

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 幡本篤

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。これまでは雪寒法を拠り所に冬期道路交通確保の取組がなされてきたが、財政悪化により行政がこれまでと同様に対応し続けることが困難になりつつあり、道路雪寒事業にはなお一層の効率化とコスト縮減が求められている。また、建設企業の経営体力低下による除雪機械の台数減と老朽化、さらにオペレータ人材の確保難等により、冬期道路を管理する体制を持続的に確保することも困難となっている。さらに、他地域と比較してスケールの異なる広域分散型構造を持ち、高齢化の進展が著しい北海道では、交通ネットワークの強化による地域間連携や地域間での機能分担が強く求められ、安全で信頼性のある冬期道路交通サービスの確保は必須である。

2. 目標とする研究開発成果

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

3. 研究の成果・取組

「2. 目標とする研究開発成果」に示した達成目標に関して、平成 29 年度までに実施した研究の成果・取組について要約すると以下のとおりである。

(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

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では、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んだ。冬期走行環境の要素である路面すべり抵抗値、道路有効幅員および路面平坦性のそれぞれの計測技術を 1 台の測定車両に搭載し、無積雪期および積雪期に走行試験を実施した。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おおよそ同じ割合で線形的に低下していることを確認した。また、道路サービスに対する道路利用者の意見要望の集計・分析システムを試作した。平成 29 年度は冬期走行環境の計測を引き続き実施するとともに、積雪・堆雪発生時の経済損失及び除排雪を行った場合の経済効果を算出するツールを試作した。

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では、積雪寒冷地の地域特性に応じた道路幅員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目標としている。平成 28 年度は路肩堆雪の形成状況と交通流の変動に関する実査を行い、路肩堆雪生成時の路肩堆雪の幅員が大きくなるに従って、交通量-速度 (Q-V) 性能が低下することをデータにより取得した。また、運搬排雪データを活用した排雪断面積と排雪速度の関係性を調査した。さらに、堆雪断面積の時間的変化の傾向を把握するため、気象状況や除排雪回数と堆雪

形状の実測値から、路肩堆雪断面積の予測式を作成した。加えて、模擬堆雪によるドライバーの視認性に与える支障度合いについて主観評価実験を行い、交差点内の堆雪の望ましい高さを把握した。平成 29 年度は、路肩堆雪生成時における交通量-速度 (Q-V) 性能について数値モデル化した。また、排雪断面積と排雪速度の相関から排雪速度予測式を算出し、その妥当性と適用可能性の確認、路肩堆雪断面積の予測式を試算し、適用性を確認した。

(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維持管理技術の開発

凍結路面对策の省力化技術に関する研究では、凍結防止剤散布オペレータの熟練度に左右されず、また運転手がオペレータをか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作業支援技術の確立に取り組む。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、熟練度の違いによるオペレータの路面状態の認知・判断および散布操作状況を分析し、支援情報の提供による効果と課題を整理した。情報提供により、オペレータの熟練度にかかわらず主観的メンタルワークロードは減少し、認知・判断状況の改善に寄与することが確認された。しかし、情報提供の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、散布作業支援インタフェース (情報提供方法、音声操作機能、自動散布機能) の設計・構築に取り組み、平成 28 年度と同様に被験者実験を行った。その結果、インタフェースの使用によりオペレータの作業負担感が著しく減少し、路面状態の判断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。

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を提案することを目的としている。平成 28 年度は、除雪機械の稼働、故障データを収集して、故障の傾向を把握するとともに、除雪機械劣化度の定量的評価にむけて、信頼性評価手法である FTA の有効性を確認した。また、重要構成部品の 1 つであるフレームの劣化度を診断する手法として、塑性変形と相関がある硬さの測定の適応性を確認した。平成 29 年度は、FTA で抽出した故障箇所に関するワイブル解析を行い、算出した信頼度が除雪機械劣化度の定量的評価の指標となることを確認した。また、その信頼度に基づいた維持管理手法の構築に向け、事務所が管理する複数路線の優先順位づけの手順を検討し、路線の重要度によって信頼度の目標値を設定することで、整備や配置換えの判断ができる維持管理手法について検討した。

(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

積雪寒冷地において冬期特有の気象および路面状態の悪化が交通事故の発生に与える影響は大きい。このため、どのような気象・路面状態で交通事故発生リスクがどの程度増大するかを定量的に評価することができる冬期交通事故リスクマネジメント手法を構築する。平成 28 年度は、交通事故データの分析・検索等に用いるための交通事故分析システムについて人身事故・物損事故および気象データの追加を行うとともに、冬期の路面状態悪化や交通事故発生に影響を与えていると考えられる日陰時間と交通事故発生率 (事故率) の関係について、札幌市内の一般国道を対象として検証を行った。検証の結果、冬期は日陰時間が長い地点で事故率が大きくなる傾向にあり、日陰時間が 7 時間台となる地点の事故率は終日日向となる地点の約 3 倍であった。また、この傾向はカーブ区間で顕著であり、冬期の日陰時間が 6 時間台となるカーブ区間の事故率は終日日向となる直線区間の約 6 倍に達することが明らかとなった。平成 29 年度は、交通事故分析システムに人身事故・物損事故および気象データの追加を行うとともに、北海道内一般国道で計測された冬期の路面状態実測値と冬期交通事故 (物損事故) リスクを評価した。その結果、冬期の事故率は路面温度が 0℃前後となる条件下で最も多く発生し、無積雪時事故率の約 1.8 倍となることや、路面のすべりやすさが氷盤～圧雪路面相当まで低下した場合の事故率が無積雪時事故率の約 5 倍に増加することを確認した。

RESEARCH ON ENSURING SAFE AND RELIABLE WINTER ROAD TRAFFIC SERVICE

Research Period : FY2016-2021

Program Leader : Director of Cold-Region Road Engineering Research Group
HATAMOTO Atsushi

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.

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

14.1 費用対効果評価に基づく合理的な冬期道路管理水準設定技術の開発

14.1.1 費用対効果による冬期道路管理水準の評価技術に関する研究

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

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

【要旨】

本研究は、走行速度や旅行時間信頼性などの客観的指標とユーザー満足度などの主観的指標を基に、冬期道路管理における費用対効果の定量評価手法の構築を最終目標とする。平成 29 年度は無積雪期および積雪期に冬期走行環境を計測することで冬期の路面すべり、道路有効幅員に加え路面平坦性が走行速度に及ぼす影響を分析した。また、冬期の積雪や路肩堆雪に伴う走行速度低下に起因する経済損失や除排雪に伴う走行速度改善による経済効果を定量的に評価するためのツールの試作を行った。

キーワード：冬期道路管理、費用対効果、冬期走行環境、ユーザー満足度

1. はじめに

積雪寒冷地域において、グランドデザイン 2050 の基本戦略にあるコンパクト＋ネットワーク化の推進には、冬期間の交通ネットワークの強化と機能確保が不可欠である。また、札幌市市政世論調査結果¹⁾において「除雪に関すること」が第 1 位であるように、積雪寒冷地域においては住民の冬期道路管理への要望が高い。冬期道路管理費の増加が見込めない実情に鑑みると、今後の冬期交通ネットワークの確保・強化および道路利用者の満足度向上には、資源やストックの再配分、すなわち一律の冬期道路の管理水準から道路の重要性やニーズに対応した格差ある管理水準の設定を促進させる必要がある。

冬期道路では、降雪および低温によって路肩堆雪（雪山）による道路有効幅員の減少、凍結による路面のすべり抵抗値低下、路面の凹凸の増大、吹雪時の視程障害等が発生する。こうした冬期走行環境の悪化は走行性の低下²⁾や冬型事故の増加³⁾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、この複雑な変化が適切な冬期道路管理の実施を難しくさせている。上述したように、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。ここでさらに、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の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（道路維持管理費）に対するその効果（走行性の改善の貨幣換算額）を踏まえた道路維持管理、換言すれば費用対効果を考慮した道路維持管理の実施が期待できる。

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

2. 研究実施内容

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

- ① 冬期走行環境の推定手法の構築



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

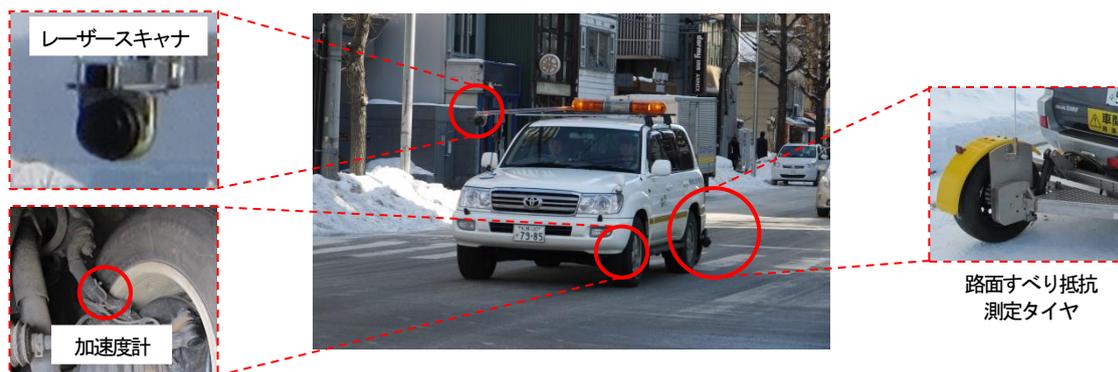


写真2 冬期走行環境同時測定車両

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それぞれ記載する。

3. 冬期走行環境の推定手法の構築

3.1 既往研究とその課題

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

冬期走行環境等におけるデータ蓄積が必要となる。

3.2 冬期走行環境計測車両の開発

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

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

冬期道路有効幅員計測には、レーザースキャナを用いた道路有効幅員計測システムを使用した。この計測システムは、路面や堆雪を計測する「レーザースキャナ」、計測位置と時間データを取得する「GPS センサ」、計測箇

所を撮影する「USBカメラ」と、これらの機器を接続する「ノートPC（独自開発した「道路有効幅員計測・解析用ソフトウェア」搭載）」で構成される。

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

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

3.3 走行試験

3.3.1 試験の概要

平成28年度は、冬期走行環境の計測技術の動作確認を兼ねて、無積雪期および積雪期に走行試験を実施した。走行試験は、札幌市内の3路線を対象に平成28年11月21日（火）、平成29年1月31日（火）および2月28日（火）の3日間にわたって実施した。表1に対象路線の延長および道路条件を示す。なお、本試験における測定項目は路面すべり抵抗値と道路有効幅員である。

3.3.2 試験の結果

図1は予備走行試験の結果を箱ひげ図で示したものであり、上段に路面すべり抵抗値、中段に道路有効幅員、

表1 予備走行試験の対象路線概要

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

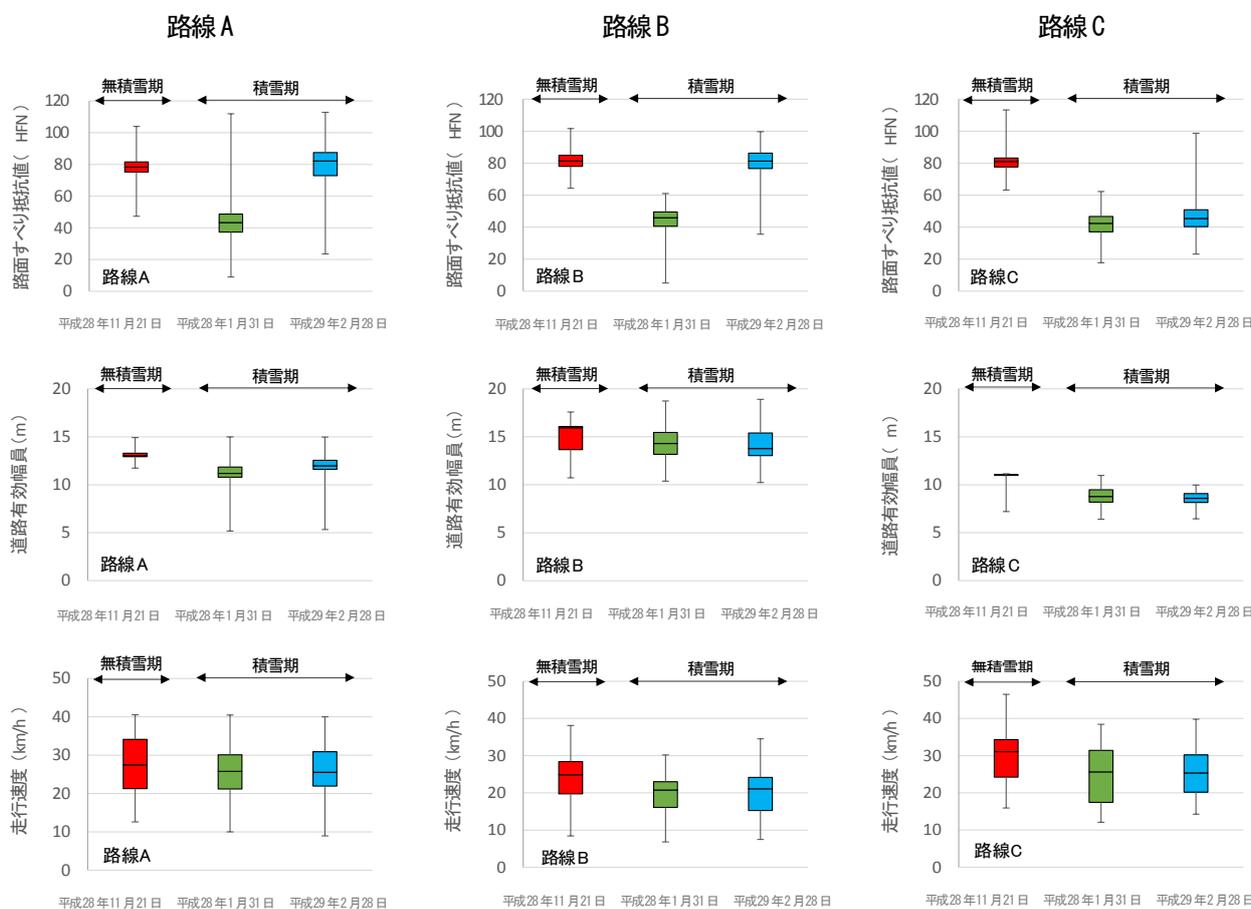


図1 走行試験の結果（上段：路面すべり抵抗値、中段：道路有効幅員、下段：走行速度）

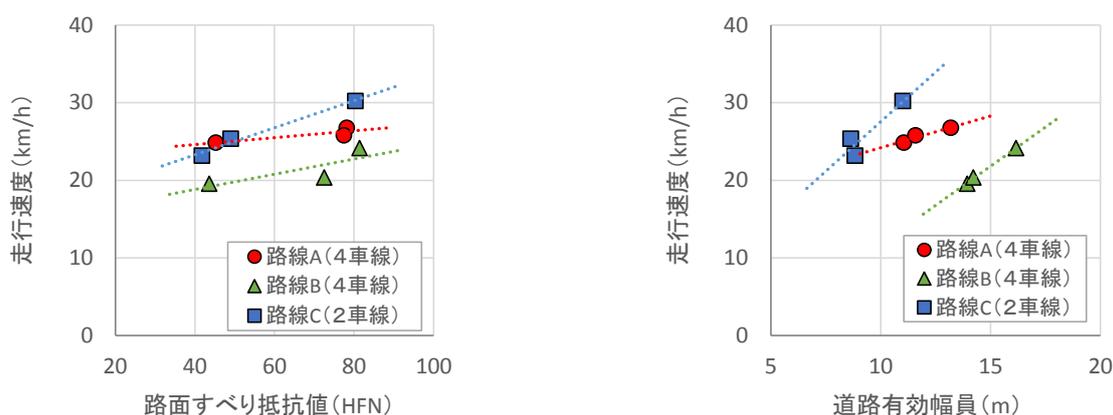


図2 冬期走行環境と走行速度の関係（左図：路面すべり抵抗値、右図：道路有効幅員）

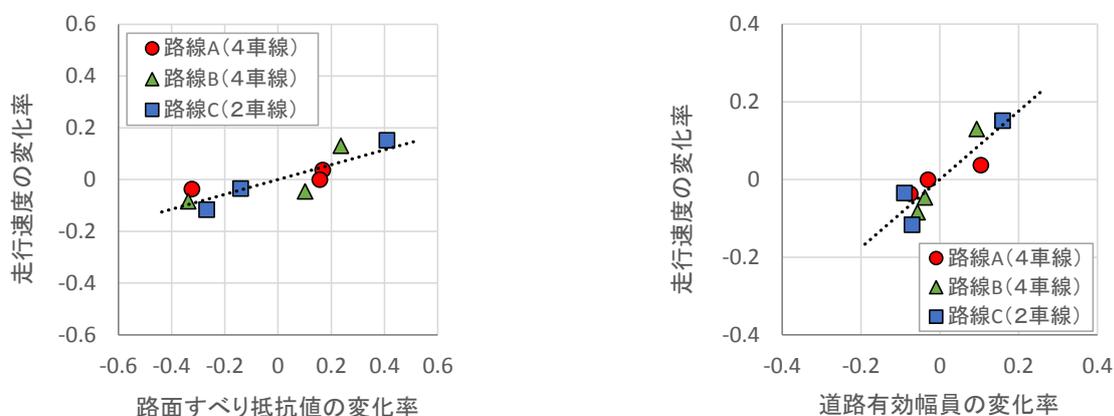


図3 冬期走行環境の変化率と走行速度の変化率との関係（左図：路面すべり抵抗値、右図：道路有効幅員）

下段に走行速度をそれぞれ示す。箱ひげ図は、中に一つの横線を持つ箱とその前後に延びる線（ひげ）で構成される。ひげの上下端は最大値と最小値を示す。箱の途中の横線は中央値、箱の上下端は第三四分位数および第一四分位数である。第一四分位数とはデータの中で小さい方から 1/4、第三四分位数とはデータの大きい方から 1/4 にある数である。中央値はデータを大きさ順に並べた時の中心の値である。

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

次に、道路有効幅員については、無積雪期に対して積

雪期の道路有効幅員は路線 A および B では 1~2 m 程度、路線 C では 2~3 m 程度狭くなった。

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

4. 走行速度、時間信頼性およびユーザー満足度の評価手法の構築

4. 1 冬期走行環境が走行性に及ぼす影響分析

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

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

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

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

4. 2 道路サービスに対する道路利用者の意見要望の集計・分析システムの試作

道路管理者が作成・とりまとめ・管理する、道路利用者からの意見・要望について、当研究所で運用する冬期道路マネジメントシステム⁹⁾上での入力・管理を支援する機能を検討・試作した。管理項目は道路事務所へのヒアリングを基に案として、事務所、路線番号、受付日時、相手先、距離標開始・終了、維持作業、応急処理、完了日時など36項目を定めた。

本システムの特徴として、路線番号およびキロポストが入力された意見要望であれば、アイコンが地図上に表示される（図4）。また、アイコンは維持管理/応急処理で色分けされ、その内容によってアイコンの記号を変えて表示される。さらに、記号内の色で処理済か否かも判断できるように工夫した。加えて、冬期道路マネジメントシステムで提供している気象データと意見要望データを関連づけて分析できるように、両者を地図上で重ね合わせる機能を搭載した（図5）。本システムは、路面すべり抵抗値のモニタリング機能を有しており、上述の冬期走行環境同時測定車両で得られた路面すべり抵抗値を記

録するとともに地図上にプロットして表示することができる。今後は路面すべり抵抗値と同様に、路面平坦性および道路有効幅員の計測結果をシステム上に図示する機能を追加する予定である。このシステムにより、気象データ、冬期走行環境データおよび意見要望データを照らし合わせて分析し、これらの相互の因果関係について検証を行うことが可能になる。このようにして気象、冬期走行環境、ユーザー満足度の関係を明らかにし、冬期走行環境に関する客観的指標に加えてユーザー満足度の主観的指標も考慮して、冬期道路管理の効率化の促進を目指す。

5. 冬期走行環境の推定手法構築のための走行試験

5. 1 試験の概要

平成29年度は、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

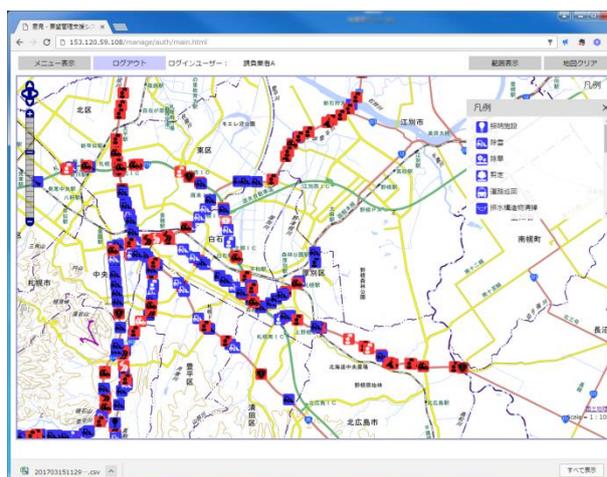


図4 道路利用者の意見要望の管理システムの表示例

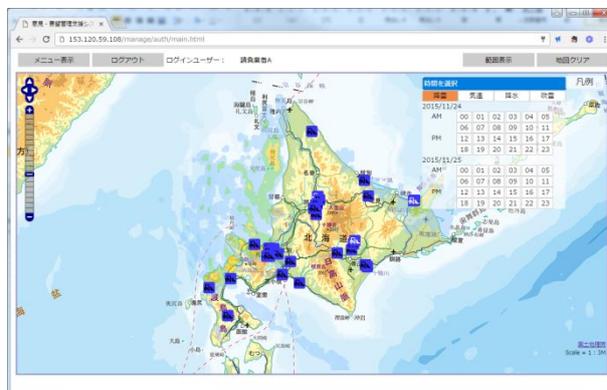


図5 道路利用者の意見要望のマップ化（気象条件との重ね合わせ）



図6 道路有効幅員計測装置の取り付け状況

表2 平成29年度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
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

記路線を対象に平成29年11月13日、平成30年1月12日、1月26日、2月6日、2月9日、2月14日、2月16日、2月23日および3月5日の9回(いずれも平日)にわたり実施した。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キャナの振動対策が必要であった。そこで、平成29年度は、レーザーキャナ2個を車両上部側面に取り付ける構造とし搭載性を向上させた(図6)。

5.2 試験の結果

図7は一般国道231号における路面すべり抵抗値と走行速度の関係を車線数毎に示す。走行速度は路面すべり抵抗値の減少に伴い低下する傾向にあり、本傾向は片側2車線区間で明確に現れた。片側2車線区間では、路面凍結時(概ねHFN20以下)における走行速度は42km/hとなり、路面乾燥時(概ねHFN80以上)における走行速度と比較して6km/h程度の低下が見られた。

図8は一般国道231号における路面平坦性(IRI)と走行速度の関係を車線数毎に示す。走行速度はIRIが大きくなるにつれ減少した。特に、片側2車線区間では無雪期(IRIは概ね1mm/m程度)の走行速度は50km/hであるが、積雪によりIRIが8mm/m程度まで増大した

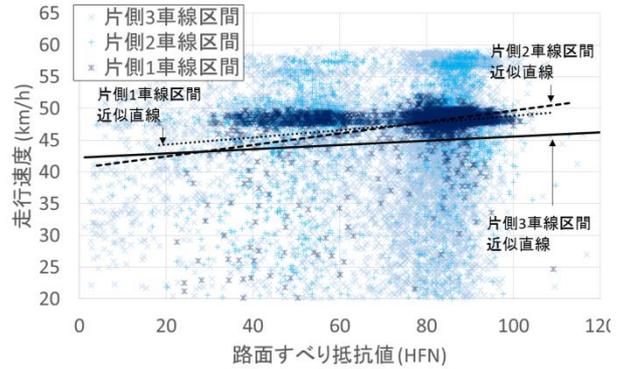


図7 一般国道231号における路面すべり抵抗値と走行速度の関係

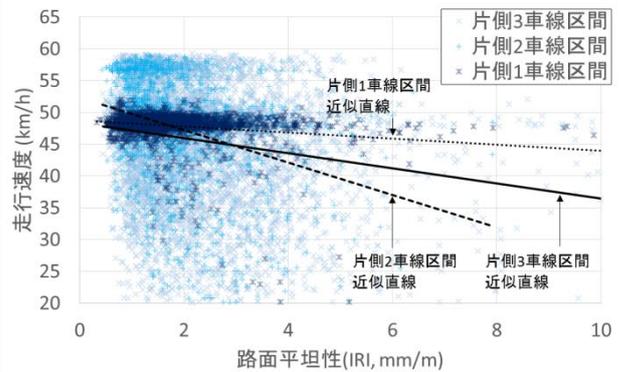


図8 一般国道231号における路面平坦性と走行速度の関係

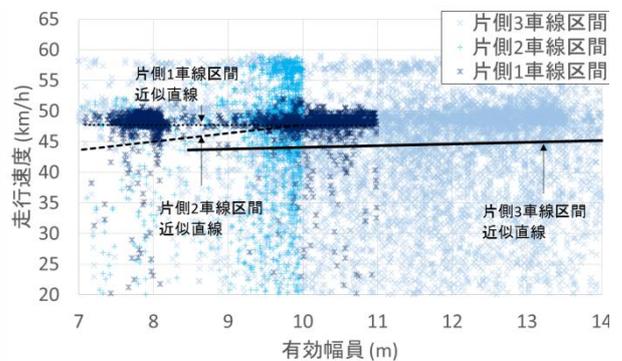


図9 一般国道231号における有効幅員と走行速度の関係

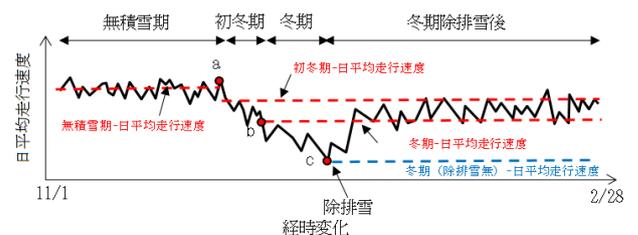


図10 日平均走行速度および積雪深の推移ならびに降雪経済損失・除排雪経済効果の評価概念図

場合に走行速度が 35km/h 未満になるなど路面平坦性が走行速度に与える影響は顕著であった。

図 9 は一般国道 231 号における道路有効幅員と走行速度の関係を車線数毎に示す。片側 2 車線区間では道路有効幅員の減少に伴い走行速度が低下する傾向にあったが、片側 1 車線区間および片側 3 車線区間では道路有効幅員と走行速度の間に明確な関係は見られなかった。

6. 降雪による経済損失および除排雪による経済効果の推定手法の構築

6. 1 経済損失および経済効果の推定手法

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

図 10 は非冬期から冬期間に亘る日平均走行速度の推移であり、この図を用いて本研究における降雪による走行時間延長(走行速度低下)と除排雪による走行時間短縮(走行速度改善)の評価の概念を述べる。

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

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

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

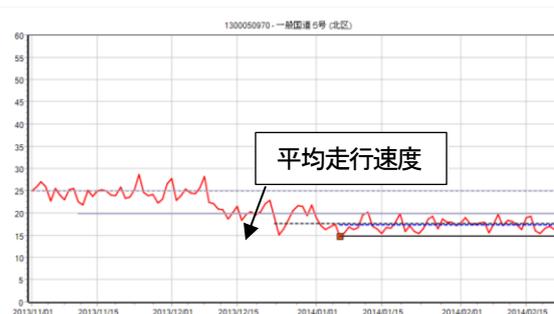


図 11 日平均走行速度の推移の例(一般国道 5 号 北 34 西 2 交差点～北 14 西 1 交差点)

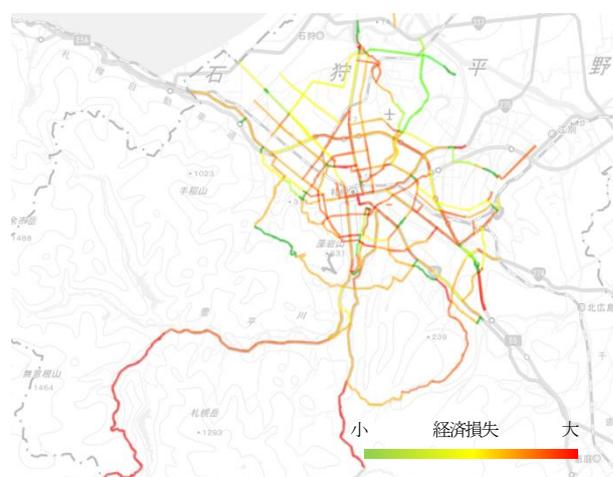


図 12 降雪による経済損失の分布(平成 25 年度冬期)

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. まとめ

本研究は、冬期道路管理の費用対効果を定量的に評価する手法の構築を最終目標とし、平成 28 年度は冬期走行環境と走行性の関係検証を、平成 29 年度はこれに加えて冬期道路管理の費用対効果の評価ツールの開発に取り組んだ。

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。また、道路サービスに対する道路利用者の意見要望の集計・分析システムを試作した。

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

経済損失・除排雪による経済効果の推定や、除排雪等費用データとの組み合わせによる冬期道路管理の費用対効果推定が可能となった。

今後は、より多様な気象、道路、交通および道路雪氷状態の条件下で繰り返し走行試験を実施し、冬期走行環境と走行性の関係についてより詳細な分析を実施するとともに、冬期走行環境および費用対効果を考慮した冬期道路管理の実施支援手法について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、北海道開発技術研究発表会、Vol. 55、2012.2
- 7) 中島繁則、川村彰、坂田光児、山崎元也、谷岡和範：高速道路の維持管理に向けた新小型 IRI 測定システムの開発、交通工学、Vol. 44、No. 2、pp. 49-56、2009.3
- 8) 徳永ロベルト、舟橋誠、高橋尚人：すべり抵抗値活用による冬期路面管理技術の高度化に関する研究、北海道開発技術研究発表会、Vol. 52、2009.2
- 9) 切石亮、徳永ロベルト、高橋尚人：冬期道路マネジメントシステムの試行運用について、北海道開発技術研究発表会、Vol. 55、2014.2

14.1.2 効果的な除排雪に資する作業計画支援技術に関する研究

担当チーム：技術開発調整監付（寒地機械技術チーム）

寒地道路研究グループ（寒地交通チーム）

研究担当者：巖博、牧野正敏、植野英睦、村上和也、佐藤信吾

佐藤昌哉、高橋尚人、宗広一徳、中村直久

【要旨】

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

平成 29 年度は、冬期道路における路肩堆雪の形成状況と交通流の変動に関する実査、運搬排雪データを活用した排雪断面積と排雪速度の相関関係の把握、路肩堆雪断面積の実測値と気象データや除排雪回数等から堆雪断面積を求める予測式の試算及び適応性の確認を行った。

キーワード：除排雪、道路幅員構成、路肩堆雪、作業計画支援

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道路幅員の再配分を行うことで、交通への影響を最小化しつつ除排雪事業のコスト縮減が図られる可能性がある。併せて、既存道路空間の有効活用は大きな行政ニーズとなっており、除排雪への考慮と同時に自転車走行空間確保のような夏期の利用方法の検討も必要とされている。

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

2. 研究実施内容

平成 29 年度は、冬期道路における路肩堆雪の形成状況と交通流の変動に関する実査と、4 ヶ年分の運搬排雪データの分析による路肩堆雪の排雪断面積と排雪速度の関係性の把握を行った。また、4 ヶ年分の堆雪形状の実測値と気象データや除排雪回数等から、堆雪断面積を求める予測式を試算し、適応性の確認を行った。

3. 路肩堆雪の形成と交通流に関する実測調査

3.1 調査方法

札幌市内の道道を対象とし、昨年度に引き続き、路肩堆雪の形成と交通流に関する実測調査を行った。調査場所及び調査期間は以下のとおりである。

- ・道道下手稲札幌線（札幌市西区発寒 14 条 11 丁目）
- ・平成 28 年 11 月～平成 29 年 2 月
- ・平成 29 年 11 月～平成 30 年 2 月



図-1 調査対象道路の横断面構成

対象道路に設置した観測カメラの画像を取得し、画像解析ソフトウェアを利用して路肩堆雪時の堆雪幅と交通流に関するデータ取得を行った。対象道路の片側車線（内側車線幅員 3.0m、外側車線幅員 3.0m、路肩幅員 0.5m）（図-1）について、堆雪幅別に交通量・速度(Q-V)の性能曲線のデータ整理を行った。

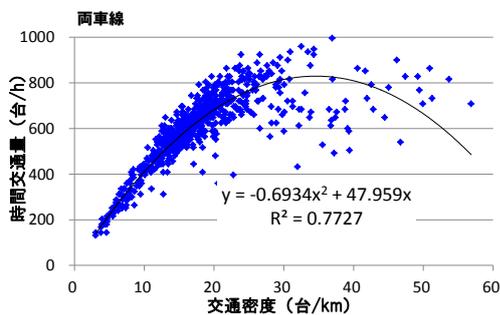
3.2 調査結果

観測カメラから、画像を連続記録した。同画像から、調査期間中の毎日の路肩堆雪の形成状況について、読み取りを行った。

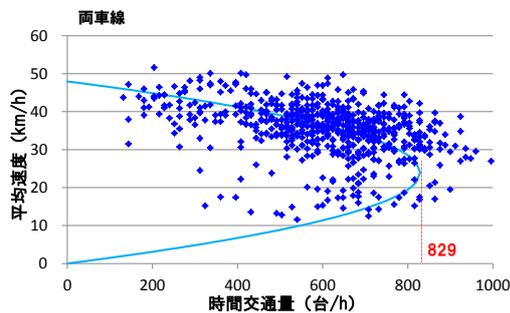
調査期間中の画像から、路肩堆雪の形成状況を以下のとおり分類した。

- ・路肩堆雪幅： $W=1.0\text{m} \cdot 1.5\text{m} \cdot 2.0\text{m} \cdot 2.5\text{m}$
- ・路面状態：雪氷路面 (snow)

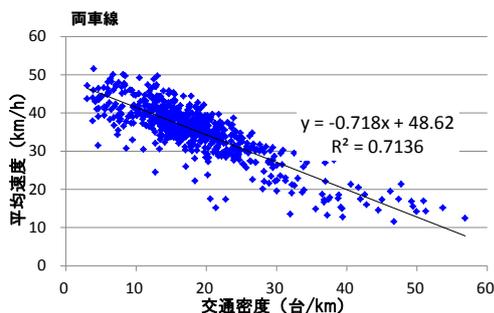
例えば、路肩堆雪幅 $W=1.5\text{m}$ (雪氷路面) における対象道路の片側2車線における交通密度—交通量 ($k-Q$)、交通量—速度 ($Q-V$)、交通密度—速度 ($k-V$) のデータを取得したところ、図-2を得た。



(1) 交通密度—交通量 ($k-Q$) 曲線



(2) 交通量—速度 ($Q-V$) 曲線



(3) 交通密度—速度 ($k-V$) 曲線

図-2 堆雪時の交通性能 (堆雪幅：1.5m)

路肩堆雪幅が大きくなるに従って、 $Q-V$ のデータが低下することが示された。例えば、堆雪幅 $W=2.5\text{m}$ のとき (図-3) の交通量—速度 ($Q-V$) の性能曲線は、



図-3 路肩堆雪状況 (堆雪幅：2.5m)

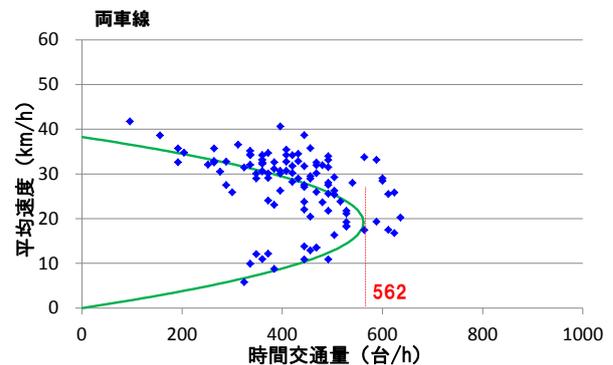


図-4 交通量—速度 ($Q-V$) 曲線 (堆雪幅：2.5m)

$W=1.5\text{m}$ と比べて、最大交通容量で7割程度に低下した (図-2(2)、図-4)。さらに、堆雪幅 $W=1.0\text{m} \cdot 1.5\text{m} \cdot 2.0\text{m} \cdot 2.5\text{m}$ の交通量—速度 ($Q-V$) 曲線を式化すると、順に次の (1) ~ (4) のとおりとなる。同式を図に示すと、図-5のとおりである。

$$W=1.0\text{m}, V = 24.1 \pm \sqrt{-0.695Q + 578.8} \quad (1)$$

$$W=1.5\text{m}, V = 24.0 \pm \sqrt{-0.693Q + 575.0} \quad (2)$$

$$W=2.0\text{m}, V = 21.8 \pm \sqrt{-0.733Q + 477.4} \quad (3)$$

$$W=2.5\text{m}, V = 19.1 \pm \sqrt{-0.651Q + 366.1} \quad (4)$$

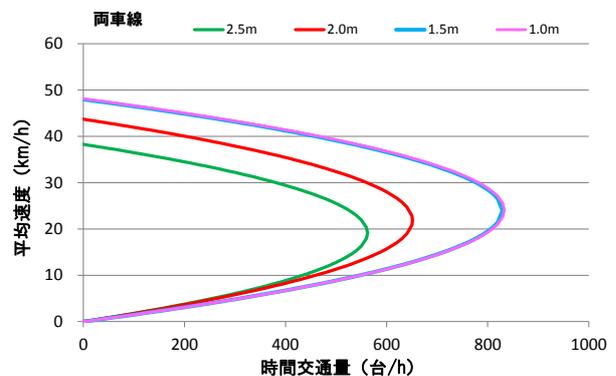


図-5 堆雪幅別の交通量—速度 ($Q-V$) 曲線

4. 路肩堆雪部の効率的な除排雪工法の検討

除排雪の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の把握、及び路肩堆雪の形成傾向の把握を行った。

4.1 排雪量と排雪速度の関係性把握

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。そのデータを作業日毎の運搬排雪量、排雪作業延長等により整理し、調査対象データを抽出した。

平成 29 年度は、昨年度に抽出した 3 ヶ年分（H25～H27）の調査対象データ（2,212 件）に、平成 28 年度分運搬排雪データから抽出した 664 件の調査対象データを新たに加え、2,876 件とした（表-1）。さらに、3 ヶ年分（H25～H27）の調査対象データの作業延長抽出方法を一部見直し、調査対象データの精度向上を図った。

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	"
小計	3,320	2,212	
H28	1,026	664	H29収集・整理
合計	4,346	2,876	

調査対象とした平成 28 年度分（664 件）の作業日におけるロータリ除雪車の作業履歴データを開発局の除雪機械等情報管理システムから取得し、作業日毎の除雪車稼働状況をグラフ化した（図-6）。

作成したグラフから移動や休憩時間などの非稼働時間を判別し、排雪作業の開始・終了ポイントの時刻と距離標（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 664 件、及び 3 ヶ年分（H25～H27）の作業延長見直し後の結果を含めた算出結果一覧表の抜粋を表-2 に示す。

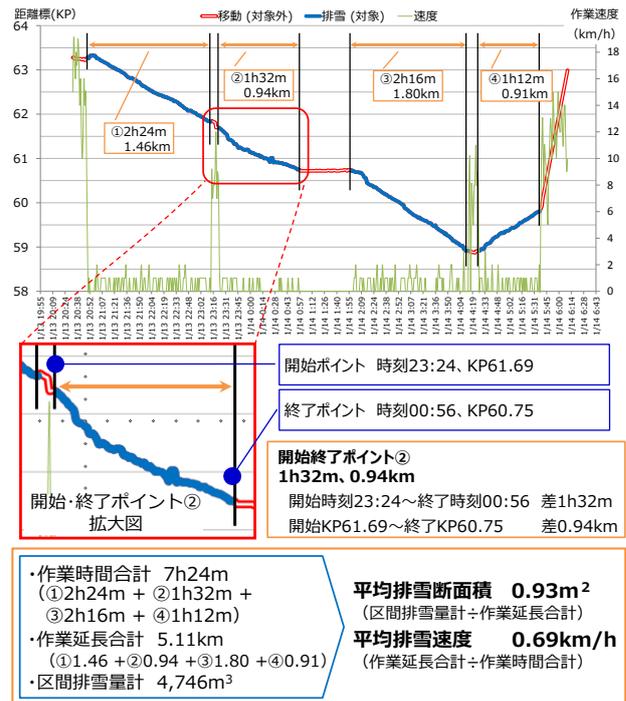


図-6 除雪車稼働グラフ例（1 日分）

表-2 算出結果一覧表（抜粋）

No	機械種別	作業区分	区間排雪量(m³)	作業時間合計(h)	作業延長合計(km)	平均排雪断面積(m²)	平均排雪速度(km/h)
1	2.2m級	拡幅	2,198	4:19	4.99	0.4405	1.1560
2	2.2m級	拡幅	1,204	2:24	1.64	0.7082	0.7083
3	2.2m級	拡幅	1,260	1:53	1.97	0.6087	1.0991
4	2.2m級	拡幅	2,002	4:12	3.69	0.4778	0.9976
5	2.2m級	拡幅	2,562	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	1,008	2:10	2.75	0.3639	1.2785
～							
2872	2.2m級	拡幅	644	2:24	1.01	0.4916	0.5458
2873	2.2m級	拡幅	1,820	6:22	2.36	0.6894	0.4147
2874	2.2m級	拡幅	1,736	6:37	1.61	0.8074	0.3249
2875	2.2m級	拡幅	1,596	6:17	3.18	0.4807	0.5284
2876	2.2m級	拡幅	910	3:53	2.31	0.3872	0.6052

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、昨年度に引き続き、複数の相関検討手法による重回帰分析及び妥当性の評価を行った。

分析は、75 の条件分類毎に相関係数を算出し、傾向把握を行った（表-3）。

表-3 相関検討手法

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

※条件分類毎の全データを分析

条件分類																																									
機械種別	全機種							一車線橋形							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										
作業区分	区分なし	1							6							11							16							21											
	幅幅	2	3	4	5	7	8	9	10	12	13	14	15	17	18	19	20	22	23	24	25	27	28	29	30	32	33	34	35	37	38	39	40	42	43	44	45	47	48	49	50
		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、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-7、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。

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。

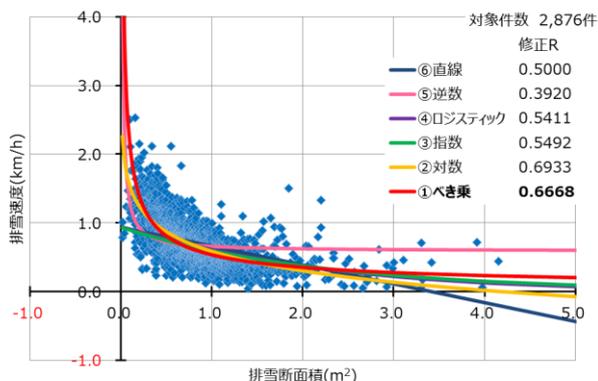


図-7 分析事例:相関検討手法①~⑥、条件分類 1

表-4 検討手法の妥当性評価

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

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、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、97%の条件分類において高い相関がみられた (表-5)。

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-8)。

表-5 相関検討の結果

修正済重相関係数 (修正R)	相関の度合い		手法①べき乗	
			条件分類	
			件数	割合
0.7 ~ 1.0	高	高い相関がある	13	19%
0.5 ~ 0.7	中	かなり高い相関がある	54	78%
		中程度の相関がある	0	0%
0.3 ~ 0.4	低	ある程度の相関がある	0	3%
0.2 ~ 0.3		弱い相関がある	2	
0.0 ~ 0.2		ほとんど相関がない	0	

※相関の度合い：出典「社会調査の基礎」放送大学テキスト
 ※条件分類は、対象データがない6パターンを除いた69件で算出

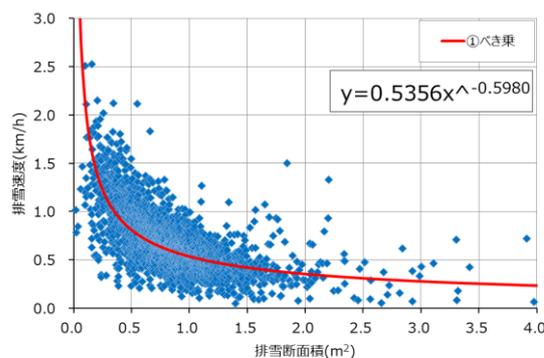


図-8 相関検討手法①べき乗、条件分類 1

4.2 路肩堆雪の形成傾向把握

4.2.1 堆雪断面積の推計方法

路肩堆雪形成時における堆雪断面積推計方法の検討を行った。検討に当たっては、開発局札幌開発建設部管内の国道10地点（R5：4地点、R274：6地点）で現地計測した4ヶ年分（H25～H28）の路肩堆雪断面積の実測値と、気象庁HPから入手可能な気象データなどを用いて重回帰分析を行った。図-9に現地計測状況、表-6に重回帰分析内容を示す。



図-9 現地計測状況

表-6 重回帰分析内容

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

4.2.2 独立変数の検証

分析に用いる独立変数について妥当性の検証を行い、5項目の除外項目を選定した(表-7)。

表-7 独立変数の妥当性検証結果

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

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-8)。

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、分類 A 累計の相関が高いことを確認した。

予測式の簡素化の観点から、独立変数が少なく、かつ相関の高い、分類 A 累計の①及び②を堆雪断面積の推計予測式として選定した(表-9)。

表-8 分析パターン及び結果

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

分類(集計期間)の考え方(降雪の場合の例)

単位: cm

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

表-9 分類A累計①及び②の予測式

堆雪断面積推定予測式				
$y = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n + b$				
内容	偏回帰係数			
		分類A累計①		分類A累計②
堆雪断面積(m ²)	y	-	y	-
e. 拡幅積上(回数)	-	-	a ₁	0.2062
f. 排雪巻出(回数)	a ₁	-2.7216	a ₂	-1.7733
g. 排雪拡幅(回数)	a ₂	-0.8473	a ₃	-0.8277
i. 最深積雪(cm)	a ₃	0.0609	a ₄	0.0382
k. 降水量(mm)	-	-	a ₅	-0.0018
定数項	b	-0.6947	b	-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-10)、予測式から算出した堆雪断面積の予測値と実測値を各地点毎に比較した。堆雪全断面積と車道部堆雪断面積の比較グラフの例を図-10及び図-11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-10 比較グラフ作成件数

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



図-10 分類A累計①(堆雪全断面積)による比較例(H28、R5地点②)



図-11 分類A累計②(車道部堆雪断面積)による比較例(H28、R5地点②)

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

確認の結果、堆雪全断面積(図-12)及び車道部堆雪断面積(図-13)ともに、堆雪断面積が大きい場合、予測値が少なめになる傾向が見られた。

差異傾向に多少の偏りが生じているが、堆雪断面積を推計する予測式として適用できる可能性があることを確認した。

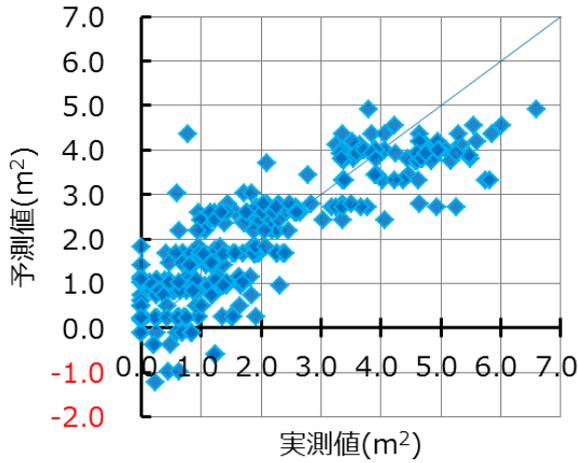


図-12 予測値の精度確認（堆雪全断面積）

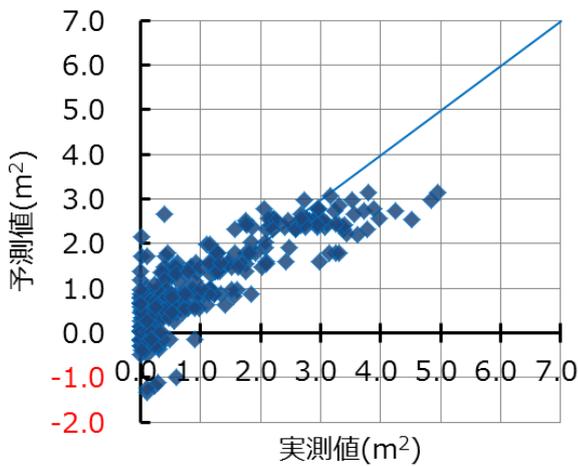


図-13 予測値の精度確認（車道部堆雪断面積）

5. 路肩堆雪が通行車両の視認性に与える支障度合い調査

5.1 路肩堆雪の影響に関する実験

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

5.1.1 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、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。

5.1.2 堆雪

走行実験で用いる模擬堆雪は7箇所（図-14）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-15）。



図-14 堆雪位置及び走行コース

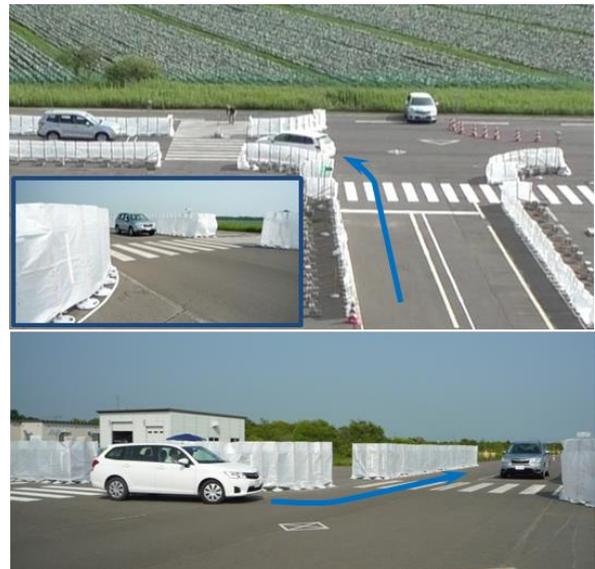


図-15 堆雪の影響に関する実験状況

5.1.3 走行条件

被験者は実験車両（トヨタ カラーフィールダー）を自由走行により運転した。走行コースは、交差点手前20mからスタートし、信号のある交差点を左折した後、20m先をゴールとした（図-14）。また、被験者は同じ実験条件で5回連続して走行した。うち、1～2回は交差点内に他の走行車両もしくは歩行者がランダムに進入する

条件で行い、他の走行車両や歩行者が来るかもしれないという意識を被験者に持たせた。

5.1.4 被験者

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

5.1.5 主観評価

被験者は各堆雪高さにおいて、堆雪毎の支障度合いを主観評価した。評価には 7 段階評価のアンケートを用いた(図-16)。アンケートにより得られた評価(主観評価点数)は、被験者間の評価点数のバラツキを抑え堆雪毎の比較を容易にするため被験者毎に標準化((個々の点数-平均)/標準偏差)し、さらに堆雪毎の全被験者の値を平均することで基準値を求めた。なお、基準値が高い(プラス方向)ほど走行する上での支障になり、逆に基準値が低い(マイナス方向)ほど支障にならない評価結果となる。

Q: 走行する上での影響度を雪場毎にチェック (○) 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-16 堆雪の支障度合いアンケート表

5.1.6 主観評価の結果

主観評価の結果(図-17)、以下のことが考察される。

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

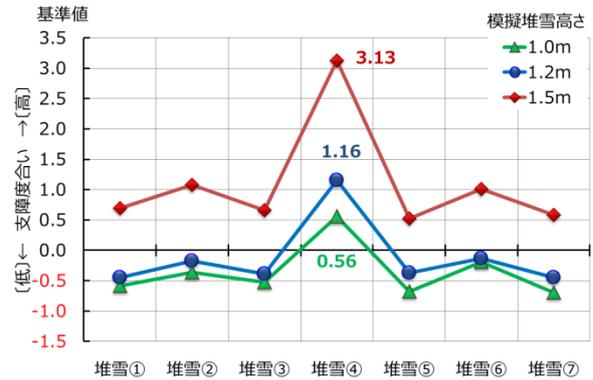


図-17 主観評価の結果

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

6. まとめ

平成 29 年度に行った研究の結果、以下の成果が得られた。

- ・片側 2 車線道路の地方道を対象とし、冬期交通流の実査を行った。路肩堆雪生成時の堆雪幅が 1.0m から 2.5m の範囲における、交通量-速度 (Q-V) 性能についてデータ取得し、数値モデル化した。
 - ・排雪断面積と排雪速度の関係性を調査した結果、ベキ乗による相関式の、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、路肩堆雪断面積の実測値と気象データなどを用いて重回帰分析を行い、路肩堆雪断面積の予測式を作成した。差異傾向に多少の偏りはあるが、堆雪断面積予測式として適用できる可能性があることを確認した。
 - ・路肩堆雪の支障度合いに関する主観評価実験より、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と考える。
- 今後、冬期堆雪幅の変動、夏期の道路横断面の利用に関する基礎データ取得を継続し、道路横断面構成の再配分を検討するほか、排雪速度予測式の精度の向上、路肩堆雪断面積予測式の構築、予測式を用いた作業計画支援方法の検討を行う予定である。

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、徳永ロベルト、中島知幸、藤本明宏、佐藤賢治、齊田光

【要旨】

冬期道路における凍結防止剤散布は、熟練オペレータ（以下、オペ）が行っているが、少子高齢化により新たな人材の確保と育成が困難な状況にある。本研究では、オペの熟練度に左右されず安全で確実な凍結防止剤散布を可能とする作業支援技術の確立に取り組んでいる。そのため、被験者実験においてオペの路面状態の判断や散布装置の操作状況を計測し、作業時の心理状態と挙動の特性を分析している。平成 28 年度は、熟練度および情報の有無・種別によるオペの心理状態および挙動の変化について調べた。また、平成 29 年度は散布作業支援の有無・種別（情報提供や操作支援）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。

キーワード：冬期路面管理、凍結防止剤、オペレータ、散布作業、支援技術

1. はじめに

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

道路管理者による冬期路面管理作業（凍結防止剤散布）の判断は、除雪等に関するハンドブック^{3,4)}や冬期路面管理マニュアル（案）⁵⁾等に記されているように、当日の気象や現地の路面条件を把握し、これらを参考にしながら必要な区間において凍結防止剤の散布を行っている。具体的には、凍結防止剤を路線全線に散布するのではなく、凍結路面の発生しやすい箇所や凍結が発生した場合に交通障害の程度が大きくなる区間を重点管理エリアとして予め設定し、これらの箇所・エリアにおいて気象予報等に基づいた事前散布（凍結予防）や現地での目視確認による事後散布（雪氷融解）を行い、作業の効率化に

努めている。また、道路管理者は路面管理作業等に関するオペ向けのトレーニング等³⁾も適宜行っており、オペの技能向上・維持に努めている。しかし、最終的には現地でのオペが路面状態を随時判断しながら散布作業を行っているのがほとんどで、その判断と作業の妥当性には未解明な部分が多い。

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

本研究では、凍結防止剤散布作業においてオペの作業経験や熟練度に左右されず、かつ一人乗車体制でも安全で確実な凍結防止剤散布作業を可能とする支援技術の提案を目指すため、被験者実験においてオペの路面状態の認知・判断および散布装置の操作状況を計測し、散布作業時の心理状態と挙動を分析している。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。

本研究では、被験者実験における安全確保を徹底する

ために安全衛生管理者を置き、被験者には実験内容、安全確保に関する留意事項および個人情報保護に関する詳細な説明を行い、文章による同意を得て実施している。

2. 研究手法

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

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

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

2.1 主観的評価法によるMWの把握

本研究では、主観的評価法として被験者本人によるアンケート形式を採用している。具体的には、Hartら¹¹⁾が開発したNASA-Task Load Index（以下、NASA-TLX）を評価指標として用いている。NASA-TLXは、精神的要

求、身体的要求、忙しさ、努力、達成度および不満度の6項目の評価尺度から構成されている。被験者は、アンケート用紙において与えられた各課題に対して尺度の「小さい（0点）・大きい（10点）」、「少ない（0点）・多い（10点）」または「良い（0点）・悪い（10点）」の両極を持つ6項目の線分上に、○印で記入する。被験者が位置付けした○印は、分析時において0~10の数値に変換し、被験者の主観的な評価を数値化する。本研究では、6項目の平均値をNASA-TLX総合値とし、オペの主観的MWの値として用いている。

2.2 客観的評価法によるMWの把握

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

3. 熟練度および情報の有無・種別によるMWの違い

3.1 実験概要

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

被験者実験は、厳冬期の夜間（18:00~23:00）3日間において、寒地土木研究所が所有する苫小牧寒地試験道路で行った。実験期間中は冬日で概ね晴れだった。当該試験道路は、延長2,700mの長円形周回路で、アスファルト舗装された直線部2区間（片側2車線区間1,200m、片側1車線の1,200m）および半径50mの曲線部2区間によって構成されている。各車線の幅員は3.5mであり、直線部は2%の横断勾配を有する。なお、当該試験道路の周回路には街路灯等の人工照明はない。

被験者は、全員が建設作業員で、未熟オペ7名（平均年齢43.0歳、全員散布作業歴なし）および熟練オペ12



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

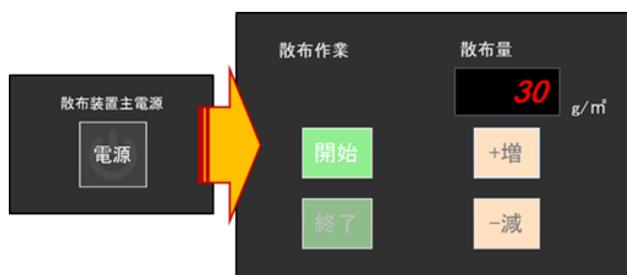


図-1 操作パネル上の表示ボタン



写真-3 アイトラッキング装置

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は、写真-3 に示すアイトラッキング装置を用いて高画質ビデオ画像 (1,920×1,080 ピクセル) および注視点座標を 30Hz で計測記録した。

当該実験では、前述の苫小牧寒地試験道路周回路 2,700m 全区間を実験コースとして使用し、試験車両は実験コースの KP0.3 付近を起終点に反時計周りで周回路を約 40km/h で走行した (図-2)。実験コースの路面状態は、乾燥路面を主とし、コース内一部には 100m の湿潤路面および凍結路面を各 2 区間 (計 4 区間) 敷設した。被験者は、これらの区間において散布作業を行った。なお、湿潤路面・凍結路面の配置は、毎日無作為に変更した。

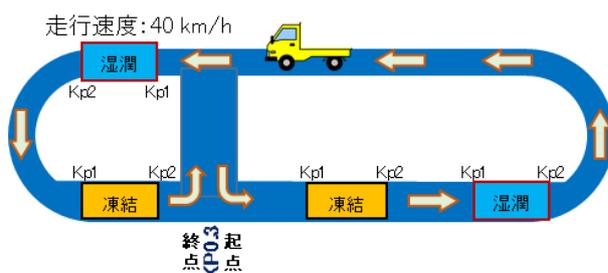
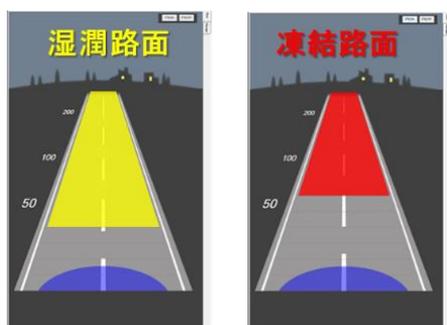


図-2 実験コース概略と凍結・湿潤路面のレイアウト例

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何れかの情報提供方



<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)ブップ (50m前)ブブブ (0m前)ブー
 凍結: (200m前)ピ・ピ・ピ (100m前)ピップ (50m前)ピピピ (0m前)ピー

図-3 車載情報端末による路面状態の情報提供例

法で被験者に伝えた。なお、情報端末による路面状態の情報提供は、実験コース内に敷設した湿潤・凍結路面 4 区間中の 3 区間で行われ、各々の区間において異なる情報提供方法を採用した。残りの 1 区間は、情報なしとした。また、同 4 区間における情報なしおよび 3 つの情報提供方法の配置についても毎日無作為に変更した。

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

3.2 実験手順

被験者は、被験者待合室にて実験担当者から配布された質問用紙に氏名、運転歴、年間走行距離、散布オペ経験の有無（有の場合は年数）等を記入した後、本実験の目的、実験内容、実験手順、個人情報保護に関する事項および安全確保に関する留意点について文章および口頭で説明を受け、実験協力承諾書用紙に同意の署名をした。また、本実験では熟練度による差を明確にするために、熟練オペは試験実施前に予め用意した周回路のビデオ映像を数回観て走行経路等を覚えた。

次に、被験者にアイトラッキング装置の装着と散布装

置の操作方法等を確認した後、実験コースの起点から終点に向けて前節の課題を遂行しながら周回路を一周した。

走行終了後、被験者は被験者待合室に戻り、本実験で課せられた課題に対する主観的 MW 評価方法について説明を受けた後、散布作業によって被験者自身が感じた主観的 MW を質問用紙に記入した。

3.3 実験結果

3.3.1 オペの主観的 MW について

表-1 に、熟練度別および情報有無・種別によるオペの主観的 MW の標本数、平均値、標準偏差等を示している。また、図-4 は熟練度別および情報有無・種別による未熟オペおよび熟練オペの主観的 MW の結果を箱ひげ図で示している。

表-1 熟練度別および情報有無・種別主観的 MW

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

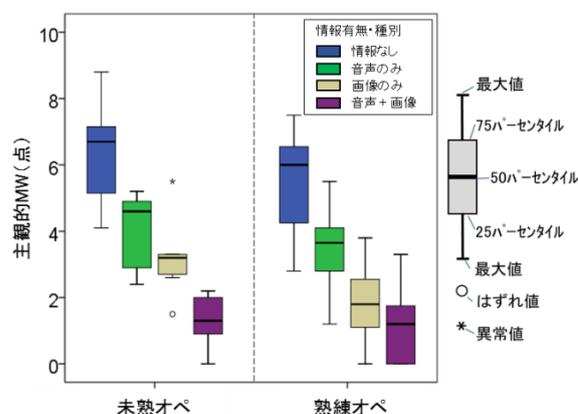


図-4 熟練度別および情報有無・種別主観的 MW

情報なしの平均主観的 MW は、未熟オペが 6.3 点および熟練オペが 5.5 点となり、未熟オペ・熟練オペともに主観的 MW が最も高かった。特に、未熟オペの主観的 MW は、熟練度および情報有無・種別の中で最も高い値となった。また、音声のみの平均主観的 MW は、未熟オペが 4.0 点および熟練オペが 3.5 点となり、情報提供によって未熟オペ・熟練オペ両者の主観的 MW が軽減した。

更に、画像のみの平均主観的 MW は、未熟オペが 3.2 点および熟練オペが 1.9 点となり、両者の主観的 MW が音声のみの時より更に低下した。最後に、音声+画像の平均主観的 MW は、未熟オペが 1.3 点および熟練オペが 1.2 点となり、未熟オペ・熟練オペともに主観的 MW が情報有無・種別の中で最も低下した。特に、未熟オペの主観的 MW は、情報なしからの減少幅が 5.0 点と熟練オペの減少幅 4.3 点に比べて大きかった。よって、熟練度による変動に違いは伺えるが、情報提供による主観的 MW の軽減効果は未熟オペ・熟練オペともに著しく、この中で音声+画像による主観的 MW の軽減が最も大きいと言えた。

3.3.2 オペの挙動について

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

表-2 熟練度別および情報有無・種別認知距離

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

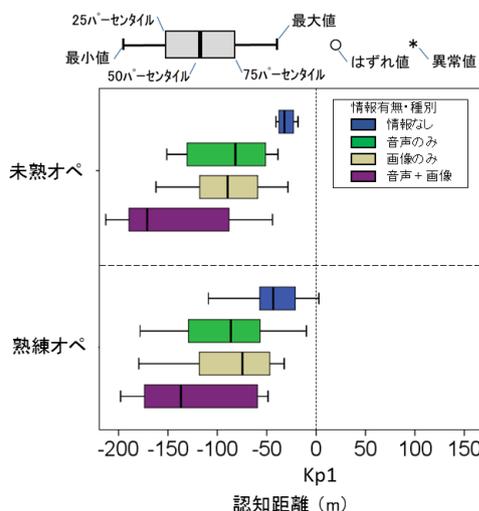


図-5 熟練度別および情報有無・種別認知距離

表-2 は、熟練度別および情報有無・種別によるオペの認知距離の標本数、平均値、標準偏差等を示し、図-5 は熟練度別および情報有無・種別によるオペの認知距離を箱ひげ図で示している。なお、本項での認知距離とは、

湿潤・凍結路面区間の起点 (Kp1) に対し、被験者が電源ボタンを操作した地点までの距離を示すものである。

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

以上の結果から、情報提供によって未熟・熟練オペ両者がより手前で散布すべき区間を認知できるようになり、熟練度に関わらず散布判断・操作のための時間的余裕ができたと言える。また、情報提供方法としては音声と画像を組み合わせることで前方の路面状態をより手前から認知可能になり、散布作業判断等の改善に繋がると考えられる。

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

この実験では、オペが散布車両の助手席からフロントガラスを通して見た前景を「道路・背景」、「散布制御装置」および「情報端末」の3つの注視エリアに分け、各エリアを注視した割合を抽出した。当該注視点データは、全被験者 19 名の中から裸眼またはコンタクトレンズを装着して実験に参加した未熟オペ 5 名および熟練オペ 7 名の計 12 名から取得したものである。

認知区間における情報なしの結果では、未熟・熟練オペともに3エリアの中で道路・背景の注視率が最も高く、未熟オペが 89.5% および熟練オペが 81.7% を示した。他方、散布制御装置の注視率は、未熟オペが 7.3% および熟練オペが 17.8%、情報端末の注視率は、未熟オペが 3.2% および熟練オペが 0.5% を示した。

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

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

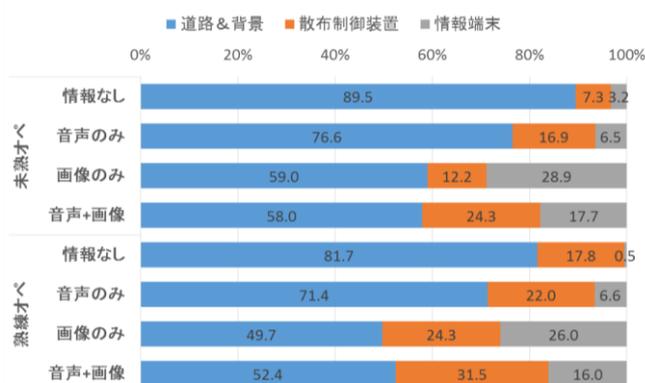


図-6 認知区間における熟練度別および情報有無・種別によるオペの注視率

両エリアの注視率が増えた。

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

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

以上の結果から、当該区間では熟練度および情報有無・種別に関係なく道路・背景を注視する割合が3つのエリアの中で最も高かった。しかし、情報提供は未熟・熟練オペの散布制御装置・情報端末の注視率を情報なしの時より増加させた。特に、画像を含む情報提供方法は

未熟・熟練オペの道路・背景の注視率を著しく減少させ、情報端末の注視率を著しく増加させた。これは、注視を要する画像情報によって注視点が情報端末に移動・滞留する頻度が増えたためと考えられる。他方、音声のみによる情報提供は、未熟・熟練オペの散布制御装置・情報端末の注視率を情報なしの時より増加させたが、画像を含む情報提供ほどではなかった。その理由として、注視を要しない音声情報は散布制御装置・情報端末の注視率増加抑制に寄与したためと考えられる。よって、特に画像を含む情報提供は路面状態の早期認知、主観的MW低減等に寄与したが、散布区間認知の際に道路や車両周囲の確認時間の割合が情報なし時より減少するため、安全面に課題があると言える。

4. 散布作業支援の有無・種別によるMWの違い

4.1 実験概要

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

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

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



写真4 実験に用いた試験車両

本実験には、試験車両に2トントラックを用いた(写真4)。なお、当該車両は被験者が運転した(写真5)。また、被験者の行動を計測するため、過年度と同じ凍結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



写真-5 被験者による各機器の確認状況

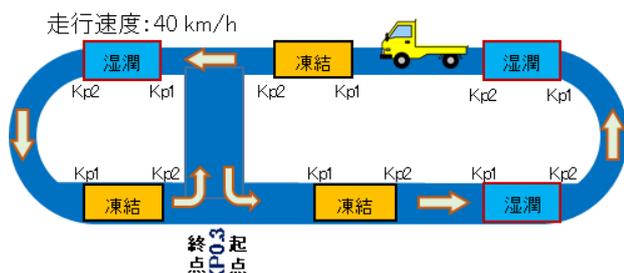


図-7 実験コース概略と凍結・湿潤路面のレイアウト例

ボード前（運転席左前方）に設置し、電源ボタン、散布量設定ボタンおよび散布 ON・OFF ボタンを画面上に表示して被験者がこれらを運転中に画面タッチで簡単に操作できるようにした。なお、散布操作パネルに表示された各ボタンの操作は、GNSS を搭載する記録装置に 10Hz で記録収集した。

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

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

本実験では、散布作業支援のためのツールとして、過年度より使用している車載情報端末を運転席右前方に設置し、実験コース内に敷設した湿潤・凍結路面区間の起点の約 200m 手前から情報提供（音声+画像）を開始するアプリケーションをインストールした。当該アプリケーションには、実験コース内の湿潤・凍結路面区間の位置が予め組み込まれており、走行中の試験車両が前方

の湿潤・凍結路面区間に近づくとその存在を情報端末で被験者に伝えた。

平成 29 年度は、車載情報端末による情報の他、音操および自散を凍結防止剤散布制御装置に追加した（写真-6）。



写真-6 試験車両内に設置した各種機器

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

被験者には、実験コース内走行時に前方の路面状態を常に観察しながら運転し、前方に凍結または湿潤路面を認知次第、速やかに凍結防止剤散布装置の電源を入れ、散布量を設定するよう指示した。この時の凍結防止剤散布量設定は、過年度と同じく湿潤路面で $20\text{g}/\text{m}^2$ および凍結路面で $30\text{g}/\text{m}^2$ とした。なお、路面状態の判断が的中か否かの判定は、路面状態に応じて正しい散布量でセットされていた中とした。次いで、湿潤・凍結路面区間の起点・終点で散布 ON・OFF を操作するものとした。なお、上記課題遂行において、情報のみ、情報+音操および情報+音操+自散の何れかによる散布作業支援があった場合、被験者はこれらを活用して運転中の散布作業を行った。

4.2 実験手順

被験者は、被験者待合室にて実験担当者から配布された質問用紙に氏名、運転歴、年間走行距離、散布オペ経験の有無（有の場合は年数）等を記入した後、本実験の

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

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

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

被験者は、試験条件毎の練習走行後に本走行（1 周）を行い、運転を兼ねた散布作業を実験コース内の 4 区間において行った。なお、散布区間の指示および模擬ブレーキランプの点灯は練習・試験条件毎にランダムに変更した。また、NASA-TLX による主観的 MW の評価は一試験条件終了毎に被験者待合室にて行った。以上の手順に従った全実験は、被験者一人当たり約 120 分を要した。

4.3 実験結果

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

4.3.1 オペの主観的 MW について

表 4 に、散布作業支援の有無・種別によるオペの主観的 MW の標本数、平均値、標準偏差等を示し、図-8 は散

布作業支援の有無・種別によるオペの主観的 MW を箱ひげ図で示している。

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

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

表-4 散布作業支援有無・種別による主観的 MW

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

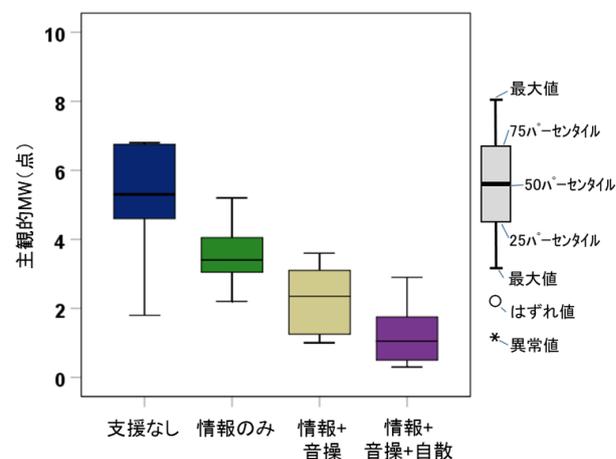


図-8 散布作業支援有無・種別による主観的 MW

4.3.2 オペの挙動について

表 5 は、散布作業支援の有無・種別によるオペの認知距離の標本数、平均値、標準偏差等を示し、図-9 は散布作業支援の有無・種別によるオペの認知距離を箱ひげ図で示している。なお、本項での認知距離とは、湿潤・凍結路面区間の起点 (Kp1) に対し、散布制御装置の電源

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

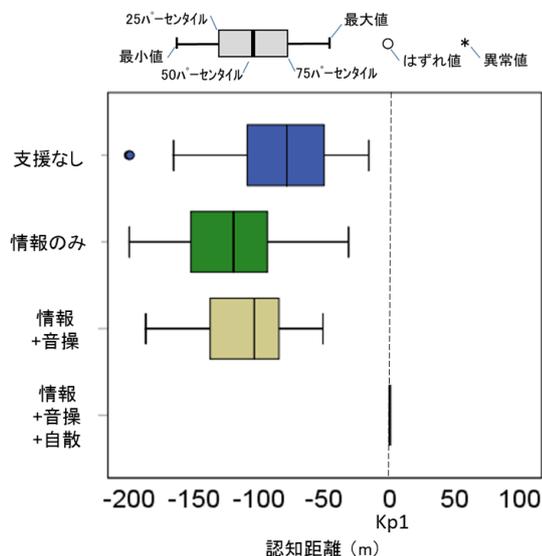


図-9 散布作業支援の有無・種別による認知距離

が入った地点までの距離を示すものである。

支援なしにおけるオペの平均認知距離は、-87mであった。他方、散布作業支援が情報のみの時の平均認知距離は-123mとなり、支援なしの時より平均認知距離が大きく伸びた。また、散布作業支援が情報+音操の時の平均認知距離は-110mとなった。なお、情報+音操+自散の場合は、Kp1地点において電源・散布量設定・散布 ON が自動的かつ同時に作動したため、平均認知距離を 0mとしている。

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

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

表-6 散布作業支援の有無・種別による判断的中率

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

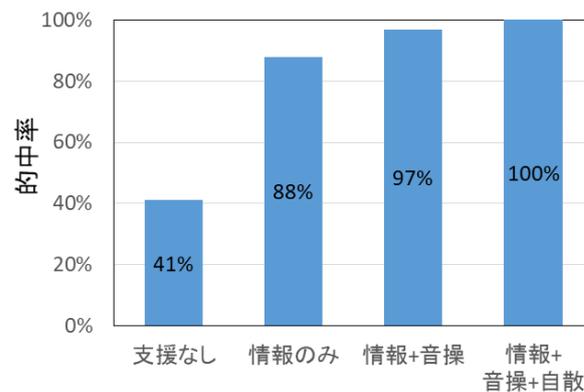


図-10 散布作業支援の有無・種別による判断的中率

操+自散の的中率は100%としている。

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

表-7 は、散布作業支援の有無・種別によるオペの反応時間の標本数、平均値、標準偏差を示し、図-11 は散布作業支援の有無・種別によるオペの反応時間を箱ひげ図で示している。なお、本項での反応時間は、試験車両のフロントガラスに設置した模擬ブレーキランプ点灯から被験者が自車のブレーキ操作を行うまでの経過時間である。支援なしにおけるオペの平均反応時間は1.6秒であった。また、当該条件では模擬ブレーキランプ点灯の見落としが1件確認された。他方、散布作業支援が情報のみの時の平均反応時間は1.4秒となり、支援なしの時より平均反応時間が短くなった。また、散布作業支援が音声+音操の時の平均反応時間1.2秒と更に短縮した。なお、散布作業にオペの介入を要しない情報+音操+自散の場合は、平均反応時間が1.2秒と情報+音操の時と同じ結果を示した。

以上の結果から、散布作業支援がある場合は支援なしに比べてオペの反応時間が短くなり、運転中に自転車前方

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

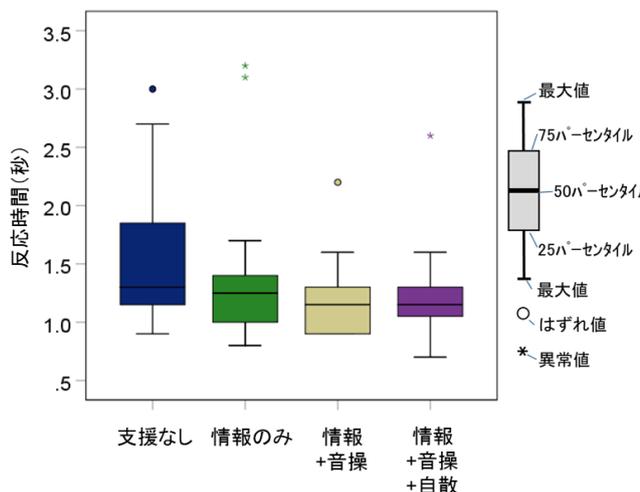


図-11 散布作業支援の有無・種別による反応時間

で発生する事象に対しより速やかに対応することが可能になると考えられる。

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

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

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

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

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

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. 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。

これまでの結果を踏まえ、今後は実際の凍結防止剤散布装置に散布作業支援技術（情報提供、音声操作機能および自動散布機能）を搭載するため、制御機構等の設計・構築に取り組むとともに、これらを用いた被験者実験を試験道路および実道においてより実践的な検証実験を更に行い、オペの心理状態や挙動への影響を考慮した安全で確実な凍結防止剤散布が可能な散布作業支援技術の確立に取り組む所存である。

参考文献

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

14.2.2 適切かつ効率的な除雪機械の維持管理技術に関する研究

担当チーム：技術開発調整監（寒地機械技術チーム）

研究担当者：巖博、牧野正敏、植野英睦、伊藤義和、幸田勝

【要旨】

近年の予算縮減により、更新が先送りされて老朽化した除雪機械が増え、故障の発生に伴う除雪作業停止日数が増加しており、道路除雪体制への影響が懸念される。

本研究では、冬期の円滑な道路交通の確保に必要な道路除雪体制を維持するため、除雪機械の効果的かつ効率的な維持管理手法の提案に取り組んでいる。平成 29 年度は、FTA（故障の木解析）で抽出した除雪作業停止日数 2 日以上（以下、「重大故障」という）に関するワイブル型累積ハザード解析を行い、算出した信頼度が除雪機械劣化度の定量的評価の指標として活用できることを確認した。また、事務所が管理する複数路線の優先順位づけの手順を検討し、路線の重要度によって信頼度の目標値を設定することで、整備や配置換えの判断ができる維持管理手法について、検討した。

キーワード：除雪機械、FTA、ワイブル型累積ハザード解析、信頼度、維持管理

1. はじめに

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

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

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

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

平成 29 年度は、FTA（故障の木解析）で抽出した重大故障に関するワイブル型累積ハザード解析を行い、除雪機械の重大故障における故障傾向の把握と信頼度を算出した。

また、算出した信頼度に基づいた維持管理手法の構築に向け、事務所が管理する複数路線の優先順位づけや路線ごとに維持すべき信頼度の設定方法について検討を行った。

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。

- ・国土交通省北海道開発局（以下、「開発局」という）：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

2.2 解析対象データの整理

2.2.1 対象データの分類

故障データの除雪機械毎の内訳を図-1 に示す。

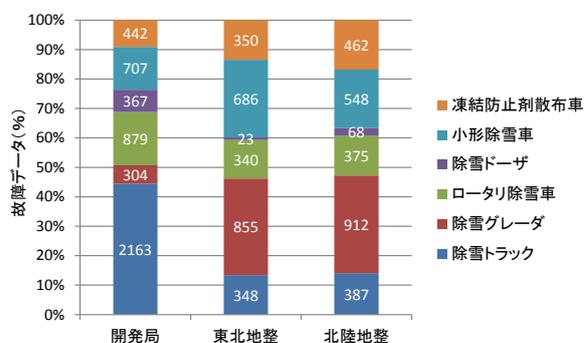


図-1 故障データの除雪機械毎の内訳

故障データでは、開発局では除雪トラックが多く、東北及び北陸地整では除雪グレーダが多かった。

除雪機械の車体、作業装置毎に重大故障の発生が多い項目を表-1に示す。

開発局と東北及び北陸地整では、重大故障の多い箇所に差異があり、東北及び北陸地整では「灯火装置」が3つの機械で該当したが、開発局ではなかった。また、東北地整は、開発局、北陸地整に比べ、故障箇所の種類が多かった。

以上のことから、開発局と東北及び北陸地整では故障の傾向に違いがあるため、以後の作業は個別に検討を進めることとした。

次項から、主に開発局の故障データを用いた解析結果について報告する。

2. 2. 2 FTA (故障の木解析)

故障箇所が明確になっている故障データを用いて、平成28年度に引き続いて重大故障を抽出し、除雪機械毎にFTAを実施した。

今回、新たに作成した除雪ドーザのFT図を図-2に示す。除雪ドーザは、車体に関する故障項目が多い傾向となった。また、抽出した故障箇所は、建設機械整備標準作業工数表(除雪機械編)¹⁾の作業項目区分のうち、中項目単位で整理する項目が多くなった。

表-1 車体、作業装置毎の重大故障の発生が多い項目

		除雪トラック		ロータリ除雪車		小形除雪車	
		中項目	小項目	中項目	小項目	中項目	小項目
開発局	作業装置	G装置	ブレード状態確認装置	オーガ	シャーピンレス装置	シュート装置	シュート旋回装置
	車体					油圧装置	油圧ホース
東北地整	作業装置	G装置	ブレード状態確認装置	油圧装置	油圧ホース	オーガ	オーガ(詳細不明)
		I装置	ソリ				ソリ
	車体	散布装置	散布円盤	油圧装置	油圧ホース	油圧装置	油圧ホース
		灯火装置	作業灯				
北陸地整	作業装置	I装置	ソリ	オーガ	オーガ(詳細不明)	オーガ	オーガ(詳細不明)
							ソリ
	車体			油圧装置	油圧ホース	エンジン	エンジン(詳細不明)
		灯火装置	作業灯				
		凍結防止剤散布車		除雪グレーダ		除雪ドーザ	
		中項目	小項目	中項目	小項目	中項目	小項目
開発局	作業装置	散布装置	スクリュウコンベア	G装置	シャッターブレード	ブレード装置	油圧ホース
	車体		散布円盤	油圧装置	油圧ホース	油圧装置	油圧ホース
東北地整	作業装置	散布装置	ホッパー	G装置	シャッターブレード	ブレード装置	ソリ
		油圧装置	散布制御器				油圧装置
	車体			灯火装置	作業灯	計器	計器
							灯火装置
北陸地整	作業装置	散布装置	ホッパー	G装置	シャッターブレード	ブレード装置	ソリ
		操作装置	散布制御器				粗面形成装置
	車体	ブレーキ	ブレーキ(詳細不明)	灯火装置	作業灯	ブレーキ	ブレーキ
							灯火装置
						ヘッドライト	

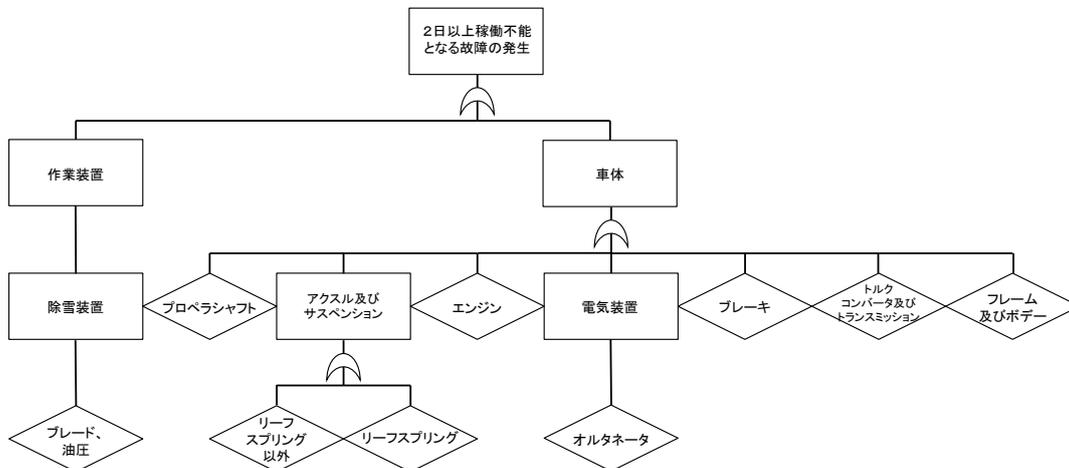


図-2 除雪ドーザのFT図

3. 除雪機械劣化度の定量的評価手法の検討（ワイブル型累積ハザード解析）

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、材料の破損確率を統計的に記述するために提案した確率分布である。時間に対する材料の劣化現象や寿命を統計的に記述することができ、機械、電気、電子系を問わず、構成部品のどれか一つでも故障すれば機器として故障となる場合の解析によく適合する。

ワイブル分布には、次の3つのパラメータが使われる。

m：形状パラメータ

η：尺度パラメータ

γ：位置パラメータ

m（形状パラメータ）の値によって、ワイブル分布の形状も変化する。0 < m < 1 の場合は故障率減少型の初期故障、m = 1 の場合は故障率一定型の偶発故障、m > 1 の場合は故障率増加型の摩耗劣化故障を表すこととなる。

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

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

不信頼度（累積故障確率、累積分布関数ともいう）F(t)と、信頼度（故障しない確率）R(t)は、次式で表される。

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^m\right]$$

$$R(t) = 1 - F(t) = \exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^m\right]$$

$$(t \geq \gamma, m > 0, \eta > 0)$$

故障率関数（瞬間故障率）λ(t)は、次式で表される。

$$\lambda(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{m-1}$$

累積ハザード値（累積ハザード関数）H(t)は、次式で表される。

$$H(t) = -\ln R(t) = -\ln\{1 - F(t)\} = \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^m$$

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つのパラメータが推定でき、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について

複数の機器を一斉に使用または試験を開始し、全ての機器が故障するまで観測し続けた「完全データ」といわれる故障データの場合は、ワイブル確率紙を用いたワイブル解析が有効である。

しかし、除雪機械の故障データは、購入年度が異なり、また、機械が更新に達しても故障が発生しないこともあるため、その解析については累積ハザード法を用いたワイブル型累積ハザード解析がより有効である。

そのため、故障データの解析にあたってはワイブル型累積ハザード解析を用いた。

観測値を稼働時間とした表-2の故障データ例で、ワイブル型累積ハザード紙を用いた解析手法の手順を示す。

表-2 故障データ（例）

手順1		手順2	手順3	手順4
観測値(t)	故障の有無	逆順位	ハザード値h(t)	累積ハザード値(累積ハザード関数)H(t)
2,000	有	6	1/6	(1/6)=0.166→17%
2,000	無	5	-	-
3,000	無	4	-	-
4,000	有	3	1/3	(1/6)+(1/3)=0.5→50%
8,000	無	2	-	-
10,000	有	1	1/1	(1/6)+(1/3)+(1/1)=1.5→150%

手順1：解析する故障データを観測値が小さい方から並べ替える。同じ観測値で故障の有無がある場合は、故障のあるデータを前に、故障のないデータを後に並べる。

手順2：観測値の大きいデータから小さいデータへ向かって、1, 2, …, 6と逆方向の順位（逆順位）を振る。データがn個あれば、最も観測値の小さいデータの順位はnとなる。

手順3：故障のあるデータに対して、逆順位の逆数を求める。この値をハザード値という。

手順4：手順3のハザード値を観測値の小さいデータから順次加えていく。この値を累積ハザード値という。

手順5：故障のあるデータの観測値、累積ハザード値の対のデータを図-3に示すワイブル型累積

ハザード紙などにプロットする。

手順6：プロットされた点に直線Aをあてはめ、この直線と平行でハザード紙上の定点であるm推定点（上横軸 $\ln t = 1$ 、右縦軸 $\ln H(t) = 0$ の交点）を通る直線Bを引く。

手順7：直線Bと、上側横軸の0との交点を求め、そこから水平線を右に伸ばして右側縦軸の目盛りを読む。読み取った値の絶対値がm（形状パラメータ）となる。（ $m \approx 1.4$ ）

手順8：直線Aと右縦軸の0との交点より下横軸へ垂線を下ろし目盛りを読む。読み取った値が η （尺度パラメータ）となる。（ $\eta \approx 7,000$ ）

以上の手順により、導出したパラメータを信頼度、故障率の公式に当てはめることにより、算出が可能となる。

$$\text{信頼度 } R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^m \right] = \exp \left[- \left(\frac{t}{7,000} \right)^{1.4} \right]$$

$$\text{故障率関数 } \lambda(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{m-1} = \frac{1.4}{7,000} \left(\frac{t}{7,000} \right)^{1.4-1}$$

この故障データにおける観測値1,000から16,000の区間の信頼度、故障率の算出結果は表-3となり、グラフ化

すると図-4になる。

表-3 故障データ例の算出結果

観測値 t	信頼度 R(t)	故障率(%) $\lambda(t)$
1,000	0.937	0.0092
2,000	0.841	0.0121
3,000	0.737	0.0143
4,000	0.633	0.0160
5,000	0.536	0.0175
6,000	0.447	0.0188
7,000	0.368	0.0206
8,000	0.300	0.0211
9,000	0.241	0.0221
10,000	0.193	0.0231
11,000	0.152	0.0240
12,000	0.119	0.0248
13,000	0.093	0.0256
14,000	0.071	0.0264
15,000	0.055	0.0271
16,000	0.042	0.0278

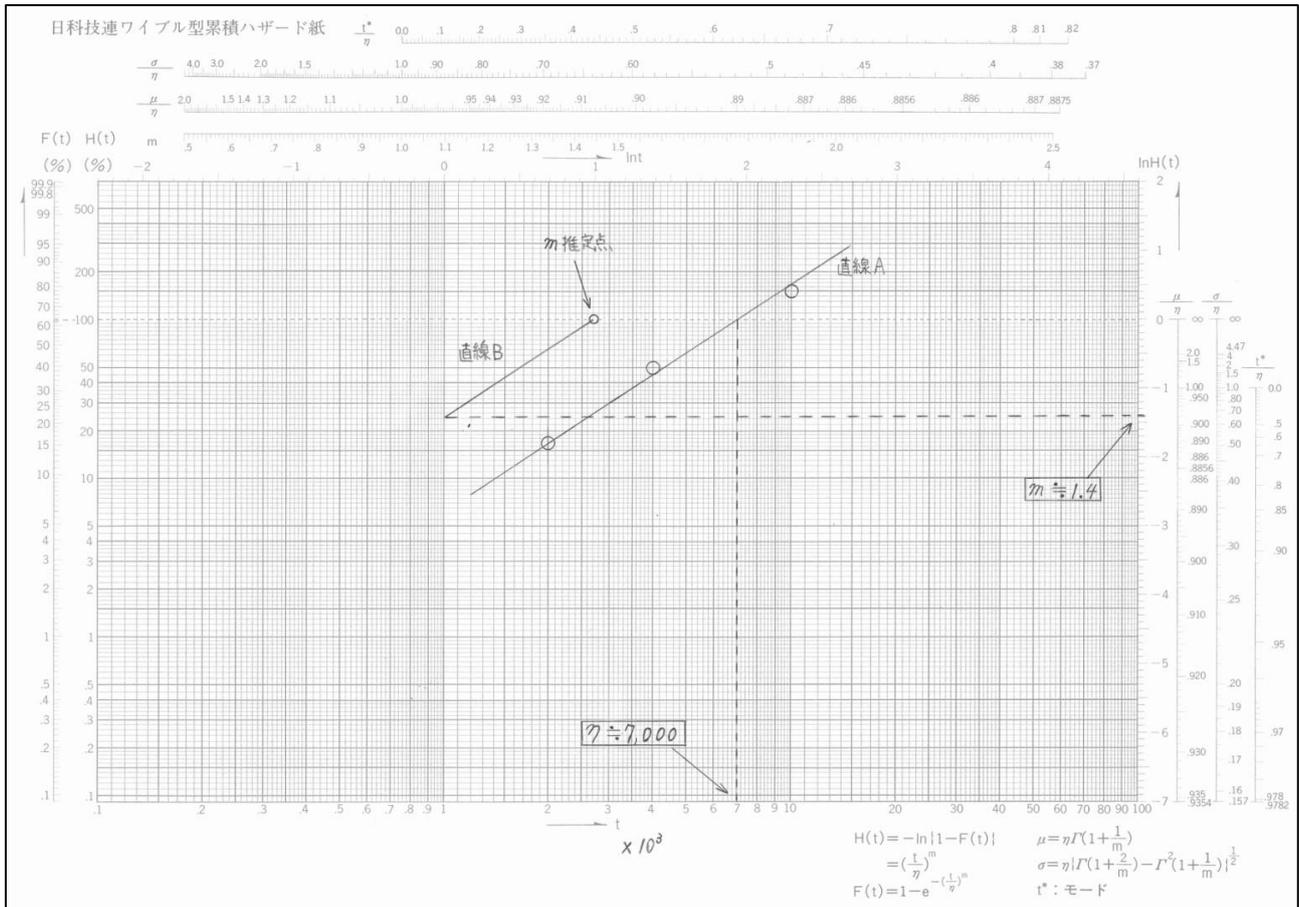


図-3 ワイブル型累積ハザード紙

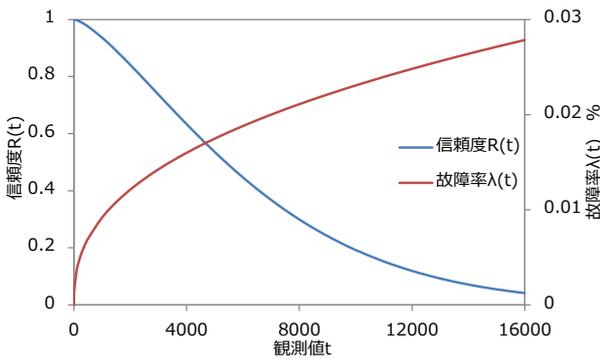


図-4 故障データ例の算出結果 (グラフ)

この故障データの解析結果は、 m (形状パラメータ) が 1.4 であることから故障率増加型の摩耗劣化故障である。算出された故障率は、観測値が増えるほど増加し、信頼度は観測開始直後から低下し始めることがわかる。

3.3 故障データの解析結果について

除雪機械の全機種について、建設機械整備標準作業工数表 (除雪機械編) の作業項目区分を参考にワイブル型累積ハザード解析を行った。

観測値 t については、「走行距離」、「稼働時間」及び「使用年数」の3つで解析を行った。例として、ロータリ除雪車オーガのシャープピンレス装置の故障についての解析結果を図-5~7に、 m (形状パラメータ)、 η (尺度パラメータ)、 $R(t)$ (信頼度) の算出式及び信頼度が 0.99 (故障しない確率が 99%) における走行距離、稼働時間及び使用年数を表-4 に示す。

その結果、ロータリ除雪車オーガのシャープピンレス装置の故障は、全ての観測値において $m > 1$ であることから、故障率増加型の摩耗劣化故障であり、信頼度が 0.99 になる期間は、走行距離で約 12,000km、稼働時間で約 2,000 時間、使用年数で約 8.3 年となった。

また、信頼度が 1 から 0.99 ~ 0.01 低下するということは、解析対象台数である平成 19~27 年度に所有していた 195 台の 1% にあたる約 2 台の故障の発生が推定されることを意味している。

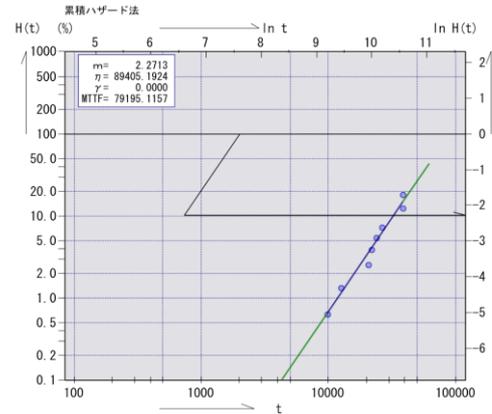


図-5 ロータリ除雪車オーガのシャープピンレス装置の故障 解析結果 (走行距離)

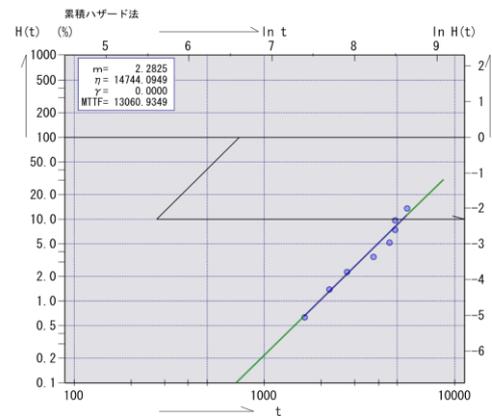


図-6 ロータリ除雪車オーガのシャープピンレス装置の故障 解析結果 (稼働時間)

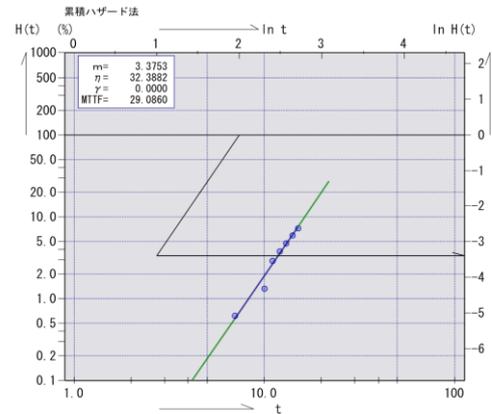


図-7 ロータリ除雪車オーガのシャープピンレス装置の故障 解析結果 (使用年数)

表-4 m , η , $R(t)$ の算出式及び信頼度 0.99 における走行距離、稼働時間及び使用年数

		走行距離	稼働時間	使用年数
ロータリ除雪車オーガシャープピンレス装置	m	2.271	2.283	3.375
	η	89,405	14,744	32.4
	$R(t)$	$\exp\left[-\left(\frac{t}{89,405}\right)^{2.271}\right]$	$\exp\left[-\left(\frac{t}{14,744}\right)^{2.283}\right]$	$\exp\left[-\left(\frac{t}{32.4}\right)^{3.375}\right]$
	$t_{(R(t)=0.99)}$	11,794[km]	1,966[h]	8.29[y]

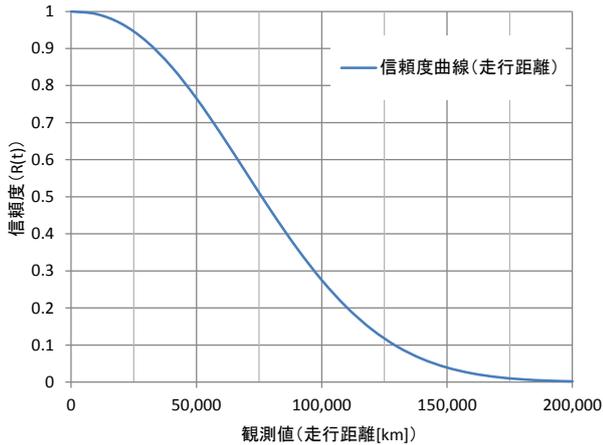


図-8 ロータリ除雪車オーガのシャープピルス装置
信頼度曲線図 (走行距離)

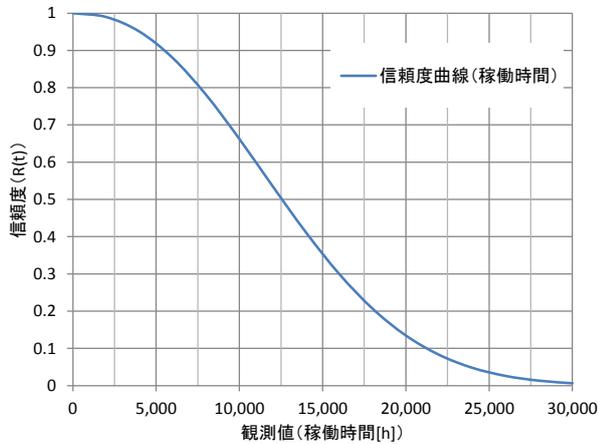


図-9 ロータリ除雪車オーガのシャープピルス装置
信頼度曲線図 (稼働時間)

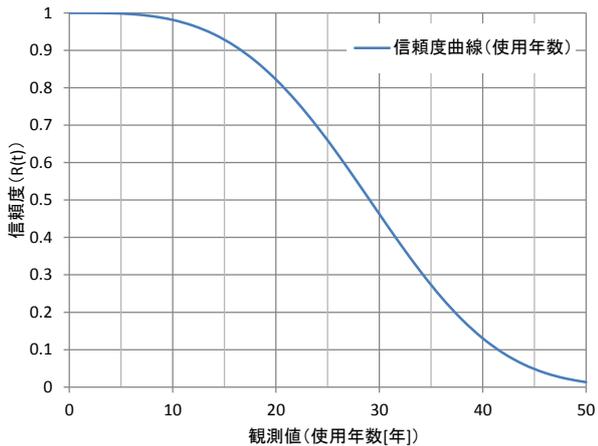


図-10 ロータリ除雪車オーガのシャープピルス装置
信頼度曲線図 (使用年数)

ロータリ除雪車オーガのシャープピルス装置について、信頼度がどのように低下するか、3つの観測値における

信頼度曲線図を図-8~10に示す。

全ての観測値において、使い始めて暫く経つと信頼度が急に低下する傾向になることがわかる。

除雪機械の重大故障箇所において、故障が発生する機械を保有台数の1%以内に抑えた維持管理基準と仮に設定した場合、必要な信頼度は0.99となり、その信頼度を満足するための観測値毎の期間を算出した。

例として、観測値を稼働時間としたロータリ除雪車の車体における信頼度曲線図を図-11に、信頼度の範囲を0.99~1に限定して拡大した曲線図を図-12に示す。

また、ロータリ除雪車車体の信頼度を0.99以上維持できる期間を観測値毎に示して、最も早く信頼度が低下する故障箇所に色づけした表を表-5に示す。

走行距離、稼働時間では冷却装置が最も壊れやすい箇所で、6,169km、788時間を超えると信頼度が0.99未満となることがわかる。また、使用年数ではプロペラシャフトが最も早く信頼度が低下する結果となった。

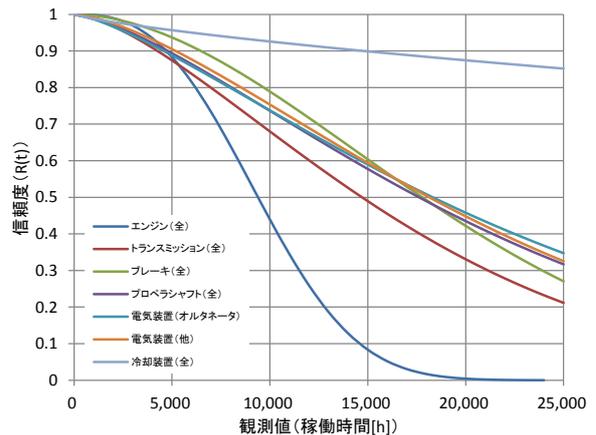


図-11 ロータリ除雪車車体の信頼度曲線
(稼働時間)

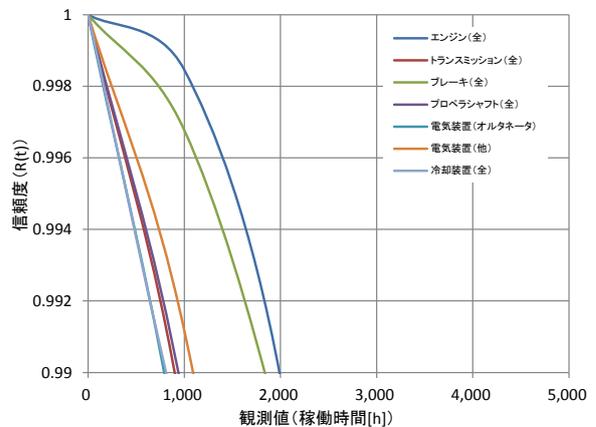


図-12 ロータリ除雪車車体の信頼度曲線
(稼働時間) (拡大)

表-5 ロータリ除雪車車体の信頼度を0.99以上維持できる期間

故障箇所		信頼度 (0.99)		
中項目	小項目	走行距離	稼働時間	使用年数
エンジン	全て	12,219	1,989	6.14
トランスミッション	全て	6,827	909	4.09
ブレーキ	全て	11,992	1,837	10.96
プロペラシャフト	全て	9,832	943	3.61
電気装置	オルタネータ	8,024	813	3.65
	その他	8,168	1,087	4.93
冷却装置	全て	6,169	788	7.38

これらの結果から、ワイブル型累積ハザード解析は、除雪機械における故障の傾向、信頼度と観測値の関係を具体的に示すことができ、有効な解析手法といえる。また、この信頼度が除雪機械劣化度の定量的評価の指標として活用できることを確認した。しかし、次に示す課題も明らかになった。

3. 4 定量的評価手法に関する課題

一つ目として、除雪機械の故障解析は、建設機械整備標準作業工数表（除雪機械編）の小項目単位まで整理できれば、故障傾向のより詳細な把握が可能となるが、FTA段階で小項目に該当するデータが少ないものは、中項目単位や「その他」項目に集約し解析せざるを得ず、十分な結果とならなかった。

解析を行う上で故障発生時の観測値は、解析精度に影響する重要な要素であるため、故障データの記載内容や記載様式について検討し、整理する必要がある。

二つ目として、3種類の観測値（走行距離、稼働時間及び使用年数）で解析を行ったが、故障箇所によっては得られた形状パラメータが、走行距離、稼働時間では初期故障型を示し、使用年数では摩耗増加型を示すなど、故障傾向の評価が異なるものがあった。

観測値の取り扱いについて、どの観測値で解析することが、より適切な故障解析となるか検討する必要がある。

三つ目として、故障解析の対象を除雪機械が2日以上稼働不能となった重大故障箇所としたため、提供頂いた故障データのうち、1割程度しか解析の対象となっていない。

残り9割にあたる稼働不能2日未満の故障データも含めてワイブル型累積ハザード解析を行うことにより、軽微な故障の発生確率も含めた故障発生の全体像を把握できる可能性がある。

今後は、全ての故障データを対象とした解析を実施し、維持すべき信頼度を検討する必要がある。

4. 除雪機械劣化度の定量的評価による維持管理手法の検討

ワイブル型累積ハザード解析から得られた信頼度を除雪機械劣化度の定量的評価の指標とし、その評価に基づいた除雪機械の維持管理方法について検討した。

その際、事務所が管理する複数路線に対する優先順位づけの手順、及び路線の重要度により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できる維持管理手法を検討した。

4. 1 複数路線の優先順位及び信頼度に関する検討

複数路線の優先順位づけの手順を検討するにあたり、路線が持つ機能及び交通量から分類することとした。

今回の検討では、除雪優先区間、緊急輸送道路、及び交通量（日当たり6,000台）の有無で優先管理区間の分類を行った。

整理した分類フロー図（案）を図-13に、フロー図をもとに整理した開発局内の事務所毎の管理区間表について、抜粋したものを表-6に示す。

図-13から、多くの事務所において、路線の重要度を2～3区間に振り分けることが可能となる。

図-13で定義した優先管理区間ごとに、配置される除雪機械に必要な信頼度の目標値を表-7のように仮に設定した。

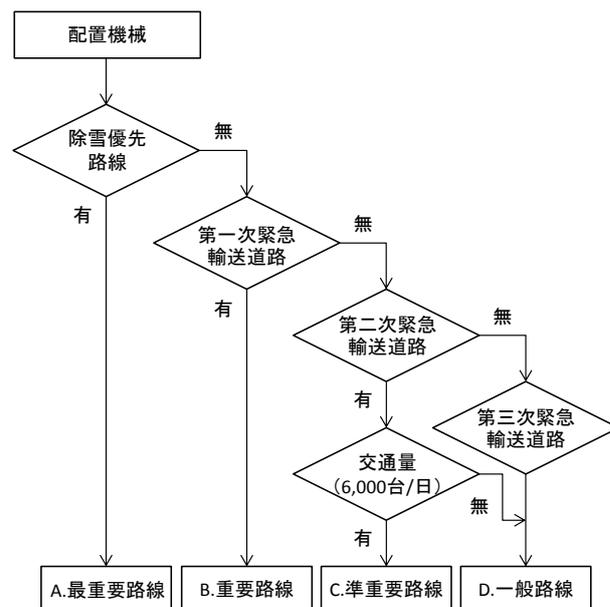


図-13 複数路線の分類フロー図（案）

表-6 事務所毎の管理区間表 (抜粋)

建設部	事務所名称	優先管理区間			
		A	B	C	D
A 開建	A 事務所		●	●	
	B 事務所		●		●
	C 事務所	●	●	●	
	D 事務所	●	●	●	●
B 開建	E 事務所		●	●	●
	F 事務所		●		
	G 事務所		●		●
C 開建	H 事務所	●	●		●
	I 事務所	●	●	●	●
	J 事務所		●		
	K 事務所		●		
D 開建	L 事務所		●		
	M 事務所	●	●		●
E 開建	N 事務所		●		
	O 事務所	●	●		●

表-7 優先管理区間と信頼度の目標値 (仮)

路線の重要度	路線の重要度の内容	配置機械の信頼度の目標値
A. 最重要路線	除雪優先路線	0.99以上
B. 重要路線	第一次緊急輸送道路	0.98以上～0.99未満
C. 準重要路線	第二次緊急輸送道路 (日あたり交通量6,000台以上)	0.97以上～0.98未満
	第二次緊急輸送道路 (日あたり交通量6,000台未満)	
D. 一般路線	第二次緊急輸送道路 (日あたり交通量6,000台未満)	0.95以上～0.97未満
	第三次緊急輸送道路	

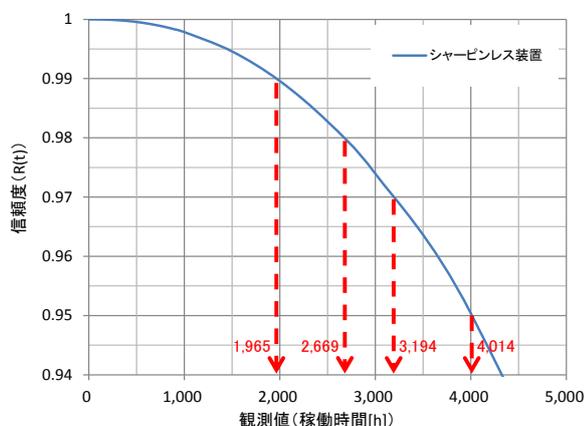


図-14 ロータリ除雪車シャーピンレス装置の信頼度曲線

表-8 ロータリ除雪車の路線配置換え (例)

ロータリ除雪車	除雪期間開始前		除雪期間中間時		除雪期間終了時	
	稼働時間	配置路線	稼働時間	配置路線	稼働時間	配置路線
車両1	1,500	最重要路線	1,700	最重要路線	1,900	準重要路線
車両2	2,700	準重要路線	2,900	準重要路線	3,100	一般路線
車両3	3,700	一般路線	3,900	一般路線	4,000	O/H後最重要路線

具体的な活用として、ロータリ除雪車のシャーピンレス装置を例に、複数路線の優先管理区間における機械の配置方法を示す。

稼働時間に応じた表-7 に示す信頼度の目標値に従い、図-14 のシャーピンレス装置の信頼度曲線から稼働時間を読み取ることができる。

同規格のロータリ除雪車を3台管理している場合の路線配置換え (例) を表-8 に示す。

「車両1」は、除雪期間開始前において最重要路線に配置されていたが、除雪期間終了後に稼働時間1,900時間に達して、このままでは信頼度が0.99を下回る可能性があることから、信頼度が0.97以上であれば問題のない準重要路線に配置換えを行う。

「車両2」についても、同様の判断で準重要路線から一般路線に配置換えをする。

「車両3」は、除雪期間終了後に稼働時間が4,000時間となり、一般路線の配置に必要な信頼度0.95を下回る可能性があることから、整備が必要である。

整備後は、信頼度が回復することから、最重要路線に配置換えして使用することが可能となる。

このように、路線の優先順位毎に除雪機械に必要な信頼度の目標値を設定することで、効率的な整備や配置換えの判断が可能となる。

4.2 維持管理手法に関する課題

今回の検討においては、除雪優先区間、緊急輸送道路及び交通量を条件に順位づけを行うフローを作成したが、これ以外の条件も考慮する必要がある。

近年、冬期における異常気象の発生頻度が増えてきており、集中的な大雪時の予防的な通行規制・集中除雪の実施など、新たな取り組みが行われる予定となっている。

その取り組みも考慮した複数路線の優先順位づけの手順について、検討する必要がある。

また、路線の優先順位ごとに信頼度の目標値を仮に設定したが、目標値の適切な設定方法について検討が必要である。

現在、整備コストを検討するにあたり、提供頂いた故障データに修理費用の記載はあるが、複数の故障内容をまとめているため、個々の故障にかかった費用が把握できないものがある。そのため、除雪機械メーカーや整備業者から故障箇所の概算費用について聞き取りを行い、おおよその概算費用を定める必要がある。

5. まとめ

除雪機械劣化度の定量的評価手法について検討するため、FTA で抽出した 2 日以上稼働不能となった重大故障箇所を対象に、ワイブル型累積ハザード解析を用いて、故障傾向の把握と信頼度を算出した。

故障傾向の把握については、ワイブル分布の形状パラメータの値から判別することができ、また、使用を継続すると故障の発生確率がどのように高くなるか、信頼度の曲線図から可視化して理解することができる。

この結果から、ワイブル型累積ハザード解析は有効であり、信頼度が除雪機械劣化度の定量的評価の指標として活用できることを確認した。

また、事務所が管理する複数路線に対する優先順位づ

けの手順を検討し、路線の重要度によって信頼度の目標値を設定することで、整備や配置換えの判断ができる維持管理手法について検討した。

今後は、全ての故障データを対象にワイブル型累積ハザード解析を行い故障傾向の把握を行うとともに、整備コストや故障発生による社会的影響度を考慮した維持管理手法の検討を進めていきたい。

参考文献

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

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

14.3.1 冬期交通事故リスクマネジメント手法の構築に関する研究

担当チーム：寒地道路研究グループ（寒地交通チーム）

研究担当者：石田樹、高橋尚人、平澤匡介、高田哲哉、齊田光

【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・効率的に実施していくためには、冬期特有の気象条件によってもたらされる雪氷路面の状態が冬期の交通事故発生に及ぼすリスクを定量的に評価していくことが求められている。しかし、事故原票等に交通事故発生時の詳細な路面状態は記録されないというデータ制約上、これまでは冬期路面状態と交通事故リスクとの関係を定量的に分析することが困難であった。そこで平成 29 年度の研究では、冬期交通事故リスク評価の基礎研究という位置付けで、冬期交通事故発生地点の路面状態を実測するとともにそれを予測する手法を開発し、冬期路面状態と交通事故リスクとの関係を分析した。キーワード：冬期交通事故リスク、雪氷路面、路面すべり抵抗値、冬期路面状態予測モデル

1. はじめに

国土の約6割を占める積雪寒冷地では、雪氷路面上でのスリップ事故や吹雪の視程障害による路外逸脱事故といった冬期特有の交通事故が依然として多発している。積雪寒冷地において冬期の交通事故件数を更に削減していくためには、これまで実施してきた冬期交通事故多発箇所での事故対策だけでなく、冬期の道路利用者の交通行動変容も含めた効果的な事故対策をリスクマネジメントの考え方に沿って効率的に実施していくことが求められる。

本研究は、気象データ、人身事故・物損事故データ、道路交通データ、冬期道路管理データ等によって構成されるビッグデータを活用した冬期交通事故リスク評価法を構築し、リスク特定・要因分析・リスク評価・リスク対応を体系化した冬期交通事故リスクマネジメント手法を開発することを目的とする。

2. 研究実施内容

上記の目的達成のため、平成28年度の研究¹⁾では、冬期交通事故のリスク要因の一つである雪氷路面の状態に関して、その状態に影響を与えていると考えられた日陰時間に着目し、日陰時間算定モデルを用いて日陰時間を予測したうえで、一般国道の平均日陰時間予測値と冬期人身事故発生率との関係を道路線形別に分析した。その結果、日陰時間が冬期交通事故のリスク要因となり得ることが示された。

一方、雪氷路面の状態それ自体が冬期交通事故のリスク要因になり得るかという点に着目して分析しようとしたところ、データ取得上の制約が生じた。一般に、交通事故発生時において詳細な路面状態が事故原票に記録されることはない。交通事故発生時の路面状態が事後的に判明したとしても、それは、事故発生直前あるいは直後に路面すべり摩擦係数等を計測する車両を用いた計測が行われていた場合に限られる。仮にそのように計測が行われていたとしても、冬期路面状態と交通事故リスクとの関係についてはこれまで明らかになっていなかった。

そこで、平成 29 年度の研究では、交通事故発生地点を含む区間の路面状態を連続して計測できる車両を使って冬期路面状態を実測するとともに、その状態を予測する手法を開発し、札幌の一般国道を対象に、冬期路面状態と交通事故リスクとの関係について分析した。

3. 実測に基づく冬期交通事故リスク

交通事故発生地点を含む区間の雪氷路面の状態を連続して実測するために、車載器として連続路面すべり計測装置、GPS、赤外放射温度計・気温計、等を備えた連続路面状態計測車両（図 1 参照）を使用した。雪氷路面の状態には様々な状態が考えられるが、連続路面状態計測車両を使用して実測できる路面温度と路面すべり抵抗値（Halliday Friction Number: HFN、無次元量）の 2 つの状態に着目した。HFN とは、米国 Halliday Technologies



図1 連続路面状態計測車両

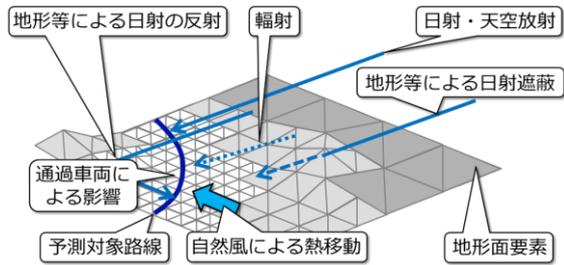


図2 沿道地物の影響を考慮した道路気象計算の概念図

Inc.の連続路面すべり計測装置によって計測される値のことであり、0~100の範囲で値が小さくなるほど路面はすべり易い状態であることを意味する²⁾。

本研究では、実測の対象とした区間内で、連続路面状態計測車両が通過した任意の地点において、雪氷路面の路面温度とHFNを計測した時刻を境に、前後1.5時間以内に発生した交通事故件数を抽出した後で、路面温度あるいはHFNの階級毎にそれを紐付けることによって、冬期路面状態と交通事故リスクとの関係を分析することにした。以下、実測された路面温度を \hat{T}_s (°C)、実測されたHFNを \hat{f}_{HFN} (無次元量)、と表す。それぞれの交通事故リスク r_t 、 r_{HFN} (件/億台km)は、次式で計算する。なお、閏年を考慮して365.25日で年換算している。

$$r_t = \frac{10^8 N_t}{365.25 P L_t Q} \quad (1)$$

$$r_{HFN} = \frac{10^8 N_{HFN}}{365.25 P L_{HFN} Q} \quad (2)$$

ただし、

N_t : \hat{T}_s の階級毎に紐付けされた交通事故件数 (件)

L_t : \hat{T}_s の階級毎に紐付けされた区間内の出現距離 (km)

N_{HFN} : \hat{f}_{HFN} の階級毎に紐付けされた交通事故件数 (件)

L_{HFN} : \hat{f}_{HFN} の階級毎に紐付けされた出現距離 (km)

Q : 年平均日交通量 (台/日)、 P : 対象期間 (年)

4. 冬期路面状態予測モデル

連続路面状態計測車両による冬期路面状態の実測では、冬期交通事故が発生した地点における路面状態と交通事故リスクとの関係は分析できるが、冬期交通事故発生地点での発生時刻における両者の関係を分析することは極めて難しい。地点と時刻を合わせて冬期路面状態と交通事故リスクとの関係を分析するためには、冬期路面状態の実測ではなく、予測モデルが必要になる。

一般に、雪氷路面の状態を予測する方法には、気象データを使って重回帰分析等によって予測する統計的アプローチと、エネルギー収支のプロセスを記述することによって予測する熱収支アプローチがある³⁾。本研究では、詳細な状態の記述が求められたので、後者を採用した。

本研究で開発した冬期路面状態予測モデル⁴⁾は、①沿道地物の影響を考慮した道路気象計算、②舗装と路面上の雪氷層との間の熱収支計算、③路面上で雪氷層を構成する水・氷・空気の状態・体積収支計算、④タイヤ接地面の路面すべり抵抗値計算、という4つのプロセスから成る。詳細を以下に述べる。

- ① 沿道地物の影響を考慮した道路気象計算のプロセスでは、デジタル地形データ等を用いて沿道地物を三角形要素の集合体として再現し、日射の遮蔽や反射や輻射がもたらす影響を計算する (図2参照)。
- ② 舗装と路面上の雪氷層との間の熱収支計算のプロセスでは、舗装および路面上の雪氷層を模した計算要素の間を出入りする熱のフラックス (流束密度) の収支に基づき、雪氷層の温度 T_s (°C) とタイヤ接地面の雪氷層厚 h_s (m) を次式で計算する (図3参照)。

$$\rho_s c_s \frac{\partial(T_s h_s)}{\partial t} = q_{sds} + q_{lds} - q_{tus} + q_{as} + q_{sf} - q_{le} - q_{sa} + q_{lm} - q_{if} - q_{dr} + q_{sp} - q_{st} \quad (3)$$

ただし、

t : 時間 (s)

$\rho_s c_s$: 雪氷層の体積熱容量 (J・K/m³)

q_{sds} : 日向・日陰を考慮した直達および散乱日射熱フラックス (表層のみ) (W/m²)

q_{lds} : 雪氷層への長波放射フラックス (W/m²)

q_{tus} : 雪氷層からの長波放射フラックス (W/m²)

q_{as} : 車両風・自然風による顕熱フラックス (W/m²)

q_{sf} : 降雨・降雪による顕熱フラックス (W/m²)

q_{le} : 蒸発・昇華による潜熱フラックス (W/m²)

q_{sa} : 飛散による顕熱フラックス (W/m²)

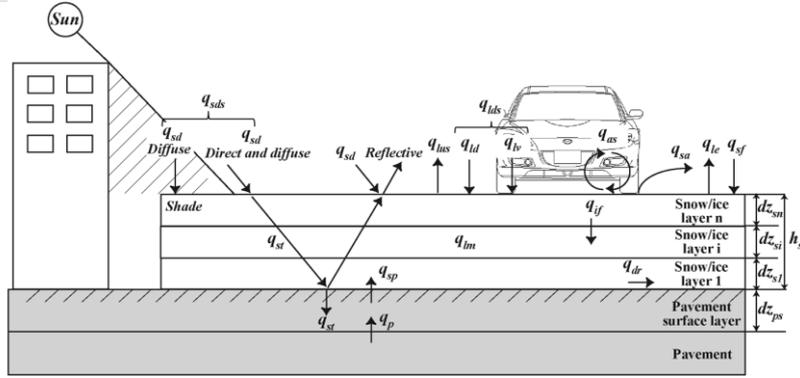


図3 舗装と路面上の雪氷層との間の熱収支計算の概念図

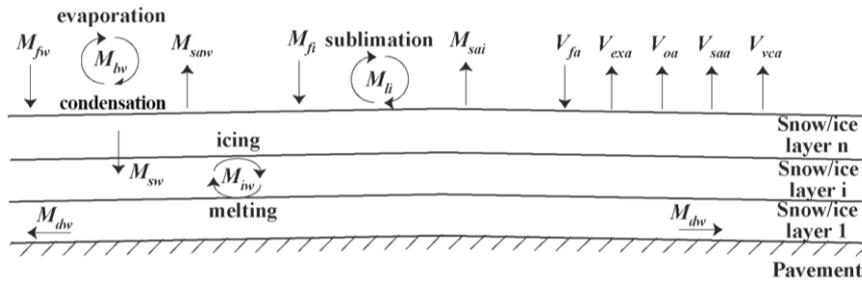


図4 路面上で雪氷層を構成する水・氷・空気の質量・体積収支計算の概念図

- q_{lm} : 融解・凝固による潜熱フラックス (W/m^2)
- q_{if} : 融雪水の下方浸透による顕熱フラックス (最下層を除く) (W/m^2)
- q_{dr} : 排水による顕熱フラックス (W/m^2)
- q_{sp} : 雪氷層と路面との熱移動フラックス (W/m^2)
- q_{st} : 日射による透過熱フラックス (W/m^2)

③ 路面上で雪氷層を構成する水・氷・空気の質量・体積収支計算のプロセスでは、水・氷・空気のフラックスの収支に基づき、雪氷層中の水の質量 M_w (kg/m^2) と氷の質量 M_i (kg/m^2) と空気の体積 V_a (m^3/m^2) を以下の式によって計算する (図4参照)。

$$\frac{\partial M_w}{\partial t} = M_{fw} + M_{iw} + M_{iw} - M_{sw} - M_{dw} - M_{saw} \quad (4)$$

$$\frac{\partial M_i}{\partial t} = M_{fi} + M_{li} - M_{iw} - M_{sai} \quad (5)$$

$$\frac{\partial V_a}{\partial t} = V_{fa} - V_{exa} - V_{oa} - V_{saa} - V_{vca} \quad (6)$$

ただし、

- M_{fw} : 降雨フラックス ($kg/m^2/s$)
- M_{iw} : 蒸発・凝結フラックス ($kg/m^2/s$)
- M_{iw} : 融解・凝固フラックス ($kg/m^2/s$)

- M_{sw} : 融雪水の下方浸透フラックス ($kg/m^2/s$)
- M_{saw} : 雪氷層中の飛散水分フラックス ($kg/m^2/s$)
- M_{fi} : 降雪フラックス ($kg/m^2/s$)
- M_{li} : 昇華フラックス ($kg/m^2/s$)
- M_{iw} : 融解・凝固フラックス ($kg/m^2/s$)
- M_{sai} : 雪氷層中の飛散氷成分フラックス ($kg/m^2/s$)
- V_{fa} : 降雪空気フラックス ($m^3/m^2/s$)
- V_{exa} : 置換空気フラックス ($m^3/m^2/s$)
- V_{oa} : 開放空気フラックス ($m^3/m^2/s$)
- V_{saa} : 雪氷層中の飛散空気フラックス ($m^3/m^2/s$)
- V_{vca} : 通過車両の粘性圧縮による排出空気フラックス ($m^3/m^2/s$)

④ タイヤ接地面の路面すべり抵抗値計算のプロセスでは、路面雪氷状態に基づいて路面すべり状態を予測する。具体手には、タイヤ接地面の雪氷層厚 h_s (m) に基づき、HFN f_{HFN} (無次元量) を次式で計算する。

$$f_{HFN} = 49.303(\theta_i h_s)^{-0.076} \quad (7)$$

ただし、

θ_i : 雪氷層の体積含水率 (%)

式(7)は、雪氷層厚を用いて HFN を予測する式を表す。

5. 使用したデータ

5.1 冬期交通事故リスクの計算で使用したデータ

連続路面状態計測車両を用いて実測する区間は、一般国道230号の札幌市内区間45kmを対象とした。また、交通事故リスクの計算では、2014年から2016年の1月および2月の平日に対象区間内で発生した物損事故の件数と、2010年道路交通センサスの日交通量を使用した。

5.2 冬期路面状態予測モデルで使用したデータ

予測モデルによる分析の対象とした区間は、札幌市中心部から半径15km圏内の一般国道のうち、ロードヒーティング実施区間を除いた区間とした。分析に用いたデータは以下の通りである。

交通事故データについては、分析対象区間内で2013年11月から2014年3月の冬期に発生した物損事故件数1,673件を用いた。また、気象データについては札幌気象台の観測値を、分析対象区間の地形データと建築物形状データについては国土地理院のデジタル標高データ（空間解像度10m）と株式会社ゼンリンのデジタル住宅地図データを、交通量データについては2010年道路交通センサスをそれぞれ用いた。

6. 結果と考察

6.1 実測による分析の結果とその考察

連続路面状態計測車両を用いた冬期路面状態の実測による冬期交通事故リスクの分析では、**図5**と**図6**に示す結果を得た。なお、分析の都合上、路面温度の階級別にみた交通事故率 r_t は路面温度が6°C以上の状態を、HFNの階級別にみた交通事故率 r_{HFN} はHFNが80以上の状態を、それぞれ1に正規化している。これは、無積雪時を基準とした場合、路面温度が6°C以上の状態では路面凍結や積雪が起きていないと考えられるためである。

結果の考察をまとめると、以下のようになる。

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

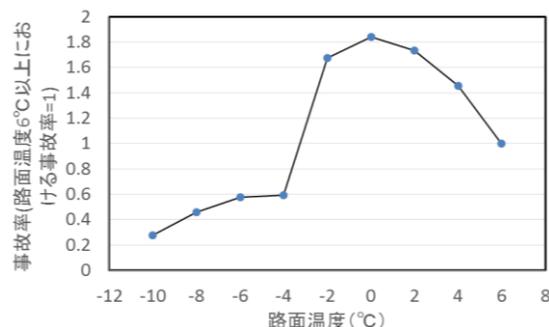


図5 路面温度（実測値）の階級別にみた交通事故率

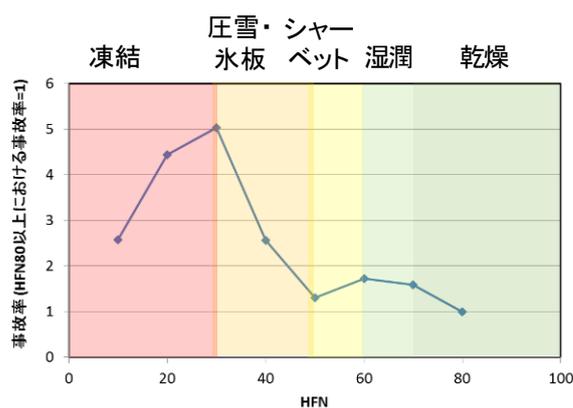


図6 HFN（実測値）の階級別にみた交通事故率

6.2 予測モデルによる分析の結果とその考察

冬期路面状態予測モデルによる分析では、雪氷路面の状態として、HFNの他に、 T_s 、 h_s 、 M_w 、 M_i 、 V_a から算出できるタイヤ接地面の路面温度(°C)と積雪深(mm)と雪氷層体積含氷率(%)に着目することにした。そして、これらの状態を各々階級に分けたうえで、分析対象区間に各状態が出現する距離あたりの交通事故件数と各状態との関係について分析した。以下、路面温度出現距離あたりの交通事故件数を R_t 、積雪深出現距離あたりの交通事故件数を R_d 、雪氷層体積含氷率出現距離あたりの交通事故件数を R_i 、HFN出現距離あたりの交通事故件数を R_{HFN} と表す。なお、分析の都合上、 R_t は路面温度が5°C以上の状態を、 R_d と R_i は積雪深が無い状態を、 R_{HFN} はHFNが70以上の状態を、それぞれ1に正規化している。

図7～**図10**に分析の結果を示す。各図において、正規化の基準となる階級については、棒グラフの色を変えている。また、**図9**で、物損事故件数が5件未満で非常に少ない場合の体積含氷率の階級は、白抜きで示している。

結果の考察をまとめると、以下のようになる。

- タイヤ接地面の路面温度(予測値)が0°C付近では、雪氷層の融解・再凍結に伴ってすべり易い路面が出

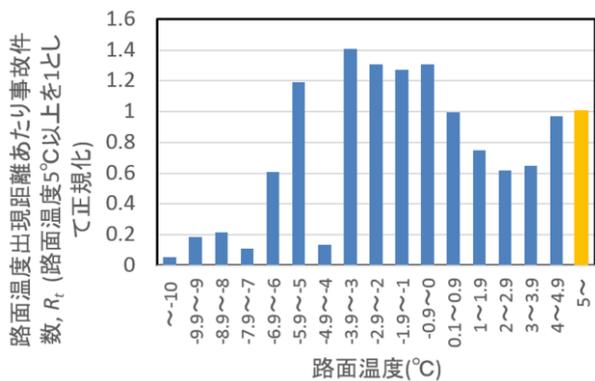


図7 タイヤ接地面の路面温度(予測値)の階級別にみた路面温度出現距離あたり交通事故件数

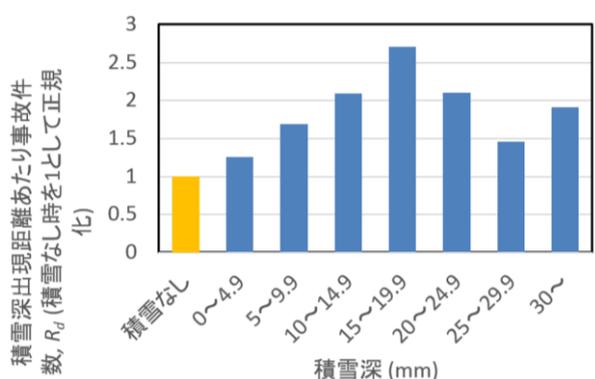


図8 タイヤ接地面の積雪深(予測値)の階級別にみた積雪深出現距離あたり交通事故件数

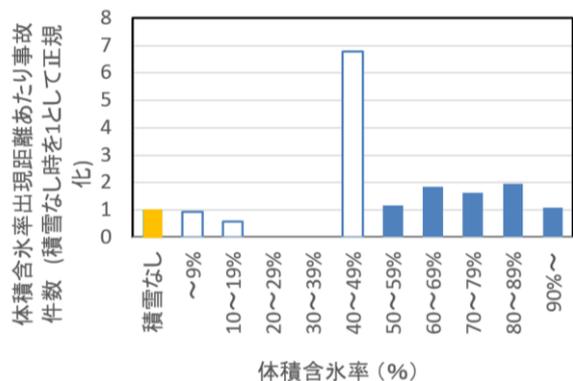


図9 タイヤ接地面の雪氷層体積含水率(予測値)の階級別にみた体積含水率出現距離あたり交通事故件数

現する等により、交通事故が発生し易くなる一方で、 -6°C 以下では、発生しにくい傾向がみられる。また、タイヤ接地面の雪氷層体積含水率(予測値)が90%以上では、目視で路面状態の危険を認識し易くなる等により、交通事故が発生しにくい傾向がみられる。

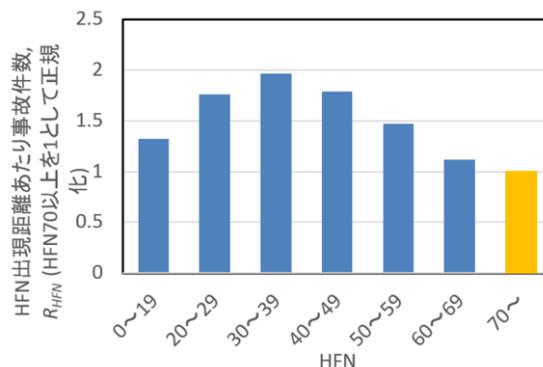


図10 HFN(予測値)の階級別にみたHFN出現距離あたり交通事故件数

- タイヤ接地面の積雪深(予測値)が15mm~20mm程度では、積雪が無い状態と比べて、交通事故件数が3倍近くになる一方で、積雪深(予測値)がそれ以上増えると件数は減少する傾向にみられる。
- HFN(予測値)が30以上40未満という中程度の雪氷路面のすべり状態のとき、交通事故件数は最も多くなる傾向がみられる。

7. まとめ

平成29年度の研究成果としては、雪氷路面の状態のうち特に路面温度とHFNについて、実測と予測の両面から、冬期交通事故リスクに及ぼす特性を検証できた。今後は、冬期道路管理による交通事故減少便益を評価し、冬期交通事故リスクマネジメント手法の構築に繋げる予定である。

参考文献

- 1) 齊田光、平澤匡介、高橋尚人、石田樹：デジタル住宅地図データを用いた広域路面日陰計算手法、寒地土木技術研究、第764号、2016。
- 2) 徳永ロベルト、舟橋誠、高橋尚人、浅野基樹、中野雅充：連続路面すべり抵抗値による冬期路面管理の高度化に関する研究、寒地土木研究所月報、第661号、2008。
- 3) 高橋尚人、徳永ロベルト、浅野基樹、石川信敬：交通量を考慮した熱収支法による路面温度推定モデルの構築について、北海道開発土木研究所月報、第631号、2005。
- 4) 齊田光、平澤匡介、高橋尚人、石田樹：路面雪氷状態推定結果を用いた冬期交通事故分析手法の基礎的検討、寒地土木技術研究、第770号、2017。