

乾燥積雪および氷板層－舗装間の熱移動

福井大学 VBL 博士研究員 正会員 ○藤本明宏
 福井大学特別研究員 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. 緒言

筆者らは、冬期道路管理の効率化を目的に、熱・水分移動による路面雪氷状態モデルを開発中である^{1), 2)}。本論文では、これまで殆ど評価されていない舗装－雪氷層間を移動する熱(以下、舗装熱)に着目する。

図-1 は、乾燥積雪およびシャーベットと舗装間の接触状態をマイクロ스코プで撮影したものである。(a)の乾燥積雪では、氷の粒径と同等オーダー(0.4~1.0mm)の空隙が点在し、氷粒子と舗装とが不連続に接触する。(b)のシャーベットでは、氷粒子間に水と空気が混合し、水の大部分は舗装と接触する。このように、舗装と雪氷層との境界(以下、界面)での接触状態は複雑であり、舗装と雪氷層間の接触熱抵抗は、雪氷状態によって異なる。従って、舗装熱フラックスを正確に評価するためには、雪氷物性と接触熱抵抗の関係を調べる必要がある。

そこで、本研究では乾燥積雪および氷板路面で定常伝熱実験を行い、接触熱抵抗と雪密度の関係を調べた。

2. 舗装熱フラックスの定式化

図-2に従って、界面の雪氷温度を T_{cs} (°C)、舗装温度を T_{cp} (°C)とすれば、定常状態の舗装熱フラックス G_{sp} (W/m²)は、雪氷内部および舗装内部を伝わる熱フラックスに等

しい。よって、 G_{sp} は式(1)で与えられる。

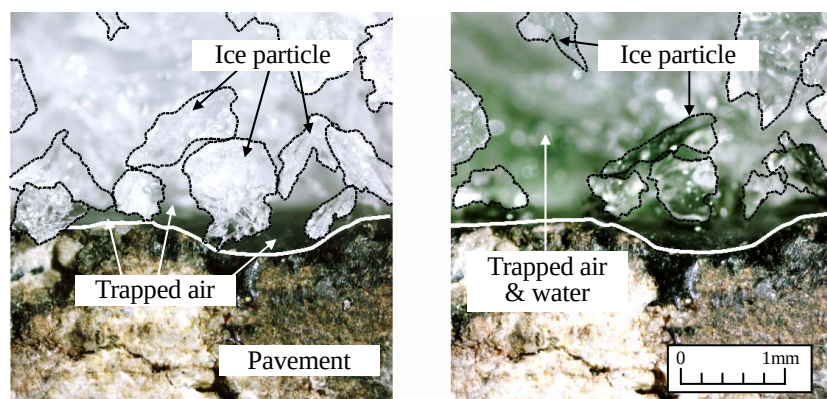
$$G_{sp} = -\lambda_s \frac{T_s - T_{cs}}{\Delta z_s} = \frac{T_{cp} - T_{cs}}{R_c} = -\lambda_p \frac{T_{cp} - T_p}{\Delta z_p} \quad (1)$$

ここに、 λ_s : 雪氷の熱伝導率(W/m/K)、 λ_p : 舗装の熱伝導率(W/m/K)、 Δz_s : 雪氷厚(m)、 Δz_p : 舗装厚(m)、 T_s : 界面から Δz_s 離れた雪氷温度(°C)、 T_p : 界面から Δz_p 離れた舗装温度(°C)および R_c : 接触熱抵抗(m²K/W)、である。

定常状態の舗装および雪氷の鉛直温度分布が分かれば、 T_{cp} および T_{cs} は推定できる。また、 G_{sp} は舗装鉛直温度勾配と λ_p より算出できる。これより、式(1)中で唯一の未知数である R_c は決定できる。

3. 定常伝熱実験

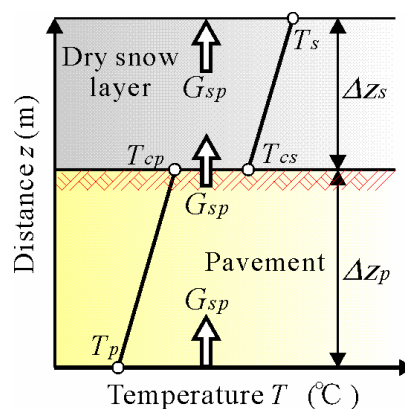
定常伝熱実験は、図-3 に示すように、密粒度舗装(W 0.30×L 0.49×H 0.11m)および削氷器で作製した人工雪を用いて、低温実験室で実施された。舗装内部温度を計測するために、舗装表面下 5, 10, 15, 25, 35, 45, 65 および 95mm に熱電対を埋設し、側部をスタイロフォーム(厚さ=50mm)で断熱した。舗装底部は、恒温水槽から供給される約 3°Cの水と接触させ、温度を一定にした。雪氷温度は、舗装表面から 5, 10, 15 および 20mm 上方に



(a) 乾燥積雪路面

(b) シャーベット路面

図-1 舗装と雪氷層との接触状態

図-2 舗装と乾燥積雪層の熱伝導と温度勾配
(定常状態)

キーワード 接触熱抵抗, 雪密度, 熱収支, 道路雪氷, 舗装

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

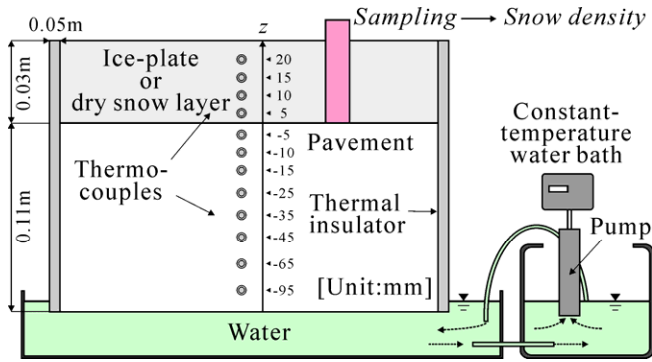


図-3 定常伝熱実験概要

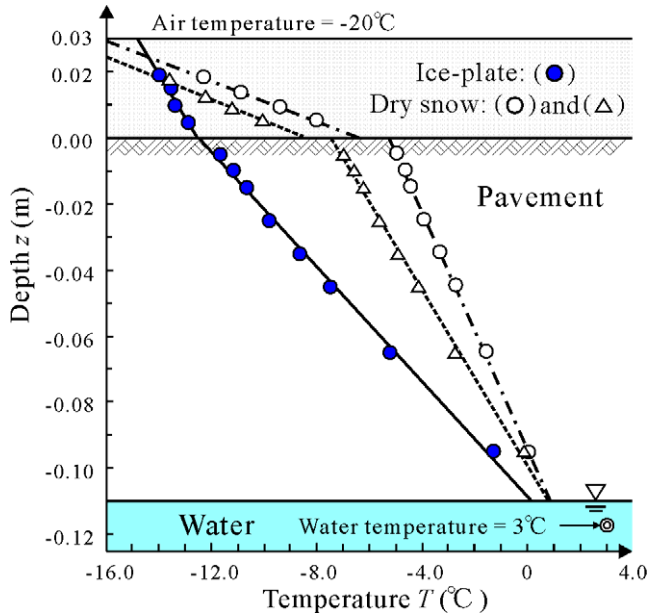


図-4 室内温度、乾燥積雪および氷板の鉛直温度分布、舗装鉛直温度分布および舗装下部の水温

設置した熱電対により測定した。

実験は、(1)舗装上に雪氷層(厚さ=約 30mm)を作る、(2)雪密度 ρ_s を円管サンプラーで測定する、(3)雪氷および舗装の内部温度を5秒間隔で計測する、(4) ρ_s を変えて、(1)～(3)を繰り返す、の順序で行った。

実験条件は、 ρ_s が 308, 351, 356, 425 および 499kg/m³の乾燥積雪と氷板(ρ_s =916kg/m³)の計 6 ケースとした。

4. 実験結果

図-4 は、室内温度、雪氷と舗装鉛直温度分布および舗装下部の水温を示す。同図には、雪氷と舗装の鉛直温度分布の近似線を併せて示す。ここでは、実験の代表例として、氷板路面(●)、 ρ_s =308 および 499kg/m³の乾燥積雪路面(○)および(△)の結果を示す。いずれのケースでも、雪氷および舗装中の鉛直温度分布は直線であり、定常状態と判断できる。

表-1 定常伝熱実験結果

Item	Unit	Dry snow		Ice plate
ρ_s	kg/m ³	308	499	916
dT_p/dz	°C/m	-55.7	-74.9	-115.1
dT_s/dz	°C/m	-328.2	-310.6	-75.6
G_{sp}	W/m ²	76.7	103.1	158.4
T_{cp}	°C	-5.3	-7.4	-12.5
T_{cs}	°C	-6.4	-8.4	-12.5
R_c	m ² K/W	15.3×10^{-3}	8.9×10^{-3}	0.3×10^{-3}

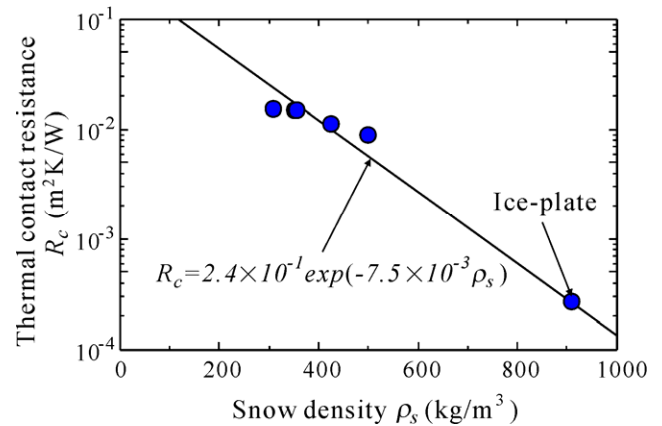


図-5 接触熱抵抗と雪密度の関係

表-1 に実験結果一覧を示す。同表の上から 2 行目に ρ_s を示す。3行目に示す舗装の鉛直温度勾配 dT_p/dz (<0)は、氷板で最も小さく、積雪層では ρ_s が小さくなるに伴い大きくなる。従って、 G_{sp} は ρ_s に比例して増加し、氷板で最も大きい(5 行目)。

次に、 dT_p/dz および dT_s/dz より計算された T_{cp} および T_{cs} を 6 および 7 行目に示す。界面での温度差($T_{cp}-T_{cs}$)も ρ_s が小さくなるにつれて大きくなる。

以上より、最下行に示す R_c は、 ρ_s が増大するにつれ、 15.3×10^{-3} , 8.9×10^{-3} および 0.3×10^{-3} m²K/W, と小さくなる。

図-5 に、 R_c と ρ_s の関係を片対数表示で示す。同図には、図-3 で示した結果以外に、3 ケースの実験結果を追加している。 ρ_s の増加に伴って、 R_c は指数関数的に減少し、 R_c と ρ_s の関係は式(2)で与えられる。

$$R_c = 2.4 \times 10^{-1} \exp(-7.5 \times 10^{-3} \rho_s) \quad (2)$$

参考文献

- 1) 藤本明宏, 渡邊洋, 福原輝幸: 路面雪氷層—舗装間の接触熱抵抗, 土木学会論文集, Vol. 63, No. 1, 2007. (登載予定)
- 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, 2007. (登載予定)