

■ 技術報告 ■

ヒートパイプによる地熱利用融雪システムの研究

Study of a Heat Pipe Snow Melting System Using Stored Earth Energy.

大串 哲朗*・田中 修**・村上 政明***
Tetsurou Ogushi Osamu Tanaka Masaaki Murakami

村松 貞夫****・佐生 新市*****
Sadao Muramatsu Shinichi Sasho

1. ま え が き

従来から主要道路の雪害対策としては機動力による除雪、排雪が主に行なわれているが、寒冷地域の路面凍結防止や機械除雪のおよばない駐車場、高速道路の料金所、ホテルや銀行の玄関口における融雪には、舗送道路等にパイプを埋設して温水や水蒸気を循環させる温水パイプ融雪、電熱線を埋設して融雪する電熱融雪あるいは地下水を汲み上げ路面上に散水して行なう散水消雪が行なわれている。しかし温水や電熱による融雪は熱エネルギー消費が大きいため維持費が高いこと、また温水や電熱線の温度が高いために熱応力によって舗装がひび割れるなどの欠点があり、また散水消雪の場合は地下水利用による水位の低下等種々の問題がある。著者らはこれらのことを解決する省エネルギー融雪システムとして、夏期に自然に蓄えられた土壌中の熱を冬期の融雪のためのエネルギー源として利用するヒートパイプを使用した融雪システムに注目しこれまで研究を行ってきた。このシステムはヒートパイプがわずかな温度差で大きな熱輸送を行なう特性を利用したもので、図-1に示すようにL字状のヒートパイプの一端を路面下の土壌中5~15mの深さ(ℓ_1)に埋設し、他端を舗装中に0.1~0.5mのピッチ(P)で埋設することにより土壌中の熱エネルギーを集め輸送し分配して路面の融雪、凍結防止を行なうものである。これまで本システムの実地試験として、長野市でヒートパイプ3本を使用した小規模な試験を行ない、つぎに長野県野尻地区でヒートパイプ28本を使用した中規

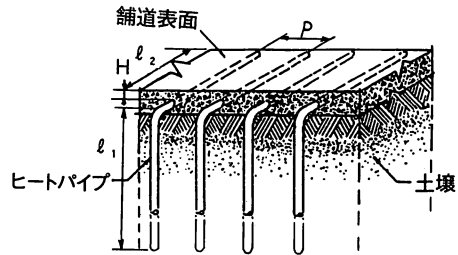


図-1 ヒートパイプ利用の融雪・除水システム

模試験を行なった。^{1)~6)} これらの試験から本システムは、長野市程度の穏やかな気象条件下では十分な融雪能力を示したが、冬期の融雪期間中にヒートパイプ近傍の土壌から熱が奪われる結果土壌温度が低下し、システムの融雪能力の設計には土壌温度の時間変化を考慮する必要があることが明らかとなった。

2. 融雪能力の時間変化計算

2.1 システムの熱モデル

土壌に蓄えられた熱が土壌内の熱伝導によりヒートパイプに流れ、さらにヒートパイプから舗道表面へ熱が伝達される時の本システムの融雪能力を図-2に示す熱モデルで計算した。すなわち(ヒートパイプ埋設ピッチP)×(ヒートパイプからの距離15m)×(深さ2~18m)の直方体の土壌を136分割し、2次元に差分化した熱伝導方程式を解くことにより土壌各部温度およびヒートパイプ温度の時間変化を求める方法である。地表から深さ2mまでの土壌の熱の大部分は直接地表へ流れると考えられるためここでは深さ2m以上の土壌について考えた。境界条件として地表から2mと18mの深さの位置を断熱、ヒートパイプから水平方向に15mの位置をヒートパイプに影響されない土壌の深さ方向の平均温度 θ_s (°C)とし時間的に一定とした。ヒートパイプはほぼ等温で動作するため一点のノ

*三菱電機中央研究所エネルギー研究部主事
〒661 尼崎市塚口本町8-1-1

**三菱電機中央研究所エネルギー研究部参事

***三菱電機中央研究所エネルギー研究部技師

****建設省関東地方建設局関東技術事務所工作課長

*****建設省関東地方建設局江戸川工事事務所機械課係長

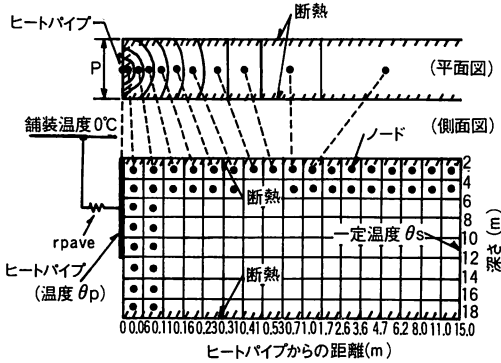


図-2 システムの熱モデル

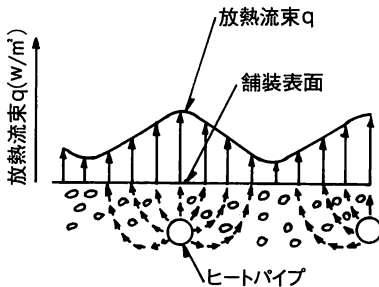


図-3 舗装中の熱流分布

ードで代表させ、舗装の熱抵抗 r_{Pave} (°C/W) を介して舗道表面に熱的に結合させた。舗道表面は本システムの1つの使用条件として、舗道表面が常に冠雪しており常時融雪中であることを仮定して0°C一定とした。これは融雪負荷としては厳しい場合に相当する。初期条件としては全土壌温度をヒートパイプに影響されない位置の平均土壌温度 θ_s とした。

ヒートパイプを通して得られる舗装表面の単位面積当たりの熱流 q (W/m²) (以下この値をシステムの放熱流束あるいは融雪能力という。)はヒートパイプ温度 θ_p を用いて次式で与えられる。

$$q = (\theta_p - 0) / (r_{Pave} P l_2) \quad (W/m^2) \quad (1)$$

ここに l_2 はヒートパイプの舗道中長さである。図-2に示した熱モデルを用いてヒートパイプ温度 θ_p の時間変化を計算することにより式(1)から本システムの融雪能力を求めることができる。なお融雪速度 L (m/day) は雪の比重量 w_{snow} (kg/m³), 含水率 ϕ , 水の融解潜熱 h (Wh/kg) を用いて次式で表わされる。

$$L = 24.0 q / (w_{snow}(1-\phi)h) \quad (m/day) \quad (2)$$

新雪 ($w_{snow} \approx 80 \text{ kg/m}^3$, $\phi \approx 0.0$) について計算すると次式となる。

$$L = q / 309 \quad (m/day) \quad (3)$$

2.2 舗装の熱抵抗

冬期における長期的なシステムの融雪能力の変化を

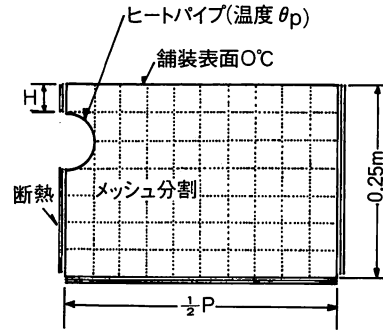


図-4 舗道の熱モデル

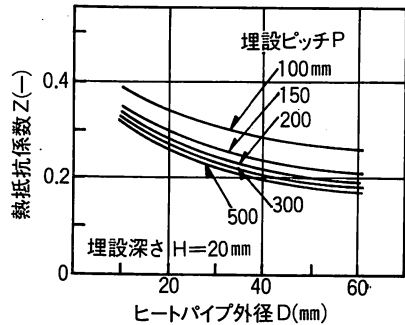


図-5 埋設深さ20mmの場合の舗装中の熱抵抗

考える場合、舗装の温度変化の時定数は土壤のそれに比べてはるかに小さく、図-2の熱モデルに用いる舗装の熱抵抗 r_{Pave} は時間的に一定と考えることができる。舗装中に埋設されたヒートパイプからの熱流は図-3に示すようにヒートパイプ真上で大きくヒートパイプ間で小さな値となる。舗装中の熱流分布はヒートパイプの外径 D , 埋設ピッチ P , 深さ H により変化するため図-4に示す舗装の熱モデルを用いてこれらの影響を考慮した熱抵抗計算を行なった。すなわち対称性からヒートパイプの片半分の舗装を考え舗装断面を2次元に差分して定常熱伝導方程式を解いた。境界条件として舗装中深さ0.25mの位置を断熱、ヒートパイプ温度を θ_p , 舗装表面を0°Cとして舗装表面の熱流分布を求めその平均熱流束 q から式(1)により、舗装の熱抵抗 r_{Pave} が得られる。その結果を次式で定義する熱抵抗係数 Z の値で表わしたものを図-5、図-6に示す。

$$r_{Pave} = Z / (\lambda_{Pave} l_2) \quad (°C/W) \quad (4)$$

ここに λ_{Pave} (W/mK) は舗装の熱伝導率である。図から熱抵抗 r_{Pave} はヒートパイプ外径 D , 埋設ピッチ P , 深さ H により大きく変化することがわかる。

2.3 計算結果

システムの仕様として以下に示す条件の場合の図-2のモデルによる計算値を図-7に示す。計算に使用した値は土壤中ヒートパイプ長さ $l_1 = 12 \text{ m}$, ヒートパイプ

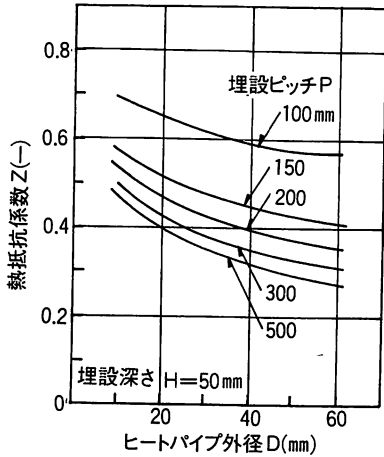


図-6 埋設深さ50mmの場合の舗装中の熱抵抗

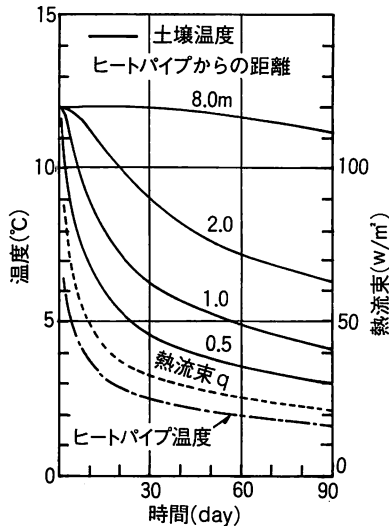


図-7 深さ7mの土壤、ヒートパイプの温度変化と放熱流束

外径 $D=27.2\text{ mm}$ 、埋設ピッチ $P=0.3\text{ m}$ 、ヒートパイプ舗装中長さ $l_2=3\text{ m}$ 、舗装中埋設深さ $H=50\text{ mm}$ 、舗装の熱伝導率 $\lambda_{\text{pave}}=1.6\text{ W/mK}$ 、土壤の熱伝導率 $\lambda_{\text{soil}}=1.3\text{ W/mK}$ 、土壤比重量 $w_{\text{soil}}=1460\text{ kg/m}^3$ 、土壤比熱 $C_{\text{soil}}=0.21\text{ Wh/kg}^\circ\text{C}$ 、式(4)から $r_{\text{pave}}=0.083\text{ }^\circ\text{C/W}$ である。図-7は深さ7mのヒートパイプとヒートパイプ近傍の土壤温度および放熱流束 q の時間変化を示したものである。土壤温度の低下に伴って放熱流束 q は減少し、特に放熱開始後約30日間は急激に低下するがその後30日以降は緩やかな低下となる。冬期の融雪期間を約3ヶ月と考えるとこのシステム仕様では少なくとも $25\sim 30\text{ W/m}^2$ の融雪能力が得られることになる。またヒートパイプから8mも離れた土壤では温度低下がわずかでありほとんど影響を受けないこともわかる。

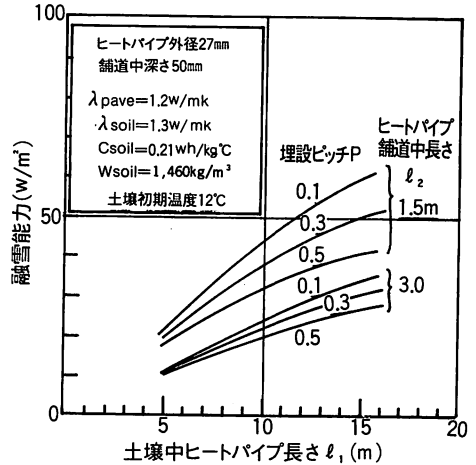


図-8 ヒートパイプ埋設パターンによる融雪能力の変化
(舗装表面 0°C 一定としての60日後の計算値)

以上の計算をヒートパイプの埋設仕様を変化させて行なうことにより、それぞれの埋設パターンでの融雪能力を計算することができる。いくつかの埋設パターンについて融雪開始後60日での融雪能力を比較したものを図-8に示す。図から本システムの融雪能力はヒートパイプの土壤中長さ l_1 が大きい程、またヒートパイプの舗装中長さ l_2 、埋設ピッチ P が小さい程大きいことがわかる。

3. 実地試験

建設省関東地方建設局関東技術事務所が企画実施し、三菱電機㈱が参画協力した、長野野尻除雪ステーションで1978年9月から1980年7月までの試験結果^{1), 3)-6)}の一部を紹介する。

3.1 試験方法

長野県野尻地区は累計降雪深が 9.4 m に達し、1月中、下旬は真冬日となる豪雪地でありシステムにとっては限界試験となることが予想される場所である。試験舗装道は厚さ 0.25 m のコンクリート舗装で巾 3.5 m 、長さ 20 m の舗装を図-9に示すようにA~Gパネルに分け表1に示すパターンでヒートパイプの埋設を行なった。Dパネルは1本のボーリング穴に2本のヒートパイプを入れることによりボーリングコストの低減を図ったものである。ヒートパイプを埋設したのは、1978年9月である。

測定項目は気温、降雪量、風速、日射量などの気象条件、ヒートパイプ表面、舗装および土壤中の各部温度である。またCパネルにおいては水平方向に $0.5, 1, 2, 4, 8\text{ m}$ の位置で 12 m の深さまで 2 m 毎の土

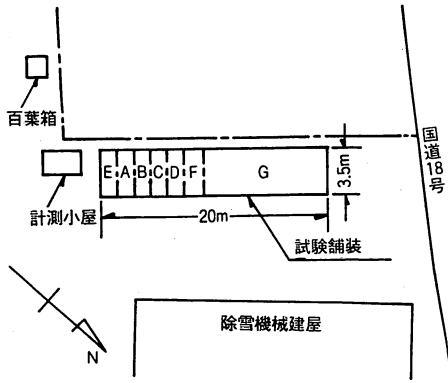


図-9 野尻テストサイト配置図

表1 ヒートパイプの埋設パターン

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	1,700	180	2
F	27.2	9	1.7	1,700	200	2
G	ヒートパイプなし					

壤温度の測定を行なった。

3.2 融雪能力

測定は1978-1979年の冬と1979-1980年の冬の2回行なった。1978-1979年の冬は暖冬で降雪量が最大積雪深0.88mと少なかったが、ヒートパイプのないGパネル上は3月中旬まで常に冠雪していた。ヒートパイプを埋設した試験舗道上では短期間に50cm前後の積雪となることもあったが、降雪が断続的であったため約150mm/day以上の速度で積雪は減少し積雪期間の2/3はパネル上に積雪がない結果であった。1979-1980年の冬は1月下旬から降雪は平年並みとなり最大積雪深は1.45mに達した。しかしヒートパイプパネル上は積雪期の1/3は積雪がみられなかった。

1978-1979年冬における各パネル上の平均放熱流束を表2に示す。表中の値は舗装内の温度勾配から求めたものである。表中の1月19日は日中曇りその後積雪がある場合、2月20日は日中晴れでその後積雪がある場合、3月2日はパネル上に連続して積雪がある場合である。したがってこれらは必ずしも常に舗装面上に積雪があるという厳しい条件下での放熱流束を示しているものではない。

表2 各パネルの平均放熱流束 (W/m²)

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

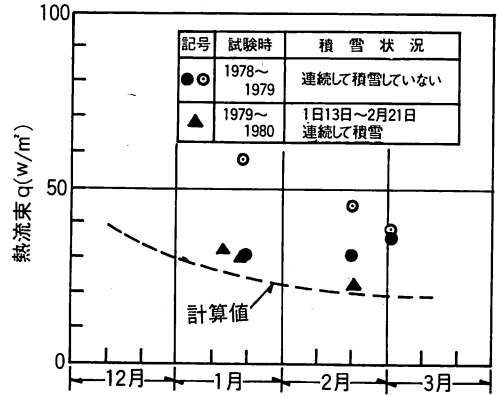


図-10 Cパネル上の放熱流束 q

●▲はヒートパイプ温度実測値によるもの
○は舗装温度勾配実測値によるもの

1979-1980年の試験においては1月13日から3月2日まで試験パネル上に連続して積雪があり、この期間の放熱流束はシステムの限界能力を示しているものと考えられる。この期間のCパネル上の放熱流束の実測値と2項で示した熱モデルによる計算値を比較したものを図-10に示す。図中点線は12月1日を初期時間として計算したものである。図中の実測値(▲印)は土壌の温度勾配の実測値からヒートパイプ温度を求め、路面温度を0℃として式(1)から得たものである。同様にして求めた1978-1979年冬の実測値も図中(●印)に示している。この方法は前述した舗装内の温度勾配によるもの(○印)に比べ数日間といったはるかに長い時間での平均熱流束を示しているものと考えられる。図から冠雪期間の長い1979-1980年冬の実測値は計算値と比較的一致した結果となっていることがわかる。また1978-1979年冬の実測値(表1)が示すように、降雪が断続的である場合は日射、外気、土壌からの熱が一時的に舗道に蓄えられその後の融雪に寄与するため計算値よりはるかに大きな値となる。

その他の実測例との比較として日本道路公団により長岡市内で実施された試験結果⁷⁾と比較したものを図-11に示す。実測値は約20日間パネル上に冠雪していた後の1979年2月5日の値であり、計算値は融雪開始

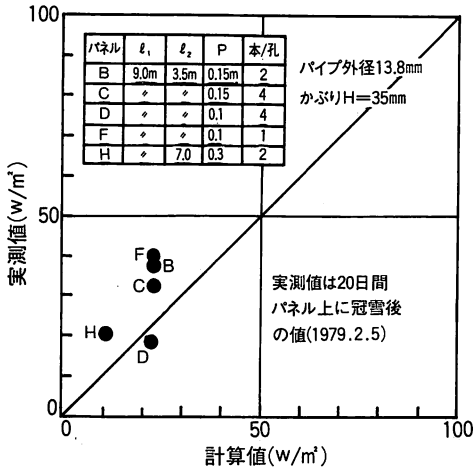


図-11 融雪開始後60日での融雪能力計算値と実測値⁷⁾の比較

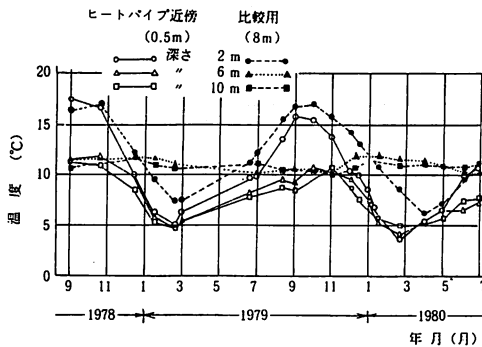


図-12 1978年9月から1980年7月までの土壌温度の変化

後60日での値である。計算値の方が融雪条件（負荷）が厳しい場合であり低目の値になるのは当然であるが比較的一致した値を示しているといえる。

3.3 土壌の温度変化

野尻における1978年9月から1980年7月までの土壌温度の時間変化を図-12に示す。この図はCパネルのヒートパイプから0.5mと8m離れた地点の土壌温度測定結果を示したものである。図-7の計算値からも予想されるようにヒートパイプから8m離れた位置の深さ6~10mの土壌はほとんど温度降下しないのにくらべ、ヒートパイプ近傍の同じ深さの土壌は12月初めから急激に温度降下をはじめ2月末には5℃以下にまで下っている。しかしこの温度は10月までにはほぼ前年と同じ程度まで回復しており夏期における土壌への蓄熱が十分行なわれていることがわかる。深度が2mと浅いところの土壌は両位置とも大きな温度変化を示しているが、これは地表面からの影響によるものと考え

られる。

4. 結 論

ヒートパイプによる地熱利用融雪システムでは土壌から熱エネルギーが奪われるにしたがって土壌温度が低下しその結果融雪能力が低下する特性がある。したがって本システムの熱設計においては土壌温度の時間変化を考慮する必要がある、ここでは舗装表面が常に雪に覆われており0℃一定にあるという条件のもとに上記特性を考慮した融雪能力計算例を示した。その計算値は約20~30日にわたって常に舗装表面が冠雪しているという厳しい条件下での実測値と比較的一致する結果であった。実際の融雪能力は気象条件にしたがって変化し、降雪が断続的な場合は上記の計算値よりもかなり大きな値となる。その値は約30~100W/㎡でありこれは0.1~0.3m/dayの融雪速度に相当している。

本システムは融雪のためのエネルギーコストを全く必要としない省エネルギーシステムであるほか、路面を常時加熱しているため過渡的には融雪能力が大きく得られまた穏やかな気象条件下では舗装表面が乾燥し凍結が防止できるなどの利点がある。しかしその反面ここでの計算、実測値が示すように本システムの融雪能力は通常の電熱融雪に比べて小さく、また受動形システムであることから融雪負荷に応じて任意に増減できるものではない。本システムの設計に当ってはその場所の気象条件（融雪負荷など）を十分吟味して埋設パターンを決定し、融雪負荷が大きい場合は機械除雪を併用するなど融雪負荷に応じた適切な使用を考えることが必要であろう。

参 考 文 献

- 1) 村松貞夫他3名；昭和53年度省エネルギー形路面凍結防止施設の調査試験，関技第147号，83106 C 541，建設省関東地方建設局関東技術事務所
- 2) 村松貞夫他4名；第16回日本伝熱シンポジウム講演論文集（1979），397~399
- 3) 村松貞夫他4名；第18回日本伝熱シンポジウム講演論文集（1981），97~99
- 4) O. Tanaka et al.；IV International Heat Pipe Conference, (1981), 11~23
- 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，（1982），33~46
- 6) 田中康之；ヒートパイプによる消雪実験結果，舗装16-3，（1981），13~18
- 7) ヒートパイプによる地熱利用融雪試験報告書，日本道路公団新潟建設局長岡工事事務所技術課，（1980）