

# 消融雪溝の雪処理能力とその標準的設計法

## SNOW-MELTING CAPACITY AND STANDARD-DESIGN METHODS OF SNOW-MELTING-GUTTER SYSTEMS

大熊 孝\*・米内弘明\*\*・小野田勲\*\*\*・小林雄二\*\*\*\*

By Takashi OKUMA, Hiroaki YONAI, Isao ONODA and Yuji KOBAYASHI

As well known, there are considerable numbers of energywise and soil-engineeringwise problems in the conventional snow-removal and snow-melting systems by means of gasoline-mobile machineries and by utilizing warm-under-ground water.

To overcome above the problems, the snow-conveyance-gutter systems and the snow melting-gutter systems by utilizing surface water have become the tow principal items as the effective and practical countermeasures.

However, the standard-design methods of them have not yet been established. The snow-transportation capacity of the snow-conveyance-gutter systems was discussed in our previous paper<sup>1)</sup>. In this paper, the snow-melting capacity of the snow-melting-gutter systems by means of surface water is made clear and the standard-design methods of the systems are discussed.

### 1. ま え が き

われわれは、「流雪溝の流雪能力と塗装によるその改善」<sup>1)</sup>(土木学会論文集, 第359号/Ⅳ-3, 1985年7月)で, 除雪施設である流雪溝の流雪能力を論じ, 流雪溝として機能させるためには, 少なくとも100 l/sの流量が必要であることを指摘した。これより少ない流量であると, 流雪溝は, 投入された雪を流し切ることができず, 水路が閉塞して溢水害を発生させるという弊害がある。

消融雪溝は, 少量の流量しか確保できない場合に, その流雪溝の欠点を克服する方法として考案されたものであり, 雪を流すことは考えず, その水のもつわずかな熱エネルギーを効率的に利用して, 時間をかけて雪を融かす方式である。この方式は, 昭和55年に, 米沢市にある東北流雪研究所(株)が開発したものであり, 現在, 山形県下をはじめとし, 日本海沿岸の豪雪地域に急速に普及しはじめている。名称も, 開発者は消融雪溝と称しているが, 金沢市等では消雪溝とよばれており, 別称が登

場するほどになっている。消融雪溝は, 流雪溝とともに, 主として地表水を利用する方法であり, 地下水利用の消雪パイプ方式に代替する方法として注目をあびている。

しかし, 消融雪溝の雪処理能力は, 水温, 天候, 地熱等の影響を受けるため, 計画立案にあたってどのように考えればよいのか, いまだ明確な指針がない状況にある。すなわち, 標準的設計法が確立されておらず, 試行錯誤的に設計されているにすぎない。そこで, 本論文は, 消融雪溝の雪処理能力を明らかにし, その標準的設計法の基本となる点を明示することを目的としている。

### 2. 消融雪溝の特徴

消融雪溝は, 上述のごとく, 冬期間の地表水のもつわずかな熱エネルギー(冬期の水温は北陸地方では通常1~3°Cが多い)を効率的に利用する方法である。その構造は, 図-1, 写真-1, 写真-2のように, 消網板という網によって水の通り道を確認し, 止水板で水を堰上げることに特徴がある。この水の通り道は, 小流量の流雪溝にみられる溢水を防ぐとともに, 消融雪溝の下流部でも雪が融けるように, 熱エネルギーを下流までできるだけ均等に配分する機能を有している。また, 止水板は, 水を堰上げ, 雪と水の接触面積を増やし, 熱エネルギーを効率的に消費するようにしたものである。

\* 正会員 工博 新潟大学教授 工学部土木工学科  
(〒950-21 新潟市五十嵐2の町8050)

\*\* 正会員 工修 アイ・エヌ・エー新土木研究所(株)  
(〒162 新宿区水道町22番1, 水道町ビル)

\*\*\* 正会員 新潟県土木部(〒950 新潟市新光町4)

\*\*\*\* 正会員 (株)間組(〒107 港区北青山2-5-8)

しかし、消融雪溝では、投入された雪が、流雪溝のように瞬間的に眼前から消え去るものでなく、融けるまで少なくとも1~2時間は待たなければならない。気象などの条件が悪ければ、融けるまで10時間もかかることがある。すなわち、従来の短時間に大量に雪を処理しようとする技術のあり方と、消融雪溝は若干ベクトルの方向が異なっている。雪処理問題にかぎらず、いままでの科学技術一般は、自然をその力で征服しようとするものが多かった。むしろ、ロータリー車やグレーダー、消雪パイプなどの強力な雪処理技術なくして現在の除雪システムは存立し得ないけれど、水のもつ小さな熱エネルギーを時間をかけてゆっくり利用する消融雪溝は、自然と調和した技術のように思われる。いまや、自然破壊や資源枯渇問題などが地球規模で論じられる時代であり、21世紀の技術は自然とどこまで調和し得るかが重要問題の1つであろう。消融雪溝はそうした技術の先駆の1つではないかと思われる。

この消融雪溝の特徴・問題点を、主に流雪溝との対比においてまとめるならば、次のごとくであろう。

[特長]

- (1) 流水量が少なくとも、溢水害を発生させることなく、雪を処理できる。
- (2) どんな地形勾配であっても、水が流れるかぎり設置できる。
- (3) 流末処理の問題がなくなる。
- (4) 現用の側溝等に消網板(足付)を入れるだけで、

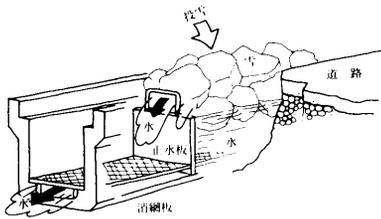


図-1 消融雪溝の概念図<sup>2)</sup>

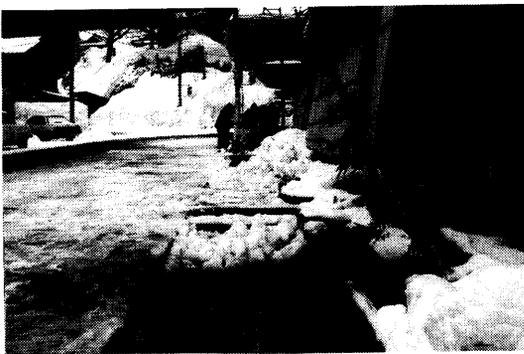


写真-1 斜め網による消融雪溝(新発田市赤谷の例)

消融雪溝化できる。

- (5) 消融雪溝の管理運営を通して、地域住民の連帯感が高められる。

[問題点]

- (1) 雪処理能力が流雪溝に比べ小さく、雪処理時間が長くなる。
- (2) 消網板の目が、ゴミや土砂で詰まらないように注意しなければならない。
- (3) 水温、水量、消融雪溝の長さ、気象などと消融雪溝の雪処理能力の関係が明確でない。

そこで、本論文では、消融雪溝の設計にあたってその雪処理能力をどのように考えればよいか、以下に、室内実験・現地実験などを参考に、検討するものである。

3. 消融雪溝の雪処理能力

(1) 消融雪溝の熱的要素と熱収支

消融雪溝の雪処理能力を考えるにあたって、まず、投入された雪はすべて融かされ、流下するものはないと仮定する。現実には、投入された雪が融け終わる最後の段階で、水面に浮いた雪が下流に流されるけれども、その量は投入雪量の1%にも達しない量であるので無視することにする。次に、その雪を融かす熱的モデルは、水温の低下と雪の融解熱が主体であると考えられるが、その他に地熱、空気対流、水面の放射を考慮して、次のような熱収支式を仮定する。

$$C_w \cdot \gamma_w \cdot \sum_i \{ [T_i(t_i) - T_0(t_i)] \cdot Q(t_i) \cdot \Delta t \} + L \cdot \sum_i \{ [Q_c(t_i) + Q_e(t_i) + Q_r(t_i)] \cdot \Delta t \} - C_s \cdot W_s = 0 \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $C_w$ ：水の比熱、 $\gamma_w$ ：水の単位重量、 $t_i$ ： $i$ 回目の測定時刻、 $T_i(t_i)$ ：上流端の水温、 $T_0(t_i)$ ：下流端の水温、 $Q(t_i)$ ：流量、 $\Delta t$ ：測定時間間隔、 $L$ ：溝の長さ、 $Q_c(t_i)$ ：対流熱、 $Q_e(t_i)$ ：地熱、 $Q_r(t_i)$ ：放射熱、 $C_s$ ：雪



写真-2 底網による消融雪溝(米沢市の例)

の融解熱 (80 cal/g (333.6 J/g)),  $W_s$ : 投入雪の重量。  
 なお,  $Q_i$ ,  $Q_e$ ,  $Q_r$  は溝の単位長さ, 単位時間当たりで表現した。

第1項は, 消融雪溝の上流端で流入した水の総熱エネルギーと下流端で排出される水の総熱エネルギーの差, すなわち, 消融雪溝によって使用される熱エネルギーの総和である。第2項は, 対流, 地熱, 輻射で得られる熱エネルギーである。第3項は, 投入された雪の融解に消費されるエネルギーであり, 雪温は  $0^{\circ}\text{C}$  と仮定した。

第1項, 第3項は測定によって得られるが, 対流熱  $Q_i$ , 地熱  $Q_e$ , 輻射熱  $Q_r$  は, 実測が難しいので, 次のような仮定で推算する。すなわち,  $Q_i$  は物体と空気との温度差による熱伝達と水蒸気の凝結・蒸発による熱伝達から,  $Q_e$  は消融雪溝の周りの土の温度勾配と熱伝導率から,  $Q_r$  は物体の温度と輻射率および日射量から求める。なお,  $Q_i$ ,  $Q_e$ ,  $Q_r$  は消融雪溝の上流と下流では水温低下により値が異なってくるが, その温度低下は  $1\sim 2^{\circ}\text{C}$  と幅が狭いので, 水路中央付近の値を代表値として用いる。

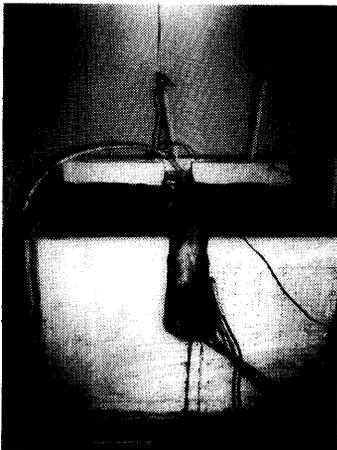
(2) 室内実験とその結果

a) 小規模モデル実験

まず, 写真—3のような小規模なモデルをつくり, 低温実験室の中で, 外気温一定の条件下で, 水を流し, 氷塊を融かす実験を行った。

実験装置は, 14 mm 厚のベニヤ板で  $500 \times 350 \times 400$  (mm) の箱をつくり, そこに砂 (新潟五十嵐浜の海砂, 2 mm ふるい通過) を詰め, プリキ製の水路 (厚さ 0.2 mm, 水路幅 60 mm, 水路深さ 100 mm, 長さ 550 mm) を埋めたものである。

温度の測定は, 水温, 気温に関しては基準温度計で検定した水銀温度計 (測定範囲  $-5\sim 35^{\circ}\text{C}$ ) で, プリキ製水路の表面温度は温度ゲージと静ひずみ計で, 地温は箱



写真—3 小規模モデル実験の装置

に  $\phi 7$  mm の穴をあけ, サーミスタ温度計を差し込み, 測定した。

水温, 流量は, それぞれ  $5^{\circ}\text{C}$ ,  $3^{\circ}\text{C}$ ,  $1^{\circ}\text{C}$ , 1 200 cc/min, 600 cc/min, 300 cc/min 程度に変化させ, そのときの気温, 上流水温, 下流水温, 水路表面温, 地温および融解量を測定した。なお, 融解量は, 本来ならば雪を投入すべきであるが, 雪であると途中段階での融解量が測定できないので, 氷を網袋に入れ, 一定時間ごとに水路から袋をとり出して, 重量を計り, 氷の融解量で代替した。

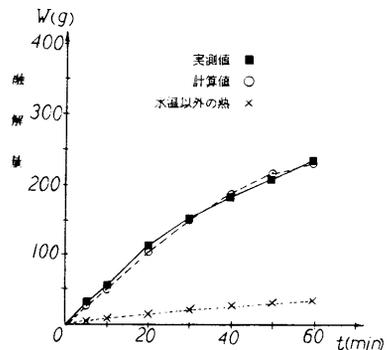
実験結果の一例を示すと, 表—1, 図—2のごとくである。図—2は, 縦軸が融解量, 横軸が経過時間であり, 実測と熱収支式から求めた融解量はほとんど合致している。図中の×で示したものは, 水温以外の熱で融解したと考えられる量であり,  $Q_i$  は低温室内の自然対流,  $Q_e$  は地温の温度勾配と熱伝導率,  $Q_r$  は低温室の壁を黒体面として求めた。したがって, この実験から, 前述の熱収支式は, 融解量を推定するうえでほぼ妥当であり, かつ, 地温, 対流, 輻射をある程度考慮する必要があることがわかった。しかし, このモデルでは時間縮尺に相似則が成立しないので, 現場に適用し得るように, 次の実験を行った。

b) 中規模モデル実験

幅 18 cm の鉄筋コンクリートU字溝を, 実験室の既設の幅 30 cm 水路の中に約 6 m 設置し, 4 mm ピッチの金網を消網板の替わりとしてU字溝水路を入れ, 下流端

表—1 消融雪溝の小規模モデル実験結果 ( $Q=290$  cc/min)

時間 min	重量 g	気温 $^{\circ}\text{C}$	水温 $^{\circ}\text{C}$	表面温度 $^{\circ}\text{C}$	時間間隔 min	水温低下平均値 $^{\circ}\text{C}$	融解量 g	計算融解量 g
0	429	4.8	2.2	1.7	0	1.35	0	0
5	396	5.1	2.2	1.3	5	1.45	33	25
10	372	5.0	2.1	1.5	5	1.45	57	49
20	315	5.9	2.1	1.7	10	1.90	114	103
30	275	5.2	2.3	1.6	10	1.45	154	151
40	245	4.1	2.3	1.9	10	0.96	184	188
50	220	5.8	2.8	2.0	10	1.50	209	219
60	193	4.7	2.9	2.3	10	0.95	236	235



図—2 消融雪溝の小規模モデル実験結果 ( $Q=290$  cc/min)

に止水板を設けた。水路側面の温度を一定に保つため、既設水路とU字溝水路のすきまに水道水を流し、地熱のかわりとした。投入する雪は、あらかじめ重量と密度を測定した。水温、流量は、それぞれ8°C、4°C、2°C、2 l/s、1 l/s、0.5 l/s 程度に変化させた。流量は正確を期しバケツとストップウォッチを用いて測定した。上流水温、下流水温、気温、水路側面温度は、雪を投入し、水を流し始めてから、その雪がすべて融解するまで、10分または5分ごとに測定した。

地熱の影響は、コンクリートの裏表の温度差から温度勾配を求め、それにコンクリートの熱伝導率 (2.0 kcal/(m・h・°C)) を乗じることで代替した。対流、放射項に関しては、溝には雪が詰められているので、水を含む雪面と大気とのやりとりとなる。熱伝達項はおおむね水温と気温の差から算出できるが、放射は太陽光などが相手となるので計算が難しい。そこで、土屋雷蔵が「道路除雪の堆雪に関する研究」<sup>3)</sup>のなかで提案している融雪算定式を用いることにした。土屋は、対流項として気温伝達熱と水蒸気伝達熱を、放射項として日射吸収熱と有効長波放射を考慮しており、それらは次式のごとく表わされる。

①気温伝達熱量

$$Q_{m0} = (0.36 + 0.14 V)(T_a - T_w)t \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $Q_{m0}$ の単位は cal/cm<sup>2</sup> であり、 $V$ は風速 (m/s)、 $T_a$ は気温、 $T_w$ は水温、 $t$ は時間である。

②水蒸気伝達熱量

$$Q_{mv} = (0.54 + 0.22 V)(S - S_0)t \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $Q_{mv}$ の単位も cal/cm<sup>2</sup> であり、 $V$ は風速 (m/s)、 $S$ は空気中の蒸気圧 (mb)、 $S_0$ は水面における飽和蒸気圧 (mb)、 $t$ は時間である。

③日射吸収熱

$$Q_{ma} = I_0(1 - \gamma) \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $Q_{ma}$ の単位も cal/cm<sup>2</sup> であり、 $I_0$ は日射量、 $\gamma$ は反射率である。

④有効長波放射量

$$Q_{me} = -\sigma T_a^4(0.48 - 0.065\sqrt{S})(1 - cn^2)t \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $Q_{me}$ の単位も cal/cm<sup>2</sup> であり、 $\sigma$ はステファン・ボルツマン定数、 $S$ は空気中の蒸気圧、 $c$ は雲による係数、 $n$ は雲量、 $t$ は時間である。

式(1)の  $Q_i$ 、 $Q_f$ との関係は次式となる。

$$Q_i = b \times (Q_{m0} + Q_{mv}) / (t_i - t_0) \dots\dots\dots (6)$$

$$Q_f = b \times (Q_{ma} + Q_{me}) / (t_i - t_0) \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 $b$ は水路幅、 $t_i$ は投入した雪がすべて融解する時刻、 $t_0$ は雪を投入した時刻である。ただし、この実験では、室内実験であり、しかも夕方と夜間の実験であったこと、天候が雪であったこと、室温変化がほとんどなかったこと等から、 $Q_f$ は無視することにした。

この実験結果の一例が図-3であり、その他の結果も総括したのが図-4である。図-4は、横軸が実際に投入した雪がすべて融けるに必要な熱量であり、縦軸が熱収支から求めた熱量である。45°の補助線は両者が一致したことを示し、結果がこの線に近いほどよい計算といえる。○は水温低下のみを、△はその他の項も考慮に入れて計算したものであり、地熱、対流を考慮した方が適合性がよいことがわかる。なお、45°線から離れた点は、取水温が高いときに発生しており、排水温の測定において、雪を融かして水温の低下した水が十分混合されていないことに原因があると考えられる。

(3) 現地実験とその結果

a) 米沢市の融雪雪溝での実験

昭和59年1月5日から8日間、山形県米沢市館山地区内の現用融雪雪溝で、地温測定を含め、観測を行った。この融雪雪溝は幅40cm、深さ50cmであり、全長は112mであるが、そのうち中央部の止水板から止水板までの16mの部分を選定区間とし、この間の投入雪の重量を測定した。また、地温は、その測定区間の中央部で、融雪雪溝の壁面から10cm離れた位置で、深さ30cm、

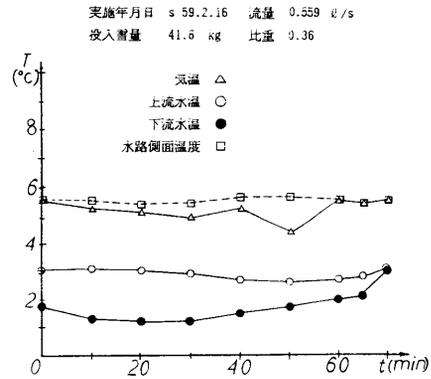


図-3 融雪雪溝の中規模モデル実験結果の一例

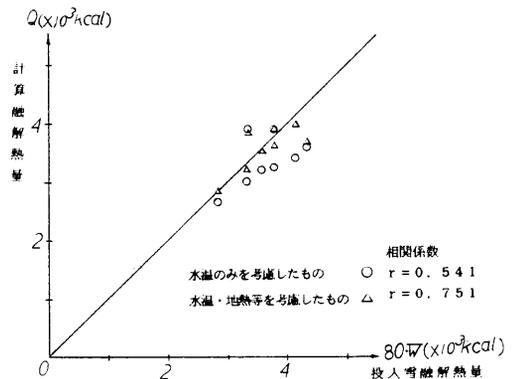


図-4 融雪雪溝の中規模モデル実験の投入雪の融解熱量と計算融解熱量の比較

60 cm において測定した、深さ 60 cm の位置が消融雪溝の底面の深さであり、これを底面温度とした。なお、その温度計は、昭和 58 年 8 月に設置しておいたものである。流量は、止水板や消納板の影響のないところで、水深と表面流速を測定し、その表面流速から平均流速を推算して、求めた（表面流速から平均流速の推算方法は文献 1) を参照されたし）。測定項目は、室内実験と同様に、上流止水板での水温、下流止水板での水温、気温、地温であり、5 分または 10 分間隔で測定した。

この実験結果の一例が図-5 である。全ケースは 5 例であるが、流量は 3~16 l/s、投入雪量は 300~650 kg の範囲であった。以上の結果を総括したのが、図-6 である。なお、熱収支式からの計算において、地熱に関する熱伝導率は、地温測定位置が水路壁面から 10 cm 離れていたため、コンクリートと土の熱伝導率とその厚さと距離を考慮して平均化して求めた。また、輻射に関しては、測定が夕方から夜間であり、天候は雪であったことから、日射は無視したが、有効長波放射は前述の式(5)

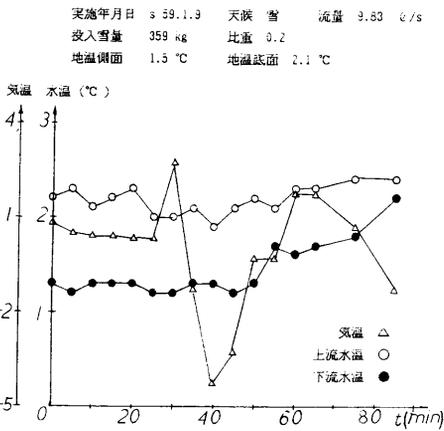


図-5 現地実験の一例 (米沢)

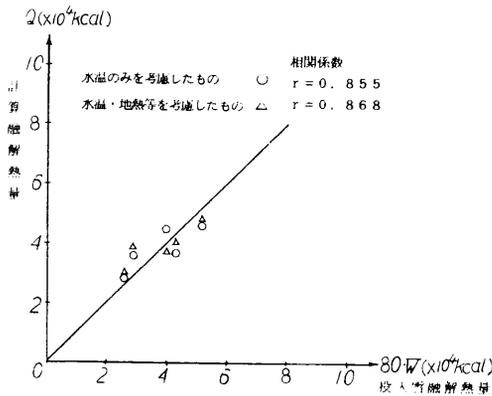


図-6 現地実験結果 (米沢) の投入雪の融解熱量と計算融解熱量の比較

を用いた。対流に関しては、前述の式(2)を用いた。

この実験結果によれば、水温・地熱等を考慮した値と水温のみを考慮した値に差がほとんど生じていない。これは、輻射と地熱が相殺されていることも考えられるが流量測定に±5%程度の誤差があるのに対して、16m程度の区間では地熱、輻射、対流の項は水温低下の項に比べ1~2%の影響をもつにすぎないことに原因があると考えられる。したがって、降雪時や曇天における熱収支を求める場合、数100mから1kmに及ぶような長い消融雪溝でないかぎり、水温の低下のみを考慮すれば、十分誤差範囲内にあり、実用的であるといえよう。むしろ、日中晴天時は日射量を考慮する必要がある。

b) 新発田市赤谷の消融雪溝での実験

米沢市での実験は、流量も少なく、投入雪量も高々 650 kg であった。そこで、流量が 35~76 l/s、投入雪量が 770~3660 kg の範囲で実験を行った。実験溝は、新潟県新発田市赤谷に試験的に設置された斜め網式消融雪溝(写真-1参照)であり、水路幅は 1 m、深さ 50 cm である。全長 36 m であり、そのうち約 20 m の区間を実験に使用した。実験日は昭和 60 年 1 月 25 日、2 月 17 日であった。

実験方法は、前述と同様に、投入雪量、流量、水温、気温を測定したが、地温の測定は実施できなかった。実験結果の一例を図-7 に示す。全ケースは 6 例であり、その結果を総括したのが図-8 である。ただし、熱収支式から求めた融解熱量は水温低下のみを考慮したものである。なお、天候は 5 例が雪、1 例が曇りであった。

この実験結果からみると、45°補助線をはさんで上下に点が分散しており、天候が雪ないし曇りであったことから大量の輻射熱も考えられず、流量測定の誤差が大きく影響しているように思われる。この実験結果からも、消融雪溝の雪処理能力は、実用的には水温低下のみを考慮し、それにある程度の安全率を見込めば十分であるように判断される。

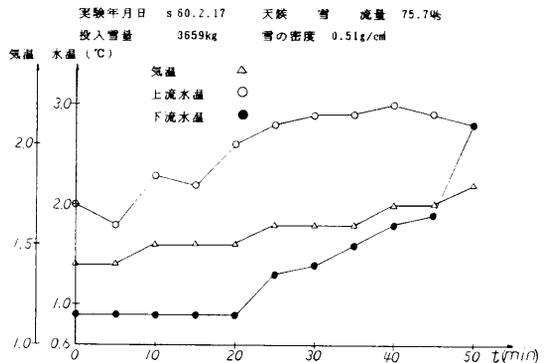
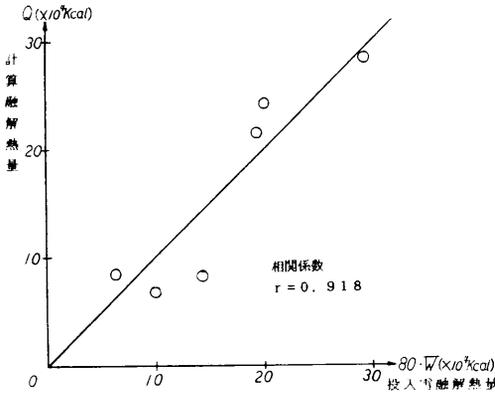


図-7 現地実験の一例 (赤谷)



図—8 現地実験結果（赤谷）の投入雪融解熱量と計算融解熱量の比較

(4) 現用消融雪溝の距離に関する事例と長距離消融雪溝の雪処理能力

以上の実験では、投入雪量の重量測定に限界があるために、消融雪溝の実験長さは16～20 mに限定されている。そこで、現用の消融雪溝がどの程度の長さを有するのか、昭和60年1月31日山形県内の各地（西村山郡朝日町松程、同郡西川町本道寺、同町横岫、村山市長善寺）の消融雪溝を見て回り、簡単な調査を行った。これをまとめたのが表—2である。

斜め網式の長善寺を除けば、断面は30×40 (cm)～50×50 (cm)であり、流量は目測を含めおおむね20～30 l/sであり、長さは200～380 mであった。現地で消融雪溝を利用している人々の話では、従来は流雪溝としては流量が少なすぎ、溢水害がしばしば発生していたが、消融雪溝化してからその心配もなく、大変有効であるとのことであった。ちなみに、松程では昭和58年度には4回のトラック排雪を実施したが、同59年度は消融雪溝を設置したため、昭和60年1月31日現在一度も排雪を実施していないとのことであった（昭和58年度、59年度ともかなりの豪雪であったことは周知のごとくである）。

現用消融雪溝の距離は上述のように200～500 mであるので、こうした消融雪溝がどの程度雪を処理し得るか、地熱、輻射、対流を前述の式で考慮して、モデル計算を

表—2 山形県内の消融雪溝の実例 (S 60.1.31 調査)

	全長 (m)	水路の寸法 (cm)	上流水温 (℃)	下流水温 (℃)	気温 (℃)	備 考
松 程	378	40 × 40	1.3	0.3	0	沿線戸数24戸
本道寺	250	右側 50 × 50 左側 40 × 40	2.1	0.8	-0.5	流量は約30 ℓ/s
横 岫	200	30 × 40	2.4	2.4	-0.5	雪が投入されていない。
長善寺	470	130 × 80	0.7	0.2	-0.7	流量は約150 ℓ/s 斜めの消網板

行ってみよう。むろん、消融雪溝が短距離であるならば、前述のごとく  $Q_e$ ,  $Q_t$ ,  $Q_r$  は無視し得る。しかし、長距離の場合、天候によってその処理能力がどのように変化し、設計上どのように雪処理能力を考えればよいのか、検討しておく必要があろう。

まず、処理能力を、投入した雪がすべて融解するのに必要な時間で表現するとする。次いで、流量、取水温、排水温が変動しないと仮定すると、その処理能力は次式となる。なお、排水温が変動しないという仮定は、消融雪溝の長さがある程度長くなると、雪が上流から融けて比較的短距離で水温が消費され、 $0^\circ\text{C}$  近くなるが、凍結することはなく、下流の雪が順次融解されていくということに基づいている。

$$t_1 - t_0 = 80 W_s / (C_w \gamma_w Q (T_1 - T_0) + L(Q_e + Q_t + Q_r)) \dots\dots\dots (8)$$

そこで、以下の4例の天候を仮定し、処理能力時間を求めてみた。なお、雪国では冬期に晴れることは少なく、日中晴れの場合は設計上危険側となるので仮定しなかった。

- 状況1：晴れ、夜間、気温  $-5^\circ\text{C}$ 、風速 0 m/s
- 状況2：曇り、夜間、気温  $-3^\circ\text{C}$ 、風速 0 m/s
- 状況3：曇り、日中、気温  $2^\circ\text{C}$ 、風速 0 m/s
- 状況4：雪、夜間、気温  $-3^\circ\text{C}$ 、風速 0 m/s

ただし、取水温は  $2.3^\circ\text{C}$ 、排水温は距離が長く十分水温が消費されたとして  $0^\circ\text{C}$ 、流量は 20 l/s、地温は側面で  $1.5^\circ\text{C}$ 、底面で  $2^\circ\text{C}$  とする。処理する雪の量は、雪の比重を 0.3 とし、 $40 \times 40$  (cm) の U 字溝に深さ 30 cm で一様に投入されたものとする（深さ 10 cm 分は消網板の設置高さに相当すると考える）。このときの投入雪の重量は次式となる。

$$W_s = 0.3 \times 0.4 \times 0.3 \times L \times \gamma_w \text{ (kg)} \dots\dots\dots (9)$$

この計算結果を消融雪溝の距離と融解時間で示したものが図—9である。この結果をみると、処理能力は天候によって大きく左右されることがわかる。このことは、天候によって取水温自体が変化するので断定し得ないが、実際の観測や現地の人々の話による「日中晴れた日は速く融け、晴れた夜はほとんど融けない」という事実とも合致している。晴れた夜にほとんど融けない理由は、放射冷却現象が大きく影響していると考えられる。一方、天候が雪か曇りであれば、輻射、対流の項は地熱の項と相殺し、処理能力は水温の低下のみで推算しても、大きな誤差はないことを示している。ところで、雪国では冬期に、夜間晴れることは少なく、晴れるときは降雪もないことを考慮すれば、消融雪溝の処理能力の算定は、長距離の場合でも、この結果から実用的には水温低下のみを考慮すればよいと結論づけられる。

この考え方に従えば、図—9 から、長さ 500 m の消融

雪溝では、取水温度  $2.3^{\circ}\text{C}$ 、流量  $20\text{ l/s}$  あれば、投入された雪  $18000\text{ kg}$  (式 (9) による) は約 8 時間で全量融解すると考えてよい。したがって、1 日 3 回のサイクルで雪を投入すれば、この場合  $54000\text{ kg}$  の雪が処理可能である。この雪量は、延長  $500\text{ m}$ 、幅  $6\text{ m}$  の道路に、新雪にして約  $20\text{ cm}$  の降雪に相当する。すなわち、降雪量  $20\text{ cm}$  の道路上の雪はその日のうちに処理できる。この降雪量が多い方とはいえないかもしれないが、この程度の雪がその日のうちに処理できることは非常に有効であるといえる。

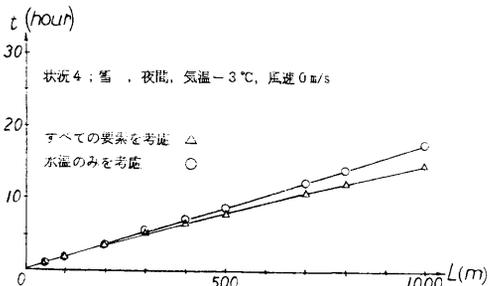
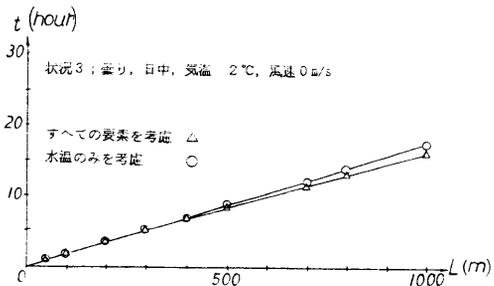
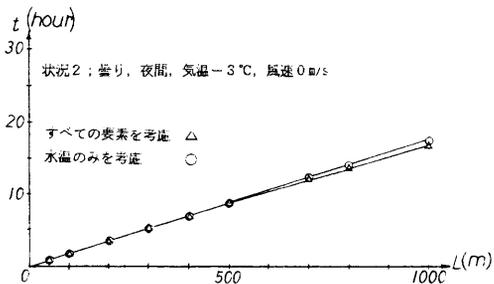
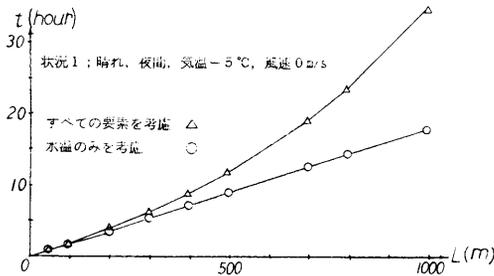


図-9 消融雪溝の距離と融雪時間

むしろ、以上の議論は、熱収支式が正しいという前提に立っているが、前述の現地実験などからもおおむね首肯し得るものであろう。したがって、流量と取水温度がわかれば、消融雪溝の処理能力は、実用的には、水温低下分のみで算定可能であるといえる。

#### 4. 消融雪溝の設計上留意すべき基本事項

消融雪溝の設計において、第 1 に重要なことは取水温度の設定である。冬期地表水は、北陸地方では通常  $1\sim 3^{\circ}\text{C}$  であるが、地形、河川、森林、集落、天候などさまざまな影響を受ける。そのため、設計上の取水温度を決定することは難しい。各地域で、毎年の水温変化を測定することが必要であろう。おそらく、冬期大寒の頃の水温が最も低いので、その頃の水温を設計上の水温とすれば、安全側の設計となる。

第 2 に、水温低下をどの程度に見積ればよいかが問題である。消融雪溝の長さが  $100\text{ m}$  以上であれば、前述のように、設計上水温は  $0^{\circ}\text{C}$  まで下がると考えてよい。また、消融雪溝が数  $100\text{ m}$  と長くても、北陸地方では氷結することがないので、その水温低下も  $0^{\circ}\text{C}$  までと考えてよいであろう。したがって、設計上の水温低下は取水温度分と考えることにする。

第 3 に、消融雪溝の雪処理能力は、前述のごとく、流量と水温低下のみから算定するものとする。

以上の仮定から、たとえば、流量  $50\text{ l/s}$ 、取水温度  $2^{\circ}\text{C}$  とすると、24 時間で処理可能な雪重量は、式 (8) から  $Q_t$ 、 $Q_e$ 、 $Q_f$  を無視して逆算すれば、 $W_s=108\text{ t}$  となる。この雪量は、長さ  $500\text{ m}$ 、幅  $6\text{ m}$  の道路に新雪で約  $40\text{ cm}$  の積雪となる。この雪量を  $500\text{ m}$  の消融雪溝に 3 回に分けて投入処理するならば、1 回の投入雪量は  $36\text{ t}$  である。この投入量を受け入れるに必要な消融雪溝の断面積は、投入時に雪はグレーダー等により押し入れられ比重  $0.3$  になったとすれば、 $0.24\text{ m}^2$  必要であり、消網板の下の水の通る空間を深さ  $10\text{ cm}$  とすれば、 $50\times 60\text{ (cm)}$  程度の断面が必要である。なお、同量の雪を 1 回の投入で処理しようとするならば、 $50\times 70\text{ (cm)}$  程度の断面の消融雪溝が道路の両側に必要であり (流量は半分ずつ  $25\text{ l/s}$  を流すことになる)、なおかつ、雪を溝の上に若干盛り上げることになる。この盛り上げた雪は、溝の中の雪が融けても、アーチ作用で溝の中に落ちず、そのままでは融けないので、時々スコップ等で突いて溝の中に落としてやる必要がある。こうした維持管理が消融雪溝にとって重要であり、地域住民の協力が設計上の大前提である。

設計上の安全率は、取水温度で考慮するか、雪処理対象量で考えるか、雪処理時間でみるかなど、何通りか考えられ、それは設計者の手腕にかかっている。たとえば、

上記の例で12時間で処理するならば、2倍の流量の100 l/sが必要となる。

しかし、100 l/sの流量が得られるならば、流雪溝として設計した方が有利である。流雪溝は少なくとも消融雪溝の10倍程度の雪処理能力がある。したがって、消融雪溝は、流雪溝として利用し得ない流量、すなわち、50～60 l/s以下の流量しか得られない場合に、有効性を発揮するものである。なお、50×70 (cm) 断面の消融雪溝では、流量の上限はおおむね50 l/sであり、水路勾配や深さ、消網板の位置などにもよるが、雪を投入した場合、これ以上の流量は流下せず、溢水することがあるので注意を要する。

ところで、消融雪溝で、屋根雪はどの程度処理可能であろうか。市街地家屋連担部での除雪対象雪量は、「流雪溝設計運営要領」<sup>1)</sup>の次式で算定される。

$$W_s = \alpha \cdot S \cdot h \cdot \rho \dots\dots\dots(10)$$

ここに、 $W_s$ は除雪対象雪量、 $\alpha$ は排雪率、 $S$ は沿道面積、 $h$ は屋根上の積雪深、 $\rho$ は屋根雪の密度である。 $\alpha$ は、沿道の建築率との関係で定められる。そこで、500 mの沿道で奥行25 m、両側で50 m、排雪率0.2、積雪深1 m、 $\rho$ を0.25 t/m<sup>3</sup>とすると、処理対象となる雪量は1250 tとなる。これを流量50 l/s、取水温度2°Cの消融雪溝で前述の仮定で処理するとすると、約11日を要することになる。むろん、日中晴れて、大幅に処理能力が増大することもある。しかし、この数値は、市街地家屋連担部では消融雪溝にあまり期待がかけられないことを、示している。もっとも、消融雪溝も設置せず、屋根から降した雪を1か月も2か月も道路上に堆雪しておくことか

ら考えれば、消融雪溝は十分威力があるといわねばならない。

要は、得られる流量、水温に対し、過度な雪処理を期待しないことである。換言するならば、上述の50 l/s、水温2°Cの処理能力は、十分大きいものであり、通常年の雪を対象とするならば多くの地方でかなり有効であると考えられる。10年から20年に1度というような大雪に対しては、非常手段としてトラック排雪などを考慮しておけば、消融雪溝は、流量も少なく、流末の心配もいらぬ、経済的な雪処理計画を実現させる有力な手段であるといえる。

謝 辞：本研究は、文部省科学研究費補助金（一般研究B）による「豪雪地域における交通及び生活環境確保のための流雪・融雪技術の開発研究」の一部として実施されたものであり、東北流雪研究所の桐生三男氏をはじめ、国・県・市町村の関係機関および地域住民の方々から多大な協力を得て、研究が進められた。ここに、心から謝意を表わす次第である。

#### 参 考 文 献

- 1) 大熊 孝ほか：流雪溝の流雪能力と塗装によるその改善、土木学会論文集，第359号/IV-3，1985年7月。
- 2) 東北流雪研究所，克雪街づくりへの提案，年月日なし。
- 3) 土屋雷蔵：道路除雪における堆雪に関する研究，東京大学学位論文，pp.125～129，1980年。
- 4) 建設省北陸地方建設局監修：流雪溝設計運営要領，北陸建設弘済会，p.33，1983年9月。

(1985.9.17・受付)