路面雪氷層－舗装間の接触熱抵抗

藤本 明宏¹・渡邊 洋²・福原 輝幸³

¹学生会員 福井大学大学院 工学研究科システム設計工学専攻 (〒910-8507 福井市文京3-9-1)
E-mail:afujimot@anc.anc-d.fukui-u.ac.jp

²正会員 福井大学特別研究員 (〒910-8507 福井市文京3-9-1)
E-mail:hw@snow.xrea.jp

³正会員 福井大学大学院教授 工学研究科建築建設工学専攻 (〒910-8507 福井市文京3-9-1)
E-mail:teruyuki@anc.anc-d.fukui-u.ac.jp

本研究では、舗装－雪氷層（気相－液相－固相）間を移動する熱フラックス（舗装熱フラックス）を正確に評価するために、種々の雪氷状態における舗装－雪氷層間の接触熱抵抗を室内実験と伝熱解析により求めた。これを基に、接触熱抵抗に及ぼす雪氷物性の影響を調べた。

その結果、(1)乾燥積雪路面における接触熱抵抗は、雪密度の増加とともに指数関数的に減少する、(2)シャーベット路面における接触熱抵抗は、本実験条件に関する限り、質量含水率が0.6以下では湿潤路面の値と変わらないが、0.6以上になると非線形的に増加する、(3)乾燥積雪、氷板およびシャーベットに係らず、接触熱抵抗は雪氷層の体積含水率の増加に伴って指数関数的に増加する、ことが分かった。

Key Words : thermal contact resistance, snow density, ice content, heat balance, road ice prediction

1. はじめに

様々な気象・車両・地形条件下で発生する凍結・圧雪路面はスリップ事故を誘発させ、円滑な交通を妨げる。路面雪氷状態を予測するモデル（以下、路面雪氷モデル）は、数時間先の路面雪氷状態が推定できることにより、凍結防止剤の適切な散布時期と量をまえて知ることを可能にする。これにより、路面雪氷モデルは道路管理の最適化および積雪と非積雪地域間のバリアフリー化の一助として期待されている。

現在、筆者らは熱収支法による路面雪氷モデルを開発している^{1), 2)}。路面の雪氷層は表-1に示すような内的・自然（気象）・人為要因の様々な熱的影響を受け、凍結・融解などを繰り返す。これまでに筆者らは路面雪氷モデルを構築するために、自然要因では風による顕熱、大気と路面間の水蒸気密度差に伴う蒸発・昇華潜熱³⁾、積雪路面における日射の反射および透過特性⁴⁾を、人為要因では車両輻射熱²⁾、タイヤ摩擦熱⁵⁾および車両誘発風に伴う顕熱⁶⁾を、調べた。しかしながら、舗装－雪氷層間を移動する熱（以下、舗装熱）については、限られた雪氷条件下で評価した³⁾ものの、定量的評価には至っていない。そこで、本論ではこの舗装熱に着目する。

雪氷層は水、空気、複雑な形状を有する氷粒子で構成

されるため、舗装と雪氷層との界面（以下、界面）での接触状態は複雑である。実際に、乾燥積雪からシャーベットへの融解過程における気相－液相－固（氷・舗装）相間の接触状態の時間経過をマイクロSCOPEで撮影したものが図-1である。図-1(a)の乾燥積雪路面では、氷粒子と舗装とが不連続に接触しており、氷の粒径と同等オーダー（0.4～1.0mm）の空隙が点在している。図-1(b)は氷粒子の融解によりシャーベットになった時の接触状態であり、氷粒子間には融氷水と空気が混合している。図-1(c)のようにさらに融解が進行すると、気泡がみられるもの

表-1 雪氷層に影響を及ぼす熱的要因

要因		伝熱
内的	地盤・道路の熱物性 や構造	舗装－雪氷層間を移動する熱（舗装熱）
	融解・凝固	潜熱
	放射	輻射熱
自然 (気象)	降雨降雪	熱伝達
	風	顕熱
	水蒸気密度	潜熱
人為	車両	輻射熱、顕熱
	凍結防止剤	熱伝達 化学反応熱、潜熱

図-1 融解過程における舗装と雪氷層との接触状態

図-2 舗装と雪氷層間の伝熱メカニズム

の舗装の大部分は融氷水と接触する。このように、気相-液相-固相間の接触状態によって界面に存在する空隙の数や大きさは異なる。空気と固体間の熱伝達率が水の場合の1/100以下⁷⁾であることを考慮すれば、界面の空隙は熱移動の障害となり、舗装と雪氷層間の接触熱抵抗(以下、接触熱抵抗)の増大に起因すると予想される。

図-2は舗装と雪氷層間の伝熱メカニズムを示す。図-2(a)の乾燥積雪路面における舗装熱は、氷粒子と舗装間の接触面を介した熱伝導(→)および積雪層内の空気を介した熱伝達(---→)からなり、図-2(b)のシヤーベットの路面では、更に水を介した熱伝達(---→)が付加される。このように、舗装熱は界面の空隙の大きさや水分状態などによって異なる。しかしながら、この舗装熱に及ぼす接触熱抵抗の影響を調べた研究例は少なく、舗装熱の定量的評価法に関して不明な点が多い。

そこで、本研究は乾燥積雪および氷板路面で定常伝熱実験を、湿潤およびシヤーベットの路面で非定常伝熱実験を行い、伝熱解析から舗装熱の評価方法を検討した。

2. 舗装熱の定式化

(1) 乾燥積雪路面

水の接触面積や空隙体積などの値の決定は難しいので、舗装熱フラックス G_{sp} (W/m²) は接触熱抵抗の表現を用いて定式化する。図-3にしたがって、界面の積雪層温度を T_{cs} (°C)、舗装温度を T_{cp} (°C) とすれば、定常状態の G_{sp} は積雪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。

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

すなわち、

$$G_{sp} = \frac{l}{\frac{\Delta z_s}{\lambda_s} + \frac{\Delta z_p}{\lambda_p} + R_c} (T_p - T_s) \quad (2)$$

ここに、 λ_s : 積雪層の熱伝導率 (W/m/K)

図-3 舗装と乾燥積雪層の熱伝導と内部温度勾配 (定常状態)

- λ_p : 舗装の熱伝導率 (W/mK)
- Δz_s : 積雪層厚さ (m)
- Δz_p : 舗装厚さ (m)
- T_s : 界面から Δz_s 離れた積雪層温度 (°C)
- T_p : 界面から Δz_p 離れた舗装温度 (°C)
- R_c : 接触熱抵抗 ($\text{m}^2\text{K/W}$)

である。

(2) シャーベット路面

シャーベットの G_{sp} は、式(3)で与えられる。

$$G_{sp} = \frac{T_{cp} - T_{cs}}{R_c} = -\lambda_p \frac{T_{cp} - T_p}{\Delta z_p} \quad (3)$$

すなわち、

$$G_{sp} = \frac{l}{\frac{\Delta z_p}{\lambda_p} + R_c} (T_p - T_{cs}) \quad (4)$$

ここで、 $T_{cs}=0^\circ\text{C}$ である。

(3) 接触熱抵抗

乾燥積雪路面では、定常状態の舗装内部および積雪層内部の鉛直温度勾配が分かれば、 T_{cp} および T_{cs} はそれぞれ推定できる。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、 R_c は式(1)中で唯一の未知数となり、決定できる。

シャーベットは、氷点下では凝固、常温下では融解するため、シャーベット路面で定常状態をつくるのが難しい。そこで、非定常状態の舗装温度を測定し、伝熱モ

図-4 シャーベット路面における舗装表層の熱収支

デルによる逆解析から R_c を同定する。伝熱モデルは次章で詳述する。

3. シャーベットー舗装伝熱モデル

(1) 舗装の熱エネルギー収支

a) 舗装表層

本実験では、短波放射はないため、舗装表層（要素 s ）の熱収支は図-4 に示すように、 G_{sp} と舗装伝導熱フラックス G_p (W/m^2) により規定される。すなわち、

$$(\rho c)_p \frac{\partial T_{ps}(t)}{\partial t} \Delta z_{ps} = -G_{sp} + G_p \quad (5)$$

ここに、 $(\rho c)_p$: 舗装表層の体積熱容量 ($\text{J/m}^3\text{K}$)

t : 時間 (sec)

T_{ps} : 要素 s の温度 (°C)

Δz_{ps} : 舗装表層厚さ (m)

である。 G_{sp} と G_p は、それぞれ式(6)、(7)で与えられる。

$$G_{sp} = \frac{l}{\frac{\Delta z_{ps}/2}{\lambda_p} + R_c} \{T_{ps}(t) - T_{cs}(t)\} \quad (6)$$

$$G_p = -\lambda_p \frac{T_{ps}(t) - T_{ps-1}(t)}{(\Delta z_{ps} + \Delta z_{ps-1})/2} \quad (7)$$

ここに、 T_{cs} : 界面のシャーベット温度 ($=0^\circ\text{C}$)

T_{ps-1} : 要素 $s-1$ の温度 (°C)

Δz_{ps-1} : 要素 $s-1$ の厚さ (m)

図-5 舗装内部(要素*i*)の熱収支

b) 舗装内部

舗装内部(要素*i*)の熱収支は図-5に示すように、要素*i-1*から流入する舗装伝導熱フラックス $G_{pi-1/2}$ (W/m²)および要素*i+1*へ流出する舗装伝導熱フラックス $G_{pi+1/2}$ (W/m²)に規定される。すなわち、

$$(\rho c)_p \frac{\partial T_{pi}(t)}{\partial t} \Delta z_{pi} = -G_{pi+1/2} + G_{pi-1/2} \quad (8)$$

ここに、 T_{pi} : 要素*i*の温度 (°C)

Δz_{pi} : 要素*i*の厚さ (m)

であり、 $G_{pi-1/2}$ と $G_{pi+1/2}$ はそれぞれ以下の式(9)、(10)で与えられる。

$$G_{pi+1/2} = -\lambda_p \frac{T_{pi+1}(t) - T_{pi}(t)}{(\Delta z_{pi+1} + \Delta z_{pi})/2} \quad (9)$$

$$G_{pi-1/2} = -\lambda_p \frac{T_{pi}(t) - T_{pi-1}(t)}{(\Delta z_{pi} + \Delta z_{pi-1})/2} \quad (10)$$

ここに、 T_{pi+1} : 要素*i+1*の温度 (°C)

T_{pi-1} : 要素*i-1*の温度 (°C)

Δz_{pi+1} : 要素*i+1*の厚さ (m)

Δz_{pi-1} : 要素*i-1*の厚さ (m)

である。

(2) 舗装の物性値

表-2に本研究で用いた密粒度舗装供試体の物性値を示す。舗装の熱伝導率は迅速熱伝導率計(京都電子工業製)を用いて測定した。測定に際して、熱伝導率が定められたプレートを用いて装置の較正を行った。舗装の比熱は

表-2 密粒度舗装供試体の物性値

Item	symbol	Value
Density	ρ_p	2365 kg/m ³
Specific heat	c_p	0.86 J/g/K
Thermal conductivity	λ_p	1.4 W/m/K

含水率計を用いて測定した。比熱の測定方法については、4章で述べる。

(3) 境界条件

舗装表面温度は、式(5)により規定される。舗装底面境界は舗装表面より深さ $z = -0.095$ mとし、任意時刻の底面温度は5秒間隔で得られる実測値の線の内挿により与えられる。

(4) モデルに含まれる仮定

本理論モデルに対して、以下の仮定を与える。

- (1) 解析を短時間で言うことから、シャーベットの物性(相)変化は考慮しない。
- (2) 本実験では舗装および雪氷層周辺を断熱していること、および解析時間内に生じる水平方向(x および y)の熱移動が十分小さいことから、舗装温度は鉛直(z)方向にのみ変化する。

4. 舗装の比熱測定

(1) 実験方法

図-6の装置および舗装供試体を用いて、比熱実験を行った。また、精度検証のために、比熱0.91J/g/K⁸⁾の純アルミニウムを用いた実験も行った。実験は装置の熱損失を避けるために、短時間(1分)で完了した。ポリエチレン容器温度と水温との差は無視できるとして、舗装供試体の比熱 c_p (J/g/K)は、式(11)により計算した。

$$\{(cM)_w + (cM)_c\}(T_{wi} - T_{wf}) = (cM)_p(T_{pi} - T_{pf}) \quad (11)$$

ここに、 c_w : 水の比熱 (J/g/K)

M_w : 水の質量 (g)

c_c : ポリエチレンの比熱 (J/g/K)

M_c : ポリエチレン容器の質量 (g)

$T_w - T_{wf}$: 舗装供試体投入前後の水およびポリエチレン容器の温度差 (°C)

M_p : 舗装供試体の質量 (g)

$T_p - T_{pf}$: 舗装供試体の変化温度 (°C)

実験は3つの舗装供試体で3回ずつ、計9回行った。

図-6 比熱実験の概要

図-7 舗装の比熱

図-8 舗装-雪氷層間の熱移動実験の概要

(2) 実験結果

図-7 に、舗装の比熱を示す。 c_p は $0.76 \sim 1.02 \text{ J/g/K}$ の範囲にあり、その平均値は 0.86 J/g/K であった。

アルミニウムの測定値は $0.92 \sim 0.94 \text{ J/g/K}$ で、本装置の誤差は $+1 \sim 3\%$ であった。

なお、実験中の測定装置から周辺空気への熱損失は、舗装の内部エネルギー変化量の 0.01% 以下であった。

5. 舗装-雪氷層間の熱移動実験

実験は、シャーベットおよび湿潤路面の非定常伝熱実験（実験-SL）、乾燥積雪および氷板路面の定常伝熱実験（実験-SO）、に大別される。

(1) シャーベットおよび湿潤路面の非定常伝熱実験

図-8(a) に、実験-SL の概要を示す。実験-SL は、密粒度舗装（ $W0.30 \times L0.49 \times H0.11 \text{ m}$ ）および削氷器で作製

した人工雪を用いて、福井大学内の低温実験室で実施された。舗装内部の熱移動を計測するために、舗装表面から $5, 10, 15, 25, 35, 45, 65$ および 95 mm 下方の 8ヶ所に熱電対を埋設し、底部および側面をスタイロフォーム（厚さ $= 50 \text{ mm}$ ）で断熱した。また、シャーベット（厚さ $\approx 10 \text{ mm}$ ）温度は、熱電対の大きさの関係上、舗装表面から 5 mm 上方の値で代表させる。

実験-SL の手順は、以下のとおりである。

- (1) -6°C に設定した低温実験室で舗装内部の温度（約 -6°C ）を一様にする。
- (2) 人工雪（雪密度 $\rho_s \approx 300 \text{ kg/m}^3$ ）に 0°C の淡水を加えてシャーベットを作製する。
- (3) シャーベットを舗装に載せる。
- (4) シャーベット質量含水率 θ_l を融解型熱量方式の含水率計で、 ρ_s を円管サンプラー（直径 $= 38 \text{ mm}$ 、高さ $= 70 \text{ mm}$ ）でそれぞれ測定する。なお、 $\theta_l < 0.4$ では、シャーベットの流動によって円管サンプラーで ρ_s が測定できなかったため、雪と水の重量を測

図-9 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

定した後、それらを規定容器に移し、 ρ_s を算出した。

- (5) 舗装およびシャーベット温度をデータロガーにより、5秒間隔で計測する。
- (6) θ_i および ρ_s を変えて、(1)~(5)を繰り返す。

実験-SLは、シャーベットの26ケースに、非積雪の湿潤の2ケースを加えて、計28ケースとした。

(2) 乾燥積雪および氷板路面の定常伝熱実験

図-8(b)に、実験-SOの概要を示す。実験-SOは、実験-SLと同じ舗装を用いて、低温実験室で実施した。舗装底部温度を一定にするために、舗装底部は恒温水槽から供給される約3°Cの水と接するように工夫した。積雪層および氷板温度は、舗装表面から5, 10, 15および20mm上方に設置した熱電対により測定した。

実験-SOの手順は、以下のとおりである。

- (1) 乾燥積雪の実験では、人工雪を圧密し、舗装上に積雪層(厚さ=約30mm)を作る。氷板の実験では、舗装上で淡水を凍らせた氷板(厚さ=約30mm)を使用する。
- (2) 乾燥積雪の実験では、 ρ_s を円管サンプラーで測定する。
- (3) 現象をより顕著に観るため、送風機で積雪層、あるいは氷板上に一定の風(風速=約9.0m/s)を供給する。
- (4) 積雪層あるいは氷板、および舗装の鉛直温度をデータロガーで5秒間隔で計測する。
- (5) ρ_s を変えて、(1)~(4)を繰り返す。

実験-SOは、 ρ_s が308, 351, 356, 425および499kg/m³の乾燥積雪の5ケースに、氷板($\rho_s=916$ kg/m³)を加えて、計6ケースとした。

6. 実験および解析結果

(1) 乾燥積雪および氷板路面

図-9に、上から順に室内温度、積雪層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を示す。同図には、積雪層および氷板(雪氷層)と舗装の鉛直温度分布の近似線を併せて示す。(●)は氷板路面、(△)、(■)および(○)は $\rho_s=308, 425$ および499kg/m³の乾燥積雪路面、の結果である。いずれのケースでも雪氷層および舗装の鉛直温度分布は直線であり、定常状態と判断できる。

表-3は、実験結果の一覧である。同表の上から2行目に ρ_s を、3行目に室内温度 T_a (°C)を、4行目に舗装下部の水温 T_w (°C)を、それぞれ示す。 T_a は-20.8~-22.4°Cの範囲にあり、 T_w はいずれも2.7°Cであった。5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。したがって、式(1)から算出される G_{sp} は ρ_s に比例して増加し、氷板で最も大きい(6行目)。

次に、 G_{sp} と7行目に示す雪氷層の鉛直温度勾配 dT_s/dz (<0)を用いて、式(1)によって λ_s を計算する。 λ_s は $\rho_s=308, 425, 499$ (以上、乾燥積雪層)および916(氷板)kg/m³と大きくなるにつれて、0.23, 0.28, 0.33および2.10W/mKのように増大する(8行目)。これらの値は既往の λ_s ⁹⁾と概ね一致する。

最後に、 dT_p/dz および dT_s/dz より計算された T_{cp} および T_{cs} を9および10行目に示す。その後、式(1)より算出された R_c を最下行に示す。 ρ_s が増大するとともに、 R_c は $15.3 \times 10^3, 11.3 \times 10^3, 8.9 \times 10^3$ および 0.3×10^3 m²K/W、と小さくなる。

なお、計算された氷板の表面温度は乾燥積雪層のそれより高くなっているが、これは図-9および表-3に示した

表-3 乾燥積雪および氷板路面の定常伝熱実験結果

Item	Unit	Symbol	←	Dry snow	→	Ice plate
Density of snow/ice	kg/m ³	ρ_s	308	425	499	916
Room temperature	°C	T_a	-21.2	-22.4	-21.5	-20.8
Water temperature	°C	T_w	2.7	2.7	2.7	2.7
Temperature gradient of pavement	°C/m	dT_p/dz	-55.7	-65.7	-74.9	-115.1
Heat flux	W/m ²	G_{sp}	76.7	90.3	103.1	158.4
Temperature gradient of snow/ice	°C/m	dT_s/dz	-328.2	-324.0	-310.6	-75.6
Thermal conductivity of snow/ice	W/mK	λ_s	0.23	0.28	0.33	2.10
Boundary temperature of pavement	°C	T_{cp}	-5.3	-6.5	-7.4	-12.5
Boundary temperature of Snow/ice	°C	T_{cs}	-6.4	-7.5	-8.4	-12.5
Room temperature	°C	T_a	-21.2	-22.4	-21.5	-20.8
Thermal contact resistance	m ² K/W	R_c	15.3×10^{-3}	11.3×10^{-3}	8.9×10^{-3}	0.3×10^{-3}

図-10 接触熱抵抗が舗装温度 ($z=-5\text{mm}$) に及ぼす影響 ($\theta=0.5$, $\rho_s=883\text{kg/m}^3$) 図-11 舗装温度の実測値と計算値の経時変化 ($\theta=0.5$, $\rho_s=883\text{kg/m}^3$)

ように, T_a が氷板で最も高かったことが挙げられる。

(2) シャーベット路面

図-10に, シャーベット路面 ($\theta_i=0.5$, $\rho_s=883\text{kg/m}^3$) での舗装表面から深さ $z=-5\text{mm}$ の舗装温度の実測値 (T_{p-5}), および R_c を 0 , 0.5×10^{-3} , 1.1×10^{-3} および $2.0 \times 10^{-3}\text{m}^2\text{K/W}$ に変化させたときの計算値 ($T_{p\text{cal}}$) を示す。先述したとおり本実験は, 約 -6°C の舗装上に 0°C のシャーベットを載せるため, T_{p-5} は時間経過とともに上昇する。 $R_c=0$ および $0.5 \times 10^{-3}\text{m}^2\text{K/W}$ の $T_{p\text{cal}}$ は T_{p-5} より過大評価され, $R_c=2.0 \times 10^{-3}\text{m}^2\text{K/W}$ では過小評価された。 T_{p-5} と $T_{p\text{cal}}$ は, $R_c=1.1 \times 10^{-3}\text{m}^2\text{K/W}$ で良好に一致した。

図-11は, 図-10と同実験の T_s , $z=-5, -10, -25$ および -95mm で測定された舗装温度 (T_{p-5} , T_{p-10} , T_{p-25} および T_{p-95}) の経時変化を示す。同図には, 舗装温度の実測値と良好に一致した $R_c=1.1 \times 10^{-3}\text{m}^2\text{K/W}$ の計算値も併せて示す。なお, T_s と T_{p-95} は計算での境界条件である。

実験開始時, 舗装温度は一様に -5.9°C で, T_s は 0°C であった。 T_{p-5} (○) および T_{p-10} (△) は, 時間経過とともに

緩やかに上昇し, T_{p-25} (□) は一定値 (-5.9°C) を推移した。また, T_s (●) は実験期間を通して約 0°C であった。式(5)~式(10)を用いて計算された舗装温度はそれぞれの深さで実験結果と一致し, 温度分布を良好に再現した。

7. 接触熱抵抗および舗装熱に及ぼす雪氷物性の影響

(1) 雪密度

図-12に, ρ_s と R_c の関係を片対数表示で示す。同図には, 図-9および表-3で示した結果以外に, 2ケースの実験結果を追加している。 R_c は ρ_s の増加に伴って小さくなっており, 式(12)で与えられる。

$$R_c = 2.4 \times 10^{-1} \exp(-7.5 \times 10^{-3} \rho_s) \quad (12)$$

図-13は G_{sp} に及ぼす ρ_s の影響を片対数表示で示す。縦軸は氷板路面の G_{sp} に対する乾燥積雪路面の G_{sp} の比 ($r_{sn/i}$) である。 $r_{sn/i}$ は ρ_s とともに式(13)のように増大する。

図-12 雪密度と接触熱抵抗の関係

図-13 舗装熱フラックスに及ぼす雪密度の影響

図-14 質量含水率と接触熱抵抗の関係

図-15 舗装熱フラックスに及ぼす質量含水率の影響

$$r_{sn/i} = 1.4 \times 10^{-3} \exp(7.2 \times 10^{-3} \rho_s) \quad (13)$$

本実験で行った乾燥積雪路面 ($308 \leq \rho_s \leq 499 \text{ kg/m}^3$) の G_{sp} は、氷板路面の 1~6% の範囲にあった。

(2) 質量含水率

図-14 に、実験-SL から得られた θ_i と R_c の関係を示す。 $0 \leq \theta_i < 0.6$ の範囲では、 R_c は $1.1 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ K/W}$ で湿潤路面の値と等しいが、 $\theta_i \geq 0.6$ では、 θ_i とともに指数関数的に増大する。 $\theta_i < 0.6$ で R_c が一定となる理由としては、氷の比重が水のそれより小さいことから、界面は水で満たされていたためと考えられる。一方、 $\theta_i \geq 0.6$ で R_c が増加する理由としては、 θ_i の増加とともに含水量が減少し、界面における含空率の増加が考えられる。この R_c と θ_i の関係は、以下の式(14)、(15)で表される。

$$R_c = 1.1 \times 10^{-3} \quad (0 \leq \theta_i < 0.6) \quad (14)$$

$$R_c = 1.3 \times 10^{-5} \exp(7.4 \theta_i) \quad (\theta_i \geq 0.6) \quad (15)$$

図-15 に、 G_{sp} に及ぼす θ_i の影響を示す。縦軸は、式(14)および式(15)を基に計算された湿潤路面の G_{sp} に対するシャーベット路面のその比 ($r_{sl/w}$) である。 $\theta_i < 0.6$ で

は R_c が一定であることから、式(4)より G_{sp} も一定となり、 $r_{sl/w}$ は 1.0 となる。

しかしながら、 $\theta_i \geq 0.6$ では R_c が急増するために、 $r_{sl/w}$ は逆に急減し、例えば $\theta_i = 0.8$ で $r_{sl/w} = 0.3$ となる。この関係は式(16)、(17)で与えられる。

$$r_{sl/w} = 1.0 \quad (0 \leq \theta_i < 0.6) \quad (16)$$

$$r_{sl/w} = \frac{0.39}{\theta_i - 0.36} - 0.60 \quad (\theta_i \geq 0.6) \quad (17)$$

ただし、式(16)と式(17)の境界である $\theta_i (=0.6)$ は、 ρ_s は約 300 kg/m^3 (本実験で使用した雪密度) の雪が水を含んで生じたシャーベット路面に限られると思われる。

(3) 体積含空率

ρ_s および θ_i が分かれば、雪氷層の体積含空率 (θ_a) は、以下に示す3つの方程式(18)、(19)、(20)より得られる。

$$\rho_s = \theta_w \rho_w + \theta_i \rho_i + \theta_a \rho_a \quad (18)$$

$$\theta_i = \frac{M_i}{M_w + M_i} = \frac{\frac{V_i}{V_{si}} \rho_i}{\frac{V_w}{V_{si}} \rho_w + \frac{V_i}{V_{si}} \rho_i} = \frac{\theta_i \rho_i}{\theta_w \rho_w + \theta_i \rho_i} \quad (19)$$

$$\theta_a + \theta_w + \theta_i = 1 \quad (20)$$

ここに, M_w : 雪氷中の水の質量 (kg)

M_i : 雪氷中の氷の質量 (kg)

V_w : 雪氷中の水の体積 (m^3)

V_i : 雪氷中の氷の体積 (m^3)

V_{si} : 雪氷体積 (m^3)

ρ_w : 水の密度 (kg/m^3)

ρ_i : 氷の密度 (kg/m^3)

ρ_a : 空気の密度 (kg/m^3)

θ_w : 雪氷中で水の占める割合

θ_i : 雪氷中で氷粒子の占める割合

である. $\rho_w, \rho_i \gg \rho_a$ より式(18)の右辺第 3 項を無視すると, θ_a は式(21)のように求められる.

$$\theta_a = \frac{\rho_i(\rho_w - \rho_s) - \theta_i \rho_s(\rho_w - \rho_i)}{\rho_w \rho_i} \quad (21)$$

図-16 に, θ_a と R_c の関係を示す. 式(21)よりシャーベットの θ_a (○) は 0.50 以下となり, 乾燥積雪 (●) では 0.45~0.66 の範囲になった. 湿潤 (△) では勿論 $\theta_a = 0$ となるが, 氷板 (▲) でも 5.(2)(1) で述べた製法から $\theta_a = 0$ であり, 両 R_c の値に大差はない. 雪氷状態に係らず, R_c は θ_a の増加とともに, 式(22)のように指数関数的に増大する.

$$R_c = 0.6 \times 10^{-3} \exp(5.3 \theta_a) \quad (22)$$

以上より, ρ_s と θ_i が分れば, R_c は計算することができる.

8. おわりに

シャーベット, 乾燥積雪および氷板路面における接触熱抵抗を室内実験と伝熱解析により求めた. これを基に, 接触熱抵抗に及ぼす雪氷物性の影響を調べた.

以下に, 得られた知見を列挙する.

- (1) 雪密度が増加するにつれて, 乾燥積雪路面の接触熱抵抗は指数関数的に減少する.
- (2) 乾燥積雪路面における舗装熱は, 氷板路面の 1~6% 程度となる.
- (3) 本実験条件に関する限り, シャーベット路面の接触熱抵抗は, 質量含水率が 0.6 以下では湿潤路面の値 ($1.1 \times 10^3 \text{ m}^2 \text{ K/W}$) と変わらないが, 0.6 以上になると非線形的に増加する.
- (4) (3) に起因して, シャーベット路面における舗装熱は, 質量含水率が 0.6 以上で急減し, 例えば質量含水率が 0.8 では湿潤路面の 30% 程度となる.
- (5) 雪氷状態に係らず, 接触熱抵抗は体積含空率の増加に伴って指数関数的に増大する.

図-16 体積含空率と接触熱抵抗の関係

- (6) 以上より, 接触熱抵抗に及ぼす雪氷物性の影響は無視し難いことが示され, 舗装熱の定量的評価が可能となった.

今後は凍結・融解に伴う路面と雪氷層間の熱フラックスの変化を考慮した熱輸送方程式を構築し, 本研究結果の妥当性と精度を検証する.

参考文献

- 1) 荒川智之, 渡邊洋, 福原輝幸, 林健一, 市ノ瀬榮彦: 熱収支法による路面凍結解析—乾燥, 湿潤および積雪路面における熱的挙動—, 寒地技術論文・報告集, Vol. 16, pp.389-395, 2000.
- 2) 渡邊洋, 藤本明宏, 福原輝幸: 通過車両から路面への熱供給に関するモデリング, 第 21 回寒地技術シンポジウム, 寒地技術論文・報告集, Vol.21, pp.195-200, 2005.
- 3) 藤本明宏, 渡邊洋, 福原輝幸, 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, pp.14-22, 2006.
- 4) 藤本明宏, 内藤知照, 渡邊洋, 福原輝幸: 道路薄雪層の日射透過—反射特性, 土木学会第 61 回年次学術講演会, Vol.61, pp.417-418, 2006.
- 5) 武士俊也, 福原輝幸, 横山孝男, 渡邊洋, 林健一, 藤本明宏: 熱収支法による路面凍結解析—車両タイヤ—圧雪層—路面間の熱移動—, 寒地技術論文・報告集, Vol. 18, pp.71-76, 2002.
- 6) 藤本明宏, 渡邊洋, 福原輝幸: 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, 査読中.
- 7) 西川兼康, 藤田恭信: 伝熱学, 理工学社, pp.81, 1982.
- 8) 日本機械学会: 伝熱工学ハンドブック, 丸善, pp.366, 1993.
- 9) 前野紀一, 福田正己: 雪氷の構造と物性, 古今書院, pp.173-174, 1986.

(2006.8.21 受付)

THERMAL CONTACT RESISTANCE BETWEEN SNOW/ICE LAYER AND PAVEMENT SURFACE

Akihiro FUJIMOTO, Hiroshi WATANABE and Teruyuki FUKUHARA

The heat flux across the interface between a dry snow layer, a slush layer and an ice plate and pavement surface, i.e., pavement heat flux, may be formulized in terms of the thermal contact resistance, R_c . These three kinds of R_c were evaluated from the thermal energy equation using data obtained from heat transfer experiments.

It was found that (1) R_c of the dry snow-pavement exponentially decreases as the snow density increases, (2) R_c of the slush-pavement is constant for the mass ice content, θ_i , less than 0.6, but exponentially increases with θ_i for $\theta_i \geq 0.6$, (3) R_c exponentially increases with the volumetric air content, regardless of the snow/ice situation.