

凍結防止剤散布支援システムの開発と実用化

大廣 智則¹・金子 雅之²・齊田 光¹

¹国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 寒地交通チーム（〒062-8602 札幌市豊平区平岸1-3-1-34）

²北海道開発局 室蘭開発建設部 道路整備保全課（〒051-8524 北海道室蘭市入江町1-14）

筆者らは、凍結防止剤散布において、ワンマン化でも安全で確実な散布作業を可能とするシステム開発を目指している。本研究では、苫小牧寒地試験道路で凍結防止剤散布に係る支援情報の有効性を検証した。その結果、支援情報だけではなく凍結防止剤散布の自動化まで組み合わせることが有効であることを明らかにした。そこで、これら機能を完備し、実際の作業に使用している散布車に搭載可能な凍結防止剤散布支援システムを開発した。北海道開発局の散布車に開発したシステムを搭載し有効性を確認した。その結果、凍結防止剤散布支援システムは機能・散布精度ともに実用レベルで、現場からはワンマン化に資するシステムとして評価された。

キーワード 自動散布，冬期道路管理，ワンマン化，作業の省力化，作業の担い手不足解消

1. はじめに

冬期間、積雪寒冷地域にとっては、凍結防止剤や防滑材の散布は、凍結路面発生の抑制や雪氷路面でのスリップ防止のために重要であり、冬期道路管理において必要不可欠な作業である。凍結防止剤散布作業は多くの場合、運転手と助手席に乗車したオペレータの2人体制で作業が行われている¹⁾。現在、これら作業に従事している作業員の確保は、近年の生産年齢人口の減少や公共事業費の減少に伴う人員の削減、新規入職者の減少等から困難になってきている²⁾。

これらの課題に対応するため、札幌市ではICTなどの先進技術を活用した取組を推進し、凍結防止剤散布車における既存機械の1人乗り化(以降、ワンマン化)の検討がされている³⁾。北海道の高速道路では、凍結防止剤散布量の削減を目的に路面状態を自動判別し、散布が必要な区間の100m手前から凍結防止剤を自動散布する仕組みを開発し運用されている⁴⁾。しかし、これまで凍結防止剤散布作業のワンマン化について実用化に至った新たな技術はほとんどなく、散布精度についても課題がある。

上述した背景に鑑みて、寒地土木研究所の寒地交通チームでは、凍結防止剤散布において経験の浅いオペレータでも作業可能で、かつワンマン化でも安全で確実な散布作業を可能とする支援技術の開発を目指している。

本研究では、凍結防止剤散布作業のワンマン化を視野に、苫小牧寒地試験道路において実施した凍結防止剤散布に係る支援情報提供による効果と課題を示す。また、

情報提供のみによる課題の解決策として、散布の自動化など散布支援の効果について、主観的方法および客観的方法の二つの方法によって評価した結果を明らかにする。さらに、北海道開発局の散布作業に用いられている全ての凍結防止剤散布機械に対応して凍結防止剤を自動散布するための方法として、凍結防止剤散布支援システムを新たに開発した。このシステムの開発状況を詳細に示す。また、路面状況は日々変化し、事前に設定した以外の箇所散布するため、このシステムでは音声散布機能を開発した。自動散布中に音声散布機能を併用した作業の安全性を示し、アンケートによる検証結果からその実用性を明らかにする。また、助手席のオペレータが目視で判定した結果から、このシステムの自動散布による散布精度を明らかにする。

2. 苫小牧寒地試験道路での検証

苫小牧寒地試験道路において、各種検証を実施した。苫小牧寒地試験道路は、土木研究所寒地土木研究所が所有する積雪寒冷地域での走行試験を行う試験道路である。全長2,720mで2-4車線を有し、直線区間が2,400m、曲線区間320mである。設計速度は、4車線区間が120km/h、2車線区間が80km/hである。

(1) 検証方法：メンタルワークロード

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（以降、MW））であるとされている⁹。検証方法は、凍結防止剤散布作業におけるオペレータの課題処理能力をMWによって定量化および評価した。

オペレータのMWは、主観的方法および客観的方法の二つ方法によって評価した。主観的評価法には、NASA-TLX⁶を用いた。NASA-TLXは宇宙飛行士の主観的MWを測定するために開発されたものである。大きい小さいなどの両極を持つ6つの評価尺度の平均値を、主観的MWの値として評価した。客観的評価法は、注視率を求めた。

(2) 凍結防止剤散布に係る支援情報提供の効果

a) 検証方法

被験者は未経験のオペレータ7名と熟練のオペレータ12名の計19名である。路面条件は、図-1に示すように乾燥を主にして湿潤100mと凍結100mを各2区間敷設した。凍結防止剤は固形の塩化ナトリウムを使用した。散布条件は、乾燥は散布なし、湿潤は20g/m²の散布、凍結は30g/m²の散布である。検証は、支援情報提供がない場合、図-2(a)に示すように画像により散布を促す支援情報提供、図-2(b)に示すように音声により散布を促す支援情報提供、画像と音声を組合せた散布を促す支援情報提供を行い、散布作業を実施した。検証方法を以下に要約する。

- ・被験者：未経験オペレータ7名、熟練オペレータ12名
- ・路面条件：乾燥を主として100mの湿潤と凍結を各2区間敷設
- ・散布条件：乾燥；情報なし、湿潤；20g/m²、凍結；30g/m²
- ・検証条件（支援情報の提供方法）：
 - (a) 情報なし、(b) 音声のみ、(c) 画像のみ、(d) 音声+画像

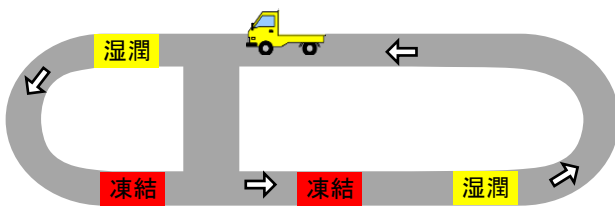
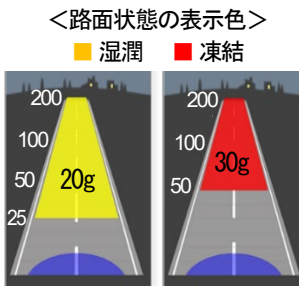


図-1 路面条件



(a) 画像による支援情報提供

- <路面状態別警告音>
- 湿潤：200m 手前；プ・プ・
100m 手前；ププッ
50m 手前；プププ
0m；プー
- 凍結：200m 手前；ピ・ピ・
100m 手前；ピッピッ
50m 手前；ピピピピ
0m；ピー

(b) 音声による支援情報提供

図-2 支援情報提供方法

b) 主観的MWの結果

図-3に主観的MWの結果を示す。縦軸の値は値が小さい程、精神的負荷が小さいことを示している。図-3より経験の有無に関わらず情報提供の方が精神的負荷が小さく、音声と画像を組合せて情報提供するのが最も精神的負荷が小さい結果が得られた。

c) 支援情報提供のみによる課題

2.(2)a)の検証時に、図-4(a)に示すアイトラッキングで凍結防止剤散布作業中のオペレータの注視状況を調べた。図-4(b)に示す、道路&背景、散布車制御装置、情報端末の3つの注視エリアに分け注視率を算出した。

図-5に注視率の結果を示す。図の上が未経験オペレータ、下が熟練オペレータを示している。図-5より経験の有無に関わらず支援情報提供によって、道路&背景の注視率が低下している。この結果から、散布を促す支援情報の提供のみでは安全面に課題があると考えられる。

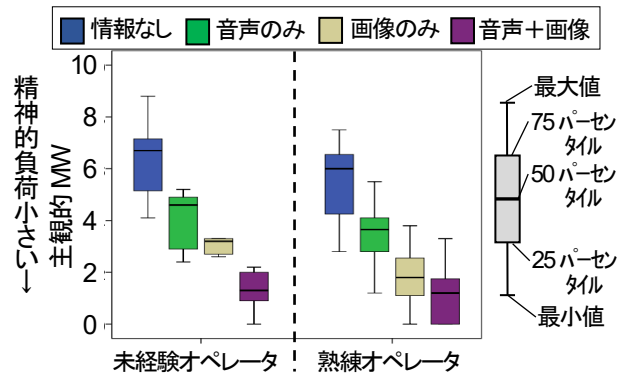
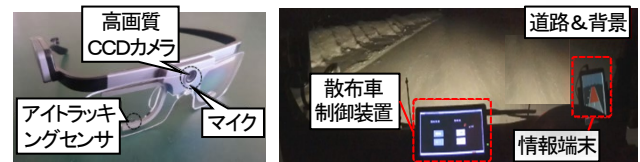


図-3 散布支援情報の効果についての主観的MWの結果



(a) アイトラッキング

(b) 注視エリア

図-4 注視率の検証方法

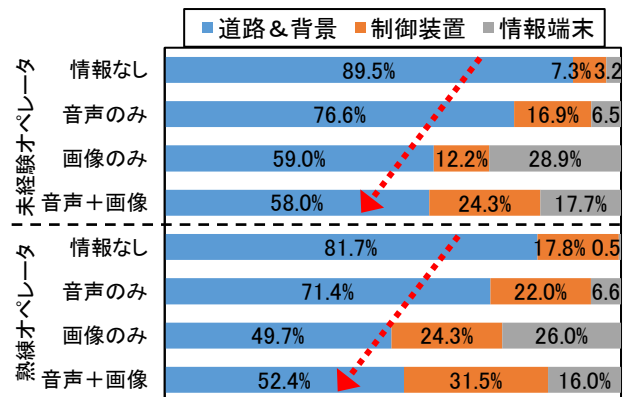


図-5 散布支援情報の効果についての注視率の結果

(3) 凍結防止剤散布支援の効果

a) 検証方法

前節の検証にて熟練度の違いによる効果の差がみられなかったため、被験者は未経験のオペレータ8名とした。路面条件は、苫小牧寒地試験道路内で乾燥を主にして湿潤100mと凍結100mを各3区間敷設した。凍結防止剤の散布条件は、乾燥は散布なし、湿潤は20g/m²の散布、凍結は30g/m²の散布である。検証方法は、支援なしの場合、画像と音声を組み合わせた散布を促す支援情報のみ、音声散布（支援情報有り）、自動散布（支援情報有り）で凍結防止剤散布作業を実施した。検証方法を以下に要約する。

- ・被験者：未経験オペレータ8名
- ・路面条件：乾燥を主として100mの湿潤と凍結を各3区間敷設
- ・散布条件：乾燥；散布なし，湿潤；20g/m²，凍結；30g/m²
- ・検証条件：(a) 支援なし，(b) 支援情報のみ，(c) 音声散布（支援情報），(d) 自動散布（支援情報）

b) 主観的MWの結果

図-6に凍結防止剤散布支援の効果についての主観的MWの結果を示す。支援なしは4つの検証条件の中で最も精神的負荷が大きかった。音声散布は、支援情報のみよりも精神的負荷が小さく、自動散布が最も精神的負荷が小さいという結果が得られた。

c) 注視率

図-7に注視率の結果を示す。音声散布は道路&背景の注視率が支援なしと同程度となった。自動散布は、オペレータが散布車の運転に専念することができるため、道路&背景の注視率を支援なしよりも高めることができた。

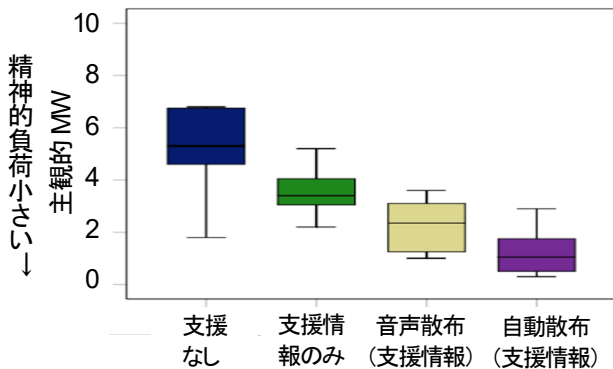


図-6 凍結防止剤散布支援の効果についての主観的MWの結果

注視対象	支援なし	支援情報のみ	音声散布 (支援情報)	自動散布 (支援情報)
道路&背景	83.5%	77.9%	82.3%	84.9%
制御装置	7.0	9.0	4.3	3.1
情報端末	8.6	8.5	8.4	8.3
車内	0.0	3.6	4.1	2.8
速度メーター				

図-7 凍結防止剤散布支援の効果についての注視率の結果

3. 凍結防止剤散布支援システムの開発

(1) 従来からの凍結路面对策における散布方法

北海道の国道では、凍結防止剤を路線全線に散布するのではなく、急勾配、急カーブ、交差点、橋梁、日陰、トンネル出口等を重点散布区間として設定し、散布を行っている⁷⁾。固形剤と溶液を散布直前に混合して散布する湿式散布は、路面への付着効果が高く速効性・持続性があり、固形剤が飛散しない効果を期待して通常の凍結防止剤散布方法として用いられている。

(2) 自動散布制御装置の設計

北海道開発局の凍結防止剤散布作業に用いられている全ての散布車規格で自動散布を実施するため、自動散布制御装置を新たに設計し、制御PC・GNSS・IoTルータ・継電器モジュール・電源装置等を収納した。自動散布制御装置と他の機器は、自動散布制御装置に電源を供給し、凍結防止剤散布車・タッチパネル液晶ディスプレイ・マイク・GNSSレシーバー・IoTルータアンテナに接続した。

(3) 自動散布ソフトの開発

CANプロトコルは、ISO-11898仕様に準拠したBosch2.0B active対応、データフォーマットは、CAN ID：11bitの標準フォーマットとして凍結防止剤散布車のCAN通信仕様を取り決めた。そして、自動散布制御装置からの散布量、散布幅、溶液の割合、散布方向、散布ON/OFFの信号を受信し、制御できるように散布車ソフトを新たに開発した。自動散布の実施は、散布車のエンジンをONにするとモニターの電源が入り自動散布ソフトが自動で起動し、30秒程度待つと接続チェックを行う。散布車のオペレータが、図-8に示す散布パターンボタンを選択すると、自動散布ボタンは連動され自動散布が実行される。自動散布終了後、エンジンをOFFにすると自動散布ソフトは自動で終了する。このように、自動散布ソフトは、散布車の運転手やオペレータが散布車操作卓を操作することなく、自動散布ソフトの画面を作業前に1回タッチするだけで自動散布を実行可能とした。

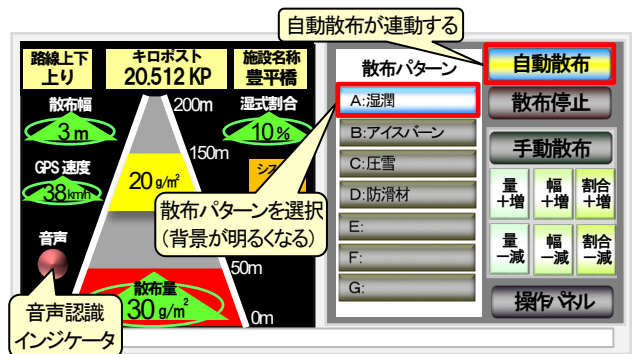


図-8 自動散布ソフト

(4) 凍結防止剤散布支援システムを構成する3つの散布支援ツール

図-9に、凍結防止剤散布支援システムを構成する3つの散布支援ツール「散布指示支援ツール」、「散布判断支援ツール」、「散布操作支援ツール」とそれらをつなぐ凍結防止剤散布フローを示す。これらの散布支援ツールは、インターネットを介したWEBサーバで連携している。

散布指示支援ツールは、各道路事務所で道路管理者等が、WebGIS上に散布が必要な区間(KP(キロポスト))を指定し、散布量・散布幅・溶液の割合・散布方向の情報を入力する。また、Excel等を使用し帳票形式で入力して、WEBサーバにアップロードすることも可能である。

散布判断支援ツールは、散布車の作業員に散布が必要な箇所200m手前から、散布の開始および終了、散布量等の情報を画像と音声とで提供し凍結防止剤散布作業を促す。また、散布幅・溶液の割合・車両速度・上下線・KPや施設名称等の情報を画像で作業員に提供する。

散布操作支援ツールは、散布指示支援ツールで設定した散布パターンに従って散布条件を凍結防止剤散布車へ送信し、凍結防止剤を自動散布する。手動モードに切り替えた場合は、タッチパネルの量・幅・割合の増減ボタンで散布条件を変更でき、作業員の発声に従って音声での散布が可能である。

(5) 凍結防止剤散布支援システムの試行導入

これまで北海道開発局では、運転手の死角にカメラを配置するなど、ワンマン化を支援する技術の試行が実施されている⁸⁾。令和3年度は、表-1に示す8開発建設部(札幌、小樽、旭川、室蘭、釧路、帯広、網走、留萌)で各1台、凍結防止剤散布車もしくは散布装置付き除雪トラックに凍結防止剤散布支援システムが試行導入された。図-10に示すように、自動散布制御装置とタッチパネルとマイクを散布車に搭載し、電源を車両から自動散布制御装置に供給し、そこからタッチパネルとマイクへ

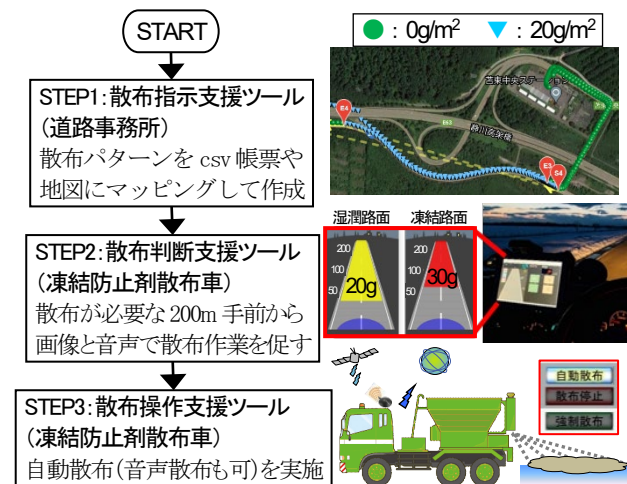


図-9 凍結防止剤散布支援システムによる散布フロー

表-1 試行導入状況

開発建設部	事務所	基地・ST	機械	規格
札幌	札幌道路	札幌 ST	散布車	4.0m ³
小樽	小樽道路	小樽基地	除トラ	10t.G.散布
旭川	旭川道路	末広基地	散布車	4.0m ³
室蘭	苫小牧道路	苫東中央 ST	除トラ	10t.G.散布
釧路	釧路道路	恋問 ST	除トラ	10t.G.散布
帯広	足寄道路	足寄基地	除トラ	10t.G.散布
網走	網走道路	網走基地	除トラ	10t.G.散布
留萌	留萌開発	大別刈 ST	除トラ	10t.G.散布

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



図-10 凍結防止剤散布車への凍結防止剤散布支援システムの搭載状況

電源・通信ケーブルで接続した。凍結防止剤散布車とは、CAN通信ケーブルで接続し、3.(3)で開発した散布車ソフトをインストールした。

(6) 凍結防止剤散布支援システムの機能性の検証

凍結防止剤散布支援システムを1冬期間運用し、散布が必要な箇所ですべて設定した散布(量・幅・方向)ができていないか検証を行った。凍結防止剤散布支援システムの自動散布機能により散布したときの散布ログデータを集計し、有効データ数と散布正答数から正答率を算出した。なお、散布正答は、予め設定した散布開始位置と実際の散布開始位置が前後50m以内の場合とした。散布終了も同様である。有効データ数219,539に対し、正答数は219,349であり、正答率はほぼ100%であった。凍結防止剤散布支援システムは、想定した機能を果たした。

4. 音声散布機能の開発と実用性の検証

(1) 音声散布機能の開発

これまで開発してきた凍結防止剤散布支援システムは、事前に設定した要散布箇所手前で情報提供とともに自動散布が可能であるが、日々変化する路面状況へ対応できていない。そこで、ワンマン化でも道路やその背景を視認しながら設定変更を可能とするため、音声散布機能を開発した。音声散布機能の起動時は、待機状態となっている。この状態では音声認識は受け付けない。これは、図-8左下と表-2に示す音声認識インジケータの赤丸表示

で確認することができる。「ヘイ Samp」とのコマンド用語彙を発声すると図-8 左下の赤丸表示が表-2 に示す青丸表示となり音声認識受付状態に遷移し、最大で 10 秒間待機する。この間に表-3 に示す予め登録した作動用語彙リストにある「Samp」、「テイシ」、「キョウセイ」、「パネル」等と発声すると、図-8 左下の赤丸表示が表-2 に示す緑丸表示となり自動散布の操作を実行する。10 秒経過するか、語彙リストにない音声認識を受け付けると待機状態に戻る。図-8 に示す散布パターンの変更は、上記方法と同様に散布パターン名を読み上げることで、対象の散布パターンに切り替えることが可能である。このように、コマンド用語彙と作動用語彙を組み合わせることで、精度良く音声認識して凍結防止剤を散布することを可能とした。

(2) 安全対策

図-3、図-5 の結果より、支援情報提供は心理的負担の軽減となるが、支援情報提供によって道路&背景の注視率が低下するため、支援情報提供のみには安全面に課題がある。そこで、図 10 に示すようにタッチパネルを散布車操作卓の横に配置し、運転視野の妨げにならないようにした。また、散布中に散布停止や強制散布等、散布条件を変更するときや散布パターンを変更するときは、図-10 に示すように無指向性のマイクを運転手の声を集音する位置に配置し、道路&背景を視認しながらの設定変更を可能とした。

(3) 音声散布機能の実用性の検証方法

本研究では、凍結防止剤散布支援システムを使用し冬期道路維持作業に従事した作業員に対し、音声散布機能の実用性についてアンケート形式で検証を行った。検証時期は 2022 年 3 月中旬である。アンケート項目は、年齢や主に担当している作業内容についてと、「音声による散布切り替えはワンマン化に必要な機能だと思いますか?」と「回答理由」である。アンケートの評価尺度は 7 段階とした。作業員はアンケート用紙の各設問に対し、評価尺度の「大いに思う・全く思わない」の両極を

表-2 音声認識インジケータ




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

表-3 作動用語彙リストの一覧

作動用語彙	読み	実行内容
自動散布	Samp	自動散布を開始する
散布停止	テイシ	散布を停止する
強制散布	キョウセイ	強制散布を開始する
操作パネル	パネル	操作パネルに制御を切り替える

持つ 7 段階の線分上に、○印で記入した。

(4) 音声散布機能の実用性の検証結果

a) 年齢や主に担当している冬期道路維持作業内容の基礎情報

アンケートは、40 歳台・50 歳台を中心に 18 名から回答を得た。アンケートの回答者は全て男性である。作業内容は、散布作業が 11 名と最多で、除雪作業が 5 名、主任技術者と現場代理人が 4 名ずつであった。ただし、散布作業と除雪作業または、主任技術者と現場代理人の重複回答があった。

b) 音声散布機能のワンマン化への必要性

凍結防止剤散布支援システムの音声散布機能は、図-11 に示すようにワンマン化に必要な機能として肯定的な意見が大勢を占める結果となった。その理由として、一人で散布できる、作業が楽、安全だから、効率的との回答が多くあった。つまり、この検証結果から音声散布機能は、想定していた安全性と効率性を備えており、ワンマン化に必要な機能として評価された。

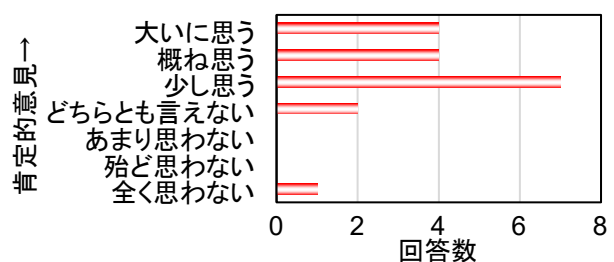
5. 凍結防止剤散布支援システムの散布精度の検証

(1) 検証方法

a) 検証期間

凍結防止剤散布支援システムの自動散布機能による散布精度の検証は、2022 年 2 月 14 日～4 月 1 日の 47 日間に行った。期間の中で凍結防止剤散布支援システムの自

(a) 音声による散布切り替えはワンマン化に必要な機能だと思うか



(b) 回答理由

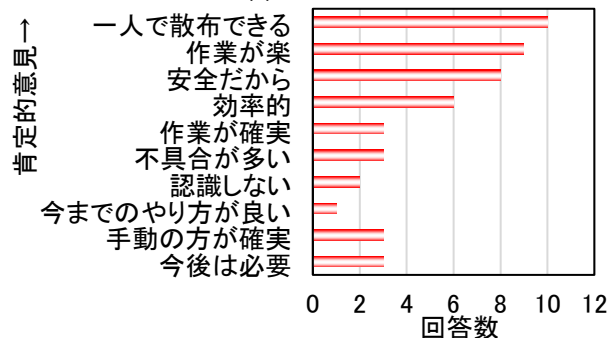


図-11 音声散布機能のワンマン化への必要性の回答結果

動散布機能を使用して 60 回の散布が行われた。

b) 検証箇所

検証箇所は、表-1 に示す試行導入の中で凍結防止剤や防滑材の散布頻度の多い旭川道路事務所とした。旭川道路事務所の凍結防止剤散布支援システムを搭載した散布車が凍結防止剤を散布する区間は、国道 40 号 KP0～8.5 と国道 12 号 KP142.52～144.68 である。

c) 検証方法

旭川道路事務所の凍結防止剤散布支援システムを搭載した散布車が担当している散布区間の中で、散布が必要な箇所は 94 ある。2022 年 2 月 14 日～4 月 1 日の期間の中で 60 回の散布が行われたため、全 5640 データについて、助手席のオペレータが目視で 10m 単位で散布精度を判定した。

(2) 検証結果

凍結防止剤散布支援システムの散布精度の検証結果を図-12 に示す。縦軸は散布回数、横軸は 0m が散布地点、マイナスは手前から散布した、プラスは散布地点を過ぎて散布したということを示している。全 5640 データの中で 8 データは散布精度の判定ができなかったため、図-12 は 5632 データの散布精度をとりまとめた。凍結防止剤散布支援システムの自動散布機能による散布精度は、全体のうち 82%は事前に設定した散布位置と一致した。

6. まとめと今後の課題

苫小牧寒地試験道路で凍結防止剤散布作業の支援情報提供の効果および散布の自動化など散布支援の効果を検証した。また、凍結防止剤散布支援システムを開発し、音声散布機能の実用性の検証および散布精度の検証を行った。本研究で得られた成果を以下にまとめる。

(1) 苫小牧寒地試験道路において、オペレータの熟練度と支援情報提供による散布作業時の精神状態と視線挙動の変化について検証し、オペレータの熟練度にかかわらず、支援情報提供により主観的 MW は減少し、音声と画像を組み合わせた支援情報の提供が最も MW が減少することを示した。しかし、支援情報提供によって前方の道路を注視する割合が減少するため、安全性確保が課題となることを示唆した。

そこで、凍結防止剤散布支援による散布作業時の心理状態および視線挙動の変化について検証し、自動散布（支援情報）により、オペレータの主観的 MW が減少し、前方の道路を注視しながら安全に散布作業を行うことが可能なことを明らかにした。

(2) 凍結防止剤散布支援システムの開発状況を詳細に示すとともに、8 開発建設部で各 1 台試行導入し、1 冬期間運用して機能性の検証を行った結果、散布が必要な箇所で予め設定した散布（量・幅・方向）がで

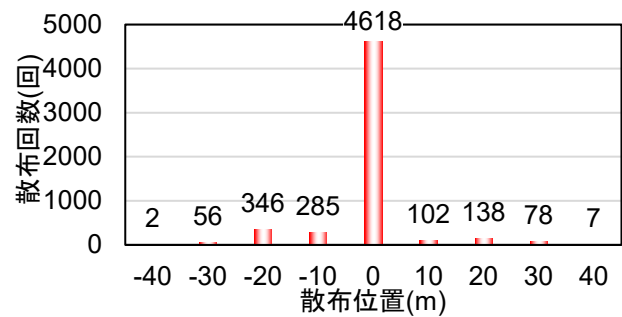


図-12 凍結防止剤散布支援システムの散布精度の検証結果

きていることを示した。

- (3) 音声散布機能の開発状況を詳細に示すとともに、音声散布機能の実用性についてアンケートにより検証を行った。凍結防止剤散布支援システムの音声散布機能は実用レベルで安全性に資するワンマン化に必要な機能として評価された。
- (4) 凍結防止剤散布支援システムの散布精度について検証を行った結果、事前に設定した散布位置と概ね (82%) 一致した。

今後、現在のサービスレベルを維持しつつ、人手不足等の課題を解決するため、現場の感覚に合わせて改良し普及を図り、ワンマン化でも安全で確実な散布作業を可能とし、担い手不足解消への貢献を目指す所存である。

参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所：IT を用いた凍結防止剤散布作業の効率化に関する技術資料，国土技術政策総合研究所資料，No.342，106p，2006 年 10 月
<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryu/tnn/tnn0342pdf/ks0342.pdf> (2022 年 10 月確認)
- 2) 札幌市建設局雪対策室計画課：札幌市冬のみちづくりプラン 2018，pp.21-36，2018 年 12 月
<https://www.city.sapporo.jp/kensetsu/yuki/keikaku/documents/03genjoutokadai.pdf> (2022 年 10 月確認)
- 3) 松井聖浩：除雪機械の 1 人乗り化について，一般社団法人日本建設機械施工協会北海道支部だより，No.121，pp.6-8，2021 年 4 月
https://www.jcmahs.jp/files/news/news_121.pdf (2022 年 10 月確認)
- 4) 大廣智則，高倉清，桜庭拓也，花塚泰史，萩原亨：自動路面状態判別システムを活用したスマート凍結防止剤散布システムの開発，交通工学論文集，第 5 巻，第 4 号（特集号 B），pp.B_7-B_15，2019 年 4 月。
- 5) Schlegel Robert E. : Driver Mental Workload, Automotive Ergonomics, pp.359-382, London & Washington D.C. 1993.
- 6) Hart, S. G. and Staveland L.E. : Development of NASA - TLX (Task Load Index): Results and theoretical research, Human Mental Workload, Elsevier Science Publishers B.V. (North Holland, Amsterdam), pp.139-183, 1988.
- 7) 国土交通省北海道開発局札幌開発建設部：“凍結路面対策”
https://www.hkd.mlit.go.jp/sp/douro_keikaku/kuhh400000adla.html (2022 年 10 月確認)
- 8) 梅木弼弥，谷津臣則，在田尚宏：除雪現場の省力化による生産性・安全性の向上に関する取組，第 65 回(2021 年度)北海道開発技術研究発表会論文集，防 22 (道)，2022 年 2 月。