

路面すべり摩擦係数の推定による 冬期道路管理の適正化に関する研究 —冬期路面改善シミュレータWIRIS(ウィリス)の開発—

藤本 明宏¹・佐藤 賢治¹・中島 知幸¹・徳永 ロベルト¹
高橋 尚人¹・石田 樹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条3丁目1番34号)

本研究では、客観的・統一的な冬期路面管理を推進させるために、気象条件、交通条件、路面状態および舗装条件を考慮して凍結防止剤散布後の路面すべり摩擦係数 μ を推定する手法(路面すべり推定法)を構築した。本論文では、路面すべり推定法を基に、適切な冬期路面管理作業を推奨し、最適な凍結防止剤散布量を計算する冬期路面改善シミュレータWIRIS(Winter Road Surface Improvement Simulator、ウィリス)を構築するとともに、計算結果より最適な凍結防止剤散布量を踏まえて推奨対策について検証した。

キーワード 冬期道路管理、凍結防止剤、コスト縮減、効率化、路面すべり摩擦係数

1. はじめに

冬期道路では、雨水や融雪水の凍結、霜凍結、圧雪表面の融解・再凍結などにより、極めて滑り易い路面が形成される場合がある。冬期道路管理では、事前に凍結防止剤散布(事前散布)を行い、凍結路面の発生抑止に努めるとともに、発生した凍結路面に対しても路面すべり摩擦係数(μ)の改善を目的に凍結防止剤散布(事後散布)を実施している。一般的に、平地部など夜間の凍結と日中の融解を繰り返すような地域では事前散布が、山間部や北海道など昼夜を問わず路面が雪氷で覆われる期間が長い地域では事後散布が、それぞれ主流となっている。平成3年度から平成6年度に亘る北海道での事前散布と事後散布の比率はおよそ1:3である¹⁾。新潟国道事務所管内の新発田地区では全散布の約3割が事後散布と報告されている²⁾。いずれにしても凍結防止剤散布は冬期道路の安全性確保に欠くことができない対策であり、道路予算の縮減や顕在化しつつある橋梁の塩害問題等を背景に、その効率化は益々重要となっている。本研究では事後散布に着目し、その効率化を目指す。

事後散布作業を効率的・効果的に実施するための資料として冬期路面管理マニュアル(案)³⁾や除雪・防雪ハンドブック⁴⁾がある。冬期路面管理マニュアル(案)には、「散布は気温と雪水量を総合的に判断し、状況にあ

わせて効果的な散布に心掛ける必要がある」と前置きした上で、気温-8℃程度を境に、それ以上では塩化ナトリウムの散布を、それ以下では防滑材の散布を推奨している(塩化カルシウムの場合は気温-12℃程度が境)。散布量について、冬期路面管理マニュアル(案)には参考値として薄い圧雪や氷板路面には30 g/m²、氷膜路面には15 g/m²と記載されている³⁾。また、除雪・防雪ハンドブックには路面水分の凍結防止を目的とする場合は標準散布量として20~40 g/m²と記載されている⁴⁾。それでもなお、路面雪氷状態が気象、舗装の種類、交通などの影響を受けて多様に変化するため、散布作業を適切に判断・実行することは依然として容易でなく、散布作業の体系化が成熟しているとは言いがたい。例えば、北陸自動車道や新潟県の国道では気象の変動もあるが、凍結防止剤の散布量は年々増大傾向にある²⁾。

以下に、現状の事後散布作業に関する問題点を挙げる。

- (i) 散布後の路面雪氷状態や μ を推定する術がなく、事前に散布効果を評価できない。
- (ii) 散布作業内容の決定において、路面上の水分量、交通および舗装の影響を十分に考慮できておらず、交通量や舗装の種類を問わず一律に凍結防止剤を散布している。
- (iii) 圧雪層に凍結防止剤を散布し、圧雪表面の融解・再凍結によって却って滑り易い路面の発生を助長させる場合がある⁵⁾。

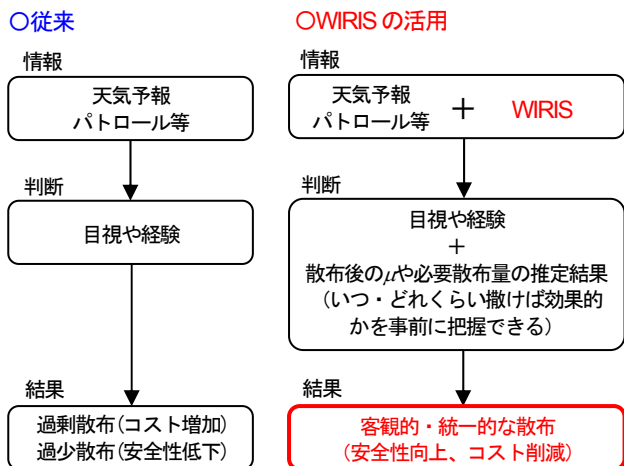


図-1 冬期道路管理へのWIRISの活用イメージ

上記(iii)に関しては、路面上の圧雪を取り除いてから散布すべきであるが、どの程度の圧雪厚であれば散布効果があるかを判断するための知見やツールが乏しいことに問題の根幹がある。

これまでに筆者らは、従来の気象条件に加えて、交通条件、路面状態および舗装条件を考慮して凍結防止剤の事後散布後の μ を推定する手法（路面すべり推定法）を構築してきた⁷⁾⁹⁾。本研究では路面すべり推定法を基に、適切な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)を開発した。図-1に示すように、冬期道路管理にWIRISを活用することにより、事後散布内容を μ によって客観的に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、誰でも同じ作業になるような統一的な事後散布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確保と冬期道路管理費用の削減が期待できる。本論文ではWIRISを紹介するとともに、WIRISによる計算結果から氷膜・氷板（以下、凍結と総称）路面と圧雪路面への凍結防止剤の事後散布について考察する。

2. 路面すべり推定法

以下に、図-2に従って路面すべり推定法の理論を記述する。

同図の上部に記した凍結防止剤散布前の状態（以下、状態1）と同図の下部に記した凍結防止剤散布後に十分に時間が経過して雪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における雪氷厚 H_i (mm)、即ち H_{i-1} (mm)、路面温度 T (°C)、凍結防止剤の散布量 M_{ss-in} (kg/m²)、舗装の

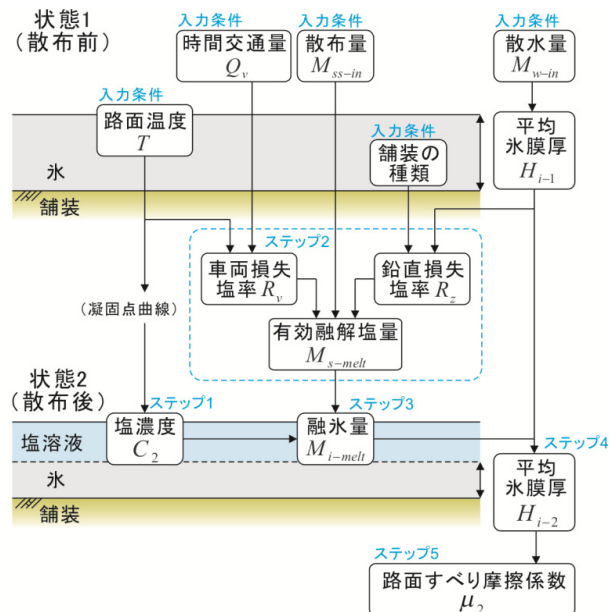


図-2 路面すべり推定法の概念図

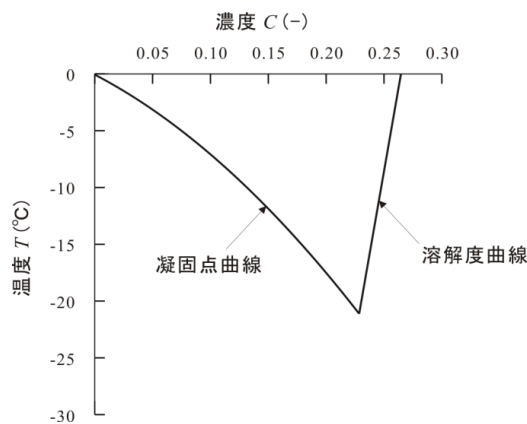


図-3 塩化ナトリウムの状態図⁹⁾

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 (μ_2) は次の5つのステップで求められる。

ステップ1: 凍結防止剤散布によって発生した塩溶液は、凝固点曲線⁹⁾上の T に対応する塩濃度 C (kg/kg) 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2における C (C_2) は T が既知であれば凝固点曲線(図-3)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、

$$C_2 = -0.017(0.02T + 1.63) \quad (1)$$

で近似させた。

ステップ2: 路面上の凍結防止剤は道路勾配に伴う流出（以下、表流損失塩）や通過車両に伴う飛散（以下、車両損失塩）によって損失する。また、SMA舗装や排水性舗装では凍結防止剤は舗装内部への損失（以下、鉛直損失塩）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を有効融解塩量 M_{s-melt} (kg/m²) と定義し、式(2)で与える。

$$M_{s-melt} = M_{ss-in}(1-R_z)(1-R_v)(1-R_x) \quad (2)$$

ここに、 R_x : M_{ss-in} に対する表流損失塩量の比、 R_z : M_{ss-in} に対する鉛直損失塩量の比（鉛直損失塩率）、 R_v : M_{ss-in} に対する車両損失塩量の比（車両損失塩率）である。

R_z は、 H_i を用いて定式化されている⁹⁾。

$$R_z = a_1 H_i + a_2 \quad (3)$$

式(3)中の係数 a_1 および a_2 は舗装の種類によって異なり、表-1に示される⁹⁾。

R_v は、 Q_v と T を用いて次のように表される⁸⁾。

$$R_v = b_1 + b_2 \ln(Q_v) \quad (4)$$

$$b_1 = \exp(0.66T) + 2.64 \times 10^{-3} T \quad (5)$$

$$b_2 = -\frac{T}{16.33} \exp\left(\frac{T}{3.27}\right) \quad (6)$$

なお、本研究では事後散布に起因して発生する塩溶液は極薄層であるため $R_x = 0$ とする。また、圧雪路面の場合は、発生した塩溶液が毛管作用により圧雪内に保持されると考えられるので、 $R_z = 0$ および $R_v = 0$ とした。

ステップ 3 : 凍結防止剤散布に起因して発生する融氷量 M_{i-melt} (kg/m^2) は、 M_{s-melt} および C_2 との関係式、

$$C_2 = \frac{M_{s-melt}}{M_{i-melt} + M_{s-melt}} \quad (7)$$

を変形して求められる。すなわち、

$$M_{i-melt} = \frac{1-C_2}{C_2} M_{s-melt} \quad (8)$$

ステップ 4 : 式(9)に示すように状態 2 の H (H_2) は、 H_{i-1} から式(10)に示す M_{i-melt} を換算した融氷厚 H_{i-melt} (mm) を引いて求められる。

$$H_{i-2} = H_{i-1} - H_{i-melt} \quad (9)$$

$$H_{i-melt} = \frac{M_{i-melt}}{\rho} \times 10^{-3} \quad (10)$$

ここに、 ρ : 密度 (kg/m^3) であり、凍結路面と圧雪路面で区別して与えられる。凍結路面では氷の密度 ρ (kg/m^3) として T を変数にした関数で与えられ¹⁰⁾、圧雪路面では雪の密度 ρ_s (kg/m^3) として車の走行による圧密¹¹⁾を考慮して与えられる。すなわち、

$$\rho = \begin{cases} \rho_i = 0.1T + 916.4 & (\text{凍結路面}) \\ \rho_s = 500.0 & (\text{圧雪路面}) \end{cases} \quad (11)$$

ステップ 5 : 凍結での μ_2 は式(12)の μ と H_i の関係式⁷⁾の H_i に H_2 を代入して算出される。

$$\mu_2 = c_1 \exp(c_2 H_{i-2}) + c_3 \quad (12)$$

表-1 舗装の種類に関連する係数

係数	R_z		μ_2		
	a_1	a_2	c_1	c_2	c_3
密粒度舗装	0	0	0.42	-3.0	0.05
SMA 舗装	-0.33	0.80	0.47	-4.1	0.05
排水性舗装	-0.29	0.96	0.54	-5.8	0.05

ここに、 c_1 、 c_2 および c_3 : 係数であり、舗装の種類別に表-1に示される数値⁷⁾を用いる。

圧雪での μ_2 は、 H_{i-2} 、質量含水率 Θ_s および ρ_s から算出される換算氷厚 H'_{i-2} (mm) と μ の関係式¹²⁾を用いて算出される。 H'_{i-2} の計算式と μ と H'_{i-2} の関係式をそれぞれ以下に示す。

$$H'_{i-2} = \frac{H_{i-2} \cdot \Theta_s \cdot \rho_s}{\rho_i} \quad (13)$$

$$\mu_2 = 0.17 \exp(-0.45 H'_{i-2}) + 0.27 \quad (14)$$

なお、圧雪路面では舗装の種類は考慮されない。

本論文では記載しないが、路面すべり推定法の計算精度については、限られた条件ではあるものの、試験道路で実施した野外試験を通じて検証されている。詳細については、参考文献8)を参照されたい。

3. 冬期路面改善シミュレータWIRIS(ウィリス)

(1) 概要

図-4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。

WIRIS は Microsoft Office Excel で作られており、EXCEL 2000以降の後継版で作動する。

(2) 入力情報

表-2 は入力画面の項目一覧である。以下に各項目について詳細を記載する。

a) 路面状態

WIRIS は、「凍結」と「圧雪」の路面状態を対象とする。よって乾燥や湿潤路面への凍結防止剤の事前散布は考慮されない。凍結と圧雪の路面状態の違いにより、式(11)に示すように H_2 を計算する際の ρ が異なる。また、式(12)および(14)に示す μ を求める式も異なる。

【ウィリスで得られる情報】

- ・除雪や散布の必要性
- ・散布後の雪氷厚や μ の推定値
- ・推奨対策
- ・必要な散布量

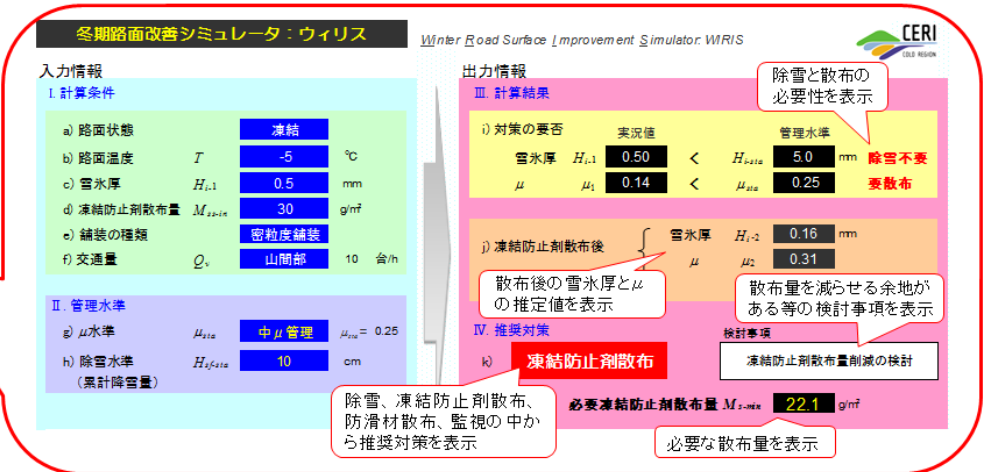


図-4 冬期路面改善シミュレータ WIRIS

表-2 入力項目の一覧

I. 計算条件			
a. 路面状態	凍結	圧雪	
b. 温度 T	0°C以上		
c. 雪氷厚 H_{i1}	0 mm 以上		
d. 凍結防止剤の散布量 M_{S-in}	0 g/m ² 以上		
e. 区域 (交通量) Q_v	都市部 (1000 台/h)	郊外部 (100 台/h)	山間部 (10 台/h)
f. 舗装の種類	密粒度舗装	SMA 舗装	排水性舗装
II. 管理水準			
g. μ 水準 μ_{sta}	低 μ 管理 (0.15)	中 μ 管理 (0.25)	高 μ 管理 (0.35)
h. 除雪水準 H_{f-sta}	5 cm	10 cm	15 cm

b) 路面温度 T

対象とする T を入力する。

c) 雪氷厚 H_{i1}

対象とする H_{i1} の厚さを入力する。参考文献 9) に示したが、SMA 舗装および排水性舗装は水分が舗装内部で貯留・浸透するため、その H_{i1} は同じ水分供給量 M_{w-in} (kg/m²) であっても密粒度舗装に比べて薄い。参考までに、各舗装における M_{w-in} と H_i の関係式 9) を以下に示す。

$$\text{密粒度舗装} : H_i = 1.09M_{w-in} \quad (15)$$

$$\text{SMA 舗装} : H_i = \begin{cases} 0.23M_{w-in}^2 & (0 \leq M_{w-in} < 2.0) \\ 1.09M_{w-in} - 1.26 & (2.0 \leq M_{w-in}) \end{cases} \quad (16)$$

$$\text{排水性舗装} : H_i = \begin{cases} 0.15M_{w-in}^2 & (0 \leq M_{w-in} < 2.0) \\ 1.09M_{w-in} - 1.58 & (2.0 \leq M_{w-in}) \end{cases} \quad (17)$$

ただし、これらの関係は劣化のない舗装で求めたものである。SMA 舗装および排水性舗装の H_i は、 T に加えて舗装のテクスチャや排水機能に依存すると考えられる。

d) 凍結防止剤の散布量 M_{S-in}

任意の M_{S-in} を設定可能であるが、散布実態に即して、1章に記載したように 20~40 g/m² 程度を設定することを推奨する。

e) 交通量 Q_v

対象とする区域を「都市部」、「郊外部」、または「山間部」から選択する。これらの区域の Q_v は 1000、100 および 10 台/h にそれぞれ設定される。対象とする路線の Q_v については道路交通センサ等を参考にされたい。

f) 舗装の種類

対象とする舗装を「密粒度舗装」、「SMA 舗装」、または「排水性舗装」から選択する。この選択により、表-1 に示す係数が変化する。

g) μ 水準 μ_{sta}

対象とする μ の水準 μ_{sta} を「低 μ 管理」、「中 μ 管理」、または「高 μ 管理」から選択する。低 μ 管理から順に μ_{sta} は 0.15、0.25、または 0.35 にそれぞれ設定される。なお、 $\mu_{sta} = 0.15$ および 0.35 は氷結路面と湿潤路面における制動停止距離 (設計速度 50 km/h) に必要な数値として、道路構造令 13) に定められている。また、フィンランドでは、 $\mu < 0.20$ を凍結状態として滑り易い路面、 $\mu \geq 0.30$ を乾燥・湿潤状態として滑り難い路面と定義されている 14)。

h) 除雪水準 H_{f-sta}

対象とする除雪水準を「5 cm」、「10 cm」、または「15 cm」から選択する。一例として、北海道の国道における新雪除雪の出動水準は、累計降雪量 5~10 cm を目安として定められている 15)。

(3) 出力情報

a) 対策の要否

ここでは、除雪作業と散布作業の要否を示す。まず、

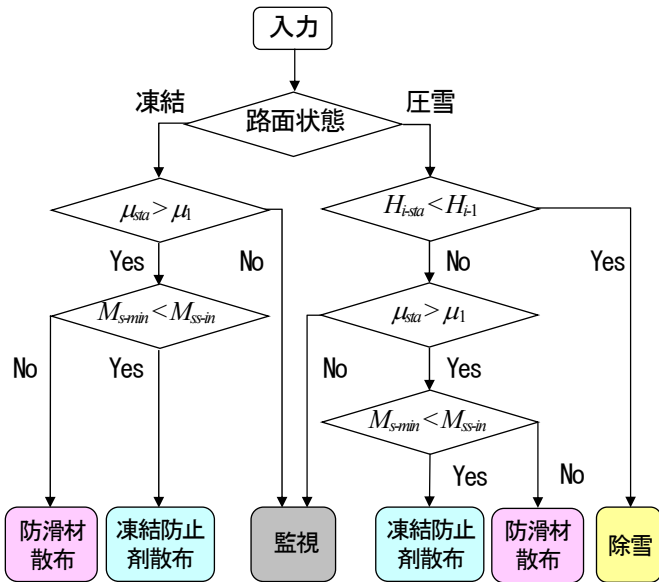


図-5 推奨対策の判別フロー

除雪作業に関して、 H_{f-1} と除雪水準の累計降雪量 H_{f-sta} (cm) を式(18)で変換した路面雪氷厚 H_{f-sta} (mm) を比較し、 $H_{f-1} \leq H_{f-sta}$ の場合に「除雪不要」、逆に $H_{f-1} > H_{f-sta}$ の場合に「要除雪」と表示される。

$$H_{f-sta} = \frac{H_{sf-sta} \rho_s}{10 \rho_{sf}} \quad (18)$$

ここに、 ρ_{sf} : 降雪密度 (kg/m^3) である。また、散布作業に関して、 μ_{th} と μ_{sta} を比較し、 $\mu_{th} > \mu_{sta}$ の場合に「散布不要」、 $\mu_{th} \leq \mu_{sta}$ の場合に「要散布」と表示される。

b) 凍結防止剤散布後

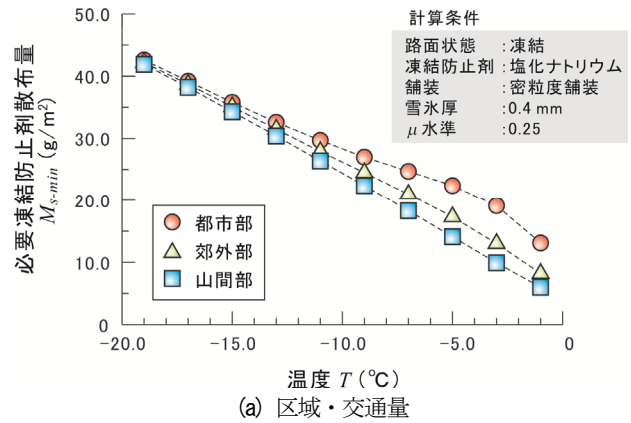
2章で述べた理論に従い、 H_{f-2} と μ_{f-2} を表示する。

c) 推奨対策

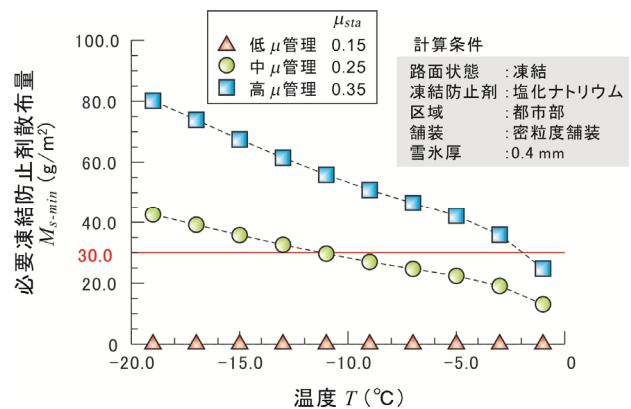
推奨対策は、図-5 のフローに従って「除雪」、「凍結防止剤散布」、「防滑材散布」、または「監視」から判別される。以下に判別の詳細について述べる。

まず、路面状態の中で「凍結」を選択した場合について述べる。WIRIS の出力結果より、 μ の水準値 $\mu_{sta} \leq \mu_{th}$ の場合は「監視」が選択される。 $\mu_{sta} > \mu_{th}$ の場合は、 μ_{sta} まで改善させるために必要な凍結防止剤散布量 M_{s-min} (g/m^2) と M_{s-in} を比較し、 $M_{s-min} < M_{s-in}$ の場合は「凍結防止剤散布」が表示される。また、検討事項の欄には「凍結防止剤散布量の削減」と表示され、さらに M_{s-min} も表示される。 $M_{s-min} \geq M_s$ の場合は「防滑材散布」が表示される。検討事項欄には「凍結防止剤散布量の増加」と表示される。

路面状態で「圧雪」を選択した場合は、除雪水準 H_{f-sta} と H_{f-1} を比較し、 $H_{f-sta} < H_{f-1}$ で「除雪」が表示される。 $H_{f-sta} \geq H_{f-1}$ では、上述の「凍結」を選択した場合と同様に μ_{sta} と μ_{th} および M_{s-min} と M_{s-in} の比較を行い、「監視」、「防滑材散布」、または「凍結防止剤散布」が選ばれる。なお、「防滑材散布」が表示された場合は、検討事項の欄に「凍結防止剤散布量の増加」と「除雪水準の低下」と表示される。



(a) 区域・交通量



(b) μ 水準

図-6 凍結路面における必要凍結防止剤散布量

4. 計算結果に関する検証

(1) 凍結路面

図-6 は凍結路面での WIRIS の計算結果であり、(a) は区域・交通量が M_{s-min} に及ぼす影響について、(b) は μ 水準が M_{s-min} に及ぼす影響について、それぞれ示す。これら計算条件は同図に示されるとおりである。

まず、同図 (a) の区域・交通量に着目する。いずれの区域においても、 T が低下すると融水量が減少するため M_{s-min} は必然的に増大する。また、同じ T であっても山間部、郊外部、都市部の順で (Q_v が多くなるほど) M_{s-min} は大きくなる。これは Q_v が大きいほど車両による凍結防止剤の飛散が顕著になるためである。

次に、同図 (b) の μ 水準について述べる。本計算条件の $H_{f-1} = 0.4 \text{ mm}$ に対して $\mu_{th} = 0.18$ であるため、低 μ 管理 ($\mu_{sta} = 0.15$) では T に関係なく散布は必要としない。中 μ 管理と高 μ 管理を比較すると、高 μ 管理 $\mu_{sta} = 0.35$ の M_{s-min} は中 μ 管理 $\mu_{sta} = 0.25$ のそれに比較しておよそ2倍となる。また、 $M_{s-in} = 30 \text{ g/m}^2$ と設定した場合、 $\mu_{th} > \mu_{sta}$ を満たす T は、中 μ 管理では -10.9°C 以上、高 μ 管理では -2.2°C 以上となる。

(2) 圧雪路面

圧雪路面における M_{s-min} と推奨対策に関する計算の条件および結果を図-7 に示す。同図(a)は高 μ 管理の結果であり、(b)は中 μ 管理の結果である。

同図(a)の高 μ 管理をみると、推奨対策は、 $H_{e1} < 1.7$ mmでは $\mu_{ksa} < \mu_1$ より「監視」となる。1.7 $\leq H_{e1} < 2.1$ mmでは「凍結防止剤散布」となる。 $H_{e1} \geq 2.1$ mmでは、 $M_{s-min} > M_{s-m}$ となることを意味する。本計算条件の $H_{fsa} = 10$ cmでは $H_{isa} = 5.1$ mmとなるため、2.1 $\leq H_{e1} < 5.1$ mmでは「防滑材散布」が表記され、 $H_{e1} \geq 5.1$ mmでは「除雪」が選択される。同図より M_{s-min} は H_{e1} の増大とともに線形的に増加することが知れる。ここで、1章(iii)で述べた圧雪路面への散布について考察する。同図において、「防滑材散布」を「凍結防止剤散布」で代替しようとする M_{s-min} は最大 222 g/m^2 となり、実際の散布量と比較して過剰で現実的でない。代替策として、 H_{fsa} を 5 cmに下げること、 M_{s-min} は最大 55 g/m^2 まで低下させることができる。この他に後述するように μ 水準を下げると散布は不要になる。

同図(b)の中 μ 管理について述べる。 $H_{e1} < 5.1$ mmでは「監視」となり、それ以上で「除雪」となる。気温-8℃かつ $\mu_{ksa} = 0.35$ では「凍結防止剤散布」および「防滑材散布」の選択はなくなる。

5. おわりに

本研究では、客観的・統一的な冬期路面管理を推進させるために、凍結防止剤散布後の路面すべり摩擦係数 μ の推定法を基にした冬期路面改善シミュレータ WIRIS (Winter Road Surface Improvement Simulator、ウィリス)を構築するとともに、計算結果より必要な凍結防止剤散布量を踏まえて推奨対策について検証した。

凍結防止剤の最適化を図る上で、凍結防止剤の散布効果を評価することは不可欠である。本研究により、従来までの気温だけでなく、雪氷厚、交通条件および舗装条件を考慮して、凍結防止剤の散布量の決定および適切な対策を判断できる可能性が高まった。

今後は、WIRISの有効な活用に関して道路管理者と協議し、今まで以上に合理的かつ客観的な冬期道路管理方法の提案を行う。

参考文献

- 川村浩二、高木秀貴、大沼秀次：北海道開発局における凍結路面対策について、北海道開発局技術研究発表会、No.39、pp.107-112、1995。
- 藤崎太一、武藤正広、長澤輝：凍結防止剤散布の効率化に関する研究、北陸雪氷シンポジウム、Vol.21、2006。
- 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）、pp.192-216、2004。

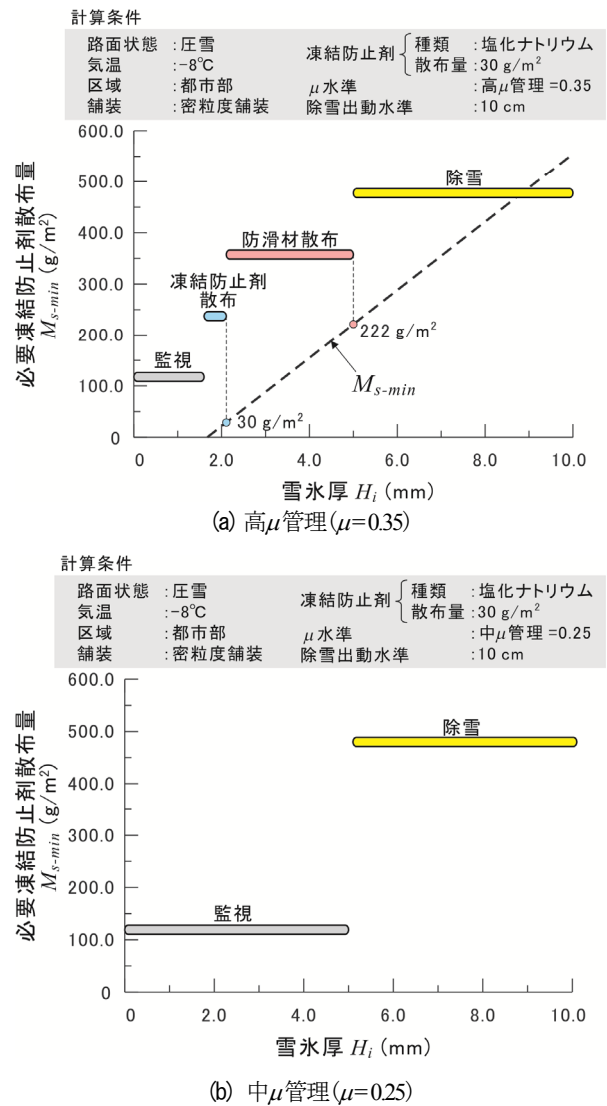


図-7 圧雪路面における必要凍結防止剤散布量および推奨対策に関する検討

- 北海道開発局：冬期路面管理マニュアル（案）、pp.14-27、1997。
- 石川裕一：凍結防止剤の影響を受ける既設道路橋の耐久性向上に関する研究(学位論文)、長岡技術科学大学、22、2013。
- 村国誠：冬期路面管理に使用する薬剤、(3) 薬剤の融雪メカニズム、ゆき、No.12、pp.97-103、1993。
- 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）、Vol. 70、No. 3、I_1-I_3、2014。
- 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、Vol. 71、No. 2、pp. 81-96、2015。
- 藤本明宏、山田慎也、田中俊輔、高橋尚人、武市

靖：SMA・排水性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）、Vol. 71、No. 3、pp. 47-54、2015.

- 10) 前野紀一、福田正巳：雪氷の構造と物性、p. 201、1986.
- 11) 成瀬廉二、石川信敬、武市靖、前野紀一：道路雪氷の消耗過程の特性、低温科学物理篇、Vol. 46、p. 135-149、1988.
- 12) 藤本明宏、渡邊洋、齊田光、福原輝幸：シャーベツト路面の滑り摩擦特性、日本雪工学会誌、Vol. 28、No. 2、pp. 99-106、2012.
- 13) 日本道路協会：道路構造令の解説と運用、pp. 384-385、2004.
- 14) SNOW AND ICE DATABOOK – 2010 Edition, PIARC Technical Committee B5 Winter Service, p. 70, 2010.
- 15) 国土交通省北海道開発局：道路の維持管理計画（案）、p. 7、2014.