

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

2016 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。

2017 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。

2018 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。

2019 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。

2020 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。

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 and Snow and Ice)
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.

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、片野浩司、木村孝司、高橋尚人、牧野正敏、丸山記美雄、徳永ロベルト、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、走行速度や旅行時間信頼性などの客観的指標とユーザー満足度などの主観的指標を基に、冬期道路管理における費用対効果の定量評価手法の構築を最終目標とする。平成 29 年度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試作を行った。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検証を行うとともに、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。

キーワード：冬期道路管理、費用対効果、冬期走行環境、ユーザー満足度

1. はじめに

積雪寒冷地域において、ランドデザイン 2050 の基本戦略にあるコンパクト+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強化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⁾において「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・強化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、冬期道路の走行性やユーザー満足度の向上を図るには、冬期走行環境の評価技術と冬期走行環境が走行性とユーザー満足度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対策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、道路維持対策、冬期走行環境の改善度合い、冬期道路の走行性やユーザー満足度の改善度合い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その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。

そこで、本研究では費用対効果による冬期道路管理水準の評価技術の確立を目指すこととした。

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



a. 連続路面すべり抵抗測定装置



b. 冬期道路有効幅員計測装置



c. 簡易型 IRI 測定装置

写真1 冬期走行環境の測定技術



写真2 冬期走行環境同時測定車両

術」を構成する技術として、客観的指標（走行速度・旅行時間信頼性）と主観的指標（ユーザー満足度）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、本研究は

- ① 冬期走行環境の推定手法の構築
- ② 走行速度、時間信頼性、ユーザー満足度の評価手法の構築
- ③ 冬期道路管理の費用対効果の評価ツールの開発

に大別される。平成28年度は、上記①および②について取り組んだ。また、平成29年度は①および②に加え、③についても取り組んだ。3章および4章では平成28年度の研究内容について、5章および6章では平成29年度の研究内容について、7章では平成30年度の研究内容について、8章および9章では、令和元年度の研究内容についてそれぞれ記載する。

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車両に搭載して走行しながら連続し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）を計測する連続路面すべり抵抗測定装置（写真1a）⁵⁾、冬期道路有効幅員計測装置（写真1b）⁶⁾および簡易型IRI測定

装置（写真1c）⁷⁾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試験が必要になり、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に、冬期走行環境計測技術を1台の車両に集約した（写真2）。

連続路面すべり抵抗測定装置は車両後部に取り付けた。本装置の路面すべり抵抗測定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）となるように較正され、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測定車と連続路

面すべり抵抗測定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」搭載)」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(写真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を自動で無効とし排除することが可能である。

簡易型 IRI 測定装置は、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 を測定する計測装置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

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	狭い
B	4.8km	対面片側2車	広い
C	2.7km	対面片側1車	広い

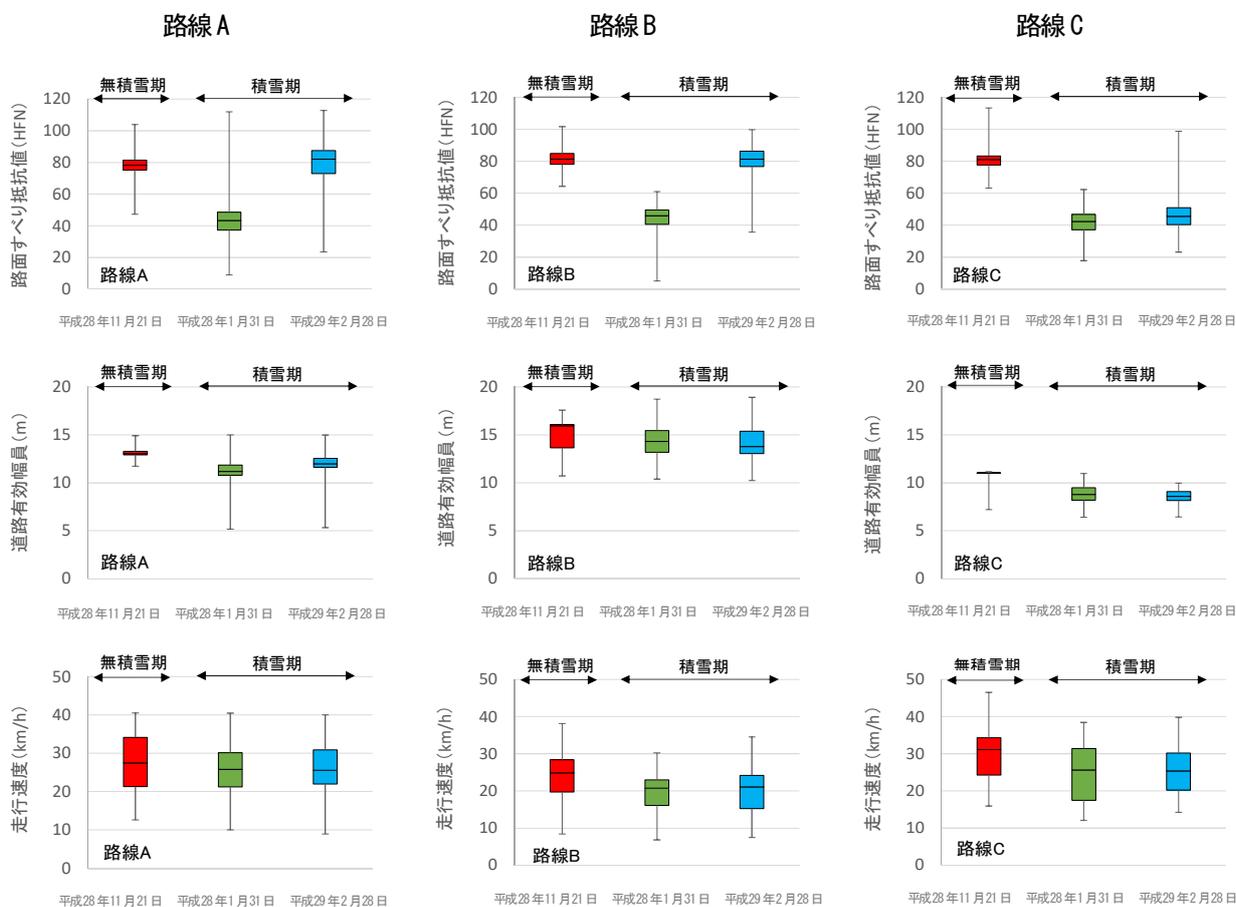


図 1 走行試験の結果(上段:路面すべり抵抗値、中段:道路有効幅員、下段:走行速度)

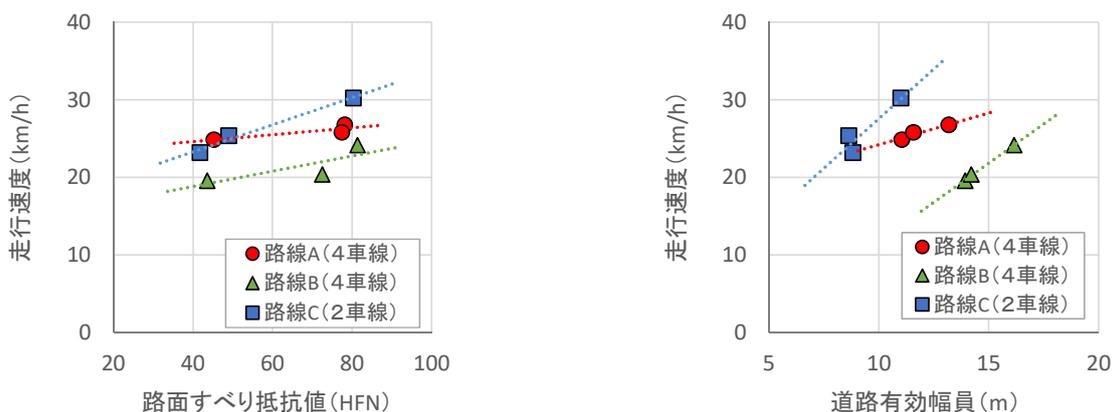


図2 冬期走行環境と走行速度の関係（左図：路面すべり抵抗値、右図：道路有効幅員）

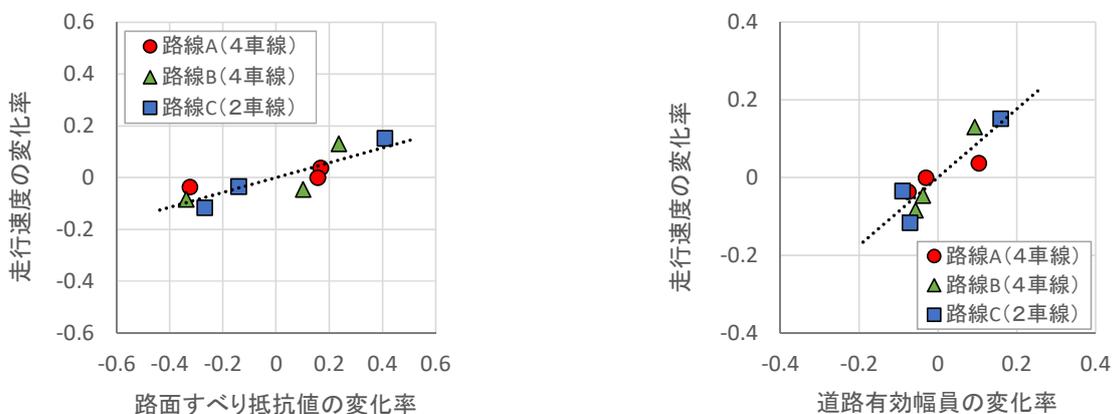


図3 冬期走行環境の変化率と走行速度の変化率との関係（左図：路面すべり抵抗値、右図：道路有効幅員）

ける測定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1は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1~2m程度、路線Cでは2~3m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31km/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2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3は図2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度合で線形的に低下していることが分かる。

図2や図3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・分析システムの試作

道路管理者が作成・とりまとめ・管理する、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・試作した。管理項目は道路事務所へのヒアリングを基に案として、事務所、路線番号、受付日時、相手先、距離標開始・終了、維持作業、応急処理、完了日時など36項目を定めた。

本システムの特徴として、路線番号およびキロポストが入力された意見要望であれば、アイコンが地図上に表示される（図4）。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

断できるように工夫した。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5）。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、上述の冬期走行環境同時測定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。このようにして気象、冬期走行環境、ユーザー満足度の関係を明らかにし、冬期走行環境に関する客観的指標に加えてユーザー満足度の

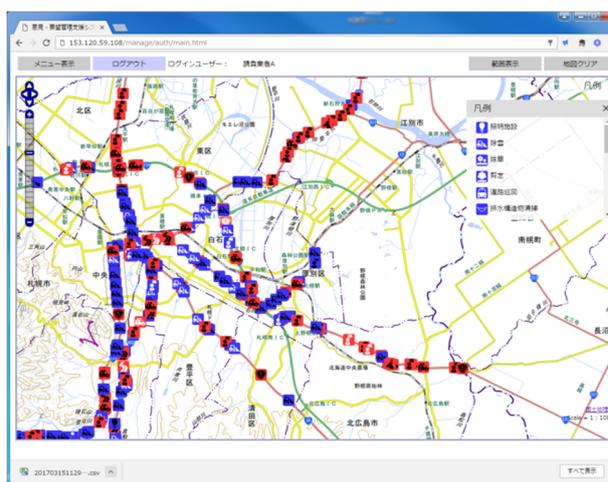


図4 道路利用者の意見要望の管理システムの表示例

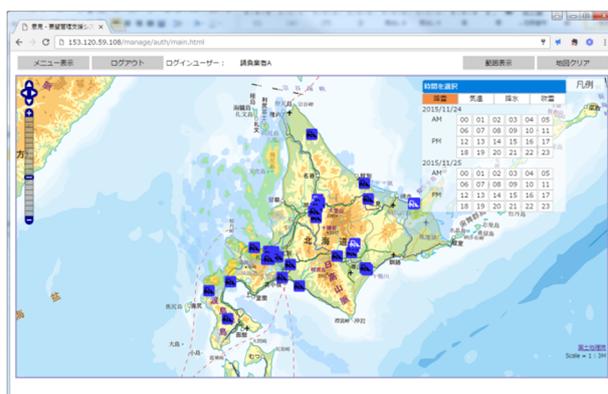


図5 道路利用者の意見要望のマッピング（気象条件との重ね合わせ）



図6 道路有効幅員計測装置の取り付け状況

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

主観的指標も考慮して、冬期道路管理の効率化の促進を目指す。

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。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を測定した。なお、道路有効幅員の計測装置について、平成28年度はレーザースキャナ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スキャナの振動対策が必要であった。そこで、平成29年度以降は、レーザースキャナ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6）。

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14交差点（札幌市手稲区）間の

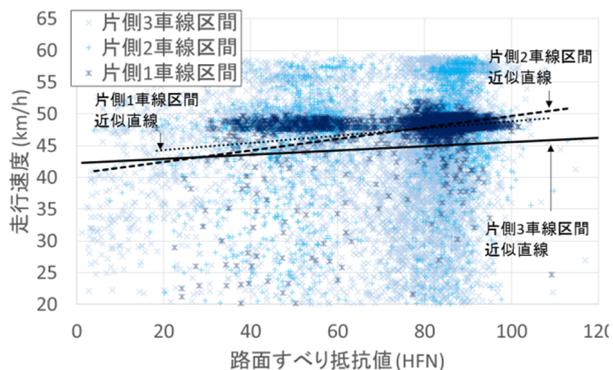


図7 一般国道231号における路面すべり抵抗値と走行速度の関係

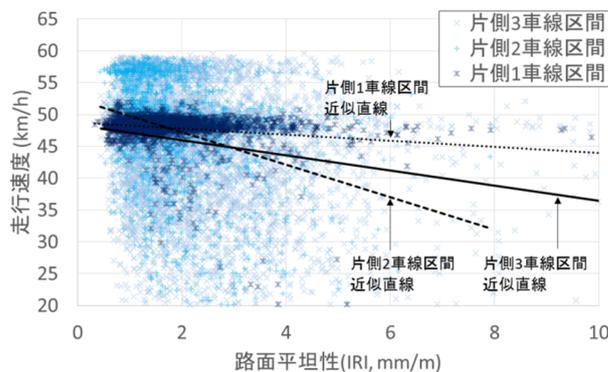


図8 一般国道231号における路面平坦性（IRI）と走行速度の関係

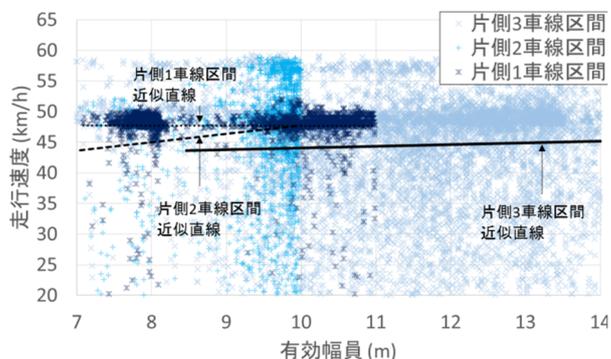


図9 一般国道231号における有効幅員と走行速度の関係

7.7kmを対象として走行試験を行った。

5.2 試験の結果

図7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

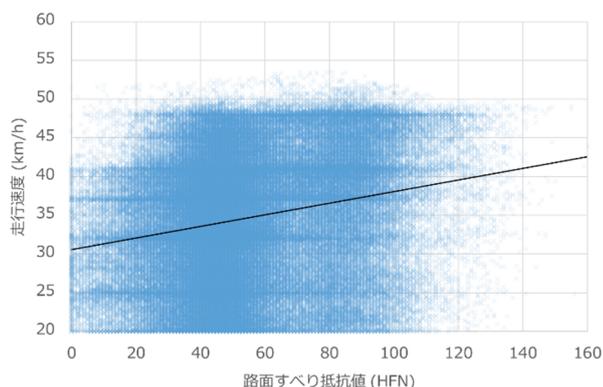


図10 二十四軒・手稲通における
路面すべり抵抗値(HFN)と走行速度の関係

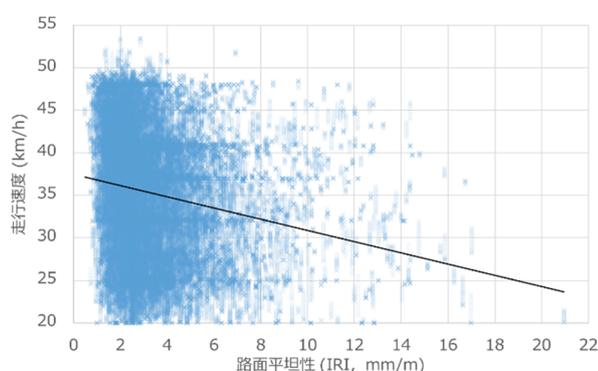


図11 二十四軒・手稲通における
路面平坦性(IRI)と走行速度の関係

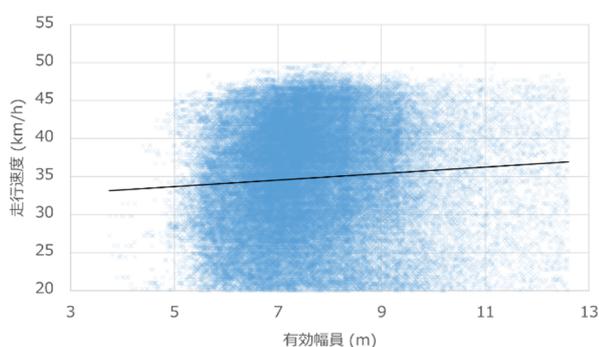


図12 二十四軒・手稲通における
有効幅員と走行速度の関係

ける走行速度と比較して6km/h程度の低下が見られた。

図8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9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10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11は二十四軒・手稲通におけるIRIと走行速度の関係を示す。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12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、タクシードロ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13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 14 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 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 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

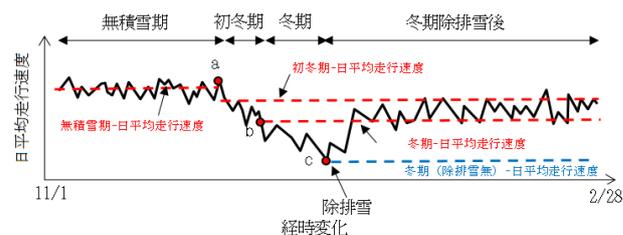


図 13 日平均走行速度および積雪深の推移ならびに降雪経済損失・除排雪経済効果の評価概念図

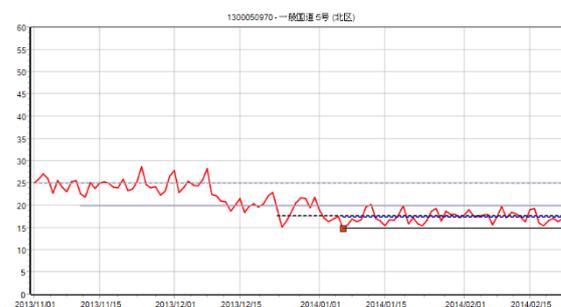


図 14 日平均走行速度の推移の例（一般国道 5 号 北 34 西 2 交差点～北 14 西 1 交差点）

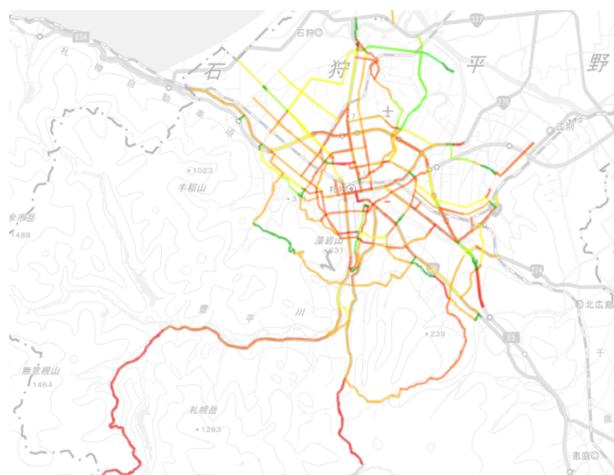


図 15 降雪による経済損失の分布（平成 25 年度冬期）

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 15 は上述の手法により平成 25 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 パーセントイル速度と 75 パーセントイル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 16 から図 18 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。

図 19 から図 21 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

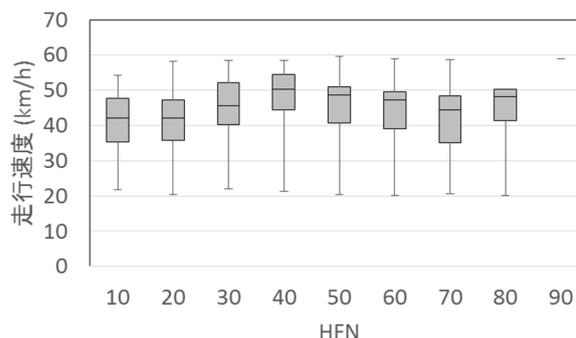


図 16 一般国道 231 号 KP0~KP11 (片側 3 車線区間) における路面すべり抵抗値と走行速度の関係

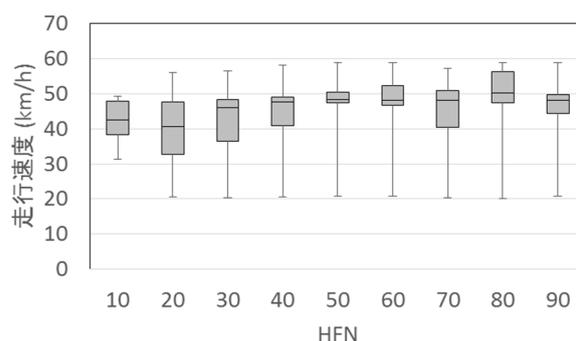


図 17 一般国道 231 号 KP11~KP15 (片側 2 車線区間) における路面すべり抵抗値と走行速度の関係

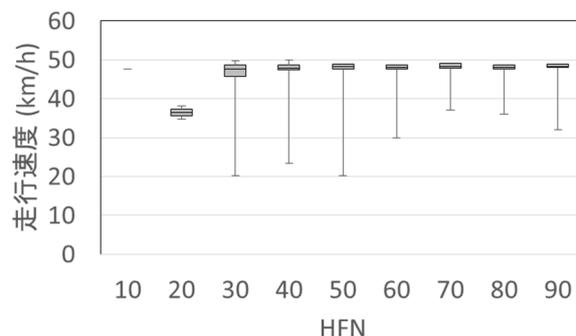


図 18 一般国道 231 号 KP15~KP19 (片側 1 車線区間) における路面すべり抵抗値と走行速度の関係

るには至らなかった。

図 22 から図 24 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のような交通容量の著しい低下がほとんど発生しなかったため、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。

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。

8. 機械学習を用いた冬期走行環境の推定

本研究では、5. で収集した冬期走行環境データと気象データ、交通条件データを用いて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。本研究では、一般国

道 231 号 KP0~KP19 を対象として区間中の任意の地点・日時における冬期走行環境（路面すべり抵抗値、路面平坦性および道路有効幅員）および平均走行速度の推定を行った。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予測器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。本検証では、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

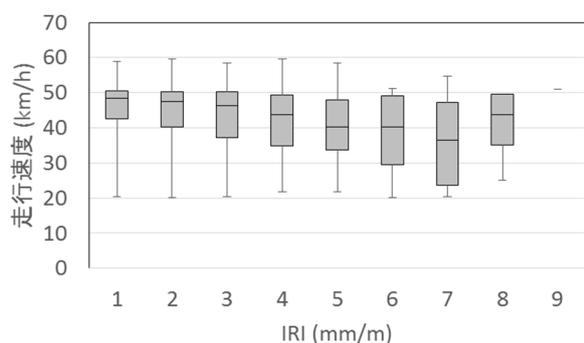


図 19 一般国道 231 号 KP0~KP11 (片側 3 車線区間) における路面平坦性と走行速度の関係

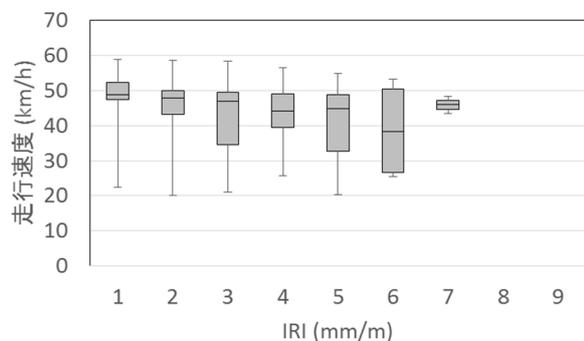


図 20 一般国道 231 号 KP11~KP15 (片側 2 車線区間) における路面平坦性と走行速度の関係

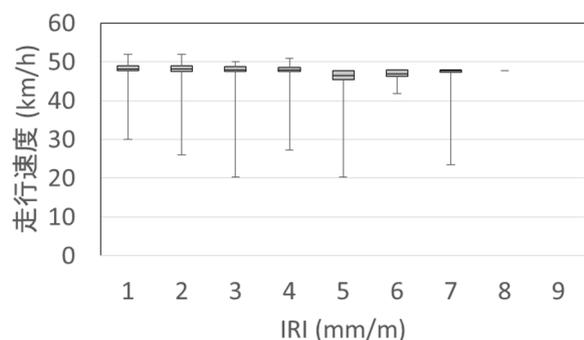


図 21 一般国道 231 号 KP15~KP19 (片側 1 車線区間) における路面平坦性と走行速度の関係

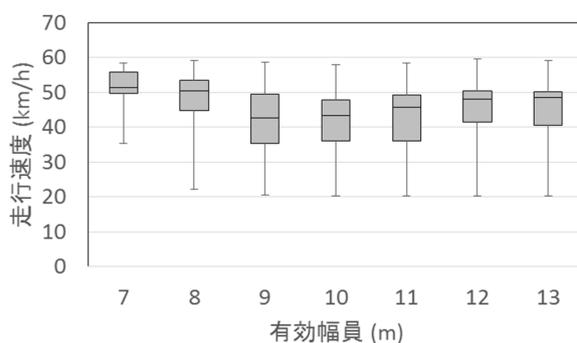


図 22 一般国道 231 号 KP0~KP11 (片側 3 車線区間) における有効幅員と走行速度の関係

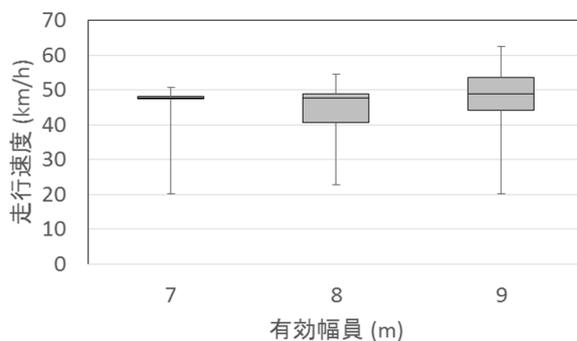


図 23 一般国道 231 号 KP11~KP15 (片側 2 車線区間) における有効幅員と走行速度の関係

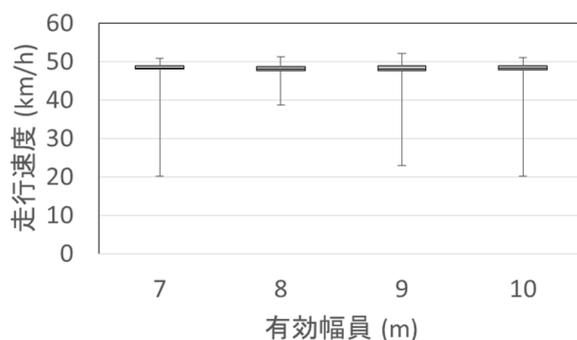


図 24 一般国道 231 号 KP15~KP19 (片側 1 車線区間) における有効幅員と走行速度の関係

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年度の冬期に当該区間で計測車両を用いて得られた値（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とし最も推定精度および汎化性能が優れた予測器を用いて冬期走行環境の推定を行った。

表3に最も推定精度および汎化性能が優れた予測器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25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1.35m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、先述の入力条件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26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。

9. 道路有効幅員計測データ解析の効率化検討

9.1 現状の解析方法

道路有効幅員計測システムで計測したデータの解析方法は、専用の解析用ソフトウェアで、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設定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、閾値の設定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

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

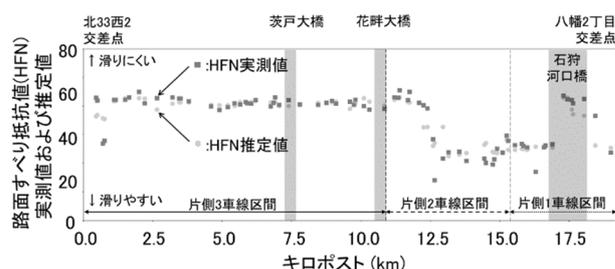


図25 路面すべり抵抗値の実測値および推定値 (2018/1/12)

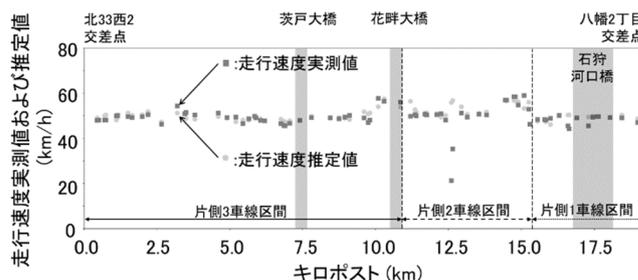


図26 走行速度の実測値および推定値 (2018/1/12)

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、正しい幅員位置に手作業で適宜修正している（図27）。

このように、全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。

このことから、迅速な冬期道路幅員の状況把握には、計測データ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

道路有効幅員計測システムは、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

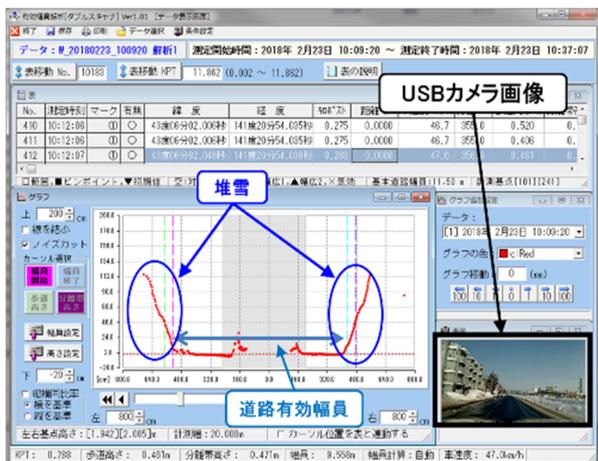


図 27 現状の解析画面

		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)

図 29 混同行列

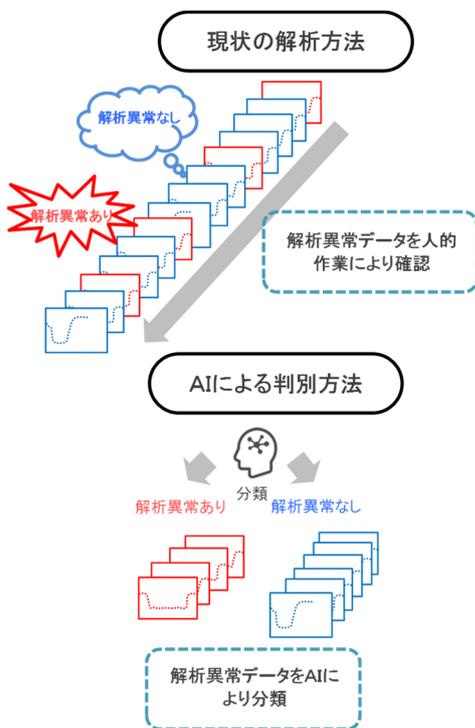


図 28 現状と AI による判別手法の概念図

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、AI を活用した道路有効幅員の判定手法の検討を行った。

今回の検討では、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 (図 28)。

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、CNN (Convolutional Neural Network) 等の 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、既存システム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。そこで、精度検証においては、確率値の閾値を一律 50%とし、50%以上を正解「修正後」、50%未満を「修正前」として判定することとした。

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 29)。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数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。

9.2.2 AI モデルの学習方法

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) を実際に道路有効幅員計測システムで計測および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 30 年 1 月 11 日、2 月 1 日、2 月 8 日のデータとした。

まずは、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。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) の違いがモデルの精度にどの程度影響するかに着目した。

次に、特定日以外（この場合は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、学習データの検証を実施するため、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。

9.2.3 AIモデルの検証結果

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

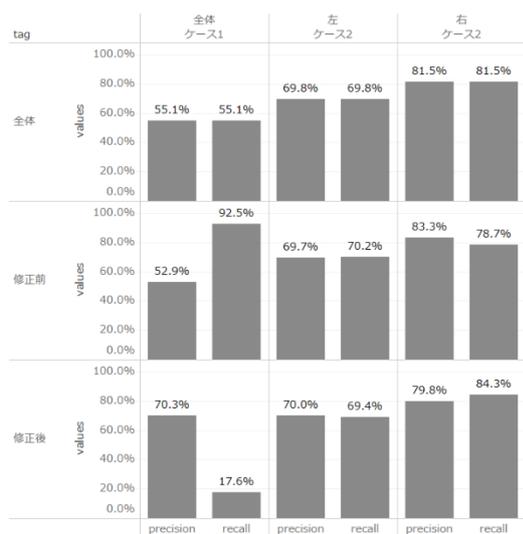


図30 ケース1(画像全体)とケース2(左右分割)の比較

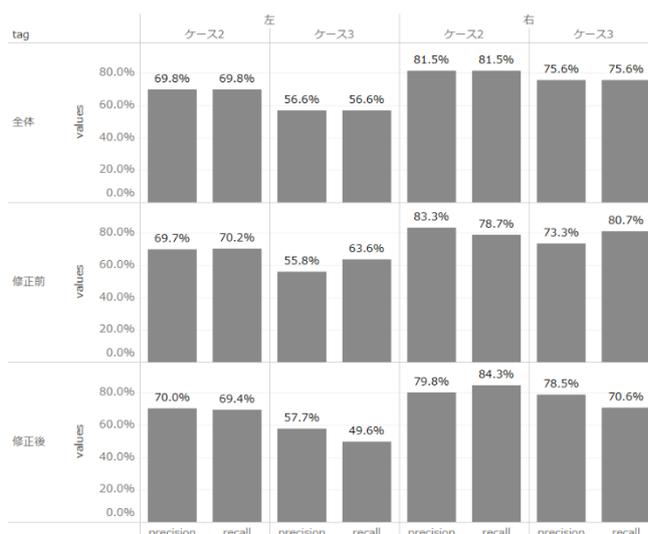


図31 ケース2(通常画像)とケース3(グレースケール)の比較

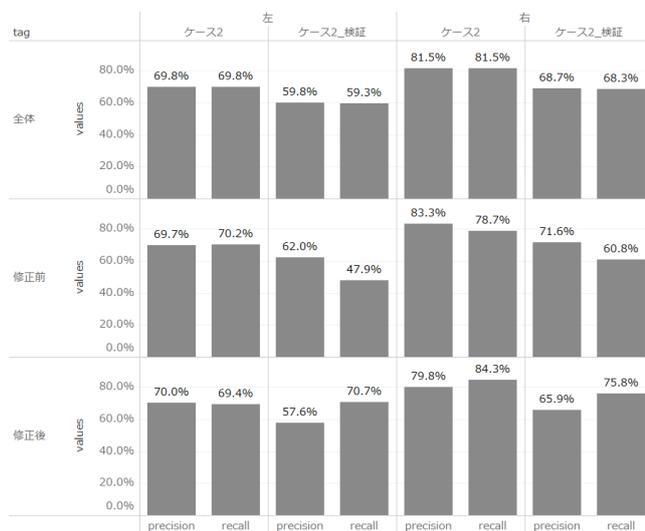


図32 ケース2(同日のデータ)とケース2検証データ(別日のデータ)の比較

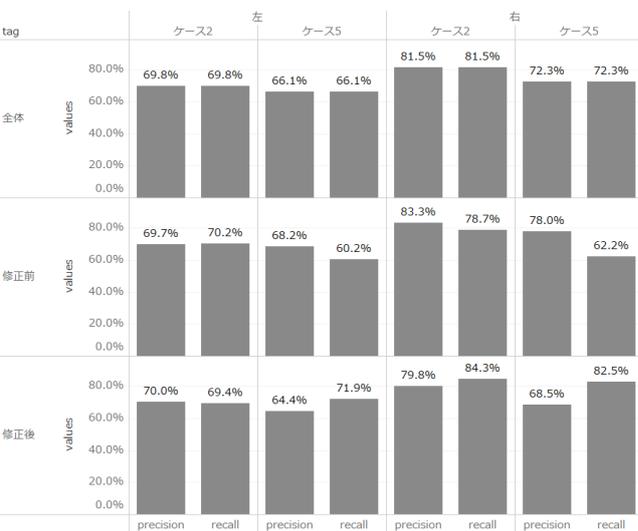


図33 ケース2(1日分データのモデル)とケース5(3日分データのモデル)の比較

度が高いことがわかった (図 30)。特に右側のモデルが左側のモデルに比べて高く、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、ある程度高い精度を確保できているといえる。これは、レーザースキャナによる計測データの取得時の特性 (車両の右側の点群データがまばらになりやすい) 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、既存システムで修正作業を行う上で、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、以降の検証は、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、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するため、画像をグレースケール化 (色彩の特徴量が減ることによる精度の確認) して学習させたモデルと比較した。結果は、グレースケール化させた画像 (ケース 3) の精度が下がり、今回のモデルでは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 31)。

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 32)。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られる。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、計測車両の走行による雪の舞い上がりを計測したデータがあるなど、大きな違いがあった。

最後に 2 月 1 日および 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、モデルの再学習 (学習データの追加) として前述までの 1 月 11 日のデータに加え 2 月 1 日および 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 33) が、1 月 11 日のモデルに 2 月 1 日および 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多少精度は改善するが、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。

今後は、データ取得日の天候等により様々なデータが存在することから、学習データの追加により様々な状況にも対応できるようにする必要がある。また、一方で単純にデータを追加するだけでは、十分な学習モデルの精度が得られなかったため、学習が不足している個所を絞り込んだモデルの構築を実施する必要がある。

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

本研究では、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の開発を行った。

図 34 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、対象とする区間の路面の滑りやすさ、路面平坦性および有効幅員を明らかにする (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、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) との連携を容易にするために、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 35 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。

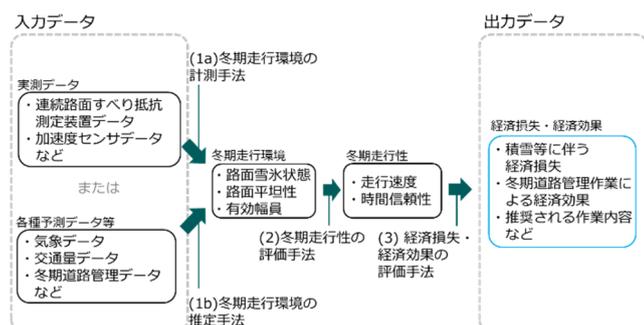


図 34 積雪等による経済損失および除雪等による経済効果の算出方法

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。加えて、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。

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が示唆された。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・分析システムを試作した。

冬期道路管理の費用対効果の評価ツールの開発に関しては、冬期の走行速度プローブデータ、交通量データ等から積雪時・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を算出するためのツール試作を行った。これにより、路線の各区間において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推定が可能となった。

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が示唆された。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、効率化を図れる可能性があることがわかった。



図 35 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

今後は、より多様な気象、道路、交通および道路雪氷状態の条件下で繰り返し走行試験を実施し、冬期走行環境と走行性の関係についてより詳細な分析を実施するとともに、交通条件や気象条件等から冬期走行環境を推定する手法についても開発を行う予定である。

参考文献

- 1) 札幌市：平成 27 年度札幌市政世論調査報告書、p. 49、2016.2
- 2) 藤本明宏、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
- 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、川村彰、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
- 1) 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

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、中島淳一、植野英睦、飯田美喜、久慈直之

佐藤昌哉、平澤匡介、宗広一徳、中村直久

【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よる除排雪の作業計画支援技術の提案を行うものである。

令和2年度は、排雪前後及び堆雪幅の推移に伴う交通性能のモデル化、路肩堆雪断面積の実測値と気象データや除排雪回数などから年間降雪量の多少等のグループごとに堆雪断面積を推計する式を作成し、適用性を確認した。また、より簡易的な堆雪形状計測技術の構築に向け、デジタル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。さらに、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」のヒアリング結果から、追加機能の抽出など改良に向けた検証と実施時期や工法についてシミュレーションを行った。

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。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、厳しい予算制約の下で、巻出し・拡幅・カットなど複数の工法を組み合わせで行われている。また、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、さらには熟練者及び担い手不足の課題もあり、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て効率的な道路横断面の利用を行うことで、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。

本研究では、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よる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

過年度まで、路肩堆雪の形成と交通流の変動に関する実査と、5ヶ年分の運搬排雪データ分析による路肩堆雪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した。また、地域（札幌・小樽・旭川）毎に路肩堆雪断面積の実

測値と気象データや除排雪回数等の分析結果から堆雪断面積予測式を作成し、適用性を確認した。

令和2年度は、排雪前後及び堆雪幅の推移に伴う交通性能の変動の整理及びモデル化、路肩堆雪断面積の実測値と気象データや除排雪回数などから年間降雪量の多小等のグループごとに堆雪断面積を推計する式を作成し、適用性を確認した。また、より簡易的な堆雪形状計測技術の構築に向け、デジタルカメラ撮影写真から3次元モデルを作成して、堆雪高さや幅の断面形状について検証し適用性を確認した。さらに、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」について動作確認や使用感を含めたヒアリングを行い、その結果から、追加機能の抽出など改良に向けた検証と実施時期や工法についてシミュレーションを行った。

3. 排雪前後の交通流の変動に関する検討

3.1 調査方法

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）〕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。

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-1）

2) 排雪前後の交通性能

・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プローブカーデータの比較により、堆雪幅別に旅行時間信頼性を算出した。

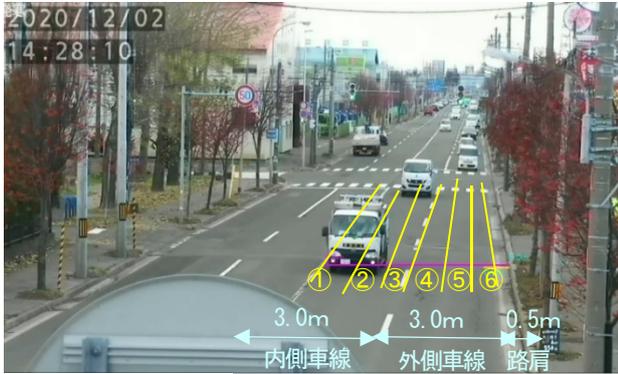


図-1 調査対象道路の横断面構成

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と堆雪幅別の交通流の事例を図-2に示す。堆雪幅1.5m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、堆雪幅2.0mでは、



(1) 圧雪路面_堆雪幅1.5m



(2) 圧雪路面_堆雪幅2.0m

図-2 堆雪に伴う交通流の変動

片側2車線道路が事実上1車線の運用になっている。

排雪前後の交通流について、比較した。ここでは、以下の事例を示す。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) 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-3に示す。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の計が、排雪前45%であったのが、排雪後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、車両は中央によった走行を余儀なくされることを確認した。

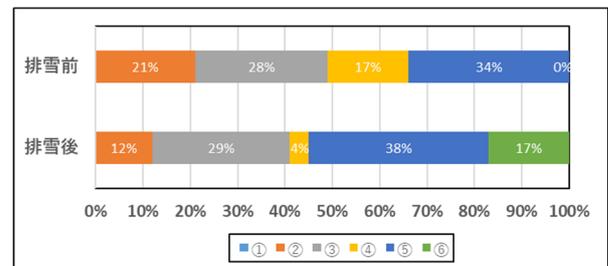


図-3 走行車線中の車両の走行位置
(排雪前：1月24日、排雪後：1月26日)

2) 交通性能の比較

排雪前後の交通性能として、速度のパーセンタイルを図-4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。

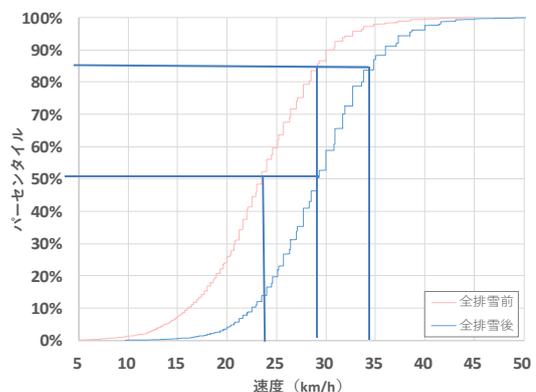


図-4 速度のパーセンタイル

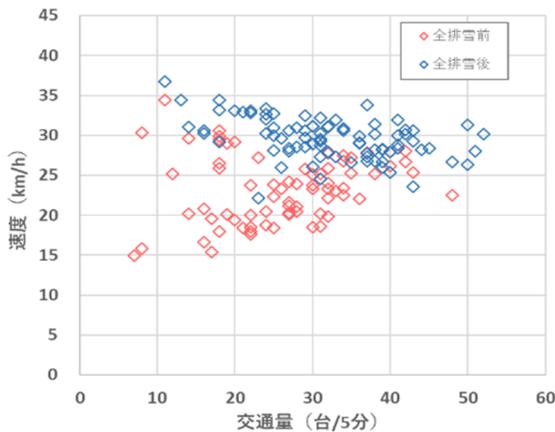


図-5 交通量-速度 (Q-V)

交通量-速度 (Q-V) 曲線を図-5 に示す。5 分間当たりの交通量と平均速度を、排雪前と排雪後についてプロットした。排雪前の最大交通量 (Qmax) は 48 台/5 分、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

過去 5 箇年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-6、図-7)。

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

$$\text{湿潤 } 1.5\text{m}, V = 24.6 \pm \sqrt{-7.948Q + 600.0} \quad (2)$$

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

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

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

$$\text{圧雪 } 1.5\text{m}, V = 20.2 \pm \sqrt{-16.015Q + 406.7} \quad (6)$$

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

3.2.3 時間信頼性の検討

札幌市内のタクシーをプローブカーとし、取得する GPS データから旅行時間をデータベース化した。定点カメラのある道路横断面を含む延長 4.7km (区間 6013) を対象とし、旅行時間信頼性指標 (PT、Tave、BT) について、95 パーセントイル旅行時間、平均旅行時間を用いて算定した。旅行時間信頼性指標を以下の計算式により求めた。

$$\bullet \text{ PT (Planning Time) } = 95 \text{ パーセントイル旅行時間} \quad (1)$$

$$\bullet \text{ Tave} = \text{平均旅行時間} \quad (2)$$

$$\bullet \text{ BT (Buffer Time) } = \text{PT} - \text{Tave} \quad (3)$$

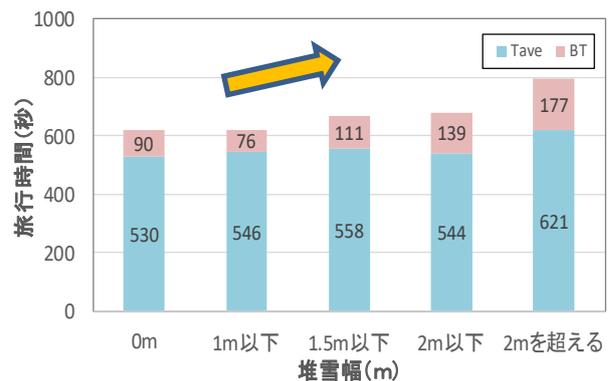


図-8 旅行時間信頼性

(非ピーク時: 9~12 時、区間: 6013)

堆雪幅別に得られた旅行時間信頼性は、図-8 のとおりである。堆雪幅が大きくなるに従って、旅行時間信頼性は低下した。

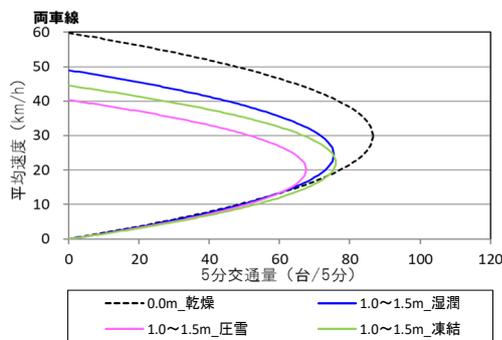


図-6 交通量 - 速度 (Q-V) 性能曲線のモデル化
(路面状態の別、堆雪の幅員 1.5m)

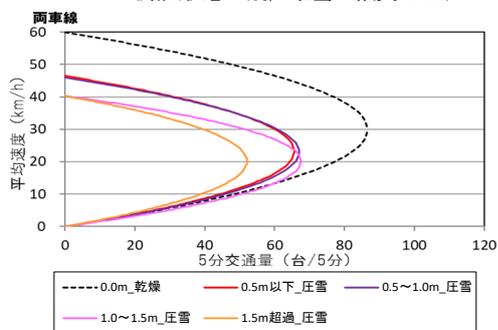


図-7 交通量 - 速度 (Q-V) 性能曲線のモデル化
(圧雪、堆雪幅の別)

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性把握、及び路肩堆雪形成傾向の把握を行った。

4.1 排雪量と排雪速度の関係性把握

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性を把握するため、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 30 年度は、昨年度までに整理した 4 ヶ年分 (H25～H28) の調査対象データ 2,876 件に、平成 29 年度分運搬排雪データから抽出した 720 件を新たに加え、調査対象データを 3,596 件とした (表-1)。

平成 29 年度分の調査対象データのうち、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排雪作業延長と時間を抽出し、除雪車稼働状況をグラフ化した (図-9)。

作成したグラフから移動や休息时间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 (KP) 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及び作業延長合計と、運搬排雪データより抽出した区間排雪量から、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を集計した算出結果一覧表の抜粋を表-2 に示す。

表-1 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	

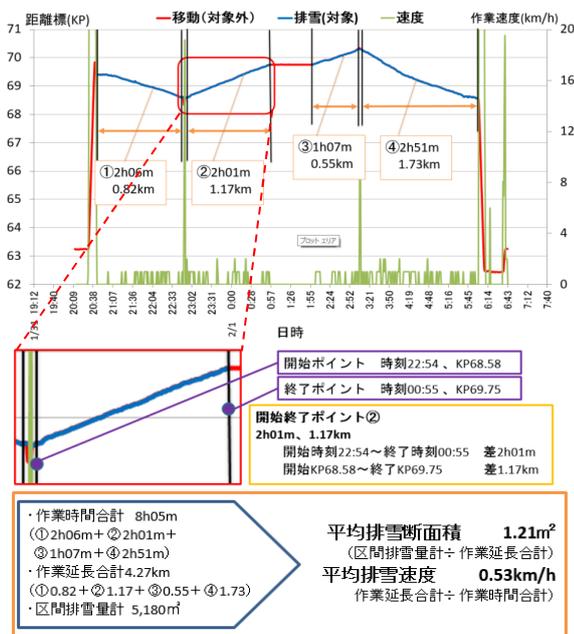


図-9 除雪車稼働グラフ例 (H29/1/31-2/1)

4.1.2 排雪量と排雪速度の相関検討

前項で算出した排雪断面積と排雪速度の関係性について確認するため、複数の相関検討手法による回帰分析及び妥当性の評価を行った。

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把握を行った (表-3)。

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 年度までに抽出した 4 ヶ年分 (H25～H28) の調査対象データのうち、表-3 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-10、表-4)。

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排雪速度の予測が 0km/h 以下となるため、妥当性なしとした。しかし、排雪速度の予測が 0km/h 以下となる範囲でのサンプル数は極めて少ないため、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、妥当性ありとした。

表-2 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

表-3 相関検討手法

		手法																														
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																														
年度	機械種別	全機種			一車線積込形			2.2m級			2.6m級			2.2m級+2.6m級																		
		H25	H26	H27	H28	H25	H26	H27	H28	H25	H26	H27	H28	H25	H26	H27	H28															
作業区分	区分なし	1				6				11				16				21														
		26				31				36				41				46														
	27		28		29		30		32		33		34		35		37		38		39		40		52		53		54		55	
	28		29		30		31		32		33		34		35		36		37		38		39		40		41		42		43	
巻出	51				56				61				66				71															
	52	53	54	55	57	58	59	60	62	63	64	65	67	68	69	70	72	73	74	75												

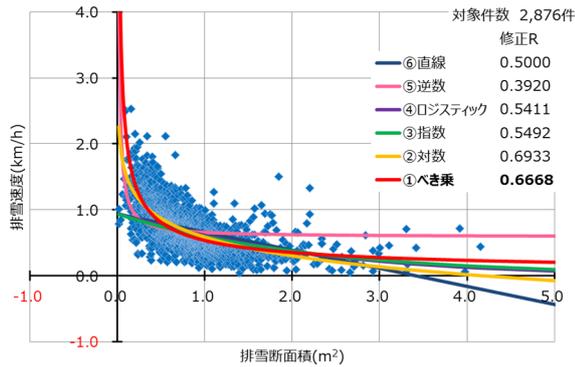


図-10 分析事例: 相関検討手法①～⑥条件分類1 (4ヶ年分)

表-4 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	○ 妥当性あり	重相関係数が高いため	0.6668	0.4446
② 対数	△ 妥当性なし	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	△ 妥当性なし	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	△ 妥当性なし	べき乗と比べて重相関係数が低いため	0.5411	0.2928
⑤ 逆数	× 妥当性なし	べき乗と比べて重相関係数が低いため	0.3920	0.1537
⑥ 直線	× 妥当性なし	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-5 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			一重線凸形			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							
作 業 区 画 区 分	区分なし	1			7			13			19			25												
	幅	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
	帯出	31			37			43			49			55												
		32	33	34	35	36	38	39	40	41	42	44	45	46	47	48	50	51	52	53	54	56	57	58	59	60
		61			67			73			79			85												
		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

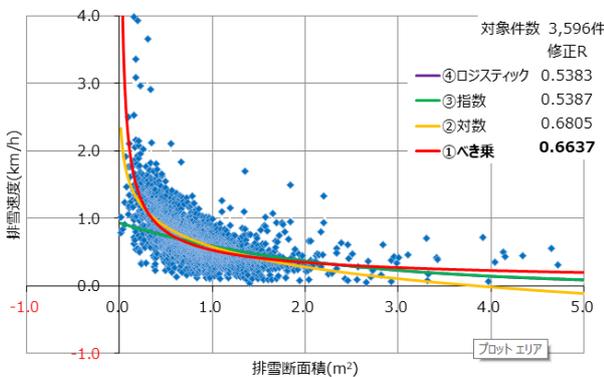


図-11 分析事例: 相関検討手法①～④条件分類1 (5ヶ年分)

手法③指数 (0.5492)、手法④ロジスティック (0.5411)、手法⑤逆数 (0.3920)、手法⑥直線 (0.5000) は手法①べき乗と比べ、重相関係数 (修正 R) が低いため、妥当性なしとした。その中でも手法⑤逆数と手法⑥直線はより重相関係数が低いため、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-5 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-11、表-6)。

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べき乗に妥当性があることを確認した。合わせて、表-5 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、91%の条件分類において高い相関がみられた (表-7)。

以上のことから、相関検討手法①べき乗による相関式が、排雪速度予測式への適用可能性があるといえる (図-12)。

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、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 ヶ年分 (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-13 に現地計測状況、表-8 に重回帰分析内容を示す。

表-6 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	○ 妥当性あり	重相関係数が高いため	0.6637	0.4405
② 対数	△ 妥当性なし	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	△ 妥当性なし	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	△ 妥当性なし	べき乗と比べて重相関係数が低いため	0.5383	0.2898

表-7 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		91%
	高	中	件数	割合	
0.7 ~ 1.0	高い相関がある	80件	13	16%	91%
0.5 ~ 0.7	かなり高い相関がある		60	75%	
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	低い相関がある		2	4%	
0.0 ~ 0.2	ほとんど相関がない		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

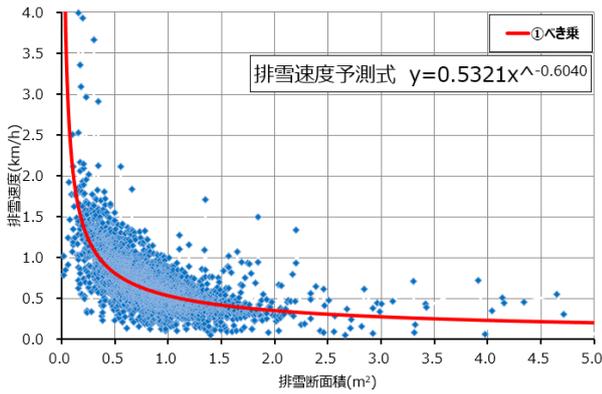


図-12 相関検討手法①ベキ乗、条件分類1



図-13 現地計測状況

表-8 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(℃)	-
	m. 平均湿度(%)	-
	n. 平均風速(m/s)	-
	o. 日照時間(h)	-

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項目の除外項目を選定した(表-9)。

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)

独立変数 a から o の 15 項目の内、前項 4.2.2 で除外した 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)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で重回帰分析を行った(表-10)。

分類 A 累計、分類 B 計測期間毎、分類 C2 計測期間毎の分析結果を比較した結果、分類 A 累計の相関が高いことを確認した。予測式の簡素化の観点から、独立変数が少なく、かつ相関の高い、分類 A 累計の①及び②を堆雪断面積の予測式として選定した(表-11)。

表-9 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)	最深積雪が多くなると、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(℃)	妥当性あり (マイナスに作用)	平均気温が0℃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-10 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	計測日間における降雪量
C.2計測期間毎	10					2計測日間における降雪量の累計
			15		20	

表-11 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	内容	偏回帰係数	
		全断面 分類A①	車道部 分類A④
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-12)、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。堆雪全断面積と車道部堆雪断面積の比較グラフの例を図-14及び図-15に示す。

各計測日毎の比較では、値の差異はあるが、予測値は実測値グラフの傾向と同様の軌跡を示している。

また、計測日ごとの予測精度を確認するため、縦軸を予測値、横軸を実測値としたグラフを作成し、予測値と実測値の差異傾向について確認した。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。

確認の結果、堆雪全断面積(図-16)及び車道部堆雪断

表-12 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

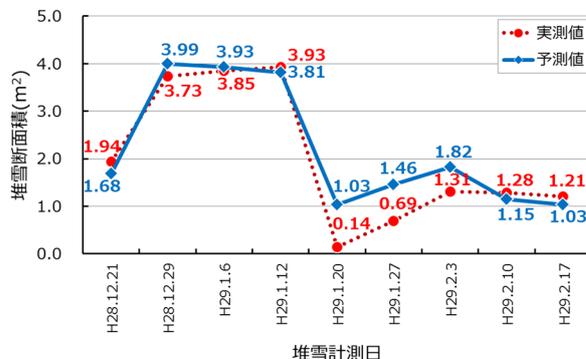


図-14 分類A累計①(堆雪全断面積)による比較例(H28、札幌 R5地点②)



図-15 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)

面積(図-17)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。差異傾向に多少の偏りが生じているが、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。

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、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-18~20に各代表箇所での堆雪全断面積の推移を示す。予測式に使用した気象観測情報は、気象庁のアメダスデータを使用した。

札幌及び小樽では概ね同様の傾向を示している。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。

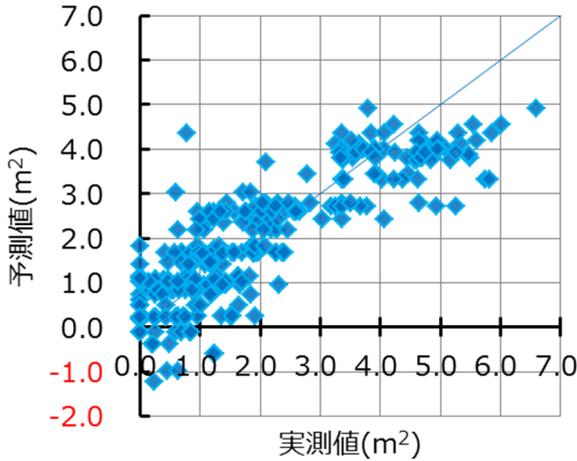


図-16 予測値の精度確認 (堆雪全断面積)

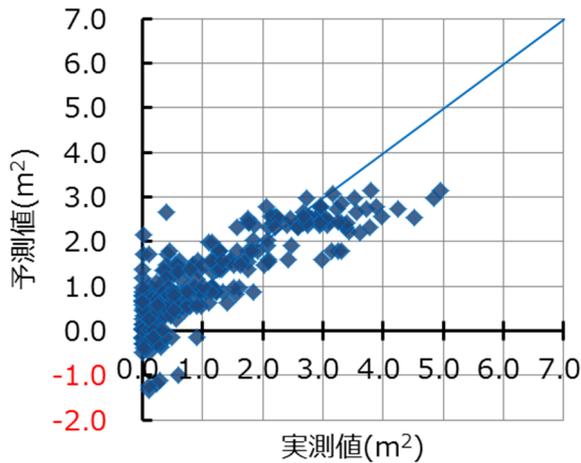


図-17 予測値の精度確認 (車道部堆雪断面積)

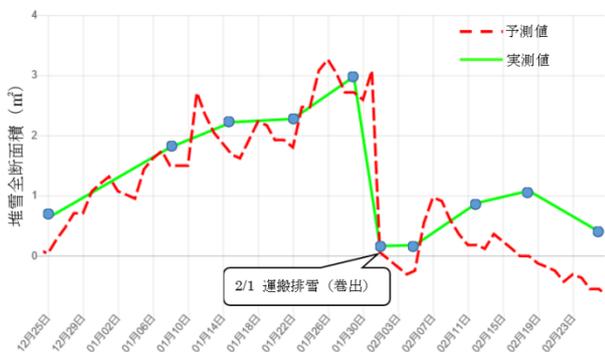


図-18 予測値 (堆雪全断面積) と実測値による推移 (H30 札幌 R274 下り KP12~13)



図-19 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)

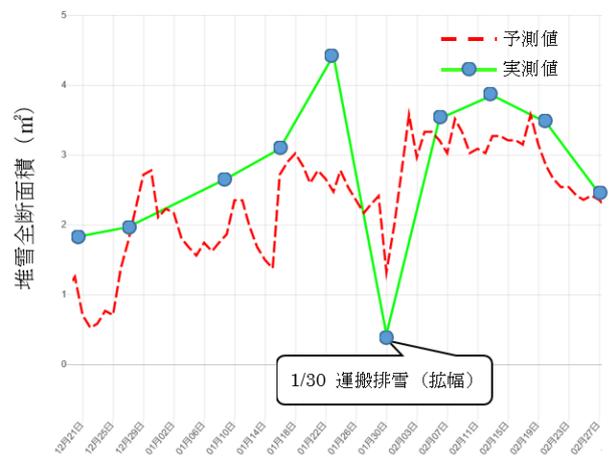


図-20 予測値 (堆雪全断面積) と実測値による推移 (H30 旭川 R39 下り KP=9~10)

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。説明変数を堆雪全断面積とし、目的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-13)。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-21、22 に実測値と予測値のグラフを示す。札幌と小樽では概ね同様の傾向が確認できた。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-22)。

表-13 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

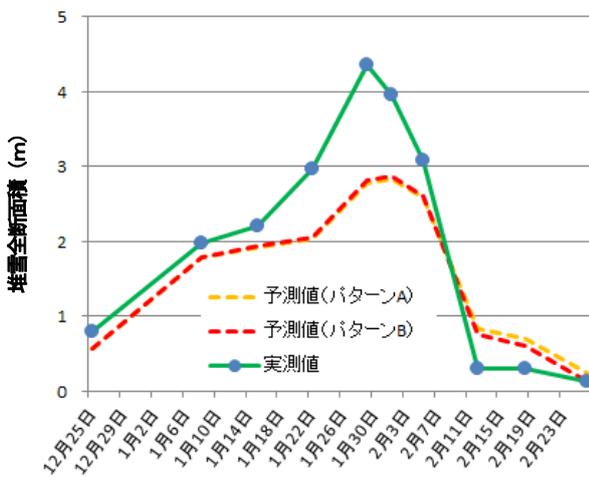


図-21 予測値（堆雪全断面積）と実測値による推移
(H30 札幌 R274 R側 KP=15~16
車線幅員 9.75m 路肩幅員 1.0m)

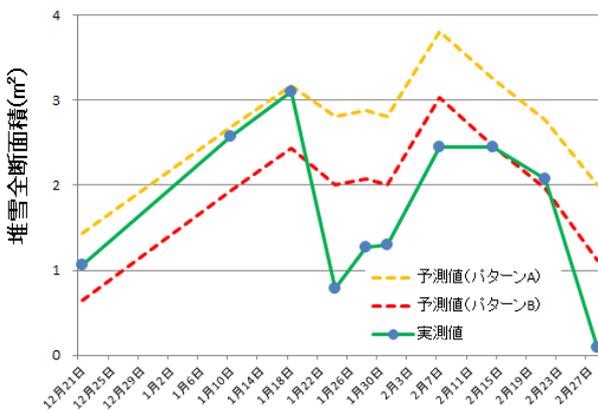


図-22 予測値（堆雪全断面積）と実測値による推移
(H30 小樽 R5 R側 KP=249~250
車線幅員 6.5m 路肩幅員 1.0m)

また、旭川では修正済重相関係数があまり高い値ではなく、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ヶ年と少なく、年度毎の運搬排雪実施工法が異なるため、初冬期と晩冬期に分け運搬排雪実施状況による要因を除くと高い相関が確認できた。

今後も堆雪断面積計測データを蓄積し、堆雪形成傾向の把握を進める予定である。

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-14）、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。

重回帰分析の実施にあたっては、修正済重相関係数を基に説明変数に係る多重共線性の確認、有意性検定、及び符号の検定等を行い、影響がある説明変数を整理した。

降雪量については、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を算出した（図-23、表-15）。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平均値が平年値の範囲（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-16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。年間降雪量が「多い」場合の母集団が他に比べて少ない等の課題があるが、予測式として適用できる可能性を確認した。

グループ毎の重回帰分析の結果、全グループで修正済重相関係数0.7以上になるグループはなかった。分類方法に

表-14 重回帰分析のグループ分け

区分	グループ	定義	
施工方法による分類	巻き出しのみ	-	
	拡幅のみ	-	
	巻き出し・拡幅の両方	-	
年間降雪量の多寡	作業実績なし	-	
	多い	平年値上限を超過	
	平年並み	平年値範囲内	
降雪時期	少ない	平年値下限を下回る	
	月別(12・1・2月)	-	
道路幅員構成	初冬期・晩冬期	運搬排雪実施日を境に分ける	
	車線数	0車線	-
		4車線	-
	中央分離帯の有無	有	-
		無	-
	路肩幅員の状況	広い	2m以上
中間		1m超、2m未満	
狭い		1m以下	

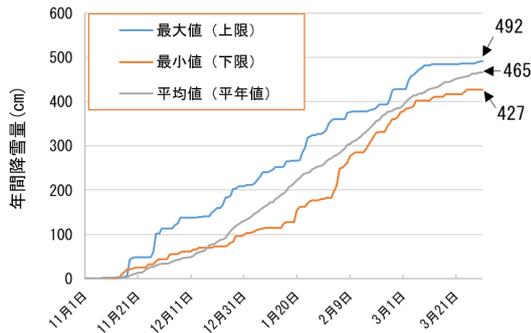


図-23 年間降雪量の平年値（アメダス札幌 30年間）

表-15 年間降雪量の平年値の範囲

観測局	平年値の範囲 (cm)		
	下限	上限	平均
札幌	427	492	465
小樽	531	657	597
旭川	552	647	592

表-16 年間降雪量の多少ごとの重回帰分析結果

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)
多い	札幌H28	90	0.9333
平年並み	札幌H25 札幌H27 札幌H29	560	0.7257
	札幌H31 小樽H29 旭川H29		
少ない	札幌H26 札幌H30 小樽H30	550	0.6033
	小樽H31 旭川H30 旭川H31		

よってはグループの母集団に大きく偏りが出てしまう場合があり、予測精度の向上のためには、引き続き計測値を蓄積することが必要と考えられる。

今後、予測式の選択について、使用者が判断しやすいフローの検討も進めていきたい。

5. 路肩堆雪断面積と堆雪の幅員の関係性把握

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カ所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が確保されているかを、判断基準の一因としている除雪従事者は8割以上だった（ヒアリング結果の詳細は第8項参照）。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。

$$\text{道路有効幅員 (m)} = \text{道路幅員 (m)} - \text{堆雪の幅員 (m)} \quad (8)$$

そこで、堆雪の幅員を把握するため、目的変数を路肩堆雪の幅員、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。

表-13 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-17）から、路肩堆雪幅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。

5.2 堆雪断面積と堆雪幅の関係性把握

堆雪断面積と堆雪幅の推移を図-24に示す。堆雪幅の予測値と実測値では概ね同様の傾向が確認できた。また、堆雪断面積と堆雪幅については、予測値と実測値ともに、その推移は類似傾向を示すことが確認された。

今後、堆雪幅成長傾向を分析し、堆雪断面積と堆雪幅の関係性把握を進める予定である。

6. 路肩堆雪部形状計測技術の評価と検証

堆雪断面積の推移の精度向上には、推計値の常時検証のために連続かつ定常的な堆雪形状の測定が必要となるが、現在、都度に現地にて計測している。

また、除排雪計画の効率のいい効果的な立案には、堆雪断面積の定常的な把握も必要である。

そのため、簡易（低コスト、短時間）で連続かつ定常的な路肩の堆雪形状計測技術の構築に向け、より簡易で現場適合性の高い計測技術について調査を実施した。

6.1 路肩堆雪部形状計測技術の評価

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・

表-17 地域ごとの重回帰分析結果

（目的変数：路肩堆雪幅）

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

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-18)。

6.2 路肩堆雪部形状計測技術の検証

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従来方式(以下「TS計測」という)による計測結果を比較し、実現性を検証した。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方式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-25)。
- (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積を算出する(図-26)。
- (4) 3次元モデル作成による計測結果とTS方式による計測結果を比較する。

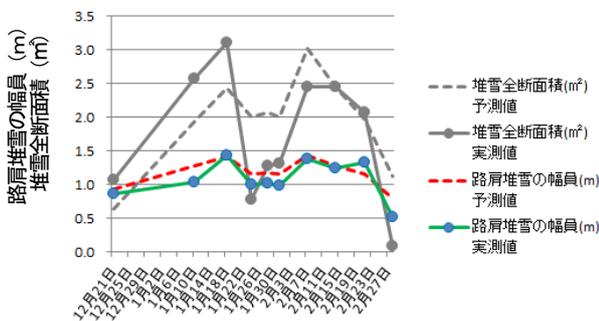


図-24 堆雪断面積と堆雪の幅員の推移
(H30 小樽 R5 R側 KP=249~250
車線幅員 6.5m 路肩幅員 1.0m)

表-18 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(モービ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

6.2.2 検証結果

3次元モデル作成による計測とTS方式による計測結果の誤差は1割程度だった。3次元モデルではTS方式では計測できなかった細かい窪みが計測可能であり、従来方式よりも作業の手間を減らせる可能性を確認した。

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値とあわせて、計測し比較検証した(図-27)。計測は1週間に1回程度の頻度で、計88件計測した。

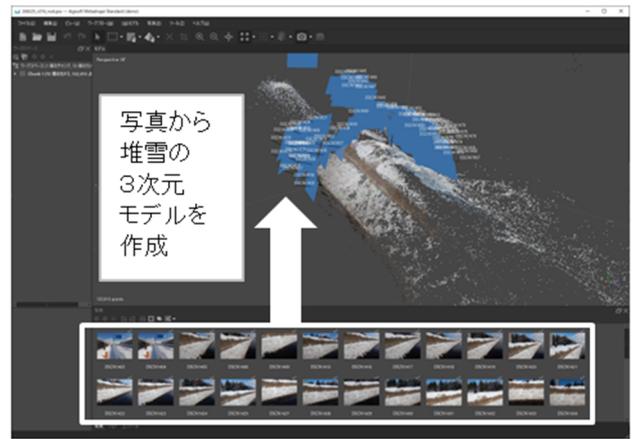


図-25 3次元モデル作成 (MetaShape)

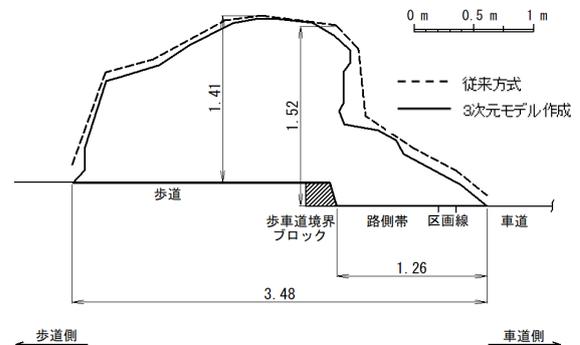


図-26 堆雪断面計測結果の比較
(R1 札幌 R274 L側 KP=14~15)



図-27 堆雪形状の写真撮影状況

計測の結果、堆雪断面形状が把握でき、堆雪断面積の残差（3次元モデル作成による計測値-TS方式）が1割未満は68件、1割以上が20件だった。

TS方式と比較し堆雪幅や高さなどの計測値においては、ほぼ同数値で、堆雪断面積は図-28のとおり残差となり、細かい凹凸まで把握することができた。

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。本計測技術は計測対象を図-29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々あり、堆雪形状が不鮮明になるなど確認できた。

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対向車線の縁石が平らに見えるなどの状況が多々あり、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や、点群上では低い傾斜変化点を認識しにくく、横断面の観測位置をとらえにくい場合があることなどがわかった。別途、計測手法について検証が必要な結果となった。

検証結果をふまえ、堆雪形状計測が可能な写真のオーバーラップ率などの現地で必要な撮影方法と条件を検討していきたい。

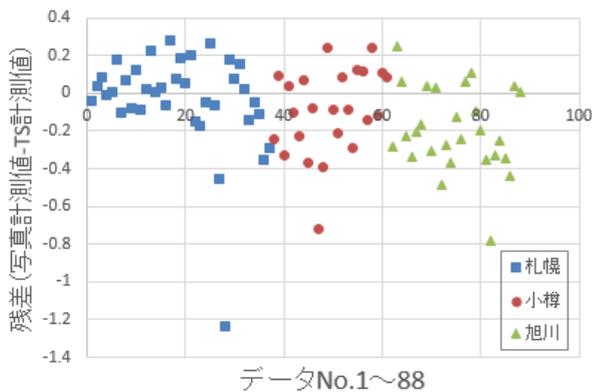


図-28 堆雪断面積の残差

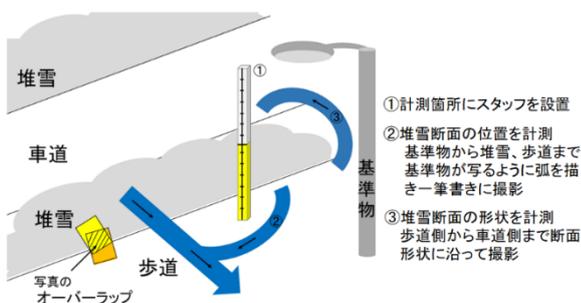


図-29 検証した写真撮影方

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-30）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-31）。

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-31）。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-32）。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。



図-30 堆雪位置及び走行コース

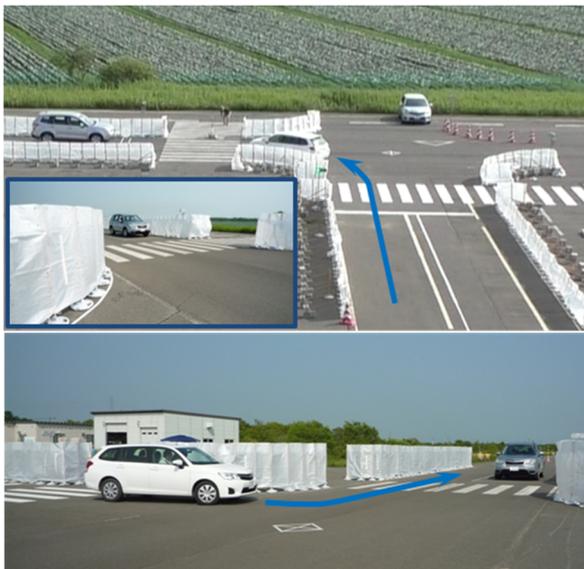


図-31 堆雪の影響に関する実験状況

7.1.6 主観評価の結果

主観評価の結果(図-33)、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。

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-32 堆雪の支障度合いアンケート表

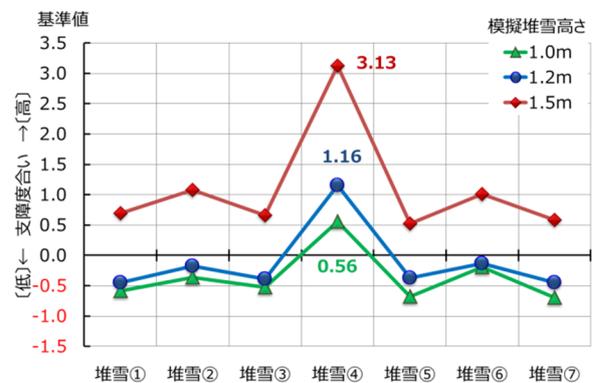


図-33 主観評価の結果

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。

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、過年度までは「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、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実施時期や工法についてのシミュレーションを行った。

8.1 要件定義

図-34に「支援システム」のイメージ図を示す。対象ユーザーは道路管理者や維持除雪工事請負者を想定する。気象

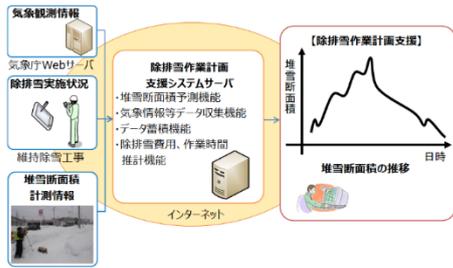


図-34 「支援システム」イメージ図

観測情報や除排雪実施状況と堆雪断面積計測情報から、堆雪断面積推計結果をグラフで表示する。堆雪断面積推計のグラフ化により、除排雪作業前後の堆雪断面積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、より効率的な判断が可能となり、作業計画立案の支援に有効と考えられる。

なお、作業時間の推計には図-12の排雪速度予測式を使用する。

8.2 概略処理フロー

図-35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）、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。

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-19、図-36)、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く見られた。6割以上が路肩堆雪状況に応じて運搬排雪工法を選択しており(図-37)、工法と実施時期の判断には、道路有効幅員や路肩堆雪の幅や高さ等の関連性が高い(図-38、39)。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か月前であった(図-40)。

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改良点として抽出した。

さらに、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-

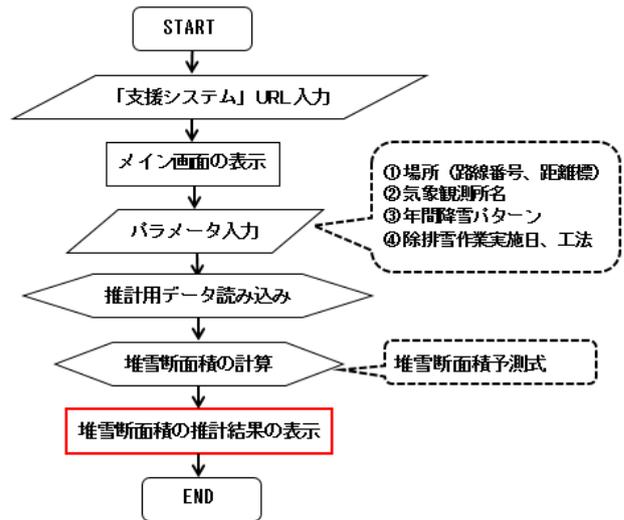


図-35 「支援システム」概略処理フロー

表-19 「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

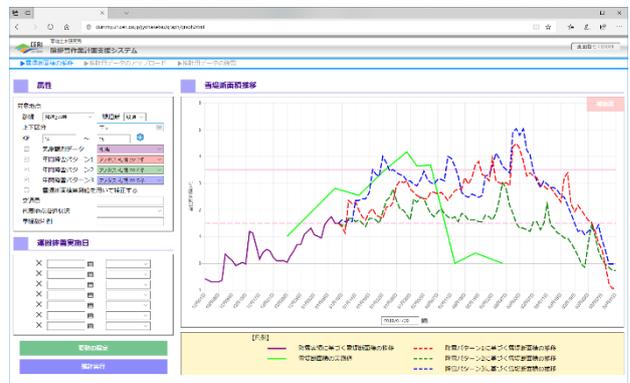


図-36 「支援システム」の画面表示例(堆雪断面積推移)

41)、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-42)。

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。

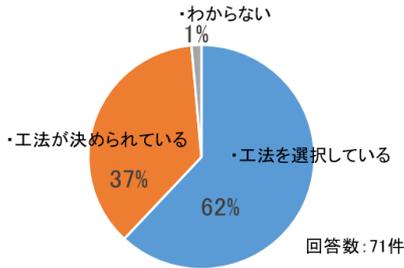


図-37 路肩堆雪状況に応じた運搬排雪工法（巻出・拡幅・カット）の選択有無

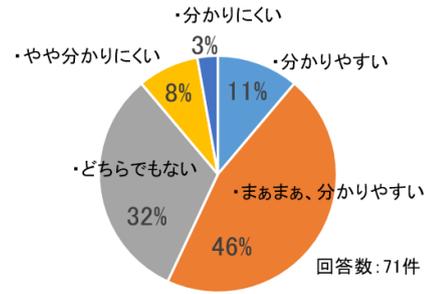


図-42 支援システムの画面表示

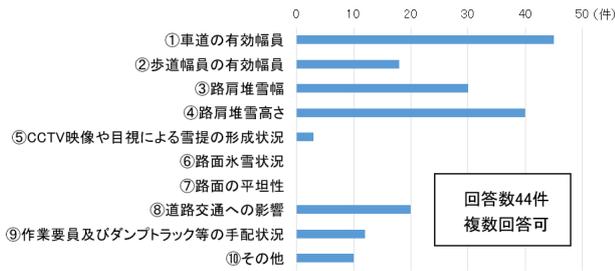


図-38 運搬排雪工法選択の主要因



図-39 運搬排雪実施日の判断基準

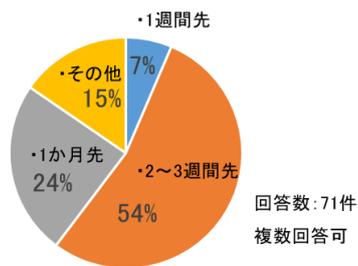


図-40 運搬排雪作業計画立案の対象期間

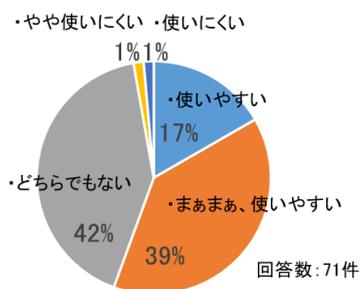


図-41 支援システムの操作性

上記の結果から、支援システムの改良点を抽出した。今後、これらの機能を追加する予定である。

- ・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-43)。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-44)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-45)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、今回の場合では、堆雪可能な最大堆雪断面積を仮に予測値の最大値の4.1㎡とし、4.1㎡と3.2㎡(図-45での最大値)に補助線を引いた。図-43では断面積が4.1㎡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-45のように、シーズン中に最大でも3.2㎡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-44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はどのようになるのかなども確認が可能である。



図-43 運搬排雪実績(2/17 巻出1回)を入力した場合



図-44 運搬排雪を行わなかった場合



図-45 (2/5 2/19 2/25 拡幅3回)を入力した場合

9. まとめ

令和2年度までに行った研究の結果、以下の成果が得られた。

- ・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。
 - ・排雪断面積と排雪速度の関係性を示し、べき乗による相関式の、排雪速度予測式への適用可能性を確認した。
 - ・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、各々の予測式の適応性を確認した。
 - ・堆雪断面積と堆雪幅の関係性を把握するため、地域ごとに路肩堆雪幅の予測式を算出した。堆雪幅の予測値と実測値では概ね同様の傾向が確認できた。
 - ・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、従来方式よりも作業の手間を減らせる可能性を確認した。
 - ・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1.0m程度に抑えることが望ましい。
 - ・堆雪断面積予測式を使用した「支援システム」の検証用システムを作製しヒアリングの結果から、「支援システム」の実用化に向けて改良点を抽出した。
- 今後、冬期の除雪レベルに応じた交通流の予測、夏期並びに冬期を考慮した効率的な道路横断面の利用を検討するほか、路肩堆雪断面積予測式を精度良く活用するため、現地の状況(気象条件、道路状況など)により、適用する予測式を選択するフローの作成、「支援システム」の実用化に向けて必要な機能を追加する予定である。

参考文献

- 1) 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～,p.6, p.9,2013
http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/yukimichi/Pdf/20130515_teigen.pdf
 (2021年7月21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、高橋尚人、平澤匡介、徳永ロベルト、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。

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縮減は、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縮減が進めば、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。

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ことが望ましい。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、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

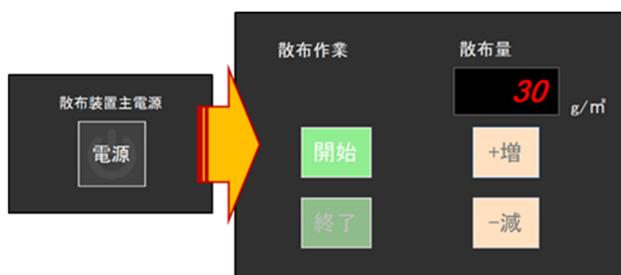


図-1 操作パネル上の表示ボタン



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。

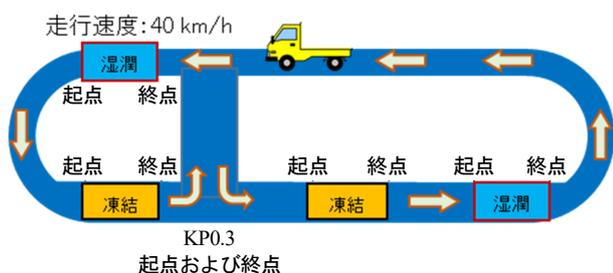
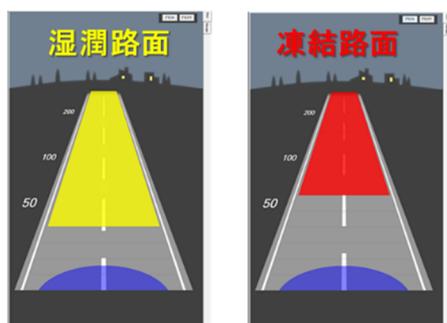


図-2 実験コースと凍結・湿潤路面のレイアウト例



<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・・・(100m前)プッッ(50m前)プブブ(0m前)プー
凍結: (200m前)ピ・・・(100m前)ピッピ(50m前)ピビビ(0m前)ピー

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。

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

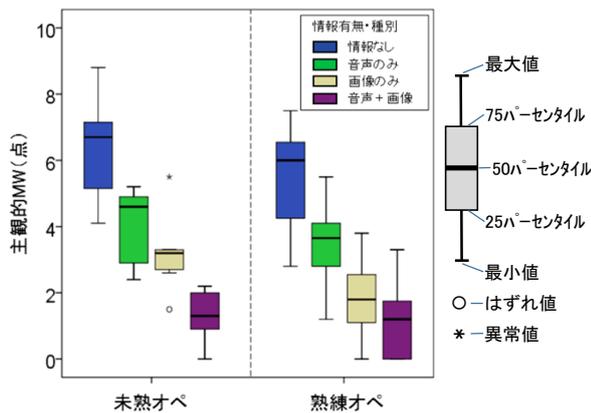


図-4 熟練度別および情報有無・種別主観的 MW

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

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

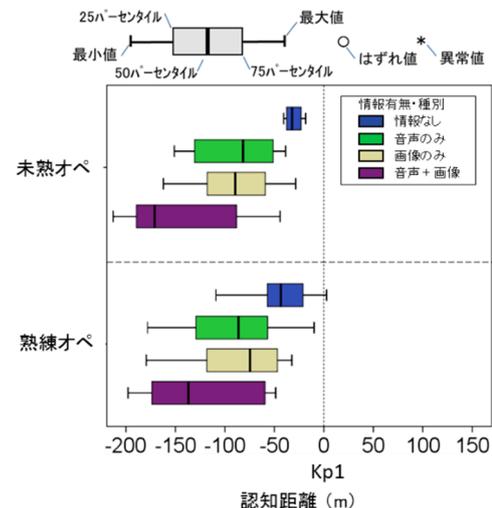


図-5 熟練度別および情報有無・種別認知距離

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

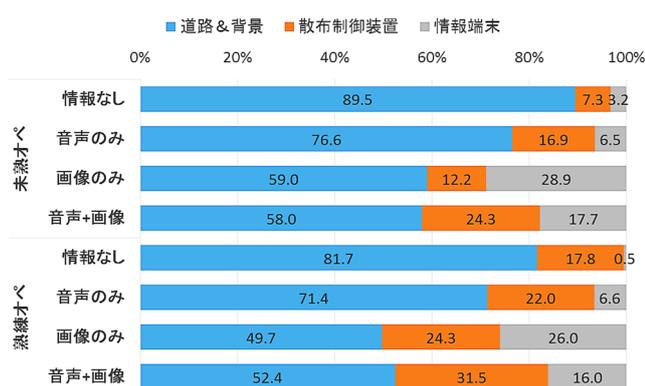


図-6 認知区間における熟練度別および情報有無・種別によるオペの注視率

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

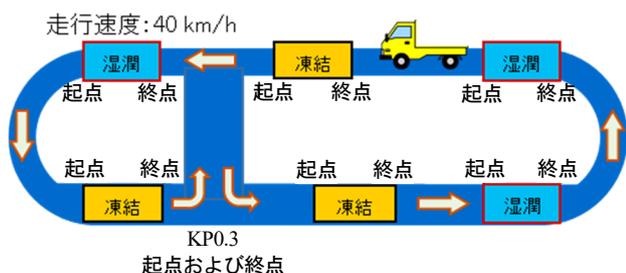


図-7 実験コースと凍結・湿潤路面のレイアウト例



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。

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

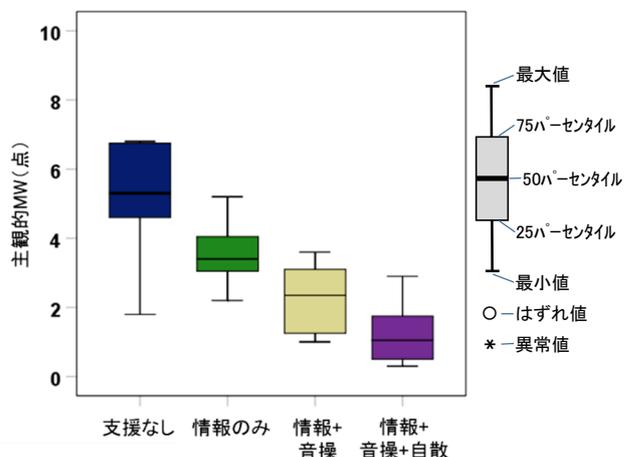


図-8 散布作業支援有無・種別による主観的 MW

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-6 散布作業支援の有無・種別による判断的中率

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%

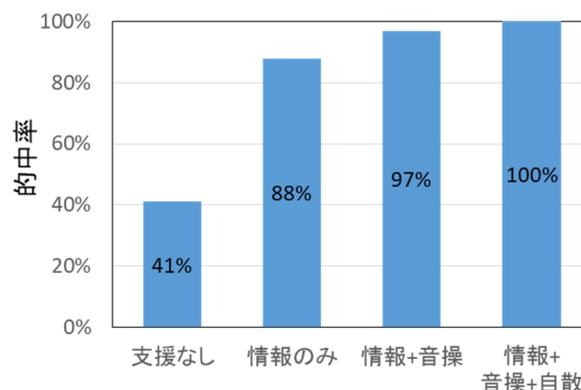


図-10 散布作業支援の有無・種別による判断的中率

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-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

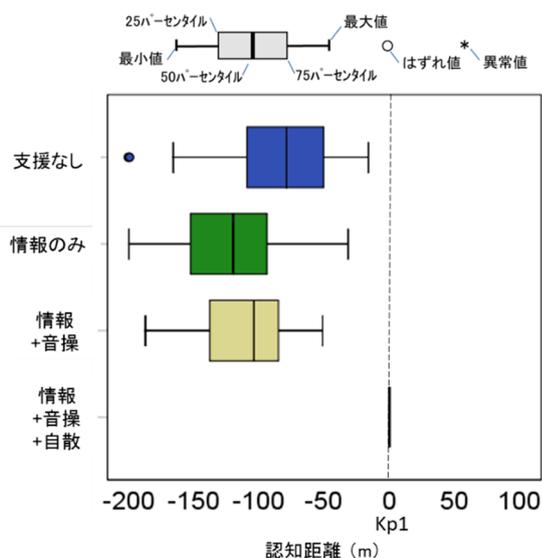


図-9 散布作業支援の有無・種別による認知距離

表-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

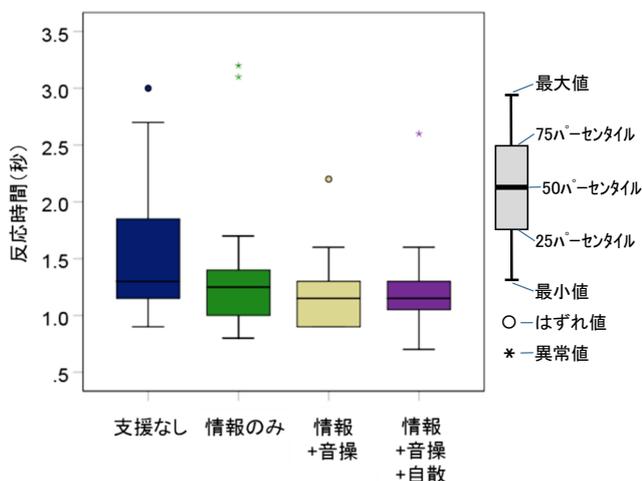


図-11 散布作業支援の有無・種別による反応時間

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

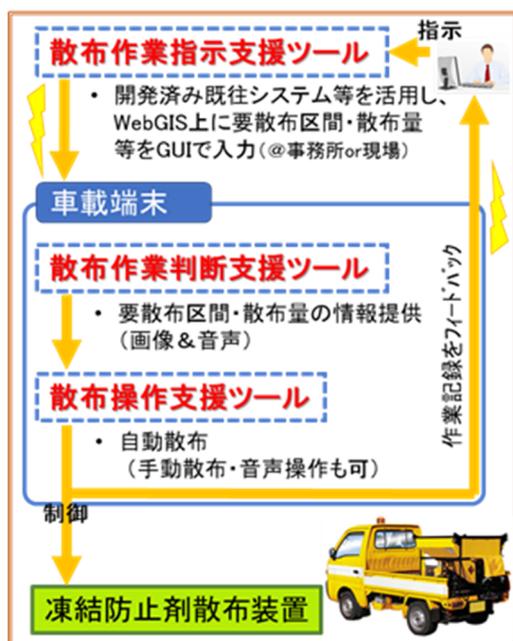


図-13 設計・構築した支援システム概念図

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。

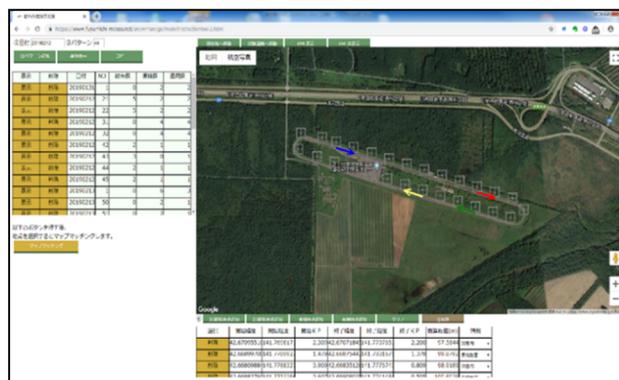


図-14 指示ツールの画面

- ・ 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

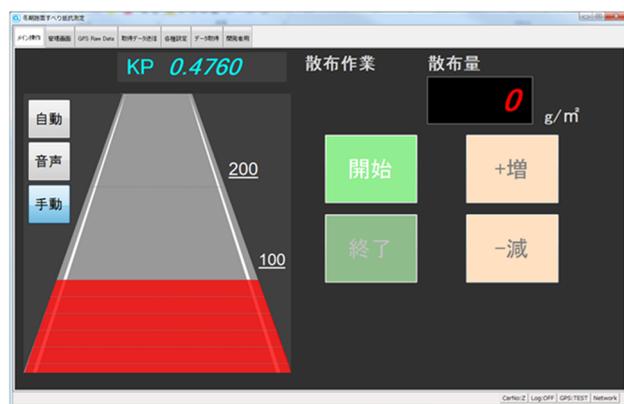


図-15 判断ツール (左)・操作ツール (右) の画面

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) が可能になった。

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

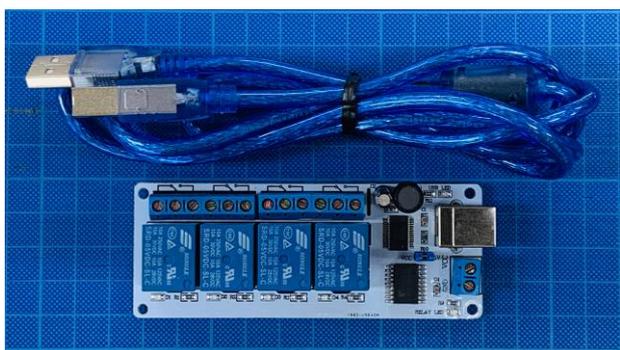


写真-9 使用した継電器モジュール



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

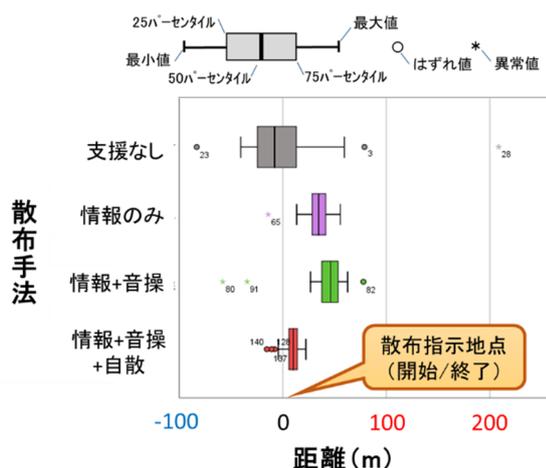


図-17 散布作業支援の有無・種別による距離差

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プ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。

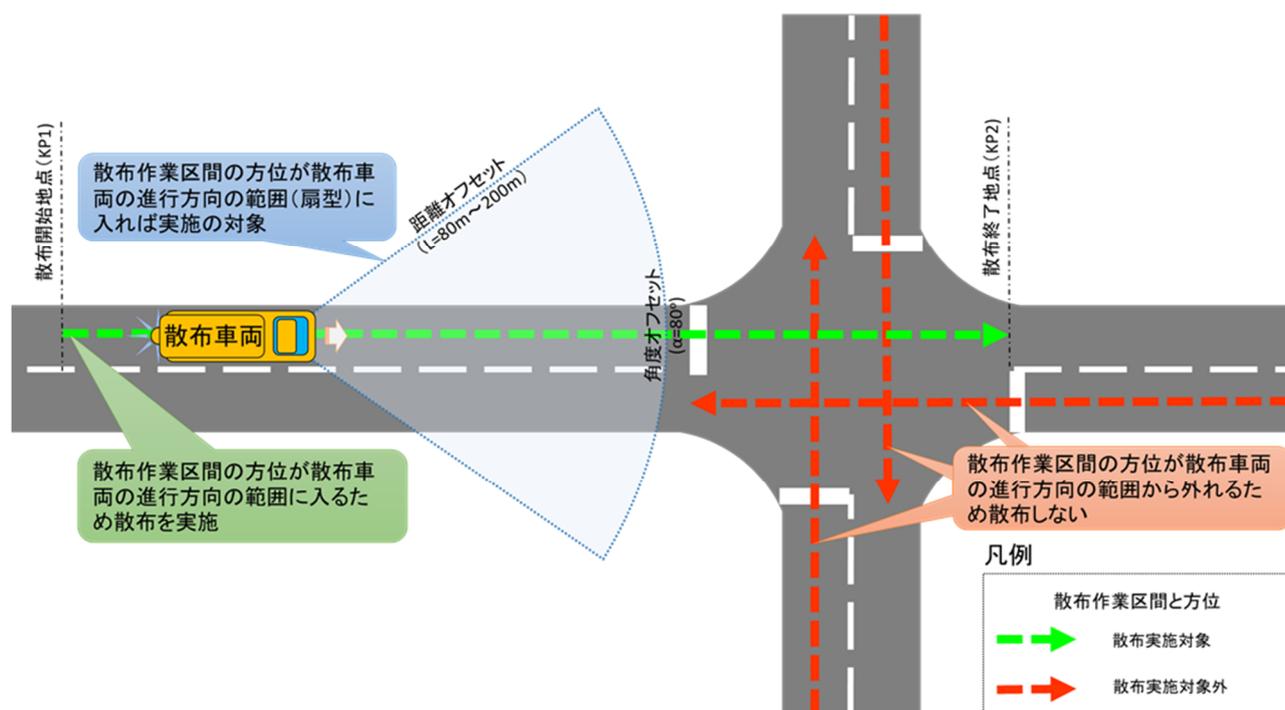


図-19 凍結防止剤散布作業支援システムによる散布作業対象区間判定方法の概念

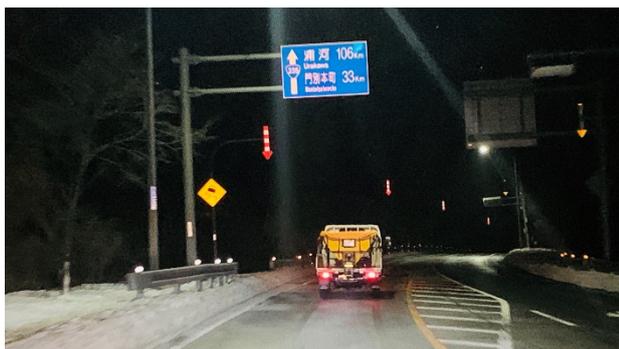


写真-11 実道路における精度検証



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

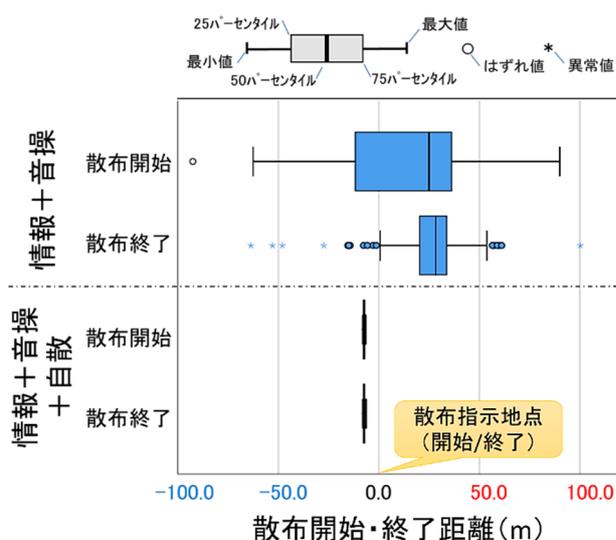


図-20 散布作業支援種別による距離差

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（最長約 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⁾（VaisalaMD30）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

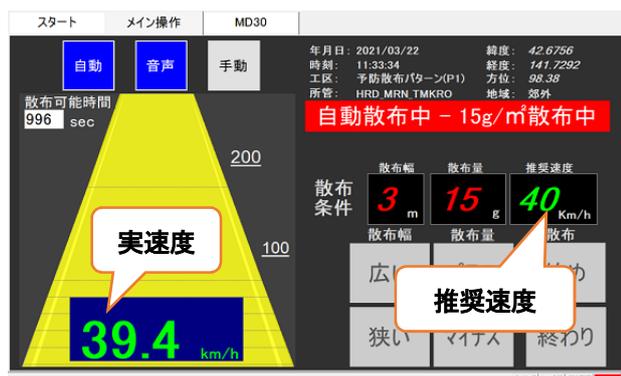


図-21 車載タブレット PC の画面に表示した実速度と推奨速度の例

(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図

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、国土交通省北海道開発局（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

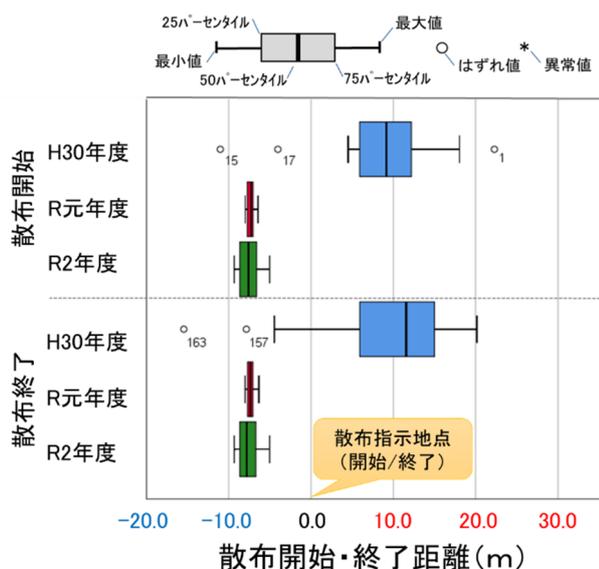


図-23 年度別による距離差（自散）

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 0.5m^3 と実際の散布作業に使用している散布装置（ 2.0m^3 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. 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。

今後、凍結防止剤散布作業支援システムの更なる改良を行い、当該システムの精度向上を図る。また、令和2年度に引き続き実際の散布作業での検証を行い、オペによる作業の実態を踏まえた安全で確実な凍結防止剤散布が可能な散布作業支援技術を確立・提案し、実運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：片野浩司、中島淳一、植野英睦、齋藤勉、菅原彰人

【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。

令和2年度は、除雪機械重要構成部品である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振動加速度を測定し各箇所にかかる負荷の対応を検証し、診断手法について検討した。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老朽化した機械が増えており、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。

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。

過年度までは、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算出した信頼度などの関連性を考察した。

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優先順位づけを行い、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を検討し、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、収集様式を作成した。また、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、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振動加速度を測定し各箇所にかかる負荷の対応を検証し、診断手法について検討した。

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。

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

・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。

次項から、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)

上記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抽出した。

細分化する際は、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。

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

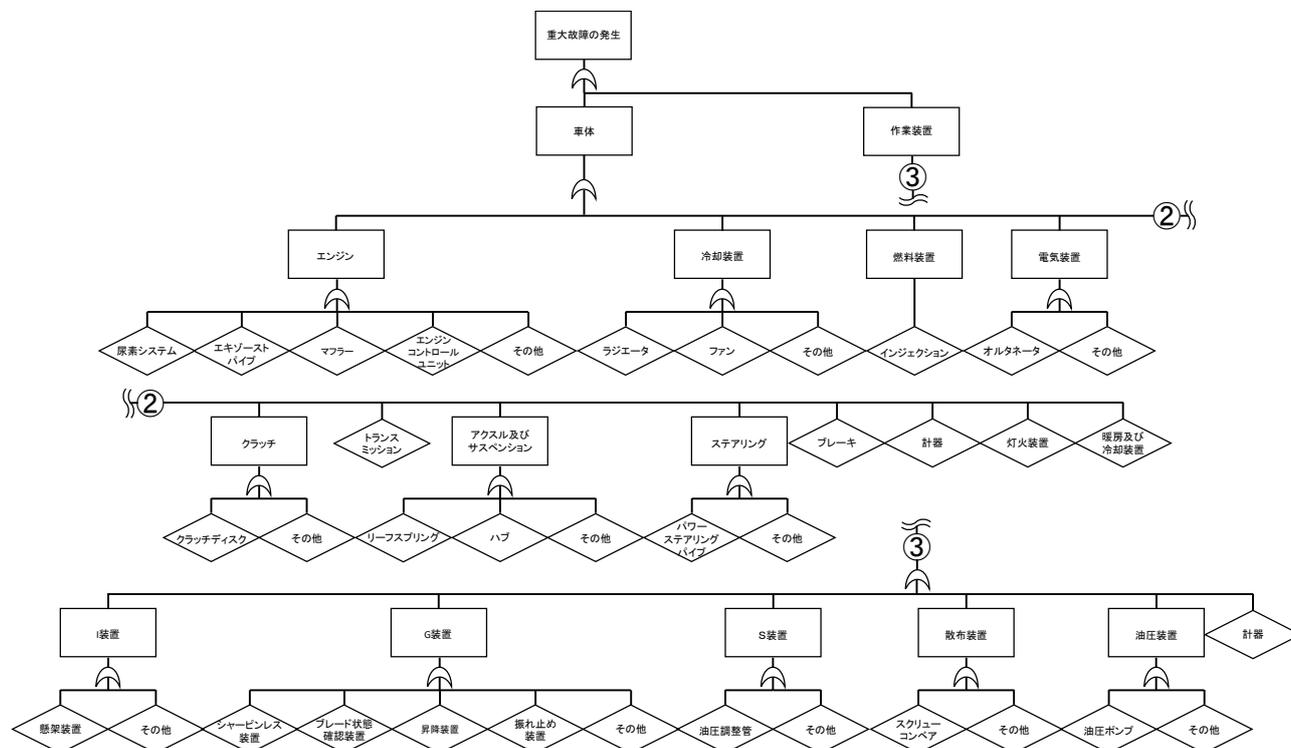


図-1 除雪トラック FT 図

除雪機械全体の重大故障箇所数を、表-2に示す。

重大故障箇所数は、故障データの件数が多いほど抽出数も多く、除雪トラック、ロータリ除雪車、小形除雪車の順に多い結果となった。

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) $F(t) = 1 - e^{-1}$ (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。

この解析専用に市販さ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

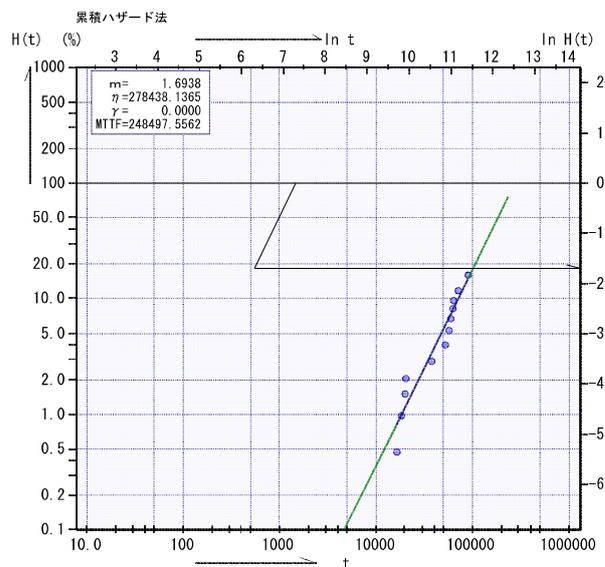


図-2 重大故障解析結果
【エンジン：尿素システム】

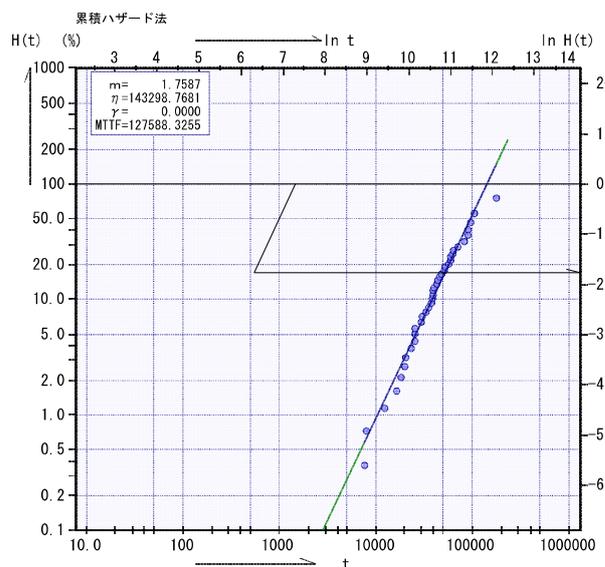


図-3 全故障解析結果
【エンジン：尿素システム】

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-4 に示している重大故障の曲線図は、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、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、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、重大故障の信頼度は 0.838 であり、故障は比較的発生しや

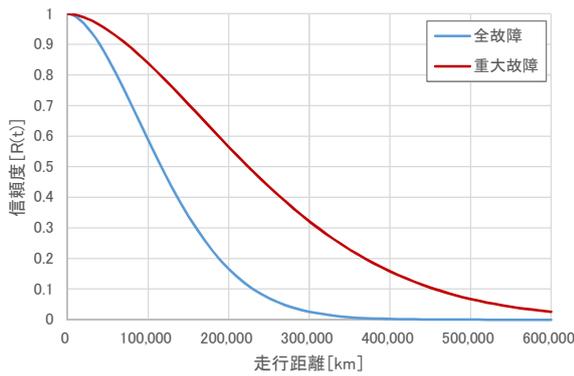


図-4 信頼度曲線図
【エンジン：尿素システム】

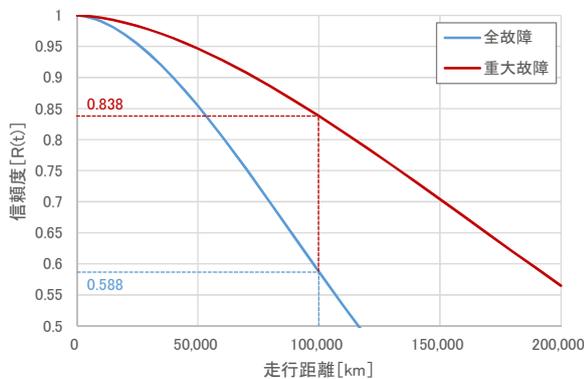


図-5 信頼度曲線図 (拡大図)
【エンジン：尿素システム】

すいが、重大故障にまで至る確率は低いことがわかる。

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。

次に、【冷却装置：ファン】における重大故障及び全故

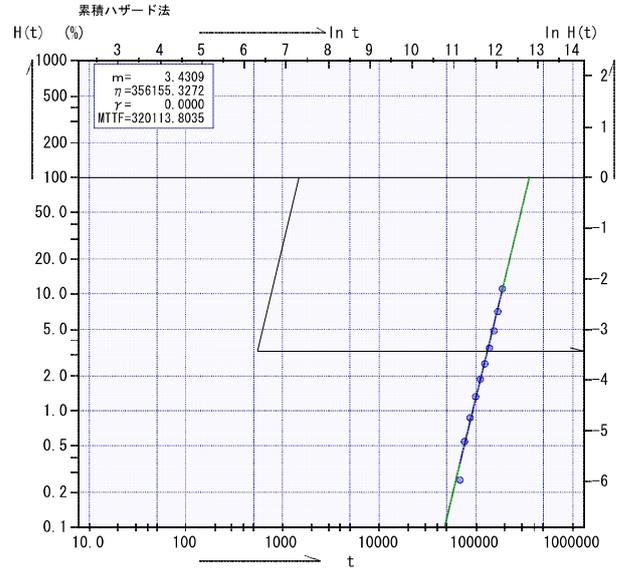


図-6 重大故障解析結果
【冷却装置：ファン】

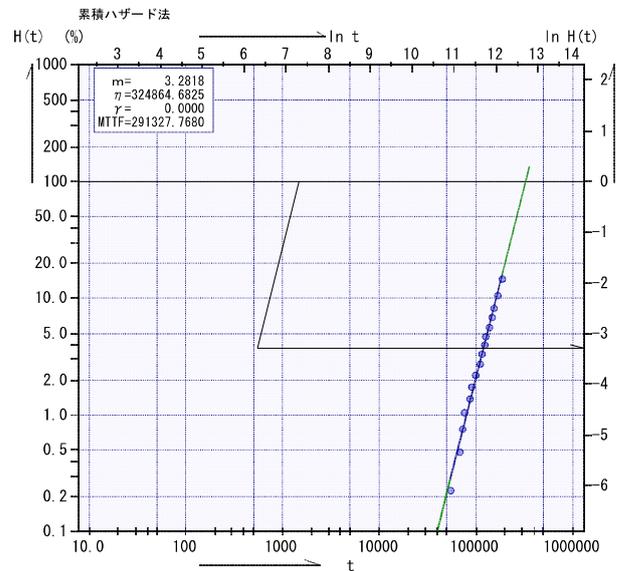


図-7 全故障解析結果
【冷却装置：ファン】

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。

50,000km 付近までは、信頼度の低下はなく、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 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 0.979、重大故障の信頼度は 0.987 であり、尿素システムの信頼度と比較すると高いことから、ファンは尿素システムより故障しにくいことがわかる。

しかし、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やすい傾向と

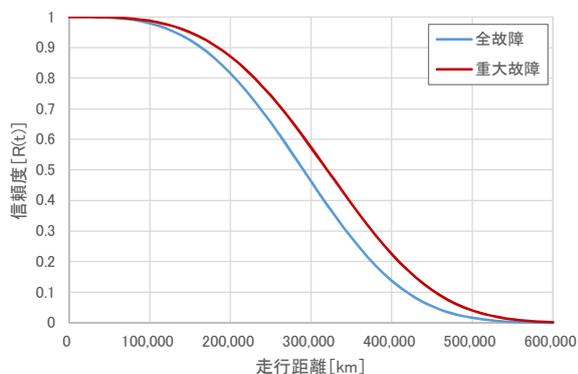


図-8 信頼度曲線図
【冷却装置：ファン】

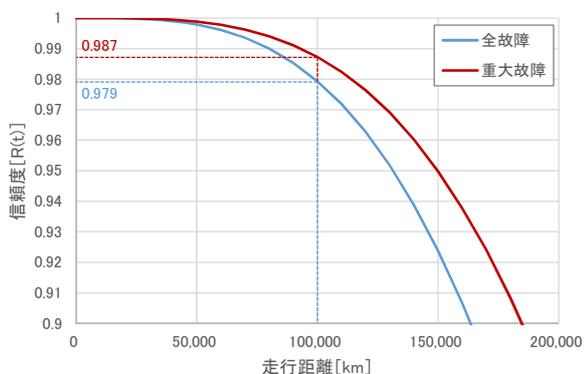


図-9 信頼度曲線図 (拡大図)
【冷却装置：ファン】

いえる。

先の【エンジン：尿素システム】と同様に保有台数を 100 台と仮定した場合、走行距離 100,000km で約 2 台故障が発生し、そのうち約 1 台に重大故障が発生する恐れがある。

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-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

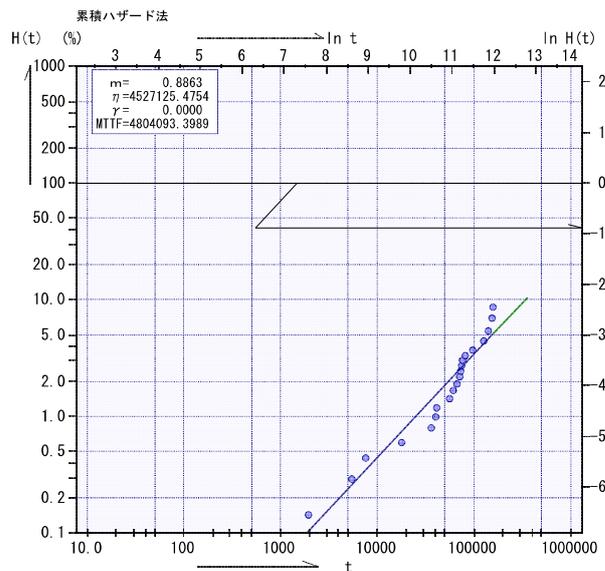


図-10 重大故障解析結果
【燃料装置：インジェクション】

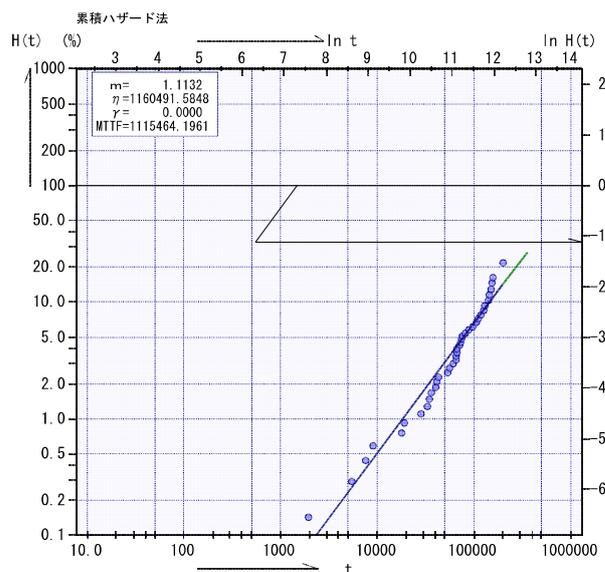


図-11 全故障解析結果
【燃料装置：インジェクション】

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、先のファンと同様に尿素システムより故障しにくいことがわかる。

保有台数を100台と仮定した場合、約6台故障が発生し、そのうち約3台に重大故障が発生することを示してい

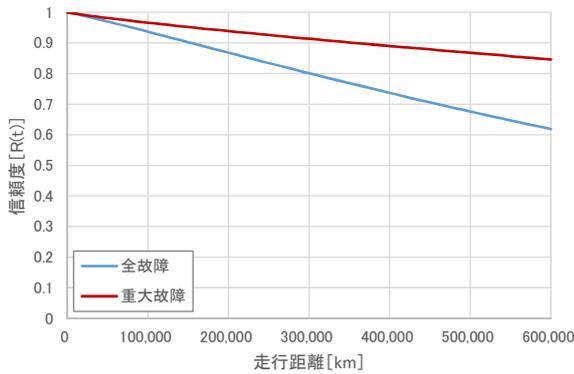


図-12 信頼度曲線図
【燃料装置：インジェクション】

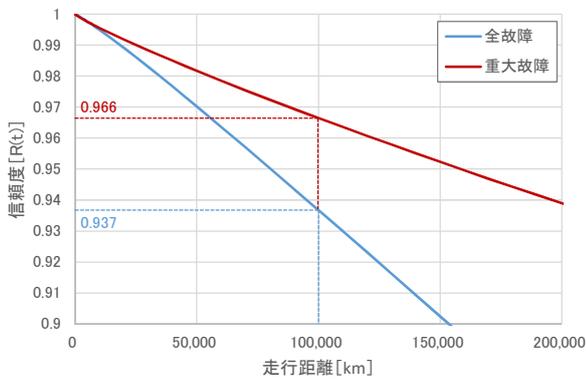


図-13 信頼度曲線図 (拡大図)
【燃料装置：インジェクション】

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

る。

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に示す傾向であることがわかった。

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。重大故障データの解析で8箇所、全故障データで5箇所が、混在する結

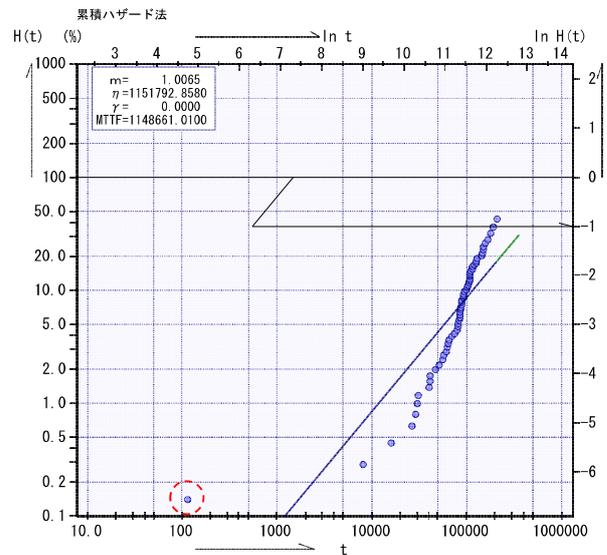


図-14 全故障解析結果 (走行距離)
【作業装置：計器】

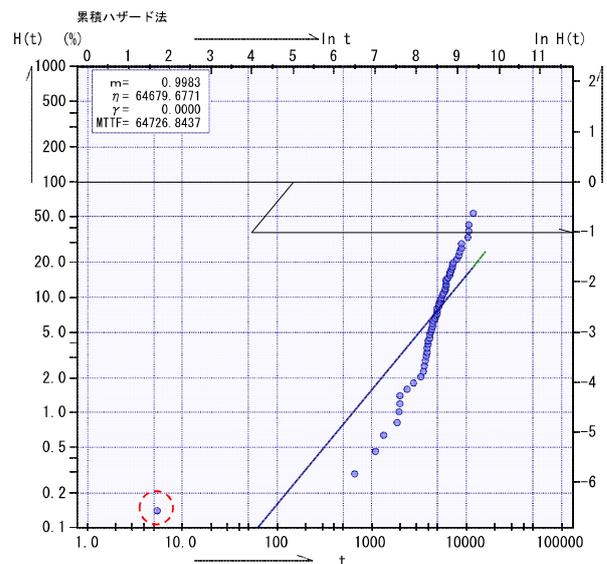


図-15 計器 全故障解析結果 (稼働時間)
【作業装置：計器】

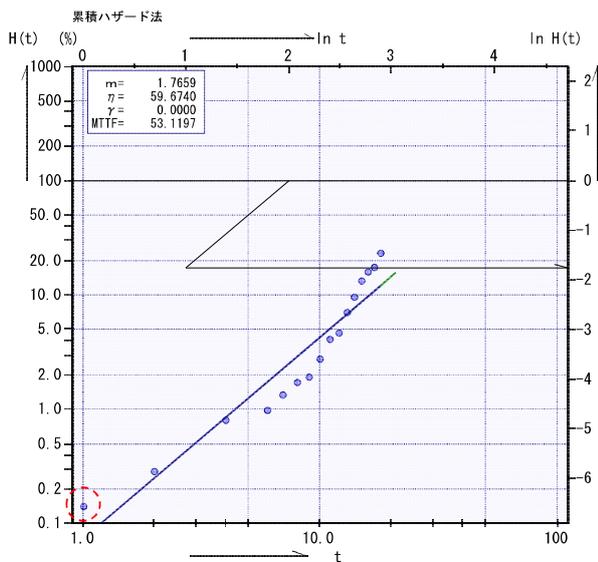


図-16 全故障解析結果（使用年数）
【作業装置：計器】

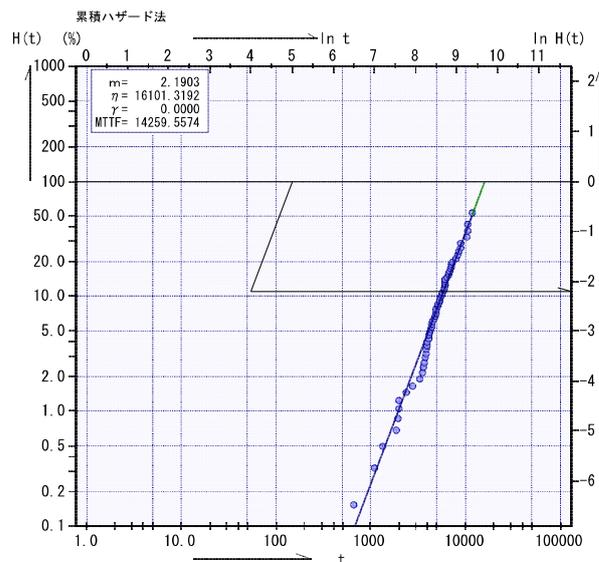


図-18 全故障再解析結果（稼働時間）
【作業装置：計器】

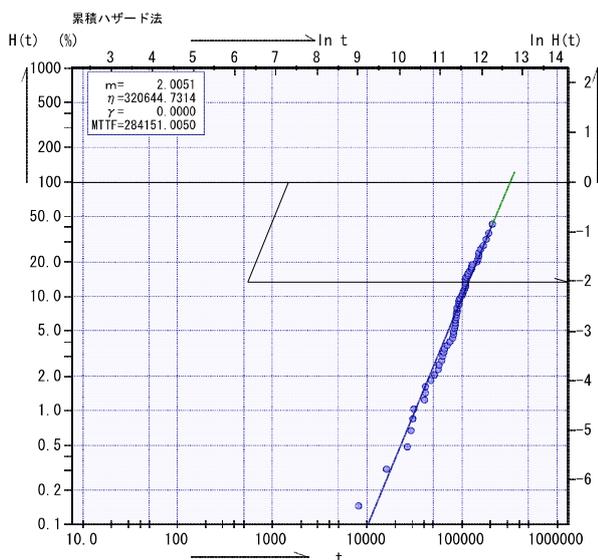


図-17 計器 全故障再解析結果（走行距離）
【作業装置：計器】

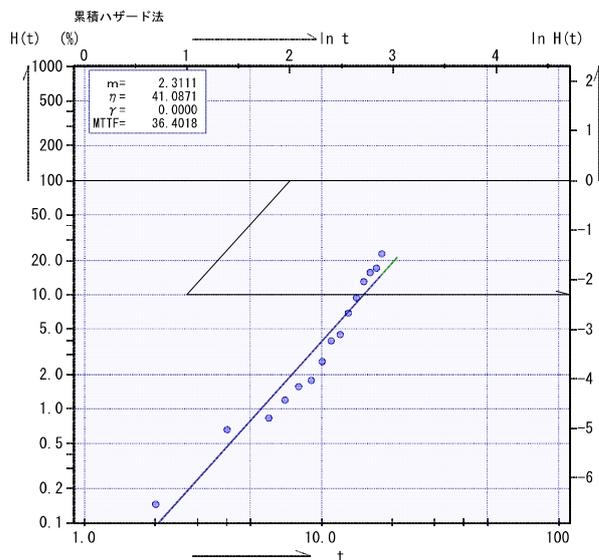


図-19 全故障再解析結果（使用年数）
【作業装置：計器】

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乗せ替える場合があるため、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て、故障した内容であることが想定される。

その場合、旧車両における使用時間などの観測値が不明なため、真の観測値ではない可能性がある。

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の状況であるため、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



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

図-20 信頼性ブロック図

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。

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は、各重大故障箇所の信頼度の積で表現でき、次式のよ

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

うに表すことができる。

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：スクリーコンベア及びその他】は、購入年度や仕様の違いによって、装備・装置の有無がある。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。

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。

装備・装置の有無によって信頼度の低下に多少の違いはあるが、信頼度曲線図に酷似した曲線を描くように信頼度が低下していくのがわかる。

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

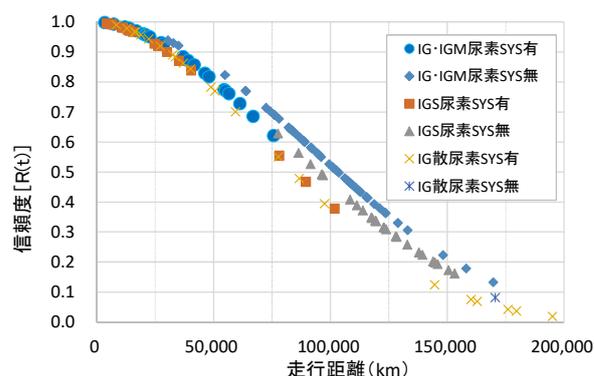


図-21 除雪トラック本体の信頼度算出結果

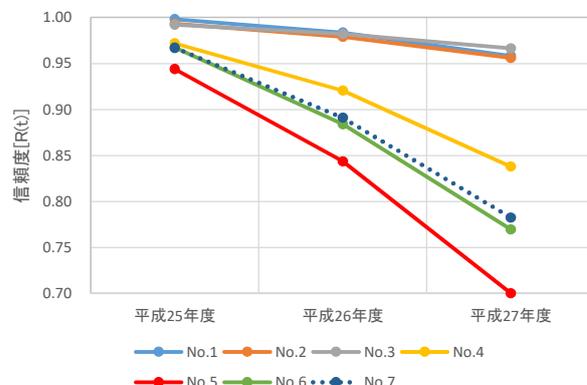


図-22 3年間の走行距離による本体の信頼度比較結果

で0に近くなることがわかった。

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てきた。

このことから、除雪機械本体の信頼度は、点検整備時の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：解析対象故障箇所抽出」として、「重故障」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日以上重故障が発生したか」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ことが必要である。

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

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・修理時の経過年数（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「草刈装置付」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	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移動管の参考値（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からの自動入力（管理番号ごとの諸データの一覧表であるシート「除雪機械データ」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入力規制を設定 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一覧表であるシート「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入力規制）				有/無の2択による入力規制	日付のみに入力規制 西暦表記の年月となるように入力規制を設定 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・修理の実施年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				
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)	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
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 複数の箇所ではない場合は、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	不具合の発生による修理費用	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を入力規制					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)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)

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、不具合発生箇所の過去の修理・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)」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(重故障のみ/全ての故障)」に従って、解析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日以上以上の重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、整備業者に故障報告データを作成してもらうことで、作業の効率化を図るため、故障報告データの作成を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本部や本局に報告」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)」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)」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、過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(以下、「検出器」という。)を用いた診断手法について検討した。

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-23 自己磁場測定型残留応力検出機

4.1 検出機の検知能力の把握

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(図-23)。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(表面方向強度)とZ方向(深さ方向強度)で、磁場強度が異なることが分かった(図-25、26)。

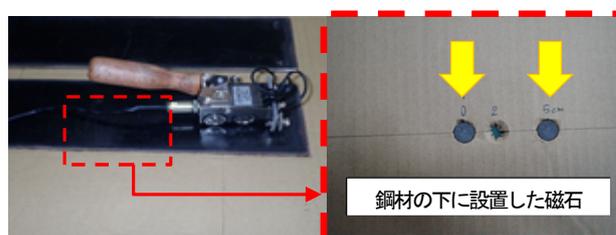


図-24 検出予備実験状況

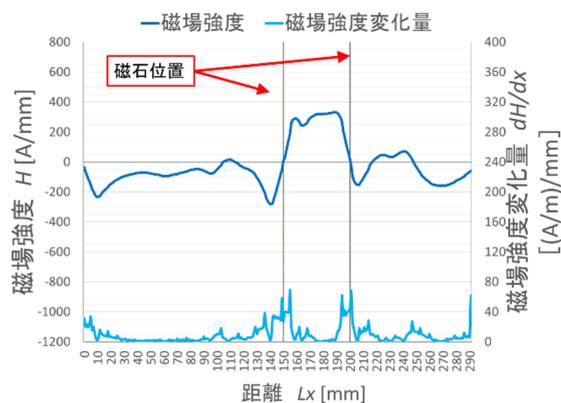


図-25 磁場強度と変化量(X方向(表面))



図-26 磁場強度と変化量(Z方向(深さ))

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。

(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年度は過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660MPに設定し（図-31）、破断までの連続実験を行ったところ、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

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。

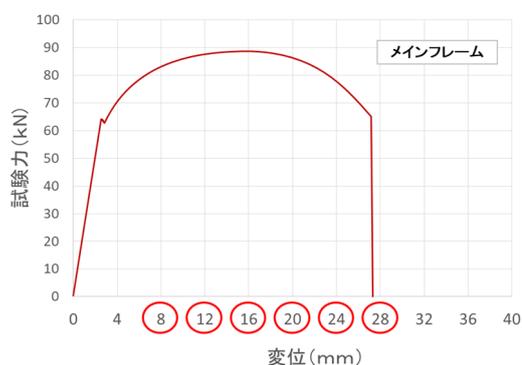


図-29 引張試験結果

(荷重-ひずみ/メインフレーム)

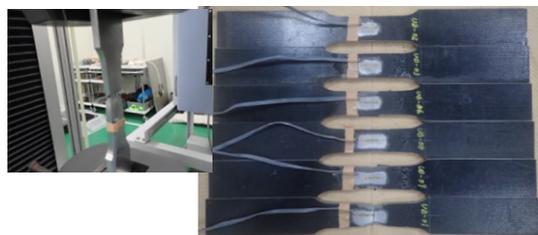


図-30 試験片（引張試験）

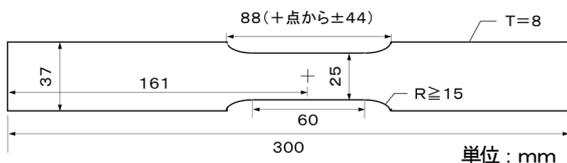


図-27 試験前の試験片寸法（引張試験）



図-31 荷重点（曲げ試験）

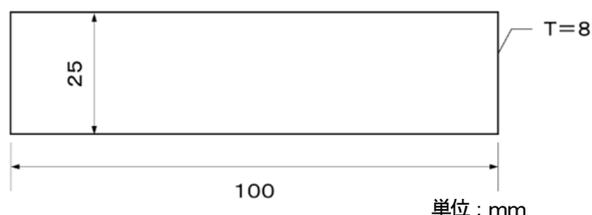


図-28 試験前の試験片寸法（曲げ試験）



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測定結果より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。)

$$\text{変化量} = \sqrt{\{(\text{磁場強度})^2 - (\text{直前の磁場強度})^2\}}$$

出され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とおりの傾向を示した。

○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。

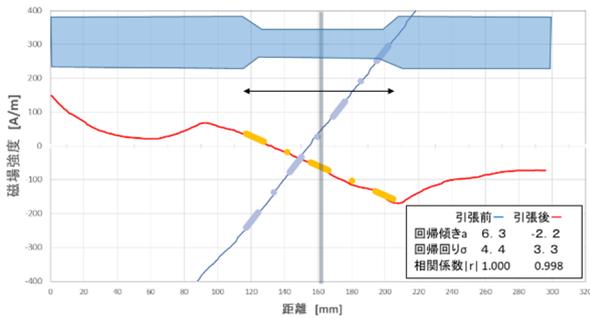


図-33 磁場強度Z方向 (引張/伸び8mm)

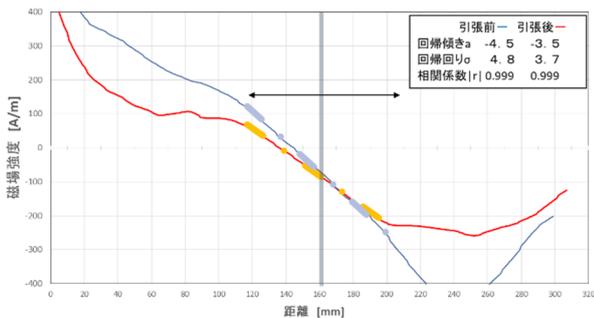


図-34 磁場強度Z方向 (引張/伸び16mm)

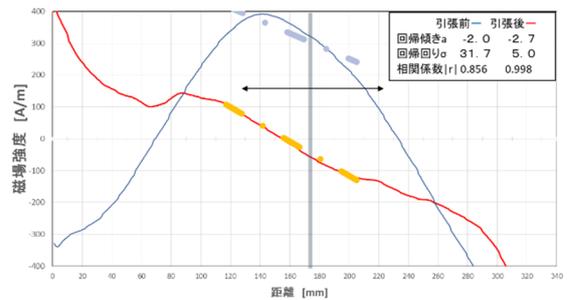


図-35 磁場強度Z方向 (引張/伸び20mm)

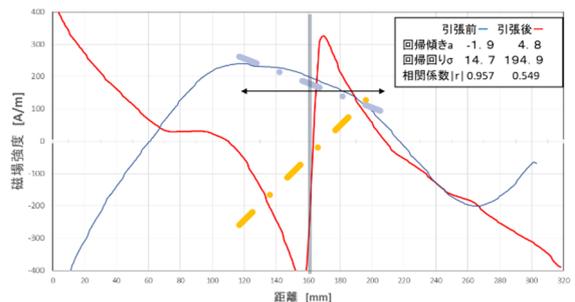


図-36 磁場強度Z方向 (引張/破断)

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)						
	8mm 約83KN	12mm 約87KN	16mm 約88KN	20mm 約87KN	24mm 約82KN	破断時 約67KN	
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。

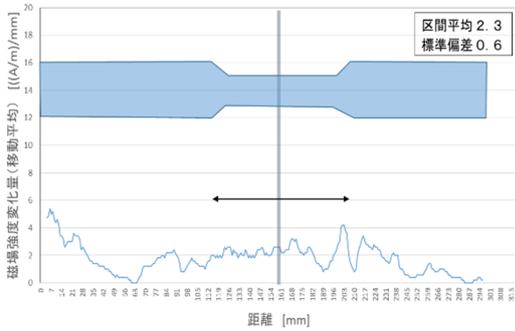


図-37 磁場強度変化量Z方向(引張/伸び8mm)

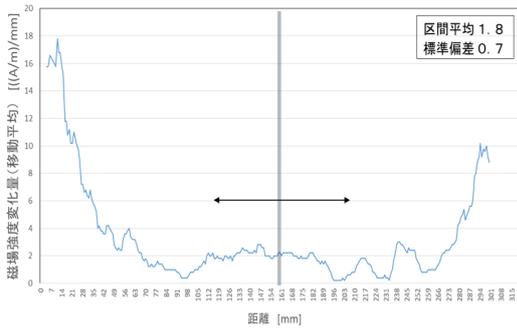


図-38 磁場強度変化量Z方向(引張/伸び12mm)

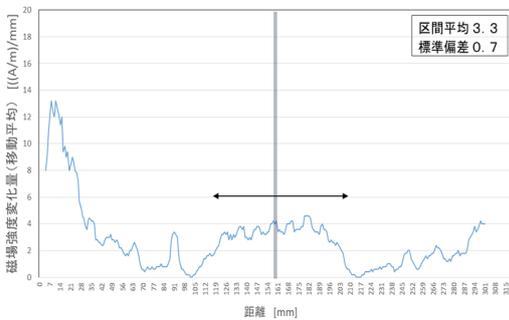


図-39 磁場強度変化量Z方向(引張/伸び16mm)

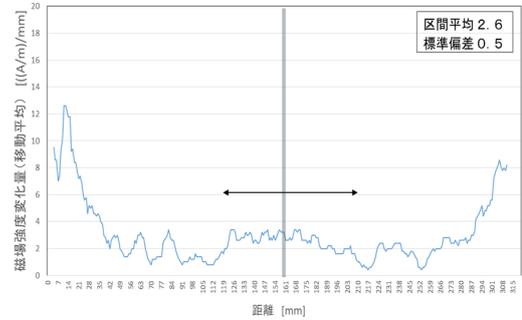


図-40 磁場強度変化量Z方向(引張/伸び20mm)

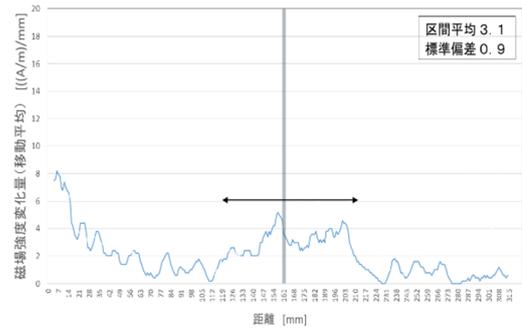


図-41 磁場強度変化量Z方向(引張/伸び24mm)

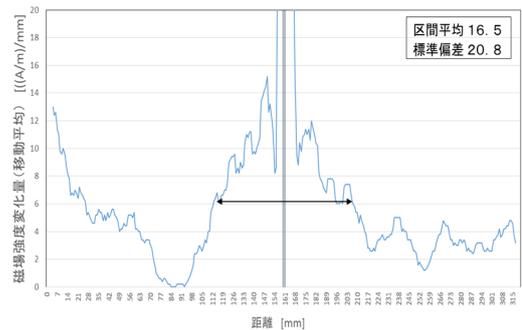


図-42 磁場強度変化量Z方向(引張/破断)

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。

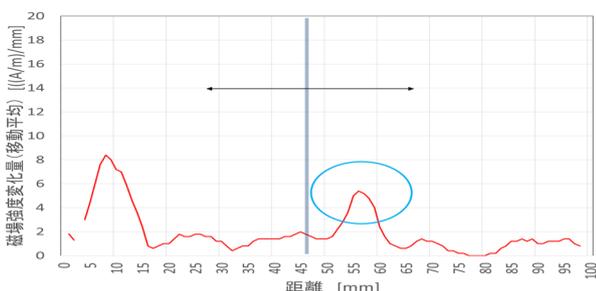


図-43 磁場強度変化量Z方向
(曲げ/6500回)

○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。

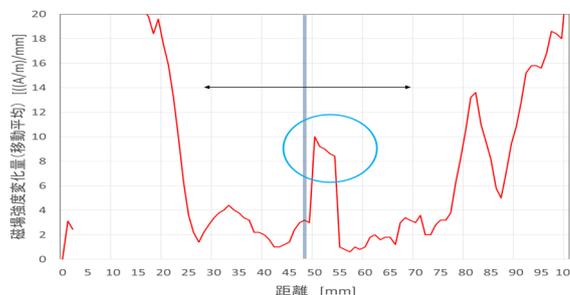


図-44 磁場強度変化量Z方向
(曲げ/破断)

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)

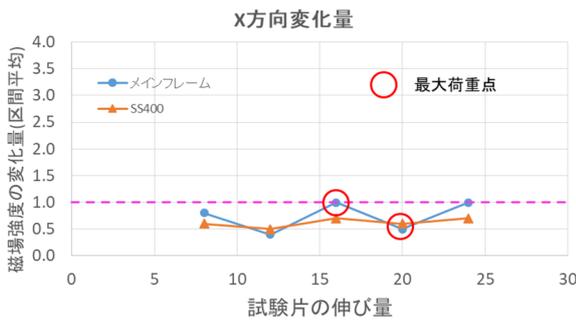


図-45 区間平均—変化量X方向 (引張伸び量)

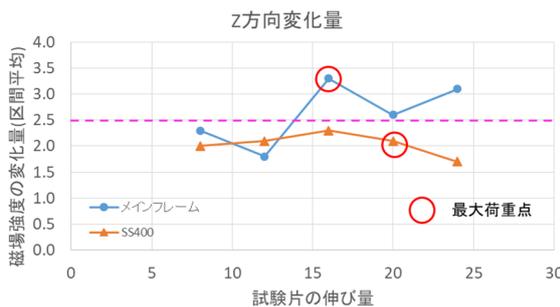


図-46 区間平均—変化量Z方向 (引張伸び量)

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

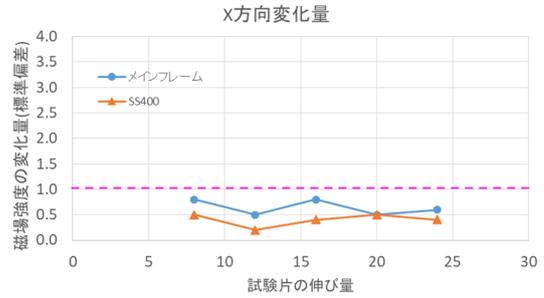


図-47 区間標準偏差—変化量X方向 (引張伸び量)

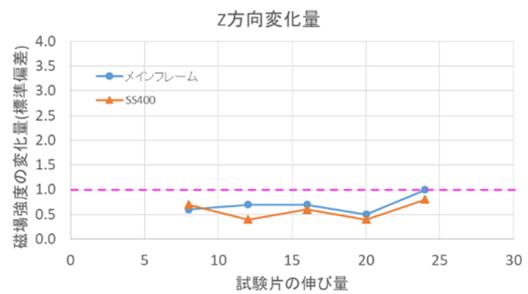


図-48 区間標準偏差—変化量Z方向 (引張伸び量)

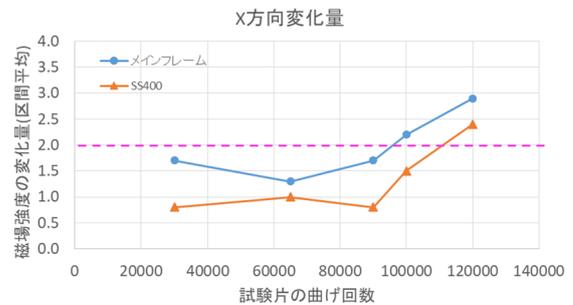


図-49 区間平均—変化量X方向 (曲げ回数)

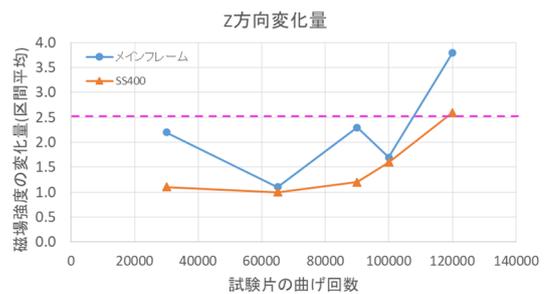


図-50 区間平均—変化量Z方向 (曲げ回数)

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)。

③ 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。過年度までの結果と同様に破断前後で大きく変化した。

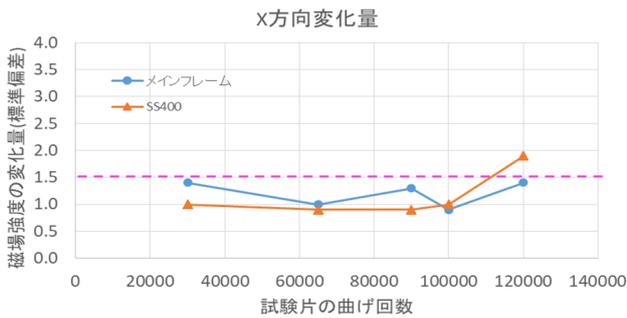


図-51 区間標準偏差—変化量X方向(曲げ回数)

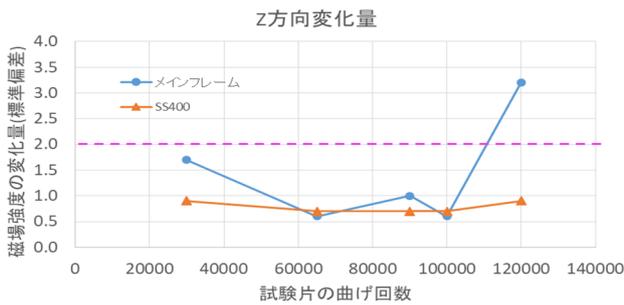


図-52 区間標準偏差—変化量Z方向(曲げ回数)

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

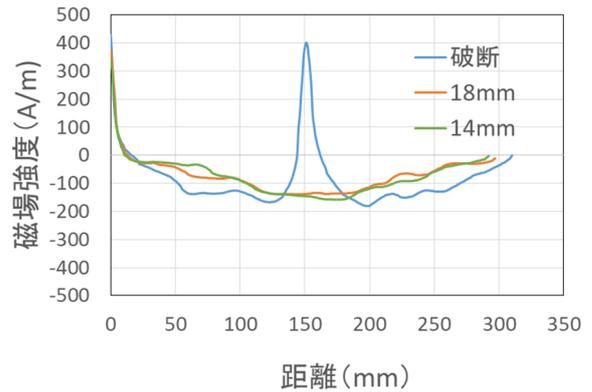


図-53 磁場強度(メインフレームX方向)
[引張試験]

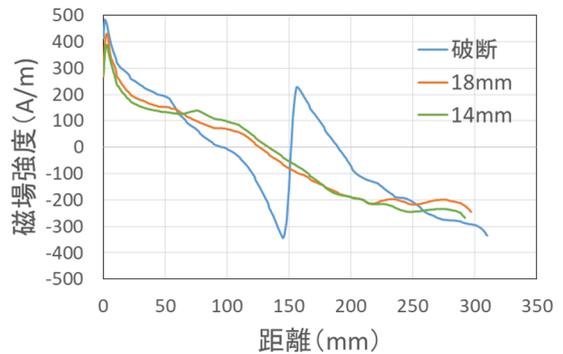


図-54 磁場強度(メインフレームZ方向)
[引張試験]

(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。

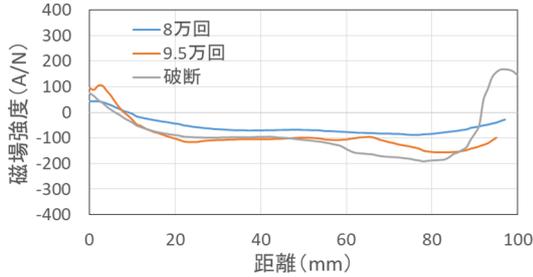


図-55 磁場強度 (メインフレームX方向) [曲げ試験]

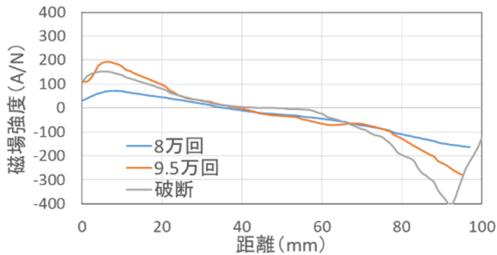


図-56 磁場強度 (メインフレームZ方向) [曲げ試験]

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

[b] 経時データ

過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。

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。原因は不明だが、今後も経時データを取得し検証していきたい。

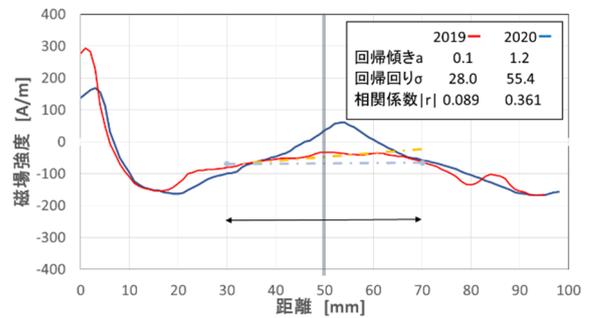


図-57 磁場強度 (メインフレームX方向) [破断 曲げ試験 2019-2020]

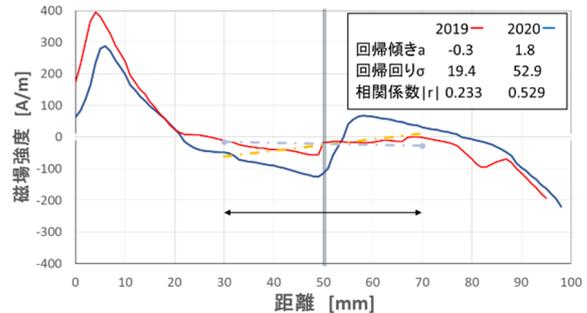


図-58 磁場強度 (メインフレームZ方向) [破断 曲げ試験 2019-2020]

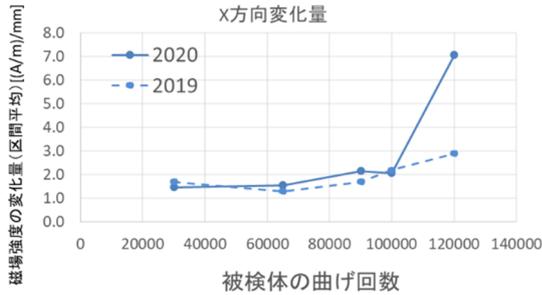


図-59 磁場強度 区間平均 メインフレーム X方向 [曲げ試験 2019-2020]

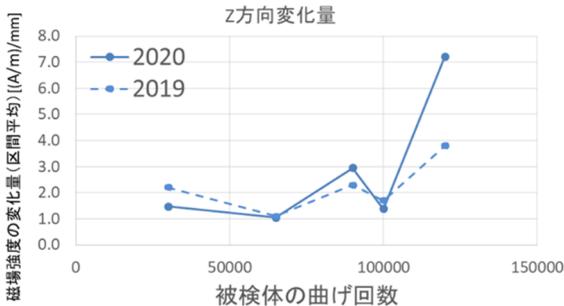


図-60 磁場強度 区間平均 メインフレーム Z方向 [曲げ試験 2019-2020]

[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、それと [b] も踏まえ劣化度診断指標を再検討した。例と引張試験と曲げ試験のメインフレームの Z 方向の区間平均の結果例を図-61~62 に示す。過年度より詳細なデータの把握ができたが、指標の過年度の検討結果から変更はなかった。

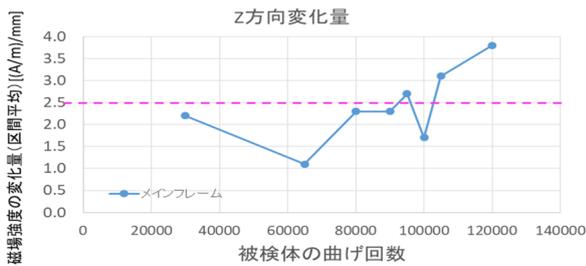


図-61 区間平均—変化量Z方向 (曲げ回数)

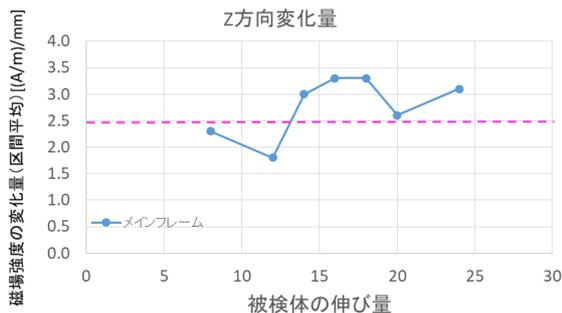


図-62 区間平均—変化量Z方向 (引張伸び量)

4. 3 実車 (計測の試行) の測定及び適応性の確認

前項の検討を踏まえ、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器及び前項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・部位について再度計測を行った。

4. 3. 1 実車 (計測の試行) 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所有の除雪トラック 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-63)。また、測定回数は3回とした。

(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-65)。

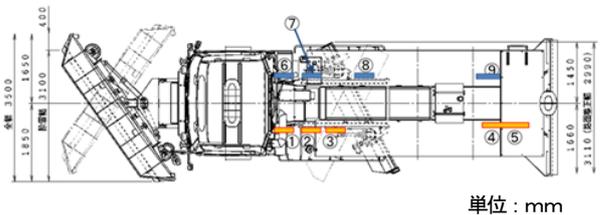


図-63 測定部位



図-64 実車測定状況

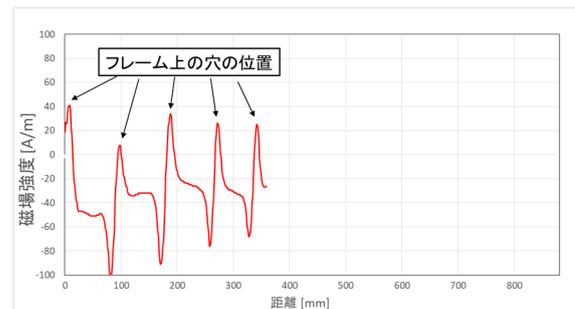


図-65 磁場強度測定例 (A車/測定部位①/X方向)

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-66)。

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-14 に例を示す。基準を超過した場合△を付け、「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-13 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

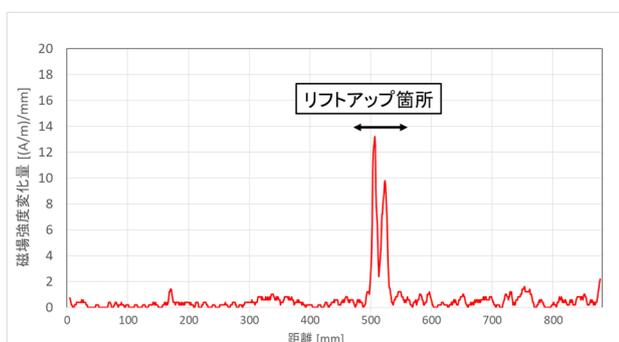


図-66 変化量測定例 (B車/測定部位④/Z方向)

表-14 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	引張力		曲げ力		備考
				基準	判定	基準	判定	
①	X	平均値	0.4 ^{0.7}	-	-	2	○	[良好区間]
		標準偏差	0.3 ^{0.9}	-	-	1.5	○	
Z	平均値	0.6 ^{1.0}	2.5	○	2.5	○	[良好区間]	
	標準偏差	0.6 ^{0.9}	1	○	2	○		
②	X	平均値	0.2 ^{0.9}	-	-	2	○	[注意] Z方向の標準偏差、引張力
		標準偏差	0.2 ^{0.8}	-	-	1.5	○	
Z	平均値	0.2 ^{1.6}	2.5	○	2.5	○	[良好区間]	
	標準偏差	0.1 ^{1.1}	1	△	2	○		
③	X	平均値	0.4 ^{0.7}	-	-	2	○	[良好区間]
		標準偏差	0.3 ^{0.9}	-	-	1.5	○	
Z	平均値	0.6 ^{1.0}	2.5	○	2.5	○	[良好区間]	
	標準偏差	0.6 ^{0.9}	1	○	2	○		
④	X	平均値	0.4 ^{0.5}	-	-	2	○	[良好区間]
		標準偏差	0.7 ^{0.8}	-	-	1.5	○	
Z	平均値	0.7 ^{0.9}	2.5	○	2.5	○	[良好区間]	
	標準偏差	0.4 ^{0.7}	1	○	2	○		
⑤	X	平均値	0.6 ^{0.7}	-	-	2	○	[良好区間]
		標準偏差	0.4 ^{0.6}	-	-	1.5	○	
Z	平均値	0.4 ^{0.6}	2.5	○	2.5	○	[良好区間]	
	標準偏差	0.4 ^{0.7}	1	○	2	○		
⑥	X	平均値	0.6 ^{0.7}	-	-	2	○	[良好区間]
		標準偏差	0.4 ^{0.6}	-	-	1.5	○	
Z	平均値	0.4 ^{0.8}	2.5	○	2.5	○	[良好区間]	
	標準偏差	0.4 ^{0.7}	1	○	2	○		
⑦	X	平均値	0.8 ^{1.2}	-	-	2	○	[良好区間]
		標準偏差	0.6 ^{0.8}	-	-	1.5	○	
Z	平均値	0.9 ^{1.4}	2.5	○	2.5	○	[良好区間]	
	標準偏差	0.5 ^{0.6}	1	○	2	○		
⑧	X	平均値	1.3 ^{1.6}	-	-	2	○	[注意] Z方向の標準偏差、引張力
		標準偏差	1.1 ^{1.4}	-	-	1.5	○	
Z	平均値	2.0 ^{2.3}	2.5	○	2.5	○	[良好区間]	
	標準偏差	1.2	1	△	2	○		
⑨	X	平均値	0.2 ^{1.0}	-	-	2	○	[良好区間]
		標準偏差	0.1 ^{0.4}	-	-	1.5	○	
Z	平均値	0.2 ^{1.0}	2.5	○	2.5	○	[良好区間]	
	標準偏差	0.1 ^{0.6}	1	○	2	○		

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、H30年式除雪トラックで注意区間が発生するなど(表-15 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。

表-15 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)					

4. 3. 2 実車測定部位の振動加速度の測定

検出器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。

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

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-67に示す。

(1) 測定方法

除雪トラック（表-15 N08(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-68）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+G同時）作業（以下「除雪（I, G）」という）」「除雪（Iのみ）作業（以下「除雪（I）」という）」「除雪（G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。

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-67 震度と振動加速度レベル（dB）

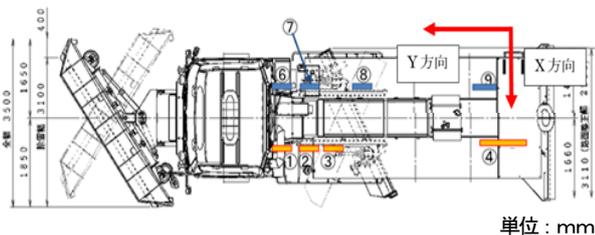


図-68 測定部位とX-Y方向



図-69 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-70に示す。

振動加速度レベルの目安として5 dBの差が約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-71に示す。

方向においては、XとZ方向はY方向に振動加速度レベルが、走行種別は除雪（I, G）と除雪（G）が大きい傾向を示した。

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-72に示す。

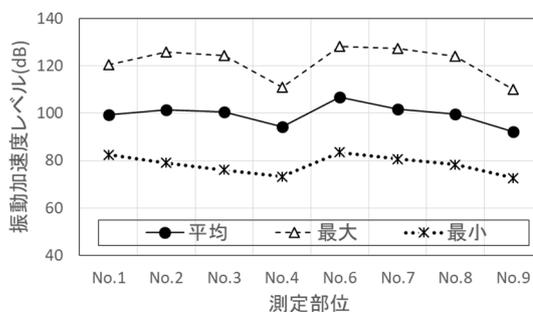


図-70 振動加速度レベル X方向 除雪（I, G）

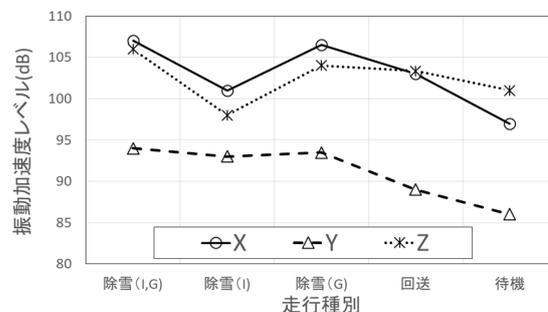


図-71 方向別振動加速度レベルの比較
測定部位 No. 6

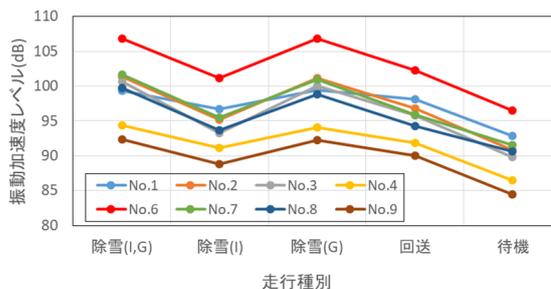


図-72 測定部位別振動加速度レベルの比較
走行種別

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-16 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）の負荷傾向の例を図-73 に示す。待機に比べ、8~13dB大きいことから約3~8倍の負荷と想定される。

4. 3. 3 実車測定部位の経時データの取得

「4. 3. 1 実車（計測の試行）の測定及び適応性の確認」の10台について計測1年後の経時データを取得するため、検出器にて磁場強度を再測定した。

前回測定時からの稼働実績と磁場強度変化量の区間平均値の1年間の差を表-17 に示す。

磁場強度変化量の区間平均値は、方向別に測定部位（No.1~4, 6~9 計8箇所）の値を合計した。

基礎試験の結果より、無負荷であれば磁場強度の変化はなかったため、1年稼働の負荷により磁場強度の変化量の区間平均値は一部マイナスになっているが増加傾向が確認できた。

表-16 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

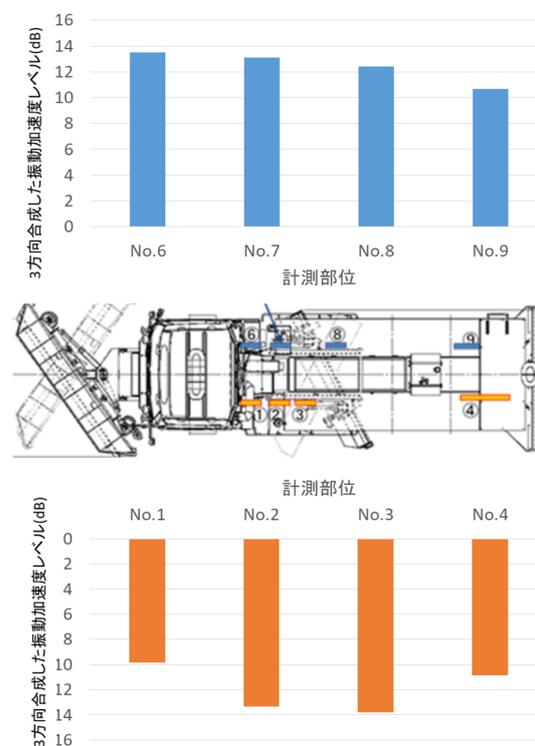


図-73 3方向合成した振動加速度レベル
除雪（I, G）

表-17 前回測定時からの稼働実績と磁場強度変化量の区間平均値の差 除雪（I, G）

車両NO	年式	規格	前回測定からの稼働実績			磁場強度の変化量の区間平均値 [(A/m)/mm]	
			運転時間	走行距離	運転日数	X方向	Y方向
1	H25	10t級、6×6、IGSM	246	1,927	80	2.2	4.0
2	H25	10t級、6×6、IG	209	2,141	68	1.9	2.0
3	H25	10t級、4×4、IG	366	4,944	87	2.2	4.0
4	H27	10t級、6×6、IGS	408	5,260	90	1.9	2.3
5	H26	10t級、6×6、IGS	345	4,805	74	2.6	3.0
6	H26	10t級、6×6、IGS	411	5,280	89	6.7	10.8
7	H26	10t級、6×6、IGM	369	4,619	61	6.1	5.7
8	H29	10t級、6×6、IG、散布	402	6,912	87	2.2	-0.9
9	H20	10t級、4×4、IG	169	2,988	52	0.5	1.4
10	H30	10t級、6×6、IGS	191	3,282	53	-0.6	-1.4

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 実車測定部位の振動加速度の測定」の振動加速度レベルと「4. 3. 3 実車測定部位の経時データの取得」による測定値の対応について検討した。

具体的には、車体番号N08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対応を整理した。

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。

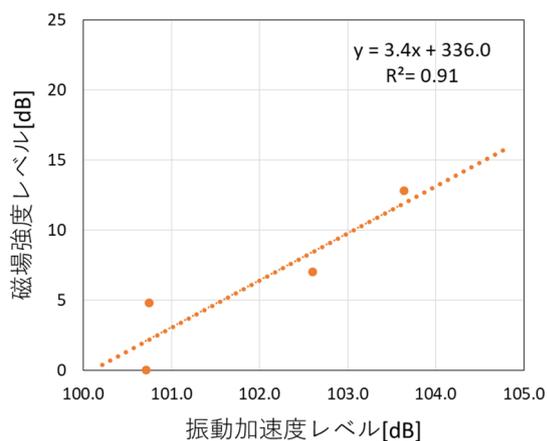


図-74 磁場強度レベルと振動加速度レベル
Z方向

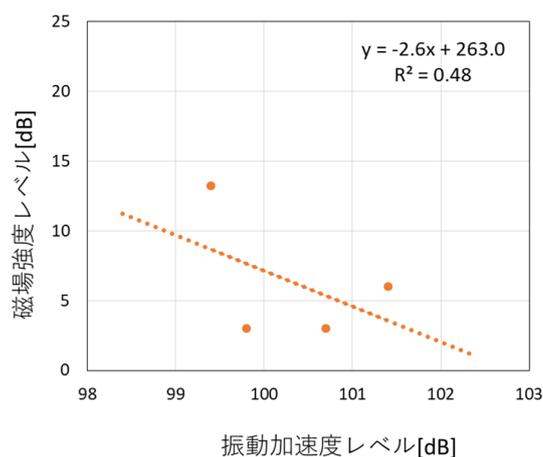


図-75 磁場強度レベルと振動加速度レベル
X方向

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-18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-19、20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-21に示す区分表で配点した。

表-18 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-22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、重大故障データで算出した故障箇所別の信頼度を用いた。

表-19 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-20 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-21 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-22 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件数の発生頻度を算出した。算出した結果を表-23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-24のように設定した。

表-23 信頼度が低下した際の重大故障件数の発生頻度

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			
平均配置台数	508	99	87	146	120	84	1,039			
信頼度	重大故障件数(件)							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)
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-24 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-25 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-25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、1 開発建設部全体で 6,000 万円/年と仮に設定し、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-76 及び表-26 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。

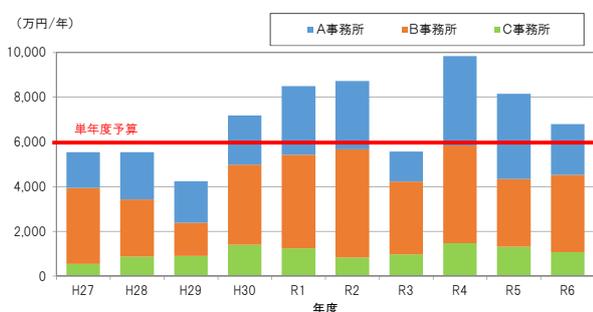


図-76 予防整備費用算出結果 (事務所毎)

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-77 及び表-27 に示す。

事務所毎に整理した図-77 には、配置換え前及び配置換え 1 回及び 2 回目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-26 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)											合計	H27~R6 単年平均
	H27	H28	H29	H30	R1	R2	R3	R4	R5	R6			
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-27 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)											
	H27	H28	H29 (配置換え)	H30	R1	R2 (配置換え)	R3	R4 (配置換え)	R5	R6	合計	H27~R6 単年平均
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

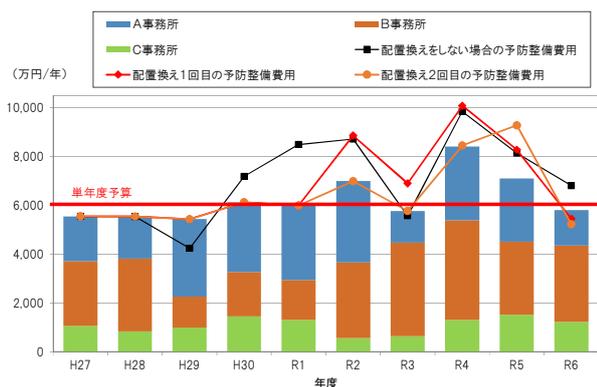


図-77 配置換え 3 回目の予防整備費用算出結果（事務所毎）

表-26、27 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言えることから、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されていない。

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 0 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」に基き、表-28 のとおり設定した。

表-28 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)

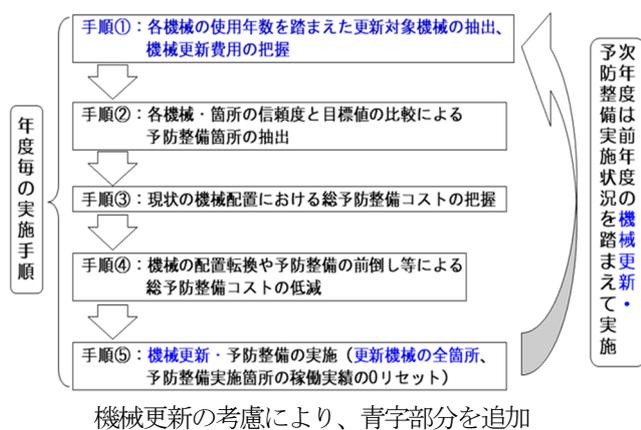


図-78 機械更新を考慮した除雪機械維持管理手法

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-78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」。
- ④ 信頼度の算出方法：「5. 3. 1」項と同様、ワイブ

表-25（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

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-25（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-79、80) 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-81 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

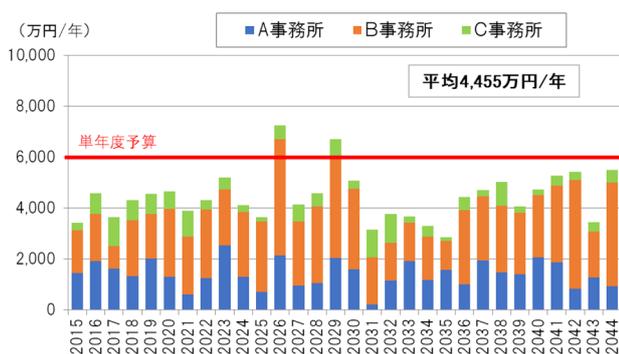


図-79 現状 (H27 時点) の機械配置における各年度の総予防整備コスト (事務所毎)

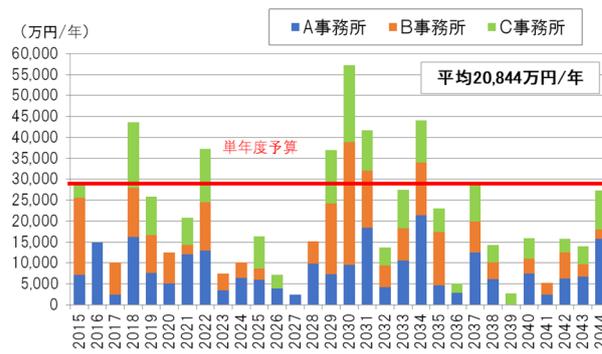


図-80 現状 (H27 時点) の機械配置における各年度の総機械更新費用 (事務所毎)

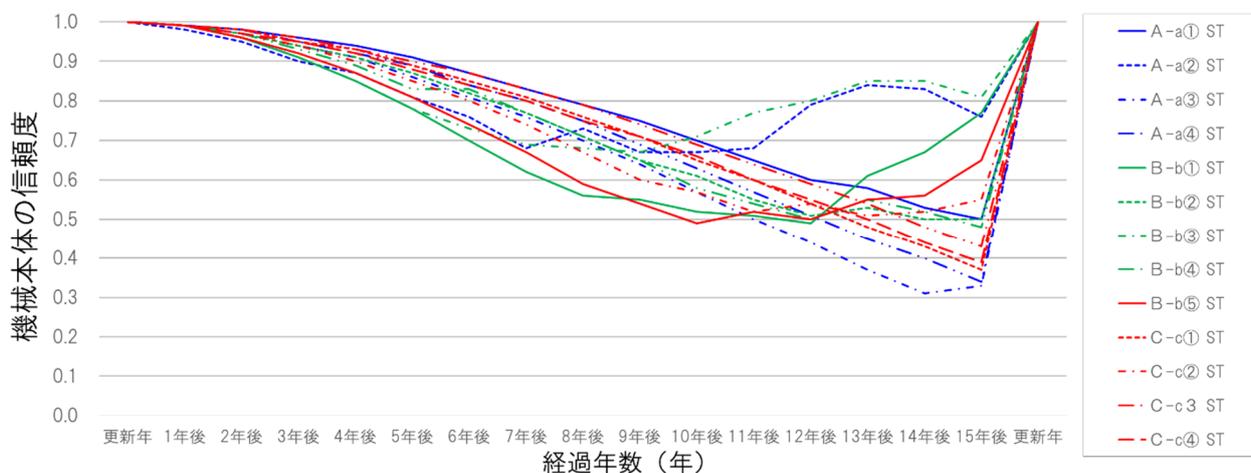


図-81 除雪トラックの配置除雪 ST 毎の機械本体の信頼度

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-82）。

- ・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】

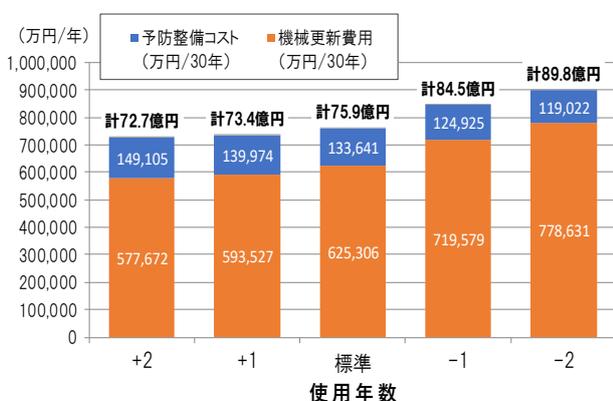


図-82 使用年数の変更によるコスト増減状況

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-83）。

- ・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90%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

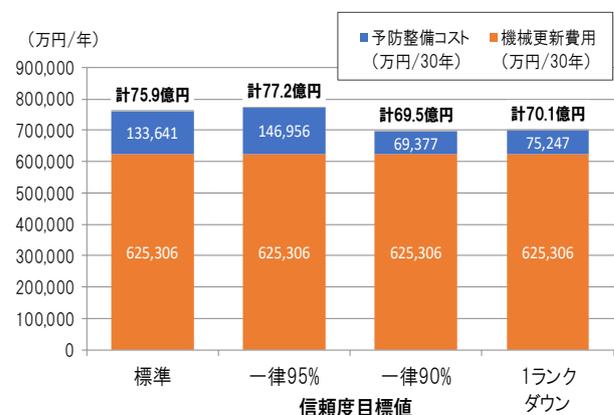


図-83 信頼度目標値の変更によるコスト増減状況

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-84 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-85 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。

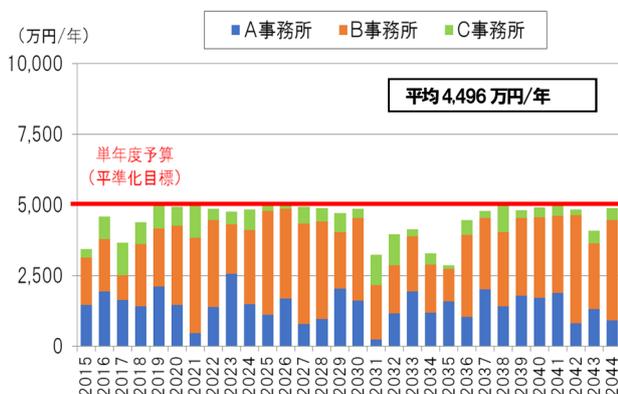


図-84 「①予防整備の前倒し」を実施した際の各年度の総予防整備コスト（事務所毎）

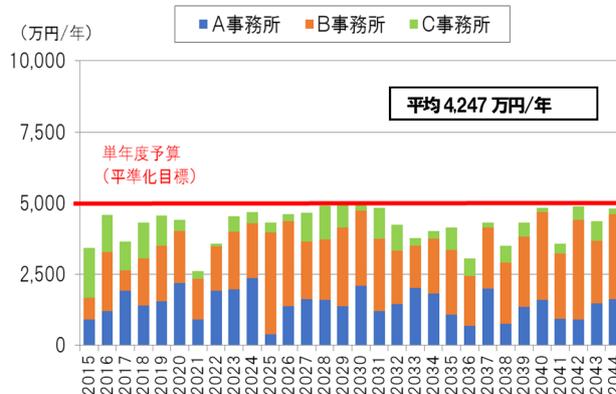


図-85 「②機械の配置転換」を実施した際の各年度の総予防整備コスト（事務所毎）

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。

6. まとめ

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。

試験片の測定結果から劣化度診断指標を設定し、実車測定結果から、検出機及び設定した指標は、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のどのくらいの劣化度なのかは判断ができない。

また、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、検出機により1年間稼働した実車を再計測し磁場強度の経時データを取得した。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。

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、車両に係る負荷との関係等について検討していきたい。

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。

しかし、機械更新時期等に劣化度が未適用であるなどの課題が明らかになった。

今後は、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」への影響等を分析し、この信頼度に応じた機械更新時期についての検討など進めていきたい。

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、高橋尚人、佐藤昌哉、平澤匡介、星卓見、高田哲哉、齊田光、四辻裕文

【要旨】

冬期道路において気象や路面状態などの悪化が原因で起こる交通事故を効果的・効率的に予防するには、交通事故の起こりやすさをリスクとして捉えたうえで、交通事故の予防に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考えられる。ところが、積雪寒冷地域では、冬期交通事故リスクマネジメントの手法が必ずしも体系的に構築されているというわけではない。そこで本研究では、交通事故分析データベースの整備、冬期交通事故リスク評価手法の構築、リスク対策による便益算定とリスク対策評価、冬期交通事故リスクマネジメントツールの開発といった要素技術研究を体系化して冬期交通事故リスクマネジメント手法を構築する見込みである。キーワード：冬期交通事故リスクマネジメント手法、交通事故分析データベース、冬期交通事故リスク評価手法、リスク対策による便益算定とリスク対策評価、冬期交通事故リスクマネジメントツール

1. はじめに

北海道を含む積雪寒冷地域では、安全で信頼性の高い冬期道路交通サービスの確保が求められており、冬期道路において交通事故を効果的・効率的に予防することがその一助になると考えられる。冬期道路において気象や路面状態などの悪化が原因で起こる交通事故を効果的・効率的に予防するには、交通事故の起こりやすさをリスクとして捉えたうえで、交通事故の予防に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考えられる。ところが、積雪寒冷地域では、冬期道路の交通事故リスクに対するリスクマネジメントの手法が必ずしも体系的に構築されているというわけではない。冬期交通事故リスクマネジメント手法を構築できれば、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を通じて、積雪寒冷地域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に貢献できると考えられる。

そこで本研究では、交通事故分析データベースの整備、冬期交通事故リスク評価手法の構築、リスク対策による便益算定とリスク対策評価、冬期交通事故リスクマネジメントツールの開発といった要素技術研究を体系化して、冬期交通事故リスクマネジメント手法を構築することを本研究の目的とする。

2. 用語について

本研究で使われる語句のうち、はじめに定義が必要な用語について、以下に示す。

2.1 人身事故と物損事故

本研究では、人身交通事故を「人身事故」、物件交通事故を「物損事故」と呼ぶ。図1に示すように、北海道の主な国道では、冬期（11～3月）になると非冬期に

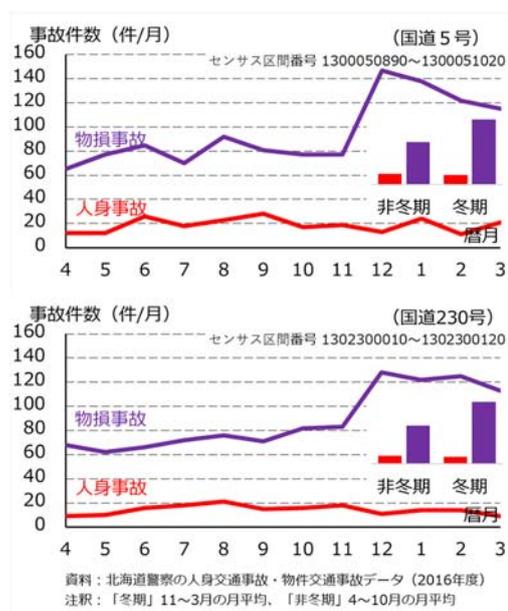


図1 北海道の主な国道における交通事故の特徴

比べて、人身事故件数が若干減る一方で、物損事故件数が急激に増えるという特徴がある。このような特徴を踏まえると、本研究で扱う交通事故リスクの対象は、人身事故と物損事故の両方とするのが望ましいと考えられる。そこで以下では、特に断らない限り、交通事故リスクとは人身・物損事故リスクのことを指すものとする。

交通事故統計上の人身事故と物損事故の相違点をみると、人身事故とは、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いうのに対し、物損事故とは、車両相互や車両単独などで物損や自損を起こして物件交通事故として警察に届け出られたものを指す。人身事故と物損事故では、警察に保管される事故原票の形式が異なる。

なお、交通事故統計上、積雪寒冷地域の冬型事故（スリップ事故、視界不良事故、わだち事故）は、人身事故の部類に属する。

2. 2 交通事故リスク

本研究では、「事故リスク」と「事故率」を区別する。事故率は、既に起こった事故から計算されるものであり、どのような状況で起きたかをその値から判断できない。国交省が定義する死傷事故率は、自動車走行台キロで基準化された年間あたりの死傷事故件数のことであり、自動車走行台キロと人身事故件数の比率のことである。それに対して、事故リスクは、既に起こった事故がどのような状況で起きたかを調べて、その状況が変化した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、交通事故リスクは、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）のことをいう。

ただし、事故リスクも事故率も事故の危険性又は有害性を表す指標であることには変わらないので、本研究では、事故リスクのみならず事故率についても取り扱うものとする。

2. 3 交通事故リスクマネジメント

国際標準化機構ISOや日本産業規格JISが組織の経営管理という観点からリスクマネジメントを定義しており、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、リスクコミュニケーションといった一連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。特に、このプロセスの中で、リスク特定、リスク分析、リスク評価の部分をリスクアセスメントと呼ぶことがある。

土木学会も建設プロジェクトの管理手法という観



図2 冬期交通事故リスクマネジメントの全体像

点からリスクマネジメントを定義しており、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およ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。

両者のプロセスはほぼ同じであるので、本研究では、交通事故リスクマネジメント手法の構築における要素技術研究の体系化に際して、リスクマネジメントをリスク特定、リスク分析、リスク評価、リスク対応というプロセスで捉えることにする。

なお、本研究において、リスク対策という用語は、上記のリスク対応と同義である。

3. 研究実施内容

冬期交通事故リスクマネジメント手法の構築において、交通事故分析データベースの整備、冬期交通事故リスク評価手法の構築、リスク対策による便益算定とリスク対策評価、冬期交通事故リスクマネジメントツールの開発といった要素技術研究を体系化することになるが、この体系化は、リスクマネジメントのプロセスに沿って行うものとする。すなわち、図2に示すように、交通事故分析データベースの整備によってリスクの特定と分析を行い、冬期交通事故リスク評価手法の構築によってリスクの分析と評価を行い、リスク対策による便益算定とリスク対策評価によってリスク評価を行い、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リスク対応を行うものとする。そして、これら一連のプロセスを冬期交通事故リスクマネジメント手法として位置付けるものとする。

本稿では、次章以降の各々の章の中で、交通事故分析データベースの整備、冬期交通事故リスク評価手法の構築、リスク対策による便益算定とリスク対策評価、

冬期交通事故リスクマネジメントツールの開発といった要素技術研究の内容を記述したあと、冬期交通事故リスクマネジメント手法の構築という章の中で、リスク特定、リスク分析、リスク評価、リスク対応というプロセスで全体を整理してリスクマネジメント手法として取りまとめることになる見込みである。

4. 交通事故分析データベースの整備

4.1 交通事故分析システムの更新

本研究において交通事故分析データベースとは、寒地土木研究所の中長期計画の第1期（平成13～17年度）、第2期（平成18～22年度）、第3期（平成23～27年度）を通じて継続的に開発されてきた交通事故分析システムに搭載されているデータベースのことである。ここで言う交通事故分析システムとは、地理情報システムGISを活用し、北海道の高速道路と国道・道道・市町村道を対象にして、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データ）、道路構造データ（北海道開発局のMICHIデータ）、交通状況データ（道路交通センサスのデータ）、気象データ（気象庁の気象官署やアメダスのデータ）などの項目に含まれる位置情報をデジタル道路地図（DRM）とリンクさせたいうで、机上のパソコンで交通事故対策を検討できるようにしたソフトウェアのことである。GISのソフトウェアにはESRI ジャパン株式会社のArcGIS for Desktopを、データベースのソフトウェアには日本マイクロソフト株式会社のAccess2003を使用した。

これまで第1期、第2期、第3期中長期計画を通じて交通事故分析データベースの整備を進めてきたが、今期の第4期では、既存データベースの項目のデータの年次追加を行ったのに加えて、新たに、交通事故データの中に物損事故データを、交通状況データの中に旅行速度データと急ブレーキ発生回数データ（ETC2.0プローブデータ）を追加し、更に一部の国道だけであるが冬期道路管理データ（寒地土木研究所が収集している冬期の国道の路面すべり抵抗値HFNデータ）という項目を追加した。

ここで、交通事故分析システムを使った簡単な分析の例を示しておく。図3は、冬期において人身事故件数が多くなるとされる日平均気温マイナス5度以下の条件に着目し、同条件下で平成28（2016）年の人身事故発生地点を検索した結果を示している。

なお、今期に新たに追加した物損事故データは、人身事故データと違って、事故原票の中に事故発生地点の緯度・経度情報が記述されていない。そこで、物損

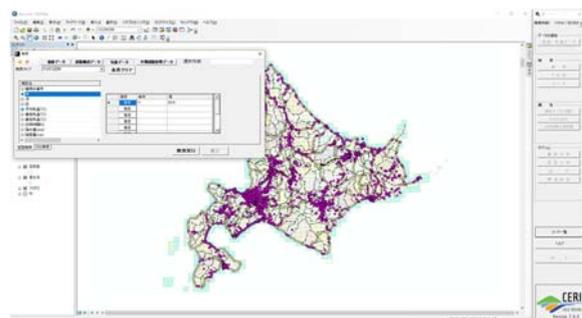


図3 交通事故分析システムを使った分析の例

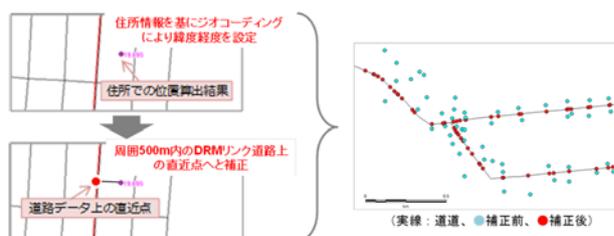


図4 物損事故データのマップマッチングの方法

事故発生地点をデジタル道路地図とリンクさせるために、図4に示すようにして、物損事故原票の住所情報に基づいて1件ごとにジオコーディングを行ったあとで、周囲500m内の直近の道路上にマップマッチングさせるという補正を行った。直近の道路が存在しない場合はジオコーディングのみを行うことになってしまい、物損事故データのうちマップマッチングができなかったデータは、全体の約半数を占めた。

4.2 路面の日陰時間と冬期交通事故率の関係についての分析

交通事故分析システムの活用例として、交通事故分析データベースと日陰計算モデルを用いて冬期道路の路面の日陰時間と冬期人身事故率の関係を分析した。

冬期道路の路面状態は、降水および降雪の有無と並び、日射や日照時間にも大きな影響を受けることが知られている。路面における日照時間は天候以外にも道路周辺の地形や建築物（沿道地物）による日射遮蔽の影響を大きく受けるため、沿道地物により日陰となる区間では、冬期に路面状態が悪化しやすいことが知られている。そのため、スリップ事故等の冬型事故が発生しやすくなることが懸念されるが、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。そこで、交通事故分析データベースと日陰計算モデルを使い、沿道地物によって路面に生じた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、まず、沿道地物の立体模型を作成し、沿道地物の計算対象地点における太陽の位置を計算モ

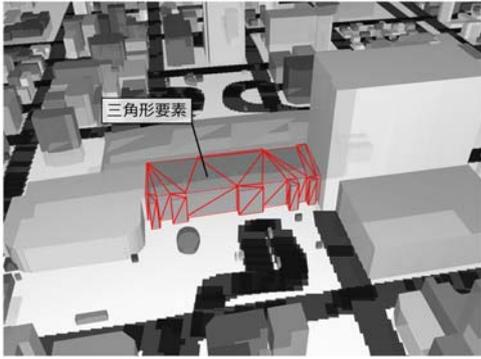


図5 札幌駅周辺の国道の沿道地物の立体模型

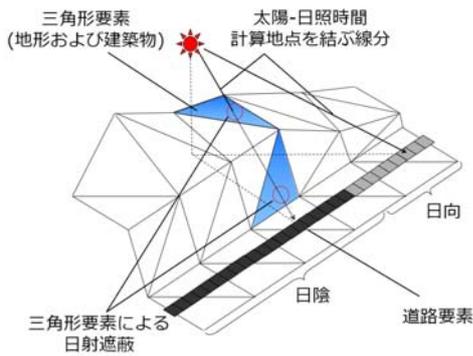


図6 路面の日陰時間の算出方法

デルで導出し、太陽と沿道地物の関係から日射が遮蔽する1日あたり日陰時間 t [h]を算出した。次に、交通事故分析システムを用いて、立体模型の対象とした沿道地物がある国道の1日当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]を算出した。最後に、両者の関係をグラフ化し、日陰時間 t と人身事故率 R_w, R_s の関係を調べた。

1日あたり日陰時間 t の計算対象地点における太陽の位置は、方位角 θ [rad]と太陽高度 α [rad]で表される。 θ は真北を0ラジアンとし、時計回り方向に $0 \sim 2\pi$ までの範囲で表される。このとき、 θ と α は、次式で表される。ただし、 δ は太陽の赤緯、 ϕ は計算対象地点の緯度、 γ は計算対象地点の太陽の時角である。

$$\sin \alpha = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \gamma \quad (1)$$

$$\tan \theta = \frac{-\cos \delta \sin \gamma}{\sin \delta \sin \phi - \cos \delta \sin \phi \cos \gamma} \quad (2)$$

計算対象地点における1日あたり日陰時間 t の算出では、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図5のような立体模型を作成し、沿道地物の形状を三角形要素の集合体と見做して、太陽の位置 (θ と α)と計算対象地点と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することを通じて、日射遮蔽の時間を

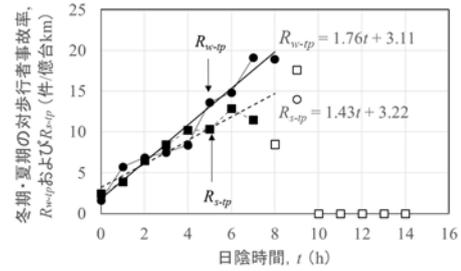


図7 対歩行者事故率と日陰時間の関係

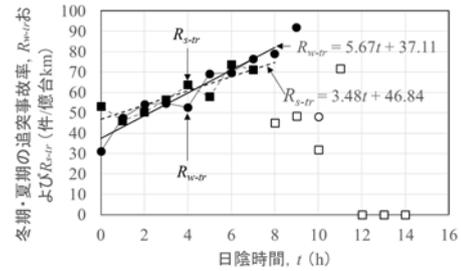


図8 追突事故率と日陰時間の関係

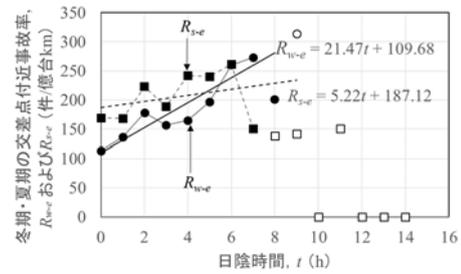


図9 交差点付近事故率と日陰時間の関係

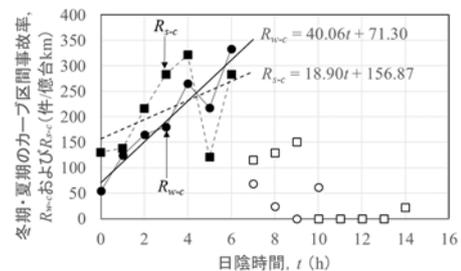


図10 カーブ区間事故率と日陰時間の関係

算出した。

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と人身事故率が増加する傾向が見られた。日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った。

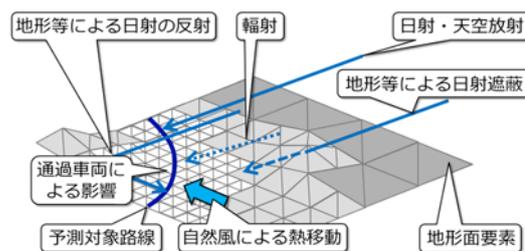


図 11 沿道地物の影響を考慮した道路気象計算

5. 冬期交通事故リスク評価手法の構築

5.1 冬期路面状態予測モデルを用いた路線の交通事故リスク評価手法の構築

冬期道路で交通事故が発生した時刻と地点の路面状態を予測することにより、冬期道路の路面状態から路線の物損事故率を評価する新たな手法を構築した。

一般に、警察に保管される事故原票には、事故発生時刻における事故発生地点の詳細な路面状態が記録されることはない。事後的にみて事故発生時刻の路面状態が判明したとしても、それは事故発生時刻の直前又は直後に偶然に事故発生地点の路面状態が計測されていた場合に限られる。そのため、路面状態からみた冬期交通事故率の評価には、事故が発生した時刻と地点の路面状態を予測することが必要になる。さらに、その予測に用いるデータとして、比較的事故が多く発生する道路の路線全体の路面状態を連続的に計測しておく必要がある。

そこで、本研究では、札幌市内の一般国道230号の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）を実測したデータを紐付けて分析するとともに、冬期路面状態予測モデルを構築し、札幌市中心部から半径15km圏内の一般国道のうちロードヒーティングをしていない区間を対象に、雪氷路面状態から物損事故率を評価した。連続路面状態計測車両は、寒地土木研究所が所有する車両であり、連続路面すべり計測装置、GPS、赤外放射温度計・気温計などを備えている。連続路面すべり計測装置によって計測される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がすべり易い状態であることを示している。

まず、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。

なお、閏年を考慮して365.25日で年換算している。

$$r_t = \frac{10^8 N_t}{365.25 P L_t Q} \quad (3)$$

$$r_{HFN} = \frac{10^8 N_{HFN}}{365.25 P L_{HFN} Q} \quad (4)$$

ただし、

- N_t : T_t の階級毎に紐付けされた交通事故件数 [件]、
- L_t : T_t の階級毎に紐付けされた区間内の出現距離 [km]、
- N_{HFN} : f_{HFN} の階級毎に紐付けされた交通事故件数 [件]、
- L_{HFN} : f_{HFN} の階級毎に紐付けされた出現距離 [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い、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ている。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網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 を参照。）
- 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 を参照。）

$$\begin{aligned} \rho_s c_s \frac{\partial(T_s h_s)}{\partial t} = & q_{sds} + q_{lds} - q_{lus} + q_{as} \\ & + q_{sf} - q_{le} - q_{sa} + q_{lm} \\ & - q_{if} - q_{dr} + q_{sp} - q_{st} \end{aligned} \quad (5)$$

ただし、

- t : 時間 [s]、
- $\rho_s c_s$: 雪氷層の体積熱容量 [J K/m³]、

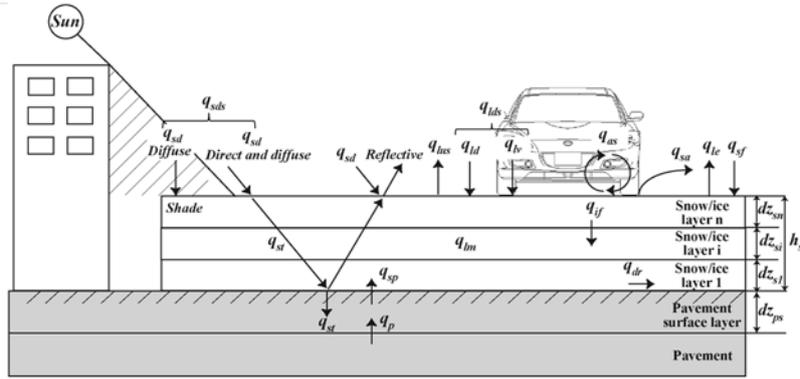


図 12 舗装と路面上の雪氷層との間の熱収支計算

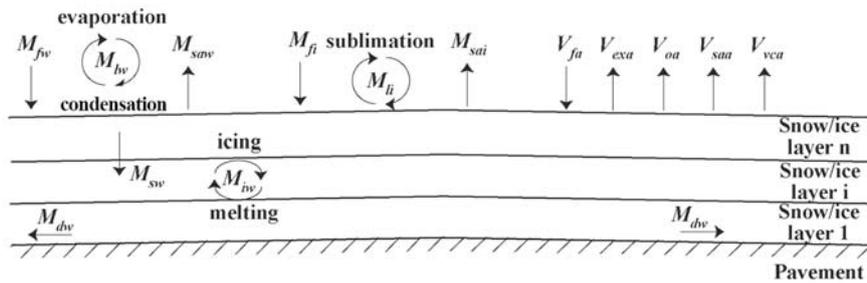


図 13 路面上で雪氷層を構成する水・氷・空気の質量・体積収支計算

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) $[W/m^2]$ 、

q_{lds} : 雪氷層への長波放射フラックス $[W/m^2]$ 、

q_{lus} : 雪氷層からの長波放射フラックス $[W/m^2]$

q_{as} : 風による顕熱フラックス $[W/m^2]$ 、

q_{sf} : 降雨・降雪による顕熱フラックス $[W/m^2]$ 、

q_{le} : 蒸発・昇華による潜熱フラックス $[W/m^2]$ 、

q_{sa} : 飛散による顕熱フラックス $[W/m^2]$ 、

q_{lm} : 融解・凝固による潜熱フラックス $[W/m^2]$ 、

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) $[W/m^2]$ 、

q_{dr} : 排水による顕熱フラックス $[W/m^2]$ 、

q_{sp} : 雪氷層と路面との熱フラックス $[W/m^2]$ 、

q_{st} : 日射による透過熱フラックス $[W/m^2]$ 。

- 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 $[kg/m^2]$ と氷の質量 M_i $[kg/m^2]$ と空気の単位面積あたり体積 V_a $[m^3/m^2]$ を以下の式によって計算する。(図 13 を参照。)

$$\frac{\partial M_w}{\partial t} = M_{fw} + M_{lw} + M_{iw} - M_{sw} - M_{dw} - M_{saw} \quad (6)$$

$$\frac{\partial M_i}{\partial t} = M_{fi} + M_{li} - M_{iw} - M_{sai} \quad (7)$$

$$\frac{\partial V_a}{\partial t} = V_{fa} - V_{exa} - V_{oa} - V_{saa} - V_{vca} \quad (8)$$

ただし、

M_{fw} : 降雨フラックス $[kg/m^2/s]$ 、

M_{lw} : 蒸発・凝結フラックス $[kg/m^2/s]$ 、

M_{iw} : 融解・凝固フラックス $[kg/m^2/s]$ 、

M_{sw} : 融雪水の下方浸透フラックス $[kg/m^2/s]$ 、

M_{saw} : 雪氷層中の飛散水分フラックス $[kg/m^2/s]$ 、

M_{fi} : 降雪フラックス $[kg/m^2/s]$ 、

M_{li} : 昇華フラックス $[kg/m^2/s]$ 、

M_{iw} : 融解・凝固フラックス $[kg/m^2/s]$ 、

M_{sai} : 雪氷層中の飛散氷成分フラックス $[kg/m^2/s]$ 、

V_{fa} : 降雪空気フラックス $[m^3/m^2/s]$ 、

V_{exa} : 置換空気フラックス $[m^3/m^2/s]$ 、

V_{oa} : 開放空気フラックス $[m^3/m^2/s]$ 、

V_{saa} : 雪氷層中の飛散空気フラックス

V_{vca} : 通過車両の粘性圧縮による排出空気フラックス $[m^3/m^2/s]$ 。

- 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。具体手には、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。

$$f_{HFN} = 49.303(\theta_i h_s)^{-0.076} \quad (9)$$

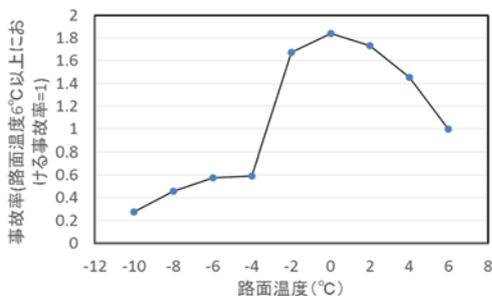


図 14 雪氷路面の路面温度（実測値）の階級別にみた物損事故率

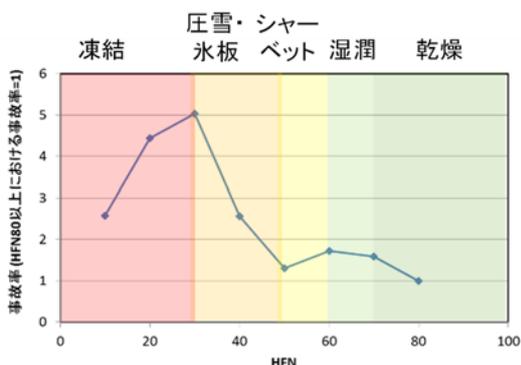


図 15 雪氷路面の路面すべり抵抗値（実測値）の階級別にみた物損事故率

ただし、

θ_i : 雪氷層の体積含水率 [%]。

以上の①～④のプロセスを通じて得られた式(9)が、雪氷層厚を用いてHFNを予測する式を表している。

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。

- ✓ 冬期交通事故率は、降雪時に路面温度が0°C前後となる条件のときに最も大きくなる。このときの交通事故率は無積雪時の交通事故率の約1.8倍になる。路面温度が0°C前後になると路面状態が急変することが原因の一つと考えられる。
- ✓ 冬期交通事故率は、降雪時にHFNが30となる条件のときに最も大きくなる。降雪時のすべり易い路面における交通事故率は、雪氷路面が圧雪・氷板に相当するまで悪化したときには、無積雪の交通事故率の約5倍に増加する。

冬期路面状態予測モデルを用いた評価では、HFNに加えて、 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することにした。これらの状態を階級に分け、対象区

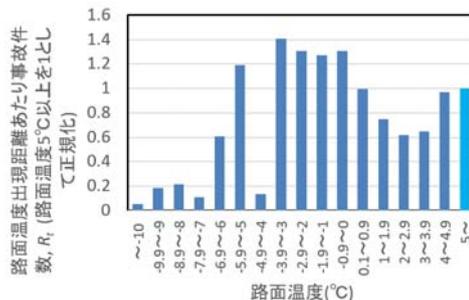


図 16 タイヤ接地面の路面温度（予測値）の階級別にみた路面温度出現距離あたり物損事故件数

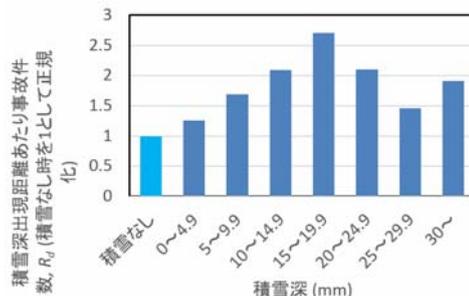


図 17 タイヤ接地面の積雪深（予測値）の階級別にみた積雪深出現距離あたり物損事故件数

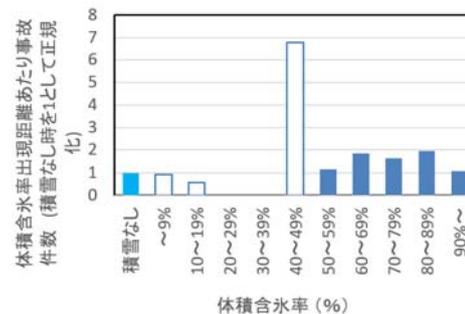


図 18 タイヤ接地面の体積含有率（予測値）の階級別にみた体積含有率出現距離あたり物損事故件数

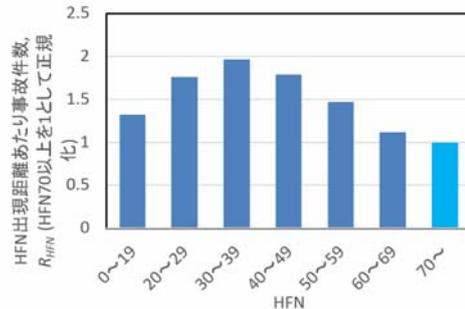


図 19 路面すべり抵抗値 HFN（予測値）の階級別にみた HFN 出現距離あたり物損事故件数

間に各状態が出現する距離あたりの物損事故件数と各状態との関係の評価した。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、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は、棒グラフの色を変えている。図18で、事故件数が5件未満と少なくなる階級は、白抜きで示している。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、物損事故が発生し易くなる。雪氷層の融解・再凍結に伴うすべり易い路面の出現といった要因が考えられる。一方、マイナス6°C以下の雪氷路面では、物損事故が発生しにくい。
- ✓ タイヤ接地面の雪氷層体積含水率（予測値）が90%以上の雪氷路面では、物損事故が発生しにくい。目視で路面状態の危険を認識し易くなるといった要因が考えられる。
- ✓ タイヤ接地面の積雪深（予測値）が15mm～20mm程度では、積雪が無い状態と比べて、物損事故件数が3倍近くになる。一方、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以上40未満という中程度のすべり状態の雪氷路面では、物損事故件数が最も多くなる。

5.2 空間統計分析を用いた交通状態別事故リスクの面的な評価手法の構築

空間統計学と交通工学の分析方法を活用して、新たに定義した「交通状態別事故リスク」を地図上で評価することができる新たな評価手法を構築した。

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空間的に集積するエリアを“見える化”して、かつ、そのエリア内に含まれる地域メッシュ単位での交通量と車速と人身・物損事故率の関係を分析して交通状態別に交通事故リスクを“見える化”した。この手法を用いるならば、これまでのような事故多発地点という“点”の視点でなく、事故集積エリアという“面”の視点に立って交通事故リスクを評価することができるようになる。それに加えて、任意の地域メッシュ内に施された交通事故対策の効果が当該メッシュに隣接する各メッシュにも波及するという利点を勘案して効果的・効率的に交通事故対策を施したいときに、当該メッシュの交通状態が季節別・時間帯別にみてどのような状態のときに対策を施せば、効果的・効率的に事故リスク低減を図れるかということについて評価することができるようになる。

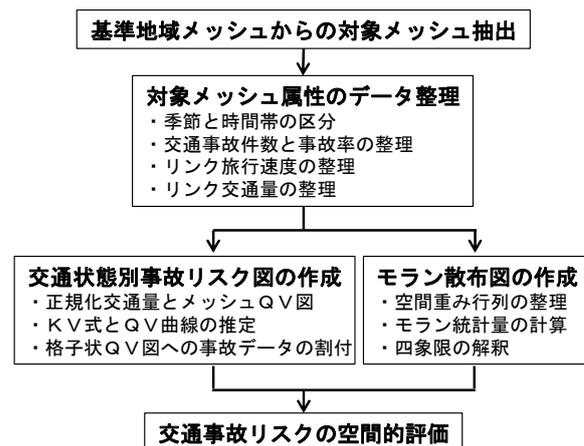


図20 空間統計分析を用いた交通状態別リスクの面的な評価手法の構築のフロー

本評価手法は、図20のフローに従う。詳細は以下の通りである。

① 基準地域メッシュからの対象メッシュ抽出

札幌市を構成する基準地域メッシュ（1km四方）1,523個のうち、メッシュ内に国道を含む196個を対象とした。それらを「対象メッシュ」と呼ぶ。

② 対象メッシュ属性のデータ整理

季節と時間帯の区分では、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）を採用した。

交通事故分析システムを用いて、対象メッシュに属する1メッシュあたりの人身・物損事故率を季節別・時間帯別に整理した。ただし、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であり、事故率の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である。

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。まず、2次メッシュDRMリンク15分集計単位のETC2.0平均旅行速度データをETC2.0搭載台数データによって加重平均したものを1時間単位で集計した。次に、2次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、この時間単位で集計した旅行速度データのマップマッチングを行い、同データを国道リンクに貼り付けた。最後に、対象メッシュ各々の国道リンク毎に同データを季節別・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」と呼ぶ。

常時観測調査の時間係数表と道路交通センサスの箇所別基本表を用いて、対象メッシュ内の国道の交通

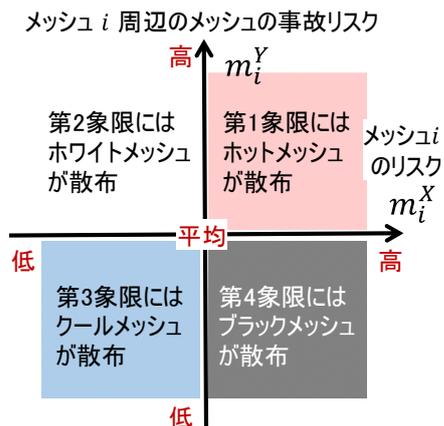


図 21 本手法におけるモラン散布図の四象限の解釈

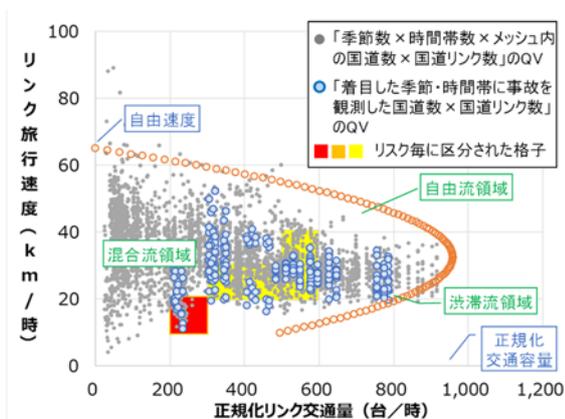


図 22 交通状態別事故リスク図の例 (札幌市中心部メッシュの冬季・昼間の人身事故率)

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

量データを整理した。まず、2 次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、センサスの日単位の交通量データのマップマッチングを行い、同データを国道リンクに貼り付けた。次に、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」と呼ぶ。

③ モラン散布図の作成

モラン散布図とは、空間的な集積の状況を“見える化”するための道具であり、散布にはローカル・モラン統計量を使う。ローカル・モラン統計量とは、局所的な空間的自己相関を測る統計量であり、空間重み行

列を使って相関係数を空間的に拡張したものである。局所的な空間的自己相関とは、地域のどの辺りで、隣接メッシュ属性が似たような傾向をもつメッシュが集積しているかを表す空間的な相関関係のことである。

対象メッシュ $N = 196$ に連番を振り、 $N \times N$ 行列 $\mathbf{w} = [w_{ij}]$ を用意した。 \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} を「空間重み行列」と呼ぶ。

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、メッシュ属性の平均 \bar{a} を $\bar{a} = \sum_{i=1}^N a_i / N$ で定義する。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。

$$I_i = N(a_i - \bar{a}) \sum_{j=1}^N w_{ij} (a_j - \bar{a}) / \sum_{i=1}^N (a_i - \bar{a})^2 \quad (10)$$

モラン散布図の作成に際して、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。各々は次式で表される。

$$m_i^X = (a_i - \bar{a}) / \sqrt{\sum_{i=1}^N (a_i - \bar{a})^2 / N} \quad (11)$$

$$m_i^Y = \sum_{j=1}^N w_{ij} (a_j - \bar{a}) / \sqrt{\sum_{i=1}^N (a_i - \bar{a})^2 / N} \quad (12)$$

モラン散布図上には、点 (m_i^X, m_i^Y) ($i = 1, \dots, N$) が散布される。 $I_i = m_i^X m_i^Y$ が成り立つので、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。原点は平均値となる。

図 21 に、本手法におけるモラン散布図の四象限の解釈を図示した。第 1 象限 (または第 3 象限) に属するメッシュを「ホットメッシュ」 (または「クールメッシュ」) と呼ぶことにした。この象限には、周辺メッシュとともに事故リスクが高い (または低い) メッシュが属する。第 4 象限 (または第 2 象限) に属するメッシュを「ブラックメッシュ」 (または「ホワイトメッシュ」) と呼ぶことにした。この象限には、周辺メッシュよりも事故リスクが高い (または低い) メッシュが属する。

④ 交通状態別事故リスク図の作成

任意のメッシュの交通状態をリンク旅行速度 V と正規化されたリンク交通量 Q に基づいて季節別・時間帯別に図示した。これを「メッシュ QV 図」と呼ぶ。メッシュ内には異なる車線数の国道が混在するので、当該メッシュ内の国道の交通量を正規化する必要がある。そこで、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/時に乗ずることで、リンク交通量を正規化した。ただし、冬季交通容量は、凍結

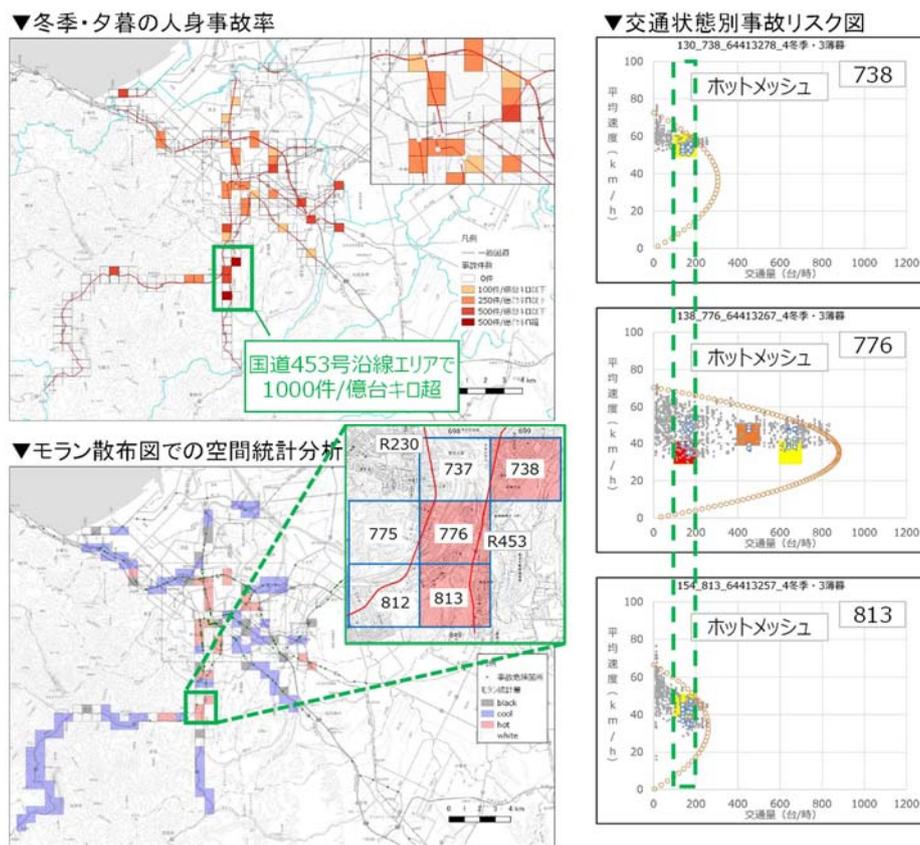


図23 札幌市内の国道網における冬季・夕暮の人身事故率の空間的評価の例

圧雪路面の影響を踏まえ、冬季補正率を考慮した。任意のメッシュQV図上には、「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ことになる。

メッシュQV図毎に、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 式を直線で近似した。そのうえで、 Q を V の二次関数と見做すことで、メッシュQV図上の交通量・速度データの特性を示すQV曲線を推定した。

メッシュQV図上に事故データを割り付けるため、同図上に格子状の区切りを設けたものを「格子状QV図」と呼び、以下の手順に従い事故データを割り付けた格子状QV図を「交通状態別事故リスク図」と呼ぶ。

図22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。格子状QV図への事故データの割付では、まず、図上にある全ての国道リンクQVデータ（灰色の丸点）の中から、着目した冬季・昼間に人身事故が観測された国道リンクQVデータ（青色の丸点）を抽出する。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の着色区分に基づいた着色を施す。例えば図中の縦軸10~20km/時と横軸200~300台/時の格子の場合、当該格子内で人身事故率が最も高い国道リンクでは表1の区分の赤色に相当したので、当該格子は赤色となった。

⑤ 交通事故リスクの空間的評価

図23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23の左上に示すように、メッシュ毎に独立してみた場合には、例えば、国道453号沿線では評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するエリアが存在した。
- ✓ 図23の左下のモラン散布図の結果をみると、空間重み行列の行番号738、776、813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ことが分かる。
- ✓ 図23の右の交通状態別事故リスク図をみると、738、776、813のメッシュでは局所的な空間的自己相関は正になるので、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/時という交通状態のと

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 27 に示す。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帰分析を行い、その分析結果から特定されたリスク要因の下で生じる当該リスクを推計し、そのリスク値を反映させた質問紙を作成して道の駅でヒアリング調査を実施して、調査データに基づいて交通事故リスク情報に応じたルート転換効果を推計した。

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、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。調査の期間は、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。現場で調査を受諾して頂いた方々に対し、事前に作成した質問紙票の内容に沿って聞き取りをした。

図 28 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。ただし、文章中の●に入る数値は、質問紙ごとにランダムとなっている。なお、文章中に示したリスク要因は、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、気象と交通に係るリスク要因の中から統計的に有意なリスク要因を抽出したものである。

『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、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、出発前にリスク値を知ったときに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

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/ス） <input type="checkbox"/> 大型車（普通貨物 3 車軸、路線バス） <input type="checkbox"/> 特大型（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
	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
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
	一般道路 <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
	一般道路 <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 月の日中に、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】 <input type="checkbox"/> ①国道ルートを利用する（選択理由 _____）	
	<input type="checkbox"/> ②高速ルートを利用する（選択理由 _____）

図 28 調査で使用した質問紙票のサンプル

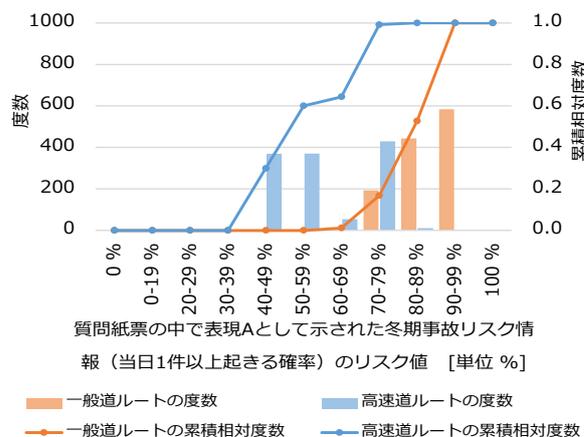


図 29 質問紙票に書かれた事故リスク値の分布

率、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●の値から推定された値が代入される。図 29 に、実際の調査において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た冬期交通事故リスク推定モデルについて説明する。交通事故リスクとは、「人身・物損事故の起こりやすさ」のことである。具体的には、交通事故が起きる確率のことであり、例えば「交通事故が1件以上起きる確率」や「交通事故が起きない確率」のことである。本検討では、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。）で定式化した。以下のモデル群の中から、統計的に最も妥当なものを交通事故リスク推定モデルとして選定した。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）

$$\mu = \exp(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_N X_N + \log QL) \quad (16)$$

$$P[Y] = \frac{\Gamma(Y+\theta)}{Y! \Gamma(\theta)} \left\{ \frac{\theta}{\mu+\theta} \right\}^\theta \left\{ \frac{\mu}{\mu+\theta} \right\}^Y \quad (17)$$

$$P[Y > 0] = 1 - \left\{ \frac{\theta}{\mu + \theta} \right\}^\theta \quad (18)$$

- ・ゼロ過剰ポアソン回帰モデル（ZIPOモデル）

$$\mu = \exp(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_N X_N + \log QL) \quad (19)$$

$$\frac{\pi}{1-\pi} = \exp(\gamma_0 + \gamma_1 X_1 + \dots + \gamma_N X_N + \log QL) \quad (20)$$

$$P[Y] = \begin{cases} \pi + (1 - \pi) \exp(-\mu) & Y = 0 \\ (1 - \pi) \frac{\mu^Y}{Y!} \exp(-\mu) & Y \geq 1 \end{cases} \quad (21)$$

$$P[Y > 0] = (1 - \pi) \exp(-\mu) \quad (22)$$

- ・ゼロ過剰負の二項回帰モデル（ZINBモデル）

$$\mu = \exp(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_N X_N + \log QL) \quad (23)$$

$$\frac{\pi}{1-\pi} = \exp(\gamma_0 + \gamma_1 X_1 + \dots + \gamma_N X_N + \log QL) \quad (24)$$

$$P[Y] = \begin{cases} \pi + (1 - \pi) \left\{ \frac{\theta}{\mu+\theta} \right\}^\theta & Y = 0 \\ (1 - \pi) \frac{\Gamma(Y+\theta)}{Y! \Gamma(\theta)} \left\{ \frac{\theta}{\mu+\theta} \right\}^\theta \left\{ \frac{\mu}{\mu+\theta} \right\}^Y & Y \geq 1 \end{cases} \quad (25)$$

$$P[Y > 0] = (1 - \pi) \left\{ \frac{\theta}{\mu + \theta} \right\}^\theta \quad (26)$$

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

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%

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。実務的にも特定しやすいリスク要因にのみ着目した点が原因に挙げられる。

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

調査の有効回答数は、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て、許容誤差±5%、信頼度99%として計算し、600票以上を必須とした。調査の結果、有効回答数は、一般道ルートは605票、高速道ルートは630票になった。

図30と図31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30（下段）をみ

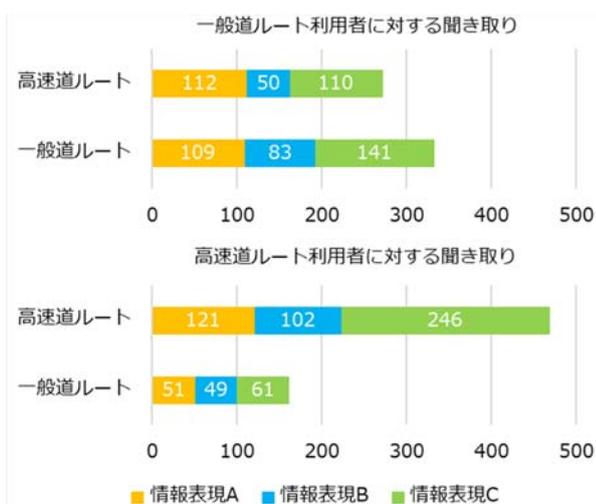


図 30 情報表現の違いによってルートを転換するドライバーと転換しないドライバー

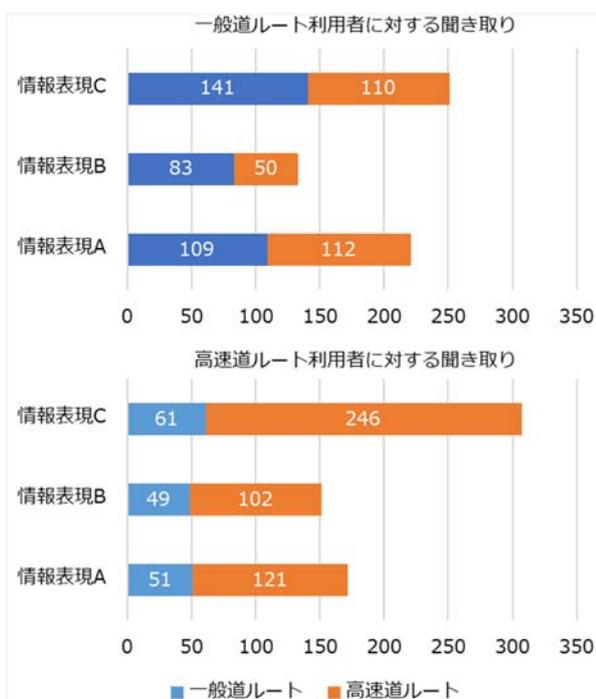


図 31 ルートを転換するドライバーが理解しやすい情報表現

ると、高速道ルート利用者に対する聞き取りでは、すべての情報表現において、多くの方が一般道ルートよりも高速道ルートを選んでいました。図 29 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い。したがって、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 30 (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。一方、図 31 (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は、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」という表現 C が他の表現の倍以上の支持を得た。図 31 (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 とが、ほぼ同じくらいの支持を得た。

このような調査データを対してネスティッドロジットモデルを適用し、冬期交通事故リスク情報の提供による並行ルート間のルート転換効果を推計した。3 種類の情報表現の中から 1 種類を選ぶと同時に、2 つのルートの中から 1 ルートを選ぶことになる。この場合、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 つの階層化が考えられる。ネスティッドロジットモデルを適用すると、選好構造の階層としてどちらが妥当かについてモデルのパラメータから判定できる。

まず、ネスティッドロジットモデルを説明する。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。また、選択するルートを変数 s とおき、一般道ルート、高速道ルートを各々、 $s = H, E$ 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 2 通りに変換できる。これが選好構造の階層を表している。 $p_i(m|s)p_i(s)$ 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、推計すべき母集団の効用 V^{ms} と、観測できない個人的な好み 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、 $U_i^{ms} = V^{ms} + \varepsilon_i^{ms} = \beta_0^{ms} + \beta_1^{ms} X_1^{ms} + \dots + \beta_K^{ms} X_K^{ms} + \varepsilon_i^{ms}$ で表される。個人 i が質問紙票で $X_1^{ms} = x_{1,i}^{ms}, \dots, X_K^{ms} = x_{K,i}^{ms}$ と回答したとすれば、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。

$$p_i(m, s) = \frac{\exp[V^{ms}]}{\sum_{m=A,B,C} \sum_{s=H,E} \exp[V^{ms}]}$$

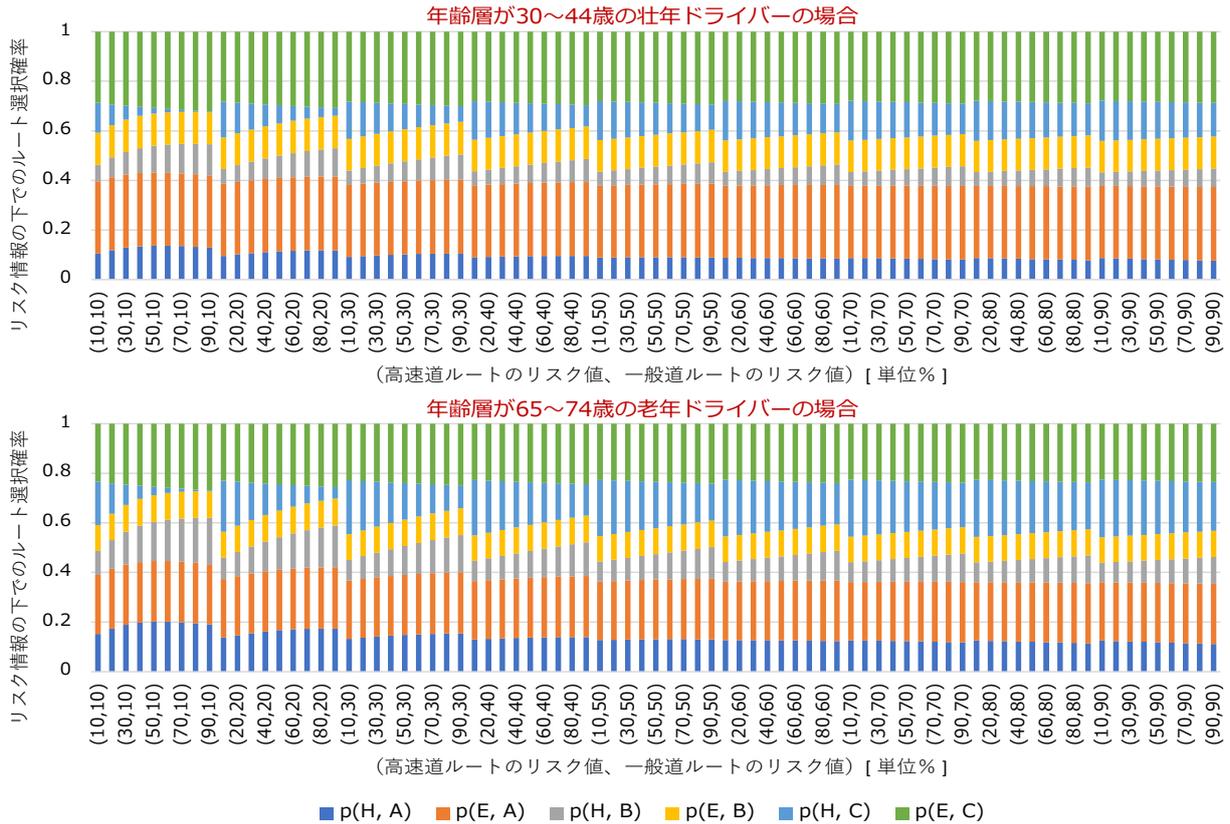


図 32 一般道ルート利用者が冬期事故リスク情報のリスク値とその表現に応じてルートを選ぶ確率

$$= \frac{\exp[\beta_0^{ms} + \beta_1^{ms} x_{1,i}^{ms} + \dots + \beta_K^{ms} x_{K,i}^{ms}]}{\sum_{m=A,B,C} \sum_{s=H,E} \exp[\beta_0^{ms} + \beta_1^{ms} x_{1,i}^{ms} + \dots + \beta_K^{ms} x_{K,i}^{ms}]} \quad (27)$$

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、選択確率 $p_i(m, s)$ 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。

$$p_i(m|s)p_i(s) = \frac{\exp[V^m + V^{ms}]}{\sum_m \exp[V^m + V^{ms}]} \frac{\exp[V^s + \lambda \Lambda^s]}{\sum_s \exp[V^s + \lambda \Lambda^s]} \quad (28)$$

$$\Lambda^s = \log[\sum_{m=A,B,C} \exp[V^m + V^{ms}]] \quad (29)$$

$$p_i(s|m)p_i(m) = \frac{\exp[V^s + V^{ms}]}{\sum_s \exp[V^s + V^{ms}]} \frac{\exp[V^m + \lambda \Lambda^m]}{\sum_m \exp[V^m + \lambda \Lambda^m]} \quad (30)$$

$$\Lambda^m = \log[\sum_{s=H,E} \exp[V^s + V^{ms}]] \quad (31)$$

式中の Λ^s は s のログサム変数、 Λ^m は m のログサム変数と呼ばれる変数であり、ログサム変数のパラメータ λ について、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いうことが判定できる。これにより、 $p_i(m|s)p_i(s)$ と $p_i(s|m)p_i(m)$ のどちら

が妥当か判明する。

図 32 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。ただし、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、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」というように設定し、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」のように設定している。図 32 の上段が壮年ドライバー、下段が老年ドライバーを表す。

図 30 と図 31 のクロス集計の結果、並びに、図 32 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といえる。
- ✓ 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 of リスク値が高くて、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だと、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、より効果的であると考えられる。

6. 2 リスク対策による便益算定に基づく対策評価

札幌都市圏の国道 36 号と道央道・札幌道の並行ルート区間を対象に、ヒアリング調査データに基づくルート転換効果の推計によって、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。しかし、国道 36 号ルートと道央道・札幌道ルートの二者択一の場合、国道 36 号ルートの事故リスク情報を通じて国道 36 号に並行する他の幹線道路（例えば、羊ヶ丘通など。）に転換してしまい、当該の幹線道路の渋滞を招いて事故リスクを増加させるという影響を考慮することができない。したがって、上記のリスク対策の便益は、たとえ情報提供の対象が国道 36 号ルートと道央道・札幌道ルートであったとしても、道路ネットワーク全体を対象に算定する必要がある。また、ヒアリング調査の結果だけでは評価できなかったが、積雪寒冷地域では積雪による車線減少といった冬期道路の交通容量低減が交通事故リスク情報提供の効果に及ぼす影響についても懸念される。

そこで、本研究では、今後、札幌都市圏の道路ネットワークを対象に、国道 36 号と道央道・札幌道の並行ルート区間で冬期交通事故リスク情報提供による交通需要マネジメント対策を施すことによる便益を算定する見込みである。具体的には、冬期交通事故リスク情報を提供する場合と提供しない場合の交通量推計（高速転換率内生化利用者均衡配分）を実施し、冬期交通事故リスク情報提供の便益（交通事故減少便益、走行時間短縮便益、走行経費減少便益）を算定するとともに、一般道ルートの冬期交通容量を変化させた場合の感度分析を行い、リスク対策評価に繋げる見込みである。

7. 冬期交通事故リスクマネジメントツールの開発

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挙げられ、その一つが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であるが、このリスク対策は都市圏を対象としたマクロな視点でのリスク対策といえる。一方、ミクロな視点でのリスク対策として「道路安全診断」が挙げられる。

これまでの道路管理の実務の現場は、事前に国道事



図 33 冬期交通事故リスクマネジメントツールの開発のイメージ

務所内の道路維持課等で管内の事故危険箇所について過去の事故件数や事故要因を調査して書類を準備し、現地でその結果を見ながら道路安全診断を行い、その見解を事務所に持ち帰って報告書が作成されていた。したがって、事故危険箇所の現場で事前に準備していなかった事故リスク（例えば、現場周辺の過去の事故傾向など。）が懸念されたとき、事務所に戻って再度書類を準備する必要があった。このとき、現地で、事故要因分析や事故リスク評価や事故対策メニュー選定や診断書の作成などが行えるモバイル型の道路安全支援ツールがあると便利であるといえる。

そこで、本研究では、モバイル端末機器に対し、交通事故分析システムを移植するとともに、エキスパートシステム（事故要因分析や診断報告書作成などの機能を兼ね備えたシステム）を実装し、道路安全診断の現場を支援するツールを開発する。このツールには、交差点等の地図上の地点を中心とした円形バッファエリア内の事故率を検索できる機能や、当該地点から近隣の大規模施設等までの最短ルート上の事故リスクを検索できる機能なども備わっている。空間統計分析を用いた交通状態別事故リスクの面的な評価手法を用いてリスク集積エリアを特定したうえで、このツールを同エリア内の現場に持参し、効果的・効率的に道路安全診断を行うというような使用が考えられる。

図 33 に、このツールの使用のイメージを示す。これまでに、エキスパートシステムの暫定版を搭載したモバイル端末の試作品を開発しており、今後、実用化に資するように機能の向上を図る見込みである。

8. 冬期交通事故リスクマネジメント手法の構築

図 2 に示したように、リスクマネジメントをリスク特定、リスク分析、リスク評価、リスク対応というプロセスとして捉えることにより、交通事故分析データベースの整備、冬期交通事故リスク評価手法の構築、

リスク対策による便益算定とリスク対策評価、冬期交通事故リスクマネジメントツールの開発といった要素技術研究の体系化を図り、冬期交通事故リスクマネジメント手法としてとりまとめる見込みである。

9. まとめ

本研究では、交通事故分析データベースの整備、冬期交通事故リスク評価手法の構築、リスク対策による便益算定とリスク対策評価、冬期交通事故リスクマネジメントツールの開発といった要素技術研究を体系化して、冬期交通事故リスクマネジメント手法を構築する。

これまでに、交通事故分析データベースの整備と冬期交通事故リスク評価手法の構築について研究成果が得られた。リスク対策による便益算定とリスク対策評価についてもリスク対策評価については研究成果が得られた。今中長期計画の最終年度では、リスク対策による便益算定、並びに、冬期交通事故リスクマネジメントツールの開発を完遂し、冬期交通事故リスクマネジメント手法として体系化を図る見込みである。

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.1013-102、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) 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.
- 6) 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.