

熱・水分収支型路面雪氷状態モデルによる融解解析

福井大学産学官連携本部 正会員 ○藤本明宏
 福井大学工学部特別研究員 正会員 渡邊 洋
 福井大学大学院工学研究科 正会員 福原輝幸

1. はじめに

積雪寒冷地では、冬期道路の安全性の確保および道路管理の効率化のために、路面の熱収支から路面温度を推定するモデル(熱収支型路面温度モデル)の開発が進められてきた¹⁾。しかしながら、路面凍結は水分の凍結(湿潤→凍結)、結露凍結(乾燥→凍結)および圧雪の融解・再凍結(圧雪→凍結)のように、多様な性状変化を経て発生する。従って、滑り易い路面の発生を事前に把握するには、路面温度に加えて路面雪氷状態の予測が必要となる。

そこで、熱収支型路面温度モデルに雪氷層を構成する水、氷および空気の質量(体積)収支を組込んだ路面雪氷状態モデル(熱・水分収支型路面雪氷状態モデル)を構築するとともに、融雪を調べた室内実験(融雪実験)との比較からモデルの妥当性を検証したので、報告する。

2. 路面雪氷層の熱および水分移動理論

2.1 水・氷質量収支および空気体積収支

路面雪氷層の水質量 $M_w(\text{kg}/\text{m}^2)$ 、氷質量 $M_i(\text{kg}/\text{m}^2)$ および空気体積 $V_a(\text{m}^3/\text{m}^2)$ の時間変化率は、以下の式でそれぞれ表される。

$$\text{水質量} : \frac{\partial M_w}{\partial t} = M_{wl} + M_{wi} \quad (1)$$

$$\text{氷質量} : \frac{\partial M_i}{\partial t} = M_{il} - M_{wi} \quad (2)$$

$$\text{空気体積} : \frac{\partial V_a}{\partial t} = -V_{aex} - V_{ao} \quad (3)$$

ここに、 M_{wl} :蒸発・凝結フラックス($\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$)、 M_{wi} :融解・凝固フラックス($\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$)、 M_{il} :昇華フラックス($\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$)、 V_{aex} :置換空気フラックス²⁾($\text{m}^3/\text{m}^2/\text{s}$)、気相から液相に変わるときに正)、 V_{ao} :開放空気フラックス²⁾($\text{m}^3/\text{m}^2/\text{s}$)および t :時間(s)である。

2.2 熱収支

路面雪氷層の熱収支は、次式で表される。

$$\frac{\partial}{\partial t} \{(\rho c)_s z_s T_s\} = C_{sp} + R_{ns} + R_{nl} + S_a - L_e + L_m \quad (4)$$

ここに、 $(\rho c)_s$:雪氷層の体積熱容量($\text{J}/\text{m}^3/\text{K}$)、 z_s :雪氷厚(m)、 T_s :雪氷温度($^{\circ}\text{C}$)、 C_{sp} :舗装熱フラックス(W/m^2)、 R_{ns} :純短波放射熱フラックス(W/m^2)、 R_{nl} :純長波放射熱フラックス(W/m^2)、 S_a :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)および L_m :融解・凝固潜熱フラックス(W/m^2)である。

なお、上述の各フラックスの詳細は、参考文献2)を参照されたい。

3. 融雪実験

図-1は、低温恒温室で実施された融雪実験の概要である。実験では、 $W 0.30 \times L 0.49 \times H 0.11\text{m}$ の密粒度アスファルト舗装の上に削氷器で作製した人工雪を載せ、赤外線放射ランプ($200\text{W} \times 4$)で融雪させる。赤外線放射ランプは、雪氷層の上方1.0mに取り付け、雪氷路面を均一に放射するための拡散フィルタとして、ランプ下0.3mにアクリル板と養生用ビニールを設置した。

舗装温度は、舗装表面の中央で舗装上面から5, 10, 15, 25, 35, 45, 65および95mm下方に埋設された熱電対

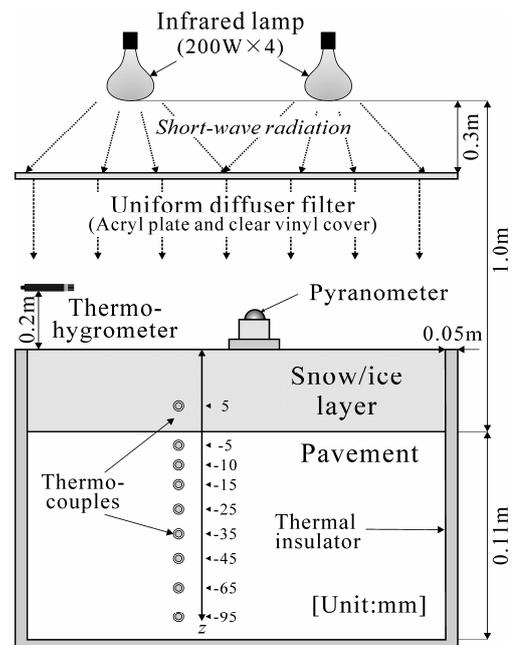
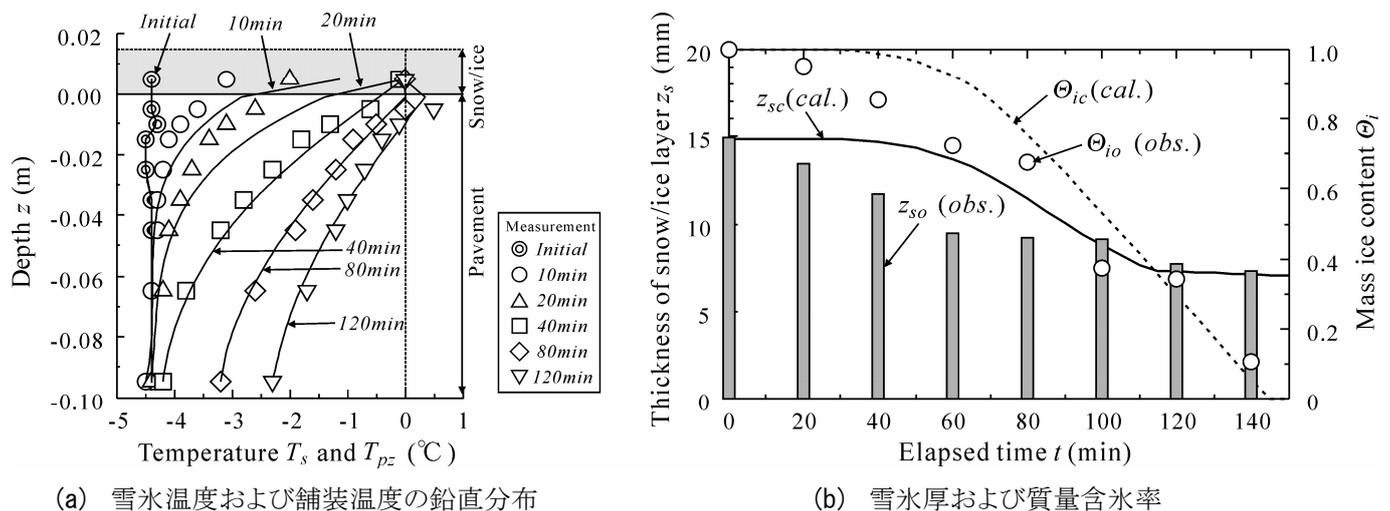


図-1 融雪実験の概要図

キーワード : 熱収支, 融解, 路面雪氷状態, 冬期道路管理, 含水率

連絡先 : 〒910-8507 福井市文京3-9-1 福井大学工学部建築建設工学科環境熱・水理研究室 Tel:0776-27-8595



(a) 雪氷温度および舗装温度の鉛直分布

(b) 雪氷厚および質量含水率

図-2 実測値と計算値の比較

で計測した。舗装上面を除く全境界は断熱材(厚さ = 50mm)で断熱した。雪氷温度は、舗装表面から5mm上方に設置した熱電対により測定した。また、気温および相対湿度は、雪氷層の上方0.2mに設置した温湿度計で測定した。さらに、雪氷厚(z_s)、質量含水率(θ_i)および雪氷密度(ρ_s)を20分間隔で測定した。

4. 実験値と計算値の比較

4.1 計算条件および境界条件

雪氷層の初期状態は乾燥雪であり、 $\rho_s = 480\text{kg/m}^3$ 、 $z_s = 15\text{mm}$ および $\theta_i = 1.0$ である。外部条件について、冷凍機の運転・停止の影響を受けて、気温は-3から-6°Cの範囲で、相対湿度は50から80%の範囲で周期変動した。この変動に起因して、雪氷層へ入射する長波放射熱フラックスは330から350 W/m^2 の範囲にあった。放射ランプによる短波放射熱フラックスは雪氷表面で476 W/m^2 であった。また、顕熱はゼロの状態に計算した。

舗装底面の境界条件は、舗装上面より深さ $z = -95\text{mm}$ の温度を採用し、任意時刻の値は5秒間隔で得られる実測値の線形内挿により与える。

4.2 雪氷および舗装温度

図-2(a)は雪氷温度(T_s)および舗装温度(T_{pz})の鉛直分布の経時変化を示す。同図には計算値も併せて示す。

舗装および雪氷層の初期温度は一樣に約-4.4°Cであった。放射ランプ点灯($t = 0$)により T_s は急激に上昇し、 $t = 40$ 分で0°Cになった。それ以降は0°Cを維持した。 T_{pz} は当然ながら T_s の挙動に追従して時間的に変化した。

T_s の計算値(実線)は、概ね実測値を再現しているものの、 $t = 20$ 分までの上昇が実測値より大きい。この要因の一つとして、要素平均値(計算値)と局所値(測定点の値)の違い

が考えられる。これに起因して、 T_{pz} の計算値も実測値より上昇が早い。

4.3 雪氷厚および質量含水率

図-2(b)に、雪氷厚の実測値(z_{so})に対する計算値(z_{sc})および質量含水率の実測値(θ_{io})に対する計算値(θ_{ic})の経時変化をそれぞれ示す。

θ_{io} (○)の低下は、 $t = 20$ 分まで緩やかであるが、それ以降はほぼ直線的になり、最終の $t = 160$ 分で $\theta_{io} = 0$ になった。他方 z_{so} (■)は、実験開始から直線的に低下し、 $t = 60$ 分以降は緩やかになり、最終的に7mmとなった。

計算された z_{sc} (実線)および θ_{ic} (破線)は、ともに実験値を概ね再現している。しかしながら、実験値は $t = 0$ から低下しているのに対して、計算値は $t = 25$ 分から低下し始めている点に違いがある。これは4.2で述べたように、計算では雪氷を一層として扱うため、雪氷全層が0°Cにならないと融解しないが、実際には雪氷表面が0°Cに到達すれば融解が始まることに起因する。これを改善するには、雪氷層を複数に分割するモデル(多層モデル)の開発が必要となる。

5. おわりに

熱・水分収支型路面雪氷状態モデルを提案するとともに、実験値と計算値の比較から妥当性を検証した。その結果、本モデルは融雪過程における雪氷温度、雪氷厚および質量含水率を概ね再現することができた。

参考文献

- 1) 福原輝幸, 藤本明宏, 渡邊洋: 路面雪氷予測モデル, 日本雪工学会誌, Vol. 22, No. 1, pp. 55-60, 2006.
- 2) 藤本明宏, 渡邊洋, 福原輝幸: 路面薄雪氷層の融解解析, 土木学会論文集, Vol. 63, No. 2, pp. 202-213, 2007.