

**凍結防止剤と車両を考慮した  
熱・水分・塩収支による路面凍結モデルの構築  
— 車両通過に伴う路面上の水分および塩の飛散のモデル化 —  
A Development of Road Surface Freezing Model Using Heat, Water  
and Salt Balance in Considering of Deicing Agents and Vehicles  
- Modeling of vehicular water and salt dispersion on road -**

藤本明宏, 切石亮 (土木研究所寒地土木研究所), 川端優一 (北海道開発局釧路開発建設部), 徳永ロベルト, 高橋尚人, 石田樹 (土木研究所寒地土木研究所)  
Akihiro Fujimoto, Makoto Kiriishi, Yuichi Kawabata, Roberto Tokunaga,  
Naoto Takahashi, Tateki Ishida

1. はじめに

冬期交通の安全性向上と冬期道路管理の効率化を図るために、路面凍結モデルは1980年代から様々な研究機関で開発されてきた(既往研究については、前報<sup>1)</sup>にとりまとめたので、参照されたい)。しかしながら、車両や凍結防止剤(以下、塩)などの人為的影響を考慮したモデルは少なく、特に塩を考慮したモデルは筆者の知る限り世界的に存在しない。路面凍結モデルに塩を加味することにより、塩散布後の路面状態の推定と散布効果の評価が可能になり、塩散布の適正化への貢献度は高い。

そこで本研究では、固相塩の散布に伴う路面の水膜厚、氷膜厚、塩濃度および残塩量の時間変化の計算を可能にする熱・水分・塩収支による路面凍結モデル(以下、Salting Vehicle Road Surface Freezing (SVRSF) model)を新たに構築した<sup>2)</sup>。本論文では、車両通過に伴う水および塩の飛散のモデル化について紹介するとともに、野外試験との比較を通じた SVRSF model の検証結果の一部を報告する。

2. SVRSF model

SVRSF model は、従来の熱・水分収支による路面凍結モデルに、塩散布の影響(溶解潜熱および凝固点降下)および通過車両の物理的影響(飛散)を組み込んだ点に新規性があり、通過車両の熱的影響(タイヤ摩擦熱フラックス, 車両輻射熱フラックス, 車両誘発顕熱フラックス, 車両による放射熱の遮蔽)<sup>3)</sup>も考慮される。

以下では、図1を用いて氷膜路面への塩散布後に起こる水・氷・塩の相変化現象のモデリングについて説明する。氷膜路面に塩を散布した場合、Step 1: 散布された塩は氷膜に接触する。Step 2: 塩周辺に飽和濃度の塩溶液が発生する。

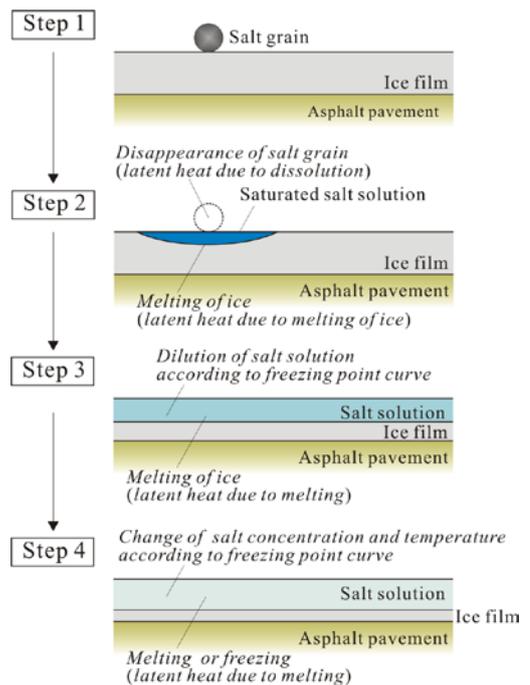


図1 氷膜路面への塩散布に伴う相変化の概念図

この相変化の際に塩の溶解熱(塩化ナトリウム：吸熱，塩化カルシウム：発熱)および氷の融解熱が発生する。Step 3：凝固点曲線上の塩溶液温度に対応する濃度まで氷が融解し，塩溶液は希釈される。Step 4：塩溶液は熱収支によって温度変化が生じると，路面上の氷の融解あるいは水の凝固が生じ，凝固点曲線に対応する濃度に変化する。

SVRFP model は，上記の Step 1 から Step 4 の過程における塩溶液の温度および濃度の変化を，路面の熱，水，氷および塩収支を解析することで可能にし，路面雪氷状態(氷膜厚や水膜厚)に加えて，塩濃度および路面残塩量を出力することができる。熱，水，氷および塩収支については次章で詳述する。

### 3. 理論

#### (1) 路面氷膜層の構成成分

図 2 は，塩散布下の氷膜路面における熱，水分および塩移動の概念を示す。この場合，路面上に存在する物質は不純物を除けば，水，氷および塩によって構成される。本論文では，路面上のこれらの混合層を WIS 層と呼ぶ。WIS 層の質量  $M_{wis}$  ( $\text{kg m}^{-2}$ ) は，水質量  $M_w$  ( $\text{kg m}^{-2}$ )，氷質量  $M_i$  ( $\text{kg m}^{-2}$ ) および塩質量  $M_s$  ( $\text{kg m}^{-2}$ ) の和となる。 $M_s$  は固相塩質量  $M_{ss}$  ( $\text{kg m}^{-2}$ ) と溶媒に溶け込んだ液相塩質量  $M_{sl}$  ( $\text{kg m}^{-2}$ ) に分けられる。

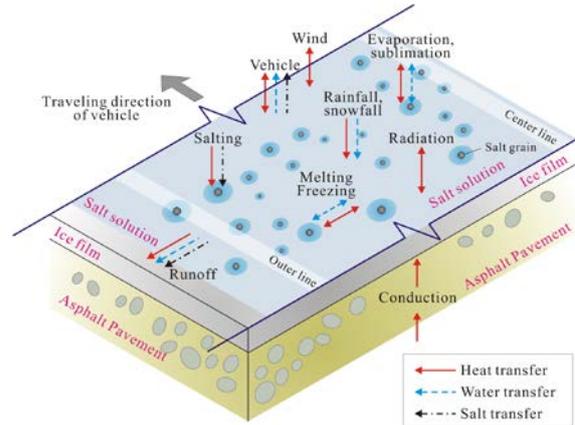


図 2 SVRFP model における熱，水分および塩移動の概念図

#### (2) 基礎方程式

SVRFP model における WIS 層の熱，氷，水および固相・液相塩質量移動の基礎方程式を以下に示す。本論文では，車両通過に伴う飛散水フラックス(車両飛散水フラックス， $m_{wv}$  ( $\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ))のみ 4 章で記述する。その他のフラックスについては参考文献<sup>2)</sup>を参照されたい。なお， $f(t)$  および  $g(t)$  は車両の有無に起因して発生および消失するフラックスの判別変数である。車両が有る場合は  $f(t) = 0$ ， $g(t) = 1$ ，車両が無い場合は  $f(t) = 1$ ， $g(t) = 0$  とする。

$$\text{氷収支} \quad : \quad \frac{\partial M_i}{\partial t} = f(t)m_{if} + m_{il} - m_{wi} - g(t)m_{iv} \quad (1)$$

$$\text{水収支} \quad : \quad \frac{\partial M_w}{\partial t} = f(t)m_{wf} + m_{wl} + m_{wi} + m_{wr} - g(t)m_{wv} \quad (2)$$

$$\text{固相塩収支} \quad : \quad \frac{\partial M_{ss}}{\partial t} = m_{sf} - m_{sl} - g(t)m_{ssv} \quad (3)$$

$$\text{液相塩収支} \quad : \quad \frac{\partial M_{sl}}{\partial t} = m_{sl} + m_{sr} - g(t)m_{sv} \quad (4)$$

$$\text{熱収支} \quad : \quad \frac{\partial}{\partial t} \{ (\rho c)_{wis} V_{wis} T_{wis} \} = q_{csp} + q_{rm} + q_{sn} + q_{ln} + q_{vn} \quad (5)$$

$m_{if}$ : 降雪フラックス， $m_{il}$ : 昇華フラックス， $m_{wi}$ : 融解・凝固フラックス， $m_{iv}$ : 車両通過による損失(飛散・消耗)氷フラックス， $m_{wf}$ : 降雨フラックス， $m_{wl}$ : 蒸発・凝結フラックス， $m_{wr}$ : 道路排水フラックス， $m_{sf}$ : 散布フラックス， $m_{sl}$ : 溶解フラックス， $m_{ssv}$ : 車両飛散固相塩フラックス， $m_{sr}$ : 道路排出塩フラックス， $m_{sv}$ : 車両通過に起因した大気への拡散・車両への付着による損失塩フラックス(車両飛散塩フラックス)， $(\rho c)_{wis}$ : WIS 層の体積熱容量， $V_{wis}$ : WIS 層体積， $T_{wis}$ : WIS 層温度， $q_{csp}$ : 舗装熱(路面雪氷層と舗装との間の伝導熱)フラックス， $q_{rm}$ : 純放射熱フラックス， $q_{sn}$ : 純頭熱フラックス， $q_{ln}$ : 純潜熱フラックスおよび  $q_{vn}$ : 純車両熱フラックス

4. 野外試験

(1) 概要

図3は野外試験の概要を示す。本試験は次の手順で実施された。(i)  $T_{wis} < 0^{\circ}\text{C}$ を確認した後、散水車を用いて密粒度アスファルト舗装区間に散水する、(ii)気温  $T_a$  の低下によって道路表面水を凍結させ、氷膜路面を形成させる、(iii)路面氷膜厚  $H_i$ 、 $T_{wis}$ 、塩濃度  $C$  および路面すべり抵抗値  $HFN$  を測定する、(iv)氷膜路面に凍結防止剤(塩化ナトリウム)を湿式散布 ( $20\text{ g m}^{-2}$ )する、(v)散布直後の  $T_{wis}$  および  $HFN$  を測定する、(vi)5台の走行車両を周回させる、(vii)10周回毎(50台通過毎)に路面水膜厚  $H_w$ 、 $H_i$ 、 $T_{wis}$  および  $HFN$  を測定する、(viii)60周回(300台通過、計測回数7回)に達するまで(vi)および(vii)を繰り返す。

(2) 車両飛散水フラックス

ここでは詳述しないが、本試験における路面の水収支(式(2))において、 $m_{wf}$ はゼロ、 $m_{wl}$ は無視できる程に小さく、 $m_{wr}$ は理論的にゼロ<sup>4)</sup>、 $m_{wi}$ ( $T_{wis}$ の低下に伴う再凍結)は極めて小さい。従って、路面の水損失は  $m_{wv}$  が支配的であった。このことから、 $M_w$ の低下は  $m_{wv}$  によるものと仮定し、1台の車両通過によって飛散する水量  $m_{wv}'$  ( $\text{kg m}^{-2}\text{台}^{-1}$ ) を計測回間における  $M_w$  の変化量から求めた。すなわち、

$$m_{wv}' = (M_w^{k+1} - M_w^k) / N_v \tag{6}$$

であり、 $k$  は計測回、 $N_v$  は各計測間の通過車両台数(=50台)である。図4は  $m_{wv}'$  と  $M_w$  の関係であり、 $m_{wv}'$  は  $M_w$  に比例して増大した。両者の関係は次式で定式化される。

$$m_{wv}' = \beta_v M_w \tag{7}$$

本論文では、 $\beta_v$  を車両損失係数(=  $0.015\text{ 台}^{-1}$ )と呼ぶ。 $\beta_v$  は車両条件や道路条件に依存すると考えられるので、今後、 $\beta_v$  を詳しく調べるのが望ましい。

5. モデルの検証

図5は、2013年1月31日に実施した野外試験における  $T_{wis}$ 、舗装温度  $T_p$  (深さ50mm)、 $H_i$ 、 $H_w$ 、 $C$  および路面残塩量  $M_s$  の時間変化をそれぞれ示す。以下、添え字  $m$  は実測値を、添え字  $c$  は計算値をそれぞれ意味する。

$T_{wis-m}$  は時間とともに低下し、 $T_{p-m}$  もこれに追従するように低下した。 $T_{wis-c}$  には塩散布直後に急激な低下が観られた。これは、2章の Step 2 で説明したように、凍結防止剤と氷の接触によって起こる溶解熱(吸熱)によるものである。その後の  $T_{wis-c}$  の上昇は主に周辺からの伝導熱に依る。本モデルは  $T_{wis-m}$  の時間変化を概ね再現できた。

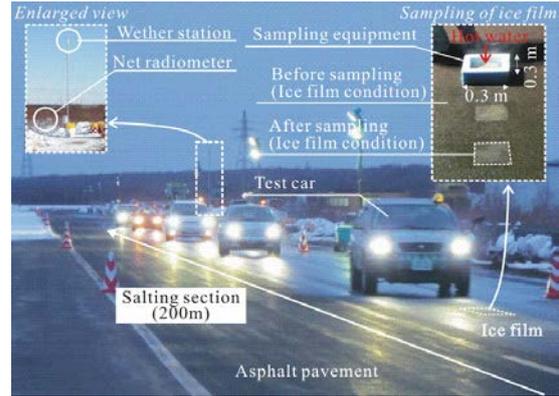


図3 野外実験の概要図

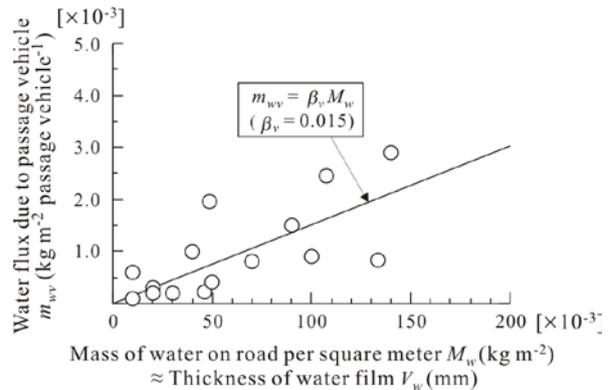


図4 車両飛散水フラックスと水膜厚の関係

$H_{i-m}$  は、塩散布によって 0.1 mm 程度の低下が生じた。その後は、ばらつきがあるものの時間とともに微減する傾向にあった。 $H_{i-c}$  は塩散布によって約 0.2 mm 低下し、その後は大気中の水蒸気から路面への凝結 ( $m_{il} > 0$ ) が生じたため微増した。この散布後の  $H_{i-m}$  と  $H_{i-c}$  の挙動の相違は、計算では路面の水蒸気密度を地上高さ 6m で測定した気温と相対湿度を用いて求めたためと考えられる。また、試験道路のテクスチャや不陸によって  $H_{i-m}$  にばらつきが生じた可能性も考えられる。

$H_{w-m}$  は、氷膜の融解によって 1.4 mm 発生し、その後時間経過とともに低下した。 $H_{w-c}$  は塩散布と同時に約 0.2 mm 発生し、指数関数的に低下した。

$C_m$  は、6.2~8.5% の範囲にあった。 $M_{s-m}$  は、塩散布時の 13 g/m<sup>2</sup> から指数関数的に低下し、試験終了時にはほぼゼロになった。 $C_c$  は、塩散布時に上昇し、その後は  $T_{wis-c}$  が時間とともに緩やかに低下したことに準じて、微増した。 $M_{s-c}$  は、散布直後に急激に上昇し、15 分後にほぼ 20 g/m<sup>2</sup> になり、その後は低下した。

以上、 $H_i$  については更なる検証が必要であるものの、SVRFP model は凍結防止剤散布に伴う路面上の相変化現象を概ね再現できた。

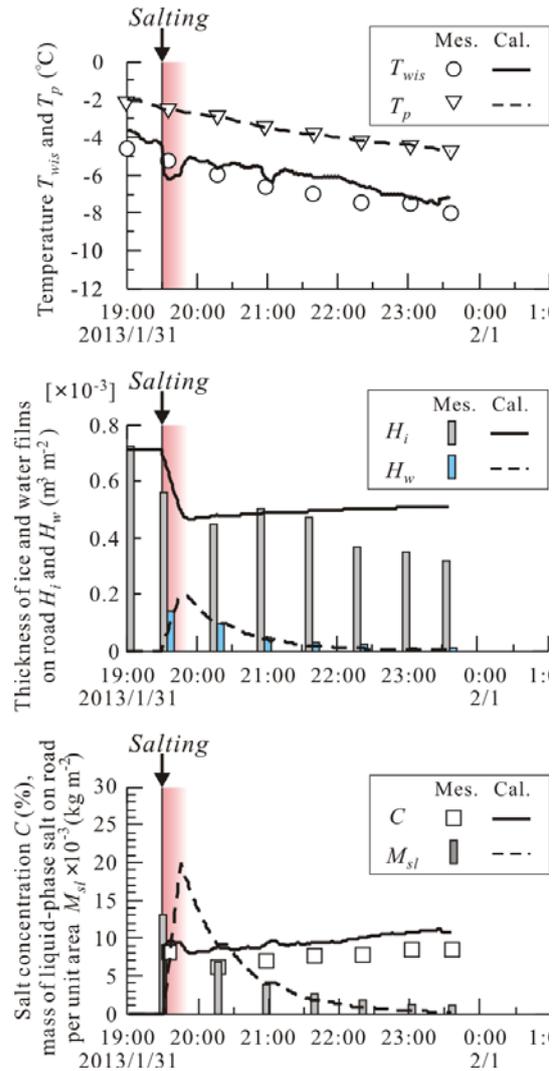


図5 実測値と計算値の比較

## 6. おわりに

今後は、野外実験を継続し、SVRFP model の検証および改良を行い、モデルの実道路への適用を目指す。SVRFP model が完成することにより、凍結防止剤散布後の路面雪氷状態のみならず、数時間先の塩濃度や路面残塩量を予測することが可能になり、凍結防止剤散布の適正化と冬期道路の安全性向上への貢献が期待される。

### 【参考・引用文献】

- 1) 藤本明宏, 2013: 路面凍結防止剤のモデリング, *北海道の雪氷*, **32**, 84-87.
- 2) Fujimoto, A., et al., 2014: A Road Surface Freezing Model Using Heat, Water and Salt Balance and Its Validation by Field Experiments, *Cold Regions Science and Technology*, 2014 (掲載決定) .
- 3) Fujimoto, A., et al., 2012: A New Approach to Modeling Vehicle-Induced Heat and Its Thermal Effects on Road Surface Temperature, *J. Appl. Meteor.*, **51**, 1980-1993.
- 4) Sass, B.H., 1992: A numerical model for prediction of road surface temperature and ice, *J. Appl. Meteor.*, **31**, 1499-1506.