

## 5 極端気象がもたらす雪氷災害の被害軽減のための技術の開発

研究期間：平成 28 年度～令和 3 年度

プログラムリーダー：寒地道路研究グループ長 松澤 勝

研究担当グループ：寒地道路研究グループ（雪氷チーム）、土砂管理研究グループ（雪崩・地すべり研究センター）技術開発調整監（寒地機械技術チーム、寒地技術推進室）

### 1. 研究の必要性

自然災害による死者・行方不明者数は、大きな地震災害を除くと風水害、雪害によるものが最も多く、そのうち雪害により平成 18 年豪雪では 152 名、平成 22～24 年度、平成 29 年度、令和 2 年度の各冬期には 100 名以上の方が亡くなっている。そのような中で、平成 25 年 3 月の北海道での暴風雪、平成 26 年 2 月の関東甲信や平成 30 年 2 月の福井、令和 3 年 1 月の北陸での多量降雪など、近年、気候変動の影響にもよる異常な吹雪、降雪、雪崩に伴い、多数の車両の立ち往生や長時間に亘る通行止め、集落の孤立などの障害に加え、死者も発生している。しかし、このような極端気象がもたらす、雪氷災害の発生地域や発生形態、災害規模は変化しており、多発化・複雑化がみられることから、雪氷に関する調査研究の総合的な推進は、豪雪地帯対策を円滑かつ効果的に実施するために不可欠である。そこで、豪雪等による国民生活や経済社会活動への影響を緩和するため、雪氷災害対策強化のための研究を行うものである。

### 2. 目標とする研究開発成果

本研究開発プログラムでは、多発化・複雑化する雪氷災害による交通障害や集落被害の軽減に資するため、大雪や暴風雪など極端気象がもたらす雪氷災害の実態解明とリスク評価技術の開発により一回の暴風雪や豪雪の発生規模や地域性を明らかにしたり、広域の吹雪予測技術の開発による冬期道路管理等の判断の支援を行うとともに、吹雪による視程障害や吹きだまりの緩和のため、吹雪対策施設の性能向上技術の開発や、吹雪視程障害時における除雪車の運行を支援するため除雪車の性能向上技術の開発に取り組むことを研究の範囲とし、以下の達成目標を設定した。

- (1) 極端気象がもたらす雪氷災害の実態解明とリスク評価技術の開発
- (2) 広域に適用できる道路の視程障害予測技術の開発
- (3) 吹雪対策施設及び除雪車の性能向上技術の開発

### 3. 研究の成果・取組

「2. 目標とする研究開発成果」に示した達成目標に関して、第 4 期中長期間中（平成 28 年度～令和 3 年度）に実施した研究の成果・取組について要約すると以下のとおりである。

#### (1) 極端気象がもたらす雪氷災害の実態解明とリスク評価技術の開発

上記の目標を達成するため、研究課題として「極端な暴風雪等の評価技術に関する研究」及び「短時間の多量降雪による雪崩危険度評価に関する研究」を設定した。

「極端な暴風雪等の評価技術に関する研究」では、まず、吹雪観測結果に基づき、気象データから吹雪量を見積もるために、降雪強度と風速から吹雪量を推定する式を提案した。次に、暴風雪や大雪に伴う過去の国道（高速道路含む）の通行止め事例を収集および解析し、通行規制などを判断するための、個々の路線・区間の障害を示す「障害度」、また警戒・非常体制の発令を判断するための、道路ネットワークの障害や地域の災害の規模を示す 5 段階の「警戒レベル」の評価指標を、暴風雪は新潟県以北の 9 エリア、大雪は積雪寒冷特別地域における道路交通の確保に関する特別措置法（雪寒法）に基づく積雪寒冷地域の 11 エリアを対象にそれぞれ設定した。また、暴風雪や大雪の評価指標および過去の気象値を用いて、それぞれの対象エリアの「警戒レベル」について、1960

## 5 極端気象がもたらす雪氷災害の被害軽減のための技術の開発

～2010年代の10冬期ごとの変化傾向を調べた。加えて、暴風雪や大雪の事象の規模と、それに伴う交通障害などの頻度をリスクとして位置づけ、「障害度」の評価指標などをもとに、道路管理に資するハザードマップを面的かつ長期的な気象解析データを用いて作成した。最後に、現状の冬期道路管理の課題について整理したうえで、上記で検討した評価指標やハザードマップを用いた、暴風雪時の道路管理における判断支援方策案を検討した。

「短時間の多量降雪による雪崩危険度評価に関する研究」では、今後、多発する可能性がある短時間多量降雪による雪崩の危険度評価手法を提案するため、短時間多量降雪時の気温や降雪強度などの気象条件、立木間隔や斜面勾配などの地形・植生条件を要素とした雪崩発生条件を解明した。また、この雪崩発生条件を満たす降雪事例の発生頻度を推定する簡便な解析手法を提案し、短時間多量降雪による雪崩の発生頻度の地域分布を提示した。次に、樹林内を流下する乾雪雪崩の運動モデルを考案し、雪崩発生区の傾斜角や発生頻度解析から求めた発生層厚、樹林の有無に応じた雪崩の衝撃圧と到達距離の算出手法を提案し、これらの研究成果をとりまとめて、短時間多量降雪による雪崩危険度評価手法を提案した。

### (2) 広域に適用できる道路の視程障害予測技術の開発

上記の目標を達成するため、研究課題として「広域的な吹雪視程障害予測技術の開発に関する研究」を設定した。

本研究では、多様な気象環境下での吹雪視程予測技術の適用に向け、青森県五所川原市など多様な気象環境下での吹雪発生状況や降雪時における視程と気象条件との関係について分析を行い、従来北海道を対象に開発した吹雪視程予測技術の青森県内への適用性について検証し、吹雪視程予測技術の改良案について検討した。改良した新しい吹雪発生条件（新アルゴリズム）や飛雪空間密度の推定式を実装した視界情報提供システム（「吹雪の視界情報」）による予測対象エリアに青森県を追加し、道路利用者に向けた情報提供を開始した。また、北海道内を対象に、「吹雪の視界情報」での情報提供を継続すると共に、著しい視程障害が予測された場合に、SNSを用いて発信し、その導入効果についてとりまとめた。

### (3) 吹雪対策施設及び除雪車の性能向上技術の開発

上記の目標を達成するため、研究課題として「防雪林の安定的な防雪性能確保に関する研究」、「防雪柵の端部・開口部対策に関する研究」及び「暴風雪による視程障害時の除雪車運行支援技術に関する研究」を設定した。

「防雪林の安定的な防雪性能確保に関する研究」では、道路防雪林の枯れ上がりによる影響を解明するため、枯れ上がりの程度等の林況の異なる道路防雪林（標準林）における防雪性能に関する現地観測と、観測データの解析を実施した。さらに、枯れ上がりによる防雪性能の低下を補うための補助対策の現地調査と、風洞実験による防雪性能の解析を実施した。この調査結果を踏まえ、補助対策を検討し、防雪林内に柵を設置する工法を提案し、現場での試験施工や、既に現場に設置されている先行事例などを調査し、防雪機能が向上することを確認した。これらの調査研究結果を「下枝の枯れ上がりが見られる防雪林の管理手法に関する技術資料(案)」として、とりまとめた。

「防雪柵の端部・開口部対策に関する研究」では、防雪柵の端部や開口部における視程や風速の急変を緩和する効果的な対策手法を提案することを目的として、実際の道路における移動気象観測や実物大の防雪柵を用いた現地観測、防雪柵模型を用いた風洞実験、防雪柵周辺の風速分布を再現する数値シミュレーション解析を実施した。これらの結果、防雪柵端部や開口部における視程や風速の急変メカニズムと走行車両への影響を解明し、既設対策手法の副防雪柵の視程や風速の急変緩和効果を明らかにした。また、副防雪柵よりもさらに効果を有する新たな対策工法を考案し、視程急変箇所の条件に応じたこれら対策工法の選定方法を提案した。

「暴風雪による視程障害時の除雪車運行支援技術に関する研究」では、暴風雪による視程障害時でも安全に除雪作業が行える運行支援技術として車線逸脱防止技術と周囲探知技術、及び暴風雪による通行止め時に除雪車が緊急車両等を安全に先導するための技術として追従走行支援技術に関する実験を行った。車線逸脱防止技術については、磁気マーカシステム等と衛星測位情報を組み合わせた車線走行支援ガイドランスの基本仕様をとりまとめた。周囲探知技術については、前方障害物探知ガイドランス及び後方障害物探知ガイドランスを製作し、公道において検証試験を行うとともに基本仕様をとりまとめた。追従走行支援技術については、追従走行支援ガイドランスを

## 5 極端気象がもたらす雪氷災害の被害軽減のための技術の開発

試作し、検証試験を行うとともに基本仕様をとりまとめた。

## Development of Technologies for the Mitigation of Snow and Ice Disasters Caused by Extreme Weather

**Research Period** : FY2016-2021

**Program Leader** : Director of Cold-Region Road Engineering Research Group  
MATSUZAWA Masaru

**Research Group** : Cold-Region Road Engineering Research Group (Snow and Ice Research Team)  
Erosion and Sediment Control Research Group  
(Snow Avalanche and Landslide Research Center)  
Cold-Region Technology Development Coordination (Machinery Technology  
Research Team, Cold-Region Technology Promotion Division)

**Abstract** : The death toll number suffered from wind, storms and floods, or snow and ice disasters are largest compared with the death toll caused by other kinds of natural disasters except for the large-scale earthquakes. The death toll number of snow and ice disasters in 2006/07 winter is 152 people and is over 100 in 2010/2011 - 2012/13 winter, 2017/18 winter, and 2020/21 winter. In recent years, extreme snow disasters including snowfalls and snow avalanches occurred in Hokkaido in March 2013, and several heavy snowfalls such as in the Kanto Koshin area in February 2014, Fukui prefecture in February 2018, and Hokuriku region in January 2021, which have resulted in vehicles being trapped in snow during blowing snow and heavy snowfall, in long hours of road closures, and in the isolation of communities. The regions' conditions and scales of disasters from extreme weather events have been changing as a result of climate changes. The number of occurrences of these events has been increasing and the conditions of these events have become increasingly complex. To smoothly and effectively implement measures for regions with heavy snowfall, it is indispensable to comprehensively pursue surveys and studies on snow and ice. In order to mitigate the influences on the citizens' daily life and the socio-economic activities, the research teams perform research in FY 2016-2021 as follows.

- A study on technology for assessing the intensity of extremely severe snowstorms
- Research on technology for assessing snowstorm-induced poor visibility in a wide area
- A study on securing stable mitigating performance for blowing snow of snowbreak woods
- A study on measures for the end and open parts of the metal snow fences
- Research on technology to support the operation of snow removal vehicles during visibility hindrances caused by severe snowstorms

**Keywords** : extreme weather, severe snow storm, poor visibility, snow avalanche, disaster prevention

## 5.1 極端気象がもたらす雪氷災害の実態解明とリスク評価技術の開発

### 5.1.1 極端な暴風雪等の評価技術に関する研究

担当チーム：寒地道路研究グループ（雪氷チーム）  
 研究担当者：西村敦史、萬 直樹、高橋丞二、松澤 勝、  
 原田裕介、金子 学、伊東靖彦、遠藤康男、  
 國分徹哉、武知洋太、大宮 哲

#### 【要旨】

本研究の目的は、一回の極端な暴風雪や大雪の厳しさを評価する技術を構築し、これらを用いたハザードマップと、道路管理における判断支援方を提示することである。まず、吹雪観測結果に基づき、気象データから吹雪量を見積もるための関数を作成した。次に、暴風雪や大雪に伴う過去の国道（高速道路含む）の通行止め事例を解析し、その規模や影響量に応じた線的な「障害度」および面的な「警戒レベル」の評価指標を作成した。これらの指標に基づき、暴風雪や大雪の発生頻度や変化傾向を地域ごとに整理し、ハザードマップを作成した。また、現状の道路管理における課題を整理のうえ、評価指標やハザードマップの活用案について提示した。

キーワード：暴風雪、大雪、吹雪量、ハザードマップ、判断支援方策

#### 1. はじめに

近年、急速に発達した低気圧や収束帯によってもたらされる暴風雪や局所的な短時間多量降雪によって被害が激甚化するケースが散見される。例えば、平成 25 年 3 月に北海道東部で発生した暴風雪では 9 名もの尊い命が失われた。また、平成 27 年 1 月に北海道羅臼町で発生した暴風雪では、国道 335 号が通行止めとなり、羅臼町は 3 日間にわたり孤立した。また、平成 30 年 2 月に福井県嶺北地域での大雪により、国道 8 号では最大で約 1,500 台の車両が長期間に渡り滞留し、通行規制解除まで 3 日を要した。

国土交通省<sup>1)</sup>では、「道路ネットワーク機能への影響の最小化」を目標とした集中的な大雪時の道路交通確保対策について議論されており、情報収集や提供の工夫、地域や道路ネットワーク（路線・区間）ごとにタイムラインを策定すべきと指摘している。また、内閣府<sup>2)</sup>では、大雪や暴風雪の開始から終了までを対象に、主に道路管理に係わる関係部局の対応事項についてフローとして整理している。

冬期道路の厳しさを示す既存の指標として、SHRP Winter Index<sup>3)</sup>がある。また、この他にも道路管理や対策検討の観点から、吹雪では年間吹きだまり量や視程障害発生頻度、降雪では年間累計または日降雪量、積雪では年最深積雪ならびに長期間積雪（根雪期間）の

最大値と再現期待値がある<sup>4)-7)</sup>。しかし、これらは一冬期を通した値または長期間で発生しうる値であり、一回の暴風雪や大雪の激しさを評価できる指標ではない。準リアルタイムでの冬期の厳しさを表現する最近の取組として、集中的な大雪に関して村田・河島<sup>8)</sup>や河島・伊豫部<sup>9)</sup>が示した数値基準に基づく危険度評価システム、白川ら<sup>10)</sup>が提案した風冷積算寒度と累計降雪量を用いた厳しさ指数などがある。しかしながら、現時点では暴風雪や大雪に伴う道路通行規制の数値基準は確立されていないため、各路線の道路管理者が、気象状況・道路パトロール・管理用カメラ映像などに基づいて総合的に通行規制を判断している。

道路管理に活用することを念頭に、一回の暴風雪や大雪の厳しさを指標に基づき適切に表現したうえで、これらの発生頻度や地域性をグラフやハザードマップなどで提示し、道路計画や維持管理の判断支援材料としてとりまとめれば、暴風雪・大雪災害時の被害軽減に資するものと考えられる。

本研究の達成目標①～⑤を、本報告書に該当する章番号とともに以下に記す。

- ① 吹雪量に与える気象要因の影響度の解明（3 章）
- ② 暴風雪や大雪の評価指標の提案（4、5、7 章）
- ③ 暴風雪および大雪の発生頻度と地域性に関する変化傾向の解明（6、8 章）

- ④ 暴風雪および大雪に関するハザードマップの開発 (9 章)
- ⑤ 指標に基づく暴風雪時の道路管理における判断支援方策の提案 (10 章)

はじめに各気象要素が吹雪量に与える影響の大小について検討した。その結果を踏まえ、複数の気象要素から吹雪量を見積もるための関数を作成した。次に、各種気象条件および推定吹雪量、過去の通行止め事例、災害発生事例との関係について解析し、暴風雪や大雪の評価指標として適切な物理量について検討した。さらに、上記成果を踏まえ、暴風雪や大雪の変化傾向やリスクを地域ごとに検討し、これらのハザードマップや暴風雪時の道路管理における判断支援方策について提案した。

なお、本文中に記す「飛雪流量」や「吹雪量」は、吹雪の激しさを示す指標として使用されることが多い物理量である。飛雪流量は風向に対して直交する単位面積を単位時間に通過する雪粒子の質量( $\text{g}/\text{m}^2/\text{s}$ )のことを指し<sup>11)</sup>、吹雪量は風向に対して直交する単位幅を単位時間に通過する雪粒子の質量( $\text{g}/\text{m}/\text{s}$ )のこと、すなわち、飛雪流量を高さ方向に積分した値を指す<sup>12)</sup>。

## 2. 各研究年度における実施内容 (概要)

### 2.1 令和 2 年度までの実施内容

本節では、過年度に実施した研究内容について、年度毎にその概要を述べる。

平成 26 年度は、北海道弟子屈町内に気象観測および吹雪観測を実施するためのサイト (以下、弟子屈吹雪観測サイト) を新たに構築し、気象および吹雪の観測を開始した。また、寒地土木研究所石狩吹雪実験場 (以下、石狩吹雪実験場) 内に二重柵基準降水量計 (DFIR) を新設し、高精度な降雪強度観測を開始するとともに、吹雪観測を実施した。また、近年の北海道内における大雪・暴風雪の発生頻度や一般国道通行止めの実施履歴を収集・整理し、地域ごとの変化傾向について解析した。詳細については「平成 26 年度プロジェクト研究・重点研究報告書」<sup>13)</sup>を参照されたい。なお、弟子屈吹雪観測サイトおよび DFIR の概要については本報告書の 3.1 節にも記述してある。

平成 27 年度は、弟子屈吹雪観測サイトおよび石狩吹雪実験場における観測を継続するとともに、弟子屈吹雪観測サイトで得た観測データと各種パラメータ (雪面粗度長や摩擦速度など) の関係について解析した。また、平成 26 年度に引き続き、近年の北海道内における大雪・暴風雪の発生頻度や一般国道通行止めの

実施履歴を収集・整理し、地域ごとの変化傾向について解析した。詳細については「平成 27 年度プロジェクト研究・重点研究報告書」<sup>14)</sup>を参照されたい。

平成 28 年度は、弟子屈吹雪観測サイトおよび石狩吹雪実験場における観測を継続するとともに、両地点で過去 2 冬期 (平成 26~27 年度) に得た観測データを用い、多変量解析等によって吹雪量推定式の作成を試みた。また、全道を対象に、最大で直近 35 冬期分の地上気象観測点データ (アメダス、道路気象テレメータ) を収集し、地点ごとに暴風雪事例および大雪事例の抽出を行った。詳細については「平成 28 年度研究開発プログラム研究報告書」<sup>15)</sup>を参照されたい。

平成 29 年度は、弟子屈吹雪観測サイトおよび石狩吹雪実験場における観測を継続するとともに、石狩吹雪実験場で得た 3 冬期分 (平成 26~28 年度) の観測データに基づき、吹雪量推定式を作成した。この推定式を用い、近年発生した暴風雪 10 事例程度を対象に、地上気象観測データ (アメダス、道路気象テレメータ) から吹雪量を算出した。また、当該事例における国道通行止め実施履歴との関係について解析した。なお、吹雪量推定式の検討は平成 28 年度にも実施しているが、平成 28 年度に使用した降雪強度データには、その一部に観測精度の低いものが含まれていた。そのため、平成 29 年度の検討では、DFIR によって高精度な降雪観測を実施している石狩吹雪実験場のデータのみを用い、改めて吹雪量推定式の作成に臨んだ。詳細については「平成 29 年度研究開発プログラム研究報告書」<sup>16)</sup>を参照されたい。

平成 30 年度は、弟子屈吹雪観測サイトおよび石狩吹雪実験場における観測を継続するとともに、近年発生した極端な暴風雪事例を対象に、推定式を用いて算出した吹雪量と国道通行止め実施履歴との関係について事例解析を行った。なお、平成 29 年度にも類似の解析を実施しているが、そこで使用したデータはアメダスおよび道路気象テレメータで得られた点的なデータであった。平成 30 年度は気象庁毎時大気解析 GPV および解析雨量を用いて時間吹雪量の 1km メッシュ値を算出し、面的な議論を行った。その結果、吹雪量と通行止め実施の関係は、暴風雪事例ごと、路線 (区間) ごとに大きく異なることが示された。詳細については「平成 30 年度研究開発プログラム研究報告書」<sup>17)</sup>を参照されたい。

令和元年度は、平成 30 年度に実施した事例解析と同様の手法で、北海道東部で発生した直近 8 年間の暴風雪事例 (全 53 事例) の時間吹雪量を面的に算出した

ほか、国道の通行止め履歴（全 54 路線）、気象注意報・警報の発表履歴、北海道開発局の災害時体制等の履歴情報を収集した。これらを取りまとめ、データセットとして整備した。詳細については「令和元年度研究開発プログラム研究報告書」<sup>18)</sup>を参照されたい。

令和 2 年度は、暴風雪時の判断支援方策を定めるため、極端な暴風雪の厳しさを評価する指標と、5 段階の警戒レベルの分類、および道路管理における判断支援方策の基本フレームについて予備検討を行った。詳細については「令和 2 年度研究開発プログラム研究報告書」<sup>19)</sup>を参照されたい。

## 2.2 令和 3 年度の実施内容

令和 3 年度は、令和元年度までに整備したデータセットを用いて網羅的な解析を行い、一回の暴風雪・大雪の厳しさを評価する指標を作成した。この指標に基づくデータ解析により、暴風雪や大雪の発生頻度を地域ごとに整理したほか、ハザードマップの作成を行った。加えて、道路管理における判断支援方策について検討した。

## 3. 吹雪量に与える気象要因の影響度の解明

本章では、達成目標①「吹雪量に与える気象要因の影響度の解明」について述べる。

吹雪量を自動的かつ連続的に実測することは困難であるため、気象データを用いて経験式によって推定することが多い。吹雪量の推定に関しては、これまでも多くの経験式が提示されているが、その大半は風速のみの関数である<sup>20)~24)</sup>など。しかし、吹雪の発生条件は風速のみならず、数多くの気象要素が関与するものである。ここでは、現地観測結果を基に、各気象要素が吹雪量に及ぼす影響を検討し、一回の暴風雪イベントによる吹雪量を見積もるための推定式を求めた。

### 3.1 現地観測

#### 3.1.1 観測地点

暴風雪が発生しやすい気圧配置条件には地域特性がある。たとえば、石狩吹雪実験場 (N43° 12'、E141° 23') が位置する道央地域では、西高東低の気圧配置時に発生しやすい。一方、弟子屈吹雪観測サイト (N43° 30'、E144° 27') が位置する道東地域では低気圧が通過する時に発生するケースが多い。

本研究では、暴風雪発生時の気象条件が異なることが多い上記 2 地点において、各種気象観測および飛雪流量観測を実施した。石狩吹雪実験場および弟子屈吹雪観測サイトの位置図を図-1 と図-2 に記す。なお、両図とも国土地理院地図に加筆したものである。また、

図中には各観測点から最も近いアメダスの位置についても付記してある。



図-1 石狩吹雪実験場位置図



図-2 弟子屈吹雪観測サイト位置図

### 3.1.2 各種気象観測

石狩吹雪実験場、弟子屈吹雪観測サイト両観測点に共通する気象観測内容を表-1 に示す。ここで、表中における「視程」は一般的な気象値ではないが、吹雪が激しくなるほど視程は低下し、交通障害を引き起こす一因となることから、気象観測に加え、視程計測も実施した。また、動画映像の記録については、実際の吹雪発生有無を目視確認することを目的に設置した。図-3 に、弟子屈吹雪観測サイトにおける気象観測タワーの様子を示す。

表-1 気象観測項目（石狩・弟子屈に共通）

観測項目	観測間隔	設置台数
気温	10分	1
風向風速	1秒	弟子屈:4 (設置高度:1m~7m) 石狩:3 (設置高度:1.3m~6.2m)
視程	1秒	1
積雪深	10分	1
日射量	10分	1
動画映像	連続(6時~18時)	1



図-3 気象観測タワー（於：弟子屈吹雪観測サイト）

### 3.1.3 降雪強度の観測

「吹雪」は、雪粒が風によって空気中を舞う現象である。したがって、吹雪の激しさを指標化するうえで、降雪を正確に把握することが必須となる。しかし、物理量としての「降雪」を定量的に正しく計測することは容易でない。

例えば、降雪量は「一定時間内に新しく降り積もった雪の深さ」として定義づけられており<sup>25)</sup>、現在気象庁では、積雪深計を用いて計測された時間積雪深差を時間降雪量として定めている。しかし、雪が降っている場合でも、積雪自身の重みによる圧密沈降効果によって積雪深が増加しなかった場合や、雪面上に降り積もった雪が風によって吹き払われた場合には積雪深が増加せず、時間降雪量がゼロと記録されてしまうことが多々ある。特に、本研究の観測サイト（石狩吹雪実験場および弟子屈吹雪観測サイト）は吹雪頻発エリアであり、風が強いケースが多い。

一方、降雪強度は単位時間に降った雪の重さに等しい水の深さのこと<sup>26)</sup>であり、その計測には雨量計が用いられる。しかし、降雪粒子は雨滴よりも風による影響を受けやすく、風が強いほど雨量計に捕捉されにくくなる。よって、雨量計による観測は、実際の降雪強度を過小評価するケースが多い。また、風による影響に加え、降水が雨量計自身を濡らすために消費される「濡れ損失」や計測前に蒸発により失われる「蒸発損失」なども、実際の降雪強度を過小評価する要因として挙げられる<sup>27)</sup>。

本研究では、二重の防風柵を用いた降水観測システム（Double Fence Intercomparison Reference、以下DFIR）を石狩吹雪実験場内に設置し、降雪強度観測を行った。この観測システムは世界気象機関(WMO)が推奨するものであり、DFIRによる実測値に対し降雪形態に応じた変換式<sup>28)</sup>を適用することで、その値を「真の降雪強度」とみなしてよいとしている。図-4にDFIRの

外観写真を、図-5にDFIRの平面図を示す。DFIRはサイズの異なる2つの正八角形の風除け柵（外側柵・内側柵の対角長はそれぞれ12m、4m）からなり、中央部に雨量計が設置されている。外側柵・内側柵はともに長さ1.5mの板からなり、外側柵の上端は内側柵の上端よりも0.5m高い。なお、柵部分の空隙率は50%、内側柵の上部と雨量計の受水口が等しい高さになるように設置されてある。なお、本研究では真の降雪強度に変換した値を解析に使用している。

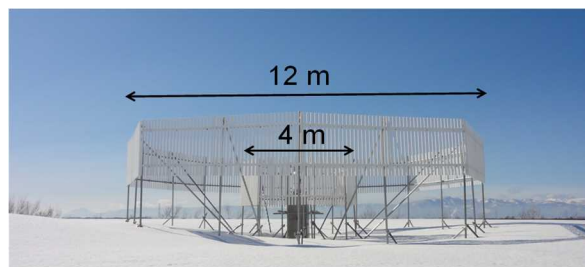


図-4 DFIRの外観写真（於：石狩吹雪実験場）

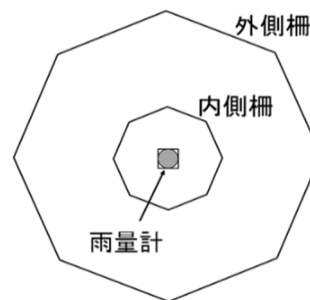


図-5 DFIRの平面図

### 3.1.4 飛雪流量の観測

図-6に、吹雪の運動形態を図示する。吹雪の運動形態は「転動」、「跳躍」、「浮遊」の3種類がある<sup>29)</sup>。転動は雪粒子が雪面上を転がる運動である。「跳躍」は雪粒子が雪面上をバウンドしながら風によって運ばれる運動であり、その高さは、概ね0.1m程度とされている。また、「浮遊」は風によって雪粒子が空気中に舞い上げられる運動であり、その高さは100m以上に達することもある。

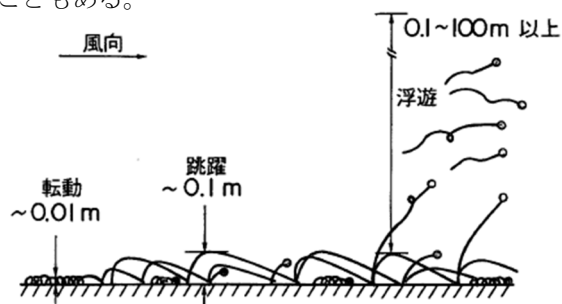


図-6 吹雪の運動形態（転動・跳躍・浮遊）<sup>29)</sup>より抜粋



石狩吹雪実験場および弟子屈吹雪観測サイトにて実施した飛雪流量観測には、タンス型ネット式吹雪計（観測高度は雪面～雪面上 0.1m）、筒型ネット式吹雪計（観測高度は雪面上 0.1m～2.0m、設置高さは計5点）、Snow Particle Counter（以下 SPC、観測高度は1m～7m、設置高さは計4点）を使用した。すなわち、タンス型ネット式吹雪計による計測値は跳躍層の飛雪流量に相当し、筒型ネット式吹雪計および SPC による計測値は浮遊層の飛雪流量に相当する。図-7 にタンス型ネット式吹雪計を、図-8 に筒型ネット式吹雪計を示す。タンス型、筒型とも、一定時間内にネット内にサンプルリングされた吹雪粒子の質量から飛雪流量を求めるものである。

次に、SPC について述べる。SPC の外観を図-9 に示す。SPC は非接触により光学的に吹雪粒子を計測する機器であり、平行光を照射しているセンサー内に粒子が通過することで生ずる光の減衰量から、飛雪流量を算出するものである。SPC の計測原理の詳細については Schmidt<sup>30)</sup> を参照されたい。



図-7 タンス型ネット式吹雪計



図-8 筒型ネット式吹雪計



図-9 Snow Particle Counter (SPC) の外観

### 3.2 各気象要素が吹雪量に及ぼす影響に関する検討

#### 3.2.1 実測飛雪流量に基づく吹雪量の算出

実測した飛雪流量から吹雪量を算出する。ここでは、ネット式吹雪量計（タンス型、筒型）による観測結果から算出した吹雪量と、SPC による観測結果から算出した吹雪量、その2パターンについて求めた。

はじめに、ネット式吹雪計および SPC の実測値の整合性について確認する。ここでは、石狩吹雪実験場で実施した3冬期分（平成26～28年度）の飛雪流量観測データ（データ数は69）を使用し、雪面上の高さ1mにおける飛雪流量を比較した。その結果を図-10 に記す。この結果より、SPC によって計測された飛雪流量は、ネット式吹雪量計によって計測された値を過大評価する傾向があることが分かった（約2.3倍）。以降、本報では、SPC の実測値を2.3で除したものを、SPC 観測によって求めた飛雪流量として扱うこととする。

上述したように、吹雪量は飛雪流量を高さ方向に積分することによって求められる。しかし、降雪がある時に飛雪流量を上空まで積分すると、吹雪量は膨大な値になる。そこで、本計算では、いずれも雪面から高度7mまでの範囲を吹雪量の積算範囲とした。これは、道路防雪柵や道路標識の高さの大半が7m以下である

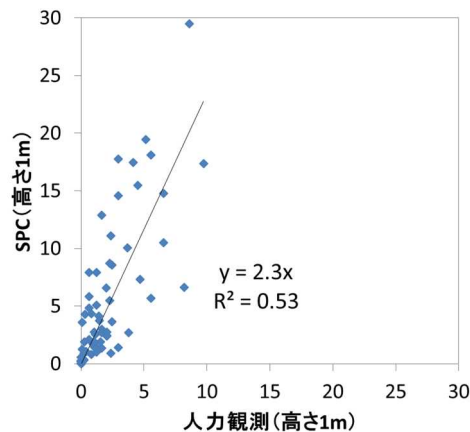


図-10 ネット式吹雪量計と SPC による飛雪流量の比較（高さ1m）

ことから、道路管理の実務においては高度 7m 程度までの吹雪量を加味すれば十分と考えられるためである。

ネット式吹雪計（タンズ型、筒型）によって観測された飛雪流量から吹雪量を算出する方法の概念図を図-11に示す。図中の網掛け部分 ( $Q_a$ 、 $Q_b$ ) の合計値  $Q_c$  が吹雪量に相当する。ここで、ネット式吹雪計による飛雪流量計測は高度 2m までしか実施していないが、高度 7m における飛雪流量は DFIR による観測結果から推定した値を使用した。DFIR 観測から求められる降雪フラックス ( $\text{g}/\text{m}^2/\text{s}$ ) を降雪粒子の落下速度 ( $\text{m}/\text{s}$ ) で除することで降雪粒子の空間密度 ( $\text{g}/\text{m}^3$ ) が求められ、これに高度 7m における風速を掛けることによって、高度 7m における飛雪流量が得られる。ここで、降雪粒子の落下速度は Ishizaka et al.<sup>31)</sup> を参考に、1.2m/s とした。

次に、SPC の観測結果から吹雪量を算出する方法の概念図を図-12に記す。図-11と同様、網掛け部分に相当する飛雪流量の合計値が吹雪量に相当する。SPC による観測時には、積雪深の変動によって雪面から SPC までの高度が変動する。本解析では、石狩吹雪実験場内で計測している積雪深データを用い、雪面からの SPC 高度を随時補正し、雪面からの高さを考慮して吹雪量を算出した。

### 3.2.2 各気象要素と吹雪量の比較

複数の気象要素から吹雪量を推定するための関数を作成するにあたり、まずは各気象要素が吹雪量に与える影響について検討する必要がある。本研究では、気温、風速、降雪強度など直接観測している気象要素のほか、各要素の累計値や降雪終了からの経過時間など、過去の気象履歴についても検討項目に入れた。

本項では、ネット式吹雪計（タンズ型、筒型）による観測結果から推定した吹雪量と、各気象要素を比較した結果について述べる。ここでは、3.2.1 項で使用したのと同じ、石狩吹雪実験場で実施した3冬期分の飛雪流量観測データを使用した。その結果、吹雪量に対して、降雪の有無に関わらず風速と気温が、降雪がある時には降雪強度あるいは降雪量が、降雪が無い時には降雪終了からの経過時間が大きく寄与することが分かった。結果の一例として、無降雪時の吹雪量と高度 10m における風速の関係を図-13に、吹雪量と降雪強度の関係を図-14に記す。

### 3.3 吹雪量推定式の検討

気象データに基づき、吹雪量推定式を作成する。本節では、ネット式吹雪計（タンズ型、筒型）による実測結果から算出した最大吹雪量を見積もるための関数

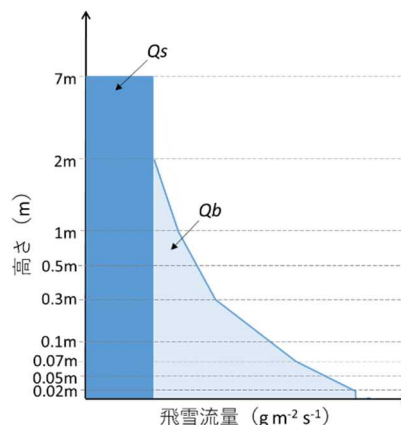


図-11 ネット式吹雪計による飛雪流量観測結果から吹雪量を算出する方法の模式図

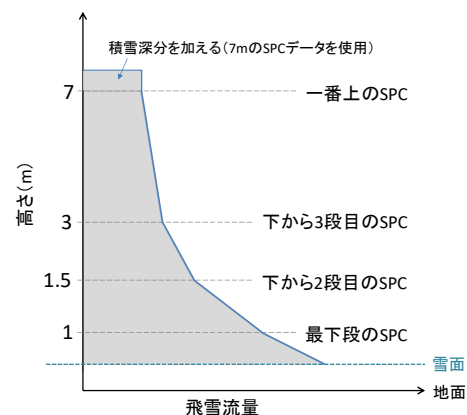


図-12 SPC による飛雪流量観測結果から吹雪量を算出する方法の模式図

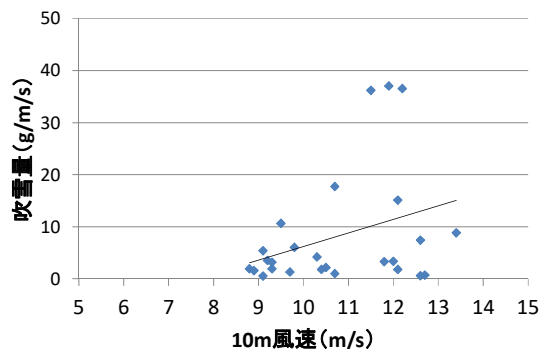


図-13 吹雪量と風速の関係（降雪なし）

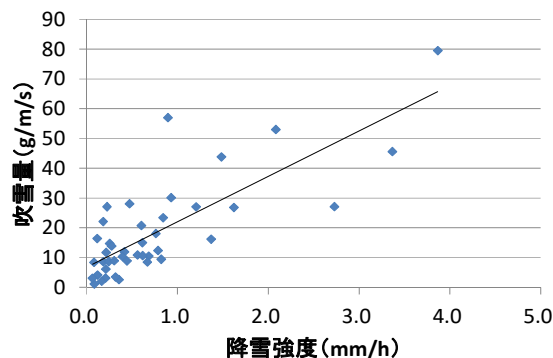


図-14 吹雪量と降雪強度の関係

を求めたプロセス、およびその結果について記す。

吹雪は、降雪粒子と地吹雪粒子（一度地面に積もった雪粒子が風によって舞い上がった粒子）から成る。そこで、吹雪量推定式には、降雪項と地吹雪項の両方を含む形の関数を考える。ここで、「降雪粒子に起因する吹雪量」は降雪量と風速に比例する。また、「地吹雪粒子に起因する吹雪量」は、既往の研究成果<sup>20)~24)</sup>などから、風速のべき関数で表されることが分かっている。そこで、吹雪量推定式は以下の形のものを検討することとした。

$$Q = \underbrace{aPU}_{Q_s} + \underbrace{bU^c}_{Q_b} \quad (1)$$

ここで、 $Q$ は吹雪量、 $P$ は降雪に関する変数、 $U$ は風速、 $a$ 、 $b$ 、 $c$ は係数を示す。第一項が降雪項  $Q_s$ 、第二項が地吹雪項  $Q_b$ に相当する。

降雪項については、 $U$ の鉛直分布と  $P$ が分かれば雪面から高さ  $H$ までの範囲における吹雪量  $Q_s$ を求めることができ、次式によって与えられる。

$$Q_s = \frac{P}{w_f} \int_0^H U(h) dh \quad (2)$$

式(2)における  $P$ は降雪フラックス ( $\text{g}/\text{m}^2/\text{s}$ )、 $w_f$ は降雪粒子の落下速度 ( $\text{m}/\text{s}$ )、 $U(h)$ は高度  $h$ における風速 ( $\text{m}/\text{s}$ )を指す。本研究では、3.2.1項と同様、 $w_f = 1.2$ を採用した。また、風速の鉛直分布が対数則であると仮定し、測定高さ  $H_0$ の風速  $U_0$ と任意の高さ  $h$ から、次式によって  $U(h)$ を求めた。

$$U(h) = U_0 \frac{\ln(h/z_0)}{\ln(H_0/z_0)} \quad (3)$$

ここで、 $z_0$ は雪面の粗度長を指す。本研究では、大浦ほか<sup>32)</sup>に基づき、 $z_0 = 0.00015 \text{ m}$ を採用した。

式(2)および式(3)を吹雪量の積算高さ  $7 \text{ m}$ まで積分すると、式(4)が求められる。ここで、式中の  $U_1$ は高度  $7 \text{ m}$ における風速のことを指す。

$$Q_s \approx 6.35 U_7 \frac{P}{w_f} \quad (4)$$

次に、降雪フラックス  $P$  ( $\text{g}/\text{m}^2/\text{s}$ )を単位変換することによって降雪強度  $P'$  ( $\text{mm}/\text{h}$ )に変換し、また、雪粒子の落下速度  $1.2 \text{ m}/\text{s}$ を用いると、式(4)は式(5)に変換される。

$$Q_s \approx 1.47 P' U_7 \quad (5)$$

実際の自然環境の中では、植生や地形の起伏などの影響によって地面粗度長が  $0.00015 \text{ m}$ よりも大きくなる場合が多々ある。地面粗度長が大きくなると雪面付近の風速が小さくなる。したがって、式(5)で求められる降雪に起因する吹雪量は、ほぼ最大値と仮定してもよいと考えられる。

次に、 $Q_s$ の最大値と  $Q_b$ の最大値の和、すなわち吹雪量  $Q$ の最大値を推定するための関数について検討する。ここでは、ネット式吹雪計（タンス型、筒型）による観測データを使用した結果について述べる。本報で最大吹雪量に着眼した根拠は、防災の観点から、吹雪の激しさを示す指標を作成するうえで安全側を考える必要があるためである。

最大吹雪量の推定式は、式(1)の  $Q_s$ に式(5)を用いることで、以下の式(6)となる。

$$Q = 1.47 P' U_7 + b U^c \quad (6)$$

次に、係数  $b$ と  $c$ を求めるため、実測吹雪量  $Q_b$ から降雪項  $Q_s$ を差し引いた値、すなわち地吹雪粒子に起因する吹雪量  $Q_b$ と風速の関係について検討する。ここでは、最大吹雪量を推定するための関数を作成するため、風速を  $1 \text{ m}/\text{s}$ 毎に階級分割し、各階級の最大風速を抽出した。なお、同じ風速階級内に振り分けられたデータ数が少ない場合（本研究では  $10$ 個以下の場合とした）には、その風速階級における値は解析に使用しないこととした。

地吹雪項  $Q_b$  ( $=Q - Q_s$ )と風速の関係を図-15に示す。図中に示す累乗近似曲線は、各風速階級における最大値に対してべき乗近似曲線を引いたものである（近似曲線の作成に用いた対象データを赤丸で囲ってある）。この結果、式(6)中の係数、 $b$ と  $c$ が求められ、最大吹雪量の推定式は式(7)の通りとなった。ここで、式中の  $U_1$ は高度  $7 \text{ m}$ における風速のことを指す。以降、吹雪量の推定には式(7)を使用する。

以上、各気象要素が吹雪量に及ぼす影響について検討がなされ、一回の暴風雪イベントによる吹雪量を見

積もるための推定式が算出された。

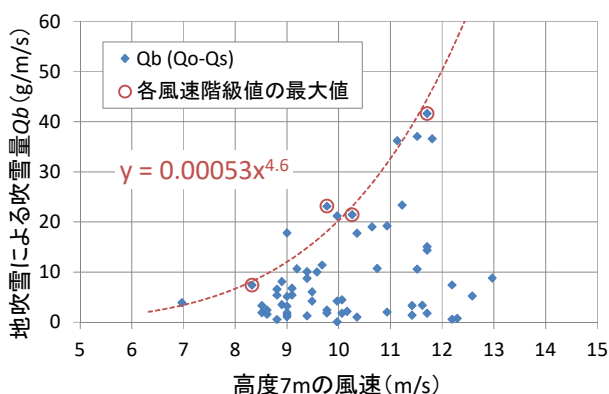


図-15 地吹雪粒子による吹雪量と風速の関係

$$Q = 1.47PU_7 + 0.00053U_7^{4.6} \quad (7)$$

#### 4. 暴風雪や大雪の評価指標の作成方針

本章では、達成目標②「暴風雪や大雪の評価指標の提案」について、指標の作成方針について述べる。

一回の暴風雪や大雪の厳しさを評価する指標に求められる要件として、以下の3つが考えられる。

- ・任意の路線・区間や地域ごとに、各事象の規模を評価または表現できる
- ・各事象の発生前または発生中において、今後発生しうる障害や災害の規模を予想できる
- ・道路管理判断のための指標として、タイムラインなどに活用できる

また、暴風雪や大雪によって生じる道路交通障害は、気象現象の規模が大きくなるにつれて以下の①～④の順に線的な障害から面的な障害へ推移し、場合により災害に至るものと考えられる。

- ① 吹雪や降雪に伴い、除雪作業の必要が生じ、併せて旅行速度が低下する
- ② 吹雪や降雪が局所的にある強度以上となり、個々の路線・区間で交通障害に至る
- ③ ある強度以上の吹雪や降雪の範囲が広がり、複数の路線・区間で交通障害に至り、道路ネットワークの機能低下が生じる

- ④ ある強度以上の吹雪や降雪が継続し、道路上の吹きだまり・積雪深さが、ロータリー除雪が必要なほど大きくなることで、交通障害の解消に多大な時間を要し、道路ネットワークの機能低下が長時間継続する

上記を踏まえ、本研究では、一回の暴風雪や大雪の厳しさを示す指標として、道路管理に資する観点から、表-2に示す(1)障害度(上記②の段階を考慮)と、(2)警戒レベル(上記③と④の段階を考慮)を設定し、これらを実評価する指標を検討した。

#### 5. 暴風雪や大雪の評価指標の提案(暴風雪について)

本章では、達成目標②「暴風雪や大雪の評価指標の提案」のうち、暴風雪の評価指標について検討した結果を述べる(大雪の評価指標については第7章)。

##### 5.1 暴風雪事例の整理

国土交通省北海道開発局網走開発建設部および釧路開発建設部の管内(図-16)を対象に、直近8冬期(2011～2018年度の12～3月)における一般国道19路線の通行止め履歴、北海道開発局の警戒および非常体制履歴、気象庁の警報・注意報の発表履歴、暴風雪時の地上気圧配置の推移をもとに、一回の暴風雪53事例を抽出のうえ、これらのデータセットを作成した<sup>33)</sup>。

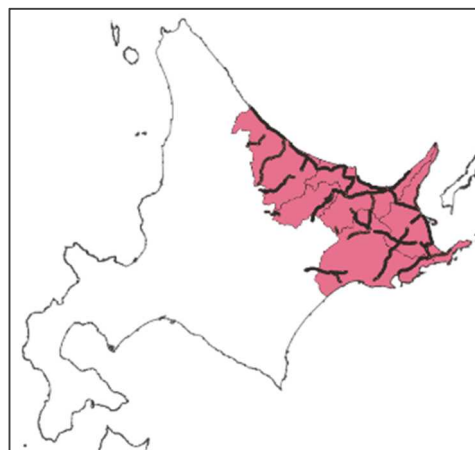


図-16 データセットの対象地域(赤)と通行止め国道路線(黒)

表-2 本研究で対象とする一回の暴風雪の厳しさを評価する指標

厳しさを指標	備考
(1) 障害度 (線的指標)	道路管理者が担当区間の通行規制などを判断するための、個々の路線・区間の障害を示す段階的な指標
(2) 警戒レベル (面的指標)	管轄する区域の責任者が、該当区域の警戒・非常体制の発令を判断するための、道路ネットワークの障害や地域の災害の規模を示す指標

なお、一般国道 19 路線について、通行止め実施のタイミング、およびその区間や延長は事例によって異なる。このため、通行止め実施区間が全事例で共通となるよう、54 区間に分割して解析した（以下、解析区間という）。また、管内の道路事務所で暴風雪時に発生した吹雪障害を確認するために、網走および釧路開発建設部が保有する道路管理記録を整理した。

各暴風雪事例の時間吹雪量 $Q_h$ は、気温(°C)、風速(m/s)、降水量(=降雪強度)(mm/h)等の気象値を用いて、吹雪発生判定フロー<sup>34)</sup>によって「吹雪発生」と判別された場合に、式(7)を用いて高さ7mまでを対象に推定した<sup>35)</sup>。ここでは、気温と風速は気象庁毎時大気解析GPV(解像度5km)、降雪強度は気象庁レーダー・アメダス解析雨量(解像度1km)を、吹雪量推定の入力値としてそれぞれ用いた。また、気温と風速の5km解像度の格子を25個の1km格子(以下、1kmメッシュという)に分割し、それらはすべて同値であると仮定した。図-17に、1kmメッシュの時間吹雪量の出力結果に基づく分布図の例を示す。なお、「一回の暴風雪」は、解析区間内の任意の1kmメッシュ地点において時間吹雪量が記録されてから、6時間以上連続して時間吹雪量が記録されなくなるまでとした。

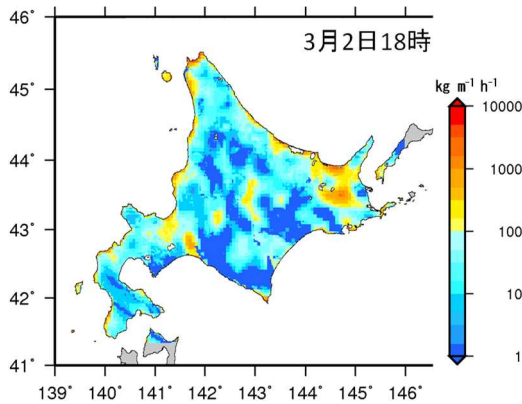


図-17 時間吹雪量分布図の例

## 5.2 時間吹雪量と吹雪障害の関係

吹雪の度合いが大きい、即ち吹雪量が大きい場合に、道路上では交通に影響する「視程障害」と「吹きだまり」の吹雪障害が発生する<sup>36)</sup>。これまで、吹雪による視程障害時のドライバーの運転挙動<sup>37)</sup>や、車両発進が困難とされる吹きだまり深さ<sup>38)</sup>が報告されている。一方で、吹雪量は実際に道路上やその区間で生じる吹雪障害を直接表現する値ではない。そこで、交通に影響を与える吹雪の厳しさを評価するために、はじめに時間吹雪量を用いた吹雪視程および吹きだまり深さの推定手法を提示する。つぎに、この推定手法と既往文献

を用いて、道路吹雪障害の基準数値を設定した。ここでは、道路除雪1サイクルの想定時間が3時間である<sup>39)</sup>ことに基づき、3時間のうちに堆積した吹きだまり深さについて議論する。また、視程について、一定程度連続した視程の低下が交通障害の発生に寄与すると考え、3時間移動平均した吹雪量を利用した。

### 5.2.1 時間吹雪量を用いた吹雪視程の推定手法

本解析では、ドライバーの目線高さ1.2mにおける吹雪時の視程 $Vis$ (m)と時間吹雪量 $Q_h$ (kg/m<sup>3</sup>h)との関係<sup>40)</sup>を参考とした。ここでは、雪堤高さ $H$ (m)が視程に影響を与えることから<sup>41)</sup>、これらを0.0、0.5、1.0、すなわち図-18に示す視程を推定する高さ $z$ (m)を1.2( $H=0.0$ )、0.7( $H=0.5$ )、0.2( $H=1.0$ )に設定のうえ、吹雪時の視程を推定した。ここでは、松澤<sup>40)</sup>と同様の手法で、雪堤を考慮した場合( $z=0.7$ m、 $0.2$ m)における吹雪時の視程 $Vis$ (m)と時間吹雪量 $Q_h$ (kg/m<sup>3</sup>h)との関係を導出した。はじめに、高さ10mの風速 $U_{10}$ (m/s)を7.5、10.0、12.5、15.0、17.5、20.0の6通り、降雪強度 $Ph$ (mm/h)を0.0、1.0、3.0、5.0の4通り、計24通りの組み合わせを設定のうえ、松澤<sup>42)</sup>により0.2mおよび0.5~7.0m(0.1mごと)の飛雪流量 $q(z)$ (g/m<sup>2</sup>/s)を求め、式(8)により飛雪流量 $q(z)$ を鉛直方向に積分のうえ、雪面から7m高さまでの時間吹雪量 $Q_h$ (kg/m/s)を求める。つぎに、武知ら<sup>43)</sup>の実験式(式(9))により、 $z=0.7$ m、 $0.2$ mの飛雪流量 $q(z)$ を用いて視程 $Vis$ (m)を求める。得られた時間吹雪量と視程を回帰分析のうえ、 $z=0.7$ m、 $0.2$ mにおける推定式を導出した(図-19、式(10))。なお、式(10)の $z=1.2$ mは松澤<sup>40)</sup>の結果を引用した。

$$Q_h = [1.68 \cdot q(0.5) + \{q(0.6) + q(0.7) + q(0.8) + \dots + q(6.9) + q(7.0)\} \cdot 0.1] \cdot 3.6 \quad (8)$$

$$Vis(z) = 10^{-0.886 \log(q(z)) + 2.648} \quad (9)$$

$$Vis = \begin{cases} 8438Q_h^{-0.891} & : H = 0.0(z = 1.2) \\ 11200Q_h^{-0.981} & : H = 0.5(z = 0.7) \\ 25284Q_h^{-1.226} & : H = 1.0(z = 0.2) \end{cases} \quad (10)$$

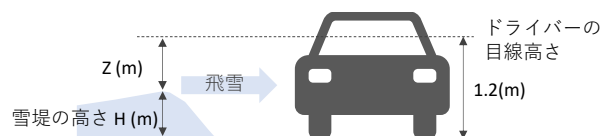


図-18 視程高さ $z$ (m)と雪堤高さ $H$ (m)との関係

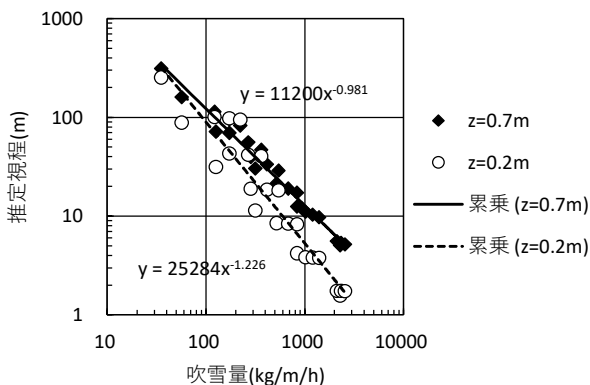


図-19 吹雪量と視程の関係  
(視程高さ z=0.2m, 0.7m の場合)

### 5.2.2 時間吹雪量を用いた吹きだまり深さの推定手法

吹きだまりは切土道路において形成されやすいことから、交通のボトルネックになる場合が想定される。そこで、切土道路に形成される吹きだまり深さを推定する。武知ら<sup>44)</sup>によれば、切土道路を対象に、高さ7mまでの吹雪量 $Q$ に対して一定の割合が風上側法面に吹きだまり、さらにその一部が車道上に吹きだまることを示している。具体的には、吹雪前の風上側法面の堆雪割合 $p$ と車道上の吹きだまり発生割合 $r$ との関係を式(11)、車道の吹きだまり量 $SD_r$  ( $m^3/m$ )と、 $Q$ および $r$ との関係を式(12)にそれぞれ示した。

$$r = 0.73 p + 0.12, \quad p = S/M \quad (11)$$

$$SD_r = 0.0018 \cdot Q \cdot r \quad (12)$$

ここで、 $S$ は吹雪前の風上側法面の堆雪量( $m^3/m$ )、 $M$ は風上側法面の堆雪容量( $m^3/m$ )である。

本項では、図-20 に示す吹雪前の道路形状の断面図を設定のうえ、冬期交通確保幅 $w$  (m)での吹きだまり深さ $d_r$  (m)を推定した。諸条件は、①第3種2級でb地域の道路<sup>6)</sup>、②高さ2.0mの切土道路(1:1.0)、③吹雪前までの除雪作業により風上側の切土法面が堆雪している状態、④吹雪により風上側の堆雪幅と車道(以降、冬期交通確保幅 $w$  (m))に一樣に吹きだまりとして堆雪するとした。設定した条件では、図-20より $S$ は $2.0 m^3/m$ 、 $M$ は $10.5 m^3/m$ であることから、式(11)より $p$ は0.19、 $r$ は0.26となる。そのうえで、吹きだまり深さ $d_r$ は、時間吹雪量 $Q_h$ を用いて、式(13)によって求める。

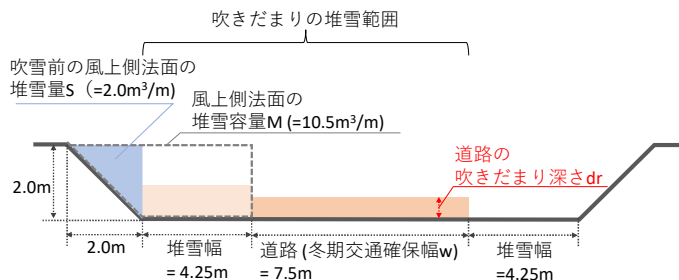


図-20 吹きだまりを推定するための道路断面

$$d_r = 0.0018 \cdot Q_h \cdot \frac{r}{w} \quad (13)$$

### 5.2.3 吹雪障害の基準数値の設定

式(10)と式(13)を用いて、時間吹雪量 $Q_h$ と吹雪量から求めた視程や吹きだまり深さの推定値との関係を表-3に整理した。加治屋ら<sup>37)</sup>によれば、視程障害時のドライバーの運転挙動を表-4のように示している。本論文では、「視程50m以上100m未満」および「視程50m未満」が道路での立ち往生や通行止めにつながる要因となるものとした。その結果、時間吹雪量100kg/m/hの場合に視程 $Vis$ は概ね100m程度、300kg/m/hの場合に視程 $Vis$ は概ね50m未満であった。また、吹きだまり

表-3 時間吹雪量と推定視程および推定吹きだまりの関係

時間吹雪量 (kg/m/h)	吹雪量から求めた推定値				
	視程(m)			吹きだまり(cm)	
	雪堤なし	雪堤50cm	雪堤100cm	1時間	3時間
50	258	241	209	0.3	0.9
100	139	122	89	0.6	1.9
200	75	62	38	1.2	3.7
300	52	42	23	1.9	5.6
500	33	25	12	3.1	9.4
1000	18	13	5	6.2	18.7
2000	10	6	2	12.5	37.4
3000	7	4	1	18.7	56.2

薄橙：視程50m以上100m未満、吹きだまり10cm以上20cm未満。

橙：視程50m未満、吹きだまり20cm以上。

表-4 視程障害時のドライバーの運転挙動

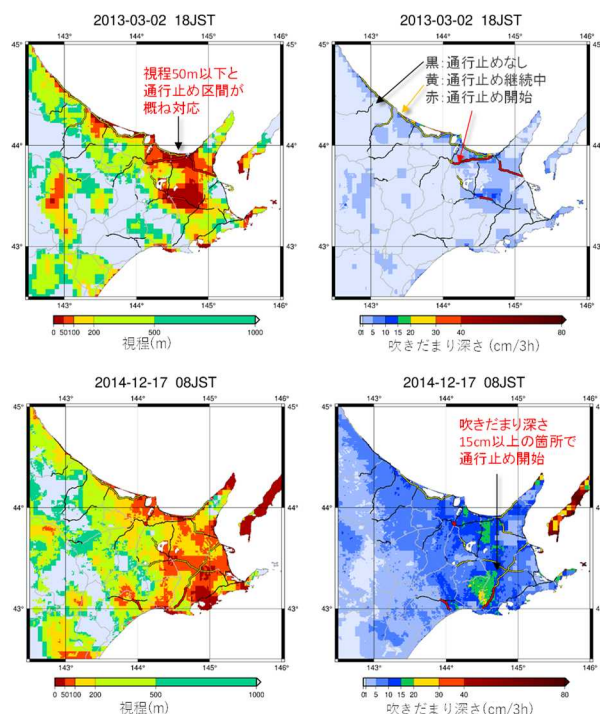
吹雪視程	運転挙動
200m 以上	・安定した走行状態が維持される
100m 以上 200m 未満	・速度調節によって視程障害に応じた運転 ・車両による速度差は小さい ・アクセルやブレーキ操作は安定
50m 以上 100m 未満	・一定速度を維持した走行が困難で、アクセル操作が頻繁になる ・車両による速度差が大きくなり、追従や車群走行が多くなる。
50m 未満	・ブレーキ操作による減速・停止が発生 ・左右への挙動が大きくなる

は、道路除雪の1サイクルを3時間として<sup>39)</sup>、その間に軽自動車の発進が困難となる深さ20cmとなる場合を設定した<sup>38)</sup>。上記の条件において、吹きだまり深さ20cm/3hとなる時間吹雪量 $Q_h$ は、概ね1000 kg/m/hと推定された。以上より、時間吹雪量 $Q_h \geq 100, 300, 1000 \text{kg/m/h}$ を、吹雪障害の基準数値として設定した。

時間吹雪量から推定した吹雪視程および吹きだまり深さと、道路の通行止め履歴の関係を、**図-21**に例示する。ここでは、① 2013年3月2日18時と、② 2014年12月17日8時の視程および吹きだまり深さの推定値の分布を示してある。両事例において、道路通行止め区間と、視程と吹きだまり深さの基準数値が概ね整合していることが確認できる。つぎに、5.1節で収集した解析区間(全54区間)の道路管理記録のうち、道路上の視程や吹きだまりが確認できた記録と、該当する解析区間における最小視程および最大吹きだまり深さの推定値を比較した(**表-5**)。道路管理記録と視程・吹きだまり深さの推定値が「整合する」と判断する基準として、視程は**表-4**に示す階級と同じまたは1階級の違いである場合<sup>45)</sup>、吹きだまりは記録された日時の推定値が20cm以上/3hとした。なお、視程不良時の記録で数値が不明の場合は、50m未満として扱った。その結果、視程障害については約半数の件数が整合した。また、不整合のうち15件は一般国道243号の美幌峠(N43° 38' 56'、E144° 14' 54')を含む解析区間の事例であり、視程の推定値が道路管理記録より大きい傾向であった。推定値は、主に気象庁毎時大気解析GPV(5km解像度)を用いており、峠部など地形の影響で局所的な気象が想定される場所では、推定精度が小さくなる可能性が示唆される。そこで、美幌峠を含む解析区間の15事例を除くと、過半数の事例が整合していた。また、道路管理記録で吹きだまりが記録された時刻において、該当解析区間の吹きだまり深さの推定値は概ね5~10cm/3hであった。推定値が管理記録より小さかった原因として、微細な周辺地形や環境などが反映していないことや、現地の実際の除雪サイクルが3h以上であった可能性が考慮される。

### 5.3 障害度の評価指標に関する検討

障害度は、通行規制などを判断するための、個々の路線・区間の障害を示す段階的な指標である(**表-2**)。ここでは、「吹雪による通行止め=交通障害」とみなし、吹雪障害の基準数値と吹雪による通行止めとの関係を整理することで、障害度を3つに区分し段階的に設定した。



**図-21** 視程および吹きだまり深さの推定値の分布  
上：2013年3月2日18時  
下：2014年12月17日8時

**表-5** 道路管理記録と推定値との比較

※括弧は一般国道243号美幌峠を除いた件数

吹雪障害	視程障害	吹きだまり
整合	31 (30)	0
不整合	37 (22)	7
計	68 (52)	7

#### 5.3.1 評価指標の候補の設定

吹雪視程について、**表-5**で示した美幌峠を除いた道路記録と推定した視程との整合件数30件のうち、解析区間の最小値50m未満が15件、60m未満が7件で半分以上を占めていた。このことと**表-4**から、本論文では視程50m未満(吹雪量300kg/m/h以上)を評価指標の候補とする。加えて、その状態が一時的ではなく、一定時間継続することで交通障害に至ると仮定する。また、吹きだまりについては、5.2.3項で設定した、吹きだまり深さ20cm以上/3h(吹雪量3000kg/m/3h以上)を、評価指標の候補として設定した。

#### 5.3.2 検討事例の抽出

5.1節で示した暴風雪53事例のうち、通行止め実施が10事例以上の解析区間を抽出のうえ、網走および釧路開発建設部の管内の海岸部と山間部・内陸部、計4解析区間を選定した(**図-22**)。つぎに、暴風雪の影響が明瞭な事例を利用して検討するため、解析区間ご

とに平均吹雪量の時間最大値を昇順とし、通行止めあり上位5事例と、通行止めなし上位5事例、計40事例を検討対象として抽出した。

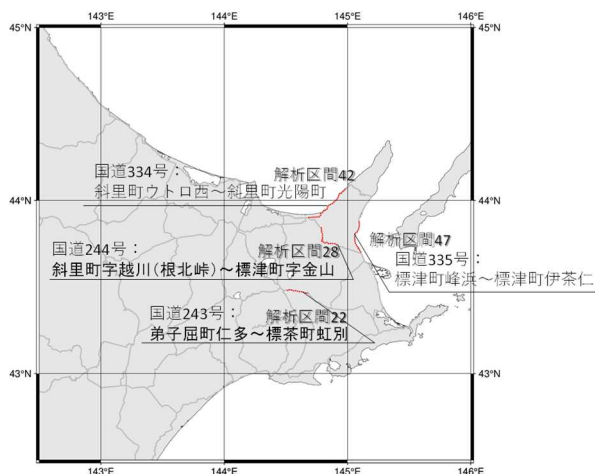


図-22 選定した4解析区間

### 5.3.3 障害度の評価指標の設定

5.3.2 項で抽出した検討対象事例を用いて、通行止めが実施された事例の発生割合と、解析区間内で吹雪視程の最低値が50m未満(吹雪量300kg/m/h以上)となる継続時間との関係を図-23に、解析区間内での最大吹雪量との関係を図-24に示す。その際、道路除雪1サイクル相当の3時間<sup>39)</sup>を考慮した。図-23より、継続時間が長くなるにつれて通行止めの発生割合が大きくなり、継続時間が3時間を超えると75%、6時間を超えると全て通行止めであった。上記より、視程50m未満の継続時間の差異が通行止めの発生と関係すると考えられる。また、図-24より、最大吹雪量が800kg/m/h以上となると全て通行止めとなっており、軽自動車も物理的に走行できなくなると推測される吹雪量1000kg/m/h(除雪1サイクル相当の3時間で20cmの吹きだまり発生に相当)と概ね整合した。以上の解析に基づき、暴風雪の障害度は、視程低下により走行環境の悪化が推定される視程50m未満が3~6時間継続する場合を「障害度1」、通行止めが必要なほどの障害発生が推定される視程50m未満が6時間以上継続する場合を「障害度2」、軽自動車の発進が困難となる吹きだまり発生がする推定される吹きだまり20cm以上/3hとなる場合を「障害度3」と設定した(表-6)。

### 5.3.4 妥当性の確認

2013年3月2日6時~3月3日18時の暴風雪期間における、国道243号弟子屈町仁多~虹別(延長13.2km)の平均吹雪量と最大吹雪量の推移を図-25に示し、障害度の評価指標の妥当性を確認した。図-25には視程

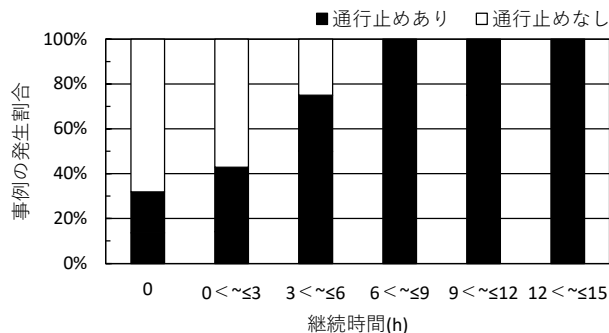


図-23 視程50m未満(吹雪量300kg/m/h以上)の継続時間と通行止めの発生割合との関係

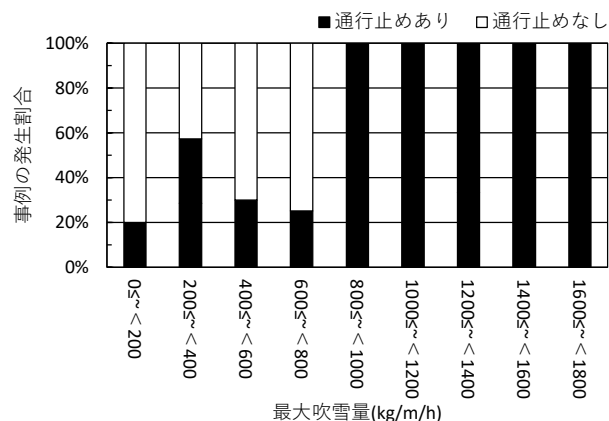


図-24 最大吹雪量と通行止めの発生割合との関係

表-6 暴風雪の障害度の評価指標

障害度	評価指標	推定される状況
障害度1	視程50m未満(吹雪量300kg/m/h以上)が3~6時間継続	視程低下により走行環境が悪化
障害度2	視程50m未満(吹雪量300kg/m/h以上)が6時間以上継続	通行止めが必要なほどの障害が発生
障害度3	吹きだまり20cm以上/3h(吹雪量3000kg/m/3h以上)が発生	軽自動車の発進が困難となる吹きだまりが発生

50mと吹きだまり深さ20cm/3hに相当する時間吹雪量を付記した。上記区間での平均吹雪量より、視程50m未満が6時間以上継続していた(障害度2に相当)。また、通行止め開始後、最大吹雪量が1000kg/m/h程度の際、立ち往生車両の救助要請の連絡があった。加えて、最大吹雪量が吹きだまり深さ20cm以上/3hを超過する期間が、通行規制中5時間推定された(障害度3に相当)。これにより、道路開通のための除雪や準備作業などにより、吹雪量が300kg/m/h以下となってから約9時間後に道路通行止めが解除されたものと示唆される。



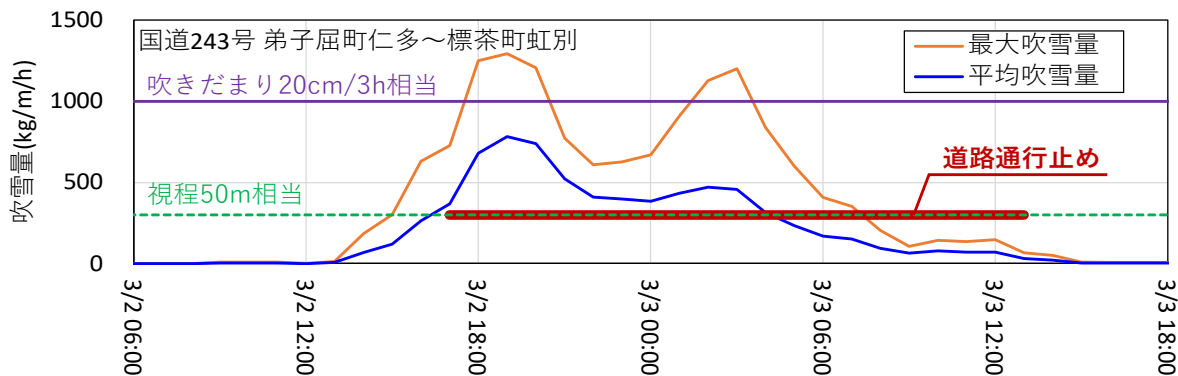


図-25 国道 243 号弟子屈町仁多～虹別における吹雪量の推移  
(2013 年 3 月 2 日 6 時～3 月 3 日 18 時)

#### 5.4 警戒レベルの評価指標に関する検討

警戒レベルは、警戒・非常体制の発令を判断するための、道路ネットワークの障害や地域の災害の規模を示す指標として定義した(表-2)。暴風雪災害の規模について、道路管理に活用することを念頭に置いた警戒レベルを作成のうえ、一回の暴風雪の厳しさを評価する指標を、新潟県以北の積雪寒冷地域を対象に設定した。

##### 5.4.1 5段階の警戒レベルの設定

内閣府による避難情報に関するガイドライン<sup>46)</sup>によれば、主に大雨に伴う災害時に住民がとるべき行動を5段階に分け、情報と行動の対応を明確化している。本研究では上記を参考として、暴風雪の災害規模、地域の道路交通網へ与える影響、ならびに吹雪障害状況をもとに、道路管理に資することを重点に置いた5段階の警戒レベル案を設定した(表-7)。ここでは、暴風雪の強度・広がり・継続時間を考慮し、警戒レベル3以上が道路交通に影響を与えるものとした。具体的には、一部通行止めで道路交通への影響が局所的であるため、対策本部の設定に至らない状況が警戒レベル3、通行止

めが多路線に渡るため、複数の道路管理者の連携が必要となり対策本部が設置される状況が警戒レベル4、通行止めが多路線に渡り、通行止めの解除まで時間を要することで、孤立集落における迅速な人命救助など自衛隊の災害派遣が必要な状況を警戒レベル5とした。つぎに、北海道開発局の災害資料、北海道新聞による関連記事、気象庁資料を用いて設定した警戒レベルに相当するかを判断したうえで、5.1節で整理したデータセットの53事例を5段階に分類した(表-7)。

##### 5.4.2 評価指標の選定

警戒レベルの違いに対し、暴風雪の強度・広がり・継続時間が相互に影響を及ぼしていると考えられる。そこで、5.2.3 項で設定した吹雪障害の程度を示す3通りの基準数値を「強度」とし、以降、広がり・継続時間の候補を設定したのち、それらの最も適切な組み合わせについて検討することとした。

###### 1) 広がり・継続時間の候補の設定

吹雪障害の基準数値以上となる面積の割合の積算値を「1)積算面積率(%)」、面積の割合の最大値を「2)最大面積率(%)」、時間数を「3)継続時間(h)」と設定

表-7 暴風雪災害における警戒レベルと規模(案)、文献による判断基準、事例数の分類

警戒レベル	暴風雪災害の規模	道路交通への影響	吹雪障害状況	(参考) 気象情報	文献による判断基準	事例数 N=53
レベル 5	通行止め+集落孤立(自衛隊の災害派遣)	広域の通行止め(立ち往生)の長期化	広範囲かつ長期的	過去に経験のない	・広範囲に立往生や集落孤立状態が2日以上継続 ・自衛隊の災害派遣	1
レベル 4	通行止め+除雪作業困難(他地方整備局や開発建設部に応援、災害対策本部の設定)	広域の通行止め(立ち往生)	広範囲	数年に1度	・同時に広範囲で一般国道通行止め発生 ・立往生発生、集落孤立 ・社会活動影響有	6
レベル 3	通行止めまたは立ち往生発生	一部通行止め(立ち往生)	局所的	警報	・一般国道通行止め発生 ・社会活動影響小	28
レベル 2	平均旅行速度の低下	-	-	注意報または警報	・一般国道通行止めなし ・吹雪の新聞記事あり	2
レベル 1	除雪	-	-	注意報	・一般国道通行止めなし ・吹雪の新聞記事なし	16

表-8 広がり・継続時間の候補の一覧

候補	概要	考慮される要素
1) 積算面積率(%)	吹雪障害の基準数値以上となる面積の割合の積算値	強度・広がり・時間
2) 最大面積率(%)	吹雪障害の基準数値以上となる面積の割合の最大値	強度・広がり
3) 継続時間(h)	吹雪障害の基準数値以上となる時間数	強度・時間

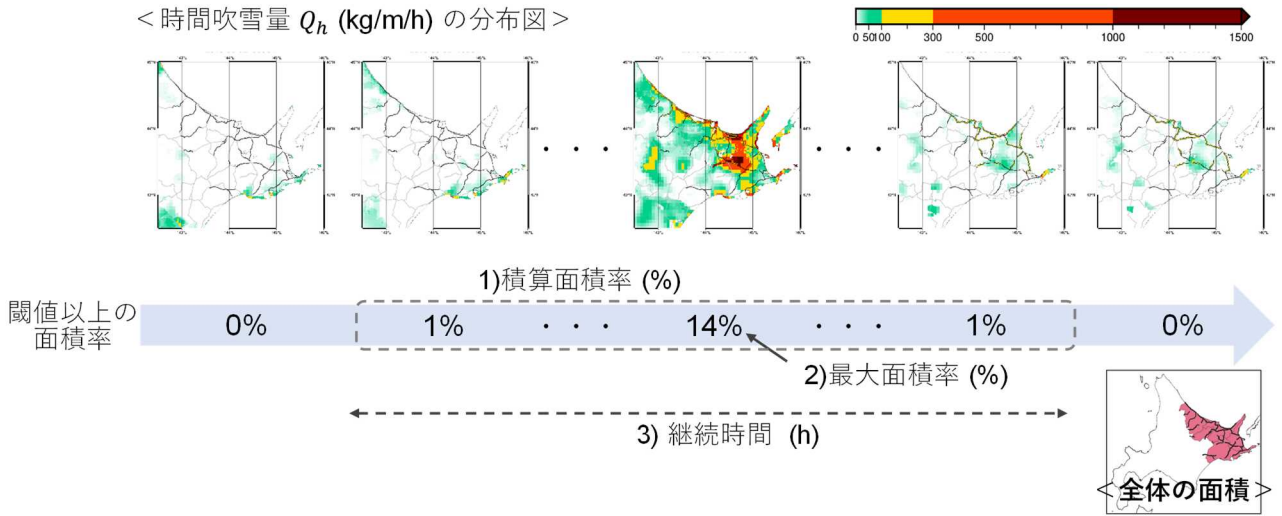


図-26 広がり・継続時間の候補の概念

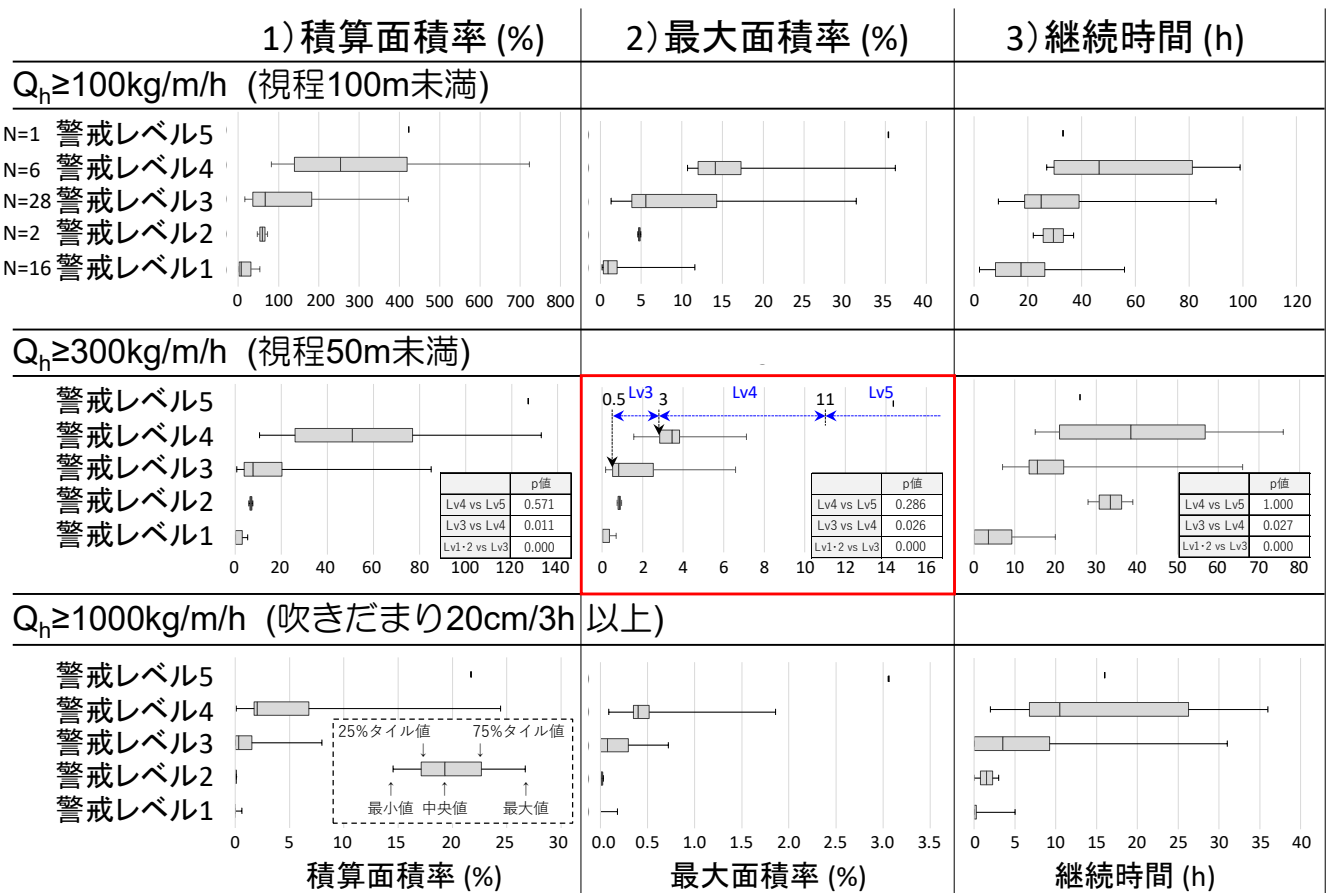


図-27 吹雪障害の基準数値ごとの、広がり・継続時間の候補と各警戒レベルとの関係 赤枠は本検討によって選定された評価指標の組み合わせ

した(表-8)。この概念を図-26に示す。図中の右下に示す全体の面積(図-16参照)に対して、点線で囲まれた「1%~14%~1%」の積算値が1)積算面積率(%)、その範囲が3)継続時間(h)、14%が2)最大面積率(%にそれぞれ該当する。

2) 評価指標の選定

図-27は、表-8で設定した3通りの広がり・継続時間の候補と、5.4.1項で設定した吹雪障害の基準数値(3通り)を行列とし、これらを組み合わせた条件において、警戒レベル1-5に分類したデータセット53事例(表-7参照)の最大・最小値および四分位数を示したものである。ここでは、道路交通に影響を与える警戒レベル3-5について、広がり・継続時間の候補と吹雪障害の基準数値との関係について確認した。その結果、時間吹雪量 $Q_h \geq 100\text{kg/m/h}$ の場合は、レベル3の75%タイル値がレベル4の25%タイル値より大きい。また、時間吹雪量 $Q_h \geq 1000\text{kg/m/h}$ の場合は、全ての評価指標についてレベル3の25%タイル値が0となった。時間吹雪量 $100\text{kg/m/h}$ は視程 $100\text{m}$ 程度に相当し、一定速度を維持した走行は困難となるがブレーキ操作による減速・停止までには達しないことから、通行止めが発生するほどの強度の事例を対象とした警戒レベル3以上の判別に適さないと考えられる。また、吹雪量 $1000\text{kg/m/h}$ は極端に吹雪の強度が大きい状態であり、警戒レベル3の通行止めの発生・非発生を判別には適さないと考えられる。以上より、「時間吹雪量 $Q_h \geq 300\text{kg/m/h}$ を、吹雪障害の基準数値(3通り)の中から採用した。つぎに、 $Q_h \geq 300\text{kg/m/h}$ を対象に、Wilcoxonの順位和検定(有意水準5%)を用いて各警戒レベル間の差を調べたところ、全ての広がり・継続時間の候補で警戒レベル1・2から4は有意( $p < 0.05$ )となった。また、レベル4と5の差は、2)最大面積率の方が1)積算面積率や3)継続時間よりも有意水準に近い結果となった。よって、「時間吹雪量 $300\text{kg/m/h}$ 以上となる最大面積率」を評価指標として選定した。なお、2)最大面積率は強度と広がり表現しているが、継続時間が考慮されていないため、3)継続時間との関係を確認した(図-28)。その結果、相関係数は $0.45$ ( $p < 0.001$ )であった。

以上のことから、警戒レベルの判別が最もできており、3)継続時間との関係性がみられた2)最大面積率( $Q_h \geq 300\text{kg/m/h}$ )を、暴風雪の強度・広がり・継続時間を考慮した警戒レベルの評価指標とした。

5.4.3 評価指標と再現期間との関係

図-27の最大面積率( $Q_h \geq 300\text{kg/m/h}$ )を用いて、各

警戒レベルの境界を設定した。警戒レベル3の75%タイル値とレベル4の25%タイル値の差は $0.3$ 、警戒レベル1の75%タイル値とレベル3の25%タイル値の差は $0.1$ と概ね類似している。表-7に示した警戒レベルは、人為的な要因や判断を含んだ暴風雪災害の規模設定に基づくため、警戒レベルごとに分類した評価指標が状況によって重複するものと考えられる。ここでは、前節のWilcoxonの順位和検定で各警戒レベル間の差を調べたところ、警戒レベル1・2から4は有意となっていることから、道路交通に影響を与える警戒レベル3と4は上位75%までを説明し、重複する場合は安全側を考慮しレベル4とした。また、警戒レベル4と5の差は有意でない( $p > 0.05$ )こと、レベル5の事例数が少ないことから、レベル4の評価指標最大値とレベル5の評価指標値の中間とした。以上から、対象地域である網走および釧路開発建設部管内(図-16)における暴風雪の評価指標(最大面積率( $Q_h \geq 300\text{kg/m/h}$ ))は、警戒レベル3が $0.5 \sim 3\%$ 、レベル4が $3 \sim 11\%$ 、レベル5が $11\%$ 以上と分類された(図-27の青)。つぎに、暴風雪事例の冬期最大値を8冬期分抽出のうえ、一般化極値分布(GEV)を用いて最大面積率と再現期間との関係を図-29に示した。藤部<sup>47)</sup>によれば、極値分布関数についてGumbel分布が一般化極値分布(GEV)の一種であり、平方根指数型最大値分布(SQRT-ET)もGEVで近似できることを併せ考えると、実用上はGEVだけで事足りると述べている。図-29に図-27の青で得られた最大面積率の分類結果を代入すると、再現期間は警

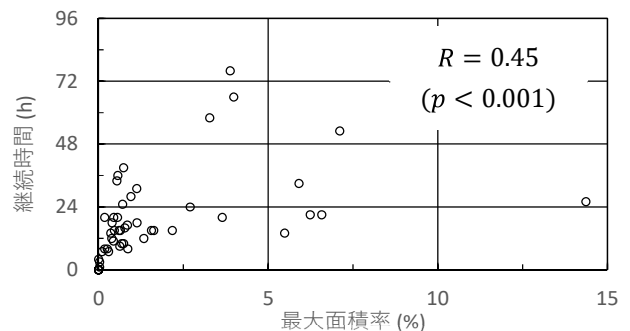


図-28 3)継続時間と2)最大面積率との関係

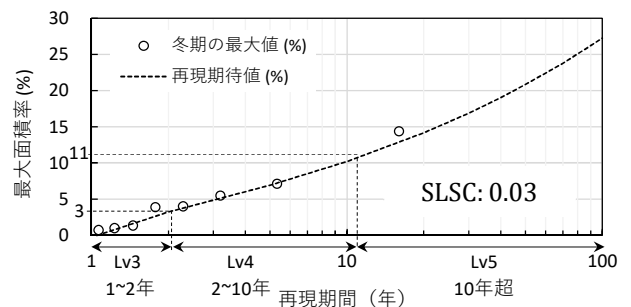


図-29 2)最大面積率と再現期間との関係

戒レベル3が1~2年、レベル4が2~10年、レベル5が10年超となった(表-9)。また、標準最少二乗規準(SLSC)は0.03で、極値統計の適合度を確認する条件として採用されている  $SLSC \leq 0.04^{(48), (49)}$  を満たす結果となった。ただし、SLSCはデータ年数が多いほど減少するため<sup>47)</sup>、ここでは参考値として扱う。

道路構造令によれば、幹線道路における堆雪幅の設定に際し、計画降・積雪深は10年再現確率値を標準とするとしている<sup>6)</sup>。また、警戒レベル5の事例は、広範囲な道路吹きだまりに伴い社会活動に多大な影響が発生する(表-7)ことから、再現期間が計画値より大きい10年超に分類されたのは妥当と考えられる。また、警戒レベル4の再現期間2~10年は、数年に1度程度の気象状況や道路堆雪幅の設定の考え方から、レベル3の再現期間1~2年は、道路通行止めが発生するものの暴風雪の収束とともに平常時に移行し社会活動の影響が少ないことから、それぞれ妥当と考えられる。

表-9 警戒レベル3-5の評価指標と再現期間

警戒レベル	評価指標 最大面積率 ( $Q_h \geq 300\text{kg/m/h}$ )	再現期間
レベル3	0.5~3%	1~2年
レベル4	3~11%	2~10年
レベル5	11%以上	10年超

## 6. 暴風雪および大雪の発生頻度と地域性に関する変化傾向の解明(暴風雪について)

本章では、達成目標③「暴風雪および大雪の発生頻度と地域性に関する変化傾向の解明」のうち、暴風雪について述べる(大雪の解析結果については第8章)。

### 6.1 地域・警戒レベルごとの評価指標の閾値の設定

5章で得られた北海道東部における警戒レベル3-5の評価指標(視程50m未満( $Q_h \geq 300\text{kg/m/h}$ )の最大面積率)と再現期間との関係、および気象格子値を用いて、**図-30**に示す新潟以北の9つの積雪寒冷地域<sup>50)</sup>を対象に再現期待値を算出し、これらを警戒レベルの評価指標の閾値とした。暴風雪の災害の規模を示す警戒レベルは、暴風雪の規模および地域の耐力(除雪体制や防雪施設の高さなどの素因)によって変化すると考えられる。ここでは、暴風雪の再現期間と警戒レベル3-5との関係が、各地域で一定であるとして扱った。

極値統計に必要なデータを得るために、気象庁が提供するJRA-55領域ダウンスケーリングDSJRA-55(1960

~2009年度、水平分解能5km格子)<sup>51)</sup>と、気象庁毎時大気解析GPVおよび気象庁レーダー・アメダス解析雨量(2011~2020年度:解像度5km、1km)による、計60冬期(12~3月)の評価指標の最大値を地域ごとに求めた。その結果、各地域の評価指標の冬期最大値は、DSJRA-55と、毎時大気解析GPVとレーダー・アメダス解析雨量を用いた場合で、平均値に差がみられた。毎時大気解析GPVとレーダー・アメダス解析雨量には、観測値による補正が施されているため、評価指標の最大値は長期解析値を領域ダウンスケーリングしたDSJRA-55を用いた場合よりも妥当性が高いと考えられる。そこで、DSJRA-55から求めた評価指標の最大値 $S_D$ を補正するための係数 $C$ を、式(14)より求めた。その際、DSJRA-55と、毎時大気解析GPVとレーダー・アメダス解析雨量による統計期間は重複していないため、評価指標の冬期最大値の経年変化に有意な傾向がなければ、それぞれの平均が概ね一致すると仮定した。ここでは、長期のDSJRA-55による統計期間(1960~2009年度;50冬期)が全ての地域で有意でない( $p > 0.05$ )ことを確認のうえ、**表-10**に評価指標の冬期最大値の平均と、式(14)に基づく補正係数 $C$ を示した。

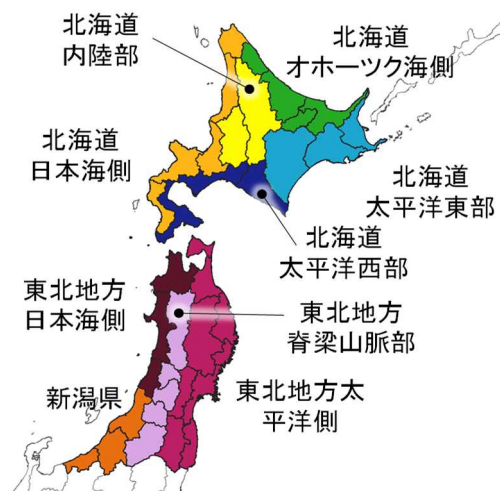


図-30 地域細分<sup>50)</sup>

$$C = \frac{\text{毎時大気解析 GPV とレーダー・アメダス解析雨量求めた評価指標の冬期最大値の平均(10 冬期)}}{\text{DSJRA-55 から求めた評価指標の冬期最大値の平均(50 冬期)}} \quad (14)$$

各地域におけるDSJRA-55から求めた補正済の評価指標の最大値 $S_D'$ (1960~2009年度)を、 $S_D$ に $C$ を乗じて算出した( $N=50$ )。それらと、毎時大気解析GPVとレーダー・アメダス解析雨量(2011~2020年度)から

求めた評価指標の最大値（ $N=10$ ）を合わせた計60冬期分のデータを用いて、GEVにより警戒レベル3-5の再現期間に相当する最大面積率の再現期待値とSLSCを表-10に示した。地域細分に着目すると、北海道や東北地方の日本海側、北海道太平洋側東部で再現期待値が他地域と比較して大きい傾向がみられる。これらは、高緯度ほど低温となる傾向により、乾き雪およびしもぎらめ雪地域<sup>52)</sup>の割合が多くなるため吹雪が発生しやすいこと、日本海側では冬型の気圧配置時における暴風雪、北海道太平洋側東部では低気圧の通過に伴う暴風雪により広い範囲で吹雪が発生することから、再現期待値が大きくなった可能性が考えられる。

## 6.2 警戒レベルごとの暴風雪の発生傾向

各地域の補正係数 $C$ を乗じたDSJRA-55（1960～2009年度）および気象庁毎時大気解析GPVと気象庁レーダー・アメダス解析雨量（2011～2020年度）を用いて、表-10で5.4節にて整理した警戒レベル3-5の再現期間

に相当する各地域の評価指標の再現期待値に基づき、警戒レベル3-5の発生頻度を10冬期ごとに図-31に示した。警戒レベル3では、1960～2000年代の北海道内陸部と、2010年代の東北地方太平洋側で、他地域と比較して発生頻度が大きかった。その理由として、評価指標の閾値が他地域より小さく、多くの事例が抽出されたことがあげられる。また、2000～2010年代にかけて北海道では減少、新潟県では増加していた。警戒レベル4では、北海道太平洋側、東北地方日本海側、新潟県で1980または1990～2010年代にかけて増加傾向であった。警戒レベル5は、明瞭な変化傾向は確認されないが、北海道日本海側・内陸部・オホーツク海側、東北地方日本海側・脊梁山脈部では2010年代に2回以上となった。極端な暴風雪と考えられる警戒レベル4と5は、多くの地域で1980または1990年代以降増加傾向と考えられることから、今後、これらに対する備えが必要と考えられる。

表-10 地域細分ごとの評価指標の冬期最大値の平均と補正係数 $C$ （左）、警戒レベル3-5の評価指標の閾値となる再現期待値と標準最少二乗規準 SLSC（右）

①：DSJRA-55から算出 ②：毎時大気解析GPVとレーダー・アメダス解析雨量から算出

地 域	評価指標の冬期最大値の平均 (%)		補正係数 $C$	評価指標の再現期待値 (%)				SLSC
	①	②		警戒レベル	レベル3	レベル4	レベル5	
				再現期間	1年以上	2年以上	10年超	
北海道日本海側	8.7	4.2	0.48	1.7～	3.9～	7.2～	0.03	
北海道内陸部	11.6	2.5	0.21	0.5～	2.0～	5.0～	0.03	
北海道オホーツク海側	15.3	2.8	0.18	0.8～	2.2～	5.5～	0.03	
北海道太平洋側東部	28.2	4.2	0.15	1.0～	3.4～	8.6～	0.04	
北海道太平洋側西部	15.8	3.0	0.19	0.8～	2.6～	5.9～	0.03	
東北地方日本海側	9.3	3.7	0.39	1.2～	3.1～	6.9～	0.04	
東北地方脊梁山脈部	2.4	2.1	0.86	0.3～	1.4～	4.6～	0.06	
東北地方太平洋側	7.0	1.6	0.23	0.2～	1.1～	3.6～	0.06	
新潟県	5.3	2.2	0.42	0.8～	1.8～	4.1～	0.03	

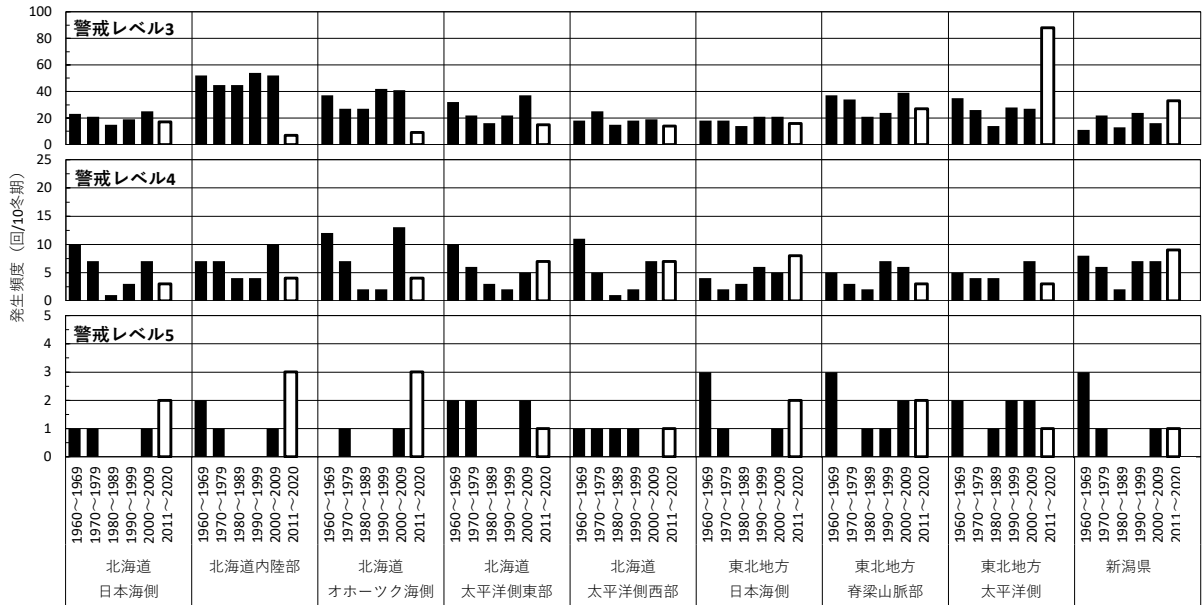


図-31 暴風雪各警戒レベル以上の発生頻度（地域別）  
 黒：1960～2000年代（補正済 DSJRA-55）  
 白：2010年代（毎時大気解析 GVP と気象庁レーダー・アメダス解析雨量）

7. 暴風雪や大雪の評価指標の提案(大雪について)

本章では、達成目標②「暴風雪や大雪の評価指標の提案」のうち、大雪の評価指標について検討した結果を述べる。5章では、暴風雪を対象に、表-2に示す「障害度」と「警戒レベル」を評価する指標を作成した。本章では、大雪の強度・広がり・継続時間に着目のうえ、一回の大雪の厳しさを評価する指標について、大雪に伴う道路交通障害が懸念される積雪地域<sup>53)</sup>を対象に検討した(図-32)。ここでは、時間あたりに降った雪の深さを降雪強度 (cm/h) として、これを大雪の厳しさを示す物理量として用いた。ここでは、過去の大雪災害事例を収集し、既往文献を用いて時間降雪量と大雪障害との関係を整理のうえ、大雪を対象とした障害度と警戒レベル(表-2)の評価指標を設定した。

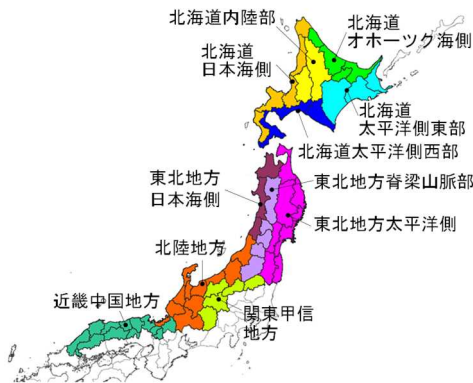


図-32 11細分された積雪地域<sup>53)</sup>

7.1 過去の大雪事例の収集

内閣府<sup>54), 55)</sup>や気象庁<sup>56)</sup>、ならびに文献<sup>57)~65)</sup>により、1995年度以降の大雪災害36事例の開始と終了年月日、道路交通への影響、災害の対応、対象地域(図-32)、自衛隊の活動について収集・整理したほか、警戒レベル案(7.3節にて後述)を付記した。収集事例の一覧を表-11に示す。

7.2 障害度の評価指標に関する検討

障害度は、通行規制などを判断するための、個々の路線・区間の障害を示す段階的な指標である(表-2)。ここでは、大雪による車両滞留に関連する既往研究や災害事例を整理し、車両滞留が発生する降積雪状況を分析のうえ、障害度の評価指標を3段階に設定した(5章と同様)。

7.2.1 大雪による車両滞留に関連する既往研究

1) 気象現象と車両滞留との関係

河島ら<sup>66)</sup>によれば、2017/18年冬期にしばしば日本海寒帯気団収束帯(JPCZ)が発達し、本州日本海側の海岸平野部を中心に各地で記録的な大雪となった結果、幹線国道の大規模な車両滞留が発生したことを示している。JPCZは、強い冬型の気圧配置や上空の寒気が流れ込む時に、この収束帯付近で対流雲が組織的に発達し、本州日本海側の地域では局地的に大雪となることがある<sup>67)</sup>。表-11の一覧のうち、事例30~34は2017年度冬期に発生しており、JPCZに伴う大雪の影響を受けた可能性が考えられる。

5 極端気象がもたらす雪氷災害の被害軽減のための技術の開発

表-11 収集した大雪事例の一覧

事例 No.	開始	終了	年 (和暦)	道路交通への影響	災害の対応	対象地域	自衛隊の活動	警戒レベル
1	1996/01/08	1996/01/09	平成8年	多路線、広域での通行止め、立ち往生、都市機能の麻痺	対策本部(市町村)の設置 自衛隊の派遣要請(札幌市)	北海道日本海側	不明	4
2	2004/01/13	2004/01/16	平成16年	多路線、広域での通行止め 都市機能の麻痺、孤立	対策本部の設置 自衛隊の派遣要請	北海道オホーツク海側、 北海道太平洋側東部	安否確認・救出(北見市)	5
3	2004/01/22	2004/01/22	平成16年	幹線道路で最大30kmに及び、洪水、高速道路通行止め	不明	北陸地方		4
4	2005/01/08	2005/01/14	平成17年	多路線、広域での通行止め 孤立	(冬期間を通して)対策本部の設置、 自衛隊の派遣要請	北陸地方	不明	4
5	2006/01/04	2006/01/05	平成18年	複数の国道で通行止め	詳細不明	東北地方日本海側、 東北地方脊梁山脈部		4
6	2006/01/07	2006/01/13	平成18年	多路線、広域での通行止め 孤立	(冬期間を通して)対策本部の設置、 自衛隊の派遣要請	北陸地方	不明	4
7	2006/03/30	2006/03/30	平成18年	登坂不能車両続出による国道全面通行止め(4時間25分)	詳細不明	不明		3
8	2007/01/06	2007/01/09	平成19年	多路線、広域での通行止め(北海道)	不明			4
9	2009/01/25	2009/01/25	平成21年	七尾市を中心とした複数の路線の通行止め、通行止めや除雪の遅れに伴う集落孤立(3地区以上)※倒木あり	詳細不明	北陸地方		3
10	2010/01/16	2010/01/18	平成22年	多路線、広域での通行止め、 都市機能の麻痺	なし	北海道日本海側		4
11	2010/12/24	2010/12/27	平成22年	国道49号通行止め(2区間、計350台以上閉じ込め)、磐越道通行止め	地盤出張所が、近隣事務所や協定業者への応援要請。また国交省および東日本高速道路株式会社の連携。	東北地方太平洋側		4
12	2010/12/31	2011/01/02	平成22年	山陰の国道9号などで1000台以上が立ち往生、米子道で長時間の通行止め。	西日本高速道路株式会社の事務所間で応援	近畿中国地方		4
13	2011/01/16	2011/01/16	平成23年	スタック車両が発生	詳細不明	近畿中国地方		3
14	2011/01/30	2011/01/31	平成23年	国道8号・北陸自動車道合わせて1180台の車両滞留。多数の滞留した車両が障害となって除雪作業が難航し、北陸自動車道や国道8号、国道365号/国道476号、越前・河野しおかぜラインなどの主要な幹線道路で通行止め。	福井河川国道事務所で非常体制をとり関係機関との情報共有を目的とした連絡室を開設、自衛隊への派遣要請	北陸地方		5
15	2011/12/15	2011/12/20	平成23年	通行止め、都市機能の麻痺	対策本部の設置(岩見沢)	北海道内陸部		3
16	2011/12/24	2011/12/26	平成23年	多路線、広域での通行止め	なし	北海道内陸部、 北海道日本海側		3
17	2012/01/07	2012/01/07	平成24年	秋田自動車道で通行止め	梯団除雪作業(秋田自動車道)	東北地方日本海側、 東北地方脊梁山脈部		3
18	2012/01/10	2012/01/16	平成24年	多路線、広域での通行止め、立ち往生	自衛隊の派遣要請(岩見沢)	北海道内陸部	除排雪支援。大雪の他、高速通行止めの影響で生じた洪水に巻き込まれてダンプが不足したため。	3
19	2012/02/01	2012/02/02	平成24年	400台を超える車両が道路上で立ち往生し、国道279号通行止め、車両救出のための自衛隊派遣要請	詳細不明	東北地方太平洋側	滞留した車両の救出のため自衛隊派遣	4
20	2012/02/07	2012/02/12	平成24年	通行止め	自衛隊の派遣要請(岩見沢、冬期を通した大雪により)	北海道内陸部		3
21	2012/03/12	2012/03/12	平成24年	八戸道で通行止め	事業所間での応援	東北地方太平洋側		4
22	2014/02/14	2014/02/15	平成26年	多路線、広域での通行止め、立ち往生、孤立、道路での死亡事故など	対策本部の設置 自衛隊の派遣要請	東北地方脊梁山脈部(Lv4)、 東北地方太平洋側(Lv5)、 関東甲信地方(Lv5)	人命救助、物資輸送(東北地方太平洋側、関東甲信地方)	5
23	2014/02/14	2014/02/16	平成26年	福島・宮城県境付近にて複数箇所の交通障害による洪水、東北自動車道通行止め	道路対策雪害支部の設置	東北地方太平洋側		4
24	2014/12/05	2014/12/06	平成26年	通行止め、立ち往生、孤立	対策本部の設置 自衛隊の派遣要請(徳島)	北陸地方	人命救助、物資輸送、道路の啓開(倒木の伐採)	5
25	2014/12/16	2014/12/21	平成26年	北陸自動車道で通行止め、100台が取り残される、国道・県道の通行止め、地域の孤立	滞留車両の救出、改正災害対策基本法に基づく区間指定	北陸地方		4
26	2015/01/30	2015/01/30	平成27年	国道6号でノーマルタイヤ装着車のスタックを皮切りに、複数の大型車がスタックし、集中除雪のため通行止め	詳細不明	東北地方太平洋側		4
27	2016/01/23	2016/01/25	平成28年	多路線、広域での通行止め、立ち往生、道路での死亡事故など	対策本部の設置 自衛隊の派遣(リエゾン)	北海道オホーツク海側、 北海道太平洋側東部、 北陸地方		4
28	2017/01/22	2017/01/24	平成29年	多路線、広域での通行止め、立ち往生、孤立	対策本部の設置 自衛隊の派遣要請	近畿中国地方	物資輸送(給水支援)、 人命救助	5
29	2017/02/09	2017/02/12	平成29年	多路線、広域での通行止め	対策本部の設置	北陸地方、近畿中国地方		4
30	2018/01/11	2018/01/14	平成30年	多路線、広域での通行止め	対策本部の設置 自衛隊の派遣	北陸地方	不明	4
31	2018/01/11	2018/01/13	平成30年	北陸道で通行止め(計460台が滞留)	詳細不明	北陸地方		4
32	2018/01/22	2018/01/28	平成30年	通行止め	対策本部の設置	北陸地方		4
33	2018/02/03	2018/02/08	平成30年	多路線、広域での通行止め、立ち往生	対策本部の設置 自衛隊の派遣	北陸地方	教護活動	5
34	2018/02/05	2018/02/07	平成30年	北陸道で通行止め(車両滞留70台)	NEXCO日本の他支社からの応援	北陸地方		4
35	2020/12/16	2020/12/17	令和2年	多路線、広域での通行止め、立ち往生、孤立	対策本部の設置 自衛隊の派遣	北陸地方	食料などの配布、ドライバーの安否確認、立ち往生車両のドライバーの輸送	5
36	2021/01/07	2021/01/11	令和3年	広域での車両滞留、広域での通行止め、公共交通の運休、孤立	対策本部の設置 自衛隊の派遣	東北地方脊梁山脈部、 北陸地方	除排雪、滞留車両周辺の除雪及び燃料・食料の配布	5

2) 車両スタックのメカニズム

国土交通省の冬期道路交通確保対策検討委員会の資料<sup>39)</sup>によれば、立ち往生の過半数は大型車であること、縦断勾配が5%を超える区間で立ち往生の発生頻度が高いことが示されている。また、藤本ら<sup>68)</sup>は、大雪時のスタック発生メカニズムについて、大雪時には車両の走行性が低下し、停車時間や発進回数が増える。停車時間や発進回数の増大は、圧雪路面の窪みの発生やすべり摩擦係数の低下を誘発する。これらがタイヤの空転を助長し、それが圧雪路面の窪みの拡大やすべり摩擦係数のさらなる低下を引き起こす負の循環を生じさせ、スタック車両の発生に至ることを示している。

3) 降雪と視程および旅行速度低下との関係

加治屋ら<sup>37)</sup>は、視程障害時のドライバーの運転挙動について整理している(表-12)。また、斎藤<sup>69)</sup>によると、降雪の強さ $S(\text{mg}/\text{cm}^2 \text{min})$ が大きくなるにつれ視程 $Vis(\text{km})$ が低下することを示し、その関係を式(15)に表した。

$$Vis = 1.15S^{-0.76} \quad (15)$$

また、村田・河島<sup>8)</sup>は、大雪による車両滞留の発生について、前24時間の累積降雪量に加えて、発生直前の強い降雪も影響している可能性を指摘している。以上により、降雪強度の増加に伴い旅行速度が低下することで、藤本ら<sup>68)</sup>が示すスタックの発生に至る可能性が考えられる。

表-12 視程障害時のドライバーの運転挙動

吹雪視程	運転挙動
200m 以上	・ 安定した走行状態が維持される
100m 以上 200m 未満	・ 速度調節によって視程障害に応じた運転 ・ 車両による速度差は小さい ・ アクセルやブレーキ操作は安定
50m 以上 100m 未満	・ 一定速度を維持した走行が困難で、アクセル操作が頻繁になる ・ 車両による速度差が大きくなり、追従や車群走行が多くなる。
50m 未満	・ ブレーキ操作による減速・停止が発生 ・ 左右への挙動が大きくなる

7.2.2 障害度の評価指標の設定

大雪による交通障害に至る状況について、多量降雪に伴う道路路面での新積雪の急激な増加により、車両の走行が物理的に困難となり、車両のスタックや立ち往生をきっかけとして車両滞留が生じるものとする。このことは、中村<sup>70)</sup>が示す、雪氷災害の特徴のうち動的性質(突如発生)であると考えられる。ここでは、動的性質を考慮した障害度として、「一定時間に積算された時間降雪量」を段階的に設定した。道路路面上の新積雪には圧密が作用するが、ここでは指標としての明確さを優先し考慮しないこととした。

表-11 で示した大雪事例のうち、車両滞留に至る道路交通の状況が詳細に記録されていた4事例(事例No. 28、33、35、36)について、立ち往生が発生した延べ8区間ごとに、降雪量と立ち往生発生を整理した(表-13)。その結果、8件中5件が大型車(3件が車種不明)のスタックにより、それぞれ車両滞留が発生していた。つぎに、各区間における車両のスタック発生日時までの近傍の気象観測所の積算降雪量を、表-14 および図-33 に整理した。ここでは、降雪の開始が概ね前48時間までであること、村田・河島<sup>8)</sup>より降雪量40cm/24hに達した場合に車両滞留に至る可能性が高いとされること、一般国道の新雪除雪が1サイクル概ね3時間<sup>39)</sup>であることを参考に、車両のスタックに至る前3、6、12、24、48時間の積算降雪量を示した。表-14 より、村田・河島<sup>8)</sup>が提示したように、スタック発生前に概ね40cm以上/24hの降雪量が発生していた。また、スタック発生時の降雪量は40~60cm/24hが多く、また60~80cm/24hの事例もみられた。加えて、前48時間および24時間との差が0cmの事例(No. 28、33)は、前3時間の積算降雪量が11~19cmおよび6時間が22~30cmと大きく、差が36~54cmと大きい4事例のうち3事例は、積算降雪量が6~12cmと小さい傾

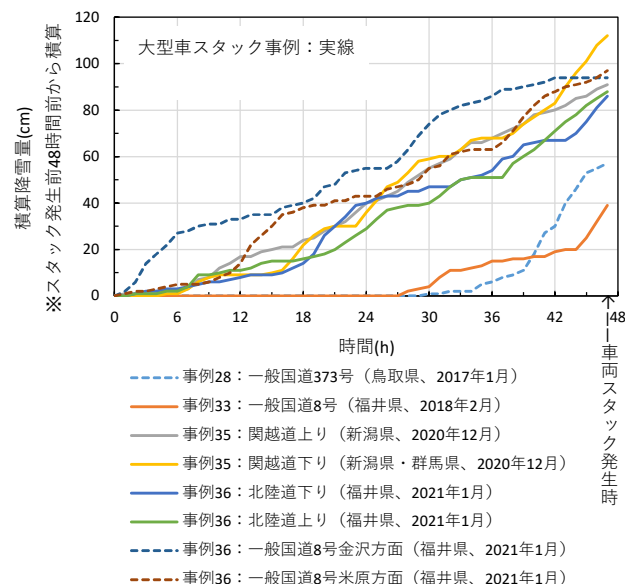


図-33 車両のスタック発生日時までの近傍の気象観測所の積算降雪量(cm)の推移



5 極端気象がもたらす雪氷災害の被害軽減のための技術の開発

表-13 大雪による車両滞留時の道路交通状況 ●：大型車が起因，○：車種不明

事例No	事例名	路線	区間	日時	道路交通の状況等	車両滞留発生
28	一般国道373号 (鳥取県, 2017年1月)	国道373号	鳥取県内(智頭町地内:駒形交差点~ 智頭東交差点,延長12km)	2017/01/23 17:55	滞留車両が多数発生	○
				2017/01/24 02:55	炎対法に基づく車両移動等の措置を行う区間に指定	
				2017/01/24 15:30	スタック車両が解消	
				2017/01/25 09:00	片側車線は通行可能(片側でセミトレーラーが立ち往生), 圧雪除去・ 拡幅除雪作業中	
33	一般国道8号 (福井県, 2018年2月)	R8	福井県等	2018/02/06 00:18	大型車3台立ち往生発生(あわら市瓜生~坂井市丸岡町)	●
				2018/02/06 06:06	大型車立ち往生発生(あわら市熊坂南交差点), 以降滞留が長時間化	
				2018/02/06 08:30	CCTVで滞留確認, 大型車チェーン装着作業(あわら市笹岡), 以降滞 留が常態化	
				2018/02/11 20:50	通行止めを全て解除	
35	関越道上り (新潟県, 2020年12月)	関越道 (上り)	塩沢石打IC~ 小出IC	2020/12/16 17:52	塩沢石打IC付近で大型車立ち往生が発生し滞留発生	●
				2020/12/17 09:45	滞留が六日町ICを超える	
				2020/12/17 10:20	湯沢IC~小出IC(上り線)通行止め開始	
				2020/12/18 12:00	滞留車両が残り約1000台	
				2020/12/18 22:15	塩沢石打IC~小出IC間(上り線)の滞留車両の退出完了	
				2020/12/19 17:30	湯沢IC~小出IC(上り線)通行止め解除	
36	北陸道下り (福井県・ 群馬県, 2020年12月)	北陸道 (下り)	月夜野IC~ 湯沢IC	2020/12/16 22:03	湯沢IC~関越トンネルにおいて大型車の立ち往生が発生し滞留発生	●
				2020/12/17 00:28	関越トンネル(新潟方面)進入禁止措置実施	
				2020/12/17 05:40	湯沢IC~月夜野IC(新潟方面)通行止め開始	
				2020/12/17 13:26	下牧PAから水上IC間の滞留車退出完了	
				2020/12/17 14:10	谷川岳PAのUターン退出開始	
				2020/12/18 07:30	湯沢IC~水上IC間(下り線)の滞留車両の退出完了	
				2020/12/19 21:30	湯沢IC~月夜野IC(下り)通行止め解除	
				2021/01/09 12:15	丸岡IC一般道取付部で大型車スタックが発生し滞留発生	●
				2021/01/09 13:55	福井北IC 大型車の故障によるランプ閉鎖	
				2021/01/09 22:20	金津IC~福井IC 災害対策基本法適用開始	
2021/01/09 23:25	渋滞延伸により福井IC~福井北IC(金沢方面) 通行止め開始					
2021/01/10 01:05	武生IC~福井IC(金沢方面) 雪により通行止め延伸					
2021/01/10 01:30	中日本高速が福井県へ自衛隊の派遣要請を依頼					
2021/01/10 04:00	福井県が陸上自衛隊に派遣要請					
2021/01/10 06:30	第1回災害対策会議(会社, 県, 自衛隊, 国交省)					
2021/01/10 10:10	福井北IC~加賀IC(金沢方面) 雪通行止め開始					
2021/01/10 20:00	福井北IC~丸岡IC(金沢方面) 区間の滞留車両排出完了					
2021/01/11 07:00	鯖江IC~福井北IC(金沢方面) 区間車両排出完了					
2021/01/12 06:00	通行止め解除					
2021/01/09 11:30	大型貨物の事故により車線閉塞	●				
2021/01/09 11:40	福井IC~丸岡IC(米原方面) 事故通行止め開始					
2021/01/09 12:12	丸岡IC部の本線物理的閉鎖					
2021/01/09 12:15	丸岡IC一般道取付部で大型車スタック発生					
2021/01/09 14:30	丸岡IC出口を起点とした本線渋滞発生					
2021/01/09 22:20	金津IC~福井IC 災害対策基本法適用開始					
2021/01/10 01:30	中日本高速が福井県へ自衛隊の派遣要請を依頼					
2021/01/10 04:00	福井県が陸上自衛隊に派遣要請					
2021/01/10 06:30	第1回災害対策会議(会社, 県, 自衛隊, 国交省)					
2021/01/10 10:00	丸岡IC~加賀IC(米原方面) 雪通行止め開始					
2021/01/10 20:00	丸岡IC~福井北IC(米原方面) 区間車両排出完了					
2021/01/11 22:57	金津IC~丸岡IC(米原方面) 区間車両排出完了					
2021/01/12 06:00	通行止め解除					
36	一般国道8号 金沢方面 (福井県, 2021年1月)	国道8号	福井県 (一般国道8号 金沢方面)	2021/1/7~	断続的な渋滞発生	○
				2021/01/10 05:00	北野交差点付近スタック発生, 渋滞が徐々に悪化	
				2021/01/10 20:00	県境~玄女南通行止め・集中除雪, 玄女南交差点付近で約12km渋滞	
				2021/01/11 15:00	玄女南交差点から約15.5km渋滞(今回最大)	
				2021/01/11 16:30	玄女南~高柳集中除雪	
36	一般国道8号 米原方面 (福井県, 2021年1月)	国道8号	福井県 (一般国道8号 米原方面)	2021/1/7~	断続的な渋滞発生	○
				2021/01/09 19:32	新保交差点スタック発生	
				2021/01/09 21:50	上安田交差点スタック発生, 渋滞が徐々に悪化	
				2021/01/10 10:00	加賀市熊坂~県境通行止め	
				2021/01/10 20:00	県境~玄女南通行止め・集中除雪	
				2021/01/11 16:20	加賀市熊坂~県境通行止め解除, 玄女南交差点から約4km渋滞(今回最 大)	
2021/01/11 20:50	通行止め解除					

表-14 車両のスタック発生日時までの近傍の気象観測所の積算降雪量 (cm)

事例 No.	事例名	気象観測所 (所管組織)	車両滞留 発生日時	積算降雪量 (cm)				
				前3 時間	前6 時間	前12 時間	前24 時間	前48 時間
28	一般国道 373 号 (鳥取県)	智頭 (気象庁)	2017/01/23 18:00	11	30	52	57	57
33	一般国道 8 号 (福井県)	熊坂 (国土交通省)	2018/02/06 00:00	19	22	26	39	39
35	関越道上り (新潟県)	小出 (気象庁)	2020/12/16 18:00	6	12	25	55	91
	関越道下り (新潟・群馬県)	みなかみ (気象庁)	2020/12/16 22:00	16	32	44	82	112
36	北陸道下り (福井県)	福井 (気象庁)	2021/01/09 12:00	16	19	34	47	86
	北陸道上り (福井県)	加賀菅谷 (気象庁)	2021/01/09 12:00	10	21	37	62	88
	一般国道 8 号金沢方面 (福井県)	福井 (気象庁)	2021/01/10 05:00	0	2	10	40	94
	一般国道 8 号米原方面 (福井県)	福井 (気象庁)	2021/01/09 19:00	6	11	34	54	97

向にあった。前3時間の最大値19cmを約20cmとみなした場合、新積雪の密度を $100\text{kg/m}^3$ 、一様の降雪強度であると仮定し、式(15)より降雪時の視程を求めると145mと算出される。これは、表-12の100m以上200m未満に相当し、速度調節によって視程障害に応じた運転になるとされる。ただし、降雪時は吹雪時とは異なり路面上の積雪が増加すること、藤本ら<sup>68)</sup>が指摘するように車両の走行性が低下し、停車時間や発進回数が増えることで路面状態は悪化することが考えられる。

以上により、障害度の評価指標は、安全側を考慮し立ち往生による車両滞留発生に至る積算降雪量40cm以上/24hを「障害度1」、最大の80cm/24hを想定し半日で車両滞留を発生する程度を勘案し、積算降雪量40cm以上/12hを「障害度2」、除雪1サイクル相当の3時間で20cm以上となる積算降雪量として20cm以上/3hを「障害度3」と設定した(表-15)。

### 7.3 警戒レベルの評価指標に関する検討

警戒レベルは、警戒・非常体制の発令を判断するための、道路ネットワークの障害や地域の災害の規模を示す指標として定義した(表-2)。内閣府による避難情報に関するガイドライン<sup>46)</sup>によれば、主に大雨に伴う災害時に住民がとるべき行動を5段階に分け、情報と行動の対応を明確化している。本章では、第5章の考え方と同様、大雪災害の規模や想定される降雪の状況

をもとに、道路管理に資することを重点に置いた5段階の警戒レベル案を表-16に設定した。ここでは、警戒レベル3以上で道路交通に影響が発生し、レベル3から5に上がるとともに降雪強度と広がりが大きくなるものとした。なお、表-11中に付記した警戒レベル案は、表-16に基づき定性的に分類したものである。

#### 7.3.1 積雪深観測値を用いた評価指標の選定

##### 1) 降雪強度の基準数値の検討

道路交通に影響を与える警戒レベル3以上の定性的な判定(表-16)に対し、定量的な降雪強度の基準数値の設定について検討した。はじめに、①降雪量(cm)と②対象時間(h)の適切な組み合わせについて検討した。

表-15 障害度の評価指標

障害度	評価指標	推定される状況
障害度1	時間降雪量の積算値 40cm以上/24h	車両滞留、通行止めが発生する程度
障害度2	時間降雪量の積算値 40cm以上/12h	半日で車両滞留、通行止めが発生する程度
障害度3	時間降雪量の積算値 20cm以上/3h	除雪1サイクル程度の時間で、路面状況の悪化、視程低下

表-16 大雪災害における警戒レベル（案）

警戒レベル	大雪災害の規模（主に道路状況）	降雪の状況	文献等による事例の判断基準
レベル 5	<ul style="list-style-type: none"> <li>・広域で除雪作業困難な状況が続き、広域の通行止めや立ち往生が長期化（対策本部を設置し、他地方整備局や他開発建設部と協力して対応）</li> <li>・通行止め解除に長時間を要する</li> <li>・集落孤立が発生・長期化し、自衛隊の災害派遣要請</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・広範囲にわたり極めて多量の降雪</li> <li>・広範囲に大規模な堆雪ができる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・多くの集落孤立や自衛隊の災害派遣が発生</li> </ul>
レベル 4	<ul style="list-style-type: none"> <li>・広域で除雪作業困難な状況となり、広域で通行止めや立ち往生が発生</li> <li>・循環除雪、状況によって集中除雪をするほか、対策本部を設置し、他地方整備局や他開発建設部と協力して対応</li> <li>・集落孤立が一時的に発生</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・多量降雪が広範囲</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・同時に広範囲で一般国道通行止めや車両滞留の発生</li> <li>・対策本部の設置</li> </ul>
レベル 3	<ul style="list-style-type: none"> <li>・一部路線で通行止めや立ち往生が発生</li> <li>・循環除雪で対応</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・局所的に多量降雪が発生</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・一般国道通行止めや車両滞留の発生</li> </ul>
レベル 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>・一般除雪若しくは循環除雪</li> </ul>	—	—
レベル 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>・一般除雪で対応可能な状態</li> </ul>	—	—

表-17 地域分類ごとの地点割合 $r$ の冬期最大値の出現頻度（1990～2020 年度冬期）

左：20cm 以上/12h 右：40cm 以上/24h

地点割合 $r$	冬期最大値の発生年数（回）																					
	20cm/12h以上										40cm/24h以上											
	北海道 日本海側	北海道 内陸部	北海道 オホーツク海側	北海道 太平洋側東部	北海道 太平洋側西部	東北地方 日本海側	東北地方 脊梁山脈部	東北地方 太平洋側	北陸地方	関東甲信地方	近畿中国地方	北海道 日本海側	北海道 内陸部	北海道 オホーツク海側	北海道 太平洋側東部	北海道 太平洋側西部	東北地方 日本海側	東北地方 脊梁山脈部	東北地方 太平洋側	北陸地方	関東甲信地方	近畿中国地方
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	3	0	0	0	0	0	0	
0 < $r$ ≤ 0.1	1	0	0	0	4	0	0	0	0	0	23	10	1	1	23	11	0	21	0	0	2	
0.1 < $r$ ≤ 0.2	15	3	1	0	10	8	0	7	0	0	1	5	14	5	10	4	15	9	7	4	2	9
0.2 < $r$ ≤ 0.3	8	12	2	2	12	16	6	14	2	1	6	3	4	10	13	1	5	9	2	8	11	14
0.3 < $r$ ≤ 0.4	7	9	7	2	4	2	4	10	6	5	10	0	2	7	1	0	0	7	1	12	14	4
0.4 < $r$ ≤ 0.5	0	5	9	7	1	5	12	0	15	7	7	0	1	5	4	0	0	6	0	3	1	2
0.5 < $r$ ≤ 0.6	0	2	1	9	0	0	5	0	2	9	4	0	0	0	1	0	0	0	0	3	2	0
0.6 < $r$ ≤ 0.7	0	0	4	5	0	0	3	0	6	5	2	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0
0.7 < $r$ ≤ 0.8	0	0	6	4	0	0	1	0	0	3	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0.8 < $r$ ≤ 0.9	0	0	1	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
0.9 < $r$ ≤ 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
計	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31

ここでは、対象地域における気象庁 AMeDAS により得られた降雪強度（cm/h）から、該当時間分を積算した値を使用した。つぎに、①と②の候補を選択した。①降雪量は、道路幅員に 20cm 以上堆雪した場合に軽自動車の発進が困難となる<sup>38)</sup>ことから、20cm および 20cm 単位で増加させた 40cm、60cm、80cm の 4 通りを選択した。②対象時間は、積雪寒冷地域における気象庁の大雪警報の発表基準で多く用いられる 12 時間、車両滞留が発生する 10～30 時間前に降雪が開始している場合が多い<sup>8)</sup>ことから 24 時間の 2 通りを選択した。加えて、図-32 に示す地域ごとに、過去 31 冬期（1990～2020 年度の 12～3 月）の気象庁 AMeDAS 積雪深観測値から求めた時間降雪量を用いて、各細分地域における積雪深観測地点数に対して降雪強度の基準数

値以上となる地点の割合（以下地点割合 $r$ という）を、上記①と②を組み合わせた 8 通りについて算出した。それらの値を用いて、各細分地域における地点割合 $r$ の冬期最大値（ $N=31$ ）の出現頻度を 0.1 ごとに整理した。その結果、20cm 以上/12h、40cm 以上/24h の 2 通りの場合に、地点割合 $r$ が  $0 < r \leq 0.9$  となった（表-17）。また、20cm 以上/24h の地点割合 $r$ は 0.5 以上、40、60、80cm 以上/12h および 60、80cm 以上/24h の地点割合 $r$ は 0 付近に偏る傾向となった。ここでは、各地域の警戒レベルを設定するために、地点割合 $r$ に偏りがないのが望ましい。この観点から、20cm 以上/12h、40cm 以上/24h の 2 通りを、降雪強度の基準数値とした。

2) 降雪強度の基準数値と地点割合との関係

地点割合 $r$ は各細分地域における大雪の広がりを表現しているが、降雪強度の大小は考慮されていない。そこで、各細分地域における、降雪強度の基準数値以上(20cm以上/12h、40cm以上/24h)となる地点割合 $r$ の冬期最大値(N=31)と、その時の平均降雪強度との関係を整理した(図-34)。その結果、これらは北海道および本州とも概ね比例関係にあることが確認され、各細分地域における地点割合 $r$ は降雪強度の違いも評価できることが示された。これはすなわち、地点割合 $r$ を用いて警戒レベル4(広範囲での多量降雪)とレベル5(広範囲での極端な多量降雪)を区別できることを示唆する。

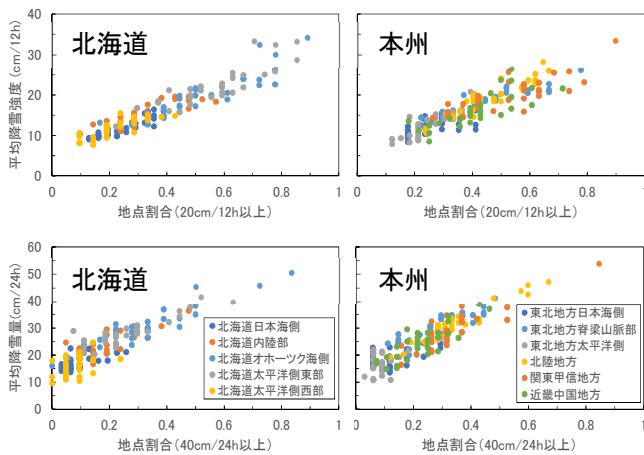


図-34 地点割合 $r$ の冬期最大値と、その時の平均降雪強度との関係(11地域、N=31)：上、20cm以上/12h；下、40cm以上/24h

3) 評価指標の選定

表-16に示す大雪災害の警戒レベル案は、災害規模や降雪状況などに基づくものである。そこで、事例数の多い北陸地方を対象に、道路交通に影響を与える警戒レベル3(1事例)・レベル4(10事例)・レベル5(5事例)と、降雪強度の基準数値(20cm以上/12h、40cm以上/24h)となる気象庁AMeDAS積雪観測点の地点割合 $r$ の最大値について整理した(図-35)。その結果、概ね警戒レベル5の方がレベル3およびレベル4と比較し大きかった。また、事例35は警戒レベル5の中で最も小さく、レベル4の全10事例のうち7事例よりも小さかった。この要因として、事例35は2020年12月に発生しており、降積雪に対する除雪作業等の準備が十分に整っていない初冬期であったことから、災害が大きくなったものと考えられる。つぎに、警戒レベル

4とレベル5について、降雪強度の基準数値以上となる地点割合 $r$ の最大値を図-36に示す。これらの中央値の差は、40cm/24h以上の方が20cm/12h以上よりも大きかった。以上より、大雪の警戒レベルを設定するための指標は、「降雪強度40cm/24h以上となる地点割合 $r$ の最大値」が妥当であると判断した。

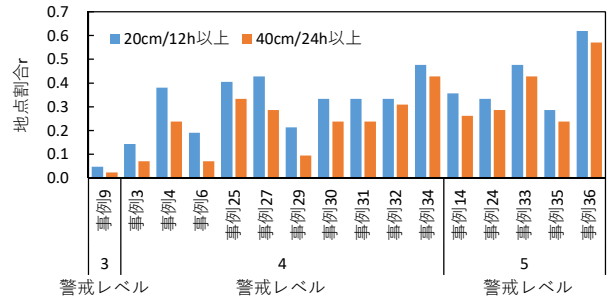


図-35 北陸地方における各事例の降雪強度の基準数値以上となる地点割合 $r$ の最大値

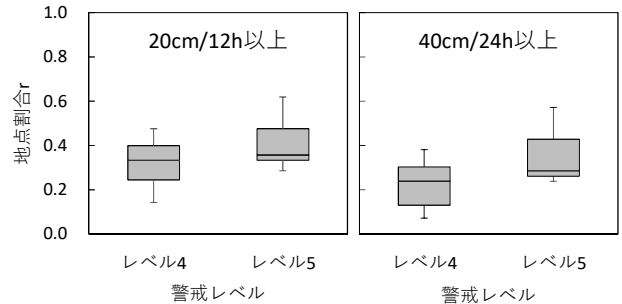


図-36 降雪強度の基準数値以上となる地点割合 $r$ の最大値の分布(於：北陸地方)

7.4 地域細分・警戒レベルごとの評価指標の閾値の設定

警戒レベルと地点割合 $r$ との関係は、地域によって異なると考えられる。そこで、前節の結果を用いて、図-32に示す11地域を対象に道路交通に影響を与える警戒レベルの評価指標の閾値について検討した。ここでは、道路交通に影響を与える警戒レベル3-5を対象とした。使用したデータは、1960~2009年度冬期(12~3月)は、気象庁が提供するJRA-55領域ダウンスケーリングDSJRA-55(水平分解能5km格子)<sup>51)</sup>の降雪強度(kg/m<sup>2</sup>/s)である。また、2011~2020年度冬期は、気象庁毎時大気解析GPVが気温2.5℃(相対湿度90%で雪の出現確率0.05、80%で雪の出現確率が0.5<sup>71)</sup>)より小さい場合を降雪と判定し、該当日時におけるレーダー・アメダス解析雨量値(mm)(以下、解析雨量という。解像度5km格子；解析雨量は該当する格子の平均値)を用いた。その際、本論文で定義した降雪強

度 (cm/h) とするために、新雪密度 100kg/m<sup>3</sup> として換算した値 (cm/h) を、評価指標の閾値の検討に用いた。

#### 7.4.1 警戒レベルと評価指標の再現期間との関係

警戒レベルごとに振り分けた大雪事例は、図-32 に示す積雪地域全体で 36 事例 (表-11) と限られているため、各地域の警戒レベルと再現期間との関係を極値統計により整理することが困難である。5 章における暴風雪の検討では、北海道東部を対象に収集した直近 8 冬期の 53 事例に基づき、一回の暴風雪の厳しさを評価する指標を「時間吹雪量 300kg/m/h (視程 50m 未満) 以上となる最大面積率」と選定し、その再現期間は警戒レベル 3 が 1~2 年、レベル 4 が 2~10 年、レベル 5 が 10 年超となることが示された。大雪と暴風雪は、道路への堆雪により交通障害に至る現象や、除雪や交通規制などの対策が類似している。また、表-16 で示した警戒レベル設定の考え方は、暴風雪での検討と類似する。以上から、大雪の再現期間と災害の規模 (警戒レベル) の関係が概ね暴風雪の場合と同様であると仮定し、暴風雪の評価指標における警戒レベルと再現期間の関係性を、大雪の評価指標にも適用することとした。ここでは、上記で得た「地点割合 $r$ の最大値」を、5 章で議論した「最大面積率」と同位に扱うことができる

とみなして、DSJRA-55 出力値や解析雨量を用いた大雪の評価指標を「降雪強度 40cm 以上/24h となる最大面積率」と設定した。最大面積率は、任意の範囲において基準数値以上となる面積の割合の最大値である。

#### 7.4.2 評価指標の閾値の設定

図-32 に示す各地域を対象に、上記で設定した大雪の評価指標 (降雪強度 40cm 以上/24h となる最大面積率) について、1960~2009 年度冬期の DSJRA-55 出力値、2011~2020 年度冬期の解析雨量値より各冬期の極値 (N=60) を抽出のうえ、再現期間を算出した。藤部<sup>47)</sup>によれば、極値分布関数について Gumbel 分布が一般化極値分布 (GEV) の一種であり、平方根指数型最大値分布 (SQRT-ET) も GEV で近似できることを併せ考えると、実用上は GEV だけで事足りると述べている。そこで、大雪の評価指標の再現期間の算出では GEV を用いた。これらの結果を図-37 に示す。また、標準最少二乗規準 (SLSC) は、11 地域のうち北海道オホーツク海側と東北地方太平洋側を除く 9 地域で、極値統計の適合度を確認する条件として採用されている  $SLSC \leq 0.04$ <sup>48), 49)</sup> を満たす結果となった。つぎに、前項で示した警戒レベルの再現期間 (レベル 3 : 1~2 年、レベル 4 : 2~10 年、レベル 5 : 10 年超) を用いて、各地

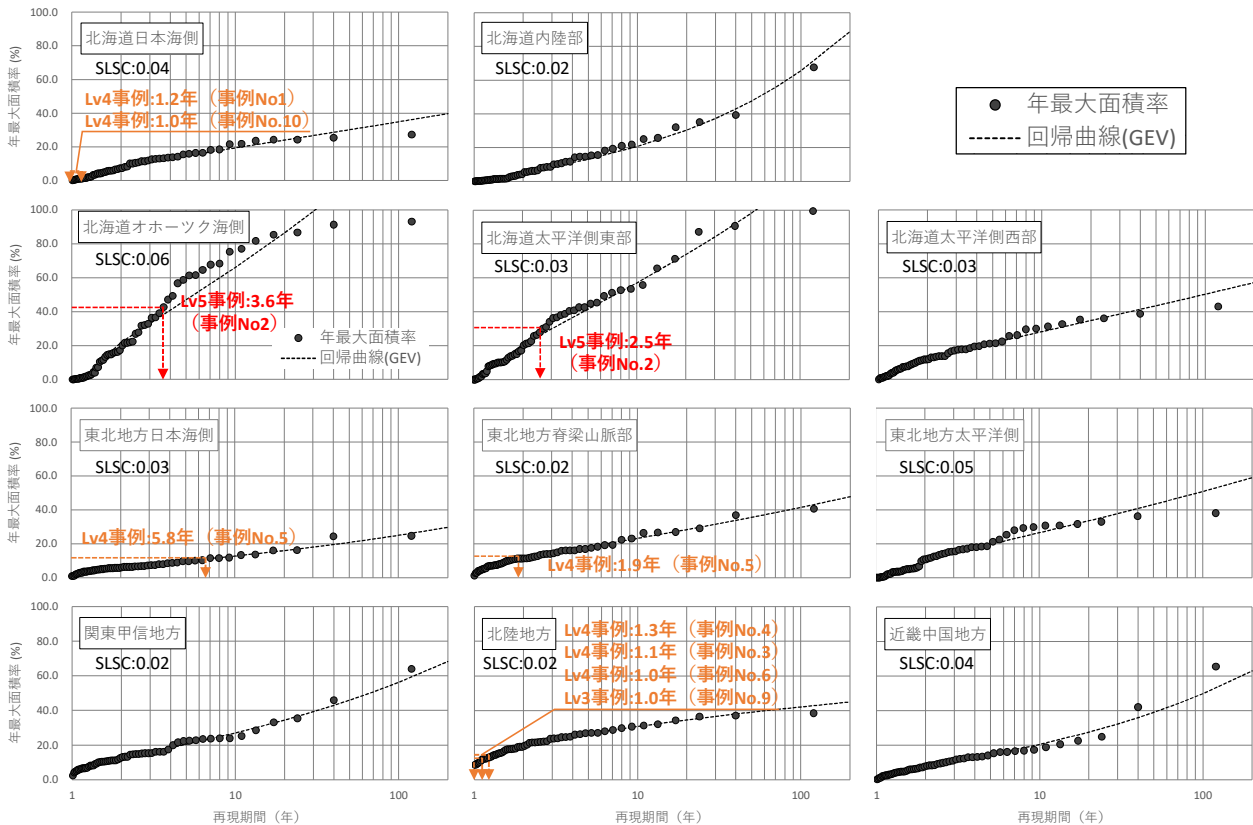


図-37 評価指標の極値統計結果と大雪事例の警戒レベルとの関係：赤，レベル5；橙，レベル3・4

域の警戒レベルを示す評価指標の閾値（再現期待値）を表-18 に設定した。地域細分に着目すると、北海道ではオホーツク海側や太平洋側東部で評価指標の閾値が大きい傾向である。北海道のオホーツク海側や太平洋側東部は、低気圧通過に伴い、まとまった降雪が広範囲に生じることから、評価指標の閾値が大きくなった可能性が考えられる。一方、日本海側は冬型の気圧配置により降雪が生じやすいものの、降雪量40cm/24h以上の大雪が広範囲で生じることが少ない可能性が考えられる。また、本州では、豪雪地帯を多く有する北陸地方で、他の本州の積雪地帯と比較して各警戒レベルの評価指標の閾値が大きかった。以上より、警戒レベル3-5の評価指標の閾値は、各地域によって異なることが確認され、大雪時の特徴を反映しているものと考えられる。

### 7.4.3 評価指標の閾値と過去の大雪事例との関係

警戒レベル3-5における評価指標の閾値と過去の大雪事例との関係を確認するために、図-37 に赤（レベル5）と橙（レベル3・4）で記載した。使用した事例はDSJRA-55出力値（50冬期）の対象期間である2010年3月以前の事例1~10のうち、対象地域の設定または面積率の算定が困難であった事例6、7、8、10を除いた6事例（延べ8地域）である。警戒レベル4は、延べ5地域の再現期間が1.0~5.8年で、暴風雪の再現期間2~10年より短い値も含まれるが、大きく外れていないことが確認された。一方で、警戒レベル5の事例2は、暴風雪で設定した再現期間10年超を下回る3年程度であった。この事例は、2004年1月に北見市を中心とした大雪災害（以下、北見豪雪という）で、対象地域は北海道オホーツク海側と太平洋側東部である（表-11）。ここでは、DSJRA-55を用いた北海道オホーツク海側の大雪の評価指標の冬期極値（N=50）を対象に、災害発生の有無を文献で確認した<sup>72)</sup>。その結果、北見豪雪（事例2）より評価指標値が大きかった16冬期の極値は、全て暴風雪や大雪災害として記録されていた。以上より、災害を示すものとして、評価指標の閾値が概ね妥当であると考えられる。つぎに、上記に示した16冬期の極値のうち、2004年度冬期以降に発生した3冬期の極値を含む一回の大雪事例と、北見豪雪（事例2）を加えた4事例を対象に、北見AMeDAS観測値と北見AMeDAS地点に該当するDSJRA-55格子の出力値における24時間降雪量の最大値を比較した（図-38）。その結果、3冬期の極値の24時間降雪量は、北見AMeDASの最大時の観測値およびDSJRA-55を用いた北海道オホーツク海側の最大面積時の出力値とも概ね

同値で、観測値よりDSJRA-55格子の出力値の方が大きいことが確認された。一方、北見豪雪（事例2）の24時間降雪量は、北見AMeDASの最大時の観測値71cmに比べて、該当する起時のDSJRA-55格子の出力値は49cmと小さかった。一方、加えて、北見豪雪（事例2）のDSJRA-55を用いた最大面積率は50%で、他3冬期の極値における61~91%より小さかった。以上より、北見豪雪（事例2）は、強い降雪が限られた範囲で発生した事例であったものと推察される。

表-18 各地域における警戒レベルごとの評価指標（面積率）の閾値（%）

警戒レベル	レベル3	レベル4	レベル5
再現期間	1年以上	2年以上	10年超
北海道日本海側	0.8~	7.8~	20.0~
北海道内陸部	0.0~	5.2~	21.9~
北海道オホーツク海側	0.0~	21.9~	68.9~
北海道太平洋側東部	2.0~	20.6~	59.2~
北海道太平洋側西部	2.3~	12.0~	29.1~
東北地方日本海側	2.7~	6.1~	13.3~
東北地方脊梁山脈部	4.9~	11.4~	24.0~
東北地方太平洋側	0.6~	10.0~	27.5~
関東甲信地方	5.8~	12.4~	28.0~
北陸地方	11.3~	19.7~	31.4~
近畿中国地方	2.2~	7.6~	21.4~

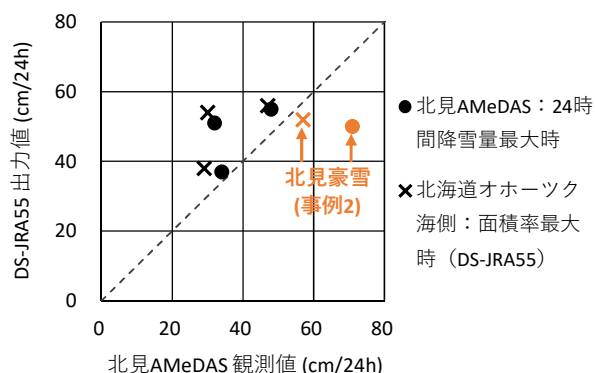


図-38 北見 AMeDAS 観測値と北見 AMeDAS を含む DSJRA-55 格子の出力値による 24 時間降雪量の関係：橙、北見豪雪（事例2）

### 8. 暴風雪および大雪の発生頻度と地域性に関する変化傾向の解明（大雪について）

本章では、達成目標③「暴風雪および大雪の発生頻度と地域性に関する変化傾向の解明」のうち、大雪について述べる。6章では、暴風雪に伴う道路交通障害が懸念される北海道・東北地方・新潟県を9つに細分した地域（図-30）を対象に、過去の気象値を用いて、警戒レベルの変化傾向を提示した。本章では、大雪に伴う道路交通障害が懸念される積雪地帯（11に細分された地域）<sup>53)</sup>を対象に検討した（図-32）。

各地域のDSJRA-55（1960～2009年度）、および気象庁毎時大気解析GPVと解析雨量（2011～2020年度）のデータを用いて、表-18にて整理した各地域における警戒レベルごとの評価指標（面積率）の閾値のうち、警戒レベル4（広範囲での多量降雪）とレベル5（広範囲での極端な多量降雪）の発生頻度を10冬期ごとに図-39に示した。警戒レベル4では、多くの地域で2000～2009年から2011～2020年度冬期にかけて減少しており、最大で11回減少していた。また、警戒レベル5は、概ね10冬期に0～2回であった。

警戒レベル4の減少傾向の一つの要因として、DSJRA-55と解析雨量とのデータの質の違いが考えられる。そこで、各地域における2011～2020年度冬期と2000～2009年度について、解析雨量とDSJRA-55による最大面積率、7.3.1項で設定した気象庁AMeDASの時間降雪量を用いた地点割合 $r$ と表18から得られた発生頻度との差を比較した（表19）。その結果、警戒レベル4では、北海道日本海側・内陸部・オホーツク海側、東北地方脊梁山脈部、関東甲信地方、近畿中国地方では、両方の手法で減少傾向がみられた。一方で、北海道太平洋側東部と西部、東北地方太平洋側、北陸地方

表19 各地域における警戒レベル4および5の2011～2020年度冬期と2000～2009年度との発生頻度の差左；解析雨量とDSJRA-55による最大面積率、右；気象AMeDASによる発生割合を使用

警戒レベル	レベル4		レベル5	
	最大面積率	発生割合	最大面積率	発生割合
北海道日本海側	-1	-5	-1	-1
北海道内陸部	-1	-5	-2	1
北海道オホーツク海側	-5	-4	-2	1
北海道太平洋側東部	-4	2	-1	-1
北海道太平洋側西部	-2	2	1	0
東北地方日本海側	0	0	-1	-1
東北地方脊梁山脈部	-9	-2	0	2
東北地方太平洋側	-2	2	0	-1
関東甲信地方	-11	-5	0	-2
北陸地方	-10	3	0	-3
近畿中国地方	-4	-1	0	-2

では、最大面積率から得られた発生頻度の差は減少傾向にあるのに対し、地点割合から得られた発生頻度の差は増加傾向となった。また、警戒レベル5は、北海道では図39と同様、最大面積率、および地点割合から得られた発生頻度の差とも顕著な特徴は確認できなかった。一方で、本州では、発生割合による結果で、概ね1～2回減少していた。

以上から、警戒レベル4は、近年10冬期ごとの発生頻度が減少傾向にある地域が多い。また、警戒レベル5は各地方とも顕著な傾向は確認できないが、10年に概ね0～2回発生する可能性があることが伺えた。

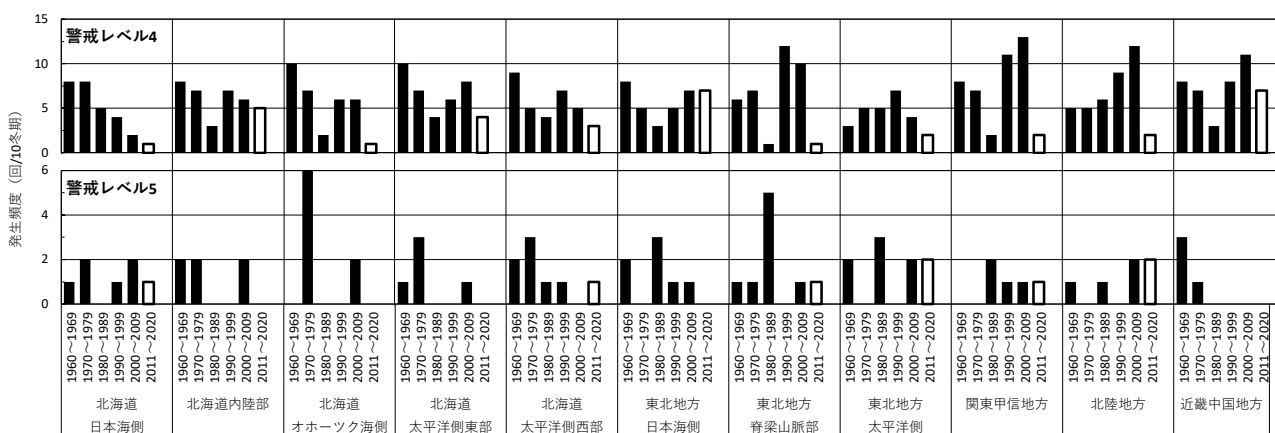


図-39 大雪警戒レベル4以上の発生頻度（地域別）黒：1960～2000年代（補正済DSJRA-55）、白：2010年代（毎時大気解析GPVと気象庁レーダー・アメダス解析雨量）

### 9. 暴風雪および大雪に関するハザードマップの開発

本章では、5章および7章で作成した暴風雪・大雪の評価指標などをもとに、暴風雪や大雪の規模や発生頻度などについてハザードマップを作成し、冬期道路管理におけるハザードマップの活用方策について検討した。

#### 9.1 ハザードマップの要件の整理

「ハザードマップ」とは、一般的に「自然災害による被害の軽減や防災対策に使用する目的で、被災想定区域や避難場所・避難経路などの防災関係施設の位置などを表示した地図」<sup>73)</sup>とされる。例えば、洪水や高潮における水深などの現象を物理値として表現したものと、土砂災害の“警戒区域”や道路防災情報の“道路冠水想定箇所”のようにあらかじめ条件を設定し表現したものがある。上記を踏まえて、一回の暴風雪および大雪のハザードマップに求められる要件と具体例について、後述する10章に示す道路管理の体制およびヒアリング結果を基に、表-20に整理した。ハザードマップに求められる要件は、利用者や利用場面によって異なると考えられる。本研究では、ハザードマップの利用者として、道路計画および暴風雪や大雪が発生した場合の体制検討を統括する国や本局、現場の道路管理者、ならびに一般の道路利用者を想定した。また、暴風雪や大雪を対象としたハザードマップは、地方自治体単位での暴風雪や大雪のリスク把握や、地方自治体内でリスクの高い場所を把握するなど、想定していない利用者にとっても有用であると考えられる。加えて、ハザードマップの利用場面としてあらかじめ暴風雪や大雪への対応を検討する「計画段階」と、暴風雪や大雪の発生およびその前後の「事象発生時」を想定した。「計画段階」では、道路計画や維持管理体制

の計画・準備時、ならびに利用者への平常時の注意喚起として利用される“静的”なハザードマップが想定される。また、「事象発生時」では、暴風雪や大雪が発生した時の管理（タイムラインやモニタリング）で用いられる、気象の現況値や予測値を表現する“動的”または“リアルタイム”なハザードマップが想定される。このうち、“動的”なハザードマップを作成するには、事象発生前後における気象の観測値や予測値が必要となる。本研究では、過去の気象データを用いた、“静的”なハザードマップを対象とした。

つぎに、ハザードマップのコンセプトについて考える。ここでは、暴風雪・大雪のハザードマップの作成にあたり、物理値で示される「ハザード(危険性)」は、「規模」と「頻度」を乗じて表現することとした。その理由として、暴風雪や大雪は、事象の規模が大きい場合には施設の破壊や人命を直接的に奪うことも想定されるが、基本的には交通障害等を誘発することにより災害へと発展するものであり、長期間で考えた場合「暴風雪や大雪の事象の規模と、それに伴う交通障害などの頻度」がリスクとして考えられるためである。

#### 9.2 ハザードマップの表示要素と方法

前節の結果を踏まえて、暴風雪・大雪のハザードマップに表示する要素（規模・発生頻度・一冬期の度合）とその方法について、5章および7章で作成した暴風雪・大雪の評価指標などをもとに整理した。

##### 9.2.1 一回の暴風雪や大雪の規模

暴風雪および大雪の評価指標のうち、表-21に示す障害度を採用した。また、既往最大の厳しさを把握するために、吹雪量および降雪量の24時間最大値を採用した。

表-20 道路管理・利用における暴風雪および大雪のハザードマップの要件と具体例

ハザードマップ利用者	利用場面	役割や目的	ハザードマップに求める要件	具体的な指標、マップの候補
国土交通省本省 北海道開発局本局	計画段階	道路計画 発生時の体制検討(統括) など	✓ 災害の規模、頻度、地域が開発建設部、振興局レベルの地域分けで判断できる	・警戒レベル(面積率)の基準値・マップ(静的)
	事象発生時	本部、関係機関との連絡体制確保 情報収集・共有 など	✓ 開発建設部、振興局レベルで発生している、発生が予想される災害の規模がわかる ✓ 各地域の障害状況がわかる	・警戒レベル(面積率)の現況値、予測値・マップ(動的) ・障害度、吹雪量、視程マップ(動的)
現業の道路管理者 ※ 開発建設部本部、 道路事務所、維持業者	計画段階	道路・防雪計画 発生時の体制検討(タイムライン、 維持管理体制など) など	✓ 発生しうる管轄・隣接区域単位の災害規模、頻度がわかる ✓ 地域内の視程、吹きだまり障害多発区間、箇所がわかる	・警戒レベル(面積率)の基準値・マップ(静的) ・障害度マップ(静的)
	事象発生時	体制の構築、対応の検討・判断 情報収集・共有 維持管理作業(除雪、巡回、通行止め 管理等) など	✓ 発生している、発生が予想される管轄・隣接区域の災害規模がわかる ✓ 路線、区間単位の視程、吹きだまり障害の現況、予測がわかる	・警戒レベル(面積率)の現況値、予測値・マップ(動的) ・障害度、吹雪量、視程マップ(動的)
道路利用者	計画段階	障害多発地域、区間の把握	✓ 災害の規模、頻度が大きい地域がわかる ✓ 地域内の視程、吹きだまり多発区間、箇所がわかる	・警戒レベル(面積率)の基準値・マップ(静的) ・障害度マップ(静的)
	事象発生時	危険地域、区間の把握 安全運転の強化、自粛など	✓ 発生している、発生が予想される管轄・隣接区域の災害規模がわかる ✓ 路線、区間単位の視程、吹きだまり障害の現況、予測がわかる	・警戒レベル(面積率)の現況値、予測値・マップ(動的) ・障害度、吹雪量、視程マップ(動的)



### 9.2.2 一回の暴風雪や大雪の発生頻度

警戒レベルのうち、道路交通に影響を与える警戒レベル3の再現期間が1~2年、レベル4が2~10年、レベル5が10年超となることを参考に、以下の4段階を基準とした。

- ・1回未満/10年
- ・1回以上/10年
- ・5回以上/10年（1回/2年以上）
- ・10回以上/10年（1回/1年以上）

### 9.2.3 冬期間の吹雪、降雪の度合い

冬期間の吹雪や降雪の度合いを示す要素として、一冬期分累積した吹雪量および降雪量の平均値を採用した。また、一回の暴風雪や大雪の度合いを示す要素として、24時間最大値を採用した。

- ・冬期平均累積吹雪量（吹雪）
- ・冬期平均累積降雪量（降雪）

### 9.2.4 ハザードマップの表示方法

9.2.1~9.2.3に示す要素を用いたハザードマップの表示方法について、以下の3パターンが考えられる。

- パターン①：各々の数値を直接表示する
- パターン②：複数の要素を組み合わせて表示する
- パターン③：複数の要素を組み合わせて危険性を階級化して表示する

### 9.3 使用データおよびその補正方法

本研究で対象としている暴風雪・大雪の“静的な”ハザードマップは、面的かつ長期的な解析データである、気象庁が提供する JRA-55 領域ダウンスケーリング DSJRA-55（1960~2009 年度冬期（12~3月）、水平分解能 5km 格子）<sup>51)</sup>を用いた。加えて、道路管理・利用に有用なハザードマップを作成するため、本節では気象モデルによる計算から解析された値である DSJRA-55 統計値を、気象庁 AMeDAS（1990~2019 年度冬期（12~3月））の観測値を用いて補正した。これらの補正の流れを、図-40 に示す。各データ処理の詳細や処理方法の検討について次に示す。

表-21 暴風雪および大雪の障害度の評価指標

障害度	暴風雪の評価指標	大雪の評価指標
障害度 1	視程 50m 未満（吹雪量 300kg/m/h 以上）が 3~6 時間継続	時間降雪量の積算値 40cm 以上/24h
障害度 2	視程 50m 未満（吹雪量 300kg/m/h 以上）が 6 時間以上継続	時間降雪量の積算値 40cm 以上/12h
障害度 3	吹きだまり 20cm 以上 /3h（吹雪量 3000kg/m/3h 以上）が発生	時間降雪量の積算値 20cm 以上/3h

### 9.3.1 データの抽出

AMeDAS と DSJRA-55 統計値を比較して補正に利用する値を求めるため、DSJRA-55 統計値の 5km 格子のうち、AMeDAS 地点を含む格子データを抽出した。

### 9.3.2 比および差の算出

前項で抽出した DSJRA-55 統計値と、該当する AMeDAS 統計値を比較し、補正に利用する値として、AMeDAS 地点ごとに両統計値の比や差を求めた。補正に利用する値の特徴と、本研究における適用を表-22 に示す。ここでは、補正後に 0 となる地点が少なくなるよう、物理量については比を、発生回数については差を求め、補正に利用することとした。

### 9.3.3 空間内挿

前項で算出した比や差は、AMeDAS 地点における値である。ここでは、面的な DSJRA-55 の格子データを補正するために、比や差の空間内挿を行い、比や差の面的な推定を行った。空間内挿は、観測値などの既知のデータを用いて、周辺のデータを推定する手法である。本

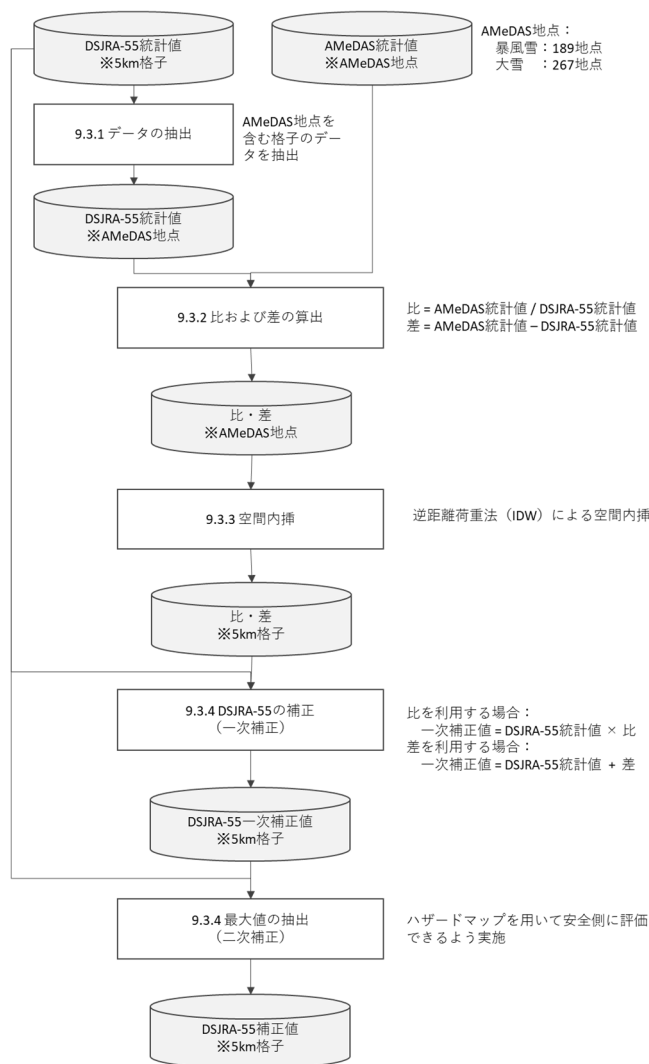


図-40 DSJRA-55 統計値の補正の流れ

研究では、距離の重みにより加重平均を取る逆距離荷重法を採用<sup>74)</sup>した。その理由として、逆距離荷重法は、推定値が周辺の推定データの範囲内となり、出力値に極端な誤差を生じないものと判断されるためである。この手法は、対象地点のデータを推定するために、対象地点周辺との距離の逆数を重みとして使用し、その周辺地点のデータの平均をとるもので、式(16)で表される。

$$u(x) = \frac{\sum_{i=0}^n u(x_i) \frac{1}{d(x, x_i)^P}}{\sum_{i=0}^n \frac{1}{d(x, x_i)^P}} \quad (16)$$

ここで、 $u(x)$ は対象地点 $x$ でのデータ、 $u(x_i)$ は周辺地点 $x_i$ でのデータ( $i = 0, 1 \dots n$ )、 $d(x, x_i)$ は対象地点と周辺地点との距離、 $P$ は重み係数である。本研究では、既知のデータとなるアメダスの地点数が3~5地点となるように、推定する格子から半径50kmの範囲の地点を対象とした。また、重み係数 $P$ は一般的に扱われる2を採用した。

### 9.3.4 DSJRA-55の補正

DSJRA-55統計値の各グリッドに対応する比または差のグリッドを乗算または加算し、アメダスによる一次補正マップを作成した。ここで、補正した各グリッドの値が0以下または無限の場合は、「値なし」とした。補正した結果、補正前が0以上(DSJRA-55で吹雪や降雪の発生が解析されている)に対して、補正後が0以下となる領域が見られた。この場合、0(現象が発生しない)として取り扱くと、ハザードマップにより危険側の判断がなされることになる。そこで、安全側に判断できるハザードマップを作成できるよう、補正前後の最大値を採用し(二次補正)、最終的な補正値とした。

### 9.4 ハザードマップの作成

本節では、9.1節と9.2節で検討した事項と、9.3節で検討した手法で補正されたDSJRA-55統計値を用いて、暴風雪や大雪のハザードマップを作成した。吹雪によって生じる道路上の視程低下や吹きだまりは、気象のほか、雪原や樹林帯・家屋の様子などの周辺環境や、盛土・切土などの道路構造にも影響を受けることが知られている。ただし、本業務でハザードマップ作成に利用したDSJRA-55は水平分解能5km格子であることから、ハザードマップはより細かい空間スケールで変化すると考えられる土地利用や周辺環境、道路構造の空間分布は考慮していないことに留意されたい。

表-22 補正に利用する値の特徴と本研究での適用

補正に利用する値	特徴	適用
比 (=アメダス統計値 / DSJRA-55統計値)	比を乗じて算出する補正後の値はマイナス値を取らないが、使用するデータに0が含まれると補正係数が0となる。補正係数を空間内挿した場合に周辺の補正值が0になってしまう。	物理量 (吹雪量、降雪量など)
差 (=アメダス統計値 - DSJRA-55統計値)	使用するデータに0が含まれても、補正值を算出することができる。ただし、アメダスよりDSJRA-55統計値が大きい場合に、補正に利用する値がマイナスの値を取り、それを空間内挿した場合に周辺の補正に利用する値がマイナス値になってしまう場合がある。	発生回数

#### 9.4.1 暴風雪のハザードマップ

##### 1) 要素の数値の直接表示 (パターン①)

暴風雪に関する要素と、ハザードマップで表現される内容や用途・活用方法を表-23に、各要素の分布を示すハザードマップ(パターン①)を図-41および図-42(左)にそれぞれ示した。この表示方法では、統計を行った要素をそのまま図化するため、暴風雪による障害や道路管理、地域、路線に精通した道路管理者向けであると考えられる。一方で、道路利用者が活用する場合に、危険性の表現として伝わりづらい可能性が考えられる。

##### 2) 要素の組み合わせ (パターン②)

冬期を通した吹雪の度合いに対する、一回の暴風雪の厳しさを把握するために、冬期平均累積吹雪量に対する、24時間最大吹雪量との比(パターン②)を図-42(右)に示した。ここでは、暴風雪による交通障害の発生が想定される、後述する危険度1(視程50m未満が6時間以上継続(1回以上/10年))以上の箇所について表示した。

表-23 暴風雪に関する要素と、ハザードマップで表現される内容や想定される用途・活用方法

要素	単位	表現される内容、事象	想定される用途、活用方法								
<table border="1"> <tr> <th>障害度</th> <th>評価指標</th> </tr> <tr> <td>障害度 1</td> <td>視程 50m 未満 (吹雪量 300kg/m/h 以上) が 3~6 時間継続</td> </tr> <tr> <td>障害度 2</td> <td>視程 50m 未満 (吹雪量 300kg/m/h 以上) が 6 時間以上継続</td> </tr> <tr> <td>障害度 3</td> <td>吹きだまり 20cm 以上 /3h (吹雪量 3000kg/m/3h 以上) が発生</td> </tr> </table>	障害度	評価指標	障害度 1	視程 50m 未満 (吹雪量 300kg/m/h 以上) が 3~6 時間継続	障害度 2	視程 50m 未満 (吹雪量 300kg/m/h 以上) が 6 時間以上継続	障害度 3	吹きだまり 20cm 以上 /3h (吹雪量 3000kg/m/3h 以上) が発生	回/10年	<ul style="list-style-type: none"> <li>視程障害により走行環境が悪化している状態の発生回数</li> <li>視程障害により通行止めが必要なほどの障害が予想される吹雪事象の発生回数</li> <li>車両 (軽自動車) の発進が困難となる吹きだまり (深さ 20cm) の発生する程度の吹雪事象の発生回数</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>走行困難となる可能性がある区間、箇所を表現 (主に利用者への注意喚起)</li> <li>通行止めが発生する可能性がある区間、箇所を表現 (通行止め管理などでの利用)</li> <li>吹きだまりにより走行が困難となる可能性がある区間、箇所を表現 (除雪計画、通行止め管理など)</li> </ul>
障害度	評価指標										
障害度 1	視程 50m 未満 (吹雪量 300kg/m/h 以上) が 3~6 時間継続										
障害度 2	視程 50m 未満 (吹雪量 300kg/m/h 以上) が 6 時間以上継続										
障害度 3	吹きだまり 20cm 以上 /3h (吹雪量 3000kg/m/3h 以上) が発生										
24 時間最大吹きだまり深さ	cm	<ul style="list-style-type: none"> <li>1 日程度での最大の吹きだまり深さ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>過去に発生した吹きだまりの最大深さなど (除雪体制検討での利用)</li> </ul>								
冬期平均累計吹雪量	kg/m	<ul style="list-style-type: none"> <li>冬期全体での吹雪量の総量</li> <li>値が大きい場合には、冬期間を通じて平均的に吹雪が発生することが多い (常襲地域)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>吹雪に対する耐力を示す指標として想定 (値が大きい箇所は、吹雪の常襲地域であり、吹雪に対する耐力が高いと予想)</li> </ul>								

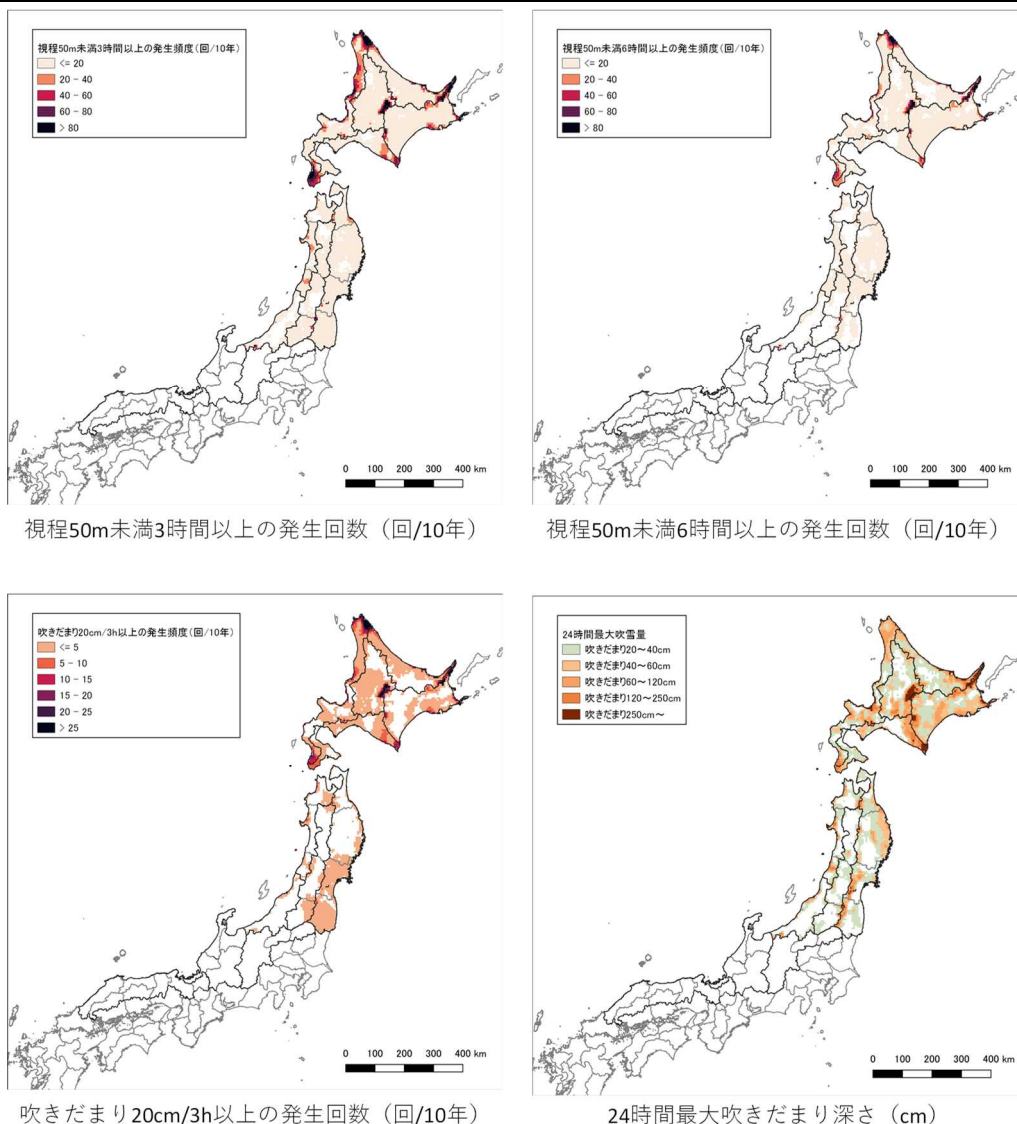


図-41 暴風雪のハザードマップ (要素の数値の直接表現 (パターン①))

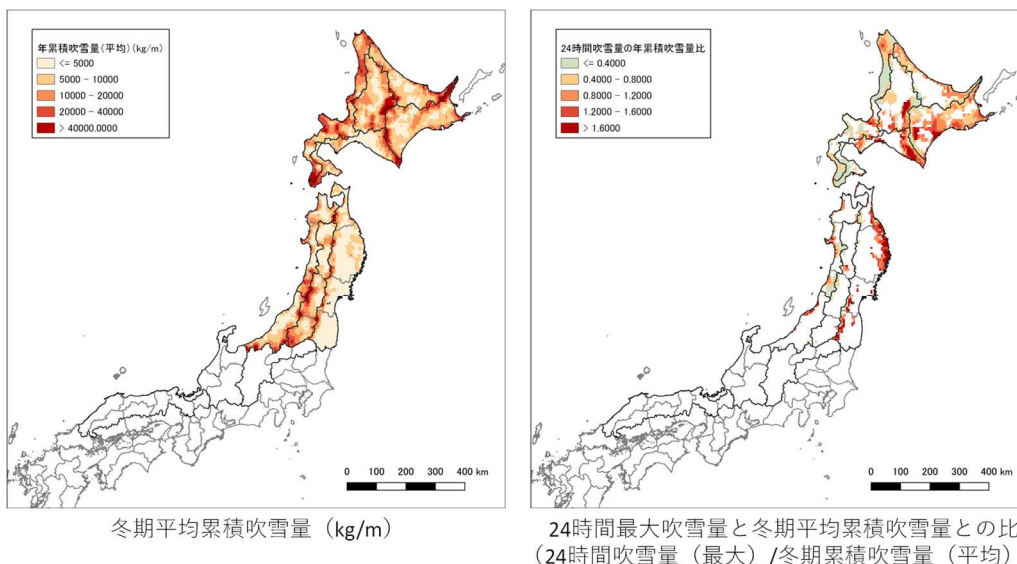


図-42 暴風雪のハザードマップ（要素の数値の直接表現（パターン①）、要素の組み合わせ（パターン②））

表-24 暴風雪に関する階級化した危険度例

説明	整理要素を基にした判定条件※どちらかを満たした場合	
	条件 1	条件 2
危険度 0 交通障害発生の可能性が低い	視程 50m 未満 継続 3～6 時間の履歴なし（1 回/10 年未満）	-
危険度 1 交通障害発生（視程障害）の可能性がある	視程 50m 未満 継続 3～6 時間の履歴あり（1 回/10 年以上）	-
危険度 2 重度の交通障害（視程障害、吹きだまり）、通行止め発生可能性がある	視程 50m 未満 継続 6 時間以上の履歴あり（1 回/10 年以上）	吹きだまり 20cm/3h 以上の履歴あり（1 回/10 年以上）
危険度 3 重度の交通障害、通行止めが発生しやすい	視程 50m 未満 継続 6 時間以上が 2 年に 1 回（5 回/10 年以上）程度	吹きだまり 20cm/3h 以上が 2 年に 1 回（5 回/10 年以上）
危険度 4 重度の交通障害、通行止めが頻発する	視程 50m 未満 継続 6 時間以上が 1 年に 1 回（10 回/10 年以上）程度	吹きだまり 20cm/3h 以上が 1 年に 1 回（10 回/10 年以上）

### 3) 危険度の階級化（パターン③）

ここでは、9.2.1 項の表-21 で示した暴風雪の障害度 1～3、9.2.2 項で示した暴風雪の発生頻度を組み合わせ、これらを交通障害発生危険度とした。それらの大小を表-24 に階級化し、ハザードマップ（パターン③）を作成した（図-43）。道路管理での利用や、道路利用者が利用する場合、危険性の表現として伝わりやすいものと考えられる。一方、マップの利用者（道路管理者、利用者）ごとに解釈が異なる可能性が考えられる。

#### 9.4.2 大雪のハザードマップ

##### 1) 要素の数値の直接表示（パターン①）

大雪に関する要素と、ハザードマップで表現される内容や用途・活用方法を表-25 に、各要素の分布を示すハザードマップを図-44 および図-45（左）にそれぞれ示した。この表示方法では、統計を行った要素をそのまま図化するため、大雪による障害や道路

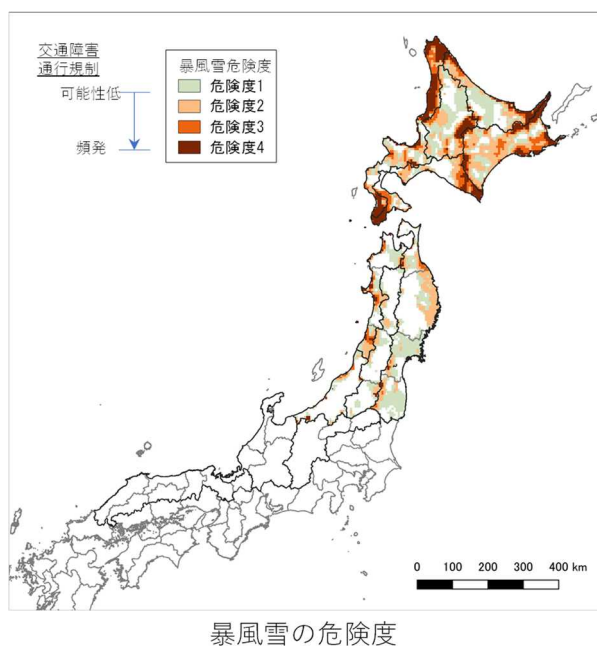


図-43 暴風雪のハザードマップ（危険度の階級化）

表-25 大雪に関する要素と、ハザードマップで表現される内容や想定される用途・活用方法

要素	単位	表現される内容、事象	想定される用途、活用方法								
<table border="1"> <tr> <th>障害度</th> <th>評価指標</th> </tr> <tr> <td>障害度 1</td> <td>時間降雪量の積算値 40cm 以上/24h</td> </tr> <tr> <td>障害度 2</td> <td>時間降雪量の積算値 40cm 以上/12h</td> </tr> <tr> <td>障害度 3</td> <td>時間降雪量の積算値 20cm 以上/3h</td> </tr> </table>	障害度	評価指標	障害度 1	時間降雪量の積算値 40cm 以上/24h	障害度 2	時間降雪量の積算値 40cm 以上/12h	障害度 3	時間降雪量の積算値 20cm 以上/3h	回/10年	<ul style="list-style-type: none"> <li>車両滞留、通行止めが発生する程度の降雪量の発生回数</li> <li>半日で車両滞留、通行止めが発生する程度の降雪量の発生回数</li> <li>標準的な除雪 1 サイクル程度の時間で、車両(軽自動車)の発進が困難となる降雪の発生回数</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>車両滞留、通行止めが生じる可能性が高い区間、箇所を表現(除雪計画、通行止め管理など)</li> <li>短時間で車両滞留、通行止めが生じる可能性が高い区間、箇所を表現(除雪計画、通行止め管理などでの利用を想定)</li> <li>除雪 1 サイクルの時間内に、走行困難となる可能性がある区間、箇所を表現(主に利用者への注意喚起を想定)</li> </ul>
障害度	評価指標										
障害度 1	時間降雪量の積算値 40cm 以上/24h										
障害度 2	時間降雪量の積算値 40cm 以上/12h										
障害度 3	時間降雪量の積算値 20cm 以上/3h										
24 時間最大降雪量	cm	<ul style="list-style-type: none"> <li>1 日程度での最大の降雪量</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>過去に発生した降雪量の最大など(除雪体制検討での利用)</li> </ul>								
冬期平均累計降雪量	cm	<ul style="list-style-type: none"> <li>冬期全体での降雪量の総量</li> <li>値が大きい場合は、多雪地域</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>大雪に対す耐力を示す指標としての利用を想定(値が大きい箇所は、多雪地域であり、降雪の耐力が高いと予想)</li> </ul>								

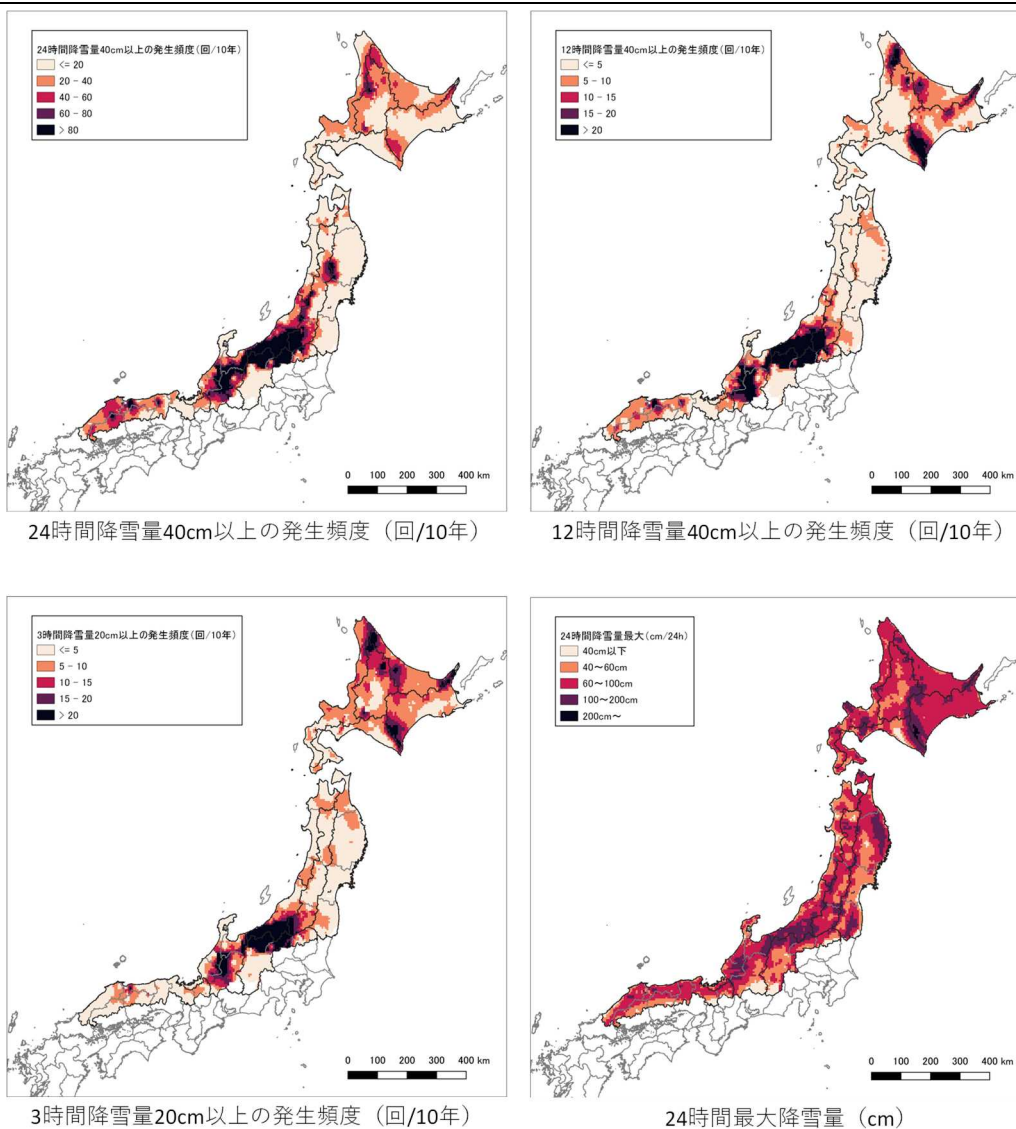


図-44 大雪のハザードマップ(要素の数値の直接表現)

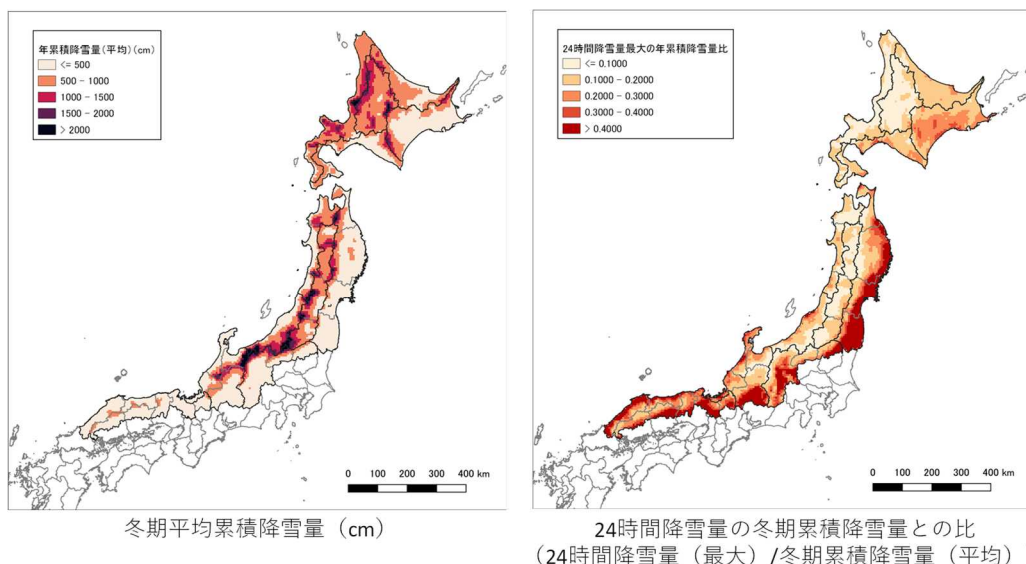


図-45 大雪のハザードマップ（要素の数値の直接表現、要素の組み合わせ）

表-26 大雪に関する階級化した危険度例

説明	整理要素を基にした判定条件
危険度 0 交通障害発生の可能性が低い	24 時間降雪量の最大値が 40cm 未満
危険度 1 交通障害発生可能性がある	24 時間降雪量の最大値が 40cm 以上
危険度 2 交通障害、通行止めが 発生しやすい	24 時間降雪量 40cm 以上の発生回数が 1 年に 1 回以上 (10 回/10 年未満)
危険度 3 交通障害、通行止めが 頻発する	24 時間降雪量 40cm 以上の発生回数が 1 年に 4 回以上 (40 回/10 年以上)

管理、地域、路線に精通した道路管理者向けであると考えられる。一方で、道路利用者が活用する場合に、危険性の表現として伝わりづらい可能性が考えられる。

2) 要素の組み合わせ（パターン②）

冬期を通した降雪の度合いに対する、一回の大雪の厳しさを把握するために、冬期平均累積降雪量に対する、24 時間最大降雪量との比（パターン②）を図-45（右）に示した。

3) 危険性の階級化（パターン③）

ここでは、表-21 で示した大雪の障害度 1 と 9.2.2 項で示した大雪の発生頻度を組み合わせ、これらを交通障害発生の危険度とした。また、既往文献<sup>(63), (75)</sup>などを参考に、豪雪年の多量降雪の頻度を 4 回以上/1 年と仮定し、40 回以上/10 年を発生頻度の基準に加えた。それらの大小を表-26 に階級化したハザードマップ（パターン③）を作成した（図-46）。道路管理での利用や、道路利用者が利用する場合、危険性の表現として伝わりやすいものと考えられる。

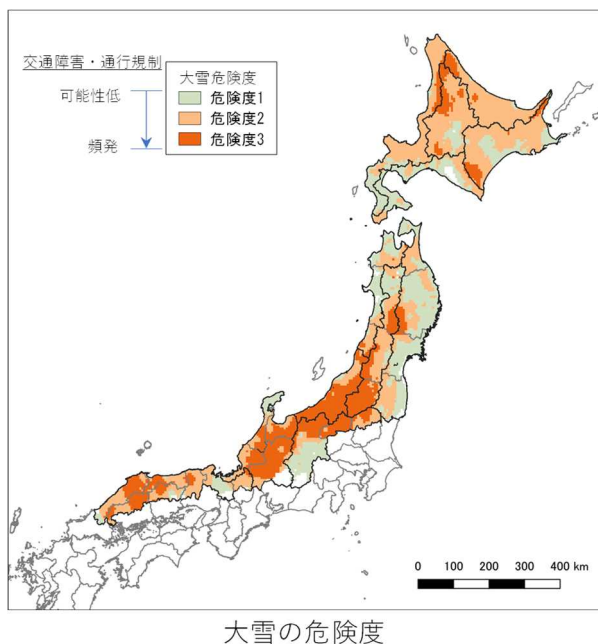


図-46 大雪のハザードマップ（危険度の階級化）

一方、マップの利用者（道路管理者、利用者）ごとに解釈が異なる可能性が考えられる。

## 10. 暴風雪時の道路管理における判断支援方策の提案

前章までにおいて、一回の暴風雪および大雪の厳しさに関する指標を作成し、その頻度や地域性をグラフやハザードマップなどで提示した。本章では、達成目標⑤「指標に基づく暴風雪時の道路管理における判断支援方策の提案」について述べる。

### 10.1 暴風雪時の道路管理体制および課題整理

はじめに、判断支援方策を検討するために、暴風雪時における道路管理体制と課題を整理した結果について示す。なお、ここで言う「暴風雪時」とは、暴風雪発生の概ね数日前から暴風雪終了後道路維持管理に関連する活動が完了するまでの期間を指す。

#### 10.1.1 暴風雪時の道路管理体制

暴風雪対応における道路管理の段階、部署の区分、ならびに各局面での対策を想定の上、各局面で必要かつ有効と考えられる指標や資料や情報の素案を、国土交通省本省や北海道開発局を例として表-27に整理した。以下に、表-27の各整理項目について詳述する。

#### 10.1.1 道路管理体制の段階、部署について

暴風雪時における道路管理の段階と部署は、概ね以下のような区分、種類に整理される。

##### 1) 道路管理体制の段階

##### イ) 道路計画、年単位の管理計画

新規道路や道路網に関わる防災事業の計画、また年単位における維持管理計画の策定(暴風雪が発生した際の対応、対策などの検討)。

表-27 暴風雪時における段階、部署、対策と指標・情報・資料の整理（案）

段階	部署	検討・実施対象となる対策		活用される指標、情報、資料 (想定)
		ハード対策	ソフト対策	
道路計画 管理計画	国土交通省 本省 北海道開発 局本局	・道路ネット ワークの機能 強化 ・防雪対策施設 などの整備	・タイムラインの策定 ・除雪計画の策定、除雪体制 の確保 ・関係機関連携体制の構築 ・利用者、地域住民への啓 蒙、理解の促進など	【指標】 ・道路ネットワークの災害規模を表現した指標 【情報・資料】 ・上記指標のハザードマップ ・上記指標の経年変化傾向
	開発建設部 本部	・道路ネット ワークの機能 強化 ・防雪対策施設 などの整備	・タイムラインの策定 ・除雪計画の策定、除雪体制 の確保 ・関係機関連携体制の構築 ・利用者、地域住民への啓 蒙、理解の促進など	【指標】 ・道路ネットワークの災害規模を表現した指標 ・管内の路線・区間の障害の度合を表現した指標 【情報・資料】 ・上記指標のハザードマップ ・上記指標の経年変化傾向
	道路事務所	・防雪対策施設 などの整備	・タイムラインの策定	【指標】 ・管轄する路線・区間の障害の度合を表現した指標 【情報・資料】 ・上記指標のハザードマップ ・上記指標の経年変化傾向
暴風雪時	国土交通省 本省 北海道開発 局本局	なし	・対策本部設置、関係機関と の連携 ・除雪体制の強化、支援 ・情報提供	【指標】 ・道路ネットワークの災害規模を表現した指標 【情報・資料】 ・上記指標の予測値 ・開発建設部本部などからの報告、情報
	開発建設部 本部	なし	・対策本部設置、関係機関と の連携 ・除雪体制の強化、支援 ・情報提供	【指標】 ・道路ネットワークの災害規模を表現した指標 ・管内の路線・区間の障害の度合を表現した指標 【情報・資料】 ・上記指標の予測値 ・管内の道路事務所などからの報告、情報
	道路事務所	なし	・道路パトロール、除雪体制 の強化 ・通行止め管理	【指標】 ・管轄する路線・区間の障害の度合を表現した指標 【情報・資料】 ・上記指標の予測値、マップ ・道路パトロール、除雪作業などからの報告

**ロ) 暴風雪時の維持管理**

暴風雪に伴う障害状況に対応した維持管理、対応の実施。

**2) 部署****イ) 国土交通省本省、北海道開発局本局**

広域かつ長期的な道路計画の策定や、暴風雪により広域(複数の開発建設部や関係機関)に甚大な被害が発生、または発生が予測される状況において、これらの調整を担当する部署。

**ロ) 開発建設部本部**

該当する開発建設部管内において、各道路事務所と連携のうえ道路防災事業や維持管理の計画を策定する。また、暴風雪時に多路線または複数の道路事務所で被害が出ている状況において、これらの調整を担当する部署。

**ハ) 道路事務所**

管轄する路線・区間において、開発建設部本部が策定する防災事業や維持管理の計画を支援する。また、暴風雪時における道路パトロールや除雪作業、通行止めの実施や解除などの維持管理を担当する部署。

**10.1.2 検討・実施対象となる対策について**

10.1.1 で整理した道路管理体制の段階や部署ごとに、検討・実施対象と想定される対策を以下に大別する。

**1) ハード対策**

- ・道路ネットワークの機能強化
- ・防雪対策施設などの整備

**2) ソフト対策****イ) 道路計画、管理計画**

- ・タイムラインの策定(各部署に応じた)
- ・除雪計画の策定、除雪体制の確保
- ・関係機関連携体制の構築
- ・利用者、地域住民への啓蒙、理解の促進など

**ロ) 暴風雪時**

- ・対策本部設置、関係機関との連携
- ・除雪体制の強化、支援
- ・情報提供
- ・道路パトロール、除雪体制の強化
- ・通行止め管理

**10.1.3 道路管理体制において活用される指標・情報・資料**

10.1.2 で示した各段階や部署ごとの対策において、判断支援材料として活用される指標・情報・資料を、以下のように想定する。

**1) 指標**

- ・暴風雪の災害規模を表現する指標(警戒レベル、障害度)および指標の再現期待値、経年変動

- ・道路状況を示す指標(吹雪視程、吹きだまり、吹雪量など)、および指標に基づく通行止め基準

**2) 情報**

- ・ハザードマップ(再現期待値など)
- ・実況値、予測値(およびその閲覧システム)
- ・気象予報
- ・道路パトロールからの現場の状況報告 など

**10.2 道路管理の現状に関する整理**

より有効な判断支援方を検討するため、暴風雪による通行止め対応の活動記録の整理や、道路管理者を対象としたヒアリング調査を行い、暴風雪時の道路管理の課題や道路管理者が必要としている指標や方策などについて取りまとめた。

**10.2.1 暴風雪事例時の状況整理**

はじめに、過去の暴風雪による通行止め対応の活動記録に基づき、暴風雪事例および道路管理区間ごとに活動記録の時系列データを作成した。つぎに、活動記録の時系列データを用いて、現状の道路管理の基本的な流れと、判断が困難な事象を整理した。上記に基づき、暴風雪時の道路管理における課題を抽出・整理した。

**1) 整理方法および整理事例**

各暴風雪事例について、道路管理区間ごとに活動記録の時系列データとして整理した。ここでの対象は、道路管理の推移や対応が分かるよう、10以上の活動記録がある117事例とした。

**2) 道路管理の基本的な流れについて**

活動記録の時系列データを用いて、道路管理区間における暴風雪時の基本的な維持管理の流れを表-28に整理した。ここでは、各段階に「平常」、「注意」、「通行止め」、「解除準備」、「平常(通行止め解除)」と名称を付して整理した。また、各段階で想定される道路管理者や利用者の行動を表-28に付記した。

**3) 道路管理における課題について**

表-28の流れにおいて、段階を移行する場合には、道路管理者が判断を行う必要がある。ここでは、段階を移行する判断が困難な場合を想定し、イ)に整理した。これらを、道路管理上の課題を示唆する状況とする。つぎに、活動記録の時系列データ117事例のうちイ)に類似する計22事例を抽出のうえ(表-29)、道路管理における課題をロ)に整理した。

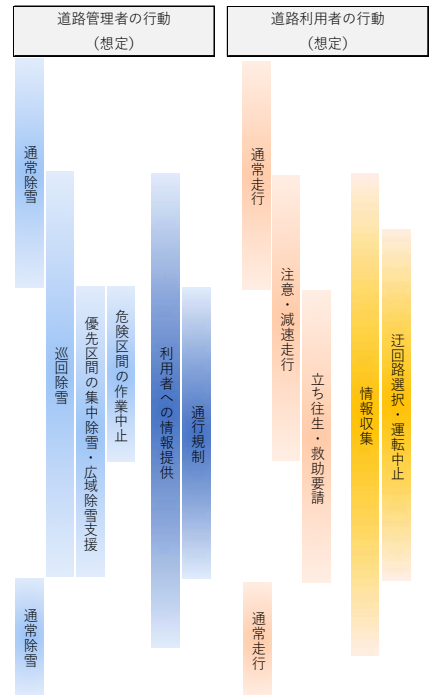
**イ) 段階移行の判断が困難な場合(想定)**

- ・通行止めや通行止め解除の判断など、段階の移行に向けて、情報収集(道路パトロールや維持業者への照会、CCTV確認による道路状況の把握、気象予測やテレメータなどの気象情報の収集)を実施したもの



表-28 道路管理区間における暴風雪時の基本的な維持管理の流れと、各段階で想定される道路管理者・利用者の行動

段階	気象	対応	作業項目 (道路事務所)	次の段階に移行する 判断のトリガー
平常	吹雪なし	通常除雪や定期的な道路パトロールにより、交通の安全を確保する	・気象情報収集 ・定期的な点検 ・通常除雪	・気象情報
注意 (通行止め準備)	吹雪なし または 吹雪開始	暴風雪が予見され、積極的に情報を収集のうえ、通行止めを検討する	・通行止めに向けた体制強化 ・除雪体制の強化 ・情報収集の強化 (臨時の道路パトロールなど) ・関係機関との情報共有、調整	・点検やCCTV映像などで把握した道路状況の悪化(視程障害、吹きだまり) ・隣接する道路管理区間との調整
通行止め	暴風雪	暴風雪により交通の安全が確保できないため通行止めを行う	・通行止めの開始 ・関係機関、利用者への周知 ・除雪作業の中止または継続	・道路パトロール、除雪作業などによる道路状況の報告 ・気象情報
解除準備 (通行止め継続)	暴風雪の減衰 (天候回復)	通行止め解除に向けた除雪と、道路の現地点検を行い、安全を確認する	・通行止め解除に向けた除雪作業 ・情報収集の強化 (臨時の道路パトロールなど) ・関係機関との情報共有、調整	・現地点検などによる道路状況の把握 ・通行止め解除に向けた除雪作業の進捗 ・隣接する道路管理区間との調整
平常 (通行止め解除)	吹雪継続 または 吹雪なし	通常除雪や定期的な道路パトロールにより、交通の安全を確保する	・通行止め解除 ・関係機関、利用者への周知 ・通常除雪	-



の、判断が困難な場合

- ・道路管理の基本的な流れ(表-28)にない、イレギュラーな対応

ロ) 道路管理における課題

a) 注意段階への移行における課題

暴風雪による通行止め対応の活動記録は、平常段階の記載がなかったことから、注意段階への移行における課題は不明である。なお、これらの活動記録は、現地維持業者からの吹雪による視程障害など、道路状況悪化の報告があった時点から開始されている場合が大部分であった。上記の報告から、今後の吹雪や暴風雪に関する情報などを道路事務所と維持業者で共有することが、迅速な道路管理に有用であると予想される。

b) 通行止め開始の判断における課題

活動記録の時系列データより、維持業者や事務所職員が現地確認を行い、道路状況の悪化(視程障害など)を確認して通行止めを判断していた。判断が困難だったと考えられる事例はなかったが、現地を直接確認する管理手法と併せて、管轄する路線上で大規模な車両滞留を回避するための事前通行規制の整備が課題と考えられる<sup>1)</sup>。

c) 通行止め解除の判断における課題

活動記録の時系列データより、通行止め解除に向けた除雪が終了し、事務所職員などの現地点検により異常がないことを確認してから、通行止めを解除する事例が多かった。一方で、降雪・強風や吹雪による視程障害

表-29 暴風雪時における道路管理の課題と想定される項目と事例数

項目	事例数	備考
注意段階への移行	0	平常時の記録がないため不明
判断が困難と想定される場合	0	
通行止め開始判断	10	点検結果、雪底除去が必要と判断された事例除く
通行止め解除判断	6	
スタック・事故の発生	4	
通行止め最中	4	
臨時的な対応(除雪)	2	通行止め中に除雪の応援を調整(1件)、除雪の増強やオペレーターの休息の確保を指示(1件)
計	22	

に伴い、通行止め解除の見込みが立たない、またはその判断を延期した事例が見られた。判断を延期した事例は、気象情報による今後の道路状況の推定が困難だったと推測される。このことから、気象情報と吹雪に伴う道路状況の悪化や交通障害との関係が不明である点、任意の区間における吹雪に関連する情報を抽出・利用する手段などに課題がある可能性が考えられる。

d) 車両スタック・事故の発生からみた道路管理の課題

活動記録の時系列データより、車両のスタックや事故の発生をきっかけに、通行止めを実施した事例がみられた。これらの事故などは、発生時の気象や道路状態、またはそれ以外の要因(例えばチェーンの未装着、ドライバーの技量など)によって発生したものと考えられる。

以上から、車両のスタックや事故に至る道路状況の把握が課題であると考えられる。

#### e) 除雪作業からみた道路管理の課題

活動記録の時系列データより、通行止め中に除雪の応援について調整している事例や、通行止め解除に向けて除雪を早めるようロータリー車の投入を指示する、または適切なオペレーターの休憩を要請する事例がみられた。判断が困難だったと考えられる明示的な記録はなかったものの、暴風雪の規模や時間に応じて除雪に必要な能力（除雪機械の台数）やオペレーターのシフトを検討することが、効率的な除雪による早期解除に向けて有用であると考えられる。

### 10.2.2 暴風雪時の道路管理に関するヒアリング調査

暴風雪時の道路管理における現状や動向、課題、道路管理者の判断支援方策に対する要望や、本報告書 5 章で述べた一回の暴風雪の評価指標、それらの活用方法の妥当性を把握することを目的として、北海道開発局の道路管理者を対象にヒアリング調査を行った。本節では、暴風雪時の道路管理と、一回の暴風雪の評価指標について、要約した結果を以下に示す。

#### 1) 暴風雪時の道路管理について

##### イ) 管理体制と管理の基準

北海道開発局では、「大雪時の道路交通確保対策中間とりまとめ<sup>1)</sup>」を受けて、暴風雪対策のタイムラインの策定が各開発建設部で進められている。基本的には、主要な峠で予防的通行規制区間が設定され、それらがタイムラインの対象となっている。タイムラインは、暴風雪の発生が見込まれる 3 日程度前から行動を開始する形となっている。また、単独の開発建設部で維持管理の対応が困難な場合は、開発建設部間で除雪などの応援が行われ、その調整は北海道開発局本局が行う。

##### ロ) 吹雪状況のモニタリング

吹雪状況のモニタリングは、道路パトロールによる現地状況の把握、気象情報や CCTV カメラなどの利用が主である。吹雪に着目した道路パトロールは、維持管理の経験を基に、吹雪障害が発生しやすい場所を中心に行われている。

##### ハ) 道路管理で利用される気象情報、データ

暴風雪時の道路管理で利用されている情報は、気象庁などが提供する気象の現況と予測、道路パトロール、CCTV、テレメータなどで収集される現地道路状況などが挙げられた。また、道路利用者に注意喚起を促す数値的な情報や、吹雪が収束するまでの時間などの予測情報、ならびに直接的な通行止めの基準への要望があった。

#### 二) 通行止めなどの判断、実施方法

気象庁が提供する気象情報、および気象警報などの発表に基づき、3 日程度先に向けてシナリオを想定のうえ道路維持管理を実施する。また、スタックの発生、除雪能力を超えた降雪、視程障害の発生などが、主たる災害の発生時点の時刻である「ゼロ・アワー（0 時間）<sup>70)</sup>」としてタイムラインに組み込まれている。

#### ホ) 課題、今後の要望

道路維持管理の従事者の経験や、道路パトロール結果への依存度が高いことが、現状の課題として挙げられている。また、上述のタイムラインにおけるゼロ・アワーの適切な設定基準が明瞭でないことから、事前の判断に有効な情報提供や判断根拠となる指標の確立に対する期待がある。また、担当者の雪害に関する知識レベルに差があることや、発注者と受注者の間のイメージの共有が難しいことが課題となっており、過去の暴風雪事例の規模と紐づけされたわかりやすい情報が求められている。

#### ヘ) その他

地域により、暴風雪への耐力が異なる。また、道路管理上ハード対策が検討・実施されるのは、吹雪の発生頻度が高い地域が中心であり、発生頻度が低い地域は、ソフト対策が主となる。

#### 2) 一回の暴風雪の評価指標について

##### イ) 道路管理における指標の妥当性

道路管理において、視程障害やスタック車両の発生を行動のトリガーとしていることから、評価指標の検討に吹雪時の視程および吹雪量を用いることが妥当であると判断された。また、面的な情報に関して、個々の管理路線を想定した細かいメッシュ（解像度）での情報提供への要望があった。加えて、道路管理者向けと一般向けのように、情報の利用者を想定した使い分けの提言があった。

##### ロ) 道路管理での指標の活用

道路管理に際し、予測に対する強い要望があり、評価指標である「警戒レベル」（5 章で記述）や、吹雪に関する細かいメッシュ（解像度）での予測値への期待がある。また、通行止めの判断の他、応援体制や人員配置の検討に、この評価指標が活用できるのではないかとという見解が示された。加えて、暴風雪の予測に対する評価指標の適用や、その情報を提供するシステムへの要望があった。

### 10.2.3 暴風雪時の道路管理における課題

10.1.2 で整理した内容をもとに、暴風雪時の道路管理とその課題を、表-27 に示す各部署および道路利用者、道路管理計画および暴風雪時の段階に分類のうえ以下

に取りまとめた。

## 1) 国土交通省本省、北海道開発局本局

### イ) 道路管理計画

国土交通省本省および北海道開発局本局は、暴風雪時に備えた道路計画、および除雪計画を立案する。道路計画や除雪計画の立案には、暴風雪に伴う地域性を把握することが重要と考えられる。ただし、吹雪の厳しさを定量的に把握できる現状の資料は、年間累計吹雪量や視程障害発生頻度など、一冬期を代表する値に限られる。加えて、急速に発達した低気圧に伴い暴風雪となる北海道東部は、北海道日本海側と比較して年間累計値は小さいことなどから、一冬期の吹雪に関する累計値と、一回の暴風雪の頻度や規模は必ずしも相関しないものと考えられる。以上より、道路計画や道路管理の体制・対応の検討にあたり、一回の暴風雪の厳しさを示す資料の整備が必要と考えられる。

#### ロ) 暴風雪時

暴風雪時において、国土交通省本省および北海道開発局本局は、各開発建設部本部や関係機関との連絡体制確保や情報収集を実施し、必要に応じて適切な対策などを指示する。各地域における気象の規模を示す既往の情報として、気象庁の気象警報・注意報や予想降雪量<sup>77)</sup>などの情報がある。ただし、利用する気象情報と、吹雪に伴う道路状況の悪化や交通障害との関係が明確でないことが課題と考えられる。

## 2) 開発建設部本部、道路事務所

### イ) 道路管理計画

開発建設部本部は、管内の道路防災事業の計画や、維持管理の計画を策定し、併せて利用者への啓蒙を実施する。また、道路事務所がこれらを支援する。ヒアリングの結果、各開発建設部において暴風雪対策のタイムラインが策定され、併せて早めの通行止め実施を目指す方針となっている。

暴風雪対応のタイムラインにおいて、主たる災害の発生時刻である「ゼロ・アワー (0 時間)」は、除雪困難や、交通障害の発生が想定されている。「タイムライン (防災行動計画) 策定・活用指針 (初版)<sup>76)</sup>」によれば、ゼロ・アワーより前にリードタイムを確保し、早めの防災行動を開始することで、防災行動を有効に機能させる必要があると示されている。したがって、タイムラインの運用に際し、ゼロ・アワーを適切に設定することが望ましい。ただし、現時点ではゼロ・アワーの適切な設定基準が明瞭でないことが、課題であると考えられる。

#### ロ) 暴風雪時

暴風雪時において、開発建設部本部および道路事務所

は、体制の構築、対応の検討・判断、情報収集・共有や利用者への周知、維持管理作業を行う。活動記録やヒアリング結果の整理により、以下の課題が示された。

- ・暴風雪の規模を予測することが困難である。
- ・通行止め開始・解除のタイミングを判断しにくい。
- ・CCTV カメラによる映像から視程障害の程度を判読しにくい場合があり、通行止め開始・解除の最終判断のために現地確認を実施している。
- ・通行止め開始時に、現地を直接確認する必要がある点が、迅速な判断や管理コスト削減における課題となっている。
- ・通行止め解除の見込みを立てられない事例があり、気象情報と道路状況の関係が不明である点、任意の路線・区間の情報を容易に利用する手段が無い点、ならびに今後の吹雪状況を推定するための情報の予測精度に課題がある。
- ・道路管理担当者同士や維持管理業者との間で、知識や経験が異なることが課題であり、暴風雪や大雪のイメージを共有できることが重要である。
- ・除雪機械オペレーターの高齢化や、世代交代に伴う技術の継承に関する課題がある。

### 3) 道路利用者

暴風雪時において、道路利用者は情報収集により危険な地域や時間帯を把握のうえ、より安全に走行可能なルートや出発時間の検討、ならびに運転の自粛を行うことが考えられる<sup>78)</sup>。本稿で例示した北海道開発局管内において、吹雪視程は「北の道ナビ【吹雪の視界情報 北海道版】<sup>79)</sup>」にて、概ね旧市町村単位で 24 時間先の予測値が公開されている。また、「気象庁 | 今後の雪 (降雪短時間予報)<sup>77)</sup>」では、2021 年 11 月より 6 時間先までの降雪量予測値が 5km 解像度で公開している。今後、これらの情報を活用しながら、一回の暴風雪の厳しさを示す指標を提示することが有用と考えられる。

## 10.3 暴風雪の道路管理時における判断支援方策案の検討

### 10.3.1 道路交通確保に向けた取り組みの概要と判断支援方策案について

近年、異例ともいえる降雪により、大規模な車両滞留が発生し、大規模な車両滞留の発生や長期化を回避することが結果的に「道路ネットワーク機能への影響の最小化」することになることから、「人命を最優先に、幹線道路上の大規模な車両滞留を徹底的に回避する」ことを基本的な考え方とすることが「大雪時の道路交通確保対策中間とりまとめ」<sup>1)</sup> (以下、「中間とりまとめ」という。) に追記された。本項では、大雪時の道路

交通確保に向けた取り組みの強化に関する内容のうち「道路管理者等の取り組み」の各項目を要約し、それらに対する暴風雪や大雪に対処するための道路管理上の判断支援方策案について、前節までに整理された課題や5～9章の整理結果に基づいて考察した。以降、ソフト的、ハード的対応について、表-30～表-33にそれぞれ記述する。

表-30 道路交通確保に向けた取り組みの概要と判断支援方策案（ソフト的対応 その1）

①タイムライン（段階的な行動計画）の作成	
「中間とりまとめ」の要約	判断支援方策案
<p>通常レベルから、短期間の集中的な大雪に対する危機管理レベルの対応へとモードを切り替えるタイミングがあり、道路管理者の迅速かつ的確な判断が求められる。地域特性、予想される降雪量やその精度を考慮し、広範囲かつ同時に躊躇なく通行止めを行う。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・危機管理レベルへの切り替えの判断材料のひとつとして、「警戒レベル」を利用する。</li> <li>・交通規制の判断材料として、「障害度」を利用する。</li> </ul> <p>&lt;考察&gt; 左記より、道路管理者は広範囲かつ同時に通行止めを行うことが想定されている。一方で10.2節より、道路管理の担当者間での知識レベルの違いが課題として挙げられており、定量的な基準を設けることが迅速な判断に有用であると予想される。5章および7章で作成した、一回の暴風雪や大雪の評価指標は定量的な指標である。「障害度」の評価指標は、交通障害を示唆する気象条件と考えられる。これらは気象予測値から算出することが可能な定量的指標・基準であり、道路管理者が迷うことなく、迅速な判断に資することができると考えられる。また、「警戒レベル」の評価指標は、地域ごとの災害規模を推定することができる指標であり、予測値に基づく体制判断に利用できると考えられる。</p>
②除雪体制の強化	
「中間とりまとめ」の要約	判断支援方策案
<p>道路管理者は、地域状況に応じた除雪体制の強化を行い、大規模な車両滞留を回避するよう努めるべきである。短期間の集中的な大雪が見込まれる場合には、道路管理者（国、高速道路会社、都道府県、市町村）の相互支援により除雪車等を広域的に配置して備えるなど、連携する必要がある。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・除雪体制検討の参考として、ハザードマップを活用する。</li> <li>・道路管理者が、管理者間の連携の必要性や連携を行う地域を判断するために、「警戒レベル」の評価指標の予測値を利用する</li> </ul> <p>&lt;考察&gt; 9章で整理されたハザードマップのうち、冬期累計吹雪量や降雪量が大きい地域は吹雪や降雪の常襲地域を示すと想定される。また、一回の暴風雪や大雪の障害度の発生頻度や危険度の大きい地域は、これらに対して留意すべき地域を示すと想定される。地域で求める除雪レベルについて、道路管理者が、ハザードマップを参考に、その実情に合わせて設定するなどの方法が考えられる。</p> <p>道路管理者同士の相互支援については、地域での連携の開始や終了するタイミングを判断するために、障害の程度を時系列で推測することができる、「警戒レベル」の評価指標の予測値を利用するのが適していると考えられる。</p>

表-31 道路交通確保に向けた取り組みの概要と判断支援方策案（ソフト的対応 その2）

③除雪作業を担う地域建設業の確保	
「中間とりまとめ」の要約	判断支援方策案
<p>道路除雪を担う地域の建設業者等は、道路交通の確保に大きな役割を果たす。一方で除雪機械の老朽化、オペレーターの高齢化等、その作業環境は厳しい状況にある。引き続き必要な除雪体制を確保するためには、少雪時も含めて適正な利潤が確保できるよう、国が中心となって契約方法等の改善を進めるべきである。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>時系列で予測された「障害度」や「警戒レベル」の評価指標を参考に、除雪車オペレーター等の適切な休憩を含めた除雪計画を立案する</li> </ul> <p>&lt;考察&gt;</p> <p>10.1 節の道路管理の現状に関する整理では、暴風雪が弱まる見通しが立たない状況では、除雪車オペレーターの休憩等の労働環境やシフト構築についての課題があることが示唆された。</p> <p>5章および7章で作成した「障害度」や「警戒レベル」の評価指標は、暴風雪や大雪の状況を時系列として把握することも可能であるため、これらを活用することで、除雪実施の計画の立案に資することができると思われる。</p>
④地域や民間団体による除雪作業への協力体制の構築	
「中間とりまとめ」の要約	判断支援方策案
<p>迅速に除雪を実施する体制を確保するため、国や地方公共団体は地域や民間団体の積極的な協力を求めるべきであり、地域団体等が積極的に除雪作業に参加できる仕組みを検討すべきである。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>除雪体制検討や地域の防災計画策定の参考として、ハザードマップを活用する。</li> </ul> <p>&lt;考察&gt;</p> <p>9章で整理したハザードマップにより、冬期累計の吹雪量や降雪量が少なくても、規模の大きい一回の暴風雪や大雪の発生の可能性が示される地域では、その対応のため相応の除雪体制・能力が必要と考えられる。道路管理者は地域特性を周知し、地域・民間団体による除雪作業の協力が重要であることを啓発することが考えられる。</p>
⑤チェーン等の装着の徹底	
「中間とりまとめ」の要約	判断支援方策案
<p>道路管理者および都道府県公安委員会は、大雪時には降雪状況や地域特性に応じて、ドライバーに対し冬用タイヤやチェーンの装着を徹底すべきである。冬タイヤやチェーンの装着徹底の実効性を高めるため、適切な装着がなく大規模な車両滞留の原因となった大型車等に対しては、ペナルティ等の対応を検討すべきである。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>冬タイヤやチェーンの装着の可能性がある地域を事前に啓発するために、ハザードマップを活用する。</li> </ul> <p>&lt;考察&gt;</p> <p>9章で整理されたハザードマップのうち、冬期累計吹雪量や降雪量が多い地域は吹雪や降雪の常襲地域を示すと想定される。また、一回の暴風雪や大雪の障害度の発生頻度や危険度の大きい地域は、これらに対して留意すべき地域を示すと想定される。道路利用者に対し、事前の啓発をするため、これらのハザードマップを提示することが考えられる。</p>
⑥短期間の集中的な大雪時の行動変容	
「中間とりまとめ」の要約	判断支援方策案
<p>短期間の集中的な大雪が予想される場合に、道路利用者に対して不要・不急の外出を控えることや、広域的な迂回等と呼び掛けているが、実際に道路利用を控える行動を起こすには十分でない。道路管理者は情報の提供方法を工夫すべきで、通行止め予測の発表のほか、気象予測や路面の状況等、内容を具体化して呼びかけるべきである。加えて、国や地方公共団体は、荷主等を含む企業、公共機関や学校など社会全体のコンセンサスが得られるような対象を広げる取り組みを進めるべきである。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>道路利用者の行動変容を促すことを目的に、事象発生時に評価指標や視程・吹きだまり量の情報を公開する。</li> </ul> <p>&lt;考察&gt;</p> <p>現状の気象情報は降雪量などの値であるため、道路交通への影響を、情報の受け手が直接イメージすることが困難である。一方、5章で作成した評価指標は、自動車の走行や運転挙動との関係が整理されており、情報利用者に道路交通状況をイメージさせやすいと予想され、道路管理者からの行動変容の呼びかけに適している可能性がある。</p>

表-32 道路交通確保に向けた取り組みの概要と判断支援方策案（ソフト的対応 その3）

⑦短期間の集中的な大雪時の計画的・予防的な通行規制・集中除雪の実施	「中間とりまとめ」の要約	判断支援方策案
	<ul style="list-style-type: none"> <li>道路管理者は、車両滞留が予見される場合、滞留が発生する前に「情報連絡本部」を設置し、国土交通省が主体となって、関係機関と調整のうえ、高速道路と並行する国道等の同時通行止めを行い、集中的な除雪作業を実施すべきである。道路管理者は躊躇ない通行止めの実効性を高めるため、通行止め判断や準備を開始する複数のメルクマールやトリガーをタイムラインに位置付けるべきである。</li> <li>道路管理者は、過去に車両立ち往生が発生した地点や、その可能性が高い地点などをリスク箇所として把握し、計画的・予防的な通行規制区間を想定する。さらに、気象庁は道路管理者の判断を支援するため、数時間先までに集中的な大雪が予想される場所や時間帯についてのきめ細かな面的な予測情報の提供や、降雪予報の精度向上やデータ共有の高度化に向けた技術開発を進めるべきである。加えて、道路管理者は、優先除雪ルートを設定したうえ、降雪や降雪状況を勘案した集中除雪による早期解放に最大限務めるべきである。</li> <li>空振りをおそれず、道路管理者は広域迂回等の呼びかけを繰り返しお願いすべきである。このため、降雪予測等から通行規制を想定して、できるだけ早く通行規制予告を繰り返し発表すべきである。また、通行規制が解除されるまで待機を希望する車両の発生を想定し、道路管理者は駐車などが可能な施設の確保等を実施すべきである。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>タイムラインにおける判断条件のひとつとして、「警戒レベル」や「障害度」の評価指標を利用する</li> <li>リスク箇所の把握に、ハザードマップを活用する</li> </ul> <p>&lt;考察&gt;</p> <p>「情報連絡本部」の設置や、同時通行止めの実施を判断するためにも、複数のトリガーや指標を用いてタイムラインの運用を行うものと考えられる。5章および7章で検討した評価指標は、道路状況や自動車の走行に関連した指標であるため、タイムラインの各段階を移行するための判断に利用することができると予想される。また、リスク箇所の把握には、9章で作成したハザードマップが有用であると考えられる。</p>
⑧立ち往生車両が発生した場合の迅速な対応	「中間とりまとめ」の要約	判断支援方策案
	<ul style="list-style-type: none"> <li>車両立ち往生が発生した場合に、長時間の大規模な車両滞留を回避するため、道路管理者は、立ち往生発生箇所の手前側で、本線の通行止めや、交差点等入口部の閉鎖を速やかに行うべきである。また、リスク箇所を把握して予め通行止め区間を想定し、迂回経路や待機スペースを確保するよう、道路管理者は関係者と情報共有や調整を行うべきである。</li> <li>道路管理者は滞留が発生した場合への対策として、資機材の準備や、沿道の物流施設や商業施設を利用できるようその管理者との協定締結、滞留車両への支援体制の構築などを行うべきである。</li> <li>道路管理者は滞留が発生した場合に正確な状況把握を行うための体制の構築や、関係者への積極的な情報共有、除雪の進捗や通行止め解除の見通しなどの情報を利用者に提供すべきである。</li> <li>政府は、滞留が発生した際のガソリン車への燃料供給実績に関するデータを収集すること等により、EVが滞留した場合の対応について、速やかに検討を行うべきである。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>リスク箇所の把握に、ハザードマップを活用する</li> <li>情報の把握や提供時に、警戒レベルや障害度も利用する</li> </ul> <p>&lt;考察&gt;</p> <p>立ち往生発生後の大規模な車両滞留を防ぐためには、車両立ち往生の発生を早期に検知し、対処することが重要であると考えられる。立ち往生発生の可能性が高い場所は気象情報（降雪量や吹雪量）から推定することができるものの、その他に道路縦断勾配や車両の装備等（スタッドレスタイヤ、チェーン等）にも影響を受ける。したがって、現時点では立ち往生を推測するよりも検知するための方策の方が重要であると考えられる。例えば、CCTVの充実、立ち往生時にドライバーに通報を促すような啓発、あるいは路線・区間の交通量を線的に評価することにより立ち往生発生を検知する技術などが考えられる。</p> <p>一方、滞留発生区間への資機材の準備等を行うためのリスク箇所の把握は、9章で作成したハザードマップにより対象区間を想定することができる可能性がある。さらに、評価指標の予測値を用いることで、通行止め解除の見通しを立てることができる可能性がある。</p>

表-33 道路交通確保に向けた取り組みの概要と判断支援方策案（ハード的対応）

①基幹的な道路ネットワークの強化	
「中間とりまとめ」の要約	判断支援方策案
<p>地域の实情に応じて、高速道路の暫定2車線区間や主要国道の4車線化等や、バイパス等迂回路の整備等により、基幹的な道路ネットワークの強化を図る必要がある。</p>	<p>・優先的な強化区間の検討材料として、ハザードマップを利用する</p> <p>&lt;考察&gt; 優先的に整備を行う道路ネットワークを検討に、道路ネットワークの観点や地域の实情による路線の重要性のほか、9章で整備された一回の暴風雪や大雪の頻度等のハザードマップを利用することが想定される。</p>
②スポット対策、車両待機スペースの確保	
「中間とりまとめ」の要約	判断支援方策案
<p>渋滞の起点となりやすい交差点などのリスク箇所について、カメラの増設や、定置式溶液散布装置、防雪柵の設置など、地域の状況に応じたスポット対策を集中的に行うべきである。</p>	<p>・リスク箇所の把握に、ハザードマップを活用する。</p> <p>&lt;考察&gt; 9章で整理した危険度に関するハザードマップは、交通障害が発生しやすい箇所を判読することができると考えられ、スポット対策を行うべき箇所を判断する際に利用することができると考えられる。</p>

### 10.3.2 道路管理を想定した評価指標やハザードマップの活用案

立場・役割の異なる道路管理・利用者ごとに、計画時と事象発生時における活用案について整理した。

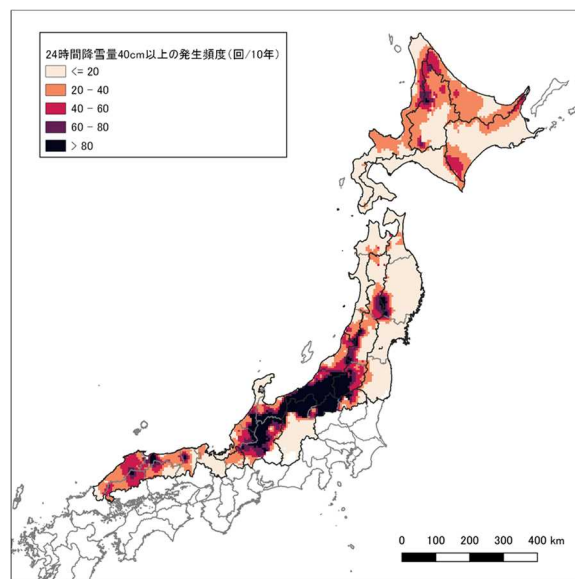
#### 1) 国土交通省本省、北海道開発局本局

##### イ) 計画時

国土交通省本省、北海道開発局本局は、暫定2車線の高速道路や国道の4車線化など、道路ネットワークの強化を優先する路線を事前に把握することが想定される。ここでは、暴風雪や大雪の発生頻度に関するハザードマップを利用することを提案する。例えば、**図-47**は大雪の発生頻度に関するハザードマップである。本州のうち、新潟県以南の日本海側で頻度が大きい傾向であり、大雪による災害を予防する観点から、道路ネットワークを優先的に検討することが考えられる。

##### ロ) 事象発生時

暴風雪や大雪が広範囲に渡って予見された場合に、道路管理者（開発建設部本部、道路事務所）や関係機関との連絡体制確保や情報収集を実施すると想定され、各地域における災害の規模を予め把握することで適切な対策を取ることができると考えられる。例えば、**図-48**に警戒レベルの分布を示すように、警戒レベル5の地域に重点的に除雪車を配備するよう、関係者間の調整を行うことが想定される。



24時間降雪量40cm以上の発生頻度

図-47 大雪の発生回数に関するハザードマップ案

#### 2) 開発建設部本部や道路事務所などの現業の道路管理者、維持業者

##### イ) 計画時

現業の道路管理者は、計画段階において、道路の防雪計画や、事象発生時における体制検討（タイムライン、維持管理体制など）、利用者への啓蒙を実施すると想定される。例えば、**図-49**に示すように、路線の中

で吹雪の発生頻度が高く、比較的危険性が高いと想定される区間を抽出し、路線の重要性や代替路を加味しつつ、防雪計画を策定することが想定される。

ロ) 事象発生時

道路管理者は、事象発生時において、情報収集を行いタイムラインに沿って体制の構築や対応の検討・判断し、除雪等の維持管理作業に加え、道路利用者への情報提供を実施すると想定される。ここでは、障害度に相当する気象条件を基準とした、道路管理の案を表-34に示す。表-34は、主に道路事務所・維持業者が通行止めを実施する際の段階と、段階の以降を判断するための障害度の評価指標を利用した判断基準案である。ここでは、「視程 50m 未満 (吹雪量 300kg/m/h 以上) が

6 時間継続 (表-6 に示す「障害度 2」)」した場合に通行止めを実施し、「視程 50m 未満 (吹雪量 300kg/m/h 以上) の継続が 5 時間以下」となる場合に通行止め解除を目指して行動することを想定した。また、吹雪が厳しく作業困難となる場合を想定し、除雪中止となる段階を設定した。除雪中止となるほどの気象条件は不明であるが、吹雪の強度が大きい状態として「吹きだまり 20cm/3h 以上 (吹雪量 1000kg/m/h 以上) (表-6 に示す「障害度 3」)」を挙げた。以上は案であり、気象の地域特性や暴風雪に対処する能力によって基準や時間は変化すると思われる。このため、案を運用する場合は、運用しながら問題・課題を整理し、適宜改善することが望ましいと考えられる。

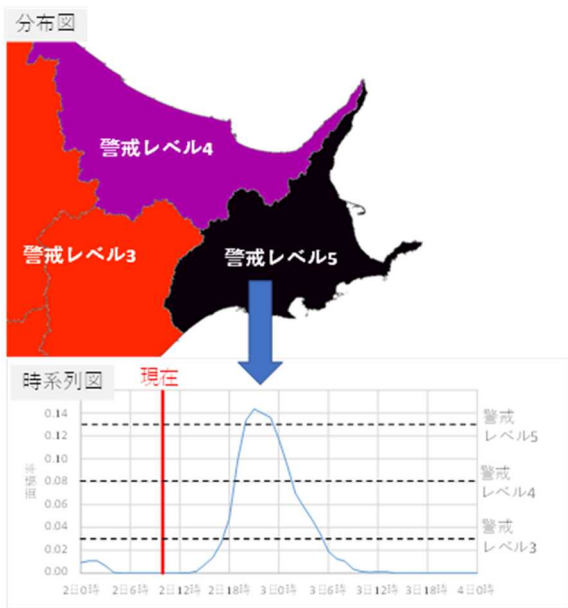


図-48 警戒レベルを示す評価指標の分布と推移

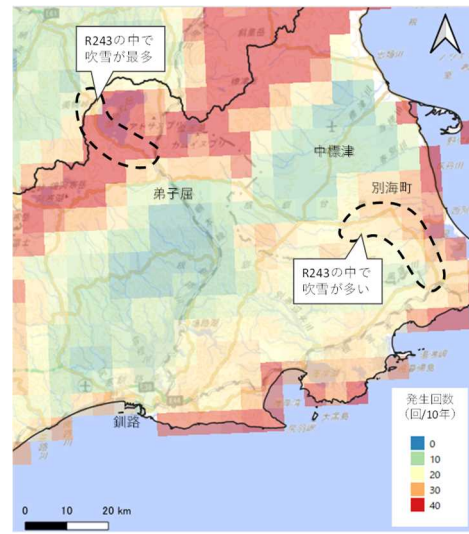
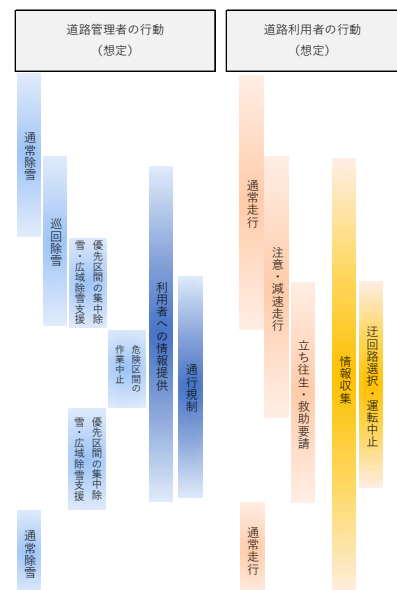


図-49 障害度 (暴風雪の発生頻度) 分布例

表-34 障害度を利用した通行止め管理案

段階	気象	対応	作業項目 (事務所、維持業者)	段階移行の判断材料 ※既往	段階移行の判断基準 (案) ※障害度を利用
平常	吹雪なし	通常除雪や定期的な点検により、交通の安全を確保する	・気象情報収集 ・定期的な点検 ・通常除雪		
注意 (通行止め準備)	吹雪なし、吹雪発生	吹雪が予見され、積極的に情報を収集し、通行止めを検討する	・通行止めに向けた体制強化 ・除雪の強化 ・情報収集の強化 (臨時の点検等) ・関係機関との情報共有、調整	・気象情報 (想定)	24時間以内に「視程50m未満 (吹雪量300kg/m/h以上) の6時間以上継続」が吹雪量から予測される
通行止め	巡回除雪	吹雪発生	・通行止めの開始 ・関係機関、利用者への周知 ・除雪の継続 (巡回除雪)	・点検やCCTV等で把握した道路状況の悪化 (視程障害、吹きだまり)	「視程50m未満 (吹雪量300kg/m/h以上) の6時間以上継続」が吹雪量から予測される
	除雪中止	吹雪ピーク	・現場作業を中止し、待機		「吹きだまり20cm/3h (吹雪量1000kg/m/h以上)」が予測される
解除準備 (通行止め継続)	吹雪減衰 (天候回復)	通行止め解除のため、除雪を行い、道路の点検を行い安全を確認する	・除雪の継続 ・情報収集の強化 (臨時の点検等) ・関係機関との情報共有、調整 ・通行止め解除のタイミングをうかがう	・点検等による道路状況 ・気象情報	「視程50m未満 (吹雪量300kg/m/h以上) の継続時間が6時間未満」が吹雪量から予測される
平常 (通行止め解除)	吹雪なし	通常除雪や定期的な点検により、交通の安全を確保する	・通行止め解除 ・関係機関、利用者への周知 ・通常除雪	・点検等による道路状況 ・除雪の進捗 ・隣接区間管理者との調整	「視程50m未満 (吹雪量300kg/m/h以上) の継続時間が6時間未満」が吹雪量から予測される





## 11. まとめと今後の展望

達成目標ごとのまとめおよび今後の展望を以下に記す。

### 11.1 吹雪量に与える気象要因の影響度の解明（達成目標①）

吹雪量を自動的かつ連続的に実測することは困難であるため、一般的には気象データから推定される。これまで、既往研究において様々な吹雪量推定式が提示されているが、その大半は風速のみの関数であった。吹雪の発生条件は、風速のみならず、数多くの気象要素が関与するものである。本研究では、各気象要素が吹雪量に及ぼす影響について検討し、複数の気象要素を用いた吹雪量推定式の作成に臨んだ。ここでは、気温、風速、降雪強度など直接観測している気象要素のほか、各要素の累計値や降雪終了からの経過時間など、過去の気象履歴についても検討項目に入れた。

暴風雪が発生しやすい気圧配置条件は、地域によって異なる。本研究では、西高東低の気圧配置時に発生しやすい石狩吹雪実験場 (N43° 12', E141° 23') と、低気圧が通過する時に発生しやすい弟子屈吹雪観測サイト (N43° 30', E144° 27') の2地点において現地観測（気象観測・吹雪観測）を行った。

解析結果に基づき、吹雪量推定式は、降雪項と地吹雪項の両方を含む関数形とし、降雪強度と風速から吹雪量を推定する式を提案した。

### 11.2 暴風雪や大雪の評価指標の提案（達成目標②）

#### 11.2.1 暴風雪の評価指標

一回の暴風雪の厳しさを評価するため、吹雪障害の基準数値を設定した。つぎに、通行規制などを判断するための、個々の路線・区間の障害を示す「障害度」、また警戒・非常体制の発令を判断するための、道路ネットワークの障害や地域の災害の規模を示す「警戒レベル」の評価指標を、北海道・東北地方・新潟県を対象に設定した。

(1) 吹雪の厳しさを示す物理量として、時間吹雪量 $Q_h$ を用い、道路吹雪障害との関係を推定した。気温、風速、降水量（降雪強度）等の気象値を用い、吹雪発生判定フロー<sup>34)</sup>によって「吹雪発生」と判別された場合に、吹雪量推定式を用いて高さ7mまでの $Q_h$ を推定した。その結果、視程障害については $Q_h \geq 100$  kg/m/h（視程100m未満）および $Q_h \geq 300$  kg/m/h（視程50m未満）を、吹きだまりについては $Q_h \geq 1000$  kg/m/h（吹きだまり深さ20cm/3h以上）を、吹雪障害の基準数値としてそれぞれ設定した。

(2) 「障害度」の評価指標は、国道の新雪除雪が1サイ

クル概ね3時間であることを考慮のうえ、吹雪障害の基準数値と吹雪による過去の国道通行止めとの関係を解析し、視程50m未満が3~6時間継続、視程50m未満が6時間以上継続、3時間の吹きだまりが20cm以上の3段階に設定した。

(3) 「警戒レベル」について、はじめに暴風雪の災害規模、地域の道路交通網へ与える影響、ならびに吹雪障害状況をもとに、道路管理に資することを重点に置いた5段階の警戒レベルを設定した。つぎに、北海道東部の過去の暴風雪事例のデータセットを用いて、暴風雪の強度・広がり・継続時間を考慮のうえ、各警戒レベルに分類した暴風雪事例の判別性などから、「時間吹雪量300 kg/m/h以上となる最大面積率」を評価指標として選定した。道路交通に影響を与える警戒レベル3-5について極値統計を実施し、再現期間は警戒レベル3が1~2年、レベル4が2~10年、レベル5が10年超となった。

#### 11.2.2 大雪の評価指標

一回の大雪の厳しさを評価するため、まず、既往文献を用いて積雪寒冷地域の大雪災害事例を収集した。つぎに、通行規制などを判断するための、個々の路線・区間の障害を示す「障害度」、また警戒・非常体制の発令を判断するための、道路ネットワークの障害や地域の災害の規模を示す「警戒レベル」の評価指標を、積雪寒冷地域を対象に設定した。

(1) 「障害度」の評価指標は、立ち往生事例をもとに、一定時間に積算された時間降雪量を段階的に設定した。立ち往生による車両滞留発生に至る積算降雪量40cm以上/24hを「障害度1」、半日で車両滞留が発生する程度の一定時間の積算降雪量を勘案し、積算降雪量40cm以上/12hを「障害度2」、国道の除雪1サイクル相当の3時間で20cm以上となる積算降雪量として20cm以上/3hを「障害度3」と設定した。

(2) 「警戒レベル」について、はじめに大雪の災害規模、地域の道路交通網へ与える影響、ならびに障害状況をもとに、道路管理に資することを重点に置いた5段階の警戒レベルを設定した。また、積雪寒冷地域の積雪深観測値を用いた解析により、大雪の評価指標を「降雪強度40cm/24h以上となる地点割合 $r$ の最大値」と設定した。つぎに、上記の検討結果をもとに、気象格子値を用いた解析により、地域ごとに大雪の評価指標の閾値を示した。その際、大雪の評価指標を「降雪強度40cm/24h以上となる最大面積率」とし、道路交通に影響を与える警戒レベル3-5

について、暴風雪での検討結果(11.2.1)に倣い、警戒レベル3の再現期間を1~2年、レベル4を2~10年、レベル5を10年超と設定した。過去の大雪事例と比較したところ、災害を示すものとして、評価指標および再現期間は概ね妥当と確認された。

### 11.3 暴風雪および大雪の発生頻度と地域性に関する変化傾向の解明(達成目標③)

#### 11.3.1 暴風雪

暴風雪の評価指標(11.2.1)および過去60冬期の気象格子値を用いて、新潟以北の9つの積雪寒冷地域を対象に、「警戒レベル」の変化傾向を調べた。その結果、各地域の警戒レベル3-5の再現期待値を評価指標の閾値として設定し、過去の気象格子値を用いて1960~2010年代の10冬期ごとの変化傾向を整理した。その結果、極端な暴風雪と考えられる警戒レベル4・5は、1980または1990年代以降多くの地域で増加傾向がみられた。

#### 11.3.2 大雪

大雪の評価指標(11.2.2)および過去の気象値を用いて、積雪地域を11に細分のうえ、「警戒レベル」の変化傾向を調べた。各地域の警戒レベル3-5の再現期待値を評価指標の閾値として設定し、過去の気象値を用いて1960~2010年代の10冬期ごとの変化傾向を整理した。その結果、警戒レベル4は近年減少傾向にある地域が多い、また警戒レベル5は各地方とも10年に概ね0~2回発生する可能性があることが伺えた。

### 11.4 暴風雪および大雪に関するハザードマップの開発(達成目標④)

暴風雪や大雪の事象の規模と、それに伴う交通障害などの頻度をリスクとして位置づけ、11.2.1および11.2.2の評価指標などをもとに、道路管理に資するハザードマップを作成した。作成に際し、既往のハザードマップの概要、現状の道路の管理体制・管理者ヒアリングによる要件、ハザードマップのコンセプトについてそれぞれ整理し、一回の暴風雪や大雪の規模や発生頻度、冬期間の吹雪や降雪の度合いについて、3パターンのハザードマップについて検討した。以下に、それぞれの概要と特徴について述べる。

- (1) パターン1: 統計値を直接表現したハザードマップ。正確な表現が可能であるが、危険性が伝わりにくいいため、一般向けではない。暴風雪や大雪、それに付随した障害に精通した道路管理者向け。
- (2) パターン2: 複数の要素を組み合わせたハザードマップ。冬期の累計値に対する一回の事象の比(吹雪量・降雪量)。地域特性を表現できるメリットがあるが、新たな指標であるため、分かりにくい可能性

がある。

- (3) パターン3: 複数の要素を組み合わせる危険性を階級化したハザードマップ。要素を組み合わせ、交通傷害の発生危険性を階級わけしたもの。利用者が危険性をイメージしやすいが、厳密さに欠けるため、個々の解釈が異なる可能性がある。

ハザードマップの使用データは、面的かつ長期的な解析データ DSJRA-55 統計値を補正したもので、本研究ではその補正方法を提示した。冬期道路管理におけるハザードマップの活用方策として、暴風雪や大雪の地域ごとの特性に応じ、道路計画や維持管理体制の検討に資することができると考えられる。

### 11.5 指標に基づく暴風雪時の道路管理における判断支援方策の提案(達成目標⑤)

本章では、現状の道路管理の課題について整理したうえ、評価指標やハザードマップを用いた、暴風雪時の道路管理における判断支援方策案を検討した。

#### 11.5.1 現状の道路管理とその課題

- ・道路管理者は、統括的な立場にある国、本局と、狭義の道路管理者である本部、事務所、維持業者に分けられる。
- ・気象予測値を用いた道路管理が実施されているが、予測値と道路状況や運転者挙動・車両走行との関係が不明であり、通行止め解除の見通しが立たない、判断が人によって異なるなどの可能性がある。
- ・立ち往生等発生等を基準としたタイムラインの整備が進んでいる。
- ・気象予測値等を確認するシステムが複数あって煩雑であり、管理者が効果的に活用しづらい
- ・現地確認した後に通行止め開始・解除を実施するため、迅速に判断する点において課題がある。
- ・除雪を担う地域の建設業等の確保に課題がある

#### 11.5.2 判断支援方策

- ・計画段階では、ハザードマップを利用し、一回の暴風雪や大雪の頻度・規模に着目した危険個所を把握することで、有効な対策・対応の検討に資することができる可能性がある
- ・暴風雪・大雪時の道路管理に、道路状況や運転者挙動・車両走行などとの関係が分かりやすい評価指標を用いることで、道路管理者が障害を想定でき、迅速かつ属人的でない判断が可能となる可能性がある。

#### 11.6 今後の展望

本研究では、現地観測データ、過去の災害事例や気象解析値に基づき、一回の極端な暴風雪や大雪の厳し

さを評価する技術を構築し、これらを用いたハザードマップと、道路管理における判断支援方を提示した。道路管理者へのヒアリングの結果、極端気象時の的確な道路維持管理のため、本研究で得られた評価指標の予測値への期待が見られた。今後、評価指標の予測値を提示する仕組みについて検討し、より適確な道路管理に貢献したいと考えている。

## 謝辞

本研究では、国土交通省北海道開発局に、暴風雪時の道路管理に関するヒアリング調査などにご対応いただいた。また、気象庁が提供する JRA-55 領域ダウンスケーリング(DSJRA-55)を利用した。このデータセットは、文部科学省の補助事業により開発・運用されているデータ統合解析システム(DIAS)の下で、収集・提供されたものである。ここに記して御礼申し上げる。

## 参考文献

- 国土交通省 (2021) : 大雪時の道路交通確保対策中間とりまとめ (令和 3 年 3 月改定), p.33, <https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/toukidourokanni/> (2022 年 3 月 27 日閲覧).
- 内閣府 (2021) : 市町村のための降雪対応の手引き<本編> (令和 3 年 11 月改訂), pp.10-11.
- Boselly, S. E. , III et al. (1993): Road weather information systems, U.S. Strategic Highway Research Program Report SHRP-H-350, 1, 219p.
- 社団法人 日本建設機械化協会, 社団法人 雪センター (2004) : 2005 除雪・防雪ハンドブック (防雪編), p.112, 247.
- 独立行政法人 土木研究所 寒地土木研究所 (2011) : 道路吹雪対策マニュアル (平成 23 年改訂版), pp.1-2-1 - 1-2-11.
- 公益社団法人 日本道路協会 (2021) : 道路構造令の解説と運用 (改訂版), pp.117-118, 244, 272-279.
- 社団法人 日本道路協会 (1990) : 道路防雪便覧, pp.106-107.
- 村田晴彦, 河島克久 (2021) : 雪による車両滞留発生前の気象変化の特徴, 雪氷北信越, 41, p.64.
- 河島克久, 伊豫部勉 (2021) : 大雪による車両滞留の危険度評価システムの開発と試験的運用, 雪氷研究大会 (2021・千葉-オンライン) 講演要旨集, p.62.
- 白川龍生, 井手上優, 亀田貴雄 (2018) : 風冷積算寒度および累計降雪量による冬季道路管理のための新しい冬の厳しさ指数の提案, 雪氷研究大会 (2018・札幌) 講演要旨集, p.95.
- 日本雪氷学会 : 新版雪氷辞典, 古今書院, p.166, 2014.
- 日本雪氷学会 : 新版雪氷辞典, 古今書院, p.190, 2014.
- 国立研究開発法人土木研究所 : 平成 26 年度プロジェクト研究・重点研究報告書、極端な暴風雪の評価技術に関する研究, 2015.  
<https://www.pwri.go.jp/jpn/results/report/report-project/2014/pdf/ju-46.pdf> (2022 年 5 月 30 日閲覧)
- 国立研究開発法人土木研究所 : 平成 27 年度プロジェクト研究・重点研究報告書、極端な暴風雪の評価技術に関する研究, 2016.  
<https://www.pwri.go.jp/jpn/results/report/report-project/2015/pdf/ju-69.pdf> (2022 年 5 月 30 日閲覧)
- 国立研究開発法人土木研究所 : 平成 28 年度 研究開発プログラム報告書、極端気象がもたらす雪氷災害の被害軽減のための技術の開発, 2017.  
<https://www.pwri.go.jp/jpn/results/report/report-program/2016/pdf/pro-5.pdf> (2022 年 5 月 30 日閲覧)
- 国立研究開発法人土木研究所 : 平成 29 年度研究開発プログラム報告書、極端気象がもたらす雪氷災害の被害軽減のための技術の開発, 2018.  
<https://www.pwri.go.jp/jpn/results/report/report-program/2017/pdf/pro-5.pdf> (2022 年 5 月 30 日閲覧)
- 国立研究開発法人土木研究所 : 平成 30 年度研究開発プログラム報告書、極端気象がもたらす雪氷災害の被害軽減のための技術の開発, 2019.  
<https://www.pwri.go.jp/jpn/results/report/report-program/2018/pdf/pro-5.pdf> (2022 年 5 月 30 日閲覧)
- 国立研究開発法人土木研究所 : 令和元年度研究開発プログラム報告書、極端気象がもたらす雪氷災害の被害軽減のための技術の開発, 2020.  
<https://www.pwri.go.jp/jpn/results/report/report-program/2019/pdf/pro-5.pdf> (2022 年 5 月 30 日閲覧)
- 国立研究開発法人土木研究所 : 令和 2 年度研究開発プログラム報告書、極端気象がもたらす雪氷災害の被害軽減のための技術の開発, 2021.  
<https://www.pwri.go.jp/jpn/results/report/report-program/2020/pdf/pro-5.pdf> (2022 年 5 月 30 日閲覧)
- Budd, W. F et al. : The Drifting of Non-uniform Snow Particles. Studies in Antarctic Meteorology, American Geophysical Union, Antarctic Research Series, 9, pp.59-70, 1966.
- 小林大二ほか : みぞによる地吹雪量の測定. 低温科学・物理編, 27, pp.99-106, 1969.
- Kobayashi, D : Studies of Snow Transport in Low-

## 5 極端気象がもたらす雪氷災害の被害軽減のための技術の開発

- Level Drifting Snow. Contributions from the Institute of Low Temperature Science, A24, pp.1-58, 1972.
- 23) Takeuchi.M : Vertical profile and horizontal increase of drift-snow transport, J.Glaciology, 26, pp.481-492, 1980.
- 24) 松澤勝ほか: 風速と吹雪量の経験式の適用に関する一考察, 寒地技術論文報告集, 26, pp.45-48, 2010.
- 25) 日本雪氷学会: 新版雪氷辞典, 古今書院, p.52, 2014.
- 26) 日本雪氷学会: 新版雪氷辞典, 古今書院, p.50, 2014.
- 27) Sevruck: Summary report. Correction of Precipitation Measurements, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, pp.13-23, 1985.
- 28) Goodison, B.E et al.: WMO Solid Precipitation Measurement Intercomparison Final Report, WMO, p.14, 1998.
- 29) 竹内政夫: 吹雪と吹きだまりの発生機構, 鉄道土木, 26, 12, pp.41-44, 1984.
- 30) Schmidt.R A : A system that measures blowing snow, USDA, Forest Service Research Paper, RM-194, 1977.
- 31) Ishizaka.M et al.: A New Method for Identifying the Main Type of Solid Hydrometeors Contributing to Snowfall from Measured Size-Fall Speed Relationship, Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol.91, No.6, pp.747-762, 2013.
- 32) 大浦浩文ほか: 地ふぶき時における風速の垂直分布特性, 低温科学・物理篇, 25, pp.73-88, 1967.
- 33) 原田裕介, 大宮哲, 武知洋太, 高橋丞二 (2020) : 暴風雪事例を網羅的に解析するためのデータセットの作成. 寒地土木研究所月報, 811, pp. 21-26.
- 34) 武知洋太, 松澤勝, 國分徹哉, 大宮哲, 原田裕介 (2016) : “吹雪の視界情報”における吹雪視程推定手法について. 寒地技術論文報告集, 32, pp.157-162.
- 35) Harada, Y., S. Omiya, H. Takechi, A. Nishimura (2022): Investigation of Evaluation Indexes for Severe Snowstorm Events, XVIth World Winter Service and Road Resilience Congress Calgary 2022.
- 36) 独立行政法人 土木研究所 寒地土木研究所 (2011) : 道路吹雪対策マニュアル (平成23年改訂版), pp.1-2-1 - 1-2-11.
- 37) 加治屋安彦, 松沢勝, 鈴木武彦, 丹治和博, 金田安弘 (2004) : 降雪・吹雪による視程障害条件下のドライバーの運転挙動に関する一考察. 寒地技術論文・報告集, 20, pp.325-331.
- 38) 金子学, 松澤勝, 渡邊崇史 (2013) : 切土・盛土道路における吹きだまり発達と車両の発進が困難となる吹きだまり深さに関する検討, 第25回ゆきみらい研究発表会論文集.
- 39) 国土交通省, 2018: 第4回冬期道路交通確保対策検討委員会(2018年11月1日開催)配付資料, 資料4: 今冬の大雪対応予定.  
<http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/toukidourokanri/giji04.html> (2022年4月1日閲覧).
- 40) 松澤勝 (2020) : 飛雪流量の推定モデルを用いた吹雪量と視程との関係, 北海道の雪氷, 39, pp.39-42.
- 41) 松沢勝, 加治屋安彦, 伊東靖彦 (2004) : 道路上のドライバーの目線の高さの視程に与える雪堤の影響, 寒地技術論文・報告集, 20, pp.310-317.
- 42) 松澤勝 (2016) : 降雪を伴う吹雪時の吹雪量推定手法に関する研究, 雪氷, 78, pp.255-268.
- 43) 武知洋太, 松澤勝, 中村浩 (2009) : 吹雪時に人間が感じる視程と視程計や吹雪計による計測値との関係, 北海道の雪氷, 28, pp.17-20.
- 44) 武知洋太, 大宮哲, 高橋丞二, 金子学, 松澤勝 (2020) : 切土道路に発生した吹きだまりの発達過程と吹雪量との関係—石狩吹雪実験場における観測事例より—, 寒地土木研究所月報, 801, pp.53-59.
- 45) 武知洋太, 大久保幸治, 大宮哲, 原田裕介, 西村敦史 (2022) : 気象条件を用いた吹雪時の視程推定手法の北海道外への適用に向けた改良効果, 寒地土木研究所月報, 830, pp.2-13.
- 46) 内閣府 (2021) : 避難情報に関するガイドライン, 132pp.
- 47) 藤部文昭 (2011) : 極値分布関数の適合度評価に関する検討, 天気, 58, pp.765-775.
- 48) 中小河川計画検討会 (1999) : 中小河川計画の手引き(案), (財) 国土開発技術研究センター, pp.47-54.
- 49) 気象庁 (2007) : 異常気象リスクマップ, [www.data.kishou.go.jp/climate/riskmap/cal\\_qt.html](http://www.data.kishou.go.jp/climate/riskmap/cal_qt.html) ; 2022年4月15日閲覧.
- 50) 原田裕介, 松下拓樹, 松澤勝 (2016) : 積雪寒冷地における短期集中降雪と寒さに関する指標の将来傾向, 日本雪工学会論文集, 32, pp.31-42.
- 51) Kayaba, N., T. Yamada, S. Hayashi, K. Onogi, S. Kobayashi, K. Yoshimoto, K. Kamiguchi, and K. Yamashita (2016) : Dynamical Regional Downscaling Using the JRA-55 Reanalysis (DSJRA-55). SOLA, 12, pp.1-5.
- 52) 石坂雅昭 (2008) : 「しもざらめ雪地域」の気候条件の再検討による日本の積雪地域の質的特徴を表す新しい気

## 5 極端気象がもたらす雪氷災害の被害軽減のための技術の開発

- 候図, 雪氷, 70(1), pp. 3-13.
- 53) 国土交通省 (2018) : 積雪寒冷特別地域における道路交通の確保について,  
<https://www.mlit.go.jp/common/001265671.pdf> ; 2022年4月19日閲覧.
- 54) 内閣府 (2021) : 防災情報のページ(防災白書),  
<http://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/> ; 2022年4月19日閲覧.
- 55) 内閣府 (2021) : 防災情報のページ(災害情報),  
<http://www.bousai.go.jp/updates/> ; 2022年4月19日閲覧.
- 56) 気象庁 (2021) : 災害をもたらした気象事例,  
<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/index.html> ; 2022年4月19日閲覧.
- 57) 金村直俊, 菊池勝弘 (1996) : 1995/1996年の札幌付近の大雪, 雪氷, 58(2), pp. 157-160.
- 58) 細川和彦 (2004) : 2004豪雪における雪害について. 日本雪工学会誌, 20(3), pp. 28-29.
- 59) 前田博司 (2007) : 平成18年豪雪における北陸地方の被害, 雪氷, 69(1), pp. 3-8.
- 60) 国土交通省 (2008 - 2019) : 第20回~第31回 ゆきみらい・ふゆトピア研究発表会論文集.
- 61) 尾関俊浩, 丹治和博, 谷口恭, 金田安弘, 日本雪氷学会北海道支部雪氷災害調査チーム (2010) : 2010年1月17日に北海道石狩中部で局地的に発生した大雪(その1) - 概要および雪氷災害調査 -, 北海道の雪氷, 29, pp. 81-84.
- 62) 金村直俊, 山崎学, 丹治和博, 金田安弘, 日本雪氷学会北海道支部雪氷災害調査チーム (2010) : 2010年1月17日に北海道石狩中部で局地的に発生した大雪(その2) - 豪雪時の降雪の特徴 -, 北海道の雪氷, 29, pp. 85-88.
- 63) 原田裕介, 松澤勝, 松下拓樹 (2013) : 石狩・空知地方における平成24年豪雪時の雪害と気象, 第56回(平成24年度)北海道開発技術研究発表会.
- 64) 鈴木猛康 (2015) : 山梨の豪雪災害 - その教訓は活かされるか -, 京都大学防災研究所年報, 58(A), pp. 16-23.
- 65) 森崎裕磨, 長木雄大, 藤生慎, 高山純一 (2019) : 2018年2月の北陸地方における大雪の被害と影響に関する一考察 - 金沢市・福井市を対象として -, 自然災害科学, 38(3), pp. 347-363.
- 66) 河島克久, 松元高峰, 本田明治, 上石勲, 小杉健二, 山口悟, 平島寛行, 山下克也, 安達聖, 伊豫部勉, 高橋徹, 本谷研, 藤本明宏, 宮島昌克, 池本敏和 (2018) : 北陸地方を中心とした広域雪氷災害に関する調査研究, 自然災害科学総合シンポジウム講演論文集, 55, pp. 43-55.
- 67) 気象庁 : 気圧配置 気団・前線・気圧配置・天気図・気圧系の発達, 移動に関する用語,  
[https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yougo\\_hp/haichi3.html](https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yougo_hp/haichi3.html) (2022年4月19日閲覧)
- 68) 藤本明宏, 河島克久, 渡部俊, 村田晴彦 (2021) : 大雪時のスタック車両発生メカニズムの解明, 雪氷, 83, pp. 507-522.
- 69) 斎藤博英 (1971) : 降雪の強さと視程, 国立防災科学技術センター研究報告, 第5号
- 70) 中村勉 (1986) : 雪氷災害とその特徴, 雪氷防災, 白亜書房, pp. 1-13.
- 71) 気象庁予報部 (2009) : 平成21年度数値予報研修テキスト, 数値予報解説資料(42), pp. 28.
- 72) (社)日本雪氷学会北海道支部 (2009) : 雪氷研究の系譜, 260pp.
- 73) 国土交通省国土地理院, ハザードマップ,  
<https://www.gsi.go.jp/hokkaido/bousai-hazard-hazard> (2022年5月23日閲覧)
- 74) Bailey, T.C. and Gatrell, A.C. (1995) Interactive Spatial Data Analysis. Vol. 413, Longman Scientific & Technical, Essex.
- 75) 気象庁、平成18年豪雪,  
<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/2005/200512/gousetsu18.html>; 2022年5月23日閲覧
- 76) 国土交通省 : タイムライン(防災行動計画)策定・活用指針(初版)、34pp、2016.
- 77) 気象庁 | 今後の雪(降雪短時間予報) :  
<https://www.jma.go.jp/bosai/snow/> (2022年1月17日閲覧)
- 78) 原田裕介, 國分徹哉, 武知洋太, 松澤勝 : 吹雪時の冬期道路環境が利用者の走行ルート選定に与える影響について, 日本雪工学会論文集, 31(3), pp. 59-67、2015.
- 79) 北の道ナビ【吹雪の視界情報 北海道版】 :  
<http://northern-road.jp/navi/touge/fubuki.htm> (2022年1月17日閲覧)

## 5.1.2 短時間の多量降雪による雪崩危険度評価に関する研究

担当チーム：土砂管理研究グループ（雪崩・地すべり研究センター）、  
寒地道路研究グループ（雪氷チーム）

研究担当者：秋山一弥、石田孝司（雪崩 C）、高橋丞二、松澤 勝、  
松下拓樹、原田裕介、高橋 渉、櫻井俊光（雪氷 T）

### 【要旨】

本研究では、短時間の多量降雪による雪崩の危険度評価手法を提案した。まず、短時間多量降雪時の気温、降雪強度、立木間隔、斜面勾配などを要素とした雪崩発生条件を提示し、低気圧通過に伴う降雪時には雪崩発生に関して降雪結晶の種類や新雪密度に注意する必要があることを示した。また、この雪崩発生条件を満たす降雪事例の発生頻度を推定する簡便な解析手法を提案し、発生頻度の地域分布を提示した。最後に、樹林内を流下する乾雪雪崩の運動モデルを考案し、雪崩発生区の傾斜角や発生層厚、樹林の有無による雪崩の衝撃圧と到達距離の算出手法を提案した。本研究により、頻度解析で得た雪崩発生条件に合致する降雪深を雪崩運動モデルの発生層厚に適用することで、対策施設の設計に必要な雪崩の到達距離と衝撃圧を任意の発生頻度に応じて算出することができるなど、短時間多量降雪による雪崩の危険度評価が可能となった。

キーワード：短時間多量降雪、雪崩発生条件、雪崩発生頻度、雪崩運動モデル、雪崩衝撃圧、雪崩到達距離

### 1. はじめに

近年、短い時間に急激に積雪深を増す多量降雪によって雪崩が生じる事例が見られる<sup>1),2)</sup>。例えば、2014年2月14日～15日にかけて、本州の南岸を通過した低気圧に伴う多量降雪により、関東甲信地方を中心とする広い地域で数多くの雪崩が発生した<sup>1)</sup>。このような短時間の多量降雪による雪崩は、従来発生しにくいと言われている樹林内でも雪崩を誘発したことが特徴である<sup>1)-7)</sup>。しかし、これらの雪崩発生の気象条件や積雪層の状態、樹林内の植生や地形の条件、雪崩の衝撃圧などの実態は明らかになっていない。そこで、短時間多量降雪時の雪崩による被害軽減に資する雪崩危険度評価手法を提案することを目的として、雪崩発生時の気象と積雪条件、植生と地形条件、発生頻度および雪崩の衝撃圧と到達範囲の算出手法について検討を行った。

本研究では、短時間多量降雪時の気温と降雪強度を用いた斜面積雪の安定度と硬度の推定結果から、雪崩発生の気象と積雪条件を提示し（第2章）、短時間多量降雪時の現地観測の結果から、低気圧通過に伴う降雪時には雪崩発生に関して降雪結晶の種類や新雪密度に注意する必要があることを示した（第3章）。また、既往の文献レビューと樹林内における雪崩発生箇所の現地調査の結果から、立木間隔、胸高直径、樹種、斜面勾配などを要素とした雪崩発生の植生と地形条件を示した（第4章）。次に、短時間多量降雪時の雪崩発生条件を満たす降雪事例を過去の気象デー

タから抽出して、その発生頻度を簡便に推定する手法を提案し、発生頻度の地域分布を提示した（第5章）。そして、樹林内を流下する雪崩の運動モデルを考案し、雪崩発生区の傾斜角や発生層厚、樹林の有無による雪崩の衝撃圧と到達距離の算出手法を提案した（第6章）。最後に、これらの研究成果をとりまとめて、短時間多量降雪による雪崩危険度評価手法を提案した（第7章）。以下に、これらの結果の詳細を述べる。

### 2. 雪崩発生の気象と積雪の条件

短時間多量降雪時の雪崩発生の典型的な事例として、第1章で述べた2014年2月の例<sup>1)</sup>がある。2014年2月14日から16日にかけて、本州の南岸を通過した低気圧による大雪に伴い、普段は積雪が少ない関東甲信地方を中心とする広い地域で数多くの雪崩が発生した。このときの雪崩の特徴の一つとして、通常は雪崩が発生しにくい樹林内でも雪崩が発生した<sup>1)-7)</sup>。斜面に樹木が密に存在していれば、樹林は斜面積雪を支えてその移動を抑制し、雪崩発生予防の効果を有する<sup>8)</sup>。樹林内で発生する雪崩については、日本<sup>9), 10)</sup>、スイス<sup>11), 12)</sup>、イタリア<sup>13)</sup>、カナダ<sup>14)</sup>において調査事例がある。しかし、これらの調査事例のうち、統計的な解析により降雪深が大きいときに樹林内で雪崩が発生する傾向を示した例<sup>12)</sup>はあるものの、気温など他の要素を用いた樹林内における具体的な雪崩発生の気象および積雪の条件は、まだ十分に示されていない。

そこで、2014年2月の短時間多量降雪時における雪崩事例を対象に、地上気温と降雪強度の観測値を用いて斜面積雪の硬度和安定度を推定し、樹林内における雪崩の発生条件を調べた。

## 2.1 データと解析方法

### 2.1.1 雪崩事例

図-1に、2014年2月の大雪において樹林内で発生した雪崩事例(図-1の○)<sup>1), 4), 5), 7)</sup>の位置を示す。これらは乾雪表層雪崩で、2014年2月14日と15日に発生した。周辺の地形から推定される雪崩発生区での斜面勾配は42~45°、標高は1000~1100mである<sup>15)</sup>。ただし、雪崩発生区の樹木密度や樹種などの植生状況は不明である。

樹林内における雪崩発生箇所(の)の近傍気象観測所は、河口湖(KW)、みなかみ(MN)、桧枝岐(HN)である。秩父(CC)とみなかみ(MN)の周辺では、落石防止用ネットを積雪がすり抜けた事例(図-1の□)の報告がある<sup>7), 16)</sup>。また、樹林以外でも数多くの雪崩(図-1の×)が発生した<sup>1)</sup>。

### 2.1.2 気象データ

解析に用いたデータは、図-1の関東甲信地方の気象庁観測所15地点における気温、積雪深の1時間データである。

本研究では、1時間毎の積雪深差が正である場合を降雪ありと判断して、降雪の中断が5時間未満であれば一つの降雪期間が継続しているとみなした。降雪深(cm)は1時間毎の積雪深差の合計値で、平均降雪強度(cm/h)は降雪深を

降雪期間の継続時間で除して求めた。例として、図-2に山梨県河口湖の2014年2月14~15日の積雪深、降雪深、気温、風速の時系列を示す。河口湖では、降雪期間は14日5時から15日9時までの29時間で、この期間の降雪深は112cm、平均降雪強度は3.9cm/h、平均気温は-3.4℃であった。

なお、気象観測所と雪崩発生箇所の間には標高差がある。そのため、樹林内における雪崩発生条件の検討には、標高補正した気温を用いることにする。図-3は、気象観測所15地点の降雪期間の平均気温 $T_{av}$ と標高 $H$ の関係である。各地点における雪崩発生区に相当する標高1100mの気温を推定するにあたり、降雪期間の平均気温と標高との回帰式(図-3の実線)を用いた。

### 2.1.3 樹林内における雪崩発生条件の検討方法

樹林内の雪崩発生に関わる指標として、雪崩そのものの発生のしやすさと、樹林に対する積雪のすり抜けやすさが重要であると考えられる<sup>15)</sup>。

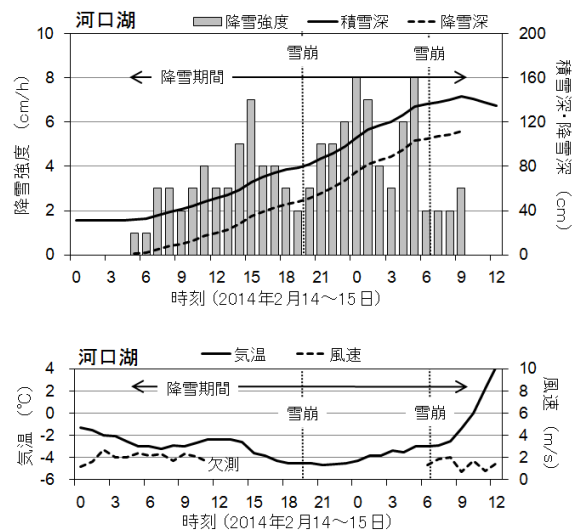


図-2 河口湖における積雪深、降雪強度、降雪深、気温、風速の時系列。

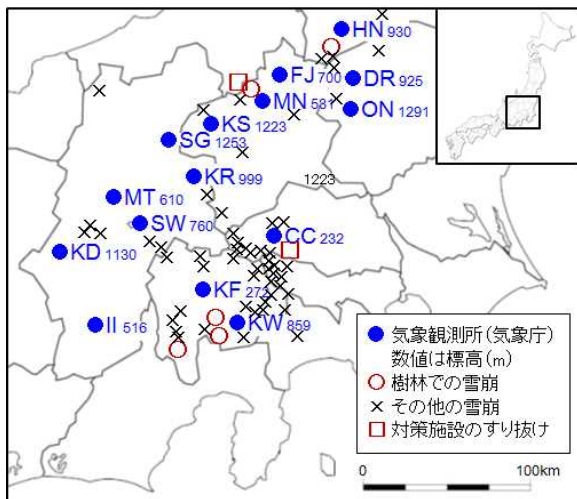


図-1 気象庁の気象観測所(●)と樹林内で発生した雪崩(○)<sup>1), 4), 5), 7)</sup>、その他の雪崩(×)<sup>1)</sup>、落石ネット等の対策施設を積雪がすり抜けた箇所(□)<sup>7), 16)</sup>の位置。HN：桧枝岐、DR：土呂部、ON：奥日光、FJ：藤原、MN：みなかみ、KS：草津、SG：菅平、KR：軽井沢、MT：松本、SW：諏訪、KD：開田高原、II：飯田、CC：秩父、KF：甲府、KW：河口湖。

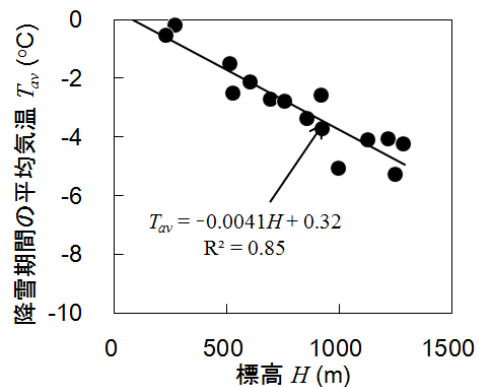


図-3 気象観測所15地点の降雪期間の平均気温 $T_{av}$ と標高 $H$ の関係。実線は回帰直線。

雪崩発生のしやすさに関する指標として斜面積雪の安定性が考えられ、ここでは積雪に対して斜面の流下方向へ働く応力と積雪の強度の比で表される安定度 $SI$ <sup>17)</sup>を用いる(式(1))。

$$SI = \frac{\Sigma_s}{h\rho g \sin \theta \cos \theta} \quad (1)$$

ここで、 $h$ は積雪深(m)、 $\rho$ は積雪密度( $\text{kg/m}^3$ )、 $g$ は重力加速度( $\text{m/s}^2$ )、 $\theta$ は斜面勾配( $^\circ$ )、 $\Sigma_s$ は積雪のせん断強度指数( $\text{N/m}^2$ )、 $h\rho g \sin \theta \cos \theta$ はせん断応力( $\text{N/m}^2$ )である。ここでは斜面勾配 $\theta$ は $45^\circ$ とした。積雪のせん断強度指数 $\Sigma_s$ は、式(2)の積雪密度 $\rho$ との関係式<sup>17)</sup>から推定した。

$$\Sigma_s = 3.10 \times 10^{-4} \rho_i^{3.08} \quad (2)$$

ただし、積雪密度 $\rho$ は圧密によって時間の経過とともに大きくなるので、式(3)より、積雪の圧密過程を考慮した時刻 $t$ (h)の積雪密度 $\rho_t$ ( $\text{kg/m}^3$ )を求めて<sup>17)</sup>、せん断強度指数 $\Sigma_s$ と安定度 $SI$ の推定に用いた。

$$\rho_t = \left\{ \frac{2Ag}{C} \cdot \cos^2 \theta \cdot t^2 + \rho_0^4 \right\}^{1/4} \quad (3)$$

$\rho_0$ は積もったばかりの初期積雪密度( $\text{kg/m}^3$ )、 $A$ は降雪強度( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}$ )である。降雪強度 $A$ は、積雪深差から求めた降雪強度 $A_{ob}$ ( $\text{m/h}$ )と、 $A = \rho_0 A_{ob}$ の関係となる。ここでは、初期積雪密度 $\rho_0$ を $50 \text{ kg/m}^3$ とした。 $C$ は圧密の進行に関する係数( $\text{N/(m}^2 \cdot \text{s} \cdot (\text{kg/m}^3)^4$ )で、以下に示す雪温 $T_s$ ( $^\circ\text{C}$ )との関係式<sup>18)</sup>を用いて求めた。

$$C = 0.21 \exp(-0.166T_s) \quad (4)$$

新雪では、雪温 $T_s$ は気温 $T$ に等しい( $T_s \approx T$ )と仮定できる。

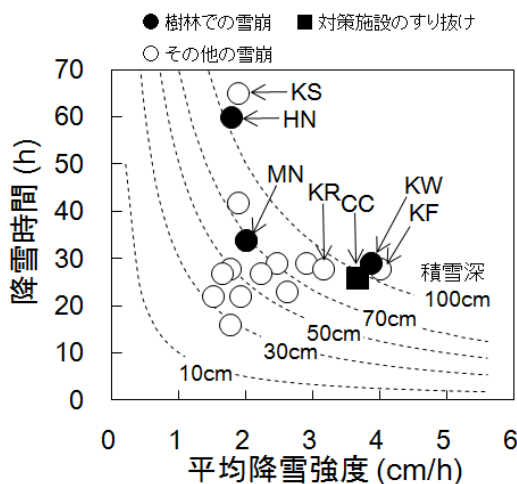


図-4 気象観測所 15 地点の降雪期間の時間と平均降雪強度の関係。地点の略記号は図-1に同じ。

次に樹林に対する積雪のすり抜けやすさに関する指標として積雪の硬度 $H$ を考える。積雪硬度 $H$ ( $\text{N/m}^2$ )は、圧縮粘性理論による積雪密度の計算値 $\rho$ を用いて、式(5)に示す密度との関係式<sup>19)</sup>から求めた。

$$H = 1.31 \times 10^{-5} \rho_i^4 \quad (5)$$

以上より、斜面勾配 $\theta$ が一定であれば、斜面積雪の安定度 $SI$ と硬度 $H$ は積雪密度 $\rho$ の関数となり、密度 $\rho$ は気温 $T$ と降雪強度 $A_{ob}$ の観測値から推定することができる。一般に、安定度 $SI$ が小さいほど斜面積雪が不安定で雪崩が発生しやすく、積雪硬度 $H$ が小さいほど積雪粒子間の結合が弱く樹林でも雪崩が発生しやすい。

## 2.2 結果

### 2.2.1 降雪状況の特徴

図-4は、図-1に示した気象観測所15地点の降雪時間と平均降雪強度、降雪深の関係である。付近の樹林内で雪崩が発生した観測地点(図-4の●)は、河口湖(KW)、みなかみ(MN)、桧枝岐(HN)である。降雪深が100cm以上となったのは、河口湖(KW)、甲府(KF)、桧枝岐(HN)、草津(KS)である。特に、河口湖(KW)や甲府(KF)は平均降雪強度が大きく、約30時間で降雪深が100cm以上になった。しかし、図-4からは樹林における雪崩の発生条件は明確ではない。

そこで、次の2.2.2項では、降雪期間のうち、特に強い降雪のあった時間帯の気温と降雪強度を用いて、2.1.3項で述べた斜面積雪の安定度と硬度を推定して、樹林内における雪崩発生条件を検討する。

### 2.2.2 樹林内における雪崩発生条件

図-5は、各気象観測地点の降雪期間のうち平均降雪強度が最も大きくなった12時間の平均気温と平均降雪強度の関係である。この気温は、図-3の方法で推定した標高1100mにおける気温である。また、図-5には2.1.3項で説明した方法で求めた斜面積雪の安定度 $SI$ (実線)と硬度 $H$ (破線)の推定値も示す。

図-5より、周辺の樹林内で雪崩が発生した河口湖(KW)、みなかみ(MN)、桧枝岐(HN)は、降雪時の平均気温が $-4^\circ\text{C}$ 以下で、平均降雪強度は3.5cm以上であった。この気温と降雪強度から推定される斜面積雪の安定度 $SI$ は1.5以下で、積雪硬度 $H$ は $400 \text{ N/m}^2$ 以下であった。また、落石防止ネットを積雪がすり抜けた事象(図-4の■)が発生した秩父(CC)も、これら樹林内における雪崩事例に近い気象および積雪状況であったと考えられる。よって、降雪時の気温と降雪強度を用いて推定される斜面積雪の安定度と硬度を指標に、樹林内における雪崩発生条件を示すことができると考えられる。つまり、樹林内の雪崩発生条件



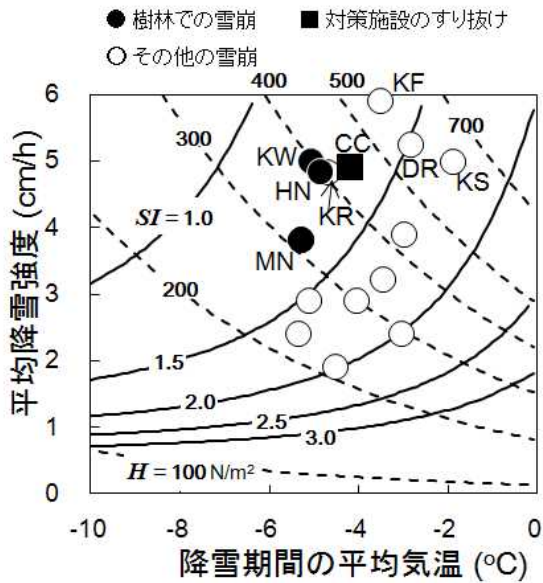


図-5 各気象観測地点における降雪期間のうち降雪強度が最大となった連続する12時間の平均気温と平均降雪強度の関係。斜面積雪の安定度  $SI$  (実線) と硬度  $H$  (破線) は、平均気温と平均降雪強度を用いた計算値。平均気温は図-3 の標高との回帰式から求めた標高1100mの値。地点の略記号は図-1に同じ。

として、降雪強度が大きい気象条件が12時間継続して斜面積雪が不安定となり(第一条件)、気温が低いために硬度が小さい積雪が形成される(第二条件)ので、樹林内でも雪崩が発生すると考えられる。

また、図-5より、軽井沢(KR)の気象条件は、樹林内で雪崩が発生した箇所の気象条件に近かった。軽井沢の周辺で、実際に樹林内において雪崩が発生したかは不明であるが、この地域でも樹林内で雪崩が発生しやすい状況にあったと考えられる。

### 2.3 雪崩発生時の気象と積雪条件のまとめ

2014年2月の短時間多量降雪時の樹林内における雪崩発生条件について、気象観測データを用いて、降雪時の気温と降雪強度を用いて推定される斜面積雪の安定度と硬度を指標に、樹林内の雪崩発生条件を調べた。その結果、降雪強度が大きい気象条件下で降雪開始から12時間程度で斜面積雪が不安定となり(第一条件)、かつ気温が低いために積雪硬度が小さい積雪が形成される(第二条件)ことにより、樹林内でも雪崩が発生したものと考えられる。

ただし、樹林内における雪崩発生条件には、植生や地形の条件も関係する<sup>20), 21)</sup>。雪崩発生の植生と地形条件については第4章で検討する。また、2014年2月の大雪に伴う雪崩発生に、雲粒の付着が少なく安息角の小さい降雪結晶が関

与した可能性が指摘されている<sup>1), 22)</sup>。そこで、次の第3章では、このような降雪結晶と雪崩発生との関係について現地観測を行った。

### 3. 雪崩発生時の気象および積雪観測

降雪に伴う雪崩発生において、雪崩が発生した箇所の積雪断面調査から、雲粒付着の少ない降雪結晶が積雪内に脆弱な層(弱層)を形成し、この弱層が長期間維持され、重大な雪崩事故の原因となっていることが指摘されている<sup>23), 24)</sup>。このような降雪結晶は、低気圧に伴う層状雲から降ることがあり<sup>25)</sup>、2014年2月の大雪に伴う雪崩発生に、雲粒の付着の少ない降雪結晶が関与した可能性が指摘されている<sup>1), 22)</sup>。

そこで、短時間多量降雪時の雪崩発生における気象および積雪条件の調査の一環として、降雪結晶の種類にも着目した気象と積雪の現地観測を、これまでに新潟県妙高市妙高山麓<sup>26)</sup>と北海道広尾町<sup>27)</sup>で行った。本章では、現地観測箇所の近傍で実際に雪崩が発生した、長野県松本市乗鞍高原における観測結果を報告する。この観測箇所近傍では、過去にも雪崩発生の報告があり、樹林内で発生した雪崩が道路に到達した事例もある<sup>9), 28)</sup>。

#### 3.1 観測概要

長野県松本市乗鞍高原の平地(北緯36度07分23秒、東経137度37分33秒、標高1458m、以下、観測サイトと呼ぶ)に気象測器を設置し、気温(サーミスタ温度計107、自然通風YG-41303)、風向・風速(風車型YG-5108)、積雪深(レーザー式KDC-S18-L-10)を観測した。降水量は、観測サイトから南東に約6.5km離れたアメダス奈川(北緯36度05分18秒、東経137度41分00秒、標高1068m)の観測値を用いる。

2018年1月22日から23日にかけて、観測サイト近傍の林道奈川安曇線B線(乗鞍高原～白骨温泉)において、雪崩状況を確認したところ、7箇所樹林または雪崩予防柵をすり抜けてデブリ(雪崩堆積物)が道路に到達していた。ここでは、上記期間の気象観測、観測サイトの積雪断面観測、ならびに観測サイト近傍の雪崩発生状況を調査した結果を述べる。

#### 3.2 気象概況

図-6(a)と(b)は、観測サイトにおける1月22日から23日の10分間ごとの気温と風向・風速の時間推移、図-6(c)は、積雪深(cm)と時間降雪深(1時間ごとの積雪深差の正值、cm/h)、アメダス奈川の時間降水量(mm/h)の推移である。図-7は、2018年1月22日12時から1月23日12時にかけての地上天気図である。観測サイトでは、低気圧の接近・通過に伴い、9時間(22日12時30分～21時30分まで)の連続降雪

で積雪深が45cm増加した。この9時間を、以下「低気圧性降雪期間<sup>22)</sup>」と呼ぶ(図-6)。特に、低気圧が接近した14時から17時にかけて降雪が強まり、時間降雪深は6cm/hを超えた(図-6(c))。低気圧性降雪期間において平均気温は-5.5°Cであり、風は静穏であった。低気圧の通過後、23日にかけて気圧配置は冬型へ移行した(図-7)。

### 3.3 積雪断面観測

#### 3.3.1 観測方法

同じ雪の量でも、長時間かかって積もるより、短時間に多量の雪が降り積もるときに雪崩発生の危険度が高まる<sup>29)</sup>。短時間の多量降雪による雪崩発生要因を明らかにするために先行して行った、新潟県妙高山麓<sup>26)</sup>と北海道広尾町<sup>27)</sup>における現地観測では、降雪結晶の種類に加えて、積雪の密度や硬度の時間変化に関する観測を行った。これらの方法に倣い、観測サイトでは以下の手順で積雪断面観測を実施した。

観測開始前の2018年1月22日9時頃に雪面に積雪層のマーカースとして赤い糸1、降雪後、1月22日15時頃に糸2、18時頃に糸3、21時30分頃に糸4を設置した(図-6(c))。糸をたよりに積雪断面を露出し、層1、層2、層3、層4の密度と硬度を、1月22日15時から23日12時の間に4回測定した(図-8(a))。密度は角型サンプラー(体積100cm<sup>3</sup>)、硬度は直径15mmの円形アタッチメントを付けたデジタル荷重測定器(ZP-500N)を用いて測定した。

なお、1月22日19時頃に幅30cm、高さ44cmの雪柱を切り出し、弱層テストのひとつであるショベルコンプレッションテストを実施したところ、糸1から上方に12cm(層1内)と27cm(層2内)付近で破壊が起こった。これらを弱層とみなし、それぞれ弱層1、弱層2とする(図-8(b))。

上載積雪荷重(Pa)は、断面積50cm<sup>2</sup>の円筒型サンプラーを用いて各積雪層の質量を測定し、サンプラーの断面積50cm<sup>2</sup>で除して求めた。密度(kg/m<sup>3</sup>)は角型サンプラーで各

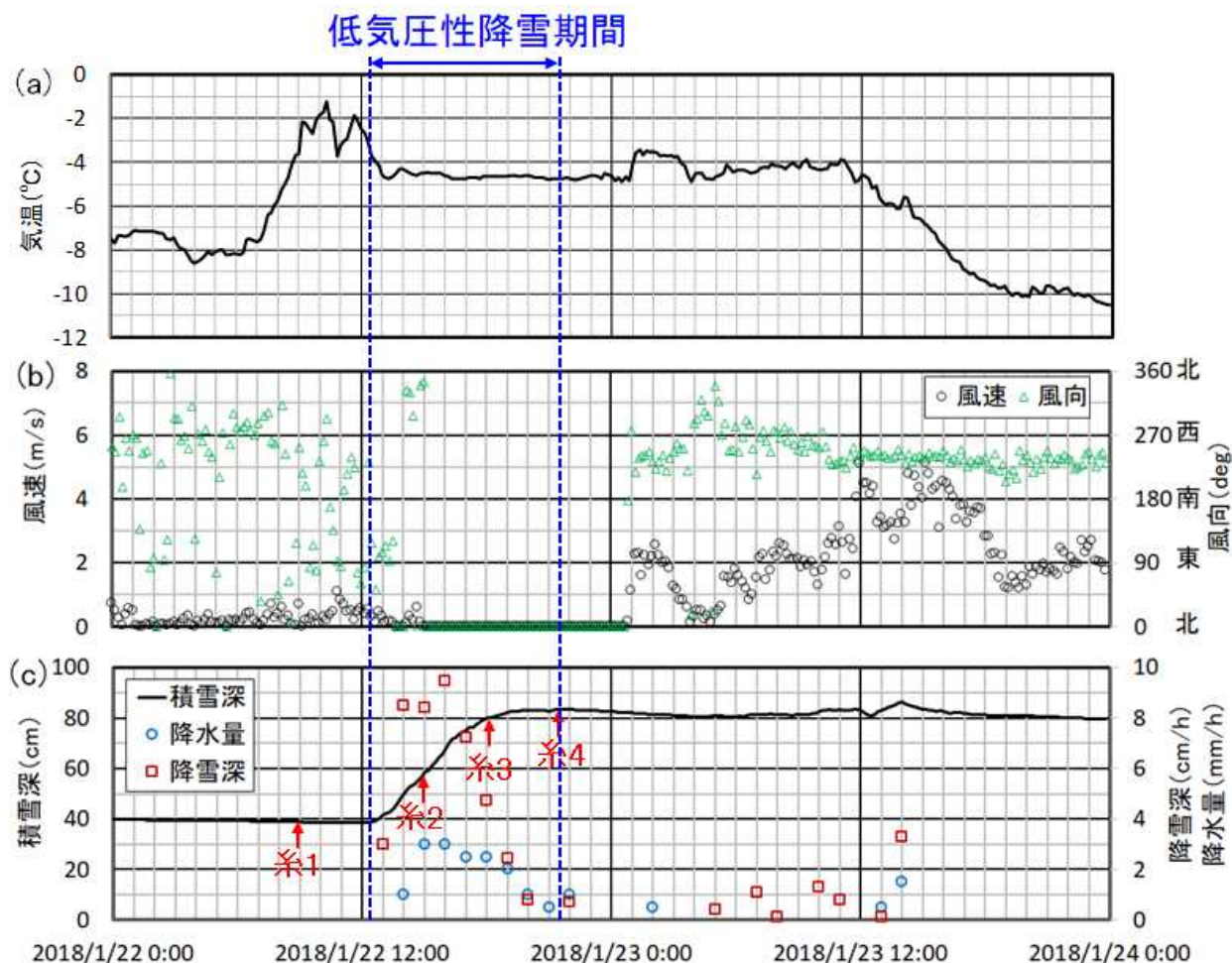


図-6 観測サイトにおける2018年1月22日から23日の(a)気温、(b)風向・風速、(c)積雪深および1時間あたりの降雪深と降水量の推移(降雪深と降水量以外は10分値、降水量は南東へ約6.7km離れたアメダス奈川の測定値で、(c)の赤矢印は積雪断面観測時にマーカースとなる糸1～糸4を設置した時刻)。

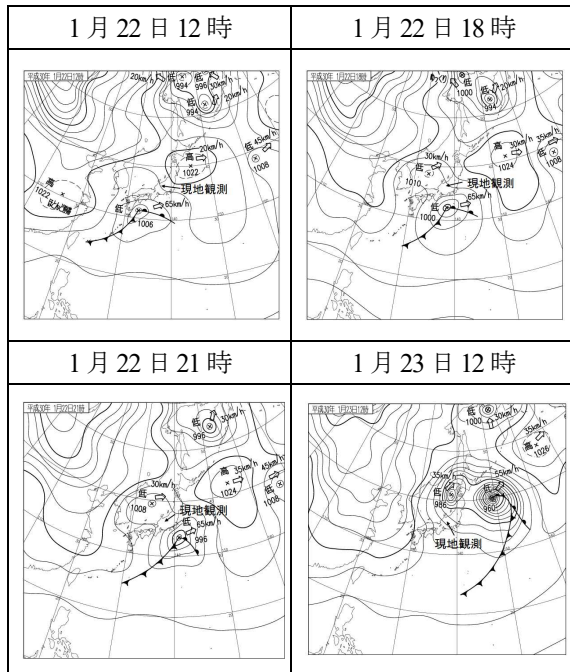


図-7 2018年1月22日12時から1月23日12時までの地上天気図（気象庁作成）

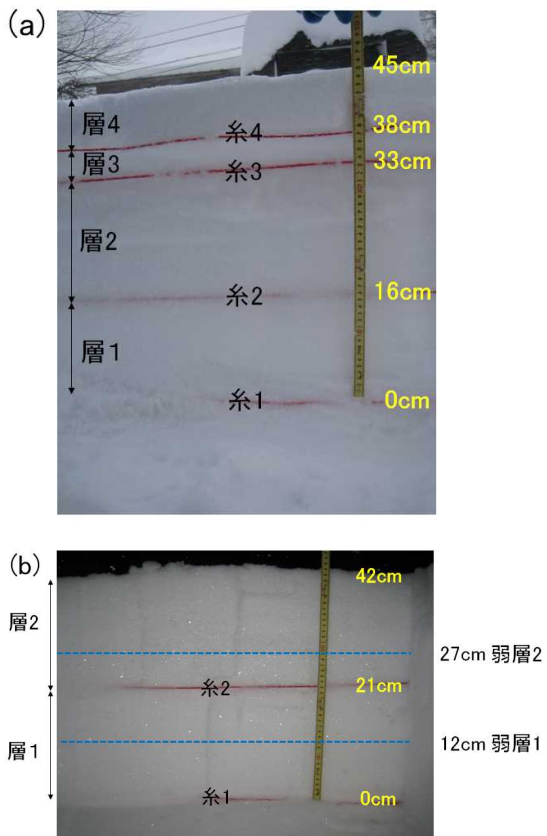


図-8 (a)2018年1月23日12時、(b)2018年1月22日18時の積雪断面。(b)から(a)にかけて、上載積雪荷重による圧密により層1と層2の厚さは小さくなっている。

積雪層の中央位置の雪を採取し質量を計測しサンプラーの体積 $100\text{cm}^3$ で除することによって求めた。いずれの測定も3回繰り返し、その平均値を求めた。

### 3.3.2 観測結果

図-9は、図-8の各層における降雪粒子を撮影(OLYMPUS TG-4)したものである。1月22日、低気圧の接近中や最接近時の低気圧性降雪期間に形成された層1、層2、層3における降雪粒子は、雲粒付着の少ない樹枝状や角

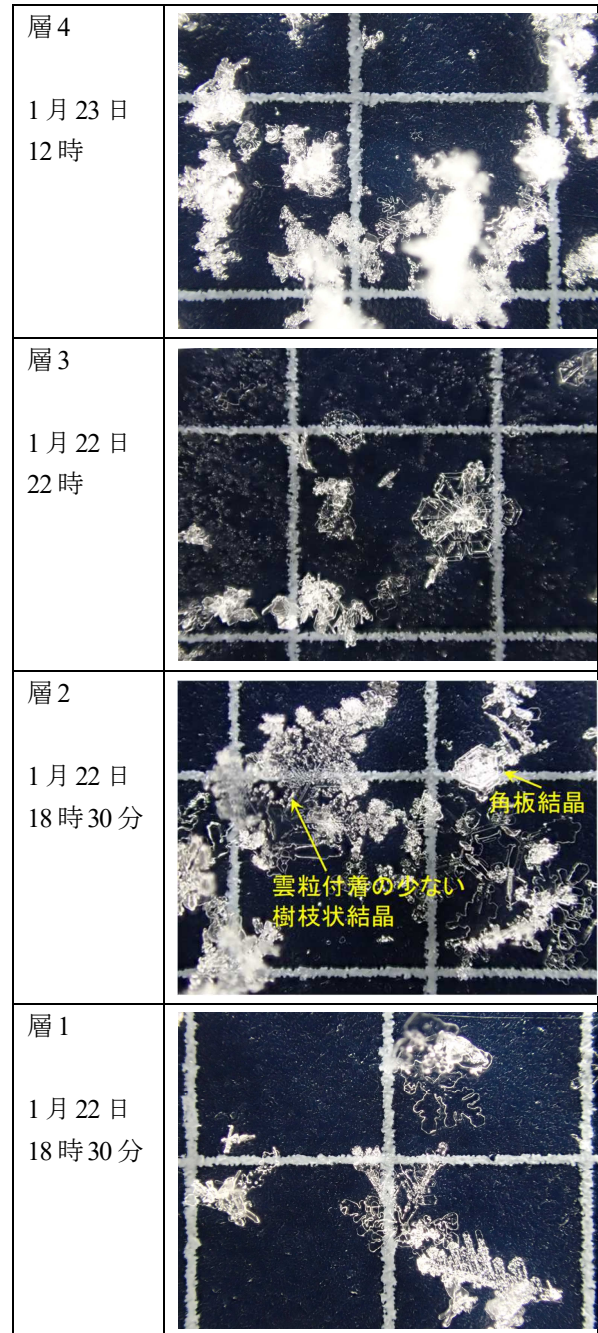


図-9 層1~4の雪粒子の写真(目盛は3mm間隔で、日時は撮影時刻)

板の結晶が多く見られた。冬型の気圧配置へと変化した1月23日に形成された層4では、雲粒付着の多い降雪粒子が確認された。弱層1、2においても雲粒付着の少ない樹枝状や広幅六花系の結晶が見られた。したがって、弱層を形成した新雪は、密度が小さい雲粒付着の少ない降雪粒子であることが示唆される。

図-10(a)は、糸と糸の間にある各積雪層の単位面積当たりの上載積雪荷重(Pa)に対する密度(kg/m<sup>3</sup>)の時間変化を示す。降雪により上載積雪荷重が大きくなると、各積雪層の密度が増加することがわかる。先行研究と同様、低気圧性降雪期間における密度(破線の黒丸)の時間変化は小さく<sup>26),27)</sup>、50から60kg/m<sup>3</sup>の範囲であった。

図-10(b)は、各積雪層の単位面積当たりの上載積雪荷重(Pa)に対する硬度(kPa)の時間変化を示す。1月22日15時から23日12時における層1の硬度は、2段階で変化した。1月22日18時までの降雪では、硬度に変化はない。層2の密度が小さいため上載積雪による圧密は進行しないものと考えられる。それ以降の時刻では、上載荷重(層3、層4)が増加すると硬度が0.5~2.5kPaの範囲で増加した。

低気圧性降雪期間では、気温が氷点下で風は静穏であったことから(図-6)、10分間で新雪層は圧密されないと仮定すると、10分間で降った新雪層の密度は、アメダス奈川の降水量と観測サイトの降雪深をもとに推定できる。

次に、低気圧性降雪期間における10分あたりの新雪層の密度(kg/m<sup>3</sup>)の推定値と、積算降雪深(積雪深差の正值の累計)の時間変化、ならびに1月22日18時の積雪断面をそれぞれ図-11(a)と(b)に示す。新雪層の密度の変化から、相対的に密度が小さい時刻は1月22日の14時00分と15時50分前後で、それぞれの密度は25~30 kg/m<sup>3</sup>と推定された(図-11(a))。乾いた新雪のせん断強度は密度のべき関数で示されることから<sup>29)</sup>、密度が小さいとせん断強度が小さ

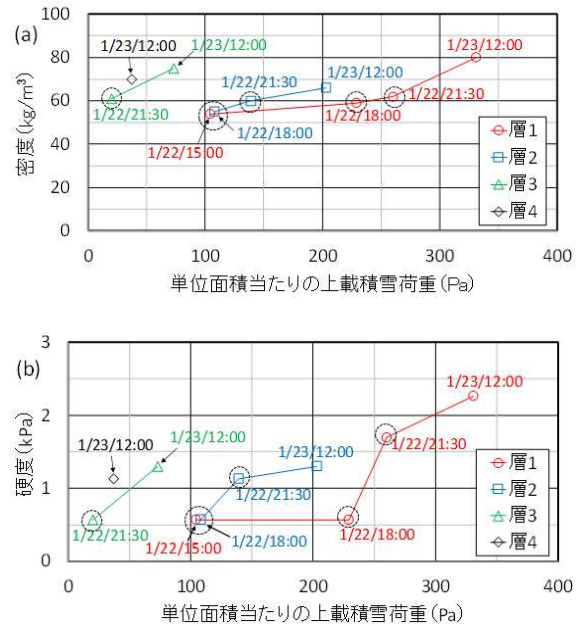


図-10 各積雪層の単位面積当たりの上載積雪荷重と(a)密度、(b)硬度の関係(破線の黒丸は低気圧性降雪期間のデータ)。

くなり、積雪層内で弱層になる可能性がある。1月22日18時の積雪断面で弱層はマーカとなる糸1から上方へ12cmと27cmの位置にあり、糸2は当日の15時に設置している(図-11(b))。以上から、相対的に新雪層の密度が小さかった1月22日の14時00分と15時50分前後はせん断強度も小さく、弱層1と2がそれぞれ形成されたと考えられる。なお、1月22日の14~15時の新雪層の最大密度は100 kg/m<sup>3</sup>程度、16~20時は主として50~100 kg/m<sup>3</sup>程度と推定されたことから、弱層1の上層と弱層2の上層はいずれの弱層よりも相対的に密度が大きい積雪であった可能性が考えられる。

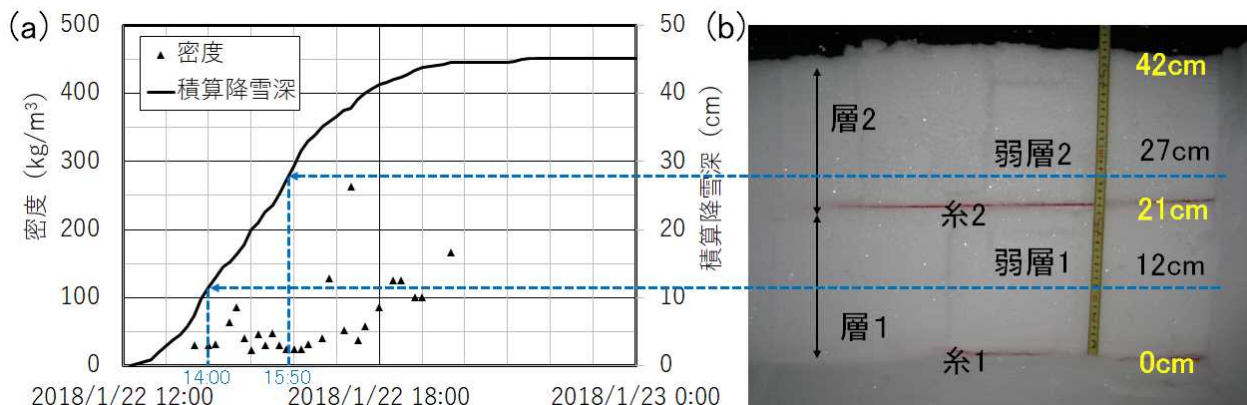


図-11 低気圧性降雪期間の(a)新雪層の密度(推定値)と積算降雪深の推移、ならびに(b)2018年1月22日18時の積雪断面。

### 3. 4 観測サイト近傍の雪崩発生状況

前述した観測サイト近傍の林道奈川安曇線B線における雪崩発生状況を受けて、2018年1月23日10時に、観測サイトから北北東に約1.1km離れた当該路線沿いの斜面斜度32度の樹林地(北緯36度07分55秒、東経137度37分52秒、標高1638m)で積雪断面観測を実施した。樹林地の主な樹種はカラマツ(落葉針葉樹)であり、23日10時に外気温は-

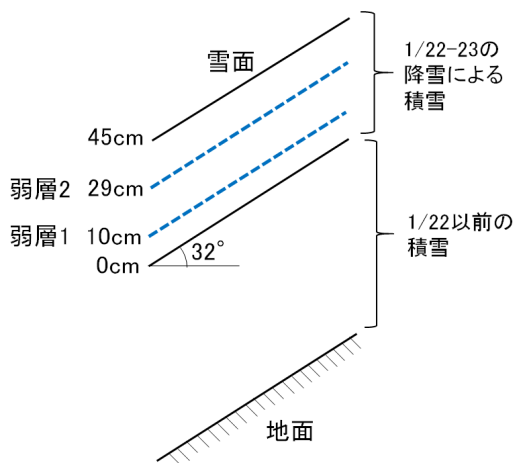


図-12 傾斜面での積雪断面の模式図

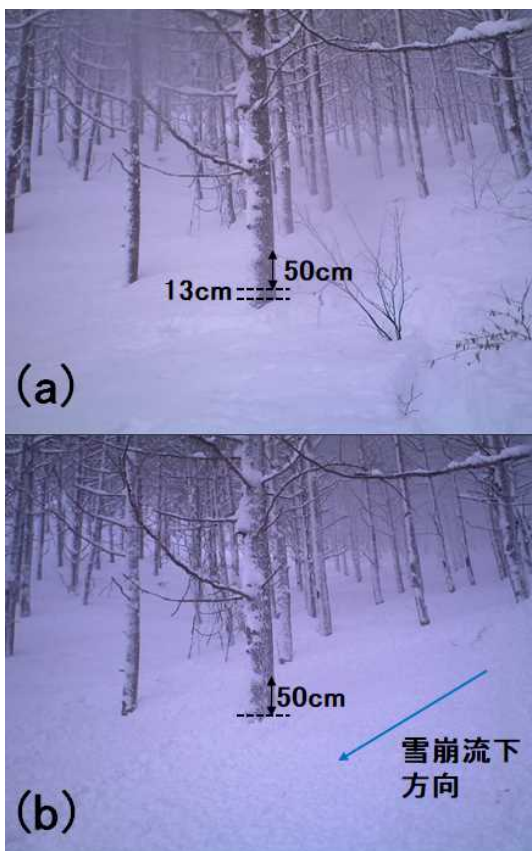


図-13 樹林内の表層雪崩、(a)雪崩発生前(2018年1月23日12時)、(b)雪崩発生後(2018年1月23日13時)

5.4℃、積雪深は135cmであった。新雪層厚は45cmであり、1月23日10時の観測サイトにおける降雪深と同じである。幅30cm、高さ60cmの雪柱を切り出し、ショベルコンプレッションテストを実施したところ、新雪層の最下端から10cmと29cm付近で破壊が起こった。これらの弱層は、観測サイトにおける積雪断面観測から検出された弱層に該当するとみなし、それぞれ弱層1、弱層2とする(図-12)。

同観測サイトで実施した積雪断面観測2~3時間後に、調査箇所近傍で樹林内をすり抜ける小規模な表層雪崩が発生した。図-13(a)は雪崩発生前の1月23日12時、図-13(b)は雪崩発生後の1月23日13時に樹林内を撮影したものである。雪崩は12時から13時の間に発生したものと考えられる。一番手前の樹木にスケールを黒矢印、雪崩流下方向を青矢印でそれぞれ示す。雪崩発生前の黒矢印下端は黒点線の範囲で露出しているが、雪崩発生後は黒矢印下端付近まで雪で覆われた。また、図-13(a)では右側に数本の低灌木が頭を出しているが、図-13(b)では雪崩により倒伏され雪に埋没している。スケールを示す樹木の画像から、当該箇所における堆積後の雪崩厚さを見積もると13cmと推定された。現地状況から、図-12に示す弱層2から上部の積雪が流下したものと考えられる。

### 3. 5 雪崩発生時の気象および積雪観測のまとめ

低気圧性降雪期間における短時間多量降雪時の雪崩発生では、3.3.2項の断面観測での結果を踏まえると、雲粒付着の少ない降雪結晶が弱層形成に関係しており、それが雪崩発生の要因になったと考えられる。このように形成された弱層は、新潟県妙高山麓<sup>26)</sup>と北海道広尾町<sup>27)</sup>における現地観測でも確認され、弱層の密度と硬度の時間変化の観測結果から、密度と硬度の小さい脆弱な状態が長い時間継続することが明らかになった。つまり、低気圧性降雪期間においては、降雪結晶の種類や新雪密度にも注意する必要があるといえる。ただし、降雪結晶の種類による影響を、第2章で示した雪崩発生の気象と積雪条件に取り入れるためには、これらの降雪結晶を含む積雪密度や硬度の時間変化に関する実測データをさらに蓄積して、式(3)の積雪の圧密の進行に関する係数Cを求める必要がある。

### 4. 雪崩発生の植生と地形の条件

短時間多量降雪時の雪崩発生において、第2章と第3章で示した雪崩発生の気象と積雪条件に加えて、雪崩発生箇所の植生や地形の条件も重要である。本章では、雪崩発生の植生と地形条件について、既往の文献レビューと、2014年2月の関東甲信地方の短時間多量降雪時の雪崩発生箇所のうち建物被害が確認された箇所の植生と地形の現地調

査を行った。

#### 4.1 文献調査

##### 4.1.1 立木間隔と立木密度、樹木の胸高直径

樹林による雪崩発生防止機能を考える上で、樹木が存在する密度(本/ha)や樹木の間隔(m)は、基本的かつ重要な植生の要素である。例えば、模擬樹林を用いた実験<sup>30)</sup>によると、勾配30°と40°の斜面において積雪の移動を抑制するための立木密度は、1000本/ha(平均立木間隔3.2m)と500本/ha(平均立木間隔4.5m)の間に存在する。また、勾配30°の斜面で、大きなグライド速度を防ぐためには、少なくとも300本/ha(平均立木間隔5.8m)の樹木<sup>31)</sup>が、勾配35°以上の斜面では1000本/ha以上の樹木<sup>32)</sup>が必要であるとの現地観測結果がある。

ただし、立木密度や立木間隔と雪崩発生との関係は、斜面勾配の他、樹木の胸高直径や樹種、雪崩の種類により異なる<sup>8), 11), 13), 31)-37)</sup>。例えば、胸高直径が6cm以上の樹木がない場合、斜面積雪は安定しない<sup>37)</sup>。また、若齢広葉樹林の場合、斜面積雪の移動は積雪内に埋まっている胸高直径6cm以上の立木の合計本数に大きく影響される<sup>36)</sup>。つまり、ある程度成長した太い樹木(胸高直径が6~10cm以上の樹木)が、雪崩発生防止に必要な立木間隔である。

図-14は、雪崩発生防止に必要な平均的な立木間隔<sup>8), 33), 35)</sup>と斜面勾配の関係である。図中の各曲線の下側は、樹木が密に存在しており斜面積雪が安定している状態、各曲線の上側は、斜面積雪が不安定で雪崩発生の可能性がある状態である。図-14の曲線aとbは、全層雪崩の発生防止に必要な立木間隔<sup>8)</sup>で、それぞれ胸高直径 $W$ が20cmと10cm

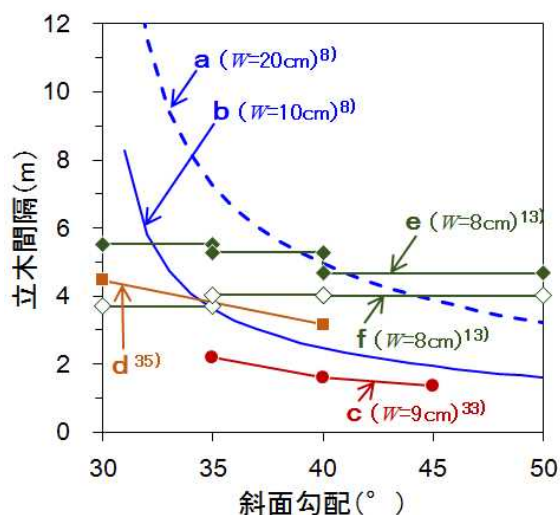


図-14 雪崩発生防止に必要な立木間隔と斜面勾配の関係(a~d)、および雪崩発生地(e)と非発生地(f)の立木間隔と斜面勾配の関係、 $W$ は樹木の胸高直径。

の場合である。石川ら<sup>8)</sup>は、樹木の胸高直径に応じた立木密度の算定式を提案しているが、全層雪崩の発生防止において、立木がいくら太くてもある程度以上の立木間隔になれば積雪は崩落するため、胸高直径が20cm以上の場合の計算は行っていない。図-14の曲線cは、表層雪崩の発生防止に必要な胸高直径9cmの樹木の立木間隔<sup>33)</sup>である。図-14のdは、スイスにおける胸高直径8cm以上の樹木の雪崩発生防止に必要な立木間隔<sup>35)</sup>である。さらに、図-14のeとfは、それぞれイタリアの樹林内で発生した雪崩55事例の発生箇所と近傍の同標高の非雪崩発生箇所の立木間隔の平均値<sup>13)</sup>である。雪崩発生の有無を分ける条件はこの2つの平均値(図-14のeとf)の間となる。図-14より、全体の傾向として、斜面勾配が大きいくまど雪崩発生防止に必要な立木間隔は小さくなる。また、全層雪崩より表層雪崩の発生防止に必要な立木間隔が小さく、斜面勾配35~45°では、表層雪崩に対して2.0~1.4m以下の立木間隔が必要となる。

図-15は、樹種別の平均的な胸高直径と立木間隔の関係を示す例<sup>38)-40)</sup>である。樹種によってばらつきはあるが、樹木が成長して胸高直径が大きくなると樹林としての平均的な立木間隔は大きくなる。特に、樹木が成長して雪崩発生防止機能を有するようになる胸高直径10cm以上になると、樹種によっては、図-14で示した表層雪崩の発生防止に必要な立木間隔より大きくなる。よって、自然の樹林では立木間隔は様々で、立木間隔が雪崩発生防止に必要な間隔より大きい箇所(雪崩発生防止機能を有しない箇所)が当然存在するといえる。つまり、樹林内における雪崩はそ

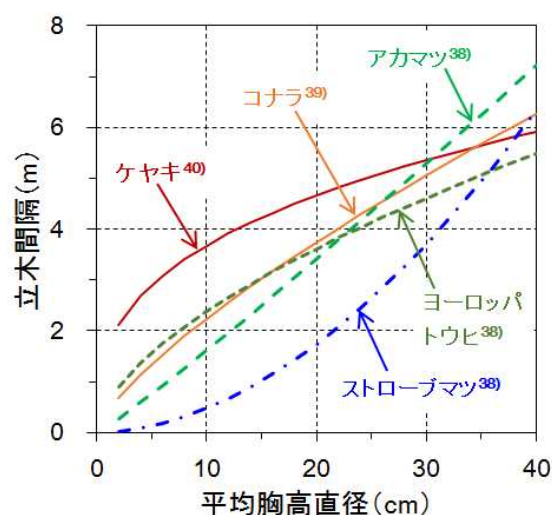


図-15 樹種別の胸高直径と立木間隔の平均的な関係の例、落葉広葉樹(コナラ、ケヤキ)と常緑針葉樹(マツ、トウヒ)

のような箇所が発生すると考えられる<sup>35), 41)</sup>。

#### 4.1.2 樹種

樹林内における雪崩発生には樹種も大きく影響し、常緑針葉樹林に比べて落葉する広葉樹林の雪崩発生防止機能は限定的となり、より小さい立木間隔が必要となる<sup>11), 34), 35)</sup>。Schneebeli and Meyer-Grass<sup>11)</sup>によるスイス・アルプスの樹林内で発生した雪崩112事例の調査結果では、常緑針葉樹林、落葉針葉樹林、広葉樹林の順に、雪崩発生箇所の立木間隔は小さくなる。常緑針葉樹は、降雪の遮断によって地面の積雪量を低下させるほか、葉の付いた枝が積雪に埋没することで斜面積雪に対するアンカーの役割を果たす<sup>35), 42), 43)</sup>。一方、落葉する広葉樹林は、降雪の遮断率が低いために樹林内の積雪が多く、またアンカー効果も小さい<sup>35), 43)</sup>。なお、降雪の遮断は、単に葉の有無だけではなく幹からの分枝状態も影響し、常緑針葉樹のスギや落葉針葉樹のカマツの幹から分枝している1次枝の本数は、広葉樹のミズナラやブナの約2倍であり、これが針葉樹の降雪遮断率が高い要因の一つである<sup>44)</sup>。

図-14で示した雪崩発生防止に必要な立木間隔のうち、全層雪崩に対する関係(図-14のb)<sup>8)</sup>は、東北地方の広葉樹林の現地調査結果に基づくものである。これに対して、雪崩発生地の立木間隔の平均値(図-14のe)<sup>13)</sup>は、イタリアの常緑針葉樹や落葉針葉樹が支配的な樹林における調査結果である。日本とイタリアの気候や積雪の地域性の違いもあると考えられるが、図-14において前者<sup>8)</sup>より後者<sup>13)</sup>が示した立木間隔が大きいのは、樹林の雪崩防止機能の樹種の違いによる影響を示していると考えられる。なお、2014年2月の関東甲信地方の大雪時において、山梨県早川周辺の雪崩62例のうち32例が落葉樹林で発生し、常緑樹林での雪崩発生はなかった<sup>20)</sup>。

以上より、樹林内における雪崩発生において、落葉する広葉樹林が最も注意を要する樹種といえる。

#### 4.1.3 樹冠密度

雪崩発生に関わる樹木の空間的な密度を表す指標には、樹冠によって地表が覆われている割合を表す樹冠疎密度(以下、樹冠密度)がある<sup>34), 45), 46)</sup>。ただし、樹冠密度は樹種による差が大きく、同じ樹冠密度でも樹種によって立木間隔は異なると考えられる。また、降雪を遮断する効果が大きい常緑針葉樹林では、樹冠密度が樹林内の雪崩発生に影響すると考えられるが、広葉樹林の場合は、落葉する前に測定した樹冠密度が、雪崩が発生する冬季も同じとは限らない。さらに、針葉樹林内の雪崩発生地と同標高の近傍地の非雪崩発生地の植生を比較したところ、立木間隔には差がみられたが、樹冠密度には明確な差はみられなかったと

の報告<sup>13)</sup>がある。

以上より、樹冠密度に関しては雪崩発生に関係するか否か結果が分かっている。よって、雪崩発生に関わる樹木の空間的な密度を表す指標として、樹冠密度より立木密度(間隔)に着目する方がよいと考えられる。特に、落葉する広葉樹林の場合、樹木による降雪遮断がほとんどないため、冬季における樹冠密度は立木間隔などに比べて雪崩発生に対する影響は小さいと考えられる。

#### 4.1.4 地形条件

樹林内の雪崩発生に関わる地形条件として重要なのは、一般的な雪崩発生条件と同様に斜面勾配であり、樹種によって雪崩発生の可能性のある斜面勾配は異なる。例えば、Frehnerら<sup>35)</sup>によると、常緑針葉樹林であれば勾配35°以下の斜面では雪崩発生の可能性は低いが、落葉針葉樹林ではそれより緩い勾配の30°の斜面でも発生する。また、相浦<sup>32)</sup>の富山県における常緑針葉樹林(スギ)と広葉樹林(ブナ)内の積雪移動量の観測結果によると、勾配35°以上の斜面で積雪は不安定になる。なお、樹林内の雪崩発生と斜面勾配の関係は、通常、立木間隔や樹種、胸高直径などの植生条件と合わせて調べられている(図-14)。

その他の地形要素として、標高や斜面方位と雪崩発生との関係を調査した例<sup>13)</sup>や斜面の断面形状について調べた例<sup>47)</sup>はあるが、これらには地域性がみられるため、現時点で標高や斜面方位を樹林内の雪崩発生条件に加えることは難しい。また、地面の凹凸も雪崩の発生に影響するが、積雪が存在すると地面の凹凸の影響は小さくなるため、表層雪崩を考える場合はその重要性は低いと考えられる。

#### 4.1.5 着目すべき植生と地形の要素

以上、文献レビューの結果、樹林内における雪崩(ここでは、乾雪表層雪崩を対象とする)の発生に関わる植生条件として着目すべき要素は、立木間隔(立木密度)、胸高直径、樹種であり、地形条件として着目すべき要素は斜面勾配である。特に、図-14のように、雪崩発生防止に必要な立木間隔と斜面勾配の関係を、胸高直径や樹種、雪崩の種類に応じてあらかじめ整理しておく、雪崩が発生する可能性のある箇所の把握に活用できると考えられる。

### 4.2 雪崩発生箇所の現地調査

#### 4.2.1 雪崩発生箇所の現地調査の概要

2014年2月14~15日の関東甲信地方の大雪に伴う乾雪表層雪崩の発生箇所のうち、建物被害があった山梨県富士河口湖町(北緯35度29.3分、東経138度36.0分、標高1048m)、東京都奥多摩町(北緯35度49.3分、東経139度5.9分、標高770m)、埼玉県秩父市(北緯36度1.1分、東経138度48.4分、標高1075m)の事例<sup>48)</sup>について、雪崩が発生したと考えら

れる斜面で、植生と地形状況の現地調査を行った。調査は、富士河口湖町は2014年6月17日、奥多摩町は同年6月18日、秩父市は同年10月30日に実施した。

#### 4.2.2 雪崩発生箇所の植生と地形の状況

2014年2月の関東甲信地方の大雪に伴う雪崩が発生した3箇所の現地調査の結果、雪崩が発生したと考えられる箇所の植生は、図-16に示すように、いずれも樹高が最大15m前後、胸高直径5~30cmの広葉樹林で、立木間隔は1.5~3.0mであった。

図-17では、今回の調査箇所と既往研究による雪崩発生防止に必要な立木間隔と斜面勾配の関係を比較した。秩父市の雪崩発生箇所では、全層雪崩に対しては立木間隔が小さく斜面積雪は安定だが、表層雪崩に対しては立木間隔が大きく斜面積雪は不安定な状態であったと考えられる。奥多摩町の雪崩発生箇所では、全層雪崩に対しても立木間隔



図-16 雪崩発生箇所の植生状況の例  
秩父市、2014年10月30日、斜面勾配は36°。

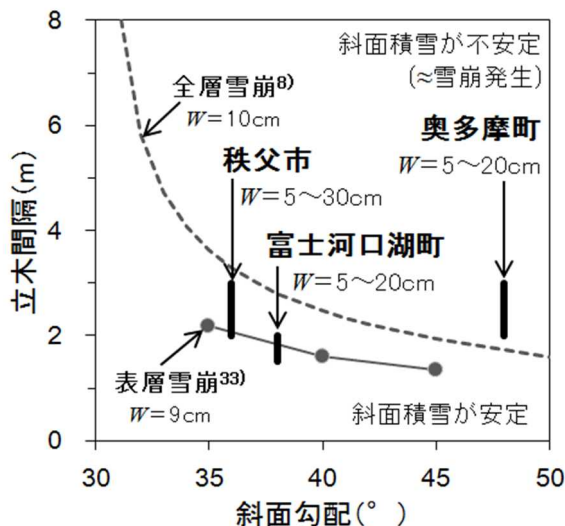


図-17 雪崩発生箇所の立木間隔と斜面勾配、雪崩発生防止に必要な立木間隔と斜面勾配の関係<sup>8), 33)</sup>、Wは胸高直径。

が大きく斜面積雪は不安定であったと考えられる。図-17の立木間隔と斜面勾配の関係との比較からみた雪崩発生条件において、これら2箇所では、いずれも樹林内で表層雪崩が発生する可能性があったと考えられる。一方、富士河口湖町の雪崩発生箇所における斜面勾配と立木間隔の関係は、表層雪崩の発生条件の境界上にある。樹木が密に植生して斜面積雪が安定している箇所があるものの、そのなかで比較的立木間隔が大きい箇所で雪崩が発生したと考えられる。よって、短時間の多量降雪時には樹林内でも雪崩が発生する可能性があり、特に2014年2月の事例では、広葉樹林の中の表層雪崩の発生防止に必要な立木間隔より大きい箇所で、乾雪表層雪崩が発生したと考えられる。

#### 4.3 雪崩発生の植生と地形条件のまとめ

雪崩発生の植生と地形条件に関する文献レビューと、2014年2月の短時間多量降雪時における建物被害のあった雪崩箇所の現地調査の結果、樹林内における雪崩(ここでは、乾雪表層雪崩を対象とする)の発生に関わる植生条件として着目すべき要素は、立木間隔(立木密度)、胸高直径、樹種であり、地形条件として着目すべき要素は斜面勾配であることを示した。特に、図-14や図-17に示す雪崩発生防止に必要な立木間隔と斜面勾配の関係は、雪崩が発生する可能性のある箇所の把握に活用できると考えられる。なお、短時間多量降雪時の雪崩は、これらの植生と地形の条件と、第2章や第3章で示した気象や積雪条件が重なって発生する<sup>21)</sup>。次の第5章では、これまでに示した雪崩発生条件を活用した雪崩発生頻度解析手法を検討する。

#### 5. 短時間多量降雪による雪崩の発生頻度

災害に関わる現象の規模や発生頻度を把握することは、防災や減災の対策を計画するにあたり重要である。雪崩に対しても発生頻度や発生確率を求める方法が提案されているが、雪崩の長期的な発生記録を有する地域は非常に限られ、特に日本国内では雪崩の履歴データから発生頻度を解析することは難しい。そこで、本章では、雪崩の長期的な発生記録が無い地域における雪崩発生頻度解析手法を提案することを目的として、第2章から第4章で示した雪崩発生条件を満たす降雪事例を過去数十年間の気象データから抽出し、その発生頻度を簡便に推定する手法の検討を行い、発生頻度の地域分布を求めた。

##### 5.1 対象とする雪崩発生条件について

気象データを用いた雪崩の発生頻度解析として、ここでは、第2章の図-1に示す2014年2月の関東甲信地方の多量降雪に伴う雪崩事例を対象とする。図-18は、この多量降雪時に樹林内で発生した雪崩とその他の雪崩の発



生条件を、近傍の気象観測データを用いて示したもので、各気象観測所の降雪期間の中で12時間の降雪深が最も大きくなったときの平均気温と降雪深の関係である<sup>15), 21), 49)</sup>。なお、図-18は、2.2.2項の図-5の縦軸の降雪強度を、12時間の降雪深に直したものである。図中に示す実線は、2.1.3項で示した斜面積雪の安定度 $SI$ の推定値<sup>15), 49)</sup>で、斜面積雪に作用するせん断方向の応力と積雪強度の比で表され、 $SI$ が小さいほど斜面積雪が不安定で雪崩が発生しやすい状況と考えられる。図-18より、雪崩(●)と×は斜面積雪の安定度 $SI$ が2.0以下となる条件で発生しており、特に樹林内における雪崩(●)はさらに安定度 $SI$ が小さい条件で発生したと推定される。この条件となったのは、群馬県のみなかみ、福島県の桧枝岐、山梨県の河口湖、埼玉県秩父の気象庁アメダスで、降雪時の平均気温が $-4^{\circ}\text{C}$ 以下で、降雪深が12時間で45cm以上(図-18の赤枠内)であった。また、第4章で示した植生条件や斜面勾配なども考慮した樹林内における雪崩発生条件を検討した結果<sup>21)</sup>によると、12時間の降雪深の条件は斜面勾配に応じて45~50cmとなる。これに加え、降雪前のある程度の積雪が存在することも樹林内における雪崩発生に必要な条件である<sup>50)</sup>。以上、多量降雪に伴う樹林内の雪崩発生条件<sup>15), 21), 49), 50)</sup>をまとめると、

- ・降雪深 $S_{12}$ ：12時間で45cm以上(斜面勾配 $45^{\circ}$ )または50cm以上(斜面勾配 $30^{\circ}$ )
  - ・気温 $T_{12}$ ： $-4^{\circ}\text{C}$ 以下(上記12時間の平均気温)
  - ・積雪深 $SD$ ：50cm以上(上記12時間の1時間前)
- となる。ここでは、気象データを用いた雪崩の発生頻度解析の試みとして、上記の短時間多量降雪に伴う樹林内における雪崩発生条件に着目することとする。

## 5.2 解析に用いたデータ

雪崩発生条件を満たす降雪事例の抽出(5.3節)には、積雪深と気温、降水量の1時間間隔の観測データが必要である。よって、積雪深と気温、降水量の1時間間隔の観測データが得られている北海道から島根県にかけての積雪地域における257箇所の気象庁観測地点と40箇所の北海道開発局道路テレメータ地点(図-19)(合計297箇所)を対象に解析を行った。

降雪事例の抽出を行った期間は、11月から翌年4月までを一冬季として、観測地点により異なるが気象庁観測地点では、積雪深の1時間間隔の観測開始から2018年4月までの16~35冬季(年)、北海道開発局道路テレメータ地点では2004年11月から2019年4月までの13~15冬季(年)である。ただし、12月から2月の期間に240時間以上の連続した欠測がある冬季(年)は解析から除外した。ま

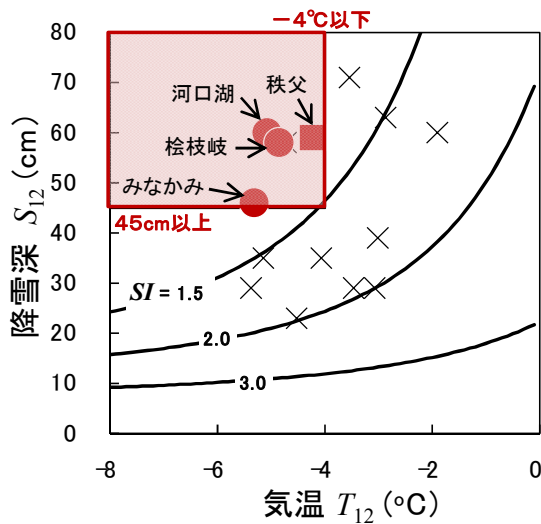


図-18 2014年2月14-15日の大雪に伴う雪崩発生条件。雪崩発生箇所近傍の各気象観測所における降雪期間のうち連続する12時間の降雪深の最大値 $S_{12}$ と平均気温 $T_{12}$ の関係<sup>15), 21), 49)</sup>(2.2.2項の図-5を基に作成)。斜面積雪の安定度 $SI$ (実線)は、2.1.3項で示した気温と降雪深を用いた計算値<sup>15), 49)</sup>。●：樹林内で発生した雪崩、×：その他の雪崩、■：落石ネットなどの対策施設を積雪がすり抜けた事例。

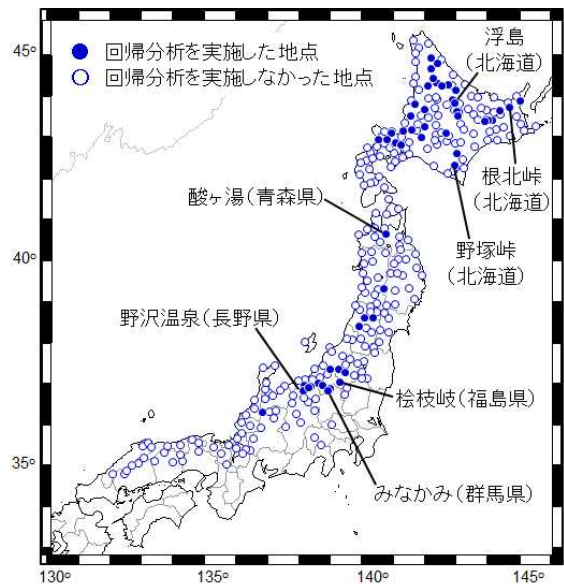


図-19 解析対象地点の分布。積雪地域の気象庁観測地点257箇所と北海道開発局道路テレメータ地点40箇所の分布。●は12時間降雪深 $S_{12}$ の発生頻度の推定式を得るための回帰分析を実施した地点、○は回帰分析を実施しなかった地点。

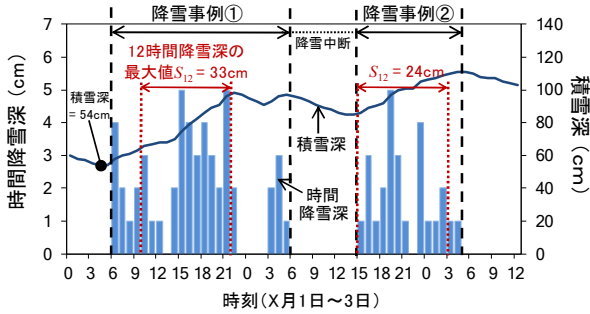


図-20 降雪事例の抽出と12時間降雪深  $S_{12}$  の算出例

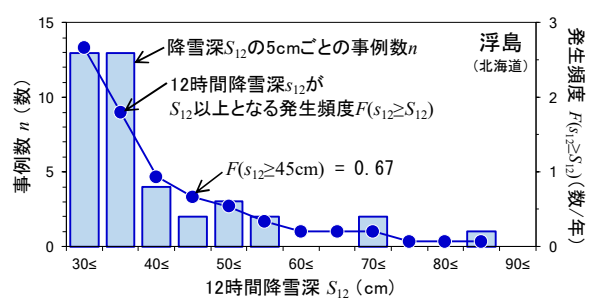


図-21 12時間降雪深  $S_{12}$  の5cmごとの事例数  $n$  と発生頻度  $F(s_{12} \geq S_{12})$  の算出例。

た、気象庁観測地点8箇所は、移転等により積雪深の統計切断があるため、統計切断の前後で年数の多い期間を解析の対象とした。

### 5.3 降雪事例の抽出方法

降雪事例の抽出例を図-20に示す。降雪事例の抽出では、降雪開始後の1時間間隔の積雪深(図-20の線グラフ)の差の正値を、その1時間における降雪深(図-20の棒グラフ)(以下、時間降雪深とする)と考え、降雪の中断(時間降雪深 $\leq 0$ cm)が5時間未満であれば連続した降雪の事例とした。次に、抽出した降雪事例を対象に、降雪期間の中で連続する12時間の時間降雪深の累積値が最大となる期間を調べ(図-20の赤い矢印の期間)、その12時間の降雪深  $S_{12}$  と平均気温  $T_{12}$  を算出した。ここでは、12時間降雪深  $S_{12}$  が30cm以上となる降雪事例を対象とした。図-20に示す例では、降雪事例①の10時から21時までの12時間の降雪深  $S_{12}$  が解析対象となる。さらに、5.1節の雪崩発生条件を満たす事例を抽出するため、12時間の平均気温  $T_{12}$  が $-4^{\circ}\text{C}$ 以下で、この12時間の1時間前の積雪深  $SD$  が50cm以上である降雪事例を抽出した。

降雪事例の抽出において、積雪深データに欠測がある場合は、連続する欠測期間が6時間までであれば、積雪深の増加分を1時間間隔の降水量データで按分することで欠測値を補間した。積雪深の欠測期間の降水量が0mmまたは欠測の場合は、線形で補間した。また、積雪深の1時間の増加が30cm以上の場合、この値を異常値と考え、この1時間の前後に積雪深の増加がみられない場合は欠測とし、それ以外は上記の方法で補間した。なお、抽出した降雪事例のうち、積雪深の補間データが50%以上含まれる事例は解析から除外した。その他のデータの取扱いについては、既報<sup>51),52)</sup>を参照していただきたい。

### 5.4 発生頻度解析の方法

5.3節の方法で抽出した各観測地点における降雪事例について、まず12時間降雪深  $S_{12}$  の5cmごとの事例数  $n$  を求め(図-21の棒グラフ)、降雪深  $S_{12}$  の大きい階級か

ら事例数  $n$  を累積した値を求めた。この累積値を観測年数で除した値を、ここでは発生頻度  $F(s_{12} \geq S_{12})$  (数/年) とする(図-21の線グラフ)。この発生頻度  $F(s_{12} \geq S_{12})$  の意味は、任意の12時間降雪深  $s_{12}$  が  $S_{12}$  cm以上となる事例の1年あたりの発生数である。図-21に示す道路テレメータ地点の浮島の例では、任意の12時間降雪深  $s_{12}$  が45cm以上となる発生頻度  $F(s_{12} \geq 45\text{cm})$ 、つまり5.1節の雪崩発生条件を満たす事例の発生頻度は0.67であり、約3年に2回の発生頻度となる。このように求めた雪崩発生条件を満たす降雪事例の発生頻度として、12時間降雪深  $S_{12}$  が45cm以上となる発生頻度の地域分布を求めた。

次に、12時間降雪深  $S_{12}$  の発生頻度を推定する式を得るため、12時間降雪深  $S_{12}$  とその発生頻度  $F(s_{12} \geq S_{12})$  の関係が指数関係に従うと仮定して、降雪深  $S_{12}$  と発生頻度  $F(s_{12} \geq S_{12})$  の対数に対して回帰分析を行った。ただし、事例数が10未満または降雪深  $S_{12}$  の5cmごとの階級数が3以下の地点は、回帰式を得るための十分なデータがないと判断して回帰分析は行わなかった。その結果、残る57の観測地点(図-19の●)を対象に、12時間降雪深  $S_{12}$  の発生頻度の推定式を得るための回帰分析を行った。

### 5.5 雪崩発生条件を満たす事例の発生頻度分布

図-22は、抽出した降雪事例の12時間降雪深  $S_{12}$  が45cm以上となる発生頻度の地域分布である。つまり、5.1節の雪崩発生条件を満たす降雪事例の発生頻度である。図-22より、群馬・長野・新潟・福島の県境付近、青森県酸ヶ湯、北海道の日高山脈や大雪山系、阿寒と知床の周辺、夕張山地の三芦(図-22の●)で0.5以上(2年に1回程度の発生)と発生頻度が高い。ただし、発生頻度が1.0を上回る(毎年発生する)地点はなかった。

群馬・長野・新潟・福島の県境付近では、2014年2月の大雪時に樹林内において雪崩が発生し、5.1節の雪崩発生条件を満たしていた(第2章)<sup>15),21)</sup>。図-22より、この地域は本州の中でも短時間多量降雪に伴う樹林内の雪崩

発生条件を満たす事例の発生頻度が高い地域といえる。一方、同じ2014年の大雪では、山梨県の河口湖周辺でも樹林内において多くの雪崩が発生した<sup>15), 21)</sup>。しかし、解析を行った河口湖の過去15年間では、2014年2月の事例が唯一<sup>5)</sup>。1節の雪崩発生条件を満たす結果となり、発生頻度は0.07であった。この地域では、2014年2月の大雪に伴う雪崩発生が特異な事象であったといえる。

北海道では、日高山脈や大雪山系周辺、阿寒と知床の周辺、夕張山地の三芦で短時間多量降雪に伴う樹林内の雪崩発生条件を満たす事例の発生頻度が高い結果となった。ただし、実際の樹林内の雪崩発生には、気象や積雪の条件のみならず植生や地形の条件も影響する(第4章)<sup>21)</sup>。例えば、大雪山系や阿寒と知床の周辺では常緑針葉樹が多いが、常緑針葉樹は落葉広葉樹に比べて積雪内に埋まった枝葉によるアンカー効果や降雪を枝葉に捕捉して林内の積雪深を減少させることなどにより、雪崩の発生を抑制する効果がある<sup>21)</sup>。図-22の結果を用いて短時間多量降雪に伴う樹林内の雪崩発生頻度を推定する場合は、植生や地形の条件も考慮して総合的に検討する必要がある。

一方、樹林内の雪崩と同様の気象条件で発生する事象に、斜面積雪が雪崩予防柵面をすり抜ける現象がある<sup>15), 53)</sup>。この柵面をすり抜ける現象は、大雪山系周辺や空知の三笠周辺などで発生事例があり<sup>53)</sup>、図-22に示す雪崩発生条件を満たす降雪事例の発生頻度が高い地域と対応している。また、図-22の発生頻度が高い群馬県のみなかみで

は、2014年2月の大雪時に落石防止用のネットを斜面積雪がすり抜けた<sup>15)</sup>。よって、図-22は柵面やネットを斜面積雪がすり抜ける現象の発生頻度を検討する際の参考資料として活用できると考えられる。

本州の低標高地域や北海道の太平洋側沿岸地域では、雪崩発生条件を満たす降雪事例が見られない地点(図-22の○)が多い。しかし、長野県などの標高1500m以上の地域では、過去に樹林内における雪崩発生の報告<sup>9)</sup>がある。この解析で用いた本州における観測地点の最高標高が奥日光の1292mであることから、本州の高標高地域の発生頻度を網羅できなかった可能性がある。また、図-22の発生頻度は、雪崩発生の記録から直接求めたものではなく、気象データから雪崩発生条件を満たす事例を解析して得た雪崩発生の可能性(ポテンシャル)を示すものであり、実際の雪崩発生には、前述の植生や地形の条件<sup>21)</sup>も影響することに留意が必要である。このような留意点はあるものの、図-22により、短時間多量降雪に伴う樹林内の雪崩発生頻度の地域分布を示すことができたと考えられる。

### 5.6 雪崩発生条件を満たす事例の発生頻度の推定式

図-23に、12時間降雪深 $S_{12}$ の発生頻度の推定式を得るための回帰分析結果の例として、北海道の浮島と根北峠、福島県の桧枝岐、群馬県のみなかみにおける12時間降雪深 $S_{12}$ と発生頻度 $F(S_{12} \geq S_{12})$ の関係を示す。縦軸の発生頻度は対数スケールで示し、図中の実線は回帰直線、 $r^2$ は決定係数(相関係数 $r$ の二乗)である。12時間降雪深の発生頻度を推定する回帰式は、式(6)のように発生頻度の対数

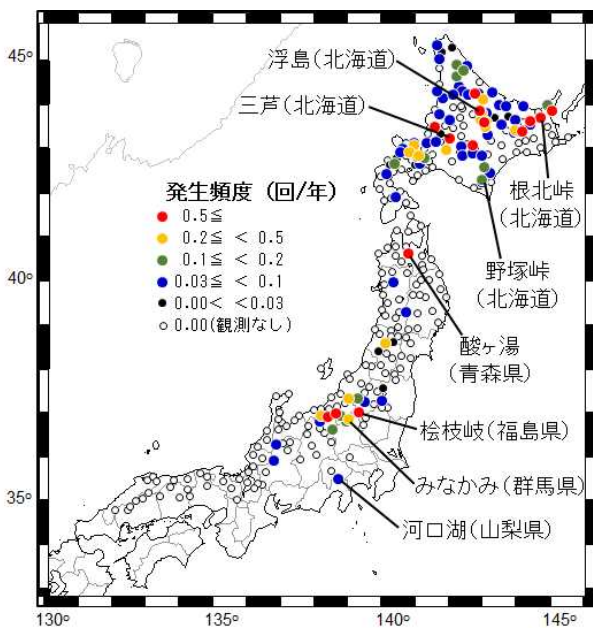


図-22 12時間降雪深 $S_{12}$ が45cm以上となる発生頻度の分布。

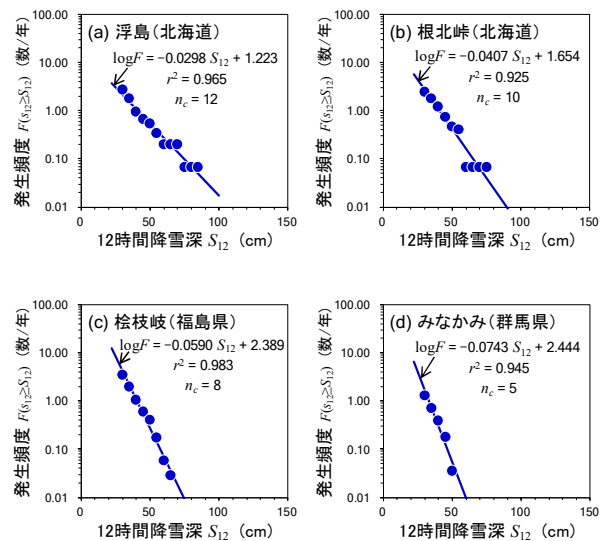


図-23 12時間降雪深 $S_{12}$ と発生頻度 $F(S_{12} \geq S_{12})$ の関係の例。実線は回帰直線、 $r^2$ は決定係数、 $n_c$ は12時間降雪深 $S_{12}$ の5cm間隔の階級数。

$\log F(s_{12} \geq S_{12})$ の形で表す。

$$\log F(s_{12} \geq S_{12}) = a S_{12} + b \quad (6)$$

ここで、 $a$  と  $b$  は係数である。図-23 より、各地点ともに、降雪深  $S_{12}$  と発生頻度の対数  $\log F(s_{12} \geq S_{12})$  の間に、統計的に有意な直線関係 (いずれも有意水準 1%) があり、図中に示す回帰式は観測値との対応が非常によい。ただし、浮島 (図-23a) や根北峠 (図-23b) のように、降雪深  $S_{12}$  の最も大きな事例が突出して、降雪深  $S_{12}$  の第一位と第二位の値の差が大きいと、観測値のプロットが横並びになる場合がある。しかし、5. 1 節の雪崩発生条件の検討に必要なのは、降雪深  $S_{12}$  が 45~50cm 以上となる条件<sup>21)</sup>であり、降雪深  $S_{12}$  の 50cm までの範囲であれば観測値と回帰式の関係は良好である。

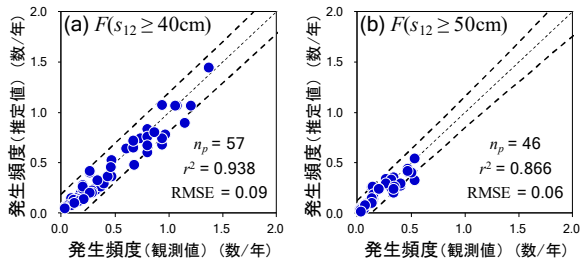


図-24 発生頻度の観測値と回帰式による推定値の比較の例。 $n_p$ は地点数、RMSEは二乗平均平方根誤差、太破線は推定値の95%予測区間。

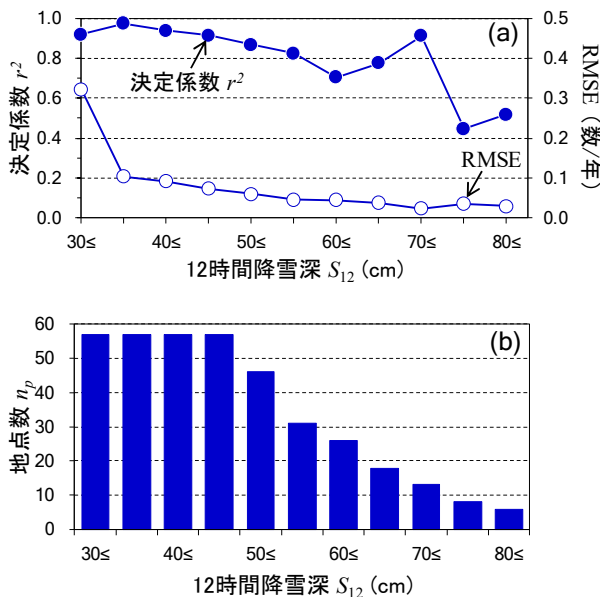


図-25 12時間降雪深  $S_{12}$  の 5cm ごとの (a) 決定係数と RMSE、(b) 観測地点数。

図-24 は、57 の観測地点の回帰式から求めた発生頻度の推定値と観測値を比較した結果である。図-24 より、任意の 12 時間降雪深  $s_{12}$  が 40cm 以上となる発生頻度  $F(s_{12} \geq 40\text{cm})$  と 50cm 以上となる発生頻度  $F(s_{12} \geq 50\text{cm})$  のい

表-1 12 時間降雪深  $S_{12}$  の発生頻度の推定式 (式 (6)) の係数  $a$  と  $b$ 。種別の A は気象庁観測地点、T は北海道開発局道路テレメータ地点。地点名のカッコ内は国道番号、決定係数  $r^2$  の “\*” は有意水準 1% を示す。

道府県	種別	地点名	観測年数	事例数	階級数	係数 $a$	係数 $b$	$r^2$
北海道	A	中頓別	35	22	5	-0.0617	1.782	0.865
北海道	A	歌登	34	22	5	-0.0657	1.897	0.949 *
北海道	A	音威子府	34	27	12	-0.0282	0.561	0.871 *
北海道	A	美深	34	10	4	-0.0455	0.844	0.988 *
北海道	A	名寄	35	10	9	-0.0268	0.135	0.880 *
北海道	T	天北峠(R239)	15	26	17	-0.0186	0.577	0.884 *
北海道	A	下川	35	18	5	-0.0665	1.804	0.974 *
北海道	A	朱鞠内	35	38	4	-0.0863	2.582	0.988 *
北海道	A	滝上	34	16	7	-0.0457	1.196	0.924 *
北海道	T	浮島峠(R273)	15	34	9	-0.0368	1.392	0.984 *
北海道	T	浮島(R273)	15	46	12	-0.0298	1.223	0.965 *
北海道	T	北見峠(R333)	15	29	9	-0.0333	1.200	0.975 *
北海道	T	羅臼峠(R335)	15	13	13	-0.0197	0.598	0.925 *
北海道	T	根北峠(R244)	15	51	10	-0.0407	1.654	0.925 *
北海道	T	野上峠(R391)	15	15	12	-0.0273	0.874	0.852 *
北海道	T	釧北峠(R240)	15	12	5	-0.0527	1.530	0.932 *
北海道	T	双岳台(R241)	15	22	7	-0.0440	1.589	0.951 *
北海道	A	阿寒湖畔	32	13	4	-0.0808	2.129	0.935
北海道	T	足寄峠(R241)	15	12	4	-0.0727	2.221	0.905
北海道	T	石北峠(R39)	15	21	8	-0.0411	1.367	0.918 *
北海道	T	カシノイ(R39)	15	17	8	-0.0346	1.197	0.960 *
北海道	T	三国(R273)	15	17	15	-0.0159	0.200	0.826 *
北海道	T	三国峠(R273)	15	17	5	-0.0607	1.937	0.982 *
北海道	A	狩勝峠(R38)	15	32	8	-0.0385	1.390	0.991 *
北海道	A	上札内	34	19	6	-0.0326	0.603	0.899 *
北海道	T	野塚峠(R236)	14	28	5	-0.0721	2.447	0.994 *
北海道	A	幌糠	33	12	4	-0.0721	1.786	0.978
北海道	A	深川	35	14	7	-0.0391	0.601	0.896 *
北海道	T	四番川(R451)	15	34	6	-0.0479	1.784	0.968 *
北海道	T	三芦(R452)	15	38	5	-0.0524	2.002	0.977 *
北海道	A	夕張	35	29	5	-0.0645	1.927	0.868
北海道	A	新篠津	33	19	4	-0.0863	2.306	0.988 *
北海道	A	石狩	31	10	5	-0.0495	0.786	0.776
北海道	T	毛無峠(R393)	15	51	5	-0.0676	2.560	0.989 *
北海道	A	共和	33	12	4	-0.0787	1.878	0.898
北海道	T	樺立(R393)	13	27	4	-0.0625	2.163	0.993 *
北海道	T	無意根(R230)	15	28	7	-0.0480	1.541	0.943 *
北海道	T	東中山(R230)	15	34	7	-0.0493	1.577	0.902 *
北海道	T	北奥漁(R453)	15	15	5	-0.0376	0.891	0.900
青森	A	酸ヶ湯	35	203	8	-0.0640	2.720	0.994 *
岩手	A	湯田	34	26	5	-0.0594	1.550	0.885
山形	A	尾花沢	34	10	4	-0.0695	1.446	0.886
山形	A	肘折	35	65	7	-0.0452	1.686	0.940 *
山形	A	大井沢	35	29	5	-0.0785	2.228	0.946 *
福島	A	只見	35	29	7	-0.0454	1.260	0.958 *
福島	A	南郷	34	29	5	-0.0781	2.368	0.979 *
福島	A	桧枝岐	35	120	8	-0.0590	2.389	0.983 *
新潟	A	守門	33	17	6	-0.0460	1.268	0.851 *
新潟	A	津南	28	59	10	-0.0418	1.698	0.972 *
新潟	A	湯沢	33	31	6	-0.0630	1.954	0.987 *
新潟	A	関山	34	32	7	-0.0408	1.312	0.943 *
長野	A	野沢温泉	35	76	9	-0.0559	2.188	0.943 *
長野	A	飯山	34	12	4	-0.0498	1.142	0.840
長野	A	信濃町	35	15	4	-0.0550	1.308	0.943
群馬	A	藤原	28	72	9	-0.0465	1.751	0.957 *
群馬	A	みなかみ	28	37	5	-0.0743	2.444	0.945 *
岐阜	A	白川	35	15	6	-0.0385	0.713	0.884 *

ずれも、観測値と推定値が等値線付近に分布しており、両者の対応が極めてよい。図-25に、57の観測地点から求めた発生頻度の推定値と観測値の決定係数 $r^2$ と二乗平均平方根誤差RMSEを降雪深 $S_{12}$ の5cmごとに示す。降雪深 $S_{12}$ が40~55cmの範囲では、決定係数 $r^2$ は0.8を上回り、二乗平均平方根誤差RMSEは0.1以下と小さい。よって、12時間降雪深 $S_{12}$ が40~55cmの範囲において、各地点の回帰式により高い精度(有意水準1%)で発生頻度の推定を行うことができ、短時間多量降雪に伴う樹林内の雪崩発生条件を満たす事例の発生頻度の推定に、この回帰式を活用できると考えられる。表-1に、回帰分析を行った57地点における任意の12時間降雪深 $s_{12}$ が $S_{12}$ cm以上となる発生頻度 $F(s_{12} \geq S_{12})$ を推定するための式(6)の係数 $a$ と $b$ を示す。

### 5.7 短時間多量降雪による雪崩の発生頻度のまとめ

本章では、第2章から第4章で示した雪崩発生条件を満たす降雪事例を過去数十年間の気象データから抽出し、その発生頻度を簡便に推定する手法の検討を行い、発生頻度の地域分布を求めた。本手法により、予め降雪深とその発生頻度の関係式を求めておくと、今後予想される降雪深が、対象箇所においてどのくらい頻繁に起こる(平均的に何年に1回相当の)降雪なのか、またはこれまでに経験のない稀な降雪なのかを事前に把握することができる。雪崩の対策では、この頻度解析から求めた雪崩発生条件を満たす降雪深を、雪崩運動モデルの発生層厚に適用することで、対策施設の設計条件となる発生頻度(例えば、30年確率など)で発生すると考えられる雪崩の到達距離と衝撃圧を算出することができる。そこで、次の第6章では、短時間多量降雪時に樹林内を流下する雪崩の到達距離と衝撃圧を算出可能な雪崩運動モデルを検討する。

## 6. 雪崩の衝撃圧と到達距離の算出方法

本章では、第4章の雪崩発生植生条件から得られた立木密度と、第5章で得た発生頻度付き降雪深の解析結果を、雪崩の発生層厚に取り込むことが可能な、樹林内を流下する雪崩の運動モデルについて、フェルミー(Voellmy)モデル<sup>54)</sup>に基づいて検討し提案した。次に、提案したモデルに採用したパラメータの値の妥当性を、既往の観測から得られた経験則に基づいて検証の上、樹林の有無、斜面高さ、雪崩発生区の傾斜角、雪崩発生層厚を変えて算定した雪崩の速度を基に、雪崩の衝撃圧や到達距離を算出し、既往研究と比較した。

### 6.1 樹林内を流下する雪崩の運動モデル

#### 6.1.1 フェルミーの雪崩運動モデル

フェルミーは雪崩を流体と考慮して開水路の水理学の結果を適用し、式(7)の運動方程式を提唱した<sup>54)</sup>。

$$\rho_s h \frac{du}{dt} = f_a - f_c - f_t \quad (7)$$

ここで、

$$f_a = \rho_s g h \sin \theta \quad (8a)$$

$$f_c = \mu \rho_s g h \cos \theta \quad (8b)$$

$$f_t = \rho_s u^2 / \xi \quad (8c)$$

である。 $\rho_s$  ( $\text{kg/m}^3$ )は雪崩の密度、 $h$  (m)は雪崩の流動層厚、 $u$  (m/s)雪崩の速度、 $t$  (s)は時間、 $\theta$ は雪崩の流下する斜面の傾斜角である。式(8a)の $f_a$ は、 $g$ を重力加速度( $=9.8 \text{ m/s}^2$ )とすると、斜面に平行に作用するせん断応力である。式(8b)の $f_c$ は雪の荷重に比例したクーロン摩擦抵抗であり、 $\mu$ は底面における動摩擦係数である。式(8c)の $f_t$ は速度 $u$ の2乗に比例する抵抗力を表すが、 $\xi$ の具体的な意味は示されていない。以降、ここでは $\xi$ を流動係数と呼ぶことにする。

斜面に沿った長さを $s$ とし、 $d/dt = u d/ds$ に注意すると、式(7)は、

$$\frac{du^2}{ds} = 2g(\sin \theta - \mu \cos \theta - \frac{1}{\xi} u^2) \quad (9)$$

と変形できる<sup>55)</sup>。ただし、式(9)の雪崩流動層厚 $h$ 、動摩擦係数 $\mu$ 、流動係数 $\xi$ を具体的に設定する必要がある。

#### 6.1.2 樹林内を流下する雪崩の運動モデルの提案

本研究では、フェルミーモデル<sup>54)</sup>に基づき、樹林内を流下する雪崩の運動モデルを提案し、雪崩流動層厚 $h$ 、動摩擦係数 $\mu$ 、流動係数 $\xi$ の具体的な設定方法を提示する。樹林内を流下する雪崩の運動方程式として、次の式(10)を提案する。

$$\rho_s h \frac{du}{dt} = f_a - f_c - f_t - f_\lambda \quad (10)$$

ここで、 $f_a$ と $f_c$ は式(8a)と式(8b)と同じであるが、 $f_t$ を次の式(11)に置き換える。

$$f_t = \frac{c_f \rho_s u^2}{2} \quad (11)$$

また、新たに式(12)の $f_\lambda$ の項を加える。

$$f_\lambda = \frac{c_D \rho_s (h d_t) u^2}{2s^2} = \frac{c_D \rho_s \lambda h u^2}{2} \quad (12)$$

式(11)は、水流では、開水路の底面に作用する乱流によるせん断抵抗力を表し、 $c_f = 2gn^2 h^{-1/3}$ は乱流摩擦抵抗係数である<sup>56)</sup>。ここで $n$ はマンニングの粗度係数であり、自然水路では、 $n$ は水路の凹凸や植生によって変化することが知られている<sup>57)</sup>。流れの深さ $h$ が増して底面粗度の影響が小さくなると、乱流摩擦抵抗係数 $c_f$ は小さくなり流動性

表-2 既往研究と本研究における雪崩流動層厚、動摩擦係数、流動係数の設定方法

	既往研究	本研究
雪崩流動層厚	$h_i = h_0$ $h_0$ : 雪崩発生層厚	$h_i = \frac{u_{i-1}}{u_i} h_{i-1}$
動摩擦係数	$\mu_i = \begin{cases} 0.6 - 0.01u_i & (0 \leq u_i < 10) \\ 5/u_i & (10 \leq u_i < 50) \end{cases}$	$\mu = 0.3$
流動係数	$\xi$ は滑走中一定 (表-3の値を参照)	$\xi_i = \frac{h_i^{1/3}}{n^2 + \frac{c_D \lambda}{2g} h_i^{4/3}}$ $n$ : 粗度係数 $\lambda = d_t/s_t^2$ : 立木密度

が増すことになる。雪崩を流体とみなしたとき、このような性質は雪崩についても当てはまると仮定する。

式(12)は、水流では、植生の存在によって流れが受ける河床単位面積当たりの抵抗力として知られている<sup>58)</sup>。ここでは植生を胸高直径 $d_t$ の円柱の樹木として、流れ方向ならびに横断方向に間隔 $s_t$ 離れて位置するものとする、式(12)は、雪崩が樹木から受ける単位面積当たりの抵抗力とみなせる。 $c_D$ は抗力係数であり、 $\lambda = d_t/s_t^2$ を立木密度とする。ただし、この立木密度は、第4章のものと定義が異なることに注意する。

加えて、式(8c)の流動係数 $\xi$ を、

$$\xi = \frac{h^{1/3}}{n^2 + \frac{c_D \lambda}{2g} h^{4/3}} \quad (13)$$

で定義すると、式(10)は式(9)に帰着する。よって、式(8c)の流動係数 $\xi$ の物理的意味は不明であったが、式(13)の $\xi$ は、雪崩流動層厚 $h$ 、粗度係数 $n$ 、立木密度 $\lambda$ に依存する形になる。このことは、流動係数 $\xi$ が雪崩流動層厚 $h$ に対して変化することになり、坊城<sup>59)</sup>が提唱した流動係数 $\xi$ の考え方を発展させるものである。

以上を、本研究における樹林内を流下する雪崩の運動モデルとする。ただし、雪崩流動層厚 $h$ と動摩擦係数 $\mu$ は、別途設定する必要がある。

### 6.1.3 雪崩流動層厚、動摩擦係数、流動係数の設定方法

ここでは、式(7)のフェルミーの雪崩運動モデル(以下、既往研究とする)と式(10)の本研究で提案する樹林内を流下する雪崩の運動モデル(以下、本研究とする)における雪崩流動層厚 $h$ 、動摩擦係数 $\mu$ 、流動係数 $\xi$ の設定方法の違いを示す(表-2)。

#### (1) 雪崩流動層厚 $h$

雪崩流動層厚 $h$ は、式(7)や式(10)の運動方程式のみでは決まらない。図-26のように斜面を分割したときに、 $(x_i, z_i)$ での雪崩流動層厚を $h_i$ とする( $i = 1, 2, 3, \dots$ )。 $h_0$ を雪崩発生層厚とし、 $i = 1$ 番目の雪崩流動層厚 $h_1$ は、

$$h_1 = h_0 \quad (14)$$

とする。既往研究では、雪崩流動層厚 $h_i$ は、雪崩発生層厚 $h_0$ のまま流下とともに変わらないもの<sup>20), 55), 60), 61)</sup>と線形に増加するもの<sup>20), 48)</sup>が用いられている。しかし後者については、流動層厚の増加割合を滑走中の雪の堆積や侵食の物理モデルに基づいて定量化することが難しく現在でも不明な点が多い。よって、表-2には前者のみを示す。

一方、雪崩流下経路の幅は一定、滑走中の雪の堆積や侵食がないと仮定し、本研究における $(x_i, z_i)$ での雪崩流動層厚 $h_i$ を、 $(x_i, z_i)$ を通過する流量 $h_i u_i$ と $(x_{i-1}, z_{i-1})$ を通

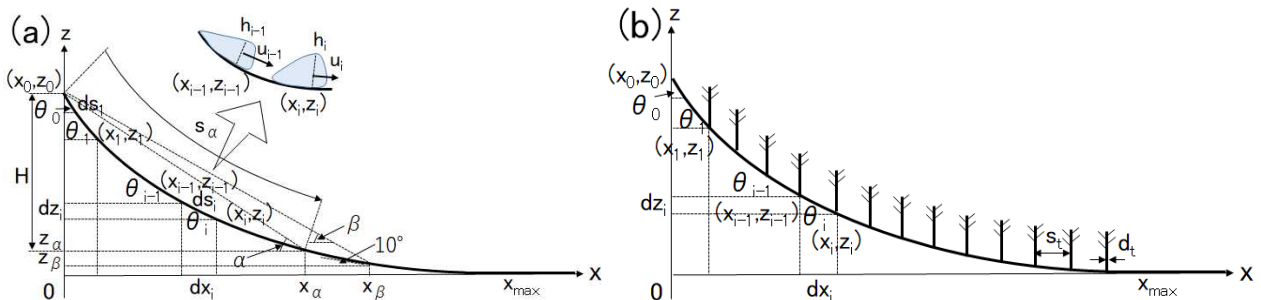


図-26 放物型地形の模式図。(a) 樹林が存在しない場合、(b) 樹林が存在する場合。

過する流量 $h_{i-1}u_{i-1}$ が等しくなるように求める<sup>54)</sup>。すなわち、

$$h_i = \frac{u_{i-1}}{u_i} h_{i-1} \quad (15)$$

となる。本研究での雪崩流動層厚 $h_i$ は、式(14)を初期値として、式(15)に従って変化するものとする。

**(2) 動摩擦係数 $\mu$**

Schaerer<sup>62)</sup>は、フェルミーの雪崩運動モデルから得られた雪崩の最大速度が、雪崩の映像記録を基に観測された雪崩の瞬間速度に一致するように動摩擦係数 $\mu$ の値を推定し、雪崩速度 $u = 10 \sim 50$  m/s の範囲において $\mu$ は速度に反比例すること ( $\mu_i = 5/u_i$ ) を示した。既往研究では、このSchaererの経験式に加えて、雪崩速度 $u < 10$  m/s の範囲では、速度が0 m/s のとき $\mu_i = 0.6$ 、10 m/s のとき $\mu_i = 0.5$ となる直線内挿式を用いている<sup>20), 49), 55)</sup> (表-2)。

一方、アモンソン-クーロンの摩擦法則によると、動摩擦係数 $\mu$ は、滑り速度に依存しないことが知られている<sup>63)</sup>。実際に、乾雪また湿雪雪崩のせん断応力と垂直応力の比から $\mu$ を評価した実験によると、雪崩速度が3.4~9.6 m/s の範囲において、 $\mu$ は速度に依存しないことが報告されている<sup>64)</sup>。また、Voellmy-Salmモデルでは、雪崩流動層厚 $h_0$ が1~2 mを超える大規模雪崩に関しては $\mu$ を0.16、雪崩流動層厚 $h_0$ が1~2 mより小さい小規模雪崩に関しては $\mu$ を0.25~0.3に設定することを推奨している<sup>65)</sup>。本研究ではこの立場に従い、雪崩発生層厚 $h_0$ が1 m以下の小規模雪崩を対象として、 $\mu = 0.3$ に設定する。

**(3) 流動係数 $\xi$**

既往研究では、流動係数 $\xi$ に関する具体的な数値の提示指針はないが、雪崩流動層厚 $h_i$ が雪崩発生層厚 $h_0$ のまま流下とともに変わらない( $h_i = h_0$ )とすると、式(13)の流動係数 $\xi$ は定数となる。ただし、 $\xi$ を求めるためには、式(13)のマニングの粗度係数 $n$ を決める必要がある。坊城は、雪崩事例に関する文献を調査して、 $n$ が雪質により変化することを指摘した<sup>59)</sup>。ここでは煙を伴わない小規模の乾雪雪崩を対象とするので、坊城<sup>59)</sup>の調査結果より $n = 0.03$ を用いる。この値は、手入れのよい直線状の自然水路に対するマニングの粗度係数の標準値に相当する<sup>56), 57)</sup>。表-3は、式(13)においてマニングの粗度係数 $n = 0.03$ 、立木密度 $\lambda = 0$ のとき、雪崩発生層厚 $h_0 = 0.3$ m, 0.5m, 1.0mに対する流動係数 $\xi$ の値を示す。既往研究の $\xi$ の設定値として、表-3の雪崩発生層厚 $h_0$ に応じた $\xi$ を用いる。

一方、本研究では、式(13)の流動係数 $\xi$ を用いる。図-27に示すように、 $\xi$ は、式(15)のように雪崩流動層厚 $h$ が変化するときは変数となる。マニングの粗度係数 $n$ は、既

表-3 樹林なしの場合の流動係数(既往研究)

粗度係数 $n = 0.03$ 、立木密度 $\lambda = 0$ の場合

雪崩発生層厚 $h_0$ (m)	流動係数 $\xi$ (m/s <sup>2</sup> )
0.3	744
0.5	882
1.0	1111

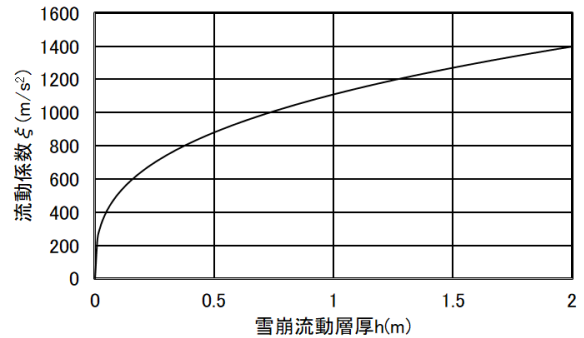


図-27 粗度係数 $n = 0.03$ 、立木密度 $\lambda = 0$ のときの流動係数 $\xi$ と雪崩流動層厚 $h$ の関係

往研究と同様に $n = 0.03$ を用いる。

**6.2 算出方法**

**6.2.1 雪崩流下地形の設定**

本研究では、既往文献<sup>66)</sup>を基に、雪崩が流下する地形は、図-26に示すように、次の放物型の縦断形状とする。

$$z = \frac{(\tan\theta_0)^2}{4z_0} x^2 - \tan\theta_0 \cdot x + z_0 \quad (16)$$

ここで、 $z_0$ は水平面からの斜面の高さ(m)、 $\theta_0$ は雪崩発生区の斜面の傾斜角(度)、 $x$ は雪崩発生区からの水平距離(m)で、斜面の高さ $z_0$ と雪崩発生区の傾斜角 $\theta_0$ を与えると斜面の形状が決まる。斜面の最下点( $z = 0$ )は $x_{\max} = 2z_0 / \tan\theta_0$ であり、 $x > x_{\max}$ のとき地形は平坦とする。図-26のように斜面と平坦部を分割したとき、 $(x_i, z_i)$ を $i$  ( $i = 0, 1, 2, 3, \dots$ ) 番目の座標とする。このとき、 $dx_i = x_i - x_{i-1}$ 、 $dz_i = z_i - z_{i-1}$ とすると、 $i$ 番目の斜面の傾斜角は  $\theta_i = \tan^{-1}(|dz_i|/dx_i)$ 、斜面長は  $ds_i = \sqrt{(dx_i)^2 + (dz_i)^2}$ となる。 $dx_i$ の値を与えると、 $dz_i$ と $ds_i$ は自動的に決まる。

**6.2.2 雪崩の衝撃圧と到達距離の算出方法**

$i$  番目の地点( $x_i, z_i$ )での雪崩速度を $u_i$ 、雪崩流動層厚を $h_i$ とする。雪崩発生点( $i = 0$ )でのみ積雪塊は剛体運動し、以降( $i \geq 1$ )の箇所では積雪塊は細かく砕けて流体運動するものとする<sup>67)-69)</sup>。雪崩発生点( $i = 0$ )で発生した雪崩の

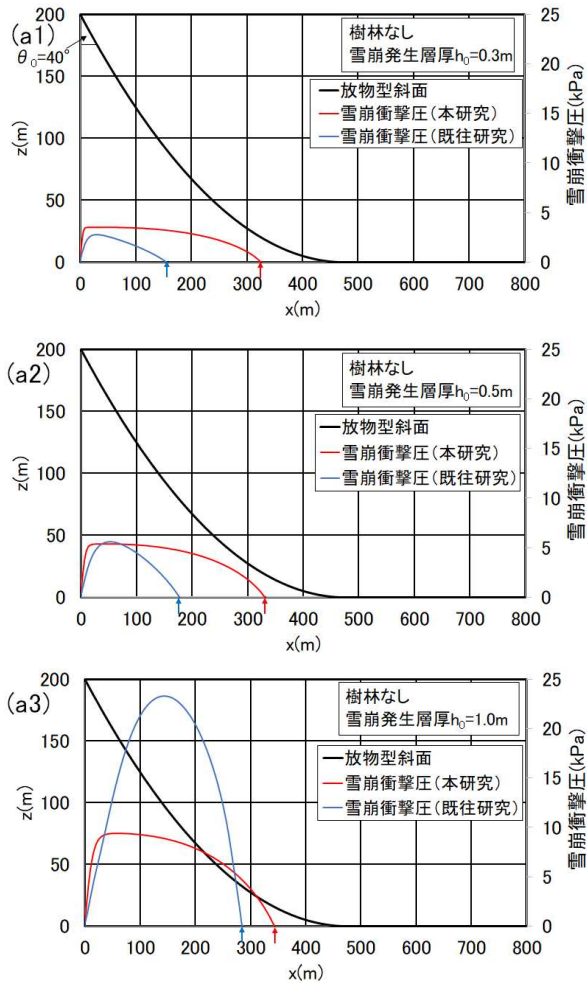


図-28 斜面高さ $z_0$ が200m、雪崩発生区の傾斜角 $\theta_0$ が $40^\circ$ の放物型斜面(黒)、雪崩の衝撃圧 $P$ (青：既往研究、赤：本研究)、雪崩到達点(青矢印：既往研究、赤矢印：本研究)

次の地点( $i = 1$ )における雪崩速度 $u_1$ について、式(9)は、 $u^2$ を含む項を省略すると剛体の運動方程式になり、初速度 $u_0 = 0$ に対する解は、

$$u_1 = \sqrt{2g(\sin\theta_1 - \mu\cos\theta_1) ds_1} \quad (17)$$

となる。次に、雪崩発生以降の箇所( $i \geq 1$ )における雪崩速度 $u_i$ について、式(9)を離散化すると、

$$du_i^2 = 2g \left( \sin\theta_i - \mu_{i-1}\cos\theta_i - \frac{1}{\xi_{i-1}h_{i-1}} u_{i-1}^2 \right) ds_i \quad (18)$$

となる。したがって $(x_i, z_i)$ での雪崩速度 $u_i$ の2乗は、 $(x_{i-1}, z_{i-1})$ での速度 $u_{i-1}$ の2乗に式(18)による速度の変化量 $du_i^2$ を加算した

$$u_i^2 = u_{i-1}^2 + du_i^2 \quad (19)$$

となり、式(19)より $(x_i, z_i)$ での雪崩速度 $u_i$ が求まる。また、 $(x_i, z_i)$ での雪崩衝撃圧 $P_i$ (Pa)は、式(20)より $u_i$ を用いて算出する<sup>67)</sup>。この $P_i$ は、雪崩が建造物の壁面に垂直に

衝突する時の衝撃圧である。

$$P_i = \rho_s (u_i \cos \theta)^2 \quad (20)$$

6.3節と6.4節で示す雪崩衝撃圧 $P_i$ は、ここでは雪崩発生層厚 $h_0 = 0.3\text{m}, 0.5\text{m}, 1.0\text{m}$ の各条件で算出する。また、雪崩密度 $\rho_s$ は、乾雪雪崩の典型的な密度<sup>68)</sup>である $\rho_s = 100 \text{ kg/m}^3$ を用いる。

雪崩の到達距離 $x_\alpha$ は、雪崩速度 $u_i$ が減速し雪崩が停止する直前の $x_i$ の値とする。雪崩の発生点 $(x_0, z_0)$ から到達点 $(x_\alpha, z_\alpha)$ までの実走斜距離を $s_\alpha$ とし、到達点から発生点を見通した角度を $\alpha$ (度)、 $H = z_0 - z_\alpha$ を雪崩の発生点から到達点までの落差とする。また、雪崩の経路を下って斜面の傾斜角が $10^\circ$ となる地点を $(x_\beta, z_\beta)$ として、 $(x_\beta, z_\beta)$ から雪崩の発生点を見上げた仰角を $\beta$ (度)とする(図-26a)。

### 6.2.3 地形と植生に関する解析条件

雪崩運動モデルによる衝撃圧と到達距離の計算は、乾雪雪崩の発生条件に関する既往の知見<sup>48), 69)-71)</sup>を参考に、斜面高さ $z_0 = 50\text{m}, 100\text{m}, 150\text{m}, 200\text{m}$ 、雪崩発生区の傾斜角 $\theta_0 = 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ$ の各条件で行う。

また、図-26(b)は、斜面上に樹林が存在する場合の模式図で、斜面の分割点 $(x_i, z_i)$ 上に樹木を配置する。樹木の胸高直径を $d_t$ 、立木間隔を $s_t$ とし、平坦部には樹木はないとする。斜面上の樹木は円柱として、その抗力係数を $c_D = 1$ とする。ここでは樹林内での乾雪表層雪崩の発生条件を検討した結果(第4章)に基づき、斜面上の樹木の胸高直径を $d_t = 0.2\text{m}$ 、立木間隔を $s_t = 3\text{m}$ とし、斜面の $x$ 軸方向の分割幅を $dx_i = 3\text{m}$ とする。このとき立木密度は $\lambda = 0.022 (\text{m}^{-1})$ となり、 $\lambda$ は斜面上で変わらないものとする。また、粗度係数は $n = 0.03$ とし、斜面上と平坦部で変わらないものとする。

### 6.3 雪崩運動モデルの検証

図-28は、表-2の既往研究と本研究における設定値を用いた、樹林のないときの雪崩運動モデルによる雪崩の衝撃圧と到達距離の計算結果の例である。図中の実線(黒)は、斜面高さ $z_0 = 200 \text{ m}$ 、雪崩発生区の傾斜角 $\theta_0 = 40^\circ$ のときの放物型の斜面形状を示す。また、実線(青と赤)は、それぞれ既往研究と本研究の設定値(表-2)に基づいて計算した雪崩衝撃圧で、 $x$ 軸上の矢印は雪崩到達点を示す。雪崩発生層厚 $h_0$ は、図-28(a)では $0.3\text{m}$ 、図-28(b)では $0.5\text{m}$ 、図-28(c)では $1.0\text{m}$ である。既往研究と本研究において、 $h_0$ が大きいほど雪崩最大衝撃圧 $P_{\text{max}}$ と雪崩到達距離 $x_\alpha$ は大きくなる。特に、雪崩発生層厚が $h_0 = 1.0\text{m}$ と大きいときに雪崩衝撃圧と到達距離の既往研究と本研究の違いが顕著となる。



以下では、雪崩運動モデルによる到達距離の計算結果が、実走斜距離 $S_\alpha$ と落差 $H$ の関係および $\alpha - \beta$ の関係に対する経験則と矛盾しないか検証を行う。

6.3.1 実走斜距離と落差の関係との比較による検証

図-29は、異なる斜面高さ $z_0$ 、雪崩発生区の傾斜角 $\theta_0$ 、雪崩発生層厚 $h_0$ に対して、既往研究と本研究における設定値(表-2)を用いて計算した樹林のない場合における実走斜距離 $S_\alpha$ と落差 $H$ の関係である。図より、既往研究(図-29(a))と本研究(図-29(b))、いずれの場合も実走斜距離 $S_\alpha$ と落差 $H$ の間に、

$$S_\alpha = C_s H + D_s \quad (C_s, D_s \text{は係数}) \quad (21)$$

の関係がある。ここで、式(21)の係数 $C_s$ と $D_s$ は、 $\theta_0$ と $h_0$ に依存する。

既往研究の設定値を用いた場合、図-29の(a1)と(a2)に示すように、雪崩発生層厚が $h_0 = 0.3\text{m}$ 、 $0.5\text{m}$ と小さい

ときは、 $\theta_0$ が大きい急勾配な斜面ほど $S_\alpha$ は小さく、 $h_0$ が大きい方が $S_\alpha$ は大きい。同様の傾向は本研究の設定値を用いた計算結果(図-29(b1)と(b2))にもみられる。ただし、雪崩発生区の傾斜角 $\theta_0$ の増加に伴う実走斜距離 $S_\alpha$ の減少は、本研究の計算結果(図-29(b1)と(b2))に比べて小さい。また、雪崩発生層厚 $h_0 = 1.0\text{m}$ (図-29(a3))における実走斜距離 $S_\alpha$ と落差 $H$ の関係は、本研究の計算結果(図-29(b3))とは大きく異なる。本研究では、 $\theta_0$ の大きい急勾配な斜面ほど $S_\alpha$ は小さくなるが、既往研究では、落差 $H$ が約70m以上の場合では、雪崩発生区の傾斜角 $\theta_0$ が大きくなると $S_\alpha$ は小さくなり、落差 $H$ が約70m以下の場合では、 $\theta_0$ が大きくなると $S_\alpha$ は大きくなるという、落差 $H$ により逆の傾向を示す。

また、実走斜距離と落差の比( $S_\alpha/H$ )について、雪崩発生層厚 $h_0$ (図-29(a1)~(a3))ごとにその平均値を求める

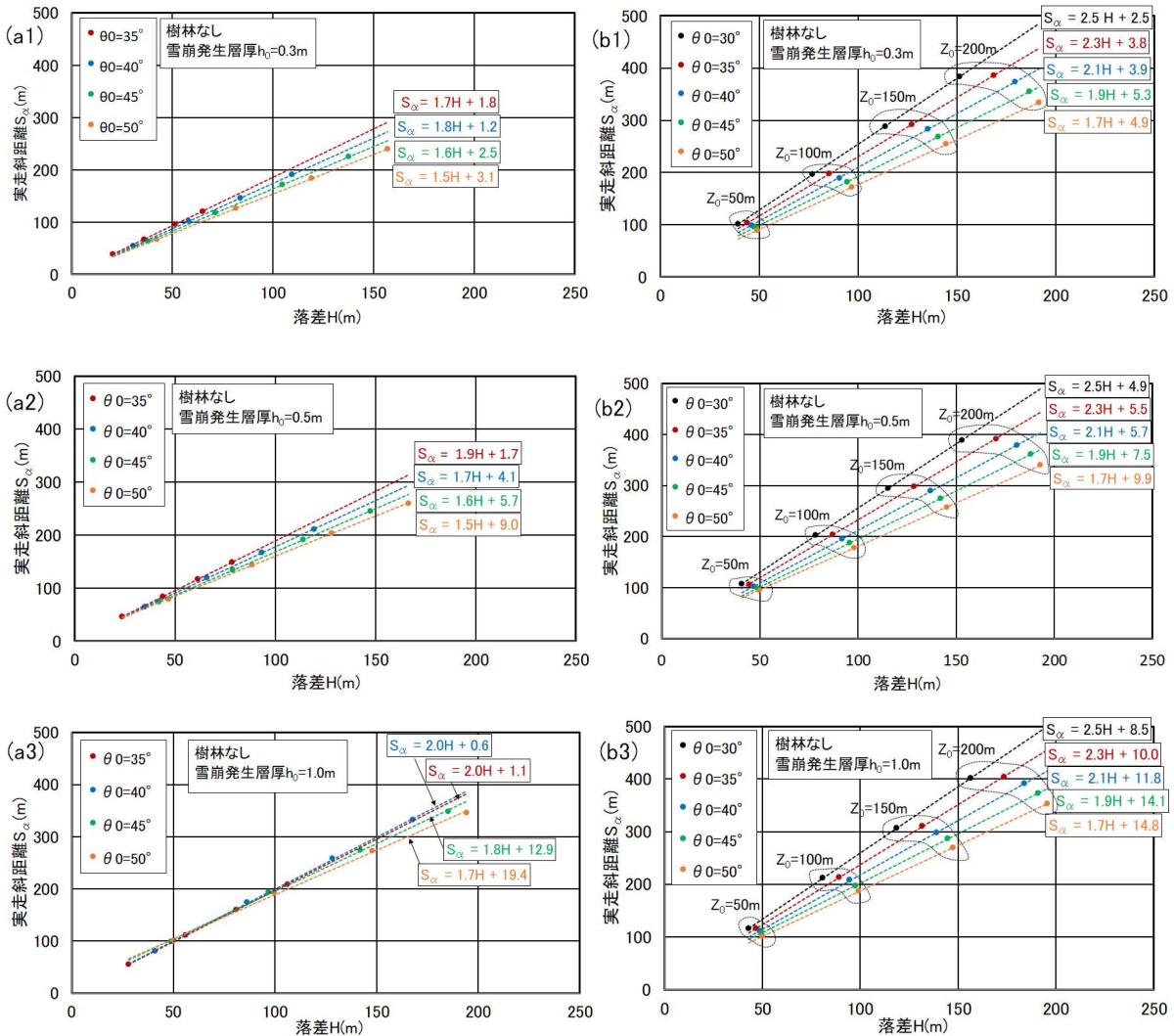


図-29 樹林のない場合、表-2の設定値を用いたときの雪崩の実走斜距離 $S_\alpha$ と落差 $H$ の関係。(a1)~(a3)は既往研究における雪崩発生層厚 $h_0 = 0.3\text{m}$ 、 $0.5\text{m}$ 、 $1.0\text{m}$ の場合、(b1)~(b3)は本研究における $h_0 = 0.3\text{m}$ 、 $0.5\text{m}$ 、 $1.0\text{m}$ の場合の計算結果。

と、雪崩発生層厚が $h_0 = 0.3\text{m}$ では1.7、 $h_0 = 0.5\text{m}$ では1.8、 $h_0 = 1.0\text{m}$ では2.0となり、雪崩発生層厚 $h_0$ の大ききつまり雪崩の規模に対する依存性がみられる。一方、本研究の設定値を用いた計算結果(図-29(b1)~(b3))では、実走斜距離と落差の比( $S_\alpha/H$ )の雪崩発生層厚 $h_0$ ごとの平均値は、 $h_0 = 0.3\text{m}$ では2.1、 $h_0 = 0.5\text{m}$ では2.2、 $h_0 = 1.0\text{m}$ では2.2となり、雪崩の実走斜距離 $S_\alpha$ が落差の約2倍であるとする経験則と整合する<sup>72)</sup>。

6.3.2  $\alpha - \beta$ の関係との比較による検証

図-30は、異なる斜面高さ $z_0$ 、雪崩発生区の傾斜角 $\theta_0$ 、雪崩発生層厚 $h_0$ に対して、既往研究と本研究における設定値を用いて計算した樹林のない場合における $\alpha - \beta$ の関係である。図-30(a1)~(a3)は既往研究の計算結果であり、図-30(b1)~(b3)は本研究における計算結果である。

雪崩発生層厚 $h_0$ は、図-30の(a1)と(b1)では0.3m、(a2)と(b2)では0.5m、(a3)と(b3)では1.0mである。ここで、 $\alpha$ と $\beta$ には、

$$\alpha = A\beta + B \quad (A, B \text{ は係数}) \quad (22)$$

の関係があることが経験的に知られ、この関係式を用いて雪崩の到達距離を推定する統計モデルは $\alpha - \beta$ モデルと呼ばれている<sup>20), 65), 69), 73)</sup>。

図-30(a1)~(a3)は、既往研究における設定値に基づく計算結果から評価した $\alpha - \beta$ の関係である。図より式(22)の線形の関係が成り立つが、雪崩発生層厚が $h_0 = 1.0\text{m}$ のとき(図-30(a3))は、 $\beta$ に対する $\alpha$ の変化は非常に小さく経験則と整合しない。一方、図-30(b1)~(b3)は、本研究の設定値に基づく計算結果から評価した $\alpha - \beta$ の関係であり、いずれの $h_0$ に対しても、図より線形の関係が成立

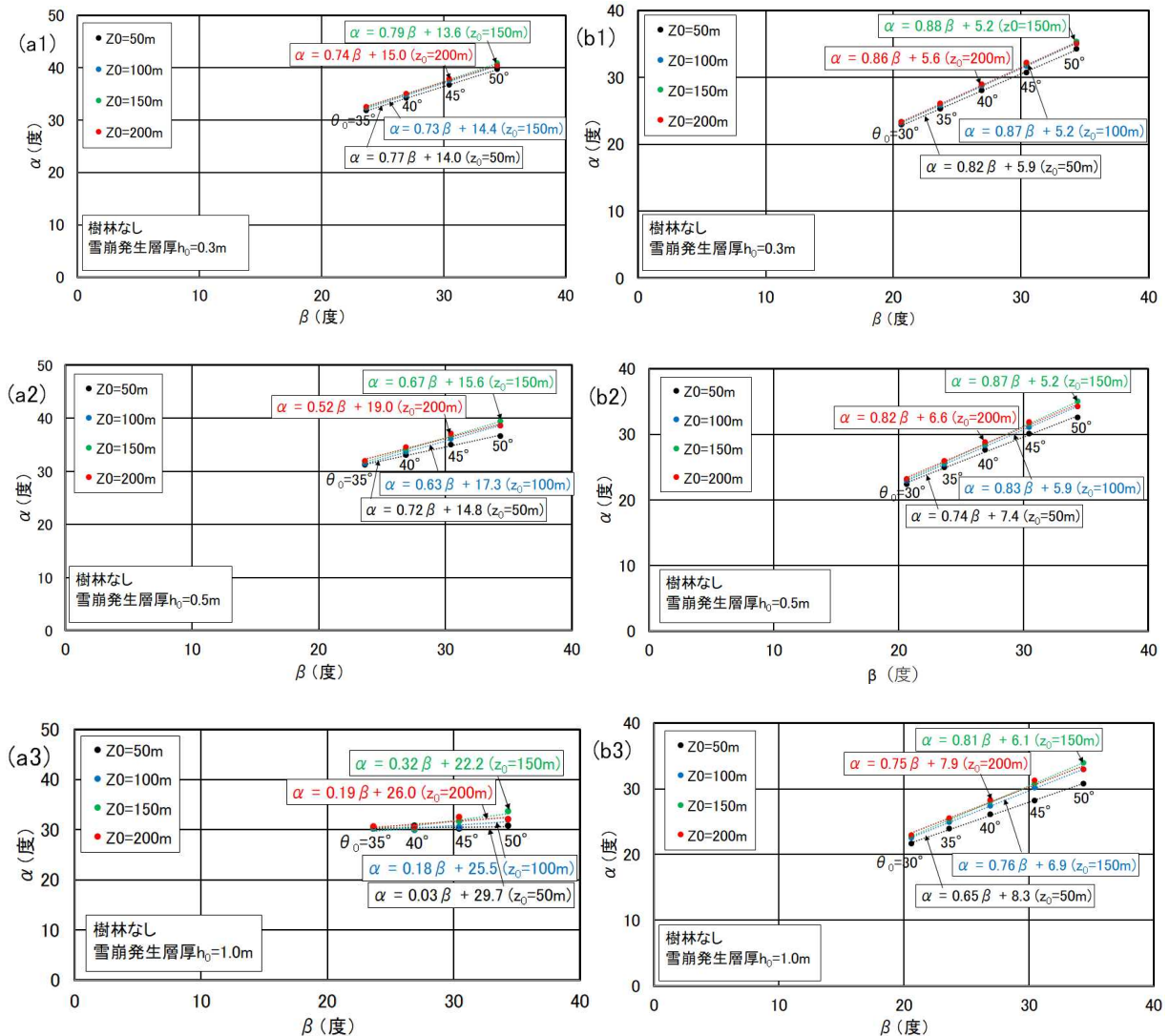


図-30 樹林のない場合、表-2の設定値を用いたときの $\alpha - \beta$ の関係。(a1)~(a3)は既往研究における雪崩発生層厚 $h_0 = 0.3\text{m}$ 、 $0.5\text{m}$ 、 $1.0\text{m}$ の場合、(b1)~(b3)は本研究における $h_0 = 0.3\text{m}$ 、 $0.5\text{m}$ 、 $1.0\text{m}$ の場合の計算結果。

していることから、式(22)の $\alpha - \beta$ の関係の経験則を満たしている。

よって、以下で行う、短時間多量降雪に伴う樹林内で発生する雪崩の衝撃圧と到達距離の計算では、実走斜距離 $S_\alpha$ と落差 $H$ の関係や $\alpha - \beta$ の関係に対する経験則と矛盾しない本研究の設定値を用いた方法で計算を行う。

### 6. 4 樹林内を流下する雪崩の衝撃圧と到達距離の結果

#### 6. 4. 1 雪崩の最大衝撃圧の計算結果

図-31 は、雪崩の衝撃圧の最大値 $P_{max}$ と斜面高さ $z_0$ の関係を、異なる雪崩発生区の傾斜角 $\theta_0$ と雪崩発生層厚 $h_0$ および樹林の有無に対して、式(10)の雪崩運動モデルおよび表-2 の本研究における設定値を用いて計算した結果である。図-31 より、雪崩の最大衝撃圧は、樹林の有無に関係なく、斜面高さ $z_0$ にはほとんど依存しないが、雪崩発生区の傾斜角 $\theta_0$ が大きくなると、雪崩の最大衝撃圧 $P_{max}$ は大きくなる。これは、 $\theta_0$ の大きい斜面ほど、式(9)の駆

表-4 雪崩の衝撃圧と被害の目安<sup>67), 69)</sup>

衝撃圧(kPa)	破壊力の目安
1	窓ガラスが割れる
5	ドアが壊される
30	木造建物が破壊される
100	大きな木が飛ばされる
1000	鉄筋コンクリート構造物が破壊される

動力を表す $\sin\theta$ の項が大きくなり、雪崩の速度の増加率が大きくなるためである。

また、図-31 (a1)~(a3) より、樹林が存在しない場合(立木密度 $\lambda = 0$ )、雪崩発生層厚 $h_0$ が0.3m、0.5m、1.0mと増加したとき、雪崩の最大衝撃圧 $P_{max}$ は大きくなる。今回計算を行った範囲では、雪崩発生層厚 $h_0 = 0.3m$ ではすべての発生区の傾斜角 $\theta_0$ に対して $P_{max}$ は5 kPa よりも小さ

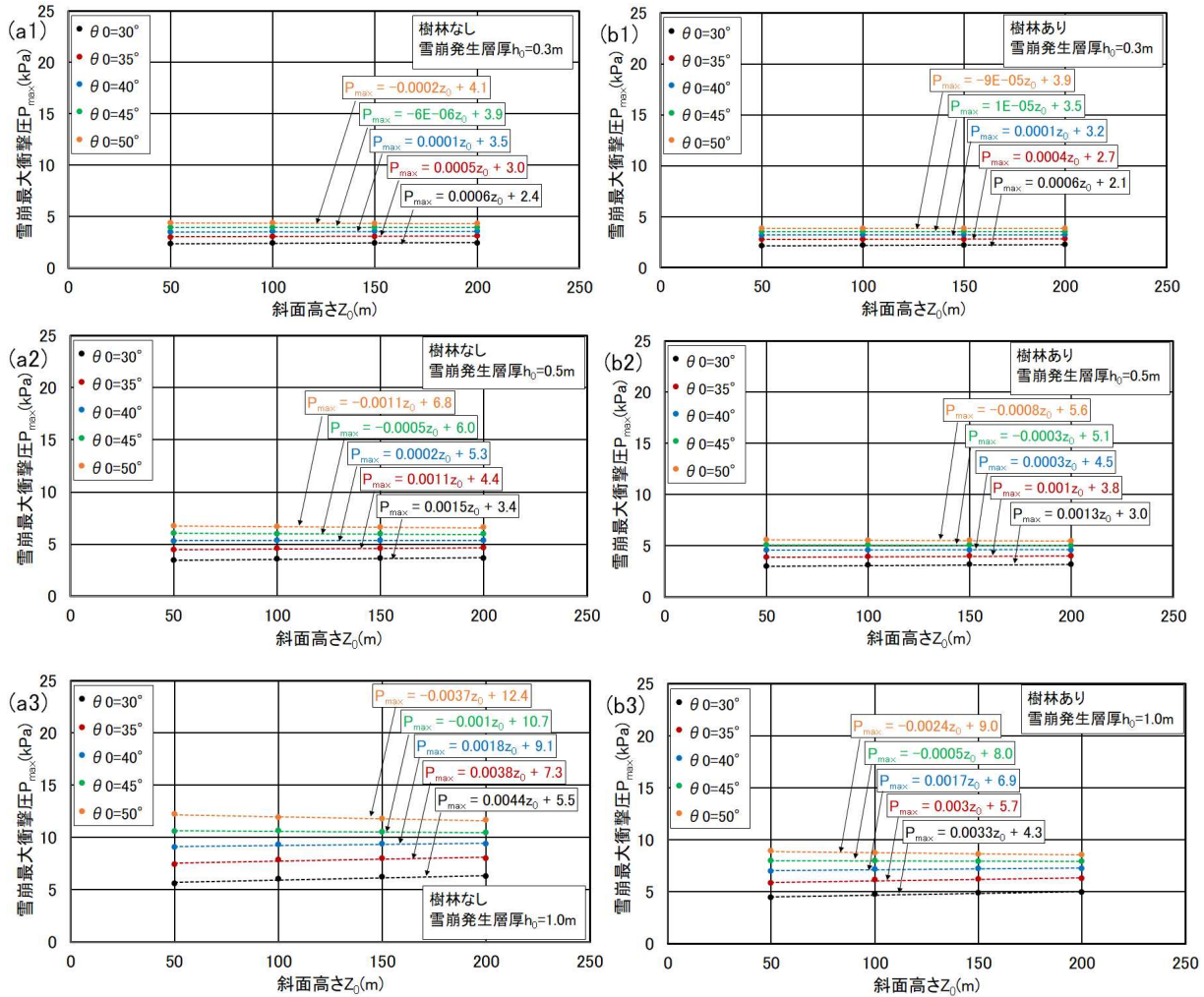


図-31 表-2 の本研究における設定値を用いたときの雪崩の最大衝撃圧 $P_{max}$ と斜面高さ $z_0$ の関係。(a1)~(a3)は樹林がないときの雪崩発生層厚 $h_0 = 0.3m, 0.5m, 1.0m$ の場合、(b1)~(b3)は樹林があるときの $h_0 = 0.3m, 0.5m, 1.0m$ の場合の計算結果。

く窓ガラスやドアが破壊される程度であるが(表-4 参照)、雪崩発生層厚が $h_0 = 1.0\text{m}$ で発生区の傾斜角 $\theta_0$ が $45^\circ$ 以上になると $P_{\max}$ は $10\text{kPa}$ を超える。

一方、図-31 (b1)~(b3)より、樹林が存在する場合(立木密度 $\lambda = 0.022$ )、樹林のない場合に比べて雪崩の最大衝撃圧 $P_{\max}$ は小さい。これは、樹林があると、式(9)と式(13)から $u^2$ の係数が $1/\xi h = n^2/h^{4/3} + c_D \lambda / (2g)$ となり、樹林のないとき( $\lambda = 0$ )に比べて第2項の分だけ抵抗力が増加するために雪崩の速度の増加率が小さくなるためである。また、雪崩発生層厚 $h_0 = 0.3, 0.5, 1.0\text{m}$ のとき、 $u^2$ の係数の第1項の大きさはそれぞれ、 $4.5 \times 10^{-3}$ 、 $2.3 \times 10^{-3}$ 、 $0.9 \times 10^{-3}$ となり、第2項の大きさ $1.1 \times 10^{-3}$ と比較すると、発生層厚 $h_0$ が小さく立木密度が $\lambda = 0.022$ の疎密度の場合は、第1項が相対的に大きくなって第2項の寄与は小さくなる。したがって、 $h_0$ が $0.3\text{m}$ や $0.5\text{m}$ のと

きの雪崩の衝撃圧は、樹林のない場合( $\lambda = 0$ )と大差はなく、雪崩は樹林内を勢いが衰えることなく流下するものと考えられる。

### 6.4.2 雪崩の到達距離の計算結果

図-32 は、雪崩到達距離 $x_\alpha$ と斜面高さ $z_0$ の関係を、異なる雪崩発生区の傾斜角 $\theta_0$ と雪崩発生層厚 $h_0$ 、および樹林の有無に対して、式(10)の雪崩運動モデルおよび表-2の本研究における設定値を用いて計算した結果である。図-32より、樹林の有無に関係なく、雪崩到達距離 $x_\alpha$ は斜面高さ $z_0$ が大きいくほど長くなる。また、雪崩発生区の傾斜角 $\theta_0$ の大きい斜面ほど、雪崩到達距離 $x_\alpha$ は短くなる。これは、雪崩発生区の傾斜角 $\theta_0$ が大きいほど、雪崩発生区からの水平距離 $x$ に関する2回微分から得られる曲率 $(\tan\theta_0)^2/2z_0$ が大きくなり、斜面の傾斜角 $\theta$ が $0^\circ$ に漸近する地点が近くなることによる。 $\theta$ が $0^\circ$ に近づくとき、 $\theta_0$ が

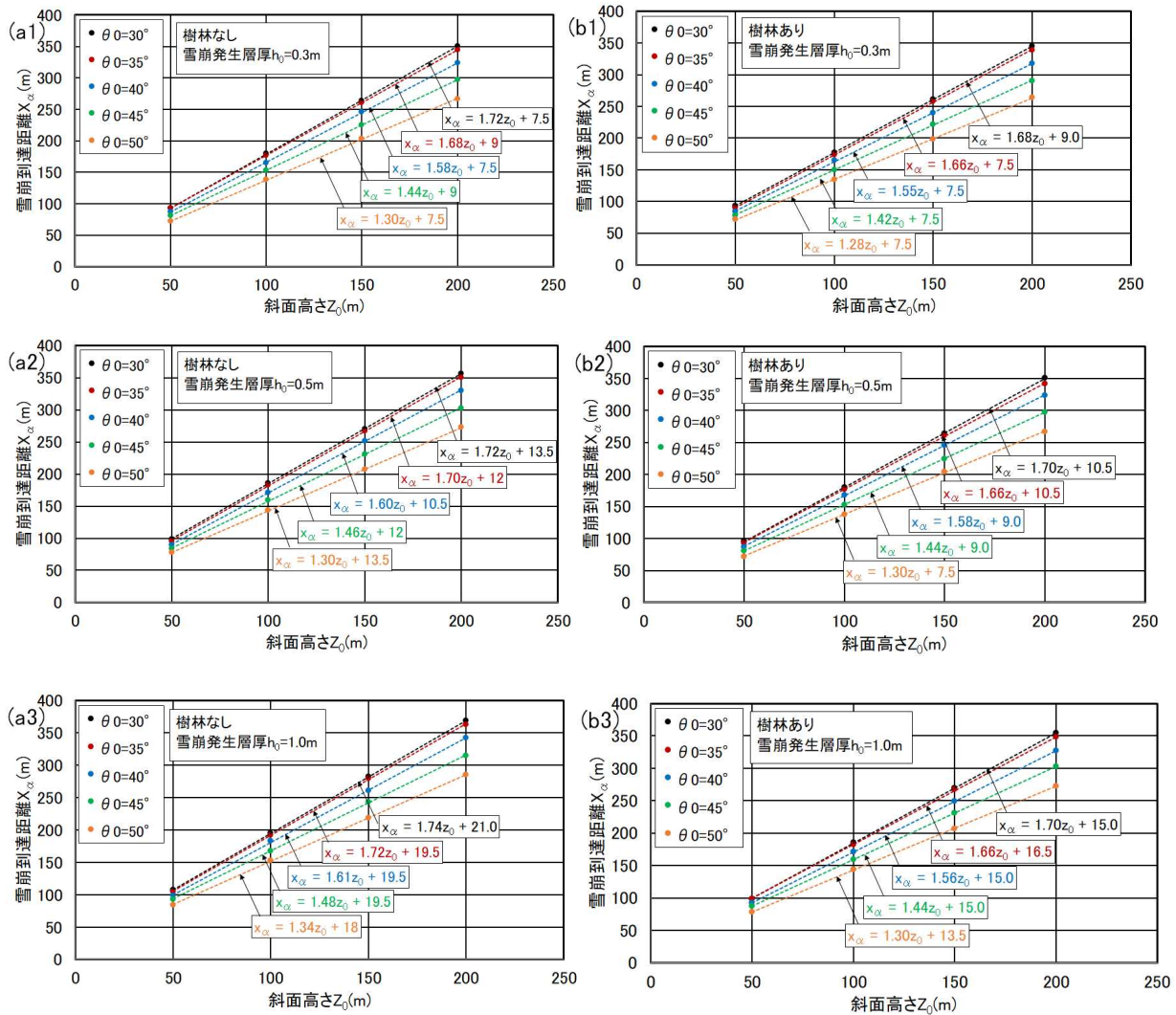


図-32 表-2の本研究における設定値を用いたときの雪崩到達距離 $x_\alpha$ と斜面高さ $z_0$ の関係。(a1)~(a3)は樹林がないときの雪崩発生層厚 $h_0 = 0.3\text{m}, 0.5\text{m}, 1.0\text{m}$ の場合、(b1)~(b3)は樹林があるときの $h_0 = 0.3\text{m}, 0.5\text{m}, 1.0\text{m}$ の場合の計算結果。

大きいほど、式(9)の駆動力を表す $\sin\theta$ の項は急激に減少し、一方クーロン摩擦抵抗の項 $\mu\cos\theta$ は急激に増加するため、雪崩の速度の増加率が小さくなり雪崩到達距離 $x_\alpha$ は短くなる。

図-32より、雪崩発生層厚 $h_0$ と雪崩到達距離 $x_\alpha$ の関係をみると、樹林の有無に関係なく、雪崩発生層厚 $h_0$ が大きくなるにしたがって雪崩到達距離 $x_\alpha$ は長くなる。これは、雪崩の規模が大きくなるほど到達距離が増大する傾向があることが経験的に知られていることと矛盾しない<sup>74)</sup>。樹林の有無による雪崩到達距離 $x_\alpha$ の違いに着目すると、樹林がある場合( $\lambda = 0.022$ )、式(9)と式(13)から $u^2$ の係数は $1/\xi h = n^2/h^{4/3} + c_p\lambda/(2g)$ となり、樹林のないとき( $\lambda = 0$ )に比べて第2項の分だけ抵抗力が増加するため、雪崩到達距離 $x_\alpha$ が短くなる。

## 6. 5 雪崩の衝撃圧と到達距離の算出方法のまとめ

本章では、短時間多量降雪時に樹林内で発生して流下する雪崩の到達距離と衝撃圧を算出する手法を検討した。その結果、フェルミーの雪崩の運動方程式<sup>54)</sup>に立木から受ける抵抗力を加えることにより、樹林の影響を考慮した雪崩の到達距離と衝撃圧を算出することが可能になった。この算出方法の妥当性を検証したところ、雪崩の実走斜距離と落差の関係などの経験則と整合することが示された。よって、本研究で提案する樹林の影響を考慮した雪崩運動モデル<sup>75)</sup>により、樹林の有無、斜面高さ、雪崩発生区の傾斜角、雪崩発生層厚などの各種条件を任意に設定して、雪崩の到達距離と衝撃圧を算出することが可能になった。

本研究で提案する雪崩運動モデルの活用により、短時間多量降雪による雪崩発生気象と積雪の条件(第2~3章)および植生や地形の条件(第4章)に応じた雪崩の到達距離と衝撃圧を算出することができる。また、頻度解析から求めた雪崩発生条件に合致する降雪深(第5章)を雪崩運動モデルの発生層厚に適用することで、雪崩対策施設的设计条件となる頻度(例えば、30年確率など)で発生すると考えられる雪崩の到達距離と衝撃圧を算出することが可能である。

## 7. 短時間の多量降雪による雪崩危険度評価手法

短時間多量降雪時の雪崩による被害軽減に資する雪崩危険度評価手法を提案することを目的として、雪崩発生時の気象と積雪条件、植生と地形条件、発生頻度および雪崩の衝撃圧と到達範囲について検討を行った。以下では、本研究における検討結果をまとめ、短時間多量降雪による雪崩の危険度評価手法を提案する。

### 7. 1 雪崩危険度評価の各要素の検討結果のまとめ

第2章では、2014年2月の短時間多量時の樹林内における雪崩発生条件について、降雪時の気温と降雪強度を用いて積雪の圧縮粘性理論に基づいて推定される斜面積雪の安定度と硬度を指標に、樹林内における雪崩発生気象と積雪条件を調べた。その結果、降雪強度が大きい気象条件下で降雪から12時間程度で斜面積雪が不安定となり(第一条件)、かつ気温が低いために積雪硬度が小さい積雪が形成される(第二条件)ことにより、樹林内でも雪崩が発生したと考えられる。具体的な気象および積雪条件として、12時間という短時間に45cm以上の降雪があり、この降雪時の平均気温が $-4^\circ\text{C}$ 以下のときに、普段は発生しにくい樹林内でも雪崩が発生する傾向にある。

第3章では、短時間多量降雪時の雪崩の実態と積雪状態に関する現地観測を行った。2018年1月の乗鞍高原における現地観測などの結果から、低気圧性の降雪には、雲粒付着の少ない樹枝状や角板、広幅六花など降雪結晶が多く見られ、これらの結晶により積雪内に密度と硬度が小さい弱層が形成されやすく、雪崩発生に関して降雪結晶の種類や新雪密度に注意する必要があることを示した。

第4章では、雪崩発生植生と地形条件について、既往の文献レビューと、2014年2月の関東甲信地方の短時間多量降雪時の雪崩発生箇所のうち建物被害が確認された箇所の植生と地形の現地調査を行った。その結果、樹林内における乾雪雪崩発生植生条件として着目すべき要素は、立木間隔(立木密度)、胸高直径、樹種であり、地形条件としては斜面勾配が重要であることを示した。

第5章では、第2章から第4章で提示した雪崩発生条件を満たす降雪事例を過去の気象データから抽出して、その発生頻度を簡便に推定する手法を検討した。検討の結果、降雪事例の降雪深と発生頻度の間には指数関係が成立し、両者の回帰式から降雪深がある値を超過する発生頻度を簡便に推定できることが明らかになった。また、この発生頻度解析手法が、国内の積雪地域全体に適用可能であることを示し、短時間多量降雪による雪崩発生頻度の地域分布や地域的な特徴を明らかにした。

第6章では、樹林内を流下する雪崩の運動モデルを提案した。ただし、雪崩流動層厚、動摩擦係数、流動係数などの設定方法が既往研究と異なることから、雪崩到達距離に関する経験則との比較検討から、本研究で提案する雪崩運動モデルの妥当性について検証を行った。その結果、本研究で提案する雪崩運動モデルが、雪崩の実走斜距離と落差の関係などの経験則と整合することを示した。また、この雪崩運動モデルの活用により、立木密度とともに雪崩に対する抵抗が増して雪崩の最大衝撃圧と到達距離が小さく

なるなど、樹林の影響を考慮した雪崩の衝撃圧と到達距離を計算することが可能になった。

## 7.2 短時間の多量降雪による雪崩危険度評価手法

7.1 節の検討結果に基づき、以下では短時間多量降雪による雪崩危険度評価手法を提案し、その活用と留意点について述べる。

### 7.2.1 短時間多量降雪による雪崩発生評価手法

第2章から第4章では、短時間多量降雪による雪崩の発生条件を、気象、積雪、降雪結晶の特徴、植生、地形の観点から検討を行い、普段は発生しにくい樹林内での雪崩発生条件を提示した。既往の雪崩危険斜面の判定手法である、斜面勾配や植生、積雪深に基づく評価得点による危険度判定<sup>76),77)</sup>では、高木が密に存在する斜面では雪崩発生危険度が小さいという判定になる。しかし、2014年の関東甲信地方を中心とした大雪では、各地で樹林内において雪崩が発生した(第2章)。本研究では、普段は発生しにくく、既往の雪崩危険度判定手法では評価できない樹林内における雪崩発生に対して、その発生条件と着目すべき要素を提示することで、短時間多量降雪による雪崩発生評価手法を提案した。特に、樹林が密な状態であっても、短時間(12時間)の降雪深が45cm以上となり、かつこの降雪時の平均気温が-4℃以下と低い場合には、樹林内でも雪崩が発生する傾向にあることを示した。

本研究で提案した雪崩発生評価手法の活用として、気象予報や現地の観測データから、本研究で提示した雪崩発生条件に合致する短時間多量降雪が予想あるいは確認される場合には、道路の通行止め等の規制や規制区間における雪崩発生状況の現地確認の際あるいは雪崩に対する警戒避難の判断のための参考資料として活用できると考えられる。特に、本研究で提示した雪崩発生条件に合致する短時間多量降雪時には、従来発生しにくいと考えられてきた樹林内においても雪崩が発生する可能性があることを念頭に置くことが大切である。

### 7.2.2 短時間多量降雪による雪崩発生危険度図

第5章では、短時間多量降雪時の雪崩発生条件(第2章～第4章)を満たす降雪事例の発生頻度解析手法の提案を行い、この手法が全国の積雪地域に対して適用できることを示した。また、全国57箇所における発生頻度の推定式を示し、短時間多量降雪に伴う樹林内の雪崩発生頻度の地域分布(雪崩発生危険度図)を提示した。国内では、同一箇所における雪崩の長期間にわたる発生記録は皆無であり、雪崩発生に関して直接的な頻度解析を行うことは難しい。しかし、本研究で提案した気象データを利用して雪崩の発生頻度を推定する手法は簡便で有用であると考え

られる。

本研究で提案した手法により、短時間多量降雪による雪崩や降雪深<sup>78)</sup>の発生頻度の推定式を予め求めておくと、気象予報などで今後予想される降雪深が、対象箇所においてどのくらいの頻度で起こる降雪なのか、あるいは樹林内における雪崩発生の可能性の有無などを事前に把握することができ、大雪や雪崩などに対する予防的対策や事前準備の参考資料として用いることができると考えられる。ただし、この手法により雪崩の発生頻度解析を行う場合は、解析結果が雪崩発生の可能性(ポテンシャル)を示すものであり、実際の雪崩の発生には植生や地形の状況も影響<sup>21)</sup>することに留意が必要である。本研究の発生頻度解析結果を活用する際は、雪崩発生評価手法(7.2.1項)も参考にしていきたい。

### 7.2.3 短時間多量降雪による雪崩危険度評価手法

第6章では、樹林内を流下する雪崩の運動モデルを考案し、樹林の有無、斜面高さ、雪崩発生区間の傾斜角、雪崩発生層厚などの各種条件に応じた雪崩の到達距離と衝撃圧の算出ができることを示した。また、第5章の頻度解析から求めた雪崩発生条件に合致する降雪深を雪崩運動モデルの発生層厚に適用することで、30年や50年、100年など異なる発生頻度(または再現期間)に相当する雪崩の到達範囲と衝撃力を推定することができると考えられる。本研究では、この手法を短時間多量降雪による雪崩危険度評価手法として提案する。

本研究で提案する雪崩危険度評価手法により、雪崩対策施設の設計条件となる頻度(30年確率や50年確率など)<sup>76),77),79)</sup>で発生すると考えられる雪崩の到達距離と衝撃圧を算出することが可能である。さらに、ヨーロッパや北米において実施されている雪崩対策の計画のためのゾーニングやハザードマップの作成<sup>79)</sup>に、本手法を活用するという方法も考えられる。ただし、本研究で対象としたのは、短時間多量降雪時において発生する乾雪表層雪崩であることに留意が必要である。第5章で提示した発生頻度は、新たに積もった積雪がすべて崩落することを仮定しており、この新積雪層の内部で崩落が起こって雪崩が発生する場合は、雪崩の規模(発生量)を過大評価することになる。一方、降雪前のすでに存在する積雪の内部に弱層があって、この弱層に新たな降雪による応力が増して、そこから雪崩発生に至る場合は過小評価となる。このような不確定な要素による影響を考慮する一つの方法として、雪崩の到達範囲や衝撃力の再現期間値を算出するにあたり、地形や植生の要素と関連付けながら、それぞれの再現期間値に対する統計的な信頼区間を推定して評価する手法<sup>80)</sup>などがある。

あるいは本研究で提案した樹林の影響を考慮した雪崩運動モデルの活用において、現地の状況に応じて複数の発生層厚（例えば、降雪深 45～50cm）や立木密度の条件で計算を行い、雪崩の到達距離と衝撃圧の幅を持った算出結果の示し方も考えられる。

#### 7.2.4 まとめ

短時間多量降雪時には、従来発生しにくいと言われている樹林内でも雪崩が発生することが特徴である。しかし、これまでの雪崩危険度評価手法では、短時間多量降雪により樹林内で発生する雪崩を評価することができなかった。また、雪崩の規模と発生頻度を把握することは、雪崩対策を計画する上で重要であるが、雪崩の長期的な発生記録を有する地域は非常に限られ、特に日本国内では雪崩の履歴データから発生頻度を解析することは困難であった。さらに、樹林の影響を考慮した雪崩の到達距離や衝撃圧を算出する手法が存在しなかった。

本研究により、短時間多量降雪による樹林内での雪崩発生条件（雪崩発生評価手法）が明らかになり、またこの発生条件を満たす降雪事例の発生頻度の地域分布（雪崩発生危険度図）を提示した。さらに、樹林の影響を考慮した雪崩運動モデルを提案した。以上より、短時間多量降雪時の雪崩の規模（発生層厚＝降雪深）と発生頻度を想定した雪崩の衝撃圧と到達距離の推定が、対象とする地域ごとに行うこと（雪崩危険度評価）が可能と考えられる。

#### 参考文献

- 和泉 薫、河島克久、伊豫部勉、松元高峰：2014 年 2 月中旬の大雪による雪崩災害の発生状況と特徴、科学研究費助成事業（課題番号 2590003）研究成果報告書、pp.111-118、2014 年 8 月
- 原田裕介、高橋渉、松下拓樹、石田孝司：短時間多量降雪に起因する雪崩発生の特徴—北海道十勝南部での調査事例—、寒地技術論文・報告集、Vol.33、pp.187-192、2017 年 11 月
- 秋山一弥、関口辰夫、池田慎二：2014 年 2 月の大雪によって山梨県の早川周辺で発生した雪崩の特徴、雪氷、77 巻、pp.47-57、2015 年 1 月
- 中村一樹、上石 勲、阿部 修：2014 年 2 月の低気圧の降雪による雪崩の特徴、日本雪工学会誌、Vol.30 No.2、pp.106-113、2014 年 4 月
- 上石 勲、中村一樹、安達 聖、山下克也：2014 年 2 月の南岸低気圧の降雪による雪崩被害と関連する大雪災害、科学研究費助成事業（課題番号 2590003）研究成果報告書、pp.119-125、2014 年 8 月
- 阿部 修、中村一樹、佐藤研吾、小杉健二：国道 48 号関山峠の雪崩災害、科学研究費助成事業（課題番号 2590003）研究成果報告書、pp.135-138、2014 年 8 月
- 町田 誠、杉本 敦、松井富栄、町田 敬：2014 年 2 月 14 日からの南岸低気圧通過時に発生した雪崩災害事例—群馬県内国道 17 号三国峠—、雪氷研究大会（2014・八戸）講演要旨集、p.78、2014 年 9 月
- 石川政幸、佐藤正平、川口利次：なだれ防止林の立木密度、雪氷、31 巻、pp.14-18、1969 年 1 月
- 山口 悟、西村浩一、納口恭明、佐藤篤司、和泉 薫、村上茂樹、山野井克己、竹内由香里、M. Lehning：上高地乗鞍スーパー林道で発生した雪崩（2003 年 1 月 5 日）の調査報告、雪氷、66 巻、pp.51-57、2004 年 1 月
- 秋山一弥、花岡正明、武士俊也、池田慎二：樹林地と無林地における斜面積雪と雪崩の発生、日本雪工学会誌、Vol.28 No.1、pp.22-26、2012 年 1 月
- Schneebeli, M., and M. Meyer-Grass: Avalanche starting zones below the timber line structure of forest, Proceedings of International Snow Science Workshop (ISSW), pp.176-181, 1992
- Teich, M., C. Marty, C. Gollut, A. Grêt-Regamey and P. Bebi: Snow and weather conditions associated with avalanche releases in forests: Rare situations with decreasing trends during the last 41 years, Cold Regions Science and Technology, Vol.83-84, pp.77-88, 2012
- Viglietti, D., S. Letey, R. Motta, M. Maggioni and M. Freppaz: Snow avalanche release in forest ecosystems: A case study in the Aosta Valley Region (NW-Italy), Cold Regions Science and Technology, Vol.64, pp.167-173, 2010
- McClung, D. M.: Characteristics of terrain, snow supply and forest cover for avalanche initiation caused by logging, Annals of Glaciology, Vol.32, pp.223-229, 2001
- 松下拓樹：関東甲信大雪時の樹林における雪崩発生条件について、気象研究ノート、第 241 号、pp.426-435、2019 年 12 月
- 和泉 薫、松元高峰、上石 勲、佐々木邦明、高橋 徹、森山英樹：2014 年 2 月の大雪による関東甲信地方の雪氷災害、雪氷、77 巻 4 号、i-ii、2015 年 7 月
- 遠藤八十一：降雪強度による乾雪表層雪崩の発生予測、雪氷、55 巻、pp.113-120、1993 年 6 月
- Abe, O.: Creep experiments and numerical simulations of very light artificial snowpacks, Annals of Glaciology, Vol.32, pp.39-43, 2001

- 19) 竹内由香里、納口恭明、河島克久、和泉 薫：デジタル式荷重測定器を利用した積雪の硬度測定、雪氷、63巻、pp.441-449、2001年9月
- 20) 秋山一弥、池田慎二、木村諤、松下拓樹：2014年2月の大雪によって山梨県早川周辺で発生した雪崩の到達距離と地形の関係、雪氷、78巻、pp.439-457、2016年11月
- 21) 松下拓樹、高橋渉、松澤勝、高橋丞二：広葉樹林における乾雪表層雪崩の発生条件について、日本雪工学会論文集、Vol.34 No.4、pp.55-67、2018年10月
- 22) 石坂雅昭、藤野丈志、本吉弘岐、中井専人、中村一樹、椎名徹、村本健一郎：2014年2月の南岸低気圧時の新潟県下における降雪粒子の特徴—関東甲信地方の雪崩の多発に関連して—、雪氷、77巻、pp.285-302、2015年7月
- 23) 池田慎二：無名沢雪崩事故の原因となった降雪結晶弱層による積雪不安定性の形成過程と持続性、雪氷、77巻、pp.17-35、2015年1月
- 24) Bair, E. H., R. Simenhois, K. Birkeland, and J. Dozier: A field study on failure of storm snow slab avalanches, Cold Regions Science and Technology, Vol.79-80, pp.20-28, 2012
- 25) 中村一樹、佐藤友徳、秋田谷英次：降雪系弱層形成時の気象の特徴、北海道の雪氷、No.32、pp.14-17、2014年1月
- 26) 松下拓樹、石川茂、石田孝司：南岸低気圧による降雪結晶弱層の密度と硬度の時間変化、寒地技術論文・報告集、Vol.32、pp.120-125、2016年11月
- 27) 高橋渉、原田裕介、松下拓樹、松澤勝：短時間多量降雪時の雪崩発生に関わる積雪密度の時間変化に関する現地観測、寒地土木研究所月報、No.770、pp.24-30、2017年7月
- 28) 原田裕介、石田孝司：樹林帯をすり抜けて多発する雪崩発生時の気象の特徴 —上高地乗鞍スーパー林道の事例—、雪氷研究大会(2017・十日町)講演要旨集、p.221、2017年9月
- 29) 遠藤八十一：積雪の破壊、基礎雪氷学講座III 雪崩と吹雪、古今書院、pp.42-51、2000年2月
- 30) 堀和彦、井良沢道也、阿部修、松嶋秀士：模擬森林による積雪の移動量および雪荷重の測定、日本雪工学会論文集、Vol.33 No.1、pp.1-11、2017年1月
- 31) Höller, P.: Snow gliding on a south-facing slope covered with larch trees, Annals of Forest Science, Vol.71, pp.81-89, 2014
- 32) 相浦英春：斜面積雪の安定に必要な立木密度、日本森林学会誌、87巻1号、pp.73-79、2005年2月
- 33) 遠藤八十一、大関義男、庭野昭二：表層雪崩の発生防止に必要な立木密度、日本雪氷学会秋季大会講演予稿集、p.126、1989年10月
- 34) Schneebeli, M., and P. Bebi: Snow and avalanche control, Hydrology, Encyclopedia of Forest Sciences, Elsevier, pp.397-402, 2004
- 35) Frehner, M., B. Wasser, and R. Schwitter: Avalanches, Sustainability and success monitoring in protection forests, The Federal Office for the Environment (FOEN), Appendix 1, pp.2-7, 2007
- 36) 佐伯正夫、渡辺成雄、大関義男：若齢広葉樹林の雪崩防止効果、雪氷、41巻、pp.37-47、1979年3月
- 37) 杉山利治、佐伯正夫：植生のなだれ防止機能に関する研究、防災科学技術総合研究報告、3号、pp.29-41、1965年3月
- 38) 佐藤大七郎：林分の立木密度と平均直径との関係についてのREINEKE'Sの式について、日本林学会誌、44巻12号、pp.343-349、1962年12月
- 39) 柳谷新一、都築和夫、小西明：東北地方におけるシイタケ原木林の本数管理と原木生産量、林業試験場東北支場年報、7号、pp.111-122、1966年
- 40) 西山嘉寛：広葉樹林管理技術に関する研究—伐採地に植栽された広葉樹の成長—、岡山県農林水産総合センター森林研究所所報、27号、pp.83-90、2011年12月
- 41) In der Grand, H., 新田隆三(訳)：ヨーロッパの山岳林に関する雪崩学の成果、雪氷、44巻、pp.105-110、1982年6月
- 42) 新田隆三：森林の雪崩防止機能、雪氷、53巻、pp.217-224、1991年9月
- 43) Tremper, B.: Staying alive in avalanche terrain, Mountaineers Books, 318pp, 2008
- 44) 工藤哲也、石川政幸、大関義男、庭野昭二、渡辺成雄、松岡広雄、山野井克己：植生要素と雪崩発生度の解明に関する研究、豪雪地帯における雪害対策技術の開発に関する研究、科学技術庁研究開発局、pp.88-98、1988年3月
- 45) 建設省北陸地方建設局北陸技術事務所：昭和63年度なだれ防災対策調査報告書、94pp、1989年3月
- 46) Bebi, P., D. Kulakowski, and C. Rixen: Snow avalanche disturbances in forest ecosystems - State of research and implications for management, Forest Ecology and Management, Vol.257, pp.1883-1892, 2009
- 47) McClung, D. M.: Characteristics of terrain, snow supply and forest cover for avalanche initiation caused by logging, Annals of Glaciology, Vol.32, pp.223-229, 2001
- 48) 池田慎二、秋山一弥、松下拓樹：2014年2月の関東甲信大雪時に発生した雪崩の運動の特徴、気象研究ノート、第241号、pp.436-442、2019年12月
- 49) Matsushita, H., and K. Ishida: Characteristics of snow avalanche release in forests during a heavy snowfall event,



- Proceedings of International Snow Science Workshop (ISSW), pp.556-560, 2016
- 50) 松下拓樹、高橋渉、松澤勝：短時間多量降雪時の雪崩発生リスクを簡便に把握する手法、寒地土木研究所月報、No.780、pp.19-24、2018年5月
- 51) 松下拓樹、高橋 渉、高橋丞二：雪崩発生条件を満たす降雪事例の頻度解析、寒地土木研究所月報、No.792、pp.2-10、2019年5月
- 52) 松下拓樹、高橋 渉、高橋丞二：気象データを用いた短時間多量降雪時の雪崩発生頻度の推定、寒地土木研究所月報、No.807、pp.2-10、2020年7月
- 53) 松下拓樹、松澤 勝、伊東靖彦、加治屋安彦：斜面積雪が雪崩予防柵面をすり抜ける現象の発生条件、寒地土木研究所月報、No.665、pp.10-17、2008年10月
- 54) Voellmy, A.: Über die Zerstörungskraft von Lawinen, Schweizerische Bauzeitung, Vol.73, pp.159-165, 1955 (On the destructive force of avalanches, translated by R. E. Tate, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Alta Avalanche Study Center Translation, No.2, 64pp, 1964)
- 55) 小川紀一郎：表層雪崩の発生と流下に関する考察、新砂防、43巻1号、pp.23-29、1990年5月
- 56) 池田俊介：詳述水理学、技報堂出版、pp.266-270、1999年1月
- 57) 岡本芳美：開水路の水理学解説、鹿島出版会、pp.129-133、1991年9月
- 58) 関根正人：移動床流れの水理学、共立出版、p.192、2005年2月
- 59) 坊城智弘：フェルミの雪崩運動モデルにおける抵抗パラメータに関する一考察、雪氷、51巻、pp.170-177、1989年9月
- 60) 新山純一、松田宏、飯倉茂弘、河島克久、藤井俊茂：東北新幹線盛岡・八戸間のなだれ危険度評価とその工学的意義、日本雪工学会誌、Vol.19 No.2、pp.91-101、2003年4月
- 61) 日本建設機械化協会 編：新編防雪工学ハンドブック（改訂版）、527pp、1988年3月
- 62) Schaerer, P. A.: Friction coefficients and speed of flowing avalanches, IAHS-AIHS Publications, No.114, pp.425-432, 1975
- 63) 松川宏：摩擦の物理、岩波書店、p.4、2012年6月
- 64) Platzler, K., P. Bartelt, and C. Jaedicke: Basal shear and normal stresses of dry and wet snow avalanches after a slope deviation, Cold Regions Science and Technology, Vol.49, pp.11-25, 2007
- 65) Gauer, P., K. Kronholm, K. Kristensen, and S. Bakkehoi: Can we learn more from the data underlying the statistical  $\alpha\beta$  model with respect to the dynamical behavior of avalanches ?, Cold Regions Science and Technology, Vol.62, pp.42-54, 2010
- 66) Gauer, P.: Considerations on scaling behavior in avalanche flow along cycloidal and parabolic tracks, Cold Regions Science and Technology, Vol.151, pp.34-46, 2018
- 67) 清水弘：なだれ、気象研究ノート、第136号、pp.63-123、1979年3月
- 68) Hopfinger, E. J.: Snow avalanche motion and related phenomena, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol.15, pp.47-76, 1983
- 69) McClung, D., and P. Schaerer: The avalanche Handbook (3rd edition), Mountaineers Books, 342pp, 2006.
- 70) 秋山一弥、関口辰夫：空中写真判読による雪崩の特徴と発生規模・発生数の関係、雪氷、75巻、pp.3-17、2013年1月
- 71) 秋山一弥、関口辰夫：Google Earthの広域写真判読で得られた雪崩の特徴と発生規模・発生数の関係、日本雪工学会論文集、Vol.34 No.1、pp.1-12、2018年1月
- 72) 松田宏、藤元隆彦、武士俊也、綱木亮介：雪崩到達距離に関する考察、雪氷、56巻3号、pp.265-269、1994年9月
- 73) Lied, K., and S. Bakkehoi: Empirical calculations of snow-avalanche runout distance based on topographic parameters, Journal of Glaciology, Vol.26, pp.165-177, 1980.
- 74) 和泉薫：大規模雪崩の流動性、新潟大学積雪地域災害研究センター研究年報、第7号、pp.187-194、1985年
- 75) 上之和人、松下拓樹、原田裕介、秋山一弥：樹林内を流下する雪崩運動モデルの提案、寒地技術論文・報告集、Vol.35、pp.58-63、2019年11月
- 76) 砂防学会（監修）：雪崩対策、山海堂、328pp、1993年2月
- 77) 日本建設機械化協会、雪センター（編）：2005除雪・防雪ハンドブック（除雪編）、417pp、2004年12月
- 78) 松下拓樹、高橋 渉、高橋丞二：降雪の発生頻度に関する簡易評価手法(2)、寒地技術論文・報告集、Vol.35、pp.73-78、2019年11月
- 79) Rudolf-Miklau, F., S. Sauermoser, and A. I. Mears (eds.): The Technical Avalanche Protection Handbook, Wilhelm Ernst & Sohn, 408pp, 2015
- 80) Barbolini, M., and C. J. Keylock: A new method for avalanche hazard mapping using a combination of statistical and deterministic models, Natural Hazards and Earth System Sciences, Vol.2, pp.239-245, 2002

## 5.2 広域に適用できる道路の視程障害予測技術の開発

### 5.2.1 広域的な吹雪視程障害予測技術の開発に関する研究

担当チーム：寒地道路研究グループ（雪氷チーム）

研究担当者：西村敦史、萬 直樹、高橋丞二、松澤 勝、  
松下拓樹、原田裕介、大久保幸治、國分  
徹哉、松島哲郎、小中隆範、武知洋太、  
大宮 哲

#### 【要旨】

近年、急激に発達した低気圧の影響により、北海道に限らず本州などの吹雪の発生頻度が低かった地域でも、吹雪による交通障害が発生するようになってきている。これまで、防雪施設などのハード対策によって吹雪災害の軽減に効果を上げていたが、多くの時間と費用が必要となる。そこで本研究では、北海道に加え全国の積雪寒冷地で適用可能な吹雪視程予測技術を開発し、吹雪時に道路管理者や道路利用者の行動判断を支援することで、吹雪災害の被害軽減に資することを目的としている。

令和3年度は、多様な気象環境下での吹雪視程予測技術の適用に向け、改良した新しい地吹雪発生条件（新アルゴリズム）や飛雪空間密度の推定式を実装した視界情報提供システム（「吹雪の視界情報」）による予測対象エリアに青森県を追加し、道路利用者に向けた情報提供を開始した。また、北海道内を対象に、「吹雪の視界情報」で著しい視程障害が予測された場合に、SNSを用いて発信し、その導入効果についてとりまとめた。

キーワード：吹雪、視程障害、予測、情報提供

#### 1. はじめに

我が国の積雪寒冷地の道路では、冬期に吹雪視程不良による交通障害がしばしば発生するなど、厳しい走行環境にある。そこで、防雪施設（防雪柵、防雪林など）などのハード対策の整備が進められており、被害の軽減に効果を上げてきている。しかし、近年急激に発達した低気圧の影響により、北海道に限らずこれまで吹雪の発生頻度が比較的lowだった本州でも、吹雪災害が発生するようになってきた。従来のハード対策の整備には、多くの費用と時間が必要となる他、極端な暴風雪への対応には限界がある。早急かつ効果的な吹雪災害の被害軽減には、従来のハード対策に加えて、吹雪視程の現況及び予測情報を提供するなどのソフト対策を行うことが必要である。

そこで本研究では、北海道に加え全国の積雪寒冷地で適用可能な吹雪視程予測技術を開発し、この技術を用いた吹雪視程情報提供システムにより、吹雪時の道路利用者や道路管理者の判断を支援することで、多様化・複雑化する雪氷災害の被害軽減に資することを目的とする。

## 2. 研究概要と成果

### 2.1 多様な気象環境下における吹雪発生条件の解明

吹雪時における視程予測技術<sup>1)</sup>では、降雪の有無や雨雪の判別、地吹雪発生の有無などの前提条件を正確に予測することが重要である。前中長期目標期間（以下、前中期）に当研究所が開発した「吹雪視程障害予測技術<sup>2)</sup>」では、北海道の道央や道北の日本海側やオホーツク海側で調査した地吹雪の発生状況を基に設定した地吹雪発生条件<sup>3)4)</sup>を適用している。また、降水の雨雪判別<sup>5)</sup>には気温のみ<sup>6)7)</sup>を用いている。

このため、東北地方など、より広域な積雪寒冷地に、既往研究による地吹雪発生条件などの予測技術をそのまま適用していくことは不十分と考えられる。

そこで、降水種別の雨雪と気温及び相対湿度との関係について分析を行い、吹雪時の視程を推定する際の行う雨雪判別条件について改良を行った。また、現状の地吹雪発生条件の青森県での適用性や改善の必要性などを把握するため地吹雪の発生状況などの気象調査を行った。

#### 2.1.1 雨雪判別条件に関する分析

平成28年度は、北海道及び青森県内にある図-1に示した9箇所の気象台・測候所において観測された1時間毎の気象データを基に、雨雪判別条件について分析を行った。9箇所の内訳は、「札幌」、「旭川」、「網走」、

「帯広」、「釧路」、「函館」、「室蘭」、「稚内」、  
「青森」である。

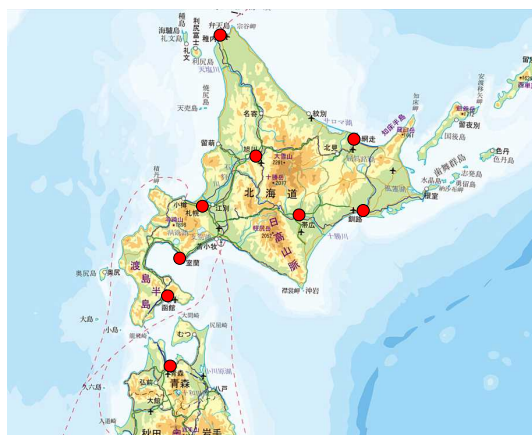


図-1 分析対象箇所  
(国土地理院 国土地理院地図に加筆)

分析対象とした期間は平成26年11月1日～平成27年3月31日、平成27年11月1日～平成28年3月31日の2冬期間とし、降水種別、気温、相対湿度のデータを用い分析を行った。なお、降水種別の観測結果は、「雪」、「雨」、「みぞれ」を対象とした。

雨雪の分類について気象学上「みぞれ」は雪に分類される。しかし、吹雪発生の判別や吹雪による視程障害の予測に活用することを考慮すると、「みぞれ」は雪に分類しないほうが良いと考えられる。そこで、本研究では雨雪判別の際に、降水種別の観測結果の「雪」を雪とし、「雨」及び「みぞれ」を雨とし2つに分類することとした。

図-2は、各観測箇所の「雪」、「みぞれ」、「雨」と観測された事例の割合である。このグラフより、太平洋側に近い「釧路」、「帯広」、「室蘭」や緯度が低く南に位置する「函館」や「青森」で「雨」又は「みぞれ」の出現割合が概ね3割以上と高くなる傾向が確認された。

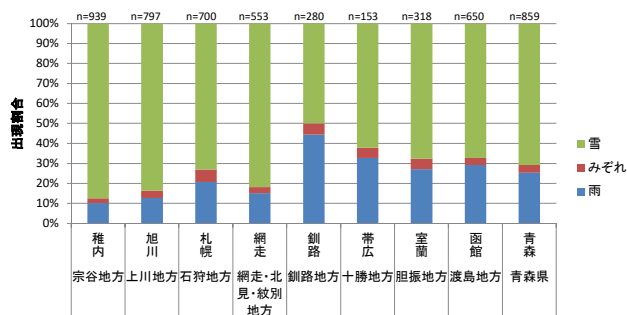


図-2 雪・みぞれ・雨の出現割合

図-3は、「雪」と「雨」又は「みぞれ」と観測された事例それぞれについての気温の中央値と、第1四分位数と第3四分位数を示した箱ひげ図である。また、図-4は、同様に相対湿度との関係について箱ひげ図で示したものである。

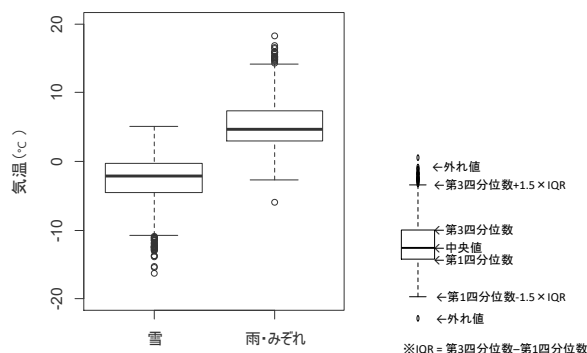


図-3 雨雪と気温との関係

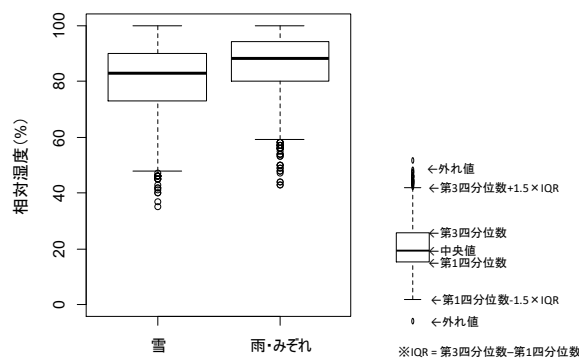


図-4 雨雪と相対湿度との関係

図-3より、気温については「雪」と「雨」又は「みぞれ」と観測された事例では「雪」の事例の方が気温は低い傾向がみられた。なお、「雪」と観測された事例の中央値が-2.1℃で、事例の半数は4.5～-0.3℃に集中していた。

一方、図-4より「雪」と「雨」又は「みぞれ」と観測された事例で相対湿度を比較すると、「雪」と観測された事例の方が低い傾向がみられたが、気温ほど明確な差は確認出来なかった。

この結果から、雨雪の発生に及ぼしている影響は、相対湿度に比べると気温の方が大きいと考えられる。

次に、図-5は「雪」と「雨」又は「みぞれ」と観測された事例それぞれの気温と相対湿度の関係を散布図で示した結果である。また、これらのデータを用い「雪」と

「雨」又は「みぞれ」を区分する判別分析を実施した結果、以下の式(1)（以下、「H28条件」という）を得た。そこで、グラフには併せてこの判別式を実線で記した。

$$RS = -0.313 \times T - 0.013 \times \varphi + 1.5246 \quad \dots(1)$$

ただし、 $T$ ：気温（℃）

$\varphi$ ：相対湿度（%）

$RS$ ：雨雪判別得点

$RS \geq 0$  の場合は「雪」

$RS < 0$  の場合は「雨」又は「みぞれ」

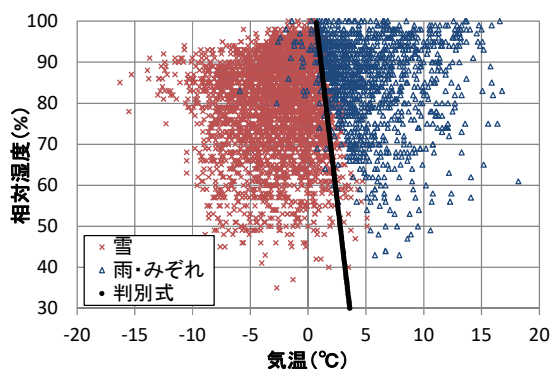


図-5 気温と相対湿度による雨雪判別条件

次に、この判別式の判別精度の検証を行った。この結果は表-1に示すとおりである。表-1より、雨雪の判別式は適中率が95%と高い精度が得られた。

表-1 判別式による「雪」と「雨」の判別結果

		観測	
		雪	雨・みぞれ
判別式	雪	71%(3749事例)	1%(56事例)
	雨・みぞれ	4%(200事例)	24%(1244事例)

■：雨雪判別の適中

■：「雪」の空振り

■：「雪」の見逃し

### 2.1.2 雨雪判別条件に関する検討

平成29年度は、図-1の北海道にある8箇所の気象台・測候所において、平成28年度に分析に利用した降水種別、気温、相対湿度のデータに、平成28年11月1日～平成29年3月31日までのデータを加え3冬期分とし、最適な雨雪判別条件の検討を行った。また、降水種別の観測結果は、平成28年度同様に「雪」、「雨」、「みぞれ」を対象として、降水種別の観測結果の「雪」を雪

とし、「雨」及び「みぞれ」を雨とし2つに分類して解析を実施した。

雨雪の判別条件については、以下の5つの条件で検討を行った。

- H28条件
- 気象庁の平成21年度数値予報研修テキスト④に記載されている「雪」と「雪か雨」境界(以下、「危険側条件」という)
- 気象庁の平成21年度数値予報研修テキスト④に記載されている「雪か雨」と「雨か雪」の境界(以下、「中間条件」という)
- 気象庁の平成21年度数値予報研修テキスト④に記載されている「雨か雪」と「雨」の境界(以下、「安全側条件」という)
- H28条件と危険側条件を組み合わせた条件(以下、「組み合わせ条件」という)

図-6に、降水種（「雪」と「雪か雨」または「みぞれ」と気温と相対湿度の関係を散布図とした上で、5つの雨雪判別条件による境界をそれぞれで示す。

次に、これら判別式の判別精度の検証を行った。判別精度は、表-2のとおり「適中率」、「空振り率」、「見逃し率」を求め確認した。

検証結果を図-7に示す。図によると、中間条件が最も適中率が高く96.6%であり、さらに見逃し率が0.5%と低くなることがわかった。

そこで、前中期で作成した「吹雪の視界情報」アルゴリズム②(以下、旧アルゴリズムという)に中間条件の判別式(2)を雨雪判別条件として組み込むこととした(以下、新アルゴリズムという)(図-8)。

$$RS = -\varphi + (100 \div 9) \times (T - 9.75) \times -1 \quad \dots(2)$$

ただし、 $T$ ：気温（℃）

$\varphi$ ：相対湿度（%）

$RS$ ：雨雪判別得点

$RS \geq 0$  の場合は「雪」

$RS < 0$  の場合は「雨」又は「みぞれ」

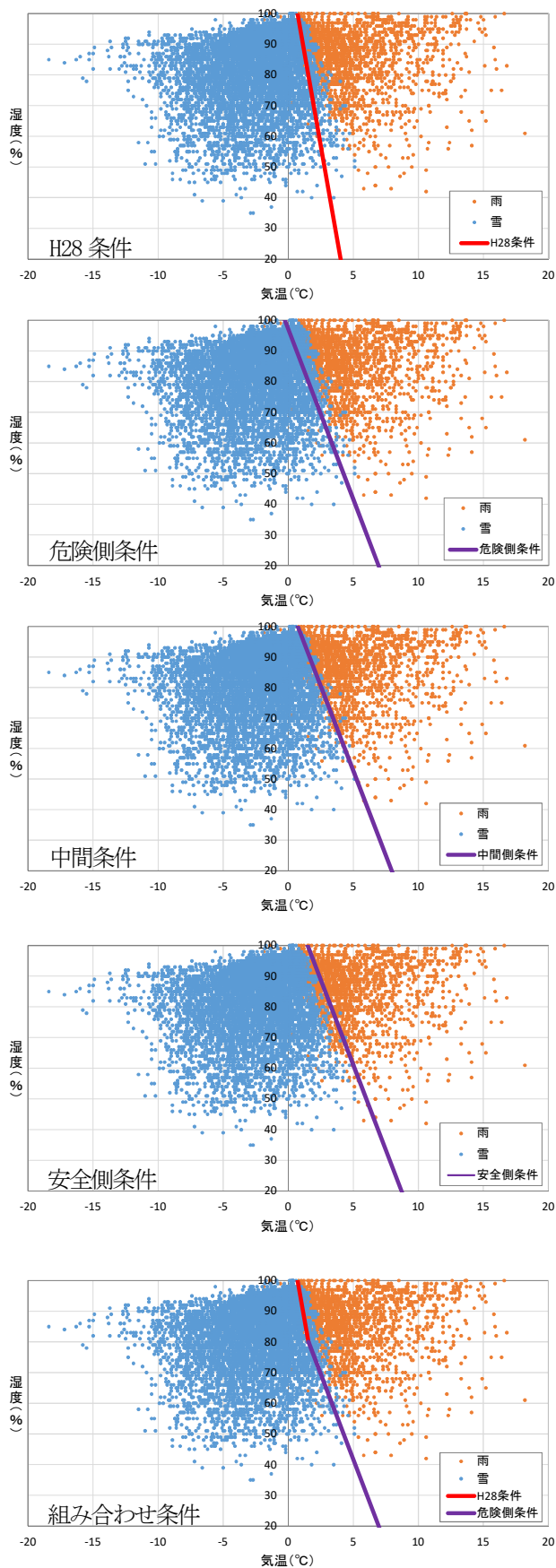


図-6 気温と相対湿度による雨雪判別条件(条件別)

表-2 判別式による適中率

		観測	
		雪	雨・みぞれ
判別式	雪	$n_{11}$	$n_{12}$
	雨・みぞれ	$n_{21}$	$n_{22}$

全データ数 =  $n$

- 適中率 =  $(n_{21} + n_{22})/n$
- 空振り率 =  $(n_{12})/n$
- 見逃し率 =  $(n_{21})/n$

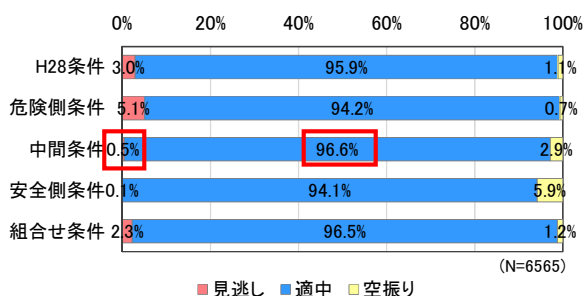


図-7 判別条件毎の適中率

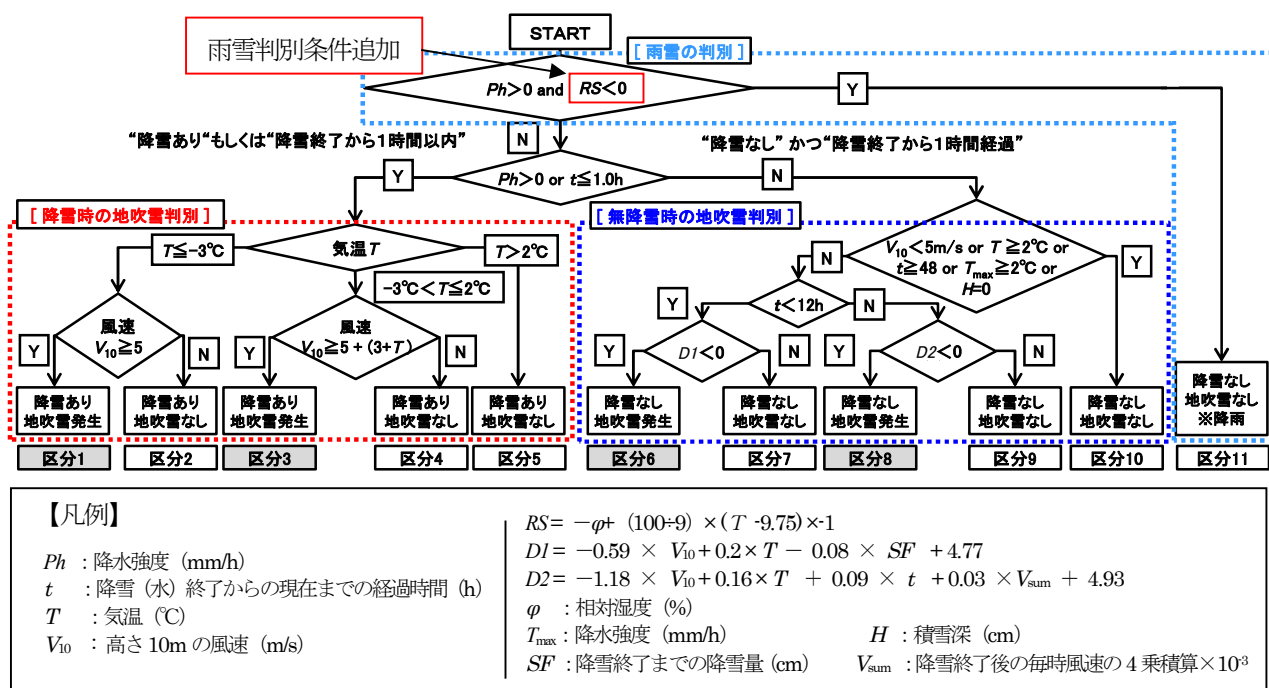


図-8 雨雪判別条件を改良した地吹雪判別条件（新アルゴリズム）

### 2.1.3 雨雪判別条件の改良後の情報提供精度

平成30年3月1日からは、2.1.2項に示した新アルゴリズム（図-8）を用いて「吹雪の視程情報（視程の予測情報）」の公開を行った。公開直後の3月1日から3月4日にかけて急速に発達した低気圧が北海道付近を通過し暴風雪が発生した。この低気圧の通過時に、北海道北部日本海側の初山別村を走る一般国道232号に設置している視程計（図-9）を用いて、新アルゴリズムと、旧アルゴリズムの視程情報の予測精度について検証を行った。精度検証は、「吹雪の視程情報」で提供している5ランクの視程状況での適中率を整理し行った。なお、適中率は表-3に示す方法で求めた。

表-3 吹雪視程の適中率

現地観測の視程	アルゴリズムによる吹雪時の視程推定				
	100未満	100～200m	200～500m	500～1000m	1000m以上
100未満	$n_{11}$	$n_{12}$	$n_{13}$	$n_{14}$	$n_{15}$
100～200m	$n_{21}$	$n_{22}$	$n_{23}$	$n_{24}$	$n_{25}$
200～500m	$n_{31}$	$n_{32}$	$n_{33}$	$n_{34}$	$n_{35}$
500～1000m	$n_{41}$	$n_{42}$	$n_{43}$	$n_{44}$	$n_{45}$
1000m以上	$n_{51}$	$n_{52}$	$n_{53}$	$n_{54}$	$n_{55}$

全データ数 =  $n$   
 適中率 =  $(n_{11} + n_{22} + n_{33} + n_{44} + n_{55}) / n$

図-10に、平成30年3月1日から3月4日の暴風雪視程の演算値、及び現地の視程の毎時の値を、吹雪の視程情報で提供している5ランクで整理した結果を示す。図-10より、適中率が新アルゴリズムの方が旧アルゴリズムより、2.6%上昇した。

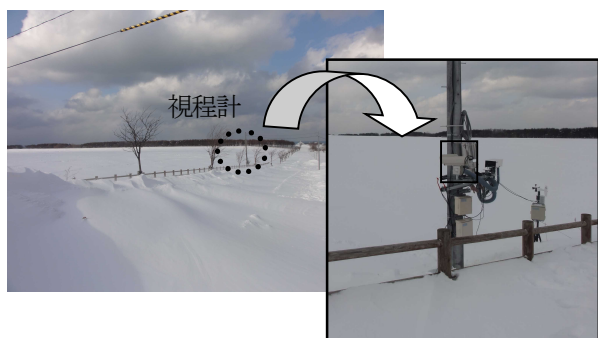


図-9 初山別村での気象観測状況

03月01日		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
推計値 (演算)	新アルゴリズム	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	旧アルゴリズム	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
視程計	観測結果	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

凡例

- 5 視程 1,000m 以上
- 4 視程 500~1,000m 未満
- 3 視程 200~500m 未満
- 2 視程 100~200m 未満
- 1 視程 100m 未満

↓ 適中率で整理

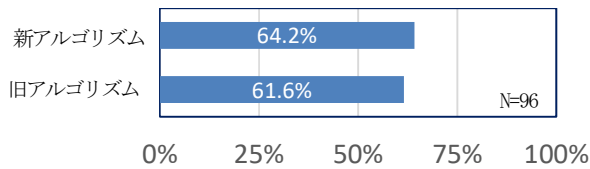


図-10 吹雪視程演算の適中率

### 2.1.4 多様な気象条件下における地吹雪発生条件の調査

北海道外での地吹雪発生条件を明らかとするため、青森県青森市及び五所川原市内の風上側が開けた箇所（図-11）で、地吹雪や視程障害の発生状況について調査を行った。

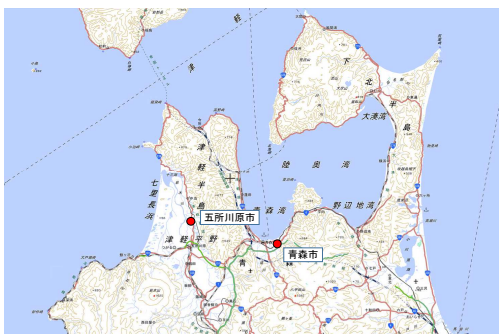


図-11 観測箇所

（国土地理院 国土地理院地図に加筆）

調査では、表-4 に示した観測項目について平成 28 年 12 月 1 日～平成 29 年 3 月 14 日、平成 29 年 11 月 22 日～平成 30 年 3 月 31 日、平成 30 年 12 月 1 日～平成 31 年 3 月 31 日、令和 1 年 12 月 1 日～令和 2 年 2 月 12 日の期間に観測を行った（図-12）。風向風速、温湿度、積雪深、日射量の観測間隔は 10 分とし、視程の観測間

表-4 地吹雪発生状況に関する定点気象観測項目

観測項目	観測機器	青森県	
		青森市	五所川原市
吹雪状況	タイムラプスカメラ BCC100	○※1	○
視程	視程計 MiniBSV	○※2	○※1
	風向風速計	○※2	○
気温	温湿度計 HMP35D	—	○
湿度		—	○
積雪深	積雪深計	—	○※1
日射量	日射量計 MS-402	—	○※1

※1はH29年度より観測開始  
※2はH30年度より観測開始  
「—」はアメダス等の既存データが利用可能のため未観測

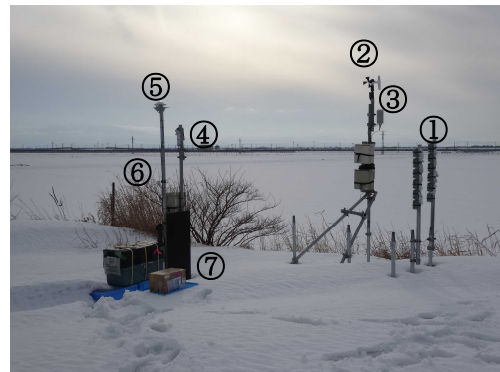


図-12 気象観測機器設置状況（五所川原市）

- ①タイムラプスカメラ、②風向風速計（地上高 2.5m）、
- ③温湿度計、④積雪深計、⑤日射量計、⑥視程計（地上高 1.2m）、⑦黒板

隔は 1 分とした。また、タイムラプスカメラの撮影は当初 10 分毎日中のみ記録した。しかし、地吹雪の判別が 10 分毎の画像では非常に難しかったため、平成 29 年 11 月 22 日からは 1 秒毎に撮影したコマ送り動画として記録した。

次に、これらのデータを用いて降雪時の地吹雪発生の有無と風向風速や気温との関係について吹雪の発生頻度が高かった五所川原市を対象に分析を行った。降雪及び地吹雪発生の有無、視程（設定した目標物に視認有無より判断）について動画データを用い 10 分毎に平均的な状況を判断した。ただし、地吹雪の判別結果に間違った判定結果のデータが含まれるのをできるだけ排除するため、1 秒毎に撮影したコマ送り動画データを取得した平成 29 年 11 月 22 日以降の観測データを分析対象とした。

図-13 は、降雪時に低い地吹雪及び高い地吹雪が発生

した場合と、しなかった場合の気温及び風速の関係を示した結果である。また、グラフには北海道石狩市における降雪時の地吹雪の発生条件に関する既往研究(竹内ら)の結果を参考に設定している地吹雪発生条件<sup>7)</sup>を併せて破線で示した。

図-13より、既往の地吹雪発生条件において地吹雪が発生するとされる気温と風速条件下においても、地吹雪が発生していない事例も多く見られた。また、気温 $0^{\circ}\text{C}$ より高い場合には地吹雪の発生している事例はあまり見られず、気温 $1^{\circ}\text{C}$ 以上ではほとんど地吹雪の発生事例がみられない(図-13の黒い色の破線囲み部)。これは、青森においては、北海道よりも気温が温暖であるため冬期に気温 $0^{\circ}\text{C}$ 以上となる機会が多く、北海道内よりも降雪粒子や雪面の雪質などが吹雪の発生しにくい条件となる頻度が高いため既往研究による地吹雪発生条件下でも地吹雪が発生しない事例が多く見られたと考えられる。

このため、青森県内で既往研究による低い地吹雪の発生条件を用いて地吹雪の発生を判断した場合、空振りしてしまう事例が多く発生することが懸念される。

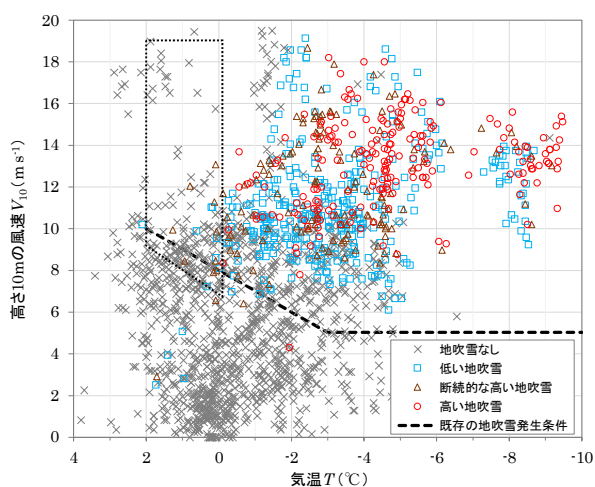


図-13 地吹雪発生有無と気温及び風速の関係  
(五所川原市：H29年11月22日～R2年2月12日)

## 2.2 降雪形態による視程低下のメカニズム解明

既往研究<sup>8)</sup>において、吹雪時の視程 $V_{IS}$ と飛雪流量 $q$ の間には強い相関関係があることが知られており、既往研究による吹雪視程障害予測技術<sup>1)2)4)</sup>においても、飛雪流量( $\text{g}/\text{m}^2/\text{s}$ )と目視観測による視程との実験式を用いて視程を推定している。なお、飛雪流量 $q$ とは単位時間に単位断面積を通過する飛雪粒子の質量( $\text{g}/\text{m}^2/\text{s}$ )である。

$$V_{IS} = 10^{-0.8861\log(q)+2.648} \quad \dots (3)$$

しかし、地吹雪に起因した飛雪粒子と降雪に起因した飛雪粒子では密度や大きさに差異がある。このため、飛雪流量が同じであっても飛雪粒子が地吹雪粒子によるものかあるいは降雪粒子によるものかによって視程が異なる可能性がある。

そこで、降雪形態の違いによる視程低下への影響など降雪時の視程低下メカニズムを明らかとするため、降雪時の視程調査に関する既往文献<sup>9)~15)</sup>を収集するとともに、冬期には降雪時に視程調査を以下のとおり実施した。

### 2.2.1 降雪時の視程調査

平成28年度、平成29年度及び平成30年度冬期に北海道石狩市、新潟県長岡市の2箇所(図-14)において、降雪時の視程の調査を行った。調査種別と調査期間は、表-5に示すとおりである。

視程観測のための目標物を設定し、降雪時に目視やカメラでの画像撮影による視程観測と降雪水量など気象状況の観測を行った。各調査箇所における気象データの観測項目と視程観測時に設定した目標物は表-6、表-7に示すとおりである。表-6に示した雨量計(DFIR)は、世界気象機関(WMO)が基準器として定めている二重柵基準降水量計を用いて計測した降水量を示す。また、目視観測は1回当たり30秒間で実施した。その結果、表-5の下線で示した視程の目視観測日には視程200m未満となった視程障害が観測された。図-15、図-16は降雪による視程障害発生時に撮影された目標物の画像の一例である。



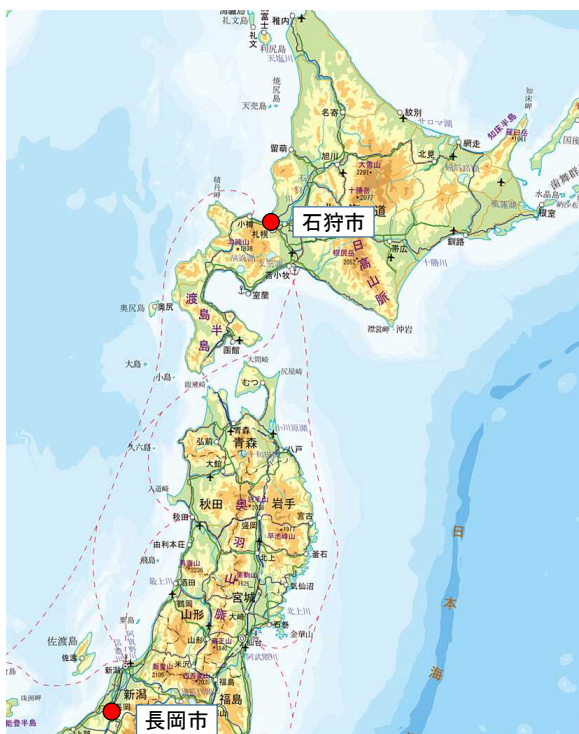


図-14 視程調査箇所  
(国土地理院 国土地理院地図に加筆)

表-5 視程観測と視程調査実施日

観測箇所	観測種別	調査期間
石狩市 (石狩吹雪実験場)	定点	2016年12月15日 ~ 2017年3月31日 2017年11月13日 ~ 2018年3月31日 2018年11月21日 ~ 2019年3月31日
	目視	2017年2月1日 2018年3月1日 2018年3月20日 2019年1月25日 2019年3月13日 2019年3月16日 2019年3月23日
長岡市 (防災科学研究所)	定点	2016年12月1日 ~ 2017年3月31日 2017年12月1日 ~ 2018年3月31日 2018年12月1日 ~ 2019年3月31日
	目視	2017年2月7日 2017年2月21日 2018年1月24日 2018年1月25日 2018年1月26日 2018年1月29日 2018年1月30日 2019年1月7日 2019年1月16日 2019年1月18日 2019年2月8日 2019年2月12日 2019年2月13日

※下線は目視により視程200m未満の視程障害が観測された事例

表-6 視程に関する定点気象観測の項目

観測項目	観測機器	石狩市	長岡市
		石狩吹雪実験場	防災科学技術研究所
視程(画像)	動画カメラ	○	—
	タイムラプスカメラ	—	○
降水量	雨量計(DFIR)	○	○
	雨量計(転倒ます型)	○	○
降雪粒子の粒径分布	レーザー式降水粒径速度分布測定装置	△	○
飛雪流量	飛雪粒子計数装置	○	—
風向風速	風向風速計	○	○
気温	気温計	○	○
積雪深	積雪深計	○	○

※「—」は未観測、「△」はH28年度を除き観測

表-7 視程観測のため設定した目標物

視程区分	石狩市 (石狩吹雪実験場)		長岡市 (防災科学研究所)	
	目標物	視程 (距離)	目標物	視程 (距離)
50m未満	視程板1	10m	視程板1※	10m
	視程板2	20m	視程板2	20m
	視程板3	40m	—	—
50m以上 100m未満	視程板4	60m	視程板3※	50m
	視程板5	80m	視程板4※	60m
	—	—	視程板5	85m
100m以上 200m未満	視程板6	100m	建物※	100m
	視程板7	135m	建物※	110m
	視程板8	175m	視程板6	135m
	—	—	樹林帯	150m
	—	—	樹林帯※	200m
200m以上 300m未満	視程板9	250m	—	—
300m以上 500m未満	樹林帯※	350m	—	—
500m以上 1000m未満	—	—	—	—
1000m以上	—	—	—	—

※2017年11月以降に追加



図-15 石狩市での視程観測（撮影画像の例）

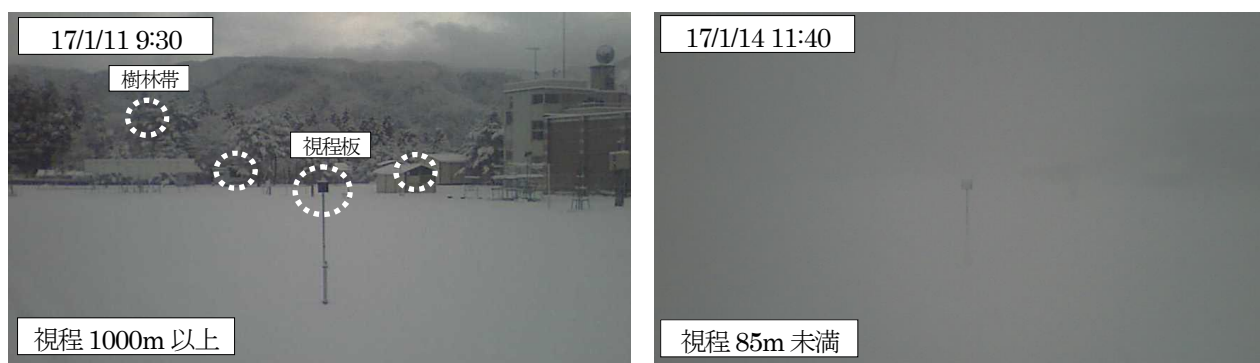


図-16 長岡市での視程観測（目標物と撮影画像の例）

さらに、石狩吹雪実験場で目視観測した結果を対象とし、視程と降雪強度の関係について分析を行った。なお、視程は視認できた最大距離より評価した。また、視程観測時の降雪強度はDFIRにより観測された1分毎の降水量より降雪強度を求めた。

図-17 は降雪強度と視程との関係を示した結果である。降雪による視程障害への影響を把握するため、地吹雪が発生していないと考えられる風速 $5\text{m s}^{-1}$ 未満の弱風時での調査結果のみを示した。

図-17 より、降雪強度の増加に伴い視程が低下する傾向がみられ、降雪強度が $10\text{mm h}^{-1}$ を超過すると視程は $100\text{m}$ 以下に低下する事例が見られた。ただし、視程が $175\text{m}$ まで低下した際にも降雪強度には $1\sim 8\text{mm h}^{-1}$ でバラツキが見られ、降雪強度以外の条件が視程に影響していることが考えられる。

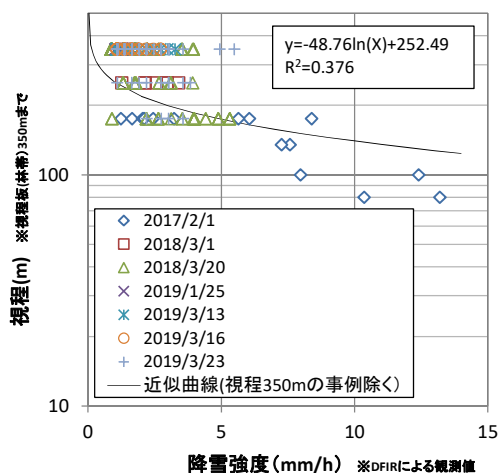


図-17 降雪強度と視程の関係（風速 $5\text{m/s}^{-1}$ 未満）

### 2.2.2 降雪時の視程と飛雪流量との関係

前述の通り、吹雪時における視程  $V_{is}$  と飛雪流量  $q$  との関係には式(3)が提案<sup>8)</sup>されており、吹雪時や降雪時の視程を推定する際に活用している。しかし、この関係式は主に吹雪時に得られた実験式であり風の弱い降雪時に適用可能かは未確認である。そこで、風の弱い降雪時の視程と飛雪流量との関係について分析を行った。

分析は、動画映像を撮影していた石狩吹雪実験場にお

ける観測結果から強い降雪強度が観測された事例(表-8)を対象に行った。

表-8 強い降雪が観測された分析対象の事例

日付	時刻		
	開始	終了	合計時間
2016年12月29日	9:00	10:00	1:00
2017年1月13日	12:00	15:00	3:00
2017年1月22日	13:40	14:40	1:00
2017年1月24日	15:50	16:40	0:50
2017年2月1日	14:44	15:10	0:26
2017年3月10日	9:00	10:00	1:00
	11:00	12:00	1:00
2017年11月19日	6:30	11:00	4:30
2017年12月5日	9:25	10:00	0:35
2017年12月9日	7:00	9:00	2:00
2017年12月16日	8:35	9:00	0:25
2018年1月4日	14:50	16:00	1:10
2018年1月6日	9:00	10:00	1:00
	10:30	12:00	1:30
	14:00	15:44	1:44
2018年2月11日	7:00	8:00	1:00
2018年2月17日	9:00	10:00	1:00
2018年2月26日	6:00	8:00	2:00
2018年2月28日	10:00	11:00	1:00
2018年3月20日	6:20	6:40	0:20
	7:20	8:20	1:00
2019年1月17日	7:00	8:00	1:00
集計時間	-	-	28:30:00

視程  $V_{10}$  は、抽出事例の動画映像より1分毎に前半30秒間の映像から主たる(平均的な)状況を読み取りにより判定した。飛雪流量  $q$  は、飛雪空間密度  $N$  と飛雪粒子の移動速度  $V$  の積として式(4)の通り表すことができる。なお、飛雪空間密度  $N$  とは単位空間に存在する飛雪粒子の質量である( $\text{g cm}^{-3}$ )。ここで降雪時における飛雪空間密度  $N$  は、降雪フラックスと降雪粒子の落下速度から式(5)として表せる。飛雪粒子の移動速度  $V$  は、風速に一致すると仮定すると水平風速と降雪粒子の落下速度から式(6)の通り表せる。

$$q = N \times V \quad \dots (4)$$

$$N = P / w_f \quad \dots (5)$$

$$V = \sqrt{(V_{10}^2 + w_f^2)} \quad \dots (6)$$

ここで、 $P$ : 降雪フラックス( $\text{g m}^{-2}\text{s}^{-1}$ )、 $w_f$ : 降雪粒子の落下速度( $\text{m s}^{-1}$ ) ( $=1.2\text{m s}^{-1}$  とする)、 $V_{10}$ : 高さ10mの風速( $\text{m s}^{-1}$ )である。

そこで、高さ10mの風速  $V_{10}$  と降水強度  $Ph$  ( $\text{mm min}^{-1}$ )の観測値から換算した降雪フラックス  $P$  を基に、式(4)、(5)、(6)から飛雪流量  $q$  を算出した。

図-18は、 $V_{10}$  が  $5\text{ m s}^{-1}$  未満の降雪時における視程と飛雪流量との関係を示したグラフである。なお、視程板

より評価された視程毎の飛雪流量については中央値、最大値、最小値、75%タイル値、25%タイル値を示した。また、既往研究で得られている式(3)の関係式を合わせて赤色の実線で示した。

図-18より、視程板より評価した視程と飛雪流量の中央値との関係は概ね式(3)と一致しており、強風下でない降雪に起因した視程低下についても式(3)の関係が適用可能であることが確認できた。ただし、同じ視程であっても飛雪流量にはバラツキが見られた。これは、降雪強度が同じであっても降雪粒子の大きさや落下速度といった降雪形態の違いが影響していることが考えられる。そこで、降雪形態に影響を及ぼしていると考えられる気温の違いに着目し分析を行った。

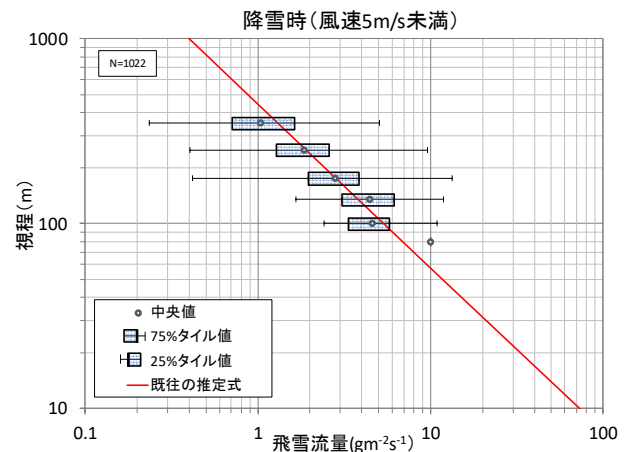


図-18 飛雪流量と視程の関係 (風速  $5\text{ m s}^{-1}$  未満)

図-19、図-20は、 $V_{10}$  が  $5\text{ m s}^{-1}$  未満かつ気温  $T$  が  $-5^\circ\text{C}$  未満と  $-5^\circ\text{C}$  より高い場合とに区分し、それぞれの降雪時の視程と飛雪流量の関係を整理した結果である。

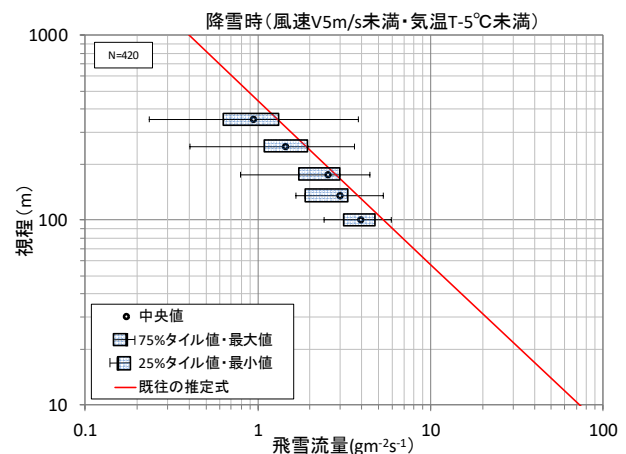


図-19 飛雪流量と視程の関係 (風速  $5\text{ m s}^{-1}$  未満かつ気温

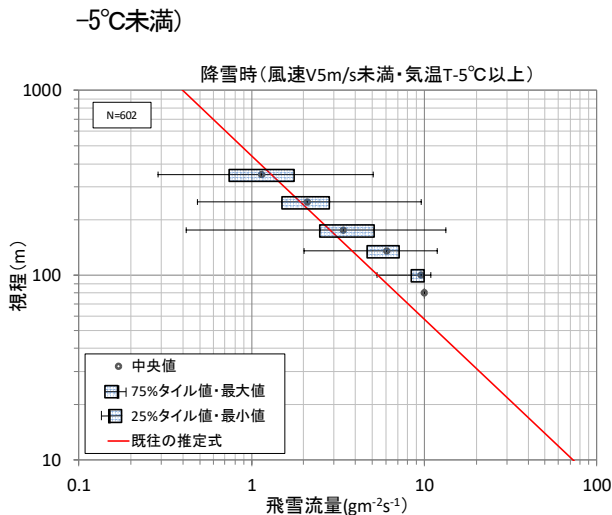


図-20 飛雪流量と視程の関係（風速 5 m s<sup>-1</sup> 未満かつ気温 -5°C 以上）

図-19 より、気温-5°C未満の場合には視程と 25%タイル値から 75%タイル値までの飛雪流量との関係に着目すると、既往の関係式よりも飛雪流量に対応する視程が小さい傾向が見られた。一方、図-20 より気温-5°C以上の場合には視程が概ね 200m 未満の場合には既往の関係式よりも視程が大きい傾向が見られた。

このように、降雪時の飛雪流量と視程との関係にはバラツキが見られ、同じ飛雪流量であっても気温が低いほど視程が小さくなる傾向が見られることを確認した。

### 2.3 多様な気象環境下における吹雪視程予測技術開発

#### 2.3.1 気象条件を用いた吹雪視程予測手法

これまでに開発した気象条件を用いた吹雪時における視程予測技術 ①について説明する。吹雪時の視程予測技術では図-21 に示す流れで視程の推定を行っている。

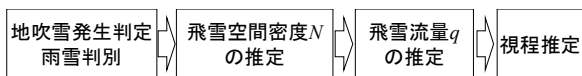


図-21 吹雪時の視程推定手法のフロー

ここで前述の通り、吹雪時の視程  $V_{is}$  と飛雪流量  $q$  の間には強い相関関係があり、式(3)が得られている。なお、浮遊層の飛雪流量は飛雪空間密度  $N$  と風速  $V$  の積 ( $q = N \cdot V$ ) で表せる。そこで、本予測手法では松澤ら ①による式(7)を用いて任意の高さ  $z$  における  $N(z)$  を求め、風速  $V$  を乗じることで  $q$  を算出している。なお、式(7)の第1項は降雪による飛雪空間密度、第2項は地吹雪による飛雪空間密度に該当する項である。次に武知ら ②による式(3)を用いて視程  $V_{is}$  に換算している。

$$N(z) = \frac{P}{w_f} + \left( N_t - \frac{P}{w_f} \right) \left( \frac{z}{z_t} \right)^{-\frac{w_b}{ku_*}} \quad \dots (7)$$

ここで、 $P$ : 降雪フラックス( $\text{g m}^2 \text{s}^{-1}$ )、 $N_t$ : 基準高さ  $z_t$  の飛雪空間密度( $\text{g m}^3$ )、 $w_f$ : 降雪粒子の落下速度( $\text{m s}^{-1}$ )、 $w_b$ : 浮遊雪粒子の落下速度( $\text{m s}^{-1}$ )、 $k$ : カルマン定数( $=0.4$ )、 $u_*$ : 摩擦速度( $\text{m s}^{-1}$ )である。なお本推定手法では、既往研究 ①を参考とし式(3)の変数には以下の値を与えている。

$$w_f = 1.2 (\text{m s}^{-1})、w_b = 0.21 (\text{m s}^{-1})、z_t = 0.15 (\text{m})、u_* = 0.036 V_{10} (\text{m s}^{-1})$$

$Ph \geq 0.4 \text{ mm h}^{-1}$  の場合

$$N_t = 0.116 \exp(0.309 V_{10}) (\text{g m}^3) \quad \dots (8)$$

$Ph < 0.4 \text{ mm h}^{-1}$  の場合

$$N_t = 0.021 \exp(0.401 V_{10}) (\text{g m}^3) \quad \dots (9)$$

ここで、 $V_{10}$ : 高さ 10m の風速( $\text{m s}^{-1}$ )、 $Ph$ : 降雪強度( $\text{mm h}^{-1}$ )である。なお、 $Ph$  は降雪を降水に換算した値とする。またドライバーの目線高さを考慮し、任意高さ  $z$  は 1.2m を基本としている。ただし、雪面から目線までの高さは積雪量により変化するため、 $z$  は積雪深を考慮した変数としている。

前述の式(7)により  $N(z)$  を推定する手法は、雪面に飛び出しやすい飛雪粒子が十分に存在し、吹雪が十分発達した平衡状態を想定したものである。このため、地吹雪が発生する状況であるかの判別や、雨ではなく雪が降っているかの判別を行った上で視程を推定することが重要となる。そこで、本推定手法では地吹雪発生と雨雪の判別を図-8 に示した判別条件で行うこととしている。

#### 2.3.2 吹雪視程予測手法の多様な地域への適用性検証

上述の吹雪視程予測手法の推定精度を視程の推定値と真値とを比較することによって検証し、青森県内への適用性や予測手法の課題について分析した。なお、視程の真値は現地での実測結果を基に判断した。

##### 1) 検証方法

検証箇所は、北海道内 4 箇所（石狩市、初山別村、猿払村、弟子屈町）及び青森県内 2 箇所（青森市、五所川原市）とした（図-22）。検証期間は北海道内が平成 28 年度、平成 29 年度、平成 30 年度の 3 冬期（12 月～3 月）、青森県内が平成 29 年度、平成 30 年度の 2 冬期（12 月～3 月）とした。検証箇所では視程推定に必要となる。



図-22 検証箇所

(国土地理院 国土地理院地図に加筆)

表-9 視程推定に用いた気象データ

気象要素		実測・推定の区分	統計方法
視程	Vis	実測値	①北海道内 前1時間の中央値(視程計) (計測インターバル1秒) ②青森県内 判読結果の中央値(動画映像) (10分毎に視認距離を判読)
		推定値	前10分値
気温	T	実測値	前10分値
相対湿度	$\phi$	実測値	前10分値 (猿払村はMSMデータ利用)
風速	$V_{10}$	実測値	前1時間の平均値 (高さは対数則により10mへ補正)
積雪深	H	実測値	前10分値
降雪フラックス	P	推定値	毎時の解析雨量データの単位を換算し利用
降雪強度	Ph	推定値	毎時の解析雨量データ利用
降雪終了後の最大気温	$T_{max}$	実測値	降雪終了時からの気温Tの最大値*
風速4乗の積算値	$U_{sum}$	実測値	降雪終了時からの 毎時風速 $V_{10}$ の4乗値の積算値*
降雪深の積算値	SF	推定値	降雪終了時からの降雪深の積算値* ただし、降雪深は解析雨量データより換算

\*降雪終了は解析雨量データにより判定

表-10 視程5ランクでの精度検証方法

観測 地点での 現地での 観測による 視程	推定した吹雪時の視程	推定した吹雪時の視程					計
		1	2	3	4	5	
		100m未満	100m以上 200m未満	200m以上 500m未満	500m以上 1000m未満	1000m以上	
1	100m未満	n11	n12	n13	n14	n15	
2	100m以上 200m未満	n21	n22	n23	n24	n25	
3	200m以上 500m未満	n31	n32	n33	n34	n35	
4	500m以上 1000m未満	n41	n42	n43	n44	n45	
5	1000m以上	n51	n52	n53	n54	n55	
計							SUM(n)

<span style="background-color: #f08080; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 10px; height: 10px;"></span> 2ランク以上見逃し	2ランク以上見逃し率= $(n_{13}+n_{14}+n_{15}+n_{24}+n_{25}+n_{35})/n$
<span style="background-color: #f0c0c0; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 10px; height: 10px;"></span> 1ランク見逃し	1ランク見逃し率= $(n_{12}+n_{23}+n_{34}+n_{45})/n$
<span style="background-color: #c0c0c0; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 10px; height: 10px;"></span> 完全適中	完全適中率= $(n_{11}+n_{22}+n_{33}+n_{44}+n_{55})/n$
<span style="background-color: #a0c0c0; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 10px; height: 10px;"></span> 1ランク空振り	1ランク空振り率= $(n_{21}+n_{32}+n_{43}+n_{54})/n$
<span style="background-color: #80c0c0; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 10px; height: 10px;"></span> 2ランク以上空振り	2ランク以上空振り率= $(n_{31}+n_{41}+n_{42}+n_{51}+n_{52}+n_{53})/n$
<span style="background-color: #60c0c0; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 10px; height: 10px;"></span> 広義の適中	広義の適中率=1ランク見逃し率+完全適中率+1ランク空振り率

気象データ(視程、気温、相対湿度、風速、積雪深)を観測した。さらに、視程の真値を把握するため、検証箇所では視程の観測又は動画映像の撮影を行った。なお、観測箇所は風上に200m以上の吹走距離を有し地吹雪が発生しやすい地点とした。

検証する視程の推定は、検証箇所における気象データの実測値(ただし、一部のデータは検証箇所近傍のアメ

ダス、道路テレメータの観測データを活用)より必要な入力データの時別値(表-9)を求め、視程の時別値を推定した。ただし、降雪強度に関連する入力データは解析雨量データを活用し求めた(表-9)。なお、視程の推定高さzは視程計の設置高さと積雪深を考慮し、視程計の雪面からの高さに設定した。

視程の真値は、後方散乱型視程計の実測値から求めた1時間毎の中央値とした。ただし、青森県内2箇所では、別途撮影した動画映像内の背景(目標物)が視認できる距離から視程を10分毎に判定し、視程の真値を1時間毎の中央値から判断した。

視程予測手法の推定精度は、視程の推定値と実測値を「吹雪の視界情報(2.3.3項参照)」で用いている「視程100m未満」、「視程100m以上200m未満」、「視程200m以上500m未満」、「視程500m以上1000m未満」、「視程1000m以上」の5つに区分し、この5ランクでの適中率を分析することにより検証した。なお適中率の分析では、

表-10の分割表により「完全適中」、「2ランク以上見逃し」、「1ランク見逃し」、「2ランク以上空振り」、「1ランク空振り」及び「広義の適中」を定義し、それぞれの割合について整理した。

2) 適中率

図-23は、北海道内4箇所と青森県内2箇所での推定視程の適中率を整理した結果である。図-23より、適中率は北海道内が81.5%、青森県内が77.3%であり、青森県内での適中率は北海道内より4.2%低いものの北海道内と同程度であった。ただし、2ランク以上の空振りが青森県内は6.8%であり北海道内の2.5%に比べ若干高い傾向が見られる。

次に、大きな見逃し・空振りの改善に向け、2ランク以上の見逃しや空振りに着目し、それらが地吹雪判別条件(図-8)のどの判定区分で発生頻度が高いかを分析した。図-24は各検証箇所における2ランク以上の見逃し、2ランク以上の空振り、広義の適中(1ランクの見逃し及び空振りを含めた割合)を地吹雪判定区分毎に整理した結果である。

図-24より、2ランク以上の空振りとなる割合は降雪時の現況気温Tが $-3 < T \leq 2^{\circ}\text{C}$ の条件下で地吹雪が発生すると判定された区分3で高い傾向が見られた。特に五所川原市ではその割合が7.6%と高い。一方、2ランク以上の見逃しは降雪時に地吹雪が発生しないと判定された区分2(降雪時の気温 $T \leq -3^{\circ}\text{C}$ かつ風速 $V_{10} < 5\text{m s}^{-1}$ )で割合が比較的高い傾向が見られた。ただし、その割合は最も高い箇

所でも 1.9%であった。

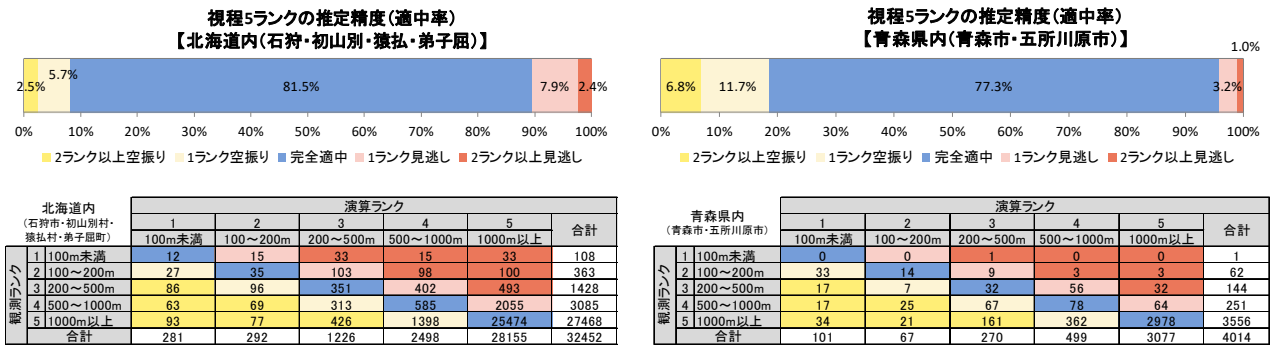


図-23 視程5ランクでの適中率

地点毎の全数に対する割合	地吹雪判定区分	2ランク以上空振り						広義の適中(※1ランクすれまで適中)						2ランク以上見逃し					
		五所川原市	青森市	石狩市	弟子屈町	初山別村	猿払村	五所川原市	青森市	石狩市	弟子屈町	初山別村	猿払村	五所川原市	青森市	石狩市	弟子屈町	初山別村	猿払村
1	1	2.5%	0.0%	1.0%	0.3%	0.8%	0.7%	4.2%	5.3%	13.9%	2.6%	7.5%	1.8%	0.0%	0.3%	0.9%	0.0%	0.4%	0.1%
2	2	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.5%	2.5%	3.2%	2.1%	4.0%	2.0%	0.1%	0.5%	1.9%	0.1%	1.4%	0.3%
3	3	7.6%	0.3%	1.5%	0.5%	0.7%	1.2%	7.3%	2.6%	4.8%	1.6%	1.7%	0.8%	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
4	4	0.8%	0.6%	0.2%	0.0%	0.2%	0.2%	11.6%	18.1%	9.9%	3.0%	6.8%	2.9%	0.2%	0.6%	0.5%	0.0%	0.4%	0.1%
5	5	0.8%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	3.6%	4.8%	0.8%	0.1%	0.5%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
6	6	0.8%	0.0%	0.1%	0.5%	0.3%	1.1%	3.0%	1.3%	3.0%	5.6%	5.6%	5.1%	0.0%	0.0%	0.2%	0.0%	0.2%	0.3%
7	7	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.6%	2.6%	1.7%	5.3%	2.5%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
8	8	0.0%	0.0%	0.0%	0.3%	0.0%	0.5%	0.9%	0.6%	0.5%	4.3%	2.7%	4.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%
9	9	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.5%	0.5%	0.1%	4.9%	1.4%	4.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%
10	10	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	44.8%	51.1%	48.2%	70.8%	57.9%	71.1%	0.0%	0.0%	0.5%	0.6%	0.5%	0.5%
11	11	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	8.1%	8.0%	1.2%	0.9%	1.7%	0.6%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%
合計		12.5%	1.1%	2.8%	1.6%	2.0%	3.7%	87.1%	97.4%	93.2%	97.6%	95.1%	94.8%	0.4%	1.5%	4.0%	0.8%	2.9%	1.5%

図-24 地吹雪判定区分別の2ランク以上の空振り・見逃しの発生頻度(検証箇所別)

ここで、同じ青森県内でも2ランク以上の空振りが五所川原市のみで高かった要因について確認するため、青森市と五所川原市における風速の階級別頻度について解析を行った(図-25)。その結果、青森市では降雪時に高い地吹雪が発生しやすくなると考えられる風速8m/s以上7)の発生頻度が5.7%であるのに対し、五所川原市では35.3%で青森市の約6倍であった。このような風速が大きい階級の発生頻度の違いにより、五所川原市では2ランク以上の空振り率が高く、青森市よりも適中率が低かったと考えられる。

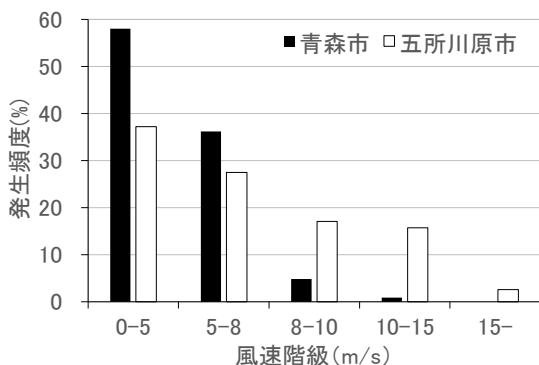


図-25 風速階級別発生頻度(青森市・五所川原市)

このような結果を踏まえると、現状の吹雪視程予測手法は、気温0°C前後の条件下で強風となる頻度の高い地域においては“地吹雪発生”や“視程低下”の推定を空振りしてしまう割合が高くなり、気温0°C前後の条件下で強風となる頻度の高くない地域に比べ適中率が低下してしまう恐れがある。これは、地吹雪発生と判定される場合には、地吹雪起因の飛雪空間濃度を式(1)の第2項より風速のみによって推定していることが要因に考えられる。地吹雪の発達しやすさは風速に加えて降雪粒子や雪面の雪質にも大きく依存していると考えられる。このため、雪質変化に寄与すると考えられる要素を別途考慮し飛雪空間濃度を推定する方法を検討していくことが重要と考えられる。

### 2.3.3 吹雪視程予測手法の改良案の検討

#### 1) 地吹雪発生条件の改良

前述の通り地吹雪判別条件の区分3で推定視程の2ランク以上の空振りが五所川原で多かった原因には、地吹雪判別条件で地吹雪判定を行った段階において空振りが発生していたことが要因の1つに考えられる。一方、2.1.4項で分析した五所川原市での降雪時の地吹雪発生状況の分析結果では、図-13より気温が0°Cより高い範囲では風速に関係なく地吹雪の発生事例がほとんど見られ

ない。

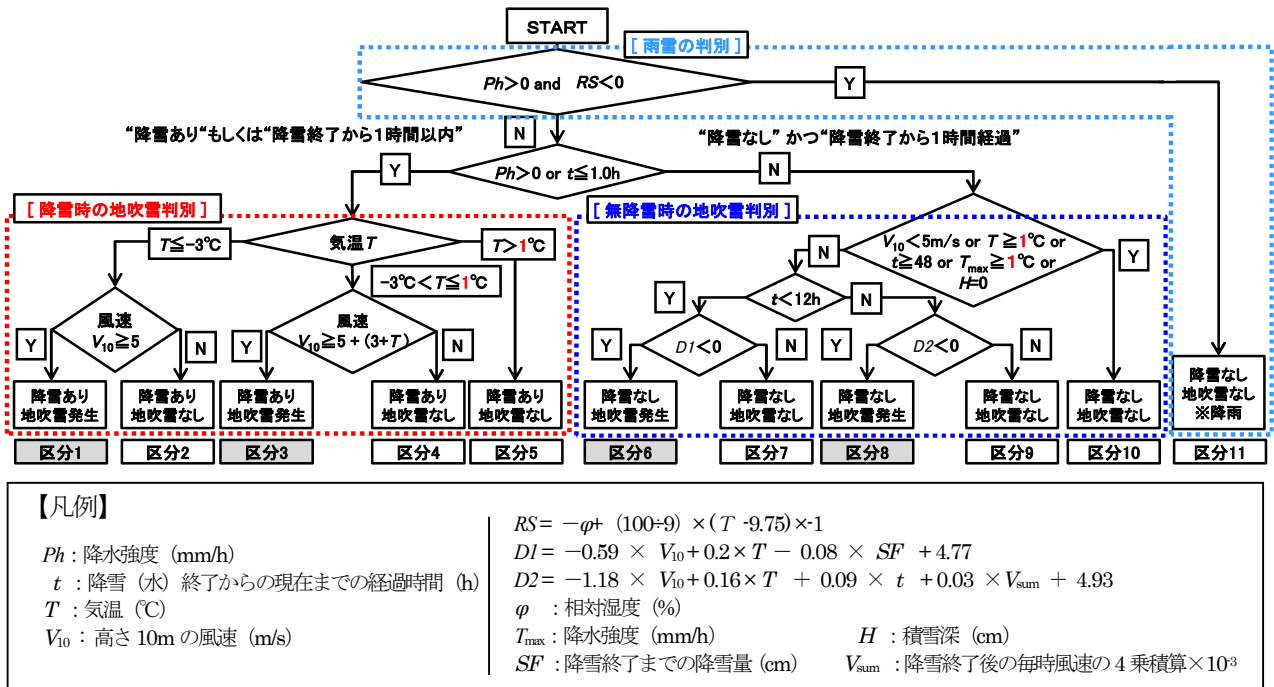


図-26 地吹雪判別条件 (気温条件の改良案) ※改良箇所: 赤字

これらの事を踏まえると、現状の地吹雪判別条件で地吹雪が発生すると判断している気温の上限値 2°C をより低温に変更することが必要と考えられる。ただし、図-13 より気温 0°C 付近においては地吹雪が発生する事例も散見されている。このことから、気温の上限値を 0°C まで低くしてしまうと地吹雪の発生を見逃してしまう恐れもある。そこで、地吹雪判定に用いる気温の上限値は 1°C に変更するが適切と考え、地吹雪判別条件の改良案を図-26 に示した通り検討した。

**2) 基準高さの飛雪空間密度の推定式の改良**

2.3.1 項で示した吹雪視程推定手法で用いている基準高さ z<sub>1</sub> (=0.15m) の飛雪空間密度 N<sub>1</sub> (=N<sub>0.15</sub>) は、吹雪時に実測された飛雪流量データを基に松澤<sup>1)</sup>が提案した経験式 (式(8)、(9)) により推定している。ただし、この飛雪流量データは気温 -6.0~-2.5°C の比較的低温下で調査された3つの観測事例で取得されたものである。

このため、気温条件によっては既往の経験式では N<sub>0.15</sub> を適切に推定ができていない可能性あると考えられる。

そこで、吹雪時に実施した吹雪量観測の結果から基準高さ (0.15m) の飛雪空間密度 N<sub>0.15</sub> を求め式(8)、(9)の妥当性について検証した。

著者らは、観測箇所の風上側に 200m 以上の吹走距離を有する地吹雪の発達しやすい箇所 (北海道石狩市 (石狩吹雪実験場) 及び弟子屈町) でネット式吹雪計 (箱型及び円

筒型) を用いて高さ 2m までの吹雪量 Q の観測を吹雪時に  
**表-11 吹雪量観測の実施概要**

観測年月日	開始時刻	終了時刻	観測回数	観測箇所	観測年月日	開始時刻	終了時刻	観測回数	観測箇所
2015/1/8	10:27	12:16	5	石狩市	2015/01/31	12:45	15:56	10	弟子屈町
2015/03/02	13:19	17:03	5	石狩市	2015/02/27	15:08	17:18	9	弟子屈町
2016/01/21	10:52	15:15	6	石狩市	2015/02/28	08:59	09:43	2	弟子屈町
2016/01/28	10:05	15:03	11	石狩市	2016/01/19	09:37	14:26	16	弟子屈町
2016/02/10	10:21	13:46	8	石狩市	2016/01/21	10:10	10:53	4	弟子屈町
2017/01/11	14:00	16:07	6	石狩市	2016/02/21	07:26	10:16	13	弟子屈町
2017/01/28	11:10	15:10	12	石狩市	小計			54	
2017/02/17	21:50	00:00	6	石狩市	合計			168	
2017/02/18	00:10	00:40	2	石狩市					
2017/02/01	16:20	17:20	4	石狩市					
2017/02/02	07:47	10:51	9	石狩市					
2017/12/26	10:50	14:20	6	石狩市					
2018/01/25	08:50	15:29	16	石狩市					
2018/03/02	10:50	16:04	18	石狩市					

※観測時間/回は5分又は10分間

実施した (表-11)。なお、吹雪量 Q とは単位幅を単位時間に通過する飛雪粒子の質量である。

本分析では、吹雪量観測で計測した高さ 0.1m と 0.3m での飛雪流量を用いた。なお、計測値は捕捉率 (箱型 0.75、円筒型 0.94) により補正した。また、観測時には併せて降雪の有無を記録し、気温 T と高度 1.0m 又は 1.3m での風速 V<sub>10</sub> を計測した。

浮遊層の飛雪流量 q は飛雪空間密度 N と風速 V の積 (q = N · V) で表せる。このため、基準高さ (0.15m) の飛雪流量 q<sub>0.15</sub> と風速 V<sub>0.15</sub> から基準高さ (0.15m) の飛雪空間密度 N<sub>0.15</sub> を求めた。なお、q<sub>0.15</sub> は高さ 0.1m と 0.3m で計測された飛雪流量から内挿し求めた。また、V<sub>0.15</sub> は高さ 10m の風速 V<sub>10</sub> から対数則により求めた。なお、雪面粗度は 1.5

×10<sup>4</sup> m とした。

図-27は、降雪を伴った場合における基準高さ(0.15m)の飛雪空間密度  $N_{0.15}$  と高さ 10m の風速  $V_{10}$  との関係が気温  $T$  が-3℃以下と-3℃より高い場合に分け整理した結果である。また、図には併せて既往の経験式(式(8))を示した。

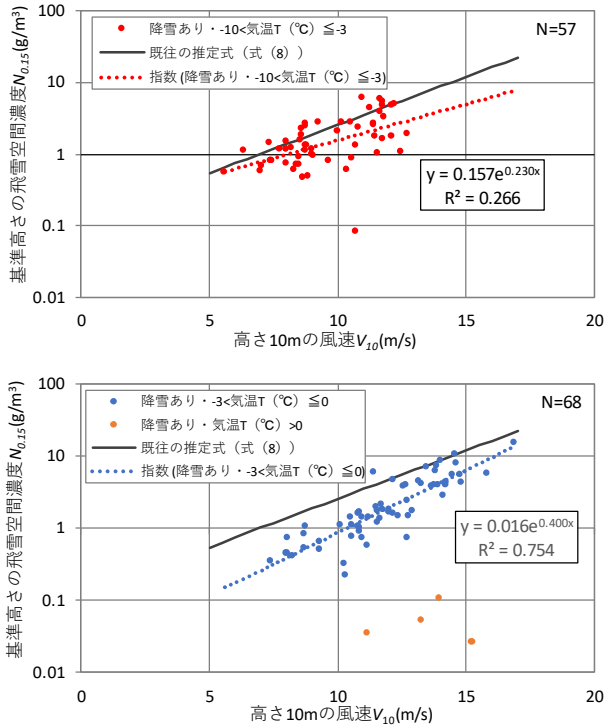


図-27 基準高さの飛雪空間密度と高さ 10m の風速 (降雪あり)

図-27より、気温-3℃以下では  $N_{0.15}$  の観測結果が既往の式(8)と概ね一致する傾向が見られた(式(10))。一方、気温  $T$  が-3℃より高い場合には  $N_{0.15}$  の観測結果が既往の経験式よりも小さい傾向が見られ、 $V_{10}$  が小さい場合に顕著であり、式(11)の関係式が得られた。

$$N_{0.15} = 0.157 \exp(0.230 V_{10}) \quad \dots(10)$$

$$N_{0.15} = 0.016 \exp(0.400 V_{10}) \quad \dots(11)$$

次に、図-28には降雪が見られなかった場合における基準高さの飛雪空間密度  $N_{0.15}$  と風速  $V_{10}$  の関係を整理した。また、図には併せて既往の経験式(式(9))を示した。なお、無降雪時の観測事例は少なく観測時の風速  $V_{10}$  が気温  $T$  によって偏りがあったため、 $T$  による場合分けを行わず近似式を求めた。その結果、 $V_{10}$  が大きいほど既往の式(9)よりも  $N_{0.15}$  は低い傾向が見られ、式(12)の関係が得

られた。

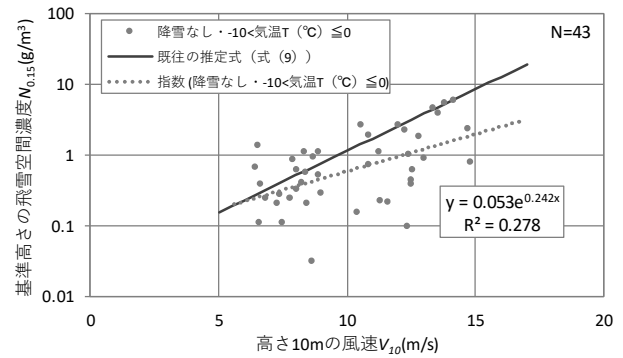


図-28 基準高さの飛雪空間密度と高さ 10m の風速 (降雪なし)

$$N_{0.15} = 0.053 \exp(0.242 V_{10}) \quad \dots(12)$$

これらの結果から、基準高(0.15m)の飛雪空間密度  $N_{0.15}$  の推定には、降雪時の気温  $T$  が-3℃未満では式(8)、気温  $T$  が-3℃より高い場合には式(11)を用い、降雪を伴わない場合には式(12)を用いることが適切と考えられる。

### 2.3.4 吹雪視程予測手法の改良案の改良効果検証

#### 1) 改良効果の検証方法

2.3.1項で詳述した視程予測手法について、以下の点を改良し、推定精度の改善効果について検証した。なお、検証方法は2.3.2項と同様の方法により北海道内と青森県内での適中率などを整理することにより行った。

#### 【地吹雪判別条件の改良】

地吹雪判別条件の気温条件を2.3.3項(1)で検討した結果を基に、図-26に示した通り変更することとした。

#### 【基準高さの飛雪空間密度 $N_e$ の推定式の改良】

2.3.3項(2)で検討した結果を基に、2.章で説明した視程推定手法の式(7)に用いる基準高(0.15m)の飛雪空間密度  $N_{0.15}$  の推定式を、以下の通り変更することとした。

降雪あり ( $Ph \geq 0.4 \text{ mm h}^{-1}$ )

$T \leq -3^\circ\text{C}$  の場合 ……式(8)を適用

$-3^\circ\text{C} < T \leq 1^\circ\text{C}$  の場合 ……式(11)を適用

降雪なし ( $Ph < 0.4 \text{ mm h}^{-1}$ )

……式(12)を適用

なお、 $Ph$ は降雪強度( $\text{mm h}^{-1}$ )、 $T$ は現況気温( $^\circ\text{C}$ )である。

#### 2) 改良効果の検証結果



図-29 は、北海道内 4 箇所と青森県内 2 箇所での改良

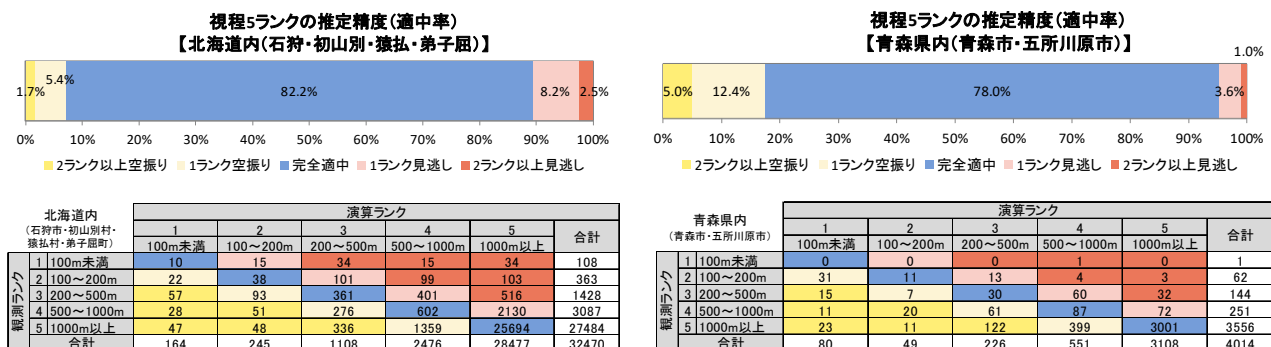


図-29 視程 5 ランクでの適中率

地点毎の全数に対する割合	地吹雪判定区分	2ランク以上空振り						広義の適中(※1ランクずれまで適中)						2ランク以上見逃し											
		五所川原市		青森市		石狩市		弟子屈町		初山別村		猿払村		五所川原市		青森市		石狩市		弟子屈町		初山別村		猿払村	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	2.4%	0.0%	1.0%	0.2%	0.7%	0.6%	4.4%	5.3%	13.8%	2.6%	7.5%	1.9%	0.0%	0.3%	1.0%	0.0%	0.5%	0.1%	0.0%	0.0%	0.5%	0.1%	0.1%	0.1%	
2	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.5%	2.5%	8.2%	2.1%	4.0%	2.0%	0.1%	0.5%	1.9%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	1.4%	0.1%	0.1%	0.3%	
3	4.3%	0.2%	1.1%	0.3%	0.4%	1.0%	9.7%	2.6%	5.2%	1.7%	2.0%	0.9%	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	
4	0.5%	0.4%	0.1%	0.0%	0.2%	0.2%	8.0%	14.8%	8.5%	2.8%	6.1%	2.7%	0.2%	0.6%	0.5%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.4%	0.1%	0.0%	0.1%	
5	1.5%	0.2%	0.1%	0.0%	0.1%	0.0%	7.6%	8.3%	2.2%	0.4%	1.2%	0.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	
6	0.3%	0.0%	0.0%	0.1%	0.1%	0.5%	2.6%	1.0%	2.9%	6.0%	5.7%	5.5%	0.0%	0.0%	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.3%	0.4%	0.0%	0.4%	
7	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1.7%	2.2%	2.1%	1.5%	5.2%	2.4%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	
8	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.5%	0.4%	0.3%	4.3%	4.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	
9	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.3%	0.1%	4.8%	1.1%	3.6%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	
10	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	47.4%	52.2%	49.1%	71.4%	58.8%	71.8%	0.0%	0.0%	0.5%	0.6%	0.5%	0.6%	0.5%	0.6%	0.5%	0.5%	0.5%	0.5%	
11	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	8.1%	8.0%	1.2%	0.9%	1.6%	0.6%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	
合計	9.0%	0.9%	2.3%	0.7%	1.5%	2.5%	90.6%	97.6%	93.6%	98.5%	95.4%	95.9%	0.4%	1.5%	4.1%	0.8%	3.1%	1.6%							

図-30 地吹雪判定区分別の 2 ランク以上の空振り・見逃しの発生頻度(検証箇所別)

した視程推定手法での推定視程の適中率を整理した結果である。図-23 及び図-29 より、適中率は北海道内で 81.5%から 82.2%、青森県内が 77.3%から 78.0%に向上し、青森県内では 2 ランク以上の見逃しが 6.8%から 5.0%に減少した。

さらに、改良後の推定視程の各検証箇所における 2 ランク以上の見逃し、2 ランク以上の空振り、広義の適中の割合を地吹雪判定区分(図-26)毎に整理した結果を図-30に示した。図-30より、2 ランク以上の空振り割合が高かった区分 3 でその割合がほとんどの検証箇所改良前に比べ低減していることがわかる。特に五所川原市では、空振りの割合が 7.6%から 4.3%に低減しており、他の検証箇所よりも大きな改善が見られた。また、改良により見逃しが増加することも懸念されたが、見逃しの割合が増加するような変化はほとんど見られなかった。

### 2.3.5 吹雪視界情報提供システムの吹雪視程予測手法改良と情報提供精度

令和 3 年 3 月 19 日からは、改良した新アルゴリズムと飛雪空間密度推定式を用いて「吹雪の視界情報(視程の予測情報)」の公開を行った。改良した新アルゴリズム等による視界予測結果の検証を、公開前の令和 3 年 3

月 17 日の気象データを用いて行った。気象庁が公表している 1 時間ごとの気象データでは、令和 3 年 3 月 17 日 9 時の後志地方寿都で、降水量 1.0mm h<sup>-1</sup>、平均風速 3.2m s<sup>-1</sup>、気温 2.1℃であった。

「吹雪の視界情報」で演算した寿都町の予測視程は、改良前で視程 500m 以下、改良後では視程 1,000m 以下であった(図-31)。北海道地区道路情報サイトの国道 229 号寿都町丹慶岬のカメラ画像により現地の視程を確認した結果、現地の視程は 1,000m 以下(図-32 から判定)であり、新アルゴリズムの改良によって予測精度の向上が見られた。

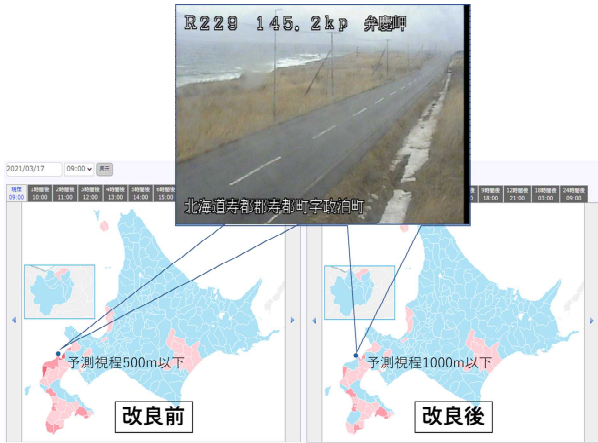


図-31 「吹雪の視界情報」の視程予測の演算結果 (令和3年3月17日9時現況)



図-32 「吹雪の視界情報」の視程毎の参考画像

### 2.3.6 平成28年度冬期の提供

吹雪時のドライバーの行動判断を支援するため、前中期計画に当研究所が開発した「吹雪視程障害予測技術<sup>2)</sup>」を利用して、北海道内の吹雪視程障害の情報提供を平成28年11月24日より、インターネットサイト「吹雪の視界情報」で行った。このインターネットサイトは、①吹雪の視界情報、②吹雪の投稿情報、③気象警報・注意報、④道路通行止め情報等を集約したインターネットサイトである (図-33)。あわせて、移動中の利用者の利便性を向上させるため、スマートフォン版「吹雪の視界情報サイト」も公開した (図-34)。

吹雪の視界状況は、吹雪時のドライバーの運転挙動に関する研究成果<sup>10)</sup>をもとに、「著しい視程障害(100m未満)」、「かなり不良(100~200m)」、「不良(200~500m)」、「やや不良(500~1000m)」、「良好(1000m以上)」の5ランクに区分し、エリアごとに色分け表示している (図-33、図-34、図-35)。

さらに、視界不良について、事前に注意喚起を促すための「メール配信サービス」も平成28年11月24日より開始した。

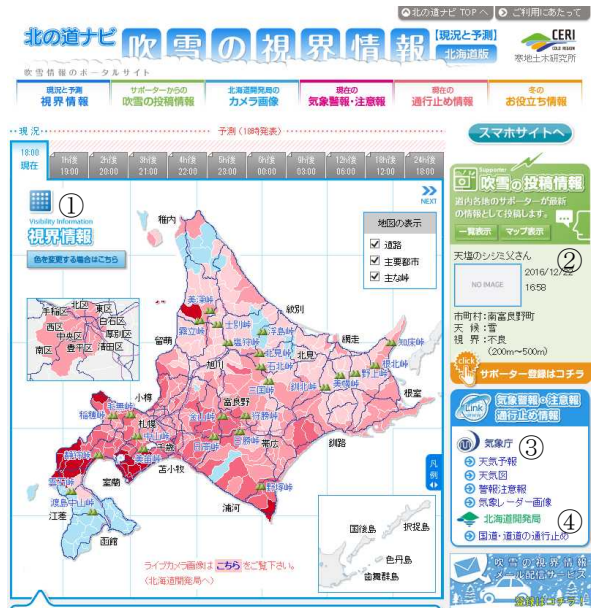


図-33 PC版「吹雪の視界情報」

URL : <http://northern-road.jp/navi/touge/fubuki.htm>  
(平成28年12月22日18時発表)

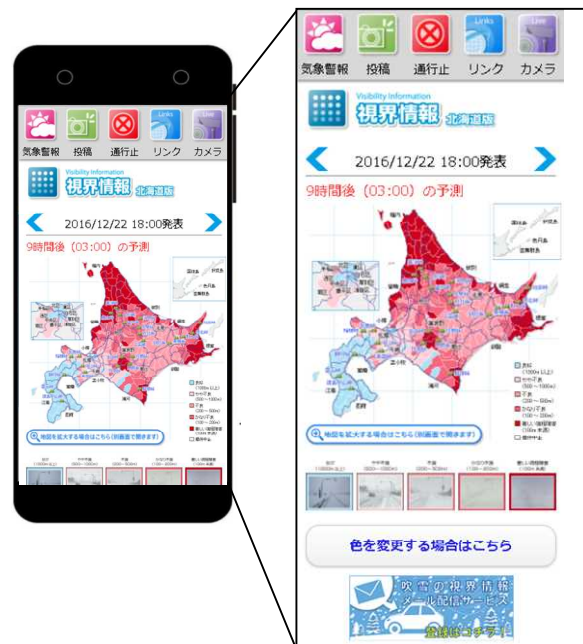


図-34 スマートフォン版「吹雪の視界情報」

URL : <http://northern-road.jp/navi/touge/sp/fubuki.htm>  
(平成28年12月22日18時発表)

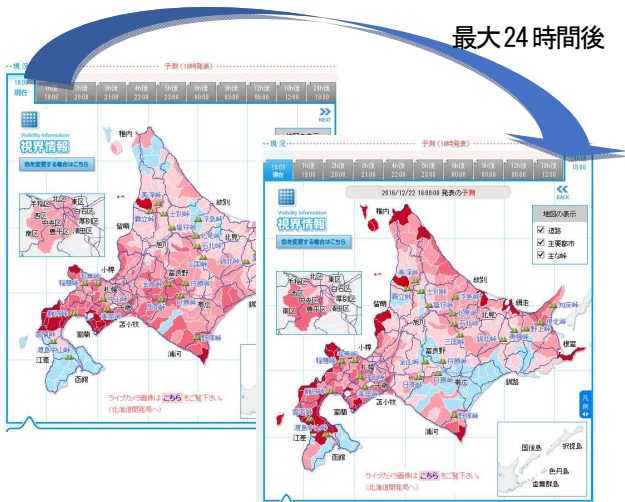


図-35 吹雪の視界情報のエリアと予測時間  
(平成28年12月22日18時発表)

利用者が事前にメールアドレスと配信条件を登録<sup>16),17)</sup>すると、条件に合致した際に視界不良の予測結果を自動で通知するプッシュ型のサービスである(図-36)。

図-37 にインターネットサイト「吹雪の視界情報」のPC版及びスマートフォン版の日平均アクセス数を示す。平成28年度の日平均アクセス数は4,145件で昨年度と比べる約1.4倍に増加した。また、札幌市内に96cmの積雪となった平成28年12月22日、23日には、10,000件を超えるアクセス数となっている。

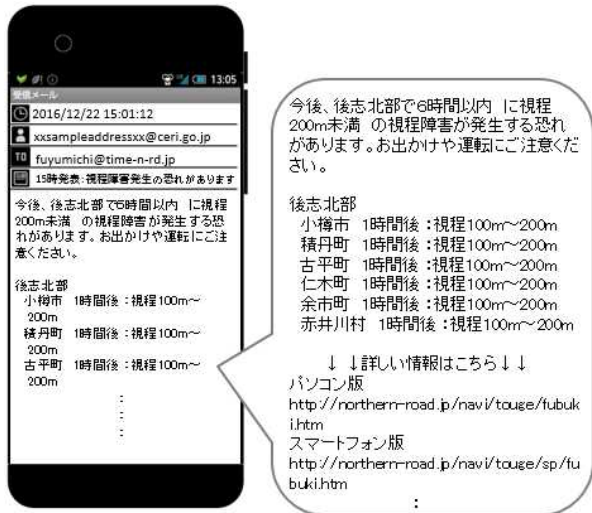


図-36 吹雪の視界情報メール配信サービス  
(平成28年12月22日15時発表)

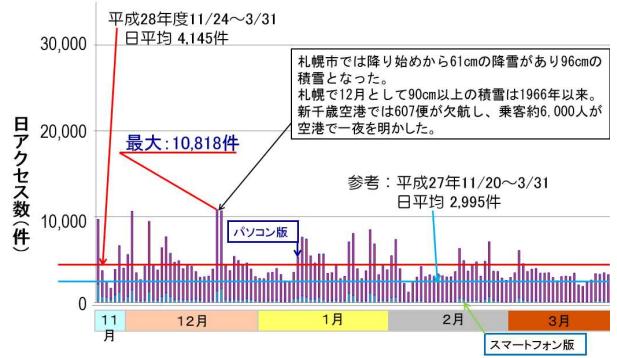


図-37 平成28年度「吹雪の視界情報」アクセス数

天候悪化時のアクセス数の増加から、利用者が「吹雪の視界情報」を行動判断に活用していることが窺われる。

### 2.3.7 平成29年度冬期の提供

吹雪時のドライバーの行動判断を支援するため、平成29年度も平成29年12月1日より、インターネットサイト「吹雪の視界情報」で情報提供を行った。なお、平成30年3月1日からは、2.1.2項に示した新アルゴリズム(図-8)で公開を行った。

図-38 にインターネットサイト「吹雪の視界情報」のPC版及びスマートフォン版の日平均アクセス数を示す。

気象庁が「人命にかかわるような暴風雪や大雪になるおそれ」と記者発表した平成30年3月1日及び2日には、2日間で5万件を超えるアクセス数となっている。

天候悪化時のアクセス数の増加から、利用者が「吹雪の視界情報」を天候悪化時の行動判断に活用していることが窺われる。

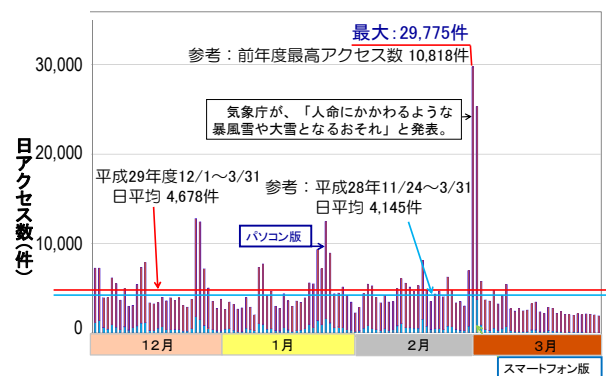


図-38 平成29年度「吹雪の視界情報」アクセス数

### 2.3.8 平成30年度冬期の提供

吹雪時のドライバーの行動判断を支援するため、平成30年度も平成30年11月22日より、インターネットサイト「吹雪の視界情報」で情報提供を行った。

図-39に、インターネットサイト「吹雪の視界情報」のPC版及びスマートフォン版の日平均アクセス数を示す。オホーツク海側、上川北部で総降雪量50cm以上の大雪となった平成31年1月23日から24日には、2日間で3万2千件を超えるアクセス数となっている。平成29年度と同様に、天候悪化時にアクセス数が増加することから、利用者が「吹雪の視界情報」を天候悪化時の行動判断に活用していることが窺われる。

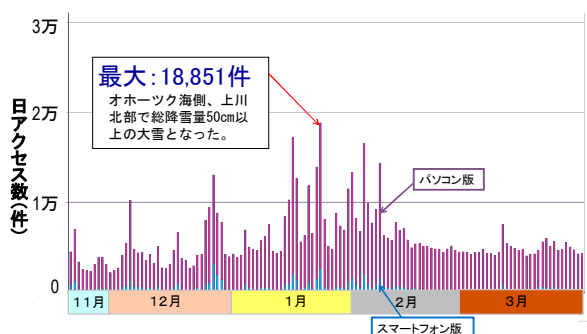
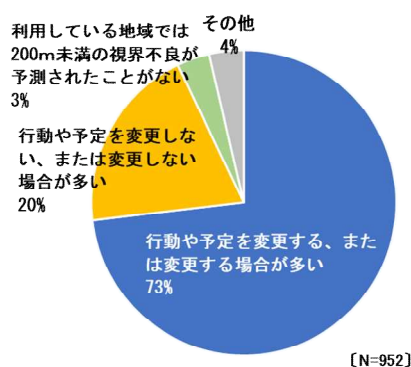


図-39 平成30年度「吹雪の視界情報」アクセス数

また、平成30年度には、インターネットサイト「吹雪の視界情報」の利用者に対して、サイト活用状況などのアンケート調査を実施した。視界不良（視程200m未満）の予測時の行動変化について、質問した回答結果を図-40に示す。アンケートの回答者は、952人であった。図-40より、アンケート回答者の73%は、視界不良（視程200m未満）が予測された際に行動を変更すると回答しており、視界予測情報が行動変更に活用されていることが窺われる。

### 【視界不良が予測された際の行動変更について】



### 【行動変更する場合の変更内容】

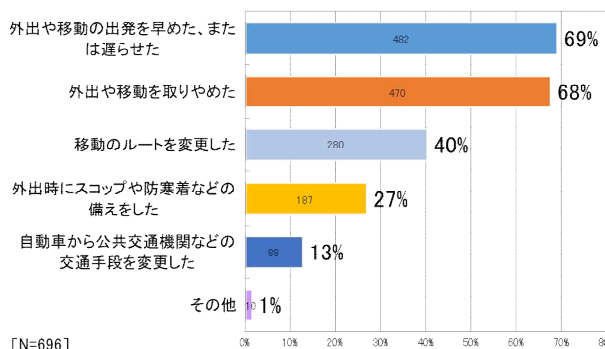


図-40 「吹雪の視界情報」アンケート（H30）の回答結果

### 2.3.9 令和元年度冬期の提供

吹雪時のドライバーの行動判断を支援するため、令和元年度も令和元年11月21日より、インターネットサイト「吹雪の視界情報」で情報提供を行った。

図-41に、インターネットサイト「吹雪の視界情報」のPC版及びスマートフォン版の日平均アクセス数を示す。太平洋側東部、オホーツク海側で総降雪量40cm以上の大雪となった令和2年1月30日から31日には、2日間で2万1千件を超えるアクセス数となっている。

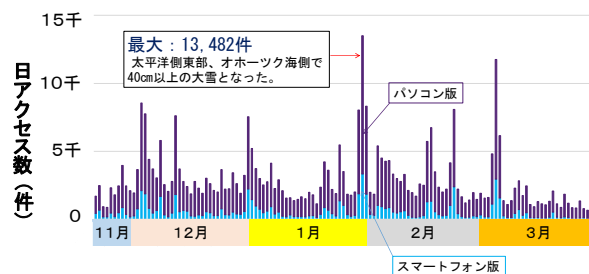


図-41 令和元年度「吹雪の視界情報」アクセス数

平成 30 年度と同様に、天候悪化時にアクセス数が増加することから、利用者が「吹雪の視界情報」を天候悪化時の行動判断に活用していることが窺われる。

### 2.3.10 令和2年度冬期の提供

吹雪時のドライバーの行動判断を支援するため、令和2年度も令和2年11月24日より、インターネットサイト「吹雪の視界情報」で情報提供を行った。

図-42 に、インターネットサイト「吹雪の視界情報」の PC 版及びスマートフォン版の日平均アクセス数を示す。日本海側北部を中心に数年に一度の猛吹雪となった令和3年2月16日には、2万7千件を超えるアクセス数となっている。令和元年度(図-41)と同様に、天候悪化時にアクセス数が増加することから、利用者が「吹雪の視界情報」を天候悪化時の行動判断に活用していることが窺われる。

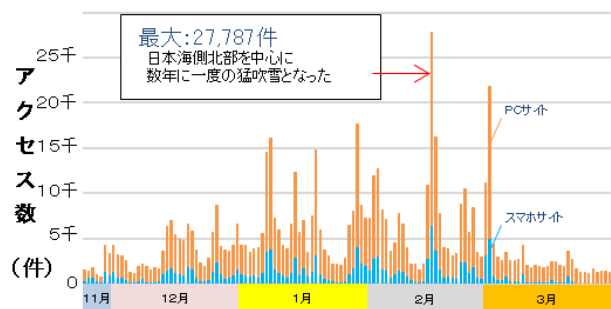


図-42 令和2年度「吹雪の視界情報」アクセス数

### 2.3.11 令和3年度冬期の提供

令和3年度冬期においては、吹雪時のドライバーの行動判断を支援するため道路利用者を対象とし、北海道内を予測対象とした「吹雪の視界情報(北海道版)」の情報に加え、青森県内を予測対象とした「吹雪の視界情報(青森県版)」の試験提供を行った。

#### 1) 吹雪の視界情報(北海道版)

吹雪時のドライバーの行動判断を支援するため、令和3年度も令和3年12月1日より、インターネットサイト「吹雪の視界情報(北海道版)」で情報提供を行った。

図-43 に、インターネットサイト「吹雪の視界情報(北海道版)」の PC 版及びスマートフォン版の日平均アクセス数を示す。日本海側、オホーツク海側を中心に猛吹雪となった令和4年2月21日には、3万6千件を超えるアクセス数となっている。令和2年度(図-42)と同様に、天候悪化時にアクセス数が増加することから、利用者が「吹雪の視界情報」を天候悪化時の行動判断に活用していることが窺われる。

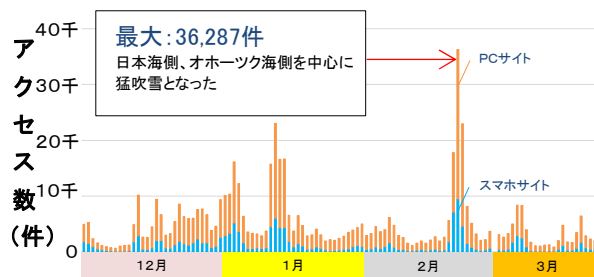


図-43 令和3年度「吹雪の視界情報」アクセス数

インターネットサイト「吹雪の視界情報(北海道版)」について、前中期の平成24年度からの日平均アクセス数の推移を年度毎に図-44に示す。日平均アクセス数は、令和元年度は視界不良が予測された日数が少なかったため平成30年度より減少したが、令和3年度は日平均アクセス数が約5.1千件となり、情報提供開始から増加傾向にあることがわかった。特に、スマートフォン版の日平均アクセス数が令和元年度の2倍以上となり増加が顕著であった。

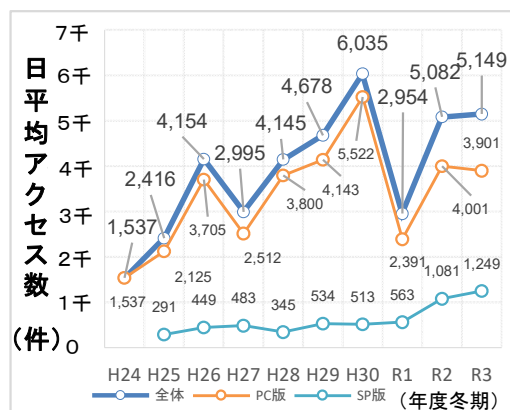
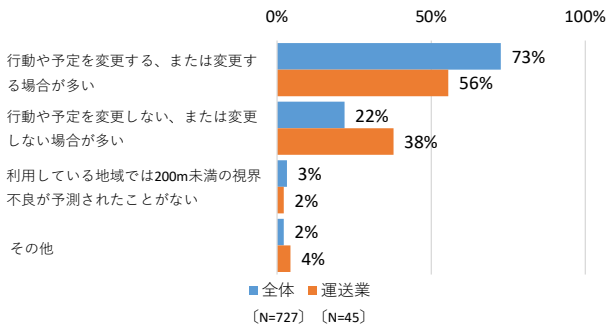


図-44 「吹雪の視界情報」への日平均アクセス数の年度別での推移

また、令和3年度には、インターネットサイト「吹雪の視界情報(北海道版)」の利用者に対して、サイト活用状況などのアンケート調査を実施した。視界不良(視程200m未満)の予測時の行動変化について、質問した回答結果を図-45に示す。アンケートの回答者は、727人であった。図-45より、視界不良(視程200m未満)が予測された際に行動を変更すると回答した者の割合は73%であり、平成30年度に実施したアンケート調査結果(図40)とも一致した。これらの結果から、インターネットサイト「吹雪の視界情報」の7割以上の利用者が視界予測情報を行動変更に活用しており、安全な交通行動に貢献しているものと考えられる。

【視界不良が予測された時の行動変化】



【視界不良が予測された時の主な行動変更】

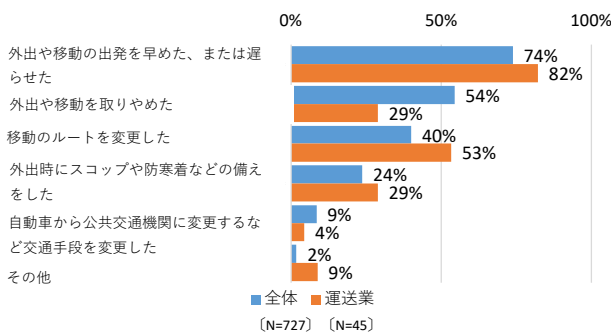


図-45 「吹雪の視界情報」アンケート (R3) 回答結果 (1)

【利用タイミング】

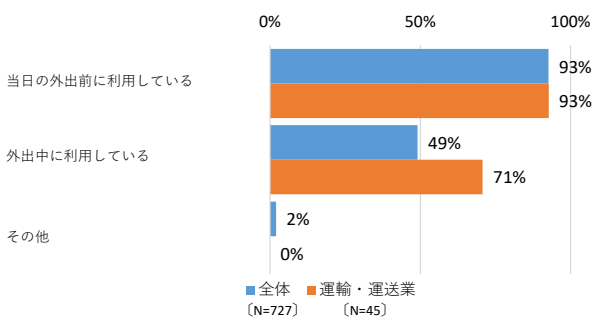


図-46 「吹雪の視界情報」アンケート (R3) 回答結果 (2)

さらに運輸・運送業の回答者を抜粋して集計した結果、運輸・運送業では視界不良（視程 200m 未満）が予測された際に行動を変更すると回答した者の割合は 56%と全体に比べると低い傾向ではあったが、出発時間や移動ルートの判断に活用している割合が全体より高い傾向が窺えた。この様な結果から、行動変更が難しいと考えられる運輸・運送業の利用者に対しても、「吹雪の視界情報」は安全な交通行動の判断に貢献しているものと考えられる。

「吹雪の視界情報（北海道版）」は、パソコン版とスマートフォン版を公開しており、スマートフォン版は外出先からでも閲覧可能である。そこで「吹雪の視界情報

（北海道版）」を利用するタイミングについてもアンケート調査を実施した。その回答結果を図-46 に示す。図-46 より、利用するタイミングを「当日の外出前」と回答した者は、回答者全体、運輸・運送業ともに 93%と高かった。「外出中」の利用は、回答者全体で 49%であったが、運輸・運送業では 71%と高く、外出中も多く利用していることが窺えた。

## 2) 吹雪の視界情報（青森県版）

2.3 節で開発した多様な気象環境下における吹雪視程予測技術を基に、青森県内を予測対象とした吹雪視程演算システムを構築し、インターネットサイト「吹雪の視界情報（青森県試行版）」の試験提供を令和 4 年 1 月 7 日より開始した（図-47）。



図-47 「吹雪の視界情報（青森県試行版）」  
URL : <http://northern-road.jp/navi/touge/fubuki.htm>  
(令和 4 年 2 月 20 日 18 時発表)

このインターネットサイトは、①吹雪の視界情報、②気象警報・注意報、③道路通行止め情報等を集約した情報サイトである（図-47）。

情報サイトでは、吹雪の視界状況を北海道と同様に吹雪時のドライバーの運転挙動に関する研究成果<sup>10</sup>を基に「著しい視程障害(100m 未満)」「かなり不良(100~200 m)」「不良(200~500m)」「やや不良(500~1000m)」「良好(1000m 以上)」の 5 ランクに区分し、予測結果を色分け表示することとした（図 47）。なお、予測対象は青森県内の 8 市町（青森市、五所川原市、つがる市、弘前市、むつ市、八戸市、十和田市、野辺地町）とし、各地点の現在から 24 時間先までの予測情報について提供を行った。

## 2.4 SNS を利用した吹雪情報提供の効果の解明

インターネットサイト「吹雪の視界情報」は、利用者が能動的にサイトにアクセスするプル型の情報提供である。2.3.6 項の「メール配信サービス」は、登録者が事前に登録した内容によりプッシュ型で情報提供しているが、情報を享受できる者は登録者に限定される。また、

「大雪時の道路交通確保対策中間とりまとめ」（国土交通省 平成30年5月(令和3年3月改定)）で、大雪時の情報収集・提供の工夫等に SNS の活用が挙げられるなど、情報提供のあり方に一層の工夫が求められている。そこで、「吹雪の視界情報」の利用促進を図るため、インターネットを利用している幅広い層を対象に、SNS を利用した情報提供を令和元年度冬期から開始した。

「吹雪の視界情報」で利用する SNS は、インターネットサイト「吹雪の視界情報」の利用者に対して、平成30年度に実施したアンケート調査で得た SNS 利用に関する回答結果(図-48)を基に検討した。アンケート調査では、「現在利用している SNS」や「SNS の利用目的」などを調査している。「現在利用している SNS」の回答で最も多かったものは、LINE であった(図-48)。しかしながら、LINE の利用目的は、「電話やメールの代わりに連絡やコミュニケーションをとるため」が92%で最も多く、「自分が知りたい、使いたいと思う情報を収集するため」は23%に留まった。

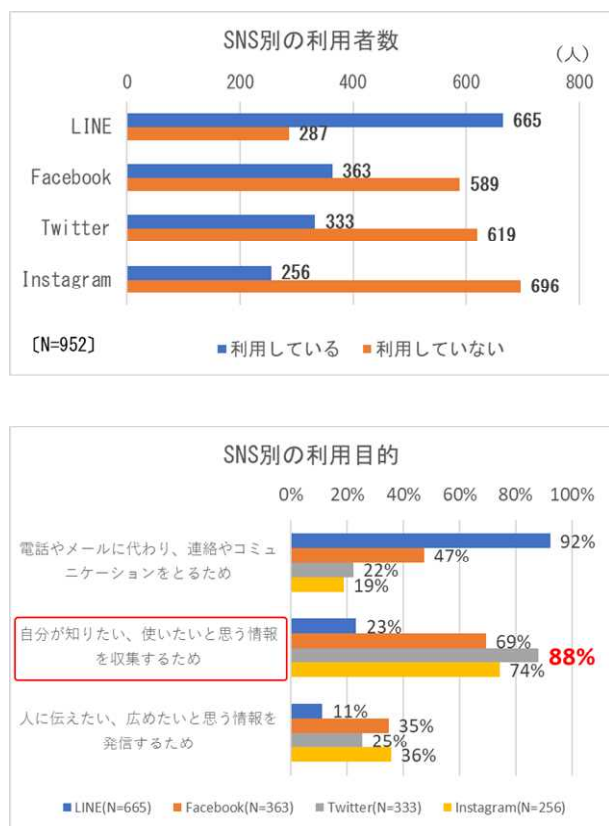


図-48 「吹雪の視界情報」アンケート (H30) の回答結果 (SNS の利用状況・利用目的)

「吹雪の視界情報」で提供する情報は、冬期道路利用者が吹雪災害を回避するための判断に使用するものであることから、SNS の利用目的を”自分が知りたい、使いたいと思う情報を収集するため”と回答している割合が高い SNS に注目した。その結果、割合が最も高かった SNS はツイッターであった(図-48)。また、ツイッターは不特定多数を対象に情報提供が可能なツールである。これらのことを踏まえ、「吹雪の視界情報」ではツイッターを用いることとした。

2.4.2 令和元年度冬期の提供効果

令和元年度冬期は、暴風雪が見込まれた日を対象にツイッターによる情報発信(ツイート)を計7回行った(図-49)。「吹雪の視界情報」ツイッターのアクセス数を図-50に示す。



図-49 「吹雪の視界情報」ツイッター URL : [https://twitter.com/fubuki\\_navi](https://twitter.com/fubuki_navi) (令和元年12月3日11時5分ツイート)

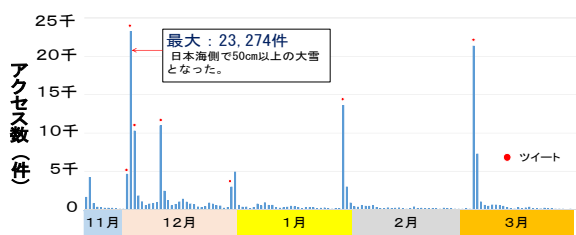


図-50 令和元年度ツイッターアクセス数

日本海側で 50cm 以上の大雪となった令和元年 12 月 3 日には 2 万 3 千件を超えるアクセスとなっている。

また、ツイッターの効果を検証するため、6 時間以内に吹雪視界不良（視程 200m 未満）が予測された地域の人口が同等であった令和 2 年 1 月 30 日と令和 2 年 2 月 23 日のインターネットサイト「吹雪の視界情報」の人口 1,000 人当たりの日アクセス数を比較した（図-51）。なお、人口は市町村合併前の平成 22 年国勢調査<sup>18</sup>から把握した。その結果、ツイートした令和 2 年 1 月 30 日は人口 1,000 人当たり 2.7 件でありツイートしていない令和 2 年 2 月 23 日の 1.6 件に対して約 1.7 倍であった。このことから、ツイートすることによりインターネットサイト「吹雪の視界情報」の利用者増加に効果があったことが窺われる。

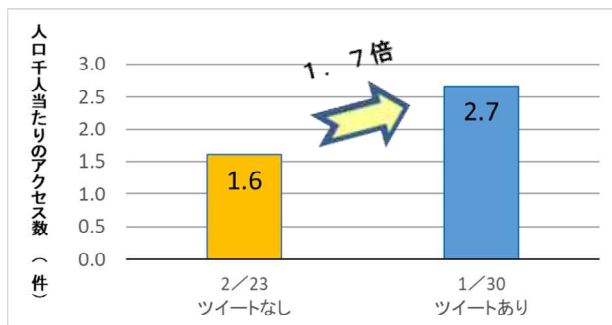


図-51 ツイートの有無による「吹雪の視界情報」の人口千人当たりのアクセス数

### 2.4.3 令和 2 年度冬期の提供効果

令和 2 年度は、情報提供を暴風雪が見込まれた日を対象にツイッターによる情報発信（ツイート）を計 9 回行った。「吹雪の視界情報」ツイッターのアクセス数を図-52 に示す。

上川地方、後志地方で 50cm 以上の大雪となった令和 2 年 3 月 2 日の視程予測情報を前日にツイートすることにより、令和 3 年 3 月 1 日は 6 万 3 千件を超えるアクセ

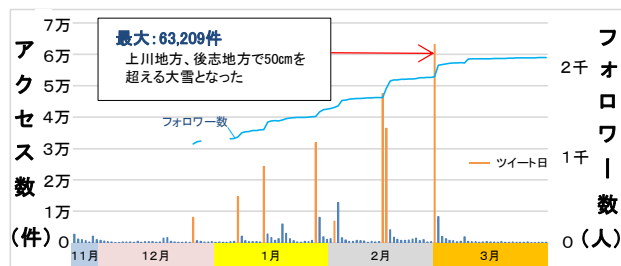


図-52 令和 2 年度ツイッターアクセス数

スとなっている。フォロワーは、令和 3 年 3 月 31 日時点で 2,000 人を超えており、その内訳には道路管理者の他、放送局や交通機関などが含まれていたことから、多岐にわたる分野において「吹雪の視界情報」に高い関心を持たれていることが窺われた。

また、ツイッターによる効果を検証するため、ツイート前後の「吹雪の視界情報」のアクセス数の変化を分析した。図-53 はツイートした令和 3 年 1 月 14 日 9:07 前後での「吹雪の視界情報」のアクセス数の変化を示した結果である。また、図には気象警報発令地域に居住する人口を併せて示した。なお、人口は市町村合併前の平成 22 年国勢調査<sup>18</sup>から把握した。

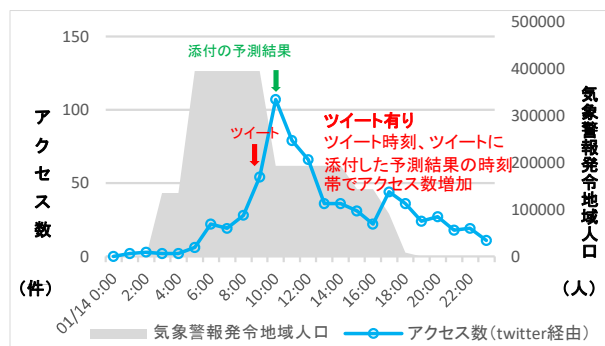


図-53 「吹雪の視界情報」のツイッター経由のアクセス数（令和 3 年 1 月 14 日）

令和 3 年 1 月 14 日は、未明から石狩地方、留萌地方、宗谷地方及び後志地方に暴風雪警報が発令されており、「吹雪の視界情報」の 9 時発表において広域に著しい視界不良が予測された。そのため、最も広域に著しい視界不良が予測された 10 時の予測画像を添付してツイートした。図-53 より、ツイッター経由のアクセス数は、ツイートした時間帯でツイート前の約 2 倍に増加し、ツイートに添付した 10 時の予測の時間帯では、さらに約 2 倍に増加した。このツイートの時間帯及びツイートに添



付した予測画像の時間帯でアクセス数が増加する傾向は、全てのツイートで見られた。このことから、ツイートがインターネットサイト「吹雪の視界情報」の利用者増加に効果があり、ツイートに添付する画像も利用者数の増加に寄与していると考えられる。

一方、「吹雪の視界情報」にアクセスするきっかけには、ツイートの有無以外にも暴風雪警報と大雪警報（以下、「気象警報」という。）の発令状況（地域・時間帯）、「メール配信サービス」のメール配信数などが影響していることが想定される。そこで、「吹雪の視界情報」のアクセスに影響している可能性がある要因として、「北海道内の気象警報発令状況」、「メール配信サービス」のメール配信数、「気象警報発令中の発令地域に居住する人口」を想定し、表-12のとおりアクセス時の条件を設定し7つの状況に分類した。なお、気象警報発令地域の人口は、気象警報が発令された対象区域の市町村に居住する人口の合計値とした。ここで、対象区域の市町村の集計は、気象庁の定める「市町村等をまとめた発表区域」毎に行った。次に、7つの各分類に該当した場合の6～23時までの各時間帯における平均アクセス数（以下、分類ごとの時間帯別平均アクセス数と示す）を算出し整理した（図-54）。なお、時間帯別平均アクセス数は、令和2年度のパソコン版サイトとスマートフォン版サイトの全アクセス数を基に時間帯別のアクセス数を抽出して求めた値であり、ツイート日を含んだ平均値である。時間帯別アクセス数は、Google Analytics で集計されたページビュー数の値を使用した。

表-12 「吹雪の視界情報」へアクセスするきっかけになると想定される状況による分類

分類No.	分類要素		
	気象警報発令状況	メール配信数	気象警報発令地域の人口
①	警報発令まで 24時間以上前	1,000通未満	-
②		1,000通以上	-
③	警報発令まで 24時間以内	1,000通未満	-
④		1,000通以上	-
⑤	警報発令中	指定無し	10万人未満
⑥		指定無し	10万人以上100万人未満
⑦		指定無し	100万人以上

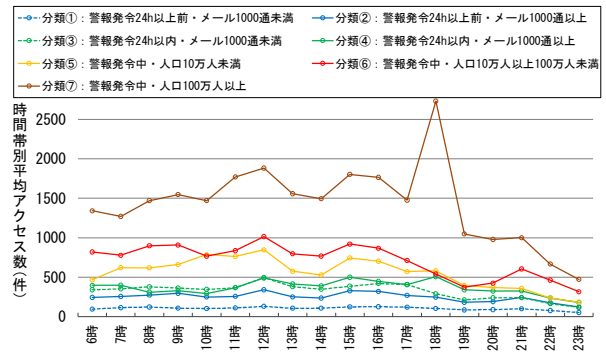


図-54 分類ごとの時間帯別平均アクセス数

分類ごとの時間帯別平均アクセス数（図-54）を、ツイートを実施した日の時間帯別アクセス数と比較する方法によりツイートの効果検証を行った。令和3年3月1日の「吹雪の視界情報」のアクセス数の時間帯別推移をツイッターアクセス経由と経由以外に分け図-55に示した。図には併せて、ツイッター経由のアクセス数の全アクセス数に対する割合、表-12の分類とその分類に該当する時間帯別平均アクセス数を示した。令和3年3月1日12時発表の予測結果において、24時間先の令和3年3月2日12時に北海道内の広範囲で視界不良が予測されたため、12:02にツイートした。なお、ツイートした時点において気象警報は発令されていなかった。この日のアクセス数は、ツイートした12時以前は各分類での時間帯別平均アクセス数と同程度であったが、ツイートした時刻を境に大きく増加した。また、ツイッター経由のアクセス数も12時以降は、全体の10～30%に増加しており、平均アクセス数との差分にツイッター経由のアクセスが占める割合も大きくなっていることが確認できた。この結果から、気象警報発令前であってもツイートにより「吹雪の視界情報」の利用促進が図られることが窺えた。

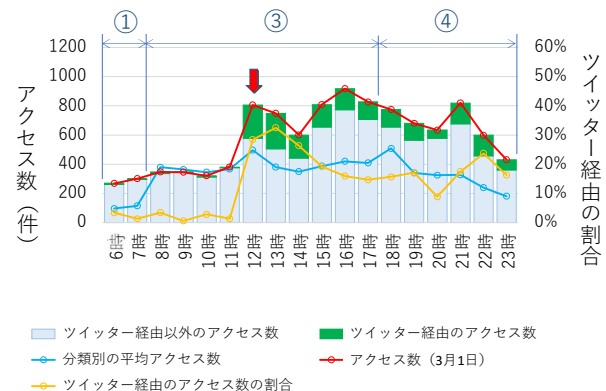


図-55 令和3年3月1日のアクセス数の時間的推移

### 2.4.4 令和3年度冬期の提供効果

令和3年度は、情報提供を暴風雪が見込まれた日を対象にツイッターによる情報発信（ツイート）を計41回行った。「吹雪の視界情報（北海道版）」ツイッターのアクセス数を図-56に示す。なお、青色のグラフはツイート未実施日、橙色のグラフがツイート実施日のツイッターへのアクセス数である。

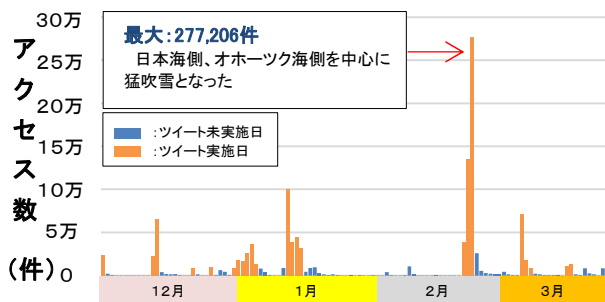


図-56 令和3年度ツイッターアクセス数

日本海側、オホーツク海側を中心に猛吹雪となった令和4年2月21日の視程予測情報を、その兆候が見られた前々日からツイートすることにより、令和4年2月21日は27万件を超えるアクセスとなった。

フォロワーは、令和4年3月22日時点で4,800人を超えており、ツイッターを開始した令和元年度の6.4倍となった（図-57）。

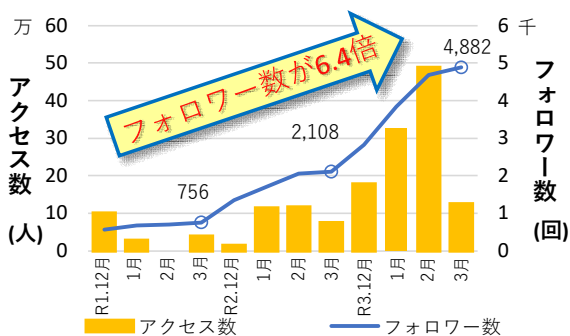


図-57 月別アクセス数とフォロワー数の推移

また、令和3年度には「吹雪の視界情報（北海道版）」ツイッターの利用者に対して、ツイートの活用状況などのアンケート調査を実施した。ツイートで視界不良（視程200m未満）が予測されていることを知った時の行動変化について、質問した回答結果を図-58に示す。なお、アンケートの回答者数は、163人であった。

### 【ツイートで視界不良の予測を知った際の行動変化】

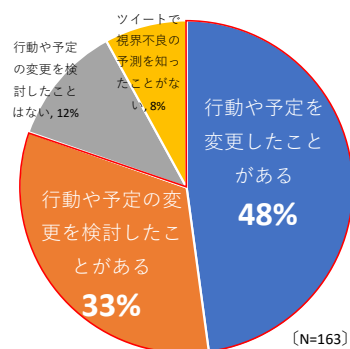


図-58 「吹雪の視界情報」ツイッターに関するアンケート回答結果

図-58より、ツイートで視界不良（視程200m未満）の予測を知った時は、48%の回答者が行動変更をしたことがあると回答しており、行動変更を検討したことがあると回答した33%と合わせると8割の回答者がツイートを吹雪時の行動判断に活用していることが窺えた。

### 3. まとめ

本研究では、広域的な吹雪視程障害予測技術の開発に向け、「多様な気象環境下における吹雪発生条件」や「降雪形態と視程の関係」や「気象条件を用いた吹雪視程予測手法」の北海道外への適用性などについて以下の通り調査を行った。

- 1) 降水種別の雨雪と気温及び相対湿度との関係について3カ年分の分析を行い、「気象条件を用いた吹雪視程予測手法」における地吹雪判定手法の雨雪判別条件について改良を行った。
- 2) 平成30年3月1日からは降水種別の雨雪と気温及び相対湿度との関係を加味した吹雪視程予測手法による情報提供を開始し、暴風雪時における予測情報について、現地の視程と、旧アルゴリズム、新アルゴリズム、それぞれで演算した視程について比較し予測精度を検証した。その結果、適中率が新アルゴリズムの方が旧アルゴリズムより2.6%上昇していることを確認した。
- 3) 青森県で地吹雪発生状況について調査を実施し、その結果を基に地吹雪発生条件について分析を行った。その結果、降雪時に地吹雪発生するとしている既往の条件下（気温と風速）においても地吹雪が発生していない事例が多く見られた。特に、気温0℃より高い場合には風速に関係なく地吹雪の発生している事例はあまり見られず、気温1℃以上ではほとんど地吹雪の発生事例がみられなかった。

- 4) 降雪形態の違いによる視程低下への影響など降雪時の視程低下メカニズムを明らかとするため、降雪時の視程調査に関する既往文献を収集した。
  - 5) 降雪時における視程調査を実施し、降雪時における飛雪流量と視程との関係について分析を行った。その結果、降雪時における飛雪流量と視程の関係は、バラツキが見られるものの吹雪時に得られた関係式とも傾向が概ね一致することを明らかとした。ただし、同様の飛雪流量であっても気温が低い場合に視程が短くなる傾向が見られた。
  - 6) 「気象条件を用いた吹雪視程予測手法」の推定精度について北海道内4箇所と青森県内2箇所において検証した。その結果、青森県内においても北海道内と概ね同程度の適中率であることを確認した。また、気温が概ね0°C以上における降雪時に推定視程の空振りが多く、風速5m/s未満の降雪時に推定視程の見逃しが多くみられるなどの課題を把握した。
  - 7) 把握した課題を基に、「気象条件を用いた吹雪視程予測手法」の吹雪発生の判定条件や飛雪空間密度の推定式のパラメーターについての改良案を検討し提案した。
  - 8) 令和2年度に、改良した吹雪視程推定手法を吹雪視界情報提供システムに実装した。また、令和3年度に、青森県版の吹雪視界情報提供システムを構築した。
  - 9) 吹雪時のドライバーの交通行動の判断支援に向けて、「吹雪の視界情報（北海道版）」をインターネットで公開し、道路利用者への試験提供を行った。その結果、アクセス数においては、天候悪化時にアクセスが増加しており、交通行動判断に活用していることが窺えた。また、情報提供を行うことにより、冬型事故が削減できていることから道路利用者の安全に貢献していることが窺えた。さらに、令和3年度より構築した吹雪視界情報提供システム（青森版）により青森県内を予測対象とした「吹雪の視界情報（青森県版）」の道路利用者への試験提供を開始した。
  - 10) 令和元年度からツイッターを用いた情報提供を開始した。ツイッターで情報提供を行うことで「吹雪の視界情報」のアクセス数の増加に効果があることが窺えた。また、ツイートを吹雪時の行動変更の判断に活用していることが窺えた。
- 今後、広域に適用可能な吹雪視程予測技術の開発に向けた調査を継続するとともに、インターネットサイト「吹雪の視界情報」のPRに努め、吹雪災害の減災に寄与していきたい。

## 参考文献

- 1) 松澤勝：浮遊粒子の落下速度を考慮した吹雪時の視程推定手法改良、寒地技術論文・報告集、Vol.23、pp.400–405、2007
- 2) 土木研究所寒地土木研究所：平成27年度プロジェクト・重点研究報告書－4.2 暴風雪による吹雪視程障害予測技術の開発に関する研究－、土木研究所、2015
- 3) 大宮哲、武知洋太、國分徹哉、原田裕介、松澤勝：複数の気象要素に基づく地吹雪発生条件、寒地土木研究所月報、第750号、pp.14–22、2015
- 4) 武知洋太、松澤勝、國分徹哉、大宮哲、原田裕介：“吹雪の視界情報”における吹雪視程推定手法について、寒地技術論文・報告集、Vol.32、pp.156–157、2016
- 5) 土木研究所寒地土木研究所：平成28年度 研究開発プログラム報告書－5.極端気象がもたらす雪氷災害の被害軽減のための研究開発－、土木研究所、2016
- 6) 気象庁：最大降雪量ガイダンス、平成21年度数値予報研修テキスト、pp.27–37、2009
- 7) 竹内政夫、石本敬志、野原他喜男、福沢義文：降雪時の高い地吹雪の発生限界風速、昭和61年度日本雪氷学会全国大会予稿集、p.256、1986
- 8) 武知洋太、松澤勝、中村浩：吹雪時に人間が感じる視程と視程計や吹雪計による計測値との関係、北海道の雪氷、28、pp.17–20、2009
- 9) 鈴木弥幸：視程と降雨(雪)強度との関係、気象庁研究時報、第15号、No7、pp.483–487、1963
- 10) Mellor, M. : Light scattering and particle aggregation in snowstorms., J. Glaciol., 6, No44, pp.237–248, 1966
- 11) O'Brien, H.W. : Visibility and light attenuation in falling Snow, J. Appl. Met., 9, pp.671–683, 1970
- 12) 齊藤博英：降雪の強さと視程、国立防災科学技術センター研究報告、5、pp.33–40、1971
- 13) 岩井邦中：長野市における降雪中の視程について、天気、Vol.22、pp.27–29、1975
- 14) 藤吉康志、若浜五郎、遠藤辰雄、入川真理、小西啓之、竹内政夫：札幌における一冬間の降雪強度と視程の同時観測、低温科学物理篇、第42巻、pp.147–156、1984
- 15) 川端一史、赤田尚史、長谷川英尚、築地由貴、近藤邦夫、稲葉次郎：降雪時における視程・降雪強度及び雪片の大きさに関する同時観測、寒地技術論文・報告集、Vol.20、pp.684–688、2004
- 16) 加治屋安彦、松澤勝、鈴木武彦、丹治和博、永田泰浩：降雪・吹雪による視程障害条件下のドライバーの運転挙動に関する一考察、寒地技術論文・報告集、Vol.20、pp.325–331、2004

## 5 極端気象がもたらす雪氷災害の被害軽減のための技術の開発

- 17) 國分徹哉、武知洋太、大宮哲、原田裕介、松澤勝：インターネットによる吹雪の視程情報提供、第36回交通工学研究発表会論文集、pp.579-584、2016
- 18) 総務省統計局：平成22年国勢調査、都道府県・市区町村別主要統計表、2017

## 5.3 吹雪対策施設及び除雪車の性能向上技術の開発

### 5.3.1 防雪林の安定的な防雪性能確保に関する研究

担当チーム：寒地道路研究グループ（雪氷チーム）、

技術開発調整監

（寒地機械技術チーム、寒地技術推進室）

研究担当者：西村敦史、萬直樹、高橋丞二、松澤勝、

金子学、伊東靖彦、遠藤康男、原田裕介、

松島哲郎、吉井昭博、高橋渉、櫻井俊光

（雪氷）、片野浩司、巖博、大槻敏行、

中島淳一、牧野正敏、植野英睦、住田則行、

齋藤勉、幸田勝（機械）、長谷山昇、渡辺淳

（推進室）

#### 【要旨】

積雪寒冷地の北海道では、吹雪による冬期交通障害が多発しており、国道における通行止めの約4割を吹雪が占めるため、吹雪対策が重要な課題である。道路防雪林は吹雪対策として高い効果が期待できるが、間引き遅れによる日照不足等で下枝が枯れ上がることにより、防雪性能の低下が懸念される。そこで本研究は、下枝の枯れ上がりによる防雪性能等への影響解明、防雪性能が低下した道路防雪林への補助対策の提案、枯れ上がりの見られる道路防雪林の管理手法を提案することで、安定的な防雪性能を確保することを目指すものである。

キーワード：防雪、吹雪、道路防雪林、間引き、植栽密度管理、枝下高

#### 1. はじめに

北海道における国道の通行止めの約4割は吹雪に起因し、安全な生活環境や社会・経済活動を維持するためには道路施設による吹雪対策が不可欠である。道路防雪林（以下、防雪林という）は、道路の風上側または両側に樹木を林立した防雪施設で、樹木が風を抑え飛雪を捕捉することにより、吹雪による視程障害や吹きだまりを緩和する役割がある。吹雪対策として最も高い効果が期待される<sup>1)</sup>。

北海道の道路事業では延長80km以上の防雪林が造成済みで、現在も引き続き造成されている。一方で、防雪林の造成を開始してから30年以上が経過したことで、課題が浮きぼりとなっている。前中期計画では、過湿や土壌堅固等が樹木の初期成長期における成長遅延要因であることを明らかにし、樹木の成長に応じた防雪林の効果的な育成管理の手法を示した<sup>2)</sup>。一方、樹木が十分に成長した防雪林の管理上の課題が散見された。課題の1つに、下枝の枯れ上がりに伴う防雪性能の低下がある<sup>3)</sup>。

外観上十分に成長した防雪林でも、その内部では日照不足により、地表面に近いところで下枝の枯れ上がりが散見される（図-1）<sup>3)</sup>。吹雪は地表面に近いほど雪

粒子の量が多い現象である<sup>4)</sup>。そのため、間引き等による下枝の枯れ上がりの対策は、吹雪による吹きだまりや視程障害の緩和に重要であると考えられる。本研究では、防雪林の安定的な防雪性能確保のため、次に挙げる項目を実施する。

- ① 下枝の枯れ上がりによる防雪性能等への影響解明
- ② 防雪性能が低下した防雪林への補助防雪対策の提案
- ③ 枯れ上がりの見られる防雪林の管理手法の提案

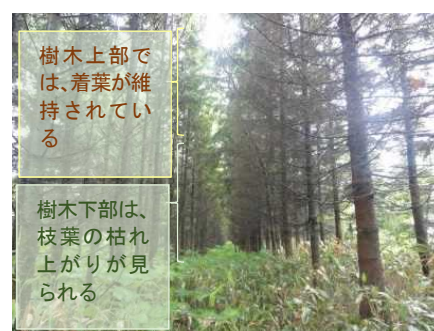


図-1 防雪林内の下枝の枯れ上がり状況

地表面付近における下枝の枯れ上がりによる機能低下については、防風林や海岸防災林等には見逃されやすい防雪林特有の課題である。そのため、吹雪による

視程障害や吹きだまりを緩和する防雪林の防雪性能に関する実測事例は、ほとんどない。ここでは、①に示す下枝の枯れ上がりによる防雪性能等への影響を解明するために、現地調査と模擬実験により、以下1)～5)を整理した。模擬実験は、任意の林況設定が可能な風洞実験装置を用いた。

- 1) 葉面積、立木密度等で表現される防雪林の構成要素を現地調査により把握
- 2) 防雪林の防雪性能評価のため、下枝の枯れ上がりによる風雪の吹き抜けに関する気象観測を実施
- 3) 防雪林の構成要素と防雪性能の定量的関係を整理
- 4) ICT 活用による防雪林の防雪性能の評価可能性の検討
- 5) 下枝の枯れ上がりに関する風洞実験

下枝の枯れ上がりがみられる防雪林では、風下や林内に防雪ネット柵や低木が設置されることがある。しかし、補助柵（防雪ネット柵や低木等）の効果や下枝の枯れ上がり高さによる設置基準については明らかになっていない。ここでは、前頁の② 防雪性能が低下した防雪林への補助対策の提案について、効果的な補助対策を検討するため、以下1)から3)の実施結果を3章に整理した。

- 1) 補助対策に関する資料調査
- 2) 補助対策の現地試験と評価検討
- 3) 国道の視界不良軽減効果の確認

現地の状況把握、効果的な補助対策を踏まえて、枯れ上がりの見られる防雪林の管理手法を技術資料としてとりまとめた。

本研究の成果となる、防雪性能を安定的に確保するための防雪林の管理手法は、効果的な道路吹雪対策施設の整備に必要不可欠である。今後、上記手法を北海道開発局など道路管理者が推進する防雪事業や、「道路吹雪対策マニュアル」に反映させることで、吹雪災害が頻発する積雪寒冷地における安全・安心な生活環境や社会・経済活動の維持に貢献することができるものと考えられる。また、植生を利用した吹雪対策（Living Snow Fences）を推進している北米や欧州に本研究の成果が活用されることで、国際的に貢献することも期待される。

## 2. 下枝の枯れ上がりによる防雪性能等への影響解明

下枝の枯れ上がりによる防雪機能等への影響を明らかにするために、防雪林の構成要素である基本林の樹齢と樹高、下枝の枯れ上がりの進行を把握した。この樹木調査を踏まえて、防雪林内の風雪の吹き抜けや

補助対策の効果等に関する現地観測を実施した。

調査対象の防雪林には標準林と狭帯林が含まれる。それぞれの防雪林の基本設計<sup>1)</sup>を図-2に示す。標準林とは林帯幅が10m以上、狭帯林とは林帯幅が10m以下の防雪林である。標準林は林帯幅が比較的広いため、道路に流れ込む吹雪による吹きだまりの緩和効果と、吹雪による視程障害の緩和効果が期待され、狭帯林は林帯幅が比較的狭いため、吹きだまりの緩和効果は薄い<sup>1)</sup>が、視程障害を緩和する効果が期待される<sup>1)</sup>。また、狭帯林は林帯幅が狭いので、広い道路用地を必要としない等のメリットがある。

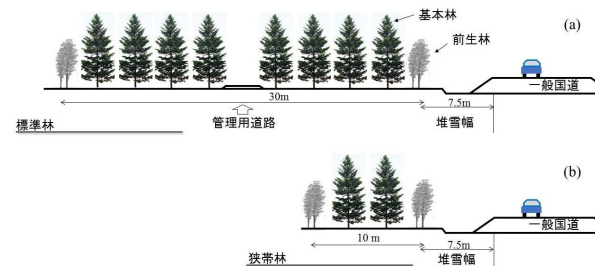


図-2 防雪林の基本設計 a) 林帯幅30mの標準林、b) 林帯幅10mの狭帯林

## 2. 1 防雪林内における下枝の枯れ上がりの把握

### 2. 1. 1 調査方法

下枝の枯れ上がりの進行に関する既往研究は少ない。ここでは、表-1に示す20年以上前に造成した防雪林を対象に現況を把握し、過去の調査と対比することで樹木の成長過程や枯れ上がりの進行を示した。

平成6年に24の防雪林について調査された報告書<sup>5),6)</sup>と現況を比較することで、樹木の成長過程や枯れ上がりの進行を調査した。過去2つの報告書には、各防雪林の代表的な樹種について、推定樹高、林齢、樹高、胸高直径、枝張、枝下高、当年伸長量（最大3年分）、枯損率が記載されている。このうち、次の4項目に該当する防雪林、① 現況存在しない防雪林、② 日照や環境条件が特異と考えられる狭帯林、③ 現在の一般的な防雪林と樹種が異なる防雪林、④ 工事等で測定困難な防雪林を除外した。その結果、21防雪林39箇所50地点で再計測を行った。調査箇所は北海道東部および北部に多い（図-3）。これは元々防雪林の分布に偏があるためである<sup>1)</sup>。

再測定では表-1に示す防雪林において、樹種ごとに標準木を2～4本選定のうえ、各樹木の樹高、枝下高（4方向および中心）、枝張（4方向）、隣接木との距離を測定した。枝下高は枯枝と生枝をそれぞれ測定した（図

-4)。枝張はそれぞれの方向の最長のものを測定した。  
測定は雪氷チームおよび道北・道東支所が分担し、平成26年11月5日～平成27年7月3日の間で行った。



図-3 構成要素と下枝の枯れ上がりを調査した防雪林

表-1 調査対象の防雪林の一覧

	国道番号	防雪林の地名
1	276	京極町北岡
2	40	中川町国府
3	39	大空町湖南
4	238	網走市東浜
5	238	紋別市共和
6	238	紋別市小向
7	239	西興部村奥興部
8	334	斜里町朱円
9	391	小清水町水上
10	40	天塩町雄信内
11	40	稚内市サラキトマナイ
12	238	枝幸町岡島
13	238	枝幸町ヤマウス
14	238	浜頓別町山軽
15	44	浜中町茶内
16	243	弟子屈町仁多
17	272	中標津町俵橋
18	334	羅臼町幌萌
19	241	上士幌町居辺
20	241	上士幌町北居辺
21	241	士幌町東雲



図-4 測定項目の詳細と測定状況（上部写真）

## 2. 1. 2 樹木調査の結果

測定した樹種は全体の4分の3がアカエゾマツであり、ヨーロッパトウヒ、トドマツをあわせると、現在道路防雪林で用いられる基本林構成種<sup>1)</sup>が96%を占めた(図-5)。樹齢は約30～40年程であり、樹高は10m前後(平均9.7m、最小約4m、最大約16m)である。

なお、樹木調査の詳細については過年度の報告書<sup>7)</sup>を参照されたい。

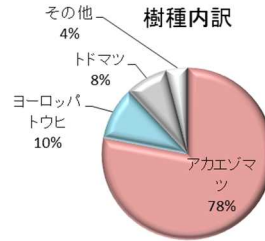


図-5 調査した樹種の内訳

### 1) 樹齢と樹高との関係

アカエゾマツの樹齢と樹高の関係を、一例として図-6に示す。図中の赤線は回帰直線であるため調査対象年数にのみ限定される直線であるが、成長速度は1年間でおおよそ0.29mである。なお、「道路吹雪対策マニュアル」<sup>1)</sup>には樹齢と樹高の散布図を掲載しているが、10～15年生以下の若年木が中心である。本調査記録は40年を超える樹木も含まれており、順調に育てば40年間で約10mの樹高になることが期待される。ただし、図中の回帰直線は調査した樹木だけに適用される。

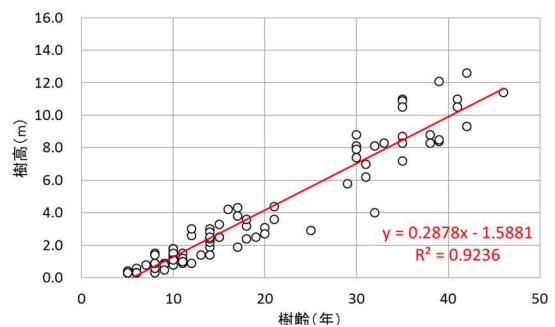


図-6 アカエゾマツの樹齢と樹高. 赤線は回帰直線

### 2) 下枝の枯れ上がりの進行

平成6年の調査結果と合わせて枯れ上がりの進行状況を把握した。アカエゾマツの樹高と生枝下高(下枝の枯れ上がり高さと同じ)の関係を図-7に示す。

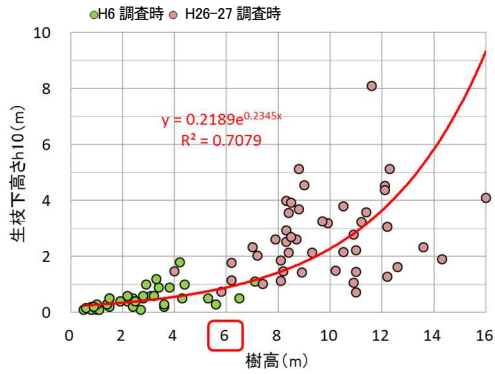


図-7 生枝下高と樹高の関係。赤線は回帰曲線

回帰曲線から、樹高が高いほど下枝の枯れ上がりが進行しやすいことを示している。特に、樹高 6m 前後から下枝の枯れ上がりが増加する傾向にある。ただし、回帰曲線の累乗関数は調査した樹高のみに適用される。

## 2. 2 防雪林の風雪の吹き抜けに関する気象観測

本中長期計画において下枝の枯れ上がりに着目して調査を行った防雪林は、標準林 3 箇所と狭帯林 1 箇所である。平成 27 年度からは天塩町雄信内（一般国道 40 号、標準林）、平成 29 年度には小清水町水上（一般国道 391 号、狭帯林）、令和元年度からは浜頓別町山軽（一般国道 238 号、標準林）と浜中町茶内（一般国道 44 号、標準林）について、それぞれ気象等の観測を実施した。なお、補助対策工が設置されている箇所においても気象等を観測している。補助対策工が設置されていない気象観測は 2 章、補助対策工が設置されている気象観測は 3 章で扱う。

### 2. 2. 1 観測箇所概要

#### 1) 雄信内防雪林（標準林）

一般国道 40 号沿いの雄信内防雪林の延長は約 5km、観測した道路南西側における防雪林の林帯幅はおよそ 30m で、風上には 300m 以上の吹走距離（吹雪が発達する距離）がある（図-8）。

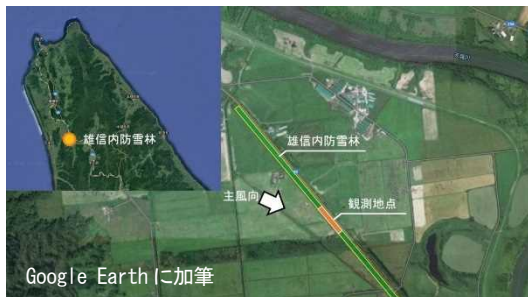


図-8 雄信内防雪林の観測箇所

樹高 1m 以下の樹木を除いた観測地 (KP181.76 付近) における林内の樹高は平均 12m であり、林帯内部には平均して高さ 2.4m の枯れ上がりが見られている（図-9）。



図-9 雄信内防雪林

#### 2) 山軽防雪林（標準林・一部補助対策工あり）

一般国道 238 号沿いの山軽防雪林の延長は約 2.8km、観測した道路南西側、道路北東側の両側における防雪林の林帯幅はおよそ 30m である。道路南西側には丘陵があるが障害物はなく吹走距離は 200m 以上で、道路北東側には低木や雑草が点在しているが吹走距離は 100m 以上で、およそ 1.5km 先にオホーツク海がある海岸沿いの防雪林である（図-10）。



図-10 山軽防雪林における観測箇所



図-11 山軽防雪林（南西側）





図-12 山軽防雪林（北東側）

観測地（KP238 付近）の南西側における防雪林内の樹高は平均 5m 程度、北東側は平均 10m 程度である。南西側の防雪林（図-11）には下枝の枯れ上がりはみられないが、北東側の防雪林には 1m 程度の枝打ちが見られる（図-12）。

### 3) 茶内防雪林（標準林・補助対策工法あり）

一般国道 44 号沿いの茶内防雪林の延長は約 0.8km、観測した道路北西側における防雪林の林帯幅はおよそ 30m である（図-13）。樹高 1m 以下の樹木を除いた観測地（KP66.5 付近）における林内の樹高は平均 12m 程度であり、林帯内部には 2m 以上の枯れ上がりが見られる。また、根室道路事務所により枯れ上がり対策として防雪ネット柵が風上林縁の牧草地側（図-14）と林内中央付近に設置されている（図-15）。



図-13 茶内防雪林の観測箇所



図-14 茶内防雪林（風上林縁の防雪ネット柵）



図-15 茶内防雪林（林内の防雪ネット柵）

### 4) 水上防雪林（狭帯林）

水上防雪林の延長は約 1km、風上林縁からの吹走距離は 300m 以上あり、観測した道路北側における防雪林の林帯幅はおよそ 10m である（図-16）。



図-16 水上防雪林の観測箇所

観測地（KP110.0 付近）における樹高は平均 10.2m であり、地表面から高さ約 2m ほどまで枝打ちされており枝葉のない状態である（図-17）。



図-17 水上防雪林の外観

## 2. 2. 2 観測および結果整理方法

### 1) 観測方法

気象等観測項目は、防雪林の箇所毎に異なるが、風向・風速、気温、視程、飛雪流量、吹きだまり量等である。各項目と単位、計測範囲および解析時に利用した範囲を表-2 に示す。観測機器について、風向・風速の観測には風車型風向風速計（R.M. Young Co.製）、湿度の観測には温度計（Vaisala Co.製）、視程の観測には視程計（明星電気社製）、飛雪流量の観測には吹雪計（新潟電機社製）を主に利用した。

表-2 単位と解析に利用した値

項目	単位	計測範囲	データ処理範囲
風向	16 方位	-	10 分最頻値
風速	m/s	0.1 以上	10 分平均値
気温	°C	-	10 分平均値
視程	m	1000 以下	10 分中央値
飛雪流量	g/m <sup>2</sup> /s	0.1 以上	1 分平均値
吹きだまり量	m <sup>3</sup> /m	-	累計値

2) 結果整理方法

ここでは観測結果について、風上基準点の値を分母、風下の観測地点（主に道路側）の値を分子とし、風速比として整理する(式(1))。なお、2.3 では、風速の他、視程、飛雪流量の結果を用いて、それぞれ風速比、視程比、飛雪流量比として表現する。

$$\text{風速比} = \frac{\text{風下（道路側）の風速 (m/s)}}{\text{風上（基準点）の風速 (m/s)}} \quad (1)$$

防雪林を通過し減風された風の場合は、風速比は 1.0 より小さい値となる。

基準点の高さを風下の風速計の高さと合わせるため、風上の高さごとの風速を算出する必要がある。雪面における風速の鉛直分布は対数則の式(2)<sup>11)</sup>で算出される。

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left( \frac{z-d}{z_0} \right) \quad (2)$$

ここで、 $u(z)$ 、 $u_*$ 、 $\kappa$ 、 $z$ 、 $d$ 、 $z_0$  はそれぞれ、基準点の高さにおける風速(m/s)、摩擦速度(m/s)、カルマン定数(=0.4)、風速を計測した高さ(m)、積雪深(m)、雪面における地表面粗度(m)である。地表面粗度 $z_0$ については既往研究<sup>10)</sup>の値 ( $1.5 \times 10^{-4}$ m) を用いる。積雪深 $d$ を北海道開発局が管理する近隣の道路テレメータ等の値を入力し、観測した高さにおける風速から摩擦速度 $u_*$ を計算する。観測した地点における摩擦風速 $u_*$ が算出できれば、基準点におけるそれぞれの高さの風速 $u$ が算出される。このように、基準点 1 点に 1 台の風速計があれば各高さの基準風速を算出することができる。

2. 2. 3 観測結果

1) 雄信内防雪林（標準林）

平成 29 年度に、雄信内防雪林における風雪の吹き抜けについて観測するため、風上林縁から道路側風下にかけて風向・風速の連続観測を実施した。風上林縁から 50m 程度離れた風上に基準点 (No.0) を、風上林縁に No.2、林内 No.21、No.22、道路側風下林縁に No.3、No.4 を設けて風向風速計を設置し観測した (図-18)。



図-18 雄信内防雪林における観測地点

図-19 に、風上の基準点 No.0 と林縁 No.2 地点における風速の比較結果 (高さ:3m) の一例を示す。図に示したデータは基準点 No.0 の風向が 270° (西) の時のもので、データ数は 1,254 データ (10 分平均値) である。図中の直線は、原点を通る回帰直線であり、傾きから風速比は 0.89 (相関係数: 0.99) である。

同様の算出方法で、地点 No.2 (高さ:1, 3, 7m)、No.21 (高さ:1, 3m)、No.22 (高さ:1, 3m)、No.3 (高さ:1, 3, 7m)、No.4 (高さ:3m) について風向別 (225.0~292.5°) に解析した。林内および林風下林縁では、風向によって風が防雪林を通過する距離が変わる。防雪林に直交するほど、風が通過する距離が短く、平行風に近づくほど、風が林内を通過する距離が長くなる (図-20)。

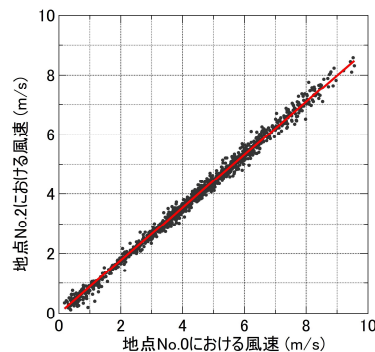


図-19 林風上の基準点 No. 0 と林縁 No. 2 地点における風速の比較 (高さ:3m)

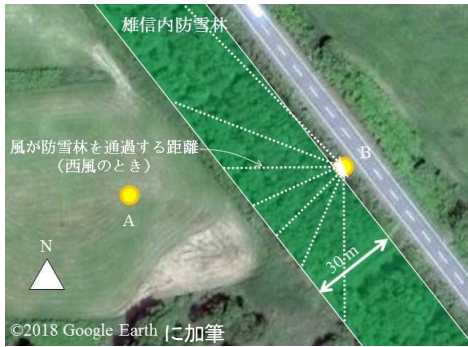


図-20 風が防雪林を通過するときの距離 (イメージ)

風が林内を通過する距離と風速比との関係を図-21に示す。ここで、防雪林の風上林縁を0mとしているので、基準点(風速比:1.0)における距離(横軸)はマイナスとなり、風向によってその距離も変わる。図-21の横軸は、防雪林の風上林縁からの距離  $x$  を平均樹高  $h$  (12m) で除した値(高倍距離)である。

図-21に示す防雪林の風上林縁からの距離と風速比との関係から、次の高さ毎に特徴が見られる。

- ・7m: 風向によらず風下(No.3)の風速比が0.6~0.2の範囲で低下している。
- ・3m: 直交風(225~247.5°)では、風下(No.3, No.4)の風速比が1.0~0.8程度と、風上とほぼ同等である。斜風では、風下の風速比が0.6~0.4程度まで低下している。
- ・1m: 直交風(225~247.5°)では、風下(No.3, No.4)の風速比が1.1~0.8程度と、風上とほぼ同等である。斜風(270~292.5°)では、風下の風速比が0.6~0.4程度まで低下している。

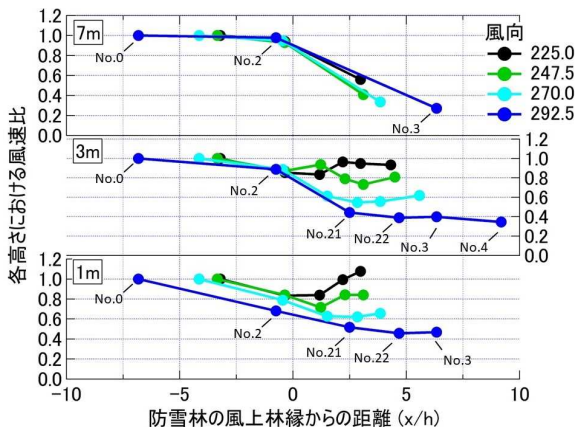


図-21 防雪林の風上林縁からの距離と風速比  
風向 225.0°: 防雪林に対して直交風。  
図中の地点 No.0~No.4: 風向 292.5° のとき

直交風では、下枝の枯れ上がりがみられる高さ1mと3mで、風速比が風上とほぼ同等で減風効果がないことから、明らかに下枝の枯れ上がりによる風雪の吹き抜けが生じていることを示す。一方、斜風では、高さ1m~7mのすべての高さで減風効果があることから、下枝の枯れ上がりによる風雪の吹き抜けの影響は認められない。

2) 水上防雪林(狭帯林)

平成29年度に、水上防雪林における風雪の吹き抜けについても調査を実施した。風上D点を基準点とし、風下A点に風向風速計を設置し(図-22)、風速比を算出した。



図-22 水上防雪林における観測地点

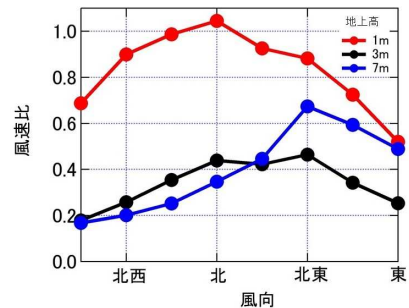


図-23 風向別の地点Aにおける風速比

図-23に、風下で計測した狭帯林における風速比を示す。高さは1m、3m、7mである。雄信内防雪林の標準林と同様に、各高さで風速比が異なる。直交風の北から斜風の西北西の風では、高さが高いほど風速比が低く、3mと7mで十分な減風効果がみられる傾向にある。

一方、北東の風では高さ7mの方が3mよりも風速比が高い。これは、現地の写真(図-24)から林冠の疎密によるものと考えられる。また、高さ1mで

は全方位（西北西～東）において風速比が 0.5 以上と高い値を示し、直交風の北風のときは 1.0 を超える風速比であった。これは、枝打ちによるものと考えられ、風雪の吹き抜けによる影響である。



図-24 一般国道 391 号から撮影した水上防雪林。赤枠の部分に疎の林冠がみられる

吹雪が発生した平成 31 年 1 月 24 日に、水上防雪林を車両で走行し動画を撮影し、防雪林の開口部を通過したときに視認性の悪化が確認された（図-25）。

一方、観測地 A 点を通過したとき、枝打ちされた防雪林の低い位置から飛雪粒子が飛散している状況が確認された。風雪の吹き抜けによる影響であったが、この時はドライバーの視認性においては防雪林が視程障害を緩和し、且つ視線誘導効果を発揮し、走行に支障のない状況であった（図-26）。



図-25 吹雪発生時における水上防雪林の開口部



図-26 吹雪発生時における水上防雪林の観測地点

水上防雪林では、地表面付近における枝打ち、あるいは枯れ上がりにより飛雪粒子の飛散による視程悪化の懸念はあるが、ドライバーの目線高さで飛雪を抑え

ていれば、狭帯林の主目的である視程障害の緩和効果が発揮されるものと考えられる。なお、風下 A 点で観測した高さ 3m は、盛土構造である一般国道 391 号上ではドライバーの目線高さに相当する。

## 2. 3 防雪林の構成要素と防雪性能の定量的関係

ここでは、雄信内防雪林（標準林）のデータを用いて、防雪林の空隙率で構成要素を表現し、気象等観測結果から防雪性能と空隙率の関係について示した。

### 2. 3. 1 防雪林の空隙率

防雪林を通過する風の空力特性を説明しうる防雪林の構成要素には、樹高、林帯幅、延長、樹種に加えて空隙率、葉面積指数 LAI または植物面積指数 PAI<sup>12)</sup> が該当する。ここで、LAI は単位地表面積あたりの葉の投影面積の総和、PAI は単位地表面積あたりの葉の他、枯れた葉、枝、幹の投影面積比として定義され、双方とも 3 次元構造を捉えた無次元の指数である<sup>12)</sup>。

防雪林の構成要素と防雪性能を正確に把握するためには、植生の空隙率や LAI 等のパラメータを調査することが必要となる。しかし、LAI 等のパラメータを明らかにするためには現地踏査が必要とされ、長大な防雪林の調査で用いるには財源制約のある中では負担が大きく、計測から解析まで時間を要する。道路の付属施設とした防雪林の道路管理手法という技術的な側面において、PAI 等を網羅的に正確に把握することよりも、道路側から如何に防雪林の構成要素を迅速に捉えるかが鍵となる。

空隙率は防雪林の投影面積で表現される 2 次元構造ではあるが、道路側から迅速に計測を可能にするものである。そこで、防雪林の空隙率を比較的簡易に算出可能な写真撮影による手法<sup>13)</sup>を採用し、本研究は簡易的に防雪林の構成要素と防雪性能の定量的関係を明らかにするため、防雪林風上と風下で風向・風速と飛雪流量を計測し、風速や飛雪流量と空隙率の関係を整理し、防雪性能の定量的関係を示す。なお、ここでいう空隙率とは光学的な空隙率 (Optical porosity) である。

解析手順は次の通りである。以下の手順 a) ~ d) は、図-27 の a) ~ d) の画像と一致させている。画像は積雪が融解した直後の平成 30 年 5 月 8 日に撮影し、撮影環境は晴天、無風であった。

- a) 道路側 B 点 (図-27) から魚眼レンズで防雪林全体を撮影した。このとき、中心線は防雪林と直交する方位 (230°) とした。すなわち、魚眼レンズで撮影される範囲は方位 230°±90°である。撮影した高さは 1, 3, 5, 7, 9m である。

- b) 撮影された魚眼画像における上下の極点を結ぶ線を方位ごとに描き、方位ごとに等分した。
- b') 水平部（白枠）をトリミングして撮影した各高さとする。地表面や防雪林以外の樹木が映り込まないようにした。
- c) トリミングされた画像を風向毎に切り取った。
- d) 切り取った画像を 8bit から 1bit まで bit 数を減らし、白黒の閾値を 50%（白と黒の二値化）で表現した。

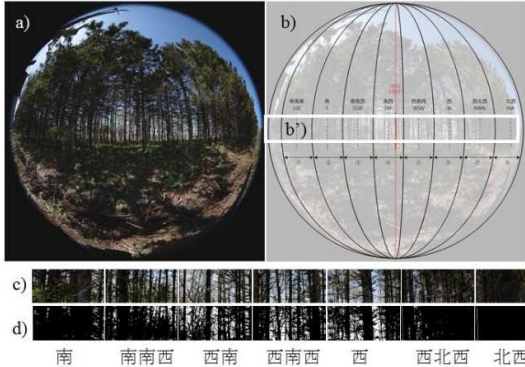


図-27 防雪林における空隙率の算出手順の一例（高さ 1m の場合）

同様の方法で、風速と同じ高さ 3m、5m、7m、9m で撮影して解析した。画像を図-28 に示す。なお、撮影した方位  $230^\circ \pm 90^\circ$  の画像から、北西方位の画像解析については防雪林の縁までとし、南南東の方位には取り付け道路があるため、解析結果では除外した。高さ 1m と 3m においては風上側に見える樹林帯のピクセルを除外した。このように、風向毎に切り取り二値化された画像について、次式の関係から防雪林の空隙率を算出した。

$$\text{空隙率} = \frac{\text{背景の面積 (二値化された白の領域)}}{\text{切り取った画像の面積}} \quad (3)$$

下枝の枯れ上がりについて定量的に評価するため、南～北西の方位における防雪林の空隙率を解析した結果を図-29 に示す。図-29 より、高さが高いほど防雪林の空隙率が低く、南風あるいは北西になるほど空隙率が低くなる傾向にある。高さが高いほど防雪林の空隙率が低くなることは、すなわち高さが低い部分に空隙があることを意味している。よってこの結果は下枝の枯れ上がりによる空隙率への影響である。また、南あるいは北西の方位では防雪林の距離が長くなり、樹木等が重なり合うため、空隙率が徐々に低くなるものと考えられる。

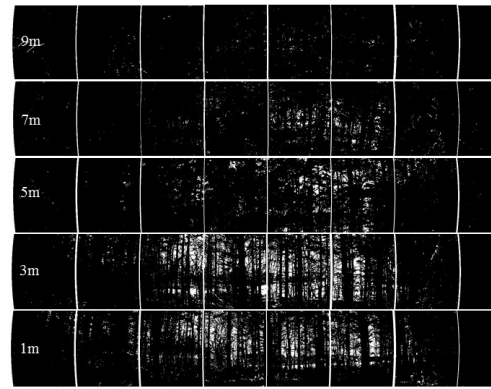


図-28 地点 B の各高さ (1, 3, 5, 7, 9m) で取得した防雪林の二値化画像

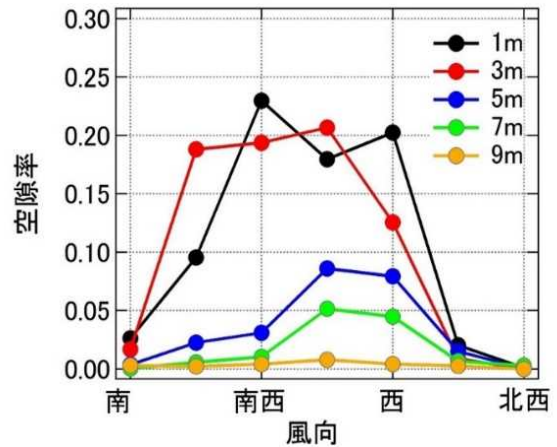


図-29 地点 B で撮影された画像から解析した防雪林の空隙率

### 2. 3. 2 防雪林を通過する風と飛雪流量の特徴

防雪林の標準林に求められている防雪性能は、吹きだまりと視程障害の緩和である<sup>1)</sup>。吹きだまりは、風速の低下等により飛雪粒子の移動が停止して堆積することで発生する。視程(*Vis*)は風向に直角な単位断面積を単位時間に移動する雪粒子の質量（飛雪流量：*Mf*）の関数（式(4)）で表される<sup>8)</sup>。

$$\log Vis = -0.773 \log(Mf) + 2.845 \quad (4)$$

飛雪流量 (*Mf*) は、風速 (*V*) と単位体積当たりの雪粒子の質量（飛雪空間密度：*Nt*）の積（式(5)）<sup>8)</sup>で表される（ただし、雪面近傍を除く）。

$$Mf = Nt \cdot V \quad (5)$$

吹きだまりと視程障害の緩和効果を評価するためには、防雪林が風と飛雪を減じさせる効果を明らかにする必要がある。言い換えれば、防雪林の風上と風下における風速と飛雪流量を観測することで防雪性能を評価できる。

1) 風の特徴

図-30に、雄信内防雪林(図-18)における地点Aと地点B(高さ3m)における風速の相関図を示す。なお、基準点Aの風向が西のときのデータである。図中の直線は原点を通る回帰直線であり、傾きから風速比は0.68である。

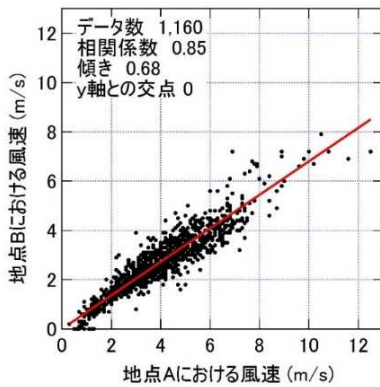


図-30 地点 A と地点 B (高さ 3m) における風速

同様の方法で、風向別に高さ 1~9m の風速比を求めた。図-31 に風向別に解析した風速比を示す。地点 B における高さ 3~9m のデータは、平成 30 年 2 月 3 日~5 月 8 日に得たものである。高さ 1m のデータは、平成 28 年 12 月 22 日~平成 29 年 3 月 18 日に得たものである。南西の風のときに風速比が最も高く、南風・北西の風になるほど風速比が低下する。また、高さが高くなるにつれて風速比が低下する傾向にある。南西の方位が 225°であり、防雪林と直交する方位が 230°であるため、南西の風のときに防雪林とはほぼ直交する風である(以下、直交風とする)。他方、南風や西の風のときは防雪林に対して斜風である。すなわち高さ 9m を除くと、高さに関係なく防雪林に対して直交風から斜風になるほど風速比が低下する。

2) 飛雪流量の特徴

飛雪流量を連続観測するため、飛雪粒子計(新潟電機、SPC-95)による観測を実施した(図-32)。

観測期間は、平成 30 年 3 月 8 日から平成 30 年 3 月 31 日である。観測地点は図-18 に示す基準点 No.0(高さ 2.5m; 地点 A) と、道路側の風下林縁の観測点 No.3(高さ 3m; 地点 B) である。

風速比と同じように飛雪流量比を計算した。地点A

の風向が西のときの飛雪流量比の算出方法を、一例として図-33に示す。風上地点Aと風下地点Bで計測された飛雪流量の散布図における回帰直線から、飛雪流量比は0.66である。相関係数は0.3と正の相関関係にあるものの、風速比のそれより低い。また、図-33から、傾き1.0を超える点(9データ)が存在している。すなわち、風上の地点Aよりも風下の地点Bの飛雪流量が多い。以降、この9データについてはSHAと記す。

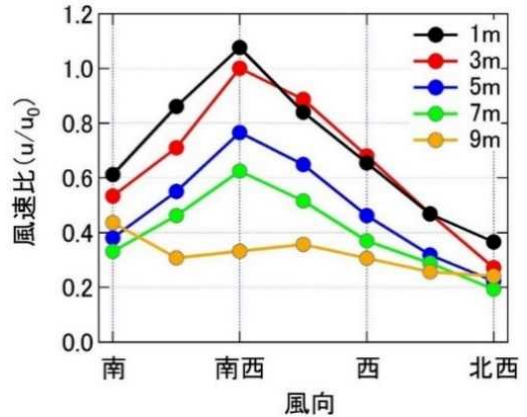


図-31 風向別の地点 B における風速比



図-32 基準点 (No. 0) に設置した飛雪粒子計

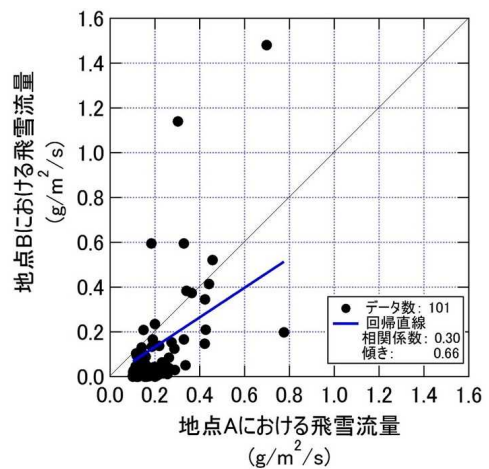


図-33 地点 A と地点 B における飛雪流量の比較  
黒色実線は傾き 1.0 の直線を示す

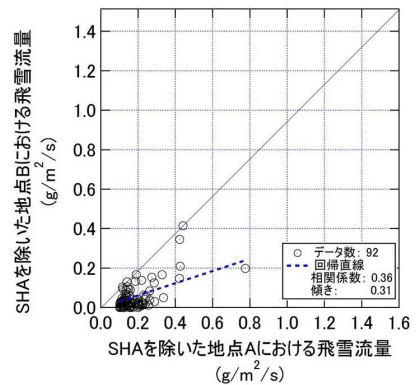
防雪林を通過する風向では、吹雪による飛雪粒子は、防雪林の樹木や枝葉が抵抗体となり風速が低下し、落下して吹きだまりになる。あるいはこれらの抵抗体に着雪する。そのため、防雪林を通過した後の風下では、風上よりも飛雪流量が減少するはずである。また、降雪を伴う吹雪においても、樹冠による降雪遮断があるものと考えれば、風上よりも林風下の飛雪流量が減少するはずである。したがって、**図-33**に示した傾き1.0を超えるSHAは、特異なものと考えられる。この原因として樹木の枝葉に積もった雪が落下して、飛雪を発生させることが挙げられる。実際に、降雪を伴う吹雪時に地点B付近で撮影した写真から、樹木に付着した冠雪からの飛雪（落雪）が認められた（**図-34**）。そこで、**図-33**の傾き1.0を超える9データ（SHA）を除き、**図-35**を得た。

風速比と同様に、風向別の飛雪流量比を算出した結果を**図-36**に示す。SHAを除く飛雪流量比がすべての風向でSHAを含む飛雪流量を下回り、風向によらず飛雪流量比がおおよそ0.2~0.4の範囲に収まることがわかる。

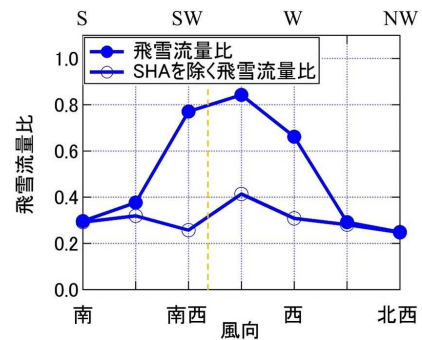
既往研究<sup>89)</sup>によって、飛雪流量と視程の関係が明らかにされており、飛雪流量 ( $M_f$ ) と視程  $V_{is}$  には式(4)の関係がある。そこで、**図-36** で得られた飛雪流量比から、式(4)を用いて視程比へ換算すると**図-37** が得られる。SHAを除くと、視程比で2.2~3.5倍の視程障害緩和効果がある。このように、飛雪流量を防雪林風上と風下で計測することにより、防雪林の視程障害緩和効果を推定することが可能である。高さ3mにおける風速比と飛雪流量比を**図-38**に示す。なお、風速比は**図-31**、飛雪流量は**図-36**のそれぞれ再掲である。風速比は防雪林に対して斜風より直交風の方が高い一方、SHAを除く飛雪流量比は風向による顕著な違いはみられない。



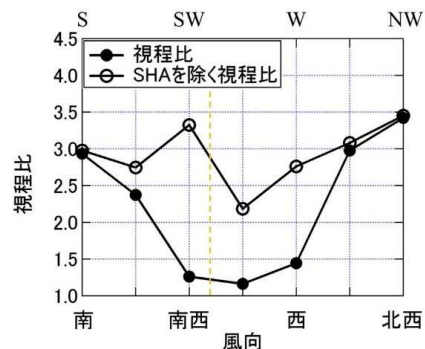
**図-34** 降雪を伴う吹雪時に撮影した、(a)樹木に付着した冠雪、(b)冠雪からの飛雪（落雪）



**図-35** 傾き1.0を超える点（SHA）を除いた地点Aと地点Bにおける飛雪流量の比較。黒色実線は傾き1.0の直線を示す



**図-36** 防雪林を通過する風向別の飛雪流量比。点線は防雪林に直交する風向（230°）を示す



**図-37** 飛雪流量比から換算した風向別の視程比。点線は防雪林に直交する風向（230°）を示す

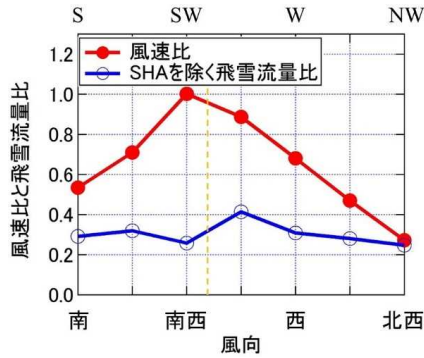


図-38 高さ3mにおける風向別の地点Bにおける風速比と飛雪流量比  
点線は防雪林に直交する風向（230°）を示す

### 2. 3. 3 防雪林を通過する距離と防雪効果

図-20 に示したように、風向が変わると風が防雪林を通過する距離が変わる。雄信内防雪林の林帯幅が30m一律であり、防雪林に直交する風向は230°なので、風向別に防雪林を風が通過する距離を計算できる（図-39）。



図-39 風が防雪林を通過するときの距離

風向別の風速比（図-31）と風向別の飛雪流量比（図-36）の横軸を、風が防雪林を通過する距離に置き換えて図-40 を得た。風が防雪林を通過する最も短い距離は南西の風（SW、225°）で35m、最も長い距離は北西の風（NW、315°）で380mである。ただし、風下林縁から地点Bまでの距離を考慮していない。図-40 から、防雪林を通過する風の距離が長くなるほど（斜風であるほど）、風速比と飛雪流量比が低く防風・防雪効果が高いと考えられる。より詳しくみると、風速比は防雪林を通過する風の距離が長くなるほど徐々に低下する。

一方、SHAを除く飛雪流量比は最短距離の35m（南西の風）で0.4以下であり、既に風速比のそれより低い値を示している。つまり、直交風では下枝の枯れ上がりが影響して防風効果がほぼ見られないのに対して、防雪効果に関しては、下枝の枯れ上がりは影響しない

結果であった。ただし、下枝の枯れ上がりとは関係ないが、SHAの発生原因を樹木の冠雪からの飛雪とするならば、直交風のときに道路側風下まで強い風が吹き込む結果、樹木の冠雪からの飛雪が道路に流れ込む可能性はあり得ると思慮される。

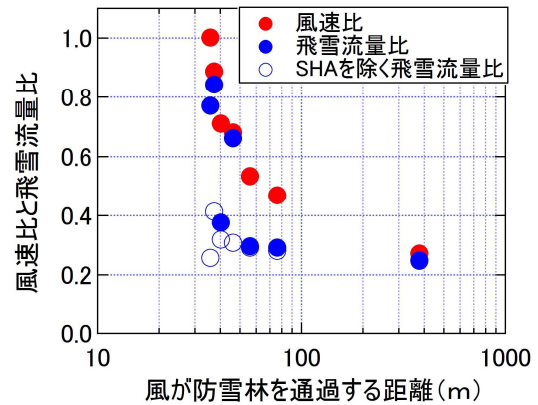


図-40 風速比・飛雪流量比と風が防雪林を通過する距離の関係

### 2. 3. 4 空隙率と防風・防雪効果

図-31 と図-36 から、斜風になるほど風速比と飛雪流量比が低くなる傾向と、空隙率も低くなる傾向が一致しているように考えられるため、図-41 に風速比、飛雪流量比を空隙率の関数として示す。高さ1~7mにおける風速比を黒丸で示す。ただし、高さ9mには相関が認められないため、高さ9mの風速比を白丸で示し、回帰分析には含めていない。また飛雪流量比は高さ3mのみの値である。

図-41 から、空隙率が高いほど風速比が高くなる傾向にあることがわかり、回帰分析から式(6)を得た。

$$u_B = 1.01 u_A A^{0.18} \quad (6)$$

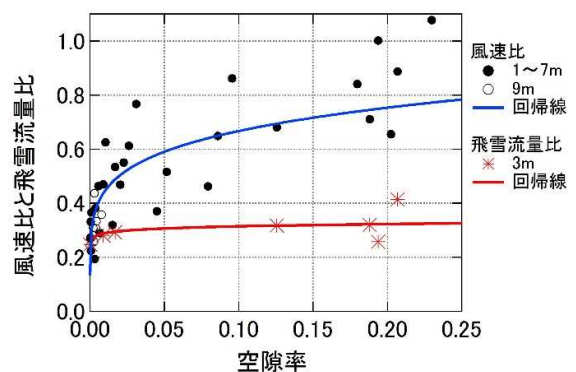


図-41 空隙率と風速比・飛雪流量比の関係



ここで $u_A$ 、 $u_B$ 、 $A$ は、それぞれ風上と風下の風速(m/s)と空隙率である。また、空隙率と飛雪流量比についても累乗関数を用いて回帰分析を行い、式(7)を得た。

$$q_B = 0.34q_A A^{0.04} \quad (7)$$

ここで $q_A$ と $q_B$ は、それぞれ風上および風下における飛雪流量(g/m<sup>2</sup>/s)である。

次に、風速比と飛雪流量比から得られた結果について物理的な意味を考える。吹雪とは、「雪粒子が風によって空中を舞う現象」として定義される<sup>14)</sup>。すなわち、抵抗となる防雪林などがなければ雪粒子は風に追従する<sup>15)</sup>。風が防雪林を通過できるものと考えれば、飛雪粒子も風に追従するので飛雪も通過するものと思われる。しかし、本研究で得られた結果では、風速比より飛雪流量比が低い結果となった(図-38、図-41)。

樹木が障害物となり飛雪粒子は着雪や吹きだまりを形成するなどして、防雪林が飛雪を捕捉したと考えれば、飛雪流量比が風速比のそれより小さくなることは想像できる。

実際に、風速比を示した式(6)では、空隙率が1に近づく時、風速比も1に近づく。一方、飛雪流量比を示した式(7)では、空隙率が1に近づく時に飛雪流量比は風速比のように1には近づかない。少しでも障害物が存在すると吹雪による飛雪が樹木や枝葉に着雪することから、急激に飛雪流量比が減少する可能性があるが、今後の課題としたい。

以上のように、空隙率と風速比および飛雪流量比から導出した関係式は、防雪林の空隙率だけで防風・防雪効果を推定することが可能であると考えられる。

### 2.3.5 構成要素と防雪性能のまとめ

一般国道40号線沿いに造成されている雄信内防雪林において、道路側から撮影された写真により、防雪林の空隙率を解析し、防雪林風上と風下で風向・風速と飛雪流量を観測した。

国道から撮影した防雪林の写真から方位別の空隙率を解析したところ、地表面に近く直交風になるほど空隙率が高い結果を得た。風速と飛雪流量の解析では、風上を基準とし、風下で観測した風速と飛雪流量を比で表現した。

その結果、防雪林に対して直交する風ほど、また地表面に近いほど風速比が高く、地表面から高いところや斜風になるほど風速比が低くなる傾向にあった。飛雪流量においては風向による顕著な違いはみられず飛雪流量比は、ほぼ0.2~0.4の間に収まった。

また、風向から風が通過する距離の関数として風速比と飛雪流量比を解析したところ、風速比は防雪林を通過する風の距離が長くなるほど徐々に低下したのに対し、飛雪流量比は最短距離の35m(南西の風)であっても低い値を示した。すなわち、防雪林風下の林縁高さ3mでの計測において、防雪効果に下枝の枯れ上がりの影響は小さいものと考えられる。また、空隙率が高いほど風速比と飛雪流量比が高いことから、空隙率と風速比、および空隙率と飛雪流量比を直接比較することにより、防雪林の防雪効果を評価するための関係式を導出した。ただし、飛雪流量の関係式については、風速ほど明確な結果が得られていないため、継続したデータの取得が必要である。なお、詳細については文献<sup>16),17),18),19),20),21),22),23)</sup>を参照されたい。

### 2.4 ICT活用による防雪林の防雪性能の評価可能性の検討

前節では、雄信内防雪林を対象に空隙率と防雪効果との関係について整理し、空隙率が防雪林の防雪性能を評価する指標になりうることを示した。本節では、防雪林の延長方向における空隙率を連続的に評価するため、雄信内防雪林において車載カメラで動画を撮影し、画像を切り取り、魚眼レンズから空隙率を算出した手法(図-27)と同様に下枝の枯れ上がりおよび樹木の有無による空隙率を計算した。また、算出された空隙率を用いて、防雪林の移動気象観測車による風速観測の結果を評価した。移動気象観測は平成30年度に、空隙率の計測は令和元年度にそれぞれ実施した。

車載カメラで撮影した動画から正確な撮影地点(KP)を算出するために車速を一定(50km/h)にし、KP標識と道路構造物(橋梁)を基準とし(図-42)、画像は60fpsで取得し、KPは小数点第3位まで換算した。1秒間隔で切り出した画像を2値化して空隙率を算出した。使用したカメラは、ウェアラブルカメラ(HERO8, GoPro Inc.製)で、車両の天板に据え付けて撮影した。図-43に、切り出し画像の一例とKPの位置関係を示す。防雪林の粗密は枯れ上がりだけでなく、取り付け道路や交差点などにより様相が異なる。

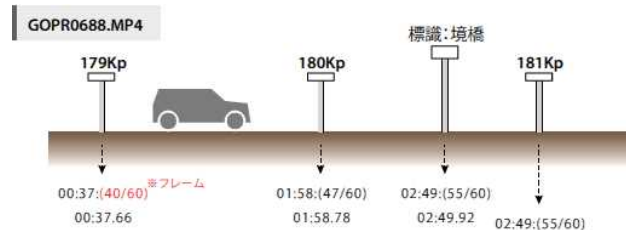


図-42 静止画の位置(KP)と撮影時間の関係



図-43 雄信内防雪林の画像取得位置

図-44 に動画から空隙率に換算した結果の一例を示す。まずは1秒間隔で動画から画像を切り取った。ウェアラブルカメラには広角レンズが取り付けられており、画像の端部では若干の湾曲が見られるため、トリミングした。また、車両の目線高さに合わせるため画像上端・下端をトリミングした。これ以外にも、背面の山岳部や道路標識等、防雪林以外の物体が映り込んでいる場合はトリミングして除いた。最終的に得られた画像を2値化し、空隙率に換算した。

視程障害移動観測車(図-45)は、超音波式風向風速計(PGWS-100-3)、GPS センサー(M12P/10S)等を搭載している。超音波式風向風速計では 10Hz の時間間隔で風速を計測し、観測地点 (KP) については GPS センサーで取得した情報を基に算出した。

吹雪が発生した平成 31 年 1 月 17 日に、雄信内防雪林の延長約 4.1km を往復 11 回走行して風速を観測した。観測地点における基準点の風向風速計(図-18)から、卓越風向は西および北西の風、平均風速は 8.5m/s であった。

図-46 に、移動気象観測で得られた風速と空隙率の換算結果を示す。一般国道 40 号沿いの風速観測結果は概ね基準点の平均風速よりも低い。ただし、風速 8.5m/s 以上の箇所もあり、たとえば KP181.319 付近など空隙率が高い箇所では、極端に風速が高い場合もみられる。

図-41 に掲載した魚眼レンズで撮影した風速比と空隙率の関係と比較するため、平均風速 8.5m/s を基準(分母)として図-46 に掲載した風速を風速比で表現し、図-47 に示す雄信内防雪林延長における風速比と空隙率の関係から、回帰分析により式(8)を得た。

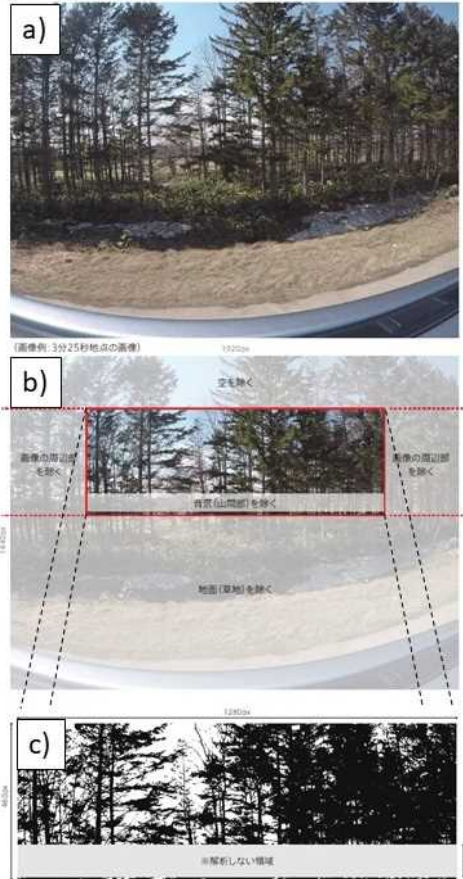


図-44 動画から切り取った画像の空隙率換算方法  
a) 動画から切り取った画像  
b) 画像のトリミング  
c) トリミングされた画像の2値化画像



図-45 移動気象観測車

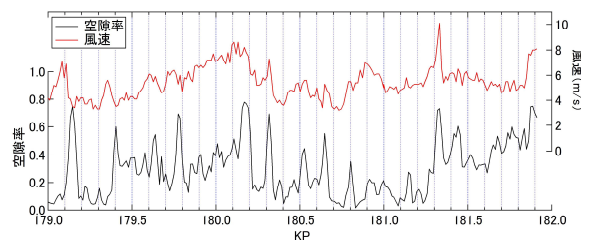


図-46 雄信内防雪林延長 (KP) における空隙率と風速

$$u = 0.8u_0A^{0.15} \quad (8)$$

次に、上記式(8)と、図-41の結果を回帰分析した式(6)を比較した(図-47)。移動気象観測と防雪林延長の動画で得られた回帰線(式(8))の方が低い値となった。移動気象観測と防雪林延長の動画で得られた結果は過小評価していることになるが、これは空隙率算出のために撮影した動画の画角(防雪林と直角方向)と風向(防雪林に対して斜風)にズレが生じていることに起因していると考えられる。

令和元年度に実施した結果、過小評価ではあったが移動気象観測と防雪林延長の動画で得られた画像から空隙率に換算することで、防雪林延長における防風効果を評価可能であることを示した。

防風効果に言及する場合、たとえば図-47の回帰線によれば防雪林の空隙率が0.1の場合、風速比は0.5となる。風上の風速が10m/sであれば吹雪により視程不良であると考えられるが、空隙率0.1の場合は風速比0.5程度であることから道路上の風速は5m/sとなる。吹雪の臨界風速(5~6m/s)<sup>24)</sup>を鑑みれば、道路上の視程は比較的良好であったと推察される。

以上のように、防雪林の空隙率を計測しただけで道路上の吹雪の状態を推定可能となるため、防雪林延長の動画で得られた画像解析は新しい評価方法になり得るものと思慮される。ただし、現段階では防雪林の林帯幅や平均樹高を考慮していない点は添えておきたい。

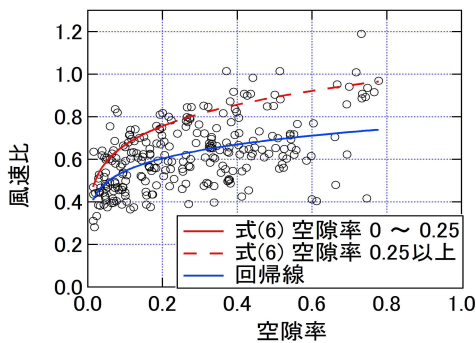


図-47 雄信内防雪林延長の風速と空隙率の関係  
青線(回帰線) :  $u = 0.8u_0A^{0.15}$

## 2.5 下枝の枯れ上がりに関する風洞実験

本節では、平成27年度に実施した、一般国道40号線沿いの天塩町雄信内防雪林(標準林)における林帯幅、樹木配置、生枝、枯れ枝の空間分布などの林況調査結果に基づき、平成28年度は、現況の防雪林を再現したモデルを製作し風洞実験を行った。

## 2.5.1 実験装置

実験には、寒地土木研究所所有の風洞実験装置(図-48)を使用する。装置の主要寸法は、全長約29m、測定洞の全長約9m、測定洞の断面1.2m×1.2mである。測定洞には、風向角を可変できるターンテーブルを備えたベースモデルを設置している(図-49)。

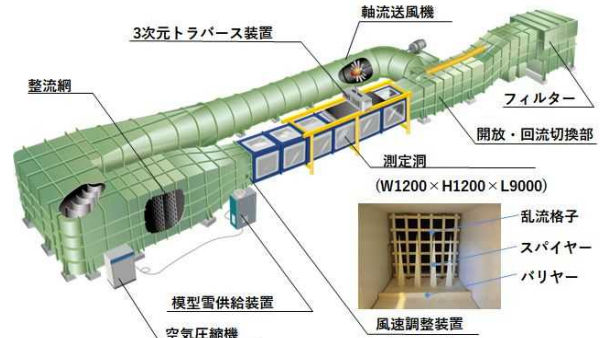


図-48 風洞実験装置



図-49 風洞実験装置のターンテーブルと防雪林模型

## 2.5.2 防雪林模型の検討と製作

可能な限り現地状況を再現するため、現地調査に基づいて防雪林模型を製作した。模型は、樹木を配置する地形模型と、地形模型上に配置する樹木模型で構成されている。地形模型の形状は、現地測量による代表断面で製作した。模型の縮尺設定については文献<sup>24)</sup>を参考にすると、以下の(1)~(3)を考慮する必要がある。

- (1) 自然風に関する相似則
- (2) 風洞断面の大きさによる制限
- (3) 測定項目からの制限

(1) 自然風に関する相似則：風洞実験では、接地境界層内に収まるよう模型を配置する必要がある<sup>24)</sup>。用いた風洞実験装置の接地境界層は下面から高さ0.4mである<sup>26)</sup>ため、その範囲内で実験を行う必要がある。

(2) 風洞断面の大きさによる制限：一般的に大きな模型を風洞に配置すると、上方や左右の拘束壁の影響によって自然風の再現に影響が出る。閉塞率（模型断面面積の風洞断面面積に対する割合）5%以下が1つの指標とされるが、確定的な回答が見当たらないとされている<sup>24)</sup>。

(3) 測定項目からの制限：大縮尺となるほど高さ方向の測定誤差が大きくなるほか、小さすぎる模型であれば物理的に取扱が困難となる。

本研究では、これらを総合的に考案して縮尺を100分の1とした。ここでは(2)で言及した閉塞率を無視している。このように、道路周辺における防雪施設（防雪柵、防雪林）を対象とした風洞実験において縮尺を100分の1としたものは多数<sup>26)・29)</sup>ある。

地形模型は円形状のターン部模型と差替部模型で構成されている。差替部模型を入れ替えることで異なるパターンの林帯を実験できる。地形模型のサイズに関して、円形状のターン部はφ1188.5mm×高さ50mmであり、差替部は幅300mm×長さ1150mmである(図-49)。

植栽の配置について、樹木寸法等を計測した現地調査範囲(約25m×約10m)を1パターン(図-50)とし、同パターンを繰り返し配置した。本実験では図-50の青書きで示した樹木は隣接する樹木と大きく接触し、配置が困難であったことから除き、同図朱書きで示した配置で構成した。

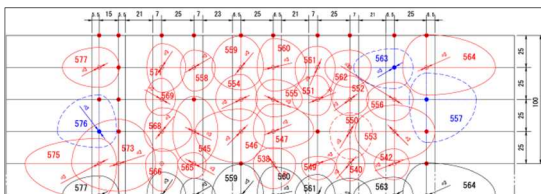


図-50 一般国道40号線沿い雄信内防雪林の調査結果から製作した植栽配置構成図

樹木模型は、自然発生した小木や倒木を除いた31形状とした(図-49、図-51)。各形状は現地調査に基づいて樹高、枝張、枝下高を再現した。材質は造形しやすく、実験中の修整が容易で、風洞実験での実績<sup>26)・28)</sup>のあるモルトフィルター材(イノアック(株)製)を用いた。フィルター材の厚さ、風速を同一条件下とした場合、単位面積当たりのセル数が増加すると圧力損失も高くなり、フィルター材の通気性が低い。そこで、2種類のフィルター材を用いて枝葉を造形した。常緑針葉樹では下枝の枯れ上がりが見られるが、この枯れ

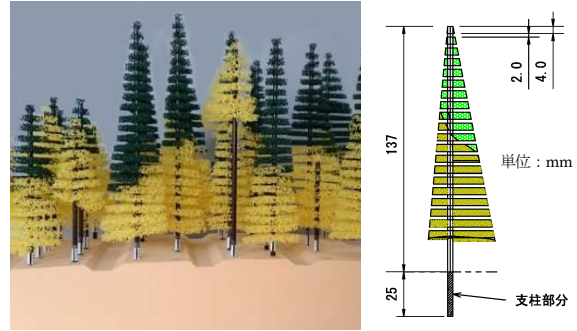


図-51 樹木模型

上がった部分にMF-8(セル数 $8\pm 2$ 個/ $25\text{mm}^2$ )を、上部にある緑色の生きた枝葉にMF-13(セル数 $13\pm 3$ 個/ $25\text{mm}^2$ )を使用した。落葉広葉樹は枯れ枝部分と同規格とした。なお樹木の幹は、樹木を問わず真鍮の棒(φ3mm)を使用した。

### 2. 5. 3 現地観測の再現実験

現地観測で得られた風況が模型上で再現されているか確認するため、模型上の防雪林風下および、より風下の道路付近において風速計測を行い、これらと現地観測によって得られた風況との比較を行った。

### 2. 5. 4 実験条件の設定

測定洞内の鉛直風速分布は、上空ほど風速が増す自然の風を模擬するため、べき法則(べき指数は田園地帯を想定した0.15<sup>30)</sup>)に近似するよう、気流を調整した<sup>26)</sup>。実験風速は、模型雪に活性白土を用いた風洞実験で吹きだまりの再現性が高いとされる風速4.5 m/s前後(地面からの高さ $H=50\text{mm}$ )<sup>31)</sup>を参考に、風速7 m/s(但し $H=400\text{mm}$ での風速)とした。防雪林模型は、2. 2の雄信内防雪林の気象等観測結果において卓越風向であった西からの風を再現するよう、測定洞内のターンテーブル上に模型を配置した(図-49)。

### 2. 5. 5 計測方法

風速計測には日本カノマックス(株)製の熱線流速計IHW-100を用いた。計測は、I型プローブを使用し1計測の計測間隔を10msとして1箇所当たり3072個計測し、計測データを平均した。計測は、2. 1で記した、雄信内防雪林において固定観測を行った4地点(防雪林の風上側の基準点(No.0に相当)から風下側の道路法尻の地点No.4まで)のほか、道路上の風速分布の把握を目的として、道路上の2地点(2車線道路の各車線上)を追加し、計6地点で行った。計測点の位置を図-52に示す。計測は、現地観測における各固定観測地点+道路上と、この地点を道路縦断方向に25mm毎ずらした5測線で行った(後述のNo.1を除く)。

各地点のデータは、No2は3点、No3~No5は5点

を平均したものを使用した。計測高さは共通で地面から高さ 150mm までは 5mm 間隔、それ以降計測上限である 400mm まで 10mm 間隔で計測した。なお、2. で述べた基準点 (No.0) に相当する風洞の基準点は、風洞壁面や模型による影響が受けにくい風洞中央の風上側計測上限の計測点 No.1 (図-52) に設定した。

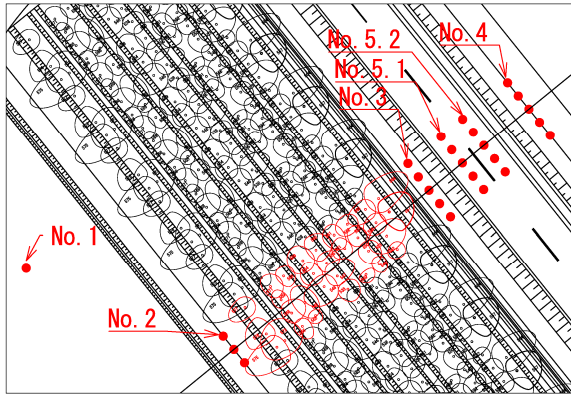


図-52 風速計測点位置図

### 2. 5. 6 現地観測データの処理

現地観測の風速比の算出には、2. 3 で述べた観測期間 (平成 28 年 12 月 22 日～平成 29 年 3 月 18 日) における風向・風速の観測結果から、西の風向を抽出して平均化したものを用いた。なお、基準点で観測された風向・風速は、高さ 3m である。基準点の高さ 1m と 7m の風速を対数則で計算し、これを基準 (分母) として道路側風下 No.3 の風速 (分子) を風速比として表現した。

### 2. 5. 7 実験結果と考察

計測点横断方向の風速比 (現地・風洞) を図-53 に示す。図中の横軸は、道路横断方向の計測点を示し、道路の中央を 0 として風上側をマイナス、風下側をプラスとして風洞実験での縮尺で示した。縦軸は、現地観測と風洞実験それぞれの風速比である。

風洞実験における風速比は、防雪林直前風上の地点 No.2 で僅かに低下し、防雪林を通り抜けた直後の地点 No.3 で大きく低下した。さらに、そこから風下の道路風下法尻に至る (No.3～No.5.2) 間、風速比は回復の傾向を示した。この傾向は現地観測と一致が見られた。

道路防雪林の風上近傍の地点 No.2 の風速比は、高さ 1m で風洞実験の値が現地観測に比べて僅かに高いものの、上方に位置する高さ 3m 及び 7m では、ほぼ一致した。

測定点別に着目すると地点 No.2 の防雪林風上側林

縁では防雪林による風速低下や斜風による林縁に沿った風の流の影響が考えられる状況であったが、現地観測と風洞実験において相関が高い結果が得られていた。一方、道路防雪林の風下側直下の地点 No.3 の風速比は、風洞実験では現地観測に比べ、高さによらず低い値となった。また、現地観測と比較した風速比は、高さ 1m で約 1/2、3m で約 1/11、7m では約 1/2.6 と低く、特に高さ 3m での乖離が大きい。道路風下側法尻近傍の地点 No.4 の風速比は、現地観測が 3m のみであるが、風洞実験では現地観測に比べて低い値を示した。

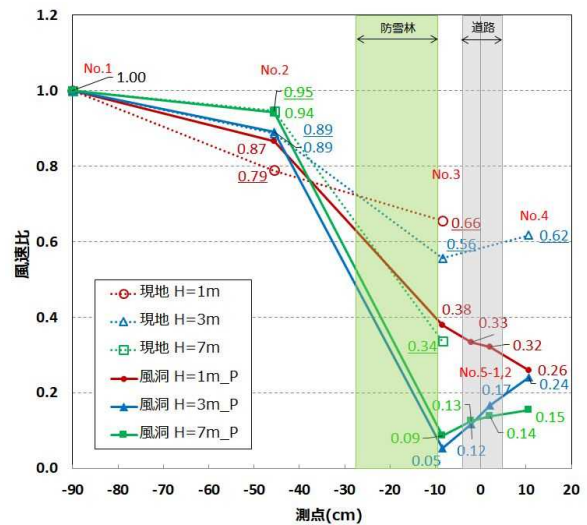


図-53 計測点横断方向の風速比 (風洞・現地)

## 2. 6 防雪林模型の下枝の枯れ上がりによる影響解析

2. 5. 3 で示したとおり、下枝の枯れ上がりが見られる高さにおいて、道路付近の風速が大きくなることについては、現地観測結果を再現したが、風洞実験の結果は防雪林による減風効果が大きく、現地観測結果と比べると乖離がみられた。そこで、防雪林の模型修整手法を検討するため、平成 29 年度は前中期研究計画期間内に実施した別の防雪林模型の風洞実験結果を再解析した。

### 2. 6. 1 樹木模型

利用した樹木は、下枝高だけを変えた 3 種である (図-54)。平均樹高は 5m を想定した模型で、模型の高さは 50mm である。樹木配置は、下枝の枯れ上りを表現するため、道路吹雪対策マニュアル (防雪林編) に従い標準林タイプで、樹木列数 5 列、千鳥間引きの林況を表現した。下枝の枯れ上がりによる影響解析のため、林縁と林内における枝下の高さを変えた模型を利用した (図-55)。なお、枝下高 5mm の樹木は下枝の枯れ上がりのないものとする。

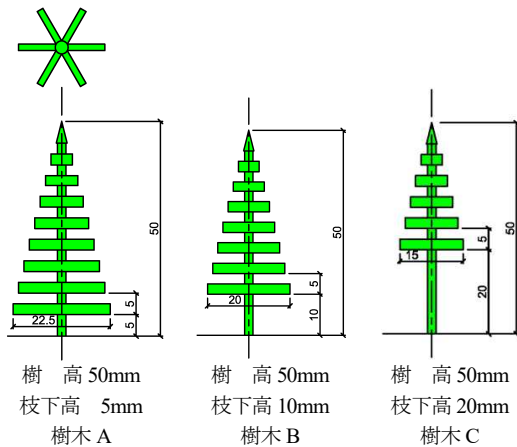


図-54 樹木模型

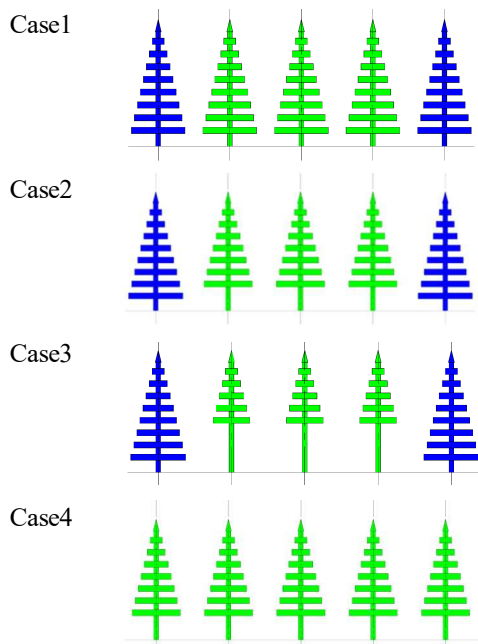


図-55 植栽配置側面図

- Case1 : 林縁・林内に樹木 A、
- Case2 : 林縁に樹木 A、林内に樹木 B、
- Case3 : 林縁に樹木 A、林内に樹木 C、
- Case4 : 林縁・林内に樹木 B

### 2. 6. 2 計測手法

計測には、PIV (粒子画像流速測定法:Particle Image Velocimetry)を用いた。計測原理は、流れ場に投入した微小なトレーサー粒子 (追跡子) にレーザーをシート状に照射して流れの断面を可視化し、ハイスピードカメラによる連続撮影された画像から、トレーサー粒子の移動量を解析して流速を計測する方法である。よって、側面からみた面的な流れ場を把握することが可能である。トレーサー粒子は、模型雪として使用している活性白土である。PIV で解析可能な供給量は 230g/min である<sup>32)</sup>。なお、模型雪の動きは空気の流れ

と完全には一致せず、計測結果は風速ではなく、模型雪の移動速度であるため、流速と表現する。

風上 (分母) と風下 (分子) における流速の比から流速比を求め、防雪機能を評価する指標として利用した。画像の撮影は毎秒 2,000 枚で 5 秒間行い、画像 2 枚 1 組から得られる流速分布を 5,000 組分平均したものを計測結果とした。計測面は鉛直面及び水平面である。

### 2. 6. 3 実験装置

実験には寒地土木研究所の風洞実験装置 (図-48) を使用した (2. 5. 1 を参照)。測定洞には、風向角を可変できるターンテーブルを備えたベース模型を設置した (図-56)。

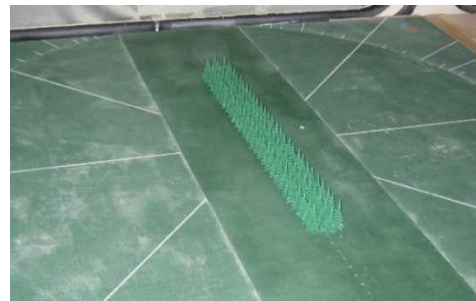


図-56 樹木模型を配置した様子

### 2. 6. 4 実験結果と考察

防雪林の模型は、標準的な防雪林の縮尺を 100 分の 1 スケールとしている。防雪林模型の高さは 50mm であり、5m 相当の防雪林を想定している。この実験で得られる結果は事例解析として成り立つが、たとえば現地調査を実施している雄信内防雪林など、他の防雪林に適用するためには、一般解として表現した方が合理的である。そこで本稿では、防雪林の現地観測結果 (図-31) と同様に、防雪林の風上林縁からの距離を樹高で除した高倍距離で表現する。なお、水平方向に計測された流速比は、乗用車ドライバーからの目線高さ ( $H=1.5\text{m}$ ) に相当する模型高さを  $h=15\text{mm}$  として、データを整理した。

図-57 に、模型の高さ  $h=15\text{mm}$  における風下の流速比を示す。林縁の枝下を維持し、林内の枝下高を 5mm、10mm、20mm (Case1~Case3) と変化させると、防雪林模型から風下の水平方向における流速比は上昇する。下枝高 20mm の防雪林 (Case3) では枝下高 5mm (Case1) に比べて平均 1.3 倍流速比が高い結果であった。

林縁における下枝を維持させ、林内の枝下高だけを変化させた結果であるため、防雪林内の下枝の枯れ上がりによる影響と考えられる。

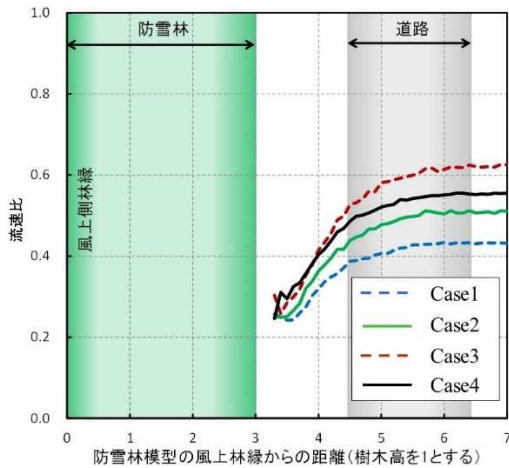


図-57 防雪林模型から風下の水平方向における流速比 (ドライバーの目線高さに相当する  $h=15\text{mm}$  の流速比)

図-58 に、林縁・林内全ての枝下高を  $10\text{mm}$  としたときの流速比 (図-57 の Case4) と、林内だけ枝下高  $10\text{mm}$  としたときの流速比 (図-57 の Case2) の比を示した。(Case2) は (Case4) と比べ、道路を想定した位置では最大  $0.9$  (全体では最大  $0.8$ ) まで低下したことが読み取れる。林縁・林内全ての枝下高の高さを変えた場合(Case4)は、下枝が枯れ上がった結果と考えられる。一方、林内だけ下枝高を変えた場合(Case2)は、言い換えれば、林縁の下枝を維持した結果と考えられる。

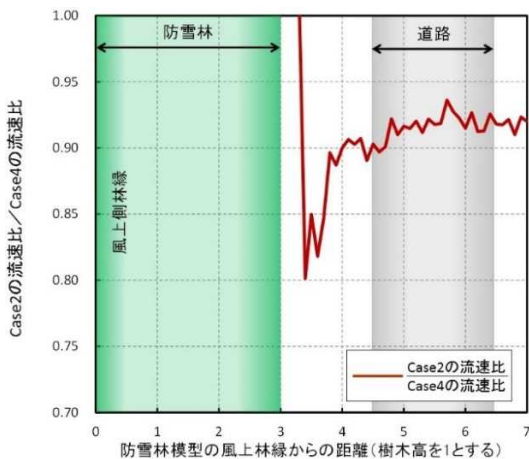


図-58 枝下高  $10\text{mm}$  とした防雪林模型における林内／林縁・林内の流速比 (林縁・林内とも枝下高を  $10\text{mm}$  とした模型による流速比を基準としたもの。  $h=15\text{mm}$ )

実際の防雪林において、道路側風下の風速に与える影響だけに着目すれば、「下枝の枯れ上がり」による防雪効果の低下と「林縁における下枝の維持」による防雪効果の持続の両者が相殺するように、林縁に対策を講じれば、防雪林内の下枝の枯れ上がりによる減風効

果の低下による影響を抑えることができ、防雪林の防雪性能を維持できるものと期待される。

本結果を踏まえて、2.5.3 で製作した防雪林模型の枯れ上がり部分において、特に林縁部の修整を慎重に行うこととした。

## 2.7 防雪林模型の修整

2.5.3 結果より、模型実験の風速比が低い傾向にある。防雪林模型における現地観測で得られた風況の再現性を高めるため、平成 30 年度は、模型の修整を行った。

### 2.7.1 模型修整手順

修整は、減風効果に大きく影響がない項目から着手し、間引きから枝葉 (モルトフィルター) の剪定の順で実施した。都度風洞実験にて風況を観測、その結果を踏まえ、次の修整を考察した。以降、修整、実験、考察を繰り返し現地観測に近づけた。

### 2.7.2 実験装置、実験条件、計測方法

実験には寒地土木研究所の風洞実験装置 (図-48) を使用した (2.5.1 を参照)。実験条件、計測方法は 2.5.3 と同様とした。実験のパターンと防雪林模型の樹木本数を表-3 に示す。パターン P は修整前の模型林である (平成 29 年度実施、実験結果は図-53)。パターン 1~4 は間引きのみで修整した模型林である (平成 30 年度実施)。

表-3 各パターンと防雪林模型の樹木本数

	防雪林模型の樹木本数 (本)										計
	列1	列2	列3	列4	列5	列6	列7	列8	列9	列10	
	H=80	H=117	H=94 H=102 H=96 H=65	H=85 H=86 H=99	H=143 H=137 H=154	H=137 H=142 H=136	H=132 H=82 H=141	H=131 H=129 H=116 H=49	H=149 H=143 H=64	H=147	
パターンP (P)	11	11	44	33	33	44	33	44	33	11	297
パターン1 (P1)	-	-	44	33	33	44	33	44	33	11	275
パターン2 (P2)	-	-	44	33	-	-	33	44	33	-	187
パターン3 (P3)	-	-	44	33	-	-	33	44	11 H=64	-	165
パターン4 (P4)	-	-	22 H=94 H=102	11 H=99	-	-	33	44	11 H=64	-	121



図-59 防雪林模型の樹木配置 (パターン P)

防雪林模型の横断方向の配置を図-59 に示す。防雪林模型の樹木は横断方向に 10 列で、樹木の高さは 49mm~158mm、樹木の本数は全部で 297 本である。樹木の配置は列 1 が風上側、列 10 は風下の道路側である。

2. 7. 3 実験結果と考察

模型の修整については、各項目毎風洞実験にて風況を確認しながら、以下の手順にて実施した。

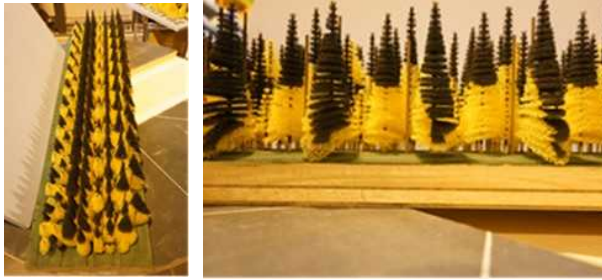


図-60 パターン 1



図-62 パターン 2

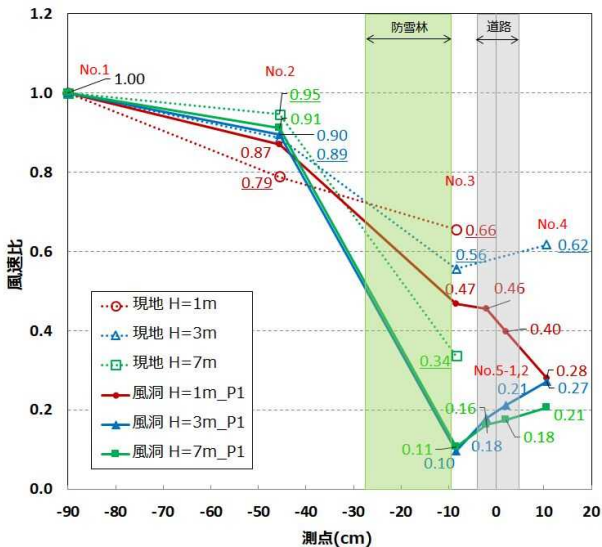


図-61 計測点横断方向の風速比 (パターン 1・現地)

(パターン 1) 落葉樹の間引き

冬期間葉を落とし減風効果がないことから、まず風上側落葉樹 (列 1, 2) について間引いた。間引き後の樹木の本数は 275 本である。

(結果)

修整前に比べ現地観測にやや近づいたが、全体的に乖離している (図-61)。

(パターン 2) 林内部の間引き

パターン 1 の結果より全体的に減風効果の低減が必

要なため、風下側落葉樹と、「0」を踏まえ林縁部を残し林内部中心列 (列 5, 6) を間引いた。間引き後の樹木の本数は 187 本である (図-62)。

(結果)

大きく本数を間引いたため、パターン 1 より H=1m, H=3m, H=7m とともに風況が現地観測に近づいたが乖離はまだ大きい (図-63)。

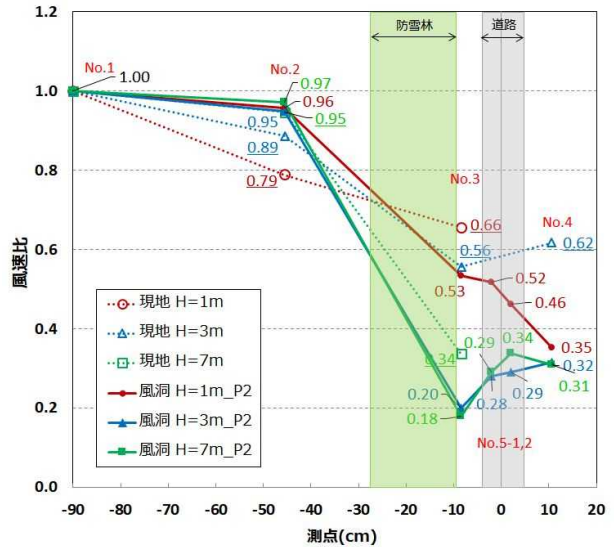


図-63 計測点横断方向の風速比 (パターン 2・現地)

(パターン 3) 風下側林縁部の間引き

林内部を間引いても乖離が大きいため、林縁部の間引きを行った。風上側に比べ、影響の少ない風下側から実施した。全体的に現地観測と乖離が大きいため、水平方向に枝葉が大きく張り出し、各高さで減風効果が大きい高い樹高のものから間引いた。(列 9, H=149mm, H=143mm)。間引き後の樹木の本数は 165 本である (図-64)。

(結果)

H=7m は現地観測値に近づいた。H=1m, H=3m については乖離が確認された (図-65)。



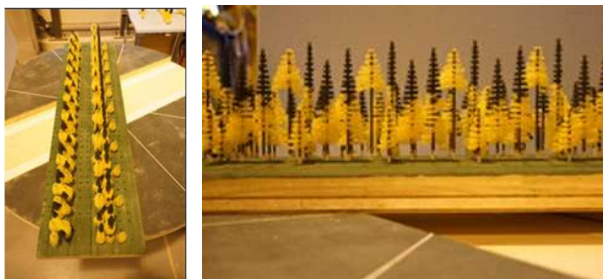


図-64 パターン3

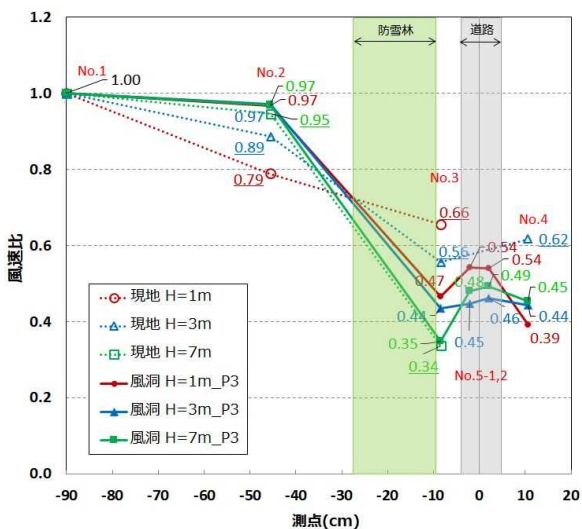


図-65 計測点横断方向の風速比 (パターン3・現地)

(パターン4) 風上側林縁部の間引き

風下側林縁部においてこれ以上の間引きは、防雪林模型の林帯幅が狭くなり、現地との差異が大きくなる。それにより、現地防雪林の防雪性能における林帯幅の要因が確保できなくなるため、風上側の林縁部を間引いた。全体的に枝葉を減らせるよう、列3は4種類ある樹高のなかで2番目と4番目に高い樹高のものを間引き(列3, H=96mm, H=65mm)、列4は3種類の中で2番目と3番目に高い樹高のものを間引いた(列4, H=85mm, H=86mm)。パターン4を図-66に示す。間引き後の樹木の本数は121本である。

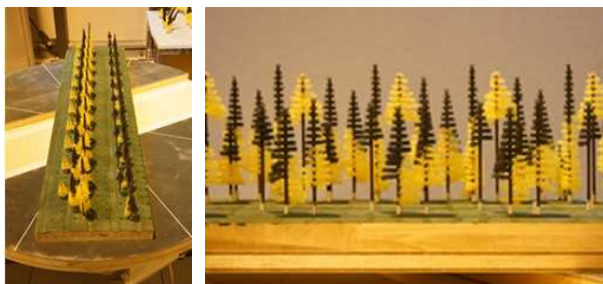


図-66 パターン4

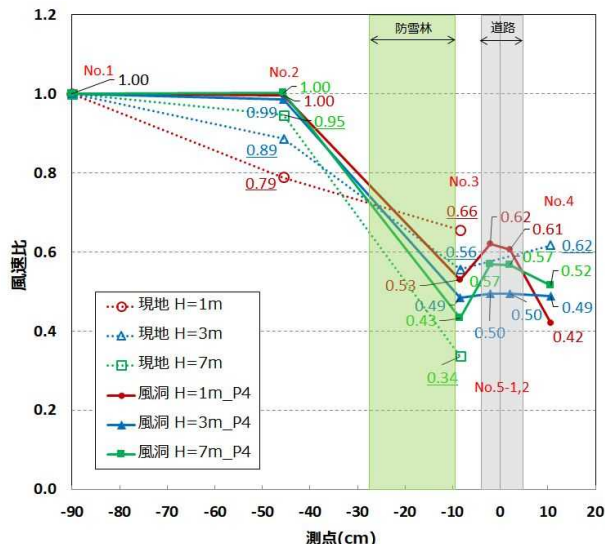


図-67 計測点横断方向の風速比 (パターン4・現地)

(結果)

H=1m, H=3mは近づいたが、H=7mにおいては、風速比が増し乖離が大きくなった(図-67)。

(各パターン)の現地風速比の乖離

現地観測と各パターン1~4の風速比との乖離を表-4に示す。乖離は風洞実験値と現地観測値の風速比の差を、現地観測値を基準とした割合で算出した。

$$\text{乖離} = \frac{\text{風洞実験風速比} - \text{現時観測風速比}}{\text{現地観測風速比}} \quad (9)$$

各パターン1~4の平均値は、全体の乖離度合いを比較するため高さH=1m, H=3m, H=7mの乖離値の絶対値の平均とした。風速比は図-52の地点No3の値とした。

各パターンの乖離の平均値は、模型を修整していないパターンPが69%で、模型を修整したパターン1が60%、パターン2が43%、パターン3が18%と修整する程小さくなった。パターン4は模型林を間引きし過ぎて高さH=7mの乖離が+29%まで上がり、そのため乖離の平均値が20%と、パターン3より大きくなった。

表-4 現地観測とパターン1~4の風速比との乖離

	高さ			乖離の 平均値
	H=1m	H=3m	H=7m	
現地観測	0.66	0.56	0.34	
パターンP (P)	0.38 -42%	0.05 -90%	0.09 -74%	69%
パターン1 (P1)	0.47 -28%	0.10 -82%	0.11 -68%	60%
パターン2 (P2)	0.53 -18%	0.20 -64%	0.18 -47%	43%
パターン3 (P3)	0.47 -29%	0.44 -22%	0.35 +3.6%	18%
パターン4 (P4)	0.53 -19%	0.49 -13%	0.43 +29%	20%

※ 上段:風速比、下段:乖離

(パターン3 剪定) 枝葉の剪定

パターン4は乖離が大きくなったので、以降、パターン3をもとに、枝葉(モルトフィルター)の剪定のみで修整を行うこととした。

剪定は、H=1m, H=3m, H=7mの風洞実験結果をもとに、減風効果の高い階層のモルトフィルターを剥離させ調整した。剪定のための修整のため、風洞実験を進めるための目安として各階層の空隙率を算出した。空隙率は模型を風向方向から撮影し、樹木・枝葉の部分の2次元的な占有率にて算出した。計8回剪定と実験を繰り返し、現地観測値に近づけた。表-5に各パターンS1~S8の枝葉(モルトフィルター)の剪定箇所を示す。

(結果)

現地観測と各パターンS1~S8の風速比との乖離を表-6に示す。最終的にパターンS8で乖離の平均値は4.8%まで現地観測に近づけることができた。パターンS8の測点と風速比の関係を図-68に示す。

表-5 各パターンS1~S8の枝葉の剪定箇所

	防雪林模型P3の枝葉(モルトフィルター)の剪定箇所
パターンS1 (P3S1)	P3樹木の列7 Z=24/H=82, 列8 Z=28/H=116, 列8 Z=15/H=49, 列8 Z=27/H=49, 列9 Z=24/H=64
パターンS2 (P3S2)	S1樹木の列7 Z=29/H=141
パターンS3 (P3S3)	S2樹木の列4 Z=22/H=86, 列3 Z=28/H=86
パターンS4 (P3S4)	S3樹木の列3 Z=30/H=94, 列3 Z=38/H=102
パターンS5 (P3S5)	S4樹木の列3 Z=12/H=94, 列3 Z=18/H=94
パターンS6 (P3S6)	S5樹木の列8 Z=35/H=129, 列9 Z=36/H=64
パターンS7 (P3S7)	S5樹木の列8 Z=9/H=49
パターンS8 (P3S8)	S5樹木の列3 Z=26/H=102

Z:剪定位置(mm) H:模型林の高さ(mm)

表-6 現地観測とパターンS1~S8の風速比との乖離

	高さ			乖離の 平均値
	H=1m	H=3m	H=7m	
現地観測	0.66	0.56	0.34	
パターンS1 (P3S1)	0.57 -14%	0.44 -21%	0.32 -5.5%	13%
パターンS2 (P3S2)	0.57 -14%	0.44 -22%	0.31 -7.7%	14%
パターンS3 (P3S3)	0.58 -11%	0.46 -17%	0.33 -1.2%	10%
パターンS4 (P3S4)	0.59 -11%	0.46 -18%	0.33 -1.1%	10%
パターンS5 (P3S5)	0.62 -5.9%	0.51 -8.8%	0.35 +4.9%	6.5%
パターンS6 (P3S6)	0.60 -8.8%	0.51 -8.8%	0.35 +5.5%	7.7%
パターンS7 (P3S7)	0.64 -2.3%	0.51 -9.0%	0.35 +5.2%	5.5%
パターンS8 (P3S8)	0.65 -0.1%	0.51 -8.4%	0.36 +5.8%	4.8%

※ 上段:風速比、下段:乖離

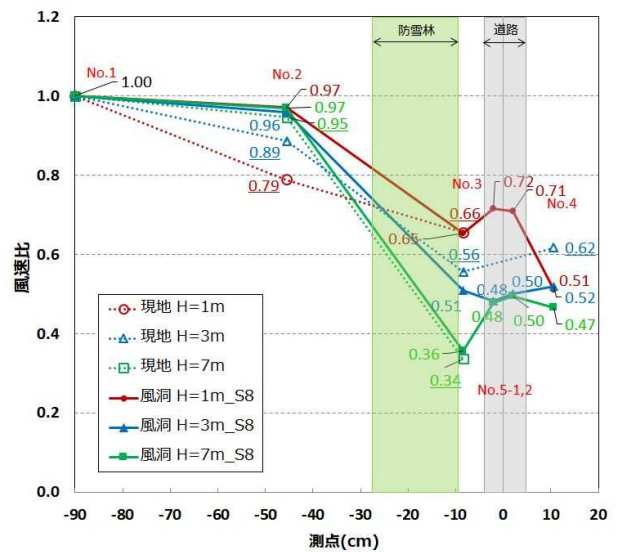


図-68 計測点横断方向の風速比 (パターンS8・現地)

2.8 防雪林模型の再検討

前項までの2.5.3結果と、2.7のモルトフィルターを用いた模型実験では風速の減速が著しく、現地と風速比を合わせるために6割の樹木模型の間引をしたため、防雪林の形体を維持できず、現地と大きく異なる形体となった。このため、令和元年度は、現地観測結果から枯れ上がり分布の解析を行い、模型の材質と形状を再度検討し模型を製作して、枯れ上がりの有無による防雪性能を把握するため実験を行った。

2.8.1 枯れ上がり分布の解析

現地観測では方位4方向(50°、140°、230°、320°)の下枝の枯れ上がりを計測している。枯れ上がり分布の特徴について、枯れ上がりがある樹木と枯れ上がりが無い樹木の種類、枯れ上がりの方角と高さ分布の解析を行った。その結果を表-7に示す。



(1) 枯れ上がりが有る樹木は全て針葉樹で、落葉広葉樹は枯れ上がりが無い。

(2) 生枝下高(地上から生枝までの高さ)は、道路側の樹木ほど高くなる傾向がある。この原因として自動車の排気ガスの影響が考えられる。

(3) 列10の樹木番号564は方角140°と230°、樹木番号557は方角230°と320°の2方位の枯れ上がりが大きい。この原因として図-71と図-72の通り、南西に高い樹木があり日差しを遮り、日射不足となるためと考えられる。列9の樹木番号542は枝葉全て枯れ上がっている。これは道路側に近く、樹高も低いため殆ど日差しが当たらないためと考えられる。

2. 8. 2 枯れ上がりが有り無しを再現した模型の製作

枯れ上がり分布の解析結果より、「枯れ上がり」と「枯れ上がり無し」の防雪林模型を製作した。

1) 樹木模型の材質と寸法

表-7の枯れ上がり分布の解析を元に、a)「枯れ上がり無し模型」、b)下枝に枯れ上がりがある「枯れ上がり模型(下枝)」、c)下枝の枯れ上がりと、防雪林の奥側2方位に枯れ上がりがある「枯れ上がり模型(下枝・奥側)」の3種類の樹木模型を製作した。

図-69に模型寸法、図-70に樹木模型と枝葉パーツを示す。模型寸法は1/100とした。様々な枯枝・生枝が簡易に再現できるように、枝葉と幹をパーツにて製作し脱着できる構造とした。枝葉パーツの高さは2.5mm、枝葉パーツの長さは0.5mm単位、枝葉パーツ間の空間は2.5mm、樹高、生枝下高、枯枝下高、陽樹

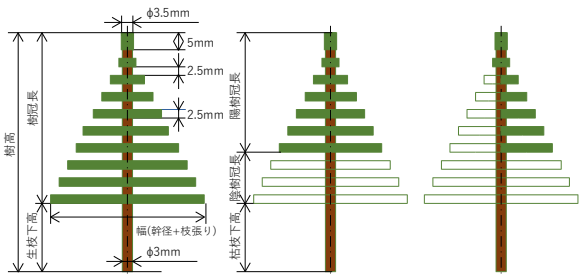


図-69 枯れ上がり無し模型と枯れ上がり模型

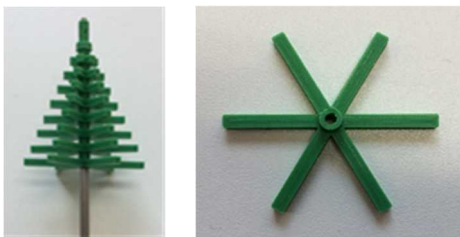


図-70 樹木模型と枝葉パーツ

冠長、陰樹冠長は5mm単位で作製した。枝葉パーツの材質はPLA樹脂を用いた。幹パーツは直径3mmのステンレス棒を使用している。枝葉パーツの層数は表-7のa)欄に記載する。

2) 枯れ上がりの有る樹木模型

枯れ上がり模型の列1から列9の樹木模型は枯れ上がり模型(下枝)とし、現地観測した4方位の生枝下高の平均値まで下層の枝葉パーツを取り除いた。枯れ上がり模型(下枝)の枝葉パーツの層数を表-7のb)欄に記載する。列10の樹木模型は枯れ上がり模型(下枝・奥側)とし、現地樹木の下枝と奥側半分は枯れ上がりがあるため、枯れ上がりが2方位ある箇所は枝葉パーツの枝6本のうち3本を切り取り、枯れ上がりが3方位から4方位ある箇所は枝葉パーツを取り除いた。枯れ上がり模型(下枝・奥側)の枝葉パーツの層数を表-7のc)欄に記載する。

3) 模型の樹木配置

枯れ上がり無し模型1ブロックの配置を図-71に、枯れ上がり模型の配置を図-72に示す。樹木の配置は2.5.2を基本とした。樹木番号575,546,555,556は隣の模型と干渉して設置できなかった。樹木番号576も隣の模型と干渉するため同じ列内で移設した。模型の樹木本数は1ブロック27本、全体で11ブロック297本である。

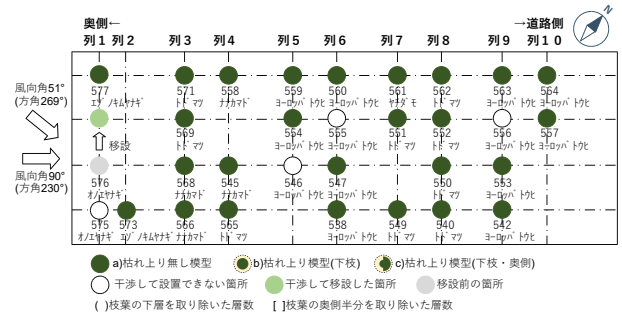


図-71 枯れ上がり無し模型の配置

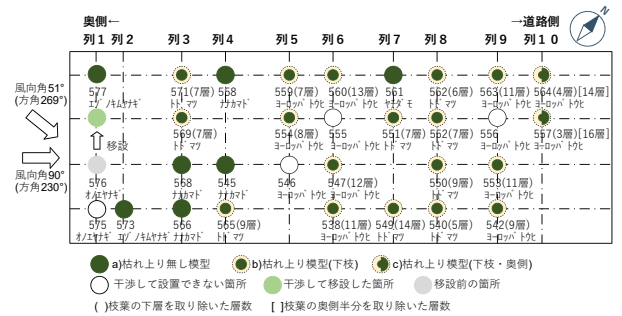


図-72 枯れ上がり模型の配置

2. 8. 3 実験条件

2. 5. 3 の計測方法（計測点）を基本に、風向角は前年度までと同じ斜風 51° と、道路に直角な直交風 90° の 2通り、模型は枯れ上がり無し模型（図-73）と枯れ上がり模型（図-74）の 2通り、風速の計測高さは H=10mm, H=30mm, H=70mm の 3点で実験を行った。



図-73 枯れ上がり無し模型の側面と実験状況



図-74 枯れ上り模型の側面と実験状況

2. 8. 4 実験結果と考察

1) 枯れ上がり模型の風況

枯れ上がり模型の計測点横断方向の風速比を図-75に示す。風況（風速比の変化）は計測高さ H=10mm、

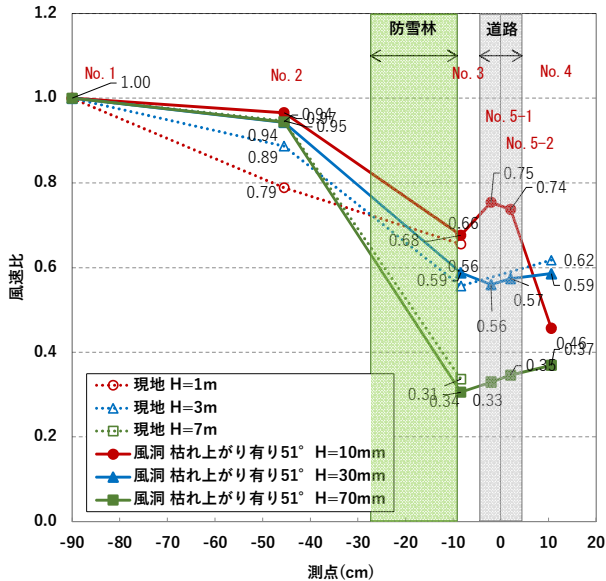


図-75 計測点横断方向の風速比（枯れ上がり模型 風向角 51°）

H=30mm、H=70mm とも風洞実験と現地観測がほぼ一致している。現地観測と風洞実験の風速比の乖離（No3地点）は、表-8に示す 6%程度であった。風洞実験と現地観測の風速比が近く、枯れ上がり模型において現地の風況に近づける事が出来た。

表-8 現地観測と枯れ上がり模型の風速比の乖離

	高さ			乖離の平均値
	H=1m	H=3m	H=7m	
現地観測	0.66	0.56	0.34	
枯れ上がり模型	0.68 +3%	0.59 +6%	0.31 -9%	6%

※ 上段:風速比、下段:乖離

2) 枯れ上がりによる防雪性能の低下

図-76に高さ H=10mm の風向角と枯れ上がり有無の比較を示す。また、枯れ上がり有りとなしとの風速比の差を図-79に示す。風向角 51° の時枯れ上がりが無しは 0.55 で、枯れ上がりが有り 0.68 と 0.13 上昇している。枯れ上がり無しの状態でも枝葉が少ないので、風速比の上昇が小さいと考えられる。風向角 90° は、枯れ上がり無し 0.36 から枯れ上がり有り 0.69 と 0.33 上昇している。高さ H=10mm は斜風の防雪性能低下は小さいが、直交風の防雪性能の低下が大きい。風向角 90° の時、高さ H=30mm の風速が早いので、その風が高さ H=10mm に入り込んでいるためと考えられる。

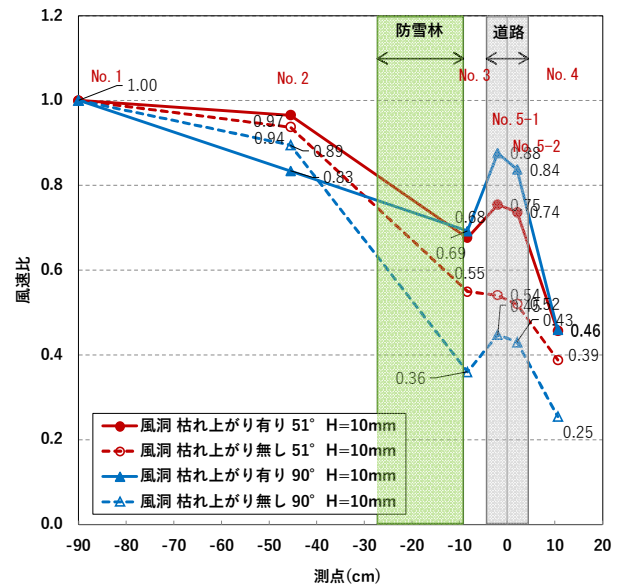


図-76 風向角と枯れ上がり有無の防雪性能（高さ H=10mm）

図-77に高さ H=30mm の風向角と枯れ上がり有無の比較を示す。風向角 51° の風速比は枯れ上がりが無し

0.13 で、枯れ上がりが有ると 0.59 と 0.46 上昇している。防雪性能低下が大きく、枯れ上がりで枝葉が無くなる箇所が多いためと考えられる。高さ H=30mm 風向角 90° は、枯れ上がり無し 0.12 から枯れ上がり有り 0.70 と 0.58 に上昇している。高さ H=30mm は防雪性能低下が大きいが、特に直交風の防雪性能低下が大きい。林帯を上がって降下する風と、林帯の中（枯れ上がり箇所）を通過する風の比率が変わるためと考えられる。

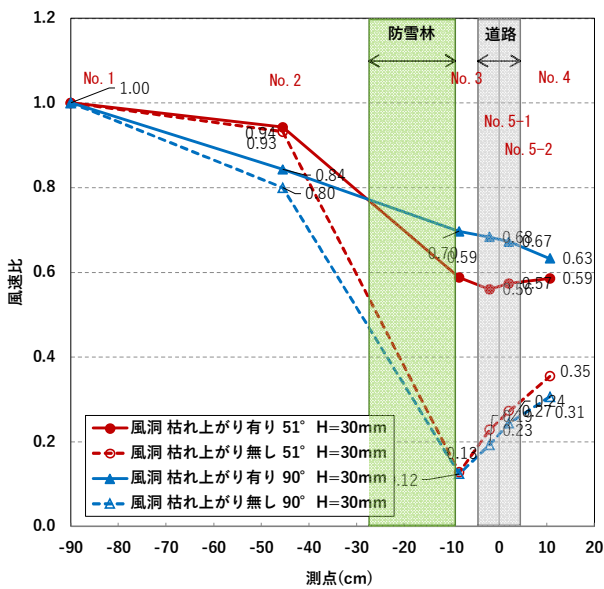


図-77 風向角と枯れ上がり有無の防雪性能 (高さ H=30mm)

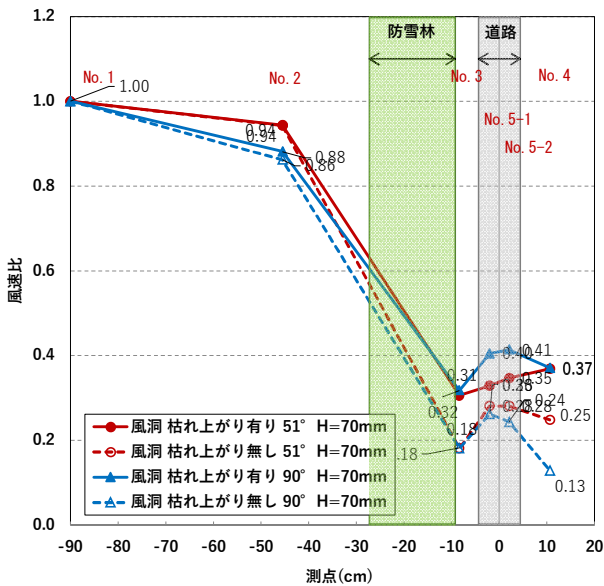


図-78 風向角と枯れ上がり有無の防雪性能 (高さ H=70mm)

図-78にH=70mmの風向角と枯れ上がり有無の比較を示す。風向角 51° の風速比は枯れ上がりが無し 0.18 で、枯れ上がりが有り 0.31 と 0.13 と上昇している。高さ H=70mm 風向角 90° は、枯れ上がり無し 0.18 から枯れ上がり有り 0.32 と 0.14 上昇している。高さ H=70mm は枯れ上がり箇所が少ないため、風向角 51°、風向角 90° とも風速比の増加が少ないと考えられる。

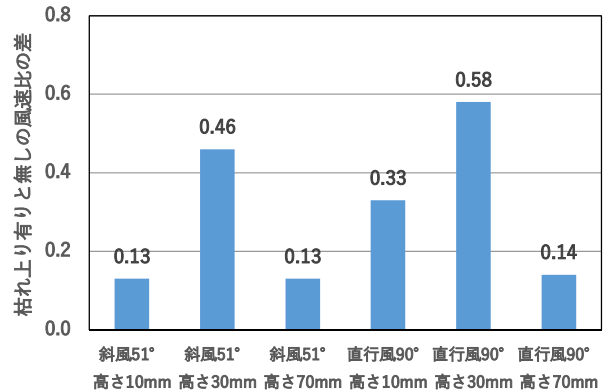


図-79 枯れ上がり有無の風速比の差

## 2. 9 下枝の枯れ上がり補助対策の風洞実験

令和2年度は「防雪林模型の再検討」の樹木模型を使って、補助対策の有無の比較により防雪性能を把握する実験を行った。

### 2. 9. 1 実験装置

実験には寒地土木研究所の風洞実験装置(図-48)を使用した。測定洞には、風向角を可変できるターンテーブルに防雪林模型を設置した(図-80)。

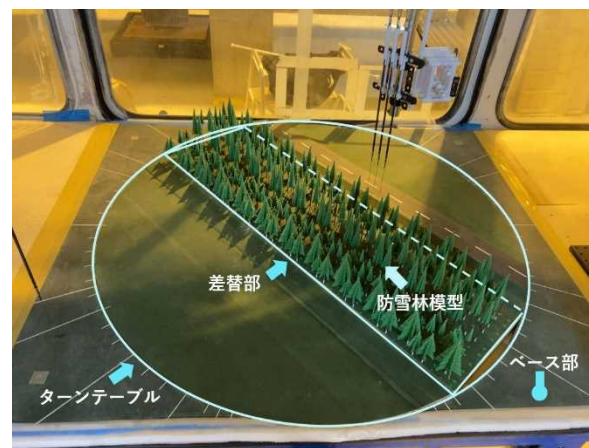


図-80 ターンテーブルに設置した樹木模型

### 2. 9. 2 補助対策ネット柵模型

本実験は補助対策として、現地の雄信内防雪林の枯れ上がりの補助対策で使っているネット柵を参考に図

-81、図-82 のネット柵模型を縮尺 1/100 で製作した。模型の空隙率は、現地で使っているネット柵と同じ 50%にした。ネット柵は図-83 に示す位置に取り付けた。

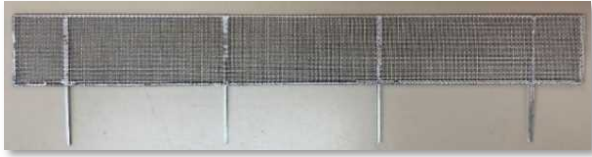


図-81 ネット柵模型

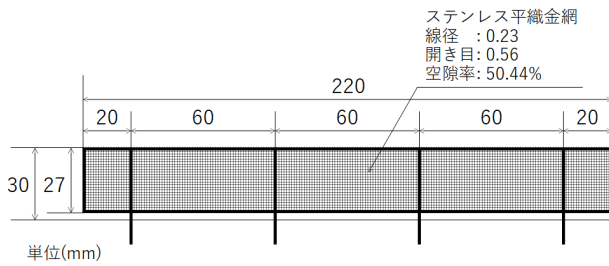


図-82 ネット柵模型寸法

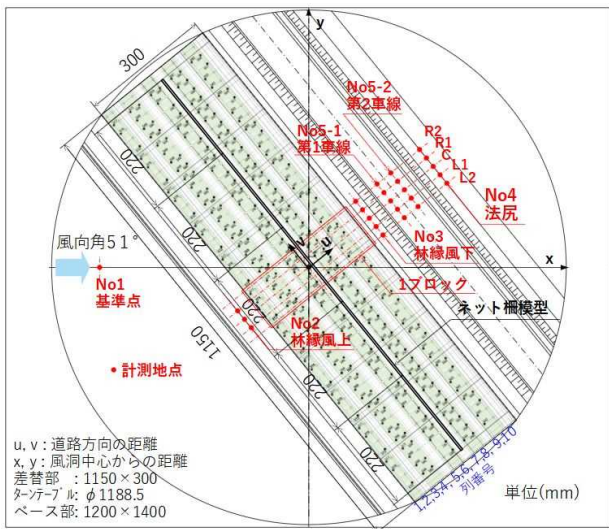


図-83 風速計測と模擬雪の吹き溜まり計測箇所図

### 2. 9. 3 風洞実験の設定

測定洞内の垂直風速分布は自然の風を模擬するため、過年度と同様、自然の風を模擬する風速 7m/s (高さ H=400mm) の条件とした。

### 2. 9. 4 計測方法

風速計測は、ゲルマニウム半導体を熱伝導率が良いニッケル管 (直径 1mm×長さ 3mm) で包んだプローブを使った、トーニック (株) 製の多点熱式風速計 (支持棒型風速風温プローブ MT-100-300Q 3 本と出力ユニット GeY-40DA 1 台) を用いた。

吹き溜まり高さの計測地点は図-83 に示す通り過年

度同様、防雪林の風上側の No.1 基準点、No.2 林縁風上、No.3 林縁風下、No.4 道路法面の法尻、No.5-1 道路上の第 1 車線中央、No.5-2 道路上の第 2 車線中央の計 6 箇所とした。

各箇所毎の風速値は、No.2 は 3 地点、No.3~No.5 は 5 地点を平均したものを使用した。計測地点間の距離は 25mm である。風速の計測高さは地面から H=10mm, H=30mm, H=70mm の 3 点で実験を行った。

### 2. 9. 5 実験条件

ネット柵の効果を確認するため、風速比を求める「風速計測」と、吹き溜まり分布を求める「模擬雪の吹き溜まり計測」を行った。また、「風速計測」と「模擬雪の吹き溜まり計測」も、ネット柵の有り無しを比較するため、樹木模型は「ネット柵無し」と、「ネット柵有り」の 2 パターンの実験を行った。風向角は「風速計測」、「模擬雪の吹き溜まり計測」とも 51° である。図-84 に樹木模型 (ネット柵無し)、図-85 に樹木模型 (ネット柵有り) を示す。

実験は防雪柵の風洞実験による吹き溜まりも含めた防雪性能の調査を行った山崎らの実験<sup>29)</sup>により、模擬雪の供給量は 230g/min、供給時間は 2 時間とした。



図-84 樹木模型 (ネット柵無し)

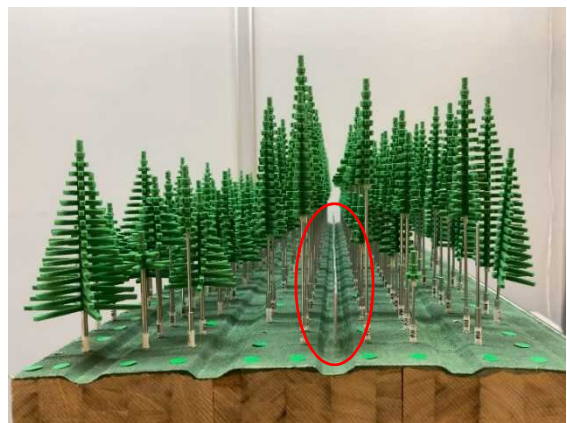


図-85 樹木模型 (ネット柵有り)

2. 9. 6 実験結果と考察

1) 風速比について

風速計測状況を図-86 に示す。風向角は  $51^\circ$  である。

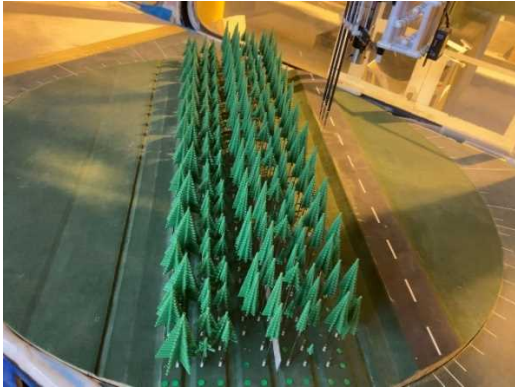


図-86 風速計測の実験状況

風向角  $51^\circ$  のネット柵無しの風速比を図-87 に、ネット柵有りの風速比を図-88 に示す。また、ネット柵無しとネット柵有りの風速比の差を図-89 に示す。

図-89 から、ネット柵を取り付けることで、高さ  $H=10\text{mm}$  の風速比の差は、No.3 林縁風下で 0.22、No.5-1 第 1 車線で 0.23、No.5-2 第 2 車線で 0.2、No.4 法尻で 0.10 と、顕著に風速比が下がっている。高さ  $H=30\text{mm}$  の風速比の差は、No.3 林縁風下は 0.19、No.5-1 第 1 車線は 0.16、No.5-2 第 2 車線は 0.13、No.4 法尻は 0.13 と顕著に下がっている。高さ  $H=30\text{mm}$  以下は、No.3 林縁風下から No.4 法尻まで、全体的に風速比の低下を確認した。高さ  $H=70\text{mm}$  はネット柵の高さ  $H=30\text{mm}$  を越えるため風速比の低下はほとんどない。

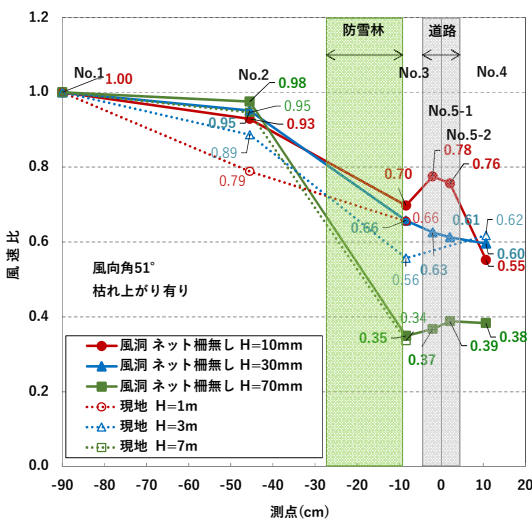


図-87 計測点横断方向の風速比 (枯れ上がり模型 ネット柵無し 風向角  $51^\circ$ )

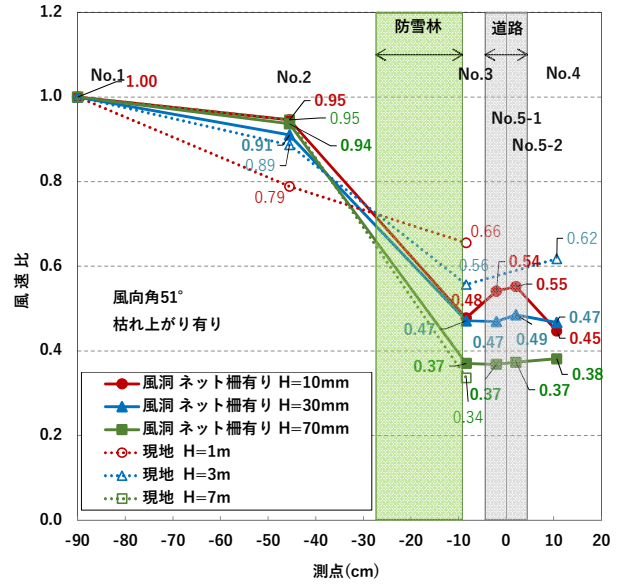


図-88 計測点横断方向の風速比 (枯れ上がり模型 ネット柵有り 風向角  $51^\circ$ )

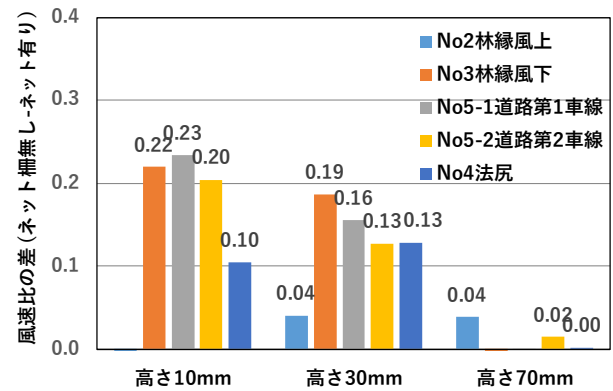


図-89 ネット柵有無による風速比の差

2) 模擬雪の吹き溜まり分布

実際の吹き溜まり現象は、雪の圧密や融解といった不確定な要素が多く含まれる現象で、吹雪風洞実験による現実象の再現は、雪の挙動が現実象と実験とは異なるものとなるため、完全に再現することは達成されていないが、吹き溜まりが生じる範囲やピークの位置は現実象に近似するため、風洞実験により防雪対策の検討が多数行われている。

ネット柵無しの吹き溜まり状況を図-90 と図-91 に示す。図-91 で防雪林を通過した模擬雪の吹き溜まりは小さな起伏が見られる。

ネット柵有りの吹き溜まり状況を図-92 と図-93 に示す。図-93 で模擬雪の吹き溜まりがなく平坦である。



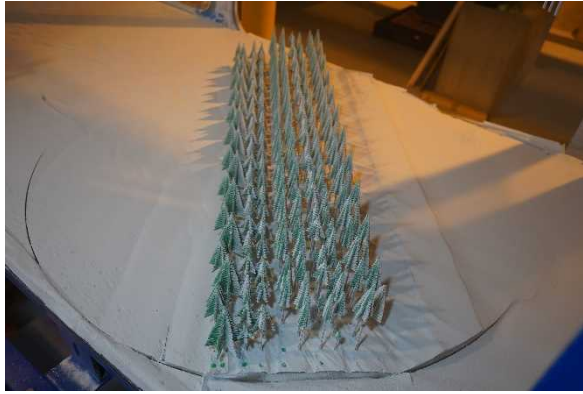


図-90 吹き溜まり状況（ネット柵無し）林帯前後



図-93 吹き溜まり状況（ネット柵有り）道路側

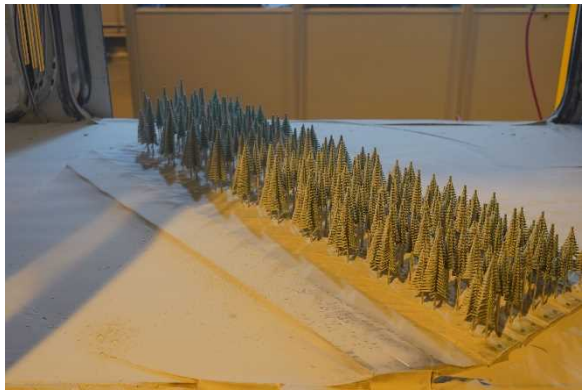


図-91 吹き溜まり状況（ネット柵無し）道路側



図-94 樹木模型に付着した模擬雪



図-92 吹き溜まり状況（ネット柵有り）林帯前後



図-95 ネット柵に付着した模擬雪

樹木模型に付着した模擬雪の状況を図-94 に示す。模擬雪の樹木への付着が確認された。

ネット柵に付着した模擬雪の状況を図-95 に示す。ネットのステンレス線とステンレス線の間は0.56mm と狭いため、模擬雪がネットに付着し空隙がほとんどなくなっていることが確認された。

模擬雪の吹き溜まり高さの計測地点は、風速計測と同じ位置（図-83）とし、No.1 基準点は1 地点、No.2 林縁風上は3 地点、No.3 林縁風下と No.4 道路法尻と No.5-1 第1 車線、No.5-2 第2 車線は5 地点の平均値とした。

枯れ上がり模型を使った模擬雪の吹き溜まり高さを、図-96 に示す。ネット柵の下部に3mm の隙間があり模擬雪が吹き飛ばされるため、吹き止め柵を設置した時に見られるような、ネット柵周辺にピークがある大きな吹き溜まりは発生していない。

No.2 林帯風上はネット柵無し1.7mm、ネット柵有り2.0mm とほぼ同じである。

No.3 林帯風下のネット柵無しは、吹き溜まりが1.8mm と No.2 林帯風上とほぼ同じで変化がない。

No.3 林帯風下のネット柵有りは、吹き溜まりが1.0mmとネット柵を設置することで模擬雪がネットに付着するため、吹き溜まり高さはネット柵無しより低くなっている。

No.5-1 道路上第1車線とNo.5-2 第2車線では、ネット柵無しが吹き溜まり1.0mmとNo.3 林縁風下より低くなっている。道路部は盛土で風速がNo.3 林縁風下より高いため吹き溜まりが低くなっている。

No.5-1 道路上第1車線とNo.5-2 第2車線のネット柵有りは吹き溜まり1.6mmとネット柵無しより高くなっている。模擬雪は、ネット柵を設置すること波形の起伏が道路にないことから吹き溜まりの影響が小さく、風速が緩和されたことにより降雪の影響が大きくなったと考えられる。

以上の実験結果からネット柵の設置により、風速の緩和効果による視程障害の緩和効果は期待できるが、吹き溜まりの緩和効果は未知数である。

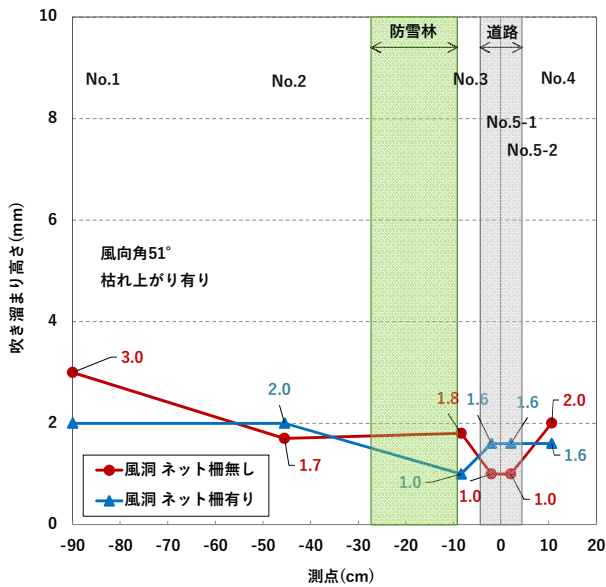


図-96 計測点横断方向の吹き溜まり高さ (枯れ上がり模型 風向角 51°)

## 2. 10 補助対策の設置位置と風況の変化

令和3年度は「2. 5. 3 現地観測の再現実験」の樹木模型と、「2. 9 下枝の枯れ上がり補助対策の風洞実験」のネット柵模型を使って、ネット柵模型の設置位置を変えた場合と、樹木模型の林帯を間引きした場合の風況を把握する実験を行った。

### 2. 10. 1 実験装置

実験には2. 5. 1と同様の風実験装置(図-48)を使用した。

測定洞(図-97)には、計測地点の風速計測用として多点熱式風速計4本と、高さH=400mmの風速計測用として超音波風速計を設置した。

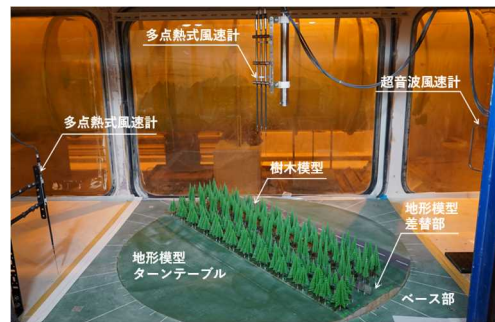


図-97 測定洞

### 2. 10. 2 補助対策模型

実験には2. 9の実験で使用した、ネット柵模型(図-81、図-82)を防雪林模型に設置して実験を行った。ネット柵模型の下部は空気が流れるよう3mmの隙間を空けてある。

### 2. 10. 3 風洞実験の設定

測定洞内の垂直風速分布は2. 5. 4と同様に、上空ほど風速が増す自然の風を模擬するため、べき法則は、田園地帯を想定した0.15に近似するよう気流を調整した。実験風速は、過年度までの実験と同じ、高さH=400mmで風速7m/s、高さH=50mmで風速4.5m/s前後である。

### 2. 10. 4 計測方法

風速計測は2. 9. 4と同様に、プローブにゲルマニウム半導体を使い、熱伝導率が良いニッケル管(直径1mm×長さ3mm)で包んだ、トーニック(株)製の多点熱式風速計MT-100-400Q3本(図-98)と、出力ユニットGeY-40DA(図-99)を用いた。計測間隔は出力ユニットGeY-40DAで温度補正等の処理をした風速データと気温データを、シリアル通信で2秒間隔に受信し(図-100)、風速値は30個(計測時間は60秒)のデータの平均値とした。



図-98 多点熱式風速計



図-99 出カユニット

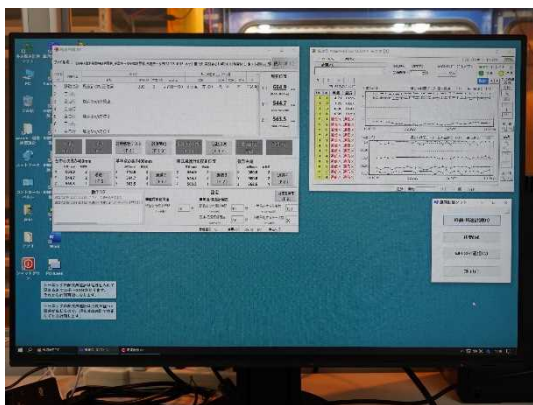


図-100 風洞制御ソフト画面

### 2. 10. 5 実験条件

ネット柵の設置位置と風況の変化を把握するため、実験条件は、ネット柵無し（図-101）、ネット柵林帯中央設置（図-102）、ネット柵林帯風上設置（図-103）、ネット柵林帯風下設置（図-104）の4種類とした。林帯は全て「間引き無し」で行った。



図-101 ネット柵無し



図-102 ネット柵林帯中央設置



図-103 ネット柵林帯風上設置



図-104 ネット柵林帯風下設置

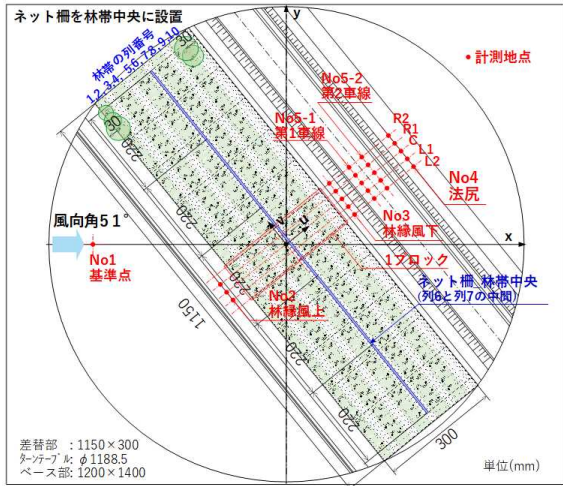


図-105 ネット柵林帯中央設置図

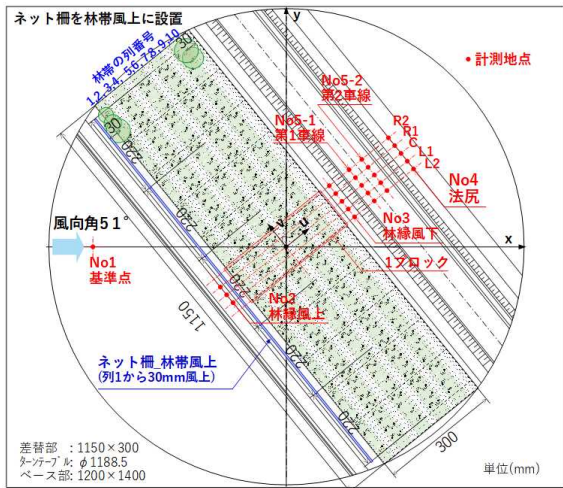


図-106 ネット柵林帯風上設置図

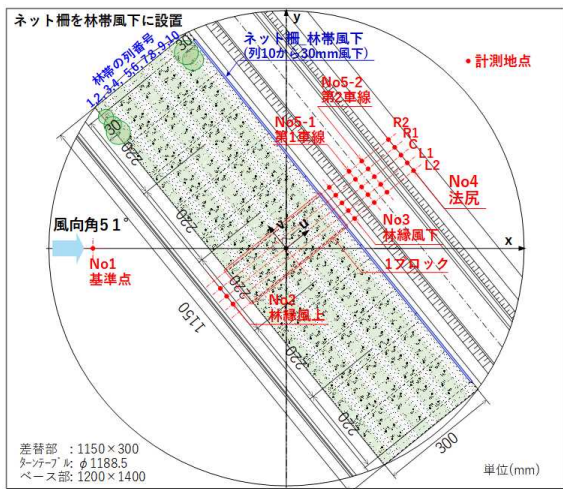


図-107 ネット柵林帯風下設置図

ネット柵中央設置（図-105）は林帯の列6と列7の中間にネット柵を設置した。ネット柵林帯風上設置（図-106）は奥側の林帯（列1）から風上30mmの位置に設置した。ネット柵林帯風下設置（図-107）は道路側の林帯（列10）から風下30mmの位置に設置した。

### 2. 10. 6 実験結果

ネット柵林帯中央設置の風速比分布図を図-108、ネット柵林帯風上設置の風速比分布図を図-109、ネット柵林帯風下設置の風速比分布図を図-110に示す。ネット柵の位置と風速緩和効果を比較するため、各図のデータ系列に「ネット柵無し、間引き無し」の風速比を追加し、計測地点の高さ H=10mm、H=30mm、H=70mm をデータ要素として整理した。

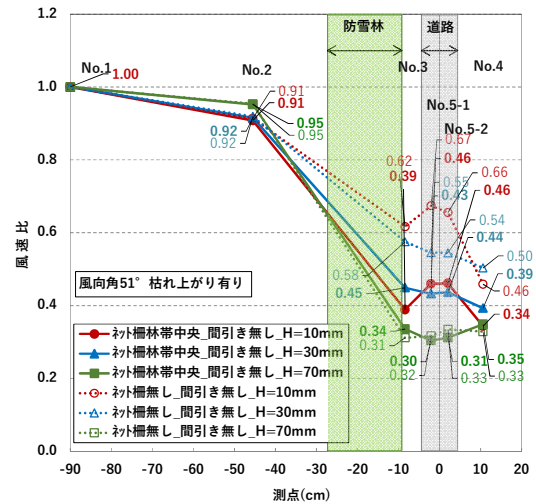


図-108 ネット柵林帯中央設置の風速比分布図

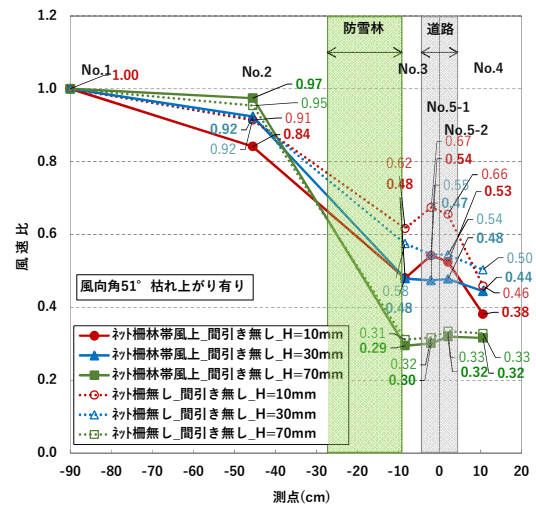


図-109 ネット柵林帯風上設置の風速比分布図

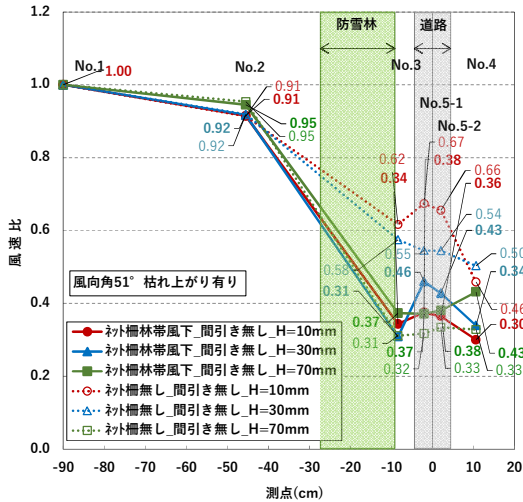


図-110 ネット柵林帯風下設置の風速比分布図

ネット柵の位置による風速緩和効果を数値化し比較するため、ネット柵有りの風速比と、ネット柵無し  
の風速比の差を、風速比変化量(A)とした。また、車両  
が通過する道路上の風況把握のため、第1車線の風速  
比変化量(Ad1)と、第2車線の風速比変化量(Ad2)の平  
均値を、道路上の風速比変化量(Ad)として比較した。

$$\text{風速比変化量(A)} = \text{ネット柵有り風速比} - \text{ネット柵無し風速比} \quad (10)$$

$$\text{道路上の風速比変化量(Ad)} = (\text{風速比変化量(Ad1)} + \text{風速比変化量(Ad2)}) / 2 \quad (11)$$

高さ H=10mm の風速比変化量を図-111、高さ  
H=30mm の風速比変化量を図-112、高さ H=70mm の  
風速比変化量を図-113 に示す。

### 1) 高さ H=10mm の風速比変化量

高さ H=10mm (図-111) において、ネット柵林帯風  
下設置は、計測地点の全てで、風速比変化量はネット  
柵無しより大きく下がっている。道路上の風速比変化  
量は-0.29 である。

ネット柵林帯中央設置もネット柵無しより大きく  
下がっている。道路上の風速比変化量は-0.20 で、ネッ  
ト柵林帯風下設置より下がり方は小さい。

ネット柵林帯風上設置の風速比変化量は、ネット柵  
無しより下がっているが、道路上の風速比変化量は  
-0.13 で、ネット柵林帯風下設置やネット柵林帯中央設  
置より下がり方が小さい。高さ H=10mm はネット柵を  
林帯風下に設置した時が風速比が一番緩和される。

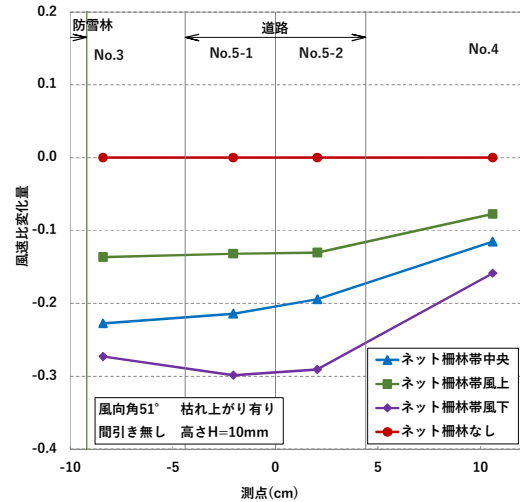


図-111 ネット柵位置と風速比変化量 (高さ H=10mm)

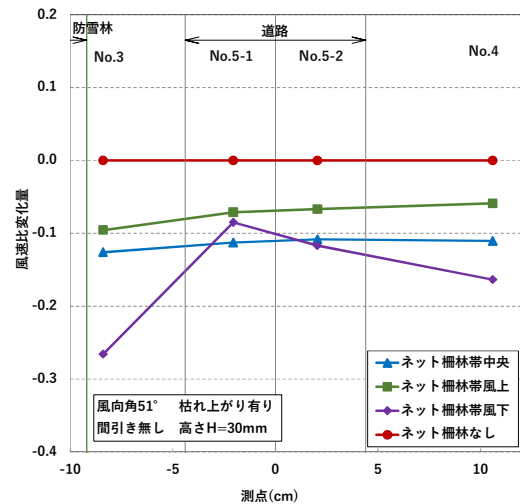


図-112 ネット柵位置と風速比変化量 (高さ H=30mm)

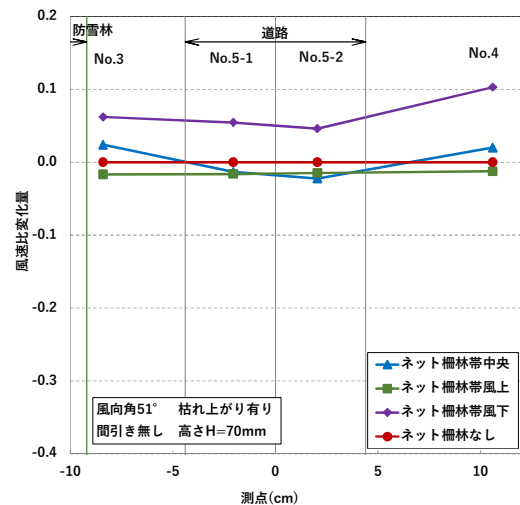


図-113 ネット柵位置と風速比変化量 (高さ H=70mm)

## 2) 高さ H=30mm の風速比変化量

高さ H=30mm (図-112) において、ネット柵林帯風下設置は、計測地点 No.3、No.5-2、No.4 で、風速比変化量は一番下がっている。道路上の風速比変化量は -0.10 である。

ネット柵林帯中央設置は、計測地点 No.3、No.5-2、No.4 で風速比変化量は二番めに下がっている。道路上の風速比変化量は -0.11 と、ネット柵林帯風下設置の -0.10 とほぼ同じである。

ネット柵林帯風上設置は、全ての計測地点でネット柵無しより風速比変化量は下がっているが、道路上の風速比変化量は -0.07 と下がり方は小さい。

高さ H=30mm は、ネット柵を林帯中央から林帯風下の方に設置した時が、道路上の風速は大きく緩和されることが確認できた。

## 3) 高さ H=70mm の風速比変化量

高さ H=70mm (図-113) において、ネット柵林帯風下設置は、全ての計測地点でネット柵無しより風速比変化量は上がっている。道路上の風速比変化量は +0.05 である。ネット柵を越えた風が上方に流れるため、高さ H=70mm の風速比変化量は上昇したと考えられる。

ネット柵林帯中央設置は、計測地点 No.3 と No.4 でネット柵無しより若干高くなって、No.5-1 と No.5-2 で若干下がっている。道路上の風速比変化量は -0.02 と、ネット柵無しとほぼ同じである。ネット柵を越えた風は高さ H=70mm 付近の上方に流れるが、防雪木の枝葉により緩和されると考えられる。

ネット柵林帯風上設置は、道路上の風速比変化量が -0.02 とネット柵無しとほぼ同じである。全ての計測地点で風速比変化量はネット柵無しより下がっていると考えられる。

## 4) ネット柵の設置位置と風速の緩和効果

本実験より、高さ H=10mm から H=30mm までは、ネット柵を林帯風下に設置すると風速の緩和効果が大きく、高さ H=30mm から H=70mm はネット柵を林帯中央に設置すると風速は緩和される。ネット柵を林帯風上に設置すると高さ H=30mm から H=70mm で、風速が上昇している。ネット柵の設置位置は林帯風下から林帯中央が良い結果となった。

### 2. 11 林帯 1 列間引きと風況の変化

#### 2. 11. 1 実験条件 (林帯 1 列間引き)

枯れ上がった林帯の間引き箇所と風況の変化を確認するため、ネット柵を林帯中央(列 6 と列 7 の中間)に設置し、林帯 10 列のうち 1 列を間引いて、各計測地

点の風況を把握する実験を行った。林帯の列番号は図-105 で示す通り、最も風上側の林帯を列 1、最も道路側の林帯を列 10 とした。枯上がり模型の配置は 2. 8. 2 (図-72) と同じである。

実験条件は列 1 間引き (図-114)、列 2 間引き (図-115)、列 3 間引き (図-116)、列 4 間引き (図-117)、列 5 間引き (図-118)、列 6 間引き (図-119)、列 7 間引き (図-120)、列 8 間引き (図-121)、列 9 間引き (図-122) 列 10 間引き (図-123) の 1 列を間引く 10 種類とした。



図-114 列 1 間引き



図-115 列 2 間引き

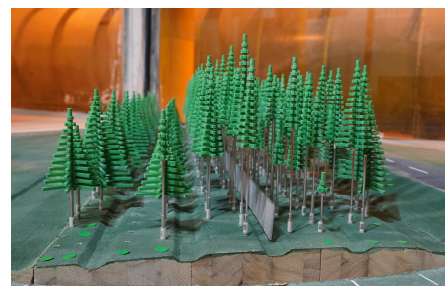


図-116 列 3 間引き



図-117 列 4 間引き



図-118 列5間引き



図-123 列10間引き

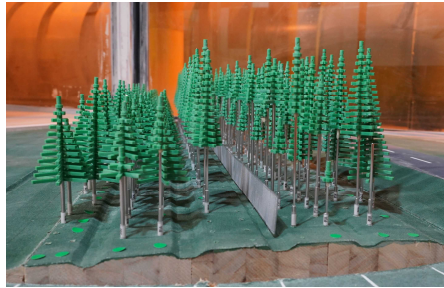


図-119 列6間引き



図-120 列7間引き



図-121 列8間引き



図-122 列9間引き

## 2. 11. 2 実験結果（林帯1列間引き）

林帯1列間引きの風速比分布図を、図-124 から図-133 に示す。林帯の間引きによる影響を比較するため、各図のデータ系列に「ネット柵林帯中央、間引き無し」の風速比を追加し、計測地点の高さ  $H=10\text{mm}$ 、 $H=30\text{mm}$ 、 $H=70\text{mm}$  をデータ要素として整理した。

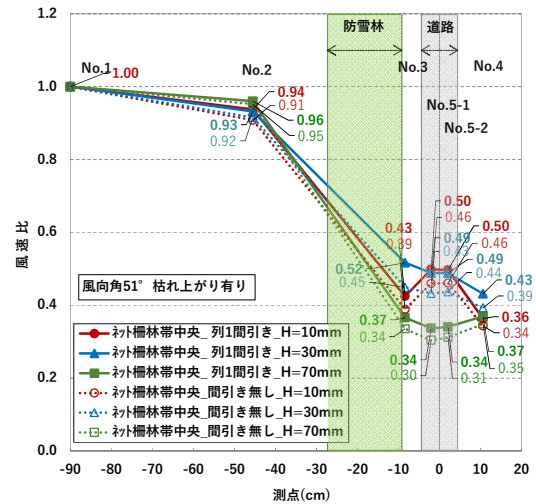


図-124 列1間引きの風速比分布図

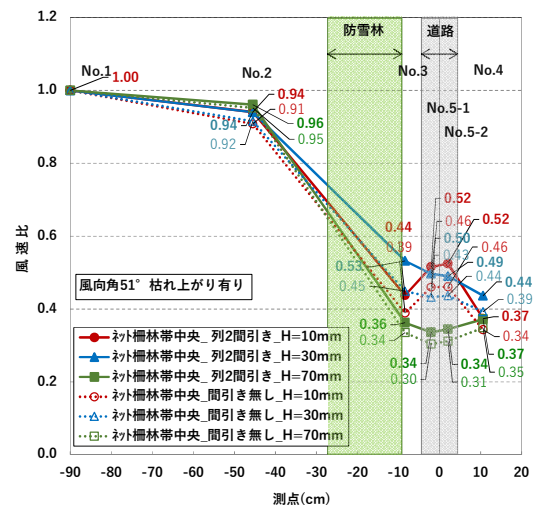


図-125 列2間引きの風速比分布図

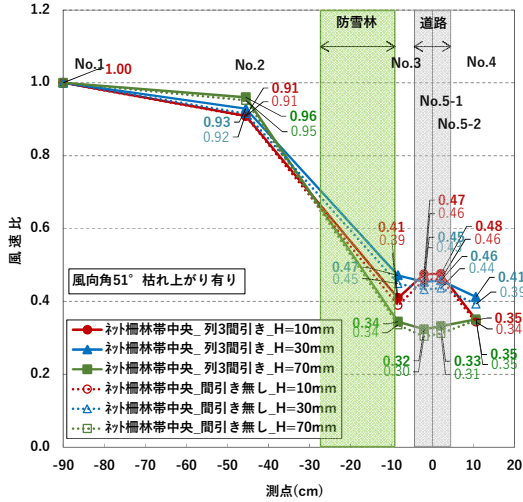


図-126 列3間引きの風速比分布図

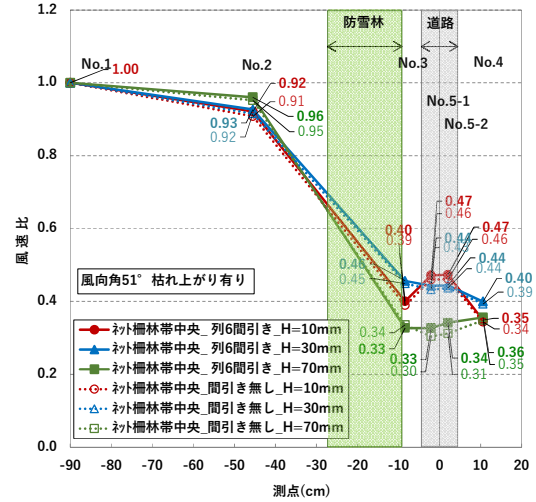


図-129 列6間引きの風速比分布図

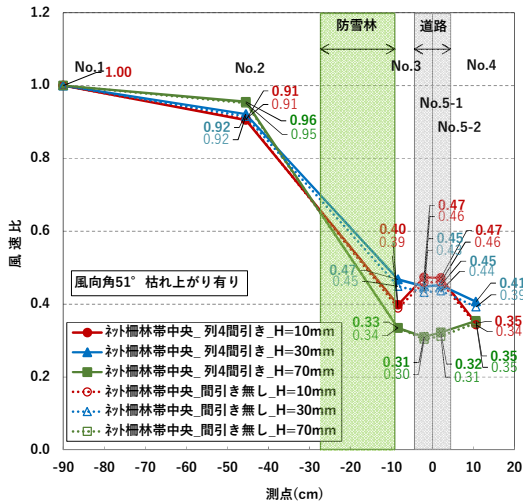


図-127 列4間引きの風速比分布図

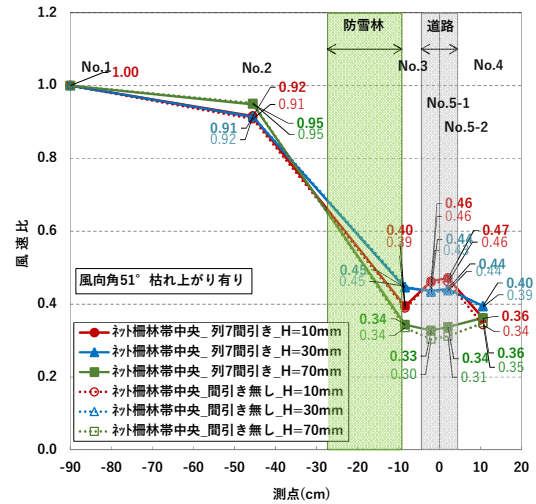


図-130 列7間引きの風速比分布図

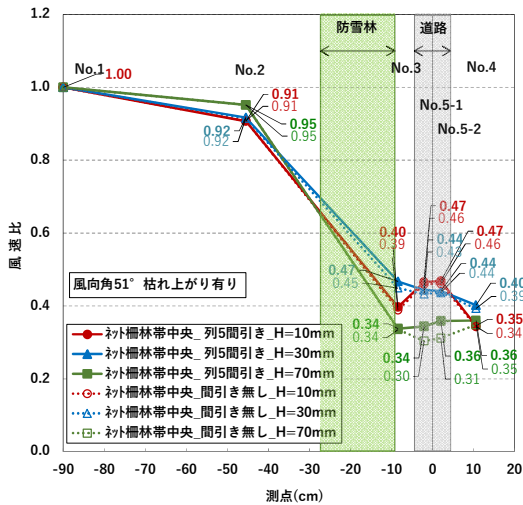


図-128 列5間引きの風速比分布図

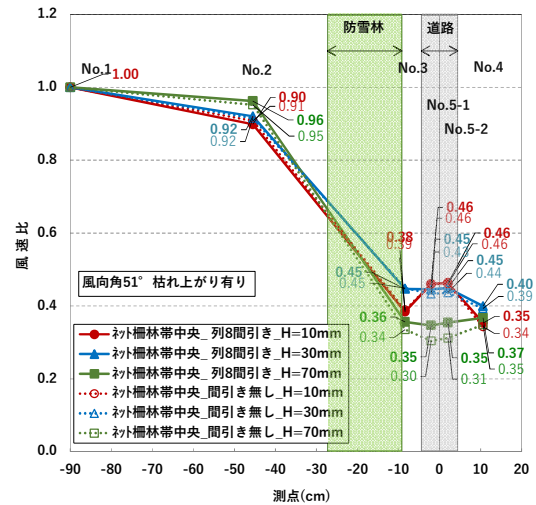


図-131 列8間引きの風速比分布図



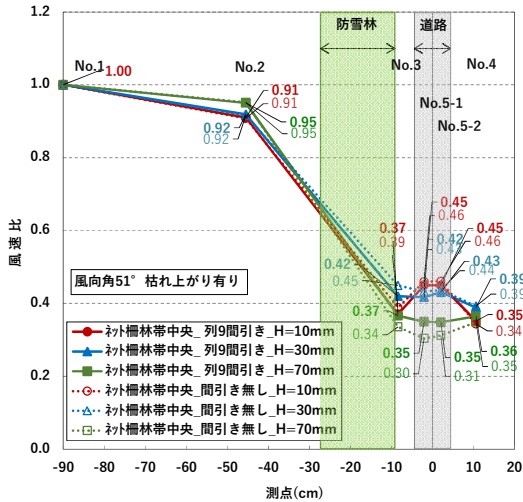


図-132 列9間引きの風速比分布図

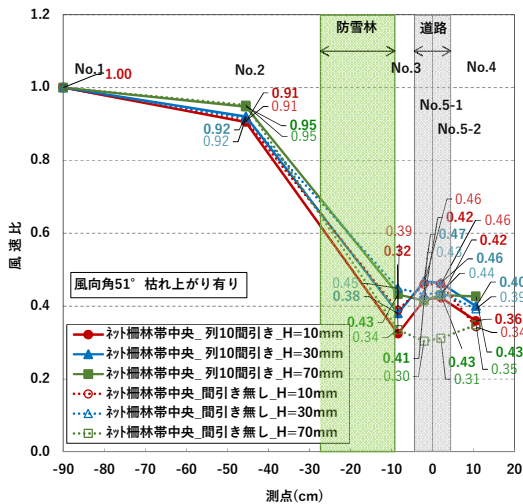


図-133 列10間引きの風速比分布図

1 列間引きによる風速の影響を数値化するため、1 列間引きの風速比と、「ネット柵林帯中央、間引き無し」の風速比の差を、風速比変化量(B)とした。また、第1車線の風速比変化量(Bd1)と、第2車線の風速比変化量(Bd2)の平均値を、道路上の風速比変化量(Bd)とする。

$$1 \text{ 列間引き風速比変化量 (B)} = \frac{1 \text{ 列間引き風速比} - \text{間引き無し風速比}}{2} \quad (12)$$

(※ネット柵林帯中央)

$$\text{道路上の風速比変化量(Bd)} = \frac{(\text{風速比変化量(Bd1)} + \text{風速比変化量(Bd2)})}{2} \quad (13)$$

高さ H=10mm の風速比変化量を図-134、高さ H=30mm の風速比変化量を図-135、高さ H=70mm の風速比変化量を図-136 に示す。

### 1) 高さ H=10mm の風速比変化量

高さ H=10mm (図-134) において、列 10 間引きは、計測地点 No.3、No.5-1、No.5-2 で風速比変化量は、「間引き無し」より下がっている。道路上の風速比変化量は-0.05 である。列 10 間引きは高さ H=70mm (図-136) において、風速比変化量は上昇している。

列 10 は林帯を通過する高い地点 H=70mm 付近の風を下 (高さ H=10mm) に流しているが、列 10 を間引くことで風が下に流れなくなるためと考えられる。

列 9 間引きも、計測地点 No.3、No.5-1、No.5-2 で風速比変化量は、「間引き無し」より下がっている。道路上の風速比変化量は-0.01 で、列 10 間引きより下がり方は小さい。

列 8 間引きは道路上の風速比変化量は 0.00 で、「間引き無し」と同じである。

列 3 間引きから列 7 間引きは、道路上の風速比変化量は+0.01 で「間引き無し」より若干上がっている。

枯れ上がりのある列 3 から列 10 は、林帯の風上側を間引くと風速比変化量が増加している。

列 2 は枯れ上がりが無い林帯で、間引くことで全ての計測地点で、風速比変化量は「間引き無し」より大きく増加している。列 2 間引きは道路上の風速比変化量が+0.06 で一番大きい。

列 1 も枯れ上がりが無い林帯で、間引くことで全ての計測地点で、風速比変化量は「間引き無し」より大きく増加している。道路上の風速比変化量は+0.05 で大きい。

列 1 と列 2 は広葉樹でもともと枯れ上がりが無いため、間引きをすると高さ H=10mm の風速比変化量は大きく増加した。

### 2) 高さ H=30mm の風速比変化量

高さ H=30mm (図-135) において、列 10 間引きは、風速比変化量が計測地点 No.3 で「間引き無し」より大きく下がっているが、No.5-1 から風下で「間引き無し」より少し上がっている。

原因として、列 10 を間引くことで、高い地点 H=70mm の風速は大きく上がり、H=10mm では下がっており、その中間である H=30mm ではネット柵から距離が大きくなるにつれ緩和効果が徐々に減少する傾向が見られ、計測地点 No.5-1、No.5-2、No.4 も風速が上がった。

列 9 間引きは、全ての計測地点で風速比変化量は、「間引き無し」より下がっている。道路上の風速比変化量は-0.01 で、列間引きの中で一番低い。

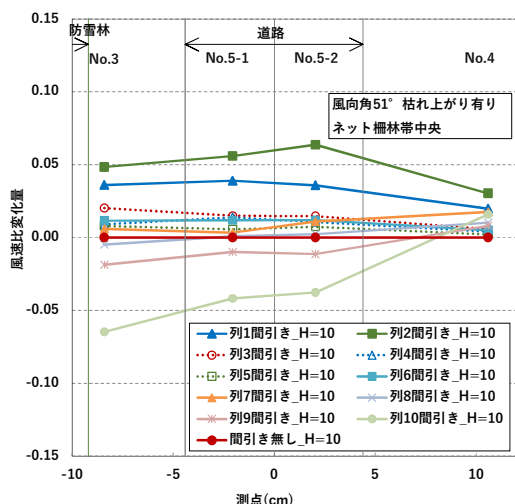


図-134 林帯1列間引きと風速比変化量 (高さ H=10mm)

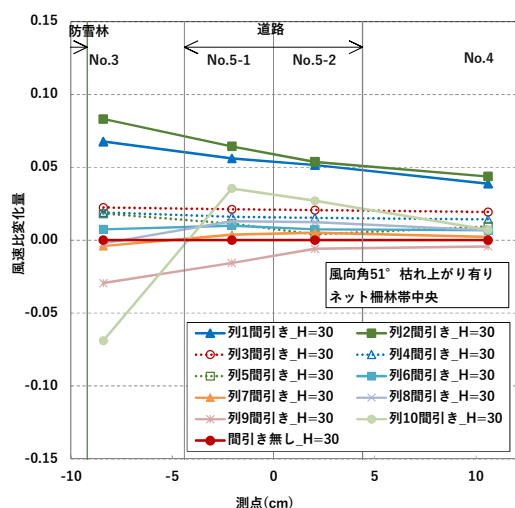


図-135 林帯1列間引きと風速比変化量 (高さ H=30mm)

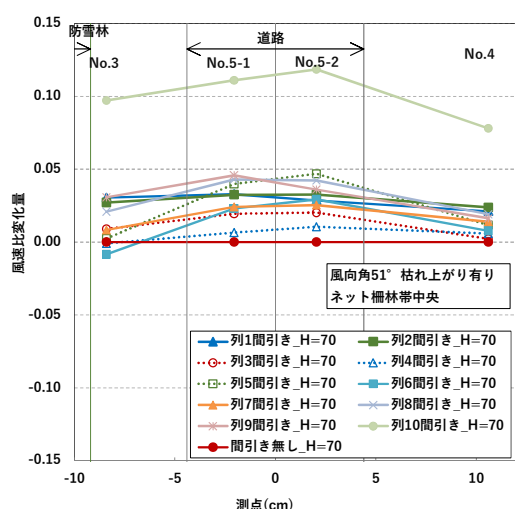


図-136 林帯1列間引きと風速比変化量 (高さ H=70mm)

列4間引きから列8間引きも、道路上の風速比変化量は+0.01で、「間引き無し」とほとんど変わらない。

列3間引きの道路上の風速比変化量は+0.02で、若干、「間引き無し」より上がっている。

列2は枯れ上がりがない林帯で、列2間引きの道路上の風速比変化量は+0.06で、風速比変化量は大きくなっている。

列1も枯れ上がりがない林帯で、列1間引きの道路上の風速比変化量は+0.05と、列2間引きとほとんど変わらない。枯れ上がりがない列1間引きと列2間引きは、風速の上昇が他の箇所の間引きより大きい。

### 3) 高さ H=70mm の風速比変化量

高さ H=70mm (図-136) において、列10間引きは風を遮っていた林帯がなくなったため、すべての計測地点で風速比変化量が一番大きく上がっている。道路上の風速比変化量の+0.11であった。

列1間引きから列9間引きは風速比変化量が+0.05以内で、間引きによる影響が小さい。

列5間引き、列8間引き、列9間引きにおいても、道路上の風速比変化量は+0.04で、道路側の林帯を間引くと、高い地点 H=70mm 付近の風速比変化量が上がるとの傾向が見えた。

列7間引きの風速比変化量は+0.02、列6間引きの風速比変化量は+0.03、列4間引きの風速比変化量は+0.01、列3間引きの風速比変化量は+0.02で、列3から列7を間引いても高い地点 H=70mm 付近の風速比変化量はあまり変化がない。

### 4) 防雪林の性能を確保した1列間引き

列3から列8と、列10間引きは、高さ H=10mm から H=30mm で、間引きをしても大きな風速比の上昇がなく、防雪林の性能は確保されている。

列9間引きは高さ H=10mm から H=30mm の風速比が下がるため、防雪林の性能は向上している。

## 2. 12 林帯2列間引きと風況の変化

### 2. 12. 1 実験条件 (林帯2列間引き)

2. 11と同様に林帯の2列間引きと風況の変化を確認するため、林帯10列のうち2列を間引いて、各計測地点の風速を計測する実験を行った。

実験条件は、列1,列2間引き (図-137)、列3,列4間引き (図-138)、列5,列6間引き (図-139)、列7,列8間引き (図-140)、列9,列10間引き (図-141)、5種類とした。ネット柵を林帯中央 (列6,列7の中間) に設置して行った。



図-137 列1,列2間引き



図-141 列9,列10間引き



図-138 列3,列4間引



図-139 列5,列6間引き



図-140 列7,列8間引き

## 2. 12. 2 実験結果 (林帯2列間引き)

2列間引きの風速比分布図を図-142から図-146に示す。間引きによる風速の影響を比較するため、各図に「ネット柵林帯中央、間引き無し」を追加した。

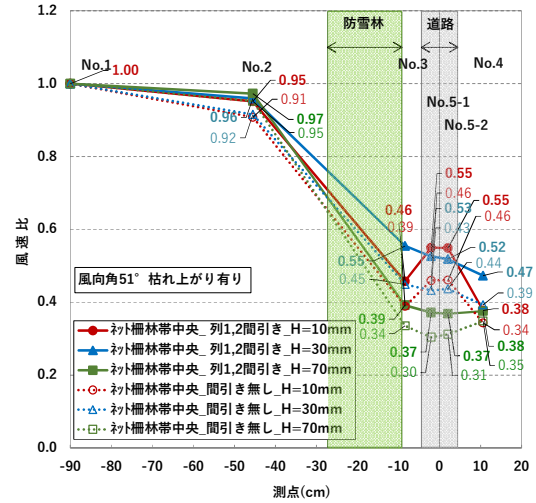


図-142 列1,列2間引きの風速比分布図

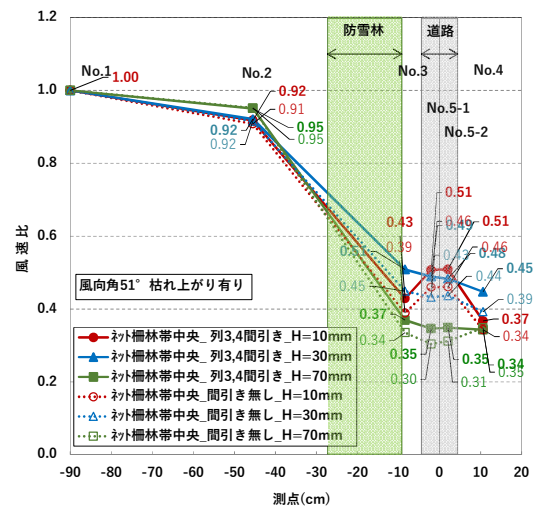


図-143 列3,列4間引きの風速比分布図

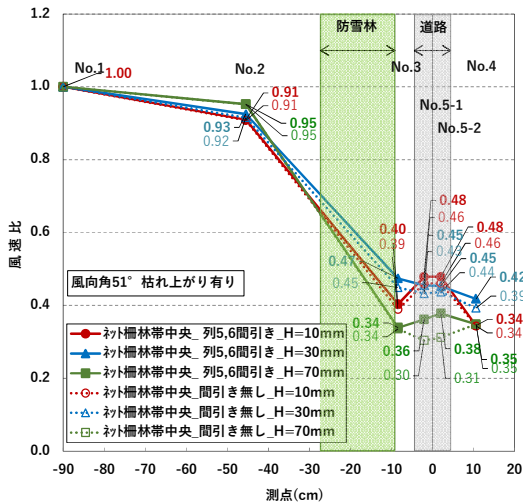


図-144 列5,列6間引きの風速比分布図

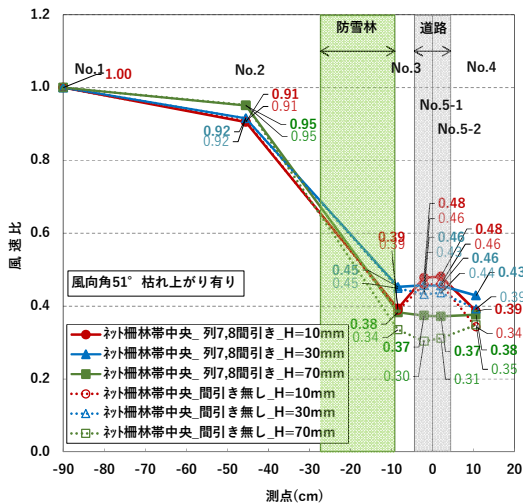


図-145 列7,列8間引きの風速比分布図

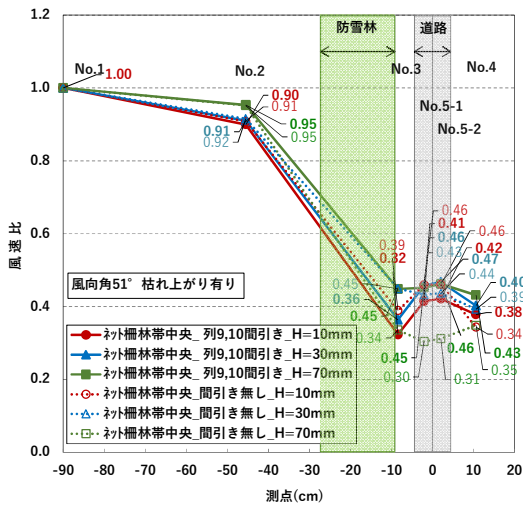


図-146 列9,列10間引きの風速比分布図

2列間引きによる風速の影響を数値化するため、2列間引きの風速比と、「ネット柵林帯中央、間引き無し」の風速比の差を、風速比変化量(C)とした。また、第1車線の風速比変化量(Cd1)と、第2車線の風速比変化量(Cd2)の平均値を、道路上の風速比変化量(Cd)とする。

2列間引きの風速比変化量 (C)=

$$2 \text{列間引き風速比} - \text{間引き無し風速比} \quad (14)$$

(※ネット柵林帯中央)

道路上の風速比変化量(Cd) =

$$(\text{風速比変化量(Cd1)} + \text{風速比変化量(Cd2)})/2 \quad (15)$$

高さ H=10mm の風速比変化量を図-147、高さ H=30mm の風速比変化量を図-148、高さ H=70mm の風速比変化量を図-149 に示す。

2列間引きによる防雪林の性能低下がどの程度かを把握するため、図-147 から図-149 に「ネット柵無し、間引き無し」を追加した。

### 1) 高さ H=10mm の風速比変化量

列9,列10間引きは、高さ H=10mm (図-147) において、計測地点 No.3、No5-1、No5-2 で風速比変化量は、「ネット柵林帯中央、間引き無し」より風速比変化量は下がっている。道路上の風速比変化量は-0.04 である。原因として、列9,列10間引きは、高い地点 H=70mm (図-149) において、風速比が大きく上がっていることから、林帯の列9と列10は風を下に流している、間引きをすることで風が下に流れなくなったと考えられる。

列5,列6間引きと、列7,列8間引きは、道路上の風速比変化量が+0.02 と、「ネット柵林帯中央、間引き無し」とほぼ同じで、間引きによる大きな風速比の上昇はなかった。

列3,列4間引きは、道路上の風速比変化量が+0.05 で、「ネット柵林帯中央、間引き無し」より少し上がっている。

列1,列2間引きは、枯れ上がりががないため、道路上の風速比変化量が+0.09 と大きく上がっている。

高さ 10mm は、どの箇所を2列間引きしても、「ネット柵無し、間引き無し」の道路上の風速比変化量+0.20 より低い。

### 2) 高さ H=30mm の風速比変化量

列9,列10間引きは、高さ H=30mm (図-148) において、計測地点 No.3 で風速比変化量は、「ネット柵林帯

中央、間引き無し」より下がっているが、No5-1、No5-2、No4 では、道路上の風速比変化量は+0.03であった。高い地点 H=70mm 付近の速い風が降下するため上がったと考えられる。

列 5,列 6 間引きと、列 7,列 8 間引きは、道路上の風速比変化量が+0.02 と、「ネット柵林帯中央、間引き無し」とほぼ同じである。

列 3,列 4 間引きは、道路上の風速比変化量が+0.06 で、「ネット柵林帯中央、間引き無し」より少し大きい。

列 1,列 2 間引きは、道路上の風速比変化量が+0.11 と大きく上がっている。

高さ 30mm の風速比変化量は、高さ 10mm より若干高く、間引きによる影響は高さ 10mm と概ね同じ傾向であった。

### 3) 高さ H=70mm の風速比変化量

列 9,列 10 間引きは、高さ H=70mm (図-149) において、風速比変化量は「ネット柵林帯中央、間引き無し」より大きく上がっている。道路上の風速比変化量は+0.15 である。林帯によって下に流れた高さ H=70mm 付近の風が、間引きをすることで下に流れなくなったためと考えられる。

列 7,列 8 間引きの風速比変化量は+0.07、列 5,列 6 間引きの風速比変化量は+0.06、列 3,列 4 間引きの風速比は+0.05 で、「ネット柵無し、間引き無し」より上がっている。また、道路側の林帯を間引くと高さ H=70mm の風速比変化量の上昇は顕著で、高さ H=10mm や高さ H=30mm と比べ反対の傾向であった。

列 1,列 2 間引きは、道路上の風速比変化量が+0.06 と大きく上がっている。

### 4) 防雪林の性能を確保した 2 列間引き

列 1 と列 2 は枯れ上がりが無い樹木のため、列 1,列 2 間引きは、高さ H=10mm、H=30mm、H=70mm すべての高さで風速比変化量は上がっている。高さ H=30mm の道路上の風速比変化量は+0.11 で、「ネット柵無し、間引き無し」の道路上の風速比変化量+0.13 に近く、ネット柵としての効果が認められなかった。

列 9,列 10 間引きは、高さ H=10mm で「ネット柵林帯中央、間引き無し」より道路上の風速比変化量が下がっており、高さ H=30mm では、「ネット柵林帯中央、間引き無し」と道路上の風速比変化量はほぼ同じのため、防雪林の性能は確保されていた。

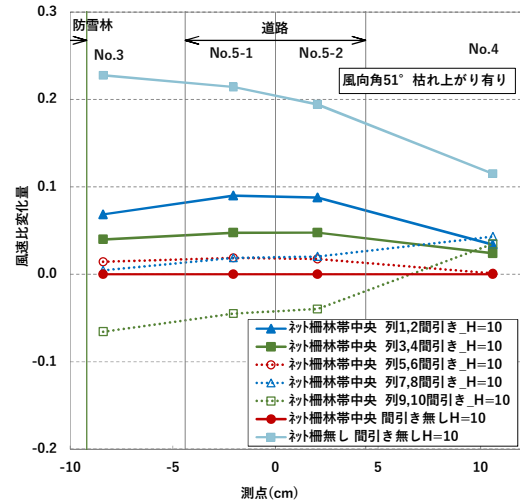


図-147 林帯 2 列間引きと風速比変化量 (高さ H=10mm)

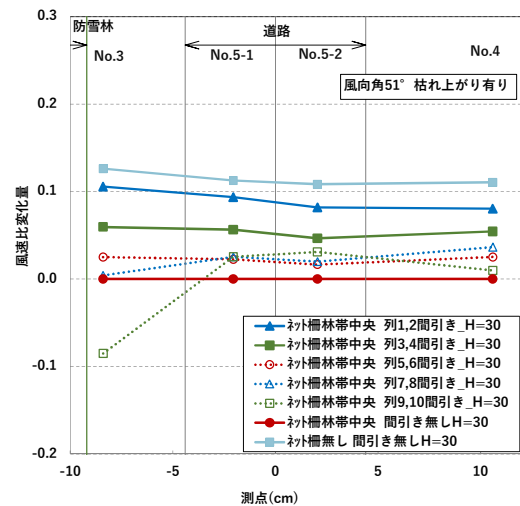


図-148 林帯 2 列間引きと風速比変化量 (高さ H=30mm)

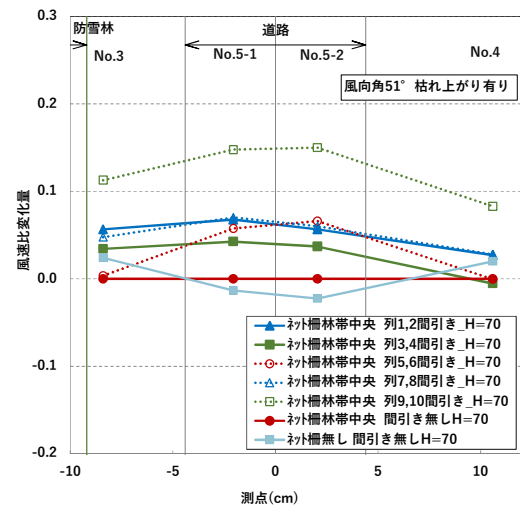


図-149 林帯 2 列間引きと風速比変化量 (高さ H=70mm)

## 2. 13 防雪林の構成要素と防雪性能における今後の展望

現在、防雪林（標準林）の整備においては、最大吹きだまり量に応じて林帯幅（11~32m）が決定される。仮に、空隙率に基づく防雪林の性能評価が可能になれば、空隙率に基づく防雪林の整備によるコスト縮減に貢献できる可能性があると考えられる。以下に、3点例示する。

- ① 防雪林内部で下枝の枯れ上がりが見られたとしても、林縁で枝葉が繁茂し空隙率が十分に低ければ（すなわち、十分な防雪性能が確保されていれば）更なる対策を講じる必要がない。
- ② 現在の防雪林では初期生長期に生育不良を伴いやすいマツ科が利用されているが、初期の生育不良を回避するためにマツ科以外の樹種を利用し、性能を確保可能な空隙率となる配置を検討する。
- ③ 性能を確保可能な空隙率から最小の林帯幅（狭林幅）を導出することで、効率的な防雪林整備につなげる。

## 3. 防雪性能が低下した防雪林への補助対策の提案

### 3. 1 補助対策に関する資料調査

防雪性能が低下した防雪林の補助対策工法として、①低木等の植生、②ネット柵などが挙げられる。低木等の場合は、日照時間が重要となるため林縁に植栽する必要がある。ネット柵の場合は、配置箇所には限らない。ただし、防雪林が植物である以上、人工的な柵を防雪林内外に配置することへの違和感は否めない。まずは、双方のメリットとデメリットを把握することを目的に資料調査等を実施した。

#### 3. 1. 1 多様な植生を活用した補助対策

防雪林の基本林は、アカエゾマツをはじめとするヨーロッパトウヒやトドマツなどマツ科の樹種で構成される（図-2、図-5）<sup>1)</sup>。また、防雪林の林縁には、基本林の初期成長を保護するため前生林が配置され、初期成長の早いヤナギ属などが主に採用される（図-2）<sup>1)</sup>。施工現場では、基本林のマツ科よりも主に初期段階でヤナギ属の樹高が高くなり、被圧に伴い基本林の成長を妨げるケースがみられる。そこで、本項では基本林の被圧の影響が極力発生しない低木の他、ヤナギ属の単一林、農作物による補助対策について調査した。なお、調査対象は我が国の防雪林ではなく、先駆的に防雪林を活用している米国の文献が主体である。米国では植生を活用した吹雪対策を Living Snow Fence

(LSF)<sup>33)</sup>としており、我が国の防雪林も LSF に含まれる。ここでは、米国で LSF に利用される植物の種類と吹雪捕捉量について整理し、日本での LSF の適用性について考察した。

#### 1) 米国で LSF に利用される植物の種類と吹雪捕捉量

米国で利用されている LSF の樹種は様々である。我が国でも利用されている 1)常緑針葉樹だけでなく、2)ヤナギ、3)トウモロコシも LSF として研究されている<sup>34)</sup>。

##### イ) 常緑針葉樹

針葉樹の多くは常緑樹であるが、カラマツやヌマスギなどの落葉樹もある。LSF には主に針葉樹のうち、分類学的にはマツ科が用いられ、米国ではマツ科トウヒ属(*Picea*)が主である。たとえば、オウシュウトウヒ(*Picea abies*)、コロラドモミ(*Abies concolor*)などがある<sup>34)</sup>。

##### ロ) ヤナギ属

前章で述べたようにヤナギは、バイオマス、野生動物の生息環境、二酸化炭素の固定だけでなく LSF に利用することで複数の利点が期待されている。そのため、ヤナギに関する先行研究の件数も群を抜いて多い(Heavey & Volk (2014)<sup>34)</sup>など)。

##### ハ) トウモロコシ

トウモロコシ(*Zea mays*)は、バイオ燃料として着目されている植物である<sup>36)</sup>。米国農務省によると、トウモロコシの生産量は食用を含めて年間4億トンにもなり、世界の輸出量の40%を占めている<sup>37)</sup>。ここで、LSF としてのトウモロコシに関する過去の研究事例を示す。

1984年頃、ミネソタ州を含む2つの州では、収穫し終えたトウモロコシの茎と葉に着目し吹雪対策効果を検証した。トウモロコシの茎の高さは約2mで、空隙率は50%の金属製の防雪柵と同等と考えて良い。方法は、トウモロコシ6~8列を2組、その間隔は50~60mで、冬季間刈り取らずに残して防雪効果を検証し、春に刈り取るものである。

吹雪捕捉量は1mあたり7.6トンで、およそ2.7mの防雪柵と同等である。また、セットバック(LSFから道路までの距離)は30mでは近すぎるため、最低46mは必要としている<sup>33)</sup>。

#### 二) LSF の吹雪捕捉量

LSF における樹種別の吹雪捕捉量について、樹高、空隙率、吹走距離、セットバックの条件を考慮した調査結果を以下に示す。

Heavey & Volk (2014)<sup>34)</sup>はニューヨーク州に造成され

ている LSF の吹雪捕捉量について、造成してからの年数、樹高、空隙率、吹走距離、セットバックの条件を調査し（表-9）、トウヒ、ヤナギ、トウモロコシの吹雪捕捉量を調べた（表-10）。

その結果、トウヒとヤナギに関して、造成から3年以内の LSF では吹雪捕捉量を、樹木を通り抜けた積雪量で除した値(Qc/Q)が1以上であることが示された。これは造成後すぐに防雪効果があることを示している。造成後4年から11年のトウヒとヤナギの LSF では Qc/Q が非常に大きいため、十分な吹雪捕捉量が得られている。特にヤナギの吹雪捕捉量が著しいことがわかる。なお、トウモロコシについては Tabler(1994)<sup>33)</sup>が指摘したセットバックよりも短く Qc/Q が1よりも小さい。設置条件を最適化すれば、トウモロコシも LSF として活用できると思われる。

以上のように、我が国でも利用されているマツ科だけでなく、LSF に利用されているヤナギ、トウモロコシ等も吹雪対策効果が確認されている。

表-9 調査対象の樹高、空隙率、吹走距離、セットバックと造成してからの年数

	樹高(m)	空隙率(%)	吹走距離(m)	セットバック(m)	年数
トウヒ属	2.9	27	855	52	3年以内
	4.0	42	400	37	4年~11年
ヤナギ属	1.9	86	339	27	3年以内
	5.0	47	383	27	4年~9年
トウモロコシ	1.3	0	340	71	1年

※Heavey & Volk (2014)<sup>34)</sup>のデータより作成

表-10 調査対象の吹雪捕捉量

	Qc(tons/m)	Q(tons/m)	Qc/Q	L(m)	D35(m)	D35/L	年数
トウヒ属	40	15	2.7	12	41	3.4	3年以内
	180	9	19.2	11	32	3.0	4年~11年
ヤナギ属	10	10	1.0	28	31	1.1	3年以内
	246	9	41.0	11	31	3.1	4年~9年
トウモロコシ	5	7	0.7	18	29	1.6	1年

Qc: 樹木に堆積した吹雪捕捉量、Q: 樹木を通り抜けた積雪量、Qc/Q: 吹雪捕捉量/樹木を通り抜けた積雪量の比、L: ドリフト（風下側のふきだまり）の長さ、D35: 標準的なセットバック、D35/L: セットバックとドリフトの比。

※Heavey & Volk (2014)<sup>34)</sup>のデータより作成。

## 2) 日本での LSF の適用性に関する考察

北海道における国道防雪林は、1976年から道北・道東を中心に造成が開始され、現在では210箇所にもなるが、総延長はおよそ80km<sup>3)</sup>と米国に比べればまだ短い。防雪林の一部にはヤナギも植栽されているが、これは防雪効果を意図したものではなく、防雪効果を期

待する基本林としては、アカエゾマツ、ヨーロッパトウヒ、トドマツなどが植栽されている（図-2）。

しかし、これらマツ科は、防雪効果が発揮されるまで成長に時間を要する。さらに、土層の確保や排水などにより、生育不良とならないよう生育基盤の整備も必要となる。最近の研究結果から、防雪林では密に樹木が植栽されているため、日照不足により下枝の枯れ上がりが見られることが指摘されている<sup>3)</sup>。

吹雪の現象は地表面に近いほど飛雪流量が多く、下枝の維持が必要であるが、下枝を維持するための間引きの作業の維持管理費用が負担となっている。

そこで、マツ科だけでなく低木等を組合せて LSF を一つのシステムとして造成することも有意義と考えられる。積雪寒冷地における在来種の生残率と成長速度を調査した結果<sup>38)</sup>によると、低木のエゾヤマハギやアキグミ等は生残率も成長速度も高いとある。生残率が高いこと、成長速度も早いこと、在来種であることを考慮すれば、エゾヤマハギやアキグミ等は LSF として適した低木であると考えられる。また、外来種のマツ科であるが、北海道の道路での導入実績があり、耐寒性、耐風性、耐雪性を有するモンタナマツも、低木の候補として考えられる。

また、造成においては米国を参考に、道路を管理・運営する一機関だけでなく、市区町村の自治体、地権者も含めた組織的な取り組みが、北海道における経済的便益も視野に入れた LSF の造成を促進させるきっかけになると考えられる。

今後、防雪林の造成・管理運営方法について、我が国でも米国での取り組みについて適用の可能性を検討することも有意義と考えられる。適用性の検討にあたっては、環境面で配慮が必要な場合を考慮した。外来種の選定の是非や、その植物が十分な市場性、供給可能性の有無など、社会資本整備に適するものであることの条件を満たすことが今後求められる。

### 3) 多様な植生を活用した補助対策のまとめ

本節では、米国における LSF に関する歴史から紐解き、最近の研究動向についてレビューを行った。樹種に着目してみれば、我が国でも利用されている常緑針葉樹だけでなく、寒冷地でも成長速度が著しいヤナギやトウモロコシなどが利用されている。また、米国では吹雪対策としての LSF だけでなく、費用対効果、バイオマスや野生動物の生育環境、二酸化炭素の固定、土壌の侵食抑制としても LSF は注目されている。加えて、一機関が LSF の造成・管理運営を実施しているわけではなく、市区町村の自治体や地権者も含めて LSF

の造成を促進させるという視点がある。このように、枯れ上がりの補助対策工法としてだけでなく、多様な植生を活用した吹雪対策には様々な付加価値が期待できるものと考えられる。詳細については文献<sup>39),40),41)</sup>を参照されたい。

### 3. 1. 2 防風ネット工による補助対策

#### 1) 資料調査

防風柵・防風ネットの構造と防風効果の関係において、抗力係数  $kr$  は防風効果に最も影響を及ぼす重要な指標である<sup>42)</sup>。ただし、抗力係数  $kr$  を直接的に推定することは容易ではなく、光学的空隙率（空隙率）が防風効果を評価する構造因子として用いられている<sup>42)</sup>。

防風ネットに関するメーカーの資料より、ネットの材質はポリエチレン、ナイロンが用いられており、樹脂でコーティングされている場合もある。防風・防雪・防砂を目的としたネットの空隙率は、約 30~50%であった。

また、資料調査をもとに、これらネットと単管(STK500、φ48.6×t2.4)、クランプを組み合わせた仮設のネット柵工について、構造計算の上の一般図を試作した(図-150)。生枝下高と樹高の関係(図-7)をもとに、柵高さは1.8mと2.7mとした。ただし、現地の地盤条件については、別途考慮する必要がある。今後、防雪林の補助対策として、現地試験等に基づいたネットの適切な材質と空隙率、立木を支柱と見立てネットを設置する応急的な対策案を検討することを考えている。

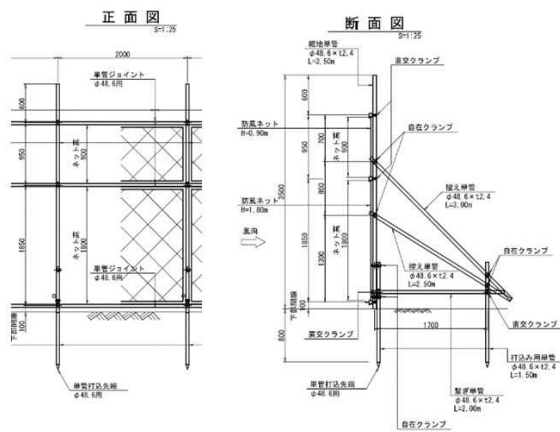


図-150 ネット柵工の一般図の例(高さ2.7mの場合)

#### 2) ヒアリング調査

北海道東部の一般国道44号浜中町に位置する茶内防雪林では、補助対策として防風ネット工が施工されている。そこで、道路管理者と維持管理業者に、補助対策工に関するヒアリング調査を実施した。



図-151 茶内防雪林で施工されているネット柵工

茶内防雪林は、平成元年度にアカエゾマツが植栽された。しかし、樹木の枯れ上がりに伴い、吹雪天候時に、雪粒子が樹木を通過して道路に到達するようになった。そのため、平成24~28年度にかけて、防雪林の風上側林縁または林内（道路用地の狭い区間）に防風ネット工（高さ3.2m）が設置された(図-151)。

当該箇所の防風ネット工は、高さ1.0mのネットパネルを3段とした構造で、最下段のパネルは遮蔽率が100%となっている。この構造は、現地での試行錯誤を経た結果である。現在の構成で、吹雪時の道路上における視程障害緩和や吹きだまり抑制等の防雪効果は発揮されている。

### 3. 2 防雪林が捕捉する吹きだまりの観測

下枝の枯れ上がりが見られる防雪林では、風雪の吹き抜けが生じていることが明らかになった。

補助対策工法による風雪の吹き抜けの低減が考慮されるが、補助対策工法の有無で防雪林が捕捉する飛雪量について示す必要がある。そこで、下枝の枯れ上がりが見られる防雪林にて吹雪イベント前後の積雪深を観測することで、吹きだまり量による防雪性能を評価し、防雪林が捕捉した吹きだまり量と最大風速との関係を整理する。

平成30年度では基準となるデータを得るため、補助対策工が設置されていない雄信内防雪林における吹きだまりの観測を実施した。

この観測では、3mスノーポールを防雪林横断面に17本設置し(図-152)、横断面の積雪深をスノーポールで読み取った。読み取りにはタイムラプスカメラ(BCC100, Brinno Inc.製)を配置し、24時間に1回の頻度で積雪深を解析した。また、吹雪の発生有無を推定するため、風向風速計を風上基準点に設置した。観測期間は平成30年12月9日から平成31年3月16日である。また、平成31年3月5日におよそ0.5mおき



に積雪深と、融雪後の平成31年4月16日に防雪林横断方向の地盤高を測角儀で測量した(図-153)。

一例として、吹雪が発生した平成31年2月4日から2月5日における気象データを図-154に示す。タイムラプスカメラで取得した画像は平成31年2月4日9時と翌5日9時である(図中矢印)。タイムラプスカメラ画像を取得した翌5日までの気象データを青色ハッチで示した。気象データから、吹雪発生前の気温は、 $-5^{\circ}\text{C}$ 以上、風速は $5\text{m/s}$ 以下であり、吹雪の発生条件に満たないが、雄信内テレメータから $3\text{cm/h}$ 程度の降雪が確認され、積雪深もそれに伴い増加している。また、4日12時頃から $10\text{m/s}$ を超える風速が観測され、気温 $-10^{\circ}\text{C}$ 以下まで低下し、降雪に伴い積雪深も変化している。



図-152 吹きだまり観測の概要図

- a) スノーポールとタイムラプスカメラの配置、
- b) タイムラプスカメラ画像

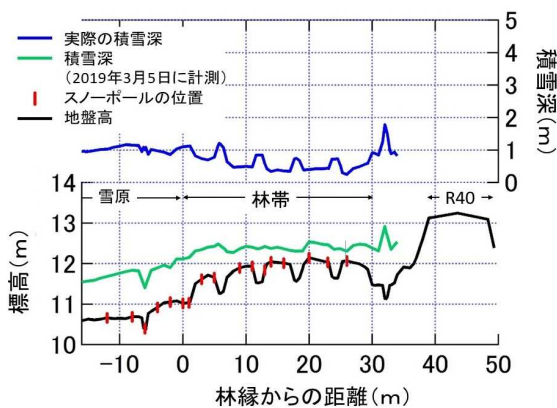


図-153 雄信内防雪林の積雪深(平成31年3月5日)と林縁からの距離

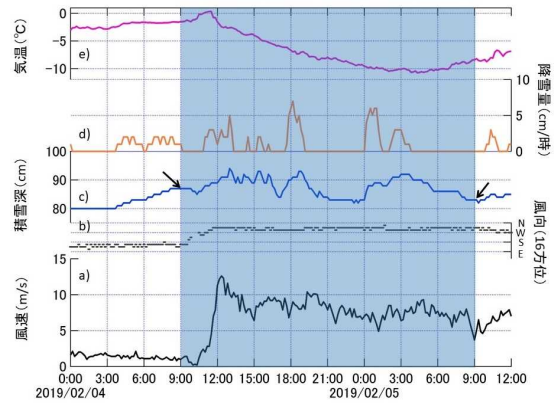


図-154 吹雪発生時の気象データ

- a, b) 基準点の風速・風向(10分平均値)、c, d, e) 雄信内テレメータ(10分平均値)の積雪深、降雪量、気温。図中の矢印はタイムラプスカメラで取得した画像の時刻(平成31年2月4日9時、翌日9時)。

タイムラプスカメラで撮影されたスノーポールの画像から、平成31年2月4日9時から翌5日の積雪深の変化を解析し、その結果を図-155に示す。防雪林の林縁から林内にかけて徐々に積雪深が低下している。風上側でより多くの飛雪を捕捉したと考えられる。

さらに、2月5日の積雪深と2月4日の積雪深との差から24時間で捕捉した積雪量が算出される(図-155赤斜線の領域)。

吹雪が発生した1イベント(24時間)で防雪林が捕捉した積雪量は、防雪林の延長 $1\text{m}$ あたり $1.5\text{m}^3$ である。たとえば、雪密度を $100\text{kg/m}^3$ とすれば、24時間で防雪林延長 $1\text{m}$ あたり約 $150\text{kg}$ の飛雪を捕捉し、仮に防雪林延長 $10\text{m}$ とすれば $1.5$ トンの飛雪を捕捉した計算となる。

ただし、ここでは降雪による積雪量は考慮されていない。そこで、図-156に示すように、防雪林が捕捉した飛雪捕捉量(吹きだまり量)を算出するため、風上の雪原に堆積した積雪量の差を算出した。

観測期間中の平成30年12月9日から平成31年3月16日において12回のイベントを解析し、イベント毎における飛雪捕捉量と最大風速の関係を図-157に示した。

その結果、最大風速が $6\text{m/s}$ 以上のとき、防雪林周辺に吹きだまりが形成され、最大風速が高ければ高いほど防雪林が捕捉した飛雪捕捉量は大きくなるのがわかる。風速 $5\sim 6\text{m/s}$ は吹雪の臨界風速<sup>24)</sup>であることを考えれば整合性があり、それ以下の風速については吹雪によらない量であることも示唆される。

言い換えれば、最大風速が 6 m/s 以下では防雪林周辺に吹きだまりは形成されず（吹きだまり量としてはマイナスである）、風が弱い時は防雪林の樹冠（枝葉や幹）が飛雪あるいは降雪を捕捉するので、防雪林周辺には吹きだまりは形成しないと考えられる。この場合、飛雪の捕捉ではなく一般的には降雪遮断<sup>43)</sup>などと言われる。

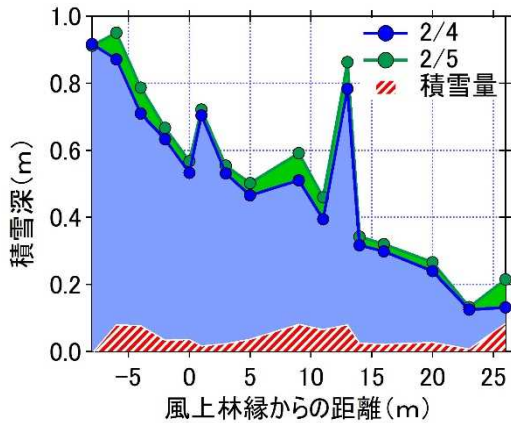


図-155 雄信内防雪林が1イベントで捕捉した飛雪量

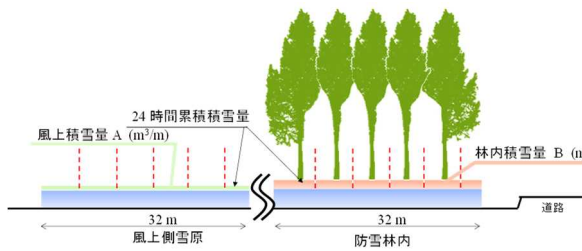


図-156 防雪林だけで捕捉した飛雪量（吹きだまり量）  
捕捉した飛雪量＝林内積雪量A－風上積雪量B  
(単位: m<sup>3</sup>/m)

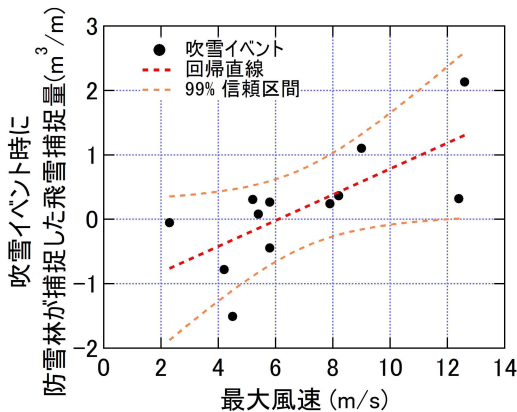


図-157 防雪林が捕捉した飛雪捕捉量と最大風速

以上のように、防雪林周辺における積雪深の経時変化を観測することで、防雪林が捕捉した飛雪捕捉量を定量的に評価することが可能であることを示した。本項の詳細は、文献<sup>44)</sup>を参照されたい。

### 3.3 補助対策実施箇所の現地計測結果・効果検証

前章より、下枝の枯れ上がりがみられる防雪林では、風下や林内に防風ネット柵や低木等の補助工法が施工することが望ましいことが明らかとなってきた。

補助対策が施工されている防雪林は複数箇所あるが、そのなかで、北海道開発局 釧路開発建設部 根室道路事務所管内の一般国道 44 号 浜中町 茶内防雪林に着目し調査、効果検証を行った。

2020年3月5日～6日に主に北海道の東部で通行止め等が発生した暴風雪時に、補助工法が導入されている茶内防雪林において、冬期観測による補助工法の効果と融雪後の樹木調査、および2次元吹雪シミュレーションによる冬期観測の再現について併せて報告する。

#### 3.3.1 現地観測概要

2020年3月4～7日9時の地上天気図を、図-158に示す。4日9時頃に日本海と本州南岸にあった2つの低気圧が、急速に発達しながら日本の東を北上し、6日9時までに根室の南東海上で1つに併合して中心気圧は978hPaとなったが、7日には千島近海に移動し、北海道東部を中心とした暴風雪は収束した。

日本道路交通情報センター(JARTIC)によると、上記期間における北海道内の一般国道および一般国道の自動車専用道路の通行止めは14路線27区間におよんだ<sup>45)</sup>。道路以外の交通機関では、JR北海道では5日に特急28本を含む125本が運休したほか、とちり帯広空港では5日に定期便が全便欠航となった。

#### 1) 茶内防雪林の現況

図-159に示す茶内防雪林(延長約730m)は、平成元年度から平成5年度に植栽されたアカエゾマツ7～8列(列間2m、千鳥配置、林帯幅約15m)で構成され、そのうち1列は間引き済となっている。

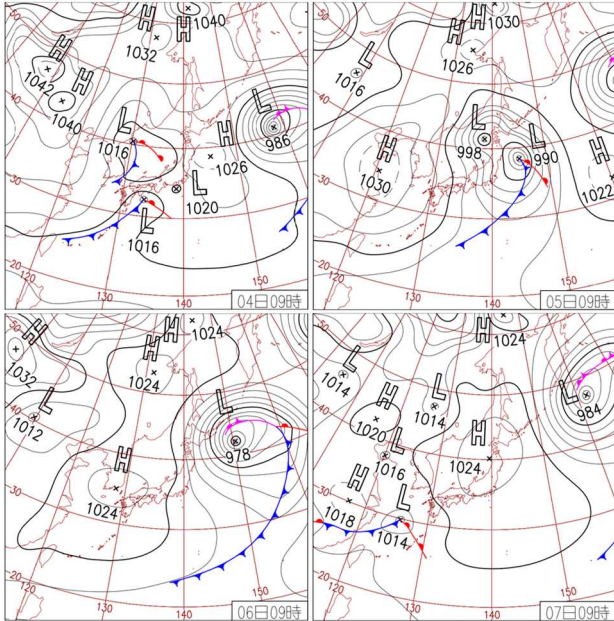


図-158 2020年3月4日～7日の9時の地上天気図

アカエゾマツの下枝の枯れ上がりに伴う防雪対策として、平成 24～28 年度に防風ネット柵(高さ 3.3m)が、防雪林の風上側林縁(図-160)および林内中央部(図-161)に施工された。その際、併せて風上側にモンタナマツ1列とアカエゾマツの幼木2列が追加植栽された。



図-161 林内中央部の防風ネット柵 (KP66.590～66.700)

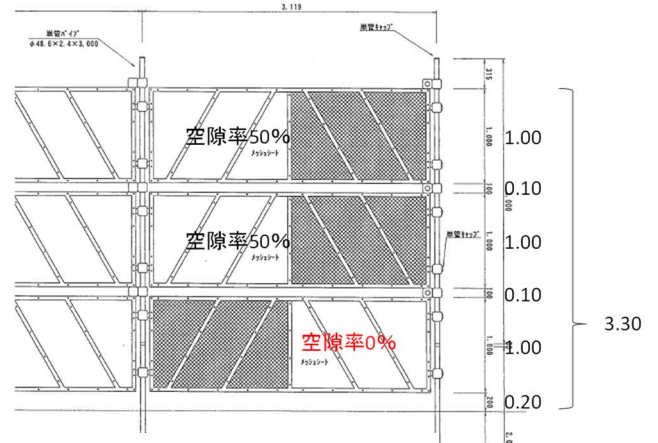


図-162 防風ネット柵図面

防風ネット柵は、高さ 1.0m 幅 3.2m のネットパネルを 3 段組み合わせせた構造で高さ 3m となる。最下段のパネルは空隙率 0% であり、上部 2 段は空隙率 50% である(図-151、図-162)。

道路管理者と維持管理業者へヒアリングしたところ、防風ネット柵の構造は現地で試行錯誤を経た結果であり、吹雪時の道路上における視程障害緩和や吹きだまり抑制等の防雪効果を発揮している。との回答を得たことから、防風ネット柵による防雪効果が期待される。

## 2) 観測方法

観測箇所は、図-159 に示す道路 L 側の 230m 区間とした。既設の防風ネット柵の位置を参考に、観測の測線を設けた。

1 箇所目は図-163 に示す KP66.548(測線 1)、2 箇所目は、図-164 に示す KP66.631(測線 2)である。以下に、各観測方法を示す。

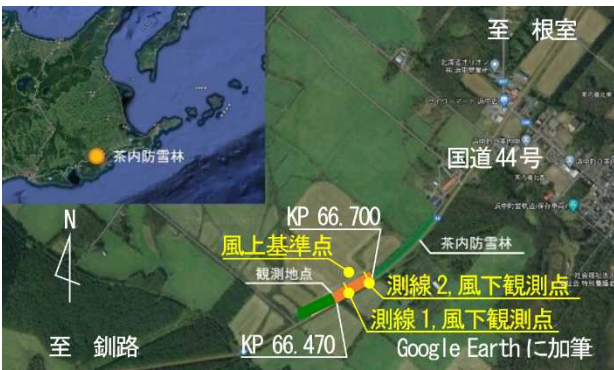


図-159 茶内防雪林および茶内防雪林の観測箇所



図-160 風上側林縁の防風ネット柵 (KP66.470～66.590)

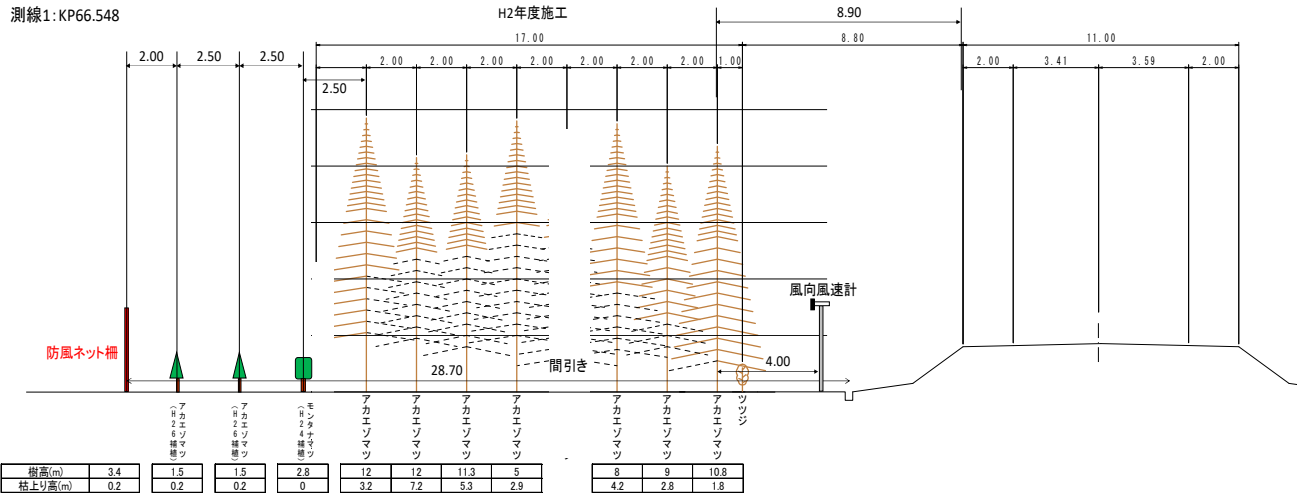


図-163 測線1 (KP66.548) の横断図 (防雪林の風上側林縁に、防風ネット柵が施工)

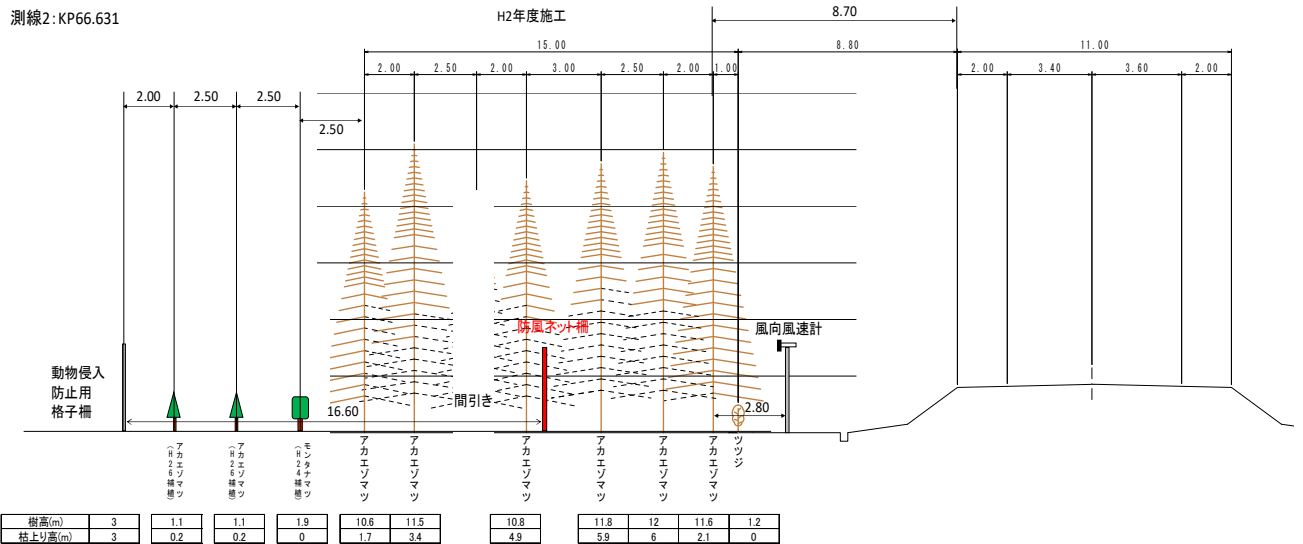


図-164 測線2 (KP66.631) の横断図 (防雪林の林内中央部に、防風ネット柵が施工)

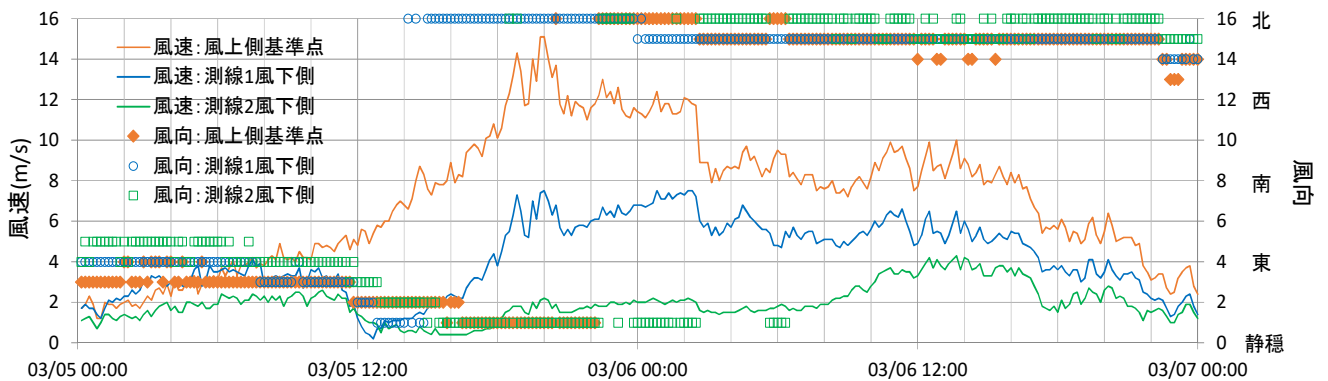


図-165 茶内防雪林の風向風速 10 分平均値 (2020 年 3 月 5 日 0 時から 7 日 0 時)

## ア) 定点気象観測

定点気象観測の期間は、2019年12月上旬から2020年3月下旬である。

KP66.590 付近の道路 L 側盛土肩から風上 65m(風上側林縁の防風ネット柵から 30m)を基準点とした。

測線 1 と測線 2 の風下側林縁、すなわち道路 L 側盛土肩の堆雪帯に、風下観測点を設けた。

風向風速の観測には風向風速計(Young Co.製)を用い、10 分平均値で計測した(図-165)。各測線には、紅白ポールを 2~3m 間隔で設置し、測線付近に設置したタイムラプスカメラ(BCC100,brinno Inc.製)で得られた画像から積雪深を読み取った。

得られた風速データのうち、防雪林の風上基準点の風速値を分母、防雪林縁の風下観測点(測線 1 と測線 2) の風速値を分子とし、風速比として整理した(式(16))。たとえば、防雪林を通過し減風された場合は、風速比 1.0 より小さい値となる。

$$\text{風速比} = \frac{\text{風下(観測点)の風速 (m/s)}}{\text{風上(基準点)の風速 (m/s)}} \quad (16)$$

気温は、茶内防雪林(標高 47m)から東に約 8.2km 離れた榎町アメダス(43°07'12", 145°06'36": 標高 2m)の値を入手し、気温減率 0.6°C/100m で茶内防雪林の標高に補正した値を用いた。

降雪時の降水強度は、北北西に約 6.1km 離れた茶内原野アメダス(43°10'24", 144°58'00": 標高 70m)の値を入手し、降雪の捕捉損失<sup>42)</sup>を考慮しないものとして扱った。

## イ) 吹雪時の現地概査

吹雪開始時の 2020 年 3 月 5 日 13 時頃、および吹雪最盛期後の 6 日 10 時頃に観測箇所全体を概査し、測線 1 と測線 2 にて測深棒を用いて積雪深を計測した。

さらに、各測線の防風ネット柵とモンタナマツの風上側と風下側、ならびにアカエゾマツ成林内にて、角型密度サンプラー(100cm<sup>3</sup>)を用いて、新雪層の高さ 10~20 cm ごとに複数回積雪密度を観測した。

測線 1 と測線 2 について、吹雪最盛期後の 2020 年 3 月 6 日 10 時頃に計測した全層の積雪深と、吹雪開始時の 5 日 13 時頃に計測した旧雪層の積雪深または吹雪開始前の 4 日に記録された画像から読み取った積雪深の差分を、新雪層の積雪高さとした。

なお、得られた新雪層の積雪高さから、降雪による積雪深増加を引いた値を、吹きだまり量(m<sup>3</sup>/m)として整理した。

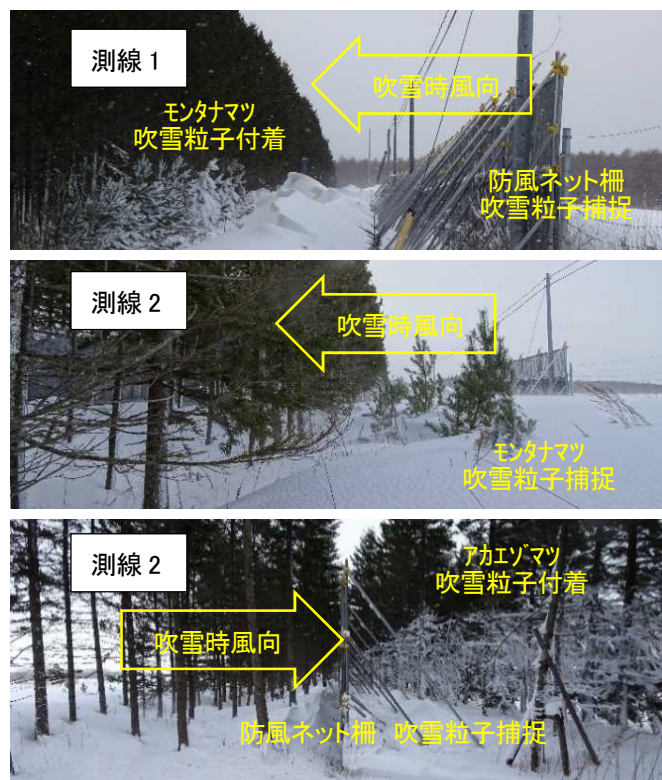


図-166 現地概査結果 (2020年3月6日10-11時頃撮影)

## 2) 現地概査結果

現地概査の結果、防風ネット柵とモンタナマツ付近で吹雪粒子を捕捉し、防風ネット柵の風下側の樹木(測線 1 はモンタナマツ、測線 2 はアカエゾマツ成木)に、吹雪粒子が付着していた(図-166)。

防風ネット柵の背面に形成された雪丘より風下側では、顕著な吹きだまりは見られなかった。ただし、KP66.590 付近の防風ネット柵の端部では、斜風時(風向が北東~北)の吹雪により、アカエゾマツ成林の最も道路に近い列まで吹きだまりが確認された。

その際、成林内の間引き済の箇所では吹き払われていた(図-163を参照)。

また、角型密度サンプラーでの測定結果をもとに、新雪層の平均積雪密度を求めた(表-11)。

測線 1 と 2 における、3 月 6 日 10 時と旧雪層の積雪深を図-167 に示す。

各測線における積雪深増加量と現地概査の結果から、降雪による積雪深増加想定線を図-167 に付記し、吹きだまり量を求めた結果、測線 1 は防風ネット柵付近で 12.9 m<sup>3</sup>/m、測線 2 は防風ネット柵付近が 4.4 m<sup>3</sup>/m、モンタナマツ付近が 2.1 m<sup>3</sup>/m、計 6.5 m<sup>3</sup>/m となった。

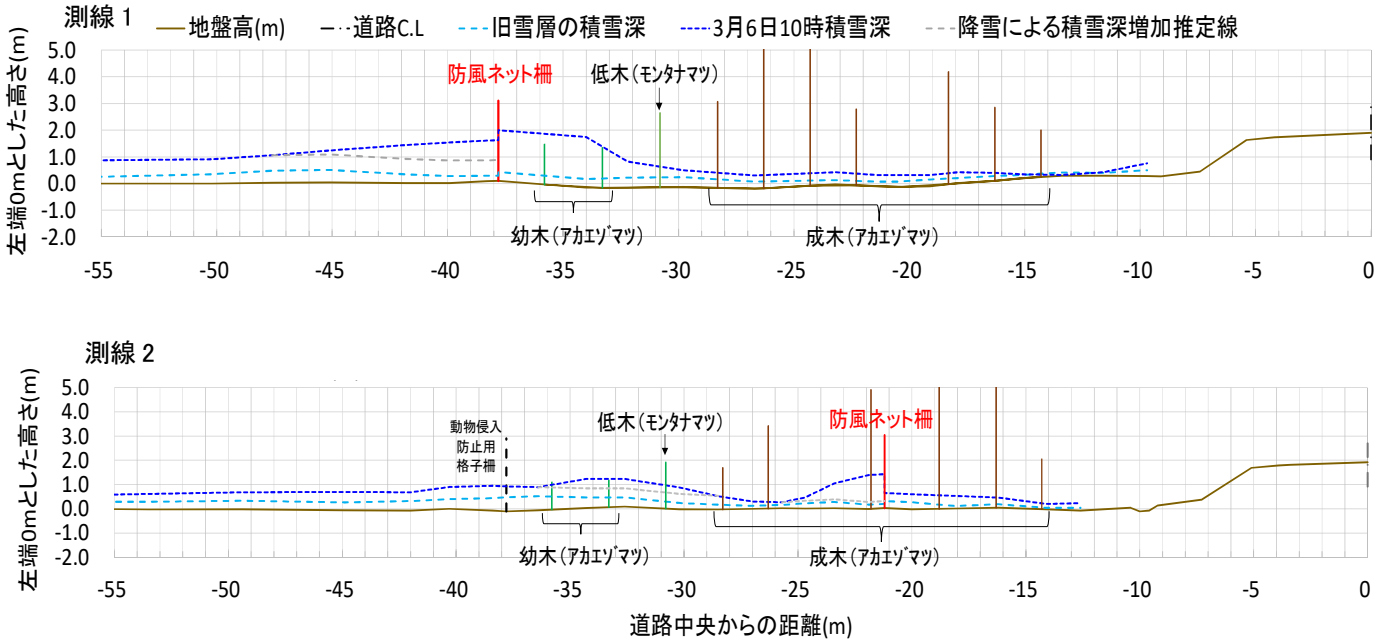


図-167 吹雪最盛期後の2020年3月6日10時と旧雪層の積雪深、降雪による積雪深増加推定線(上図測線1、下図測線2)

表-11 新雪層の平均積雪密度 (kg/m<sup>3</sup>)

	柵		モンタナマツ		アカエゾマツ
	風上側	風下側	風上側	風下側	成林内
測線 1	205	168	—	—	182
測線 2	181,189	146	245	197	150

### 3. 3. 3 考察

#### 1) 吹雪量の推定

吹雪の程度を表現する方法として、本稿では簡便な吹雪量を用いる。

吹雪量は、風向に対して直交する単位幅を単位時間に通過する雪粒子の質量(g/m/s)<sup>47)</sup>である。

竹内ら<sup>48)</sup>による気温と風速による吹雪の発生条件のうち、低い地吹雪の発生条件(曲線I)について、7m高さの風速を  $V_7$ 、気温を  $T$  として読み取ると、式(17)が得られる。

$$V_7 \geq 11.143 \times (3.0 - T)^{-0.389} \quad [T < 3.0] \quad (17)$$

式(17)の吹雪の発生条件を満たす場合に、大宮ら<sup>49)</sup>による式(18)により吹雪量  $Q$ (kg/m/s)を推算した。

$$Q = 1.42PhV_7 + 0.00053V_7^{4.6} \quad (18)$$

ここで、 $Ph$ は降雪時の降水強度(mm/h)である。式(16)に代入する気象データは、式(18)で7mにおける風速  $V_7$ を計算し、茶内防雪林高さ3mの風上側基準点を対数則の式(19)<sup>11)</sup>によって、高さ7mとしたものである。

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (19)$$

ここで、 $u(z)$ 、 $u_*$ 、 $\kappa$ 、 $z$ 、 $z_0$ はそれぞれ、基準点の高さにおける風速(m/s)、摩擦速度(m/s)、カルマン定数(=0.4)、風速を計測した高さ(ここでは3m)、雪面における地表面粗度( $1.5 \times 10^{-4}$  m)<sup>50)</sup>である。

前述したように、気温  $T$ は榊町アメダスの補正值、降雪時の降水強度  $Ph$ は茶内原野アメダスの値とした。

式(17)より吹雪の発生は3月5日12時から6日20時までと推定され、式(18)より吹雪量は累計3500 kg/mと推算された。3月5日12時から雪況観測を実施した6日10時までの吹雪量は、累計3,085 kg/mと推算された。

2) 防風ネット柵とモンタナマツの吹雪捕捉率の試算

現地概査で得られた各測線の防風ネット柵とモンタナマツ付近の吹きだまり量(m<sup>3</sup>/m)に、各測定地点の新雪層の平均積雪密度(kg/m<sup>3</sup>)を乗じ、吹雪量(kg/m)に換算した。

つぎに、3月5日12時から6日10時までの累計3085kg/mと比較し、吹雪捕捉率を試算した。その結果を表-12に示す。

なお、測線2の防風ネット柵の風下側は、アカエゾマツ成木の高さ0~5m程度に吹雪粒子が付着していたため、表-12に示した値以上に捕捉しているものと推察される。

表-12 換算吹雪量(kg/m)と吹雪捕捉率(%)の推定

	防風ネット柵	モンタナマツ	防風ネット柵
	風上側林縁	風上側林縁	防雪林内
測線1	2,311kg/m 74.9%	—	—
測線2	—	460kg/m 14.9%	750kg/m 24.3%

3. 3. 4 吹雪シミュレーションの試行

1) 現地観測結果の再現

測線1を対象に、2次元吹雪シミュレーション<sup>51)</sup>を利用して観測結果を再現した。

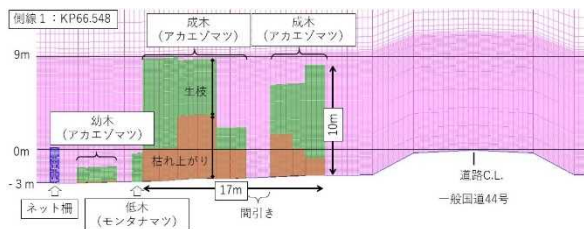


図-168 吹雪シミュレーションのメッシュ画像

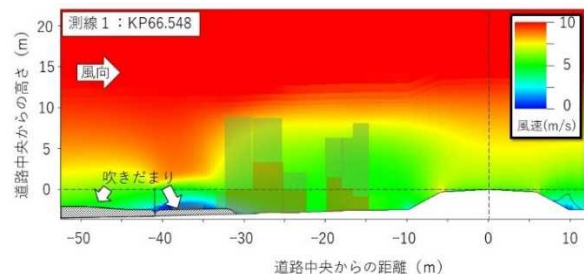


図-169 測線1の現地観測結果を再現した吹雪シミュレーションによる風速と吹きだまりの分布

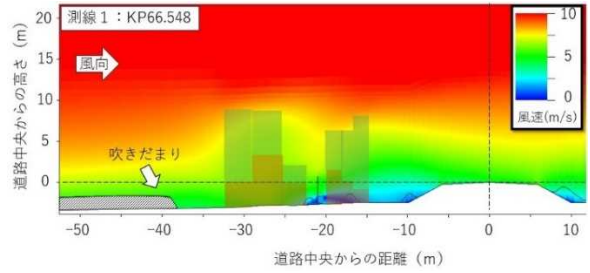


図-170 測線1の補助工法を防雪林の間引き済み箇所に設置したときの吹雪シミュレーションによる風速と吹きだまりの分布

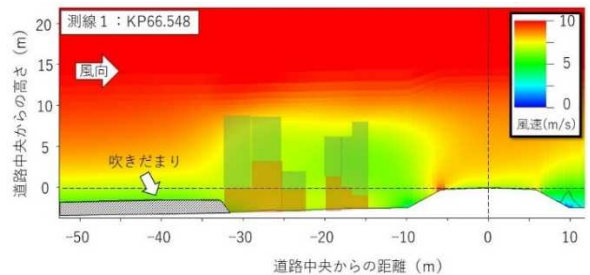


図-171 測線1の補助工法(防風ネット柵・モンタナマツ低木・アカエゾマツ幼木)を除いたときの吹雪シミュレーションによる風速、吹きだまりの分布

図-163を基に、測線1の諸条件(地盤、防風ネット柵、枯れ上がり高さ、樹高)のメッシュ値を作成した(図-168)。気象条件は、風速7.0m/s、降雪強度5.0mm/hとし、演算時間は24時間とした。

吹雪シミュレーションの結果を図-169に示す。風上基準点と風下観測点の風速(共に地面高さ3m)を抽出し、式(17)より風下観測点の風速比は0.74であった。

現地観測結果の風速比は0.66であったことから、概ね現地の観測結果を再現していると考えられる。

一方、吹きだまりはアカエゾマツ成木まで分布しており、現地観測による吹きだまり分布の結果(図-167)と類似した。

ただし、防風ネット柵付近の吹きだまりの捕捉による積雪深の増加の細部までは再現されていないことも分かった。

3) 防風ネット柵の配置変更による効果

上述の測線1風上林縁から、図-167の測線2を参考に成木内における間引き済みの箇所に、防風ネット柵の配置を変えて効果を検証した。

防風ネット柵を移設した場合の計算条件は、現地を再現したときと同じものとした。その結果、風速および吹きだまり形状に差異が見られた(図-170)。

式(17)より風下観測点の風速比を求めたところ、風速比は0.53となった。

図-169の風速比は0.74であったことから、防風ネット柵を移設したことにより、約30%の風速が低減される効果があると見積もられる。

#### 4) 補助工法がない場合の効果

茶内防雪林に施工された補助工法の効果を推定するため、図-163に示される平成24年度以降に設置・植栽された防風ネット柵、幼木(アカエゾマツ)と低木(モンタナマツ)がない場合について計算し、その結果を図-171に示す。

計算条件は、現地を再現したときと同じものとした。その結果、風速および吹きだまり形状に差異が見られた。式(17)より風速比を求めたところ、風速比は0.90となった。

図-169の風速比は0.74であり、補助工法を除外したことにより約20%の風速が増すこととなった。

以上から、吹雪シミュレーションの結果ではあるが、茶内防雪林の補助工法は適切なものと思われ、とくに測線2のように成木内に防風ネット柵を設置する方がより風速の低減効果が高いものと期待される。

なお、現地観測の結果から、測線2の風速比も吹雪シミュレーション結果と同程度であった。

### 3. 3. 5 補助対策実施箇所の現地計測結果・効果検証結果についてのまとめ

2020年3月5日～6日の暴風雪時に、補助柵が導入されている一般国道44号浜中町茶内防雪林で現地観測を実施した結果、当該期間における現地の推定吹雪量は約3,500 kg/m、補助工法により吹雪量の約40～75%が吹きだまりとして捕捉された。

併せて、吹雪シミュレーションを利用し、現地観測を再現したうえで補助工法がない場合と比較し、風速低減効果を見積もった。

その結果、茶内防雪林における補助工法が適切であることを確認し、加えて現地でも設置されているように成木内に防風ネット柵を設置する方がより効果が高いものと想定された。

### 3. 4 防風ネット柵による国道の視界不良軽減効果

前述した検討結果を踏まえ、本章では、防雪性能が低下した道路防雪林へ補助対策を施した場合の効果を確認する。

枯れ上がりが生じている防雪林に、ネット柵による補助工法を施すことで、国道上での視界不良の差異、すなわち吹雪による視界不良が軽減している効果を確認した。

吹雪発生時を抽出し、視界不良の差異がわかる、写真による判別を試みた。これは、武知ら<sup>52)</sup>による調査で、道路画像でも、ドライバーの感じている「視程障害度」が評価できるためである。

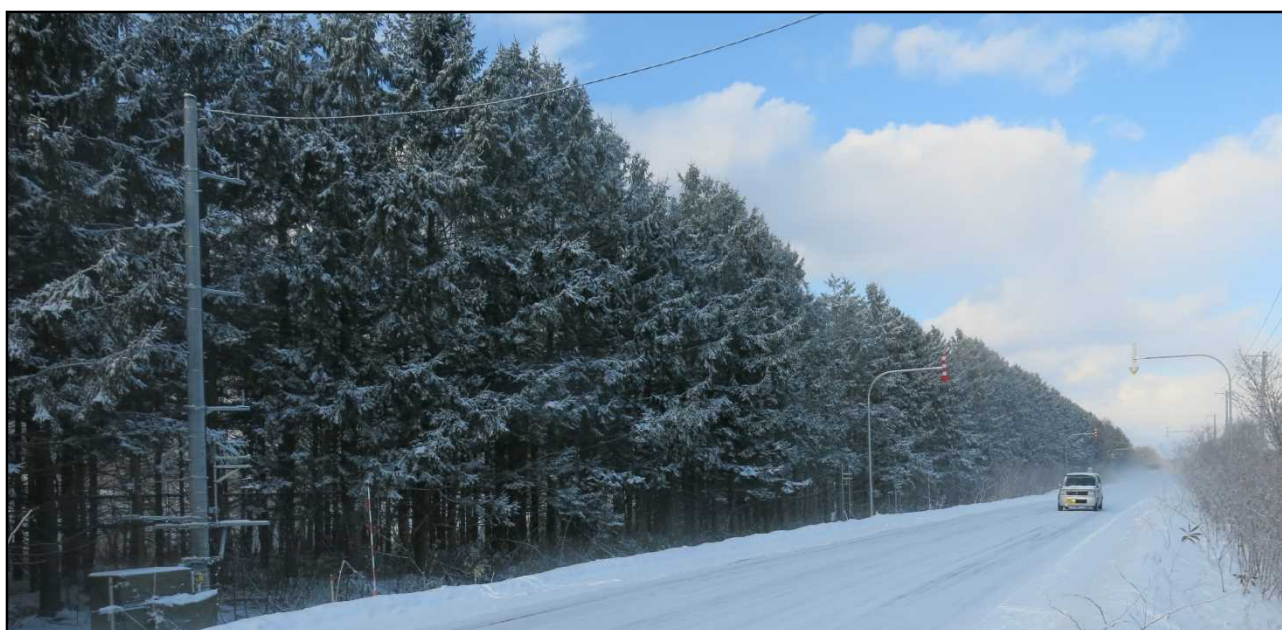


図-172 雄信内防雪林の全景と計測機器設置状況(写真左側電柱に風速計などを設置:令和3年1月撮影)





図-173 雄信内防雪林の位置

表-13 雄信内防雪林の概要

路線	一般国道40号
起点	BP=178,226
終点	EP=183,529
路線延長	5,303m
左林帯延長	4,440m
右林帯延長	2,291m
防雪林延長	6,731m
林帯幅員	30m
落葉広葉高木	ドロノキ ナナカマド ナカバヤナギ ヤチダモ
常緑針葉高木	アカエゾマツ オウシュウトウヒ トドマツ バンクシャーマツ

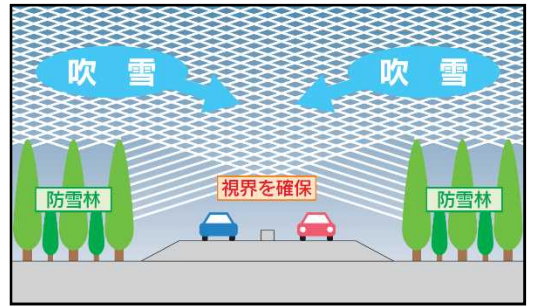


図-174 両側防雪林の視界不良緩和効果<sup>54)</sup>

雄信内防雪林は、路線番号 E5「幌富バイパス」の幌延インターチェンジより、南に約 15km の距離にある、一般国道 40 号 天塩町に位置（図-173）している。

### 3. 4. 2 雄信内防雪林の概況

昭和 56 年度から平成 16 年度にかけて段階的に整備された林帯で、樹種構成などを表-13 に示す。

吹雪による、道路上での吹きだまり防止効果、風速を弱めることによる道路の視界不良軽減効果<sup>53)</sup>、視線誘導効果、良好な地域景観の形成などに寄与することであり、図-174 に示す<sup>54)</sup>ように林帯が道路の両側に設置されている箇所もある。平成 21 年度に維持管理手法の検討<sup>55)</sup>を行っているが、防雪林内の樹木の成長に伴い、一部の区間では、樹木同士の相互干渉による生育不良が生じている箇所が見受けられる<sup>56)</sup>。

これら生育不良による防雪・防風効果の機能低下で、防雪林内で風速が弱まらず、雪が舞い上がり、国道上では、視界不良が生じている可能性がある。

### 3. 4. 3 雄信内防雪林の防雪効果の一事例

生育不良が発生している防雪林の一部の区間では、防雪・防風効果が低減している箇所が見受けられる

しかし、路線全体としてマクロ的にとらえ、防雪林の機能に着目すると、国道を安全に通行するための視界不良の軽減効果は高いと考えられる。以下に、その事例を示す。

### 3. 4. 1 調査箇所

本章では、国土交通省 北海道開発局 留萌開発建設部 羽幌道路事務所にご協力いただき、一般国道 40 号 天塩町 雄信内防雪林（図-172）の一部で、林帯下枝の枯れ上がりを原因とした防雪機能の低下が危惧される箇所を試験フィールドとし、補助柵の設置を行った結果、吹雪による視界不良が改善される可能性が示唆されたため、以下のとおり報告する。



図-177 図-175 の視界良好な状況



図-175 防雪林未整備箇所での視界不良発生状況



図-176 図-175 と同時刻の林整備箇所の視界良好な状況

図-175、176 は、令和3年2月3日 午前6時40分頃の雄信内防雪林の状況で、一般国道40号を旭川へ向かい走行した観測車両から撮影したものである。

図-175 は、KP=180.197 付近、路側にテレメーター機器が設置され、防雪林が未整備の箇所である。

強風により雪が舞い上がり、車両のドライバーの視線の高さで視界不良が発生し、走行が危険な状況となっている。なお、同箇所同日で視界不良が発生していない時の状況を、図-177 に示す。

一方、図-176 は、テレメーター機器設置箇所より数百メートル旭川側で、防雪林が設置されている箇所を、同日ほぼ同時刻に、撮影したものである。

防雪林は、風を弱め、雪が舞い上がることを防ぐ<sup>22)</sup>。よって、図-176 では、視界良好で、路面状況や対向車両も視認可能である。本事例からも、防雪林の防雪・防風効果のポンシヤルの高さが伺える。

### 3. 4. 4 過年度の天塩町雄信内の気象概況

本対策を検討するにあたり、平成27年度から令和2年度までの過去6年間、11月1日から3月31日までの冬期における雄信内防雪林近傍での気象概況を検証した。

本対策を施工する箇所から約700m南東方向に、北海道開発局が管理している、道路テレメーター機器が設置されている。

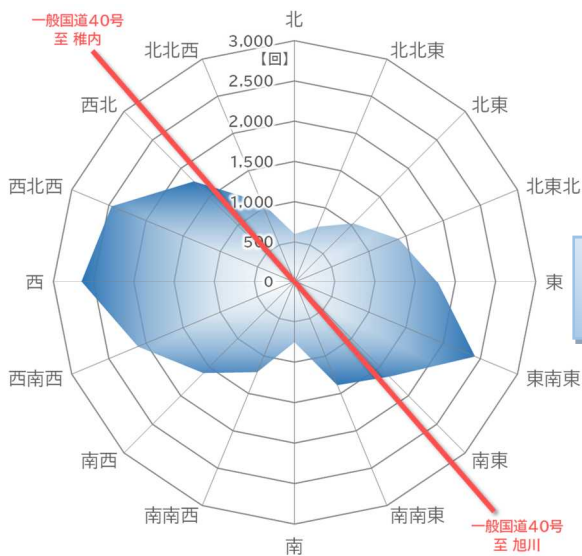


図-178 雄信内テレメーターで計測された冬期の風向

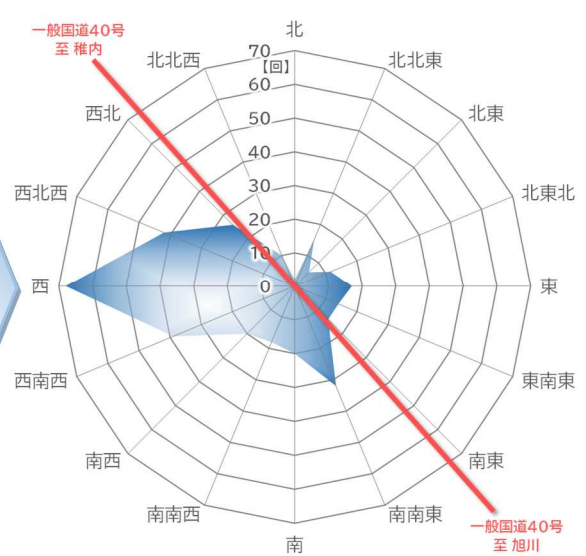


図-181 視界が500m以下に低下した際の風向

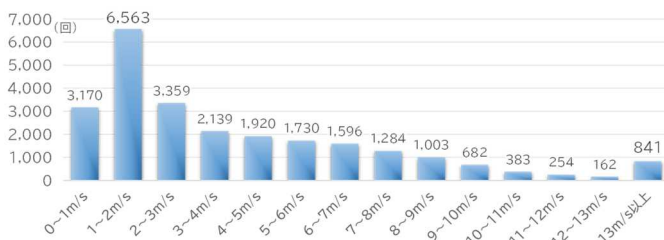


図-179 2015年度から2020年度までの冬期の風速別発生頻度



図-182 視界不良が想定される年度別の回数

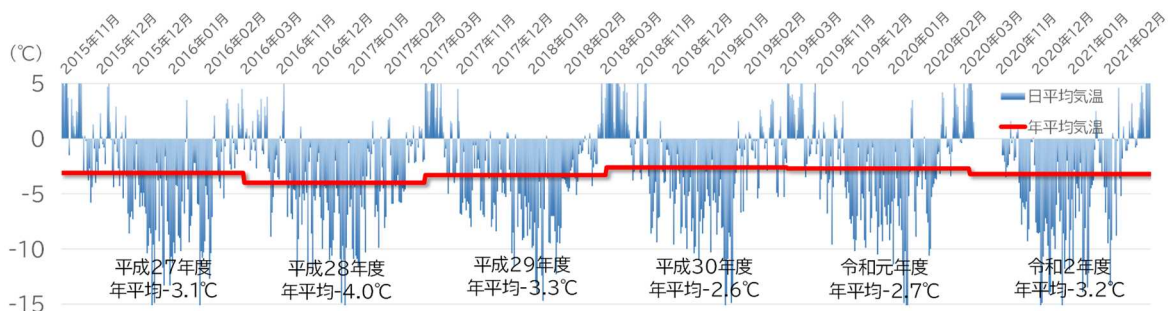


図-180 雄信内テレメーターで計測された冬期の日平均気温

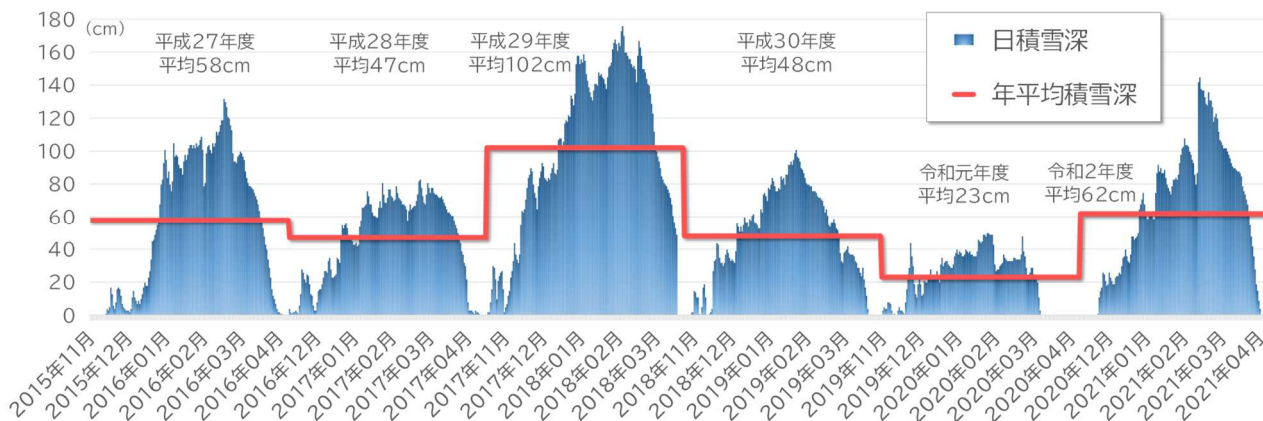


図-183 雄信内テレメーターで計測された冬期の日積雪深と年平均積雪深

道路の現場状況、周辺環境状況には大きな差異はなく、気象条件が大きく乖離することはないと仮定し、道路テレメーター雄信内局の1時間平均値のデータを用いて、雄信内の気象概況を整理した。

風向を図-178、風速の分布を図-179、気温を図-180に示すが、冬期間全体では、西風または東南東の風向、風速は1~2m/sが多く、年平均気温は約-3℃である。

その中から、吹雪などで視界不良が生じた可能性が高い、視界が500m以下に低下した際の風向データを図-181、年度別発生回数を図-182に示す。

視界不良が生じた場合、西風が多いことが明らかとなった。しかし、その際の風速分布は、図-179と同様な傾向で、顕著な特徴は認められなかった。

図-183に日積雪量を示すが、令和2年度が少雪であった他は、平成29年度が最も多く年平均102cm、他の年は約40~60cmの日積雪量であった。

なお、雄信内防雪林では、悪天候時に、図-184、185に示すような視界不良が発生し、路面や、他の車両が視認できず、車両の走行が危険<sup>58)</sup>である可能性が窺える。



図-184 視界不良状況1 (令和3年1月20日撮影)



図-185 視界不良状況2 (令和3年2月4日撮影)



図-186 林帯内の枯れ上がり状況(国道と平行方向に撮影)



図-187 林帯の疎な状況(国道から林に向かい撮影)

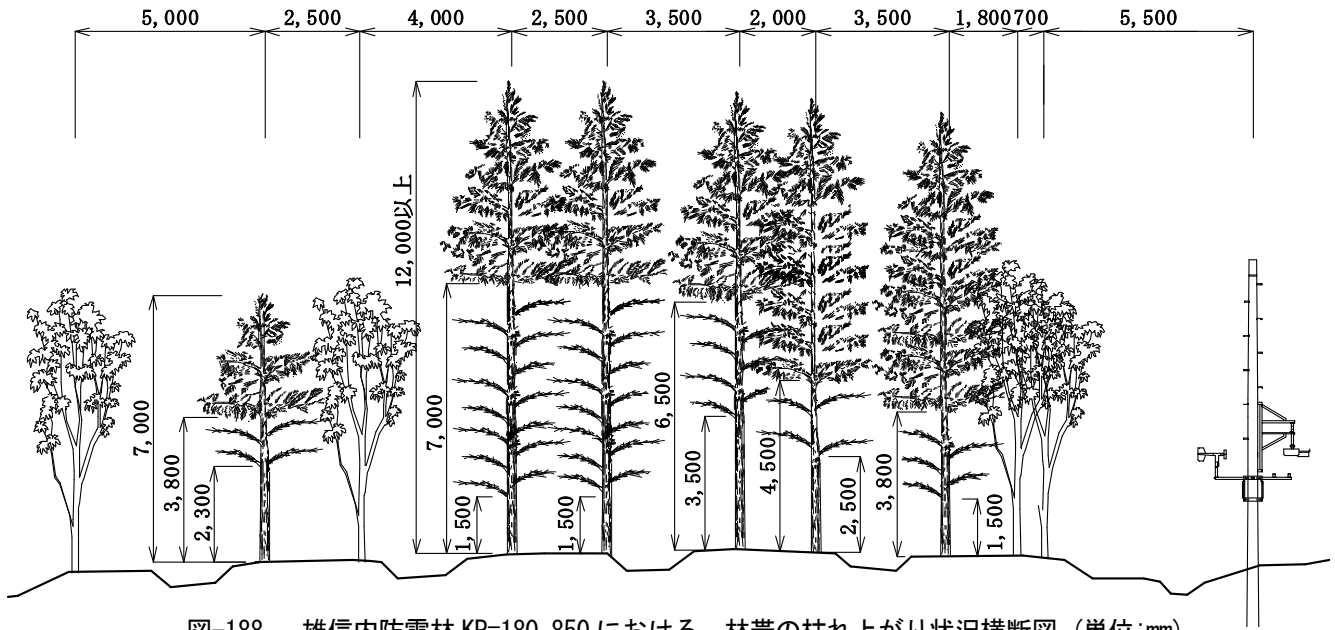


図-188 雄信内防雪林 KP=180.850 における、林帯の枯れ上がり状況横断面図（単位:mm）

### 3. 4. 5 雄信内防雪林内の枯れ上がり状況

下枝の枯れ上がりが進行している状況を、図-186、187 に、令和 2 年度に樹木調査を行った KP=180.850 の枯れ上がり状況横断面図を図-188 に示す。

林帯中央部分では、高さ 6.5m から 7.0m まで枯れ上がりが進行し、下部は葉がなく枝のみの疎な状態となり、風が吹き抜けていることが想定される。

背後地は、図-189 に示すように、見渡す限り平坦な草原であり、冬期は天候が悪化すると、強風により雪粒子が舞い上がり、図-190、191 に示すホワイトアウトが発生する可能性が高い。

視界 100m 程度では、前を走行する車両のテールライトが見えない場合があると同時に、人によっては「前がまったく見えない」と感じることもある<sup>59)</sup>。

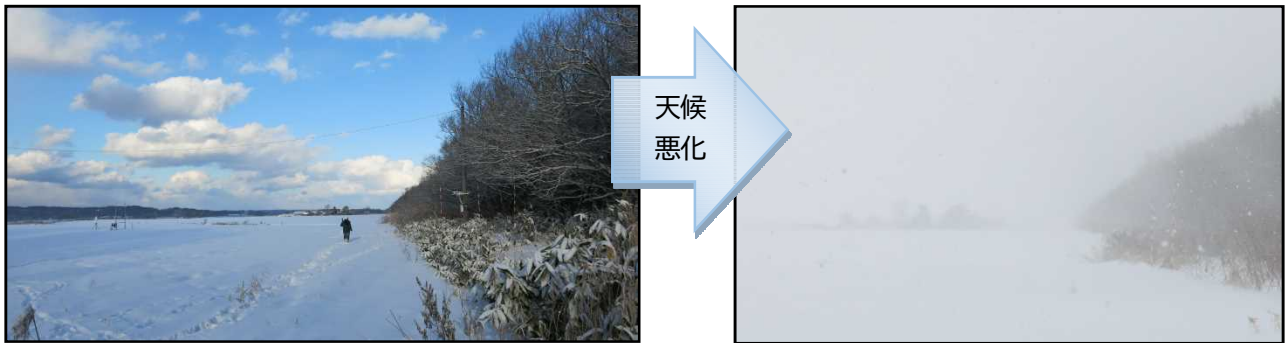


図-189 雄信内防雪林の背後地の状況（左写真：晴天時、右写真：天候が悪化し地吹雪が発生している状況）



図-190 視界不良状況 3（平成 29 年 3 月 5 日撮影）

図-191 視界不良状況 4（平成 30 年 1 月 24 日撮影）

3. 4. 6 補助柵：防風ネット柵の検討・設置

前述したとおり、風上や林内に防風ネット柵などの補助柵の追加設置、あるいは低木樹を植樹することで、防雪・防風効果が改善される可能性が高いことが明らかとなっている。

雄信内防雪林内は、枝が張り出しているため油圧ショベルなどの建設機械による施工は困難である。よって、人力で設置可能である、単管パイプを組み合わせた防風ネット柵を選定した。

防風ネット柵の諸元を表-14、詳細図を図-192 に示すが、設計風速を検討するため、平成 27 年度から令和元年度まで 5 年分のテレメーター雄信内局データを確認したところ、最大風速は、平成 29 年 3 月 28 日 19 時に観測された 19.0m/s であった。

そこで、鋼部材の外力に対する機械的強度の安全率 1.5 を準拠<sup>60)</sup>し、設計風速は 30.0m/s と設定した。

ネットは、入手性や価格などを考慮し、一般的に販売、使用されている、充実率 50% の防風ネットとした。

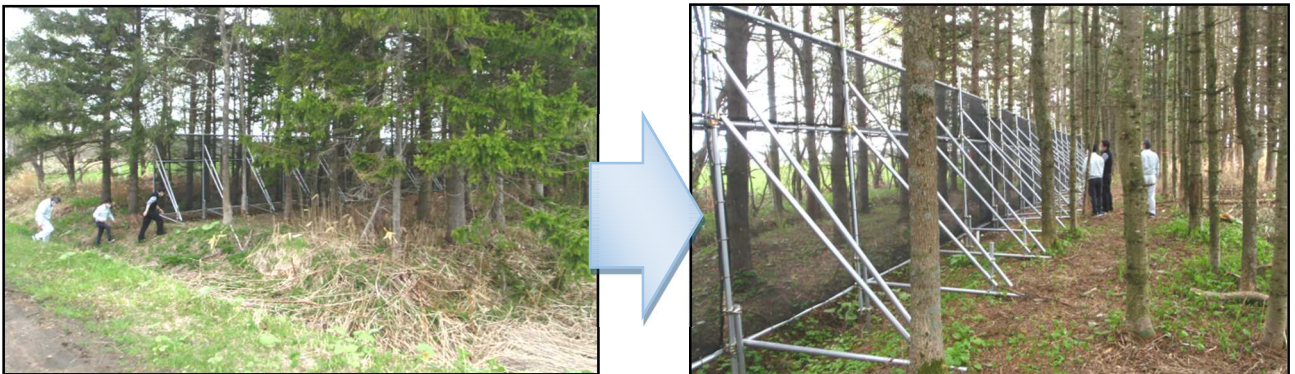


図-194 林内へ設置完了した防風ネット柵（左写真：林帯中央部設置状況、右写真：柵に近接し撮影）

表-14 防風ネット柵の諸元

柵高	3,050mm
スパン	2,000mm
ネットサイズ	1,900* 900mm 1,900*1,800mm
材質	ポリエチレン
規格	ラッセル網
目合	1.8~2.7mm
充実率	50%
ネット色	ブラック
加工	ターボリン補強
縦引張強さ	1,380N
横引張強さ	1,690N
設計風速	30m/s

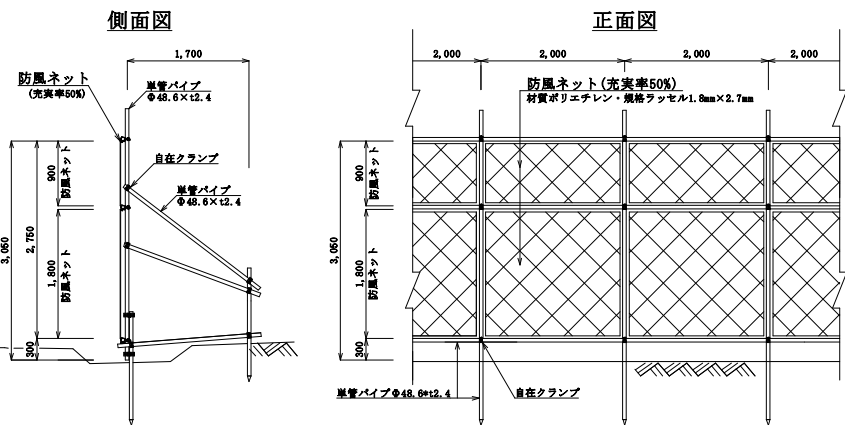


図-192 防風ネット柵の詳細図（単位:mm）

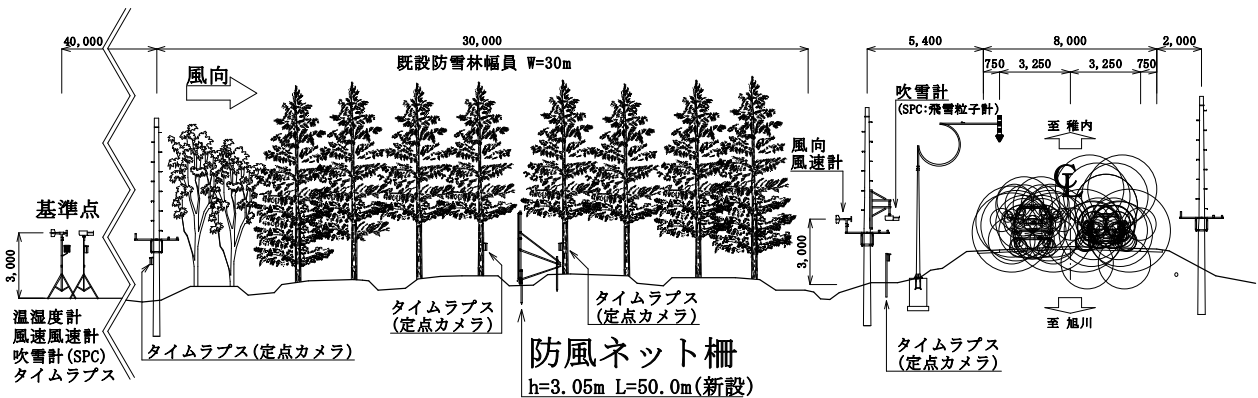


図-193 防風ネット柵の設置位置、および計測機器の設置位置を示した横断面図（単位:mm）

柵の設置位置は、防雪林内の現地調査を行い、樹木の繁茂状況などを確認し、枝払いは必要最小限、かつ既設林に悪影響を及ぼさない箇所を検討した結果、図-193の横断図、および図-194に示すように、林内中央部に設置した。

設置延長は、柵の有無による視界不良の発生有無や、発生状況の差異の判別が可能となることが期待できる $L=50.0\text{m}$ とした。

### 3. 4. 7 防雪林内の雪粒子捕捉状況

図-189に示すように、防雪林の背後地は平地である。武知ら<sup>61)</sup>の調査より、風上に平坦地が存在する場合、強風により雪粒子が舞い上がり、視界不良に至ることが明らかとなっている。

よって、防雪林で風を弱め、雪粒子を林内で捕捉・堆積することで、道路まで到達しなければ、視界不良を軽減することが可能<sup>62)</sup>である。

図-195は、令和3年2月3日の状況であるが、防風ネット柵を設置したことで、風速が弱まり柵の前後に吹きだまりが発生した事例である。柵近傍の積雪深の調査状況を図-196に示す。表面から新雪が11cm、ざらめ雪が51cm、合計積雪深は62cmであった。



図-195 防風ネット柵前後に堆積された吹きだまりの状況

図-197に柵全体の状況を示すが、柵のネットにも広範囲にわたり雪粒子が捕捉され、道路まで到達せずに、視界不良を軽減した可能性がある。

さらに、防風ネット柵だけでなく、樹木にも雪粒子が捕捉されていることから、下枝が枯れ上がってしまった場合でも、防風・防雪機能は完全に喪失していないことが鑑みられる。

### 3. 4. 8 補助柵設置の防雪効果検証

補助柵の防雪効果を検証する手法は多種多様であるが、本章では、吹雪発生などの気象状況把握のため、図-193に示す位置に、風向風速計、温湿度計、吹雪計(飛雪粒子計、SPC: Snow Particle Counter)、タイムラプス定点カメラを設置した。

さらに、吹雪発生時に、図-198、199に示す寒地土木研究所所有の、視程障害移動観測車を走行させ、気象データを取得した。

調査結果を精査し、特徴的なデータを取得できた箇所を抽出した。その結果、視界不良軽減効果が認められた1事例と、効果がなかった1事例、合計2事例について、以下のとおり報告する。



図-196 積雪深などの調査状況(令和3年2月3日)



図-197 ネットに雪粒子が捕捉された状況



図-198 視程障害移動観測車の計測状況(令和3年2月3日)



図-199 視程障害移動観測車の車載計測機器

### 3. 4. 9 視界不良(1)令和3年2月17日：効果なし

2月16日から17日にかけて、二つの低気圧が日本海側と太平洋側から発達しながら北海道に接近し、札幌管区气象台より「数年に一度の猛吹雪となる見込み」と発表された。

天気図を図-200に、風向予測概況を図-201に、寒地土木研究所で運営している「吹雪の視界情報」の現況を図-202に示すが、全道的に悪天候に見舞われた状況である。

タイムラプス定点カメラ画像のうち、未対策箇所を図-203、補助柵設置箇所を図-204に示す。両写真には、午前9時00分、同時刻に撮影した、補助柵の有無による視界不良の差異を比較した写真である。

両写真とも、視界不良が発生し、カメラより距離が遠い箇所は、電柱・電線、固定式視線誘導柱の矢羽根などが見えない。しかし、距離を示す基準もなく、定量的に、明確な差異を導くのは困難と言わざるを得ない。

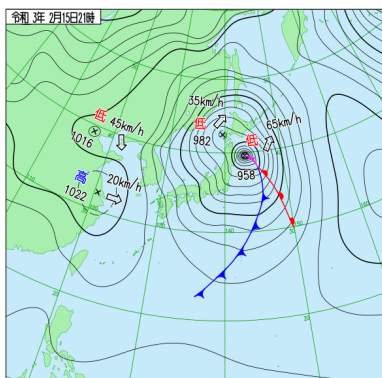


図-200 2月15日の天気図  
(気象庁Webサイトより引用)



図-201 2月17日の風向予測概況  
(<https://www.windy.com/ja/>より引用)

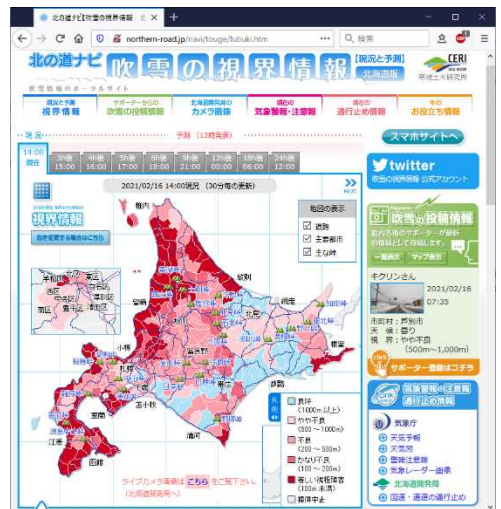


図-202 吹雪の視界情報による  
2月16日の視界不良発生予測

本事例から、風向風速や気温、雪粒子の飛散量などにより補助柵設置による防雪・防風効果が表れない場合もある。

### 3. 4. 10 視界不良(2)令和3年2月3日：効果あり

2月2日から冬型の気圧配置となり、低気圧は北海道を通過したが、気温が低く、西からの強風に見舞われた。

天気図を図-205に、風向予測概況を図-206に、吹雪の視界情報の現況図を図-207に示すが、日本海側全域に視界不良の発生が予測された。

2月3日は、視程障害移動観測車(図-198、199)を走行させ、気象データ、および動画撮影を行った。

図-208、209は、視界不良が発生している状況を、令和3年2月3日午前7時53分頃、一般国道40号を稚内方向へ走行しつつ撮影したものである。

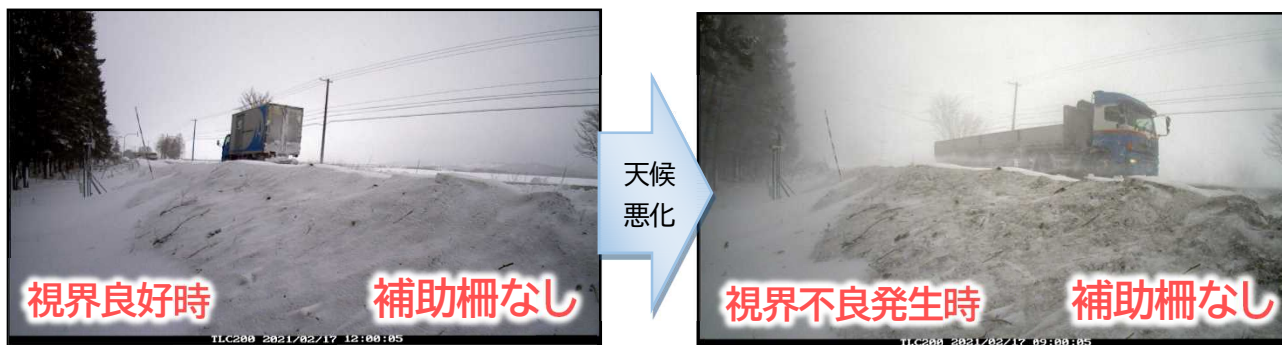


図-203 【補助柵なし】吹雪による視界不良発生状況 (左写真：視界良好時、右写真：吹雪発生時)

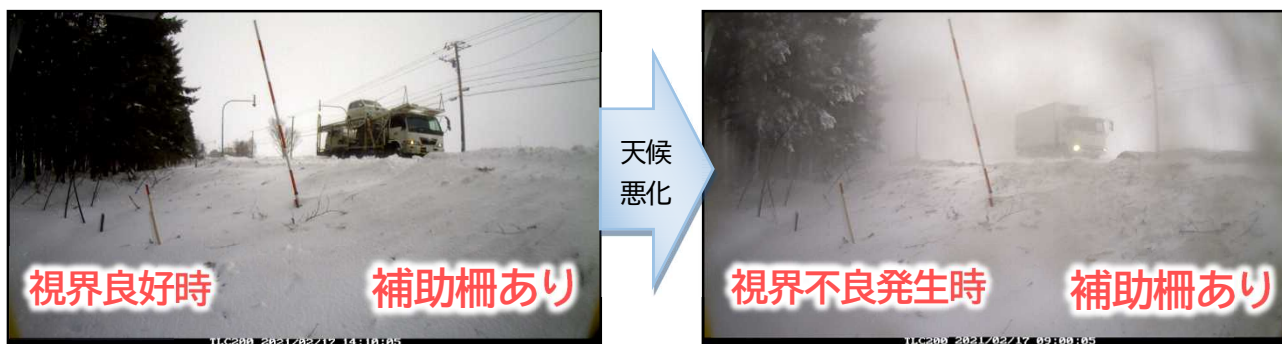


図-204 【補助柵あり】吹雪による視界不良発生状況 (左写真：視界良好時、右写真：吹雪発生時)

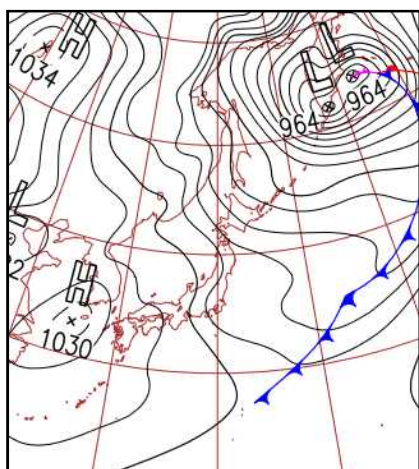


図-205 2月3日の天気図

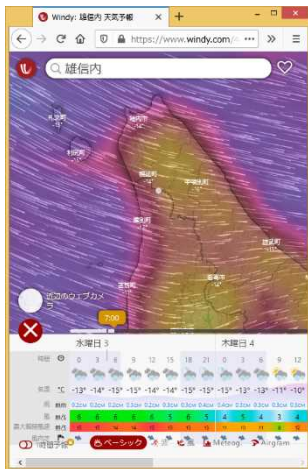


図-206 2月3日の風向予測概況

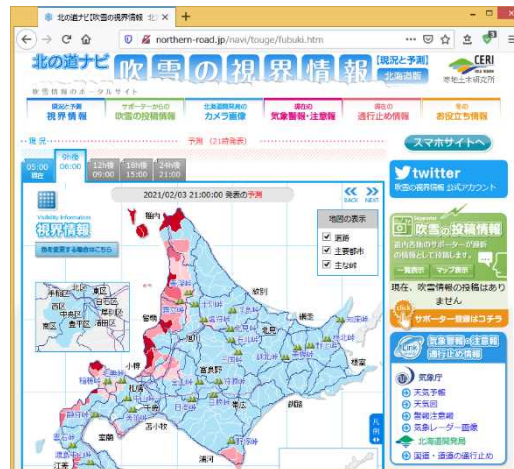


図-207 吹雪の視界情報による  
2月3日の視界不良発生予測

未対策箇所を図-208、補助柵設置箇所を図-209に示すが、電柱が50m間隔で設置されているため、これを一定の指標とし、電柱や電線の見え方で視界不良が軽減できたか否かを判断した。

橙色点線で示している場所に、電柱が設置されているが、補助柵を設置していない図-208は、電柱は視認できない。しかし、補助柵が設置されている図-209では、若干ではあるが、電柱の存在が視認できる。

同様に、水色点線で示した電線4本も、図-208、209では見え方が異なっている。

写真判別という、定性的、かつ主観も含まれる判断ではあるが、補助柵設置により、防雪林内で雪粒子を捕捉し、道路上の視界不良を軽減できた可能性が高い。

なお、タイムラプス定点カメラは、図-210に示すとおり、レンズ部分にも雪が付着してしまい、写真による道路画像は取得できなかった。



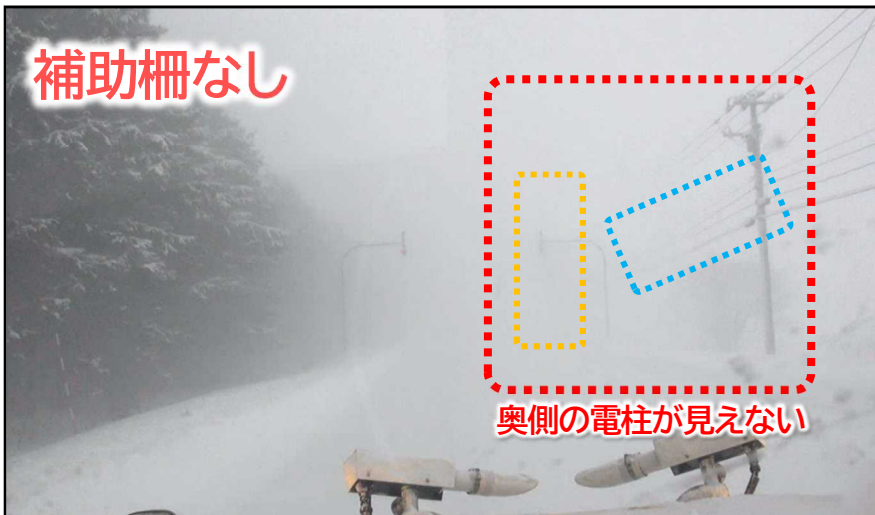


図-208 【補助柵なし】 視界不良が発生し、電柱 2 本が視認できない状況



図-210 雪が付着した定点カメラ

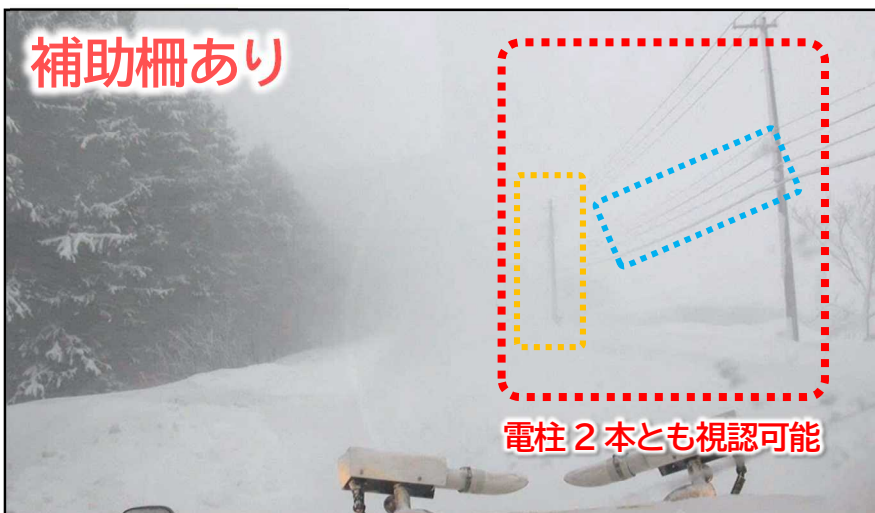


図-209 【補助柵あり】 視界不良発生時、電柱 2 本が視認可能な状況



図-211 VSP 植樹活動の状況



図-212 VSP 活動後の記念撮影

本調査だけではなく、吹雪発生時には、カメラに雪が付着してしまい、映像が取得できない場合がある。これらの着雪対策は、今後の課題としたい。

### 3. 4. 11 国道上の視界不良軽減効果まとめ

本章では、下枝に枯れ上がりが生じている雄信内防雪林の機能向上対策として、留萌開発建設部羽幌道路事務所にご協力いただき、既設道路防雪林に、新たに補助柵を設置し、以下の知見を得た。

- ✓ 下枝の枯れ上がりは、高さ 6.5m から 7.0m まで進行し、下部は葉がなく枝のみの疎な状態であり、風が吹き抜けていることが考えられる。
- ✓ 防風ネット柵の設置後は、風速が弱まり、防雪林内に雪粒子が補足・堆積されていた。
- ✓ 写真判別の結果、道路上の視界不良を低減できる可能性が高い。

写真判別という定性的な検討結果ではあるが、国道の維持管理実務上のリクワイヤメントは、「視界不良を軽減する効果を発揮し、道路利用者の安全性向上を図ること」であり、国道での視界不良軽減などの防雪性能を把握し、改善することに意義がある。

### 3. 4. 12 維持管理における創意工夫の好事例

本章で報告した雄信内防雪林では、国土交通省が進める「ボランティア・サポート・プログラム(VSP)<sup>63)</sup>」の実施団体「てしお森遊会<sup>64)</sup>」が、平成 16 年度から現在に至るまで、防雪林帯への植樹や、除草などを定期的に行っている<sup>65)</sup> (図-211、212)。

長年にわたる活動が、道路の清掃、美化などに顕著な功績があったと認められ、留萌開発建設部より「平成 28 年度 道路功労者」として表彰<sup>66)</sup>されていることから、それら活動の重要性が伺える。

これら、地域の方々の多大なご尽力により、防雪林として適切に育成・成長し続けていられるのである。

本件に限らず、公共事業とは、地域の方々に認知・受容されて、初めて地域貢献に資する付加価値を持ち、本来の機能を発揮できると同時に、地域の魅力度向上にも寄与するものである。

よって、本章で報告した雄信内防雪林は、多くの地域の方々のご尽力により「防雪・防風効果を最大限に発揮させる」という機能面の充実だけではなく、地域の豊かさの醸成に結びついていることが期待される。

今後も、地域の方々と良好な関係性を保ちつつ、官民一体となった活動や、地道な取り組みが、末永く継続し、やがて大きな実を結ぶことを切に願う。

これら多くの方々のご尽力に重ねてお礼申し上げる次第であり、この場を借りて深く感謝の意を表す。

#### 4. 技術資料のとりまとめ

これまでに得られた調査結果や技術的知見をとりまとめ、「下枝の枯れ上がりが見られる防雪林の管理手法に関する技術資料(案)」を作成した。下枝の枯れ上がりが見られる防雪林の管理手法に関して必要な技術的事項についてとりまとめたものである。その章立てを以下に示す。

本テーマで得られた調査結果や技術的知見は、技術資料(案)に提言されているため、詳細は技術資料(案)を参照されたい。

ただし、下枝の枯れ上がりによる防雪性能等への影響や、補助工法の効果は、研究途上の事項もある。本技術資料(案)は、今後も新しい技術開発や知見が蓄積された時点で更新・改訂を行い、内容の充実に努めていく所存である。

「下枝の枯れ上がりが見られる防雪林の管理手法に関する技術資料(案)」

##### 第1章 総則

- 第1節 目的
- 第2節 適用範囲
- 第3節 本技術資料案の構成

##### 第2章 防雪林の防雪機能の評価

- 第1節 下枝の枯れ上がりと防雪機能
  - 第1項 防雪林の成長と防雪機能
  - 第2項 下枝の枯れ上がりと機能低下
  - 第3項 機能低下が懸念される防雪林
- 第2節 防雪林の機能評価
  - 第1項 評価の概要
  - 第2項 空隙率の調査

- 第3項 防雪林風上の風速の推定
- 第4項 林縁、林内の現地樹木調査
- 第5項 防雪機能の評価

##### 第3章 管理手法の検討

- 第1節 検討の概要
- 第2節 管理方法の選定
- 第3節 補助柵設置による機能低下対策
- 第4節 間引きによる機能低下抑制

##### 第4章 参考文献一覧

##### 第5章 参考資料

- 第1節 検討の実施例：雄信内防雪林
  - 第1項 防雪林の機能評価
  - 第2項 管理手法の選定
  - 第3項 補助柵併設による機能低下対策
- 第2節 検討の実施例：山軽防雪林 (L 側)
  - 第1項 防雪林の機能評価
  - 第2項 管理手法の選定
  - 第3項 補助柵併設による機能低下対策
- 第3節 検討の実施例：山軽防雪林 (R 側)
  - 第1項 防雪林の機能評価
  - 第2項 管理手法の選定
  - 第3項 補助柵併設による機能低下対策
- 第4節 補助柵の併設例
  - 第1項 概要
  - 第2項 設計条件
  - 第3項 設置箇所
  - 第4項 補助柵の高さ
  - 第5項 構造計算条件
- 第5節 雄信内防雪林併設事例

#### 謝辞

本調査、報告を行うにあたり、国土交通省 北海道開発局 釧路開発建設部 根室道路事務所、網走開発建設部 網走道路事務所、留萌開発建設部 羽幌道路事務所、稚内開発建設部 浜頓別道路事務所において、本研究に対してご理解いただき、試験フィールドの提供、技術的指導、資料提供、観測機材設置、補助柵設置、冬期の現場除雪作業など、多大なるご協力をいただいた。ここに記して感謝の意に代えたい。

#### 参考文献

- 1) 独立行政法人土木研究所寒地土木研究所：道路吹雪対策マニュアルー防雪林編ー（平成23年版）、2011
- 2) 独立行政法人土木研究所寒地土木研究所：ライフサイクルに応じた防雪林の効果的な育成・管理手法に関する

## 5 極端気象がもたらす雪氷災害の被害軽減のための技術の開発

- る研究、平成 26 年度研究報告書、2015
- 3) 伊東靖彦：防雪林の課題について－雪氷研究大会（2009・札幌）の企画セッションにおける討議を基に－、日本雪工学会誌、26、pp.9-15、2010
  - 4) 竹内政夫、石本敬志、野原他喜男：吹雪量と飛雪量垂直分布、雪氷、37(3)、pp.114-121、1975
  - 5) 北海道開発局開発土木研究所・(財)北海道森林保全協会：防雪林育成・管理業務報告書、1996
  - 6) 北海道開発局開発土木研究所・(財)北海道森林保全協会：防雪林育成・管理手法検討業務報告書、1995
  - 7) 国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所：防雪林の機能向上に関する研究、平成 27 年度成果報告書、2017
  - 8) 松沢勝、加治屋安彦、竹内政夫：風速と降雪強度から吹雪時の視程を推定する手法について、北海道開発土木研究所月報、593、pp.20-27、2002
  - 9) 武知洋太、松澤勝、中村浩：吹雪時に人間が感じる視程と視程計や吹雪計による計測値との関係、北海道の雪氷、No.28、pp.17-20、2009
  - 10) 大浦浩文、小林大二、小林俊一：地ふぶき時における風速の鉛直分布特性、低温科学（物理篇）、25、pp.73-88、1967
  - 11) 松澤勝：降雪を伴う吹雪時の吹雪量の推定手法に関する研究、雪氷、78(5)、pp.255-268、2016
  - 12) 牧雅康、高橋厚裕、岡野哲郎、小熊宏之：可搬型 3 次元レーザーキャナデータと放射伝達モデルを用いた林床光環境の推定手法の開発、日本リモートセンシング学会誌、32(2)、pp.77-87、2012
  - 13) P.F. Grant & W.G. Nickling: Direct field measurement of wind drag on vegetation for application to windbreak design and modelling, *Land Degradation & Development*, 9, pp.57-66, 1998
  - 14) (公社)日本雪氷学会編：新版雪氷辞典、古今書院、p.307、2014
  - 15) K. Nishimura, C. Yokoyama, Y. Ito, M. Nemoto, F. Naaim-Bouvet, H. Bellot, and K. Fujita: Snow particle speeds in drifting snow, *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, 119, pp. 9901-9913, 2014
  - 16) 櫻井俊光、伊東靖彦、渡邊崇史、松澤勝：防雪林における風速の変化に関する研究、寒地技術論文・報告集、32、pp.102-104、2016
  - 17) Sakurai, T., Y. Ito, T. Watanabe, M. Matsuzawa: Preliminary investigations on the effects of branch withering and the thinning of trees for living snow fences in Northern Hokkaido, Japan, *96<sup>th</sup> Annual meeting of the Transportation Research Board*, Washington D.C., pp.1-11, 2017
  - 18) Sakurai T, Y. Ito, T. Watanabe, M. Matsuzawa, Study of wind speed changes with differences in wind direction through the living snow fence, in *The 32<sup>nd</sup> International Symposium on Okhotsk Sea & Polar Oceans*, A-7, pp.1-4, 2017
  - 19) 櫻井俊光、伊東靖彦、武知洋太、松澤勝：斜風時における道路防雪林の枯れ上がりの影響に関する研究、寒地技術論文・報告集、33、pp.125-130、2017
  - 20) Sakurai, T., Y. Ito, M. Matsuzawa, Effect of branch withering in living snow fences on blowing-snow mitigation in Northern Hokkaido, Japan, in *The 1<sup>st</sup> International Workshop on Wind-Related Disasters and Mitigation*, 44, pp.1-10, 2018
  - 21) Sakurai *et al.*: The wind speed and mass flux of snow on both sides of a LSF to investigate the wind and blowing-snow mitigation effects of a LSF, *98<sup>th</sup> Annual meeting of the Transportation Research Board*, Washington D.C., pp.1-10, 2019.
  - 22) 櫻井俊光、伊東靖彦、高橋渉、武知洋太、松澤勝、高橋丞二：下枝の枯れ上がりが見られる道路防雪林の防風・防雪効果について、寒地土木研究所月報、793、pp.11-20、2019
  - 23) 櫻井俊光、伊東靖彦、武知洋太、高橋渉、松澤勝、高橋丞二：空隙率を指標とした防雪林の防風・防雪効果把握の可能性、雪工学会論文集、技術論文、36(1)、pp.14-22、2020
  - 24) 竹内政夫：大気中の雪粒子と視程、地学雑誌、100(2)、264-272、1991
  - 25) 社団法人日本鋼構造物協会（編）：構造物の耐風工学、東京電機大学出版局、ISBN:4501615702、p.616、1997
  - 26) 松澤勝、上田真代、渡邊崇史、住田則行、山崎貴志、石川真大：ライフサイクルに応じた防雪林の効果的な育成・管理手法に関する研究、平成 23 年度成果報告書、2013
  - 27) 山田毅、伊東靖彦、加治屋安彦、小杉健二、根本征樹：風洞実験による防雪林の樹木形態と防雪効果の関係について、北海道の雪氷、25、pp.85-88、2006
  - 28) 山田毅、伊東靖彦、加治屋安彦、松澤勝、小杉健二、根本征樹、望月重人：風洞実験による防雪林の樹木形態と防雪効果の関係について、北海道の雪氷、26、pp.21-24、2007
  - 29) 山崎貴志、住田則行、幸田勝：新型路側設置型防雪柵の開発について－風洞実験による防雪機能調査－、第 28 回ゆきみらい研究発表会論文集、804B、40、pp.1-4、2016
  - 30) 風洞実験法ガイドライン研究委員会（編）：実務者のための建築物風洞実験ガイドブック、財団法人日本建築センター、ISBN:978-4-88910-148-5、2008

## 5 極端気象がもたらす雪氷災害の被害軽減のための技術の開発

- 31) 老川進、苫米地司、石原孟：建物近傍の雪吹きだまりの風洞総時速に関する考察、日本雪工学会誌、23、pp.13-32、2007
- 32) 山崎貴志、住田則行、中村隆一：吹雪風洞実験における防雪林縮尺模型と PIV について、雪氷研究大会 (2014、八戸)、講演要旨集、p.240、2014
- 33) Tabler, R.D.: *Design guidelines for the control of blowing and drifting snow*, Strategic highway research program, Report SHRP-H-381, 1994
- 34) Heavey, J.P., and T.A. Volk: Living snow fences show potential for large storage capacity and reduced drift length shortly after planting, *Agroforestry Systems*, 88(5), pp.803-814, 2014
- 35) Shaw, D.L., Living snow fences: Protection that just keeps growing, *Colorado Interagency Living Snow Fence Program*, Colorado State University, Fort Collins, CO., 1991
- 36) Lynd, L.R. et al.: How biotech can transform biofuels, *Nature Biotechnology*, 26(2), pp.169-172, 2008
- 37) United States Department of Agriculture, Economic Research Service, Online URL: <http://www.ers.usda.gov/topics/crops/corn.aspx>, (2018 年 12 月確認) .
- 38) 長坂晶子ら：北海道産木本 17 種を用いた道路法面の植栽試験-樹種特性からみた植栽の確実性-、北海道林業試験場研究報告、第 45 号、pp.9-20、2008
- 39) 櫻井俊光、伊東靖彦、松澤勝：米国における植物を利用した吹雪対策について、寒地技術論文・報告集、32、pp.91-96、2016
- 40) 櫻井俊光、松澤勝、伊東靖彦：道路防雪林の付加価値と将来展望—米国の Living Snow Fence に関する調査研究から—、日本道路会議、p.1092、2017
- 41) 櫻井俊光、伊東靖彦、松澤勝：多様な植生を活用した吹雪対策とその付加価値、北海道開発技術研究論文集、p.61、2018
- 42) 鳥田宏行：防雪林の評価についての最近の研究、日本雪工学会誌、25、pp.3-20、2009
- 43) 中井裕一郎、坂本知己、寺嶋智巳、北村兼三：ドドマツ林における降雪の遮断蒸発量 (II) —熱収支モデルによる推定と水収支的観測との比較—、日林誌、78(1)、pp.15-19、1996
- 44) Sakurai *et al.*: A Case Study of Snowdrift Trapping Efficiency of a Living Snow Fence - Determined From a Transverse Measurement of Snow Depth Profiles, *99<sup>th</sup> Annual meeting of the Transportation Research Board*, Washington D.C., pp.1-11, 2020
- 45) 財団法人日本道路交通情報センター：令和元年度通行止め区間および期間調書(雪害)、2020
- 46) 大宮哲、原田裕介、高橋丞二：降雪強度把握のための雨量計の捕捉損失補正式の改良検討、寒地土木研究所月報、No.810、pp.31-34、2020
- 47) 日本雪氷学会：新版雪氷辞典、古今書院、p.190、2014
- 48) 竹内政夫、石本敬志、野原他喜男、福沢義文：降雪時の高い地吹雪の発生限界風速、昭和 61 年度日本雪氷学会予稿集、日本雪氷学会、p.252、1986
- 49) 大宮哲、武知洋太、高橋丞二、松澤勝：降雪時における吹雪量推定式の提案～降雪強度と風速による吹雪量の算定、雪氷研究大会(2018 札幌)講演要旨集、p.273、2018
- 50) 大浦浩文、小林大二、小林俊一：地ふぶき時における風速の鉛直分布特性、低温科学(物理篇)、25、pp.73-88、1967
- 51) 小中隆範、伊藤靖彦、松澤勝：道路構造の防雪効果を評価する数値シミュレーションモデルの検討、第 59 回(平成 27 年度)北海道開発技術研究発表会、2016
- 52) 武知洋太、松澤勝、中村浩、金子学、川中敏朗：冬期道路の吹雪時における視程障害度の評価に関する研究、寒地土木研究所月報、No.706、pp.20-29、2012.
- 53) 伊東靖彦：道路防雪林の視程障害緩和効果について、寒地土木研究所月報、No.664、pp.34-39、2008.
- 54) 江川倫法：一般国道 40 号 更喜苫内防雪、北の交差点 Vol24 AUTUMN-WINTER、pp.32-33、2009.
- 55) 大地誠、鈴木正行、酒井亮司：地域との協働による道路防雪林の維持管理検討について～一般国道 40 号天塩町雄信内防雪林での取り組み、第 54 回(平成 22 年度)北海道開発技術研究発表会、連 15、2010.
- 56) 阿部正明、檜澤肇、北村有樹士、斎藤新一郎：成林しつつある道路防雪林の維持管理手法について～一般国道 40 号天塩町雄信内防雪林の事例より、北海道の雪氷、No29、2010.
- 57) 伊東靖彦、櫻井俊光、松澤勝：下枝の枯れ上がりが見られる防雪林における吹雪量と風速の変化、雪氷研究大会、2017.
- 58) 武知洋太、松澤勝、中村浩、金子学、川中敏朗：冬期道路の視界と路面状況による走行速度への影響について、寒地土木研究所月報、No.691、pp.2-12、2010.
- 59) 寒地土木研究所：北の道ナビ・冬道運転ガイド「降雪・視界・路面の基礎知識」Web サイト、2007.  
[http://northern-road.jp/navi/info/guide1\\_2.html#b](http://northern-road.jp/navi/info/guide1_2.html#b)(令和 4 年 5 月閲覧)
- 60) 公益社団法人土木学会鋼構造委員会：鋼構造物設計指針 PARTA、第 6 章 荷重の組合せと安全率、p.51、1987.
- 61) 武知洋太、松澤勝、伊東靖彦、國分徹哉：吹雪危険度の

評価手法に関する研究—道路構造や沿道環境が冬期道路の吹雪視程障害発生に及ぼす影響、寒地土木研究所月報、No.767、pp.11-19、2017.

- 62) 鳥田宏行：樹林帯で吹雪を防ぐ(I)、—防雪林の吹雪の捕捉過程とその効果—、北海道立総合研究機構森林研究本部林業試験場、光珠内季報、No.117、1999.
- 63) 北海道開発局建設部：ボランティア・サポート・プログラム Web サイト  
[https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/kn/dou\\_iji/ud49g7000000ene2.html](https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/kn/dou_iji/ud49g7000000ene2.html) (令和4年5月閲覧)
- 64) 渡邊博司：“森林とふれあい・まなび・つくる” てしお森遊会の活動について、林野庁 北海道森林管理局 留萌北部森林管理署 Web サイト  
[https://www.rinya.maff.go.jp/hokkaido/kikaku/pdf/24happyou\\_s\\_26.pdf](https://www.rinya.maff.go.jp/hokkaido/kikaku/pdf/24happyou_s_26.pdf) (令和4年5月閲覧)
- 65) 北海道開発局留萌開発建設部：地域や企業の皆さんによる国道の美化活動を行います Web サイト、2015.  
<https://www.hkd.mlit.go.jp/rm/release/f6h4sv0000000x74-att/f6h4sv0000000xnn.pdf> (令和4年5月閲覧)
- 66) 北海道開発局留萌開発建設部：平成28年度「道路功労者表彰」伝達式を開催～てしお森遊会が受賞 Web サイト、2016.  
<https://www.hkd.mlit.go.jp/rm/release/f6h4sv0000000go5-att/dfvnau0000000h8u.pdf> (令和4年5月閲覧)

### 5.3.2 防雪柵の端部・開口部対策に関する研究

担当チーム：寒地道路研究グループ（雪氷チーム）、  
技術開発調整監（寒地機械技術チーム）

研究担当者：西村敦史、萬直樹、高橋丞二、松澤勝、伊東靖彦、金子学、松島哲郎、松下拓樹、小中隆範、高橋渉、櫻井俊光、菅原邦泰（雪氷）、片野浩司、巖博、大槻敏行、中島淳一、牧野正敏、植野英睦、住田則行、幸田勝、齋藤勉（機械）

#### 【要旨】

吹雪による通行止めの対策として、防雪柵など吹雪対策施設の整備が進められているが、柵端部や開口部において、視程障害により多重事故等が発生している。しかし、防雪柵端部や開口部における吹雪時の視程急変メカニズムや、車両の走行に影響を与える視程急変の特徴は解明されていない。また、視程急変箇所対策として様々な方法が試みられているが、各々の対策効果は定量的には明らかとなっていない。

本研究では、視程急変メカニズムの解明及び視程急変箇所における対策技術の効果の定量化を行い、視程急変箇所の条件に応じた効果的な対策技術の提案を行うことを目的として、現地移動気象観測と定点観測、防雪柵模型を用いた風洞実験、防雪柵周辺の風速分布を再現する数値シミュレーション解析を実施した。その結果、防雪柵の端部や開口部における視程急変メカニズムや車両の走行への影響と、防雪柵端部と開口部の対策として用いられている副防雪柵による風速や視程の急変緩和効果を明らかにした。また、副防雪柵に替わる新たな対策工法を考案してその効果を確認し、これら対策工法の風向等の現地条件に応じた選定手法に関する整理を行った。

キーワード：吹雪、吹雪対策、防雪柵開口部、視程急変、エンドエフェクト

#### 1. はじめに

積雪寒冷地の冬期道路では、吹雪による視程障害や吹きだまりによって、多重衝突事故や車両の立ち往生などの交通障害が多く発生しており、吹雪による通行止めは北海道内の国道における通行止め要因の4割を占める<sup>1)</sup>。吹雪対策として防雪柵の整備が進められているが、防雪柵整備区間であっても防雪柵端部や開口部において、突発的な視程障害により多重事故等が発生している。このため視程急変対策に関する行政ニーズは高く、公共事業費のコスト削減が求められている中、吹雪対策施設についても整備の優先づけや効率的な道路管理が重要となる。そこで本研究は、視程急変箇所対策の効率的・効果的な整備を通じて雪氷災害の被害軽減を目指すものである。

ここで防雪柵とは、吹雪対策のために鋼板等の材料で作られた防雪板で柵前後の風速や風の流れを制御して、道路の吹きだまり防止や視程障害の緩和を図ることを目的とした吹雪対策施設<sup>2)</sup>と定義され、防雪柵の型式には、吹きだめ柵、吹き止め柵、吹き払い柵および吹き上げ防止柵がある<sup>3)</sup>。本研究では主に吹き止め柵について取り

扱い、以降では防雪柵は吹き止め柵のことをいう。防雪柵の端部や開口部における視程急変の対策工には副防雪柵など<sup>4)</sup>が提案されているが、副防雪柵の定量的な効果については明らかにされていない。

本研究では、視程急変メカニズムの解明及び視程急変箇所における対策技術の効果の定量化を行い、視程急変箇所の条件に応じた効果的な対策技術の提案を行うことを目的とする。2章では、防雪柵端部や開口部における道路気象と車両の走行に影響を与える視程急変の特徴を捉えて視程急変メカニズムを解明し、3章では、副防雪柵の視程や風速の急変対策効果と課題を明らかにした。また、4章では、副防雪柵に替わる新たな対策工法を考案してその効果を確認し、5章でこれらの対策工法の風向等の現地条件に応じた選定に関する整理を行った。

#### 2. 防雪柵端部・開口部における視程急変メカニズムの解明

防雪柵端部や開口部における視程急変メカニズムの解明には、吹雪時における防雪柵の有無による違いだけで

なく、防雪柵端部や開口部における風の収束に伴う局所的な強風とそれに伴う視程障害（以下、エンドエフェクト<sup>2)</sup>という）が発生した時の防雪柵周辺の地形や気象条件等を整理し、把握することが重要である。また、防雪柵端部や開口部で多重事故等が発生するため、視程急変時におけるドライバーによる運転挙動から、適切な対策工を検討する必要性もあり、多角的な視点から防雪柵端部や開口部における視程急変メカニズムに迫る必要がある。他方、現道では気象条件が常に変化することや、沿道環境が多様であることにより、観測データの収集には多くの労力と時間が必要となる。こうした場合、比較的容易に条件変更が可能な数値解析や風洞実験で検討することが有効と考えられる。そのため、数値解析や風洞実験と現地観測との整合性が十分であることを確認する必要がある。そこで、石狩吹雪実験場における防雪柵の視程障害移動観測および定点気象観測に加え、同一の防雪柵の設置条件で数値シミュレーションを実施し、整合性を確保した上で対策工の比較検討を行うこととした。

以上から本章は、①現道の防雪柵設置区間における移動気象観測、②防雪柵開口部の道路気象と運転挙動、③石狩吹雪実験場における防雪柵開口部の定点気象観測、④数値シミュレーションによる現地観測結果の検討、⑤模型防雪柵を用いた風洞実験による開口部の影響解析で構成される。

## 2. 1 現道の防雪柵設置区間における移動気象観測

### 2. 1. 1 視程障害移動観測車による観測方法

一般国道 231 号及び 337 号、393 号（図-1）において、視程障害移動観測車（図-2）を用い、平成 29 年 1～2 月、平成 29 年 12 月～30 年 3 月、平成 31 年 1～2 月の 3

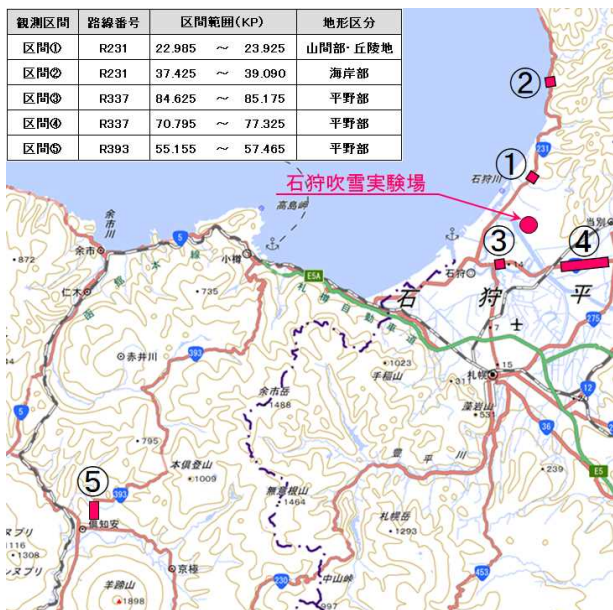


図-1 移動気象観測車による移動気象観測位置

冬期の吹雪発生時に移動気象観測を行った（但し、一般国道 393 号の観測は平成 29 年 12 月～30 年 3 月）。区間内には、吹き止め式防雪柵の開口部が合計で 43 箇所存在する。

視程障害移動観測車は、ビデオカメラ、前方散乱型視程計(TZF-31A)、超音波式風向風速計(PGWS-100-3)、温度計(R003-1YRP631)、GPS センサー(M12P/10S)、ブレーキ踏力計、アクセル踏量計及びハンドル操舵角計を搭載している。この視程障害移動観測車を用い、道路上の防雪柵設置区間の端部や開口部における視程急変に着目し、道路気象状況と運転挙動等に関する移動観測を行った（表-1）。なお、データの収録間隔は 0.1 秒とし、観測はドライバーと調査員の 2 名により行った。

視程障害移動観測車による観測の場合、道路上の気象条件について連続的に捉えることが可能となる。一方、定点気象観測では、防雪施設や沿道環境の影響を受けない基準点のデータを取得でき、また、観測点が限られるものの長期間連続したデータ収集が可能である。

### 2. 1. 2 視程障害移動観測車による観測結果

一般国道 231 号における吹雪時の調査結果の代表的な観測結果を図-3 に示す。また、移動観測時の道路状況を進行方向順に図-4 に示す。



図-2 視程障害移動観測車

表-1 移動気象観測の内容

観測要素	走行中の道路映像、気温、風向風速、視程、走行速度、アクセル踏量、ブレーキ踏力、ハンドル操舵角
記録間隔	0.1秒
観測方法	視程障害移動観測車1台用い、吹雪時に観測を実施
観測箇所	5区間(図-1参照) ※同一区間を繰り返し観測

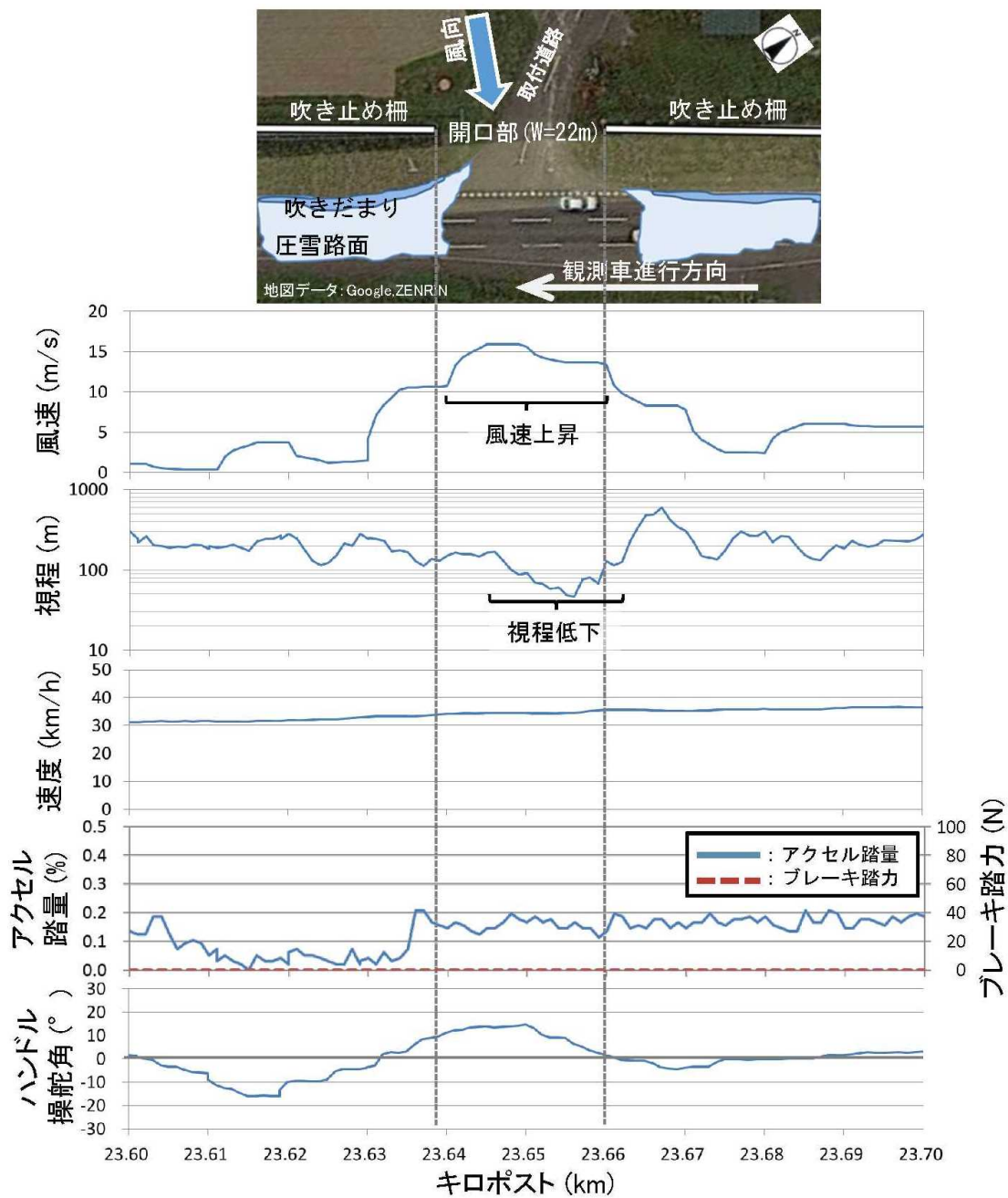


図-3 観測事例1(観測日:平成29年1月28日10時45分)(上:平面図、下:観測結果)



図-4 観測時の道路状況(観測事例1)(左:観測車開口部進入前、右:防雪柵区間)



当該区間は、丘陵地にある上下2車線の道路で風上側には300m以上のなだらかな傾斜地（草地で冬期は雪原となる）があり、地吹雪の発達しやすい箇所である。吹き止め柵の開口部は22mである。観測日時は平成29年1月28日10時45分、天候は降雪を伴う吹雪である。観測車は、道路終点側（図-3の右側）から起点側（左側）に向かって走行した。

観測車が開口部に差し掛かる手前では、風速は3~6m/s、視程は200m程度と吹き止め柵が有効に機能しており、車速、アクセル踏量、操舵角とも安定していた。開口部に差し掛かると、風速の急速な増大（最大16m/s）と、それに伴う視程の低下（最低40m程度）が見られた。アクセル踏量の大きな変化やブレーキ操作は見られなかったが、急な横風に対し風上側にハンドルを切り、その後風下側、再度中立位置に操舵を行っていた。開口部通過後は、開口部手前側とほぼ同様の風速、視程、運転挙動に戻っていた。

なお、この事例では、視程の低下はあったものの、ブレーキ操作には至らなかった。しかし、急な横風に対し数回のハンドル切り返し操作を要し、車速は緩やかに低下する傾向を示していた。

## 2.2 防雪柵端部の道路気象と運転挙動

### 2.2.1 開口幅が風速や視程に与える影響

防雪柵の開口部への対策工を検討するにあたり、まず開口部周辺における道路気象の変化を正しく把握することが必要となる。

開口幅が風速や視程に与える影響に着目し、観測データの整理を行うこととし、平均風速3m/s以上、最低視程200m以下のデータを抽出した。対象区間は、開口部の前後の吹き止め柵におけるそれぞれの中点から中点までを採用した（図-5）。

ここで、評価指標として、「視程比」及び「風速比」を以下のように定義した。

$$\begin{aligned} \text{視程比} &= \text{対象区間の最低視程} / \text{対象区間の視程中央値} \\ \text{風速比} &= \text{対象区間の最大風速} / \text{対象区間の平均風速} \end{aligned}$$

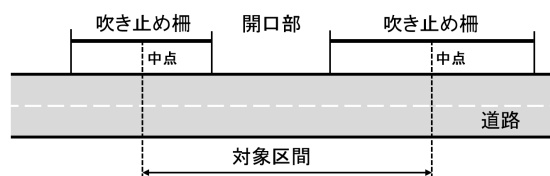


図-5 データ解析対象区間

視程値は、値の変動の幅が大きく単純に平均値を用いることができないため、中央値を採用した。なお、以下の箱ひげ図には、最小値、25%タイル値、中央値、75%タイル値、最大値を表示した。

開口幅と風速比の関係について図-6に示す。開口幅の増加とともに風速比が増加する傾向が見られた。ただし、開口幅8m未満では風速比（中央値）が1.2、開口幅8m以上では風速比（中央値）が1.3と、変化の程度は小さかった。

次に、開口幅と視程比の関係について、図-7に示す。開口幅の増加とともに視程比が低下する傾向が見られた。変化傾向は比較的明瞭であり、開口幅8m未満では視程比（中央値）が0.4以上、開口幅8m以上では視程比（中央値）が0.3以下となっていた。

開口幅の違いが道路気象に与える影響について、より詳細に調査するため、風速や視程の変動が50%以上あった場合を「開口部の著しい影響があった」と考え、風速については開口部での最大風速が平均風速の1.5倍以上、視程については最低視程が平均視程の0.5倍以下の場合を「開口部の影響有り」と定義し、風速や視程と開口幅との関係について、図-8と図-9にそれぞれ整理した。

その結果、風速については開口幅8m以下の場合に、開口部の影響の出現頻度が小さく、開口幅が8mを超える場合には開口幅の違いによる大きな変化は見られなかった（図-8）。また、視程については、開口幅が比較的狭い（12m以下）場合に開口部の影響の出現頻度が小さく、開口幅の増加に伴い出現頻度が増加する傾向にあることが判った（図-9）。

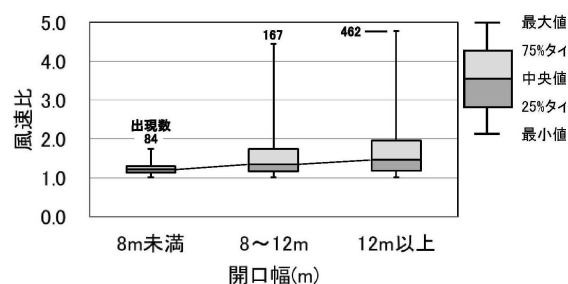


図-6 開口幅と風速比

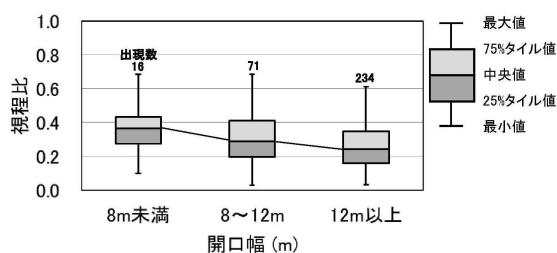


図-7 開口幅と視程比

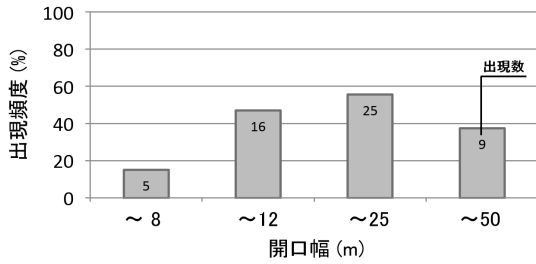


図-8 開口幅毎の風速への影響の出現頻度

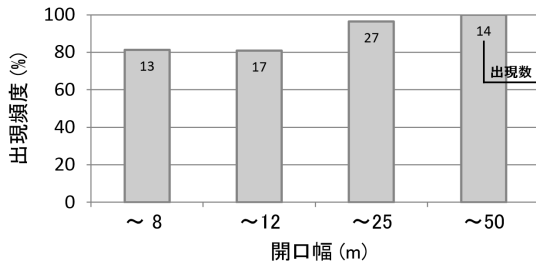


図-9 開口幅毎の視程への影響の出現頻度

### 2. 2. 2 風速や視程が運転挙動に与える影響

前項では、開口部における道路気象の変化について取りまとめた。対策施設の検討に向けては、道路気象の変化がドライバーの運転挙動に与える影響について評価することが重要となる。

風速や視程の違いがドライバーの運転挙動に与える影響に着目し、観測データの整理を行った。前項では強風、視程障害に着目してデータ抽出を行ったが、ここでは無風、視程良好時も含む全データを採用した。データ解析対象区間は、前項と同様の範囲とした(図-5)。

ここで、気象条件には風速と視程を、運転挙動には走行速度、アクセル踏量、ハンドル操舵角を用い、これらの関係について調査した。風速と視程については、データ解析対象区間(図-5)の観測データの平均値を用いた。

平均風速、平均視程に対する走行速度、アクセル踏量の関係について、図-10~図-13に示す。箱ひげ図の要素は、運転挙動の最小・最大値、25%及び75%タイル値、中央値とした。

平均風速と走行速度(中央値)との関係については、風速が低い場合(5m/s未満)、走行速度は50km/h程度となっていたが、風速5m/s以上では35km/h程度に低下していた(図-10)。

次に、平均視程と走行速度(中央値)との関係では、視程良好時(500m以上)には45km/h程度と高かった走行速度が視程の低下とともに低下し、視程100m未満では20km/hに低下していた(図-11)。

風速とアクセル踏量との関係については、明確な傾向

は見られなかった(図-12)。しかし、視程とアクセル踏量について見ると、視程100m未満の場合にアクセル踏量が最大~中央~最小値ともに顕著に低下した(図-13)。

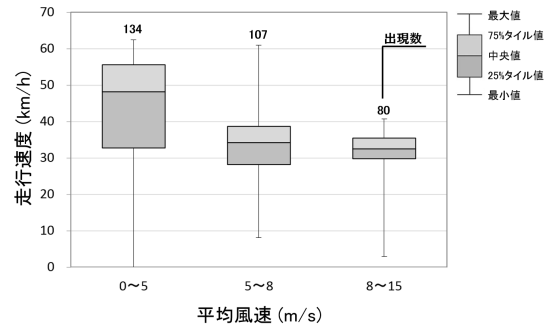


図-10 平均風速と走行速度

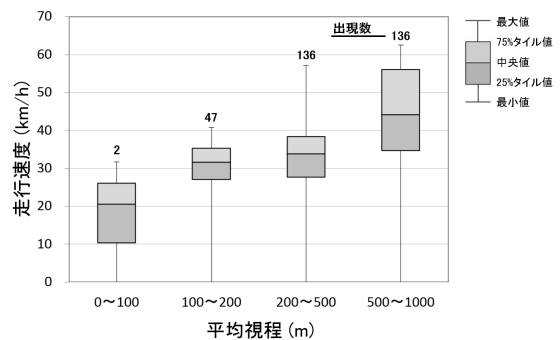


図-11 平均視程と走行速度

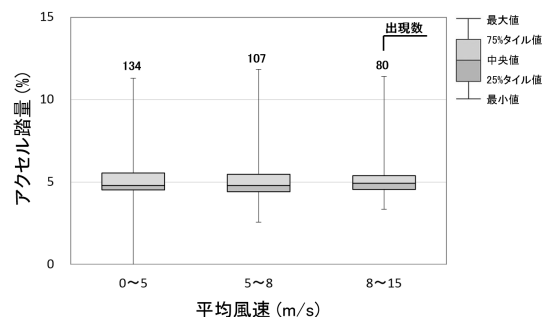


図-12 平均風速とアクセル踏量

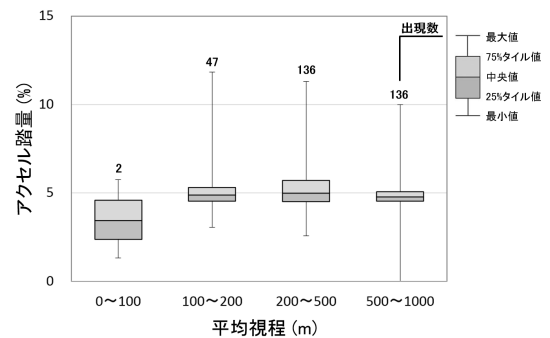


図-13 平均視程とアクセル踏量

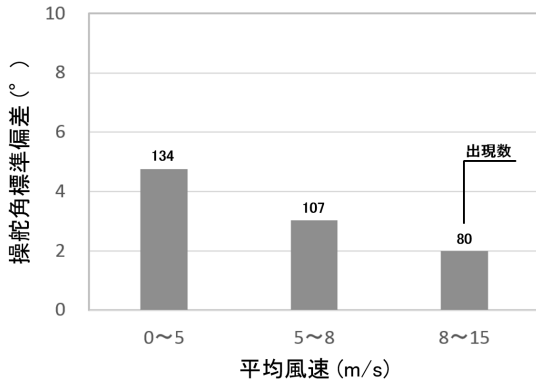


図-14 平均風速とハンドル操舵角標準偏差

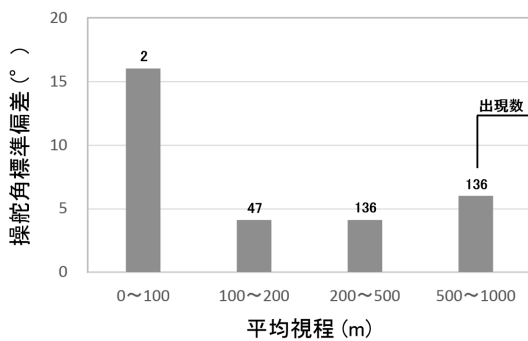


図-15 平均視程とハンドル操舵角標準偏差

一般的に、風速 5m/s 以上では低い地吹雪が、風速 8m/s 以上では高い地吹雪が発生するとされており、風速が高い条件における走行速度の低下は、吹雪に伴う視程障害によるものと考えられる。また、「視程 100m 未満では、道路線形や視的目標物の確認が難しい」<sup>3)</sup>とわれ、アクセル踏量の減少は視程障害発生によるものと考えられる。

平均風速、平均視程に対するハンドル操舵角の関係について、図-14 と図-15 に示す。ここで、直進する場合のハンドル操舵角の中央値には変化がみられないため、図-14 と図-15 には標準偏差のみを示した。



図-16 石狩吹雪実験場位置図

風速とハンドル操舵角との関係については、風速が低い (5m/s 未満) 場合に標準偏差が大きく、風速の増大に伴って、やや低下する傾向となっていた (図-14)。視程とハンドル操舵角の関係では、平均視程が低くなるほどハンドル操舵角の標準偏差が小さくなる傾向にあるが、視程 100m 未満の場合には標準偏差が大きくなる傾向を示した (図-15)。ただし、視程 100m 未満についてはデータ数が少ないので参考値とする。

### 2. 3 石狩吹雪実験場における防雪柵開口部の定点気象観測

#### 2. 3. 1 定点気象観測の概要

防雪柵の開口部が、風向・風速や視程等の道路気象に及ぼす影響について把握するため、図-16に示す石狩吹雪実験場において、現地観測を行った。

ここでは、平成30年の1~3月に観測したデータについて解析した。吹き止め柵 (設置延長93m) は、冬期の主風向に直交するよう設置し、幅9mの開口部を設けた。吹き止め柵から20m離れた風上側に基準となる観測点 (基準点) を設け、吹き止め柵開口部の中心と、柵風下側の路側位置 (以下、風下路側) において、通過車両への風の影響を想定した高さ1.8mで風速を観測した (図-17)。風向・風速の観測にはR.M. Young社製 (KDC-S04) を用いた。

吹き止め柵は、南北に対し約10°時計回りの方向に設置されており、直角方向は「西」と「西北西」との間にある。風向の解析には、柵と直角方向から時計回りに「西北西」、「北西」、「北北西」、反時計回りに「西」、「西南西」、「南西」 (16方位中6方位、柵と直角方向を中心に112.5°) の範囲で、風速5m/s以上 (10分平均値) のデータを抽出した。



図-17 観測機器設置状況

2.3.2 定点気象観測の解析と結果

観測点の風速を基準点風速で除した値を風速比と定義し、風向別に箱ひげ図として表現した。図中の要素は風速比の最小・最大値、25%及び75%タイル値、中央値とした。ここで、風速比が1のとき、風上基準点の風速と同じ風速であることを示す。解析には、開口部の平均的な風場を表現する10分平均値を用いることとし、瞬間風速や乱流については考慮していない。

風下路側における観測結果を図-18に示す。南西(SW)を除き、風速比は防雪柵直角方向を中心に凸型となった。さらに、防雪柵直角方向から概ね45°の範囲で風速比の平均値が1を上回り、道路上に風が強く吹き込む現象が確認された。また、後述する開口部中心と比べ、風速比のばらつきが大きかった。この理由として、開口部風下側では風が大きく乱れていることが考えられる。風向が防雪柵直角方向から45°以上斜めに流入する斜風時では、風速比の低下が見られたが、開口部からの強風が距離とともに弱まることや、防雪柵直角方向から35°を超える場合、観測点が防雪柵の影に入ることが影響したのではないかと考えられる。

開口部中心における観測結果を図-19に示す。風下路側と同様に、全風向で風速比は防雪柵直角方向をほぼ中

心に凸型となった。しかし、広い範囲で風速比が1を超えており、風速比の強弱は風下路側ほど顕著ではなく、風下路側と比べ、ばらつきが小さかった。防雪柵の有無の影響のみであれば、基準点と同様の風速(風速比=1)となると考えられるが、直角方向に近い「西南西」、「西」、「西北西」について、風速比の中央値が1を上回っており、風速比の増大はエンドエフェクトの影響と考えられる。

以上の結果から、開口部から道路側に流れる強風域の分布状況が風向によって変化していることが推測されるが、開口部における風速の面的な分布、視程障害あるいは吹きだまりの分布を把握するためには、より細かな調査や分析が必要になると考えられる。

2.4 数値シミュレーションによる現地観測結果の検討

現地観測の結果、開口部における局所的な強風の発生が確認された。しかし、現地観測の場合、風速計等の観測機器を多数設置することには限界がある。このため、本章では有限要素法(数値シミュレーション)の利用により、観測点以外の風速分布についても可視化し、吹き止め柵まわりの風場を表現することとした。また、本研究では副防雪柵を含む多様な柵の配置について検討し、効果的な開口部対策工法を提案することを目標としている。対策検討に先立ち、数値シミュレーションのパラメータを適切に設定し、現地観測の結果を再現することとした。

2.4.1 数値シミュレーション概要

防雪柵の形状作成に利用したCADはSOLIDWORKS(Dassault Systèmes SolidWorks社製)であり、数値シミュレーターはSOLIDWORKS flow simulationである。SOLIDWORKSはCADから数値シミュレーションまでを単体のパッケージソフトで処理できるため、形状の変更や再解析が容易である。図-20に解析に利用したCAD形状を示す。

防雪柵は、現地観測と同じ形状の吹き止め柵を2枚作成した。長さはそれぞれ北側51m、南側42mとし、柵高5m、開口部9mとした。また、現地観測と同じように、通過車両への風の影響を想定した高さ1.8mにおける平面を作成し、風速分布を可視化できるように設定した。なお、実際の吹き止め柵は、防雪板の下部は無孔、上部は有孔であるが、有孔を表現した場合、計算に膨大な時間を要することが解ったため、本シミュレーションでは忍び返しを含めてすべて無孔と見なした。

シミュレーションモデルでは、吹き止め柵の風上側と風下側それぞれに100mの空間を設け、モデル上端に存在する壁面の影響を受けないよう、上方には100mの空間を設けるように空間を構成した。

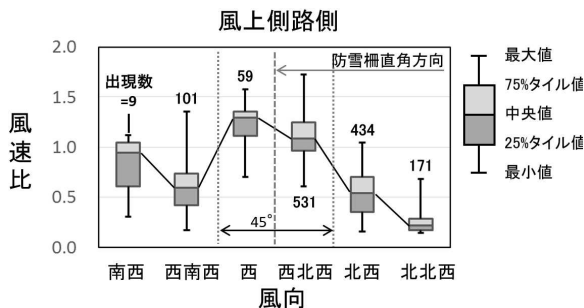


図-18 風下路側における風向別の風速比

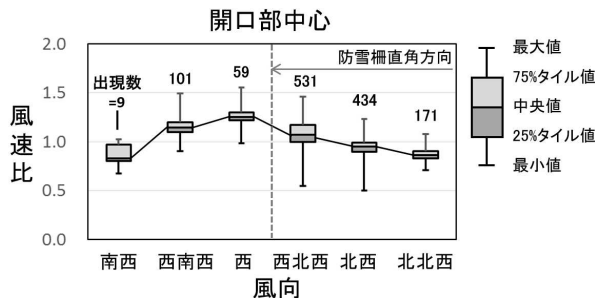


図-19 開口部中心における風向別の風速比

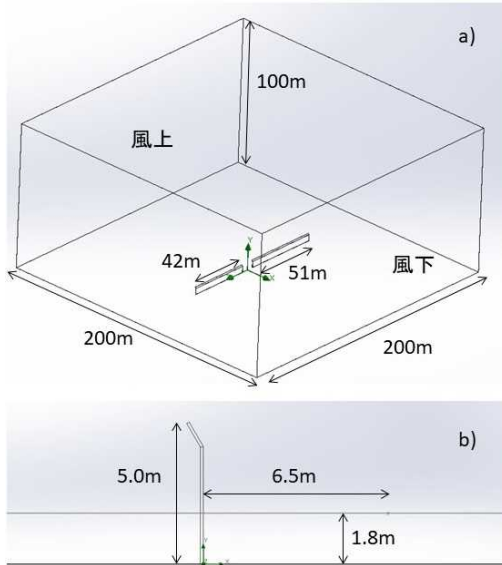


図-20 実験場の吹き止め柵を再現した CAD 画像。a)CAD 画像の鳥瞰図、b)防雪柵の CAD 画像の側面図。

本シミュレーションでは、空気は密度変化しない非圧縮性粘性流体とし、質量保存の法則で示される連続の運動方程式（ナビエ・ストークス方程式）を用いている。初期条件では、風上側の壁面から風速10m/sで流入するよう設定した。気象条件は、気温0°C（273.15K）、気圧1atm（約101,325 Pa）、雪面の粗度は、吹雪時の表面粗度と同じ値（ $1.5 \times 10^{-4} \text{m}$ ）<sup>4)</sup>とした。なお、全メッシュ数は約60万であり、1回の計算には1時間程度を要した。

風が防雪柵に流入する角度（流入角）について、防雪柵と直交する角度を0°とし、±11.25, ±22.5, ±33.75, ±45°の9パターンについて計算を実施した。

#### 2. 4. 2 数値シミュレーション結果

図-21に数値シミュレーション結果の一例（防雪柵と直交する角度0°）を示す。高さ1.8mの平面の風速分布が描写され、防雪柵の開口部周りの風速分布を読み取ることができる。図中の白点線は吹き止め柵開口部の中心線であり、中心線の風速は図-22のようになる。図から、防雪柵風上では風速が10m/sであったが、防雪柵の開口部から6m風上で約8m/sまで減少し、開口部を過ぎると12m/s程度まで風速が増加する。さらに風下では約4m/sまで徐々に減少している。現地観測結果との比較を行うため、以降では風上基準点（防雪柵より20m風上）、防雪柵開口部0mと吹き止め柵風下路側6.5mの風速のみを抽出し、風上基準点を分母として風速比を表現することとした。防雪柵開口部から-20m、0m、6.5mの各3点に対し、計算モデルの格点の位置が完全には一致しないため、

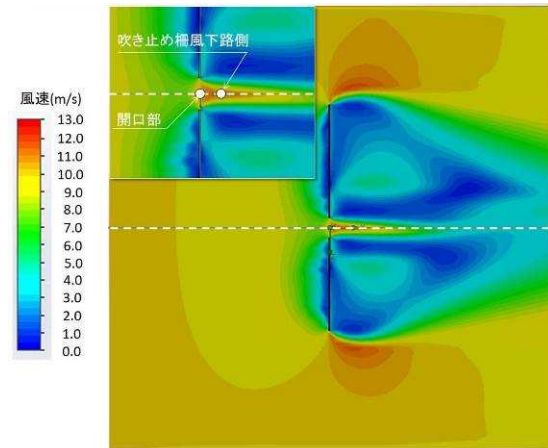


図-21 吹き止め柵まわりを再現した風速分布。高さ1.8mの平面の風速をコンターで示した。○は開口部0mと、吹き止め柵風下路側6.5mの地点を、白点線は中心線を示す（左から右に風が流れている）

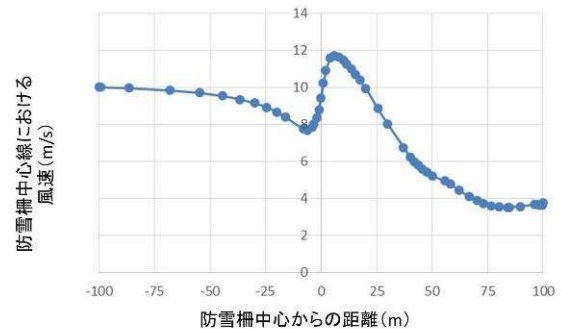


図-22 防雪柵中心線における風速の変化。

3点に相当するデータは内挿により算出した。なお、現地観測で設置されている防雪柵の中心線は、真西から時計回りに10.8°北西にあるので、数値シミュレーションの流入角0°を現地の風向に合わせて（中心線の風向：270°+10.8°=280.8°）表現した。

図-23に、風下路側における風速比の実測値と数値シミュレーション結果を示す。開口部（風向280.8°）を中心に風速比が凸型を示し、現地観測（図-18）と同様の傾向となっていた。数値シミュレーションでの風速比は、6点で現地観測結果（中央値）と比べ低い値を示し、3点で高い値を示した。また、南西（図中SW）の風の場合、現地観測では風速比が1.0に近い。数値シミュレーションにおいては西南西（図中WSW）が図中最小値を示し、それより南では風速比が1.0に近い。北風の場合、現地観測では北北西（図中NNW）で図中最小値を示した。数値シミュレーションでは北西（図中NW）が最小値で、それより北で風速比が1.0に近い。北風と南風の違いは、現地の周囲にある構造物や植生、地形等の影響によるもの



図-23 風下路側における風速比の実測値と計算値



図-24 開口部中心における風速比の実測値と計算値

と考えられる。

図-24に、開口部中心における風速比の実測値と数値シミュレーション結果を示す。西(W)の風向を中心に風速比は凸型であるが、風下路側よりも開口部中心の方が風速比は全体的に高い値を示す。この傾向は、現地観測結果からも得られている。吹き止め柵に対して直交する風向(280.8°)では風速比が他の風向に比べてやや低い値を示した。

本数値シミュレーションは完全な定常状態であり、乱流の時間変化や瞬間的な風速・風向を取り扱うものではない。また、比較した現地観測結果も風速の10分平均値の中央値である。それらを踏まえれば、現地観測と数値シミュレーションとで若干の違いはあるものの、数値シミュレーション結果は、吹き止め柵周辺の風況について再現できたものと考えられる。

以上、現地観測と同様の条件を設定し、数値シミュレーションを行い、風向毎の風速比を求めた結果、現地観測結果を概ね再現する計算結果を得ることができた。今後の効果的な開口部対策工法の提案に向けて、数値シミュレーションが効果的な検討手法となると考えられる。

## 2.5 模型防雪柵を用いた風洞実験による開口部の影響解析

防雪柵端部や開口部における視程急変箇所を把握

するためには、実フィールドで計測することが望ましいが、計測条件の設定が困難である。そこで本研究では、様々な設定条件下での計測が可能な風洞実験装置を用いて、防雪柵端部や開口部における視程急変の状況把握、対策工法の検討を行う。

平成28年度は、現道の設置状況に基づき、風洞実験用の縮尺模型を製作した。

平成29年度は、副防雪柵の模型を追加製作し、風洞実験にて、防雪柵の開口幅の違いと副防雪柵の有無による影響解析を行った。

平成30年度は、副防雪柵の緩和効果を求めるため、副防雪柵のパターンを追加して実験と解析を行った。

令和元年度は、風向角の違いによる緩和効果を詳細に把握するため風向角を増やし実験を行った。

令和2年度は、数値シミュレーションで緩和効果が確認された、斜行柵群と、くの字柵の風洞実験を行った。

令和3年度は、斜行柵群の設置角や枚数を変えた風洞実験を行った。

### 2.5.1 実験装置

実験には寒地土木研究所所有の風洞実験装置(図-25)を使用した。装置の主要寸法は、全長約29m、測定洞の全長約9m、測定洞の断面1.2m×1.2mである。測定洞には風向角を可変できるターンテーブルを設置している(図-26)。

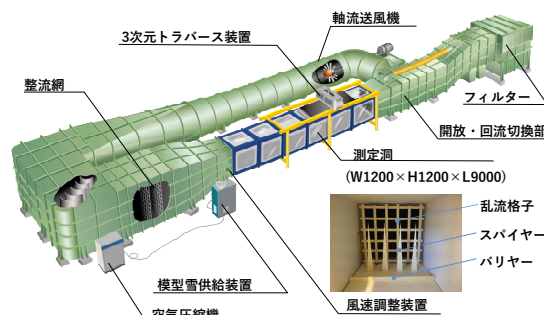


図-25 風洞実験装置



図-26 実験装置のターンテーブルと製作した防雪柵模型

## 2. 5. 2 縮尺模型の検討と製作

模型の縮尺設定については文献<sup>9)</sup>を参考にすると、以下の(1)~(3)を考慮する必要がある。

### (1) 自然風に関する相似則

接地境界層内に収まるよう模型を配置する必要がある<sup>9)</sup>。用いた風洞実験装置の接地境界層は下面から高さ0.4mである<sup>9)</sup>ため、この範囲に模型を配置する必要がある。

### (2) 風洞断面の大きさによる制限

一般的に大きな模型を風洞に配置すると、上方や左右の拘束壁の影響によって自然風の再現に影響が出る。閉塞率(模型断面積の風洞断面積に対する割合)5%以下が1つの指標とされるが、確定的な回答が見当たらない<sup>9)</sup>とされている。

### (3) 測定項目からの制限

風速計測においては、大縮尺となるほど高さ方向の測定誤差が大きくなるほか、小さすぎる模型であれば、物理的に取扱が困難となる。

本研究では、これらを総合的に勘案して縮尺を100分の1とした。このように道路周辺における防雪施設(防雪柵、防雪林)を対象とした風洞実験において縮尺を100分の1としたものは多数<sup>9)~11)</sup>ある。

防雪柵模型は、2. 1 で防雪柵の柵端部や開口部の対策が行われている一般国道337号(KP=74.25付近)の柵形式、対策を参考に以下の諸元とした。

- ・防雪柵の形式：吹き止め式防雪柵 (H=5.0m)
- ・有孔板(防雪板)の空隙率：30%
- ・開口幅のパターン：5m、7m、10m、20m

防雪柵模型は、防雪板にはアルミ板を、支柱にはステンレス棒を用い製作した(図-27)。また、防雪柵模型の一部は、3Dプリンタを用いてABS樹脂で製作した。

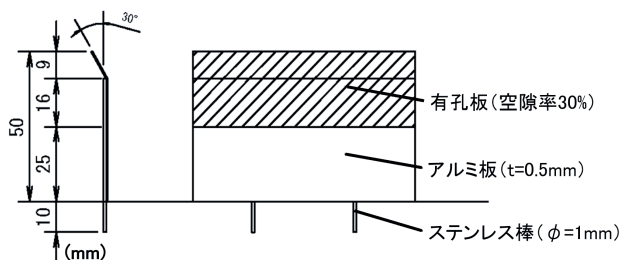


図-27 防雪柵模型(吹き止め式防雪柵)

## 2. 5. 3 風洞実験条件の設定

測定洞内の垂直風速分布は、上空ほど風速が増す自然の風を模擬するため、べき法則(べき指数は田園地帯を想定し0.15とした<sup>10)</sup>)に、近似<sup>9)</sup>するよう気流を調整した。

実験風速は、模型雪に活性白土を用いた風洞実験で吹きだまりの再現性が高いとされる風速4.5 m/s前後(地面からの高さH=50mm)<sup>11)</sup>を参考に、風速7 m/s(但しH=400mmでの風速)とした。

## 2. 5. 4 実験パターン

本実験では2. 5. 2 で製作した防雪柵模型のうち、開口幅100mmと200mm(図-28)を用いた。風向条件は防雪柵に対して直交の場合のほか、斜風の場合の影響も把握するため、これらの模型をそれぞれ風向に対して45°、90°、135°に設置(図-28、図-29)し計測を行った。

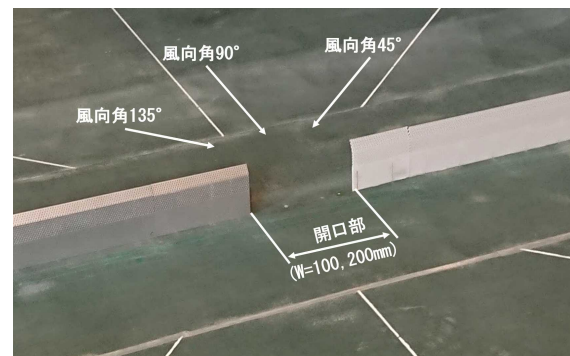


図-28 防雪柵開口部

## 2. 5. 5 計測方法

風速計測には日本カノマックス(株)製の熱線流速計IHW-100を用いた。計測は、I型プローブを使用し、1計測の計測間隔を10msとして1箇所あたり3,072個計測し、そのデータを平均した。

計測箇所は、4車線道路における防雪柵開口部がもたらす影響を把握するため、道路上の2列(4車線の最も風上側車線を第1車線として、第1車線上中央と風下側の第4車線上中央)とした。計測では、防雪柵開口部の中央を基準とし、道路縦断方向に前後300mmを50mm毎に1列あたり13計測点で行った(図-29)。計測高さは地面から高さ100mmまでは5mm間隔、それ以降150mmまで10mm間隔で計測した。なお、風速の基準点は、風洞壁面や模型による影響を受けにくい風洞中央の風上側計測上限の計測点に設定した(図-29)。

以下、この基準点の風速に対し、同じ高さで計測した風速の比を風速比として定義する。

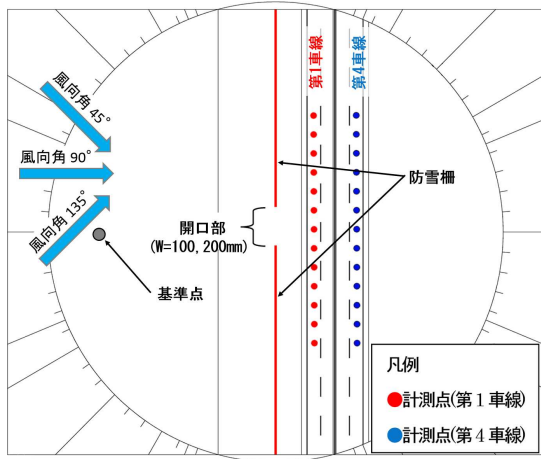


図-29 風速計測箇所図

2. 5. 6 実験結果と考察

風洞実験により取得した風速データの中から、乗用車の目線高さ(高さ1.5m)に相当する高さ $h=15\text{mm}$ のデータを抽出し、風向角(90°、135°)ごとに図-30~図-33に示す。風向角は、風向と道路延長方向のなす角と定義する。ここで図中の横軸は道路縦断方向の測点を示し、防雪柵開口部の中央を0、風下側から見て左側をマイナス、右側をプラスとした。風向角45°の結果は135°と左右対称となったため割愛する。

防雪柵の開口幅100mm、道路に対して風が直交(風向角90°)した場合の風速比を図-30に示す。防雪柵直近の第1車線について見ると、開口部端部では吹き止め柵により風が弱められ(風速比0.2程度)、開口部で風速が上昇し、開口部中央で基準点風速を20%程度上回る結果となった。最も風下側の第4車線については、風速比の変化の傾向は第1車線とおおむね同様であったが、風速比のピーク値が第1車線よりも小さくなる傾向にあった。開口部周辺で集中した風が、防雪柵から離れるに従い拡散しているものと考えられる。

防雪柵の開口幅200mm、道路に対して風が直交(風向角90°)した場合の風速比について図-31に示す。第1車線では、風速比のピーク値は、開口幅100mmの場合と同様であるものの、そのピークの範囲はより広い。第4車線については、開口幅100mmの場合と比べて風速比のピーク値が大きく、基準点風速より大きい。開口部周辺で集中した風が、柵から離れるに従って拡散するものの、開口部の幅が広い場合には、風下に大きく影響するものと考えられる。

このように直交風の場合、開口部中心付近で風が強められること、開口幅が広い場合にはより風下に強風が到達する傾向が見られた。

次にこれまでと同様の条件で、風向角135°の場合の開口幅100mmの場合を図-32に、200mmの場合の風速比を図-33に示す。

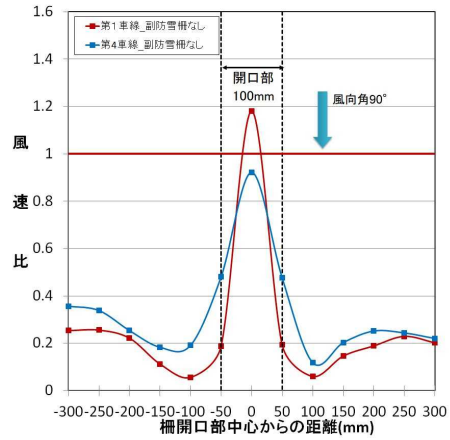


図-30 道路上の縦断方向における風速比 (風向角90°、開口幅100mm)

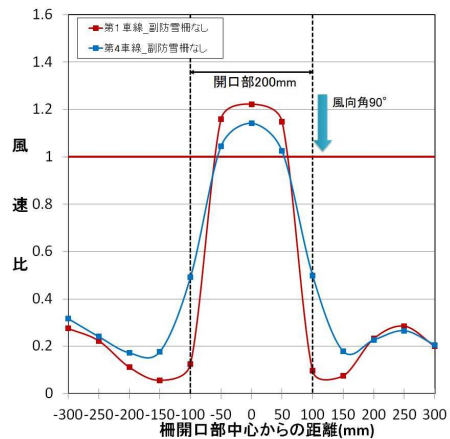


図-31 道路上の縦断方向における風速比 (風向角90°、開口幅200mm)

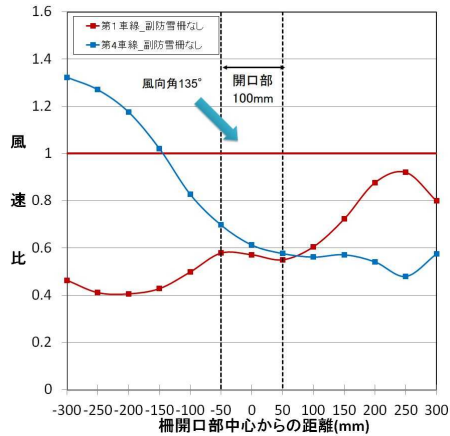


図-32 道路上の縦断方向における風速比 (風向角135°、開口幅100mm)



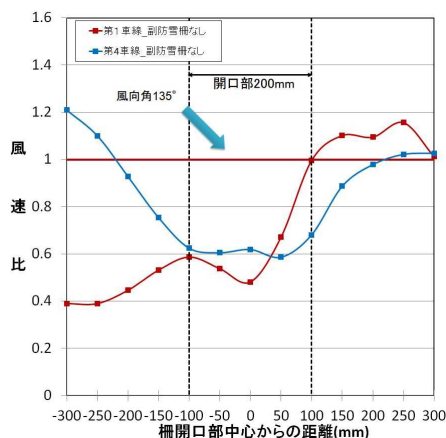


図-33 道路上の縦断方向における風速比  
(風向角 135°、開口幅 200mm)

開口幅 100mm の場合 (図-32)、第 1 車線では、風速比のピークの位置が風下側 (開口部中心からの距離がプラスの方向) に移動するものの、風速比のピークの値は 0.9 程度と、直交風の場合 (図-30、図-31) と比べて小さかった。第 4 車線については、風上側 (開口部中心からの距離がマイナスの方向) の風速比が大きくなっていった。風洞模型は風の風向角 90° の場合に測定洞の幅員とおおむね一致させているが、模型を 45° 回転させたことにより、測定洞幅員の左右に各々空隙が生じ、気流が回り込んだことが原因と見られる。今後風を回り込まないよう、模型延長の変更や、端板の設置等の対策を講じていきたい。

開口幅 200mm の場合 (図-33)、第 1 車線では、風速比のピーク値が開口幅 100mm 場合と比べてより大きく、影響範囲も広がっていた。また、直交風の場合よりも風速比のピークの値がやや小さかった。第 4 車線では防雪柵設置部の方が風速比が高い結果となったが、開口幅 100mm の場合 (図-32) と同様に柵端部から気流が回り込んだことが原因と見られる。

### 3. 視程急変箇所の緩和対策効果の解明

#### 3.1 既往の対策技術

道路の交差点や取付道路等では、開口部を設けるため、視程が急激に変化する箇所が発生することはすでに述べた。このような視程急変箇所における緩和対策には、副防雪柵、端部処理施設として擬木板あるいは取付道路における開口部対策として門扉式防雪柵など利用される事例はある<sup>1)</sup>。また米国<sup>12)</sup>では、立体交差により開口部で吹きだまりを発生させない方法、防雪林を L 字型あるいは直角三角状に配置する方法や道路線形を直線からカーブ線形に道路構造を変更することで、視程急変を回避す

る方法などがある。さらに、卓越風向が道路に平行した場合には、道路に対し角度をもって配置した複数の柵で構成されるヘリンボン柵が紹介されている<sup>12)</sup>。なお、ヘリンボンとは模様的一种でニシンの骨という意味があり、杉綾模様とも言われる。しかし、発生する視程障害の実状に即した対策手法の選定が必要とされるものの国内だけでなく海外においても調査例は少なく、対策方法は確立されていない。

#### 3.2 移動気象観測

前章で述べた移動気象観測区間 (図-1) には、副防雪柵による開口部対策 (図-34) が行われている 17 箇所が含まれる。開口部対策としての副防雪柵の有効性について検討するため、開口部の有無が風速や視程等の道路気象に及ぼす影響について検討する。ここでは、2.2 に示した条件に加え、開口部の条件を揃えるため、開口幅 10m 以上 20m 未満の箇所のデータを抽出した。また、データのばらつきを抑えるため 10m 移動平均 (観測地点前後各 5m のデータの平均) データを用いた。

副防雪柵の有無と風速比との関係について図-35 に、副防雪柵の有無と視程比との関係について図-36 に示す。風速比について見ると、最大値、中央値とも副防雪柵がある場合に小さく、風速比は風速が安定的に低下する傾向を示した。次に、視程比について見ると、最大値から最小値まで副防雪柵がある場合に大きく、また、中央値が高いことから、視程の低下が安定して抑えられている傾向がみられた。

これらから、副防雪柵は開口部における強風や急激な視程障害の発生を効果的に抑制できるものと考えられる。ただし、本検討結果は、風向や風速域の影響、開口幅の影響を十分に定量化したものではないため、以降で示す石狩吹雪実験場での現地観測や数値シミュレーション解析、風洞実験の結果と合わせて検討する必要がある。



図-34 調査区間に設けられている副防雪柵

### 3. 3. 1 観測方法

石狩吹雪実験場（北海道石狩市美登位、北緯 43 度 12 分 40 秒、東経 141 度 23 分 42 秒）には、約 180m 程度の直線道路（アスファルト舗装、一部周回可能）の道路脇に、高さ 5.07m の防雪柵（吹き止め柵式）（L=102m）が設置されており、北北東の方向に伸びている。防雪柵には開口部が 2 箇所設けられている（図-37）。平成 30 年度冬期の観測では、開口部 1 の南側片側に 2 枚の防雪柵を 45° で繋ぎ合わせた副防雪柵を、開口部の視程急変対策として設置した（図-37 左下。図-38 上）。令和元年度冬期は、同じく開口部 1 において、両側に 1 枚の防雪柵を 90° で繋ぎ合わせた副防雪柵を設置した（図-37 右下。図-38 下）。なお、開口部 2 は、比較のため無対策とした。それぞれの開口部の幅は 9m であるが、平成 30 年度冬期は副防雪柵を 45° の交差角で設置したことから、実質的な開口幅は 6.9m である（図-37 左下）。

気象観測機器は、風上側に 1 点、風下側に 6 点設置した（図-37）。風上側の 1 点（図-37 の①）を基準点として、開口部と開口部に挟まれた防雪柵の背後に、平成 30 年度冬期は 20m、令和元年度冬期は 17m 離し、ドライバーの視点を想定した高さ 1.5m の位置に、風向風速計（R.M. Young 製：KDC-S04）と、視程計（明星電気製：TZE-4）を設置した。また、風下側には、それぞれの開口部の中央（図-37 の②、⑤）と道路路側（開口部から 6.5m）の点（図-37 の③、⑥）に視程計と風向風速計を設置し、設置高さは風上側と同じである。データの取得は 1.0s ごとに行った。

### 3. 3. 2 観測結果

図-39 は、基準点の風向別に、基準点①の風速に対する、開口部の道路路側における観測点③と⑥の風速をプ

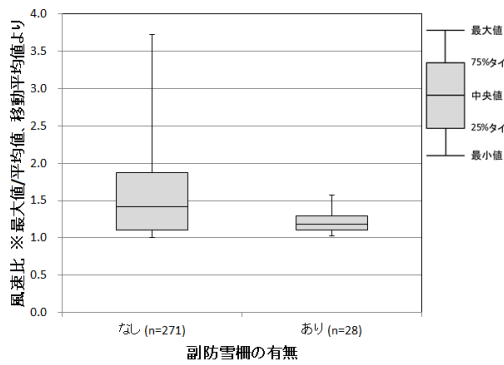


図-35 副防雪柵の有無と風速比の関係

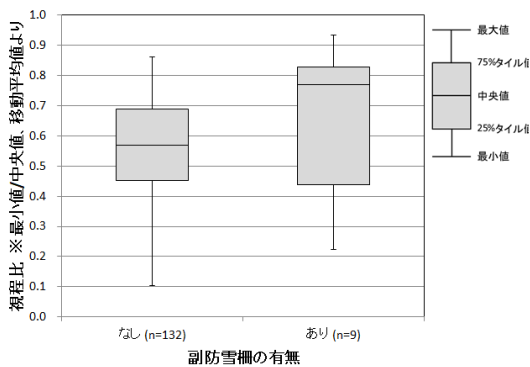


図-36 副防雪柵の有無と視程比の関係

## 3. 3 石狩吹雪実験場における現地観測

防雪柵開口部の対策として、副防雪柵を設置した場合の風速急変や視程急変の緩和効果に関して、平成 30 年度冬期と令和元年度冬期に石狩吹雪実験場で実施した現地観測結果を報告する。

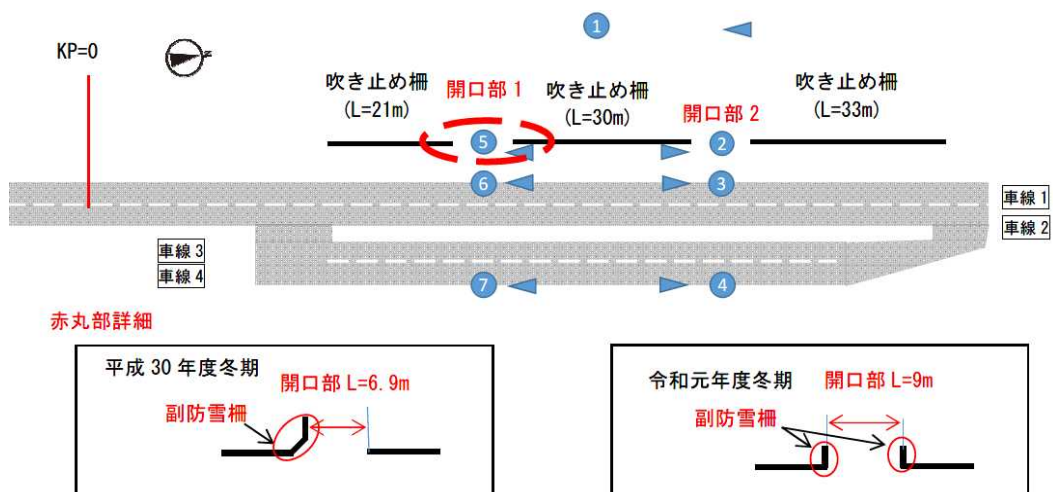
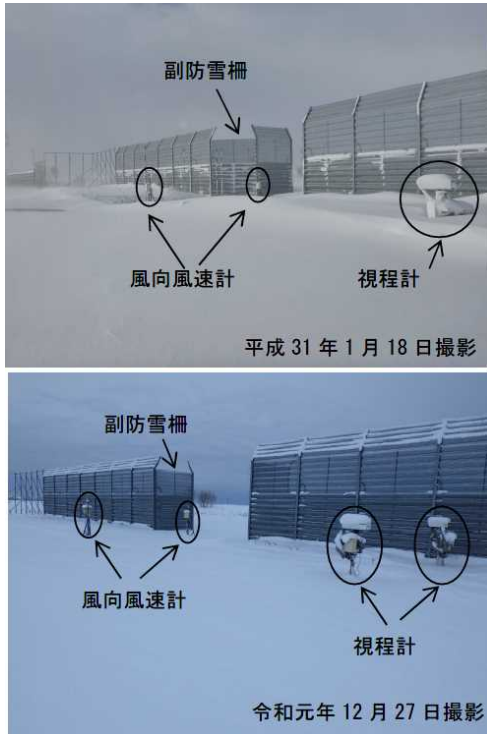


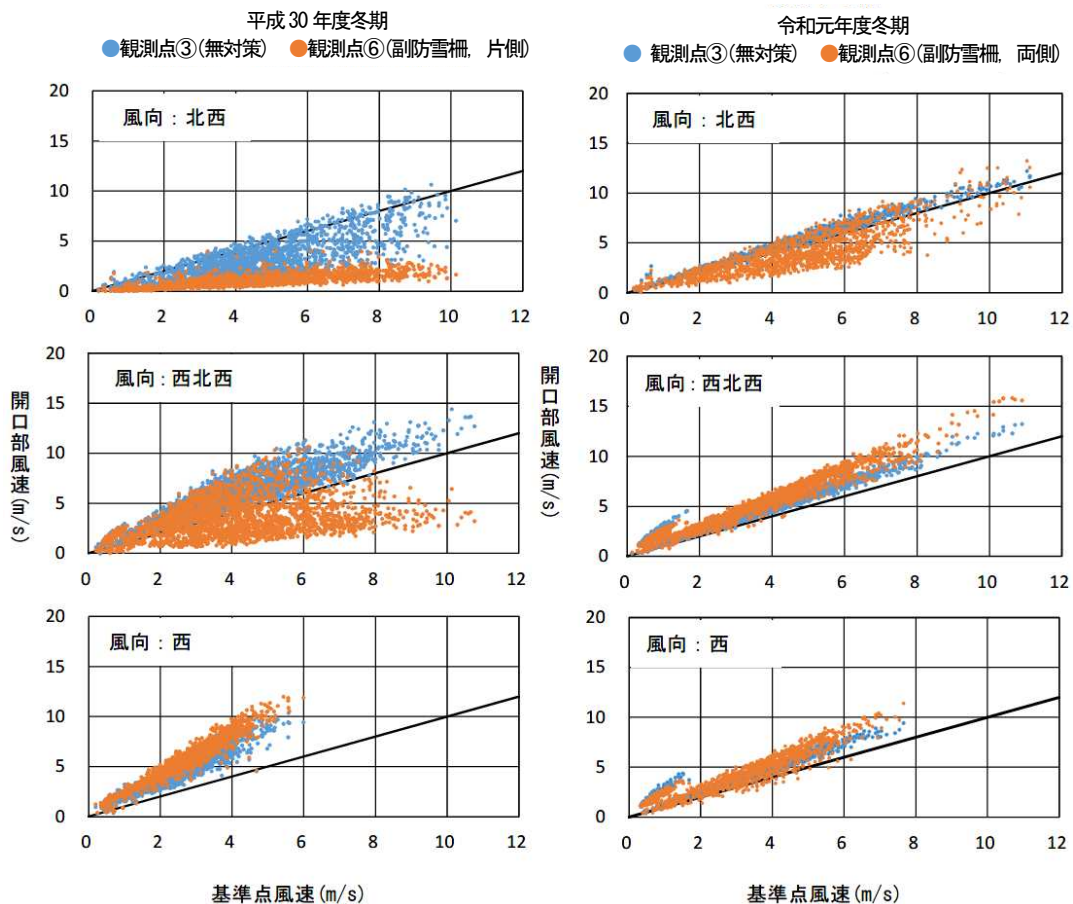
図-37 石狩吹雪実験場内の防雪柵、気象観測機器の配置状況  
（図中●は風向風速計、▲は視程計とその向きを示す）



図一38 副防雪柵設置部の観測状況  
(上段:平成30年度冬期、下段:令和元年度冬期)

ロットしたものである。副防雪柵を設置している観測点⑥の観測値を青丸(●)で、無対策の観測点③の観測値を橙色(●)で示している。基準点①の風向のうち、西北西が吹き止め柵にほぼ直交する風向であり、北西と西は防雪柵に対して斜風となる。

図一39より、平成30年度冬期では、基準点の風向が北西と西北西の時は、観測点⑥(副防雪柵あり、片側)と観測点③(副防雪柵なし)を比較して、副防雪柵がある観測点⑥の風速が小さかったが、基準点の風向が西の時は、逆に副防雪柵がある観測点⑥の風速が大きくなる結果となった。令和元年度冬期では、基準点の風向が北西の時は、観測点⑥(副防雪柵あり、両側)の方が観測点③(副防雪柵なし)よりも風速が小さくなったが、基準点の風向が西北西と西の時は、副防雪柵のある観測点⑥の風速が大きくなった。また、平成30年度冬期と令和元年度冬期のいずれも、基準点①の風速より開口部の観測点③と⑥の風速が大きくなっている。以上より、風向が防雪柵に直交する西北西~西の場合、副防雪柵を設置した場合の開口部の風速は、無対策の開口部や基準点の風速よりやや大きくなる傾向がみられた。



図一39 基準点①と開口部の観測点③と⑥における風速の比較

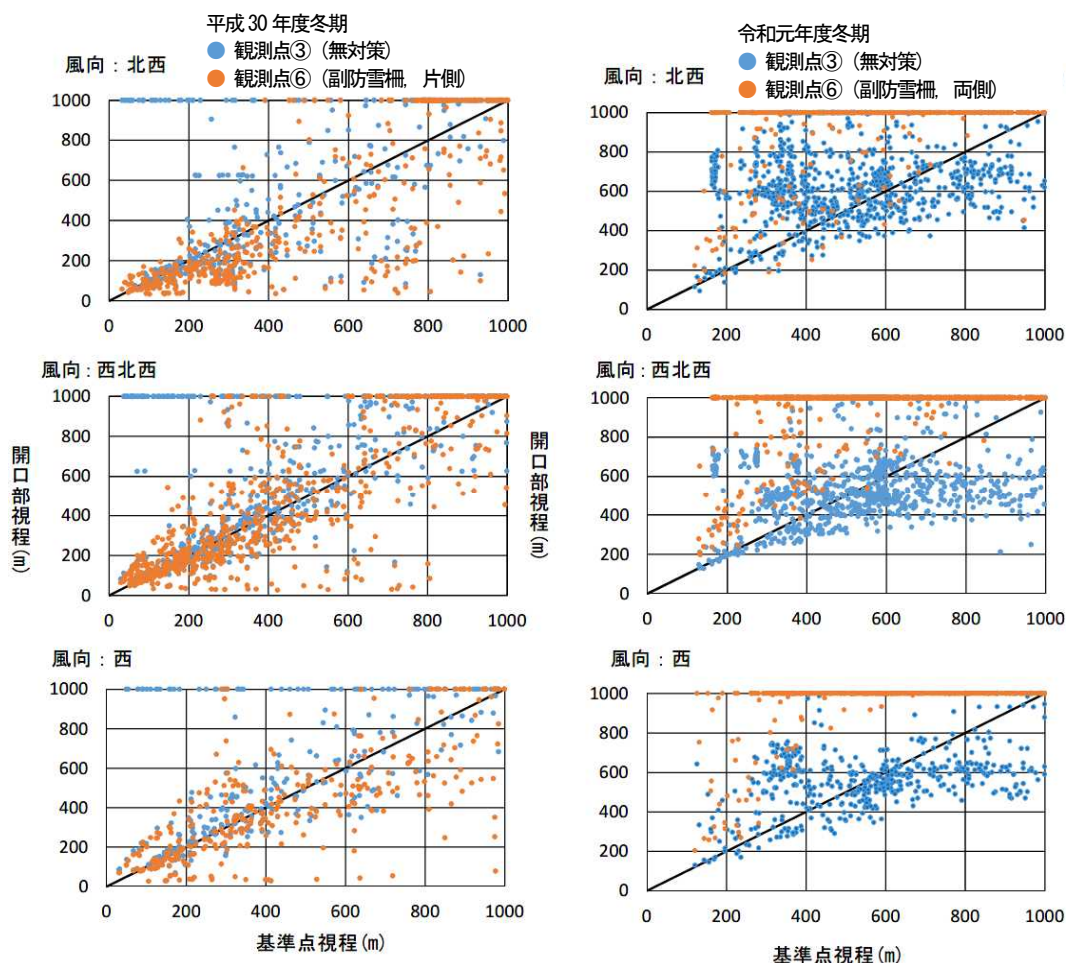


図-40 基準点①と開口部の観測点③と⑥における視程の比較

図-40は、基準点①の風向別に、基準点の視程値に対する開口部の道路路側③と⑥における視程値をプロットしたものである。なお、視程障害時を想定し、基準点の視程値が1000mを下回るデータのみをプロットした図-40より、平成30年冬期は、北西、西北西、西風のいずれも風向も、観測点⑥(副防雪柵あり、片側)と観測点③(副防雪柵なし)で視程の観測値に大きな違いはみられない結果となった。一方、令和元年度冬期は、平成30年度と同じ風向に対して、全ての風向で観測点③(副防雪柵なし)と比べて観測点⑥(副防雪柵あり、両側)の視程が良い結果となった。以上の結果から、令和元年度冬期の観測において、開口部対策による視程急変の緩和効果がみられ、副防雪柵を設置する場合、開口部の片側よりも両側に設置の方が視程急変の緩和効果が見込める結果となった。ただし、図-39で示したように、風向が防雪柵に直交に近い場合は、副防雪柵の設置によって風速が強まる傾向にあるので、現地の主風向に基づく風速急変と視程急変の両方の緩和効果を勘案して対策方法を選定する必要があると考えられる。

### 3.3.3 副防雪柵による対策効果について

以上の観測結果より、副防雪柵の設置により防雪柵開口部における風速や視程の急変が緩和されることを確認した。ただし、風向が防雪柵に直交する場合は、副防雪柵の設置により逆に開口部の風速が強まる傾向も明らかになった。そこで、4章では、直交風でも開口部における風速や視程の急変に対して緩和効果を有する対策工(例えば、図-41の斜行柵群)を考案し、これらの新対策工法の風速や視程の急変緩和効果を明らかにする。

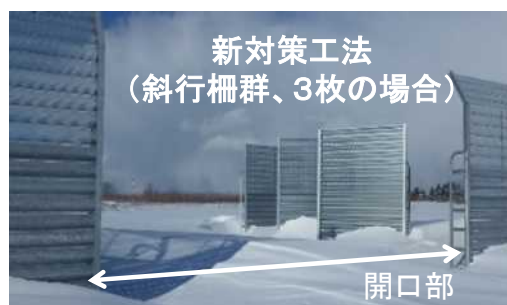


図-41 開口部における斜行柵群の設置状況

### 3. 4 数値シミュレーションによる検討

2.3 節や3.3 節で行った石狩吹雪実験場における現地観測では、防雪柵開口部における強風の発生や副防雪柵の設置による風速急変の緩和効果が確認された。こうした現象を把握するためには、風速の面的な分布状況の調査が重要と考えられるが、現地への観測機器の多数配置には限界があるため、数値解析(有限要素法)により、観測点周辺の風速分布を可視化し、柵まわりの風の流れを表現する。ここでは、3.3 節で行った石狩吹雪実験場における防雪柵開口部対策の効果に関する観測のうち風速について、数値シミュレーションによる解析結果を報告する。

#### 3. 4. 1 解析方法

3.3 において現地観測した、副防雪柵の形状や風向の違いによる風速の低減や増加を、数値シミュレーションで再現する。なお、数値シミュレーションは、観測点以外の風速においても三次元で可視化が可能である。防雪柵の三次元 CAD 形状の作成には SOLIDWORKS (Dassault Systèmes SolidWorks 社製) を使用し、数値シミュレーターには SOLIDWORKS flow simulation を使用した。なお、境界条件等の詳細については2.4.1 項を参照されたい。

#### 3. 4. 2 解析結果

図-42 に数値シミュレーションで計算した風速の水平分布の結果の一例を示す。図中の色が風速を表し、図中矢印の向きに風速 10m/s の風が吹く場合の計算結果である。図-42 (a)と (b)は、平成 30 年度冬期に観測を実施した副防雪柵を開口部の片側に設置した場合で、各図中の上側の開口部は無対策で、下側の開口部に副防雪柵を配置している。また、図-42 (a)は防雪柵に対して直交する風向の場合、図-42 (b)は直交に対して 11.25° の方向からの斜風の場合である。同様に、図-42 (c)と(d)は、令和元年度冬期の副防雪柵を開口部の両側に設置した場合の風速の水平分布の計算結果である。

図-42 より、風向や副防雪柵の形状によって程度に差はあるものの、開口部が、風を収束させ、風下側の風速が増す効果を確認することができる。また、無対策の開口部と副防雪柵を設置した開口部における風速分布を比較すると、副防雪柵を開口部の片側に配置した場合(図-42 (a)と (b))、風の流れが副防雪柵を設置した側に曲がる傾向があり、強風域の位置が変化することがわかる。つまり、3.3 節などで示した開口部の現地観測では、

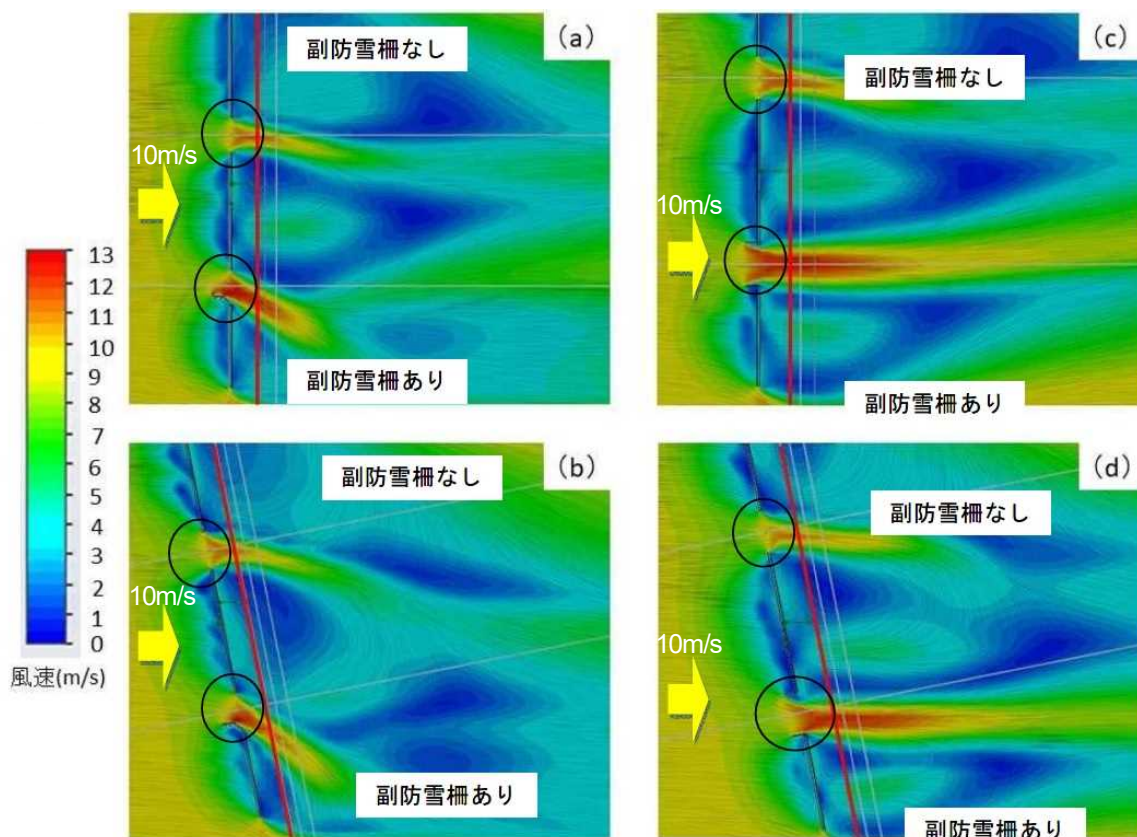


図-42 数値シミュレーションによる風速の分布(風速は図中矢印の向きに 10m/s で入力)  
 (a)平成 30 年度冬期直交風、(b)平成 30 年度冬期斜風(柵に対して-11.25°)、  
 (c)令和元年度冬期直交風、(d)令和元年度冬期斜風(柵に対して-11.25°)

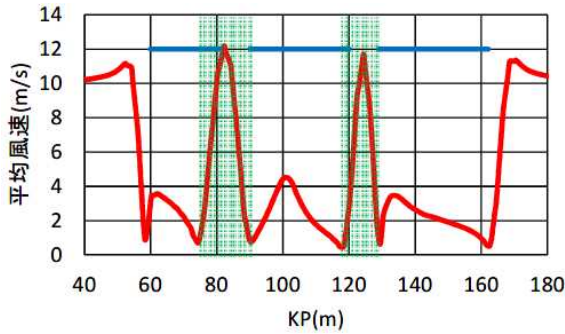


図-43 平成30年度冬期、西北西風の時の柵から6.5m離れた地点における風速のシミュレーション結果

表-2 数値シミュレーションによって求められた強風域における最大風速と変化率

	平成30年度冬期					
	副防雪柵あり			副防雪柵なし		
風向	北西	西北西	西	北西	西北西	西
強風域 (m)	19.9	16.0	13.3	11.2	11.5	10.2
最大風速 (m/s)	10.8	12.2	11.6	11.1	11.7	11.4
変化率	0.5	0.8	0.9	1.0	1.0	1.1

	令和元年度冬期					
	副防雪柵あり			副防雪柵なし		
風向	北西	西北西	西	北西	西北西	西
強風域 (m)	19.9	16.0	13.3	11.2	11.5	10.2
最大風速 (m/s)	15.3	14.5	12.4	12.4	11.0	10.7
変化率	0.8	0.9	0.9	1.1	1.0	1.0

図-42 で示した強風域を捉えるように観測機器を配置する必要があり、現地観測結果の解析や考察には図-42 で示すような数値シミュレーションの解析結果と合わせて行うことが重要であると考えられる。

また、図-42 より、副防雪柵の配置により、無対策の開口部に比べて道路縦断方向に対する強風域の幅が広がり、風速の急変を和らげる効果が見られた。図-43 は、図-42 (a)における柵に近い車線の路側(防雪柵より6.5mの位置、赤線で示す)の道路縦断方向の風速の推移である。開口部で風が強くなるが、開口部の前後でいったん風速が極小となる地点の間(図-43 中の緑色で着色部)を強風域と定義し、この区間の最大風速を強風域の長さで割った値を変化率と定義した。開口部における風速の変化率の計算結果を表-2 に示す。これによると、副防雪柵を設置した場合の方が、変化率が低く抑えられている。このことは、開口部における風速の急変対策を行う

上で、副防雪柵は有効な手段となり得ることを示している。

### 3.4.3 副防雪柵に替わる新たな対策工法に向けて

以上より、数値シミュレーションによる解析でも、副防雪柵が持つ防雪柵開口部の風速急変の緩和効果を確認した。なお、数値シミュレーションによる検討では、開口部における副防雪柵の配置や構造、風向を変えた様々な条件で、開口部周辺の風速分布の解析を行い、より大きな風速急変の緩和効果を有する対策工法について検討<sup>-51-13),14)</sup>を行った(例えば、図-44)。つまり、防雪柵の開口部対策として、直交風でも開口部における風速急変や視程急変に対して緩和効果を有する対策工法の検討を、現地観測や風洞実験を実施する前の事前検討として行った。この検討の一例として、図-44 に新対策工法(斜行柵群、くの字型柵)の数値シミュレーションによる風速分布の解析結果を示す。これらの新対策工法の防雪柵開口部における風速や視程の急変緩和効果については、4章で、石狩吹雪実験場における実物大の防雪柵を用いた現地観測(4.1節)と防雪柵模型を用いた風洞実験(4.2節)の結果を示す。

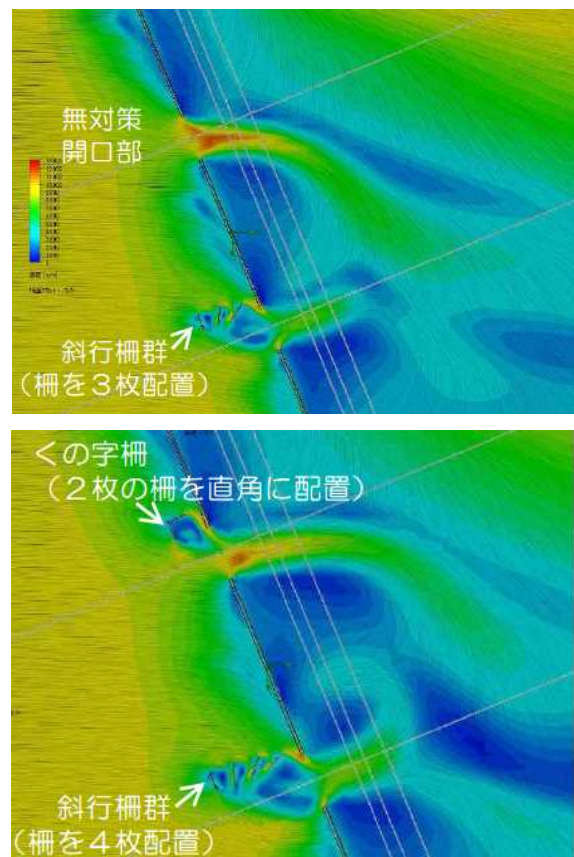


図-44 開口部における新対策工法の数値シミュレーションによる風速分布の検討例

3. 5 風洞実験による副防雪柵の開口部への影響解析

副防雪柵の有無による開口部への影響を解析するため、風洞実験を行った。

3. 5. 1 実験条件

実験条件は前章 2. 5 と同様である。実験を行った副防雪柵の設置例を図-45、図-46 に示す。副防雪柵の長さは30mmとした。風向角ごとの計測点縦断方向の風速比を、2. 5 で計測した副防雪柵がない場合と重ねたものを図-47～図-52 に示す。

3. 5. 2 実験結果と考察

防雪柵の開口幅 100mm、道路に対して風が直交（風向角 90°）したときの副防雪柵の有無による風速分布の違いについて

図-47 に示す。防雪柵直近の車線（第1車線）について見ると、副防雪柵がある場合には、風速比のピークを示す位置が副防雪柵側に移行し、風速比の値が上昇した。また強風の影響範囲も拡大する傾向となっていた。副防雪柵は一般に、風の水平方向の流入を抑制すると考えられるが、本実験では開口部付近の風が副防雪柵により整流され、副防雪柵側に誘導されたと考えられる。最も風下側の第4車線については、強風となる範囲の傾向

は第1車線とおおむね同様であったが、風速比のピーク値が大きくなる傾向にあった。

その理由として、付近の風が副防雪柵により整流され、副防雪柵側に誘導されたと考えられる。最も風下側の第4車線については、強風となる範囲の傾向は第1車線とおおむね同様であったが、風速比のピーク値が大きくなる傾向にあった。

上記と同様の条件で、防雪柵の開口幅を 200mm とした場合の副防雪柵の風速比を図-48 に示す。

第1車線では、風速比のピーク値と副防雪柵の有無による影響は、開口幅 100mm の場合と同様であるものの、

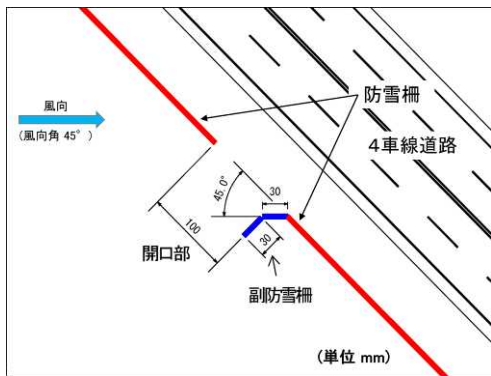


図-45 副防雪柵配置例  
(風向角 45°、開口幅 100mm、副防雪柵 30mm)

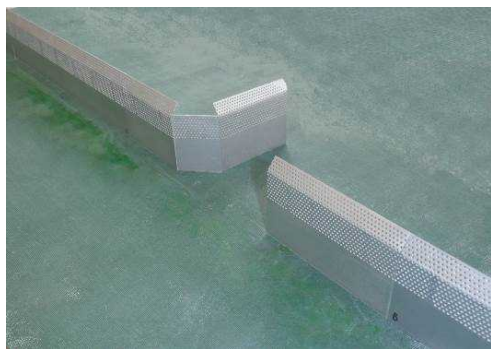


図-46 副防雪柵設置例

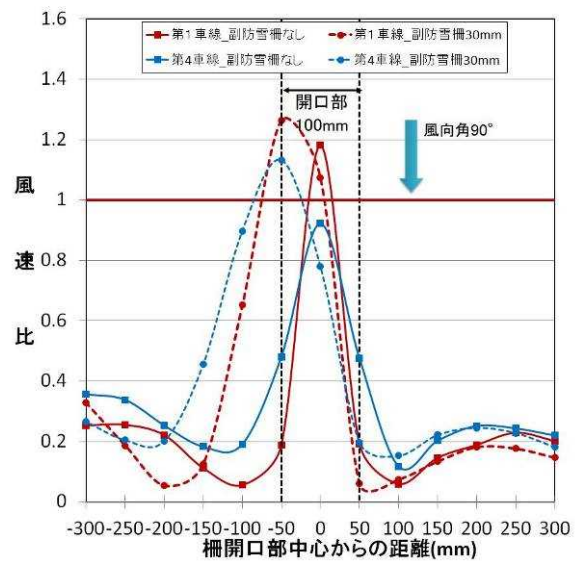


図-47 道路上の縦断方向における風速比  
(風向角 90°、開口幅 100mm)

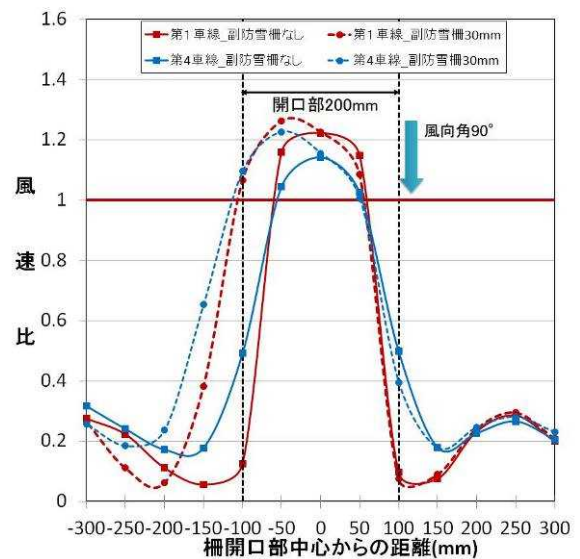


図-48 道路上の縦断方向における風速比  
(風向角 90°、開口幅 200mm)

## 5 極端気象がもたらす雪氷災害の被害軽減のための技術の開発

強風の影響範囲はより広がっていた。第4車線については、開口幅100mmの場合と比べて風速比のピークの値が大きくなった。開口部周辺で集中した風が、距離とともに拡散するものの、開口部の幅が広い場合には、強風がより風下側に広く影響するものと考えられる。直交風の場合、副防雪柵の影響により風速比のピークの位置が副防雪柵側に移動しピークの値も上昇することが判った。

これまでと同様の実験条件で、風向角135°の場合の風速比を図-49(開口幅100mm)と、図-50(開口幅200mm)に示す。

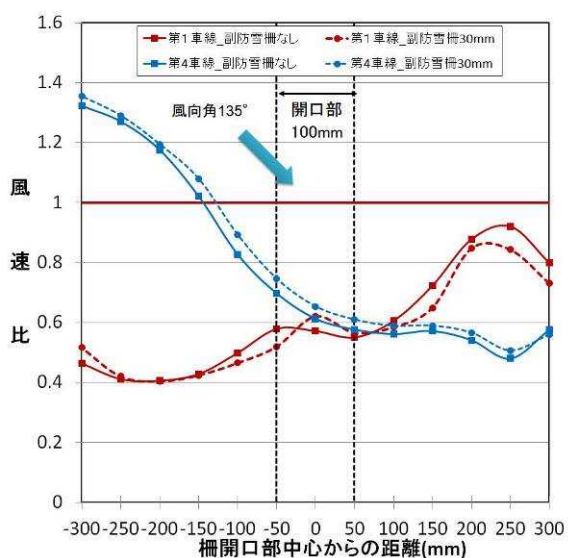


図-49 道路上の縦断方向における風速比  
(風向角 135°、開口幅 100mm)

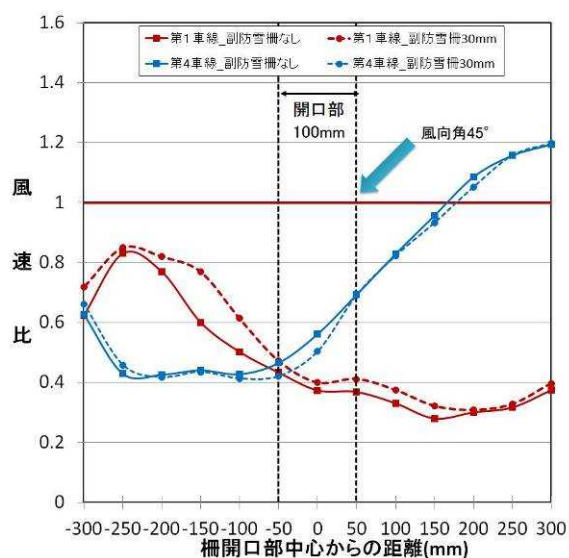


図-51 道路上の縦断方向における風速比  
(風向角 45°、開口幅 100mm)

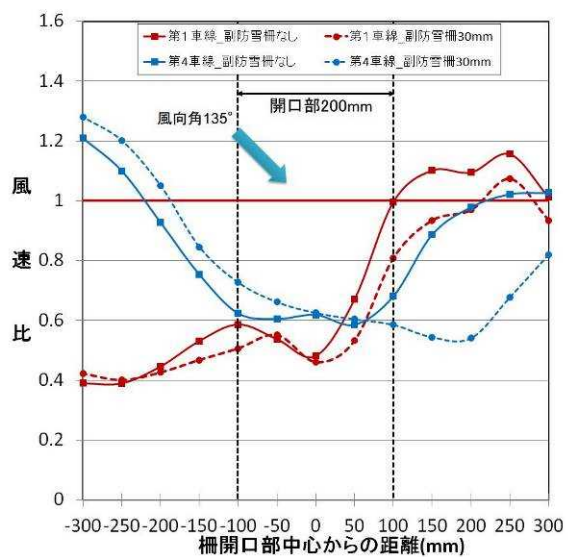


図-50 道路上の縦断方向における風速比  
(風向角 135°、開口幅 200mm)

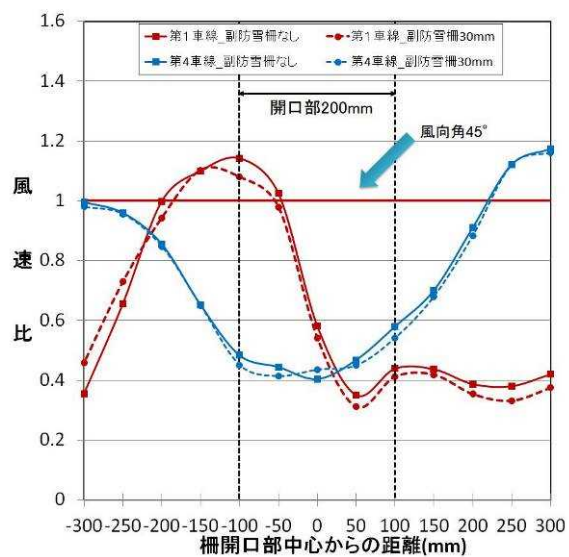


図-52 道路上の縦断方向における風速比  
(風向角 45°、開口幅 200mm)



比が0.6以上となり、「副防雪柵あり」の方が「副防雪柵なし」よりも風速比が小さい。また、その低減効果は開口幅100mmよりも大きかった。

次にこれまでと同様の条件で、風向角45°の場合の風速比を図-51(開口幅100mm)と、図-52(開口幅200mm)に示す。

開口幅100mmの場合(図-51)、第1車線では、副防雪柵がある場合には、ピーク付近の風速比の値が、副防雪柵がない場合に比べてより大きくなる傾向にあった。これは、副防雪柵により、風が開口部に誘導され、集中したことが原因と考えられる。

開口幅200mmの場合(図-52)、第1車線では、「副防雪柵なし」の場合に風速比のピークの値がより大きく、強風の範囲も広がっていた。また、開口幅100mmの場合と比べ、副防雪柵の影響による風速比の上昇は顕著ではなかった。副防雪柵の影響と比べ、開口幅が大きく影響しているものと見られる。

### 3.6 副防雪柵の種類による開口部への影響解析

#### 3.6.1 実験条件

平成29年度は、2.5及び3.5.1で記述した「副防

雪柵なし」「副防雪柵30mm」の実験を行った。平成30年度は、副防雪柵の長さなどの違いによる風速の影響を解析するため、「副防雪柵なし」、「副防雪柵30mm」、「副防雪柵60mm」、「副防雪柵90mm」、「副防雪柵30mm張出10mm」、「副防雪柵60mm張出10mm」の6パターンの実験を行った。表-3に実験条件と副防雪柵のパターンを、図-53に副防雪柵の設置状況を示す。副防雪柵の設置は角柵を付けて設置した。

#### 3.6.2 実験結果と考察

##### 1) 風向角90°

図-54に「実験条件1(開口幅100mm第1車線)」、図-55に「実験条件2(開口幅100mm第4車線)」、図-56に「実験条件3(開口幅200mm第1車線)」、図-57に「実験条件4(開口幅200mm第4車線)」の風速比の分布を示す。

##### イ) ピーク値について

表-4に風向角90°の風速比のピーク値を示す。条件1~4で副防雪柵が長い方が風速を増す傾向が確認できた。副防雪柵が長い方が、より開口部垂直方向に風が整流され、開口部付近の風速がより増すためと考えられる。また、副柵30mmでは張出があることによる風速比の軽減が確認できた。張り出すことにより開口部への風の流入を防いでいたと考えられる。しかし、副柵60mmでは張出有りの風速比がやや大きくなっている。張出により開口部への風の流入は防いでいるが、副柵30mmに比べ柵長が長いので、風が整流されて風速が増し、張出による効果が相殺されたと考えられる。

##### ロ) ピーク位置について

副防雪柵を設置しない場合のピーク位置は開口部中心で、副防雪柵を設置した場合は開口部中心から-50mm(副防雪柵を設置している側)である。ばらつきはあるが特に傾向は見られなかった。

##### ハ) 風速比の上昇について

副防雪柵を設置した場合は、設置しない場合よりも風速比が上昇する範囲が広い。特に副柵60mm張出10mmでは上昇範囲が広い。仰角(9.59°)があることで、副防雪柵設置側(マイナス方向)へ風を誘導していたと考え

表-3 実験条件と副防雪柵のパターン

実験条件	風向角(°)	開口幅(mm)	計測車線	副防雪柵のパターン
1	90	100	第1	副防雪柵なし(角柵なし) 副防雪柵30mm(+角柵30mm) 副防雪柵60mm(+角柵30mm) 副防雪柵90mm(+角柵30mm) 副防雪柵30mm張出10mm(+角柵30mm) 副防雪柵60mm張出10mm(+角柵30mm)
2	90	100	第4	
3	90	200	第1	
4	90	200	第4	
5	135	100	第1	
6	135	100	第4	
7	135	200	第1	
8	135	200	第4	
9	45	100	第1	
10	45	100	第4	
11	45	200	第1	
12	45	200	第4	

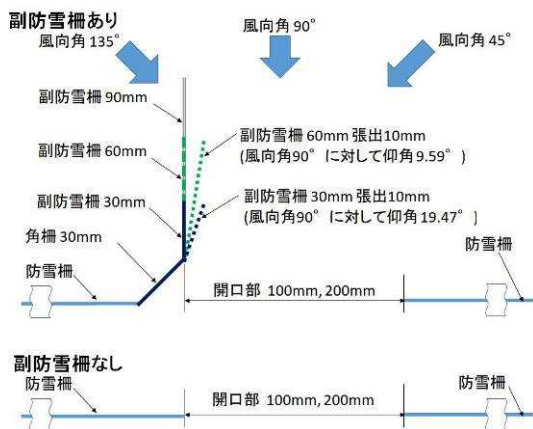
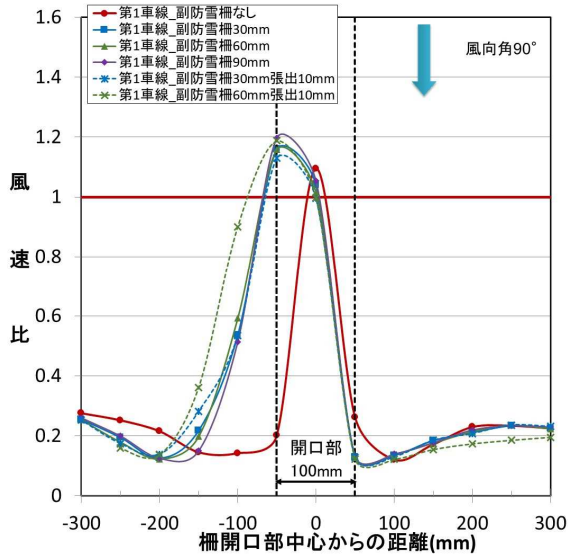


図-53 副防雪柵の設置状況

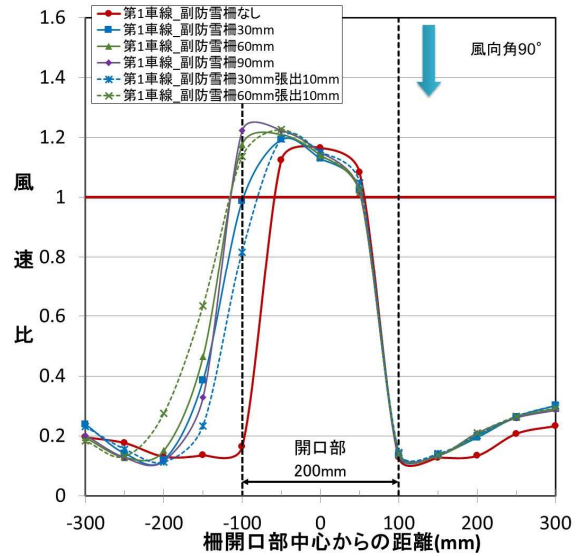
表-4 風速比のピーク値(風向角90°)

実験条件	風向角(°)	開口幅(mm)	計測車線	副防雪柵なし	副防雪柵30mm	副防雪柵60mm	副防雪柵90mm	副防雪柵30mm張出10mm	副防雪柵60mm張出10mm
1	90	100	第1	1.09 (1)	1.16 (3)	1.16 (3)	1.20 (6)	1.13 (2)	1.19 (5)
2	90	100	第4	0.85 (1)	1.05 (3)	1.06 (4)	1.07 (5)	1.02 (2)	1.08 (6)
3	90	200	第1	1.16 (1)	1.19 (2)	1.21 (4)	1.22 (5)	1.19 (2)	1.23 (6)
4	90	200	第4	1.08 (1)	1.10 (2)	1.14 (4)	1.16 (6)	1.11 (3)	1.14 (4)

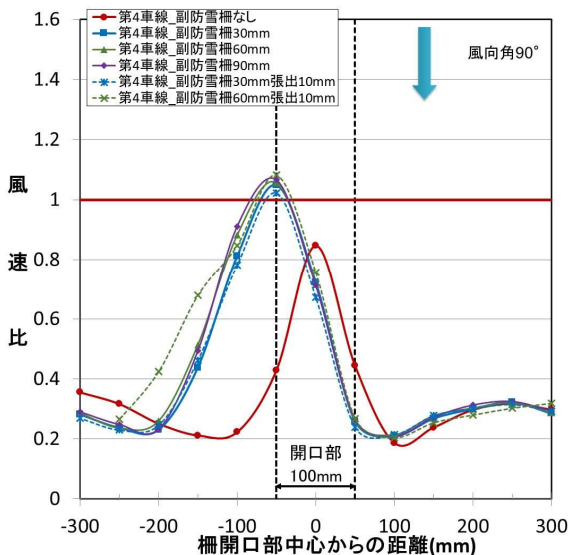
( )内の数値は風速比が低い方からの順位



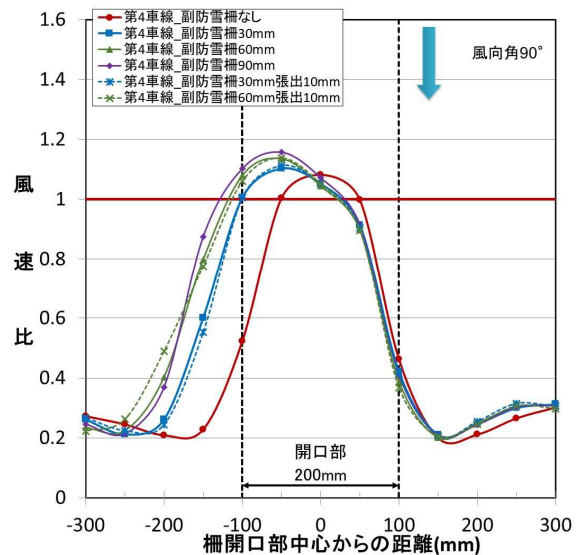
図一54 道路上の縦断方向における風速比  
(実験条件 1、風向角 90°、開口幅 100mm、第 1 車線)



図一56 道路上の縦断方向における風速比  
(実験条件 3、風向角 90°、開口幅 200mm、第 1 車線)



図一55 道路上の縦断方向における風速比  
(実験条件 2、風向角 90°、開口幅 100mm、第 4 車線)



図一57 道路上の縦断方向における風速比  
(実験条件 4、風向角 90°、開口幅 200mm、第 4 車線)

られる。しかし、副柵 30mm 張出 10mm は、同じ柵長の副柵 30mm と上昇範囲に差が無い。柵長が短いため、副防雪柵の設置側（マイナス方向）へ風が整流しきれず誘導が少なくなったと考えられる。

## 2) 風向角 135°

2. 5. 6 で前述した結果（図-32、図-33）では測定洞幅員の左右に空隙が生じ気流が回り込んだと見られるため、防雪柵の端部に板を設置し、風が回り込まないように対策を講じて実験を行った（図-58）。

図-59 に「実験条件 5（開口幅 100mm 第 1 車線）、



図-58 気流の周り込み対策をした防雪柵模型

図-60 に「実験条件 6 (開口幅 100mm 第 4 車線)」、図-61 に「実験条件 7 (開口幅 200mm 第 1 車線)」、図-62 に「実験条件 8 (開口幅 200mm 第 4 車線)」の風速比の分布を示す。

イ) ピーク値について

風向角 135°の風速比のピーク値を表-5 に示す。副防雪柵の設置側 (マイナス方向) からの風向のため、柵の種類によらず、特に副防雪柵を設置していない側 (プラス方向) で車線を問わず風速比は軽減できた。柵長が短い方が軽減が大きい傾向が窺えた。柵長が長いと風向の垂直方向の幅が制限されるが、柵長が長いために風が整流し軽減が小さくなったと考えられる。

実験条件 5-8 で、柵長が同じでも張出がある方で軽減が確認できた。特に実験条件 7、8 では軽減が大きい。

表-5 風速比のピーク値(風向角 135° )

実験条件	風向角 (°)	開口幅 (mm)	計測車線	副防雪柵なし	副防雪柵 30mm	副防雪柵 60mm	副防雪柵 90mm	副防雪柵 30mm 張出 10mm	副防雪柵 60mm 張出 10mm
5	135	100	第1	0.83 (5)	0.76 (2)	0.79 (3)	0.84 (6)	0.71 (1)	0.79 (3)
6	135	100	第4	0.65 (2)	0.66 (5)	0.65 (2)	0.66 (5)	0.63 (1)	0.65 (2)
7	135	200	第1	1.04 (6)	0.94 (2)	0.99 (4)	1.03 (5)	0.92 (1)	0.96 (3)
8	135	200	第4	0.69 (4)	0.64 (2)	0.71 (5)	0.79 (6)	0.59 (1)	0.67 (3)

( )内の数値は風速比が低い方からの順位

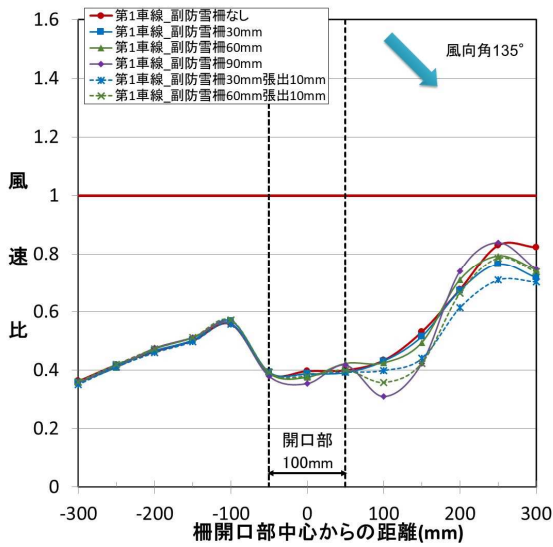


図-59 道路上の縦断方向における風速比 (実験条件 5、風向角 135°、開口幅 100mm、第 1 車線)

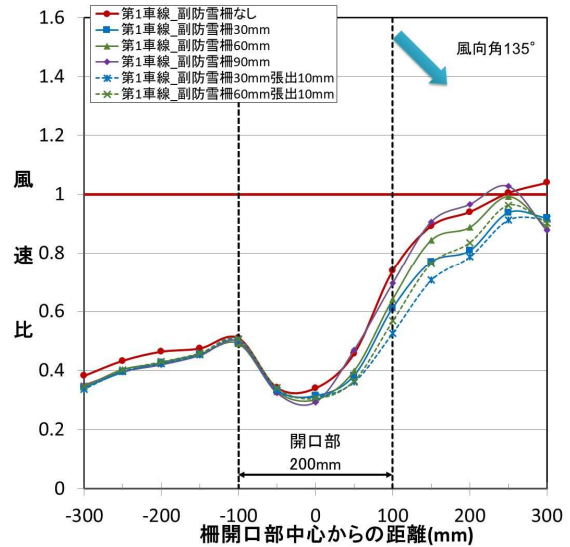


図-61 道路上の縦断方向における風速比 (実験条件 7、風向角 135°、開口幅 200mm、第 1 車線)

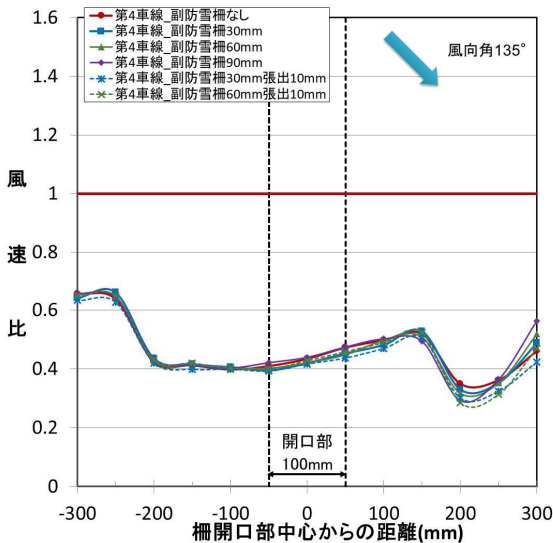


図-60 道路上の縦断方向における風速比 (実験条件 6、風向角 135°、開口幅 100mm、第 4 車線)

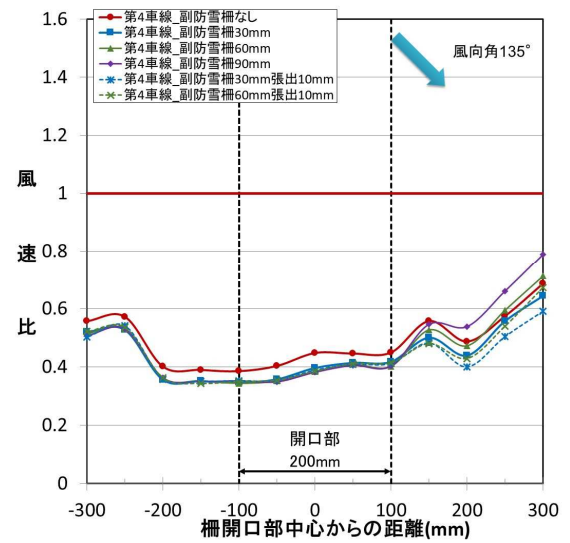


図-62 道路上の縦断方向における風速比 (実験条件 8、風向角 135°、開口幅 200mm、第 4 車線)

張出がある場合、柵長が短い方が効果が大きかった。風向と副防雪柵の仰角が大きくな方が、開口部に流入する風量をより減らすことができ、流入する風も柵が短い方が長いものに比べ整流されにくいと考えられる。

ロ) ピーク位置について

第1車線では開口幅が100mmから200mmになっても風速比のピーク位置は開口部中心から250mm(副防雪柵を設置していない側)と概ね変わらない(副防雪柵なしを除く)。副防雪柵の違いとピーク位置はばらつきがあまりなく大きな傾向が見られなかった。

ハ) 風速比の上昇について

副防雪柵の設置側からの風向のため、副防雪柵の種類によらず、特に副防雪柵を設置していない側(プラス方向)で車線を問わず風速比は軽減できた。

開口部200mmの場合、柵長が90mmと長いと、柵がない場合よりも、第4車線では開口部中心から150mm以降(副防雪柵を設置していない側)で風速比が高い。これは副防雪柵により直接の風の流入は防いでいるが、副防雪柵端部より回り込んだ風によるものと考えられる。柵長が長い程、風速比が高くなっている。回り込んだ風がより整流されると考えられる。そのため、第1車線の開口部中心から150~250mmで風速比が一番高く、風下の第4車線で風速が増す範囲が広がったと考えられる。副防雪柵の違いによる軽減の範囲は変わらないが、柵長が短い方が軽減は大きかった。張出の有無では張り出た方が、張出がある場合は柵長が短い方が、それぞれ軽減が大きかった。風向に対して柵の仰角が大きくな方が開口部への風の流入を防ぎ、また、柵が短い方が長いものに比べ整流されにくいと考えられる。

3) 風向角45°

風向角45°は風向角135°と同様に、実験では柵の端部に板を設置し、風が回り込まないように対策を講じて実験を行った。図-63に「実験条件9(開口幅100mm第1車線)」、図-64に「実験条件10(開口幅100mm第4車線)」

表-6 風速比のピーク値(風向角45°)

実験条件	風向角(°)	開口幅(mm)	計測車線	副防雪柵なし	副防雪柵30mm	副防雪柵60mm	副防雪柵90mm	副防雪柵30mm張出10mm	副防雪柵60mm張出10mm
9	45	100	第1	0.78 (1)	0.81 (2)	0.84 (5)	0.83 (3)	0.84 (5)	0.83 (3)
10	45	100	第4	0.63 (3)	0.61 (1)	0.65 (6)	0.61 (1)	0.63 (3)	0.64 (5)
11	45	200	第1	1.09 (5)	1.05 (3)	1.07 (4)	1.04 (2)	1.03 (1)	1.09 (5)
12	45	200	第4	0.88 (6)	0.85 (3)	0.84 (2)	0.81 (1)	0.87 (5)	0.85 (3)

( )内の数値は風速比が低い方からの順位

線)、図-65に「実験条件11(開口幅200mm第1車線)」、図-66に「実験条件12(開口幅200mm第4車線)」の風速比の分布を示す。

イ) ピーク値について

表-6に風向角45°の風速比のピーク値を示す。開口幅100mmの第1車線では副防雪柵の柵長が長くなると風速比が上昇している。柵長が長くなることで風にあたる面積が増えて、開口部への流入量が増えたためと考えられる。第4車線では、顕著な差を確認できなかった。

ロ) ピーク位置について

副防雪柵を設置していない側(プラス方向)からの風

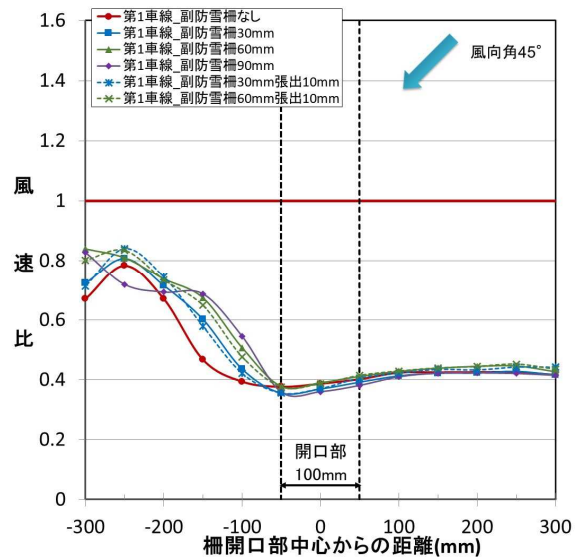


図-63 道路上の縦断方向における風速比 (実験条件9、風向角45°、開口幅100mm、第1車線)

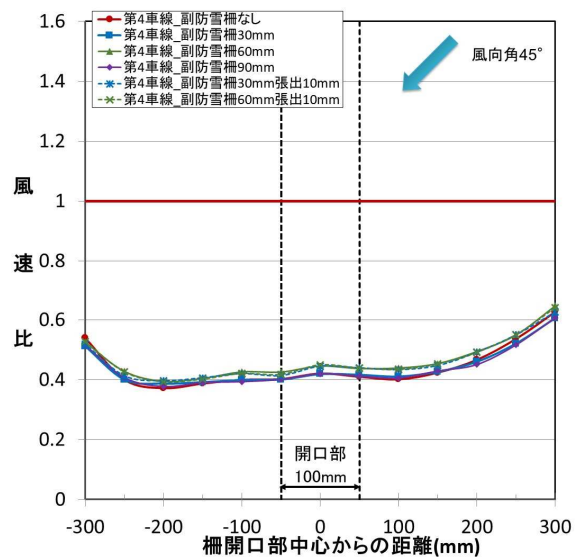
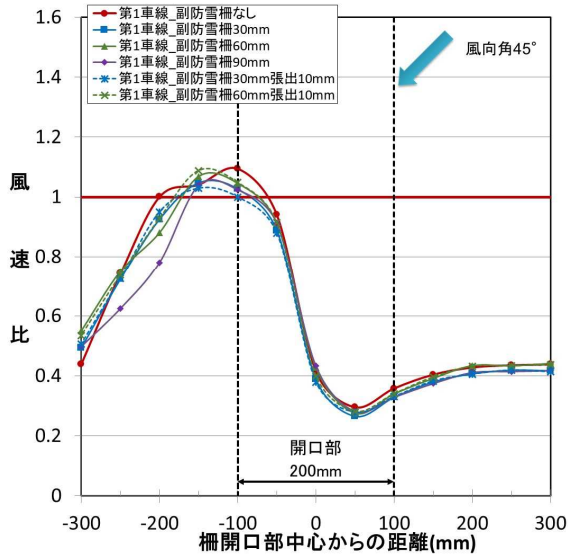
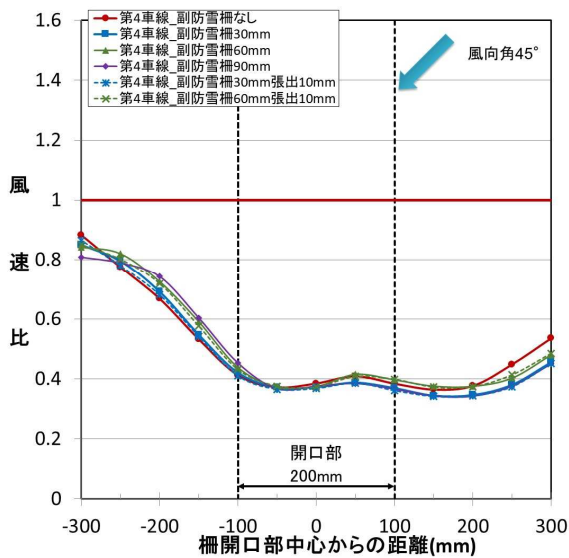


図-64 道路上の縦断方向における風速比 (実験条件10、風向角45°、開口幅100mm、第4車線)



図一65 道路上の縦断方向における風速比  
(実験条件 11、風向角 45°、開口幅 200mm、第 1 車線)



図一66 道路上の縦断方向における風速比  
(実験条件 12、風向角 45°、開口幅 200mm、第 4 車線)

向のため、副防雪柵の設置側（マイナス方向）で風速が増している。実験条件 9 では、柵長が長い方が風速が増している。柵長が長いとより多くの風を開口部に取り入れたためと考えられる。

張出の有無では張出の方が風速の上昇を抑えていた。張り出すことで、風向に対しより副防雪柵の仰角が小さくなり、開口部への流入を防ぐことができると考えられる。

### ハ) 風速比の上昇について

開口部 100mm では副防雪柵が長い方が、第 1 車線の開口部中心から -50 ~ -300mm（副防雪柵の設置側）で風速が上昇した。副防雪柵が開口部への風をより多く流入させていたと考えられる。第 4 車線では、顕著な差を確認できなかった。これは風が拡散されたためと考えられる。

### 3. 7 風向角による開口部への影響解析

#### 3. 7. 1 実験条件

令和元年度は、風向角の違いによる影響を詳細に把握するため風向角 112.5° と風向角 67.5° の実験を行った。副防雪柵は平成 30 年度と同様、「副防雪柵なし」、「副防雪柵 30mm」、「副防雪柵 60mm」、「副防雪柵 90mm」、「副防雪柵 30mm 張出 10mm」、「副防雪柵 60mm 張出 10mm」の 6 パターンとした。表一7 に実験条件と副防雪柵のパターンを示す。

表一7 実験条件と副防雪柵のパターン

実験条件	風向角 (°)	開口幅 (mm)	計測車線	副防雪柵のパターン
1 3	112.5	100	第1	副柵なし(角柵なし)
1 4	112.5	100	第4	副柵30mm(+角柵30mm)
1 5	112.5	200	第1	副柵60mm(+角柵30mm)
1 6	112.5	200	第4	副柵90mm(+角柵30mm)
1 7	67.5	100	第1	副柵30mm張出10mm(+角柵30mm)
1 8	67.5	100	第4	副柵60mm張出10mm(+角柵30mm)
1 9	67.5	200	第1	副柵60mm張出10mm(+角柵30mm)
2 0	67.5	200	第4	副柵60mm張出10mm(+角柵30mm)

#### 3. 7. 2 実験結果と考察

前述 3. 5. 2 の副防雪柵の種類による開口部への影響解析では開口部 100mm と 200mm について記載したが、今実験では同種の傾向を示したため、開口部 100mm を主に記述する。

##### 1) 開口幅 100mm 風向角 112.5°

##### イ) ピーク値について

図一67 に風向角 112.5° 開口幅 100mm 第 1 車線のピーク値を示す。風向角 90° の場合は副防雪柵なしが一番低かったが、風向角が 112.5° になると副防雪柵 30mm 張出 10mm が一番低くなった。副防雪柵が風を引き寄せる効果が弱くなったためと考えられる。

図一68 に風向角 112.5° 開口幅 100mm 第 4 車線のピーク値を示す。第 1 車線から第 4 車線にかけて副防雪柵なしは風速比の低下が大きい、副防雪柵ありは風が整流されているため、副防雪柵なしに比べ風速比の下がり方が小さい。

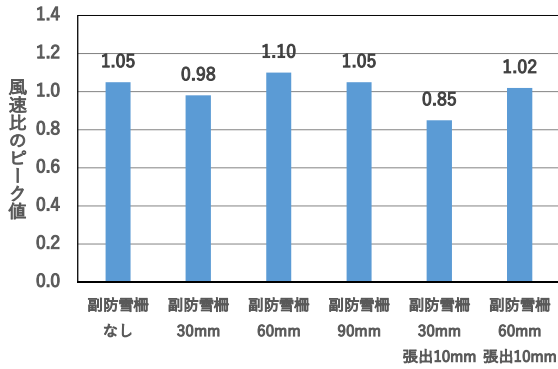


図-67 風向角 112.5° のピーク値  
(開口幅 100mm、第 1 車線)

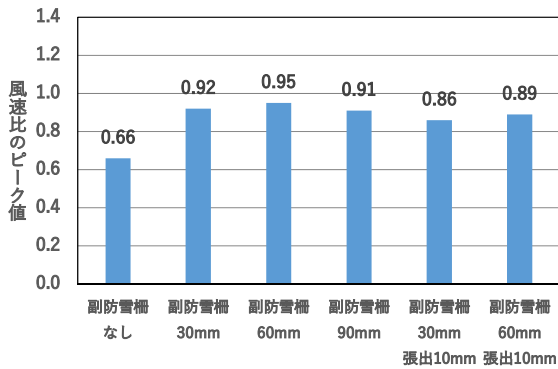


図-68 風向角 112.5° のピーク値  
(開口幅 100mm、第 4 車線)

### ロ) 風速比の上昇範囲

図-69 に風向角 112.5° 開口幅 100mm 第 1 車線の風速比を示す。風向角 112.5° も風向角 90° と同様に、風が副防雪柵に誘導されて、風速比の上昇している範囲が少し広がっている。風速比は副防雪柵 30mm 張出 10mm が一番低い。これは風向角 90° と同様の傾向で、風向に対して柵の仰角が大きく開口部への風の流入を防ぎ、副防雪柵 60mm や副防雪柵 90mm 比べ整流されにくいと考えられる。

図-70 に 風向角 112.5° 開口幅 100mm 第 4 車線の風速比を示す。第 1 車線から第 4 車線にかけて、副防雪柵なしはピーク値が下がりながら上昇範囲が広がっているが、副防雪柵ありはピーク値があまり下がることなく上昇範囲が広がっている。風向角 90° と同様の傾向が確認でき、風が副防雪柵に誘導されているのが原因を思われる。

第 1 車線と第 4 車線のピーク位置の変化から、開口部通過後の風向は、副防雪柵ありが副防雪柵なしより、道路に直交に近づくと考えられる。第 1 車線と第 4 車線の上昇範囲の変化から、開口部を通過した後の風の拡散は、副防雪柵ありの方が副防雪柵なしより拡散していると考

えられる。

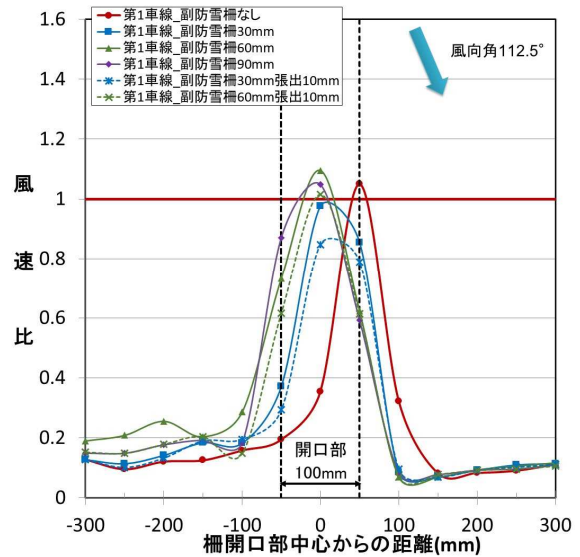


図-69 道路上の縦断方向における風速比  
(実験条件 13、風向角 112.5°、開口幅 100mm、第 1 車線)

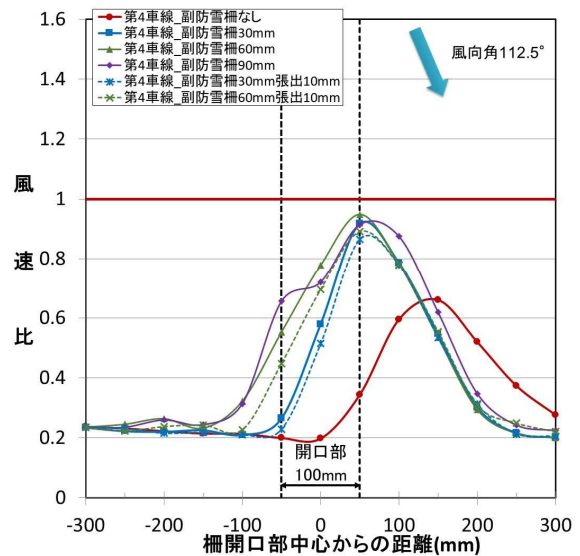


図-70 道路上の縦断方向における風速比  
(実験条件 14、風向角 112.5°、開口幅 100mm、第 4 車線)

## 2) 開口幅 100mm 風向角 67.5°

### イ) ピーク値について

図-71 に風向角 67.5° 開口幅 100m 第 1 車線のピーク値を示す。副防雪柵の設置有無による風速比の変化はあまりない。

図-72 に風向角 67.5° 開口幅 100m 第 4 車線のピーク値を示す。第 1 車線から第 4 車線にかけて副防雪柵なしは風速比の低下が大きい、副防雪柵ありは風が整流されているため風速比の低下が小さい。風向角 112.5° と数

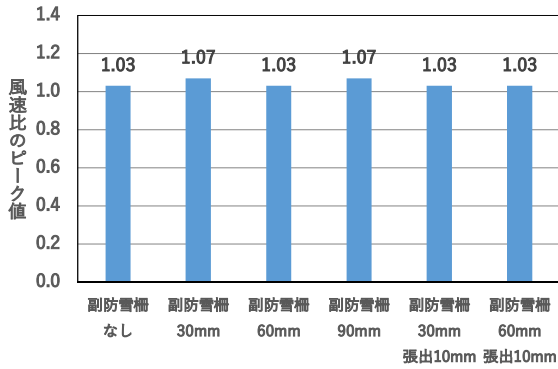


図-71 風向角 67.5° のピーク値  
(開口幅 100mm、第 1 車線)

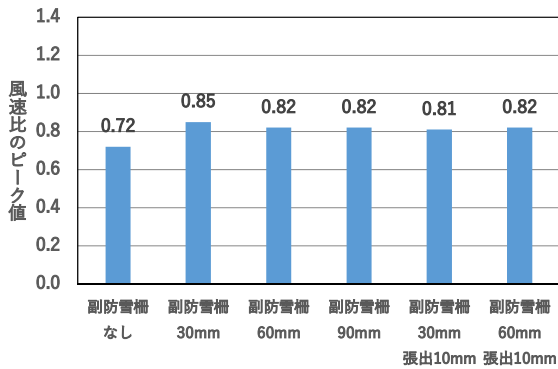


図-72 風向角 67.5° のピーク値  
(開口幅 100mm、第 4 車線)

値は近いが、風向角の違いにより風の整流の影響は小さいと考えられる。

ロ) 風速比の上昇範囲

図-73 に風向角 67.5° 開口幅 100mm 第 1 車線の風速比を示す。ピーク値は副防雪柵なしと副防雪柵ありでありあまり変わらないが、副防雪柵ありは風が誘導されているため、上昇範囲が副防雪柵の設置側 (マイナス側) に広がっている。

図-74 に風向角 67.5° 開口幅 100mm 第 4 車線の風速比を示す。第 1 車線と第 4 車線のピーク位置の変化から、開口部通過後の風向は、副防雪柵ありが副防雪柵なしより、風向角 112.5° と同様に道路に直交に近づくと考えられる。第 1 車線と第 4 車線の上昇範囲の変化から、副防雪柵ありと副防雪柵なしで、開口部を通過した後の風の広がり方が違い、副防雪柵なしは副防雪柵ありより拡散しているため、副防雪柵なしの上昇範囲は第 1 車線では副防雪柵ありより狭いが、第 4 車線で副防雪柵ありと同じ広がりになったと考えられる。

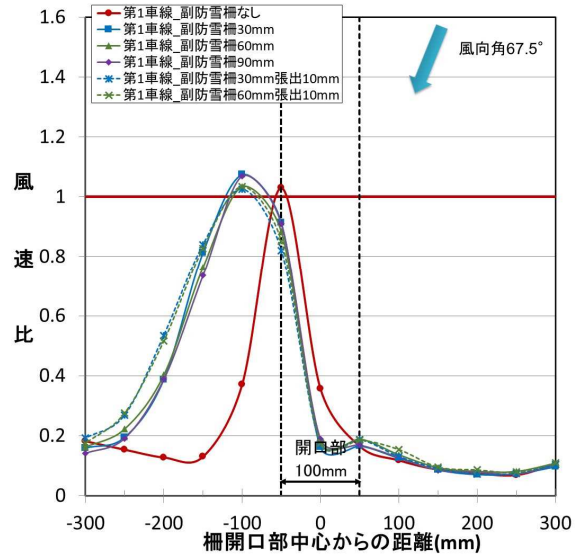


図-73 道路上の縦断方向における風速比  
(実験条件 17、風向角 67.5°、開口幅 100mm、第 1 車線)

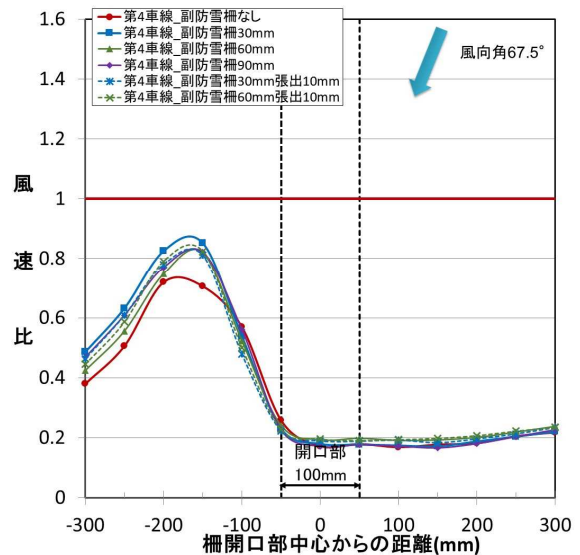


図-74 道路上の縦断方向における風速比  
(実験条件 18、風向角 67.5°、開口幅 100mm、第 4 車線)

3) 開口幅 100mm の風向角と副防雪柵の緩和効果

図-75 に開口幅 100mm 第 1 車線の風向角と風速比のピーク値を示す。風向角が 135° から 90° 付近までは、副防雪柵 30mm 張出 10mm の風速比が一番低い。

風向角が 90° 付近から 45° は副防雪柵なしの風速比が一番低いが、副防雪柵 30mm 張出 10mm との差は僅かである。副防雪柵を設置することで、道路に直交する風向角以外では、第 1 車線は風速が緩和される。

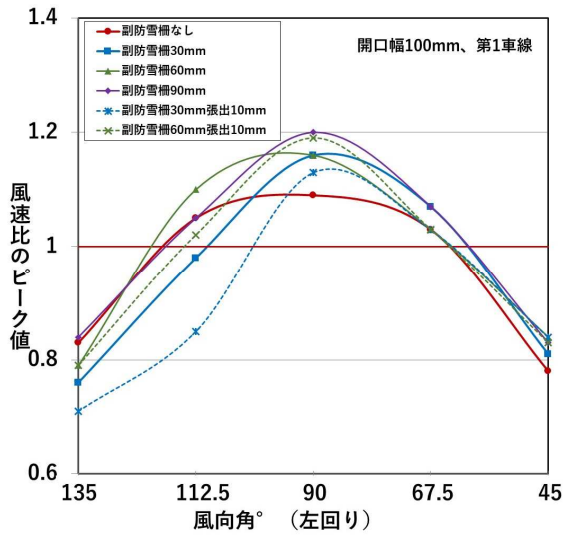


図-75 風向角と風速比のピーク値  
(開口幅 100mm、第 1 車線)

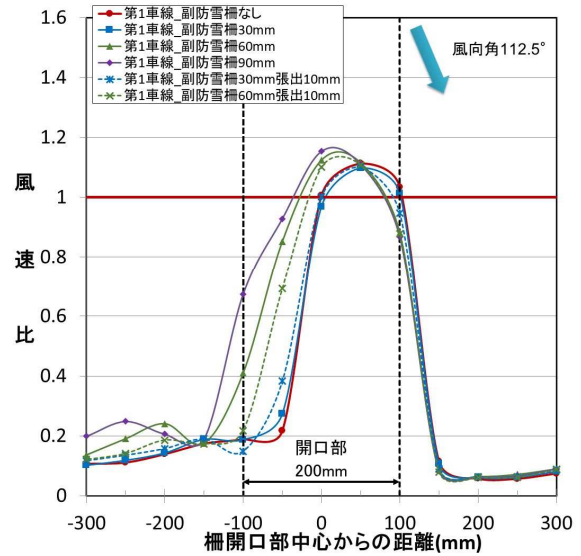


図-77 道路上の縦断方向における風速比  
(実験条件 15、風向角 112.5°、開口幅 200mm、第 1 車線)

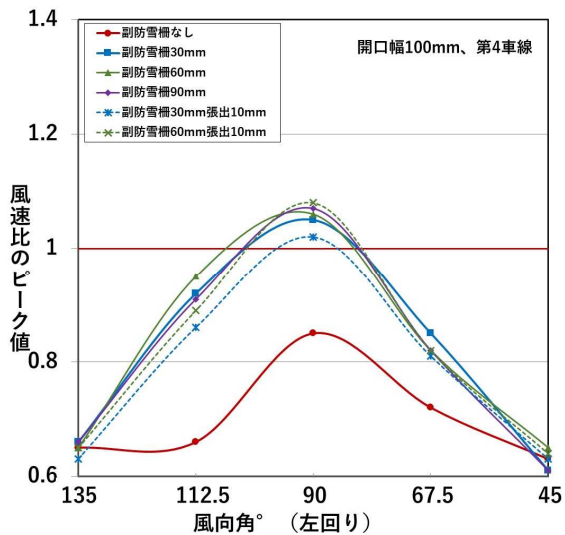


図-76 風向角と風速比のピーク値  
(開口幅 100mm、第 4 車線)

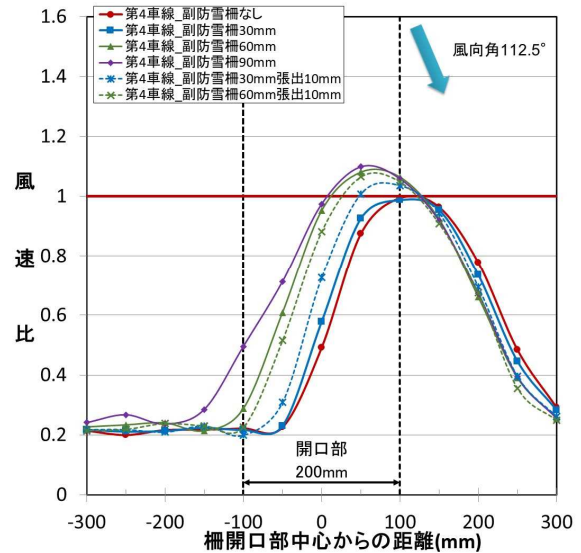


図-78 道路上の縦断方向における風速比  
(実験条件 20、風向角 67.5°、開口幅 200mm、第 4 車線)

図-76 に開口幅 100mm 第 4 車線の風向角と風速比のピーク値を示す。第 4 車線は、風向角 135°で副防雪柵なしと副防雪柵ありの差が小さいが、全域で副防雪柵なしより副防雪柵ありの方が風速比が高くなり、風向角が 45°付近で副防雪柵なしと副防雪柵ありの差が小さくなっている。

#### 4) 開口幅 200mm の実験結果

前述の通り、開口幅 200mm の実験結果は開口幅 100mm と同様の傾向であるため、開口幅 100mm と比べ特徴的な点について記述する。

図-77 に風向角 112.5°開口幅 200mm 第 1 車線の風速比、図-78 に風向角 112.5°開口幅 200mm 第 4 車線の風速比を示す。

開口幅 100mm で風の流入を防いでいたと考えられる副防雪柵 30mm 張出 10mm は、張出なしと変わらない結果となった。開口幅が広いと直接流入する風量が多くなるため、仰角による流入を防ぐ影響度合いが小さくなるためと考えられる。

図-79 に風向角 67.5°開口幅 200mm 第 1 車線の風速比、図-80 に風向角 67.5°開口幅 200mm 第 4 車線の風速比を



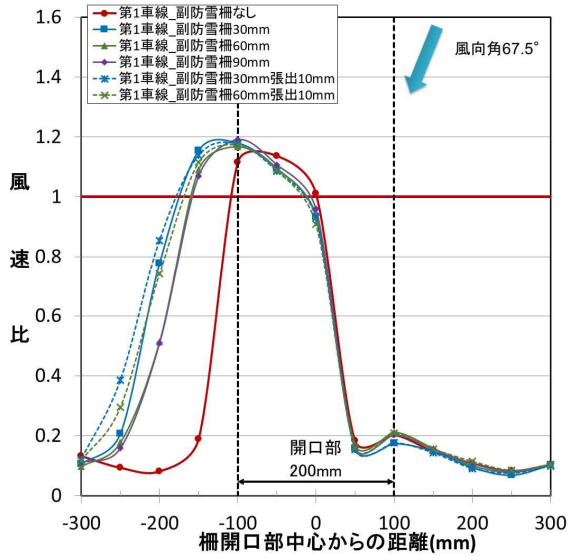


図-79 道路上の縦断方向における風速比  
(実験条件 19、風向角 67.5°、開口幅 200mm、第 1 車線)

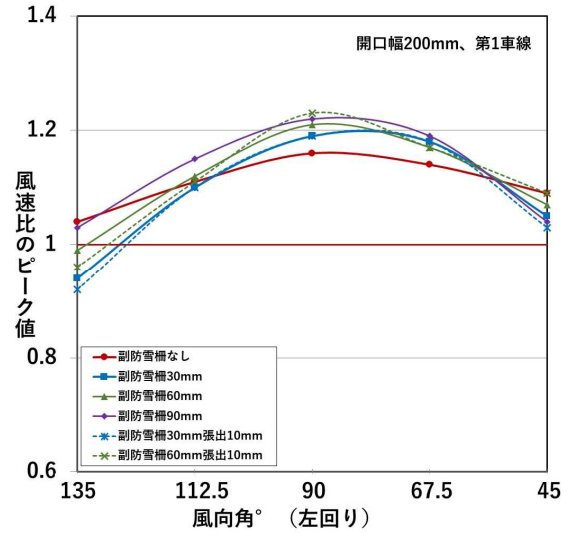


図-81 風向角と風速比のピーク値  
(開口幅 200mm、第 1 車線)

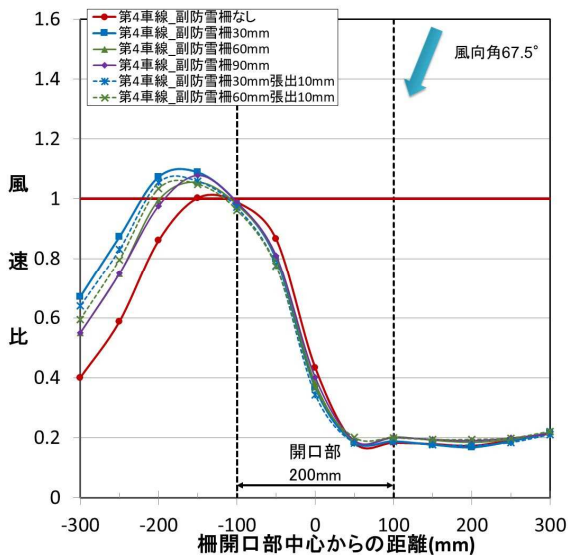


図-80 道路上の縦断方向における風速比  
(実験条件 20、風向角 67.5°、開口幅 200mm、第 4 車線)

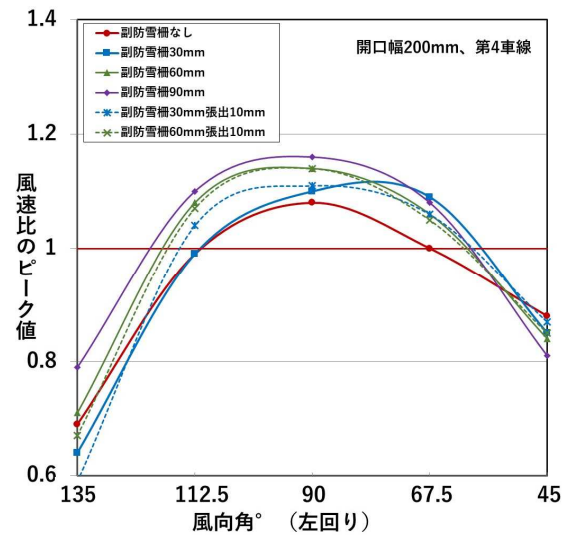


図-82 風向角と風速比のピーク値  
(開口幅 200mm、第 4 車線)

示す。開口幅 100mm に比べ風速比の上昇範囲が若干広がっているが同様の傾向を示していた。

### 5) 開口幅 200mm の風向角と副防雪柵の緩和効果

図-81 に開口幅 200mm 第 1 車線の風向角と風速比のピーク値を示す。副防雪柵ありで風速比が一番低い副防雪柵 30mm 張出 10mm と副防雪柵なしを比較すると、風向角 135°では副防雪柵を設置した方が風速比が低く、風向角 112.5°ではほぼ同じになり、風向角 90°から 67.5°では副防雪柵なしが低い。現地の風向角が 135°から 112.5°の範囲は、副防雪柵による明確な緩和効果が確認できた。

図-82 に開口幅 200mm 第 4 車線の風向角と風速比のピーク値を示す。現地の主風向角が 135°から 112.5°の範囲は、副防雪柵を設置による僅かな緩和効果が確認できた。風向角が 90°から 67.5°は副防雪柵ありの風速比が高くなる。開口幅 100mm に比べ、風速比の上昇度合いは低いことが確認された。

4. 視程急変箇所の効果的な対策の提案

4.1 副防雪柵に替わる新たな対策工法の現地観測

3章で行った実物大の防雪柵を用いた石狩吹雪実験場の現地観測や防雪柵周辺の風速分布の数値シミュレーション解析、防雪柵模型を用いた風洞実験では、副防雪柵による開口部の風速や視程の急変緩和効果を確認したが、風向が防雪柵に直交する場合は、副防雪柵の設置によって逆に風速が強まり、視程が低下する場合があることも確認された。本節では、防雪柵に対して直交する風でも風速急変および視程急変の緩和効果を有する開口部対策工法を考案し、令和2年度冬期および令和3年度冬期において現地観測を行った結果を報告する。

4.1.1 副防雪柵に替わる新たな対策工法について

実物大の防雪柵を用いた現地観測の実施中に柵の形状や配置を変更して、効果的な対策工法を検討することは

不可能である。そこで、吹雪対策に関する既往文献<sup>12)</sup>などを参考にしつつ、防雪柵周辺の風速を再現する数値シミュレーション<sup>13),14)</sup> (3.4.3 参照) を活用して、副防雪柵の形状や配置を事前検討した。

現在、北海道の道路における防雪柵開口部にはL字型副防雪柵（以下、単に副防雪柵とする）が設置されている。このような副防雪柵の角度を変えて設置した場合の数値シミュレーションを実施した結果、主風向に対して直角に柵を配置した場合に、最も強風域が小さくなることが分かった<sup>13),14)</sup>。また、道路と平行に吹く風を効果的に低減させる防雪柵の配置として、柵を一定間隔で斜めに並べて配置したヘリンボン柵が提案されている<sup>12)</sup>。そこで、開口部対策として、ヘリンボン柵を参考に、防雪柵に直交する風に対しても風速や視程の急変の緩和効果を有するように3枚の柵を並べて配置した斜行柵群（図

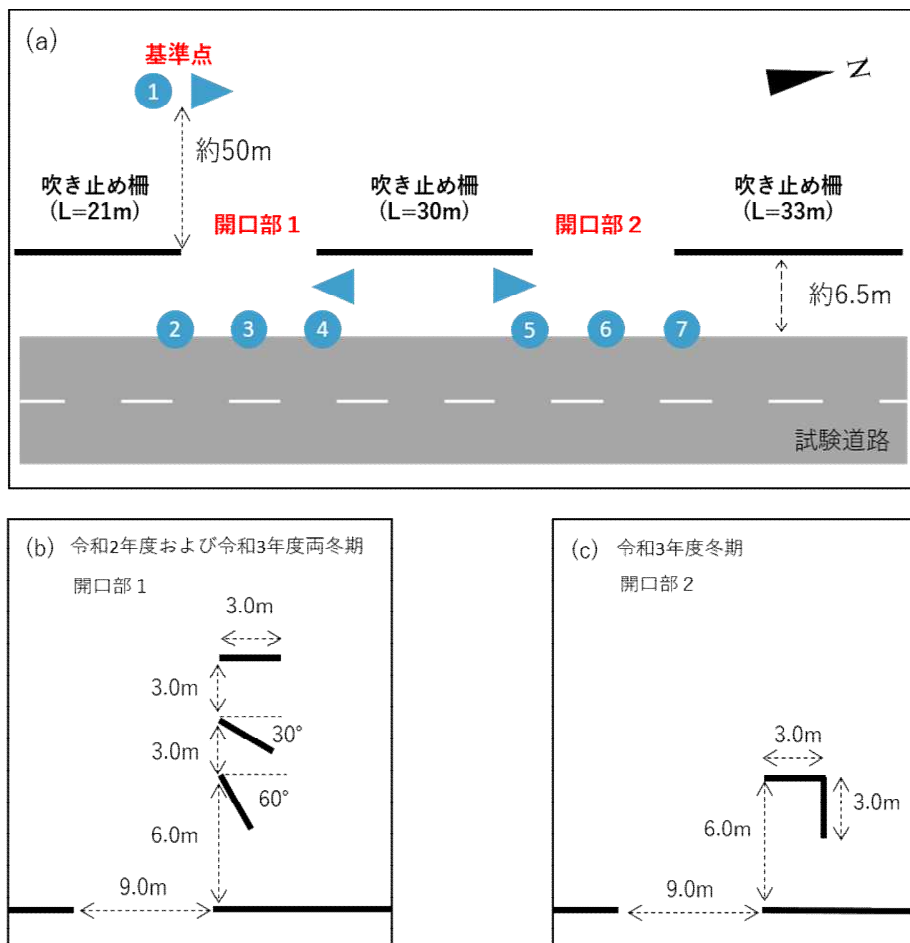


図-83 石狩吹雪実験場内の防雪柵、気象観測機器の配置状況

(a)令和2年度と令和3年度両冬期における防雪柵と気象観測機器の配置。図中の丸は風向風速計、三角は視程計とその向きを示す。(b)令和2年度冬期および令和3年度冬期の開口部1における「斜行柵群」の配置。(c)令和3年度冬期の開口部2における「くの字型柵」の配置。

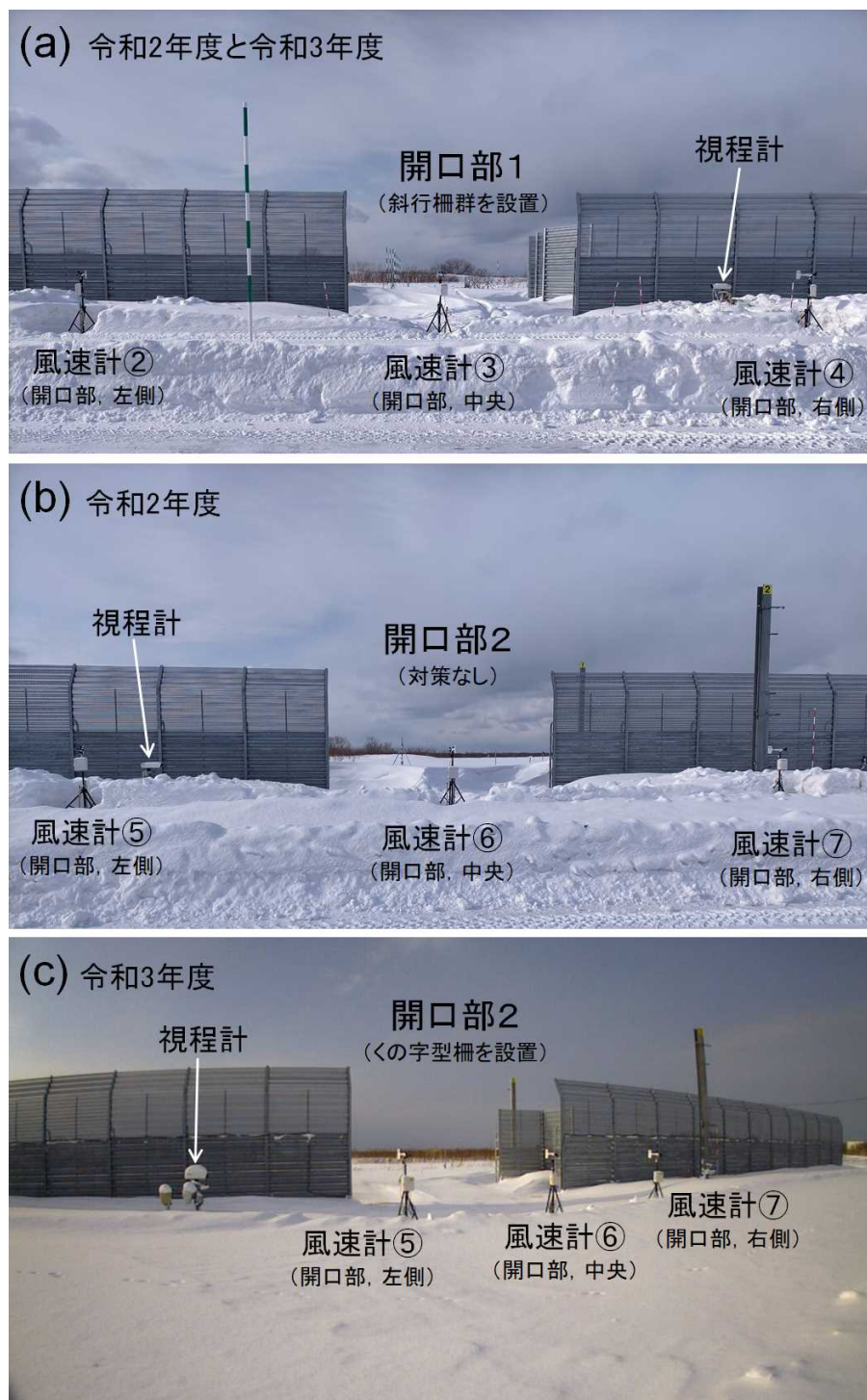


図-84 石狩吹雪実験場における観測状況

(a)斜行柵群を設置した開口部1(令和2年度と令和3年度)、(b)無対策の開口部2(令和2年度)、(c)くの字型柵を設置した開口部2(令和3年度)の観測状況。

-83(b)、図-84(a)を考案した<sup>13)</sup>。一方、用地の制約やコストを鑑みれば、柵の枚数は可能な限り少ない方が望ましい。よって、柵の枚数を2枚にとどめ、かつ必要な道路用地面積を小さくするために、2枚の柵を直角に連結して、「くの字型」に配置することを考案した<sup>13)</sup>。

これを、くの字型柵(図-83(c)、図-84(b))と呼ぶこととする。

以下で示す令和2年度冬期と令和3年度冬期の現地観測は、斜行柵群とくの字型柵の防雪柵開口部における風速急変と視程急変の緩和効果に着目して実施した。

#### 4. 1. 2 現地観測の方法

3.3 節と同様に、石狩吹雪実験場の防雪柵が設置された試験道路（図-83）で実施した。令和2年度冬期の観測では、開口部1の片側（北側）に斜行柵群を設置した。なお、比較のため、開口部2は無対策とした。令和3年度冬期の観測では、開口部1には令和2年度冬期同様に、片側（北側）に斜行柵群を設置し、開口部2の片側（北側）にくの字型柵を設置した。

現地観測では、視程と風向風速の観測を行った。これらの観測機器の配置を図-83(a)に示す。防雪柵から風上側約50mの位置（以下、基準点）と、2箇所（防雪柵から風下に6.5mまでの範囲）に、3.3節と同様に、視程計（高さ1.5m）および風向風速計（高さ1.8m）を設置した。これらの観測データは1.0秒間隔で取得し、解析は視程の10分間における中央値と、風向および風速の10分間平均値を算出して行った。図-84に各年度、および各開口部における観測状況を示す。

#### 4. 1. 3 観測結果

石狩吹雪実験場の防雪柵は、北の方角から時計回りに約11度傾いて設置されている。すなわち、防雪柵に直交する方向は16方位の西から西北西の間にあり、西風は直

交方向から約11度対策工を設置していない側からの風となり、西北西風は直交方向から約11度対策工を設置した側からの風となる。そこで、直交風における斜行柵群とくの字型柵の対策効果を調べるため、基準点の風向が西と西北西の場合の観測結果に着目する。

図-85および図-86は、それぞれ令和2年度冬期および令和3年度冬期において、基準点の風向別に開口部の観測点③（斜行柵群を設置）と⑥（無対策）の風速と基準点①の風速を比較した結果を示したものである。令和2年度冬期（図-85）に着目すると、西風の場合（図-85(a)、(b))、対策の有無による風速の差は小さいが、回帰係数の比較から、斜行柵群による若干の風速低減効果がみられる。一方、西北西風の場合、斜行柵群を設置した開口部③（図-85(b)）の方が、無対策の開口部⑥（図-85(d)）よりも風速が小さい傾向が明確である。これは、西北西風が、斜行柵群を設置している側からの風であり、対策工の影響を強く受けたためと考えられる。令和3年度冬期（図-86）は、斜行柵群を設置した場合とくの字型柵を設置した場合で風速に大きな違いはみられず、いずれも基準点の風速より大きい結果となった。ただし、令和2年度冬期の観測結果（図-85）で斜行柵群の設置

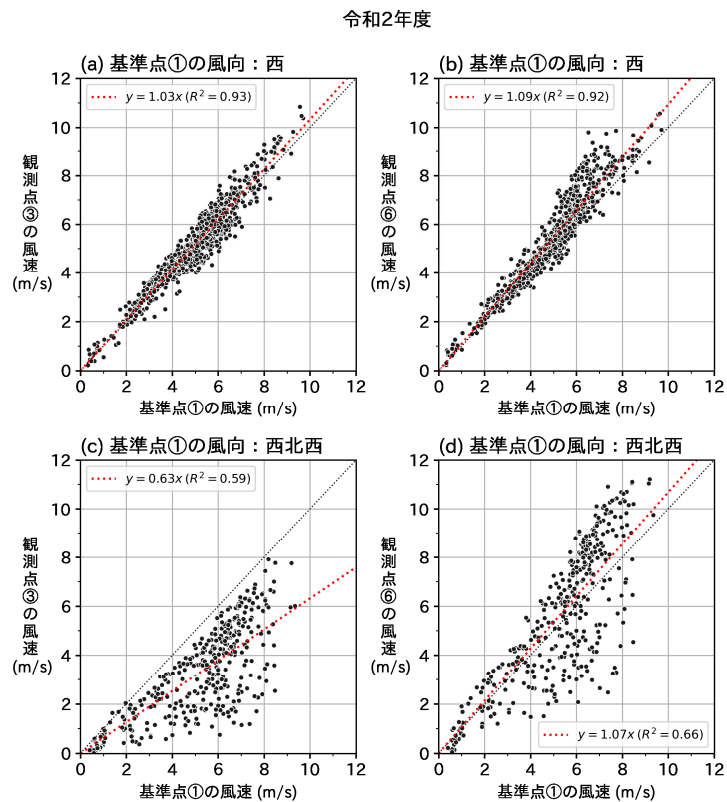


図-85 基準点①と開口部③(斜行柵群)および開口部⑥(無対策)の風速の比較(令和2年度)

上段は、基準点①の風向が西の場合、下段は西北西の場合。

黒線は等値線、赤線は回帰直線を示す。回帰式の  $x$  は基準点①の風速、 $y$  は開口部③や⑥の風速、 $R^2$  は決定係数。

令和3年度

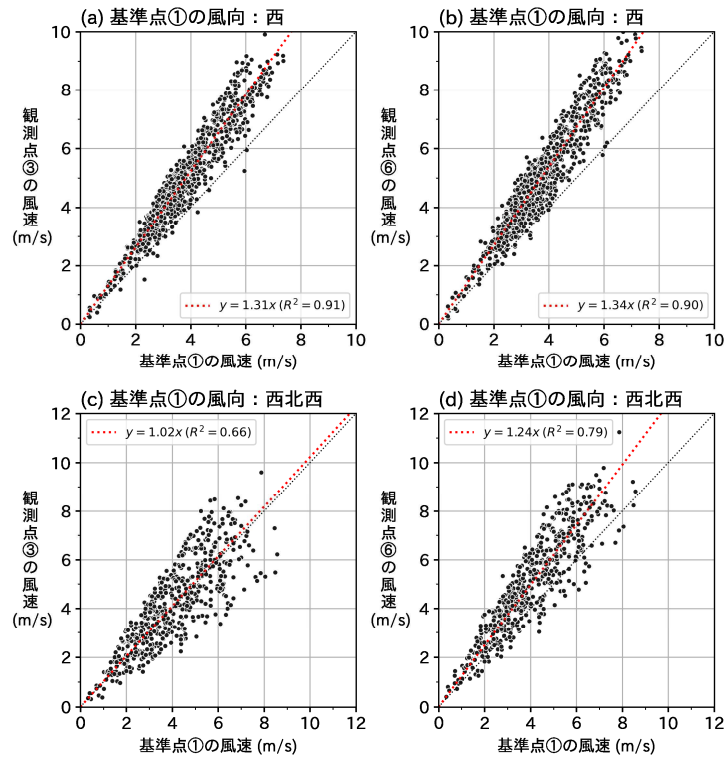


図-86 基準点①と開口部③(斜行柵群)および開口部⑥(くの字型柵)の風速の比較(令和3年度)

図の説明は、図-85に同じ。

令和2年度

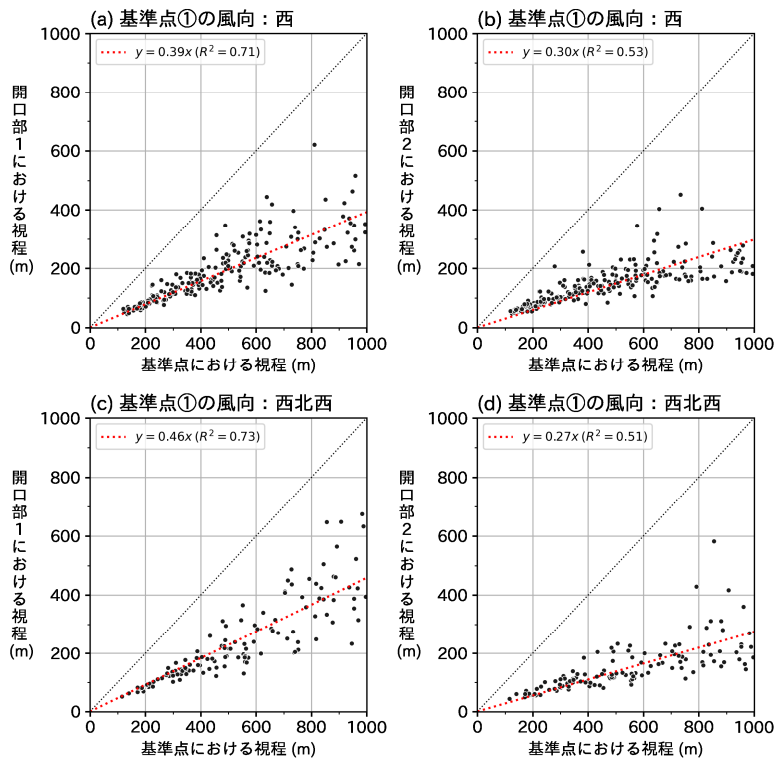


図-87 基準点と開口部1(斜行柵群)および開口部2(無対策)の視程の比較(令和2年度)

図の説明は、図-85に同じ。

令和3年度

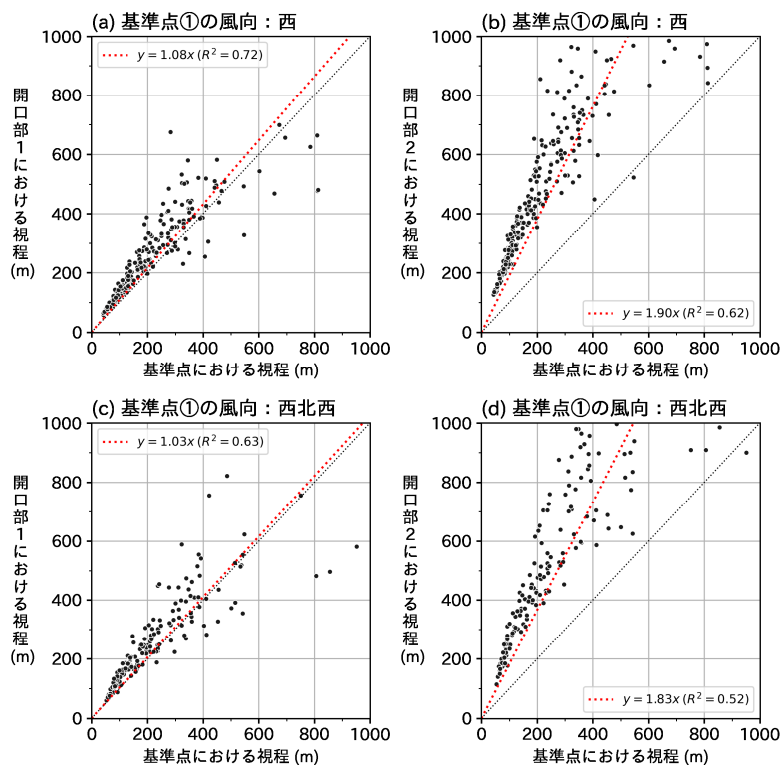


図-88 基準点と開口部1(斜行柵群)および開口部2(くの字型柵)の視程の比較(令和3年度)

図の説明は、図-85に同じ。

によって無対策開口部より風速が小さくなることから、くの字型柵も同様に風速低減の効果を有するものと考えられる。図-86の基準点①風速との回帰係数の比較から、斜行柵群とくの字型柵ともに、西風より西北西風の方が風速が小さくなる傾向にある。以上より、防雪柵に直交する風向、特に西北西風において、防雪柵開口部に斜行柵群やくの字型柵を施すことで風速の低減を見込むことができると考えられる。

図-87および図-88は、それぞれ令和2年度冬期および令和3年度冬期において、基準点の風向別に開口部1(斜行柵群を設置)と開口部2(無対策、もしくはくの字型柵を設置)の視程と基準点の視程を比較した結果を示したものである。なお、これらの図には両者の視程が1000mより小さい場合のデータのみ用いた。

まず、令和2年度冬期(図-87)に着目する。基準点風向が西北西および西のどちらの場合でも、開口部の視程は基準点の視程より小さかった。一方で、回帰係数の比較から、斜行柵群を設置した開口部の視程は無対策開口部に比べて64%(西北西風)および30%(西風)改善することが確認できた。次に、令和3年度冬期(図-88)に着目すると、対策工法の違いに関係なく、開口部の視

程は基準点の視程よりも大きい結果となった。斜行柵群を設置した場合(図-88(a)、(c))とくの字型柵を設置した場合(図-88(b)、(d))を比較すると、くの字型柵を設置した開口部の視程の方が大きく、対策による視程改善効果が顕著である。両者の回帰係数の比較から、くの字型柵を設置した開口部の方が斜行柵群を設置した開口部に比べて、69%(西北西風)および73%(西風)視程が改善することが確認できた。

#### 4. 1. 4 現地観測結果のまとめ

令和2年度冬期と令和3年度冬期の石狩吹雪実験場における現地観測の結果をまとめると、防雪柵開口部に斜行柵群やくの字型柵を施すことで、防雪柵に直交する風向においても視程の改善や風速の低減を見込むことができると考えられる。その傾向は、特に対策工を設置した側からの風(西北西風)の場合に顕著である。なお、これらの対策工を開口部の両側に設置した場合、さらなる視程改善や風速減を見込むことができると考えられるが、実際に対策を行う場合の整備コストを考え、今回の現地観測では開口部の片側に設置した場合の視程や風速の緩和効果の確認を行った。開口部の両側に設置した場合の風速低減に関する風洞実験は、次節以降で説明する。

## 4. 2 副防雪柵に替わる新たな対策工法の風洞実験

### 4. 2. 1 風洞実験概要

令和2年度は、過年度までの結果を踏まえ、新たな対策工法について、数値シミュレーションで検証を行った3種類の新型柵について、開口部への影響を把握するため風洞実験を行った。風洞実験装置（風速計取付状態）を図-89に示す。

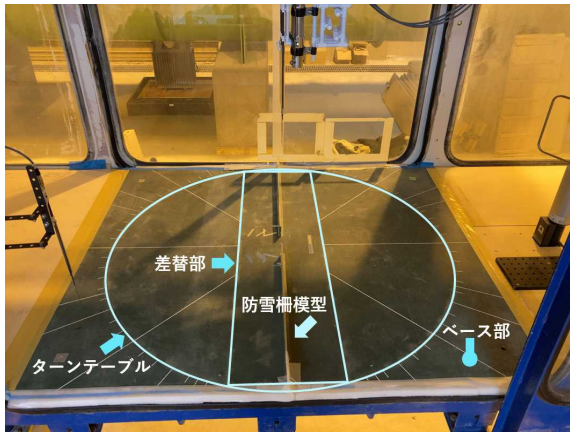


図-89 風洞実験装置(風速計取付状態)

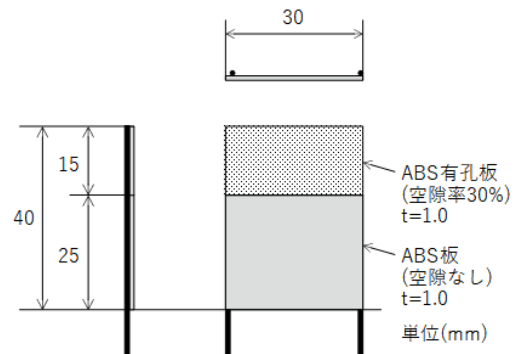


図-91 斜行柵群模型(空隙率30%)

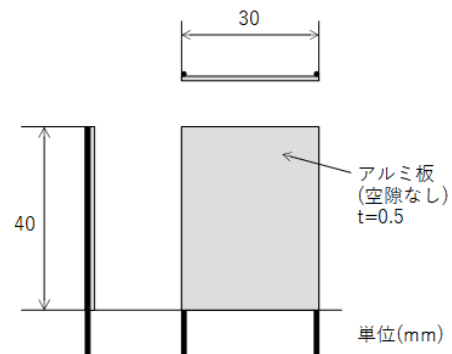


図-92 斜行柵群模型(空隙なし)

### 4. 2. 2 縮尺模型の検討と製作

新型柵模型と防雪柵模型を図-90に示す。斜行柵群模型は上部が空隙率30%の模型と、空隙なしの模型を使って実験を行った。全ての模型と設置状況は現地の1/100スケールで製作した。

新型柵模型は、開口部に入り込む風をそらす斜行柵群模型(図-91、図-92)と開口部に風が入り込まないようにした、くの字柵(図-93)模型を製作した。斜行柵群模型は空隙による影響を把握するため、既設防雪柵の有孔板と同じ空隙率にした、空隙率30%の模型(図-91)と空隙なしの模型(図-92)を製作した。新型柵模型は上部に鼠返しが無い高さ40mmである。吹き止め柵模型は図-94に示す模型を使用した。

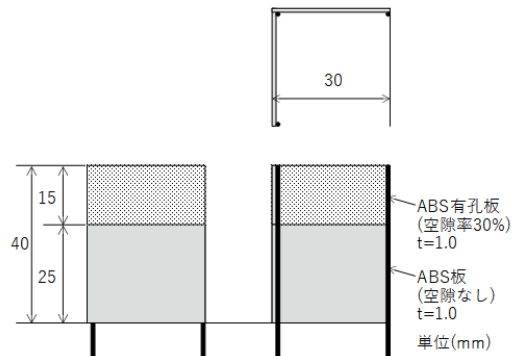


図-93 くの字柵模型

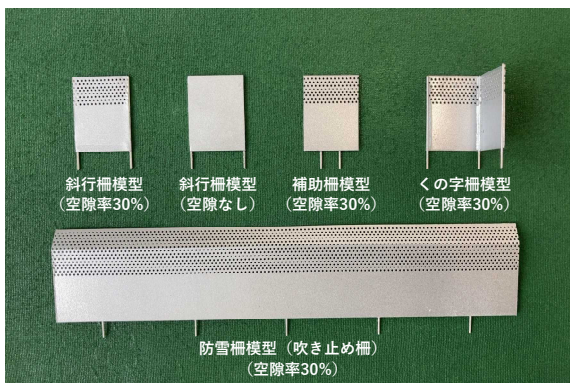


図-90 新型柵模型と防雪柵模型

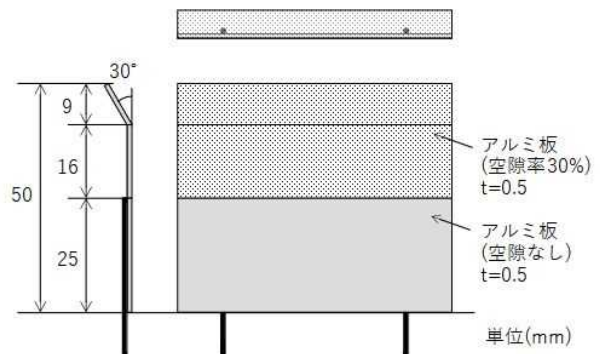


図-94 吹き止め柵模型

4. 2. 3 風洞実験の風速設定

測定洞内の垂直風速分布は、過年度 (2. 5. 3) と同様、自然の風を模擬する風速 7 m/s (高さ H=400mm) の条件とした。

4. 2. 4 計測方法

風速計測は、ゲルマニウム半導体を熱伝導率が良いニッケル管 (直径 1mm×長さ 3mm) で包んだプローブを使った、トーニック (株) 製の多点熱式風速計 (支持棒型風速風温プローブ MT-100-300Q 3 本と、出力ユニット GeY-40DA を用いた。計測間隔は出力ユニット GeY-40DA で温度補正等の処理をした風速データと気温データを、シリアル通信で 2 秒間隔に受信し、風速値は 30 個 (計測時間は 60 秒) のデータの平均値とした。多点熱式風速計による計測状況を図-95 に示す。基準点風速は多点熱式風速計、前年度までの熱式風速計とも高さ H=15mm では 4.7m/s 前後で同じである。

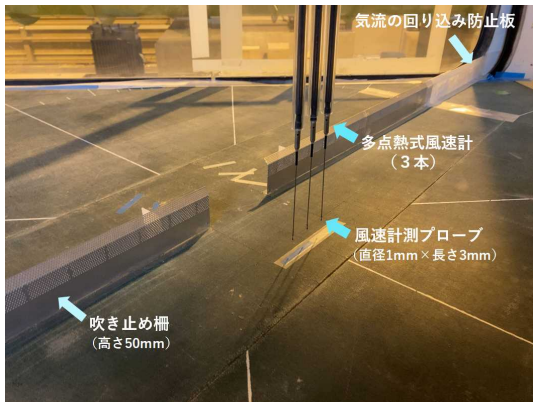


図-95 多点熱式風速計による計測状況

計測箇所は、新型柵による 4 車線道路における開口部の緩和効果を把握するため、第 1 車線上中央と風下側の第 4 車線上中央とした。計測では、過年度 (2. 5. 5) と同様に、防雪柵開口部の中央を基準とし、道路縦断方向に前後 300mm を、今回はより詳細に影響を把握するため、25mm 毎に 1 列あたり 25 計測点で行った。防雪柵の開口部中心から第 1 車線中心までの距離は 100mm、開口部中心から第 4 車線中心までの距離は 210mm である。計測地点の高さは地面から高さ 15mm である。風向角 90° の計測箇所を図-96 に示す。

なお、基準点の風速は、風洞中央の風上側とした。この基準点の風速に対し、同じ高さで計測した風速の比を風速比として定義する。

4. 2. 5 実験条件

新型柵の種類による開口部の風速の緩和効果を解析するため、数種類の数値シミュレーションで緩和効果が確

認された、「斜行柵群 (空隙率 30%)」、「斜行柵群 (空隙なし)」、「くの字柵」と、緩和効果を比較するため「新型柵なし」の 4 パターンの実験を行った。風向条件は防雪柵に対して直交の場合のほか、斜風の影響も把握するため、風向に対して 90°、112.5°、135° に設置し計測を行った。

斜行柵群模型設置図を図-97、くの字柵模型設置図を図-98 に示す。新型柵の設置状況を図-99 に、実験条件を表-8 に示す。斜行柵群は 4 枚柵とし左右に設置した、斜行柵と斜行柵の角度 (以降、「角度ピッチ」) は 22.5° とした。

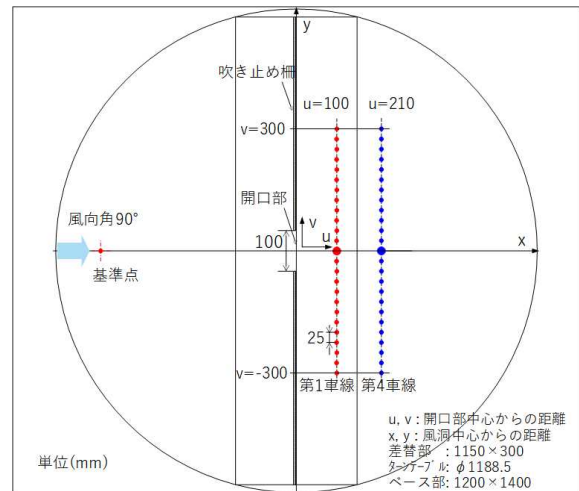


図-96 計測箇所 (風向角 90°)

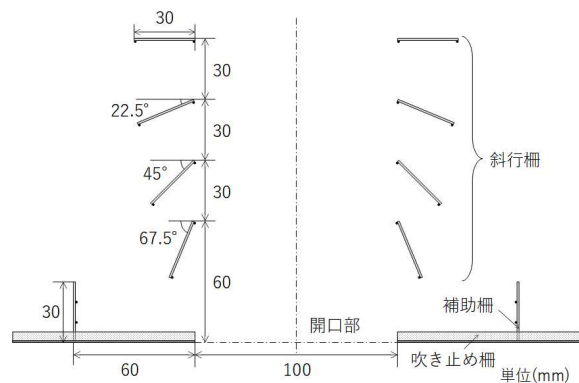


図-97 斜行柵群模型設置図

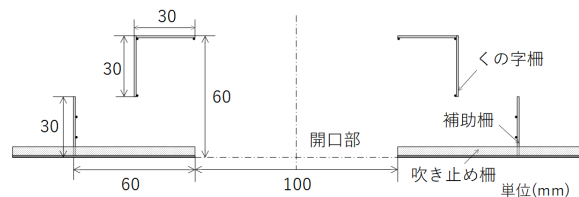


図-98 くの字柵模型設置図



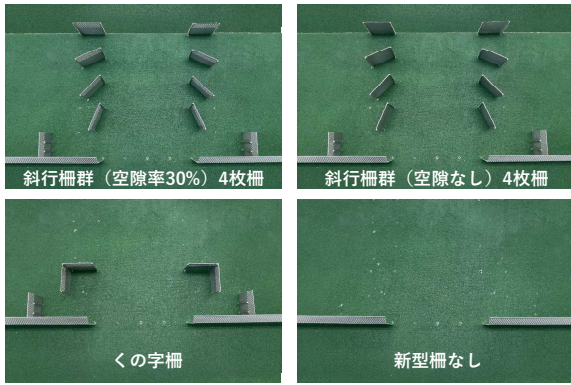


図-99 新型柵模型の設置状況

表-8 新型柵の実験条件

番号	風向角	新型柵の種類	斜行柵群の設置角(°)			
			1枚目	2枚目	3枚目	4枚目
1	90	新型柵なし	—	—	—	—
2	90	斜行柵群(空隙率30%)4枚柵 左右	0	22.5	45	67.5
3	90	斜行柵群(空隙なし)4枚柵 左右	0	22.5	45	67.5
4	90	くの字柵	—	—	—	—
5	112.5	新型柵なし	—	—	—	—
6	112.5	斜行柵群(空隙率30%)4枚柵 左右	0	22.5	45	67.5
7	112.5	斜行柵群(空隙なし)4枚柵 左右	0	22.5	45	67.5
8	112.5	くの字柵	—	—	—	—
9	135	新型柵なし	—	—	—	—
10	135	斜行柵群(空隙率30%)4枚柵 左右	0	22.5	45	67.5
11	135	斜行柵群(空隙なし)4枚柵 左右	0	22.5	45	67.5
12	135	くの字柵	—	—	—	—

#### 4. 2. 6 実験結果

##### 1) 風向角 90° の風況

##### イ) 風速比が上昇する範囲(風向角 90°)

風向角 90° 第1車線の風速比分布図を図-100に示す。風速比の上昇範囲は左-50mm から右+50mm で、新型柵ありと新型柵なしに差がない。

風向角 90° 第4車線の風速比分布図を図-101に示す。新型柵なしより新型柵ありの方が風速比の上昇範囲は少し広がっている。

##### ロ) 最大風速比(風向角 90°)

風向角 90° の最大風速比を図-102に示す。第1車線は、新型柵なしの1.16に対して、斜行柵群(空隙率30%)1.08と、斜行柵群(空隙なし)1.09は、最大風速比が下がっている。斜行柵群は開口部に入り込む風を防雪柵側にそらしているためと考えられる。くの字柵も1.13と、新型柵なしの1.16より最大風速比が少し下がっている。くの字柵の緩和効果は斜行柵群より小さい。

第4車線の最大風速比は、新型柵なし0.86と、斜行柵群(空隙率30%)0.86と、斜行柵群(空隙なし)0.86は、同じである。くの字柵は0.91で新型柵なし0.86より少し高くなっている。

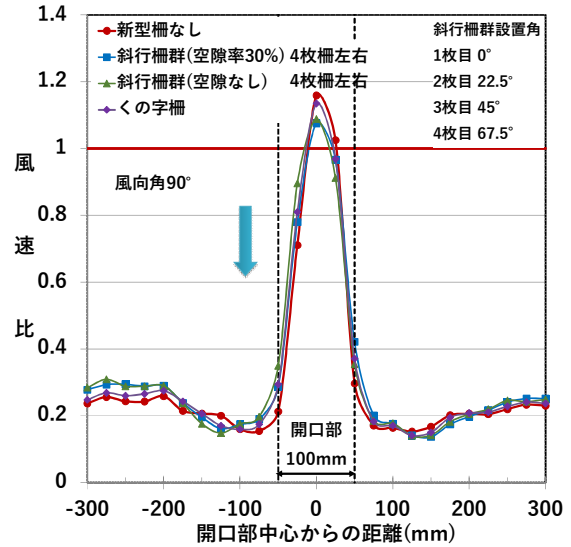


図-100 新型柵の風速比分布図  
(風向角 90° 第1車線)

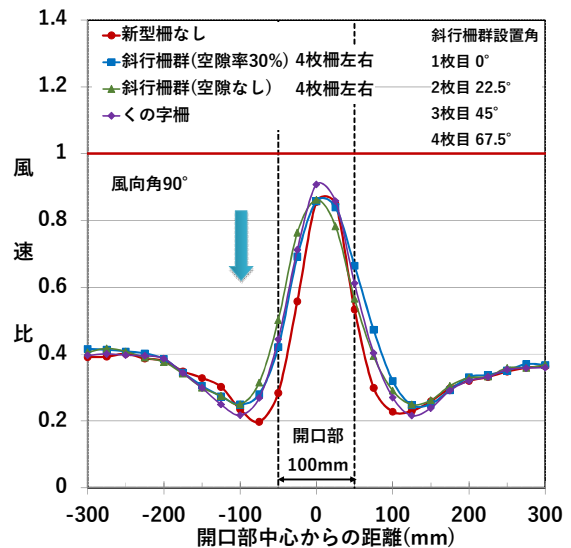


図-101 新型柵の風速比分布図  
(風向角 90° 第4車線)

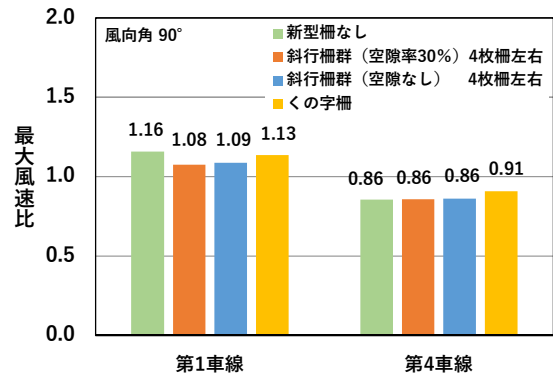


図-102 新型柵の最大風速比(風向角 90°)

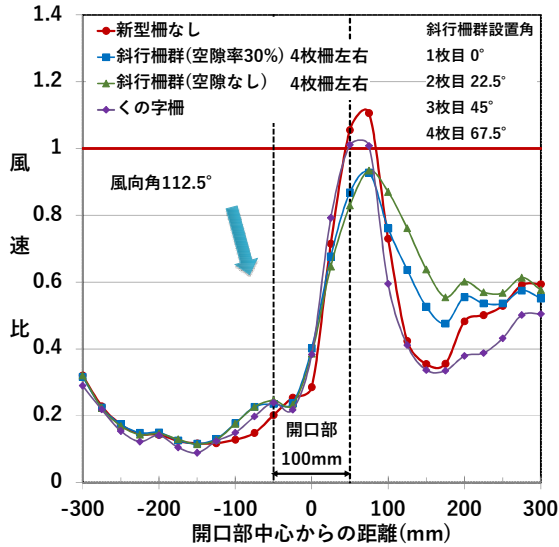


図-103 新型柵の風速比分布図  
(風向角 112.5° 第1車線)

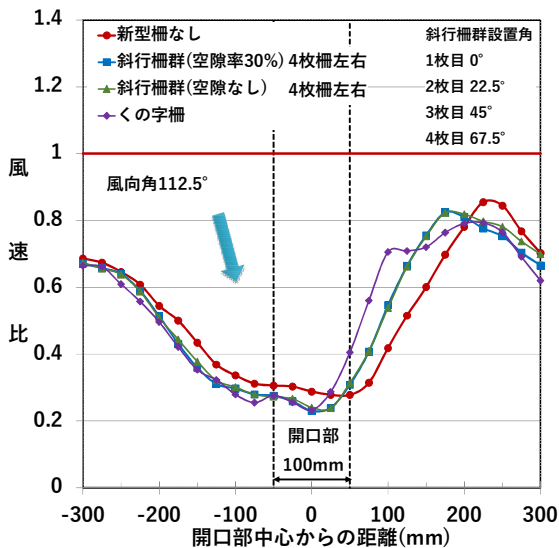


図-104 新型柵の風速比分布図  
(風向角 112.5° 第4車線)

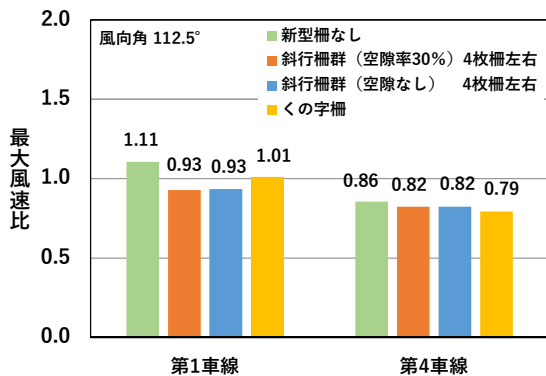


図-105 新型柵の最大風速比(風向角 112.5° )

## 2) 風向角 112.5° の風況

### イ) 風速比が上昇する範囲(風向角 112.5° )

風向角 112.5° 第1車線の風速比分布図を図-103に示す。風速比の上昇範囲は、新型柵なしが中心 0mm から右+150mm、斜行柵群(空隙率 30%)と斜行柵群(空隙なし)は、左-25mmから右+175mmで、新型柵なしと比べて左右に少し広がっている。くの字柵は左-25mmから右+150mmで新型柵なしより左に少し広がっている。

風向角 112.5° 第4車線の風速比分布図を図-104に示す。上昇範囲は、新型柵なしは右+50mmから右側に対して、斜行柵群が右+25mmから右側と右に風速比の上昇範囲が移動し、くの字柵は中心 0mm から右側と更に右に移動している。

### ロ) 最大風速比(風向角 112.5° )

風向角 112.5° の最大風速比を図-105に示す。第1車線は新型柵なしが 1.11 と一番高く、斜行柵群(空隙率 30%) 0.93 と、斜行柵群(空隙なし) 0.93 は最も低い。第1車線では斜行柵群の空隙ありなしの違いが見られなかった。

第4車線は新型柵なしが 0.86 で、斜行柵群(空隙率 30%) 0.82、斜行柵群(空隙なし) 0.82、くの字柵 0.79 は新型柵なしより低く、新型柵の緩和効果が確認された。第4車線も斜行柵群の空隙ありなしの違いが見られなかった。

## 3) 風向角 135° の風況

### イ) 風速比が上昇する範囲(風向角 135° )

風向角 135° 第1車線の風速比分布図を図-106に、第4車線の風速比分布図を図-107に示す。開口部付近の風速比が低く、左端と右端は風速比が上昇している。この現象は後述の「4.2.7 考察」に記述する。

### ロ) 最大風速比(風向角 135° )

風向角 135° の最大風速比を図-108に示す。第1車線は新型柵なしが 1.07 で、斜行柵群(空隙率 30%) 0.98、斜行柵群(空隙なし) 0.98、くの字柵 0.97 は、新型柵なしより風速比が低く緩和効果が確認された。風向角 135° も斜行柵群で、空隙ありなしの違いは見られなかった。

第4車線の最大風速比は、斜行柵群(空隙率 30%) 0.97、斜行柵群(空隙なし) 0.96、くの字柵 0.97 で、新型柵なし 0.94 より若干高い。開口部に入り込む風を斜行柵群やくの字柵が風を外側にそらす影響で、左端の風速比が上昇したと考えられる。

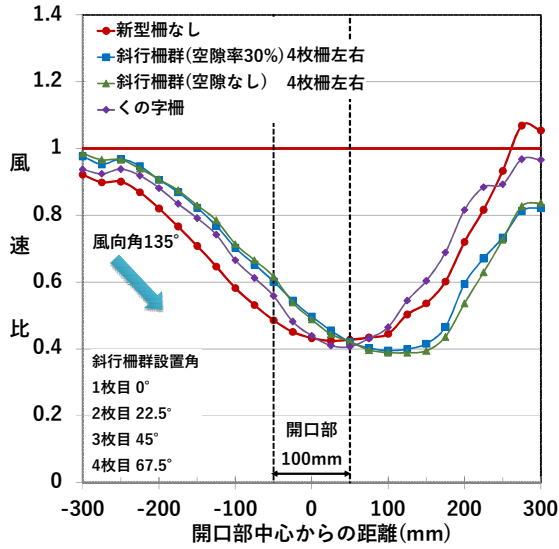


図-106 新型柵の風速比分布図  
(風向角 135° 第 1 車線)

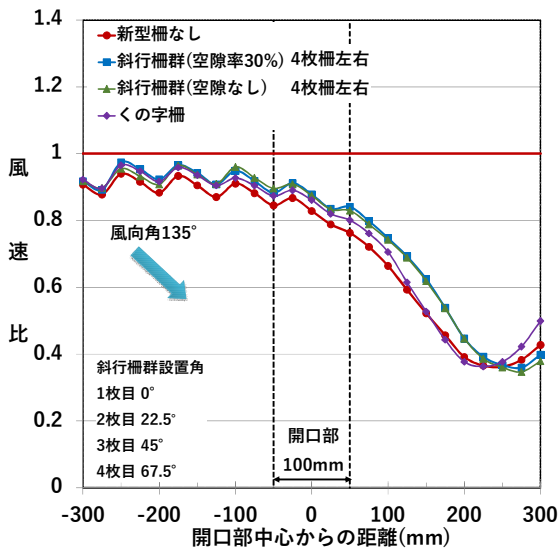


図-107 新型柵の風速比分布図  
(風向角 135° 第 4 車線)

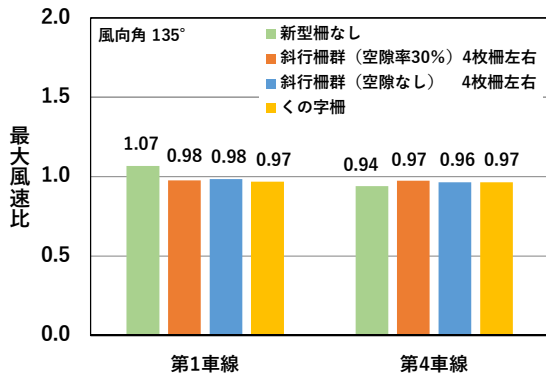


図-108 新型柵の最大風速比(風向角 135° )

#### 4. 2. 7 考察

##### 1) 開口部を通過した風の流れ(風向角 135° )

風向角 135° の時、開口部を通過した風の流れは図-109 で示す様に、右側の防雪柵に引き寄せられると考えられる。また、左側の防雪柵から開口部付近に風速が低い箇所が発生すると考えられる。このため開口部風下では風速比が低下したと考えられる。数値シミュレーションでも同様の結果である。

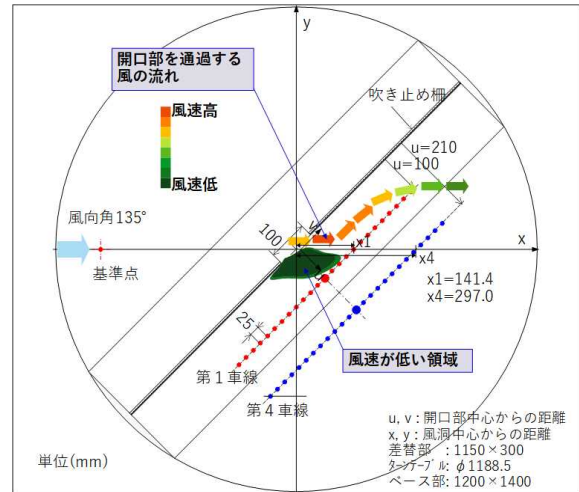


図-109 開口部を通過した風の流れ(風向角 135° )

##### 2) 防雪柵を越えた風の流れ(風向角 135° )

風向角 135° 第 1 車線と第 4 車線の風向鉛直方向の風速比分布図を図-110 に示す。開口部より左側は左端ほど風速比が高くなっている。また、開口部の左側は第 1 車線より第 4 車線の風速比が高い。

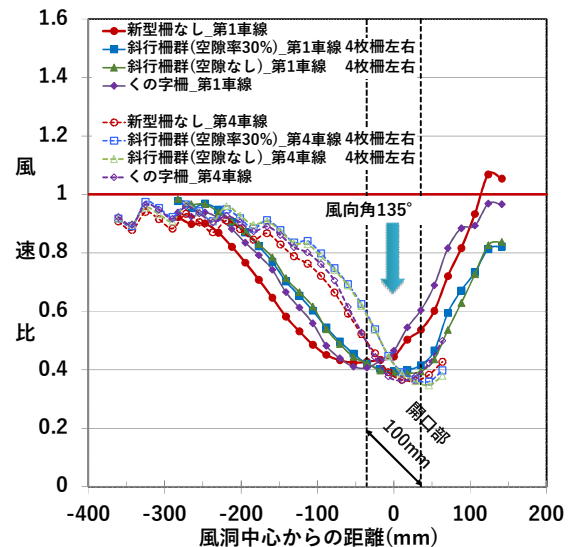


図-110 風向鉛直方向の風速比分布図(風向角 135° )

開口部から第1車線までの距離は図-111に示す通り、風向角  $90^\circ$  では  $100\text{mm}$  であるが、風向角  $135^\circ$  では  $141.4\text{mm}$  と長くなる。第4車線までの距離は風向角  $90^\circ$  では  $210\text{mm}$  であるが、風向角  $135^\circ$  では、 $297.0\text{mm}$  と長くなる。このため防雪柵の上方に流れた早い風速が、道路上で下方に流れて第4車線の風速が第1車線より高くなると考えられる。

また、防雪柵に当たり上方に流れる風の高さは、風向角  $90^\circ$  より風向角  $135^\circ$  が低いと考えられ、風向角  $135^\circ$  は防雪柵を越えた早い風速が、道路上で下方に流れ、防雪柵の左端と右端の風速が上がると考えられる。

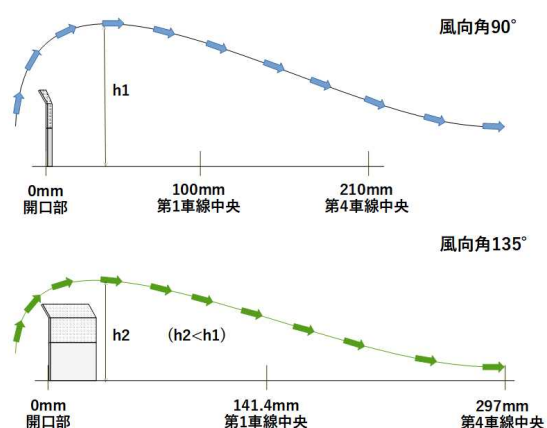


図-111 防雪柵を越えた風の流れ  
(風向角  $90^\circ$  と風向角  $135^\circ$  )

#### 4.3 斜行柵群3枚柵(角度ピッチ $22.5^\circ$ ) の風況

令和3年度は、数値シミュレーション、現地観測状況、設置コスト等を考慮し、斜行柵群の設置枚数を減らし、開口部の緩和効果を確認するため、柵枚数を1枚減らした3枚柵(以降、「斜行柵群3枚柵」という)の実験を行った。設置角の違いによる影響を把握するため、角度ピッチ  $22.5^\circ$  と、角度ピッチ  $30^\circ$  の実験を行った。

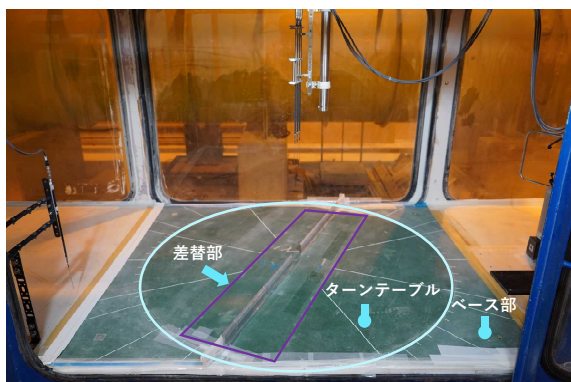


図-112 測定洞

#### 4.3.1 実験装置

実験には前章2.5.1同様に寒地土木研究所所有の風洞実験装置(図-25)を使用した。装置の主要寸法は、全長約  $29\text{m}$ 、測定洞の全長約  $9\text{m}$ 、測定洞の断面  $1.2\text{m} \times 1.2\text{m}$  である。測定洞(図-112)には風向角を可変できるターンテーブルを設置している。

#### 4.3.2 斜行柵群模型

実験に使用した模型は前章4.2.2(図-90)の上部に空隙がある斜行柵(空隙率  $30\%$ )模型と、空隙がない斜行柵(空隙なし)模型を使って実験を行った。

#### 4.3.3 風洞実験の風速設定

測定洞内の垂直風速分布は前章2.5.3と同様である。上空ほど風速が増す自然の風を模擬するため、べき法則は、田園地帯を想定した  $0.15$  に近似するよう気流を調整した。実験風速は、高さ  $H=400\text{mm}$  で風速  $7\text{ m/s}$ 、高さ  $H=15\text{mm}$  で風速  $4.7\text{ m/s}$  前後とした。

#### 4.3.4 計測方法

風速の計測方法は前章4.2.4と同様である。トーニック(株)製の多点熱式風速計 MT-100-400Q 3本(図-113)と、出力ユニット GeY-40DA(図-114)を用いた。

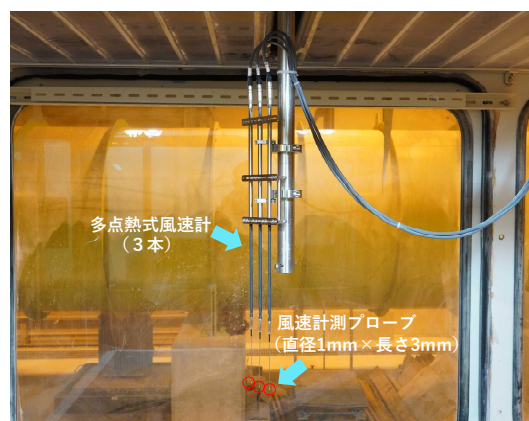


図-113 多点熱式風速計



図-114 出力ユニット

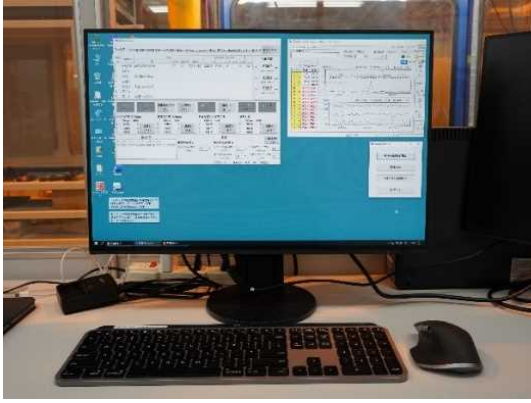


図-115 風洞制御ソフト画面

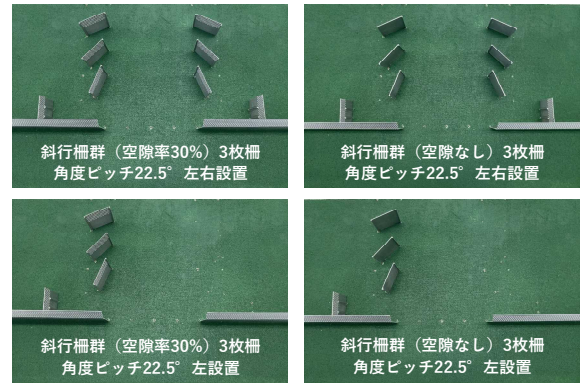


図-117 斜行柵群3枚柵(角度ピッチ 22.5°)模型

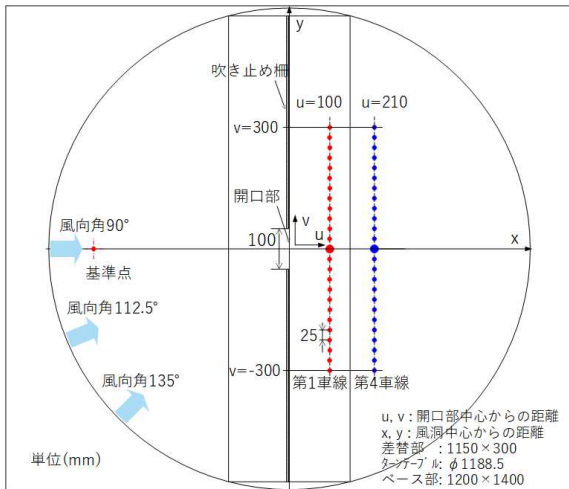


図-116 計測箇所図

計測間隔は出力ユニット GeY40DA で温度補正等の処理をした風速データと気温データを、シリアル通信で2秒間隔に受信し、風速値は30個(計測時間は60秒)のデータの平均値とした。

計測箇所図を図-116に示す。風速の計測箇所は前章4.2.4と同じである。計測箇所は、第1車線上中央と風下側の第4車線上中央とした。計測は道路縦断方向600mmを、25mm毎に1列あたり25計測点で行った。開口部中心から道路横断方向へ100mmを第1車線中心、同様に210mmを第4車線中心とした。計測地点の高さは地面から高さ15mmである。

#### 4.3.5 実験条件

斜行柵群3枚柵(角度ピッチ22.5°)模型の設置状況を図-117に、実験条件を表-9に、模型の左右設置図を図-118に、左設置図を図-119に示す。風向条件は防雪柵に対して直交の風向き90°、斜風の112.5°、135°とした。

表-9 斜行柵群3枚柵(角度ピッチ 22.5°)の実験条件

番号	風向角	新型柵の種類	斜行柵群の設置角(°)			補助柵
			1枚目	2枚目	3枚目	
13	90	斜行柵群(空隙率30%)3枚柵 左右	22.5	45	67.5	左右
14	90	斜行柵群(空隙なし)3枚柵 左右	22.5	45	67.5	左右
15	90	斜行柵群(空隙率30%)3枚柵 左	22.5	45	67.5	左
16	90	斜行柵群(空隙なし)3枚柵 左	22.5	45	67.5	左
17	112.5	斜行柵群(空隙率30%)3枚柵 左右	22.5	45	67.5	左右
18	112.5	斜行柵群(空隙なし)3枚柵 左右	22.5	45	67.5	左右
19	112.5	斜行柵群(空隙率30%)3枚柵 左	22.5	45	67.5	左
20	112.5	斜行柵群(空隙なし)3枚柵 左	22.5	45	67.5	左
21	135	斜行柵群(空隙率30%)3枚柵 左右	22.5	45	67.5	左右
22	135	斜行柵群(空隙なし)3枚柵 左右	22.5	45	67.5	左右
23	135	斜行柵群(空隙率30%)3枚柵 左	22.5	45	67.5	左
24	135	斜行柵群(空隙なし)3枚柵 左	22.5	45	67.5	左

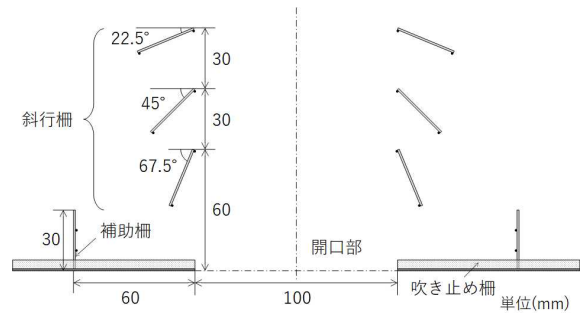


図-118 斜行柵群3枚柵(角度ピッチ 22.5°)模型  
左右設置図

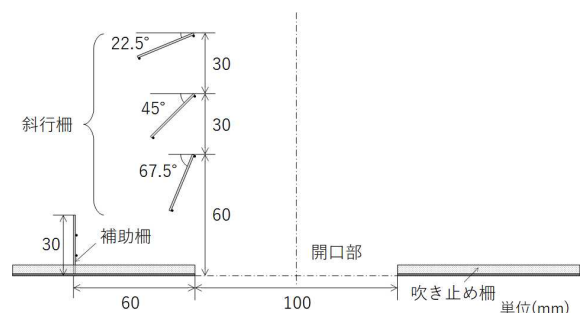


図-119 斜行柵群3枚柵(角度ピッチ 22.5°)模型  
左設置図

斜行柵群の種類は、斜行柵群（空隙率30%）と、斜行柵群（空隙なし）とした。斜行柵群の設置方法は3枚柵の左右設置と、3枚柵の左設置とした。斜行柵と斜行柵の角度ピッチは22.5°とした。斜行柵群を左のみ設置した実験では、補助柵を左のみ設置した。

4. 3. 6 実験結果

1) 風向角90°の風況

イ) 風速比が上昇する範囲（風向角90°）

風向角90° 第1車線の風速比分布図を図-120に示す。風速比の上昇範囲は左-50mmから右+50mmで、斜行柵群なしと、斜行柵群左右設置と、斜行柵群左設置に差がない。但し、斜行柵群左設置は左-25mmから中心0mmの区間の風速比が上昇して、中心0mmから右+25mmの区間の風速比が下がっており、開口部を通過する風は若干、左側の風速比が少し高くなっている。斜行柵群の空隙ありと空隙なしは違いが見られない。

風向角90° 第4車線の風速比分布図を図-121に示す。斜行柵群なしの風速比の上昇範囲は左-75mmから右+100mmに対して、斜行柵群左右設置は左-100mmから右+125mmと左右に広がっている。斜行柵群左設置は左-125mmから右+100mmと斜行柵群左右設置より左側に広がっている。

ロ) 最大風速比（風向角90°）

斜行柵群3枚柵（角度ピッチ22.5°）の風向角90°の最大風速比を図-122に示す。

a) 斜行柵群なしと斜行柵群3枚柵の比較（第1車線）

第1車線は、斜行柵群なし1.16に対して、斜行柵群（空隙率30%）3枚柵左右設置1.12と0.04下がっている。斜行柵群（空隙なし）3枚柵左右設置1.14は斜行柵群なしより0.02下がっている。斜行柵群は空隙があると風速比が少し低くなっていた。

b) 斜行柵群3枚柵と斜行柵群4枚柵の比較（第1車線）

斜行柵群（空隙率30%）3枚柵左右設置1.12は、斜行柵群（空隙率30%）4枚柵左右設置1.08（図-102）と比較すると0.04高い。斜行柵群（空隙率30%）3枚柵の風速緩和効果は、斜行柵群なしより高く、斜行柵群（空隙率30%）4枚柵より低い結果となった。

斜行柵群（空隙率なし）3枚柵は、斜行柵群4枚柵左右設置1.09（図-102）と比較すると0.05高く、斜行柵群（空隙率なし）3枚柵も、緩和効果は、斜行柵群なし以上、斜行柵群（空隙率なし）4枚柵以下の結果となった。

c) 斜行柵群3枚柵の左右設置と左設置の比較（第1車線）

斜行柵群（空隙率30%）3枚柵左設置は1.14で、斜行柵群なしより0.02低く、斜行柵群（空隙率30%）3枚柵

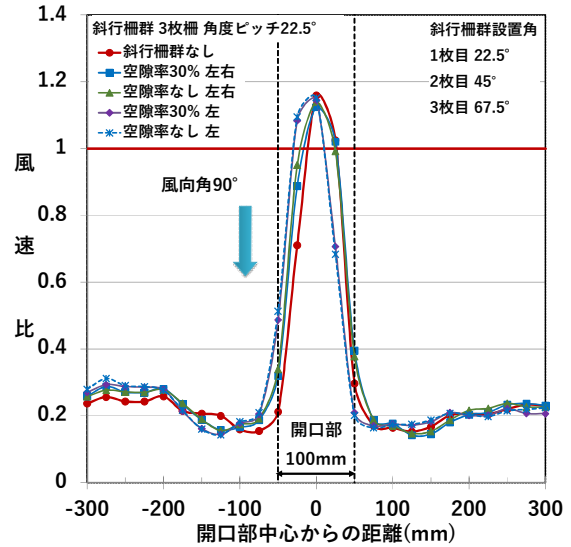


図-120 斜行柵群3枚柵の風速比分布図  
(風向角90° 角度ピッチ22.5° 第1車線)

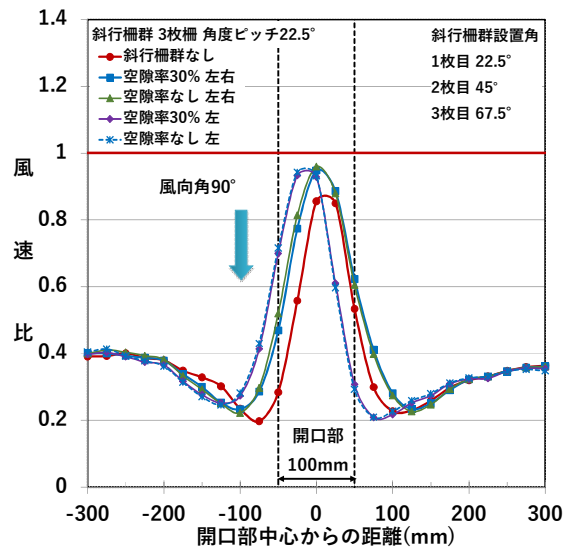


図-121 斜行柵群3枚柵の風速比分布図  
(風向角90° 角度ピッチ22.5° 第4車線)

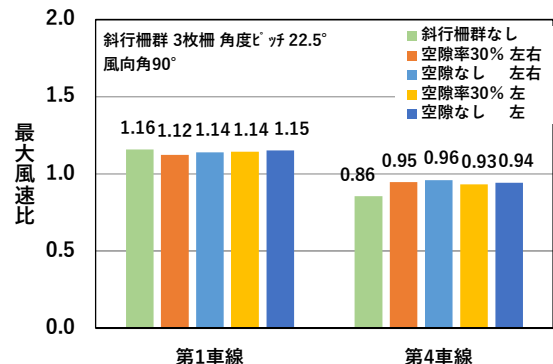


図-122 斜行柵群3枚柵の最大風速比  
(風向角90° 角度ピッチ22.5°)

左右設置より 0.02 高い。斜行柵群（空隙率 30%）3 枚柵左設置の風速緩和効果は、斜行柵群なし以上、斜行柵群（空隙率 30%）3 枚柵左右設置以下となった。

斜行柵群（空隙なし）3 枚柵左設置は 1.15 で、斜行柵群なしより 0.01 低く、斜行柵群（空隙なし）3 枚柵左右設置より 0.01 高い。斜行柵群（空隙なし）3 枚柵左設置の風速緩和効果も、斜行柵群なし以上、斜行柵群（空隙なし）3 枚柵左右設置以下となった。

風向角 90° の第 1 車線では、斜行柵群（空隙なし）より斜行柵群（空隙率 30%）の方が風速緩和効果が若干高い。空隙があることで風速を弱めていると考えられる。

斜行柵群 3 枚柵の左右設置と左設置を比較すると、左設置は左右設置と比べて風速緩和効果が低下することが確認された。

**d) 斜行柵群 3 枚柵の左右設置と左設置の比較(第 4 車線)**

第 4 車線の最大風速比は、新型柵なし 0.86 (図-122) より、斜行柵群（空隙率 30%）3 枚柵左設置 0.93 高く、更に、斜行柵群（空隙率 30%）3 枚柵左右設置 0.95 高くなっている。開口部に入り込む風を斜行柵群が外側にそらした風が防雪柵を越えて、第 4 車線付近で下に流れたためと考えられる。また、斜行柵群（空隙なし）3 枚柵 0.86 より斜行柵群（空隙なし）3 枚柵左設置 0.94 高く、更に、斜行柵群（空隙なし）3 枚柵左右設置 0.96 高くなっている。第 4 車線も斜行柵群（空隙なし）より斜行柵群（空隙率 30%）の方が風速緩和効果が若干 0.01 高い。

**2) 風向角 112.5° の風況**

**イ) 風速比が上昇する範囲 (風向角 112.5° )**

風向角 112.5° 第 1 車線の風速比分布図を図-123 に示す。風速比の上昇範囲は、斜行柵群なしが中心 0mm から右+150mm に対して、斜行柵群（空隙率 30%）3 枚柵左右設置と、斜行柵群（空隙率 30%）3 枚柵左設置は、左-25mm から右+150mm で左側に広がっている。斜行柵群 3 枚柵は空隙ありなしで違いは見られない。斜行柵群 4 枚柵左右設置の上昇範囲 (図-103) は左-25mm から右+175mm で、3 枚柵にすることで右側への広がり少し小さくなった。

風向角 112.5° 第 4 車線の風速比分布図を (図-124) に示す。斜行柵群なしは右+50mm から右側に対して、斜行柵群 3 枚柵左右設置は中心 0mm から右側と、左に 50mm 移動している。左側の斜行柵群が風向に対して直角に近づくため開口部に入り込む風を抑えたと考えられる。斜行柵群 3 枚柵左設置の上昇範囲は左-25mm から右側と、左右設置に比べて更に左側に 25mm 移動している。

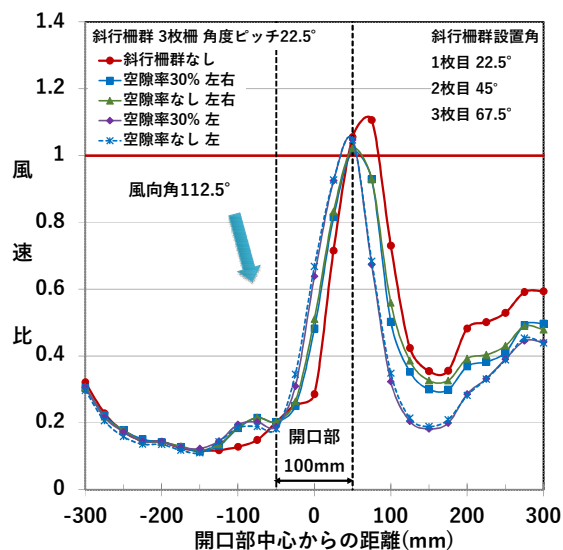


図-123 斜行柵群 3 枚柵の風速比分布図 (風向角 112.5° 角度ピッチ 22.5° 第 1 車線)

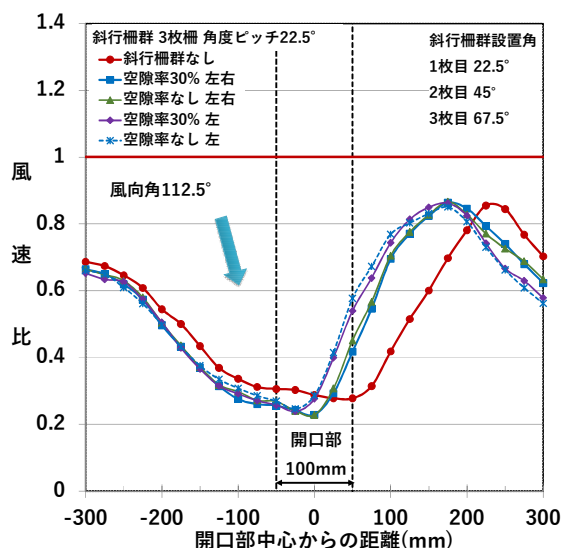


図-124 斜行柵群 3 枚柵の風速比分布図 (風向角 112.5° 角度ピッチ 22.5° 第 4 車線)

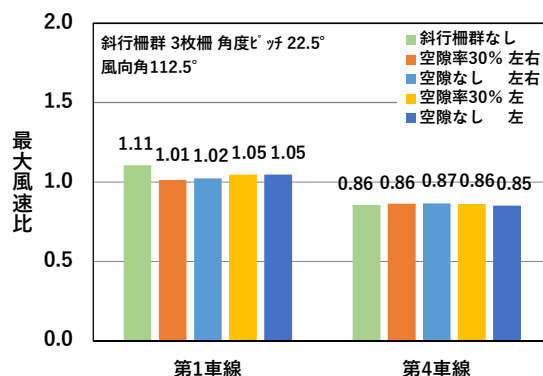


図-125 斜行柵群 3 枚柵の最大風速比 (風向角 112.5° 角度ピッチ 22.5° )

ロ) 最大風速比 (風向角 112.5°)

斜行柵群 3 枚柵 (角度ピッチ 22.5°) の風向角 112.5° の最大風速比を図-125 に示す。

a) 斜行柵群なしと斜行柵群 3 枚柵の比較 (第 1 車線)

第 1 車線は、斜行柵群なし 1.11 に対して、斜行柵群 (空隙率 30%) 3 枚柵左右設置 1.01 は 0.1 下がっており、斜行柵群 (空隙率なし) 3 枚柵左右設置 1.02 は 0.09 下がって、風速の緩和効果が確認できた。

斜行柵群 (空隙率なし) 3 枚柵左右設置は 1.02 と、斜行柵群 (空隙率 30%) 3 枚柵左右設置 1.01 と、空隙ありなしで大きな違いは見られない。

b) 斜行柵群 3 枚柵と斜行柵群 4 枚柵の比較 (第 1 車線)

斜行柵群 (空隙率 30%) 3 枚柵左右設置 1.01 は、斜行柵群 (空隙率 30%) 4 枚柵左右設置 0.93 (図-105) より 0.08 高い。斜行柵群 (空隙率 30%) 3 枚柵左右設置 1.01 の風速緩和効果は、斜行柵群なし 1.11 と、斜行柵群 (空隙率 30%) 4 枚柵左右設置 0.93 のほぼ中間である。

斜行柵群 (空隙率なし) 3 枚柵左右設置 1.02 も、斜行柵群 (空隙率なし) 4 枚柵左右設置 0.93 と、斜行柵群なし 1.11 のほぼ中間であった。

c) 斜行柵群 3 枚柵の左右設置と左設置の比較 (第 1 車線)

斜行柵群 (空隙率 30%) 3 枚柵左設置 1.05 で、斜行柵群なし 1.11 より 0.06 低く、斜行柵群 (空隙率 30%) 3 枚柵左右設置 1.01 より 0.04 高い。斜行柵群 (空隙率 30%) 3 枚柵左設置の風速緩和効果は、斜行柵群なしと、斜行柵群 (空隙率 30%) 3 枚柵左右設置の中間である。

斜行柵群 (空隙なし) 3 枚柵左設置 1.05 は、斜行柵群 (空隙率 30%) 3 枚柵左右設置 1.05 と同じで、空隙有無で違いが見られない。

d) 斜行柵群 3 枚柵の左右設置と左設置の比較 (第 4 車線)

第 4 車線の最大風速比は、斜行柵群なし 0.86 (図-125)、斜行柵群 (空隙率 30%) 3 枚柵左右設置 0.86、斜行柵群 (空隙なし) 3 枚柵左右設置 0.87 とほぼ同じである。また、斜行柵群左設置の最大風速比は、斜行柵群なし 0.86、斜行柵群 (空隙率 30%) 3 枚柵左設置 0.86、斜行柵群 (空隙なし) 3 枚柵左設置 0.85 とほぼ同じであった。

3) 風向角 135° の風況

イ) 風速比が上昇する範囲 (風向角 135°)

風向角 135° 第 1 車線の風速比分布図を図-126 に示す。風速比の上昇範囲は、斜行柵群なしが右+100mm から右側で、前章 4. 3. 7 の図-109 に示す通り開口部を通過した風が、右の防雪柵に引き寄せられるためと考えられる。中心 0mm から左側は前章 4. 3. 7 の図-111 に示す通り、防雪柵を越えた風が下に流れる影響で左端ほど風

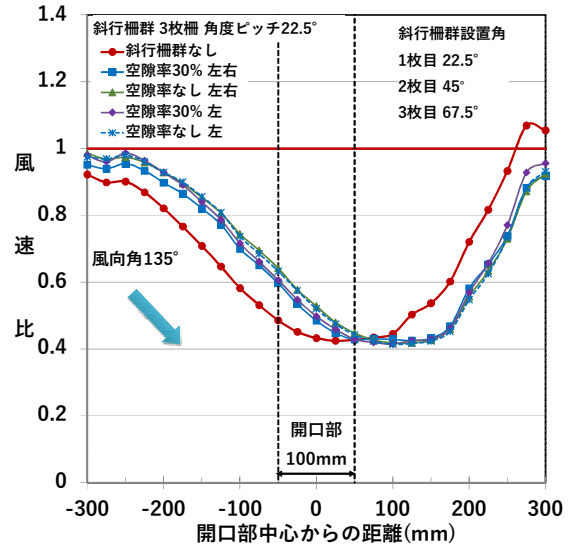


図-126 斜行柵群 3 枚柵の風速比分布図 (風向角 135° 角度ピッチ 22.5° 第 1 車線)

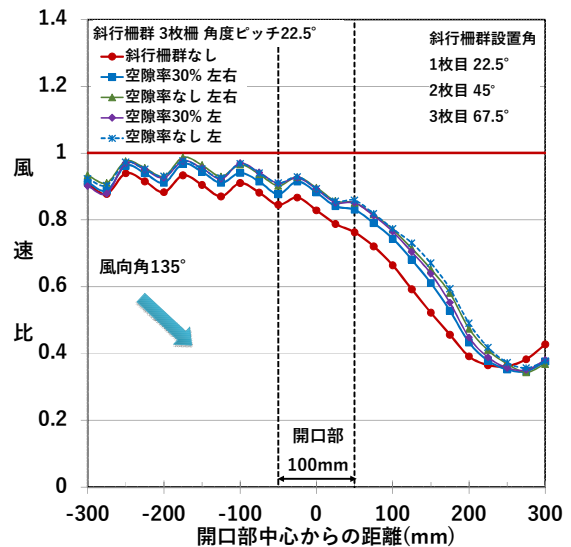


図-127 斜行柵群 3 枚柵の風速比分布図 (風向角 135° 角度ピッチ 22.5° 第 4 車線)

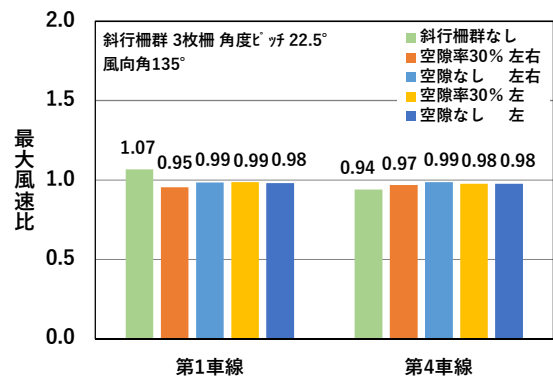


図-128 斜行柵群 3 枚柵の最大風速比 (風向角 135° 角度ピッチ 22.5°)



速比が上昇していると考えられる。

斜行柵群3枚柵左右設置は、空隙率30%と空隙率なしとも、右+175mmから右側で、斜行柵群なしより右側に75mmずれている。この原因は、斜行柵群3枚柵左設置も右+175mmから右側と同じであるため、右に設置した斜行柵群の影響はないと考えられる。左に設置した斜行柵群の影響でさらに風が弱まったと考えられる。

風速緩和効果も風向角135°では右に設置した斜行柵群による影響ないが、左に設置した斜行柵群により開口部を通過する風を緩和していたと考えられる。

風向角135°第4車線の風速比分布図を図-127に示す。斜行柵群3枚柵左設置と、斜行柵群3枚柵左右設置に違いは見られない。

第1車線より第4車線の風速比が大きく、左側の防雪柵を越えた風が下に流れる影響は、第4車線で大きくなるためと考えられる。

**ロ) 最大風速比 (風向角135°)**

斜行柵群3枚柵(角度ピッチ22.5°)の風向角112.5°の最大風速比を図-128に示す。

**a) 斜行柵群なしと斜行柵群3枚柵の比較(第1車線)**

第1車線は、斜行柵群なし1.07に対して、斜行柵群(空隙率30%)3枚柵左右設置0.95と大きく0.12下がっている。斜行柵群(空隙なし)3枚柵左右設置0.99は斜行柵群なしより0.08下がっているが、斜行柵群(空隙率30%)3枚柵左右設置ほど下がってない。斜行柵群は空隙があった方が風速緩和効果が大きかった。

**b) 斜行柵群3枚柵と斜行柵群4枚柵の比較(第1車線)**

斜行柵群(空隙率30%)3枚柵左右設置0.95で、斜行柵群(空隙率30%)4枚柵左右設置0.98(図-108)と比較すると0.03と若干低い。4枚柵は左に設置した斜行柵の風上1枚目が風向と鉛直になるため、3枚柵に比べて開口部に入る風を導入していたと考えられる。

斜行柵群(空隙なし)3枚柵左右設置0.99は、斜行柵群(空隙率なし)4枚柵左右設置0.99とほぼ同じであった。

**c) 斜行柵群3枚柵の左右設置と左設置の比較(第1車線)**

斜行柵群(空隙率30%)3枚柵左設置は0.99で、斜行柵群なし1.07より0.08低く、斜行柵群(空隙率30%)3枚柵左右設置0.95より0.04高い。

斜行柵群(空隙なし)3枚柵左設置0.98は、斜行柵群(空隙率30%)3枚柵左右設置0.99と同じであった。

**d) 斜行柵群3枚柵の左右設置と左設置の比較(第4車線)**

斜行柵群3枚柵の第4車線の最大風速比は、図-128より斜行柵群なしが0.94が一番低い。斜行柵群4枚柵の最大風速比(図-108)も斜行柵群なしが一番低くなって

いる。左側の防雪柵を越えた風が第4車線付近で下に流れる影響が大きいためと考えられる。

斜行柵群(空隙率30%)3枚柵左右設置0.97は、斜行柵群(空隙率30%)3枚柵左設置0.98とほぼ同じである。左右設置と左設置に大きな違いは見られなかった。

斜行柵群(空隙なし)3枚柵左右設置0.99は、斜行柵群(空隙なし)3枚柵左設置0.98とほぼ同じである。風向角135°は空隙ありなしで違いが見られなかった。

**4.4 斜行柵群3枚柵(角度ピッチ30°)の風況**

**4.4.1 実験条件**

斜行柵群(空隙率30%)3枚柵(角度ピッチ30°)模型の設置状況を図-129に、実験条件を表-10に、模型の設置図を図-130から図-133に示す。風向条件は防雪柵に対して直交の90°と、斜風の112.5°、135°として実験を行った。新型柵の種類はすべて「斜行柵群(空隙率30%)」である。斜行柵群は3枚柵とし左右設置と、左設置の実験を行った。斜行柵と斜行柵の角度ピッチは30°とした。また、実験では補助柵の効果を確認するため、補助柵ありと、補助なしの実験を行った。

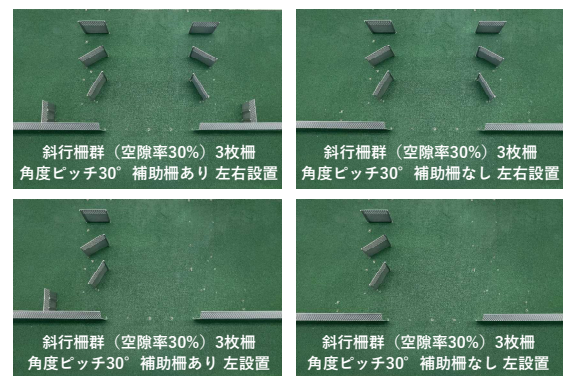


図-129 斜行柵群3枚柵(角度ピッチ30°)模型

表-10 斜行柵群3枚柵(角度ピッチ30°)の実験条件

番号	風向角	新型柵の種類	斜行柵群の設置角(°)			補助柵
			1枚目	2枚目	3枚目	
25	90	斜行柵群(空隙率30%)3枚柵 左右	0	30	60	左右
26	90	斜行柵群(空隙率30%)3枚柵 左右	0	30	60	なし
27	90	斜行柵群(空隙率30%)3枚柵 左	0	30	60	左
28	90	斜行柵群(空隙率30%)3枚柵 左	0	30	60	なし
29	112.5	斜行柵群(空隙率30%)3枚柵 左右	0	30	60	左右
30	112.5	斜行柵群(空隙率30%)3枚柵 左右	0	30	60	なし
31	112.5	斜行柵群(空隙率30%)3枚柵 左	0	30	60	左
32	112.5	斜行柵群(空隙率30%)3枚柵 左	0	30	60	なし
33	135	斜行柵群(空隙率30%)3枚柵 左右	0	30	60	左右
34	135	斜行柵群(空隙率30%)3枚柵 左右	0	30	60	なし
35	135	斜行柵群(空隙率30%)3枚柵 左	0	30	60	左
36	135	斜行柵群(空隙率30%)3枚柵 左	0	30	60	なし

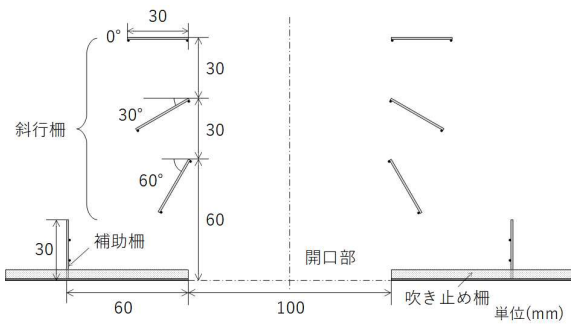


図-130 斜行柵群3枚柵(角度ピッチ 30°)模型  
補助柵あり 左右設置図

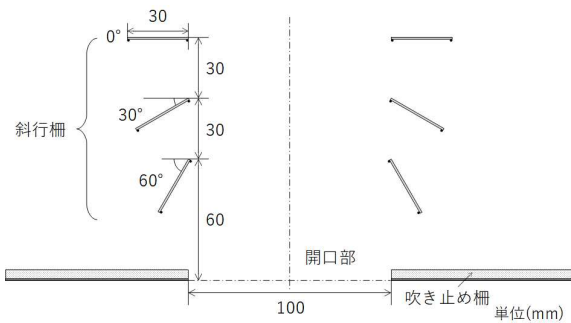


図-131 斜行柵群3枚柵(角度ピッチ 30°)模型  
補助柵なし 左右設置図

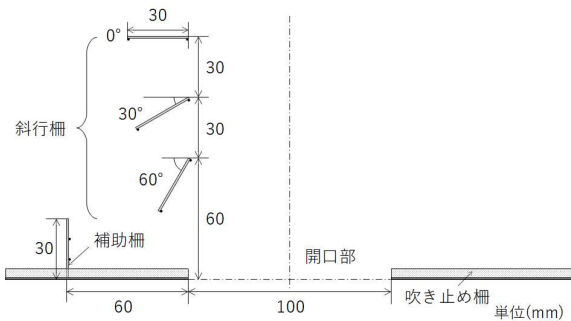


図-132 斜行柵群3枚柵(角度ピッチ 30°)模型  
補助柵あり 左設置図

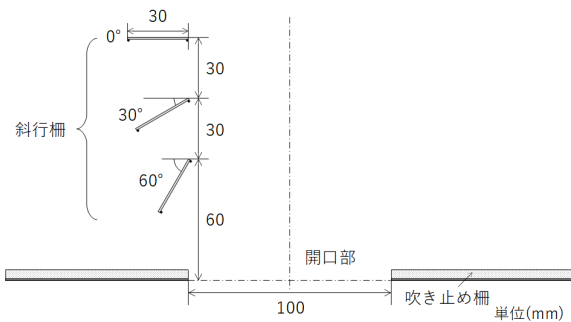


図-133 斜行柵群3枚柵(角度ピッチ 30°)模型  
補助柵なし 左設置図

#### 4. 4. 2 実験結果

##### 1) 風向角 90° の風況

##### イ) 風速比が上昇する範囲 (風向角 90°)

風向角 90° 第1車線の風速比分布図を図-134に示す。風速比の上昇範囲は左-50mm から右+50mm で、角度ピッチ 22.5° (図-120) と角度ピッチ 30° (図-134) とでは違いが見られない。斜行柵群左設置は補助柵ありと補助柵なしとも左-25mm から中心 0mm の区間で風速比が上昇して、中心 0mm から右+25mm の区間の風速比が下がっている。開口部を通過する風は若干、左側が若干高く、角度ピッチ 22.5° (図-120) と同じである。

風向角 90° 第4車線の風速比分布図を図-135に示す。斜行柵群なしの風速比の上昇範囲は左-75mm から右+100mm で、斜行柵群左右設置は左-100mm から右+125mm と左右に広がっている。角度ピッチ 22.5° (図-121) と角度ピッチ 30° (図-135) とでは違いが見られない。

##### ロ) 最大風速比 (風向角 90°)

斜行柵群3枚柵(角度ピッチ 30°)の風向角 90° の最大風速比を図-136に示す。

##### a) 斜行柵群3枚柵の補助柵ありと補助柵なしの比較

第1車線は、斜行柵群なし 1.16 に対して、斜行柵群3枚柵(補助柵あり)左右設置は 1.09 と 0.07 下がっている。更に、斜行柵群3枚柵(補助柵なし)左右設置 1.04 は斜行柵群なしより 1.04 と大きく下がっている。斜行柵群によって外側に流れる風が、補助柵がなくなることで、更に強くなることが確認できた。

第4車線も、斜行柵群3枚柵(補助柵あり)左右設置は 0.90 に対して、斜行柵群3枚柵(補助柵なし)左右設置は 0.80 と下がっている。斜行柵群3枚柵(補助柵なし)左右設置 0.80 は、斜行柵群なし 0.86 より風速比が下がっている。左右設置、左設置とも、補助柵がなくなることで風速緩和効果が確認できた。

##### b) 斜行柵群3枚柵の角度ピッチ 22.5° と 30° の比較

第1車線は、斜行柵群3枚柵(角度ピッチ 22.5°)(補助柵あり)左右設置(図-122) 1.12 に対して、斜行柵群3枚柵(角度ピッチ 30°)(補助柵あり)左右設置 1.09 は若干 0.03 下がっている。斜行柵群3枚柵(角度ピッチ 22.5°)(補助柵あり)左設置(図-122) 1.14 に対して、斜行柵群3枚柵(角度ピッチ 30°)(補助柵あり)左設置 1.12 は若干 0.02 下がっている。左右設置でも左設置でも斜行柵群の角度ピッチを 22.5° から 30° にすることで風速緩和効果が確認できた。

第4車線は、斜行柵群3枚柵(角度ピッチ 22.5°)(補

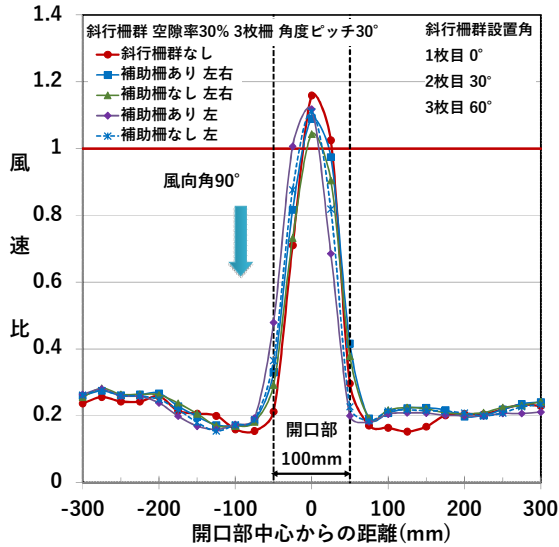


図-134 斜行柵群3枚柵の風速比分布図  
(風向角90° 角度ピッチ30° 第1車線)

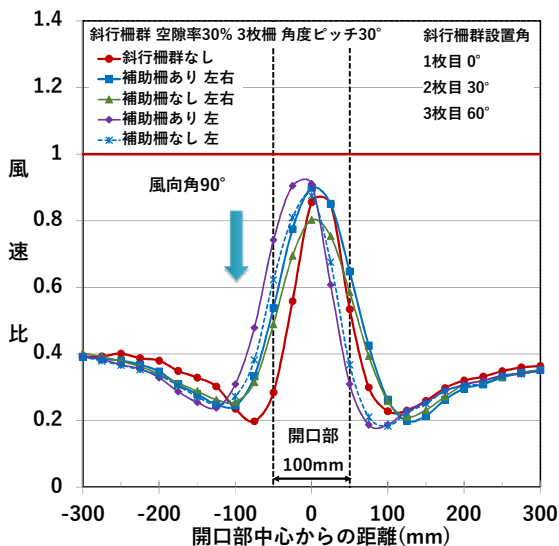


図-135 斜行柵群3枚柵の風速比分布図  
(風向角90° 角度ピッチ30° 第4車線)

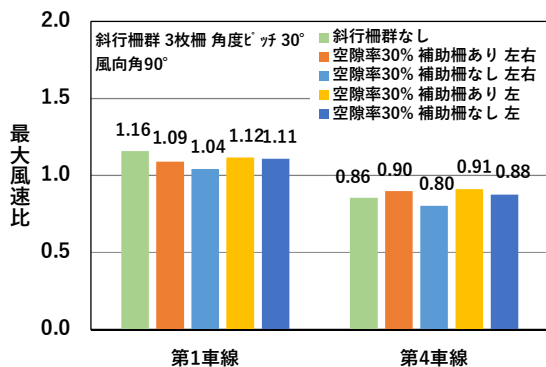


図-136 斜行柵群3枚柵の最大風速比  
(風向角90° 角度ピッチ30°)

助柵あり) 左右設置 (図-122) 0.95 に対して、斜行柵群3枚柵(角度ピッチ30°)(補助柵あり)左右設置0.90は若干0.05下がっている。第4車線でも、角度ピッチを22.5°から30°にすることで風速緩和効果が確認できた。

c) 斜行柵群4枚柵(補助柵あり)と斜行柵群3枚柵(補助柵なし)の比較

第1車線は、斜行柵群4枚柵(補助柵あり)左右設置1.08(図-102)に対して、斜行柵群3枚柵(補助柵なし)左右設置は1.04と若干0.04低い。斜行柵群を4枚柵(補助柵あり)より、斜行柵群3枚柵で角度ピッチを30°として補助柵をなくすことで、柵枚数を5枚から3枚に少なくでき、更に風速緩和効果が向上することが確認できた。

第4車線は、斜行柵群4枚柵(補助柵あり)左右設置0.86(図-102)に対して、斜行柵群3枚柵(補助柵なし)左右設置は0.80と若干0.04低く、斜行柵群3枚柵でも斜行柵群4枚柵より風速緩和効果が確認できた。

d) 斜行柵群3枚柵の左右設置と左設置の比較

第1車線は、斜行柵群3枚柵(補助柵あり)左設置は1.12と斜行柵群なし1.16より0.04下がり、斜行柵群3枚柵(補助柵あり)左右設置は1.09と0.07下がっている。斜行柵群3枚柵(補助柵なし)左設置1.11は斜行柵群なし1.16より0.05下がり、斜行柵群3枚柵(補助柵なし)左右設置1.04は斜行柵群なし1.16より0.12下がっている。斜行柵群の左設置に対して、左右設置は風速緩和効果が大きくなっている。

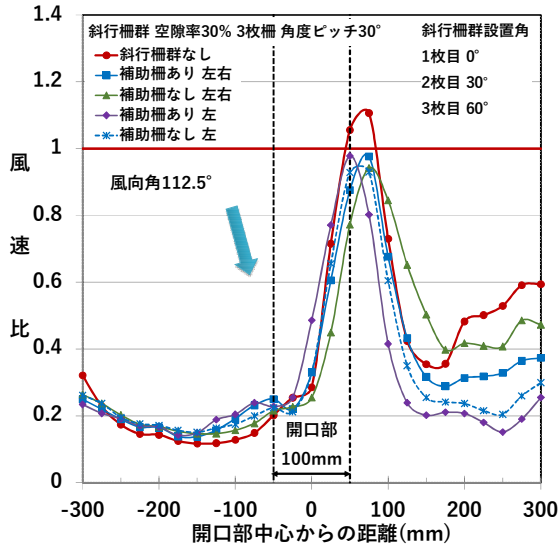
第4車線は、斜行柵群3枚柵(補助柵あり)左右設置は0.90、斜行柵群3枚柵(補助柵あり)左設置は0.91と、斜行柵群なしより風速比が上昇している。防雪柵を越えた風が第4車線付近で下に流れる影響が補助柵あることで強められると考えられる。

斜行柵群3枚柵(補助柵なし)左設置は0.88と若干斜行柵群なしより風速比が上がっているが、斜行柵群3枚柵(補助柵なし)左右設置とすることで風速比は0.80と斜行柵群なしより風速比が下がることが確認できた。風向角90°において、第4車線まで風速を下げる場合は、斜行柵群3枚柵(角度ピッチ30°)左右設置とした方が良い。

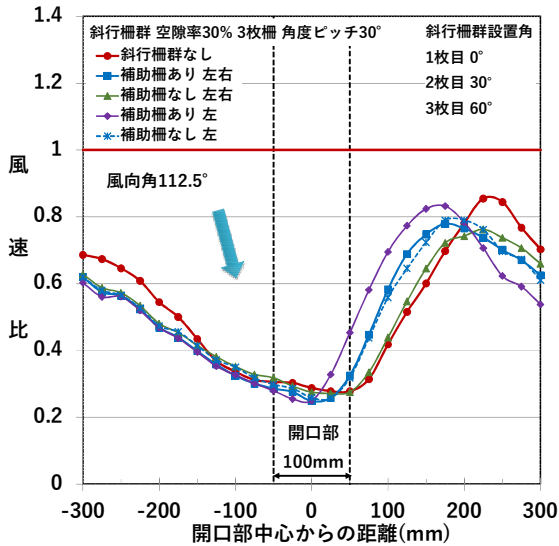
2) 風向角112.5°の風況

イ) 風速比が上昇する範囲(風向角112.5°)

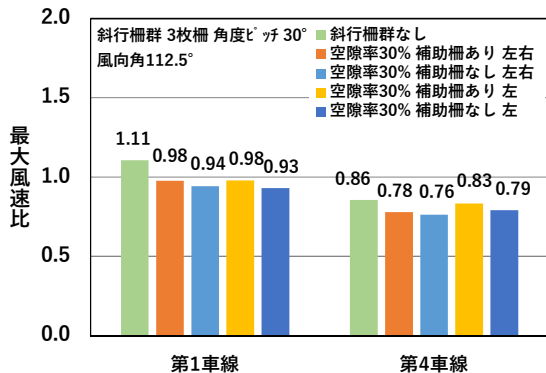
風向角112.5°第1車線の風速比分布図を図-137に示す。速比の上昇範囲は、斜行柵群3枚柵(補助柵あり)左右設置と、斜行柵群3枚柵(補助柵あり)左設置と、



図一137 斜行柵群3枚柵の風速比分布図  
(風向角 112.5° 角度ピッチ 30° 第1車線)



図一138 斜行柵群3枚柵の風速比分布図  
(風向角 112.5° 角度ピッチ 30° 第4車線)



図一139 斜行柵群3枚柵の最大風速比  
(風向角 112.5° 角度ピッチ 30° )

斜行柵群3枚柵(補助柵なし)左設置が、風左-25mmから右+150mmであるが、斜行柵群3枚柵(補助柵なし)左右設置は中心0mmから右+150mmと、右側に25mm移動している。右側の斜行柵群の影響で風が広がり、広がる風を右側の補助柵が抑えていると考えられる。

風向角112.5°第4車線の風速比分布図を図一138に示す。斜行柵群3枚柵(補助柵あり)左右設置は右+25mmから右側に広がっているが、斜行柵群3枚柵(補助柵なし)左右設置は右+50mmから右側に広がっており、補助柵がなくなることで25mm右側に移動している。斜行柵群3枚柵(補助柵あり)左設置は中心0mmから右側に対して、斜行柵群3枚柵(補助柵なし)左設置は右+25mmから右側こと、右側に移動している。第4車線では補助柵がないことで風が右側に移動していることが確認できた。

ロ) 最大風速比(風向角 112.5°)

斜行柵群3枚柵(角度ピッチ30°)の風向角112.5°の最大風速比を図一139に示す。

a) 斜行柵群3枚柵の補助柵ありと補助柵なしの比較

第1車線は、斜行柵群なし1.11に対して、斜行柵群3枚柵(補助柵あり)左右設置は0.98と0.03下がっている。斜行柵群3枚柵(補助柵なし)左右設置0.94は斜行柵群なしより0.07下がっている。補助柵がなくなることで風速緩和効果が大きくなった。この現象は風向角90°と同じである。

第4車線も、斜行柵群3枚柵(補助柵あり)左右設置は0.78に対して、斜行柵群3枚柵(補助柵なし)左右設置は0.76と補助柵がなくなることで風速緩和効果が増すことが確認できた。

b) 斜行柵群3枚柵の角度ピッチ22.5°と30°の比較

第1車線は、斜行柵群3枚柵(角度ピッチ22.5°)(補助柵あり)左右設置(図一125)1.01に対して、斜行柵群3枚柵(角度ピッチ30°)(補助柵あり)左右設置0.98は0.03下がっている。斜行柵群3枚柵(角度ピッチ22.5°)(補助柵あり)左設置(図一125)1.05に対して、斜行柵群3枚柵(角度ピッチ30°)(補助柵あり)左設置0.98は0.07下がっている。風向角90°と同じく、斜行柵群の角度ピッチ22.5°から30°に変えることで風速緩和効果が大きくなることが確認できた。

第4車線は、斜行柵群3枚柵(角度ピッチ22.5°)(補助柵あり)左右設置(図一125)0.86に対して、斜行柵群3枚柵(角度ピッチ30°)(補助柵あり)左右設置0.78は0.07下がっている。風向角90°と同じく、角度ピッチを22.5°から30°にすることで風速緩和効果が増すことが確認できた。

**c) 斜行柵群 4 枚柵（補助柵あり）と斜行柵群 3 枚柵（補助柵なし）の比較**

第 1 車線は、斜行柵群 4 枚柵（補助柵あり）左右設置 0.93 (図-105) に対して、斜行柵群 3 枚柵（補助柵なし）左右設置は 0.94 (図-139) とほぼ同じである。柵の枚数を片側 5 枚から 3 枚に減らしても、ほぼ同様の風速緩和効果を保つことができた。

第 4 車線は、斜行柵群 4 枚柵（補助柵あり）左右設置 0.82 (図-105) に対して、斜行柵群 3 枚柵（補助柵なし）左右設置は 0.76 (図-139) と 0.06 低く、第 4 車線は斜行柵群 3 枚柵で、斜行柵群 4 枚柵より風速比を抑えることができた。

**d) 斜行柵群 3 枚柵の左右設置と左設置の比較**

第 1 車線は図-139 の通り、斜行柵群 3 枚柵（補助柵あり）左右設置は 0.98 に対して、斜行柵群 3 枚柵（補助柵あり）左設置は 0.98 と同じである。斜行柵群 3 枚柵（補助柵なし）左右設置は 0.94 に対して、斜行柵群 3 枚柵（補助柵なし）左設置は 0.93 とほぼ同じである。風向角 112.5° は左右設置と左設置の違いは僅かである。

第 4 車線は図-139 の通り、斜行柵群 3 枚柵（補助柵なし）左右設置は 0.76 に対して、斜行柵群 3 枚柵（補助柵なし）左設置は 0.79 と少し上がっている。風向角 112.5° の第 4 車線は風向角 90° と同様に、左右設置の方が左設置より風速比が少し低い。

斜行柵群 3 枚柵（補助柵あり）左右設置は 0.78、斜行柵群 3 枚柵（補助柵あり）左設置は 0.83 と、補助柵なしより風速比が上昇している。風向角 90° と同様に防雪柵を越えた風が第 4 車線付近で下に流れるためと考えられる。

**3) 風向角 135° の風況**

**イ) 風速比が上昇する範囲（風向角 135°）**

風向角 135° 第 1 車線の風速比分布図を図-140 に示す。

風速比の上昇範囲は、斜行柵群なしと、斜行柵群 3 枚柵（補助柵なし）左右設置と、斜行柵群 3 枚柵（補助柵なし）左設置は右+100mm から右側に対して、斜行柵群 3 枚柵（補助柵あり）左右設置と斜行柵群 3 枚柵（補助柵あり）左設置は右+50mm から右側で、左側の補助柵があることで、風速比が上昇する範囲は左側に移動している。また、左側の補助柵があることで左-50mm から右+100mm 区間の風速比が大きく下がっている。右側の補助柵の影響はないと考えられる。

斜行柵群 4 枚柵 (図-106) は左-300mm から中心 0mm の区間で、斜行柵群 3 枚柵 (角度ピッチ 22.5° ) (

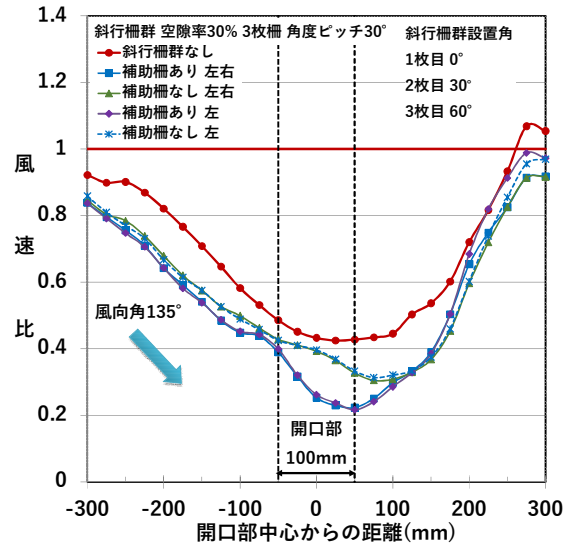


図-140 斜行柵群 3 枚柵の風速比分布図 (風向角 135° 角度ピッチ 30° 第 1 車線)

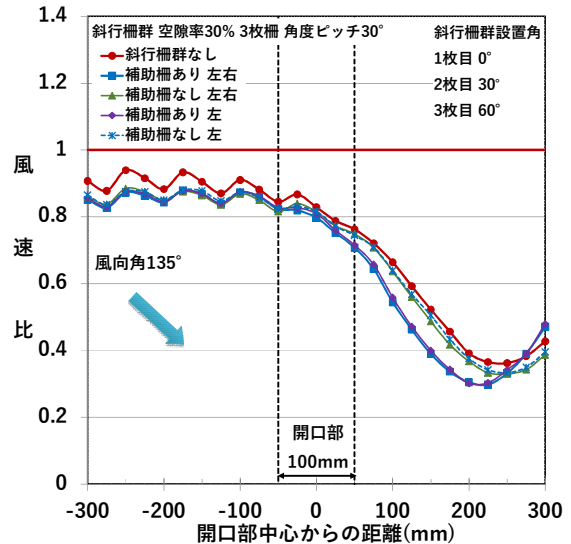


図-141 斜行柵群 3 枚柵の風速比分布図 (風向角 135° 角度ピッチ 30° 第 4 車線)

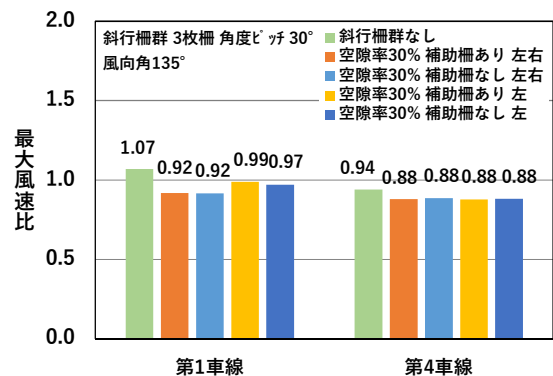


図-142 斜行柵群 3 枚柵の最大風速比 (風向角 135° 角度ピッチ 30°)

図-126) は左-300mm から右+50mm の区間で新型柵なしの風速比が一番低いが、斜行柵群3枚柵(角度ピッチ $30^{\circ}$ )ではすべての区間で斜行柵群なしの風速比が高い。斜行柵群の角度ピッチを $30^{\circ}$ (図-140)とすることで風向角 $135^{\circ}$ でも風速の緩和効果が確認された。

風向角 $135^{\circ}$ 第4車線の風速比分布図を図-141に示す。斜行柵群3枚柵左設置と、斜行柵群3枚柵左右設置に違いは見られない。補助柵ありは右+25mmから右+250mmの長い区間で、補助柵なしより風速比が下がっていた。

#### ロ) 最大風速比(風向角 $135^{\circ}$ )

斜行柵群3枚柵(角度ピッチ $30^{\circ}$ )の風向角 $135^{\circ}$ の最大風速比を図-142に示す。第1車線は開口部を通過した風が防雪柵に引き寄せられる影響で右端の風速比が上昇している。第1車線の最大風速比は左右設置より左設置の方が高い。右側の斜行柵群が風を外側にそらし最大風速比を少し下げていると考えられる。

第4車線は防雪柵を越えた風が道路上で下に下る影響で左端の風速比が上昇している。斜行柵群3枚柵(補助柵あり)左右設置、斜行柵群3枚柵(補助柵なし)左右設置、斜行柵群3枚柵(補助柵あり)左設置、斜行柵群3枚柵(補助柵なし)左設置とも、すべての最大風速比が0.88と同じである。

斜行柵群4枚柵(図-107)と、斜行柵群3枚柵(角度ピッチ $22.5^{\circ}$ ) (図-127)は左-300mmから右+225mmの区間で新型柵なしの風速比が一番低いが、斜行柵群3枚柵(角度ピッチ $30^{\circ}$ ) (図-141)では一番高くなっている。第4車線でも第1車線と同様に斜行柵群の角度ピッチを $30^{\circ}$ とすることで風向角 $135^{\circ}$ でも風速の緩和効果が確認できた。

## 5. 視程急変箇所の条件に応じた対策の選定手法

### 5.1 本研究で調査を行った対策工法

本研究では、防雪柵端部・開口部の視程や風速の急変緩和対策工法として、まず始めに3章で、実際の道路で既に用いられている副防雪柵(L字型副防雪柵)の対策効果について、現道における移動気象観測や実物大の防雪柵を用いた石狩吹雪実験場における現地観測、防雪柵模型を用いた風洞実験、防雪柵周辺の風速分布を再現する数値シミュレーション解析を行った。その結果、副防雪柵の設置により、防雪柵端部と開口部の視程や風速の急変を緩和する効果があることを確認した。ただし、吹雪時の風向が防雪柵に直交する場合、副防雪柵の設置により逆に風速が強まる傾向があることも確認した。

本研究の次のステップとして、4章では、防雪柵に直

交する風でも開口部の視程や風速の急変を緩和できる副防雪柵に替わる新たな対策工法の検討を行った。風洞実験や現地観測の事前検討として、数値シミュレーション解析によって、開口部における副防雪柵の配置や構造、風向を変えた様々な条件で、開口部周辺の風速分布の解析<sup>13),14)</sup>を行い、風速急変のより大きな緩和効果を有する対策工法の検討を行った。そして、この検討結果<sup>13)</sup>から直交風でも開口部における風速低減を見込める対策工として、「斜行柵群」と「くの字型柵」を考案し、防雪柵模型を用いた風洞実験と実物大の防雪柵を用いた現地観測を実施した。その結果、これらの対策工を防雪柵開口部に設置することで、風向が防雪柵に直交する場合でも、視程や風速の急変緩和を見込むことができることを示した。

本研究では、この他の防雪柵端部・開口部対策についても、これまでの吹雪対策に関する既往文献<sup>1),12)</sup>などや現地調査等に基づいて調査を行った。副防雪柵以外の施設による対策としては、仮設応急的に冬期間のみ防雪柵開口部に防雪柵を設置する方法や、視線誘導施設により開口部における路側の位置や道路線形の視認性を高めて、冬期道路交通安全性を確保する方法などがある。ただし、仮設防雪柵の設置は、冬期間の使用が無い土地に限られ、必ずしも全ての開口部で設置できるとは限らない。また、視線誘導施設は、吹雪による視程急変を根本的に緩和する対策施設ではないため、副防雪柵等の開口部対策を施工することができない場合の対策の二次的な選択肢の一つとして位置付けられると考えられる。

次の5.2節では、施設による防雪柵の開口部対策として、主に本研究で検討を行った副防雪柵(L字型副防雪柵)、斜行柵群、くの字型柵の選定に関して整理する。

### 5.2 現地条件に応じた対策工法の選定について

防雪柵の開口部対策の目的は、開口部における局所的な視程の急変や視程障害を緩和することにより、冬期道路交通安全性を確保することである。防雪柵の開口部対策を実施するにあたり、まずその必要性を検討し、対策が必要と判断された場合に、現地の各条件と各対策工の特徴に応じて対策工を選定する。

#### 5.2.1 防雪柵の開口部対策の必要性について

防雪柵の開口部において視程障害が頻発する場合に、対策を検討することになる。対策の必要性の検討には、吹雪による視程障害の発生頻度の他、交通量や事故履歴等の現地の交通実態も考慮する必要があると考えられる。特に、局所的な視程の急変は車両間の速度差を招き、車間距離が短くなって危険な状態となる。

### 5. 2. 2 防雪柵の開口部対策の種類

防雪柵の開口部対策は、飛雪を制御する常設の副防雪柵や視線誘導施設のハード対策が主であるが、ハード対策が困難な場合は通行規制等のソフト対策で対応する。

以降は、常設の施設による防雪柵の開口部対策として、本研究で検討を行った副防雪柵、斜行柵群、くの字型柵の選定に関して整理を行った。

### 5. 2. 3 防雪柵の開口部対策工の選定の基本的考え方

防雪柵の開口部において視程障害の緩和対策が必要と判断される場合は、各対策工の利点や留意事項等の特徴と現地の各条件を勘案して、対策工を選定する。

現地における各条件とは、気象条件（吹雪時の卓越風向等）、道路構造、対策工を設置することが可能な用地確保の可否などである。さらに、対策工の選定では整備費や維持費なども考慮して総合的に判断する必要があると考えられる。ただし、本研究で視程や風速の急変緩和効果の検討を行った副防雪柵、斜行柵群、くの字型柵について、これらすべての条件で観測や実験を行うことができたわけではない。以降では、本研究で得られた知見に基づいて、現地条件のうち主要な条件と各対策工法の選定における利点や留意点を整理した。

#### 1) 吹雪時の卓越風向（主風向）との関係から

副防雪柵等の常設の対策施設を開口部に設置する場合、効果の観点から開口部の両側に設置することが望ましいが、整備費が負担となる。開口部の片側のみに副防雪柵等を設置する場合は、現地の吹雪時の卓越風向（主風向）を調べて、開口部の片側のうち強風が卓越する側に設置することが望ましい。吹雪時の卓越風向の調査には、現地観測や近傍の気象観測データの解析の他、雪況調査による風紋や吹きだまり形状から把握する方法、吹雪時の風況を再現する数値シミュレーション解析がある。

ただし、吹雪時の卓越風向調査の結果、風向が防雪柵に直交する場合には、副防雪柵を両側に設置すると開口部における風速が逆に強まる場合がある。そのため直交風が卓越する程度（例えば、直交風の頻度が極めて高いのかや、他の風向と僅差で頻度が高いのか等）を勘案して副防雪柵を片側に設置するか、くの字型柵や斜行柵群の設置を検討するとよいと考えられる。斜行柵群やくの字型柵は、風向が防雪柵に直交する条件でもある程度の視程急変緩和効果を有することが確認されている。

また、過去の事故事例など個別のケースで対策を選定する場合は、気象状況や道路構造を含めた現地状況を反映させた数値シミュレーションで複数の対策工法による防雪効果を比較し、対策工を選定する方法も有効である。

### 2) 対策工の設置に必要な用地について

常設の対策施設を開口部に設置する場合、ほとんどの場合で交差点付近の用地条件の制約を受ける（用地の確保が必要になる）と考えられる。そのため、常設の対策施設による開口部対策を計画した段階で、道路用地条件に関する詳細な情報を事前に得ておくことが望ましい。

本研究で検討を行った、副防雪柵、斜行柵群、くの字型柵のうち、設置するために必要な面積が最も小さいのは副防雪柵であり、次いで、くの字型柵、斜行柵群の順に設置面積は大きくなる。ただし、前述したように、吹雪時の風向が防雪柵に直交する場合は、くの字型柵や斜行柵群の方が視程急変を緩和する効果が期待できるため、設置に必要な用地確保の可否と対策効果、その他の条件を勘案して、対策工法を選定する。

### 3) 対策工の整備費（材料費）について

現在使われている防雪柵（吹き止め柵）の支柱ピッチは、3m 間隔で施工される場合がほとんどである。本研究で検討した副防雪柵、斜行柵群、くの字型柵は、既存の幅 3m の防雪柵を特別な加工等を行うことなく使用しており、これらの対策工を整備する場合の材料費は、基本的に幅 3m の既設の防雪柵の枚数とそれに伴う各部材の数量によって決まる。柵の構造や配置により数量が変化する部材は、主に柵端部の送り止めと基礎である。

副防雪柵は、防雪柵本体と連続した構造であり、柵の枚数が 2 枚であれば、くの字型柵や斜行柵群より材料費の面で若干有利となる。一方、斜行柵群は、幅 3m の柵 3~4 枚を単体で設置するため、送り止めや基礎の数が副防雪柵やくの字型柵より多くなり、材料費がやや高くなることが不利点である。くの字型柵の材料費は、その中間となり、副防雪柵の柵の枚数が 3 枚の場合と同程度かやや安くなる。なお、施工費は、これらの対策工を設置する全体の数量等にも影響するので、対策箇所と対策の種類が決まった段階で別途見積りにより確認するとよい。

### 5. 2. 4 防雪柵の開口部対策の技術資料(案)について

上記の各条件と各対策工の選定に関して整理した結果は、今後「防雪柵の開口部対策に関する技術資料(案)」としてまとめる予定である。

## 6. まとめ

本研究では、視程急変メカニズムの解明と視程急変箇所の対策技術の効果の定量化を行い、視程急変箇所の条件に応じた効果的な対策技術の提案を目的に現地観測や風洞実験等を実施した。主な結果を以下にまとめる。

2 章では、道路上や石狩吹雪実験場内の防雪柵設置区間において視程障害移動観測車による移動気象観測と、

石狩吹雪実験場における定点気象観測を行い、防雪柵端部や開口部における道路気象と車両の走行に影響を与える視程急変の特徴を捉えて視程急変メカニズムを解明した。特に、防雪柵の開口幅の増加とともに風速が上昇し、視程が低下する傾向が見られ、開口幅 12m 以上では視程比（中央値）が 0.3 以下に低下することがわかった。また、風速の増加や視程の低下がドライバーの運転挙動に影響を及ぼし、特に視程が 100m 以下に低下した場合に影響が顕著となることがわかった。

これらの観測に加えて開口部を含む防雪柵模型を用いた風洞実験と防雪柵周辺の風速分布を再現する数値シミュレーション解析を行い、風向が防雪柵の直角方向を中心に 45 度の範囲となる場合に道路上に強い風の吹き込みを生じることと、開口部においてエンドエフェクトが発生することを確認した。

3章では、既設の端部・開口部対策として用いられている副防雪柵の視程や風速の急変箇所における対策効果と課題を明らかにした。副防雪柵の現地観測や数値シミュレーション解析の結果では、副防雪柵の設置により風速急変や視程急変を緩和する効果を有することを確認した。ただし、風向が吹き止め柵に直交に近い場合は、副防雪柵により逆に風が強くなる場合があることも明らかになった。また、副防雪柵の風洞実験では、副防雪柵が短い場合や張り出しを持たせた場合に道路上の風速上昇を軽減できるなど、副防雪柵の構造や風向の変化による道路上における影響について把握することができた。

4章では、副防雪柵に替わる新たな対策工法を考案してその効果を確認した。新対策工法として、「斜行柵群」と「くの字型柵」を数値シミュレーション解析による検討で考案し、石狩吹雪実験場の現地観測により、防雪柵に直交する風向でも開口部の視程や風速の急変を緩和する効果を有することを確認した。

また、斜行柵群 4 枚柵、くの字型柵、新型柵なしの風洞実験で、風向角 112.5° では、斜行柵群の緩和効果が大きく新型柵なしより風速上昇を抑えることができた。風向角 135° は、開口部を通過した風が防雪柵に引き寄せられるため開口部の風速が下がること、吹き止め柵の上方を越えた早い風速が下方に流れるため開口部から離れた箇所の風速が上昇することがわかった。

斜行柵群 3 枚柵は斜行柵群 4 枚柵より防雪性能が低下するが、斜行柵群 3 枚柵の設置角度を変えて補助柵をなくすことで、風向角 90° でも大きく風速比を下げることができ、斜行柵群 4 枚柵より防雪性能を高められることが風洞実験で確認できた。

5章では、これらの開口部対策工法の風向等の現地条

件に応じた選定手法に関して整理を行った。今後、以上の結果に基づき、各対策工の選定に関して整理した結果をまとめ、「防雪柵の開口部対策に関する技術資料(案)」を作成する予定である。

## 参考文献

- 1) 独立行政法人土木研究所寒地土木研究所：道路吹雪対策マニュアル（平成 23 年改訂版）、2011
- 2) 福澤義文、加治屋安彦、畠山祐司：防雪柵端部付近における視程障害と対策、日本道路会議論文集 24 号、pp.358-359、2001
- 3) 加治屋安彦、松澤勝、鈴木武彦、丹治和博、永田泰浩：降雪・吹雪による視程障害条件下のドライバーの運転挙動に関する一考察、寒地技術論文報告集、Vol.20、pp.325-331、2004
- 4) 大浦浩文、小林大二、小林俊一：地ふぶき時における風速の鉛直分布特性、低温科学（物理篇）、25、pp.73-88、1967
- 5) 社団法人日本鋼構造物協会（編）：構造物の耐風工学、東京電機大学出版局、ISBN:4501615702、p.616、1997
- 6) 松澤勝、上田真代、渡邊崇史、住田則行、山崎貴志、石川真大：ライフサイクルに応じた防雪林の効果的な育成・管理手法に関する研究、平成 23 年度成果報告書、2013
- 7) 山田毅、伊東靖彦、加治屋安彦、小杉健二、根本征樹：風洞実験による防雪林の樹木形態と防雪効果の関係について、北海道の雪氷、25、pp.85-88、2006
- 8) 山田毅、伊東靖彦、加治屋安彦、松澤勝、小杉健二、根本征樹、望月重人：風洞実験による防雪林の樹木形態と防雪効果の関係について、北海道の雪氷、26、pp.21-24、2007
- 9) 山崎貴志、住田則行、幸田勝：新型路側設置型防雪柵の開発について—風洞実験による防雪機能調査—、第 28 回ゆきみらい研究発表会論文集、804B、40、pp.1-4、2016
- 10) 風洞実験法ガイドライン研究委員会（編）：実務者のための建築物風洞実験ガイドブック、財団法人日本建築センター、ISBN:978-4-88910-148-5、2008
- 11) 老川進、苫米地司、石原孟：建物近傍の雪吹きだまりの風洞相似則に関する考察、日本雪工学会誌、23、pp.13-32、2007
- 12) R. D. Tabler: Controlling blowing and drifting snow with snow fences and road design -Final report-, Prepared for National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Transportation Research Board of the National Academies, 2003
- 13) 櫻井俊光、菅原邦泰、松下拓樹、松島哲郎、西村敦史、植野英睦、齋藤勉、片野浩司：数値シミュレーションを利用した防雪柵開口部における新型副防雪柵の検討、寒地土木研究所月報、827 号、pp.27-32、2022
- 14) Sakurai, T., W. Takahashi, H. Matsushita, T. Matsushima and M.



## 5 極端気象がもたらす雪氷災害の被害軽減のための技術の開発

Kaneko: Wind mitigation effects on a road at an apertural area between metal snow fences during blowing snow, In Proceedings of the 16th World Winter Service and Road Resilience Congress (PIARC), Calgary, Canada, 7-11 February 2022.

### 5.3.3 暴風雪による視程障害時の除雪車運行支援技術に関する研究

担当チーム：技術開発調整監（寒地機械技術チーム）

研究担当者：片野浩司、巖 博、大槻敏行、中島淳一、牧野正敏  
舟橋誠、山口洋士、佐藤信吾、高本敏志、新保貴広  
久慈直之、三浦豪、村上和也

#### 【要旨】

近年、積雪寒冷地では気候変動の影響にもよる異常な暴風雪に伴い、車両の立ち往生や長時間にわたる通行止め・集落の孤立など、障害の発生が増えてきている。本研究では、暴風雪による視程障害時でも安全に除雪作業が行える運行支援技術として車線逸脱防止技術と周囲探知技術、暴風雪による通行止め時に除雪車が緊急車両等を安全に先導するための追従走行支援技術に関する実験を行った。令和3年度は、車線逸脱防止技術については主たる測位技術である準天頂衛星みちびきによる測位精度を検証し、車線走行支援ガイダンスの基本仕様をとりまとめた。周囲探知技術について前方障害物探知ガイダンス及び後方障害物探知ガイダンスを製作し、公道における検証試験を行うとともに、基本仕様をとりまとめた。追従走行支援技術では、追従走行支援ガイダンスの試作機を改良し、追従走行支援ガイダンスの基本仕様をとりまとめた。

キーワード：除雪車、除雪作業、周囲探知、自車位置推定、ミリ波レーダ、磁気マーカシステム

#### 1. はじめに

近年、積雪寒冷地では気候変動の影響による極端な暴風雪に伴い、車両の立ち往生や長時間にわたる通行止め・集落の孤立など、障害の発生が増えてきている。平成25年3月1日～3日の暴風雪では、北海道内において、雪に埋まった車中での一酸化炭素中毒や車外での低体温症などにより、9人が犠牲となる事故が発生している。このため、暴風雪による視程障害時においても安全に除雪作業を行い、道路交通の早期解放や緊急車両の先導を可能とする除雪車の開発については、現場ニーズが非常に高い。また、「国土交通省防災業務計画 第7編 雪害対策編（H27.7改正）」<sup>1)</sup>において除雪機械の冬期の安全な走行を支援する技術等の開発、「北海道総合開発計画（H28.3.29）」<sup>2)</sup>において積雪寒冷地特有の災害等に対応する高機能除雪車の開発等が求められている。

本研究は、暴風雪による視程障害時でも安全に除雪作業が行える運行支援技術として、自車位置を推定し車線内を走行するための車線逸脱防止技術と、除雪車周囲の人・車両・道路工作物などを探知し衝突事故を防ぐための周囲探知技術の開発に取り組むものである。また、除雪車が救急車等の後続車両を安全に先導可能な追従走行支援技術の開発も行った。

#### 2. 車線逸脱防止技術の検討

車線逸脱防止には、車両の位置を正確に把握する測位

技術が必要である。本研究では高精度の測位技術開発のため、VRS方式<sup>※1</sup>のRTK-GNSS（以下、「VRS-GNSS」という）、RFID<sup>※2</sup>、LiDAR<sup>※3</sup>、磁気マーカシステム<sup>※4</sup>、準天頂衛星みちびきを対象に実験を行った。

#### 2.1 VRS-GNSSにおける積雪による測位への影響

単独測位のGNSSより測位精度が高く、移動体でも使用可能なVRS-GNSSを使用し積雪による影響を検証した。

##### 2.1.1 実験方法

GNSSアンテナを乗用車の屋根に設置し、雪を被せることで模擬的に積雪状況を再現した。積雪は0cm・5cm・10cmの3パターンとし、乗用車が停止した状態で測位した。なお、VRS-GNSSは100HzのRTK測位を行うことが可能なVBOX3i（VBOX社製）と、ジェノバ社GNSS補正情報で構成されている。機器構成を図-1に示す。

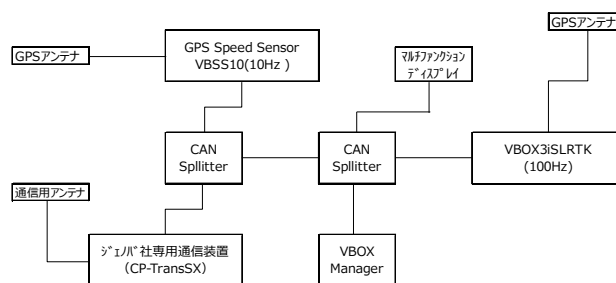


図-1 機器構成

## 2. 1. 2 実験結果

積雪による測位の変化を図-2 に示す。実験の結果、積雪が 0cm の場合、測位の変位は 1.9cm×1.4cm の範囲内であったのに対し、積雪を 10cm にした場合の変位は、14.8cm×60.9cm となり、積雪による測位精度の低下を確認した。このことから、GNSS アンテナ部の積雪対策を検討する必要があることがわかった。

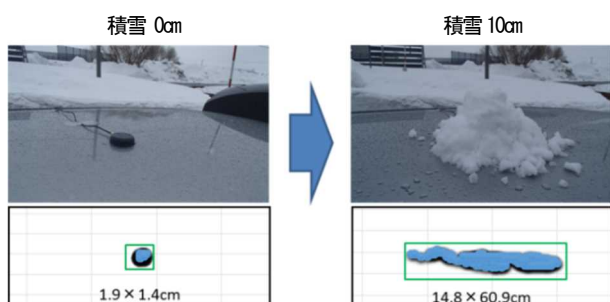


図-2 アンテナ部の積雪による測位の変化

## 2. 2 RFID の電波検出実験

トンネル出口や橋梁高架下など、GNSS の測位精度が低下する箇所における、補助的な測位方法を検討した。比較的安価で調達可能、小型・薄型で取り扱いが容易、舗装への埋め込みも可能なことから RFID を選定し、積雪状況を再現して電波検出実験を行った。

### 2. 2. 1 実験方法

RFID タグの種類には読取装置（以下、「リーダ」という）から発信される電波で作動するパッシブタグと、電池を内蔵し電波を発信するアクティブタグがある。実験にはパッシブタグを採用し、水分が付着した状況や金属面では使用できないシールタイプ（写真-1 上段）と、防水性があり金属面に設置しても使用可能なプラスチックタイプ（写真-1 下段）を使用した。表-1 に RFID タグの諸元を示す。

表-1 使用した RFID タグ（パッシブタグ）

タグ種類	メーカー	名称	検知距離	作動温度	費用	特徴
シールタイプ	SMART RAC	Short dipole	長距離 8.5m	-40℃～85℃	65千円/ロット (1,000個)	水・金属非対応
プラスチックタイプ	LOGI FLEX	MT-SH	長距離 9.0m	-20℃～100℃	84千円/ロット (100個)	水・金属対応

リーダは、送信出力を 250mW から 1W まで任意設定できる DOTR-920J（東北システムズ・サポート社製）の UHF 帯リーダを使用した（写真-2）。電波特性は円偏波方式で

ある。

RFID タグを舗装内に埋設することを想定し、直径 41.5cm 深さ 10 cm のプラスチック製トレーの内側底面に RFID タグを貼り付け（写真-3）、厚さが 5cm になるよう A s 常温合材を入れて締め固めた。また、同型の別トレーに厚さ 10cm になるよう雪を入れ、トレーを積み重ねることで、積雪量の変化を再現した実験を行った。

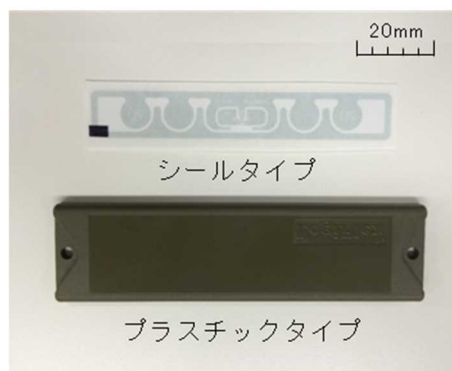


写真-1 RFID タグ（パッシブタグ）



写真-2 読取装置（UHF 帯リーダ）

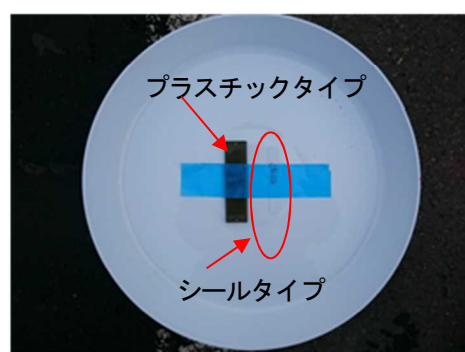


写真-3 トレーの内側底面への RFID タグ貼付状況

実験は、寒地土木研究所苫小牧寒地試験道路で実施した。走行車線の外側線上に RFID タグ入りトレーを設置し、リーダを搭載した実験車両を走行させ、積雪状況、鉛直距離、水平距離、走行速度の違いによる電波の検出状況を確認した（写真-4）。なお、リーダは、RFID タグに向けてスタッフに取り付け、実験車両に搭載した。

実験項目は以下のとおりである。

- 積雪状況：A s 5cm+積雪 (0cm, 10cm, 20cm, 30cm, 40cm) の5パターン (図-3)
- 鉛直距離：2m, 3m の2パターン (図-4)
- 水平距離：1m, 2m, 3m の3パターン (図-4)
- 走行速度：10 km/h, 20 km/h, 30 km/h の3パターン

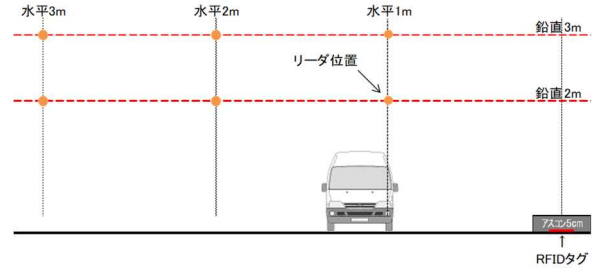


図-4 実験概略図



写真-4 実験状況

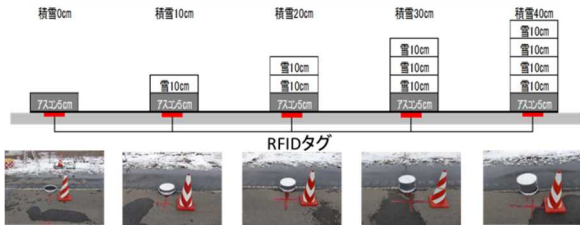


図-3 積雪状況再現概略図

### 2.2.2 実験結果

実験結果を表-2に示す。

実験の結果、反射波 (マルチパス) の影響により、電波の検出が不安定な状況はあったが、リーダーの送信出力が1W、走行速度30 km/hまでの条件で、プラスチックタイプは鉛直距離3m×水平距離2m以内で検出可能であった。また、シールタイプは鉛直距離2m×水平距離2m、または鉛直距離3m×水平距離1m以内で検出可能であった。なお、積雪の違いによる検出への影響は見られなかった。

以上のことから、RFIDが補助的な測位方法に適用可能と判断した。

表-2 実験結果

タグ種類	鉛直距離 (m)	送信出力	条件	検出状況: 数値は受信電界強度 (dBs)														
				1.0					2.0					3.0				
プラスチックタイプ	2.0	1W	水平距離 (m)	1.0					2.0					3.0				
			リーダー角度 (°)	63					45					34				
			積雪状況	0cm	10cm	20cm	30cm	40cm	0cm	10cm	20cm	30cm	40cm	0cm	10cm	20cm	30cm	40cm
			・車両停止時	-69	x	-67	-68	-73	-66	x	-70	-64	-67	-69	x	x	x	x
			・10km/h	-71	x	-63	-67	-63	-69	x	-63	-65	-62	x	x	x	x	x
			・20km/h	x	x	-70	-68	-68	-68	x	-64	-69	x	x	x	x	x	x
	・30km/h	x	x	-66	-74	-65	-64	x	-70	-64	x	x	x	x	x	x		
	3.0	1W	水平距離 (m)	1.0					2.0					3.0				
			リーダー角度 (°)	72					56					45				
			積雪状況	0cm	10cm	20cm	30cm	40cm	0cm	10cm	20cm	30cm	40cm	0cm	10cm	20cm	30cm	40cm
			・車両停止時	x	x	x	-63	-73	x	x	-75	-66	-80	x	x	x	x	x
			・10km/h	x	x	-70	-58	x	x	x	-63	-60	-69	停止時が未検出のため省略				
・20km/h			x	x	-64	-66	x	x	x	-64	-74	-70	停止時が未検出のため省略					
・30km/h	x	x	-68	-71	-74	x	x	-66	-67	-77	停止時が未検出のため省略							
シールタイプ	2.0	1W	水平距離 (m)	1.0					2.0					3.0				
			リーダー角度 (°)	63					45					34				
			積雪状況	0cm	10cm	20cm	30cm	40cm	0cm	10cm	20cm	30cm	40cm	0cm	10cm	20cm	30cm	40cm
			・車両停止時	-68	-73	-76	-70	-70	-71	-76	-75	-70	-76	-76	-78	x	-78	x
			・10km/h	-75	-72	-78	-68	-69	-73	-70	-72	-73	x	x	-76	x	x	x
			・20km/h	-81	-75	-69	-80	-71	-76	x	x	-72	x	x	x	x	x	x
	・30km/h	-76	-73	-73	-70	-64	-72	-75	x	-67	x	-80	x	x	x	x		
	3.0	1W	水平距離 (m)	1.0					2.0					3.0				
			リーダー角度 (°)	72					56					45				
			積雪状況	0cm	10cm	20cm	30cm	40cm	0cm	10cm	20cm	30cm	40cm	0cm	10cm	20cm	30cm	40cm
			・車両停止時	-73	x	-73	-70	-68	-73	-76	-75	-73	x	x	x	x	x	x
			・10km/h	-70	x	-70	-70	-73	-73	-77	x	x	x	停止時が未検出のため省略				
・20km/h			-75	x	-75	-70	-79	x	x	-72	-75	x	停止時が未検出のため省略					
・30km/h	-81	-75	-73	-70	-73	x	x	x	x	x	停止時が未検出のため省略							

凡例  
 検出した箇所  
 検出したケース内で最も高い電界強度の箇所  
x 検出なかった箇所

## 2.3 RFIDによる自車位置測位実験

2.2.2の実験結果より電波の検出が可能であったため、RFIDを用いた自車位置測位について、TDOA方式<sup>※4</sup>による計測システムを製作し、測位精度の検証を行った。

TDOA方式は、複数あるタグからリーダーが電波を受信した際の到達時間差を用いて、位置を推定する方式である。

### 2.3.1 実験方法

TDOA方式による測位には、リーダー・タグ双方において正確な時刻が必要であり、アクティブタグは電池を内蔵しているため、時刻の送出が可能である。

なお、今回の実験ではアクティブタグの調達ができなかったため、計測用とは別のリーダーを用意し、パッシブタグ（プラスチックタイプ）と結合することで、時刻の送出を可能としたものを模擬的なアクティブタグとして使用した（写真-5）。

実験は寒地土木研究所石狩吹雪実験場で行い、交差点を想定した実験①（図-5）と道路上を想定した実験②（図-6）を行った。

交差点を想定した実験①は、30m×30m四方の四隅にRFIDタグを設置し、1.5m間隔に分割したマス目毎の測位精度を検証した（写真-6）。

なお、計測は15m×15m内の100マスで行った。



写真-5 RFIDタグ（アクティブタグの模擬型）

道路上を想定した実験②は、横断方向を15m、縦断方向を30mと60mの2パターンについて位置測位の精度を検証した。

横断方向はともに3m間隔とし、縦断方向は30mの場合は3m間隔、60mの場合は6m間隔とした。

なお、計測は図-6の緑枠内の縦横交点を対象箇所とし、それぞれ10箇所で行った（写真-7）。

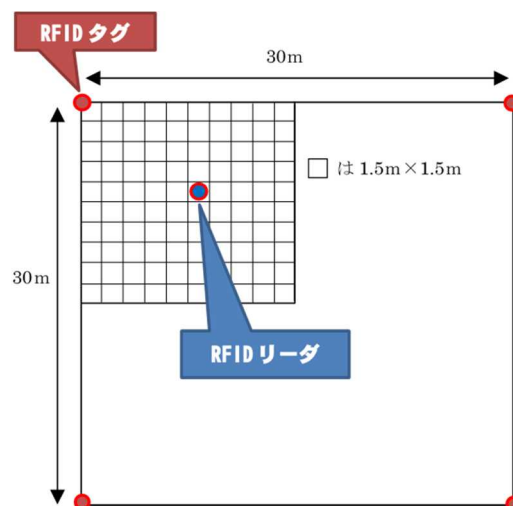


図-5 実験①計測エリア図

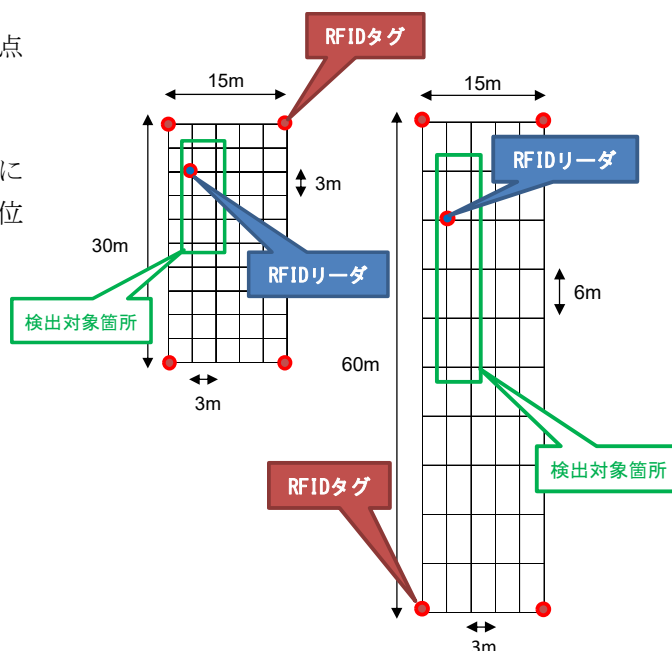


図-6 実験②計測エリア図

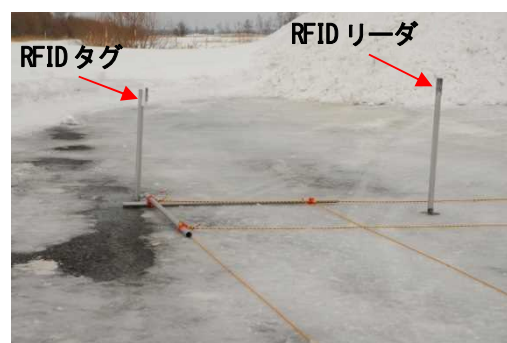


写真-6 実験①計測状況

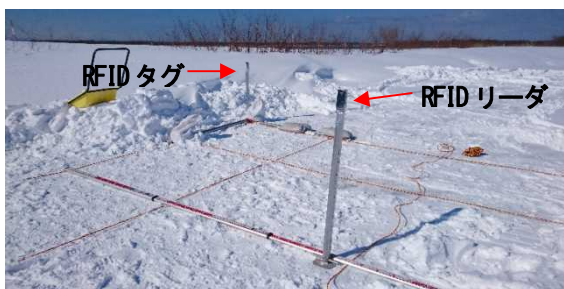


写真-7 実験②計測状況

差は大きくなり、縦断方向に 24m 以上離れると計測不能となった。

測位精度を確保かつ経済的に RFID タグを設置するには、設置間隔が縦断方向 30m を超える範囲でさらなる確認が必要といえる。

実験①及び②の結果から、RFID は、車線逸脱防止に使用するうえで、自転車位置測位に適用可能な測位精度を有していることを確認した。

## 2. 3. 2 実験結果

実験①の計測結果を図-7 に示す。

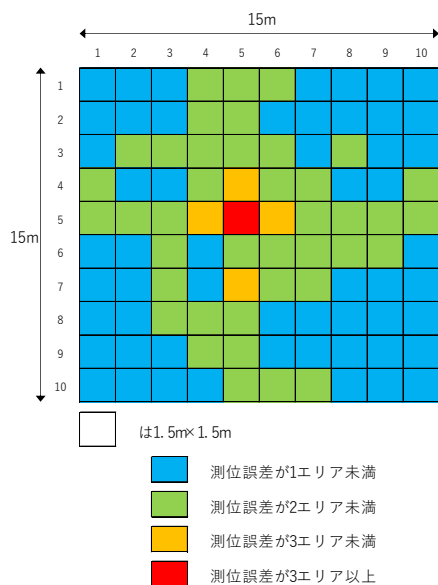


図-7 実験①計測結果

計測回数は、測位誤差が 1 エリア未満となった場合は 2 回とし、測位誤差が 1 エリア以上となった場合は追加計測を 1 回行い、各々の平均値を測位誤差とした。

測位誤差が 1 エリア未満に収まったのは全体の 55%、2 エリア未満と合わせると全体の 95% となった。

一方で、測位誤差が 3 エリア以上の箇所があったが、リーダーと RFID タグの位置関係によって複数の電波を捕捉できない場合があり、測位精度が低下したものと考えられる。

次に実験②の計測結果を図-8 に示す。

計測回数は 2 回とし、計測誤差が生じた箇所は追加計測を 1 回行い、各々の平均値を計測値とした。

縦断方向 30m の場合、誤差なしが全体の 40%、誤差 1m 未満では 100% となった。

一方、縦断方向 60m の場合では誤差 1m 未満が全体の 20% であった。計測点が RFID タグから離れる程、計測誤

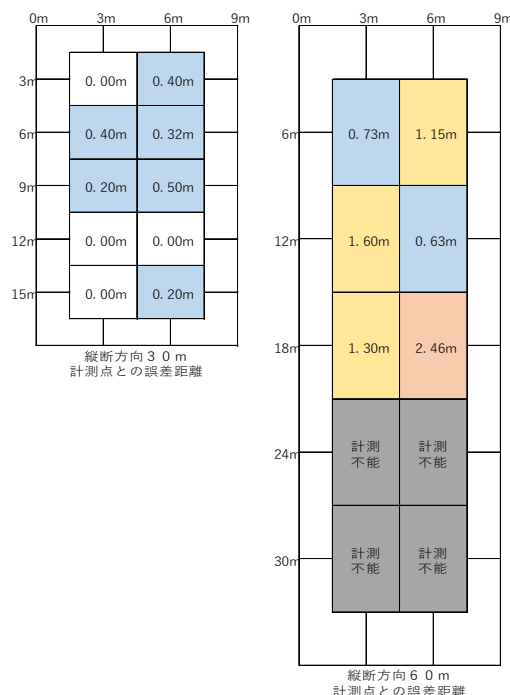


図-8 実験②計測結果

## 2. 4 LiDAR による自転車位置測位実験

LiDAR は、レーザ光により物体の位置、距離、形状を探知・計測する技術であり、自動車の先進運転支援システムや自動運転車への活用について研究が進められているが、降雪や積雪が LiDAR の自転車位置測位に与える影響は明らかになっていない。

そこで、LiDAR の自転車位置測位実験を行い、車線逸脱防止技術に適用可能か検証した。

### 2. 4. 1 実験方法

自転車位置測位実験には、ベロダイン社製 LiDAR と自動運転向けオープンソースソフトウェア「Autoware」<sup>3)</sup> を用いた。

Autoware の自転車位置測位手法は、高精度 3 次元地図データと LiDAR のスキャンデータを重ね合わせるスキャンマッチングによるものである。

実験は寒地土木研究所苫小牧寒地試験道路で行った。冬期に行う自転車位置測位実験と周辺環境を合わせる必

要があるため、試験道路の高精度 3 次元地図は、樹木の落葉後の秋期に作成した。

試験道路の直線部に座標値が既知の計測点を 5 箇所設定し、手押し台車に搭載した LiDAR を計測点の直上に設置して、静止状態で 1 分間計測を行った (写真-8)。



写真-8 LiDAR による自転車位置測定状況

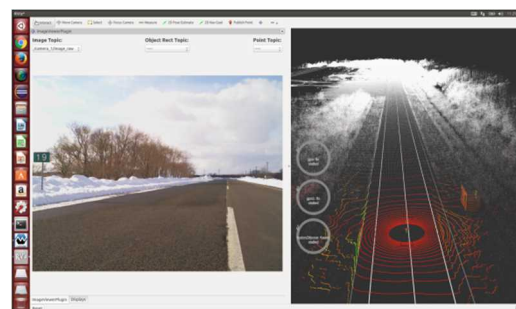


図-10 自転車位置測定状況

実験時の天候は晴れ、走行路面に積雪は無く乾燥状態で、路肩部には路面を除雪した雪が堆積している状態であった。

計測の結果、計測箇所②の X 方向の誤差が 33cm と大きな値を示したが、全箇所の平均誤差は、X 方向に約 15cm、Y 方向に約 7cm であった。

今回の実験では、降雪時や走行路面に積雪のある状況での測位精度の検証はできなかったものの、路肩に雪が堆積している状況において、LiDAR は、車線逸脱防止に使用するうえで、自転車位置測位に適用可能な測位精度を有していることを確認した。

## 2. 4. 2 実験結果

自転車位置測定結果を表-3 に、その中の代表例として、計測箇所①の自転車位置測定結果を図-9 に、Autoware による自転車位置測定状況を図-10 に示す。

なお、自転車位置測定結果は平面直角座標を用いている。

表-3 自転車位置測定結果

計測箇所	条件		① 自転車位置測定座標 平均値 (m)		② 既知座標 (m)		測位誤差 (②-①) (m)	
	天候	路面 状況	x	Y	x	Y	x	Y
①	晴れ	走行部 : 乾燥 路肩部 : 積雪有	-38983.875	-147640.252	-38983.980	-147640.188	0.105	0.064
②			-39010.701	-147632.218	-39010.367	-147632.313	0.334	0.095
③			-39079.702	-147612.012	-39079.777	-147612.016	0.075	0.004
④			-39291.065	-147550.334	-39290.930	-147550.422	0.135	0.088
⑤			-39367.941	-147528.474	-39367.852	-147528.359	0.089	0.115
						平均値:	0.148	0.073

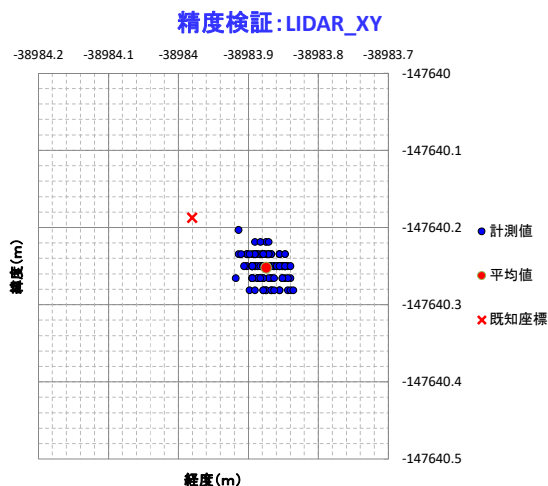


図-9 計測箇所① 自転車位置測定結果

## 2. 5 磁気マーカシステムによる自転車位置測定実験

磁気マーカシステムは、道路に埋設した磁気マーカを車両底部に設置した磁気センサーで検知することで、自転車位置を測定する技術であり、気象や環境の影響を受けにくい特徴がある。

同技術は、国土交通省が実施する「道の駅等を拠点とした自動運転サービス」における実証実験のうち、路車連携型の自動運転バスに利用されている<sup>4)</sup>。

そこで、平成 30 年度は磁気マーカシステムを除雪車に搭載して、除雪作業が自転車位置推定の測位精度に与える影響を把握し、車線逸脱防止技術に適用可能な検証した。

### 2. 5. 1 実験方法

自転車位置測定実験には、(株)愛知製鋼製の MI センサーを用いた磁気マーカシステムを使用した。また、磁気マーカシステムの位置情報と IMU<sup>※6)</sup>による自律航法を組み合わせた自転車位置推定システムを新たに開発し、使用した。

自転車位置推定システムは、IMU による自律航法を主としているが、IMU は観測時間の経過とともに測位誤差が累積される。そこで磁気マーカシステムの位置情報により測位誤差を補正する仕組みとなっている。

実験は、寒地土木研究所苫小牧寒地試験道路の直線部及び曲線部で行い、磁気マーカの設置間隔、走行速度、

除雪作業の有無による測位精度を検証した。  
実験場所平面図を図-11に示す。

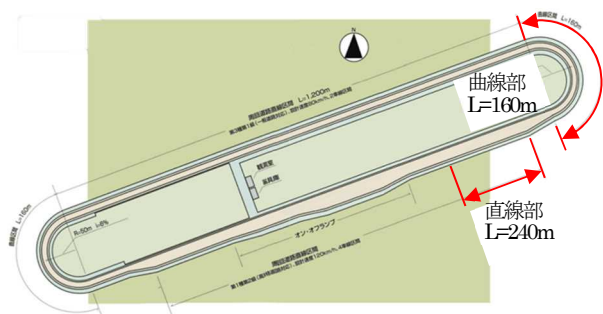


図-11 実験場所平面図

### 2.5.2 小型車両による予備実験

除雪車を使用した実験を行う前に、自車位置推定システムの精度検証のため、乾燥路面においてカート型小型車両を用いた予備実験を行った。

磁気センサは、小型車両の前方下部に高さを調整できるように設置した。

磁気マーカは、直径 100mm 厚さ 2mm の表面設置型マーカを走行車線の中央部に保護シートにより貼り付けた。

実験条件は以下のとおりである。

- ・マーカ設置間隔：直線部  
10m, 20m, 30m, 40m, 60m, 80m
- ：曲線部  
2m, 3m, 4m, 6m, 10m, 15m, 20m, 30m
- ・センサ取付高さ：20cm, 25cm
- ・走行速度：5 km/h, 10 km/h, 20 km/h

実験状況を写真-9に示す。



写真-9 予備実験状況 (曲線部)

自車位置推定システムの測位精度の検証は、自動追尾型トータルステーション (以下、「TS」という) による小型車両の走行軌跡の測位結果を基準とし、自車位置推

定システムの測位結果と比較した (写真-10)。

なお、測位結果は平面直角座標を用いた。

また、TSの計測間隔は、300ms 毎とし、TSと自車位置推定システムの時刻同期は行っていない。



写真-10 TSによる計測状況 (直線部)

### 2.5.3 小型車両による予備実験結果

道路幅員が 3.5m の一般的な道路の中心を、車体幅が 2.5m の除雪車が走行した場合、車体側端部から車線端部まで 0.5m の余裕幅ができることから、車線逸脱防止を目的とした自車位置推定システムの目標精度を最大で ±50cm とした。

直線部の実験結果を表-4に、曲線部の実験結果を表-5に示す。

表-4 予備実験結果 (直線部)

マーカ設置間隔	走行速度	平均測位誤差 (m)	左方向最大誤差 (m)	右方向最大誤差 (m)	評価
10m	5km/h	0.04	-0.27	0.32	○
	10km/h	0.00	-0.30	0.37	○
	20km/h	0.06	-0.20	0.31	○
20m	5km/h	-0.02	-0.30	0.27	○
	10km/h	0.09	-0.16	0.35	○
	20km/h	0.08	-0.15	0.32	○
30m	5km/h	0.07	-0.23	0.41	○
	10km/h	0.03	-0.24	0.31	○
	20km/h	0.15	-0.14	0.40	○
40m	5km/h	0.23	-0.10	0.63	×
	10km/h	0.22	-0.17	0.71	×
	20km/h	0.22	-0.09	0.58	×
60m	5km/h	0.03	-0.25	0.30	○
	10km/h	0.06	-0.23	0.33	○
	20km/h	0.04	-0.26	0.30	○
80m	5km/h	0.09	-0.13	0.36	○
	10km/h	0.04	-0.20	0.31	○
	20km/h	0.16	-0.06	0.42	○

実験結果は、TSの測位位置を0とした場合に、自車位置推定システムが水平方向の右側に測位した誤差をプ



ラス表示、左側に測位した誤差をマイナス表示とし、その最大誤差及び平均誤差を示している。

なお、実験条件のうち、センサ取付高さの違いによる測位誤差に差が見られなかったため、平均処理した結果を表にまとめた。

直線部の実験結果は、マーカ設置間隔 40m の条件を除いた全ての条件で目標精度を達成できた。

マーカ設置間隔が広くなるにつれ、測位誤差が増加する傾向が見られた。

また、走行速度の違いが測位精度に与える影響は、顕著には見られなかった。



写真-11 除雪トラック全景

表-5 予備実験結果（曲線部）

マーカ設置間隔	走行速度	平均測位誤差 (m)	左方向最大誤差 (m)	右方向最大誤差 (m)	評価
2m	5km/h	-0.07	-0.25	0.18	○
	10km/h	-0.05	-0.20	0.13	○
	20km/h	0.01	-0.16	0.21	○
3m	5km/h	0.03	-0.16	0.28	○
	10km/h	-0.12	-0.34	0.16	○
	20km/h	-0.13	-0.33	0.06	○
4m	5km/h	-0.07	-0.27	0.32	○
	10km/h	-0.06	-0.34	0.20	○
	20km/h	0.02	-0.29	0.20	○
6m	5km/h	0.01	-0.19	0.28	○
	10km/h	-0.12	-0.31	0.20	○
	20km/h	-0.13	-0.33	0.18	○
10m	5km/h	-0.06	-0.30	0.25	○
	20km/h	0.10	-0.08	0.33	○
15m	5km/h	-0.07	-0.27	0.13	○
	20km/h	-0.17	-0.34	0.02	○
20m	5km/h	-0.04	-0.45	0.27	○
	20km/h	0.34	0.05	0.73	×
30m	5km/h	-0.05	-0.30	0.21	○
	20km/h	-0.15	-0.42	0.16	○

曲線部では、マーカ設置間隔 20m、走行速度 20 km/h の条件を除いた全ての条件において、目標精度を達成することができた。

直線部同様、走行速度の違いが測位精度に与える影響は顕著には見られなかった。

マーカ設置間隔 2~6m は、測位誤差に顕著な差は見られなかったが、マーカ設置間隔 10m~30m は、設置間隔が広がるにつれて測位誤差が大きくなる傾向が見られた。

#### 2. 5. 4 除雪車による自車位置測位実験

予備実験により自車位置推定システムの測位精度が確認できたことから、除雪車による自車位置測位実験を行った。

実験には除雪トラックを使用した。磁気センサは、除雪トラックの前方底部にブラケットを取り付け、地上高 25cm の位置に設置した（写真-11）。

磁気マーカは、直径 30mm、高さ 20mm の埋設型マーカを、車線中央部に深さ 3cm で削孔した穴に埋設し、表層 1cm を充填剤にて充填した（写真-12）。



写真-12 磁気マーカ埋設状況

除雪作業を行いながら実験を実施するため、苫小牧試験道路の直線部と曲線部に圧雪路面を形成した。

直線部の平均圧雪厚さは 6.0cm、雪硬度は 207kg/cm<sup>2</sup>、曲線部の平均圧雪厚さは、4.7cm、雪硬度は 156kg/cm<sup>2</sup> であり、路面状態は圧雪及び氷板であった（写真-13）。



写真-13 走行車線積雪状況

実験条件は以下のとおりである。

- ・マーカ設置間隔：直線部 20m, 40m, 80m  
：曲線部 6m, 15m
- ・走行速度：15 km/h, 30 km/h
- ・除雪作業の有無：除雪有り, 除雪無し（回送）  
実験状況を写真-14, 15 に示す。



写真-14 自車位置測位実験（直線部）



写真-15 自車位置測位実験（曲線部）

測位精度の検証は、予備実験と同様にTSによる走行軌跡の測位結果と比較した。

### 2.5.5 除雪車による自車位置測位実験結果

直線部の実験結果を表-6に、曲線部の実験結果を表-7に示す。

直線部の実験では、マーカ設置間隔 20m の条件及び設置間隔 40m における除雪作業時の走行速度 15km/h の条件において目標精度を達成できた。

磁気マーカの設置間隔が広がるにつれ、測位誤差が増加する傾向は、予備実験よりも顕著になる傾向が見られた。

また、走行速度の上昇により測位誤差が増加する傾向が見られたが、除雪作業の有無により測位誤差に顕著な差が見られなかったことから、除雪作業による振動を受けても測位精度に影響を及ぼさないことがわかった。

表-6 自車位置推定実験結果（直線部）

設置間隔	除雪有無	走行速度	平均測位誤差(m)	最大誤差範囲(m)		評価	
				左方向最大誤差(m)	右方向最大誤差(m)		
20m	回送	15km/h	-0.02	0.63		○	
		30km/h	-0.23	-0.34	0.29		
	除雪	15km/h	-	0.50		○	
		30km/h	0.05	-0.48	0.01		
40m	回送	15km/h	-0.26	0.84		×	
		30km/h	-0.35	-0.44	0.40		
	除雪	15km/h	-0.02	0.97		○	
		30km/h	-0.12	-0.74	0.23		
	80m	回送	15km/h	-0.62	0.85		×
			30km/h	-0.76	-0.77	0.08	
除雪		15km/h	-0.44	0.88		×	
		30km/h	-	-0.40	0.48		

※「-」は、マーカ未検出による棄却データ

曲線部では、全ての条件において目標精度を達成することができなかった。

磁気マーカの設置間隔の広がり及び走行速度の上昇、除雪作業を伴うことにより測位誤差が増加する傾向が見られた。

表-7 自車位置推定実験結果（曲線部）

設置間隔	除雪有無	走行速度	平均測位誤差(m)	最大誤差範囲(m)		評価
				左方向最大誤差(m)	右方向最大誤差(m)	
6m	回送	15km/h	0.56	1.26		×
		30km/h	-	-0.02	1.24	
	除雪	15km/h	0.63	1.42		×
		30km/h	0.61	-0.24	1.18	
15m	回送	15km/h	-0.92	1.25		×
		30km/h	-	-0.08	1.18	
	除雪	15km/h	-1.10	2.17		×
		30km/h	-1.47	-1.84	0.34	
	回送	15km/h	-	2.34		×
		30km/h	-	-	-	
除雪	15km/h	-	2.91		×	
	30km/h	-	-3.09	-0.17		

※「-」は、マーカ未検出による棄却データ

本実験では、予備実験に使用した小型車両用に設定した自車位置推定システムを除雪車に搭載し使用した。そのため、走行速度の上昇や圧雪が厚い場合に、磁気マーカの未検出や測位精度の低下を招いたものと考えられる。

曲線部の設置間隔については、今後検討が必要であるが、直線部の設置間隔 20m では、除雪作業による振動を受けても目標精度を達成することができたことから、自車位置推定システムは、車線逸脱防止に使用するうえで、適用可能な測位精度を有していることを確認した。

## 2. 6 磁気マーカを用いた車線走行支援ガイダンスの検証実験

磁気マーカシステムと IMU による自律航法を組み合わせた自車位置推定システムを用いた車線走行支援ガイダンスを試作し、自車位置精度を検証するとともに、ガイダンス情報に従い車線を逸脱せずに走行可能な検証実験を行った。

### 2. 6. 1 ガイダンス試作機の作製

ガイダンス試作機は、ロボット用オープンソースソフトウェア「ROS」<sup>※7</sup>の可視化ツールである「RViz」をベースに新たに開発したものである。RViz は、ROS で通信されるデータであれば種類を問わず表示することができ、外部からのセンサ情報やロボットの形状モデル、地図、計画軌道などを三次元表示することができる。

苫小牧試験道路全周の高精度三次元地図データベースを作成し、ベクターマップにより車線境界を判りやすく表示し、走行時のガイダンス用に走行車線の中心に走行目安線を表示した。また、現在位置や道路周辺状況を把握しやすいように、点群情報を基に道路や道路周辺の起伏・背景をカラー表示した。

画面に表示される除雪車モデルは、実際の除雪トラックの諸元を基に 3D モデル化しており、地図と除雪車の尺度を合わせることで、オペレータに違和感の無い表示とした。また、ガイダンス画面はオペレータの運転操作のしやすさを考慮し、運転席からの視点（以下、「コックピットビュー」という）、後方からの鳥瞰的な視点（以下、「バードビュー」という）、カーナビゲーションのような二次元的な視点（以下、「2D ビュー」という）の 3 種類を設定した。図-12、13、14 にガイダンス画面例を写真-16 に除雪トラック 3D モデルイメージを示す。

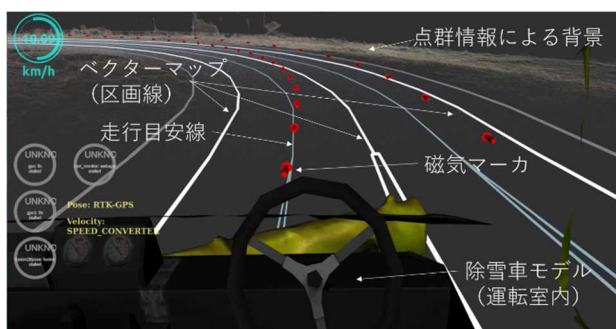


図-12 ガイダンス画面例（コックピットビュー）

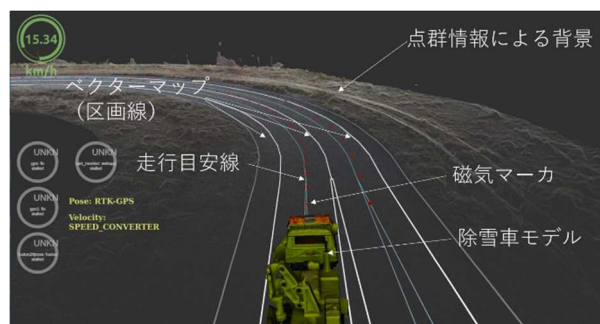


図-13 ガイダンス画面例（バードビュー）

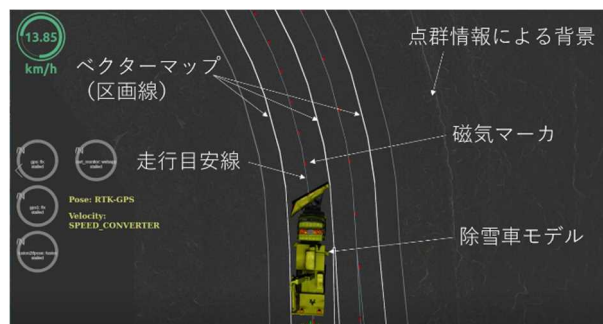


図-14 ガイダンス画面例（2D ビュー）



写真-16 除雪トラック 3D モデル（イメージ）

### 2. 6. 2 実験方法

ガイダンス試作機は、磁気マーカシステムと IMU による自律航法の組み合わせによる自車位置推定システム（以下、「磁気マーカ方式」という）のほかに、RTK-GPS による位置測位（以下、「RTK方式」という）も可能である。平成 30 年度の実験結果より RTK-GPS の測位結果は、TS による走行軌跡の測位結果と同程度の精度があったことから、RTK 方式と磁気マーカ方式の測位結果を比較することで測位精度を検証することとした。

また、視程障害時におけるガイダンスによる運転操作性を検証するため、フロントガラス全面の視界を遮断し、視程障害時を模擬的に再現した状況において、ガイダンス情報を頼りに車線を逸脱せずに走行する実験を行った。

### 2. 6. 3 RTK方式によるガイダンス性能検証実験

実験は、寒地土木研究所苫小牧寒地試験道路で行った。ガイダンス性能の検証は試験道路を半周するため自車位置測位をRTK方式で行った。ガイダンスシステムはリアルタイムに自車位置を高精度地図に表示するとともに、走行軌跡が記録可能である。高精度地図には、走行位置をガイダンスするための走行目安線が表示されているため、オペレータは走行目安線に除雪車モデルの中心を合わせて運転することで、車線を逸脱せずに走行することができる。そこで走行目安線の設定座標を基準とし、目視による通常走行の軌跡と視界を遮断した各ガイダンス情報のみによる走行軌跡の測位座標との差を比較することで、ガイダンス性能を評価することとした。また、オペレータにガイダンス使用時における運転操作性に関するアンケート調査とヒアリングを行った。なお、除雪トラックの視界遮断はフロントガラス全面及び側面の窓に白色半透明のビニールシートを設置した。

試験道路の路面状態は、半周1,800mのうち、直線部1 L=800mには圧雪路面 L=240mを、曲線部には L=160mすべて圧雪路面を形成した。圧雪路面の条件は、直線部1の平均圧雪厚さは9.5cm、雪硬度は63kg/cm<sup>2</sup>、曲線部の平均圧雪厚さは、4.8cm、雪硬度は50kg/cm<sup>2</sup>である。圧雪路面では除雪作業を行いながら走行し、圧雪路面以外の区間は乾燥路面のため回送姿勢にて走行するものとした。

実験条件は以下のとおりである。

- ・ガイダンス種類：コックピット、バード、2D、通常走行（ガイダンス無し）
- ・走行条件：除雪作業有り、回送のみ

実験場所平面図を図-15に、実験状況を写真-17、18に、実験時の運転室内の状況を写真-19に示す。

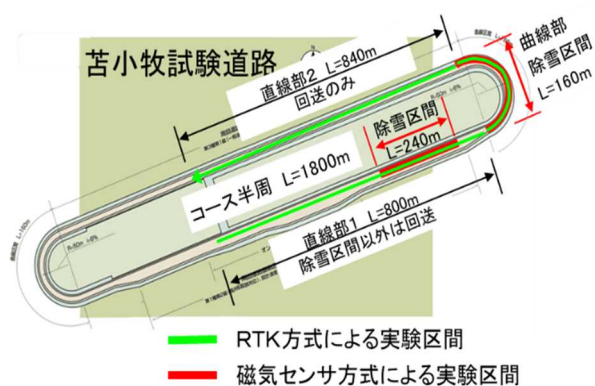


図-15 実験場所平面図



写真-17 実験状況全景



写真-18 実験状況（除雪機械外観）



視界遮断無し 視界遮断有り  
写真-19 運転室内状況

### 2. 6. 4 RTK方式によるガイダンス性能検証実験結果

実験結果を表-8に示す。

実験はガイダンス種類毎に2回行い、実験結果は道路条件及び走行条件毎に分割し平均処理を行った。目標精度は平成30年度と同様に±50cmとした。

コックピットビューでは、直線路の除雪時においては目標精度を達成できたが、直線路の回送時と曲線路の除雪時では、左右方向の最大離隔距離が50cmを超える箇所があった。しかし最大離隔距離範囲では1m以内に収まっていることから概ね目標精度を満たしていると評価した。バードビューでは、直線路の回送時と除雪時においては目標精度を達成できた。曲線路の除雪時では最大離隔距離範囲が1mを超えているため目標を達成できていない。2Dビューはコックピットビューと同様の結果

なった。一方、比較のため実施した目視による通常走行では、直線路の回送時と除雪時は目標精度内で走行できたが、曲線路では最大離隔距離範囲が 1m を大幅に超える結果となった。

表-8 ガイダンス性能検証実験結果

ガイダンス種類	走行条件	道路条件	平均離隔距離(m)	最大離隔距離範囲(m)		評価
				左方向最大離隔距離(m)	右方向最大離隔距離(m)	
無し (通常走行) 視界遮断無	回送	直線	0.00	0.49		○
				-0.26	0.24	
	除雪	直線	0.16	0.39		○
-0.03				0.37		
コックピットビュー 視界遮断有	回送	直線	-0.36	1.28		×
				-0.84	0.44	
	除雪	直線	-0.08	0.71		△
-0.61				0.10		
バードビュー 視界遮断有	回送	直線	0.02	0.40		○
				-0.32	0.08	
	除雪	直線	0.05	0.80		△
-0.23				0.57		
2Dビュー 視界遮断有	回送	直線	-0.14	0.60		△
				-0.30	0.30	
	除雪	直線	-0.19	0.35		○
-0.12				0.23		
2Dビュー 視界遮断有	回送	直線	-0.14	1.13		×
				-0.56	0.56	
	除雪	直線	-0.19	0.79		△
-0.55				0.25		
2Dビュー 視界遮断有	回送	直線	-0.14	0.48		○
				-0.46	0.02	
	除雪	直線	-0.18	0.69		△
-0.53				0.16		

通常走行とガイダンス種類毎の平均離隔距離を比較すると、直線路の回送時及び除雪時では、通常走行とバードビューの平均値は小さく道路中心寄りに走行する傾向が見られた。また、コックピットビューと 2D ビューは、左方向に偏る傾向が見られた。曲線路では目視による通常走行でも左方向に偏る傾向があり、2D ビューは同様の傾向を示したが、コックピットビューとバードビューでは、緩和される傾向が見られた。通常走行では、路面状況が圧雪のため中央線や外側線が視認できなかったため、道路中心より左寄りに走行したものと考えられる。一方コックピットビューやバードビューでは、ガイダンス画面上に区画線や走行目安が表示されているため、バラツキはあるものの道路中心に沿って走行することができた。

アンケート評価結果を図-16 に示す。

アンケートはオペレータ 2 名に対し、道路空間の認識、ガイダンスを見ながらの操作性、運転操作の不安感、安全性について、ガイダンス種類毎に評価の高い順に配点をしてもらった。道路空間の認識については、目視による視界に近いコックピットビューの評価が高かったが、それ以外の項目はバードビューの評価が高かった。2D ビューについては全ての項目で評価が低い結果となった。

オペレータへのヒアリングでは、除雪車モデルと 3D 地図との位置合わせに慣れが必要だが、慣れると走行に

支障は無いことがわかった。また、3D 地図に背景があるため位置関係を把握しやすい、特にバードビューは俯瞰のため道路の先を見通せ、距離感を掴みやすかった。但し、バードビュー、コックピットビューともに曲線部の出入りではハンドル操作の遅れが生じる場合があるため、ある程度の習熟は必要と思われる。また、画面を見ながらの運転でも画面酔いをする事は無いことが確認できた。

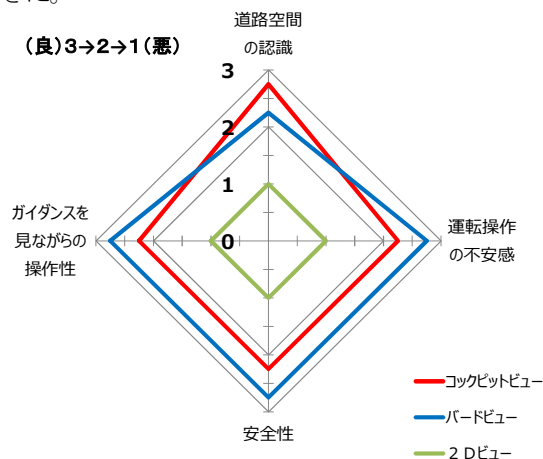


図-16 アンケート評価結果

ガイダンス性能の検証実験の結果、コックピットビュー及びバードビューでは、視界を遮断した状況においてもガイダンス情報に従って車線逸脱することなく除雪作業が可能ことが確認できた。また、オペレータへのヒアリングの結果、バードビューが最も高い評価を得た。

### 2.6.5 磁気マーカ方式による測位精度検証実験

磁気マーカ方式による測位精度の検証は、磁気マーカを埋設した直線部と曲線部において、設置間隔の違いによる測位精度を検証した。

磁気マーカの設置間隔は、平成 30 年度の実験結果を踏まえ、直線部では 20m, 40m に加えてより高い精度が期待できる 10m を追加した。また、曲線部では 6m, 15m では目標精度が達成できなかったことから、3m, 5m に設置間隔を狭めることとした。圧雪路面の条件は、直線部の平均圧雪厚さは 9.5cm、雪硬度は 63kg/cm<sup>2</sup>、曲線部の平均圧雪厚さは、4.8cm、雪硬度は 50kg/cm<sup>2</sup> であり、路面状態は圧雪である。磁気センサ及び磁気マーカの条件は平成 30 年度と同様である。実験条件は以下のとおりである。

- ・マーカ設置間隔：直線部 10m, 20m, 40m  
：曲線部 3m, 5m
- ・視界遮断の有無：有・無（視界遮断は直線部のみ）
- ・除雪作業の有無：除雪有、除雪無（回送）

実験状況を写真-20、21 に示す。



写真-20 直線部実験状況



写真-21 曲線部実験状況

2. 6. 6 磁気マーカ方式による測位精度検証実験結果

直線部の実験結果を表-9 に、曲線部の実験結果を表-10 に示す。目標精度は、平成 30 年度と同様に±50cm とした。直線部の実験では、マーカ設置間隔 10m における視界遮断無しの場合と除雪時の条件において目標精度を達成できた。視界遮断有りの場合と除雪時では、右方向の最大誤差が目標の 50cm を超える箇所があった。しかし最大誤差範囲では 1m 以内に収まっていることと、平均誤差に大きな差が見られないことから、視界遮断無と同等の評価と判断した。一方、マーカ設置間隔 20m, 40m を条件とする平成 30 年度の実験で目標精度を達成できていたが、本実験では目標精度を達成することができなかった。

曲線部では、マーカ設置間隔 3m の場合において目標精度を達成できた。マーカ設置間隔 3m の除雪時と設置間隔 5m の場合では、右方向の最大誤差が目標の 50cm を超える箇所があったが、最大誤差範囲では 1m 以内に収まっていることと、平均誤差に大きな差が見られないことから、設置間隔 3m の場合と同等の評価と判断した。

表-9 自車位置推定実験結果 (直線部)

設置間隔	除雪有無	視界遮断	平均測位誤差(m)	最大誤差範囲(m)		評価
				左方向最大誤差(m)	右方向最大誤差(m)	
10m	回送	無し	0.08	0.77		○
		有り	0.14	-0.33	0.44	△
	除雪	無し	0.07	0.71		○
		有り	0.07	-0.18	0.53	△
20m	回送	無し	0.71	2.40		×
		有り	0.52	0.04	2.45	×
	除雪	無し	0.39	2.26		×
		有り	0.47	-0.56	1.69	×
40m	回送	無し	0.58	0.86		×
		有り	0.75	0.00	0.86	×
	除雪	無し	0.53	1.41		×
		有り	0.53	-0.21	1.20	×

表-10 自車位置推定実験結果 (曲線部)

設置間隔	除雪有無	平均測位誤差(m)	最大誤差範囲(m)		評価
			左方向最大誤差(m)	右方向最大誤差(m)	
3m	回送	0.04	0.65		○
	除雪	0.08	-0.23	0.42	△
5m	回送	0.28	0.83		△
	除雪	0.04	-0.24	0.60	×

本実験では、平成 30 年度の実験よりも高い測位精度が得られるよう、磁気マーカの設置間隔を狭め、IMU や磁気センサの調整を行ったが、直線部の実験では 20m, 40m において目標精度を達成できず、マーカの設置間隔を狭めた 10m でのみ目標精度を達成できた。今回の実験では圧雪路面上に磁気マーカの位置を示すマーキングは行っておらず、ガイダンスの画面に表示される磁気マーカの位置を目安に実験を行った。そのため直接目視で路面を確認しながら運転するよりも、細かなハンドル操作を伴う運転となり、自律航法の測位精度に影響を与えたものと思われる。また、視界を遮断した場合は運転挙動がより不安定になるため、その傾向がより強くなったものと考えられる。

曲線部の実験では、マーカ設置間隔を狭めたことにより平成 30 年度の実験結果より測位精度が向上した。しかし曲線部は道路線形に合わせてハンドル操作を行いな

がら、マーカの位置合わせを行うため、確実にマーカ上をセンサが通過するためには、ガイダンスによる運転操作の習熟が必要である。

## 2.7 準天頂衛星みちびきによる測位精度の検証

これまで車線走行支援ガイダンスの測位技術は磁気マーカシステムと IMU を組み合わせた自車位置推定システムに関する検証を進めてきた。この自車位置推定システムは、主たる測位技術である高精度衛星測位の不感地帯における補助的な測位技術として位置付けている。

高精度な衛星測位技術に関しては、2.1にて VRS-GNSS の測位精度を検証したが、近年、準天頂衛星みちびきによる測位技術に関する受信機の低価格化が図られ普及が進んできている。そこで、準天頂衛星みちびきの測位精度を検証し、車線走行支援ガイダンスの主たる測位技術として適用可能か検証実験を行った。

### 2.7.1 準天頂衛星測位精度検証実験方法

実験は、準天頂衛星みちびきによる車両走行時の測位精度を検証するため、札幌市内及び近郊の一般国道において準天頂衛星みちびき受信機を搭載した計測用車両を用いた移動体計測を行った。実験には、三菱電機(株)製の受信機 AQLOC-Light を使用した。計測用車両の屋根上に受信機のアンテナを設置し、受信機及び記録用ノート型 PC は車室内に設置した。また、受信機はセンチメートル級測位補強情報のパラメータ設定、及び INS 複合測位を行うための車速パルス情報の設定を行った。なお、サンプリングレートは 1Hz に設定した。

実験場所は、札幌市内及び近郊の一般国道にて除雪工事を実施している市街部、郊外部、峠部の区間を対象とし、衛星配置の影響を検証するため昼間と夜間に計測を実施した。写真-22 にアンテナ設置状況、表-11 に実験区間一覧を示す。

### 2.7.2 準天頂衛星測位精度検証実験結果

準天頂衛星みちびき受信機が記録した測位情報等のデ



写真-22 アンテナ設置状況

表-11 実験区間一覧

路線	区間	延長
一般国道12号	札幌市中央区大通東1丁目 ～ 札幌市厚別区厚別東4条4丁目交差点	L=13km
一般国道337号	札幌市北区あいの里4・8交差点 ～ 江別市江別太 江別東IC出口付近	L=21km
一般国道230号	南区豊滝 ～ 喜茂別町中山峠パーキング	L=25km

ータは NMEA フォーマット形式で出力され、緯度経度座標、時刻情報、使用衛星数、DOP 値、測位ステータス等が記録される。測位ステータスとは、使用衛星数や衛星信号の受信状況等から測位状態を示したもので、FIX 解・FLOAT 解・単独測位・未受信(Dead Reckoning(自律航法):以下「DR」という)に分類される。FIX 解はセンチメートル級測位補強信号を受信し、高精度測位が行える状態であり、FLOAT 解は高精度測位の初期化状態から FIX 解に至る過程の状態を言う。センチメートル級測位補強信号を受信できない場合は単独測位、不感地帯等で衛星信号を受信できない場合は未受信(DR)となり、INS 複合測位に切り替わる。路線毎の測位ステータス計測結果を表-12に示す。

郊外部を対象とした一般国道 337 号では、FIX 率は 98%、FLOAT 率は 2%とほぼ全区間において高精度測位が可能な状態であることがわかった。当該区間の地形は平坦で標高の高い地形や高層の構造物がほぼないため、上空視界が開けており、衛星信号の受信状態が良好であることが一因と言える。なお、FLOAT 解になった箇所は、美原大橋の主塔部分及び道路情報表示板の門型柱を通過した際に、僅かな時間だが上空視界を遮ったことで信号受信感度が低下し、FLOAT 解になったものと考えられる。

市街部を対象とした一般国道 12 号における昼間の計測では、FIX 率は 81%、FLOAT 率は 13%、単独測位率は 7%であった。夜間の計測では、FIX 率は 92%、FLOAT 率は 6%、単独測位率は 1%、未受信(DR)率は 2%であった。昼間と夜間を比較すると夜間の FIX 率が高い結果となったが、測位補強信号を受信している状態である FIX 解と FLOAT 解を合計してみると、昼間の 94%と夜間の 98%に大きな差がない結果となったことから、計測時刻による影響は少ないものと考えられる。

なお、FLOAT 解になった箇所は、一般国道 12 号の起点から北 1 条通りの左右に比較的高層の建物が複数存在する区間と、道路情報表示板の門型柱や横断歩道橋といった比較的短時間であるが上空視界を遮断する構造物があ

る箇所であり、衛星信号の受信レベルが低下することが影響していた。また、未受信(DR)となった箇所は、高速道路や鉄道の高架橋下で上空視界が完全に遮断される状況であった。

峠部を対象とした一般国道 230 号における昼間の計測では、FIX 率は 74%、FLOAT 率は 12%、単独測位率は 10%、未受信(DR)率は 4%であった。夜間の計測では、FIX 率は 86%、FLOAT 率は 3%、単独測位率は 4%、未受信(DR)率は 7%であった。峠部においても夜間の FIX 率が高い結果となったが、市街部同様に FIX 解と FLOAT 解の合計値で比較すると昼間の 86%と夜間の 89%に大差が無い結果となった。峠部は郊外部、市街部と比較して最も FIX 率が低い結果となった。同区間には錦トンネル、白糸トンネル、臼別トンネル、定山溪トンネルと 4か所のトンネルが存在し、臼別トンネルから定山溪トンネルの間には覆道が 2か所あり、衛星不感地帯が連続している。また、トンネル等を通じた後も急峻な地形の影響により衛星信号の受信レベルが低く、単独測位解の割合が高い状況であった。図-17 に定山溪トンネル付近の衛星受信状況を示す。

衛星測位では、捕捉衛星数が多くても衛星が特定方向に偏って配置していると高い計測精度は得られない。計

表-12 測位ステータス計測結果

項目	一般国道12号		一般国道230号		一般国道337号
	昼間	夜間	昼間	夜間	昼間
FIX率	81%	91%	74%	86%	98%
FLOAT率	13%	6%	12%	3%	2%
単独測位率	7%	1%	10%	4%	0%
測位不能(DR)	0%	2%	4%	7%	0%



図-17 一般国道 230 号定山溪トンネル付近の受信状況

測精度上は、衛星配置が偏りなく取り囲む形が望ましい。この衛星配置状態を指標化したものが DOP<sup>※9</sup> (Dilution of Precision: 測位精度劣化係数) であり、値が小さいほど測位精度が高い傾向を示す。DOP 値には基準となる閾値の設定がなく一般的に 3.0 以下が良好な値とされているが、センチメートル級測位補強情報による測位精度を満足するための利用条件は、HDOP (Horizontal DOP: 水平成分測位精度劣化係数) が 1.1 以下とされている。そこで、各路線における計測時刻毎の HDOP 値を検証した。図-18 に一般国道 12 号の捕捉衛星数及び HDOP 状況を、図-19 に一般国道 230 号の捕捉衛星数及び HDOP 状況を示す。

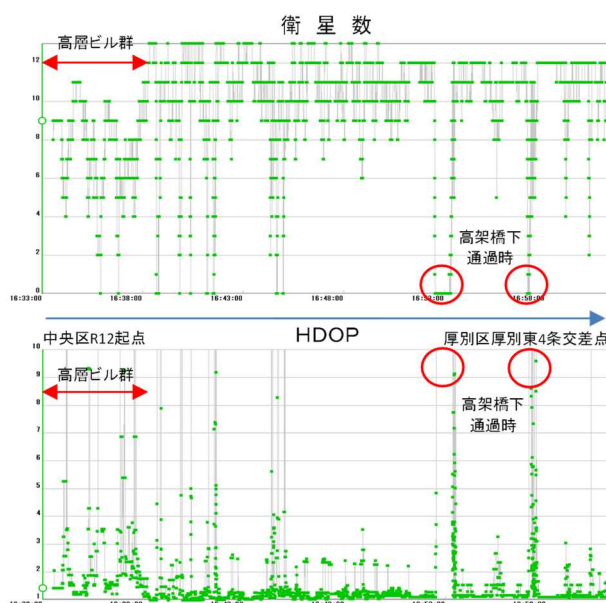


図-18 一般国道 12 号捕捉衛星数及び HDOP 状況

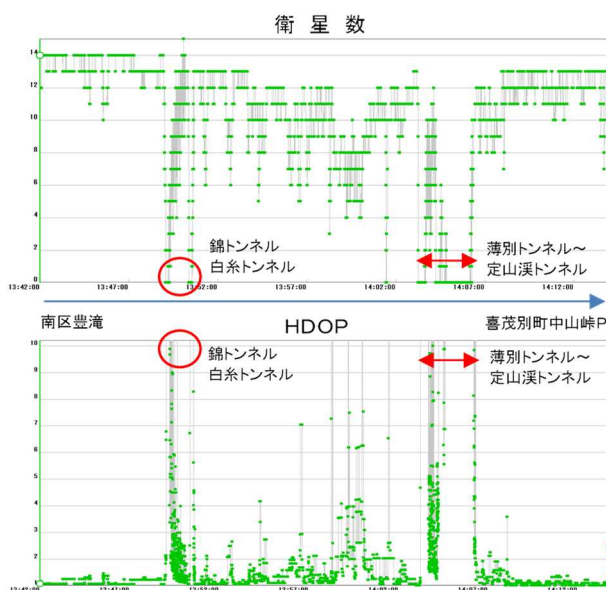


図-19 一般国道 230 号捕捉衛星数及び HDOP 状況



市街部を対象とした一般国道12号では、起点から北1条通りの高層ビル群にてHDOP値が上昇しており、測位精度が低下している傾向が見られた。これは測位ステータスの検証にてFLOAT解になった箇所と同一区間である。捕捉衛星数も他の区間より減少しており、高層ビルにより衛星信号の受信に影響がでていることがわかった。高層ビル群の他に高架橋や横断歩道橋等を通過時にHDOP値が上昇していることが確認できたが、それ以外の区間ではHDOP値が概ね1.5前後で推移していることがわかった。

峠部を対象とした一般国道230号では、錦トンネルから白糸トンネルの区間及び、薄別トンネルから定山溪トンネルの区間では、衛星信号が遮断されるためHDOP値が上昇している。また、白糸トンネルを通過し薄別トンネルまでの区間においても、HDOP値が概ね3前後まで上昇する区間があり、標高の高い急峻な地形の影響により測位精度が低下するものと考えられる。それ以外の区間では、南区豊滝から錦トンネルまでの区間及び定山溪トンネルから中山峠山頂までの区間においてHDOP値が概ね1.5前後で推移していることがわかった。

検証の結果、センチメートル級測位補強情報の測位精度を担保する1.1以下とはならなかったものの、市街部・峠部では、HDOP値が1.5前後で推移する区間の割合が多く、それ以外の区間でもHDOP値が概ね3以下の占める割合は多いことから、車線走行支援に適用可能な測位精度を有していることを確認した。

## 2.8 車線走行支援ガイダンスの基本仕様とりまとめ

これまでの検討結果を基に、車線走行支援ガイダンスの基本仕様をとりまとめた。図-20に車線走行支援システム構成図、表-13に磁気マーカ性能仕様、表-14に磁気センサ性能仕様、表-15に処理用PC性能仕様、表-16に準天頂衛星みちびき受信機性能仕様、表-17にIMU性能仕様を示す。

車線走行支援ガイダンスシステムは、除雪車前方底部に設置した磁気センサユニットにより路面に埋設した磁気マーカを検知するとともに、除雪車から車速パルスを収集する。磁気マーカの測定データ及び車速パルスデータはセンサユニットからUSBを介して測定データ処理用PCに伝達され、マーカ情報、経過時間（マーカ検知からの経過時間）、横偏差量、極性（N極、S極）のデータに変換し、イーサネットを介して車両情報処理用PCに出力される。車両情報処理用PCでは、準天頂衛星みちびき受信機より緯度経度情報、IMUより加速度・方位角情報を収集し、衛星測位精度が良好な区間ではGPS情報による自車位置推定を行い、衛星不感地帯や衛星測位精

度が確保できない区間においては、当該区間に埋設した磁気マーカ情報を取得し、自車位置推定を行うものである。

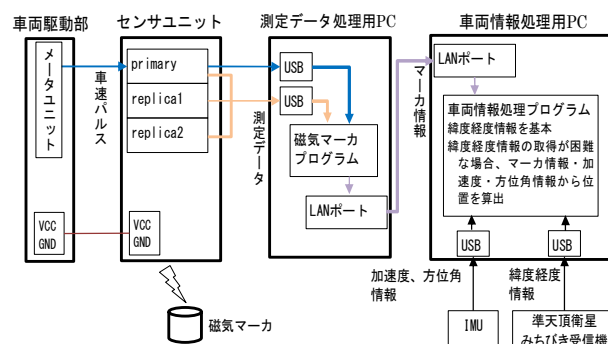


図-20 システム構成図

表-13 磁気マーカ性能仕様

項目	参考値
径	φ30 [mm]
高さ	21 [mm]
重量	50 [g]
磁場方向	アキシアル方向
密度	3.54 [g/cm <sup>3</sup> ]
表面磁束	110 [mT] ※1

※1 ICNIRPで規定される健康被害の可能性がある磁気暴露限界が400mT

表-14 磁気センサ性能仕様

項目	仕様	備考
筐体本体寸法	1210×50×24 (mm)	ケーブル等突起物を除く
検出範囲	横方向	±500mm 以内
	高さ方向	150～250mm
マーカ検出	横偏差精度	±10mm 以下
供給電源電圧 [入力]	DC 6～18V (12V 推奨)	
車速パルス [入力]	DC 6～30V	

表-15 処理用PC性能仕様

機器等	項目	仕様
測定データ処理用PC	CPU	core i5-580m 2.67Ghz Passmarkベンチマーク2617以上
	OS	Windows10 Pro 64bit
	メモリ	8.0Gb以上
	インターフェース	USB2.0 3ポート以上
	USBハブ	6ポート以上
車両情報処理用PC	CPU	core i5-580m 2.67Ghz Passmarkベンチマーク2617以上
	OS	Linux Ubuntu 20.04 LTS
	メモリ	8.0Gb以上
	インターフェース	USB2.0 3ポート以上
	USBハブ	6ポート以上

表-16 準天頂衛星みちびき受信機性能仕様

項目	仕様
対応衛星信号	QZSS※、GPS、Galileo
測位方式	PPP-RTKもしくはPPP-RTK-INS複合 (GLAS使用時)
出力データ	GA、RMC、GSV、GSA (NMEA 0183 準拠)
出力信号	PPS パルス
外観寸法	受信機:90(W)×90(D)×30(H)mm アンテナ:59(W)×59(D)×33(H)mm、ケーブル長:3m
電源	DC12V

※QZSS (Quasi-Zenith Satellite System: みちびき (準天頂衛星システム) の英語表記)

表-17 IMJ 性能仕様

項目	仕様
3軸ジャイロ加速度センサ	静的精度: 0.5° (Pitch/Roll), 2.0° (Yaw) 角速度入力レンジ: ±2000° /s 加速度入力レンジ: ±16g
本体寸法	36×34×9(mm) 堅牢タイプ
電源	DC 4.5~5.5V

### 3. 周囲探知技術の検討

#### 3. 1 ミリ波レーダ周囲探知実験

ミリ波レーダは、ミリ波帯 (30GHz~300GHz) の電波を用いて障害物を検出するものである。

電波を利用しているのでカメラやレーザなどに比べ、気象の影響を受けにくい特徴があり、自動車の予防安全技術に使用されるなど実用化が進められているが、吹雪時の適用性については明らかにされていない。

本実験は、市販車用ミリ波レーダが、視程障害時における周囲探知技術として適用可能か検証した。

現在、ミリ波レーダに使用できる周波数帯は、24GHz帯と76GHz帯である。24GHz帯は近・中距離用、76GHz帯は長距離用として用いられることが多い。

実験では、除雪車が前方障害物を探知するために必要な検出距離を70m以上と想定し、長距離用の76GHz帯ミリ波レーダを使用した。

表-18に実験に使用したミリ波レーダの諸元を示す。

表-18 ミリ波レーダ諸元表

項目	性能
最小検出距離	1m以上
最大検出距離	175m以下 (10dB target以下) 100m以下 (0dB target以下)
距離方向検出精度	+/- 0.5m 以上
同一角度、同一速度に2つのターゲットが存在する場合の距離方向分離性能	2.5 m以上
水平視野角	20 deg以下
同一距離、同一速度に2つのターゲットが存在する場合の水平方向角度分離性能	3.5 deg以上
垂直視野角	4.2 ~ 4.75 deg

#### 3. 2 ミリ波レーダ定置実験 (その1)

実験は寒地土木研究所石狩吹雪実験場で行った。

ミリ波レーダは高さや角度が調整できるように設置し(写真-23)、ミリ波レーダと検出結果を画像処理するためのレーダ検証用カメラを取り付けた(写真-24)。また、計測空間を直線方向に100m程度確保した(写真-25)。

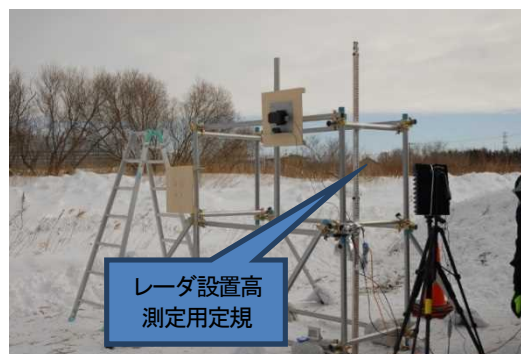


写真-23 ミリ波レーダ設置状況

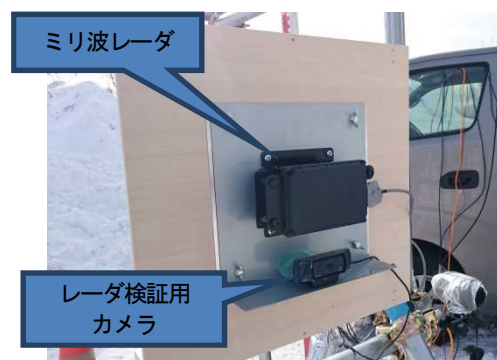


写真-24 ミリ波レーダとレーダ検証用カメラ

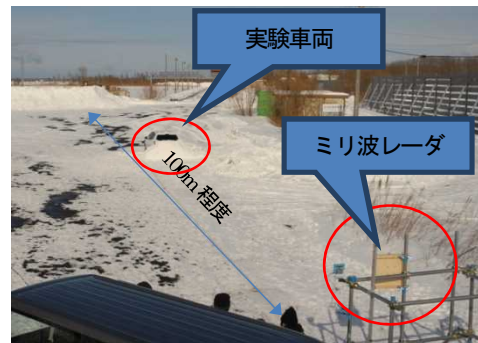


写真-25 計測場所全景

レーダの設置高さや設置角度、対象物との水平検出距離を基本のパラメータとし、以下の実験を行った。

実験①: 対象物が車両の場合の検出実験

実験②: 対象物が人の場合の検出実験

実験③: 吹雪時を想定した、レーダ前面に着雪した場合の検出実験

実験④: 吹雪時を想定した、車両に雪が堆積した場合の検出実験

##### 3. 2. 1 実験①: 車両の検出

実験①の概略図を図-21に、実験結果を表-19に示す。

車両を検出対象とした実験では、レーダの設置高が3m、設置角が4度、水平検出距離10mの条件で、未検出

があったが、この1例を除き、設置高・設置角・水平検出距離の全条件において、車両を検出することができた。

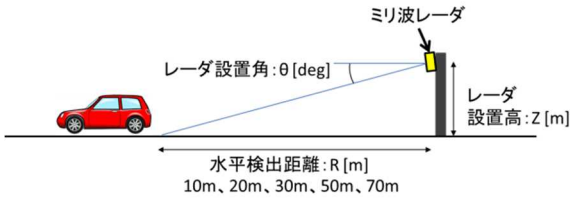


図-21 実験①概略図

表-19 実験①計測結果

設置高 Z[m]	設置角 θ [deg]	水平検出距離 R[m]						
		10	20	30	40	50	60	70
1.0	0	○	○	○	○	○	○	○
1.0	1	○	○	○	○	○	○	○
1.5	2	○	○	○	○	○	○	○
1.5	3	○	○	○	○	○	○	○
2.0	2	△	○	○	○	○	○	○
2.0	3	○	○	○	○	○	○	○
2.5	3	□	○	○	○	○	○	○
2.5	4	○	○	○	○	○	○	□
3.0	4	×	○	○	○	○	○	○

○：検出  
 △：一部未検出（検出データに一部欠測あり）  
 ×：未検出  
 □：1回目は検出、2回目は未検出

3. 2. 2 実験②：人の検出

実験②の概略図を図-22に、実験結果を表-20に示す。

人を検出対象とした実験では、立ち・しゃがみ・腹ばいの状態に分けて確認した。

人が立っている状態では、10m~70m先まで検出することができたが、姿勢が揺れた場合などでは、検出データの欠測により、一部未検出となる場合があった。

また、しゃがんだ状態では、立っている状態より反射面積が小さくなるため、さらに未検出となる場合が多く発生した。

腹ばいの状態では、全条件で検出することができなかった。

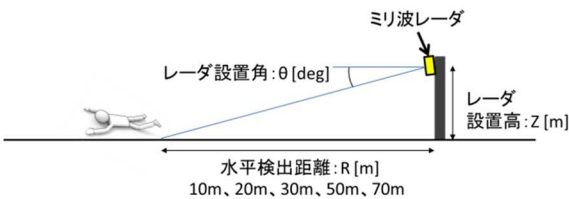


図-22 実験②概略図

表-20 実験②計測結果

設置高 Z[m]	設置角 θ [deg]	水平検出距離 R[m]										
		10			20			30			50	70
		立ち	しゃがみ	腹ばい	立ち	しゃがみ	腹ばい	立ち	しゃがみ	腹ばい	立ち	立ち
1.0	0	○	△	×	△	△	×	△	△	×	△	○
2.0	3	○	×	×	△	△	-	△	△	-	△	△

○：検出  
 △：一部未検出（検出データに一部欠測あり）  
 ×：未検出  
 -：未実施

3. 2. 3 実験③：レーダ前面の着雪の影響

実験③の概略図を図-23に、実験結果を表-21に示す。

レーダ前面に着雪した状態は、発泡スチロール製の枠に雪を詰めたものをブラケットでレーダ前面に設置することで、模擬的に再現した（写真-26）。

実験条件は、レーダ設置高を2m、設置角を3度に固定した。パラメータは、雪厚（t）を3cm, 5cm、水平検出距離（R）を30m, 70m、雪距離（D）を0~10cmの組合せと、雪厚（t）を1cm, 2cm, 10cm、水平検出距離（R）を30m、雪距離（D）を0cm, 2cm, 5cm, 7cm, 10cmの組合せに設定した。

雪厚3cm、水平検出距離30m、雪距離6cmの条件で未検出があったが、この1例を除き、雪厚・水平検出距離・雪距離の全条件において、車両を検出することができた。

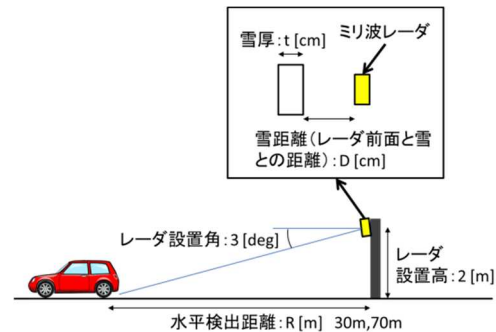


図-23 実験③概略図

表-21 実験③計測結果

雪厚 t:[cm]	水平検出 距離 R:[m]	雪距離 D:[cm]										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	30	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
2	30	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
3	30	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○
3	70	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
5	30	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
5	70	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
10	30	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

○：検出  
 ×：未検出

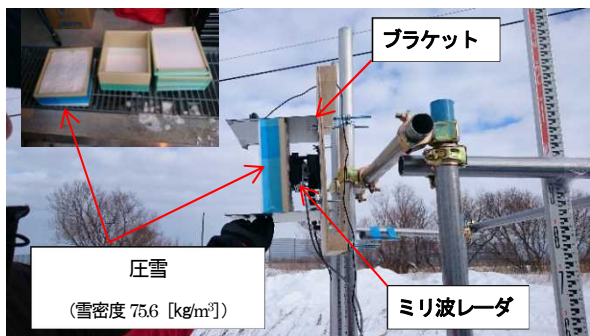


写真-26 着雪再現状況



写真-27 車両積雪再現状況

### 3. 2. 4 実験④：車両周りの積雪の影響

実験④の概略図を図-24に、実験結果を表-22に示す。

実験④は車両に雪が堆積している状態での実験であるが、雪は自然降雪によるものではなく、所定の雪壁厚となるよう除雪機とスコップで雪を被せて再現した（写真-27）。

実験条件は、レーダ設置高を2m、設置角を3度、水平検出距離を30mに固定した。

パラメータは、雪壁厚 (H) を 10cm, 20cm, 30cm のみとした場合と、雪壁厚 (H) を 10cm、雪厚 (t) を 3cm, 5cm、雪距離 (D) を 0cm, 5cm の組合せに設定した。

実験の結果、雪壁厚 10cm, 20cm, 30cm のみの場合と、雪壁厚 10cm、雪厚 3cm、雪距離 0cm, 5cm の条件では検出することができたが、雪壁厚 10cm、雪厚 5cm、雪距離 0cm 及び 5cm の条件では検出することができなかった。

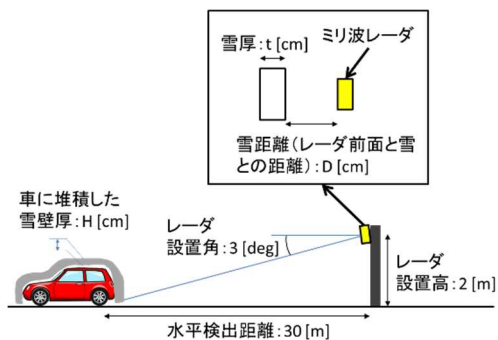


図-24 実験④概略図

表-22 実験④計測結果

雪壁厚 H:[cm]	雪厚 t:[cm]	雪距離 D:[cm]	
		0	5
10	0	○	○
20	0	○	○
30	0	○	○
10	3	○	○
10	5	×	×

○: 検出  
×: 未検出

### 3. 3 ミリ波レーダ定置実験 (その2)

降雪及び車両に堆積した雪がミリ波レーダの検出性能に与える影響を比較検証するため、寒地土木研究所石狩吹雪実験場で以下の実験を行った。

実験⑤：晴天時の車両の検出実験

実験⑥：降雪時の車両の検出実験

実験⑦：降雪により車両に雪が堆積した状態の検出実験

計測場所全景を写真-28に示す。

吹雪状況での実験を効率的かつ確実にを行うため、実験場にミリ波レーダ（写真-29）と実験車両を45日間存置し、監視用カメラ（写真-30）により吹雪の発生状況を確認し、遠隔制御により計測を行った。

実験車両は、レーダから30mの距離に実験車両①を、70mの距離に実験車両②を配置した（写真-31）。

視程距離は、ミリ波レーダから約50m離れた箇所に設置されている後方散乱型視程計の計測値と、実験車両の側方に10m間隔で設置した視程確認用スノーボールの目視観測結果を採用した。

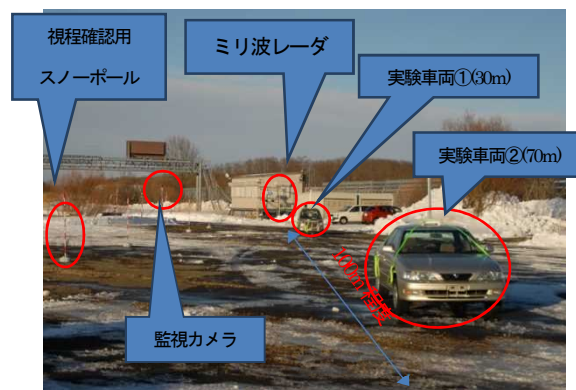


写真-28 計測場所全景

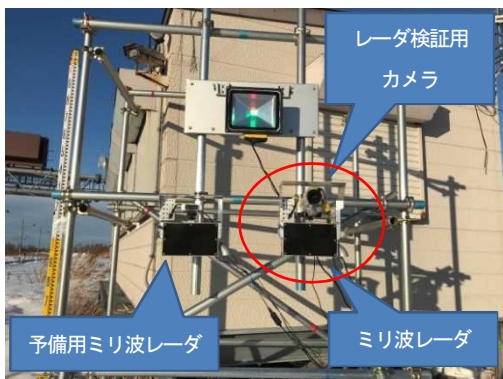


写真-29 ミリ波レーダ設置状況



写真-30 監視カメラ設置状況



写真-31 実験車両配置状況

### 3. 3. 1 実験⑤：車両の検出(晴天時)

実験⑤の概略図を図-25 に示す。

実験条件は、レーダ設置高を 2m、設置角を 3 度に固定した。

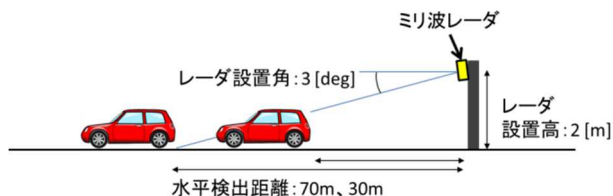


図-25 実験⑤概略図

実験⑤は、計測日の 9:30、11:00、13:30、14:30、15:30、16:30 に 1 回当たり 1 分間の計測を行った。

実験状況を写真-32 に、実験結果を図-26、27 に示す。

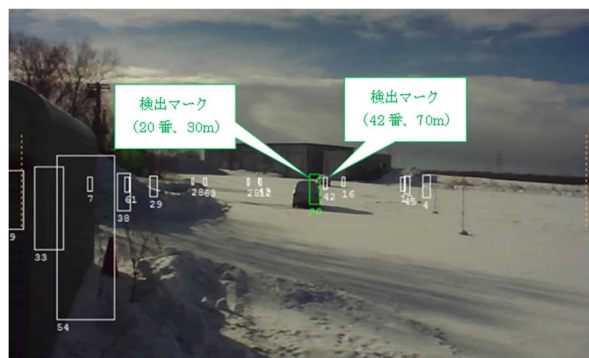


写真-32 実験⑤晴天時車両検出状況

実験結果は、反射断面積、検出距離、検出角度、検出率について、計測時刻毎に計測データの平均値を示したものである。

反射断面積とは、レーダから電波の照射を受けた対象物の電波反射強度の係数で、車両検出に必要とされる反射断面積の目安は-10dBsm である。

実験車両①の平均反射断面積は 6.1dBsm であり、変動量は-2.6~+2.9dBsm であった。実験車両②では 16.3dBsm、変動量は-0.3~+1.7dBsm であった。

検出距離はレーダから対象物までの距離であり、実験車両①の平均検出距離は 29.5m、変動量は±0.1m であった。実験車両②では 69.5m、変動量は±0.4m であった。

検出角度は対象物をレーダの正面で検出した場合は 0 度となり、右側に検出した場合が+、左側に検出した場合が-で表される。実験車両①の平均検出角度は 0.3 度であり、変動量は-0.9~+1.4 度であった。実験車両②では 1.7 度、変動量は-0.4~+0.8 度であった。

検出率は実験車両①及び②ともに全計測時刻において 100%であった。

晴天時の計測値を基準とし、降雪時及び車両に雪が堆積した状態の計測値と比較した。

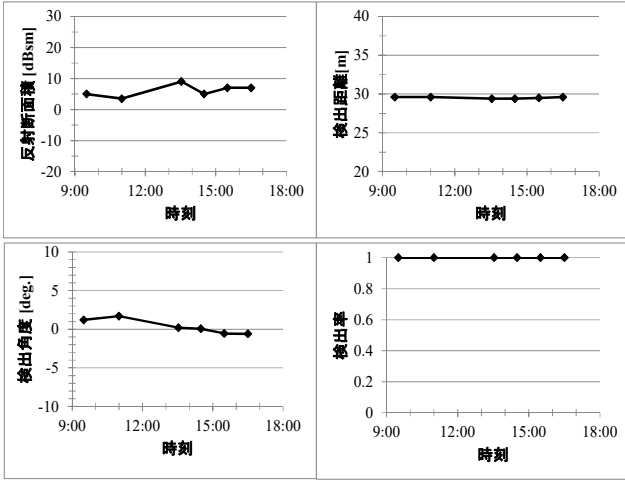


図-26 実験⑤検出結果(30m、実験車両①)

に、検出結果を図-29、30に、実験結果比較表を表-23に示す。

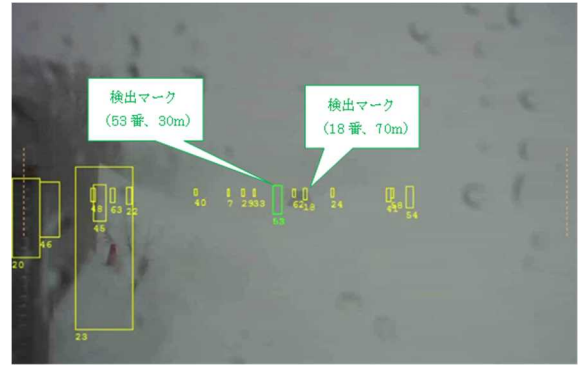


写真-33 実験⑥車両検出状況

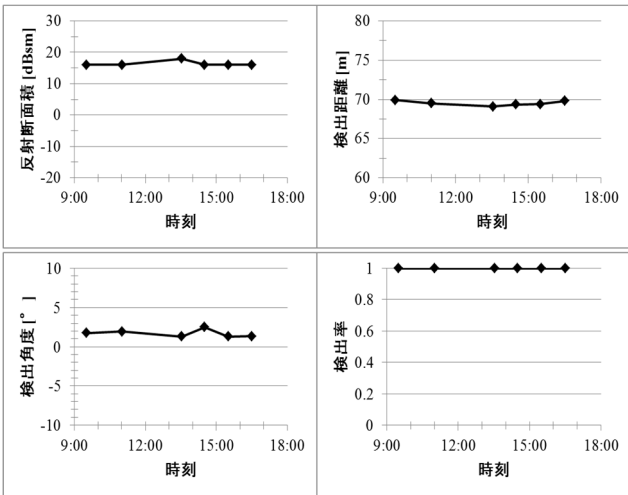


図-27 実験⑤検出結果(70m、実験車両②)

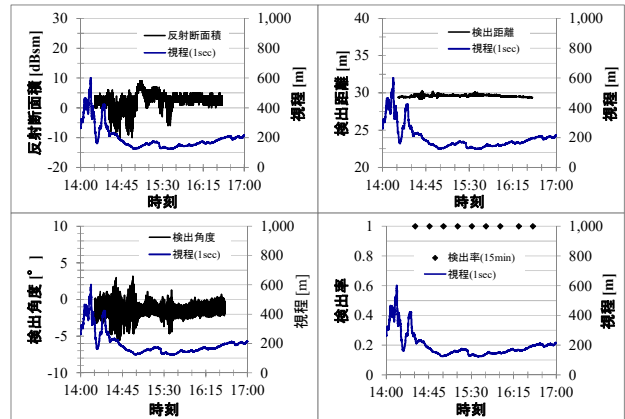


図-29 実験⑥検出結果(30m、実験車両①)

### 3. 3. 2 実験⑥：車両の検出(降雪時)

実験⑥の概略図を図-28に示す。

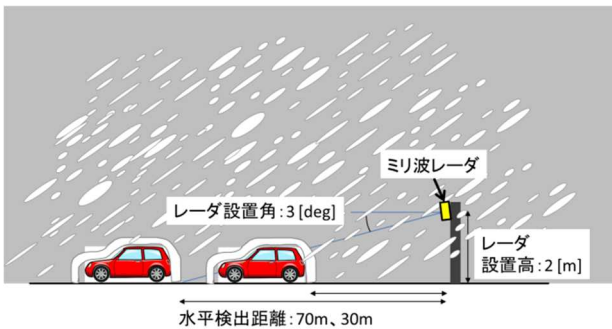


図-28 実験⑥概略図

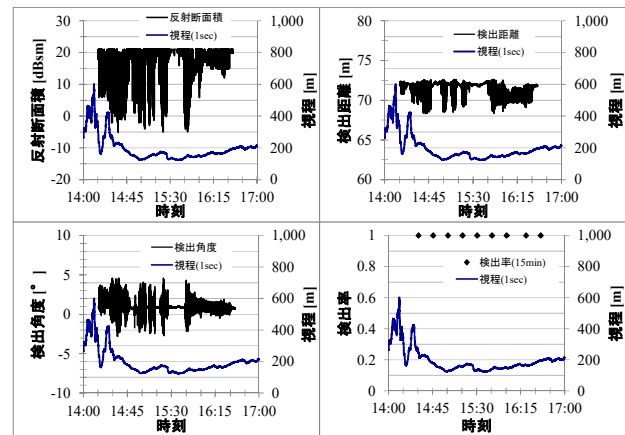


図-30 実験⑥検出結果(70m、実験車両②)

実験⑥は、降雪に伴う視程距離の違いによる検出性能を比較するため、降雪が発生した時間帯で連続的に計測した。

最も視程距離が低下した計測日の検出状況を写真-33

表-23 実験結果比較表

検出対象	項目	単位	実験⑤:晴天時			実験⑥:降雪時		
			平均値	最小値	最大値	平均値	最小値	最大値
30m 実験 車両 ①	反射 断面積	dBsm	6.1	3.5 -2.6	9 ~2.9	2.7	-10 -12.7	9 ~6.3
	検出距離	m	29.5	29.4 -0.1	29.6 ~0.1	29.6	29.2 -0.4	30.3 ~0.5
	検出角度	度	0.3	-0.6 -0.9	1.7 ~1.4	-1.5	-5.6 -4.1	3.2 ~4.7
	検出率	%	100	100 0	100	100	100 0	100
70m 実験 車両 ②	反射 断面積	dBsm	16.3	16 -0.3	18 ~1.7	18.1	-5 -23.1	21 ~2.9
	検出距離	m	69.5	69.1 -0.4	69.9 ~0.4	71.6	68.3 -3.3	72.6 ~1
	検出角度	度	1.7	1.3 -0.4	2.5 ~0.8	0.9	-2.8 -3.7	4.6 ~3.7
	検出率	%	100	100 0	100	100	100 0	100

実験の結果、後方散乱型視程計の平均視程距離は173mで、最低値は写真-27と同日の15時36分の123mであった。また、同時刻の視程確認用スノーボールの目視確認による視程距離は約50mであった。

実験⑤の計測結果と比較すると、視程距離の低下に伴い各計測項目の変動量は大きくなり、特にマイナス方向の変動量が大きくなる傾向が見られたことから、降雪の影響によりレーダの受信レベルが低下することで、計測誤差が大きくなるものと考えられる。

しかし、対象物の検出率に関しては、実験車両①、②ともに検出に必要とされるレーダの反射断面積-10dBsmを上回っており、全ての計測時刻にわたって検出率は100%であった。

このことから、76GHz帯のミリ波レーダは、目視による視程距離が50m程度の吹雪時でも70m先の車両の探知が可能であることを確認できた。

### 3.3.3 実験⑦: 降雪による積雪時の車両検出

実験⑦の概略図を図-31に示す。

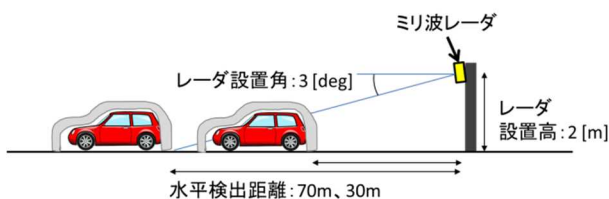


図-31 実験⑦概略図

実験⑦は、車両上に雪が堆積し、かつ晴天時において、1日6回(9:30、11:00、13:30、14:30、15:30、16:30)、1回当たり1分間の計測を行った。

降雪により生じた車両上の積雪深は、ルーフ上に設置した雪尺を周辺監視カメラにより目視計測した。

車両上の積雪深が最も大きかった計測日の検出状況を写真-34に、実験車両の積雪状況を写真-35、36に、実験結果比較表を表-24に示す。

実験車両①のルーフ上の積雪は15cm、実験車両②の積雪は20cm、車両周辺の積雪は40cm程度であり、テールランプ付近の車両背面は露出している状態であった。

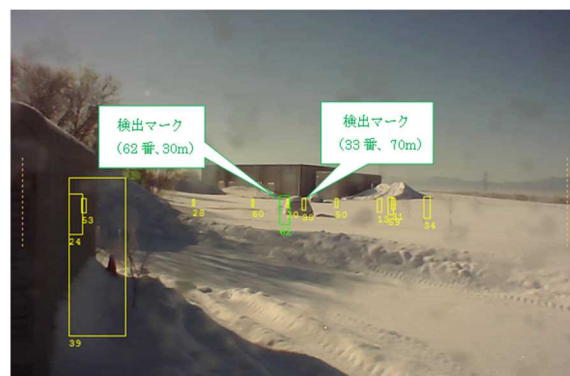


写真-34 実験⑦車両検出状況



写真-35 実験車両①積雪状況



写真-36 実験車両②積雪状況

表-24 実験結果比較表

検出対象	項目	単位	実験⑤:晴天時		実験⑦:積雪時	
			平均値	最小値   最大値 変動量	平均値	最小値   最大値 変動量
30m 実験 車両 ①	反射 断面積	dBsm	6.1	3.5   9 -2.6 ~ 2.9	2.2	-6   8.5 -8.2 ~ 6.4
	検出 距離	m	29.5	29.4   29.6 -0.1 ~ 0.1	29.7	29.3   30.1 -0.4 ~ 0.4
	検出 角度	度	0.3	-0.6   1.7 -0.9 ~ 1.4	-0.5	-2.5   1.8 -2 ~ 2.3
	検出 率	%	100	100   100 0	100	100   100 0
70m 実験 車両 ②	反射 断面積	dBsm	16.3	16   18 -0.3 ~ 1.7	15.9	8.5   21 -7.4 ~ 5.1
	検出 距離	m	69.5	69.1   69.9 -0.4 ~ 0.4	71.3	70   72.3 -1.3 ~ 1
	検出 角度	度	1.7	1.3   2.5 -0.4 ~ 0.8	0.9	0.2   2 -0.7 ~ 1
	検出 率	%	100	100   100 0	100	100   100 0

実験車両に雪が堆積することにより、雪が堆積していない状態より平均反射断面積は低下するものの、検出に必要なとされる反射断面積-10dBsmを上回っているため、全ての計測時刻において検出率は100%であった。

### 3.4 ミリ波レーダ除雪車搭載実験

平成30年度は、除雪車に市販車用ミリ波レーダを搭載し、除雪作業がミリ波レーダの検出性能に与える影響を検証する実験を行った。

実験⑧：除雪車走行時における車両の検出実験

実験⑨：除雪車停止時における人の検出実験

実験場所全景を写真-37に、実験場所平面図を図-32に示す。

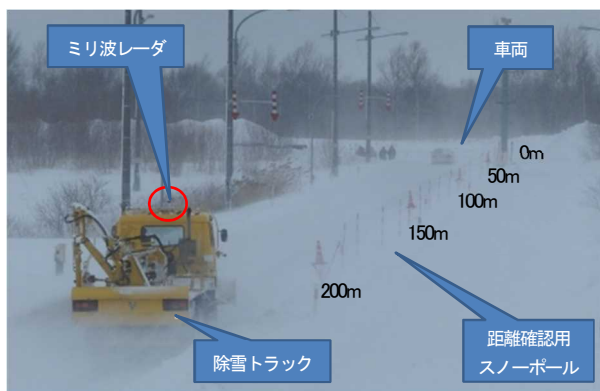


写真-37 実験場所全景

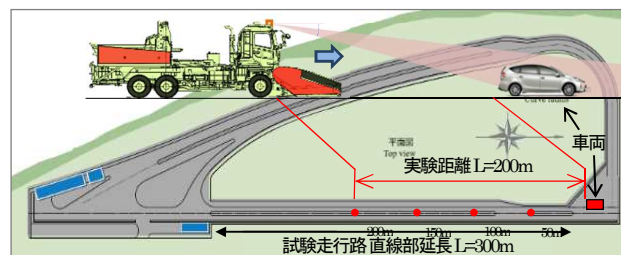


図-32 実験場所平面図 (石狩吹雪実験場)

実験は寒地土木研究所石狩吹雪実験場の試験走行路で行った。除雪作業を行いながら実験を実施するため、試験走行路の直線部に圧雪路面を形成した。

平均圧雪厚さは5.3cm、雪硬度は134kg/cm<sup>2</sup>、路面状態は圧雪であった。

直線部の終点側に車両(写真-38)を配置し、車両から200m手前の位置を除雪車の出発地点とした。

視程距離は、試験走行路の中央分離帯に設置されている透過型視程計の計測値と、中央分離帯に10m間隔で設置した視程確認用スノーポールの目視観測結果を採用した。

実験には除雪トラックを使用した(写真-39)。

ミリ波レーダを、除雪トラックのルーフ部中央の地上高3.31mの位置に、角度調節が可能なブラケット及びハウジングを用いて設置した(写真-40)。



写真-38 車両設置状況



写真-39 除雪トラック全景





写真-40 ミリ波レーダ設置状況

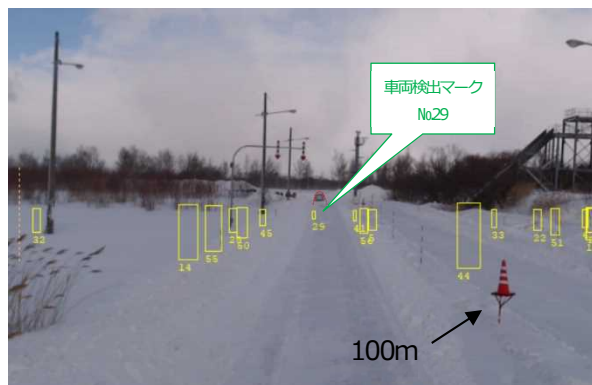


写真-41 実験⑧車両検出状況 (降雪無し)

3. 4. 1 実験⑧：除雪車走行時における車両の検出

実験⑧の概略図を図-33 に示す。

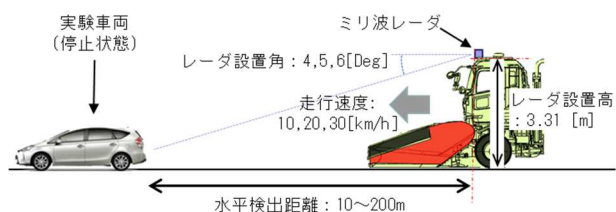


図-33 実験⑧概略図

実験条件は、ミリ波レーダの設置角度を 4, 5, 6 度、走行速度を 10, 20, 30km/h、除雪作業をプラウ単独作業、プラウ・グレーダ併用作業とした。また、比較のため除雪作業を伴わない回送も条件に加えた。

気象条件は、実験中に吹雪を伴うような降雪が発生した場合は降雪有り、軽微な降雪や曇天の場合は降雪無しとした。

除雪車走行時の車両検出は、除雪車を車両に向けて走行させ、ミリ波レーダが車両を検出し始めた距離と、車両直前まで接近し検出不能となる距離を計測することで、検出範囲を把握することとした。

検出結果の一例として、レーダ設置角度 5 度、走行速度 30km/h、プラウ単独作業時における、降雪無しの車両検出状況及び検出結果を写真-41、図-34 に、降雪有りの車両検出状況及び検出結果を写真-42、図-35 に示す。

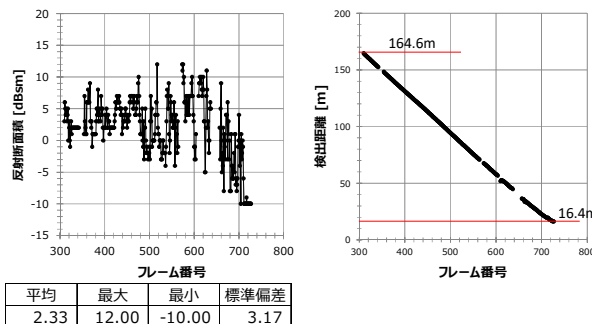


図-34 実験⑧車両検出結果 (降雪無し)

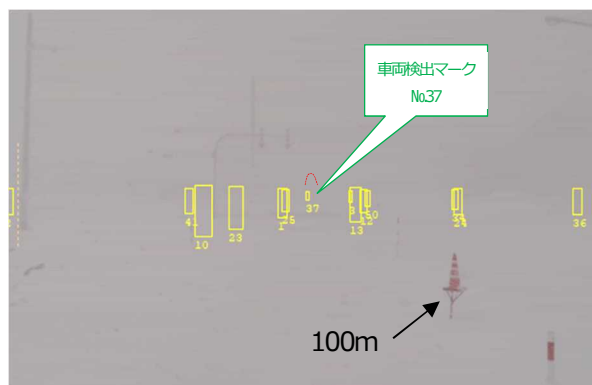


写真-42 実験⑧車両検出状況 (降雪有り)

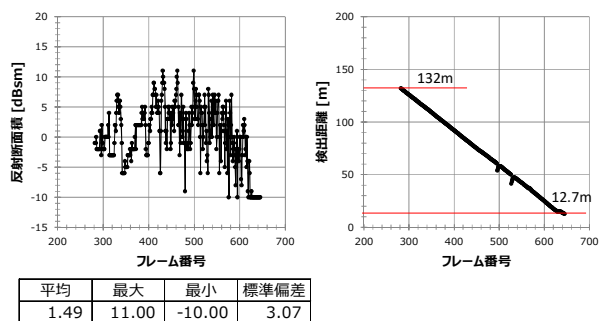


図-35 実験⑧車両検出結果 (降雪有り)

車両検出結果は、反射断面積と検出距離を示したものである。グラフ横軸のフレーム番号は、計測間隔50ms毎の検出結果の順番を示している。

降雪無しの車両検出距離は、164.6m手前から検出を始め、一部未検知があったが、16.4mまで検出できた。平均反射断面積は2.33dBsmであった。

降雪有りの実験時における透過型視程計の平均視程距離は57.3mであり、スノーポールを目視確認による視程距離は50m以下であった。車両検出距離は、132m手前から検出し12.7mまで検出できた。平均反射断面積は1.49dBsmであった。

上記の実験環境では、降雪の影響により車両の最大検出距離が約20%程度低下することがわかった。

しかし、最大検出距離は低下するが、100m以上手前から車両を検出できるため、除雪車が前方障害物を探知するために必要な距離として想定していた70mよりも更に手前から車両を探知可能であることを確認した。

図-36は、各実験条件の組み合わせによる車両検出範囲の比較を示したものである。

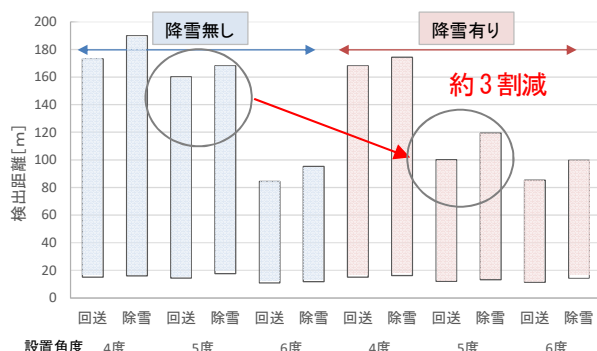


図-36 車両検出範囲の比較結果

なお、実験条件のうち、走行速度の違い及び除雪作業の種類による検出範囲に差が見られなかったため、平均処理したものをグラフ化した。

最大検出距離は、設置角度4度の時が最も長く、5度の場合は1割程度、6度の場合は5割程度低下した。

最小検出距離は、全ての条件において10m以上20m未満の範囲であった。

降雪による影響は、今回の気象条件では、設置角度5度の場合が顕著であり、降雪無しと比べて最大検出距離が3割程度低下した。

除雪作業の有無では、回送時に比べ除雪作業時の最大検出距離が増加する傾向を示した。これは路面整正装置の押付力により車体前方が若干持ち上がるため、レーダ

の俯角が上がり検出距離が増加したものと考えられる。

また、除雪作業に伴う振動の影響により、車両が未検出になることはなかったが、圧雪路面の凸凹により車体が上下に振動した場合、レーダ照射範囲から車両が外れることにより、部分的な未検出が生じる場合があった。

### 3.4.2 実験⑨：除雪車停止時における人の検出

実験⑨の概略図を図-37に示す。

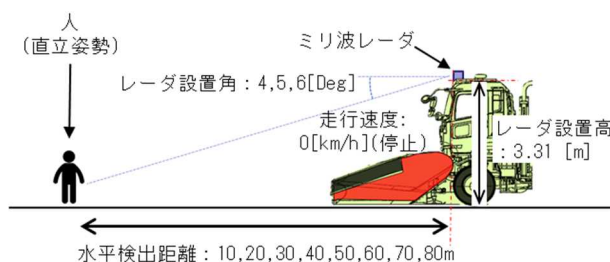


図-37 実験⑨概略図

除雪車停止時における人の検出実験は、試験走行路の直線部に人を直立姿勢で配置し、人から10m離れた位置を基点に80mまで10m毎に除雪車を停止させ、1箇所あたり約15s間計測を行った。

実験条件は、レーダの設置角度を4, 5, 6度、除雪車の状態を路面に除雪装置を接地させた除雪姿勢と回送姿勢とした。

気象条件は、降雪有りと降雪無しとした。

検出結果の一例として、レーダ設置角度5度、水平検出距離70m、除雪姿勢時における降雪無しの人検出状況及び検出結果を写真-43、図-38に、降雪有りの人検出状況及び検出結果を写真-44、図-39に示す。



写真-43 実験⑨人検出状況(降雪無し)

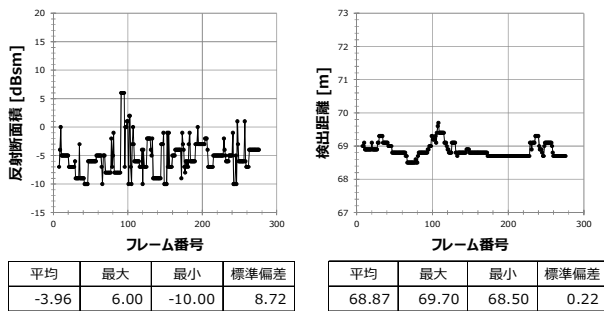


図-38 実験⑨人検出結果 (降雪無し)



写真-44 実験⑨人検出状況(降雪有り)

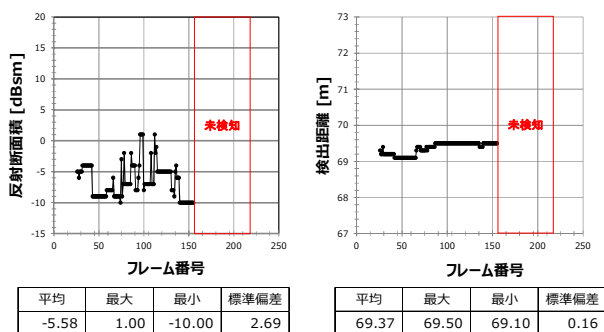


図-39 実験⑨人検出結果 (降雪有り)

降雪無しの実験時における平均反射断面積は、-3.96dBsm、平均検出距離は68.87mであった。  
 人の検出は車両等と比べ、レーダの反射断面積が小さいため、ばらつきが大きくなる等、検出が不安定になる傾向が見られた。  
 降雪有りの実験時における平均反射断面積は、-5.58dBsm、平均検出距離は69.37mであった。  
 降雪の影響により一部未検知があり、平均反射断面積は低下する傾向を示した。  
 実験⑨の検出結果一覧を図-40に示す。  
 表中の判定結果は、計測時間内における人を検出した時間率が90%以上の場合を○、50%以上90%未満を△、50%未満を×とした。

最大検出距離は、レーダの設置角度が4度及び5度の場合70mであり、6度では50mであった。

停止状態の実験では、除雪車の姿勢による検出距離の違いは見られなかった。

降雪の有無による影響は、検出結果の一例で述べたとおり、反射断面積が低下する傾向は見られたものの、検出不能となるような強い降雪が発生しなかったため、影響を確認することはできなかった。

降雪	設置角度	除雪車状態	水平検出距離[m]							
			10	20	30	40	50	60	70	80
なし	4度	回送姿勢	×	○	×	△	○	×	○	×
		除雪姿勢	×	△	○	○	○	△	×	×
	5度	回送姿勢	×	○	○	△	△	○	×	×
		除雪姿勢	×	△	△	○	○	○	○	×
	6度	回送姿勢	×	△	×	○	○	×	×	×
		除雪姿勢	×	○	○	△	×	×	×	×
あり	4度	回送姿勢	×	△	○	○	○	△	○	×
		除雪姿勢	×	△	△	△	○	△	○	×
	5度	回送姿勢	×	○	○	△	○	△	×	×
		除雪姿勢	×	○	○	○	○	○	△	×
	6度	回送姿勢	×	○	○	×	○	×	×	×
		除雪姿勢	×	○	△	○	○	×	×	×

【凡例】

計測時間内に対象を計測した時間率			
○	90%以上	△	50~90%
×	50%未満		

図-40 実験⑨ 検出結果一覧

### 3.5 ミリ波レーダガイダンスシステムの検証実験

令和元年度は、ミリ波レーダによるガイダンスシステムを試作し、未検出や誤検出をすることなく障害物情報をオペレータに提供可能か、また視程障害を再現した視界を遮断した状況において、ガイダンス情報により安全に停車可能かを検証する実験を行った。

実験⑩：ガイダンス試作機性能検証実験

実験⑪：ガイダンスによる除雪車停止実験

#### 3.5.1 ガイダンス試作機の作製

ガイダンス試作機の作製にあたり、ミリ波レーダによる障害物の検知判定処理方法について検討した。ミリ波レーダによる障害物検知では、ミリ波による検知、受信結果の1次処理、受信処理結果のフィルタリングによる2次処理の3つの工程が必要である。ミリ波による検知及び受信結果の1次処理については、市販ミリ波レーダの検出結果を活用し、除雪車用に新たに構築した障害物判定処理ソフトウェアにより2次処理を行うこととした。障害物判定処理ソフトウェアの処理イメージを図-41に示す。

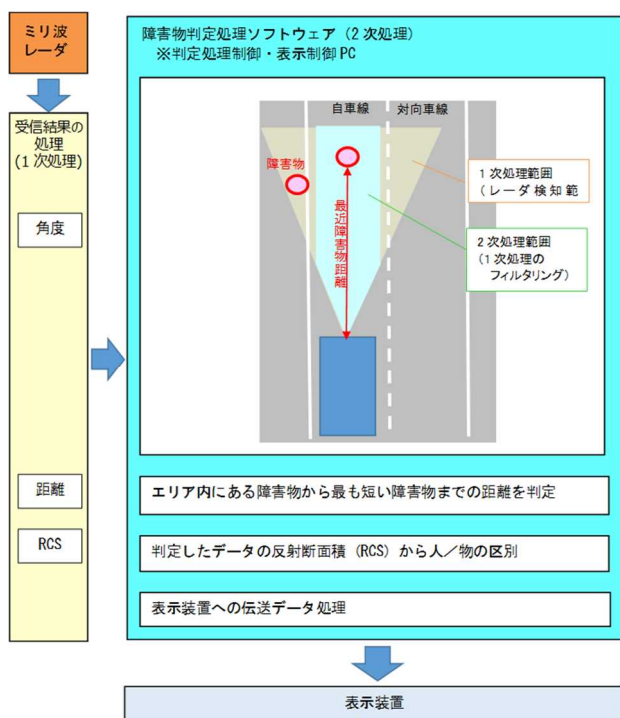


図-41 障害物判定処理のイメージ

ガイダンス試作機は、ミリ波レーダの検出結果を表示できるツールであり、除雪車オペレータの支援を目的として、視程障害時におけるミリ波レーダの有効性を検証するために開発した。なお、ガイダンス試作機は、自車の位置情報や道路の構造情報（車線幅、車線数、曲率等）を持たないため、直線道路を前提としたガイダンスを行うものである。

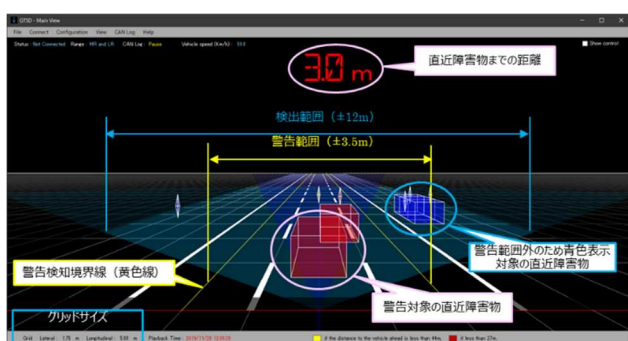


図-42 ガイダンス試作機の表示イメージ

図-42 にガイダンス試作機の表示イメージを示す。ガイダンス試作機の表示画面は、3D グラフィックスで描画した道路に、ミリ波レーダが検出した障害物情報をオペレータの視線（視野）で重畳表示したものである。描画する道路の車線数や幅は所定の範囲内で変更可能とした。H30 年度の実験結果より車両の反射断面積は強い領

域に、人の反射断面積は弱い領域に分布していることが確認できたため、強領域（車両相当）を長方形、弱領域（人相当）を双四角錐表示することで視覚的に区別できるようにした。

オペレータに障害物の接近を警告するため、自車（レーダ）と障害物の距離が近づくにつれ障害物の表示色を段階的に変化させることとした。通常時は青色、注意時は黄色、警告時は赤色に変化する。なお、警告を発する設定距離は任意に変更することができる。また画面中央上部には、レーダから最も近い障害物までの距離が常に表示される。

道路水平方向の検出範囲及び警告範囲も任意設定することができる。図-42 の例では、検出範囲を自車の±12m に設定しており、この範囲内の障害物を全て表示させる。警告範囲は自車の±3.5m に設定しており、この範囲内の障害物は警告対象として自車に接近すると表示色が変更される。図-42 の例では、警告範囲内の直近障害物は赤色で表示されているが、右側の障害物は警告範囲外のため青色で表示されている。

### 3. 5. 2 実験⑩：ガイダンス試作機性能検証実験

実験は寒地土木研究所苫小牧試験道路で行った。

ミリ波レーダ及びガイダンス試作機を搭載した除雪トラックを回送姿勢で走行させ、自車線上と隣接車線に設置した障害物を検知可能か検証した。実験条件は、レーダ設置角度を 4 度、走行速度を 15km/h と 30km/h とし、車両を対象とした実験では除雪車の出発地点から 100m 先の路側帯に車両 1、150m 先の対向車線に車両 2、200m 先の自車線に車両 3 を配置した。人を対象とした実験では、人形を用いて 100m 先の路側帯に人形 1、200m 先の自車線に人形 2 を配置した。

実験状況を写真-45 に、実験概略図を図-43、44 に示す。



写真-45 実験状況

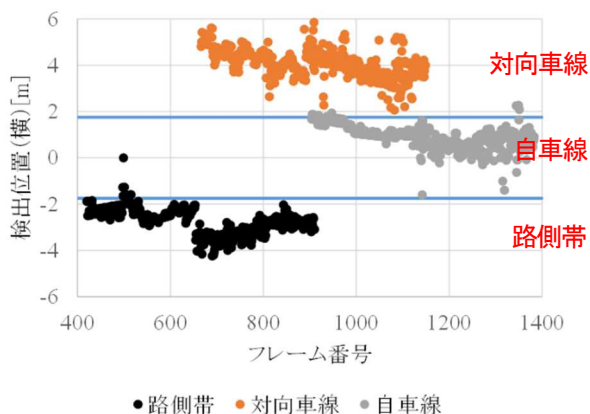


図-43 実験概略図 (障害物：車両)



図-44 実験概略図 (障害物：人形)

検出結果の一例として、走行速度 15km/h における車両の検出位置を図-45 に、人形の検出位置を図-46 に示す。検出位置は除雪車 (レーダ) を原位置 0 とし、正の値が右側、負の値が左側に対する長さで表されている。車線幅は 3.5m であるため、±1.75m の範囲が自車線、-1.75m 未満が路側帯、+1.75m より大きければ対向車線と判断する。ここで、誤検出率は設置した障害物が設置車線外に検出された割合を、正検出率は障害物が設置車線内で検出された割合を示す。図の青色の直線が車線の境界線を示しており、この境界線を越えて検出された場合、誤検出となる。



	平均	最大	最小	標準偏差
路側帯	-2.75	0.00	-4.24	0.55
対向車線	4.09	5.85	2.06	0.60
自車線	0.91	2.27	-1.60	0.50

	検出率	未検出率	誤検出率	正検出率
路側帯	100.0%	0.0%	2.0%	98.0%
対向車線	100.0%	0.0%	0.0%	100.0%
自車線	100.0%	0.0%	2.3%	97.7%

図-45 検出位置結果 (障害物：車両)

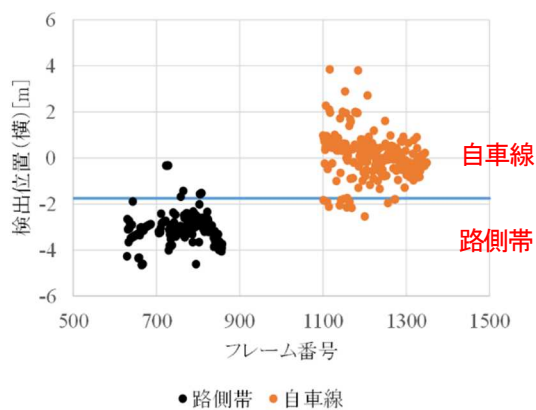


図-46 検出位置結果 (障害物：人形)

	平均	最大	最小	標準偏差
路側帯	-3.03	-0.32	-4.64	0.71
自車線	0.09	3.85	-2.53	0.95

	検出率	未検出率	誤検出率	正検出率
路側帯	92.2%	7.8%	5.7%	86.5%
自車線	100.0%	0.0%	11.6%	88.4%

車両では、自車線の検出率は100%であった。また、誤検出率は平均2.3%であった。走行による振動や姿勢変動を考慮すると、誤検出の原因となる角度推定誤差は変動を避けられないため、実験結果は想定範囲内といえる。

人形でも、自車線の検出率は100%であった。また、誤検出率は平均8.9%であった。車両と比較して、反射断面積が小さいため、反射信号の信号対雑音比が低く、角度推定誤差の変動がより大きくなる。従って、誤検出率も高くなる傾向がみられる。

### 3. 5. 3 実験⑪：ガイダンスによる除雪車停止実験

ミリ波レーダ及びガイダンス試作機を搭載した除雪トラックのフロントガラス全面に白色半透明のビニールシートを貼り付けオペレータの視界を遮断し、吹雪による視程障害を模擬的に再現した状況において、除雪トラックを走行させたときにガイダンス試作機で検出した前方の障害物情報のみを用いて安全に停止可能か実験を行い、ガイダンス試作機の有効性及課題に関するオペレータへのヒアリングを実施した。

実験条件は、レーダ設置角度を 4 度、走行速度を 20km/h とし、障害物にはコーナーリフレクタを使用することとした。障害物を検出できなかった場合や、検出が遅れた場合に除雪トラックが障害物の位置まで走行しても路面に設置したコーナーリフレクタの上を除雪トラックが通過することで接触しないようにした。除雪車の出発地点から 100m 先の路側帯に障害物 1、200m 先の自車線に障害物 2 を配置した。

5 極端気象がもたらす雪氷災害の被害軽減のための技術の開発

実験状況を写真-46に、実験中の運転室内状況を写真-47に、コーナーリフレクタを写真-48に、実験概略図を図-47に示す。



写真-46 実験状況



写真-47 走行中の運転室内状況

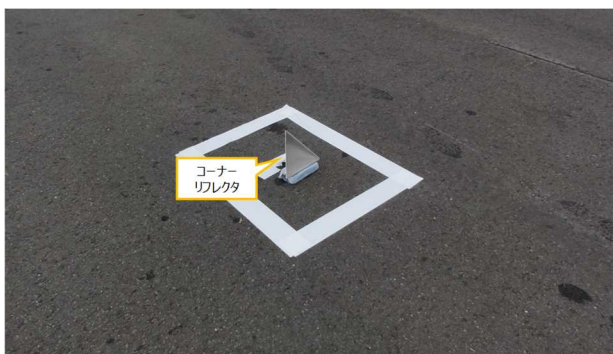


写真-48 コーナーリフレクタ

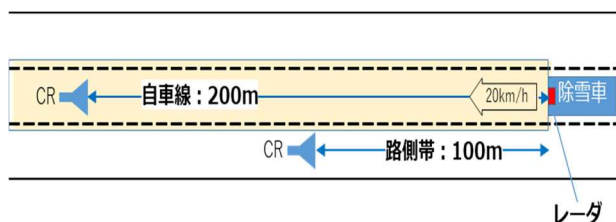


図-47 実験概略図

ガイダンスシステムへの警報は、障害物の接近に伴い障害物の表示色を通常時は青色、注意時は黄色、警告時は赤色に変化させるものであり、設定距離は任意に変更可能である。そこで警報を出す設定距離を注意40m・警告20m、同50m・25m、同60m・30mに設定し、それぞれの停止距離を確認した。なお、実験は被験者2名で行い、被験者はガイダンスシステムに従って自車線を走行し、赤色の警告表示を認識したところで停止操作をすることとした。図48～50に実験時のガイダンス画面例を、表-25に実験結果一覧を示す。

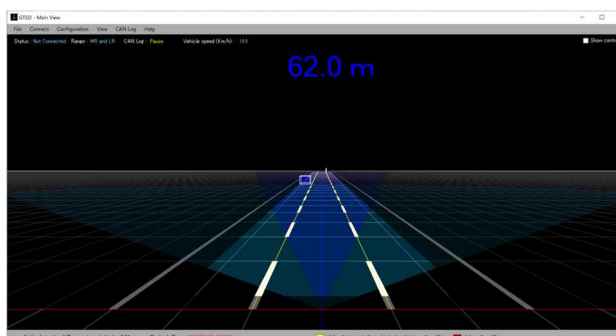


図-48 ガイダンス画面例 (注意 60m 警告 30m時\_通常)

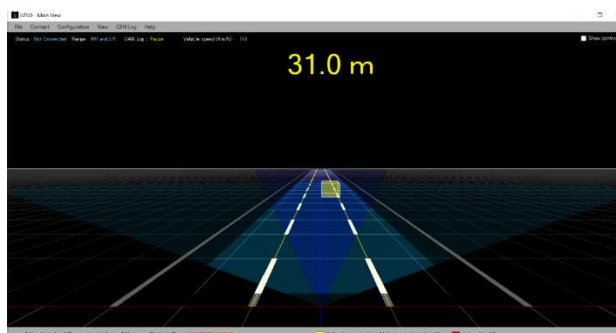


図-49 ガイダンス画面例 (注意 60m 警告 30m時\_注意)



図-50 ガイダンス画面例 (注意 60m 警告 30m時\_警告)

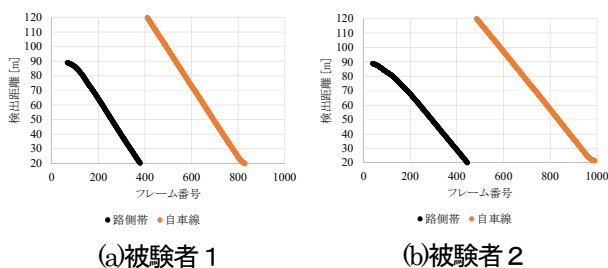
表-25 実験結果一覧

No	警報距離(m)		検出範囲(m)		停止時の障害物までの距離(m)			
	注意 黄色	警告 赤色	検出幅	警告幅	被験者1		被験者2	
					路側帯	自車線	路側帯	自車線
1	40m	20m	3.5m	3.5m	-	5.8m	-	8.6m
2			8.0m	3.5m	-	7.8m	-	6.0m
3	50m	25m	3.5m	3.5m	-	10m	-	11.8m
4			8.0m	3.5m	-	12.9m	13.5m	14.1m
5	60m	30m	3.5m	3.5m	-	15.5m	-	17.5m
6			8.0m	3.5m	-	17.7m	19.2m	17.5m

ここで停止時の障害物までの距離はプラウの先端からの距離を示している。レーダの設置位置とプラウの先端までの水平距離は3.85mであった。

実験の結果、全ての条件において被験者2名ともにガイダンス情報に従い、自車線障害物の手前で安全に停止することができた。警告距離20mでの平均停止距離が7.05m、25mでは12.2m、30mでは17.05mだったことから、より安全な停止距離を確保するには警告距離を30mにすることが望ましいと考えられる。

路側帯の障害物は、誤検出により自車線に誤表示した場合、その情報を見たオペレータが停止操作をするか検証するため設置したものである。図-51に検出結果の一例として実験No.6におけるフレーム毎の検出結果を示す。路側帯の障害物は誤検出率が0%であり、路側帯の障害物が誤って自車線に表示されることはなかった。ただし、被験者2の実験No.4及び6で路側帯の障害物で停止したのは、ガイダンス画面の表示色の変化による判断ではなく、表示距離のみを見て誤操作した結果であった。



	検出率	未検出率	誤検出率	正検出率		検出率	未検出率	誤検出率	正検出率
路側帯	100.0%	0.0%	0.0%	100.0%	路側帯	100.0%	0.0%	0.0%	100.0%
自車線	100.0%	0.0%	10.0%	90.0%	自車線	100.0%	0.0%	8.1%	91.9%

図-51 障害物検出結果

被験者に対するガイダンスシステムの評価に関するヒアリングでは、前方が見えない状況ではガイダンスシステム自体の有効性は高く、前方に何か障害物があるという情報は安心感に直結するため、できるだけ遠方から障

害物を把握することが重要だということがわかった。また、オペレータとしてはより安全側で警報を受ける方が良く、今回の条件だと注意60m警告30mでのタイミングが望ましいことがわかった。一方で、画面表示（視覚情報）のみでオペレータに情報を伝達する方法には限界があり、音による警報と組み合わせることが有効であることが確認できた。

### 3.6 障害物探知ガイダンスの公道検証実験

令和2年度は、ミリ波レーダガイダンスシステムの試作機を改良し（以下、「障害物探知ガイダンス」という）、性能検証実験を行うとともに、障害物探知ガイダンスを搭載した除雪トラックの公道走行時における適用性の検証実験を行った。

実験⑫：障害物探知ガイダンスの性能検証実験

実験⑬：障害物探知ガイダンスの公道走行実験

#### 3.6.1 ガイダンス試作機の改良

3.5.3の実験結果を踏まえ、オペレータに対しより正確な情報伝達を目的にソフトウェアの改良を行った。

障害物までの距離表示は、文字が小さく見えにくかったため、フォントサイズの大きさを2種類追加し、大中小から選択可能とした。また、距離表示の対象を、検出範囲内の直近障害物から、警告範囲内の直近障害物に変更することで、オペレータが誤認識しないようにした。警告方法については、警告範囲内に障害物が接近したときの表示方法を、距離表示の文字色のみの変化から、画面全体が点滅する方法に変更し、注意喚起時と警告喚起時でそれぞれ違う警報音を鳴らすことで、オペレータの認識度を向上させた。

また、ガイダンス試作機では走行速度の入力は、手入力により行っていたが、速度情報を自動で取り込めるよう改良した。ただし、車両から車速パルスを取得するのではなく、加速度センサ及びGPS機能を有したスマートフォン等情報端末の速度検出アプリとの通信により速度情報を取得できるようにした。これにより除雪車に特別な改造を施さなくても速度情報の取得が可能となった。障害物探知ガイダンス表示例を図-52~54に示す。

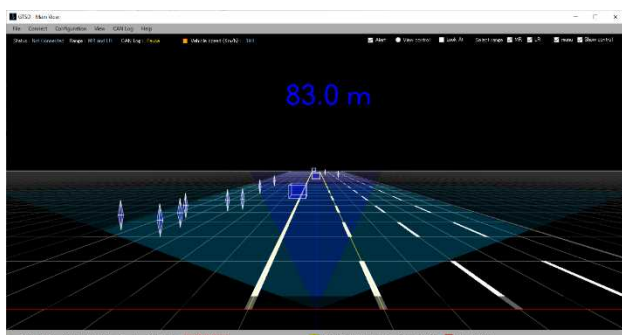


図-52 改良ガイダンス画面例（通常時 文字サイズ小）

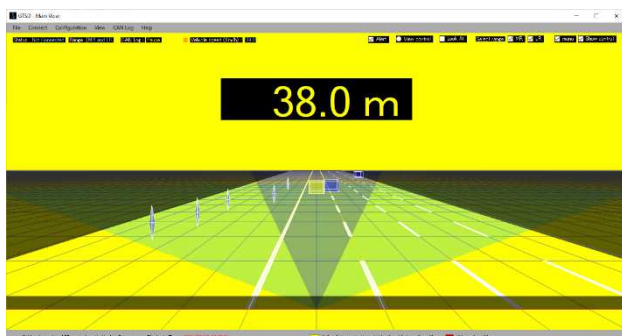


図-53 改良ガイダンス画面例（注意時 文字サイズ中）

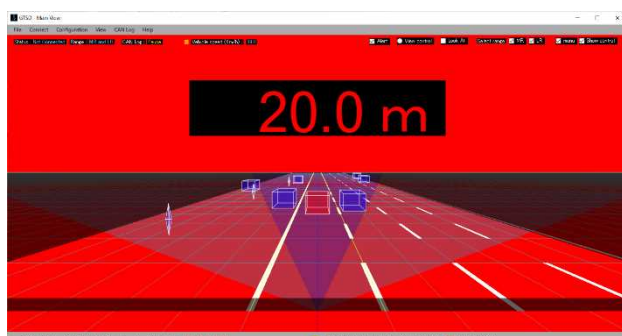


図-54 改良ガイダンス画面例（警告時 文字サイズ大）

### 3. 6. 2 実験⑫: 障害物探知ガイダンスの性能検証実験

障害物探知ガイダンスの性能を検証し、公道走行実験における警報幅及び検出強度等パラメータのデフォルト値を設定するため、寒地土木研究所石狩吹雪実験場において、除雪車を用いた検証実験を実施した。

実験は除雪トラックを回送姿勢で走行させ、自車線上と隣接車線に設置した障害物のうち、自車線上の障害物のみを未検出・誤検出することなく検知し、オペレータに適切なガイダンスが可能か検証した。実験条件を以下に、実験概略図を図-55に示す。

- ・レーダ設置角：4度
- ・走行速度：40km/h（公道での走行速度想定）
- ・対象物：コーナーリフレクタ（CR）
- ・レーダ検出幅：3.5m、3.0m、4.0m

- ・レーダ検出強度：-10dBsm、-3dBsm、0dBsm
- ・警報距離：【30-60m】、【40-80m】、【50-100m】

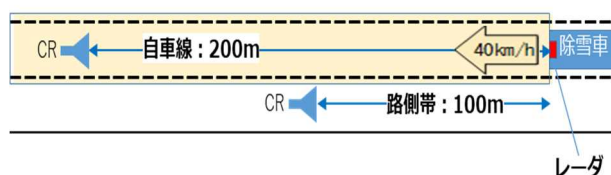


図-55 実験概略図

図-56に検出データの表示例を示す。

検出データ表示例に記載されている用語の定義は以下の通りである。

- ・検出率：対象物が検出された割合
  - ・未検出率：対象物が検出されなかった割合
  - ・誤検出率：対象物の検出位置が前後のデータと大きくずれ、誤った検出をしたと考えられる割合（距離・横ずれ等）
  - ・正検出率：正しく検出したと考えられる割合。
- 以上を整理すると以下の関係が成り立つ。
- ・検出率＝誤検出率＋正検出率
  - ・検出率＋未検出率＝100%

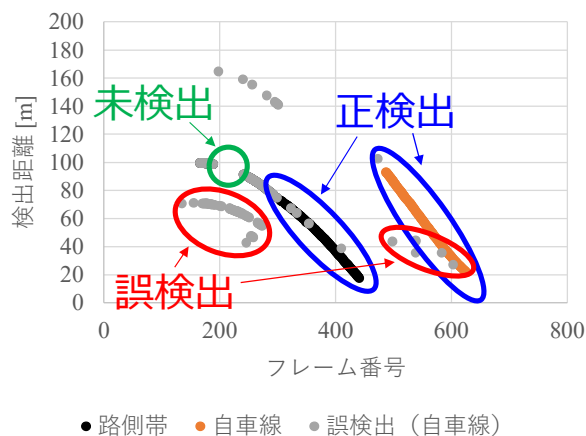


図-56 検出データ表示例

実験結果の一例として、検出強度-10dBsm・警報幅3.0mの検出結果を図-57に、検出強度0dBsm・警報幅3.5mの検出結果を図-58に示す。

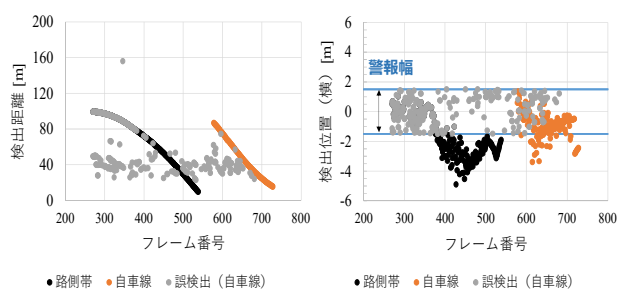
いずれのケースでも80m～20mの範囲で自車線の対象物を検出できていることが確認できた。検出強度-10dBsm・警報幅3.0mの場合、自車線・路側帯共に検出率は100%であった。また、正検出率はそれぞれ、76.8%、58.0%であった。一方、検出強度を0dBsmまで引



き上げると、自車線の正検出率を95.5%まで改善することができた。石狩吹雪実験場の直線路は1車線幅である上に除雪による堆雪が路側帯にある状況であったため、反射断面積の低い検出物を除外することで検出精度が向上したと思われる。

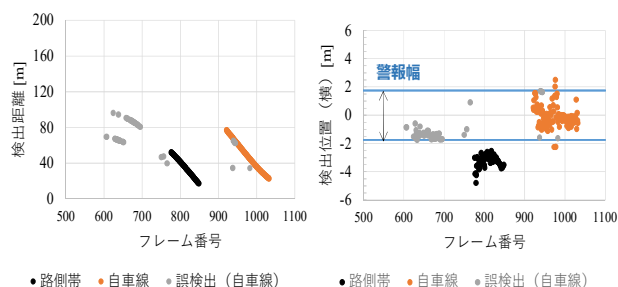
ただし、路側帯の誤検出率については、上記の堆雪やガードレールなど誤検出を誘発する反射物が多い環境であり、測定毎のバラツキも大きく、はっきりとした改善効果は得られなかった。

以上のことから、公道走行実験のパラメータデフォルト値は、検出強度 0dBsm・警報幅 3.5m とし、レーダの設置角は4度 に設定することとした。



	検出率	未検出率	誤検出率	正検出率		平均	最大	最小	標準偏差
路側帯	100.0%	0.0%	42.0%	58.0%	路側帯	-1.60	1.03	-4.89	1.45
自車線	100.0%	0.0%	23.2%	76.8%	自車線	-0.91	1.35	-3.38	0.94

図-57 検出結果(検出強度-10dBsm・警報幅 3.0m)



	検出率	未検出率	誤検出率	正検出率		平均	最大	最小	標準偏差
路側帯	100.0%	0.0%	0.0%	100.0%	路側帯	-3.27	-2.54	-4.79	0.41
自車線	99.1%	0.9%	3.6%	95.5%	自車線	-0.11	2.51	-2.25	0.74

図-58 検出結果(検出強度 0dBsm・警報幅 3.5m)

### 3. 6. 3 実験⑬: 障害物探知ガイダンスの公道走行実験

障害物探知ガイダンスを除雪トラックに搭載し、公道走行時における車両等障害物の検知を行い、ガイダンス状況の検証実験を行った。

実験は、北海道開発局札幌開発建設部が管轄する国道337号及び231号の維持除雪工事区間で実施し、維持除雪工事受注者協力のもと、オペレータが除雪トラックを回送状態で運転し、除雪トラックと同一車線前方を走行するターゲット用の対象車両及び、路側帯に停車したタ

ーゲット用の対象車両を検出対象とした。走行ルートは道路形状(直線・カーブ)や道路幅員(車線数)の違いによる検出対象の未検知・警報率を検証するため、複数の走行区間を設定した。

実験条件を以下に、公道走行実験走行ルートを図-59に、実験状況を写真-49に、実験中の運転室内状況を写真-50に示す。

- ・レーダ設置角：4度
- ・走行速度：40km/h (法定速度以下)
- ・レーダ検出幅：3.5m、4.0m、5.0m、7.0m
- ・レーダ検出強度：0dBsm、-10dBsm
- ・警報距離：警告 30m・注意 60m

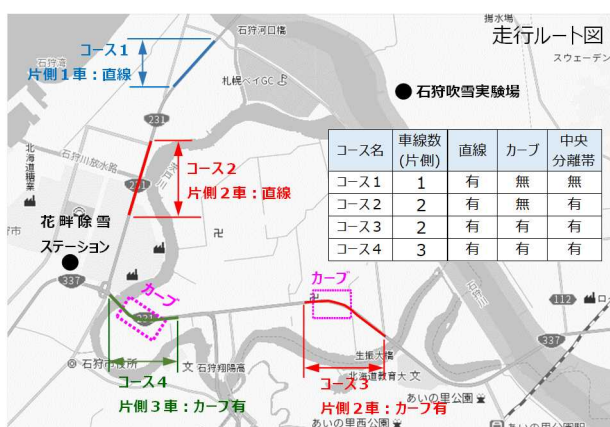


図-59 公道走行実験 走行ルート図



写真-49 実験状況



写真-50 実験中の運転室内状況

表-26 に実験結果一覧を示す。一覧表に記載されている用語の定義は以下の通りである。

- ・前方車両検出率：自車線と同一車線を走る対象車両の検出率
- ・前方車両正警報率：対象車両との距離に応じて正しくガイダンスできた割合
- ・前方車両未警報率：対象車両を警報範囲外として警報しなかった割合
- ・自車線誤検出率：対象車両以外を警報範囲内として警報対象とした割合

表-26 実験結果一覧

コース	検出強度 [dBsm]	警報幅	道路形状	前方車両検出率	前方車両正警報率	前方車両未警報率	自車線誤検出率
1, 2	0	3.5m	直線	96.7%	88.8%	7.9%	0.5%
		4.0m		99.1%	90.7%	8.4%	0.8%
		7.0m		98.8%	94.9%	3.9%	15.1%
1, 2	-10	3.5m	直線	100.0%	89.9%	10.1%	0.3%
		4.0m		100.0%	93.2%	6.8%	0.8%
		7.0m		100.0%	97.4%	2.6%	23.6%
3	0	3.5m	直線	98.7%	95.0%	3.7%	0.0%
			カーブ	98.9%	15.5%	83.4%	0.5%
		5.0m	直線	98.8%	98.5%	0.3%	0.0%
			カーブ	99.0%	43.8%	55.2%	1.0%
3, 4	0	3.5m	直線	100.0%	94.2%	5.8%	0.2%
			カーブ	100.0%	35.7%	64.3%	0.1%
3	-10	4.0m	直線	100.0%	96.3%	3.7%	1.8%
			カーブ	100.0%	65.6%	34.4%	3.4%
4	-10	5.0m	直線	100.0%	98.5%	1.6%	0.1%
			カーブ	100.0%	47.2%	52.8%	0.9%

直線道路コース 1 及び 2 における検出強度-10dBsm 検出幅 3.5m の検出データを図-60 に、検出強度-10dBsm 検出幅 4.0m を図-61 に、検出強度-10dBsm 検出幅 7.0m を図-62 に示す。図-60 の青線は警報幅を示しており、警報幅内に表示されている検出対象は正警報、警報幅外に表示されている検出対象は誤警報を示している。また、検出対象の手前で存在しない物体が検知され、警報対象となったものを誤検出としている。

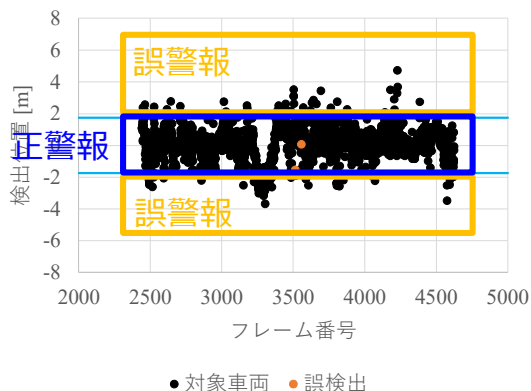


図-60 検出データ (-10dBsm, 3.5m)

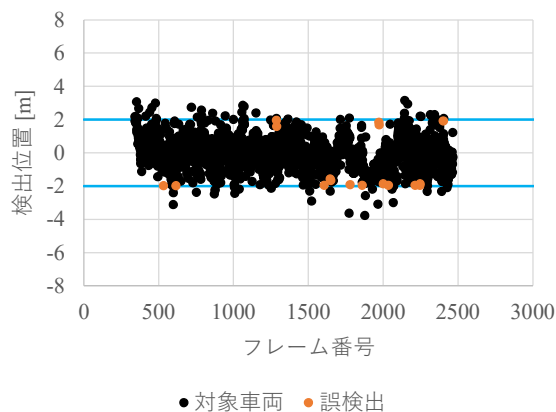


図-61 検出データ (-10dBsm, 4.0m)

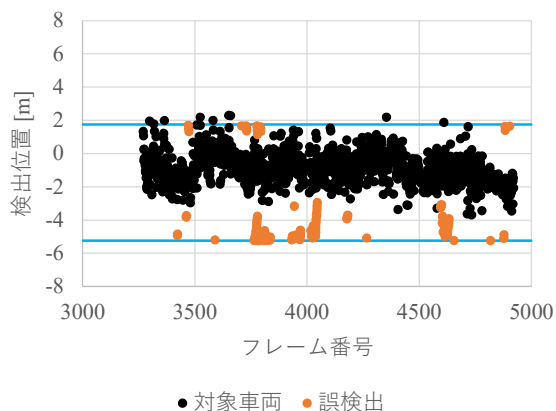


図-62 検出データ (-10dBsm, 7.0m)

直線道路における公道走行実験の結果、検出強度 0dBsm 時平均の前方車両検出率は 98.5%、前方車両正警報率は 91.5%、前方車両未警報率は 6.7%、自車線誤検出率は 5.5%であった。検出強度-10dBsm 時平均の前方車両検出率は 100%、前方車両正警報率は 93.5%、前方車両未警報率は 6.5%、自車線誤検出率は 8.2%であった。検出強度はデフォルト値の 0dBsm よりも-10dBsm に設定した時の方が前方車両検出率及び前方車両正警報率が向上する結果となった。公道走行実験では、除雪車前方を走行する対象車両との車間距離は平均 50m 程度に保たれ、走行速度も除雪車と同調させていたため、比較的安定して対象車両を検出できる状況であった。そのため、より検出状況の良い検出強度-10dBsm の検出結果が良好であったと考えられる。

また、警報幅の違いによる検出結果は、検出強度 -10dBsm の場合、前方車両検出率は全て 100%であったが、前方車両正警報率では、警報幅 3.5m は 89.9%、4.0m は 93.2%、7.0m は 97.4%であった。これはミリ波レーダの角度推定誤差により車両の検出に水平方向のバラツキが生じるため、警報幅を広げることで警報対象の検出数が増え、正警報率が向上したものと考えられる。

図-62 は、路側帯に停車している車両の検出状況を確認するために警報幅を 7m に設定し、除雪車の進行方向に対し右側を 1.75m、路側帯のある左側を 5.25m まで広げたものである。除雪車前方を走行する対象車両及び路側帯に停車した対象車両の検出状況を確認した。

グラフでは路側帯の対象車両は誤検出として表示しているが、車両等の強い反射断面積を持つ静止した対象物の場合、連続して検出されるため誤検出の表示が顕著に表れる結果となった。また、警報幅内の車両以外の道路付属物も誤検出されるため、停止車両のみ検出させる場合は、検出強度を 0dBsm に設定することで、ある程度誤検出を抑制できると考えられる。

カーブを含むコース 3 及び 4 における検出強度-10dBsm 検出幅 3.5m の検出データを図-63 に、検出強度-10dBsm 検出幅 4.0m を図-64 に示す。グラフの青点は直線区間を、黒点はカーブ区間を示している。

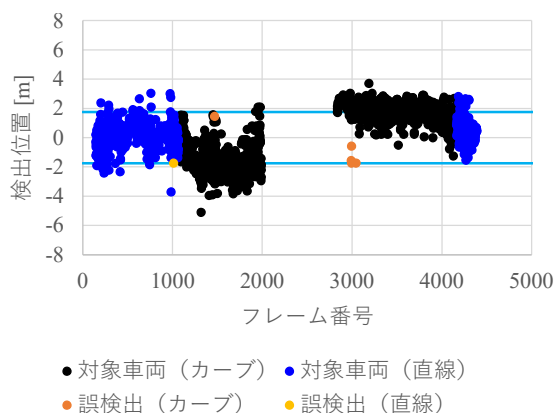


図-63 検出データ (-10dBsm、3.5m、カーブ有)

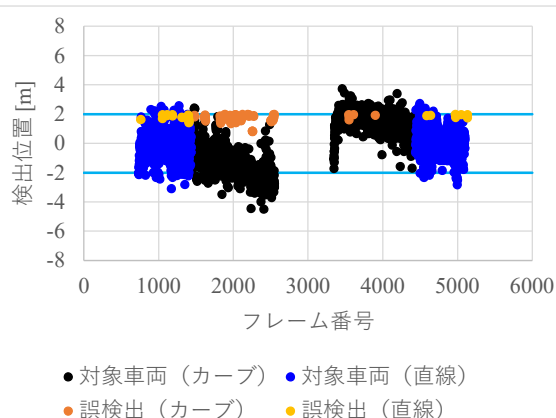


図-64 検出データ (-10dBsm、4.0m、カーブ有)

カーブを含むコースにおける公道走行実験の結果、検出強度-10 dB sm、警報幅 3.5m 及び 4.0m 時の直線及びカーブの前方車両検出率はともに 100%であった。前方車両正警報率は、警報幅 3.5m の直線では 94.2%、警報幅

4.0m の直線では 96.3% とほぼ同等の結果となったが、カーブ区間については、警報幅 3.5m の正警報率が 35.7% に対して警報幅 4.0m の正警報率は 65.6% と大幅に向上した。先行する対象車両がカーブに進入すると、レーダ検出範囲のうち直線状に設定している警報幅の外側に外れるため正警報率が低下する。そこで警報幅を広げることによって正警報率の低下を抑制できるが、警報幅を広げすぎると隣接車線の車両や路側帯の障害物を誤検出する懸念がある。今回のカーブ区間の曲線半径はコース 3 が R=1000、コース 4 が R=500 と比較的緩いカーブであったことから、警報幅 4.0m に設定した時の正警報率もとても良い結果となった。なお、図-63 のフレーム番号 2000~2800、図-64 のフレーム番号 2500~3300 に見られる空白部分は、対象車両がレーダ検出範囲を外れたものであり、検出率の算定には含めていない。

公道走行試験の結果、直線路及びカーブ区間を含むコースでの前方車両検出率は、平均 99.4% と高い結果であった。前方車両の正警報率は、直線路で平均 94.3% と高い結果であったが、カーブ区間では平均 41.6%、最も良い条件で 65.6%、最も悪い条件で 15.5% と、直線路と比べ正警報率が低下する傾向を示し、警報幅の条件により正警報率に開きが見られた。本ガイダンスシステムは直線路を検出範囲として設定していることから、カーブを走行中は対象車両が警報幅から外れてしまうためである。カーブでの正警報率を上げるには警報幅を広げることが有効であるが、一方で誤検出の要因にもなり得るので、適切な警報幅の設定が必要と言える。

カーブ走行時の警報発出には課題はあるものの、複数車線においても除雪車前方の車両を検出し、車両が接近した時の警報は除雪車オペレータの安全運行に有効であることを確認した。

### 3.7 実機導入に向けた障害物探知ガイダンスの改良及び公道検証実験並びに基本仕様の検討

令和 3 年度は、カーブ走行時における障害物探知ガイダンスの警報率改善に関するシステム改修を行った（以下、「前方障害物探知ガイダンス」という）。また、障害物探知ガイダンスのソフトウェアをベースに、除雪車後方から接近する車両を警報するための後方障害物探知ガイダンスを新たに製作した。前方及び後方障害物探知ガイダンスについて、公道走行時における検証実験を行い、実機導入に向けた基本仕様を検討した。

実験⑭：前方障害物探知ガイダンスの公道検証実験

実験⑮：後方障害物探知ガイダンスの公道検証実験

### 3. 7. 1 前方障害物探知ガイダンスの改良

障害物探知ガイダンスは、直線路を想定した検出範囲を設定しているため、カーブ走行中は自車線前方の車両が警報幅の範囲外となり、未検出が発生する課題があった。そこで、GPS 情報によりカーブ判定を行い、カーブ走行時に検出幅や警告幅を自動で変更できるように改良を行った。

カーブ判定処理は、GPS により順次得られる緯度経度情報から一定距離毎の相対方位角を算出し、相対方位角が一定の基準値(以下、「カーブ判定値」という)以上となった場合にカーブと判定する。カーブ判定をした際は、検出幅や警報幅をカーブ方向にスライドさせる補正(以下、「スライド幅」という)を行うことで、カーブ走行時における車両検出率を改善した。なお、カーブ判定値及びスライド幅は、道路線形に合わせて適宜変更する必要があることから、パラメータ設定画面より変更できるものとした。図-65 にカーブ判定処理時の画面表示例を示す。



図-65 カーブ判定処理時の画面表示例

### 3. 7. 2 実験⑭前方障害物探知ガイダンス公道検証実験

前方障害物探知ガイダンスを除雪トラックに搭載し、カーブ走行時の車両検出状況及びガイダンス状況の検証実験を行った。実験方法は実験⑬と同様であるが、カーブ走行時の検証が主となるため、実験場所はカーブ区間を含むコース4で実施した。

カーブ判定値の設定は、曲線半径  $R=500\sim 1000$  の比較的緩やかなカーブに対応するため、相対方位角  $0.4$  度を

基準とし、 $\pm 0.1$  度の範囲でカーブ判定率を検証することとした。スライド幅の設定についても曲線半径  $R=500\sim 1000$  に対応するため  $2.0\text{m}$  とした。

実験条件を以下に、公道走行実験走行ルートを図-59に、実験状況を写真-51に、実験中の運転室内状況を写真-52に示す。

- ・レーダ設置角：4度
- ・走行速度：40km/h (法定速度以下)
- ・レーダ検出幅：3.5m
- ・レーダ検出強度：0dBsm
- ・警報距離：警告 30m-注意 60m
- ・カーブ判定値：0.3度、0.4度、0.5度
- ・スライド幅：2.0m



写真-51 実験状況



写真-52 運転室内状況

実験結果一覧を表-27に、カーブ判定値  $0.4$  度の検出データを図-66に示す。

実験の結果、カーブ判定値  $0.3$  度ではカーブ判定率が  $74.7\%$ 、 $0.4$  度では  $67.4\%$ 、 $0.5$  度では  $57.8\%$  となった。カーブ判定値を小さくするとカーブ判定率が高くなる一方で、直線区間において僅かなハンドル操作により生じる車体の挙動をカーブと誤判定する頻度が高くなる傾向が見られたため、カーブ判定率が概ね  $6\sim 70\%$  担保されている  $0.4$  度に設定することが望ましいと考えられる。

直線区間における前方車両検出率は  $100\%$ 、前方車両正警報率の平均値は  $90.2\%$ 、前方車両未警報率の平均値

は 5.3%、前方車両誤警報率の平均値は 4.5%と過年度における同一条件の実験とほぼ同等の結果となった。

カーブ区間については、カーブ判定値 0.3 度の前方車両検出率が 86.1%であったが、0.4 度では 100%、0.5 度では 99.9%と直線区間と変わらない結果であった。カーブ判定値 0.4 度の前方車両正警報率は 95.9%、未警報率は 0.9%、誤警報率は 3.2%と最も良く、次いで 0.3 度、0.5 度の順となった。過年度のカーブ区間における警報幅 3.5m の正警報率が 35.7%、未警報率が 64.3%、警報幅 4.0m の正警報率は 65.6%、未警報率が 34.3%だったことから、カーブ判定処理を行うことでカーブ区間の未警報を改善し、正警報率を大幅に向上できる事が確認できた。

表-27 実験結果一覧

コース	検出強度 dBsm	警報幅	カーブ判定角度	スライド幅	道路形状	前方車両検出率	前方車両正警報率	前方車両未警報率	自車線誤検出率	カーブ判定率
3	0	3.5	0.3°	2.0m	直線	100.0%	84.8%	7.5%	7.7%	74.7%
					カーブ	86.1%	87.4%	1.3%	11.2%	
			0.4°		直線	100.0%	92.1%	5.4%	2.4%	67.4%
					カーブ	100.0%	95.9%	0.9%	3.2%	
					直線	100.0%	93.7%	3.0%	3.3%	
					カーブ	99.9%	73.4%	1.9%	24.7%	

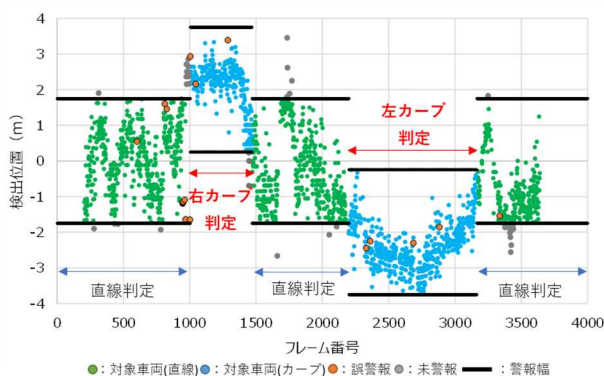


図-66 検出データ (カーブ判定角度 0.4 度)

以上の実験結果を踏まえ、前方障害物探知ガイダンスの基本設定値は、カーブ判定値を 0.4 度、警報幅を 3.5m、レーダ検出強度を 0dBsm、警報距離を警告 30m-注意 60m、スライド幅を 2.0m にすることとした。

### 3. 7. 3 前方障害物探知ガイダンスの基本仕様

これまでの検討結果を基に、前方障害物探知ガイダンスの実機導入に向けた基本仕様を検討した。図-67 にシステム構成図を、表-28 に基本機器構成を、表-29 にガイダンス初期設定値一覧を示す。

前方障害物探知ガイダンスは、情報収集機器であるミリ波レーダ及び GPS、情報処理・表示を行うタブレット

PC、電源装置から構成される。

実機導入に向けた前方障害物探知ガイダンスは、タブレット PC を採用することで、モニタ画面のタッチ操作により容易に設定変更等の操作を可能とした。また、速度情報やカーブ判定に必要な位置・角度情報は、タブレット PC に搭載された GPS 機能または USB 接続された GPS から必要な情報を得られるようにしている。

ガイダンスシステムの電源は、車両のアクセサリ電源に連動し起動するようにしており、タブレット PC のガイダンスソフトウェアも自動立ち上げするよう改良を行った。ガイダンスの初期設定値は、令和 3 年度の実験結果を基に整理しているが、レーダ検出強度及びレーダ検出幅は実験時の設定値よりも引き下げることで検出率を高める設定とした。

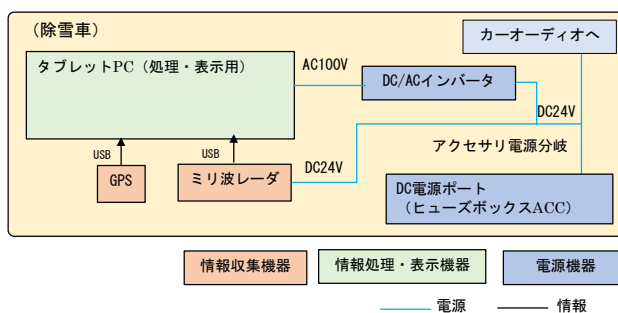


図-67 システム構成図

表-28 基本機器構成

使用機器	要求スペック	動作確認機器	動作確認機器スペック
タブレット (表示・処理用)	OS ; Windows® 10, 11 CPU : インテル® Core™ i5 第 7 世代以上 メモリ ; 8GB ストレージ : ディスクの書き込み頻度が多い為、SSD が望ましい	TOUGHBOOK FZ-G1W	CPU : インテル® Core™ i5-7000U メモリ : 8GB SSD : 256GB
GPS	Windows 対応のドライバーが必須 現在位置の取得等	HiLetgo® VK172 G-MOUSE USB GPS/GLONASS	チップ : Ublox7020
ミリ波レーダ	76GHz 帯のミリ波レーダであること。 ミドルレンジ (60m) において±45 度、ロングレンジ (175m) において±10 度程度の水平視野を確保できること	Delphi 製 DEL-ESR-21	最小検出距離 : 1 m 最大検出距離 : 175m (10dbsm) 100m (0dbsm) 距離方向検出精度 : ±0.5m 同一角度、同一速度に 2 つのターゲットが存在する場合の距離方向分解性能 : 2.5m 水平視野角 : 20 度 同一角度、同一速度に 2 つのターゲットが存在する場合の水平方向分解性能 : 3.5 度 垂直視野角 : 4.2-4.75 度
AC/DC インバータ	DC24V を AC100V に変圧するインバータであること 1500W 以上の電力を安定供給できること 冷却機能を有していること	-	-

表-29 ガイダンス初期設定値一覧

設定値		初期設定値
レーダ検出距離		1.0~204.7m
レーダ検出角度		-51.2deg~51.1deg
レーダ検出強度		-5dBsm
検出対象相対速度		-81.92m/s~81.92m/s
レーダ検出幅		-6(左)~10(右)m
レーダ警告幅		-2.25(左)~2.25(右)m
障害物 種別	人相当	-5dbsm~0dbsm
	車両相当	0dbsm~21dbsm
警告距離 ※走行 速度毎	0km/h	警告:0m 注意:0m
	10km/h	警告:20m 注意:40m
	20km/h	警告:20m 注意:40m
	30km/h	警告:20m 注意:40m
	40km/h	警告:40m 注意:80m
カーブ 判定	50km/h	警告:50m 注意:100m
	判定距離差	3.50m
	判定角度差	0.4deg(曲線半径1000m相当)
	スライド幅	2.0m

除雪トラックにミリ波レーダを常設するにあたり、専用の保護ケースを製作した。ミリ波レーダの設置角度は、実験結果を基に4度を基本とするため、保護ケースには角度調整機能を有した設計としている。ミリ波レーダと運転室に設置するタブレット PC 間の電源及び通信ケーブルの配線は、運転室後方のサービスホールより車内に取り込む。配線にあたっては、低温・着雪等により損傷しないようケーブル保護を施すものとしている。

図-68 に保護ケース外観図を、写真-53 にミリ波レーダ設置状況を、図-69 に車内への配線イメージを示す。

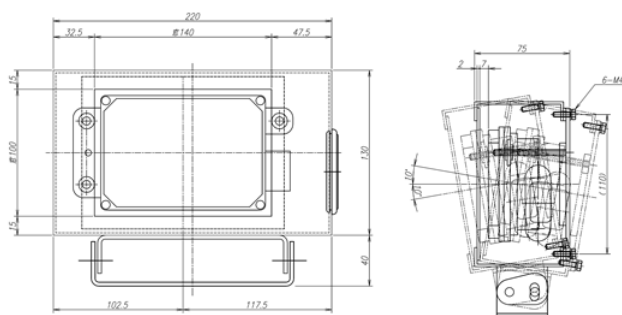


図-68 保護ケース外観図



写真-53 ミリ波レーダ設置状況



図-69 車内への配線イメージ

### 3.7.4 後方障害物探知ガイダンスの製作

北海道開発局は、近年の除雪現場における課題に対応するため、産学官民が連携して取り組む「除雪現場の省力化による生産性・安全性の向上に関する取組プラットフォーム (i-Snow)」を設立し、令和2年度までに一般国道 38 号狩勝峠において、ロータリ除雪車の投雪作業自動化技術及び周辺探知技術による安全対策の公道実証実験を実施している。寒地土木研究所では、ミリ波レーダを用いた障害物探知技術の知見を有していることから、周辺探知技術による安全対策のうち、ロータリ除雪車後方から接近する車両を検出し、オペレータに警告するためのガイダンス（以下、「後方障害物探知ガイダンス」という）を担当した。

令和2年度は、ミリ波レーダをロータリ除雪車後方に後ろ向きに設置し、障害物探知ガイダンスによる後方接近車両の検出状況を確認した。その結果、カーブ走行時において車両の未検出があること、除雪車前方の障害物を想定したガイダンスであるため、左右が逆に描画される等の課題があげられた。そこで、令和3年度は障害物

探知ガイダンスのソフトウェアをベースに、前方障害物探知ガイダンスと同様にカーブ判定処理機能を加え、ガイダンス画面の描画はバックミラーと同様となるよう右側後方から接近する車両を右側に描写させるため、ミリ波レーダに対して、左に位置するものを右に表示するよう左右の位置を反転させて表示した。図-70 に後方障害物探知ガイダンスの表示例を示す。



図-70 後方障害物探知ガイダンス表示イメージ

### 3. 7. 5 実験⑮後方障害物探知ガイダンス公道検証実験

実験は一般国道 38 号狩勝峠の登坂車線区間において、実際の除雪作業を想定し、登坂車線の路側帯寄りを 10km/h 以下の低速にて回送状態で走行させ、登坂車線及び追い越し車線を走行する一般車両等を検出対象とした。

警告幅は、登坂車線と追い越し車線を範囲に含めるため、ロータリ除雪車右方向を 6.5m と 10m に、路側帯側のロータリ除雪車左方向を 2m と 3m に設定した。カーブ判定値の設定は、現地の曲線半径  $R=100$  のカーブに対応するため、相対方位角を 0.8 度とした。ミリ波レーダはロータリ除雪車背面高さ 1.5m の位置に俯角 0 度（水平）で設置した。

実験条件を以下に、警報幅設定イメージを図-71 に、ミリ波レーダ設置状況を写真-54 に、実験状況を写真-55 に、実験中の運転室内状況を図-72 に示す。

- レーダ設置角：0 度
- 走行速度：10km/h 以下
- レーダ検出強度：-10dBsm

- 警告幅：-3m~6.5m、-3m~10m、-2m~10m
- 警報距離：警告 50m-注意 100m
- カーブ判定値：0.8 度
- スライド幅：2.0m

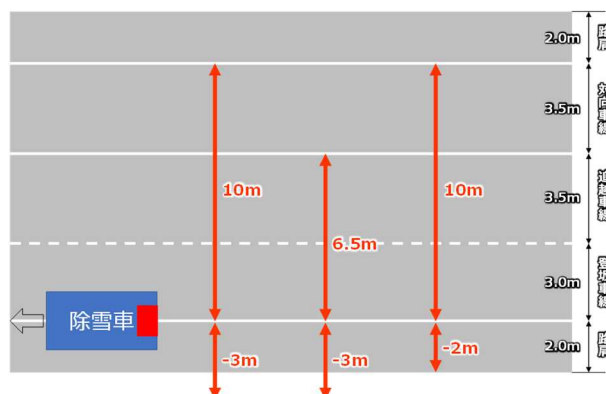


図-71 警報幅設定イメージ



写真-54 ミリ波レーダ設置状況



写真-55 実験状況



図-72 運転室内状況

実験結果一覧を表-30に、警報幅-3m~10mの検出データを図-73に示す。

表-30 実験結果一覧

No	警報幅	道路形状	後方車両検出率	正警報率	未警報率	誤検出率	カーブ判定率
1	-3m ~ 6.5m	カーブ	99.5%	83.5%	8.9%	7.6%	67.1%
		内、大カーブ	100.0%	88.1%	0.0%	11.9%	69.4%
		内、小カーブ	98.8%	77.0%	21.8%	1.3%	62.2%
2	-3m ~ 10m	カーブ	84.3%	88.6%	1.6%	9.8%	66.7%
		内、大カーブ	78.1%	88.1%	0.0%	11.9%	68.0%
		内、小カーブ	98.4%	89.5%	4.4%	6.2%	62.6%
3	-2m ~ 10m	カーブ	84.3%	89.0%	2.5%	8.5%	66.7%
		内、大カーブ	78.1%	89.5%	0.0%	10.5%	68.0%
		内、小カーブ	98.4%	88.0%	6.6%	5.3%	62.6%

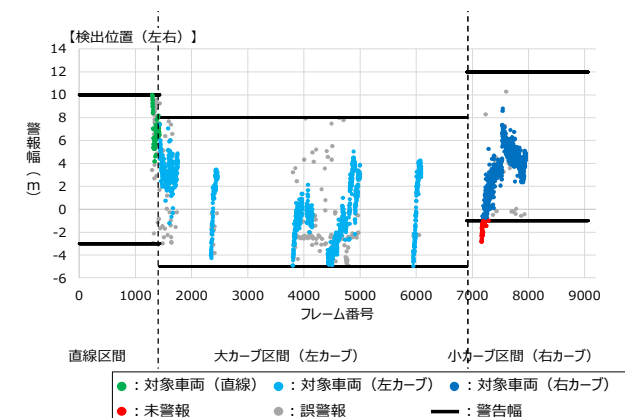


図-73 検出データ (警報幅-3m~10m)

実験の結果、カーブ判定値 0.8 度でのカーブ判定率は平均で 66.8% であり、概ねカーブ判定ができていたことがわかった。後方車両検出率は、警報幅-3m~6.5m では 99.5% と高く、警報幅-3~10m 及び-2~10m では 84.3% であった。しかし、正警報率では警報幅-3m~6.5m の 83.5% よりも

警報幅-3~10m の 88.6%、-2~10m の 89% と右方向の警報幅を広げることで高い正警報率を担保できる結果となった。また、未警報率でも、警報幅-3m~6.5m の 8.9% よりも警報幅-3~10m の 1.6%、-2~10m の 2.5% と大幅に未検出を抑えることができた。

一方で警報幅を広げた影響により、誤検出率が増加する傾向が見られたが、カーブ区間のうち大カーブ区間では誤警報率に差は見られなかったことから、特段の支障はないものとする。カーブ判定時のスライド処理により、概ね警報範囲内に接近車両を検出することができたことから、スライド幅 2m の設定で問題ないことがわかった。

以上の実験結果を踏まえ、後方障害物探知ガイダンスの基本設定値は、警報幅を-3~10m に、レーダ検出強度を-10dBsm、警報距離を警告 50m-注意 100m、カーブ判定値を 0.8 度、スライド幅を 2.0m にすることとした。

### 3. 7. 6 後方障害物探知ガイダンスの基本仕様

後方障害物探知ガイダンスの実機導入に向けた基本仕様については、システム構成図と基本機器仕様は前方障害物探知ガイダンスと同一とした。ガイダンスの初期設定値は、令和 3 年度の実験結果を基に設定した。表-31 に初期設定値を示す。

表-31 ガイダンス初期設定値一覧

設定値		初期設定値
レーダ検出距離		1.0~204.7m
レーダ検出角度		-51.2deg~51.1deg
レーダ検出強度		-5dBsm
検出対象相対速度		-81.92m/s~0m/s
レーダ検出幅		-6(左)~10(右)m
レーダ警告幅		-3.0(左)~10.0(右)m
障害物種別	人相当	-5dbsm~0dbsm
	車両相当	0dbsm~21dbsm
警告距離 ※走行速度毎	0km/h	警告:0m 注意:0m
	10km/h	警告:20m 注意:40m
	20km/h	警告:20m 注意:40m
	30km/h	警告:20m 注意:40m
	40km/h	警告:40m 注意:80m
カーブ判定	50km/h	警告:50m 注意:100m
	判定距離差	3.50m
	判定角度差	0.8deg(曲線半径100m相当)
スライド幅		2.0m



図-74 に車内への配線イメージを、図-75 に運転室内タブレット型 PC 設置イメージを示す。

ミリ波レーダと運転室に設置するタブレット PC 間の電源及び通信ケーブルの配線は、ラジエータグリルからエンジンルーム内に入れ、フレーム内側の他の配線に這わせて車両フレーム内側に沿って固定し、運転席後方のサービスホールより車室内に取り込む。配線にあたっては、センターピンの動きに支障をきたさないように注意するとともに、低温・着雪等によりケーブルが損傷しないようケーブル保護を施すものとしている。運転室内におけるタブレット型 PC の設置位置は、既設の投雪自動制御用タブレット型 PC の横に設置するものとしている。



図-74 車内への配線イメージ



図-75 運転室内タブレット型 PC 設置イメージ

#### 4. 追従走行支援技術の検討

暴風雪による道路の通行止め区間において緊急車両等を通行させる場合、除雪車が緊急車両等を先導しながら通行することがある(図-76)。この時に吹雪等による視程障害が発生し、見通しがきかない状況になると、除雪車及び後続車両は目視による安全確認に頼らざるを得ず、

安全な通行に支障をきたす恐れがある。そこで、周囲探知技術の検討で得られた知見を基に、ミリ波レーダ等のセンサ類により得られる除雪車と後続車両間の車間距離や走行軌跡等の各種情報を活用し、視程障害時においても除雪車が後続車両を安全に先導可能な追従走行支援技術の検討を行った。



図-76 除雪車による緊急車両等の先導

#### 4. 1 追従走行支援ガイダンス試作機の作製

##### 4. 1. 1 後続車両に提供する情報の整理

追従走行支援ガイダンスの試作にあたり、先導する除雪車(以下、「除雪車」という)から後続車両に提供する情報を整理した。追従走行中の除雪車と後続車両の衝突を回避するためには、除雪車の挙動(アクセル・ブレーキ)に関する情報及び、除雪車と後続車両の車間距離に関する情報が必要となる。そのため、除雪車後方にミリ波レーダを設置し、後続車両との車間距離を計測することが必要である。

視界不良時においては、前方の道路が直線かカーブなのか判断できなくなる場合がある。また、除雪車に前方視界を遮られることになる。そのため、前方の道路線形を後続車両に伝達することが危険回避に繋がる。そこで除雪車の走行軌跡及び舵角(車両の向き)を表示することで、簡易的に直線路か左右カーブかを把握できるようにする必要がある。車両の軌跡は、GPS で取得される緯度経度をもとに、直前に測位した位置差をもって把握できる。また、車両の舵角(車両の向き)についても、GPS で取得される緯度経度をもとに算出される方位の活用が可能である。

##### 4. 1. 2 車車間通信技術に関する整理

後続車両へ追従走行支援を行うためには、除雪車と後続車両の通信を確保することが必要となる。車両間の通信を確保する技術については、車両と車両を直接通信する車車間通信技術と携帯電話等外部を介して通信する技術がある。携帯電話通信網の活用は、最も汎用性のある

通信手段であるが、山間部等では不感地帯等もあり通信が確保されない場合がある。一方、無線 LAN は 2.4GHz 帯と 5GHz 帯の電波を利用した通信が広く普及しており、携帯電話通信網と同様に汎用な通信技術と言える。通信距離は、無指向性アンテナを活用した場合、屋外で 100～500m 程度、指向性アンテナでは、障害物がなければ数 km 程度の通信が可能であり、音声、画像、動画の通信が可能のため、車車間通信への適用も可能である。

### 4. 1. 3 追従走行支援ガイダンスの機器構成の検討

表-32 に機器構成一覧、図-77 に機器構成図を示す。

追従走行時は、視程障害時でありかつ前方に除雪車が存在する状況のため、速い速度で走行することはできない。また、視界が悪いため除雪車との距離が離れると追従が困難となる。そのため、機器構成の検討条件は追従時の走行速度を概ね 30km/h 程度、車間距離は 30～50m 程度に設定して機器の選定を行った。

表-32 機器構成一覧

設置場所	情報項目	機器	機器の役割
先導車両 (除雪車)	センサー類	ミリ波レーダ	除雪車後方に設置し、後続車両との車間距離を計測
		GPS受信機	現在位置及び方位を取得
		Webカメラ	除雪車運転席に設置し、前方を撮影
	通信装置	無線LANルータ	除雪車と後続車両の通信
	制御・表示装置	制御用PC	センサー類からの情報を取得し、表示用情報に処理
	電源	AC/DCインバータ	24V直流電源から100V交流電源に変換
表示装置	タブレットPC	先導車両に設置し、情報を表示	
後続車両	表示装置	タブレットPC	後続車両に貸し出し、情報を表示
	センサー類	GPS受信機	後続車両に貸し出し、先導車両に情報を提供

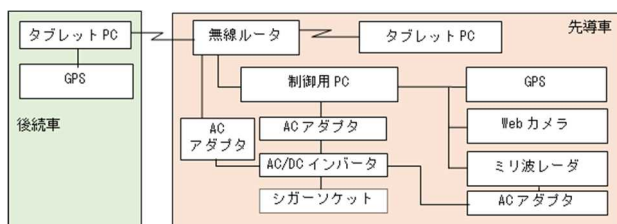


図-77 機器構成図

後続車両との車間距離の計測には気象の影響を受けにくく、近距離から中長距離まで検出可能な 76GHz 帯ミリ波レーダを、車車間通信には、無線規格 IEEE802.11ac に準拠した屋外用指向性アンテナを有する無線 LAN ルータを選定した。

除雪車前方の映像を取得するため、フル HD 規格の WEB カメラを除雪車の運転席に設置することとし、位置情報

及び方位情報を取得する GPS には、L1/CA 信号、SBAS 信号 (DGPS) を受信可能で、NMEA0183 フォーマットを出力できる GPS 受信機を採用した。

後続車両には、情報提供用のタブレット端末と位置情報等を取得するためのタブレット端末に接続可能な GPS 受信機を貸与する想定とし、後続車両に特別な装備を必要としない機器構成とした。

### 4. 1. 4 追従走行支援ガイダンスのシステム構成の検討

図-78 にシステム構成図を示す。

除雪車には、制御用 PC と情報表示用のタブレット端末を、後続車両には情報提供用のタブレット端末を配置し、ミリ波レーダ及び GPS 受信機の情報、Web カメラの映像を制御用 PC のソフトウェアにて処理し、タブレット端末の表示用ソフトウェアにガイダンス情報を配信するシステム構成とする。

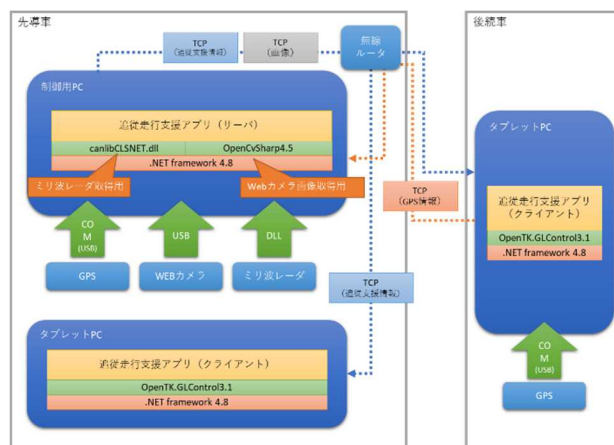


図-78 システム構成図

追従走行支援ガイダンスの表示画面は、後続車両から除雪車を見る視点にするため、除雪車後方に設置したミリ波レーダの情報を後続車両視点に変換するプログラムを作成した (図-79)。また、除雪車がカーブに進入した際は、カーブ判定を行い画面にカーブの方向を知らせる矢印を表示させるとともに、除雪車の走行軌跡を表示させることとした (図-80)。除雪車と後続車両が急接近した時の判断は、先行車との相対速度が維持された場合にあと何秒で衝突するかをあらわす指標 TTC<sup>※8</sup> (Time-To-Collision) にて判断することにした。TTC は、先行車との車間距離を相対速度で除した値であり、国土交通省の技術指針<sup>5)</sup>では衝突被害軽減ブレーキシステムなどにおいて自動ブレーキが作動するタイミングは、乗用車が 1.4 秒以下、大型車で 1.6 秒以下とされていることを参考に、本ガイダンスシステムの初期値は 2 秒とした。

(図-81)

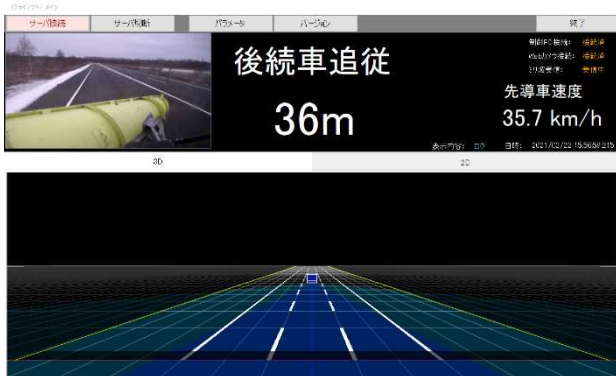


図-79 ガイダンス画面例（通常時）



図-80 ガイダンス画面例（カーブ判定時）



図-81 ガイダンス画面例（急ブレーキ判定時）

#### 4.2 試作機によるガイダンス性能検証実験

ガイダンス試作機を搭載した除雪トラックを後続車両が追従走行した状況において、追従走行支援ガイダンスの誤検知・未検出の有無等の機能検証及び除雪車と後続車両間の通信状況の確認、情報表示の遅延等ユーザーインターフェースの検証を行った。

##### 4.2.1 検証実験概要

実験は寒地土木研究所苫小牧試験道路で行った。

実験箇所平面図及び実験概略図を図-82 に、除雪車への機器設置状況を図-83 に示す。



図-82 実験箇所平面図及び実験概略図



図-83 機器設置状況

実験条件を以下に示す。

- ・ 走行区間：直線部、カーブ部
- ・ 走行速度：10km/h、20km/h、30km/h
- ・ レーダ設置角：0度、2度
- ・ レーダ検出幅：直線部 3.5m(左 1.8m～右 1.8m)  
：カーブ部 13.8m(左 1.8m～右 12m)

ガイダンスシステムは、ミリ波レーダ及びGPSのデータを基に後続車両の有無を判断する。実験で記録された後続車両のデータ解析にあたっては、正検出、未検出、誤検出の判断基準を以下のとおり設定した。

後続車両が存在するにも関わらず、システムが後続車両を認識できなかった場合は未検出とした。除雪車と後続車両双方のGPS座標から算出した車両間距離（以下、

「GPS 車間距離」という) を正値とし、ミリ波レーダが計測した車間距離と比較し、距離差が±5m 以上大きい場合は、誤検出と判断することとした。また、カーブ部においては、後続車両の水平方向 (Y 軸) の検出位置がマイナスに検出された場合は、誤検出と判断することとした (図-84)。未検出及び誤検出以外の検出を正検出とした。

また、除雪車と後続車両間の通信状況の確認は、後続車両の室内状況をビデオ撮影し、通信状況を確認するとともに、タブレット情報と実際の事象を比較し遅延の有無を確認した。

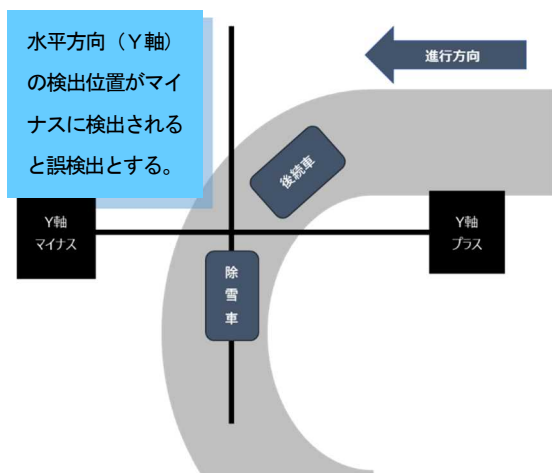


図-84 カーブ部における誤検出の判断

#### 4. 2. 2 検証実験結果

実験結果一覧表を表-33 に示す。直線部の代表例としてNo.1 の結果を図-85 に、カーブ部の代表例としてNo.9 の結果を図-86 に示す。

表-33 実験結果一覧表

No	走行区間	レーダ俯角	除雪車 速度 (km/h)	後続車両 速度 (km/h)	検出結果		
					検出率 (%)		
					正検出	未検出	誤検出
1	直線	2°	30	30	96	4	0
2	直線	2°	30	20	96.8	3	0.2
3	直線	2°	20	30	93.2	5.6	1.2
4	直線	2°	30 ⇒急ブレーキ	30	87.3	8.2	4.5
5	直線	2°	30	30 ⇒急加速	87.4	9.6	3
6	カーブ	0°	10	10	37.8	33.3	28.9
7	カーブ	0°	10	10	49.4	20.4	30.2
8	カーブ	0°	30	30	55	14	31
9	カーブ	0°	30	30	57	21	22

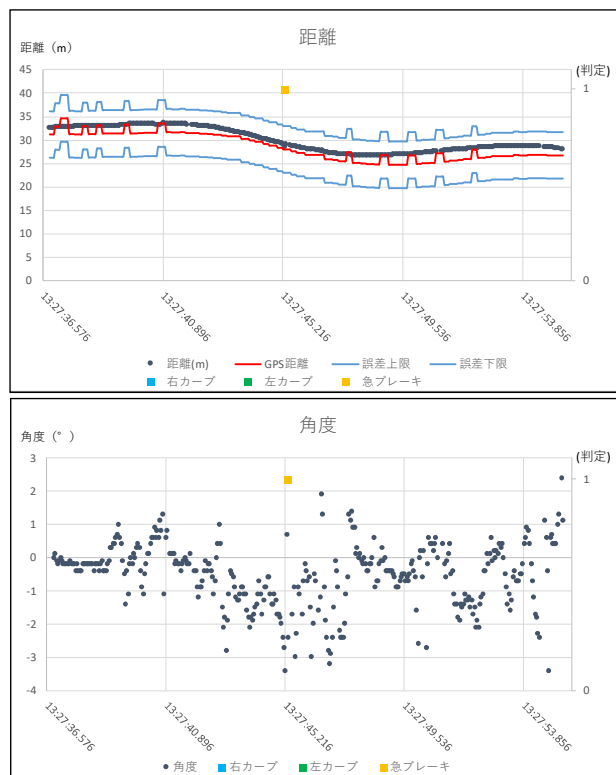


図-85 No.1 実験結果 (直線部代表例)

図-85 上段は追従走行時の時間経過毎の車間距離を表したものである。グラフの赤線はGPS 車間距離を示しており、青線は誤検出の判断基準±5m を示している。ミリ波レーダによる車間距離は、概ね 30m 前後で検出しており GPS 車間距離とも近似した計測結果となった。

下段のグラフは時間経過毎の検出角度を表しており、除雪車から見た後続車両の位置が右側にある場合は+、左側にある場合は-で表示される。直線部では概ね±3° 以内に表示されており、誤ったカーブ判定は無かった。直線部の実験では、正検出率が平均 90%以上と高い傾向を示し、特に誤検出はほぼ見られなかった。実験No.4 及び 5 では、故意に除雪車と後続車両に速度差をつけ、一定の距離に近づいた時点で急ブレーキや急加速の動作を行い、急ブレーキの判定状況を確認した。その結果、TCC は初期値の 2 秒よりも 5 秒に変更した方が、より安全に急ブレーキ情報を提供可能であることを確認した。

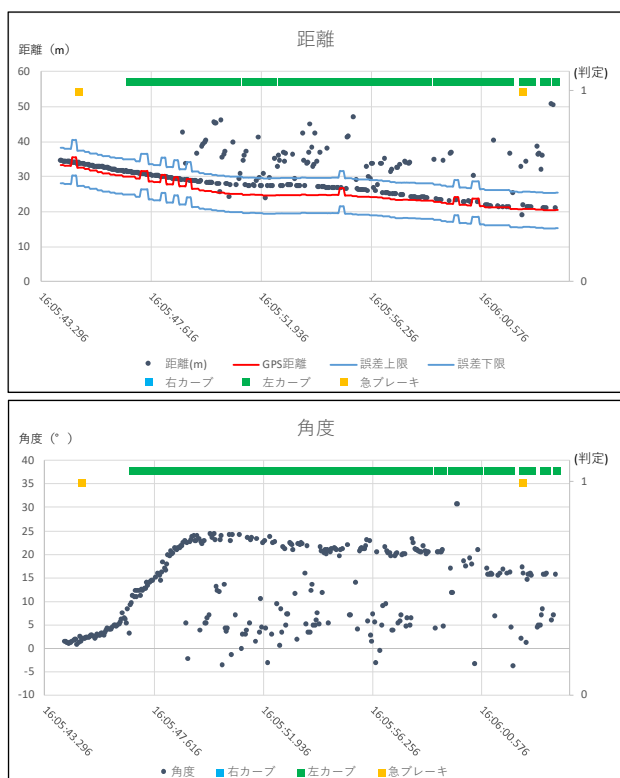


図-86 No.9 実験結果 (カーブ部代表例)

図-86 上段は、カーブ部における車間距離を表したものであり、第2軸の緑色のプロットは左カーブの判定を示している。カーブ進入前はミリ波レーダの車間距離とGPS 車間距離はほぼ近似した結果を示しているが、カーブ進入後は未検出率が 21%、誤検出率が 22%と顕著になっている。これはカーブにより後続車両がミリ波レーダの検出範囲から外れることで未検出が生じたものと、カーブ区間に設置されているガードレールを誤検出したものが考えられる。しかしながらカーブ部の正検出率は 57%と一定の検出は可能であった。

下段のグラフはカーブ部における検出角度を表しており、 $\pm 10^\circ$  を超える位置に後続車両が検出されるとカーブと判定される。カーブに進入し検出角度が $+10^\circ$  を超えた以降は継続的に左カーブの判定が可能であった。カーブ部の実験では、実験No.6 及び 7 の正検出率が平均 44%と低く、実験No.8 及び 9 の正検出率は平均 56%と改善している。これはNo.6 及び 7 の実験では除雪車及び後続車両の走行速度を 10km/h と低速としたことで車間距離が概ね 10m~20m と近くなりすぎたことが影響していると考えられる。No.8 及び 9 では走行速度を 30km/h、車間距離を概ね 30m と直線部と同様の条件とすることで、正検出率が改善する傾向が見られた。

除雪車と後続車両間の通信状況は、一連の実験を通して良好であり、ガイダンス情報の遅延等も確認されなかつ

たことから、ユーザーインターフェースについては問題なく情報が得られることを確認した。追従走行実験時の最大車間距離は 80m 程度だったことから、無線 LAN の通信可能範囲を検証したところ、200m 以上は通信可能であることが確認できた。

ガイダンス試作機による検証実験の結果、試験道路における直線部とカーブ部において追従走行支援ガイダンのガイダンス情報により、除雪車と後続車両の追従走行が可能であることを確認した。

#### 4.3 追従走行支援ガイダンの基本仕様の検討

令和 3 年度は、カーブ走行時における追従走行支援ガイダンの検出率改善に関するシステム改修を行った。また、追従走行支援ガイダンの実機導入に向けた基本仕様を検討した。

##### 4.3.1 追従走行支援ガイダンの改良

追従走行支援ガイダンス試作機のカーブ区間判定は、ミリ波レーダから得られる先導車に対する後続車の角度、または、GPS により得られる先導車と後続車の緯度経度から算出される角度のいずれかが判定値以上となった場合に先導車の走行経路がカーブであると判定していた。そこで、前方障害物探知ガイダンスにおけるカーブ判定処理と同様のロジックを用いて、GPS から得られる位置情報を使用し直前の GPS 情報との角度差により判定するものに改良した。

##### 4.3.2 追従走行支援ガイダンの基本仕様

これまでの検討結果を基に追従走行支援ガイダンの実機導入に向けた基本仕様を検討した。図-87 にシステム構成図を、表-34 に基本機器構成を、表-35 にガイダンス初期設定値一覧を示す。

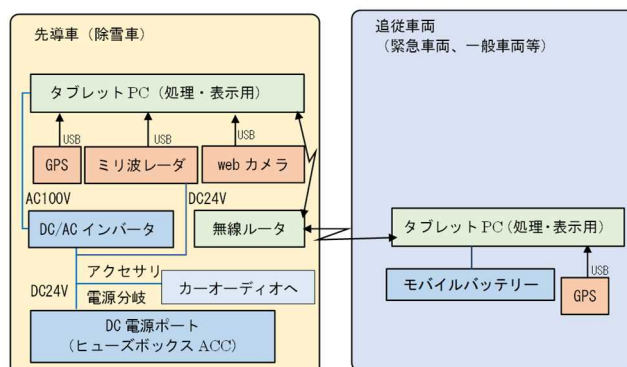


図-87 システム構成図

表-34 基本機器構成

使用機器	要求スペック	動作確認機器	動作確認機器スペック
Web カメラ	Windows で使用可能な 30FPS 以上のカメラ	ロジクール製 C920R	最大30 フレーム/秒 動画撮影：フルHD 1080p (1920× 1080)* Windows® 10 以降、Windows® 8、 Windows® 7
タブレッ ト (表示 処理用)	OS；Windows® 10、11 CPU：インテル® Core™ i5 第7世代以上 メモリ；8 GB ストレージ；ディスク の書き込み頻度が多い 為、SSD が望ましい	TOUGHBOOK FZ-G1	CPU：インテル® Core™ i5-7000U メモリ；8GB SSD：256GB
GPS	Windows 対応のドライ バーが必須 現在位置の取得等	HiLetgo® VK172 G- MOUSE USB GPS/GLONASS	チップ：Ublox7020
無線 ルータ	屋外設置が可能で、外 部指向性アンテナを有 しているもの。 Wifi 6 は対応 PC が限 られるため対象外とす る。	WAVLINK Wifi 無線 LAN 中継器 屋外 アクセスポ イント AP 機 11ac	屋外用 11ac 対応・デュアルバンド無 線 LAN アクセスポイント/中継器。 無線規格 IEEE 802.11 ac/a/b/g/n 転 送速度：867Mbps (11ac)、 300Mbps (11n)、54Mbps (11a、11g)、 11Mbps (11b) 4つの外部アンテナ(7dbi)を搭載
ミリ波 レーダ	76GHz 帯のミリ波レ ーダであること ミドルレンジ (60m) において±45度、ロン グレンジ (175m) において±10度程度 の水平視野を確保でき ること	Delphi 製 DEL-ESR-21	最小検出距離：1 m 最大検出距離：175m (10db) 100m (0db) 距離方向検出精度：±0.5m 同一角度、同一速度に2つのターゲッ トが存在する場合の距離方向分解性 能：2.5m 水平視野角：20度 同一角度、同一速度に2つのターゲッ トが存在する場合の水平方向分解性 能：3.5度 垂直視野角：4.2-4.75度
AC/DC イン バータ	DC24V を AC100V に変 圧するインバータであ ること 1500W 以上の電力を安 定供給できること 冷却機能を有している こと	-	-

表-35 ガイダンス初期設定値一覧

項 目	初期設定値	
ミリ波レーダ 後続車判定	レーダ検出距離	1.0~204.7m
	レーダ検出角度	-51.2deg~51.1deg
	レーダ検出強度	0dBsm
	検出対象相対速度	-81.92m/s~81.92m/s
	相対Y軸座標(左)	-12m
	相対Y軸座標(右)	12m
ミリ波レーダ 急ブレーキ判定	TTC	5.0
カーブ 判定	判定距離差	3.50m
	判定角度差	3.5deg
	スライド幅	2.0m

除雪トラックにミリ波レーダを設置するための専用保護ケースは、前方障害物探知ガイダンスと同様のものを利用し、除雪トラック後方の荷台に地上高 185cm の位置に設置するものとした。ミリ波レーダと運転室に設置するタブレット PC 間の電源及び通信ケーブルの配線は、運転室後方のサービスホールより車内に取り込んだ。Wifi アンテナは運転室の屋根上に設置し、配線はミリ波レーダと同様に運転室後方のサービスホールより車内に

取り込んだ。配線にあたっては、低温・着雪等により損傷しないようケーブル保護を施すものとした。

障害物探知ガイダンスの試作機は、先導車(除雪車)に制御用 PC と情報表示用のタブレット端末が必要であったが、実機導入に向けてタブレット端末のみで制御と情報表示が可能となるよう改良した。タブレット端末には、速度情報やカーブ判定に必要な位置・角度情報を取得するための GPS 及び車両前方の映像を撮影するための web カメラを接続する。なお、後続車両にも先導車と同様のタブレット端末を搭載するものとしている。

図-88 に機器設置状況を、図-89 に後続車両タブレット端末搭載イメージを示す。



図-88 機器設置状況



図-89 後続車両タブレット端末搭載イメージ

## 5. まとめ

本研究では、暴風雪による視程障害時でも安全に除雪作業が行える運行支援技術として、自車位置を推定し車線内を走行するための車線逸脱防止技術と、除雪車周囲の人・車両・道路工作物などの衝突事故を防ぐための周囲探知技術、更に暴風雪に伴う通行止め時に除雪車に先導される緊急車両等の後続車両の安全性を確保するための追従走行支援技術の開発に取り組ん

だ。

これまでの研究成果を以下に要約する。

- 1) 車線逸脱防止技術については、VRS-GNSS における積雪による影響を検証し、アンテナへの積雪が 0cm の場合、測位の変位は約 2cm 以内に収まるが、積雪が 10cm の場合は約 60cm まで変位が広がり、測位精度が低下することを確認した。このことから GNSS アンテナ部の積雪対策を検討する必要があることがわかった。
- 2) トンネル出口など GNSS 測位精度が低下する箇所における補助的な測位方法として、RFID を用いた自車位置測位実験を行った。道路上を想定した横断方向 15m、縦断方向 30m の計測エリアでは、測位誤差が 1m 未満となり、車線逸脱防止に使用するうえで、自車位置測位に適用可能な精度を有していることを確認した。
- 3) 雪の影響が明らかになっていない LiDAR を用いた自車位置測位実験を行った。路肩に雪が堆積している状況において、測位誤差は約 15cm であり、車線逸脱防止に使用するうえで、自車位置測位に適用可能な精度を有していることを確認した。
- 4) 磁気マーカシステム等を用いた自車位置推定システムを除雪車に搭載し、自車位置測位実験を行った。除雪作業による振動を受けても、測位誤差±50cm 以内で測位可能であり、車線逸脱防止に使用するうえで、自車位置測位に適用可能な精度を有していることを確認した。
- 5) 自車位置推定システムの車線走行支援ガイダンスを試作し、除雪車の前方視界を遮断した状態でガイダンス情報に従って走行し、車線走行支援ガイダンスは、目標測位誤差(±50cm 以内)で自車位置を表示し、車線逸脱することなく除雪作業が可能であることを確認した。
- 6) 準天頂衛星みちびきの測位精度を検証するため、札幌市内及び近郊において移動体計測を行った。測位精度の指標となる HDOP 値は、センチメートル級測位補強情報の測位精度を担保する 1.1 以下とはならなかったものの、市街部・峠部では、HDOP 値が 1.5 前後で推移する区間の割合が多く、それ以外の区間でも HDOP 値が概ね 3 以下の占める割合は多いことから、車線走行支援に適用可能な測位精度を有していることを確認した。
- 7) 車線逸脱防止技術として、磁気マーカシステム等を用いた自車位置推定システムと準天頂衛星みちびきによる測位情報を組み合わせた車線走行支援ガイダンスの基本仕様をとりまとめた。
- 8) 周囲探知技術については、市販車用ミリ波レーダ(76GHz 帯)を除雪車に搭載し、視程約 50m 以下の吹雪時

に、除雪作業による振動を受けても、100m 以上手前から車両を探知可能であることを確認した。

また、晴天時に人を対象とした検出実験で、人がしゃがんだ状態や腹ばいの状態では、検出できない場合があることを確認した。

9) ミリ波レーダを用いた障害物探知ガイダンスを試作し、これを搭載した除雪車の前方視界を遮断した状態で走行して、ガイダンス情報に従って除雪車を停止させる実験を行った。ガイダンス情報に障害物の未探知・誤探知はなく、オペレータはガイダンス情報に従いながら、障害物の 10m 以上手前で安全に停止可能であることを確認した。

10) 障害物探知ガイダンスの試作機を改良し、ガイダンス性能を検証するとともに、除雪トラックの公道走行時における適用性の検証実験を行った。障害物探知ガイダンスは、複数車線においても除雪車前方の車両を検出し、車両が接近した時の警報は除雪車オペレータの安全運行に有効であることを確認した。

11) 障害物探知ガイダンスの実機導入に向け、課題であったカーブ走行時の警報率を改善するシステム改良等を行い、除雪トラックを対象とした前方障害物探知ガイダンスとロータリ除雪車を対象とした後方障害物探知ガイダンスを製作するとともに公道検証実験を行い、システムの初期パラメータ値を設定するとともに、使用する機器類の性能及び設置方法を整理し、基本仕様をとりまとめた。

12) 追従走行支援技術については、除雪車と後続車両の車車間通信に適応可能な通信技術を選定するとともに後続車両へ提供する情報を整理した。追従走行に必要な機器構成及びシステム構成の構築を行い、追従走行支援ガイダンスを試作した。試験道路において後続車両との通信状況の確認及びガイダンス性能を検証し、ガイダンス情報により除雪車と後続車両の追従走行が可能であることを確認した。

13) 追従走行支援ガイダンスの実機導入に向け、カーブ走行時における検出率改善に関するシステム改良等を行い、使用する機器類の性能及び設置方法を整理し、基本仕様をとりまとめた。

今後、車線逸脱防止技術、周囲探知技術及び追従走行支援技術については、北海道開発局及び関係機関に対し実用化に向けた技術提案を行う等、研究成果の普及に努めるとともに、後継研究においてこれら技術の完成度を高めつつ、除雪技術の更なる高度化に向けた研究に取り組む予定である。

- ※1:VRS方式 (Virtual Reference Station : 仮想基準点方式)
- ※2:RFID (Radio Frequency Identifier : ICタグを利用した近距離無線通信技術)
- ※3:LiDAR (Light Detection and Ranging : 光による検知及び測距技術)
- ※4:磁気マーカシステム : MI センサを用いた自動運転用磁気マーカシステム
- ※5:TDOA方式 (・ : 到達時間差方式)
- ※6:IMU (inertial measurement unit : 慣性計測装置)
- ※7:ROS (Robot Operating System : ロボット用ソフトウェアプラットフォーム)
- ※8:TTC (Time-To-Collision : 衝突予測時間)
- ※9:DOP (Dilution of Precision : 測位精度劣化係数)

## 参考文献

- 1) 国土交通省 : 国土交通省防災業務計画 第7編雪害対策編 (H27.7改) <http://www.mlit.go.jp/common/001036313.pdf> (2021年6月17日確認)
- 2) 北海道総合開発計画 (H28.3.29) <http://www.mlit.go.jp/common/001128021.pdf> (2021年6月17日確認)
- 3) 自動運転ソフトウェアのオープンソースの公開 (H27.8.25) <https://www.pdsl.jp/fot/autoware/> (2021年6月17日確認)
- 4) 道の駅を拠点とした自動運転サービス「中間とりまとめ」 (平成31年1月23日)
- 5) 国土交通省自動車交通局 : 前方障害物衝突軽減制動装置の技術指針 (H23.6.30)