

ヒートパイプによる地熱の融雪への利用

長岡技術科学大学

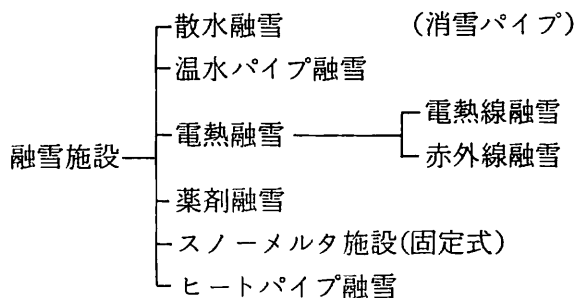
建設系 河原能久

1. はじめに

積雪寒冷地域では、冬期間の道路交通確保、屋根雪を含む建物の回りの雪処理が重大な課題となり続けている。経済、社会の発展に伴い、生活環境の無雪化促進への期待は量的にも質的にも高まりつつある。道路交通確保への要請は強く、豪雪時においてもできるだけ多くの路線を、できるだけ高い水準で確保し、その信頼性を高めることが求められている。

現在の除雪対策は大きく機械・人力除雪と融雪・流雪施設による方法とに分けられる。融雪施設についてはさらに表-1のように分類される。¹⁾主要

表-1 融雪施設の分類¹⁾



道路の除雪では機械除雪が主力であるが、幅員の狭い道路、路面の凍結防止箇所、駐車場、建物の回りの除雪においては人力除雪や融雪施設による場合が多い。機械除雪は安価で迅速に大量の雪を処理することができるが、除雪機械の維持・確保、作業員の確保が深刻な問題となっている。これに対し、施設による方法は高価であるが人手を必要としないものが多い。散水融雪(消雪パイプと呼ばれることが多い)は、それらの中で最も安価で融雪能力も高く広く普及しているが、水源である

地下水の過度の汲み出しにより地下水不足、水位低下、地盤沈下等の問題を引き起こしている。例えば、消雪パイプの使用はその発生地の長岡市で曲り角にさしかかっている。消雪パイプの埋設された市道延長50kmのうち、56豪雪時にはその65%に当たる33kmが、また、59豪雪時でも61%に当たる31kmが使用不能となった。玄関先や駐車場、歩道にゴムホースやエンピパイプをめぐらせ井戸水で融雪させる自家用消雪パイプの急速な普及が、地下水位低下防止に歯止めをかけられない原因となっている。²⁾融雪施設のうち、既往の他の方法はエネルギーコストの高騰によりその運用が困難になっている。

最近、地盤や地下水のもつ自然の熱エネルギーを利用したヒートパイプ融雪装置が開発されつつあり、道路のみならず建物の回り等に適用されている。この装置は、ヒートパイプがその両端の温度差が小さくても多量の熱量を輸送しうることを利用したもので、自動的に地中の熱エネルギーのみを抽出し(地下水は汲み出さず)、輸送し、融雪に使用するものである。この装置は次のような利点をもっている。

- (1) 無保守であり、運転費がかからない。
- (2) ヒートパイプが1本ごとに独立しているため破損しても故障範囲が限定され、装置全体に及ぼす影響が少ない。

一方、以下のような欠点を有する。

- (1) ヒートパイプを埋設するボーリング費用が高いため、イニシャルコストが嵩む。
- (2) 使用しうる熱量に限界があり、融雪能力が大きくない。したがって、多量の雪を迅速に処理することは特別な条件がない限り困難で

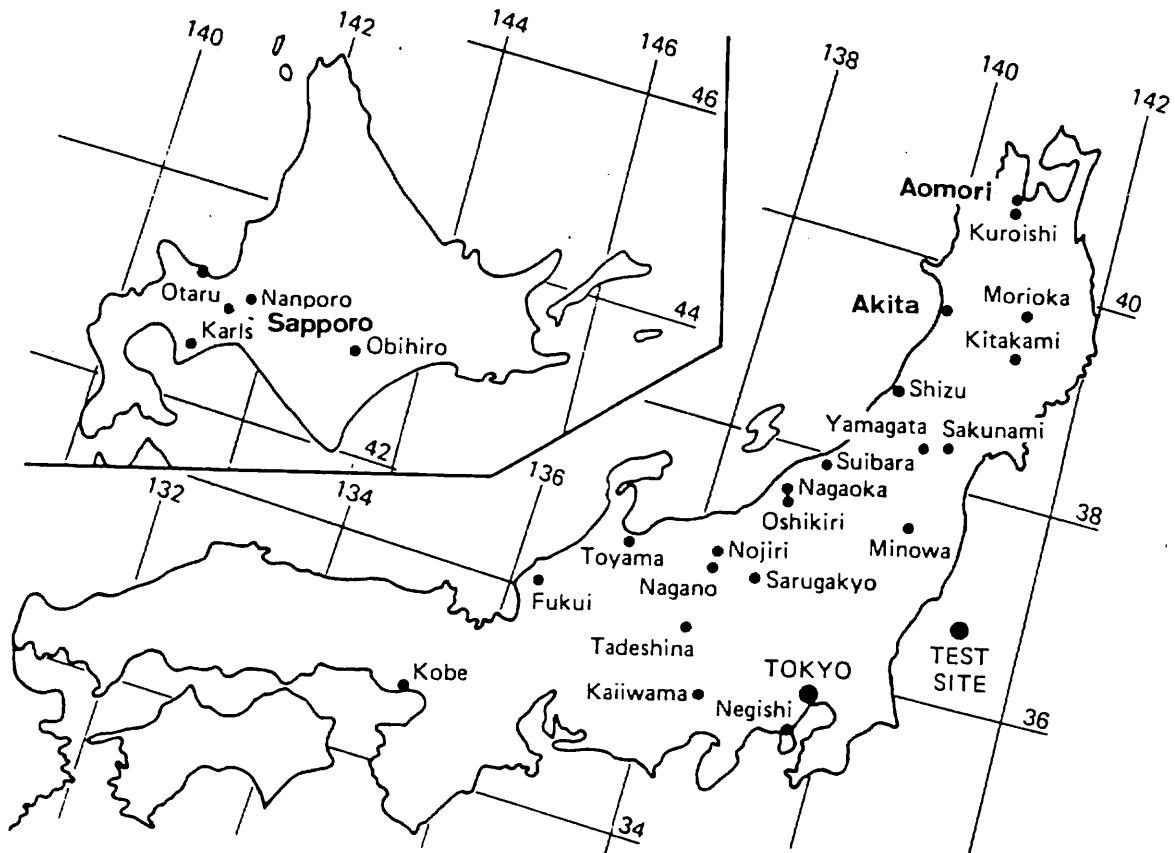


図-1 地熱利用のヒートパイプ融雪試験地

ある。

地熱を利用したヒートパイプ道路融雪は1972年頃からアメリカで開始された。日本では1977年に建設省が行った小規模なフィールド試験が始めであり、それ以来、数多くの地点で試験的に実施されている。図-1に地熱利用のヒートパイプ融雪試験地の位置を示す³⁾フィールド試験より、その装置が実際に汲み出した熱量、融雪能力の目安が得られている。

ここでは、地下水に恵まれた地域を念頭におき、地下水自体を汲み上げることなく、そこから採熱するヒートパイプ融雪装置の可能性を検討しようと思う。そこで、以下に、ヒートパイプとヒートパイプ融雪装置の概要、ヒートパイプにより抽出される地熱量の評価方法、実施例、今後の検討課題を順次述べようと思う。

2. ヒートパイプとヒートパイプ融雪装置

2.1 ヒートパイプの構造と作動原理⁴⁾

ヒートパイプとは、図-2に示すように、十分

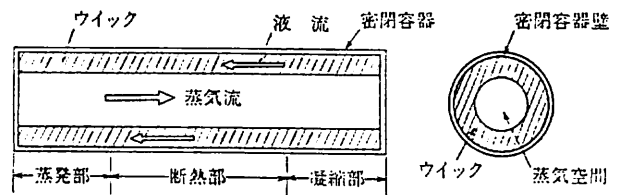


図-2 ヒートパイプの構造

脱気された密封容器（必ずしも円管でなくてもよい）内に作動流体と呼ばれる気体と液体に相互に変化しやすい媒体（例えば、アンモニア、フロン-21等）を封入し、その相変化の潜熱を仲介にして、流動により熱を輸送する装置である。ヒートパイプは外部との熱の授受により蒸発部（加熱部）、断熱部、凝縮部（冷却部）とに分けられる。

ヒートパイプの作動原理を図-3に従い説明する。

- (1) 外部の熱源から熱が蒸発部に加えられ、管壁、液（作動流体）を含んだウイック（多孔性物質であることが多い）の順序で熱が伝わる。
- (2) 液の温度が上昇し、液面での蒸発が起こる。

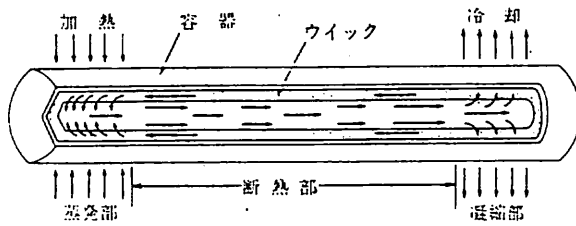


図-3 ヒートパイプの作動原理

- この際、潜熱として熱が蒸気に与えられる。
- (3) 温度が上がるので、飽和蒸気圧も上がり、蒸気は蒸気空間を通り、より低い温度、したがってより低い圧力の他端(凝縮部)に流れる。
 - (4) 蒸気は凝縮部の気液界面で凝縮し、潜熱を放出する。
 - (5) 熱が気液界面から、液を含んだウイック、管壁の順で外部の吸熱源に放出される。
 - (6) 凝縮した液はウイックを通り、凝縮部から蒸発部へ毛細管力や重力により環流されサイクルを完結する。

上記の過程を繰り返し、作動流体は潜熱の形で蒸発部から凝縮部へと熱輸送を行う。潜熱の形で行う熱輸送は、通常の間接熱輸送で行う対流による熱輸送に比べて、同一の温度差に対し数けた大きい熱量を輸送しうるから、ヒートパイプは大量の熱量を輸送することができる。蒸発部と凝縮部の蒸気の圧力差は非常に小さいため蒸気の温度差もわずかである。また、管壁を熱伝導率のよい薄肉の金属でつくれば、熱源と蒸気間、蒸気と吸熱源間の温度差も十分小さくすることができる。このため、ヒートパイプは小さい温度差で熱源と吸

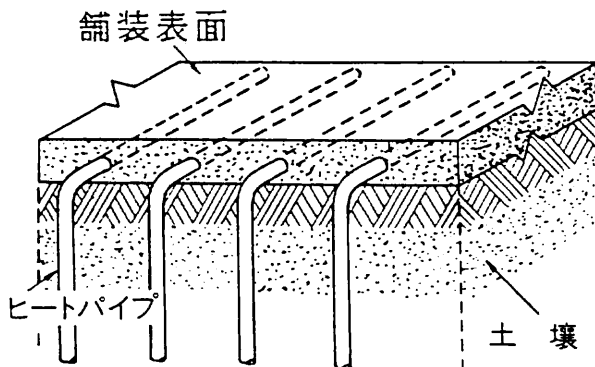


図-4 ヒートパイプ融雪装置の概略

熱源との間の熱輸送を行うことができる。

2.2 ヒートパイプ融雪装置の原理と方法

地熱を利用するヒートパイプ融雪装置の基本形は、道路融雪に適用される場合を例にとると、図-4のようになる。この装置は多数のヒートパイプを地中5~20m程度の深さに埋設し、地中の熱エネルギーを集め、輸送し、舗装版内で放出して路面の融雪を行うものである。地中からヒートパイプ蒸発部への熱輸送は、地下水のない、または地下水流動のない場合は熱伝導による。地下水流れが存在する場合には熱伝導のほか流れにより供給されるため熱量が増加する。

地中温度はある深さに達すると一年中ほとんど変化しなくなる。(恒温層と呼ばれる。) その深さは含水量の多い土地では浅く、乾いた土地では深い。恒温層上限の地中温度(T_u)とその地方の年平均気温(T_m)との間には次の関係があることが知られている。⁹⁾

$$T_u = 0.83 T_m + 3.7$$

したがって、本州では恒温層あたりの地盤が10~14℃以上の熱エネルギーを保存しており、この熱エネルギーを路面あるいは対象箇所まで伝達すれば融雪の可能性はある。

ヒートパイプ融雪装置の熱輸送量は熱源と吸熱源間の伝熱抵抗に逆比例し、その間の温度差に比

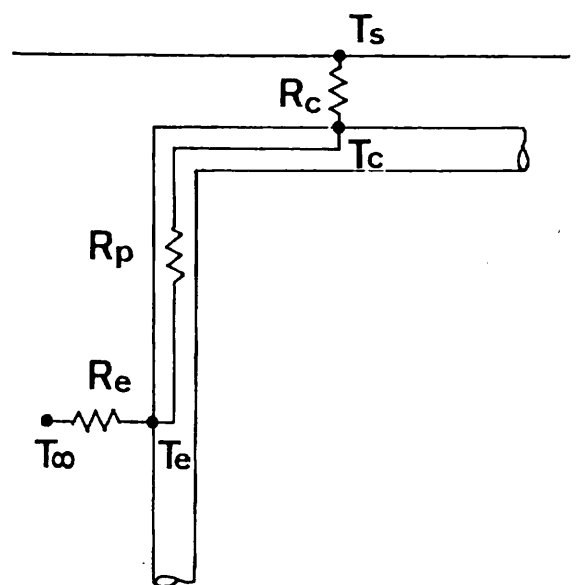


図-5 ヒートパイプ融雪装置の伝熱回路

例する。この装置の伝熱回路は図-5のように示される。ヒートパイプ1本当りの熱輸送量(Q)と融雪面を通しての平均熱流束(qs)は次のように表わされる。

$$Q = (T_{\infty} - T_s) / (R_e + R_p + R_c)$$

$$q_s = Q / (P \cdot L_c)$$

ここに、 T_{∞} は熱源温度、 T_s は融雪面(舗装表面)温度、 R_e は熱源とヒートパイプ蒸発部との間の伝熱抵抗、 R_p はヒートパイプ自体の伝熱抵抗、 R_c はヒートパイプ凝縮部と融雪面との間の伝熱抵抗、 p は舗装版中のヒートパイプ埋設ピッチ、 L_c はヒートパイプ凝縮部(舗装版中の)長さである。

伝熱抵抗のうち、 R_e は地盤の熱伝導率、地下水の流向・流速、ヒートパイプ形状(直径、長さ)、ボーリング孔ピッチに、 R_c は舗装材料の熱伝導率、ヒートパイプ形状、舗装版中の埋設ピッチ、かぶりによって決まる。

気温が下がるか降雪のため舗装表面の温度が低下すると地中温度と舗装表面温度との間に差が生じる。これにより、ヒートパイプ融雪装置は自動的に熱エネルギーを地中から融雪面へ輸送し、熱負荷が大きくなるほど熱輸送量も増加する。冬期間であっても日射が強く積雪のない舗装表面の温

度が地中温度より高くなると、その箇所のヒートパイプの熱輸送は停止し休止状態に入る。

3. ヒートパイプによる地熱抽出量の評価

ヒートパイプ融雪装置の熱輸送量の算出においては、前述のように、伝熱抵抗 R_e , R_p , R_c の値を知らねばならない。ここでは、それらのうち R_e の評価方法、しかも、熱輸送が定常状態に達している場合の R_e の値の算出方法について述べたい。定常状態での R_e の評価方法に限定する理由は以下のようなものである。 R_p は一般に R_e , R_c と比較すると一桁以上小さい値であることが知られている。また、 R_c については、舗装版内の熱輸送が熱伝導のみにより行われるため、舗装版の熱伝導率、熱容量が知られば実際の状況に応じた R_c の値を数値計算により容易に求めることができるからである。ヒートパイプ融雪装置の熱輸送は気象変化や融雪状況の変化に応じ、非定常の挙動を示す。しかし、融雪過程の途中では融雪面上に積雪や融雪水が残存し融雪面温度がほぼ定常状態とみなしうる場合が存在する。また、熱負荷が次第に厳しくなる場合にはヒートパイプに流入する熱量が定常状態の値に比べて大きくなる。したがって、定常状態

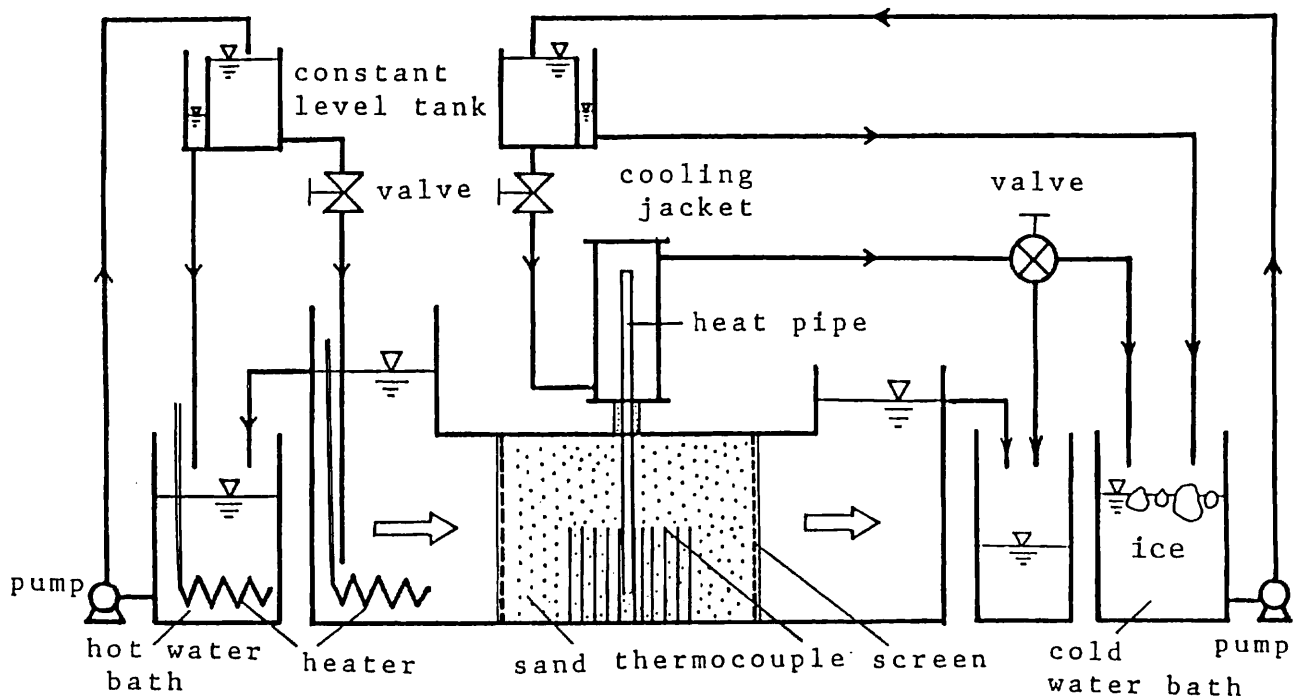


図-6 実験装置概略

でヒートパイプにより抽出される熱量は融雪装置の設計上の一つの目安となるものと考えられる。

以下では、地下水流れ中にヒートパイプ蒸発部を設置し地熱を抽出している場合の現象を理解するために、まず、室内実験の結果から述べようと思う。

3.1 実験概要及び実験結果

実験装置の概要を図-6に示す。地盤のモデルとして水槽中央に砂槽(長さ80cm, 幅30cm, 高さ70cm, 透水係数0.11cm/s, 間隙比0.47)を設け、その中央にヒートパイプ(スチール・アンモニア形, 全長100cm, 外径34mm, 肉厚3.4mm, 蒸発部長さ60cm)を鉛直に埋め込んである。地下水流れは地盤両端に一定の水位差を与えることにより生じさせる。ヒートパイプ凝縮部にはジャケットを取りつけ、一定量、一定温度の冷却水を供給し放熱させている。地下水水温, 冷却水水温はそれぞれ電熱ヒーターと氷を用い調節してある。

実験ではヒートパイプの放熱条件を一定に保ち、地下水流速を5ケース, 地下水水温を3ケース変化させている。

(1) ヒートパイプ熱輸送量

ヒートパイプへの入熱量(Q)と地下水流速(Ua断面平均流速)との関係を地下水水温(Tf)をパラメータとして表わしたものが図-7である。地下水流速が増すにつれ、また、地下水水温が上昇するにつれ、ヒートパイプへの入熱量が増大する。

(2) ヒートパイプ蒸発部平均温度

図-8は地下水水温(Tf)とヒートパイプ蒸発部

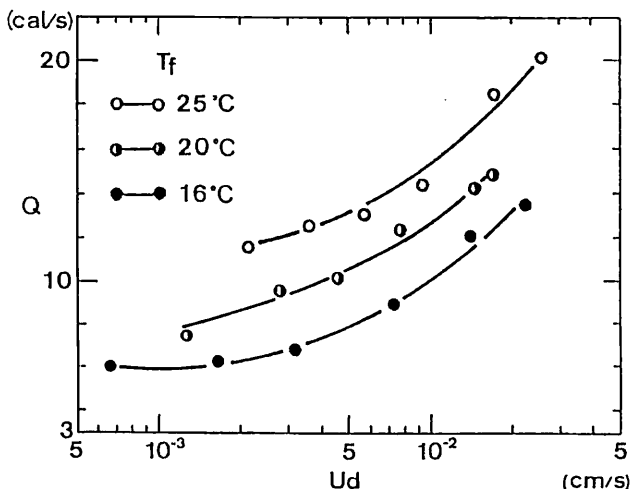


図-7 ヒートパイプへの流入熱量

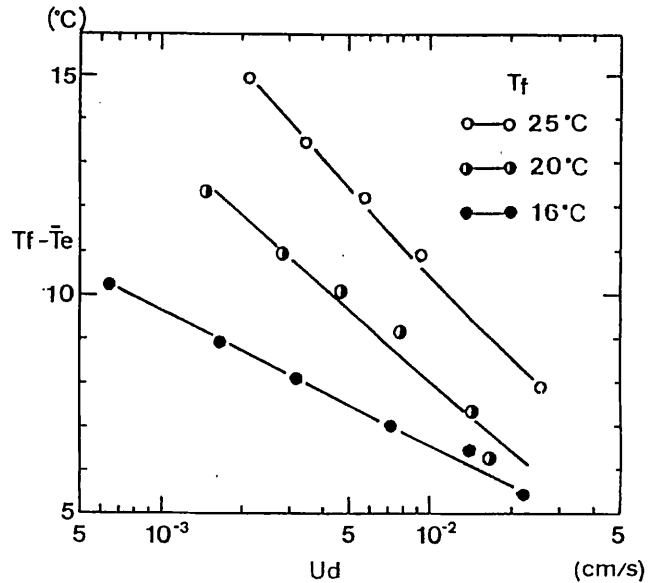


図-8 ヒートパイプ蒸発部平均温度

平均温度(Te)との差と地下水流速との関係を示すものである。地下水水温が一定であれば、地下水流速が増すにつれ、温度差は減少する。

ヒートパイプ熱輸送量は次式より求められる。

$$Q = \alpha_{em} A_e (T_f - \bar{T}_e) = (T_f - \bar{T}_e) / Re$$

ここに、 α_{em} はヒートパイプ蒸発部外壁の平均熱伝達率、 A_e はヒートパイプ蒸発部外盤表面積、 Re は地盤とヒートパイプ蒸発部との間の伝熱抵抗であり、 $Re \equiv 1 / (\alpha_{em} A_e)$ である。(Reの評価とはより基本的な量 α_{em} の評価にほかならず、以下では α_{em} について説明してゆく。)

図-7, 8の結果を上式に適用すれば、地下水流速が増加するにつれヒートパイプ熱輸送量が増大するのは、地下水流速の増加に伴う温度差($T_f - \bar{T}_e$)の減少分を平均熱伝達率の増加分が上回るためであることがわかる。地下水流速が一定で地下水水温の上昇とともに熱輸送量が増加するのは、平均熱伝達率が一定で温度差が増すためである。このことは、次の図-9で明確となる。

(3) ヒートパイプ蒸発部平均ヌセルト数

ヒートパイプ蒸発部平均熱伝達率と地下水流速との関係は、以下に定義される平均ヌセルト数(Num)とペクレ数(Pe)との関係としてより一般的に表現される。

$Num = \alpha_{em} D_o / \lambda_e$, $Pe = U_d D_o / a_e$, $a_e = \lambda_e / (\rho c)_w$
ここで、 D_o はヒートパイプ外径、 λ_e は地盤の有効熱伝導率、 a_e は地盤の有効温度伝導率、 $(\rho c)_w$

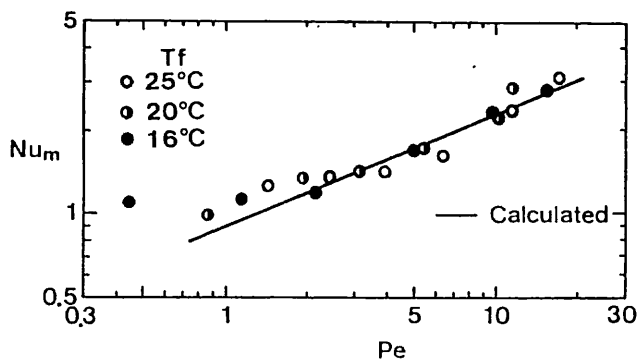


図-9 ヒートパイプ蒸発部平均ヌセルト数

は水の熱容量である。平均ヌセルト数は地下水流れが存在する場合のヒートパイプに流入する熱量と地下水流れがなく熱伝導による場合の流入熱量との比の目安となる指標である。また、ペクレ数は地下水流れによる熱輸送と熱伝導との比を意味する無次元数である。

図-9に平均ヌセルト数とペクレ数との関係を示す。地下水流速の増加とともに、平均ヌセルト数、つまりは平均熱伝達率が增大することが知られる。(実験では D_o , λ_e が一定である。)また、平均ヌセルト数とペクレ数との関係が地下水水温に依存しないことが理解される。

(4) 温度分布

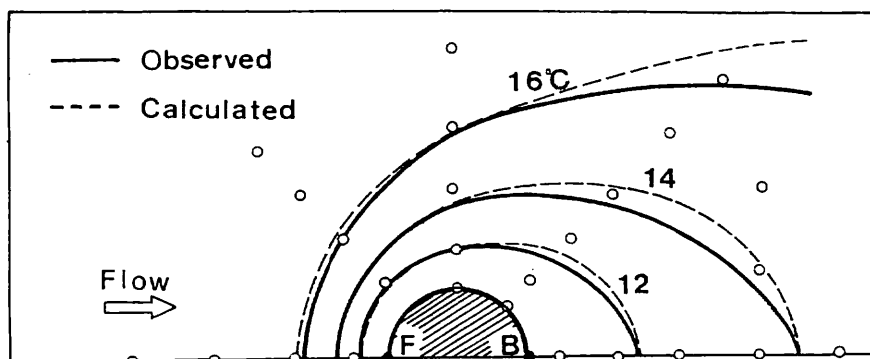
(a) 地盤内温度分布

地下水の水温がほぼ同一で流速が異なる場合の地盤内温度分布の測定例を図-10に示す。図は地盤の水平面内の温度分布であり、ヒートパイプ(斜線部)の回りの温度分布が流れの上流側からみて左右対称となるため、ここでは左側半分についてのみ示してある。図中の実線が測定された等温線を、丸印が測定位置を表わす。等温線はヒートパイプ前面で密に、背面

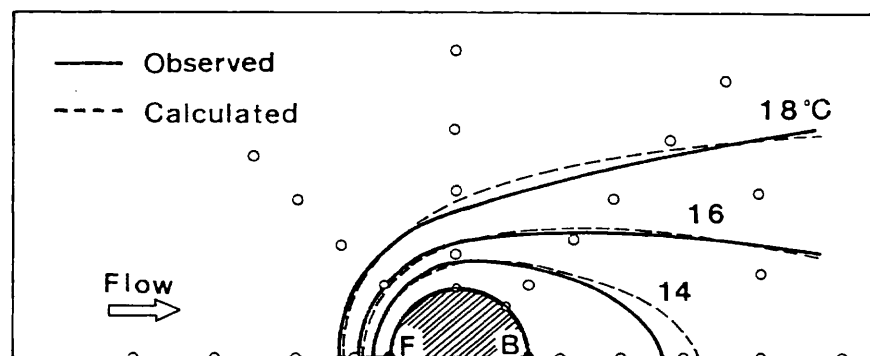
で下流に引き延ばされた卵形のような形状となっている。また、地下水流速が増すにつれてその傾向が顕著になることが確認される。

(b) ヒートパイプ管壁温度分布

図-10と同一の実験ケースにおけるヒートパイプ管壁温度の管軸方向の分布を図-11に示す。図中のE, A, Cはそれぞれ蒸発部(地盤中の埋設部), 断熱部, 凝縮部(冷却ジャケット内の部分)を表わす。また, F線, B線とはそれぞれヒートパイプ前面のよどみ点(図-10の黒丸印の位置)を管軸方向へ連ねた線, 背面のよどみ点を連ねた線を意味する。図より, 地盤内では下線, B線に沿って温度が一様になっていることが知られる。地下水流速が増加すると前面と背面との温度差は増すが, 管軸方向の温度の一様性は保たれている。これらの結果は, ヒートパイプ埋設部が全長にわたり蒸発部として有効に作動していること, 及び, 地盤内のヒートパイプの熱収支については水平2次元内の問題として取扱ってよいことを意味して

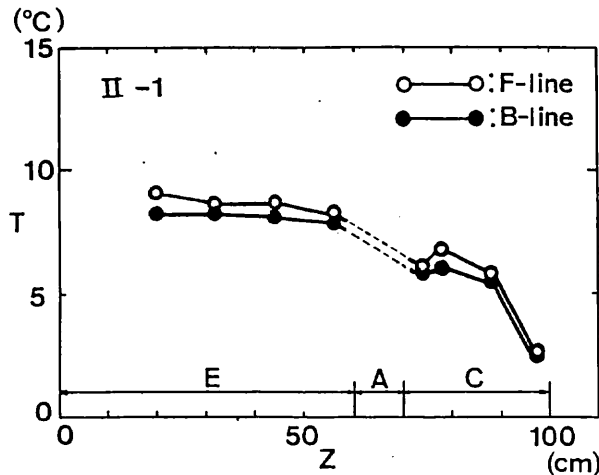


(a) $U_d = 1.24 \times 10^{-3}$ cm/s $T_f = 21.0^\circ\text{C}$

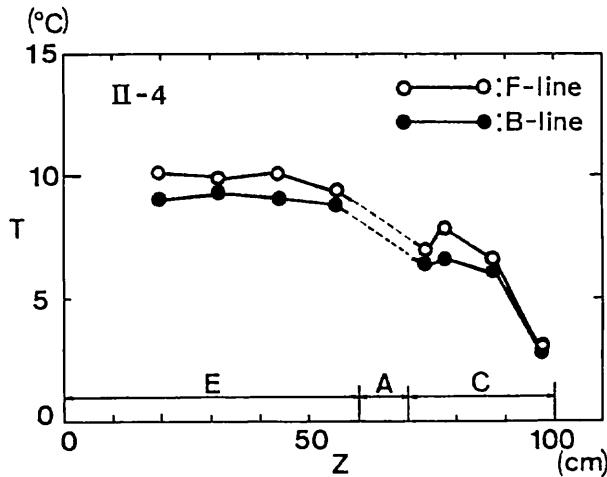


(b) $U_d = 7.75 \times 10^{-3}$ cm/s $T_f = 19.6^\circ\text{C}$

図-10 地盤内温度分布



(a) $U_d = 1.24 \times 10^{-3}$ cm/s $T_f = 21.0^\circ\text{C}$



(b) $U_d = 7.75 \times 10^{-3}$ cm/s $T_f = 19.6^\circ\text{C}$

図-11 ヒートパイプ外壁の管軸方向温度分布

いる。したがって、地盤内埋設部の長さを長くするほどヒートパイプへ流入する熱量も増加することとなる。(実際には、ヒートパイプ自体の性能、放熱形式の影響を受ける。)

3.2 地盤内熱輸送のモデル化と検証

ヒートパイプにより抽出される熱量を算出するためには、まず、地盤内の熱輸送のモデル化を行わねばならない。そのモデルの妥当性が確認された後、モデルを実際のヒートパイプの使用状況に適用し抽出熱量を求めることとなる。ここでは、モデルの妥当性を前述の実験結果との比較により検討する。

図-12に示すように、実験地盤の水平面内の半分を解析領域とし、座標系を設定する。また、

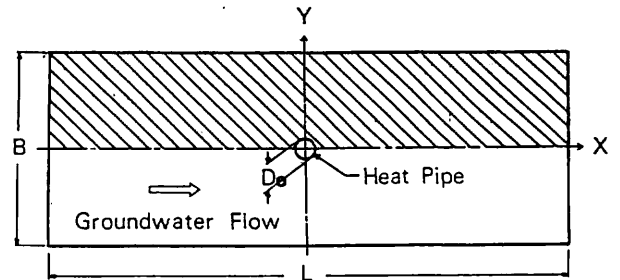


図-12 解析領域と座標系

次の5つの仮定を設ける。

- (1) 地下水流れと温度分布は水平2次元であり、定常状態にある。自然対流の影響は無視できる。
- (2) 地下水流れはダルシーの法則に従う。
- (3) 地盤はいたる所で飽和している。
- (4) 土粒子と地下水とはいたる所で局所的に熱平衡状態にあり、温度が等しくなっている。
- (5) 地盤と地下水の物性値は一定である。

この場合、基礎式は以下のように書かれる。

$$(\rho c)_w \left(u \frac{\partial t}{\partial x} + v \frac{\partial t}{\partial y} \right) = \lambda e \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

$$u = -k \frac{\partial h}{\partial x}, \quad v = -k \frac{\partial h}{\partial y} \quad (3)$$

ここで、 u 、 v はそれぞれ x 方向、 y 方向の流速成分、 t は温度、 h はピエゾ水頭、 $(\rho c)_w$ は水の熱容量、 λe は地盤の有効熱伝導率、 k は地盤の透水係数である。

式(3)を式(1)、(2)に代入すると

$$k \left(\frac{\partial h}{\partial x} \cdot \frac{\partial t}{\partial x} + \frac{\partial t}{\partial y} \cdot \frac{\partial t}{\partial y} \right) + a_e \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (5)$$

式(4)、(5)を次の境界条件のもとで解く。

$$-\frac{L}{2} \leq x \leq \frac{L}{2}, y = \frac{B}{2} \text{にて } t = T_s(x), \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad (6.a)$$

$$\frac{D_0}{2} \leq x \leq \frac{L}{2}, y = 0 \text{にて } \frac{\partial t}{\partial y} = 0, \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad (6.b)$$

$$-\frac{L}{2} \leq x \leq -\frac{D_0}{2}, y = 0 \text{にて } \frac{\partial t}{\partial y} = 0, \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad (6.c)$$

$$x = \frac{L}{2}, 0 \leq y \leq \frac{B}{2} \text{にて } t = T_f, h = Hu \quad (6.d)$$

$$x = \frac{L}{2}, 0 \leq y \leq \frac{B}{2} \text{にて } \frac{\partial t}{\partial x} = 0, h = Hd \quad (6.e)$$

$$x^2 + y^2 = \frac{Do^2}{4} \text{にて } t = Te(x, y), \frac{\partial h}{\partial n} = 0 \quad (6.f)$$

ここで、Lは地盤の長さ、Bは地盤の幅、Doはヒートパイプ外径、T_fは地盤上流端での温度、T_sは地盤側壁での温度、Teはヒートパイプ外壁温度、Hu、Hdはそれぞれ地盤の上流端、下流端でのピエゾ水頭である。

数値計算では有限要素法(三角形シンプレックス要素を用い、解析領域を345節点、592要素に分割)を使用し、ピエゾ水頭の分布、地盤内温度分布、ヒートパイプ各点で流入する熱量、ヒートパイプ外壁での熱伝達率、ヌセルト数を順次算出した。

ヒートパイプ外壁での平均ヌセルト数とペクレ数との関係についての計算結果を図-9に実線で示す。また、地盤内温度分布の計算値を図-10に破線で表わす。図より、計算値と測定値とは良好な一致をみている。これより、地盤内の熱輸送は式(1)~(3)で十分表現しうることが確認される。

3.3 ヒートパイプによる地熱抽出量の算出

ここでは、ヒートパイプが十分広いピッチで埋設された場合を対象としヒートパイプへ流入する熱量の算出方法について述べよう。ヒートパイプ埋設ピッチの影響、ボーリングコストを下げるために1本のボーリング孔に2本のヒートパイプを設置した場合については文献(8)を参照されたい。また、鉛直方向に透水性、伝熱性が大きく変化する

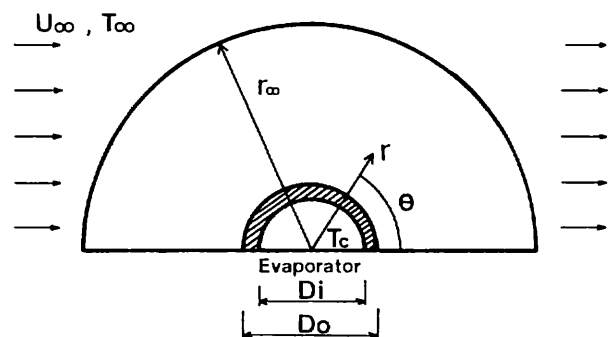


図-13 座標系

ような地盤からの熱抽出については今後の検討に待つところが多い。

前述の数値モデルは、図-13で示されるような円筒座標系で表わされると便利である。ここでは、ヒートパイプ外壁温度を指定せずヒートパイプ管壁内の熱伝導をも同時に解析しよう。

地盤内の熱輸送は次式で表現される。

$$(\rho c)_w \left(v_r \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial t}{\partial \theta} \right) = \lambda e \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t}{\partial \theta^2} \right) \quad (7)$$

$$v_r = U_\infty \left(1 - \frac{Do^2}{4r^2} \right) \cos \theta \quad (8.a)$$

$$v_\theta = -U_\infty \left(1 + \frac{Do^2}{4r^2} \right) \sin \theta \quad (8.b)$$

ここに、V_r、V_θはそれぞれr方向も、θ方向の流速成分、U_∞はヒートパイプより十分上流側の地下水流速である。

また、ヒートパイプ管内の熱輸送は以下のように表わされる。

$$\lambda_p \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t}{\partial \theta^2} \right) = 0 \quad (9)$$

ここで、λ_pはヒートパイプ管壁材料の熱伝導率である。

この場合式(2)の解が求められ、それらは式(8)で表わされる。このため、温度について方程式(7)、(9)を以下の境界条件のもとで解けばよいことになる。

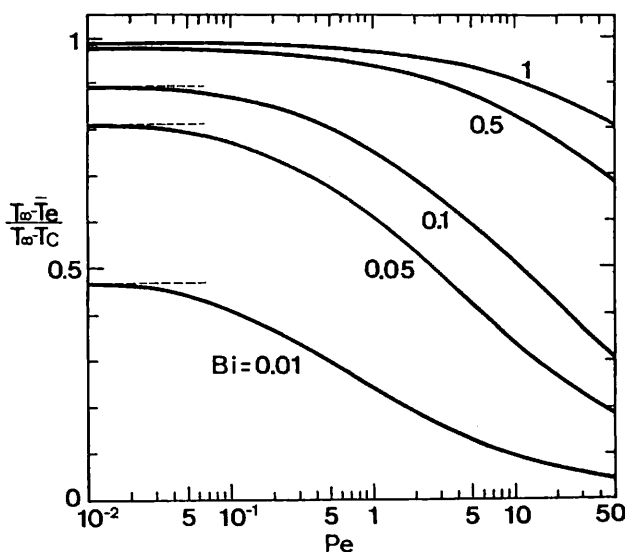


図-14 無次元ヒートパイプ外壁平均温度

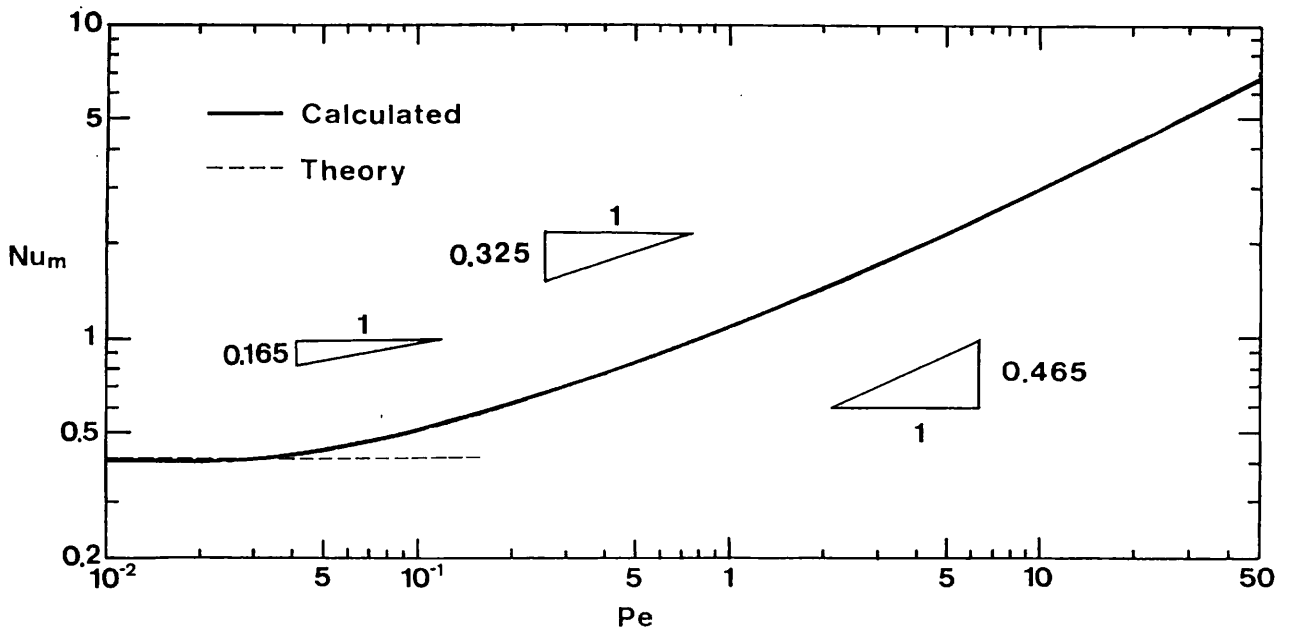


図-15 ヒートパイプ蒸発部外壁平均ヌセルト数

$$r = r_{\infty}, 0 \leq \theta \leq \pi \text{にて } t = T_{\infty} \quad (10.a)$$

$$r = \frac{D_i}{2}, 0 \leq \theta \leq \pi \text{にて } \lambda_p \frac{\partial t}{\partial r} = \alpha_i (t - T_c) \quad (10.b)$$

$$\frac{D_i}{2} \leq r \leq r_{\infty}, \theta = 0, \pi \text{にて } \frac{\partial t}{\partial r} = 0 \quad (10.c)$$

ここで、 r_{∞} は温度に対する影響半径、 D_i はヒートパイプ内径、 r_{∞} はヒートパイプから十分離れた地点での地下水水温、 T_c はヒートパイプ中心温度、 α_i はヒートパイプ内壁での熱伝達率であり円周方向に一定であるとしている。

数値計算では r_{∞} に有限な値を与えねばならない。 r_{∞}/D_o の値を30~150の範囲で変化させたところ、数値解は Pe の値が 5×10^{-2} 以上であれば r_{∞} の値に影響を受けないことが確認されている。数値計算では以下の値を用いている。 $r_{\infty}/D_o = 58.8$, $D_i/D_o = 0.765$, $\lambda_e = 2.1 \text{ w/m}\cdot\text{k}$, $\lambda_p = 50 \text{ w/m}\cdot\text{k}$ である。また、数値解は無次元数を用いて表現されるが、それらの無次元数は次のように定義される。

$$Num = \frac{\alpha_{em} D_o}{\lambda_e}, Pe = \frac{U_{\infty} D_o}{a_e}, Bi = \frac{\alpha_i D_i}{\lambda_p}$$

ここで、 α_{em} はヒートパイプ外壁平均熱伝達である。

図-14はヒートパイプ蒸発部外壁平均温度(\bar{T}_e)と地下水流との関係をビオ数(Bi)をパラメータと

して表わしたものである。縦軸は \bar{T}_e そのものではなく上流の地下水水温(T_{∞})との温度差を無次元化したものである。横軸は地下水流の影響をペクレ数(Pe)で示している。図よりペクレ数が増加するにつれ \bar{T}_e が上昇することがわかる。また、ビオ数が増大するにつれ(ヒートパイプ内壁での作動流体の蒸発がさかんになることに対応する)、 \bar{T}_e は減少し T_c に接近する。

図-15はヒートパイプ蒸発部外壁の平均熱伝達率と地下水流速との関係を平均ヌセルト数(Num)とペクレ数との関係で整理したものである。図中の破線は地下水流が存在せず熱伝導のみの場合の理論解であり、実線は数値解を表わしている。理論解は次のように書かれる。

$$Num = \frac{2}{\ln(2 r_{\infty}/D_o)}$$

数値解は以下のように近似される。

$$Num = 1.04 Pe^{0.465} \quad 1 \leq Pe < 50 \quad (11.a)$$

$$Num = 1.04 Pe^{0.325} \quad 0.1 \leq Pe < 1 \quad (11.b)$$

$$Num = 0.72 Pe^{0.165} \quad 0.05 \leq Pe < 0.1 \quad (11.c)$$

$$Num = \frac{2}{\ln(2 r_{\infty}/D_o)} \quad Pe < 0.05 \quad (11.d)$$

ペクレ数が0.05未満で理論解を用いているのは、数値解が解析領域の大きさ(r_{∞})に依存し、熱伝導が卓越するためである。ビオ数は0.1から1ま

で変化しているが、その影響は無視しうることが知られる。

上記の式(11)より、地盤とヒートパイプ蒸発部との間の伝熱抵抗(Re)は以下のようにして求められる。ヒートパイプ外径(Do)、地下水の接近流速(U_∞)、地盤の有効熱伝導(λe)が知らればペクレ数(Pe)が定まり、式(11)より平均ヌセルト数(Num)が求まる。したがって、平均熱伝達率(α_{em})、伝熱抵抗(Re)が次のように算出される。

$$\alpha_{em} = \frac{Num \cdot \lambda e}{D_o}, \quad Re = \frac{1}{\alpha_{em} A_e}$$

ここに、A_eはヒートパイプ蒸発部外壁表面積である。

ヒートパイプが地盤より抽出する熱量(Q)は前述の次式より求められる。

$$Q = (T_{\infty} - T_s) / (Re + R_p + R_c)$$

なお、地下水流れが存在せず十分広い地盤にヒートパイプ融雪装置が設置されている場合もある。この場合、上記の解析結果によればヒートパイプに流入する熱量はゼロとなり、装置が作動しないことになる。実際には非定常な熱伝導が生じているのであり、断えず地温を低下させながら熱エネルギーを汲み出しているのである。

4. ヒートパイプ融雪装置の実施例

ヒートパイプ融雪装置の開発は我が国が最も盛んであり、試験場所は既に20数箇所に至っている。しかし、試験結果を公表しているものは極めて少ない。ここでは、道路の融雪、凍結防止の例と、

表-2 ヒートパイプ埋設パターン

パネル	径 mm	蒸発部長さ m	凝縮部長さ m	土壌中ピッチ mm	パネル中ピッチ mm	ヒートパイプ本数
A	27.2	9	3	300	300	6
B	27.2	12	3	300	300	6
C	27.2	12	3	500	500	4
D	27.2	12	3	500	250	8
E	48.6	9	1.7	1700	180	2
F	27.2	9	1.7	1700	200	2
G	ヒートパイプなし					

建物の回りの通路融雪の例を紹介する。

(1) 道路の融雪・凍結防止⁵⁾

1978年から1980年に標高約 680 m の寒冷・豪雪

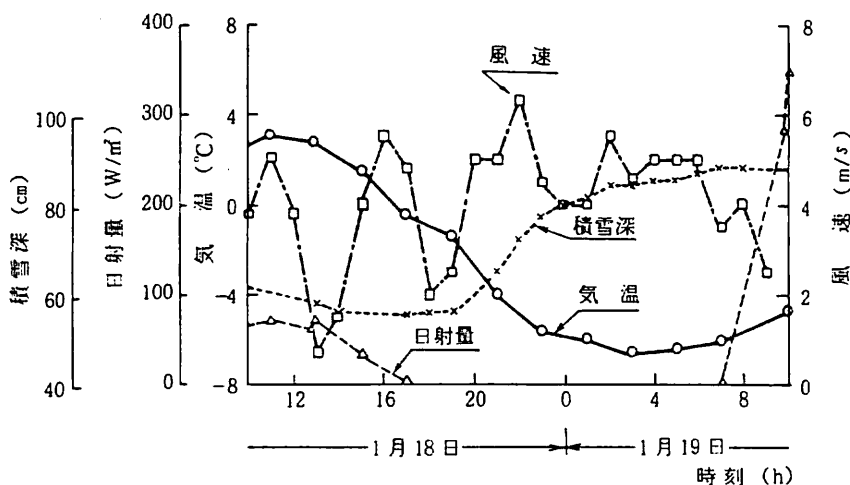


図-16 1979年1月18日、19日の気象条件

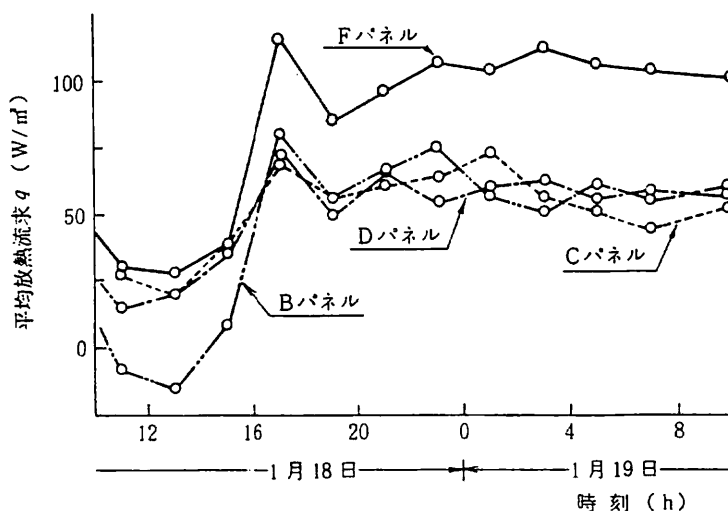


図-17 代表的なパネルの平均熱流束

表-3 各パネルの平均熱流束 (w/m^2)

パネル 1979年	A	B	C	D	E	F
1月19日	53.	63	59	60	90	104
2月20日	63.	73	45	78	83	99
3月2日	45	44	39	48	68	84

地である野尻除雪ステーション構内に試験用コンクリート舗装道路(長さ20m, 幅3.5m, 厚さ25cm)を建設し, その中に直径, 長さ, ピッチ等を変えたヒートパイプ(スチール・アンモニア形)をかぶり5cmで埋設し, 融雪状況の観測を行った。この地点の地質はシルトと砂質であり地下水は存在しない。ヒートパイプの埋設パターンは表-2に示すようであり, パネルDは1本のボーリング孔に2本のヒートパイプを設置したもの, パネルGは比較用としてヒートパイプを埋設してないものである。

1979年1月18日から1月19日にかけてのこの装置の特性を紹介する。図-16はその2日間の気象条件を表わしている。18日は曇りで夕方から19日の朝にかけて約33cmの降雪があった。図-17は代表的なパネルの表面熱流束を示している。図より, 日射量が多く気温の高い時には熱流束は小さいが, 日射量が減少し気温が下がり風速が大きくなるにつれ急激に増加している。

1979年1月から3月にかけて, パネルが冠雪状態にある時に3回平均表面熱流束を測定した。その結果は表-3のようであった。熱流束はパネルごとに異なり39~104 w/cm (融雪能力換算で12~33cm/日)であった。目視による融雪状況の観測より, 融雪能力は大きい順にE, F, D, B, Aであった。パネルDはパネルBと同程度の融雪能力を

表-4 ヒートパイプ埋設状況

モデル	蒸発部 長さ(m)	断熱部 長さ(m)	凝縮部 長さ(m)	かぶり 厚(mm)	舗装材料
玄関先 (A)	8.5	3.0	5.0	60	コンクリート 小 舗 石
通 路 (B)	6.2	3.0	1.8	60	コンクリート 小 舗 石
駐車場 入口(C)	8.5	3.0	5.0	80	コンクリート

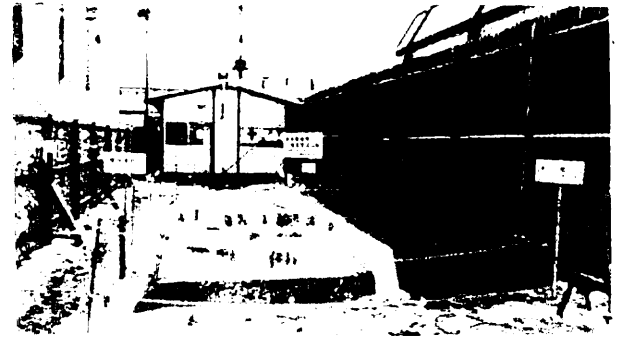


図-18 各モデルの外観

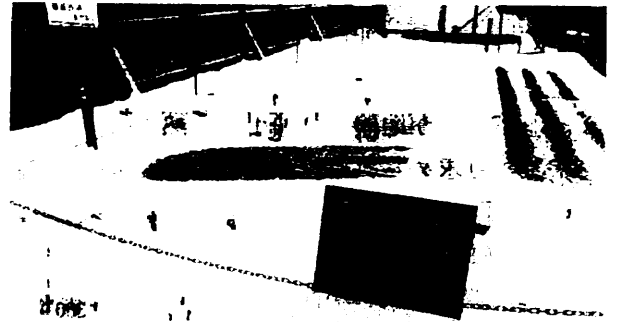


図-19 1983年1月21日午前9時の融雪状況

示し, ボーリング孔が少なくてすむため, 能力的にも経済的にも有利である。

この試験では, ヒートパイプ近傍の地中温度の変化を年間を通じて観測し, 冬期に低下した地中温度が翌年の10月までには元通り回復していることを確認した。また, 重車両(17.5t)をパネル上

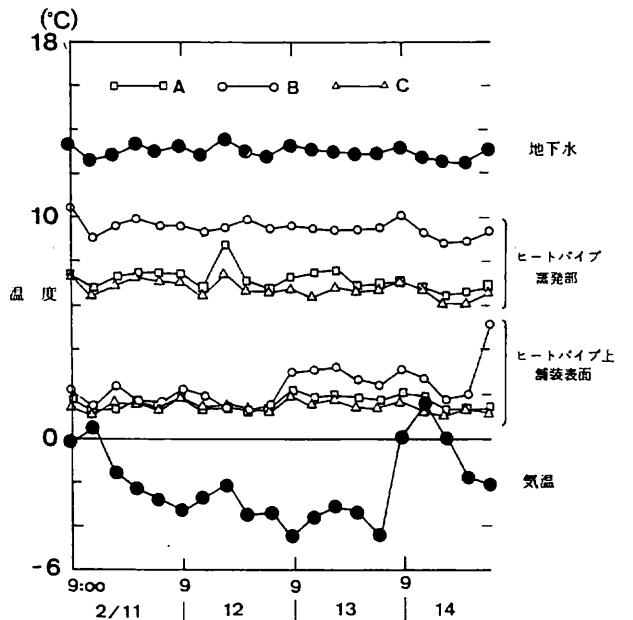


図-20 各モデルの温度変化

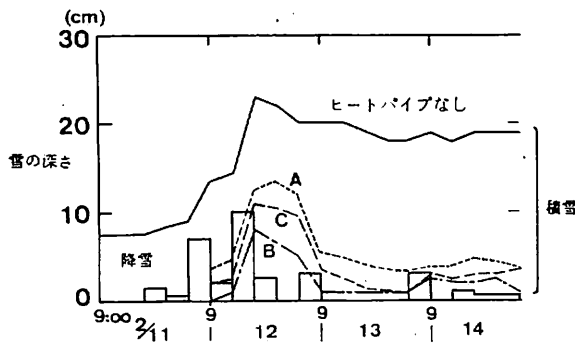


図-21 各モデル上の積雪状況

に走らせヒートパイプにかかる応力を測定した。その結果より、最大応力は小さく、疲労に対する許容応力からみて車道にも十分使用しうるとの結論を得ている。

(2) 建物回りの通路の融雪⁹⁾

1983年1月から2月にかけて秋田市で建物の玄関先、通路、地下駐車場入口モデルをそれぞれ建設し、その中にヒートパイプ(スチール・アンモニア形、外径27.2mm)を3本ずつ30cmピッチで敷設した。3本のヒートパイプはいずれも1本のボーリング孔内に設置されている。埋設状況は表-4に示すようである。各モデルの外観を図-18に示す。

図-19は1月21日午前9時での融雪状況を表わしており、前日の夜中から当日の朝にかけて約10cmの降雪があり、気温は零下であった。雪のうねりが残っているのが見えるが、これはヒートパイプ直上の舗装表面と中間地点での熱流束が異なるためである。

2月11日から14日にかけての気象条件と融雪状況とを紹介する。図-20は気温、ヒートパイプから離れた地点での地下水温、各モデルでのヒートパイプ直上の舗装表面温度、ヒートパイプ蒸発部先端付近での外壁温度の変化を表わしている。また、図-21は降雪状況と各モデル上での積雪深、ヒートパイプなしの地点での積雪深の変化を示している。これらの図より、気温が-2℃以下になっても舗装表面温度は1℃以上を保ち融雪が進んでいることが知られる。

この期間を通じてのヒートパイプ融雪装置の融雪能力は6~18cm/日と評価されている。

5. 今後の検討課題

(1) 熱輸送量

地熱利用のヒートパイプ融雪装置のフィールド試験について、今までに報告された熱流束は150w/m²が最大であろう。したがって、電熱方式のロードヒーティングに比べ融雪能力は低いと言える。このように利用できる熱量に限界があるのは次のような理由による。

1つには地盤の熱容量に限界があるためである。地下水がなかったり、地下水の流動が微弱な地域では地中の熱輸送は熱伝導となり、それまでに自然に蓄積されていた熱エネルギーを除々に消費し続けることとなる。多くの融雪装置はこのような状況であろう。

2つめは、地熱とヒートパイプ蒸発部との間の伝熱抵抗(Re)とヒートパイプ凝縮部と吸熱源との間の伝熱抵抗(Rc)とのいずれもが大きいことである。地下水流れが存在する場合、熱エネルギーは上流側より供給され続ける。このため、利用しうる熱量は熱伝導の場合に比べかなり大きくなることが期待される。(フィールド試験では地下水の流速は測定されておらず、今後確認される必要がある。)ただし、この場合においてもヒートパイプ凝縮部の埋設状況がいままでと同様であれば、ReとRcとは同程度の値となり、融雪能力の大きな向上は望み難い。Re, Rcの値をいかに低減するかが課題である。例えば、地盤や地下水の状態を変化させることなくRcを減少させるためには、ヒートパイプの径を(場合によれば地盤中の部分だけでも)増すことが挙げられる。「式(11)より、 $Num = C \cdot Pe^n$ ($Pe > 0.05$) のとき、ReはDo(ヒートパイプ外径)のn乗に反比例する。0.1 ≤ Pe < 1の範囲では、径を2倍に増すとReは約2割減少する。あるいは、1本のボーリング孔に複数本のヒートパイプを設置することも有効な方法であろう。」Rcの値を小さくするには、できるだけかぶりを小さくするか、ヒートパイプより上方の舗装材料の熱伝導率を大きくすること等が考えられる。上載荷重が小さい地点へ応用する場合には、かぶりをゼロに近づけること、あるいはヒートパイプ凝縮部を平板状にし、上方にのみ放熱されるようにすることも考えられる。¹⁰⁾建物の回りや屋根雪の処理

においてはRcの値をかなり減少させられうるのではないだろうか。

(2) 費用

ヒートパイプ融雪装置の費用は、金額の大きい順に、ボーリング工事費、ヒートパイプ製造コスト、ヒートパイプ設置費に分けられよう。このうち、ヒートパイプ製造コストは大量生産により大幅な低減がなされうる。検討されるべき問題は10m程度のボーリングをいかに安価に行うかである。1本のボーリング孔に2本以上のヒートパイプを設置しその費用の軽減をはかっているのが現状である。

(3) 耐久性

ヒートパイプは作動流体のもれ量が20年以上にわたり全封入量の10%以上であるように製造される。ヒートパイプの地盤中での腐食や舗装版内での変形、疲労破壊の問題については特に検討すべき問題は報告されていない。むしろ、路盤の局所的な沈下などにより、ヒートパイプ凝縮部が曲がり、機能停止する懸念がある。装置の設置前に、路盤や路床の基礎固めを入念にする必要がある。

6. 結論

地熱利用のヒートパイプ融雪装置は、保守とランニングコストのいらない省エネルギー装置であり、比較的穏やかな気象条件下の坂道、カーブ、トンネルの出入口、駐車場、建物の回りの通路などの小規模の面積の融雪に適している。

地下水の水温が高く、流速も大きい地点では建物の回り(屋根雪をも含めて)の雪処理に応用され

ていくことであろう。装置の低廉化がはかれ、各地で実用化されることを期待したい。

参考文献

- 1) 建設省北陸地方建設局：散水融雪施設等設計要領，日本建設機械化協会北陸支部，1981.
- 2) 建設省北陸地方建設局：新潟県の雪と交通・59豪雪の記録，土木学会誌，8月号，65，70，1984.
- 3) Dunn, P. D., Reay, D. A.: Heat Pipes (3rd edition) Pergamon Press, 267, 1982.
- 4) 大島耕一，松下 正，村上正秀：ヒートパイプ工学，朝倉書房，1979.
- 5) 田中 修：ヒートパイプを利用した融雪・凍結防止システム，ヒートパイプ協会設立記念論文集，33-46，ヒートパイプ協会，1982.
- 6) 湯原浩三：地下水温，地下水ハンドブック，119-129，建設産業調査会，1979.
- 7) KAWAHARA Y., Goto I., HAYASHI DA T.: Heat Transfer to a Heat Pipe Evaporator from Groundwater Flow, Proc. 5th Int. Heat Pipe Conf 1984.
- 8) 後迫 茂，後藤 巖，河原能久：ヒートパイプによる地熱の抽出について，第2回土木学会新潟会研究調査発表会論文集，1984.
- 9) 三井建設技術研究所：技術資料，1983.
- 10) 福田 誠他4名：融雪・凍結防止ヒートパネルの実証実験，昭和58年度日本雪氷学会講演予稿集，p.156，1983.