

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。

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 Col-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 FY 2017, 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 FY 2018, 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.

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

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、巖博、木村孝司、高橋尚人、牧野正敏、丸山記美雄、徳永ロベルト、高本敏志、佐藤賢治、中島知幸、藤本明宏、齊田光、佐藤信吾、新保貴広、大浦正樹

【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。

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、グランドデザイン 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)、4)}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

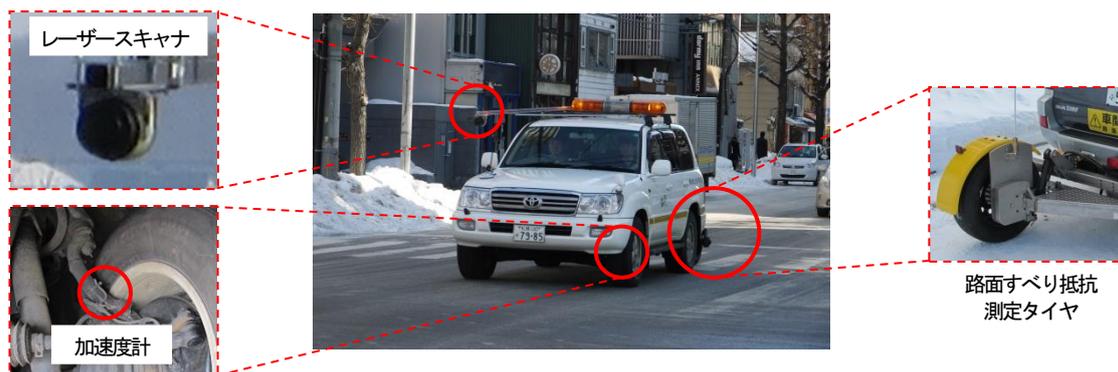
とユーザー満足度に及ぼす影響の評価技術が不可欠となる。さらに、除排雪や凍結防止剤散布などの道路維持対策がもたらす冬期走行環境の改善効果を評価する技術があれば、道路維持対策、冬期走行環境の改善度合い、冬期道路の走行性やユーザー満足度の改善度合いの順で評価が可能になる。冬期道路の走行性の改善は旅行時間短縮や旅行時間信頼性の向上として評価することにより貨幣換算できる。こうした一連の評価方法を体系的に確立することにより、投じた費用に対するその効果（を踏まえた道路維持管理、換言すれば費用対効果を考慮した道路維持管理の実施が期待できる。

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、

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

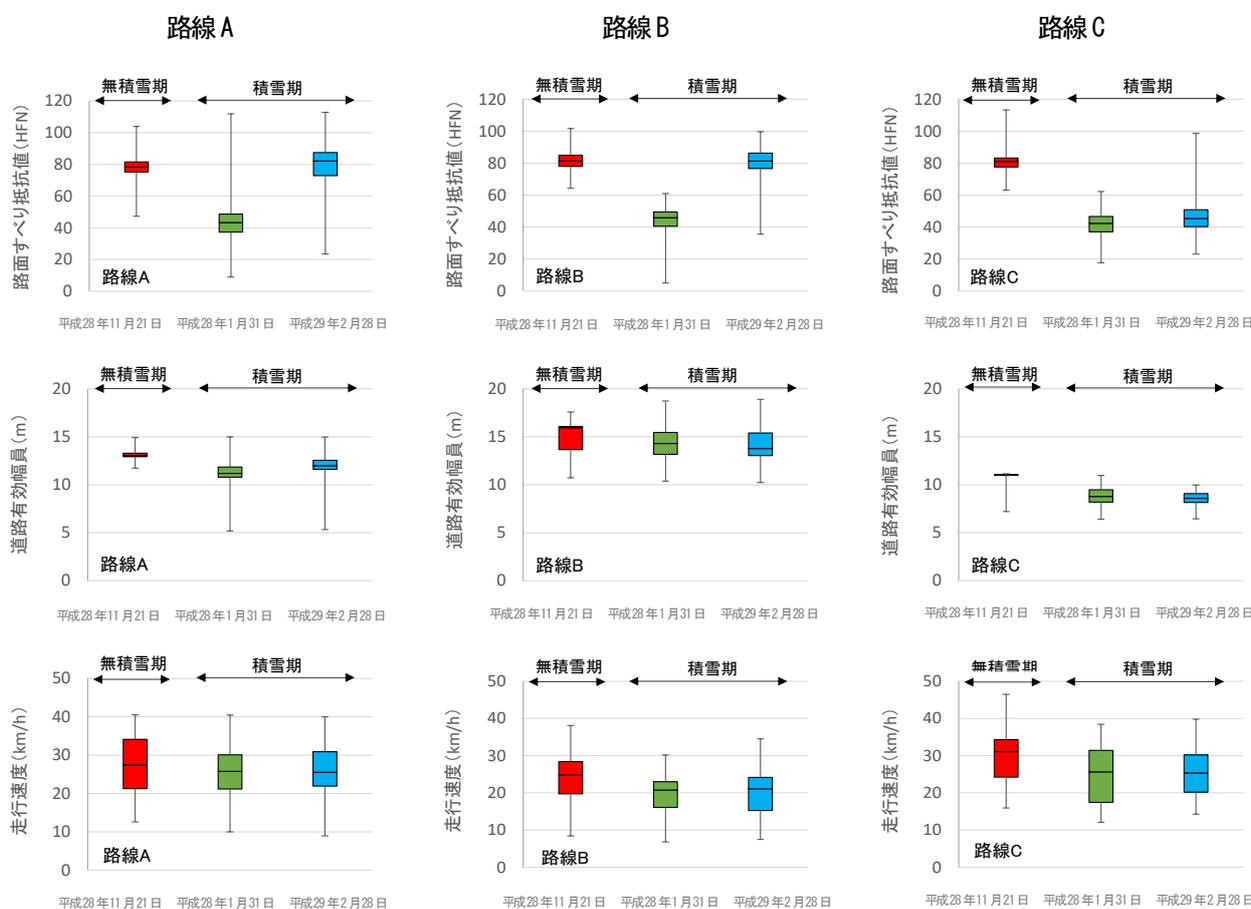


図 1 走行試験の結果 (上段：路面すべり抵抗値、中段：道路有効幅員、下段：走行速度)

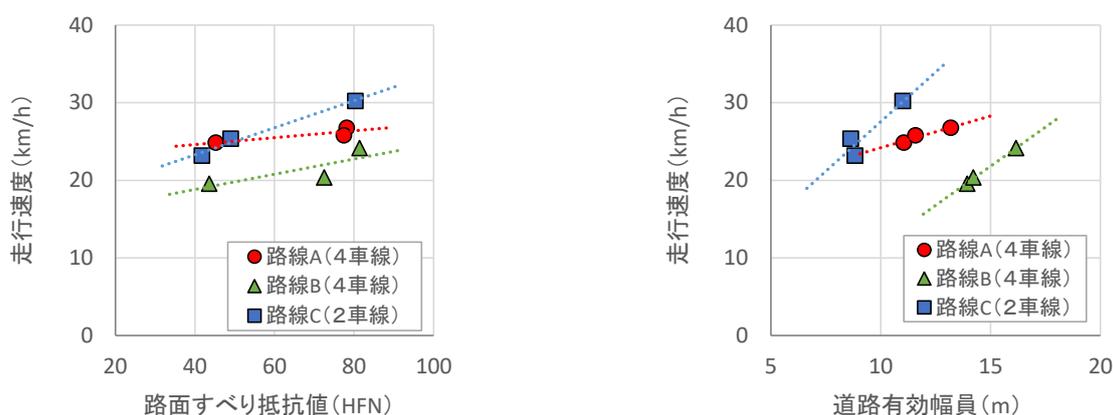


図2 冬期走行環境と走行速度の関係（左図：路面すべり抵抗値、右図：道路有効幅員）

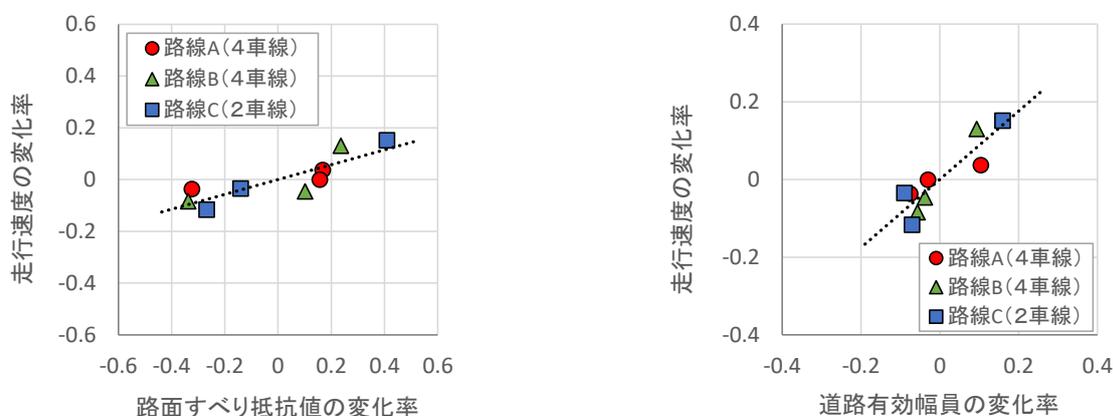


図3 冬期走行環境の変化率と走行速度の変化率との関係（左図：路面すべり抵抗値、右図：道路有効幅員）

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 1~2 m 程度、路線 C では 2~3 m 程度狭くなった。

最後に、走行速度については、無積雪期における走行速度の中央値は、路線 A、B および C でそれぞれ 28、25 および 31 km/h である。この相違は、交通量、車線数、信号の有無、路肩の広さなどが影響したと考えられる。積雪期における走行速度の中央値は無積雪期と比較していずれの路線も低い。積雪期の中で平成 29 年 1 月 31 日と平成 29 年 2 月 28 日を比較すると、路線 B において走行速度は前者が後者に比べて僅かだが小さい。前者は後者と比較して道路有効幅員に大差がないものの、路面すべり抵抗値が 40 程度低い。このように走行速度は冬期走行環境の悪化を受けて低下し、その低下度合は路面すべり抵抗値や道路有効幅員の変化によって異なる。

4. 走行速度、時間信頼性およびユーザー満足度の評価手法の構築

4. 1 冬期走行環境が走行性に及ぼす影響分析

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

図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割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

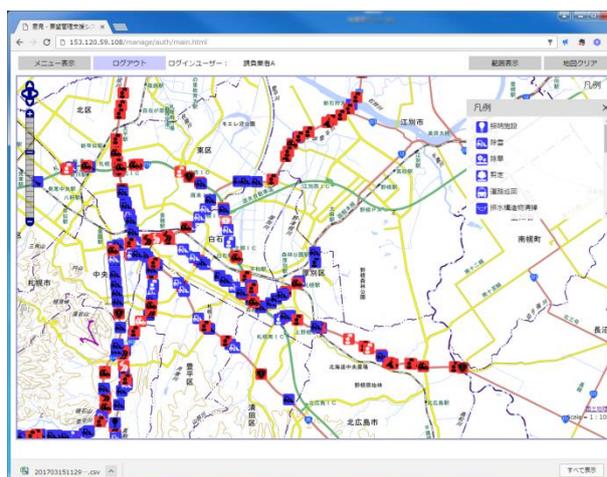


図4 道路利用者の意見要望の管理システムの表示例

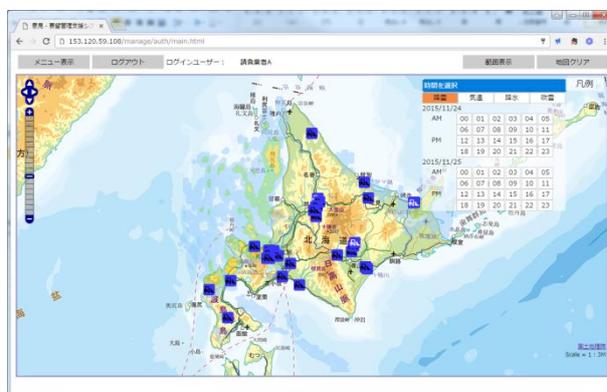


図5 道路利用者の意見要望のマップ化（気象条件との重ね合わせ）



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

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)。

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

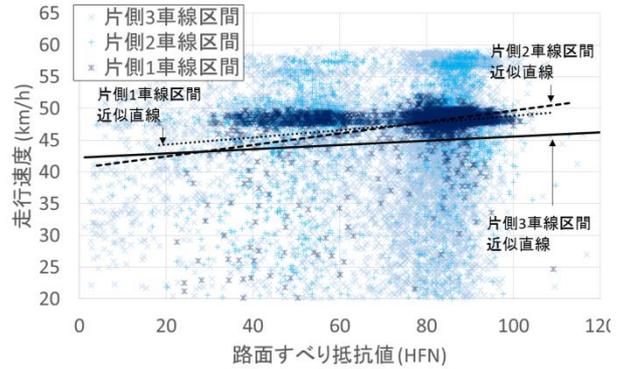


図7 一般国道231号における路面すべり抵抗値と走行速度の関係

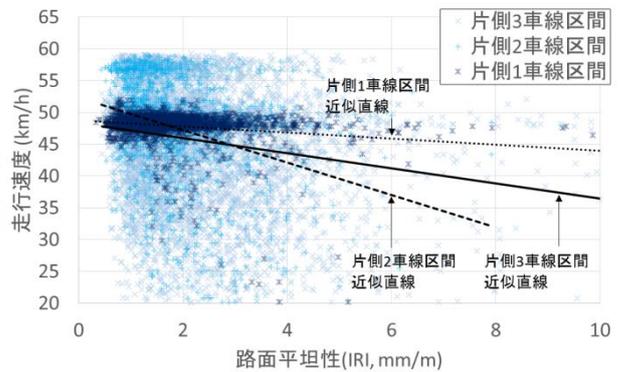


図8 一般国道231号における路面平坦性と走行速度の関係

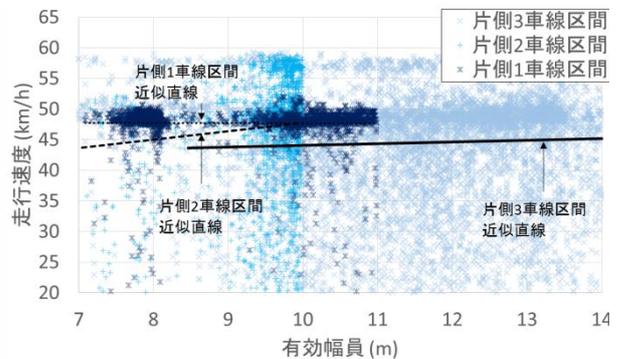


図9 一般国道231号における有効幅員と走行速度の関係

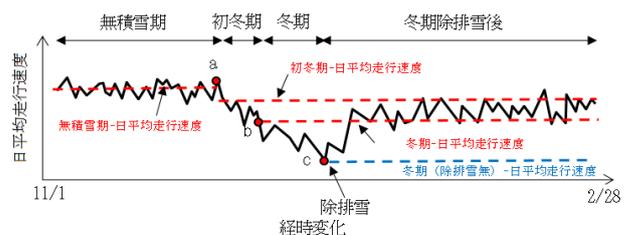


図10 日平均走行速度および積雪深の推移ならびに降雪経済損失・除排雪経済効果の評価概念図

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。

6. 降雪による経済損失および除排雪による経済効果の推定手法の構築

6.1 経済損失および経済効果の推定手法

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

図10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



図11 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)

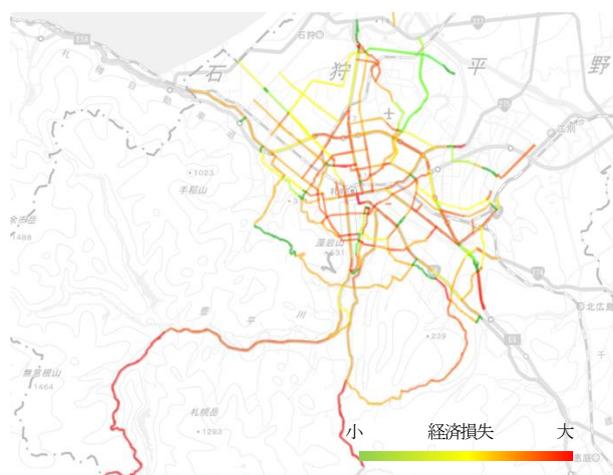


図12 降雪による経済損失の分布(平成25年度冬期)

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 11 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 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 12 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 パーセンタイル速度と 75 パーセンタ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 13 から図 15 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 16 から図 18 は計測区間における IRI と走行速度の関係を示す。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

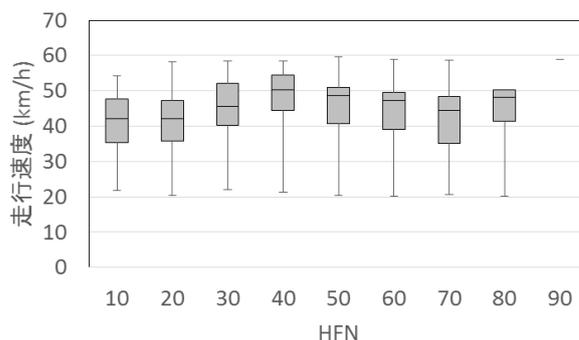


図 13 一般国道 231 号 KP0～KP11 (片側 3 車線区間) における路面すべり抵抗値と走行速度の関係

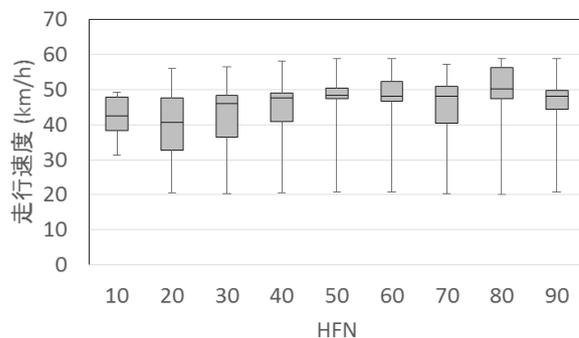


図 14 一般国道 231 号 KP11～KP15 (片側 2 車線区間) における路面すべり抵抗値と走行速度の関係

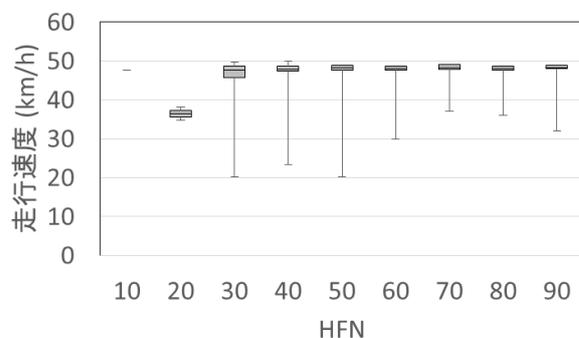


図 15 一般国道 231 号 KP15～KP19 (片側 1 車線区間) における路面すべり抵抗値と走行速度の関係

ることが明らかとなった。なお、本計測で得られたデータのうち、片側3車線区間ではIRIが8mm/m以上、片側2車線区間および片側1車線区間ではIRIが7mm/m以上のデータ数が少なくIRIと走行速度の関係を検証するには至らなかった。

図19から図21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. まとめ

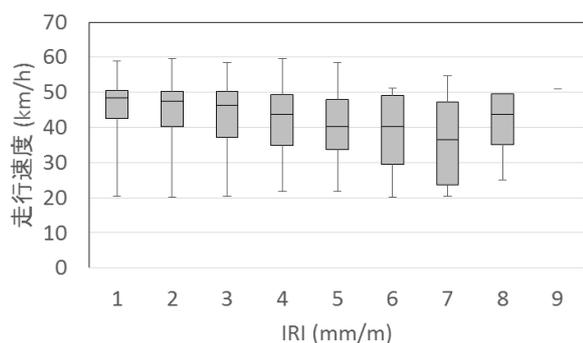


図16 一般国道231号KP0~KP11(片側3車線区間)における路面平坦性と走行速度の関係

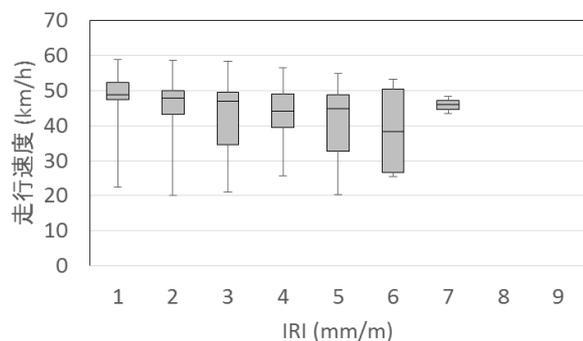


図17 一般国道231号KP11~KP15(片側2車線区間)における路面平坦性と走行速度の関係

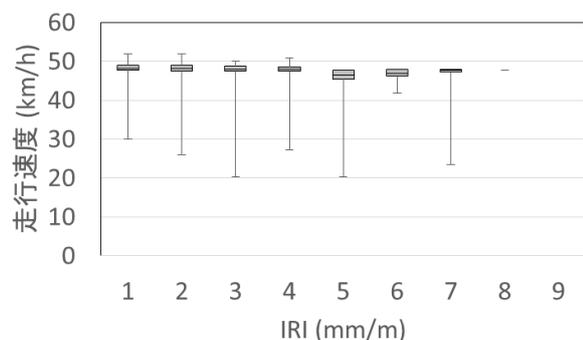


図18 一般国道231号KP15~KP19(片側1車線区間)における路面平坦性と走行速度の関係

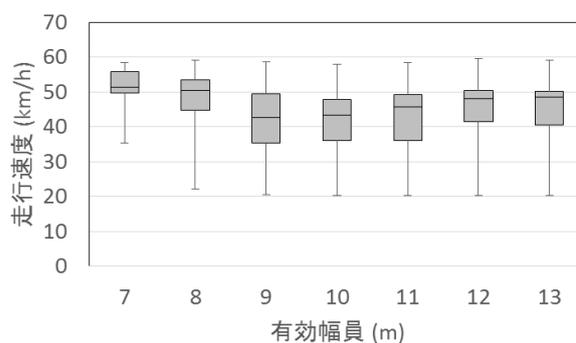


図19 一般国道231号KP0~KP11(片側3車線区間)における有効幅員と走行速度の関係

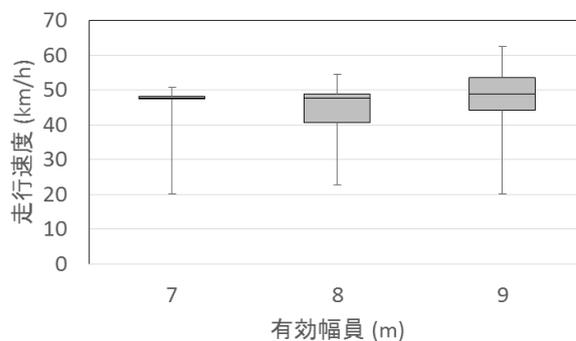


図20 一般国道231号KP11~KP15(片側2車線区間)における有効幅員と走行速度の関係

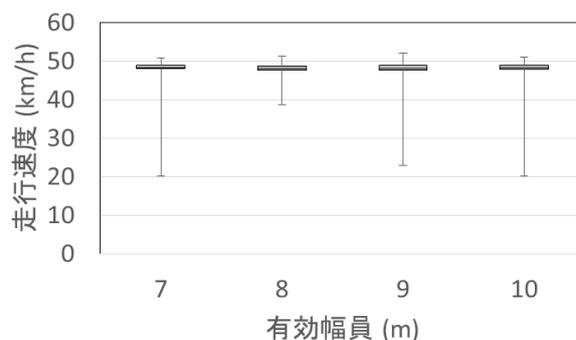


図21 一般国道231号KP15~KP19(片側1車線区間)における有効幅員と走行速度の関係

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。

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。

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 一交通事故統計からみる発生構造一、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、北海道開発技術研究発表会、Vol. 55、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、北海道開発技術研究発表会、Vol. 52、2009.2
- 9) 切石亮、徳永ロベルト、高橋尚人：冬期道路マネジメントシステムの試行運用について、北海道開発技術研究発表会、Vol. 55、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、牧野正敏、植野英睦、村上和也、佐藤信吾

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。

平成 30 年度は、冬期道路における路肩堆雪の形成状況と交通流の変動に関する実査、運搬排雪データを活用した排雪断面積と排雪速度の相関式の妥当性を確認した。さらに、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堆雪断面積を推計する式の適用性確認、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¹⁾、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削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、冬期道路における路肩堆雪の形成状況と交通流の変動に関する実査と、4 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、堆雪形状の実測値と気象データや除排雪回数などの分析結果から、堆雪断面

積予測式の適用性を確認した。

平成 30 年度は、交通量と速度の関係式を構築し、排雪断面積と排雪速度の相関について 5 ヶ年分の運搬排雪データで分析を行った。また、堆雪断面積予測式においては、分析実施地域を増やして適用性の確認を行った。さらに、堆雪断面積の予測から除排雪作業計画立案を支援するシステムについて、要件定義の整理を行った。

3. 路肩堆雪の形成と交通流に関する実測調査

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、過年度に取得した画像データを基に、画像処理システムを用いて路肩堆雪の形成と交通流に関する分析を行った。同システムには、車両追跡、カウント及び車両番号認識の機能が含まれており、背景減算方式のガウス混合モデル^{2)、3)}の改良版で

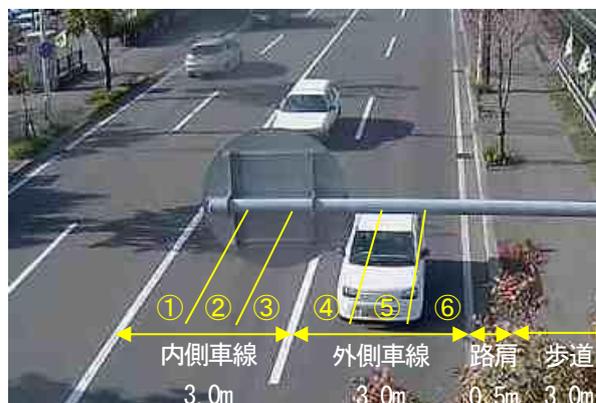


図-1 調査対象道路の横断面構成

ある。すなわち、移動物体の検出機能、追跡、背景色の違いに基づく認識機能を備えている。これらの機能に基づき、冬期に取得した画像から交通データを分析した。

3.2 調査結果

画像処理システムにより、以下の観点から冬期の交通流を分析した。

- 1) 走行車線中の車両の走行位置
 - ・ 走行位置①～⑥ (図-1)
- 2) 路肩堆雪の幅員別の車両走行速度
 - ・ 堆雪の幅員 : $W=0.5\text{ m} \cdot 1.0\text{ m} \cdot 1.5\text{ m} \cdot 2.0\text{ m} \cdot 2.5\text{ m}$
 - ・ 路面状態 : 雪氷路面

3) 車頭間隔

- ・ 前車と後車との車頭間隔

これらの分析結果は、図-2、図-3、図-4の通りである。これらから、堆雪の幅員が1.0m以上になると片側2車線の中央あたりを走行する車両が多くなり、実際上片側1車線の運用となってしまいう傾向が見られた。それとともに、速度はより低下し、車頭間隔もより大きくなる傾向が見られた。

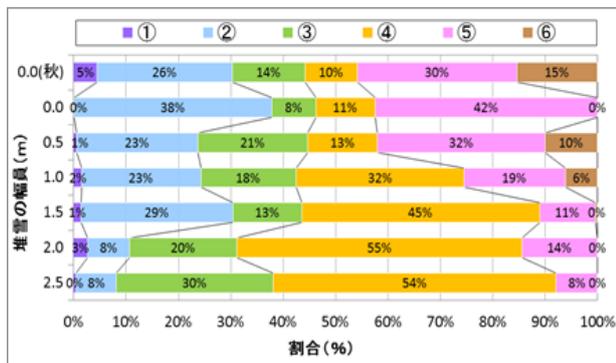


図-2 走行車線中の車両の走行位置

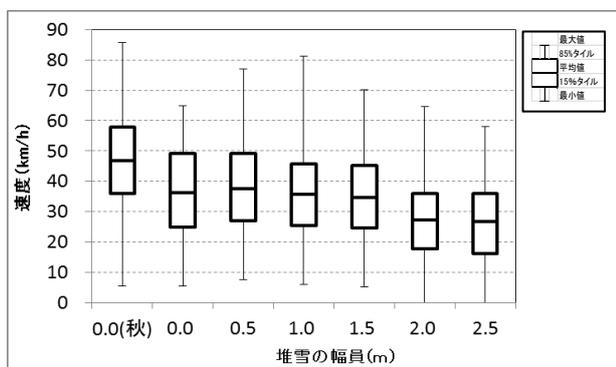


図-3 速度分布

また、路肩堆雪の幅員が変動するに従って (図-5)、交通量-速度 ($Q-V$) のデータについて分析した。 Q 、

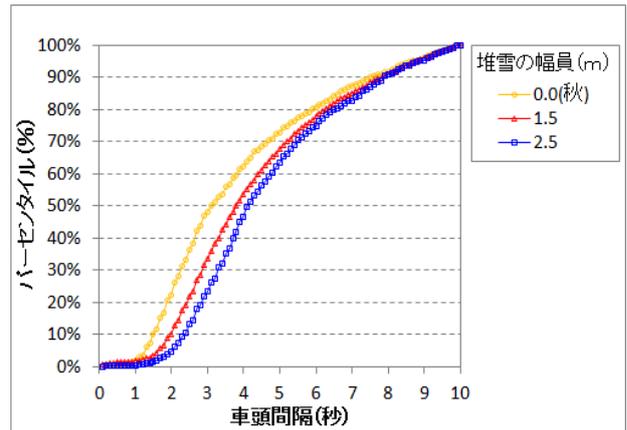


図-4 車頭間隔のパーセンタイル



12月23日
堆雪 2.5m
路面 : 圧雪

図-5 路肩堆雪状況 (堆雪の幅員 : 2.5m)

交通量、 K : 交通密度、 V : 速度は、次式により表される。

$$Q = KV \quad (1)$$

$$Q = aK^2 + bK \quad (2)$$

$$V = \frac{b}{2} \pm \sqrt{aQ + \frac{b^2}{4}} \quad (3)$$

ここで、 a, b : 定数

堆雪の幅員 $W=1.0\text{ m} \cdot 1.5\text{ m} \cdot 2.0\text{ m} \cdot 2.5\text{ m}$ の別に、交通量-速度 ($Q-V$) の性能曲線を式化すると、順に次の (4) ~ (7) のとおりとなる。同式を図示すると、図-6 のとおりである。すなわち、堆雪 2.5m では、堆雪 1.0m のときと比べて、 $Q-V$ 性能が 7 割程度まで低下している様子が分かった。

$$W=1.0\text{ m}, V = 24.1 \pm \sqrt{-0.695Q + 578.8} \quad (4)$$

$$W=1.5\text{ m}, V = 24.0 \pm \sqrt{-0.693Q + 575.0} \quad (5)$$

$$W=2.0\text{ m}, V = 21.8 \pm \sqrt{-0.733Q + 477.4} \quad (6)$$

$$W=2.5\text{ m}, V = 19.1 \pm \sqrt{-0.651Q + 366.1} \quad (7)$$

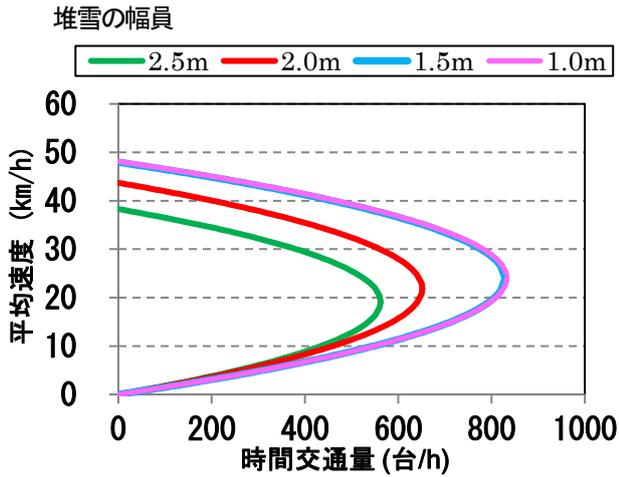


図-6 交通量—速度 (Q-V) 曲線
(堆雪の幅員別)

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、昨年度までに抽出した 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)。

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	

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-7)。

作成したグラフから移動や休息時間などの非稼働時間を判別し、排雪作業の開始・終了ポイントの時刻と距離標 (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

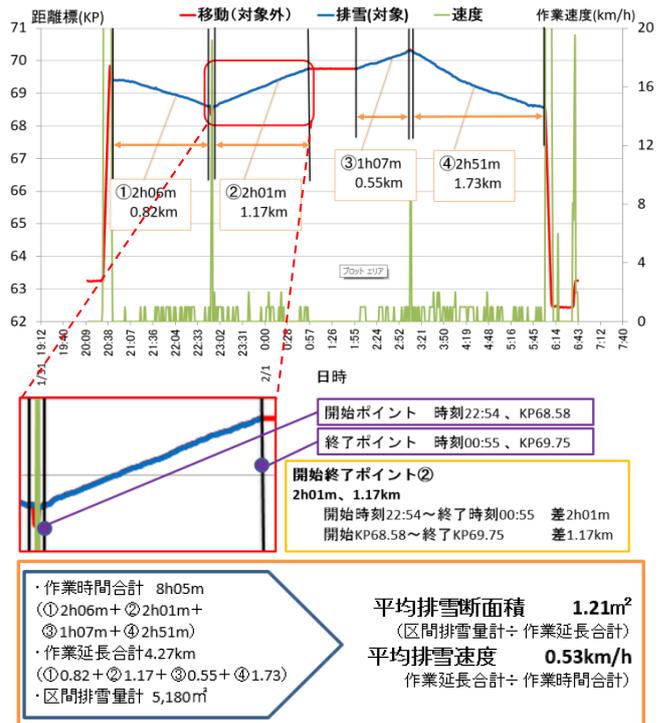


図-7 除雪車稼働グラフ例 (H29/1/31-2/1)

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

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。

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)。

表-3 相関検討手法

手法	
①	べき乗
②	対数
③	指数
④	ロジスティック
⑤	逆数
⑥	直線

※条件分類毎の全データを分析

条件分類																					
機械種別	全機種	一車線楕円形	2.2m級	2.6m級	2.2m級+2.6m級																
年度	H25	H26	H27	H28	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			
	幅	2	3	4	5	7	8	9	10	12	13	14	15	17	18	19	20	22	23	24	25
	幅	26				31				36				41				46			
	巻出	51				56				61				66				71			
巻出	52	53	54	55	57	58	59	60	62	63	64	65	67	68	69	70	72	73	74	75	

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

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-9、表-6)。

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、昨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-8、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。

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。

表-5 相関検討の条件分類(90パターン)

条件分類																										
機械種別	全機種	一車線楕円形	2.2m級	2.6m級	2.2m級+2.6m級																					
年度	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				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
	幅	31				37				43				49				55								
	巻出	61				67				73				79				85								
巻出	62	63	64	65	66	68	69	70	71	72	74	75	76	77	78	80	81	82	83	84	86	87	88	89	90	

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

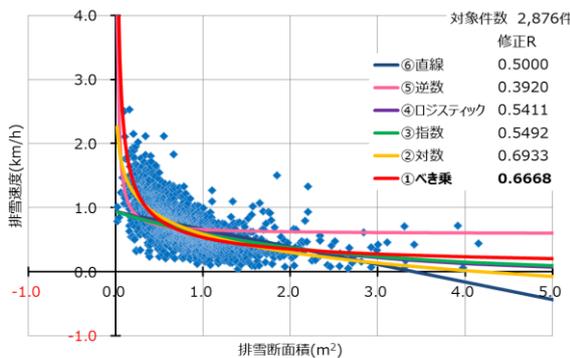


図-8 分析事例:相関検討手法①~⑥条件分類1(4ヶ年分)

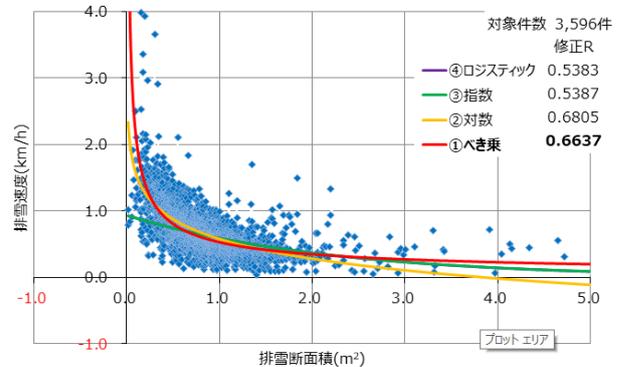


図-9 分析事例:相関検討手法①~④条件分類1(5ヶ年分)

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-10）。

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		
			件数	割合	
0.7 ~ 1.0	高	高い相関がある 80件	13	16%	91%
0.5 ~ 0.7	中	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	低	ある程度の相関がある	1	4%	
0.2 ~ 0.3		弱い相関がある	2		
0.0 ~ 0.2		ほとんど相関がない	0		

※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)を削いた80件で算出

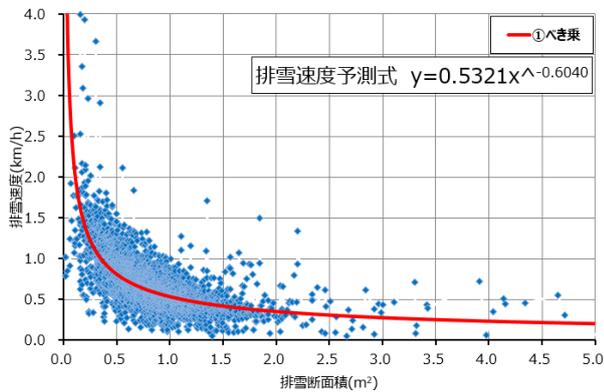


図-10 相関検討手法①べき乗、条件分類1

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-11に現地計測状況、表-8に重回帰分析内容を示す。



図-11 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)	-
	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）。

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(°C)	妥当性あり(マイナスに作用)	平均気温が0°Cを超えると雪が融け、堆雪断面積が小さくなると推定できるため
m. 平均湿度(%)	候補から除外	有意性検定では関係性があると判定されたが、明確な作用が判定できないため
n. 平均風速(m/s)	妥当性あり(マイナスに作用)	風速が強くなると雪が融けやすくなり、堆雪断面積が小さくなると推定できるため
o. 日照時間(h)	妥当性あり(マイナスに作用)	日照時間が多くなると雪が融け、堆雪断面積が小さくなると推定できるため

4.2.3 推計結果

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)。

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-12 及び図-13 に示す。

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

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-12 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-13 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）

また、計測日毎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-14）及び車道部堆雪断面積（図-15）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。

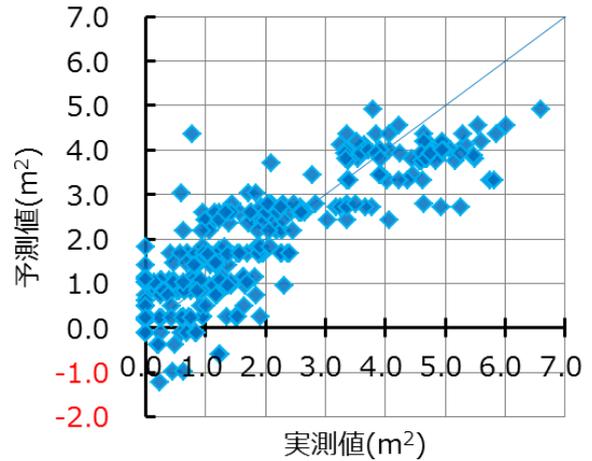


図-14 予測値の精度確認（堆雪全断面積）

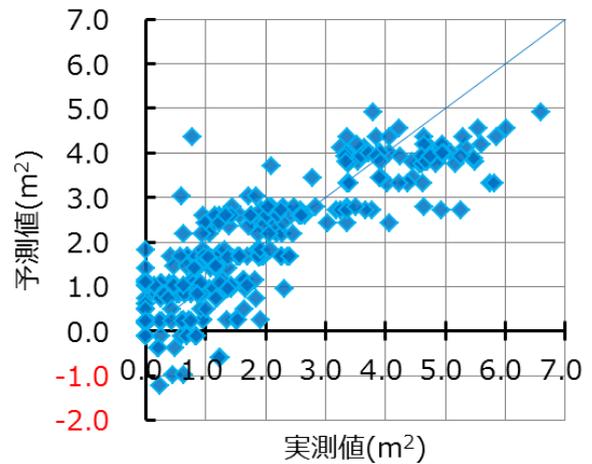


図-15 予測値の精度確認（車道部堆雪断面積）

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-16～18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、旭川については、大きな乖離があった。今後、気象条件の差など地域性等に着目し、原因を追及するとともに予測式を見直していきたい。

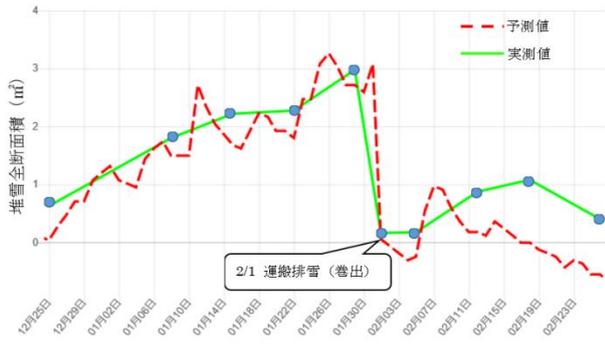


図-16 予測値（堆雪全断面積）と実測値による推移
(H30 札幌 R274 下り KP12~13)

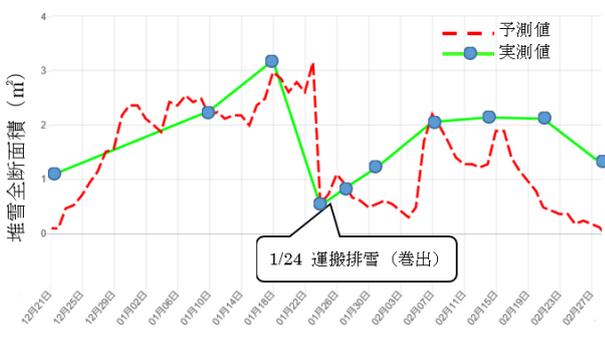


図-17 予測値（堆雪全断面積）と実測値による推移
(H30 小樽 R5 上り KP246~247)

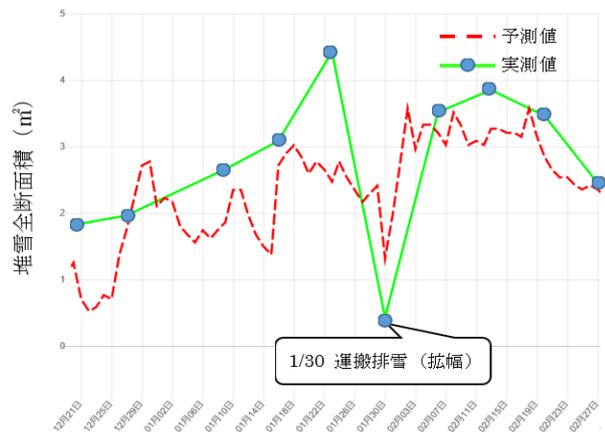


図-18 予測値（堆雪全断面積）と実測値による推移
(H30 旭川 R39 下り KP=9~10)

5. 路肩堆雪が通行車両の視認性に与える支障度合い調査

5.1 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。

5.1.1 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み行った。

5.1.2 堆雪

走行実験で用いる模擬堆雪は7箇所（図-19）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-20）。



図-19 堆雪位置及び走行コース



図-20 堆雪の影響に関する実験状況

5.1.3 走行条件

被験者は実験車両（トヨタ カローラフィールダー）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-19）。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。

5.1.4 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。

5.1.5 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-21）。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。

Q: 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.	1	2	3	4	5	6	7
堆雪①	1.5m							
堆雪②	1.5m							
堆雪③	1.5m							
堆雪④	1.5m							
堆雪⑤	1.5m							
堆雪⑥	1.5m							
堆雪⑦	1.5m							

支障にならない 支障になる

図-21 堆雪の支障度合いアンケート表

5.1.6 主観評価の結果

主観評価の結果（図-22）、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。

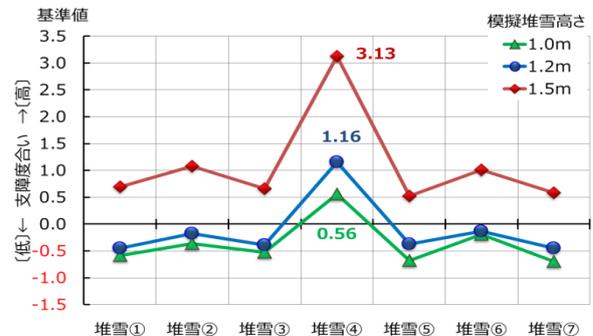


図-22 主観評価の結果

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。

6. 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、平成30年度は、表-11の「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。

6.1 要件定義

図-23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。

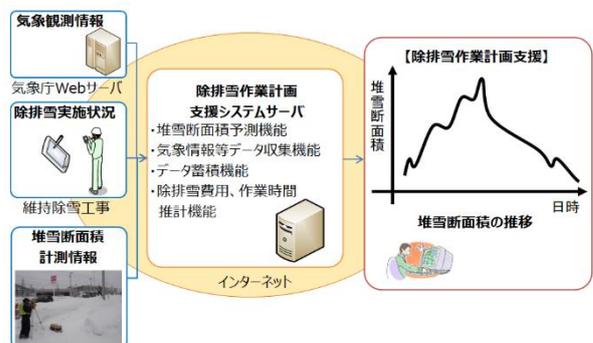


図-23 「支援システム」イメージ図

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-10 の排雪速度予測式を使用する。

6.2 概略処理フロー

図-24 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。

今後、検証用システムを作成し、動作確認やユーザーの使用感を含めた課題の抽出を行う予定である。

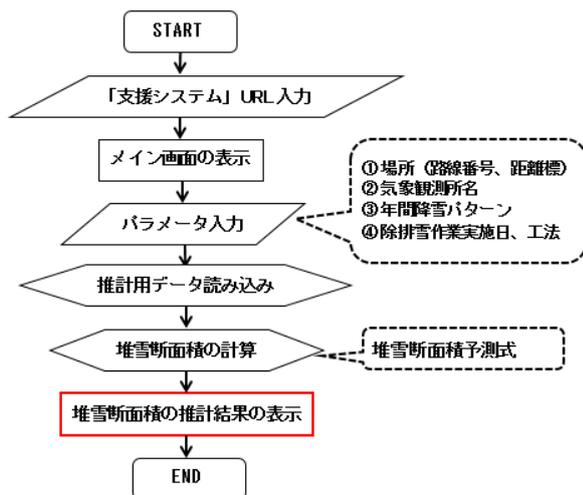


図-24 「支援システム」概略処理フロー

7. まとめ

平成 30 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、冬期交通流の実査を行った。路肩堆雪生成時における堆雪の幅員が 1.0m から 2.5m の範囲における、交通量-速度 (Q-V) 性能についてデータ取得し、数式化した。
- ・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。
- ・路肩堆雪の形成傾向把握を行うため、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た。また、札幌以外での適用性を確認するため堆雪断面積の予測式と実測値を比較した結果、札幌及び小樽では概ね同様の傾向を示した。しかし、旭川については、大きな乖離があった。

- ・路肩堆雪がドライバーの視認性に与える支障度合いの主観評価より、交差点内の堆雪の高さはドライバーの目線高さより低い 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」の要件定義と概略処理フローの整理を行った。

今後、冬期堆雪幅の変動、夏期の道路横断面の利用に関する基礎データ取得を継続し、効率的な道路横断面の利用を検討するほか、排雪速度予測式と路肩堆雪断面積予測式の精度向上、「支援システム」構築に向けた課題の抽出を行う予定である。

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～
http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/yukimichi/Pdf/20130515_teigen.pdf, 2013.5 , p.6 , p.9
- 2) P.KaewTraKulPong, R.Bowden : An Improved Adaptive Background Mixture Model for Real-time Tracking with Shadow Detection, Proceedings for 2nd European Workshop on Advanced Video Based Surveillance Systems, Sept. 2001.
- 3) Zoran Zivkovic : Improved Adaptive Gaussian Mixture Model for Background Subtraction, Proceedings of International Conference on Pattern Recognition, 2004.

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、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。そのため、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。

キーワード：冬期路面管理、凍結防止剤、オペレータ、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⁾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。

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・単純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、被験者の主観的な評価を数値化する。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を調べた。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。当該試験道路は、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車線の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



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

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。また、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(全地球航行法衛星システム)を搭載する記録装置に10Hzで記録収集した。

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

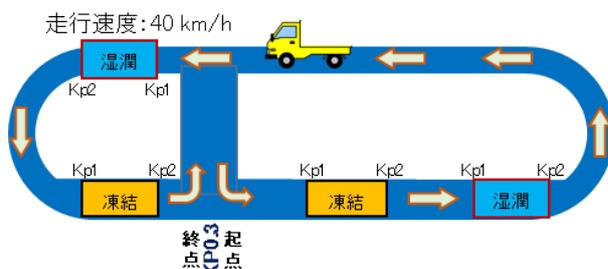
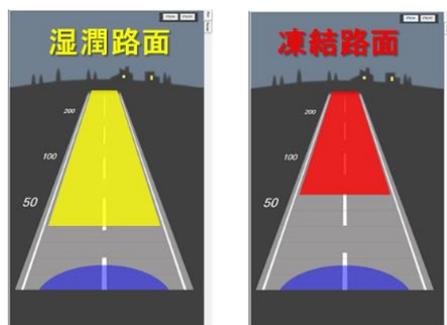


図-2 実験コース概略と凍結・湿潤路面のレイアウト例

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・



<路面状態の表示色>
 ■ 湿潤 ■ 凍結

<路面状態別警告音>
 湿潤: (200m前)ブ・・・(100m前)ブブッ(50m前)ブブブ(0m前)ブー
 凍結: (200m前)ピ・・・(100m前)ピッピ(50m前)ピピピ(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

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 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。

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。

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

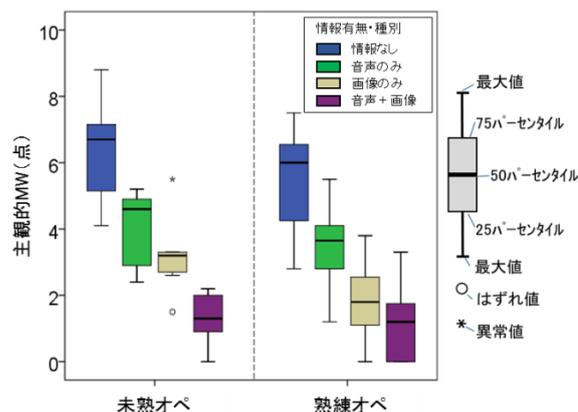


図-4 熟練度別および情報有無・種別主観的 MW

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。

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 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

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 (Kp1) に対し、被験者が電源ボタンを操作した地点までの距離を示すものである。

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

以上の結果から、情報提供によって未熟・熟練オペ両者がより手前で散布すべき区間を認知できるようになり、熟練度に関わらず散布判断・操作のための時間的余裕ができたと言える。また、情報提供方法としては音声と画像を組み合わせて提供す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。

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、

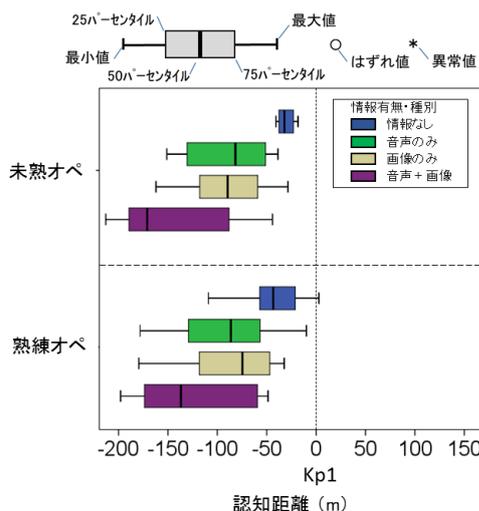


図-5 熟練度別および情報有無・種別認知距離

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

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

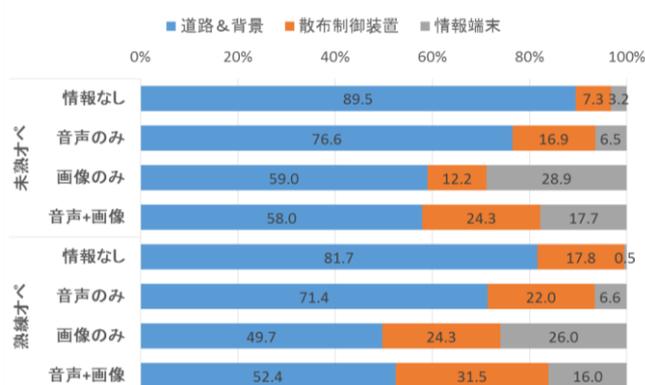


図-6 認知区間における熟練度別および情報有無・種別によるオペの注視率

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。



写真-4 実験に用いた試験車両

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



写真-5 被験者による各機器の確認状況

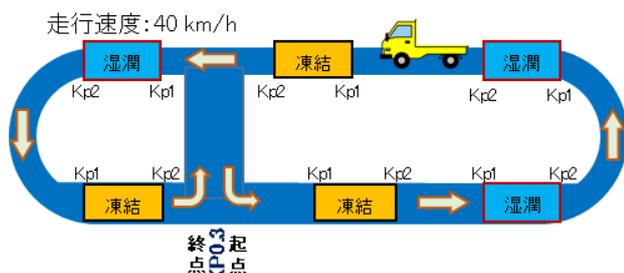


図-7 実験コース概略と凍結・湿潤路面のレイアウト例

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回りで周回路を約 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、音操および自散を凍結防止剤散布制御装置に追加した（写真-6）。

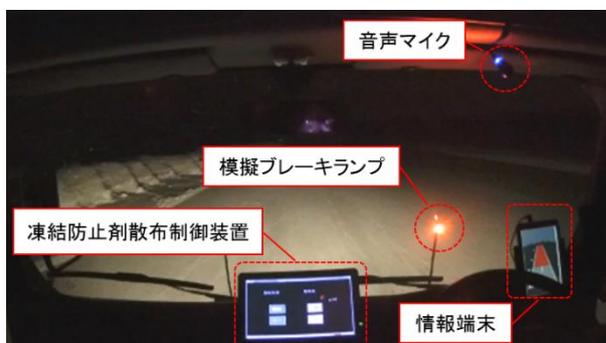


写真-6 試験車両内に設置した各種機器

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観察しながら運転し、前方に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。

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 の評価は一試験条件終了毎に被験者待合室にて行った。以上の手順に従った全実験は、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 が情報のみの時より更に低下した。最後に、散布作業支援が情報+音操+自散では、オペの主観的 MW は 1.2 点となり、散布作業支援の有無・種別の中で最も低下した。その理由として、オペは運転中に散布作業（認知・判断・操作）を行う必要が一切なく、車両の運転のみを行ったためと考える。

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

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

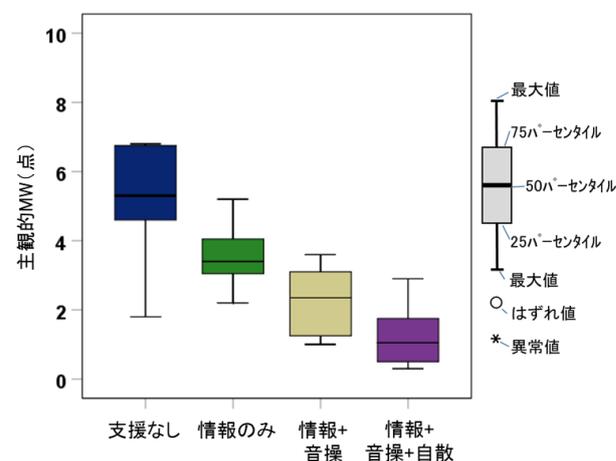


図 8 散布作業支援有無・種別による主観的 MW

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

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

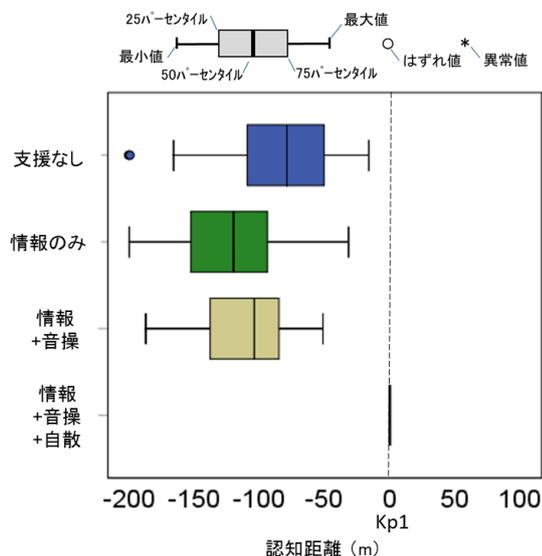


図-9 散布作業支援の有無・種別による認知距離

結路面区間の起点 (Kp1) 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、Kp1 地点において電源・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、情報のみの的中率は88%であった。更に、情報+音操の的中率は

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%

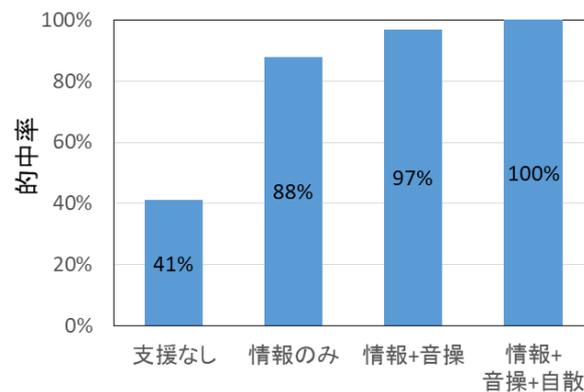


図-10 散布作業支援の有無・種別による判断的中率

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他、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し

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

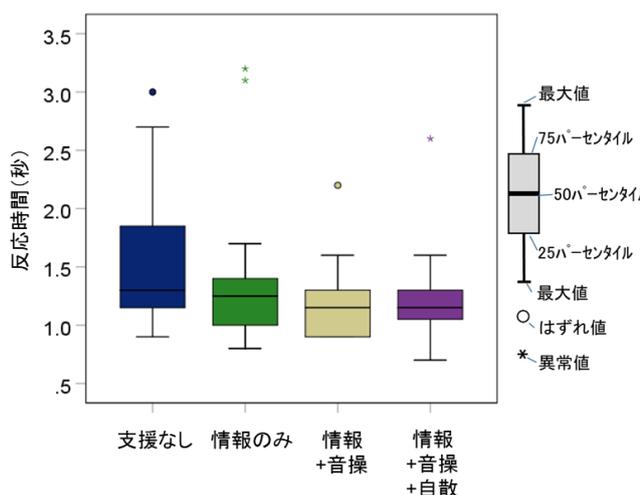


図-11 散布作業支援の有無・種別による反応時間

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い。

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

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

制御装置・情報端末の注視率はそれぞれが9.0%および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、其々が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へ移動・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

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）でも適格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の設計および構築に取り組んだ。また、当該システムを用いた現道での予備実験を実施し、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（図-13）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

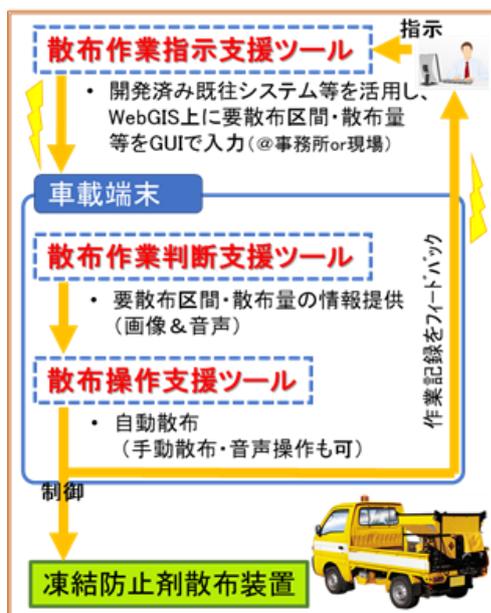


図-13 設計・構築した支援システムの概念図

携できるようにした。指示ツールは、当研究所で所有・試行運用している既往の冬期道路マネジメントシステム内に組み込み、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。

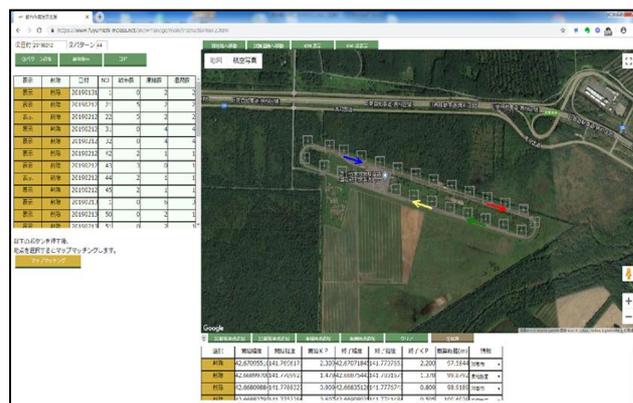


図-14 指示ツールの画面

- ・ 当研究所が所有する既往の冬期道路マネジメントシステムと連携させ、当該システムが提供する冬期の路面状態予測情報（気象メッシュデータ、路面温度予測データ、凍結リスク予測データ等）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こと
- ・ 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に送信できること
- ・ 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こと
- ・ 既往の冬期道路マネジメントシステムと同様の開発言語（Java Script等）およびWebGIS（国土地理院や民間が提供する背景地図）を使用すること
- ・ 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・管理すること

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



写真-7 車載タブレットPC

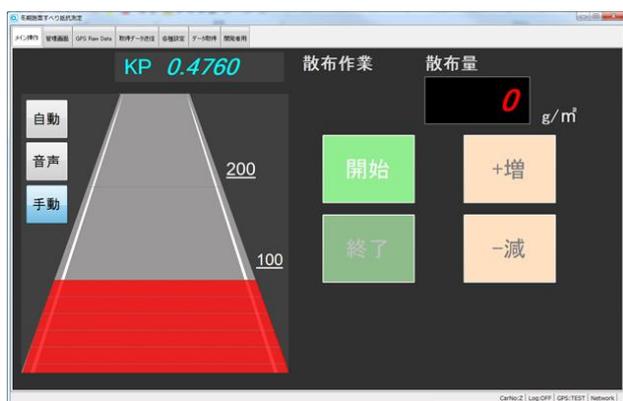


図-15 判断ツール (左)・操作ツール (右) の表示画面

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。

- ・ 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)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こと
- ・ 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有すること
- ・ 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音声(ビープ音)でその存在を知らせ、散布作業の判断を促すこと(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、併せてビープ音の間隔が短くなること
- ・ 要散布区間の起点を通過次第、ビ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ること
- ・ 要散布区間通過を終えると画像およびビープ音が消えること

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・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備えるようにした。

- ・ 当該ツールは、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)が可能であること
- ・ 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上で散布作業状況を確認できること
- ・ 車載タブレットPCから、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すること

5.1.4 操作ツールと凍結防止剤散布装置の連結

本研究には、市販の車載式凍結防止剤散布装置(繁多機械株式会社製、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)。



写真-8 車載式凍結防止剤散布装置

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、操作ツールからの信号を変換してモジュールが内蔵するリ

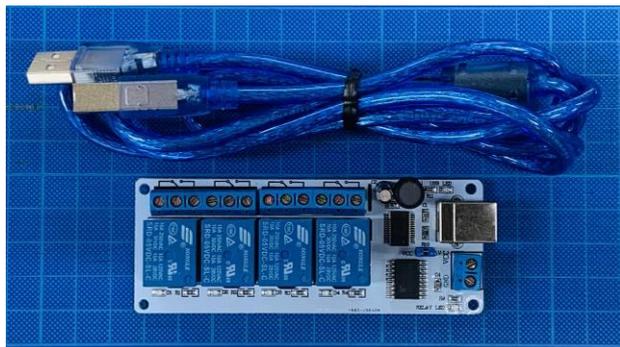


写真9 使用した継電器モジュール

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。

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、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上し、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



図-16 一般国道235号

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

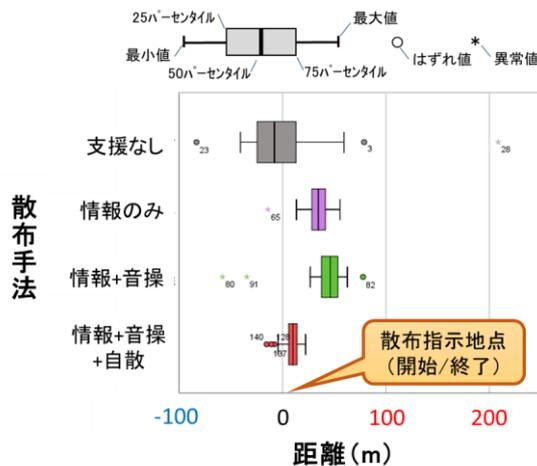


図-17 散布作業支援の有無・種別による距離差

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、距離差のばらつき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、散布作業支援が行われた時に生じた傾向的な遅れについては、GNSS またはアプリケーションの反応遅れから生じたものであると推察でき、今後これらの応答性改善を図れば反応遅れは解消可能であると考えられる。

6. 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（反応遅れ）について更なる検討が必要であることも分かった。

以上の結果を踏まえ、今後は散布作業支援システムの改良を検討するとともに、当該システムを用いた被験者実験を引き続き実道において実施し、オペの心理状態や挙動への影響を考慮し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の確立に取り組む所存である。

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、
http://www.hkd.mlit.go.jp/zigyoka/z_doro/jyosetsu/pdf/jyosetsutaisai.pdf、平成 28 年 11 月
- 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>
- 3) Salt Institute: The Snowfighter's Handbook - A Practical Guide for Snow and Ice Control,
http://www.saltinstitute.org/wp-content/uploads/2013/07/Snowfighters_HB_2012.pdf, 2013
- 4) Minnesota Local Road Research Board: Minnesota Snow and Ice Control – Field Handbook for Snowplow Operators, Second Edition,
<http://www.mnltap.umn.edu/publications/handbooks/documents/snowice.pdf>, October 2012
- 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,
http://clearroads.org/wp-content/uploads/dlm_uploads/11-03-Totally-automated-spreader_final_report.pdf, February 2014
- 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、神代：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,
https://www.rug.nl/research/portal/files/13410300/09_thesis.pdf,
June 1996
- 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

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、牧野正敏、植野英睦、伊藤義和、幸田勝

【要旨】

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

本研究では、冬期の円滑な道路交通の確保に必要な道路除雪体制を維持するため、除雪機械の効果的かつ効率的な維持管理手法の提案に取り組んでいる。平成30年度は、FTA（故障の木解析）で抽出した除雪作業停止日数2日以上（以下、「重大故障」という。）箇所について、除雪作業停止日数2日未満（以下、「全故障」という。）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比較した。また、国土交通省北海道開発局の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。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。

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。

平成30年度は、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、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。

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、平成29年度の検討で使用したデータと同様で、以下のとおりである。

- ・開発局：平成19～27年度の故障データ約4,900件。
- ・国土交通省東北及び北陸地方整備局（以下、「東北及び北陸地整」という。）：平成23～27年度の故障データ約5,400件。

このうち平成30年度は、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。

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

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。

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。

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

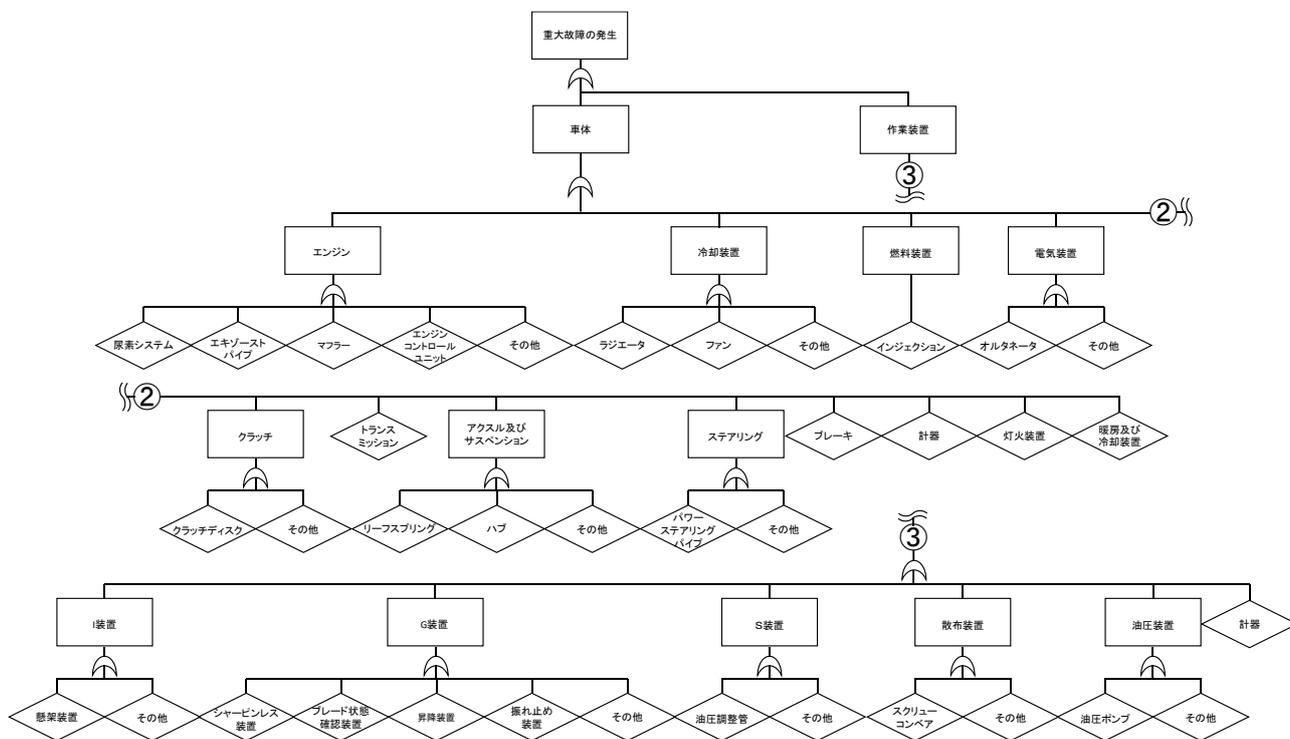


図-1 除雪トラック FT 図

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。

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

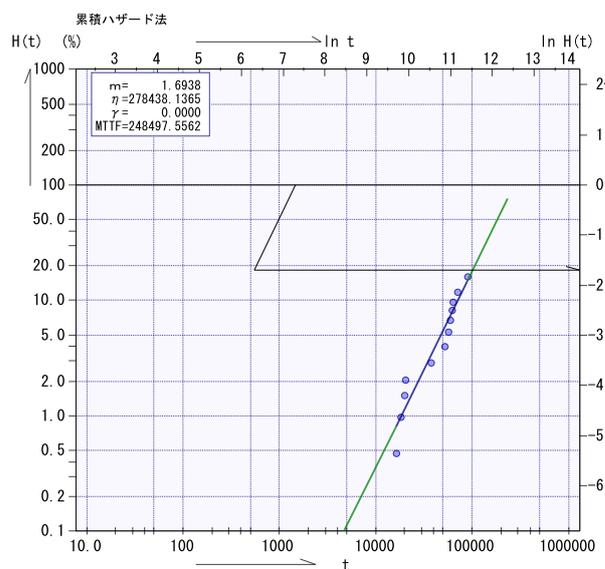


図-2 重大故障解析結果
【エンジン：尿素システム】

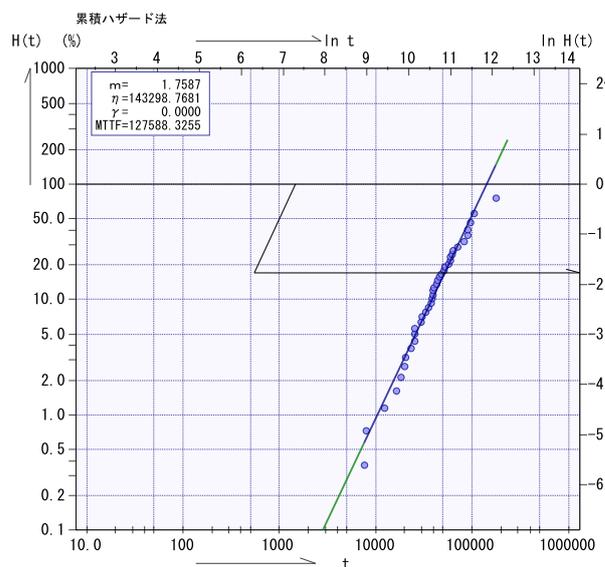


図-3 全故障解析結果
【エンジン：尿素システム】

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。

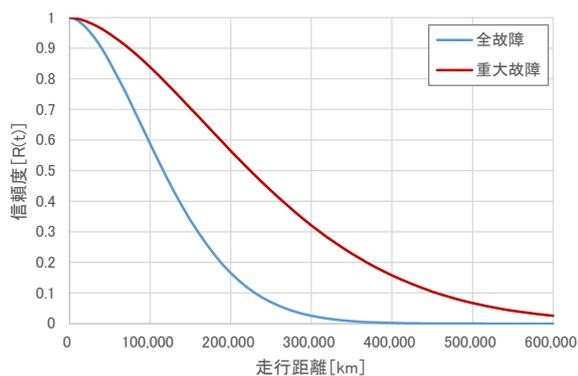


図-4 信頼度曲線図
【エンジン：尿素システム】

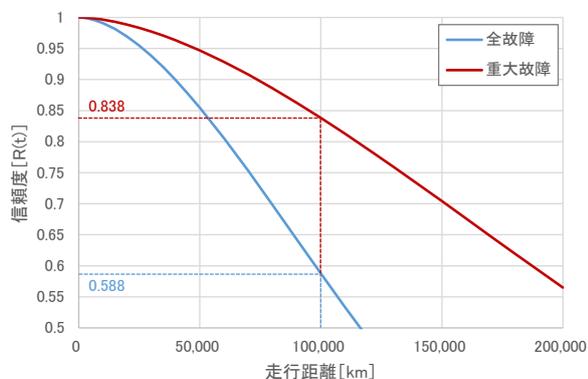


図-5 信頼度曲線図 (拡大図)
【エンジン：尿素システム】

次に、【冷却装置：ファン】における重大故障及び全故障データの解析結果を図-6、7 に示す。

重大故障、全故障ともにm形状パラメータが 3.4309、3.2818 と 1 以上であることから、摩耗劣化故障を示している。

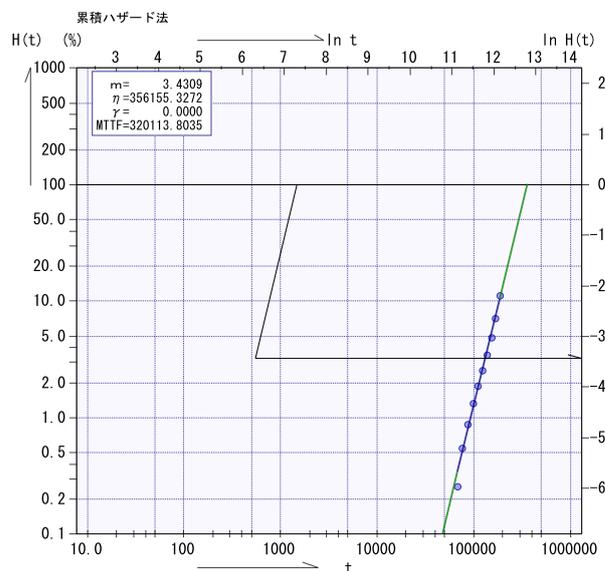


図-6 重大故障解析結果
【冷却装置：ファン】

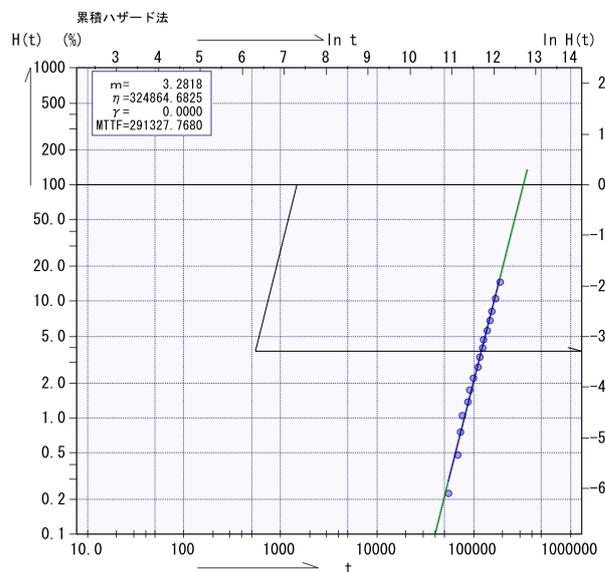


図-7 全故障解析結果
【冷却装置：ファン】

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、低下する割合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がやすい傾向といえる。

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。

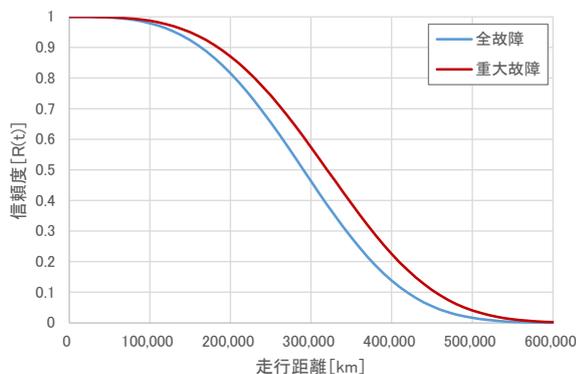


図-8 信頼度曲線図
【冷却装置：ファン】

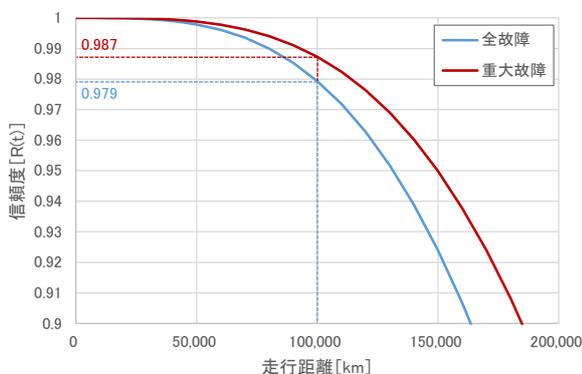


図-9 信頼度曲線図 (拡大図)
【冷却装置：ファン】

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。

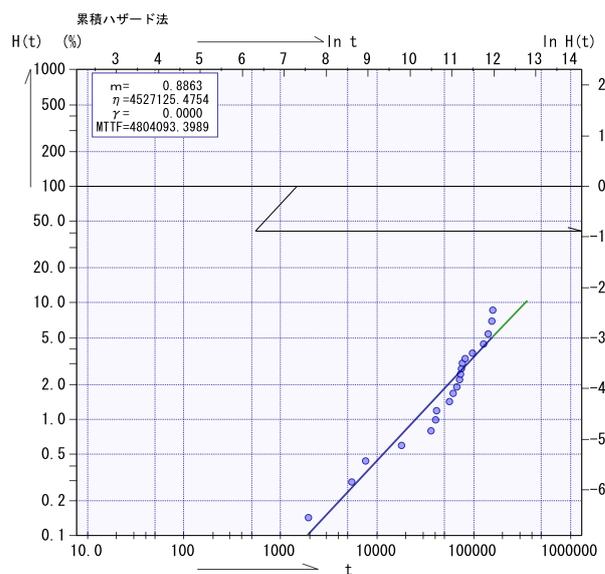


図-10 重大故障解析結果
【燃料装置：インジェクション】

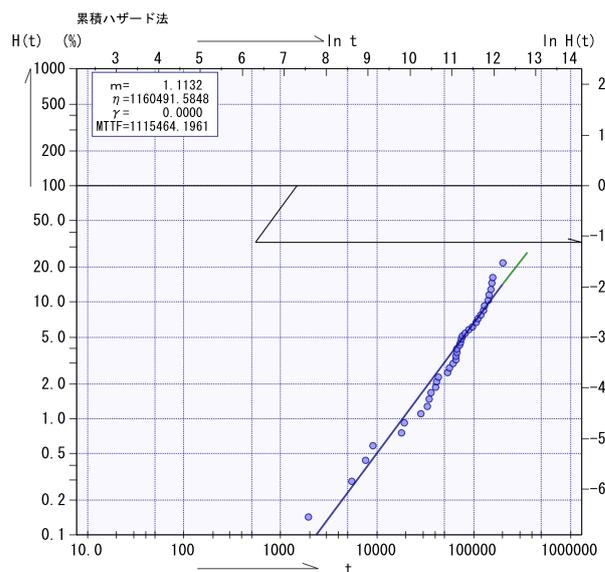


図-11 全故障解析結果
【燃料装置：インジェクション】

図-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。

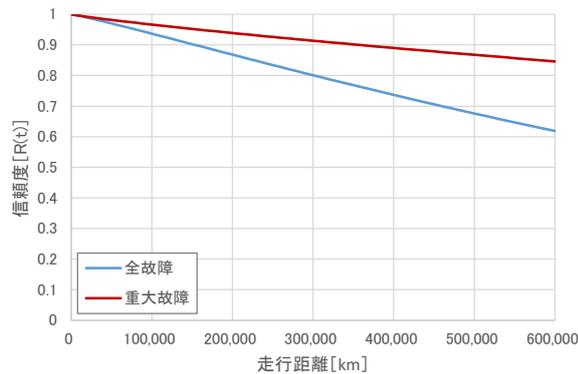


図-12 信頼度曲線図
【燃料装置：インジェクション】

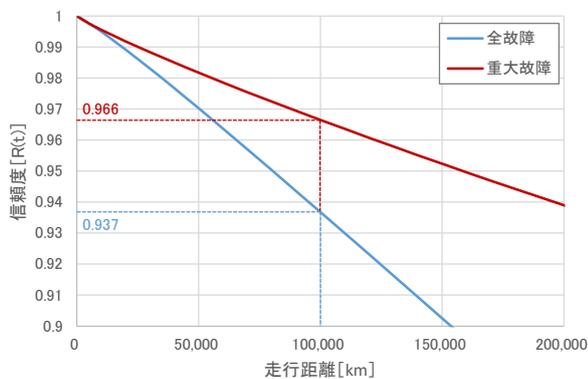


図-13 信頼度曲線図 (拡大図)
【燃料装置：インジェクション】

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

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

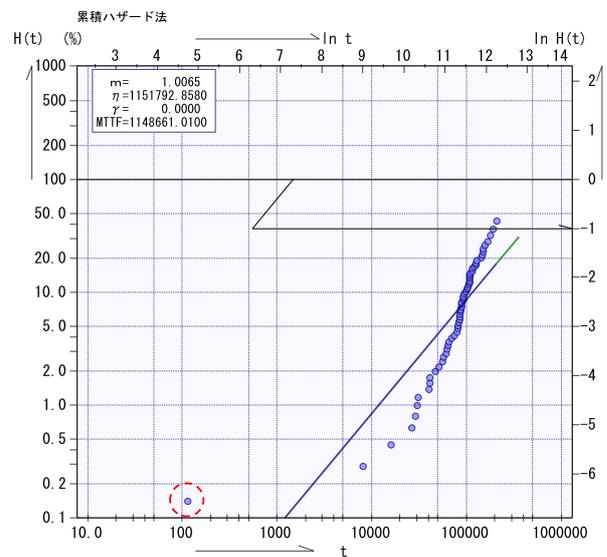


図-14 全故障解析結果 (走行距離)
【作業装置：計器】

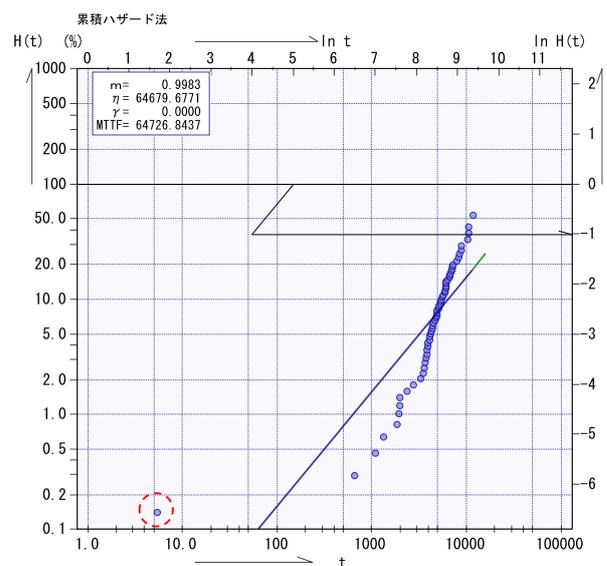


図-15 計器 全故障解析結果 (稼働時間)
【作業装置：計器】

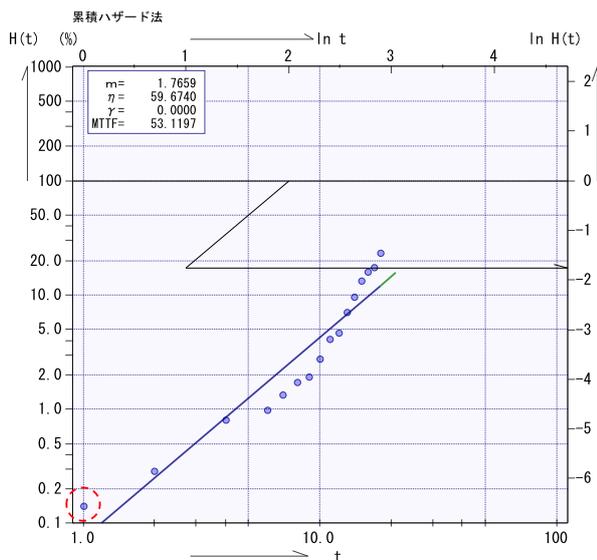


図-16 全故障解析結果（使用年数）
【作業装置：計器】

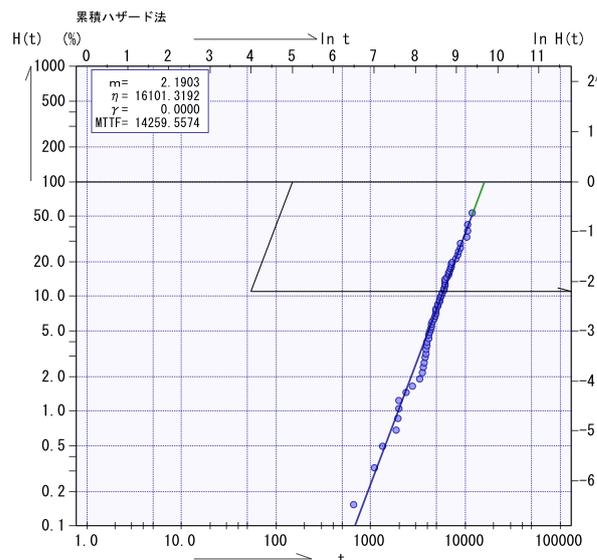


図-18 全故障再解析結果（稼働時間）
【作業装置：計器】

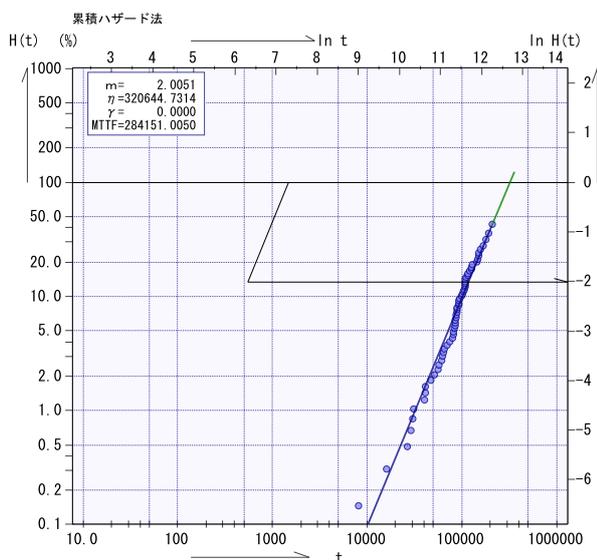


図-17 計器 全故障再解析結果（走行距離）
【作業装置：計器】

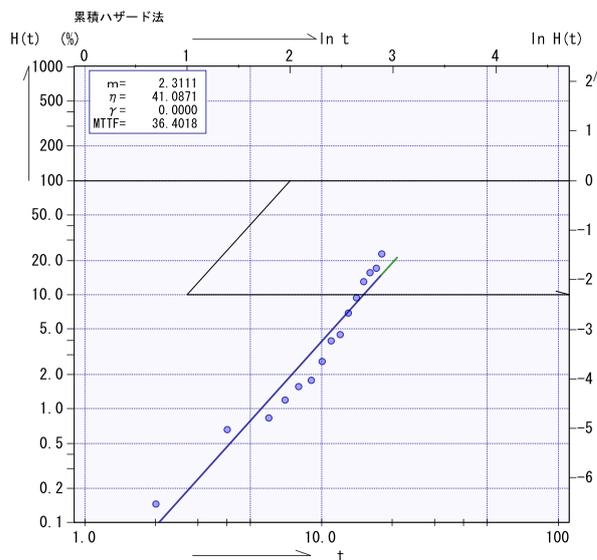


図-19 全故障再解析結果（使用年数）
【作業装置：計器】

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ことがあるため、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。



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

図-20 信頼性ブロック図

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

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

よって、除雪トラック本体の信頼度を算出する際は、重大故障箇所が37箇所あるため、 $n=37$ となる。

ただし、重大故障箇所のうち、【エンジン：尿素システ

ム】、【S装置：油圧調整管及びその他】、【散布装置：スクリ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。

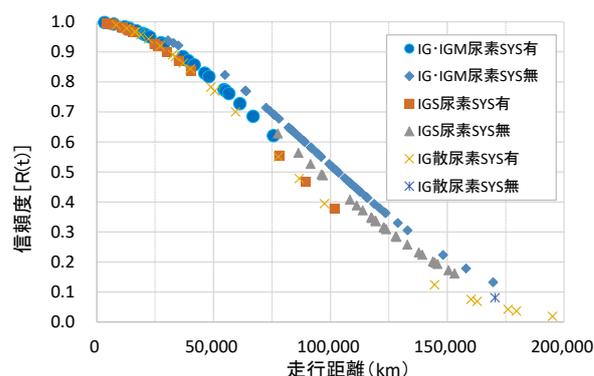


図-21 除雪トラック本体の信頼度算出結果

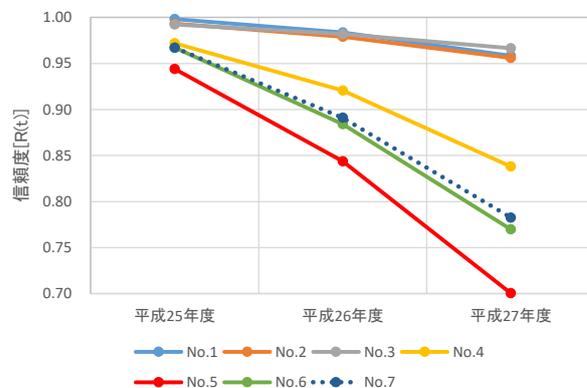


図-22 3年間の走行距離による本体の信頼度比較結果

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ですが、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。

4. 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。

4.1 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-4 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

表-4 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	A	A	B	C
		A	B	C	D
		B	C	D	E
	低	C	D	E	E

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-5、6 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-7 に示す区分表で配点した。

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-8 に示す。

表-5 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-6 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-7 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-8 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

4. 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。

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-9に示す。

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-10のように設定した。

表-9 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	重大故障件数 (件/箇所)		
								開発建設部 (10箇所)	事務所 (34箇所)	除雪ST (147箇所)
平均配置台数	508	99	87	146	120	84	1,039			
信頼度	重大故障件数 (件)									
0.99	5	1	1	1	1	1	10	1.0	0.3	0.1
0.98	10	2	2	3	2	2	21	2.1	0.6	0.1
0.97	15	3	3	4	4	2	31	3.1	0.9	0.2
0.95	25	5	4	7	6	4	52	5.2	1.5	0.4
0.90	51	10	9	15	12	8	104	10.4	3.1	0.7
0.85	76	15	13	22	18	12	156	15.6	4.6	1.1
0.80	101	20	17	29	24	16	208	20.8	6.1	1.4
0.70	152	30	26	44	36	25	312	31.2	9.2	2.1
0.50	253	50	43	73	60	41	520	52.0	15.3	3.5

表-10 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-11 除雪STにおける信頼度の目標値

事務所	除雪ST	路線の重要度	信頼度の目標値	配置台数
A	a①	B	0.95	24
	a②	A	0.97	6
	a③	C	0.90	6
	a④	D	0.85	2
B	b①	B	0.95	7
	b②	B	0.95	12
	b③	A	0.97	5
	b④	B	0.95	2
	b⑤	B	0.95	9
C	c①	C	0.90	6
	c②	B	0.95	9
	c③	D	0.85	4
	c④	C	0.90	9

4. 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。

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-11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に行っているものとした。
- 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-23及び表-12に示す。

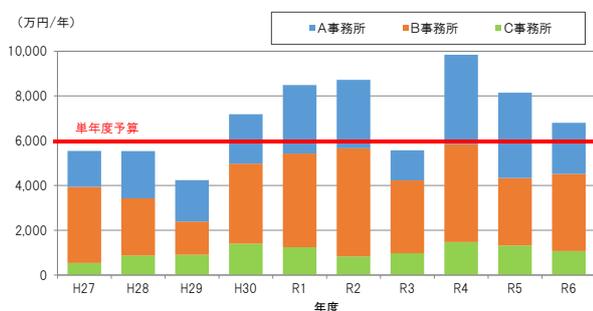


図-23 予防整備費用算出結果 (事務所毎)

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ST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ST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。

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-24及

表-12 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-13 配置換え 3 回目の予防整備費用算出結果 (除雪機械毎)

除雪機械	配置換え3回目の予防整備費用(万円)											合計	H27~R6 単年平均
	H27	H28	H29 (配置換え)	H30	R1	R2 (配置換え)	R3	R4 (配置換え)	R5	R6			
除雪トラック	2,204	1,703	1,095	2,139	1,664	1,833	1,928	1,739	3,438	2,587	20,329	2,033	
除雪グレーダ	0	55	395	370	0	25	115	745	350	0	2,055	206	
除雪ドーザ	272	0	162	168	0	670	488	433	443	264	2,897	290	
ロータリ除雪車	2,013	3,098	2,795	2,460	2,818	3,625	2,688	3,995	2,073	1,995	27,558	2,756	
小形除雪車	765	403	920	913	700	475	463	1,143	728	678	7,185	719	
凍結防止剤散布車	295	283	70	78	815	365	85	355	78	285	2,708	271	
合計	5,548	5,541	5,437	6,127	5,996	6,993	5,766	8,409	7,108	5,809	62,731	6,273	

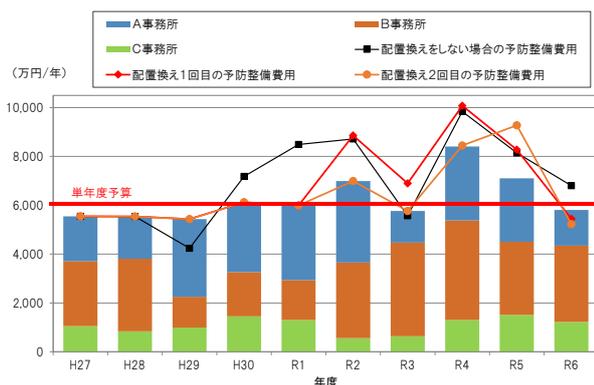


図-24 配置換え 3 回目の予防整備費用算出結果 (事務所毎)

び表-13 に示す。

事務所毎に整理した図-24 には、配置換え前及び配置換え 1 回及び 2 回目の各年度の予防整備費用を折れ線グラフで示し、配置換え 3 回目の予防整備費用を棒グラフで示しているが、配置換えの実施を繰り返すことにより、各年度の予防整備費用が平準化されていることがわかる。

単年度予算が 1,000 千万円以上超過した年数も 5 年から 2 年に減少した。

表-12、13 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単年度の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. まとめ

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。

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し、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。

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。

しかし、除雪機械の更新時期や更新費用の設定を加味する必要があること、定期整備費用が反映されていないことから、よりの確な予防整備実施時期の判断が必要であること、整備費用の試算にあたっては、整備履歴を加味する必要があるなどの課題が明らかになった。

今後は、定期整備や故障の履歴を確実に記録するための内容・様式の整理を行うとともに、維持管理手法のシミュレーション結果で明らかになった課題を解決すべく検討を進めていきたい。

参考文献

- 1) 建設機械整備技術委員会：建設機械整備標準作業工数表（除雪機械編）（平成22年度版）、2010

14.3 リスクマネジメントによる効果的・効率的な冬期交通事故対策技術の開発

14.3.1 冬期交通事故リスクマネジメント手法の構築に関する研究

担当チーム：寒地道路研究グループ（寒地交通チーム）

研究担当者：佐藤昌哉、平澤匡介、星卓見、四辻裕文

【要旨】

積雪寒冷地でリスクマネジメント手法を用いて冬期交通事故対策を効果的・効率的に実施するには、冬期交通事故のリスク評価の手法が必要になる。本研究では、空間統計学と交通工学の知見を活用して、交通状態別事故リスクの空間的評価の手法を開発し、札幌市内の国道網を対象とした季節別・時間帯別の交通事故リスク評価に対して本手法の適用を試みた。本手法により、事故多発地点という「点」の視点でなくホットメッシュ集積エリアという「面」の視点に立つリスク評価が可能となり、隣接メッシュへの効果波及という観点からみて交通事故対策を施すべき効果的・効率的なメッシュ交通状態を季節別・時間帯別に推測できるようになった。

キーワード：交通事故リスク、空間的自己相関、モラン散布図、交通基本図、ETC2.0プローブデータ

1. はじめに

北海道を含む積雪寒冷地において冬期道路交通サービスの安全性・信頼性の向上を技術的に支援するため、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が求められている。本研究は、交通事故分析データベース整備、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により、冬期交通事故リスクマネジメントの手法を構築することを目的とする。

2. 研究実施内容

上記の目的達成のため、平成28年度の研究¹⁾では、冬期交通事故のリスク要因である路面雪氷状態に対して影響を及ぼす日陰時間に着目し、国道230号の日陰時間予測値と冬期人身事故率との関係を分析した。結果、日陰時間が間接的に冬期人身事故率に影響を及ぼすことが示された。平成29年度の研究²⁾では、舗装及びそれを覆う雪氷層の質量と体積の収支計算に基づく路面雪氷状態予測モデルを開発し、国道230号の冬期物損事故件数と事故発生箇所の路面温度・積雪深・体積含水率・路面すべり抵抗値の予測値との関係を分析した。結果、冬期物損事故件数は路面雪氷状態が中程度に悪化した条件下で最も増加することが示された。

一方、これまでは単一路線内で発生した冬期交通事故のリスク要因を詳細に検討してきたが、冬期交通事故

リスクマネジメント手法構築のためには、リスク要因分析の手法のみならず、リスク評価の手法についても開発する必要がある。

そこで平成30年度の研究では、要因分析手法でなく評価手法に研究の主眼を置きつつ、評価の対象を単一路線から道路網へと拡張し、交通事故リスクの空間的評価の手法を開発した。空間統計学³⁾と交通工学の知見を活用して、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、そのエリアに含まれる地域メッシュにおいて交通状態別にリスクを「見える化」した。これらの道具を用いて、札幌市内の国道網を対象とした評価を実施した。具体的には、季節別・時間帯別に交通事故リスクが集積するエリアを地域メッシュ単位で特定化し、エリア内のメッシュ交通状態に応じてリスクを評価した。この評価手法を用いることで、事故多発地点という「点」の視点でなくホットメッシュ集積エリアという「面」の視点に立って冬期交通事故リスクを評価できるようになる。加えて、ある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交通事故対策を施せば、隣接メッシュへの対策効果の波及という観点からみて、効果的・効率的に当該メッシュ内の交通事故リスクの低減が図れるかということについて推測できるようになる。

3. 交通状態別事故リスクの空間的評価の手法

本手法は、図1のフローに従う。以下、札幌市内の

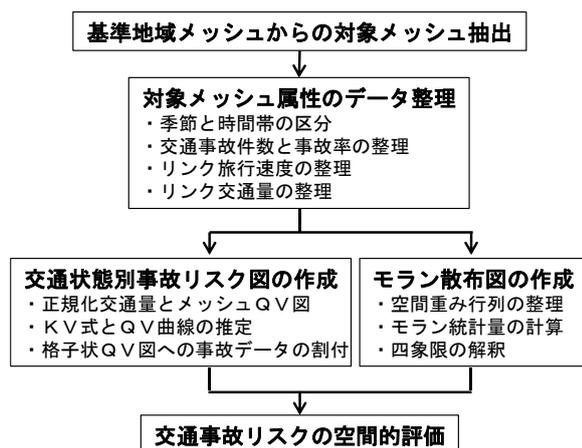


図1 提案する評価手法のフロー

国道網のリスク評価に本手法を適用した内容を示す。

3.1 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。

3.2 対象メッシュ属性のデータ整理

3.2.1 季節と時間帯の区分

季節と時間帯の区分では、各々、春季 (3~5 月)、夏季 (6~8 月)、秋季 (9~11 月)、冬季 (12~2 月) と、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。

3.2.2 交通事故件数と事故率の整理

対象メッシュに属する 1 メッシュ当たりの人身・物損事故件数と人身・物損事故率 (単位: 件/億台 km) 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。整理には、寒地土木研究所の交通事故分析システム⁴⁾を使った。

3.2.3 リンク旅行速度の整理

ETC2.0 プローブデータを用いて、次の手順に従い、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。

3.2.4 リンク交通量の整理

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、次の手順に従い、対象メッシュ内の国道の交通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。

3.3 モラン散布図の作成

3.3.1 諸概念について

モラン散布図⁵⁾とは、ローカル・モラン統計量⁶⁾で測ったメッシュ属性に関して、空間的な集積の状況を「見える化」するための道具である。ローカル・モラン統計量とは、局所的な空間的自己相関の測度であり、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、隣接するメッシュの属性が似たような傾向を示すメッシュが集積しているかを表す指標である。これらの諸概念の詳細は、月報⁷⁾を参照願う。

3.3.2 空間重み行列の整理

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。

3.3.3 モラン統計量の計算

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。

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

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。

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

$$m_i^Y = \sum_{j=1}^N w_{ij}(a_j - \bar{a}) / \sqrt{\sum_{i=1}^N (a_i - \bar{a})^2 / N} \quad (3)$$

3.3.4 四象限の解釈

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

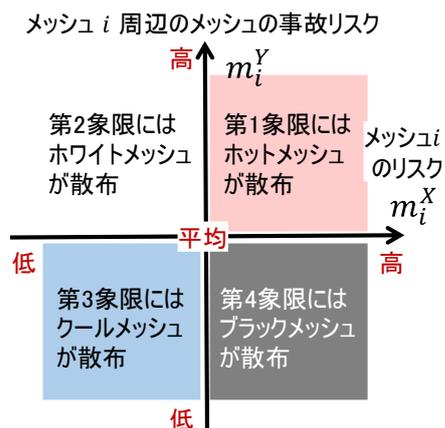


図2 本手法における Moran 散布図の四象限の解釈

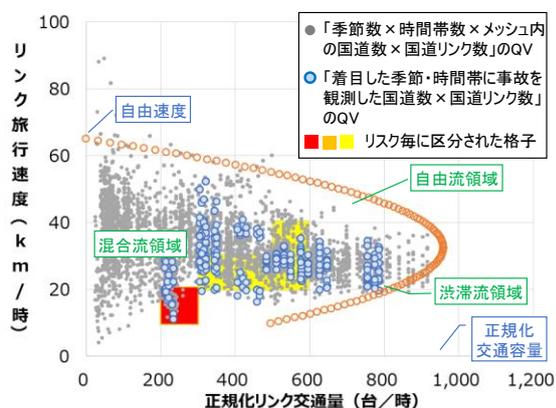


図3 交通状態別事故リスク図の例 (札幌市中心部メッシュの冬季・昼間の人身事故率)

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

カル・モラン統計値となる。原点は平均値となる。

図2に、本手法における Moran 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。

3.4 交通状態別事故リスク図の作成

3.4.1 正規化交通量とメッシュ QV 図

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。

3.4.2 KV 式と QV 曲線の推定

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。

3.4.3 格子状 QV 図への事故データの割付

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3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。

3.5 交通事故リスクの空間的評価

図4には、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を例示した。図4左上に示すように、メッシュ毎に独立してみた場合、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。他方、図4左下の Moran 散布図分析結果をみると、空間重み行列の行番号738、776、813の着色が示す通

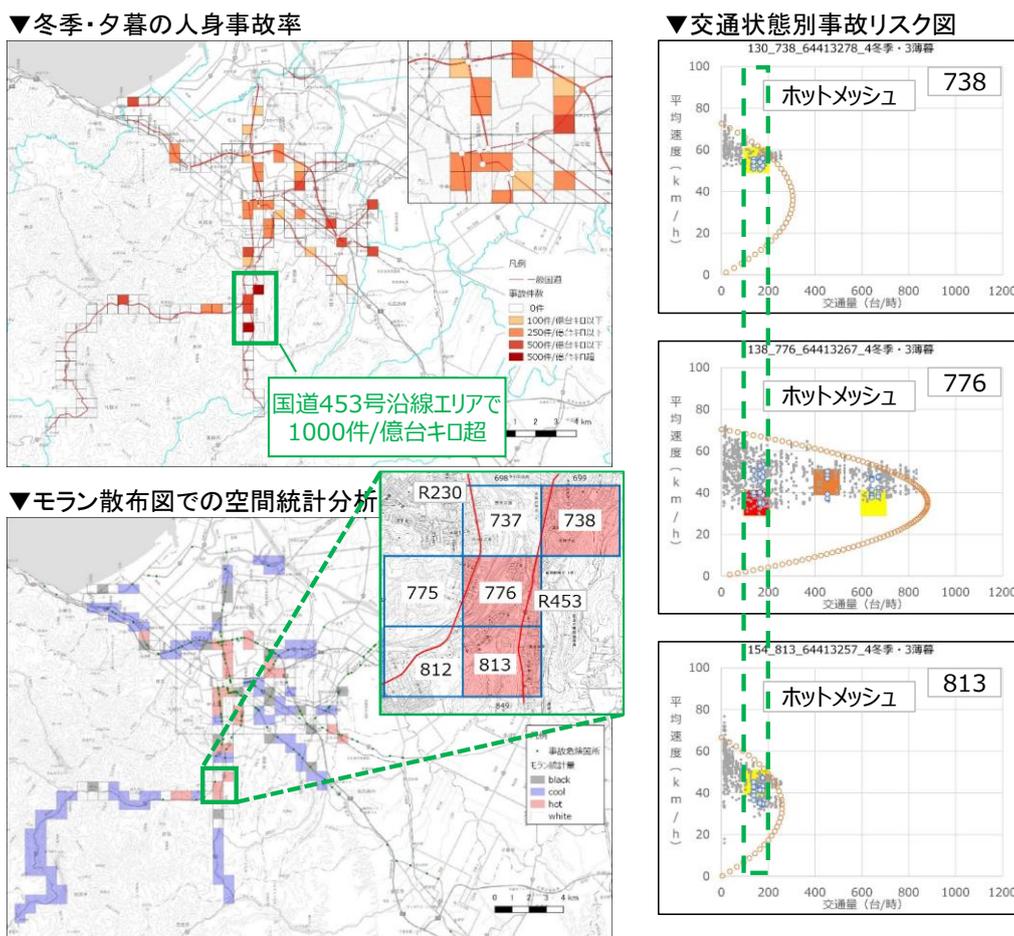


図4 札幌市内の国道網における冬季・夕暮の人身事故率の空間的評価の例（評価期間：H27～H28年度）

り、当該エリアにはホットメッシュが集積した。図4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きに何らかの交通事故対策を施すことにより、その対策効果がメッシュ738と813の最大人身事故率の低減に寄与する可能性があるとして評価できる。この場合は、対策効果の波及を勘案したうえで対策を施すメッシュを選ぶことが効果的・効率的となる。

4. まとめ

平成30年度は、冬期交通事故リスクの評価手法の開発という目的を達成するため、季節別・時間帯別の交通状態別事故リスクに関する空間的評価手法を開発し、札幌市内の国道網を対象とした評価に対して本手法の適用を試みた。今後は、リスク対策による便益算定とリスク対策評価、及び冬期交通事故リスクマネジメントツールの開発を進めていく予定である。

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、第764号、2016。
- 2) 齊田光、平澤匡介、高橋尚人、石田樹：路面雪氷状態予測モデルを用いた交通事故発生状況と路面状態の關係の定量的評価、第55回土木計画学研究発表会、2017。
- 3) 瀬谷創、堤盛人：空間統計学、朝倉書店、2014。
- 4) 平澤匡介、高田哲哉、浅野基樹：交通事故分析システムの開発、第47回北海道開発局技術研究発表会、2003。
- 5) Anselin, L.: The Moran scatterplot as an ESDA tool to assess local instability in spatial association, Spatial Analytical Perspectives on GIS, pp.111-125, 1996。
- 6) Moran, P. A. P.: The interpretation of statistical maps, Journal of the Royal Statistical Society B, Vol.10, No.2, pp.243-251, 1948。
- 7) 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。