吹雪時の視程急変予測技術に関する研究

研究予算：運営費交付金
研究期間：令 5～令 7
担当チーム：雪氷チーム
研究担当者：西村敦史、松下拓樹、大宮哲、
國分徹哉、越國一九、武知洋太

【要旨】
先行研究[1)]で開発された吹雪時の視程急変推定技術では、その適用範囲が X バンド MP レーダの観測データが存在する地域における「降雪粒子」を要因とした視程障害の検知に限定されていた。そこで、本研究では「降雪粒子」に加えて「地吹雪粒子」を要因とした視程急変の検知や予測に適用可能な手法を、実用的観点から考案した。この手法による視程急変の実証試験を実施し、顕著な吹雪事例に対する予測精度を検証した結果、実用面において大きな問題はないことを確認した。さらに、道路利用者及び道路管理者の情報ニーズを調査し、視程急変予測システムの開発を想定した情報提供手法の素案を構築した。
キーワード：吹雪、地吹雪、視程障害、急変、X バンド MP レーダ、高解像度降水ナウキャスト

1. はじめに

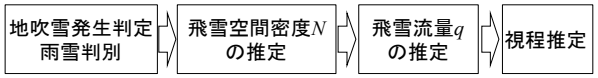
吹雪による視程障害は、冬期の道路交通において多重衝突事故や長時間にわたる車両滞留の原因となり、人的被害のみならず、人流・物流の停滞による経済的損失をもたらす。寒地土木研究所では、吹雪災害の防止軽減に向け、道路利用者の吹雪時における安全な交通行動支援のため、北海道内を対象とした「吹雪の視界情報」[2)]として、旧市町村毎に区分したエリアの 1 時間毎の平均的な視程を予測し提供している。一方、吹雪時の視程は時空間的に大きく変動する場合があり、より細かい時空間分解能の予測情報が求められる。本研究では、視程急変の予測に適用可能な手法について、実用面にも考慮した上で検討した。

2. 吹雪時の視程急変予測技術の開発

2.1 気象条件に基づく吹雪視程推定技術の現状

「吹雪の視界情報」[2)]の視程推定手法[3)]では、視程は**図－1** 示すフローで気象条件に基づき推定される。なお、飛雪空間密度 N (g/m^3)とは単位空間に存在する飛雪粒子の質量、飛雪流量 q (g/(m^2/s))とは単位断面積を単位時間に通過する飛雪粒子の質量である。

吹雪時の視程 $V$is (m)と飛雪流量 q (g/(m^2/s))の間には強い相関関係がある[3)]。吹雪粒子の主な運動形態には転動、跳躍、浮遊の 3 種類があり、このうち空気中に浮遊する雪粒子が卓越する浮遊層の飛雪流量は、飛雪空間密度 N (g/m^3)と風速 V (m/s)の積（$q=N\cdot V$）で表すことができる。本手法では松澤ら[4)]による式(1) を用いて、任意の高さ z における飛雪空間密度 N(z)を求め、式(2)よりその高さの風速 V(z)を乗じることで飛雪流量 q(z)を算出する。式(1)の第 1 項は降雪、第 2 項は地吹雪による飛雪空間密度にそれぞれ該当する。次に、武知ら[5)]による式(3)を用いて視程 $V$is に換算する。



図－1 吹雪雪時の視程推定手法の概要

$$N(z)=\frac{P}{w_f}+\left(N_t-\frac{P}{w_f}\right)\left(\frac{z}{z_t}\right)^{-\frac{w_b}{ku_*}} \quad \cdots\cdot(1)$$

$$q(z) = N(z)\cdot V(z) \quad \cdots\cdot(2)$$

$$V\text{is}=10\text{-}0.886\log(q(z))+2.648 \quad \cdots\cdot(3)$$

ここで、P は降雪フラックス(g/(m^2/s))、 N_tは基準高さ z_t の飛雪空間密度(g/m^3)、 w_fは降雪粒子の落下速度(m/s)、 w_bは浮遊雪粒子の落下速度(m/s)、 k はカルマン定数(=0.4)、 u*は摩擦速度(m/s)である。

また、本推定手法では既往研究[3)4)]を参考とし式(1)の変数に以下の値を与えている。

w_f= 1.2 (m/s) 、w_b = 0.21 (m/s) 、z_t= 0.15 (m) 、
u_* = 0.036 V_{10} (m/s) 、
【降雪あり（Ph≧0.4 mm/h）の場合】
T < -3℃
N_t = 0.116 exp (0.309 V_{10}) (g/m^3) ····(4)

-3℃≦T<2℃

$$N_t = 0.016 \exp(0.400\, V_{10})\ (\mathrm{g/m^3}) \quad \cdots\cdot(5)$$

【降雪なし（Ph<0.4 mm/h）の場合】

$$N_t = 0.053 \exp(0.242\, V_{10})\ (\mathrm{g/m^3}) \quad \cdots\cdot(6)$$

ここで、V_{10} は高さ 10m の風速 (m/s)、Ph は降雪強度 (mm/h)、T は気温（℃）である。なお、Ph は降雪を降水に換算した値とする。本研究ではドライバーの目線の高さを考慮し、視程を推定する高さ z は地上から 1.2m と 3.0m を基本とした。

「吹雪の視界情報」[2]では、気象データの予報値（数 km メッシュ・1 時間毎）を利用しており、細かい視程の変動までは予測できない。

2.2 吹雪時の視程急変推定技術の現状

先行研究 [1]において、北海道内に配備されている 2 基（石狩局・北広島局）の X バンド MP レーダ（以下、X-MP）のうちの 1 基で観測されたデータを活用することにより、地上の風向風速分布および上空からの降雪粒子の落下と移流を考慮した地上における降雪強度を推定することで、「降雪粒子」を要因とした地上の飛雪流量と視程を 5 分毎に 250m メッシュで推定可能であることが確認された（**図－2**）。ただし、この手法の対象は、X-MP の観測範囲における「降雪粒子」を要因とした視程障害に限定されている。

2.3 実用性を考慮した吹雪時の視程急変予測技術案

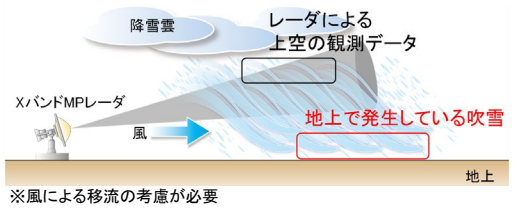
本研究では、地吹雪粒子を考慮した吹雪時の視程推定手法（2.1 節）と降雪粒子を考慮した視程急変推定技術（2.2 節）を基に、降雪粒子及び地吹雪の両方に起因した視程急変を予測する手法について、リアルタイムに運用する実用的な観点から検討し、その素案を新たに考案した。考案した手法の概要は、**図－3** の推定フローに示す通りである。その詳細は、以下で説明する。

2.3.1 風向風速の分布

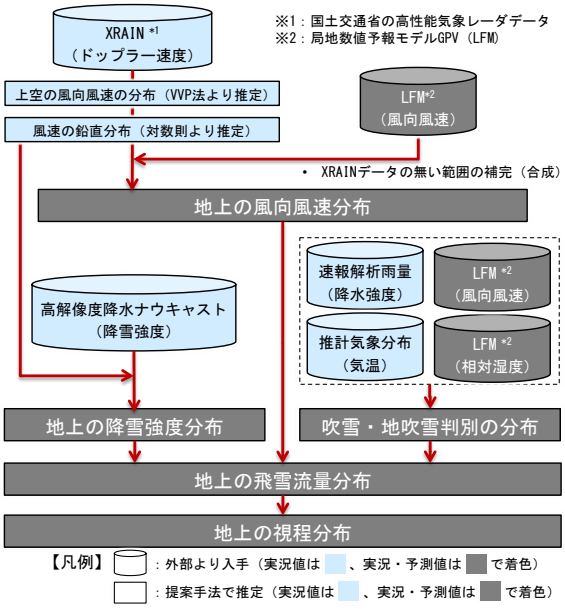
本研究では、既往研究 [1]による手法を参考に 1 基の X-MP（石狩局）で得られるドップラー速度から VVP 法 [6]により風向風速の分布を推定する手法を採用した。これにより、上空の代表高度を 1000m とし、最初に上空 1000m における風向風速の 250m メッシュでの面的分布を推定した。次に、風速の鉛直分布について、既往研究 [1]による解析結果を参考に、高度 1000～500m の範囲では 1000m の高度低下で風速が 0.5m/s 減少すると仮定し、高度 500m より下の風速分布は対数則に従うとみなして、地上 10m の風速を推定した（**図－3**）。なお、大気が中立状態にあると仮定し、地表面粗度は国土数値情報の土地利用細分類に基づく道路橋耐風設計便覧 [7]で示されている値を設定した。さらに、視程推定に用いる地上高さ 1.2m と 3.0m の風速は、高さ 10m の風速から対数則により、雪面粗度を 1.5×10^{-4}m と仮定して推定した。ただし、市街地と森林の地表面粗度 [7]は 0.3m とした。

2.3.2 降雪強度の分布

X-MP による降水強度分布の実況は 5 分毎に更新されており、既往研究 [1]によると、降雪粒子の上空からの落下と移流を考慮することで約 14 分先の地上の吹雪視程の予測が可能であることが示されているが、予測された視程を基に交通行動を変更するには十分な時間とは言いがたい。一方、高解像度降水ナウキャストでは、X-MP の降水強度分布を含めた観測データにより、1 時間先までの降水強度（250m メッシュ、ただし 35 分以降先は 1km メッシュ）が 5 分毎に更新されており、X-MP と同程度の時空間分解能で降水強度の予測値が利用可能である。そこで本研究では、降雪強度分布のデータには高解像度降水ナウキャストを採用することとした。ただし、当該データは地上における降水強度分布であり、降雪粒子としての落下や移流を考慮したものではない。そこで、上空 1500m から降雪粒



図－2 吹雪（降雪粒子のみ）時の視程急変推定技術イメージ



図－3 吹雪時の視程急変予測手法の概要

子として落下し風により移流すると仮定し、風向風速の鉛直分布（2.3.1 項）と降雪粒子の落下速度（一律 1.2m/s と仮定）より、既往研究 [1]と同様に移流後の地上の降雪強度分布を推定した（**図－3**）。

2.3.3　飛雪流量及び視程の推定

2.3.1 項、2.3.2 項で推定した地上の風速や降雪強度に基づき、降雪及び地吹雪に起因する地上の高さ 1.2m 及び 3.0m の飛雪流量を式(2)から推定し、式(3)に基づき飛雪流量から視程へ換算する。なお、地吹雪に起因する飛雪流量は、風速や気温、相対湿度、降雪有無やその履歴などの条件に基づき地吹雪の発生有無を判別 [3]し、その結果に基づき推定する（**図－3**）。

2.3.4　予測情報の仕様

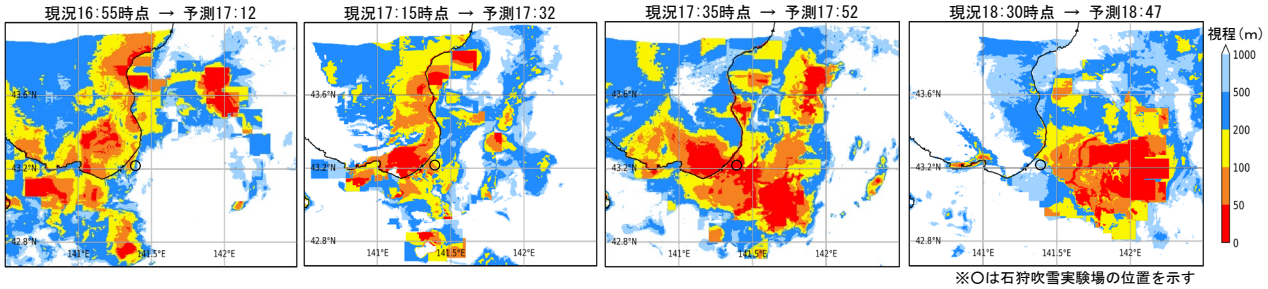
視程急変予測において主要な入力データとなる X-MP の格子点間隔（250m メッシュ）、高解像度降水ナウキャストの格子点間隔（250m～1km メッシュ）及び予測時間（60 分先まで 5 分間隔）より、予測する視程の格子点間隔は 250m メッシュ、予測時間は落下移流時間（17 分）を考慮した 77 分先までの 5 分間隔に設定した。また、予測の更新頻度は、入力データの更新間隔から 5 分毎に設定した。

2.4　視程急変予測技術案の実証試験

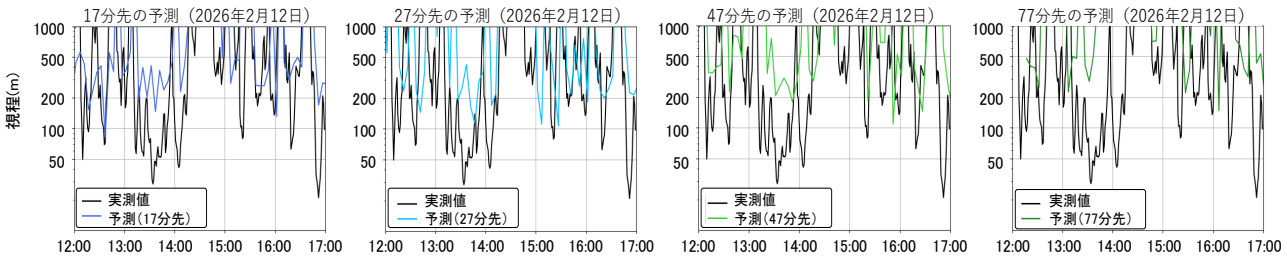
考案した視程急変予測技術（**図－3**）が、リアルタイムで予測可能であるかを検証するため、実際にリアルタイムで予測演算し視程の予測データを保存蓄積する実証試験を行った。予測演算する範囲は X-MP（石狩局）の観測範囲とその周辺（北緯: 42°40'00～43°59'52.5"、東経: 140°30'00～142°29'48.8）とし、実施期間は令和 7 年 12 月 22 日～令和 8 年 2 月 27 日とした。

実証試験の結果、考案した吹雪視程急変予測手法で用いた入力データを基に、5 分毎に 77 分先までの 250m メッシュでの視程予測が運用可能であることを確認した。また、試験運用では、高解像度降水ナウキャストの現況値（0 分）と予測値（10 分、30 分、60 分先）に基づく予測結果（17 分先、27 分先、47 分先、77 分先）を履歴データとして蓄積保存し、顕著な吹雪事例を対象に予測精度を検証した（**図－4、図－5**）。

札幌市内を含めた広い範囲で急激な視程障害が発生した 2026 年 1 月 13 日 18 時頃、寒地土木研究所の石狩吹雪実験場（北緯: 43° 13′、東経: 141° 24′）においても 17 時 30 分～18 時 30 分頃の期間に視程 100m 未満の厳しい視程障害が断続的に発生していた。**図－4** は、視程急変予測の面的な分布を検証することを目的に、実際に視程急変が発生した時刻の前後を含めた 16 時 55 分、17 時 15 分、17 時 35 分、18 時 30 分時点の現況値に基づいた 17 分先の予測結果である。**図－4** より、石狩吹雪実験場（〇印）における予測結果は、17 時 30 分頃から視程が 100m 未満となり、18 時 30 分以降の 18 時 47 分には視程が回復することを示しており、実際の状況と概ね一致することを確認した。また、**図－5** は、視程急変予測のピンポイントでの時系列変化を検証することを目的に、石狩吹雪実験場で視程急変が連続して数時間に渡って発生した 2026 年 2 月 12 日について、予測結果と後方散乱型視程計による実測値を時系列で比較した結果である。**図－5** より、17 分先、27 分先および 47 分先を予測した結果では、視程



図－4 高さ 1.2m の視程分布の予測結果（令和 8 年 1 月 13 日の現況値に基づく 17 分先の予測）



図－5 令和 8 年 2 月 12 日における高さ 3.0m の視程（予測値と実測値：石狩吹雪実験場）

が低下するタイミングが概ね現況と一致する傾向が見られたが、77 分先の予測では、視程低下の程度やタイミングなどが実際の状況と差が生じる傾向も見られた。視程 200m 未満の視程障害が発生した時間帯に着目すると、17 分先の予測値では 12 時 00 分～12 時 30 分に発生した視程 200m 未満の事象を概ね適確に予測できていた。さらに、13 時 00 分～14 時 00 分においても視程 200m 未満の発生を 17 分先や 27 分先の予測値でも連続的ではないが予測できていた。ただし、視程の予測値は実測値に比べ大きい傾向が見られた。この要因には、5 分未満の短時間の強風を 5 分間隔の推定値では捉えることができなかったことなどが考えられる。

3. 視程急変予測情報の提供手法の構築について

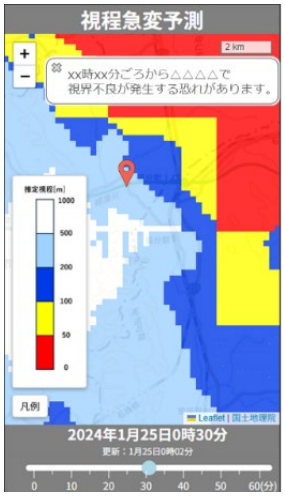
3.1 視程急変予測情報に関するニーズ調査

3.1.1 道路管理者へのヒアリング調査

予測範囲に想定される札幌近郊の道路管理者（北海道開発局札幌道路事務所、札幌市、当別町）へ吹雪時の道路管理や視程急変予測情報に関するヒアリング調査を実施し、郊外部の道路において地吹雪による確実な現況把握に苦慮していることを把握した。このため、今回考案した視程急変予測技術は、道路管理者の現況把握を支援できる可能性があると考えられるが、予測時間がやや短いため、道路管理の準備や判断に直接情報を活用することはやや難しいとの意見も得られた。ただし、調査の全体的な結果としては道路利用者には有益との意見が多かった。

3.1.2 アンケート調査

視程急変予測情報（情報の入手媒体、表示内容、更新頻度、有効性など）に対する道路利用者のニーズを把握するため、2025 年 2 月 10～12 日の 3 日間において Web アンケート実施した。最も要望の高かった情報の入手方法（媒体と表示内容、更新頻度）は、「スマートフォン」による「地図表示」で、10 分間隔（選択肢の最短）の情報の更新頻度であった [8]。



図－6 スマートフォンによる視程急変予測情報のイメージ

3.2 情報提供手法の検討

前述の結果を踏まえ、「スマートフォン」を情報提供媒体に想定し、具体的な情報提供手法（情報画面、機能など）について検討し、情報提供画面案（**図－6**）を考案した。

4. まとめ

本研究では、X バンド MP レーダを活用した視程急変推定技術を基に、「降雪粒子」に加え「地吹雪粒子」に起因した視程急変の予測にも適用可能な方法を、実用面にも配慮し考案した。さらに、この手法を用いた視程急変の実証試験を実施し、顕著な吹雪事例を対象に精度検証を行った結果、実用性に大きな問題がないことを確認した。また、道路利用者及び道路管理者の情報ニーズを調査するとともに、視程急変予測システム開発を想定した情報提供手法の素案を構築した。

参考文献

1) 大宮哲、松下拓樹、大久保幸治、菅原邦泰、西村敦史：X バンド MP レーダによる吹雪時の視程分布のリアルタイム推定、日本雪工学会論文集、第 39 巻第 3 号、pp.10～21 頁、2023.7
2) 土木研究所寒地土木研究所：吹雪の視界情報、https://northern-road.ceri.go.jp/navi/touge/fubuki.htm
3) 武知洋太、大宮哲、原田裕介、大久保幸治、高橋丞二、松澤勝：気象条件を用いた吹雪時の視程推定手法の精度改善に向けた分析―北海道と青森県における観測結果より―、寒地土木研究所月報、No.805、pp58-65-、2020.5
4) 松澤勝：吹雪時の視程推定手法の改良に関する研究、雪氷、69、pp.79-92、2007.1
5) 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、2009.8
6) 立平良三、鈴木修：単一ドップラーレーダーによる上層風推定の精度、天気、Vol.41、No.11、pp.33-36、1994.11
7) 社団法人日本道路協会：道路橋耐風設計便覧（平成 19 年 21 月）、区分別粗度長 pp.66-77、2008.1
8) 大宮哲、武知洋太、越國一九、松下拓樹：吹雪時の視程急変予測情報の提供方法に関する検討 －Web アンケートに基づく道路利用者のニーズ調査－、寒地土木研究所月報、No.871、pp.36-42、2025.7

RESEARCH ON TECHNOLOGIES FOR FORECASTING SUDDEN CHANGES IN VISIBILITY DURING SNOWSTORMS

Research Period: FY2023-2025
Research Team: Snow and Ice Research Team,
Cold-Region Road Engineering Research Group

Author: NISHIMURA Atsushi
MATSUSHITA Hiroki
OMIYA Satoshi
KOKUBU Tetsuya
KOSHIKUNI Ikku
TAKECHI Hirotaka

Abstract: Sudden changes in visibility during snowstorms can cause drivers to brake and swerve suddenly, leading to multiple vehicle collisions. To prevent traffic accidents caused by reduced visibility, it is important to predict the likelihood of sudden changes in visibility in advance and to provide information on visibility reductions to drivers and road administrators. In the Study Using X-Band Multi-parameter (MP) Radar to Develop Snowstorm Detection Technologies, a project that was carried out until FY2021, we developed a technique for estimating the visibility on roads during snowstorms based on radar data during snowfall. In this research, we developed this estimation technique into a technology for forecasting sudden changes in road visibility during snowstorms or drifting snow for providing such information to drivers and road administrators. Furthermore, we conducted interviews with road administrators and surveys with road users to understand the needs and methods for providing visibility change prediction information. Based on these results, we considered a draft method for providing the information.

Keywords: Snowstorms, Drifting snow, Poor visibility, Sudden changes, X-Band Multi-parameter (MP) Radar, High-resolution precipitation nowcasts

論文リスト

- 学術誌等による成果普及

<u>査読付論文・国内（計 1 本）</u>

a-1) 大宮哲、松下拓樹、大久保幸治、菅原邦泰、西村敦史：X バンド MP レーダによる吹雪時の視程分布のリアルタイム推定、日本雪工学会論文集、第 39 巻第 3 号、10～21 頁、2023 年 7 月

<u>査読付論文・海外（計 2 本）</u>

b-1) NISHIMURA Kouichi, NEMOTO Masaki, ITO Yoichi, OMIYA Satoshi, Shimoyama Kou, NIIYA Hirofumi: Elucidation of spatiotemporal structures from high-resolution blowing-snow observations, The Cryosphere, 18, pp.4775-4786, 2024.10

b-2) OKAZE Tsubasa, KAWASHIMA Risa, ITO Takeru, OMIYA Satoshi, NIIYA Hirofumi, NISHIMURA Kouichi: Field-based investigation of snow-drift flux increases in blowing snow and application to mapping of short-term visibility reduction using mesoscale meteorological simulation, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 275, 105989, 2025, 2024.12

<u>査読無し論文・国内（計 3 本）</u>

c-1) 大風翼、新屋啓文、大宮哲：吹雪の時空間構造解明のための雪原での野外観測、日本風工学会誌 Vol.49, No.1, 25-32

c-2) 大宮哲, 武知洋太, 越國一九, 西村敦史：気象レーダによる吹雪時の視程推定－視程急変予測情報の社会実装を見据えて－, 第 40 回寒地技術シンポジウム, ポスター発表, 2024.11

c-3) 大宮哲, 武知洋太, 越國一九, 西村敦史：気象レーダを用いた吹雪時の視程推定～視程急変予測情報の社会実装を見据えて～, 第 36 回ゆきみらい研究発表会論文集, 2025.1
https://www.hrr.mlit.go.jp/yukimirai-joetsu/file/paper/oralpresentation/%E2%85%A0-01-05.pdf,2025.1

<u>学会発表等その他（計 11 本）</u>

e-1) 武知洋太、大宮哲、松島哲郎、原田裕介、西村敦史、亀田貴雄：従来の経験式による吹雪量と新たな観測結果との比較（2）－北海道石狩市での吹雪時の観測に基づく－、雪氷研究大会（2023・郡山）講演要旨集、78 頁、2023 年 9 月

e-2) 大風翼、川島理沙、伊藤武竜、大宮哲、新屋啓文、西村浩一：高い地吹雪発生時の飛雪流量の平均化時間と最大値の関係、雪氷研究大会（2023・郡山）講演要旨集、77 頁、2023 年 9 月

e-3) 大宮哲、松下拓樹、大久保幸治、菅原邦泰、西村敦史：X バンド MP レーダを用いた吹雪時の地上視程のリアルタイム推定、水文・水資源学会 2023 年度研究発表会要旨集、PP-2-1-17、2023 年 9 月

e-4) 大風翼、川島理沙、伊藤武竜、大宮哲、新屋啓文、西村浩一：吹雪の時空間構造の解明　その 4　吹雪時の飛雪流量の平均化時間と最大値の関係、2023 年度日本建築学会大会（近畿）学術講演梗概集、2103～2104 頁、2023 年 9 月

e-5) 大宮哲、松下拓樹、西村敦史：気象レーダを用いた吹雪時の視程推定～視程急変予測情報の社会実装を見据えて～、第 35 回日本道路会議論文集、論文番号 1P11 頁、2023 年 11 月【ポスター発表論文優秀賞受賞】

e-6) 大宮哲、國分徹哉、武知洋太、西村敦史：気象レーダを用いた吹雪時の視程推定 ～視程急変予測情報の社会実装を見据えて～、日本災害情報学会第 28 回学会大会、日本災害情報学会第 28 回学会大会予稿集、113-114 頁、2024 年 3 月

e-7) 西村浩一, 大宮哲, 大風翼, 新屋啓文,根本 征樹：吹雪の時空間構造の解析Ⅲ,雪氷研究大会（2024・長岡）講演要旨集, p.33,2024.9

e-8) 伊藤武竜, 大宮哲, 新屋啓文, 西村浩一, 大風翼：平均化時間の違いに伴う最大飛雪流量および最低視程

の量的差異について, 雪氷研究大会（2024・長岡）講演要旨集, p.107, 2024.9

e-9) 大風翼、伊藤武竜、大宮哲、新屋啓文：吹雪の時空間構造の解明(その 8):飛雪流量の観測に基づく光の消散係数による視程の評価の検討、2025 年度日本建築学会大会（九州）概要集、pp.1987-1988、2025.9

e-10) 大風翼、伊藤武竜、新屋啓文、大宮哲：吹雪粒子の粒径分布に基づく光の消散係数算出の検討、雪氷研究大会(2025・津)講演要旨集、p.37、2025.9

e-11) 西村浩一、大宮哲、新屋啓文、根本征樹：吹雪の時空間構造の解析 Ⅳ、雪氷研究大会(2025・津)講演要旨集、p.44、2025.9

土研刊行物（計 2 本）

f-1) 武知洋太、原田裕介、大宮哲、國分徹哉、西村敦史：雪面近傍の飛雪空間密度とその最大値について－ネット式吹雪計の測定結果から－、寒地土木研究所月報、第 854 号、55～64 頁、2024 年 3 月

f-2) 大宮哲、武知洋太、越國一九、松下拓樹：吹雪時の視程急変予測情報の提供方法に関する検討 －Web アンケートに基づく道路利用者のニーズ調査－、寒地土木研究所月報、第 871 号、pp.36-42、2025.7