

凍結防止剤散布支援システムの開発

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 ○大廣 智則
北海道開発局 室蘭開発建設部 道路整備保全課 金子 雅之
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 齊田 光

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や実道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、支援情報だけでは無く散布の自動化まで組合せることが有効な手段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自動散布システムを開発した。

キーワード：冬期道路管理、ワンマン化、自動散布、凍結防止剤

1. はじめに

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。これまで散布作業は、運転手と助手席のオペレータの2人乗車で作業が行われている。現在、これら作業に従事している経験豊富なオペレータ（以降、熟練オペレータ）の高齢化が進んでいる。また、経験の浅いオペレータの確保は、近年の少子化による人口減少に伴う人手不足等の課題により困難になってきている^{1),2)}。今後更に人手不足が進めば、運転手がオペレータを兼ねる作業形態（以降、ワンマン化）が想定され、作業の確実性と安全性の低下が懸念されている。他方、散布作業の自動化³⁾が海外では試行されているが、これらの技術は導入コストが高額等の理由もあり、普及が進んでいないのが現状である。

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・課題を示す。また、情報の提供のみによる課題の解決策として音声散布や自動散布の主観的評価法および客観的評価法の両面から評価した結果を示す。次に実道において実施した助手席に被験者が乗車した状態での自動散布の検証結果を示す。また、ワンマン化での実用性の検証結果を示す。最後に、令和3年度にこれまでの課題を解決するために開発した凍結防止剤自動散布システムや試行導入予定を示す。

2. 凍結防止剤散布支援システム

本研究で開発した凍結防止剤散布支援システム^{4),5)}、⁶⁾を図-1に示す。凍結防止剤散布支援システムは、散布指示支援ツール（以降、指示ツール）、散布判断支援ツール（以降、判断ツール）、散布操作支援ツール（以降、操作ツール）の三つの散布支援ツールで構成している。また、これらの散布支援ツールは、インターネットを介したWEBサーバにより、リアルタイムに連携している。指示ツールは、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を指定し、散布が必要な散布量や幅等の情報を散布量や幅等の情報を入力する。判断ツ

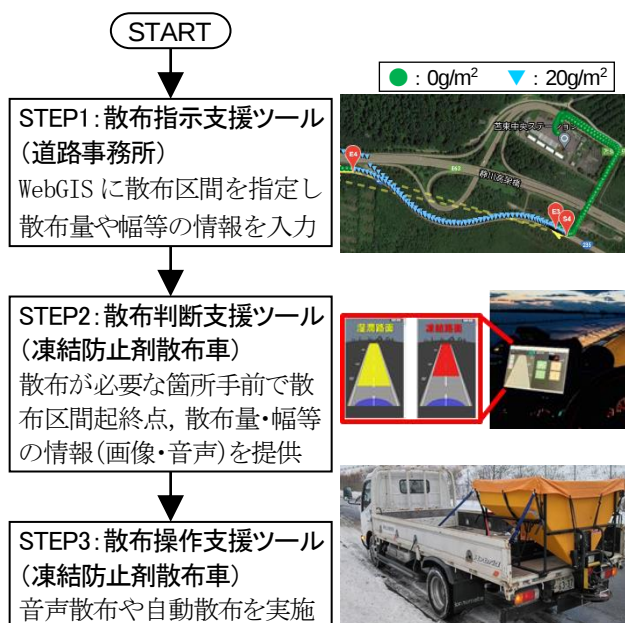


図-1 凍結防止剤散布支援システム

ルは、凍結防止剤散布車のオペレータに、散布が必要な箇所手前で散布区間の起終点、散布量・幅等の情報を画像と音声とで提供する。操作ツールは、凍結防止剤散布車に制御信号を送り、信号変換器を介して音声散布や自動散布を実施する。

3. 検証方法：メンタルワークロード(MW)

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⁷⁾。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。

MWの評価は、主観的評価法および客観的評価法の両面からオペレータのMWを求めた。主観的評価法には、NASA-TLX[®]を用いた。NASA-TLXは宇宙飛行士の主観的メンタルワークロード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、主観的メンタルワークロードの値として評価した。客観的評価法は、認知距離、注視率、的中率、的確性を求めた。

4. 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検証を実施した。苫小牧寒地試験道路は、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。積雪寒冷地域での走行試験を行う試験道路である。

4.1 凍結防止剤散布に係る支援情報提供の効果

（1）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-2に示すように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2区間敷設した。凍結防止剤の散布条件は、乾燥は散布無し、湿潤は20g/m²散布、凍結は30g/m²である。試験方法は、支援が無い場合、図-3(a)に示すように画像による支援情報提供、図-3(b)に示すように音声による支援情報提供、画像と音声を組合せた支援情報提供を行い、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；散布無し、湿潤；20g/m²、凍結；30g/m²
- ・試験方法：①支援なし、②音声のみ、③画像のみ、④音声+画像

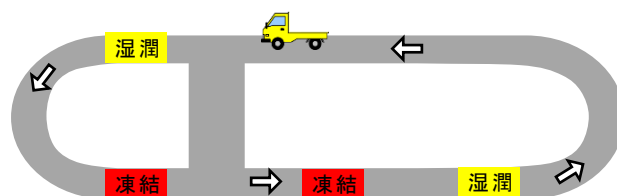


図-2 路面条件

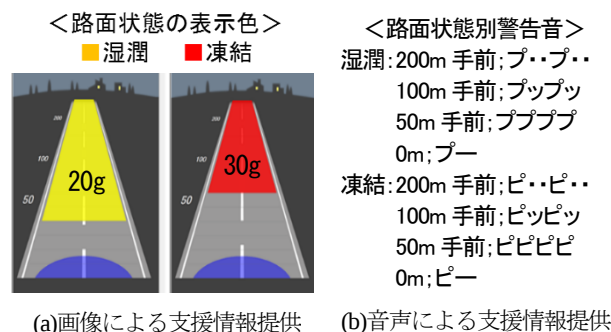


図-3 支援情報提供方法

（2）主観的MWの結果

図-4に主観的MWの結果を示す。縦軸の値は値が小さい程、心理的負荷が小さいことを示している。図-4より経験の有無に関わらず情報提供する方が心理的負荷が小さく、音声と画像を組合せて情報提供するのが最も心理的負荷が小さいという結果が得られた。

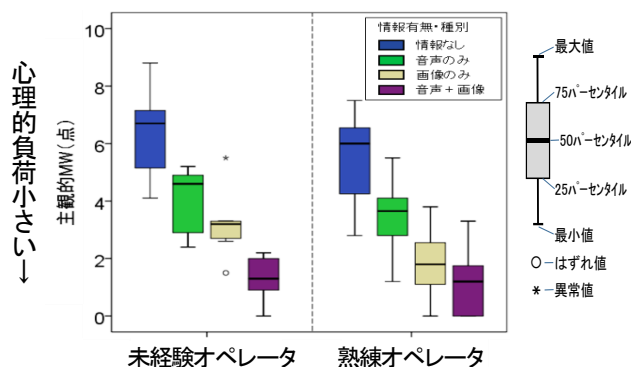


図-4 主観的MWの結果

（3）認知距離

図-5に認知距離を示す。これは、湿潤や凍結の路面を事前に認知した距離を示している。図-5より経験の有無に関わらず情報提供する方が手前から散布箇所を認知することができ、音声と画像を組合せて情報提供するのがより手前から認知可能になるという結果が得られた。

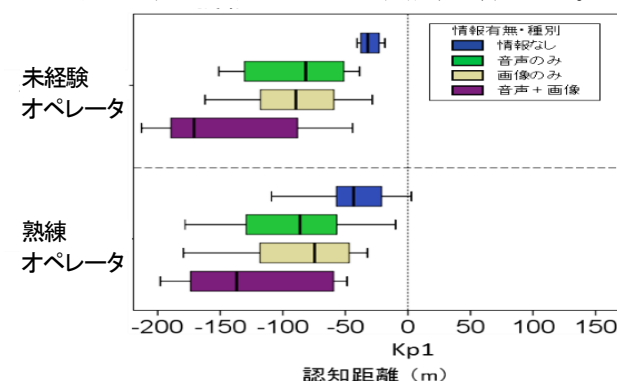


図-5 認知距離

(3) 支援情報提供のみによる課題

4.1(1)と同様の検証方法で、図-6(a)に示すようにアイトラッキングで凍結防止剤散布作業中オペレータはどこを見ているのか、図-6(b)に示す、道路&背景、散布制御装置、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-7に注視率を示す。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-7より経験の有無に関わらず情報提供によって、道路と背景の注視率が低下していることが確認できる。この結果から、支援情報提供のみでは、安全面に課題があると考えられる。



図-6 注視率の検証方法

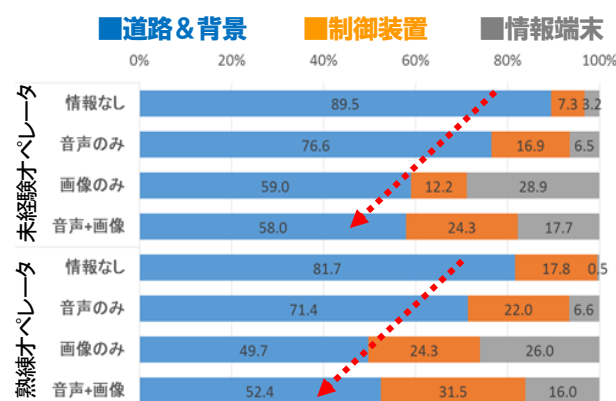


図-7 注視率

4.2 音声散布や自動散布の効果

(1) 検証方法

被験者は建設作業員8名である。路面条件は、図-8に示すように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、乾燥は散布無し、湿潤は20g/m²散布、凍結は30g/m²である。試験方法は、支援が無い場合、画像と音声を組合せた支援情報提供、音声散布(支援情報有り)、自動散布(支援情報有りで音声散布も可能な状態)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：建設作業員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；散布無し、湿潤；20g/m²、凍結；30g/m²
- ・試験方法：①支援なし、②支援情報、③音声散布(支援情報有り)、④自動散布(支援情報有りで音声散布も可能な状態)

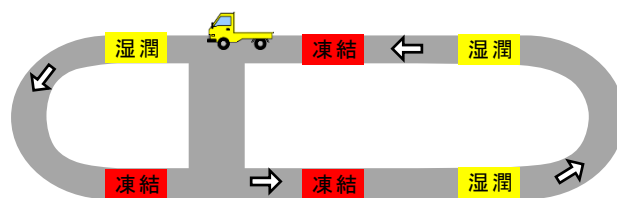


図-8 路面条件

(2) 主観的MWの結果

図-9に音声散布や自動散布の主観的MWの結果を示す。支援なしは4つの試験条件の中で最も心理的負荷が大きかった。音声散布は、情報のみよりも心理的負荷が小さく、自動散布が最も心理的負荷が小さいという結果が得られた。

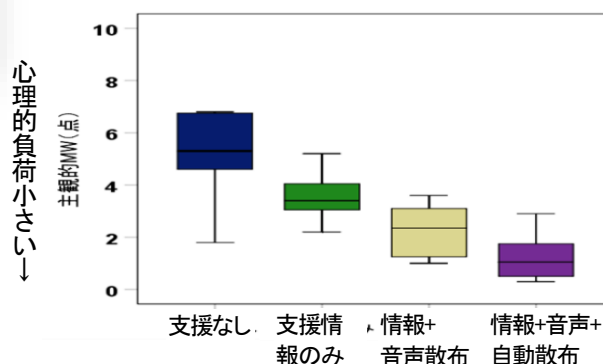


図-9 音声散布や自動散布の主観的MWの結果

(3) 的中率

図-10に的中率を示す。支援なしの的中率は41%であり、最も低い結果を示した。また、情報のみの的中率は88%であった。音声散布の的中率は97%と一部でミスがあった。一方、自動散布は決められた箇所に決められた量を確実に散布できているという結果が得られた。

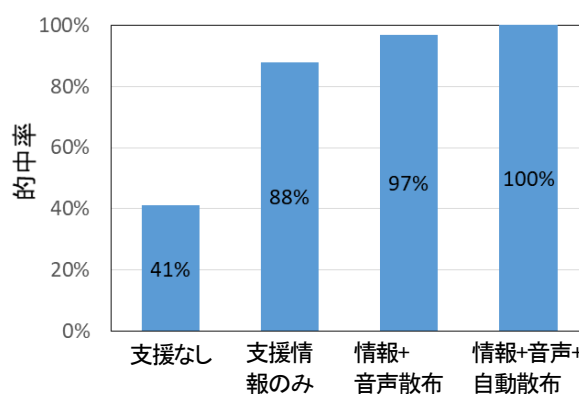


図-10 的中率

(4) 注視率

図-11に注視率を示す。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。

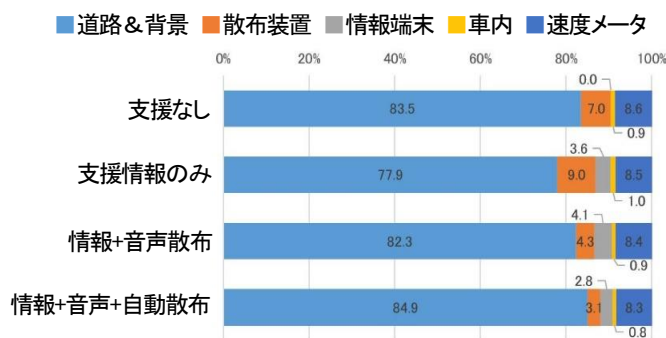


図-11 注視率

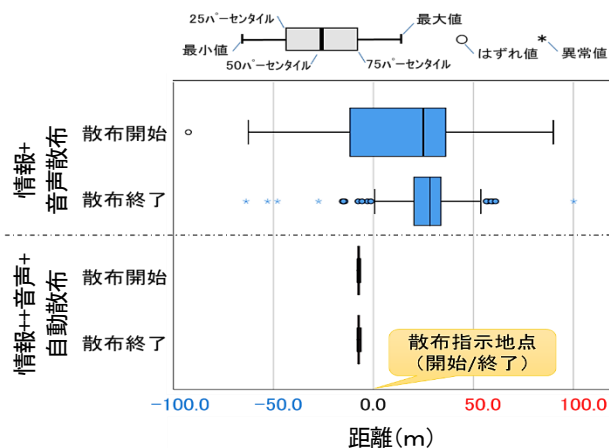


図-12 的性の検証結果

5. 実道での検証

5.1 被験者が助手席に乗りし自動散布の検証

(1) 検証方法

助手席に実験補助員が同乗し、被験者への指示や安全確認の補助を行った。被験者は運転経験が平均30年と熟練のドライバーであり、凍結防止剤散布経験の無い建設作業員8名である。検証箇所は、国土交通省北海道開発局（室蘭開発建設部苫小牧道路事務所）が所管する一般国道235号の約11km区間（KP5.0～KP16.0の往復区間）とした。凍結防止剤の散布条件は、①交差点100m手前から交差点終了まで（散布量30g/m²）、②カーブ開始50m手前からカーブ終了まで（散布量20g/m²）、③橋梁50m手前から橋梁終了地点まで（散布量20g/m²）である。試験方法は、音声散布（支援情報有り）と自動散布（支援情報有り）で音声散布も可能な状態で凍結防止剤散布作業を実施した。散布すべき地点や散布を終了すべき地点と実際に散布・終了した地点の距離を求めた的確性の検証を行った。検証方法を以下に要約する。

- ・被験者：建設作業員8名（運転経験の平均年数：30年）
- ・検証箇所：国道235号 KP5.0～KP16.0 往復区間
- ・散布条件：①交差点100m手前から交差点終了まで（散布量30g/m²）、②カーブ開始50m手前からカーブ終了まで（散布量20g/m²）、③橋梁50m手前から橋梁終了地点まで（散布量20g/m²）
- ・試験方法：①音声散布（支援情報有り）、②自動散布（支援情報有り）で音声散布も可能な状態

(2) 検証結果

図-12に的確性の検証結果を示す。横軸は0mが散布位置、マイナスが手前からの散布、プラスが散布位置を過ぎてからの散布を示している。図-12より、音声散布は、平均距離差が散布開始で15.5m、散布終了で33.4mと散布位置を過ぎて散布しており、バラツキが生じていることが確認できる。一方、自動散布は、平均距離差は散布開始・終了ともに-7.3mとなり、散布の遅れが無くバラツキが小さい。散布開始・終了地点が散布指示地点より約7m

手前となった理由は、地表面に落下した凍結防止剤は、車両の風圧で進行方向に移動するため、少し手前から散布する必要があることを考慮したシステム設定である。このことで、散布が必要な個所に必要な量を的確に散布できている。

5.2 ワンマン化での自動散布の検証

(1) 検証方法

ワンマン化（運転手がオペレータを兼ねる作業形態）にて検証を行った。被験者は凍結防止剤散布経験が3年の建設作業員1名である。検証箇所は、一般国道235号の約5km区間（KP1.7～KP6.6の往復区間）とした。凍結防止剤の散布条件は、①維持作業指示責任者が散布区間、散布量、散布幅等の散布条件を指示ツールに入力、②建設作業員が判断・操作ツールを用いて散布である。試験方法は、自動散布（支援情報有り）で音声散布も可能な状態で凍結防止剤散布作業を実施した。散布すべき地点や散布を終了すべき地点と実際に散布・終了した地点の距離を求めた的確性の検証を行った。検証方法を以下に要約する。

- ・被験者：建設作業員1名（散布作業経験年数：3年）
- ・検証箇所：国道235号 KP1.7～KP6.6 往復区間
- ・散布条件：①維持作業指示責任者が散布区間、散布量、散布幅等の散布条件を指示ツールに入力、②建設作業員が判断・操作ツールを用いて散布
- ・試験方法：自動散布（支援情報有り）で音声散布も可能な状態

(2) 検証結果

写真-1に検証状況を、図-13に的確性の検証結果を示す。令和2年度における自動散布の平均距離差は、散布開始で-7.3m、散布終了で-8.1mと令和元年度の検証結果とほぼ同様であった。標準偏差は、散布開始で1.2m、散布終了で1.0mと令和元年度と比べると0.6～0.8m大きくなっているが、誤差の範囲内であり、平成30年度と比べると小さい。自動散布の散布開始・終了地点が散布指示地点より



写真-1 検証状況(国道におけるワンマン化での自動散布)

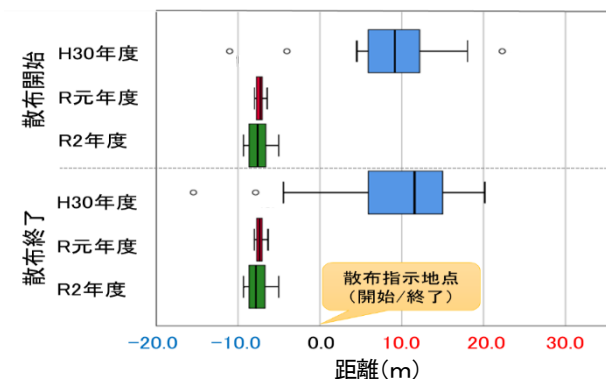


図-13 的確性の検証結果(自動散布の年度別の距離)

り7～8m手前となっているのは、前述した通りである。ワンマン化での自動散布の検証結果においても散布が必要な個所に必要な量を的確に散布できている。

(3) ヒアリング結果

検証期間中および終了後、凍結防止剤散布支援システムを利用したオペレータを対象に当該システムの課題や実用性についてヒアリングを行った。

複数の機能(手動散布・音声散布・自動散布)を同時に使用した場合、車載タブレットPCが応答しなくなったことに対する指摘があった。音声散布は、散布量を設定する命令に対する誤認が多かったとの指摘があった。また、本検証に用いた車載式凍結防止剤散布装置は、最大積載容量が0.5m³と小さく散布延長が短いため、実用性に問題があるとの指摘があった。

一方、自動散布による散布作業は的確かつ精度良く実施されているとの回答を得た。

6. 令和3年度の改良状況および試行導入予定

6.1 令和3年度の改良状況： 凍結防止剤自動散布システムの開発

これまでAIS3は、写真-1に示すように凍結防止剤散布装置(簡易散布装置)をベースに開発が進められてきた。簡易散布装置が使われているのは、北海道開発局の中でごく一部であり、本運用の課題となっていた。

凍結防止剤散布車や除雪トラック(散布装置付き)で自動散布を実施するには、散布車メーカーと通信仕様を細

かく取り決める必要がある。また、車両の振動に耐えられる筐体の設計や車両ノイズの問題を解決するGPS(GNSS)も必要となる。システムは自動起動・自動終了のオートマチックが必要である。

令和3年度、これら問題点を解決すべく開発を行った。散布車メーカーとの通信仕様と取り決め、凍結防止剤散布装置のほか、実際の散布作業に使用している2～10m³の凍結防止剤散布車や除雪トラック(散布装置付き)にも対応可能な凍結防止剤自動散布システムを開発した。そして、写真-2に示す室蘭開発建設部苫小牧道路事務所が所有する除雪トラック(散布装置付き)に搭載した。図-14に除雪トラック(散布装置付き)への搭載状況を示す。制御装置を新たに開発し、GPSや通信装置等を収納した。制御装置は、電源、散布車操作卓、タッチパネル、マイクと接続している。操作は、タッチパネルもしくはマイクで行うため、散布中に散布車操作卓を操作することなく作業を実施することが可能である。

写真-3に示すようにタッチパネルは、散布車操作卓の横に設置しているため運転視野の妨げにならない。自動散布を実施する場合、散布前に散布パターンと自動散布のボタンを押すだけである。散布中に条件を変更するときや自動散布で設定した条件以外の散布を実施するときは、写真-4に示すようにマイクで操作が可能のため、道路&背景を視認しながら設定変更ができる。



写真-2 凍結防止剤自動散布システムを搭載した除雪トラック(散布装置付き)

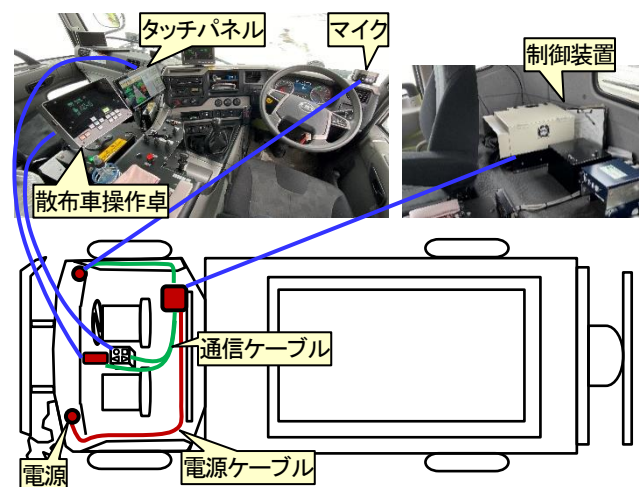


図-14 除雪トラック(散布装置付き)への凍結防止剤自動散布システムの搭載状況



写真-3 タッチパネル



写真-4 マイク

6.2 試行導入予定

北海道開発局では、運転手の死角にカメラを配置する等ワンマン化の試行が実施されている。そこで令和3年度、ワンマン化へ向けた検証のため、8開発建設部（札幌、小樽、旭川、室蘭、釧路、帯広、網走、留萌）各1台、凍結防止剤散布車もしくは除雪トラック（散布装置付き）に当該システムの試行導入が予定され、令和4年1月から順次、試行運用を開始している。

6.3 検証計画

試行導入では、沿道条件、気象・路面状況、散布剤（材）の種類に応じた制御等、機能的な検証を計画した。また、過年度と同様に的確性を実測する等の性能的な検証、システム稼働率を求める等のシステムの信頼性の検証、その他にユーザビリティテストやセキュリティテストを計画している。

7. まとめ

本研究で得られた成果を以下にまとめる。

- ・苫小牧寒地試験道路において、オペレータ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視線挙動の変化について調べ、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を示した。
- ・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を示唆した。
- ・苫小牧寒地試験道路において、散布作業支援の有無・種別（支援なし、情報提供（音声+画像）のみ、情報提供+音声散布、情報提供+音声散布+自動散布）による運転中のオペレータの心理状態および視線挙動の変化について調べ、情報提供+音声散布+自動散布の使用により、オペレータの主観的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示した。

- ・凍結防止剤散布支援システムを構築し、実道において助手席に被験者が乗車した実験を行い、凍結防止剤散布支援システムによる散布は、散布が必要な個所に必要な量を的確に散布できており、実用上問題が無いことを確認した。
- ・実道においてワンマン化での凍結防止剤散布支援システムの実用性の検証においても同様の結果を得た。また、検証期間中および終了後のオペレータへのヒアリングにより、自動散布による散布作業は的確かつ精度良く実施されているとのヒアリング結果を得た。
- ・これまでの課題を整理し、凍結防止剤散布装置のほか、実際の散布作業に使用している2～10m³の散布車や除雪トラック（散布装置付き）にも対応可能な凍結防止剤自動散布システムを開発した。そして、8開発建設部各1台、散布車もしくは除雪トラック（散布装置付き）に当該システムの試行導入が予定された。

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、ワンマン化でも安全で確実な散布作業が可能な自動散布システムを確立し、実用を目指す所存である。

参考文献

- 1) 国土交通省：冬期道路交通の確保のあり方に関する検討委員会提言，持続的な冬期道路交通確保をめざして～連携と協働～，pp. 25-26，平成 25 年 5 月。
<http://www.mlit.go.jp/common/000997537.pdf>，（令和 4 年 1 月確認）
- 2) 経済産業省：2050 年までの経済社会の構造変化と政策課題について，平成 30 年 9 月。
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/2050_keizai/pdf/001_04_00.pdf，（令和 4 年 1 月確認）。
- 3) Thompson Gregory and Thompson Todd: Clear Roads - Developing a Totally Automated Spreading System, Final Report, February 2014, http://clearroads.org/wp-content/uploads/dlm_uploads/11-03-Totally-automated-spreader_final_report.pdf，（令和 4 年 1 月確認）。
- 4) 徳永ロベルト，佐藤賢治，高橋尚人，石田樹：凍結防止剤散布におけるオペレータの現地作業判断支援に関する研究，寒地土木研究所月報，No. 767，pp. 2-10，平成 29 年 4 月。
- 5) 徳永ロベルト，佐藤賢治：凍結防止剤散布作業時におけるオペレータの注視点に関する研究，寒地土木研究所月報，No. 783，pp. 8-16，平成 31 年 8 月。
- 6) 徳永ロベルト，佐藤賢治，齊田光，星卓見，佐藤昌哉：凍結防止剤散布支援技術による散布作業の負担軽減および的確性について，第 32 回ふゆトピア研究発表会，pp. 209-214，令和 2 年 1 月。
- 7) Schlegel Robert E.: Driver Mental Workload, Automotive Ergonomics, pp. 359-382, London & Washington D.C. 1993.
- 8) 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.