

## 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～33 年度

プログラムリーダー：寒地道路研究グループ長 松澤勝

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

### 1. 研究の必要性

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

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

2016 年度は、冬期走行環境の推定手法の構築と冬期道路管理の費用対効果の評価ツールの開発に取り組むとともに、排雪断面積と排雪速度の関係性を調査した。また、凍結防止剤散布オペレータの路面状態の認知・判断の分析、除雪機械劣化度評価に対する FTA の有効性確認、冬期の日陰時間と交通事故発生率の関係の把握を行った。

2017 年度は、積雪による経済損失及び除雪による経済効果を算出するツールを試作した。路肩堆雪断面予測式の適用性確認、凍結防止剤散布作業支援インタフェースを設計・構築し、実験を行った。また、FTA とワイブル解析により除雪機械劣化度の定量的評価が可能であることを確認した。さらに、冬期の路面状態実測値を用いて交通事故リスクを評価した。

2018 年度は、冬期の路面平坦性が走行速度に及ぼす影響の分析、堆雪断面積予測式を用いた「除排雪作業計画支援システム」の要件定義と概略処理フローの整理、凍結防止剤散布支援システムの設計・構築に取り組んだ。また、路線の重要度に合わせて除雪機械の信頼度の目標値を設定することで整備や配置換えの判断が可能となる維持管理手法を検討するとともに、交通状態別事故リスクの空間的評価の手法を開発した。

2019 年度は、機械学習を用いた冬期走行環境の推定、道路有効幅員計測データ解析の効率化検討、路肩堆雪断面積予測式による除排雪作業計画支援技術の開発、凍結防止剤散布支援システムの改良に取り組んだ。また、残留応力を磁場強度の変化で検出する機器を用いた除雪車劣化度診断の試行、除雪機械の故障確率の目標値を変えた際の予防保全費用の試算、リスクマネジメント手法である冬期交通事故リスク情報提供による経路誘導策の便益算定と対策評価を行った。

## 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.

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

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

## 14.1 費用対効果評価に基づく合理的な冬期道路管理水準設定技術の開発

### 14.1.1 費用対効果による冬期道路管理水準の評価技術に関する研究

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

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

#### 【要旨】

本研究は、走行速度や旅行時間信頼性などの客観的指標とユーザー満足度などの主観的指標を基に、冬期道路管理における費用対効果の定量評価手法の構築を最終目標とする。平成 29 年度は無積雪期および積雪期に冬期走行環境を計測することで冬期の路面すべり、道路有効幅員に加え路面平坦性が走行速度に及ぼす影響を分析した。また、冬期の積雪や路肩堆雪に伴う走行速度低下に起因する経済損失や除排雪に伴う走行速度改善による経済効果を定量的に評価するためのツールの試作を行った。また、平成 30 年度は冬期走行環境実測値の蓄積を進めるとともに、冬期走行環境と時間信頼性の関係についても検証を行った。令和元年度は機械学習を用いて気象条件や交通条件等から冬期走行環境の推定が可能であるか検証を行うとともに、道路有効幅員計測データ解析の効率化の検討を行った。

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<sup>1)</sup>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<sup>2)</sup>や冬型事故の増加<sup>3) 4)</sup>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、





a. 連続路面すべり抵抗測定装置



b. 冬期道路有効幅員計測装置



c. 簡易型 IRI 測定装置

写真1 冬期走行環境の測定技術

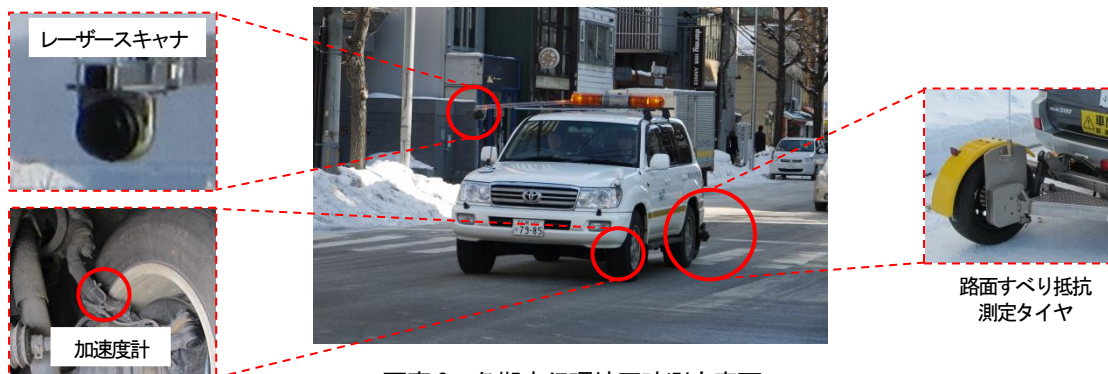


写真2 冬期走行環境同時測定車両

冬期道路管理の費用対効果を定量評価する手法の構築を目標とする。この目標を達成するため、本研究は

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

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

### 3. 冬期走行環境の推定手法の構築

#### 3.1 既往研究とその課題

当研究所では、前中長期計画において車両に搭載して走行しながら連続して路面すべり抵抗値、路面平坦性および道路有効幅員（以下、冬期走行環境と総称）を計測する連続路面すべり抵抗測定装置（写真1a）<sup>5)</sup>、冬期道路有効幅員計測装置（写真1b）<sup>6)</sup>および簡易型IRI測定装置（写真1c）<sup>7)</sup>を開発した。しかしながら、同写真からも分かるように、これらの計測技術はそれぞれ異なる

車両に搭載されている。そのため、冬期走行環境のデータ取得には複数の計測車両の同時走行試験が必要になり、予算と時間的な制約を受け、これまでに得られたデータは十分でない。冬期走行環境が走行性とユーザー満足度に及ぼす影響を評価するには、様々な道路条件、交通量、冬期走行環境等におけるデータ蓄積が必要となる。

#### 3.2 冬期走行環境計測車両の開発

本研究では、3.1の課題を解決するために、冬期走行環境計測技術を1台の車両に集約した（写真2）。

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

式が構築されている<sup>8)</sup>。

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<sup>7)</sup>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。

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

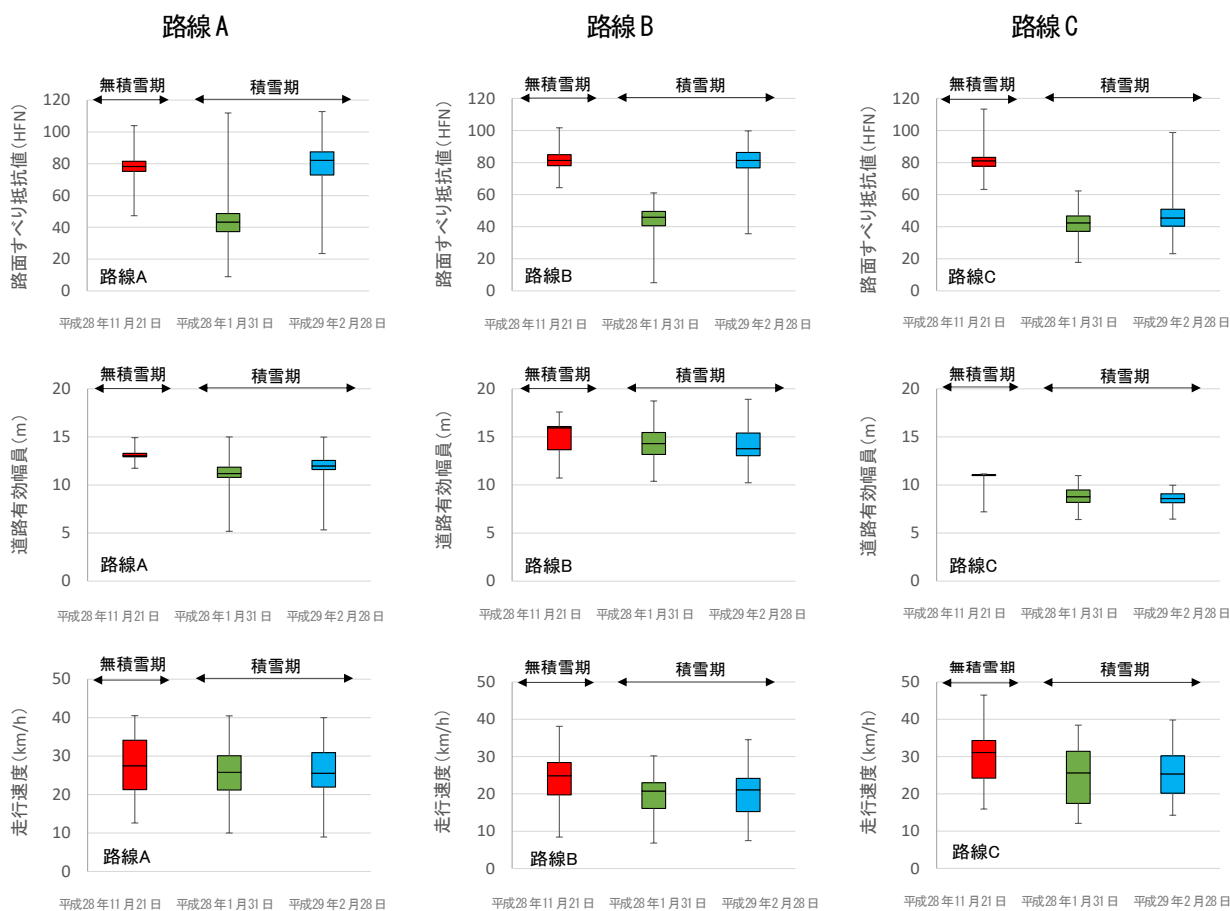


図1 走行試験の結果(上段:路面すべり抵抗値、中段:道路有効幅員、下段:走行速度)

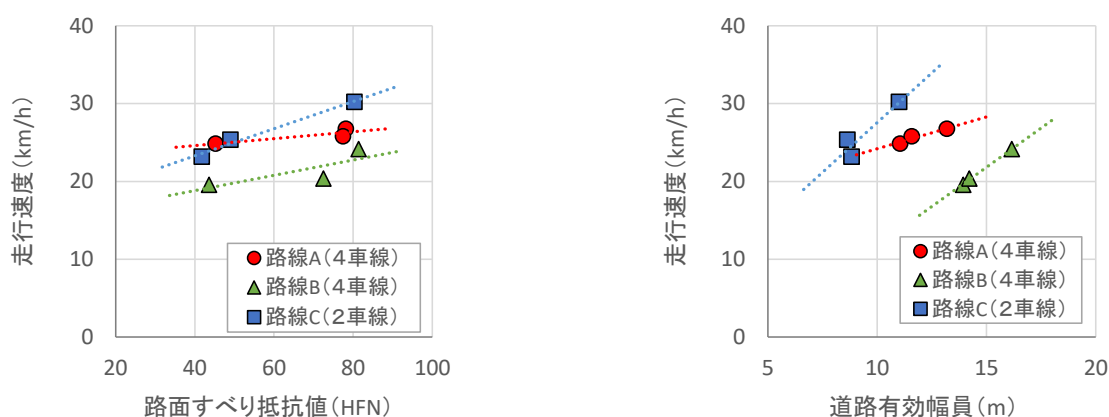


図2 冬期走行環境と走行速度の関係（左図：路面すべり抵抗値、右図：道路有効幅員）

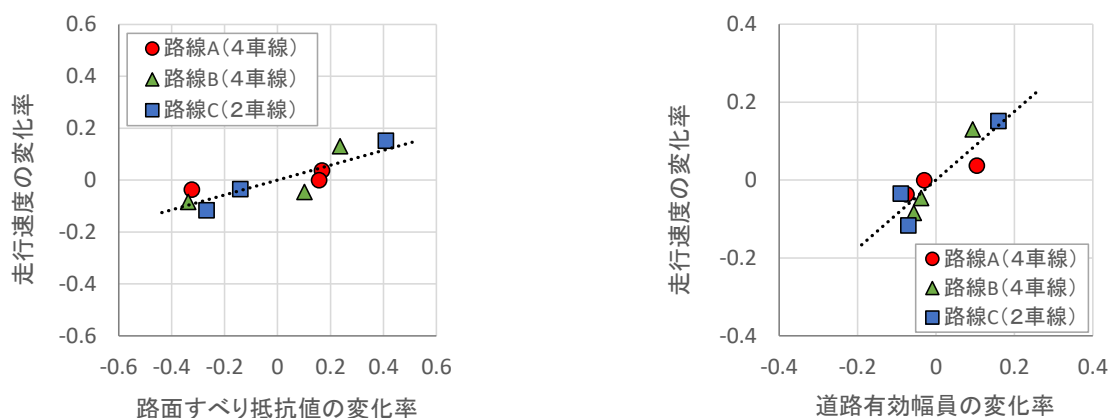


図3 冬期走行環境の変化率と走行速度の変化率との関係（左図：路面すべり抵抗値、右図：道路有効幅員）

### 3.3.2 試験の結果

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

路面すべり抵抗値については、いずれの路線でも無積雪期の中央値は80前後にある。平成29年1月31日（積雪期）の中央値は40近くまで低下した。一方、平成29年2月28日（積雪期）では、路線AとBは無積雪期と同程度の80前後であるが、路線Cは45程度で

あった。積雪期における日時や路線における値の相違は、気象条件や道路維持作業の影響を受けて生じたと推察される。

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

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



は冬期走行環境の悪化を受けて低下し、その低下度合は路面すべり抵抗値や道路有効幅員の変化によって異なる。

#### 4. 走行速度、時間信頼性およびユーザー満足度の評価手法の構築

##### 4.1 冬期走行環境が走行性に及ぼす影響分析

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

図2は冬期走行環境と走行速度の関係であり、左図に路面すべり抵抗値との関係を、右図に道路有効幅員との関係を、それぞれ示す。路面すべり抵抗値と、走行速度の分布域は路線によって異なるが、いずれの路線も走行速度は路面すべり抵抗値とともに低下した。道路有効幅員も同じ傾向にあり、分布域は異なるがいずれも道路有効幅員の減少に伴い走行速度が低下した。

図3は図2に示すデータ（路面すべり抵抗値、道路有効幅員および走行速度）について路線毎に平均値を求め、各データの値を平均値で除すことで平均値に対する変化率（ $R=A/A_{ave}-1$ 、 $A$ ：データの値、 $A_{ave}$ ：データの平均値）を求め図示したものである。同図より、走行速度の変化率はいずれの路線も路面すべり抵抗値および道路有効幅員の変化率の低下に伴い大よそ同じ度合で線形的に低下していることが分かる。

図2や図3より、冬期走行環境と走行速度の関係を定量的に評価することにより、冬期走行環境から走行速度を推定できる可能性が示唆された。

##### 4.2 道路サービスに対する道路利用者の意見要望の集計・分析システムの試作

道路管理者が作成・とりまとめ・管理する、道路利用者からの意見・要望について、当研究所で運用する冬期道路マネジメントシステム<sup>9)</sup>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。

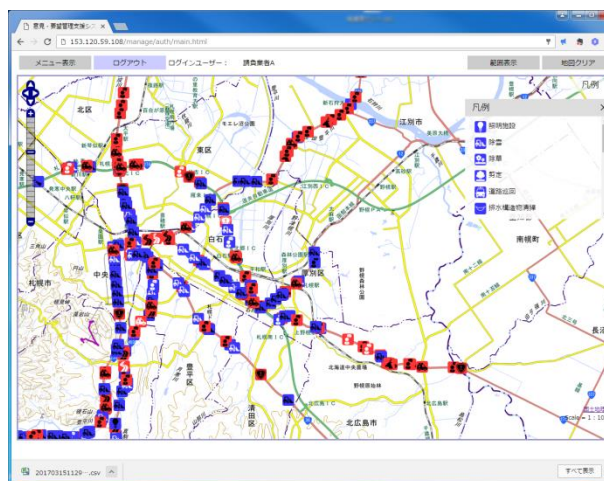


図4 道路利用者の意見要望の管理システムの表示例

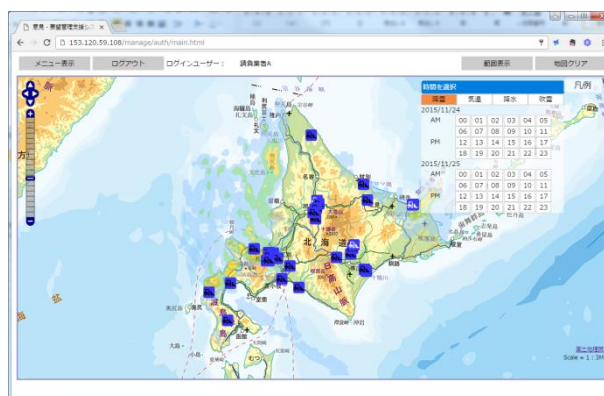


図5 道路利用者の意見要望のマッピング（気象条件との重ね合わせ）



図6 道路有効幅員計測装置の取り付け状況

表2 冬期走行環境計測試験の対象路線概要

路線	対象延長	道路条件	
		車線	路肩
一般国道 231号	KP0~KP11	片側3車線	広い
	KP11~KP15	片側2車線	広い
	KP15~KP19	片側1車線(対面)	狭い

5. 冬期走行環境の推定手法構築のための走行試験

5.1 試験の概要

本研究では、一般国道231号 KP0~KP19 (札幌市北区北34条西2丁目~石狩市八幡2丁目) において積雪期に定期的に走行試験を実施した。走行試験は、上記路線を対象に平成29年度および平成30年度の冬期(12月~翌年2月、いずれも平日)に実施した。表2に対象路線の道路条件を示す。本計測では午前10時に計測対象路線の起点を出発し、周囲の車両と同程度の速度で走行し走行速度、路面すべり抵抗値、道路有効幅員およびIRIを測定した。なお、道路有効幅員の計測装置について、平成28年度はレーザースキャナ1個を車両前方に張り出して搭載する構造であったため、ボンネットがある車両では、張り出しが大きくなりレーザースキャナの振動対策が必要であった。そこで、平成29年度以降は、レーザースキャナ2個を車両上部側面に取り付ける構造とし搭載性を向上させた(図6)。

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

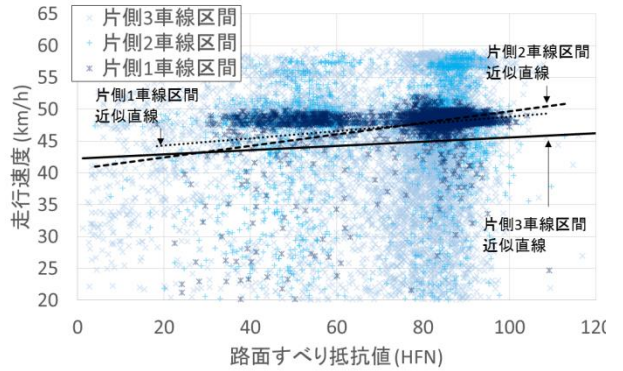


図7 一般国道231号における路面すべり抵抗値と走行速度の関係

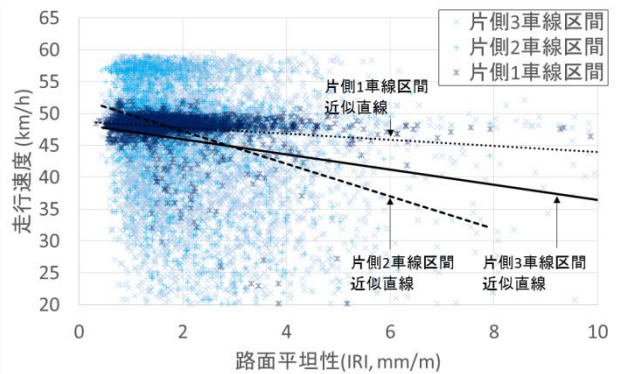


図8 一般国道231号における路面平坦性と走行速度の関係

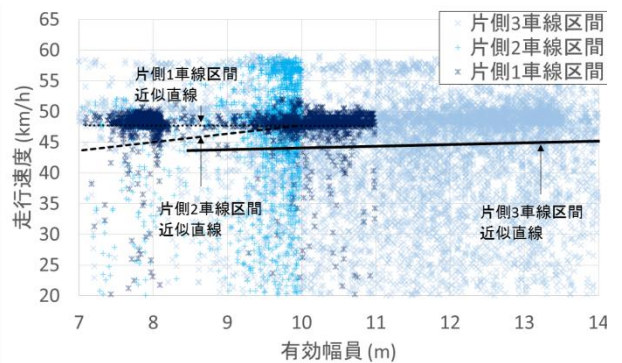


図9 一般国道231号における有効幅員と走行速度の関係

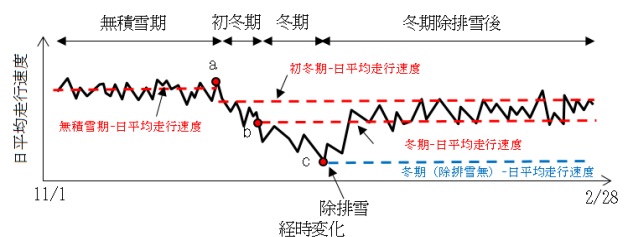


図10 日平均走行速度および積雪深の推移ならびに降雪経済損失・除排雪経済効果の評価概念図



きくなるにつれ減少した。特に、片側2車線区間では無雪期（IRIは概ね1mm/m程度）の走行速度は50km/hであるが、積雪によりIRIが8mm/m程度まで増大した場合に走行速度が35km/h未満になるなど路面平坦性が走行速度に与える影響は顕著であった。

図9は一般国道231号における道路有効幅員と走行速度の関係性を車線数毎に示す。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。

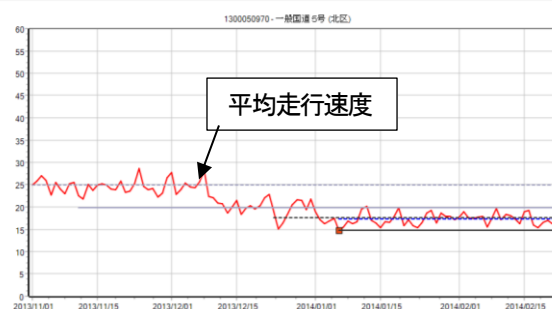


図11 平成25年冬期の一般国道5号における日平均走行速度の推移

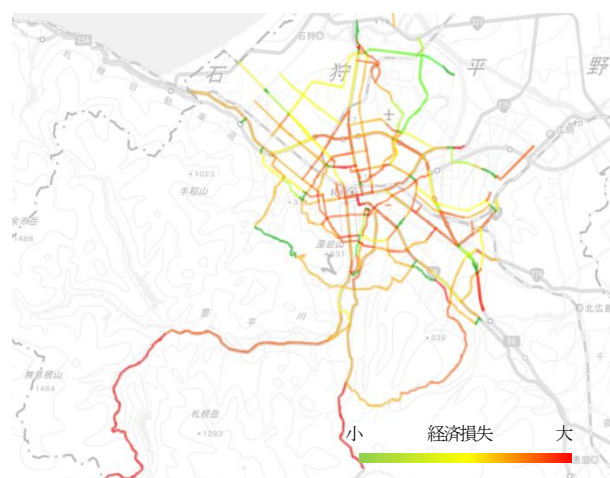


図12 降雪による経済損失の分布(平成25年度冬期)

3. 対象延長を無積雪期、初冬期、冬期、および冬期除排雪後期間の日平均走行速度の平均値で除すことで、対象区間の旅行時間を求める。
4. 除排雪を実施しないケースは、除排雪直前(図中c)の日平均走行速度が冬期にわたり継続するとし、冬期に除排雪しない場合の旅行時間を求める。
5. 降雪による走行時間延長は無積雪期の日平均走行速度ー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ー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)の日平均走行速度ー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の度合いは概ね一定であるが、片側 2 車線区間では HFN の低下に伴い走行速度のばらつきが大きくなる傾向にあった。これは片側 2 車線区間かつ滑りやすい路面では通過に要する時間のばらつきが大きくなる（当該区間通過時の時間信頼性が小さくなる）ことを示

している。

図 16 から図 18 は計測区間における IRI と走行速度の関係を車線数毎に示す。走行速度は IRI が大きくなるにつれ減少した。特に、片側 3 車線区間および片側 2 車線区間では無雪期（IRI は概ね 1mm/m 程度）の走行速度中央値は 50km/h であるが、積雪により IRI が 6mm/m 程度まで増大した場合に走行速度中央値が 40km/h 未満になるなど路面平坦性が平均走行速度に与える影響は顕著であった。また、IRI 毎の走行速度のばらつきに着目すると、片側 3 車線区間および片側 2 車線区間では IRI の増大に伴い走行速度のばらつきが大きくなる現象が見

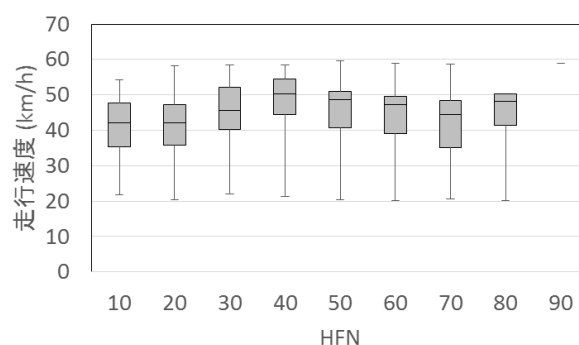


図 13 一般国道 231 号 KP0～KP11 (片側 3 車線区間) における路面すべり抵抗値と走行速度の関係

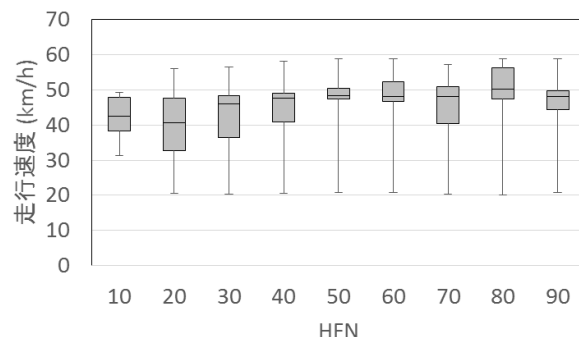


図 14 一般国道 231 号 KP11～KP15 (片側 2 車線区間) における路面すべり抵抗値と走行速度の関係

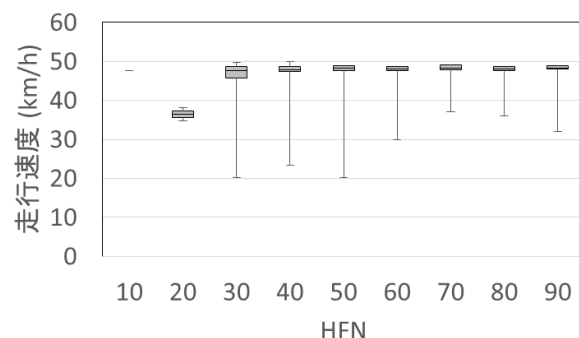


図 15 一般国道 231 号 KP15～KP19 (片側 1 車線区間) における路面すべり抵抗値と走行速度の関係

られ、IRI が 6mm/m 以上となる条件下では走行速度の第 1 四分位と第 3 四分位の差が 20km/h 以上となり、当該条件における区間通過時の時間信頼性が大きく低下することが明らかとなった。なお、本計測で得られたデータのうち、片側 3 車線区間では IRI が 8mm/m 以上、片側 2 車線区間および片側 1 車線区間では IRI が 7mm/m 以上のデータ数が少なく IRI と走行速度の関係を検証するには至らなかった。

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つ

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

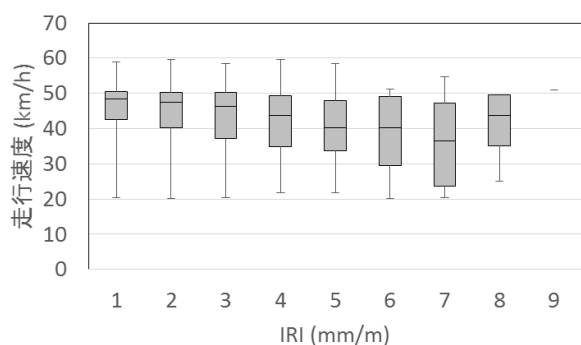


図 16 一般国道 231 号 KP0~KP11 (片側 3 車線区間)における路面平坦性と走行速度の関係

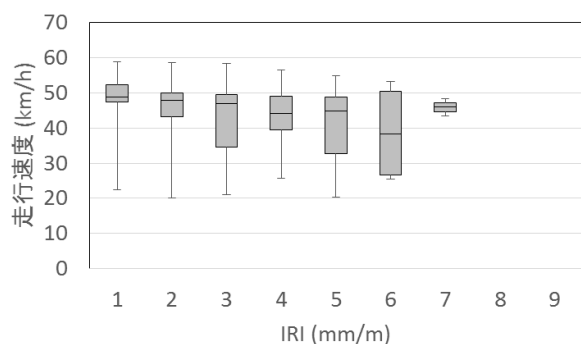


図 17 一般国道 231 号 KP11~KP15 (片側 2 車線区間)における路面平坦性と走行速度の関係

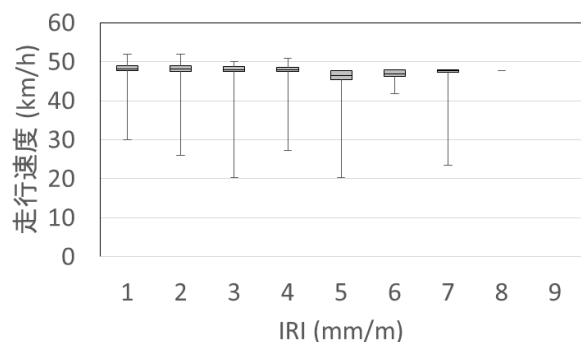


図 18 一般国道 231 号 KP15~KP19 (片側 1 車線区間)における路面平坦性と走行速度の関係

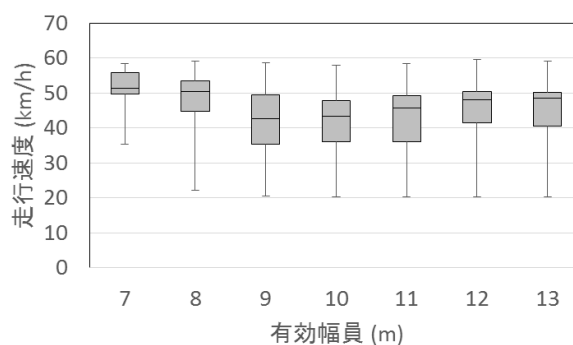


図 19 一般国道 231 号 KP0~KP11 (片側 3 車線区間)における有効幅員と走行速度の関係

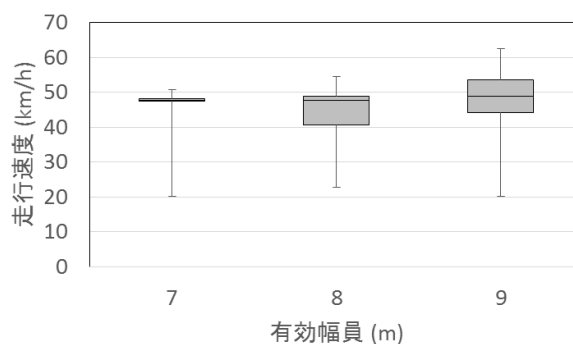


図 20 一般国道 231 号 KP11~KP15 (片側 2 車線区間)における有効幅員と走行速度の関係

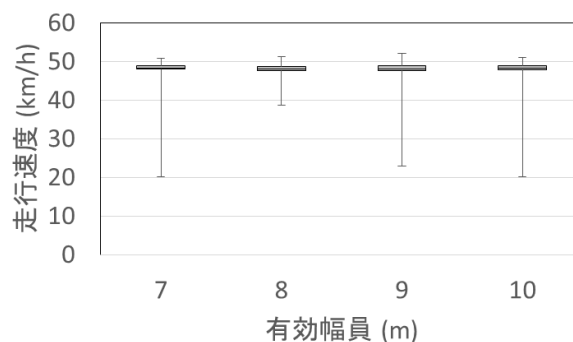


図 21 一般国道 231 号 KP15~KP19 (片側 1 車線区間)における有効幅員と走行速度の関係



が示唆された。

### 8. 機械学習を用いた冬期走行環境の推定

本研究では、5. で収集した冬期走行環境データと気象データ、交通条件データを用いて機械学習により冬期走行環境を推定する手法を開発した。本研究では、一般国道231号 KP0~KP19 を対象として区間中の任意の地点・日時における冬期走行環境（路面すべり抵抗値、路面平坦性および道路有効幅員）および平均走行速度の推定を行った。冬期走行環境の推定では、道路構造や気象条件などを多層パーセプトロン（MLP）に入力することで機械学習を行い、K-分割交差検証により予測器を生成した後に冬期走行環境の推定を行いその精度を求めた。本検証では、学習のためのMLPへの入力値として推定対象日時から24時間前までの札幌気象台における1時間毎気象計測値（気温、降水量、風速、日照時間）、車線数、24時間交通量、交差点からの距離、橋梁の有無および制限速度を用いた。また、冬期走行環境実測値は平成29年度および平成30年度の冬期に当該区間で計測車両を用いて得られた値（計測回数12回、計測距離延べ460km）を使用した。なお、MLPの中間層数は3から5、中間層のノード数は50、75、100および150とし最も推定精度および汎化性能が優れた予測器を用いて冬期走行環境の推定を行った。

表3に最も推定精度および汎化性能が優れた予測器を用いた時の路面すべり抵抗値、路面平坦性、道路有効幅員および走行速度の実測値-推定値間の決定係数とRMSE・MAE、および推定に用いたMLPの中間層ノード数・中間層数をそれぞれ示す。路面すべり抵抗値の推定値は実測値と概ね一致し、決定係数は0.660、RMSEは9.90となった。また、路面すべり抵抗値推定値の空間分布は図22に示すように実測値と概ね同様の傾向を示した。有効幅員推定値は実測値とある程度一致し、決定係数は0.508、RMSEは1.35mであった。一方で、路面平坦性の推定値は実測値の傾向を再現するに至らず、決定係数は0.131、RMSEは0.74mm/mであった。路面平坦性の推定精度が低くなった理由としては、積雪時の路面平坦性は路面の雪氷層による凹凸の発生以外にも舗装自体の平坦性に大きく左右され、舗装自体の路面平坦性は気象や交通条件等のみから推定することは困難であるためと推察される。また、先述の入力条件から走行速度を直接推定した場合の決定係数は0.474、RMSEは4.92km/hであり、図23に示すように推定値の空間分布は実測値とある程度一致した。なお、本検証では冬期走行環境推定ではMLPの中間層数が

増えるに従って推定精度が向上する傾向にあり、冬期走行環境を推定する手法として多数の中間層を有するMLPによる学習（深層学習）が有効である可能性が示唆された。

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

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

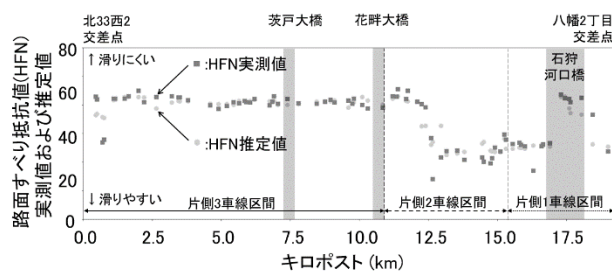


図22 路面すべり抵抗値の実測値および推定値（2018/1/12）

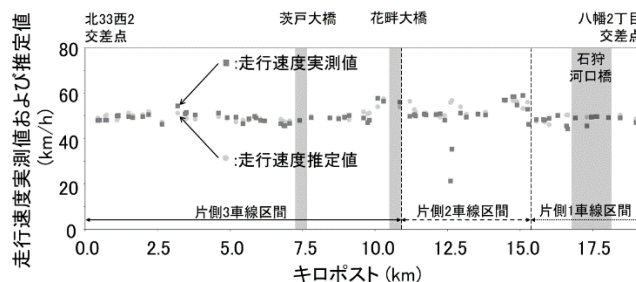


図23 走行速度の実測値および推定値（2018/1/12）

## 9. 道路有効幅員計測データ解析の効率化検討

### 9.1 現状の解析方法

道路有効幅員計測システムで計測したデータの解析方法は、専用の解析用ソフトウェアで、車線数、車線幅等の道路条件を設定し、幅員として認識する高さ等の閾値設定を駐車車両や並走車両等の障害物を異常値と判別するように設定する。

道路有効幅員の解析は、堆雪、縁石等の道路構造物と車道との境界を、設定した条件により判別するため、異常値と判別されたデータは、無効データとなり除外される。解

析は、閾値の設定を調整しながら無効データが少なくなるように繰り返し実施する。しかし、閾値の調整だけでは、轍や車両走行により飛散した雪を異常値として判別する場合もあるため、解析したすべてのデータをカメラで撮影した計測箇所の画像と照合しながら確認し、正しい幅員位置に手作業で適宜修正している（図24）。

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

このことから、迅速な冬期道路幅員の状況把握には、計測データ解析処理の効率化が必要である。

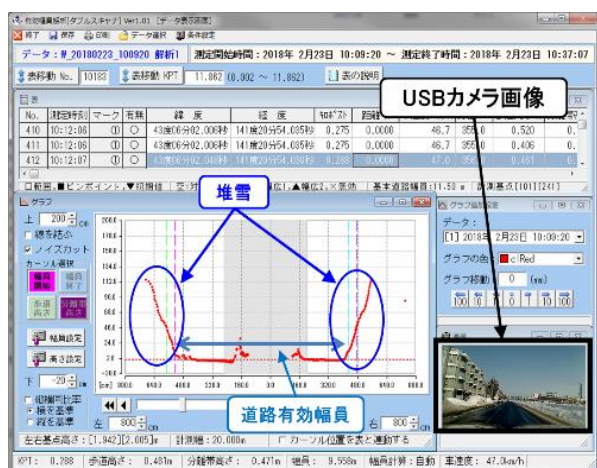


図24 現状の解析画面

## 9.2 AIを用いた解析データ判定処理方法の検討

### 9.2.1 検討概要

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

今回の検討では、解析データで修正が必要なデータの抽出を一次スクリーニングとしてAIで判別し、人が確認するデータ数を絞り込むことを目的とした（図25）。

対象データが、2次元座標上にプロットした点群画像データであるので、CNN（Convolutional Neural Network）等のAI画像認識技術を使用し、判定結果の正誤分類による検証を行った。

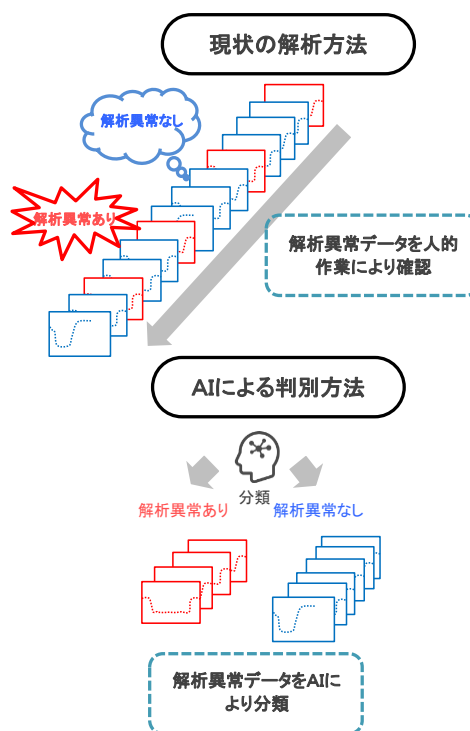


図25 現状とAIによる判別手法の概念図

モデルの構築は、既存システムで判別された結果を画像化し、手動修正が行われる前の画像を「修正前（幅員に誤りがある画像）」、手動修正が行われた後の画像を「修正後（幅員が正しい画像）」として正解データ（分類タグ）を付与した。それぞれの画像を学習データとテストデータに分割し、学習データを用いてAIモデルを構築したのち、学習済みモデルにテストデータを投入し、精度検証を実施した。AIモデルの結果は、テストデータ毎に正解データ「修正後」である可能性が確率値で出力される。そこで、精度検証においては、確率値の閾値を一律50%とし、50%以上を正解「修正後」、50%未満を「修正前」として判定することとした。

評価の手法は、分類モデルで一般的に用いられる混同行列を用いた（図26）。混同行列は、任意のタグに対して「真の値」「予測の値」をそれぞれ「陽性」「陰性」の2パターンに分類してデータ数を整理したものである。モデルの評価には、この整理をもとに算出される「適合率（Precision）」と「再現率（Recall）」を用いた。

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

図 26 混同行列

### 9.2.2 AI モデルの学習方法

検証に使用したデータは、一般国道 231 号 KP0~KP19 (札幌市北区北 34 条西 2 丁目~石狩市八幡 2 丁目) を実際に道路有効幅員計測システムで計測および解析したデータのうち、人による修正作業が多かった平成 30 年 1 月 11 日、2 月 1 日、2 月 8 日のデータとした。

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

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

最後に、学習データの検証を実施するため、データを追加してモデルの再構築を実施した。モデルの構築に当たっては、1 月 11 日、2 月 1 日、2 月 8 日の 3 日分のデータを用いた。

### 9.2.3 AI モデルの検証結果

1 月 11 日のデータを用いて、画像による「修正前」「修正後」の学習モデルを構築し、ケース 1 (画像全体を学習) とケース 2 (左右の幅員を別々のデータとするため画像を分割して学習) を比較した。なお、データは、計測時に車両の左右に搭載したレーザースキャナで、それぞれ計測し合成している。結果としては、ケース 2 のモデルの方が精度が高いことがわかった (図 27)。特に右側のモデルが左側のモデルに比べて高く、適合率 (Precision)、再現率 (Recall) とともに 80% を超えており、一般的な画像分類に

おいては、ある程度高い精度を確保できているといえる。これは、レーザースキャナによる計測データの取得時の特性 (車両の右側の点群データがまばらになりやすい) があり、右側の方が判定しやすいデータとなった可能性があるからである。ケース 1 のモデルの精度が低かった理由としては、既存システムで修正作業を行う上で、左側だけ、あるいは右側だけを修正されている箇所も多いことから、修正前後の特徴 (差異) が複雑になり十分な学習ができなかったためと考えられる。よって、以降の検証は、画像を分割して学習したモデルの精度が高かったことから、ケース 2 との比較で実施した。

次に加工の違いによる精度を検証するため、画像をグレースケール化 (色彩の特徴量が減ることによる精度の確認) して学習させたモデルと比較した。結果は、グレースケール化させた画像 (ケース 3) の精度が下がり、今回のモデルでは画像の色彩の特徴量も重要な特徴の一つである可能性が高いことがわかった (図 28)。

次にモデルの精度の検証として 1 月 11 日のデータで作成したモデル (ケース 2) に 2 月 1 日と 2 月 8 日のデータをテストデータとして入力し検証 (ケース 2 検証) したところ 1 月 11 日のみで検証 (ケース 2) した結果よりも精度が下がっている (図 29)。これは、2 月 1 日と 2 月 8 日のデータには 1 月 11 日のデータに見られない特徴があると考えられる。カメラ映像を確認したところ、1 月 11 日のデータには計測中に降雪があったのに対して 2 月 1 日と 2 月 8 日のデータは、計測中の降雪はなかった。降雪中のデータには、レーザースキャナで計測した点群データに、計測車両の走行による雪の舞い上がりを計測したデータがあるなど、大きな違いがあった。

最後に 2 月 1 日および 2 月 8 日のデータは、1 月 11 日のデータと特徴が違うことから、モデルの再学習 (学習データの追加) として前述までの 1 月 11 日のデータに加え 2 月 1 日および 2 月 8 日の 3 日分のデータで再学習させ (ケース 5) 精度の検証を実施した。その結果、前述の 1 月 11 日のモデル (ケース 2) に比べると精度は下がった (図 30) が、1 月 11 日のモデルに 2 月 1 日および 2 月 8 日のデータを投入した場合 (ケース 2 検証) に比べて全体的に精度が向上した。

これらのことから、1 日分のデータだけでは、計測日より異なる様々な状況を十分に学習できないことがわかった。

また異なる計測日のデータを追加することで多少精度は改善するが、単純に追加するだけでは十分な学習には至らないということがわかった。

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

本研究は、冬期道路管理の費用対効果を定量的に評価する手法の構築を最終目標とし、平成28年度は冬期走行環境と走行性の関係検証を、平成29年度はこれに加えて冬期道路管理の費用対効果の評価ツールの開発に取り組んだ。また、平成30年度は冬期走行環境実測値の蓄積を進めるとともに、冬期走行環境と時間信頼性の関係についても検証を行った。加えて、令和元年度は機械学習を用いて気象条件や交通条件等から冬期走行環境の

10. まとめ

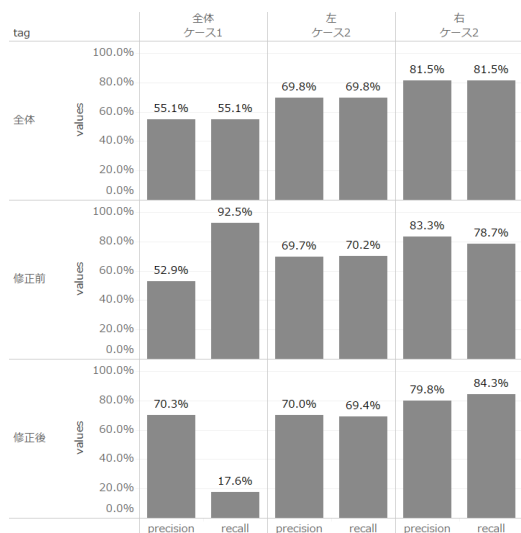


図27 ケース1(画像全体)とケース2(左右分割)の比較

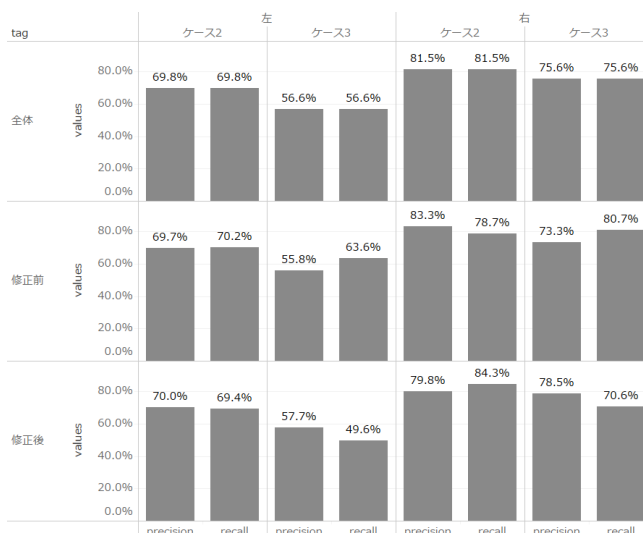


図28 ケース2(通常画像)とケース3(グレースケール)の比較

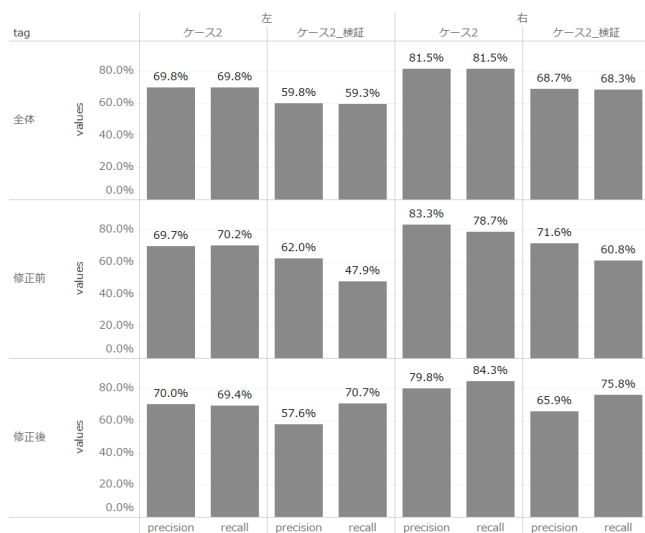


図29 ケース2(同日のデータ)とケース2検証データ(別日のデータ)の比較

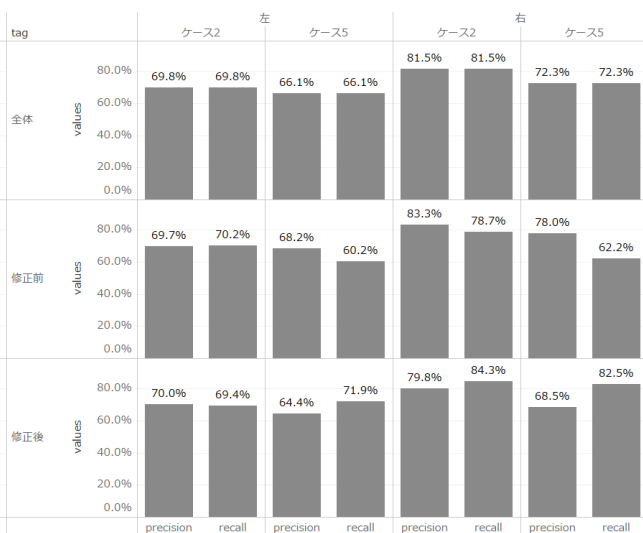


図30 ケース2(1日分データのモデル)とケース5(3日分データのモデル)の比較

推定が可能であるかの検証と、道路有効幅員計測データ解析の効率化の検討を行った。

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

冬期道路管理の費用対効果の評価ツールの開発に関しては、冬期の走行速度プローブデータ、交通量データ等から積雪時・路肩堆雪時の走行速度低下に伴う経済損失や除排雪による経済効果を算出するためのツール試作を行った。これにより、路線の各区間において降雪による経済損失・除排雪による経済効果の推定や、除排雪等費用データとの組み合わせによる冬期道路管理の費用対効果推定が可能となった。

機械学習を用いた冬期走行環境の推定では、気象や道路構造等を基に多層パーセプトロンを用いて機械学習を行うことで、降雪等に伴う路面すべりや有効幅員、走行速度の変動を推定できる可能性があることが示唆された。また、道路有効幅員計測データの解析は、AI画像認識技術を用いることで、効率化を図れる可能性があることがわかった。

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方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 —交通事故統計からみる発生構造—、北海道の雪氷、No. 33、pp. 35-38、2014.9
- 5) 舟橋誠、徳永ロベルト、浅野基樹：連続路面すべり抵抗値測定装置 (RT3) の導入について、北海道の雪氷、No. 26、pp. 5-8、2007.9
- 6) 大上哲也、住田則行：道路有効幅員計測に関する試験報告について、第 55 回北海道開発技術研究発表会、2012.2
- 7) 中島繁則、川村彰、坂田光児、山崎元也、谷岡和範：高速道路の維持管理に向けた新小型 IRI 測定システムの開発、交通工学、Vol. 44、No. 2、pp. 49-56、2009.3
- 8) 徳永ロベルト、舟橋誠、高橋尚人：すべり抵抗値活用による冬期路面管理技術の高度化に関する研究、第 52 回北海道開発技術研究発表会、2009.2
- 9) 切石亮、徳永ロベルト、高橋尚人：冬期道路マネジメントシステムの試行運用について、第 57 回北海道開発技術研究発表会、2014.2



## 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

### 14.1.2 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、飯田美喜、久慈直之  
佐藤昌哉、平澤匡介、宗広一徳、中村直久

#### 【要旨】

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

令和元年度は、排雪前後の交通流の変動に関する分析、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地域ごとに堆雪断面積を推計する式を算出し、複数地域での適用性を確認した。また、路肩堆雪部の形状計測に適用可能な技術についても調査し検証した。さらに、堆雪断面積予測式を用いた「除排雪作業計画支援システム」の検証用システムを作製し、動作確認やユーザーの使用感を含めた課題の抽出を行った。

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られて行われている。また、実施時期や工法は、除雪従事者の経験に依るところが大きく、さらには熟練者及び担い手不足の課題もあり、実施時期や工法などに関する判断を経験に依存しないための定量的な指標が必要である。

一方、路肩堆雪と運搬排雪計画を考慮して効率的な道路横断面の利用を行うことで、交通への影響を最小化しつつ除排雪事業のコスト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、路肩堆雪の形成と交通流の変動に関する実査と、5ヶ年分の運搬排雪データ分析による路肩堆雪の排雪断面積と排雪速度の相関式について妥当性を確認した。

また、札幌での路肩堆雪断面積の実測値と気象データや除排雪回数等の分析結果から堆雪断面積予測式を算出した。算出した堆雪断面積予測式を小樽や旭川に適用し、予測値と実測値を比較した。

令和元年度は、排雪前後の交通流の変動に関する分析、地域ごと（札幌・小樽・旭川）にそれぞれ堆雪断面積予測式を算出し、予測値と実測値を比較した。また、路肩堆雪部の形状計測に適用可能な技術についても調査、検証した。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の構築に向け検証用システムを作製し、動作確認やユーザーの使用感を含めた課題の抽出を行った。

#### 3. 排雪前後の交通流の変動に関する検討

##### 3.1 調査方法

札幌市内の地方道〔道道下手稲札幌線（札幌市西区発寒14条11丁目）〕を対象とし、定点カメラからの取得画像データを基に、排雪前後の交通流の変動に関する分析を行った。

##### 1) 排雪前後の走行車線中の車両の走行位置

- ・走行位置①～⑥（図-1）

##### 2) 排雪前後の交通性能

- ・速度のパーセンタイル
- ・交通量—速度（Q-V）性能

さらに、札幌市内を走行するタクシードロブカーデータの比較により、路肩堆雪の幅員別に旅行時間信頼性を算出した。

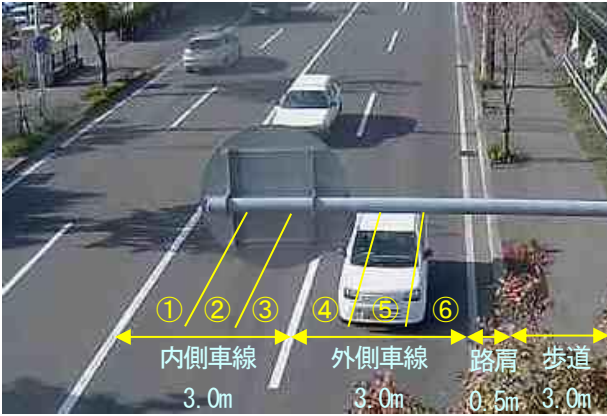
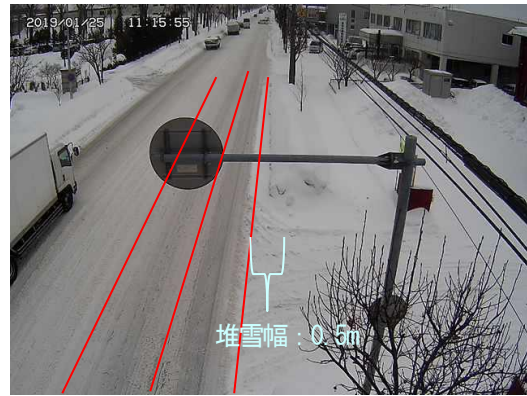


図-1 調査対象道路の横断面構成



(1) 排雪前 (1月24日)



(2) 排雪後 (1月26日)

図-3 排雪前後の道路状況

### 3.2 調査結果

#### 3.2.1 排雪前後の交通流の比較

排雪前後の交通流について、比較した。ここでは、以下の事例を示す。

- ・排雪前 (平成31年1月24日)
- ・排雪後 (平成31年1月26日)

この時点での道路状況は、図-3に示すとおりである。

##### 1) 走行車線中の車両の走行位置

排雪前後の車両の走行位置について、図-2に示す。片側2車線のうち、内側車線の走行が①・②・③、外側車線の走行が④・⑤・⑥である。片側2車線のうち、車線をまたがって中央を走行している③と④の計が、排雪前45%であったのが、排雪後33%へと減少している。また、外側車線の路肩寄りの⑥の位置の走行が、排雪前は0%に対し、排雪後は17%へ増加した。すなわち、路肩における堆雪の存在により、車両は中央によった走行を余儀なくされることを確認した。

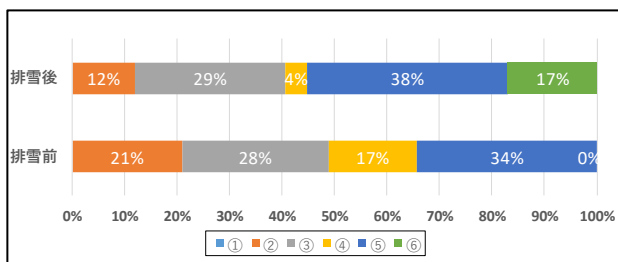


図-2 走行車線中の車両の走行位置  
(排雪前：1月24日、排雪後：1月26日)

##### 2) 交通性能の比較

排雪前後の交通性能として、速度のパーセンタイルを図-4に示す。排雪前は、50パーセンタイル速度で23km/h、85パーセンタイル速度で29km/hであったが、排雪後は、50パーセンタイル速度で29km/h、85パーセンタイル速度で35km/hへ向上した。

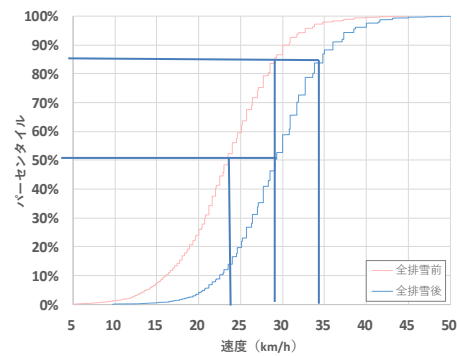


図-4 速度のパーセンタイル

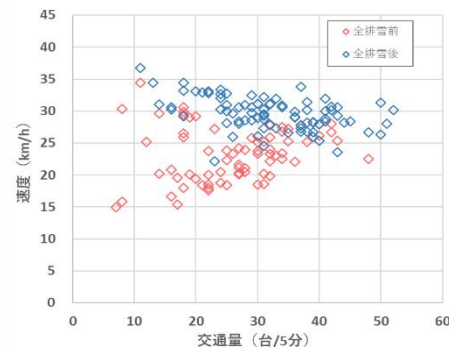


図-5 交通量—速度 (Q-V) 曲線

交通量—速度 (Q-V) 曲線を図-5に示す。5分間当たりの交通量と平均速度を、排雪前と排雪後についてプロットした。排雪前の最大交通量 (Qmax) は48台/5min、Vmax は22km/hであるが、排雪後のQmax は52台/5min、Vmax は30km/hへ増加した。

### 3.2.2 時間信頼性の検討

札幌市内のタクシーをプローブカーとし、取得するGPSデータから旅行時間をデータベース化した。定点カメラのある道路横断面を含む延長4.7km(区間1:札幌市手稲区前田6条10丁目～札幌市西区発寒14条2丁目)を対象とし、旅行時間信頼性指標 (PT、Tave、BT) について、95パーセンタイル旅行時間、平均旅行時間を用いて算定した。旅行時間信頼性指標を以下の計算式により求めた。

- ・PT (Planning Time) = 95パーセンタイル旅行時間 (1)
- ・Tave = 平均旅行時間 (2)
- ・BT (Buffer Time) = PT - Tave (3)

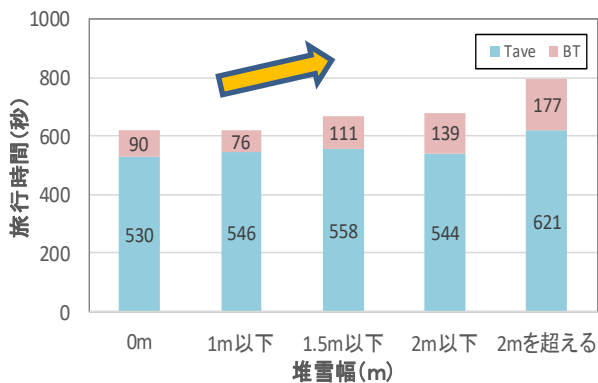


図-6 旅行時間信頼性 (非ピーク時: 9~12時, 区間1)

堆雪の幅員別に得られた旅行時間信頼性は、図-6のとおりである。堆雪幅が大きくなるに従って、旅行時間信頼性は低下した。

## 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。

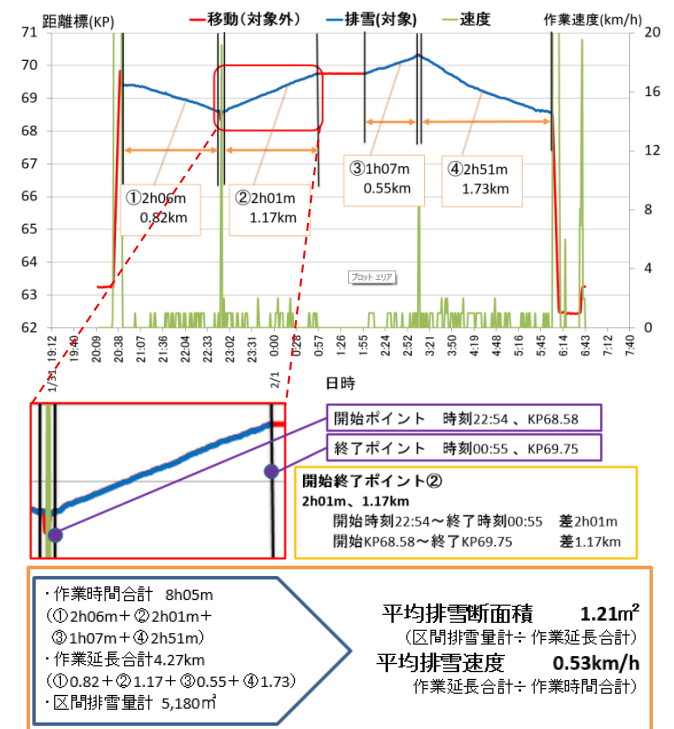


図-7 除雪車稼働グラフ例 (H29/1/31-2/1)



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(m <sup>3</sup> )	作業時間合計(h)	作業延長合計(km)	平均排雪断面積(m <sup>2</sup> )	平均排雪速度(km/h)
1	2.2m級	拡幅	2198	4:19	4.99	0.4405	1.1560
2	2.2m級	拡幅	1204	2:24	1.64	0.7082	0.7083
3	2.2m級	拡幅	1260	1:53	1.97	0.6087	1.0991
4	2.2m級	拡幅	2002	4:12	3.69	0.4778	0.9976
5	2.2m級	拡幅	2562	4:33	5.07	0.4917	1.1451
6	2.2m級	拡幅	658	2:21	0.31	0.3241	0.8638
7	2.2m級	拡幅	1008	2:10	2.75	0.3639	1.2785
~							
3592	2.2m級	拡幅	2324	4:37	1.06	0.9525	0.5285
3593	2.2m級	拡幅	5740	7:48	4.81	1.1786	0.6244
3594	2.2m級	拡幅	1918	4:37	2.78	0.5920	0.7018
3595	2.2m級	拡幅	3122	7:57	5.18	0.5846	0.6717
3596	2.2m級	拡幅	2114	3:54	1.32	1.6015	0.3385

4.1.2 排雪量と排雪速度の相関検討

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	④	ロジスティック																						
②	対数	⑤	逆数																						
③	指数	⑥	直線																						
※条件分類毎の全データを分析																									
		条件分類																							
機械種別		全機種				一車線橋形				2.2m級				2.6m級				2.2m級+2.6m級							
年度		H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
作業区分	区分なし	1				6				11				16				21							
	拡幅	2	3	4	5	7	8	9	10	12	13	14	15	17	18	19	20	22	23	24	25				
		26				31				36				41				46							
	巻出	51				56				61				66				71							
		52	53	54	55	57	58	59	60	62	63	64	65	67	68	69	70	72	73	74	75				

4.1.3 相関検討手法の分析結果

1) 妥当性の評価

相関検討手法の妥当性を評価するため、平成29年度までに抽出した4ヶ年分(H25~H28)の調査対象データのうち、表-3の条件分類1(全機種、区分なし)のデータを用いて、各手法の相関検討を行った(図-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。

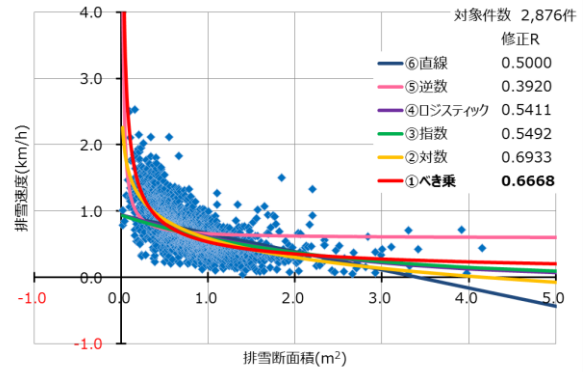


図-8 分析事例:相関検討手法①~⑥条件分類1(4ヶ年分)

表-4 検討手法の妥当性評価(4ヶ年分)

手法	妥当性の評価	理由	修正済重相関係数(修正R)	修正済決定係数(修正R <sup>2</sup> )
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)。

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										一車線橋形										2.2m級										2.6m級										2.2m級+2.6m級									
年度		H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H												
作業区分	区分なし	1										7										13										19										25									
	拡幅	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	32	33	34	35	36	38	39	40	41	42	44	45	46	47	48	50	51	52	53	54	56	57	58	59	60
		31										37										43										49										55									
	巻出	61										67										73										79										85									
		62	63	64	65	66	68	69	70	71	72	74	75	76	77	78	80	81	82	83	84	86	87	88	89	90																									

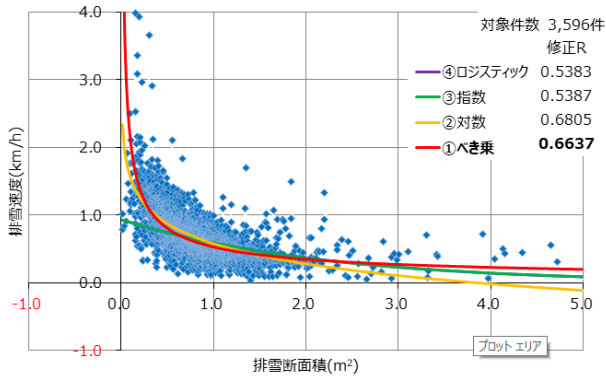


図-9 分析事例: 相関検討手法①～④条件分類1(5ヶ年分)

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 <sup>2</sup> )
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

## 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		91%
	高	中	件数	割合	
0.7 ~ 1.0	高い相関がある		13	16%	91%
0.5 ~ 0.7	かなり高い相関がある		60	75%	
0.4 ~ 0.5	中程度の相関がある		4	5%	
0.3 ~ 0.4	ある程度の相関がある		1		
0.2 ~ 0.3	弱い相関がある		2	4%	
0.0 ~ 0.2	ほとんど相関がない		0		

※相関の度合い: 出典「社会調査の基礎」放送大学テキスト

※条件分類は、90件から10パターン(対象データが10件以下)を削いた80件で算出

## 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。

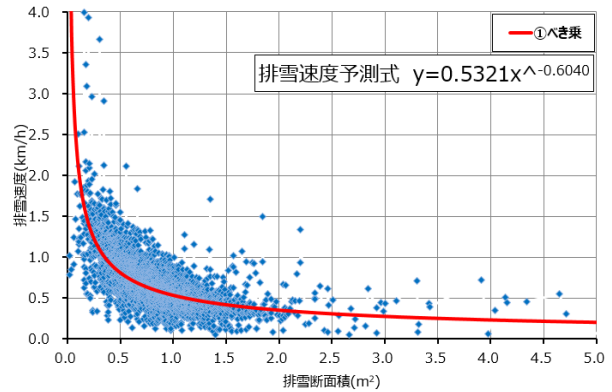


図-10 相関検討手法①べき乗、条件分類1



図-11 現地計測状況

### 4.2.2 独立変数の検証

分析に用いる独立変数について妥当性の検証を行い、5項目の除外項目を選定した(表-9)。

### 4.2.3 推計結果

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を堆雪断面面積の予測式として選定した(表-11)。

表-8 重回帰分析内容

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

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、堆雪断面面積が小さくなると推定できるため
l. 平均気温(℃)	妥当性あり (マイナスに作用)	平均気温が0℃を超えると雪が融け、堆雪断面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、堆雪断面面積が小さくなると推定できるため

表-10 分析パターン及び結果

分類	従属変数 (目的変数)	修正済み相関係数 (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 堆雪全断面面積	0.8539	<b>0.8444</b>	f,g,i
	② 車道部 堆雪断面面積	0.8334	<b>0.8299</b>	e,f,g,i,k
B 計測 期間毎	③ 堆雪全断面面積	0.7390	0.7307	e,f,h,i,n
	④ 車道部 堆雪断面面積	0.6955	0.6820	e,f,g,h,i,n
C 2計測 期間毎	⑤ 堆雪全断面面積	0.8215	0.8111	e,f,h,i,n
	⑥ 車道部 堆雪断面面積	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	堆雪断面面積(m <sup>2</sup> )	-	-
a <sub>1</sub>	e. 拡幅積上(回数)	-	0.2062
a <sub>2</sub>	f. 排雪巻出(回数)	-2.7216	-1.7733
a <sub>3</sub>	g. 排雪拡幅(回数)	-0.8473	-0.8277
a <sub>4</sub>	i. 最深積雪(cm)	0.0609	0.0382
a <sub>5</sub>	k. 降水量(mm)	-	-0.0018
b	定数項	-0.6947	-0.2151

選定した予測式の精度を確認するため、予測式(2種類)×計測地点(10地点)×4ヶ年分(H25~H28)、計80件の比較グラフを作成し(表-12)、予測式から算出した堆雪断面面積の予測値と実測値を地点毎に比較した。堆雪全断面面積と車道部堆雪断面面積の比較グラフの例を図-12及び図-13に示す。

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

表-12 比較グラフ作成件数

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

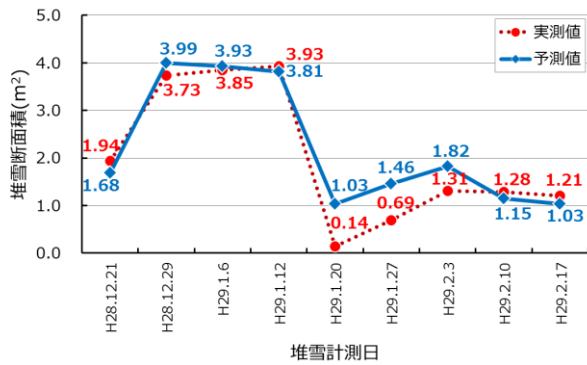


図-12 分類A 累計① (堆雪全断面積) による比較例 (H28、札幌 R5 地点②)

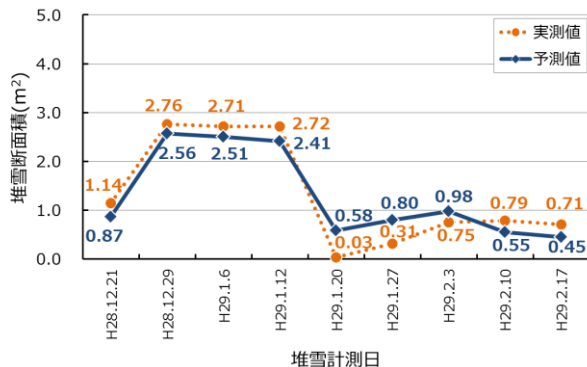


図-13 分類A 累計② (車道部堆雪断面積) による比較例 (H28、札幌 R5 地点②)

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

確認の結果、堆雪全断面積(図-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。

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、

旭川では予測値と実測値の差が大きかった。旭川では札幌と気象条件及び運搬排雪実施判断基準等が異なることが原因と思われる。

また、車道幅員等の道路幅員構成を考慮する必要があると考えられる。

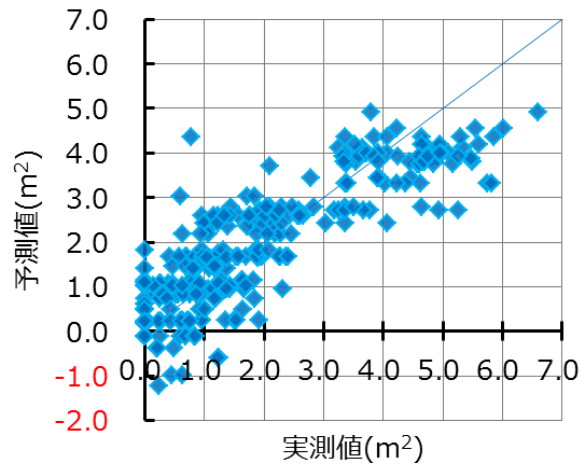


図-14 予測値の精度確認 (堆雪全断面積)

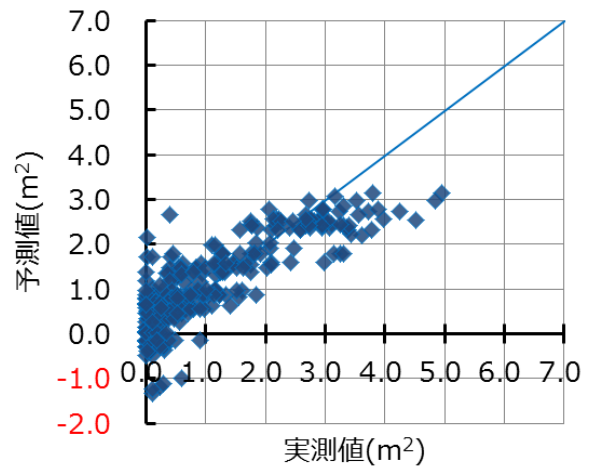


図-15 予測値の精度確認 (車道部堆雪断面積)

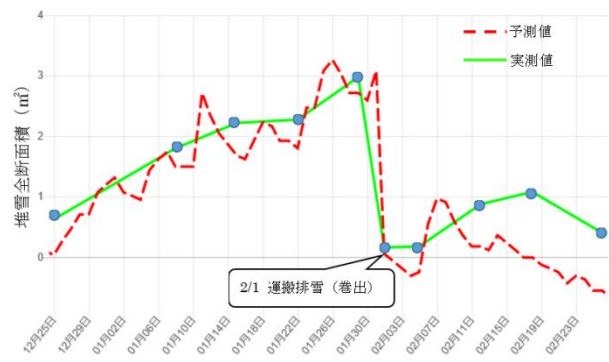


図-16 予測値 (堆雪全断面積) と実測値による推移 (H30 札幌 R274 下り KP12~13)



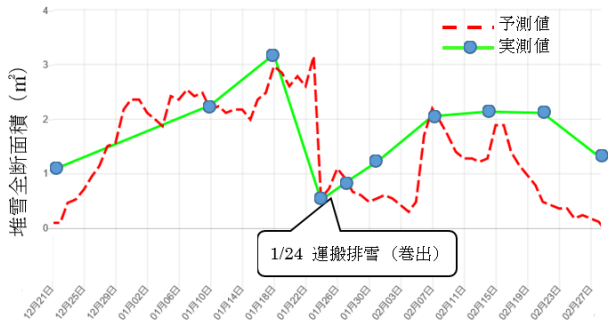


図-17 予測値（堆雪全断面積）と実測値による推移  
(H30 小樽 R5 上り KP246~247)

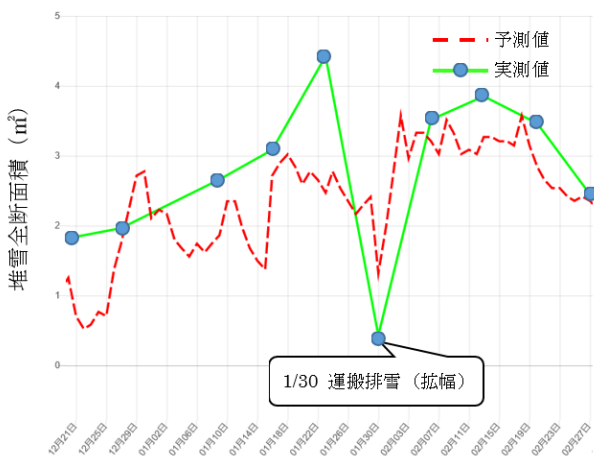


図-18 予測値（堆雪全断面積）と実測値による推移  
(H30 旭川 R39 下り KP=9~10)

令和元年度は、気象条件及び道路幅員構成等の地域性に着目し、札幌6ヶ年分(H25~H30)・小樽2ヶ年分(H29~H30)・旭川2ヶ年分(H29~H30)のデータを用いて、地域ごとに堆雪断面積予測式を試算した。説明変数を堆雪全断面積とし、目的変数が過年度と同様のパターンA(目的変数:巻出回数、拡幅回数、最深積雪深)とパターンAに道路幅員構成を追加したパターンBについて、重回帰分析を行った(表-13)。全地域でパターンBの方がパターンAよりも修正済重相関係数が高く、札幌と小樽で高い相関が確認できた。図-19、20に実測値と予測値のグラフを示す。札幌と小樽では概ね同様の傾向が確認できた。札幌と比較して、小樽ではパターンBの方がパターンAよりも実測値に近い傾向が見られた(図-20)。

また、旭川では修正済重相関係数があまり高い値ではなく、予測値と実測値の差が大きかった。旭川では堆雪断面積計測値が2ヶ年と少なく、年度ごとの運搬排雪実施判

断基準が異なるため、初冬期と晩冬期に分け運搬排雪実施状況による要因を除くと高い相関が確認できた。

今後も堆雪断面積計測データを蓄積し、堆雪形成傾向の把握を進める予定である。

表-13 地域ごとの重回帰分析結果  
(目的変数:堆雪全断面積)

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

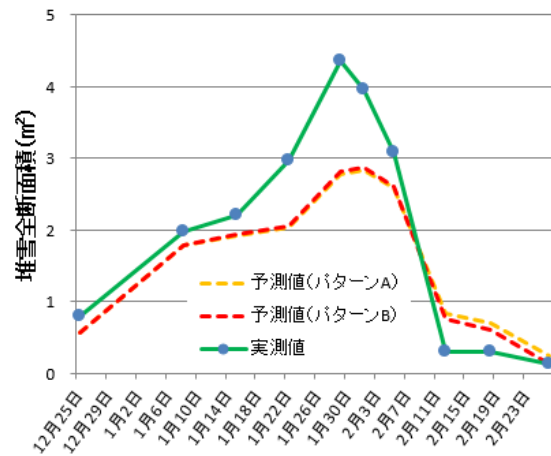


図-19 予測値（堆雪全断面積）と実測値による推移  
(H30 札幌 R274 R側 KP=15~16  
車線幅員9.75m 路肩幅員1.0m)

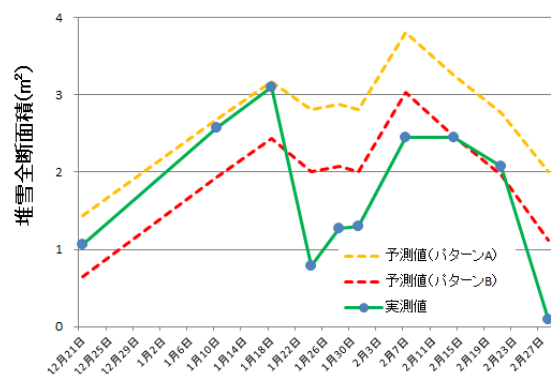


図-20 予測値（堆雪全断面積）と実測値による推移  
(H30 小樽 R5 R側 KP=249~250  
車線幅員6.5m 路肩幅員1.0m)

## 5. 路肩堆雪断面積と堆雪の幅員の関係性把握

令和元年度に開発局、札幌・小樽・旭川開発建設部管内の維持除雪工事監督員及び請負者（20 か所 74 名）へヒアリングを行った結果、運搬排雪実施時期を決める際に、通行に必要な道路有効幅員が確保されているかを、判断基準の一因としている除雪従事者は 8 割以上だった。そのため、冬期における路肩堆雪による道路有効幅員の関係性を把握するため、気象データ等による重回帰分析を行った。

### 5.1 気象データ等による堆雪の幅員の把握

道路有効幅員は次式で算出できる。

$$\text{道路有効幅員 (m)} = \text{道路幅員 (m)} - \text{堆雪の幅員 (m)} \quad (4)$$

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

表-13 パターンBについて、札幌・小樽・旭川の各地域で重回帰分析を行った結果（表-14）から、路肩堆雪幅の予測式を作成した。データ件数は、それぞれ 2 ヶ年分の 200 件（20 計測日（H29:10 回、H30:10 回）×10 地点）を対象とした。

札幌、小樽と比較し、旭川の相関は低い結果となった。

表-14 地域ごとの重回帰分析結果  
（目的変数：路肩堆雪の幅員）

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

### 5.2 堆雪断面積と堆雪の幅員の関係性把握

堆雪断面積と堆雪の幅員の推移を図-21 に示す。堆雪の幅員の予測値と実測値では概ね同様の傾向が確認できた。また、堆雪断面積と堆雪の幅員については、予測値と実測値ともに、その推移は類似傾向を示すことが確認された。

今後、堆雪の幅員成長傾向を分析し、堆雪断面積と堆雪の幅員の関係性把握を進める予定である。

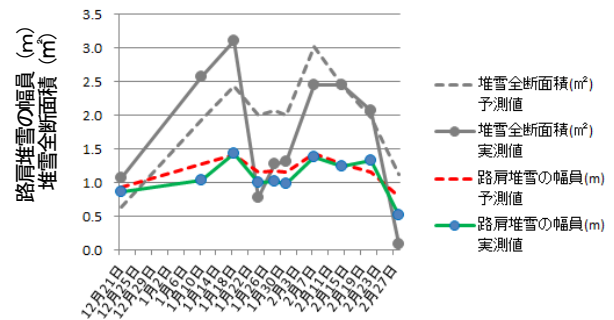


図-21 堆雪断面積と堆雪の幅員の推移  
(H30 小樽 R5 R側 KP=249~250  
車線幅員 6.5m 路肩幅員 1.0m)

## 6. 路肩堆雪部形状計測技術の評価と検証

堆雪断面積の推移の精度向上には、推計値の常時検証のために連続かつ定常的な堆雪形状の把握が必要となるが、現在必要の都度に人力にて計測している。

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

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

### 6.1 路肩堆雪部形状計測技術の評価

路肩堆雪部の形状計測方法について、適用可能な技術を調査した。建設分野における ICT 技術の進展を踏まえ、適用できる可能性がある技術を 5 例抽出し、精度・経済性・現場適合性について評価したところ「デジタルカメラ撮影写真による 3 次元モデル作成」が最も高い評価となった（表-15）。

表-15 路肩堆雪部形状計測技術の評価

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

※◎：5点、○：3点、△：1点

### 6.2 路肩堆雪部形状計測技術の検証

SfM(Structure from Motion)技術に基づく 3 次元モデル作成ソフトを用いた計測結果と従来方式（トータルステーション）による計測結果を比較し、実現性を検証した。なお、3 次元モデル作成ソフトは市販されている

MetaShape を使用した。

### 6.2.1 検証手順

- (1) 従来方式による計測箇所の堆雪断面をデジタルカメラで10枚程度撮影する。堆雪部表面の同一箇所が複数の写真に納まるように撮影する。大きさの基準となる既存構造物（標識支柱等）も併せて撮影する。
- (2) MetaShape に撮影写真を投入し、3次元モデルを作成する（図-22）。
- (3) MetaShape から出力された3次元モデルをCADソフト（AutoCAD）で取り込み、既存構造物の大きさ等を参考に堆雪断面積を算出する（図-23）。
- (4) 3次元モデル作成による計測結果と従来方式による計測結果を比較する。

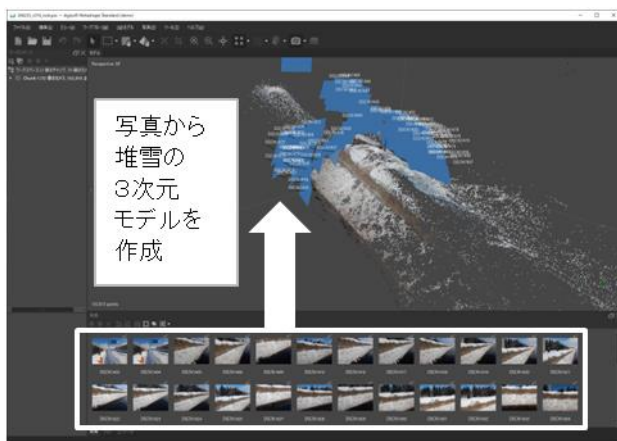


図-22 3次元モデル作成 (MetaShape)

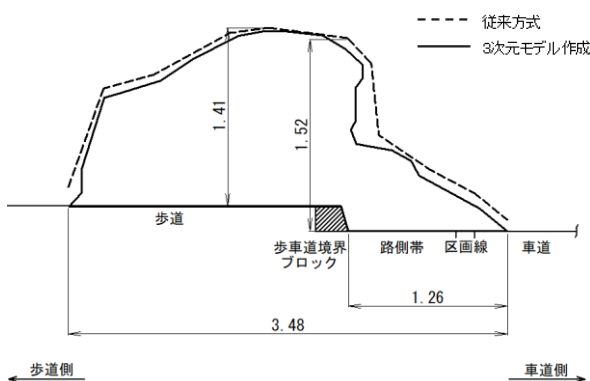


図-23 堆雪断面計測結果の比較  
(R1 札幌 R274 L側 KP=14~15)

### 6.2.2 検証結果

3次元モデル作成による計測と従来方式による計測結

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

今後、3次元モデル作成による詳細な計測手法について検討していきたい。

## 7. 路肩堆雪が通行車両の視認性に与える支障度合い調査

### 7.1 路肩堆雪の影響に関する走行実験

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

#### 7.1.1 走行実験概要

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

#### 7.1.2 堆雪

走行実験で用いる模擬堆雪は7箇所（図-24）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-25）。

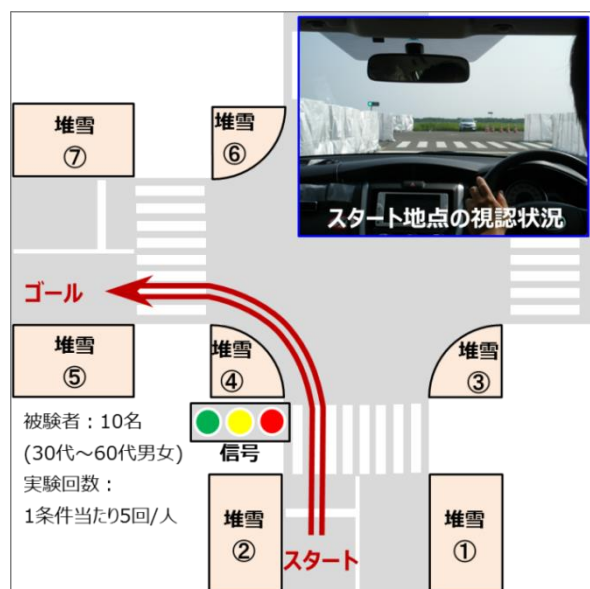


図-24 堆雪位置及び走行コース

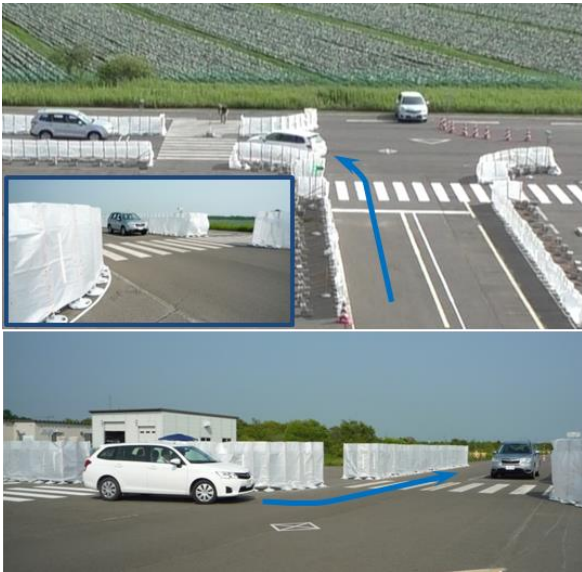


図-25 堆雪の影響に関する実験状況

### 7.1.3 走行条件

被験者は実験車両（トヨタ カ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-25）。また、被験者は同じ実験条件で5回連続して走行した。うち、1~2回は交差点内に他の走行車両もしくは歩行者がランダムに進入する条件で行い、他の走行車両や歩行者が来るかもしれないという意識を被験者に持たせた。

### 7.1.4 被験者

被験者は、運転初心者やペーパードライバーではない男女10名とした。全員が視覚に対する健常者で、年齢は30歳~60歳代、運転時の目線の高さは116cm~125cmの範囲であった。

### 7.1.5 主観評価

被験者は各堆雪高さにおいて、堆雪毎の支障度合いを主観評価した。評価には7段階評価のアンケートを用いた（図-26）。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。

### 7.1.6 主観評価の結果

主観評価の結果（図-27）、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。

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.						
堆雪① 1.5m	1	2	3	4	5	6	7
堆雪② 1.5m	1	2	3	4	5	6	7
堆雪③ 1.5m	1	2	3	4	5	6	7
堆雪④ 1.5m	1	2	3	4	5	6	7
堆雪⑤ 1.5m	1	2	3	4	5	6	7
堆雪⑥ 1.5m	1	2	3	4	5	6	7
堆雪⑦ 1.5m	1	2	3	4	5	6	7
	支障にならない  支障になる						

図-26 堆雪の支障度合いアンケート表

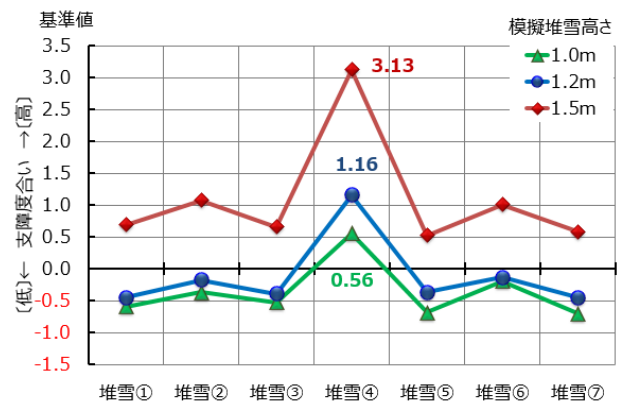


図-27 主観評価の結果

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

## 8. 除排雪の作業計画支援技術の開発

堆雪断面積の推移を予測することで、効率的な除排雪作業や除排雪作業計画の立案が可能となる。そこで、過年度までに表-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。

令和元年は、支援システムの検証用システムを作製し動作確認やユーザーの使用感を含めた課題の抽出を行った。



## 8.1 要件定義

図-28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。

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。

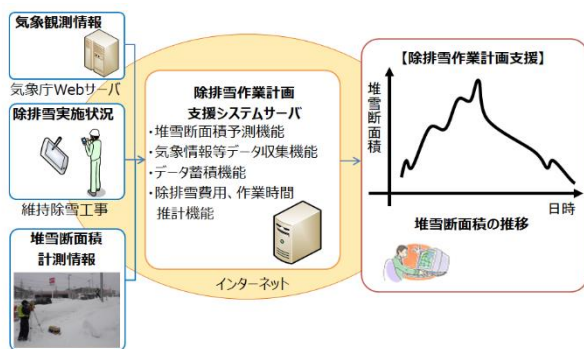


図-28 「支援システム」イメージ図

## 8.2 概略処理フロー

図-29に「支援システム」の概略処理フローを示す。ユーザーが①場所（路線番号、距離標）、②使用したい気象観測所名、③年間降雪パターン、④除排雪作業実施日と工法を選択すると堆雪断面積の推移がグラフで確認できる。

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

## 8.3 検証用システム作製と課題の抽出

検証用システムを作製し(表-16、図-30)、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ため、開発局、札幌・小樽・旭川開発建設部管内の維持除雪工事監督員及び請負者(20か所74名)へヒアリングを行った。

ヒアリングの結果から、アメダス観測地点データの追加、車線有効幅員の表示や当該年度に近い年間降雪パターンを選択する機能の追加等の要望が明らかになった。

今後、現場ニーズに近づくために、必要な機能の抽出を行う予定である。

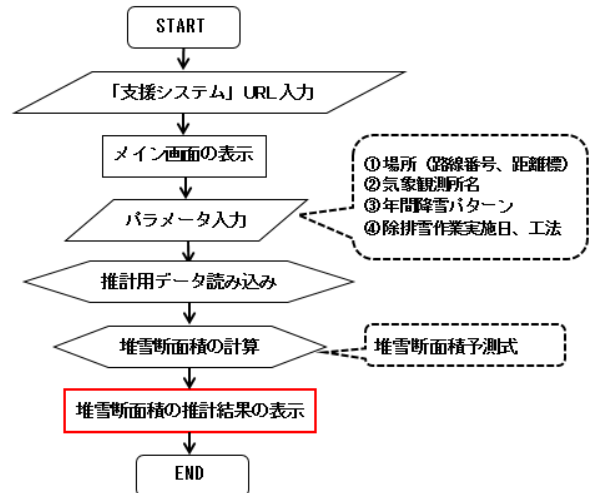


図-29 「支援システム」概略処理フロー

表-16 「支援システム」の動作環境

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

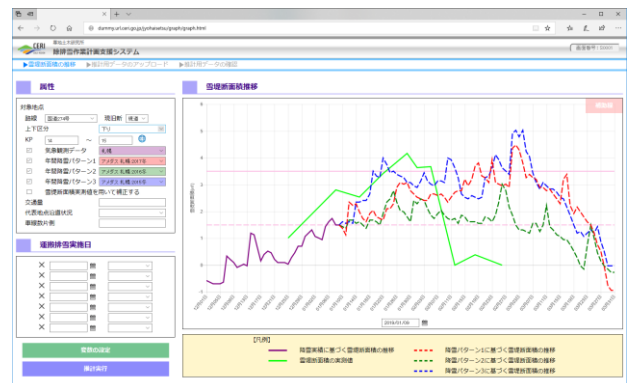


図-30 「支援システム」の画面表示例(堆雪断面積推移)

## 9. まとめ

令和元年度までに行った研究の結果、以下の成果が得られた。

- 片側2車線道路の地方道を対象とし、排雪前後の交通流の分析を行った。排雪作業の実施に伴い、交通量-速度(Q-V)性能が向上することをデータにより確認した。また、路肩の堆雪幅の増加に伴い、旅行時間信頼性が低下することも確認した。
- 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、地域ごとに路肩堆雪断面積の予測式を作成した。また、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、旭川では予測値と実測値の差が大きかった。
  - ・堆雪断面積と堆雪の幅員の関係性を把握するため、地域ごとに路肩堆雪の幅員の予測式を算出した。札幌と小樽で高い相関があることを確認したが、旭川ではあまり高い相関はみられなかった。
  - ・路肩堆雪部の形状計測に適用可能な技術を調査し、精度・経済性・現場適合性による評価が最も高い「デジタルカメラ撮影写真による3次元モデル作成」について検証した結果、従来方式よりも作業の手間を減らせる可能性を確認した。
  - ・路肩堆雪がドライバーの視認性に与える支障度合いの主観評価より、交差点内の堆雪の高さはドライバーの目線高さより低い1.0m程度に抑えることが望ましい。
  - ・堆雪断面積予測式を使用した「支援システム」の検証用システムを作製しヒアリングの結果から、システムに対するいくつかの機能追加の要望が明らかになった。
- 今後、冬期の除雪レベルに応じた交通流の予測、夏期並びに冬期を考慮した効率的な道路横断面の利用を検討するほか、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」の実用化に向けて必要な機能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～， p.6 ， p.9, 2013  
[http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/yukimichi/Pdf/20130515\\_teigen.pdf](http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/yukimichi/Pdf/20130515_teigen.pdf) (2020年6月18日確認)

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

### 14.2.1 凍結路面对策の省力化技術に関する研究

担当チーム：寒地道路研究グループ（寒地交通チーム）

研究担当者：石田樹、佐藤昌哉、高橋尚人、平澤匡介、徳永ロベルト、中島知幸、藤本明宏、佐藤賢治、高田哲哉、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、それらの変化から各種作業支援がもたらす効果や課題を明らかにした。平成 30 年度は、過年度までの結果を踏まえた凍結防止剤散布作業支援システムの設計・構築に取り組んだ。令和元年度は、凍結防止剤散布作業支援システムの改良および実道における精度検証を行った。

キーワード：冬期路面管理、凍結防止剤、オペレーター、散布作業、支援技術

#### 1. はじめに

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

道路管理者による冬期路面管理作業（凍結防止剤散布）の判断は、除雪等に関するハンドブック<sup>3,4)</sup>や冬期路面管理マニュアル（案）<sup>5)</sup>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<sup>3)</sup>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<sup>6)</sup>が試行されるなど、オペの判断・作業を支援する技術の検討が進められている。しかしながら、これらの技術は導入コストが高額等の理由もあり、普及まで進んでいないのが現状である。

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

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

平成 29 年度は、散布作業支援の有無・種別（支援な

し、情報提供のみ、情報提供+音声操作機能および情報提供+音声操作機能+自動散布機能)による運転中のオペの心理状態および挙動の変化について調べた。

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

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

## 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）<sup>7)</sup>において定義されている。

産業・医療・航空・鉄道・自動車分野等では、過剰な負荷がかかるような課題内容や長時間に及ぶ単純・単調な課題はヒューマンエラーにつながり、作業効率の低下や事故の要因になるとして、作業中における人間の負担に関する様々な研究<sup>8)</sup>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<sup>9, 10, 11, 12)</sup>。しかし、道路の維持管理作業に従事するオペについては、これらの課題処理能力を MW によって評価した例は筆者らの知る限り見受けられない。本研究では、凍結防止剤散布の現地作業判断支援技術の構築に向けて、凍結防止剤散布作業におけるオペの課題処理能力を MW によって定量化および評価している。

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

### 2.1 主観的評価法による MW の把握

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

### 2.2 客観的評価法による MW の把握

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

## 3. 熟練度および情報の有無・種別による MW の違い

### 3.1 実験概要

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

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。当該道路は、延長 2,700m の長円形周回路で、アスファルト舗装された直線部 2 区間（片側 2 車線区間 1,200m、片側 1 車線 1,200m）および半径 50m の曲線部 2 区間



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

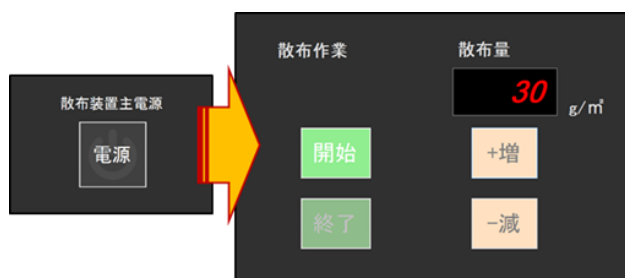


図-1 操作パネル上の表示ボタン



写真-3 アイトラッキング装置

によって構成されている。

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

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

本実験には、試験車両に 2 トントラックを用いた(写真-1)。なお、被験者は当該車両の助手席に搭乗し、運転は実験補助員が行った。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（全地球航法衛星システム）を搭載する記録装置に 10Hz で記録収集した。

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

当該実験では、前述の苫小牧寒地試験道路周回路 2,700m 全区間を実験コースとして使用し、試験車両は実験コースの KP0.3 付近を起終点に反時計周りで周回路を約 40km/h で走行した(図-2)。

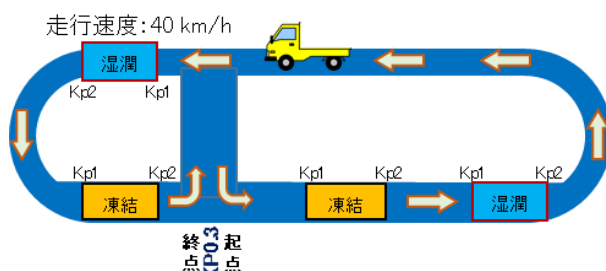


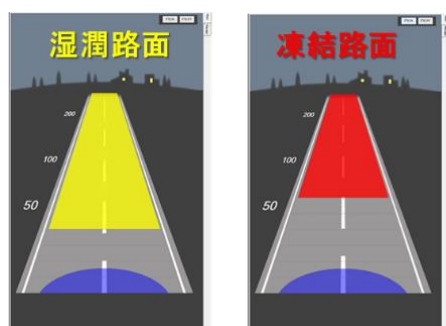
図-2 実験コースと凍結・湿潤路面のレイアウト例

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・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。



<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・ブ・ブ(100m前)ブツツ(50m前)ブブブ(0m前)ブ  
 凍結: (200m前)ピ・ピ・ピ(100m前)ピツピ(50m前)ピビビ(0m前)ピー

図-3 車載情報端末による路面状態の情報提供例

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 20g/m<sup>2</sup> および凍結路面で 30g/m<sup>2</sup> とした。なお、路面状態の判断が的中か否かの判定は、路面状態に応じて正しい散布量でセットされていれば的中とした。次いで、湿潤・凍結路面区間の起点・終点で散布 ON・OFF ボタンを操作するものとした。なお、上記課題遂行において車載情報端末から前方の路面状態等に関する情報提供があった場合は、これを参考にして良いこととした。

### 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

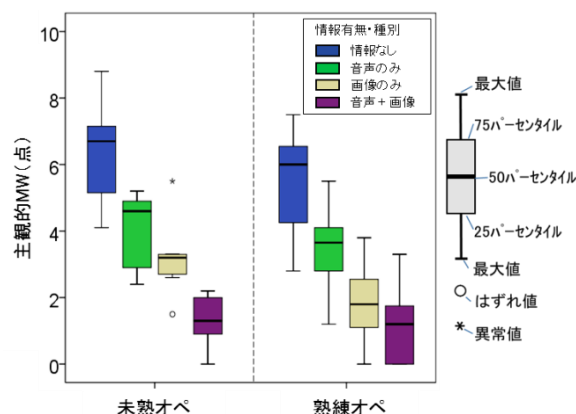


図-4 熟練度別および情報有無・種別主観的 MW

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 は、熟練度別および情報有無・種別によるオペの認知距離の標本数、平均値、標準偏差等を示し、図-5 は熟練度別および情報有無・種別によるオペの認知距離を箱ひげ図で示している。なお、本項での認知距離とは、湿潤・凍結路面区間の起点 (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

表-2 熟練度別および情報有無・種別認知距離

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

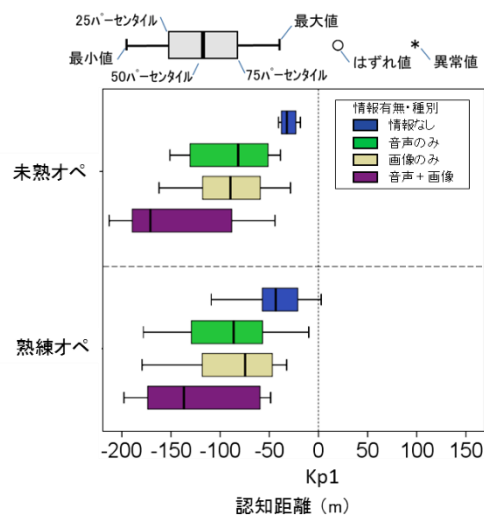


図-5 熟練度別および情報有無・種別認知距離

は音声と画像を組み合わせることで前方の路面状態をより手前から認知可能になり、散布作業判断等の改善に繋がると考えられる。

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

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

表-3 認知区間における熟練度別および情報有無・種別によるオペの注視率

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

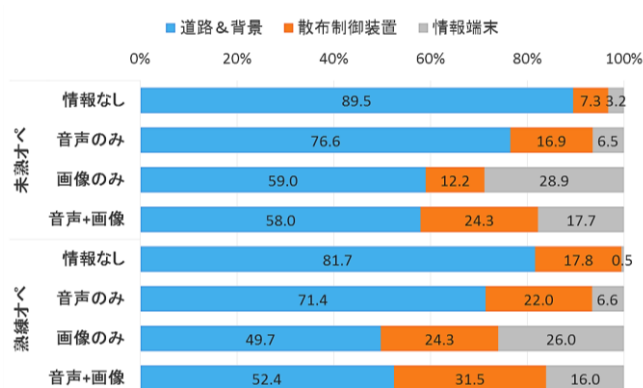


図-6 認知区間における熟練度別および情報有無・種別によるオペの注視率

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

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

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

散布制御装置の注視率が増えた。

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

#### 4. 散布作業支援の有無・種別によるMWの違い

##### 4.1 実験概要

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

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

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

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





写真-4 実験に用いた試験車両



写真-5 被験者による各機器の確認状況

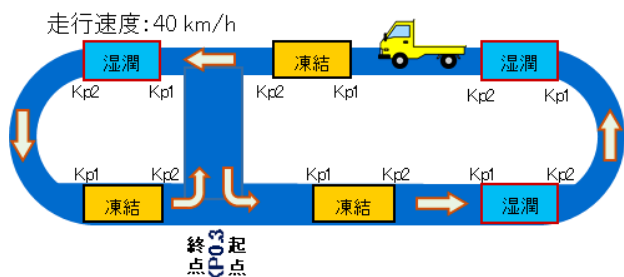


図-7 実験コースと凍結・湿潤路面のレイアウト例

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

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

実験では、平成 28 年度と同様に試験道路周回路全区間を使用し、試験車両は実験コースの KP0.3 付近を起終点に反時計周りで周回路を約 40km/h で走行した (図-7)。また、実験コースの路面状態は乾燥路面を主とし、コース内一部には 100m の湿潤路面および凍結路面を各 3 区間 (計 6 区間) 敷設した。被験者は、これら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、音操および自散の二つの操作支援機能を凍結防止剤散布制御装置に追加した (写真-6)。



写真-6 車内に設置した凍結防止剤散布制御装置

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

被験者には、実験コース内走行時に前方の路面状態を常に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/m<sup>2</sup> および凍結路面で 30g/m<sup>2</sup> とした。なお、路面状態の判断が的中か否かの判定は、路面状態に応じて正しい散布量でセットされていれば的中とした。次いで、湿潤・凍結路面区間の起点・終点で散布 ON・OFF 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。

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

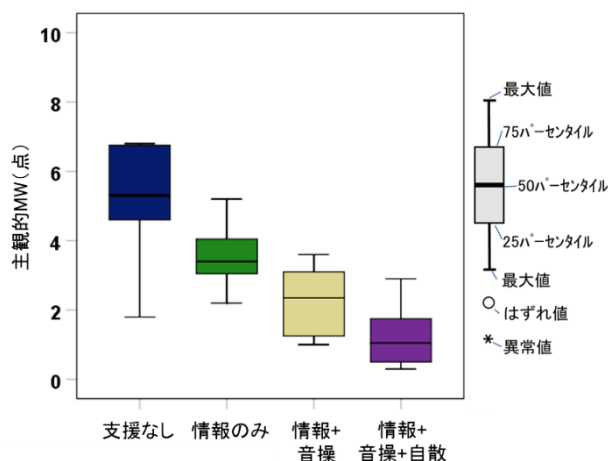


図-8 散布作業支援有無・種別による主観的 MW

支援なしにおけるオペの平均主観的 MW は、5.2 点となり、4 つの試験条件の中で評価点が最も高かった。また、散布作業支援が情報のみの時の平均主観的 MW は 3.5 点となり、過年度の結果と同様に情報提供によってオペの主観的 MW が軽減することを確認した。更に、散布作業支援が情報+音操になると、オペの平均主観的 MW は 2.2 点となり、主観的 MW が情報のみの時より更に低下した。最後に、散布作業支援が情報+音操+自散では、オペの主観的 MW は 1.2 点となり、散布作業支援の有無・種別の中で最も低下した。その理由として、オペは運転中に散布作業（認知・判断・操作）を行う必要が一切なく、車両の運転のみを行ったためと考える。

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

かった。

### 4.3.2 オペの挙動について

表-5 は、散布作業支援の有無・種別によるオペの認知距離の標本数、平均値、標準偏差等を示し、図-9 は散布作業支援の有無・種別によるオペの認知距離を箱ひげ図で示している。なお、本項での認知距離とは、湿潤・凍結路面区間の起点 (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。

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

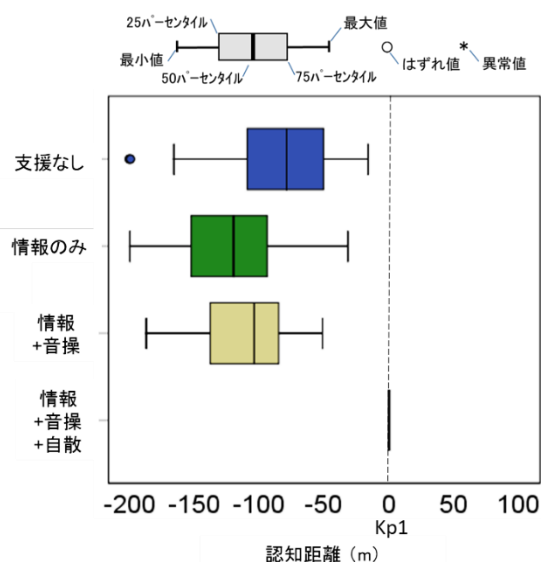


図-9 散布作業支援の有無・種別による認知距離

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 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。

表-6 散布作業支援の有無・種別による判断の的中率

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

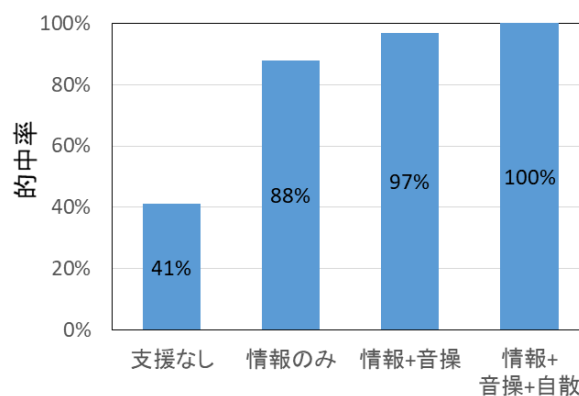


図-10 散布作業支援の有無・種別による判断の的中率

以上の結果から、散布作業支援 (情報のみおよび情報+音操) はオペによる路面状態の判断の的中率向上に貢献することが分かった。また、散布作業支援が情報+音操+自散の場合、確実な散布判断が可能である他、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



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

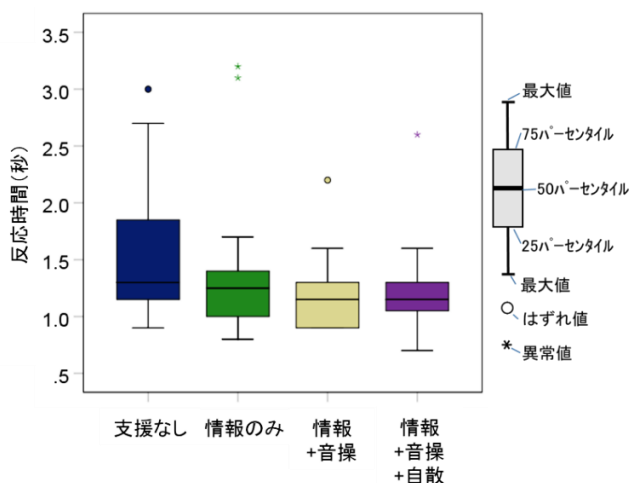


図-11 散布作業支援の有無・種別による反応時間

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

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

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

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

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

情報のみでは、支援なしと同じく 5 エリアの中で道路・背景の注視率が最も高く 77.9%を示したが、支援なしより減少し、4 条件の中で最も減少した。一方、散布制御装置・情報端末の注視率はそれぞれが 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に移動・滞留する頻度が増えたためと考えられる。他方、情報+音操は、散布制御装置・情報端末の注視率を支援なしより増加させたが、情報のみほどではなかった。これは、運転中のオペが散布制御装置を手で操作することなく音声を発して散布作業が可能になったため、情報端末や散布制御装置の注視率増加抑制に寄与したと考えられる。また、情報+音操+自散は、散布制御装置・情報端末の注視率を情報+音操より更に減少させ、道路・背景の注視率が4条件の中で最も高い値となった。これは、自動散布機能が加えられたことで散布を要する湿潤・凍結路面区間において運転中のオペが情報の確認や散布制御装置を操作することなく、自動的に電源ON、散布量設定、散布ON・OFFが可能になり、オペが散布車両運転に専念することができたためと考えられる。

## 5. 凍結防止剤散布作業支援システムの構築

平成30年度は、過年度までの被験者実験による散布作業判断支援技術および散布作業操作支援技術がオペの心理状態および挙動にもたらす効果を踏まえ、熟練度に左右されず、一人乗車（ワンマンオペレーション）でも適格かつ安全な散布作業を可能とする凍結防止剤散布支援システム（図-13）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。

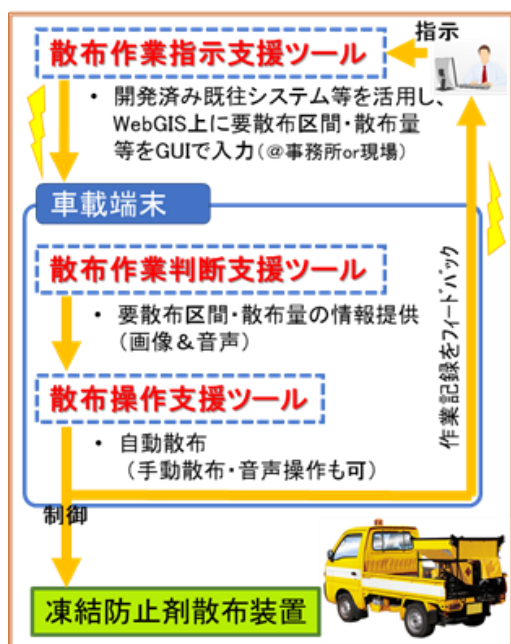


図-13 設計・構築した支援システムのプロット

## 5.1 システム構成の概要

凍結防止剤散布作業支援システムは、散布作業指示支援ツール（以下、指示ツール）、散布作業判断支援ツール（以下、判断ツール）および散布操作支援ツール（操作ツール）の三つのツールで構成させた。これらのツールを、インターネットを介してリアルタイムに連携できるようにした。指示ツールは、当研究所で所有・試行運用している既往の冬期道路マネジメントシステム内に組み込み、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。

- 当研究所が所有する冬期道路マネジメントシステムと連携させ、冬期の路面状態予測情報（気象メッシュ、路面温度・路面状態等）を参考に、事務所の担当者（道路管理者または道路維持従事者）が机上において散布箇所（または区間）毎の散布是非、散布量を入力できること
- 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（JavaScript等）およびWebGIS（国土地理院や民間が提供する背景地図）を使用すること
- 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

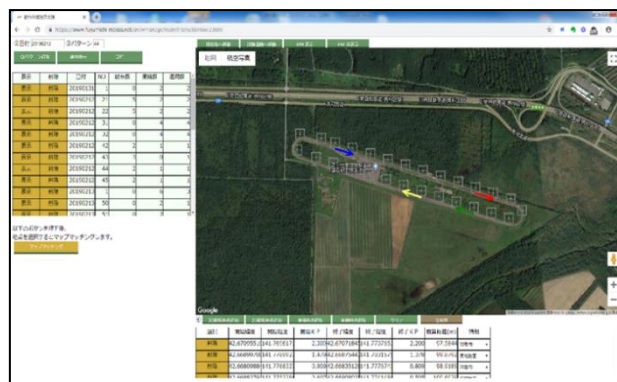


図-14 指示ツールの画面



写真-7 車載タブレット PC

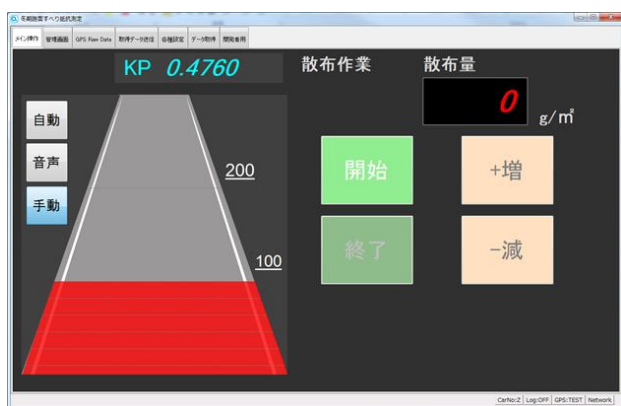


図-15 判断ツール (左)・操作ツール (右) の画面

### 5.1.2 判断ツール

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

- ・ 車載タブレット PC にジャイロセンサー・加速度センサー付 GNSS (パイオニア社製、GPS-M1ZZ、更新周期 1Hz、位置精度 10m、) を接続し、市街地・トンネル内でも搭載車両の位置・方位を正確に測位できること
- ・ 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、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 上で散布作業状況が確認できること
- ・ 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)。

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



写真-8 車載式凍結防止剤散布装置



トローラ間の信号変換器 (DA コンバータ) として使用し、操作ツールからの制御信号を変換してモジュールが内蔵するリレーを作動させることで凍結防止剤散布装置の制御 (散布量設定や散布開始・散布終了) が可能になった。

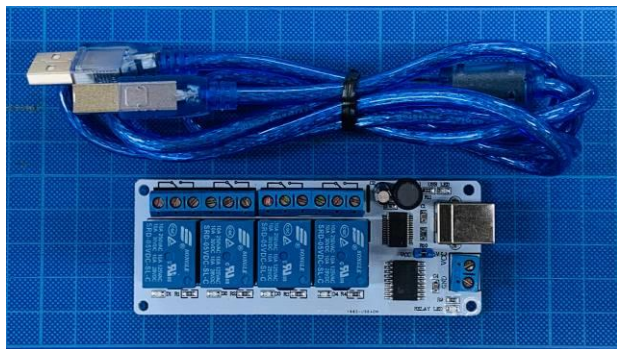


写真-9 使用した継電器モジュール

## 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。



図-16 一般国道 235 号

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  $30 \text{ g/m}^2$ )。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  $20 \text{ g/m}^2$ )。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  $20 \text{ g/m}^2$ )。なお、凍結防止剤散布作業支援システムによる判断支援・操作支援がある条件では、これらを使用するよう指示した。なお、車両の助手席には補助員が同乗し、運転者の安全確認を補助した。運転者は、走行区間において道路交通法規 (法定速度) 等を厳守し、路面状況を踏まえながら運転および散布作業を行った。

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

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

以上の結果から、判断支援および操作支援が加わった散布手法では散布操作に遅れが伺えるが、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、散布作業支援があった際に生じた傾向的な遅延については、GNSS

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

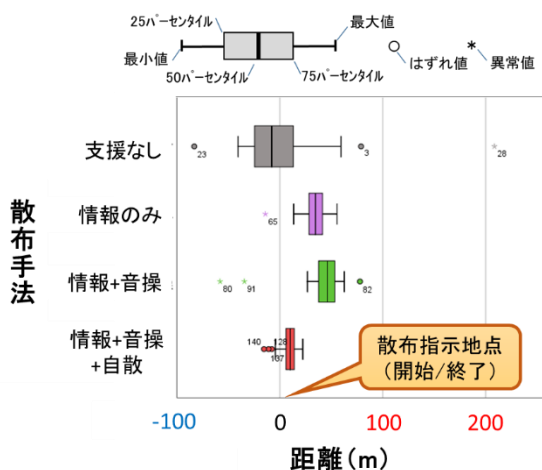


図-17 散布作業支援の有無・種別による距離差

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、これらの応答性改善を含めた改良が必要であることを確認した。

## 6. 凍結防止剤散布作業支援システムの精度向上

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

### 6.1. システムの改良

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

#### 6.1.1 指示ツールの改良

令和元年度は、指示ツールのアプリケーション改良によって以下の仕様を満たすよう取り組んだ。

- ・ 国道に限らず、距離標（キロポスト）が存在しない市街道路にも対応させるため、過年度構築した散布作業実施箇所等の位置情報を距離標の他、座標判定方式（緯度経度および方位）でも表示し、後者でも使用可能になるようソフトウェアを改良すること（図-18）

- ・ 上記指示ツールのデータが改良前のツールと同様にインターネットを介して現地の車載タブレット PC にリアルタイムに送信できるようソフトウェアを改良すること



図-18 指示ツールの画面（令和元年度版）

#### 6.1.2 判断ツールの改良

令和元年度は、判断ツールの改良によって以下の仕様を満たすよう取り組んだ。

- ・ 国道に限らず市街道路にも対応させるため、距離標の他、緯度経度および方位でも表示可能にし、後者でも判断ツールが使用できるよう可能にすること
- ・ 車両の位置情報については、測位精度・更新時間を向上させるため、複数の衛星システムに対応したマルチ測位機能と自律航法機能を搭載した陸上用 GNSS モジュール（古野電気株式会社製 GNSS、PT-G1、更新周期 10Hz、位置精度 2.5m、写真-10）を採用し、これに対応させるためのソフトウェア改良を行うこと
- ・ 指示ツールからインターネット回線を介して散布指示区間および散布量の情報をリアルタイムに車載タブレット PC で受信し、要散布区間において画像およびブザー音が明示されること



写真-10 採用した GNSS モジュール一式



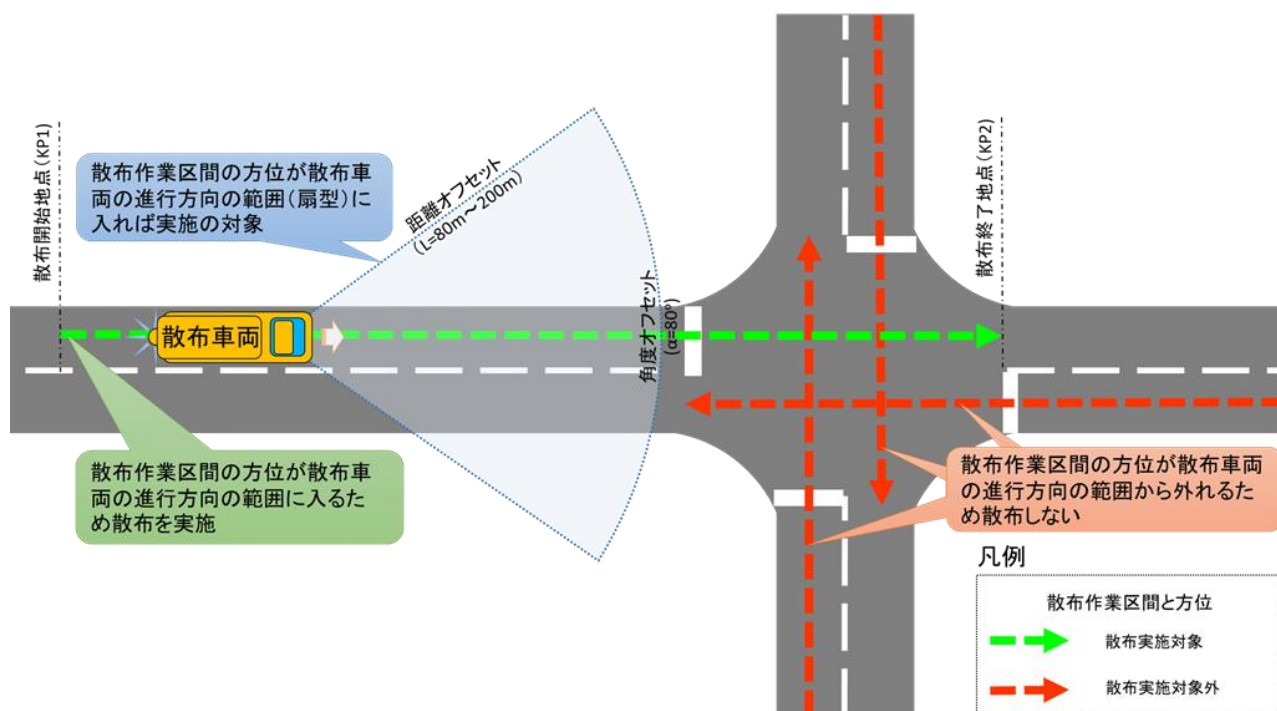


図-19 凍結防止剤散布作業支援システムによる散布作業対象区間判定方法の概念

### 6.1.3 操作ツールの改良

操作ツールは、指示ツール・判断ツール同様に過年度より設計・構築しているアプリケーションである。なお、令和元年度は操作ツールの改良によって以下の仕様を満たすよう取り組んだ。

- ・ 当該システムを国道に限らず市街道路にも対応させるため、過年度業務において構築した散布作業実施個所等の位置情報を指示ツールと同様に距離標の他、緯度経度および方位でも表示し、後者でも作動可能になるようソフトウェアを改良すること
- ・ 判断ツールと同様に、新たなGNSSに対応させるため、操作ツールの改良と動作確認を行うこと

### 6.2 改良システムの精度検証

本研究では、過年度構築した凍結防止剤散布支援システムの基本仕様を保持しながら、GNSS モジュールの変更および散布作業区間の設定に座標判断方式（緯度経度・方位）を新たに採用するとともに、当該支援システムのソフトウェア改良（システムの応答性・精度向上等）に取り組む、実道においてこれらの効果の有無・度合いを調べるための精度検証を行った。

GNSS モジュールを変更したことによって、測位の更新周期が1 Hz から10 Hz になり、準天頂衛星システムにも対応したことで応答性および測位精度が著しく向上した。また、散布作業区間の設定に座標判断方式

を新たに採用したことで、国道のように明確な距離標を有しない路線でも散布作業の指示・判断・操作を支援することが可能になり、当該支援システムの適用範囲を拡大することができた。更に、座標・方位の活用およびソフトウェア改良によって、散布作業区間が同路線内や交差する路線等に近接して複数存在する場合の誤判断や誤操作を回避することが可能になった（図-19）。

本研究では、上記改良による凍結防止剤散布作業支援システムの精度向上を確認するため、実道における精度検証を令和2年2月中旬（4日間）の夜間（18:00～22:00）に行った。実施場所は、平成30年度の検証と同様に、苫小牧寒地試験道路近傍の一般国道235号側道（KP5.0～KP16.0）の往復区間（ $L \approx 22$  km）とした。

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

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

本実験には、試験車両（散布車両）として1.5トントラック（平ボディ）を用い、これを被験者が運転し

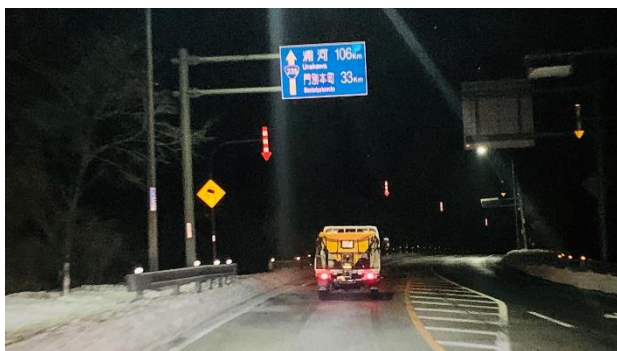


写真-11 実道路における精度検証



写真-12 検証に用いた試験車両(1.5トントラック)



写真-13 補助員による被験者への指示状況



写真-14 運転席付近に設置した車載タブレットPC

た(写真-12)。また、当該車両の助手席には実験補助員が同乗し、被験者への指示を行なった他、走行中や旋回時における安全確認等を補助した(写真-13)。

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

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

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

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

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

表-10 散布作業支援の種別による距離差

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

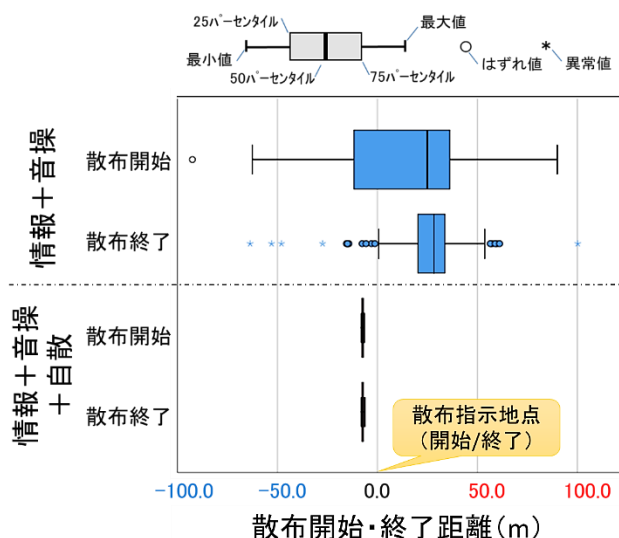


図-20 散布作業支援種別による距離差

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

以上の結果から、情報+音操に関しては平成 30 年度の距離差と比較して応答性に改善は認められるものの、依然として反応遅れとばらつきが生じていることが明らかとなった。これらは、実験後の被験者アンケートとデータ解析の結果から、音声認識機能の誤認や不感が原因であることが分かり、今後は音声認識機能の応答性の他に音声の感度改善を図るためのソフトウェア改良等が必要であることを確認した。他方、情報+音操+自散に関しては、散布精度が平成 30 年度に比べて著しく向上したことによって、延長が短くかつ冬期の路面状態が変化しやすいボックスカルバート（最

短約 6m）のような道路構造区間においても確実に凍結防止剤の散布が可能であることが分かった。

## 7. まとめと今後の課題

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

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

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

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

令和元年度は、本研究において開発中の凍結防止剤散布支援システムの測位手法改良による誤報・誤作動解消、操作ツールの音声操作機能・自動散布機能の応答性向上（操作反応時間短縮等）についてハード・ソフトウェアの改良に取り組み、実道において被験者を用いた当該支援システムの精度検証を行った。その結果、情報+音操に関しては応答性が改善したが、音声



誤認・不感が認められ、この部分について今後も更なる改善が必要であることが分かった。情報+音操+自散に関しては、散布精度が過年度に比べて著しく向上した。よって、支援システムによる散布作業の省力化および適正化が技術的に可能であるとともに、従来の2人乗車での作業を1人乗車でも可能とする見通しが立ったと言えた。

今後は、凍結防止剤散布作業支援システムと既往技術と連携を具現化するための改良もを行い、当該支援システムの更なる精度向上に取り組む。また、道路管理者と連携してより実践的な検証を行い、オペの心理状態や挙動への影響を踏まえた安全で確実な凍結防止剤散布が可能な散布作業支援技術の確立および提案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、平成28年11月  
[http://www.hkd.mlit.go.jp/zigyoka/z\\_doro/jyosetsu/pdf/jyosetsjyosets.pdf](http://www.hkd.mlit.go.jp/zigyoka/z_doro/jyosetsu/pdf/jyosetsjyosets.pdf) (平成29年4月確認)
- 2) 国土交通省、冬期道路交通の確保のあり方に関する検討委員会提言、持続的な冬期道路交通確保をめざして～連携と協働～、pp. 25-26、平成25年5月、  
<http://www.mlit.go.jp/common/000997537.pdf>、(平成29年4月確認)
- 3) Salt Institute: Snow Fighter's Handbook - A Practical Guide for Snow and Ice Control, 2013,  
[http://www.saltinstitute.org/wp-content/uploads/2013/07/Snowfighters\\_HB\\_2012.pdf](http://www.saltinstitute.org/wp-content/uploads/2013/07/Snowfighters_HB_2012.pdf)、(平成28年8月確認)
- 4) Minnesota Local Road Research Board: Minnesota Snow and Ice Control - Field Handbook for Snowplow Operators, Second Edition, October 2012,  
<http://www.mnltap.umn.edu/publications/handbooks/documents/snowice.pdf>、(平成28年8月確認)
- 5) 北海道開発局建設部道路維持課：冬期路面管理マニュアル(案)、平成9年11月
- 6) Thompson Gregory et al.: Clear Roads – Developing a Totally Automated Spreading System, Final Report, February 2014,  
[http://clearroads.org/wp-content/uploads/dlm\\_uploads/11-03-Totally-automated-spreader\\_final\\_report.pdf](http://clearroads.org/wp-content/uploads/dlm_uploads/11-03-Totally-automated-spreader_final_report.pdf)、(平成29年4月確認)
- 7) 青木和夫：ISO/TC159におけるメンタルワークロードの概念と定義および設計の指針、人間工学、Vol. 29、No. 6 ('93)、pp. 339-342、平成5年9月
- 8) 三宅、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, June 1996,  
[https://www.rug.nl/research/portal/files/13410300/09\\_thesis.pdf](https://www.rug.nl/research/portal/files/13410300/09_thesis.pdf)、(平成28年8月確認)
- 10) Tokunaga Roberto et al.: Effects of Conversation Through a Cellular Telephone while Driving on Driver's Reaction Time and Subjective Mental Workload; Transportation Research Record No. 1724, Paper No. 00-1480, pp. 1-6, April 2000.
- 11) Hart Sandra et al.: Development of NASA-TLX: Results and Theoretical Research, Human Mental Workload, Pp. 139-183, North-Holland, 1988.
- 12) 芳賀繁：NASAタスクロードインデックス日本語版の作成と試行、鉄道総研報告、特集：人間科学、Vol.18、No.1、pp.15-20、平成6年



## 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

### 14.2.2 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、齋藤勉

#### 【要旨】

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

本研究では、冬期の円滑な道路交通の確保に必要な道路除雪体制を維持するため、除雪機械の効果的かつ効率的な維持管理手法の提案に取り組んでいる。令和元年度は、ワイブル型累積ハザード解析を効率的に実施するため、必要な故障データの内容や項目を検討し、収集様式を作成した。また、除雪機械重要構成部品の劣化度診断手法では、除雪トラックのメインフレームの劣化度診断手法の構築に向け、残留応力を磁場強度の変化で検出する自己磁場測定型残留応力検出機を用いた診断手法について検討した。さらに、除雪機械劣化度の定量的評価による維持管理手法については、信頼度の目標値を変えた際の予防整備費用の試算・比較を行った。

キーワード：除雪機械、FTA、ワイブル型累積ハザード解析、信頼度、維持管理

#### 1. はじめに

積雪寒冷地における冬期の円滑な道路交通の確保は、地域住民の生活にとって必要不可欠であり、確実な道路除雪体制が求められている。

しかし、近年、購入・整備費用の制約により、除雪機械の更新が先送りされ老朽化した機械が増えており、除雪トラックではフレームに亀裂が生じるなど、除雪作業に支障をきたす重大故障が発生している。これらの重大故障に伴う除雪作業停止日数は年々増加しており、道路除雪体制への影響が懸念される。

そのため、限られた予算の中、効果的かつ効率的に除雪機械の維持管理を行い、重大故障に伴う除雪作業停止日数を削減する必要がある。

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

過年度までは、FTA（故障の木解析）で抽出した2日以上不稼働となった故障（以下、「重大故障」という。）箇所について、全故障データも含めたワイブル型累積ハザード解析を行い、重大故障箇所における重大故障データと全故障データで算出した信頼度などの関連性を考察した。

また、国土交通省北海道開発局（以下、「開発局」という。）の1開発建設部の過去3年分の稼働実績をもとに、FTAで機械本体の信頼度を算出し、除雪機械劣化度の定

量的評価としての適用性を検討した。

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

令和元年度は、ワイブル型累積ハザード解析を効率的に実施するため、必要な故障データの内容や項目を検討し、収集様式を作成した。また、除雪機械重要構成部品の劣化度診断手法では、除雪トラックのメインフレームの劣化度診断手法の構築に向け、残留応力を磁場強度の変化で検出する自己磁場測定型残留応力検出機を用いた診断手法について検討した。さらに、除雪機械劣化度の定量的評価による維持管理手法については、信頼度の目標値を変えた際の予防整備費用の試算・比較など引き続き検討した。

#### 2. 除雪機械の故障データの整理

##### 2.1 解析対象データ

解析対象データは、以下のとおりである。

- ・開発局：平成19～27年度の故障データ約4,900件。
  - ・国土交通省東北及び北陸地方整備局（以下、「東北及び北陸地整」という。）：平成23～27年度の故障データ約5,400件。
- このうち、障害物との接触など「外的要因による損傷」

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

に関する故障データ、機種及び管理番号が稼働データと一致しない故障データを除外した。

解析対象データの内訳を表-1に示す。

次項から、開発局の故障データを用いた解析結果を主として報告する。

## 2.2 FTA (故障の木解析)

上記で整理した解析対象データでFT図を作成した。作成にあたっては、重大故障箇所のデータ件数が5件未満になるまで、故障箇所の分類を細分化し抽出した。

細分化する際は、建設機械整備標準作業工数表(除雪機械編)<sup>1)</sup>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

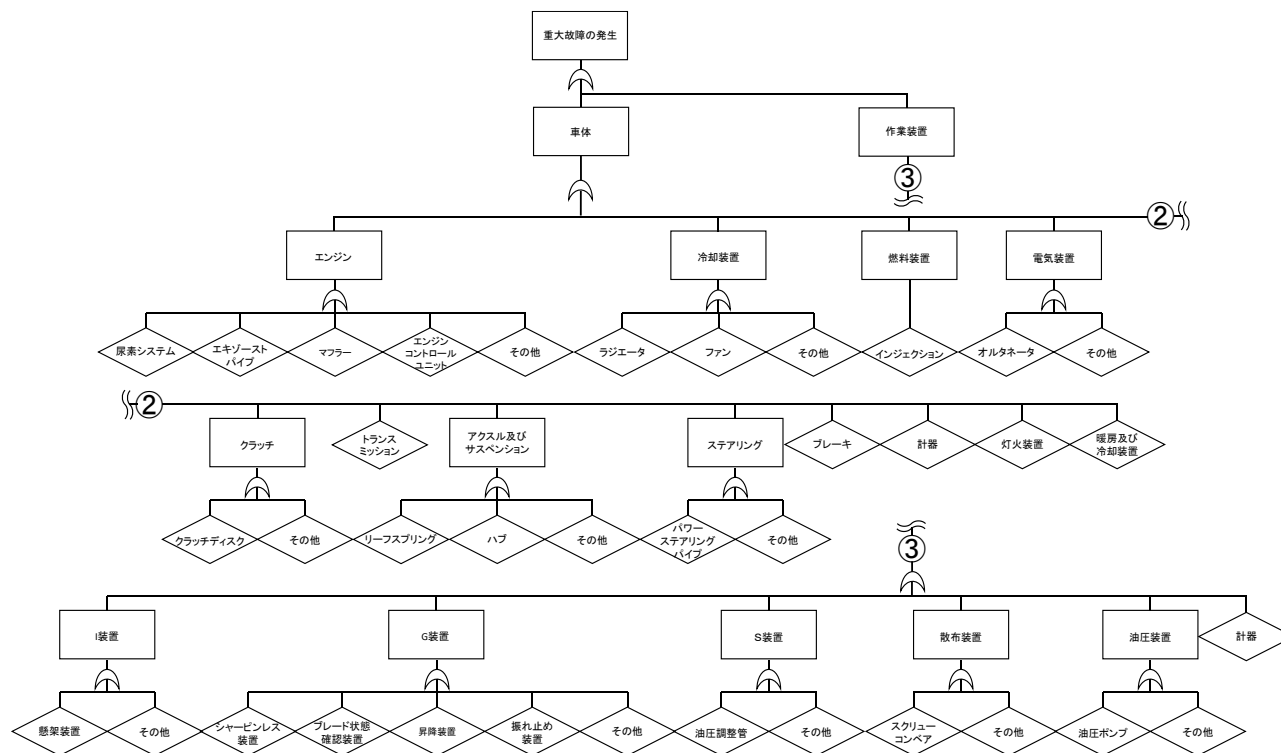


図-1 除雪トラック FTA図

### 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

$\eta$  : 尺度パラメータ

$\gamma$  : 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。

$\eta$  (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。

$\gamma$  (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、 $\eta$  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。

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

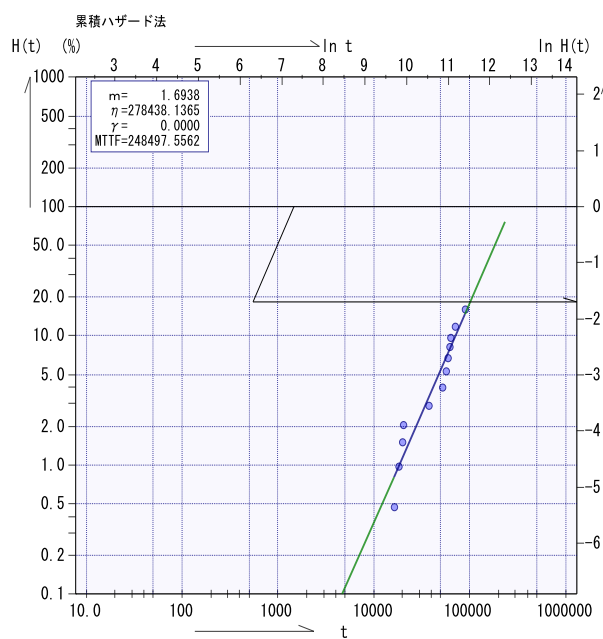


図-2 重大故障解析結果  
【エンジン：尿素システム】

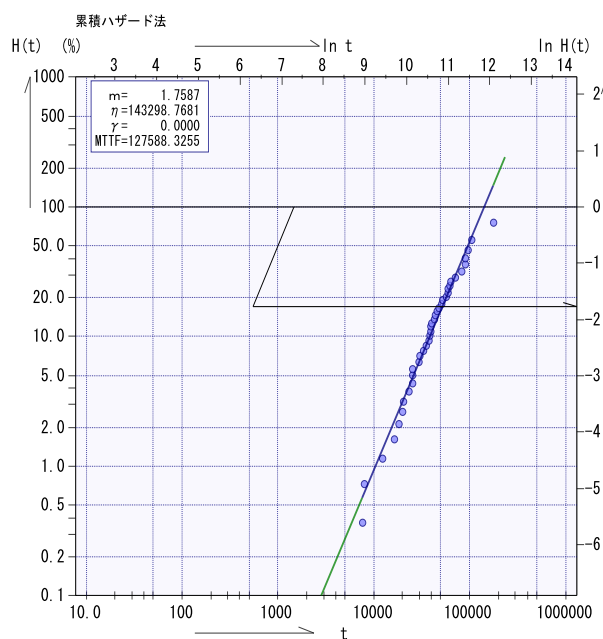


図-3 全故障解析結果  
【エンジン：尿素システム】

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。

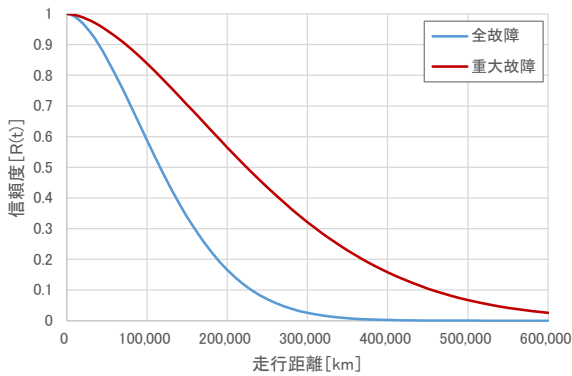


図-4 信頼度曲線図  
【エンジン：尿素システム】

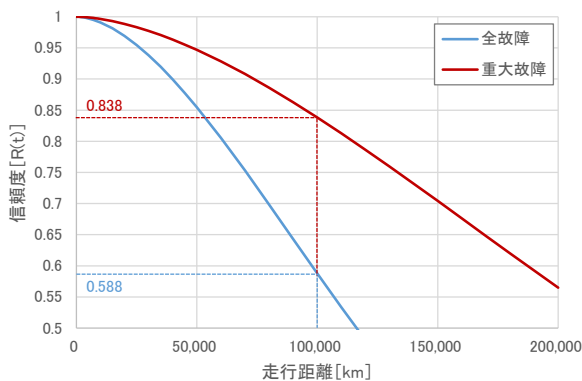


図-5 信頼度曲線図 (拡大図)  
【エンジン：尿素システム】

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。

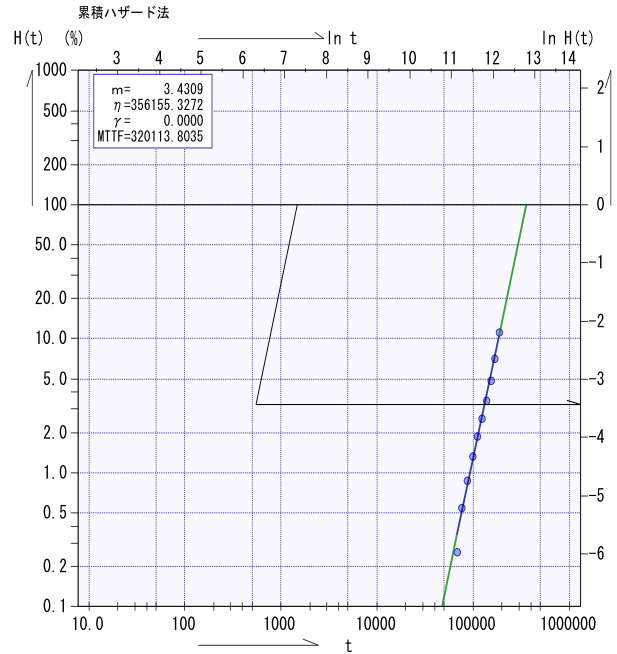


図-6 重大故障解析結果  
【冷却装置：ファン】

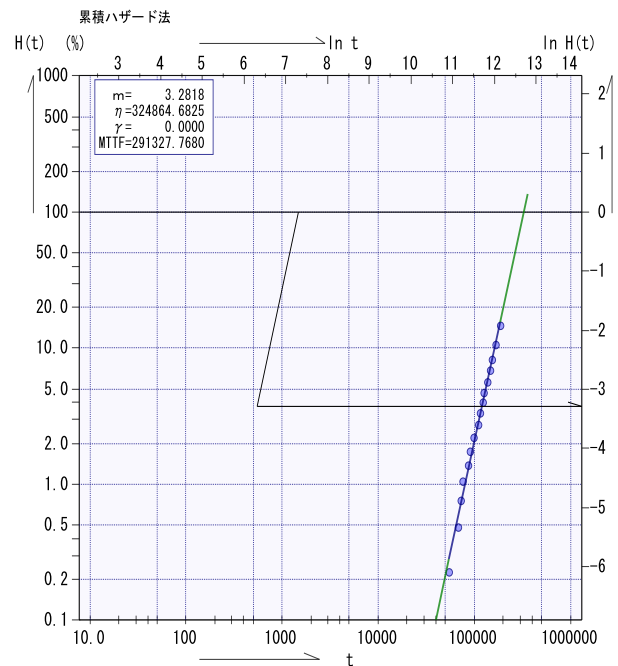


図-7 全大故障解析結果  
【冷却装置：ファン】



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、低下する度合いが大きくなっている。

図-9 は走行距離 100,000km を基準とした場合の信頼度曲線図になるが、全故障の信頼度は 0.979、重大故障の信頼度は 0.987 であり、尿素システムの信頼度と比較すると高いことから、ファンは尿素システムより故障しにくいことがわかる。

しかし、重大故障と全故障の信頼度の差が少ないことから、故障が発生した場合は重大故障に繋がり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。

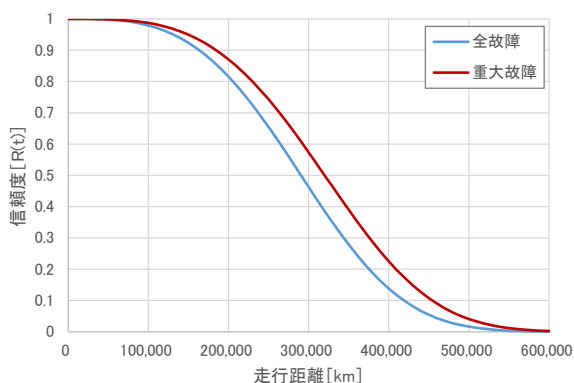


図 - 8 信頼度曲線図  
【冷却装置：ファン】

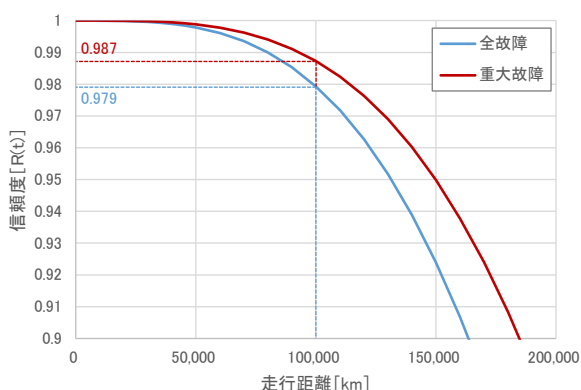


図 - 9 信頼度曲線図 (拡大図)  
【冷却装置：ファン】

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。

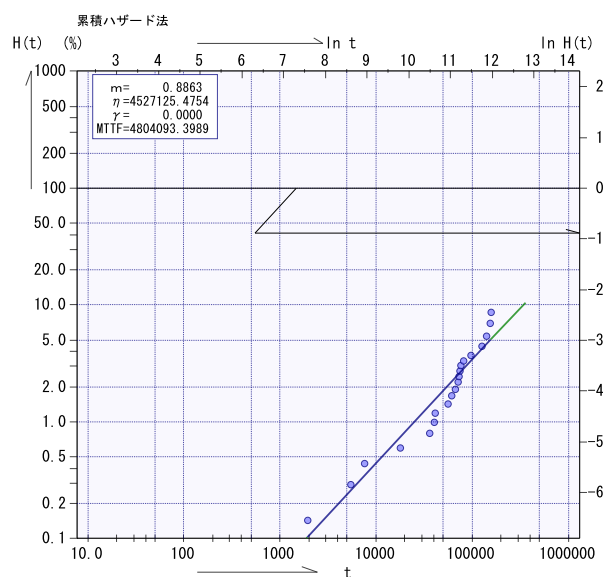


図 - 10 重大故障解析結果  
【燃料装置：インジェクション】

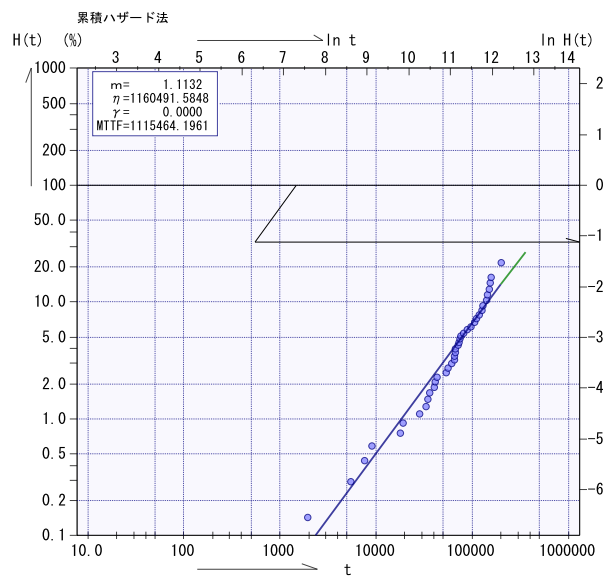


図 - 11 全故障解析結果  
【燃料装置：インジェクション】

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。

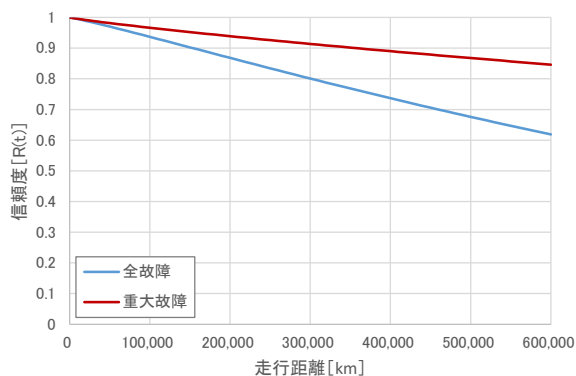


図-12 信頼度曲線図  
【燃料装置：インジェクション】

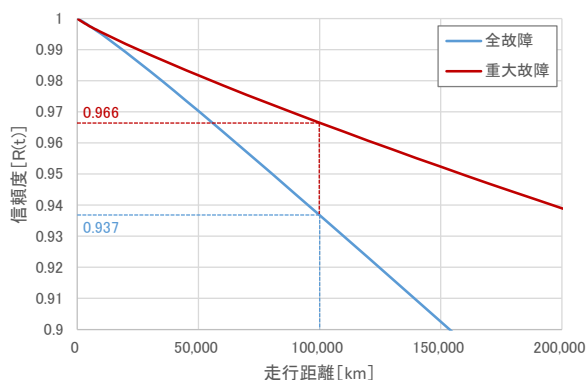


図-13 信頼度曲線図 (拡大図)  
【燃料装置：インジェクション】

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

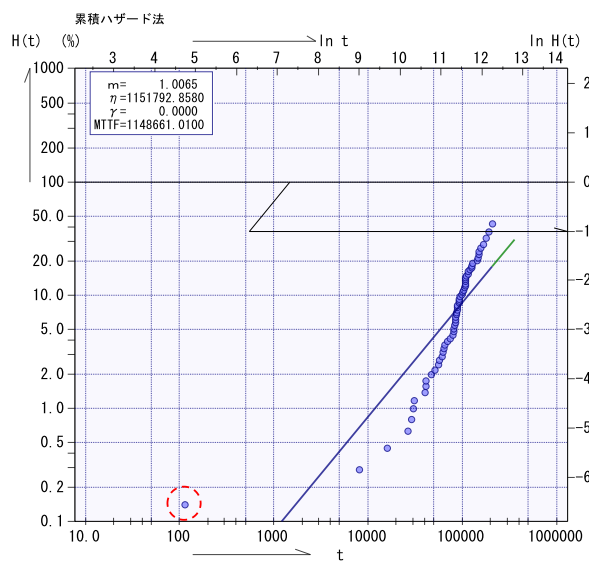


図-14 全故障解析結果 (走行距離)  
【作業装置：計器】

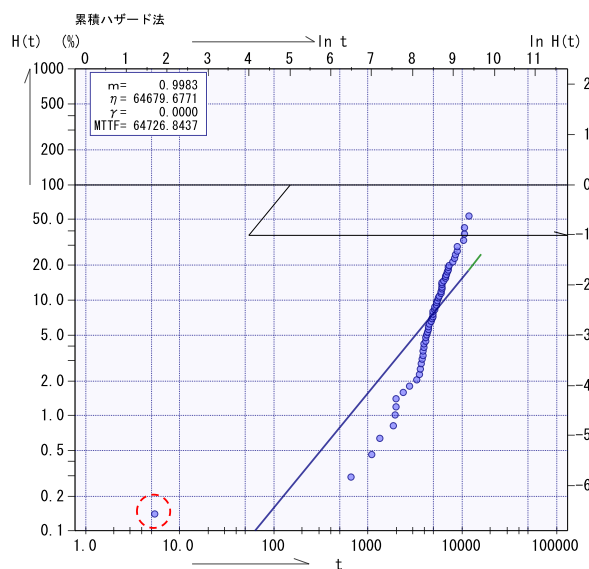


図-15 計器 全故障解析結果 (稼働時間)  
【作業装置：計器】

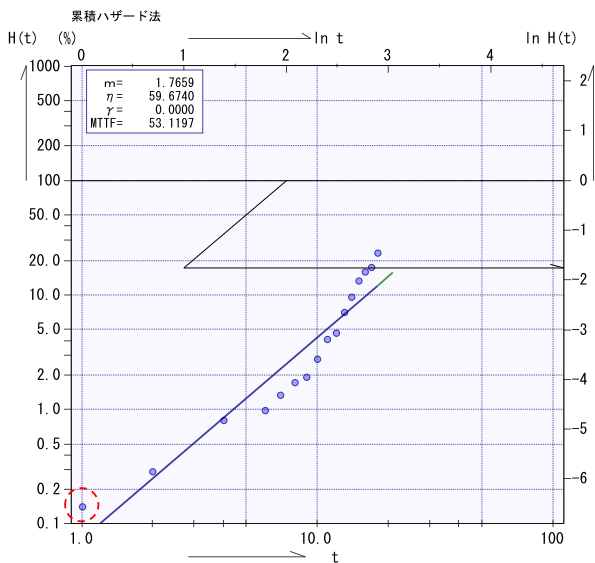


図-16 全故障解析結果（使用年数）  
【作業装置：計器】

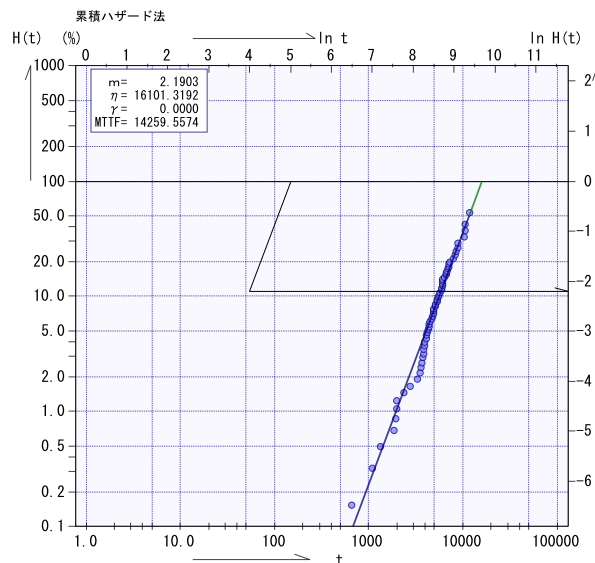


図-18 全故障再解析結果（稼働時間）  
【作業装置：計器】

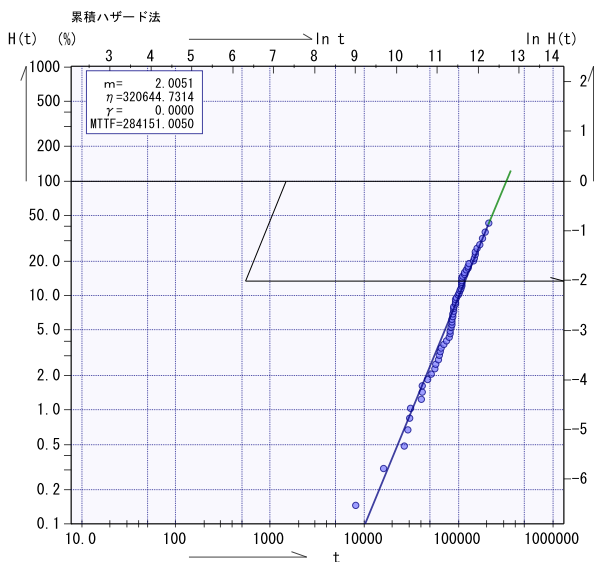


図-17 計器 全故障再解析結果（走行距離）  
【作業装置：計器】

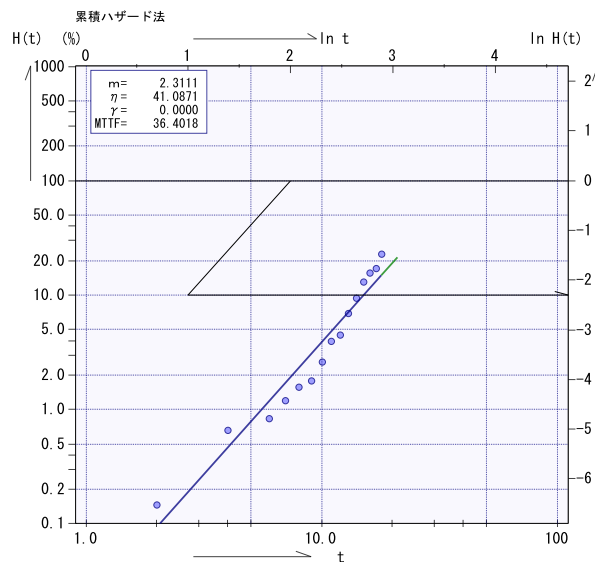


図-19 全故障再解析結果（使用年数）  
【作業装置：計器】

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する可能性があるため、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後、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。

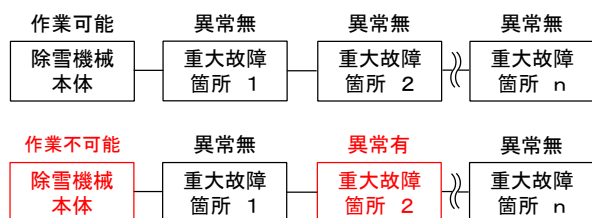
その状態を信頼性ブロック図で表現した場合、図-1で表されるFT図は図-20に示すような直列で繋がるブロック図となる。

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



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

図-20 信頼性ブロック図

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、走行距離を図-23に示す。

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

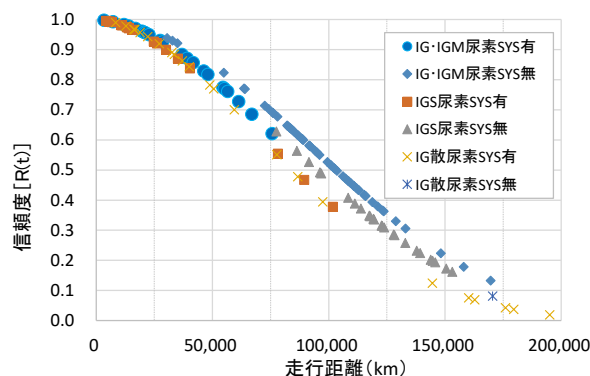


図-21 除雪トラック本体の信頼度算出結果

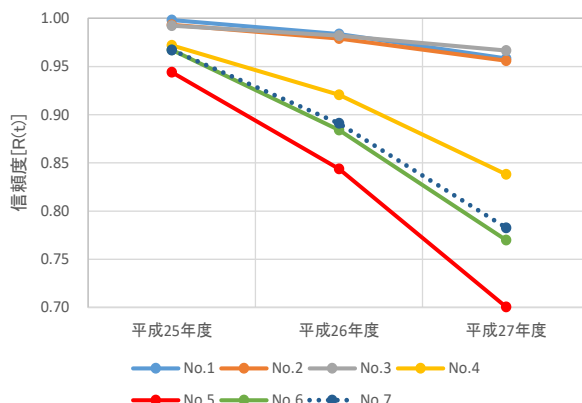


図-22 3年間の走行距離による本体の信頼度比較結果



	平成25年度	平成26年度	平成27年度	3ヶ年平均
No. 1	3,355	8,665	8,577	6,866
No. 2	7,251	6,724	7,244	7,073
No. 3	6,319	4,352	4,830	5,167
No. 4	13,981	12,160	14,225	13,455
No. 5	22,182	17,924	19,362	19,823
No. 6	16,365	17,342	16,822	16,843
No. 7	16,380	16,139	16,309	16,276

図-23 3年間の走行距離 (km)

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、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、有効であると考ええる。

### 3. 4 故障データの収集に関する検討

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

#### 3. 4. 1 故障データの内容・項目の整理

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

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

タには、下記のデータ項目が必須である。

#### 【故障データの必須項目】

必須項目①：故障発生機械の特定（管理番号・種類）

必須項目②：故障発生時点の累積稼働時間、累積走行距離

必須項目③：故障発生箇所の分類（大分類・小分類）

必須項目④：故障による不稼働日数（重故障の判定）

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

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

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

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

#### 【様式作成時に配慮・工夫すべき点】

- 配慮① 「必須項目②：故障発生時点の累積稼働時間、累積走行距離」は、機械全体の稼働実績だけでなく、「故障発生箇所の修理・整備後の累積稼働時間、累積走行距離」も報告してもらうことが望ましい。
- 配慮② 「必須項目③：故障発生箇所の分類（大分類・小分類）」は、報告者による書き方・表現の違いが生じないように、「大分類・小分類」の選択肢をあらかじめ設定しておくことが必要である。
- 配慮③ 「必須項目③：故障発生箇所の分類（大分類・小





表-5 故障収集様式 (案) (項目15~27)

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

目7~19)は、機械全体の稼働実績【項目9,10】が必須情報であり、確実に間違えることなく入力する必要があるため、入力を数字のみ、かつ前年度末の稼働実績より大きい数字などに規制し、当該機械の経過年数【項目8】は、入力する不具合発生日【項目7】と自動入力された購入年度【項目6】から自動計算している。

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

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

さらに、故障報告データから「ワイブル型累積ハザード

解析」の解析用データを容易に作成できるようにするため、指定した解析対象の「除雪機械の種類・故障発生箇所・故障のレベル(重故障のみ/全ての故障)」に従って、解析用データを自動作成するマクロを作成した。

### 3.4.3 故障データ収集の運用方法の検討

故障データ収集の運用について、開発局の組織を例に整理した。

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

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

さらに、①「整備業者が故障報告の内容(故障報告デー

タの様式の記載事項)を入力」②「その内容を現場事務所の担当者がシステム上で確認・承認」③「その結果をそのまま本部や本局に報告」をシステム化することで、①～③の一連の流れが連動し、より効率的且つ確実にデータ収集を行うことができる。

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

#### 4. 除雪機械重要構成部品の劣化度診断手法の検討

除雪機械重要構成部品の劣化度診断手法では、除雪トラックメインフレームの劣化度診断手法の構築に向け、残

表-6 自己磁場測定型残留応力検出機的主要仕様

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



図-24 自己磁場測定型残留応力検出機

留応力を磁場強度の変化で検出する自己磁場測定型残留応力検出機(以下、「検出機」という。)を用いた診断手法について検討した。

#### 4.1 検出機の検知能力の把握

検出機の基本的な検知能力を把握するため簡単な検出予備実験を行った。

検出機は、磁場を測定しており、資材の自己磁場の乱れにより不良箇所(引張、圧縮、腐食等)を確認できる仕組みとなっている。主な仕様を表-6に、外観を図-24に示す。

まず、その基本動作を確認するため、鋼材の下に磁石を設置(図-25)し、検出機により磁場強度と変化量について確認した。磁石接地面座標上の同一位置において、X方向(表面方向強度)とZ方向(深さ方向強度)で、磁場強度が異なることが分かった(図-26、27)。

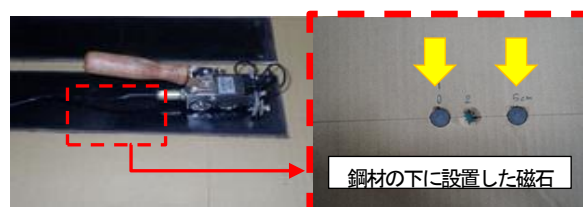


図-25 検出予備実験状況

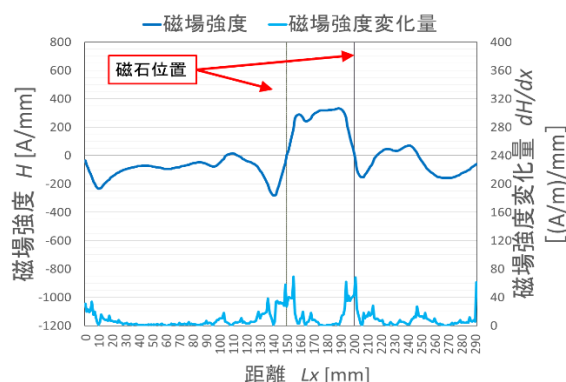


図-26 磁場強度と変化量(X方向(表面))

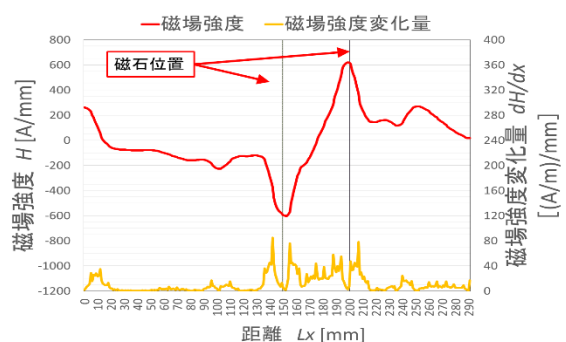


図-27 磁場強度と変化量(Z方向(深さ))



## 4. 2 試験片を用いた基礎データ取得及び考察

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

### (1) 検証用試験片の作成

JIS に準拠した引張試験と曲げ疲労試験（以下、「曲げ試験」という。）を行った。各試験毎、**図-28、29** に示すとおり試験片を作成した。材質は除雪トラックのメインフレーム鋼材（以下、「メインフレーム」という。）と比較用に一般構造用圧延鋼材 SS400（以下、「SS400」という。）の2種類を用いた。

#### [a] 引張試験により作成した試験片

破断に至るまでの過程を段階的に検証するため、破断まで試験を実施、その結果（**図-30**）より伸び量（8,12,16,20,24,28mm）の異なる6種類（**図-31**）を作成した。

#### [b] 曲げ試験により作成した試験片

引張試験と同様に破断まで段階的に検証するため、繰り返し荷重を660MPに設定し（**図-32**）、破断までの連続実験を行ったところ、約120,000回で破断した。その結果から、繰り返し回数、40,000回、65,000回、90,000回、100,000回、破断時の5種類の試験片を作成した（**図-33**）。

### (2) 試験片による測定

#### [a] 試験片の測定範囲

引張試験の測定範囲：試験片の中央付近(161mm)から±44mmとした（**図-28**）。

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

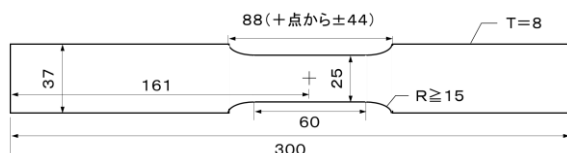


図-28 試験前の試験片寸法（引張試験）

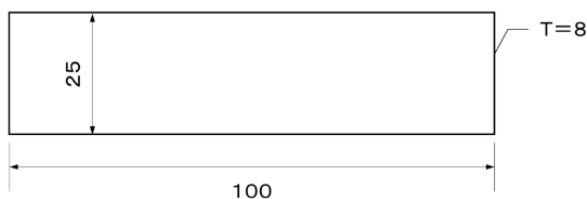


図-29 試験前の試験片寸法（曲げ試験）

#### [b] 測定結果の解析指標

測定結果の解析指標を測定結果より以下のとおり設定した。

##### ○磁場強度

1mm単位の測定値（生値）とした。

##### ○磁場強度の解析指標

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

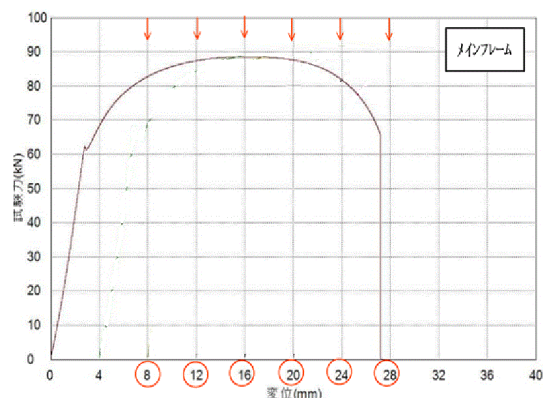


図-30 引張試験結果  
(荷重-ひずみ/メインフレーム)

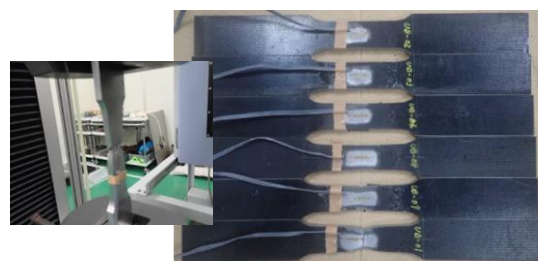


図-31 試験片（引張試験）

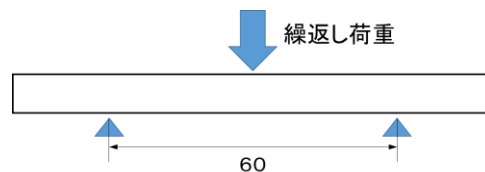


図-32 荷重点（曲げ試験）

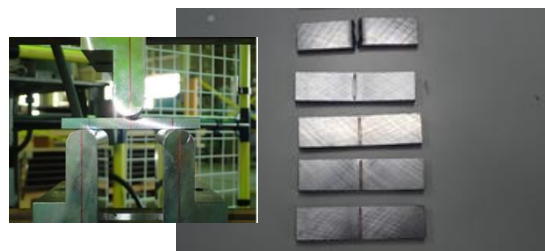


図-33 試験片（曲げ試験）

○磁場強度変化量（以下、「変化量」という。）  
 変化量 $=\sqrt{\{(\text{磁場強度})^2-(\text{直前の磁場強度})^2\}}$   
 出された各地点の変化量を 5mm ピッチで移動平均とした。

○変化量の解析指標  
 区間平均値と標準偏差とした。  
 区間平均は、測定範囲の変化量の平均値とした。  
 標準偏差は、同一区間のデータの標準偏差を示す値として、本測定のために定義した。

[c] 引張試験の測定及び分析  
 メインフレーム・SS400 共に数値の大小はあるが、解析結果において以下のとおりの傾向を示した。

○磁場強度  
 ・Z 方向の変化は、引張前（無荷重）では特段の規則性は認められないが、荷重が加わると何れの相関係数も 1 に近くなるなど直線性を示した。メインフレームの例を図-34~38、表-7 に示す。

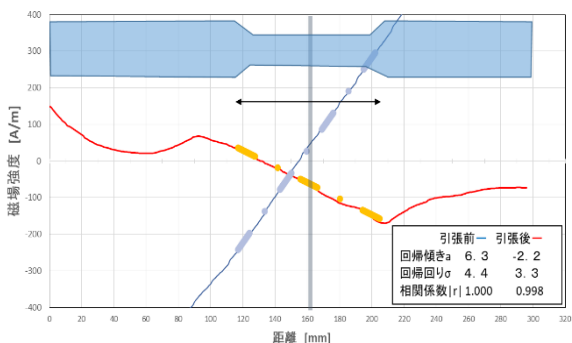


図-34 磁場強度 Z 方向（引張/伸び 8mm）

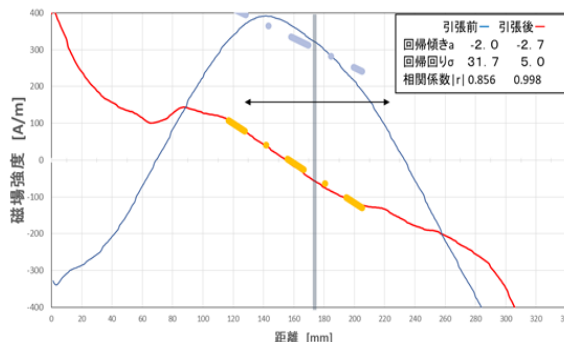


図-37 磁場強度 Z 方向（引張/伸び 20mm）

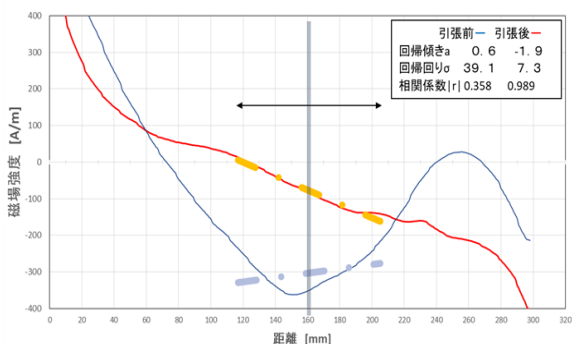


図-35 磁場強度 Z 方向（引張/伸び 12mm）

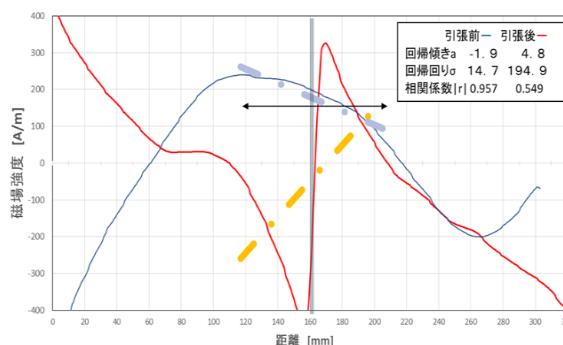


図-38 磁場強度 Z 方向（引張/破断）

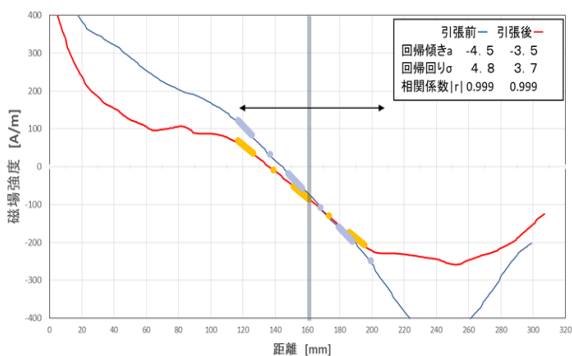


図-36 磁場強度 Z 方向（引張/伸び 16mm）

表-7 磁場強度 Z 方向の測定分析結果

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

○変化量

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

前の伸び量(24mm)の時には標準偏差がわずかではあるが大きくなる傾向を示した。メインフレームの例を図-39~44、表-8に示す。

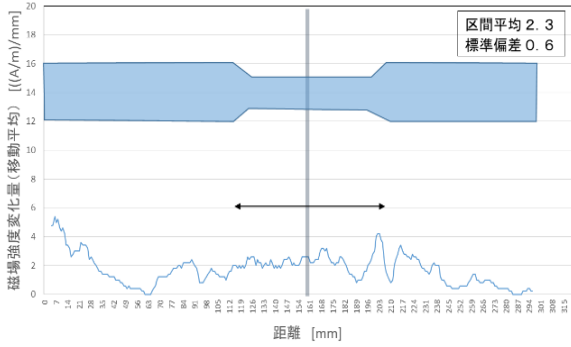


図-39 磁場強度変化量Z方向(引張/伸び8mm)

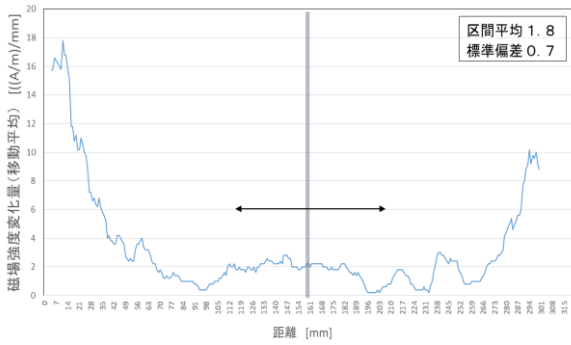


図-40 磁場強度変化量Z方向(引張/伸び12mm)

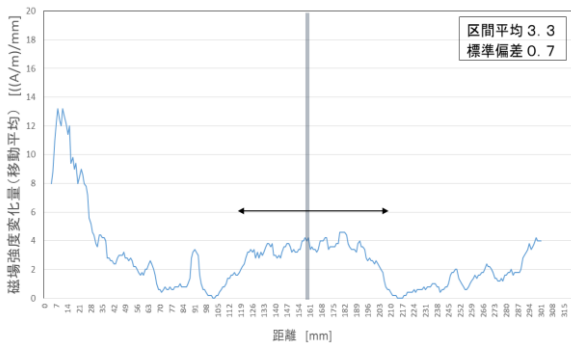


図-41 磁場強度変化量Z方向(引張/伸び16mm)

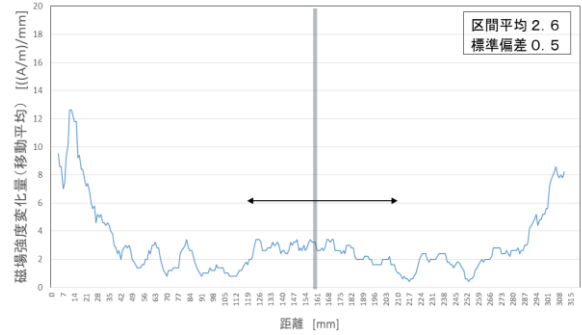


図-42 磁場強度変化量Z方向(引張/伸び20mm)

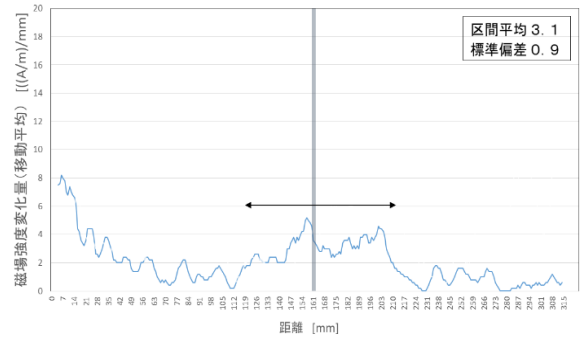


図-43 磁場強度変化量Z方向(引張/伸び24mm)

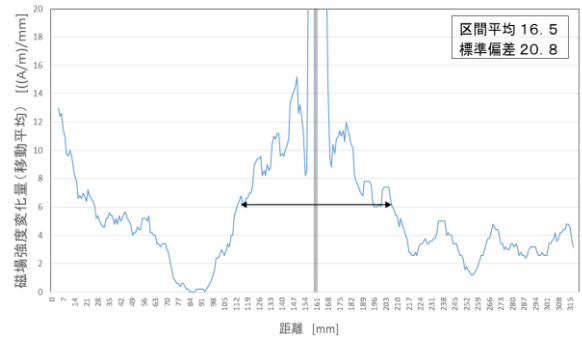


図-44 磁場強度変化量Z方向(引張/破断)

表-8 磁場強度変化量Z方向の測定分析結果

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

[d] 曲げ試験の測定及び分析

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

○磁場強度

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

○変化量：

X 方向の変化は、曲げ試験を行った全ての試験片で解析区間の中央付近でわずかながら磁気強度が強い箇所（盛り上がり変化）が見られた（図-45）。

Z 方向の変化は、破断時に最大値等の増加が見られるが、それ以外は、ほとんど変化がなかった（図-46）。

(3) 検出機の測定値の傾向

○引張試験

・磁場強度、変化量

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

・変化量（メインフレームが顕著）

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

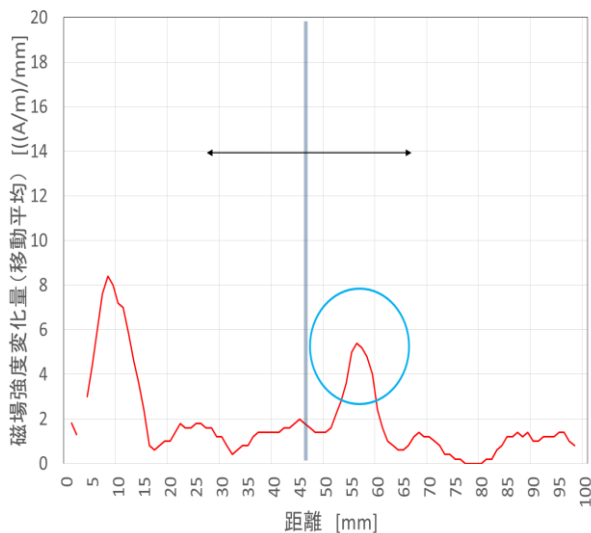


図-45 磁場強度変化量Z方向  
(曲げ/6500回)

○曲げ試験

・磁場強度、変化量

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

・変化量（メインフレームが顕著）（表-9）

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

(4) 基礎データの考察

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

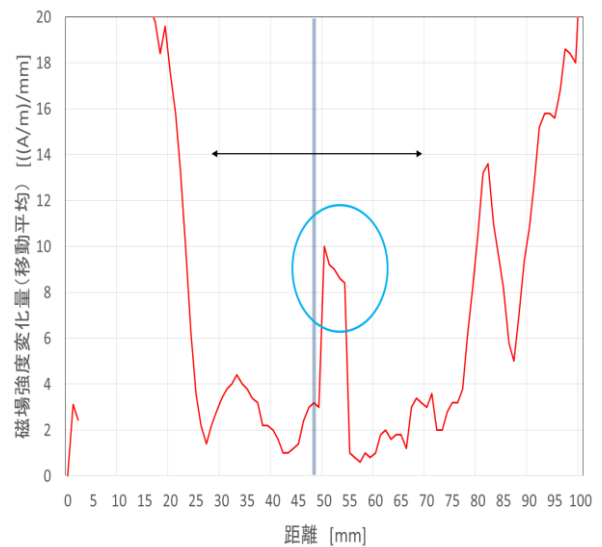


図-46 磁場強度変化量Z方向  
(曲げ/破断)

表-9 磁場強度変化量Z方向の測定分析結果

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



①検出機の出力と荷重との関係性検討

[a] 引張試験における試験片の伸び量と磁場強度変化量の関係

区間平均値は、X方向で傾向は見られないが、Z方向は材質により傾向は異なり、メインフレームは、最大荷重点以降の区間平均が大きくなる傾向が伺える。(図-47~48、表-10)

区間標準偏差は、X方向で傾向は見られないが、Z方向は、両材料とも破断に向かい僅かながら大きくなり 1.0 を超える傾向が見られる。(図-49~50)

[b] 曲げ試験における試験片の曲げ回数と磁場強度変化量の関係

区間平均値は、X方向、Z方向は、破断に近づくにつれ、概ね増加傾向(曲げ回数に比例する関係)が現れている。具体的には、メインフレームは、X方向で概ね2.0以上、Z方向で概ね2.5以上で破断となる。(図-51~52)

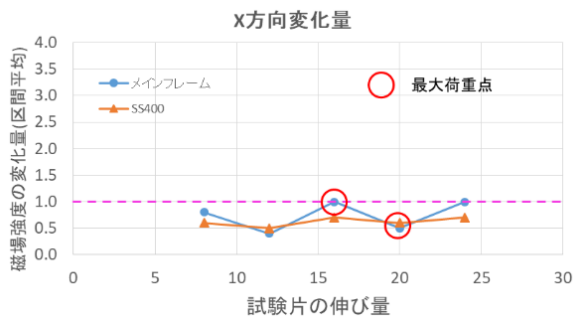


図-47 区間平均—変化量X方向(引張伸び量)

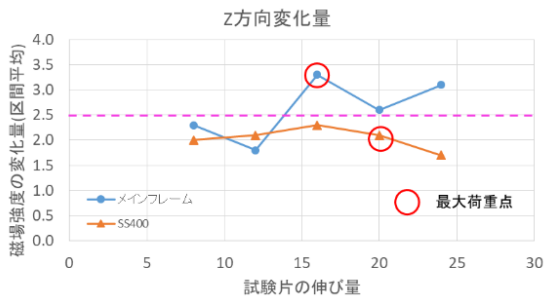


図-48 区間平均—変化量Z方向(引張伸び量)

表-10 引張試験試験片(伸び量-荷重)

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

区間標準偏差は、X方向、Z方向は、破断直前までは概ね一定と考えられ、破断時は特にZ方向が変化した。(図-53~54)

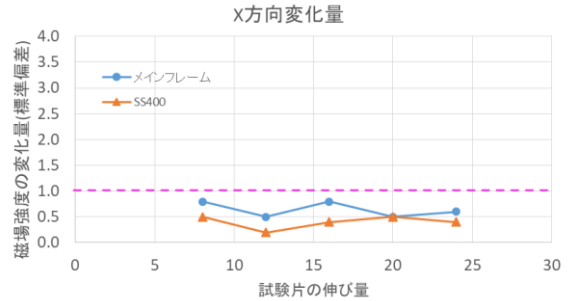


図-49 区間標準偏差—変化量X方向(引張伸び量)

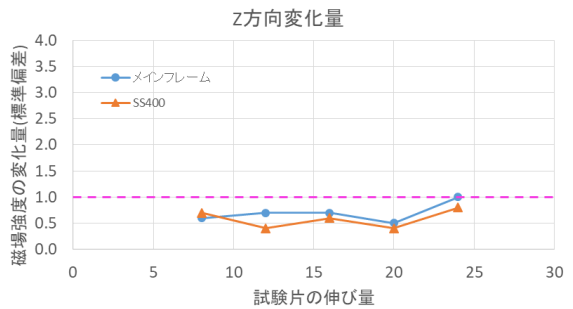


図-50 区間標準偏差—変化量Z方向(引張伸び量)

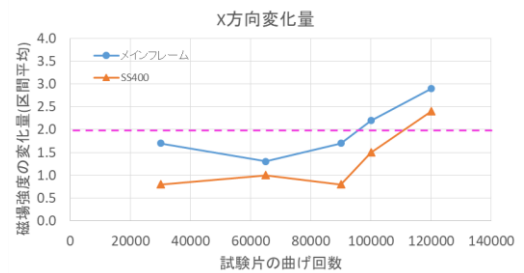


図-51 区間平均—変化量X方向(曲げ回数)

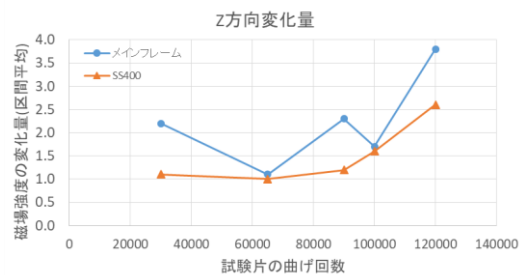


図-52 区間平均—変化量Z方向(曲げ回数)

②検出機を用いた劣化度診断指標の検討

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

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

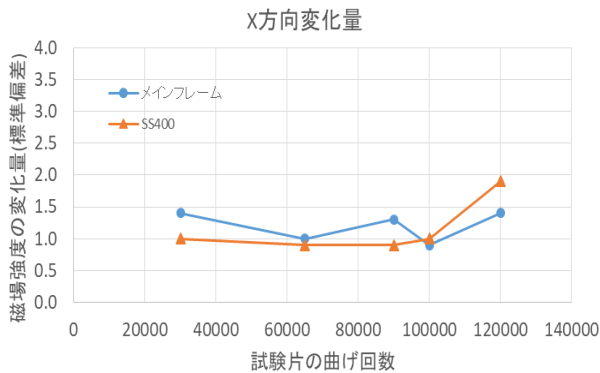


図-53 区間標準偏差—変化量X方向 (曲げ回数)

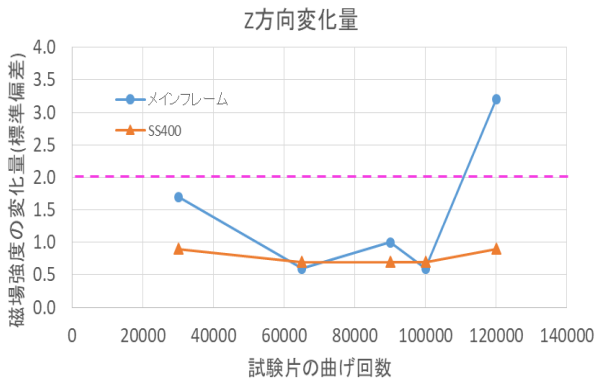


図-54 区間標準偏差—変化量Z方向 (曲げ回数)

表-11 劣化度診断指標

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

4.3 実車 (計測の試行) の測定及び適応性の確認

前項の検討を踏まえ、実車の予備測定を行った。予備測定結果から、計測部位や範囲などを決定し、今後の計測方法についてとりまとめた。また測定結果から検出器及び前項の劣化度診断指標の適応性について検証した。

(1) 測定対象機械、測定部位及び測定回数

測定機械は、開発局札幌開発建設部札幌道路事務所保有の除雪トラック 10 台とした。まず 2 台について予備測定を実施し、その結果から測定部位は、外力が加えられにくく、メインフレームが露出しており測定が比較的容易な 9 箇所とした。(図-55) また、測定回数は 3 回とした。

(2) 実車測定結果と解析

①磁場強度の測定結果

磁場強度の変化とフレーム上の穴の位置は、概ね対応しているなど、フレームに掛かる様々な要因に対し磁場強度の変化が確認できた。(図-57)

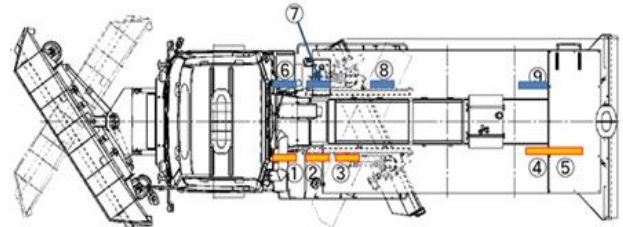


図-55 測定部位

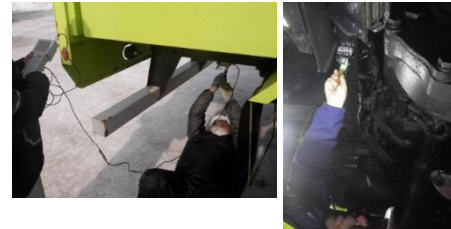


図-56 実車測定状況

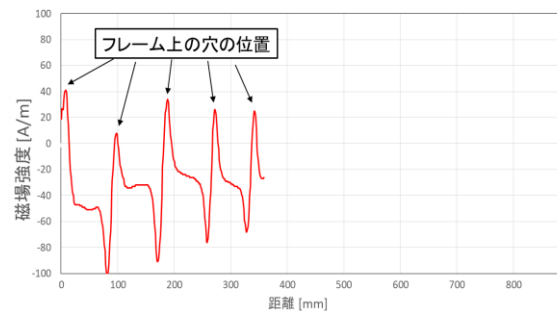


図-57 磁場強度測定例 (A車/測定部位①/X方向)

②変化量の測定結果

実車においても磁場強度、変化量ともに検出可能であることを確認した。フレーム上の穴の位置や、リフトアップ箇所等の要因による変化も確認することができた。(図-58)

③測定結果の解析

計測結果を、前項で設定した劣化度診断指標にて車両毎に整理した。表-12に例を示す。基準を超過した場合△を付け、「注意」区間とした。

「注意」区間について測定全車両診断集計結果を表-13に示す。「複数注意区間数」は引張力と曲げ力とも複数の

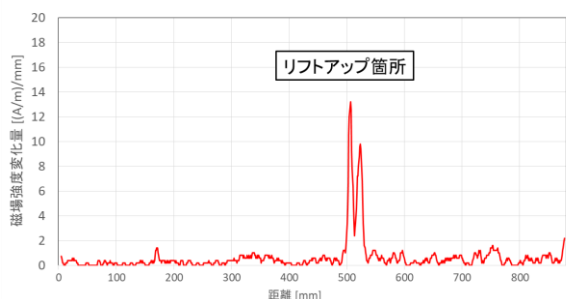


図-58 変化量測定例 (B車/測定部位④/Z方向)

表-12 測定部位毎劣化度診断 例

測定部位	磁場方向	指標	磁場強度 の変化量	引張力		曲げ力		備考
				基準	判定	基準	判定	
①	X	平均値	0.4 <sup>0.7</sup>	—	—	2	○	[良好区間]
		標準偏差	0.3 <sup>0.9</sup>	—	—	1.5	○	
	Z	平均値	0.6 <sup>1.0</sup>	2.5	○	2.5	○	
		標準偏差	0.6 <sup>0.9</sup>	1	○	2	○	
②	X	平均値	0.2 <sup>0.9</sup>	—	—	2	○	[注意] Z方向の標準偏差、引張力
		標準偏差	0.2 <sup>0.8</sup>	—	—	1.5	○	
	Z	平均値	0.2 <sup>1.6</sup>	2.5	○	2.5	○	
		標準偏差	0.1 <sup>1.1</sup>	1	△	2	○	
③	X	平均値	0.4 <sup>0.7</sup>	—	—	2	○	[良好区間]
		標準偏差	0.3 <sup>0.9</sup>	—	—	1.5	○	
	Z	平均値	0.6 <sup>1.0</sup>	2.5	○	2.5	○	
		標準偏差	0.6 <sup>0.9</sup>	1	○	2	○	
④	X	平均値	0.4 <sup>0.5</sup>	—	—	2	○	[良好区間]
		標準偏差	0.7 <sup>0.8</sup>	—	—	1.5	○	
	Z	平均値	0.7 <sup>0.9</sup>	2.5	○	2.5	○	
		標準偏差	0.4 <sup>0.7</sup>	1	○	2	○	
⑤	X	平均値	0.6 <sup>0.7</sup>	—	—	2	○	[良好区間]
		標準偏差	0.4 <sup>0.6</sup>	—	—	1.5	○	
	Z	平均値	0.4 <sup>0.6</sup>	2.5	○	2.5	○	
		標準偏差	0.4 <sup>0.7</sup>	1	○	2	○	
⑥	X	平均値	0.6 <sup>0.7</sup>	—	—	2	○	[良好区間]
		標準偏差	0.4 <sup>0.6</sup>	—	—	1.5	○	
	Z	平均値	0.4 <sup>0.8</sup>	2.5	○	2.5	○	
		標準偏差	0.4 <sup>0.7</sup>	1	○	2	○	
⑦	X	平均値	0.8 <sup>1.2</sup>	—	—	2	○	[良好区間]
		標準偏差	0.6 <sup>0.8</sup>	—	—	1.5	○	
	Z	平均値	0.9 <sup>1.4</sup>	2.5	○	2.5	○	
		標準偏差	0.5 <sup>0.6</sup>	1	○	2	○	
⑧	X	平均値	1.3 <sup>1.6</sup>	—	—	2	○	[注意] Z方向の標準偏差、引張力
		標準偏差	1.1 <sup>1.4</sup>	—	—	1.5	○	
	Z	平均値	2.0 <sup>2.3</sup>	2.5	○	2.5	○	
		標準偏差	1.2	1	△	2	○	
⑨	X	平均値	0.2 <sup>1.0</sup>	—	—	2	○	[良好区間]
		標準偏差	0.1 <sup>0.4</sup>	—	—	1.5	○	
	Z	平均値	0.2 <sup>1.0</sup>	2.5	○	2.5	○	
		標準偏差	0.1 <sup>0.6</sup>	1	○	2	○	

基準を超過、「両項目注意区間数」は引張力と曲げ力とも1つの基準を超過、「引張力注意区間数」は引張力のみ超過、「曲げ力注意区間数」は曲げ力のみ超過、としてそれぞれ整理した。

機械右側(運転席側)の方が左側より約2倍、注意区間が多く発生している。

・右側は曲げ力、左側は引張力に関する診断基準を超過する傾向が見られた。

(3) 検出機の実車測定への適応性

測定結果から、検出機及び劣化度診断指標は、特定の要因箇所や部位毎に注意区間を検出することが可能となり、同一車両の部位間等の比較により劣化度の相対的な診断が可能となるなど、適応性を確認することができた。

しかし、複数車両での比較は難しく、また測定結果が絶対的にどのくらいの劣化度なのかは判断ができない。

さらに、H30年式除雪トラックで注意区間が発生するなど(表-13 車両NO, 10)劣化以外の要因を検出している可能性も散見された。

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

表-13 劣化度診断集計

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

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

### 5. 除雪機械劣化度の定量的評価による維持管理手法の検討

事務所が管理する複数路線の優先順位づけを行い、路線の重要度によって信頼度の目標値を設定することで、整備や配置転換の実施判断が可能な維持管理手法を検討し、シミュレーションを実施した。

令和元年度は、機械更新を考慮し長期間における維持管理手法についてシミュレーション試行により検証した。

#### 5.1 路線の重要度の設定に関する検討

路線の重要度の設定にあたり、以下の2つの重要度を評価し、分類する方法を新たに検討した。

①路線が持つ機能や交通量を考慮した「交通機能」の重要度

②年間当たりの除雪作業日数を考慮した「除雪作業」の重要度

路線の重要度をA～Eの5段階で評価するマトリックス表を表-14に示す。

交通機能の重要度は、除雪ステーション（以下、「除雪ST」という。）が担当している路線・区間における「緊急輸送道路」及び「24時間交通量」を点数化し、それぞれを加算して4段階評価とした。

緊急輸送道路は、担当路線・区間の該当状況を踏まえて、3段階で加点した。24時間交通量は、平成27年度道路交通センサスの24時間交通量を3段階で加点した。

配点表を表-15、16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・

表-14 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

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-17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-18に示す。

#### 5.2 信頼度の目標値の設定に関する検討

次に、配置されている除雪機械に対する、信頼度の目標値の設定方法について検討した。

検討にあたっては、信頼度の目標値の設定に際し、信頼度の低下に伴う重大故障発生頻度について整理を行った。

この検討では、重大故障データで算出した故障箇所別の信頼度を用いた。

表-15 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-16 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-17 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-18 路線の重要度 評価結果

総合評価	除雪ST数
A(最重要路線)	7
B(重要路線)	42
C(準重要路線)	61
D(一般路線①)	28
E(一般路線②)	9
計	147



信頼度の目標値の設定において、平成19年度～27年度に所有していた除雪機械の平均配置台数をもとに、信頼度が低下した際の重大故障件数の発生頻度を算出した。算出した結果を表-19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-20のように設定した。

表-19 信頼度が低下した際の重大故障件数の発生頻度

除雪機械	除雪トラック	除雪グレーダ	除雪ドーザ	ロータリ除雪車	小形除雪車	凍結防止剤散布車	合計			
平均配置台数	508	99	87	146	120	84	1,039			
信頼度	重大故障件数(件)							重大故障件数(件/箇所)		
								開発建設部(10箇所)	事務所(34箇所)	除雪ST(147箇所)
0.99	5	1	1	1	1	1	10	1.0	0.3	0.1
0.98	10	2	2	3	2	2	21	2.1	0.6	0.1
0.97	15	3	3	4	4	2	31	3.1	0.9	0.2
0.95	25	5	4	7	6	4	52	5.2	1.5	0.4
0.90	51	10	9	15	12	8	104	10.4	3.1	0.7
0.85	76	15	13	22	18	12	156	15.6	4.6	1.1
0.80	101	20	17	29	24	16	208	20.8	6.1	1.4
0.70	152	30	26	44	36	25	312	31.2	9.2	2.1
0.50	253	50	43	73	60	41	520	52.0	15.3	3.5

表-20 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-21 除雪STにおける信頼度の目標値

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

### 5.3 維持管理手法のシミュレーション試行

これらの検討を踏まえた維持管理手法について、シミュレーションを試行し、効果と課題の抽出を行った。

#### 5.3.1 配置転換による維持管理手法のシミュレーション試行

シミュレーションの試行にあたり、以下の条件を設定した。

- ①対象の除雪機械は、前章で検討した開発局の1開発建設部の除雪機械のうち、平成27年度に配置されていた101台を対象とした。各事務所の除雪STにおける信頼度の目標値は、表-21のとおりである。
- ②シミュレーションの実施期間は、平成27年度から10年間(平成27年度～令和6年度)とした。
- ③信頼度は、重大故障データから推定した形状・尺度パラメータと、各除雪機械の年度末の稼働実績(走行距離または稼働時間)を算定式に代入して算出した。な

お、信頼度は走行距離と稼働時間のそれぞれの値のうち、低い値を採用した。

- ④稼働実績は、信頼度の目標値を下回った時点で予防整備を実施したものとし、累積した稼働実績をリセットした。リセット後の稼働実績は、除雪機械の種類毎に各除雪工区の平均年間走行距離及び稼働時間を年度毎に加算した。
- ⑤本シミュレーションの初年度の算出は、平成26年度以前においても予防整備が実施されていたと仮定し、

平成 26 年度までの稼働実績から信頼度を算出し、その信頼度に基づく予防整備を定期的実施しているものとした。

- ⑥重大故障箇所の予防整備費用については、整備業者・除雪機械メーカーに主な故障内容と想定される予防整備内容を提示したアンケートを実施し、想定される費用（労務費や部品費を含む）の把握を行った。
- ⑦予防整備にかかる単年度予算は、1 開発建設部全体で 6,000 万円/年と仮に設定し、単年度予算に対して予防整備費用が大幅に超過する場合は、除雪機械の配置転換を 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 年度までの配置転換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-59 及び表-22 に示す。

シミュレーション初年度の平成 27 年度の予防整備費用は、単年度予算内に収まっている。

事務所毎に比較すると、担当する各除雪 S T の信頼度の目標値が高く、配置台数も多い B 事務所の予防整備費用が最も高い。

一方、配置台数が少なく、担当する各除雪 S T の信頼度の目標値も低い C 事務所の単年度平均の予防整備費用は、A 事務所の 1/3 以下となった。

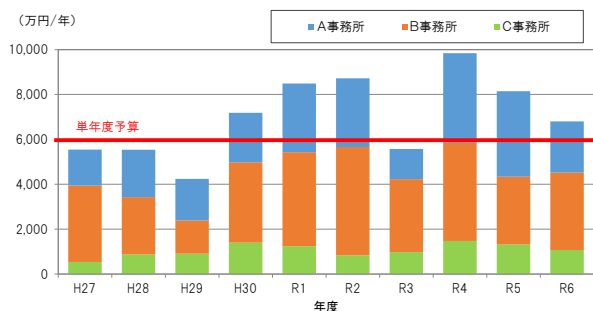


図-59 予防整備費用算出結果 (事務所毎)

平成 30 年度~令和 2 年度及び令和 4~5 年度の予防整備費用は単年度予算を 1,000 千万円以上超過しており、10 年間の総額では、約 1 億円超過する試算となった。

除雪機械毎に比較すると、予防整備費用で「トランスミッション：350 万円」、「油圧ポンプ：300 万円」など、単価が高いロータリ除雪車にかかる費用が大きく、次に配置台数や重大故障箇所が多い除雪トラックが大きくなっている。

先の試算結果を踏まえて、除雪機械の配置転換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。

配置転換の実施時期は、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。

配置転換の実施内容は、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。

配置転換 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-60 及び表-23 に示す。

事務所毎に整理した図-60 には、配置転換前及び配置転換 1 回及び 2 回目各年度の予防整備費用を折れ線グラフで示し、配置転換 3 回目の予防整備費用を棒グラフで示しているが、配置転換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-22 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-23 配置転換 3 回目の予防整備費用算出結果（除雪機械毎）

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

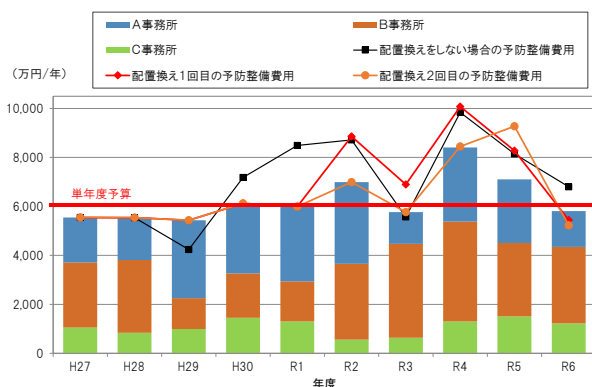


図-60 配置転換 3 回目の予防整備費用算出結果（事務所毎）

表-22、23 を比較すると、単年度の予防整備費用は、配置転換前では単年度平均で約 7,000 万円に対し、配置転換 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転換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転換している。

これは、予防整備を先送りしているとも言えることから、配置転換の回数を増やしすぎると、長期的には予防整備実施時期が集中して予防整備費用が増大する恐れがある。

二つ目として、平成 27 年度時点で配置されていた除雪機械を令和 6 年度まで稼働し続けている前提で、シミュレーションを実施したが、実際の運用では稼働実績や使用

年数、除雪機械本体の信頼度などが一定の基準に達した段階で更新を行うため、更新時期や更新費用の設定を加味する必要がある。

最後に、今回のシミュレーションでは、定期整備費用について反映されていない。

よりの確な予防整備実施時期の判断や、整備費用の試算にあたっては、整備履歴を加味した試算が必要である。

信頼度の算出においても同様に、故障データだけでなく、重大故障箇所の整備履歴が必要となる。

そのためには、重大故障箇所の故障・整備履歴を確実に記録する管理表の内容・様式などを整理していく必要がある。

### 5. 3. 2 機械更新を考慮した維持管理手法のシミュレーション試行

前項で抽出した課題のとおり、配置転換を繰り返した場合長期的には予防整備コストが増大する恐れがある。

しかし、実際には、稼働年数や機械本体の信頼度などが一定の水準に到達した段階で、機械の処分・更新を行うことになるため、機械の処分・更新についても考慮する必要がある。令和元年度は、「除雪機械の更新（一定の使用年数に達した段階で機械を更新）」を反映した維持管理手法についてシミュレーションを試行した。

具体的には、除雪機械の種類毎に、「標準的な使用年数（更新のタイミング）」を事前に設定し、維持管理手法の対象としている除雪機械の使用年数が「標準的な使用年数」に達した時点で機械の更新（稼働実績を 0 リセットし、更新費用を計上）を行い、更新しない機械については、前項と同様の考え方により、配置機械の稼働実績・信頼度に応じた予防整備による維持管理を行う想定とした。なお、除雪機械の種類毎の「標準的な使用年数（機械更新を行うタイミングとする使用年数）」は、「平成 30 年度版 建設機械等損料算定表（北海道補正版 北海道開発局）」における「標準使用年数」に基き、表-24 のとおり設定した。

表-24 除雪機械種類毎の「標準的な使用年数」

除雪機械	算定表 <sup>※</sup> の標準使用年数	維持管理手法に用いる使用年数
除雪トラック	15.5	16
除雪グレーダ	16.0	16
除雪ドーザ	13.5	14
ロータリ除雪車	15.0	15
小形除雪車	15.0	15
凍結防止剤散布車	11.0	11

※平成30年度版 建設機械等損料算定表(北海道補正版 北海道開発局)

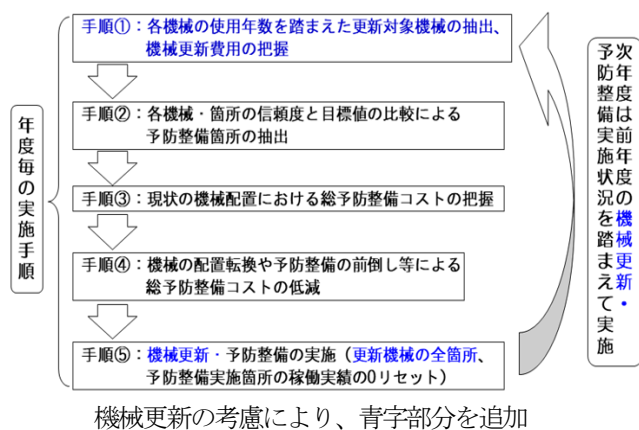


図-61 機械更新を考慮した除雪機械維持管理手法

また、除雪機械の更新費用（単価）についても、「平成30年度版 建設機械等損料算定表（北海道補正版 北海道開発局）」に基づき、機械の種類・規格・装備に応じた費用を適用した。

各除雪機械の使用年数や稼働実績（想定）に基づいて、図-61の手法を経年的に実施し、将来の各年度に必要な総機械更新費用・総予防整備コストを明らかにするとともに、除雪機械の配置転換や予防整備の実施時期の調整（総予防整備コストが安い年度への前倒し）等を実施することで、各年度における総費用の平準化についての検討を行った。

(1) シミュレーションの実施条件

- ① 対象とする除雪機械：「5. 3. 1」項と同様、開発局の1開発建設部の除雪機械のうち、平成27年度配置の101台を対象。
- ② 実施期間：H27から30年間（2015～2044年度）。
- ③ 機械更新のタイミング・単価：「平成30年度版 建設機械等損料算定表（北海道補正版 北海道開発局）」に基づく「標準的な使用年数」及び「単価」。

表-21（再掲）除雪STにおける信頼度の目標値

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

- ④ 信頼度の算出方法：「5. 3. 1」項と同様、ワイブル型累積ハザード解析で導出した算定式に各除雪機械の年度末の稼働実績（走行距離または稼働時間）を代入して算出。  
代入する稼働実績は、予防整備を実施した時点で、累積した稼働実績を0リセット。  
故障箇所毎の信頼度は、稼働時間と走行距離のそれぞれによる算定値のうち、低い方を採用。  
本シミュレーションの初年度（H27）の算出は、H26以前についても、同様の考え方で予防整備が実施されていたと仮定して、機械の導入年度からH26までの稼働実績、その稼働実績に基づく信頼度、信頼度に基づく予防整備の実施を考慮。  
H28以降の稼働実績は、除雪機械の種類毎に算出した「各除雪工区（配置されている除雪ST）の平均年間走行距離および稼働時間」を毎年度加算。
- ⑤ 信頼度の目標値：「5. 3. 1」項と同様、「路線の重要度（配置されている除雪STが受け持つ除雪工区の重要度）」及び「路線の重要度に応じた信頼度の目標値」に基づく値（表-21（再掲））。
- ⑥ 各箇所の予防整備コスト（単価）：「5. 3. 1」項と同様、整備業者や除雪機械メーカーへのアンケート等から把握した予防整備コスト。
- ⑦ 予防整備コストの単年度予算：「5. 3. 1」項と同様、開発建設部全体で「6,000万円/年」。
- ⑧ 機械更新費用の単年度予算：建設部全体で「28,000万円」。  
対象機械101台のH23-27機械更新費用の実績を基に設定。



(2) 現状の機械配置による予防整備コストの算出  
シミュレーション条件に基づき、現状 (H27 時点) の除雪機械の配置における総予防整備コスト及び総機械更新費用を算出した (図-62、63)。算出結果は、下記のとおりである。

- 機械更新を考慮したことで、シミュレーション対象年度における大部分の年度で、総予防整備コストが単年度予算におさまっている。
- 総機械更新費用は、平均すると、単年度予算内におさまるが、更新のタイミングが集中する年度があり、単年度予算を大幅に超過する年度がある。
- 事務所毎に予防整備コストを比較すると、各除雪 ST の信頼度の目標値が高く、機械台数も多い B 事務所の予防整備コストが最も高い。一方、機械台数が特に少なく、各除雪 ST の信頼度の目標値も特に低い C 事務所の単年平均は、B 事務所の 1/4 以下である。
- 機械毎に予防整備コストを比較すると、「トランスミッション-中項目全て：350 万円」、「油圧装置-油圧ポンプ：300 万円」など、予防整備コストの単価が高いロー

タリ除雪車の予防整備費が最も高く、次いで、機械台数や予防整備対象箇所が多い除雪トラックが高くなっている。

また、現状の機械配置によるシミュレーションについて、各除雪機械の機械本体の信頼度を算出し、機械更新から次の機械更新までの機械本体の信頼度の推移を整理した。機械本体の信頼度の算出は、機械毎に対象となっている『全箇所の信頼度の積』により算出している。

図-64 に示す除雪トラック (使用 16 年目に更新) の配置除雪 ST 毎に機械本体の信頼度の比較・整理結果は、以下のとおりである。

- 年間稼働実績が最も多いのは「B-b①ST」であり、9 年後頃までは全 ST の中で、機械本体の信頼度が最も低くなっているが、信頼度の目標値が 0.95 (重要度 B) と比較的高く、この頃から、順次、予防整備が行われるため、信頼度が最も低下した時でも 0.5 程度である。
- 機械本体の信頼度が最も下がるのは、信頼度の目標値が 0.90 (重要度 C) で、年間稼働実績は平均的な「A-a③ST」であり、0.3 程度まで低下する。また、信

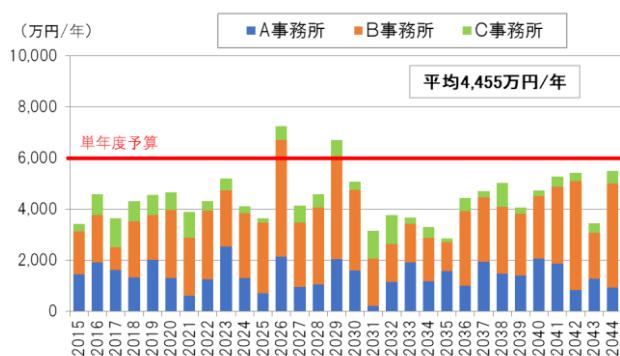


図-62 現状 (H27 時点) の機械配置における各年度の総予防整備コスト (事務所毎)

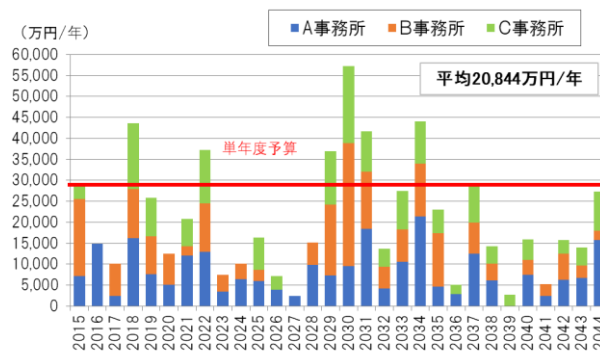


図-63 現状 (H27 時点) の機械配置における各年度の総機械更新費用 (事務所毎)

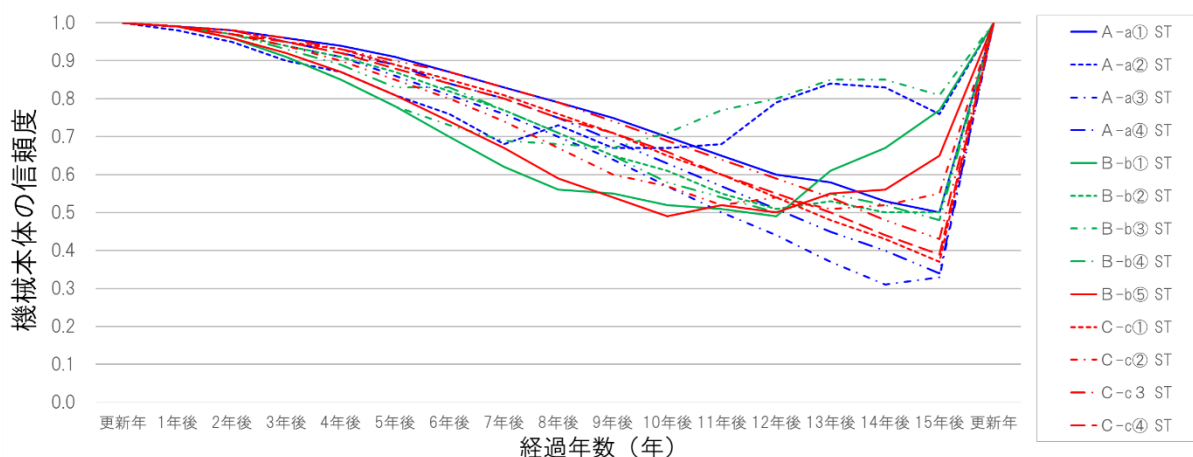


図-64 除雪トラックの配置除雪 ST 毎の機械本体の信頼度

頼度の目標値が0.85（重要度D）の「A-a④ST」も0.35程度まで低下する。

- ・信頼度の目標値が0.97（重要度A）の「A-a②ST」や「B-b③ST」の機械本体の信頼度は、0.65程度までしか下がらず、12～15年後付近では、他のSTと比較して、非常に高くなっている。

従って、信頼度の目標値が高いSTは、各箇所の予防整備が早め実施されることで、機械本体の信頼度も高水準で推移する。

(3) シミュレーション条件の変更が予防整備コスト等に及ぼす影響の分析

機械更新年数や信頼度の目標値の条件設定によって、予防整備や機械更新のタイミングが変わってくるため、これらを変更することで、予防整備コストや機械更新費用に及ぼす影響を分析した。

最初に機械更新年数の変更（一律で±1年及び2年）による予防整備コスト・機械更新費用の増減状況を分析した（図-65）。

- ・機械更新年数を延長することで、予防整備コストは増加するが、機械更新費用が減少するため、総額は減少【使用年数+1年のときは標準から総額2.5億円（1年あたり848万円）の減少、使用年数+2年のときは標準から総額3.2億円（1年あたり1,072万円）の減少】
- ・機械更新年数を短縮することで、予防整備コストは減少するが、機械更新費用が増加するため、総額は増加【使用年数-1年のときは標準から総額8.6億円（1年あたり2,852万円）の増加、使用年数-2年のときは標準から総額13.9億円（1年あたり4,624万円）の増加】

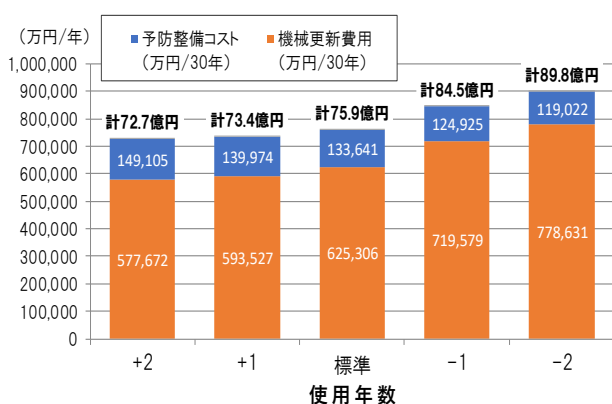


図-65 使用年数の変更によるコスト増減状況

続いて、信頼度目標値の変更（信頼度を一律95%または90%にした場合、路線の重要度に応じた目標値を現状から各1ランク下げた場合）による予防整備コストの増減状況を分析した。（図-66）。

- ・信頼度目標値を一律95%にした場合、路線の重要度Aの除雪ST（2箇所）は目標値が下がるが、C,Dの除雪ST（5箇所）は目標値が上がるため、予防整備コストが増加【一律95%のときは標準から総額1.3億円（1年あたり444万円）の増加】
- ・信頼度目標値を一律95%にした場合、路線の重要度A,Bの除雪ST（8箇所）の目標値が下がり、Dの除雪ST（2箇所）のみが上がるため、予防整備コストは減少（ランクダウンよりも減少するコスト大）【一律90%のときは標準から総額6.4億円（1年あたり2,142万円）の減少、1ランクダウンとすると標準から総額5.8億円（1年あたり1,946万円）の減少】

(4) 予防整備コスト平準化の検討

維持管理手法に機械更新を考慮したことで、現状配置によるシミュレーションにおいても、対象年度のほとんどの年度において、総予防整備コストが事前に設定した単年度予算（6,000万円/年）におさまっているが、30年のシミュレーション期間における予防整備コストの最大は7,256万円/年、最小は2,853万円/年であり、約4,500万円の開きがある。このように、年度によるばらつきが大きいと、年度毎の予算による予防整備で、開発建設部所有の除雪機械の信頼度を確実に確保しておくことが難しくなる。

よって、①予防整備の前倒しと②機械の配置転換による予防整備コストの平準化を検討した。なお、現状の機械配置によるシミュレーションにおける各年度の予防整備コ

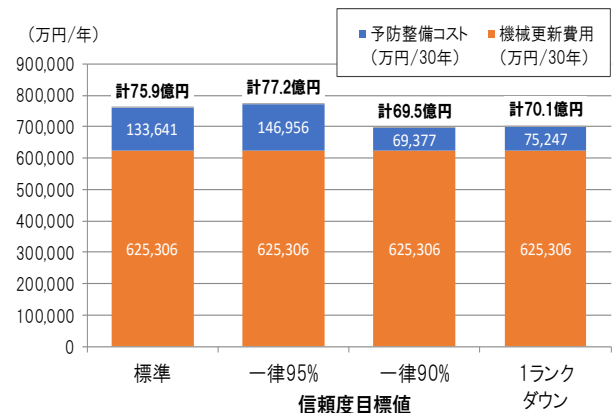


図-66 信頼度目標値の変更によるコスト増減状況

ストの平均が約4,500万円/年であったことを踏まえて、コスト平準化で目標とする単年度予算は、当初設定の6,000万円/年よりも1,000万円/年を減じた「5,000万円/年」とした。

「①予防整備の前倒し」による予防整備コストの平準化は、予算に余裕がある年度において、次年度以降に予防整備の実施が想定される機械・箇所の予防整備を前倒しすることで、各年度の予防整備コストを平準化する手法である。本手法を試行した結果を図-67に示す。

各年度の予防整備コストを考慮しながら、予算に余裕がある年度に、予防整備の前倒しを実施することで、各年度の予防整備コストを平準化し、予算内におさめることができています。予防整備コストの前倒しによる「30年間の総予防整備コスト」の増加は、1,245万円（1年あたり42万円）と小さいため、予算内で適切な信頼度を確保できる効果が大きいと考えられる。

「②機械の配置転換」による予防整備コストの平準化は、年間の稼働実績（走行距離・稼働時間）や信頼度の目標値が異なる除雪ST間で、除雪機械を配置転換することで、予防整備の実施のタイミングを調整し、総予防整備コストの平準化を図る手法である。本手法を試行した結果を図-68に示すが、本試行では、5年間隔で配置転換を実施することとし、最初の配置転換（Step1）は2020年度のシーズンが始まる前に実施、以降、2025年度のシーズンが始まる前にStep2、2030年度のシーズンが始まる前にStep3、2035年度のシーズンが始まる前にStep4、2040年度のシーズンが始まる前にStep5の配置転換を実施している。

機械更新の直前に予防整備が実施される場合などに、当該機械を信頼度の目標値が低いSTや稼働が少ないSTに配置転換し、予防整備を実施することなく機械更新を迎えることができるため、各年度の予防整備コストの平準化のみならず、全体の予防整備コストの低減も図ることができ

た。

（5）維持管理手法の効果と課題・対応策の整理

「機械更新を考慮した除雪機械の維持管理手法」について、シミュレーション結果を踏まえて、効果と課題および課題への対応策を整理した。

効果①：稼働実績に基づいて算出した信頼度を用いて、予防整備を実施すべき箇所を選定することで、客観的・定量的に、予防整備に必要な予算規模の把握や、予防整備の実施計画を立案することが可能。

さらに、機械更新を考慮したことで、機械更新に要する費用も把握でき、より実態に即した費用が想定可能。

効果②：予防整備の前倒しについてシミュレーションした結果、全体（30年間）の予防整備コストは微増するが、各年度の予防整備コストの平準化を図ることが可能。

予防整備の前倒しは、予算規模と稼働実績・信頼度を踏まえた予防整備のシミュレーションから簡単に実施を判断することができるため、開発建設部本部や道路事務所の担当者など、特別な知識や経験がなくても実施可能。

効果③：除雪機械の配置転換をシミュレーションすることで、各年度の予防整備コストの平準化を図ることが可能。さらに、機械更新を反映したことで、全体の予防整備コストの低減も可能。

効果④：信頼度の目標値や機械更新年数等の条件設定を変更したシミュレーションを実施することで、予算に応じた予防整備や機械更新の計画を立案することが可能。

効果⑤：各装置や部品の信頼度から機械全体の信頼度を算出することで、機械全体の劣化度の目安とすることが可能。また、機械全体の信頼度を機械更新の判断に適用できる可能性がある。

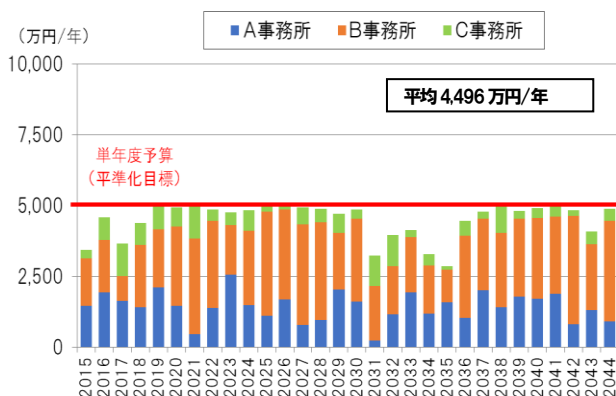


図-67 「①予防整備の前倒し」を実施した際の各年度の総予防整備コスト（事務所毎）

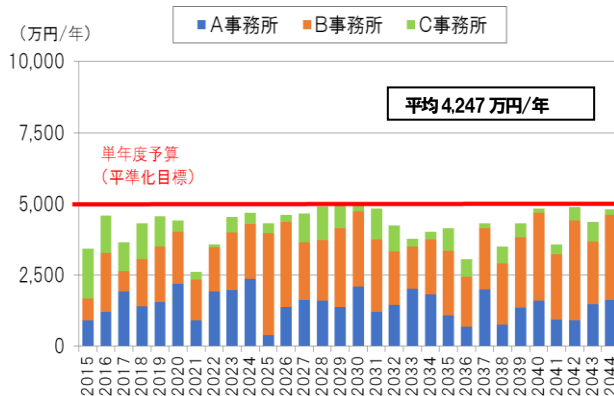


図-68 「②機械の配置転換」を実施した際の各年度の総予防整備コスト（事務所毎）

一方で、本シミュレーションによる維持管理手法の課題と対応策は以下のとおりである。

課題①：予防整備コストの平準化手法は、「予防整備の前倒し」が取組やすい手法であるが、一定期間の予防整備コストは増加。

一方で、「配置転換」による予防整備コストの平準化手法は、全体の予防整備コストの低減が可能であるが、配置転換する除雪機械を決定するためには、稼働実績や更新予定、信頼度の目標値などから総合的に判断する必要があり、効果的な配置転換を行うためには、知識・経験が必要。

⇒対応策：現場担当者が活用できるように、維持管理手法の実施方法と合わせて、配置転換の判断のポイントなどをマニュアル化。

課題②：機械更新のタイミングを「平成30年度版 建設機械等損料算定表」における「標準使用年数」に基づいて設定しているが、一律の考え方であり、機械そのものの劣化度は未適用。

⇒対応策：信頼度の目標値や機械更新年数の変更による「機械本体の信頼度」への影響（増減状況）を分析し、この信頼度に応じた機械更新のタイミングの判断方法を検討。

課題③：設定した維持管理手法は、1 開発建設部の除雪機械（約100台）を対象としたシミュレーションしか実施していないため、対象を変えた場合の影響の確認も必要。

⇒対応策：対象範囲を変えた場合（保有除雪機械台数や稼働状況が異なる開発建設部）や規模を拡大した場合（開発局全体保有除雪機械約1,000台など）のシミュレーションを実施し、予防整備コストや機械更新費用を確認し、対象を変えた場合の影響・課題を確認。

課題④：本シミュレーションでは、信頼度が目標値を下回った機械・箇所は、必ず予防整備を実施することとしており、予防整備コストが必要になる。予防整備を実施しない場合の重大故障の発生確率は、予防整備の実施割合と比較すると小さい。そのため、予防整備を実施しない場合に必要となる修理コストと予防整備コストを比較すると、予防整備コストの方が過大。

⇒対応策：現実の除雪機械の運用では、定期整備において、予防整備と同様の整備が行われたことで、何も整備をしなかった場合よりも重大故障の発生確率が低減している可能性がある。そのため、より正確に重大故障の発生確率等を設定するため、各除雪機械の装置・部品毎に、整備・修理履歴を整理しておくことが

必要。（劣化度評価の対象となる箇所毎の整備・修理履歴の管理表の作成等により、各除雪機械の管理を統一した様式で実施するなど）

また、重故障が発生した場合には、除雪機械が不稼働となることで、「A：除排雪作業が遅れることで、走行環境が悪化し、走行速度が低下」したり、「B：除排雪作業が遅れないように、代替機械を手配して除排雪作業を実施」することが考えられ、Aの場合には、「走行速度の低下による時間損失など、社会的な損失」が発生し、Bの場合には「代替機械の手配・使用に要する費用」が発生する。

さらに、予防整備をしないことで発生する故障は、予防整備を行う箇所以外の故障にも波及する可能性があり、故障発生前に実施する予防整備のコストと比較して、故障発生後の修理費の方が高くなる傾向がある。よって、予防整備を実施しない場合の損失（予防整備を実施した場合のコストと比較する予防整備を実施しない場合のコスト）には、予防整備よりも単価が高くなる「故障の修理費」と、除雪機械の不稼働による「除排雪作業の遅れによる時間損失額（社会的損失額）」または「代替機械の費用」も考慮すべきであり、その方法の検討が必要である。

## 6. まとめ

### ①除雪機械劣化度の定量的評価手法の検討

FTA（故障の木解析）で抽出した重大故障箇所について、全故障データも含めたワイブル型累積ハザード解析を行い、全故障データと重大故障データで算出した信頼度などの関連性を考察した。

重大故障箇所は全故障データ、重大故障データを用いた解析の結果、約9割が摩耗劣化故障であること、一方で偶発故障を示す故障も存在することを確認した。

重大故障箇所について、それぞれの信頼度を図化し比較することで、故障発生時に重大故障に陥りやすい故障であるかないかを可視化できた。

また、重大故障箇所に関する重大故障データと全故障データの解析結果において、故障傾向の違いがある場合の対応方法を検討し、適切な故障傾向に修正できる対応策の一つを見いだした。開発局の1開発建設部の過去3年分の稼働実績をもとに、FTAで機械本体の信頼度を算出し、除雪機械の劣化度の定量的評価としての適用性を検討した。

走行距離、稼働時間などの稼働実績で除雪機械本体の信頼度を算出することにより、点検整備時の優先順位を判断



する指標になることを確認した。

信頼度による除雪機械劣化度の定量的評価手法構築に向け、必要な故障データの内容や項目を抽出・整理し、既存の故障報告書などを参考に、解析の精度向上や実施しやすさ、記入担当者の負担を考慮した故障データの収集様式を作成した。

### ②除雪機械重要構成部品の劣化度診断手法の検討

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

試験片の測定結果から劣化度診断指標を設定し、実車測定結果から、検出機及び設定した指標は、特定の要因箇所や部位毎に注意区間を検出することが可能となり、同一車両の部位間等の比較により劣化度の相対的な診断が可能となるなど、適応性を確認することができた。

しかし、複数車両での比較は難しく、また測定結果が絶対的のどのくらいの劣化度なのかは判断ができない。

今後は、より詳細な実験データの収集、実車測定データの蓄積及び解析を行い、劣化度合いと検出機での測定値、車両に係る外力との関係等について検討していきたい。

### ③除雪機械劣化度の定量的評価による維持管理手法の検討

事務所が管理する複数路線に対する優先順位付けを行い、路線の重要度に合わせて信頼度の目標値を設定するこ

とで、整備や配置転換の実施判断が可能な維持管理手法について検討、さらに機械の更新時期も考慮したシミュレーションを実施した。

路線が持つ機能や交通量を考慮した「交通機能」と、年間の除雪作業日数を考慮した「除雪作業」の2つの観点から、路線の重要度を5段階で評価する手法を検討するとともに、除雪機械の重大故障発生頻度を整理し、路線毎に信頼度の目標値を設定した。

配置転換を想定したシミュレーションの結果、数回の配置転換を実施することで、予防整備費用を平準化でき、単年度予算が大幅に超過する年数を削減できた。

さらに除雪機械の更新時期や更新費用の設定を反映した長期間のシミュレーションの結果、予防整備や更新時期の効率的な計画立案が可能となった。

しかし、機械更新時期等に劣化度が未適用であるなどの課題が明らかになった。

今後は、信頼度の目標値や機械更新年数の変更による「機械本体の信頼度」への影響等を分析し、この信頼度に応じた機械更新時期についての検討など進めていきたい。

### 参考文献

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

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

### 14.3.1 冬期交通事故リスクマネジメント手法の構築に関する研究

担当チーム：寒地道路研究グループ（寒地交通チーム）

研究担当者：佐藤昌哉、平澤匡介、倉田和幸、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、リスク対策による便益算定とリスク対策評価の研究が必要になる。そこで本研究では、リスク対策として「冬期における交通事故リスク情報の提供による高リスク路線から低リスク路線への交通量転換」に着目し、一般国道と高速自動車国道が並行する区間のルートを対象に、情報提供に応じたルート転換率を推計するとともに、本リスク対策の事前評価手法を構築した。

キーワード：交通事故リスク情報、ルート転換率、リスク対策評価

#### 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<sup>1)</sup>では、札幌市内の国道230号等を対象に、日陰による路面状態悪化が冬期交通事故の要因になることを示した。平成29年度の研究<sup>2)</sup>では、路面すべりに影響する路面雪氷状態の推定手法を開発し、札幌市内の国道230号の路面雪氷状態と冬期交通事故リスクとの相関関係を示した。平成30年度の研究<sup>3)</sup>では、季節別・時間帯別・交通状態別にみた交通事故リスクの空間的評価手法を開発し、札幌市内の国道網を含む地域メッシュを対象に、冬期の交通事故リスクの空間的自己相関関係を示した。

このようにこれまででは、交通事故分析データベース整備、並びに、冬期交通事故リスク評価手法の構築に主眼を置いて研究を進めてきた。今後は、リスク対策による便益算定とリスク対策評価、並びに、冬期交通事故リスクマネジメントツールの開発を進めていくこ

とが求められている。

そこで、令和元年度の研究（以下、「本研究」という）では、リスク対策として「冬期における交通事故リスク情報の提供による高リスク路線から低リスク路線への交通量転換」に着目し、リスク対策による便益算定に必要となる交通量転換の程度を推計するとともに、リスク対策評価の手法を構築した。

具体的には、本研究では、一般国道（以下、「一般道」と略す。）と高速自動車国道（以下、「高速道」と略す。）が並行する区間のルート（以下、「並行ルート」と略す。）を対象に、一般化線形モデルを用いて冬期の交通事故リスクとリスク要因の回帰分析をおこない、分析結果から特定されたリスク要因の下で生じる当該リスクを推計した。続いて、リスク値を反映させた交通事故リスク情報の提供下でルート選択を問う質問紙を作成して道の駅で調査をおこない、情報提供に応じたルート転換率を推計した。最後に、交通事故リスクと交通量転換の関係から簡易シミュレーションをおこない、本リスク対策の事前評価の手法を構築した。

本研究の内容を図1のフローで示す。上記の交通事故リスク推計において対象とした区間と時期は、図2に示す道央自動車道（KP0～KP35.400）・札幌自動車道（KP0～KP7.539）と国道36号（KP0～KP39.382）との並行ルートであり、平成26(2014)年度・平成27(2015)年度の12月・1月・2月からなる冬期2か年（181日）である。

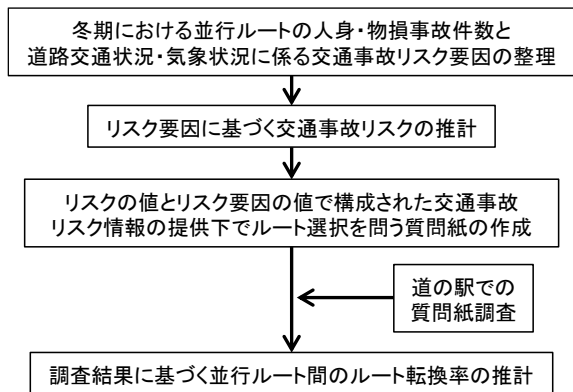


図1 研究フロー

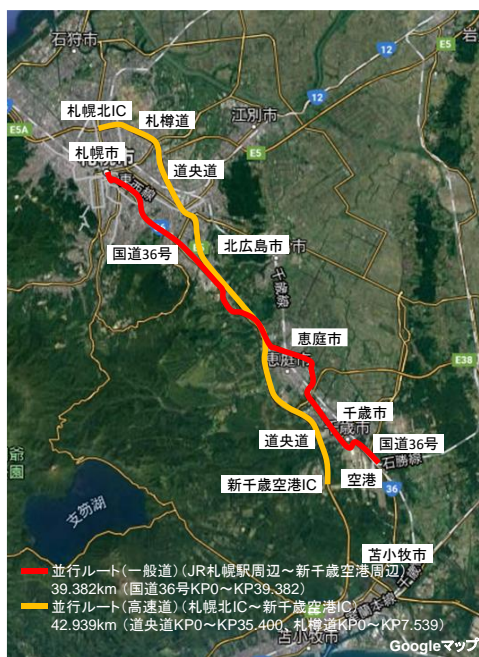


図2 分析対象の並行ルート

### 3. 調査の概要

質問紙調査では、調査場所で調査に協力頂いた回答者に、並行ルートの冬期交通事故リスク状況を記した質問紙(図3に示す。詳細は後述する。)に沿って、どちらのルートを選択するかを尋ねた。調査場所は、道の駅「花ロードえにわ」「ウトナイ湖」の休憩施設外とした。質問紙に記入された事故リスク状況は、質問紙ごとに異なる状況が記入されている。有効票数は、日交通量を母集団と見なして許容誤差5%と信頼度99%から、道の駅合計で600票以上とした。

質問紙に書かれる冬期の交通事故リスク状況は、交通事故リスク要因と交通事故リスクで構成される。リスク要因に基づく当該リスクの推計の内容については、次章で説明する。

1. あなたご自身と今回の車での移動についてお聞かせください。

【情報管理について】 ご回答いただいた個別の情報は統計的に処理を施し、回答をそのままの形で公表することはありません。また、本調査で取得した情報は厳重に管理し、本調査の終了後に破棄します。

1 性別	<input type="checkbox"/> ①男性	<input type="checkbox"/> ②女性	
2 年齢	<input type="checkbox"/> ①18～29歳	<input type="checkbox"/> ②30～44歳	<input type="checkbox"/> ③45～64歳
	<input type="checkbox"/> ④65～74歳	<input type="checkbox"/> ⑤75歳以上	
3 住所	<input type="checkbox"/> 道内(市町村名: ) <input type="checkbox"/> 道外(都道府県名: )		
4 車種	<input type="checkbox"/> 普通車(普通車用No.3、小型No.4.5.6.7) <input type="checkbox"/> 軽自動車(軽四輪、自動二輪)		
	<input type="checkbox"/> 中型車(普通貨物2車輪、マイクロバス) <input type="checkbox"/> 大型車(普通貨物3車輪、路線バス)		
	<input type="checkbox"/> 特大車(普通貨物4車輪以上、大型バス12m以上、大型特殊)		
5 移動目的	<input type="checkbox"/> ①業務/通勤、出張 <input type="checkbox"/> ②業務/運送		
	<input type="checkbox"/> ③私用/買い物、観光 <input type="checkbox"/> ④私用/その他		
6 高速道路利用時のETCカードの使用	<input type="checkbox"/> ①使用する <input type="checkbox"/> ②使用しない		
7 高速道路の利用頻度	平日	<input type="checkbox"/> ①ほぼ毎日 <input type="checkbox"/> ②月に数回 <input type="checkbox"/> ③年に数回	
	休日	<input type="checkbox"/> ①ほぼ毎日 <input type="checkbox"/> ②月に数回 <input type="checkbox"/> ③年に数回	
8 最近5年以内に交通事故を起こした経験	高速道路	<input type="checkbox"/> ①あり <input type="checkbox"/> ②なし	
	一般道路	<input type="checkbox"/> ①あり <input type="checkbox"/> ②なし	
9 最近5年以内に交通事故に遭遇した経験	高速道路	<input type="checkbox"/> ①あり <input type="checkbox"/> ②なし	
	一般道路	<input type="checkbox"/> ①あり <input type="checkbox"/> ②なし	

2. 事故リスク(事故を起こす、または遭遇する危険度)についてお聞かせください。

あなたは、2月の日中に、高速道路と国道36号のどちらかを利用して、新千歳空港と札幌駅の間(約40km)を車で移動します。このとき、高速道路では、その日に雪が1cm降り、交通量は30,000/日(平均の1.01倍)、利用料金は1,430円(新千歳空港IC～札幌北IC)です。

また、国道36号では、最高気温が-1.6℃、その日に雪が1cm降り、道路の外には45cmの雪が積もっています。さらに交通量は24,000台/日(平均の1.00倍)、速度は55km/hで、300mに1つのペースで信号交差点を通過します。

【Q1】あなたは、出発前に事故リスク(人身事故・物損事故を起こすまたは遭遇する確率)に関する情報を知ることができた場合、下記のどの表現が理解しやすいですか? 理解しやすい順位を教えてください。

表現A: 移動するその日に1件以上の事故が起きる確率は、国道ルートでは83%、高速ルートでは42%です。  
 表現B: 国道ルートでは7,000台に1台、高速ルートでは22,000台に1台、事故に遭う可能性が異なります。  
 表現C: 国道ルートの事故リスクは、高速ルートの事故リスクの2.0倍です。

【A1】 1位 \_\_\_\_\_ 2位 \_\_\_\_\_ 3位 \_\_\_\_\_

【Q2】あなたは、上記の事故リスクを知った場合、国道ルートと高速ルートのどちらを利用しますか?

【A2】 ①国道ルートを利用する(選択理由 \_\_\_\_\_)  
②高速ルートを利用する(選択理由 \_\_\_\_\_)

図3 質問紙

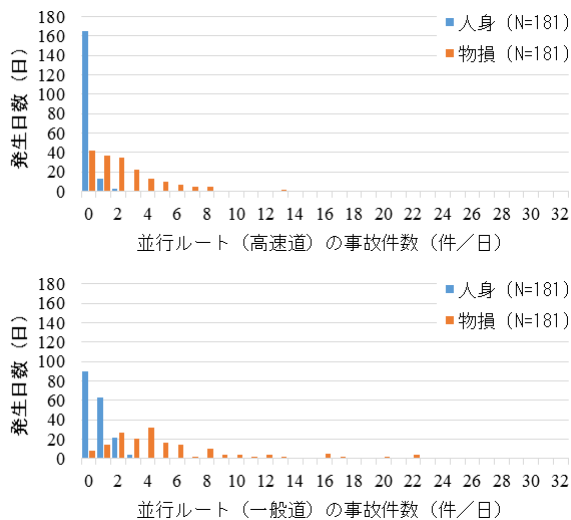


図4 冬期交通事故件数ごとの発生日数

### 4. 並行ルートの冬期の交通事故リスクについて

#### 4.1 並行ルートの冬期交通事故の特徴

並行ルートの一般道では、冬期181日で、人身事故件数128件(平均0.7件/日、標準偏差0.9件/日)、物損事故件数1,137件(平均6.3件/日、標準偏差6.2件/日)であり、高速道では、人身事故件数19件(平均0.1件/日、標準偏差0.4件/日)、物損事故件数450件(平均2.5件/日、標準偏差2.6件/日)であった。冬期の並行ルートでは、日当たり平均で一般道の人身

と物損の事故件数は、高速道の各々の件数の7倍と2.5倍発生していた。

図4に、高速道と一般道の各々で事故件数がカウントされた延べ日数を示す。高速道の場合、人身事故が0件カウントされた日数は延べ165日、物損事故が0件カウントされた日数は延べ42日となり、人身事故も物損事故も発生しなかった日数が全日数の中で最も大きな割合を占めた。一般道の場合、人身事故が0件カウントされた日数は延べ90日、物損事故が4件カウントされた日数は延べ32日となり、人身事故が発生しなかった日数が全日数の中で最も大きな割合を示したのに対し、物損事故のほうは4件発生した日数が最も大きな割合を占めた。

#### 4.2 交通事故リスク要因の推計方法

交通事故リスクとは、「人身・物損事故の起こりやすさ」のことである。具体的には、交通事故が起きる確率のことであり、例えば「交通事故が1件以上起きる確率」や「交通事故が起きない確率」のことである。

本研究では、交通事故リスクとリスク要因の関係を一般化線形モデル (GLM) という確率モデルで定式化した。GLMとは、重回帰モデルを拡張した回帰モデル群の総称である。以下のモデルの中から、統計的に最も妥当なものを交通事故リスク推定モデルとして選定した。式中の $Y$ が人身・物損事故件数を、 $X_1, \dots, X_N$ がリスク要因を表す。 $P[Y > 0]$ は人身・物損事故が1件以上起きるリスクである。

##### (1)ポアソン回帰モデル (POモデル)

$$\mu = \exp(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_N X_N) \quad (1)$$

$$P[Y] = \frac{\mu^Y}{Y!} \exp(-\mu) \quad (2)$$

$$P[Y > 0] = 1 - \exp(-\mu) \quad (3)$$

##### (2)負の二項回帰モデル (NBモデル)

$$\mu = \exp(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_N X_N) \quad (4)$$

$$P[Y] = \frac{\Gamma(Y+\theta)}{Y! \Gamma(\theta)} \left\{ \frac{\theta}{\mu+\theta} \right\}^\theta \left\{ \frac{\mu}{\mu+\theta} \right\}^Y \quad (5)$$

$$P[Y > 0] = 1 - \{\theta/(\mu + \theta)\}^\theta \quad (6)$$

##### (3)ゼロ過剰ポアソン回帰モデル (ZIPOモデル)

$$\mu = \exp(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_N X_N) \quad (7)$$

$$\frac{\pi}{1-\pi} = \exp(\gamma_0 + \gamma_1 X_1 + \dots + \gamma_N X_N) \quad (8)$$

$$P[Y] = \begin{cases} \pi + (1-\pi) \exp(-\mu) & Y = 0 \\ (1-\pi) \frac{\mu^Y}{Y!} \exp(-\mu) & Y \geq 1 \end{cases} \quad (9)$$

$$P[Y > 0] = (1-\pi) \exp(-\mu) \quad (10)$$

##### (4)ゼロ過剰負の二項回帰モデル (ZINBモデル)

$$\mu = \exp(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_N X_N) \quad (11)$$

$$\frac{\pi}{1-\pi} = \exp(\gamma_0 + \gamma_1 X_1 + \dots + \gamma_N X_N) \quad (12)$$

$$P[Y] = \begin{cases} \pi + (1-\pi) \left\{ \frac{\theta}{\mu+\theta} \right\}^\theta & Y = 0 \\ (1-\pi) \frac{\Gamma(Y+\theta)}{Y! \Gamma(\theta)} \left\{ \frac{\theta}{\mu+\theta} \right\}^\theta \left\{ \frac{\mu}{\mu+\theta} \right\}^Y & Y \geq 1 \end{cases} \quad (13)$$

$$P[Y > 0] = (1-\pi) \{\theta/(\mu + \theta)\}^\theta \quad (14)$$

POモデル、NBモデル、ZIPOモデル、ZINBモデルの中から交通事故リスク推定モデルを選定する手順は、以下のとおりである。

- ①POモデル、NBモデル、ZIPOモデル、ZINBモデルの各々について、道路交通状況に係る事故リスク要因の回帰分析、並びに、気象状況に係る事故リスク要因の回帰分析をステップワイズで実施した。
- ②各々の回帰モデルに対して、AIC (データへの当てはまりと説明変数の数とのバランスからみて説明変数の最適な組合せを判定する指標) が最小になる事故リスク要因の組合せを特定した。
- ③POとNBの両モデルに対して、過分散検定 (平均と分散の差がゼロであるという帰無仮説を検定する。) をおこなった。等分散性が棄却されたならば、NBモデルを採用した。
- ④POとZIPOの両モデル、若しくは、NBとZINBの両モデルに対して、ゼロ過剰検定 (両モデルの有意差は無いという帰無仮説を検定する。) をおこなった。有意差無しが棄却されたならば、ZIPOモデル又はZINBモデルを採用した。

POモデルの推定には統計分析ソフトウェア R のパッケージ stats の glm 関数を、NBモデルの推定にはパッケージ MASS の glm.nb 関数を、ZIPOモデルとZINBモデルの推定にはパッケージ pscl の zeroinfl 関数を使用した。リンク関数の右辺には、対数変換された台キロの offset 項 (回帰係数を1に固定した項を指す。) を加えた。また、過分散検定にはパッケージ AER の dispersiontest 関数を、ゼロ過剰検定にはパッケージ pscl の vuong 関数を使用した。

交通事故リスクをリスク情報として利用する情報発信者の立場からすると、できるだけ組み合わせる数が少なく、かつ、予見しやすいリスク要因が特定されたほうが望ましい。そこで本研究では、表1に示す道路交通状況に係る交通事故リスク要因と表2に示す気象状況に係る交通事故リスク要因に限定した。

#### 4.3 交通事故リスクとそのリスク要因

交通事故リスク推定モデルの選定結果とリスク要因の推計結果は、以下のとおりである。



一般道に対する人身事故リスク推計モデルは、POモデルに従うのが統計的に妥当であった。したがって、冬期における並行ルート的一般道の人身事故リスクは、ポアソン分布に従うことが分かった。そのリスク要因は、キロ当たり交通量、信号交差点密度、降雪量が特定された。特に、信号交差点密度と降雪量は、一般道の人身事故リスクとの相関が認められた。

高速道に対する人身事故リスク推計モデルは、ZIPOモデルに従うのが統計的に妥当であった。したがって、冬期における並行ルート的高速道の人身事故リスクは、ゼロ過剰ポアソン分布に従うことが分かった。そのリスク要因は、キロ当たり交通量、旅行速度、降雪量が特定された。特に、キロ当たり交通量は、高速道の人身事故リスクとの相関が認められた。

一般道の物損事故リスク推計モデルは、NBモデルに従うのが統計的に妥当であった。したがって、冬期における並行ルート的一般道の物損事故リスクは、負の二項分布に従うことが分かった。そのリスク要因は、キロ当たり交通量、信号交差点密度、最高気温、積雪深、降雪量、月ダミーが特定された。いずれも、一般道の物損事故リスクとの相関が認められた。

高速道の物損事故リスク推計モデルは、NBモデルに従うのが統計的に妥当であった。したがって、冬期における並行ルート的高速道の物損事故リスクは、負の二項分布に従うことが分かった。そのリスク要因は、キロ当たり交通量、旅行速度、降雪量、月ダミーが特定された。特に、キロ当たり交通量と降雪量と月ダミーは、高速道の物損事故リスクとの相関が認められた。

以上より、冬期における並行ルート的一般道と高速道では、人身事故リスクと物損事故リスクの生成メカニズムが異なることが分かった。

また、人身事故と物損事故を合わせた交通事故としてみた場合、一般道と高速道の交通事故リスク推計モデルはNBモデルが統計的に妥当であった。したがって、冬期における並行ルート的一般道と高速道の交通事故リスクは、負の二項分布に従うことが分かった。そのリスク要因は、一般道の場合は、キロ当たり交通量、旅行速度、信号交差点密度、最高気温、積雪深、降雪量が、高速道の場合は、キロ当たり交通量、降雪量が、それぞれ特定された。

なお、並行ルート間でのルート選択に着目しているため、並行ルート的高速道利用料金の影響は、高速道モデルと一般道モデルの間では定数項の差として反映されることになる。

#### 4. 4 モデルの予測精度

表 1 道路交通状況に係る交通事故リスク要因

路線名	交通調査基本区間番号	年月	人身事故件数 (件/月)	物損事故件数 (件/月)	月平均 交通量 (台/12時間)	月平均 旅行速度 (km/h)	交差点密度 係数 <sup>1)</sup> (箇所/km)	交差点密度 係数 <sup>2)</sup> (箇所/km)
一般道36号	1300360010	201412	0	8	11,113	15.66	10.0	3.6
一般道36号	1300360010	201501	1	24	10,178	20.50	10.0	3.6
一般道36号	1300360010	201502	0	2	10,811	13.53	10.0	3.6
一般道36号	1300360010	201512	0	11	10,932	15.14	10.0	3.6
一般道36号	1300360010	201601	0	5	10,444	19.00	10.0	3.6
一般道36号	1300360010	201602	0	3	10,725	19.05	10.0	3.6
一般道36号	1300360020	201412	0	12	26,419	25.53	10.0	3.6
一般道36号	1300360020	201501	1	12	24,195	32.76	10.0	3.6
一般道36号	1300360020	201502	4	10	25,700	25.47	10.0	3.6
一般道36号	1300360020	201512	0	18	25,989	21.20	10.0	3.6

表 2 気象状況に係る交通事故リスク要因

年月日	一般道		高速道路		気象データ				
	人身事故件数 (件/日)	物損事故件数 (件/日)	人身事故件数 (件/日)	物損事故件数 (件/日)	平均気温 (°C)	最高気温 (°C)	最低気温 (°C)	最深積雪 (cm)	降雪量合計 (cm)
2014/12/1	1	2	0	2	8.1	11.4	6.2	0	0
2014/12/2	2	4	0	0	-0.9	7.5	-3.4	0	0
2014/12/3	1	4	0	2	-1.9	0.1	-4.0	0	0
2014/12/4	0	3	0	1	-3.8	1.4	-9.5	0	0
2014/12/5	0	2	0	1	-4.6	-0.1	-9.3	0	0
2014/12/6	0	3	0	13	-7.0	-1.4	-12.0	0	0
2014/12/7	2	20	2	11	-7.6	0.1	-13.6	7	7
2014/12/8	0	11	0	1	-7.4	-0.5	-14.6	5	3

表 3 モデルの予測精度 (高速道の場合)

道路交通状況に係る要因		Y = 0	Y > 0	的中率
人身事故	$P[Y = 0] \geq 0.5$	99	7	93%
	$P[Y > 0] \geq 0.5$	0	8	100%
	感度、特異度	100%	47%	94%
物損事故	$P[Y = 0] \geq 0.5$	12	29	29%
	$P[Y > 0] \geq 0.5$	11	62	85%
	感度、特異度	52%	68%	65%
気象状況に係る要因		Y = 0	Y > 0	的中率
人身事故	$P[Y = 0] \geq 0.5$	164	3	98%
	$P[Y > 0] \geq 0.5$	1	13	93%
	感度、特異度	99%	81%	98%
物損事故	$P[Y = 0] \geq 0.5$	26	46	36%
	$P[Y > 0] \geq 0.5$	16	93	85%
	感度、特異度	62%	67%	66%

表 4 モデルの予測精度 (一般道の場合)

道路交通状況に係る要因		Y = 0	Y > 0	的中率
人身事故	$P[Y = 0] \geq 0.5$	45	39	53%
	$P[Y > 0] \geq 0.5$	40	32	44%
	感度、特異度	53%	45%	50%
物損事故	$P[Y = 0] \geq 0.5$	5	63	7%
	$P[Y > 0] \geq 0.5$	8	80	91%
	感度、特異度	39%	56%	55%
気象状況に係る要因		Y = 0	Y > 0	的中率
人身事故	$P[Y = 0] \geq 0.5$	69	58	54%
	$P[Y > 0] \geq 0.5$	21	33	61%
	感度、特異度	77%	36%	56%
物損事故	$P[Y = 0] \geq 0.5$	5	59	8%
	$P[Y > 0] \geq 0.5$	3	114	97%
	感度、特異度	63%	66%	66%

表 3 をみると、高速道の道路交通状況による人身事故リスクと物損事故リスクの推計モデルについては、「0件となる確率が0.5以上であると予測して実際には0件であった事象」、かつ、「1件以上起きる確率が0.5以上であると予測して実際には1件以上あった事象」が全事象に占める割合(「全予測的中率」と呼ぶ。)は各々94%と65%であった。同様に、気象状況による人身事

故リスクと物損事故リスクの推計モデルについては、全予測的中率は各々98%と66%であった。

表4をみると、一般道の道路交通状況による人身事故リスクと物損事故リスクの推計モデルについては、全予測的中率は各々50%と55%であり、気象状況による人身事故リスクと物損事故リスクの推計モデルについては、全予測的中率は各々56%と66%であった。

なお、モデルのパラメータ推定や統計的検定の詳細については、文献<sup>4)</sup>に譲る。

交通事故リスク要因と、交通事故リスク推計モデルで推計されたリスクの値は、質問紙調査において質問紙に書かれる交通事故リスク情報に反映される。そして、質問紙調査で回答されたルート選択結果、交通事故リスク、及びそのリスク要因を用いて、交通事故リスク情報提供下のルート転換率を推計する。交通事故リスク情報の内容とルート転換率推計の内容については、次章で説明する。

## 5. 冬期の交通事故リスク情報の提供に応じた並行ルート間のルート転換率について

### 5. 1 交通事故リスク情報の内容

3. で概要を述べた質問紙調査において、質問紙に書かれる交通事故リスク情報の内容を説明する。

質問紙において冬期の交通事故リスク状況を表現する文章は、以下のようにした。ただし、文章中の●に入る数値は、各リスク要因の現実的な範囲内で、質問紙ごとにランダムとした。

『あなたは、●月中に、高速道路と国道36号のどちらかを利用して、新千歳空港と札幌駅の間（約40km）を車で移動します。このとき、高速道路では、その日に雪が●cm降り、交通量は●台/日（平均の●倍）、利用料金は1,430円（新千歳空港IC～札幌北IC）です。また、国道36号では、最高気温が●℃、その日に雪が●cm降り、道路の外には●cmの雪が積もっています。さらに交通量は●台/日（平均の●倍）、速度は●km/h、●mに1つのペースで信号交差点を通過します。』

上記の●の値を交通事故リスク推計モデルに代入することで、質問紙に記入する交通事故リスクを算定した。ただし、その値は、道路交通状況による交通事故リスクの値と気象状況による交通事故リスクの値を掛けた値（つまり、同時確率のこと。）とした。

交通事故リスク情報の表現方法として、以下の3種

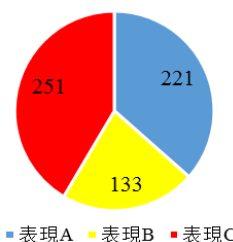


図5 最も理解しやすかった表現方法

類を取り上げた。各表現方法の基になっている交通事故リスクの値は、質問紙ごとに同じ値になっている。

表現A『移動するその日に1件以上の事故が起きる確率は、国道ルートでは●%、高速ルートでは●%です。』

表現B『国道ルートでは●台に1台、高速ルートでは●台に1台、事故に遭う可能性があります。』

表現C『国道ルートの事故リスクは、高速ルートの●倍です。』

質問紙では、回答者に対して、上記の表現A、表現B、表現Cの中で「理解しやすい順位」を決めてもらい、その表現による情報提供下でのルート選択を尋ねている。したがって、情報提供に応じたルート転換率は、表現方法ごとに推計される。

### 5. 2 交通事故リスク情報の表現方法

冬期の交通事故リスク情報として最も理解しやすかった表現方法について、回答結果を図5に示す。

回答者の約4割が表現Cを、約4割が表現Aを選んだ。以下では、表現Aの交通事故リスク、すなわち、当日に交通事故が1件以上起きる確率（以下、「交通事故が起きる確率」という）に着目し、ルート転換率の推計方法と推計結果を示す。

### 5. 3 ルート転換率の推計方法

本研究では、並行ルート間のルート選択結果（高速道： $r=1$ 、一般道： $r=0$ ）と選択要因 $Z_1, \dots, Z_N$ の関係をGLMのロジスティック回帰モデルで定式化した。

$$P[r=1] = \frac{\exp(\omega_0 + \omega_1 Z_1 + \dots + \omega_N Z_N)}{1 + \exp(\omega_0 + \omega_1 Z_1 + \dots + \omega_N Z_N)} \quad (14)$$

選択要因には、質問紙上で冬期の交通事故リスク状況を説明する際に使った高速道のキロ当たり交通量、高速道の降雪量、一般道のキロ当たり交通量、一般道の旅行速度、一般道の信号交差点密度、一般道の最高気温、一般道の積雪深、一般道の降雪量の他に、高速道と一般道の交通事故リスクの値を含めている。

### 5. 4 ルート転換率の推計結果とその考察

ルート転換率の推計結果の一部を図6に示す。図中の5本の曲線は、高速道の交通事故リスクの値によって分割されている。

図6をみると、例えば、高速道で交通事故が起きる確率が0.25（橙色の曲線）のときに一般道で交通事故が起きる確率が0.75（横軸の値）であった場合（すなわち、高速道に対して一般道の交通事故リスクが3倍あった場合）、高速道へのルート転換率は70%となり、一般道の交通量の30%は転換しない。それに対して、高速道で交通事故が起きる確率が0.75（青色の曲線）のときに一般道で交通事故が起きる確率が0.25（横軸の値）であった場合（すなわち、高速道に対して一般道の交通事故リスクの3倍あった場合）、高速道へのルート転換率は0%になる。つまり、一般道と高速道の交通事故リスク比が3対1の場合には一般道と高速道の交通量転換比は30対70となる一方で、前者が1対3の場合には後者は、70対30になる訳ではなく、100対0となる。

以上の結果は、交通事故リスク情報に対する並行ルート間の交通量転換の感度が非対称であることを意味する。平易な表現を使うと、「交通事故リスクの大きさに関係なく一般道が好きな利用者がいる」というバイアスの存在を示唆している。

したがって、冬期における交通事故リスク情報の提供による高リスク路線から低リスク路線への交通量転換というリスク対策では、高リスク路線が一般道に該当するのか高速道に該当するのかによって交通量転換の程度にバイアスがかかることに注意して、本リスク対策を評価する必要があることが分かった。

### 6. リスク対策の事前評価の手法について

交通事故リスク推計モデルを利用して、冬期の人身・物損事故リスクと並行ルート間の交通量転換の関係を求め、それを基に、交通事故リスク情報の提供による高リスク路線から低リスク路線への交通量転換の効果について簡易シミュレーションをおこなった。以下、シミュレーションを通じてリスク対策の事前評価をおこなう手法を示す。

シミュレーションの与条件は、以下のとおりである。高速道と一般道の交通量の初期値を各々15,000、33,000（台/12h）と設定し、一般道から高速道へ2000（台/12h）ずつ転換した。表3と表4の道路交通状況に係る人身・物損事故リスク要因に基づく交通事故リスク推計モデルを使い、時期を1月、高速道の旅行速度を100（km/h）、一般道の信号交差点密度を8（箇所

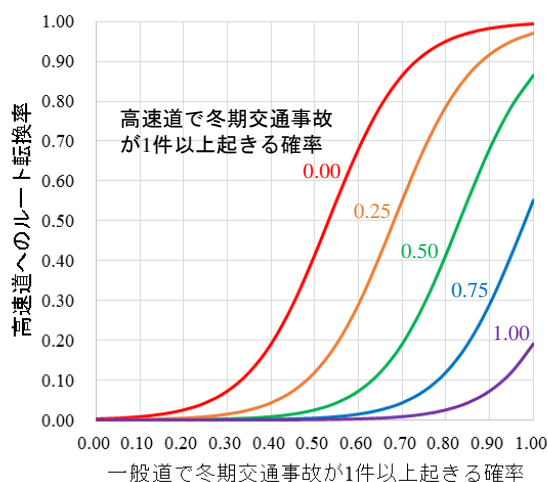


図6 冬期の交通事故リスクとルート転換率の関係

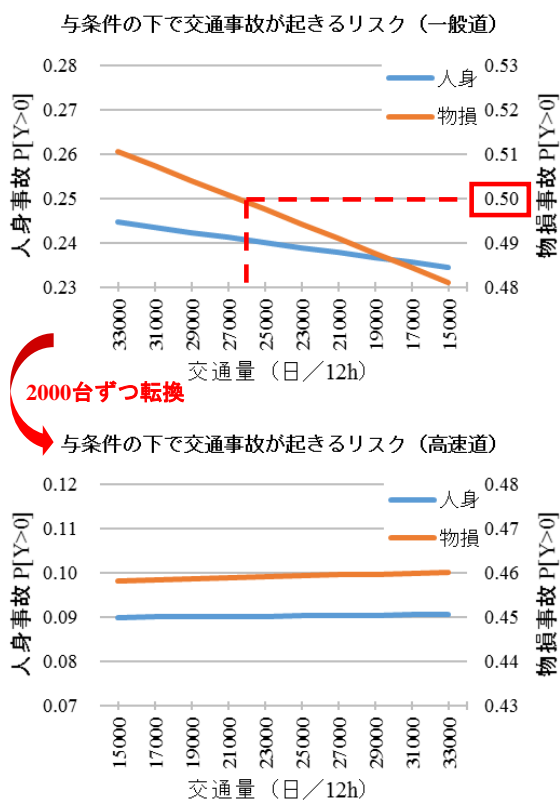


図7 冬期の交通事故リスクと交通量転換の関係

／km）と設定した。

図7に示すのはシミュレーション結果の一例である。この結果によると、図7の上段の赤色の点線が示すように、与条件の下で一般道の交通量を27,000台以下に減らせるならば、例えば一般道から高速道へ10,000台転換できるならば、理論上、物損事故が起きるリスクを0.5以下（つまり、物損事故が起きるか起きないか

五分五分であるよりも起きない可能性のほうが高いような状態を意味する。)にまで抑えられる。33,000台中10,000台は約30%に当たる。

図6において高速道へのルート転換率0.3の水準をみると、高速道の交通事故リスクが0、0.25、0.5、0.75の状態のときに、一般道において交通事故リスクが0.45以上、0.6以上、0.75以上、0.9以上という交通事故リスク情報を提供すれば、理論上、当該水準以上の交通量転換が期待できる。

以上に示した手法を用いれば、簡易的ではあるが、リスク対策の事前評価が可能である。また、ルート転換率を利用すれば、費用便益分析マニュアルの交通事故削減便益の推計手法を用いて、リスク対策の便益算定も可能である。

## 7. まとめ

令和元年度は、リスク対策による便益算定とリスク対策評価の研究を進めた。冬期における交通事故リスク情報の提供による高リスク路線から低リスク路線への交通量転換というリスク対策に着目し、一般国道と高速自動車国道が並行する区間のルートを対象に、道の駅での質問紙調査を通じて、情報提供下の一般道利用者による一般道から高速道への交通量転換の程度をルート転換率として推計するとともに、本リスク対策

の事前評価の手法を構築した。

本リスク対策による便益算定と本リスク対策の評価のおこなうには、本稿で示した「一般道利用者のルート転換」の推計だけでなく、「高速道利用者のルート転換」も併せて推計したうえで、両者の総便益を算定する必要がある。そのために必要な現地調査はコロナ禍のために休止せざるを得なかったが、今後は、その調査を再開して便益算定と評価を完遂する予定である。また、冬期交通事故リスクマネジメントツールの開発も今後の課題である。

## 参考文献

- 1) 齋田光、平澤匡之、高橋尚人、石田樹：日陰時間が冬期交通事故発生率に与える影響の定量的評価、土木学会論文集D3(土木計画学)、73巻、5号、pp.1013-102、2017。
- 2) 齋田光、平澤匡介、高橋尚人、石田樹：路面雪氷状態推定結果を用いた冬期交通事故分析手法の基礎的検討、寒地土木研究所月報、No.770、2017。
- 3) 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。
- 4) 四辻裕文、星卓見、平澤匡介、佐藤昌哉：北海道の高速道と一般道の並行ルートにおける冬期交通事故リスクとその要因、寒地土木研究所月報、No.808、2020。