

# ハイブリッド型ヒーティング装置の開発と ロードヒーティングへの適用性に関する研究

村上由貴\*・竹内 康\*\*・岡澤 宏\*\*・小梁川雅\*\*・牧 恒雄\*\*

(平成 22 年 8 月 4 日受付/平成 23 年 3 月 10 日受理)

要約：積雪寒冷地では、歩道を含む道路の雪対策として、幾つかの種類のロードヒーティングが行われているが、運用に際してはランニングコストが安くともインシヤルコストが高い、またはその逆といった財政的な要因があるため、広く普及していないのが現状である。本研究では、温泉排水を利用することを前提に、安価な金属パイプに液化ガスを封入した簡易なハイブリッド型ヒーティング装置を製作し、室内での昇温実験および融雪実験を行った。その結果、封入する液化ガスとして代替フロン HFC-R407C および液化石油ガス LPG の 2 種類について検討したところ、HFC-R407C の昇温効果が優れていたこと、金属パイプを蛇行させることでパイプ温度が距離によらず均一になったこと、舗装体内に埋設するにあたっては、加熱部は放熱部よりも下方に位置し、放熱部は 2° 以上の勾配を持たせて設置させる必要があること、熱源に温水を用いることでロードヒーティングに必要な融雪熱量が得られることがわかった。

キーワード：ロードヒーティング、融雪、金属パイプ、液化ガス、温泉、排水利用

## 1. はじめに

北海道、東北地方、北陸地方などの積雪寒冷地域では、積雪時における歩行者の安全確保、車道利用者の走行安全性および物資流通機能の確保のため、毎年雪対策に多大の費用が投じられている。特に平成 5 年にスパイクタイヤの使用が禁止され、スタッドレスタイヤが主として使用されるに至り、アイスバーン状態の路面での車両の制動性能を確保するために、冬期における道路環境整備が求められるようになってきた。従来、冬期間の交通確保は機械力による除排雪が中心的な役割をはたしてきたが、短期間の集中的な降雪に完全に対応することは、人員、資材、交通事情、排雪場所の確保等の点から極めて困難になってきている。また、2006 年の「高齢者、障害者等の移動等の円滑化の促進に関する法律」いわゆるバリアフリー新法の制定に伴い、積雪寒冷地域において歩道や立体横断施設を新設する際に、高齢者や障害者等安全かつ円滑な通行に支障を来すおそれのある場合には、融雪施設等の防雪施設の設置が義務づけられるようになった。このため、恒常的な雪対策が望まれるようになり、道路幅員が狭く除雪した雪を道路脇に置けないような箇所には、消雪パイプやロードヒーティング等の融雪装置が設置されるようになってきている。

消雪パイプは、一定間隔で設けられた通水口から地下水を路面に流し、融雪する装置のことで、北陸地方等の豪雪地帯の市街地で多く見られるが、積雪期において大量の地下水を揚水するため、図 1 に示すように、地域によっては地下水の揚水に伴う地盤沈下が深刻な問題となっている<sup>1)</sup>。

また、ロードヒーティングとは、アスファルト混合物やコンクリートといった舗装表層内に温水パイプや電熱シートなどの発熱体を埋設し、道路表面の雪や氷を融かす施設のこと、熱源として灯油や電気等が利用されている。このうち、温水パイプによるロードヒーティングは、ボイラーで加熱した不凍液を循環させて融雪するものであるため、ボイラーの設置場所を確保しなければならないという欠点がある。これに対し、電熱シートは融雪効果にムラは無く、ボイラー等の占有設備は不要であるものの、ランニングコストが高くなるという欠点がある<sup>2)</sup>。

一方、近年では地熱や温泉水などの自然熱源を利用するロードヒーティングに関する研究も幾つが行われている。その中でも、宇宙用に開発されたヒートパイプを利用したロードヒーティングは、ランニングコスト・耐久性の面で優れており、長野県松本市を起点として岐阜県高山市に至る中部縦貫自動車道のロードヒーティングシステム<sup>3)</sup>として採用されている。ヒートパイプは、直線状の金属管の内面に毛管作用を有する特殊な材料を貼り付けたもので、金属管内に封入したアンモニア等の作動液が、加熱部（パイプの一端）で蒸発し、非加熱部で放熱・凝縮するとともに毛管作用によって加熱部に環流することで熱循環を行うものである。しかし、ヒートパイプ自体が高価なものであるため、インシヤルコスト<sup>4)</sup>は消雪パイプの 4 倍、温水パイプの 2 倍と割高になってしまう。

このように、ロードヒーティングシステムは、ランニングコストは安くともインシヤルコストが高い、またはその逆といった財政的な要因があるため、広く普及していない

\* 福島県相双農林事務所

\*\* 東京農業大学地域環境科学部生産環境工学科

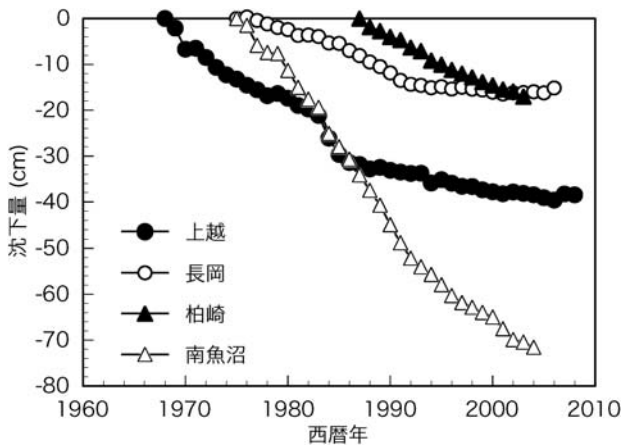


図 1 新潟県内での消雪による地盤沈下<sup>1)</sup>

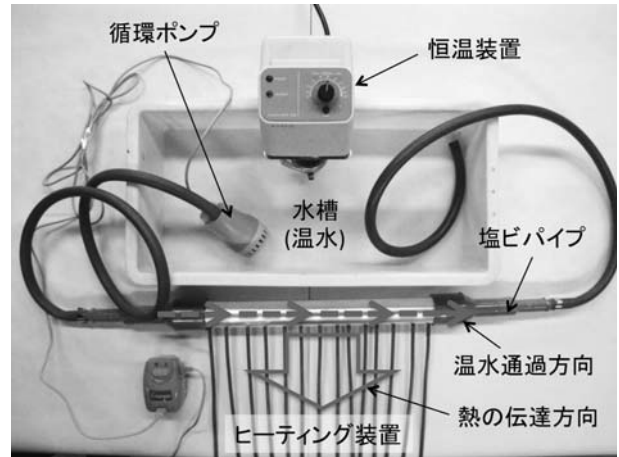


図 3 昇温実験における加熱方法

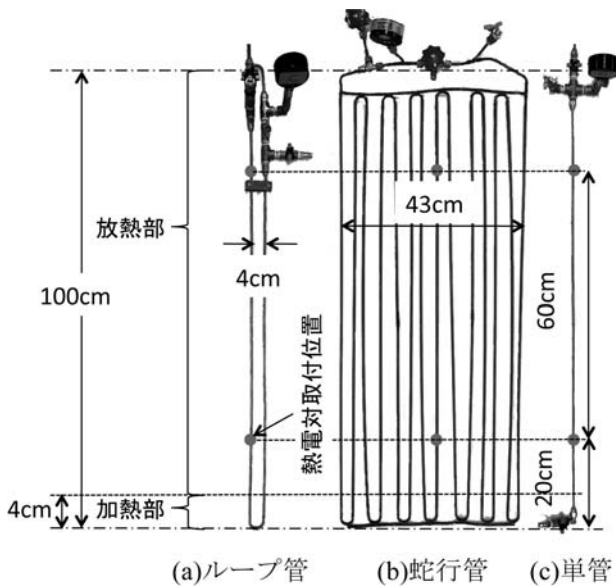


図 2 昇温実験に用いた各種形状の銅製パイプ

のが現状である。

本研究で作製したヒーティング装置は、銅製パイプに作動液としての液化ガスを封入したもので、パイプ内に封入したガスを媒体として、ヒートパイプのように一端を加熱することでパイプ全体が暖まることを期待したものである。このヒーティング装置では、熱源に温泉排水の利用を想定しており、温水パイプ方式のように耐久性がある金属管を使用し、電熱シート方式のようにボイラー等の占有設備の確保が不要であること、すなわちランニングコストが安く、温水パイプ方式のように耐久性が高いだけでなく電熱シート方式のように設置条件が柔軟であるという利点を組み合わせたヒーティング装置であることから、これをハイブリッド型ヒーティング装置と名付けることとした。本研究では、当該ヒーティング装置の昇温実験を実施してパイプの加工形状および封入するガスの種類を検討した。そして、コンクリート版内に当該装置を埋設し、室内での融雪実験を実施することで、ロードヒーティング装置として

十分な融雪能力があることを確認したので報告するものである。

## 2. 昇温実験によるヒーティング装置の作製・設置条件の検討

### (1) 実験方法

昇温実験では、エアコンの配管に用いられているものと同じ銅製パイプ（外径 6.35 mm、肉厚 0.8 mm）を用いて図 2 に示す 3 種類の加工形状のヒーティング装置を製作し、パイプの加工形状およびパイプ内に封入するガスの種類による昇温効果について検討した。本研究で考案するヒーティング装置は、加熱部で吸熱したパイプ内の液化ガスが膨張しながらパイプ内を移動し、放熱した後に凝縮してパイプ内を環流することを想定したもので、図 2 (a) のループ状のもの、図 2 (b) の蛇行状のものがこれに相当し、直線状の図 2 (c) は比較対象として準備したものである。本研究では、(a) をループ管、(b) を蛇行管、(c) を単管と呼び、それぞれの管の加工形状を区別することとした。ここで、図 2 (a) はガスの環流が期待される最も単純なパターンで、(b) はガスが環流するまでに複数回の加熱～放熱過程を繰返すことで、ガスの環流を促進することを期待したものである。

実験を行うにあたって、図 3 に示すように加熱部に外径 48 mm、肉厚 4 mm の塩ビパイプを取り付け、恒温水槽から供給される 40℃ の温水を小型循環ポンプで強制的に循環させることで加熱温度を一定に保つこととした。この加熱方法は、前述したように、道路脇の側溝に流される温泉排水を利用したヒーティングを想定して考案したもので、昇温効果を把握するために図 2 に示したように加熱部下端から長軸方向に 20、80 cm の位置に T 熱電対を金属用接着剤で貼り付け、パイプ表面の温度変化を測定した。また、昇温実験は室温を 20℃ に調整した恒温室内で行った。なお、温度計測にはデータロガー（共和電業 UCAM-60B）を使用し、傾斜角度の検討では 40 秒おき、ガスの種類の検討では 20 秒おきの温度データを計測した。

ガス管の間隔は、モルタル平板内にヒーティング装置を



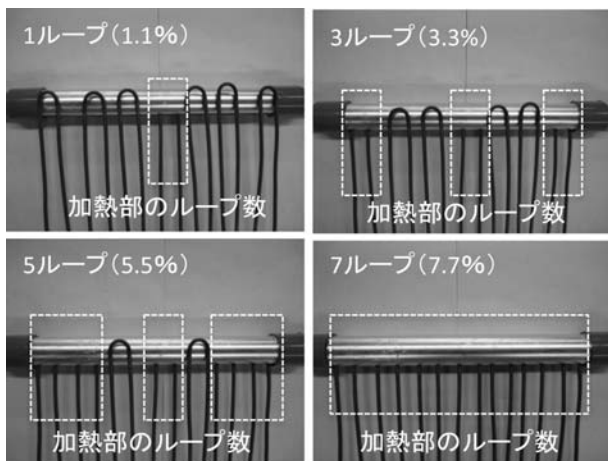


図 4 予備実験による蛇行管ループ数の検討

埋設して行う室内融雪実験を視野に入れ、温水パイプやヒートパイプの一般的な 15 cm 程度の埋設間隔よりも狭い 4 cm とした。これは、融雪実験は室内で行うため平板の設置スペースに制約があり、融雪実験時の融雪量をより正確に把握するために平板上の雪が均一に溶けるよう考慮したためである。既往の研究<sup>5)</sup>によると、熱源の埋設深さと埋設間隔が等しいときに路面において均等な熱流束が得られるとの解析データが示されている。融雪実験では、パイプの埋設位置を 4 cm に予定していたことから、ガス管の間隔を 4 cm とした。蛇行管については、4 cm を目途に曲げ加工を行ったが結果として 3.5 cm 程度で、幅が 43 cm となった。

蛇行管のループ数については、長軸方向の長さが 60 cm の 7 ループの蛇行管を用いた予備実験によって、図 4 に示すとおり受熱ループ数と昇温効果の関係について検討を行った。その結果、蛇行管全体の長さに対する受熱部の長さの割合が 5.5% (図 4 の 5 ループ) 以上で放熱部 (ヒートパイプ部) の温度がほぼ同じになることがわかった。これを長軸方向の長さを 100 cm にした場合には、7 ループで銅管の総延長が約 14 m に対して加熱部の長さが 80 cm 程度となり、総延長に対する受熱部の長さが 5.7% となったことから、本実験のループ数を 7 とした。また、ループ管でも管長 208 cm に対して受熱部が 12 cm 程度で、受熱部の長さは蛇行管と同様に総延長の 5~6% となっている。これに対して単管での割合は 4% と小さい。これは、単管は受熱部を同程度にしてもループ管と蛇行管に比べてガスの環流が期待できず、単なる比較対象として捉えたためである。

封入したガスは、エアコンや冷凍機の冷媒として広く用いられているため入手しやすく、分子中に塩素を含まずオゾン層を破壊しないと言われている代替フロン HFC (ハイドロフルオロカーボン, R407C) およびガスライターに使用されている液化石油ガス LPG (プロパン 54%, ブタン 46%) を用いた。また、ガスを封入するにあたっては、冷凍機の冷媒封入方法にしたがい、真空ポンプで管内を真空状態にした後にガスを最密充填した。この他、アルゴン

ガス、ヘリウムガスについても検討を行ったが、ガスを注入する際に圧力調整弁を使用せねばならず、ガスを液化させて封入することができなかったため、昇温効果を得るには至らなかった。そのため、HFC-R407C と LPG の結果のみを報告することとした。

ヒートパイプではパイプ内の作動液が加熱されて放熱部に移動する際に、ある程度の勾配が必要であるとされている<sup>4)</sup>。当該ヒートパイプ装置は、作動液としての液化ガスが吸熱~放熱を行う際にパイプ内を移動することを想定しているが、ヒートパイプと同様にある程度の勾配を持たせて設置することで、迅速な熱伝達が可能になるものと考えられる。そのため、加熱部よりも放熱部が高くなるよう、傾斜角度を 0°, 2°, 4°, 6° と変化させて実験を行った。これは、舗装路面には雨水排水のための横断勾配 (排水勾配) が設けられており、当該ヒートパイプ装置を路面と平行に舗装体内に設置することを想定したためである。道路構造令によると排水勾配は 1.5~5% 程度であり、傾斜角度 2° のときが排水勾配の平均値に相当し、0°, 4°, 6° は比較対象となる。

## (2) 実験結果

### a) 傾斜角度・ガスの種類の検討

図 5, 6 に傾斜角度を変化させた場合の昇温効果測定結果を示す。図 5 は代替フロン HFC-R407C を用いた場合、図 6 は液化石油ガス LPG を用いた場合の結果を示している。また、両図における測定結果は、蛇行管によるもので、加熱部下端から 80 cm (最遠部) での測定値を示している。

これらの結果からわかるように、HFC-R407C, LPG いずれの場合においても、ヒートパイプと同様に、放熱部は加熱部よりも高い位置になればヒートパイプ装置としての性能が発揮できないことがわかる。これは、加熱部の温度にも依存するが、ガスの膨張・凝縮に起因する圧力変化によってガスが自ら環流するのではなく、膨張・凝縮による密度変化と重力の影響、圧力変化の相互作用によってガスが環流していることを示しているものと思われる。また、同図より HFC-R407C では 0°, LPG では 2° よりも角度を大きくしなければ昇温効果が得られないことがわかる。このことは、本実験で用いたヒートパイプ装置で HFC-R407C を用いたものは道路の横断勾配と平行に設置すれば昇温効果が得られることを示唆しており、LPG を封入したものは横断勾配程度の傾斜では十分な昇温効果が得られない可能性があることがわかった。

次に、図 5, 6 よりガスの種類による影響について検討する。勾配の条件を整えるため 4° での結果 (凡例▲) に注目すると、HFC-R407C では加熱開始から 4~5 分で一定温度に達し、その値は 32°C 程度であることがわかる。これに対し、LPG では加熱開始から 3 分程度では温度上昇は見られないが、その後温度上昇が始まってから 3~4 分程度、加熱開始から 7~8 分後には一定温度に達し、その値は 27°C 程度となった。LPG と HFC-R407C の熱的特性は明確ではないことから、これら 2 種類のガスによる温度上昇特性の違いの原因は明らかにはできないが、図 5, 6 の結果より HFC-R407C の方が LPG に比べて昇温効果が高いことが

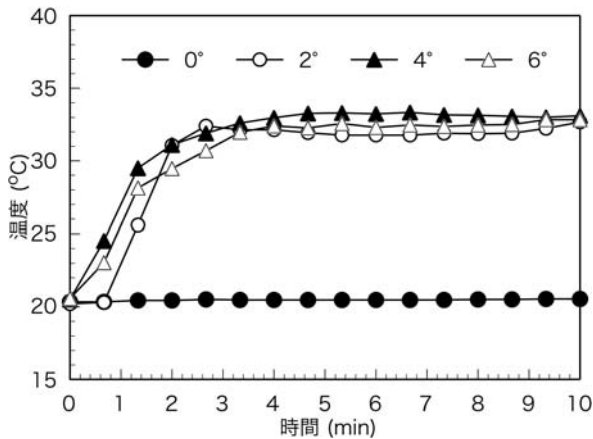


図 5 昇温効果に及ぼす傾斜角度の影響  
(HFC-R407, 下端から 80 cm)

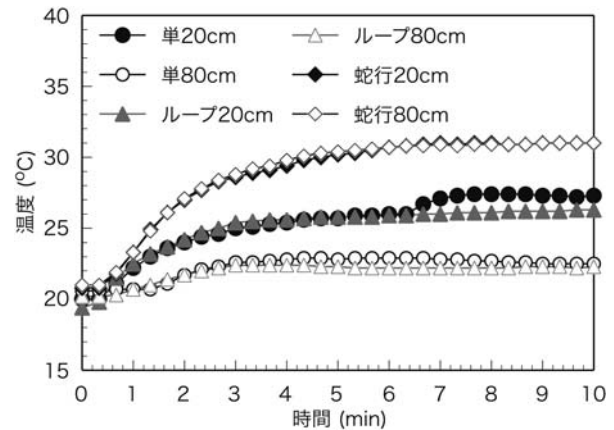


図 7 管の加工形状による昇温効果の違い  
(HFC-R407)

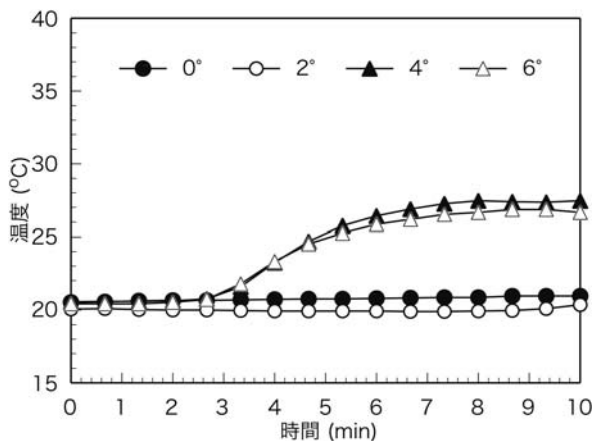


図 6 昇温効果に及ぼす傾斜角度の影響  
(LPG, 下端から 80 cm)

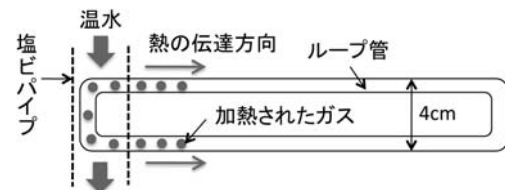


図 8 ループ管における熱伝達のイメージ

わかった。

#### b) パイプの加工形状の検討

図 7 にパイプの加工形状による昇温効果の相違を示す。図 7 は前項の検討において良好な成績が得られた HFC-R407C を用いた結果を示している。なお、実験時の傾斜角度は  $2^\circ$  で、図中の凡例は単管、ループ管、蛇行管での加熱部下端から 20 cm, 80 cm の温度の推移を示している。この結果より、蛇行管での温度計測結果は加熱部からの位置によらず同じ温度を示しているのに対し、ループ管、単管では加熱部から遠ざかるほど温度が低下していることがわかる。

単管は、ヒートパイプのようにウィックを装着したものではないため、ヒートパイプのような伝熱性能を有していないであろうことは予想されたが、膨張・凝縮による密度変化と重力の影響によってガスが環流することを期待したループ管は単管と同程度の結果であった。これは、図 8 に示すようにループ管の左右のパイプの間隔は 4 cm と狭いため、温水によって左右のパイプが同時に、同じ温度に加熱され、ガスが平衡状態になったことが原因であると考えられる。これについては、ループ管の短軸方向の幅を一般

的な埋設間隔 (15 cm 程度) に変化させて検討する必要があるものと考えられる。一方、蛇行管は図 3 に示すように幅が 43 cm と広く、左右両端の間に幾つもの吸・放熱部があるため、加熱初期段階において管内のガスが平衡状態にはならなかったために、ガスが環流して全体的に温度が均一になったものと考えられる。

これらのことより、今回の実験条件では、良好な昇温効果を得るためには、パイプを蛇行させるのが良いことがわかった。ただし、ガス管の間隔は、熱源の埋設位置から最も遠い位置 (舗装表面) での熱量が融雪に必要な熱量を上回るよう決定されるため、フィールド実験を行う際には、ループ管の間隔も含めて検討を行う必要があると考えられる。

#### c) 昇温実験結果のまとめ

以上の結果をまとめると、本研究で作製したヒーティング装置のうち、最も昇温効果が高かったものは、図 2 (b) に示す蛇行管タイプで、代替フロン HFC-R407C を液化させて封入したものであった。そのため、本論文ではこれをハイブリッド型ヒーティング装置と位置づけることとする。ただし、HFC-R407C は温暖化係数が高いために温暖化ガス規制対象となっている現状に鑑みると、今後は管径やガスの封入圧を調整することで液化石油ガス LPG やその他のガスを用いた場合についても検討を行う必要があるものと考えられる。

また、路面融雪のためにハイブリッド型ヒーティング装置を路面と平行に舗装体内に埋設するにあたっては、図 9 に例示するように、放熱部が埋設されている路面の排水勾



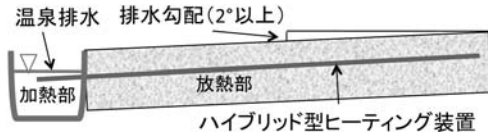


図9 ヒーティング装置の埋設例

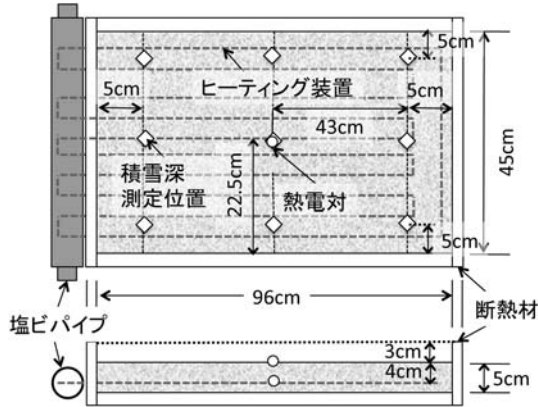


図10 融雪実験に用いたモルタル平板

配が $2^\circ$ 以上であれば、加熱による昇温効果が得られそうであることがわかった。

### 3. 室内実験による融雪特性の検討

本検討では、昇温実験によって求められたハイブリッド型ヒーティング装置を埋設したモルタル平板を用い、室内において融雪実験を行うとともに、平板に用いたモルタルの熱拡散率が舗装用コンクリートと同等であるかを知るための照射実験を行った。

#### (1) 実験方法

##### a) 供試体の作製

融雪実験で使用したモルタル平板の寸法は、図10に示すように幅45 cm、長さ96 cm、厚さ5 cmで、被り厚さ4 cmでヒーティング装置を埋設したものである。平板に使用したモルタルは、市販のプレミックスモルタル(25 kg/袋、内田商事製)で、推奨されていた標準加水量(4.3 L/25 kg)にしたがって加水した。そして、モルタルを打設する際に、図10に示す位置にT熱電対を設置し、実験時に平板内部と表面の温度を測定できるようにした。また、同時にモルタルの熱拡散率を測定するために、円筒供試体(直径5 cm、高さ10 cm)を作製し、供試体中心軸に沿って上面から1, 5, 9 cmの位置にT熱電対を埋設した。なお、平板、円筒供試体ともに、打設後24時間で脱型し、1週間の水中養生を行った。また、温度計測にはデータロガー(共和電業 UCAM-60B)を使用し、照射実験では15分おき、融雪実験では10分おきに温度データを計測した。なお、融雪実験時には、気温もあわせて測定した。

##### b) 照射実験

融雪実験で用いる平板は、プレミックスモルタルを用いたもので、舗装材料に用いられるコンクリートとは比熱や

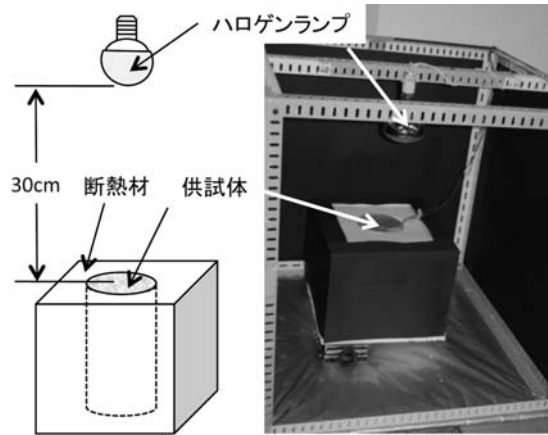


図11 照射実験の概要

熱伝導率などの熱的特性が異なっている可能性がある。これらの熱的特性が異なっていた場合、融雪実験結果をもとに非定常熱伝導解析<sup>6)</sup>を行い、実際の舗装材料を用いた場合の融雪効果を類推する必要がある。

一般的に舗装体の熱伝導解析は、舗装の表面温度を境界条件として一次元で行われる。そのため、舗装体の支配方程式は式(1)に示す一次元熱伝導方程式となる。

$$\frac{\partial T(z, t)}{\partial t} = \frac{\kappa}{\rho C} \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial T(z, t)}{\partial z} = a \frac{\partial^2 T(z, t)}{\partial z^2} \quad (1)$$

ここに、 $T$ : 任意の点における温度 (K)

$z$ : 舗装面からの深さ (m)

$t$ : 時間 (s)

$\kappa$ : 熱伝導率 ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )

$\rho$ : 密度 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )

$C$ : 比熱 ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )

$a$ : 熱拡散率 ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )

式(1)からわかるように、一次元熱伝導方程式に現れる熱伝導率や比熱といった材料固有の値は、最終的に熱拡散率に集約される。そのため、本実験では、図12に示すように円筒供試体にハロゲンランプ(日立 JDR110V50WN/K 9, 50 W, 最大光度12000 cd)を照射して得られた供試体内部の温度測定結果と式(1)による解析結果を比較し、最も良く一致するときの熱拡散率を求めることとした。測定にあたっては、図11に示すように、円筒供試体は上面を除いて全て断熱材(発砲スチロール, 最小厚5 cm)で覆い、一次元方向のみに熱が伝導するようにした。

##### c) 融雪実験

モルタル平板は、水中養生後に昇温実験と同様に温水による加熱を行うために、図10に示したように、加熱部に外径48 mm、肉厚4 mmの塩ビパイプを取り付けた。また、実験中にヒーティング装置以外からの熱伝導を抑制するため、平板の上面以外を厚さ5 cmの断熱材(発砲スチロール)で覆った。さらに、モルタル平板の傾斜角度は昇温実験結果の最低値である $2^\circ$ とした。

室内において自然状態に近い雪を作り出すことは難しい。そのため、融雪実験では製氷機で作った氷をかき氷機

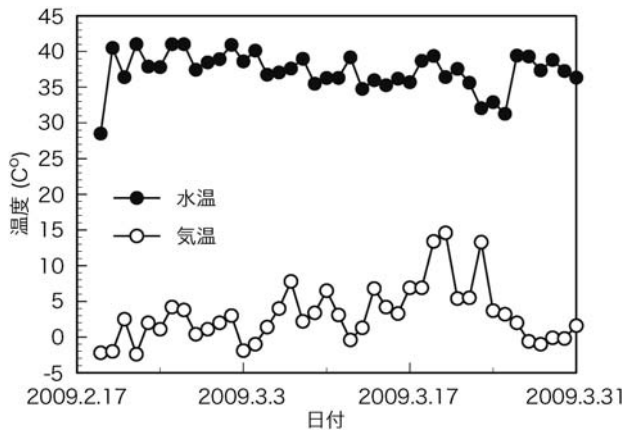


図 12 妙高市赤倉地区の温泉排水温度と気温

械で細かく削ったものを雪に見立て、平板上面に密度が  $200 \text{ kg/m}^3$  になるよう一定厚に捲き出すこととした。なお、積雪層厚を一定にするために、側部の断熱材を平板上面から約  $3 \text{ cm}$  の高さまで立ち上げ、これに沿って余分な雪を削り取ることにした。また、平板での積雪深の変化は、温度測定にあわせてステンレススケールを用いて測定した。測定位置は図 10 に示す 9 カ所で、断熱材沿いの測点以外では断熱材天端に糸を張って積雪深を測定し、9 カ所の平均値を積雪深とした。なお、融雪水は塩ビパイプ側の断熱材側壁の両端に穴を空けて排水した。

本実験は、2009 年の 12 月に温度調節されていない（暖房設備の無い）実験室内にて実施した。しかし、冬季といえども気温によって積雪表面から融雪が進行することが十分に予想された。そこで、融雪実験において観測された融雪深から気温によるものを差し引き、ヒーティングによる融雪深を求めるために、モルタル平板の脇に断熱材の箱を置き、融雪実験と同様に気温による融雪量を測定した。積雪層厚、積雪密度および設置傾斜角度は融雪実験と同じとし、融雪水は断熱材側壁に穴を空けて排水した。

前述したように、本研究では温泉排水の利用を想定しているため、融雪実験を行うに当たっては実際の温泉排水温度にあわせて熱源（温水）温度を設定する必要がある。そこで、2008 年度の冬～春に新潟県妙高市役所の協力を得て同市赤倉地区の温泉排水（建物外に排出されたもの）の温度を測定した。これを図 12 に示す。

図 12 からわかるように、温泉排水は気温に関わらず  $30 \sim 40^\circ\text{C}$  の範囲で安定しており、比較的暖かい状態で排出されていることがわかった。このことより、実験時の熱源温度は最高で  $40^\circ\text{C}$  とし、これより低い温度として、温泉排水温度範囲の下限値  $30^\circ\text{C}$ 、さらにその半分の  $15^\circ\text{C}$  の 3 段階とした。

## (2) 実験結果

### a) 照射実験

図 13 は、円筒供試体内の温度の時系列変化を示している。本実験では、図 13 の結果と式 (1) を中央差分化した式 (2) を用いた解析結果とを比較し、実験結果と最も良く一致するときの熱拡散率を求めることとした。

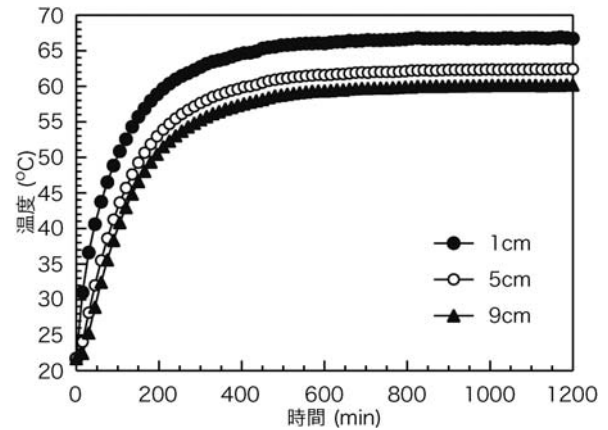


図 13 円筒供試体内の温度の時系列変化

$$\frac{T_i^{t+\Delta t} - T_i^t}{\Delta t} = a \frac{T_{i+1}^{t+\Delta t} - T_i^{t+\Delta t}}{\Delta z^2} - a \frac{T_i^{t+\Delta t} - T_{i-1}^{t+\Delta t}}{\Delta z^2} \quad (2)$$

ここに、 $T_i^t$  : 計測点  $i$  の時刻  $t$  における温度 ( $^\circ\text{C}$ )

$a$  : 熱拡散率 ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )

$\Delta z$  : 節点間隔 (m)

$\Delta t$  : 計測時間間隔 (s)

具体的には、実験条件より  $\Delta z = 0.04 \text{ m}$ 、 $\Delta t = 900 \text{ s}$  であり、供試体上面から  $5 \text{ cm}$  の点を  $i$ 、 $1 \text{ cm}$  の点を  $i-1$ 、 $9 \text{ cm}$  の点を  $i+1$  とし、現在時刻を  $t + \Delta t$  とすると、式 (2) において未知となるのは熱拡散率  $a$  のみとなる。しかし、単純に  $a$  を逆算すると、定常状態に近づくにつれて  $a$  は 0 に収束していくことになる。そこで、 $a$  に適当な値を与えて  $\Delta t$  (900 s) 前の  $T_i^t$  と現在時刻の  $T_{i+1}^{t+\Delta t}$ 、 $T_{i-1}^{t+\Delta t}$  を既知として  $T_i^{t+\Delta t}$  を逆算し、供試体中央部での実測値と比較することとした。このとき、計算値と実測値の誤差を検定するために、式 (3) に示す二乗平均平方根 (RMS) を用いた。解析にあたっては、熱拡散率を  $1.0 \times 10^{-7} \sim 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  まで  $10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  間隔で変化させ、RMS が 1.00% 未満になったときの熱拡散率を求めた。RMS の閾値は、舗装の弾性係数の逆解析に用いられている値<sup>7)</sup>を採用した。

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{T_i^m - T_i^c}{T_i^m} \times 100 \right)^2} \quad (3)$$

ここに、RMS : 二乗平均平方根 (%)

$n$  : データ数

$T_i^m$  : 温度の実測値 ( $^\circ\text{C}$ )

$T_i^c$  : 温度の解析値 ( $^\circ\text{C}$ )

その結果、 $a = 8.0 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  のときに RMS が 0.962 % となり、実測値と解析値が良く一致していた。土木学会舗装標準仕方書<sup>8)</sup>によると、コンクリート舗装に用いられているコンクリートの熱拡散率は  $8.30 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  程度としていることから、本実験で得られたモルタルの熱拡散率は舗装に用いられているコンクリートと殆ど等しい値であることがわかる。このことより、融雪実験によって得られる結果は舗装用コンクリートに埋設した場合を再現し得るものと考えられる。

### b) 融雪実験

図 14～図 16 に  $15 \sim 40^\circ\text{C}$  の温水を用いた融雪実験結果

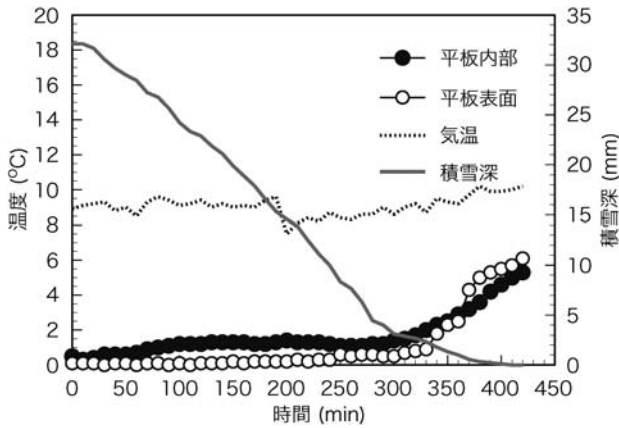


図 14 水温 15°C での融雪実験結果

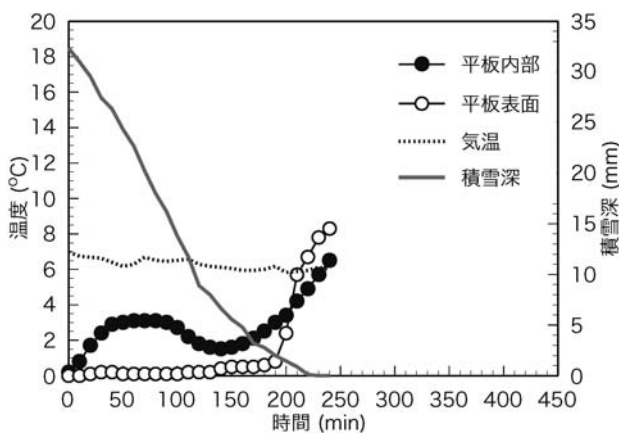


図 15 水温 30°C での融雪実験結果

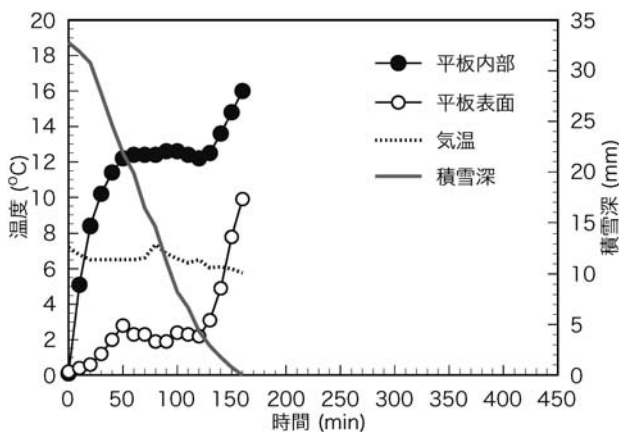


図 16 水温 40°C での融雪実験結果

を示す。図中において示されている記号は、平板中央部での測定結果で、実線は気温による融雪を差し引いた積雪深の時系列変化、破線は気温の時系列変化である。これらの図より、加熱過程で平板内の温度が一旦低下し、その後急激に上昇していた。温度が一定値を示したり低下したりした原因としては、熱源からの熱が融雪時の潜熱あるいは断熱材と平板の間に浸透した融雪水の気化潜熱として奪われ

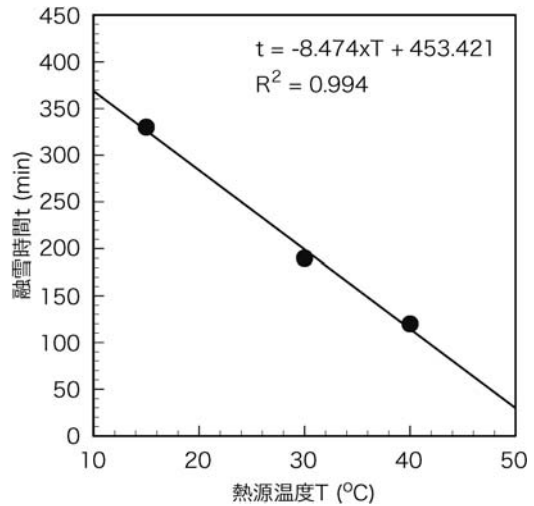


図 17 熱源温度と融雪時間の関係

たためであると考えられる。また、温度が急激に上昇し始めたときの積雪深は 3~4 mm 程度であり、融雪水とシャーベット状の雪が不均一に分布している状態であった。つまり、温度の急激な上昇は、平板上の雪がほとんど無くなり、熱源からの熱が顕熱として使われたためであると考えられる。このことより、温度が急激に上昇し始める直前までの時間が実質的な融雪時間であると考えられる。

これらの結果からわかるように、熱源温度が高くなるにつれて平板内の温度が上昇するとともに、融雪時間が短くなっていった。この結果に着目し、熱源温度と融雪時間の関係をプロットしたのが図 17 であり、この図より融雪時間と熱源温度は一次関数で近似できることがわかる。

フーリエの法則<sup>9)</sup>によると、熱流束は熱流方向の温度勾配に熱伝導率を乗じた一次式で表される。熱流束は融雪熱量、温度勾配は平板内部のパイプと平板表面の温度勾配とすると、モルタルの熱伝導率は常温の範囲では殆ど変化しないことから、熱源温度と融雪熱量は比例関係にあることがわかる。一方、ロードヒーティングによる融雪熱量は式(4)によって求めることができる<sup>3)</sup>。

$$q = q_1 + q_2 = S \cdot \rho_s \cdot C_s (T_g - T_s) + S \cdot \rho_s \cdot L_s = S \cdot \rho_s [C_s (T_g - T_s) + L_s] \quad (4)$$

ここに、 $q$  : 融雪熱量 ( $W \cdot m^{-2}$ )

$q_1, q_2$  : 雪に伝える顕熱量, 雪の融解潜熱量 ( $W \cdot m^{-2}$ )

$S$  : 降雪強度 ( $m \cdot s^{-1}$ )

$\rho_s$  : 雪の密度 ( $g \cdot m^{-3}$ )

$C_s$  : 雪の比熱 ( $J \cdot g^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ )

$L_s$  : 雪の融解潜熱 ( $J \cdot g^{-1}$ )

$T_g$  : 平板表面温度 ( $^\circ C$ )

$T_s$  : 雪温度 ( $^\circ C$ )

降雪強度  $S$  は、今回の融雪実験では実験開始時の積雪深を融雪時間で除した値に相当し、雪の密度  $\rho_s$ 、雪の比熱  $C_s$ ・融解潜熱  $L_s$  および雪温度  $T_s$  は、図 14~図 16 では同じである。また、平板表面温度  $T_g$  を融雪時間内の平均値とすると、15°C のとき 0.3°C、30°C のとき 0.4°C、40°C のとき 1.7°C と概ね 1°C 前後であった。これらのことより、融雪熱



表 1 融雪熱量の解析条件

熱源温度	積雪深	融雪時間	$\rho_s$	$C_s$	$L_s$	$T_s$	$T_g$
15°C	32mm	330min	$200 \times 10^3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$	$2.1 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$	$335 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$	-2.0°C	0.3°C
30°C	32mm	190min	$200 \times 10^3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$	$2.1 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$	$335 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$	-2.0°C	0.4°C
40°C	33mm	120min	$200 \times 10^3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$	$2.1 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$	$335 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$	-2.0°C	1.7°C

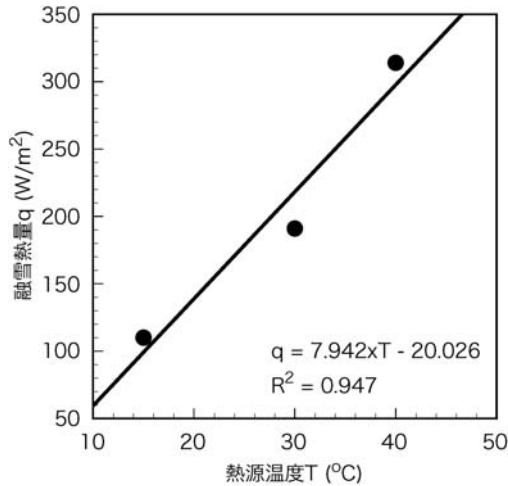


図 18 熱源温度と融雪熱量の関係

量は降雪強度に比例することがわかる。これは、今回の融雪実験のように実験開始時の積雪深が一定の場合には、融雪熱量が大きいほど融雪時間が短くなることを示している。

したがって、上述したように融雪熱量は熱源温度に伴って増加し、融雪時間は融雪熱量の増加に伴い短縮することから、図 17 の結果は、今回の融雪実験結果が妥当なものであることを示していると言える。

次に、式 (4) を用いて各熱源温度での融雪に費やした熱量を求めた。解析条件を表 1 に示す。

ロードヒーティングの設計では、 $C_s$  および  $L_s$  は氷と雪で同じ値が使われている<sup>3,10)</sup> ため、設計用値をそのまま用いることとし、 $\rho_s$  は実験時の測定値を用いた。また、30 mm の積雪深では  $T_s$  をうまく計ることができなかったため、 $C_s$ 、 $L_s$  と同様に設計用値を用いることとした。

ロードヒーティングの必要熱量を求める場合には、融雪熱量を多め（安全側）に見積もるために、通常  $T_g$  は 1°C とされている。しかし、ここでは必要熱量ではなく、融雪に費やした熱量を求めることから、融雪時間内の平均値を  $T_g$  として用いた。

解析結果を図 18 に示す。フーリエの法則に示されるように、融雪熱量と熱源温度は比例関係にあることがわかる。また、既往の文献より必要融雪熱量を調べたところ、盛岡市<sup>5)</sup> では  $130 \text{ W/m}^2$ 、札幌市<sup>11)</sup> では  $210 \text{ W/m}^2$ 、中部縦貫自動車道<sup>3)</sup> では  $160 \text{ W/m}^2$  となっていた。これは、降雪強度が異なるため、ロードヒーティングの必要熱量は地域によって異なるものと言える。本実験で温泉排水温度を調査した妙高市赤倉地区は、地形や気候が中部縦貫自動車道の平湯地区と類似しているため、融雪に必要な熱量は

$160 \text{ W/m}^2$  程度であると考えられる。

図 18 の回帰直線より融雪熱量  $160 \text{ W/m}^2$  に対応する熱源温度を算出すると、 $22.7^\circ\text{C}$  であった。当該地域での温泉排水温度は冬期で  $30 \sim 40^\circ\text{C}$  であったことから、温泉排水によるロードヒーティングは十分に可能であるものと考えられる。

一方、地域によっては、路盤（下方）への放熱が 20% 程度に達する<sup>12)</sup> 場合、逆に下方からの熱流入によってヒーティングが促進される場合<sup>13)</sup> があることから、路盤上への断熱材の導入に関しては地盤内温度を測定した上で検討する必要がある。

#### 4. おわりに

本研究では、ロードヒーティングへの温泉排水の利用を前提とし、金属パイプに液化ガスを封入した簡易なヒーティング装置（ハイブリッド型ヒーティング装置）を作製するとともに、室内での昇温実験および融雪実験を実施した。本研究で得られた知見をまとめると以下の通りである。

- (1) 単管、ループ管、蛇行管の 3 種類のパイプの加工形状について検討を行ったところ、単管、ループ管では昇温効果が得られなかったが、蛇行管では温度が熱源からの距離によらず均一になった。また、封入する液化ガスとして、代替フロン HFC-R407C および液化石油ガス LPG の 2 種類について検討したところ、HFC-R407C の方が昇温効果が良好であった。
- (2) ハイブリッド型ヒーティング装置を舗装体内に埋設するにあたっては、加熱部は放熱部よりも下方に位置し、放熱部は  $2^\circ$  以上の勾配を持たせて設置させる必要があることがわかった。
- (3) 融雪実験では、実際の温泉排水温度を考慮して熱源温度を設定するとともに、ハイブリッド型ヒーティング装置をコンクリートと同等の熱的特性を有するモルタル平板内に設置して融雪特性の検討を行った。その結果、温泉排水を利用することでロードヒーティングに必要な融雪熱量が得られることがわかった。

以上のことから、本研究で開発したハイブリッド型ヒーティング装置はロードヒーティングに利用可能であることがわかった。しかし、本研究は室内レベルでの検討のみを行ったものであるため、今後はフィールド実験を実施し、パイプの間隔が融雪特性に及ぼす影響等を検討する必要があると言える。

謝辞：本研究を実施するにあたり、妙高市役所斉藤 誠氏、ナカジマ技販(株)中島 健氏、同中島剛志氏、東京農



業大学地域環境科学部生産環境工学科学生諸氏の多大なる協力を得た。また、本研究は文部科学省科学研究費補助金（萌芽研究，20658056 研究代表者：竹内 康）の援助を受けて実施したものであることを付記し、関係各位に感謝の意を表すものである。

#### 参考文献

- 1) 新潟県：環境対策ホームページ，<http://www.pref.niigata.lg.jp/kankyotaisaku/1200934841552.html~1205255778775.html>，2010.
- 2) 宮本修司，小長井宣生：道路の消融雪・凍結防止技術—その1. ロードヒーティングの現状について—，開発土木研究所月報，No. 460，pp. 48-58，1991.
- 3) 高山国道工事事務所編：安房峠道路工事誌—一般国道158号中部縦貫自動車道—，pp. 697-723，1999.
- 4) 雪センター編：ヒートパイプ道路融雪研究会報告書，1991.
- 5) 廣瀬宏一，吉井 司：ロードヒーティングによる融雪についての伝熱解析，日本機械学会東北支部講演会，講演論文集，pp. 7-8，2000.
- 6) 竹内 康，岡澤 宏，江向俊文，馬場竜介，牧 恒雄：積雪寒冷地におけるアスファルト舗装の熱伝導解析に関する基礎的研究，農業土木学会論文集，No. 245，pp. 95-100，2006.
- 7) Yang, H. HUANG: Pavement Analysis and Design, Prentice-Hall, Inc., 1993.
- 8) 土木学会：舗装標準示方書，丸善(株)，2007.
- 9) 棚澤一郎，西尾茂文，前川 透：伝熱工学，朝倉書店，1989.
- 10) 国立天文台編，理科年表，丸善(株)，2010.
- 11) 岡 喜秋，石山栄三，上出光志，北口敏弘：鋼板を利用したロードヒーティングシステムの開発，北海道立工業試験場報告，No. 294，pp. 77-82，1996.
- 12) 東北ブロック管轄主管課長会議編：東北地方多雪・寒冷地設備設計要領，p. 25，2004.
- 13) 宮本重信：地下水を利用した節水型融雪システムの開発，土木学会論文集，No. 492，pp. 77-86，1994.

# Development of Hybrid Heating System and its Applicability to Road Heating

By

Yoshitaka MURAKAMI\*, Yasushi TAKEUCHI\*\*, Hiromu OKAZAWA\*\*,  
Masashi KOYANAGAWA\*\* and Tsuneo MAKI\*\*

(Received August 4, 2010/Accepted March 10, 2011)

**Summary** : Some kinds of road heating systems are applied as one of the snow disaster-countermeasures for roads including side-walks in snowy areas. However, the road heating system is not used widely because of the initial cost. The running cost is low but the initial cost is very high. In this study, on the assumption that the drainage water from hot spring is applicable for road heating, a simple hybrid heating device with metal pipes in which liquefied gas was infused was developed, and the temperature rising test and the snow melting test using the hybrid heating device were carried out in a laboratory. As a result, it was confirmed that the heating device developed in this study had enough snow melting ability for road heating.

**Key words** : Road heating, Snowmelt, Metal pipe, Liquefied gas, Hot spring, Drainage water utilization

---

\* Sousou Agriculture and Forestry Office, Fukushima Prefectural Government

\*\* Department of Bioproduction and Environment Engineering, Faculty of Regional Environment Science, Tokyo University of Agriculture