

# 舗装種別に応じた凍結防止剤散布に関する研究 —粗面系舗装への路面すべり摩擦係数推定法の適用—

(独) 土木研究所 寒地土木研究所 ○藤本 明宏  
(独) 土木研究所 寒地土木研究所 田中 俊輔  
北海学園大学 工学部 武市 靖

本論文では、凍結防止剤散布に伴う密粒度舗装および粗面系舗装の平均氷膜厚および $\mu$ の変化を明らかにし、密粒度舗装に加えて粗面系舗装にも適用可能な散布後の $\mu$ 推定法を構築するとともに、任意の路面温度における散布後の $\mu$ の推定値を舗装種別間で比較した。

結果、(1)平均氷膜厚はいずれの舗装も散布量の増大とともに線形的に低下する、(2) $\mu$ は平均氷膜厚の増大とともに指数関数的に低下する、(3)粗面系舗装の鉛直損失塩率は散水量の増大につれて減少する、ことが分かった。本研究により、密粒度舗装だけでなく粗面系舗装における散布後の $\mu$ 推定が可能になり、散布後の $\mu$ は舗装の種類によって異なることが示された。

キーワード：冬期道路管理、路面すべり摩擦係数、凍結防止剤、粗面系舗装、氷膜路面、塩濃度、推定手法

## 1. はじめに

氷膜路面に対して凍結防止剤や防滑材を適切に散布することは依然として容易でない。凍結防止剤の性質や散布に関する基本事項は、除雪・防雪ハンドブック<sup>1)</sup>や冬期路面管理マニュアル(案)<sup>2)</sup>に記載されている。しかしながら、気象条件および路面雪氷状態を十分に考慮して凍結防止剤散布を体系化するまでには至っていない。加えて、凍結防止剤散布方法は舗装の種類によって区別されておらず、密粒度舗装と粗面系舗装で同じ散布効果が得られているか、または同程度の路面すべり摩擦係数(以下、 $\mu$ と呼称)を確保できているか、については不明な点が多い。舗装の多種化が進む中、今まで以上に凍結防止剤散布の適正化を図るには、舗装の違いを考慮し、かつ $\mu$ などの客観的指標を用いた凍結防止剤散布効果の評価法が必要となる。

これまでに筆者らは、試験道路で実施した走行試験結果を基に凍結防止剤散布後の路面すべり抵抗値の推定法を提案した<sup>3)</sup>。この成果は本論文の基礎となるものであるが、密粒度舗装のみを対象としており、凍結防止剤の舗装内部鉛直方向の移動を伴う粗面系舗装には適用できない。

そこで本論文では、密粒度舗装、機能性SMAおよび排水性舗装を対象に低温恒温室で氷膜路面への凍結防止剤散布実験を実施し、凍結防止剤散布に伴う各舗装上の氷膜厚および $\mu$ の変化を明らかにするとともに、粗面系舗装に適用可能な凍結防止剤散布後の $\mu$ 推定法を提案する。

## 2. $\mu$ 推定法

### (1) 仮定および条件

本論文において、提案する凍結防止剤散布後の $\mu$ 推定法は、以下の仮定および条件の下で成り立つ。

- 凍結防止剤の散布時の飛散、車両通過に伴う飛散および道路勾配に伴う流出は考慮されない。
- 凍結防止剤散布に伴う路面氷膜の融解は面的に一律に起こるものとする。実際には、氷膜路面に固形の凍結防止剤を散布した場合、路面は氷面と舗装面が混在するまだら状態になる。路面上の真の氷膜厚と本研究で空間平均的に扱う氷膜厚を区別するために、以下では後者を平均氷膜厚  $H_i(\text{mm})$  と呼ぶ。

### (2) 概要

図-1 に示す概念図に従い、本論文で提案する $\mu$ 推定法を説明する。同図の上部に記した凍結防止剤散布前の氷膜路面(以下、状態 I)と同図の下部に記した散布後に十分に時間が経過し、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 II)を考える。ここで、状態 I の平均氷膜厚  $H_i'(\text{mm})$ 、路面温度  $T(^{\circ}\text{C})$  および凍結防止剤の散布量  $M_{s-in}(\text{kg/m}^2)$  は入力条件とする。

状態 II の $\mu$ は次の5つのステップを踏んで求められる。

ステップ 1：氷膜路面に凍結防止剤を散布すると、凍結防止剤を含む水溶液(以下、塩溶液)が発生する。塩溶液は凝固点曲線に準じた  $T$  に対応する塩濃度  $C(\%)$  になるまで周囲の氷を融かすことで希釈する。従って、状態 II における  $C$  は凍結防止剤の凝固点曲線<sup>1)</sup>から推定でき

る。本研究では、凍結防止剤に塩化ナトリウムを選び、その凝固点曲線を二次関数、( $C = -T(0.02T + 1.63)$ )で近似させた。

ステップ 2：道路上に散布された凍結防止剤は、道路勾配に伴う流出(以下、表流損失塩)や車両通過に伴う飛散(以下、車両損失塩)によって損失する。また、粗面系舗装では鉛直下方向への凍結防止剤の損失(以下、鉛直損失塩)、具体的には排水性舗装では舗装内部への浸透、機能性 SMA では凹部での貯留がそれぞれ生じる。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を有効融解塩量  $M_{s-melt}$  ( $\text{kg/m}^2$ ) と定義し、次式で与える。

$$M_{s-melt} = M_{s-in} \{1 - (R_z + R_x + R_v)\} \quad (1)$$

ここに、 $R_z$ ： $M_{s-in}$  に対する鉛直損失塩量の比(以下、鉛直損失塩率)、 $R_x$ ： $M_{s-in}$  に対する表流損失塩量の比および  $R_v$ ： $M_{s-in}$  に対する車両損失塩量の比である。本論文では、上述の仮定 2.(1) i) より、 $R_x$  および  $R_v$  は考慮せず、ゼロとする。 $R_z$  については 4.(4) で詳述する。

ステップ 3：凍結防止剤散布に伴う融氷量  $M_{i-melt}$  ( $\text{kg/m}^2$ ) は  $M_{s-melt}$  および  $C$  との関係式 ( $C = M_{s-melt} / (M_{i-melt} + M_{s-melt}) \times 100$ ) を変形して求められる。すなわち、

$$M_{i-melt} = \frac{100 - C}{C} M_{s-melt} \quad (2)$$

ステップ 4：状態 II の  $H_i$  は、 $H_i'$  から  $M_{i-melt}$  を換算した融氷厚  $H_{i-melt}$  ( $= M_{i-melt} / \rho_{ice}$ 、 $\rho_{ice}$ ：氷の密度 ( $\text{kg/m}^3$ )) を差し引いて求められる。

ステップ 5：最後に、状態 II の  $\mu$  は  $\mu - H_i$  関係式から算出される。 $\mu - H_i$  関係式については、4.(3) で述べる。

### 3. 凍結防止剤散布実験

#### (1) 手順および条件

凍結防止剤散布実験は低温恒温室で実施された。

写真-1 に氷膜形成後の舗装供試体を示す。同写真に示すように、舗装供試体は排水性舗装(上段)、機能性 SMA (中段) および密粒度舗装(下段)の 3 種類とし、各舗装につき、それぞれ 3 体を使用した。舗装供試体のサイズは幅 0.40 m × 長さ 0.40 m × 高さ 0.05 m である。粗骨材の最大寸法は 13 mm であり、排水性舗装の空隙率は 17% である。なお、同写真の氷膜上に見られる円形はダイナミック・フリクション・テスターによる  $\mu$  測定の軌跡である。

以下に実験の手順を述べる。(i) 低温恒温室で舗装供試体の温度を室内温度にする、(ii) 噴霧器を用いて舗装供試体に淡水を散布する、(iii) 氷膜路面が形成するまで待つ、(iv) 塩化ナトリウムを固形散布する、(v) 塩化ナトリ

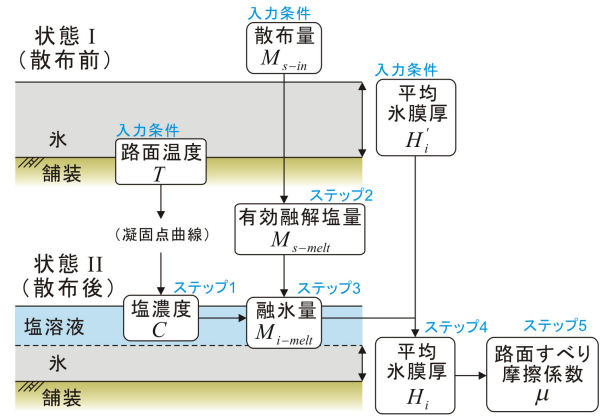


図-1 凍結防止剤散布後の  $\mu$  推定法の概念図

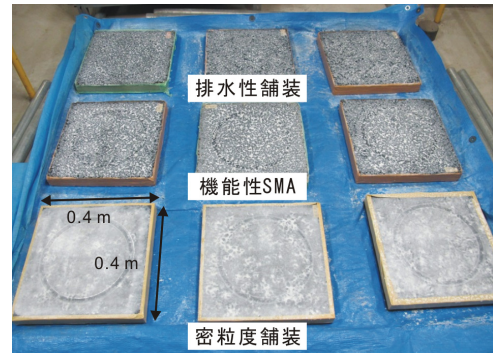


写真-1 凍結防止剤散布実験の様子

表-1 実験条件の一覧

環境条件	室温	-5℃
散水条件	量	1.0 $\text{kg/m}^2$ (0.5 $\text{kg/m}^2 \times 2$ 回)、 2.0 $\text{kg/m}^2$ (0.5 $\text{kg/m}^2 \times 4$ 回)
	温度	0～1.0℃
	着色	白(水性アクリル絵具) 質量比(淡水：絵具=100：1)
凍結防止剤 散布条件	種類	塩化ナトリウム
	量	0、20 $\text{g/m}^2$ 、40 $\text{g/m}^2$ 、60 $\text{g/m}^2$ 、80 $\text{g/m}^2$
	形状	粉末状
舗装供試体 条件	種類	密粒度舗装、機能性 SMA、排水性舗装
	サイズ	幅 0.40 m × 長さ 0.40 m × 高さ 0.05 m
	個数	各 3 体
測定条件	仕様	粗骨材最大寸法 13 mm 空隙率 17% (排水性舗装)
	項目	路面温度 (放射温度計) $\mu$ (ダイナミック・フリクション・テスター) 塩濃度 (屈折式塩分濃度計) 平均氷膜厚 (融解質量式路面氷膜厚計)

ウムの溶解が完了するまで待つ、(vi)  $T$ 、 $\mu$ 、 $C$ 、 $H_i$  の順で測定する。なお、手順(v)では、 $T$  を定期的に測定し、塩化ナトリウム散布(吸熱反応)に起因して低下した  $T$  が室内温度に戻った時点で塩化ナトリウムの溶解が完了したと判断した。

表-1 に実験条件を示す。低温恒温室の室内温度は-5℃とした。散水条件に関して、散水量  $M_{w-in}$  ( $\text{kg/m}^2$ ) = 1.0 および 2.0  $\text{kg/m}^2$  の 2 ケースとし、散水する淡水の温度は 0～1.0℃に制御した。1 回の  $M_{w-in}$  は 0.5  $\text{kg/m}^2$  とし、散水

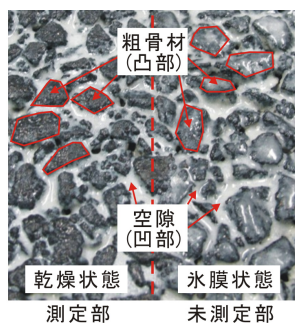
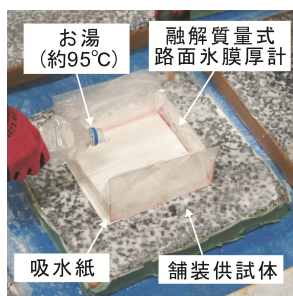


写真-2 平均氷膜厚の測定状況

写真-3 測定部と未測定部の路面状態

した水分が路面上で完全に凍結した後、次の散水を行い、規定の  $M_{s-in}$  になるまで繰り返した。また、本論文には記載しないが、本実験ではサーキュラー・テクスチャ・メーターを用いて MPD (Mean profile depth) を測定した。そのために水性アクリル絵具を用いて淡水を白に着色した。なお、淡水と着色剤の質量比は 100 : 1 であり、着色が各種測定に及ぼす影響は無視できる程に小さいことを確認している。参考までに、本試験で用いた密粒度舗装、機能性 SMA および排水性舗装の MPD は、乾燥状態において 0.47、1.10 および 1.55 mm であった。

使用した凍結防止剤は塩化ナトリウムであり、 $M_{s-in} = 20, 40, 60$  および  $80 \text{ g/m}^2$  の 4 ケースとした。なお、比較のために無散布の実験も実施した。本実験では、粒状の塩化ナトリウムを用いたが、実道では散布された塩化ナトリウムが車両の通過によって粉碎されることを考慮して、粉末状 (0.1 mm 程度) にして散布した。

## (2) 測定項目

$T$  は、氷膜と塩溶液が混在する舗装供試体上面の平均温度であり、放射温度計で測定した。測定は 5 秒間に亘って放射温度計の測定範囲を舗装供試体上面内で動かして行われた。測定精度は  $T = 0^\circ\text{C}$  において  $\pm 2.0^\circ\text{C}$  である。 $\mu$  の測定にはダイナミック・フリクション・テスターを用いた。本論文では計測速度  $40 \text{ km/h}$  の  $\mu$  を採用した。 $C$  は、吸水紙を用いて路面上の塩溶液を採取し、屈折式塩分濃度計を用いて測定した。

$H_i$  は Haavasojä, T et al.<sup>4)</sup> を参考に作製した融解質量式路面氷膜厚計 (以下、路面氷膜計) を用いて測定した。以下に路面氷膜計による  $H_i$  の測定方法について詳述する。路面氷膜計は写真-2 に示すような箱とその下 (箱と路面氷膜との間) に設置する吸水紙から成る。本実験では、成形が容易なラミネートシートを用いて幅  $220 \times$  長さ  $230 \times$  高さ  $100 \text{ mm}$  の箱を作製した。 $H_i$  は次の手順で測定される。(i) 吸水紙を用いて路面上の水分を取り除く、(ii) 路面氷膜計を舗装供試体上に設置し、箱の中に約  $95^\circ\text{C}$  の熱湯を注ぐ、(iii) 15 秒後に路面氷膜計を取り外し、融解水を含んだ吸水紙の質量を測定する、(iv) 吸収された融解水量が下限値を下回るまで (iii) を繰り返す、(v) 得

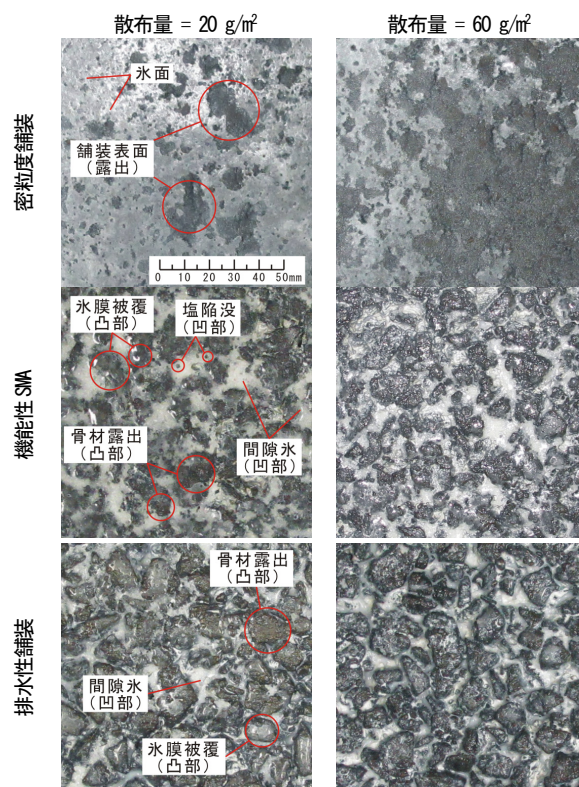


写真-4 状態 II から水分を除去した後の路面状態

(上段: 密粒度舗装、中段: 機能性 SMA、下段: 排水性舗装)

られた融解水の総質量から  $H_i$  を算出する。融解水量の下限値は湿潤路面の  $\mu$  を基準に設定した。この下限値を設定した経緯とその方法を以下に述べる。(iii) を繰り返すと  $\mu$  に影響を及ぼさない舗装内部の空隙に詰まった氷を融解・吸収することになる。こうした  $H_i$  の過大評価を防ぐために、(iii) の後に  $\mu$  を測定する予備実験を行い、湿潤路面の  $\mu$  になった時の融解水量を調べ、この融解水量を下限値とした。従って、 $H_i$  は  $\mu$  に影響を及ぼす舗装表層の氷の空間平均厚を意味する。

写真-3 は  $H_i$  を測定した後の舗装 (写真左側) と測定していない舗装 (写真右側) の比較である。同写真から分かるように、 $H_i$  測定後に粗骨材の表面は乾燥状態となる。

## 4. 実験の結果

### (1) 路面状態

写真-4 は状態 II から吸水紙を用いて路面上の水分を除去した後の路面状態である。同写真は左列に  $M_{s-in} = 20 \text{ g/m}^2$ 、右列に  $M_{s-in} = 60 \text{ g/m}^2$  の写真を示す。また、上段から順に、密粒度舗装、機能性 SMA および排水性舗装の路面状態を示す。 $M_{s-in} = 20 \text{ g/m}^2$  において、密粒度舗装では、塩化ナトリウムと接触した箇所の氷膜が局所的に融解し、舗装表面と氷面が混在するまだら状態となった。機能性 SMA では、舗装凸部上には塩化ナトリウ



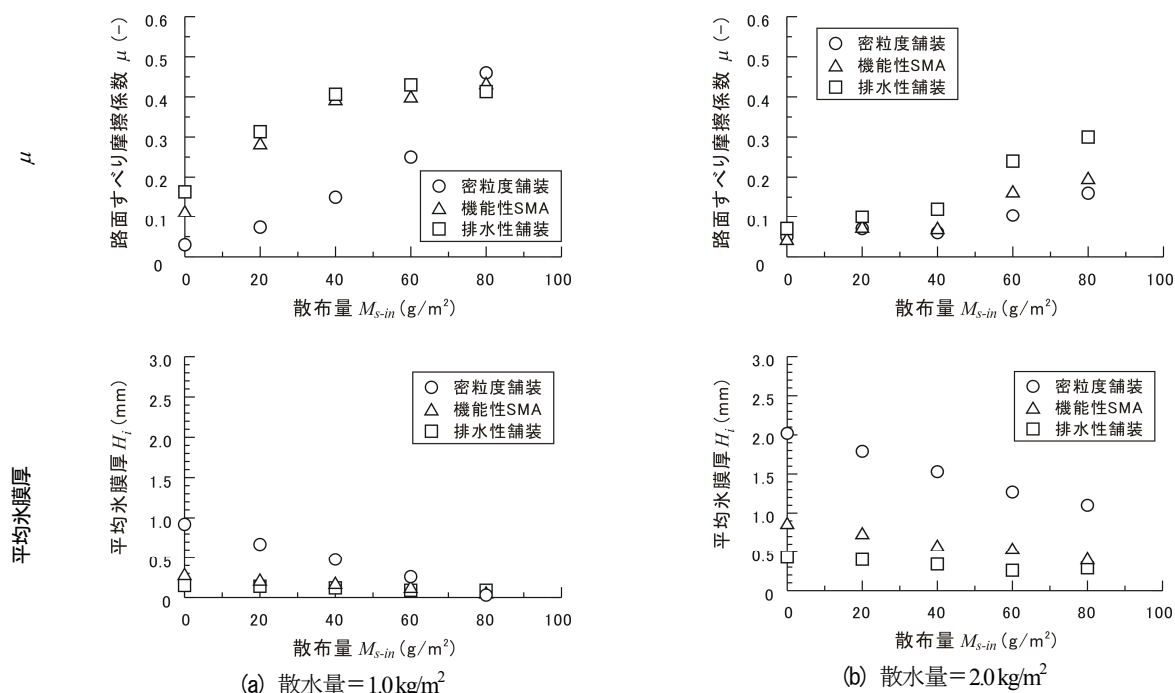


図-2 凍結防止剤散布実験の結果(上段： $\mu$ ，下段：平均氷膜厚)

ムとの接触による骨材の露出が、舗装凹部の間隙氷には所々に塩化ナトリウムの陥没痕が、それぞれ見られた。

$M_{s-in} = 60 \text{ g/m}^2$ では、 $M_{s-in} = 20 \text{ g/m}^2$ と比較して、密粒度舗装では水平方向に舗装の露出面積が拡大し、機能性SMAおよび排水性舗装では舗装凸部の骨材の露出面積が拡大した。

## (2) $\mu$ および平均氷膜厚に及ぼす散布量の影響

図-2 は $\mu$  および $H_i$ に及ぼす $M_{s-in}$ の影響を示す。同図(a)および(b)はそれぞれ $M_{w-in} = 1.0$ および $2.0 \text{ kg/m}^2$ の結果であり、上段は $\mu$  および下段は $H_i$ の結果をそれぞれ示す。

$\mu$ について記述する。まず、 $M_{w-in} = 1.0 \text{ kg/m}^2$ の結果について述べる。無散布( $M_{s-in} = 0 \text{ g/m}^2$ )の $\mu$ は密粒度舗装、機能性SMAおよび排水性舗装でそれぞれ0.03、0.11および0.16であった。密粒度舗装の $\mu$ は $M_{s-in}$ とともに指数関数的に増大し、 $M_{s-in} = 80 \text{ g/m}^2$ で0.46になった。一方、機能性SMAおよび排水性舗装の $\mu$ は $M_{s-in}$ とともに対数関数的に増大し、 $M_{s-in} = 80 \text{ g/m}^2$ ではそれぞれ0.43および0.41となった。排水性舗装の $\mu$ は機能性SMAの $\mu$ よりやや大きい値を推移した。次に、 $M_{w-in} = 2.0 \text{ kg/m}^2$ を見ると、すべての舗装における $\mu$ は $M_{s-in}$ の増大とともに指数関数的に増大した。その増大率は排水性舗装、機能性SMA、密粒度舗装の順で大きい。機能性SMAおよび排水性舗装の $\mu$ の分布形が $M_{w-in}$ によって異なる理由は、写真4に見られるように舗装表面の露出状況の相違、すなわち $M_{w-in} = 1.0 \text{ kg/m}^2$ では $M_{s-in}$ の増大とともに粗なテクスチャの露出面積が増大したが、 $M_{w-in} = 2.0 \text{ kg/m}^2$ では $H_i$ が比較的厚いために、 $M_{s-in}$ の

増大に対して粗なテクスチャの露出面積の増大が隠微であったためと推察される。

$H_i$ について述べる。無散布における密粒度舗装、機能性SMAおよび排水性舗装の $H_i$ は、 $M_{w-in} = 1.0 \text{ kg/m}^2$ で0.92、0.27および0.15 mm、 $M_{w-in} = 2.0 \text{ kg/m}^2$ で2.02、0.85および0.43であり、密粒度舗装の $H_i$ は最も厚く、排水性舗装の $H_i$ は最も薄い。また、 $M_{w-in}$ および舗装の種類を問わず、 $H_i$ は $M_{s-in}$ の増大とともに線形的に低下した。その低下率は密粒度舗装、機能性SMAおよび排水性舗装の順で大きい。

なお、同図には表示していないが、 $C$ は $M_{s-in}$ や舗装の種類に関係なく9%前後であった。これは凝固点曲線における $T = -5^\circ\text{C}$ に対応する塩溶液の濃度に相当する。

## (3) $\mu$ と平均氷膜厚の関係

図-3に $\mu - H_i$ 関係を示す。すべての舗装において $\mu$ は $H_i$ の増大につれて指数関数的に低下した。ただし、その低下率は排水性舗装が最も大きく、次いで機能性SMA、密粒度舗装の順であった。本データが示す範囲は機能性SMAで $H_i < 0.85$ 、排水性舗装で $H_i < 0.43$ であるが、これらより $H_i$ が厚くなれば、舗装表面のテクスチャの影響がより小さくなるため、機能性SMAおよび排水性舗装の $\mu$ はともに0.05程度(氷膜路面の $\mu$ )に漸近すると考えられる。ここで図中のAを見ると、2つのプロットが他の分布から外れている。これらは $M_{w-in} = 2.0 \text{ kg/m}^2$ における $M_{s-in} = 60$ および $80 \text{ g/m}^2$ の結果であり、写真4に示したように部分的な融解による舗装表面の露出と比較的厚い氷膜の混在が抵抗となって $\mu$ を大きくさせたと推察される。なお、 $H_i = 0$ の $\mu$ は $T = 20^\circ\text{C}$ 、

$M_{w-in}=1.0\text{kg/m}^2$ の条件で測定したものである。

上述した  $\mu - H_i$  関係式は、次式で与えられる。

$$\mu = a \exp(bH_i) + c \quad (3)$$

各舗装の  $\mu$  に対する係数  $a$ 、 $b$  および  $c$  を図-3 中に示す。なお、式(3)による  $\mu$  の計算値と実測値との間の相関係数は、密粒度舗装、機能性 SMA および排水性舗装でそれぞれ 0.97、0.95 および 0.67 であり、いずれも相関性が認められる。

#### (4) 鉛直損失塩率

本節では、実験結果から  $R_z$  を求める。本実験条件では、 $R_z$  は  $M_{s-in}$  に対する路面上の氷膜の融解に作用しないで路面から損失した塩量 ( $M_{s-in} - M_{s-melt}$ ) の比、

$$R_z = 1 - \frac{M_{s-melt}}{M_{s-in}} \quad (4)$$

と定義される。ここで、 $M_{s-melt}$  は無散布の実験における  $H_i$  と散布の実験における  $H_i$  の差  $\Delta H_i$  を  $\rho_{ice}$  ( $-5^\circ\text{C}$  の氷密度 =  $916.9 \text{ kg/m}^3$ ) で除したものを  $M_{i-melt}$  とし、 $M_{i-melt}$  と  $C$  の実測値を式(2)に代入して求めた。

図-4(a)および(b)は  $M_{w-in} = 1.0$  および  $2.0 \text{ kg/m}^2$  における  $R_z$  と  $M_{s-in}$  の関係をそれぞれ示す。密粒度舗装、機能性 SMA および排水性舗装の  $R_z$  は、 $M_{w-in} = 1.0 \text{ kg/m}^2$  でそれぞれ  $-0.08 \sim 0.10$ 、 $0.69 \sim 0.76$  および  $0.89 \sim 0.93$  の範囲にあり、平均値はそれぞれ  $-0.02$ 、 $0.74$  および  $0.92$  であった。 $M_{w-in} = 2.0 \text{ kg/m}^2$  では、それぞれ  $-0.07 \sim 0.03$ 、 $0.39 \sim 0.53$  および  $0.76 \sim 0.90$  の範囲にあり、平均値はそれぞれ  $-0.02$ 、 $0.48$  および  $0.83$  であった。同図より、 $R_z$  は  $M_{s-in}$  に依存しないことが知れる。また、密粒度舗装では実験中に水分あるいは凍結防止剤が舗装から流出することなく、散布した凍結防止剤の殆ど全てが舗装上の氷膜の融解に作用したと判断できる。一方、機能性 SMA および排水性舗装では、散布した凍結防止剤の多くが、固形あるいは高濃度の塩溶液として、舗装表層の凹部や舗装内部へ移動したと推察される。密粒度舗装の  $R_z$  は  $M_{w-in}$  に依存せずほぼゼロで変化しないが、機能性 SMA および排水性舗装の  $R_z$  は  $M_{w-in}$  が増えると小さくなった。十分に厚い氷膜への凍結防止剤散布を考えると舗装のテクスチャや排水性能に関係なく  $R_z$  はゼロになると考えられるため、 $M_{w-in}$  の増大に伴う  $R_z$  の減少は妥当と考えられる。ただし、 $R_z - M_{w-in}$  関係の詳細については今後の研究課題としたい。

#### 5. 凍結防止剤散布後の $\mu$ に関する考察

4 章で  $\mu - H_i$  関係および  $R_z$  を明らかにしたので、状態 II の  $\mu$  を推定することが可能になった。本章では、

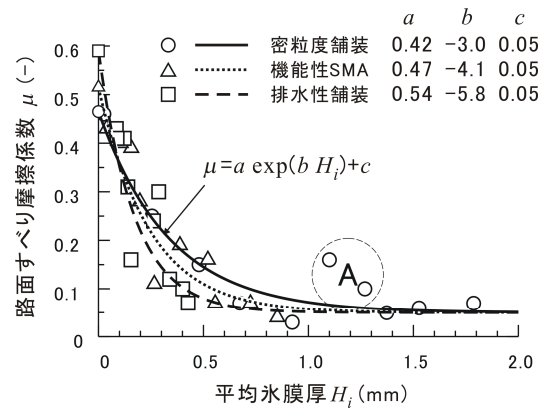


図-3  $\mu$  と平均氷膜厚の関係

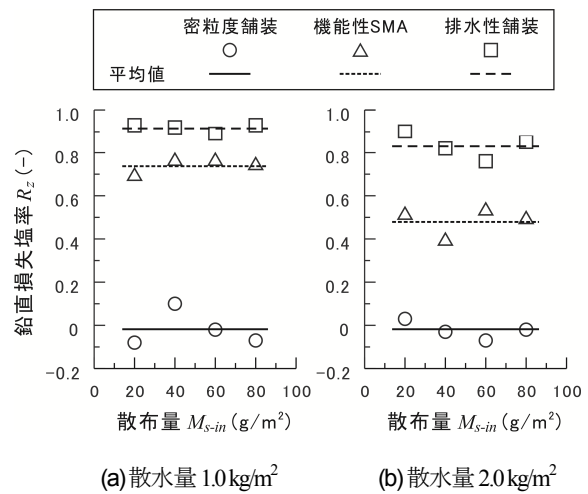


図-4 鉛直損失塩率

まず 2.(2)に記載した理論に従い、密粒度舗装、機能性 SMA および排水性舗装の  $\mu$  の推定例を示す。計算条件は  $M_{s-in} = 30 \text{ g/m}^2$ 、 $M_{w-in} = 1.0 \text{ kg/m}^2$ 、 $T = -3^\circ\text{C}$  とした。次に、 $T$  のみ  $0 \sim -8^\circ\text{C}$  に変化させた時の各舗装における  $\mu$  の変化を調べた。なお、本推定に用いた  $H_i'$  は本実験結果の値として、密粒度舗装、機能性 SMA および排水性舗装でそれぞれ  $0.92$ 、 $0.27$  および  $0.15 \text{ mm}$  を与えた。

表-2 に  $\mu$  推定の結果を示す。 $T = -3^\circ\text{C}$  の場合、塩化ナトリウムの凝固点曲線から  $C = 4.7\%$  が得られる (ステップ 1)。 $M_{s-in} = 30 \text{ g/m}^2$  に  $1 - R_z$  を乗じることにより、密粒度舗装、機能性 SMA および排水性舗装の  $M_{s-melt} = 30.0$ 、 $7.8$  および  $2.4 \text{ g/m}^2$  となる (ステップ 2)。次に式(2)を用いて  $M_{i-melt}$  を求める (ステップ 3) と、密粒度舗装、機能性 SMA および排水性舗装の  $H_{i-melt} = 0.66$ 、 $0.17$  および  $0.05 \text{ mm}$  となる。これより、 $H_i = 0.26$ 、 $0.10$  および  $0.10 \text{ mm}$  となる (ステップ 4)。最後に、式(3)に  $H_i$  を代入すると、状態 II における密粒度舗装、機能性 SMA および排水性舗装の  $\mu = 0.24$ 、 $0.37$  および  $0.36$  が得られる (ステップ 5)。

図-5 は  $M_{s-in} = 30 \text{ g/m}^2$  および  $M_{w-in} = 1.0 \text{ kg/m}^2$  の計算条件における  $\mu - T$  関係である。密粒度舗装では  $T = -2.1^\circ\text{C}$  まで湿潤路面の  $\mu (= 0.47)$  であった。それ以下になると、

表-2  $\mu$  推定の結果

	項目	記号	密粒度舗装	機能性 SMA	排水性舗装
入力条件	状態Ⅰ(散布前)平均氷膜厚	$H_i'$	0.92 mm	0.27 mm	0.15 mm
	路面温度	$T$	-3°C		
	散布量	$M_{s-in}$	30 g/m <sup>2</sup>		
ステップ 1	塩濃度	$C$	4.7%		
ステップ 2	鉛直損失塩率	$R_z$	0	0.74	0.92
	有効融解塩量	$M_{s-melt}$	30.0 g/m <sup>2</sup>	7.8 g/m <sup>2</sup>	2.4 g/m <sup>2</sup>
ステップ 3	融氷厚	$H_{i-melt}$	0.66 mm	0.17 mm	0.05 mm
ステップ 4	状態Ⅱ(散布後)平均氷膜厚	$H_i$	0.26 mm	0.10 mm	0.10 mm
ステップ 5	路面すべり摩擦係数	$\mu$	0.24	0.37	0.36

$\mu$  は  $T$  の低下につれて指数関数的に低下し、-8°Cでは0.11 となった。機能性 SMA および排水性舗装では、それぞれ  $T = -2.0$  および  $-1.0$ °Cまで湿潤路面の  $\mu$  ( $=0.52$  および  $0.59$ ) であり、それら以下になると  $\mu$  は  $T$  とともに低下し、-8°Cでそれぞれ 0.25 および 0.30 となった。このように、湿潤路面の  $\mu$  を保持する  $T$  と  $T$  の低下とともに漸近する  $\mu$  の下限値が各舗装で異なるために、各舗装の  $\mu$ - $T$  関係は交差した。例えば、機能性 SMA の  $\mu$ - $T$  関係と排水性舗装のそれは約-1.3°Cと約-3.2°Cで交差しており、 $T > -1.3$ °C および  $T \leq -3.2$ °C では後者の  $\mu$  が、 $-1.3 \geq T > -3.2$ °C では前者の  $\mu$  が大きい。

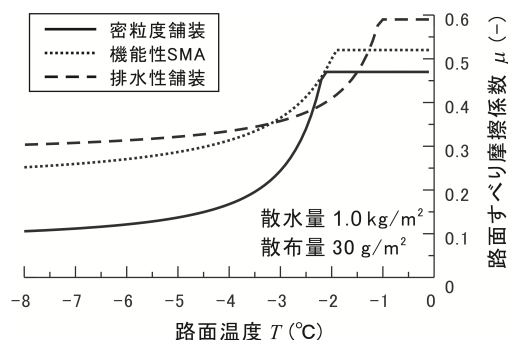
以上より、状態Ⅱの  $\mu$  は  $M_{s-in}$ 、 $M_{w-in}$  および  $T$  が同じであっても舗装の種類によって異なる可能性が示された。言い換えると、同じ  $\mu$  を確保するために必要な  $M_{s-in}$  は舗装の種類によって異なる。これは、複数の種類の舗装が存在する路線において、 $\mu$  の連続性を確保しようとする、舗装毎に  $M_{s-in}$  を変える必要があることを意味する。ただし、本章で示した  $\mu$  の推定値や  $\mu$ - $T$  関係は  $R_x$  および  $R_v$  が考慮されていないため、必ずしも現道に適用できるとは限らないことを追記しておく。

## 6. おわりに

本論文では、密粒度舗装、機能性 SMA および排水性舗装を対象に、低温恒温室で氷膜路面への凍結防止剤散布実験を実施し、凍結防止剤散布後の各舗装上の氷膜厚および路面すべり摩擦係数  $\mu$  を評価した。この結果を基に凍結防止剤散布後の  $\mu$  の推定法を構築し、任意の路面温度における凍結防止剤散布後の  $\mu$  の推定値を舗装種別間で比較した。

以下に得られた知見を示す。

- (1) 平均氷膜厚は、同じ散水量であっても舗装の種類によって異なり、密粒度舗装、機能性 SMA、排水

図-5 状態Ⅱにおける  $\mu$  と路面温度の関係

性舗装の順で厚かった。また、凍結防止剤散布後の平均氷膜厚は散布量の増大とともに線形的に低下した。

- (2)  $\mu$  は平均氷膜厚の低下とともに指数関数的に増大した。各舗装の  $\mu$  と平均氷膜厚の関係をそれぞれ定式化できた。
- (3) 鉛直損失塩率は密粒度舗装では散水量に依存せずゼロであったが、機能性 SMA および排水性舗装では散水量の増大とともに減少する傾向にあった。
- (4) (2)および(3)より、車両通過および縦横断勾配のない氷膜路面に限定されるものの、凍結防止剤散布後の密粒度舗装、機能性 SMA および排水性舗装の  $\mu$  をそれぞれ推定することが可能になった。
- (5) 凍結防止剤散布後の  $\mu$  は温度・散水量・凍結防止剤散布量が同じであっても、舗装の種類によって異なる可能性が示された。

本研究が進展し、提案する  $\mu$  推定法を現道に適用することにより、路面テクスチャや舗装の排水性能を考慮して、 $\mu$  を指標に凍結防止剤の散布効果を定量的に評価できるようになる。こうした成果は、凍結防止剤の散布内容(量・タイミング・場所)の適正化に寄与し、今まで以上の冬期道路の安全性向上と冬期道路管理費の削減が期待される。

今後は、平均氷膜厚と鉛直損失塩率の関係の解明に加えて、車両による飛散や道路勾配による流出に伴う凍結防止剤の損失を考慮した  $\mu$  推定法を構築し、野外試験を通してその適用性について検証を行う。

## 参考文献

- 1) 社団法人日本建設機械化協会：2005 除雪・防雪ハンドブック(除雪編)、2004。
- 2) 北海道開発局：冬期路面管理マニュアル(案)、1997。
- 3) 藤本明宏、川端優一、徳永ロベルト：凍結防止剤散布を考慮した路面すべり抵抗値の簡易推定手法、北海道開発技術研究発表会、Vol. 57、2013。
- 4) Haavasoja, T., Nylander, J. and Nylander, P.: Relation of road surface Friction and salt concentration, SIRWEC 2012, Vol. 16, 2012。