

Freezing analysis of sodium chloride solution on road surface

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2011-02-03 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 藤本, 明宏, 齊田, 光, 福原, 輝幸, FUJIMOTO, Akihiro, SAIDA, Akira, FUKUHARA, Teruyuki メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10098/2997

NaCl 溶液散布路面の凍結解析

Freezing analysis of sodium chloride solution on road surface

藤本 明宏*
(地域環境研究教育センター協力メンバー)
齊田 光**
(福井大学大学院工学研究科博士後期課程)
福原 輝幸***
(福井大学大学院工学研究科)

1. はじめに

時々刻々と多様に変化する路面雪氷状態は、凍結防止剤散布の時期と量の決定を難しくさせる。現状では、交通安全性を重視するが故に過剰散布になることもある。これによって、財政への圧迫と沿道環境への悪影響が懸念され、散布量削減への取り組みは今後益々必要とされる。その一助として、統計解析や熱収支解析による数値モデルを用いて、数時間先の路面温度を予測し、散布時期を決定する試みが行われている^{1), 2)}。また、最近になって塩濃度の経時変化を予測する試みもある³⁾。しかしながら、現在のところ凍結路面を回避するための最適な散布の量と時期を決定するための研究は十分とは言えない。

交通安全の向上と散布量の削減という相反する要求を満たすためには、今まで以上に物理的根拠に基づく凍結防止剤散布の最適化手法が必要となる。そのために、これまでに筆者らは、熱・水分移動の連成解析による路面雪氷状態モデル（熱・水分収支型路面雪氷状態モデル^{4)~6)}を開発した。これによって路面雪氷層を横切る熱フラックス（舗装熱、放射熱、顕熱、潜熱および車両熱⁷⁾）の計算と同時に、路面雪氷層中の水・氷質量収支および空気体積収支を解くことが可能となり、従来の雪氷状態（温度および層厚）に加えて、含水率および雪氷密度も求めることができるようになった。

次に、熱・水分収支型路面雪氷状態モデルに凍結防止剤の熱・物理・化学的影響と、路面雪氷物性と

(キーワード：路面凍結，凍結防止剤，熱・水分収支，滑り抵抗，塩濃度)

* Akihiro Fujimoto

(Department of Civil Engineering, Graduate school of Engineering, University of Fukui, Fukui, 910-8507)

** Akira Saida

(Department of Civil Engineering, Graduate school of Engineering, University of Fukui, Fukui, 910-8507)

*** Teruyuki Fukuhara

(Department of Civil Engineering, Graduate school of Engineering, University of Fukui, Fukui, 910-8507)

滑り摩擦係数（以下、 μ ）の関係を組み入れた塩化ナトリウム（NaCl）湿潤路面の凍結モデル⁸⁾を開発した。これにより、凍結防止剤の散布効果を μ で評価できるようになり、安全 μ の確保に必要な最小散布量を事前に把握することが可能になった。

本論文では、NaCl 湿潤路面の凍結モデルを紹介し、凍結過程における温度、塩濃度、質量含水率および μ の実験値との比較からモデルの妥当性を示すとともに、NaCl 湿潤路面の熱収支について詳しく考察したので、ここに紹介する。

2. NaCl 湿潤路面の凍結モデルの概要

2. 1 NaCl 湿潤路面の凍結現象とそのモデル化

凝固点降下で知られるように、NaCl 溶液の凝固点 T_f (°C) は NaCl 濃度 C_s (%) の増加とともに降下する。NaCl 溶液の凝固点曲線は図-1 に示すように、純水の凝固点（図中 A 点、 C_s : 0%, T_f : 0°C）から共融点（B 点、 C_s : 23.3%, T_f : -21.2°C）までの間で非線形に変化する⁹⁾。

以下に、図 1 中の凍結過程(i)~(iv)を用いて NaCl 湿潤路面の凍結モデルを述べる。過程(i)では、NaCl 溶液温度 T_s (°C) は a 点から凝固点曲線上の b 点まで低下する。この間の C_s の変化はない。過程(ii)では、氷が析出（凍結が進行）して、 C_s は b' 点の濃度 (C_{sb}) まで増大する。実際には、この氷（固相）と NaCl 溶液（液相）の混合物（以下、SSI）の組成は、凝固点曲線を沿うように変化すると考えられる。すなわち、 T_s の低下と C_s の増大は同時に起こる現象と推察されるが、この相互作用を表現する数式化は難しい。そこで、モデルでは、一時的に T_s を一定のままとする。過程(iii)では、 C_s の増大に伴って凝固点が降下するので、 T_s は凝固点曲線上の d 点、 T_{sd} まで低下する。過程(iv)では、再び C_s は増大する。このように、 T_s と C_s は交互に変化しながら、c 点に向かう。

なお、こうしたステップ上の凍結近似は、計算間隔を短くすることで改善が期待できる。本解析では 1 秒とした。

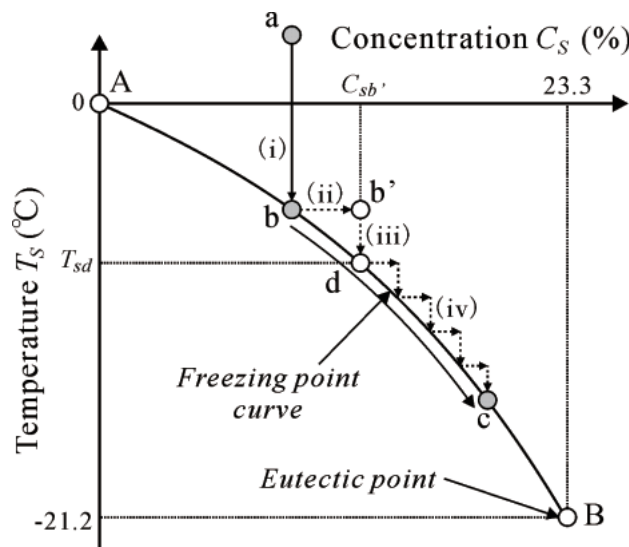


図 1 NaCl 湿潤路面の凍結過程の概念図

2. 2 熱・水分移動に含まれる仮定

本解析は実験条件に従って、以下の仮定の下で行われる。

- (i) 通過車両の人為要因、日射、降雨降雪および道路勾配に伴う排水はない。
- (ii) (i)により系外への塩の流失はない。
- (iii) 道路縦横断方向の熱・水分移動は無視する。

3. 熱および水分移動理論

3. 1 構成要素と定義

氷粒子、水および NaCl によって構成される SSI 層の単位水平面積当たりの体積 V_s (m^3/m^2) は、式(1)のように水体積 V_w (m^3/m^2)、氷体積 V_i (m^3/m^2) および NaCl 体積 V_{sa} (m^3/m^2) の和となる。

$$V_s = V_w + V_i + V_{sa} \quad (1)$$

NaCl の質量濃度 C_s (%) は式(2)で表される。

$$C_s = \frac{M_{sa}}{M_w + M_{sa}} \times 100 \quad (2)$$

ここに、 M_{sa} および M_w : SSI 層中の単位水平面積当たりの NaCl および水の質量 (kg/m^2) である。
質量含氷率 θ_i は式(3)で求められる。

$$\theta_i = \frac{M_i}{M_w + M_i + M_{sa}} \quad (3)$$

ここに、 M_i : SSI 層中の単位水平面積当たりの氷質量 (kg/m^2) である。

3. 2 水および氷質量収支

2. 2 の仮定および図 2 に基づけば、凍結過程における SSI 層の水および氷質量収支は、水分の相変化を考慮して以下の式で表される。

$$\text{水質量} : \frac{\partial M_w}{\partial t} = -M_{wl} - M_{wi} \quad (4)$$

$$\text{氷質量} : \frac{\partial M_i}{\partial t} = M_{il} + M_{wi} \quad (5)$$

ここに、 M_{wl} : 蒸発フラックス ($\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$)、 M_{wi} : 凝固フラックス ($\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$)、 M_{il} : 昇華フラックス ($\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$) および t : 時間 (s) である。

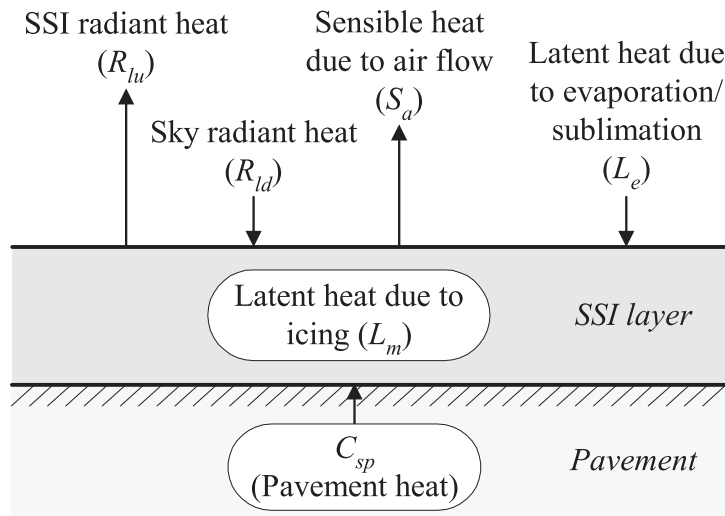


図2 凍結過程の熱収支の概念図

3. 3 熱収支

図2の伝熱モデルに従えば、厚さ z_s の SSI 層に対する熱収支は式(6)で与えられる。

$$\frac{\partial}{\partial t} \{(\rho c)_s z_s T_s\} = C_{sp} - R_{lu} + R_{ld} - S_a - L_e + L_m \quad (6)$$

ここに、 $(\rho c)_s$: SSI 層の体積熱容量 ($\text{J}/\text{m}^3/\text{K}$)、 C_{sp} : 舗装熱フラックス (W/m^2)、 R_{lu} : SSI 層からの長波放射熱フラックス (W/m^2)、 R_{ld} : 天空放射熱フラックス (W/m^2)、 S_a : 自然風に伴う顕熱フラックス (W/m^2)、 L_e : 蒸発・昇華潜熱フラックス (W/m^2)、 L_m : 凝固熱フラックス (W/m^2) および t : 時間 (s) である。なお、 $(\rho c)_s$ は SSI 層の水、氷および塩の体積熱容量の調和平均として与える。

各フラックスの計算方法は、参考文献 8) を参照されたい。

4. 凍結およびすべり抵抗実験

図3左図は低温恒温室で実施した凍結実験の概要、右図は実験装置の写真である。実験では、室内温度を低下させ、6時間に亘り密粒度舗装上の淡水あるいは NaCl 溶液を凍結させる。 T_s は舗装表面から 0.5mm 上方 (SSI 層の中央) に設置した熱電対で、舗装温度 T_p ($^{\circ}\text{C}$) は舗装表面から 5, 10, 15, 25, 35 および 45mm 下方に埋設された熱電対でそれぞれ計測される。また、気温 T_a ($^{\circ}\text{C}$) および相対湿度 R_a (%) は SSI 層の上方 15mm に設置した温湿度計で、 R_{ld} は SSI 層の上方 0.2m に設置した放射収支計で、それぞれ測定される。

本実験で用いた舗装は W 300×L 600×H 50mm の新 20FH であり、熱伝導率 $1.4\text{W}/\text{m}/\text{K}$ 、密度 $2365\text{kg}/\text{m}^3$ および比熱 $0.86\text{kJ}/\text{kg}/\text{K}$ である。また右図に示すように、SSI 層表面を除く全境界は断熱材 (厚さ 60mm) で断熱した。

実験に際して、天井からの冷氣による顕熱および気温の急変を除去するために、装置全体をビニールシート (1 辺 1.2m の立方体) で囲った。

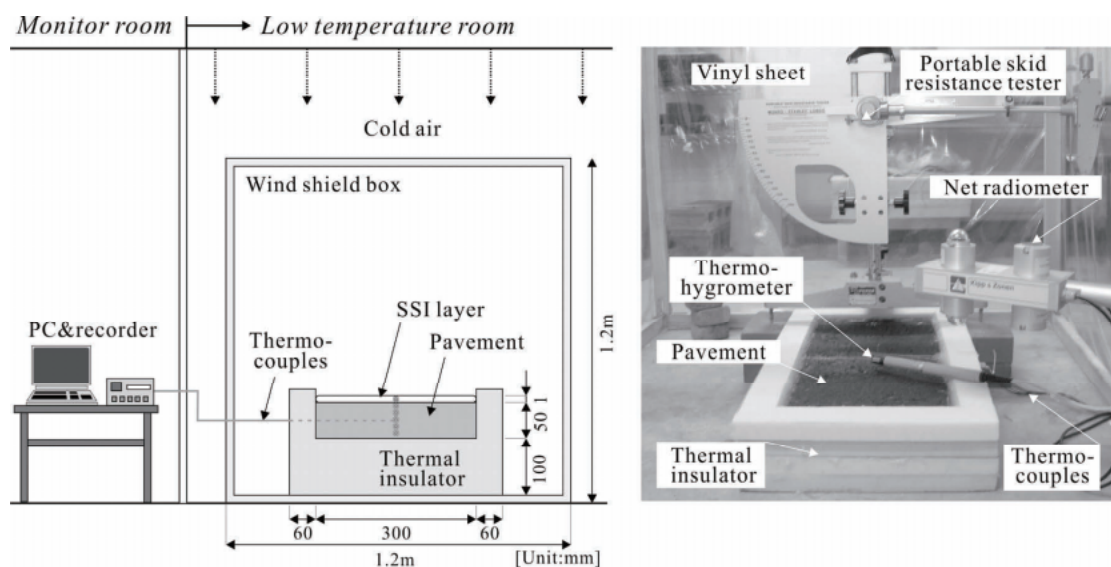


図3 凍結実験の概要図

実験手順は以下のとおりである。

- (i) 低温恒温室で舗装内部の温度を一様（約 3°C ）にする。
- (ii) T_p と同温のNaCl溶液を厚さ1mmになるように舗装に散布する。
- (iii) T_a を氷点下（ -20°C ）に設定し、実験を開始する。
- (iv) C_s は塩分濃度計を用いて舗装上の異なる2ヶ所で30分間隔で測定する。
- (v) T_p , T_s , T_a , R_a および R_{ld} はデータロガーで1分毎に自動収集する。

また、同じ実験条件下でポータブル・スキッド・レジスタンス・テスターを用いてすべり抵抗（BPN）と C_s を30分間隔で測定する実験も実施した。

本報告では、淡水に加えて、初期 C_s （ C_{s0} ）を2, 4および8%とした計4ケース（Case-0, Case-C2, Case-C4およびCase-C8）の実験結果を報告する。

5. 実験値と計算値の比較

5. 1 計算条件および境界条件

本解析では、実験初期に測定した T_p , T_s , C_s および z_s を初期条件として与えた。境界条件である気象データおよび舗装底面温度は1分間隔で得られる実測値を線形内挿して与えた。

5. 2 SSI 温度および舗装温度

(1) 淡水路面

図4はCase-0における T_a , T_s および T_p の鉛直分布の経時変化を示す。シンボルは実験値、実線は凝固熱を考慮した場合の計算値（Cal-A）、破線は凝固熱を考慮しない場合の計算値（Cal-U）である。

まず、実験結果について述べる。 T_a は実験開始時の 2.4°C （●）から270分後の -10.4°C （◇）まで時間

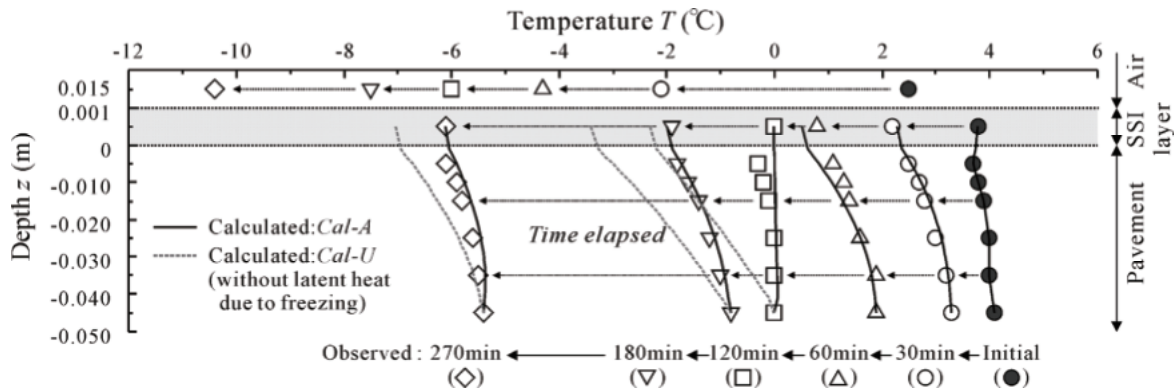


図4 気温 T_a , SSI 温度 T_s および舗装温度 T_p の鉛直分布の経時変化 (Case-0)

とともに低下した。初期の T_s および T_p (●) は、温度が一致しなかったために厳密に一樣分布にならなかったものの、 3.6°C から 4.0°C の範囲にある。 T_a の低下とともに T_s は低下し、120 分 (□) までに全域で 0°C に到達した。120 分までは、舗装底面から SSI 層に向かって温度低下するような鉛直分布となる。しかしながら、120 分では SSI 層は過冷却となり、舗装表面温度も負となったが、凍結に伴う凝固熱で 0°C 付近に上昇したために、舗装表面付近で $T_p < T_s < 0^{\circ}\text{C}$ となったと考える。その後、SSI 層は完全に凍結して温度低下が進行し、180 分や 270 分のように再び舗装表面から SSI 層に向かって温度低下するような分布になる。

次に、計算結果について述べる。 $Cal-A$ (実線) はいずれの時間においても実験値と良好に一致するものの、 $Cal-U$ (破線) は $T_s < 0^{\circ}\text{C}$ になると実験値より 1°C 前後下回る。当然のことながら、凍結計算に凝固熱は無視できないことが知れる。

(2) NaCl 湿潤路面

図 5(a) および (b) は、Case-C2 および Case-C4 における T_a , T_s および T_p の鉛直分布の経時変化である。実線は $Cal-A$ を表わし、Case-C2 に限っては破線で $Cal-U$ も示す。

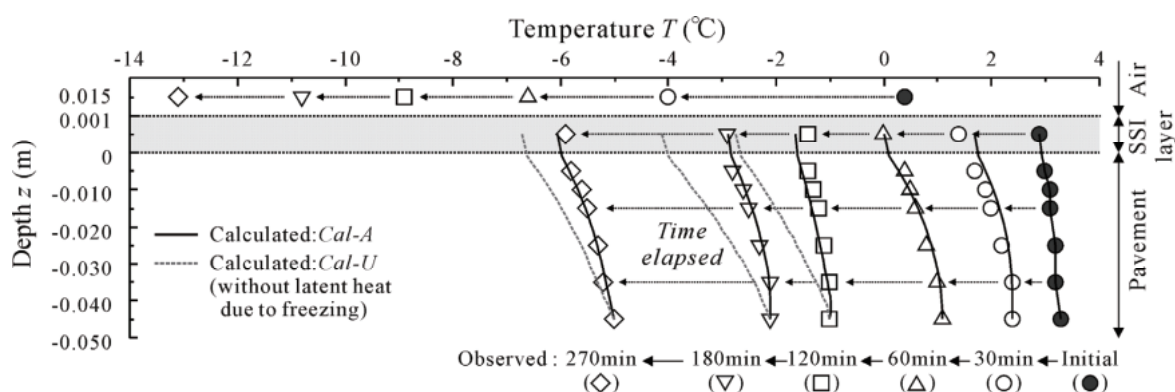
まず、Case-C2 の結果について記述する。上述の Case-0 と同様に、実験開始により T_s は時間とともに低下し、それに引きずられるように T_p も表面付近から低下する。温度勾配の絶対値 $|dT_p/dz|$ に着目すると、120 分後 (□) の $|dT_p/dz|$ はそれ以前に比べて小さい。これは T_s が $C_{s0} = 2\%$ の凝固点 $T_f (= -1^{\circ}\text{C})$ に到達したことで、凝固熱が発生し、 T_s の低下が鈍化したためである。後述するように、凝固熱を考慮しないと、計算でも T_s および T_p の温度低下は実験結果よりも早くなる。

次に、Case-C4 に注目する。 $|dT_p/dz|$ が小さくなる時間は、Case-C2 の 120 分に対して、Case-C4 では 180 分と遅い。これは Case-C4 の C_{s0} に対する T_f が低いためである。

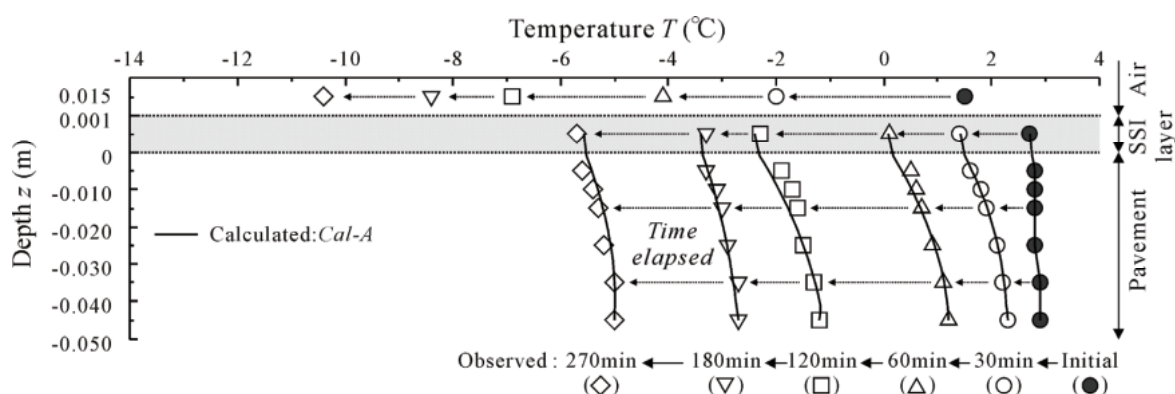
両ケースとも、 $Cal-A$ は実験値と良好に一致しており、本モデルは淡水路面に加えて NaCl 湿潤路面の凍結過程における温度変化を再現できた。また、 $Cal-U$ は Case-0 と同様に T_s が T_f に達した後で凝固熱が考慮されていないため、実験値より約 1°C 低くなった。

5. 3 塩濃度

図 6 は C_s の経時変化である。図中の ○, △ および □ で表されるシンボルは、Case-C2, Case-C4 およ



(a) Case-C2 ($C_{s0} = 2\%$)



(b) Case-C4 ($C_{s0} = 4\%$)

図5 気温 T_a , SSI 温度 T_s および舗装温度 T_p の鉛直分布の経時変化

び Case-C8 の実験値で、実線、破線および一点破線は Case-C2, Case-C4 および Case-C8 における計算値である。

Case-C2 (○) に着目すると、 C_s は実験開始から 90 分まで 2% (C_{s0}) を推移するが、その後は凍結が進行するために時間とともに増大する。Case-C4 (△) および Case-C8 (□) の C_s についても同様に C_{s0} を推移した後に増大するが、その開始時間は C_{s0} が高いほど遅い。

C_s の計算値はいずれのケースも実験値と良好に一致した。

5. 4 質量含氷率

図7は θ_i の経時変化で、 θ_i は図6に示した C_s の変化から算出されたものである。 θ_i はCase-C2, Case-C4 および Case-C8 の順に増大し始め、その増加率は時間とともに緩やかになる。最終的な θ_i も同順に大きい。Case-0の θ_i は計算結果のみであるが、NaCl溶液より凍結開始時間が早まり、凍結速度(= $d\theta_i/dt$)も速い。その結果、150分後に $\theta_i = 1.0$ (完全凍結)に達する。NaCl湿潤路面の実験に限られるが、計算値は実験値を良好に再現している。

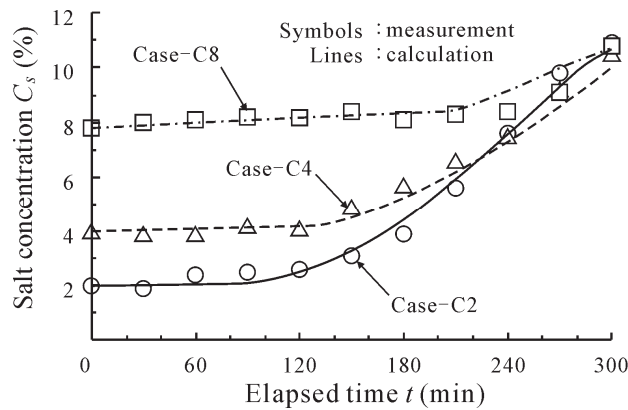


図6 塩濃度 C_s の経時変化

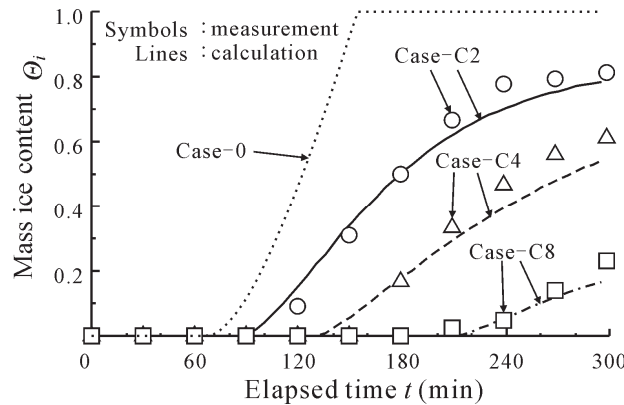


図7 質量含水率 θ_i の経時変化

5. 5 すべり抵抗

図8は BPN と θ_i の関係を示したものである。同図には、村國⁹⁾による研究結果も併せて示す。本実験結果より、 BPN は、 $\theta_i < 0.14$ の範囲では76で湿潤路面と殆ど変わらないが、 $\theta_i \geq 0.14$ では θ_i とともに減少する。 $\theta_i < 0.14$ で BPN が大きいのは、SSI層に発生した氷成分と舗装との接着が緩く、SSI層が流動的であったためと考えられる。 $\theta_i \geq 0.14$ では θ_i の増大によって舗装表面の氷面積が増大するために BPN は小さくなる。この BPN と θ_i の関係は、式(7)で表される。

$$BPN = \begin{cases} 76 & (\theta_i < 0.14) \\ -56.9\theta_i + 84.0 & (\theta_i \geq 0.14) \end{cases} \quad (7)$$

なお、本実験結果は村國の結果と概ね一致しているが、 $\theta_i = 0$ 付近で本実験の BPN は村國の結果に比べて小さい。これは舗装の種類や粗度の違いと推測される。

図9は、式(7)に示した BPN と θ_i の関係をモデルに組み込んで計算された BPN の経時変化と実験で得られたそれを比較したものである。

まず、Case-0 の BPN (●) は実験開始から70分を境に急激に低下し、150分以降は30前後である。一方、Case-C2、Case-C4 および Case-C8 では、 C_s が高い順に BPN 低下開始時間が遅くなり、 BPN 低下

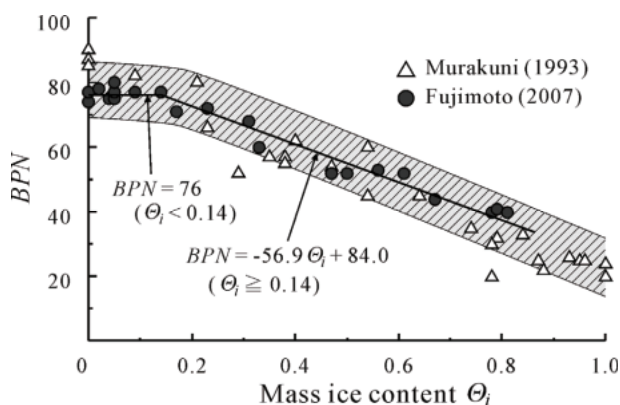


図 8 BPN と質量含水率 Θ_i の関係

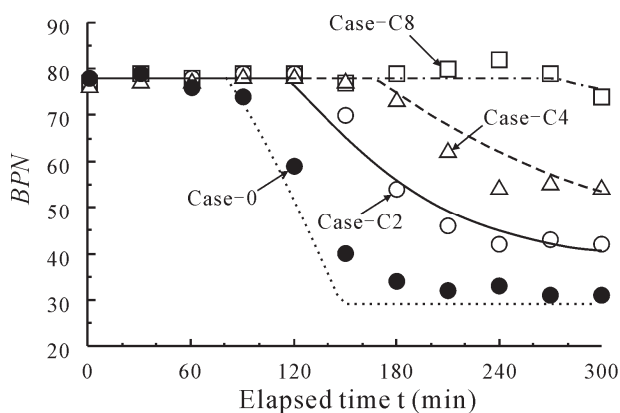


図 9 BPN の経時変化

速度が鈍化する。これより、NaCl 溶液は凍結に伴うすべり抵抗を抑制することが知れる。

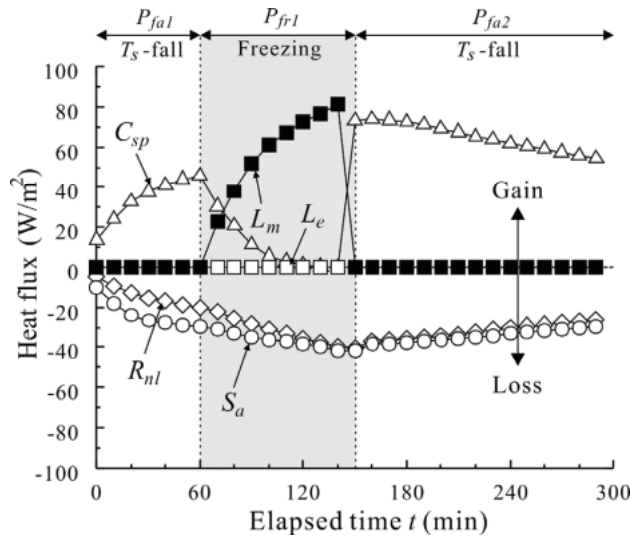
計算結果はすべり抵抗の時間変化を良好に再現している。

6. SSI 層の熱移動に関する考察

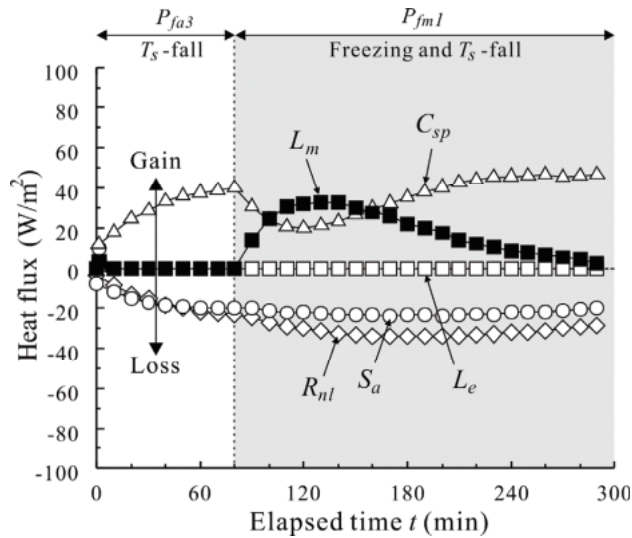
ここでは、Case-0 (淡水路面) と Case-C2 (NaCl 湿潤路面) における SSI 層の熱移動を考察する。

図 10(a)および(b)は、Case-0 および Case-C2 における SSI 層の熱フラックスの経時変化をそれぞれ示す。同図縦軸の正は SSI 層への熱供給を、負は熱損失を意味する。また、図中の P_{fa} は T_s の低下期間、 P_{fr} は凍結期間および P_{fm} は T_s の低下と凍結現象が同時に生じる期間 (凝固点降下期間) を表す。

まず、Case-0 (淡水路面) について述べる。 P_{fa1} では、 T_a の低下に伴う S_a および R_{nl} (純長波放射熱フラックス) による熱損失が生じる。これによる T_s の低下に起因して、舗装からの熱供給、すなわち C_{sp} が時間とともに増大する。 P_{fr1} における S_a および R_{nl} による熱損失は、 L_m と C_{sp} により補われる。5.2(1) で述べたように、 P_{fr1} では T_p が T_s ($= 0^\circ\text{C}$) に漸近するために、 C_{sp} は時間とともに減少し、120 分後にゼロになる。一方、 L_m は時間とともに増大するが、140 分を境にゼロになる (完全凍結)。 L_m がゼロになったことで、 P_{fa2} では T_s が低下し、再び C_{sp} によって舗装からの熱供給が始まる。その後は、 T_a に T_s が近づくために、 S_a 、 R_{nl} および C_{sp} の値はいずれも小さくなる。



(a) Case-0



(b) Case-C2

図 10 熱フラックスの経時変化

次に、Case-C2 (NaCl 湿潤路面) について述べる。 P_{fa3} では、Case-0 と同様に、 S_a および R_{nl} による熱損失と C_{sp} による熱供給が起こる。90分から L_m は急激に増大し、ピーク (130分) に達した後、緩やかに減少する。 L_m は、淡水層では完全凍結と同時に急にゼロになるが、SSI層では凝固点 T_f (°C) が降下するので徐々に減少する。

7. おわりに

本報告では、NaCl 湿潤路面の凍結モデルの概念を述べ、基本式を示した。また、密粒度舗装上の淡水層およびNaCl溶液層の凍結過程における温度、質量含水率および塩濃度について実験結果と比較した。その結果、計算値は実験値を良好に再現できた。さらに、NaCl 湿潤路面の凍結過程におけるすべり抵抗

(BPN) と質量含水率の関係をモデルに組み込むことで、凍結過程におけるすべり抵抗の低下が計算できるようになった。

参考文献

- 1) 高橋尚人, 浅野基樹, 石川信敬, 2006, 沿道構造物を考慮した路面温度推定モデルの構築について, 寒地技術論文・報告集, Vol. 22, pp. 153 - 158.
- 2) 鈴木啓介, 青木崇光, 大島淳一, 下村忠一, 2004, 凍結防止剤散布の最適化に関する研究, 日本雪工学会誌, Vol. 21, pp. 65 - 66.
- 3) 沼田実, 長門幸朗, 栗林直義, 川平吉則, 稲沢太志, 浦野隆, 2006, 凍結防止剤散布の最適化技術手法に関する評価試験報告, 寒地技術論文・報告集, Vol. 22, pp. 218 - 223.
- 4) 藤本明宏, 渡邊洋, 福原輝幸, 2007, 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, Vol. 63, No. 2, pp. 156 - 165.
- 5) 藤本明宏, 渡邊洋, 福原輝幸, 2007, 単一層路面雪氷状態モデルの適用範囲および熱的考察, 日本雪工学会誌, Vol. 23, No. 5, pp. 19 - 29.
- 6) 藤本明宏, 渡邊洋, 福原輝幸: 多層路面雪氷状態モデル, 2008, 日本雪工学会誌, Vol. 24, No. 1, pp. 3-11.
- 7) 藤本明宏, 渡邊洋, 福原輝幸, 2007, 車両熱のモデリングと乾燥路面温度への影響評価, 土木学会論文集, Vol. 63, No. 2, pp. 250 - 261.
- 8) 藤本明宏, 渡邊洋, 福原輝幸, 2008, 凍結に伴う NaCl 湿潤アスファルト舗装のすべり抵抗低下, 日本雪工学会誌, Vol. 24, No. 2, pp. 3 - 11.
- 9) 村國誠, 1993, 冬期路面管理に使用する薬剤(2)薬剤の事前散布効果, ゆき, No. 11, pp. 87 - 94.