

佐藤工業(株) 正員 川島 康広
長岡技術科学大学 正員 河原 能久
長岡技術科学大学 正員 後藤 巖

1. はじめに

表雪地帯においては冬期間の道路交通網の確保や屋根雪処理のために融雪システムの開発や改良が求められている。しかし、積雪層の融解過程については未解明な点が多く、融雪システムの形状や運転条件を事前に検討できないのが現状である。本研究は、融雪過程の物理モデルの構築の第一歩として、最も基礎的な均質な一次元積雪層を対象とし、底面から加熱した場合の融解過程と実験と数値解析により検討したものである。

2. 実験概要

実験装置の概略を図-1に示す。試料容器はアクリル製で長さ150 mm、幅145 mm、高さ210 mmであり、前面のみが可視化のために2重のアクリル板から成り、他面は断熱材でおおわれている。底面にはラバーヒーターが設置され電圧調節により所定の熱流束に設定された。積雪層内の融雪水の浸透前面の位置は底面に与えられた染料の移動から求められた。また、積雪層内の温度測定には熱電対(Cu-Co線, $\phi 0.1$ mm)が使用された。実験は融雪水の浸透前面が積雪層表面に達するまでとした。実験条件を表-1に示す。初期の雪温が -5°C のしり雪を用い、外気温 -5°C の状態と空隙率と供給熱流束とを変化させた。

3. 積雪層の融解過程のモデル化

3.1 融解過程の概要 実験範囲内で観察された積雪層の融解過程の模式図を図-2に示す。含水率ゼロの乾き雪層(図-2(a))に底面より熱を供給すると底面に接する雪粒子は融雪水に変化する。(図-2(b))この融雪水は毛管力によって瞬時に積雪層内部へと浸透してゆく。(湿り雪層) また、積雪層はその雪粒子が構成していた高さだけ沈下する。積雪層表面では熱損失があるため乾き雪層内には温度勾配が発生し、浸透前面で浸透水の一部が再凍結する。融解の進行につれ、積雪層下部の含水量が高まり、浸透前面は上方へと移動し、やがて積雪表面に到達する。(図-2(c))

3.2 物理モデル 図-3に座標系と使用記号を示す。記号の意味を表-2に整理する。まず、凍結・昇華による層構造の変化及び水蒸気の移動の影響は無視すると仮定する。モデル化の対象は湿り雪層内での水分移動(水分飽和度 S_w)と乾き雪層内での熱移動(温度 T_d)の2つである。乾き雪層の含水率はゼロであり、湿り雪層の温度は 0°C であるからである。基礎式は以下になる。

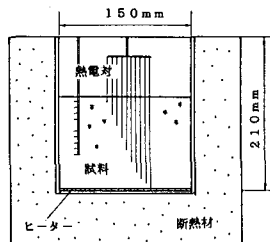


図-1 実験装置概略

表-1 実験条件

Run	空隙率	初期密度 (g/cm^3)	熱流束 (W/m^2)
1	0.50	0.446	1500
2	0.55	0.409	1500
3	0.60	0.357	1500
4	0.55	0.409	700
5	0.55	0.409	1200
6	0.55	0.409	1700

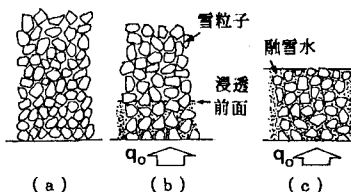


図-2 積雪層の融解過程の模式図

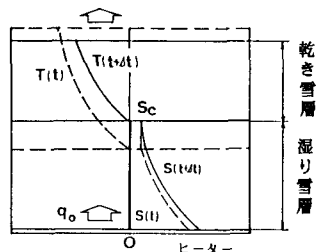


図-3 座標系

表-2 記号一覧

S : 水分飽和度	Sc : 限界水分飽和度
T : 温度	P* : 無次元毛管力
ρ : 密度	α : 経路係数
ρ_w : 水の密度	d : 雪粒子の粒径
ϵ : 積雪層の空隙率	σ : 表面張力
m : 水分移動量	ϕ : 雪粒子の形状係数
u : 積雪層の減少速度	μ : 水の粘性係数
η : 浸透前面高さ	h : 熱伝達率
c : 比熱	g : 重力加速度
λ : 熱伝達率	添字
H : 積雪層厚	w : 湿り雪
q : 熱流束	d : 乾き雪
	∞ : 外気

$$\varepsilon \rho_w \frac{\partial S}{\partial t} = -\frac{\partial m}{\partial x} - \varepsilon \rho_w u \frac{\partial S}{\partial x} \quad (1)$$

$$c_d \rho_d \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_d \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - c_d \rho_d u \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2)$$

$$u = -\frac{g_0}{L(1-\varepsilon)\rho_i} \quad (3)$$

また、水分移動量(m)については大谷ら⁽¹⁾、関ら⁽²⁾の関係式を用いる。

$$m = -\frac{\varepsilon^2}{2\phi(1-\varepsilon)} \cdot \frac{\sigma d \rho_w}{\mu} \cdot \bar{d}(S) \left\{ \frac{\varepsilon}{\phi(1-\varepsilon)} \cdot \frac{\rho_w g d}{\sigma} - \frac{\partial P^*(S)}{\partial x} \right\} \quad (4)$$

$$P^*(S) \equiv \frac{P}{\sigma} \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \frac{d}{\phi} = 0.77 + \frac{0.3}{S+0.28} - \exp[30(S-1)] \quad (5)$$

$$\bar{d}(S) \equiv \alpha \int_{S_0}^S \frac{1}{(P^*)^2} dS = 0.67 \exp[6(S-1)] \quad (6)$$

境界条件は次のようである。

$$x=0; \quad g=g_0, \quad (m)_{x=0} = (g_0/L) - \varepsilon \rho_w u(S)_{x=0} \quad (7)$$

$$x=\eta; \quad S=S_c, \quad T=0, \quad \frac{d\eta}{dt} = \frac{1}{\varepsilon \rho_w S_c} \left\{ (m)_{x=\eta} + \lambda_d \left(\frac{\partial T_d}{\partial x} \right)_{x=\eta} \right\} + u \quad (8)$$

$$x=H; \quad g=h\{(T)_{x=H}-T_{\infty}\}, \quad \frac{dH}{dt} = u \quad (9)$$

3.3 数値計算法 数値計算は差分法、空間については可変格子法⁽³⁾、時間については陰解法を行った。

4. 実験結果と数値解析結果との比較

図-4は底面から熱流束が同一で空腔率を変化させた場合の、積雪層厚と融雪水の浸透前面位置の時間的変化を表わしたものである。積雪層厚の減少速度は空腔率が小さいほど速く、その速度は時間によらずほぼ一定である。融雪水の浸透前面の移動速度は空腔率が大きいほど速く、その速度は初期に速く次第に遅くなる。数値解は実験値と比較的よく再現している。

図-5は空腔率を同一とし供給熱流束を変化させた場合の積雪層厚と浸透前面位置の時間的変化を示す。当然ながら熱流束が大きいほど積雪層厚の減少速度と浸透前面の上昇速度は速い。数値解と実験値とはほぼ一致している。

図-6は積雪層の温度分布の時間的変化の一例である。浸透前面までの温度勾配は時間とともに弱くなっていく。図-7は熱流束を変化させた場合の30分経過後の温度分布を示す。熱流束が大きいほど浸透前面の移動速度が速く、浸透前面までの温度勾配は急になる。図-6,7より数値解と実験値とは良好に一致していることが知られる。

5. 結論

底面加熱時の積雪層の一次元融解モデルは実験値をほぼ再現することを確認した。今後、供給熱流束の小さい場合や層上部からの入熱量のある場合への拡張を考へたい。

参考文献 (1)大谷, 前田, 化学工学, 28-5(1964) 362 (2)関, 福迫, 田中, 日機論, 43(1977), 1086 (3)Murray W.D. and Landis F., ^{Trans. ASME} 81(1954) 421

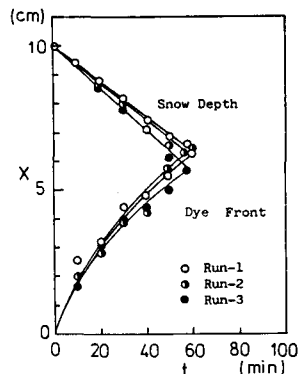


図-4 空腔率の積雪層厚と浸透前面への影響

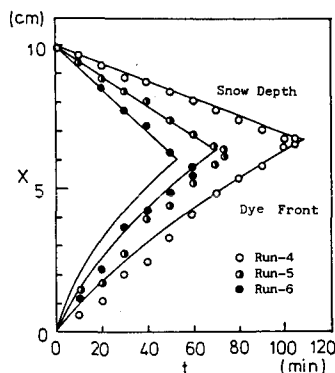


図-5 供給熱流束の積雪層厚、浸透前面への影響

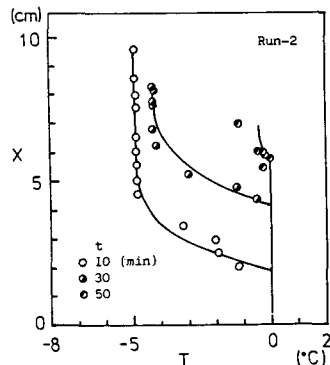


図-6 積雪層の温度変化 (Run-2)

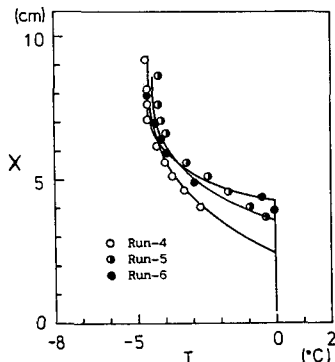


図-7 供給熱流束の積雪層温度への影響 (t=30 min)