

金沢大学 正会員 小森友明 関平和 学生員○近田康夫

1 緒言

高性能熱伝達装置として多方面に応用されているヒートパイプを用いた路上融雪システムの開発が進められている。ここではその基礎的研究として、ヒートパイプ埋設層から熱伝導により積雪層へ供給される熱量を定量的に把握するとともに、それによる融雪機構を実験結果に基づいて検討し、特に浸透過程についての数学的解析を試みた。

2 実験装置及び実験方法

実験に使用したヒートパイプ埋設層は、図1に示すような $360 \times 400 \times 120$ [mm³] のモルタル層に、外径 19.2 [mm]、内部流動体エタノール、全長 1000 [mm] の L 型ヒートパイプ 3 本を等間隔に埋設し、その周囲及び底部も厚さ 100 [mm] の発泡スチロフォームで断熱したものである。ヒートパイプ周囲には、温度測定用に Cu-C 熱電対を任意の位置に埋設した。

実験手順は、まず 35~40 °C の恒温水中にヒートパイプ下部を浸漬加熱してヒートパイプを作動させ、融雪面に氷を載せて埋設層内温度分布がほぼ定常になるまで放置する。その後氷を取り除き、積雪深が約 200 [mm] の積雪層を載せ、積雪層高さ、融解水の浸透高さ、及び融雪面周囲に設けた集水樋から得られる流出融解水量を経時的に測定する。尚、積雪層は下端に融解水流出用の穴をあけた厚さ 5 [mm] の塩ビ板によって支持し、周囲は発泡スチロフォームで断熱した。

3 ヒートパイプ埋設層内温度分布

埋設層から積雪層へ供給される伝熱量を算出するためには、埋設層内温度分布を求めなければならぬが、ここでは以下に示す 3 つのモデルを用いて温度分布を算出した。

Model I ヒートパイプを線熱源とみなす。

Model II ヒートパイプ近傍の温度分布を、無限固体中の円柱面熱源による非定常熱伝導の解析解で近似する。

Model III 温度場を長方形のみならず、三角形、扇形等の微小要素を用いて分割する。

これらのモデルによる計算結果の一例を図2に示す。埋設層と積雪層の接触面での境界熱伝達係数 h の値は、計算値が実験値に最も近くなるように計算機を用いて試行的に求めた。詳細は割愛するが、いずれのモデルを用いた場合にも類似した結果が得られ、特に、熱源より上方では実験値ともよく一致している。また、埋設層と積雪層の接触面付近では、水平方向の温度勾配が殆んど無く、鉛直方向の温度勾配が全面を通じてほぼ一定なので、伝熱量にも場所的変化は現れない。

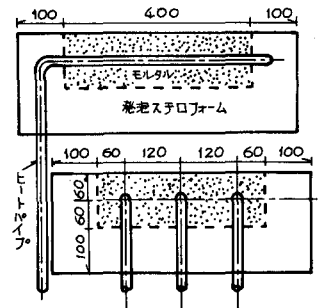


図1 ヒートパイプ埋設層

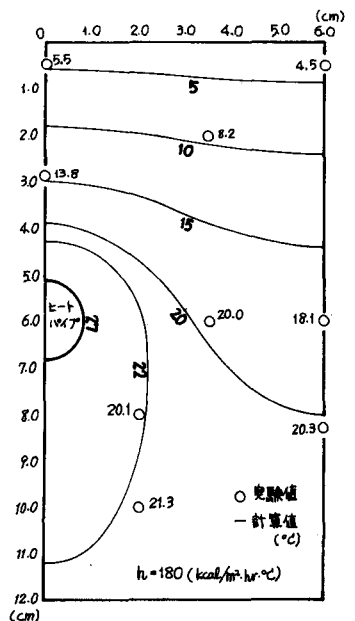


図2 埋設層内温度分布 Model I.

ものと考えられる。

4 融雪実験結果とそれに基づく浸透過程の解析

融雪機構は、雪質によって大きく変化するが、ここでは雪質を密度 ρ_s によって、自然状態における降雪によるもの（新雪： $\rho_s=100\sim 200\text{ kg/m}^3$ ）、自重によって、もしくは人為的に圧密されたもの（圧密雪： $\rho_s=300\sim 400\text{ kg/m}^3$ ）、水分浸透後、気温の低下により再凍結して氷粒となったもの（ガラメ状の雪： $\rho_s=300\sim 500\text{ kg/m}^3$ ）、の3種類に大別する。

ここでは、前二者の雪質のものを対象として融雪実験を行なったが、新雪について測定された融雪過程における積雪層高さ、水分浸透高さ、流出水量の経時的変化の一例を図3に示す。図からわかることは、まず積雪層高さが時間とともに直線的に減少すること、水分浸透高さは、融解水流出開始までは時間とともに増加するが、その後一定値に近づくことである。また、浸透相は実験終了後切断して観察するとシャーベット状になっており、水分が飽和状態に達していると考えられることから、浸透は水分飽和状態の湿潤相と、浸透相の2つに分けて考えるのが妥当であると思われる。

このような実験結果に基づいて水分浸透過程を解析するにあたり次のような仮定を設定する。(1)融雪は埋設層と積雪層の接触面のみで起こる。(2)湿潤相の含水率は飽和含水率である。(3)浸透相内の水分移動は拡散的である。(4)浸透相は積雪層高さの降下速度に等しい一定速度で降下する。

以上の仮定に基づき、次のように現象を数式化した。

$$\text{基礎方程式} \quad \frac{\partial w_1}{\partial \theta} = D \frac{\partial^2 w_2}{\partial x^2} - u \frac{\partial w_2}{\partial x} \quad (\delta < x < L - u\theta)$$

$$\text{初期条件} \quad w_2 = w_i \quad (\theta = 0)$$

$$\text{境界条件} \quad w_2 = w_s, \quad w_2 \rho_s \frac{df}{d\theta} = W_m + \rho_s D \frac{\partial w_2}{\partial x} \quad (x = \delta)$$

$$\frac{\partial w_2}{\partial x} = 0 \quad (x = L - u\theta)$$

これを、Variable Space Network 法¹⁾を用いて数値的に解き、算出した浸透高さ(=湿潤相厚み δ)を図3に実線で示した。 δ は実験値と比較的一致しているが、初期には実験値より多少小さな値となっている。この原因は断定はできないが次のようなことであると考えられる。(1)本解析では浸透相内融雪を考慮していない。(2)実験初期には仮定した拡散的水分移動よりも浸透圧による急激な水分浸透が起こった可能性がある。(3)浸透高さの明確な判定が困難であった。

5 結言

浸透過程を湿潤相厚み δ と指標として解析を試みたが、明確な結論はより綿密な実験的検討によるなければならない。今後の課題としては、(1)水分浸透状態の視覚化の工夫、(2)浸透相内における浸透水による融雪を考慮した解析、(3)融解水流出開始後の水分流出過程の解析が考えられる。

参考文献 1) Murray, W. D., F. Landis : Trans. ASME (Heat Trans.), 81, 106. (1958)

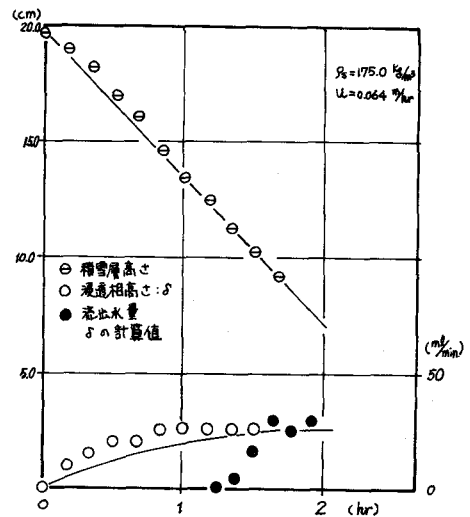


図3. 積雪層高さ、浸透相高さ、流出水量 対 時間

w_1, w_2 : 湿潤相、浸透相の含水比 δ : 湿潤相厚み
 D : 水分拡散係数, ρ_s : 雪の密度, u : 積雪層高さ減少速度(一定), W_m : 接触面での供給熱量, L : 初期積雪層高さ, w_i : 初期含水比, θ : 時間, x : 接触面からの距離