

Analysis of Frost – Freezing on Road Surface being scattered with Solid Sodium Chloride

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2012-08-23 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/10098/6463

固形塩化ナトリウム散布路面の着霜－凍結解析

Analysis of Frost – Freezing on Road Surface being scattered with Solid Sodium Chloride

藤本明宏^{*1}・齊田光^{*2}
Akihiro Fujimoto Akira Saida
福原輝幸^{*3}
Teruyuki Fukuhara

SYNOPSIS

The present study describes the theoretical analysis on the generation and melting of frost and freezing on the road surface after solid sodium chloride is scattered. The accuracy of the proposed frost model was secured by comparing with the experimental results. Two frost models were presented according to the shape of the NaCl particles, i.e. spherical frost model and cubic frost model. The time variations in the salt concentration, condensate mass and pavement temperature undergoing continuous water-ice-NaCl phase change on the road surface were measured using a pavement specimen. There was little difference in the calculated results between the two frost models and both the frost models could reproduce the experimental results well.

Keywords : frost, road freezing, sodium chloride, heat and mass transfer, salt concentration

1. はじめに

冬期夜間、橋梁部の路面温度は土工部に比べて低下し易い¹⁾。そのため橋梁や高架橋路面は着霜し易く(図-1を参照、A-A'下方の橋梁部でのみ霜が観測される)、局所的かつ短時間に路面すべり摩擦係数の急変(減)をもたらす。上記の理由から橋梁・高架橋の道路脇に凍結防止剤が置かれることが多く、宮本・浅野²⁾は橋梁部での散布頻度が土工部の2倍以上高いことを示した。一方で、道路予算の縮減³⁾および橋の塩害劣化⁴⁾など、経済性と環境負荷の両面から凍結防止剤散布量の適正化は冬期道路管理において重要な課題となっている。

路面凍結モデルは統計手法と熱収支法に大別される。鈴木ら⁵⁾や沼田ら⁶⁾は、統計手法で予測した路面温度と塩分濃度の時間低減を基にした凍結防止剤散布の最適化手法を提案した。散布量の削減に主眼を置いた点で興味深い研究であるが、統計手法は気象

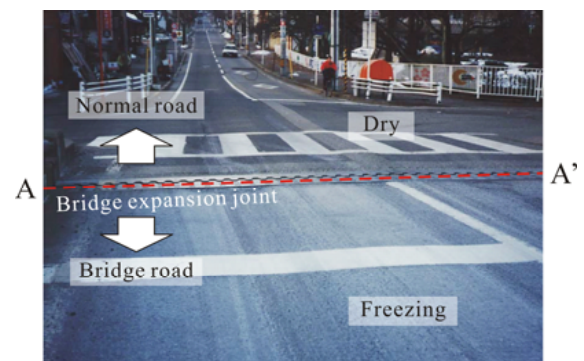


図-1 霜路面(福井市K橋)

データと路面状態の関係がブラックボックスで、物理的根拠に乏しい。そのために、汎用性(場所毎に野外実験によるデータ蓄積の必要性)に課題がある。一方、熱収支法は物理的根拠に基づいて構築されるために、どこでも凍結予測できる優位性があるものの、熱・物質移動に関連する定数あるいは係数を求

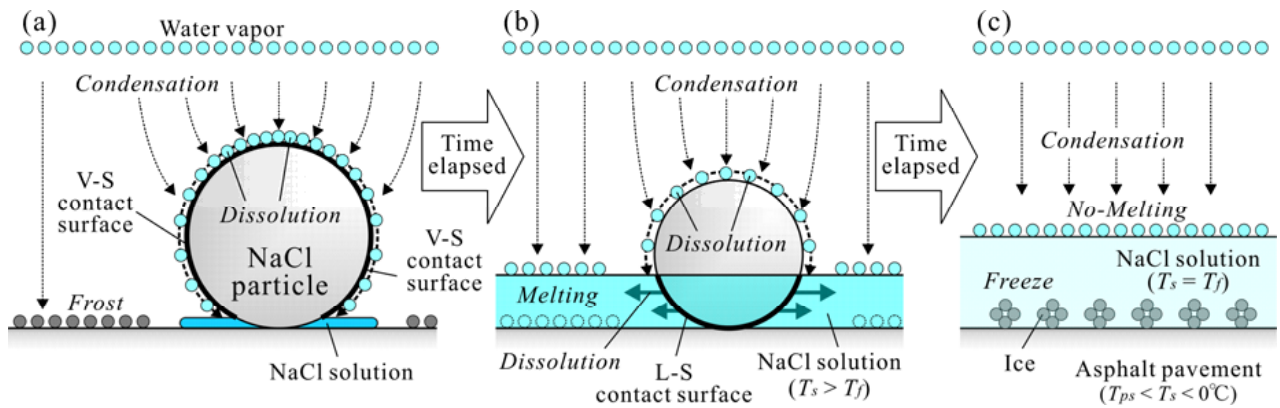


図-2 固形NaCl散布路面の着霜に伴う水-氷-NaCl間の相変化の概要

めなければならない。熱収支路面凍結モデルの一つに着霜に着目した木曾ら⁷⁾の研究がある。木曾らは、路面の熱収支に霜発生条件を考慮した路面凍結モデルを構築し、単位面積当りの着霜量を基に路面すべり摩擦係数の予測を可能にした。しかしながら、既往の熱収支路面凍結モデルの多くは、凍結防止剤の影響を考慮しておらず、非散布下での路面温度や路面凍結予測に留まっている。このように、現時点で凍結防止剤散布方法が体系化されているとは言い難い。

本研究の最終目的は、物理的アプローチによる凍結防止剤散布の最適化手法の開発にある。これまでに筆者らは、熱・水分収支による路面雪氷状態モデル^{8)~10)}を構築し、圧雪やシャーベットというような雪氷状態の視覚的分類を、含氷率、含水率および含空率(路面雪氷のコントロールボリュームに含まれる空気の体積割合)で評価できることを示した。さらに前報¹¹⁾では、路面雪氷状態モデルに凍結防止剤の影響を組み込んだ塩化ナトリウム(NaCl)湿潤路面の凍結モデルを提案し、NaClによる凝固点降下が路面温度、含氷率、含水率に及ぼす影響は無視できないことを定量的に示した。しかしながら、このモデルは溶液散布を対象として、NaCl溶液散布後の水から氷への相変化(凝固過程)を解析したものであり、固形NaClの溶解を伴う水-氷-NaClの同時相変化に適応できない。

そこで本論文では固形NaCl散布を対象として、NaCl散布後に起こる着霜-NaCl溶解-霜融解-凝固過程を表現した水-氷-NaClの相変化モデル(以

下、Frost model)を構築し、Frost modelの妥当性を霜発生実験の結果との比較を通じて検証した。

2. Frost model

2.1 水、氷およびNaClの相変化

固形NaCl散布路面(路面温度 T_{ps} ($^{\circ}\text{C}$) $< 0^{\circ}\text{C}$)に着霜した場合、図-2の(a)から(c)に向うような水-氷-NaCl間の相変化が考えられる。

- (a) 着霜によってNaCl粒子は溶解する。この溶解は図-2(a)に示す水蒸気とNaCl粒子の接触面(以下、V-S接触面)で起こる。同時に一部の水蒸気は路面に付着し、霜となる。
- (b) NaCl溶液温度 T_s ($^{\circ}\text{C}$) $>$ 凝固開始温度 T_f ($^{\circ}\text{C}$)の時、図-2(b)に示すNaCl溶液とNaCl粒子の接触面(以下、L-S接触面)でNaCl粒子の溶解が起こる。また、(a)で発生した霜はNaCl溶液と接することで融解する。
- (c) $T_s < T_f$ になるとNaCl溶液の凝固が始まる。

このように固形NaCl散布路面で起こる多様な相変化を考慮したFrost modelは、次節で記述する路面上の熱、水分およびNaCl収支によって構成される。

2.2 モデルの概要

乾燥路面に散布された固形NaClは、車両の通過によって粉碎され、図-3に示すような丸みを帯びた粉体や角ばった粉体として路面上に点在すると考えられる。Frost modelでは、モデルの簡略化のために一つ一つ形状の異なる粒子を全て球体あるいは立方体として扱うことにした。

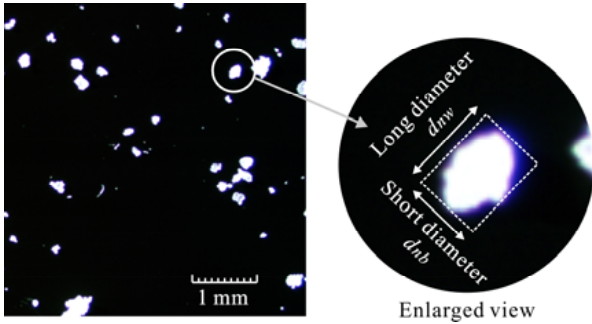


図-3 固形NaClの拡大図

図-4 (a)および(b)は、NaCl粒子を球体あるいは立方体と見做したFrost modelの概要を示す。両Frost modelにおけるL-S接触面 A_{ls} (m^2)およびV-S接触面 A_{vs} (m^2)は、それぞれ次式で与えられる。

A_{ls} は、

$$A_{ls} = \begin{cases} \frac{1}{2}\pi(1 - \cos\theta)d_n^2 & \text{球体粒子} \\ 4 \cdot d_n \cdot h_w & \text{立方体粒子} \end{cases} \quad (1)$$

となる。ここに、 θ : 球体NaCl粒子の中心から見たNaCl溶液表面とNaCl粒子が接する面の立体角(sr), d_n : NaCl粒子の代表長(m), および h_w : NaCl溶液厚(m)である。

A_{vs} は、

$$A_{vs} = \begin{cases} \pi d_n^2 - A_{ls} & \text{球体粒子} \\ 5 \cdot d_n^2 - A_{ls} & \text{立方体粒子} \end{cases} \quad (2)$$

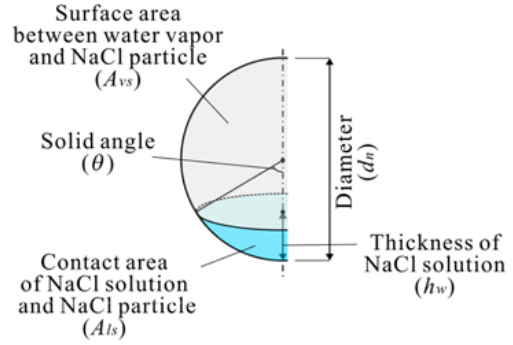
となる。

なお、球体粒子のFrost modelを以下ではS model立方体粒子のそれをC modelと区別する。

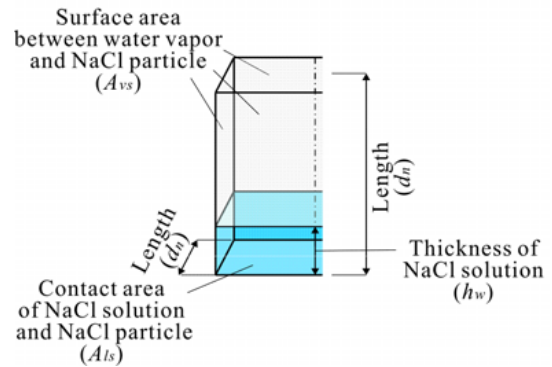
2.3 仮定および条件

後述の実験および解析では、Frost modelの妥当性検証を容易にするために、以下の仮定と条件を設けた。

- (i) 通過車両の影響、日射、降雨降雪および道路勾配に伴う排水はない。
- (ii) 道路縦横断方向の熱・水分移動は無視する。
- (iii) NaClの系外への流出はない。
- (iv) NaCl粒子への水蒸気の付着は、NaCl表面で均一に起こる。
- (v) 水蒸気がNaCl粒子と接触して発生するNaCl



(a) 球体粒子



(b) 立方体粒子

図-4 NaCl粒子の形状およびモデリング

溶液は、飽和塩濃度 C_{so} ¹²⁾とする。ここで、塩濃度 C_s は溶解NaCl質量 M_{nl} (kg)/NaCl溶液質量(kg)で定義される。

- (vi) 溶解に伴うNaCl粒子の侵食およびNaCl粒子の吸湿は無視する。

3. 理論

3.1 水および氷収支

任意時間の路面上に存在する淡水質量 M_w (kg/m^2)および氷質量 M_i (kg/m^2)の時間変化率 m_w (kg/m^2s)および m_i (kg/m^2s)は、相変化を考慮した以下の式でそれぞれ与えられる。

$$m_w = m_{vc} + m_{mf} \quad (3)$$

$$m_i = m_{sc} - m_{mf} \quad (4)$$

ここに、 m_{vc} : 蒸発(<0)・凝縮(>0)フラックス(kg/m^2s), m_{mf} : 凝固(<0)・融解(>0)フラックス(kg/m^2s)および m_{sc} : 昇華フラックス(kg/m^2s)である。特に、本研

究で対象とする $m_{sc} > 0$ を，ここでは霜フラックスと呼ぶ。

m_{vc} は式(5)で与えられる。

$$m_{vc} = \alpha_{vc}(\rho_{va} - \rho_{vp}) \quad (5)$$

ここに， α_{vc} ：蒸発・凝縮速度係数(m/s)， ρ_{va} ：大気の水蒸気密度(kg/m^3)および ρ_{vp} ：NaCl溶液の水蒸気密度降下を考慮した湿潤路面の水蒸気密度¹³⁾(kg/m^3)である。ここで， α_{vc} は気温 T_a ($^{\circ}\text{C}$)と T_{ps} を用いて式(6)で表される⁵⁾。

$$\alpha_{vc} = 9.2 \times 10^{-3} \exp\{-0.13(T_a - T_{ps})\} \quad (6)$$

また， ρ_{vp} は水蒸気密度降下率 ϕ ¹⁴⁾を用いて式(7)で与えられる。

$$\rho_{vp} = \rho_{vp0}(1 - \phi) \quad (7)$$

ここに， ρ_{vp0} ：溶媒の水蒸気密度(kg/m^3)である。何ら¹⁴⁾の実験によれば， ϕ は C_s に線形比例して増加する。すなわち，

$$\phi = 0.51C_s \quad (8)$$

m_{mf} は， $T_{ps} \geq T_f$ かつ $M_i > 0$ で融解(正值)，逆に $T_{ps} < T_f$ かつ $M_w > 0$ で凝固(負値)が発生し，各々の値は舗装表層の純熱フラックス q_{net} (W/m^2 ，式(17)参照)で規定され，式(9)で与えられる。

$$m_{mf} = \frac{1}{1000} \frac{q_{net}}{L_{mf}} \quad (9)$$

ここに， L_{mf} ：融解・凝固熱(kJ/kg)である。

m_{sc} は，霜速度係数 α_{sc} (m/s)⁷⁾を用いて式(10)で与えられる。

$$m_{sc} = \alpha_{sc}(\rho_{va} - \rho_{vp}) \quad (10)$$

3.2 NaCl収支

溶媒(淡水)に溶解したNaCl質量 M_{nl} (kg/m^2)および固形NaCl質量 M_{ns} (kg/m^2)の時間変化率 m_{nl} および m_{ns} ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)は図-5に示すように， A_{ls} および A_{vs} でのNaCl溶解フラックス m_{di1} および m_{di2} ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)を用いて式(11)および(12)で与えられる。

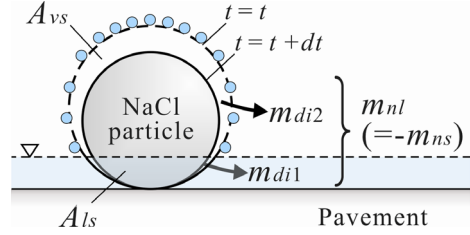


図-5 NaCl溶解フラックスの概念図

$$m_{nl} = m_{di1} + m_{di2} \quad (11)$$

$$m_{ns} = -m_{di1} - m_{di2} = -m_{nl} \quad (12)$$

m_{di1} はNoyes-whitneyの式を用いて，式(13)で与えられる。

$$m_{di1} = K(C_{so} - C_s)A_{ls} \cdot n_s \cdot \rho_s \quad (13)$$

ここに， K ：溶解速度定数(m/s)， n_s ：NaCl粒子密度(number/ m^2)および ρ_s ：NaCl密度(kg/m^3)である。NaClの K については，Wagner¹⁵⁾，清水・尾方¹⁶⁾および党ら¹⁷⁾による研究がある。しかしながら，本実験のように氷点下で静止流体におけるNaClの K は，筆者の知る限り報告されていない。そこで本解析では， C_s の計算結果と実験結果が適合するように K を決定した。

ここで， n_s は固形NaClの散布密度 M_{nsi} (kg/m^2)を用いて式(14)で表される。

$$n_s = \frac{M_{nsi}}{\rho_s \cdot V_s} \quad (14)$$

ここに， V_s ：NaCl粒子の体積(球体： $1/6\pi d_n^3$ ，立方体： d_n^3)である。

m_{di2} は，仮定2.3(v)に準じて式(15)で与える。

$$m_{di2} = \frac{C_{so}}{1 - C_{so}} m_{vc} \cdot A_{vs} \cdot n_s \quad (15)$$

3.3 熱収支

舗装内部および表層の熱収支は，式(16)および(17)で与えられる。

$$\rho_p c_p \frac{\partial T_p}{\partial t} \Delta z_p = q_z \quad (16)$$

$$\rho_p c_p \frac{\partial T_{pt}}{\partial t} \Delta z_{pt} = q_z + q_m + q_{sa} + q_{ln} = q_{net} \quad (17)$$

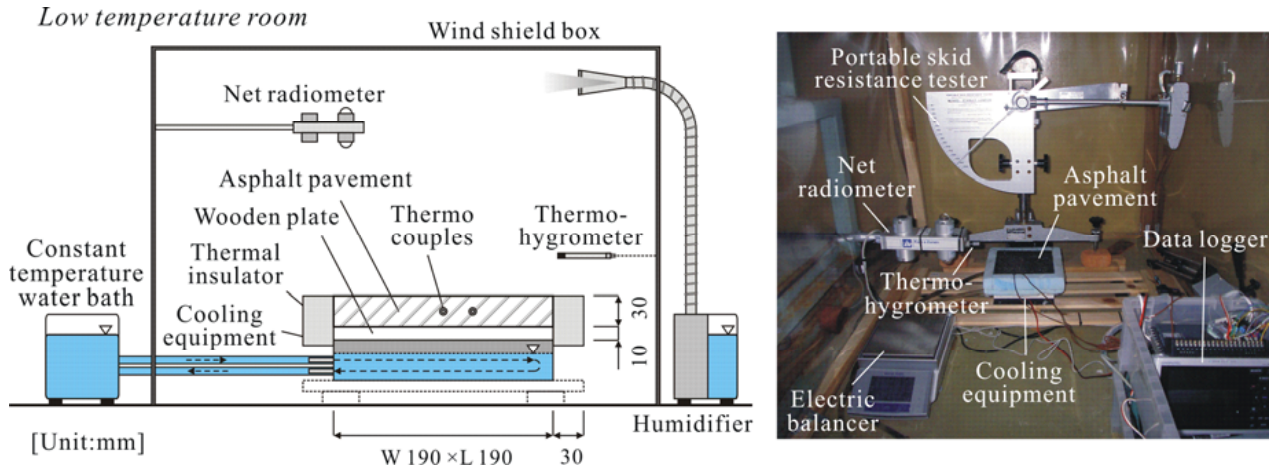


図-6 霜発生実験の概要図

ここに、 ρ_p : 舗装密度 (kg/m^3), c_p : 舗装比熱 (J/kgK), T_p : 舗装温度 ($^{\circ}\text{C}$), Δz_p : 舗装要素厚 (m), T_{pt} : 舗装表層温度 ($^{\circ}\text{C}$), Δz_{pt} : 舗装表層要素厚 (m), t : 時間 (s), q_z : 舗装熱フラックス (W/m^2), q_{rn} : 純放射熱フラックス (W/m^2), q_{sa} : 自然風に伴う顕熱フラックス (W/m^2), および q_{ln} : 純潜熱フラックス (W/m^2) である. なお, 本熱移動解析は, 上述の仮定 2.3 (ii) のとおり, 鉛直方向 z (m) のみとする.

(1) 舗装熱フラックス

q_z は, Fourier の法則に従って式 (18) で与えられる.

$$q_z = -\lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial z} \quad (18)$$

ここに, λ_p : 舗装の熱伝導率 (W/mK) である.

(2) 純放射熱フラックス

q_{rn} は, 上述の仮定 2.3 (i) に従えば, 路面長波放射フラックス q_{rlu} (W/m^2) および天空長波放射フラックス q_{rld} (W/m^2) の和として与えられる. すなわち,

$$q_{rn} = q_{rld} + q_{rlu} \quad (19)$$

ここで, q_{rlu} は Stefan-Boltzmann の法則に従い, 式 (20) で表される.

$$q_{rlu} = \varepsilon_p \sigma (T_{ps} + 273.15)^4 \quad (20)$$

ここに, ε_p : 路面の放射率および σ : Stefan-Boltzmann 定数 ($\text{W/m}^2\text{K}^4$) である. なお, q_{rld} は実測値を与える.

(3) 自然風に伴う顕熱フラックス

q_{sa} は, Newton の冷却則に従い, 式 (21) で与える.

$$q_{sa} = \alpha_{sa} (T_a - T_{ps}) \quad (21)$$

ここに, α_{sa} : 大気と舗装間の熱伝達率 ($\text{W/m}^2\text{K}$)¹⁸⁾ である.

(4) 純潜熱フラックス

ここでは, 水, 氷および NaCl の相変化に関連する潜熱は, すべて舗装表層の熱収支 (式 (17)) に付加されるとして, q_{ln} を式 (22) で与える.

$$q_{ln} = m_{vc} L_{vc} + m_{sc} L_{sc} - m_{mf} L_{mf} - (m_{d1} + m_{d2}) L_{di} \quad (22)$$

ここに, L_{vc} : 蒸発・凝縮熱 (kJ/kg), L_{sc} : 昇華熱 (kJ/kg) および L_{di} : NaCl の溶解熱 ($= -3.88 / (58.44 \times 10^{-3}) \text{ kJ/kg}$) である.

4. 霜発生実験

図-6 は, 低温恒温室で実施した霜発生実験の概要である. 実験では, 舗装供試体の下に設置した電子冷却器 (日本ブロアー製) を用いて NaCl 粉体を散布した舗装を冷却させることで, 大気中の水蒸気の舗装表面への昇華 (霜) の発生を促進させた.

実験の間, C_s は NaCl 溶液を吸水紙でサンプリングしてコンパクト塩分計 (Horiba 製) で, T_{ps} は放射温度計 (Raytek 製) で, M_w と M_i の合計 M_{wi} (kg/m^2) は電子天秤 (最小目盛 0.01g, Mettler toledo 製) で, それぞれ 30 分間毎に測定した. また, 気温 T_a ($^{\circ}\text{C}$) および相対湿度 RH_a (%) は温湿度計 (Vaisala 製) により, R_{ld} は放射

収支計 (Kipp & zonen製) により、舗装の代表温度 \overline{T}_p は舗装表面の中央で舗装上面から15 mm下方 (舗装厚中央) に埋設した熱電対により、それぞれ1分間隔で計測した。

本実験で用いた舗装は、幅 190×長190×高 30 mm の密粒度アスファルト混合物 13FH であり、 $\lambda_p = 1.4 \text{ W/mK}$ 、 $\rho_p = 2365 \text{ kg/m}^3$ および $c_p = 0.86 \text{ J/gK}$ である。 λ_p は迅速熱伝導率計 (京都電子工業製) を用いて、 c_p は熱量式含水率計を用いて測定した。また、舗装側面は断熱した。

本実験では、次の3点に留意した。

- (i) 天井からの冷氣による顕熱および冷却機の稼動・停止に伴う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で囲んだ。
- (ii) 舗装への霜を促進させるために、加湿器を用いてビニールシート内に水蒸気を供給した。
- (iii) 舗装と電子冷却器の間に木板を挟むことで、舗装温度の調整に努めた。

実験には、 $M_{nsi} = 5, 10$ および 20 g/m^2 と非散布路面の計4ケースを選び、以下ではそれぞれ Case-M5, Case-M10, Case-M20 および Case-0 と呼ぶ。

5. 実験結果および計算結果の検証

5.1 NaCl 粉体の粒径分布

図-7は、本実験で用いた d_n の確率密度関数 F_n である。 d_n は、図-3に示すように外接長方形の長径 d_{nw} および短径 d_{nb} の平均値 ($= (d_{nw} + d_{nb})/2$) として求め、0.5 mm 以下の範囲にあった。 F_n は d_n の増加につれて減少し、次式で与えられる。

$$F_n = 9.8 \exp(-9.7d_n) \quad (23)$$

5.2 計算条件および境界条件

T_p の初期条件は、実験開始時 ($t=0$) における \overline{T}_p と T_{ps} の測定値の線形補間で与えた。舗装上面の境界条件は1分間隔で得られた気象データを、舗装下面の境界条件は \overline{T}_p の測定値をそれぞれ線形内挿して与えた。

なお、本解析では $K = 1.2 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ とした。

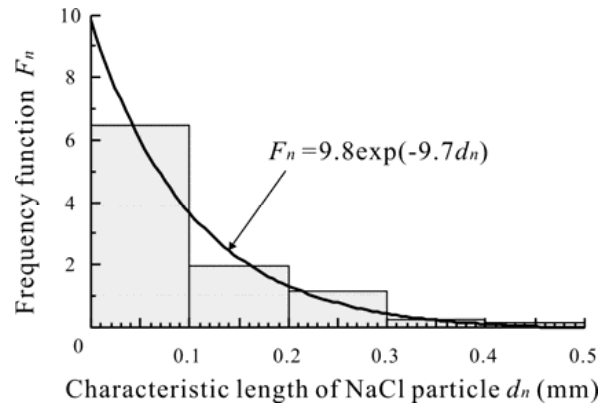


図-7 NaCl粒子の代表長の確率密度関数

5.3 気温および相対湿度

図-8は、(a) Case-0, (b) Case-M5, (c) Case-M10 および (d) Case-M20 における T_a および RH_a の時間変化を示す。なお、同図には後述する T_{ps} および \overline{T}_p の時間変化も併せて示す。

T_a (○) は $0.5 \sim -2.0^\circ\text{C}$ の範囲、 RH_a (破線) は実験開始直後と一部の時間を除いて $70 \sim 100\%$ の範囲にあった。Case-M10 の $t = 2.5 \sim 5.0 \text{ h}$ と Case-M20 の $t = 5.5 \sim 7.0 \text{ h}$ の RH_a の低下は、加湿器による水蒸気の供給が一時的に停止したことによる。なお、およそ30分間隔で見られる T_a および RH_a の同時増加は、計測作業時の人体からの輻射熱や吐息によって生じた。

5.4 路面温度

\overline{T}_p (△) は図-8に示したように、 $t=0$ の約 -1°C から $t=3.0 \text{ h}$ 程度で $-8 \sim -10^\circ\text{C}$ まで低下した。 T_{ps} の実験値 T_{psm} (▲) は、 \overline{T}_p に追従して低下し、平衡状態に達すると \overline{T}_p より $0.5 \sim 1.5^\circ\text{C}$ 高く推移した。

T_{ps} の計算値 T_{psc} (実線) に関する S model と C model の差は最大でも $2.0 \times 10^{-6}^\circ\text{C}$ で無視できる程度に小さい。また、すべてのケースで T_{psc} は T_{psm} と良好に一致した。

5.5 水質量および氷質量

図-9は、(a) Case-0, (b) Case-M5, (c) Case-M10 および (d) Case-M20 における M_{wi} (=水質量 M_w + 氷質量 M_i) および M_i の時間変化を示す。Case-M5 以外は、路面状態の写真を併せて示す。

まず、 M_{wi} について述べる。Case-0 では、常に $M_w =$

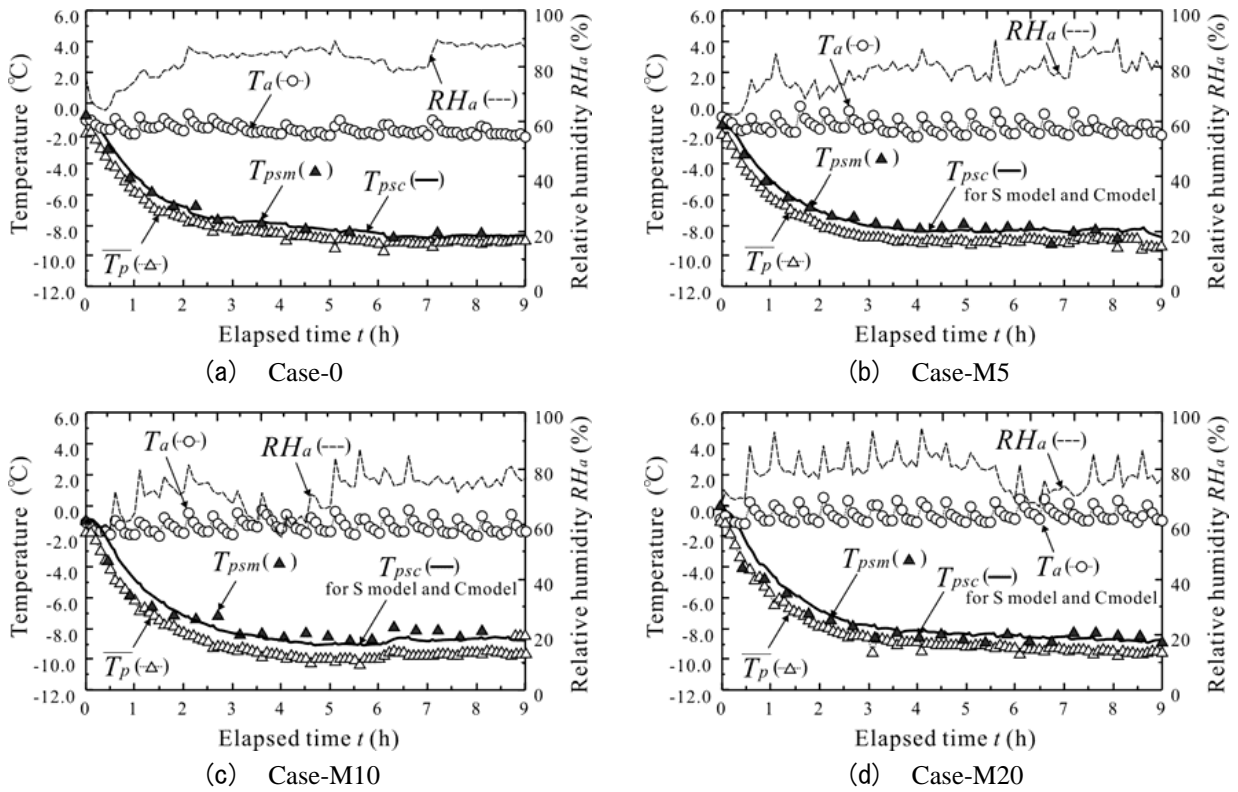


図-8 気温，相対湿度，路面温度および舗装代表温度の時間変化

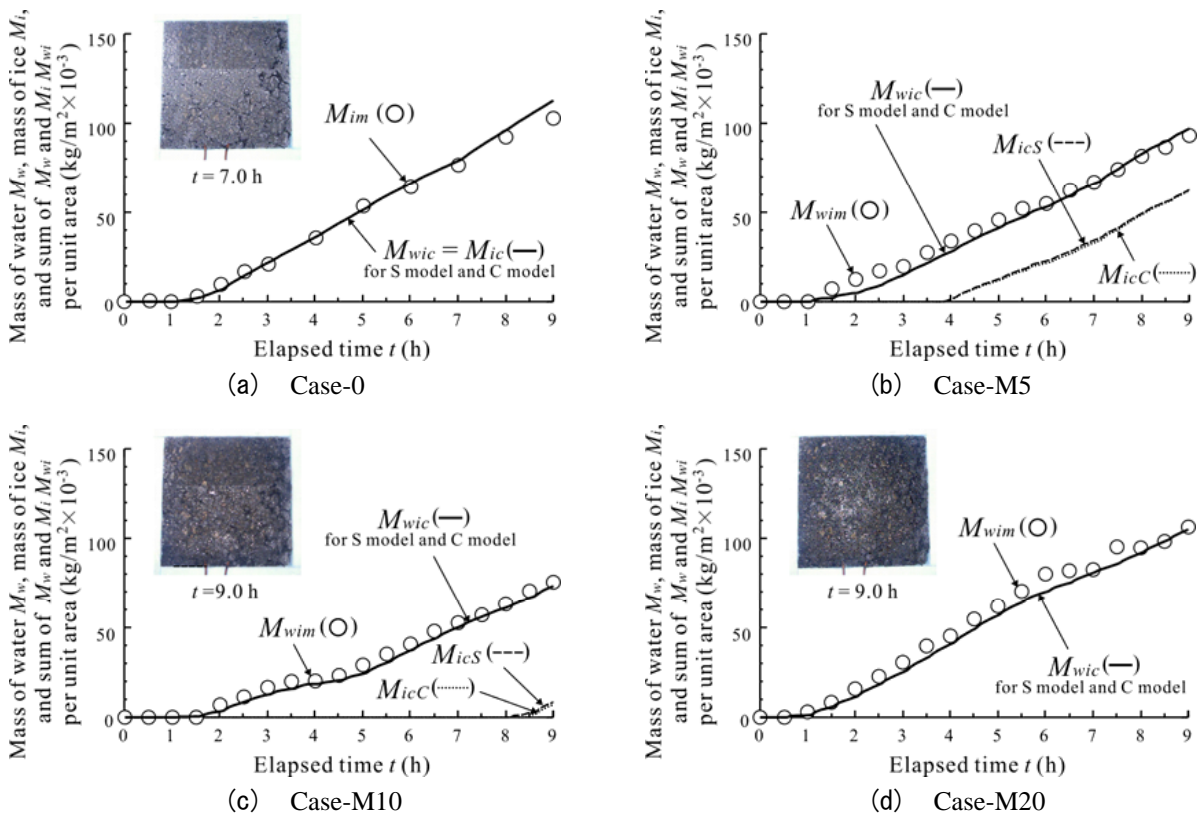


図-9 路面の水質量および氷質量の時間変化(単位面積当たり)

0であり、 M_{wi} は M_i に等しい。同図(b), (c)および(d)で知れるように、 M_{wi} の実験値 M_{wim} (○)は、 $t = 1.0 \sim 1.5$ hの間で検出され、時間とともに増大した。その時間増加率は、加湿器の不具合により RH_a が低下したCase-M10およびCase-M20の一部期間(5.3を参照)を除くと、概ね $3.0 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^2\text{s}$ であった。 M_{wi} の計算値 M_{wic} (実線)は、モデル間に相違がなく、すべてのケースで実験値を良好に再現した。

次に、 M_i の計算値 M_{ic} について述べる。Case-0の M_{ic} は M_{wic} と等しく、 $t = 7.0$ hで 0.077 kg/m^2 となった。図中の写真より、実際に $t = 7.0$ hで路面に薄氷層が形成されていることが確認できる。Case-M5では、S modelによる M_{ic} 、 M_{icS} (破線)およびC modelによる M_{ic} 、 M_{icC} (点線)は酷似しており、 M_{icS} と M_{icC} はともに $t = 3.8$ hから増加し始めた。Case-M10では、 M_{icS} と M_{icC} はCase-M5よりも4.3 h遅れ、 $t = 8.1$ hより増加が始まった。図中の写真では判断し難いが、実際に $t = 9.0$ hの路面状態はシャーベット(氷と水が混在)であった。Case-M20では、 M_{ic} は発生せず、図中の写真から知れるように、 $t = 9.0$ hにおける路面は湿潤状態であった。

5.6 塩濃度および固形NaCl質量

図-10は、(a) Case-M5、(b) Case-M10および(c) Case-M20における塩濃度 C_s および無次元された固形NaCl質量 M_{ns} 、 $M_{ns}^* (= M_{ns}(t) / M_{nsi})$ の時間変化を示す。

まず、 C_s に着目する。Case-M5において C_s の実験値 C_{sm} (○)は、 $t = 1.5$ h(C_{sm} の計測が可能になった時間)の0.24から急激に低下し、 $t = 4.5$ h以降、約0.12となった。しかしながら、 $t = 6.5$ h以降は路面が氷で覆われたためにNaCl溶液の採取ができず、 C_{sm} は計測できなかった。Case-M10では、測定が可能になった $t = 2.0$ hで $C_{sm} = 0.24$ となった。 C_{sm} の低下は、加湿器の一時停止により $t = 2.5 \sim 4.5$ hの間に緩慢となったが、加湿が再び始めると低下率は再び増大し、 C_{sm} は $t = 6.5$ hで0.15となった。その後、 C_{sm} の低下は鈍化し、 $t = 8.5$ hで C_{sm} は0.13となった。Case-M20の C_{sm} は、 $t = 1.5$ hの $C_{sm} = 0.24$ から時間とともに線形的に低下し、 $t = 9.0$ hで $C_{sm} = 0.17$ となった。これより、 M_{nsi} が多いほど C_{sm} の時間低下率は小さいことが知れ

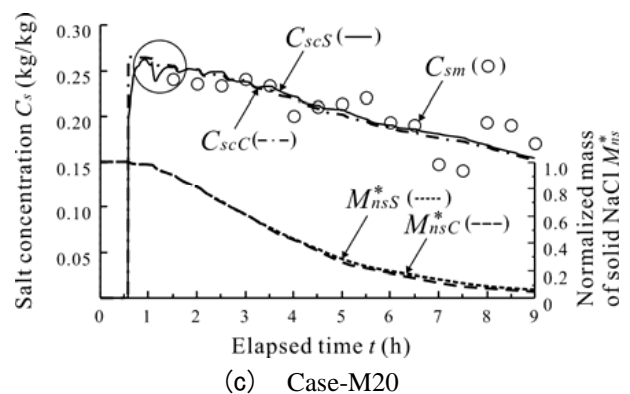
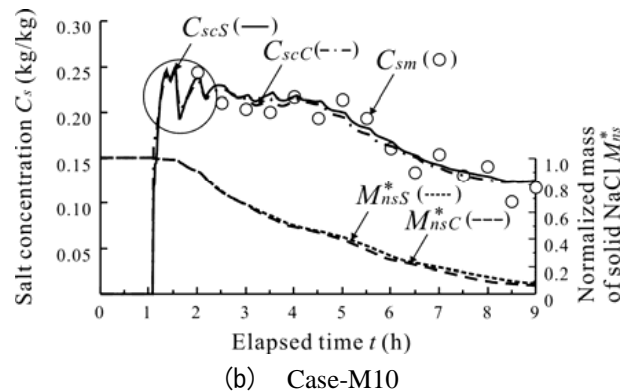
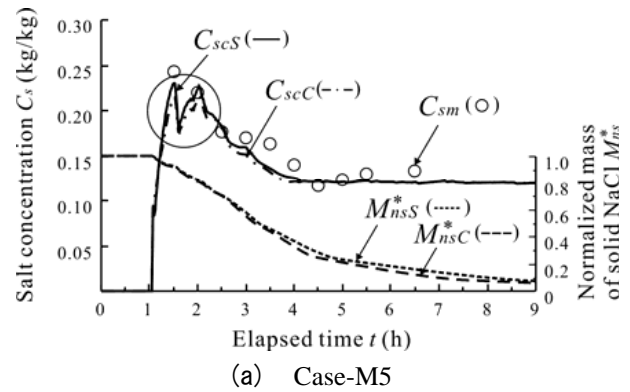


図-10 塩濃度および無次元固形NaCl質量の時間変化

る。この原因については M_{ns}^* の挙動を踏まえて次の段落以降で考察する。いずれのケースも、 C_s の計算値 C_{sc} (S-modelによる C_{sc} 、 C_{scS} (実線)とC modelによる C_{sc} 、 C_{scC} (一点破線))間の違いはなく、良好に C_{sm} の時間変化を再現できた。なお、 $C_{sc} (= M_{nl} / (M_{nl} + M_w))$ には実験の初めに明確な増減が観られ、時間とともに小さくなるのが分かる。これは5.3で説明したように計測作業時の影響による。計測作業時の T_a と RH_a の一時的な上昇に伴う着霜-融解量の増大によって M_w は増大し、 C_{sc} は低下した。その後の m_{dil} (NaCl溶液とNaCl粒子の接触面で起こるNaCl溶解フラック

ス)の増加により C_{sc} は増大した。特に図中丸で囲んだ着霜直後($t = 1.5$ h付近)では, M_{ni} が小さいために, C_{sc} の変化が大きく現れた。

次に M_{ns}^* について述べる。S modelおよびC modelで計算された M_{ns}^* , M_{nscS}^* (破線)および M_{nscC}^* (点線)の経時変化(M_{ns}^* - t 関係)は3ケースともほぼ相似であり, M_{nsi} が M_{ns}^* の時間的減少率に及ぼす影響は認められなかった。従って今回の場合,3ケースとも路面上の M_{ns}^* は次式で表される。

$$M_{ns}^*(t) = M_{nsi} \exp\{a(t_0 - t)\} \quad (24)$$

ここに, a :低減係数(=0.34)および t_0 : M_{ns} が減少し始める時間(h)である。なお, C_s および M_{wi} の計算値は実験値と良好に一致していることから,図中の M_{ns}^* は信頼性が高いと判断できる。

固形NaClの散布密度 M_{nsi} はCase-M5, Case-M10, Case-M20の順に1:2:4であること,および式(24)中の係数 a および t_0 は M_{nsi} に依存しないことから,実験期間中の各ケースの M_{ns} は概ね上記の M_{nsi} の比率で路面に残留していたと言える。これに対して M_{nsi} の違いが M_{wi} の時間増加に及ぼす影響は殆どないことから(5.5で説明), M_{nsi} が大きいほど凍結防止の持続時間は長く,Case-M5, Case-M10, Case-M20の順で C_s の時間低下率は小さくなった。

6. おわりに

本研究では,固形散布を対象としてNaCl散布後に起こる着霜-NaCl溶解-霜融解-凍結(凝固)過程を表現した水-氷-NaClの相変化モデル(Frost model)を構築し,霜発生実験との比較からFrost modelの妥当性を検証した。

以下に,得られた知見を列挙する。

- (1) 今回の実験条件に関する限り,無次元固形NaCl質量の経時変化は固形NaClの散布密度に依存しない。
- (2) Frost modelによる固形NaCl散布後の着霜-NaCl溶解-霜融解-凍結(凝固)過程の路面温度,着霜量および塩濃度の計算値は,実験値と良好に一致し,Frost modelの妥当性を得た。

- (3) 固形NaCl粒子を球体あるいは立方体と見做しても,(2)で述べた結果に違いは殆どない。今後は,路面に散布された固形NaClの溶解速度定数 K および低減係数 a に関する検討を行うとともに,実道路における車両による塩の飛散,車両への塩の付着,排水による道路系外への塩の排出を考慮したFrost modelの改良と実用化を目指す。なお,本研究は科学研究費補助金を受けて行った。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 渡邊洋, 福原輝幸:サーマルマッピングによる冬期道路の路面温度特性,日本雪工学会誌, Vol. 14, No. 2, 1998, pp. 11 - 18.
- 2) 宮本修司, 浅野基樹:高規格幹線道路日高自動車道におけるサーマルマッピングによる路面凍結要注意箇所の抽出,北海道開発土木研究所月報, No. 590, 2002, pp. 40 - 46.
- 3) 国土交通省:道路局,道路IR,予算決算情報(<http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-yosan/ir-yosan.html>).
- 4) 石川裕一, 青山實伸, 倉戸伸浩, 西尾守広:劣化した道路鋼橋RC床版の凍結防止剤による塩分浸透特性,コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, ROMBUNNO. 2233, 2010.
- 5) 鈴木啓介, 青木崇光, 大島淳一, 下村忠一:凍結防止剤散布の効率化に関する研究,日本雪工学会誌, Vol. 20, No. 5, 2004, pp. 65 - 66.
- 6) 沼田実, 長門幸朗, 栗林直義, 川平吉則, 稲沢太志, 浦野隆: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, 2006, pp. 218 - 223.
- 7) 木曾忠幸, 渡邊洋, 福原輝幸:橋梁での微気象が生む橋梁道路と大気との間の熱・水分移動特性と路面結露凍結現象,水工学論文集, Vol. 41, 1997, pp. 361 - 366.
- 8) 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, Vol. 63, No. 2, 2007, pp. 156 - 165.
- 9) 藤本明宏, 渡邊洋, 福原輝幸: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, 2007, pp. 19 - 29.

- 10) 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, 2008, pp. 3 - 11.
- 11) 藤本明宏, 渡邊洋, 福原輝幸: 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, 2009, pp. 3 - 11.
- 12) 日本建設機械化協会: 道路除雪ハンドブック第4版, 1993, p. 157.
- 13) 日本機械学会: 湿度・水分測定と環境のモニタ, 1992, pp. 7 - 11.
- 14) Chao HE, 福原輝幸, 高野保英, 南条雅志, Jingsong YANG: 塩集積層を有する土壌中の散水-蒸発過程における熱・水分・塩移動, 土木学会論文集, No. 747, 2003, pp. 15 - 28.
- 15) C. L. Wagner, Z. Phys. Chem., Vol. 71, p. 401, 1916.
- 16) 清水典子, 尾方昇: 食塩の溶解速度定数, 日本海水学会誌, Vol. 42, No. 1, 1988, pp. 3 - 6.
- 17) 莞弘之, 鴨志田智之, 谷井潤郎, 篠原富男: 広範囲の粒径に適用可能な溶解速度表示法, 日本海水学会誌, Vol. 56, No. 3, 2002, pp. 256 - 260.
- 18) 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, 2006, pp. 14 - 22.

記号

a	: 低減係数	(-)
A_{ls}	: NaCl溶液とNaCl粒子の接触面積	(m^2)
A_{vs}	: 水蒸気とNaCl粒子の接触面積	(m^2)
c_p	: 舗装比熱	(J/kgK)
C_s	: 塩濃度	(kg/kg)
C_{so}	: 飽和塩濃度	(kg/kg)
d_n	: NaCl粒子の代表長	(m)
d_{nb}	: NaCl粒子の外接長方形の短径	(m)
d_{nw}	: NaCl粒子の外接長方形の長径	(m)
F_n	: 確率密度関数	(-)
h_w	: NaCl溶液厚	(m)
K	: 溶解速度定数	(m/s)
L_{di}	: NaClの溶解熱	(kJ/kg)

L_{mf}	: 融解・凝固熱	(kJ/kg)
L_{sc}	: 昇華熱	(kJ/kg)
L_{vc}	: 蒸発・凝縮熱	(kJ/kg)
m_{di1}	: A_{ls} でのNaCl溶解フラックス	(kg/m^2s)
m_{di2}	: A_{vs} でのNaCl溶解フラックス	(kg/m^2s)
m_i	: 氷質量の時間変化率	(kg/m^2s)
m_{nl}	: 淡水に溶解したNaCl質量の時間変化率	(kg/m^2s)
m_{ns}	: 固形NaCl質量の時間変化率	(kg/m^2s)
m_{mf}	: 凝固・融解フラックス	(kg/m^2s)
m_{sc}	: 昇華フラックス	(kg/m^2s)
m_{vc}	: 蒸発・凝縮フラックス	(kg/m^2s)
m_w	: 淡水質量の時間変化率	(kg/m^2s)
M_i	: 氷質量	(kg/m^2)
M_{nl}	: 溶媒(淡水)に溶解したNaCl質量	(kg/m^2)
M_{ns}	: 固形NaCl質量	(kg/m^2)
M_{ns}^*	: 無次元固形NaCl質量	(-)
M_{nsi}	: 固形NaClの散布密度	(kg/m^2)
M_w	: 淡水質量	(kg/m^2)
M_{wi}	: M_w と M_i の合計	(kg/m^2)
n_s	: NaCl粒子密度	(number/ m^2)
q_{in}	: 純潜熱フラックス	(W/m^2)
q_{net}	: 舗装表層の純熱フラックス	(W/m^2)
q_{rld}	: 天空長波放射フラックス	(W/m^2)
q_{rlu}	: 路面長波放射フラックス	(W/m^2)
q_m	: 純放射熱フラックス	(W/m^2)
q_{sa}	: 自然風に伴う顕熱フラックス	(W/m^2)
q_z	: 舗装熱フラックス	(W/m^2)
RH_a	: 相対湿度	(%)
t	: 時間	(s)
t_0	: M_{ns} が減少し始める時間	(h)
T_a	: 気温	($^{\circ}C$)
T_f	: 凝固開始温度	($^{\circ}C$)
T_p	: 舗装温度	($^{\circ}C$)
T_{ps}	: 路面温度	($^{\circ}C$)
T_s	: NaCl溶液温度	($^{\circ}C$)
T_{pt}	: 舗装表層温度	($^{\circ}C$)
\bar{T}_p	: 舗装の代表温度	($^{\circ}C$)
V_s	: NaCl粒子の体積	(m^3)
z	: 鉛直方向	(m)

α_{sa}	: 大気と舗装間の熱伝達率	(W/m ² K)
α_{sc}	: 霜速度係数	(m/s)
α_{vc}	: 蒸発・凝縮速度係数	(m/s)
Δz_p	: 舗装要素厚	(m)
Δz_{pt}	: 舗装表層要素厚	(m)
ε_p	: 路面の放射率	(-)
ϕ	: 水蒸気密度低下率	(-)
λ_p	: 舗装の熱伝導率	(W/mK)
θ	: 球体NaCl粒子の中心から見たNaCl溶液表面と NaCl粒子が接する面の立体角	(sr)
ρ_p	: 舗装密度	(kg/m ³)
ρ_s	: NaCl密度	(kg/m ³)
ρ_{va}	: 大気の水蒸気密度	(kg/m ³)
ρ_{vp}	: 湿潤舗装表面の水蒸気密度	(kg/m ³)
ρ_{vp0}	: 溶媒の水蒸気密度	(kg/m ³)
σ	: Stefan-Boltzmann定数	(W/m ² K ⁴)
添字		
m	: 実験値	
c	: 計算値	
cS	: S modelによる計算値	
cC	: C modelによる計算値	