

道路散水消雪における非定常熱収支数値シミュレーション

福井県雪対策・建設技術研究所

正会員 ○高島 浩一

同 宮本 重信

1. 目的

積雪地の多くの市街地では、地下水散水消雪が行われている。しかし、地盤沈下や水資源の浪費が問題となり、節水が課題となっている。

現在、散水消雪施設の設計は「路面消・融雪施設等設計要領」を参考としており、消雪水の熱エネルギーの他、車両による攪拌効果等を加味して必要散水量を算定している。しかし、実際の路面の積雪、消雪に影響する、太陽からの熱放射や上空との熱放射、対流、あるいは地面（舗装）との熱伝達については、「融解効率」という係数を用いて扱っており、実現象を正しく反映しているか不明である。また、消雪区間を2つに分割して交互に散水をおこなう「交互散水方式」については、設計手法が確立されていない。本研究では、上記2つの点について着目し、全国の気象台で観測している地上気象観測データを用いて消雪効果を定量的に判断できる、散水消雪モデル、およびシミュレーションプログラムを構築した。なお、消雪水を用いない無散水融雪の数値シミュレーションについては既存研究で開発されている。今回は、連続散水、間欠散水、および散水量による消雪の程度を、比較した。

2. モデルの定式化

ここで対象とする散水消雪道路の模式図、および座標系と計算境界を図2.1に示す。散水ノズルから噴出した消雪水は、計算領域端から道路延長方向に均一に流れ縦断勾配その他の物性値が一定と仮定した道路横断方向 x 、鉛直方向 y の2-D座標系で、消雪水-舗装体における熱収支を扱う。まず、舗装体内外での熱移動から、

$$\rho_r C_r \frac{\partial T_r}{\partial t} = \lambda_r \left(\frac{\partial^2 T_r}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_r}{\partial y^2} \right) \quad (\text{式 2.1})$$

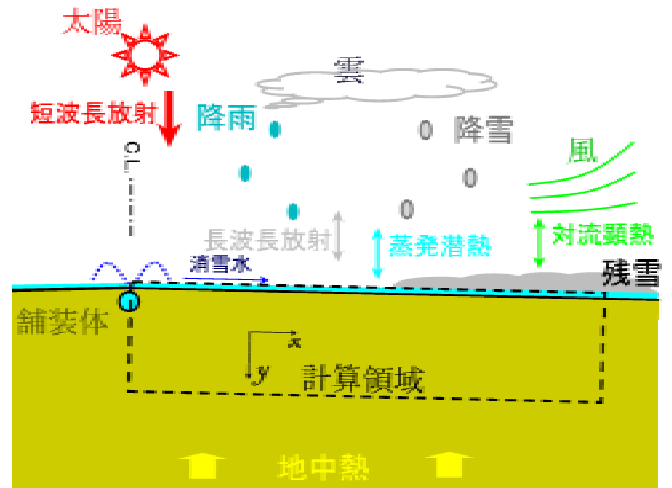


図 2.1 散水消雪モデル模式図と熱移動

$$\lambda_r \frac{\partial T_r}{\partial y} = -q_w + q_{Ar} \quad (\text{式 2.2})$$

$$\left. -\lambda_r \frac{\partial T_r}{\partial y} \right|_{(y=\text{地中との境界面})} = q_e \quad (\text{式 2.3})$$

$$\left. -\lambda_r \frac{\partial T_r}{\partial x} \right|_{(x=\text{境界面})} = 0 \quad (\text{式 2.4})$$

とする。ここで、 ρ_r ：舗装体の密度、 C_r ：舗装体の比熱、 T_r ：舗装体の温度、 t ：時間、 λ_r ：舗装体の熱伝導率、 q_r ：舗装体表面に流入する熱流束、 q_e ：地中境界面に流入する熱流束、 q_w ：舗装体から消雪水に流入する熱流束、 q_{Ar} ：上空からの熱流束で、図2.1に示す放射熱、対流顕熱、蒸発潜熱など、である。

次に、舗装表面の消雪水について、熱移動から

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} = \frac{q_w + q_s}{\rho_w C_w h} - v_x \frac{\partial T_w}{\partial x} + \frac{\lambda_w}{\rho_w C_w} \frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2} \quad (\text{式 2.5})$$

$$q_s = -I_s (C_{sm} + C_w \cdot T_w - C_s \cdot T_s) + q_{As} \leq 0 \quad (\text{式 2.6})$$

$$q_r = -I_r \cdot C_w \cdot (T_w - T_{wet}) \quad (\text{式 2.7})$$

キーワード：散水消雪，数値シミュレーション，熱解析，積雪センサー，道路管理

連絡先：〒918-8108 福井市春日 3-303 TEL0776-35-2412 <http://www.mitene.or.jp/~yukitec/sctrc/>

ここで、 T_w ：消雪水の温度、 q_s ：雪の融解し流水温まで昇温させるのに要する熱量、 C_w ：水の比熱、 λ_w ：水の熱伝導率、 h ：消雪水の水深、 I_s ：雨量換算融雪強度、 C_{sm} ：雪の融解潜熱、 C_s ：雪の比熱、 T_s ：雪の温度、 I_r ：降雨強度、 T_{wet} ：雨の温度である。

続いて、流体の運動方程式、連続式より、

$$\mu \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \rho_w g \cos \beta = 0 \quad (\text{式 2.8})$$

$$Q = \int_0^h v_x dy = \overline{hv_x} = \frac{\rho_w g h^3 \cos \beta}{3\mu} \quad (\text{式 2.9})$$

$$h_n \cdot v_n + I_r \cdot \Delta x + I_s \cdot \Delta x = h_{n+1} \cdot v_{n+1} \quad (\text{式 2.10})$$

ここで、 μ ：舗装面の摩擦係数、 v_x ：消雪水の流速、 ρ_w ：水の密度、 g ：重力加速度、 β ：舗装面と重力方向のなす角度、 Q ：消雪水の流量、 Δx ： x 方向微小要素幅、 n ： x 方向要素 Index である。

消雪水の散水開始停止時、および降雪、降雨時には、非定常流となり、さらに残雪による影響を受けるので、実際の流れを反映しているとは言えない。しかし、本モデルは熱移動を扱っていることから、前述の仮定による影響は微小であると考え定常流として取り扱った。

降雪微小時間 Δt 間に降った雪、および残雪はその時間内において消雪水と等しい温度になるまで熱量をすべて受け取り、水になるとし、消雪水温が 0 度となるまで消雪され、溶け残った雪は次ステップに残雪として積み上げることとした。

3. シミュレーション条件

計算領域外からの熱移動は、水平方向では 0 とし、地中からの熱移動は、温度を一定（年平均気温）として取り扱った。また、反射率、放射率、熱伝達率など必要なパラメータは、既存研究で用いられている値、もしくは推定式を用いている。本稿では割愛する。消雪運転の自動制御には、路面積雪の有無を感知する積雪センサーによるものとし、路面の 85% 以上に 0.5cm 積雪した時点で 0n となり、路面上の積雪がすべてなくなるまで運転するようにした。

4. 計算例と考察

片側 2 車線 6.0m、横断 2% の道路を対象とし、福井市の気象データ（期間は 2003 年 1 月 1 日から同 21 日）を用いた。特に 13～15 日にかけては、観測され

た最深積雪が 93cm と 15 年ぶりの大雪となり、期間中の降雪時間強度も 3cm 以上と福井県内の消雪設計で想定する 2cm 程度を上回る時が多かった。

散水は 0.4、0.2 (l/min.m²) の連続散水と、0.4 (l/min.m²) 10 分間隔の間欠運転で計算した。図 4.1、図 4.2 はそれぞれ、ノズルから 3m、4.8m 離れた地点での路面上の積雪量の変化である。

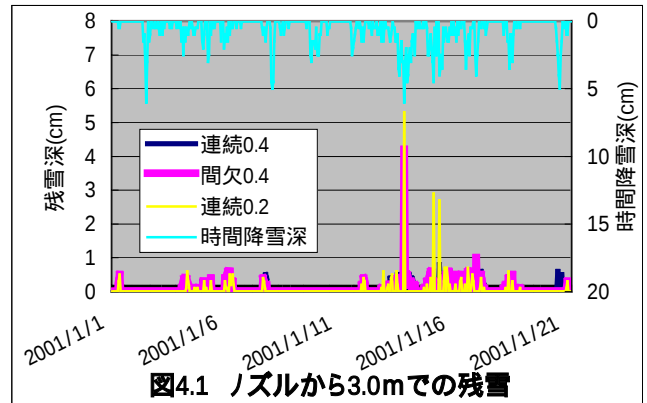


図4.1 ノズルから3.0mでの残雪

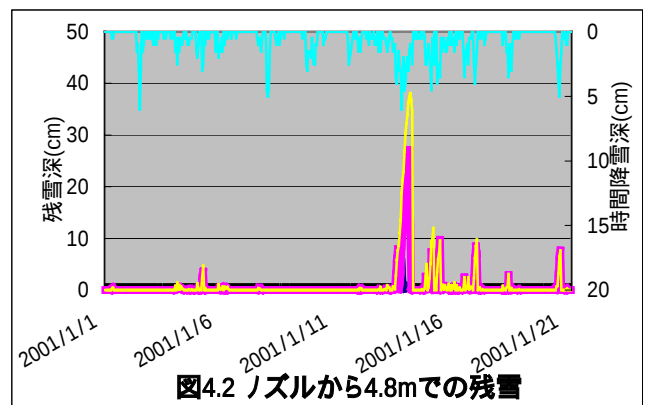


図4.2 ノズルから4.8mでの残雪

時間降雪量が一時的に大きくても、持続しない上旬は消雪されているが、大雪となった中旬では散水によって差が生じた。また、時間当り散水量が等しい”0.4l 間欠”と”0.2l 連続”では、前者の消雪効果が高いことが読み取れる。より多量の散水をおこなうことによって、消雪の熱容量が増し、舗装体や上空への面的な熱損失が減ることが考えられる。

なお、0.4l 連続散水でも中旬には 5.0m 以上の個所では、一時的に 40cm 程度の残雪となった。しかし、一般的な降雪については、0.2l の散水でほぼ全面的に消雪されるようである。

5. 今後の課題

現実には、通過車両による攪拌効果、および消雪流が路面上を均一に流れないため、シミュレーション条件と合わない面がある。今後は、これらの現象を考慮するとともに、実測値との比較や、パラメータの感度分析を行い、モデルの信頼性を向上していく。