無雪道路の熱設計に関する研究*

梅宮 弘道^{*1}, 大高 敏男^{*2}Thermal Design of Snow-Melt Road, Utilizing
Short-Term Thermal Energy Storage Under the Road

Hiromichi UMEMIYA and Toshio OHTAKA

A theoretical analysis of a snow-melt road has been performed using a method of imaging line sources. The results showed that: (1) The snow-melt road proposed in this report is assumed to be a uniform concrete road which has a deep heat storage zone 2.9 m under the road. (2) The heat loss through the road shoulder can be eliminated by a thermal insulator buried in the shoulder 50 cm deep. (3) The power of the proposed type of heat storage is far superior to the standard one. Over 5 days, the surface heat flux of this road is larger than the standard one. (4) The optimal relation between the pitch, the depth of the buried heat transfer pipes and the temperature of water used are shown in the figures. A thermal design process is proposed.

Key Words: Snow-melt Road, Heat Conduction, Thermal Energy Storage, Apparent Over-all Coefficient of Heat Transmission, Heat Transfer.

1. 緒 言

雪国の生活環境には、表日本のそれに比べて、なかなか厳しいものがある。その一つに冬期間の交通網の確保が挙げられる。最近の自動車社会の普及にあたっては、交通網は都市の生命線であり、雪国住民にとっては雪からの交通網の確保は死活問題であると言っても過言ではない。交通網の除雪法には、機械除雪を主として、流雪溝、散水融雪、薬剤融雪などの施設による除雪法が種々考案・実施されている⁽¹⁾。しかし、自然が相手であるから、農業に適地適作という言葉があるのと同じく、唯一の除雪法で間に合うというものではない。除雪の研究は、その地域に見合った方法を探し求めていく研究でもある。市街の建築物密集地帯の除雪法の一つとして、地下水をくみ上げて、直接路面に散水する地下水消雪法が考案され、昭和40年台前半、日本海沿岸を中心として本州一帯に広く普及した。しかしながら、地下水消雪法は、地表が凍結し地下浸透の少ない時期に、大量の地下水をくみ上げるわけであるから、地下水自然水位を低下させ、さらには地盤沈

下といった深刻な社会問題を引き起こして今日に至っている⁽²⁾。著者らはその対策として地下水循環形の無散水融雪道路を提案し、10年にわたってその性能試験を行ってきた。システム概念図および道路断面図を、図1に示す。生産井①よりくみ上げた地下水を道路に埋設した伝熱管②に連続通水し、熱伝導によって融雪を行い、使用済み冷水を還元井③経由で地下還元するシステムである。最近、地下帯水層蓄熱法を基礎とするエネルギーシステムの一要素として組み込むことにより、経済的にも成立する見通しが得られ⁽³⁾、性能的にも実用上十分使用にたえ得ると判断されたので、本報告ではその熱設計に整理して以下に報告する。伝熱管埋設物の熱伝導現象は、温水床暖房に代表されるように、広く一般に使用されているものの、床下断熱構造を前提とした解析にとどまっており、連続通水による土壌蓄熱効果を加味した伝熱問題は未整理のままになっている。伝熱管埋設構造の連続通水形の融雪道路を本報告では、簡単のため、無雪道路とよぶ。

2. 無雪道路の融雪性能と土壌蓄熱効果

システム概念図および道路断面図を、図1に示す。生産井よりくみ上げた地下水を道路に埋設した伝熱管②に連続通水し、熱伝導によって融雪を行い、使用済

* 原稿受付 平成2年2月16日。

^{*1} 正員、山形大学工学部 (〒992 米沢市城南4-3-16)。^{*2} (株)東芝 (〒105-01 東京都港区芝浦1-1-1)。

み冷水を還元井③経由で地下還元するシステムである。道路構造は、下より、現地土壌からなる路床、セメント系土壌改良剤を30%添加後、振動加圧により密化した改良土壌から成る路盤、伝熱管、コンクリート板より成る。特徴は、図2にも示すように、安価な工法で強度の向上と熱伝導率の増大をねらった路盤と伝熱管を埋設したコンクリート板にある。これらの寸法、特性値を図2に示す。なお、無雪道路の温度分布を測定するために、深さ方向2mまで、合計125本の熱電対(C-C)を埋設した(図3参照)。冬期間の無雪道路の(1)未通水自然状態、(2)通水して降雪を待っている状態、(3)通水後、降雪のある状態の3例について地下温度分布の測定例を図3に示す。地下水の通水に伴い、図3(a)の自然状態と比較すると地下2mまで温度上昇が認められる。すなわち、雪が降らない期間の通水により、路面地下の土壌に蓄熱されることがわかる。降雪があると、図3(c)、に示すように、路面近

傍の温度が低下し、地下方向に強い温度こう配が生じる。コンクリートサンプルの熱伝導率の実測値を用い、表面熱流束に整理した結果を図4に示す。初期段階の表面熱流束は 250 W/m^2 と、かなり高い値を示している。さらに、入口、出口間の温度差から伝熱管放熱量を求め、図4に示す。表面熱流束と伝熱管放熱量との差は、土壌蓄熱エネルギーの放出量に相当する。前後の気象状態により異なるものの、継続時間はほぼ2日弱と土壌蓄熱効果が極めて有効であることがわかった。さらに、地下帯水層蓄熱法あるいは、各種排熱利用を想定して 20°C の微温水を通水する場合、同様な測定を行い、図4に示す。 20°C 程度の熱源があれば初期の表面熱流束が 400 W/m^2 に上昇することが明らかになった。

一方、路面融雪状況は、路面熱流束、気象条件によりさまざまな様相を見せるが、それらを屋根融雪と同じく⁽⁴⁾大まかに分類すると、図5に示すように、(1)降雪はあるものの、ぬれた路面到達と同時に融雪するAタイプ、(2)路面全体に積雪していくBタイプ、(3)その中間にあつて、部分融雪、部分積雪となるCタイプ、(4)降雪のない乾燥路面Dタイプに分類される。

また、道路構造としては、路盤・路床への蓄熱効果をねらった土壌蓄熱形道路(以下蓄熱道路と呼ぶ)と路盤直下に碎石を敷き詰める標準形断熱構造道路(以下断

図1 システム概念図および道路断面図

Thermal conductivity of concrete and road-bed				
	Concrete	Road bed		
		A-type	B-type	C-type
λ [Ratio]	1	1.04	0.89	1.24
λ [$\text{W/m}^\circ\text{C}$]	4.59			
(Experimental value)		4.77	4.09	5.69

図2 無雪道路要素寸法、特性値

図3 無雪道路の地下温度分布

熱道路と呼ぶ)に分類される。

無雪道路の融雪性能は、蓄熱道路・断熱道路に対して、A～Dタイプの融雪状態の合計8とおりの組合せに対し、道路地下方向および長手方向の温度分布を求める熱伝導問題に帰着される。以下その代表的な場合について、解析を行う。

記 号 表

- a : 伝熱管埋設深さ m
 b : 断熱道路舗装厚さ m
 c : 比熱 $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$
 d_1 : 伝熱管内径 m
 d_2 : 伝熱管外径 m
 d_3 : P/π
 f : 熱流束 W/m^2
 H : 熱伝達率 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$
 $h = H/\lambda$
 K : 熱通過率 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$
 l_a : 融解熱(新雪) kJ/kg
 $L' = LS/(v_w - v_a)$
 $L = l_a \times \rho_w$
 l : 伝熱管全長 m
 $\dot{m}$: 流量(1本当たり) L/min
 M : 総流量 L/min
 N : 伝熱管本数
 $Nu = H_d/\lambda$
 Pr : プラントル数
 P : 伝熱管埋設ピッチ m
 $Re = ud/\nu$
 u : 流速 m/s

図4 無雪道路降雪時の表面熱流束

Q : 単位長さ単位時間熱量 W/m

$$q = Q/c\rho$$

R_1, r_1 : 熱源までの距離 m

S : 降雪強度 mm/h

t : 時間 s

v : 温度,

V : 初期温度 $^\circ\text{C}$

$$\delta_n : kb = \delta_n \tan \delta_n$$

$$\theta = (v - V)/(v_w - v_a)$$

α : 温度伝導率 m^2/s

λ : 熱伝導率 $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$

ρ : 密度 kg/m^3

添 字

a : 外気

c : 地下方向

g : 無限遠(地下2 m)

h : 道路表面方向

i : 入口

o : 出口

p : 伝熱管表面

s : 道路表面

図5 融雪状況の分類

図6 無雪道路解析モデル

W: 水
y: y 方向

$$\begin{aligned} \text{[B. C.]} \quad & \theta = 0 \quad \text{at } t > 0, y = 0 \\ & Q = c\rho q \quad \text{at } t > 0' \text{ 伝熱管} \end{aligned}$$

[解]

$$\theta = \frac{-q_0}{4\pi\pi} \sum_{i=0}^{N-1} \left[E_i \left(\frac{-r_i^2}{4xt} \right) - E_i \left(\frac{-R_i^2}{4xt} \right) \right] \dots\dots (3)$$

D タイプ蓄熱道路: 乾燥路面道路のステップ加熱では, 熱量が時間とともにほぼ直線的に降下する領域が現れる。すなわち,

$$\text{[B. C.]} \quad Q = c\rho\phi(t) \quad [\phi(t) = at + \beta]$$

[解]

$$\begin{aligned} \theta = \sum_{i=0}^{N-1} & \left[\frac{-1}{4\pi x} E_i \left(\frac{-r_i^2}{4xt} \right) \left(at + \beta + \frac{ar_i^2}{4x} \right) \right. \\ & - \frac{at}{4\pi x} e^{-r_i^2/4xt} - \frac{1}{4\pi x} E_i \left(\frac{-R_i^2}{4xt} \right) \left(at + \beta \right. \\ & \left. \left. + \frac{aR_i^2}{4x} \right) - \frac{at}{4\pi x} e^{-R_i^2/4xt} \right] \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

ただし,

$$\begin{aligned} -E_i(-x) &= \int_x^\infty \frac{e^{-u}}{u} du, \quad h_i = \delta_n \tan \delta_n \\ r_0^2 &= x^2 + (y+a)^2; \quad R_0^2 = x^2 + (y-a)^2 \\ r_1^2 &= (x-P)^2 + (y+a)^2; \quad R_1^2 = (x-P)^2 + (y-a)^2 \\ r_2^2 &= (x+P)^2 + (y+a)^2; \quad R_2^2 = (x+P)^2 + (y-a)^2 \\ &\dots\dots\dots \\ j=1 \quad a \rightarrow a; \quad j>1 \quad a \rightarrow 3a+4a(j-2) \end{aligned}$$

3.2 伝熱管表面温度 v_p v_p は式(5)より通水温度と流量の関数として, 算出される。よって, 理論式に与える q_0 は伝熱管表面位置に相当する温度 v_p になる q_0 を与える。

$$\begin{aligned} \pi d_1 H_1 (v_w - v_p) dx &= -\dot{m} c_w \rho_w \cdot dv_w \\ \dot{m} c_w \rho_w (v_i - v_w) &= xQ \\ v_p &= v_w - \frac{\dot{m} c_w \rho_w (v_i - v_0)}{\pi d_1 H_1} \text{ より } \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

ただし, $H_1 = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.3} \lambda_w / d_1$

3.3 見掛け熱通過率の導入と出口温度の推算
融雪道路出口温度の推算は, 気象変化が極端に激しくない限り, 見掛け熱通過率 K の導入により, 熱通過現象として取扱うことができる⁽⁵⁾。

図7に示すように, 伝熱管1本当たりの道路表面積と等しい伝熱面積を持つ円筒形に近似する。さらに,

図7 円筒形モデル

3. 理論解析

3.1 理論式 無雪道路の解析にあたり次の仮定を設ける。

- (1) 熱源の伝熱管を長手方向の線熱源とする。
- (2) 冠雪時の路面温度は, 実測値 0.4°C とする。
- (3) 地下構造は一様物質とする。

以下その代表として, 四つの解を示す。

$$\text{[F. E.]} \quad \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = \frac{1}{x} \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

ここで, 路盤, 路床湿分の影響は, 温度伝導率 x の中に含めて解析する。

$$\text{[I. C.]} \quad \theta = 0 \quad \text{at } t = 0$$

A タイプ蓄熱道路:

$$\begin{aligned} \text{[B. C.]} \quad & -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} + H(\theta - \theta_a) + L' = 0 \\ & \text{at } t > 0, y = 0 \\ & Q = c\rho q \quad \text{at } t > 0 \quad \text{伝熱管} \end{aligned}$$

[解]

$$\begin{aligned} \theta = \frac{-q_0}{4\pi\pi} \sum_{i=0}^{N-1} & \left[E_i \left(\frac{-r_i^2}{4xt} \right) + E_i \left(\frac{-R_i^2}{4xt} \right) \right] \\ & [= \theta_i(t)] \\ & + \int_0^t \frac{\lambda h \theta_a [1 - \theta_i(t')/\theta_a] - L'}{\lambda h} \left\{ \frac{y}{2[\pi x(t-t')]^{1/2}} \right. \\ & \times \exp \left[-\frac{y^2}{4x(t-t')} \right] - h^2 x \exp[hy \\ & + h^2 x(t-t')] \operatorname{erfc} \left[\frac{y}{2x(t-t')} + hx(t-t') \right] \\ & \left. + \left\{ \frac{-y}{2[\pi x(t-t')]^{1/2}} + h \left[\frac{x}{\pi(t-t')} \right]^{1/2} \right\} \right\} \\ & \times \exp \left[-\frac{y^2}{4x(t-t')} \right] \Big] dt' \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

A タイプ断熱道路:

$$\begin{aligned} \text{[B. C.]} \quad & -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} + H(\theta - \theta_a) + L' = 0 \quad \text{at } t > 0, \text{ at } y = 0 \\ & -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} = 0 \quad t > 0, y = -b \\ & Q = c\rho q \quad \text{at } t > 0 \text{ 伝熱管} \end{aligned}$$

[解] $b = 2a$ とすれば,

$$\begin{aligned} \theta = \frac{-q_0}{4\pi\pi} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{i=0}^{N-1} & \left[E_i \left(\frac{-r_{ij}^2}{4xt} \right) + E_i \left(\frac{-R_{ij}^2}{4xt} \right) \right] [= \theta_i(t)] \\ & + \int_0^t [-\theta_i(t') + \theta_a] \sum_{n=1}^{\infty} \frac{-2 \sin \delta_n \times \delta_n^2 x}{b^2 (\delta_n^2 + \sin^2 \delta_n \cos^2 \delta_n)} \\ & \times \exp \left[-\frac{\delta_n^2 x(t-t')}{b^2} \right] \cos \left(\delta_n \frac{y}{b} \right) dt' \dots\dots (2) \end{aligned}$$

B タイプ蓄熱道路:

隣接ユニット影響は熱通過率に含めて整理することとし、これを見掛け熱通過率とする。

道路断面で伝熱パイプを中心にして1ユニットを取り出して熱の出入りを考える。温水から、融雪面あるいは地下方向への熱の移動は左右断熱面に挟まれた領域の熱の移動であるが、パイプ上下方向の熱通過現象に近似すると、上下方向の熱量 Q_h, Q_c は以下のように表現される。

$$Q_h = K_h A (v_w - v_a); Q_c = K_c A (v_w - v_g) \cdots (6)$$

ここで、 A : 伝熱面積(ピッチ間隔)

また、出口温度は、式(7)によって求められる。

$$v_0 = \frac{K_h v_a + K_c v_g}{K_h + K_c} + v_w \exp \left[\frac{-\pi d_3 x}{c \rho m} (K_h + K_c) \right] \cdots (7)$$

$$\text{ただし、} \pi d_3 = P, v_w' = v_w - \frac{K_h v_a + K_c v_g}{K_h + K_c}$$

4. 解析結果の検証と熱設計を目指した考察

4.1 解析精度の検証 理論解析に際しては、種々の仮定を設定して簡略化しており、3章の解析は無雪道路温度場の近似解の一つである。この近似解が、どの程度の精度で実際の無雪道路の温度場を表現しているかを、(1)室内モデル実験、(2)屋外実験にて検証した。

(1) 室内モデル実験 モデル道路の地下構造を図8に示す。構造は、屋外無雪道路と同じである。下から現地土壌による路床、セメント系固化剤を30%添加後、かくはん・転圧した路盤、耐圧ビニールホースの伝熱管を埋設したコンクリート板より成る。

温水は、水道水をガス湯沸かし器で加温し、オーバーフロータンクを介して、伝熱管に流して放流する。伝熱管入口および出口には熱電対を設置して、温度を測定した。また、コンクリート板、路盤にも熱電対を埋設して、道路地下温度を測定した。

ところで、無雪道路の動作は、蓄熱行程-Aタイプ融雪行程のサイクルもしくは、蓄熱行程-Aタイプ融雪行程-Bタイプ融雪行程-Aタイプ融雪行程のサイクルであると考えられるが、ここで、代表例として、蓄熱行程の実験を行い、解析結果との比較検討を行う。

道路表面に断熱材として発泡スチロールを載せ、表面を断熱し、温度20°Cの水を連続通水して理想的な蓄熱をする行程の温度経時変化実測値と解析結果を図9に示す。解析では、コンクリート一様とする道路と、土壌一様とする道路の場合を想定して計算した。図9から明らかなように、コンクリート一様とした場合と実

測値が平均0.75°Cで良く合っている。これより、無雪道路は、実際は三層構造となっているが、深部土壌は、長期間の圧密状態にあり、含水率も最適含水率に近い状態にあることから、本実験場の砂質土壌では最適含水率21%に対し、実測含水率20%であった。その熱物性値は、コンクリートのそれに近い値をとるためである。

(2) 屋外実験 PIC(Pipe in Coil 鋼管)無雪道

図8 無雪道路の室内模型実験装置

図9 路面断熱・蓄熱行程の地下温度経時変化

図10 見掛け熱通過率経時変化

図11 無雪道路出口温度の推算

図12 地下温度と表面熱流束経時変化

図13 無雪道路の準定常温度分布

路を用いて、理論解析による出口温度、式(7)と、実測値とを比較した。理論式の熱通過率 K_h , K_c は、蓄熱道路に対する A タイプにおいて、降雪強度を零とした境界条件の解、式(1)を用い、伝熱管より上方向の道路表面方向、下の地下方向に流れる熱量から、式(6)の定義式から算出した。その結果を、図10に示す。これより、ステップ状の境界条件に対し、時間とともに減少し、ほぼ3日で定常値に到達することがわかる。したがって、実際の路面は、強い非定常状態なので、初期値 $K_h=6.8$, $K_c=5.7$ をとった。

図11に通水出口温度の理論値と実測値を整理して示す。図11より、両者はその差の平均が0.5°C以下と良い一致が見られ、理論解析が、実用上、十分の精度で使用できることがわかる。

4.2 温度場の定常判定 無雪道路は、蓄熱・融雪行程を繰返して機能するものであり、厳密にはシーズンを通して非定常現象である。しかしながら、自然界では、特に蓄熱行程において、温度場が準定常とみな

表1 物性値⁽⁶⁾

	Concrete	Soil	Water
λ [W/m°C]	4.59	0.523	0.58
c [kJ/kg°C]	0.882	1.848	4.189
ρ [kg/m³]	2300	2000	999.0
κ [m²/s]	2.26×10^{-5}	1.41×10^{-7}	1.39×10^{-4}
l_a [J/kg]	333.7×10^3	H (Surface)	8
ρ (New-fallen snow) [kg/m³]			50

図14 無雪道路の準定常表面熱流束分布

図15 断熱材埋設深さと表面熱流束の関係

せる状態がしばしば現れる。ところが、そこに至るまでの正確な時間・温度場などが掌握されていない。

蓄熱行程の完結を知るために、蓄熱道路・Dタイプの境界条件でステップ加温を想定し、式(4)を用いて、路面下3点の温度応答と表面熱流束の経時変化を整理したものを図12に示す。なお、ここで道路構造は、伝熱管埋設ピッチ0.2m、埋設深さ0.2mのコンクリートまたは土壌一様とする道路とした。1日の温度上昇が 0.3°C 以下で準定常とすれば、コンクリート一様道路では6日、土壌一様道路では15日で、準定常に到達する。なお、計算に使用した物性値を表1に示す。

4.3 路肩の断熱効果 4.2節の準定常状態における断面温度分布および表面熱流分布を図13, 14に示す。これより、道路幅員方向に無視できない熱損失があることがわかる。よって、道路幅員面に、断熱施工が望まれる。ここでは、断熱施工深度を整理する。道路中央最大表面熱流束を $f_{s(\max)}$ とすると、幅員方向熱流束 f_x との比が1%以下で断熱とみなし、この深さまで断熱施工したとすれば、 $f_{s(\max)}$ と幅員における熱流束差 Δf_s との比 $\Delta f_s/f_{s(\max)}$ を図15に示す。図15より、0.5mの断熱施工で、幅員方向の熱損失を押えること

ができることがわかる。

4.4 土壌蓄熱の蓄熱領域と蓄熱効果 準定常温度場、図13より明らかなように、蓄熱行程では、地下2.9mまで蓄熱されることがわかる。これは、無雪道

図18 伝熱管埋設条件($v_p=10^{\circ}\text{C}$)

図19 伝熱管埋設条件($v_p=15^{\circ}\text{C}$)

図16 蓄熱道路と断熱道路の表面熱流束

図17 伝熱管埋設条件($v_p=5^{\circ}\text{C}$)

図20 伝熱管埋設条件($v_p=20^{\circ}\text{C}$)

表 2 道路伝熱管仕様および計算結果

	PIC snow-melt road	Snow-melt road (Standard-type)
Pitch	0.159[m]	0.2[m]
Depth	0.05[m]	0.17[m]
Length	116[m]	296[m]
Diameter	0.0217[m]	0.0272[m]
v_i	15	15
v_o	12.35	7.57
$vp(in)$	14.63	14.45
$vp(out)$	12.24	7.46

図 22 無雪道路融雪風景

図 21 熱設計フローチャート

路地下温度分布の実測値、図 3 にほぼ合致している。蓄熱後、ステップ状に大雪が降ったことを想定し、土壤蓄熱が融雪能力をどの程度向上させるか、断熱道路と蓄熱道路の道路表面熱流束を式(1)と式(2)より算出し、図 16 にその比も同時に整理した。これより、5 日までは、特に降り始めは格段に、蓄熱道路の融雪能力が断熱道路のそれを上回ることがわかる。過去 30 年の気象データからしても、降雪が 5 日以上も休みなく降り続くことは極めてまれであることから、蓄熱形無雪道路に格段の優位性が見られる。

4・5 伝熱管埋設条件 蓄熱形無雪道路の融雪能力は路面熱流束 f で表現することができる。 f は、通水温度、伝熱管埋設ピッチ、埋設深さ、通水量の関数であるが、熱設計の便宜のため、B タイプの冠雪に対し、温度場の解、式(3)を用い、伝熱管表面温度、道路表面熱流束を媒介変数とし、伝熱管埋設ピッチと埋設深さの関係に整理して、図 17～20 に示す。図 17～20 は、道路表面熱流束が、 $\pm 5 \text{ W/m}^2$ 以内のむらに収まる領域も示している。日本海沿岸、秋田以南では、融雪に必要な道路表面熱流束は経験上、 100 W/m^2 である。したがって、それぞれの伝熱管表面温度に対して、ドット領域に入る伝熱管埋設ピッチ、埋設深さを選定すればよい。

5. 無雪道路の熱設計

5・1 熱設計手順 従来の経験値と以上の結果を組合せ、熱設計の手順に整理して図 21 のフローチャートに示す。

(1) 環境に応じた道路表面熱流束 f_0 、通水入口温度 v_i 、道路幅員、道路長さが与えられる。

(2) 伝熱管埋設ピッチ P 、埋設深さ a 、長さ l 、をそれぞれの標準値 0.2、0.2、100 m を用い仮想配管する。

(3) 通水量を $0.3 \sim 0.5 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ を目安に、通水総流量 M を求め、伝熱管 1 本あたりの通水量 m を算出する。

(4) 伝熱管表面温度 v_p を式(5)より、算出する。 $v_p \geq 8^\circ\text{C}$ の場合のみ、融雪能力が期待される。

(5) 通水出口温度 v_o を式(7)より、算出する。 $v_o \geq 8^\circ\text{C}$ の場合のみ、融雪能力が期待される。

(6) 図 17～20 を用いて、伝熱管埋設ピッチ、埋設深さが、 $f_s \geq 100 \text{ W/m}^2$ を満たすことを確認する。

5・2 実際の施工例 5・1 節の設計手順に従って以下にその施工例を挙げる。なお、当研究室に現在施工されている無雪道路伝熱管仕様および、計算結果を表 2 に示す。

(1) 山形県米沢市において、 $f_0 = 100 \text{ W/m}^2$ 以上、 $v_i = 15^\circ\text{C}$ 、道路幅員は 4 m 以上、道路長さは、表 2 に示すように設定する。

(2) 伝熱管埋設位置を表 2 のように設定する。

(3) 式(5)より、 v_p 、式(7)より v_o を算出(表 2 参照)し、伝熱管入口および出口において融雪能力が期待できることがわかった。

(4) 図 17～20 より、 $f_s \geq 100 \text{ W/m}^2$ を満たすことがわかるが、PIC 無雪道路では、むらが生じることが予想される。

図 22 に施工例融雪状況を示した。写真手前が PIC

無雪道路で、すじ状の融雪むらが残っている。また写真奥が蓄熱形無雪道路で、きれいに融雪されている。

新日本製鉄(株)の研究助成金によることを付記し深謝する。

6. 結 論

(1) 無雪道路は、コンクリート一様とした道路とみなすことができ、その蓄熱領域は地下2.9mである。

(2) 道路端で、幅員方向の熱損失防止のため断熱施工が必要であり、その深さは0.5m程度である。

(3) 土壌蓄熱効果は無雪道路に有効で、表面熱流束は地下断熱形無雪道路より約5日は上回る。

(4) 無雪道路の冠雪時にむらなく融雪できる伝熱管の埋設条件を示し、その熱設計手順を示した。

本研究の一部は、山形大学工学部産業研究所および、

文 献

- (1) 日本建設機械化協会編, 新防雪工学ハンドブック, (1983), 362, 盛北出版.
- (2) 長岡市企画開発部, 長岡市の地質と地下水, (1983), 52, 科学技術庁資源調査会, 地下水の保全・使用に関する第2次調査報告, (1984), 58.
- (3) 梅宮・佐藤, 機論, 55-520, B(1989), 3794-3802.
- (4) 梅宮・ほか4名, 太陽エネルギー, 9-2(1983), 29-39.
- (5) 梅宮・ほか2名, 第26回伝熱シンポジウム講演, (1989), 836.
- (6) 梅宮・ほか2名, 第26回伝熱シンポジウム講演, (1989), 839.
- (7) H. S. Carslaw, and J. C. Jaeger, *Conduction of Heat in Solids*, (1959), Oxford at The Clarendon Press.