

1. はじめに

近年 多雪都市では流雪溝を用いた除排雪計画が積極的に進められる傾向にある。流雪溝は負荷重量が流水量の50~60%として設計されるのが普通である。しかし 地形や水路形状によってはこれより下回る流雪能力で設計投雪量を定めなければいけない場合もある。また、流来条件によっては、流送雪塊の融解の程度あるいは投雪による水温降下の程度が問題になる場合もある。雪の融解挙動に関する研究には McIlroy (1968), 小林等 (1972) 菅原 (1974), 関等 (1980) 等々あるが未解明な点が多く、流送雪塊の融解挙動の解明についておこれらという感がある。今後、より複雑な条件のおとで水路を用い 除排雪をしていくことを考えうることから、雪塊融解の解明は急がれる課題ともえよう。この融解挙動について、マクロな立場から論じておこうとするのが本研究である。本研究は流送雪塊の融解時間を局所熱源法により求めようとするものである。

2. 基礎方程式

ここで対象とする現象は以下のようになる。

①流れの場合：開水路(長方形断面あるいは円形断面)、流速=0.5~1.5 m/sec、水深=0.10~0.8 m、水路幅(管径)=0.40~1.0 m であることより流水の状態は乱流である。雪塊流入により、水位が上がり層流状態に近くなる場合もある。

②雪塊の漂流状況：投入直後—浸潤、停止状態に近い。投入後—徐々に流水速度に近づく。氷の場合には水塊との速度差はほとんどないが 雪塊の場合には浸潤、膨張などの影響が速度差が生ずる場合が多い。

③水温、気温、雪温：水温—表流水=0~2°C、下水=6°C~12°C、地下水≒15°C、気温=-10°C~5°C、雪温=-10°C~0°C。

以上により、雪層を氷1、水2系とすると 基礎方程式は次式のように書かれる。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x_j} \right) \quad (1)$$

$$\rho c \left(\frac{\partial T_2}{\partial t} + u_2 \frac{\partial T_2}{\partial x_1} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x_j} - \rho c u_{2j} T_2 \right\} \quad (2)$$

$$(\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} - \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n})_c = \gamma L \rho \frac{dC}{dt} \quad (3)$$

ここに、 ρ =密度、 c =比熱、 λ_1, λ_2 =熱伝導率、 C =境界Cの要素、 n =境界での法線ベクトル、 γ =雪の含有率、 L =潜熱、 u_1, u_2 =流速、温度の時間平均

値、 $u_1', T_1' = u_1, T_2$ の変動成分。

3. 局所熱源法による解

速度、温度は断面にわたって平均したものを考え、平均流速で移動する座標をとり、記号を簡単にし、温度、移動座標を T, x で表わすものとし、層流の場合を考えるものとおれば式(2)は次のようになる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{s}{A} \frac{x}{1} (T - T_{air}) \quad (4)$$

ここに、 α =温度伝導率、 s =水路の単位長さ当たりの表面積、 A =断面積、 T_{air} =外気温度 であり、右辺第2項は放熱項である。ここでは基本的な解を求めたことをゆいとして放熱項を省略する。投雪前の温度を T_0 (水温)、雪塊流入により変化した温度を $\tilde{T}$ とおれば、式(4)は次のようになる。

$$\frac{\partial \tilde{T}}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial x^2}, \quad \tilde{T} = T - T_0 \quad (5)$$

式(1)(3)(5)で氷と水の相変化を考えると、境界要素Cは次式のようになる。

$$C \propto \sqrt{t} \quad (6)$$

雪塊周辺の状態は方向に関係なく一様だとおれば、雪塊の体積は次式のようになる。

$$V \propto 1.0 \cdot (1 - \sqrt{t/t_1})^3 \quad (7)$$

$$\rho_0 = \sqrt[3]{V_0}$$

ニシテ

t_1 : 雪塊の融解時間

V_0 : 雪塊の投入時の体積

いま 微小時間 dt の間に变化する体積を相変化に対応して任意に定められる関数を用いて

$$dV = -f(z) dz \quad (9)$$

と表わす。式(9)は熱量にすれば 時間 dt の間に

$$\bar{q} = \gamma L \cdot \rho dV \cdot \frac{\gamma L^2}{A} \quad (10)$$

$$\rho = (\rho_0 + \int_0^z -f(z) dz)^{1/3} \quad (11)$$

が生じたことを意味する。式(9)(10)より単位時間に放出する熱量 $\bar{q}$ は次式で与えられる。

$$\bar{q} = \frac{1}{\rho_1} \int_0^{t_1} \gamma L \rho (-f(z)) \cdot \frac{\gamma L^2}{A} dz \quad (12)$$

いま、式(5)で表わされる系において、初期温度が0の場合を考えると 熱源に座標原点を固定した $x > 0$ の点熱源 $\bar{q}/dt$ (Kcal/h) が生じたとすれば 微小時間 dt の間に原点で $\bar{q}$ なる量の熱放出があることになる。(→)

(←) となるおのとすると (Fig.1)、式(12~16)より解が求まる。

$$\tilde{T} = \frac{\bar{q}}{2\rho c (\pi a t)^{1/2}} \int_0^t \frac{1}{(t-\tau)^{1/2}} \exp \left[-\left\{ \xi - v_0 \left(t - \frac{t_1}{2} \right) + v_0 \left(\tau - \frac{\tau^2}{2t_1} \right) \right\}^2 / 4a(t-\tau) \right] d\tau \quad (13)$$

雪塊の融解時間 t_1 は $t = t_1$ における全熱量が $-\gamma L \rho_0^3$ に等しいことより、すなわち、

$$\begin{aligned} -\gamma L \rho_0^3 &= \int_{-\infty}^{\infty} \rho c \tilde{T} d\xi \\ &= -\frac{\bar{q}}{2(\pi a)^{1/2}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{t_1} \frac{\exp \left[-\left\{ \xi - v_0 \left(t_1 - \frac{t_1}{2} \right) + v_0 \left(\tau - \frac{\tau^2}{2t_1} \right) \right\}^2 / 4a(t_1 - \tau) \right]}{(t_1 - \tau)^{1/2}} d\tau d\xi \end{aligned} \quad (14)$$

より、 t_1 が求まる。

4. おとがき 本研究では雪層内の融解挙動に詳しくは融解時間を求めておいたが、式(9)の $f(z)$ の与え方、および式(10)の $\bar{q}$ と式(12)の $\bar{q}$ の差が解の精度に影響を及ぼすことになる。

参考文献: (1) 福澤共著「伝熱論」理工社, (2) 関地「雪層の融解挙動」第14回伝熱シンポジウム(昭和57), (3) 上原・藤田他「天然伝熱の発展と課題」

(8) → もし、雪塊が原点から動かないおのとすれば、温度は次式のようになる。

$$\tilde{T} = \frac{\bar{q}}{2\rho c (\pi a t)^{1/2}} e^{-x^2/4at} \quad (13)$$

ところで 実際には座標は動いているから雪塊と水塊は同速度で動いているとして、時刻 t において点 ξ' にあった点が現在時刻 t において ξ にあるとすれば、

$$\xi = \xi' - \left(\int_0^t v d\tau - \int_0^{\tau} v d\tau \right) \quad (14)$$

ニシテ v は次式により与えられる雪塊の相対速度である。

$$v = u_s - u \quad (15)$$

u_s : 雪塊の速度

u : 水の平均流速

いま、雪塊の相対速度 v が

$$v = -v_0 \left(1 - t/t_1 \right) \quad (16)$$

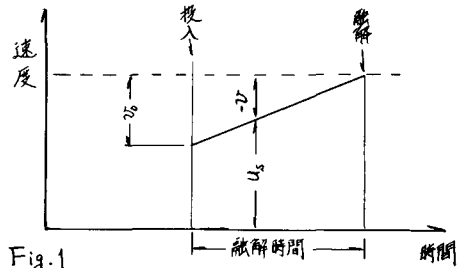


Fig.1