

地下水を利用した節水型融雪システムの開発

宮本重信*

地下水利用の融雪について①歩道は舗装に埋設された放熱管に地下水を流し融雪し、車道はその使用後の水を散水して融雪する②放熱管とタイルを組み込んだ高熱伝導コンクリート・ブロックの融雪歩道③スプリンクラーによるムラのない均一な車道散水融雪④従来の降雪センサーでなく融雪路面の積雪を感知するセンサーによる融雪装置の運転などを組み合わせることで、節水と水はねのない歩きやすい歩道を安価に実現するシステムの開発を行ってきた。本論ではこの融雪の熱的解析と実測、節水効果、施工、運転管理などについて述べる。

Key Words : snow-melting system, snow cover sensor, sprinkler, groundwater

1. まえがき

雪国では地下水を使った融雪が普及しているが、過剰揚水による地盤沈下から節水が課題となっている。更に、散水融雪時の水はねが歩行者に嫌われ、歩道の無散水融雪化も課題となっている。この環境と人にやさしいという二つの課題を低コストで実現するため、筆者は次の五つの構成からなる融雪システムを考案し、開発・施工・管理してきた¹⁾。

- ①歩道は舗装に埋設された放熱管に地下水を流し融雪し、車道はその使用後の水を散水し融雪する。
- ②歩道はガス・水道などの工事で将来掘削しても再利用できるように、また工期短縮のため、放熱管を組み込んだパネルブロックとする。
- ③このパネルブロックなどの舗装体は地域に産する珪石を骨材に使用し、熱の伝導を良くする。
- ④従来の車道へのノズル散水では車の通らない路側は水筋しか溶けないので、こうした溶けムラをなくすためスプリンクラーでの散水を行う。
- ⑤従来融雪装置は雪が降っているかどうかを感知するセンサーで運転されていたが、路面の雪が溶けたかどうかを感知するセンサーを試作し、フィードバック機能を持った運転にする。

この五つをシステムとして示したのが図-1で、地下水の熱をハード・ソフトの両面でムダ・ムラなく利用し節水しようというものである。また、この節水化は井戸・ポンプ・電気設備を縮小し、低コスト化となる。

ここでは、このシステム開発に関連して行った熱解析と実験、および施工と運転管理で得られた知見を述べる。

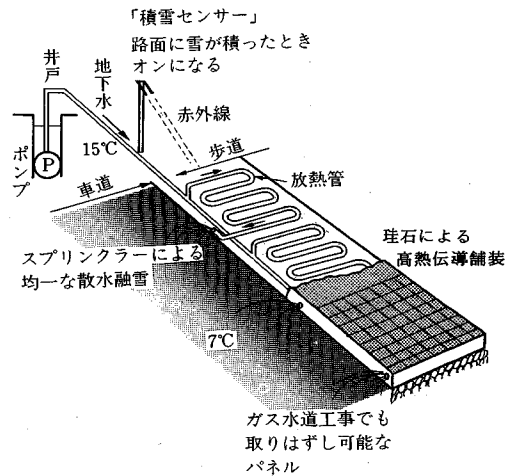


図-1 システム概念図

2. 放熱管方式融雪（歩道部）の熱解析と実測

放熱管方式無散水融雪（歩道部）の開発では、放熱管の種別、舗装の熱伝導率、流量などの条件によって、融雪能力がどのように変化するかを求める必要があった。その能力算定は放熱管出口水温を求めることになり、車道の融雪能力を求める上でも必要であった。そこで熱解析を行い、実験で検証した。

(1) モデル式

無散水融雪では、放熱管の舗装表面までのかぶりがない場合には定常条件で考えればよい²⁾。これまでの融雪の設計では、舗装表面の温度を0~2°Cに設定するとされ、その範囲の何°Cとするかは明らかにされてなかった³⁾⁻⁵⁾。そこで、筆者は融雪中の積雪と舗装表面との間に熱抵抗があるとして次のモデル式を考えた。この方法なら舗装表面温度を決めることなく融雪時の積雪温度を0°Cとして、流量・水温・放熱管の種別と設置位置・舗

* 正会員 福井県雪対策技術センター
(〒910 福井市春日3-303)

装体の熱伝導率などから融雪能力 q_{uo} が求められる。

$$q_{uo} = Q_0 \cdot \rho \cdot C_p \cdot f \cdot [T_{pi} - \{f \cdot T_s + (1-f) \cdot T_g\}] \cdot \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{U_u}{Q_0 \cdot \rho \cdot C_p \cdot f}\right) \right\} + U_u \cdot (1-f) \cdot (T_g - T_s) \quad (1)$$

$$T_{p0} = [T_{pi} - \{f \cdot T_s + (1-f) \cdot T_g\}] \cdot \exp\left(-\frac{U_u}{Q_0 \cdot \rho \cdot C_p \cdot f}\right) + \{f \cdot T_s + (1-f) \cdot T_g\} \quad (2)$$

$$f = \frac{U_u}{U_u + U_1} \quad (3)$$

$$U_u = \frac{1}{\frac{P_p}{\pi \cdot h \cdot D_i} + \frac{P_p \cdot \log(D_0/D_i)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_p} + \frac{P_p}{\lambda_{cu} \cdot S_u} + \frac{1}{S_n}} \quad (4)$$

$$U_1 = \frac{1}{\frac{P_p}{\pi \cdot h \cdot D_i} + \frac{P_p \cdot \log(D_0/D_i)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_p} + \frac{P_p}{\lambda_{cl} \cdot S_1}} \quad (5)$$

ここに、 q_{uo} ：単位面積当り舗装上面への放熱量(融雪熱量)

Q_0 ：単位面積当り流量

ρ ：水の密度

C_p ：水の比熱

T_{pi} ：放熱管入口の水温

T_{p0} ：放熱管出口水温

T_g ：着目する路盤温度

T_s ：溶けている雪の温度(0°C)

U_u ：管内水から舗装面上の雪までの総括熱通過率

U_1 ：管内水から着目する路盤までの総括熱通過率

P_p ：放熱管配管間隔

D_0 ：放熱管外径

D_i ：放熱管内径

λ_p ：放熱管の熱伝導率

h ：放熱管内を流れる水と放熱管との熱伝達率

λ_{cu} ：放熱管から舗装表面までの舗装の熱伝導率

λ_{cl} ：放熱管から着目路盤までの舗装の熱伝導率

S_u ：放熱管から舗装表面までの二次元形状係数⁶⁾

S_1 ：放熱管から着目路盤までの二次元形状係数⁶⁾

S_n ：雪と舗装表面の間の熱伝達率である。

(2) 実験

a) 舗装と雪との間の熱伝達率の計測

雪と舗装表面の間の熱伝達率を求めるため図-2の実験装置で実験した。暖冬で降雪での実験を十分行えなかったことと実験の再現性を得るため、残雪のざらめ雪

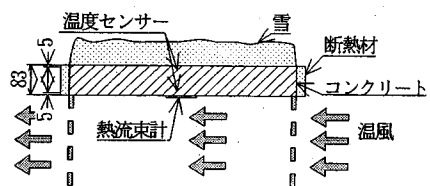


図-2 雪と舗装表面の間の熱伝導率計測装置

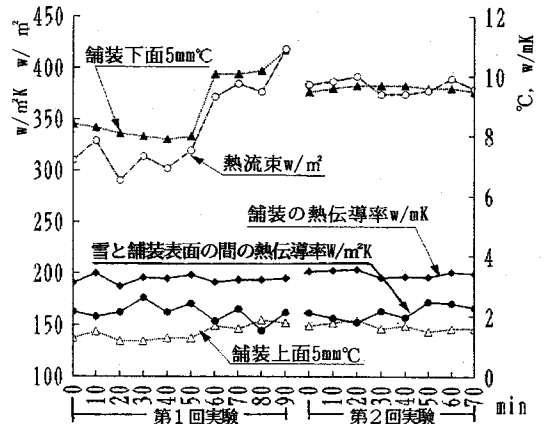


図-3 雪と舗装表面の間の熱伝導率計測結果

をコンクリート表面に載せて融雪した。定常状態になったと考えられる融雪開始から2時間以降についてデータを取り、コンクリート内部の温度分布は直線的であるとしてコンクリート上面側下面側の二点の実測温度からコンクリート表面温度を推定した。また、融雪中の雪を0°Cとし、コンクリート下面に張り付けて計測した熱流束は舗装と雪との間の熱流束に等しいことからコンクリートと雪との間の熱伝達率を熱流束/(舗装表面温度-0°C)で174 W/m²Kであると推定した⁷⁾。更にコンクリートの二点の温度と熱流束から、そのコンクリートの熱伝達率を求めた。その値は、ヒートプローブ法(QTM迅速熱伝導率計)で計測した値3.26 W/mKとほぼ一致し、計測の適正さが裏付けられた。図-3は、これらの実験を整理したものである。なお、降雪直後の新雪と舗装表面との熱伝達率については次項b)の実験からの逆算で290 W/m²Kと推定した⁷⁾。なお翌年図-2で温風を温水に替えたほぼ同様な福原輝幸氏による降雪直後の新雪での実験で、ほぼ近い253.9 W/m²Kとの結果が得られた⁸⁾。

b) 放熱管・舗装・水温・水量を変えての融雪実験によるモデル式の検証

図-4、表-1の設備などを用いて、放熱管の種類・舗装の種類・水温・水量を変え融雪し、出口の水温を計測した。表-1の設備①を用いて、1989年1月27日に水温16°C流量9 cm²/(m³s)を流して、雪が1 cm積もってから融雪を始め、4時間で降雪を含め14 cmの雪を溶

表-1 設備仕様

設備	舗装		放熱管				位置	
	種別	熱導率 w/mK	種別	熱導率 w/mK	外径 mm	内径 mm	Du mm	D1 mm
①	プレキャスト珪石コンクリ	3.26	銅管	442	15.9	14.3	40.0	43.0
②	現場打設コンクリート	1.51	架橋ポリエチレン管	0.42	17.0	13.0	57.0	63.0
③	現場打設コンクリート	1.51	コルゲート・ステンレス管	16.3	13.1	12.5	58.5	61.5
④	プレキャスト珪石コンクリ	3.26	コルゲート・ステンレス管	16.3	13.1	12.5	38.0	45.0

※ コルゲート・ステンレス管の外径は規格値

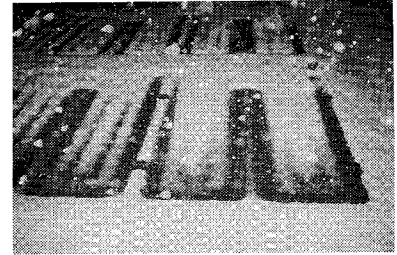


写真-1 融雪状況 A

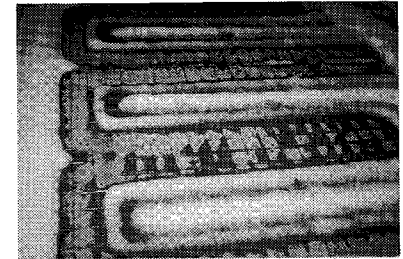


写真-2 融雪状況 B

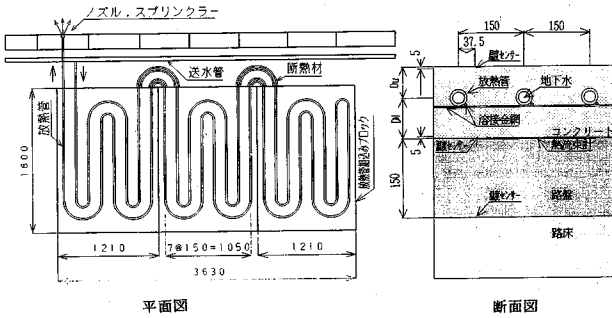


図-4 設備構造図

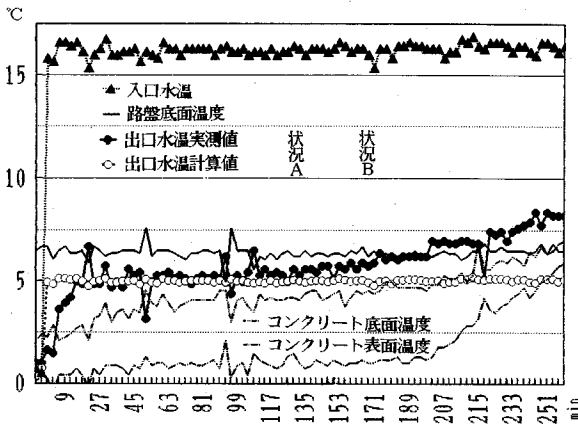


図-5 放熱管融雪のケースヒストリー

かしたケースヒストリーが図-5である。図-5には、計測した舗装の熱伝導率、新雪と舗装との熱伝達率 $253.9 \text{ W/m}^2\text{K}$ と前述のモデル式を用いて出口水温を計算し、その計算値を○で、その実測値を●で示した。融雪開始後20分から雪が溶け路面の約60%が露出した写真-2の状態まで、計算値と実測値は良く一致している。その後は、雪が降り止み積雪が次第になくなったので、融雪を前提とした計算は実測値と乖離し、路面の約90%が露出し約80%が乾燥した200分以後は舗装表面温度も上昇しはじめた。

このような降雪時の融雪実験を水量・水温を変えて5ケース実施した。さらに、残雪のざらめ雪を融雪路面に載せて、放熱管・舗装・水温・水量を変えて11ケースの実験を行った^{7),9)}。その各々の路面露出が60%以内での実験結果を平均値で一覧表としたのが図-6である。条件を変えたこれらの計算値はどれも実測値とよく一致し、モデル式や定数が適切であることが検証された。

なお、実際の設計に際して必要とされる路盤底面の温度は、融雪開始から終了までに図-5にみられるようにほとんど上昇しない。更に、この路盤底面温度は、上面放熱量に大きな影響を与えないので、福井では安全側に $3\sim 4^\circ\text{C}$ を見込めば良いと考えられる。

3. 融雪歩道のハード面での開発

(1) コンクリートの高熱伝導化

舗装の熱伝導率を高くするために、珪石骨材と安山石骨材との比較、現場打設コンクリートとプレキャストコンクリートなどの熱伝導率を計測し比較した。結果は、表-2のとおりで、一般的なコンクリートの熱伝導率¹⁰⁾に比べ歩道舗装のコンクリートは低い値となった。なお、福井県産の珪石を骨材とすることで、安価に高熱伝導舗装が得られた。

(2) パネル・ブロック化

放熱管方式の融雪歩道は高価で面的敷設となることから、ガス・水道などの工事で将来掘り返されても再利用できることが望ましい。そこで、内部に放熱管を表面にはタイルを組み込んだ広さ約 2 m^2 のコンクリート舗装体を工場で製造し、現地で据え付けた(写真-6)。工場では、タイルを下向きに敷き、その上に放熱管を並べ、珪石コンクリートを流し込んだ。工場では十分な振動が与えられるなどで、表-2に示すように、現場打設に比べ1.3倍の熱伝導率が得られた。

従来のプレキャストによらない施工では、放熱管の配管、コンクリートの打設と養生、雨を避けてモルタルで

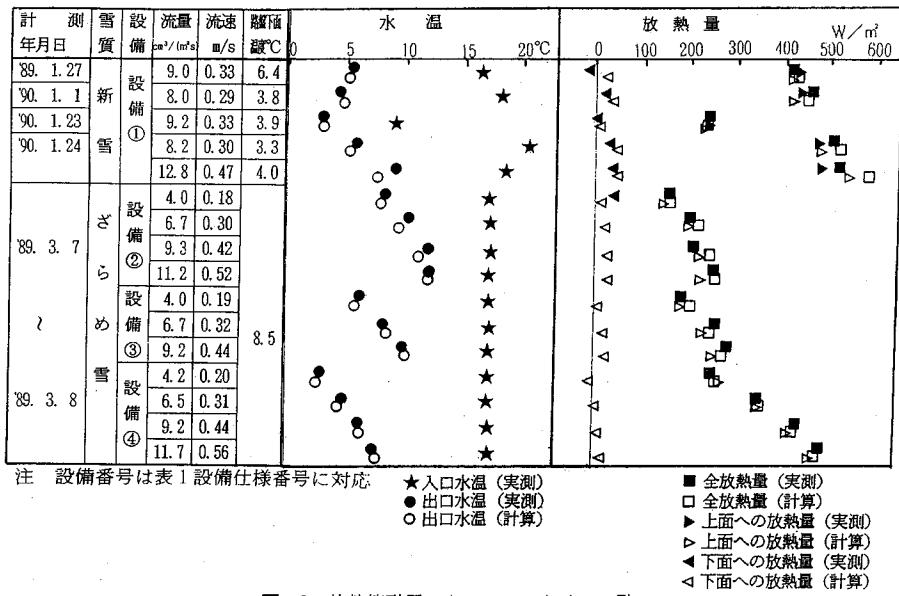


図-6 放熱管融雪のケースストーリー一覽

表-2 コンクリートなどの熱伝導率測定結果

対象	熱伝導率w/mK
安山岩を骨材とする現場打設歩道コンクリート	1.51
珪岩を骨材とする現場打設歩道コンクリート	2.44
安山岩を骨材とする転圧コンクリート(RCCP)	1.98
珪岩を骨材とする工場製作パネルコンクリート	3.26
安山岩 (福井県丸岡町)	2.09
珪岩 (福井県今庄町-南条町)	6.05
安山岩を骨材とするモルタル 1:2配合	1.51
珪岩を骨材とするモルタル 1:2配合	2.38

計測はQTM迅速熱伝導率計による。計測時温度20~30℃
対象材は2週間以上室内で保管した状態のものを使用。

タイルを接着するという工程を要したが、プレキャスト化で現場作業は数分の1になった。この工期短縮は当該施工が都心部で実施されるため有意義であった。更に、これまで生じたタイルの剥がれも見られなくなった。

(3) 放熱管にステンレス・コルゲート管を使用

金属管の放熱管については熱伝導率は大いだが占有物の多い歩道で自在に曲げ加工できず、ポリ管ではその逆になる。そこで、両方を解決するものとしてステンレス・コルゲート管を一部用いた。これは、素材は高価だが、施工性に優れた。ただ、速度水頭損失は凹凸のためストレート管の約10倍にもなった。

(4) 凍結破損・断熱材の使用など

熱伝導を良くすることに伴い、晴天時早朝の輻射放熱での凍結による放熱管の破壊が懸念された。そこで、最低気温-10.6℃を記録した寒冷地福井県勝山市に放熱管方式の融雪装置を一冬設置した。放熱管内に残った水が何度か凍結したが、放熱管は破損しなかった。しかし、コンクリート表面に放熱管に沿ってひび割れが生じた。

福井市内での橋梁歩道部で断熱材を敷設し、その上に放熱管を設置しコンクリートを打設し、そうでないものとの比較を行った。路盤温度が3℃以上にもなる地域では橋梁でも融雪時の放熱管から下面への熱損失は少なく断熱しても大きな効果がなく、逆に、断熱で下面からの熱供給が少なくなり雪が多く積もり逆効果となった。その上に断熱で輻射放熱による凍結が生じた。凍結と断熱材挿入でコンクリートの断面係数が小さくなったことから、コンクリート表面に放熱管に沿ったひび割れが生じた。福井市内では断熱材設置を行わない場合には6年経過した現在まで放熱管内水の凍結は問題となっていない。

4. スプリンクラーによる車道散水融雪

ノズル散水では、車で攪拌されない限り、水が流れる筋道しか溶けず、流末となる路側の側溝は雪で覆われ、路側は水びたしになる。そこで、路面全体の均一な散水融雪を目指してスプリンクラーでの融雪を試みた。スプリンクラー融雪については、旧国鉄で実施されたが取りまとめがなされていない¹⁴⁾。そこで、熱解析と実験を行い、従来のノズル散水との比較を行った。

(1) 熱解析

散水による融雪では、雪は落下瞬間に溶けるとすると流水が道路横断方向に任意のn点から微小区間Δx下流のn+1点に達するまでの熱と水量について次式を得る。

$$\begin{aligned} & \rho \cdot C_p \cdot T_{s0} \cdot q_n \cdot \Delta x + \rho \cdot C_p \cdot T_n \cdot V_n \cdot H_n \\ & = \rho \cdot C_p \cdot T_{n+1} \cdot V_{n+1} \cdot H_{n+1} - (-R_s + R_e + Q_a \\ & \quad + Q_e + Q_g + Q_s) \Delta x \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

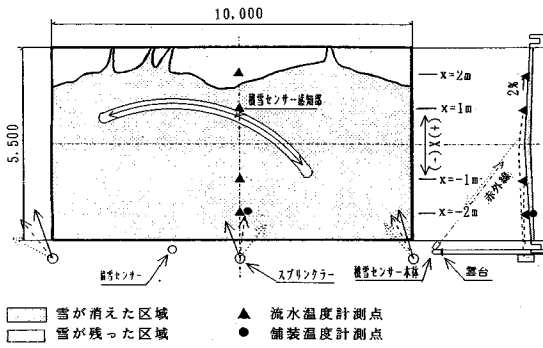


図-7 スプリンクラー散水融雪実験施設と融雪状況

$$V_n \cdot H_n + q_n \cdot \Delta x + I_s \cdot \Delta x / \rho = V_{n+1} \cdot H_{n+1} \dots (7)$$

$$Q_s = I_s \cdot (C_s + \rho \cdot C_o \cdot T_{n+1} - \rho \cdot C_o \cdot T_s) \dots (8)$$

ここに、 ρ : 水の密度

C_o : 水の単位重量当り熱容量

T_{so} : 落下点での散水温度

q_n : n 点から $n+1$ 点までの面積当り散水量
(道路センターからのノズル散水では 0)

T_n : n 点での流水温

V_n : n 点での流水速度

H_n : n 点での流水の水深

R_s : 流水が吸収する短波長(日射)放射熱量

R_o : 流水が放出する長波長放射熱量

Q_a : 大気(空気)への顕熱失熱量

Q_e : 蒸発による失熱量

Q_o : 舗装への失熱量

I_s : 面積当り重量換算降雪強度

Q_s : 降雪を融解し融解水を流水温にまで昇温させるのに要する熱量

C_s : 雪の単位重量当り熱容量

T_s : 雪の温度

である。

$Q_a + Q_e$ については、 $Q_a + Q_e = K(T_n - T_a)$ 、 T_a : 気温
 K : 係数となり、 K についてはノズル散水融雪での実験と解析¹²⁾から中村秀臣氏、今井清保氏はそれぞれ $K = 14.2 + 2.8 U$ 、 $J \cdot K^{-1} \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$ $K = 13.3 \times (1 + 0.22 \times U^{1/2}) J \cdot K^{-1} \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$ 、 U : 風速 $m \cdot s^{-1}$ と推定している^{13), 14)}。二つの式は風速 2 m/s までで 7% 以内の差に過ぎない。ここでは中村秀臣氏の式を用いた。

V_o, H_o はスプリンクラーでは 0、道路センターノズル散水方式では散水量となり、式から逐次 T_{n+1} が求められる。

この差分法により、今井氏や中村氏の一般解の方法^{13), 14)}では扱えなかったスプリンクラーの計算が行える。さらに、熱量不足で残雪となった後も、残雪分相当を次の時間帯に繰り越すことで、時間経過をとらな

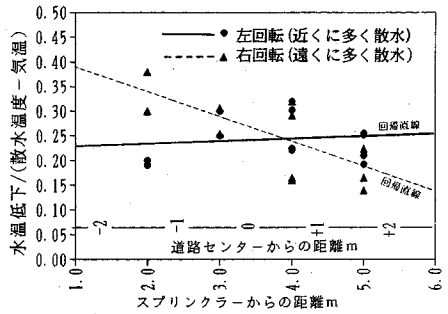


図-8 空中における水温低下

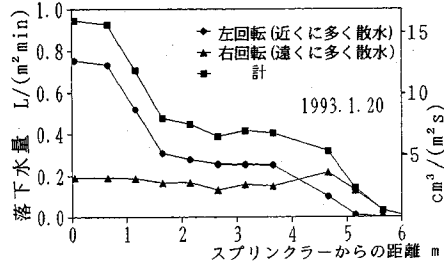


図-9 散水の分布

融雪の数値シミュレーションが可能となる。

(2) 実験装置と実験方法

モデル式の検証のため、図-7のスプリンクラー散水融雪施設で実験を行った。スプリンクラーは、低空で水が飛び、その回転速度も低速なものを製作依頼した。流水の温度は、隣接するスプリンクラーからの散水のない道路横断線上の図-7に示す四ヶ所の舗装表面に 2 mm の V 字切込みを作り、そこに熱電対温度センサーを設置し、計測した。更に、降雪重量・風速・気温を自動計測した。これらの計測は、降雪予報のあった日に散水温度を適当に変えながら散水し続けて行った。

空中での水温低下は、少量の水が貯まる断熱容器を 1 m 間隔に設置し、貯まった水温を散水しながら計測することで求めた。気温と散水温度を変えて実験を重ね図-8を得た。

なお、使用したスプリンクラーは、任意の 2 点で反転し、右回転では遠くに多く散水し、左回転では水はねを多くして近くに多く散水するように作られている。左右の回転の違いで水球径が違うので、左右を分けて空中水温低下と散水分布を計測した。空中での水温低下が飛距離に比例しないのは、遠くに飛ぶ水の球径が大きいことによると考えられる¹¹⁾。

なお、スプリンクラーの散水分布は、寒波ごとに孔の迎角を数度変え、その都度散布状態を計測した。図-9はその一例である。

(3) 実験結果と考察

15分ごとに平均化した実測データと式(6)~(8)から

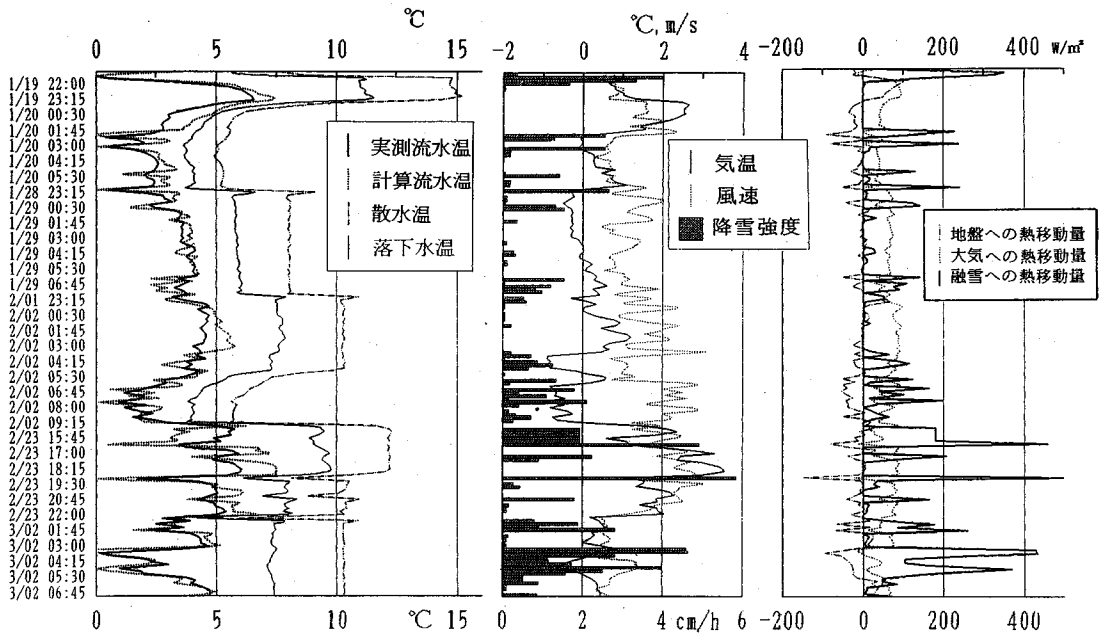


図-10 流水温 (X=-2m)

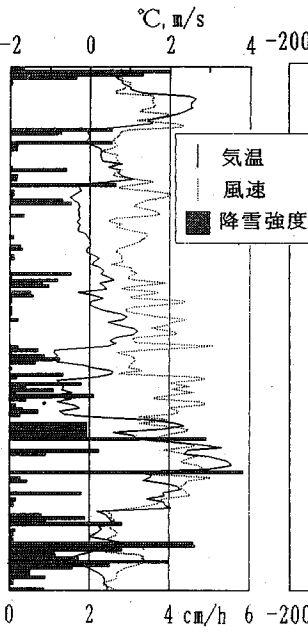


図-11 気象条件

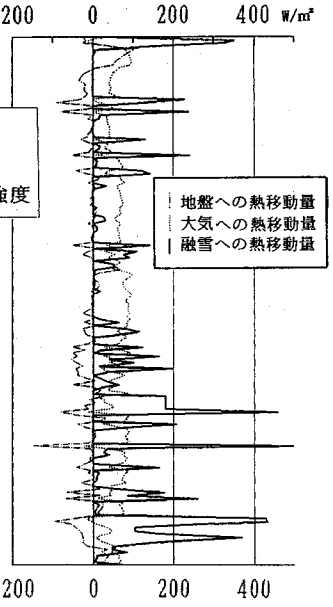


図-12 流水が奪われる熱量内訳

表-3 流水温の実測と計算の平均値 単位: °C

	X=-2m	X=-1m	X=1m	X=2m
散水温	8.98			
各点での落水水温	7.46	7.03	6.79	6.65
実測平均水温	3.56	2.38	3.67	2.61
計算平均水温	3.72	3.04	3.40	2.71
計算平均水温-実測平均水温	0.16	0.66	-0.27	0.10

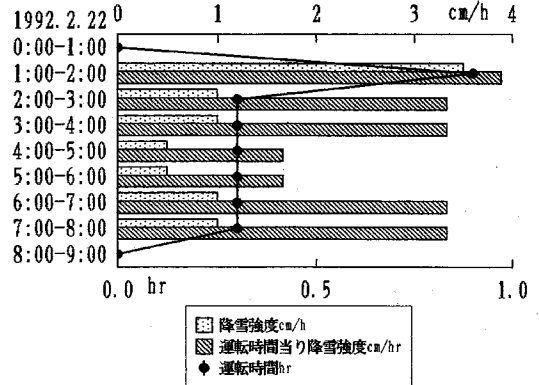


図-13 積雪センサーでのスプリンクラー融雪運転と降雪の例

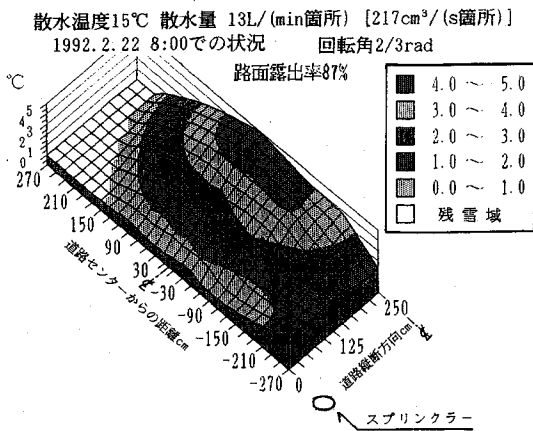
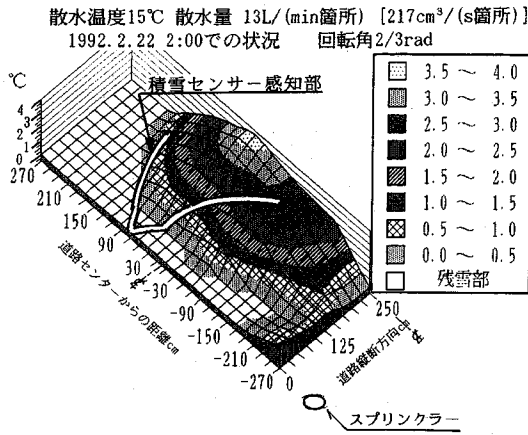
- ①降雪重量は全て0°Cの水である。
- ②流水から地盤への熱移動は、各地点での流水の温度差が小さいので全地点同じで、地点X=-2mでの舗装表面下5mmと15mmでの温度差と舗装の熱伝導率で得られる。
- ③流水が0°Cに達しない限り雪は時間遅れを伴わず溶ける。
- ④流水が0°Cに達した領域では雪は流れず止まり、次の時間帯に残る。
- ⑤短波長放射熱量と長波長放射熱量は雪雲があり無視できる。

などの仮定で流水温を計算した。図-10はX=-2m地点での散水温・落下直後の水温・流水温の実測値と計算値、図-11はその折の気象、図-12はX=-2m地点で流水が奪われる熱量の内訳である。他の三地点を含めて流水温の実測と計算・落水水温・散水温の平均値を示したのが表-3である。散水温の平均値8.98°Cに比べ、流水温の計算値と実測値との差は数%で良く一致している。また空中での熱損失は表-3からこの気象条件では散水熱量の1/4~1/5である。これに比べ大気への

熱損失量は降雪時には流水温が低い小さいことが図-12から分る。図-10で流水温の計算値は実測値に比べ降雪時に低く、降雪直後に高くなる傾向がある。これは流水が0°C以上であっても雪が流水に溶けるまでに時間を要し上記③の仮定が崩れることによると考えられる。そのことは、あられの降った場合には目視で観察された。なお、表-3では、時間的に平均化するため、その不一致がなくなっている。

(4) 融雪運転記録からの検証

次に、より強い降雪があった1992年2月22日における断続融雪運転での記録から考察する。この日は午前1時から8時までに図-13のように8.5mmの雨量換算降雪があり、融雪運転がなされた。融雪は図-7に積雪センサー感知部として示す円弧領域が25%以上白い場合に融雪運転となるように後述する積雪センサーで制御



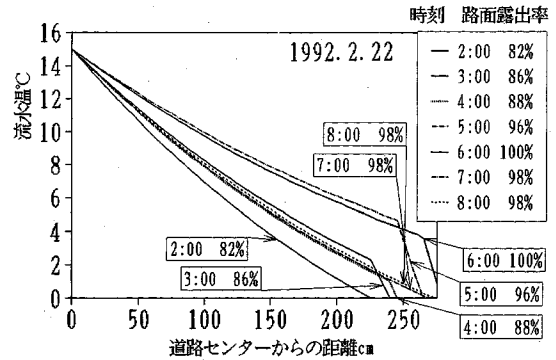
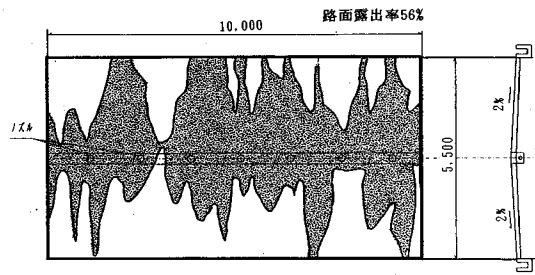
された。ただし、運転の更新は18分ごとになされた。
この一連の降雪について、先の数値シミュレーションを今度は1時間ごとに、隣接するスプリンクラーからの散水を重ねて行った。その際地盤への熱移動は無視できるとした。また、その時刻の運転時間に1時間の全降雪があり、運転のない時は路面に変化が生じないとして計算した。最も降雪の強かった1:00~2:00での運転時間当りの降雪強度は4.1 cm/hであった。流水温を計算した結果が図-14で、流水温が0°C以下は残雪とした。図-14に積雪センサー感知部を重ねてみると、薄白くなった部分が25%という融雪運転の稼働限界に近いことから計算がほぼ妥当であると推察される。

次に、朝8:00まで逐次数値シミュレーションし、朝8:00の流水温を図-15に図示した。この図-15と8:00での実際の路面上の雪の状況を記録した図-7とを比べると路面露出率も残雪の形も良く一致している。

以上よりスプリンクラー散水による融雪は先のモデル式により、数値シミュレーションできることが分った。

(5) ノズル散水との比較

この1992年2月22日にはスプリンクラーと同じ散水



温度15°Cで全く同じ時間帯だけ図-16に示すノズル方式の施設で散水融雪がなされていた。水量は、路面当りでスプリンクラーより22%少なかった。この時の状態を同じようにシミュレーションしたのが図-17である。実際の路面状況は図-16に記載のとおりで、計算での路面露出率98%に比べ著しく低い56%であった。このようにノズル散水で実際に計算に比べ溶けないのは、二つの理由からであろう。一つは、道路センターで溶けた部分が路側に向かう途中で消えていることから計算より多い熱損失があること。その熱損失は、路面が運転休止中に冷え、その上スプリンクラーと違って流水温が高いので路面への熱損失が無視できないほど大きいことによると考えられる。もう一つは、図-16の右上のように路側まで溶けている部分もあることから水が計算と違って路面を均一に流れないことである。この二点から、ノズル散水での融雪能力の見積りが実際と合わないと考えられる。

なお、中村秀臣氏のノズル散水融雪の実験¹³⁾は、連続散水の実験条件で水が完全に均一に流れるとして結果を整理し直しているため、また、今井清保氏の実験¹⁴⁾はドーム膜での融雪実験で下面への熱損失が無視できたために、実験値と一致していると考えられる。

ここで、路面当り水量を同じにしてのスプリンクラーでのシミュレーションを行うと路面露出率は66%となる。このスプリンクラーでのシミュレーションは比較的实际に近いことから、ノズル散水に比べ10%路面露出

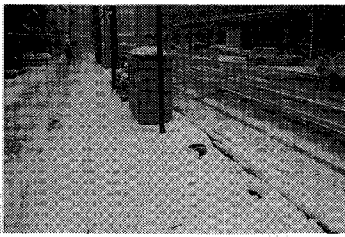


写真-3 スプリンクラー散水開始直後 (セット融雪)



写真-4 断続的融雪での散水直前

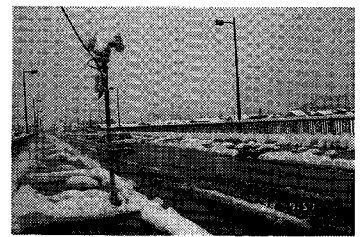


写真-5 融雪終了時 (散水融雪)

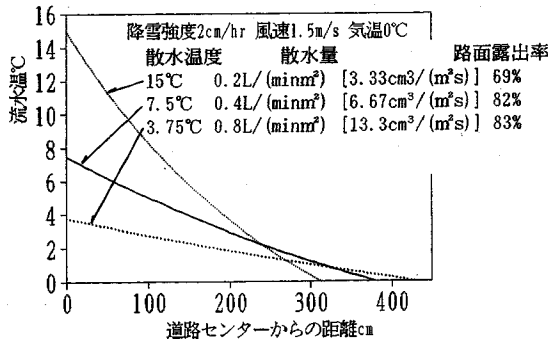


図-18 ノズル散水融雪シミュレーション 熱量一定

率が良くなると推定される。

更に、ノズルでは流水温が0°Cの区域は全く溶けないが、スプリンクラーでは落下する水の熱で流水温は0°C以下でもかなり溶ける計算になる。実際に残雪はノズルでは全く溶けず写真-5の歩道部のような雪こぶに、スプリンクラーでは残雪部がやや溶けてシャベット状態になっていることが観測される。

ノズル散水では、熱量を同じにした15°C、3.33 cm³/(m²s)、7.5°C、6.67 cm³/(m²s)、3.75°C、13.3 cm³/(m²s)の三種類の散水を地盤への熱損失を無視できるとして計算すると図-18のように、3.75°Cの方が15°Cに比べ35%路面が多く露出する。これは、水量が多くて流水温が低いほど流下中の大気への無駄な熱損失が少なくなることによる。このことは計算では無視した舗装への熱損失についても同様であるから、この点でも低温水の方が路面露出率は大きくなる。しかし、スプリンクラー散水では、ノズル散水ほど端的に低温水が有利にはならない。それは、流下中の水温が低い大気や舗装への熱損失の絶対量が少ないことと、水量の増加は空中での比表面積の減に必ずしもならず空中での熱損失の減にならないことによる。

以上熱的に雪を溶かすという解析を行ってきたが、水量が増えると、雪が溶けなくても流水で流される流雪現象が生じるとの考えがある¹⁵⁾。このことについては、水量が少なかったためか当該実験で観測されず熱的解析のみになっており、今後の課題となった。



写真-6 融雪終了時 (セット融雪)

5. 積雪センサーの効果

(1) 積雪センサーの意義とセンサーの構成

融雪装置の運転は、これまで雪が降っているかどうかを検知する降雪センサーで自動運転されていた。これを路面に雪があるかどうかを判断できる積雪センサーにすれば、フィードバック機能を持つ自動制御運転が可能となる。路面が雪に覆われると赤外線反射量が増えることを利用した積雪センサーを試作し、実際の融雪運転に用いて、運転上の問題とその効果を調べた。

放熱管方式融雪歩道では、気温計測を同時に行い4°C以下では積雪なしとし、路面を黒くするなど、太陽光などによる誤操作は除かれ順調な運転となった。しかし、車道部のノズル散水では、写真-3~5のように車輪の通る部分の雪が先に溶け、どの部分を検知させれば良いのが問題になった。特に、雪が降り続けると車の通過部分が道路センターへとシフトし、感知部分を予め決めることはできなかった。そこで、センサー本体を雲台に取り付け首振りさせ図-7のように円弧上の路面を検知させ、路面に雪がないと判断した時間の比率を計測することで運転を可能とした。なお、この方法では路面露出率(=路面全体に占める積雪のない部分の比率)を道路管理者が任意に設定できる。

(2) 降雪センサー運転との運転時間の比較

このようにして実用可能となった積雪センサーを用いて、実際の道路での運転を従来の降雪センサーと比較して行った。効果測定は、地下水利用のノズル散水車道融雪と歩道無散水・車道スプリンクラー散水をセットにした融雪(以下セット融雪という)の二か所で行った。積雪センサーは路面が25%以上白くなった際に積雪と判断するように設定し、降雪センサーは福井県内で最も多

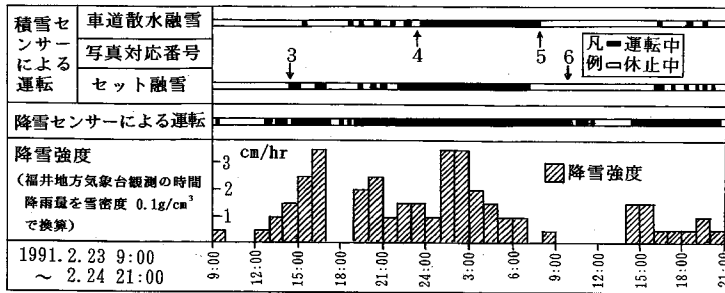


図-19 降雪センサーと積雪センサーの融雪運転記録

表-4 積雪センサーと降雪センサーの運転時間比較

	夜間 21:00- 9:00	昼間 9:00- 21:00	合計
降雪センサーでの運転	57.1hr	33.6hr	90.7hr
積雪センサーでの散水融雪運転	29.0hr	4.2hr	33.2hr
積雪センサーでのセット融雪運転	38.2hr	7.7hr	45.9hr
期間中の降雪量	71.5cm	26.0cm	97.5cm

用されているものを用いた。観測は、最大積雪深 60 cm を記録した 1991 年 2 月下旬の 1 週間と 1992 年 1 月 18 日からの 1 か月間行った。図-19 は 1991 年 2 月下旬の最も自然積雪大きかった前後 36 時間についての運転記録である。こうした記録を午前午後の 9 時を区切りに半日単位で集約したのが表-4 である。表-4 に示すように、降雪センサーは期間中 90.7 時間の降雪を記録したが、これを 100% とすると、積雪センサーでの車道ノズル散水運転では 37%、セット融雪では 51% と驚くほどの節水となった。このように大幅な節水となるのは、降雪日の 80% をカバーできる融雪水準（福井市では 2.4 cm/hr）を地熱も日射も無く車の攪拌も深夜の少ない条件で地下水位低下時にも融雪できるように設備が設計されているので、ほとんどの降雪で融雪能力に余裕があることに因ると考えられる¹⁵⁾。従って、降雪が連続し舗装が冷え降雪が強くなった図-19 の 2 月 23 日 24 時以降のようなケースでは積雪センサーは降雪センサーと同じく連続運転となる。また降雪センサーに比べ、日中（9:00~21:00）での運転は車道ノズル散水では 13%、セット融雪では 23% で、夜間のそれぞれ 51%、67% に比べ節水が大きく、散水による歩行者への水はねはほとんどなくなる。

(3) 積雪センサー制御での路面状況

次に、このような積雪センサーでの節水運転は、路面状態をどの程度悪くするかを路面観測と運転記録から示す。残雪が無い状態から突然雪が積もり始めると、積雪センサーが積雪の感知確認に 5 分ほどを要し、路面全体が数 mm の積雪となる。その直後の融雪開始を捉らえたのが写真-3 である。その後、路側や轍と轍の中央に雪は残るが、路面露出率は 75% 以上になり運転は終了

した。次に雪が積もるのは残雪部とその周囲からであった。それは、直前の散水終了から 40 分が経過し、積雪センサーが路面の 25% 以上を積雪と感知した直後の写真-4 に示されている。その後は、積雪センサーも降雪センサー同様に連続運転していることから、降雪センサー運転であっても路面状況には差が生じないと推定される。朝になって降雪が弱まり、更に散水だけでは溶けなかった路側や轍と轍の中央の残雪が増加した車で踏み潰され路面の 25% 以下になり、融雪が止った（写真-5、6）。その後も降雪センサーでは 2 時間以上連続運転している。以上、写真-3~6 の状況からも、積雪センサーでの節水は、交通の支障にはつながらぬものであった。なお、23 日 12:40 から 14:40 までのように降っても積もらないことが通常の寒波では多く観測され、この場合は全く問題がない。

また、積雪センサーでは必要最低限の散水となることから散水した水が凍結することが懸念されたが、福井市での二カ所三シーズンには生じなかった。

以上、融雪装置の運転を降雪センサーから積雪センサーにすれば、福井市内では路面を悪くすることなく、融雪設備と時々気象・地下水位・交通量などによって決まる融雪能力に応じた大幅な節水となることが分った。

6. まとめ

ここでは、まず歩道無散水と車道散水の融雪の相互関係について述べる。無散水融雪では、雪に直接接しないために熱抵抗が大きく、低温になると融雪能力が下がり低温水は利用できなくなる。しかし、水が雪に浸透する散水融雪ではエクセルギーの小さな低温水でも雪は早く溶け、水の再利用が可能となる。歩道無散水・車道散水を組み合わせた当該融雪システムは、こうした地下水節水の点、車道では放熱管が設置しにくいという設計施工の点、水がかからない無散水で歩ける点、コストの点の四つを追及したものといえよう。

セット融雪では最適とされる放熱管・舗装材質と配置などは、歩車道の幅員比、設定融雪能力、歩道表面の仕上げなどで変わり、個々の条件にあった設計を要する。写真-3、6 の実施例では、歩道 1.8 m を融雪対象にし、

磁器質タイル 10 mm, タイル表面から 30 mm の被りに架橋ポリエチレン管の放熱管を珪石骨材使用のコンクリートで一体化したプレキャストパネルで, 16°C の地下水を $0.651 \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$ ($10.8 \text{ cm}^3 \text{ sec}^{-1} \text{ m}^{-2}$) 流し, 片幅員 4.5 m の車道を 3.6 m 間隔に設置したスプリンクラーで散水融雪した。

二箇所のセット融雪を維持管理して, スプリンクラー散水では水量が少ないと回転が不安定になること, ノズル散水では穴径が小さくなり目詰りで各水量がバルブ調整できず不安定になることが分った。前者ではスプリンクラー設置間隔を広げ, 後者では歩道出口からの水を一旦リバースリターン配管で集水し, その後に散水することが対策となろう。

4. 結 論

これまで述べた実験・解析と試験施工から, 暖地積雪地においては, 次のことが明らかになった。

- ①地下水をカスケードに利用するセット融雪は, 節水, 歩行者への快適性と維持管理の面から合理的なこと。
- ②その歩道部分の放熱管方式融雪については, 舗装と雪との間の熱伝達率を考慮した熱収支モデル式により融雪能力・出口水温が求められること。
- ③その出口水温を流入水温として, 個々のスプリンクラーごとの散水分布・空中での水温低下と熱収支モデル式を用いれば降雪強度ごとに融雪可能な平面範囲が求められること。また, ノズル使用散水融雪では車の攪拌が無いと流水部だけが溶け雪こぶができるが, スプリンクラー使用ではムラのない融雪となること。
- ④積雪の有無を感知する積雪センサーで融雪を運転させると降雪センサーによる運転に比べ 37%~51% の大幅な節水の事例が得られ, 特に日中の節水が著しいこと。この時も路面は交通の支障にはならないこと。

こうした知見を得て, 現在福井の都心など六か所所て施工されている。適切な設計施工を願い, 散水融雪での流雪効果, 車の攪拌効果, 融雪での日射の効果などは課題として残るが, 全体を取りまとめた。

謝辞：石川高専今井清保氏, 福井大学の竹内正紀氏,

福原輝幸氏, (株)山田技研, (有)西村電機商会, (株)ホクコン, 東洋スプリクラー (株), 福井県管工事設備工業協会, 大村鑿泉工業 (株), 福井県道路維持課, 福井土木事務所, 職場の藤野間幸英氏, 今村英樹氏, 久保俊章氏, 杉森正義氏には助言や協力をいただきましたことを記し, 感謝の意とします。

参 考 文 献

- 1) 宮本重信：環境にやさしい融雪をめざして, 土木学会誌プロジェクト・リポート, pp. 6~9, 1993. 5.
- 2) 杉森正義：無散水融雪における熱流の設計および維持管理に関する考察, 第 6 回日本雪工学学会大会論文報告集, pp. 235~240, 1989. 11.
- 3) 日本建設機械化協会編：新編防雪工学ハンドブック, pp. 370~413, 1988. 3.
- 4) 浦上晃一・佐藤守：低温な地下水を用いた道路融雪の実験, 温泉工学会誌, Vol. 19, No. 2/3, pp. 41~62, 1985.
- 5) 熊谷元伸・野坂以伊部：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, 国立防災科学技術センター研究報告, 第 41 号, pp. 285~309, 1988.
- 6) J. P. ホールマン著, 平田賢監訳：伝熱工学 (上), p. 60, プレイン図書出版 K. K., 1985.
- 7) 宮本重信・藤野間幸英：放熱管方式道路融雪の解析と実測, 第 6 回日本雪工学学会大会論文報告集, pp. 241~248, 1989. 11.
- 8) 福原輝幸・橋本泰英：放熱管を有する舗装体の融雪能力特性, 水工学論文集第 36 巻, pp. 721~724, 1992. 2.
- 9) 宮本重信：放熱管方式融雪の解析と実測 (II), 福井県建設・雪対策技術センター年報第 3 号, pp. 55~60, 1990. 8.
- 10) 土木学会：コンクリート標準示方書設計編, pp. 23~24, 平成 3 年度版。
- 11) 中俣三郎：上越新幹線消雪システムの研究経過と概要, 新潟大学災害研究所年報第 7 号, pp. 1~5, 1985.
- 12) 斎藤博英：地下水を利用する融雪の基礎理論, 雪害実験研究所報告, 1967.
- 13) 中村秀臣：地下水による道路融雪実験から算出した適性散水量, 国立防災科学技術センター研究報告, 第 18 号, pp. 117~147, 1977. 11.
- 14) 今井清保・割沢安泰ほか：頂上散水法による屋根融雪の熱力学, 第 5 回雪工学シンポジウム, pp. 197~204, 1989. 11.
- 15) 建設省北陸地方建設局監修：路面消・融雪施設等設計要領, p. 44, p. 39, p. 116, 1990. 7. (1993. 6. 7 受付)

DEVELOPMENT OF SNOW-MELTING SYSTEM FOR SAVING GROUNDWATER

Sigenobu MIYAMOTO

A snow-melting system using groundwater was developed in order to save groundwater. This development was consisted of the following four devices : (1) Snow on a sidewalk was melt by flowing groundwater through pipes in the pavement and then snow on the roadway was melt by sprinkling used water flowed out from exit of pipes in the side walk. (2) Precast concrete panels which contained a pipe and had high thermal conductivity were installed in the sidewalk. (3) Water was sprinkled equally on the roadway by sprinklers. (4) Snow-melting system was controlled by a snow cover sensor. Field experiments showed that those devices were effective and some calculated results agreed with facts.