

## 下水熱利用ロードヒーティングシステム構築のための要素技術開発

富田 和彦, 岡 喜秋, 北口 敏弘, 保科 秀夫, 白土 博康  
 長野 克則\*, 本田 公宏\*\*, 久保 茂昌\*\*\*, 長田 茂樹\*\*\*\*

## Development of Fundamental Techniques for Road Heating Systems utilized Drainage Heat

Kazuhiko TOMITA, Yoshiaki OKA, Toshihiro KITAGUCHI  
 Hideo HOSHINA, Hiroyasu SHIRATO  
 Katsunori NAGANO\*, Kimihiro HONDA\*\*  
 Shigemasa KUBO\*\*\*, Shigeki NAGATA\*\*\*\*

キーワード：下水熱, ロードヒーティング, 融雪, 土壌蓄熱, 省エネルギー

### 1. はじめに

近年, ロードヒーティングは融雪機・融雪槽と並び, 都市部における雪捨て場の減少, 高齢化の進展, さらに地方自治体による助成制度の充実などを背景に, 民生用を中心に急速な普及, 発展を見せている。しかし, これら融雪装置の普及は化石燃料等のエネルギー消費を増大させ, 炭酸ガス排出による地球温暖化を助長する。

下水熱は, 都市排熱において大きなエンタルピーを持つ未利用エネルギーの一つであり, 年間を通じ水量, 水温(処理水: 12~17°C)とも比較的安定していることから, ヒートポンプ等との組合せによる暖冷房用熱源としての利用<sup>1)</sup>の他, 積雪寒冷地にある札幌市などでは融雪用熱源として公共用融雪槽への利用<sup>2)</sup>が試みられている。今後は, 灯油など貴重な化石燃料の消費を抑えるためにも, 下水熱を公共用融雪槽だけではなく, 民生用ロードヒーティングの熱源として利用することが期待される。

そこで本研究では, 下水熱を利用するロードヒーティングシステムの構築に向け, 中核技術となる下水からの採熱方法として下水管一体型の熱交換器を試作し, 熱交換性能を試験

するとともに, もう一つの重要な中核技術である高性能融雪路盤については, 著者らが置き雪処理対策として開発した高出力の鋳鉄製ロードヒーティングパネル<sup>3,5)</sup>を用いることとし, 低温水融雪路盤としての適合性を確認するため屋外融雪実験とシミュレーションによる検証を行った。

### 2. 下水熱利用ロードヒーティングシステムのイメージ

図2.1に, 下水熱利用ロードヒーティングシステムのイメージを示す。下水熱は, 下水管壁内に埋設された熱交換パイプを流れる熱媒体(ブライン)を介して蓄熱槽に蓄熱され, 降雪時にロードヒーティングの融雪用熱源として利用される。このシステムでは, 採熱が行われない期間は下水熱が周囲土壌へ蓄熱され, 採熱時には下水熱および周囲土壌熱が利用できる蓄採熱システムとなるのが特徴である。従って, ここで用いる路盤は下水や土壌からの熱回収温度レベルでも融雪可能なように, 熱容量が小さく温度応答性に優れ, かつ放熱ムラの少ない伝熱性能に優れた路盤であることが求められる。

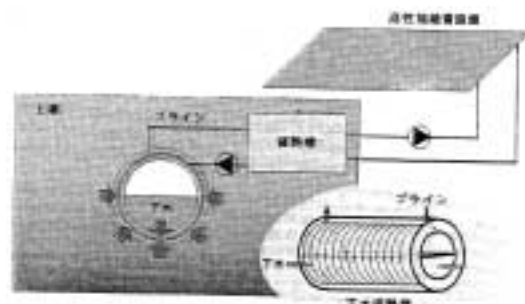


図2.1 下水熱利用ロードヒーティングシステムのイメージ

\* 北海道大学大学院工学研究科都市環境工学専攻

\*\* (株)日本設計

\*\*\* (株)北秀

\*\*\*\* (株)ホッコンアイピーシー

事業名：重点研究

課題名：北国型福祉社会における住生活環境整備に関する研究

### 3. 下水管一体型熱交換器の基礎実験<sup>6)</sup>

#### 3.1 下水採熱管

下水管内に熱交換器を設置する場合、下水の汚濁による皮膜や汚物による熱交換性能の低下、スムーズな流れの阻害等の問題が想定されたため、その解決策として熱交換パイプと下水管が一体化した熱交換器（以下、下水採熱管又は採熱管と呼ぶ。）を開発することとした。今回試作した下水採熱管は、下水管に内径300mm、肉厚30mm、有効長2000mmの遠心力鉄筋コンクリート製（JIS A5303）を用い、この壁内中心に、内径8mm、肉厚1.5mmのポリブデンパイプを45mmピッチでスパイラル状（全長：約55m）に埋設する構造とした。



図3.2 堰（水位1/4）の設置状況

#### 3.2 実験施設概要及び実験方法

実験施設の系統図を図3.1に示す。装置上部のタンク内で一定温度に保持された温水（下水）を下水採熱管内に一定流量で投入した。ブライン（40%プロピレングリコール水溶液）は恒温槽にて一定温度に設定され、採熱管壁内のスパイラル管に送られる。採熱管内の水位を一定に保つため、採熱管出口に堰を設けた（図3.2）。この採熱管の熱交換性能を把握するため、まず、下水管周囲をグラスウールで断熱した実験（実験1）を行った。次に、本体を1,000mm×1,000mm×1750mmの土壌（砂）に埋設させた実験（実験2）を行った。土壌埋設時の採熱管断面と温度測定箇所を図3.3に、実験施設の外観を図3.4に示す。

#### 3.3 実験条件

表3.1に実験条件を示す。本体のみを用いた実験1では、下水（温水）側が送水温度15～20℃、流量6 l/min、採熱

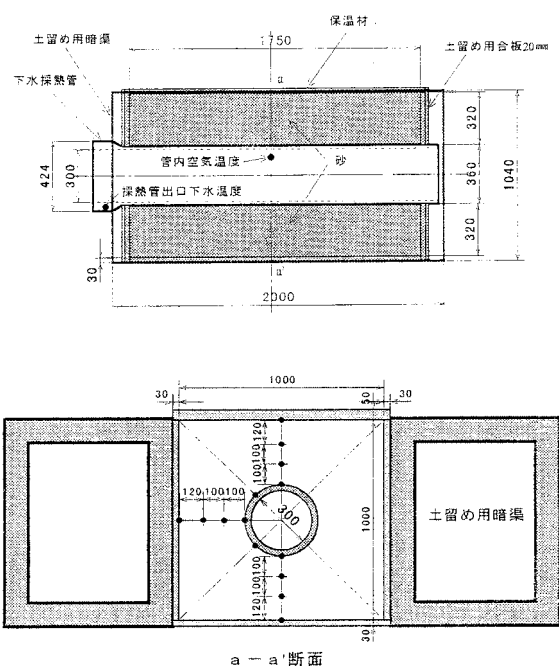


図3.3 下水採熱管の断面及び温度測定箇所

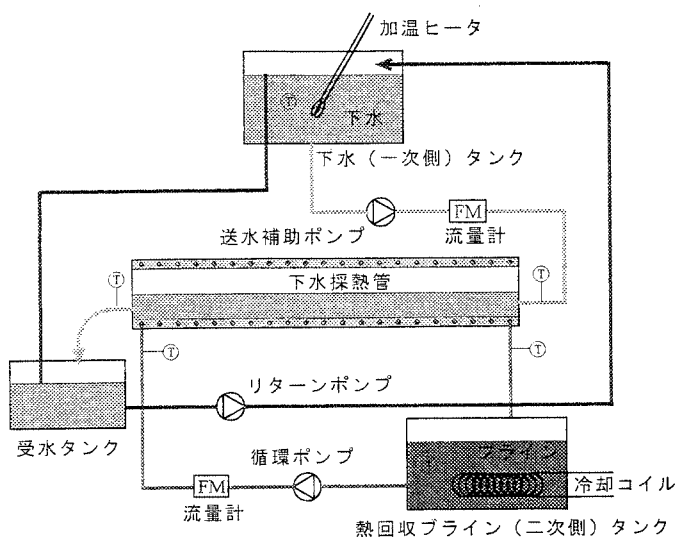


図3.1 熱交換性能実験施設の系統図



図3.4 下水採熱管の熱交換性能実験の外観

（ブライン）側が送水温度0～1℃、流量0.5～1.5 l/minの条件で行った。次に、本体を土壌に埋設して行った実験2では、すべての条件を表のように設定し、蓄熱と採熱の繰り返しを

3 サイクル行った。このうち、採熱期間と2 サイクル目の蓄熱期間は24時間とした。また、3 サイクル目については採熱管への送水を停止し、中空状態とする土壤のみからの採熱とした。採熱管の水位(堰高)は、実験1, 2 共に管内径の1/4, 1/2, 3/4の3種類とした。

表3.1 実験条件

|      |           | 実験1     | 実験2   |
|------|-----------|---------|-------|
|      |           | 本体のみ    | 本体+土壤 |
| 下水   | 温度(°C)    | 15~20   | 15    |
|      | 流量(ℓ/min) | 6       | 6     |
| ブライン | 温度(°C)    | 0~1     | 1     |
|      | 流量(ℓ/min) | 0.5~1.5 | 1.0   |

### 3.4 実験結果及び考察

#### 3.4.1 コンクリート製下水一体型熱交換器の熱交換性能

本体のみで行った実験1の結果を、下水とブラインの単位温度差、単位長さあたりの採熱量と流量の関係を用いて図3.5に示す。また、土壤に埋設した実験2の2 サイクル目の採熱期間平均値を同図に示した。これより、採熱量はブライン流量の増加に伴い高くなり、その傾向は水位が高いほど顕著である。また累乗近似式から推定した採熱量を比較すると、水位1/4では10.9W/m・K、水位1/2では14.7W/m・K、水位3/4では19.2W/m・Kとなり、水位1/2と3/4は1/4に比べ、それぞれ1.35, 1.76倍の採熱量となった。ここで採熱量は、下水と採熱管側面の接触面積(濡れ面積)が大きくなるほど増大すると考えられる。濡れ面積比は、水位1/4を1とすると、水位1/2と3/4はそれぞれ1.5, 2倍となる。採熱量の実測値よりもやや大きな値となっているが、採熱量の大きさは濡れ面積にほぼ比例することが分かる。

次に、下水とブラインの単位温度差あたりのブライン温度差 $\Delta T^*$ とブライン流量の関係を図3.6に示す。図よりブライン流量の増加に伴い $\Delta T^*$ は小さくなり、その特徴は水位が高いほど顕著である。図3.6より、下水の温度、水位及びブラインの温度、流量から採熱管出口のブライン温度を求めることができる。一例として、下水温度20°C、水位1/2、ブライン温度1°C、ブライン流量1ℓ/minとすると、図より $\Delta T^*$ は0.46となり、 $\Delta T^* = \text{ブライン温度差} / (\text{下水温度} - \text{ブライン平均温度})$ より、 $0.46 = (t_0 - 1) / (20 - (t_0 + 1) / 2)$ を解くと、 $t_0 = 8.1^\circ\text{C}$ となる。

#### 3.4.2 土壤蓄採熱時の熱交換性能

実験2の代表例として水位3/4の経時変化を図3.7, 3.8に示す。図3.7に採熱管から200mmの位置での土壤温度を示したが、蓄熱時には時間経過と共に上昇、採熱時には下降すること、また土壤のみからの採熱となる採熱期間3では急激に下

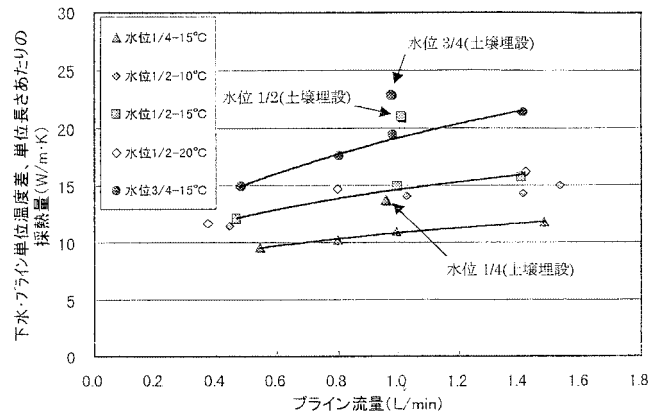


図3.5 採熱量とブライン流量の関係

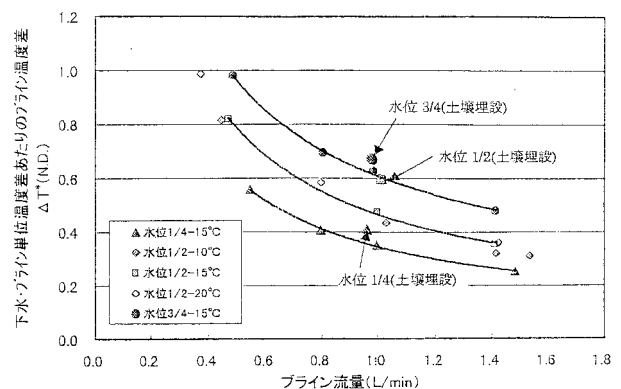


図3.6 ブライン温度差とブライン流量の関係

降しているのが分かる。また、土壤温度は上方、水平、下方の順に高くなっており、採熱管と下水の濡れ面積の大きさにほぼ相関する結果となっている。なお、採熱管から100, 320 mmの土壤温度についても同様な傾向を示した。次に下水と土壤からの採熱となる採熱期間2(図3, 8)では、採熱開始直後の採熱量は約550Wであるが、時間経過と共に徐々に減少し24時間経過の採熱終了時は約400W、土壤のみの採熱となる採熱期間3では約50W程度であった。図に示していないが水位1/2, 1/4についても同様な傾向を示し、採熱開始直後は各々約500W, 約400W, 24時間後の終了時は各々約360W, 300W, また採熱期間3の終了時は水位による違いはなく約50W程度であった。

以上の結果を、図3.9~3.11に整理した。図3.9(a)に水位をパラメータに採熱期間2における採熱開始時と終了時の土壤平均温度、図3.10(a)にその温度差、同様に図3.9(b), 3.10(b)に採熱期間3における土壤平均温度、温度差を示す。ここで、土壤平均温度は採熱管から等距離にある上方、水平、下方の土壤温度の平均(但し、水平を2倍)として求めた(図3.3参照)。

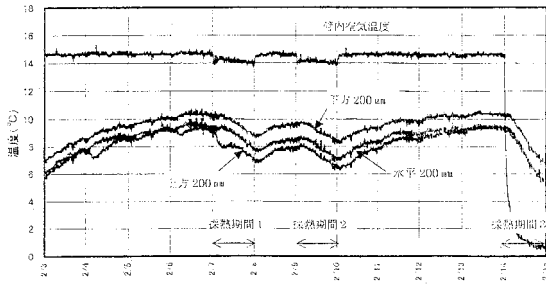


図3.7 土壌温度の経時変化 (水位3/4)

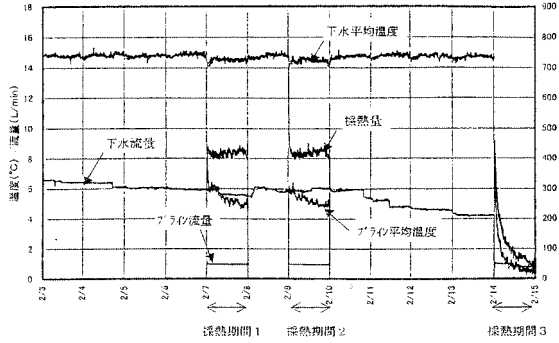
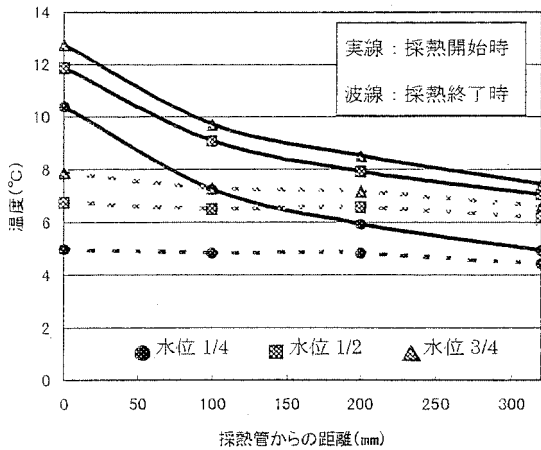
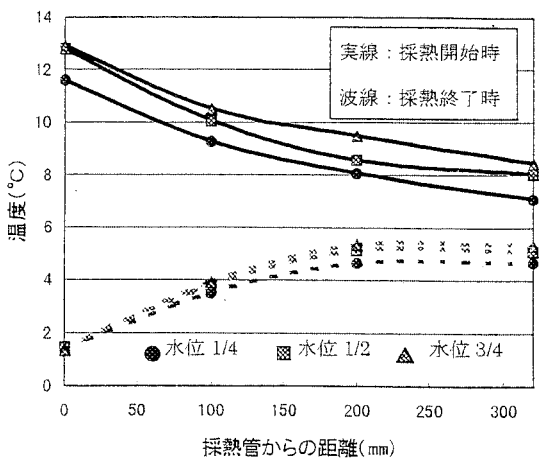


図3.8 採熱量の経時変化 (水位3/4)

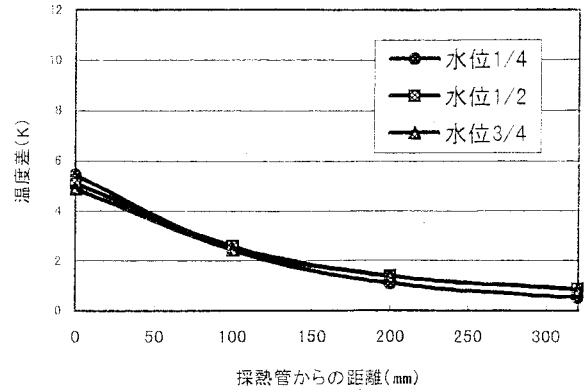


(a) 採熱期間2 (本体+土壌)

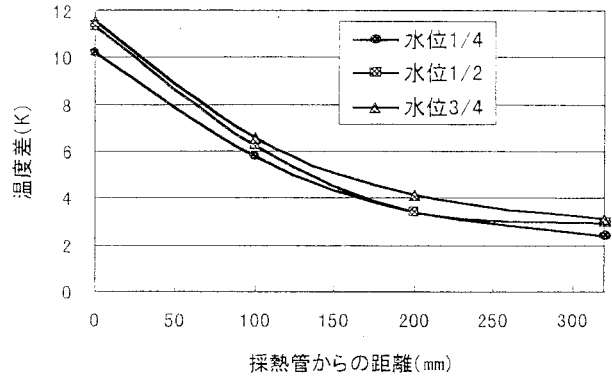


(b) 採熱管3 (土壌)

図3.9 採熱開始時及び採熱終了時の土壌平均温度



(a) 採熱期間2 (本体+土壌)



(b) 採熱管3 (土壌)

図3.10 採熱期間中の土壌温度降下

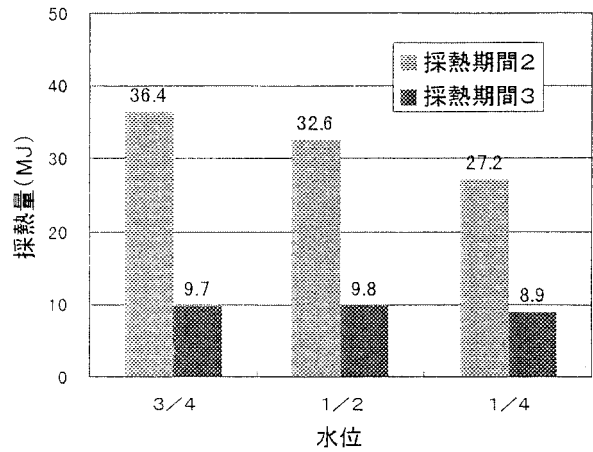


図3.11 24時間積算採熱量の比較

図3.11に採熱期間2の24時間積算採熱量を採熱期間3と比較して示す。この図から、採熱期間2の採熱量は、3.4.1の本体のみの結果と同様、1/4、1/2、3/4の順に水位が高いほど大きい。図3.5に実験2の平均採熱量を示すが、実験1に比べ、水位1/4では1.27倍の13.8W/m・K、水位1/2では1.38倍の21.0W/m・K、水位3/4では1.2倍の22.9W/m・Kであった。これより、周囲土壌への蓄熱効果による採熱量の増加が明らかになった。また、採熱期間2では下水と土壌の両方から採熱が行われるが、土壌からの採熱量は採熱開始時と終了時の土壌温度差に比例すると考えられる。図3.9(a)から水位が高いほど土壌温度も高いが、図3.10(a)から土壌採熱量に水位の違いによる差はほとんど無いことが分かる。従って、採熱期間2における採熱量の水位による相違は、土壌よりも下水からの熱移動に起因するものと推定される。

一方、図3.11から採熱期間3の下水のない土壌のみからの採熱量は、蓄熱時の各水位でほぼ等しく、図3.10(b)の土壌温度差に相関している。また、図3.10(a),(b)の土壌温度差の比較から、採熱期間3の土壌採熱量は下水のある採熱期間2より約2.5倍程度大きいことが推測される。これは、図3.9(b)から分かるように、下水のない採熱期間3では採熱終了時の土壌温度が採熱管付近でブライン温度に接近するほど低くなるためである。

#### 4. 鋳鉄製ロードヒーティングパネルによる 低温水融雪実験<sup>7)</sup>

##### 4.1 鋳鉄製ロードヒーティングパネルの特徴

本鋳鉄製パネルは、玄関前や歩道部の大量置き雪を短時間で効率的に融解処理する温水循環式ロードヒーティングパネルとして開発した<sup>3-5)</sup>。路盤材に熱伝導、耐荷重に優れる鋳鉄を用い、表面肉厚を15mm程度の薄さに仕上げているため、循環水の保有熱をパネル表面に速やかに伝えることができ、従来のコンクリートやアスファルト融雪路盤に比較し融雪能力が格段に優れる。表4.1に本鋳鉄製パネルの仕様、図4.1に平

表4.1 鋳鉄製ロードヒーティングパネル仕様

|       |                    |
|-------|--------------------|
| 材 質   | 鋳 鉄                |
| 外形寸法  | 985 × 492 × 50mm   |
| 重 量   | 74kg               |
| 有効面積  | 0.48m <sup>2</sup> |
| 回路方式  | 3分割つづら折り           |
| 流路断面積 | 32m <sup>2</sup>   |
| 流路全長  | 2.76m              |
| 保有水量  | 8.8 ℓ              |

面図と流路断面を示す。温水配管は3分割つづら折り方式で、流路断面32cm<sup>2</sup>、全長2.76m、保有水量8.8ℓである。パネル形状は、縦985mm、横492mm、厚さ50mmで、表面部はパネル同志が安定配置できるように三角形とし、さらに融雪水が速やかにパネル外へ流出させるための溝が設けられている。

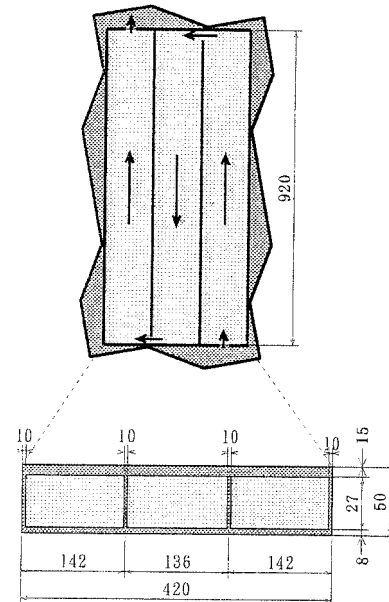


図4.1 鋳鉄製パネルの断面

##### 4.2 融雪実験装置及び方法

工業試験場試験棟南側に設置した屋外融雪実験装置の概略を図4.2に示す。鋳鉄製パネルは、図に示すように2枚直列に接続した。熱源には温度制御付き電気温水器(出力1.5kW、貯湯量35ℓ)を、循環水に不凍液(濃度40%のエチレングリコール水溶液)を使用した。循環ポンプは遅延タイマ付き降雪センサを用いて自動運転とし、パネル表面の融雪状況は路面監視カメラで昼夜連続撮影し、タイムラプスビデオにより自動記録した。降雪量は、内径200mmのステンレス製漏斗と電子天秤からなる測定器を試作し、降水量として重量をパソコンを用いて5分間隔で自動収録した。その他の測定項目は、循環水のパネル入口出口温度、パネル表面温度4箇所、外気温、貯湯槽内循環水温度、循環水流量であり、測定インターバルは5分間隔、データロガー、パソコンを用いて自動収録した。

測定期間は、平成12年1月14日から1月27日までの14日間である。なお、予備試験から5℃程度の循環水温度で融雪可能であることが確認されているため、本試験では貯湯槽内温度を3~5℃の範囲に設定した。また、融け残り防止機能として降雪センサに付加されている遅延タイマは、鋳鉄製パネルの特長である温度応答性の良さを考慮し、最短の5分間に設定した。

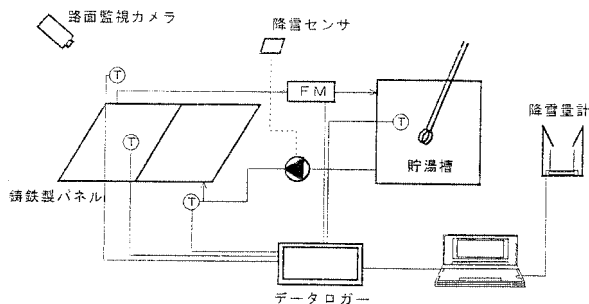


図4.2 屋外融雪実験装置の概略

### 4.3 試験結果及び考察

測定期間中の全結果を表4.2に示す。これらの値は、30分以上連続して降雪があり、かつ循環ポンプも30分以上連続して稼働していた状態のものであり、計20ケースの時間帯について、各々平均値で示した。

パネル内を流れる循環水平均温度は1.6～3.5℃、パネル表面温度は0.5～2.9℃とプラスの状態にある。この間の路面状況は、監視カメラから降雪開始時から数分間1mm以下の積雪のある場合が幾つかのケースで観察されたが、ポンプが稼働すると間もなく融けて以後は露出状態にあること、また多くのケースでは常時露出状態にあることが確認された。また、パネル表面からの放熱量は、降雪強度、風速、外気温に影響を受けるが、62～449W/m<sup>2</sup>の範囲にあることが分かる。

これらの中から、降雪量が多く、外気温の低かったCase 10-13及びCase16-19について、運転状況の経時変化を図4.3(a),(b)及び図4.4(a),(b)に、最大降雪時における路面状況を図4.5(a),(b)に示す。図4.3(a)からCase10-13の期間、外気温が-6℃程度、5分間降水量で平均0.05mm程度の降雪(降雪強度は、

雪密度を100kg/m<sup>3</sup>と仮定すると0.6cm/h)が連続してあったことが分かる。この間の循環水平均温度は約2℃、パネル表面温度が約0.5℃、放熱量は250W/m<sup>2</sup>程度である(図4.3(b))。また図4.5(a)から、最大降雪時0.12mm(降雪強度:約1.4cm/h)に、路面が全面露出状態にあることが分かる。同様にCase 16-19についてみると、図4.4(a)に示すように、外気温は-9℃と厳しい寒さであり、降雪のピークは1/25の18:10頃、20:20頃、22:40頃、1/26の1:20頃となっている。このうち22:40頃の降雪が最大で、0.41mm(降雪強度:約4.9cm/h)を記録しているが、この時の路面状況も図4.5(b)のとおり全面露出状態で、循環水温度は約3.5℃、パネル表面温度は約0.8℃、放熱量は約380W/m<sup>2</sup>であった(図4.4(b))。

以上の結果から、本铸铁製パネルの限界融雪温度は、通常の設計データとして用いられる250～300W/m<sup>2</sup>程度の融雪負荷に際しては2℃程度、また450W/m<sup>2</sup>程度の大きな融雪負荷に対しては3.5℃程度の低温水で対応できることが確認された。

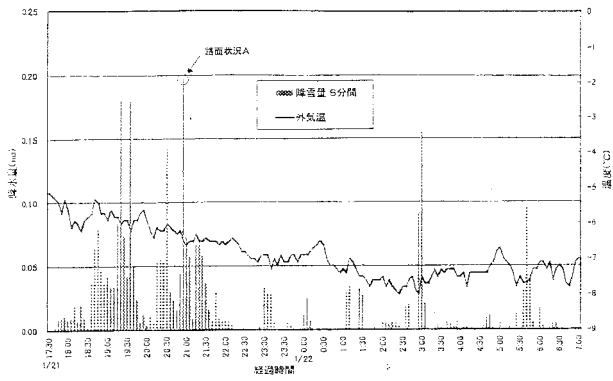
## 5. 低温水融雪を想定した期間融雪負荷シミュレーション解析<sup>8)</sup>

### 5.1 解析手法

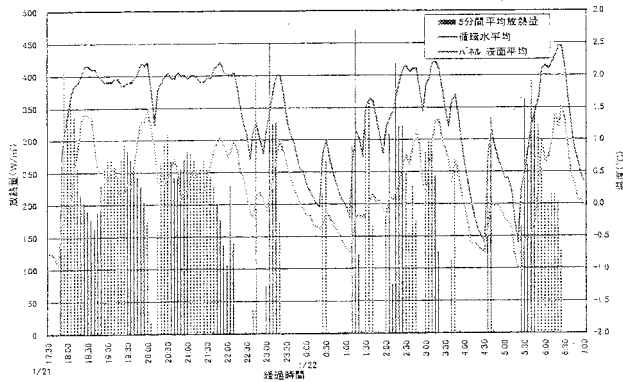
ロードヒーティングの評価指標の一つとして、融雪シーズン中のエネルギー消費量が考えられるが、路盤構造や運転方法(制御法)のほか、設置場所、気象条件などに大きく左右される。ここでは、これらの影響因子を自由に設定できる期間融雪負荷シミュレーションプログラムを用い、一般のコンクリート路盤との比較により铸铁製パネルを評価することと

表4.2 屋外低温水融雪実験結果

| case | 解析時間帯 |       | 降雪強度<br>mm/h | 風速<br>m/sec | 外気温<br>℃ | 放熱量<br>W/m <sup>2</sup> | 循環水流量<br>L/min | 循環水平均<br>℃ | 循環水入<br>℃ | 循環水出<br>℃ | パネル表面<br>℃ | 貯湯槽<br>℃ |     |     |     |
|------|-------|-------|--------------|-------------|----------|-------------------------|----------------|------------|-----------|-----------|------------|----------|-----|-----|-----|
|      | 開始時間  | 終了時間  |              |             |          |                         |                |            |           |           |            |          |     |     |     |
| 1    | 1/14  | 20:35 | 21:20        | 45          | 0.11     | 1.77                    | 0.4            | 128        | 5.28      | 2.6       | 2.8        | 2.4      | 2.1 | 2.9 |     |
| 2    |       | 22:00 | 1/14         | 22:40       | 40       | 0.51                    | 1.78           | 0.5        | 141       | 5.37      | 2.6        | 2.8      | 2.4 | 2.1 | 2.9 |
| 3    | 1/16  | 22:40 | 1/16         | 23:40       | 60       | 0.59                    | 0.94           | -1.6       | 135       | 4.77      | 2.4        | 2.6      | 2.2 | 2.0 | 2.7 |
| 4    |       | 0:55  | 1/16         | 1:30        | 35       | 0.52                    | 0.75           | -1.2       | 125       | 5.65      | 2.7        | 2.8      | 2.5 | 2.2 | 3.0 |
| 5    | 1/17  | 2:05  | 1/17         | 3:15        | 70       | 0.73                    | 1.54           | -0.8       | 169       | 5.64      | 2.6        | 2.9      | 2.4 | 1.9 | 2.9 |
| 6    |       | 5:20  | 1/17         | 6:30        | 70       | 0.62                    | 0.95           | -1.4       | 157       | 5.61      | 2.5        | 2.8      | 2.3 | 1.9 | 2.9 |
| 7    | 1/19  | 6:15  | 1/19         | 7:40        | 85       | 0.37                    | 0.78           | -6.9       | 289       | 3.62      | 1.6        | 2.2      | 0.9 | 0.5 | 2.3 |
| 8    |       | 8:00  | 1/19         | 8:30        | 30       | 0.15                    | 0.83           | -6.2       | 209       | 3.55      | 1.8        | 2.3      | 1.4 | 1.2 | 2.4 |
| 9    | 1/21  | 15:10 | 1/21         | 15:50       | 40       | 0.28                    | 1.00           | -1.3       | 62        | 3.88      | 2.7        | 2.9      | 2.6 | 2.4 | 3.0 |
| 10   |       | 17:50 | 1/21         | 20:00       | 130      | 0.51                    | 0.49           | -5.8       | 254       | 4.10      | 1.9        | 2.4      | 1.4 | 0.6 | 2.5 |
| 11   | 1/22  | 20:15 | 1/22         | 22:15       | 110      | 0.55                    | 0.39           | -6.4       | 242       | 3.94      | 2.0        | 2.5      | 1.5 | 0.5 | 2.6 |
| 12   |       | 2:00  | 1/22         | 2:40        | 40       | 0.09                    | 0.60           | -7.8       | 260       | 3.24      | 1.8        | 2.4      | 1.1 | 0.4 | 2.5 |
| 13   | 1/23  | 5:25  | 1/23         | 6:25        | 60       | 0.20                    | 0.52           | -7.4       | 259       | 3.81      | 1.7        | 2.2      | 1.1 | 0.4 | 2.3 |
| 14   |       | 20:45 | 1/23         | 22:40       | 115      | 0.90                    | 1.43           | -2.9       | 267       | 4.11      | 1.9        | 2.4      | 1.4 | 0.6 | 2.4 |
| 15   | 1/25  | 22:55 | 1/23         | 23:25       | 30       | 0.62                    | 1.48           | -2.7       | 157       | 4.04      | 2.2        | 2.5      | 1.9 | 1.2 | 2.7 |
| 16   |       | 17:15 | 1/25         | 18:45       | 90       | 1.01                    | 1.19           | -9.2       | 431       | 4.08      | 2.7        | 3.5      | 1.9 | 0.8 | 3.6 |
| 17   | 1/25  | 19:50 | 1/25         | 20:30       | 40       | 1.13                    | 1.03           | -9.2       | 449       | 3.93      | 2.7        | 3.6      | 1.8 | 0.7 | 3.7 |
| 18   |       | 21:40 | 1/25         | 23:05       | 85       | 1.63                    | 0.95           | -9.2       | 359       | 3.90      | 3.5        | 4.2      | 2.9 | 1.4 | 4.4 |
| 19   | 1/26  | 23:55 | 1/26         | 1:30        | 95       | 0.59                    | 0.99           | -9.4       | 310       | 3.79      | 3.4        | 4.0      | 2.8 | 1.7 | 4.0 |
| 20   |       | 8:15  | 1/26         | 11:25       | 190      | 0.36                    | 0.61           | -11.2      | 417       | 4.06      | 3.5        | 4.3      | 2.7 | 1.3 | 4.4 |



(a) 降雪量、外気温の経時変化



(b) 放熱量、表面温度の経時変化

図4.3 Case10-13における融雪実験運転状況

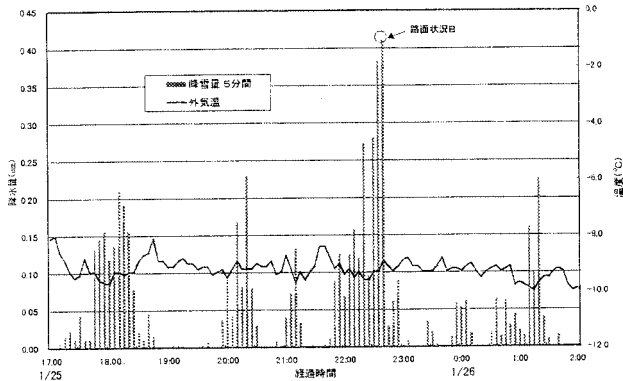


(a) 路面状況A

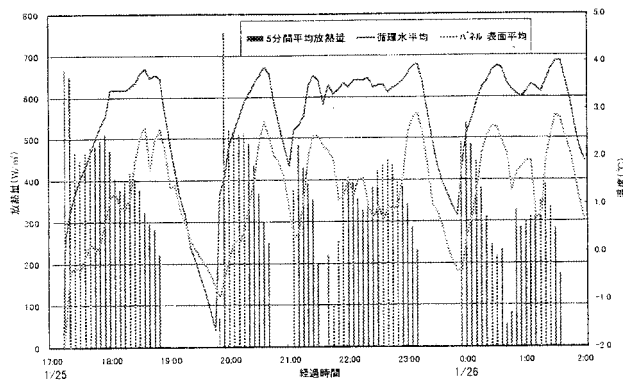


(b) 路面状況B

図4.5 最大降雪時の路面状況



(a) 降雪量、外気温の経時変化



(b) 放熱量、表面温度の経時変化

図4.4 Case16-19における融雪実験運転状況

した。本シミュレーションプログラムは、路盤内を二次元非定常熱伝導モデルとし、路面上の積雪状況や熱収支を考慮した計算ソフトであり、路面や路盤内部の温度変動、融雪状況、期間中に使用されるエネルギー消費量（期間融雪負荷）を求めることができる<sup>9)</sup>。

## 5.2 シミュレーションモデルの設定

### 5.2.1 路盤モデル

鋳鉄製パネル及び比較対象のコンクリート路盤の解析モデルを、図5.1(a),(b)に示す。鋳鉄製パネルモデルの解析領域は温水流路の半分、パネル下に厚さ20mmの断熱材を敷設するものとした。コンクリート路盤モデルは、厚さ70mmのコンクリート舗装で、配管ピッチ150mm、その下は鋳鉄製パネルと同様に断熱材を敷設する構造とした。

### 5.2.2 制御方式

制御方式は、図5.2に示すように、降雪センサと路盤温度センサによる2要素制御とし、温度センサの取付位置は、図5.1に示すように温水配管の中間で、路面からの埋設深さは鋳鉄製パネルモデルが5mm、コンクリート路盤モデルは一般

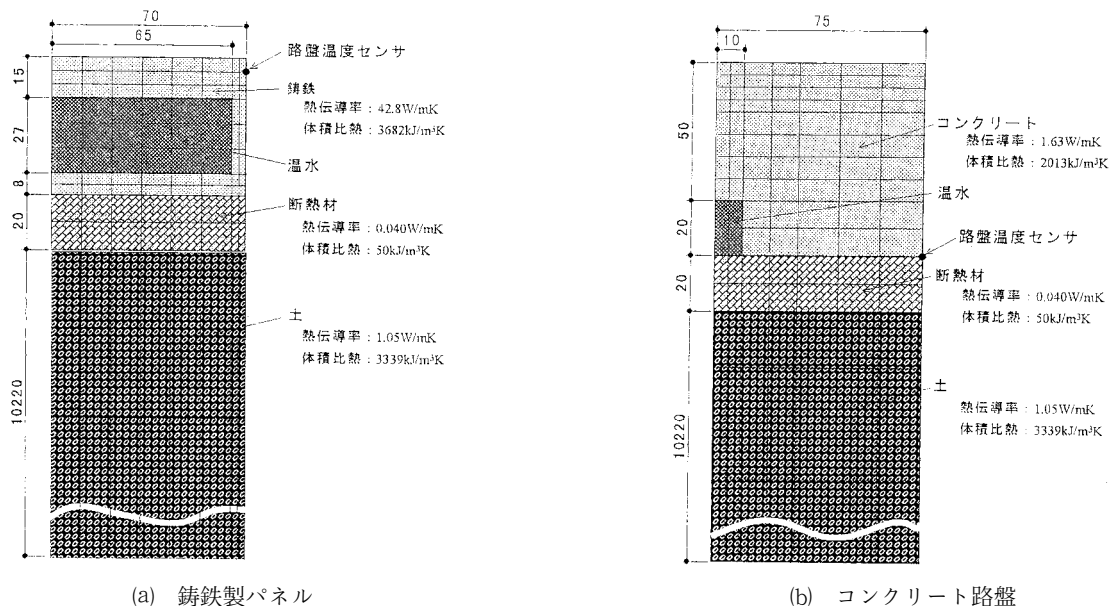


図5.1 解析モデル

的な70mmとした。

### 5.2.3 計算条件

ロードヒーティングのエネルギー消費量は、同一路盤、同一熱源容量であっても、路面が雪に覆われているか露出しているかなど、融雪レベル（路面状況）の違いによって大きく異なる。このため、構造の異なる路盤を比較するには、同一の融雪レベルで検討する必要がある。今回の制御方式では、路盤温度が融雪レベルを大きく左右することから、設定温度（記号：Tc）を操作パラメータとし、同程度の融雪レベルが得られるように、铸铁製パネルでは1.5~4℃及び路面温度を用いない降雪センサのみの制御（Tc:なし）、コンクリート路盤では10~14℃及びなしの条件で期間融雪負荷を計算した。また、熱源容量は通常用いられる349W/m<sup>2</sup>（300kcal/m<sup>2</sup>・h）とした。

気象データとして、札幌の1990年12月~1991年3月の1時間降水量、気温、風速、水平面日射量の気象台観測データを用いた。

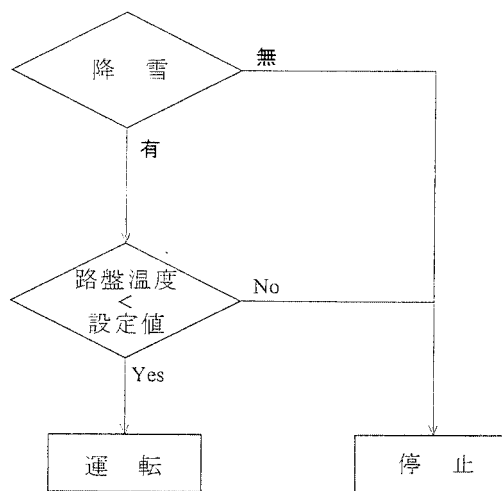


図5.2 制御方式

## 5.3 解析結果及び考察

### 5.3.1 期間融雪負荷と積雪時間

図5.3に積雪時間と期間融雪負荷の関係を示す。ここで積雪時間は、路面の積雪状況を示す値で、路面上のどこかに積雪があった場合のシーズン中の累積時間である。なお、このシーズン中の降雪時間は491時間であった。図5.3から、铸铁製パネルの曲線はコンクリート路盤の曲線よりも左にシフトしており、同じ融雪レベル（積雪時間）に対しエネルギー消費量が小さく、省エネルギー性、経済性に優れた路盤であることが分かる。

同程度の融雪レベルが得られる铸铁製パネル（Tc=1.5℃）とコンクリート路盤（Tc=10℃）の期間融雪負荷の比較を図5.4に、積雪状況を図5.5に示す。図5.4、5.5より、ほぼ同一の路面状況にもかかわらず、铸铁製パネルの期間融雪負荷は、コンクリート路盤の70%程度であることが分かる。

### 5.3.2 温水温度

降雪量の多かった1991年1月21日~1月23日における温水温度、路面平均温度、最大積雪深の経時変化を、図5.6(a),(b)に、この期間の気象条件を図5.7に示す。図5.6から、コンク



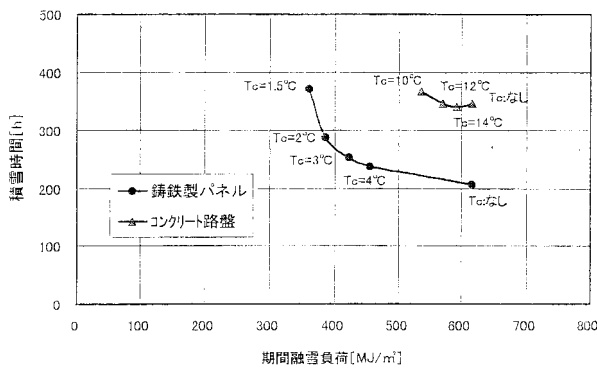


図5.3 積雪時間と期間融雪負荷の関係

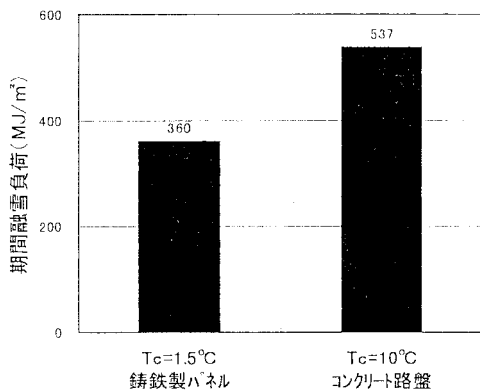


図5.4 期間融雪負荷の比較

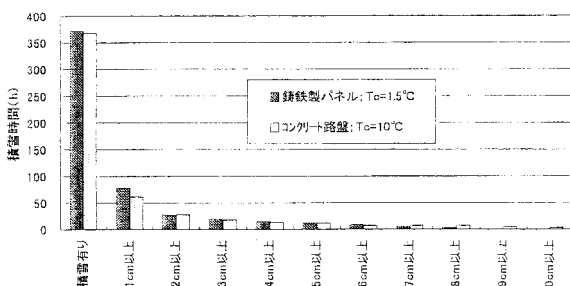


図5.5 最大積雪深による積雪状況(1990/12/1~1991/3/31)

リート路盤が温水平均温度20°C、温度幅10K程度で推移するのに対し、鑄鉄製パネルでは各々4°C、0.5K程度となっており、低温水融雪が行われていること、また温度応答性に優れた制御の容易な路盤であることが分かる。

## 6. おわりに

下水熱を利用する低環境負荷型の低温水ロードヒーティングシステムの構築に向け、中核技術となる下水からの採熱方

法として下水管一体型の熱交換器を試作し、熱交換性能を試験するとともに、もう一つの中核技術である鑄鉄製ロードヒーティングパネルについて低温水融雪路盤としての適合性を確認するため、屋外融雪実験と期間融雪負荷シミュレーションによる検証を行った。得られた結果を以下に要約する。

- 1) 試作した内径300mmの高圧コンクリート製下水採熱管の熱交換性能を明らかにした。採熱量は下水と採熱管の濡れ面積(下水の水位)にほぼ比例して増加し、下水とブラインの単位温度差、単位長さあたり10~20W/m・Kであった。
- 2) 下水採熱管を土壤に埋設する土中蓄採熱実験を行った。採熱管本体である下水のみの場合に比べ、採熱量は各水位で1.2~1.4倍程度増加した。ただし、土壤からの採熱量には水位による差は認められなかった。
- 3) 鑄鉄製ロードヒーティングパネルの屋外融雪実験の結果、通常の設計データに用いられる250~300W/m<sup>2</sup>程度の融雪負荷に際しては2°C程度、450W/m<sup>2</sup>程度の大きな融雪負荷に対しても3.5°C程度の低温水で融雪可能であることが確認された。
- 4) 期間融雪負荷シミュレーションにより、鑄鉄製パネルのエネルギー消費量は一般のコンクリート路盤の70%程度であり、省エネルギー、経済性に優れた路盤であること、また、コンクリート路盤では温水温度20~25°Cで融雪が行われるのに対し、鑄鉄製パネルでは4°C程度となることを検証した。

## 謝 辞

本研究を行うにあたり、期間熱負荷シミュレーションソフトの提供と使い方について指導いただいた寒地住宅都市研究所の月館司研究員、また、下水採熱管の試作に際しポリブデンパイプを提供いただいた㈱ソーラー技研に深く感謝を表します。

## 引用文献

- 1) 下水熱利用促進研究会：未利用エネルギー活用の手引き、山海堂,168PP.(1994)
- 2) 札幌市：パンフレット「さっぽろの融雪槽」(1999)
- 3) 富田和彦・岡喜秋・北口敏弘ほか：北国型福祉社会における住生活環境整備に関する研究,平成9年度共同研究(重点)報告書,pp.52-60(1998)
- 4) 富田和彦・岡喜秋・北口敏弘ほか：北国型福祉社会における住生活環境整備に関する研究,平成10年度共同研究(重点)報告書,pp.40-45(1999)
- 5) 富田和彦・岡喜秋・北口敏弘ほか：鑄鉄製高出力ロードヒーティングパネルの開発,第15回寒地技術シンポジウム, pp.751-755(1999)
- 6) 長野克則・持田徹・本田公宏・富田和彦：下水管一体型熱交換器の基礎実験とその応用に関する研究,平成12年度

空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集,pp.1521-1524  
(2000)

7) 富田和彦・保科秀夫・白土博康弘ほか：北国型福祉社会  
における住生活環境整備に関する研究,平成11年度共同研  
究(重点)報告書,pp.33-39(2000)

8) 富田和彦・保科秀夫・白土博康弘ほか：北国型福祉社会  
における住生活環境整備に関する研究,平成12年度共同研  
究(重点)報告書,pp.40-47(2001)

9) 月館司・富田和彦：ロードヒーティングの期間融雪負荷  
シミュレーション,空気調和衛生工学会論文集,No.61,pp.57-  
65(1996.4)