

長岡技術科学大学 学生員 〇川島 康広
長岡技術科学大学 正員 後藤 巖
長岡技術科学大学 正員 河原 能久

1. はじめに. 本報告は積雪層を人工的に融雪することを想定して、積雪層底部に熱源が存する場合の積雪層の融解現象を基礎的な鉛直方向の一次元問題として扱い数値解析と実験から解明しようとするものである。本報告では乾き雪の積雪層を底面から加熱し、その融解過程と融解時間を浸透前面の移動に注目して検討することで、豪雪地帯の融雪システムの条件や最適化を計る基礎資料を得ようとしたものである。

2. 実験装置および方法

実験装置の概要を図1に示す。実験は積雪層底面から一様な熱流束を加え積雪層から融雪水を流出させたいものである。また、実験では外気温一定の条件で行なうた装置は低温室に設置された。実験では空隙率(雪密度)を一定に保ち加える熱流束値を変化させた場合と、加える熱流束値を固定し空隙率の異なる積雪層を融解した場合の2種類の場合作を試みた。積雪層の融解状況としては融雪水浸透前面位置、積雪層厚、層温度分布を計測した。観測は積雪層表面に融雪水浸透前面が到達した時間までとした。積雪層内水分飽和度の計測は実験終了後に雪試料を採取し遠心分離器を用い求めた。

3. 数値計算

3-1 基礎方程式 解析モデルを図2に示す。湿り雪層域での基礎式は時間変化を伴う水分移動量に積雪層の沈降を考慮したものである。乾き雪層域では伝熱量と積雪層の沈降に着目して基礎式を導いた。下にそれぞれの領域での基礎式を示す。

$$\varepsilon \rho_w \frac{\partial S}{\partial t} = - \frac{\partial w}{\partial x} - \varepsilon \rho_w u_x \frac{\partial S}{\partial x} \quad (0 < x < \eta)$$

$$c_p \rho_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - c_p \rho_p u_x \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\eta < x < E)$$

雪は多孔質物質である。従って積雪層内を移動する融雪水は毛管カと重力と摩擦の影響を受けるものとして、関らの水分移動量 W の関係式を採用した。水分移動量 W の式を下記に示す。

$$W = - \frac{\sigma d \rho_w \varepsilon^2}{2 \mu (1 - \varepsilon) \phi} \left\{ \frac{\varepsilon g}{\phi (1 - \varepsilon)} \frac{\rho_w d}{\sigma} + \frac{\partial P^+}{\partial x} \right\}$$

ただし、 $P^+ = 0.77 + \frac{0.30}{S + 0.28} - \exp\{30(S - 1)\}$

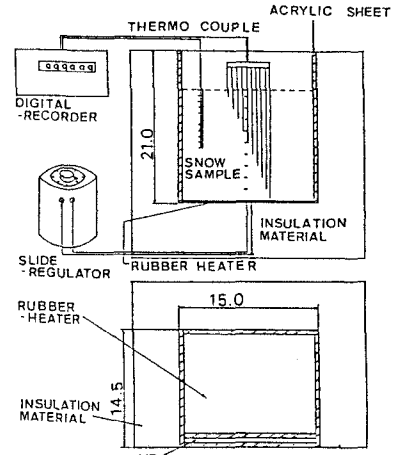


図-1

実験装置概要図(下図は装置平面図)

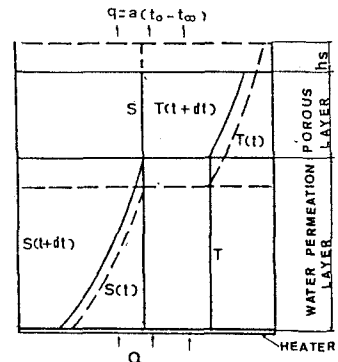


図-2 解析モデル

d	雪の粒径 m	E	積雪層空隙率
E	積雪層高 m	\eta	浸透前面位置 m
L	潜熱 W/s/kg	t	時間 秒
W	水分移動量 kg/m ² s	\lambda	熱伝導率 W/m ²
P ⁺	無次元毛管力 Pa	\mu	粘性 Pa·s
Q	熱流束 W/m ²	\rho	密度 kg/m ³
Q ₀	供給熱流束 W/m ²	\sigma	表面張力 N/m
S	水分飽和度		
S _c	限界水分飽和度		
T	温度 °C	P	乾き雪層
U _x	積雪層厚減少速度 m/s	E	積雪層表面
x	座標軸 m	\infty	室内
\beta	熱損失 W/m ²		
g	重力加速度 m/s ²		
\phi	雪の形状係数		
\rho_s	積雪層下量 m		

$$\bar{\alpha}(s) = 0.67 \exp \{6(s-1)\}$$

3-2 境界条件式

$$x=0 : Q=Q_0$$

$$x=\eta : S=S_c, T=0.0,$$

$$\frac{d\eta}{dt} = \frac{W(S_c)}{\varepsilon \rho_w S_c} + \frac{\lambda \frac{\partial T}{\partial x} / L}{\varepsilon \rho_w S_c} + u_x$$

$$x=E : -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha (T_E - T_\infty), \quad \frac{dE}{dt} = u_x$$

本解析には差分法を適用し数値的に解を求めた。また、時間毎に位置が変化する積雪層表面と浸透前面の境界に関しては境界の移動を考慮する空間格子分割法の可変格子法を採用した。

4. 結果と考察

4-1. 空隙率の影響 底面からの熱流束を同一とし積雪層の空隙率が異なる場合の浸透前面位置と層厚の時間変化を図3に示す。積雪層の空隙率は、その値が小さいほど進行速度が大きくなる。これは空隙率の小さい積雪層には毛管力の影響が大きく働き融雪水の浸透を促進するためである。また、積雪層厚は一定の速度で減少を続け、空隙率の大きいものほど層厚の減少速度が大きくなる傾向をみせる。

4-2 熱流束による影響 同一の空隙率を持つ積雪層を底面からの熱流束の条件を変えて融解させた場合の浸透前面位置と層厚の時間的変化を図4に示す。浸透前面進行速度は熱流束が大きいのほど速くなる傾向を示した。これは毛管力によって浸透してゆく融雪水の供給量の差異によるものである。また、積雪層厚減少速度は熱流束値が大きいのほど速くなる。これは当然のこととも言えるが雪層を構成する雪粒子を融解するための熱量が大きいのからである。

4-3 計算結果と実験値の比較 計算結果と実験値の比較のは水分浸透前面位置と積雪層厚の2つに着目した。(図3と図4を参照) 実験値と計算結果の傾向はほぼ同じであり数値計算の基礎式と、解法は妥当なものであったといえる。水分浸透前面の移動速度は融解初期に大きい値を示すが、時間の経過に伴い減少する。さらに時間が経過すると逆に移動速度は増加の一途をたどる特異な傾向がみられた。

文 献

- (1) 関・ほか2名, 日本機械学会論文集, 43-367
昭和52年, 1086, 高熱流束を受ける含水多孔物質の乾燥。
- (2) WILLIAM D. MURRY・FRED LANDIS, Transactions of the ASME, 106/MAY 1959,
Numerical & Machine Solutions of Transient H-C Problems Involving Melting or Freezing

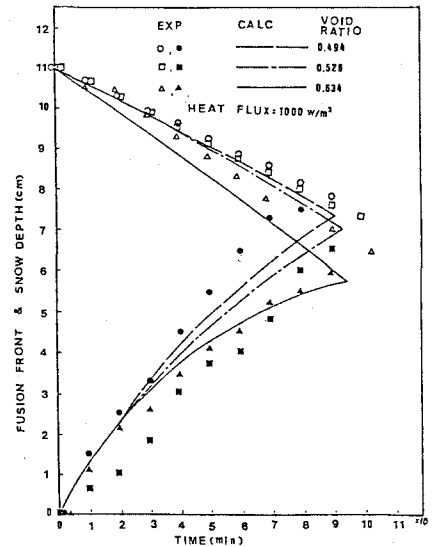


図-3

空隙率と浸透前面位置ならびに積雪層厚との関係を示す。但し、熱流束は $W=1000 \text{ W/m}^2$ である。

図中の黒塗りの記号は浸透前面位置を示す。図中の白塗りの記号は積雪層厚を示す。

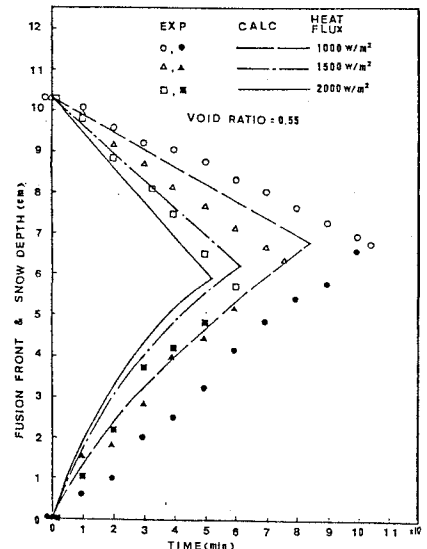


図-4

熱流束と浸透前面位置ならびに積雪層厚との関係を示す。 $\varepsilon = 0.550$