

14 安全で信頼性の高い冬期道路交通サービスの確保に関する研究

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（寒地交通チーム）、寒地保全技術研究グループ（寒地道路保全チーム）、技術開発調整監（寒地機械技術チーム）

1. 研究の必要性

人口減少、高齢化、財源不足等が全国的に大きな課題となっている。国土交通省では、新たな国土形成計画において対流促進型国土の形成を基本方針とし、地域・国土構造のコンパクト＋ネットワーク化を打ち出している。そのため積雪寒冷地では、冬期にも安全で信頼性の高い道路交通サービスを確保することが一層重要となっている。本研究開発プログラムでは、積雪寒冷地における安全で信頼性の高い冬期道路交通サービスの確保を支援する技術の開発をプログラム目標とし、以下の達成目標を設定した。

- (1) 費用対効果評価に基づく合理的な冬期道路管理水準設定技術の開発
- (2) 冬期道路管理の ICT 活用による省力化および除雪機械の効率的維持管理技術の開発
- (3) リスクマネジメントによる効果的・効率的な冬期交通事故対策技術の開発

平成 28 年度は、冬期走行環境の推定手法の構築と冬期道路管理の費用対効果の評価ツールの開発に取り組むとともに、排雪断面積と排雪速度の関係性を調査した。また、凍結防止剤散布オペレータの路面状態の認知・判断の分析、除雪機械劣化度評価に対する FTA の有効性確認、冬期の日陰時間と交通事故発生率の関係の把握を行った。

平成 29 年度は、積雪による経済損失及び除雪による経済効果を算出するツールを試作した。路肩堆雪断面予測式の適用性確認、凍結防止剤散布作業支援インタフェースを設計・構築し、実験を行った。また、FTA とワイブル解析により除雪機械劣化度の定量的評価が可能であることを確認した。さらに、冬期の路面状態実測値を用いて交通事故リスクを評価した。

平成 30 年度は、冬期の路面平坦性が走行速度に及ぼす影響の分析、堆雪断面積予測式を用いた「除排雪作業計画支援システム」の要件定義と概略処理フローの整理、凍結防止剤散布支援システムの設計・構築に取り組んだ。また、路線の重要度に合わせて除雪機械の信頼度の目標値を設定することで整備や配置換えの判断が可能となる維持管理手法を検討するとともに、交通状態別事故リスクの空間的評価の手法を開発した。

令和元年度は、機械学習を用いた冬期走行環境の推定、道路有効幅員計測データ解析の効率化検討、路肩堆雪断面積予測式による除排雪作業計画支援技術の開発、凍結防止剤散布支援システムの改良に取り組んだ。また、残留応力を磁場強度の変化で検出する機器を用いた除雪車劣化度診断の試行、除雪機械の故障確率の目標値を変えた際の予防保全費用の試算、リスクマネジメント手法である冬期交通事故リスク情報提供による経路誘導策の便益算定と対策評価を行った。

令和 2 年度は、費用対効果による冬期道路管理作業の意思決定支援ツールの開発、堆雪幅と交通性能の関係のモデル化、気象データ・除排雪作業から路肩堆雪断面積の推計と適用性の確認に取り組んだ。また、凍結防止剤散布作業支援システムの改良と実際の作業での有効性の検証とヒアリング、自己磁場測定型残留応力検出機による磁場の測定と負荷の関係を検証し診断手法について検討、交通事故リスク情報による交通需要マネジメントの検討、交通事故リスクマネジメントツールの試作をおこなった。

令和 3 年度は、費用対効果による冬期道路管理作業の意思決定支援ツールの改良、道路有効幅員の表示・堆雪断面積予測式自動算出・大雪予報反映等の機能を備えた「除排雪作業計画支援システム」を開発した。また、凍結防止剤散布車・除雪トラックに対応した凍結防止剤自動散布システムを開発し、国土交通省北海道開発局の 8 開発建設部で試行導入が行われた。さらに、磁場強度の変化量による劣化箇所の特定手法についてとりまとめる

14 安全で信頼性の高い冬期道路交通サービスの確保に関する研究

とともに、現場で信頼度を算出し劣化度を評価できる簡易な除雪機械劣化度評価ツールを作成した。また、交通事故リスクマネジメントツールは、現場チェックリスト、事故対策メニュー、事故類型毎に対策等をまとめたチェックシートの機能を追加し、交通安全診断支援ツールとして再構築した。

RESEARCH ON ENSURING SAFE AND RELIABLE WINTER ROAD TRAFFIC SERVICE

Research Period : FY2016-2021

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

Research Group : Cold-Region Road Engineering Research Group (Traffic Engineering)
Cold-Region Maintenance Engineering Research Group (Road Maintenance Research)
Director for Cold-Region Technology Development Coordination (Machinery Technology)

Abstract : Population declines, aging, lack of resources, etc. are a major issue nationwide. The Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism has adopted the basic policy of the formation of a convective promotion type of land in a new national land formation plan and has proposed compact plus network structure of regional and national land structures. Therefore, it is becoming more important to secure safe and reliable road transportation services in winter as well in snowy cold areas. In this research and development program, we set the following objectives with the program goal as the development of technology to support safe and reliable winter road traffic service in snowy cold areas.

- (1) Development of reasonable winter road management standard setting technology based on cost effectiveness evaluation
- (2) Labor-saving by utilizing ICT in winter road management and development of efficient maintenance technology for snow removing machine
- (3) Development of effective and efficient winter traffic accident countermeasure technology by risk management

In FY2016, we constructed the estimation method of the winter road environment, developed the evaluation tool for the cost effectiveness of the winter road management, grasped the relation between the snow cross sectional area and the snow removal speed. In addition, we analyzed the cognitive / judgment situation of anti-freezing agent operator, examined the effectiveness of FTA on snow removal machine deterioration degree evaluation, examined the relation between the road shade time in winter and the incidence of traffic accidents.

In FY2017, we experimentally created a tool for determining economic losses due to snowfall and the economic effects of snow removal, verified the applicability of a prediction formula for determining the cross-section of snow piled on a road shoulder, and designed, constructed, and conducted an experiment on a support interface for de-icing agent spreading works. We also verified that the quantitative assessment of the degree of deterioration of snow removal equipment is possible by using fault tree analysis and Weibull analysis. In addition to the above results, we conducted traffic accident risk assessment by using measured winter road surface condition parameters.

In FY2018, our research was on the following: (1) clarifying how winter road surface roughness affects driving speed, (2) compiling definitions for the itemized requirements and developing a process flow for the Planning Support System for Snow Removal and Hauling Operation, that uses the prediction formula for the cross-sectional area of snow pile, and creating a process flow for this system, and (3) designing and constructing a support system for deicing agent spreading. Furthermore, we examined a maintenance and management method that enables flexible decision-making for the preparation and reallocation of snow removal machinery according to the importance of the routes by setting a target reliability value for each snow removal machine. We also developed a method for spatially evaluating the accident risk of several types of traffic

conditions.

In FY2019, we simulated the winter road environment using machine learning, studied an efficiency improvement of Effective road width measurement data analysis and developed a technology intended to facilitate the implementation of the snow removal and hauling plans, that used a mathematical formula to estimate the cross-sectional area of snow accumulation on road shoulders. We also improved the system designed to assist in the application of deicing agents. In addition, we experimentally diagnosed the severity of deterioration in snow removal vehicles using equipment capable of detecting residual stress by measuring changes in magnetic field intensity. We also estimated the cost of implementing preventative measures when the anticipated probability of snow removal machinery failure is revised. Finally, we estimated and evaluated the benefits of our risk management scheme: route guidance services using information on winter road accident risks.

In FY2020, we developed a tool to support decision making for winter road management based on cost effectiveness, modeled the relationship between the snow piling area and traffic performance, and estimated the cross-section of snow piled on a road shoulder while verifying its applicability based on meteorological data and snow removal and hauling operations. We also improved a support system for deicing agent spreading and conducted verification of and interviews on its effectiveness in actual practice, examined a diagnostic method by verifying the relationship between the measurement of magnetic fields using a self-magnetic field measurement-type residual stress detector and the load on each section, examined traffic demand management based on traffic accident risk information, and created a prototype traffic accident risk management tool.

In FY2021, we improved the cost-effective decision-making support tool for winter road management work. Then, we have developed a "snow removal work plan support system" that has the functions of displaying the effective width of the road, automatically calculating the snowfall cross-sectional area prediction formula, and reflecting the heavy snow forecast. In addition, an automatic antifreeze spraying system was developed for antifreeze sprayers and snow removal trucks, and was introduced on a trial basis by the 8 Development and Construction Departments of the Hokkaido Development Regional Bureau of the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism. Furthermore, we summarized the method of identifying the deteriorated part by the amount of change in the magnetic field strength, and created a simple snow removal machine deterioration degree evaluation tool that can calculate the reliability and evaluate the deterioration degree at the site. The traffic accident risk management tool has been reconstructed as a traffic safety diagnosis support tool by adding the functions of a site checklist, an accident countermeasure menu, and a check sheet that summarizes countermeasures for each accident type.

Key words : winter road management, service level, snow removing machinery, traffic accident risk, ICT

14.1 費用対効果評価に基づく合理的な冬期道路管理水準設定技術の開発

14.1.1 費用対効果による冬期道路管理水準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（寒地交通チーム）、技術開発調整監（寒地機械技術チーム）、寒地保全技術研究グループ（寒地道路保全チーム）

研究担当者：石田樹、佐藤昌哉、畠山乃、片野浩司、丸山記美雄、高橋尚人、木村孝司、牧野正敏、徳永ロベルト、大廣智則、山口洋士、佐藤賢治、中島知幸、藤本明宏、齊田光、新保貴広、久慈直之、大浦正樹、佐藤大輔

【要旨】

本研究は、路面のすべりやすさや路面平坦性、有効幅員などの冬期走行環境から走行速度や旅行時間信頼性などの冬期道路の走行性を推定し、冬期道路管理における費用対効果を定量評価する手法を構築することを最終目標とする。本研究では無積雪期および積雪期に冬期走行環境を計測することで、冬期の路面すべり、道路有効幅員に加え路面平坦性が走行速度および時間信頼性に及ぼす影響を分析した。また、冬期の積雪や路肩堆雪に伴う走行速度低下に起因する経済損失や除排雪に伴う走行速度改善による経済効果を定量的に評価するためのツールの開発を行った。加えて、機械学習を用いて気象条件や交通条件、路面画像から冬期走行環境の推定が可能であるか検証を行うとともに、AIを用いた道路有効幅員計測データ解析の効率化の検討を行った。これらの取り組みにより、積雪・路肩堆雪に伴う走行速度低下に起因する経済損失、除排雪に伴う走行速度改善による経済効果を推定し、冬期道路管理における費用対効果を定量的に評価するツールを開発した。

キーワード：冬期道路管理、費用対効果、冬期走行環境、意思決定支援

1. はじめに

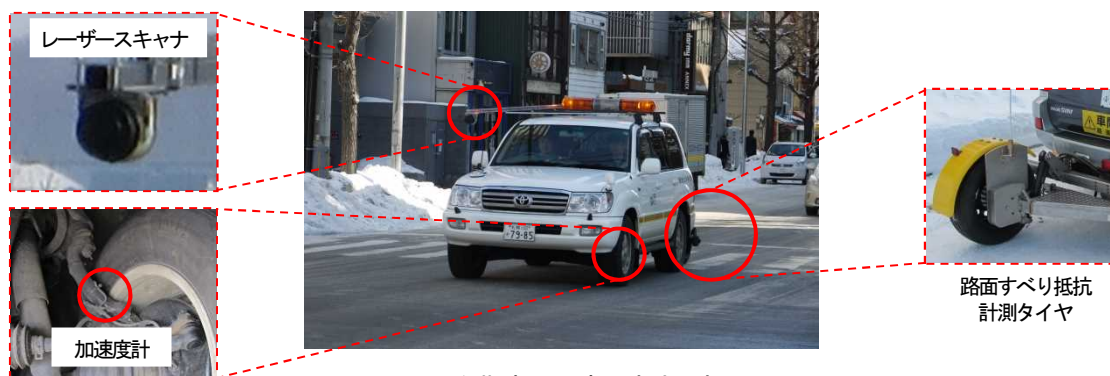
積雪寒冷地域において、コンパクト+ネットワーク化の推進には、冬期間の交通ネットワークの維持と機能確保が不可欠である。また、札幌市市政世論調査結果¹⁾における市民からの要望においては「除雪に関すること」が第1位であるように、積雪寒冷地域においては住民の冬期道路管理への要望が高い。冬期道路管理費の増加が見込めない実情に鑑みると、今後の冬期交通ネットワークの確保・維持および道路利用者の満足度向上には、資源やストックの再配分、すなわち一律の冬期道路の管理水準から道路の重要性やニーズに対応した格差ある管理水準の設定を促進させる必要がある。

冬期道路では、降雪および低温によって路肩堆雪(雪山)による道路有効幅員の減少、凍結による路面のすべり抵抗値低下、路面の凹凸の増大、吹雪時の視程障害等が発生する。こうした冬期走行環境の悪化は走行性の低下²⁾や冬型事故の増加³⁾に繋がる。冬期走行環境は気象、交通、地形および道路維持作業の影響を受けて時空間的に複雑に変化し、この変化が適切な冬期道路管理の実施を難しくさ

せている。冬期道路の管理水準に格差を設け、冬期道路の走行性向上を図るには、冬期走行環境の評価技術と冬期走行環境が走行性に及ぼす影響の評価技術が不可欠となる。さらに、除排雪や凍結防止剤散布などの道路維持作業がもたらす冬期走行環境の改善効果を評価する技術があれば、道路維持作業、冬期走行環境の改善度合い、冬期道路の走行性の順で評価が可能になる。冬期道路の走行性の改善は旅行時間短縮や旅行時間信頼性の向上として評価することにより貨幣換算できる。こうした一連の評価方法を体系的に確立することにより、投じた費用に対する効果を踏まえた道路維持管理、換言すれば費用対効果を考慮した道路維持管理の実施が期待できる。

2. 研究実施内容

本研究では、研究開発プログラムの達成目標である「費用対効果評価に基づく合理的な冬期道路管理水準設定技術」を構成する技術として、走行速度・旅行時間信頼性を用いた、冬期道路管理の費用対効果を定量評価する手法の構築を目標とする。この目標を達成するため、本研究では



以下に示す研究および開発を行った。

- 1) 冬期走行環境の計測および推定手法の構築
- 2) 走行速度、時間信頼性の評価手法の構築
- 3) 冬期道路管理の費用対効果の評価ツールの開発

3. 冬期走行環境の推定手法の構築

3.1 既往研究とその課題

当研究所では、前中長期計画において路面すべり抵抗値、路面平坦性および道路有効幅員（以下、冬期走行環境と総称）の計測方法として、連続路面すべり抵抗計測装置（図-1a）⁵⁾、冬期道路有効幅員計測装置（図-1b）⁶⁾および簡易型 IRI 計測装置（図-1c）⁷⁾を用いて走行経路上の冬期走行環境を連続的に計測する手法を開発した。しかしながら、同写真からも分かるように、これらの計測技術はそれぞれ異なる車両に搭載されている。そのため、冬期走行環境のデータ取得には複数の計測車両の同時走行が必要になり、予算と時間的な制約を受け、これまでに得られたデータは十分でない。冬期走行環境が走行性とユーザー満足度に及ぼす影響を評価するには、様々な道路条件、交通量、冬期走行環境等におけるデータ蓄積が必要となる。

3.2 冬期走行環境計測車両の開発

本研究では、3.1の課題を解決するため、図-2に示す

ように冬期走行環境計測技術を1台の車両に集約した。

連続路面すべり抵抗計測装置は車両後部に取り付けた。本装置の路面すべり抵抗計測タイヤは車両進行方向に対して内側に1~2°程度の角度を与えて牽引される。路面すべり抵抗値は走行により発生する試験輪と路面の間の横反力から算出される。路面すべり抵抗値は、開発者が独自に設定した HFN（Halliday Friction Number）と呼ばれる指標であり、タイヤ空転時を0、乾燥舗装走行時を通常80から100（路面温度に依存）となるように校正され、凍結路面のように滑りやすい路面では小さく、湿潤や乾燥路面のように滑り難い路面では大きくなる。なお、当研究所ではフルロック式路面すべり摩擦係数計測車と連続路面すべり抵抗計測装置を搭載した車両の合同走行試験を行っており、HFNと路面すべり摩擦係数との間には実験式が構築されている⁸⁾。

冬期道路有効幅員計測には、レーザースキャナを用いた道路有効幅員計測システムを使用した。この計測システムは、路面や堆雪を計測する「レーザースキャナ」、計測位置と時間データを取得する「GPS センサ」、計測箇所を撮影する「USB カメラ」と、これらの機器を接続する「ノート PC（独自開発した「道路有効幅員計測・解析用ソフトウェア」がインストールされた PC）」で構成される。

レーザースキャナは、車両のルーフキャリアに車両進行

方向に固定したアルミ棒の前方先端に取り付け、道路横断面形状を計測する(図-1、2)。道路有効幅員は、計測された道路横断面形状から、解析用ソフトウェアにより、堆雪や道路構造物と車道路面の境界を自動で判別し算出される。このとき、堆雪や歩道と車道路面の境界を正しく判別できない場合や、並走車や障害物で正しく道路有効幅員を算出できない場合などの異常値は、自動で無効とし排除することが可能である。

簡易型 IRI 計測装置は、道路の平坦性を表す指標として世界共通の国際ラフネス指数 IRI を計測する計測装置⁷⁾である。本装置は、車両のバネ上およびバネ下に加速度計を取り付け、上下加速度信号から車両に依存する振動を除去し、IRI を算定する。本計測車両では、加速度計を左前輪のバネ上およびバネ下にそれぞれ装着した。

3.3 走行試験

3.3.1 試験の概要

平成 28 年度は、冬期走行環境の計測技術の動作確認を兼ねて、無積雪期および積雪期に走行試験を実施した。走行試験は、札幌市内の 3 路線を対象に平成 28 年 11 月 21 日(火)、平成 29 年 1 月 31 日(火)および 2

月 28 日(火)の 3 日間にわたって実施した。表-1 に対象路線の延長および道路条件を示す。なお、本試験における計測項目は路面すべり抵抗値と道路有効幅員である。

3.3.2 試験の結果

図-3 は 3.3.1 で述べた予備走行試験の結果を箱ひげ図で示したものであり、上段に路面すべり抵抗値、中段に道路有効幅員、下段に走行速度をそれぞれ示す。箱ひげ図は、中に一つの横線を持つ箱とその前後に延びる線(ひげ)で構成される。ひげの上下端は最大値と最小値を示す。箱の途中の横線は中央値、箱の上下端は第三四分位数および第一四分位数である。第一四分位数とはデータの中で小さい方から 1/4、第三四分位数とはデー

表-1 予備走行試験の対象路線概要

路線	対象延長	道路条件	
		車線	路肩
A	6.4km	対面片側2車線	狭い
B	4.8km	対面片側2車線	広い
C	2.7km	対面片側1車線	広い

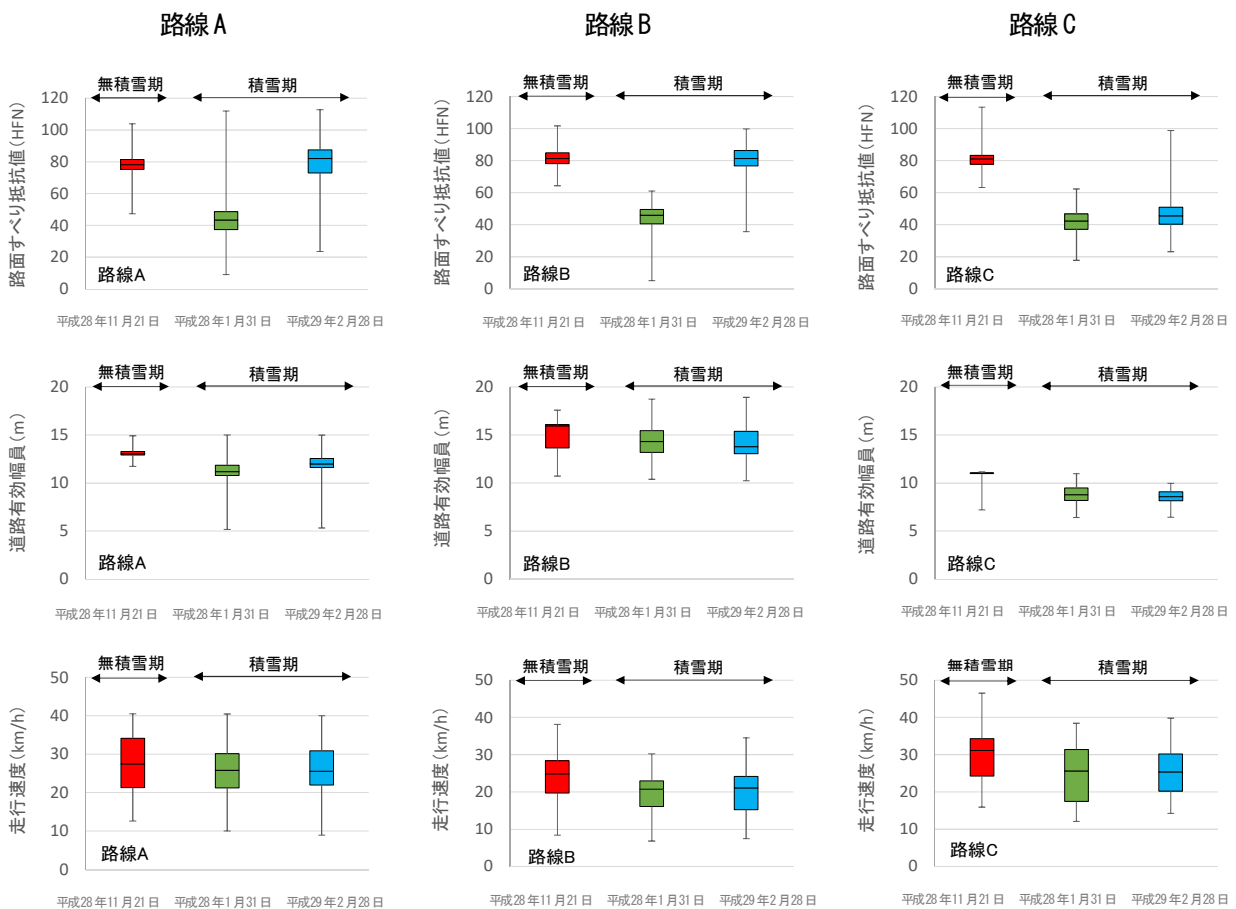


図-3 走行試験の結果 (上段: 路面すべり抵抗値、中段: 道路有効幅員、下段: 走行速度)

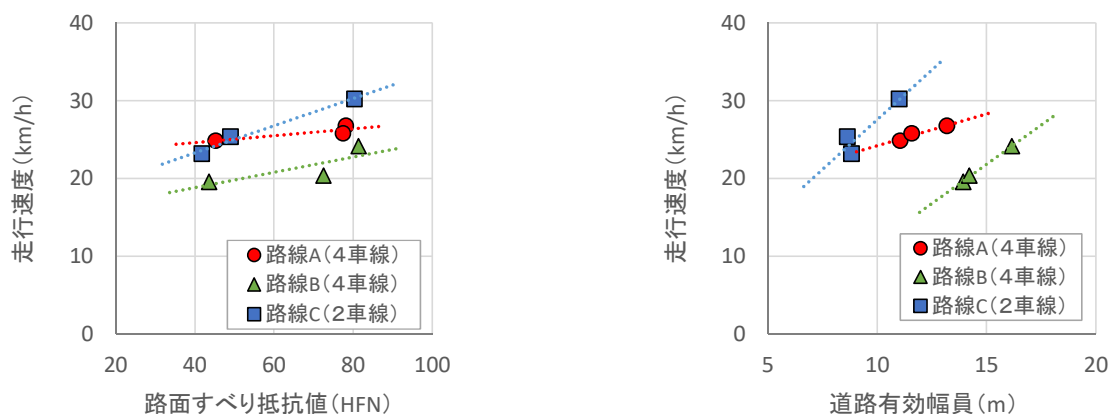


図-4 冬期走行環境と走行速度の関係（左図：路面すべり抵抗値、右図：道路有効幅員）

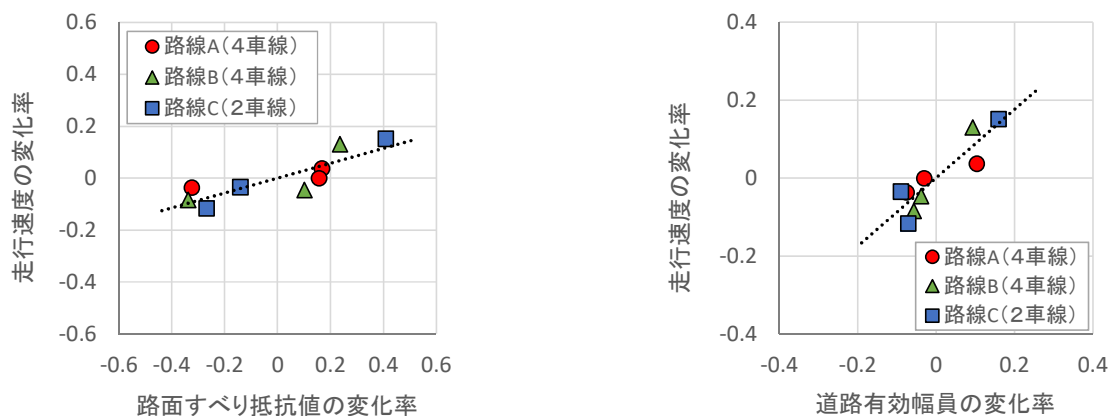


図-5 冬期走行環境の変化率と走行速度の変化率との関係（左図：路面すべり抵抗値、右図：道路有効幅員）

タの大きい方から 1/4 にある数である。中央値はデータを大きさ順に並べた時の中心の値である。

路面すべり抵抗値については、いずれの路線でも無積雪期の中央値は 80 前後にある。平成 29 年 1 月 31 日（積雪期）の中央値は 40 近くまで低下した。一方、平成 29 年 2 月 28 日（積雪期）では、路線 A と B は無積雪期と同程度の 80 前後であるが、路線 C は 45 程度であった。積雪期における日時や路線における値の相違は、気象条件や道路維持作業の影響を受けて生じたと推察される。

次に、道路有効幅員については、無積雪期に対して積雪期の道路有効幅員は路線 A および B では 1~2 m 程度、路線 C では 2~3 m 程度狭くなった。

最後に、走行速度については、無積雪期における走行速度の中央値は、路線 A、B および C でそれぞれ 28、25 および 31 km/h である。この相違は、交通量、車線数、信号の有無、路肩の広さなどが影響したと考えられ

る。積雪期における走行速度の中央値は無積雪期と比較していずれの路線も低い。積雪期の中で平成 29 年 1 月 31 日と平成 29 年 2 月 28 日を比較すると、路線 B において走行速度は前者が後者に比べて僅かだが小さい。前者は後者と比較して道路有効幅員に大差がないものの、路面すべり抵抗値が 40 程度低い。このように走行速度は冬期走行環境の悪化を受けて低下し、その低下度合は路面すべり抵抗値や道路有効幅員の変化によって異なる。

4. 走行速度、時間信頼性およびユーザー満足度の評価手法の構築

4.1 冬期走行環境が走行性に及ぼす影響分析

走行試験で得られたデータを基に、冬期走行環境が走行性に及ぼす影響を分析した。

図-4 は冬期走行環境と走行速度の関係であり、左図に路面すべり抵抗値との関係を、右図に道路有効幅員との

関係を、それぞれ示す。路面すべり抵抗値と、走行速度の分布域は路線によって異なるが、いずれの路線も走行速度は路面すべり抵抗値とともに低下した。道路有効幅員も同じ傾向にあり、分布域は異なるがいずれも道路有効幅員の減少に伴い走行速度が低下した。

図-5は図-4に示すデータ（路面すべり抵抗値、道路有効幅員および走行速度）について路線毎に平均値を求め、各データの値を平均値で除すことで平均値に対する変化率（ $R=A/A_{ave}-1$ 、 A ：データの値、 A_{ave} ：データの平均値）を求め図示したものである。同図より、走行速度の変化率はいずれの路線も路面すべり抵抗値および道路有効幅員の変化率の低下に伴い大よそ同じ割合で線形的に低下していることが分かる。

図-4や図-5より、冬期走行環境と走行速度の関係を定量的に評価することにより、冬期走行環境から走行速度を推定できる可能性が示唆された。

4.2 道路サービスに対する道路利用者の意見要望の集計・分析システムの開発

本研究では道路利用者からの意見・要望について、当研究所で運用する冬期道路マネジメントシステム⁹⁾上での入力・管理を支援する機能を検討・開発した。入力項目は道路事務所へのヒアリングを基に、事務所、路線番号、受付日時、相手先、距離標（キロポスト、KP）開始・終了、維持作業、応急処理、完了日時など36項目を定めた。

本システムは、路線番号およびキロポストが入力された意見要望を地図上に表示する機能を有する（図-6）。また、アイコンは維持管理／応急処理で色分けされ、その内容によってアイコンの記号を変えて表示される。さらに、記号内の色で処理済か否かも判断できるよう工夫した。加えて、冬期道路マネジメントシステムで提供している気象データと意見要望データを関連づけて分析できるように、両者を地図上で重ね合わせる機能を搭載した

（図-7）。本システムは、路面すべり抵抗値のモニタリング機能を有しており、3.2で述べた冬期走行環境同時計測車両で得られた路面すべり抵抗値を記録するとともに地図上にプロットして表示することができる。今後は路面すべり抵抗値と同様に、路面平坦性および道路有効幅員の計測結果をシステム上に図示する機能を追加する予定である。このシステムにより、気象データ、冬期走行環境データおよび意見要望データを照らし合わせて分析し、これらの相互の因果関係について検証を行うことが可能になる。

5. 冬期走行環境の推定手法構築のための走行試験

5.1 試験の概要

本研究では、一般国道231号KP0～KP19（札幌市北区北34条西2丁目～石狩市八幡2丁目）において積雪期に定期的に走行試験を実施した。走行試験は、上記路線を対象に平成29年度および平成30年度の冬期（12月～翌年2月、いずれも平日）に実施した。また、令和2年度冬期には冬期道路管理水準が異なる路線における冬期走行環境と走行速度の関係を明らかにするために、二十四軒・手稲通 北5西24交差点（札幌市中央区）～富丘1-4交差点（札幌市手稲区）間の7.7kmを対象として走行試験を行った。表-2に対象路線の道路条件を示す。本計測では午前10時に計測対象路線の起点を出発し、周囲の車両と同程度の速度で走行し走行速度、路面すべり抵抗値、道路有効幅員およびIRIを計測した。なお、道路有効幅員の

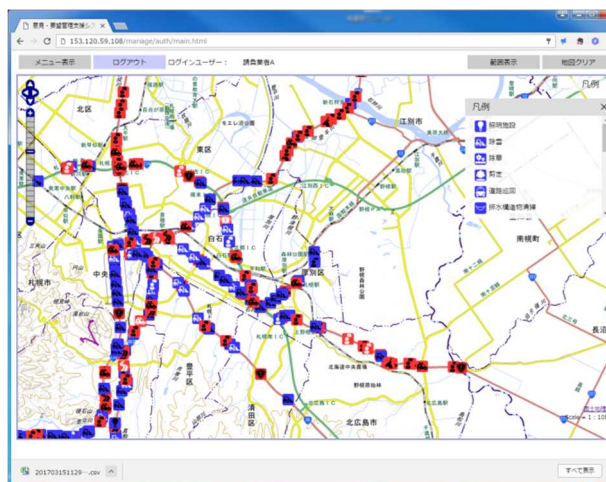


図-6 道路利用者の意見要望の管理システムの表示例

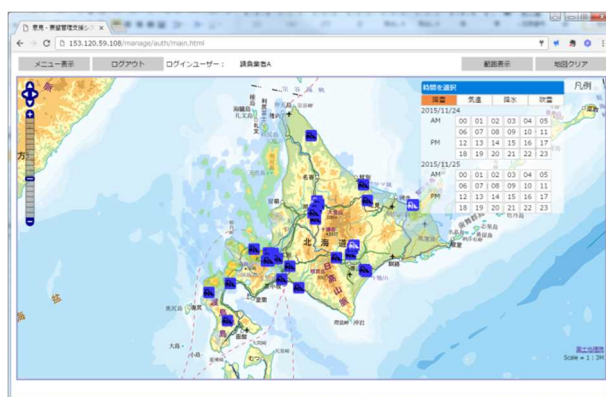


図-7 道路利用者の意見要望のマップ化
（気象条件との重ね合わせ）

表-2 冬期走行環境計測試験の対象路線概要

路線	対象延長	道路条件	
		車線	路肩
一般国道 231号	KP0~KP11	片側3車線	広い
	KP11~KP15	片側2車線	広い
	KP15~KP19	片側1車線(対面)	狭い
二十四軒・ 手稲通	7.7km	片側2車線	狭い



図-8 道路有効幅員計測装置の取り付け状況

計測装置について、図-2 の計測車両ではレーザー扫描仪 1 個を車両前方に張り出して搭載する構造であったため、ボンネットがある車両では、張り出しが大きくなりレーザー扫描仪の振動対策が必要であった。そこで、平成 29 年度以降は、レーザー扫描仪 2 個を車両上部側面に取り付ける構造とし搭載性を向上させた (図-8)。

5. 2 試験の結果

図-9 は一般国道 231 号における路面すべり抵抗値と走行速度の関係を車線数毎に示す。走行速度は路面すべり抵抗値の減少に伴い低下する傾向にあり、本傾向は片側 2 車線区間で明確に現れた。片側 2 車線区間では、路面凍結時 (概ね HFN20 以下) における走行速度は 42km/h となり、路面乾燥時 (概ね HFN80 以上) における走行速度と比較して 6km/h 程度の低下が見られた。

図-10 は一般国道 231 号における路面平坦性 (IRI) と走行速度の関係を車線数毎に示す。走行速度は IRI が大きくなるにつれ減少した。特に、片側 2 車線区間では無雪期 (IRI は概ね 1mm/m 程度) の走行速度は 50km/h であるが、積雪により IRI が 8mm/m 程度まで増大した場合に走行速度が 35km/h 未満になるなど路面平坦性が走行速度に与える影響は顕著であった。

図-11 は一般国道 231 号における道路有効幅員と走行速度の関係を車線数毎に示す。片側 2 車線区間では道路有効幅員の減少に伴い走行速度が低下する傾向にあった

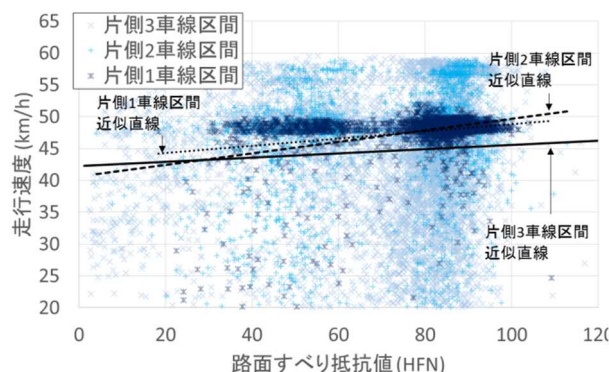


図-9 一般国道 231 号における路面すべり抵抗値と走行速度の関係

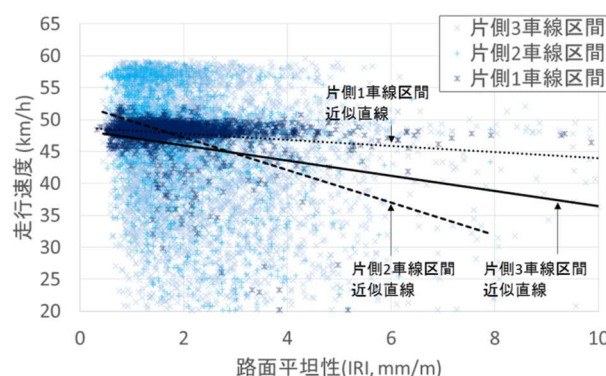


図-10 一般国道 231 号における路面平坦性 (IRI) と走行速度の関係

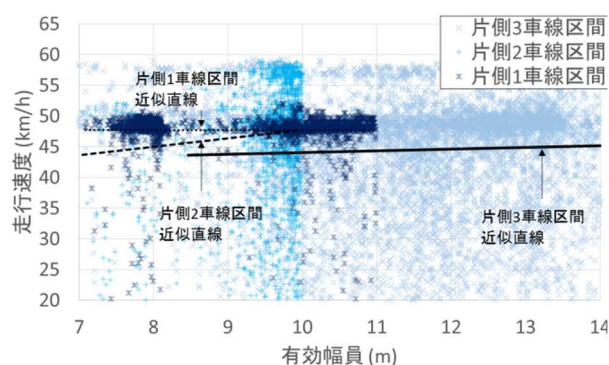


図-11 一般国道 231 号における有効幅員と走行速度の関係

が、片側 1 車線区間および片側 3 車線区間では道路有効幅員と走行速度の間に明確な関係は見られなかった。

図-12 は二十四軒・手稲通における HFN と走行速度の関係を示す。一般国道 231 号における試験結果と同様に、走行速度は HFN の減少に伴い低下し路面凍結時 (概ね HFN20 以下) における走行速度は路面乾燥時 (概ね HFN80 以上) と比較して 6km/h 程度低下した。

図-13 は二十四軒・手稲通における IRI と走行速度の関

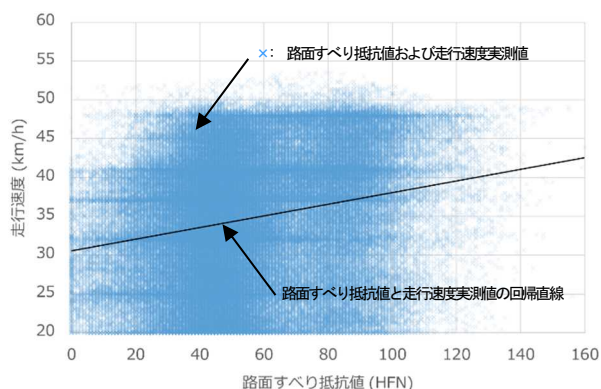


図-12 二十四軒・手稲通における
路面すべり抵抗値 (HFN) と走行速度の関係

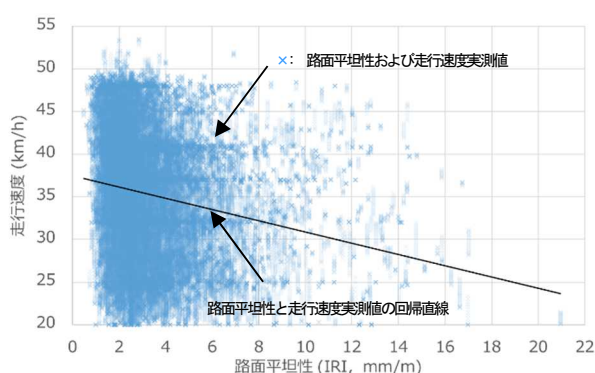


図-13 二十四軒・手稲通における
路面平坦性 (IRI) と走行速度の関係

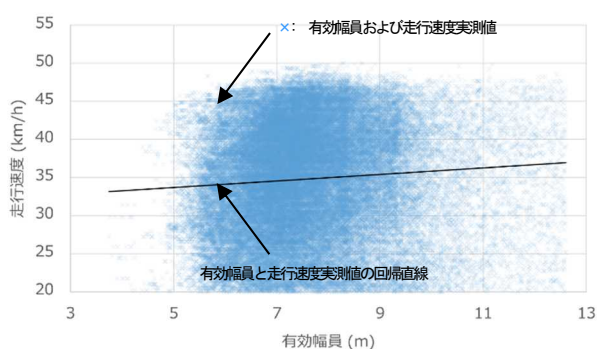


図-14 二十四軒・手稲通における
有効幅員と走行速度の関係

係を示す。二十四軒・手稲通では一般国道 231 号と比較して IRI が大きい傾向にあり、IRI の最大値は 21mm/m に達した。走行速度は IRI が大きくなるにつれて減少する傾向にあり、積雪により IRI が 8mm/m 程度となった場合の走行速度は無積雪時 (IRI 約 2mm/m) と比較して 4km/h 程度、IRI が 16mm/m 程度となった場合の走行速

度は無積雪時と比較して 10km/h 程度それぞれ低下した。

図-14 は二十四軒・手稲通における有効幅員と走行速度の関係を示す。当該区間の走行速度は有効幅員の減少に伴いわずかに低下する傾向があるものの、明確な関係は見られなかった。

6. 降雪による経済損失および除排雪による経済効果の推定手法の構築

6.1 経済損失および経済効果の推定手法

本研究では、降雪や積雪に起因した走行速度低下による経済損失 (降雪経済損失) と冬期道路管理に伴う走行速度改善による経済効果 (除排雪経済効果) の評価を行うために、タクシープローブデータから得られた平均走行速度を用いて降雪経済損失および除排雪経済効果を推定する手法を構築した。

図-15 は非冬期から冬期間に亘る日平均走行速度の推移であり、この図を用いて本研究における降雪による走行時間延長 (走行速度低下) と除排雪による走行時間短縮 (走行速度改善) の評価の概念を述べる。

本評価で用いた日平均走行速度の推移について説明する。無積雪期の日平均走行速度は短期的な上下動があるものの、増大や減少の傾向がなく、水平に推移する。初冬期および冬期には、降雪や除雪によって上下動を伴いながらも道路有効幅員の減少に伴い日平均走行速度は減少する。除排雪が行われると道路有効幅員が広がり、日平均走行速度は改善する。それでも、無積雪期と比べると道路有効幅員は狭く、日平均走行速度も低い。

以下に、降雪による走行時間延長と除排雪による走行時間短縮の評価の手順を列挙する。

- 1) 日平均走行速度の推移および降雪量を基に、降雪によって日平均走行速度が低下傾向に移行する日 (図中 a)、積雪深が 30cm 以上となり路肩の堆雪が走行速度に影響を与え始める日 (図中 b) と除排雪が行われた日 (図中 c) を設定する。11/1 から a を無積雪期、a から b を初冬期、b から c を冬期、および c から冬期間中積雪深が最大となる日を冬期除排雪後期間とする。
- 2) 無積雪期、初冬期および冬期の日平均走行速度の平均値をそれぞれ求める。
- 3) 対象延長を無積雪期、初冬期、冬期、および冬期除排雪後期間の日平均走行速度の平均値で除すことで、対象区間の旅行時間を求める。
- 4) 除排雪を実施しないケースは、除排雪直前 (図中 c) の日平均走行速度が冬期にわたり継続するとし、

冬期に除排雪しない場合の旅行時間を求める。

- 5) 降雪による走行時間延長は無積雪期の日平均走行速度－初冬期の日平均走行速度より求める。
- 6) 堆雪による走行時間延長は初冬期の日平均走行速度－冬期の日平均走行速度より求める。
- 7) 除排雪による走行時間短縮は冬期（除排雪無）の日平均走行速度－冬期の日平均走行速度より求める。
- 8) 降雪による経済損失は降雪による走行時間延長と交通量および通行車両の時間価値原単位の積から求める。同様に、堆雪による経済損失および除排雪による経済効果は堆雪による走行時間延長・除排雪による走行時間短縮と交通量および通行車両の時間価値原単位の積から求める。

6. 2 経済損失および経済効果推定の試行

本研究では、札幌市内のタクシープローブデータを用いて札幌市内幹線道路の降雪経済損失および除雪経済効果の試算を行った。図-16 は平成 25 年度冬期の一般国道 5 号 北 34 西 2 交差点～北 14 西 1 交差点における日平均走行速度の推移を示す。無積雪期の日平均走行速度は 25.0km/h であったが、日平均走行速度は平成 25 (2013) 年 12 月上旬からの積雪深増加に伴い低下し、同月下旬には日平均走行速度が 20km/h 程度まで低下した。平成 26 (2014) 年 1 月上旬には降雪の影響により日平均走行速度は最も低い 14.8km/h となり、その後は除排雪等の効果により走行速度は回復した。図-17 は上述の手法により平成 25 (2013) 年度冬期の札幌市内幹線道路の各道路センサス区間における降雪経済損失を求めた結果であり、札幌中心市街地や一般国道 230 号の山間部区間などで特に降雪経済損失が大きくなるなど経済損失・経済効果について空間分布の面から検証を行うことが可能となった。

7. 冬期走行環境と時間信頼性の関係検証

本研究では、冬期走行環境と時間信頼性の関係を明らかにするために一般国道 231 号 KP0～KP19 において路面すべり抵抗値、路面平坦性および有効幅員の各階級における走行速度の出現状況を求めた。本検証では 5.1 の実験で得た冬期走行環境実測値および走行速度を用いて路面すべり抵抗値、路面平坦性または有効幅員が一定範囲内にあったときの走行速度を集計し、各階級における走行速度の四分位数を求めた。これにより得られた各階級の 25 パーセント速度と 75 パーセント速度の差を用いて時間信頼性を定義し、冬期走行環境の変化に伴う時間信頼性の変化について考察を行った。

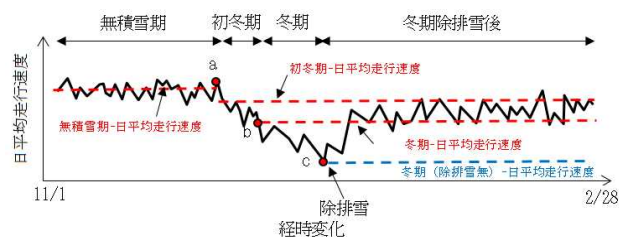


図-15 日平均走行速度および積雪深の推移ならびに降雪経済損失・除排雪経済効果の評価概念図

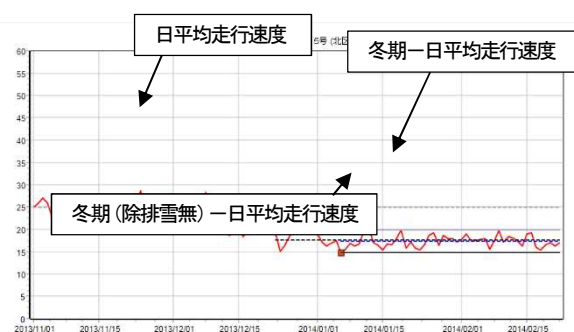


図-16 日平均走行速度の推移の例（一般国道 5 号 北 34 西 2 交差点～北 14 西 1 交差点）

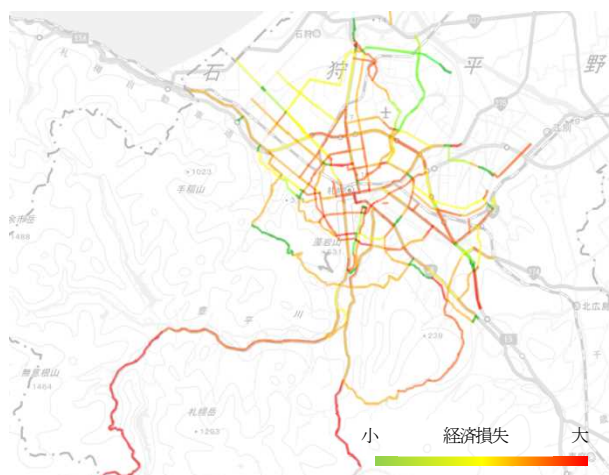


図-17 降雪による経済損失の分布（平成 25 年度冬期）

7. 1 路面すべり抵抗値および車線数と走行速度の関係

図-18 から図-20 は計測区間における HFN と走行速度の関係を車線数毎に示す。なお、図中の箱ひげは走行速度の最大値、第 3 四分位数、中央値、第 1 四分位数および最小値をそれぞれ示す。走行速度は路面すべり抵抗値の減少に伴い低下する傾向にあった。片側 2 車線区間では、路面凍結時（概ね HFN20 以下）における走行速度中央値は 42km/h となり、路面乾燥時（概ね HFN80 以

上)と比較して7km/h程度の低下が見られた。片側3車線区間および片側1車線区間ではHFNによらず走行速度のばらつきの度合いは概ね一定であるが、片側2車線区間ではHFNの低下に伴い走行速度のばらつきが大きくなる傾向にあった。これは片側2車線区間かつ滑りやすい路面では通過に要する時間のばらつきが大きくなる(当該区間通過時の時間信頼性が小さくなる)ことを示している。

7.2 路面平坦性および車線数と走行速度の関係

図-21から図-23は計測区間におけるIRIと走行速度の関係を車線数毎に示す。走行速度はIRIが大きくなるにつれ減少した。特に、片側3車線区間および片側2車線区間では無雪期(IRIは概ね1mm/m程度)の走行速度中央値は50km/hであるが、積雪によりIRIが6mm/m程度まで増大した場合に走行速度中央値が40km/h未満になるなど路面平坦性が平均走行速度に与える影響は顕著であった。また、IRI毎の走行速度のばらつきに着目すると、片側3車線区間および片側2車線区間ではIRIの増大に伴い走行速度のばらつきが大きくなる現象が見られ、IRIが6mm/m以上となる条件下では走行速度の第1四分位と第3四分位の差が20km/h以上となり、当該条件における区間通過時の時間信頼性が大きく低下することが明らかとなった。なお、本計測で得られたデータのうち、片側3車線区間ではIRIが8mm/m以上、片側2車線区間および片側1車線区間ではIRIが7mm/m以上のデータ数が少なくIRIと走行速度の関係を検証するには至らなかった。

7.3 道路有効幅員および車線数と走行速度の関係

図-24から図-26は計測区間における道路有効幅員と走行速度の関係を車線数毎に示す。本計測期間中では道路有効幅員と走行速度の間に明確な関係は見られなかった。本計測実施日には有効幅員減少による走行可能な車線数の減少といった交通容量の著しい低下がほとんど発生しなかった。道路有効幅員や車線数と走行速度の関係を分析するには、今後はより有効幅員が減少した条件下での冬期走行環境データを収集する必要があると考えられる。

これらの結果より、降雪による路面すべり抵抗値の減少やIRIの増加は平均走行速度の低下を引き起こし、特にIRIの増加は平均走行速度に与える影響が大きいことが明らかとなった。また、走行環境の悪化は平均走行速度そのものの低下だけでなく時間信頼性の低下にもつながり、路面状態悪化時の通過所要時間を過小に見積もったことによる遅延の発生などの経済損失が発生することが示唆された。

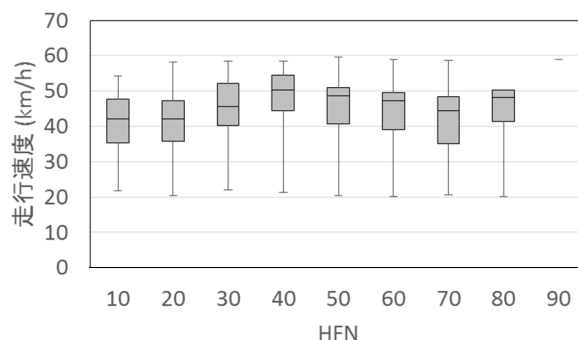


図-18 一般国道231号KP0~KP11(片側3車線区間)における路面すべり抵抗値と走行速度の関係

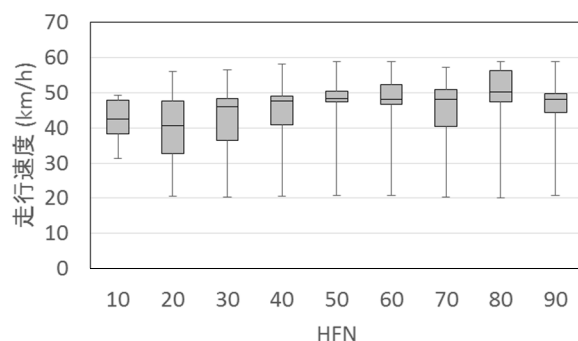


図-19 一般国道231号KP11~KP15(片側2車線区間)における路面すべり抵抗値と走行速度の関係

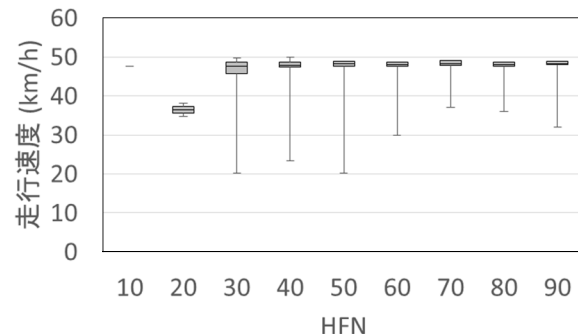


図-20 一般国道231号KP15~KP19(片側1車線区間)における路面すべり抵抗値と走行速度の関係

8. 機械学習を用いた冬期走行環境の推定

本研究は冬期の降雪、路面凍結時における道路の走行速度・時間信頼性の低下やそれに伴う経済損失、除雪作業等による経済効果を推定することを目的とする。降雪や路面凍結に伴う走行速度・時間信頼性の低下を定量的に評価するためには冬期走行環境データが必要となるが、冬期走行環境は3.2で述べたような複数の機器を用いた計測が必要となる。そこで本研究では機械学習を用いて冬期走行環境を簡便に推定する手法を開発した。

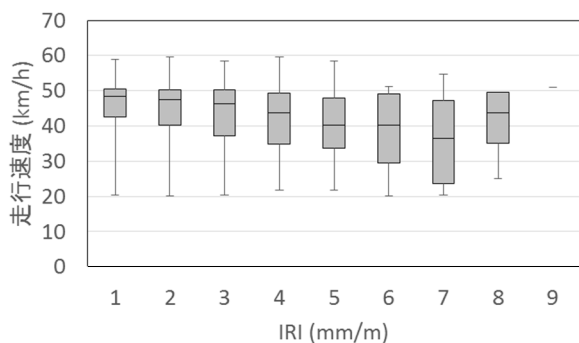


図-21 一般国道 231 号 KP0~KP11(片側 3 車線区間)における路面平坦性と走行速度の関係

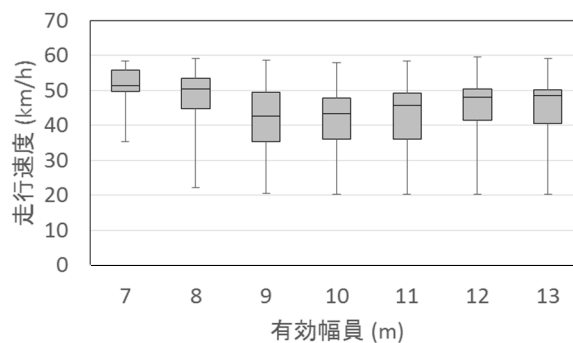


図-24 一般国道 231 号 KP0~KP11(片側 3 車線区間)における有効幅員と走行速度の関係

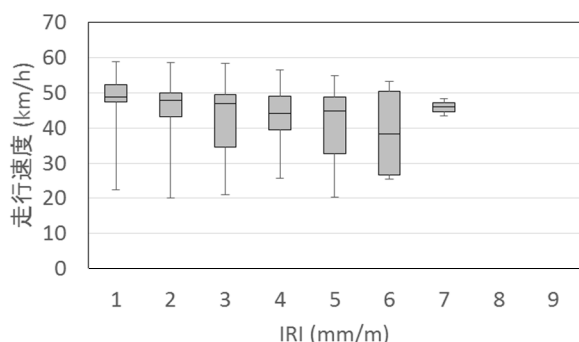


図-22 一般国道 231 号 KP11~KP15(片側 2 車線区間)における路面平坦性と走行速度の関係

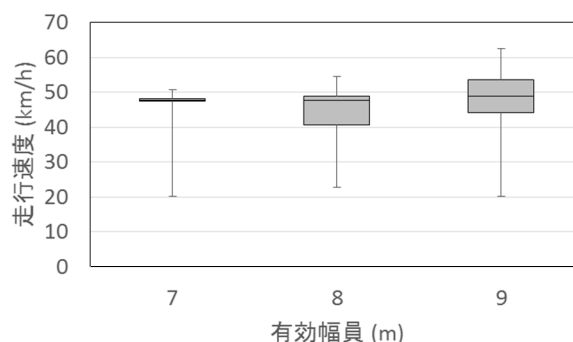


図-25 一般国道 231 号 KP11~KP15(片側 2 車線区間)における有効幅員と走行速度の関係

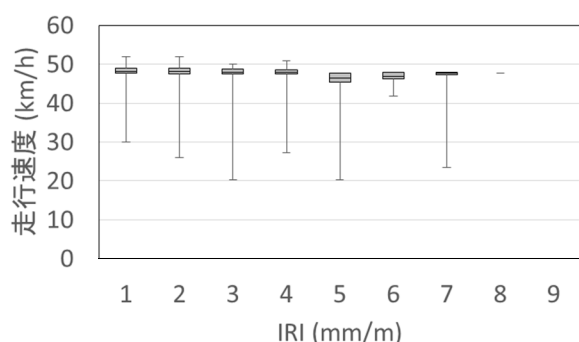


図-23 一般国道 231 号 KP15~KP19(片側 1 車線区間)における路面平坦性と走行速度の関係

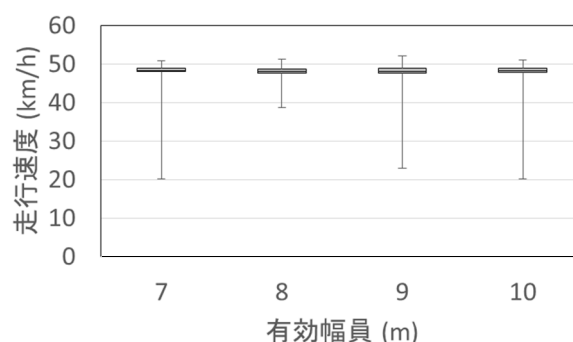


図-26 一般国道 231 号 KP15~KP19(片側 1 車線区間)における有効幅員と走行速度の関係

8. 1 多層パーセプトロンを用いた冬期走行環境推定手法の検討

本検討では 5. で収集した冬期走行環境データに加えて後述する気象データ、交通条件データを学習用データとして用いることで、機械学習により冬期走行環境を推定する手法を開発した。冬期走行環境の推定では、道路構造や気象条件などを多層パーセプトロン (MLP) に入力することで機械学習を行い、K-分割交差検証により推定モデルを生成した後に冬期走行環境の推定を行いその精度を求めた。推定モデルの生成では、学習のための MLP への入

力値として推定対象日時から 24 時間前までの札幌管区気象台における 1 時間毎気象計測値 (気温、降水量、風速、日照時間)、車線数、24 時間交通量、交差点からの距離、橋梁の有無および制限速度を用いた。また、冬期走行環境実測値は平成 29 年度および平成 30 年度の冬期に一般国道 231 号 KP0~19 で計測車両を用いて得られたすべり抵抗値、路面平坦性、道路有効幅員および走行速度 (計測回数 12 回, 計測距離延べ 460km) を使用した。なお、MLP の中間層数は 3 から 5、中間層のノード数は 50、75、100 および 150 とし最も推定精度が優れた推定モデ

ルを用いて冬期走行環境の推定を行った。

表-3 に最も推定精度が優れた推定モデルを用いた時の路面すべり抵抗値、路面平坦性、道路有効幅員および走行速度の実測値・推定値間の決定係数と RMSE・MAE、および推定に用いた MLP の中間層ノード数・中間層数をそれぞれ示す。路面すべり抵抗値の推定値は実測値と概ね一致し、決定係数は 0.660、RMSE は 9.90 となった。また、路面すべり抵抗値推定値の空間分布は図-27 に示すように実測値と概ね同様の傾向を示した。有効幅員推定値は実測値とある程度一致し、決定係数は 0.508、RMSE は 1.35 m であった。一方で、路面平坦性の推定値は実測値の傾向を再現するに至らず、決定係数は 0.131、RMSE は 0.74mm/m であった。路面平坦性の推定精度が低くなった理由としては、積雪時の路面平坦性は路面の雪氷層による凹凸の発生以外にも舗装自体の平坦性に大きく左右され、舗装自体の路面平坦性は気象や交通条件等のみから推定することは困難であるためと推察される。また、先述の気象データおよび交通条件データから走行速度を直接推定した場合の決定係数は 0.474、RMSE は 4.92km/h であり、図-28 に示すように推定値の空間分布は実測値とある程度一致した。なお、本検証では冬期走行環境推定では MLP の中間層数が増えるに従って推定精度が向上する傾向にあり、冬期走行環境を推定する手法として多数の中間層を有する MLP による学習（深層学習）が有効である可能性が示唆された。

8. 2 深層学習を用いた路面すべり推定手法の活用

本研究では、冬期走行環境のうち計測に多くの費用および労力を要する路面すべりやすさについて、深層学習を用いた路面すべり推定手法¹⁰⁾を活用することで、より安価かつ容易に路面すべりやすさを推定するための手法を開発した。路面すべりの推定手法には、深層学習の一種である Convolutional Neural Network（畳み込みニューラルネットワーク、以下 CNN）による画像分類手法を用いた。

CNN による画像分類は畳み込み・プーリング等の処理により画像の特徴量を抽出し、得られた特徴量を用いて入力画像をいくつかのクラスに分類する手法である。路面すべり

表-3 冬期走行環境推定時の決定係数、RMSE、MAE、MLP 中間層ノード数および中間層数

	決定係数	RMSE	MAE	中間層ノード数	中間層数
すべり抵抗値	0.660	9.90	6.67	150	5
路面平坦性	0.131	0.74	0.45	150	5
有効幅員	0.508	1.35	1.03	75	5
走行速度	0.474	4.92	2.63	150	5

りの推定を行うための学習済みモデルは、路面画像および

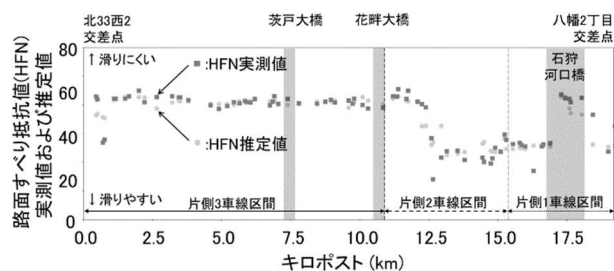


図-27 路面すべり抵抗値の実測値および推定値 (H30/1/12)

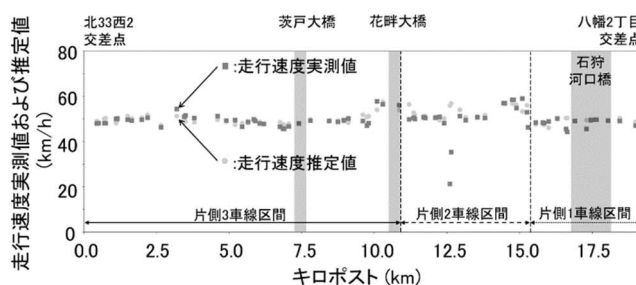


図-28 走行速度の実測値および推定値 (H30/1/12)

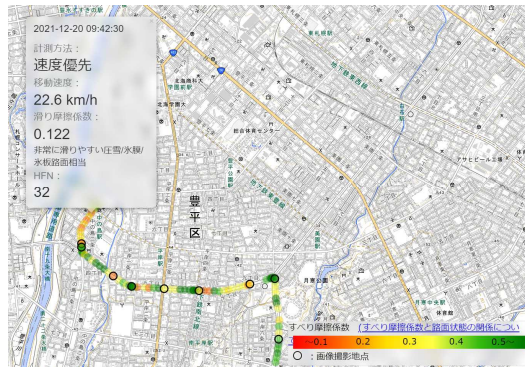
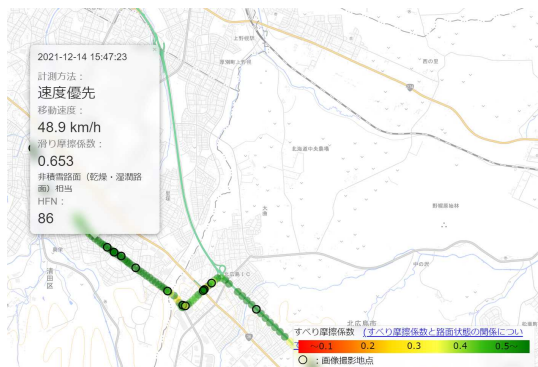


図-29 路面画像を用いた深層学習による路面すべり摩擦係数の推定例（左：非積雪時、右：積雪時）

路面すべりやすさの実測値を1組とする学習用データセットを用いて生成した。学習用データセットは図-8に示す冬期走行環境計測車両にカメラを搭載し路面画像を撮影するとともに、連続路面すべり抵抗計測装置を用いて路面すべりやすさを計測することで収集した。以上の方法により生成された学習済みモデルは、画像中の路面が映っている領域(224x112px)を入力値とし、路面すべり摩擦係数推定結果を出力する。

上記手法による路面すべり推定手法の推定精度は、日中の路面すべり摩擦係数推定値の二乗平方平均誤差が0.10程度、夜間の路面すべり摩擦係数推定値の二乗平方平均誤差が0.15程度となり、本手法を用いて実用的な精度で路面すべり摩擦係数を推定できる可能性があることが明らかとなっている¹⁰。本研究では上記手法を用いて、車載カメラ等で撮影した路面画像から深層学習により路面すべり摩擦係数を推定し、得られた結果を冬期道路管理作業の費用対効果算出に用いるためのシステムを開発した。図-29は非積雪時および積雪時における路面すべり摩擦係数の計測結果をシステム上に表示した場合の例を示す。本システムで得られた路面すべり摩擦係数推定結果は10.で後述する費用対効果による冬期道路管理作業の意思決定支援ツールの冬期走行環境推定値として用いられる。

9. 道路有効幅員計測データの解析処理の効率化検討

9.1 現状の解析方法

冬期道路有効幅員計測データの解析方法は、専用の解析用ソフトウェア(以降、「既存ソフトウェア」という。)で行うが、その際は、車線数、車線幅等の道路条件を設定し、幅員として認識する高さ等の閾値を駐車車両や並走車両等の障害物を異常値と判別するように設定する。

道路有効幅員の解析は、堆雪、縁石等の道路構造物と車道との境界を、設定した条件により判別するため、異常値と判別されたデータは、無効データとなり除外される。解析は、閾値を調整しながら無効データが少なくなるように繰り返し実施する。しかし、閾値の調整だけでは、轍や車両走行により飛散した雪を異常値として判別する場合もあるため、解析したすべてのデータをカメラで撮影した計測箇所の画像と照合しながら確認し、手作業で適宜修正している(図-30)。

このように、すべての計測データを正しく解析する閾値の設定は難しく、最終的には人がすべての解析データを確認しているため解析作業に多くの時間を要している。

従って、迅速な冬期道路幅員の状況把握には、計測データの解析処理の効率化が必要である。

9.2 AIを用いた解析データ判定処理方法の検討

9.2.1 検討概要

道路有効幅員の計測には、2Dレーザースキャナを搭載した車両から道路横断面形状をスキャンし、道路横断面を点群データとして画像表示すると共に、歩道高さ、分離帯高さ、幅員を自動計算する。解析する計測データは、膨大な道路横断面のデータであり、多くの時間と煩雑な手作業を伴うため、解析処理の効率化には、AIの活用が有効であると考えた。

今回の検討は、解析データで修正が必要なデータの抽出を一次スクリーニングとしてAIで判別し、人が確認するデータ数を絞り込むことを目的とした。対象データが、2次元座標上にプロットした点群画像データであるので、AI画像認識技術を使用し、判定結果の正誤分類による検証を行った。

モデルの構築は、既存ソフトウェアで判別された結果を画像化し、手動修正が行われる前の画像を「修正前(幅員に誤りがある画像)」、手動修正が行われた後の画像を「修正後(幅員が正しい画像)」として正解データ(分類タグ)を付与した。それぞれの画像を学習データとテストデータに分割し、学習データを用いてAIモデルを構築したのち、学習済みモデルにテストデータを投入し、精度検証を実施した。AIモデルの結果は、テストデータ毎に正解データ「修正後」である可能性が確率値で出力される。令和元年度の精度検証においては、確率値の閾値を一律50%とし、50%以上を「修正後」、50%未満を「修正前」として判定することとしたが、修正が必要なデータの特徴を捉えきれなかった。そのため、令和2年度は解析精度を向上させることを目的に道路構造と修正幅員幅の2種類のタグを付与して検証を行ったところ、修正幅員幅のタグを付与することで精度が向上した。そこで令和3年度は修正の多かつ

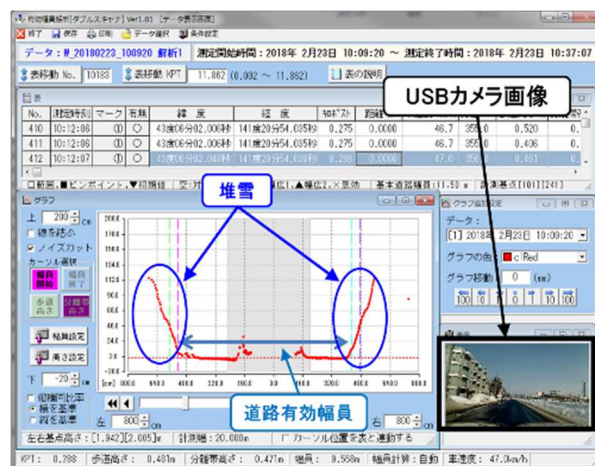


図-30 現状の解析画面

		予測 (判定結果)	
		陽性	陰性
真の値 (正解)	陽性	True Positive (TP)	False Negative (FN)
	陰性	False Positive (FP)	True Negative (TN)

- ・ TP : 幅員が正しい画像を正しいと判定
- ・ FN : 幅員が正しい画像を誤りと判定
- ・ FP : 幅員が誤りの画像を正しいと判定
- ・ TN : 幅員が誤りの画像を誤りと判定

図-31 混同行列

た工区で、修正幅員幅毎のタグを付けた学習モデルを構築し、「修正が必要なデータ」と「修正が不要なデータ」の抽出精度に着目して検証した。

なお、評価の手法は、分類モデルで一般的に用いられる混同行列を用いた(図-31)。混同行列は、任意のタグに対して「真の値」「予測の値」をそれぞれ「陽性」「陰性」の2パターンに分類してデータを整理したものである。モデルの評価には、この整理をもとに算出される「適合率 (Precision)」と「再現率 (Recall)」を用いた。本検証の適合率とは、幅員が正しい画像を正しいと予測したデータのうち、実際に正しいものの割合 ($TP/(TP+FP)$) をいい、再現率は実際に幅員が正しい画像データのうち、正しいと予測されたものの割合 ($TP/(TP+FN)$) として評価している。

9. 2. 2 AI モデルの学習方法

令和元年度の検証に使用したデータは、一般国道 231 号 KP0~KP19 (札幌市北区北 34 条西 2 丁目~石狩市八幡 2 丁目) の道路有効幅員を計測後、既存ソフトウェアで解析したデータのうち、人による修正作業が多かった平成 31 年 1 月 11 日、2 月 1 日、2 月 8 日のデータとした。

令和元年度は、最も手動修正件数が多かった 1 月 11 日のデータを用いて学習モデルの構築を行った。学習モデルの構築に当たっては、学習に用いる画像の作成方法(分割・加工)の違いが学習モデルの精度にどの程度影響するかに着目した。

着目した。

次に、特定日(モデルの構築に使用した 1 月 11 日)以外のデータに対して構築した学習モデルが、どの程度有効かを確認するために、手動修正件数が 2 番目、3 番目に多かった 2 月 1 日と 2 月 8 日のデータを用いて学習モデルの精度検証を行った。

最後に、2 月 1 日及び 2 月 8 日のデータは、1 月 11 日のデータと特徴が違うことから、学習モデルの精度を確認するため、データを追加してモデルの再構築を実施した。モデルの構築に当たっては、1 月 11 日、2 月 1 日、2 月 8 日の 3 日分のデータを用いた。令和 2 年度に学習させるデータは、令和元年度に検証した 3 日分のデータのほか、令和 2 年 2 月 5 日の計測データを追加して精度検証を行った。

学習モデルは、過年度同様、幅員の修正を行った画像のみを対象とし、左右で修正箇所の修正内容が異なっていることから左右別にデータを作成した。それを 1 日ごとの学習モデルと、4 日分の学習モデルとして AI に学習させることにより学習モデルを構築した。

令和 3 年度は、令和 2 年度に使用した 4 日分のデータで修正作業が多かった一般国道 231 号 KP0~KP12 (札幌市北区北 34 条西 2 丁目~石狩市新港南 2 丁目) の右側車線区間データのほか、この 4 日分のデータは幅員を修正した幅の小さいデータが少なかったため、さらに 8 日分(平成 30 年 2 月 14 日・12 月 21 日、平成 31 年 1 月 28 日、令和 2 年 1 月 20 日・1 月 21 日・2 月 6 日・2 月 17 日・2 月 18 日)のデータを追加し、計 12 日分のデータでモデルを構築した。なお、12 日分のデータは学習用と検証用に分け、解析の精度を確認した。

9. 2. 3 AI モデルの検証結果

令和元年度の検証では、1 月 11 日のデータを用いて、画像による「修正前」「修正後」の学習モデルを構築し、ケース 1 (画像全体を学習) とケース 2 (左右の幅員を別々のデータとするため画像を分割して学習) を比較した。なお、データは、計測時に車両の左右に搭載したレーザースキャナで、それぞれ計測し合成している。結果としては、ケース 2 のモデルの方が精度が高いことがわかった(図-32)。特に右側のモデルが左側のモデルに比べて精度が高く、適合率 (Precision)、再現率 (Recall) とともに 80% を超えており、一般的な画像分類においては、高い精度を確保できているといえる。これは、車両の右側の点群データがまばらになりやすいレーザースキャナによる計測データの取得時の特性があり、右側の方が判定しやすいデータとなった可能性があるからである。ケース 1 のモデルの

精度が低かった理由としては、既存ソフトウェアで解析されたデータを修正する際、左側だけ、あるいは右側だけを修正されている箇所も多いことから、修正前後の特徴（差異）が複雑になり十分な学習ができなかったためと考えられる。よって、以降の精度検証には、画像を分割して学習したモデルの精度が高かったことから、画像を左右に分割したケース2との比較で実施した。

次に加工の違いによる精度を検証した。色彩の特徴量が減ることによる精度を確認するため、画像をグレースケール化して学習させたモデルと、ケース2によるモデルと

を比較した。その結果、グレースケール化させた画像（ケース3）の精度が下がり、グレースケール化したモデルから画像の色彩の特徴量も重要な特徴の一つである可能性が高いことがわかった（図-33）。

次にモデルの精度の検証として1月11日のデータで作成したモデル（ケース2）に2月1日と2月8日のデータをテストデータとして入力し検証（ケース2検証）したところ1月11日のみで検証（ケース2）した結果よりも精度が下がっている（図-34）。これは、2月1日と2月8日のデータには1月11日のデータに見られない特徴があると考え

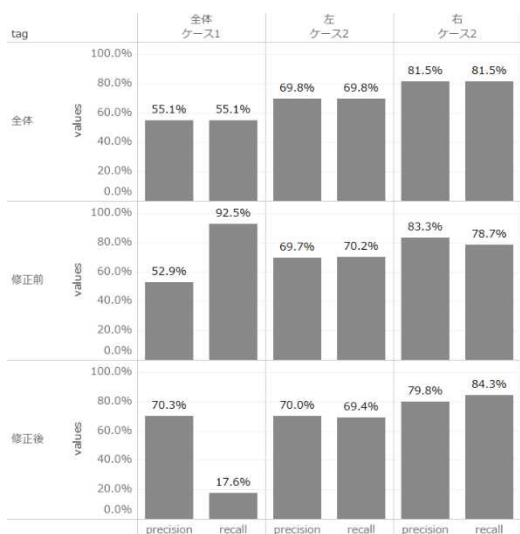


図-32 ケース1(画像全体)と
ケース2(左右分割)の比較

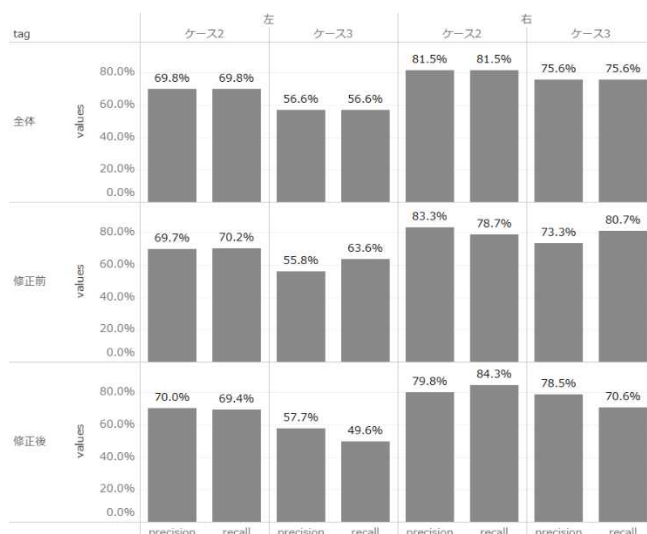


図-33 ケース2(通常画像)と
ケース3(グレースケール)の比較

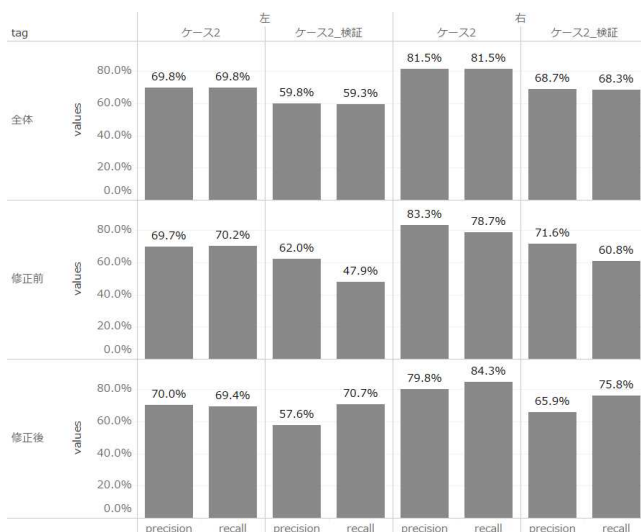


図-34 ケース2(同日のデータ)と
ケース2検証データ(別日のデータ)の比較

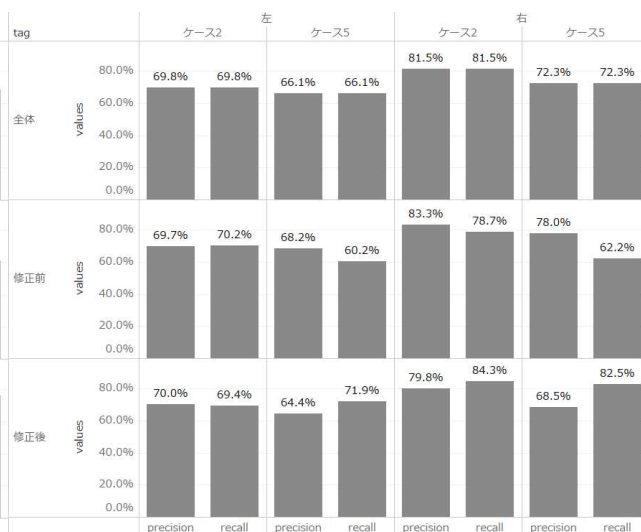


図-35 ケース2(1日分データのモデル)と
ケース5(3日分データのモデル)の比較

られた。カメラ映像を確認したところ、1月11日のデータには計測中に降雪があったのに対して2月1日と2月8日のデータは、計測中の降雪はなかった。降雪中のデータには、レーザースキャナで計測した点群データに、計測車両の走行などによる雪の舞い上がりを計測したデータがあるなど、1月11日と他の日の計測データには違いがあった。

最後に2月1日及び2月8日のデータは、1月11日のデータと特徴が違うことから、学習モデルの再学習（学習データの追加）として、1月11日のデータに加え2月1日及び2月8日の3日分のデータで再学習させ（ケース5）精度の検証を実施した。その結果、前述の1月11日のモデル（ケース2）に比べると精度は下がった（図-35）が、1月11日のモデルに2月1日及び2月8日のデータを投入した場合（ケース2検証）に比べて全体的に精度が向上した。

これらのことから、1日分のデータだけでは、計測日より異なる様々な状況を十分に学習できないことがわかった。また異なる計測日のデータを追加することで精度は改善するが、単純に追加するだけでは十分な学習には至らないということがわかった。

令和2年度は、交差点、バス停、中央分離帯の道路構造がデータ解析に影響を及ぼすかについて検証するため、これらのタグを付与した画像をAIに学習させモデルを構築した。なお、構築したモデル概要を表-4に示す。

道路構造の影響について検証するにあたりモデル1-0とモデル1-2を基本モデルとし、「交差点」「バス停」「中央分離帯」のすべてのタグを設定したモデルを1-1、1-3として精度の検証を行った（道路構造1）。

次に4日間すべてのデータを学習させたケース2を基本モデル（モデル2-0）とし「交差点」「バス停」「中央分離帯」を同一タグとして設定したモデル2-1、「交差点」「バス停」「中央分離帯」をそれぞれ個別のタグとして設定したモデル2-2～4について、精度の検証を行った（道路構造2）。

表-4 構築した道路構造タグ付きモデル

No	方法	モデル名	モデル説明	学習データ	
1	道路構造1	モデル1-0	2019年1月11日モデル(基本モデル)	2019年1月11日	
2		モデル1-1	モデル1-0の道路構造タグ付きモデル		
3		モデル1-2	2020年2月5日学習モデル		2020年2月5日
4		モデル1-3	モデル1-2の道路構造タグ付きモデル		
5	道路構造2	モデル2-0	4日データ学習モデル	2019年1月11日	
6		モデル2-1	4日データ道路構造タグ付きモデル	2019年2月1日	
7		モデル2-2	交差点モデル	2019年2月8日	
8		モデル2-3	バス停モデル	2020年2月5日	
9		モデル2-4	中央分離帯モデル		

道路構造1における検証結果を図36-から図39、道路構造2における検証結果を図40から図44に示す。

「交差点」「バス停」「中央分離帯」のタグを付与したモデルの精度検証において、タグの付与の仕方により適合率、再現率の増減は異なるが、交差点のみ付与したモデル2-2において適合率、再現率が低下している（図-42）。これは交差点の対象データが、左側24件、右側68件と少なかったため、学習に必要なデータ数を確保することができなかったことが要因の一つと考えられる。

なお、冬期道路幅員に影響を与えると想定していた道路構造（交差点、バス停、中央分離帯）のタグを付与し、モデルの構築を行ったが、タグをつけることによる精度の向上は確認できなかった。これは、本報告「3.2」で記載している計測システムの機器構成において、計測車両のGPSの受信性能（1秒間に1回）とレーザースキャナの計測性能（0.1秒間に1回）が異なっているため、レーザースキャナの計測結果に対し、GPSの計測結果はわずかにずれた地点・時点の情報となり、道路構造物ごとに付与した緯度/経度情報と、GPSの計測結果にずれが生じていたことが要因と考えられる。

続いて修正した幅員の幅が解析精度に及ぼす影響について確認するため、これらのタグを付与した画像をAIに学習させ、モデルを構築した。なお、構築したモデル概要を表-5に示す。

計測日について精度の検証するモデル1-0とモデル1-2を基本モデルとし、それぞれの計測日の基本モデルに修正幅員タグを付与して精度の検証を行った（修正幅員1）。

次に4日間のデータを学習させたモデル2-0を基本モデルとし、すべての修正幅員タグを付与して学習させたモデル2-1及び修正幅員別（30cm以上、50cm以上、1m以上の3区分）に学習させたモデル2-2～2-4について精度の検証を行った（修正幅員2）。

修正幅員1で検証している単日のデータでは、解析精度が向上することもあれば、逆に低下することも確認でき

表-5 モデル概要

No	方法	モデル名	モデル説明	学習データ	
1	修正幅員1	モデル1-0	2019年1月11日学習モデル(基本モデル)	2019年1月11日	
2		モデル1-1	モデル1-0の修正幅員タグ付きモデル		
3		モデル1-2	2020年2月5日学習モデル		2020年2月5日
4		モデル1-3	モデル1-2の修正幅員タグ付きモデル		
5	修正幅員2	モデル2-0	4日間データ学習モデル	2019年1月11日	
6		モデル2-1	4日間データ修正幅員タグ付きモデル	2019年2月1日	
7		モデル2-2	修正幅員幅30cm以上モデル	2019年2月8日	
8		モデル2-3	修正幅員幅50cm以上モデル	2020年2月5日	
9		モデル2-4	修正幅員幅1m以上モデル		

た(図-45~47)。これは左右で修正幅員の幅のデータ分布が偏っていることが要因の一つと推察され、そのため、AIで学習させる場合は、データ件数に偏りのない形で学習させることも重要であると考えられる。

なお、修正幅員2の4日間モデルにおいて左側レーザースキャナの再現率が大幅に向上している(図-48~50)。これは複数日としたことにより、学習件数が増加したためデータの偏りが減ったことが再現率が向上した要因の一

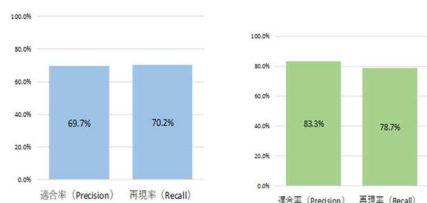


図-36 モデル1-0 (2019年1月11日モデル)の適合率と再現率 (左: 左側レーザースキャナ、右: 右側レーザースキャナ)

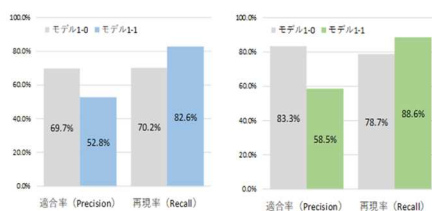


図-37 モデル1-1 (モデル1-0のタグ付きモデル)の適合率と再現率 (左: 左側レーザースキャナ、右: 右側レーザースキャナ)

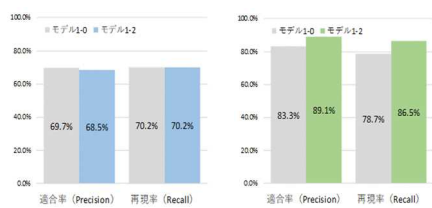


図-38 モデル1-2 (2020年2月5日モデル)の適合率と再現率 (左: 左側レーザースキャナ、右: 右側レーザースキャナ)

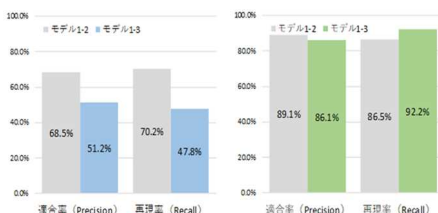


図-39 モデル1-3 (モデル1-2のタグ付きモデル)の適合率と再現率 (左: 左側レーザースキャナ、右: 右側レーザースキャナ)

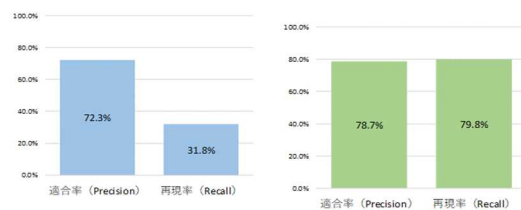


図-40 モデル2-0 (4日間モデル)の適合率と再現率 (左: 左側レーザースキャナ、右: 右側レーザースキャナ)

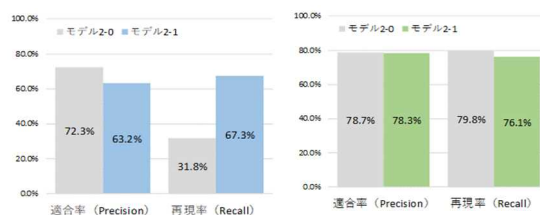


図-41 モデル2-1 (モデル2-0のタグ付きモデル)の適合率と再現率 (左: 左側レーザースキャナ、右: 右側レーザースキャナ)

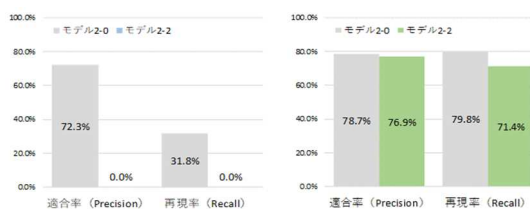


図-42 モデル2-2 (交差点モデル)の適合率と再現率 (左: 左側レーザースキャナ、右: 右側レーザースキャナ)

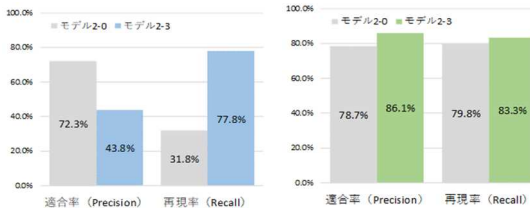


図-43 モデル2-3 (バス停モデル)の適合率と再現率 (左: 左側レーザースキャナ、右: 右側レーザースキャナ)

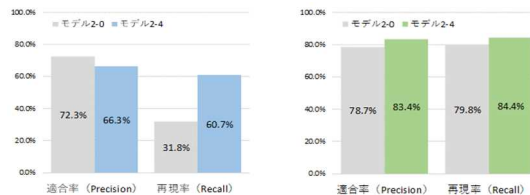


図-44 モデル2-4 (中央分離帯モデル)の適合率と再現率 (左: 左側レーザースキャナ、右: 右側レーザースキャナ)

つと考えられる。

修正幅員幅タグを付与してAIモデルを構築することにより解析精度が向上したことから、令和3年度は、重複のない修正幅員別のタグを付与した画像をAIに学習させ、学習用モデルを構築した後、この学習用モデルに検証用のデータを投入し、解析の精度を確認した。検証結果は、修正不要 (after)、もしくは要修正 (before) である確率値が示され、この各確率値別の枚数を整理した。また、確率値別の整理に加え、修正不要、要修正において、どれだけ取りこぼしなく予測することができたかを表す再現率と、予測したものがどれだけ正しかったかを示す適合率の値を整理した。なお、学習用モデルの構築にあたり、タグと

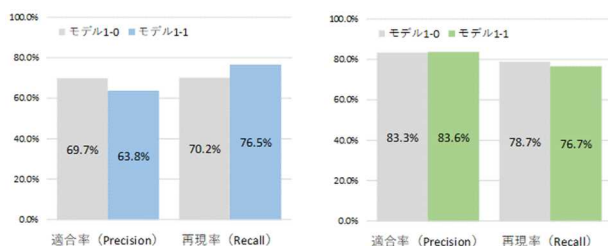


図-45 モデル1-0とモデル1-1のモデル精度比較
(左図：左側レーザースキャナ、
右図：右側レーザースキャナ)

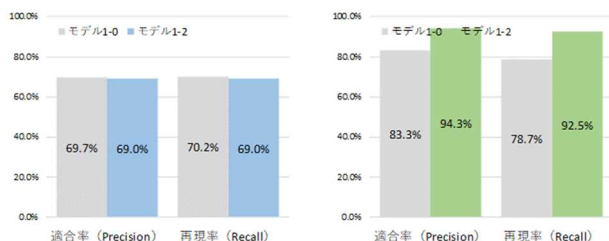


図-46 モデル1-0とモデル1-2のモデル精度比較
(左図：左側レーザースキャナ、
右図：右側レーザースキャナ)

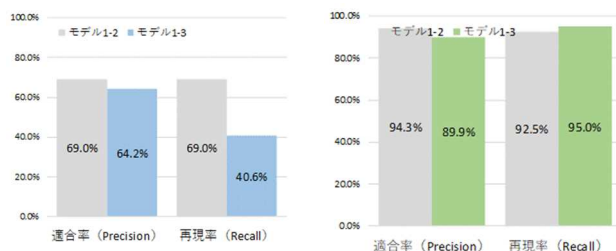


図-47 モデル1-2とモデル1-3のモデル精度比較
(左図：左側レーザースキャナ、
右図：右側レーザースキャナ)

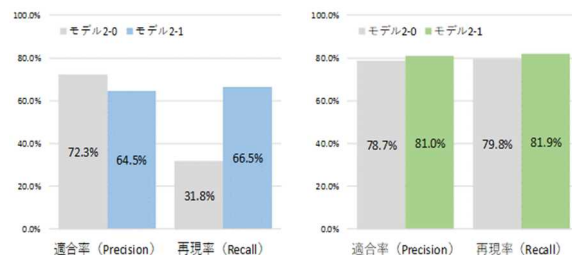


図-48 モデル2-0とモデル2-1のモデル精度比較
(左図：左側レーザースキャナ、
右図：右側レーザースキャナ)

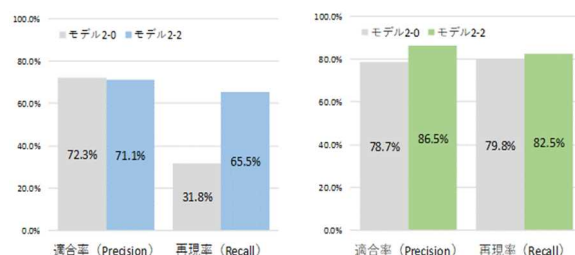


図-49 モデル2-0とモデル2-2のモデル精度比較
(左図：左側レーザースキャナ、
右図：右側レーザースキャナ)

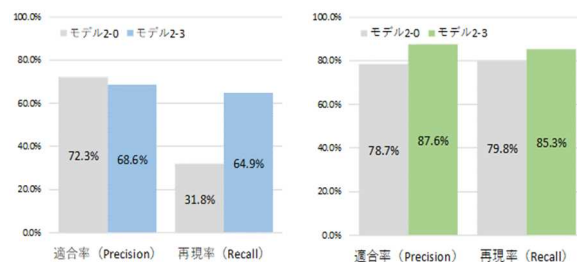


図-50 モデル2-0とモデル2-3のモデル精度比較
(左図：左側レーザースキャナ、
右図：右側レーザースキャナ)

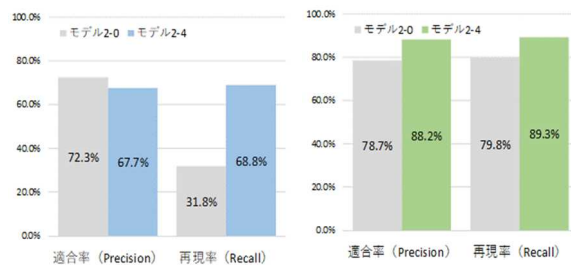


図-51 モデル2-0とモデル2-4のモデル精度比較
(左図：左側レーザースキャナ、
右図：右側レーザースキャナ)

表-6 修正幅5区分モデル(左側レーザースキャナ)の修正の有無における確率値別データ数

	修正不要と判断された画像			要修正と判断された画像		
	AIによる判断	修正不要(after)	要修正(before)	AIによる判断	要修正(after)	修正不要(before)
0%	530	265	265	530	265	265
10%	530	265	265	530	265	265
20%	530	265	265	530	265	265
30%	530	265	265	530	265	265
40%	507	254	253	521	263	258
50%	289	165	124	429	236	193
60%	39	29	10	104	69	35
70%	1	1	0	4	3	1
80%	0	0	0	0	0	0
90%	0	0	0	0	0	0
100%	0	0	0	0	0	0

表-7 修正幅5区分モデル(左側レーザースキャナ)の修正の有無における確率値別適合率と再現率

	修正不要と判断された画像		要修正と判断された画像	
	Recall	Precision	Recall	Precision
0%	100.00%	50.00%	100.00%	50.00%
10%	100.00%	50.00%	100.00%	50.00%
20%	100.00%	50.00%	100.00%	50.00%
30%	100.00%	50.00%	100.00%	50.00%
40%	95.85%	50.10%	99.25%	50.48%
50%	62.26%	57.09%	89.06%	55.01%
60%	10.94%	74.36%	26.04%	66.35%
70%	0.38%	100.00%	1.13%	75.00%
80%	0.00%		0.00%	
90%	0.00%		0.00%	
100%	0.00%		0.00%	

表-8 修正幅5区分モデル(右側レーザースキャナ)の修正の有無における確率値別データ数

	修正不要と判断された画像			要修正と判断された画像		
	AIによる判断	修正不要(after)	要修正(before)	AIによる判断	要修正(after)	修正不要(before)
0%	1,298	649	649	1,298	649	649
10%	1,294	649	645	1,292	647	645
20%	1,221	645	576	1,251	642	609
30%	1,081	641	440	1,148	632	516
40%	922	614	308	940	593	347
50%	777	573	204	709	523	186
60%	616	485	131	528	445	83
70%	385	328	57	365	335	30
80%	147	130	17	200	193	7
90%	22	18	4	26	25	1
100%	0	0	0	0	0	0

表-9 修正幅5区分モデル(右側レーザースキャナ)の修正の有無における確率値別適合率と再現率

	修正不要と判断された画像		要修正と判断された画像	
	Recall	Precision	Recall	Precision
0%	100.00%	50.00%	100.00%	50.00%
10%	100.00%	50.15%	99.69%	50.08%
20%	99.38%	52.83%	98.92%	51.32%
30%	98.77%	59.30%	97.38%	55.05%
40%	94.61%	66.59%	91.37%	63.09%
50%	88.29%	73.75%	80.59%	73.77%
60%	74.73%	78.73%	68.57%	84.28%
70%	50.54%	85.19%	51.62%	91.78%
80%	20.03%	88.44%	29.74%	96.50%
90%	2.77%	81.82%	3.85%	96.15%
100%	0.00%		0.00%	

表-10 修正幅3区分モデル(左側レーザースキャナ)の修正の有無における確率値別データ数

	修正不要と判断された画像			要修正と判断された画像		
	AIによる判断	修正不要(after)	要修正(before)	AIによる判断	要修正(after)	修正不要(before)
0%	530	265	265	530	265	265
10%	530	265	265	530	265	265
20%	530	265	265	530	265	265
30%	530	265	265	527	265	262
40%	519	262	257	500	260	240
50%	427	230	197	321	181	140
60%	190	119	71	78	48	30
70%	19	17	2	1	1	0
80%	0	0	0	0	0	0
90%	0	0	0	0	0	0
100%	0	0	0	0	0	0

表-11 修正幅3区分モデル(左側レーザースキャナ)の修正の有無における確率値別適合率と再現率

	修正不要と判断された画像		要修正と判断された画像	
	Recall	Precision	Recall	Precision
0%	100.00%	50.00%	100.00%	50.00%
10%	100.00%	50.00%	100.00%	50.00%
20%	100.00%	50.00%	100.00%	50.00%
30%	100.00%	50.00%	100.00%	50.28%
40%	98.87%	50.48%	98.11%	52.00%
50%	86.79%	53.86%	68.30%	56.39%
60%	44.91%	62.63%	18.11%	61.54%
70%	6.42%	89.47%	0.38%	100.00%
80%	0.00%		0.00%	
90%	0.00%		0.00%	
100%	0.00%		0.00%	

表-12 修正幅3区分モデル(右側レーザースキャナ)の修正の有無における確率値別データ数

	修正不要と判断された画像			要修正と判断された画像		
	AIによる判断	修正不要(after)	要修正(before)	AIによる判断	要修正(after)	修正不要(before)
0%	1,298	649	649	1,298	649	649
10%	1,279	648	631	1,281	646	635
20%	1,145	645	500	1,194	641	553
30%	1,009	638	371	1,034	624	410
40%	888	615	273	828	590	238
50%	778	577	201	667	520	147
60%	633	502	131	528	451	77
70%	458	393	65	391	356	35
80%	215	195	20	232	226	6
90%	47	41	6	53	51	2
100%	0	0	0	0	0	0

表-13 修正幅3区分モデル(右側レーザースキャナ)の修正の有無における確率値別適合率と再現率

	修正不要と判断された画像		要修正と判断された画像	
	Recall	Precision	Recall	Precision
0%	100.00%	50.00%	100.00%	50.00%
10%	99.85%	50.66%	99.54%	50.43%
20%	99.38%	56.33%	98.77%	53.69%
30%	98.31%	63.23%	96.15%	60.35%
40%	94.76%	69.26%	90.91%	71.26%
50%	88.91%	74.16%	80.12%	77.96%
60%	77.35%	79.30%	69.49%	85.42%
70%	60.55%	85.81%	54.85%	91.05%
80%	30.05%	90.70%	34.82%	97.41%
90%	6.32%	87.23%	7.86%	96.23%
100%	0.00%		0.00%	

表-14 修正幅2区分モデル(左側レーザースキャナ)の修正の有無における確率値別データ数

	修正不要と判断された画像			要修正と判断された画像		
	AIによる判断	修正不要(after)	要修正(before)	AIによる判断	要修正(after)	修正不要(before)
0%	530	265	265	530	265	265
10%	530	265	265	530	265	265
20%	530	265	265	530	265	265
30%	530	265	265	530	265	265
40%	530	265	265	515	257	258
50%	510	263	247	361	205	156
60%	344	198	146	70	53	17
70%	67	49	18	1	1	0
80%	0	0	0	0	0	0
90%	0	0	0	0	0	0
100%	0	0	0	0	0	0

表-15 修正幅2区分モデル(左側レーザースキャナ)の修正の有無における確率値別適合率と再現率

	修正不要と判断された画像		要修正と判断された画像	
	Recall	Precision	Recall	Precision
0%	100.00%	50.00%	100.00%	50.00%
10%	100.00%	50.00%	100.00%	50.00%
20%	100.00%	50.00%	100.00%	50.00%
30%	100.00%	50.00%	100.00%	50.00%
40%	100.00%	50.00%	96.98%	49.90%
50%	99.25%	51.57%	77.36%	56.79%
60%	74.72%	57.56%	20.00%	75.71%
70%	18.49%	73.13%	0.38%	100.00%
80%	0.00%		0.00%	
90%	0.00%		0.00%	
100%	0.00%		0.00%	

表-16 修正幅2区分モデル(右側レーザースキャナ)の修正の有無における確率値別データ数

	修正不要と判断された画像			要修正と判断された画像		
	AIによる判断	修正不要(after)	要修正(before)	AIによる判断	要修正(after)	修正不要(before)
0%	1,298	649	649	1,298	649	649
10%	1,177	645	532	1,276	646	630
20%	1,063	643	420	1,193	640	553
30%	943	624	319	1,073	632	441
40%	826	600	226	888	602	286
50%	727	564	163	744	555	189
60%	618	502	116	614	506	108
70%	483	412	71	503	443	60
80%	268	245	23	356	332	24
90%	73	66	7	187	182	5
100%	0	0	0	0	0	0

表-17 修正幅2区分モデル(右側レーザースキャナ)の修正の有無における確率値別

	修正不要と判断された画像		要修正と判断された画像	
	Recall	Precision	Recall	Precision
0%	100.00%	50.00%	100.00%	50.00%
10%	99.38%	54.80%	99.54%	50.63%
20%	99.08%	60.49%	98.61%	53.65%
30%	96.15%	66.17%	97.38%	58.90%
40%	92.45%	72.64%	92.76%	67.79%
50%	86.90%	77.58%	85.52%	74.60%
60%	77.35%	81.23%	77.97%	82.41%
70%	63.48%	85.30%	68.26%	88.07%
80%	37.75%	91.42%	51.16%	93.26%
90%	10.17%	90.41%	28.04%	97.33%
100%	0.00%		0.00%	

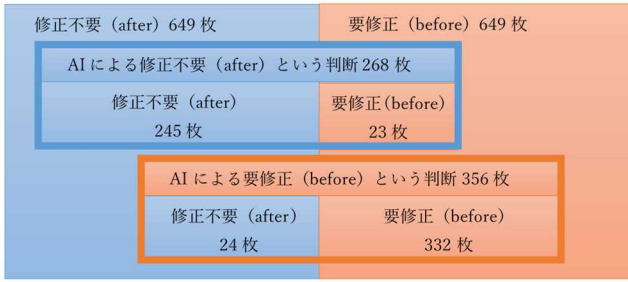


図-52 閾値 80%における AI による絞込イメージ

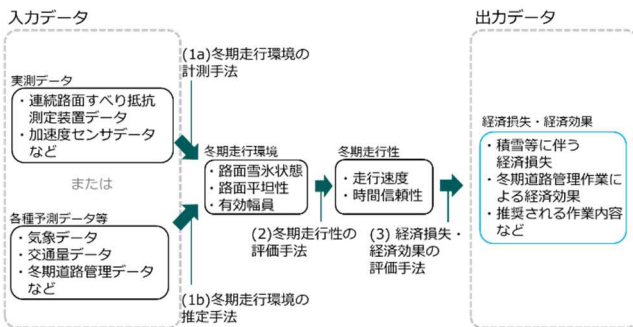


図-53 積雪等による経済損失および除雪等による経済効果の算出方法



図-54 費用対効果による冬期道路管理作業の意思決定支援ツール

して付与した修正幅員の区分は以下の 3 種類である。

- 5 区分 : 0cm~10cm 未満、10cm~30cm 未満、30 cm~50cm 未満、50 cm~1m 未満、1m 以上
- 3 区分 : 0cm~50cm 未満、50cm~1m 未満、1m 以上
- 2 区分 : 0cm~1m 未満、1m 以上

修正幅員 5 区分における検証結果を表-6~9、修正幅員

3 区分における検証結果を表-10~13、修正幅員 2 区分における検証結果を表-14~17 に示す。

表-16 は、修正幅員幅 2 区分の右側レーザースキャナ画像 1,298 枚を検証した結果であるが、修正不要データが 649 枚、要修正データを 649 枚含ませた状態で、AI には、その正解情報を知らせず修正不要、要修正の判断をさせた。なお、修正不要と要修正の確率値を変えることにより、AI が判断する枚数とその正解率は変動する。修正不要、要修正ともに確率値を 80%とした場合、1,298 枚中 268 枚は修正不要、356 枚は要修正と判断され、残りの 674 枚 (1,298 枚-268 枚-356 枚) を人が確認することとなる。なお、本来修正が必要な 23 枚は見逃され、修正の必要のない 24 枚は要修正と判断された。なお、確率値を低くするほど修正不要と要修正は重複する結果となった(図-52)。

この修正不要、要修正における再現率と適合率を整理した結果、修正幅 2 区分モデル (右側レーザースキャナ) の確率値を 80%とした場合 (表-17)、再現率は 37.75% (修正不要)、51.16% (要修正)、適合率は 91.42% (修正不要)、93.26% (要修正) となり、再現率と適合率のバランスから確率値は 70%から 80%が良いと考えられる。ただ、左側レーザースキャナ画像の再現率と適合率を見る限り、左側レーザースキャナ画像を AI に解析させることは現状の学習データ数では難しいと考えられる。これは、左側レーザースキャナの画像は、右側レーザースキャナの画像に比べ、路側の雪堤に近いことから、レーザースキャナの点群データの密度が高くなるため、AI が画像の変化を捉えきれず、精度が向上しなかったと考えられる。そのため、左側レーザースキャナにおける修正が必要な画像及び修正が不要な画像の学習データを増やすことで、点群画像の傾向が明確となり、解析の精度が向上することが期待される。なお、修正幅員を細かく設定し AI に学習させても、再現率と適合率の値が高くならなかったことから、修正幅員を細かく学習させても、解析精度の向上にはつながらないものと考えられる。

今までの検証結果から、道路有効幅員解析データの修正箇所を AI で確認させるには、有効幅員の画像を左右に分け、修正した幅員幅が「1m 未満、1m 以上」などの大まかなタグを付与し、道路状況が異なる複数日の修正画像をより多く AI に学習させることが重要である。これらのことから現在、道路有効幅員解析データの全ての点群画像を人が目視確認している作業を、AI 技術を活用することにより、人で行っていた作業を軽減できることを確認した。

10. 費用対効果による冬期道路管理作業の意思決定支援ツールの開発

本章では、前章までに述べた手法を統合して、冬期走行環境や走行速度、積雪・路面凍結による経済損失や除雪・凍結防止剤散布による経済効果を算出し、冬期道路管理作業の意思決定を支援するツール(冬期道路管理作業意思決定支援ツール)の開発を行った。

図-53は積雪・路面凍結による経済損失および除雪・凍結防止剤散布による経済効果の算出方法の概要を示す。本提案手法では、3. で開発した冬期走行環境計測車両、8. で開発した冬期走行環境推定手法などを用いて、対象とする区間の冬期走行環境を明らかにする(図中(1a)および(1b))。次に、5. で得られた冬期走行環境と走行速度の関係から、積雪・路面凍結による走行速度の低下幅または除雪・凍結防止剤散布等の作業実施による走行速度の上昇幅を算出する(図中(2))。その後、6. で開発した手法を用いて、走行速度の変化幅および交通量から経済損失・経済効果額を推定する(図中(3))。

本ツールは、8. 2 で挙げた深層学習による路面雪氷状態推定手法や既往の冬期道路マネジメントシステム(冬期の気象や路面温度、路面雪氷状態などの実況・予測情報を提供するシステム)との連携を今後行うことを想定し、HTML5およびJavaScriptを用いてWebブラウザ上で動作するシステムとして実装した。

図-54は費用対効果による冬期道路管理作業意思決定支援ツールの使用例を示す。本ツールは冬期走行環境、交通量や除雪・凍結防止剤散布作業費用などを入力することで、走行速度の低下の度合いや走行速度低下に伴う経済損失額、除雪や凍結防止剤散布による走行速度改善効果や経済効果を算出することが可能である。

11. まとめ

本研究は、冬期道路管理の費用対効果を定量的に評価する手法の構築を最終目標とし、平成28年度は冬期走行環境と走行性の関係検証を、平成29年度はこれに加えて冬期道路管理の費用対効果の評価ツールの開発に取り組んだ。また、平成30年度は冬期走行環境実測値の蓄積を進めるとともに、冬期走行環境と時間信頼性の関係についても検証を行った。令和元年度は機械学習を用いて気象条件や交通条件等から冬期走行環境の推定が可能であるかの検証と、道路有効幅員計測データ解析の効率化の検討を行った。令和2年度は市街地における冬期走行環境と走行速度の実測データ収集を行うとともに、費用対効果による冬期道路管理作業の意思決定支援ツールの開発を行っ

た。令和3年度は冬期走行環境のうち路面すべりを簡易的に推定する手法を用いて積雪・路肩堆雪に伴う走行速度低下に起因する経済損失、除排雪に伴う走行速度改善による経済効果をより容易に推定するための手法の開発や道路有効幅員計測データ解析の効率化を進めるとともに、費用対効果による冬期道路管理作業の意思決定支援ツールの改良を行った。

冬期走行環境と走行性の関係検証では、路面すべり抵抗値、路面平坦性および道路有効幅員のそれぞれの計測技術を車両1台に集約し、無積雪期および積雪期に走行試験を実施した。試験の結果より、走行速度は冬期走行環境の悪化を受けて低下し、その低下度合は路面すべり抵抗値や道路有効幅員、路面平坦性の変化によって異なることを確認した。加えて、冬期走行環境の悪化は時間信頼性の低下も同時に引き起こし、特に路面平坦性の悪化は時間信頼性に大きな影響を与えることを明らかにした。また、道路サービスに対する道路利用者の意見要望の集計・分析システムを開発した。

機械学習を用いた冬期走行環境の推定では、気象や道路構造等を基に多層パーセプトロンを用いて機械学習を行うことで、降雪等に伴う路面すべりや有効幅員、走行速度の変動を推定できる可能性があることや、畳み込みニューラルネットワークを用いて冬期走行環境のうち路面すべりやすさを容易に推定できることを示した。また、道路有効幅員計測データの解析は、AI画像認識技術を用いることで、効率化できることがわかった。

冬期道路管理の費用対効果の評価ツール開発では、機械学習を用いて推定された冬期走行環境や交通量等の入力データから、積雪時・路肩堆雪時の走行速度低下に伴う経済損失や除排雪による経済効果の算出を可能にした。本研究により、路線の各区分における降雪による経済損失・除排雪による経済効果の推定や、除排雪等費用データとの組み合わせによる冬期道路管理の費用対効果を推定することが可能となった。今後は本研究で開発した冬期道路管理の費用対効果評価ツールの普及に取り組むとともに、冬期走行環境の計測および推定手法など本研究を通して得られた技術の改良を行う。

参考文献

- 1) 札幌市：平成27年度札幌市市政世論調査報告書、p. 49、2016.2
- 2) 藤本宏宏、徳永ロベルト、武知洋太、住田則行、丸山記美雄：道路複合雪害が走行速度に及ぼす影響評価、第50回土木計画学研究発表会、50、論文番号154、2014.11

14 安全で信頼性の高い冬期道路交通サービスの確保に関する研究

- 3) 安藤和彦、倉持智明：路面のすべり摩擦と路面管理水準及びすべり事故：土木技術資料、Vol.52-5、 pp. 56-59、2010.5
- 4) 竹内政夫：冬の視界不良事故について ―交通事故統計からみる発生構造―、北海道の雪氷、No. 33、 pp. 35-38、2014.9
- 5) 舟橋誠、徳永ロベルト、浅野基樹：連続路面すべり抵抗値測定装置（RT3）の導入について、北海道の雪氷、No. 26、 pp. 5-8、2007.9
- 6) 大上哲也、住田則行：道路有効幅員計測に関する試験報告について、第 55 回北海道開発技術研究発表会、2012.2
- 7) 中島繁則、川村章、坂田光児、山崎元也、谷岡和範：高速道路の維持管理に向けた新小型 IRI 測定システムの開発、交通工学、Vol. 44、No. 2、 pp. 49-56、2009.3
- 8) 徳永ロベルト、舟橋誠、高橋尚人：すべり抵抗値活用による冬期路面管理技術の高度化に関する研究、第 52 回北海道開発技術研究発表会、2009.2
- 9) 切石亮、徳永ロベルト、高橋尚人：冬期道路マネジメントシステムの試行運用について、第 57 回北海道開発技術研究発表会、2014.2
- 10) 齊田光、大廣智則、畠山乃：AI による画像認識技術を用いた冬期路面滑り摩擦係数推定手法の開発、第 65 回(2021 年度) 北海道開発技術研究発表会論文集、2022.

14.1.2 効果的な除排雪に資する作業計画支援技術に関する研究

担当チーム：技術開発調整監付（寒地機械技術チーム）

寒地道路研究グループ（寒地交通チーム）

研究担当者：片野浩司、巖 博、大槻敏行、中島淳一、牧野正敏、
植野英睦、高本敏志、飯田美喜、村上和也、吉田智、
久慈直之、佐藤信吾、畠山乃、佐藤昌哉、高橋尚人、
石田樹、平澤匡介、宗広一徳、布施浩司

【要旨】

本研究は、冬期道路における維持管理事業の計画立案支援を目的として、積雪寒冷地の地域特性に応じた道路幅員構成の見直しと、除排雪作業の効率化に向けた作業計画支援技術（以下「支援技術」という）の提案に取り組むものである。本研究では、冬期道路交通の実態把握のために、排雪前後及び堆雪幅の推移に伴う交通性能のモデル化を行うなど、排雪前後の交通流の変動に関する検討を行った。また支援技術の基礎となる運搬排雪作業における排雪量と排雪速度の関係や気象観測値等により路肩堆雪の形成傾向の把握を行い、路肩堆雪部の効率的な除排雪工法を検討した。さらに、それらの検討結果を踏まえ、除雪従事者が担当工区の堆雪断面積や道路有効幅員の推移の把握が可能な「除排雪作業計画支援システム」の開発を行い、効果的な除排雪の作業計画支援技術としてとりまとめた。

キーワード：除排雪、道路幅員構成、路肩堆雪、作業計画支援、堆雪断面積

1. はじめに

冬期間の道路交通サービス低下の大きな要因の一つは、路肩堆雪による道路有効幅員の減少である¹⁾。その要因を解消するために行われる運搬排雪作業は、総除雪費の約3割を占める主要な工種であり²⁾、厳しい予算制約の下で、巻出し・拡幅など複数の工法を組み合わせで行われている。また、運搬排雪作業の実施時期や工法は除雪従事者の経験に依るところが大きく、さらには除雪従事者、特に熟練者不足もあり³⁾、実施時期や工法などに関する判断を経験に依存しないための定量的な指標が必要である。

一方、路肩堆雪と運搬排雪計画を考慮した効率的な道路横断面を計画し、実行することで、交通への影響を最小化しつつ除排雪事業のコスト縮減が図られる可能性がある。併せて、既存道路空間の有効活用は大きな行政ニーズとなっており、除排雪への考慮と同時に自転車走行空間確保のような夏期の利用方法の検討も必要とされている⁴⁾。

そこで本研究は、冬期道路における維持管理の計画立案支援を目的として、積雪寒冷地の地域特性に応じた道路幅員構成の見直しと、除排雪作業の効率化に向けた除排雪の作業計画支援技術の提案を行うものである。

2. 研究実施内容

本研究では、都市内道路の冬期交通確保のため、排雪前後及び堆雪幅の推移に伴う交通性能のモデル化を行うなど、排雪前後の交通流の変動に関する検討を行った。また、効果的な除排雪の作業計画支援技術の提案に向け、支援技術の基礎となる運搬排雪作業における排雪量と排雪速度の関係や気象による路肩堆雪の形成傾向の把握を行い、路肩堆雪部の効率的な除排雪工法を検討した。

令和2年度までは、排雪前後の交通流の変動に関する検討として、排雪前後及び堆雪幅の推移に伴う交通流の変動の整理及びモデル化を行い、効率的な除排雪工法の検討として、運搬排雪データの分析によりロータリ除雪車の排雪断面積と排雪速度の相関式について妥当性を確認するとともに、地域、降雪量の多少、道路幅員構成（車線数、中央分離帯の有無、車線幅員、路肩幅員）等のグループ毎に分析し、路肩堆雪断面積の実測値と気象観測値や除排雪回数等の相関から堆雪断面積予測式を作成し、その適用性を確認した。

令和3年度は、排雪前後の交通流の変動モデルの見直し、冬期道路サービス水準の階層化を踏まえた道路空間の再配分の試案に関する検討を行った。また運搬排雪作業における作業工区の排雪断面積と排雪速度の関係性の把握、道路幅員構成（車線数、中央分離帯の

有無、車線幅員、路肩幅員)による堆雪断面積予測式の選択フローを検討した。さらに堆雪断面積の予測精度向上のため、より簡易的な堆雪形状計測技術の構築に向け、定点カメラ撮影写真から堆雪断面形状を把握する手法について適用性を確認した。加えて、これまでの検討結果を踏まえ、道路有効幅員の表示、堆雪断面積予測式の自動算出、大雪予報の反映等の機能を備えた「除排雪作業計画支援システム」を開発し、効果的な除排雪の作業計画支援技術として取りまとめた。

3. 排雪前後の交通流の変動に関する検討

3.1 調査方法

除排雪の実施レベルと交通流の実態を把握するため、札幌市内の地方道〔道道下手稲札幌線(札幌市西区発寒14条11丁目):全道路幅員20.0m(車線幅員3.0m、路肩幅員0.5m、歩道幅員3.5m)]を対象とし、定点カメラからの取得画像データを基に、排雪前後の交通流の変動に関する分析を行った(図-1)。取得・整理したデータは、以下の通りである。

- 1) 排雪前後の走行車線中の車両の走行位置
 - ・走行位置①~⑥(図-2)
- 2) 排雪前後の交通流
 - ・速度のパーセンタイル
 - ・交通量-速度(Q-V)性能

さらに、路面状態及び堆雪幅別の交通量-速度性能曲線のモデル化を行った。また、札幌市内を走行するタクシードロブデータとの比較により、堆雪幅別に旅行時間信頼性を算出した。

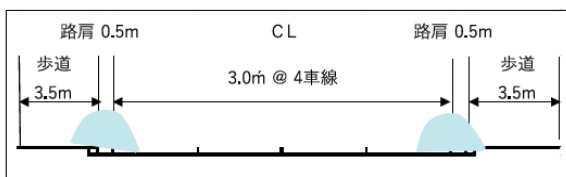


図-1 調査対象道路の横断面構成



図-2 走行位置の分割

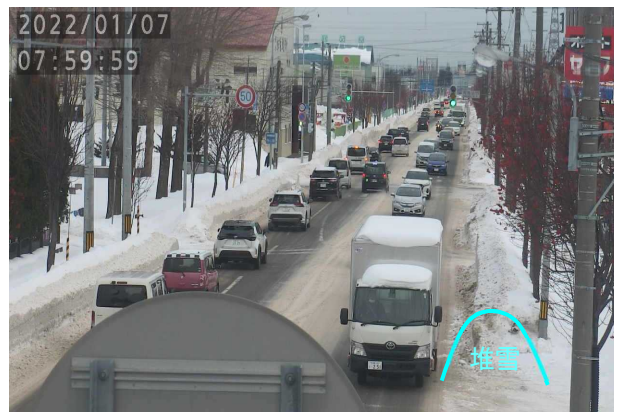
3.2 調査結果

3.2.1 排雪前後の交通流の比較

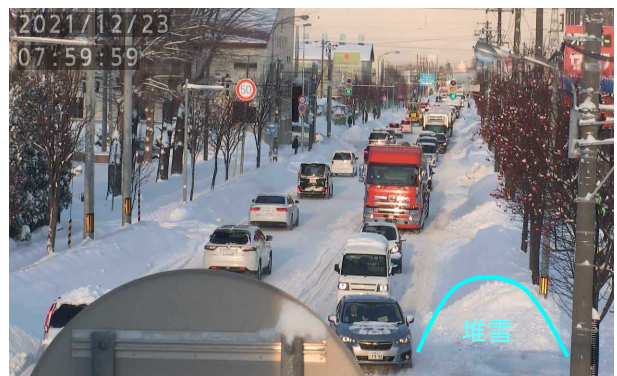
調査対象道路における路面状態や堆雪幅により交通流が変化した事例を図-3に示す。図中(1)に示す堆雪幅1.5mの事例では、片側2車線道路が1.5車線の運用になっている。また、図中(2)に示す堆雪幅2.0mの事例では、片側2車線道路が事実上1車線の運用になっている。

このように同様の路面状態であっても堆雪幅の違いにより交通流の変化が見られる。そこで、排雪前後の交通流について、比較を行った。ここでは、以下の事例を示す。この事例において、排雪前の堆雪幅は1.5mであったが、排雪後の堆雪幅は0mである。

- ・排雪前(2019年1月24日)
- ・排雪後(2019年1月26日)



(1) 圧雪路面_堆雪幅 1.5m



(2) 圧雪路面_堆雪幅 2.0m

図-3 堆雪に伴う交通の変化

- 1) 走行車線中の車両の走行位置

排雪前後の車両の走行位置について、図-4に示す。走行位置は、車両中心とした。片側2車線のうち、内側車線の走行が①・②・③、外側車線の走行が④・⑤・⑥(図-2参照)である。片側2車線のうち、車線をまたがって中央を走行している③と④の走行が、排雪前

に合わせて 45%であったものが、排雪後は 33%へと減少している。また、外側車線の路肩寄りの⑥の位置の走行が、排雪前は 0%に対し、排雪後は 17%へ増加した。すなわち、路肩における堆雪の存在により、車両は道路中央によった走行を余儀なくされていることが確認できた。

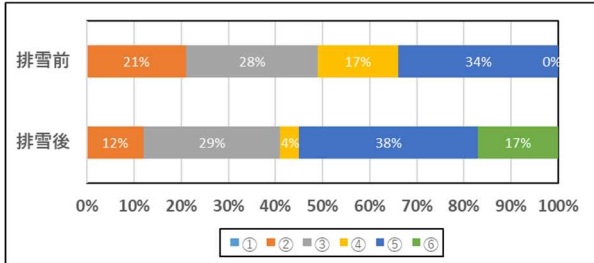


図-4 走行車線中の車両の走行位置
(排雪前：1月24日、排雪後：1月26日)

2) 交通性能の比較

排雪前後の交通性能として、走行速度のパーセンタイルを図-5に示す。排雪前は、50パーセンタイル速度で 23km/h、85パーセンタイル速度で 29km/hであったが、排雪後は、50パーセンタイル速度で 29km/h、85パーセンタイル速度で 35km/hへ向上した。

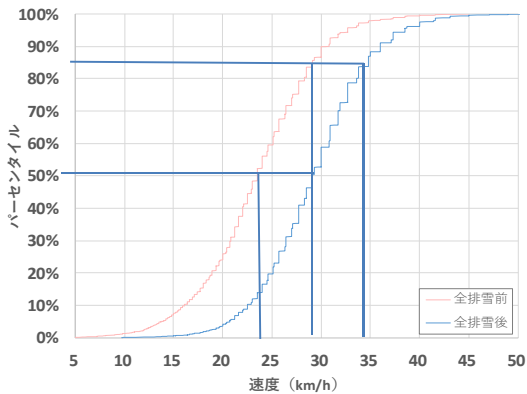


図-5 速度のパーセンタイル

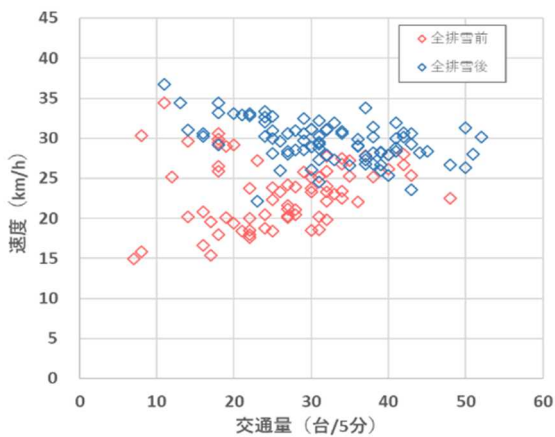


図-6 交通量-速度 (Q-V)

排雪前後の交通量と速度 (Q-V) の関係を図-6に示す。排雪前と排雪後の5分間当たりの交通量と平均速度をプロットした。排雪前の最大交通量 (Qmax) は 48台/5分、そのときの速度 (Vmax) は 22km/hであるが、排雪後の Qmax は 52台/5分、Vmax は 30km/hへ増加した。

3.2.2 交通量-速度性能曲線のモデル化

平成28年度～令和2年度に亘り取得した交通流と速度のデータを路面状態、堆雪幅別に集計・整理した。さらに、交通量-交通密度 (Q-K) 式を展開し、路面状態、堆雪幅別の交通量-速度性能曲線を構築したところ、以下の式(1)～(7)が得られた (図-7、図-8)。

$$\text{乾燥 } 0.0\text{m}, V = 29.9 \pm \sqrt{-10.333Q + 896.1} \quad (1)$$

$$\text{湿潤 } 1.5\text{m}, V = 24.5 \pm \sqrt{-7.948Q + 600.0} \quad (2)$$

$$\text{凍結 } 1.5\text{m}, V = 22.3 \pm \sqrt{-6.512Q + 495.4} \quad (3)$$

$$\text{圧雪 } 0.5\text{m}, V = 23.2 \pm \sqrt{-8.211Q + 539.5} \quad (4)$$

$$\text{圧雪 } 1.0\text{m}, V = 23.0 \pm \sqrt{-7.894Q + 529.6} \quad (5)$$

$$\text{圧雪 } 1.5\text{m}, V = 20.2 \pm \sqrt{-6.015Q + 406.7} \quad (6)$$

$$\text{圧雪 } 1.5\text{m超}, V = 20.1 \pm \sqrt{-7.792Q + 405.9} \quad (7)$$

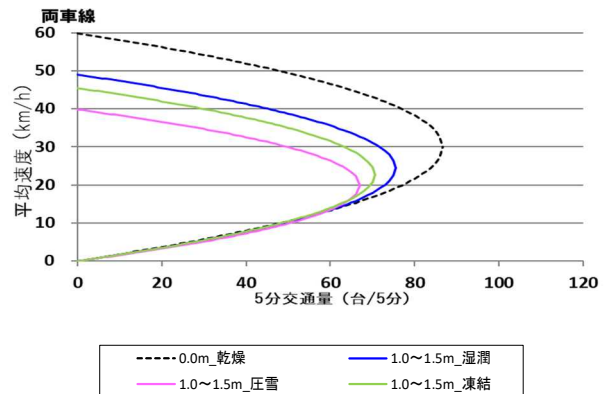


図-7 交通量 - 速度 (Q-V) 性能曲線のモデル化
(路面状態の別、堆雪の幅員 1.5m)

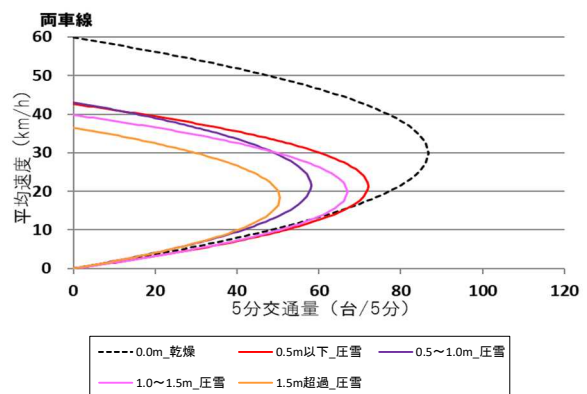


図-8 交通量 - 速度 (Q-V) 性能曲線のモデル化
(圧雪、堆雪幅の別)

3.2.3 時間信頼性の検討

堆雪の形成による交通性能の評価指標として、時間信頼性を検討するため、札幌市内のタクシーをプローブカーとして取得した GPS データから調査区間における旅行時間のデータベース化を行った。対象は観測用の定点カメラ設置の道路横断面を含む延長 4.7km(札幌市手稲区前田 6 条 10 丁目～札幌市西区発寒 14 条 2 丁目)とし、旅行時間信頼性指標 (PT、Tave、BT) について、95 パーセンタイル旅行時間、平均旅行時間を用いて次の式 (8) ～式 (10) の通り、算定した。

- ・ PT (Planning Time) = 95 パーセンタイル旅行時間 (8)
- ・ Tave = 平均旅行時間 (9)
- ・ BT (Buffer Time) = PT - Tave (10)

堆雪幅別に得られた旅行時間信頼性は、図-9 のとおりである。ここで、堆雪幅は定点カメラ設置点の値である。堆雪幅が大きくなるに従って、Tave、BT ともに大きくなり、旅行時間信頼性は低下した。

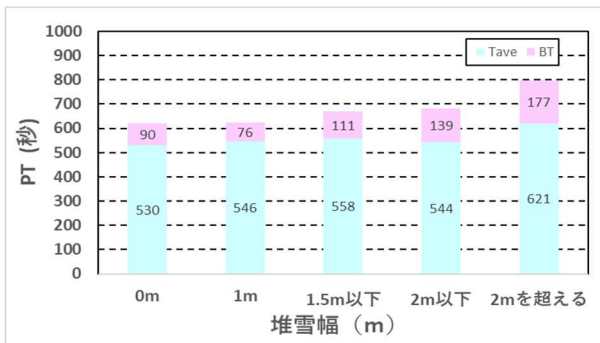


図-9 堆雪幅との関係

(非ピーク時：9～12 時、区間：札幌市手稲区前田 6 条 10 丁目～札幌市西区発寒 14 条 2 丁目)







3.2.4 冬期道路サービス水準の試案

都市内道路の車線運用、堆雪幅、交通特性を踏まえ、都市内道路の冬期道路サービス水準を試案した。交通特については、3.2.2 並びに 3.2.3 で示した交通量-速度 (Q-V) 性能曲線及び旅行時間信頼性を考慮し、階層化を試行した。

表-1 に、A～F に階層化した冬期道路サービス水準の試案を示している。C～F の車線運用に見られるように、堆雪幅 1.0m～1.5m で 1.5 車線運用に到り、1.5m 超過で 1 車線運用に到った。よって、当該区間では、2 車線運用もしくは 1.5 車線運用のために、堆雪幅 1.5m 確保が求められる。路肩は、冬期堆雪幅として十分なスペースを確保するとともに、春～秋期間には自転車走行空間として利用し、季節別の運用も考慮でき

ると考えている。

表-1 冬期道路サービス水準の試案

[A]	[B]
 2車線運用, 堆積幅 0.5m 以下 V = 40km/h 以上	 2車線運用, 堆積幅 1.0m 以下 V = 35～40km/h
[C]	[D]
 1.5車線運用, 堆積幅 1.5m 以下 V = 30～35km/h	 1.5車線運用, 堆積幅 1.5m 以下 V = 25～30km/h
[E]	[F]
 1車線運用, 堆積幅 1.5m 超過 V = 20～25km/h	 1車線運用, 堆積幅 1.5m 超過 V = 20km/h 以下

4. 路肩堆雪部の効率的な除排雪工法の検討

除排雪作業計画支援技術の検討にあたり、基礎となる運搬排雪作業における排雪量と排雪速度の関係の把握、及び気象観測値などから路肩堆雪の形成傾向の把握を行った。

4.1 排雪量と排雪速度の関係

4.1.1 排雪断面積と排雪速度の算出

排雪量と排雪速度の関係を把握するため、国土交通省北海道開発局 (以下、「開発局」という)、札幌・小樽・旭川開発建設部管内の国道で行われた運搬排雪データを収集した。

平成 29 年度までに整理した 4 ヶ年分 (H25～H28) のデータ 2,876 件に、平成 29 年度分運搬排雪データから作業延長や工法毎に排雪量を算出できないデータを除き抽出した 720 件を新たに加え、調査対象データを 3,596 件とした (表-2)。

調査対象データは、開発局の除雪機械等情報管理システムからロータリ除雪車の稼働状況をグラフ化し排雪作業延長と時間を抽出した (図-10)。作成したグラフから移動や休憩時間などの非稼働時間を判別し、排雪作業の開始・終了ポイントの時刻と距離標を読み取

り、その間の作業時間、作業延長を算出した。さらに、算出した作業時間合計、作業延長合計、運搬排雪データより抽出した作業区間の排雪量から、作業日毎の平均排雪断面積及び平均排雪速度を算出した。算出した平均排雪断面積と平均排雪速度の一部を表-3 に示す。

表-2 データ整理件数

対象年度	運搬排雪データ	調査対象データ	備考
H25	1,317	880	H29作業延長一部見直し
H26	925	691	"
H27	1,078	641	"
H28	1,026	664	H29収集・整理
H29	1,153	720	H30収集・整理
合計	5,499	3,596	

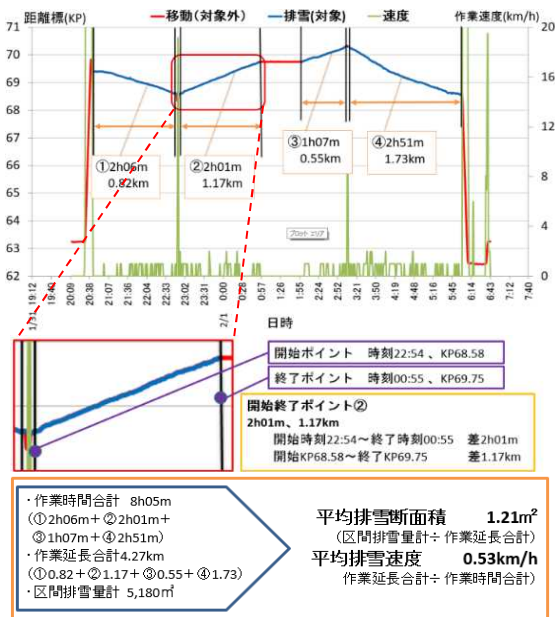


図-10 除雪車稼働グラフ例 (H29/1/31-2/1)

表-3 算出結果一覧表 (抜粋)

No	機械種別	作業区分	区間排雪量(m³)	作業時間合計(h)	作業延長合計(km)	平均排雪断面積(m²)	平均排雪速度(km/h)
1	2.2m級	拡幅	2198	4:19	4.99	0.4405	1.1560
2	2.2m級	拡幅	1204	2:24	1.64	0.7082	0.7083
3	2.2m級	拡幅	1260	1:53	1.97	0.6087	1.0991
4	2.2m級	拡幅	2002	4:12	3.69	0.4778	0.9976
5	2.2m級	拡幅	2562	4:33	5.07	0.4917	1.1451
6	2.2m級	拡幅	658	2:21	0.31	0.3241	0.8638
7	2.2m級	拡幅	1008	2:10	2.75	0.3639	1.2785
3592	2.2m級	拡幅	2324	4:37	1.06	0.9525	0.5285
3593	2.2m級	拡幅	5740	7:48	4.81	1.1786	0.6244
3594	2.2m級	拡幅	1918	4:37	2.78	0.5920	0.7018
3595	2.2m級	拡幅	3122	7:57	5.18	0.5846	0.6717
3596	2.2m級	拡幅	2114	3:54	1.32	1.6015	0.3385

4.1.2 排雪量と排雪速度の相関

前項 4.1.1 で算出したロータリ除雪車の排雪断面積と排雪速度の関係について確認するため、複数の相関検討手法(回帰式の種類)による回帰分析及び妥当性の評価を行った。

表-4 に示す 75 の条件分類毎に相関係数を算出し、分析した結果から傾向を把握した。また、排雪断面積から排雪時間が予測できると排雪計画策定資料として

活用できるため、分析による相関式について排雪断面積から排雪速度を予測する式としての適用性も検証した。

4.1.3 相関検討手法の分析結果

1) 妥当性の評価

相関検討手法の妥当性を評価するため、平成 29 年度は、平成 28 年度までに抽出した 4 ヶ年分(H25~H28)の調査対象データのうち、まず表-4 の条件分類 1 (全機種、区分なし) のデータを用いて、各手法の相関検討を行った(図-11、表-5)。

相関検討手法①から手法⑥の中で、重相関係数(修正 R) が最も高いのは手法②の対数(0.6933)だったが、排雪断面積が大きくなるとサンプル数は極めて少ないが排雪速度の予測が 0km/h 以下となるため、妥当性の評価は△とした。次に高かったのは、手法①のべき乗(0.6668)で、妥当性の評価は○とした。手法⑤(0.3920)逆数と手法⑥直線(0.5000)は重相関係数が低いため、妥当性の評価は×とし、続いて重相関係数が低い手法③指数(0.5492)、手法④ロジスティック(0.5411)の妥当性の評価は△とした。

平成 30 年度は相関検討手法①から手法④について、平成 29 年度分を含めた 5 ヶ年分のデータを用いて、表-6 の条件分類 1 (全機種、区分なし) について同様の傾向を確認した(図-12、表-7)。

2) 相関検討手法まとめ

相関検討手法の妥当性評価を行い、手法①べき乗での妥当性の評価は○であることを確認した。合わせて、表-6 の相関検討の条件分類毎に重相関係数(修正 R) の相関の度合いを確認した結果、条件分類のうち 91% において高い相関がみられた(表-8)。

以上のことから、相関検討手法①べき乗による相関式の排雪速度予測式への適用性を確認した(図-13)。

表-4 相関検討手法

相関検討手法(回帰式の種類)																
①	べき乗	④	ロジスティック													
②	対数	⑤	逆数													
③	指数	⑥	直線													
※条件分類毎の全データを分析																
条件分類																
機械種別	全機種				一車線狭道形				2.2m級				2.6m級			
年度	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
	25	26	27	28	25	26	27	28	25	26	27	28	25	26	27	28
区分なし	1				6				11				16			
	2				3				7				12			
作業区分	26				31				36				41			
	27				32				37				42			
帯出	51				56				61				66			
	52				57				62				67			

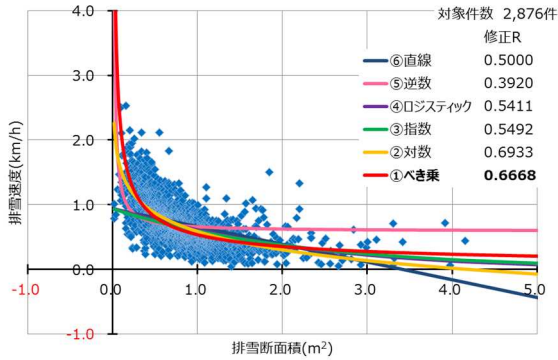


図-11 分析事例:相関検討手法①～⑥条件分類1 (4ヶ年分)

表-5 検討手法の妥当性評価(4ヶ年分)

手法	妥当性の評価	理由	修正済重相関係数(修正R)	修正済決定係数(修正R ²)
① べき乗	○	重相関係数が高いため	0.6668	0.4446
② 対数	△	重相関係数が高いが、断面積が大きくなると排雪速度の予測値が0km/h以下になるため	0.6933	0.4807
③ 指数	△	べき乗と比べて重相関係数が低いため	0.5492	0.3016
④ ロジスティック	△	べき乗と比べて重相関係数が低いため	0.5411	0.2928
⑤ 逆数	×	べき乗と比べて重相関係数が低いため	0.3920	0.1537
⑥ 直線	×	べき乗と比べて重相関係数が低く、排雪速度の予測値が0km/h以下になるため	0.5000	0.2500

表-6 相関検討の条件分類 (90パターン)

機械種別	条件分類																													
	全機種			一車線積込形			2.2m級			2.6m級			2.2m級+2.6m級																	
年度	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H												
区分なし	2	3	4	5	6	8	9	10	11	12	14	15	16	17	18	20	21	22	23	24	26	27	28	29	30					
作業区分	31			37			43			49			55			61			67			73			79			85		
帯出	62	63	64	65	66	68	69	70	71	72	74	75	76	77	78	80	81	82	83	84	86	87	88	89	90					

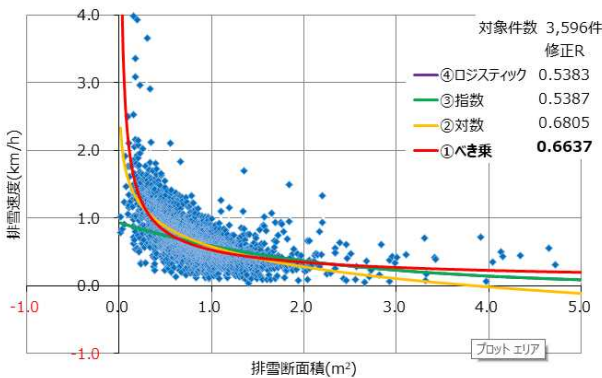


図-12 分析事例:相関検討手法①～④条件分類1 (5ヶ年分)

表-7 検討手法の妥当性評価(5ヶ年分)

手法	妥当性の評価	理由	修正済重相関係数(修正R)	修正済決定係数(修正R ²)
① べき乗	○	重相関係数が高いため	0.6637	0.4405
② 対数	△	重相関係数が高いが、断面積が大きくなると排雪速度の予測値が0km/h以下になるため	0.6805	0.4631
③ 指数	△	べき乗と比べて重相関係数が低いため	0.5387	0.2902
④ ロジスティック	△	べき乗と比べて重相関係数が低いため	0.5383	0.2898

表-8 相関検討の結果

修正済重相関係数(修正R)	相関の度合い		相関検討手法①	
	高	中	件数	割合
0.7 ~ 1.0	高い相関がある	80件	13	16%
0.5 ~ 0.7	かなり高い相関がある	60	75%	91%
0.4 ~ 0.5	中程度の相関がある	4	5%	
0.3 ~ 0.4	ある程度の相関がある	1	4%	
0.2 ~ 0.3	弱い相関がある	2		
0.0 ~ 0.2	ほとんど相関がない	0	0	

※相関の度合い:出典「社会調査の基礎」放送大学テキスト
 ※条件分類は、90件から10パターン(対象データが10件以下)を除いた80件で算出

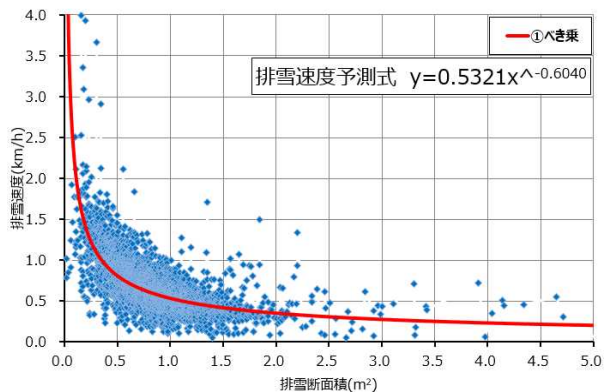


図-13 相関検討手法①べき乗、条件分類1

3) 運搬排雪工区の排雪断面積と排雪速度の把握

前項 4.1.2、4.1.3 1)、2)では、運搬排雪工区内で移動などのロータリ除雪車の非稼働時間を除いた作業時間と延べ作業延長を抽出し、ロータリ除雪車の排雪断面積と排雪速度との関係を把握した。令和3年度は、運搬排雪作業の各工区の堆雪断面積から工区としての排雪速度を予測するため、作業時間と作業延長を算出し、排雪量と合わせ工区における排雪速度と排雪断面積を集計分析し関係性を把握した。作業時間はロータリ除雪車の非稼働時間も含めたものとし、作業延長は4.1.1ではロータリ除雪車が連続して走った距離としていたが、作業を行った運搬排雪工区の延長で整理した。

集計には開発局札幌・小樽・旭川開発建設部管内の

国道で行われた運搬排雪データ 3 年分 (H30~R2) 4,358 件を使用し、運搬排雪工法 (巻出し、拡幅) ごとに運搬排雪量を算出できないデータ等を除き、920 件を分析データとした。ここで表-9 の条件分類を行うと、極端にデータ数が少ない分類が散見されたため、条件分類①のみで、相関検討手法①から手法④の相関分析を行った。その分析結果を図-14 に示す。非稼働時間を除いたロータリ除雪車の実作業での排雪速度と比べ、非稼働時間等を含めた工区全体の実排雪速度の最大値は半分程度になった。さらに、相関検討手法の妥当性を評価するため、条件分類① (全機種・全地域・作業区分なし・3 年分) のデータを用いて、各手法の相関検討を行った結果、相関検討手法①べき乗が最も相関が高く妥当の評価は○とした (表-10)。相関検討手法①~④の全てで修正済重相関係数 0.7 以上になり、強い相関が確認できた。

相関検討手法①べき乗による相関式により、排雪断面積から排雪速度の予測が可能となり、相関式を排雪速度予測式 (図-14) とした。予測式より路肩堆雪の断面積から、工区の排雪速度と、さらに作業延長を加味することで排雪時間の把握が可能となる。さらに排雪する断面積の違う工法 (拡幅、巻出など) による工区の排雪時間も算出でき、運搬排雪計画策定の基礎資料としての活用が期待できる。

しかし、排雪断面積が 1m²に満たない工区のデータが多数あり、一般的な排雪形態でないと考えられる工区が含まれている (図-14) など、データの抽出や分析手法についてさらに検討していく必要がある。

表-9 相関検討手法と条件分類 (12 パターン)

相関検討手法 (回帰式の種類)			
①	べき乗	③	指数
②	対数	④	ロジスティック
※条件分類毎の全データを分析			
条件分類			
①全データ(全機種・全地域・作業区分なし・3年分)			
項目	種別		
機種種別	②一車線横込形	③2.2m級	④2.6m級
年度	⑤H30	⑥R1	⑦R2
地域	⑧札幌	⑨小樽	⑩旭川
作業区分	⑪拡幅	⑫巻出	-

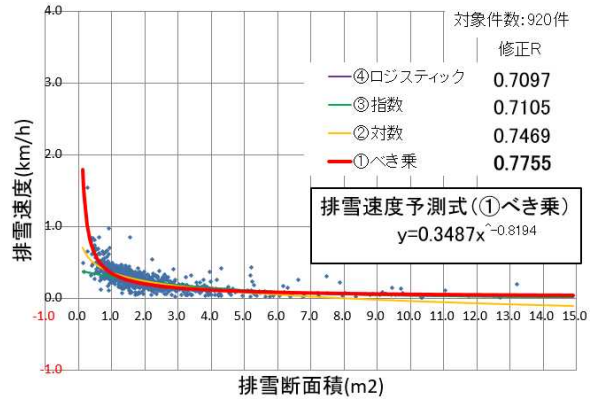


図-14 分析事例: 相関検討手法①~④ (全データ (全機種・全地域・作業区分なし・3 年分))

表-10 検討手法の妥当性評価 (3 年分)

手法	妥当性の評価	理由	修正済重相関係数 (修正R)	修正済決定係数 (修正R ²)
① べき乗	○	重相関係数が高いため	0.7755	0.6018
② 対数	△	べき乗と比べて重相関係数が低く、断面積が大きくなると排雪速度の予測値が0km/h以下になるため	0.7469	0.5584
③ 指数	△	べき乗と比べて重相関係数が低いため	0.7105	0.5053
④ ロジスティック	△	べき乗と比べて重相関係数が低いため	0.7097	0.5043

4.2 路肩堆雪の形成傾向把握

4.2.1 堆雪断面積の推計方法

路肩堆雪形成時における堆雪断面積推計方法の検討を行った。検討に当たっては、開発局の札幌開発建設部管内の国道 10 地点 (R5 : 4 地点、R274 : 6 地点) で現地計測した 4 年分 (H25~H28) の路肩堆雪断面積の実測値と、気象庁 HP から入手可能なアメダスデータなどを用いて重回帰分析を行った。図-15 に現地計測状況、表-11 に重回帰分析の内容を示す。従属変数は堆雪全断面積と車道部堆雪断面積とし、図-16 のように定義した。



図-15 現地計測状況

表-11 重回帰分析内容

項目	内容	内訳
従属変数 (目的変数)	堆雪断面積	堆雪全断面積 車道部堆雪断面積
独立変数 (説明変数)	a. 24時間自動車類交通量 (センサス)	-
	b. 代表沿道状況	DIDかつ商業地域 DID(商業地域を除く) その他市街部 平地部
	c. 車線数片側	-
	d. 除雪一般(一般除雪回数)	-
	e. 拡幅積上(回数)	-
	f. 排雪巻出(回数)	-
	g. 排雪拡幅(回数)	-
	h. 降雪(累計降雪)(cm)	-
	i. 最深積雪(cm)	-
	j. 現地平均気圧(hPa)	-
	k. 降水量(mm)	-
l. 平均気温(°C)	-	
m. 平均湿度(%)	-	
n. 平均風速(m/s)	-	
o. 日照時間(h)	-	

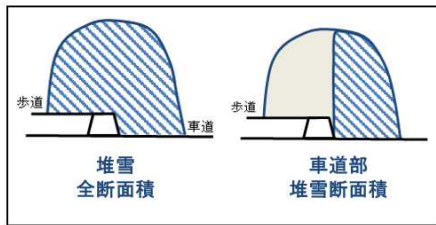


図-16 堆雪断面積の定義

4.2.2 独立変数の検証

分析に用いる独立変数について妥当性の検証を行い、5項目(a.24時間自動車類交通量、b.代表沿道状況、c.車線数片側、j.現地平均気圧、m.平均湿度)の除外項目を選定した(表-12)。

4.2.3 推計結果

1) 計測期間毎の重回帰分析(全断面積・車道部)

前項4.2.2で示したとおり、独立変数aからoの15項目の内、5項目を除き、増減法を用いた重回帰分析を行った。さらに、分析後の独立変数の偏回帰係数について、有意性検定及び符号の検証を繰り返して独立変数を整理し、最終的に有効となった独立変数(表-12、妥当性あり)で重回帰分析を行った(表-13)。

表-13 下段の「分類の考え方」に示すように、独立変数の集計期間を3パターン(A累計、B計測期間毎、C2計測期間毎)で検討した。堆雪断面積の前回計測日から次回計測日までを1計測期間とし、分類Aを累計、分類Bを計測期間毎、分類Cを2計測期間毎として結果を比較した結果、分類A(累計)の修正済重相関係数が高いことを確認した。予測式の簡素化の観

点からも、独立変数が少なく、かつ相関の高い、分類A累計の①堆雪全断面積及び②車道部堆雪断面積を堆雪断面積の予測式として選定した(表-14)。

表-12 独立変数の妥当性検証結果

独立変数	検証結果 (偏回帰係数の適切な符号)	理由
a. 24時間自動車類交通量(センサス)	候補から除外	有意性検定では関係性があると判定されたが、明確な作用が判定できないため
b. 代表沿道状況	候補から除外	符号の明確な作用が推定できず、有意性検定でも関係性が低いと判定されたため
c. 車線数片側	候補から除外	車線数が多くなると、堆雪断面積が大きくなることが推定できるが、明確な作用が不明なため
d. 除雪一般(一般除雪回数)	妥当性あり (プラスに作用)	除雪回数が多くなると、堆雪断面積が大きくなると推定できるため
e. 拡幅積上(回数)	妥当性あり (プラスに作用)	拡幅積上回数が多くなると、堆雪断面積が大きくなると推定できるため
f. 排雪巻出(回数)	妥当性あり (マイナスに作用)	排雪巻出回数が多くなると、堆雪断面積が小さくなると推定できるため
g. 排雪拡幅(回数)	妥当性あり (マイナスに作用)	排雪拡幅回数が多くなると、堆雪断面積が小さくなると推定できるため
h. 降雪(累計降雪)(cm)	妥当性あり (プラスに作用)	降雪が多くなると、堆雪断面積が大きくなると推定できるため
i. 最深積雪(cm)	妥当性あり (プラスに作用)	最深積雪が大きくなると、堆雪断面積が大きくなると推定できるため
j. 現地平均気圧(hPa)	候補から除外	符号の明確な作用が推定できず、有意性検定でも関係性が低いと判定されたため
k. 降水量(mm)	妥当性あり (マイナスに作用)	降水量が多くなると雪が融け、堆雪断面積が小さくなると推定できるため
l. 平均気温(°C)	妥当性あり (マイナスに作用)	平均気温が0°Cを超えると雪が融け、堆雪断面積が小さくなると推定できるため
m. 平均湿度(%)	候補から除外	有意性検定では関係性があると判定されたが、明確な作用が判定できないため
n. 平均風速(m/s)	妥当性あり (マイナスに作用)	風速が強くなると雪が融けやすくなり、堆雪断面積が小さくなると推定できるため
o. 日照時間(h)	妥当性あり (マイナスに作用)	日照時間が多くなると雪が融け、堆雪断面積が小さくなると推定できるため

表-13 分析パターン及び結果

分類	従属変数 (目的変数)	修正済重相関係数 (修正R)		有効となった 独立変数
		独立変数 除外前	独立変数 除外後	
A 累計	① 堆雪全断面積	0.8539	0.8444	f,g,i
	② 車道部 堆雪断面積	0.8334	0.8299	e,f,g,i,k
B 計測 期間毎	③ 堆雪全断面積	0.7390	0.7307	e,f,h,i,n
	④ 車道部 堆雪断面積	0.6955	0.6820	e,f,g,h,i,n
C 2計測 期間毎	⑤ 堆雪全断面積	0.8215	0.8111	e,f,h,i,n
	⑥ 車道部 堆雪断面積	0.7874	0.7731	e,f,g,h,i,n

分類(集計期間)の考え方(降雪の場合の例)

単位: cm

分類	計測日の例					備考
	12/1	12/25	1/5	1/15	1/25	
A. 累計	0	10	15	30	40	計測期間内降雪量の累計
B. 計測期間毎	0	10	5	15	10	計測日間にける降雪量
C. 2計測期間毎	10					2計測日間にける降雪量の累計
			15		20	

表-14 分類A 累計①及び②の予測式

堆雪断面積予測式			
$y = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n + b$			
	変数	偏回帰係数	
	内容	堆雪全断面積 分類A累計①	車道部 堆雪断面積 分類A累計②
y	堆雪断面積(m ²)	-	-
a ₁	e. 拡幅積上(回数)	-	0.2062
a ₂	f. 排雪巻出(回数)	-2.7216	-1.7733
a ₃	g. 排雪拡幅(回数)	-0.8473	-0.8277
a ₄	i. 最深積雪(cm)	0.0609	0.0382
a ₅	k. 降水量(mm)	-	-0.0018
b	定数項	-0.6947	-0.2151

選定した予測式の精度を確認するため、予測式(2種類)×計測地点(10地点)×4ヶ年分(H25~H28)、計80件の比較グラフを作成し(表-15)、予測式から算出した堆雪断面積の予測値と実測値を地点毎に比較した。歩道上も含めた堆雪全断面積と縁石から車道側の車道部堆雪断面積のそれぞれについて、実測値と予測値の比較グラフの例を図-17及び図-18に示す。各計測日毎の比較では、堆雪断面積の値に差異はあるが、予測値のグラフは実測値グラフと同様の増減傾向を示している。

また、計測日ごとの予測精度を確認するため、予測値と実測値の差異傾向について確認した(図-19、図-20)。データ件数は、4ヶ年分の280件(28計測日(H25:5回、H26:5回、H27:9回、H28:9回)×10地点)を対象とした。

堆雪全断面積(図-19)及び車道部堆雪断面積(図-20)ともに、堆雪断面積が大きい場合、予測値が少なめになる傾向が見られたものの、本提案式が堆雪断面積を推計する予測式として適用できる可能性があることを確認した。

表-15 比較グラフ作成件数

分類A累計	地点	年度	件数
① 堆雪全断面積	R5 ①~④	H25~H28	40
② 車道部堆雪断面積	R274 ⑤~⑩	(4ヶ年)	40
合計			80



図-17 分類A 累計①(堆雪全断面積)による比較例(H28、札幌 R5 地点②)



図-18 分類A 累計②(車道部堆雪断面積)による比較例(H28、札幌 R5 地点②)

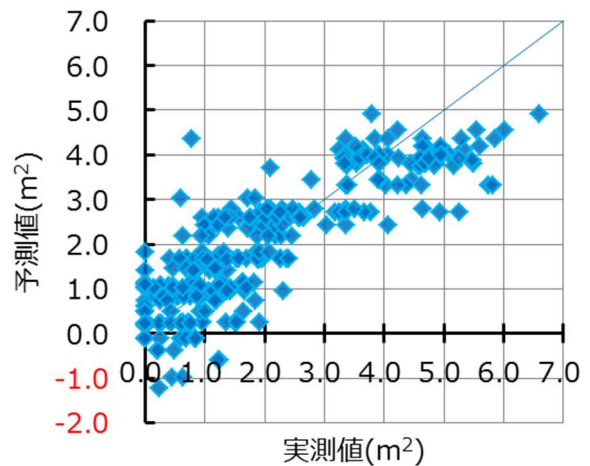


図-19 予測値の精度確認(堆雪全断面積)

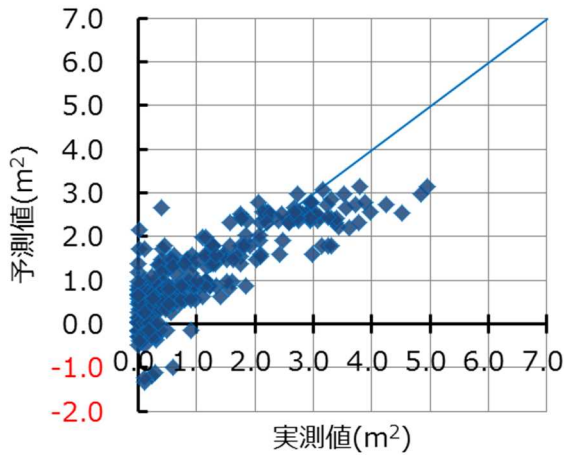


図-20 予測値の精度確認（車道部堆雪断面積）

2) 堆雪断面積予測式（札幌）の他地域での適用性確認

平成 30 年度は、札幌以外の地域での適用性を確認するため、前項 4.2.3 1) で求めた予測式（分類 A 累計 ① 堆雪全断面積）を使用して推計した値と、2ヶ年分の札幌・小樽・旭川の実測値（H29:10 回、H30:10 回）の推移について、計 60 件（札幌:10 地点+小樽:10 地点+旭川:10 地点）×2ヶ年）の比較グラフを作成し、比較した。

図-21～23 に各地域での代表箇所における堆雪全断面積の推移を示す。予測式に使用した気象値は、気象庁のアメダスデータを使用した。

札幌及び小樽では実測値と予測値の増減傾向やその値は近似している。しかし、旭川では予測値と実測値の差が大きかった。旭川では札幌と気象条件及び運搬排雪実施工法等が異なることが原因と思われる。また、車道幅員等の道路幅員構成を考慮する必要があると考えられる。

3) 地域（札幌・小樽・旭川）毎の分析と適用性確認

令和元年度は、気象条件及び道路幅員構成等の地域性に着目し、札幌 6ヶ年分（H25～H30）・小樽 2ヶ年分（H29～H30）・旭川 2ヶ年分（H29～H30）のデータを用いて、地域毎に堆雪断面積予測式を作成した。目的変数を堆雪全断面積とし、説明変数が過年度と同様のパターン A（目的変数：巻出回数、拡幅回数、最深積雪深）とパターン A に道路幅員構成を追加したパターン B について、重回帰分析を行った（表-16）。全地域でパターン B の方がパターン A よりも修正済重相関係数が高く、札幌と小樽で高い相関が確認できた。図-24、25 に代表地点の実測値と予測値のグラフを示す。札幌と小樽では実測値と予測値の概ね同様の増減傾向が確認できた。札幌と比較して、小樽ではパター

ン B の方がパターン A よりも実測値に近い傾向が見られた（図-25）。

また、旭川では修正済重相関係数が高い値ではなく、予測値と実測値の差が大きかった。旭川では堆雪断面積計測値が 2ヶ年分と少なく、年度毎の運搬排雪実施工法が異なるため、運搬排雪（巻出）により堆雪が無くなった日を境に初冬期（運搬排雪前）と晩冬期（運搬排雪後）に分け運搬排雪実施状況による要因を除くと高い相関を示し、予測値と実測値の近似を確認できた（図-26）。以上の結果から、気温が下がり堆雪が大きくなる時期（初冬期）と、気温が上がり積雪が解け出す時期（晩冬期）で、時期により堆雪成長に関する要素が異なる可能性が考えられる。

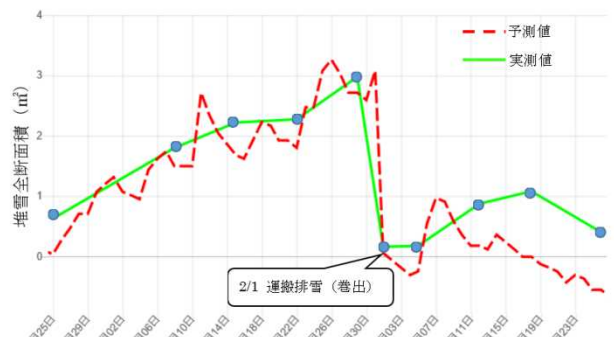


図-21 予測値（堆雪全断面積）と実測値による推移（H30 札幌 R274 下り KP12～13）

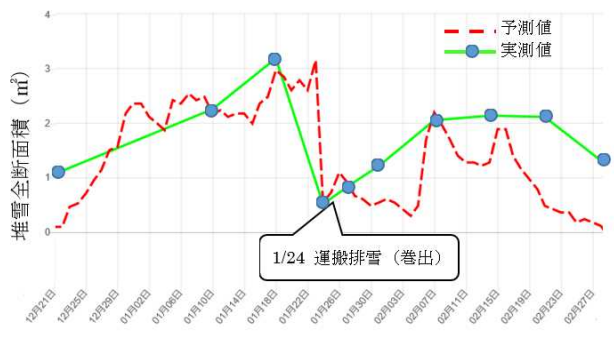


図-22 予測値（堆雪全断面積）と実測値による推移（H30 小樽 R5 上り KP246～247）

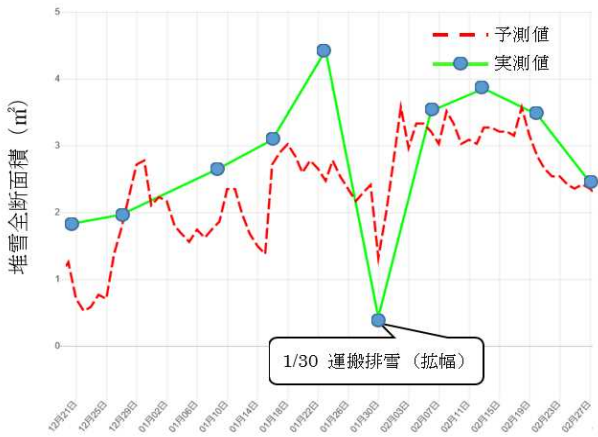


図-23 予測値（堆雪全断面積）と実測値による推移
(H30 旭川 R39 下り KP=9~10)

表-16 地域毎の重回帰分析結果
(目的変数：堆雪全断面積)

地域	修正済重相関係数 (修正R)		分析データ年
	パターンA	パターンB	
	説明変数 (巻出回数、拡幅回数、最深積雪深)	説明変数 (巻出回数、拡幅回数、最深積雪深、道路幅員構成)	
札幌	0.7552	0.7812	H25~30
小樽	0.5975	0.7902	H29~30
旭川	0.4366	0.4769	H29~30

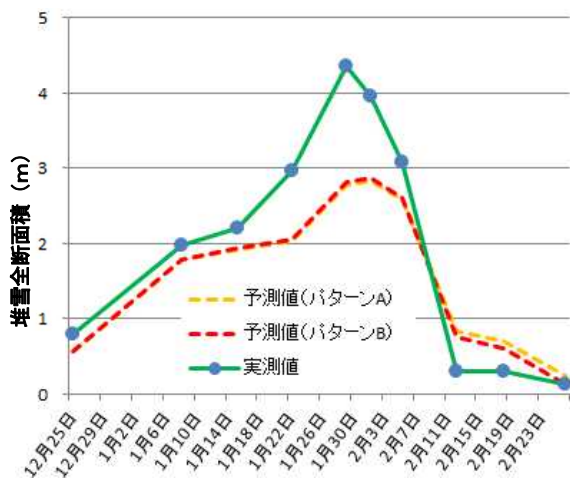


図-24 予測値（堆雪全断面積）と実測値による推移
(H30 札幌 R274 R側 KP=15~16
車線幅員 9.75m 路肩幅員 1.0m)

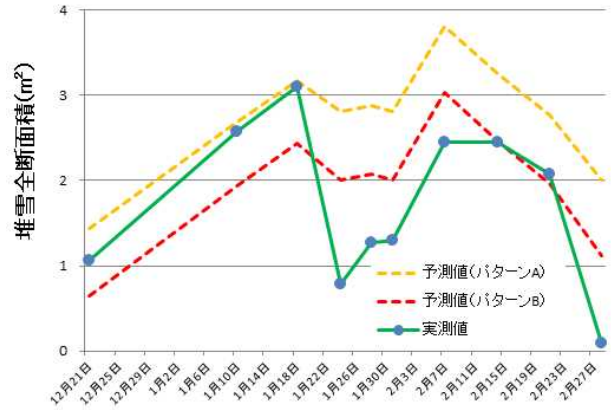


図-25 予測値（堆雪全断面積）と実測値による推移
(H30 小樽 R5 R側 KP=249~250
車線幅員 6.5m 路肩幅員 1.0m)

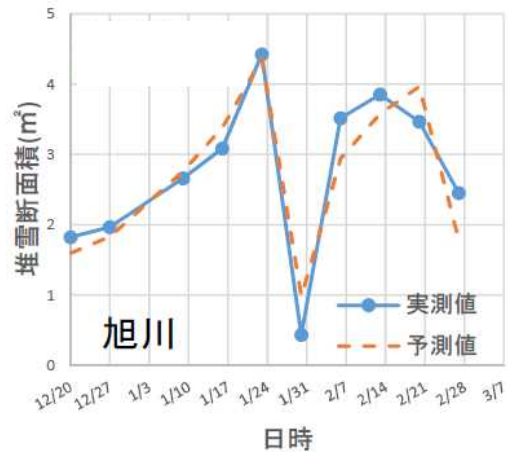


図-26 予測値（堆雪全断面積）と実測値による推移
(H30 旭川 R39 L側 KP=9~10
車線幅員 6.5m 路肩幅員 1.0m)

4) 地域以外でのグループ分けによる分析

令和2年度は、札幌・小樽・旭川以外の地域で予測式の適用が可能となるよう、地域ではない要素でグループ分け（施工方法、降雪量、道路幅員構成等）を行い（表-17）、それぞれ説明変数の組み合わせを変更し、重回帰分析を行い適用性について確認した。分析に使用した堆雪断面積の実測値は、札幌は7年分（H25～R1）、旭川と小樽は3年分（H29～R1）を使用した。なお、説明変数は表-18に示すとおり地域毎の分析時に最適となった組合せ（パターン①、④）と、特に影響があると思われる最深積雪深を除いた気象観測値を組合せた（パターン②、③）4つのパターンを設定した。

表-17 重回帰分析のグループ分けと相関係数

グループ		修正済重相関係数(修正R)			
		R<0.6	0.6<R<0.7	0.7<R	
道路幅員構成	車線数	6車線		○	
		4車線	○		
	中央分離帯の有無	有	○		
		無	○		
路肩幅員の状況		2m以上		○	
		1m超、2m未満		○	
		1m以下	○		
運搬排雪工法		巻き出しのみ		○	
		拡幅のみ	○		
		巻き出し・拡幅の両方		○	
		作業実績なし		○	
年間降雪量		多い		○	
		平年並み		○	
		少ない	○		
降雪傾向	12月の降雪が多い	全道(札幌・旭川)		○	
		札幌 旭川	○		
	1月の降雪が多い	全道(札幌・旭川)	-	-	-
		札幌 旭川	-	-	-
	2月の降雪が多い	全道(札幌・小樽)		○	
		札幌 小樽		○	
	各月平年並み	全道(札幌・旭川)		○	
		札幌 旭川		○	
		旭川		○	
	その他			○	

表-18 説明変数のパターン

パターン	説明変数		
	道路幅員構成	運搬排雪回数	気象観測値
①	-	運搬排雪(巻出)回数 運搬排雪(拡幅)回数	最深積雪深
②	-	運搬排雪(巻出)回数 運搬排雪(拡幅)回数	平均気温 平均湿度 平均風速 降水量(累計) 降雪量(累計) 日射時間(累計)
③	-	運搬排雪(巻出)回数 運搬排雪(拡幅)回数	0℃以上の積算気温 平均湿度 平均風速 降水量(累計) 降雪量(累計) 日射時間(累計)
④	歩道幅員 路肩幅員 車道幅員 路肩幅員(中央側) 中央帯幅員	運搬排雪(巻出)回数 運搬排雪(拡幅)回数	最深積雪深

説明変数について、相関の強さを示す修正済重相関係数を基に多重共線性の確認、有意性検定、及び符号の検定を行い、堆雪成長に影響がある変数を整理した。なお、降雪傾向(1月の降雪が月別降雪量の平年値より多い)では実測値が少ないため、分類が難しく、分析を行えなかった。

ここでは、一例として、年間降雪量のグループの分析を示す。令和元年度は記録的な少雪年であったことを考慮し、年間降雪量の多少により分類軸を設定した。平成2年度から令和元年度までの過去30年間の年間降雪量を基に年間降雪量の平年値と「平年並み」と判断するための最大値と最小値を算出した(図-27、表-19)。年度毎の年間降雪量30件を少ない順に並べ、中央の10件から平年値等を求めた。中央の10件の最小値(下限)、平均値(平年値)、最大値(上限)とした。

年間降雪量はアメダス札幌の日降雪量の年合計とした。各地域年度の年間降雪量が表-19に示す下限から上限にある場合は「平年並み」とし、それより「多い」場合と「少ない」場合に分類し、グループ毎に重回帰分析をした結果は表-20のとおりとなった。年間降雪量が「多い」、「平年並み」では修正済重相関係数0.7以上であり、「少ない」場合には修正済重相関係数0.6程度であった。

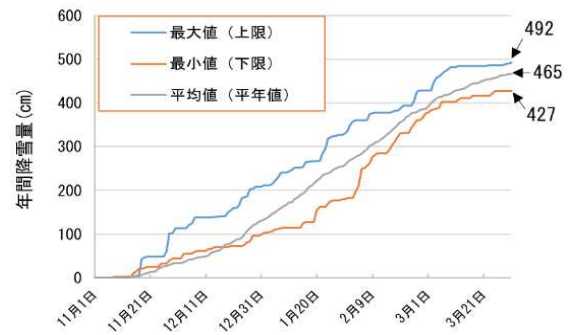


図-27 年間降雪量の平年値 (アメダス札幌 H2~R1)

表-19 年間降雪量の「平年並み」の範囲

観測局	「平年並み」の範囲(cm)		
	下限	上限	平均
札幌	427	492	465
小樽	531	657	597
旭川	552	647	592

表-20 年間降雪量の多少によるグループ毎の重回帰分析結果

年間降雪量	地域と年度			実測値(件)	修正済重相関係数(修正R)
	札幌H25	札幌H27	札幌H29		
多い	札幌H28			90	0.9333
	札幌H31	小樽H29	旭川H29	560	0.7257
少ない	札幌H26	札幌H30	小樽H30	550	0.6033
	小樽H31	旭川H30	旭川H31		

その他のグループについても同様に分析し、修正済重相関係数の最大値で整理した結果を表-17に示す。重回帰分析結果による、グループ毎の修正済重相関係数が最も高い説明変数の組合せを用いた回帰式を堆雪断面面積の推移を予測する式とし、時間経過による予測値を算出し、実測値と比較した。例として、道路幅員構成のグループで車線数6車線と路肩幅員の状況2m以上の場合の堆雪断面面積予測式と予測式から算出した予測値と実測値の比較例を示す(表-21、図-28、29)。

実測値と予測値は概ね同様の増減傾向や値を示すことを確認した。項目によって母集団が少ない等の課題はあるものの、地域毎以外の要素である道路幅員構成等の分類による堆雪断面面積予測式としての適用の可能

性を確認した。

令和3年度は、除雪従事者等が担当工区に適した予測式を選択できるように予測式を選択フローを作成した(図-30)。フローチャートの作成にあたっては、予測式の修正済重相関係数が大きく、現場条件のみで使用者が選択可能な指標である道路幅員構成を用いた。これにより、札幌・小樽・旭川以外の地域でも予測が可能になったが、今後、3地域以外でも堆雪断面積の実測値を収集し、予測値と比較し適用性を検証したい。

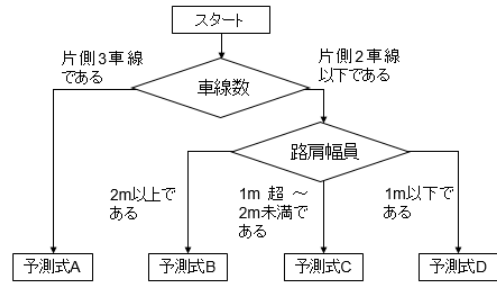


図-30 予測式を選択フロー(道路幅員構成)

表-21 堆雪断面積予測式
(車線数6車線、路肩幅員の状況2m以上)

堆雪断面積予測式		Y=a ₁ x ₁ +a ₂ x ₂ +...+a _n x _n +b		
説明変数		偏回帰係数		
		記号	車線数6車線(片側3車線)	路肩幅員の状況2m以上
雪運回数	運搬排雪(巻出)回数(回)	a ₁	-2.6814	-1.7385
	運搬排雪(拡幅)回数(回)	a ₂	-0.6758	-0.7600
気象観測値	平均気温(°C)	a ₃	-0.3213	-
	0°C以上の積算気温(°C)	a ₄	-	-
	平均湿度(%)	a ₅	0.1512	0.0957
	平均風速(m/s)	a ₆	-	-
	降水量(累計)(cm)	a ₇	-	-
	降雪量(累計)(cm)	a ₈	0.0185	0.0176
	日射時間(累計)(時間)	a ₉	-0.0105	-0.0158
	定数項	b	-10.8823	-5.9545



図-28 予測値(堆雪全断面積)と実測値の比較例
(車線数6車線 札幌 H30 R274 L側 KP=15 付近)



図-29 予測値(堆雪全断面積)と実測値の比較例
(路肩幅員の状況2m以上 札幌 H28 R274 L側 KP=18 付近)

5. 路肩堆雪と道路有効幅員の関係性把握

令和元年度に開発局、札幌・小樽・旭川開発建設部管内の維持除雪工事監督員及び請負者(19か所71名)へヒアリングを行った結果、運搬排雪実施時期を決める際に、通行に必要な道路有効幅員の有無を、判断の一因とした除雪従事者は8割以上であった(ヒアリング結果の詳細は第8章参照)。そのため、冬期における路肩堆雪による道路有効幅員の関係性を把握するため、気象データ等による重回帰分析を行った。

5.1 気象データ等による堆雪の幅員の把握

道路有効幅員は次式(11)で算出できる。

$$\text{道路有効幅員(m)} = \text{道路幅員(m)} - \text{堆雪の幅員(m)} \quad (11)$$

そこで、堆雪の幅員を把握するため、目的変数を堆雪の幅員、説明変数を気象データ、除排雪回数及び道路有効幅員とする重回帰分析を行った。

前項 4.2.3 3)の堆雪断面積の予測において高い相関が確認された表-16 パターンBについて、札幌・小樽・旭川の各地域で重回帰分析を行った結果(表-22)、その回帰式から路肩堆雪の幅員の予測式を作成した。データ件数は、それぞれ2ヶ年分の200件(20計測日(H29:10回、H30:10回)×10地点)を対象とした。札幌、小樽と比較し、旭川の相関は低い結果となった。

表-22 地域ごとの重回帰分析結果
(目的変数：路肩堆雪の幅員)

地域	修正済重相関係数(修正R)	分析データ年
	パターンB	
目的変数(巻出回数、拡幅回数、最深積雪深、道路幅員構成)		
札幌	0.6067	H25-30
小樽	0.6154	H29-30
旭川	0.5448	H29-30

5.2 堆雪断面積と堆雪の幅員の関係性把握

前項 4.2 の堆雪断面積の予測式と前項 5.1 で作成した堆雪の幅員の予測式による予測値とそれぞれの実測値の推移を図-31 に示す。堆雪の幅員の予測値と実測値は概ね一致することを確認した。堆雪断面積については予測値と実測値の間に差異があり、予測値が大きくなる日と小さくなる日の両方があった。しかし増減の推移は類似の傾向を示した。

前項 4.2 の旭川の堆雪断面積の予測で相関が高かった説明変数の組み合わせである初冬期（運搬排雪前）と晩冬期（運搬排雪後）に分割し、同じく路肩堆雪の幅員の重回帰分析を行った。小樽では運搬排雪（巻出）の実績がなかったため、札幌と旭川のみ分析した。その結果、札幌（初冬期・晩冬期）と旭川（初冬期）で修正済重相関係数が 0.7 以上となった（表-23）。

初冬期と晩冬期に説明変数「パターン B」の分析結果（表-22）に比べ初冬期と晩冬期に分割した分析結果（表-23）で、高い相関を示したことから、表-24 の予測式を堆雪の幅員の推移を予測する式とし、時間変化による予測値を算出し実測値と比較した（図-32、33）。実測値と予測値は概ね一致した。この結果から、実測件数が少ない（2ヶ年分の 200 件）、運搬排雪（巻出）の実績がない地域での初冬期と晩冬期の分割をどのように判別するかなどの課題はあるが、堆雪の幅員の予測式として適用できる可能性を確認した。今後、気象条件による初冬期と晩冬期の分割方法について検証したい。

表-23 地域ごとの重回帰分析結果

（目的変数：路肩堆雪の幅員）

地域	修正済重相関係数(修正R)	
	説明変数 (道路幅員構成、0℃以上の積算気温、平均湿度、平均風速、累計降水量、累計降雪量、累計日射時間)	
札幌	運搬排雪前	0.7177
	運搬排雪後	0.7092
小樽	運搬排雪前	-
	運搬排雪後	-
旭川	運搬排雪前	0.7436
	運搬排雪後	0.6085

表-24 堆雪の幅員予測式

（札幌 運搬排雪回数 1 回）

堆雪幅員予測式				
$Y = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n + b$				
説明変数	記号	偏回帰係数		
		初冬期	晩冬期	
道路幅員構成	歩道幅員(m)	a_1	-0.1180	0.9697
	路肩幅員(m)	a_2	-2.4352	-1.4278
	車道幅員(m)	a_3	-0.3974	-0.0072
	路肩幅員(中央帯側)(m)	a_4	2.5063	2.5145
	中央帯幅員(m)	a_5	-0.0113	-0.0439
気象観測値	0℃以上の積算気温(℃)	a_6	-0.0438	-0.1013
	平均湿度(%)	a_7	-0.0831	0.0167
	平均風速(m/s)	a_8	1.0598	0.0115
	降水量(累計)(cm)	a_9	0.0153	-0.0156
	降雪量(累計)(cm)	a_{10}	-0.0064	0.0235
	日射時間(累計)(時間)	a_{11}	0.0023	-
定数項	b	6.2272	-3.5326	

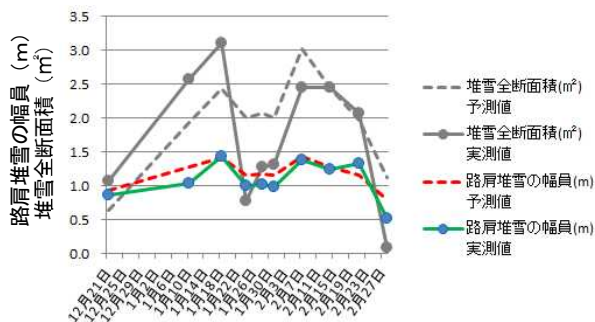


図-31 堆雪断面積と堆雪の幅員の推移
(H30 小樽 R5 R側 KP=249~250
車線幅員 6.5m 路肩幅員 1.0m)



図-32 予測値（堆雪の幅員）と実測値の比較例
(札幌 H30 R274 R側 KP=17 付近)

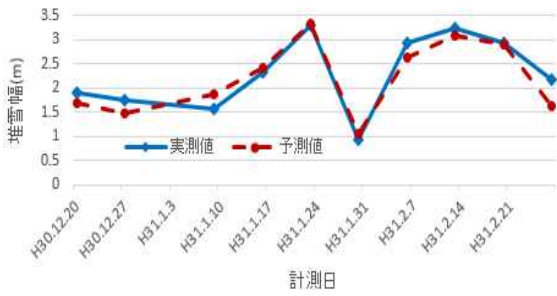


図-33 予測値（堆雪の幅員）と実測値の比較例
（旭川 H30 R39 L側 KP=10 付近）

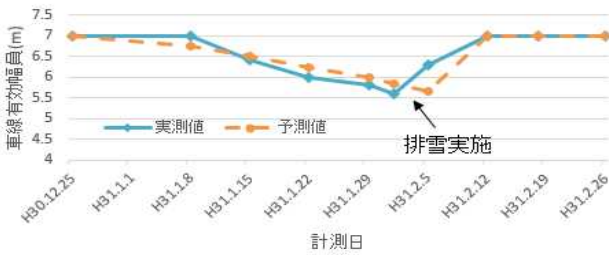


図-34 予測値（道路有効幅員）と実測値の比較例
（札幌 H30 R274 R側 KP=17 付近）

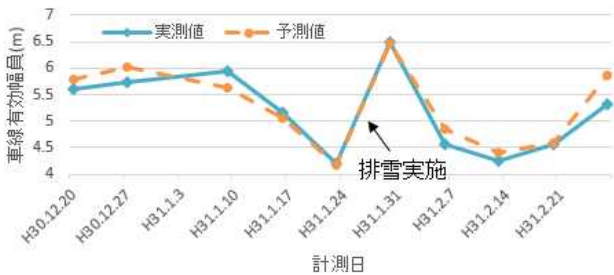


図-35 予測値（道路有効幅員）と実測値の比較例
（旭川 H30 R39 L側 KP=10 付近）

5.3 堆雪の幅員からの道路有効幅員の関係性把握

前項 5.2 で作成した堆雪の幅員の予測式を用いて、運搬排雪作業実施の判断指標の1つである道路有効幅員の予測値を式(11)により算出した。道路有効幅員の予測値と実測値の比較例を図-34、35 に示す。札幌、旭川ともに概ね実測値と同様の傾向を確認した。

調査期間中の道路有効幅員の最低値は、札幌では約 5.5m、旭川では約 4m であり、いずれも排雪直前であった。道路有効幅員の予測が可能になれば、運搬排雪実施時期の判断指標としての活用が期待できる。

6. 路肩堆雪部形状計測技術の評価と検証

堆雪断面の推計の精度向上には、推計値と実測値を比較するため堆雪形状の測定が必要となるが、現在、都度現地にて計測を要している。

また、除排雪計画の効率的かつ効果的な立案には、堆雪断面の多地点でのシーズンを通じた把握も必要である。

そのため、低コスト、短時間で連続かつ継続して計測可能な路肩堆雪形状計測技術の構築に向け、適用可能な計測技術について現場適合性を検証した。

6.1 路肩堆雪部形状計測技術の評価

令和元年度は、路肩堆雪部の形状計測方法について、適用可能な技術を調査した。建設分野における ICT 技術の進展を踏まえ、適用できる可能性がある技術を 5 例抽出し、精度・経済性・現場適合性について評価したところ「デジタルカメラ撮影写真による 3 次元モデル作成」が最も高い評価となった（表-25）。

6.2 路肩堆雪部形状計測技術の検証（3次元モデル作成）

SfM (Structure from Motion) 技術に基づく 3 次元モデル作成ソフトを用いた計測結果とトータルステーション（以下「TS」という）による計測結果を比較し、実現性と実運用に向けた計測手法について検証した。なお、3 次元モデル作成ソフトは市販されている MetaShape を使用した。

6.2.1 検証手順

- (1) TS による計測箇所の堆雪断面をデジタルカメラで 10 枚程度撮影する。堆雪部表面の同一箇所が複数の写真に納まるように撮影する。大きさの基準となる既存構造物（標識支柱等）も併せて撮影する。
- (2) MetaShape に撮影写真を投入し、3 次元モデルを作成する（図-36）。
- (3) MetaShape から出力された 3 次元モデルを CAD ソフト（AutoCAD）で取り込み、既存構造物の大きさ等を参考に堆雪断面を算出する（図-37）。
- (4) 3 次元モデル作成による計測結果と TS による計測結果を比較する。

表-25 路肩堆雪部形状計測技術の評価

計測技術	精度	経済性	現場適合性	総合評価
MMS(モバイルマッピングシステム)	○	△	△	△ (5点)
道路有効幅員計測システム	△	○	△	△ (5点)
ステレオ写真測量(地上移動体)	△	△	△	△ (3点)
UAVを用いたSfM 多視点ステレオ写真測量	○	○	△	△ (7点)
デジタルカメラ撮影写真による3次元モデル作成	○	◎	○	○ (11点)

※◎：5点、○：3点、△：1点

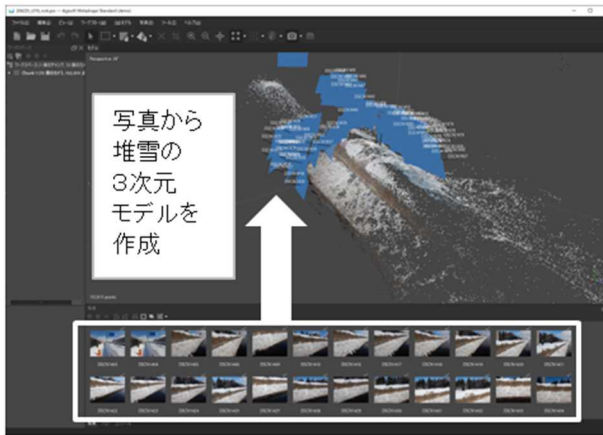


図-36 3次元モデル作成 (MetaShape)

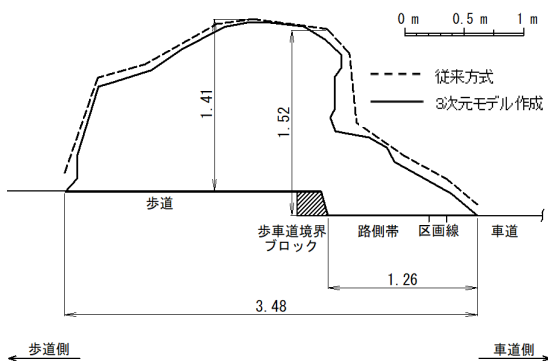


図-37 堆雪断面計測結果の比較
(R1 札幌 R274 L側 KP=14~15)

6.2.2 検証結果

令和2年度は、実運用に向けた計測手法について検証するため、開発局の札幌・小樽・旭川開発建設部管内の国道各10地点でTSによる計測値とあわせて、撮影し比較検証した(図-38)。撮影は1週間に1回程度の頻度で、計86件計測した。

計測の結果、堆雪断面形状が把握でき、3次元モデル作成による計測とTSによる計測結果の誤差は堆雪断面積が平均7%、堆雪の幅員は9%、高さは4%であった。堆雪断面積は図-39のとおり残差となり、3次元モデル作成でも十分な計測結果が得られ、実用的な計測が可能であることを確認した。さらに写真撮影によるSfMは、TSによる計測と比べ省力化も期待でき、細かい凹凸(図-37)も把握することができた。図-39に示すように、地域ごとの残差の符号による偏りや、地域ごとの傾向の差はなかった。また、実運用に向けて以下の課題も確認した。本計測技術は計測対象を図-40のようにオーバーラップさせ撮影することが必要であるが、天候不良や路面反射等により写真が鮮明に

撮影できない状況も多くあり、堆雪形状が不鮮明になる場合も確認された。

また、道路有効幅員についても写真にて計測を行って見たところ、天候により写真が鮮明に撮影できない、積雪量が少なく段差のない状態に見えてしまう、撮影位置から遠く縁石が低いため対向車線の縁石が平らに見える、堆雪が白色であるため道路との境界線が判断しにくいことから、点群上では低い傾斜変化点を認識しにくく、横断面の堆雪形状をとらえにくい場合があることなどがわかった。



図-38 堆雪形状の写真撮影状況

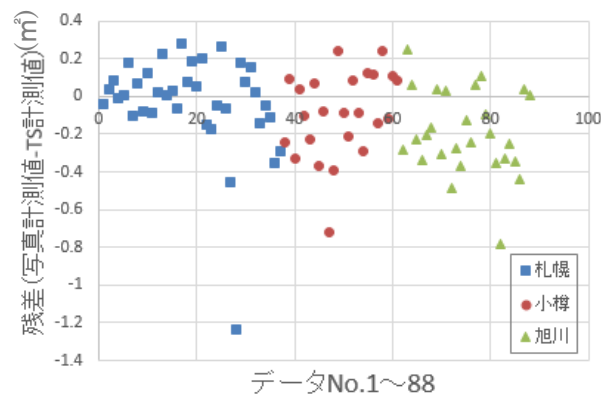


図-39 堆雪断面積のTS測定とSfMによる測定の残差 (SfM-TS)

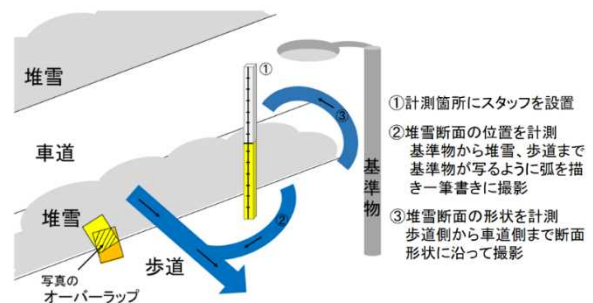


図-40 検証した写真撮影方法

6.3 路肩堆雪部形状計測技術の検証(定点カメラ)

前項6.2では、現地での計測の省力化などについて検討したが、道路管理者が運用中の道路状況を撮影し

ているカメラの活用や、さらなる計測作業の省力化に向け定点カメラによる計測手法を検討し、定点カメラが活用できるか検証した。

道路沿いに定点カメラを設置し、堆雪形状画像を撮影、堆雪断面積等を算出、TS による計測結果と比較した。定点カメラの設置箇所は、TS による計測箇所のうち札幌市内の 12 箇所のうち、定点カメラ設置可能な道路付属物の有無、道路付属物と計測箇所との距離、道路付属物の所有者及び周辺の民家の有無等を考慮し、3 箇所を選定した。カメラを設置する道路付属物は、歩道上の堆雪が形成される付近にあり、照明柱等に比べて強度の高い F 型柱を選定した。カメラの設置高さは、堆雪に埋もれてしまう可能性が低く、脚立等でカメラ設置作業が可能な 3.0m とした。過去の堆雪状況を踏まえ最大堆雪幅 7m が撮影可能となるようカメラの位置と角度を調整した (図-41)。

定点カメラは、市販されている遠隔制御可能な自動撮影カメラを使用し、1日1回定時にタイムラプス機能により堆雪画像を撮影するよう設定した。計測期間は令和3年1月18日～2月24日とした。堆雪形状を模した線分の角度は、目視で堆雪形状の変化点を認識可能な 5°以上となった位置で高さを計測する点とした (図-42)。選定した開発局の札幌開発建設部管内の国道3地点で計30件堆雪断面積を算出し、そのうち6件はTS値と同日に撮影し、堆雪断面形状により適用性を検証した。



図-41 定点カメラ設置状況

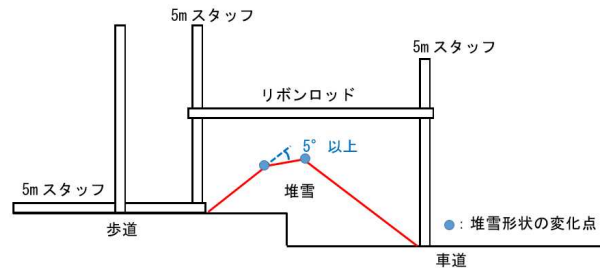


図-42 スケール設置方法 概略図

6.3.1 検証手順

- (1) 基準寸法となるスケールを含めた事前撮影を実施する。スケール設置方法の概略を図-42に示す。
- (2) 撮影した画像(1日1枚)のうち画像が鮮明であり堆雪形状を確認可能な画像を1箇所あたり10枚抽出する。抽出した堆雪画像に基準寸法と断面形状を記載し、目視により堆雪断面積等を算出する(図-43)。
- (3) 定点カメラによる計測結果とTSによる計測結果を比較する(図-44)。

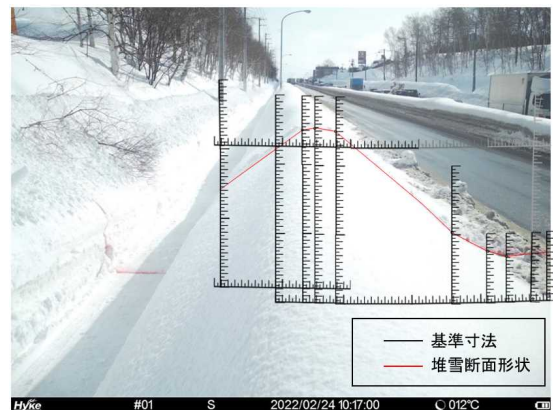


図-43 堆雪画像から断面形状を抽出

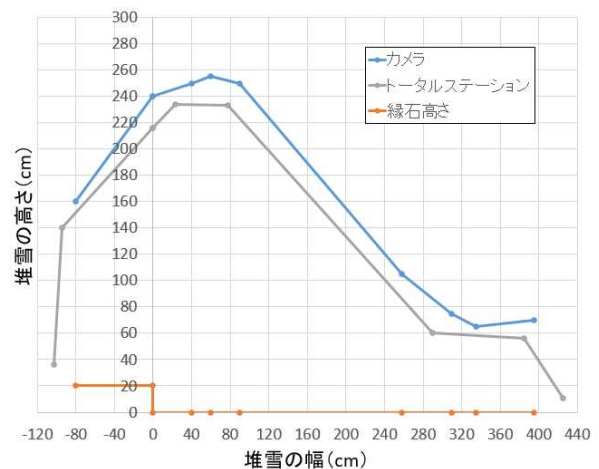


図-44 堆雪断面形状の比較 (定点カメラとTS)

6.3.2 検証結果

定点カメラ画像による計測と TS による計測結果の堆雪断面積の誤差は平均して 11%であった。タイムラプス機能により自動で画像を撮影し保存、遠隔で画像を抽出できるので、現地に行く回数が少なくて済み、多くの画像を取得可能であるため、TS よりも省力化できる。

堆雪形成後に基準寸法用のスケールを事前撮影すると、堆雪部分にスケールを設置することが難しく、縁石の位置も推測する必要があるため、降雪前に事前撮影を行うことが望ましい。堆雪が太陽光に照らされている状態の方が、堆雪の凹凸が確認しやすかったため、カメラの設置位置や撮影方向に合わせ撮影時間を調整することで、より鮮明な画像を取得可能である。画像が暗く堆雪形状の凹凸が確認しにくい場合には、計測位置の目印となるものを利用することで堆雪形状が確認可能である。

令和 3 年度では、例年以上に堆雪が大きかったため、堆雪全体を画角に収めることが難しかった。今後、カメラの設置位置を変え、画角の異なる位置にカメラを複数台設置することにより、車道側の堆雪を画角に収めることができるよう検討していきたい。

7. 路肩堆雪が通行車両の視認性に与える支障度合い調査

7.1 路肩堆雪の影響に関する走行実験

路肩堆雪が大きくなると、ドライバーや歩行者の視界を遮るなど、交通の安全性や円滑性への影響が懸念される。除排雪の作業計画を立案するうえで判断要素となる、路肩堆雪の位置や高さがドライバーの視認性に与える支障度合いを定量的に把握するため、被験者参加による走行実験を行った。

7.1.1 走行実験概要

寒地土木研究所苫小牧寒地試験道路において、模擬堆雪を設置した十字交差点を被験者が実験車両を運転走行し、左折する場合の各堆雪の高さがドライバーに与える支障度合いについて、主観評価を行った。なお走行実験は堆雪とドライバーの距離が近く、視界への支障度合いが大きいと考えられる左折の場合のみ行った。

7.1.2 堆雪

走行実験で用いる模擬堆雪は 7 箇所 (図-45) とし、高さは 1.0m、1.2m、1.5m とした。また、路面状況は乾燥及び湿潤で、模擬堆雪は木製の棒に白色のシートを取り付けることにより再現した (図-46)。



図-45 堆雪位置及び走行コース

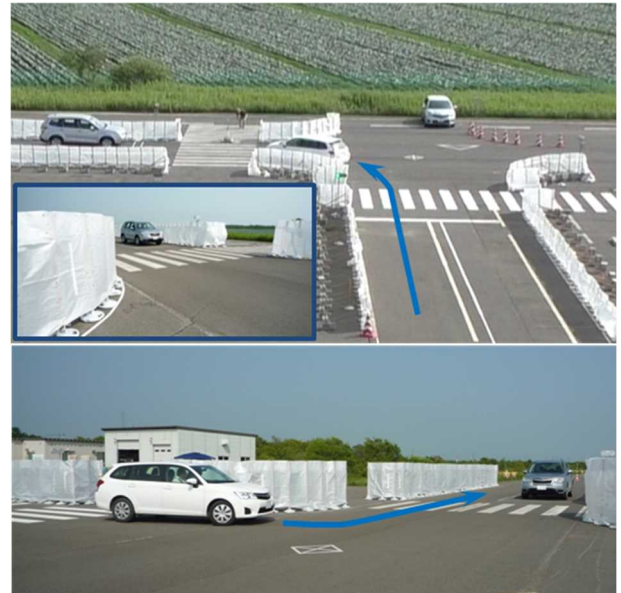


図-46 堆雪の影響に関する実験状況

7.1.3 走行条件

被験者は実験車両(トヨタ カラーフィールダー)を自由走行により運転した。走行コースは、交差点手前 20m からスタートし、信号のある交差点を左折した後、20m 先をゴールとした (図-46)。また、被験者は同じ実験条件で 5 回連続して走行した。うち、1~2 回は交差点内に他の走行車両もしくは歩行者がランダムに進入する条件で行い、他の走行車両や歩行者が来るかもしれないという意識を被験者に持たせた。

7.1.4 被験者

被験者は、運転初心者やペーパードライバーではない男女 10 名とした。全員が視覚に対する健常者で、

年齢は30歳～60歳代、運転時の目線の高さは116cm～125cmの範囲であった。

7.1.5 主観評価

被験者は各堆雪高さにおいて、堆雪毎の支障度合いを主観評価した。評価には7段階評価のアンケートを用いた(図-47)。アンケートにより得られた評価(主観評価点数)は、被験者間の評価点数のバラツキを抑え堆雪毎の比較を容易にするため被験者毎に標準化((個々の点数-平均)/標準偏差)し、さらに堆雪毎の全被験者の値を平均することで基準値を求めた。なお、基準値が高い(プラス方向)ほど走行する上での支障になり、逆に基準値が低い(マイナス方向)ほど支障にならない評価結果となる。

0: 走行する上での影響度を雪堤毎にチェック(○)してください。


試験番号	被験者No.							
堆雪①	1.5m	1	2	3	4	5	6	7
堆雪②	1.5m	1	2	3	4	5	6	7
堆雪③	1.5m	1	2	3	4	5	6	7
堆雪④	1.5m	1	2	3	4	5	6	7
堆雪⑤	1.5m	1	2	3	4	5	6	7
堆雪⑥	1.5m	1	2	3	4	5	6	7
堆雪⑦	1.5m	1	2	3	4	5	6	7
		支障にならない  支障になる						

図-47 堆雪の支障度合いアンケート表

7.1.6 主観評価の結果

主観評価の結果(図-48)、以下のことが考察される。

- 1) 交差点内にある堆雪④は他の堆雪に比べ、どの堆雪高さでも基準値が高い。堆雪④は、左折時のドライバーにとって、横断歩道を通行する歩行者に対する視認性に支障となる位置であるためと考えられる。
- 2) 堆雪の高さに伴って、基準値も高くなる。また、堆雪高さ1.5mは、堆雪高さ1.0m及び1.2mに比べ基準値が特に高い。これは、堆雪高さ1.5mは、被験者の運転時の目線高さより高く、不可視範囲が広いためと考えられる。

以上のことから、交差点内の堆雪は、ドライバーの視認性に支障となるため、ドライバーの目線高さより低い、概ね1.0m程度に抑えることが望ましいと考える。

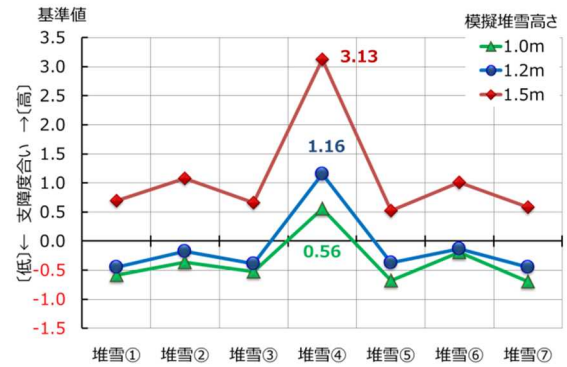


図-48 主観評価の結果

8. 除排雪の作業計画支援技術の開発

堆雪断面積の推移を予測することで、効率的な除排雪作業や除排雪作業計画の立案が可能となる。そこで、令和元年度までは「堆雪断面積予測式」を用いた、「除排雪作業計画支援システム(以下、「支援システム」という)」の要件定義と概略処理フローの整理を行った。また、支援システムの検証用システムを作製し、動作確認やユーザーの使用感を含めた改良点の抽出を行った。

令和2年度は、ユーザーへのヒアリング結果から明確になった改良点について具体的に必要な機能を抽出し、過去の運搬排雪実績を用いて排雪の実施時期や工法についてのシミュレーションを行った。

令和3年度は、道路有効幅員の表示、堆雪断面積予測式を自動算出する機能や暴風雪や大雪の発生が見込まれる場合の予報を反映する機能を備えた「除排雪作業計画支援システム」を開発し、作業計画支援技術として取りまとめた。

8.1 要件定義

図-49に「支援システム」のイメージ図を示す。対象ユーザーは維持除雪工事監督員及び請負者を想定する。気象観測情報や除排雪実施状況と堆雪断面積計測情報から、堆雪断面積の推計結果をグラフで表示する。推計堆雪断面積のグラフ化により、除排雪作業前後の堆雪断面積の成長傾向の把握が可能となる。

さらに、除排雪費用・作業時間の推計により、除排雪作業の工法の選定や実施時期などの作業判断が容易となり、効率的な作業計画立案の支援に有効と考えられる。

なお、堆雪断面積の推計には表-21、作業時間の推計には図-14の排雪速度予測式を使用する。

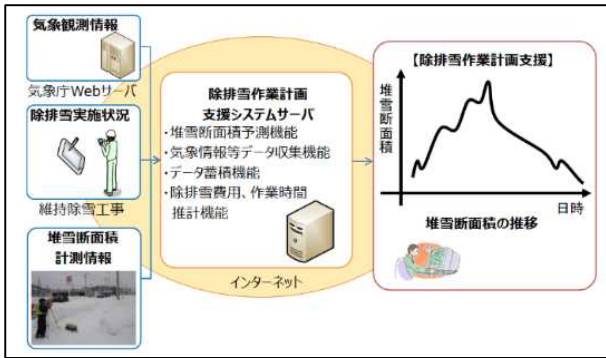


図-49 「支援システム」イメージ図

8.2 概略処理フロー

図-50に「支援システム」の概略処理フローを示す。ユーザーが①場所(路線番号、距離標、道路幅員構成)、②使用したい気象観測所名、③年間降雪パターン、④除排雪作業実施日と工法を選択すると堆雪断面積の推移がグラフで確認できる。

除排雪作業実施日前は、リアルタイムに収集したアメダスデータから、作業実施日後は過去の年間降雪パターンから、堆雪断面積の推計を行いグラフ化する。

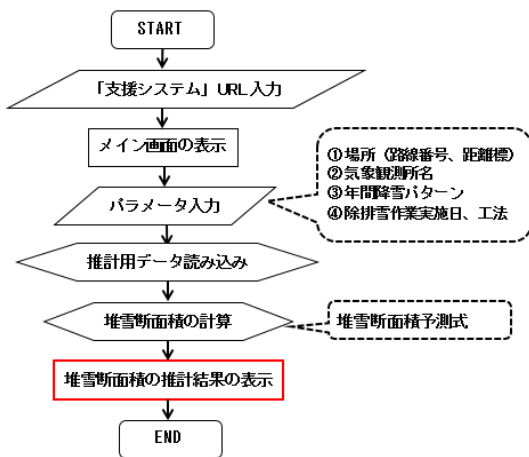


図-50 「支援システム」概略処理フロー

8.3 検証用システム作製と改良点の抽出

検証用システムを作製し(表-26、図-51)、動作確認やユーザーの使用感を含めた改良点の抽出を行うため、開発局の札幌、小樽、旭川、各開発建設部管内の維持除雪工事監督員及び請負者(19 か所 71 名)へ支援システムの使用感と運搬排雪計画について、ヒアリングを行った。回答者の経験年数は1年から38年までであり、監督員に比べ請負者にベテランの方が多い。6割以上が路肩堆雪状況に応じて運搬排雪工法を選択すると回答しており(図-52)、工法と実施時期の判断には、車道の有効幅員や路肩堆雪の幅員や高さが用いられている(図-53、54)。また運搬排雪計画を立案する対象

期間は、約8割が2~3週間先または1か月先であった(図-55)。

以上により、堆雪断面積と合わせて道路有効幅員の表示や1ヶ月以上の長期にわたる予測精度の向上などを支援システムの改良点として抽出した。

さらに、支援システムの使用感について、操作性は、「使いやすい」、「まあまあ使いやすい」が5割以上であり(図-56)、画面表示の分かりやすさは、「分かりやすい」、「まあまあ、分かりやすい」が5割以上であった(図-57)。

改善点として「当該年度に近い年間降雪パターンを選びやすくする」、「道路有効幅員も表示した方が運搬排雪時期の判断がしやすい」、「工区により傾向が異なるので、それぞれ予測する機能があると良い」等の意見があった。

表-26 「支援システム」の動作環境

装置区分	ソフトウェア	システム要件
クライアント	OS	Windows10(64bit)
	Webブラウザ	Internet Explorer 11、Edge
サーバ	OS	CentOS 7.4 (1708)
	Webサーバ	Apache 2.4.6
	アプリケーション	PHP 5.6.31
	RDBMS	PostgreSQL 9.3.19



図-51 「支援システム」の画面表示例 (堆雪断面積推移)

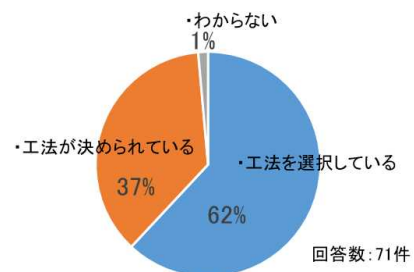


図-52 路肩堆雪状況に応じた運搬排雪工法(巻出・拡幅・カット)の選択有無

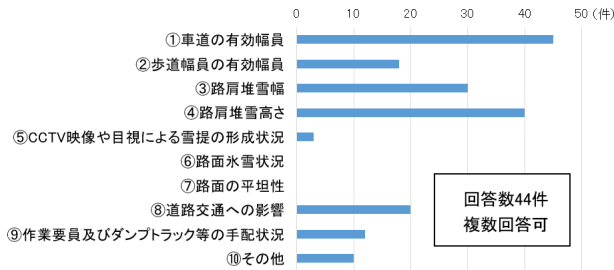


図-53 運搬排雪工法選択の主要因

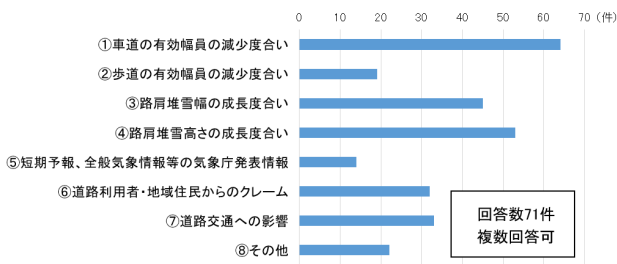


図-54 運搬排雪実施日の判断基準

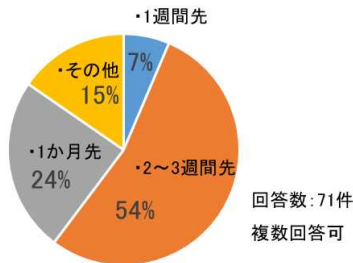


図-55 運搬排雪作業計画立案の対象期間

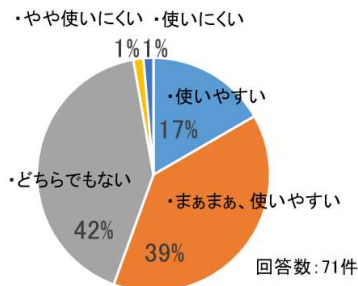


図-56 支援システムの操作性

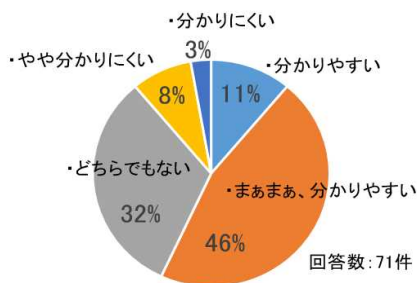


図-57 支援システムの画面表示

以上より、支援システムの改良点として以下を抽出した。

- ・予測情報（天気予報、長期予報）の反映
- ・車道有効幅員予測結果の表示機能の追加
- ・堆雪断面積予測式自動算出機能の追加
- ・年間降雪パターン選択支援機能の追加
- ・道路テレメータの降雪データの登録
- ・位置情報による年間降雪パターンの絞り込み機能

8.4 シミュレーション例（札幌・R1年度）

令和元年度の札幌での路肩堆雪成長傾向について、「支援システム」を使用し、実施時期や工法のシミュレーションを行った。運搬排雪実績(2/17 巻出1回)を入力した場合は、予測値と実測値の推移が同様の傾向を示した(図-58)。予測値から堆雪のピークが巻出により効果的に解消されていることがわかる。また、運搬排雪を行わなかった場合(図-59)と比較すると、運搬排雪を実施したことで、以降、運搬排雪を行う必要がないとの判断が、堆雪断面積の推移から想定可能となる。仮に、巻出ではなく拡幅3回を行った場合(図-60)は2月上旬から3月上旬まで堆雪の大きさが半分以下に抑えられる可能性が確認できる。

また、堆雪断面積のグラフ上に任意の補助線を設定可能とした。グラフ上に堆雪可能な断面積の閾値などの補助線を引くことで、設定した断面積を超える時期を見える化でき、運搬排雪工法・時期の判断が可能となる。例えば、堆雪可能な最大堆雪断面積を予測値の最大値の4.1m²とし、4.1m²と3.2m²(図-60での最大値)に補助線を引いた。図-58では断面積が4.1m²を超えないよう運搬排雪(巻出1回)の時期を調整したり、図-60のように、シーズン中に最大でも3.2m²以下に止めたい場合、3回の拡幅で対応可能といった運搬排雪計画の策定も可能となる。実施日は図-59の堆雪断面積のピークを参考に判断できる。

このように、運搬排雪実施時期や工法のシミュレーションを行うことで、該当工区の堆雪可能な断面積を推察しながら、より効率的な工法や実施時期、回数など様々なパターンで検証でき、運搬排雪作業計画立案の支援が可能となる。

今回は過去の運搬排雪実績の有効性を確認したが、過去の降雪パターンを想定し、該当年度を選択することにより、以降の堆雪の大きさも予測できるため、堆雪が最も大きくなる時期や、運搬排雪実施後の堆雪断面の大きさの推移も確認が可能である。



図-58 運搬排雪実績(2/17 巻出1回)を入力した場合



図-59 運搬排雪を行わなかった場合



図-60 (2/5 2/19 2/25 拡幅3回)を入力した場合

8.5 「支援システム」の開発（機能追加）

令和3年度は、8.3で抽出した改良点と大雪予報の反映機能を追加し、より現場適用性の高いシステムを開発した。追加した機能の例を示す。

8.5.1 道路有効幅員予測結果の表示機能の追加

5.2で作成した堆雪の幅員の予測式から道路有効幅員を算出し、時間経過による推移を表示する機能を追加した。場所や気象観測値等の入力値は堆雪断面積と同様の値を使用し、堆雪断面積と道路有効幅員の双方を確認可能とした。堆雪断面積の予測値の算出には、複数ある予測式から任意でより適した式の設定もできる。

道路有効幅員の把握が可能になれば、そのグラフ上に閾値等の補助線を引くことで、閾値を超える時期を視覚的にも確認することができるなど、運搬排雪実施時期の判断指標としての活用が期待できる（図-61）。

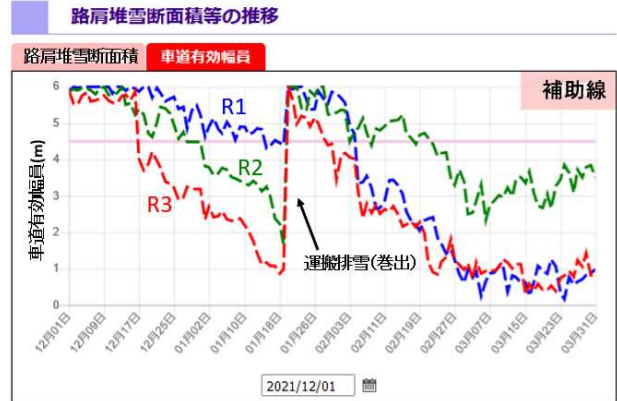


図-61 道路有効幅員の画面表示例

8.5.2 堆雪断面積予測式自動算出機能の追加

4.2に示した堆雪断面積の推計の手法を活用し、任意の工区での気象や道路幅員構成等のデータに合わせて堆雪断面積の予測式を自動算出する機能を追加した。

予測式は、4.2と同様に堆雪断面積を目的変数とした重回帰分析による回帰式とし、断面積の実測値を複数入力することで、それぞれ自動で算出可能とした。

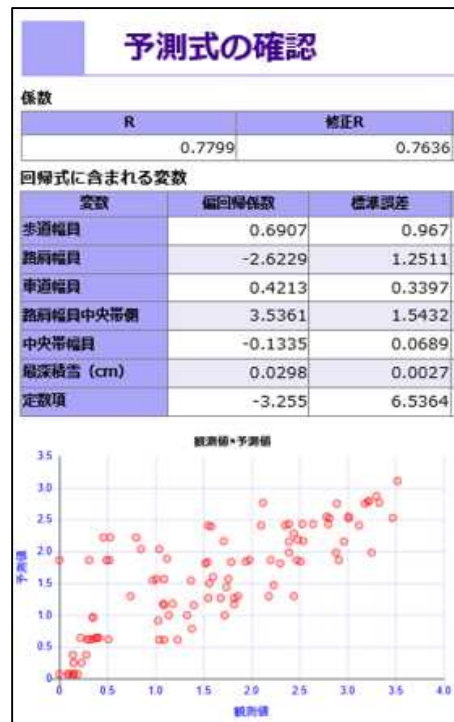


図-62 予測式自動算出結果の画面表示例

現在は、本研究で計測した実測値のみ入力されているため、札幌・小樽・旭川の3地域のみ算出だが、任意に実測を行った地域・年度を指定すると、修正済重相関係数や偏回帰係数等の分析結果と実測値と予測値の比較のグラフ等が表示され(図-62)、さらにその算出した予測式を登録できる機能となっている。

8.5.3 暴風雪や大雪予報の反映機能の追加

近年の天気予報では、暴風雪や大雪の発生が見込まれる場合に、降雪量、もしくは積雪増加量の見通しが、気象庁をはじめとする気象予報士により発表されている(図-63)。短期の除排雪計画支援のため、その大雪の見通しを支援システムの堆雪断面積へ反映する機能を検討した。

支援システムにおける堆雪断面積と道路有効幅員の予測にあたっては、日降雪量と最深積雪(日毎)を説明変数として設定できる。大雪の予報の降雪量を日降雪量として、積雪の増加量を最深積雪(日毎)の増加量とすることで、予測が可能となるが、どちらか一方のみの見通しが発表された場合は、他方での予測ができない。そこで、降雪量(日降雪量)と積雪の増加量(最深積雪(日毎)の増加量)の相互の変換を検討した。

気象庁アメダスの降雪に係る観測データ(札幌、昭和61年から令和2年までの11月から3月)から、大雪の実績として日降雪量が20cm以上で日最深積雪に係る前日との差が正の数値になる日(計158件)を抽出し、日降雪量と積雪の増加量の関係について重回帰分析を行った結果、双方とも修正済重相関係数が0.8033と強い相関が確認でき、回帰式(式(12)、(13))を算出した。

$$\begin{aligned} & \text{(積雪の増加量(cm))} \\ & = 0.7425 \times \text{(日降雪量(cm))} + 0.8421 \quad (12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{(日降雪量(cm))} \\ & = 0.8721 \times \text{(積雪の増加量(cm))} + 9.1250 \quad (13) \end{aligned}$$

大雪が発生する予報期間と降雪量または積雪の増加量を支援システムに入力すると、堆雪断面積予測式に、この回帰式による入力値からの推計値を加算して堆雪断面積や道路有効幅員を表示可能とした(図-64)。

今後、大雪予報が発表される事例において予測値と実測値による検証が必要だが、数日後の大雪予報に対応した堆雪断面積等の推移が表示可能になった。

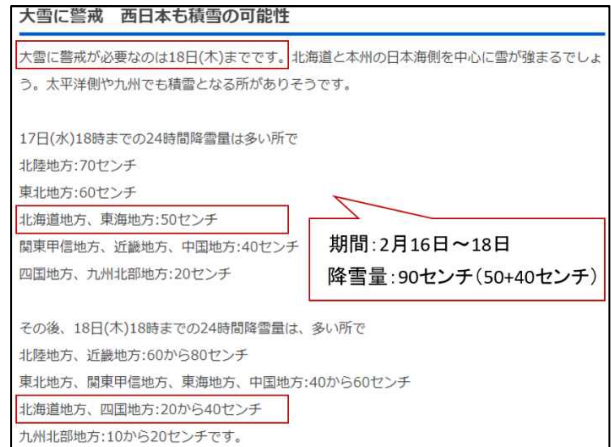


図-63 日本気象協会 48時間先までの大雪予報⁵⁾
(令和3年2月16日18時10分現在)



図-64 堆雪断面積の表示例(大雪予報の反映)

9. まとめ

本研究では、冬期道路における維持管理事業の計画立案支援を目的として、道路空間の再配分に向け、排雪前後及び堆雪幅の推移に伴う交通流のモデル化を行うなど、排雪前後の交通流の変動に関する検討を行った。また、開発を行う除排雪作業計画支援技術の基礎となる、運搬排雪作業における降雪量と排雪速度の関係や気象観測値等により路肩堆雪の形成傾向の把握を行い、路肩堆雪部の効率的な除排雪工法を検討した。さらにそれらの検討結果を踏まえ、除雪従事者が担当工区の堆雪断面積や道路有効幅員の推移の把握が可能な「除排雪作業計画支援システム」の開発を行い、効果的な除排雪の作業計画支援技術としてとりまとめた。その結果は以下のとおりである。

① 排雪前後の交通流の変動に関する検討

- ・片側2車線道路の地方道を対象とし、排雪前後の交通流の分析を行った。排雪作業の実施、堆雪幅の減少に伴い、交通量-速度(Q-V)性能が向上することについて、性能曲線のモデルを構築した。
- ・堆雪形成に伴う交通流の変動を把握したことにより、

冬期交通の確保、効率的な除排雪作業の実施を踏まえた道路空間の再配分、路肩幅員の確保、季節別運用を提案した。

- ・交通量-性能曲線のモデルを活用し、冬期道路サービス水準の設定を試行した。路線・区間で求められる冬期道路サービス水準を確保するために、適切な運搬排雪作業の実施タイミングの確定、効率化への活用が期待される。

②路肩堆雪部の効率的な除排雪工法の検討

除排雪作業計画支援技術の検討にあたり、基礎となる運搬排雪作業における排雪量と排雪速度の関係の把握、及び気象観測値などから路肩堆雪の形成傾向を把握した。

- ・ロータリ除雪車が排雪した雪量と工区として排雪した雪量をそれぞれ整理し、相関検討手法のべき乗による相関式の排雪速度予測式への適用性を確認した。予測式から排雪時間の把握が可能になり、運搬排雪計画策定の基礎資料としての活用が期待できる。
- ・地域、施工方法、降雪量、道路幅員構成などによる路肩堆雪の形成傾向把握を行うため、グループ分けを行い路肩堆雪断面の実測値と気象データなどを用いた重回帰分析により路肩堆雪断面積の予測式を作成し、各々の予測式の適用性を確認した。これにより、地域、施工方法、降雪量、道路幅員構成などのグループ毎に予測式の適用が可能となった。今後は、これまでに堆雪断面積を実測している以外の地域からも実測値を収集し、予測値と比較し適用性を検証したい。

② 路肩堆雪と道路有効幅員の関係性把握

運搬排雪実施時期を決める主要因の1つである道路有効幅員を把握するため、路肩堆雪と道路有効幅員の関係性を把握した。

- ・地域ごとに堆雪の幅員の実測値と気象データなどを用いた重回帰分析により路肩堆雪の幅員の予測式を作成し、各々の予測式の適用性を確認した。堆雪の幅員の予測式を用いて、道路有効幅員の予測値を算出し、実測値と概ね同様の傾向を確認した。道路有効幅員の予測が可能になれば、運搬排雪実施時期の判断指標としての活用が期待できる。今後、気象条件による初冬期と晩冬期の分類方法について検証したい。

④路肩堆雪部形状計測技術の評価と検証

堆雪断面積の予測精度向上と除排雪計画の効率的かつ効果的な立案のため、低コスト、短時間で連続かつ継続して計測可能な路肩堆雪形状計測技術の構築に向

け、より簡易な計測技術について現場適合性を検証した。

- ・路肩堆雪部の形状計測に適用可能な技術を調査し、精度・経済性・現場適合性による評価が最も高い「デジタルカメラ撮影写真による3次元モデル作成」について検証した結果、TSと比較し計測作業の省力化が期待できる。さらに現地での計測作業の省力化に向け、定点カメラ撮影写真から堆雪断面形状を計測する手法の適用性と省力化の可能性を確認した。今後、堆雪が大きい場合でも堆雪全体を画角に収める設置方法を検討したい。

⑤路肩堆雪が通行車両の視認性に与える支障度合い調査

除排雪の作業計画を立案するうえで判断要素となる、路肩堆雪の位置や高さがドライバーの視認性に与える支障度合いを定量的に把握するため、被験者参加による走行実験を行った。

- ・路肩堆雪がドライバーの視認性に与える支障度合いの主観評価より、交差点内の堆雪の高さはドライバーの目線高さより低い概ね1.0m程度に抑えることが望ましい結果となった。

⑥除排雪の作業計画支援技術の開発

前項までの検討をふまえ、維持除雪工事監督員及び請負者等が、担当工区の堆雪断面積や道路有効幅員の推移を把握可能な「支援システム」を開発し、効果的な除排雪作業計画支援技術として取りまとめた。

- ・分析結果から堆雪断面積や道路有効幅員の推移をグラフ化し、運搬排雪工法や実施時期の選定などのシミュレーションが可能となり、現場状況(気象条件・道路幅員構成・工区延長等)に応じた効果的な除排雪工法や実施時期の選択が可能となった。
- ・「支援システム」において、推計した堆雪断面積に工区延長を乗算し排雪量を推計、工区別単価を入力により、運搬排雪に必要なダンプトラック台数や所要時間、費用を示すことで、より効率的な判断が可能となった。

10. おわりに

本研究では効果的な除排雪の作業計画支援技術の提案に向け、堆雪幅や路面状況毎の交通流や路肩堆雪の形成傾向など様々な検討を行った。

それぞれの検討結果を組み合わせ、「除排雪作業計画支援システム」を開発し、作業計画支援技術としてとりまとめた。本技術を使用することで、運搬排雪工法や実施時期の選定などの作業計画のより効率的な立

案への活用が期待できるが、堆雪量推計等の様々な予測式と予測値の精度向上や、それらのより広範囲での適用性を確認する必要がある、今後も特に堆雪量の調査分析を行い、本技術のさらなる普及に努めたい。

参考文献

- 1) 日本建設機械化協会：2005 除雪・防雪ハンドブック（除雪編）、p. 112、2004
- 2) 札幌市：2021 年 11 月 17 日雪対策費実績
<https://www.city.sapporo.jp/kensetsu/yuki/library/budget.html> (2022 年 6 月 8 日確認)
- 3) 国土交通省冬期道路交通確保対策検討委員会：大雪時の道路交通確保対策 中間とりまとめ、pp. 14-15、2018（2021改定）.
<http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/toukidourokanri/pdf/t02.pdf> (2021 年 8 月 31 日確認)
- 4) 国土交通省道路局・警察庁交通局：安全で快適な自転車利用 環境創出ガイドライン、2016 年 7 月
- 5) 日本気象協会：2021 年 2 月 16 日 18:10 大雪予報
https://tenki.jp/forecaster/t_yoshida/2021/02/16/1501.html (2022 年 4 月 9 日確認)

14.2 冬期道路管理の ICT 活用による省力化および除雪機械の効率的維持管理技術の開発

14.2.1 凍結路面对策の省力化技術に関する研究

担当チーム：寒地道路研究グループ（寒地交通チーム）

研究担当者：石田樹、佐藤昌哉、島山乃、高橋尚人、平澤匡介、徳永ロベルト、大廣智則、中島知幸、藤本明宏、佐藤賢治、高田哲哉、村上健志、齊田光

【要旨】

冬期道路における凍結防止剤散布は、熟練オペレータ（以下、オペ）が行っているが、少子高齢化により新たな人材の確保と育成が困難な状況にある。本研究では、オペの熟練度に左右されず安全で確実な凍結防止剤散布を可能とする作業支援技術の確立に取り組んでいる。これまで筆者らは、被験者実験においてオペの路面状態の判断や散布装置の操作状況を計測し、作業時の心理状態と挙動の特性を分析している。平成29年度までの取り組みでは、熟練度の他、散布作業支援の有無・種別（情報提供や操作支援の有無・種別）による運転中のオペの心理状態および挙動を計測し、それらの変化から各種作業支援がもたらす効果や課題を明らかにした。平成30年度は、過年度までの結果を踏まえた凍結防止剤散布作業支援システムの設計・構築に取り組んだ。令和元年度は、凍結防止剤散布作業支援システムの改良および実道における精度検証を行った。令和2年度は、凍結防止剤散布作業支援システムを改良し、実際の凍結防止剤散布作業での有効性の検証および、ヒアリングによる当該システムの課題整理を行った。令和3年度は、全ての散布車規格へ対応した凍結防止剤自動散布システムの開発に取り組み、8開発建設部各1台当該システムが試行導入され、実用可能な凍結防止剤自動散布システムを開発した。

キーワード：冬期路面管理、凍結防止剤、オペレーター、散布作業、支援技術

1. はじめに

道路管理の効率化とコスト削減は、重要な課題であり、道路管理者による冬期の凍結防止剤散布に関しては、路面の「凍結が発生しやすい区間を対象とし、路面状況に応じて散布を実施」¹⁾している。そのため、現地での凍結防止剤散布オペによる路面状況の的確な判断が非常に重要である。このような中、近年は新たなオペを確保・育成することが困難²⁾になっており、現在作業に従事している熟練オペに頼らざるを得ない状況にある。また、これらのオペの高齢化も進んでおり、今後更に人材難やコスト削減が進めば、経験の浅いまたは経験のないオペが作業を行うに留まらず、運転手がオペレーターを兼ねる作業形態（一人乗車体制による運転+散布）が想定され、作業の確実性と安全性の低下が懸念される。

道路管理者による冬期路面管理作業（凍結防止剤散布）の判断は、除雪等に関するハンドブック^{3,4)}や冬期路面管理マニュアル（案）⁵⁾等に記されているように、当日の気象や現地の路面条件を把握し、これらを参考

にしながら必要な区間において凍結防止剤の散布を行っている。具体的には、凍結防止剤を路線全線に散布するのではなく、凍結路面の発生しやすい箇所や凍結が発生した場合に交通障害の程度が大きくなる区間を重点管理エリアとして予め設定し、これらの箇所・エリアにおいて気象予報等に基づいた事前散布（凍結予防）や現地での目視確認による事後散布（雪氷融解）を行い、作業の効率化に努めている。また、道路管理者は路面管理作業等に関するオペ向けのトレーニング等³⁾も適宜行っており、オペの技能向上・維持に努めている。しかし、最終的には現地のオペが路面状態を随時判断しながら散布作業を行っているのがほとんどで、その判断と作業の妥当性には未解明な部分が多い。

近年では、車載式光学路面状態判別センサーの利用や散布作業の自動化⁶⁾が試行されるなど、オペの判断・作業を支援する技術の検討が進められている。しかしながら、これらの技術は導入コストが高額等の理由もあり、普及まで進んでいないのが現状である。

本研究では、凍結防止剤散布作業においてオペの作

業経験や熟練度に左右されず、かつ一人乗車体制でも安全で確実な凍結防止剤散布作業を可能とする支援技術の提案を目指している。

平成 28 年度は、助手席に搭乗したオペの熟練度および情報の有無・種別（情報なし・音声のみ・画像のみ・音声＋画像）による散布作業時の心理状態および挙動の変化について調べた。

平成 29 年度は、散布作業支援の有無・種別（支援なし、情報提供のみ、情報提供＋音声操作機能および情報提供＋音声操作機能＋自動散布機能）による運転中のオペの心理状態および挙動の変化について調べた。

平成 30 年度は、過年度までの結果を踏まえた凍結防止剤散布作業支援システムの設計・構築に取り組んだ。

令和元年度は、凍結防止剤散布作業支援システムを構成するハードウェアおよびソフトウェアに更なる改良を施し、実道における走行実験で当該システムの精度を検証した。

令和 2 年度は、凍結防止剤散布作業支援システムを改良し、実際の凍結防止剤散布作業での当該システムの有効性を検証した。また、ヒアリングを実施し、当該システムの課題を整理した。

令和 3 年度は試行導入を目指し、国土交通省北海道開発局（以下、北海道開発局）で主に使用している凍結防止剤散布車や除雪トラック（散布装置付き）でも自動散布が可能な凍結防止剤自動散布システムの開発に取り組んだ。

2. メンタルワークロードについて

人間が行う仕事において、身体的活動が主となる活動であってもその活動は全て精神的負荷（メンタルワークロード：以下、MW）であるとされている。この MW の概念・用語は ISO（国際標準化機構）⁷⁾ において定義されている。

産業・医療・航空・鉄道・自動車分野等では、過剰な負荷がかかるような課題内容や長時間に及ぶ単純・単調な課題はヒューマンエラーにつながり、作業効率の低下や事故の要因になるとして、作業中における人間の負担に関する様々な研究⁸⁾ が既に行われている。この負担の把握・評価には、上記の MW が用いられている。特に、自動車運転中における運転者の MW に関しては、様々な研究が既に国内外で行われている^{9, 10, 11, 12)}。しかし、道路の維持管理作業に従事するオペについては、これらの課題処理能力を MW によって評価した例は筆者らの知る限り見受けられない。本研究では、凍結防止剤散布の現地作業判断支援技術の構築に

向けて、凍結防止剤散布作業におけるオペの課題処理能力を MW によって定量化および評価している。

特定の課題を遂行する人間の MW は、主観的および客観的に評価可能であるが、それぞれには長所と短所があるため、両者を同時に用いて調べるのが望ましい。主観的評価法は、被験者本人または第三者がある課題に対し自身の心理状態や被評価者の行動を報告するものである。これらは、ヒアリングやアンケート形式により、実験担当者が予め設定した評価尺度に基づいて主観的に評価してもらう方法が最も多い。他方、客観的評価法は、更に行動的評価と生理的評価の二つに分かれる。行動的評価は、被験者の挙動（反応時間、注視点、発声等）を指標として評価するものである。生理的評価は、被験者の心身反応（心拍、脳波、発汗等）を指標として評価するものである。本研究では、主観的評価法および客観的評価法の両者を用いてオペの MW を評価している。

2.1 主観的評価法による MW の把握

本研究では、主観的評価法として被験者本人によるアンケート形式を採用している。具体的には、Hart ら¹¹⁾が開発した NASA-Task Load Index（以下、NASA-TLX）を評価指標として用いている。NASA-TLX は、精神的要求、身体的要求、忙しさ、努力、達成度および不満度の 6 項目の評価尺度から構成されている。被験者は、アンケート用紙において与えられた各課題に対して尺度の「小さい（0 点）・大きい（10 点）」、「少ない（0 点）・多い（10 点）」または「良い（0 点）・悪い（10 点）」の両極を持つ 6 項目の線分上に、○印で記入する。被験者が位置付けした○印は、分析時において 0～10 の数値に変換し、被験者の評価を数値化する。本研究では、6 項目の平均値を NASA-TLX 総合値とし、オペの主観的 MW の値として用いている。

2.2 客観的評価法による MW の把握

本研究では、様々な条件下における凍結防止剤散布作業時のオペの挙動（認知・判断・操作状況）を計測している。具体的には、予め指示した凍結防止剤散布区間に対して、被験者が前方の散布すべき区間を認知した地点（認知距離）、散布を開始および終了した地点（散布開始・終了距離）を計測するとともに、路面状態に応じた散布量の設定状況（判断的中率）を計測している。また、車両の運転を兼ねた散布作業（平成 29 年度）の場合は、前方約 40m を同方向に走行する車両のブレーキランプをフロントガラスに再現し、模擬ブレーキランプ点灯から被験者が自車のブレーキ操作を行うまでの反応時間を計測している。更に、凍結防

止剤散布におけるオペの注視点を把握するため、眼鏡型のアイトラッキング装置を用いて被験者の注視点も計測している。

3. 熟練度および情報の有無・種別による MW の違い

3.1 実験概要

平成 28 年度は、オペの熟練度（未熟と熟練）および情報の有無・種別（①情報なし、②音声のみ、③画像のみおよび④音声+画像）による 4 つの試験条件を設定し、これらが及ぼす MW の違いとその度合いについて調べた。

被験者実験は、厳冬期の夜間（18:00～23:00）3 日間において、寒地土木研究所が所有する苫小牧寒地試験道路で行った。実験期間中は冬日で概ね晴れだった。当該道路は、延長 2,700m の長円形周回路で、アスファルト舗装された直線部 2 区間（片側 2 車線区間 1,200m、片側 1 車線 1,200m）および半径 50m の曲線部 2 区間によって構成されている。

各車線の幅員は 3.5m であり、直線部は 2% の横断勾配を有する。なお、当該試験道路の周回路には街路灯等の人工照明はない。

被験者は、全員が建設作業員で、未熟オペ 7 名（平均年齢 43.0 歳、全員散布作業歴なし）および熟練オペ 12 名（平均年齢 57.3 歳、平均散布作業歴 7 年）の計 19 名とし、全ての被験者が男性で自動車運転免許保有者であった。

本実験には、試験車両に 2 トントラックを用いた（写真-1）。なお、被験者は当該車両の助手席に搭乗し、運転は実験補助員が行った。

被験者の行動を計測するため、凍結防止剤散布制御装置を模した液晶タッチパネル（以下、操作パネル）を車内ダッシュボード前（助手席右前方）に設置し、電源ボタン、散布量設定ボタンおよび散布 ON・OFF ボタンを画面上に表示して被験者がこれらを画面タッチで簡単に操作できるようにした（写真-2 および図-1）。散布操作パネルに表示された各ボタンの操作は、GNSS（全地球航法衛星システム）を搭載する記録装置に 10Hz で記録収集した。

実験コース走行時における被験者の注視点は、写真-3 に示すアイトラッキング装置を用いて高画質ビデオ画像（1,920×1,080 ピクセル）および注視点座標を 30Hz で計測記録した。

当該実験では、前述の苫小牧寒地試験道路周回路 2,700m 全区間を実験コースとして使用し、試験車両は実験コースの KP0.3 付近を起終点に反時計周りで周回

路を約 40km/h で走行した（図-2）。

実験コースの路面状態は、乾燥路面を主とし、コース内一部には 100m の湿潤路面および凍結路面を各 2 区間（計 4 区間）敷設した。被験者は、これらの区間において散布作業を行った。なお、湿潤路面・凍結路面の配置は、毎日無作為に変更した。

被験者に前方の路面状態等の情報を提供するため、車載情報端末（7 インチタブレット）を助手席左前方に設置し、実験コース内に敷設した湿潤・凍結路面区



写真-1 実験に用いた試験車両



写真-2 試験車両の助手席付近に設置した各機器

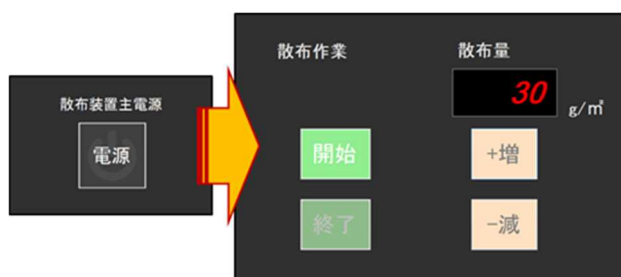


図-1 操作パネル上の表示ボタン



写真-3 アイトラッキング装置

間の起点の約 200m手前から情報提供を開始するアプリケーションをインストールした(図-3)。当該アプリケーションには、実験コース内の湿潤・凍結路面区間の位置が予め組み込まれており、走行中の試験車両が前方の湿潤・凍結路面区間に近づくとその存在を画像・音声の何れかまたは両方の情報提供方法で被験者に伝えた。なお、情報端末による路面状態の情報提供は、実験コース内に敷設した湿潤・凍結路面 4 区間中の 3 区間で行われ、各々の区間において異なる情報提供方法を採用した。残りの 1 区間は、情報なしとした。また、同 4 区間における情報なしおよび 3 つの情報提供方法の配置についても毎日無作為に変更した。

被験者には、実験コース内走行時に前方の路面状態を常に観察し、前方に凍結または湿潤路面を認知次第、速やかに散布操作パネルの電源ボタンを押し、散布量を設定するよう指示した。この時の凍結防止剤散布量設定は、湿潤路面で $20\text{g}/\text{m}^2$ および凍結路面で $30\text{g}/\text{m}^2$ とした。なお、路面状態の判断が的中か否かの判定は、路面状態に応じて正しい散布量でセットされていれば的中とした。次いで、湿潤・凍結路面区間の起点・終点で散布 ON・OFF ボタンを操作するものとした。なお、上記課題遂行において車載情報端末から前方の路面状態等に関する情報提供があった場合は、これを参考にして良いこととした。

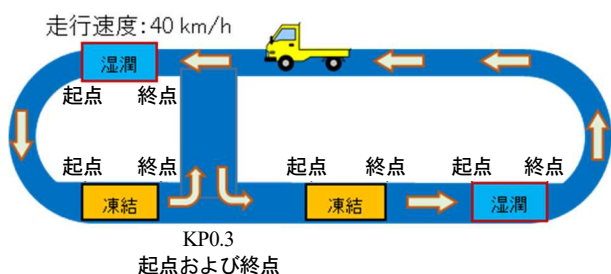
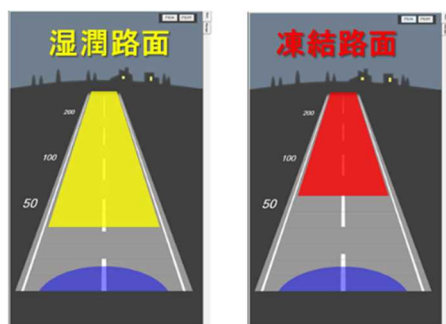


図-2 実験コースと凍結・湿潤路面のレイアウト例



<路面状態の表示色>

■ 湿潤 ■ 凍結

<路面状態別警告音>

湿潤: (200m前)プッ・プッ・(100m前)プッ・プッ(50m前)プッ・プッ(0m前)プッ

凍結: (200m前)ビッ・ビッ・(100m前)ビッ・ビッ(50m前)ビッ・ビッ(0m前)ビッ

図-3 車載情報端末による路面状態の情報提供例

3.2 実験手順

被験者は、被験者待合室にて実験担当者から配布された質問用紙に氏名、運転歴、年間走行距離、散布オペ経験の有無(有の場合は年数)等を記入した後、本実験の目的、実験内容、実験手順、個人情報保護に関する事項および安全確保に関する留意点について文章および口頭で説明を受け、実験協力承諾書用紙に同意の署名をした。また、本実験では熟練度による差を明確にするために、熟練オペは試験実施前に予め用意した周回路のビデオ映像を数回観て走行経路等を覚えた。次に、被験者にアイトラッキング装置の装着と散布装置の操作方法等を確認した後、実験コースの起点から終点に向けて前節の課題を遂行しながら周回路を一周した。走行終了後、被験者は被験者待合室に戻り、本実験で課せられた課題に対する主観的 MW 評価方法について説明を受けた後、散布作業によって被験者自身が感じた主観的 MW を質問用紙に記入した。

3.3 実験結果

3.3.1 オペの主観的 MW について

表-1に、熟練度別および情報有無・種別によるオペの主観的 MW の標本数、平均値、標準偏差等を示している。また、図-4は熟練度別および情報有無・種別による未熟オペおよび熟練オペの主観的 MW の結果を箱ひげ図で示している。主観的 MW の値は、2.1節に示した通り、大きい小さいなどの両極を持つ6つの評価尺度の平均値である。情報なしの平均主観的 MW は、未熟オペが 6.3 点および熟練オペが 5.5 点となり、未熟オペ・熟練オペともに主観的 MW が最も高かった。特に、未熟オペの主観的 MW は、熟練度および情報有無・種別の中で最も高い値となった。また、音声のみの平均主観的 MW は、未熟オペが 4.0 点および熟練オペが 3.5 点となり、情報提供によって未熟オペ・熟練オペ両者の主観的 MW が軽減した。更に、画像のみの平均主観的 MW は、未熟オペが 3.2 点および熟練オペが 1.9 点となり、両者の主観的 MW が音声のみの時より更に低下した。最後に、音声+画像の平均主観的 MW は、未熟オペが 1.3 点および熟練オペが 1.2 点となり、未熟オペ・熟練オペともに主観的 MW が情報有無・種別の中で最も低下した。特に、未熟オペの主観的 MW は、情報なしからの減少幅が 5.0 点と熟練オペの減少幅 4.3 点に比べて大きかった。よって、熟練度による変動に違いは伺えるが、情報提供による主観的 MW の軽減効果は未熟オペ・熟練オペともに著しく、この中で音声+画像による主観的 MW の軽減が最も大きいと言えた。

表-1 熟練度別および情報有無・種別主観的 MW

被験者	情報有無・種別	主観的MW			
		標本数	平均値(点)	中央値(点)	標準偏差(点)
未熟オペ (7人)	情報なし	7	6.3	6.7	1.7
	音声のみ	7	4.0	4.6	1.2
	画像のみ	7	3.2	3.2	1.2
	音声+画像	7	1.3	1.3	0.8
熟練オペ (12人)	情報なし	12	5.5	6.0	1.6
	音声のみ	12	3.5	3.7	1.1
	画像のみ	12	1.9	1.8	1.1
	音声+画像	12	1.2	1.2	1.2

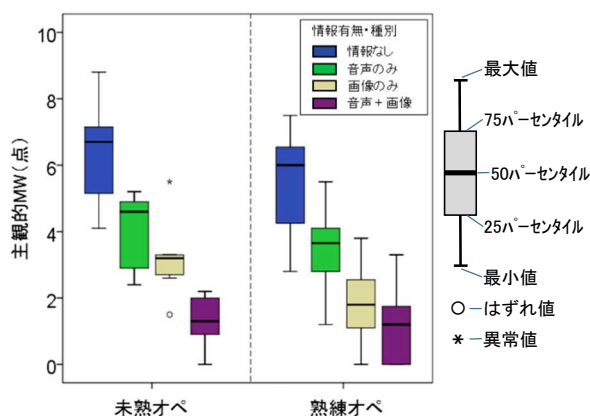


図-4 熟練度別および情報有無・種別主観的 MW

表-2 熟練度別および情報有無・種別認知距離

被験者	情報有無・種別	認知距離			
		標本数	平均値(m)	中央値(m)	標準偏差(m)
未熟オペ (7人)	情報なし	7	-30	-32	9
	音声のみ	7	-91	-82	46
	画像のみ	7	-91	-90	49
	音声+画像	7	-141	-171	70
熟練オペ (12人)	情報なし	12	-44	-43	31
	音声のみ	12	-91	-86	53
	画像のみ	11	-87	-75	54
	音声+画像	12	-121	-137	60

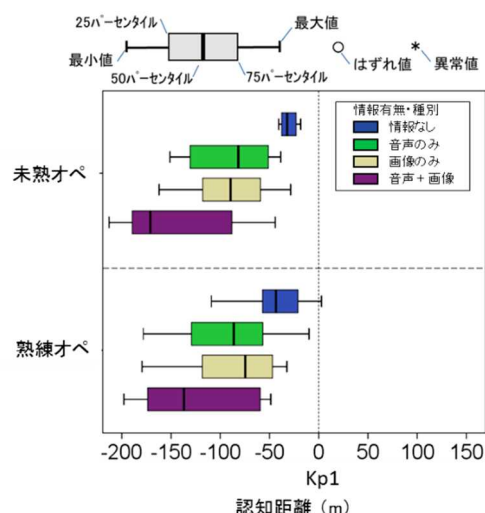


図-5 熟練度別および情報有無・種別認知距離

3.3.2 オペの挙動について

当該実験では、散布作業時におけるオペの認知距離、散布開始・終了距離、注視点等の計測を行った。以下に、得られた結果の一部を紹介する。

表-2は、熟練度別および情報有無・種別によるオペの認知距離の標本数、平均値、標準偏差等を示し、図-5は熟練度別および情報有無・種別によるオペの認知距離を箱ひげ図で示している。なお、本項での認知距離とは、湿潤・凍結路面区間の起点に対し、被験者が電源ボタンを操作した地点までの距離を示すものである。

情報なしにおける平均認知距離は、未熟オペが-30m および熟練オペが-44m となり、熟練オペの平均認知距離にばらつきはあるが未熟オペより長かった。また、音声のみの平均認知距離は、未熟オペが-91m および熟練オペが-91m となり、両者ともに情報なしの時より平均認知距離が伸びた。更に、画像のみの平均認知距離は、未熟オペが-91m および熟練オペが-87m となり、両者とも音声のみとほぼ同様の結果を示した。最後に、音声+画像の平均認知距離は、未熟オペが-140m および熟練オペが-121m となり、両者ともに他の情報提供方法に比べて最も長い平均認知距離となった。

以上の結果から、情報提供によって未熟・熟練オペ両者がより手前で散布すべき区間を認知できるように

なり、熟練度に関わらず散布判断・操作のための時間的余裕ができたと言える。また、情報提供方法としては音声と画像を組み合わせることで前方の路面状態をより手前から認知可能になり、散布作業判断等の改善に繋がると考えられる。

表-3および図-6は、認知区間における熟練度別および情報有無・種別によるオペの注視率を示している。なお、本項での認知区間とは、湿潤・凍結路面区間の起点約 200m 手前から散布制御装置の主電源ボタンを操作するまでの区間を示すものである。

この実験では、オペが散布車両の助手席からフロントガラスを通して見た前景を「道路・背景」、「散布制御装置」および「情報端末」の3つの注視エリアに分け、各エリアを注視した割合を抽出した。当該注視点データは、全被験者 19 名の中から裸眼またはコンタクトレンズを装着して実験に参加した未熟オペ 5 名および熟練オペ 7 名の計 12 名から取得したものである。認知区間における情報なしの結果では、未熟・熟練オペともに3エリアの中で道路・背景の注視率が最も高く、未熟オペが 89.5% および熟練オペが 81.7% を示した。他方、散布制御装置の注視率は、未熟オペが 7.3% および熟練オペが 17.8%、情報端末の注視率は、未熟オペが 3.2% および熟練オペが 0.5% を示した。

表-3 認知区間における熟練度別および情報有無・種別によるオペの注視率

被験者	情報有無・種別	認知区間(区間1)における注視率					
		道路・背景		散布制御装置		情報端末	
		平均値(%)	標準偏差(%)	平均値(%)	標準偏差(%)	平均値(%)	標準偏差(%)
未熟オペ (5人)	情報無し	89.5	2.6	7.3	2.1	3.2	1.1
	音声のみ	76.6	22.7	16.9	17.2	6.5	6.1
	画像のみ	59.0	24.0	12.2	7.5	28.9	18.3
	音声+画像	58.0	28.6	24.3	17.9	17.7	12.5
熟練オペ (7人)	情報無し	81.7	23.4	17.8	23.0	0.5	0.6
	音声のみ	71.4	11.3	22.0	13.4	6.6	5.6
	画像のみ	49.7	24.7	24.3	19.6	26.0	9.6
	音声+画像	52.4	24.2	31.5	23.2	16.0	2.2

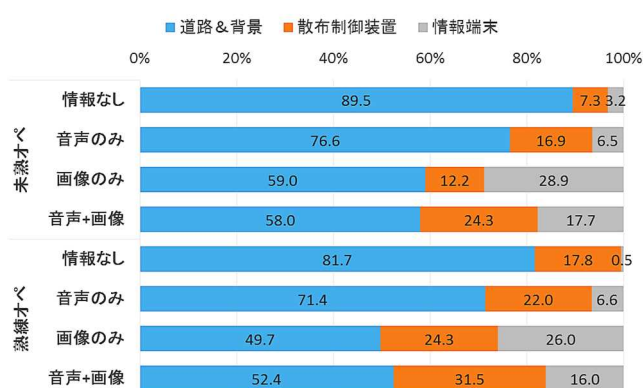


図-6 認知区間における熟練度別および情報有無・種別によるオペの注視率

音声のみの結果では、前述と同じく未熟・熟練オペともに3エリアの中で道路・背景の注視率が最も高く、未熟オペが76.6%および熟練オペが71.4%を示したが、情報なしより減少した。反面、散布制御装置の注視率は、未熟オペが16.9%および熟練オペが22.0%、情報端末の注視率は未熟オペが6.5%および熟練オペが6.6%となり、両エリアの注視率が増えた。

画像のみの結果では、未熟・熟練オペともに3エリアの中で道路・背景の注視率が他のエリアより高いが、未熟オペが59.0%および熟練オペが49.7%と音声のみより更に減少した。他方、散布制御装置の注視率は、未熟オペが12.2%および熟練オペが24.3%、情報端末の注視率は未熟オペが28.9%および熟練オペが26.0%となり、両者の情報端末に対する注視率が増える傾向を示した。

音声+画像の結果では、同じく未熟・熟練オペともに3エリアの中で道路・背景の注視率が他のエリアより高く、未熟オペが58.0%および熟練オペが52.4%と画像のみと似た注視率であった。他方、散布制御装置の注視率は、未熟オペが24.3%および熟練オペが31.5%、情報端末の注視率は未熟オペが17.7%および熟練オペが16.0%となり、画像のみと異なって両者の

散布制御装置の注視率が増えた。

以上の結果から、当該区間では熟練度および情報有無・種別に関係なく道路・背景を注視する割合が3つのエリアの中で最も高かった。しかし、情報提供は未熟・熟練オペの散布制御装置・情報端末の注視率を情報なしの時より増加させた。特に、画像を含む情報提供方法は未熟・熟練オペの道路・背景の注視率を著しく減少させ、情報端末の注視率を著しく増加させた。これは、注視を要する画像情報によって注視点が情報端末に移動・滞留する頻度が増えたためと考えられる。他方、音声のみによる情報提供は、未熟・熟練オペの散布制御装置・情報端末の注視率を情報なしの時より増加させたが、画像を含む情報提供ほどではなかった。その理由として、注視を要しない音声情報は散布制御装置・情報端末の注視率増加抑制に寄与したためと考えられる。よって、特に画像を含む情報提供は路面状態の早期認知、主観的 MW 低減等に寄与したが、散布区間認知の際に道路や車両周囲の確認時間の割合が情報なし時より減少するため、安全面に課題があると言える。

4. 散布作業支援の有無・種別による MW の違い

4.1 実験概要

平成29年度は、散布作業支援の有無・種別に①支援なし、②情報のみ、③情報+音声操作機能(以下、音操)および④情報+音操+自動散布機能(以下、自散)による4つの試験条件を設定し、これらの条件が運転中の凍結防止剤散布オペの MW に及ぼす影響について調べた。

被験者実験は、過年度と同様に厳冬期の夜間(18:00~23:00)4日間において、当研究所が所有する苫小牧寒地試験道路で行った。実験期間中における試験道路および近傍の天候は冬日で概ね晴れだった。

実験に参加した被験者は、建設作業員8名とし、全員が男性、年齢は40~60代(平均年齢53.0歳)および全員が自動車運転免許保有者(普通自動車以上)であった。

本実験には、試験車両に2トントラックを用いた(写真-4)。なお、当該車両は被験者が運転した(写真-5)。また、被験者の行動を計測するため、過年度と同じ凍結防止剤散布制御装置を模した操作パネルを車内ダッシュボード前(運転席左前方)に設置し、電源ボタン、散布量設定ボタンおよび散布 ON・OFF ボタンを画面上に表示して被験者がこれらを運転中に画面タッチで簡単に操作できるようにした。なお、散布操作パネル

に表示された各ボタンの操作は、GNSS を搭載する記録装置に 10Hz で記録収集した。

実験コース走行時における被験者の注視点は、アイトラッキング装置（写真-3）を用いて高画質ビデオ画像および注視点座標を 30Hz で計測記録した。

実験では、平成 28 年度と同様に試験道路周回路全区間を使用し、試験車両は実験コースの KP0.3 付近を起終点に反時計周りで周回路を約 40km/h で走行した（図-7）。また、実験コースの路面状態は乾燥路面を主とし、コース内一部には 100m の湿潤路面および凍結路面を各 3 区間（計 6 区間）敷設した。被験者は、これら 6 区間中の条件毎に指示された 4 区間で散布作業を行った。なお、湿潤路面・凍結路面の配置は、毎日ランダムに変えた。

本実験では、散布作業支援のためのツールとして、過年度より使用している車載情報端末を運転席右前方

に設置し、実験コース内に敷設した湿潤・凍結路面区間の起点の約 200m 手前から情報提供（音声+画像）を開始するアプリケーションをインストールした。当該アプリケーションには、実験コース内の湿潤・凍結路面区間の位置が予め組み込まれており、走行中の試験車両が前方の湿潤・凍結路面区間に近づくとその存在を情報端末で被験者に伝えた。

平成 29 年度は、車載情報端末による情報の他、音操および自散の二つの操作支援機能を凍結防止剤散布制御装置に追加した（写真-6）。

音操は、実験コース内の要散布区間においてオペが操作パネルのボタンを手で操作することなく凍結防止剤散布装置の制御が可能な音声認識・制御プログラムである。オペは、「電源オン」、「30 グラム」、「開始」、「終了」等の単純な音声命令を運転中に発し、凍結防止剤散布制御装置を操作した。また自散は、実験コースのレイアウトに従って散布を要する湿潤・凍結路面区間において運転中のオペが一切操作することなく、自動的に電源、散布量設定、散布 ON・OFF が可能な自動散布制御プログラムである。オペが試験車両を運転し、散布対象区間を通過するだけで凍結防止剤散布制御装置が自動的に作動した。

被験者には、実験コース内走行時に前方の路面状態を常に認知しながら運転し、要散布区間において凍結または湿潤路面を認知次第、速やかに凍結防止剤散布装置の電源を入れ、散布量を設定するよう指示した。この時の凍結防止剤散布量設定は、過年度と同じく湿潤路面で 20g/m² および凍結路面で 30g/m² とし、路面状態の判断が的中か否かの判定は、路面状態に応じて正しい散布量でセットされていた中とした。次いで、湿潤・凍結路面区間の起点・終点で散布 ON・OFF を操作するものとした。なお、上記課題遂行において、情報のみ、情報+音操および情報+音操+自散の何れかによる散布作業支援があった場合、被験者はこれらを活用して運転中の散布作業を行った。



写真-4 実験に用いた試験車両



写真-5 被験者による各機器の確認状況

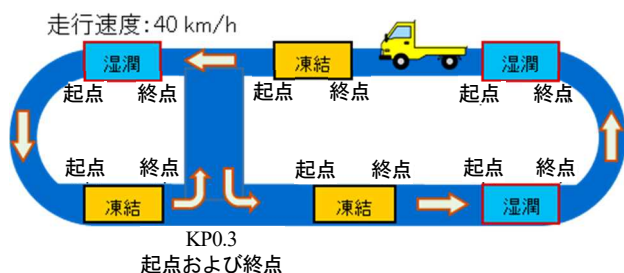


図-7 実験コースと凍結・湿潤路面のレイアウト例



写真-6 車内に設置した凍結防止剤散布制御装置

4.2 実験手順

被験者は、被験者待合室にて実験担当者から配布された質問用紙に氏名、運転歴、年間走行距離、散布オペ経験の有無（有の場合は年数）等を記入した後、本実験の目的、実験概要、個人情報保護に関する事項および安全確保に関する留意点について文章および口頭で説明を受け、実験協力承諾書用紙に同意の署名をした。その後、実験内容の他、コース内で運転する車両、車内に搭載されている各種装置の使用方法等について実験担当者より詳細な説明を受け、完全に理解するまで各事項を繰り返し確認した。また、被験者は本実験において課せられた課題に対する主観的 MW の評価に用いた NASA-TLX についても実験担当者より説明を受け質問用紙の記入要領等について習得した。その後、注視点計測のためにアイトラッキング装置を被験者に装着し、調整および動作確認を行った。

アイトラッキング装置を装着した被験者は、実験コース起終点に停車した試験車両の運転席に乗り、座席やミラー等の調整を行うとともに、車載情報端末、散布制御装置の位置確認や操作方法について助手席に同乗した実験担当者と確認した。

上記確認を終えた後、実験担当者の説明や指示に従いながら 40km/h で実験コースを周回し、湿潤・凍結路面 6 区間中、スタート前に指示された 4 区間において散布作業を実施する練習走行を行った。また、実験担当者は実験コース走行中にフロントガラスに設置した模擬ブレーキランプを無作為に 2 回点灯（約 3 秒/回）させ、被験者はこれを確認次第、速やかに試験車両のブレーキを作動させて 30km/h まで減速し、上記ランプが消灯後、40 km/h に戻した。なお、被験者が練習走行を更に行う必要があると実験担当者が判断した場合は、当該事項を繰り返した。また、上記練習走行は試験条件毎に行った。

被験者は、試験条件毎の練習走行後に本走行（1 周）を行い、運転を兼ねた散布作業を実験コース内の 4 区間において行った。なお、散布区間の指示および模擬ブレーキランプの点灯は練習・試験条件毎にランダムに変更した。また、NASA-TLX による主観的 MW の評価は試験毎に被験者待合室にて行った。全実験は、被験者一人当たり約 120 分を要した。

4.3 実験結果

平成 29 年度の被験者実験では、車両の運転を兼ねた散布作業時におけるオペの認知距離、判断的中率、注視点等の計測を行った。以下に、当該実験から得られた主な結果を紹介する。

4.3.1 オペの主観的 MW について

表-4 に、散布作業支援の有無・種別によるオペの主観的 MW の標本数、平均値、標準偏差等を示し、図-8 は散布作業支援の有無・種別によるオペの主観的 MW を箱ひげ図で示している。主観的 MW の値は、2.1 節に示した通り、大きい小さいなどの両極を持つ 6 つの評価尺度の平均値である。支援なしにおけるオペの平均主観的 MW は、5.2 点となり、4 つの試験条件の中で評価点が最も高かった。また、散布作業支援が情報のみの時の平均主観的 MW は 3.5 点となり、過年度の結果と同様に情報提供によってオペの主観的 MW が軽減することを確認した。更に、散布作業支援が情報+音操になると、オペの平均主観的 MW は 2.2 点となり、主観的 MW が情報のみの時より更に低下した。最後に、散布作業支援が情報+音操+自散では、オペの主観的 MW は 1.2 点となり、散布作業支援の有無・種別の中で最も低下した。その理由として、オペは運転中に散布作業（認知・判断・操作）を行う必要が一切なく、車両の運転のみを行ったためと考える。

以上の結果から、オペの主観的 MW は散布作業支援を行うことによって減少し、この中で情報+音操+自散による主観的 MW の軽減が最も大きいことが分かった。

4.3.2 オペの挙動について

表-5 は、散布作業支援の有無・種別によるオペの認知距離の標本数、平均値、標準偏差等を示し、図-9 は

表-4 散布作業支援有無・種別による主観的 MW

支援有無・種別	主観的 MW			
	標本数	平均値 (点)	中央値 (点)	標準偏差 (点)
支援なし	8	5.2	5.3	1.6
情報のみ	8	3.5	3.4	0.9
情報+音操	8	2.2	2.3	0.9
情報+音操+自散	8	1.2	1.0	0.8

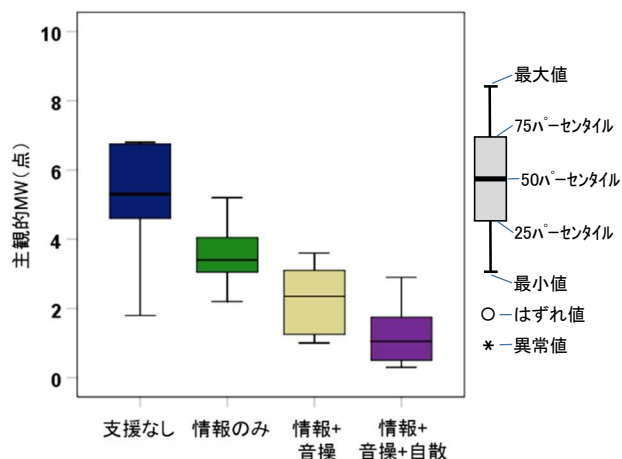


図-8 散布作業支援有無・種別による主観的 MW

散布作業支援の有無・種別によるオペの認知距離を箱ひげ図で示している。なお、本項での認知距離とは、湿潤・凍結路面区間の起点に対し、散布制御装置の電源が入った地点までの距離を示すものである。

支援なしにおけるオペの平均認知距離は、-87m であった。他方、散布作業支援が情報のみの時の平均認知距離は-123m となり、支援なしの時より平均認知距離が大きく伸びた。また、散布作業支援が情報+音操の時の平均認知距離は-110m となった。なお、情報+音操+自散の場合は、起点において電源・散布量設定・散布 ON が自動的かつ同時に作動したため、平均認知距離を 0m としている。

以上の結果から、散布作業支援が情報のみおよび情報+音操の場合、オペは支援なしに比べてより手前で散布すべき区間を認知できるようになった。過年度の結果と同様に散布判断・操作のための時間的余裕ができたと考えられる。他方、散布作業支援が情報+音操+自散の場合、オペは運転中に散布を要する区間を認知する必要がなく、車両の運転のみに専念することができたため、安全面において有効であると言える。

表-6 および図-10 は、散布作業時における路面状態の判断（散布量設定）の的中率を示す。支援なしの的中率は41%となり、最も低い結果を示した。また、情

表-5 散布作業支援の有無・種別による認知距離

支援有無・種別	認知距離			
	標本数	平均値 (m)	中央値 (m)	標準偏差 (m)
支援なし	32	-87	-79	51
情報のみ	32	-123	-120	46
情報+音操	32	-110	-104	35
情報+音操+自散	32	0	0	0

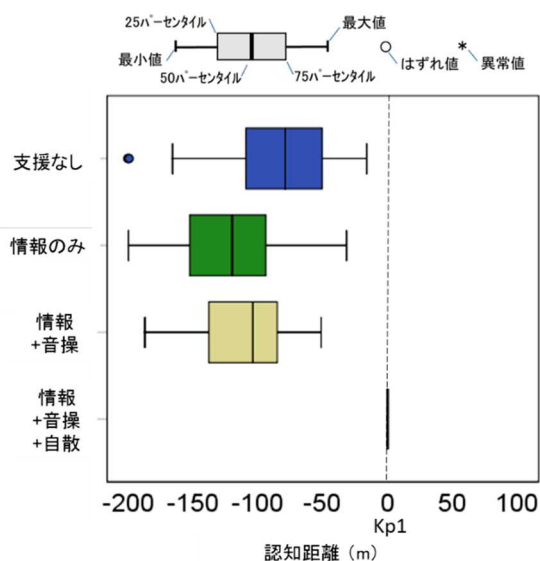


図-9 散布作業支援の有無・種別による認知距離

表-6 散布作業支援の有無・種別による判断の的中率

支援有無・種別	路面状態の判断			
	標本数	的中 (件)	はずれ (件)	的中率 (%)
支援なし	32	13	19	41%
情報のみ	32	28	4	88%
情報+音操	32	31	1	97%
情報+音操+自散	32	32	0	100%

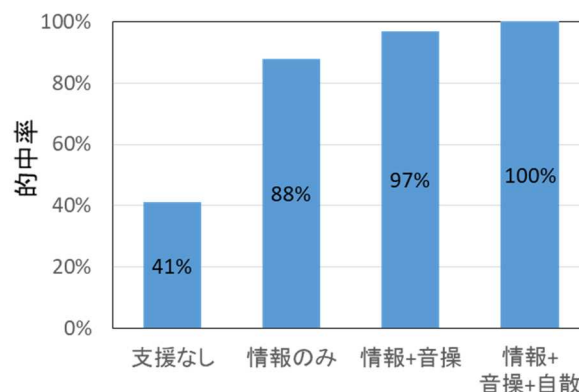


図-10 散布作業支援の有無・種別による判断の的中率

報のみの的中率は88%であった。更に、情報+音操の的中率は97%であった。なお、オペの判断が含まれない情報+音操+自散の的中率は100%としている。

以上の結果から、散布作業支援（情報のみおよび情報+音操）はオペによる路面状態の判断の的中率向上に貢献することが分かった。また、散布作業支援が情報+音操+自散の場合、確実な散布判断が可能である。また、オペは運転中に路面状態の判断（散布量の設定）を行う必要がなく、車両の運転のみに専念することができるため、安全面において有効であると言える。

表-7 は、散布作業支援の有無・種別によるオペの反応時間の標本数、平均値、標準偏差を示し、図-11 は散布作業支援の有無・種別によるオペの反応時間を箱ひげ図で示している。なお、本項での反応時間は、試験車両のフロントガラスに設置した模擬ブレーキランプ点灯から被験者が自車のブレーキ操作を行うまでの経過時間である。

支援なしにおけるオペの平均反応時間は 1.6 秒であった。また、当該条件では模擬ブレーキランプ点灯の見落としが 1 件確認された。他方、散布作業支援が情報のみの時の平均反応時間は 1.4 秒となり、支援なしの時より平均反応時間が短くなった。また、散布作業支援が音声+音操の時の平均反応時間 1.2 秒と更に短縮した。なお、散布作業にオペの介入を要しない情報+音操+自散の場合は、平均反応時間が 1.2 秒と情報+音操の時と同じ結果を示した。

以上の結果から、散布作業支援がある場合は支援な

表-7 散布作業支援の有無・種別による反応時間

支援有無・種別	反応時間			
	標本数	平均値(秒)	中央値(秒)	標準偏差(秒)
支援なし	15	1.6	1.3	0.6
情報のみ	16	1.4	1.3	0.7
情報+音操	16	1.2	1.2	0.3
情報+音操+自散	16	1.2	1.2	0.4

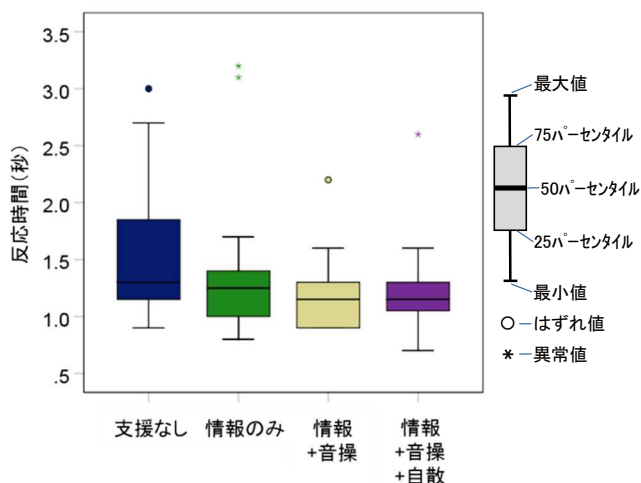


図-11 散布作業支援の有無・種別による反応時間

しに比べてオペの反応時間が短くなり、運転中に自車前方で発生する事象に対しより速やかに対応することが可能になると考えられる。

表-8 および図-12 は、認知区間における散布作業支援の有無・種別によるオペ8名の注視率を示している。なお、本項での認知区間とは、湿潤・凍結路面区間の起点約200m手前から散布制御装置の主電源ボタンを操作するまでの区間を示すものである。

当該実験では、オペが試験車両の運転席から見た前景を「道路・背景」、「散布制御装置」、「情報端末」、「車内」および「速度メーター」の5つの注視エリアに分け、散布作業支援の有無種別に各エリアを注視した割合を抽出した。

支援なしでは、5エリアの中で道路・背景の注視率が最も高く、83.5%を示した。他方、散布制御装置・情報端末の注視率はそれぞれ7.0%および0.0%であった。なお、車内・速度メーターの注視率についてはそれぞれが0.9%および8.6%となり、その他の条件(情報のみ、情報+音操および情報+音操+自散)においてもこれらの値がほとんど変動することはなかった。

情報のみでは、支援なしと同じく5エリアの中で道路・背景の注視率が最も高く77.9%を示したが、支援なしより減少し、4条件の中で最も減少した。一方、散布制御装置・情報端末の注視率は、それぞれ9.0%

表-8 認知区間における散布作業支援の有無・種別による注視率

散布作業支援有無・種別	認知区間における注視率									
	道路・背景		散布制御装置		情報端末		車内		速度メーター	
	平均値(%)	標準偏差(%)	平均値(%)	標準偏差(%)	平均値(%)	標準偏差(%)	平均値(%)	標準偏差(%)	平均値(%)	標準偏差(%)
支援なし	83.5	5.4	7.0	3.2	0.0	0.0	0.9	1.8	8.6	3.6
情報のみ	77.9	8.4	9.0	5.4	3.6	2.9	1.0	1.2	8.5	4.4
情報+音操	82.3	9.2	4.3	4.8	4.1	2.4	0.9	1.6	8.4	6.7
情報+音操+自散	84.9	6.2	3.1	4.6	2.8	2.7	0.8	2.2	8.3	4.1

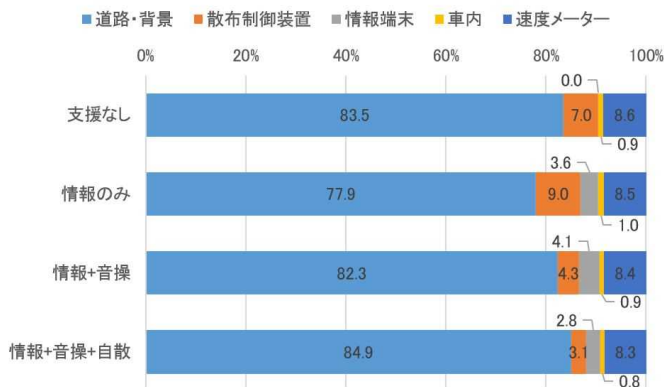


図-12 認知区間における散布作業支援の有無・種別による注視率

よび3.6%となり、当該2エリア合計の注視率が増えたことを示した。

情報+音操では、5エリアの中で道路・背景の注視率が最も高く、82.3%と情報のみより増加し、支援なしの注視率に近づいた。他方、散布制御装置・情報端末の注視率は、各々が4.3%および4.1%となり、当該2エリアで情報のみのそれより減少した。

情報+音操+自散では、他の条件と同じく5エリアの中で道路・背景の注視率が84.9%と最も高く、4条件の中においても最も高い注視率を示した。他方、散布制御装置・情報端末の注視率は、それぞれが3.1%および2.8%となり、当該2エリア合計の注視率が4条件の中で最も低かった。

以上の結果から、認知区間では散布作業支援の有無・種別に関係なく道路・背景を注視する割合が5つのエリアの中で最も高いことが分かった。しかしながら、情報のみは散布制御装置・情報端末の注視率を支援なしの時より増加させた。これは、注視を要する情報等によってオペの注視点が道路・背景から情報端末等に移動・滞留する頻度が増えたためと考えられる。他方、情報+音操は、散布制御装置・情報端末の注視率を支援なしより増加させたが、情報のみほどではなかった。これは、運転中のオペが散布制御装置を手で操作することなく音声を発して散布作業が可能になっ

たため、情報端末や散布制御装置の注視率増加抑制に寄与したと考えられる。また、情報+音操+自散は、散布制御装置・情報端末の注視率を情報+音操より更に減少させ、道路・背景の注視率が4条件の中で最も高い値となった。これは、自動散布機能が加えられたことで散布を要する湿潤・凍結路面区間において運転中のオペが情報の確認や散布制御装置を操作することなく、自動的に電源ON、散布量設定、散布ON・OFFが可能になり、オペが散布車両運転に専念することができたためと考えられる。

5. 凍結防止剤散布作業支援システムの構築

平成30年度は、過年度までの被験者実験による散布作業判断支援技術および散布作業操作支援技術がオペの心理状態および挙動にもたらす効果を踏まえ、熟練度に左右されず、一人乗車（ワンマンオペレーション）でも的確かつ安全な散布作業を可能とする凍結防止剤散布作業支援システム（図-13）の設計および構築に取り組んだ。また、実験が1日と少ないが、当該システムを用いた実道での実地検証を行い、散布作業の精度確認と技術的な課題の抽出を行った。

5.1 システム構成の概要

凍結防止剤散布作業支援システムは、散布作業指示支援ツール（以下、指示ツール）、散布作業判断支援ツール（以下、判断ツール）および散布操作支援ツール（操作ツール）の三つのツールで構成させた。これらのツールを、インターネットを介してリアルタイムに連携で

きるようにした。指示ツールは、当研究所で所有・試行運用している既往の冬期道路マネジメントシステム¹³⁾に組み込み、判断ツールおよび操作ツールは、凍結防止剤散布車両に搭載する車載タブレットPCにインストールした。

5.1.1 指示ツール

指示ツール（図-14）の設計・構築において、以下の仕様および機能を備えるようにした。

- ・ 当研究所が所有する冬期道路マネジメントシステムと連携させ、冬期の路面状態予測情報（気象メッシュ、路面温度・路面状態等）を参考に、事務所の担当者（道路管理者または道路維持従事者）が机上において散布箇所（または区間）毎の散布是非、散布量を入力できるようにした
- ・ 指示者が入力した情報をインターネット経由でリアルタイムに車載タブレットPCに送信できる機能を設けた
- ・ グラフィカルユーザーインターフェース（GUI）を採用し、事務所の指示者が散布量、散布区間の起点・終点等をマウスやキーボード操作によって簡単に設定できるようにした
- ・ 冬期道路マネジメントシステムと同様の開発言語（JavaScript等）およびWebGIS（国土地理院や民間が提供する背景地図）を使用した
- ・ 指示記録データは、他のアプリケーションにおいても簡単に変換・使用できるようCSVファイル形式で保存・管理可能にした

5.1.2 判断ツール

判断ツールは、平成29年度の被験者実験用に作製したアプリケーションを基に設計・構築し、車載タブレットPC（写真-7）にインストールした。なお、当該ツール作製において、以下の仕様および機能を備えるようにした。

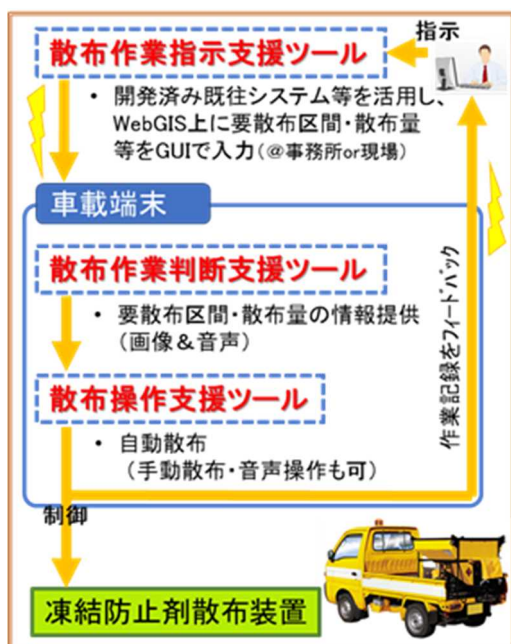


図-13 設計・構築した支援システムの概念図

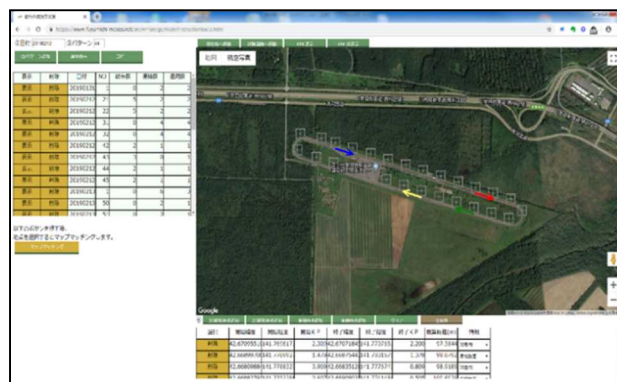


図-14 指示ツールの画面

- ・ 車載タブレット PC にジャイロセンサー・加速度センサー付 GNSS (パイオニア社製、GPS-M1ZZ、更新周期 1Hz、位置精度 10m、) を接続し、市街地・トンネル内でも搭載車両の位置・方位を正確に測位できるようにした
- ・ 指示ツールで入力した情報がインターネットを介してリアルタイムに判断ツールに反映できるよう通信機能を加えた
- ・ 当該ツール搭載車両が、要散布区間の起点 200m 手前まで接近すると前方の要散布区間を示す画像と断続的なピープ音でその存在を知らせ、散布作業の判断を促すようにした (図-3、図-15)
- ・ 要散布区間の起点に 100m 以内、50m 以内と近づくにつれ、画面上に表示した路面も近づき、併せてピープ音の間隔が短くなるようにした
- ・ 要散布区間の起点を通過次第、ピープ音が連続音になり、区間内を通過中であることを知らせ、要散布区間通過を終えると画像およびピープ音が消えるようにした
- ・ 構築し、判断ツールと同様の車載タブレット PC にインストールした (図-15)。なお、操作ツール作製において、以下の仕様および機能を加えた。
- ・ 当該ツールには、車載タブレット PC の画面上に表示させた散布量設定ボタン、散布開始・終了ボタンを画面タッチによって手動操作する方法 (支援なし)、発声によって操作する方法 (音操) およびオペによる操作を一切要しない自動散布 (自散) の 3 つの機能を備えた
- ・ 判断ツールと同様、車載タブレット PC に接続された GNSS を使用して市街地・トンネル内でも搭載車両の位置・方位を正確に測位し、操作情報等とマッチングされたデータが CSV ファイル形式 (10Hz) で記録・保存されるとともに、インターネットを介してリアルタイムに WebGIS 上で散布作業状況が確認できるようにした
- ・ 車載タブレット PC に、凍結防止剤散布装置を制御するための制御プログラムを構築し、当該ツールによる手動操作、音操および自散を可能にした

5.1.3 操作ツール

操作ツールは、判断ツールと同様に平成 29 年度の被験者実験用に作製したアプリケーションを基に設計



写真-7 車載タブレット PC

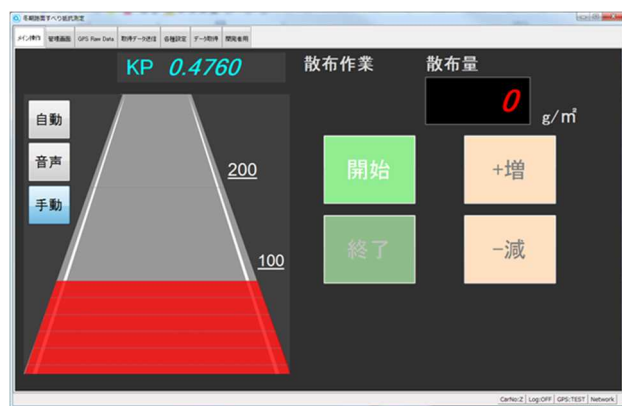


図-15 判断ツール (左)・操作ツール (右) の画面

5.1.4 操作ツールと凍結防止剤散布装置の連携

本研究には、市販の車載式凍結防止剤散布装置 (範多機械株式会社製、MS-05AH、積載容量 0.5 トン) を用い、2 トントラックの荷台に設置した (写真-8)。操作ツールによる凍結防止剤散布装置の制御には、写真-9 に示す継電器モジュール (Quimat 社製モジュール、USB 対応、4 チャンネル) を用いた。当該モジュールを、車載タブレット PC と凍結防止剤散布装置コントローラ間の信号変換器 (DA コンバータ) として使用し、操作ツールからの制御信号を変換してモジュールが内蔵するリレーを作動させることで凍結防止剤散布装置の制御 (散布量設定や散布開始・散布終了) が可能にした。

5.2 システムの精度検証

本研究で構築した凍結防止剤散布作業支援システムの精度検証は、平成 31 年 2 月中旬 (1 日) の夜間に苫小牧寒地試験道路近傍の一般国道 235 号側道で行った (図-16)。なお、検証時の天候は冬日で概ね晴れだった。

当該精度検証では、平成 29 年度の被験者実験と同様に①支援なし、②情報のみ、③情報+音操および④情報+音操+自散による 4 つの条件を設定し、これらの条件下における散布作業支援有無・種別による散布作業の精度を調べた。なお、判断ツール・操作ツールを搭載した 2 トントラックは、男性 1 名 (年齢 50 代、中型自動車運転免許保有者) が運転した。



写真-8 車載式凍結防止剤散布装置

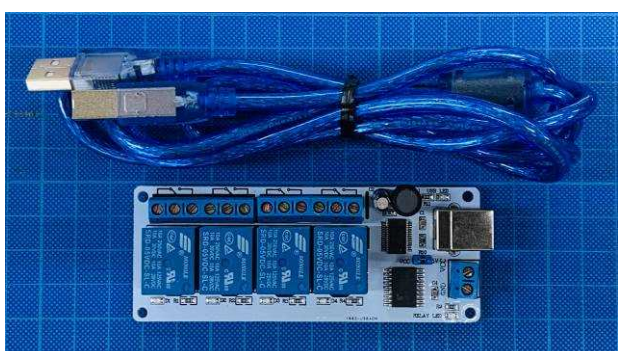


写真-9 使用した継電器モジュール



図-16 一般国道 235 号

精度検証は、苫小牧寒地試験道路周回路で練習走行を終えた後、図-16の赤線で示す通り、苫小牧寒地試験道路入口を起終点に近傍の一般国道235号側道（往復区間約20Km）を走行し、浜厚真野原公園を折り返し地点として上記条件毎に1往復（計4往復）した。

運転者には、走行中に次の要領で散布作業を行うよう指示した。交差点では、交差点50m手前から交差点中心までの区間において凍結防止剤散布作業を行う（散布量は30g/m²）。また、カーブ区間では、カーブ100m手前からカーブ終了までの区間において凍結防止剤散布作業を行う（散布量は20g/m²）。更に、橋梁区間では、橋梁50m手前から橋梁終了までの区間において凍結防止剤散布作業を行う（散布量は20g/m²）。なお、凍結防止剤散布作業支援システムによる判断支援・操作支援がある条件では、これらを使用するよう指示した。なお、車両の助手席には補助員が同乗し、運転者の安全確認を補助した。運転者は、走行区間において道路交通法規（法定速度）等を厳守し、路面状況を踏まえながら運転および散布作業を行った。

表-9は、散布作業支援の有無・種別による散布指示地点（開始・終了）と散布操作地点（開始・終了）の距離差の標本数、平均値、標準偏差等を示し、図-17は散布作業支援の有無・種別による散布指示地点（開始・

終了）と散布操作地点（開始・終了）の距離差を箱ひげ図で示している。

支援なしにおける平均距離差は0mと最も小さい値を示しているが、標準偏差が4条件の中で最も大きく、距離差のばらつきが大きいことを示している。他方、散布作業支援が情報のみの平均距離差は34m、音声+音操の平均距離差は42mおよび情報+音操+自散の平均距離差は9mと情報なしより大きい値を示し、傾向的に散布操作に遅れが生じているが、標準偏差は支援なしのそれよりも小さいことが分かる。

以上の結果から、判断支援および操作支援が加わった散布手法では散布操作に遅れが伺えるが、ばらつき（標準偏差）を考慮すると散布作業の精度が支援なしより向上することを示している。特に、情報+音操+自散の精度が最も高いことが分かる。なお、散布作業支援があった際に生じた傾向的な遅延は、GNSSまた

表-9 散布作業支援の有無・種別による距離差

支援有無・種別	距離差			
	標本数	平均値 (m)	中央値 (m)	標準偏差 (m)
支援なし	36	0	-8	47
情報のみ	36	34	35	12
情報+音操	36	42	46	24
情報+音操+自散	36	9	10	9

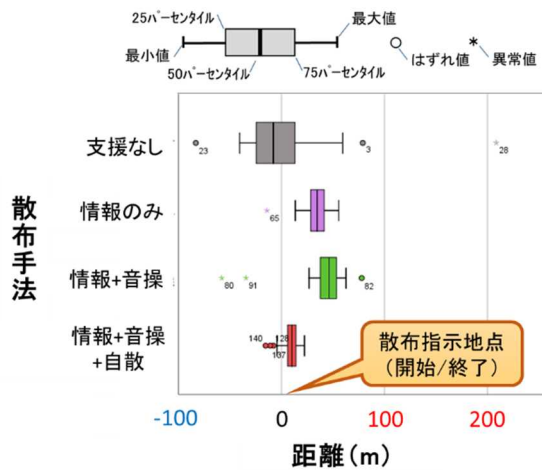


図-17 散布作業支援の有無・種別による距離差

はアプリケーションの応答遅れから生じたものであると推察でき、これらの応答性改善を含めた改良が必要であることを確認した。

6. 凍結防止剤散布作業支援システムの精度向上

令和元年度は、凍結防止剤散布作業支援システムの改良に取り組むとともに実道において被験者を用いた当該支援システムの精度検証を行った。

6.1. システムの改良

凍結防止剤散布作業支援システムは、5章でも述べたとおり、指示ツール、判断ツールおよび操作ツールによって構成されている。令和元年度は、過年度の技術的課題を踏まえ当該システムの測位手法改良による誤報・誤作動解消、操作ツールの音声操作機能・自動散布機能の応答性向上（操作反応時間短縮等）についてハード・ソフトウェアの改良に取り組んだ。

6.1.1 指示ツールの改良

令和元年度は、以下の仕様を満たすよう指示ツールのアプリケーションを改良した。

- ・ 国道に限らず、距離標（キロポスト）が存在しない市街道路にも対応させるため、過年度構築した散布作業実施個所等の位置情報を距離標の他、座標判定方式（緯度経度および方位）でも表示および使用可能になるよう改良した（図-18）
- ・ 指示者が入力した座標判定方式の情報をインターネットを介して現地の車載タブレットPCにリアルタイムに送信できるよう改良した

6.1.2 判断ツールの改良

令和元年度は、以下の仕様を満たすよう判断ツールを改良した。

- ・ 国道に限らず市街道路や道路以外の空間にも対

応させるため、距離標（キロポスト）の他、緯度経度および方位でも表示および使用可能になるよう改良した

- ・ 車両位置情報の測位精度・更新時間を向上させるため、複数の衛星システムに対応したマルチ測位機能と自律航法機能を搭載した陸上用GNSSモジュール（古野電気株式会社製GNSS、PT-G1、更新周期10Hz、位置精度2.5m）を採用した（写真-10）
- ・ インターネット回線を介して散布指示区間および散布量の情報をリアルタイムに車載タブレットPCで受信し、要散布区間において画像およびビーブ音が明示できるよう改良した

6.1.3 操作ツールの改良

操作ツールは、指示ツール・判断ツール同様に過年度より設計・構築しているアプリケーションである。令和元年度は、以下の仕様を満たすよう操作ツールを改良した。

- ・ 当該システムを国道に限らず市街道路にも対応させるため、過年度構築した散布作業実施個所等の位置情報を指示ツールと同様に距離標の他、緯度経度および方位でも表示および作動可能になるよう改良した



図-18 指示ツールの画面（令和元年度版）



写真-10 採用したGNSSモジュール一式

6.2 改良システムの精度検証

本研究では、過年度構築した凍結防止剤散布支援システムの基本仕様を保持しながら、GNSS モジュールの変更および散布作業区間の設定に座標判断方式（緯度経度・方位）を新たに採用した。また、応答性・精度向上等するため、当該支援システムのアプリケーションを改良した。実道においてこれら効果の有無・度合いを調べるための精度検証を行った。

GNSS モジュールを変更したことによって、測位の更新周期が 1 Hz から 10Hz になり、準天頂衛星システムにも対応したことで応答性および測位精度が著しく向上した。また、散布作業区間の設定に座標判断方式を新たに採用したことで、国道のように明確な距離標を有しない路線でも散布作業の指示・判断・操作を支援することが可能になり、当該支援システムの適用範囲を拡大することができた。更に、座標・方位の活用およびアプリケーション改良によって、散布作業区間が同路線内や交差する路線等に近接して複数存在する場合の誤判断や誤操作を回避することが可能になった（図-19）。

本研究では、上記改良による凍結防止剤散布作業支援システムの精度向上を確認するため、実道における精度検証を令和 2 年 2 月中旬（4 日間）の夜間（18:00～22:00）に行った。実施場所は、平成 30 年度の検証と同様に、苫小牧寒地試験道路近傍の一般国道 235 号

側道（KP5.0～KP16.0）の往復区間（ $L \approx 22$ km）とした。

写真-11 に、実道での検証状況を示す。なお、検証期間中の天候は 4 日間とも冬日の曇り一時晴れで、時折降雪が発生したが、視界不良など車両の走行や本精度検証に影響を及ぼすような状況には至らなかった。

実験に参加した被験者は、男性 6 名および女性 2 名（計 8 名）で全員が建設業従事者、年齢は 40～60 代（平均年齢 50.8 歳）、運転経験の平均年数が 30.1 年および全員が自動車運転免許保有者（準中型自動車以上）であった。

本実験には、試験車両（散布車両）として 1.5 トントラック（平ボディ）を用い、これを被験者が運転した（写真-12）。また、当該車両の助手席には実験補助員が同乗し、被験者への指示を行なった他、走行中や旋回時における安全確認等を補助した（写真-13）。

上記試験車両の荷台には、平成 30 年度と同様に市販の車載式凍結防止剤散布装置（範多機械株式会社製、MS-05AH、積載容量 0.5 トン）を搭載し、継電器モジュールを介して運転席付近に設置した車載タブレット PC（写真-14）と連結させて散布を制御した。

本実験における精度検証では、運転中における車内装置等の注視や手動操作を必要としない①情報+音操および②情報+音操+自散による 2 つの条件を設定し、これらの条件下における散布作業支援種別による散布作業の精度向上の有無・度合いについて調べた。

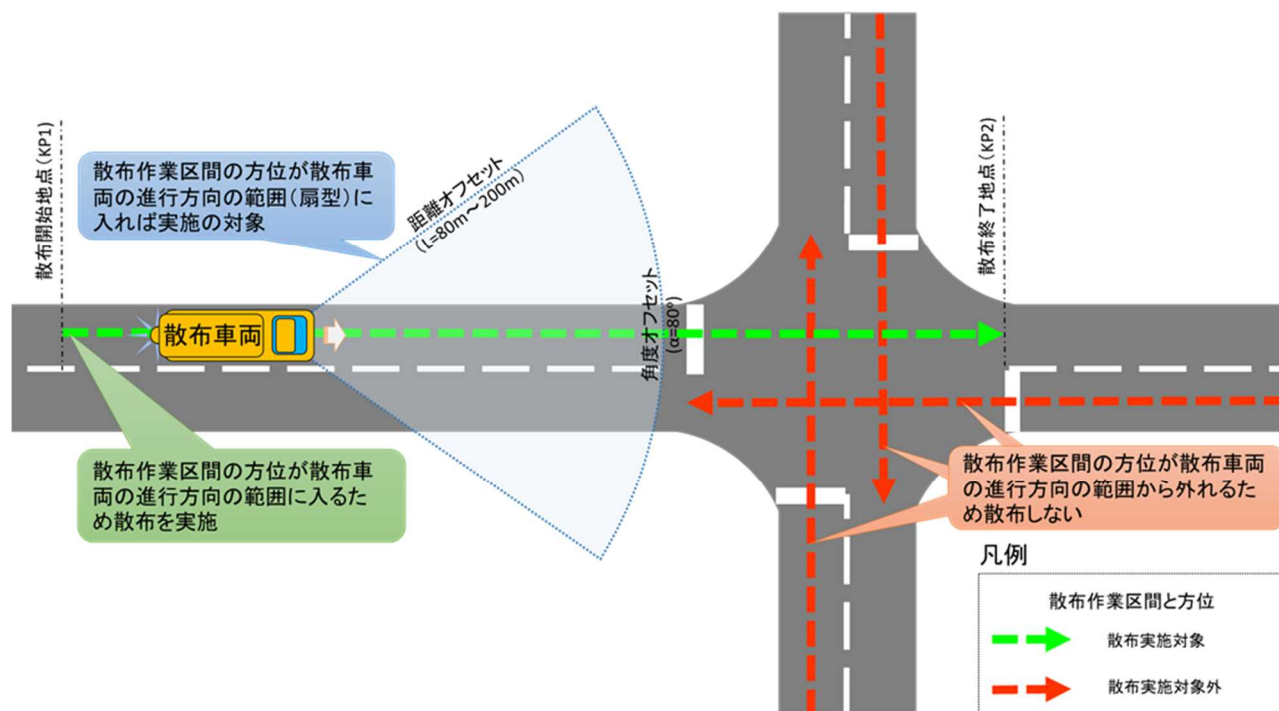


図-19 凍結防止剤散布作業支援システムによる散布作業対象区間判定方法の概念

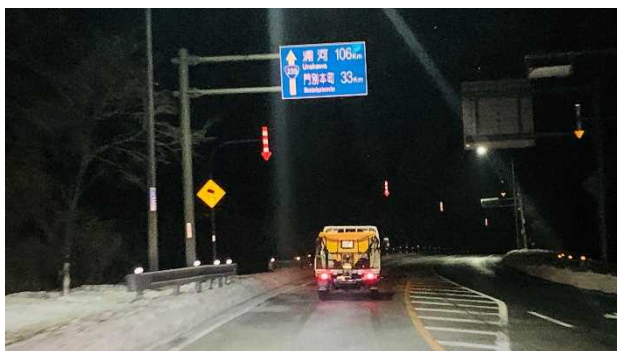


写真-11 実道路における精度検証



写真-12 検証に用いた試験車両 (1.5 トントラック)



写真-13 補助員による被験者への指示状況



写真-14 運転席付近に設置した車載タブレット PC

被験者には、一般国道 235 号側道の指定区間を走行中に次の要領で散布作業を行うよう指示した。交差点では、交差点 100m 手前から交差点終了（対向車線の停止線）までの区間において凍結防止剤散布作業を行う（散布量は 30 g/m^2 ）。また、カーブ区間では、カーブ開始地点の 50m 手前からカーブ終了地点までの区間において凍結防止剤散布作業を行う（散布量は 20 g/m^2 ）。更に、橋梁区間においては橋梁開始地点の 50m 手前から橋梁終了地点までの区間において凍結防止剤散布作業を行う（散布量は 20 g/m^2 ）こととした。

実験手順は、①実験内容に関する説明と実験参加の承諾、②試験車両および散布支援システム（車載タブレット PC）の操作方法確認、③苫小牧寒地試験道路周回路での練習走行、④実道走行試験、⑤実験後のアンケート票記入とした。被験者 1 名の実験所要時間は約 120 分（休憩時間を除く）であった。なお、実道走行に際し、被験者は道路交通法規（法定速度等）を厳守するとともに路面状況を踏まえながら試験車両の運転および散布作業を行った。

表-10 は、散布作業支援の種別による散布指示地点（開始・終了）と散布操作地点（開始・終了）の距離差の標本数、平均値、標準偏差等を示し、図-20 は散布作業支援の種別による散布指示地点（開始・終了）と

表-10 散布作業支援の種別による距離差

支援種別 (散布開始・終了)		距離差			
		標本数	平均値 (m)	中央値 (m)	標準偏差 (m)
情報+音操	散布開始	142	15.5	24.9	43.5
	散布終了	142	33.4	28.3	64.2
情報+音操+自散	散布開始	103	-7.3	-8.0	0.4
	散布終了	103	-7.3	-8.0	0.4

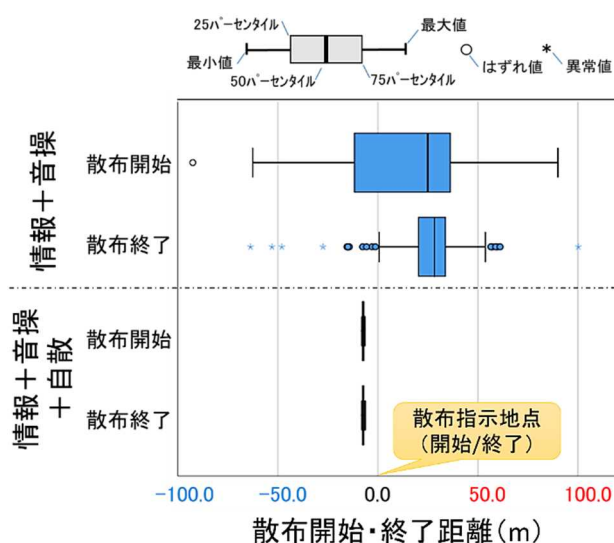


図-20 散布作業支援種別による距離差

散布操作地点（開始・終了）の距離差を箱ひげ図で示している。

情報+音操の場合、平均距離差は散布開始で 15.5m および散布終了で 33.4m となった。他方、情報+音操+自散の平均距離差は散布開始・終了ともに-7.3m となり、後者の値が前者のそれらよりも小さいことを示した。また、情報+音操の散布開始・終了の平均値および標準偏差を見ると、平成 30 年度の予備実験のそれらと同様に操作遅れとばらつきが引き続き生じていることが分かる。一方、情報+音操+自散の散布開始・終了の距離差平均値および標準偏差は、平成 30 年度および本年度の実験結果の中で最も小さい。すなわち、情報+音操+自散では散布操作の遅れおよびばらつき（反応性・精度）が最も解消されていることが分かる。更に、情報+音操+自散の散布開始・終了地点が散布指示地点より約 7m 手前となった理由については、散布支援システムのアプリケーション改良時において、凍結防止剤が散布装置から路面に到達するまでの時間（落下時間）を考慮して早めに稼働するよう設定（以降、オフセット）したことが本結果として現れたものと考えられる。

以上の結果から、情報+音操に関しては平成 30 年度の距離差と比較して応答性に改善は認められるものの、依然として反応遅れとばらつきが生じていることが明らかとなった。これらは、実験後の被験者アンケートとデータ解析の結果から、音声認識機能の誤認や不感が原因であることが分かり、今後は音声認識機能の応答性の他に音声の感度改善を図るためのアプリケーション改良等が必要であることを確認した。他方、情報+音操+自散に関しては、散布精度が平成 30 年度に比べて著しく向上したことによって、延長が短くかつ冬期の路面状態が変化しやすいボックスカルバート（最短短約 6m）のような道路構造区間においても確実に凍結防止剤の散布が可能であることが分かった。

7. システムの改良と実践的検証

令和 2 年度は、実運用を目指し、凍結防止剤散布作業支援システムを改良し、実際の凍結防止剤散布作業での当該システムの有効性を検証した。

7.1 システムの改良

令和元年度の技術的課題を踏まえ、実運用させるため、凍結防止剤散布作業支援システムを構成する指示・判断・操作ツールを改良した。

7.1.1 指示ツールの改良

指示ツールのアプリケーションを改良し以下の機能

を追加した。

- ・ 当研究所が開発した既存の冬期道路マネジメントシステムが提供する数時間後の路面凍結予測データ等を凍結防止剤散布作業支援システムと連携させた
- ・ 当該指示ツールにて適切な散布作業指示ができるよう上記予測データ（例：路面温度・凍結リスク等）を路線上に表示する仕組みを設けた
- ・ 道路管理者・道路維持従事者に対し、担当する工区路線での凍結防止剤散布の是非、散布条件等に関する情報を提供する機能を追加した
- ・ 凍結防止剤の事前散布（凍結予防）や事後散布（雪氷融解）を実施するタイミング、作業区間等を GUI 形式で自在に設定できる機能を追加した
- ・ 予め対象路線の気象条件等に応じた散布パターンを複数用意し、道路管理者・道路維持従事者が散布パターンを選択できる機能を追加した

7.1.2 判断ツールの改良

判断ツールのアプリケーションを改良し、以下の機能を追加した。

- ・ 指示ツールと同様に、冬期道路マネジメントシステムが提供する路面凍結予測データ等を判断ツールに連携させた
- ・ 予め設定した予測レベル（例：凍結リスク中以上）に達すると判断ツールがリアルタイムかつ自動的に警報（画像・ビープ音）させる機能を追加した
- ・ 判断ツールに IR センサ¹⁴⁾（Vaisala 社製 MD30）を連携させ、当該センサーを搭載した道路巡回車や凍結防止剤散布車が走行中に路面上の水分や雪氷を検知すると判断ツールがリアルタイムかつ自動的に警報（画像・ビープ音）させる機能を追加した
- ・ 速度同調散布機能（車両の走行速度に応じた散布量自動調整機能）を搭載しない簡易型散布装置に対応させるため、設定散布量・散布幅に合わせた推奨速度および実速度（実際の自車速度）を判断ツール上に表示させた
- ・ 実速度が推奨速度と比べて 5 km/h 以上の差が生じた場合は警告（実速度を赤色でフラッシング等）を表示して散布時の速度調整を促す機能を追加した。また、7 km/h 以下の速度になると散布装置を自動的に停止する機能を追加した（図-21）

7.1.3 操作ツールの改良

操作ツールのアプリケーションを改良し、以下の機

能を追加した。

- ・ 上記判断ツールの新たな機能と連動させ、散布対象となる区間の散布量・散布幅の設定、散布開始・終了等を自動的に行う機能を追加した
- ・ 音声操作による散布作業時の車内の雑音（エンジン音等）、操作用単語の追加・選定、オペの音量・声域による誤認・不感解消および応答性改善に必要なアプリケーションを改良した
- ・ 複数車線区間においてもオフセットを機能させるためオフセット位置を、座標指定箇所を中心とした半径（図-22 (a)）から座標指定箇所の車線全体を後退方向（図-22 (b)）に変更し、凍結防止剤散布車がどの車線を通過しても同じ横断面でオフセットするようアプリケーションを改良した

7.2 実場面におけるシステムの検証

本研究は、凍結防止剤散布作業支援システムの有効性を検証するため、実際の凍結防止剤散布作業で当該

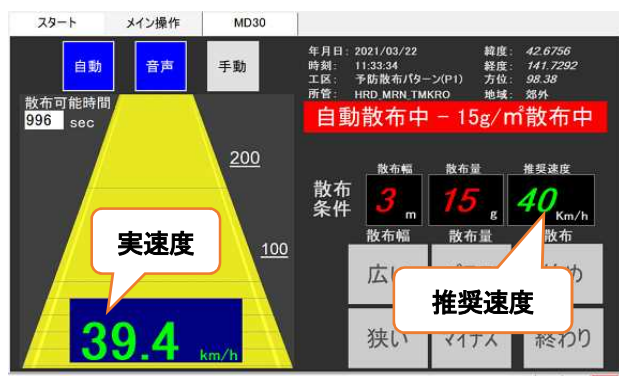


図-21 車載タブレット PC の画面に表示した実速度と推奨速度の例

(a) 令和元年度（座標指定箇所を中心とした半径）



(b) 令和2年度（座標指定箇所の車線全体を後退方向）

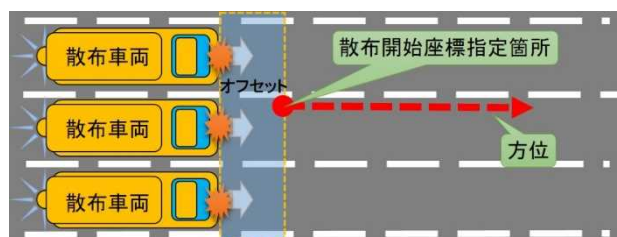


図-22 複数車線におけるオフセットの概念

支援システムを使用し、各ツールの操作性や散布作業の精度検証を行った。

検証に先立ち、凍結防止剤散布作業支援システムの操作マニュアルを作成し、検証期間初日に当該マニュアル、支援システムを搭載した車両等を用いて道路管理者・維持従事者を対象とした講習会（写真-15）を開催して凍結防止剤散布作業支援システムの特徴や各ツールの操作方法の説明および操作の練習を行った（写真-16）。

7.2.1 検証期間と場所

検証は、令和3年1月28日から2月23日の期間に行った。実施場所は、北海道開発局（室蘭開発建設部 苫小牧道路事務所）が所管する一般国道235号の約10km区間（苫東中央IC～KP1.7の側道往復区間）とした。なお、本検証は実道での実際の散布作業において行われたため、一人乗車（運転と散布作業を兼務）するオペの安全確保を最優先して主に自散（自動散布機能）を使用した。

7.2.2 検証機器

検証に使用した機器は、上記路線の工事を行っている維持従事者が所有する車両（4トントラック・平ボディ・道路維持車両（写真-17））を用いた。荷台に令和元年度と同様に市販の車載式凍結防止剤散布装置を搭載し、継電器モジュールを介して運転席付近に設置した車載タブレット PC（写真-18）と連結させて判断ツールおよび操作ツールをインストールした。

7.2.3 検証作業者

検証期間中、判断ツールおよび操作ツールを搭載した上記車両は、中型自動車運転免許以上を保有する建設作業員1名（年齢50代、自動車運転歴34年、凍結防止剤散布作業経験3年以上）が運転した。

7.2.4 散布指示方法

指示ツールは、前述の路線を管轄する除雪ステーション内事務所に置かれた端末のブラウザを介して閲覧・操作できるようにし、これを維持作業指示責任者が冬期道路マネジメントシステム等による各種予測情報、CCTV画像、道路巡回による現地の天候・路面状況等を踏まえ、散布区間、散布量、散布幅等の散布条件を指示ツールに入力した。

7.2.5 検証中の不具合

上記検証期間中、対象路線の路面状態や気候条件に応じて当該支援システムを用いた散布作業（写真-19）が行われたのは2月2日・8日・10日・12日・13日・18日および19日の計7日間であった。ただし、これらの散布作業時にシステム内に不具合が生じ、散布作



写真-15 講習会の様子



写真-19 実道における散布作業の様子



写真-16 判断・操作ツールを用いた練習の様子



写真-17 検証に用いた道路維持車両(4トントラック)



写真-18 運転席付近に設置した車載タブレットPC

業が一時的に中断または中止せざるを得ない場面が数回発生した。不具合の発生箇所は、GNSSの停止および操作ツールを構成するアプリケーションの強制停止によるものであった。GNSSが停止した原因は、GNSS測位補正に必要な車両側の速度パルス信号にノイズが生じたためである。また、アプリケーションが強制停止した原因は、手動操作・音操および自散の3つの機能を同時に使用すると操作ツールに過度な負荷がかかり、オーバーフローしたためである。今後、これらの課題を踏まえた改良が必要である。

7.2.6 検証結果

表-11 および図-23 は、年度別(令和2年度、令和元年度、平成30年度)の検証で計測記録した自散の散布指示地点(開始・終了)と散布操作地点(開始・終了)の距離差を用いて得た基本統計量(平均値、標準偏差等)と箱ひげ図を示している。令和2年度の結果は、全部で44データある。このうち、前述の不具合発生時の16データを除き、28データを採用した。

令和2年度における自散の平均距離差は、散布開始で-7.3m、散布終了で-8.1mと令和元年度とほぼ同様であった。標準偏差は、散布開始で1.2m、散布終了で1.0mと令和元年度と比べると0.6~0.8m大きくなっているが、誤差の範囲内であり、平成30年度と比べると小さい。このように令和2年度に実施した実際の散布作業においても令和元年度の被験者実験結果と同様に、自散の高い精度を確認することができた。また、令和元年度の結果と同様に自散の散布開始・終了地点が散布指示地点より7~8m手前となっており、凍結防止剤が散布装置から路面に到達するまでの時間(落下時間)を考慮し、早めに稼働するアプリケーションの機能が問題なく作動していることが確認できた。

7.2.7 ヒアリング

検証期間中および終了後、凍結防止剤散布作業支援システムを利用したオペ等を対象に当該システムの操

表-11 年度別による距離差（自散）

自散 (散布開始・終了)		距離差			
		標本数	平均値 (m)	中央値 (m)	標準偏差 (m)
平成30年度	散布開始	18	8.6	9.1	7.5
	散布終了	18	9.1	11.6	9.6
令和元年度	散布開始	103	-7.3	-8.0	0.4
	散布終了	103	-7.3	-8.0	0.4
令和2年度	散布開始	16	-7.3	-7.3	1.2
	散布終了	12	-8.1	-8.2	1.0

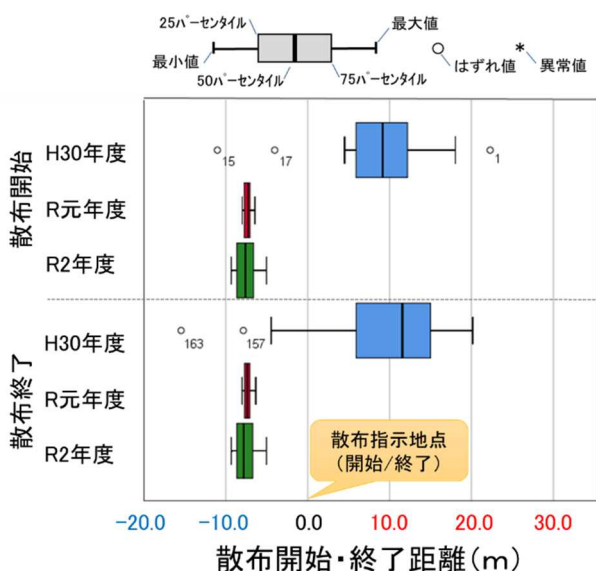


図-23 年度別による距離差（自散）

作性や課題点についてヒアリングを行った。その結果、自散による散布作業は的確かつ精度良く実施され、本機能の有効性を確認することができた。しかし、複数の支援機能を同時に使用した場合に操作ツールが応答しなくなったこと、音操による散布を試みた際、散布量設定用の命令に対する誤認が依然として多かったこと等、多数の指摘事項があった。今後、当該システムの更なる改良に取り組む必要がある。また、本検証に用いた車載式凍結防止剤散布装置の最大積載容量が0.5m³と実際の散布作業に使用している散布装置（2.0m³以上）よりも容量が小さい。このため、散布延長が短く、凍結防止剤を積み込むために複数回基地に戻る等、非効率との指摘を受けた。今後、実際の散布作業に支障が無い状況で精度検証を実施するため、容量の大きい散布装置で当該支援システムを試行することが必要と考える。

8. 自動散布システムの開発

これまで凍結防止剤散布支援システムは、写真-12や写真-17に示すように凍結防止剤散布装置（簡易散

布装置）をベースに開発が進められてきた。簡易散布装置が使われているのは、北海道開発局の中のごく一部であり、本運用の課題となっていた。

そこで、令和3年度は、凍結防止剤散布車や除雪トラック（散布装置付き）で自動散布を実施するために凍結防止剤自動散布システムを開発し試行導入した。

8.1 凍結防止剤自動散布システムの開発

凍結防止剤散布車や除雪トラック（散布装置付き）で自動散布を実施するには、散布車メーカーと通信仕様を細かく取り決める必要がある。また、車両の振動に耐えられる制御装置の設計や車両ノイズの問題を解決するGNSSも必要となる。システムは自動起動・自動終了のオーマチックが必要であり、運転視野へ考慮した配置や道路&背景を視認しながら設定変更が可能なシステム等、安全対策が必要である。

8.1.1 通信仕様

令和3年度、凍結防止剤散布車や除雪トラック(散布装置付き)で自動散布を実施するため、表-12に示すように散布車メーカーとCAN通信仕様を取り決めた。CANプロトコルは、ISO-11898仕様に準拠したBosch2.0B active対応とした。データフォーマットは、CAN ID: 11bitの標準フォーマットである。通信速度は250kbps、サンプルポイントは75%とした。周期は、0.5秒またはデータ変化時であり、ハンドシェイク通信無しである。散布量、湿式割合、散布幅、散布方向、散布ON/OFFを制御できるようにした。

8.1.2 制御装置の設計

凍結防止剤自動散布システム制御装置は、図-24に

表-12 CAN通信仕様

項目	仕様
CANプロトコル仕様	Bosch2.0B active 対応： ISO-11898 仕様準拠
データフォーマット	標準フォーマット： CAN ID: 11bit
内容	散布量、溶液の割合、散布幅、散布方向、散布ON/OFF
散布量	0~40g/m ² (1g/m ² 単位)
湿式割合	0~100% (1%単位)
散布幅	0~12.0m (0.1m単位)
散布方向	左7~中央~右7
散布ON/OFF	ON、OFF

示すように新たに設計し、制御 PC・GNSS・通信装置・電源装置等を収納した。凍結防止剤自動散布システム制御装置は、**図-25** に示すように電源を供給し、凍結防止剤散布車・タッチパネル液晶ディスプレイ・GNSS・マイクと接続させた。

8.1.3 GNSS

GNSS は、古くからカーナビを製作し、車両ノイズ対策等がなされている Pioneer 社製の GPS-M2 (**図-26**) を採用した。GPS-M2 は、GNSS 情報 (準天頂衛星「みちびき」対応)、車速取り込み、加速度・ジャイロの各センサー内蔵により、車両の位置 (緯度・経度)・高度・



図-26 GPS-M2

速度・進行方向や、時刻の情報を取得する。トンネル等の GNSS 不感地帯でも、ジャイロセンサーや加速度センサー等、各種センサーからの情報と合せて演算処理するデッドレコニング (自律航法) により測位でき、位置データ出力が途切れない。また、加速度情報 (前後/左右) や方位変化量、積算走行距離 (オドメーター) が取得可能である。

8.1.4 自動散布システム

凍結防止剤自動散布システムを試行導入させるため、散布車規格へ対応し安全対策を施した。そして、自動散布機能および音声散布機能を開発した。以下に詳細を示す。

(1) 散布車規格への対応

散布作業に使用している 2~10m³ の凍結防止剤散布車と除雪トラック (散布装置付き) は、散布車の CAN 仕様が異なる。そこで、**表-12** の CAN 通信仕様に則り、凍結防止剤自動散布システム制御装置からの信号を受信できるような散布車のソフトを開発した。

また、車両の型式に応じて CAN 接続位置や車両の長さが異なる。CAN 接続位置は、ケーブル長で調整した。車両の長さは、GNSS の測位位置と散布円盤までのタイムラグを車両毎に調整できるように、散布開始・散布終了のタイミングにオフセット機能を設けた。

凍結防止剤散布装置の制御は、**写真-9** に示した過年度に検討した継電器モジュールを制御装置内に配置し、凍結防止剤散布装置の制御信号 (散布量設定や散布開始・散布終了) を変換して凍結防止剤散布装置のアクチュエーターを作動させることで自動散布を可能とした。

このように、凍結防止剤散布装置のほか、実際の散布作業に使用している 2~10m³ の凍結防止剤散布車や除雪トラック (散布装置付き) にも自動散布を可能とし、全ての散布車規格に対応した凍結防止剤自動散布システムを開発した。そして、**写真-20** に示す北海道開発局室蘭開発建設部苫小牧道路事務所が所有する除雪トラック (散布装置付き) に搭載した。**図-27** に除雪トラック (散布装置付き) への搭載状況を示す。

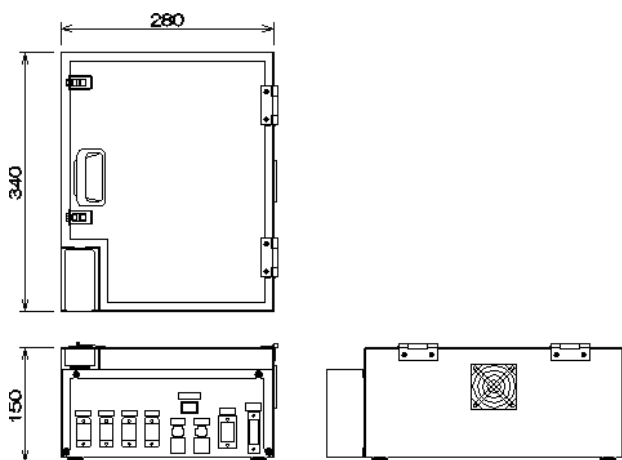


図-24 凍結防止剤自動散布システム制御装置

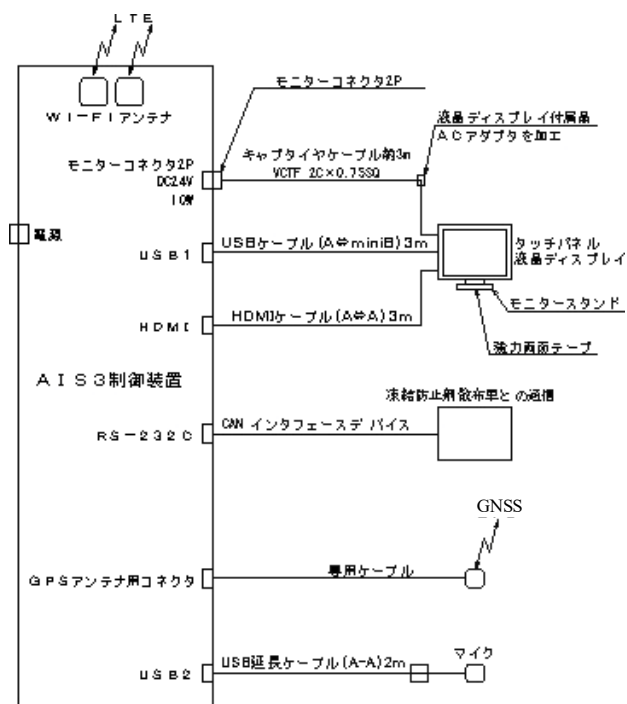


図-25 凍結防止剤自動散布システムの配線系統図



写真-20 凍結防止剤自動散布システムを搭載した除雪トラック（散布装置付き）

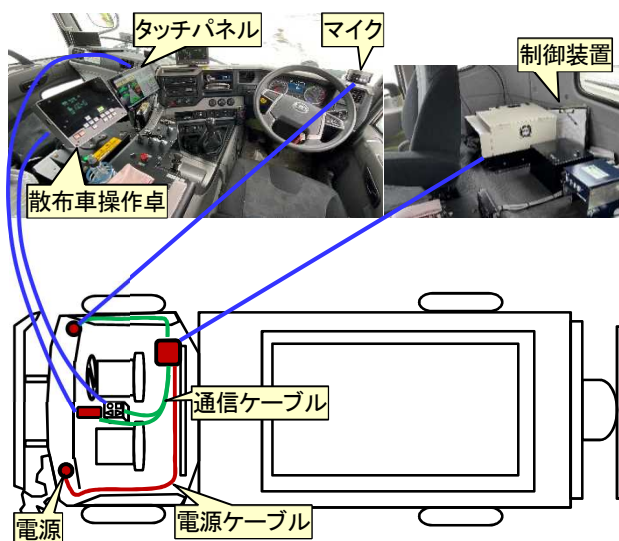


図-27 除雪トラック（散布装置付き）への凍結防止剤自動散布システムの搭載状況

(2) 安全対策

写真-21 に示すようにタッチパネルは、散布車操作卓の横に設置し、運転視野の妨げにならないようにした。また、散布中に散布停止や強制散布等、散布条件を変更するときや散布パターンを変更するときは、写真-22 に示すようにマイクによる音声操作が可能となるようなインターフェースを開発した。これにより、



写真-21 タッチパネル



写真-22 マイク

道路や背景を視認しながら、安全に設定変更が可能となった。

(3) 自動散布機能

自動散布機能は、散布車のエンジンを ON にするとモニターの電源が入り自動散布システムが自動で起動する。ソフトが起動するまで 45 秒待つと自動で接続チェックが行われる。凍結防止剤散布車の運転手やオペレーターは、図-28 に示す自動散布ソフトの散布パターンボタンを選択し、自動散布ボタンを押すと、自動散布が実行される（ボタンを押すと背景が明るくなる）。散布終了後、エンジンを OFF にすると自動散布機能は自動で終了する。

このように、凍結防止剤自動散布システムは、自動起動・自動終了のオーマチック仕様であり、凍結防止剤散布車の運転手やオペレーターは、散布車操作卓を操作することなく、自動散布ソフトの画面を 2 回タッチするだけで自動散布が実行可能である。

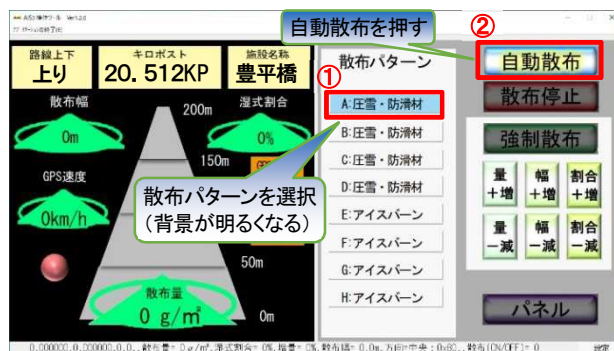


図-28 自動散布ソフト

(4) 音声散布機能

音声散布機能は、オープンソースウェアの「Julius」の「grammar kit」を利用して開発した。「自動散布」や「散布停止」等、必要となる語彙を予め決めて語彙リストを作成し、発声するとコマンドを実行する。語彙リストの音声認識は、閾値を設けることで、誤認識を防ぎ認識率を向上させた。また、音声散布機能は、語彙リストで作成したテキストファイルを読み取り、操作を実行する機能としたことで、リストの修正が任意

に可能である。

音声散布機能の起動時は、待機状態となっている。この状態では音声認識は受け付けない。これは、図-28の左下・表-13 に示す音声認識インジケータの赤丸表示で確認することができる。「ヘイサンプ」と発声すると表-13 に示す音声認識インジケータが青丸表示となり音声認識受付状態に遷移し、最大で 10 秒間待機する。この間に表-14 に示す予め登録した語彙リストにある「サンプ」、「テイシ」、「キョウセイ」、「パネル」と発声すると、表-13 に示す音声認識インジケータが緑丸表示となり自動散布の操作を実行する。10 秒経過するか、語彙リストに無い音声認識を受け付けると待機状態に戻る。散布パターンの変更は、散布パターン名を読み上げることで、対象の散布パターンに切り替えることが可能である。音声認識結果は、テキストファイルで出力できるようにした。

表-13 音声認識インジケータ




画面表示	表示内容	状態
	赤丸表示	音声認識待機状態
	青丸表示	音声認識受付状態
	緑丸表示	音声認識操作実行状態

表-14 語彙リストの一覧

コマンド	読み	実行内容
自動散布	サンプ	自動散布を開始する
散布停止	テイシ	散布を停止する
強制散布	キョウセイ	強制散布を開始する
操作パネル	パネル	操作パネルに制御を切り替える

8.2 試行導入

北海道開発局では、運転手の死角にカメラを配置する等ワンマン化の試行が実施されている。そこで令和 3 年度、ワンマン化へ向けた検証のため、8 開発建設部（札幌、小樽、旭川、室蘭、釧路、帯広、網走、留萌）各 1 台、凍結防止剤散布車もしくは除雪トラック（散布装置付き）に当該システムが試行導入された。表-15 に試行導入一覧を示す。

9. まとめと今後の課題

本研究では、凍結防止剤散布オペの熟練度に左右されず、また運転手がオペを兼ねる作業形態でも安全で確実な凍結防止剤散布作業を可能とするための散布作業支援技術の確立に取り組んでいる。以下に、これまで

表-15 試行導入一覧

No.	建設部	事務所	基地・ST	機械	規格
1	札幌	札幌道路	札幌 ST	散布車	4.0m ³
2	小樽	小樽道路	小樽基地	除トラ	10tI.G. 散布
3	旭川	旭川道路	末広基地	散布車	4.0m ³
4	室蘭	苫小牧道路	苫東中央 ST	除トラ	10tI.G. 散布
5	釧路	釧路道路	恋間 ST	除トラ	10tI.G. 散布
6	帯広	足寄道路	足寄基地	除トラ	10tI.G. 散布
7	網走	網走道路	網走基地	除トラ	10tI.G. 散布
8	留萌	留萌開発	大別刈 ST	除トラ	10tI.G. 散布

※10tI.G. 散布：I は一方スノープラウの略称、G は路面
 整正装置の略称、散布は散布装置の略称

の主な研究結果と今後の予定について述べる。

平成 28 年度は、苫小牧寒地試験道路で実施した被験者実験のデータを用い、オペの熟練度および情報の有無・種別（情報なし・音声のみ・画像のみ・音声＋画像）によるオペの路面状態の認知・判断および散布操作状況を分析し、情報提供方法による効果と課題を整理した。その結果、情報提供により、オペの熟練度にかかわらず主観的 MW は減少し、路面状態の認知・判断等の改善に寄与することが確認された。しかし、情報提供方法によっては前方の道路を注視する割合が著しく減少し、散布時の安全性確保が課題となることも確認した。

平成 29 年度は、情報提供（音声＋画像）に加えて音声操作機能および自動散布機能を設計・構築し、過年度と同様に被験者実験を苫小牧寒地試験道路において行い、散布作業支援技術の有無・種別（支援なし・情報のみ・情報＋音操・情報＋音操＋自散）がオペの路面状態の認知・判断、散布操作状況等にもたらす効果とその度合いについて調べた。その結果、散布作業支援技術の使用によりオペの主観的 MW が著しく減少し、路面状態の認知・判断等が速やかかつ的確になり、散布作業時の安全性も向上することを確認した。

平成 30 年度は、実際の凍結防止剤散布作業への実装を目指し、散布指示、散布判断および散布操作を支援する機構等の設計・構築に取り組み、これらを用いて予備試験を行い、散布作業の精度検証を行った。その結果、凍結防止剤散布作業支援システムによる凍結防止剤散布作業の省力化および適正化が可能であることを確認した。他方、当該システムの応答性（操作反応遅れ）について更なる検討が必要であった。

令和元年度は、本研究において開発中の凍結防止剤

散布支援システムの測位手法改良による誤報・誤作動解消、操作ツールの音声操作機能・自動散布機能の応答性向上（操作反応時間短縮等）についてハード・ソフトウェアの改良に取り組み、実道において被験者を用いた当該支援システムの精度検証を行った。その結果、情報＋音操に関しては応答性が改善したが、音声誤認・不感が認められ、この部分について今後も更なる改善が必要であることが分かった。情報＋音操＋自散に関しては、散布精度が過年度に比べて著しく向上した。よって、支援システムによる散布作業の省力化および適正化が技術的に可能であるとともに、従来の2人乗車での作業を1人乗車でも可能とする見通しが立ったと言えた。

令和2年度は、実運用を目指し、凍結防止剤散布作業支援システムを改良し、実際の凍結防止剤散布作業場面での当該システムの有効性を検証した。その結果、実際の散布作業での検証においても令和元年度と同様に、自散の高い散布精度を確認することができた。しかし、車両からの車速パルス信号のノイズによってGNSSの測位が途絶えること、複数の支援機能を同時に使用すると操作ツールが応答しなくなること等の課題も幾つか認められた。

令和3年度は、これまでの課題を整理し、凍結防止剤散布装置のほか、実際の散布作業に使用している2～10m³の散布車や除雪トラック（散布装置付き）にも対応可能な凍結防止剤自動散布システムを開発した。そして、8開発建設部各1台、散布車もしくは除雪トラック（散布装置付き）に当該システムが試行導入された。

今後、現在のサービスレベルを維持しつつ、人手不足等の課題を解決するため、ワンマン化でも安全で確実な散布作業が可能な自動散布システムを確立し、実用を目指す所存である。

参考文献

- 1) 国土交通省北海道開発局：平成28年度・今冬の除雪体制等について、平成28年11月
http://www.hkd.mlit.go.jp/zigyoka/z_doro/jyosetsu/pdf/jyosetsjyosets.pdf（平成29年4月確認）
- 2) 国土交通省：冬期道路交通の確保のあり方に関する検討委員会提言、持続的な冬期道路交通確保をめざして～連携と協働～、pp.25-26、平成25年5月
<http://www.mlit.go.jp/common/000997537.pdf>（平成29年4月確認）
- 3) Salt Institute: Snow Fighter's Handbook - A Practical Guide for Snow and Ice Control, 2013
http://www.saltinstitute.org/wp-content/uploads/2013/07/Snowfighters_HB_2012.pdf（平成28年8月確認）
- 4) Minnesota Local Road Research Board: Minnesota Snow and Ice Control - Field Handbook for Snowplow Operators, Second Edition, October 2012
<http://www.mnltap.umn.edu/publications/handbooks/documents/snowice.pdf>（平成28年8月確認）
- 5) 北海道開発局建設部道路維持課：冬期路面管理マニュアル（案）、平成9年11月
- 6) Thompson Gregory et al.: Clear Roads – Developing a Totally Automated Spreading System, Final Report, February 2014
http://clearroads.org/wp-content/uploads/dlm_uploads/11-03-Totally-automated-spreader_final_report.pdf（平成29年4月確認）
- 7) 青木和夫：ISO/TC159におけるメンタルワークロードの概念と定義および設計の指針、人間工学、Vol.29、No.6（'93）、pp.339-342、平成5年9月
- 8) 三宅晋司、神代雅晴：メンタルワークロードの主観的評価法、人間工学、Vol.29、No.6、平成5年
- 9) De Waard Dick: The Measurement of Driver's Mental Workload, The Traffic Research Centre VSC, University of Groningen - The Netherlands, June 1996
https://www.rug.nl/research/portal/files/13410300/09_thesis.pdf（平成28年8月確認）
- 10) Tokunaga Roberto et al.: Effects of Conversation Through a Cellular Telephone while Driving on Driver's Reaction Time and Subjective Mental Workload; Transportation Research Record No. 1724, Paper No. 00-1480, pp. 1-6, April 2000
- 11) Hart Sandra et al.: Development of NASA-TLX: Results and Theoretical Research, Human Mental Workload, Pp. 139-183, North-Holland, 1988
- 12) 芳賀繁：NASAタスクロードインデックス日本語版の作成と試行、鉄道総研報告、特集：人間科学、Vol.18、No.1、pp.15-20、平成6年
- 13) 徳永ロベルト、切石亮、高橋尚人：冬期道路マネジメントシステムの試行運用について、第57回（平成25年度）北海道開発技術研究発表会、平成26年2月
<https://thesis.ceri.go.jp/db/files/5384566425460277f138cc.pdf>（令和3年5月確認）
- 14) Johan, W., Patrik, J. and Henrik, B. : Laboratory test of five different optical road condition sensors, SIRWEC(Standing International Road Weather Commission) 2016, Conference paper, 1-5, 2016

14.2.2 適切かつ効率的な除雪機械の維持管理技術に関する研究

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：片野浩二、巖博、大槻敏行、
中島純一、牧野正敏、植野英睦、
住田則行、齋藤勉、菅原彰人、
伊藤義和、幸田勝

【要旨】

近年、購入・整備費用の制約により、更新が先送りされて老朽化した除雪機械が増え、故障の発生に伴う除雪作業停止日数が増加しており、道路除雪体制への影響が懸念される。

本研究では、冬期の円滑な道路交通の確保に必要な道路除雪体制を維持するため、除雪機械の効果的かつ効率的な維持管理手法の提案に取り組んでいる。

提案に向け、①除雪機械の稼働、故障等のデータを収集分析し、維持管理の指標となる除雪機械劣化度の定量的評価手法と、②センサー等を活用した除雪トラックのメインフレームなどの重要構成部品の劣化度診断手法、③故障発生リスクを考慮した劣化度の定量的評価に基づく効果的効率的な維持管理手法、以上3つについて検討を行った。

令和3年度は、除雪トラックのメインフレームにおける劣化度診断手法について、残留応力を磁場強度の変化で検出する自己磁場測定型残留応力検出機にて試験片や実車を測定するとともに、過年度の測定結果から経時変化や持続性について検証し、磁場強度の変化量による劣化箇所の特的手法についてとりまとめた。さらに、ワイブル型累積ハザード解析による信頼度を現場でも簡易に算出できるツールを作成するとともに、信頼度を劣化度の定量的評価の指標とした維持管理手法についてとりまとめた。

キーワード：除雪機械、FTA、ワイブル型累積ハザード解析、信頼度、維持管理

1. はじめに

積雪寒冷地における冬期の円滑な道路交通の確保は、地域住民の生活にとって必要不可欠であり、確実な道路除雪体制が求められている。しかし、近年、購入・整備費用の制約により除雪機械の更新が先送りされ、このため老朽化した機械が増えており、例えば除雪トラックではフレームに亀裂が生じるなど、除雪作業に支障をきたす重大故障が発生している。これらの重大故障に伴う除雪作業停止日数は年々増加しており、道路除雪体制維持への影響が懸念される。そのため、限られた予算の中、効果的かつ効率的に除雪機械の維持管理を行い、重大故障に伴う除雪作業停止日数を削減する必要がある。

そこで本研究では、冬期の円滑な道路交通の確保に必要な道路除雪体制を維持するため、除雪機械の効果的かつ効率的な維持管理手法の提案に取り組んでいる。

平成30年度までは、FTA（故障の木解析）で抽出した2日以上不稼働となった故障（以下、「重大故障」という。）箇所について、全故障データも含めたワイブル型累積ハ

ザード解析を行い、重大故障箇所における重大故障データと全故障データで、走行距離や算出した信頼度などの関係性を考察した。

また、国土交通省北海道開発局（以下、「開発局」という。）の1開発建設部の過去3年分の稼働実績をもとに、FTAで機械本体の信頼度を算出し、除雪機械劣化度の定量的評価として信頼度の適用性を検討した。

さらに、事務所が管理する複数路線の重要度の優先順位づけを行い、路線の重要度に合わせて除雪機械の信頼度の目標値を設定することで、整備や配置換えの実施判断が可能な維持管理手法を検討し、その手法のシミュレーションを実施した。

令和元年度は、ワイブル型累積ハザード解析を効率的に実施するため、必要な故障データの内容や項目を検討し、故障データの収集様式を作成した。また、除雪トラックのメインフレームの劣化度診断手法の構築に向け、残留応力を磁場強度の変化で検出する自己磁場測定型残留応力検出機を用いた診断手法について検討した。

さらに、除雪機械劣化度の定量的評価による維持管理手法については、除雪機械の信頼度の目標値を変えた際の予防整備費用の試算・比較などを引き続き検討した。

令和2年度は、引き続き除雪トラックのメインフレームの劣化度診断手法の構築に向け、残留応力を磁場強度の変化で検出する自己磁場測定型残留応力検出機による測定値と、その測定箇所に加速度ピックアップを設置して振動加速度を測定し、各箇所にかかる負荷との関係を検証した。

令和3年度は、引き続き自己磁場測定型残留応力検出機による試験片や実車を測定するとともに、令和元年度と令和2年度の測定結果から磁場強度の経時変化や変化量の持続性を確認し、磁場強度の変化量による除雪機械の劣化箇所の特定手法の検証を行い、重要構成部品の劣化度診断手法についてとりまとめた。さらに、ワイブル型累積ハザード解析による除雪機械の信頼度を現場でも簡易に算出できるツールを作成するとともに、その信頼度を除雪機械の劣化度の定量的評価の指標とした維持管理手法についてとりまとめた。

2. 除雪機械の故障データの整理

2.1 解析対象データ

解析対象データは、以下のとおりである。

- ・開発局：平成19～27年度の故障データ約4,900件。
- ・国土交通省東北及び北陸地方整備局（以下、「東北及び

北陸地整」という。）：平成23～27年度の故障データ約5,400件。

このうち、障害物との接触など「外的要因による損傷」に関する故障データ、機種及び管理番号が稼働データと一致しない故障データを除外した。解析対象データの内訳を表-1に示す。

次節から、開発局の故障データを用いた解析結果を主として報告する。

2.2 FTA（故障の木解析）

2.1で整理した解析対象データでFT図を作成した。作成にあたっては、重大故障箇所のデータ件数が5件未満になるまで、故障箇所の分類を細分化した。細分化は、建設機械整備標準作業工数表（除雪機械編）¹⁾の作業項目区分に準じた、大、中、小項目単位で行った。

除雪トラックのFT図を図-1に示す。FT図のうち、菱形で表示した項目が重大故障箇所であり、車体で23項目、作業装置で14項目の計37項目となった。

除雪機械全体の重大故障箇所数を、表-2に示す。故障データ（表-1）の件数が多いほど重大故障箇所数（表-2）も多く、除雪トラック、ロータリ除雪車、小形除雪車の順に重大故障箇所数が多い結果となった。

表-1 解析対象データの内訳

故障分類	地方整備局等	除雪トラック	除雪グレーダ	除雪ドーザ	ロータリ除雪車	小形除雪車	凍結防止剤散布車	計
全故障	開発局	2,150	301	360	870	693	434	4,808
	東北地整	262	715	10	239	335	154	1,715
	北陸地整	304	880	47	307	459	355	2,352
	合計	2,716	1,896	417	1,416	1,487	943	8,875
重大故障	開発局	454	61	77	192	170	75	1,029
	東北地整	66	139	3	40	72	38	358
	北陸地整	61	209	12	50	84	106	522
	合計	581	409	92	282	326	219	1,909

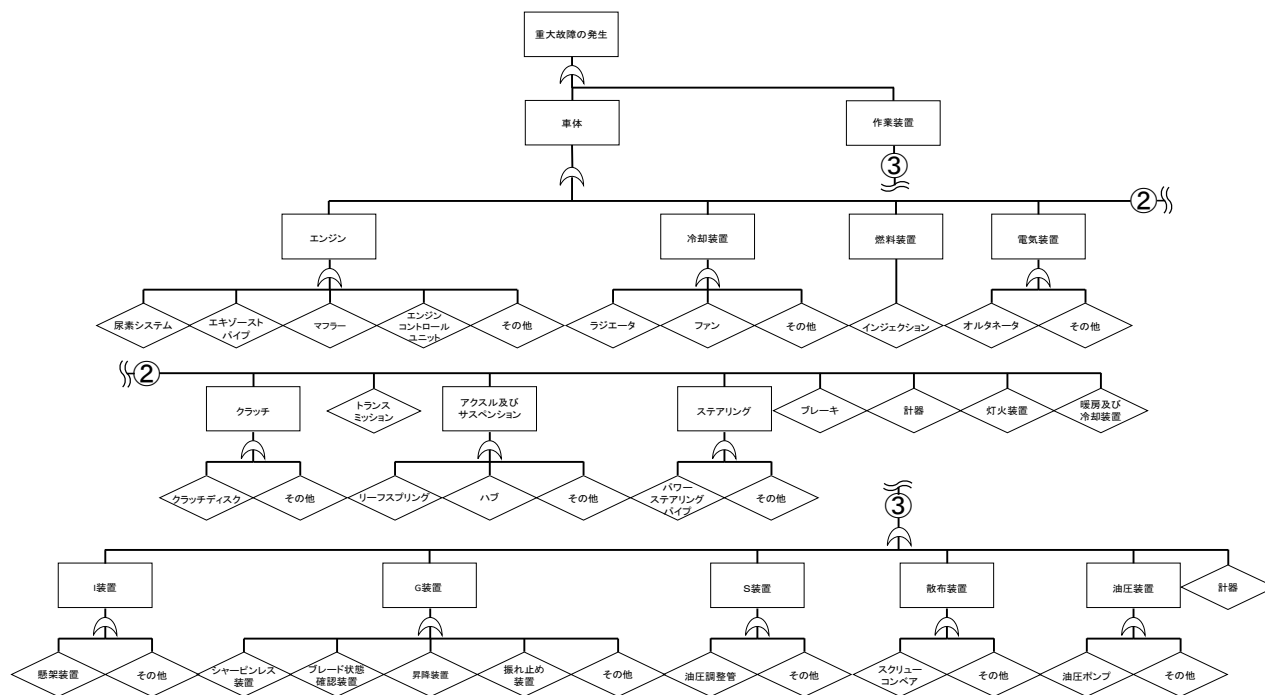


図-1 除雪トラック FT 図

表-2 除雪機械の重大故障箇所数

除雪機械	車体	作業装置	計
除雪トラック	23	14	37
除雪グレーダ	3	2	5
ロータリ除雪車	7	12	19
除雪ドーザ	8	1	9
小形除雪車	8	8	16
凍結防止剤散布車	3	3	6
計	52	40	92

3. 除雪機械劣化度の定量的評価手法の検討

3.1 ワイブル分布について

ワイブル分布は、スウェーデンの科学者ワイブルが材料強度の研究において、材料の破損確率を表す分布関数を提唱したものである。その後、別の科学者が真空管の寿命に関しても、この分布があてはまることを示した。ワイブル型累積ハザード解析は、この分布を用いた信頼性データ解析手法の一つである。

ワイブル分布には、次の3つのパラメータが使われる。

m : 形状パラメータ

η : 尺度パラメータ

γ : 位置パラメータ

m (形状パラメータ) の値によって、ワイブル分布の形状も変化し、 $0 < m < 1$ の場合は故障率減少型の初期故障、

$m=1$ の場合は故障率一定型の偶発故障、 $m > 1$ の場合は故障率増加型の摩耗劣化故障を表すこととなる。

η (尺度パラメータ) は、mの値に関係なく不信頼度 (累積故障確率) $F(t) = 1 - e^{-t}$ (約63.2%) となる観測値 t を基準化した際の寿命の尺度を表し、特性寿命ともいう。

γ (位置パラメータ) は、故障が始まる位置を表し、 $\gamma = 0$ ならば最初から故障が起こり始め、 $\gamma > 0$ は無故障期間があることを表すが、通常は $\gamma = 0$ と考える。

この解析専用にとりまられているワイブル確率紙やワイブル型累積ハザード紙、表計算ソフトウェアを使用することにより、3つのパラメータの推定ができる。また、上記の式に当てはめることにより、バスタブ曲線で表される故障の種類 (初期故障、偶発故障、摩耗劣化故障) の判定や特性寿命、信頼度などが算出できる。

3. 2 ワイブル型累積ハザード解析

抽出した除雪機械の重大故障箇所について、観測値を走行距離、稼働時間及び使用年数として、以下の内容でワイブル型累積ハザード解析を行った。

- ①2日以上作業停止となった重大故障データを使用した解析
- ②2日未満の作業停止も含めた全故障データを使用した解析

解析によって得られる形状、尺度パラメータを、信頼度の算出式に代入して信頼度曲線図を作成し、比較分析を行った。除雪トラックの車体に関わる重大故障箇所の代表

例を以下に示す。

始めに【エンジン：尿素システム】における重大故障及び全故障データの解析結果を図-2、3に示す。

解析結果は、重大故障及び全故障においてもm形状パラメータが1.6938、1.7587と1以上であることから、摩耗劣化故障であることを示している。

解析で得られたm形状パラメータ、 η 尺度パラメータと、 t 観測値（走行距離、稼働時間及び使用年数）を次式の信頼度算出式に代入することで、信頼度の算出が可能となる。

$$\text{信頼度 } R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right]$$

走行距離で、0～600,000km まで計算した信頼度曲線図を図-4に、0～200,000km までの範囲で拡大した曲線図を図-5に示す。

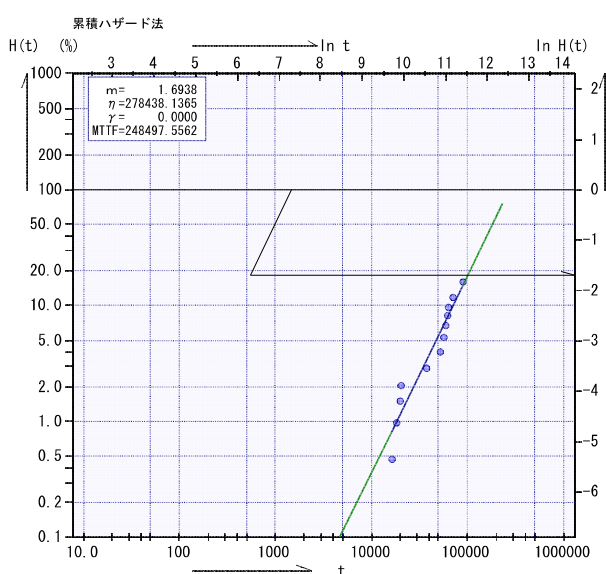


図-2 重大故障解析結果
【エンジン：尿素システム】

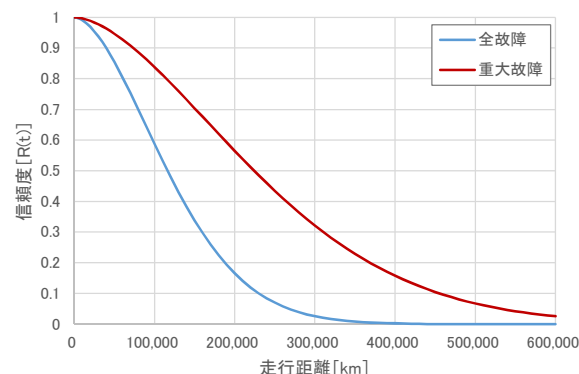


図-4 信頼度曲線図
【エンジン：尿素システム】

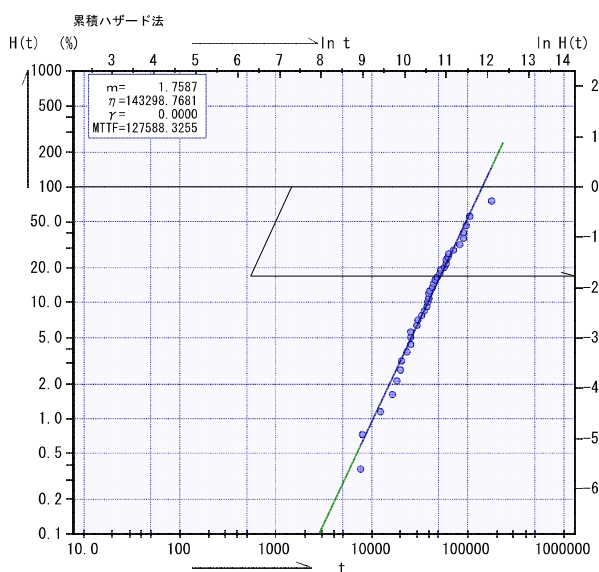


図-3 全故障解析結果
【エンジン：尿素システム】

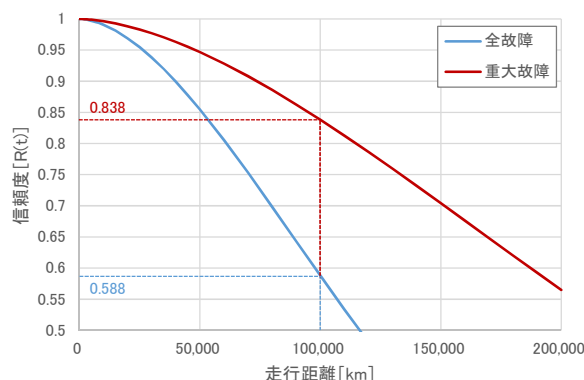


図-5 信頼度曲線図 (拡大図)
【エンジン：尿素システム】

図-4 に示している重大故障の曲線図は、走行距離 300,000km 付近まで概ね一定の傾きで低下し、以降は傾きが緩やかに経過する。

一方、全故障の曲線図は、走行距離 200,000km 付近まで一定に低下し、曲線の傾きは重大故障よりも大きい。その後、傾きは緩やかに経過し、走行距離 350,000km を超えたあたりで信頼度は、ほぼ 0 となる。

図-5 において、走行距離 100,000km を基準とした場合の信頼度を比較すると、全故障データの信頼度は 0.588、

重大故障データの信頼度は 0.838 である。これは、保有台数を 100 台と仮定した場合、走行距離 100,000km で約 41 台故障が発生し、そのうち約 16 台に重大故障が発生することを示している。つまり故障は比較的発生しやすいが、重大故障にまで至る確率は全故障に比べると低いことがわかる。

次に、【冷却装置：ファン】における重大故障及び全故障データの解析結果を図-6、7 に示す。重大故障、全故障ともに m 形状パラメータが 3.4309、3.2818 と 1 以上であることから、摩耗劣化故障を示している。

図-8 に示している信頼度曲線図は、重大故障、全故障ともに酷似した曲線を描いている。走行距離 50,000km 付近までは、信頼度の低下はほぼなく、走行距離 100,000km あたりから、低下する度合いが大きくなっている。

図-9 は走行距離 100,000km 付近の信頼度曲線図になるが、全故障の信頼度は 0.979、重大故障の信頼度は 0.987 であり、【エンジン：尿素システム】の信頼度と比較する

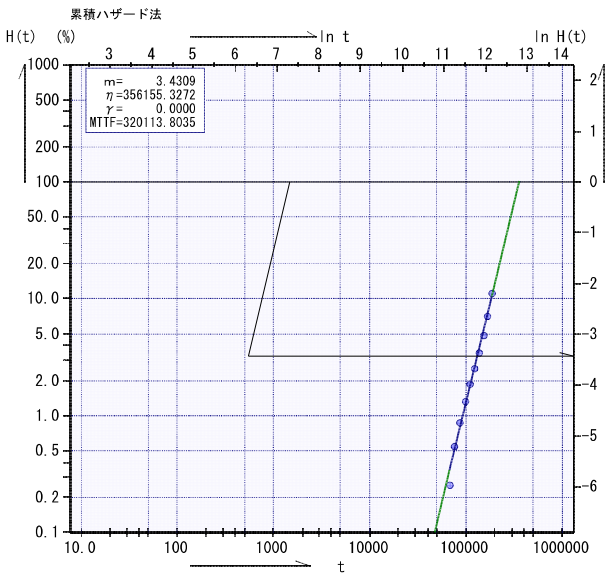


図-6 重大故障解析結果
【冷却装置：ファン】

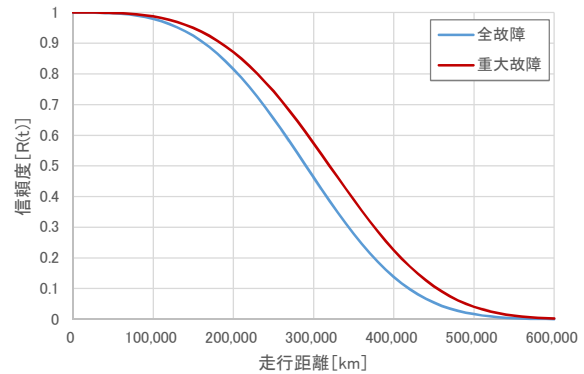


図-8 信頼度曲線図
【冷却装置：ファン】

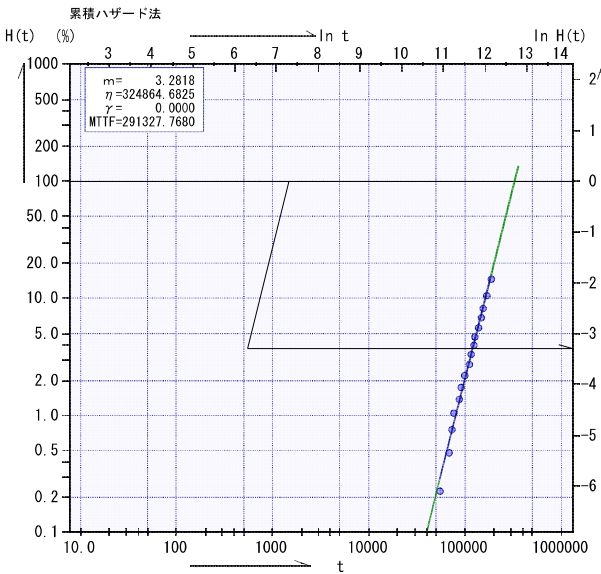


図-7 全大故障解析結果
【冷却装置：ファン】

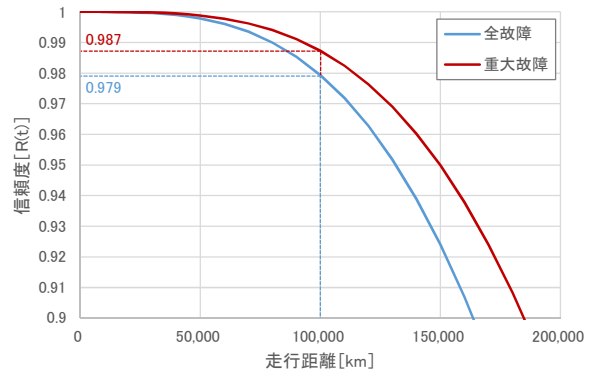


図-9 信頼度曲線図 (拡大図)
【冷却装置：ファン】

と高いことから、【冷却装置：ファン】は【エンジン：尿素システム】より故障しにくいことがわかる。一方、重大故障と全故障の信頼度の差が少ないことから、故障が発生した場合は重大故障に繋がりがやすい傾向といえる。

最後に、【燃料装置：インジェクション】における重大故障及び全故障データの解析結果を図-10、11に示す。m形状パラメータが重大故障で0.8863、全故障で1.1132と1前後であることから、偶発故障を示している。

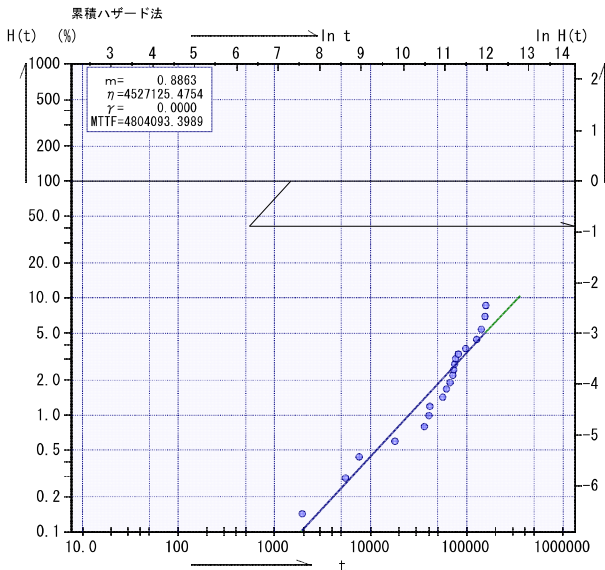


図-10 重大故障解析結果
【燃料装置：インジェクション】

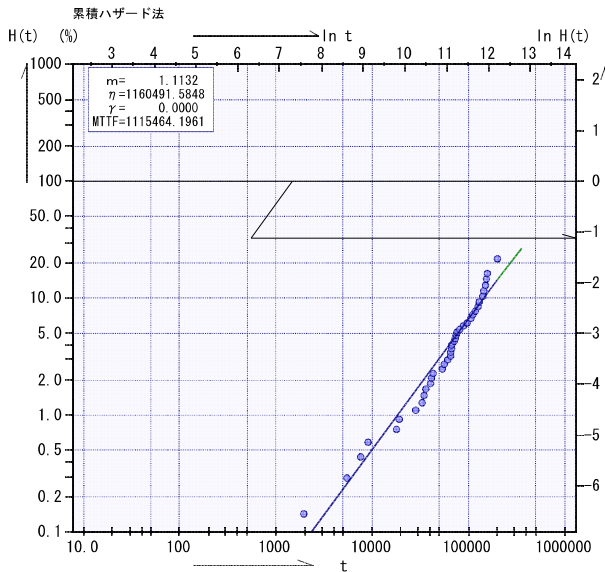


図-11 全故障解析結果
【燃料装置：インジェクション】

図-12に示した信頼度曲線図では、重大故障、全故障ともにほぼ直線で表現され、信頼度は緩やかに低下する傾向となっている。ただし、全故障の信頼度は、重大故障より早く低下し、それぞれの信頼度の差分は走行距離が増えるほど、大きくなる傾向となっている。

図-13は走行距離100,000kmを基準とした場合の信頼度曲線図になるが、全故障の信頼度は0.937、重大故障の信頼度は0.966であり、先の【冷却装置：ファン】と同様に【エンジン：尿素システム】より故障しにくいことがわかる。

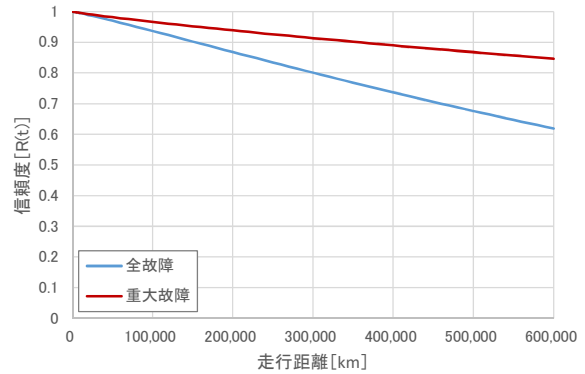


図-12 信頼度曲線図
【燃料装置：インジェクション】

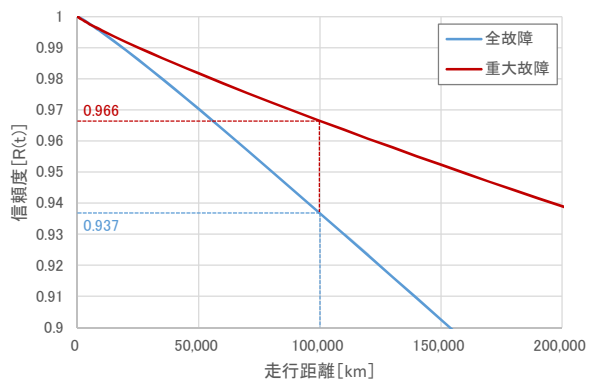


図-13 信頼度曲線図 (拡大図)
【燃料装置：インジェクション】

このようにワイブル型累積ハザード解析を行った結果、重大故障箇所における故障傾向は、表-3のとおりである。重大故障箇所92箇所のうち、全体の約9割が摩耗劣化故障であり、重大故障データを用いた解析では偶発故障は2箇所、初期故障は1箇所であった。

故障傾向混在は、観測値（走行距離、稼働時間及び使用年数）によって、故障傾向（初期故障、偶発故障及び摩耗劣化故障）が違う結果となったものである。重大故障データによる解析で8箇所、全故障データによる解析で5箇所が、混在する結果となった。

故障箇所混在となった【作業装置：計器】の全故障データにおける観測値毎の解析結果を図-14~16に示す。m形状パラメータは、走行距離及び稼働時間では1前後であることから偶発故障であり、使用年数では1.7659であることから摩耗劣化故障を示している。ただし、観測値が走行距離、稼働時間の解析結果において、プロットされた点群と、当てはめ線が合っていない状況がわかる。これは、最

小二乗法で当てはめ線を引いているため、赤丸点線で囲った点の影響を受けたと考えられる。

赤丸点線で囲った点の故障データを確認すると、施工記録装置に関する故障で新車更新後に発生した状況であった。作業装置の計器のうち、施工記録装置は、除雪機械を更新する際に旧車両から新車両に載せ替えするため、この故障データは旧車両で使用した機材を新車両に載せ替え後、故障した可能性が想定される。その場合、旧車両における使用時間が不明なため、記録されている使用時間は真の使用時間ではない可能性がある。

表-3 重大故障箇所92箇所における故障傾向

故障傾向	重大故障データ	全故障データ
摩耗劣化故障	81	86
偶発故障	2	1
初期故障	1	0
故障傾向混在	8	5
計	92	92

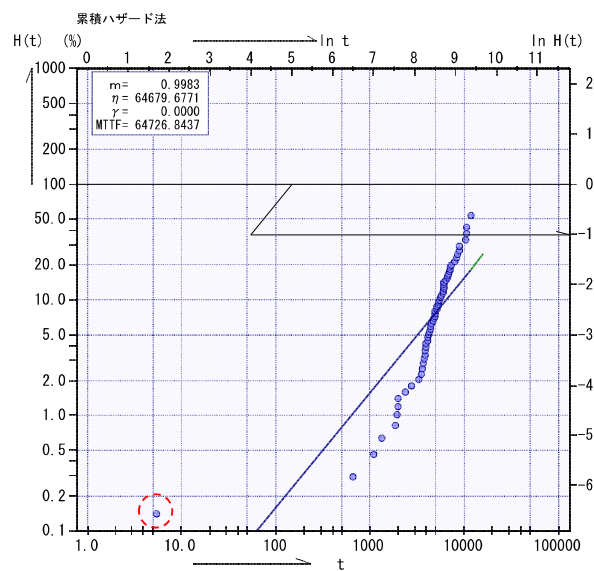


図-15 全故障解析結果（稼働時間）
【作業装置：計器】

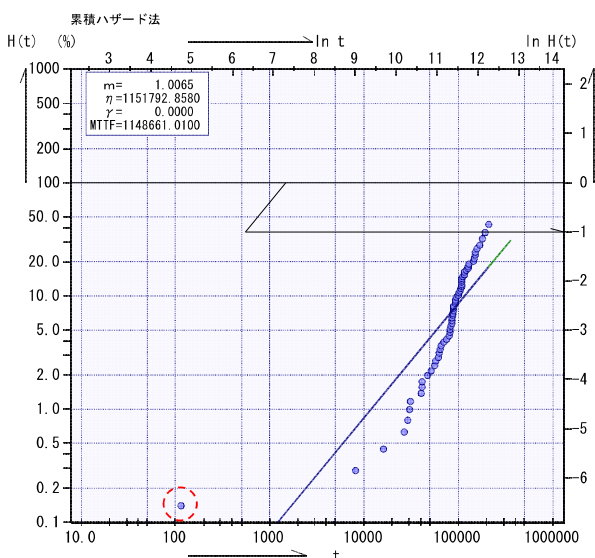


図-14 全故障解析結果（走行距離）
【作業装置：計器】

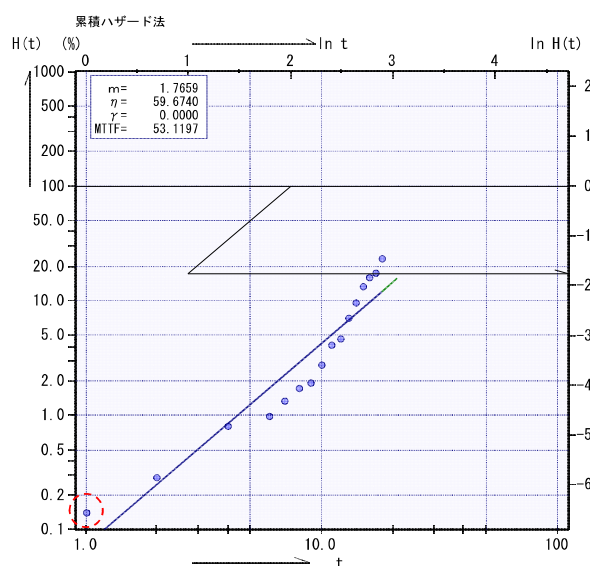


図-16 全故障解析結果（使用年数）
【作業装置：計器】

そこで、赤丸点線で囲った点を除外し、再度解析を行った。その結果を図-17~19に示す。結果、m形状パラメータは走行距離で2.0051、稼働時間で2.1903となり、摩耗劣化故障の評価となった。また当てはめ線についても、点群に対する当てはまりが良くなった。このことから、【作業装置：計器】の全故障データにおける解析結果は、本来は摩耗劣化故障と判断すべきと思われるが、除外した故障データが異常な観測値であることを示す、施工記録装置の載せ替えの有無に関する記録が不明なため、判断が難しい状況である。

他の故障傾向が混在した重大故障箇所も同様に原因の特定が難しい状況であるため、本研究では特異点を除外せ

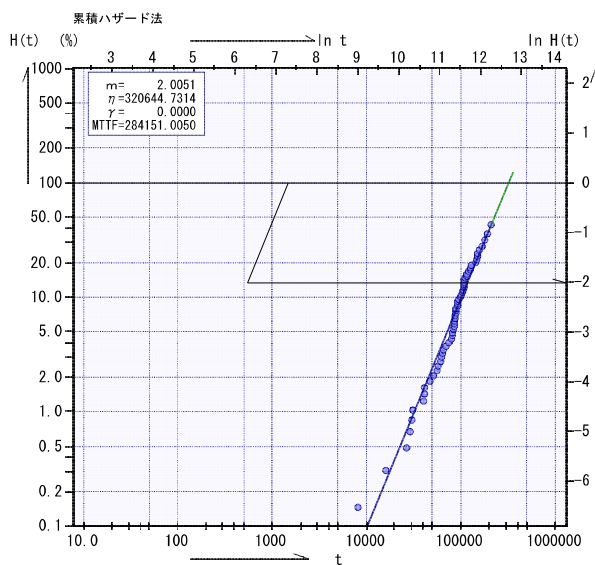


図-17 全故障再解析結果（走行距離）
【作業装置：計器】

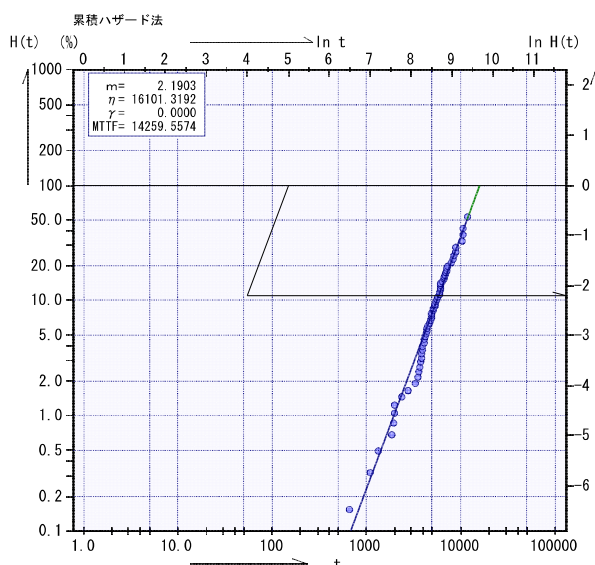


図-18 全故障再解析結果（稼働時間）
【作業装置：計器】

ず当初の解析結果により検討を続けた。

今後、重大故障箇所の故障データを蓄積することにより、故障傾向の混在はなくなり、一定の評価ができるようになるが、施工記録装置など載せ替えを行う装置に関する解析を行う際は、その装置の明確な使用時間などのデータが必要である。

3.3 FTAによる除雪機械本体の信頼度の算出

開発局の1開発建設部の過去3年分の稼働実績をもとに、FTAで機械本体の信頼度を算出し、除雪機械劣化度の定量的評価としての適用性を検討した。

除雪機械本体の信頼度を算出するにあたり、以下のように整理した。

除雪機械に重大故障箇所の故障が一切無い場合は除雪作業が可能で、一箇所でも故障が発生すると除雪作業が不可能となる。その状態を信頼性ブロック図で表現した場合、図-1で表されるFT図は図-20に示すような直列で繋がるブロック図となる。

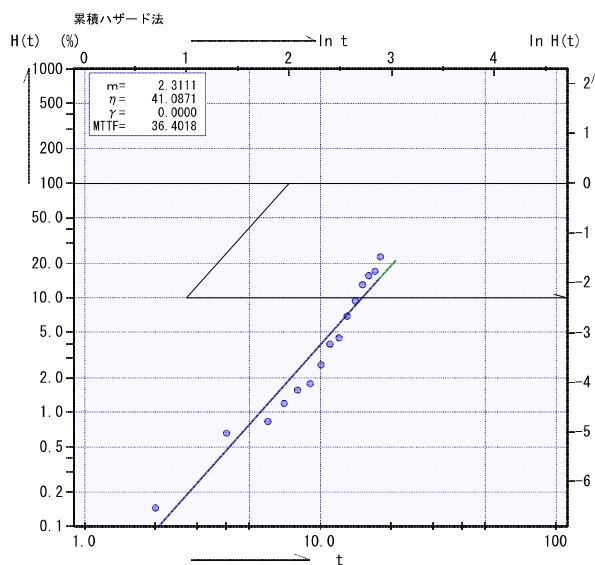
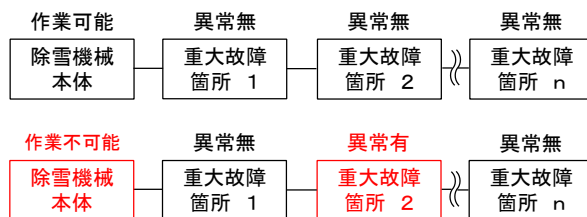


図-19 全故障再解析結果（使用年数）
【作業装置：計器】



$$\text{信頼度 } R_s(t) = \text{信頼度 } R_1(t) \times \text{信頼度 } R_2(t) \times \dots \times \text{信頼度 } R_n(t)$$

図-20 信頼性ブロック図

直列で繋がるブロック図における除雪機械本体の信頼度 $R_s(t)$ は、各重大故障箇所 $R_i(t)$ の積で表現でき、次式のように表すことができる。

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) = R_1(t) \cdots R_n(t)$$

よって、除雪トラック本体の信頼度を算出する際は、重大故障箇所が 37 箇所あるため、 $n=37$ となる。ただし、重大故障箇所のうち、【エンジン：尿素システム】、【S装置：油圧調整管及びその他】、【散布装置：スクリュコンベア及びその他】は、購入年度や仕様の違いによって、車両の装備や除雪装置の有無に差異がある。そのため、除雪機械本体の信頼度を算出する際に、重大故障箇所に関する装備・装置が存在しない場合は、信頼度が低下しないものとし、常に 1 で計算した。

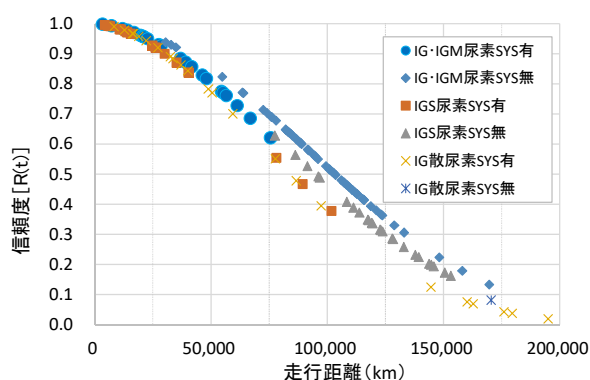


図-21 除雪トラック本体の信頼度算出結果

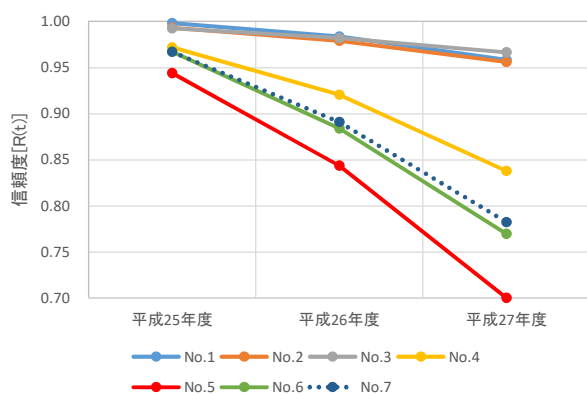


図-22 3年間の走行距離による本体の信頼度比較結果

除雪トラック以外の除雪機械についても同様の整理で、本体の信頼度を算出した。

除雪トラック本体の信頼度を算出した結果を図-21に示す。車両装備・除雪装置の有無によって多少の違いはあるが、図-4や図-8に示した信頼度曲線図に類似した曲線を描いて信頼度が低下するのがわかる。

除雪トラック本体の信頼度は、走行距離 100,000km で 0.4~0.5、150,000km で 0.1~0.2 まで低下し、200,000km で 0 に近くなるのがわかった。

平成 25 年度に更新された 7 台の車両を対象に、平成 27 年度までの 3 年間の走行距離で本体の信頼度を算出し、比較した結果を図-22に示す。

年間当たりの走行距離が 7,000km 程度の No. 1~3 の信頼度は、稼働 1 年目で 1 付近、3 年目でも 0.95 以上と高い状態を維持している。

一方、年間当たりの走行距離が 20,000km 程度である No. 5 は、稼働 1 年目で 0.95 を下回り、3 年目で 0.7 まで信頼度が低下している。更新後 1 年目では、稼働実績が 13,000km 程度の違いによる信頼度の差は比較しにくいだが、3 年目になると明確に差がでた。このことから、除雪機械本体の信頼度は、点検整備時の適正時期や、機種による優先順位を判断する指標として、有効であると考えられる。

3. 4 故障データの収集に関する検討

「ワイブル型累積ハザード解析」に基づく「信頼度の算出手法」の手順を踏まえ、令和元年度は、除雪機械劣化度の定量的評価手法構築に向け、収集のために必要な故障データの内容や項目を抽出・整理した。その上で、既存の故障報告書などを参考に、解析の精度向上や実施しやすさ、記入担当者の負担を考慮した故障データの収集様式についても検討した。

3. 4. 1 故障データの内容・項目の整理

「ワイブル型累積ハザード解析」に基づく「信頼度の算出手法」の手順は、故障データを基に「手順 1：解析対象データの整理」を行い、整理した解析対象データを用いて、「手順 2：解析対象故障箇所の抽出」として、「重大故障」箇所を抽出している。その上で、解析対象故障箇所について、解析対象データを基に「ワイブル型累積ハザード解析」の解析用データを作成し、「手順 3：ワイブル型累積ハザード解析による各箇所の信頼度算定式の導出」を実施している。さらに、解析結果の「形状パラメータ：m」の値等により、各解析対象故障箇所の故障傾向を確認し、「信頼度による除雪機械劣化度の定量的評価」の対象とする故障箇所（摩耗劣化故障の傾向を示す故障箇所）の絞り込みを行っている。

上記の手順に示す「ワイブル型累積ハザード解析」の解析用データの作成にあたっては、故障報告データから「どの機械の、どのような稼働実績の時（累積稼働時間、累積走行距離）に、どの箇所で、不稼働日数2日以上の重大故障が発生したか」を把握する必要がある。よって、故障データには、下記のデータ項目の記録が必須である。

【故障データの必須項目】

- 必須項目①：故障発生機械の特定（管理番号・種類）
- 必須項目②：故障発生時点の累積稼働時間、累積走行距離
- 必須項目③：故障発生箇所の分類（大分類・小分類）
- 必須項目④：故障による不稼働日数（重大故障の判定）

また、現在「手順1：解析対象データの整理」においては、以下、5点を別途実施している。

- 1) 故障発生時の累積稼働時間、累積走行距離の付与（故障発生時点の累積稼働時間、累積走行距離が記載されていないデータに別途機械を管理しているシステムや帳票から累積稼働時間、累積走行距離を付与）
- 2) 故障箇所の分類の設定（既存故障報告書に自由記述で記載されている「不具合・故障状況」を基に故障箇所の分類を設定）
- 3) 複数箇所の故障が混在するデータの分割（故障データの1データに複数の箇所の故障が含まれている場合に当該箇所毎に故障データを分割）
- 4) 稼働実績不明の機械の故障データの除外（記載ミス等により、実在しない機械管理番号等のデータがあり、これを除外）
- 5) 外的要因による損傷である故障データの除外（障害物に接触して機械が損傷した場合など、外的要因によって損傷したデータを除外）

さらに、実際の除雪機械は、故障箇所によっては、過去に整備が行われている場合があり、その場合、当該箇所に対する稼働状況がその時点の累積稼働実績（稼働時間、走行距離）に相当しないため、箇所毎の故障時点の稼働実績に基づくワイブル型累積ハザード解析を正確に実施することができない。

これらを踏まえて、解析の精度向上や解析のやりやすさ、記入担当者の負担軽減や記載ミスの排除等を考慮し、故障データの収集様式作成における配慮・工夫すべき点を以下のとおり整理した。

【様式作成時に配慮・工夫すべき点】

- 配慮① 「必須項目②：故障発生時点の累積稼働時間、累積走行距離」は、機械全体の稼働実績だけでなく、「故障発生箇所の修理・整備後の累積稼働時間、累積走行距離」も報告してもらうことが望ましい。

配慮② 「必須項目③：故障発生箇所の分類（大分類・小分類）」は、報告者による書き方・表現の違いが生じないように、「大分類・小分類」の選択肢をあらかじめ設定しておく必要がある。

配慮③ 「必須項目③：故障発生箇所の分類（大分類・小分類）」を精査できるようにするため、これまでの故障報告データのように、具体的な故障内容も記載しておいてもらう必要がある。

配慮④ 一度の故障により、派生的に複数の箇所が故障し、重大な故障が発生する場合があるため、各故障の根本的な要因となった故障箇所（重大故障の要因）を記載してもらう必要がある。

配慮⑤ 人為的な記載ミスを極力排除し、記入担当者の負担を軽減するため、入力規制（存在しない機械管理番号は入力不可など）や自動入力（機械管理番号の入力による除雪機械の種類の自動入力など）等の機能をもたせる必要がある。

配慮⑥ 外的な要因による故障を解析対象から除外できるように、故障原因の分類（経年劣化、外的要因など）を記載してもらう必要がある。

配慮⑦ 「ワイブル型累積ハザード解析」の対象とする除雪機械の種類や故障発生箇所などを指定して、解析用データを自動加工できるとよい。

また、故障データ収集を適切かつ確実に進めていくためには、下記の点にも留意する必要がある。

【故障データ収集時の留意事項】

留意① 重要データである「必須項目②：故障発生時点の累積稼働時間、累積走行距離」などを確実に記載してもらうように運用する必要がある。

留意② 「配慮①」のように、より正確に各除雪機械の劣化度評価実施のためには、「故障発生箇所の修理・整備後の累積稼働時間、累積走行距離」を把握する必要があるため、各除雪機械の箇所毎に、整備・修理履歴（稼働実績がどの程度の時に整備・修理を行ったか）を継続的に整理しておく必要がある。

3. 4. 2 故障データの収集様式の作成

「故障報告データの必須データ項目」及び「様式作成時に配慮・工夫すべき点」を踏まえて、現状の故障報告データの様式を基に項目の追加や変更、記載時の工夫等を行って、故障データの収集様式(案)をExcelファイルにて作成した。(表-4、5)

機械番号等の基礎情報【項目1~6】は、機械を特定するための情報を記載する。建設機械番号【項目3】、建設機械種別【項目4】は、必須情報であるが、これまでの故障報告データでは、存在しない「機械管理番号」の入力や、「機械管理番号」と「機械の種類」が一致していないなど、人為的な記載ミスが散見された。このような人為的なミスを極力排除するため、本様式では、「機械管理番号の入力規制(存在しない番号は入力不可)」及び「機械種別や購入年度等の自動入力」の機能をもたせた。なお、「機械種別や購入年度等の自動入力」は、除雪機械の履歴等のデータ(機械管理番号毎の機械種別や購入年度当該年度時点での使用年数、前年度末時点の稼働実績等)をExcelファイルの別シートにセットし、その一覧を参照することで、記入担当者が入力した機械管理番号から自動的に機械種別等を入力できるようにした。

不具合発生時の稼働実績などの不具合発生時点情報【項目7~19】は、機械全体の稼働実績【項目9,10】が必須情報であり、確実に間違えることなく入力する必要があるため、入力を数字のみ、かつ前年度末の稼働実績より大きい数字などに規制し、当該機械の経過年数【項目8】は、入

力する不具合発生日【項目7】と自動入力された購入年度【項目6】から自動計算している。

さらに、解析精度向上のためには、不具合発生箇所過去の修理・整備以降の稼働実績が必要なため、故障発生箇所の整備・修理履歴の有無【項目11】、履歴がある場合の整備・修理を実施した年月【項目12】、履歴がある場合の整備・修理の内容【項目13】や整備・修理を実施した時点の累積稼働時間・累積走行距離【項目15,16】も入力するようにした。

不具合発生箇所などの不具合情報【項目20~27】は、不具合発生箇所(分類)【項目20,21】が必須情報のため、報告者による書き方・表現の違いが生じないように「建設機械整備 標準作業工数表(除雪機械編)」¹⁾に従って、分類1,2を入力し、不具合発生箇所(分類)の精査を行えるよう、これまでの故障報告データと同様に、具体的な故障内容も記載するようにしている【項目22】。さらに、複数の箇所が故障している場合の対応として、各故障の根本的な要因となった故障箇所(重大故障の要因)【項目23】、外的要因等による故障を除くための発生要因種別(経年劣化/外的要因/その他の3択)【項目24】、重大故障を判断するための不稼働期間【項目25】等を入力するようにしている。

さらに、故障報告データから「ワイブル型累積ハザード解析」の解析用データを容易に作成できるようにするため、指定した解析対象の「除雪機械の種類・故障発生箇所・故障のレベル(重大故障のみ/全ての故障)」に従って、解析

表-4 故障収集様式(案)(項目1~14)

項目1	項目2	項目3	項目4	項目5	項目6	項目7	項目8	項目9	項目10	項目11	項目12	項目13	項目14			
基礎情報				不具合発生時点情報												
地整名 ※地整番号	区分	建設機械番号	建設機械種別		購入年度	不具合発生日	不具合発生時経過年数(年目)	機械全体の稼働実績				不具合発生箇所の前回の整備・修理以降の稼働実績				
			種別	備考				累積稼働時間(h)	【参考値】前年度末の累積稼働時間(h)	累積走行距離(km)	【参考値】前年度末の累積走行距離(km)	故障発生箇所の整備・修理履歴	前回の整備・修理を実施した年月	前回の整備・修理の内容	前回の整備時の経過年数(年目)	
項目説明	地整番号、開発局は81	保護台帳の区分 除雪機械は「車道用、歩道用、散布用」	xx(購入年度)-xxxx (年度毎のユニーク番号)	除雪トラック、除雪グレーダ、除雪ドーザ、ロータリ除雪車、小形除雪車、凍結防止剤散布車	ロータリ装置の「多機能型」、小形除雪車の「単列装置付」などの機械の特殊な仕様・装備に関する記載欄	既存様式は昭和換算、今後は西暦	故障等の不具合の発生日	不具合が発生した年度での当該機械の使用年数	当該機械の故障発生時点の稼働時間	当該機械の故障発生時点の稼働時間の参考値(この値を下回ることはない)	当該機械の故障発生時点の走行距離	当該機械の故障発生時点の走行距離の参考値(この値を下回ることはない)	不具合発生箇所(小分類)の過去の整備・修理履歴の有無	過去の整備・修理履歴がある場合の整備・修理の実施年月	過去の整備・修理履歴がある場合の整備・修理の内容	過去の整備・修理履歴がある場合の整備・修理をした時点の当該機械の使用年数
配慮・工夫した点	81で共通のため、81を事前入力	建設機械名から自動入力 ・歩道用：小形除雪車 ・散布用：凍結防止剤散布車 ・車道用：上記以外	その時点で稼働している機械の管理番号(シート「除雪機械データ」)のみに入力規制	その時点で稼働している機械の管理番号からの自動入力(管理番号ごとの諸データの参照)より参照)	(参考情報のため、入力規制は無く、文章で記載)	日付のみに入力規制	西暦表記となるように書式を設定 20xx/xx/xx	不具合発生日と購入年度からの自動計算	(当該機械から故障発生時点の稼働時間・走行距離を確認して数値を入力) (参考値として、前年度末の稼働実績を管理番号ごとの諸データの参照シート「除雪機械データ」より自動入力) (故障発生時点の累積稼働時間・走行距離は、前年度末の稼働実績以上の数値に自動入力)	有/無の2択による入力規制	西暦表記の年月となるように書式を設定 20xx/xx	(参考情報のため、入力規制は無く、文章で記載)	前回の整備・修理月と購入年度からの自動計算			

表-5 故障収集様式 (案) (項目15~27)

	項目15	項目16	項目17	項目18	項目19	項目20	項目21	項目22	項目23	項目24	項目25	項目26	項目27
	不具合発生時点情報					不具合発生箇所(分類)			不具合情報				
	不具合発生箇所の前回の整備・修理以降の稼働実績					不具合発生箇所(分類)			不具合の発生状況・影響など				
項目説明	前回の整備・修理時の稼働時間(h)	前回の整備・修理時の走行距離(km)	整備・修理から故障発生までの経過年数(年目)	整備・修理から故障発生までの稼働時間(h)	整備・修理から故障発生までの走行距離(km)	分類1	分類2	具体的な不具合の故障箇所(主要因となっている不具合箇所)	不具合の発生要因・状況	発生要因種別(経年劣化/外的要因/その他)	不稼働期間(日)	修理費用(千円)	利用者・事業者等への影響度
項目説明	過去の整備・修理履歴がある場合の整備・修理をした時点の当該機械の稼働時間	過去の整備・修理履歴がある場合の整備・修理をした時点の当該機械の走行距離	過去の整備・修理履歴がある場合の整備・修理から今回の故障発生までの使用年数	過去の整備・修理履歴がある場合の整備・修理から今回の故障発生までの稼働時間	過去の整備・修理履歴がある場合の整備・修理から今回の故障発生までの走行距離	故障発生箇所の分類(1, 2) 「建設機械整備 標準作業工数表(除雪機械編)」の装置区分(分類1)、作業項目(分類2)に合わせて入力 分類1はコード番号(装置区分)、分類2は作業番号(作業項目)		不具合が発生している箇所の詳細な情報 複数の箇所での不具合が発生している場合は、主要因となった箇所を記載	不具合が発生した要因・不具合の内容・状況	不具合の発生要因が「障害物への接触」、「ロータリ装置への異物巻き込み」等の外的な要因によるものか、機械を使用してきたことによる劣化か、部品の初期不良等の突発的なその他の要因かを種別で選択	不具合により、当該機械が使用できなかった日数	不具合の未里にかかった費用	不具合により発生した除排雪作業等への影響
配慮・工夫した点	前回の整備・修理の情報から当時の稼働時間・走行距離を確認して数値を入力 今回の故障発生時点の稼働実績以下の数値に入力規制		故障発生時の機械全体と前回整備・修理時の経過年数・稼働時間・走行距離からの自動計算		故障箇所の分類を「建設機械整備 標準作業工数表(除雪機械編)」に従って入力 分類1は、機械種別毎の装置区分のコード番号を入力(シート「不具合発生箇所の分類」により入力規制)すれば、コード番号に従って装置区分を自動入力 分類2は、作業番号(4桁番号に入力規制)を入力し、当該番号の作業項目も入力		(参考情報のため、入力規制は無く、文章で記載)	(入力規制は無く、文章で記載)	経年劣化/外的要因/その他の3択による入力規制	日数の数字のみの入力規制	数字のみの入力規制	(入力規制は無く、文章で記載)	

用データを自動作成するマクロを作成した。

3. 4. 3 故障データ収集の運用方法の検討

故障データ収集の運用について、開発局の組織を例に整理した。

故障収集様式(案)により、適切な故障データを収集していくためには、除雪機械の運用・維持管理を行っている現場事務所(各開発建設部道路事務所)等において、本様式に必要な事項を確実に入力して報告してもらう必要がある。しかし、現場事務所の担当者が故障報告を行う必要がある時は、除雪機械に故障が発生した時であり、特に不稼働日数2日以上での重大故障が発生している場合には、不稼働になったことへの対応などにより、繁忙な状況に陥っている可能性がある。故障報告データの作成は、他の対応により時間がない中に合間を縫って行うことが想定され、適切に対応を行えない場合も予想される。一方で、除雪機械の故障に対しては、整備業者が修理を行うことになり、修理実施にあたっては、整備業者から現場事務所の担当者に、詳細な修理の内容等が報告される。

上記を踏まえ、作業の効率化を図るため、故障報告データを整備業者に作成してもらい、修理実施時の整備業者から現場事務所の担当者への報告書類の1つに組み込むことが有効と考えられる。

さらに、①「整備業者が故障報告の内容(故障報告データの様式の記載事項)を入力」②「その内容を現場事務所の担当者がシステム上で確認・承認」③「その結果をそのまま開発局の開発建設部や本局に報告」をシステム化する

ことで、①~③の一連の流れが連動し、より効率的且つ確実にデータ収集を行うことができる。

また、機械毎に定期的な整備の実施箇所や故障後の修理箇所などの履歴を把握・整理しておくためには、それらの情報の一元管理が重要である。作成した故障収集様式(案)では、故障発生箇所(部位)を「建設機械整備 標準作業工数表(除雪機械編)」¹⁾のコード表に従って入力するため、各機械の修理の履歴とも連携することができる。故障報告をシステム化し、各機械の整備履歴も同システムに登録(実施年月、実施時の稼働実績、「建設機械整備 標準作業工数表(除雪機械編)」¹⁾のコード表に従った整備内容を登録)するようにすれば、修理と整備の実施箇所・タイミングの履歴を一元的に管理することができ、各箇所における整備・修理後の稼働実績を適切に把握可能となる。

今後、平成30年度までに収集した故障データを本様式【案】で整理し、実際の整備・修理データと比較する等、システム化も含め故障収集様式(案)の検証をしていきたい。

4. 除雪機械重要構成部品の劣化度診断手法の検討

除雪機械重要構成部品である除雪トラックメインフレームの劣化度診断手法の構築に向け、残留応力を磁場強度の変化で検出する自己磁場測定型残留応力検出機(以下、「検出機」という。)を用いた診断について検討した。

4.1 検出機の検知能力の把握

検討に先立ち、検出機の基本的な検知能力を把握するため簡単な検出予備実験を行った。

検出機(図-23)は、磁場を測定しており、資材の自己磁場の乱れにより不良箇所(引張、圧縮、腐食等)を確認できる仕組みとなっている。主な仕様を表-6に示す。まず、その現象を確認するため、鋼材の下に磁石を設置(図-24)し、検出機により磁場強度と変化量について確認した。磁石接地面座標上の同一位置において、X方向(表面に平行な方向の強度)とZ方向(表面に対し鉛直な方向の強度)で、磁場強度が異なることが分かった。(図-25、26)

4.2 試験片を用いた基礎データ取得及び考察

メインフレームに使用されている鋼材などを用い荷重を加えた試験片を作成し、検出機で残留磁場等を計測して基礎データを取得するとともに、測定値と荷重との関係性についても分析を行った。

令和2年度は、基礎データを補完するため追加した試験片の試験と、1年後の磁場強度の変化を把握するため各試験片について再度計測を行った。

令和3年度は、令和2年度までに作成したすべての試験片を計測し経年変化等について確認した。

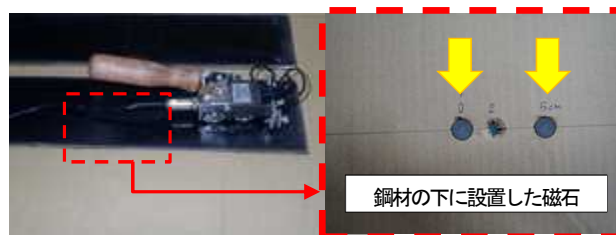


表-6 自己磁場測定型残留応力検出機的主要仕様

自己磁場測定型残留応力検出機 (ENERGODIAGNOSTIKA社 TSC-3M-12)	
センサーチャンネル数	2~12
マイクロプロセッサ	16ビット
RAMディスク容量	32Mb
フラッシュメモリ容量	1Mb
キーボード	45キー
表示部	80×60mm液晶
サイズ	230×105×40mm
重量	600g
電源	1.2V×4(DC9V)
測定磁場強度(Hp)	±2,000A/m
磁場強度測定誤差	5%
最小/最大 スキャンニングステップ	1mm / 128mm
最大スキャンニングスピード (1mmステップ)	0.5m/s
動作環境温度	-15℃~+55℃

図-24 検出予備実験状況

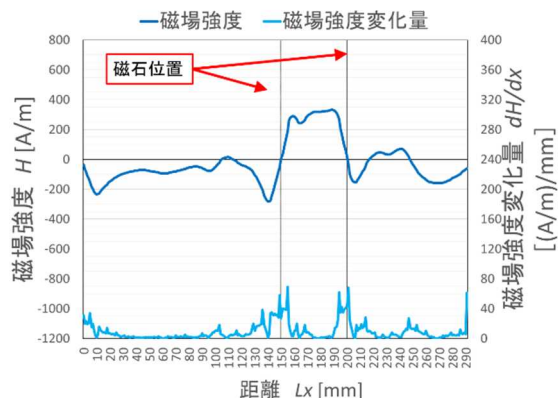


図-25 磁場強度と変化量(X方向(表面))



図-23 自己磁場測定型残留応力検出機

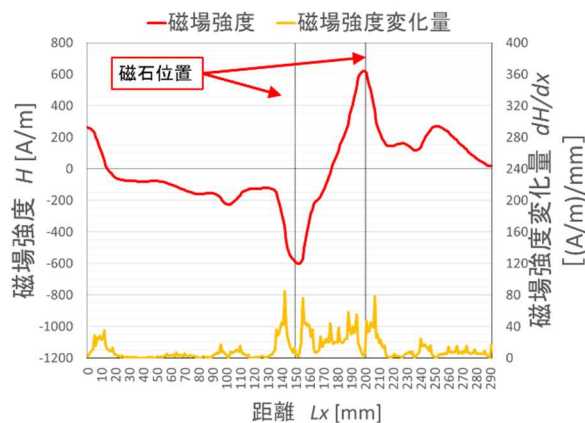


図-26 磁場強度と変化量(Z方向(深さ))

(1) 検証用試験片の作成

JIS に準拠した引張試験と曲げ疲労試験（以下、「曲げ試験」という。）を行った。各試験毎、図-27、28 に示すとおり試験片を作成した。材質は除雪トラックのメインフレーム鋼材（以下、「メインフレーム」という。）と比較用に一般構造用圧延鋼材 SS400（以下、「SS400」という。）の2種類を用いた。

[a] 引張試験により作成した試験片

破断に至るまでの過程を段階的に検証するため、破断まで試験を実施、その結果（図-29）より伸び量（8,12,16,20,24,28mm）の異なる6種類（図-30）を作成した。令和2年度は令和元年度の結果を踏まえ破断前の伸び量を補完するため14,18mmと破断の3種類を作成した。

[b] 曲げ試験により作成した試験片

引張試験と同様に破断まで段階的に検証するため、繰り返し荷重を660MPaに設定し、破断までの連続実験を行ったところ（図-31）、約120,000回で破断した。その結果から、繰り返し回数、40,000回、65,000回、90,000回、100,000回、破断時の5種類の試験片を作成した（図-32）。令和2年度は過年度の結果を踏まえ破断前の繰り返し回数を補完するため80,000回、95,000回と破断の3種類を作成した。

(2) 試験片による測定

[a] 試験片の測定範囲

引張試験の測定範囲：試験片の中央付近(161mm)から±44mmとした（図-27）。

曲げ試験の測定範囲：試験片の中央付近(荷重点)±30mmの内±20mmとした（図-28）。

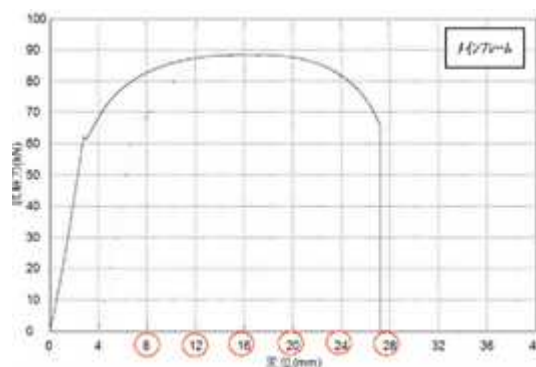


図-29 引張試験結果
(荷重-ひずみ/メインフレーム)

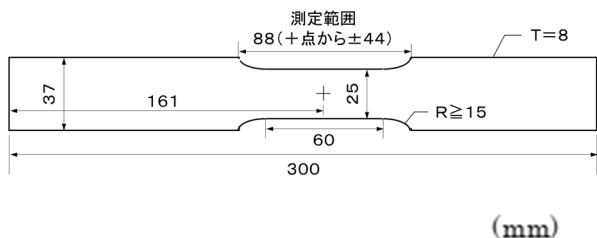


図-27 試験前の試験片寸法（引張試験）

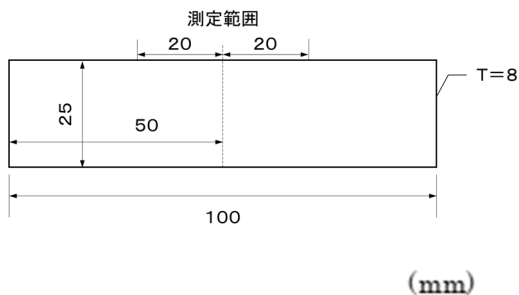


図-28 試験前の試験片寸法（曲げ試験）

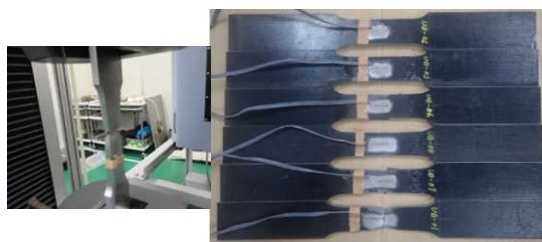


図-30 試験片（引張試験）



図-31 荷重点（曲げ試験）

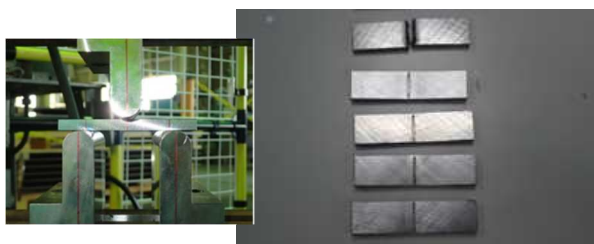


図-32 試験片（曲げ試験）

[b] 測定結果の解析指標

測定結果の解析指標を以下のとおり設定した。

○磁場強度

1mm 単位の測定値（生値）とした。

○磁場強度の解析指標

回帰分析から得られる回帰式の傾き a 、回帰式まわりのばらつき（標準偏差） σ 及び相関係数の絶対値 $|r|$ の3つとした。

○磁場強度変化量（以下、「変化量」という。）

変化量 = $\sqrt{\{(\text{磁場強度})^2 - (\text{直前の磁場強度})^2\}}$
算出した各地点の変化量を 5mm ピッチで移動平均とした。

○変化量の解析指標

区間平均値と標準偏差とした。

区間平均は、測定範囲の変化量の平均値とした。

標準偏差は、同一区間のデータの標準偏差を示す値として、本測定のために定義した。

[c] 引張試験の測定及び分析

メインフレーム・SS400 共に数値の大小はあるが、解析結果において以下の通りの傾向を示した。

○磁場強度

・Z 方向の変化は、引張前（無荷重）では特段の規則性は認められないが、荷重が加わると何れの相関係数も 1 に近くなるなど直線性を示した。メインフレームの例を図-33~36、表-7 に示す。

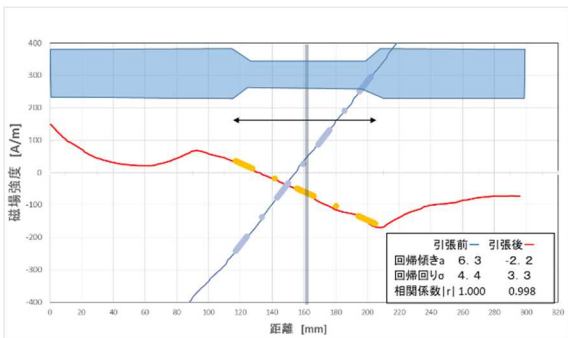


図-33 磁場強度Z方向（引張/伸び8mm）

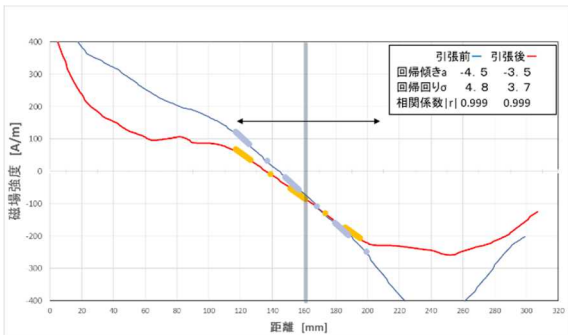


図-34 磁場強度Z方向（引張/伸び16mm）

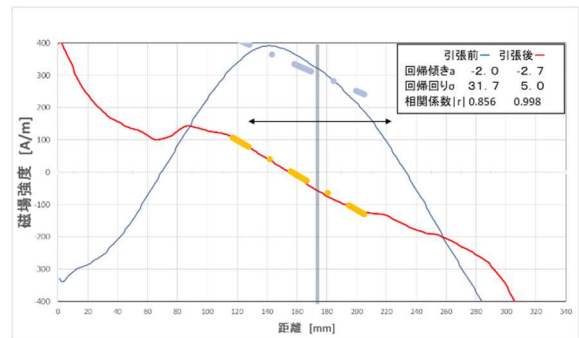


図-35 磁場強度Z方向（引張/伸び20mm）

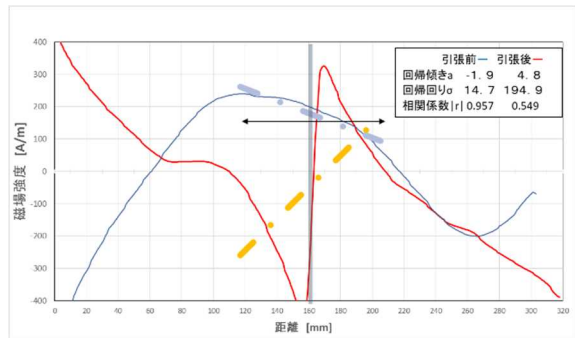


図-36 磁場強度Z方向（引張/破断）

表-7 磁場強度Z方向の測定分析結果

メインフレーム	検出器による測定間隔(伸び量mm)					破断時 約67KN	
	8mm 約83KN	12mm 約87KN	16mm 約88KN	20mm 約87KN	24mm 約82KN		
回帰式の傾きa	-2.2	-1.9	-3.5	-2.7	-3.2	4.8	
回帰ばらつきσ	3.3	7.3	3.7	5	7.1	194.9	
相関係数 r	0.998	0.989	0.999	0.998	0.996	0.549	
引張前	a	6.3	0.6	-4.5	-2	-3.3	-1.9
	σ	4.4	39.1	4.8	31.7	32.2	14.7
	r	1	0.358	0.999	0.856	0.935	0.957

○変化量

・Z方向の変化は、破断まで区間平均、標準偏差($\sigma < 0.8$)とも一様な傾向を示したが、破断時には激しく変動した。さらに、本試験での破断前の伸び

量(24mm)の時には標準偏差がわずかではあるが大きくなる傾向を示した。メインフレームの例を図-37~42、表-8に示す。

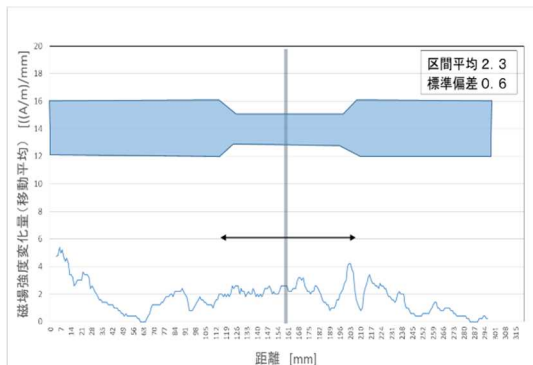


図-37 磁場強度変化量Z方向(引張/伸び8mm)

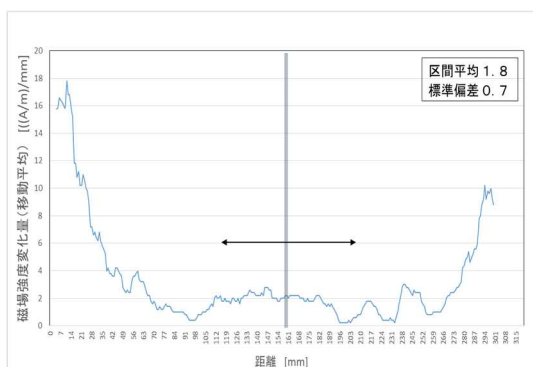


図-38 磁場強度変化量Z方向(引張/伸び12mm)

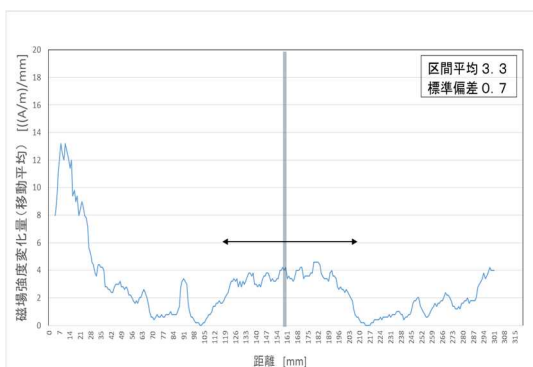


図-39 磁場強度変化量Z方向(引張/伸び16mm)

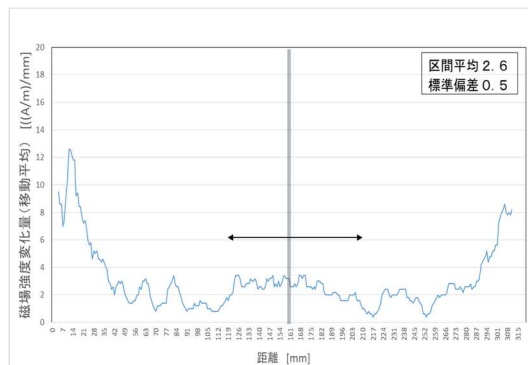


図-40 磁場強度変化量Z方向(引張/伸び20mm)

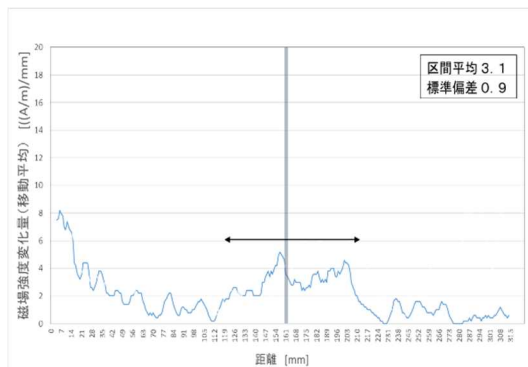


図-41 磁場強度変化量Z方向(引張/伸び24mm)

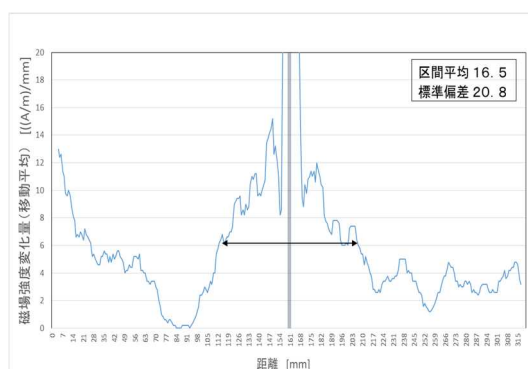


図-42 磁場強度変化量Z方向(引張/破断)

表-8 磁場強度変化量Z方向の測定分析結果

メインフレーム	検出器による測定間隔(伸び量mm)					
	8mm	12mm	16mm	20mm	24mm	破断時
区間平均	約83KN	約87KN	約88KN	約87KN	約82KN	約67KN
標準偏差	2.3	1.8	3.3	2.6	3.1	16.5
	0.6	0.7	0.7	0.5	0.9	20.8

[d] 曲げ試験の測定及び分析

曲げ試験も、メインフレーム・SS400 共に数値の大小はあるが、解析結果において以下のとおりの傾向を示した。

○磁場強度

曲げ試験の金属疲労による、解析区間の磁場強度には、有意な差は見られなかった。

○変化量：

X 方向の変化は、曲げ試験を行った全ての試験片で解析区間の中央付近でわずかながら磁気強度が強い箇所（盛り上がり変化）が見られた（図-43）。

Z 方向の変化は、破断時に最大値等の増加が見られるが、それ以外は、ほとんど変化がなかった（図-44）。

(3) 検出機の測定値の傾向

○引張試験

・磁場強度、変化量

- ① 破断箇所の判定（波形による特定）が可能なことを確認。（破断状態の箇所で、大きな変化が生じる）
- ② 材料の種類により破断時の測定値の大きさが異なることを把握。

・変化量（メインフレームが顕著）

- ③ 破断時、Z 方向の区間平均は大きく変化。
- ④ 破断に近づくほど、Z 方向の標準偏差は増加。

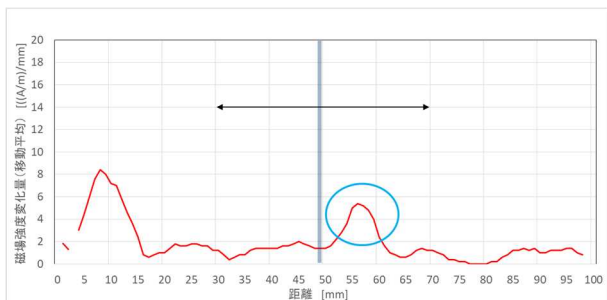


図-43 磁場強度変化量Z方向
(曲げ/6500回)

○曲げ試験

・磁場強度、変化量

- ① 破断状態の箇所で、溝等があれば大きな変化が生じるが、そうでない場合は、破断箇所の判定（波形による特定）が難しいことを確認。
- ② メインフレームの裏表（厚さ8mm）で、荷重特性（引張と圧縮）が異なるが、磁場強度は、ピーク位置が若干異なるが大きな変化は見られなかった。

・変化量（メインフレームが顕著）（表-9）

- ③ 破断時、Z 方向の区間平均は大きく変化。
- ④ 破断時、Z 方向の標準偏差は増加。

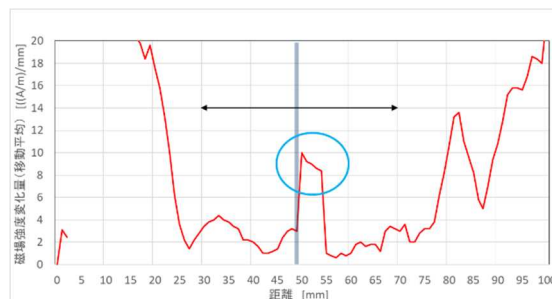


図-44 磁場強度変化量Z方向
(曲げ/破断)

表-9 磁場強度変化量Z方向の測定分析結果

メインフレーム	検出器による測定間隔(曲げ回数)				
	40,000	65,000	90,000	100,000	破断時
区間平均	2.2	1	2.2	1.7	3.7
標準偏差	1.7	0.6	1	0.4	3.7

(4) 基礎データの考察

変化量と外力の関係を評価する指標について、基礎実験で算出した、区間平均値と区間標準偏差で検討した。

①検出機の出力と荷重との関係性検討

[a]引張試験における試験片の伸び量と磁場強度変化量の関係

区間平均値は、X方向で傾向は見られないが、Z方向は材質により傾向は異なり、メインフレームは、最大荷重点以降の区間平均が大きくなる傾向が伺える。(図-45~46、表-10)

区間標準偏差は、X方向で傾向は見られないが、Z方向は、両材料とも破断に向かい僅かながら大きくなり1.0を超える傾向が見られる。(図-47~48)

[b]曲げ試験における試験片の曲げ回数と磁場強度変化量の関係

区間平均値は、X方向、Z方向は、破断に近づくにつれ、概ね増加傾向(曲げ回数に比例する関係)が現れている。具体的には、メインフレーム

は、X方向で概ね2.0以上、Z方向で概ね2.5以上で破断となる。(図-49~50)

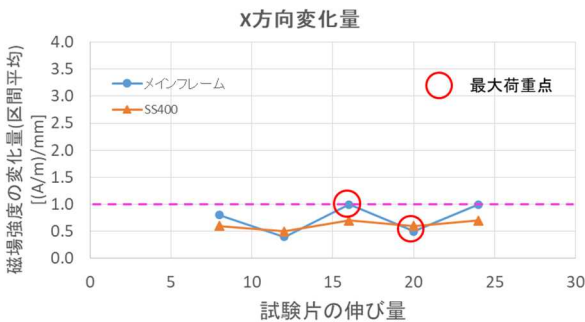


図-45 区間平均—変化量X方向 (引張伸び量)

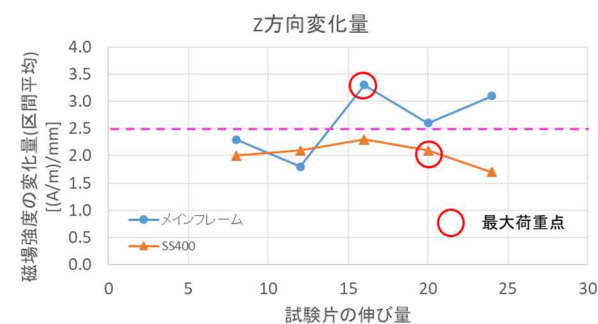


図-46 区間平均—変化量Z方向 (引張伸び量)

表-10 引張試験試験片 (伸び量-荷重)

	試験片の伸び量				
	8mm	12mm	16mm	20mm	24mm
メインフレーム	83KN	87KN	88KN (最大荷重)	87KN	82KN
SS400	88KN	97KN	98KN (最大荷重)	99KN (最大荷重)	97KN

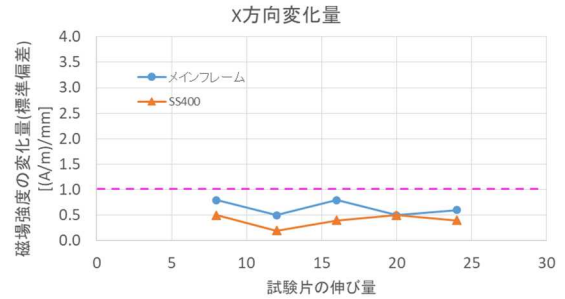


図-47 区間標準偏差—変化量X方向 (引張伸び量)

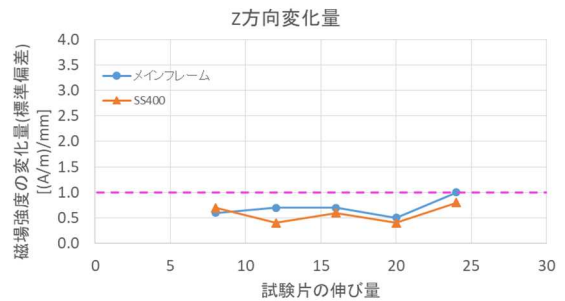


図-48 区間標準偏差—変化量Z方向 (引張伸び量)

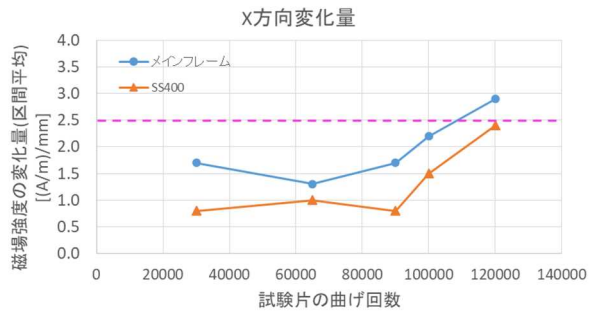


図-49 区間平均—変化量X方向 (曲げ回数)

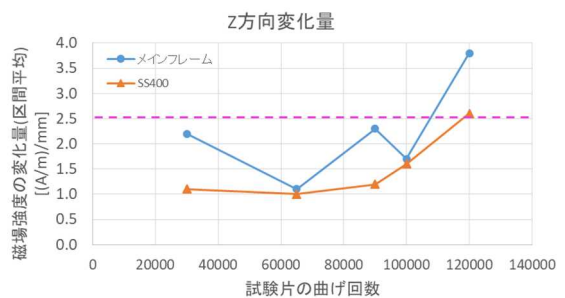


図-50 区間平均—変化量Z方向 (曲げ回数)

区間標準偏差は、X方向、Z方向は、破断直前までは概ね一定と考えられ、破断時は特にZ方向が変化した。(図-51~52)

②検出機を用いた劣化度診断指標の検討

前項の検討より、磁場強度変化量を指標として、2つの外力(「引張り」と「曲げ」)について劣化診断指標を表-11の通り設定した。

しかし、本測定結果から読み取ったものであり、劣化度合いなど把握できない。さらにメインフレームの引張力は、最大荷重点以降破断まで2点(20mm,24mm)のため、詳細な数値が設定できないなど、今後データの細分化や蓄積等による、さらなる検証が必要である。

③試験片の追加と経時データ取得による劣化度診断指標の再検討

[a] 追加した試験片の測定データ(引張試験)

追加で引張試験にて作成した伸び量(14,18mm)と破断の3種類の試験片(メインフレーム及びSS400)に対して検出機による測定を行った。メインフレームの磁場強度の測定結果例を図-53~54に示す。令和元年度までの結果と同様に破断前後で大きく変化した。

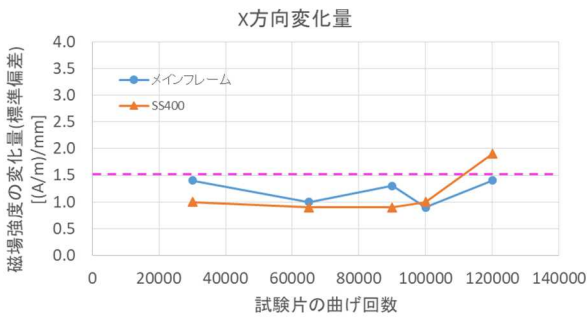


図-51 区間標準偏差—変化量X方向(曲げ回数)

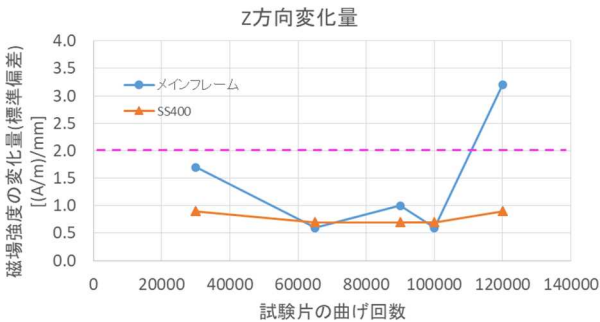


図-52 区間標準偏差—変化量Z方向(曲げ回数)

表-11 劣化度診断指標

	X方向 (表面方向磁場強度)		Z方向 (深さ方向磁場強度)	
	引張力	曲げ力	引張力	曲げ力
平均値	—	2.5	2.5	2.5
標準偏差	—	1.5	1	2

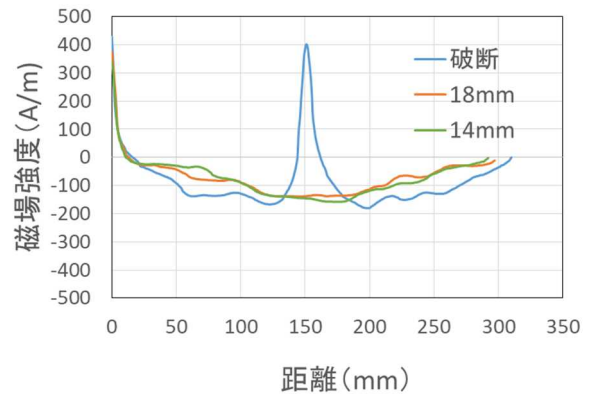


図-53 磁場強度(メインフレームX方向)
[追加した引張試験片]

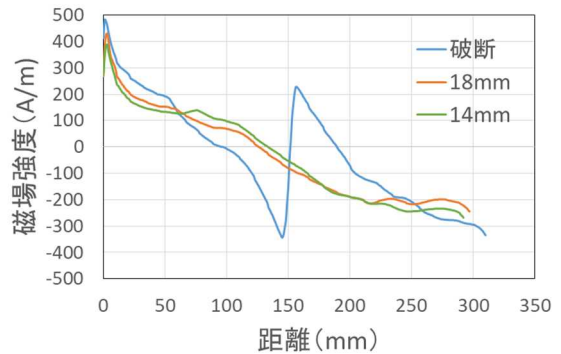


図-54 磁場強度(メインフレームZ方向)
[追加した引張試験片]

(曲げ試験)

追加曲げ試験にて作成した 80,000 回、95,000 回と破断の 3 種類の試験片 (メインフレーム及び SS400) に対して検出機による測定を行った。メインフレームの磁場強度の測定結果例を図-55~56 に示す。過年度までの結果と同様に特に破断前で大きな変化は確認できなかった。

[b] 経時データ

令和 2 年度に、令和元年度に計測を行った各試験片 (表-12~13) について経時同様の手法で再計測を行った。その結果、曲げ試験のメインフレームの破断以外はほとんど変化が認められなかった。

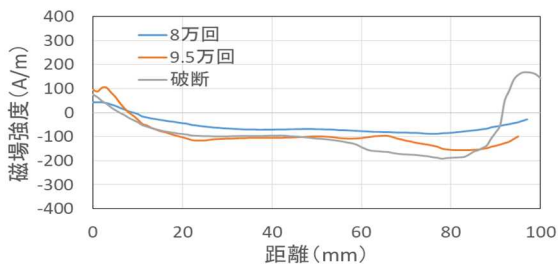


図-55 磁場強度 (メインフレームX方向) [追加した曲げ試験片]

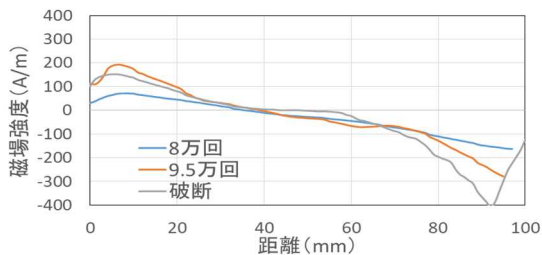


図-56 磁場強度 (メインフレームZ方向) [追加した曲げ試験片]

表-12 過年度[2019]計測引張試験片(枚) (枚)

材料	引張試験内容 (伸び量)						計
	8mm	12mm	16mm	20mm	24mm	破断	
フレーム鋼材	1	1	1	1	1	1	6
SS 材	1	1	1	1	1	1	6

表-13 過年度[2019]計測曲げ試験片 (枚)

材料	曲げ疲れ試験内容 (660MPa_曲げ回数:回)					計
	40,000	65,000	90,000	100,000	破断	
フレーム鋼材	1	1	1	1	1	5
SS 材	1	1	1	1	1	5

曲げ試験のメインフレームの破断の磁場強度図-57~58 は 1 年の経時により変化量が大きくなった。曲げ試験の再計測した変化量の区間平均 (図-59~60) においても、2 倍程度変化が確認された。

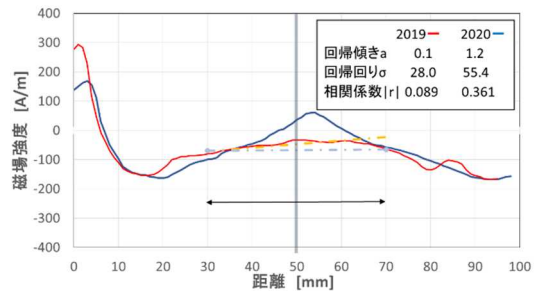


図-57 磁場強度 (メインフレームX方向) [破断 曲げ試験 2019-2020]

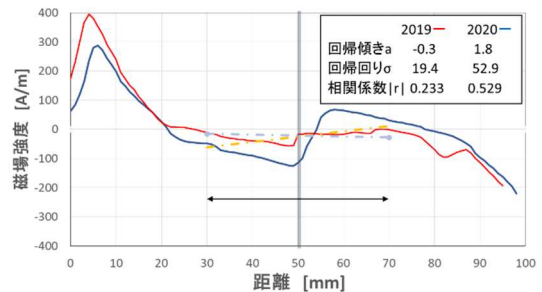


図-58 磁場強度 (メインフレームZ方向) [破断 曲げ試験 2019-2020]

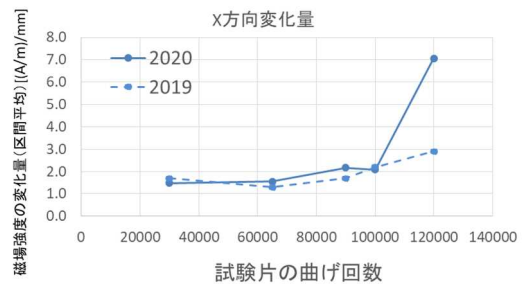


図-59 磁場強度 区間平均 メインフレーム X方向 [曲げ試験 2019-2020]

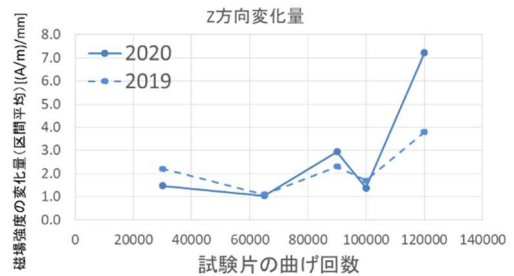


図-60 磁場強度 区間平均 メインフレーム Z方向 [曲げ試験 2019-2020]

令和3年度は、過年度に作成したすべての試験片（表-14～15）について再計測を行った。前年と同様、曲げ試験のメインフレーム以外はほとんど変化が認められなかった。

曲げ試験によるメインフレームは、曲げ回数の少ない40,000回と65,000回（図-61～62）で昨年から磁場強度が変化した。試験片作成時と1年経過時は変化が認められず、1年経過時から2年経過時に変化があった。曲げ回数の多い80,000回以上では特に変化が認められなかった。

引張試験ではすべてが塑性変形であり、経時データに変化はなかったことから、80,000回以上では塑性変形が40,000回と65,000回では弾性変形のため経時により磁場強度に変化があったと考えられる。また、試験後一年間は磁場強度に変化がなかったため、磁場強度に変化を与え

表-14 過年度[2019-2020]計測曲げ試験片

材料	引張試験内容(伸び量)							計	
	8mm	12mm	14mm	16mm	18mm	20mm	24mm		破断
フレーム鋼材	1	1	1	1	1	1	1	1	8
SS400	1	1	1	1	1	1	1	1	8

表-15 過年度[2019-2020]計測曲げ試験片

材料	曲げ疲れ試験内容(660MPa_曲げ回数:回)						計	
	4万	6.5万	8万	9万	9.5万	10万		破断
フレーム鋼材	1	1	1	1	1	1	1	7
SS400	1	1	1	1	1	1	1	7

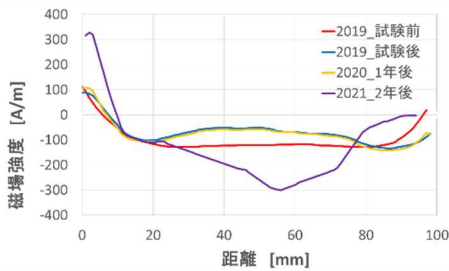


図-61 磁場強度 (メインフレームX方向) [曲げ試験]

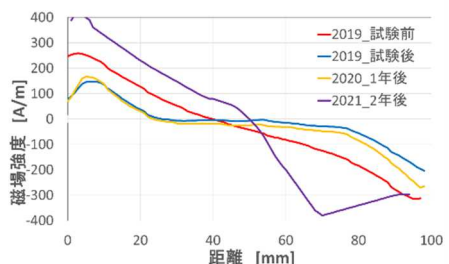


図-62 磁場強度 (メインフレームZ方向) [曲げ試験]

る様な負荷が加われば一時的に磁場強度が保持されると考えられる。しかしそれぞれ原因は不明であり、今後も経時データを取得し検証していきたい。

40,000回と65,000回での令和2年度と令和3年度の区間移動平均と標準偏差の比較のグラフを図-63～66に示す。

なお、令和2年度に計測された曲げ試験のメインフレームの破断の変化については、令和3年度の計測では確認できなかった。

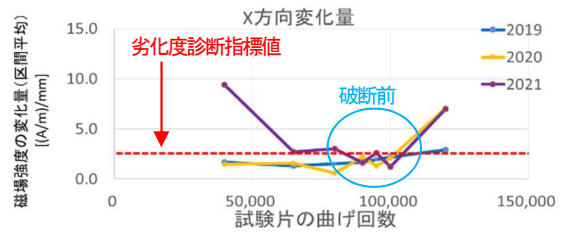


図-63 磁場強度 区間平均 メインフレーム X方向 [曲げ試験 2019-2021]

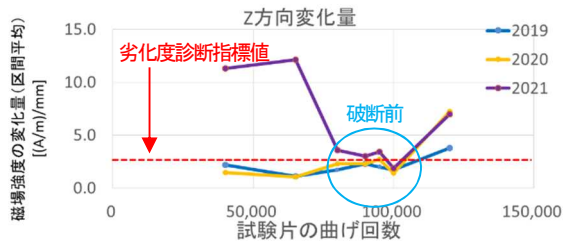


図-64 磁場強度 区間平均 メインフレーム Z方向 [曲げ試験 2019-2021]

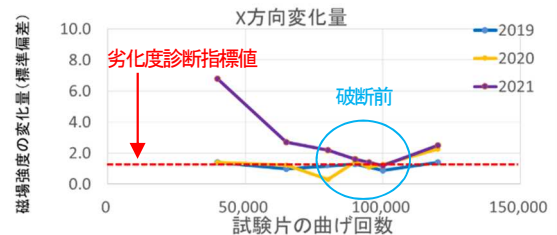


図-65 磁場強度 標準偏差 メインフレーム X方向 [曲げ試験 2019-2021]

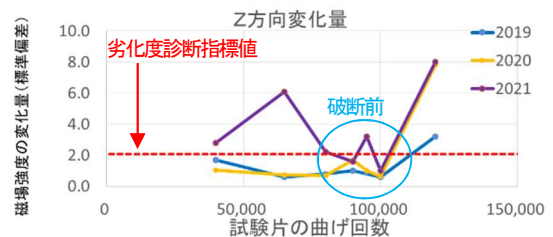


図-66 磁場強度 標準偏差 メインフレーム Z方向 [曲げ試験 2019-2021]

[c] 劣化度診断指標の検討

上項 [a] について過年度と同様に磁場強度の変化量の区間平均と標準偏差を算出し、[b] も踏まえ劣化度診断指標 (表-11) を再検討した。引張試験は経時データにおいて大きな変化見られなかった。曲げ試験のメインフレームにおいては経時データの変化があり、劣化度診断指標の指標とした数値を大きく超える結果となった (図-63~66)。しかし破断前については変化があまりないため、安全側ではあるが数値は変更せずに指標とした

4. 3 実車の測定及び適応性の確認

4. 2 の検討を踏まえ、令和元年度に実車の予備測定を行った。予備測定結果から、測定部位や範囲などを決定し、今後の計測方法についてとりまとめた。また測定結果から検出機及び4. 2の劣化度診断指標の適応性について検証した。令和2年度は、測定部位毎の作業による負荷状況を把握するため、加速度ピックアップにより加速度を計測し、振動加速度レベルによる部位毎の比較を行った。また、測定部位の1年間稼働後の磁場強度の変化等の経時データを把握するため同一の機械・部位について再計測を行った。令和3年度も引き続き加速度測定と同一の機械・部位について計測を行った。

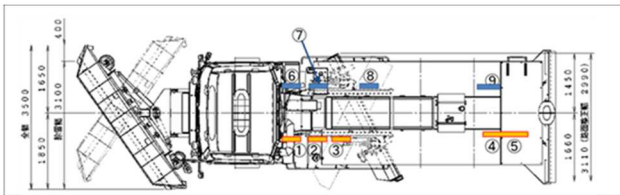


図-67 測定部位



図-68 実車測定状況

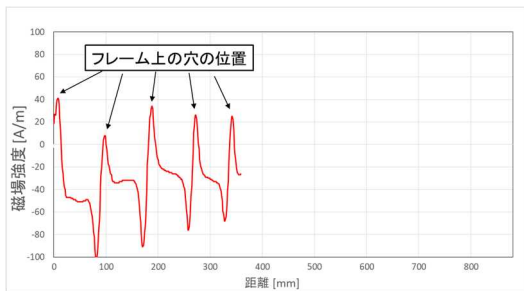


図-69 磁場強度測定例 (A車/測定部位①/X方向)

4. 3. 1 実車の測定及び適応性の確認

(1) 測定対象機械、測定部位及び測定回数

測定機械は、開発局札幌開発建設部札幌道路事務所保有の除雪トラック10台とした。まず2台について予備測定を実施し、その結果から測定部位は、外力が加えられにくく、メインフレームが露出しており測定が比較的容易な9箇所とした (図-67)。また、測定回数は3回とした (図-68)。

(2) 実車測定結果と解析

①磁場強度の測定結果

磁場強度の変化とフレーム上の穴の位置は、概ね対応しているなど、フレームに掛かる様々な要因に対し磁場強度の変化が確認できた (図-69)。

②変化量の測定結果

実車においても磁場強度、変化量ともに検出可能であることを確認した。フレーム上の穴の位置や、リフトアップ箇所等々の要因による変化も確認することができた (図-70)。

③測定結果の解析

計測結果を、前項で設定した劣化度診断指標にて車両毎に整理した。表-16に例を示す。基準を超過した場合△を

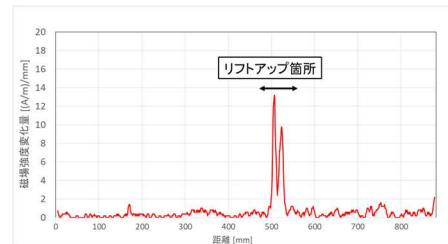


図-70 変化量測定例 (B車/測定部位④/Z方向)

表-16 測定部位毎劣化度診断 例

測定部位	磁場方向	指標	磁場強度 の変化量	引張り		曲げ力		備考
				基準	判定	基準	判定	
①	X	平均値	0.47	—	—	2	○	[良好区間]
		標準偏差	0.39	—	—	1.5	○	
	Z	平均値	0.61	2.5	○	2.5	○	
②	X	平均値	0.29	—	—	2	○	[注意] Z方向の標準偏差、引張り
		標準偏差	0.28	—	—	1.5	○	
	Z	平均値	0.26	2.5	○	2.5	○	
③	X	平均値	0.47	—	—	2	○	[良好区間]
		標準偏差	0.39	—	—	1.5	○	
	Z	平均値	0.61	2.5	○	2.5	○	
④	X	平均値	0.47	—	—	2	○	[良好区間]
		標準偏差	0.39	—	—	1.5	○	
	Z	平均値	0.79	2.5	○	2.5	○	
⑤	X	平均値	0.67	—	—	2	○	[良好区間]
		標準偏差	0.46	—	—	1.5	○	
	Z	平均値	0.46	2.5	○	2.5	○	
⑥	X	平均値	0.67	—	—	2	○	[良好区間]
		標準偏差	0.46	—	—	1.5	○	
	Z	平均値	0.48	2.5	○	2.5	○	
⑦	X	平均値	0.82	—	—	2	○	[良好区間]
		標準偏差	0.88	—	—	1.5	○	
	Z	平均値	0.94	2.5	○	2.5	○	
⑧	X	平均値	1.31	—	—	2	○	[注意] Z方向の標準偏差、引張り
		標準偏差	1.14	—	—	1.5	○	
	Z	平均値	2.03	2.5	○	2.5	○	
⑨	X	平均値	0.21	—	—	2	○	[良好区間]
		標準偏差	0.14	—	—	1.5	○	
	Z	平均値	0.21	2.5	○	2.5	○	

付け、「注意」区間とした。

「注意」区間について測定全車両診断集計結果を表-17に示す。「複数注意区間数」は引張力と曲げ力とも複数の基準を超過、「両項目注意区間数」は引張力と曲げ力とも1つの基準を超過、「引張力注意区間数」は引張力のみ超過、「曲げ力注意区間数」は曲げ力のみ超過、としてそれぞれ整理した。

機械右側（運転席側）の方が左側より約2倍、注意区間が多く発生している。

- ・右側は曲げ力、左側は引張力に関する診断基準を超過する傾向が見られた。

(3) 検出機の実車測定への適応性

測定結果から、検出機及び劣化度診断指標は、特定の要因箇所や部位毎に注意区間を検出することが可能となり、同一車両の部位間等の比較により劣化度の相対的な診断が可能となるなど、適応性を確認することができた。しかし、複数車両での比較は難しく、また測定結果が絶対的どのくらいの劣化度なのかは判断ができない。さらに、製造が比較的新しい H30 年式除雪トラックで注意区間が発生するなど（表-17 車両 NO, 10）劣化以外の要因を検出している可能性も散見された。

製造加工時等の残留磁場の検出も想定され、今後は、より詳細な実験データの収集、実車測定データの蓄積及び解析を行い、劣化度合いと検出機での測定値、車両に係る外力との関係等について検討していきたい。

4. 3. 2 実車測定部位の振動加速度の測定

検出機にて計測した部位毎の作業による負荷状況を把握するため、加速度ピックアップを設置し振動加速度を計測した。振動加速度値を、基準値（例として人の感じる振動の大きさ）からの尺度とするため、次式の振動加速度レベル（dB）に換算し比較を行った。

振動加速度レベル(dB)

$$= 20\text{Log}_{10} (\text{振動加速度}/\text{基準となる振動加速度})$$

また、振動加速度レベル（dB）目安として地震の震度との関係を図-71に示す。

(1) 測定方法

除雪トラック（表-17 NO8(6×6, IG 散)）のフレームの測定部位（No. 1~4, 6~9 計8箇所）毎に加速度ピックアップを取り付け、3方向（XYZ方向）（図-72）の振動加速度を測定した。

測定方向については、車両進行方向に対して直角方向（X方向）、車両進行方向（Y方向）、車両進行方向に対して鉛直方向（Z方向）とした。

計測の走行種別は、「回送」「除雪（I装置+G装置同時）作業（以下「除雪（I, G）」という）」「除雪（I装置のみ）作業（以下「除雪（I）」という）」「除雪（G装置のみ）作業（以下「除雪（G）」という）」の走行の4種類、とアイドリングにて停車状態の「待機」の計5種類を計測した。令和3年度は、散布作業を加え計6種類計測を行った。

震度	7	6強	6弱	5強	5弱	4	3	2
振動加速度レベル(dB)	110	108	105	100	95	85	75	65

図-71 震度と振動加速度レベル（dB）

表-17 劣化度診断集計

車両NO	年式	複数注意区間数	両項目注意区間数	引張力注意区間数	曲げ力注意区間数
1	H25	1+1	1+0	0+0	0+0
2	H25	1+0	0+0	1+0	0+0
3	H25	0+2	0+0	4+0	0+1
4	H27	1+1	0+0	1+0	0+1
5	H26	1+1	0+1	0+0	0+0
6	H26	0+2	1+0	0+0	0+0
7	H26	1+2	0+0	1+0	0+1
8	H29	2+2	0+0	0+1	0+0
9	H20	0+3	0+0	2+0	0+1
10	H30	0+0	0+0	1+1	0+1
合計		7+14	2+1	10+2	0+5

※0+0 → 車両の左右側別の注意区間数を示す。
（左側区間数）+（右側区間数）

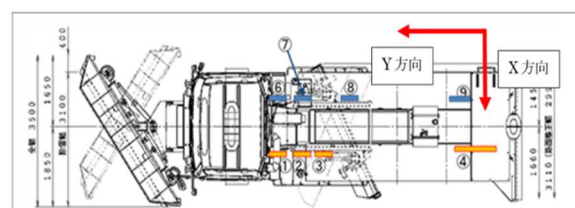


図-72 測定部位とX-Y方向



図-73 加速度ピックと設置状況

(2) 振動加速度レベルの比較

全計測結果について振動加速度レベルを算出した。X方向、除雪（I，G）の例を図-74に示す。

振動加速度レベルの目安として、5 dBの差で約2倍の負荷が想定される。

走行種別毎の振動加速度レベルをXYZ方向でまとめた測定部位No. 6の例を図-75に示す。

方向においては、X方向とZ方向はY方向に比べて振動加速度レベルが大きく、走行種別では除雪（I，G）と除雪（G）が大きい傾向を示した。また、測定部位については、車両右側の前方No. 6が走行種別にかかわらず大きい傾向を示した。X方向の例を図-76に示す。

最も振動加速度レベルの高いNo. 6とその他の振動加速度レベルの相関関係の除雪（I，G）の例を表-18に示す。各走行種別毎にNo. 6と部位毎の相関係数が0.7以上と高く、走行種別毎、各部位毎にある程度一定の負荷傾向が確認できた。

3方向を合成した振動加速度レベルについて待機を基準とした除雪（I，G）との差の例を図-77に示す。待機に比べ、8～13 dB大きいことから約3～8倍の負荷と想定される。散布作業は、ほぼ回送と同様の負荷状況であった。

また、外力の方向について、各作業毎大まかな傾向があると想定していたが、複数の方向から複雑に外力がかかっており、方向の傾向は掴めなかった。

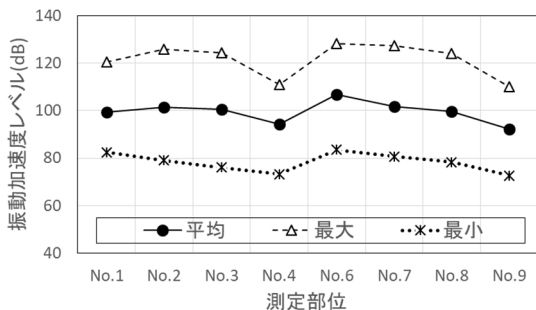


図-74 振動加速度レベル X方向 除雪（I，G）

表-18 No. 6と測定部位の方向別相関係数
除雪（I，G）

測定部位	X方向におけるNo.6に対する相関係数	X方向におけるNo.6に対する相関係数	X方向におけるNo.6に対する相関係数
No.1	0.83	0.97	0.92
No.2	0.93	0.98	0.96
No.3	0.90	0.97	0.94
No.4	0.78	0.92	0.74
No.7	0.92	0.99	0.95
No.8	0.88	0.98	0.94
No.9	0.77	0.98	0.79

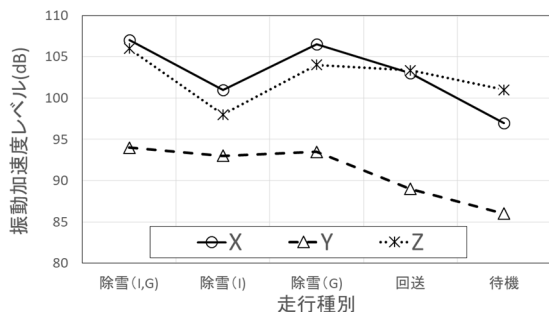


図-75 方向別振動加速度レベルの比較
測定部位 No. 6

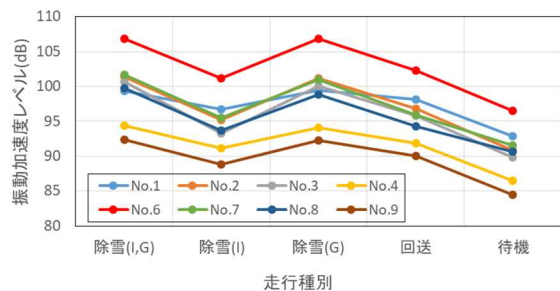


図-76 測定部位別振動加速度レベルの比較
走行種別

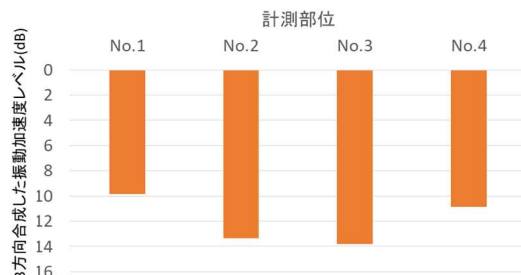
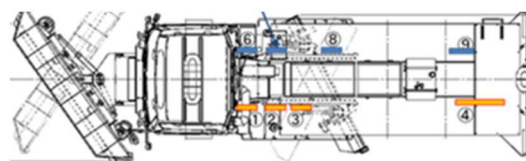
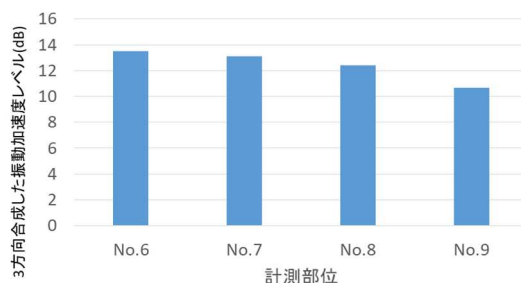


図-77 待機と除雪（I，G）の3方向合成した振動加速度レベルの差

4. 3. 4 実車測定部位の振動加速度の測定と経時データの取得を踏まえた劣化度診断への適用性の検討

4. 3. 2で計測した振動加速度レベルと4. 3. 3で測定した測定値の相関について検討した。

具体的には、車体番号No8の磁場強度と振動加速度レベルの除雪（I，G）の測定結果を用いて相関を整理した。

磁場強度測定Z方向が振動加速度Z方向、同様に、X方向がX-Y平面方向（XとY方向の加速度レベルをベクトル合成）に対応する。また、各部位の磁場強度は、これまでの継続的な負荷を蓄積した量に相当すると仮定し、「4. 3. 3 実車測定部位の経時データの取得」の今回の測定値から前回の測定値を差し引き、対数表記するために、磁場強度レベル $[=10 \times \log(\text{磁場強度})+10]$ とした。その結果は、以下の通りである。

- ・ Z方向の振動加速度レベルと磁場強度レベルの関係は、高い相関関係がみられ、振動加速度レベルが大きくなると、磁場強度レベルが大きくなる傾向にある（図-74）。
- ・ X方向の振動加速度レベルと磁場強度レベルの相関関係は、負の相関で、振動加速度レベルが大きくなると、磁場強度レベルが小さくなる傾向にある（図-75）。

以上から、磁場強度のZ方向が、除雪（I，G）作業の振動加速度レベルとの相関が高い可能性が確認できた。今後、継続し経時データ等を取得し解析を続けていきたい。

4. 4 試験片及び実車測定を踏まえた劣化度診断手法の検討

4. 1～4. 3までの検出機による磁場強度の測定試験を踏まえ除雪トラックメインフレームの劣化度診断手法について検討した。

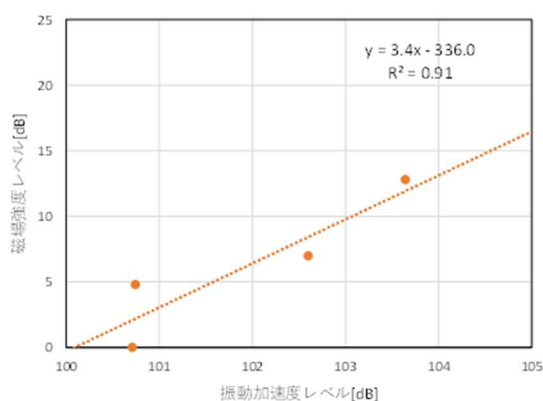


図-80 磁場強度レベルと振動加速度レベル
Z方向

本項の測定により把握できることを以下に整理した。

- ① 残留磁場強度の測定値は、引張試験、曲げ試験に用いた試験片を1年毎2年間の経時計測した結果、受けた負荷や外力に対し高い再現性があることを確認した。

そこで、破断した試験片の数値や経時計測データから、劣化診断指標の評価値を設定した。

一方、弾性変形領域内の比較的弱い負荷に対しては、残留磁場強度を一時的に保持するが継続的に変化させるには至らず、その数値が大きく変動する場合もあることが確認できた。また、1回の通常の除雪作業の実施の外力では、磁場強度にほとんど変化が現れなかった。

- ② 破断した試験片の数値や経時計測データから、劣化診断指標の評価値を設定した。しかし劣化の有無を評価する数値設定はできたが、劣化度合いの診断までは至らなかった。

- ③ 除雪トラックの経年変化を追跡調査した結果、毎年の疲労の蓄積が残留磁場強度の増加という形で定性的に把握できることを確認した。

以上から、検出機により、フレームに長期間に蓄積する疲労または通常作業では生じない大きな外力に対して、その変化を磁場強度にて定性的に把握し、診断指標より劣化の有無について評価できる可能性を確認できた。

しかし、劣化度合いを診断するまでの解析はできなかった。

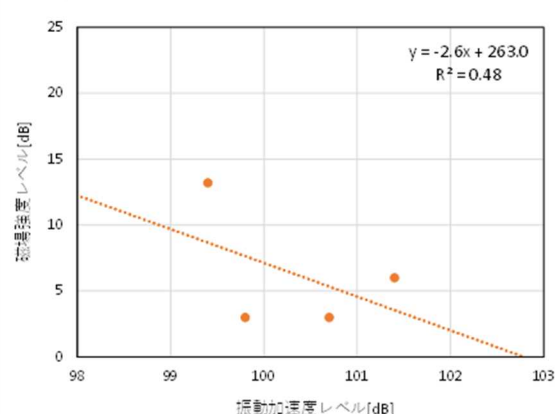


図-81 磁場強度レベルと振動加速度レベル
X方向

4. 4. 2 磁場強度測定による劣化箇所の評価手法の検討

ここまでの結果より診断までには至らなかったが、磁場強度による劣化箇所の評価について可能となり、その手法について以下のようにとりまとめた。

①評価したい部位の中で評価区間を設定する（区間長は10～20mm程度）（図-82）。

②検出機等により評価区間内を一定の間隔（1mm程度）で磁場強度を測定する（図-83）。

③計測したデータから、以下の式で磁場強度の移動平均値を算出する。

$$Have.i = (\Delta Hi + \Delta Hi+1 + \Delta Hi+2 + \Delta Hi+3 + \Delta Hi+4) / 5$$

Have.i : 磁場強度の変化量の移動平均

$\Delta Hi = Hi+1 - Hi$: 磁場強度の変化量

Hi : 測定点 (i) の磁場強度

④隣り合う磁場強度の変化量の移動平均値の差分を求める。

$$\Delta Have.i = Have.i+1 - Have.i$$

⑤評価区間内の移動平均値の差分を平均して、評価値H①（区間平均値）を算出する。

$$H① = \Sigma \Delta Have.i / \Delta Have.i \text{ 数}$$

$\Delta Have.i$ 数 : 評価区間内で算出した $\Delta Have.i$ の総数（測定点 (i) - 1）

⑥劣化度診断指標（表-11）の平均値、各方向外力の数値 2. 5 と比較し評価。評価値を超えるところは劣化している可能性が高い箇所として特定する。

⑦評価区間内の移動平均値の差分の標準偏差H②を算出する。

$$H② = \sqrt{ \{ \Sigma (\Delta Have.i - H①)^2 \} / \Delta Have.i \text{ 数} }$$

$\Delta Have.i$ 数 : 評価区間内で算出した $\Delta Have.i$ の総数（測定点 (i) - 1）

⑧劣化度診断指標（表-11）の標準偏差、X方向（曲げ）1.5、Z方向（引張）1、Z方向（曲げ）2と比較し評価。評価値を超えるところは劣化している可能性が高い箇所として特定する。

今回劣化箇所の特定までは可能となったが、以下の課題もあった。

- ・引張試験や曲げ試験では、一定方向の外力に関して破断の状態を再現したが、メインフレームには1方向の力が作用するのではなく、複数の方向からの力も作用していることがわかった。そのため複数方向の外力での磁場強度の変化について検証が必要である。

- ・特定箇所の中に劣化箇所は入っているが、特定箇所が劣化箇所と等しい訳ではない。そのため、精度向上に向け検証が必要である。

- ・磁場強度の変化量が大きいと劣化度合いが大きいとは言いきれず、箇所の特定はできるが、劣化度合いの診断はできなかった。今後は磁場強度の変化量にこだわらず、アコースティックエミッション（AE）等の様々な技術手法について検証していきたい。

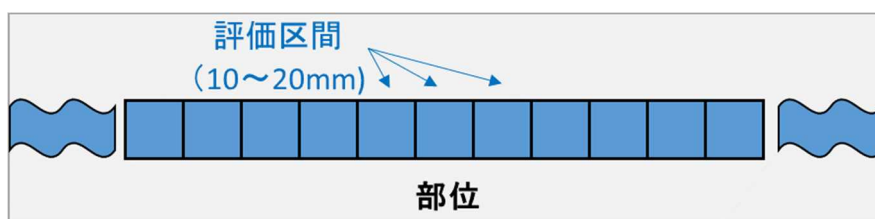


図-82 評価区間イメージ

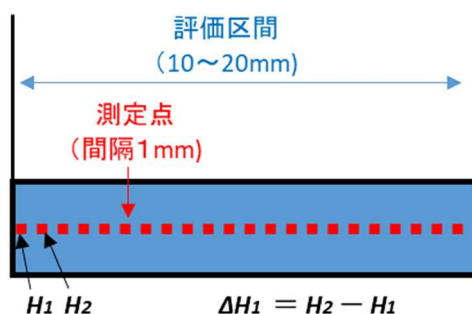


図-83 評価区間測定イメージ

5. 除雪機械劣化度の定量的評価による維持管理手法の検討

事務所が管理する複数路線の優先順位づけを行い、路線の重要度によって信頼度の目標値を設定することで、整備や配置換えの実施判断が可能な維持管理手法を検討し、シミュレーションを実施した。

5.1 路線の重要度の設定に関する検討

路線の重要度の設定にあたり、以下の2つの重要度を評価し、分類する方法を新たに検討した。

- ①路線が持つ機能や交通量を考慮した「交通機能」の重要度
- ②年間当たりの除雪作業日数を考慮した「除雪作業」の重要度

路線の重要度をA～Eの5段階で評価するマトリックス表を表-21に示す。

交通機能の重要度は、除雪ステーション（以下、「除雪ST」という。）が担当している路線・区間における「緊急輸送道路」及び「24時間交通量」を点数化し、それぞれを加算して4段階評価とした。

緊急輸送道路は、担当路線・区間の該当状況を踏まえて、3段階で加点した。24時間交通量は、平成27年度道路交通センサスの24時間交通量を3段階で加点した。

配点表を表-22、23に示す。

除雪作業の重要度は、降雪量が多く除雪作業の実施頻度が高い路線をより高く評価することとし、稼働実績から1年間の「平均作業日数」で4段階評価した。

平均作業日数は、一般除雪に用いられる除雪トラック・除雪グレーダを対象として、平成25～27年度の稼働実績を踏まえ、表-24に示す区分表で配点した。

表-21 路線の重要度を評価するマトリックス表

		除雪作業の重要度				
		高 ←			→ 低	
		4	3	2	1	
交通機能の重要度	高	4	A	A	B	C
		3	A	B	C	D
		2	B	C	D	E
	低	1	C	D	E	E

これらの検討を踏まえ、開発局の除雪STにおける路線の重要度の評価を行った結果を、表-25に示す。

5.2 信頼度の目標値の設定に関する検討

次に、配置されている除雪機械に対する、信頼度の目標値の設定方法について検討した。

検討にあたっては、信頼度の目標値の設定に際し、信頼度の低下に伴う重大故障発生頻度について整理を行った。

この検討では、重大故障データ（3.2参照）で算出した箇所別の信頼度を用いた。

表-22 緊急輸送道路の配点表

配点	緊急輸送道路
2点	担当路線・区間の総延長の半分以上が「第1次緊急輸送道路」
1点	担当路線・区間の総延長の半分未満が「第1次緊急輸送道路」
0点	担当路線・区間が「第2次緊急輸送道路」

表-23 24時間交通量の配点表

配点	24時間交通量
2点	平均交通量が「10,000台/日以上」
1点	平均交通量が「4,000～10,000台/日」
0点	平均交通量が「4,000～台/日未満」

表-24 平均作業日数の配点表

配点	平均作業日数の配点表
4点	平均作業日数が「90日以上」
3点	平均作業日数が「60日以上」
2点	平均作業日数が「30日以上」
1点	平均作業日数が「30日未満」

表-25 路線の重要度 評価結果

総合評価	除雪ST数
A(最重要路線)	7
B(重要路線)	42
C(準重要路線)	61
D(一般路線①)	28
E(一般路線②)	9
計	147

信頼度の目標値の設定において、平成19年度～27年度に所有していた除雪機械の平均配置台数をもとに、信頼度が低下した際の重大故障の発生頻度を算出した。算出した結果を表-26示す。

信頼度0.99の場合は、重大故障が各開発建設部で1件程度発生し、0.97まで低下すると各開発建設部で3件、

各事務所で1件程度発生すると推定される。

信頼度が0.85まで低下すると、各除雪STで1件発生する状況となる。

このように重大故障の発生頻度を開発建設部、事務所及び除雪ST単位で整理した結果を踏まえて、路線の重要度毎に信頼度の目標値を表-27のように設定した。

表-26 信頼度が低下した際の重大故障の発生頻度

除雪機械	除雪トラック	除雪グレーダ	除雪ドーザ	ロータリ除雪車	小形除雪車	凍結防止剤散布車	合計	重大故障件数(件/箇所)		
								開発建設部(10箇所)	事務所(34箇所)	除雪ST(147箇所)
平均配置台数	508	99	87	146	120	84	1,039			
信頼度	重大故障件数(件)									
0.99	5	1	1	1	1	1	10	1.0	0.3	0.1
0.98	10	2	2	3	2	2	21	2.1	0.6	0.1
0.97	15	3	3	4	4	2	31	3.1	0.9	0.2
0.95	25	5	4	7	6	4	52	5.2	1.5	0.4
0.90	51	10	9	15	12	8	104	10.4	3.1	0.7
0.85	76	15	13	22	18	12	156	15.6	4.6	1.1
0.80	101	20	17	29	24	16	208	20.8	6.1	1.4
0.70	152	30	26	44	36	25	312	31.2	9.2	2.1
0.50	253	50	43	73	60	41	520	52.0	15.3	3.5

表-27 信頼度の目標値

路線の重要度	信頼度の目標値	重大故障発生頻度
A(最重要路線)	0.97以上	道路事務所で1台発生
B(重要路線)	0.95以上	道路事務所で1.5台発生
C(準重要路線)	0.90以上	道路事務所で3台発生
D(一般路線①)	0.85以上	除雪STで1台発生
E(一般路線②)	0.70以上	除雪STで2台発生

表-28 除雪STにおける信頼度の目標値

事務所	除雪ST	路線の重要度	信頼度の目標値	配置台数
A	a①	B	0.95	24
	a②	A	0.97	6
	a③	C	0.90	6
	a④	D	0.85	2
B	b①	B	0.95	7
	b②	B	0.95	12
	b③	A	0.97	5
	b④	B	0.95	2
	b⑤	B	0.95	9
C	c①	C	0.90	6
	c②	B	0.95	9
	c③	D	0.85	4
	c④	C	0.90	9

5.3 維持管理手法のシミュレーション試行

これらの検討を踏まえた維持管理手法について、シミュレーションを試行し、効果と課題の抽出を行った。

5.3.1 配置換えによる維持管理手法のシミュレーション試行

シミュレーションの試行にあたり、以下の条件を設定した。

- ①対象の除雪機械は、前章で検討した開発局の1開発建設部の除雪機械のうち、平成27年度に配置されていた101台を対象とした。各事務所の除雪STにおける信頼度の目標値は、表-28のとおりである。
- ②シミュレーションの実施期間は、平成27年度から10年間(平成27年度～令和6年度)とした。
- ③信頼度は、重大故障データから推定した形状・尺度パラメータと、各除雪機械の年度末の稼働実績(走行距離または稼働時間)を算定式に代入して算出した。な

お、信頼度は走行距離と稼働時間のそれぞれの値のうち、低い値を採用した。

- ④稼働実績は、信頼度の目標値を下回った時点で予防整備を実施したものとし、累積した稼働実績をリセットした。リセット後の稼働実績は、除雪機械の種類毎に各除雪工区の平均年間走行距離及び稼働時間を年度毎に加算した。
- ⑤本シミュレーションの初年度の算出は、平成26年度以前においても予防整備が実施されていたと仮定し、

平成 26 年度までの稼働実績から信頼度を算出し、その信頼度に基づく予防整備を定期的実施しているものとした。

⑥重大故障箇所の予防整備費用については、整備業者・除雪機械メーカーに主な故障内容と想定される予防整備内容を提示したアンケートを実施し、想定される費用（労務費や部品費を含む）の把握を行った。

⑦予防整備にかかる単年度予算は、過去の実績と配置台数から勘案し、1 開発建設部全体で 6,000 万円/年に設定し、単年度予算に対して予防整備費用が大幅に超過する場合は、除雪機械の配置換えを 2～3 年度毎に検討するものとした。

このシミュレーション条件に基づき、平成 27 年度時点の除雪機械の配置で、令和 6 年度までの配置換えを行わない場合における予防整備費用を試算した。試算した結果を、事務所毎及び除雪機械毎に図-84 及び表-29 に示す。

シミュレーション初年度の平成 27 年度の予防整備費用は、単年度予算内に収まっている。

事務所毎に比較すると、担当する各除雪 S T の信頼度の目標値が高く、配置台数も多い B 事務所の予防整備費用が最も高い。

一方、配置台数が少なく、担当する各除雪 S T の信頼度の目標値も低い C 事務所の単年度平均の予防整備費用は、A 事務所の 1/3 以下となった。

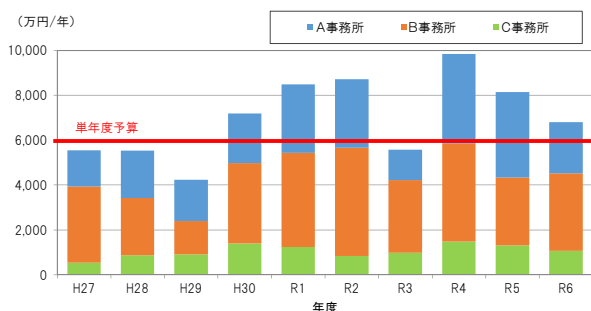


図-84 予防整備費用算出結果 (事務所毎)

平成 30 年度～令和 2 年度及び令和 4～5 年度の予防整備費用は単年度予算を 1,000 千万円以上超過しており、10 年間の総額では、約 1 億円超過する試算となった。

除雪機械毎に比較すると、予防整備費用で「トランスミッション：350 万円」、「油圧ポンプ：300 万円」など、単価が高いロータリ除雪車にかかる費用が大きく、次に配置台数や重大故障箇所が多い除雪トラックが大きくなっている。

先の試算結果を踏まえて、除雪機械の配置換えによる予防整備費用総額の抑制及び単年度の予防整備費用の平準化について検討した。

配置換えの実施時期は、平成 29 年度末時点、令和 2 年度末時点及び令和 4 年度末時点の 3 回実施するものとした。

配置換えの実施内容は、以下のとおりである。

- 平成 29 年度末時点では、予防整備費用が高額となるロータリ除雪車を対象に実施。
- 令和 2 年度末時点では、上記ロータリ除雪車のほか、配置台数や重大故障箇所が多い除雪トラック、予防整備の単価がロータリ除雪車の次に高い除雪ドーザも対象として実施。
- 令和 4 年度末時点では、全ての除雪機械を対象として実施。

配置換え 3 回を実施した予防整備費用の試算結果について、事務所毎及び除雪機械毎に整理した図表を図-85 及び表-30 に示す。

事務所毎に整理した図-85 には、配置換え前及び配置換え 1 回及び 2 回目の各年度の予防整備費用を折れ線グラフで示し、配置換え 3 回目の予防整備費用を棒グラフで示しているが、配置換えの実施を繰り返すことにより、各年度の予防整備費用が平準化されていることがわかる。

単年度予算が 1,000 千万円以上超過した年数も 5 年から 2 年に減少した。

表-29 予防整備費用算出結果 (除雪機械毎)

除雪機械	予防整備費用(万円)											H27～R6 単年平均
	H27	H28	H29	H30	R1	R2	R3	R4	R5	R6	合計	
除雪トラック	2,204	1,703	1,095	2,139	1,664	3,041	2,620	2,607	2,738	1,952	21,762	2,176
除雪グレーダ	0	55	395	370	0	25	115	395	700	350	2,405	241
ロータリ除雪車	2,013	3,098	1,600	3,515	5,310	3,823	1,803	5,350	2,810	3,310	32,630	3,263
除雪ドーザ	272	0	162	168	0	990	488	55	333	421	2,886	289
小形除雪車	765	403	920	913	700	475	463	1,338	935	528	7,438	744
凍結防止剤散布車	295	283	70	78	815	365	85	95	633	243	2,960	296
合計	5,548	5,541	4,242	7,182	8,489	8,719	5,572	9,839	8,148	6,802	70,081	7,008

表-30 配置換え 3 回目の予防整備費用算出結果（除雪機械毎）

除雪機械	配置換え3回目の予防整備費用(万円)											合計	H27~R6 単年平均
	H27	H28	H29 (配置換え)	H30	R1	R2 (配置換え)	R3	R4 (配置換え)	R5	R6			
除雪トラック	2,204	1,703	1,095	2,139	1,664	1,833	1,928	1,739	3,438	2,587	20,329	2,033	
除雪グレーダ	0	55	395	370	0	25	115	745	350	0	2,055	206	
除雪ドーザ	272	0	162	168	0	670	488	433	443	264	2,897	290	
ロータリ除雪車	2,013	3,098	2,795	2,460	2,818	3,625	2,688	3,995	2,073	1,995	27,558	2,756	
小形除雪車	765	403	920	913	700	475	463	1,143	728	678	7,185	719	
凍結防止剤散布車	295	283	70	78	815	365	85	355	78	285	2,708	271	
合計	5,548	5,541	5,437	6,127	5,996	6,993	5,766	8,409	7,108	5,809	62,731	6,273	

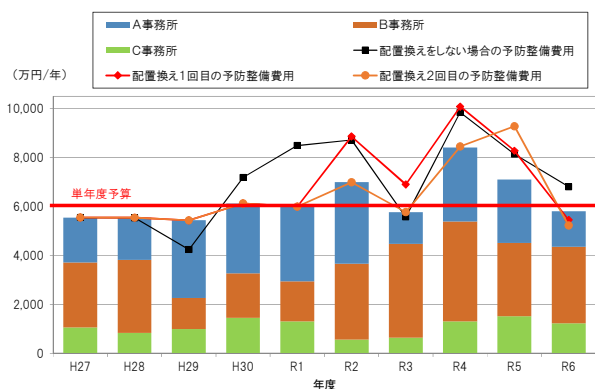


図-85 配置換え 3 回目の予防整備費用算出結果（事務所毎）

表-29、30 を比較すると、単年度の予防整備費用は、配置換え前では単年度平均で約 7,000 万円に対し、配置換え 3 回目では 6,300 万円まで低減している。10 年間分の予防整備費用では総額で約 7 億円であったものが、約 6.3 億円まで低減できた。

このことから、今回検討した維持管理手法でシミュレーションを行うことで、予防整備箇所の実施の有無を稼働実績から算出した信頼度を用いて判定でき、客観的かつ定量的な予防整備の実施が可能となることを確認した。

さらに除雪機械の配置換えを併用して実施することにより、予防整備費用の平準化、並びに予防整備予算の総額を低減することが可能であった。しかし、次に示す課題が明らかになった。

一つ目として、今回のシミュレーションでは予防整備予算の低減方法として、稼働実績が多い除雪機械を信頼度の目標値が低い除雪工区に配置換えしている。

これは、予防整備を先送りしているともいえることから、配置換えの回数を増やしすぎると、長期的には予防整備実施時期が集中して予防整備費用が増大する恐れがある。

二つ目として、平成 27 年度時点で配置されていた除雪機械を令和 6 年度まで稼働し続けている前提で、シミュレーションを実施したが、実際の運用では稼働実績や使用

年数、除雪機械本体の信頼度などが一定の基準に達した段階で更新を行うため、更新時期や更新費用の設定を加味する必要がある。

最後に、今回のシミュレーションでは、定期整備費用について反映していない。よりの確な予防整備実施時期の判断や、整備費用の試算にあたっては、整備履歴を加味した試算が必要である。信頼度の算出においても同様に、故障データだけでなく、重大故障箇所の整備履歴が必要となる。そのためには、重大故障箇所の故障・整備履歴を確実に記録する管理表の内容・様式などを整理していく必要がある。

5. 3. 2 機械更新を考慮した維持管理手法のシミュレーション試行

前項で抽出した課題のとおり、配置転換を繰り返した場合長期的には予防整備コストが増大する恐れがある。

しかし、実際には、稼働年数や機械本体の信頼度などが一定の水準に到達した段階で、機械の処分・更新を行うことになるため、機械の処分・更新についても考慮する必要がある。令和元年度は、「除雪機械の更新（一定の使用年数に達した段階で機械を更新）」を反映した維持管理手法についてシミュレーションを試行した。

具体的には、除雪機械の種類毎に、「標準的な使用年数（更新のタイミング）」を事前に設定し、維持管理手法の対象としている除雪機械の使用年数が「標準的な使用年数」に達した時点で機械の更新（稼働実績をリセットし、更新費用を計上）を行い、更新しない機械については、前項と同様の考え方により、配置機械の稼働実績・信頼度に応じた予防整備による維持管理を行う想定とした。なお、除雪機械の種類毎の「標準的な使用年数（機械更新を行うタイミングとする使用年数）」は、「平成 30 年度版 建設機械等損料算定表（北海道補正版 北海道開発局）」における「標準使用年数」に基づき、表-31 のとおり設定した。

表-31 除雪機械種類毎の「標準的な使用年数」

除雪機械	算定表 [※] の標準使用年数	維持管理手法に用いる使用年数
除雪トラック	15.5	16
除雪グレーダ	16.0	16
除雪ドーザ	13.5	14
ロータリ除雪車	15.0	15
小形除雪車	15.0	15
凍結防止剤散布車	11.0	11

※平成30年度版 建設機械等損料算定表(北海道補正版 北海道開発局)

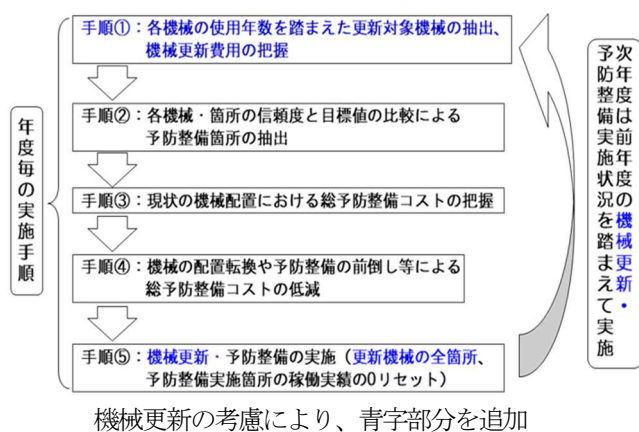


図-86 機械更新を考慮した除雪機械維持管理手法

また、除雪機械の更新費用（単価）についても、「平成30年度版 建設機械等損料算定表（北海道補正版 北海道開発局）」に基づき、機械の種類・規格・装備に応じた費用を適用した。

各除雪機械の使用年数や稼働実績（想定）に基づいて、図-86の手法を経年的に実施し、将来の各年度に必要な総機械更新費用・総予防整備コストを明らかにするとともに、除雪機械の配置転換や予防整備の実施時期の調整（総予防整備コストが安い年度への前倒し）等を実施することで、各年度における総費用の平準化についての検討も行った。

(1) シミュレーションの実施条件

- ① 対象とする除雪機械：「5. 3. 1」項と同様、開発局の1開発建設部の除雪機械のうち、平成27年度配置の101台を対象。
- ② 実施期間：H27から30年間（2015～2044年度）
- ③ 機械更新のタイミング・単価：「平成30年度版 建設機械等損料算定表（北海道補正版 北海道開発局）」に基づく「標準的な使用年数」及び「単価」。

表-28（再掲）除雪STにおける信頼度の目標値

事務所	除雪ST	路線の重要度	信頼度の目標値	配置台数
A	a①	B	0.95	24
	a②	A	0.97	6
	a③	C	0.90	6
	a④	D	0.85	2
B	b①	B	0.95	7
	b②	B	0.95	12
	b③	A	0.97	5
	b④	B	0.95	2
	b⑤	B	0.95	9
C	c①	C	0.90	6
	c②	B	0.95	9
	c③	D	0.85	4
	c④	C	0.90	9

- ④ 信頼度の算出方法：「5. 3. 1」項と同様、ワイブル型累積ハザード解析で導出した算定式に各除雪機械の年度末の稼働実績（走行距離または稼働時間）を代入して算出
代入する稼働実績は、予防整備を実施した時点で、累積した稼働実績を0リセット
故障箇所毎の信頼度は、稼働時間と走行距離のそれぞれによる算定値のうち、低い方を採用
本シミュレーションの初年度（H27）の算出は、H26以前についても、同様の考え方で予防整備が実施されていたと仮定して、機械の導入年度からH26までの稼働実績、その稼働実績に基づく信頼度、信頼度に基づく予防整備の実施を考慮
H28以降の稼働実績は、除雪機械の種類毎に算出した「各除雪工区（配置されている除雪ST）の平均年間走行距離および稼働時間」を毎年度加算
- ⑤ 信頼度の目標値：「5. 3. 1」項と同様、「路線の重要度（配置されている除雪STが受け持つ除雪工区の重要度）」及び「路線の重要度に応じた信頼度の目標値」に基づく値（表-28（再掲））
- ⑥ 各箇所の予防整備コスト（単価）：「5. 3. 1」項と同様、整備業者や除雪機械メーカーへのアンケート等から把握した予防整備コスト
- ⑦ 予防整備コストの単年度予算：「5. 3. 1」項と同様、開発建設部全体で「6,000万円/年」
- ⑧ 機械更新費用の単年度予算：建設部全体で「28,000万円」
対象機械101台のH23-27機械更新費用の実績を基に設定

(2) 現状の機械配置による予防整備コストの算出
シミュレーション条件に基づき、現状 (H27 時点) の除雪機械の配置における総予防整備コスト及び総機械更新費用を算出した。(図-87、88) 算出結果は、下記のとおりである。

- ・機械更新を考慮したことで、シミュレーション対象年度における大部分の年度で、総予防整備コストが単年度予算におさまっている。
- ・総機械更新費用は、平均すると、単年度予算内におさまるが、更新のタイミングが集中する年度があり、単年度予算を大幅に超過する年度がある。
- ・事務所毎に予防整備コストを比較すると、各除雪 ST の信頼度の目標値が高く、機械台数も多い B 事務所の予防整備コストが最も高い。一方、機械台数が特に少なく、各除雪 ST の信頼度の目標値も特に低い C 事務所の単年平均は、B 事務所の 1/4 以下である。
- ・機械毎に予防整備コストを比較すると、「トランスミッション-中項目全て：350 万円」、「油圧装置-油圧ポンプ：300 万円」など、予防整備コストの単価が高いロー

タリ除雪車の予防整備費が最も高く、次いで、機械台数や予防整備対象箇所が多い除雪トラックが高くなっている。

また、現状の機械配置によるシミュレーションについて、各除雪機械の機械本体の信頼度を算出し、機械更新から次の機械更新までの機械本体の信頼度の推移を整理した。機械本体の信頼度の算出は、機械毎に対象となっている『全箇所の信頼度の積』により算出している。

図-89 に示す除雪トラック (使用 16 年目に更新) の配置除雪 ST 毎に機械本体の信頼度の比較・整理結果は、以下のとおりである。

- ・年間稼働実績が最も多いのは「B-b①ST」であり、9 年後頃までは全 ST の中で、機械本体の信頼度が最も低くなっているが、信頼度の目標値が 0.95 (重要度 B) と比較的高く、この頃から、順次、予防整備が行われるため、信頼度が最も低下した時でも 0.5 程度である。
- ・機械本体の信頼度が最も下がるのは、信頼度の目標値が 0.90 (重要度 C) で、年間稼働実績は平均的な「A-a③ST」であり、0.3 程度まで低下する。また、信

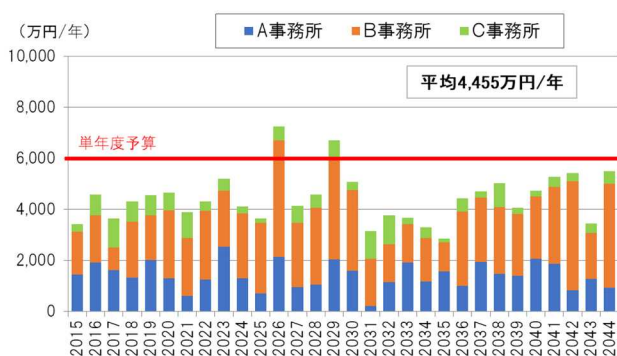


図-87 現状 (H27 時点) の機械配置における各年度の総予防整備コスト (事務所毎)

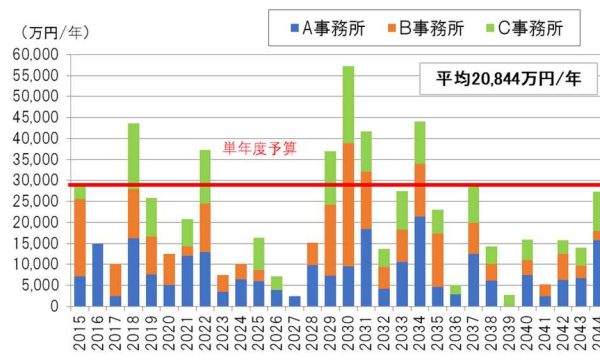


図-88 現状 (H27 時点) の機械配置における各年度の総機械更新費用 (事務所毎)

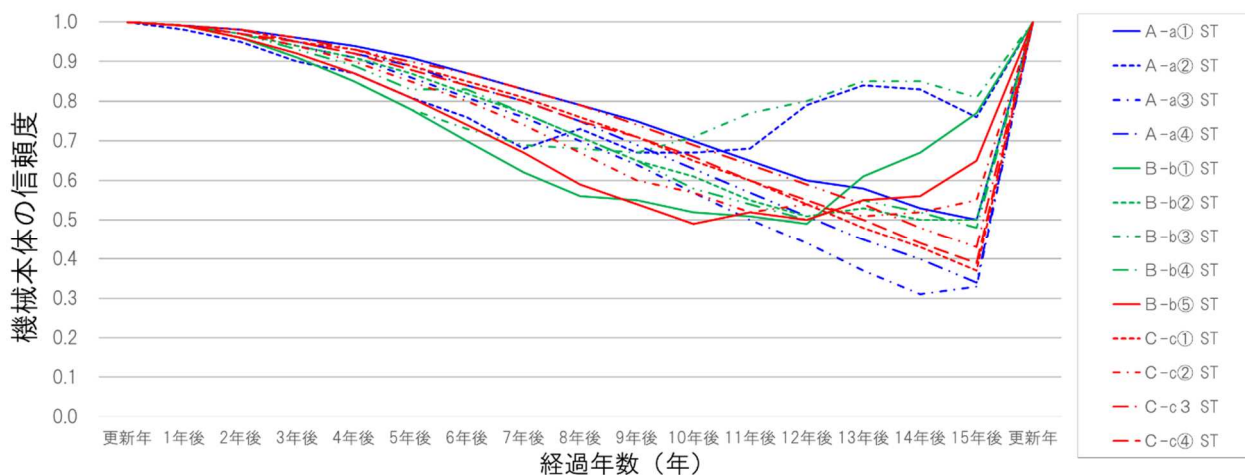


図-89 除雪トラックの配置除雪 ST 毎の機械本体の信頼度

頼度の目標値が0.85（重要度D）の「A-a④ST」も0.35程度まで低下する。

- ・信頼度の目標値が0.97（重要度A）の「A-a②ST」や「B-b③ST」の機械本体の信頼度は、0.65程度までしか下がらず、12～15年後付近では、他のSTと比較して、非常に高くなっている。

従って、信頼度の目標値が高いSTは、各箇所の予防整備が早め実施されることで、機械本体の信頼度も高水準で推移する。

(3) シミュレーション条件の変更が予防整備コスト等に及ぼす影響の分析

機械更新年数や信頼度の目標値の条件設定によって、予防整備や機械更新のタイミングが変わってくるため、これらを変更することで、予防整備コストや機械更新費用に及ぼす影響を分析した。

最初に機械更新年数の変更（一律で±1年及び2年）による予防整備コスト・機械更新費用の増減状況を分析した（図-90）。

- ・機械更新年数を延長することで、予防整備コストは増加するが、機械更新費用が減少するため、総額は減少【使用年数+1年のときは標準から総額2.5億円（1年あたり848万円）の減少、使用年数+2年のときは標準から総額3.2億円（1年あたり1,072万円）の減少】
- ・機械更新年数を短縮することで、予防整備コストは減少するが、機械更新費用が増加するため、総額は増加【使用年数-1年のときは標準から総額8.6億円（1年あたり2,852万円）の増加、使用年数-2年のときは標準から総額13.9億円（1年あたり4,624万円）の増加】

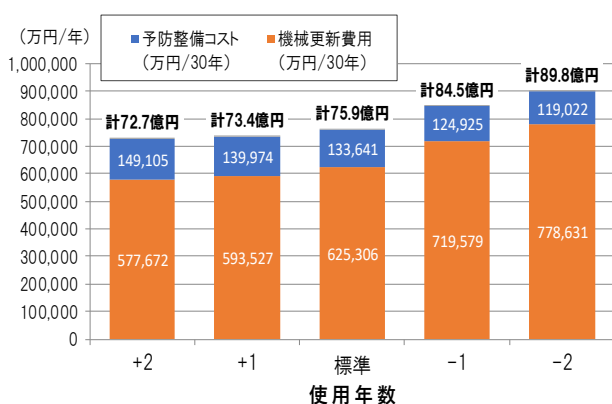


図-90 使用年数の変更によるコスト増減状況

続いて、信頼度目標値の変更（信頼度を一律95%または90%にした場合、路線の重要度に応じた目標値を現状から各1ランク下げた場合）による予防整備コストの増減状況を分析した（図-91）。

- ・信頼度目標値を一律95%にした場合、路線の重要度Aの除雪ST（2箇所）は目標値が下がるが、C,Dの除雪ST（5箇所）は目標値が上がるため、予防整備コストが増加【一律95%のときは標準から総額1.3億円（1年あたり444万円）の増加】
- ・信頼度目標値を一律95%にした場合、路線の重要度A,Bの除雪ST（8箇所）の目標値が下がり、Dの除雪ST（2箇所）のみが上がるため、予防整備コストは減少（ランクダウンよりも減少するコスト大）【一律90%のときは標準から総額6.4億円（1年あたり2,142万円）の減少、1ランクダウンとすると標準から総額5.8億円（1年あたり1,946万円）の減少】

(4) 予防整備コスト平準化の検討

維持管理手法に機械更新を考慮したことで、現状配置によるシミュレーションにおいても、対象年度のほとんどの年度において、総予防整備コストが事前に設定した単年度予算（6,000万円/年）におさまっているが、30年のシミュレーション期間における予防整備コストの最大は7,256万円/年、最小は2,853万円/年であり、約4,500万円の開きがある。このように、年度によるばらつきが大きいと、年度毎の予算による予防整備で、開発建設部所有の除雪機械の信頼度を確実に確保しておくことが難しくなる。

よって、①予防整備の前倒しと②機械の配置転換による予防整備コストの平準化を検討した。なお、現状の機械配置によるシミュレーションにおける各年度の予防整備コ

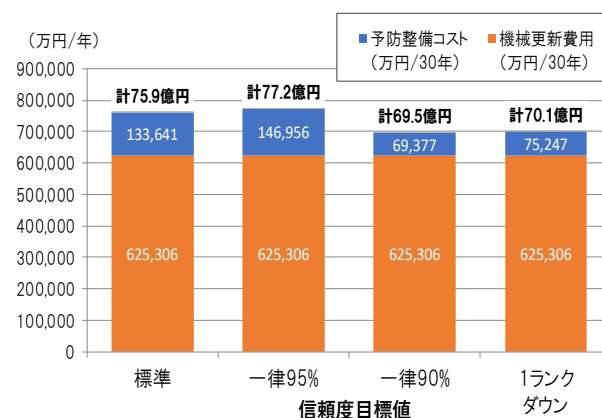


図-91 信頼度目標値の変更によるコスト増減状況

ストの平均が約4,500万円/年であったことを踏まえて、コスト平準化で目標とする単年度予算は、当初設定の6,000万円/年よりも1,000万円/年を減じた「5,000万円/年」とした。

「①予防整備の前倒し」による予防整備コストの平準化は、予算に余裕がある年度において、次年度以降に予防整備の実施が想定される機械・箇所の予防整備を前倒しすることで、各年度の予防整備コストを平準化する手法である。本手法を試行した結果を図-92に示す。

各年度の予防整備コストを考慮しながら、予算に余裕がある年度に、予防整備の前倒しを実施することで、各年度の予防整備コストを平準化し、予算内におさめることができています。予防整備コストの前倒しによる「30年間の総予防整備コスト」の増加は、1,245万円（1年あたり42万円）と小さいため、予算内で適切な信頼度を確保できる効果が大きいと考えられる。

「②機械の配置転換」による予防整備コストの平準化は、年間の稼働実績（走行距離・稼働時間）や信頼度の目標値が異なる除雪ST間で、除雪機械を配置転換することで、予防整備の実施のタイミングを調整し、総予防整備コストの平準化を図る手法である。本手法を試行した結果を図-93に示すが、本試行では、5年間隔で配置転換を実施することとし、最初の配置転換（Step1）は2020年度のシーズンが始まる前に実施、以降、2025年度のシーズンが始まる前にStep2、2030年度のシーズンが始まる前にStep3、2035年度のシーズンが始まる前にStep4、2040年度のシーズンが始まる前にStep5の配置転換を実施している。

機械更新の直前に予防整備が実施される場合などに、当該機械を信頼度の目標値が低いSTや稼働が少ないSTに配置転換し、予防整備を実施することなく機械更新を迎えることができるため、各年度の予防整備コストの平準化のみならず、全体の予防整備コストの低減も図ることができ

た。

（5）維持管理手法の効果と課題・対応策の整理

「機械更新を考慮した除雪機械の維持管理手法」について、シミュレーション結果を踏まえて、効果と課題および課題への対応策を整理した。

効果①：稼働実績に基づいて算出した信頼度を用いて、予防整備を実施すべき箇所を選定することで、客観的・定量的に、予防整備に必要な予算規模の把握や、予防整備の実施計画を立案することが可能。

さらに、機械更新を考慮したことで、機械更新に要する費用も把握でき、より実態に即した費用が想定可能。

効果②：予防整備の前倒しについてシミュレーションした結果、全体（30年間）の予防整備コストは微増するが、各年度の予防整備コストの平準化を図ることが可能。

予防整備の前倒しは、予算規模と稼働実績・信頼度を踏まえた予防整備のシミュレーションから簡単に実施を判断することができるため、開発建設部本部や道路事務所の担当者など、特別な知識や経験がなくても実施可能。

効果③：除雪機械の配置転換をシミュレーションすることで、各年度の予防整備コストの平準化を図ることが可能。さらに、機械更新を反映したことで、全体の予防整備コストの低減も可能。

効果④：信頼度の目標値や機械更新年数等の条件設定を変更したシミュレーションを実施することで、予算に応じた予防整備や機械更新の計画を立案することが可能。

効果⑤：各装置や部品の信頼度から機械全体の信頼度を算出することで、機械全体の劣化度の目安とすることが可能。また、機械全体の信頼度を機械更新の判断に適用できる可能性がある。

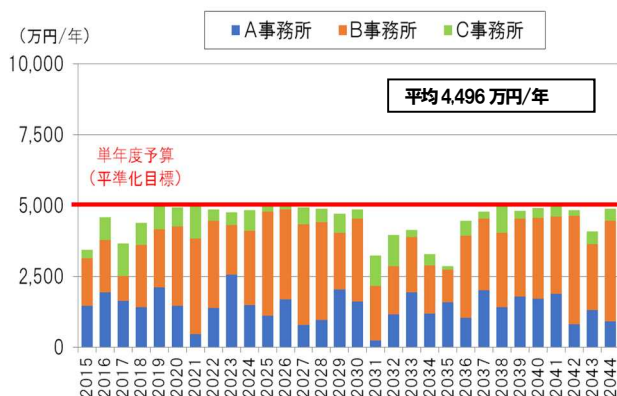


図-92 「①予防整備の前倒し」を実施した際の各年度の総予防整備コスト（事務所毎）

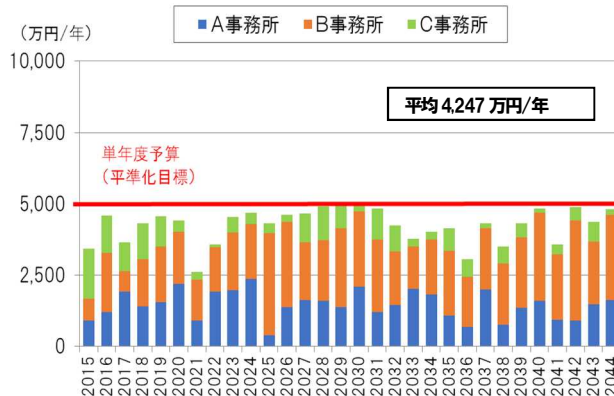


図-93 「②機械の配置転換」を実施した際の各年度の総予防整備コスト（事務所毎）

一方で、本シミュレーションによる維持管理手法の課題と対応策は以下のとおりである。

課題①：予防整備コストの平準化手法は、「予防整備の前倒し」が取組やすい手法であるが、一定期間の予防整備コストは増加。

一方で、「配置転換」による予防整備コストの平準化手法は、全体の予防整備コストの低減が可能であるが、配置転換する除雪機械を決定するためには、稼働実績や更新予定、信頼度の目標値などから総合的に判断する必要があり、効果的な配置転換を行うためには、知識・経験が必要。

⇒対応策：現場担当者が活用できるように、維持管理手法の実施方法と合わせて、配置転換の判断のポイントなどをマニュアル化。

課題②：機械更新のタイミングを「平成30年度版 建設機械等損料算定表」における「標準使用年数」に基づいて設定しているが、一律の考え方であり、機械そのものの劣化度は未適用。

⇒対応策：信頼度の目標値や機械更新年数の変更による「機械本体の信頼度」への影響（増減状況）を分析し、この信頼度に応じた機械更新のタイミングの判断方法を検討。

課題③：設定した維持管理手法は、1 開発建設部の除雪機械（約100台）を対象としたシミュレーションしか実施していないため、対象を変えた場合の影響の確認も必要。

⇒対応策：対象範囲を変えた場合（保有除雪機械台数や稼働状況が異なる開発建設部）や規模を拡大した場合（開発局全体保有除雪機械約1,000台など）のシミュレーションを実施し、予防整備コストや機械更新費用を確認し、対象を変えた場合の影響・課題を確認。

課題④：本シミュレーションでは、信頼度が目標値を下回った機械・箇所は、必ず予防整備を実施することとしており、予防整備コストが必要になる。予防整備を実施しない場合の重大故障の発生確率は、予防整備の実施割合と比較すると小さい。そのため、予防整備を実施しない場合に必要となる修理コストと予防整備コストを比較すると、予防整備コストの方が大きい。

⇒対応策：現実の除雪機械の運用では、定期整備において、予防整備と同様の整備が行われたことで、何も整備をしなかった場合よりも重大故障の発生確率が低減している可能性がある。そのため、より正確に重大故障の発生確率等を設定するため、各除雪機械の装置・部品毎に、整備・修理履歴を整理しておくことが

必要。（劣化度評価の対象となる箇所毎の整備・修理履歴の管理表の作成等により、各除雪機械の管理を統一した様式で実施するなど）

また、重大故障が発生した場合には、除雪機械が不稼働となることで、「A：除排雪作業が遅れることで、走行環境が悪化し、走行速度が低下」したり、「B：除排雪作業が遅れないように、代替機械を手配して除排雪作業を実施」することが考えられ、Aの場合には、「走行速度の低下による時間損失など、社会的な損失」が発生し、Bの場合には「代替機械の手配・使用に要する費用」が発生する。

さらに、予防整備をしないことで発生する故障は、予防整備を行う箇所以外の故障にも波及する可能性があり、故障発生前に実施する予防整備のコストと比較して、故障発生後の修理費の方が高くなる傾向がある。よって、予防整備を実施しない場合の損失（予防整備を実施した場合のコストと比較する予防整備を実施しない場合のコスト）には、予防整備よりも単価が高くなる「故障の修理費」と、除雪機械の不稼働による「除排雪作業の遅れによる時間損失額（社会的損失額）」または「代替機械の費用」も考慮すべきであり、その方法の検討が必要である。

5. 4 除雪機械劣化度評価ツールに関する検討

信頼度を劣化度の定量的評価の指標とした維持管理手法についてシミュレーションにて検証を行ったが、信頼度は、2. 及び3. で収集解析した結果を使用した。しかし、実際に現場の整備担当者が信頼度を算出するには、故障データを収集し解析する必要がある。そのため、信頼度の算出に必要な故障データの収集について検証し、3. 4. 2を踏まえ、各現場で信頼度を算出し劣化度を評価できる簡易な除雪機械劣化度評価ツールを作成した。

5. 4. 1 除雪機械劣化度評価ツールの機能

ツール作成にあたり機能要件を以下のとおりとした。

- ・ 整備担当者が担当している除雪機械の故障や稼働等のデータを入力することで、そのデータを都度追加し解析を行い、該当機種装置、部品の信頼度を更新し算出表示する。
- ・ 信頼度算出に十分な故障データがない機関も想定されるため、「2. 除雪機械の故障データの整理」で収集した故障データを搭載し、新たに入力されるデータを加え信頼度を更新し算出する。
- ・ 除雪機械毎、装置毎の信頼度を算出し、担当者が欲しい任意の稼働等に合わせた情報を提供する。
- ・ 開発局で使用している「修理及び故障報告書」を参考

に、その報告書とデータ連携して、除雪機械の使用履歴、装置毎の故障、修理の履歴も管理し、信頼度とあわせ情報を提供する。

- 故障報告と故障履歴を一元化するため、「修理及び故障報告書」の機能も備え、故障データの入力により「修理及び故障報告書」を作成し、その逆の「修理及び故障報告書」の作成により故障データを入力可能とする。
- 地域毎（地整、建設部、事務所等毎）、除雪機械毎、装置毎の信頼度を提供する。

5. 4. 2 除雪機械劣化度評価ツールの作成

ツールは、広く使用できるように一般的な表計算ソフトである Microsoft Excel ファイルで作成した。(図-94)

ツールの代表的な機能について、操作手順とあわせ以下に示す。

<データの閲覧>

- ②開発局・地整名、③事務所名、④除雪 ST 名を順に入力し、読み込みボタンをクリックすると、当該除雪 ST の除雪機械の情報が読み込まれ、⑤機械名・規格、⑥管理番号、⑧登録番号のリストに一覧表示される。⑥管理番号のリストを選択すると任意の機械の故障情報（⑨経過年数～⑳事業者・事業等への影響度）が表示される。④除雪 ST 名を空白にすると、③事務所名に表示されているすべての除雪機械の情報が読み込まれ、③事務所名を空白にすると、②開発局・地整名に表示されているすべての除雪機械の情報が読み込まれる。

(b)絞込みを選択すると、解析した信頼度のデータの読み込み。

(c) | < (先頭)、< (1つ戻る)、> (1つ進む)、> | (末尾) ボタンを押すことで、読み込んだデータを順次切り替えて表示する。

<データの登録>

- 「修理及び故障報告書」もしくは故障情報（⑨経過年数～⑳事業者・事業等への影響度）を入力した後、(d)更新ボタン（当該データを上書き）または(e)追加ボタンを押すとデータが登録される。

(f)消去ボタンを押すと画面のデータがクリアされる。(g)削除ボタンを押すと表示されているデータが削除される。

<信頼度の計算と信頼度曲線の描画>

- (h)信頼度ボタンをクリックすると読み込まれているデータの信頼度を計算する。
- (i)(j)描画ボタンをクリックして、稼働時間または稼働距離の信頼度曲線を表示する。グラフには表示されている稼働時間または稼働距離時点の信頼度も重ねて表示される。

<修理及び故障報告書の作成と情報入力>

- (k)台紙へコピーは、入力した故障情報から「修理及び故障報告書」へ、(l)台紙からコピーは、「修理及び故障報告書」から故障情報へ、それぞれデータをコピーする。(m)台紙を保存ボタンで、該当「修理及び故障報告書」を Excel 形式でファイルとして保存する。

修理及び故障報告書				3/15	
② 開発局・地整名	③ 事務所名	④ 除雪ST名	① 発生年月日	2016年	12月 16日
⑤ 機械名・規格	⑧ 登録番号	⑥ 管理番号	⑦ メーカー・型式(架装装置)	機械製作所 (KBL55S1)	
⑦ メーカー・型式(車両本体)	- 除雪機械製作所 (HTR300M)		⑫ 修理費	550	千円
経過年数	現在	過去	年		
累積稼働時間	2016年度		3825時間		
累積稼働距離			35273km		
⑬ 分類	車両	付属装置	バックパー		
⑭ 供給部品名	シールキルト	供給までの日数	7 日	理由	シリンダー・ロット・ホク修理を札幌で行うため
⑮ 発生時の作業状況	号線で横断管清掃中異音が発生した		⑲ 不具合・故障状況・原因	フレッド・リッド・シリンダーの油漏れ。血ハネ破損に伴うシリンダー・ロッドの損傷による。	
⑯ 故障状況	別整備で入庫した際、右側「フレッド・リッド・シリンダー」の油漏れを確認。シリンダー分解した結果、クレーダ作業時の路面凹凸の衝撃を緩和する為の血ハネ(11枚)が破損していた。破損した血ハネは路面凹凸の衝撃緩和(クレーダ)の役割をしており、長期稼働により金属疲労で破損したと思われる。		⑳ 事業者・事業等への影響度	修理により不稼働(7日間)が発生した	
⑰ 原因	2年に一度分解点検、4年に一度部品交換を実施し故障防止に努める。また、今回故障箇所と逆側のシリンダーについても同様の金属疲労が想定されるため併せて分解点検及び				
⑱ 対策					
(a) 読み込み	>	(h) 信頼度	稼働時間	7,356	(i) 描画
(b) 絞込み	<	(f) 消去	信頼度	0.970	(j) 描画
(d) 更新	(e) 追加	(g) 削除	(n) 終了	(k) 台紙へコピー	(l) 台紙からコピー
			(m) 台紙を保存		
国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所					

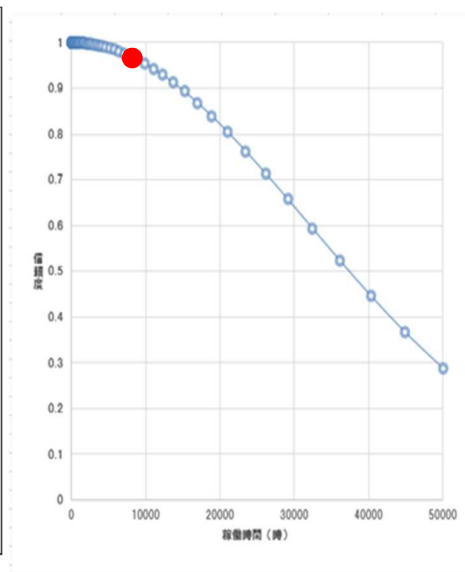


図-94 除雪機械劣化度評価ツール

ツール作成による効果は以下のとおりである。

- ・ 現場にて2. 及び3. で収集解析した信頼度と、さらに、管理している機械の故障データを入力することにより、管理箇所独自の信頼度の算出が可能となった。
- ・ 3. 4. 3と同様に、故障発生時①「整備業者が故障報告の内容を「修理及び故障報告書」へ入力」、②「その内容を現場事務所の担当者が事務所等で確認・承認」、③「その結果をそのまま本部や本局に報告」のシステム化が可能となり、①～③の一連の流れが連動し、より効率的かつ確実にデータ収集を行うことが可能となった。
- ・ 機械毎に定期的な整備の実施箇所や故障後の修理箇所などの履歴を一元管理し把握・整理が可能となった。

また、本項(5.)での維持管理手法を運用するにあたり、現状は、データを収集、解析し、管理している全除雪機械の全対象箇所の信頼度を年度毎の算出、それらを横並びにし複合的に検討を行い、整備に向けた信頼度の目標値の設定や、整備箇所の選定等の判断が必要である。

今回ツールの作成により、故障データの収集、信頼度の算出まで一元化が可能となったが、今後、除雪機械劣化度の定量的評価による維持管理手法の一元化、システム化に向け、更に検討を進めていきたい。

6. まとめ

本研究は、冬期の円滑な道路交通の確保に必要な道路除雪体制を維持するため、除雪機械の効果的かつ効率的な維持管理手法の提案に向け、①除雪機械の稼働、故障等のデータを収集分析し、維持管理の指標となる除雪機械劣化度の定量的評価手法、②センサー等を活用した除雪トラックのメインフレームなどの重要構成部品の劣化度診断手法、③故障発生リスクを考慮した、劣化度の定量的評価に基づく効果的効率的な維持管理手法の3つについて検討を行った。その結果は以下のとおりである。

①除雪機械劣化度の定量的評価手法の検討

FTA(故障の木解析)で抽出した重大故障箇所について、全故障データも含めたワイブル型累積ハザード解析を行い、全故障データと重大故障データで算出した信頼度などの関連性を考察した。

重大故障箇所は全故障データ、重大故障データを用いた解析の結果、約9割が摩耗劣化故障であること、一方で偶発故障を示す故障も存在することを確認した。

重大故障箇所について、それぞれの信頼度を図化し比較

することで、故障発生時に重大故障に陥りやすい故障であるかないかを可視化できた。

また、重大故障箇所に関する重大故障データと全故障データの解析結果において、故障傾向の違いがある場合の対応方法を検討し、適切な故障傾向に修正できる対応策の一つを見いだした。開発局の1開発建設部の過去3年分の稼働実績をもとに、FTAで機械本体の信頼度を算出し、除雪機械の劣化度の定量的評価としての適用性を検討した。

走行距離、稼働時間などの稼働実績で除雪機械本体の信頼度を算出することにより、点検整備時の優先順位を判断する指標になることを確認した。

信頼度による除雪機械劣化度の定量的評価手法構築に向け、必要な故障データの内容や項目を抽出・整理し、既存の故障報告書などを参考に、解析の精度向上や実施しやすさ、記入担当者の負担を考慮した故障データの収集様式を作成した。

②除雪機械重要構成部品の劣化度診断手法の検討

除雪機械重要構成部品の劣化度診断手法では、除雪トラックメインフレームの劣化度診断手法の構築に向け、残留応力を磁場強度の変化で検出する自己磁場測定型残留応力検出機を用いた診断手法について検討した。

検出機にて測定している部位に加速度ピックアップを設置し、振動加速度レベルにてメインフレームの負荷傾向を把握した。各作業により一定の負荷傾向が確認できた。さらに、振動加速度レベルと磁場強度の経時データから、劣化度診断への適用性について検討し、車両鉛直(Z)方向の磁場強度と振動加速度レベルの相関の可能性を確認することができた。

残留磁場強度の測定値は、引張試験、曲げ試験に用いた試験片を1年毎2年間に渡り経時計測した結果、受けた負荷や外力に対し高い再現性があることを確認した。

破断した試験片の数値や経時計測データから、劣化診断指標の評価値を設定した。

一方、弾性変形領域内の比較的弱い負荷に対しては、残留磁場強度を一時的に保持するが継続的に変化させるには至らず、その数値が大きく変動する場合もあることが確認できた。また、1回の通常の除雪作業実施の負荷では、磁場強度にほとんど変化が現れなかった。

破断した試験片の数値や経時計測データから、劣化診断指標の評価値を設定した。しかし劣化の有無を評価する数値設定はできたが、測定結果が定量的にどのくらいの劣化度なのかは判断ができず、劣化度診断までには至らな

かった。

除雪トラックの経年変化を追跡調査した結果、毎年の疲労の蓄積が残留磁場強度の増加という形で定性的に把握できることを確認した。検出機に複数年による計測により、フレームに長期間に蓄積する疲労または通常作業では生じない大きな外力に対して、その変化を磁場強度にて定性的に把握し、診断指標より劣化の有無について評価できる可能性を確認した。

また、検出機を用いた診断手法の課題も確認した。

引張試験や曲げ試験では、一定方向の外力に関して破断の状態を再現したが、メインフレームには1方向の力が作用するのではなく、複数の方向からの力も作用していることがわかり、複数方向の外力での磁場強度の変化について検証が必要である。

さらに、劣化箇所の特定は可能となった。しかし、特定箇所の中に劣化箇所は入っているが、特定箇所が劣化箇所と等しい訳ではなく、精度向上に向け検証が必要である。

今後は磁場強度の変化量にこだわらず、様々な技術手法について検証していきたい。

③除雪機械劣化度の定量的評価による維持管理手法の検討

事務所が管理する複数路線に対する優先順位付けを行い、路線の重要度に合わせて信頼度の目標値を設定することで、整備や配置換えの実施判断が可能な維持管理手法について検討、さらに機械の更新時期も考慮したシミュレ-

ーションを実施した。

路線が持つ機能や交通量を考慮した「交通機能」と、年間の除雪作業日数を考慮した「除雪作業」の2つの観点から、路線の重要度を5段階で評価する手法を検討するとともに、除雪機械の重大故障発生頻度を整理し、路線毎に信頼度の目標値を設定した。

配置換えを想定したシミュレーションの結果、数回の配置換えを実施することで、予防整備費用を平準化でき、単年度予算が大幅に超過する年数を削減できた。

さらに除雪機械の更新時期や更新費用の設定を反映した長期間のシミュレーションの結果、予防整備や更新時期の効率的な計画立案が可能となった。

整備担当者が整備計画の立案等に活用できるよう除雪機械劣化度評価ツールを作成した。その結果、より効率的かつ確実な故障データ収集と、データの収集から信頼度の算出までの一元化が、それぞれ可能となった。

しかし、機械更新時期等に劣化度が未適用であったりするなどの課題が明らかになった。

今後、除雪機械劣化度の定量的評価による維持管理手法の一元化、システム化に向け、更に検討を進めていきたい。

参考文献

- 1) 建設機械整備技術委員会：建設機械整備標準作業工数表（除雪機械編）（平成22年度版）、2010

14.3 リスクマネジメントによる効果的・効率的な冬期交通事故対策技術の開発

14.3.1 冬期交通事故リスクマネジメント手法の構築に関する研究

担当チーム：寒地道路研究グループ（寒地交通チーム）

研究担当者：石田樹、佐藤昌哉、島山乃、高橋尚人、平澤匡介、星卓見、四辻裕文、高田哲哉、齊田光、奥村航太

【要旨】

積雪寒冷地では冬期特有の気象や路面状態の悪化などが交通事故の発生に与える影響が大きい。冬期交通事故対策技術の開発のためには、冬期特有の気象や路面状態の悪化などがもたらす交通事故の起こりやすさを「冬期交通事故リスク」と捉えてリスクマネジメントの考え方を適用することが有益である。しかし「冬期交通事故リスクマネジメント」の手法は必ずしも体系的に整備されていない。そこで本研究では「交通事故分析データベース整備」、「冬期交通事故リスク要因分析」、「冬期交通事故リスク評価手法の開発」、「リスク対策評価」、「リスク対策による便益算定」及び「冬期交通事故リスクマネジメントツールの開発」を行い、効果的・効率的な冬期交通事故対策に資する冬期交通事故リスクマネジメント手法を開発した。

キーワード：交通事故リスク、リスクマネジメント、データベース、リスク評価、リスク対策、ツール

1. はじめに

国土の約6割を占める積雪寒冷地では、冬になると道路上でスリップ事故や視界不良事故などの冬型事故が多発する。積雪寒冷地では冬期特有の気象や路面状態の悪化などが交通事故の発生に与える影響は大きい。首都圏を含む普段雪が少ない地域でも記録的な大雪時の道路交通の安全確保が課題になっている。このように冬期交通事故対策技術の開発の重要性は積雪寒冷地のみならず普段雪が少ない地域でも高まっている。

冬期交通事故対策技術の開発のためには、冬期特有の気象や路面状態の悪化などがもたらす交通事故の起こりやすさを「冬期交通事故リスク」と捉えたうえでリスクマネジメントの考え方を適用することが有益である。ところが「冬期交通事故リスクマネジメント」の手法は必ずしも体系的に整備されていない。

そこで本研究では、北海道を対象にした冬期交通事故リスクマネジメントに着目して「交通事故分析データベース整備」、「冬期交通事故リスク要因分析」、「冬期交通事故リスク評価手法の開発」、「リスク対策評価」、「リスク対策による便益算定」及び「冬期交通事故リスクマネジメントツールの開発」を行い、これらの要素技術を「リスク特定」「リスク分析」「リスク評価」及び「リスク対応」に位置付けて体系化した冬期交通事故リスクマネジメント手法を構築する。

これにより「ビッグデータ等を活用した冬期交通事故リスク評価手法の構築」、「冬期交通事故リスクマネジメント手法の構築」及び「冬期交通事故リスクマネジメントツールの開発」という3つの目標を達成することを本研究の目的とする。

2. 用語について

本稿で用いる語句のうち最初に定義が必要なものについて以下に示す。

2.1 人身事故と物損事故

図-1に示すように、北海道の主な国道では冬期（11～3月）になるとそれ以外の期間に比べて人身事故件数が若干減る一方、物損事故件数が急激に増える。このような特徴を踏まえると、積雪寒冷地では交通事故リスクの対象を人身事故と物損事故の両方にすることが望ましい。そこで本稿では、特に断らない限り交通事故リスクとは人身・物損事故リスクを指すものとする。

交通事故統計上の人身事故と物損事故の相違点を明らかにしておくこと、人身事故データは事故当事者の死亡・重傷・軽症を伴う人対車両事故・車両相互事故・車両単独事故のことを指すのに対し、物損事故データは車両相互や車両単独などで物質的損害を与えて物件交通事故として警察に届け出られたものを指す。警察で保管される事故原票の形式が異なるため両データを

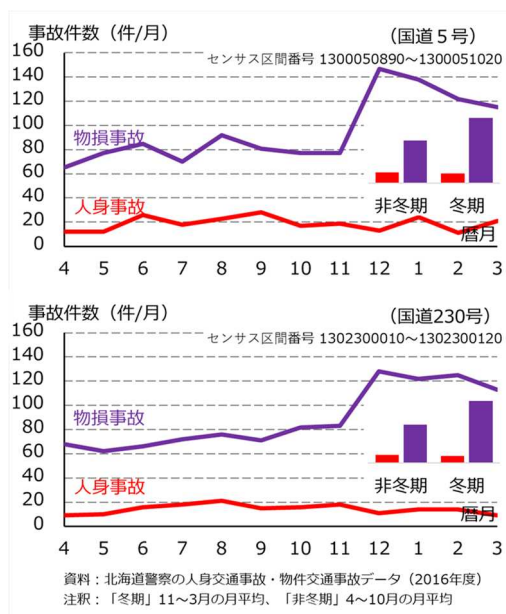


図-1 北海道の主な国道における交通事故の特徴

同時に分析するには技術的な工夫が必要になる。尚、交通事故統計上、冬型事故は人身事故に属する。

2. 2 交通事故リスク

交通事故リスクを交通事故率と混同する文献が見受けられるが、両者は区別される。交通事故リスクとは既に起こった事故がどのような状況で起きたのかを分析し、その状況が変化するとき起こり得るリスクを計算したものである。本研究では交通事故リスクを「自動車走行台キロで基準化された単位期間あたりの人身・物損事故の起こりやすさ（生起確率）」と定義する。一方、交通事故率は既に起こった事故から計算されるものではあるが、どのような状況で事故が起きたのかをその値から判別できない。国土交通省が定義した死傷事故率は自動車走行台キロで基準化された年間の死傷事故件数のことであり、特定の状況下における交通事故リスクを示しているものではないため、交通・気象等の状況が変化したときの死傷事故の起こりやすさを分析するためには死傷事故率ではなく死傷事故リスクの算出が不可欠となる。

2. 3 交通事故リスクマネジメント

リスクマネジメントの定義について、国際標準化機構ISOや日本産業規格JISは組織による経営管理の手法という文脈で定義している。ISO31000によれば、リスクマネジメントとは「リスク特定、リスク分析、リスク評価、リスク対応、モニタリング及びリスクコミュニケーションのプロセスを通じてリスクを効果的・効率的に管理すること」を指す。このプロセスの中でリスク特定、リスク分析及びリスク評価は「リスクアセ

スメント」と呼ばれる。

土木学会JSCEは建設プロジェクトの管理手法という文脈でリスクマネジメントを定義している。土木計画学ハンドブックによれば、リスクマネジメントとは「危険性又は有害性の特定、リスクの把握、リスクのコントロール、リスクの回避や分散、及びリスクによる損害や損失の予防や低減措置内容の決定といった一連のプロセスを通じて建設プロジェクトのリスクに対する管理や対処方法を検討すること」を指す。「危険性又は有害性の特定」が「リスク特定」に、「リスクの把握」が「リスク分析」に、「リスクのコントロール、リスクの回避や分散」が「リスク評価」に、「リスクによる損害や損失の予防や低減措置内容の決定」が「リスク対応」に各々相当する。

本研究では、ISOやJISに倣い、交通事故リスクマネジメントの要素技術を「リスク特定」、「リスク分析」、「リスク評価」又は「リスク対応」に位置付けて体系化を図り、効果的・効率的に交通事故リスクを管理する手法を構築する。「交通事故分析データベース整備」がリスク特定に、「冬期交通事故リスク要因分析」がリスク分析に、「冬期交通事故リスク評価手法の開発」と「リスク対策評価」と「リスク対策による便益算定」がリスク評価に、「冬期交通事故リスクマネジメントツールの開発」がリスク対応に各々相当するものである。尚、本研究においてリスク対策は上記のリスク対応と同義とする。

3. 研究実施内容

本研究の主な実施内容を図-2に示す。以下、本研究の3つの達成目標に沿って研究実施内容を説明する。

3. 1 達成目標①ビッグデータ等を活用した冬期交通事故リスク評価手法の構築

3.1.1 交通事故分析データベース整備

平成28年度～令和元年度には、地理情報システムArcGISとデータベース管理システムAccessを基盤にし



図-2 冬期交通事故リスクマネジメント手法全体像

て過去の中長期計画において開発した交通事故分析システムのデータベースに対し、物損事故やETC2.0プローブ等のデータを追加してシステムを更新した。

3.1.2 冬期交通事故リスク要因分析

平成28年度には、日陰時間と冬期交通事故リスクとの関係の分析¹⁾や雪氷路面すべり抵抗値と冬期交通事故リスクとの関係の分析²⁾を行った。

平成30年度には、国道230号のスリップ事故のリスク要因を分析して降雪量と平均気温から当日のスリップ事故危険度を判定する図を開発し、北海道警察による交通情報板を利用したスリップ事故危険度情報の提供を支援した。

3.1.3 冬期交通事故リスク評価手法の開発

平成28年度～令和元年度には、空間統計分析と交通状態推定の手法を用いて、札幌市の地図上で冬期に人身・物損事故リスクが高くなる地域メッシュが集積しているエリアを特定可能かつエリア内の国道でリスクが高まる交通量・車速状態を評価可能な手法を開発した⁴⁾。

令和2年度には、地図画像を利用した深層学習の手法を用いて、札幌市に流入する時間あたり交通量のデータ等を使い高事故リスクのエリアを地図上で評価できる手法を開発した。

3.2 達成目標②冬期交通事故リスクマネジメント手法の構築

3.2.1 リスク対策評価

令和2年度には、リスク対策（リスク対応）の一つとして「並行する国道と高速道のルート上で冬期交通事故リスク情報を提供し、高事故リスクルートから低事故リスクルートへと交通量を転換させてトータルリスク低減を図る」という交通需要マネジメント手法を提案し、道の駅での調査等のデータから道路利用者のリスク情報の理解しやすさやルート転換の意向を評価した^{6),7)}。

3.2.2 リスク対策による便益算定

令和3年度には、上記のリスク対策の便益として、並行ルートを含む道路ネットワーク全体を対象にした交通量配分⁸⁾に基づく情報提供便益を算定した。そしてリスク情報のリスク値が並行ルート間でどの程度ならば便益が生じてリスクマネジメントに効果的かを示した。

3.3 達成目標③冬期交通事故リスクマネジメントツールの開発

令和2年度には、ArcGISとAccessを基盤にした既存の交通事故分析システムの機能の一部を移植して無償の

QGISとPostgreSQLを新たなシステム基盤に持つモバイル型の交通事故分析システムを作製した。さらに抜け道や交差点周辺の事故状況を分析できる機能や現地で報告書を作成できる機能をもつアプリケーションソフトウェアを開発し、上記のモバイルに実装した⁹⁾。

令和3年度には、交通事故リスクが懸念される現場で道路管理者・警察等がリスク対策を行ううえでチェックすべき項目や対策メニューなどを表示したアプリを開発し、エキスパートシステムとして上記のモバイルに実装した。交通事故分析システムとエキスパートシステムを実装したモバイル端末の開発により、リスク対策の一つである「生活道路での交通安全診断（道路安全診断）」を支援するツールとした⁹⁾。

以下、本章で説明した研究実施内容の細目について詳述する。

4. 交通事故分析データベース整備

「交通事故分析データベース」とは第1期～3期中長期計画（平成13年度～平成27年度）を通じて継続的に整備されてきた「交通事故分析システム」のデータベースのことであり、北海道の高速道・国道・道道・市町村道を対象に、交通事故データ（北海道警察との共同研究を通じて貸与される人身事故データ）、道路構造データ（国土交通省北海道開発局の道路管理データベースMICHのデータ及び寒地土木研究所の計測車両による冬期路面すべり抵抗値のデータ）、交通データ（道路交通センサスの交通量・道路幅員等のデータ）、気象データ（気象官署やアメダスの気温・降水量等のデータ）などを統合して、事故1件ごとに事故発生地点の緯度・経度情報と気象等の情報を紐付けていったものである。「交通事故分析システム」とは、交通事故分析データベースの緯度・経度情報をDRM（日本デジタル道路地図協会のデジタル道路地図）に紐付けてデータの検索や分析をできるようにしたシステムのことである。図-3は交通事故分析システムを使った分析の例であり、日平均気温マイナス5度以下で発生した平成28年の人身事故発生地点を示している。

第4期中長期計画（平成28年度～令和3年度）では既存の交通事故分析データベースに新たな年次のデータを追加した他、新たな項目として道内の物損事故、ETC2.0プローブ車による車速・急挙動、寒地土木研究所で計測した一部の国道の路面すべり抵抗値を追加した。物損事故の事故原票には事故発生地点の緯度・経度情報が記されておらず町丁目だけなので、物損事故の発生地点をDRM上に表示させるには、町丁目の情報

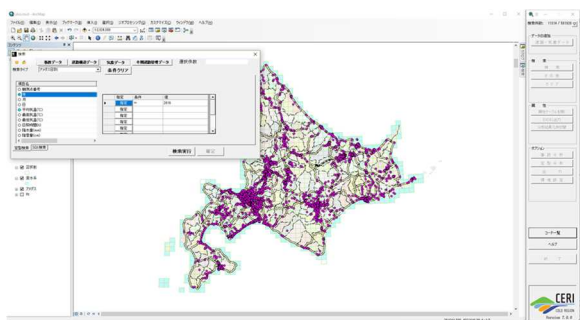


図-3 ArcGIS等を基盤にした交通事故分析システムを使った分析の例

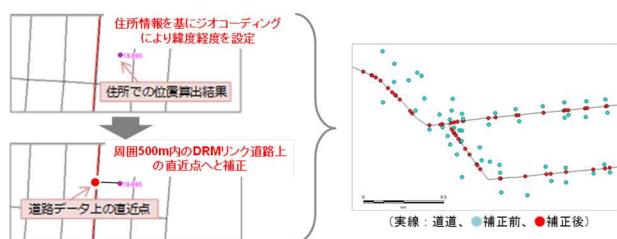


図-4 物損事故データのマップマッチングの方法

でDRM上にジオコーディングをした後で直近の道路上にマップマッチングさせる必要があった(図-4)。直近に道路が無い場合はジオコーディングのみとなってしまう、結果的にマップマッチングができなかった物損事故データは約半数を占めた。

5. 冬期交通事故リスク要因分析

5.1 路面の日陰時間と冬期交通事故リスクの関係についての分析^{1), 2)}

冬期道路では融けた雪が路面上で凍ることによりスリップ事故を誘発する。路面上の融雪の程度は路面の日照時間に影響を受ける。路面の日照時間は沿道地物等の日射遮蔽に影響を受ける。したがって沿道地物等の日射遮蔽で日陰になる区間では路面状態が悪化しやすくなりスリップ事故等の冬型事故が発生しやすくなると考えられる。日陰と事故リスクの関係についてはこれまで不明な点が多かったため、交通事故分析データベースと日陰計算モデルを用いて沿道地物による日陰時間と冬期人身事故率の関係を分析した。

分析の方法は、はじめに、沿道地物の立体模型を作り沿道地物の原位置に対する太陽の位置を計算し、太陽と沿道地物の位置関係から日射が遮蔽する1日あたりの日陰時間 t [h]を算出した。次に、交通事故分析システムを用いて、模型となった沿道地物が立地する国道の1日あたりの冬期人身事故率 R_w [件/億台km]と夏期人身事故率 R_s [件/億台km]を算定した。最後に、両

者の関係をグラフで表して、日陰時間 t [h]と人身事故率 R_w, R_s [件/億台km]の関係を調べた。

沿道地物の立体模型については、国土地理院のデジタル標高データと株式会社ゼンリンのデジタル住宅地図データを用いて作製した(図-5)。

太陽の位置については、方位角 θ [rad]と太陽高度 α [rad]の各々を次式で計算した。ただし、 δ は赤緯、 ϕ は緯度、 γ は太陽の時角である。

$$\sin \alpha = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \gamma \quad (1)$$

$$\tan \theta = \frac{-\cos \delta \sin \gamma}{\sin \delta \sin \phi - \cos \delta \cos \phi \cos \gamma} \quad (2)$$

日陰時間 t [h]の算定については、沿道地物の形状を三角形要素の集合体と見做し、太陽の位置 (θ と α)と任意の路面地点を結ぶ線分と沿道地物の三角形要素との間に交差が生じるかを判定し、交差した時間から日射遮蔽の時間を算定した(図-6)。

図-7~図-10に、分析結果の一部を示す。図中の●は冬期、■は夏期を表す。事故件数が50件以下となり相対的に少なくなる場合は白抜ききの○や□で表し、分析対象から除外した。図-7~図-10をみると、概ね $t \leq 8$ の範囲で、冬期・夏期ともに路面の日陰時間が増加するにつれて人身事故率が増加する傾向が見られた。日

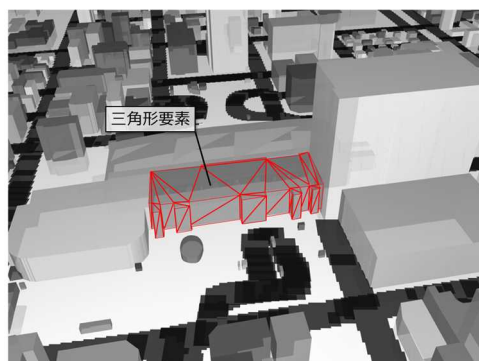


図-5 札幌駅周辺の国道沿道地物の立体模型

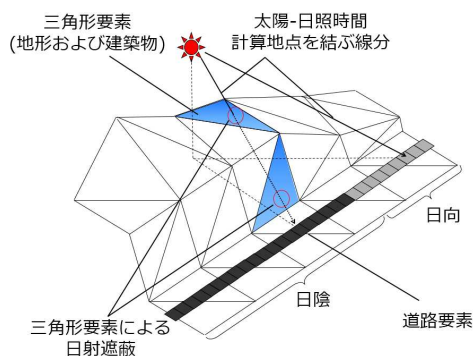


図-6 路面の日陰時間の算定方法

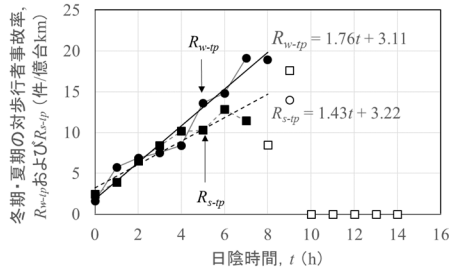


図-7 対歩行者事故率と日陰時間の関係

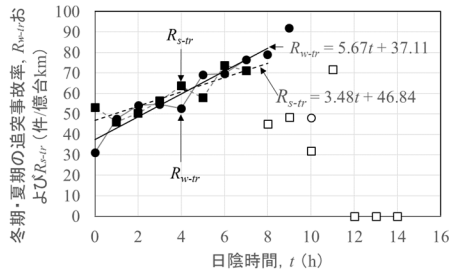


図-8 追突事故率と日陰時間の関係

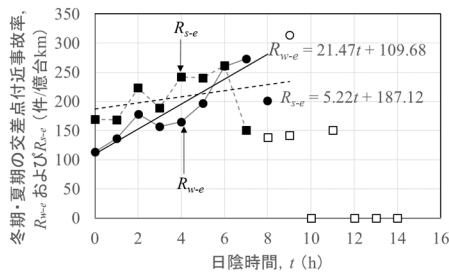


図-9 交差点付近事故率と日陰時間の関係

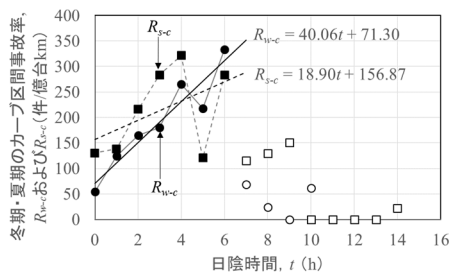


図-10 カーブ区間事故率と日陰時間の関係

陰時間が事故率に及ぼす影響は事故類型や道路構造によって異なり、特徴として以下に示す点が見られた。

- ✓ 冬期における路面の日陰時間中の対歩行者事故率と追突事故率は、夏期と比べると、有意に大きな値であった。
- ✓ 交差点付近では、冬期において路面の日陰時間が増えると、人身事故率が夏期と比べて4倍以上増える傾向にあった。
- ✓ カーブ区間では、冬期と夏期で日陰時間の増加に

伴う人身事故率の増加に有意な差はみられなかったが、冬期と夏期のいずれも直線区間よりは増加が大きくなっていた。

5. 2 雪氷路面すべり抵抗値と冬期交通事故リスクの関係についての分析³⁾

警察の事故原票には事故発生時刻の詳細な路面状態は記録されない。事故発生時刻の正確な路面状態が判明するのは、偶然その時刻にその地点の路面状態を計測していた場合に限られる。路面状態と交通事故リスクの関係を知るには、路線全体にわたって連続的に路面状態を計測しておいて過去に当該路線で発生した交通事故との関係を分析する必要がある。そこで本研究では、国道230号の札幌市内45km区間で1月と2月に発生した物損事故のデータと連続路面状態計測車両で同区間の雪氷路面状態（路面温度と路面すべり抵抗値HFN）を実測したデータとを紐付けた冬期路面状態予測モデルを開発し、札幌市中心部から半径15km圏内のロードヒーティングをしていない国道を対象にこのモデルを使って雪氷路面状態と物損事故リスクの関係を分析した。「連続路面状態計測車両」とは連続路面すべり計測装置によって路面すべり抵抗値HFNを計測できる寒地土木研究所所有の車両である。HFNは無次元の値であり、0~100の範囲で値が小さくなるほど路面はすべりやすい状態であることを示す。

分析の方法は、はじめに、連続路面状態計測車両が通過した任意の地点において、路面温度とHFNを計測した時刻を境に前後15時間以内に発生した物損事故件数を抽出し、路面温度とHFNの階級ごとに物損事故件数を紐付けた。路面温度を T_t [°C]、HFNを f_{HFN} （無次元）とおくと、各々の物損事故率 r_t, r_{HFN} [件/億台km]は次式で表される。

$$r_t = \frac{10^8 N_t}{365.25 P L_t Q} \quad (3)$$

$$r_{HFN} = \frac{10^8 N_{HFN}}{365.25 P L_{HFN} Q} \quad (4)$$

ただし、

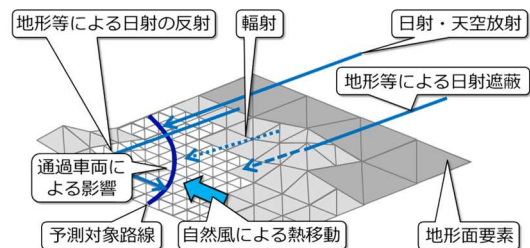


図-11 沿道地物の影響を考慮した道路気象計算

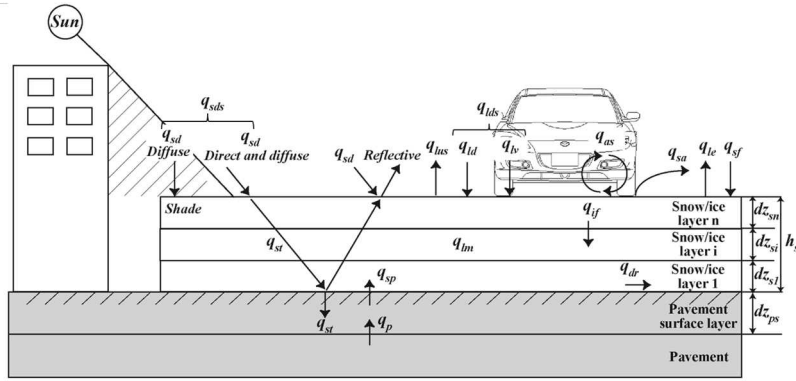


図-12 舗装と路面上の雪氷層との間の熱収支計算

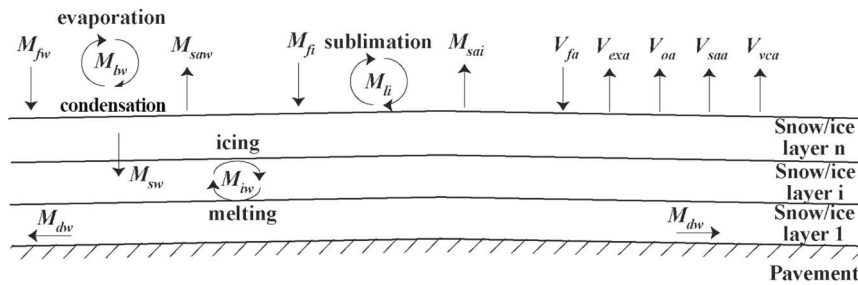


図-13 路面上で雪氷層を構成する水・氷・空気の質量・体積収支計算

$N_t : T_t$ の階級ごとに紐付けされた交通事故件数 [件/年]、
 $L_t : T_t$ の階級ごとに紐付けされた区間内出現距離 [km]、
 $N_{HFN} : f_{HFN}$ の階級ごとに紐付けされた件数 [件/年]、
 $L_{HFN} : f_{HFN}$ の階級ごとに紐付けされた距離 [km]、
 Q : 年平均日交通量 [台/日]、 P : 対象期間 [年]。

次に、熱収支アプローチに従って冬期路面状態予測モデルを構築した。同モデルは、①沿道地物の影響を考慮した道路気象計算、②舗装と路面上の雪氷層との間の熱収支計算、③路面上で雪氷層を構成する水・氷・空気の質量・体積収支計算、④タイヤ接地面の路面すべり抵抗値計算という4つのプロセスから構成される。詳細は以下の通りである。

- ① 沿道地物の影響を考慮した道路気象計算では、デジタル地形データ等を用いて沿道地物を三角形要素の集合体として再現し、日射の遮蔽や反射や輻射がもたらす影響を計算する (図-11)。
- ② 舗装と路面上の雪氷層との間の熱収支計算では、舗装および路面上の雪氷層を模した計算要素の間を出入りする熱のフラックス (単位時間あたり単位面積を通過する物理量で、流速密度のこと。) の収支に基づき、雪氷層の温度 T_s [°C]とタイヤ接地面の雪氷層厚 h_s [m]を次式で計算する (図-12)。

$$\rho_s c_s \frac{\partial(T_s h_s)}{\partial t} = q_{sds} + q_{lds} - q_{tus} + q_{as}$$

$$+q_{sf} - q_{le} - q_{sa} + q_{tm} - q_{if} - q_{dr} + q_{sp} - q_{st} \quad (5)$$

ただし、

t : 時間 [s]、

$\rho_s c_s$: 雪氷層の体積熱容量 [J K/m³]、

q_{sds} : 日向・日陰を考慮した直達および散乱日射熱フラックス (表層のみ) [W/m²]、

q_{lds} : 雪氷層への長波放射フラックス [W/m²]、

q_{tus} : 雪氷層からの長波放射フラックス [W/m²]、

q_{as} : 風による顕熱フラックス [W/m²]、

q_{sf} : 降雨・降雪による顕熱フラックス [W/m²]、

q_{le} : 蒸発・昇華による潜熱フラックス [W/m²]、

q_{sa} : 飛散による顕熱フラックス [W/m²]、

q_{tm} : 融解・凝固による潜熱フラックス [W/m²]、

q_{if} : 融雪水の下方浸透による顕熱フラックス (最下層を除く) [W/m²]、

q_{dr} : 排水による顕熱フラックス [W/m²]、

q_{sp} : 雪氷層と路面との熱フラックス [W/m²]、

q_{st} : 日射による透過熱フラックス [W/m²]。

- ③ 路面上で雪氷層を構成する水・氷・空気の質量・体積収支の計算では、水・氷・空気のフラックス収支に基づき、雪氷層中の水の質量 M_w [kg/m²]と氷の質量 M_i [kg/m²]と空気の単位面積あたり体積 V_a [m³/m²]を以下の式で計算する (図-13)。

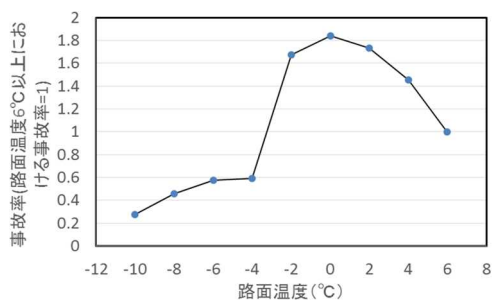


図-14 雪氷路面の路面温度（実測値）の階級別にみた物損事故率

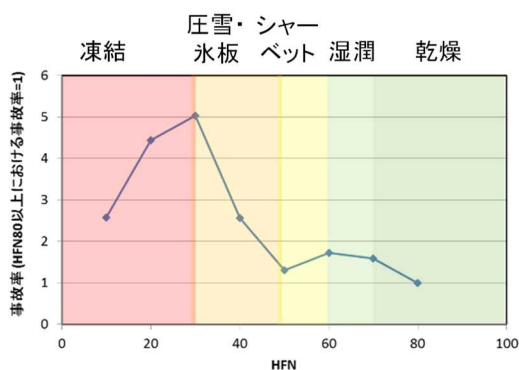


図-15 雪氷路面の路面すべり抵抗値（実測値）の階級別にみた物損事故率

$$\frac{\partial M_w}{\partial t} = M_{fw} + M_{lw} + M_{iw} - M_{sw} - M_{dw} - M_{saw} \quad (6)$$

$$\frac{\partial M_i}{\partial t} = M_{fi} + M_{li} - M_{iw} - M_{sai} \quad (7)$$

$$\frac{\partial V_a}{\partial t} = V_{fa} - V_{exa} - V_{oa} - V_{saa} - V_{vca} \quad (8)$$

ただし、

- M_{fw} : 降雨フラックス [kg/m²/s]、
- M_{lw} : 蒸発・凝結フラックス [kg/m²/s]、
- M_{iw} : 融解・凝固フラックス [kg/m²/s]、
- M_{sw} : 融雪水の下方浸透フラックス [kg/m²/s]、
- M_{saw} : 雪氷層中の飛散水分フラックス [kg/m²/s]、
- M_{fi} : 降雪フラックス [kg/m²/s]、
- M_{li} : 昇華フラックス [kg/m²/s]、
- M_{iw} : 融解・凝固フラックス [kg/m²/s]、
- M_{sai} : 雪氷層中の飛散氷成分フラックス [kg/m²/s]、
- V_{fa} : 降雪空気フラックス [m³/m²/s]、
- V_{exa} : 置換空気フラックス [m³/m²/s]、
- V_{oa} : 開放空気フラックス [m³/m²/s]、
- V_{saa} : 雪氷層中の飛散空気フラックス [m³/m²/s]、
- V_{vca} : 通過車両の粘性圧縮による排出空気フ

ラックス [m³/m²/s]。

- ④ タイヤ接地面の路面すべり抵抗値計算のプロセスでは、路面雪氷状態に基づいて路面すべり状態を予測する。タイヤ接地面の雪氷層厚 h_s [m]に基づき HFN f_{HFN} (無次元量) を次式で計算する。

$$f_{HFN} = 49.303(\theta_i h_s)^{-0.076} \quad (9)$$

ただし、

θ_i : 雪氷層の体積含水率 [%]。

- ①～④のプロセスから得られた式(9)が雪氷層厚を用いてHFNを予測する式である。

図-14と図-15に、路面温度 T_t 及びHFN f_{HFN} と物損事故率 r_t 及び r_{HFN} の関係を分析した結果を示す。 r_t は6°C以上を、 r_{HFN} は80以上を各々1に正規化している。特徴として以下に示す点が見られた。

- ✓ 冬期交通事故リスクは降雪時の路面温度が0°C前後のときに最大になる。その際、リスクは無積雪時の約1.8倍になる。この原因として0°C前後の路面温度で路面状態が急変する点が挙げられる。
- ✓ 冬期交通事故リスクは降雪時の路面すべり抵抗値HFNが30のときに最大になる。すべりやすい路面の交通事故リスクは路面状態が圧雪・氷板になると無積雪時の約5倍になる。

冬期路面状態予測モデルを用いた評価ではHFNのみならず T_s 、 h_s 、 M_w 、 M_i 、 V_a から算出されるタイヤ接地面の路面温度、積雪深、雪氷層体積含水率にも着目した。これらの状態を階級に分け、階級に応じて生じた物損事故件数と各状態の関係を分析した。以下、路面温度出現距離あたりの交通事故件数を R_t [件/km]、積雪深出現距離あたりの交通事故件数を R_d [件/km]、雪氷層体積含水率出現距離あたりの交通事故件数を R_i [件/km]、HFN出現距離あたりの交通事故件数を R_{HFN} [件/km]と表す。

図-16～図-19に分析結果を示す。 R_t は5°C以上を、 R_d と R_i は積雪深が無い状態を、 R_{HFN} は70以上の状態を各々1に正規化している。各図の中で正規化の基準となる階級の棒グラフは色を変えている。図-18では事故件数が5件未満となる階級を白抜きで表している。特徴として以下に示す点が見られた。

- ✓ タイヤ接地面の路面温度（予測値）が0°C付近の雪氷路面では物損事故が発生しやすくなる。この原因として雪氷層の融解・再凍結に伴ってすべりやすい路面が出現する点が挙げられる。一方、路面温度がマイナス6°C以下まで低下すると物損事故は発生しにくい。
- ✓ タイヤ接地面の雪氷層体積含水率（予測値）が

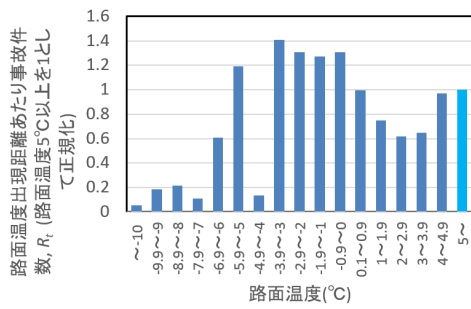


図-16 タイヤ接地面の路面温度（予測値）の階級別にみた路面温度出現距離あたり物損事故件数

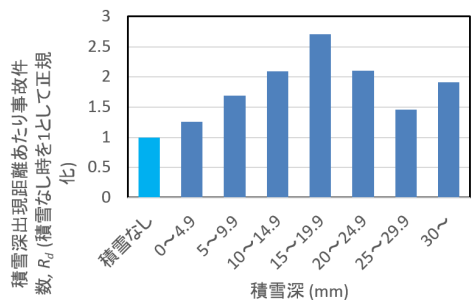


図-17 タイヤ接地面の積雪深（予測値）の階級別にみた積雪深出現距離あたり物損事故件数

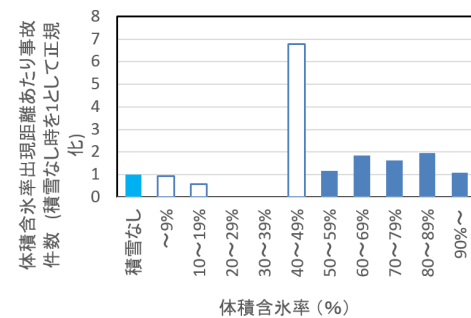


図-18 タイヤ接地面の体積含有率（予測値）の階級別にみた体積含有率出現距離あたり物損事故件数

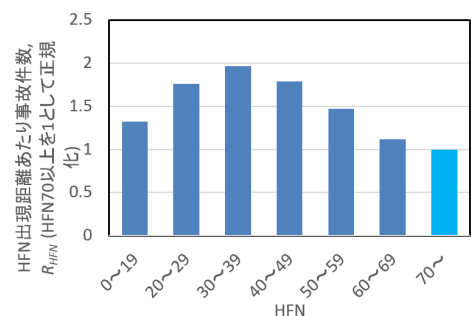


図-19 路面すべり抵抗値 HFN（予測値）の階級別にみた HFN 出現距離あたり物損事故件数

90%以上の雪氷路面では物損事故が発生しにくい。この原因として目視で路面状態の危険を認識しやすくなる点が挙げられる。

- ✓ タイヤ接地面の積雪深（予測値）が15mm~20mm程度では無積雪時と比べて物損事故件数が3倍程になる。積雪深（予測値）がそれ以上増えると物損事故件数は減少する。
- ✓ HFN（予測値）が30~40という中程度の路面すべり状態で物損事故件数は最大になる。

5. 3 降雪量・平均気温とスリップ事故リスクの関係についての分析

国道230号中山峠の交通情報板を用いて北海道警察がリアルタイムのスリップ事故リスク情報提供を試行するにあたってスリップ事故リスク要因を分析した。

交通事故分析システムを用いて国道230号の過去の冬型事故の発生状況を分析した結果、日平均気温がマイナス4.9°C~0°Cの状況で、かつ、降雪量がゼロの状況のとき最もスリップ事故件数が多かった。そこでこの状況をレベル4と定義してスリップ事故危険度を4段階で判定し、降雪量と日平均気温に基づくスリップ事故危険度の判定図を作成した（図-20）。

北海道警察による情報提供の仕組みについては、警察の担当者が毎日の朝・昼・夕のタイミングで国道230

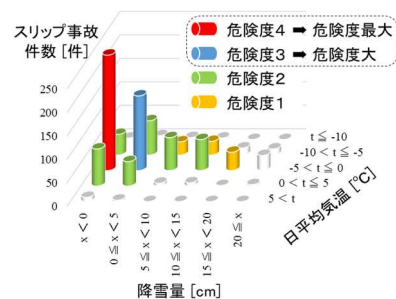


図-20 降雪量と日平均気温に基づくスリップ事故危険度の判定



図-21 国道 230 号中山峠の交通情報板を用いた北海道警察によるスリップ事故リスク情報提供の試行

号中山峠のCCTVカメラから目視で路面状況を確認して気温・降雪量の値を判定図に照らし合わせ、スリップ事故危険度がレベル4又はレベル3に該当した場合には管制センターに電話で連絡して交通情報板への表示を依頼するというものである。レベル4とレベル3とで情報板の表示内容が変わる(図-21)。尚、平成30年度の冬期から試行された国道230号に続いて、令和2年度の冬期からは国道36号でも試行されている。

6. 冬期交通事故リスク評価手法の開発

6.1 空間統計分析と交通状態推定を用いた冬期交通事故リスク集積エリアの評価手法⁴⁾

新たに「交通状態別事故リスク」を定義し、空間統計学と交通工学の手法を活用して交通状態別事故リスクを地図上で評価できる手法を開発した。札幌市内の国道網で季節別・時間帯別に交通事故リスクが集積するエリアを地図上で「見える化」し、エリア内の交通量・車速と交通事故率との関係から交通状態別事故リスクを評価した。道路管理者がこの手法を使うと、従来の事故多発地点のような「点」ではなく事故リスク集積エリアという「面」で事故対策を評価できる。加えて、エリア内の交通状態が季節別・時間帯別にみてもどのような状態のときに事故対策を施せば、効果的・効率的な事故リスク低減を図れるか評価できるようになる。本手法は図-22のフローに従うが、詳細は以下に示す。

① 基準地域メッシュからの対象メッシュ抽出

札幌市の地図上の地域メッシュのうち基準地域メッシュ(3次メッシュ、1km四方)に着目し、全基準地域メッシュ1,523個のうちメッシュ内に国道を含む196個を評価対象にした。それらを「対象メッシュ」と名付けた。

② 対象メッシュ属性のデータ整理

季節と時間帯の区分については春季(3~5月)、夏季(6~8月)、秋季(9~11月)、冬季(12~2月)、朝方(7~9時台)、昼間(10~15時台)、夕暮(16~18時台)、夜間(19~6時台)とした。

対象メッシュの属性データの整理にあたって、まず交通事故分析システムを用いて対象メッシュの1メッシュあたり人身・物損事故率を季節別・時間帯別に整理した。この事故率の分子は対象メッシュ内の国道リンクに紐付けされた交通事故件数を、分母はメッシュ内の総リンク交通量と総リンク長の積の億倍を指す。

次に、ETC2.0プローブデータを用いて対象メッシュ内の国道の旅行速度データを整理した。ETC2.0プロー

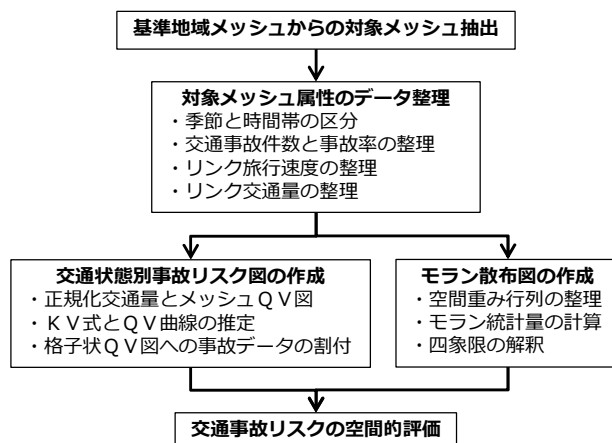


図-22 空間統計分析を用いた交通状態別リスクの面的評価手法の構築のフロー

ブ車のDRMリンクごとの15分集計単位の平均旅行速度(地域メッシュのうち10km四方の2次メッシュに含まれるDRMを対象にしてDRMリンク上を走行したETC2.0プローブ車の旅行速度を15分単位で平均したものを)、当該DRMリンク上に15分集計単位で存在したETC2.0プローブ車の台数で加重平均したものを1時間単位で集計した後で、メッシュ番号と流入流出ノード番号と単位区間番号を参照して地図上に紐付けるマップマッチングを行い、国道リンクに旅行速度データを貼り付けて季節別・時間帯別に集計した。これを「対象メッシュのリンク旅行速度」と名付けた。

次に、国土交通省北海道開発局の交通量常時観測システム(国道等に設置された交通量計測装置を使って常時収集している交通量データをデータベースに蓄積するシステムのこと)から出力された「時間係数表」と国土交通省の道路センサス(道路局等が定期的実施する全国道路街路交通情勢調査のこと)の調査結果を示す平成27年度「箇所別基本表」を用いて、対象メッシュ内の国道の交通量データを整理した。メッシュ番号と流入流出ノード番号と単位区間番号を参照してセンサスの日集計単位の交通量データを地図上に紐付けるマップマッチングを行い国道リンクに交通量データを貼り付けた。そして季節別の時間係数を用いて日交通量を時間交通量へと比例配分し、時間帯別に集計した。これを「対象メッシュのリンク交通量」と名付けた。

③ モラン散布図の作成

「モラン散布図」とは地域メッシュの属性の空間的な集積状況を「見える化」するための空間統計学の道具であり、本稿では地域メッシュの交通事故リスクについてモラン散布図を作成する。同図の作成にはロー

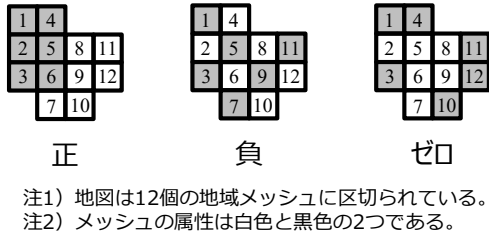


図-23 空間的自己相関の符号とメッシュ配置

カル・モラン統計量を使う。「ローカル・モラン統計量」とは空間的自己相関を測る空間統計学の統計量のことである。「空間的自己相関」とは通常の統計学の自己相関を空間的に拡張したものであり、地域のどの辺りで似た傾向をもつメッシュ同士が集積しているかを表す。図-23の地図を使って空間的自己相関を説明すると、地図上の個々の地域メッシュについて周囲のメッシュ同士の属性が似たような傾向又は非常に異なった傾向（例えば周囲の上下左右に接するメッシュは真逆の属性になるといった傾向。）をもって配置されるとき空間的自己相関は正の符号又は負の符号をもち、正の符号ならば当該属性は集積している。周囲のメッシュ同士の属性が完全にランダムに配置されるとき空間的自己相関はゼロになる。

モラン散布図の作成にあたっては、はじめに「空間重み行列」を作る必要がある。対象メッシュ $N = 196$ に連番を振って $N \times N$ 行列 $\mathbf{w} = [w_{ij}]$ を用意する。この \mathbf{w} の行番号 i が任意のメッシュの番号を表し、列番号 j がその周辺のメッシュの番号を表す。要素 w_{ij} の値はメッシュ i ($i = 1, \dots, N$) に他のメッシュ j ($j \neq i; j = 1, \dots, N$) が隣接する場合は1、そうでない場合は0となる。 \mathbf{w} が「空間重み行列」と呼ばれるものである。

次に、ローカル・モラン統計量を求める必要がある。メッシュ i ($i = 1, \dots, N$) の属性（人身・物損事故件数や人身・物損事故率）を a_i とおき、その平均 \bar{a} を $\bar{a} = \sum_{i=1}^N a_i / N$ と定義する。このときメッシュ i のローカル・モラン統計量 I_i は次式で表される。

$$I_i = N(a_i - \bar{a}) \sum_{j=1}^N w_{ij}(a_j - \bar{a}) / \sum_{i=1}^N (a_i - \bar{a})^2 \quad (10)$$

次に、ローカル・モラン統計量 I_i を「メッシュ i の属性 a_i の標準化測度 m_i^X 」と「メッシュ i に隣接するメッシュ j の属性 a_j の標準化測度 m_i^Y 」に分解する必要がある。 m_i^X と m_i^Y は各々、次式で表される。

$$m_i^X = (a_i - \bar{a}) / \sqrt{\sum_{i=1}^N (a_i - \bar{a})^2 / N} \quad (11)$$

$$m_i^Y = \sum_{j=1}^N w_{ij}(a_j - \bar{a}) / \sqrt{\sum_{i=1}^N (a_i - \bar{a})^2 / N} \quad (12)$$

最後に、図上に点 (m_i^X, m_i^Y) ($i = 1, \dots, N$) を散布するとモラン散布図が完成する。 $I_i = m_i^X m_i^Y$ が成り立つ

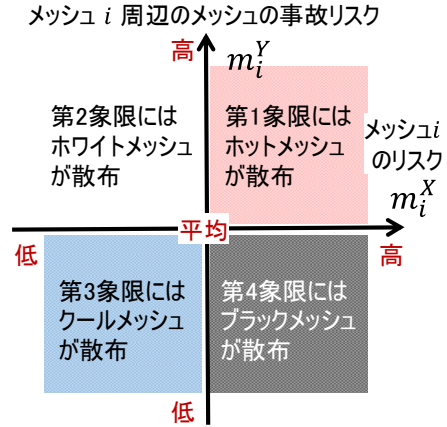


図-24 本手法におけるモラン散布図の四象限の解釈

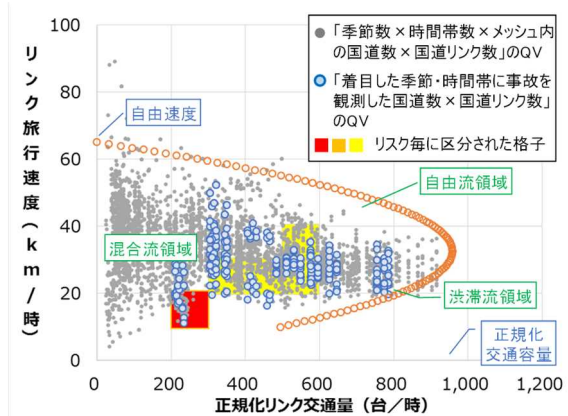


図-25 交通状態別事故リスク図の例（札幌市中心部メッシュの冬季・昼間の人身事故率）

表-1 交通状態別事故リスクの着色区分

着色区分	赤色	橙色	黄色
人身事故件数	4 以上	2 以上	1 以上
人身事故率	20 以上	10 以上	1 以上
物損事故件数	1,000 以上	500 以上	100 以上
物損事故率	5,000 以上	2,500 以上	100 以上

ので、点 (m_i^X, m_i^Y) と X 軸と Y 軸で囲まれた領域の面積がその点のローカル・モラン統計値となる。 (m_i^X, m_i^Y) の平均値が原点を示す。

図-24に本手法におけるモラン散布図の四象限の解釈を示す。第1象限、第3象限に属するメッシュを各々「ホットメッシュ」、「クールメッシュ」と名付ける。この象限には周辺メッシュとともに事故リスクが高い又は低いメッシュが属する。また、第4象限、第2象限に属するメッシュを各々「ブラックメッシュ」、「ホワイトメッシュ」と名付ける。この象限には周辺メッシュよりも事故リスクが高い又は低いメッシュが属する。

④ 交通状態別事故リスク図の作成

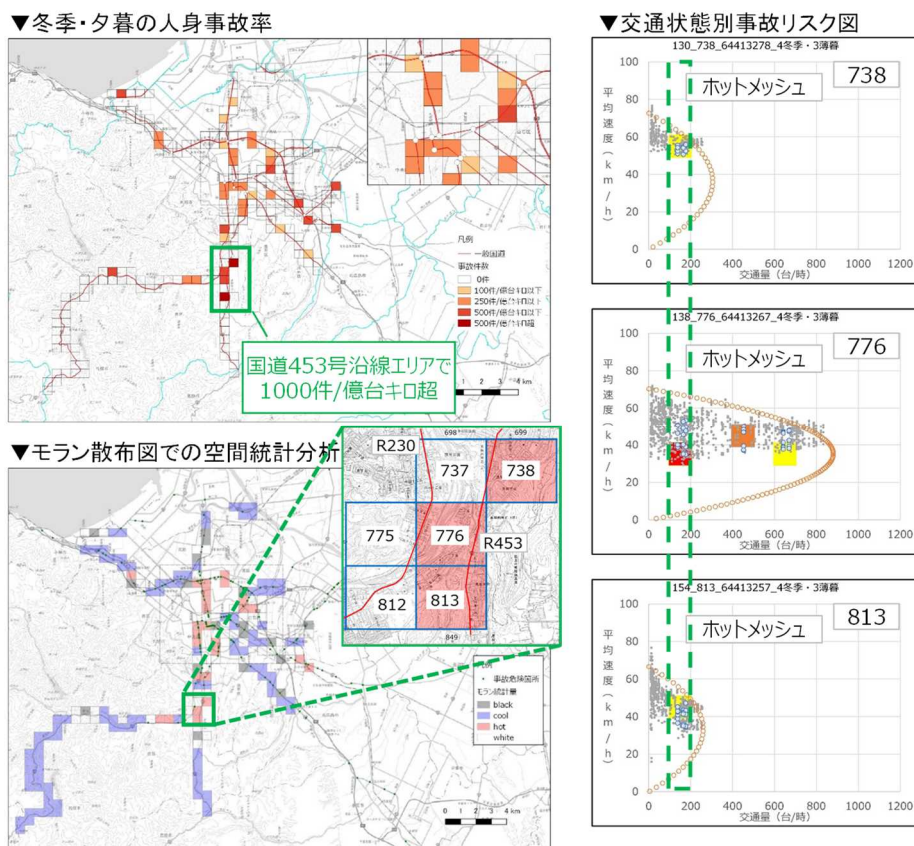


図-26 札幌市内の国道網における冬季・夕暮の人身事故率の空間的評価の例

交通状態別事故リスク図の作成にあたっては、はじめに任意のメッシュの交通状態をリンク旅行速度 V と正規化リンク交通量 Q に基づいて季節別・時間帯別に図示する必要がある。これを「メッシュQV図」と名付ける。メッシュ内には異なる車線数の国道が混在するため、当該メッシュ内の国道の交通量を正規化する。本研究ではリンク交通量を往復車線数に応じた季節別交通容量で除して交通容量比を算出し、その値を往復2車線の基本交通容量2,500台/時に乗ずることによりリンク交通量を正規化した。「冬季交通容量」には圧雪・凍結路面の影響を鑑みて冬季補正率(日本道路協会「道路の交通容量」における「乾燥路面の飽和交通流率」と「圧雪・凍結路面の飽和交通流率」の比0.84を適用。)を乗じた。メッシュQV図作成の結果、図上に「季節数×時間帯数×当該メッシュ内の国道数×国道リンク数」の数だけQVデータが描画される。そのうえで正規化リンク交通量 Q をリンク旅行速度 V で除して交通密度 K を算出し、「 K と V が反比例して $K = Q/V$ が成り立つ」という交通工学の知見を活用してKV式を近似し、 Q を V の二次関数と見做すことによりメッシュQV図上にQV曲線が描画されることになる。

次に、メッシュ QV 図に格子状の区切りが付いた「格

子状 QV 図」に対して事故データを割り付けて着色すると「交通状態別事故リスク図」が完成する。まず格子状 QV 図上にある全ての国道リンク QV データの中から人身事故が観測された国道リンク QV データを抽出する。図-25 に JR 札幌駅や地下鉄大通駅を含む市中心部メッシュの冬季・昼間の人身事故率に関する交通状態別事故リスク図を例示した。図中の全ての国道リンク QV データが灰色の丸点、人身事故が観測された国道リンク QV データが青色の丸点である。次に抽出した国道リンク QV データが属する格子の色について、観測された人身事故率のうち最大の値に応じて表-1 の着色区分に従う着色を施す。図-25 の縦軸 10~20km/時と横軸 200~300 台/時の格子の場合、格子内で人身事故率が最も高い国道リンクは表-1 の区分の赤色に相当するので、当該格子は赤色になる。このような手続きを踏んで完成したものが「交通状態別事故リスク図」である。

⑤ 交通事故リスクの空間的評価

図-26に市全体の冬季・夕暮の国道単路部人身事故率に関する空間的評価の例を示す。特徴として以下に示す点が見られた。

✓ 図-26左上に示すように、国道453号の沿線では評

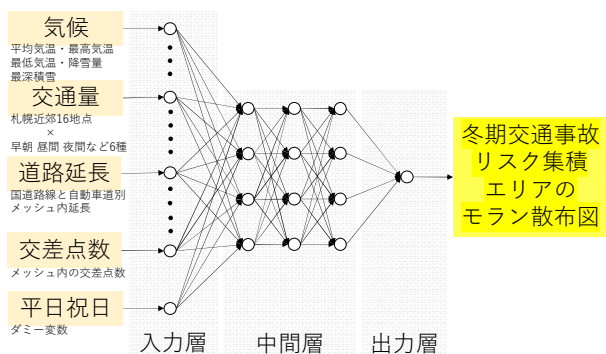


図-27 冬期交通事故リスク集積エリアを評価するための深層学習モデル

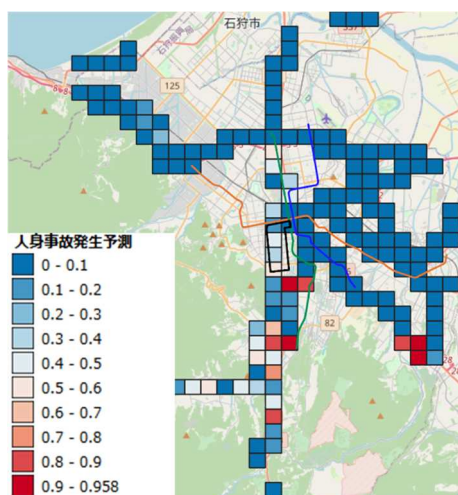


図-28 地図画像の深層学習手法を用いた冬期交通事故リスク集積エリア評価の例

価期間中に人身事故率が1,000件/億台kmを超えるメッシュが集中している。

- ✓ 図-26左下のモラン散布図をみると、空間重み行列の行番号738、776、813のメッシュの着色が示すように、当該エリアにはホットメッシュが集積している。
- ✓ 図-26右の交通状態別事故リスク図をみると、738、776、813のメッシュでは空間的自己相関は正なので、例えばメッシュ776において正規化リンク交通量100~200台/時、かつ、リンク旅行速度30~40km/時の交通状態のときに事故対策を施せばその対策効果はメッシュ738と813の事故率低減に寄与する可能性がある。したがってこれらのメッシュでは対策効果の波及も考慮して対策を施すことが効果的・効率的である。

6. 2 地図画像の深層学習手法を用いた冬期交通事故リスク集積エリアの評価手法

空間統計分析と交通状態推定を用いた冬期交通事

故リスク集積エリアの評価手法は時々刻々の収集データを使わないので、札幌市内の道路網を対象にしたリアルタイムな空間的リスク評価には不向きである。そこで国土交通省北海道開発局の交通量常時観測システムの交通量データを使って、過去に札幌市の周辺から流入した時間あたり交通量等を入力値に、過去の交通事故リスク集積エリア地図を出力値にした深層学習モデル(ニューラルネットワークモデル)を構築して、現在の交通量等のデータから現在の交通事故リスク集積状況を推計する手法を開発した。

図-27は本手法の深層学習モデルの概念図を表す。入力値として交通量データ(早朝・昼間・夜間を含む6時間帯に札幌市近郊の常時観測機器が設置された16地点を通過した交通量)、気象データ(平均気温、最高気温、最低気温、降雪量、最深積雪量)、道路延長データ(地域メッシュ内で集計された国道・自専道の延長)、交差点データ(地域メッシュ内で集計された交差点の箇所数)を使い、出力値として空間統計分析と交通状態推定による冬期交通事故リスク集積エリア評価手法で作成したモラン散布図のリスク値を使った。

図-28に評価結果の例を示す。特徴として以下に示す点が見られた。

- ✓ 「交通事故は減多に起こらない」ことを反映してほとんどのエリアで事故発生リスクが小さくなっており、事故が起きているエリアでもリスクは小さいと評価されているケースが見受けられた。
- ✓ このような現象は評価時間を短くして、よりリアルタイムに近づけると生じてしまう課題であり、実務的にどの程度のリアルタイム性を必要とするかを踏まえた検討が必要になる。

7. リスク対策による便益算定とリスク対策評価

7. 1 冬期交通事故リスク情報の提供による交通需要マネジメントというリスク対策の評価^{6), 7)}

交通事故リスクマネジメントにおけるリスク対策には様々なものがある。近年では交通事故リスク情報の提供による交通需要マネジメント対策が注目されてきた⁵⁾。この対策は「並行している複数のルートの中で交通事故リスクが高いルートと低いルートが存在したときに交通事故リスク情報をドライバーに提供することで高事故リスクルートから低事故リスクルートへの交通量転換を図り、ルート全体のトータルリスク低減を図る」という交通需要マネジメントのことである。近年、阪神都市圏、新潟都市圏、松山都市圏でこのリ

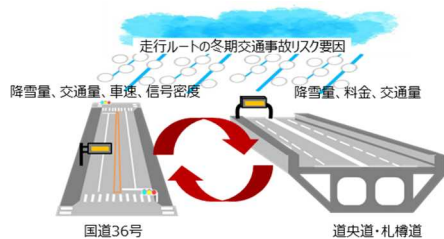


図-29 冬期交通事故リスク情報の提供による交通需要マネジメント対策のイメージ

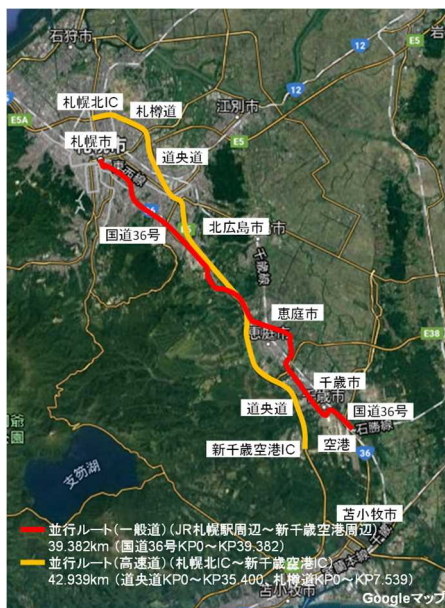


図-30 評価の対象にした一般道ルートと高速道路ルートの並行ルート区間

スク対策の検討が為されており⁹⁾、これらの都市圏と比較すると交通・気象等の状況が異なる札幌都市圏でもこの対策が効果的か検討しておく必要がある。

そこで本研究では札幌都市圏で一般国道（一般道と略す。）と高速自動車国道（高速道と略す。）が並行する区間のルート（並行ルートと略す。）を対象に、冬期交通事故リスク情報の提供による交通需要マネジメント対策の効果を検討した。図-29 にこのリスク対策のイメージを示す。評価対象の並行ルートは図-30 に示す道央自動車道（KP0～KP35.400）・札幌自動車道（KP0～KP7.539）と国道36号（KP0～KP39.382）にした。評価対象の時期は平成26～27年度の冬期2か年（181日）とした。図-31 に評価対象の評価対象時期における冬期交通事故状況を示す。人身事故件数は高速道で19件、一般道で128件であった。物損事故件数は高速道で450件、一般道で1,137件であった。

本検討のフローを図-32 に示す。まず、一般化線形モデルを用いて冬期交通事故リスクとリスク要因の回

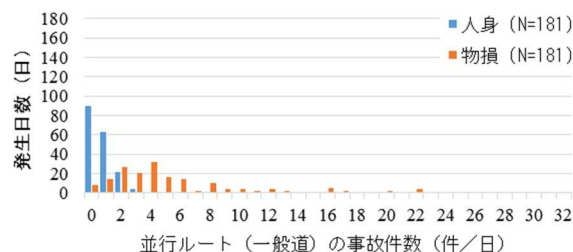
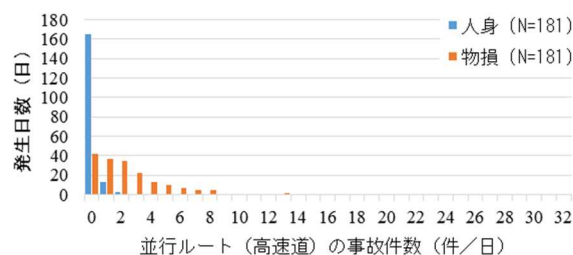


図-31 評価対象の並行ルート区間における冬期交通事故件数ごとの事故発生日数

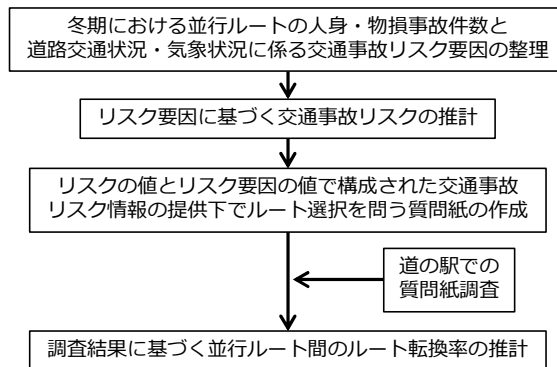


図-32 冬期交通事故リスク情報の提供による交通需要マネジメント対策の検討フロー

帰分析を行い、特定されたリスク要因の下で起こる冬期交通事故リスクを推計する。次に、そのリスク値を反映させた質問紙を使って道の駅でヒアリング調査を実施する。最後に、調査データを使って交通事故リスク情報に応じたルート転換効果を推計する。

① 質問紙票を使ったヒアリング調査の内容

ヒアリング調査の場所は「道の駅ウトナイ湖」と「道と川の駅花ロードえにわ」の敷地内（ただし建物外・道路外。）であった。調査期間は北海道知事の新型コロナウイルス緊急事態宣言（R2.2.28～3.19）後の4月10日（金）～13日（月）、及び緊急事態措置（R2.4.17～5.31）後の7月2日（木）～11日（土）であった。

図-33 にヒアリング調査で使用した質問紙票のサンプルを示す。質問紙票の上半分には以下に示す文章が書いてあり、冬期交通事故リスクのリスク要因を説明している。文章中の●に入る数値は質問紙ごとにラン

1. あなたご自身と今回の車での移動についてお伺いします。

【情報管理について】 ご回答いただいた個別の情報は統計的に処理を施し、回答をそのままの形で公表することはありません。また、本調査で取得した情報は厳重に管理し、本調査の終了後に適切に破棄します。

1 性別	<input type="checkbox"/> ①男性 <input type="checkbox"/> ②女性	
2 年齢	<input type="checkbox"/> ①18~29歳 <input type="checkbox"/> ②30~44歳 <input type="checkbox"/> ③45~64歳 <input type="checkbox"/> ④65~74歳 <input type="checkbox"/> ⑤75歳以上	
3 住所	<input type="checkbox"/> 道内(市町村名:) <input type="checkbox"/> 道外(都道府県名:)	
4 車種	<input type="checkbox"/> 普通車(普通車用 No.3, 小型 No.4, 5, 6, 7) <input type="checkbox"/> 軽自動車(軽四輪, 自動二輪) <input type="checkbox"/> 中型車(普通貨物 2 車軸, マイクロバス) <input type="checkbox"/> 大型車(普通貨物 3 車軸, 路線バス) <input type="checkbox"/> 特大車(普通貨物 4 車軸以上, 大型バス 12m 以上, 大型特殊)	
5 移動目的	<input type="checkbox"/> ①業務/通勤, 出張 <input type="checkbox"/> ②業務/運送 <input type="checkbox"/> ③私用/買い物, 観光 <input type="checkbox"/> ④私用/その他	
6 高速道路利用時の ETC カードの使用	<input type="checkbox"/> ①使用する <input type="checkbox"/> ②使用しない	
7 高速道路の利用頻度	平日	<input type="checkbox"/> ①ほぼ毎日 <input type="checkbox"/> ②月に数回 <input type="checkbox"/> ③年に数回 <input type="checkbox"/> ④ほぼ毎日 <input type="checkbox"/> ⑤月に数回 <input type="checkbox"/> ⑥年に数回
	休日	<input type="checkbox"/> ①ほぼ毎日 <input type="checkbox"/> ②月に数回 <input type="checkbox"/> ③年に数回 <input type="checkbox"/> ④ほぼ毎日 <input type="checkbox"/> ⑤月に数回 <input type="checkbox"/> ⑥年に数回
8 最近 5 年以内に交通事故を起こした経験	高速道路	<input type="checkbox"/> ①あり <input type="checkbox"/> ②なし <input type="checkbox"/> ①あり <input type="checkbox"/> ②なし
	一般道路	<input type="checkbox"/> ①あり <input type="checkbox"/> ②なし <input type="checkbox"/> ①あり <input type="checkbox"/> ②なし
9 最近 5 年以内に交通事故に遭遇した経験	高速道路	<input type="checkbox"/> ①あり <input type="checkbox"/> ②なし <input type="checkbox"/> ①あり <input type="checkbox"/> ②なし
	一般道路	<input type="checkbox"/> ①あり <input type="checkbox"/> ②なし <input type="checkbox"/> ①あり <input type="checkbox"/> ②なし

2. 事故リスク(事故を起こす, または遭遇する危険度)についてお伺いします。

あなたは、2 月の中に、高速道路と国道 36 号のどちらかを利用して、新千歳空港と札幌駅の間(約 40km)を車で移動します。このとき、高速道路では、その日に雪が 1cm 降り、交通量は 30,000/日(平均の 1.01 倍)、利用料金は 1,430 円(新千歳空港 IC~札幌北 IC)です。

また、国道 36 号では、最高気温が -1.6℃、その日に雪が 1cm 降り、道路の外には 45cm の雪が積もっています。さらに交通量は 24,000 台/日(平均の 1.00 倍)、速度は 55km/h で、300m に 1 つのペースで信号交差点を通過します。

【Q1】あなたは、出発前に事故リスク(人身事故・物損事故を起こすまたは遭遇する確率)に関する情報を知ることができるとした場合、下記のどの表現が理解しやすいですか? 理解しやすい順位を教えてください。

表現 A: 移動するその日に 1 件以上の事故が起きる確率は、国道ルートでは 83%、高速ルートでは 42%です。
 表現 B: 国道ルートでは 7,000 台に 1 台、高速ルートでは 22,000 台に 1 台、事故に遭う可能性があります。
 表現 C: 国道ルートの事故リスクは、高速ルートの事故リスクの 2.0 倍です。

【A1】 1位 2位 3位

【Q2】あなたは、上記の事故リスクを知った場合、国道ルートと高速ルートのどちらを利用しますか?

【A2】 ①国道ルートを利用する(選択理由:)
②高速ルートを利用する(選択理由:)

図-33 調査で使った質問紙票のサンプル

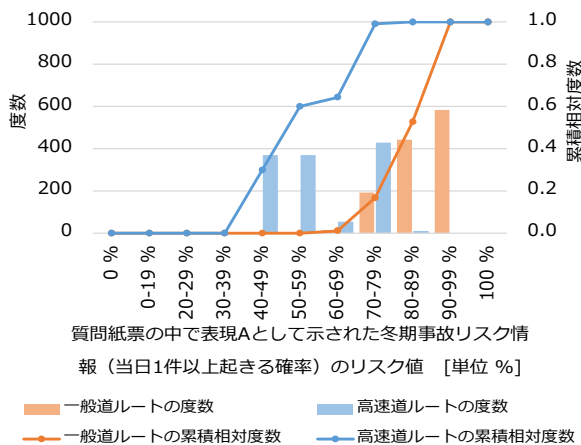


図-34 質問紙票に書かれた事故リスク値の分布

ダムである。文章中に示すリスク要因には後述する冬期交通事故リスク推定モデルの分析結果に基づいて統計的に有意なリスク要因が代入される。

『あなたは、●月中に、高速道路と国道 36 号のどちらかを利用して、新千歳空港と札幌駅の間(約 40km)を車で移動します。このとき、高速道路では、その日に雪が●cm 降り、交通量は●台/日(平均の●倍)、利用料金は 1,430 円(新千歳空港 IC~札幌北 IC)です。また、国道 36 号では、最高気温が●℃、その日に雪が●cm 降り、道路の外には

●cm の雪が積もっています。さらに、交通量は●台/日(平均の●倍)、速度は●km/h、●m に 1 つのペースで信号交差点を通過します。』

質問紙票の下半分には提供されるリスク情報の理解しやすさの問い、及び情報提供下でのルート選択の問いが列挙してある。同一のリスク値を 3 種類の異なる表現 A、B、C に変換したうえでどの表現が理解しやすいか、及び出発前にリスク値を知っていたとしてどちらのルートを選ぶかを尋ねている。表現 A、B、C は、以下のとおりである。

表現 A 『移動するその日に 1 件以上の事故が起きる確率は、国道ルートでは■%、高速ルートでは■%です。』

表現 B 『国道ルートでは■台に 1 台、高速ルートでは■台に 1 台、事故に遭う可能性があります。』

表現 C 『国道ルートの事故リスクは、高速ルートの■倍です。』

表現 A、B、C の■には質問紙票の上半分に書かれた文章の●から推定されるリスク値が代入される。図-34には質問紙票に書かれたリスク値の分布を示す。

② 質問紙票に記述する冬期交通事故リスク値の推定

●の値から■を推定するのに用いられる冬期交通事故リスク推定モデルについて説明する。交通事故リスクとリスク要因の関係を一般化線形モデル(重回帰モデルを拡張した回帰モデル群の総称を指す。)で定式化する。以下のモデル群の中から、統計的に最も妥当なものを冬期交通事故リスク推定モデルとして選定する。式中の Y は人身・物損事故件数を、 X_1, \dots, X_N は交通状況や気象状況に係るリスク要因を表す。QL は走行台キロを表し、Y を事故率に変換するためのものである。P[Y > 0] は人身・物損事故が 1 件以上起きるリスクを指す。

- ポアソン回帰モデル (PO モデル)

$$\mu = \exp(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_N X_N + \log QL) \quad (13)$$

$$P[Y] = \frac{\mu^Y}{Y!} \exp(-\mu) \quad (14)$$

$$P[Y > 0] = 1 - \exp(-\mu) \quad (15)$$

- 負の二項回帰モデル (NB モデル)

$$\mu = \exp(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_N X_N + \log QL) \quad (16)$$

$$P[Y] = \frac{\Gamma(Y+\theta)}{Y! \Gamma(\theta)} \left\{ \frac{\theta}{\mu+\theta} \right\}^\theta \left\{ \frac{\mu}{\mu+\theta} \right\}^Y \quad (17)$$

$$P[Y > 0] = 1 - \left\{ \theta / (\mu + \theta) \right\}^\theta \quad (18)$$

- ゼロ過剰ポアソン回帰モデル (ZIPO モデル)

$$\mu = \exp(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_N X_N + \log QL) \quad (19)$$

表-2 推定モデルの予測精度 (高速道)

交通状況に係る要因		Y = 0	Y > 0	的中率
人身事故	P[Y = 0] ≥ 0.5	99	7	93%
	P[Y > 0] ≥ 0.5	0	8	100%
	感度、特異度	100%	47%	94%
物損事故	P[Y = 0] ≥ 0.5	12	29	29%
	P[Y > 0] ≥ 0.5	11	62	85%
	感度、特異度	52%	68%	65%
気象状況に係る要因		Y = 0	Y > 0	的中率
人身事故	P[Y = 0] ≥ 0.5	164	3	98%
	P[Y > 0] ≥ 0.5	1	13	93%
	感度、特異度	99%	81%	98%
物損事故	P[Y = 0] ≥ 0.5	26	46	36%
	P[Y > 0] ≥ 0.5	16	93	85%
	感度、特異度	62%	67%	66%

表-3 推定モデルの予測精度 (一般道)

交通状況に係る要因		Y = 0	Y > 0	的中率
人身事故	P[Y = 0] ≥ 0.5	45	39	53%
	P[Y > 0] ≥ 0.5	40	32	44%
	感度、特異度	53%	45%	50%
物損事故	P[Y = 0] ≥ 0.5	5	63	7%
	P[Y > 0] ≥ 0.5	8	80	91%
	感度、特異度	39%	56%	55%
気象状況に係る要因		Y = 0	Y > 0	的中率
人身事故	P[Y = 0] ≥ 0.5	69	58	54%
	P[Y > 0] ≥ 0.5	21	33	61%
	感度、特異度	77%	36%	56%
物損事故	P[Y = 0] ≥ 0.5	5	59	8%
	P[Y > 0] ≥ 0.5	3	114	97%
	感度、特異度	63%	66%	66%

$$\frac{\pi}{1-\pi} = \exp(\gamma_0 + \gamma_1 X_1 + \dots + \gamma_N X_N + \log QL) \quad (20)$$

$$P[Y] = \begin{cases} \pi + (1 - \pi) \exp(-\mu) & Y = 0 \\ (1 - \pi) \frac{\mu^Y}{Y!} \exp(-\mu) & Y \geq 1 \end{cases} \quad (21)$$

$$P[Y > 0] = (1 - \pi) \exp(-\mu) \quad (22)$$

・ ゼロ過剰負の二項回帰モデル (ZINB モデル)

$$\mu = \exp(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_N X_N + \log QL) \quad (23)$$

$$\frac{\pi}{1-\pi} = \exp(\gamma_0 + \gamma_1 X_1 + \dots + \gamma_N X_N + \log QL) \quad (24)$$

$$P[Y] = \begin{cases} \pi + (1 - \pi) \left\{ \frac{\theta}{\mu + \theta} \right\}^\theta & Y = 0 \\ (1 - \pi) \frac{\Gamma(Y + \theta)}{Y! \Gamma(\theta)} \left\{ \frac{\theta}{\mu + \theta} \right\}^\theta \left\{ \frac{\mu}{\mu + \theta} \right\}^Y & Y \geq 1 \end{cases} \quad (25)$$

$$P[Y > 0] = (1 - \pi) \{ \theta / (\mu + \theta) \}^\theta \quad (26)$$

パラメータ推定の結果、一般道ルートの人身事故リスクはポアソン分布、物損事故リスクは負の二項分布に従い、高速道ルートの人身事故リスクはゼロ過剰ポアソン分布、その物損事故リスクは負の二項分布に従うことが判明した。

表-2 と表-3 に、冬期交通事故リスク推定モデルの予測精度をまとめた。人身事故あるいは物損事故が 0 件となる確率が 0.5 以上であると予測して実際には 0 件

であった事象、かつ、1 件以上起きる確率が 0.5 以上あると予測して実際には 1 件以上あった事象が全事象に占める割合 (全予測の的中率と呼ぶ。) をみると、高速道の人身事故については高い的中率を採っているが、その他の事故については 5 割以上の的中率であった。高速道の推定モデルの予測精度に比べて一般道の精度が低くなった原因は、一般道の道路管理者が交通・気象等の統計データを使って比較的簡単に収集可能な交通量、車速、信号交差点密度、最高気温、降雪深、積雪深といったデータのみに着目してモデルを構築した点が挙げられる。回帰モデルは説明変数で説明できる部分と誤差として扱われる部分の和になっているが、目的変数に対して説明変数で説明できる部分の寄与が低いと的中率は小さくなってしまう。一般道の精度が低くなった原因は、一般道の回帰モデルで誤差として扱った部分の変数が高く寄与したためと考えられる。的中率を向上させる可能性がある説明変数候補として路面すべり抵抗値データなどが考えられるが、冬期交通事故リスク情報の提供に使うにはデータ収集性等を改善する必要がある。

③ 調査データに基づく並行ルート間のルート転換効果の推計

一般道ルートと高速道ルートの冬期の日交通量を調査対象者の母集団と見做し、許容誤差±5%、信頼度99%として有効回答数は600票以上を必須とした。調査の結果、有効回答数は一般道ルートで605票、高速道ルートで630票であった。

図-35 と図-36 に冬期交通事故リスク情報の表現 A, B, C の選択結果と一般道・高速道ルートのルート選択結果をクロス集計した結果を示す。図-35 下段をみると、高速道ルート利用者に対する聞き取りでは全ての情報表現において多くの人一般道ルートよりも高速道ルートを選んでいった。図-34 に示したように質問紙票に書かれたリスク値は平均値でみると高速道ルートのほうが低かったため、調査日当日に高速道ルートを利用していた人は出発前に冬期事故リスク情報を得ることでそのリスク値を参照してルート選択を行う可能性がある。図-35 上段をみると、一般道ルート利用者に対する聞き取りでは高速道ルートへの転換を選んだ人も多かったが、リスク値によらず一般道ルートを選んだ人も多かった。図-36 下段をみると、高速道ルート利用者に対する聞き取りでは一般道ルートへの転換を選んだ人にとってどの情報表現への支持も大差なかったが、高速道ルートを選んだ人にとっては「一般道ルートの事故リスクは高速道ルートの何倍である」

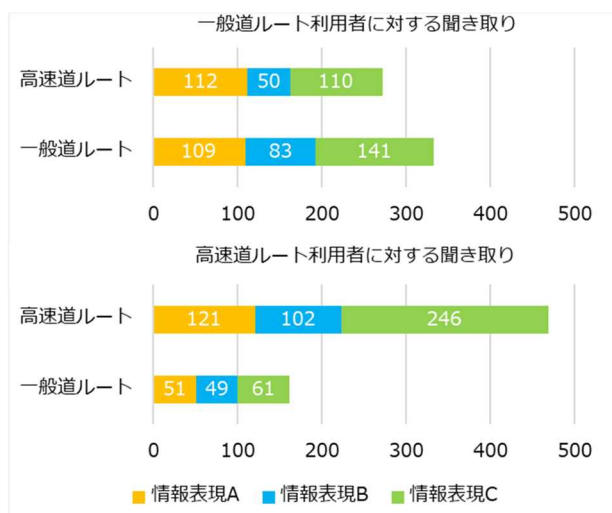


図-35 情報表現の違いによってルートを転換するドライバーと転換しないドライバー

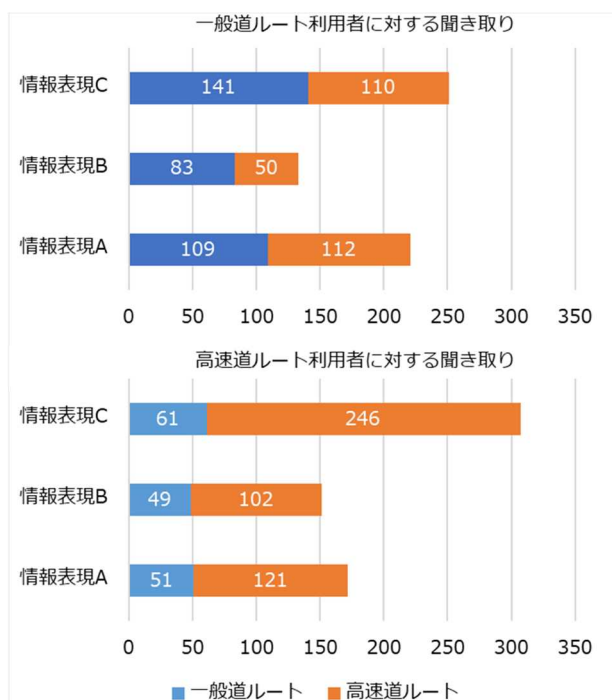


図-36 ルートを転換するドライバーが理解しやすい情報表現

という表現 C が他の表現の倍以上の支持を得た。図-36 上段をみると、一般道ルート利用者に対する聞き取りでは高速道ルートへの転換を選んだ人も一般道ルートを選んだ人も「一般道ルートの事故リスクは高速道ルートの何倍である」という表現 C と「1 件以上事故が起きる確率は、一般道ルートで何パーセント、高速道ルートで何パーセントである」という表現 A がほぼ同じくらいの支持を得た。

図-35 と図-36 で調査票の回答者の意向は確認できたが、回答者を含む母集団に対するルート転換効果を知るためにネスティッドロジットモデルでルート転換率を推計した。調査において回答者は、3 種類の情報表現の中から 1 種類を選び、同時に 2 つのルートの中から 1 ルートを選んでいる。このとき、選んだ情報表現のもとでルートを選ぶのか、ルートを選ぶときに情報の表現を参照するのかという 2 つの階層が考えられる。ネスティッドロジットモデルを分析に使うと、選好構造の階層としてどちらが妥当かについてパラメータから判定できる。

ここでネスティッドロジットモデルを説明しておく。冬期事故リスク情報の表現を変数 m とおき、表現 A、B、C を各々 $m = A, B, C$ とおく。選択するルートを変数 s とおき、一般道ルート (National Highway) と高速道ルート (Expressway) を各々 $s = H, E$ とおく。 m と s が選択肢となる。有効回答をした I 人のうち個人 i が m と s を選択する確率を $p_i(m, s)$ とおくと、 $p_i(m, s)$ は $p_i(m|s)p_i(s)$ と $p_i(s|m)p_i(m)$ のいずれかに変換される。これが選好構造の階層を示す。 $p_i(m|s)p_i(s)$ では $p_i(s)$ が階層の上位に、 $p_i(m|s)$ が階層の下位になる。 $p_i(s|m)p_i(m)$ ではその逆になる。個人 i が m と s を選んで得る効用 U_i^{ms} を母集団の効用 V^{ms} と個人的な好み ε_i^{ms} の和 $V^{ms} + \varepsilon_i^{ms}$ で表す。質問紙票の項目を効用関数の説明変数 $X_1^{ms}, \dots, X_K^{ms}$ とおくと、 $U_i^{ms} = V^{ms} + \varepsilon_i^{ms} = \beta_0^{ms} + \beta_1^{ms} X_1^{ms} + \dots + \beta_K^{ms} X_K^{ms} + \varepsilon_i^{ms}$ となる。個人 i が質問紙票で $X_1^{ms} = x_{1,i}^{ms}, \dots, X_K^{ms} = x_{K,i}^{ms}$ と回答すれば、個人 i が選択肢 m と s を選ぶ確率 $p_i(m, s)$ は次式のロジットモデルで表される。

$$p_i(m, s) = \frac{\exp[V^{ms}]}{\sum_{m=A,B,C} \sum_{s=H,E} \exp[V^{ms}]} = \frac{\exp[\beta_0^{ms} + \beta_1^{ms} x_{1,i}^{ms} + \dots + \beta_K^{ms} x_{K,i}^{ms}]}{\sum_{m=A,B,C} \sum_{s=H,E} \exp[\beta_0^{ms} + \beta_1^{ms} x_{1,i}^{ms} + \dots + \beta_K^{ms} x_{K,i}^{ms}]} \quad (27)$$

ネスティッドロジットモデルはこのロジットモデルに選好構造の階層を組み込んだものである。階層化にあわせて U_i^{ms} を $V^m + V^s + V^{ms} + \varepsilon_i^m + \varepsilon_i^s + \varepsilon_i^{ms}$ のように分解する。すると、 $p_i(m, s)$ のネスティッドロジットモデルは以下に示すように $p_i(m|s)p_i(s)$ と $p_i(s|m)p_i(m)$ の 2 通りで表される。

$$p_i(m|s)p_i(s) = \frac{\exp[V^m + V^{ms}]}{\sum_m \exp[V^m + V^{ms}]} \frac{\exp[V^s + \lambda \Lambda^s]}{\sum_s \exp[V^s + \lambda \Lambda^s]} \quad (28)$$

$$\Lambda^s = \log[\sum_{m=A,B,C} \exp[V^m + V^{ms}]] \quad (29)$$

$$p_i(s|m)p_i(m) = \frac{\exp[V^s + V^{ms}]}{\sum_s \exp[V^s + V^{ms}]} \frac{\exp[V^m + \lambda \Lambda^m]}{\sum_m \exp[V^m + \lambda \Lambda^m]} \quad (30)$$

$$\Lambda^m = \log[\sum_{s=H,E} \exp[V^s + V^{ms}]] \quad (31)$$

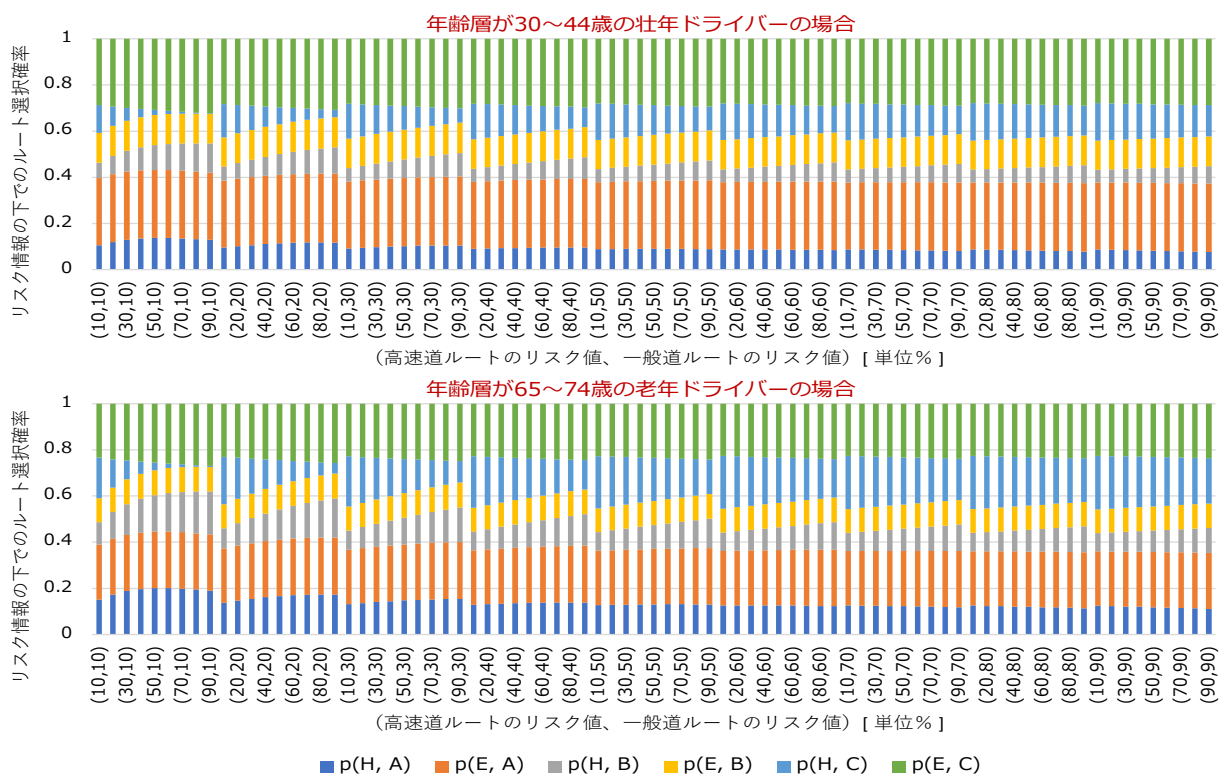


図-37 一般道ルート利用者が冬期事故リスク情報のリスク値とその表現に応じてルートを選ぶ確率

式中の Λ^s は s のログサム変数、 Λ^m は m のログサム変数であり、パラメータ λ はその推定値が $0 < \lambda \leq 1$ ならば選好構造の階層の仮説は妥当であり、 $\lambda = 0$ ならば階層の下位が上位に全く反映されていないことになり、 $\lambda > 1$ ならば階層の上下関係が仮説とは逆になっており、 $\lambda < 0$ ならばそもそも仮説に矛盾があると判定できる。これによって $p_i(m|s)p_i(s)$ と $p_i(s|m)p_i(m)$ のどちらが妥当か判明する。

図-37 に一般道ルート利用者が出発前に冬期交通事故リスク情報を得たときの並行ルート間のルート転換効果を示す。前提条件としてネスティッドロジットモデルの説明変数の値を「一般道ルートで事故を起こした経験も事故に遭遇した経験も近年では無くて、月に数回ほどは休日に ETC を使って高速道ルートを利用する」と設定し、かつ、「年齢層が 30～44 歳の壮年ドライバー」又は「65～74 歳の老年ドライバー」と設定している。図-37 上段が壮年ドライバー、下段が老年ドライバーを表す。凡例について、例えば $p(H, A)$ 、 $p(E, A)$ は一般道ルート利用者が情報表現 A のもとで一般道ルート (H)、高速道路ルート (E) を選ぶ確率を各々表している。

図-35 と図-36 のクロス集計の結果、並びに、図-37 のルート選択確率の結果に基づいて得られた考察をまとめると、特徴として以下に示す点が見られた。

- ✓ 冬期交通事故リスク情報の表現の理解しやすさについては、「リスクが何パーセントか」という確率表現と「リスクが何倍か」という倍数表現が同程度に支持されたが、その中でもルート転換効果が高い確率表現のほうが望ましい。
- ✓ 一般道ルート利用者に情報提供をする場合、一般道ルートのリスク値が高くてもリスク値以外の要因（例えば、運転者の年齢、事故の経験、平休日、等）で一般道ルートを選ぶ人が存在する。
- ✓ 情報を受け取る人が老年ドライバーの場合、たとえ情報が確率表現であってもルート転換効果は小さくなる。確率表現のルート転換効果は情報を受け取る人の年齢が若いほどより効果的である。

7. 2 冬期交通事故リスク情報の提供による交通需要マネジメントの便益算定

国道 36 号と道央道・札幌道の並行ルートにおいて冬期交通事故リスク情報を提供した場合、国道 36 号ルートから道央道・札幌道ルートではなく国道 36 号に並行する他の幹線道路（例えば羊ヶ丘通等の市道。）に交通量が転換してしまう可能性があり、当該の幹線道路の事故リスクを高めることが危惧される。したがって並行ルートにおける冬期交通事故リスク情報提供の便益を算定するには並行ルートを含む道路ネットワーク全体を対象に情報提供有り無しで効果の差を推

計する必要がある。

一方、国土交通省の「費用便益分析マニュアル」(令和2年4月版)は「走行時間短縮便益」、「走行経費減少便益」、「交通事故減少便益」の算定に必要な「交通流の推計」において路線の整備又は改良、つまり道路ネットワークへの新規リンクの追加又は既存リンクの容量増加のみを対象としており、新規リンクの追加や既存リンクの容量増加が生じない「情報提供の便益」を算定するには新たな便益算定手法が必要になる。その手法は建設コンサルタント等が準拠する際に容易に取り扱えるもののほうが望ましい。

そこで本研究では「交通事故リスク情報の提供は情報を受け取ったドライバーの走行時間に影響を与えて結果的に交通事故の減少につながる」という仮説を立て、「交通流の推計」におけるリンク別走行時間の計算式を改良して情報提供の便益を算定するというアプローチに従い新たな便益算定手法を開発した。このアプローチの利点は、市販の交通量配分ソフトウェアに入力する走行時間データ自体を改良するだけなのでソフトウェアのプログラムを書き換える必要がなく、建設コンサルタント等が所有する市販ソフトをそのまま使える点にある。

本研究の情報提供便益算定手法は交通流推計の手続きに変更が生じるだけであり、それに続く便益算定

表-4 冬期交通事故リスク情報提供便益算定において情報提供を想定した道路情報板の位置と形式

	位置	形式
国道 36号	KP13.66 札幌市	門型情報板 (NHL3 形)
	KP38.74 千歳市	門型情報板 (HL3 形)
	KP39.07 千歳市	エフ形情報板 (NHL3 形)
	KP42.14 千歳市	門型情報板 (HL3 形)
	KP44.31 千歳市	門型情報板 (HL3 形)
道央 道	KP3.76 札幌市	大谷地 IC 出口情報板 (AL2 形)
	KP6.50 札幌市	前方広域情報板 (KL1 形)
	KP6.88 札幌市	札幌南 IC 出口情報板 (AL2 形)
	KP8.33 札幌市	札幌南 IC 出口情報板 (AL2 形)
	KP11.68 北広島市	北広島 IC 出口情報板 (AL2 形)
	KP13.13 北広島市	北広島 IC 出口情報板 (AL2 形)
	KP25.70 恵庭市	恵庭 IC 出口情報板 (AL2 形)
	KP26.94 恵庭市	恵庭 IC 出口情報板 (AL2 形)
	KP35.01 千歳市	千歳 IC 出口情報板 (AL2 形)
	KP36.36 千歳市	千歳 IC 出口情報板 (AL2 形)
札幌 道	KP38.74 千歳市	新千歳空港 IC 出口情報板 (AL2 形)
	KP38.77 千歳市	新千歳空港 IC 出口情報板 (AL2 形)
	KP2.92 札幌市	伏古 IC 出口情報板 (AL2 形)
	KP6.37 札幌市	札幌北 IC 出口情報板 (AL2 形)

の手続き自体は費用便益分析マニュアルに従う。図-38に示す交通流推計フローにおいて赤字の部分に変更箇所であり、BPR式の変更によって交通量配分の市販ソフトに入力する走行時間データを改良することになる。尚、図-38のフローで赤字以外の手続きは第4期道央都市圏パーソントリップ調査のデータ分析で採用された手法「高速転換率内生化学者均衡配分手法」と同じ手続きであり、建設コンサルタント等が市販ソフトを使って計算できる部分である。本研究では市販のJICA-STRADA 3.5を用いた。図-38のフローの詳細については以下に示す⁸⁾。

① 配分対象道路網

交通量配分の対象となる道路網を決める。本研究では平成18年第4期道央都市圏パーソントリップ調査の道路網に、創成川アンダーパス、輪厚スマート IC、新千歳空港 IC、道央圏連絡道路、羊ヶ丘通などの路線を追加したものを使用した。情報提供に利用することを想定している道路情報板は国道36号ルートに5基、道央道・札幌道ルートに14基とした(表-4)。

② 配分 OD 表

第4期道央都市圏パーソントリップ調査で用意された地区レベル相当の「小ゾーン」の配分 OD 表を使う。同調査では平成18年現況 OD 表と令和12年将来 OD

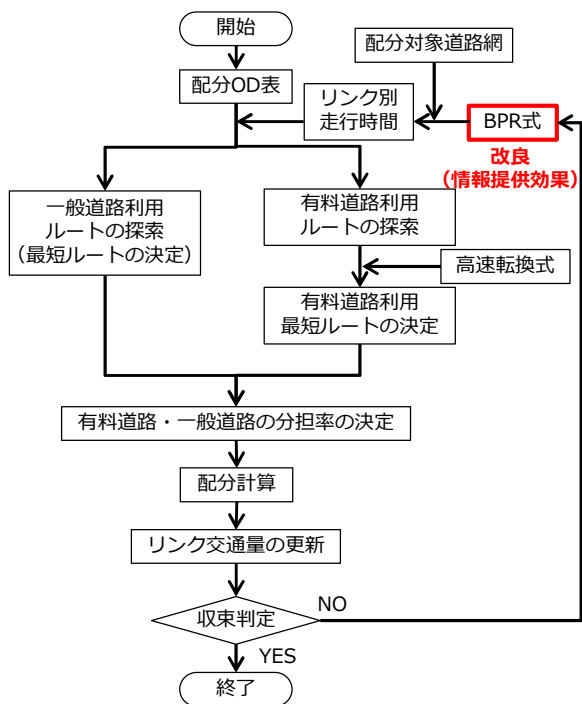


図-38 冬期交通事故リスク情報提供便益の算定に必要な「交通流の推計」のフロー

表が用意されているが、本研究では令和2年を対象とするためOD交通量の年次補正（線形補間）を行う。

③ BPR式、リンク別走行時間

第4期道央都市圏パーソントリップ調査のデータ分析で採用された手法「高速転換率内生化利用者均衡配分手法」においてリンク別走行時間を計算する式をBPR式と呼ぶ。交通事故リスク情報提供有りの場合には任意のリンク上の交通事故リスクによる損失時間を当該リンクの走行時間に付加するようにBPR式を改良する。情報提供無しの場合は通常のBPR式を使う。

情報提供有りのBPR式は以下とする。式(32)右辺の第一項が通常のBPR式による走行時間を、第二項が交通事故リスクによる損失時間を表している。情報提供無しの場合には第二項の $\gamma_a \omega$ は計算しない。情報提供有りの場合には、情報提供無しの場合に推計したリンク交通量を式(34)の \bar{x}_a に代入して γ_a を計算する。

$$t_a = t_{a0} \left\{ 1 + \alpha \left(\frac{x_a}{C_a} \right)^\beta \right\} + \frac{\xi_a + \gamma_a \omega}{\omega_\xi} \quad (32)$$

$$\omega = \frac{\omega_\xi}{\omega_\gamma} \quad (33)$$

$$\gamma_a = \frac{p \cdot g \cdot l_a}{\bar{x}_a \cdot l} \quad (34)$$

$$p = 1 - \exp(-\lambda) \quad (35)$$

$$\lambda = \exp(b_0 + b_1 z_1 + \dots + b_n z_n) \quad (36)$$

ただし、

- t_a : 情報提供有り又は無しのリンク a の走行時間 [分]、
- x_a : 情報提供有り又は無しのリンク a の交通量 [台]、
- C_a : リンク a の冬期交通容量 [台]、
- t_{a0} : リンク a の自由走行時間 [分]、
- α, β : BPR式のパラメータ、
- ξ_a : リンク a が高速道に属したときの通行料金 [円/台]、
- γ_a : 情報提供がもたらすリンク a の損失額 [円/台]、
- ω_ξ : 通行料金の時間価値換算係数 [円/台分]、
- ω_γ : 損失額の時間価値換算係数 [円/台分]、
- p : ルート上で冬期交通事故が1件以上起きる確率、
- g : 冬期交通事故損失額原単位 [円]、
- l_a : リンク a の延長 [km]、
- l : ルートの総延長 [km]、
- \bar{x}_a : 情報提供無しのリンク a の交通量 [台]、
- λ : ルート上の冬期交通事故件数の期待値 [件]、
- z_1, \dots, z_n : ポワソン回帰モデルの説明変数、
- b_0, b_1, \dots, b_n : ポワソン回帰モデルのパラメータ。

本稿では、 t_{a0} 、 α, β 、 ξ_a は第4期道央都市圏パーソントリップ調査のデータ分析で用いられた値を使った。 ω_ξ 、 ω_γ は費用便益分析マニュアルの値を使った。 C_a は

第4期道央都市圏パーソントリップ調査のデータ分析で用いられた値に冬期補正係数（日本道路協会「道路の交通容量」における「乾燥路面の飽和交通流率」と「圧雪・凍結路面の飽和交通流率」の比0.84を適用。）を乗じた値を使った。 g は内閣府「交通事故の被害・損失の経済的分析に関する調査」における人身事故1人あたりの損失額と物損事故1件あたりの損失額の加重平均1,503円/件又は単純平均7,568円/件を使った。

④ 最短ルート検索、分担率の決定、配分計算

全てのリンクでリンク別走行時間 t_a が求まった後、OD間で最短走行時間のルート上にリンク交通量 x_a を配分していく。どのルートが最短になるかについての

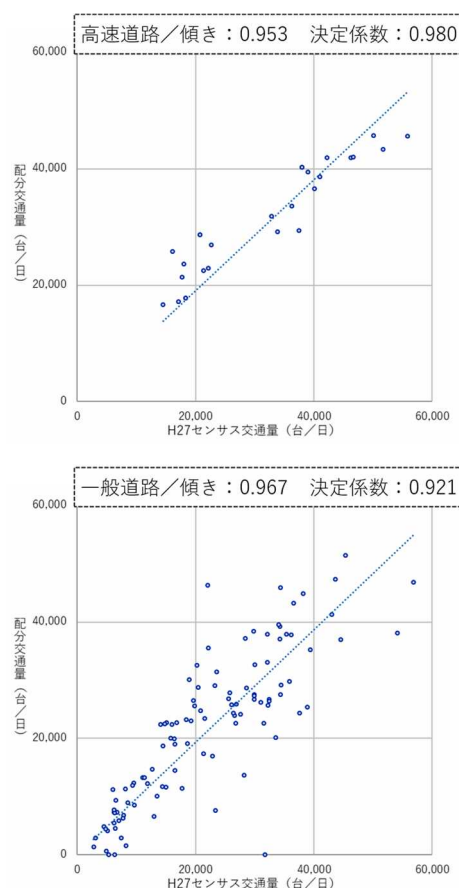


図-39 交通流推計の再現性

表-5 冬期交通事故リスク情報提供便益の算定結果

	情報提供の内容		費用 (千円/日)			便益 (千円/日)	
	一般道	高速道	総走行時間費用	総走行経費	交通事故社会損失		
0	情報無し	情報無し	2,478,752	614,265	73,324	3,166,341	
1	高リスク	低リスク	2,476,263	613,898	73,246	3,163,407	2,934
2	低リスク	低リスク	2,478,884	614,341	73,338	3,166,563	▲222
3	高リスク	高リスク	2,477,104	614,038	73,277	3,164,419	1,922
4	低リスク	高リスク	2,478,879	614,344	73,328	3,166,550	▲210

検索結果は交通量の配分次第で変更が生じる。しかし収束計算によって OD 間の全てのルートはいずれ等時間配分状態になる。この状態は「利用者均衡配分」と呼ばれている。配分結果の交通量 x_a と走行時間 t_a を使って「走行時間短縮便益」、「走行経費減少便益」、「交通事故減少便益」を算定する。

配分対象道路網に有料道路が含まれる場合は、まず有料道路を利用するか利用しないかの選択をロジットモデルで計算し、次に有料道路経由のルート間若しくは一般道路経由のルート間で配分計算を行う。このような手続きは「高速転換率内生化」と呼ばれている。高速転換率内生化を行いながら利用者均衡配分状態を求める手法が「高速転換率内生化利用者均衡配分手法」である。図-39 に示すように配分結果のリンク交通量と実際のリンク交通量の相関をみると決定係数が 0.9 以上となっており高い再現性が確保された。

以上の①～④の手続きを踏んで得られた結果を表-5 に示す。「総走行時間費用」と「総走行経費」と「交通事故社会損失」を合計した費用について情報提供有りの費用のほうが無しの費用よりも安ければ便益が発生する。この便益は「走行時間短縮便益」と「走行経費減少便益」と「交通事故減少便益」を合計したものである。表-5 の特徴として以下に示す点が見られた。

- ✓ 国道 36 号ルートと道央道・札幌道ルートにおける冬期交通事故リスク情報の提供は、情報の内容によっては便益がマイナスになることがある。
- ✓ 国道 36 号ルートの事故リスク情報の内容が高事故リスクの場合、道央道・札幌道ルートの事故リスク情報の内容にかかわらず便益が発生する。
- ✓ 国道 36 号ルートの事故リスク情報の内容が低事故リスクの場合、道央道・札幌道ルートの事故リ

スク情報の内容にかかわらず便益がマイナスになる。

- ✓ 国道 36 号ルートと道央道・札幌道ルートにおける冬期交通事故リスク情報の提供は、国道 36 号ルートの事故リスクが高いときに限って情報提供をすることにより便益が見込まれる。事故リスクが低い場合には提供しないほうがよい。

8. 冬期交通事故リスクマネジメントツールの開発

8. 1 生活道路での交通安全診断を支援するツール⁹⁾

冬期交通事故リスク情報の提供による交通需要マネジメント対策は幹線道路を対象としたリスク対策である。交通事故リスクマネジメントのリスク対策には様々なものが挙げられるが、生活道路を対象としたリスク対策として「交通安全診断」（「道路安全診断」と呼ぶこともある。）がある。北海道交通事故対策検討委員会の資料によれば、交通安全診断は「インハウスインエンジニアを含む診断チームが生活道路の管理者からの要請に基づき、現地踏査や関係機関との連携を通じて交通安全対策に関する技術的な助言をする制度」のことである。図-40 左側にその枠組みを示す。

交通安全診断では診断チームが事故等のデータを管理事務所で分析し、事故現場に分析結果を持ち込み踏査しながら事故要因を特定した後、事務所に戻って事故対策を検討するという手順が多かった。この手順だと、準備した分析結果に加えて新たな分析が現場で必要になった場合、例えば踏査して初めてその存在が明らかになった抜け道について過去の事故状況を知りたくなった場合や、周辺を含む広い範囲で過去の事故が起きていないかを知りたくなった場合には、事務所に戻って改めて抜け道や周辺のデータなどを分



図-40 交通安全診断の枠組と交通安全診断支援ツールの内容

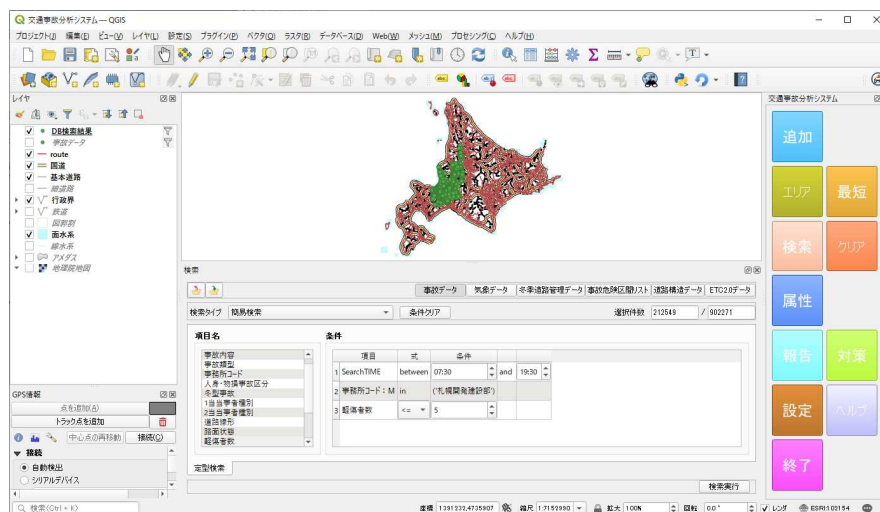


図-41 検索機能、検索結果表示機能

析し直す手間が生じていた。現場で分析できるモバイル型のツールがあれば気付いた点を忘れないうちに分析して診断に反映できるため、診断結果がより効果的になる。加えて、観察すべきポイントや検討すべき対策を提示してくれたり、診断書作成を現場で可能とする機能が備わっていれば、現場と事務所を往復する手間が省けて診断作業がより効率的になる。

そこで効果的・効率的な交通安全診断の支援のため、「モバイル型の交通事故分析システム」と「エキスパートシステム」で構成された交通安全診断支援ツールを開発した。図-40 右側にその内容を示す。

「モバイル型の交通事故分析システム」とは、新たに開発した地理情報システムとデータベース管理システムを基盤に、北海道を対象にしたビッグデータ（検索レコード数約 90 万件。）を分析できるアプリをモバイル端末にインストールしたものである。寒地土木研究所では ArcGIS と Access を基盤にした交通事故分析システムを開発しているが、今回新たに開発したアプリはその機能の一部を移植する形で無償の QGIS と PostgreSQL を基盤にしたものである。また、移植した機能の他に、後述する機能も実装する。

「エキスパートシステム」とは、現場で観察すべきポイントを整理した「チェックリスト」、道路特性に応じて事故対策とその概算費用を列挙した「対策メニュー」、観察すべきポイントと検討すべき対策を事故類型毎にまとめた「チェックシート」について各々を HTML で結び付けたアプリである。

8.2 モバイル型の交通事故分析システム

モバイル型の交通事故分析システムの代表的な機能を列挙する。

① 検索機能、検索結果表示機能

本ツールは、ツールに格納されたデータベースと QGIS の検索エンジンを使って気象・交通等と事故のクロス分析ができる「検索機能」を有する（図-41）。この機能を使えば、積雪時の診断現場で夏期の事故状況が参照できる。ツールに格納されたデータベースは ArcGIS と Access を基盤にした交通事故分析システムの Access 版「交通事故分析データベース」を PostgreSQL 版として移植しており、北海道の高速道・国道・道道・市町村道を対象に、交通事故データ（北海道警察との共同研究を通じて貸与される人身事故データ）、道路構造データ（国土交通省北海道開発局の道路管理データベース MICH I のデータ及び寒地土木研究所の計測車両による冬期路面すべり抵抗値のデータ）、交通データ（道路交通センサスの交通量・道路幅員等のデータ）、気象データ（気象官署やアメダスの気温・降水量等のデータ）などを統合し、事故が発生した時間と場所で紐付けて事故 1 件ごとに検索レコードに設定した。物損事故データは、人身事故データのように緯度・経度情報を持たないので、町丁目に基づくジオコーディングで場所を推定した。

② 最短ルート上の事故分析機能

本ツールは、抜け道は最短ルート上にあるとの仮定の下、抜け道の事故分析ができる機能を有する。地図上で任意の 2 点を指定すると、ダイクストラ法によって 2 点間の最短ルートを演算し、クロス分析結果のうちその経路上に合致した結果だけを地図上に表示できる（図-42）。この機能を使えば、現場踏査をして初めてその存在が明らかになった抜け道について過去の事故状況を知りたい場合も現場で分析できるようになる。

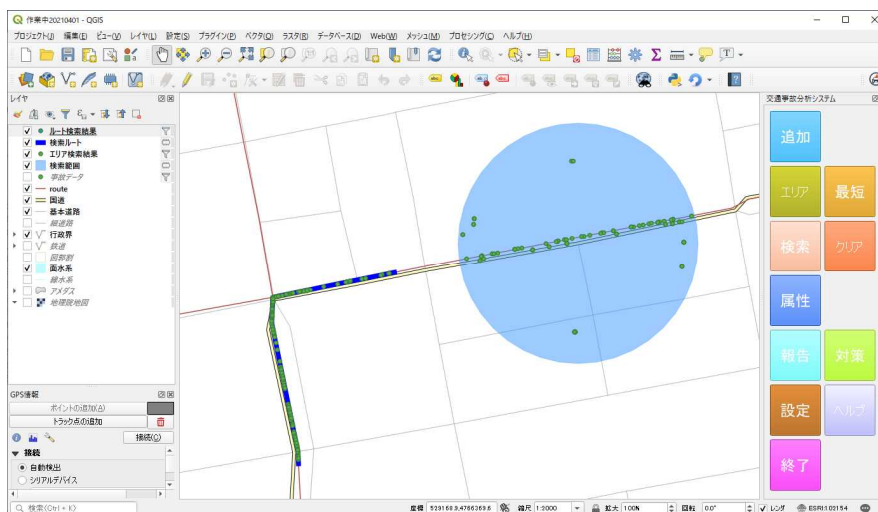


図-42 最短経路上の事故分析の機能、同心円内の事故分析の機能

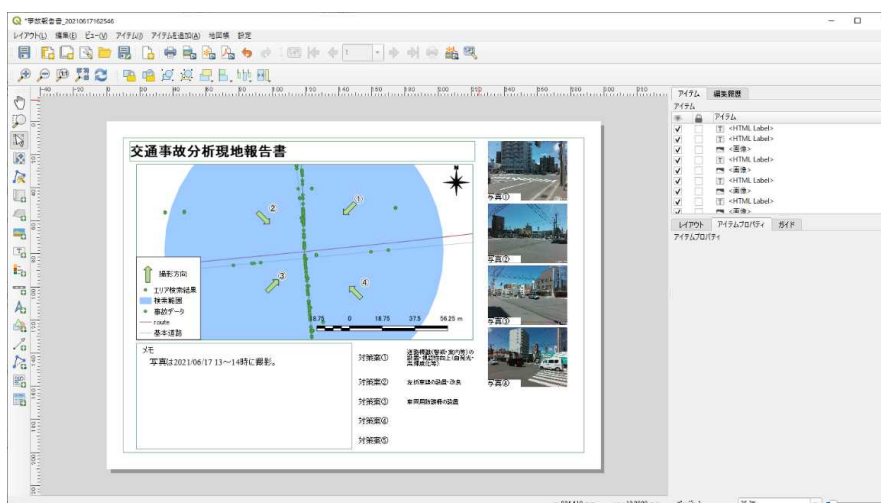


図-43 現場写真の自動配置の機能、診断書作成・PDF 変換機能

③ 同心円内の事故分析機能

本ツールは、任意の地点から一定距離にある領域内の事故分析ができる機能を有する。地図上で任意の1点と複数の半径を指定すると、QGIS のバッファツールによって同心円を演算し、クロス分析結果のうち指定円内に含まれる結果だけを地図上に表示できる(図-42)。この機能を使えば、現場踏査中に周辺の交差点で過去に同様の事故が起きていないか分析できるようになる。

④ 現場写真自動配置機能、診断書作成機能

本ツールは、モバイル端末に内蔵した Wi-Fi や GNSS やカメラを使って現場で撮影したジオタグ付き写真を診断書の地図上に自動配置するとともに、定型の診断書を PDF で作成して電子メールで送付できる機能を有する(図-43)。現場写真の自動配置では、撮影した方向についても矢印記号で地図上に表示が可

能である。

8.3 エキスパートシステム

モバイル型の交通事故分析システムの機能を列挙する。

① チェックリスト

診断チームが現地で観察すべきポイントを、「過去の事故対策」「沿道状況」「交通状況」「横断構成」「交差点」「信号機・信号現示」「路面表示・標識」「視認性」「歩行者」「自転車」「路面管理」「道路付属物」「照明」「公共交通」の区分で 94 項目に整理した。これを本ツールの「チェックリスト」と呼ぶ。表-6 にその一部を示す。

② 対策メニュー

「道路形状(交差点、単路)」「地域区分(市街地、非市街地)」「信号の有無」「車線数(2車線以下同士の交差、多車線と2車線以下の交差、多車線同士の交差、

表-8 チェックシート（一部を抜粋）

事故類型区分 1	事故類型区分 2	事故要因区分1	事故要因区分2	事故要因の詳細	現地視察ポイント	対策案
人対車両	横断歩道横断中の事故（横断歩道、横断歩道付近）	道路幾何構造	視認性不良	・車からの歩行者(自転車)、歩行者(自転車)からの車が見えにくい	・道路横断箇所前後の道路線形 ・交差点形状・交差角 ・隅角部の歩行者への視認性 ・横断歩道の位置	視距の改善 交差点流入部の改良・交差点形状の変更 交差点部の見通し、隅切りの確保（障害物の撤去・移設・整理等） 道路反射鏡の設置 横断歩道位置の変更（車両から見やすい箇所へ移動）
				・運転者が交差点に気づかない	・各流入部からの交差点の視認性	警戒標識（法定・法定外）の設置・視認性向上（大型化・高輝度化・自発光等） 路面標示(区画線等)の設置・視認性向上 高視認性区画線 チャッターバー 自発光路面標示 路面標示（文字・マーク・矢印等）の設置 ドット線の設置
			歩行者交通需要への対応不備	・歩道・横断歩道が無い・狭い ・横断待ちスペースが不明瞭・不十分 ・横断歩道の標示が不適切 ・横断距離に対して、青時間が不足している	・歩道・横断歩道の設置状況 ・横断待ち歩行者の状況 ・通行車両の走行速度	歩道の設置・改良（拡幅等） 路面標示(区画線等)の設置・視認性向上 高視認性区画線 チャッターバー 自発光路面標示 歩行者滞留スペースの確保 横断歩道の設置・改良（位置変更、拡幅等）
		交通弱者への対応不備	・高齢者・障がい者・子供等利用に對しての不備	・横断施設利用時の不都合 ・横断未完了歩行者の状況	横断歩道部の段差切り上げ 横断距離の短縮化（交差角の直角化、車道幅員の絞込み） 安全島設置、歩行者の二段渡し 信号現示改良 ITSの開発・導入（弱者感応式信号機の設置（PICS））	
		障害物	視認性阻害	・市街地等で、障害物により車から歩行者・自転車や交差点部、歩行者・自転車から車が見えにくい	・障害物(柵、看板、植樹など) ・背景の視覚ノイズ ・駐停車車両の有無	工作物/障害物の撤去・移設・整理 視覚ノイズの除去 道路反射鏡の設置 駐車取り締り
				交通流	右左折時の注意不足	・右折時の横断歩行者・自転車への注意不足（対向車両を意識） ・左折時の横断歩行者・自転車への注意不足
		不適切な運転	・過度のスピードにより歩行者・自転車と交錯	・法定速度と実走行速度 ・横断歩道と交差点の間の距離	舗装面による速度抑制・注意喚起対策 すべり止め舗装 グレーピング舗装 イメージハンブ 隅角半径の改良（縮小、速度抑制） 速度取り締り	
			・前方不注意・脇見による歩行者への視認性	・歩行者の視認性	舗装面による速度抑制・注意喚起対策 すべり止め舗装 グレーピング舗装 イメージハンブ	

事故、その他横断中の事故)」「自動車対自転車(対面・背面通行時の事故)」「車両相互(正面衝突事故、追突事故、出会い頭事故、進路変更時の事故、左折時の事故、右折時の事故)」「自動車単独(車線逸脱事故)」「冬型事故(スリップ事故、わだち事故、視界不良事故)」に分類し、事故類型毎に事故要因と現地観測ポイントと対策案を整理した。これを本ツールの「チェックシート」と呼ぶ。表-8にその一部を示す。チェックシートに記載された現地観察ポイントと対策案は、各々、チェックリストと対策メニューにハイパーリンクで紐付けられている。

9. まとめ

本研究では北海道を対象にした冬期交通事故リスクマネジメントに着目し、リスク特定として「交通事故分析データベース整備」を、リスク分析として「冬期交通事故リスク要因分析」を、リスク評価として「冬期交通事故リスク評価手法の開発」と「リスク対策評

価」と「リスク対策による便益算定」を、リスク対応として「冬期交通事故リスクマネジメントツールの開発」を各々実施して体系化した冬期交通事故リスクマネジメント手法を構築した(図-44)。そして「交通事故データベース整備」と「冬期事故リスク要因分析」と「冬期交通事故リスク評価手法の開発」によって達



図-44 本研究で構築した冬期交通事故リスクマネジメント手法

成目標①「ビッグデータ等を活用した冬期交通事故リスク評価手法の構築」を、「リスク対策評価」と「リスク対策による便益算定」によって達成目標②「冬期交通事故リスクマネジメント手法の構築」を、「冬期交通事故リスクマネジメントツールの開発」によって達成目標③「冬期交通事故リスクマネジメントツールの開発」を各々達成することにより、効果的・効率的に冬期交通事故リスクを管理する手法を構築した。

参考文献

- 1) 齊田光、平澤匡介、高橋尚人、石田樹：デジタル住宅地図データを用いた広域路面日陰計算手法、寒地土木研究所月報、No.764、2016.
- 2) 齋田光、平澤匡之、高橋尚人、石田樹：日陰時間が冬期交通事故発生率に与える影響の定量的評価、土木学会論文集D3(土木計画学)、73巻、5号、pp.1013-1022、2017.
- 3) 齊田光、平澤匡介、高橋尚人、石田樹：路面雪氷状態推定結果を用いた冬期交通事故分析手法の基礎的検討、寒地土木研究所月報、No.770、2017.
- 4) 四辻裕文、平澤匡介、佐藤昌哉：札幌市内の国道網を対象とした交通状態別事故リスクの空間的評価、寒地土木研究所月報、No.794、2019.
- 5) 吉井稔雄：交通事故リスクマネジメント手法の研究開発、道路政策の質の向上に資する技術研究開発、成果報告レポートNo. 29-5、新道路技術会議、2021.
- 6) 四辻裕文、星卓見、平澤匡介、佐藤昌哉：北海道の高速道と一般道の並行ルートにおける冬期交通事故リスクとその要因、寒地土木研究所月報、No.808、2020.
- 7) 四辻裕文、平澤匡介、佐藤昌哉：冬期事故リスク情報の内容に対する北海道のドライバーの選好、寒地土木研究所月報、No.818、2021.
- 8) 四辻裕文：交通量配分の数値計算について、寒地土木研究所月報、No.804、2020.
- 9) 四辻裕文、奥村航太、平澤匡介、伊東靖彦：複雑な事故要因を有する生活道路等に有効な交通安全診断支援ツールの開発、寒地土木研究所月報、No.832、2022.