

タイトル	粗面系舗装における凍結防止剤散布後の塩分および融解水の移動現象に関する研究
著者	田湯, 文将; 武市, 靖; 高橋, 尚人; 田中, 俊輔; 藤本, 明宏; TAYU, Fumimasa; TAKEICHI, Kiyoshi; TAKAHASHI, Naoto; TANAKA, Shunsuke; FUJIMOTO, Akihiro
引用	北海学園大学工学部研究報告(41): 19-31
発行日	2014-01-17

粗面系舗装における凍結防止剤散布後の 塩分および融解水の移動現象に関する研究

田 湯 文 将*・武 市 靖**・高 橋 尚 人***・
田 中 俊 輔***・藤 本 明 宏***

Transferring phenomena of salt and melting water after salt application on rough textured pavements

Fumimasa TAYU*, Kiyoshi TAKEICHI**, Naoto TAKAHASHI***,
Shunsuke TANAKA*** and Akihiro FUJIMOTO***

要 旨

凍結防止剤散布による冬期路面管理は、費用対効果や塩害抑制の点から合理的な散布方法が求められている。凍結路面の補助的対策工として排水性舗装や機能性SMAなどの粗面系舗装が施工されているが、粗面系舗装は粗な路面テクスチャや排水機能を有するため、凍結防止剤散布後の路面状態の変化は密粒度舗装と異なると予想されるが、定量的な検証が不十分である。このため、本研究では、粗面系舗装と密粒度舗装上に散水して凍結路面を作製し、凍結防止剤散布後に一定数の車輪走行があった場合の、凍結防止剤および融解水の貯留と流出などの移動現象を、室内実験を行って定量的に示した。さらに、重回帰分析を行い、路面状態の変化に寄与する要因の分析を行った。

1. はじめに

積雪寒冷地では、安全で円滑な冬期道路交通を確保するために、凍結防止剤散布を主とした凍結路面対策が講じられている。また、補助的対策工として排水性舗装や機能性SMAなどの粗面系舗装も施工されている¹⁾。

粗面系舗装は、粗な路面テクスチャや排水機能を有するため、凍結路面の発生条件や凍結防止剤散布後の路面状態の変化が、密粒度舗装と異なると考えられる。従って、雪寒事業費を効率的に執行するためには、粗面系舗装の性能に応じて散布量やタイミングを変える必要があ

* 北海学園大学大学院工学研究科建設工学専攻（社会環境系）

* Graduate School of Engineering (Civil & Environmental Eng.), Hokkai-Gakuen University

** 北海学園大学社会環境工学科

** Department of Civil and Environmental Engineering, Hokkai-Gakuen University

*** 独立行政法人土木研究所寒地土木研究所

*** Civil Engineering Research Institute for Cold Region

る。しかし、舗装種類毎の路面状態の変化、すなわち、路面上の水分と凍結防止剤の移動現象に対する定量的な検証が不十分なため、舗装種類に関わらず一定の散布手法を適用している。このため、粗面系舗装における凍結防止剤の適正な散布手法の確立は重要な課題である。

既往の研究として、田中ら²⁾は凍結防止剤を散布した氷板路面上で試験輪を通過させる室内試験を行い、走行回数に伴う路面露出率、水膜厚およびすべり摩擦係数の変化について密粒度舗装と粗面系舗装の違いを示した。また、筆者ら³⁾は同試験において凍結防止剤の路面残留量や路面外への流出量を測定し、密粒度舗装と粗面系舗装における凍結防止剤および水分移動の相違について考察した。これらの研究は凍結防止剤散布後の粗面系舗装における路面露出率やすべり摩擦係数が、気温、散布量、水膜厚、走行回数だけでなく、排水性能やテクスチャの影響を受けることを明らかにしたが、各々の環境因子が路面露出率やすべり摩擦係数に及ぼす影響度については依然として不明な点が多い。現状、粗面系舗装への適切な凍結防止剤散布に資する知見は極めて少ない。

そこで本研究では、凍結防止剤散布による冬期路面管理の一層の効率化に資するため、凍結路面に凍結防止剤を散布した後の塩分および融解水の移動現象を定量的に評価することを目的として、室内走行試験装置を用いて基礎的な試験を行った。また、重回帰分析から路面露出率に及ぼす因子の影響度について検討を行った。

2. 室内試験の概要

(1) 試験方法

本試験は、写真-1に示す室内走行試験装置を用いて実施した。室内走行試験装置は、恒温室内で各種制動駆動条件、温度環境条件、路面条件において、制動試験によるすべり摩擦係数測定や、繰り返し走行試験などを行うことができる。トラバース装置により試験輪はレーン毎に所定の座標に移動が可能であり、舗装面に対する試験輪の走行位置は常に一定の状態での試験が可能である。

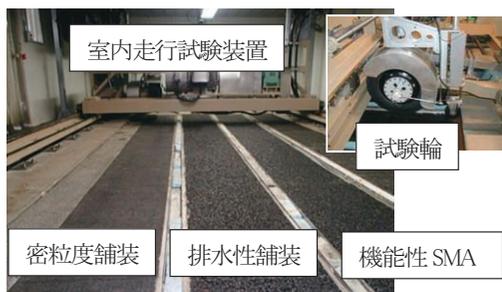


写真-1 室内走行試験装置および試験舗装



写真-2 凍結防止剤散布状況

試験の手順を述べる。室内温度と路面温度がほぼ同値で安定している状態で 2.0 l/m^2 の散水を行い、氷板路面を作製した。次に、写真-2に示すように粒状凍結防止剤を氷板路面に対して格子状に均等に散布し、その後に室内走行試験装置を稼働し、試験輪を繰り返し走行させる。試験輪の通過が100, 500, 1000, 1500および2000回後に路面露出率、路面に残存している融解水量（以下、残存融解水量）、塩分濃度および氷膜厚を測定する。

(2) 試験条件

表-1に試験条件を示す。凍結路面作製時の散水量は 2.0 l/m^2 、水温は $0 \sim 1 \text{ }^\circ\text{C}$ とした。これは、路肩堆雪からの雪氷融解水が凍結する現象を想定して、密粒度舗装で最大約2mmの氷膜が発生する散水量を設定したものである。実路で実施されている路面管理を参考にし⁵⁾、凍結防止剤には塩化ナトリウムを用い、散布量は 20 g/m^2 、散布方式は湿式散布とした。

試験温度は -3 、 -5 および $-8 \text{ }^\circ\text{C}$ とした。本試験では、環境条件の違いが散布効果に及ぼす影響の検証を一つの着眼点にしており、実路で凍結防止剤散布作業の実施の目安⁵⁾とされている $-8 \text{ }^\circ\text{C}$ までの試験温度を設定した。

試験輪の走行条件として輪荷重は5kNの下、繰り返し走行試験および制動試験の走行速度はそれぞれ5km/hおよび10km/hとした。

試験舗装は最大粒径13mmの骨材を使用した密粒度舗装（以下、密粒度舗装）、粗面系舗装

表-1 凍結防止剤散布の条件

試験舗装	密粒度舗装, 排水性舗装, 機能性SMA		
試験温度	$-3 \text{ }^\circ\text{C}$	$-5 \text{ }^\circ\text{C}$	$-8 \text{ }^\circ\text{C}$
	室内温度と路面温度がほぼ同値で安定している状態で試験開始		
散水条件	散水量： 2.0 l/m^2 水温： $0 \sim 1 \text{ }^\circ\text{C}$ 散水方法： 500 ml/m^2 を4回に分けて路面に噴霧		
凍結防止剤	塩化ナトリウム 20 g/m^2 湿式散布（質量比、固形NaCl：NaCl溶液＝9：1）		
試験項目	路面露出率	100回, 500回, 1000回, 1500回, 2000回走行後に試験輪走行部で測定 （走行部4箇所平均, 氷膜厚のみ 走行部の骨材頂点部6箇所平均）	
	残存融解水量		
	塩分濃度		
	氷膜厚		
走行速度	繰り返し走行試験 5 km/h 制動試験 10km/h		
走行輪荷重	5 kN（接地圧0.196MPa程度）		
試験輪	冬期路面調査用標準タイヤ ⁴⁾ （165/80R-13） トレッド：ブロック型		
舗装面の縦断・横断勾配	0%（各レーン側端部に70×75mmの排水溝を設置）		

として排水性舗装（空隙率17%）と機能性SMAを用いた。参考までに、表-2に試験舗装の乾燥時におけるすべり摩擦係数と平均きめ深さ（Mean Profile Depth：以下、MPD）を示す。すべり摩擦係数は3回実施した制動試験の平均値、MPDは回転式テクスチャメータ（CTメータ）により測定された4箇所での測定値の平均値である。

表-2 試験舗装の基本性状

舗装の種類		密粒度舗装	排水性舗装	機能性SMA
すべり摩擦係数(μ)	乾燥路面	0.82	0.83	0.82
	湿潤路面	0.62	0.63	0.62
MPD(mm)		0.68	2.07	1.45

(3) 測定方法

路面露出率は走行部において400mm×130mm（タイヤ接地幅）の範囲で4箇所を測定している。測定箇所を一定の角度で、デジタルカメラにより撮影した。路面露出率は2値化による画像解析を行い、式（1）で求める。

$$\text{路面露出率（\%）} = \frac{\text{路面露出面積}}{\text{解析画像全体面積}} \quad \dots (1)$$

路面露出率を算出するための画像解析手法は、参考文献⁹⁾を参照されたい。

残存融解水量は50×50mmの吸水紙を用いて路面の残存融解水を採取し、その重量を測定した。測定箇所は走行部における格子状に配置した粒状凍結防止剤のスポットとスポットの間であり、各走行回数における測定箇所は同一とした。

塩分濃度は、吸水紙に含まれた融解水を塩分濃度計のプリズム面に滴下して測定した。氷膜厚は、氷に針を刺して測定する簡易式の膜厚計を用いて測定を行った。写真-3に塩分濃度計と膜厚計を、表-3にその仕様を示した。

各舗装で試験温度毎に3回試験を行っており、本論文では3回の測定値の平均値を用いた。

以下に路面の融解水の凍結防止剤含有量（以下、残塩量）の算出方法について記載する。下記の式（2）は塩分濃度と塩化ナトリウムおよび融解水の関係を表したものである。式（2）を式（3）に変形し、既知の測定値を代入することで求められる。

$$C = \frac{Ms}{Mm} \times 100 \quad \dots (2)$$

表-3 塩分濃度計と膜厚計の仕様

測定機器	測定範囲	最少目盛	誤差
塩分濃度計	0.0~28.0%	0.2%	±0.2%
膜厚計	0.0~10.0mm	0.1mm	±0.1mm



写真-3 塩分濃度計（左）と膜厚計（右）

$$Ms = \frac{C \times Mm}{100} \quad \dots (3)$$

ここに、 C ：融解水の塩分濃度（%）、 Ms ：融解水に含まれる塩化ナトリウムの量（ $g/2,500mm^2$ ）および Mm ：吸水した融解水量（ $g/2,500mm^2$ ）である。

本論文では路面上で残存融解水量，残塩量は均一であると考えて， $1m^2$ 当たりの重量（ g/m^2 ）に換算しており，後述する流出塩量（ g/m^2 ）は凍結防止剤散布量である $20g/m^2$ から残塩量を減じたものと定義する。

3. 試験結果と考察

(1) 凍結防止剤の移動現象

図-1 に塩化ナトリウムにおける凝固点曲線および相平衡図，図-2 に各試験温度における塩分濃度の測定値と残塩量の算定値を，表-4 には試験温度と走行回数ともに代表的な条件として $-5^{\circ}C$ ，1000回走行における塩分濃度測定データの散布度を示した。変動係数（以下，CV）の範囲は各舗装の各走行回数における変動係数の最小値と最大値の範囲を示したものである。塩分濃度の測定データはCVが $0.05\sim 0.29$ と散布度が小さかった。

a) 塩分濃度の推移

図-2 により，各舗装を試験温度別に比較した場合に，試験温度が低いほど塩分濃度は高くなる傾向にあることが分かる。これは塩化ナトリウム溶液が図-1 に示す凝固点曲線に準ずる温度と濃度に落ち着くためである。また今回の試験では，走行回数増加に伴う塩分濃度に大きな変化は見られなかった。後述するように， $-8^{\circ}C$ ，100回走行後の密粒度舗装では固形の凍結防止剤が確認されているが，それを除けば，散布から早い段階でほとんどの凍結防止剤は氷板と十分反応し溶液中に溶解したと考えられる。

$-8^{\circ}C$ において排水性舗装の塩分濃度は約13%であり，おおよそ凝固点曲線に対応する濃度であるが，密粒度舗装と機能性SMAの塩分濃度はともに9%前後と低い。この理由として，凝固点曲線に従い物理的に考えると，密粒度舗装と機能性SMAの路面温度が排水性舗装より高かった可能性がある。また，各舗装における何らかの塩移動の違いが塩分濃度の相違を引き

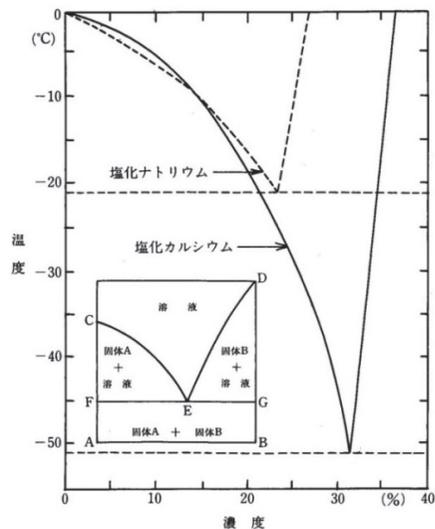


図-1 塩化ナトリウムの凝固点曲線および相平衡図⁷⁾

起こした可能性が考えられる。本研究の測定項目、試験結果からは要因の特定に至らなかったが、この議論の展開のためには、塩移動と路面温度の経時変化を詳細に測定する必要がある。

b) 残塩量および損失・流出塩量の推移

残塩量は図-2に示すように各舗装、各試験温度で走行回数の増加とともに、減少していく傾向にあった。各試験温度で残塩量は密粒度舗装>機能性SMA>排水性舗装の関係にあった。舗装別で残塩量の推移が異なる理由を考察すると、密粒度舗装では繰り返し走行に伴う、試験輪への付着および、飛散による凍結防止剤の流出が考えられる。これに加えて、機能性SMAでは融解水とともに空隙部へ貯留が、さらに排水性舗装では空隙部から排水流出が付加される。こうした凍結防止剤の流出機構の違いが残塩量の違いに影響したと推測される。

流出塩量はおおよそ密粒度舗装>機能性SMA>排水性舗装の関係にあった。ただし、-8℃の試験では、機能性SMAと排水性舗装には差がほとんど見られなかった。この理由として、排水性舗装では試験温度が低いほど散布直後に水が凍結し易いので連続空隙が塞がれ、排水機能が低下しやすいと考えられる。

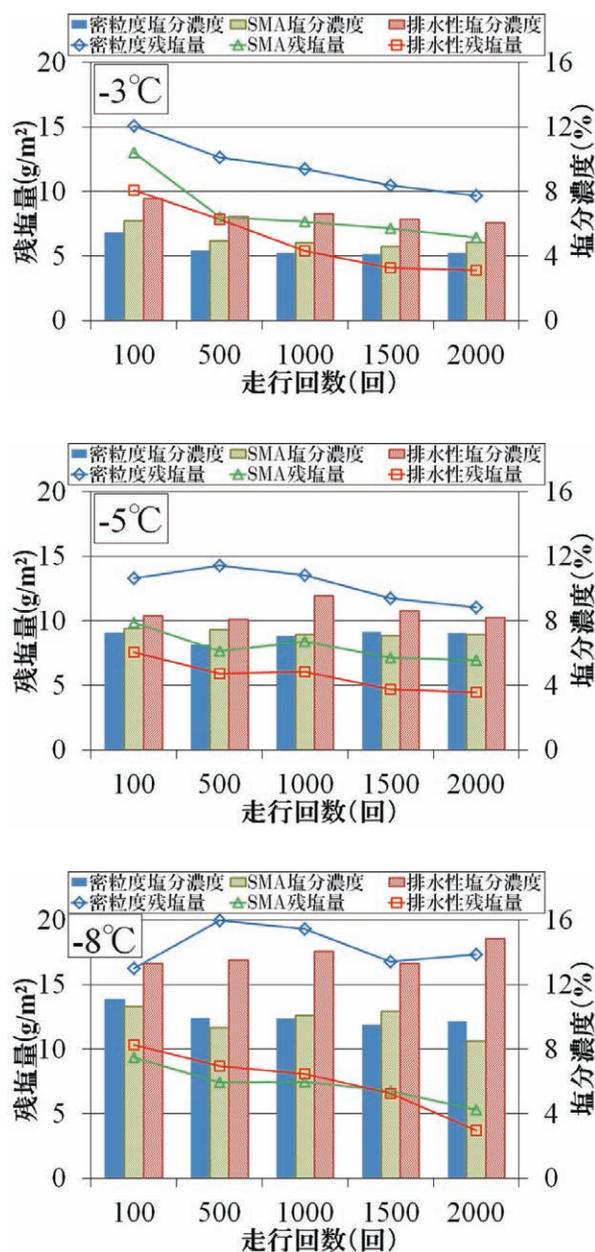


図-2 路面上塩分濃度と残塩量の推移

表-4 塩分濃度測定データの散布度

-5℃ 1000回走行	平均値 (μ)	標準偏差 (σ)	変動係数 (CV)
密粒度	7.0	0.34	0.05
排水性	9.2	2.30	0.25
SMA	7.2	0.78	0.11
CV範囲(各舗装, -5℃, 全走行回数)	0.05~0.29		

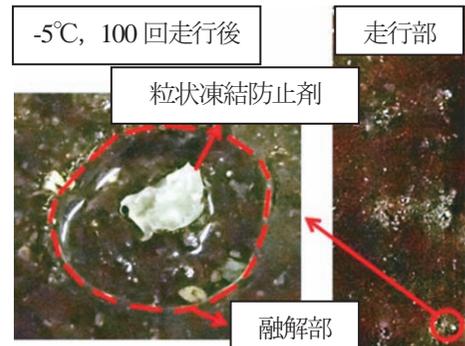


写真-5 100回走行後に残存した固形の凍結防止剤

なお、残塩量は走行回数の増加とともに減少することを記述したが、例外として-8℃における密粒度舗装の残塩量は100回から500回走行にかけて上昇している。これは本論文で定義した残塩量が溶液中の塩化ナトリウムの量であり、凍結防止剤と氷板の反応が500回走行まで完了しなかったためである。写真-5に示すように100回走行後の路面上には固形の凍結防止剤が存在している。

(2) 水分および氷の移動現象

図-3に各舗装における温度条件別の路面の残存融解水量と氷膜厚の測定値を示した。表-4と同様に、表-5と表-6に氷膜厚、残存融解水量の測定データの散布度を示した。

氷膜厚は排水性舗装においてCVが0.57と、他の舗装に比べて大きな値を示した。融解水量と同様に氷膜厚についても測定箇所により骨材頂点部の氷の状態が大きく異なっている。特に、排水性舗装では1000回走行の時点で骨材頂点部の氷が完全に剥離もしくは融解している箇所があり、氷が残っている箇所の測定値とは差が大きくなっている。走行回数の増加に伴い、この傾向は強くなり2000回走行後においては排水性舗装でCVが0.98と大きな値を示した。これらの理由から、氷膜厚における排水性舗装の測定データは散布度が大きくなったと考えられる。

残存融解水量は各舗装でCVが0.5前後の値を示した。本試験では低温下の恒温室内において各舗装に対し凍結防止剤を均等に散布した上で、所定の位置で試験輪の走行を行い、各試験項目についても同一の箇所で測定を行っている。しかし、同一の舗装であっても測定箇所により路面テクスチャには違いがある。実際に融解水量は測定箇所毎で採取した融解水量には差が見られており、この影響によって、散布度が大きくなったと考えられる。

氷膜厚と残存融解水量については、上記の理由により散布度の値は大きくなったと考えられるが、これらのデータの平均値を比較すると、走行回数の増加に伴い氷膜厚は減少し、粗面系

舗装の融解水も低減する傾向が見られ、各舗装における試験輪通過による路面状態の変化を捉えることができたと考えられる。

a) 氷膜厚の推移

各試験温度で走行回数の増加に伴い氷膜厚は薄くなることが確認された。氷膜厚は密粒度舗装が最も厚くなっており、次いで機能性SMAと排水性舗装の順であった。

粗面系舗装は散布した水が空隙部へ貯留、排水されるため、初期氷膜厚が薄くなったと考えられる。

-3℃および、-5℃の機能性SMAと排水性舗装は初期氷膜厚がほぼ同値であるが、-3℃では100回走行で、-5℃では500回走行の時点で、排水性舗装の氷膜厚は機能性SMAよりも薄くなり、その後の減少度合いも大きい。表-2に示したようにMPDは機能性SMAで1.45、排水性舗装で2.07程度であり、この差が凍結防止剤散布後の試験輪走行による氷膜厚の低下率に影響したと考えられる。

-8℃では、各舗装とも走行回数に伴う氷膜厚の低下は緩やかであった。機能性SMAの氷膜厚は、密粒度舗装のそれと非常に近い値であった。これは、上述したように機能性

SMAの空隙が散布した水の凍結によって塞がれてしまい、氷板路面時における機能性SMAの路面テクスチャが密粒度舗装とほぼ同等になったためと推察される。一方、排水性舗装については、-8℃であっても初期氷膜厚が1.3mm程度であり、-5℃とほとんど変わらない。

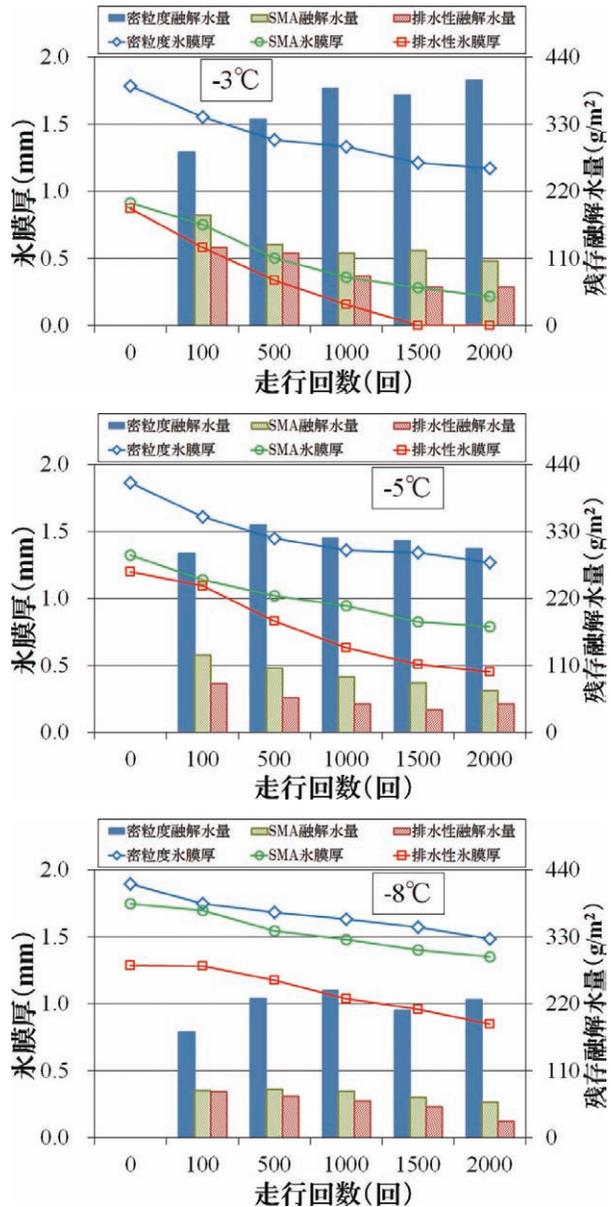


図-3 路面の残存融解水量および氷膜厚の推移

表-5 氷膜厚測定データの散布度

-5℃ 1000回走行	平均値 (μ)	標準偏差 (σ)	変動係数 (CV)
密粒度	1.36	0.56	0.27
排水性	0.61	0.35	0.57
SMA	0.96	0.16	0.17
CV範囲(各舗装, -5℃, 全走行回数)			0.14~0.98

表-6 残存融解水量測定データの散布度

-5℃ 1000回走行	平均値 (μ)	標準偏差 (σ)	変動係数 (CV)
密粒度	0.80	0.45	0.50
排水性	0.12	0.07	0.58
SMA	0.28	0.11	0.40
CV範囲(各舗装, -5℃, 全走行回数)			0.28~0.58

b) 残存融解水量の推移

図-3に示すように、いずれの試験温度および走行回数においても残存融解水量は密粒度舗装が多くなっており、次いで機能性SMA、排水性舗装であった。密粒度舗装は粗面系舗装のように空隙部に残存融解水が流出することがなく、凍結防止剤散布前の氷膜厚（以下、初期氷膜厚）が最も厚かったことがこの要因として考えられる。

密粒度舗装の残存融解水量に対する粗面系舗装の残存融解水量の割合を見ると100回から500回走行までは40~60%と約半分程度となっており、1000回走行以降は機能性SMAで30%前後で推移し、排水性舗装で20%前後になっている。残存融解水量については、各舗装で初期氷膜厚や舗装構造・機能に違いがあるため単純比較は難しいが、粗面系舗装は車両走行の少ない段階で、発生した融解水のほとんどが空隙部に流出したと考えられる。また、各試験温度を比較すると、温度が低下するほど各舗装の残存融解水量は低下するが、この割合に大きな違いは見られなかった。このことから、各走行回数における舗装毎の残存融解水量の割合は試験温度によらずに一定であると推測できる。

密粒度舗装では走行回数に伴う残存融解水量の明確な変化は見られないが、粗面系舗装の残存融解水量は、走行回数の増加に伴い減少し、温度が低いほどその低下は顕著であった。同様に氷膜厚も減少しているので、融解水の一部は試験輪の通過に伴い付着および飛散し、粗なテクスチャの空隙部に貯留されたり、排水機能によって排水されたと考えられる。

(3) 路面状態の変化

図-4に各試験温度における走行回数の増加に伴う路面露出率の推移を示した。

路面露出率は走行回数の増加に伴って増大する傾向にある。特に排水性舗装は-3℃における路面露出率の上昇が著しく、500回から1500回走行までは密粒度舗装と機能性SMAより路面露出率が8%以上高い。また、-5℃においても2000回走行後の路面露出率は9%程度まで上昇しており、密粒度舗装や機能性SMAよりも路面露出率の上昇率が大きい。

各試験温度で密粒度舗装と機能性SMAの路面露出率の変化は類似した。他の試験温度と比較して残存融解水量の少ない-8℃では全舗装で路面露出率の向上は、ほとんど見られなかった。

4. 試験結果に基づく重回帰分析

ここでは、凍結防止剤散布試験において測定および算出した各因子が路面露出率の上昇に寄与している度合いを検討するために、室内試験結果を基に重回帰分析を行った。

(1) 目的変数および説明変数の選定

路面のすべり抵抗に大きく関わる因子である路面露出率を目的変数とした⁸⁾。説明変数としては塩分濃度、残塩量、残存融解水量、氷膜厚、試験温度、走行回数が考えられる。

説明変数相互での相関を検証した結果、複数の説明変数間に高い相関や舗装毎の傾向の違いが確認された。図-5に塩分濃度と残塩量、図-6に残存融解水量と残塩量、図-7に氷膜厚と試験温度の各舗装における相関図を示した。

密粒度舗装は塩分濃度と残塩量の間が高い相関が見られ、粗面系舗装では残存融解水量と残塩量の間、氷膜厚と試験温度の間に高い相関が見られた。

各舗装の残存融解水量と残塩量の関係を見ると粗面系舗装では正の相関となったが、密粒度舗装では負の相関となった。粗面系舗装は走行回数の増加に伴い、融解水とそれに含まれる凍結防止剤が空隙部に貯留ないし流出するため正の相関になったと考えられる。

一方、路面に融解水が滞留する密粒度舗装は路面の融解水量が多く、試験輪走行に伴って水分および凍結防止剤が路面全体に拡散されると推測できる。そのため、路面全体の融解水中の凍結防止剤の量は増加すると考えられるが、本試験では、走行路面における残存融解水量を測

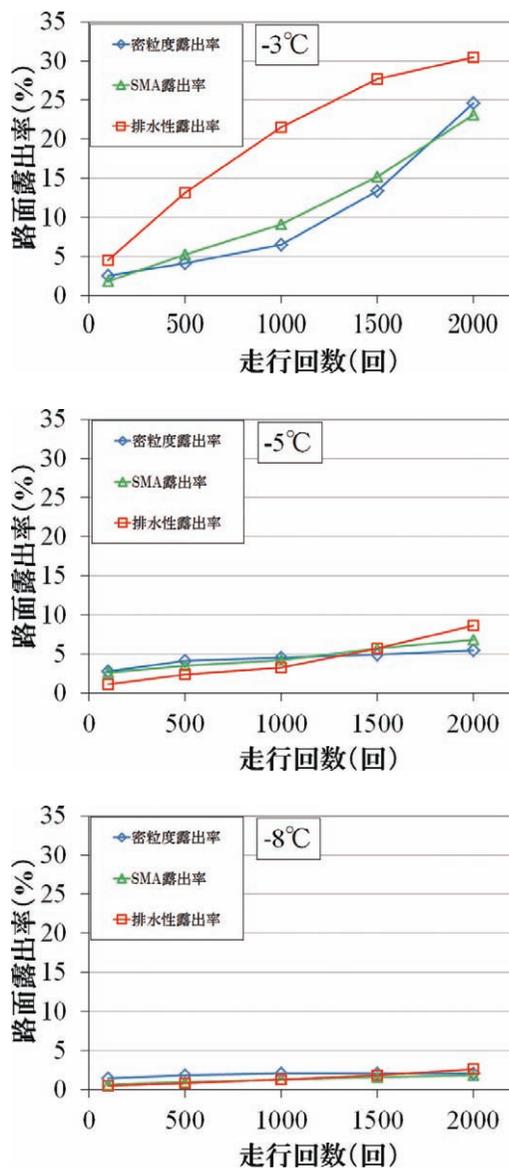


図-4 走行回数増加に伴う舗装別の路面露出率の推移

定し、残塩量を算出したために、負の相関になったと考えられる。

説明変数相互で高い相関が確認された因子の中で目的変数である路面露出率との相関が高かったのは塩分濃度、残存融解水量と氷膜厚であった。しかし、氷膜厚は路面露出率との相関が極めて高かったため、説明変数に加えて解析を行った場合、氷膜厚の寄与度が非常に高くなり、正確に各因子の影響度を判断することができなかった。そこで、本論文では塩濃度、残存融解水量、試験温度、走行回数の4つの因子を説明変数として用いた。

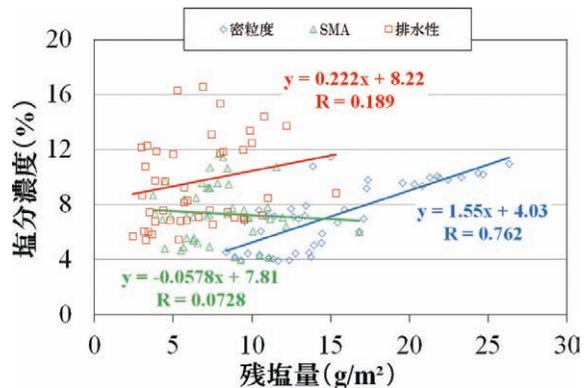
(2) 舗装別における重回帰分析結果

表一七に舗装別に分類した解析結果を示した。

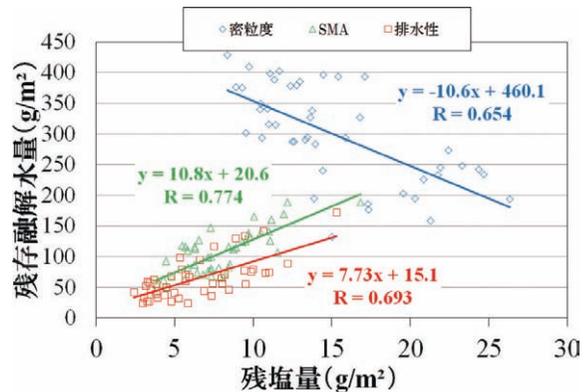
各舗装における決定係数は、密粒度舗装で0.619、機能性SMAは0.655、排水性舗装は0.697であり比較的良好な解析精度は得られた。

標準偏回帰係数について検証する。標準偏回帰係数は密粒度舗装では残存融解水量と走行回数、粗面系舗装では走行回数と残存融解水量に着目して考察する。粗面系舗装で走行回数における標準偏回帰係数の値が大きい理由としては、路面テクスチャが氷板面に影響を与えて粗なテクスチャを生成し、局所的に試験輪との接触を強め、部分的な氷板の消耗を促進させたためと推測する。

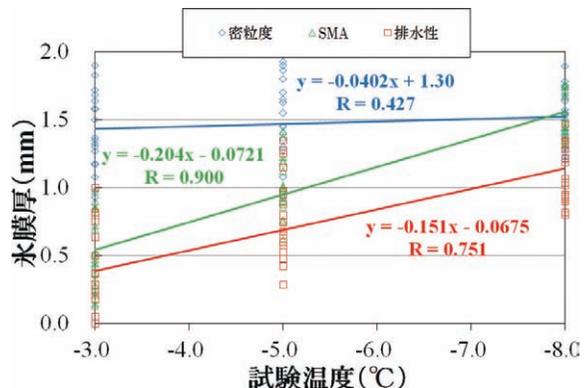
また、試験輪の通過による凍結防止剤の移動が舗装全体の路面露出率を上昇させたために、



図一五 各舗装における塩分濃度と残塩量の相関図



図一六 各舗装における融解水量と残塩量の相関図



図一七 各舗装における氷膜厚と試験温度の相関図

表一 7 舗装別における重回帰分析結果（目的変数：路面露出率）

舗装	R ²	偏回帰係数					標準偏回帰係数			
		塩分濃度	残存融解水量	試験温度	走行回数	定数項	塩分濃度	残存融解水量	試験温度	走行回数
密粒度	0.619	-0.662	0.021	0.173	0.004	0.990	-0.392	0.487	0.061	0.465
SMA	0.655	-0.334	0.019	1.099	0.005	6.519	-0.188	0.167	0.382	0.629
排水性	0.697	-0.687	0.094	1.508	0.009	8.054	-0.342	0.375	0.322	0.658

粗面系舗装だけでなく密粒度舗装でも走行回数の値が高くなったと考えられる。

本試験では試験輪の走行のない路面にも凍結防止剤を散布したが、散布箇所スポット的な融解が生じたのみで、その後の時間経過に伴う路面露出率の増加は見られなかった。このことから、路面露出率への走行回数の影響度が大きいことが分かった。

残存融解水量の値の大小は、舗装毎の水分および塩の移動機構の違いが影響を及ぼしたと考ええる。上述したように密粒度舗装の水分および塩の流出は水平方向の流出および試験輪に起因した流出であるが、粗面系舗装では鉛直方向の排水流出が加わる。このことは、散布された凍結防止剤は粗面系舗装よりも密粒度舗装の方が多く溶解し、路面の氷を融解したと推測できる。粗面系舗装では凍結防止剤が固形のまま、あるいは高塩分濃度で流出した可能性が高い。

残存融解水量は凍結防止剤散布に起因するため、この値は凍結防止剤散布がもたらした路面露出率の改善効果と考えることができる。他方、走行回数は試験輪の通過に伴う氷板の剥離、飛散、消耗等の攪乱作用がもたらした路面露出率の改善効果を意味する。これより、密粒度舗装では凍結防止剤散布量と試験輪の通過の両方の影響を強く受けて路面露出率が改善する。粗面系舗装では凍結防止剤散布後の試験輪の通過による相乗効果がより一層、路面露出の改善効果に高く寄与していると推測できる。

5. 結論

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 試験温度が高いほど、残存融解水量は増加し、希釈によって塩分濃度は薄くなることが分かった。また、走行回数増加に伴い氷膜厚は減少、路面露出率は増加したことからも、試験温度が高くなるほど凍結防止剤散布による融氷効果は高いことが明らかになった。
- (2) 凍結防止剤および融解水の流出量は排水性舗装、機能性SMA、密粒度舗装の順で多くなっており、粗面系舗装は融解水が空隙部に貯留、排水されるため、密粒度舗装に比べて流出量が多くなることが分かった。
- (3) 排水性舗装は凍結防止剤と融解水の流出が最も多かったが、各試験温度で他の試験舗装と比較しても路面露出率が大きく上昇していた。そのため、排水性舗装は同じ環境条件であ

れば、機能性SMAや密粒度舗装よりも凍結防止剤散布効果が高いことが分かった。

- (4) 重回帰分析を行い、各因子の路面露出の上昇に寄与する度合いを検討した結果、密粒度舗装では凍結防止剤散布と車両走行の両方が大きく影響し、粗面系舗装では凍結防止剤散布後の車両走行による路面の攪乱作用が密粒度舗装よりも路面露出の改善効果に高く寄与していると分かった。

6. おわりに

本論文は北海学園大学工学部社会環境工学科（道路研究室）と（独）土木研究所、寒地土木研究所（寒地道路保全チーム、寒地交通チーム）との共同研究（平成24年度～平成26年度）における「舗装種類別の凍結防止剤および防滑材適正散布に関する研究」について中間成果をとりまとめたものである。

本研究では、凍結防止剤を散布した氷板路面上で試験輪を通過させる室内試験を行い、密粒度舗装、機能性SMAおよび排水性舗装における水分および凍結防止剤の移動を明らかにし、路面露出率に及ぼす各因子の影響度を検証した。

今後、粗面系舗装における適切な凍結防止剤散布方法の検討のために、車両走行が凍結路面に与える影響の調査や散布量の違いにより、路面上の水分や凍結防止剤の移動現象、それに伴う路面状態の変化にどのような違いが表れるか、屋外における試験結果との比較検討を行い評価していきたい。

参考文献

- 1) ㈱雪センター：冬期路面対策事例集，pp.159-206，1997.
- 2) 田中俊輔，安部隆二，高橋尚人，武市靖，田湯文将：粗面系舗装の凍結抑制効果を考慮した凍結防止剤散布手法に関する研究，土木学会北海道支部論文報告集，第68号，2013.
- 3) 田湯文将，武市靖，高橋尚人，田中俊輔，藤本宏明：排水性舗装における凍結防止剤散布後の残塩量の評価に関する研究，土木学会第68回年次学術講演会講演概要集，V-402，2013.
- 4) 財団法人高速道路調査会路面すべり測定標準タイヤ研究検討会：冬期路面すべり測定用標準タイヤ使用に関する検討報告書，2000.
- 5) 北海道開発局：冬期路面管理マニュアル（案），1997.
- 6) 田中俊輔，武市靖，増山幸衛，高橋尚人：凍結路面のすべり抵抗特性および凍結抑制効果の定量的評価方法に関する研究，土木学会論文集，Vol.67/E1，pp.53-64，2011.
- 7) ㈱日本建設機械化協会：道路除雪ハンドブック，pp.156-164.
- 8) 田中俊輔，凍結路面における路面露出率に着目したすべり抵抗特性に関する研究，北海学園大学大学院工学研究科建設工学専攻博士論文，pp.24-50，2012.