

16.2 効率的な冬期路面管理のための複合的路面処理技術に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

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

研究担当者：石田樹、木村孝司、大槻敏行、高橋尚人、丸山記美雄、徳永ロベルト、安倍隆二、住田則行、佐藤賢治、中島知幸、藤本明宏、磯田卓也、田中俊輔、幸田勝、三浦豪

【要旨】

昨今の厳しい財政事情の中、道路維持管理費が削減され、冬期路面管理についても一層の効率化が求められている。凍結防止剤等についてもより適正な散布が求められているが、凍結防止剤の散布は舗装の種類にかかわらず一律に行われているのが現状である。より効果的・効率的に凍結路面对策を行うためには、舗装の種類・特性に応じた凍結防止剤散布技術を確立する他、凍結防止剤散布、舗装等の個別技術による凍結路面对策に限らず、凍結防止剤散布・舗装対策・散布機械改良等による複合的な凍結路面処理技術の開発が喫緊の課題である。

本研究では、より効果的・効率的な凍結路面对策の実施に資するため、舗装の種類・特性に応じた凍結防止剤の散布技術を確立するとともに、散布剤、散布技術および散布機械の改良による複合的な凍結路面処理技術の開発に取り組んだ。

キーワード：凍結路面对策、舗装種類、散布剤、散布機械

1. はじめに

スパイクタイヤ使用規制以降、積雪寒冷地における路面管理の重要性は高まり、凍結防止剤の散布、凍結抑制舗装、散布機械の開発等が進められた。しかしながら、依然として冬型事故の約 9 割をスリップ事故が占めており、冬期の道路交通性能は低いままである。

これまで、凍結路面对策に関する試験研究は、塩化物を主体とした凍結防止剤の散布試験、また、機能性 SMA 等の凍結抑制舗装の開発や舗装としての効果の検証がそれぞれ行われてきた。しかしながら、凍結防止剤の散布は、舗装種類にかかわらず一律に行われており、舗装種類に適した凍結防止剤散布技術は未開発である。また、防滑材と加熱水の湿式散布（防滑材加熱水混合散布）などに対応する散布機械の改良は未着手であり、散布剤・舗装・散布機械の改良等を組み合わせた路面処理技術も未開発である。

本研究では、舗装の種類・特性に応じた凍結防止剤の散布技術、塩化物以外の散布剤や散布技術の改良、および散布機械の改良も合わせた凍結路面処理技術を開発することで、より効果的・効率的な凍結路面对策の実施に

資する技術開発に取り組むものである。

2. 研究実施内容

本研究では、より効果的・効率的な凍結路面对策の実現に資するため、以下の研究に取り組んだ。

- ① 舗装種類に合致した効果的・効率的な凍結防止剤等の散布技術の検討
- ② 散布剤や散布技術の改良、散布機械の改良も合わせた凍結路面処理技術の検討

3. 舗装種類に合致した効果的・効率的な凍結防止剤等の散布技術の提案

3.1 舗装種類毎の凍結防止剤散布実態及び路面状態の把握

3.1.1 凍結防止剤散布

舗装種類毎の凍結防止剤散布実態把握のケーススタディとして、一般国道 230 号の排水性舗装が多い区間及び密粒度舗装が多い区間の凍結防止剤散布実態について調べた。その結果、気象条件や地形条件（例：標高）は異なるが、当該路線における凍結防止剤散布量は、粗面

系舗装が多い区間（札幌都心側）より密粒度舗装区間（中山峠側）の方が多岐分かった。

3.1.2 凍結路面のすべり抵抗

実道を想定した環境下で室内試験を行うことのできる北海学園大学所有の室内凍結路面走行試験装置（写真1）を用いて、各舗装の凍結路面時におけるすべり抵抗を確認した。まず、試験室内に設置された各舗装に規定した方法で散水を行い、凍結路面を作製した。その後、制動試験ですべり摩擦係数を測定した。表1に試験条件を示す。試験温度は-3°Cに設定し、試験開始時に室内温度と路面温度がほぼ同値で安定するまで養生して、試験を行った1回の散水量は0.5l/m²とし、散水後に30分間養生（繰返し走行0回）を行った後に路面露出率の測定と制動試験を行い、さらに散水という行程を5回繰り返して行った。

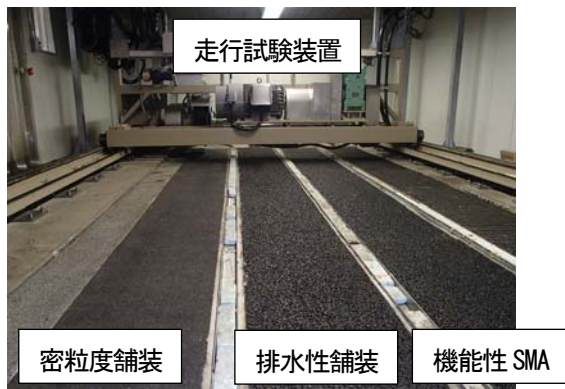


写真1 室内凍結路面走行試験装置（北海学園大学）

表1 凍結路面における室内走行試験の概要

| | |
|-------------------|--|
| 試験舗装：MPD (mm) | 密粒度舗装：0.69 排水性舗装：1.42 機能性 SMA：1.98 |
| 試験温度 | -3°C |
| 1回の散水量 | 0.5 l/m ² |
| 試験回数 (散水、制動試験) | 5回 (総散水量 2.5 l/m ²) |
| 走行速度 | 制動試験 10 km/h |
| 走行輪荷重 | 5 kN (接地圧 0.196 MPa) |

図1に試験結果を示す。すべての舗装で、散水回数の増加とともに、すべり摩擦係数および路面露出率の減少が確認された。すべり抵抗に着目すると、密粒度舗装はすべての条件ですべり摩擦係数が0.1程度であり、路面の露出もほぼ見られなかった。一方、機能性 SMA およ

び排水性舗装は、-3°Cでは4回散水時まで密粒度舗装に比べて高いすべり摩擦係数となった。したがって、ブラックアイスのような路面上の氷膜が比較的薄い路面状態において、機能性 SMA および排水性舗装は、すべり抵抗を確保することができると考えられる

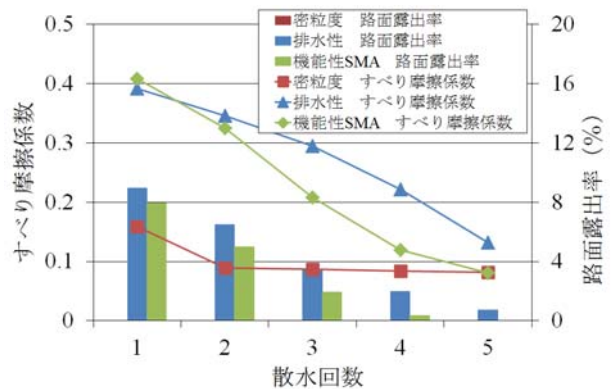


図1 凍結路面における室内走行試験の結果

3.1.3 路面すべり抵抗の出現傾向

寒地土木研究所では、冬期路面すべりモニタリング調査を行っている。ここでは、調査で得られた結果を基に、粗面系舗装（機能性 SMA および排水性舗装）と密粒度舗装区間のすべり抵抗特性を検証した。

調査は、一般国道230号札幌市内で、1日2往復（除雪・凍結防止剤散布などの作業前を想定したAM3時と作業後を想定した8時30分、札幌都市部発）行った。路面すべり抵抗値の測定には、写真2に示す連続すべり抵抗値測定装置（CFT: Continuous Friction Tester）により測定される路面すべり抵抗値を使用した。



写真2 連続路面すべり抵抗値測定装置（CFT）

本調査では、機能性 SMA、排水性舗装、密粒度舗装が混在する、北1条西11丁目（KP1.0）から定山溪（KP29.6）までの区間（ロードヒーティング区間およびトンネル区間は除く）の2011年度および2012年度の調査結果を対

象とした。調査当時、この区間は、機能性 SMA と排水性舗装を併せた延長が L=14,243m、密粒度舗装の延長が L=14,457m であり、排水性舗装は概ね 2002 年から 2003 年にかけて施工されている。

調査は、2012 年 1 月 5 日から 2 月 29 日、および 2012 年 12 月 3 日から 2013 年 3 月 1 日までの、計 95 日行った。図 2 に調査区間を示す。分析では、路面すべり抵抗値である路面すべり抵抗値データ、測定車両に取り付けられた赤外線放射温度計で計測した路面温度、気象庁札幌管区気象台の降雪データ、測定車両に搭乗した観測員が目視判別した路面状態（乾燥、湿潤、シャーベット、圧雪および凍結）を用いた。



図 2 冬期路面モニタリング調査対象区間

まず、調査日毎に密粒度舗装区間と機能性 SMA および排水性舗装を併せた区間（以下、粗面系舗装区間）の路面すべり抵抗値を確認した。その結果、粗面系舗装区間が密粒度舗装区間に比べて高い路面すべり抵抗値を示した日と、示さなかった日が見られた。そこで、路面すべり抵抗値の平均値が走行上安全とされる 60^{l)}を下回った日を、粗面系舗装区間の路面すべり抵抗値が密粒度舗装区間より 5 以上大きい日（粗面系>密粒度）、路面すべり抵抗値の差が±5 未満の日（粗面系=密粒度）、粗面系舗装区間の路面すべり抵抗値が密粒度舗装区間より 5 以上小さくなった日（粗面系<密粒度）の 3 つに分類した。なお、本検討では、粗面系=密粒度を、路面すべり抵抗値で±5（10 の差）の範囲としたが、苫小牧寒地試験道路で行なわれた試験より、路面すべり抵抗値の値で 10 の差は、すべり摩擦係数（バス型すべり測定車による測定）では約 0.05 である^{l)}。また、路面すべり抵抗値の平均値が 60 以下だった日は、全調査日 95 日中 69 日であった。

表 2 に、各舗装区間の路面すべり抵抗値を日別に比較した表を示す。路面すべり抵抗値が 60 以上になった日は、

2 ヶ年度合計で 27.4%と少なく、調査区間は、冬期路面管理において厳しい環境であることが示唆される。路面すべり抵抗値が 60 以下になった日の各舗装区間を比較すると、粗面系>密粒度と粗面系=密粒度の日が 70%近くを占め、粗面系<密粒度になった日は 2011 年度で 1 日（2.6%）、2012 年度で 6 日（8.9%）と少なかった。したがって、粗面系舗装による冬期路面対策としての効果は認められると考えられる。

表 2 各舗装区間の調査日別路面すべり抵抗値

| 年度 | 路面すべり抵抗値 >60 | 路面すべり抵抗値 ≤60 | | |
|------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|
| | | 粗>密 | 粗=密 | 粗<密 |
| 2011 | 14 日 (35.9%) | 13 日 (33.3%) | 11 日 (28.2%) | 1 日 (2.6%) |
| 2012 | 12 日 (21.4%) | 8 日 (14.3%) | 31 日 (55.4%) | 5 日 (8.9%) |
| 合計 | 26 日 (27.4%) | 21 日 (22.1%) | 42 日 (44.2%) | 6 日 (6.3%) |

※ () 内は出現率

次に、路面すべり抵抗値と降雪量の関係を確認した。

図 3 に結果を示す。

降雪量が 5cm 以上になると、粗面系>密粒度になった日の割合は、20%以下と低くなった。したがって、本調査対象区間の環境下では、降雪量 5cm 以上になると、雪水に路面が覆われ、粗面系舗装の効果が現れにくくなり、密粒度舗装とほぼ同等の路面状態になることが考えられる。しかし、降雪量 10cm 以上では、粗面系>密粒度の出現割合が若干増加している。国土交通省北海道開発局では、5cm~10cm 程度の降雪量を目安として、気象条件、交通状況等を勘案し、新雪除雪を実施しているが、除雪管理と併せることで、粗面系舗装の効果が発現することも考えられる。

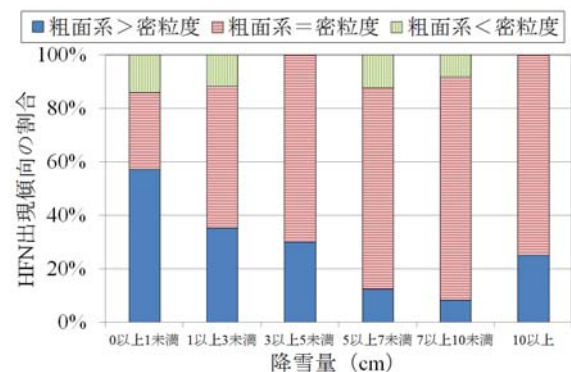


図 3 路面すべり抵抗値の出現傾向と降雪量の関係

次に、路面すべり抵抗値の出現傾向と路面状態の関係を検討した結果を図4に示す。

凍結路面時は、粗面系>密粒度の割合が約40%と高く、粗面系=密粒度を含めた割合は80%を超えており、凍結路面時の粗面系舗装の効果が認められる。それに比べて、シャーベット、圧雪路面では、粗面系>密粒度の路面状態の割合は20~30%程度まで低下している。したがって、路面上の雪水量が多い場合、粗面系舗装のきめ深さによる凍結抑制などの機能が発揮されにくいことが考えられる。なお、路面上の雪水量が多い場合でも、粗面系>密粒度と粗面系=密粒度を合わせた割合は90%程度であり、粗面系舗装の効果は認められる。

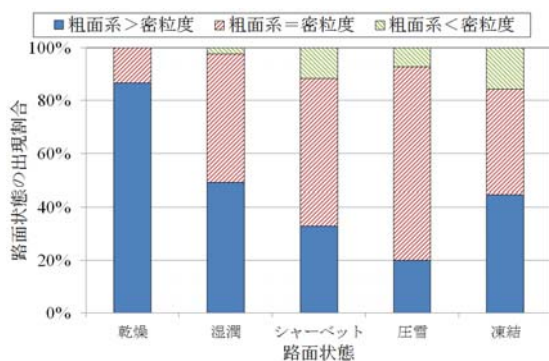


図4 路面すべり抵抗値の出現傾向と路面状態の関係

3.2 舗装種類毎の適切な散布技術の開発

3.2.1 散布効果の比較

(1) 防滑材散布

室内凍結路面走行試験装置を用いて、実道の車両走行を想定した室内走行試験を行った。すべり摩擦係数や路面上の防滑材残存状況を確認し、機能性SMAにおける防滑材散布効果を検証した。なお、排水性舗装は、空隙詰まりによる排水機能低下の懸念があることから、防滑材散布が望ましくないとされており、試験対象から除外した。

表3に室内走行試験の条件を示す。本試験では、凍結路面を作製した後、防滑材散布し、走行速度10km/hで行った制動試験によりすべり摩擦係数を測定した。また、同じく防滑材散布後に規定回数繰り返し走行を行い、防滑材の残存率を測定した。防滑材には7号砕石を用いた。

なお、前述のように排水性舗装は基本的に防滑材の散布が望ましくないため、試験対象は機能性SMA、比較舗装は密粒度舗装とした。試験温度は-8℃、路面状態は氷膜路面とし、防滑材は7号砕石150g/m²を均等に散布した。散布方法は湿式散布とした。

表3 室内走行試験（防滑材）の条件

| | | |
|----------------|--|--|
| 試験舗装 | 機能性SMA、密粒度舗装 | |
| 試験温度 | -8℃ | |
| 路面状態 | 氷膜路面（散水量1.0 l/m ² ） | |
| 氷膜厚 （全試験平均） | 機能性SMA（凸部）：0.84mm 密粒度舗装：0.87mm | |
| 防滑材 | 散布材 | 7号砕石 |
| | 散布量 | 繰り返し走行：150g/m ² 制動試験：0~400g/m ² |
| | 散布方法 | i) 乾式散布 ii) 湿式散布（水道水0~1℃、 質量比20%混合） |
| 走行速度 | 繰り返し走行：5km/h 制動試験：10km/h | |
| 走行輪荷重 | 5kN（接地圧0.196MPa程度） | |
| 使用タイヤ | 冬期すべり測定用標準タイヤ 165/80R-13 | |
| 測定項目 | i) 防滑材残存率（繰り返し走行0、50、 100、500、1000回後に測定） ii) すべり摩擦係数（制動試験） | |

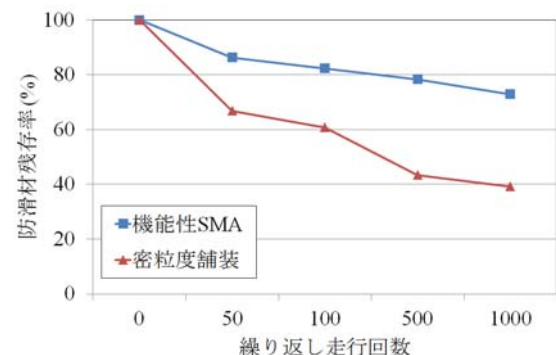


図5 繰り返し走行による防滑材残存率の変化

図5に防滑材残存率の測定結果を示す。機能性SMAは繰り返し走行50回で10%程度の飛散に留まり、1000回走行後も70%以上の防滑材が残存した。密粒度舗装は、50回走行で40%程度が飛散し、1000回走行後の残存率は40%程度となった。以上より、防滑材散布効果の発現および持続において、機能性SMAの粗いきめ深さによる影響が優位に働くと考えられる。

次に、路面上の防滑材量とすべり摩擦係数の関係を明らかにした。図6に試験結果を示す。

機能性SMAは、防滑材量の増加に伴いすべり摩擦係数も高くなり、防滑材量150g/m²ではすべり摩擦係数が0.25、400g/m²では0.4程度まで増加した。一方、密粒度舗装は、200g/m²までは、機能性SMAとほぼ同様にすべり摩擦係数が増加したが、その後すべり摩擦係数の増加

がほぼ見られず、400g/m²でもすべり摩擦係数は0.3以下だった。これは、機能性 SMA に生成された氷膜路面はきめ深さによる凹凸が残っており、防滑材が凹部に留まりやすいことから、タイヤによる引きずりの際にグリップしやすいと推測される。一方で密粒度舗装の路面上には平滑な氷膜が生成されたことにより、機能性 SMA よりも防滑材がグリップしにくいことが考えられる。したがって、機能性 SMA は粗いきめ深さの影響から、密粒度舗装に比べて、防滑材の散布量増加に伴う路面すべり抵抗値の向上が期待できる。

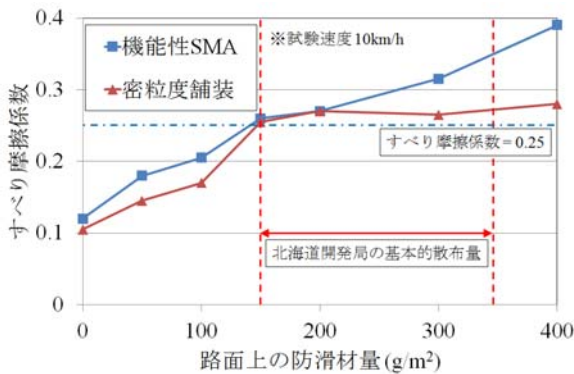


図6 防滑材量とすべり摩擦係数の関係

(2) 凍結防止剤散布

a) 室内走行試験

室内凍結路面走行試験装置を用いて、試験室内に設置された各舗装に氷板路面を作製した後、凍結防止剤を散布して走行試験を行い、各舗装における凍結防止剤散布効果を定量的に評価した。

表4に試験の概要を示す。凍結路面は、路面に2.0l/m²散水して氷板を作製した。凍結路面作製後に散布した凍結防止剤は塩化ナトリウムを使用し、散布量20g/m²で湿式散布（塩化ナトリウム+飽和塩化ナトリウム水溶液、質量比9:1）とした。走行車両を模擬した繰り返し走行は2000回まで行った。繰り返し走行終了後、路面露出率と、制動試験によるすべり摩擦係数の測定を行った。

図7に試験結果を示す。-3℃と-5℃時において、機能性 SMA および排水性舗装は、路面露出率、すべり摩擦係数ともに、密粒度舗装よりも高い値となった。

温度条件の違いに着目すると、全測定項目で温度の低下とともに路面露出率やすべり摩擦係数は低下した。特に、-3℃と-5℃を比較すると、路面露出率やすべり摩擦係数が大きく低下しており、-8℃において路面露出率は数%程度、すべり摩擦係数も0.1から0.2の範囲となって

表4 凍結防止剤散布室内走行試験の概要

| | |
|-----------------------|---------------------------------|
| 試験舗装 | 密粒度、排水性、機能性 SMA |
| 試験温度 | -3℃、-5℃、-8℃ |
| 路面状態 | 凍結路面 散水量：2.0l/m ² |
| 凍結防止剤 | 塩化ナトリウム 20g/m ² 湿式散布 |
| 試験項目 (2000回走行後に測定) | 路面露出率 |
| | すべり摩擦係数 (制動試験) |
| 走行速度 | 繰返し走行試験 5 km/h 制動試験 10 km/h |
| 走行輪荷重 | 5 kN (接地圧0.196 MPa 程度) |

いる。

このことから、温度条件に影響されるが、機能性 SMA や排水性舗装は、凍結防止剤散布による対策と複合的に組み合わせることにより、すべり摩擦係数の低下抑制および早期回復が可能になると考えられる。

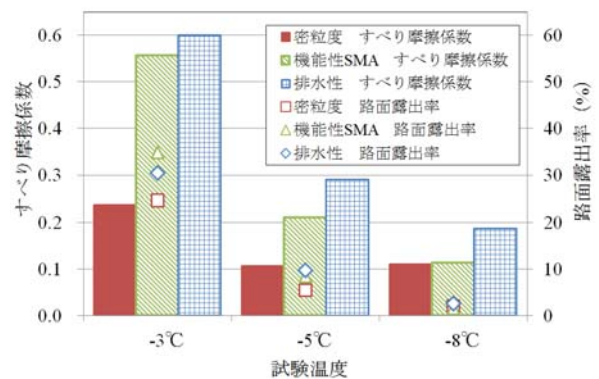


図7 室内走行試験の結果

b) 屋外走行試験

本試験は、苫小牧寒地試験道路の密粒度舗装、機能性 SMA、排水性舗装区間で行った。

表5に試験条件および測定項目を示す。各舗装区間で、散水車を用いて氷膜路面（密粒度舗装において簡易膜厚計による計測で氷膜厚1.0mm程度）を作製し、凍結防止剤を散布した。凍結防止剤は湿式散布（塩化ナトリウム+塩化カルシウム水溶液）で20g/m²散布した。その後、交通模擬車両（以下、ダミー車）を走行させた。測定項目は、路面露出率と連続すべり抵抗値測定装置（CFT）で測定した路面すべり抵抗値とし、凍結防止剤散布前、交通模擬車両（ダミー車）走行50~300台後に測定を行った。表6に試験日の気象条件を示す。

図8に試験結果を示す。全ての舗装で凍結防止剤散布

表5 試験条件と測定項目

| | |
|---------------|--|
| 試験舗装 | 密粒度舗装、排水性舗装 機能性 SMA |
| 舗装の仕様 | 最大粒径 13mm (全舗装) 空隙率 17% (排水性舗装) |
| 舗装のきめ深さ (MPD) | 密粒度舗装 0.68mm 排水性舗装 1.96mm 機能性 SMA 1.62mm |
| 測定日 | 2014年1月22日 |
| 試験の時間帯 | 夕方、路面温度が氷点下になった 時点で凍結路面作製開始 |
| 路面状態 | 氷膜路面 |
| 凍結防止剤 | NaCl 湿式散布 20g/m ² |
| 走行速度 | 40km/h |
| ダミー車走行台数 | 50、100、150、200、250、300 |
| 測定項目 | 路面露出率 路面すべり抵抗値 |

表6 1月22日の気象条件

| | | |
|------|------------------|------------------|
| 外気温 | -5.7°C → -12.1°C | |
| 路面温度 | 密粒度舗装 | -0.3°C → -12.0°C |
| | 機能性 SMA | -2.6°C → -13.4°C |
| | 排水性舗装 | -1.8°C → -9.8°C |
| 天候 | 晴れ | |

前の路面すべり抵抗値が20前後と低い値となった。しかし、機能性 SMA および排水性舗装は凍結防止剤散布後に大きく路面すべり抵抗値が上昇し、散布前より20以上高い値となった。

密粒度舗装は、凍結防止剤散布後に路面すべり抵抗値が約38まで上昇したものの、温度が低下した試験後半は逆に33に低下した。これは、凍結防止剤により融解した水が再凍結した可能性が考えられる。一方、排水性舗装は融解水が連続空隙から透水し、機能性 SMA は路面凹部に落ちるため、路面凸部の再凍結は見られず、路面すべり抵抗値も低下することはなかった。

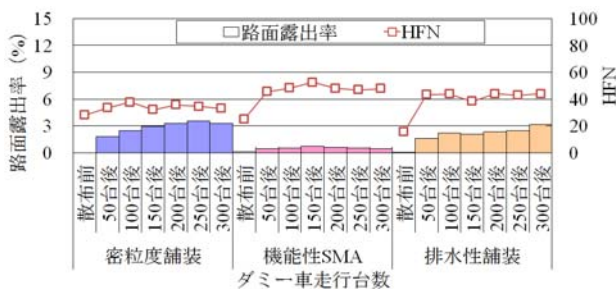


図8 屋外走行試験の結果

3.2.2 舗装種類を考慮した路面すべり推定法の構築

適切に凍結防止剤散布を実施するには気象条件、路面雪氷状態、舗装条件および交通条件を十分に考慮しなければならない。しかしながら、これらを考慮して凍結防止剤散布の量・タイミング・場所の決定を支援するための技術は未成熟である。本研究では、凍結防止剤散布の効率的な運用を図る上で、路面すべり摩擦係数（以下、 μ ）を指標に散布内容を決定する事が合理的と考え、凍結防止剤事後散布（ μ の改善を目的とした氷膜や圧雪路面への散布）後の μ を推定する手法（以下、路面すべり推定法）²⁾を構築した。また、路面すべり推定法を基に、適切な凍結防止剤散布量を計算し、凍結防止剤散布が不適切な場合には他の冬期路面管理作業を推奨する冬期路面改善シミュレータ:ウィリス (Winter Road Surface Improvement Simulator: WIRIS)³⁾を開発した。

(1) 路面すべり推定法

図9に従って路面すべり推定法の概略を説明する。

同図の上部に記した事後散布前の状態（以下、状態1）と同図の下部に記した事後散布後に十分に時間が経過して路面上の氷の融解と凍結防止剤の溶解が完了した平衡状態（以下、状態2）を考える。ここで、状態1における散水量 M_{w-in} (kg/m²)、路面温度 T (°C)、凍結防止剤の散布量 M_{ss-in} (kg/m²)、舗装の種類および時間交通量 Q_v (台/h) は入力条件とする。状態2の μ 、すなわち μ_2 は次の5つのステップで求められる。

i) 状態2における塩濃度 C (C_2) を T と凝固点曲線 (C と T の関係図) から求める。

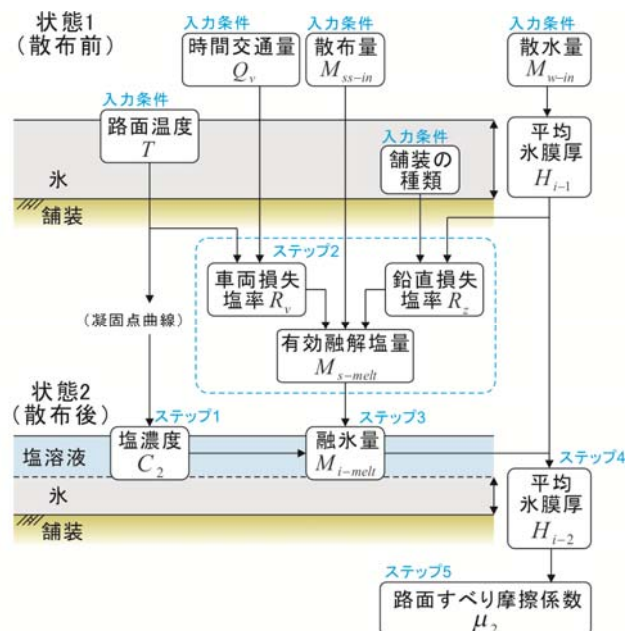


図9 路面すべり推定法の概念図²⁾

- ii) 道路上の凍結防止剤および道路勾配に伴う流出（表流損失塩率 R_s ）⁴⁾や通過車両に伴う飛散（車両損失塩率 R_v ）⁴⁾によって損失する。また、機能性SMA舗装・排水性舗装では凍結防止剤は舗装内部への損失（鉛直損失塩率 R_z ）⁵⁾が生じる。これらの損失を考慮するために、路面上の氷の融解に作用する凍結防止剤の質量（有効融解塩量 M_{s-melt} ）を求める。
- iii) M_{s-melt} および C_2 より事後散布に起因して発生する融氷量 M_{i-melt} を求め、 M_{i-melt} を氷密度で除して融氷厚 H_{i-melt} を求める。
- iv) 状態1の H_i 、 H_{i-1} から H_{i-melt} を引いて状態2の平均氷膜厚 H_i 、 H_{i2} を求める。
- v) μ - H_i 関係式⁶⁾より μ_2 を求める。

(2) 冬期路面改善シミュレータ WIRIS(ウィリス)

図10にWIRISの画面を示す。WIRISは同図左の入力画面と同図右の出力画面に分けられる。入力画面には、「I. 計算条件」と「II. 管理水準」があり、全ての項目の入力は必須である。入力の結果は、出力画面の「III. 計算結果」および「IV. 推奨対策」に反映される。また、推奨対策の横には検討事項の欄を設けており、さらに検討が必要な事項を表示する。

入力項目は、路面状態、路面温度、路面雪氷厚、凍結防止剤散布量、交通量、舗装の種類、 μ 水準および除雪水準からなる。計算例として、凍結路面、路面温度 -4°C 、雪氷厚 0.4mm 、密粒度舗装、交通量 100 台/h、 μ 水準 0.35 の結果を以下に記述する。この条件では、 μ - H_i 関係式より散布前の μ は 0.18 となる。散布後の雪氷厚は路面すべり推定法より 0.08m となり、散布後の μ は 0.38 となる。散布後の μ が μ 水準の 0.35 を上回ることから凍結防止剤散布が表示・推奨される。なお、 μ 水準の 0.35 を上回るために必要な散布量 27.0g/m^2 も併せて示される。

WIRISを冬期道路管理に活用することにより、従来までのパトロールやCCTVカメラによる主観的な判断に加えて、WIRISによって得られる客観的な情報（散布前後の μ や氷膜厚および最適な凍結防止剤散布量）を基に維持管理作業内容を決定する事が可能になる。また、散布車のオペレータの熟練度や主観に関係なく、誰であっても同じ作業になるような統一的な維持管理作業の実施が促進される。これにより、過剰散布や過少散布が減り、確実な冬期交通の安全性の確保と冬期道路管理費用の削減が期待できる。

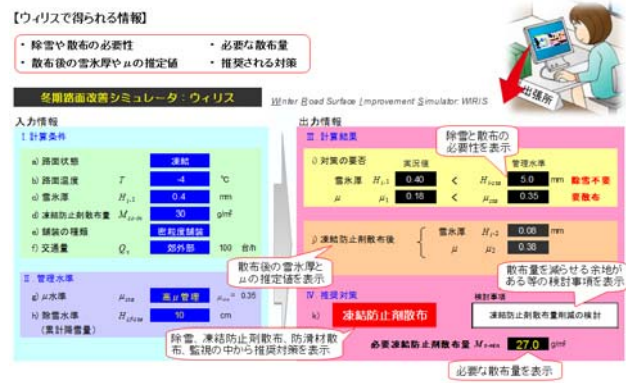


図10 冬期路面改善シミュレータWIRISの画面

4. 散布剤や散布技術の改良、散布機械の改良も合わせた凍結路面処理技術の提案

4.1 既往の研究および課題

4.1.1 海外事例

防滑材加熱水混合散布は、1997年からノルウェー公共道路庁が実施した「Winter Friction Project in Norway」によって試験が行われた⁷⁾ (写真3、表7)。この手法は、焼砂を乾式散布する従来の手法に比べ、路面すべり抵抗値の改善効果が高く、その散布効果の持続時間は10~20倍となり、防滑材の使用量が40~50%削減できる可能性がある」と報告されている。



写真3 ノルウェーにおける防滑材加熱水混合散布に対応した機械の一例

表7 ノルウェーにおける防滑材加熱水混合散布の主要仕様

| | |
|----------|---------------------|
| 防滑材の粒度 | 0~4mm |
| 加熱水の温度 | 90~95°C |
| 加熱水の混合割合 | 重量比30% |
| 散布量 | 200g/m ² |

4.1.2 国内事例

佐藤ら⁸⁾は、低温実験室において防滑材加熱水混合散布における焼砂と7号碎石の固着率(全散布重量に対する供試体に固着した散布重量の割合)の比較試験を実施した。結果は、焼砂より7号碎石が高い固着率を示した。

防滑材加熱水混合散布に関する研究はいくつかあるものの、その適切な散布条件(防滑材の量および加熱水の混合割合・温度)については研究の余地が残されている。また、車両通過による防滑材の路面残留・飛散特性および路面に残留する防滑材の量(防滑材残留量)と μ や路面すべり抵抗値の関係については明らかにされていない。

4.2 機械的改良による散布技術の検討

現在、日本において市販されている凍結防止剤散布車には、水を加熱する機構は装備されていない。

新たに散布機械を開発することは、導入経費が高額となり実導入に向けての支障となるため、既存の凍結防止剤散布車の改良による、防滑材加熱水混合散布方式について検討した。

4.2.1 散布機械の改良検討

散布機械の改良を行うに当たって、以下の条件を設定した。

- ① 国内で販売されている凍結防止剤散布車に対応可能であり、車検取得等の各種法令、法規を準拠した設計とする。
- ② 「防滑材加熱水混合散布」および「凍結防止剤+塩化水溶液の湿式散布」の散布手法を切り替え可能とする。
- ③ 加熱する対象は水とし、加熱温度は既往の基礎試験結果⁸⁾から40℃以上とする。

上記条件から、加熱水の作製に必要な熱量、加熱手法、搭載容積、配管系統などを検討し、加熱水混合散布の機構(以下、加熱水混合散布システム)を凍結防止剤散布車に搭載する方式とした(以下、試作機)。

4.2.2 防滑材加熱水混合散布に対応した試作機

試作機には、国土交通省北海道開発局で使用されている凍結防止剤散布車(4.0m³級)を用いた(写真4)。



写真4 防滑材加熱水混合散布に対応した試作機

試作機の加熱水混合散布システムは、図11に示すとおり、加熱機器2台と熱交換器1台などから構成される加熱ユニットを介して、水溶液タンクB内の水を循環させてタンク内の水を加熱する予熱方式とした。加熱機器と熱交換器間には不凍液を、水溶液タンクと熱交換器間には水を循環させ、熱交換器で放熱した不凍液は加熱機器へ、熱交換器で加熱された水是水溶液タンクへ循環する。

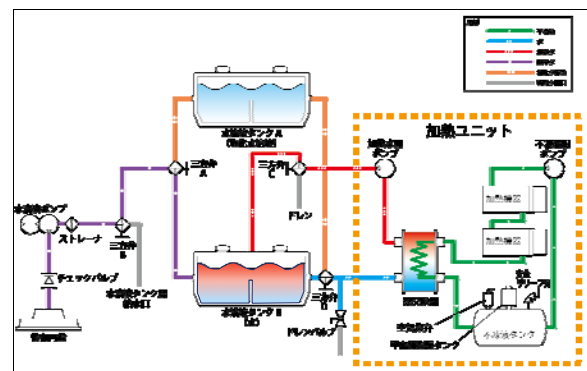


図11 加熱水混合散布システム系統図

加熱ユニットは、運転室と散布装置の間のスペースに搭載した(図12)。また、外気に露出し凍結しやすい水溶液ポンプ、ストレーナを含む経路の凍結対策として、保温ヒータを取り付けた(写真5)。なお、これらの電力は、既存の車両発電量では賅えないため、車両のオルタネータを大容量タイプに変更した。

また、運転室において、各経路の温度を確認しながら、加熱ユニットを操作することで、走行中も安定的な加熱水の作製ができるようにした。

防滑材加熱水混合散布作業終了後の凍結対策は、水溶液タンクから散布円盤間、および水溶液タンクから熱交換器間の経路の水抜き後、それら経路に塩化水溶液又は不凍液を注入することで完了する。

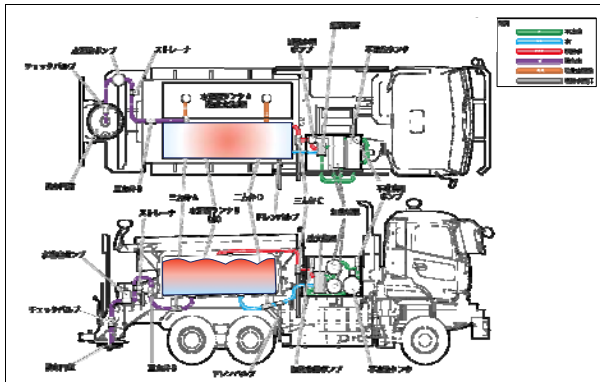


図 12 試作機の外観図



写真 5 保温ヒータ取り付け状況

4.3 散布剤や散布技術の改良による散布技術の検討

4.3.1 新たな凍結防止剤として糖蜜液の導入可能性検討

我が国では、凍結防止剤として一般的に塩化物を使用しているが、一層の散布コスト削減、環境負荷低減等の観点から、散布剤の改良や散布技術の改良についても検討が必要である。そこで文献調査を行い、新たな散布剤について検討した。その結果、海外において、凍結防止剤の路面定着性および散布効果の持続性を向上させるために、湿式剤に塩化物水溶液よりも粘性が高い糖蜜液を使用している例があった(写真6)。本研究では、凍結防止剤の湿式剤として糖蜜液の導入可能性を検討するため、苫小牧寒地試験道路において散布試験を実施した。検討結果は4.4.1に記載する。



写真 6 ワシントン州で使用している糖蜜液

4.3.2 防滑材加熱水混合散布に関する基本的検討

防滑材加熱水混合散布における加熱水の温度と混合割合の条件を検討するために、室内実験を実施した。

室内試験は低温恒温室で回転ラベリング試験器(写真7)を用いて行われた。回転ラベリング試験器は2個の試験タイヤとドーナツ状の舗装供試体で構成され、試験器を稼働させると舗装供試体が回転することでタイヤが路面上を転がる。

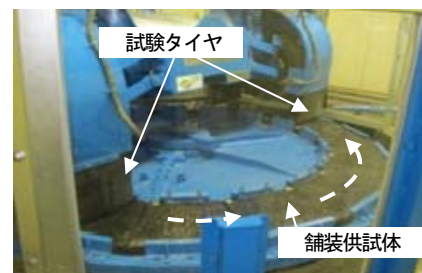


写真 7 回転ラベリング試験器

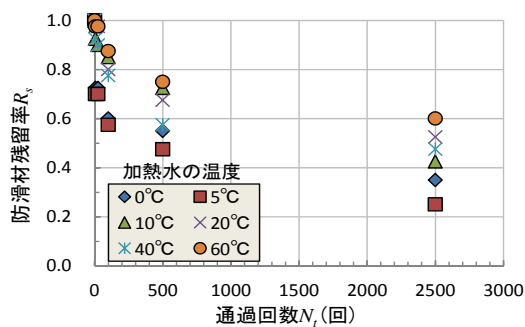
試験の手順を述べる。(i)舗装供試体上に噴霧器で水分を与えて氷膜を作製する。(ii)舗装供試体表面に事前に描いていた格子の交点に防滑材を2個ずつ置き、計50個配置する。ただし、内側の1列はタイヤが通過しなかったため評価には考慮されない。(iii)分注器を用いて規定の温度・混合割合で加熱水を防滑材に供給する。(iv)加熱水が氷化後、回転ラベリング試験器を稼働させ、氷膜上にタイヤを通過させる。(v)5、25、100、500および2500回のタイヤ通過後に防滑材の個数をカウントし、防滑材残留量を求める。室内試験の条件を表8に示す。

図13はタイヤの通過回数 N_t (回)と防滑材残留率 R_s (防滑材の散布量に対する防滑材残留量の比)の関係であり、同図(a)は加熱水の温度に関する検討の結果を、(b)は加熱水の混合割合に関する検討の結果をそれぞれ示す。まず、図の(a)について述べる。 R_s は加熱水の温度が高いほど大きく、 N_t の増大とともに低下した。 $N_t \leq 100$ 回に注目すると、加熱水温度 0°C および 5°C の R_s は 10°C 以上のそれに比べて明らかに小さい。次に、同図(b)を見ると、乾式や混合割合12%では5台通過後の R_s は0.2以下であり、タイヤ通過に伴う R_s の低下が著しい。混合割合18%以上では、 R_s は N_t の増大につれて指数関数的に減少し、混合割合が高いほど R_s の低下率は小さい。

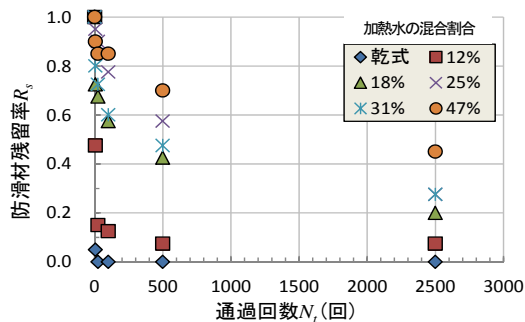
表 8 室内試験の条件

| | | |
|------|--------------|-----------------------|
| 水膜厚 | 1 mm | |
| 防滑材 | 種類 | 7号碎石 |
| | 散布量 | 140 g/m ² |
| 加熱水 | 温度 | 0、5、10、20、40、60℃ |
| | 混合割合 | 0(乾式)、12、18、25、31、47% |
| 舗装 | 密粒度アスファルト混合物 | |
| 走行条件 | タイヤ | ノーマルタイヤ |
| | 輪荷重 | 2000 N |
| | 空気圧 | 170 kPa |
| | 通過速度 | 30 km/h |
| | 通過回数 | 5、25、100、500、2500回 |
| 室温 | -8℃ | |

以上の結果を踏まえ、加熱水の温度（路面に接触時の温度）は10℃以上、混合割合は18%以上とし、後述する野外試験の防滑材加熱水混合散布の条件を設定した。



(a) 加熱水の温度に関する検討



(b) 加熱水の混合割合に関する検討

図 13 タイヤの通過回数と防滑材残留率の関係

4.4 散布技術の効果の試験道路での検証

4.4.1 糖蜜液の散布効果

糖蜜液を用いた散布試験は苫小牧寒地試験道路で行われた。試験では、散水車を用いて密粒度アスファルト舗装上に散水し、気温の低下を利用して氷膜路面を形成させる。次に氷膜路面上に凍結防止剤を湿式散布する。その後、路面すべり抵抗値測定器を搭載した車両とダミー車を走行させ、路面すべり抵抗値を計測する。路面すべり

り抵抗値の測定はダミー車 50 台通過毎に行われた。試験に用いた凍結防止剤には、固形剤に塩化ナトリウム、湿式剤に CaCl₂ 水溶液と糖蜜液を用いた。固形剤の散布量 20g/m² とし、湿式剤の散布量は固形剤の重量比 10% とした。なお、路面すべり抵抗値は連続路面すべり抵抗値測定装置¹⁾で測定した。路面すべり抵抗値は当該装置の開発者が独自に設定した Halliday Friction Number と呼ばれる値で、すべり難い路面ほど高い値を示し、すべり易い路面ほど低い値を示す。

図 14 に試験結果を示す。試験当日の路面温度は-4.7℃～-2.1℃の範囲に、気温は-7.2℃～-3.3℃の範囲にあった。氷膜路面の厚さは0.8～1.0 mm の範囲にあった。

試験の結果、散布直後からダミー車 300 台走行後までに亘り、塩化ナトリウム+糖蜜液を散布した区間の路面すべり抵抗値は塩化ナトリウム+CaCl₂ 水溶液を散布した区間のそれと同等であったことを確認した。

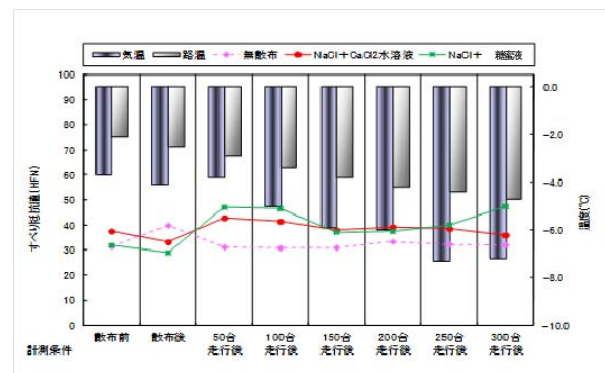


図 14 糖蜜液（湿式剤）の散布効果

4.4.2 防滑材加熱水混合散布の路面定着特性と路面すべり改善効果

防滑材加熱水混合散布を対象とした散布および走行試験を苫小牧寒地試験道路にて実施し、当散布手法の路面定着性と路面すべり抵抗値の改善効果を検証した。

試験手順は次のとおりである。散水車を用いて散水し、試験区間に氷膜を形成する。散布車を用いて乾式散布および防滑材加熱水混合散布を行う。模擬車両を走行させる。規定の通過台数 $N_p = 0、50、100、150$ および 200 台後に路面すべり抵抗値と防滑材残留量を測定する。図 15 に野外試験の概要を表 9 に野外試験の条件を、それぞれ示す。写真 8 に防滑材加熱水混合散布の状況とその熱画像を示す。写真 9 に散布後の路面状態を示す。散布車の詳細は、4.2 を参照されたい。

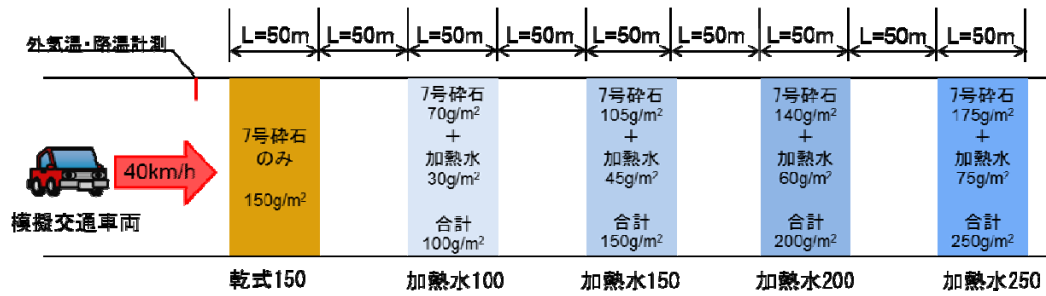


図 15 野外走行試験の概要図

表 9 野外試験の条件

| | | |
|---------|--------------|---|
| 散水後の水膜厚 | 0.8 mm | |
| 防滑材 | 種類 | 7号碎石 |
| | 散布量 | 150 g/m ² (乾式散布) 100、150、200、250 g/m ² (防滑材加熱水混合散布) |
| 加熱水 | 温度 | 40°C (タンク内の水温) |
| | 混合割合 | 30% |
| 舗装 | 密粒度アスファルト混合物 | |
| 走行条件 | タイヤ | スタッドレスタイヤ |
| | 車種 | 小型・普通乗用車 |
| | 通過速度 | 40 km/h |
| | 通過台数 | 200 台 |

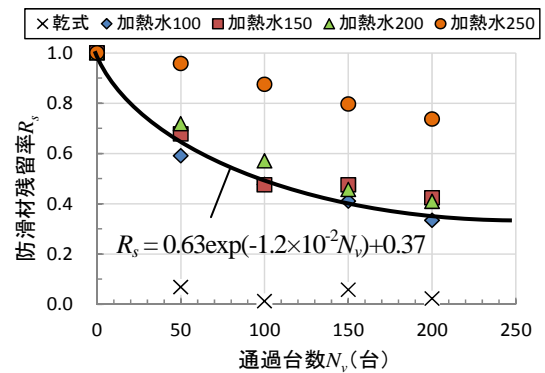


図 16 防滑材残留率と通過台数の関係

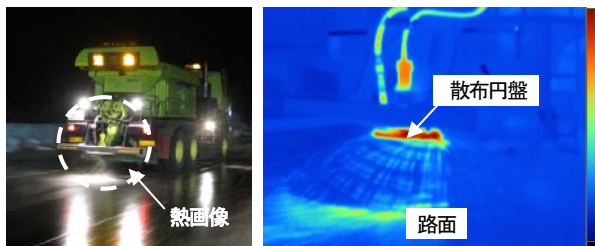


写真 8 防滑材加熱水混合散布の状況



写真 9 防滑材加熱水混合散布後の路面状態

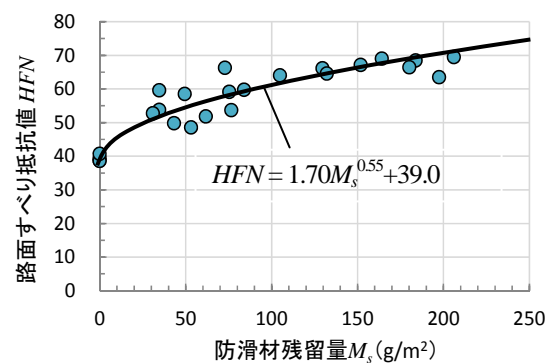


図 17 路面すべり抵抗値と防滑材残留量の関係

図 16 は防滑材残留率 R_s と通過台数 N_v の関係である。乾式散布に注目すると、50 台通過後の R_s は 0.07 となり、50 台通過後には散布量の大半が路面から失われた。他方、防滑材加熱水混合散布の R_s は、加熱水 250 を除いて類似の分布形を呈し、 N_v の増大につれて指数関数的に減少し

た。 R_s は、 $N_v = 200$ 台でも 0.3 以上であり、防滑材加熱水混合散布による防滑材の路面定着性が高いことがここでも確認される。加熱水 250 はその他の加熱水と比べて R_s が高い。この原因には防滑材残留量の計測箇所とタイヤの走行箇所がずれがあったためと考える。本論文では、加熱水 250 を除き、 R_s と N_v の関係について近似式を求めた。両者の関係は図中に示される。

図 17 は防滑材残留量 M_s と路面すべり抵抗値 HFN の関係である。 $M_s = 0$ の路面すべり抵抗値は約 40 であり、 μ に換算すると 0.2 程度である。路面すべり抵抗値 HFN は M_s が増えるにつれてべき関数的に増大した。 M_s と路面すべり抵抗値 HFN の関係は図中に示されるように近

表 10 実道試験の条件

| | | | |
|------|---------|--|----------------|
| 試験日時 | | 2014年2月5日 3:00 ~ 11:00 | |
| 天候 | | 晴 | |
| 気温 | | -19.3 ~ -12.8℃ | |
| 路温 | | -16.5 ~ -9.5℃ | |
| 路面状態 | 雪水厚 | 21.3mm | |
| | 雪水密度 | 808kg/m ³ | |
| | 雪水硬度 | 18.8kg/cm ² | |
| 試験場所 | 試験区間A | 湿式散布 | KP=50.8 ~ 51.0 |
| | | 無散布 | KP=50.4 ~ 50.6 |
| | | 加熱水混合散布 | KP=50.0 ~ 50.2 |
| | 試験区間B | 湿式散布 | KP=42.8 ~ 43.0 |
| | | 無散布 | KP=42.4 ~ 42.6 |
| | | 加熱水混合散布 | KP=42.0 ~ 42.2 |
| 散布条件 | 湿式散布 | 150g/m ² (凍結防止剤水溶液混合割合20%) | |
| | 加熱水混合散布 | 150g/m ² (加熱水温度40℃、加熱水混合割合30%) | |



写真10 試作機による防滑材加熱水混合散布状況

防滑材加熱水混合散布後の路面すべり抵抗値の改善効果について以下に述べる。図19に経過時間毎の路面すべり抵抗値の一例を示す。データは各計測区間 200m における1秒毎の計測であり、サンプル数は11~17件である。防滑材散布後の6時台以降では、湿式散布に比べて防滑材加熱水混合散布の方が高い値を示した。



図 18 実道試験の散布区間

似できる。

4.5 実道での検証

4.5.1 実道試験の概要

防滑材加熱水混合散布に関する実道試験は、北海道樺戸郡新十津川町内の一般国道451号で行った。表10に試験条件を示す。実道試験では図18に示すように、無散布区間、湿式散布区間および防滑材加熱水混合散布区間を設定した。調査項目は、路面すべり抵抗値、天候、気温、路温、路面状態および加熱水混合散布システムの各経路における加熱水温度(3箇所)とした。気温、路温、路面状態はKP=51.0を代表地点として計測した。路面すべり抵抗値は、散布前(3時台)、散布後(6時台、8時台、10時台)の計4回計測した。施工時の天候は晴れ、気温は-20℃~0℃、路面はほぼ圧雪状態、交通量は10台/h程度であった。

4.5.2 実道試験の結果

写真10に防滑材加熱水混合散布状況を示す。

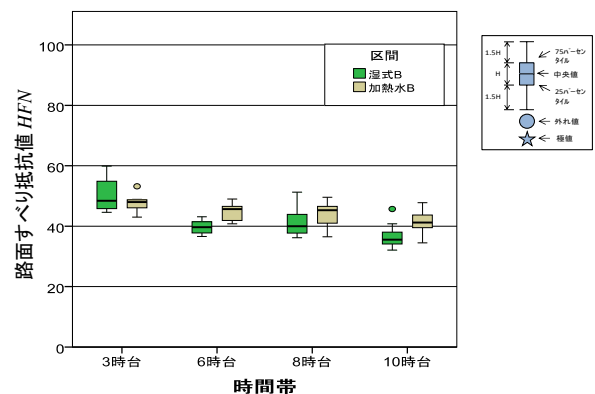


図19 路面すべり抵抗値(試験区間B)

試作機の加熱水混合散布システムの作動については、各経路および加熱ユニットの構成機器に問題は発生しなかった。試験中の各経路の温度を測定した結果、水溶液タンクB内の加熱水温度は、加熱開始水温5℃から45分程で40℃に達した。さらに加熱ユニットを操作して加熱を行うことで70℃程度まで水温が上昇した。また、散布直前の散布円盤での加熱水温度は、散布開始から数秒で水溶液タンク内の温度(60~70℃)に上昇した(図20)。

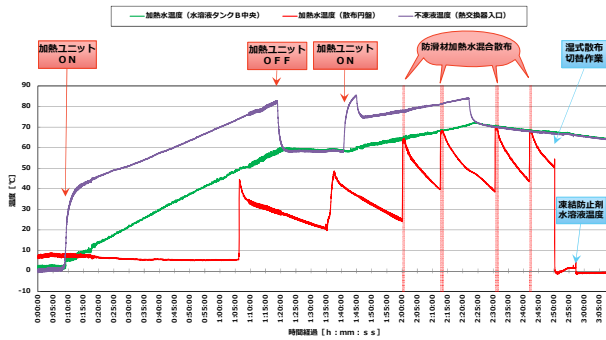


図 20 試作機における加熱水温度の一例

6. まとめ

本研究では、舗装の種類・特性に応じた凍結防止剤の散布技術、塩化物以外の散布剤や散布技術の改良、および散布機械の改良も合わせた凍結路面処理技術を開発することで、より効果的・効率的な凍結路面対策の実施に資する技術開発に取り組んだ。

本研究における試験条件に限られるものの、得られた主な成果を以下に列挙する。

- 1) 一般国道230号の実態として、凍結、シャーベットおよび圧雪などの冬期路面における粗面系舗装の路面すべり抵抗値は密粒度舗装と比べて同等か大きいことが多い。また、凍結防止剤の散布量は密粒度舗装より粗面系舗装が多い。
- 2) 凍結路面における防滑材残存率は機能性SMAの方が密粒度舗装より高い。
- 3) 氷膜および氷板路面への凍結防止剤散布において、機能性SMAおよび排水性舗装の路面すべり抵抗値は密粒度舗装のそれより大きい。
- 4) 路面温度、路面氷膜厚、舗装の種類、交通量および凍結防止剤の散布量を考慮して凍結防止剤散布後の路面すべり摩擦係数を推定する手法(路面すべり推定法)を構築した。
- 5) 路面すべり推定法を基に、適切な凍結防止剤散布量を推定するとともに、凍結防止剤散布が不適切な場合には他の冬期路面管理作業を推奨する冬期路面改善シミュレータ(ウィリス)を開発した。
- 6) 防滑材と加熱水の湿式散布(防滑材加熱水混合散布)に対応可能な加熱水混合散布システムを試作し、既存の凍結防止剤散布車に搭載した。
- 7) 新たな凍結防止剤の湿式剤として、粘性の高い糖蜜液を選び、糖蜜液を用いた湿式散布は従来の湿式剤(塩化ナトリウム溶液)を用いた湿式散布と同等の路面すべり抵抗値改善効果であることを確認した。

- 8) 防滑材加熱水混合散布において加熱水の温度および混合割合が防滑材残存率に及ぼす影響を明らかにした。
- 9) 防滑材加熱水混合散布の防滑材路面定着特性と路面すべり抵抗値改善効果を定量的に評価した。
- 10) 実道における防滑材加熱水混合散布と湿式散布の比較試験から、防滑材加熱水混合散布後の路面すべり抵抗値は湿式散布後のそれより高い傾向にあることを実証した。

以上、本研究により、舗装種類毎の凍結防止剤散布実態および路面状態を明らかにするとともに、舗装の種類・特性に応じた凍結防止剤散布技術を確立できた。また、新しい散布剤や散布技術の提案と併せて散布機械の改良を行うなど、複合的な凍結路面処理技術を開発した。今後、寒地土木研究所では、研究開発に留まらず、本研究の成果が冬期道路管理の実務に適切かつ有効に活用されるように、積極的に講習会や意見交換を実施する予定である。また、今まで以上に道路管理者と密に連携し、道路管理者からのフィードバックを通じて新たな課題抽出やその解決策の検討を行う所存である。

参考文献

- 1) 徳永ロベルト、切石亮、高橋尚人：冬期路面管理の判断・評価におけるすべり抵抗、第56回(平成24年度)北海道開発局技術研究発表会、ふゆ10、2013
- 2) 藤本明宏、佐藤賢治、田中俊輔、徳永ロベルト、高橋尚人、石田樹：舗装種別および通過車両を考慮した凍結防止剤事後散布後の路面すべり推定手法の構築と検証、寒地土木研究所月報、753、pp.12-20、2016
- 3) 藤本明宏、佐藤賢治、中島知幸、徳永ロベルト、高橋尚人、石田樹：冬期路面改善シミュレータ WIRIS(ウィリス)について、寒地土木研究技術、755、pp.19-24、2016
- 4) 藤本明宏、山田慎也、田中俊輔、高橋尚人、武市靖：通過車両の影響を考慮した凍結防止剤事後散布後の路面すべり抵抗推定法の構築と検証、土木学会論文集 E1(舗装工学)、71、2、pp.81-96、2015
- 5) 藤本明宏、山田慎也、田中俊輔、高橋尚人、武市靖：粗面系舗装に対する路面すべり推定法の適用性向上と凍結防止剤事後散布の有効性評価、土木学会論文集 E1(舗装工学)、71、3、pp.47-54、2015
- 6) 藤本明宏、山本悠介、田中俊輔、川端優一、武市靖：凍結防止剤散布による氷膜の融解を伴う密粒度および粗面系舗装面のすべり摩擦係数の推定法、土木学会論文集 E1(舗装工学)、70、3、pp.173-180、2014

16.2 効率的な冬期路面管理のための複合的路面処理技術に関する研究

- 7) T. Vaa : Implementation of New Sanding Method in Norway, Sixth International Symposium on Snow Removal and Ice Control Technology, TRB Electronic Circular 63, pp.473-486, 2004
- 8) 佐藤圭洋、秋元清寿、宮本修司、徳永ロベルト : 防滑材の飛散対策に関する基礎的研究、寒地土木研究所月報、No.675、pp.35-41、2009

A STUDY ON COMPLEX ROAD SURFACE TREATMENT TECHNOLOGY FOR EFFICIENT WINTER ROAD SURFACE MANAGEMENT

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2011-FY2015

Research Team : Cold Region Road Engineering Research Group (Traffic Engineering Research Team), Road Maintenance Research Team and Snow and Ice Research Team), Cold Region Technology Development Coordination (Machinery Technology Research Team)

Author : ISHIDA Tateki, KIMURA Takashi, OTSUKI Toshiyuki, TAKAHASHI Naoto, MARUYAMA Kimio, TOKUNAGA Roberto, ABE Ryuji, SUMITA Noriyuki, SATO Kenji, NAKAJIMA Tomoyuki, FUJIMOTO Akihiro, ISODA Takuya, TANAKA Shunsuke, KODA Masaru and MIURA Go

Abstract:

Considering that budgets for road improvement have been reduced year by year recently, winter roadway management seeks further efficiency and the spreading technology of salt and/or abrasive also needs to promote more efficiency. Although there are various types of pavements, the de-icing agent spreading is performed uniformly regardless of the type of pavement. In order to implement more efficient and effective measures against icy road surface, it is necessary to establish a spreading technology of salt and/or abrasive in consideration of characteristics and type of pavement, and to develop a management technology that combines spreading technology, pavement technology and machinery improvement.

In this project, to contribute in the more effective and efficient winter roadway management implementation, the authors conducted a series of studies and experiments such as non-chloride materials, new spreading methodology, spreader machine improvement, etc. to establish a complex road surface treatment technology.

Key words: snow and ice control, pavement types, agents, spreader machine