

## 地下水利用による無散水融雪工法の実用化に関する研究

熊谷元伸\*・野原以左武\*\*

国立防災科学技術センター雪害実験研究所

### **Studies on a practical use of snow melting system by using the heat of ground water through pipes**

By

**Motonobu Kumagai\*, Isamu Nohara\*\***

*Institute of Snow and Ice Studies, National Research Center  
for Disaster Prevention, Nagaoka, Niigata-ken, 940*

#### **Abstract**

Under the notion of prevention of ground subsidence, and preservation of ground water, ground water was circulated in a metal piping system laid to 7.5cm depth and 15 cm pitch in the pavement to melt away newly fallen snow on the pavement by the ground water heat. The ground water circulated in the piping system was returned into the ground.

The experiment was practiced in order to confirm snow melting effect in heavy snowfall regions by the snow melting system.

Snowfall onto the experimental pavement was completely melted away in the following conditions. Atmospheric temperature range was  $-1\sim-4^{\circ}\text{C}$ , circulating water temperature was  $13^{\circ}\text{C}$  at the inlet which turned into  $8^{\circ}\text{C}$  at the outlet, density of newly fallen snow was below  $0.07\text{g}/\text{cm}^3$  and snowfall intensity per hour was  $2\text{cm}/\text{hr}$ .

On the other hand, snowfall intensity per hour was  $2\sim3\text{cm}/\text{hr}$ , then snow condition on the pavement was of sherbet.

When snowfall intensity per hour was over  $3\text{cm}/\text{hr}$ , it was unable to melt away snow on the pavement due to lack of enough heat.

This snow melting system will be applicable to a parking lot, a side walk and a narrow street in spite of heavy snowfall regions.

---

\*第三研究室

\*\*前第三研究室(現在 範多機械株式会社)

## 1. ま え が き

地下水を利用した散水消雪工法は、構造が比較的簡単で消雪効果も大きいこと等から主に北陸地方の豪雪地帯において普及しているが、近年その汲上量が増大してきたため、地下水位の異常低下や地盤沈下等の問題が生じ、一部の地域では地下水の汲上げを規制している。

このような問題に対処するため、地下水を舗装盤内に埋設したパイプに循環させて、路面上の雪を融かす無散水融雪工法の研究が行われてきており、数多くの研究成果が発表されている(例えば、梅宮ほか、1986)。また、国立防災科学技術センター新庄支所においても無散水融雪工法の実験的研究が行われ、成果が得られている(中村勉ほか、1986)。これらの成果により、地下水を利用した無散水融雪工法は北海道、山形県、富山県で実用化されつつある。

しかし、新潟県の豪雪地帯では未だこのような工法を用いた実験研究が行われたことがなく、地下水熱でどの程度の融雪効果があるものか自然条件下で検証を行う必要があった。

このような背景の下に、1982～84年度に雪害実験研究所構内において温水を利用した無散水融雪の基礎実験を行い(野原、1984、1985)、この結果を踏まえ1985～86年度に、長岡市内に地下水を利用した無散水融雪実験施設を設置し、現場実験を行った。

本報告書は、とりあえず現場実験の結果とこの工法の実用化を図る上で必要と考えられる基礎資料をとりまとめたものである。

なお、この研究は科学技術振興調整費を用いて行ったものである。

## 2. 実験施設及び方法

### 2.1 無散水融雪実験施設

図1に示すような地下水還元方式無散水融雪歩道実験施設を1985年度に長岡市中島公園の脇の歩道に設置した。融雪路面の構造および規模は、コンクリート舗装で舗装厚は15cm、融雪路面の面積は約100m<sup>2</sup>である。融雪むらを防止するため路面を六つに分割し、それぞれのブロックに放熱管(内径25mmのガス鋼管)を櫛の歯状に埋設した。放熱管の埋設深さは図2に示すように路面から7.5cm、埋設間隔は15cmで、放熱管の延長は1m<sup>2</sup>当り約6.5mである。86年度には一箇所のブロックのみ(図1の⑥のブロックで面積は約12m<sup>2</sup>)の融雪能力を増やす目的で、放熱管の埋設深さを路面から3.5cm、埋設間隔を7.6cmとした。

このブロックの放熱管の延長は1m<sup>2</sup>当り約13mである。汲上井戸の深さは70m、還元井戸の深さは30mあり、それぞれの井戸の地層は図3に示すように、ほとんどが砂利又は砂礫層で途中に一部粘土混じり砂利層があり、透水性が悪い。

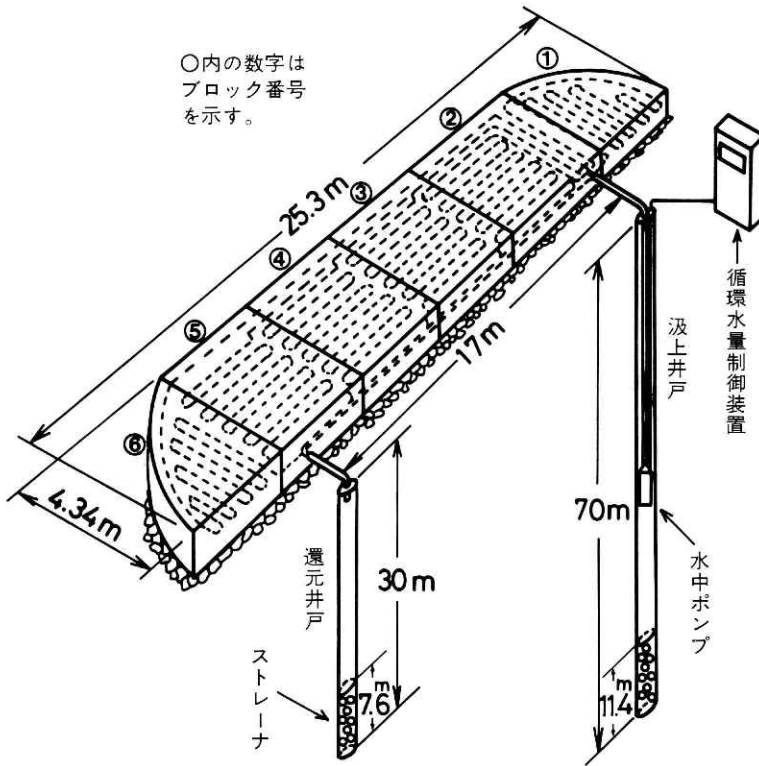


図1 地下水還元方式融雪歩道実験施設(設置場所 長岡市中島公園の脇)  
Fig. 1 Snow melting system using the heat of ground water for a sidewalk.

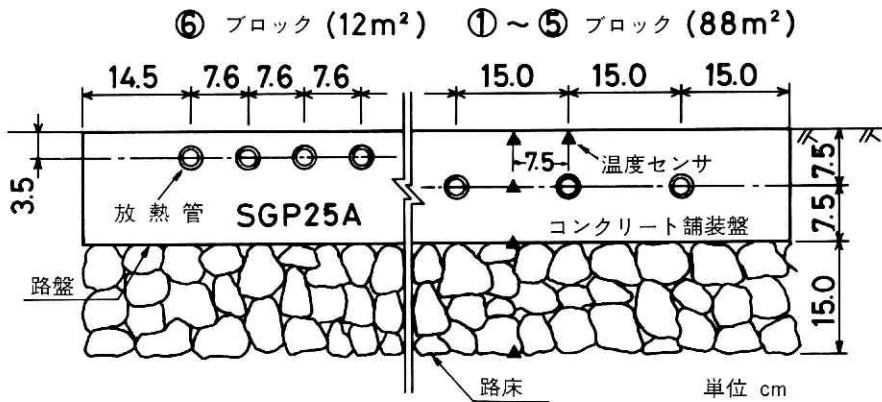


図2 融雪路面断面図  
Fig. 2 Sectional diagram of the two experimental snow melting pavements.

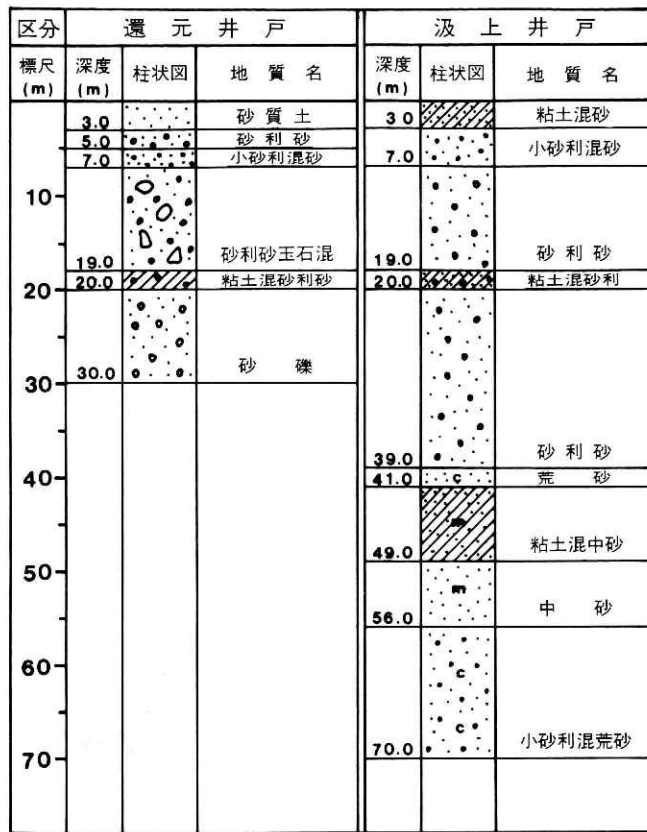


図3 汲上井戸及び還元井戸地質柱状図  
 Fig. 3 Geologic column of the ground where a pumping up well (right) and a return well (left) were dug.

## 2.2 実験方法

地下水の汲上水量(循環水量)を1985年度が図4, 86年度が図5の要領で制御した。融雪のための循環水量の制御要素は, 85年度では, 降雪の有無, 路面温度, 循環水出口温度の3要素としたが, 86年度では, 降雪強度に対応した制御を行えるように, 降雪の有無, 路面温度, 降雪継続時間の3要素とし循環水出口温度を削除した。

実験は1986年2月8日から3月8日までと, 87年1月10日から2月28日までのうち, 降雪のあった時間帯に行った。特に連続した降雪が予想される日には1時間ごとの観測及び計測を24時間行った。この間次の各項目の観測及び計測を行った。

1. 天候
2. 気温
3. 風速
4. 降雪の深さ
5. 新積雪の密度
6. 雪温
7. 積雪の深さ
8. 路面および舗装盤並びに路床路盤温度
9. 循環水入口温度および出口温度
10. 循環水量
11. 還元井戸水位
12. 歩行者数
13. 融雪状況。

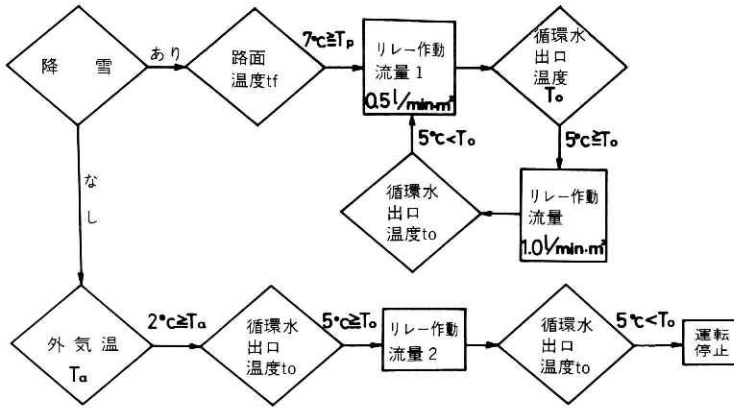


図4 循環水量自動制御フロー

Fig. 4 Automatic control diagram for pumping up (used in 1986).

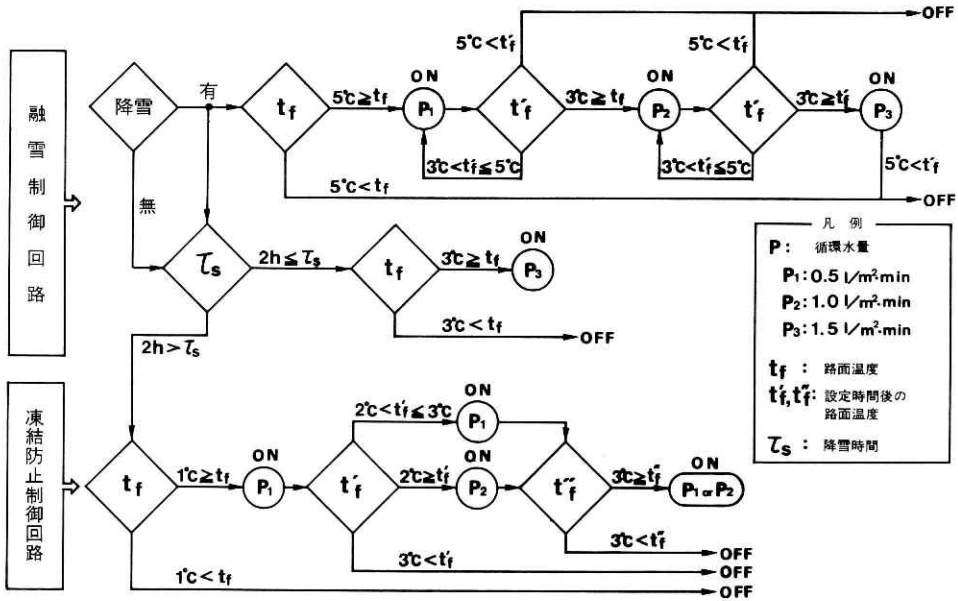


図5 循環水量自動制御フロー

Fig. 5 Automatic control diagram for pumping up (used in 1987).

### 3. 実験結果

図6は、1986年2月8日～3月8日の間で最も降雪の多かった2月9日の0時から23時までの24時間の実験結果である。また、写真1に8時から18時までの1時間毎の融雪、積雪の状況を示す。この日の24時間の積算降雪深さは41cmであった。この実験結果は、図4に示し

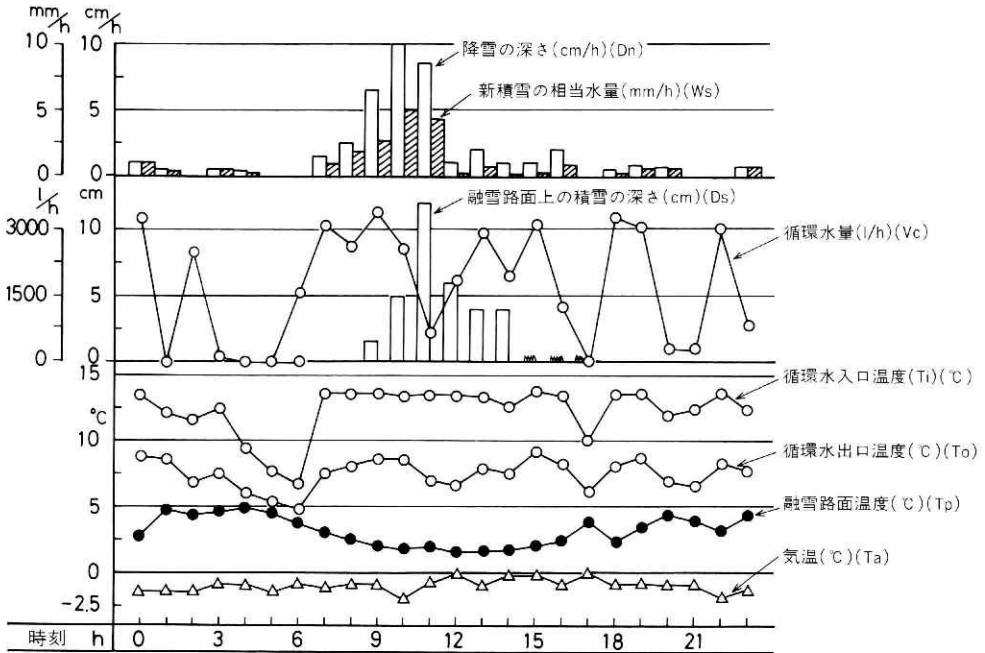


図6 24時間実験結果(1986年2月9日)

Fig. 6 Experimental conditions and the result of the snow melting system. Newly fallen snow depth (Dn), water equivalent of snow (Ws), snow depth on the pavement unable to be melted (Ds), circulating water volume (Vc) and water temperature (Ti : at the inlet, To : at the outlet), Temperature (Tp) on the pavement, atmospheric air temperature (Ta) from 0 hr to 23 hr, Feb.9, 1986.

た制御法によって得られたものであるが、この制御フローの中には、降雪強度(1時間当りの降雪深さ)に対応した制御要素が組込まれていないので、降雪が比較的多い時でも循環水量が少ないこともある。但し、11時に降雪が多いのに循環水量が極端に少ないのは、流量計の点検調整のため一時ポンプを止めたためである。

循環水入口温度はポンプ運転中において13~14°Cであった。この値は、実験期間中において変化が無かった。これは汲上井戸と還元井戸の深さが異なることや粘土混じり砂利層があり水が浸透しにくいなどのため還元水が汲上側の水脈に殆ど戻らず、途中の水脈に戻されたためであると考えられる。

還元水入口温度は、循環水量が約 $0.51/m^2 \cdot min$ (約3,000l/h)のときは8~9°Cであった。したがって循環水入口・出口の温度差は5°C前後である。この値は実用化設計を行う上で重要であるが、循環水量及び放熱管の埋設深さによって変化する。

路面温度は、降雪がないかまたは少ない1~6時及び17~23時には、3~5°Cと比較的高目に保たれているが、9~16時のように融雪路面上に積雪がある場合には2°C程度に保持されている。融雪効果については、0~8時の間に気温-1~-1.5°Cで0.3~2.5cm/h降雪があり、循環水量 $0.25 \sim 0.551/m^2 \cdot min$ (1,500~3,300l/h)で循環させると完全に融解した。9~

11時の3時間に気温 $-1 \sim -2^{\circ}\text{C}$ で $6.5 \sim 10\text{cm/h}$ の降雪があり、循環水量約 $0.1 \sim 0.55\text{l/m}^2 \cdot \text{min}$ ( $600 \sim 3,300\text{l/h}$ )で循環させた場合、融雪路面上に積雪があったが、12時以降は $1 \sim 2\text{cm/h}$ と比較的弱い降雪が続いたため、6時間後にはシャーベット状、8時間後には完全に融解した。

図7は、1987年1月9日～2月28日の間において、比較的まとまった降雪があった1月19日9時～1月20日9時までの24時間の実験結果である。24時間の積算降雪深さは約 $48\text{cm}$ であった。この実験結果は、図5の循環水量の制御法によって得られたものであるが、この制御フローの中には、降雪強度に対応した制御ができるように降雪時間の制御要素を組み込んである。図5において降雪時間が2時間以上のときに路面温度が $3^{\circ}\text{C}$ 以下であれば、 $1.5\text{l/m}^2 \cdot \text{min}$ の水量で循環する制御となっているが、この実験結果では2時間以上の連続降雪があったのは、19日の17時10分頃から19時40分頃の約2時間30分と20日の1時30分頃から5時までの約3時間30分で、雪が一時的に止んだ19日の19時40分と20日の5時の路面温度はそれぞれ $3.2^{\circ}\text{C}$ 、 $3.7^{\circ}\text{C}$ 、と $3^{\circ}\text{C}$ を超えていたため、ポンプは運転されず、また路面上に積雪もなかった。いずれにしても、87年の冬は少雪であったため、新規に開発したこの方式が降雪強度に対応できるかどうかの確認は困難であった。ただし、水量制御方式をできるだけ簡略化する

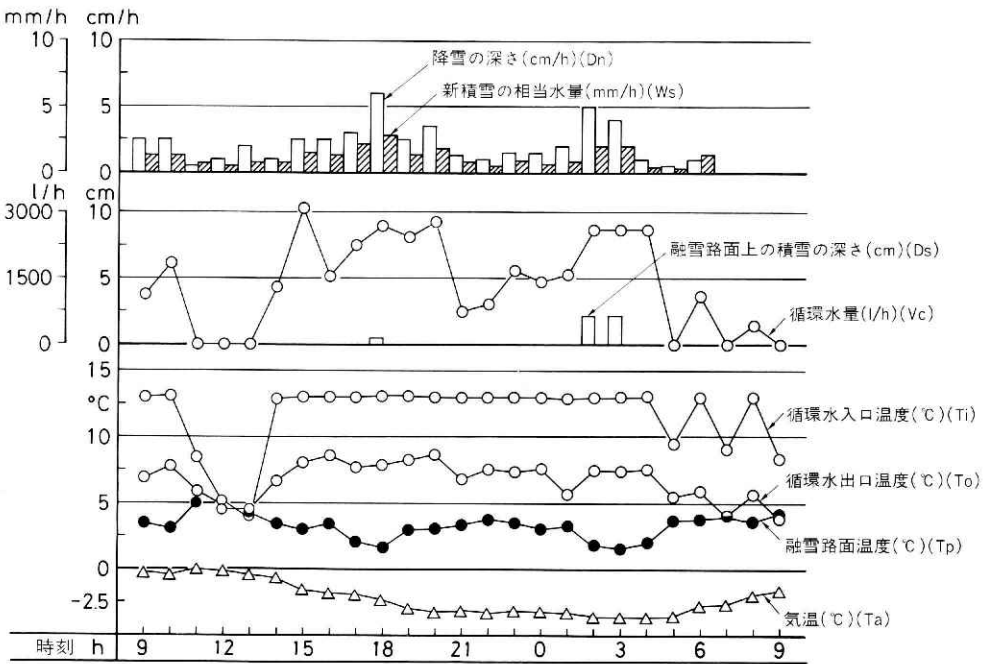


図7 24時間実験結果(1987年1月19日～20日)

Fig. 7 Experiment conditions and the result of the snow melting system. Newly fallen snow depth (Dn), water equivalent of snow (Ws), snow depth on the pavement unable to be melted (Ds), circulating water volume (Vc) and water temperature (Ti: at the inlet, To: at the outlet), Temperature on the pavement (Tp), atmospheric air temperature (Ta) from 9hr of 19th to 8hr of 20th, Jan. 1987.

こと、路面温度設定値を5～7°C程度とすること、降雪検知時間の設定値を30分～1時間程度とすることなどこの方式の実用化を図るために必要な知見を得ることができた。

循環水入口温度は、ポンプ運転中において13°Cでほぼ一定であった。この値は86年度の結果より多少低目であるが、循環水出口温度も多少低目にでているので、循環水入口、出口温度差は概ね5°Cで1986年の値と同値であった。

舗装盤及び路面、路床の各々の温度並びにその他の生のデータを付表1及び2に示す。舗装盤温度は、5.5～7.5°Cと2°C前後変動しており、また、路面温度に対し2～5°C高くなっているが、降雪がないか少ないほど路面温度が高いため、路面と舗装盤との温度差は小さくなる。また、路盤温度は6.5～8.5°Cと舗装盤温度より0.5～1°C程度高目に保持されている。路床温度は7～8°Cと高目に保持されかつ変動幅が小さい。また、路面及び舗装盤温度が変動しても路床温度はほとんど変動しないことから、路床への熱損失は比較的少ないものと考えられる。

1986, 87年の実験結果から融雪効果についてまとめると、概ね次のとおりである。

気温-1～-4°C、新積雪の密度0.07g/cm<sup>3</sup>以下において、降雪強度が2cm/h以下のとき、循環水量0.5l/m<sup>2</sup>・minで循環させると、路面温度が3～5°C、循環水入口、出口温度差が5°Cで完全に融解する。降雪強度が3cm/h以上の連続降雪の場合、路面温度が2°C程度に保持され、路面上に積雪が観測されることがある。但し、降雪強度が2～3cm/hでは歩行者の足跡はシャーベット状になり歩行には支障がない。

## 4. 考 察

### 4.1 熱収支計算式及び結果

#### 4.1.1 熱収支計算式

雪を融かすのに必要な熱量で大気に奪われる熱量を含めない熱量(融雪必要熱量)、循環水から放出される熱量(放熱量)並びに循環水と放熱管とコンクリート舗装盤を移動する熱量(熱移動量)をそれぞれ次の計算式により求めた。ただし、熱の移動は、循環水と路面との間に温度差があれば行われるが、ここでは降積雪があった時のみ行われるものとした。これは、融雪必要熱量を雪を融かすのに必要な熱量としたため、これに対応させたものである。また、放熱量は雪を融かすのに必要な熱量、大気及び地中に奪われる熱量などに置換されるものとした。

(1) 融雪必要熱量  $q_a$  kcal/m<sup>2</sup>・h

$$q_a = q_s + q_n - q_{in} \dots \textcircled{1}$$

$$q_s = C_s \cdot \Delta t \cdot S_d \cdot \gamma_s$$

$q_s$  : 顕熱..... kcal/m<sup>2</sup>・h



$C_s$  : 雪の比熱……………0.5kcal/kg/°C

$\Delta t$  : 雪温を 0°Cまで高める温度……………実測値°C

$S_d$  : 時間降雪深……………実測値m/h

$\gamma_s$  : 新積雪の密度……………実測値kg/m<sup>3</sup>

$$q_n = J \cdot S_d \cdot \gamma_s$$

$q_n$  : 融解熱……………kcal/m<sup>2</sup>・h

$J$  : 水の融解潜熱……………80 kcal/kg/°C

$q_{in}$  : 日射による融雪熱量……………路面に積雪があるとき日射量の10%が融雪に使われたと仮定し,降雪が完全に融解し路面が湿潤のとき日射量の20%が融雪に使われたと仮定した。

日射量は,雪害実験研究所構内の気象観測露場で観測したデータを用いた。1986年2月9日7時から16時までの日射量が803kcal/m<sup>2</sup>・dayで,このうち,89kcal/m<sup>2</sup>・dayが融雪に使われたと仮定し,1987年1月19日9時から16時までの日射量が790kcal/m<sup>2</sup>・dayで,このうち158kcal/m<sup>2</sup>・dayが融雪に使われたと仮定した。

(2) 放熱量  $q_d$  kcal/m<sup>2</sup>・h

$$q_d = M \cdot (t_i - t_o) / A \cdots \cdots \textcircled{2}$$

$M$  : 循環水量……………実測値l/h

$t_i$  : 循環水入口温度……………実測値°C

$t_o$  : 循環水出口温度……………実測値°C

$A$  : 融雪路面面積……………図1の①~⑤ブロックの合計88m<sup>2</sup>, ⑥ブロック12m<sup>2</sup>

(3) 熱移動量  $q_t$  kcal/m<sup>2</sup>・h

循環水を循環させると図8に示すように循環水,放熱管,コンクリート舗装盤にそれぞれ温度勾配が生じ,熱が移動する。

単位面積当りの熱移動量 $q_t$ は

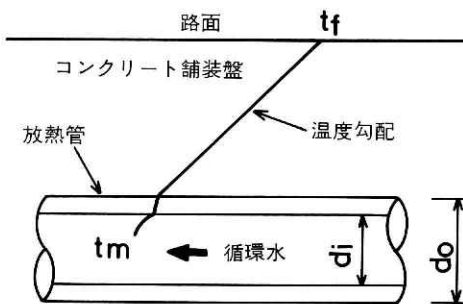


図8 温度勾配図  
Fig. 8 Schematic diagram showing temperature between pavement surface and circulating water.

$$qt = \frac{tm - tf}{\frac{P}{h \cdot \pi di} + \frac{P \cdot \log(do/di)}{Ks \cdot 2\pi} + \frac{P}{Kc \cdot S}} \dots\dots\dots ③$$

で表わされる。

tm : 循環水対数平均温度差……………°C

$$tm = \frac{ti - to}{\log(ti - to)}$$

- tf : 融雪路面温度……………実測値°C
- h : 循環水の熱伝達率……………後述 kcal/m<sup>2</sup>・h・°C
- Ks : 放熱管の熱伝導率……………46 kcal/m・h・°C
- Kc : コンクリートの熱伝導率……………1.2 kcal/m・h・°C
- di : 放熱管内径……………0.025m
- do : 放熱管外径……………0.034m
- P : 放熱管埋設間隔……………0.15m
- S : 放熱管と路面間の形状係数……………後述

分母は、放熱管内の循環水の熱抵抗+放熱管の熱抵抗+コンクリートの熱抵抗である。まず放熱管内の循環水の熱抵抗  $S/(h \cdot \pi di)$  を求めると、熱抵抗は管内の流れの状態、すなわち層流か、乱流かで大きく異なる。管内平均流速を0.28m/s、動粘性係数を  $1.31 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$  (10°Cにおいて)としてレイノルズ数を求めると5400となり、管内の流れは乱流と推測される。

乱流の場合の熱伝達率 h は

$$h = Kw \times \frac{0.0395 Re^{3/4} \cdot Pr^{1/3}}{di} \dots\dots\dots ④ \text{で表わされる。}$$

- Pr : プラントル数 =  $(3600 \cdot Cp \cdot \mu) / Kw$
- Cp : 定圧比熱……………0.9997 kcal/kg・°C (10°Cにおいて)
- μ : 粘性係数…………… $1.31 \times 10^{-3} \text{kg} \cdot \text{s}/\text{m}^2$  (10°Cにおいて)
- Kw : 熱伝導率……………0.505 kcal/m・h・°C (10°Cにおいて)

Pr = 9.34

$h \doteq 1,059 \text{kcal}/\text{m}^2 \text{h} \cdot \text{°C}$  となり

$$\frac{P}{h \cdot \pi di} = \frac{0.15}{1.059 \times \pi \times 0.025} \doteq 0.0018 \text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}/\text{kcal} \text{が得られる。}$$

次に放熱管の熱抵抗を求めると

$$\frac{P \cdot \log(do/di)}{Ks \cdot 2\pi} = \frac{0.15 \times \log(0.034/0.025)}{46 \times 2\pi} \approx 0.00016 \text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}/\text{kcal} \text{となる.}$$

コンクリートの熱抵抗  $\frac{P}{Kc \cdot S}$  の値を求めるには 2次元の熱流 ( $\frac{d^2t}{dx^2} + \frac{d^2t}{dy^2} = 0$ ) の問題を

解析する必要があるが、2次元の熱流を解析的に解くことは実用的に複雑すぎたり、解析的な解の得られない場合もあるため、他の有用な解法、例えば流束図示(flux plotting)、電気的相似(electrical analog)、弛緩(relaxation method)などが開発されているが、このうちの流束図示によってその値を求めることとする。

図9は路面上に積雪があると仮定したときの放熱管と路面間の等温線と熱流線を示したものである。

流束図示の方法は、任意の温度間隔数を選び、これに対応する等温線を描き、次に等温線と直角に交わるように熱流線を描く。ここで等温線と熱流線がどこでもできるだけ正方形になるように作図する必要がある。また、温度間隔数が多いほど精度が良くなる。図9において、任意の一小要素(四角形)を通る単位面積当り熱流 $\Delta qc$ の大きさは、

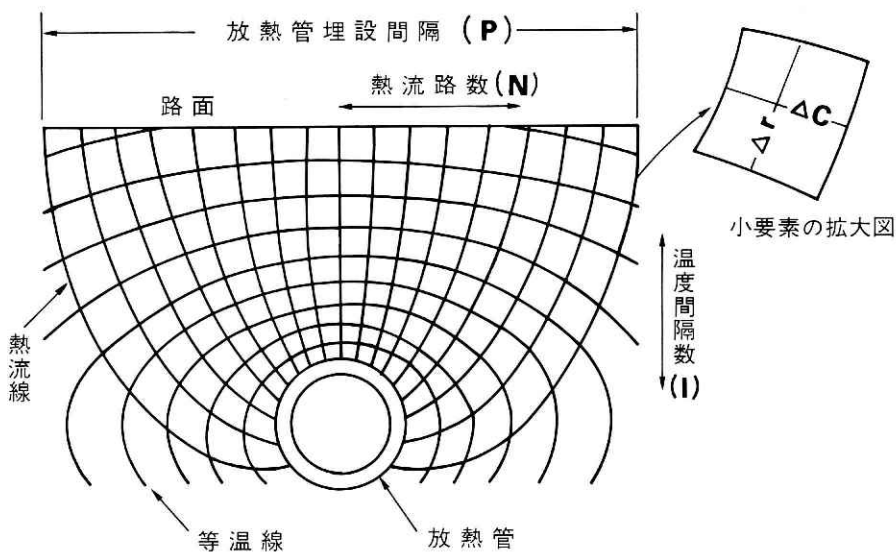


図9 放熱管と路面間の熱流束図

Fig. 9 Heat transfer between pavement surface and metal piping surface.

$$\Delta q_c = -K_c \Delta C \frac{\Delta t}{\Delta r \cdot P} \dots \dots \dots \textcircled{5}$$

ここで  $\Delta C$  : 小要素の平均幅  
 $\Delta r$  : 小要素の平均長さ  
 $\Delta t$  : 等温線の間の温度間隔

等温線及び熱流線は  $\Delta C = \Delta r$ ,  $\Delta t = (t_f - t_m) / I$  ( $I$  : 温度間隔数) のように描かれてあるから

$$\textcircled{5} \text{式は } \Delta q_c = -K_c \frac{(t_f - t_m)}{I \cdot P} \dots \dots \dots \textcircled{6} \text{となる.}$$

この式は、小要素を通過する熱流の大きさを表わす式であり、放熱管外周から路面への熱流  $q_c$  の大きさは  $\textcircled{6}$  式に熱流路数  $N$  を掛けたものである。

従って

$$q_c = N \Delta q_c = K_c \frac{N}{I} \cdot \frac{(t_m - t_f)}{P}$$

ここで  $\frac{N}{I} = S$  とすると、この  $S$  が放熱管と路面間の形状係数である。

図9より  $N = 16$ ,  $I = 9$  であるから形状係数は  $S = \frac{16}{9} \doteq 1.78$  となり、

コンクリート熱抵抗は

$$\frac{P}{K_c \cdot S} = \frac{0.15}{1.2 \times 1.78} \doteq 0.0702 \text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C} / \text{kcal} \text{となる.}$$

全熱抵抗のうち循環水の熱抵抗は乱流の場合比較的小さく、また放熱管の熱抵抗もガス鋼管等の金属を用いると微少である。従って、放熱管は熱伝導率の極めて小さな材料を選ばなければその熱抵抗は無視できる。無論銅のような熱伝導の優れたものを選ぶ必要もない。

従って熱移動量  $q_t$  は近似的に  $q_t = (t_m - t_f) / (1/K_c) = (t_m - t_f) / (\frac{P}{h \cdot \pi d_i} + \frac{P}{K_c \cdot S})$   
 $= (t_m - t_f) / 0.072$  で表わされる。

#### 4.1.2 計算結果と実験結果との比較

以上の三つの計算式から得られた結果と、実際の融雪状況との比較検討を行う。86年2月9日0時から23時までの24時間の累計融雪必要熱量  $\Sigma q_a$ , 累計放熱量  $\Sigma q_d$ , 累計熱移動量  $\Sigma q_t$  を求めプロットすると図10のようになる。 $\Sigma q_a \leq \Sigma q_t$  の時完全に融解し、 $\Sigma q_a > \Sigma q_t$  の時積雪の

状態となる。図6の実験結果では、0時から8時までと17時から23時までが、完全に融解し、15時、16時がシャーベット状になっていたが、熱収支計算結果では、0時から9時までと16時から23時までが $\Sigma q_a \leq \Sigma q_t$ であるので完全に融解し、10時から15時までは $\Sigma q_a > \Sigma q_t$ なので積雪の状態ということになる。融雪の状況は実験結果と熱収支計算結果に多少のずれがあるものの、ほぼ一致していると考えて良い。このように低熱源を利用する方式では、降雪の多いときには瞬時に融雪することは不可能で、積雪状態がある程度継続する。この継続時間 $\tau$ は1時間当り平均熱移動量を $q_{tm}$ とし、積雪状態が継続しているであろう間の累計融雪必要熱量を $\Sigma q_{as}$ とすると、 $\tau = \Sigma q_{as} / q_{tm}$ でおおよその値が求められる。

放熱量と熱移動量は、定常熱伝導状態(舗装盤内の温度分布が時間の変化に関係なく常に一定の状態。以下定常状態と略称する。)の時には、同じ値となるが、実際には殆どの場合、非定常熱伝導状態(時間の変化と共に舗装盤内の温度分布が変動する状態。以下非定常状態と略称する。)であるため、1時間ごとのそれぞれの値は同じにはならない。この放熱量と熱移動量の差は、その全部が無駄な熱量(大気に奪われる熱量)かというところ必ずしもそうではない。

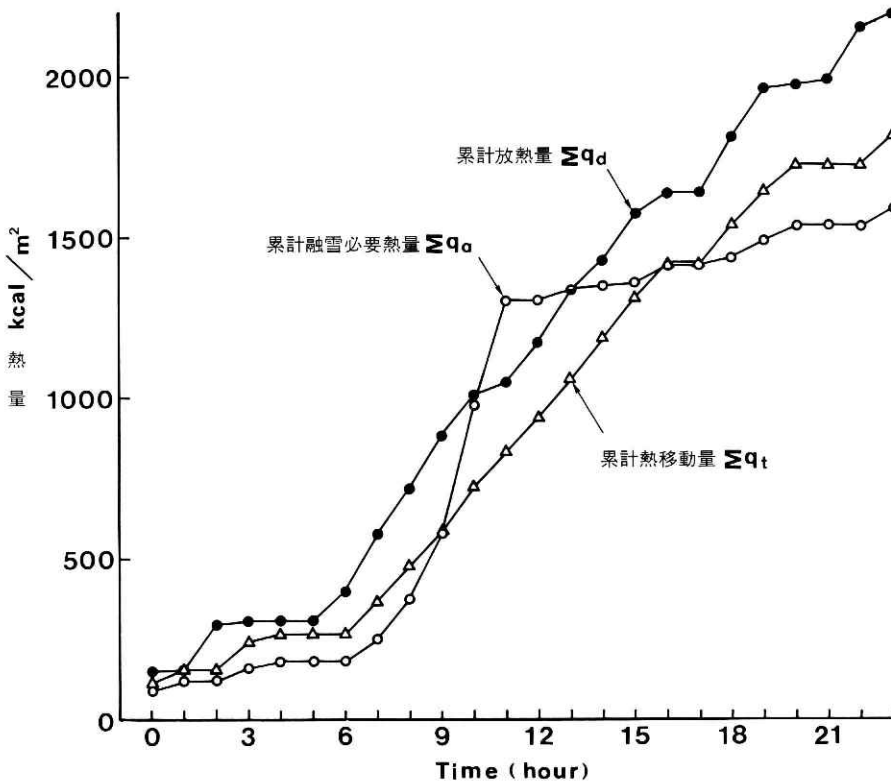


図10 24時間の累計放熱量、累計融雪必要熱量、累計熱移動量の関係(1986年2月2日)

Fig. 10 Relation between cumulative conductive heat and cumulative snow melting heat and cumulative heat transfer from 0hr to 23hr, Feb. 9, 1986.

降雪が弱く融雪必要熱量が小さいときには、放熱量の一部は舗装盤内を温める、いわゆる蓄熱をしているのである。その一例として、0時から1時の間放熱量に変化がない、すなわち1時の放熱量が0にもかかわらず、降雪があったため路面温度が低下し熱は移動している。これは0時以前の放熱量の一部が舗装盤内に蓄積されて、それが時間の経過とともに路面に移動してきたため、一時的に $\Sigma q_t > \Sigma q_d$ となったものと思われる。

2月9日0時から23時の最大放熱量は $176 \text{kcal/m}^2 \cdot \text{h}$  ( $\approx 205 \text{W/m}^2$ ) (7時)、最大熱移動量は $126 \text{kcal/m}^2 \cdot \text{h}$  ( $\approx 147 \text{W/m}^2$ ) (15時)であった。この値は、車道の融雪に利用されている電熱式ロードヒーティング ( $150 \sim 250 \text{W/m}^2$ ) の低位の熱量程度である。

図11は、87年1月19日9時から1月20日8時までの24時間の $\Sigma q_a$ 、 $\Sigma q_d$ 、 $\Sigma q_t$ を示したものである。図7より路面上に積雪があった時刻は、19日の18時と20日の2時と3時であるが、図11で路面上に積雪があると考えられるのは $\Sigma q_a > \Sigma q_t$ となっている19日18時から23時までと20日の2時と3時及び6時から8時までである。したがって、融雪状況は図7と図11で必ずしも一致していないが、図11より $\Sigma q_a$ と $\Sigma q_t$ の値が接近しているのも、実際の融雪状況と概ね一致していると考えてよく、融雪状況は熱収支計算によっておおよそ推測することができる。

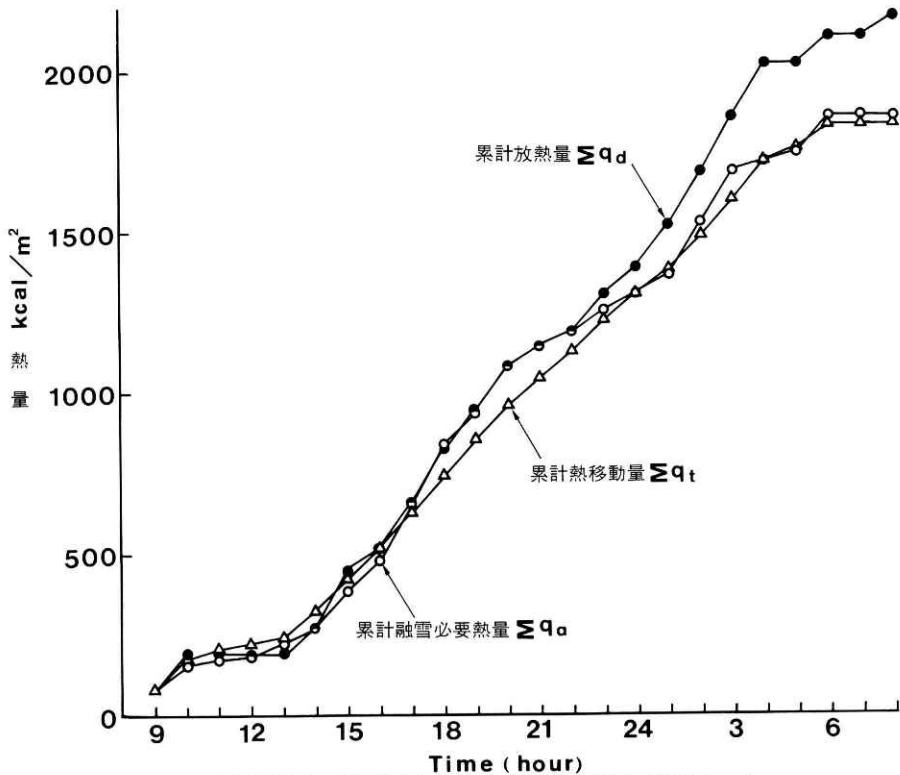


図11 24時間の累計放熱量、累計融雪必要熱量、累計熱移動量の関係(1987年1月19日～20日)  
 Fig. 11 Relation between cumulative conductive heat and cumulative snow melting heat and cumulative heat transfer from 9hr of 19th to 8hr of 20th, Jan. 1987.

1月19日9時から1月20日9時の間の最大放熱量は、 $172\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$  ( $=200\text{W}/\text{m}^2$ ) (19日15時)、最大熱移動量は $114\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$  ( $\approx 133\text{W}/\text{m}^2$ ) (19日19時)であった。

融雪熱効率(融雪必要熱量/放熱量)は86年2月9日0時から23時までが約73%, 87年1月19日9時から1月20日8時までが約86%と良好であった。

これは、循環水入口温度が低いため、路面温度も必要以上に高くなり、大気に無駄に放出される熱量が少ないことによるものと思われる。

#### 4.2 舗装盤内温度分布

舗装盤内部の温度分布については概ね図12に示すような状態になっているものと推測される。

図12-1のように降雪が無く路面が湿潤状態で、循環水が循環していない場合、路面のa点(放熱管の真上)とb点(放熱管と放熱管の間)の温度差は実測値からほとんどない。

図12-2のように降雪があるが路面が湿潤状態で、循環水が循環している場合、a点とb点の温度差は、実測値から概ね $0.5^\circ\text{C}$ 以下となっている。

図12-3のように路面上に積雪があり、循環水が循環している場合、a点とb点の温度差は実測値から概ね $0.5^\circ\text{C} \sim 1.0^\circ\text{C}$ となっている。

降、積雪がある場合のa点とb点の温度差は、放熱管の埋設深さ、埋設間隔が変われば当然変わってくるが、埋設間隔が広くなればなるほど大きくなる。即ちb点付近の温度が低くなるため融雪不能となり、融雪むらが生じることになる。

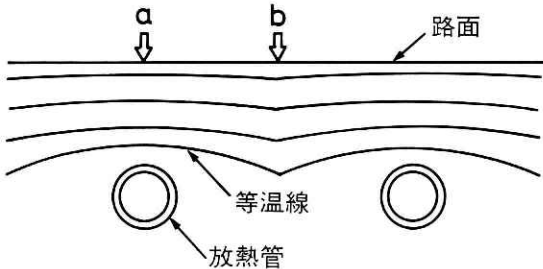


図12-1 降雪が無く路面が湿潤状態における温度分布

Fig12-1 Temperature distribution in case of no snow fall and wet surface condition.

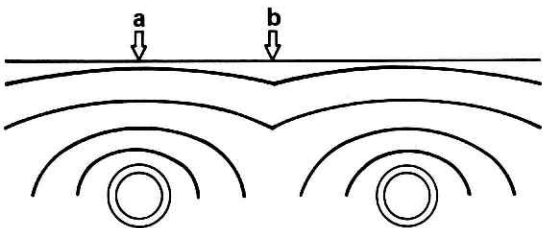


図12-2 降雪があり路面が湿潤状態における温度分布

Fig.12-2 Temperature distribution in case of snow fall and wet surface condition.

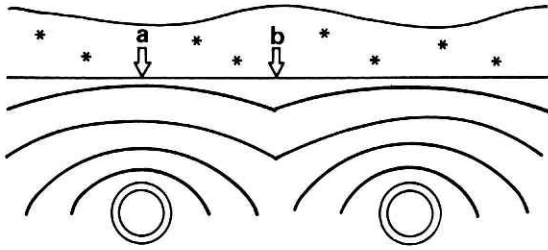
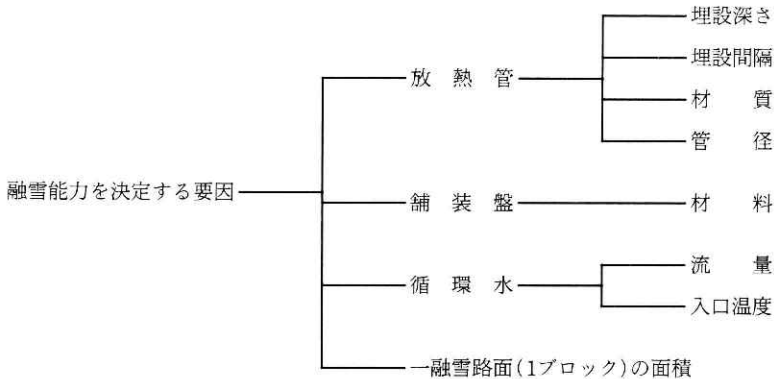


図12-3 路面上に積雪がある場合の温度分布  
 Fig. 12-3 Temperature distribution in case of snow cover on the pavement.

### 4.3 融雪能力を決定する要因

融雪能力を決定する要因として表1に示すような項目が考えられるが、地下水のような低温の自然熱源を加熱しないでそのまま融雪に利用する無散水方式の場合、温水ロードヒーティング方式と異なり、循環水入口温度を任意に設定できないため、実用化設計を行う上での自由度が一つ少なくなるが、期待した融雪効果を得るには、放熱管の埋設深さ、埋設間隔及び循環水量を合理的に設定する必要がある。

表1 融雪能力を決定する要因  
 Table. 1 Primary factors for decision of snow melting capacity.



舗装盤の材料は熱伝導率の高いものの方が融雪効果が良く、また短時間に定常状態となるが、アスファルト、コンクリート共に熱伝導率が低いため、熱が路面に移動し定常状態になるまで実験結果から概ね1時間程度(舗装材料、放熱管の埋設深さ、埋設間隔、循環水量によって変わる。)の時間を要している。このことは、舗装盤及び路面温度が低く保たれているところに降雪がある場合、それが弱い降雪であっても積雪となることがあるので、融雪効果は降雪直前の舗装盤及び路面温度も影響するものと考えられる。

したがって、低温熱源を豊富に利用できる場合には、ある程度の熱損失があっても舗装盤及び路面温度を比較的高目に設定しておくことが得策であると考えられる。

では、その温度をどの程度に保てば熱損失が少なく且つ融雪効果も高めることができるか



については、非定常熱伝導方程式を解いて求めることもできるが、実験結果に述べたように長岡市のような比較的気温の高い豪雪地方では、5～7℃に設定するのが望ましいと考えられる。これは、5℃未満に設定すると強い降雪のときは積雪となりやすく、また7℃を超えて設定すると舗装盤内の温度とほぼ同じ程度に保持しなければならなくなり、熱損失も大きくなるからである。

また、ポンプの運転・停止の制御要素を降雪の有無や路面温度等を組合せて用いるよりも、路面温度だけにすると制御が簡単になる。図3、図4の循環水自動運転制御フローは、実験研究のために複雑な回路を組んでいるが、実用段階では融雪能力をほぼ一定にすることを前提に考えると、降雪の有無に無関係に路面温度によってポンプを制御することが得策と考えられる。

#### 4.4 循環水量と融雪能力

循環水量を増すことによって、融雪能力がどの程度向上するか図13に示す熱収支モデルより推測する。図13より放熱管の微小長さ $dx$ における定常状態での熱収支は放熱量と熱移動量が等しいとして $q_{d1} - q_{d2} = -q_t \cdot dx \cdot P$ で表わされる。

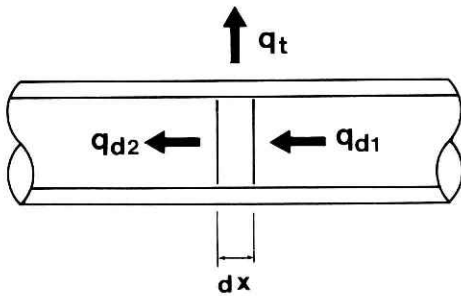


図13 熱収支モデル  
Fig. 13 Heat balance model.

$$M \cdot t - M \left( t - \frac{dt}{dx} dx \right) = - \frac{(t - t_f)}{\frac{P}{h \cdot \pi \cdot d_i} + \frac{P}{K_c \cdot S}} \cdot dx \cdot P$$

$t$  : 放熱管の長さ  $x$  における循環水の温度

その他の記号 : 先述

$$dt = - \frac{t - t_f}{M \cdot \left( \frac{1}{h \cdot \pi \cdot d_i} + \frac{1}{K_c \cdot S} \right)} \cdot dx$$

$$M \cdot \left( \frac{1}{h \cdot \pi \cdot d_i} + \frac{1}{K_c \cdot S} \right) = \lambda \text{ とすると}$$

$$\frac{dt}{t - t_f} = - \frac{1}{\lambda} dx$$

$$t - t_f = C \cdot \exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right)$$

$x = 0$  (放熱管の入口)のとき  $t = t_i$ であるから

$$t = (t_i - t_f) \cdot \exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right) + t_f \cdots \cdots \textcircled{7}$$

この式を用いて、循環水量を変化させたときの循環水出口温度と熱移動量を求めると図14のようになる。ただし、この図は循環水入口温度 $t_i$ を $13^\circ\text{C}$ 、路面温度 $t_f$ を $2^\circ\text{C}$ 、放熱管の延長 $x$ を $6.5\text{m}^2 \times 88\text{m}^2 = 572\text{m}$ として計算したものである。従って、循環水出口温度は $t_o = 11 \cdot \exp(-1192/M) + 2$ で表わされる。

この計算によると流量を2倍、3倍と増やしていても循環水出口温度も高くなり、放熱量及び熱移動量があまり増えないので、融雪能力(融雪可能な降雪強度)はほとんど向上しないことが分かる。

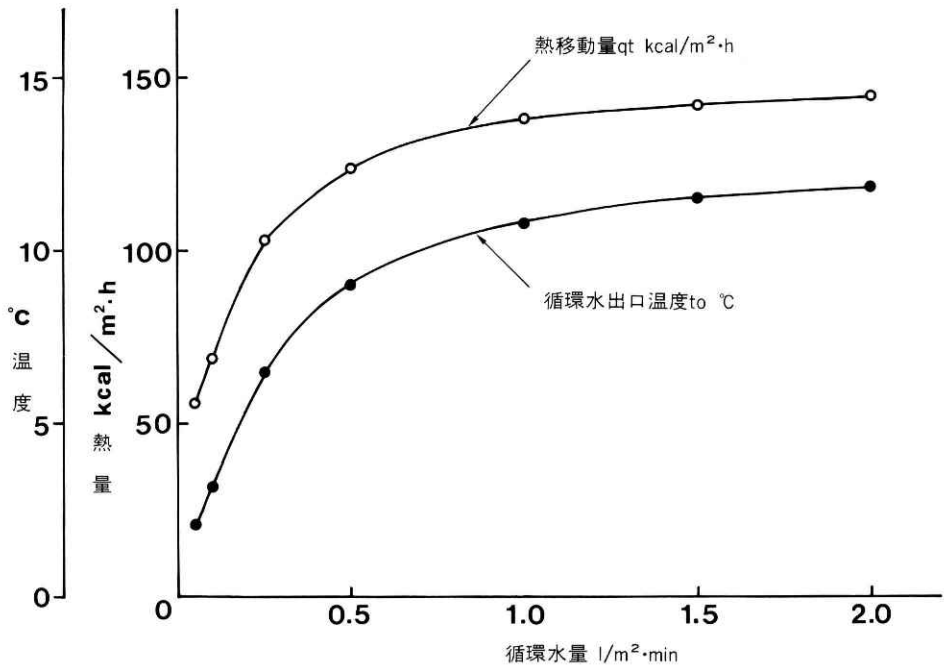


図14 循環水量と融雪能力(熱量)との関係

Fig. 14 Relation between circulating water volume and snow melting capacity of the system.

また、融雪能力を増やすため、一箇所のブロックの放熱管の埋設深さを浅くし、埋設間隔を狭くしたが、融雪効果が逆に劣っていた。この原因は、循環水入口付近では熱の上方への移動が盛んに行われるため循環水温がそこで急激に下がる。すなわち、循環水の持つ熱が入口付近でほとんど消費されるので熱が循環水出口付近まで充分到達せず、出口付近で融雪むらができるためである。この場合の循環水出口温度の実測値は、循環水量 $0.35\text{l}/\text{m}^2\cdot\text{min}$ 、循環水入口温度 $13^{\circ}\text{C}$ において、 $2^{\circ}\text{C}$ 程度と非常に低温であるため、循環水出口付近では融雪に必要な熱量がほとんど得られないことが分かる。したがって、循環水温が急激に下がらないように循環水量を増やし、 $1.0\text{l}/\text{m}^2\cdot\text{min}$ とすれば循環水出口温度の計算値は $T_o=9^{\circ}\text{C}$ (計算値は路盤・路床及び大気への熱損失がないものとし、更に定常熱伝導状態としたので高目に出るが実際には $7\sim 8^{\circ}\text{C}$ 程度と考えられる。)となり、融雪むらがなく融かすことができると考えられる。

#### 4.5 豪雪時における融雪効果

1986、87年の実験結果及び熱収支計算結果から熱移動量が最も大きかった86年2月9日15時の $126\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{h}$ を用いて、近年長岡市で最も降雪の多かった1984年12月下旬における融雪状況を推測すると図15に示すようになる。1週間で4mを超えるような猛烈な降雪があると、融雪路面上には一時的に数10cmの積雪があると思われる。ただし、実際の積雪の深さは日射及び積雪の沈降などの影響により、融雪不能な雪の積算深さの推測値よりもっと小さな値になると思われる。

このような融雪施設を車道に利用する場合、降雪の多い日には除雪を行う必要があると思われるが、除雪量が少ないので除雪作業は容易であろう。歩道に利用する場合、この程度の積雪の深さであれば、初めのうちは歩行に難渋すると思われるが、踏み固められればあまり支障がないと思われる。また、歩行者や自動車の攪乱効果が相乗されれば融雪は一層促進されるものと思われる。

### 5. あとがき

自然熱源を利用した無散水融雪施設は、強い降雪時には一時的に積雪となることもあるが、ある程度の時間を掛ければ完全に融解することができる。したがって、豪雪地帯であっても、駐車場、市街地の狭隘道路、各種施設構内道路、自然積雪のみを融雪する通勤通学歩道など一時的であれば多少の積雪があっても支障のない場所に利用できると考えられるが、無散水融雪方式は、散水消雪方式に比べ、同一面積において建設コストが5～6倍程度高くなるので、この方式の普及を図るには、コストの低減の研究開発が必要である。

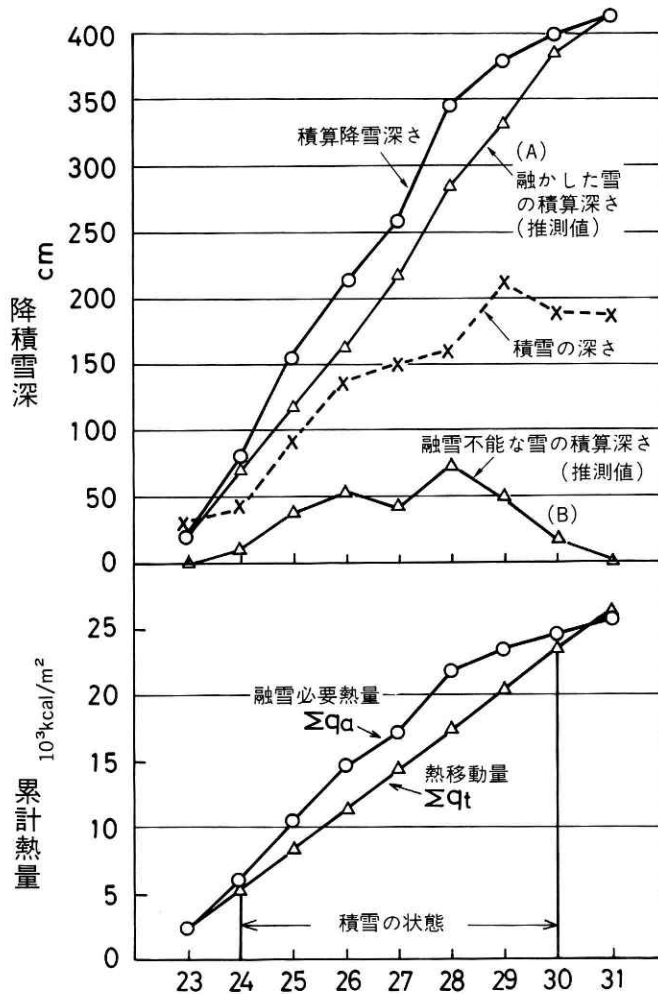


図15 1984年12月23日～31日間の融雪、積雪状況(推測)

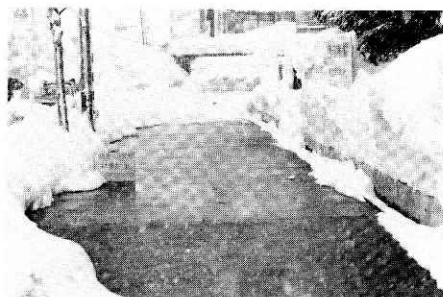
Fig. 15 Estimated amount of snow to be melted (A) by this system during the past heavy snowfall period from 23rd to 31st, Dec.1984.

The amount of the snow which shall not be melted completely was shown as well (graph B).

謝 辞

地下水還元方式無散水融雪実験施設の設置に当り、新潟県長岡市道路管理課及び緑地街路課には、設置場所の借用等で様々な便宜を図って頂き感謝いたします。

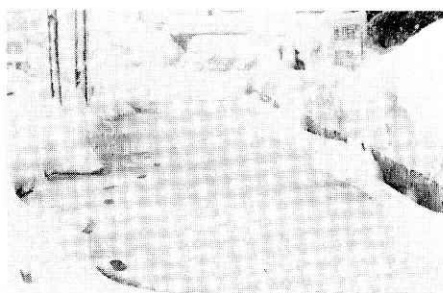
また、この報告書をまとめるに当り、当センター新庄支所雪害防災第一研究室室長中村秀臣博士及び雪害実験研究所の方々、特に雪害実験研究所所長中村勉博士から有益な御助言を頂きました。更に雪害実験研究所第三研究室小林俊市研究員から多大な御協力と有益な御助言を頂きました。記して感謝の意を表します。



8 時



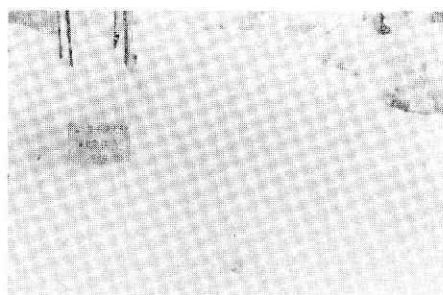
12 時



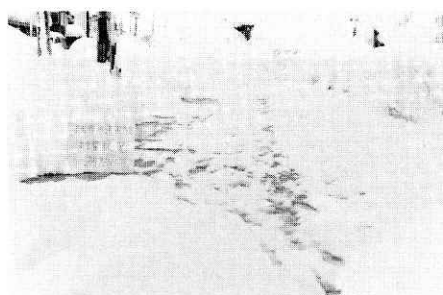
9 時



13 時



10 時



14 時



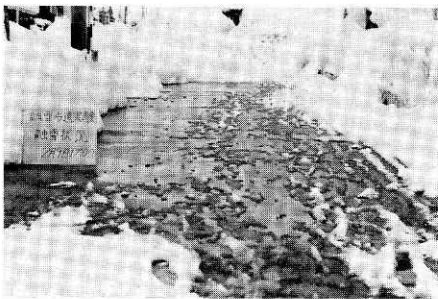
11 時



15 時



16 時



17 時



18 時

写真1 1987年2月9日8時～18時の融雪，積雪状況  
Photo 1 Melting snow condition from 8hr to 18hr, Feb.9, 1986.

時刻	天候	気温	風速	降雪の深さ	新積雪の密度	雪温	路面温度		舗装盤内温度	路盤温度	路床温度	循環水温度		循環水量	融雪状況
							直上	中間				入口	出口		
hr	W	Ta °C	Vw m/s	Dn cm/h	Ds g/cm <sup>3</sup>	Ts °C	Tpo °C	Tpm °C	Tpi °C	°C	°C	Ti °C	To °C	Vc ℓ/h	
0	曇	-1.5	0.45	1.0	0.11	-0.7	2.8	2.8	7.4			13.4	8.8	3,273	融解
1	〃	-1.5	0	0.5	0.07	-0.9	4.8	4.6	7.7			12.1	7.5	0	〃
2	〃	-1.5	0	0	—	—	4.5	4.2	6.9			13.1	7.2	2,483	〃
3	〃	-1.0	0	0.5	0.11	-1.0	4.8	4.2	7.2			13.2	8.3	187	〃
4	〃	-1.0	0	0.3	0.07	-0.8	4.9	4.9	6.8			9.4	5.9	0	〃
5	〃	-1.4	0	0	—	—	4.5	4.5	6.2			7.7	5.4	0	〃
6	〃	-1.0	0.15	0	—	—	3.7	3.6	5.6			13.5	7.5	1,555	〃
7	雪	-1.2	0	1.5	0.06	-0.7	3.4	3.0	6.3			13.5	7.7	3,033	〃
8	〃	-1.0	0	2.5	0.07	-0.7	2.7	2.3	7.0			13.5	8.2	2,614	〃
9	〃	-1.0	0	6.5	0.04	-0.6	2.3	1.8	7.0			13.5	8.5	3,336	積雪 2cm
10	〃	-2.0	0.15	10.0	0.05	-0.5	2.1	1.6	6.9			13.3	8.5	2,574	〃 5cm
11	〃	-0.8	0	8.5	0.05	-0.5	2.0	2.2	6.6			13.4	6.9	621	〃 12cm
12	〃	-0.1	0	1.0	0.02	-0.2	1.8	1.5	5.6			13.3	6.5	1,865	〃 6cm
13	〃	-1.0	0.15	2.0	0.03	-0.1	1.9	1.3	6.2			13.2	7.8	2,900	〃 4cm
14	〃	-0.3	0	1.0	0.02	-0.1	2.1	1.6	6.6			13.7	8.7	1,957	〃 4cm
15	〃	-0.3	0.3	1.0	0.02	-0.2	2.2	1.9	6.7			13.7	9.1	3,108	シャーベット
16	〃	-0.1	0.45	2.0	0.04	-0.2	2.3	2.2	7.0			13.3	8.1	1,243	〃
17	曇	-0.1	0	0	—	—	2.8	2.8	6.3			10.1	6.0	0	融解
18	雪	-1.0	0.45	0.5	0.04	-0.1	2.5	2.2	6.2			13.4	8.1	3,252	〃
19	曇	-1.0	0.45	0.8	0.08	-0.1	3.5	3.3	7.2			13.5	8.6	3,036	〃
20	〃	-1.0	0.15	0.7	0.08	-1.8	4.5	4.4	7.5			13.1	7.8	272	〃
21	〃	-1.0	1.20	0	—	—	4.0	3.9	6.8			13.3	7.2	272	〃
22	〃	-2.0	0.3	0	—	—	3.2	3.0	6.3			13.6	8.2	3,008	〃
23	雪	-1.5	0.15	0.7	0.11	-2.4	4.3	4.1	7.3			13.1	8.6	837	〃

付表1 1986年2月9日の24時間実験結果表  
(路盤, 路床には温度センサを埋込んでいないので温度の測定をしなかった.)

Table. 1 Summary of the experiment conditions.  
Weather (W), atmospheric air temperature (Ta), velocity of the wind (Vw), newly fallen snow depth (Dn), density of the newly fallen snow (Ds), snow temperature (Tc), temperature on the pavement (Tpo : at the piping system overhead, Tpm : at the piping system middle), temperature in the pavement (Tpi), circulating water temperature (Ti : at the inlet, To : at the outlet) and water volume (Vc) from 0hr to 23hr, Feb. 9, 1986.

時刻	天候	気温	風速	降雪の深さ	新積雪の密度	雪温	路面温度		舗装盤内温度	路盤温度	路床温度	循環水温度		循環水量	融雪状況
							直上	中間				入口	出口		
hr	W	T <sub>a</sub> °C	V <sub>w</sub> m/s	D <sub>n</sub> cm/h	D <sub>s</sub> g/cm <sup>3</sup>	T <sub>s</sub> °C	T <sub>po</sub> °C	T <sub>pm</sub> °C	T <sub>pk</sub> °C	T <sub>b</sub> °C	T <sub>g</sub> °C	T <sub>i</sub> °C	T <sub>o</sub> °C	V <sub>c</sub> ℓ/h	
9	雪	-0.2	0	2.5	0.05	-0.1	4.0	3.5	6.4	7.1	7.5	13.0	6.9	1,132	融解
10	〃	-0.4	0.15	2.5	0.05	-0.1	3.4	3.1	6.8	7.4	7.5	13.1	7.8	1,825	〃
11	〃	0	0	0.5	0.13	-0.1	5.0	4.9	6.7	7.7	7.5	8.9	5.9	0	〃
12	〃	0.1	0.15	1	0.05	0	5.0	4.8	6.2	7.2	7.5	5.1	4.9	0	〃
13	〃	-0.4	0	2	0.04	-0.1	4.6	4.3	5.9	6.8	7.5	4.0	4.6	0	〃
14	〃	-0.6	0.3	1	0.08	-0.1	3.7	3.5	5.5	6.5	7.4	12.9	6.7	1,296	〃
15	〃	-1.5	0	2.5	0.06	-0.4	3.5	3.0	6.4	7.0	7.2	13.0	8.1	3,090	〃
16	〃	-1.8	0	2.5	0.05	-0.5	3.9	3.4	7.4	8.0	7.3	13.0	8.6	1,545	〃
17	曇	-1.9	0	3	0.07	-0.4	2.8	2.1	6.9	7.9	7.3	13.0	7.7	2,240	〃
18	雪	-2.3	0	6	0.04	-0.4	2.5	1.7	7.0	7.9	7.3	13.0	7.9	2,688	積雪 0~0.3cm
19	〃	-2.9	0	2.5	0.05	-0.4	2.6	2.0	7.0	8.1	7.4	13.1	8.3	2,438	融解
20	〃	-3.2	0	3.5	0.05	-0.4	3.3	2.8	7.4	8.2	7.4	13.0	8.7	2,782	〃
21	〃	-3.1	0	1.3	0.06	-0.1	3.8	3.4	7.4	8.6	7.8	13.0	6.8	742	〃
22	〃	-3.3	0	1	0.05	-0.3	4.1	3.8	7.0	8.1	7.7	13.0	7.6	922	〃
23	〃	-3.1	0	1.5	0.06	-0.1	3.8	3.5	6.8	7.7	7.7	13.0	7.4	1,686	〃
0	〃	-3.2	0	1.5	0.04	-0.7	3.6	3.1	7.3	8.2	7.8	13.0	7.6	1,438	〃
1	〃	-3.3	0	2	0.04	-0.7	3.7	3.3	6.9	7.9	7.8	12.9	5.7	1,591	〃
2	〃	-3.6	0	5	0.04	-1.0	2.6	1.8	7.1	7.9	7.6	13.0	7.5	2,622	積雪 0.5~2.0cm
3	〃	-3.6	0	4	0.05	-1.0	2.4	1.6	7.1	8.2	7.6	13.0	7.4	2,622	〃 0.5~2.5cm
4	〃	-3.6	0	1	0.04	-1.0	2.5	1.7	7.0	8.2	7.7	13.1	7.6	2,622	融解
5	〃	-3.5	0	0.5	0.06	-0.9	4.0	3.7	7.3	8.4	7.9	9.5	5.5	0	〃
6	曇	-2.7	0	1	0.14	-0.7	4.1	3.8	6.5	7.6	7.9	13.0	5.9	1,097	〃
7	〃	-2.6	0.3	0	0	-0.6	4.3	4.2	6.7	7.7	8.0	9.1	4.1	0	〃
8	〃	-1.9	1.2	0	0	-0.6	4.2	3.9	6.3	7.2	7.9	13.0	5.7	727	〃

付表2 1987年1月19日~20日の24時間実験結果

Table. 2 Summary of the experiment conditions.

weather (W), atmospheric air temperature (T<sub>a</sub>), velocity of the wind (V<sub>w</sub>), newly fallen snow depth (D<sub>n</sub>), density of the newly fallen snow (D<sub>s</sub>), snow temperature (T<sub>s</sub>), temperature on the pavement (T<sub>po</sub> : at the piping system overhead, T<sub>pm</sub> : at the piping system middle), temperature in the pavement (T<sub>pi</sub>), circulating water temperature (T<sub>i</sub> : at the inlet, T<sub>o</sub>: at the outlet) and water volume (V<sub>c</sub>) from 0hr to 23hr, Feb.9, 1986.



引用文献

- 1) 熊谷元伸・栗山弘・野原以左武(1986)：地下水利用による無散水融雪の実用性，第11回雪害防災研究発表会，32-37.
- 2) 熊谷元伸・栗山弘・野原以左武(1987)：地下水利用による無散水融雪の実用性，第3回雪工学シンポジウム論文報告集，95-100.
- 3) 野原以左武・栗山弘(1986)：地下水利用による融雪方式の研究第I期，科学技術振興調整費による研究成果報告，科学技術庁，1-15.
- 4) 野原以左武(1984)：コンクリート舗装版およびアスファルト舗装版に埋設した温水パイプの融雪特性について，日本雪氷学会秋季大会講演予稿集，講演番号169.
- 5) 野原以左武(1985)：特殊ナイロンパイプを使用したアスファルト舗装の温水融雪試験，日本雪氷学会秋季大会講演予稿集，講演番号136.
- 6) 熊谷元伸・野原以左武(1987)：地下水利用による無散水融雪実験，日本雪氷学会全国大会講演予稿集，講演番号241.
- 7) 梅宮弘道(1986)：無散水型地下水融雪法，雪氷防災(高橋博・中村勉他編・著)，302-313. 白亜書房.
- 8) 安濃恒友(1986)：家庭における地下水利用による融雪，雪氷防災(高橋博・中村勉他編・著)
- 9) 中村勉・中村秀臣・阿部修(1986)：風力・熱エネルギー利用技術に関する研究調査報告書，科学技術庁，1-8.
- 10) 大浦浩文・小林大二・小林俊一(1967)：雪面を覆うビニール布およびアルミ箔の融雪に及ぼす影響，低温科学，物理編第25輯，219-220
- 11) 日本建設機械化協会編(1977)：新防雪工学ハンドブック，334. 森北出版
- 12) 日本機械学会編(1986)：伝熱工学資料(改訂第4版)，317，322.
- 13) J.P.ホールマン著，平田賢監訳(1985)：伝熱工学(上)，178. プレイン図書出版K.K
- 14) ギート著，横堀進・久我修共訳(1966)：基礎伝熱工学，53-56. 丸善K.K
- 15) 山田穰・五十嵐高志・納口恭明・木村忠志・清水増治郎・野原以左武・小林俊市(1985)：長岡における積雪観測資料(9)，防災科学技術研究資料，第100号，5.

(1987年12月1日 原稿受理)