広域路面滑り-雪氷状態予測モデルを用いた 路面滑り摩擦に及ぼす交通量の影響評価

田中雅人¹・齊田光²・寺崎寛章³・藤本明宏³・福原輝幸⁴

¹正会員 ミサワ環境技術株式会社 (〒729-6202 広島県三次市向江田町 4252-2)

E-mail: tanaka@ecomisawa.com

²正会員 博士(工) 土木研究所寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3-1-34)

³正会員 博士(工) 福井大学 工学部 (〒910-8507 福井県福井市文京 3-9-1)

⁴正会員 博士(工) 広島工業大学 工学部 (〒731-5193 広島市佐伯区三宅 2-1-1)

本研究では交通量が路面温度 T_p , 積雪深および路面の滑り摩擦係数 μ に与える影響を数値実験により考察した。本研究に使用した広域路面滑り-雪氷状態予測モデルは, 交通量に応じて車両熱と車両による雪氷の飛散を考慮し, μ および T_p の路線に沿った時空間変化を予測する。数値実験の結果, シャーベット路面においては交通量の増加に伴い μ は上昇し, μ の回復に要する時間は短くなる傾向にあることが明らかとなった。さらに, $T_p = 0^\circ\text{C}$ であっても μ は 0.4~0.7 程度の変化があり, T_p の路線分布(サーマルマップ)による路線危険度評価と μ の路線分布(μ マップ)によるそれは必ずしも一致せず, 交通量の影響を受けることが明らかになった。

Key Words : road surface friction, snow/ice conditions, route-based forecast, heat and mass balance method, traffic volume

1. はじめに

筆者らは, 凍結防止剤の散布支援および凍結による冬期の交通事故の回避を目的として, 路線上の定点での熱収支から数10kmの路線を対象とした熱収支法による広域路面温度予測モデル(SAFFモデル)を構築した¹⁾。ただし, SAFFモデルは乾燥路面に限定されたものであった。そこで, SAFFモデルの熱収支理論に路面雪氷の水・氷・空気収支を加味することで路面雪氷状態を計算し, 路面の滑り抵抗値(Halliday Friction Number, HFN)を算定する広域路面滑り-雪氷状態予測モデル(SAFFモデルⅡ)を構築した²⁾。広域路面滑り-雪氷状態予測モデルでは時間交通量分布, 車両による雪氷の飛散および機械除雪が考慮される。モデルの精度検証を福井と兵庫の2路線で行い, 路面温度分布(路線温度)における平均誤差(区間にわたる164~718箇所の計算値と測定値の差の平均値)は $\pm 1.2^\circ\text{C}$ に収まった²⁾。また, 計算による路面の雪氷状態および HFN は, デジタル標高データの解像度(50m)以下の雪氷状態の局所的変化が強い箇所を除けば, ビデオ映像の結果や HFN の測定値と概ね一致した²⁾。しかしながら, 2つの路線で大きく異なる交通量が路面の滑り抵抗に如何なる影響を及ぼすかを

把握するには至らなかった。交通量や車両熱を考慮したモデルは過去にもあるものの^{3) 4)}, 予測の対象は路面温度であり, 路面雪氷状態や路面滑り抵抗までに到っていない。

これまでに通過車両の影響による雪氷飛散については, 沿道環境の観点から車両通行による歩行者への雪や融雪水の飛散⁵⁾および飛散による沿道構造物の塩害⁶⁾の観点から議論されてきた。勿論, 路面雪氷と交通の関係に注目した研究も過去にある。藤本ら⁷⁾は, 飛散量はシャーベット厚さに伴って線形的に増大するが, 質量含氷率が0.75以上になると, 路面上のシャーベットは殆ど飛散しないことを示した。さらに, シャーベット路面の滑り摩擦係数 μ はシャーベット層中の氷成分の厚さを用いて整理すれば, μ との相関が最も高いことを明らかにした⁸⁾。伊東ら⁹⁾は, ドイツでの調査より凍結防止剤の50-75%が道路縁に飛散することを紹介した。佐藤ら¹⁰⁾は, 轍での水飛散を調べた結果, 散水直後0.1mmの路面水膜厚は車300台が走行後, 0.01mm以下になることを明らかにした。こうした結果からも, タイヤの巻き上げによるシャーベットの飛散は無視できず, タイヤ走行部は非走行部に比べて黒路面になり易いことが理解できる。またカナダの冬期運転冊子¹¹⁾は,

図-1 舗装路面雪氷層熱収支の概念図

飛散によってタイヤハウスに溜まるシャーベットのハンドル操作に影響を及ぼすと忠告している。

これらの研究により、雪の飛散は交通量に依存し、路面雪氷状態を変化させ、延いては路面の滑りに影響を与えることが推察できる。しかしながら現状では、任意の降雪状況と交通量の時間分布が路面の滑りにどのような影響をもたらすかについての研究成果は無く、今後明確にすべき課題の一つである。交通量およびその時間分布は路線によって異なることから、この点が科学的に明らかにできれば、冬期における路線網固有の危険性を把握することが期待できる。

以上より、本研究では広域路面滑り-雪氷状態予測モデルを用いて交通量およびその時間分布が、 μ および T_p の路線分布に及ぼす影響を考察する。

2. 広域路面滑り-雪氷状態予測モデル

(1) モデルの概要

広域路面滑り-雪氷状態予測モデルは、道路気象計算、路面雪氷層(路面)の熱・水・氷・空気の収支計算および μ 計算から成る。モデルの計算フローは参考文献²⁾を参照されたい。以下では、熱・水分収支式および車両飛散に伴う熱・水分フラックスの定式化を紹介する。その他の影響因子の計算は参考文献²⁾を参照されたい。

(2) 路面雪氷層の熱収支理論

a) 路面雪氷層の熱収支

道路を形成する有限要素(道路路面要素)上の雪氷層に対する熱収支は、式(1)で与えられる。

$$(\rho c)_s \frac{\partial (T_s h_s)}{\partial t} = q_{sds} + q_{lds} - q_{lus} + q_{as} + q_{sf} - q_{le} - q_{sa} + q_{lm} - q_{if} - q_{dr} + q_{sp} - q_{st} \quad (1)$$

ここに、 $(\rho c)_s$: 雪氷層の体積熱容量(J/m³/K)、 T_s : 雪氷層温度(°C)、 h_s : 走行(タイヤ)部の路面雪氷層厚(m)、 t : 時間(sec)、 q_{sds} : 日向・日陰を考慮した日射熱フラックス¹⁾(W/m²)(表層のみ)、 q_{lds} : 雪氷層に入射する長波放射フラックス¹⁾(W/m²)(表層のみ)、 q_{lus} : 雪氷層からの長波放射フラックス¹⁾(W/m²)(表層のみ)、 q_{as} : 車両風・自然風による顕熱フラックス¹⁾(W/m²)(表層のみ)、 q_{sf} : 降雨/降雪顕熱フラックス¹²⁾(W/m²)(表層のみ)、 q_{le} : 蒸発・昇華潜熱フラックス¹²⁾(W/m²)(表層のみ)、 q_{sa} : 飛散による顕熱フラックス(W/m²)、 q_{lm} : 融解・凝固潜熱フラックス¹²⁾(W/m²)、 q_{if} : 融雪水の下方浸透による顕熱フラックス¹³⁾(W/m²)(最下層以外)、 q_{dr} : 排水による顕熱フラックス²⁾(W/m²)(最下層のみ)、 q_{sp} : 雪氷層と舗装表面間の熱移動フラックス¹²⁾(W/m²)(最下層のみ)、 q_{st} : 日射の透過熱フラックス¹²⁾(W/m²)。

右边第7項の q_{sa} は、路面雪氷各層($j=1 \sim n$)の温度の違いを考慮して、飛散による顕熱フラックスは各層のその総和として式(2)で与えられる。

$$q_{sa} = \sum_{j=1}^n (M_{sa} C_s T_s N_{vh})_j \quad (2)$$

ここに、 M_{sa} : 雪氷層毎の飛散フラックス(kg/m²/台)、 C_s : 雪氷層の比熱(J/kg/K)、 N_{vh} : 単位時間当たりの車両通過台数(台/s)。

M_{sa} は各雪氷層厚(dz_s)で重み付けし、全雪氷層にわたる M_{sa} の合計 $\sum M_{sa}$ が飛散フラックスに等しくなるように与えた。 M_{sa} は式(3)で与えられる。

$$M_{sa} = \frac{m_{sa} dz_s}{h_s B_t} \quad (3)$$

ここに、 m_{sa} ：車進行方向の単位幅当たりのシャーベット飛散量(kg/m/台)、 h_s ：走行(タイヤ)部の路面雪氷層厚(m)、 B_t ：タイヤ幅(m)。

m_{sa} は、藤本らのシャーベットの飛散実験(普通車重量：1.16t, 中型車重量：3.5t, 走行速度 50km/h)の結果⁷⁾に従って、式(4)より求めた。

$$m_{sa} = \begin{cases} 0.08h_s & (\text{普通車}) \\ 0.11h_s & (\text{中型車}) \end{cases} \quad (4)$$

ここで、小型車は普通車に、大型車は中型車にそれぞれ含める。

h_s は $\sum_{j=1}^n dz_{sj}$ となる。

C_s は、雪氷層の構成に従って式(5)で与えられる。

$$C_s = C_i \theta_i + C_w \theta_w + C_a \theta_a \quad (5)$$

ここに、 θ_i ：体積含氷率、 θ_w ：体積含水率、 θ_a ：体積含空率(=1- θ_i - θ_w)、 C_i ：氷の比熱(J/kg/K)、 C_w ：水の比熱(J/kg/K)、 C_a ：空気の比熱(J/kg/K)。

b) 舗装表層の熱収支

雪氷層と接する舗装表層の熱収支は、式(1)右边第 11 項の q_{sp} 、同じく右边第 12 項の q_{st} および舗装熱伝導フラックス q_p ¹⁾を用いて式(6)で与えられる。

$$(\rho c)_p \frac{\partial T_{ps}}{\partial t} dz_{ps} = -q_{sp} + q_p + q_{st} \quad (6)$$

ここに、 $(\rho c)_p$ ：舗装表層の体積熱容量(J/m³/K)、 T_{ps} ：舗装表層温度(°C)、 dz_{ps} ：舗装表層厚(m)。

なお、舗装内部、路盤および地盤の熱移動は鉛直一次元の熱伝導方程式で規定される。

(3) 路面雪氷層の水・氷・空気収支理論

a) 水質量収支

雪氷層はその厚さに応じて複数の層に分割され、単位面積当たりの雪氷層中の水質量 M_w (kg/m²)の時間変化率は、式(7)で与えられる。

$$\frac{\partial M_w}{\partial t} = M_{fw} + M_{lw} + M_{iw} - M_{sw} - M_{dw} - M_{saw} \quad (7)$$

ここに、 M_{fw} ：降雨フラックス¹²⁾(kg/m²/s)(表層のみ考慮)、 M_{lw} ：蒸発・凝結フラックス¹²⁾(kg/m²/s)(表層のみ考慮)、 M_{iw} ：融解・凝固フラックス¹²⁾(kg/m²/s)、(M_{iw} >0：融解、 M_{iw} <0：凝固)、 M_{sw} ：融雪水の下方浸透フラックス¹³⁾(kg/m²/s)(最下層以外考慮)、 M_{dw} ：融雪水の排水フラックス²⁾(kg/m²/s)、 M_{saw} ：飛散水成分フラックス(kg/m²/s)。

ただし上式の適用に際して、排水が進行して雪氷層厚が減少しても完全に排水されることはなく、水膜は残存することが予想される。Sass¹⁴⁾は Garrat¹⁵⁾が導いた熱水分

移動に関する氷の粗度高さを参考に、限界排水状態の残水膜厚 h_{wc} を 5.0×10^{-4} m とした。この考え方に従い本研究でも飛散があっても路面上に幾らかの水分(路面水)は残るとし、 h_{wc} は藤本ら¹⁶⁾の湿潤アスファルト路面上の風速分布から求めた粗度高さ 1.1×10^{-4} m を採用した。なお、水膜厚 h_w が h_{wc} より小さい場合、路面水は蒸発によって減るものとした。

シャーベット路面の飛散に関しては、藤本らの実験⁷⁾に基づき、 M_{saw} を式(8)により求めた。

$$M_{saw} = \frac{m_{sa} N_{vh} \Theta_w}{B_t} \quad (8)$$

ここに、 Θ_w ：雪氷層中の質量含水率(kg/kg)。

b) 氷質量収支

単位面積当たりの雪氷層中の氷質量 M_i (kg/m²)の時間変化率は、式(9)で与えられる。

$$\frac{\partial M_i}{\partial t} = M_{fi} + M_{li} - M_{iw} - M_{sai} \quad (9)$$

ここに、 M_{fi} ：降雪フラックス¹²⁾(kg/m²/s)(表層のみ)、 M_{li} ：昇華フラックス¹²⁾(kg/m²/s)(表層のみ)、 M_{sai} ：飛散氷成分フラックス(kg/m²/s)。

M_{sai} は式(10)により求めた。

$$M_{sai} = \frac{m_{sa} N_{vh} \Theta_i}{B_t} \quad (10)$$

ここに、 Θ_i ：雪氷層中の質量含氷率(kg/kg)。

ただし、質量含氷率 $\Theta_i > 0.75$ では、木下ら¹⁷⁾ および藤本ら⁷⁾に倣い、飛散は生じないとする。

c) 空気体積収支

単位面積当たりの雪氷層中の空気体積 V_a (m³/m²)の時間変化率は、藤本ら¹²⁾の空気体積収支式に車両による飛散を加味して、式(11)で与えられる。

$$\frac{\partial V_a}{\partial t} = V_{fa} - V_{exa} - V_{oa} - V_{saa} - V_{vca} \quad (11)$$

ここに、 V_{fa} ：降雪空気フラックス¹²⁾(m³/m²/s)、 V_{exa} ：置換空気フラックス¹²⁾(m³/m²/s)、 V_{oa} ：開放空気フラックス¹²⁾(m³/m²/s)、 V_{saa} ：飛散空気成分フラックス(m³/m²/s)、 V_{vca} ：車両が 1 台通過した時の粘性圧縮による排出空気フラックス (m³/m²/s)。

V_{saa} は式(12)により求めた。

$$V_{saa} = \frac{m_{sa} N_{vh}}{\rho_{sa} B_t} (1 - \theta_i - \theta_w) \quad (12)$$

ここに、 ρ_{sa} ：シャーベットの密度(kg/m³)。

なお、車両通過に伴う雪の圧密状態は参考文献¹⁸⁾に従って与えた。

(4) 滑り摩擦係数(μ)の算定

路面雪氷層の熱収支および水・氷・空気収支理論によって、雪氷層中の氷厚 z (mm)は式(13)で計算される。

$$z_i = \theta_i h_s \quad (13)$$

これより、シャーベット路面では MASS 車によって測定された μ と z_i との関係⁸⁾に従って、 μ は計算される。

$$\mu = 0.27 \exp(-0.45z_i) + 0.42 \quad (14)$$

また、圧雪は飛散が起きない雪氷状態で起こるとみなし、 $\theta_i \geq 0.75$ の時、 $\mu = 0.40^{8), 19)}$ とする。氷板は氷成分だけの雪氷状態とみなし、 $\theta_i = 1.0$ の時、 $\mu = 0.35^{19)}$ とする。

なお、本論文では輪荷重の大きい車両による雪氷層の路面剥離に伴う飛散は考慮していない。

3. 数値実験条件

(1) 計算対象区間

交通量による路面温度や路面の滑り摩擦係数の感度分析を行うために、兵庫県の春日和田山道路(青垣 IC(南側)から和田山 JCT(北側)までの約 19km)を計算の対象とした。本論文では和田山 JCT を距離の起点とする。春日和田山道路は片側 1 車線のアスファルト舗装自動車専用道路(一部トンネル区間はコンクリート舗装)であり、冬期の気象条件は場所的に異なる。

(2) 交通条件

図-2 に示す平成 22 年度交通センサスのデータを利用し、交通センサスの時間区分に従い昼間 403 台/h(8 時～19 時)、夜間 128 台/h(20 時～7 時)を実測値とした。数値実験の交通条件として、表-1 に示すように交通量の時間分布は変わらないものとして、時間交通量を実測値の 0.2 倍、0.5 倍、1.0 倍および 2.0 倍に増減させた 4 ケース(W-1 から W-4)を与えた。各ケースの倍率は、交通量の影響による感度を把握しやすいように設定した。さらに交通

図-2 交通量実測値(W-3)

表-1 交通量の条件

Case	倍率	日交通量(台/日)
W-1	実測値の 0.2 倍	1,274
W-2	実測値の 0.5 倍	3,186
W-3	実測値(1.0 倍)	6,372
W-4	実測値の 2.0 倍	12,744

センサスの交通量は、図-2 に示すように小型車と大型車に区別して計算に組み込んだ。

(3) 気象条件

数値実験の気象条件として 2012/1/25～28 の気象庁によるメソ数値予報モデルのうち和田山周辺の 5km メッシュ数値予報を面的に与えた。この期間の降雪量、気温 T_a および日射量の経時変化を図-3(a)に示す。期間中降雪は昼夜に関係なくほぼ断続的であり、特に 1/25 21:00 から 1/26 9:00 までは時間降雪 10mm 程度以上が 10 回程度あった。 T_a は最高でも 1/26 で約 2℃、1/27 で約 4℃であり、夜間は両日とも約 4℃まで低下した。なお、降雪量および T_a は路線にわたる空間平均値を示す。長波放射データは実測値がないために、近藤らの式²⁰⁾を用いて計算した。

(4) 初期条件および地盤温度条件

初期路面温度は降雪前に行ったサーマルマッピングで得られた実測値(1 月 25 日 12:00)を与えた。底部境界条件の地盤温度は兵庫県春日和田山道路和田トンネル坑口で測定した舗装および地盤温度結果より、路面下 2m の地盤温度は 15℃一定だったので、これを底部境界条件として与えた。初期の舗装および地盤温度は、和田トンネル坑口の路面下 0.005, 0.015, 0.025, 0.035, 0.05, 0.08, 0.1, 0.14, 0.21, 0.28, 0.35, 0.5, 0.65 および 2m の位置に埋設された熱電対により測定された 2011 年 1 月 25 日 12:00 の鉛直分布の相似性が、全路線に適用できると仮定して与えた。計算の詳細は参考文献⁹⁾を参照されたい。

4. 路線の危険度に及ぼす交通量の影響

(1) 時間変化特性

図-3(a)～(e)は、気象条件、積雪深 h_s 、飛散、路面温度 T_p (積雪時は雪氷層表面温度、非積雪時は舗装表面温度)および μ の経時変化をそれぞれ示す。図中の h_s 、 T_p および μ は路線にわたる空間平均値を示す。雪の飛散に関しては、計算出力間隔(10 分)毎および測点毎に飛散の有無を判断し、区間にわたる 1 時間毎の飛散累積時間を 1 時間にとり計算出力回数に測点数を乗じた値で除して無次元化した時間飛散率(以下、飛散率と呼称)を示す。

a) 積雪深と雪の飛散

計算開始から 1/26 12:00 頃まで飛散はなく、積雪は車両通過により速やかに圧雪される。同様なことが 1/26～1/27 の夜間にも認められる。特に 1/26 6:00 頃までの比較的強い降雪で圧雪になると、 h_s には交通量による差が認められない。

1/26 10:00～16:00 および 1/27 8:00～16:00 では $T_a > 0^\circ\text{C}$ および日射の影響により融雪が進行し、 θ_i が低下するため

図-3 気象条件、積雪深、飛散率、路面温度および μ の経時変化

路面はシャーベット状態となり、1/26 13:00～18:00 および 1/27 7:00～17:00 の間で飛散が生じる。交通量に比例して飛散の開始は早まり、1/27 には W-1 と W-4 では 2 時間の違いが生じる。 $T_a < 0^\circ\text{C}$ となる 1/26 17:00～1/27 7:00 のように飛散が止まると、 h_s の時間変化は降雪強度のそれに依存する。1/27～1/28 の夜間は降雪がないために交通量が多い程、雪氷層は車両熱の影響を受けて積雪の時間的低下速度(dh_s/dt)は、交通量に比例して大きくなり、W-1 で -0.10mm/h 、W-4 で -0.13mm/h となった。

以上より、シャーベット路面では交通量が多い程、 h_s は小さくなる傾向にあることが分かる。

b) 路線温度

基本的に路線温度は交通量の大小に関係なく、その分布形は相似である。ただし、全般的に交通量が多い程 T_p は高く、従って $T_p > 0^\circ\text{C}$ の期間は長く、 $T_p < 0^\circ\text{C}$ の期間は短くなる。よって、 T_p が負から正へ移行する時期は交通量が多い程早まり易く、1/27 6:00 頃を観ると W-4 は W-1 に比べて 1 時間程度早まる。

c) 路面滑り摩擦

交通量による μ への影響は μ の低下期よりも上昇期で現われ易い。これを明確に示しているのが 1/27 6:00～12:00 の期間である。昼間は上述したように交通量が増えるに従い h_s の低下(雪の飛散)開始時期が早まるために、 μ の上昇開始時期も早まり、W-1 と W-4 では1時間の差となる。また、 μ の値は同日 11:00 の W-1 で $\mu=0.54$ および W-4 で $\mu=0.65$ となる。この路面上を時速 40km で走行すると、制動距離は前者で約 12m, 後方で約 10m となり²⁾、W-4 で約 2m(20%)短くなる。

ただし、夜間では氷点下の気温となって路面は圧雪または氷板状態となるために、 μ は交通量に依らず同じ値になる。

(2) 路線分布から見た危険度評価

前節では主に h_s 、 T_p および μ の空間(路線)平均値の時間変化について言及した。そこで本節では h_s 、 T_p および μ の路線分布の時間変化について考察を行う。考察の対象とする時間帯は前節で議論したように、交通量の影響を受け易い μ 上昇期(1/27 7:00, 9:00, 11:00)とする。この時間の h_s 、 T_p および μ の路線分布を図-4(1)～(3)にそれぞれ示す。図-4の左縦軸は h_s を、右縦軸は T_p および $\mu(\times 10)$ の値を示し、同図(1)は7:00, (2)は9:00 および(3)は11:00の結果である。横軸は和田山から青垣までの距離を表す。

また、同図には遠阪トンネルおよび和田トンネルも表示される。

まず h_s の路線分布に注目する。交通量に関係なく h_s 分布は時間の経過とともに低下する。交通量の違いで h_s を観ると、3つの時間ともそれぞれ交通量が多い程 h_s は小さい。例えば、1/27 11:00 の和田山から和田トンネルまでの区間で $h_s \approx 0\text{mm}$ の距離はW-1 で0.2km, W-2 で1.0km, W-3 で3.1km, W-4 で7.3km となり、W-3 と W-4 の間で大きな差異が生じる。

次に、 T_p に注目する。1/27 7:00 を観ると交通量に関係なく全域で $T_p=0^\circ\text{C}$ となる。9:00 では和田トンネルから青垣の間で $T_p>0^\circ\text{C}$ が局所的に現れてくる。この傾向は交通量が増えるにつれて顕著になる。11:00 では降雪の影響を受けてW-1 から W-3 では全線 $T_p=0^\circ\text{C}$ であるが、W-4 では遠阪トンネルから青垣間のうち2.6kmの区間で $T_p>0^\circ\text{C}$ が現れる。

最後に μ について考察する。1/27 7:00 の μ は和田山から和田トンネル間で交通量に関係なく $\mu \approx 0.4$ (圧雪)となる。これより南の青垣までの μ は僅かながら交通量に比して増大する。9:00 になっても和田山から和田トンネルの区間で μ の回復は見られないが、和田トンネルから青垣の間ではW-1, W-2, W-3 で μ のレベルが全体的に上がり、W-4 では $\mu \approx 0.7$ (湿潤)となる。11:00 になると和田山から和田トンネル間で $\mu \approx 0.4$ の区間はW-1 で5.7km,

図-4(1) h_s 、 T_p および μ の路線分布 (1/27 7:00) (TN : tunnel)

図-4(2) h_s , T_p および μ の路線分布 (1/27 9:00) (TN : tunnel)

図-4(3) h_s , T_p および μ の路線分布 (1/27 11:00) (TN : tunnel)

W-2 で4.7km, W-3 で2.7km, W-4 で1.1km となり、交通量が増えるに従い短くなる。

以上より、 $T_p=0^{\circ}\text{C}$ であっても $\mu=0.4\sim 0.7$ の変化があること、および T_p が急変する地点と μ が急変する地点は一致せず、交通量によって変わることが知れる。

5. おわりに

これまで冬期路面の危険度は路面温度 T_p に基づいて評価され、交通の影響は車両熱に留まっていた。しかしながら、雪氷路面の計算に当たっては、車両による圧雪や飛散が雪氷状態を変化させる因子であることは自明の理である。一方で路面雪氷に及ぼす車両の影響を実験的に解明することは多種多様な条件を伴うために難しい。本研究では、広域路面滑り-雪氷状態予測モデルを用いることで、交通量が路面の雪氷状態および μ に及ぼす影響を初めて考察することができた。

当然ながら、路面雪氷状態は飛散の有無、気温や降雪量と関係するので、交通量による影響は単純ではないが、本研究により得られた知見はその緒となる。以下に主要な結論を述べる。

- 1) シャーベット路面では飛散のために交通量に比例して積雪深は減少し、路面の滑り摩擦係数 μ は上昇し易くなる。
- 2) 特に、 μ が下降する時よりも上昇する時に、 μ に及ぼす交通量の影響は現れ易く、路面の滑りの回復は交通量が増大するにつれて時間的に早まる傾向にある。
- 3) 圧雪路面では交通量が路面雪氷状態へ及ぼす影響は小さい。
- 4) T_p が路線に亘り 0°C であっても μ は空間的に変動し、 T_p が急変する地点と μ が急変する地点は一致せず、交通量によって変わることが分かった。

以上、本研究により、サーマルマップに基づく路線の危険度と μ マップに基づくそれは必ずしも一致せず、路線の危険度は交通量の影響を受けることを示すことができた。今後更に μ の空間変化と交通との関係を理論的および実験的に研究する必要がある。

参考文献

- 1) 齊田光, 藤本明宏, 福原輝幸: 熱収支法による広域路線温度予測—乾燥路面の路線温度分布予測—, 土木学会論文集 E1, Vol.69, No.1, pp.1-11, 2012.
- 2) 齊田光, 田中雅人, 寺崎寛章, 福原輝幸, 藤本明宏: 広域路面滑り-雪氷状態予測モデル, 日本雪工学会誌, Vol.32, No.1, pp.1-16, 2016.
- 3) Chapman L., Thomes E. J., Bradley V. A.: Modelling of road surface temperature from a geographical parameter database. Part 2 Numerical, *Meteorological Applications*, Vol.8, pp.421-436, 2001.
- 4) Crevier L. P., Delage Y.: METRo: A New Model for Road-Condition Forecasting in Canada, *Journal of applied meteorology*, Vol.40, pp.2026-2037, 2001.
- 5) 米沢市: 米沢冬の暮らしかた情報, p.7, 2012.
- 6) 岩崎英治, 永藤壽宮, 湯浅昭, 西剛広: 凍結防止剤の飛散と鋼橋の腐食, 土木学会構造工学論文集, Vol.58A, pp.655-667, 2012.
- 7) 藤本明宏, 渡邊洋, 内藤知照, 福原輝幸: 車両通過に伴うシャーベットの飛散実験—その2—, 寒地技術論文・報告集, Vol.22, pp.239-243, 2006.
- 8) 藤本明宏, 渡邊洋, 齊田光, 福原輝幸: シャーベット路面のすべり摩擦特性, 日本雪工学会誌, Vol.28, No.2, pp.99-106, 2012.
- 9) 伊東靖彦, 大上哲也, 高橋尚人, 牧野正敏, 松沢勝, 丸山記美雄, 宗広一徳, 浅野基樹: PIARC 国際冬期道路会議に参加して, 寒地土木研究所月報, No.686, pp.30-50, 2010.
- 10) 佐藤賢治, 藤本明宏, 切石亮, 徳永ロベルト, 高橋尚人, 石田樹: 凍結防止剤の通過車両への付着量とその分布に関する走行試験, 寒地土木研究所月報, No.737, pp.32-36, 2014.
- 11) Traveler Information Services, Ontario, Canada: Winter Driving - Be Prepared, Be Safe!, p.9, 2013.
- 12) 藤本明宏, 渡邊洋, 福原輝幸: 輻射—透過を伴う路面薄雪氷層の融解解析, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.2, pp.202-213, 2007.
- 13) 藤本明宏, 渡邊洋, 福原輝幸: 多層路面雪氷状態モデル, 日本雪工学会誌, Vol.24, No.1, pp.3-11, 2008.
- 14) Sass B. H.: A Numerical Model for Prediction of Road Temperature and Ice, *Journal of applied meteorology*, Vol.31, pp.1499-1506, 1992.
- 15) Garratt J. R.: Review of drag coefficients over oceans and continents, *Monthly Weather Review*, Vol.105, pp.915-929, 1977.
- 16) 藤本明宏, 福原輝幸, 渡邊洋, 佐藤威, 根本征樹, 望月重人, 岸井徳雄: 乾燥, 湿潤, 氷板および圧雪路面と大気との間の熱・水蒸気移動, 日本雪工学会誌, Vol.22, No.3, pp.220-228, 2006.
- 17) 木下誠一, 秋田谷英次, 田沼邦雄: 道路上の雪氷の調査 II, 低温科学物理篇, Vol.28, pp. 311-323, 1970.
- 18) 武士俊也, 福原輝幸, 横山孝男, 渡邊洋, 林健一, 藤本明宏: 熱収支法による路面凍結解析—車両タイヤ-圧雪層—路面間の熱移動—, 寒地技術論文・報告集, Vol.18, pp. 71-76, 2002.
- 19) 藤本明宏, 渡邊洋, 福原輝幸, 武士俊也, 小林一治, 宮崎長生, 小川明子, 浅野基樹: MASS 車によるすべり摩擦と道路雪氷との関係, 日本雪工学会誌, Vol.21, No.5, pp.26-35, 2005.

- 20) 近藤純正, 中村亘, 山崎剛: 日射量および下向き大気放射量の推定, 天気, Vol.38, No.1, pp.41-48, 1991.
- 21) 安藤和彦, 倉持智明, 寺田剛: アンチロック状態などを考慮した制動停止距離, 土木技術資料, 51-10, pp.52-55, 2009.

Evaluation of Effects of Traffic Volume on Road-Surface Friction Using A Route-Based Forecasting Model of Road Slipperiness and Snow / Ice Conditions

Masato TANAKA, Akira SAIDA, Hiroaki TERASAKI, Akihiro FUJIMOTO
and Teruyuki FUKUHARA

This study aims at revealing impacts of traffic volume on the road surface temperature (RST), snow depth, and road surface friction μ along a road networks by performing numerical simulations. Our route-based forecasting model used in this study newly considers temporal/spatial variations of the μ and RST due to the difference in hourly traffic volume through vehicle related heats and snow scattering.

The main conclusions are 1) when the road surface is slush, the μ is likely to rise in proportion to the traffic volume and the increase of traffic volume tends to shorten the recovery period of μ , i.e. period required to reach safe road surface state from dangerous one. 2) Although the RST is 0°C along a route, μ fluctuates 0.4 to 0.7. As a result, the present results imply that risk assessment of winter roads using a thermal map is not always in agreement with it using a μ -map, and that the disagreement of the risk assessment is affected by traffic volume.