

地中熱利用による道の駅「ハチ北」の路面温度制御システム

—貯水槽集熱システムの熱特性および路面融雪—

ROAD TEMPERATURE CONTROL SYSTEM AT “MICHINO-EKI”,
「HA-CHI-KITA」 USING TERRESTRIAL HEAT

—Thermal Properties of Reservoir Heat Collection System and Road Snow Melting—

福原輝幸¹・坂本信弘²・石野圭史郎²

Teruyuki FUKUHARA, Nobuhiro SAKAMOTO, Keishiro ISHINO

¹ 正会員 工博 福井大学教授 工学部環境設計工学科 (〒910-8507 福井市文京 3-9-1)

² 非会員 建設省近畿地方建設局豊岡工事事務所 (〒668-0025 兵庫県豊岡市幸町 10-3)

“Michi-No-Eki”, HACHI-KITA has been in operation on Route 9 in Muraoka-cho, Hyogo Prefecture, since March 1998. “HACHI-KITA” has two types of snow melting systems using terrestrial heat. One is a Reservoir Heat Collection System (RHCS) applied to a 1120 m² parking lot that is used to put on or take off tire chains. The other is a Bore-hole Heat Exchange System (BHES) used for melting snow on a 310 m² sidewalk. This paper deals with the thermal behavior of the fluid in the water tank and in the surrounding ground, as well as the interaction between them. The snow melting performance of the RHCS was completely satisfactory and this made it possible for people to walk from the parking lot to the “Michi-No-Eki” buildings on a snow-free pavement. The fluid temperature was as high as 19.8°C on December 31 and a zone with high ground temperature (17-19°C) existed around the tank in winter, even though the ambient ground temperature was only about 15°C. From these results it was confirmed that the effect of the thermal energy storage during summer persisted until the following winter.

Key Words : Reservoir Heat Collection System (RHCS), Heat transfer, Terrestrial heat, Thermal energy storage

1. はじめに

平成10年3月、道の駅「ハチ北」(以下、「ハチ北」と呼称)が国道9号兵庫県美方郡村岡町の八井谷地区に完成した。八井谷地区は兵庫県の最高峰氷ノ山(標高1510m)の麓に位置する。標高は340mと高いために積雪量が多い。そのために沿線スキー場へ京阪神からスキー客が集中する場所である。京阪神から行けば八鹿辺りから積雪が多くなり、峠越えの但馬トンネルを抜け八井谷地区に入った途端、多雪地帯に入る。このような地形および気象特性から、当地は冬期の交通安全のために、チェーン着脱場が必要とされてきた。

一方、近年大型車に加え一般車も長距離ドライブが増え、女性や高齢者ドライバーが増加する中、やすらぎやゆとりの持てる施設と環境や省エネルギーに配慮

した施設との共存が求められている。このような快適な道路空間の形成を目指して、「ハチ北」では、全国で初めて地中熱だけを利用した歩道および駐車場の路面温度制御に、掘削杭熱交換システム(Bore-hole Heat Exchange System, BHES)と貯水槽集熱システム(Reservoir Heat Collection System, RHCS)がそれぞれ導入された。その目的は、1)冬期の路面加熱による融雪および凍結防止、2)夏期の路面冷却によるアスファルトの流動化防止および路面からの輻射と熱対流の緩和による道の駅の熱環境改善、である。

「ハチ北」周辺は緑豊かな自然を持つ地域であることから、路面温度制御の熱源として自然環境に優しい太陽熱、風力、地中熱および沢水が候補として考えられた。その中から地中熱が選ばれた理由は、地中熱が地盤と路面との温度差より、夏期には路面冷却のための

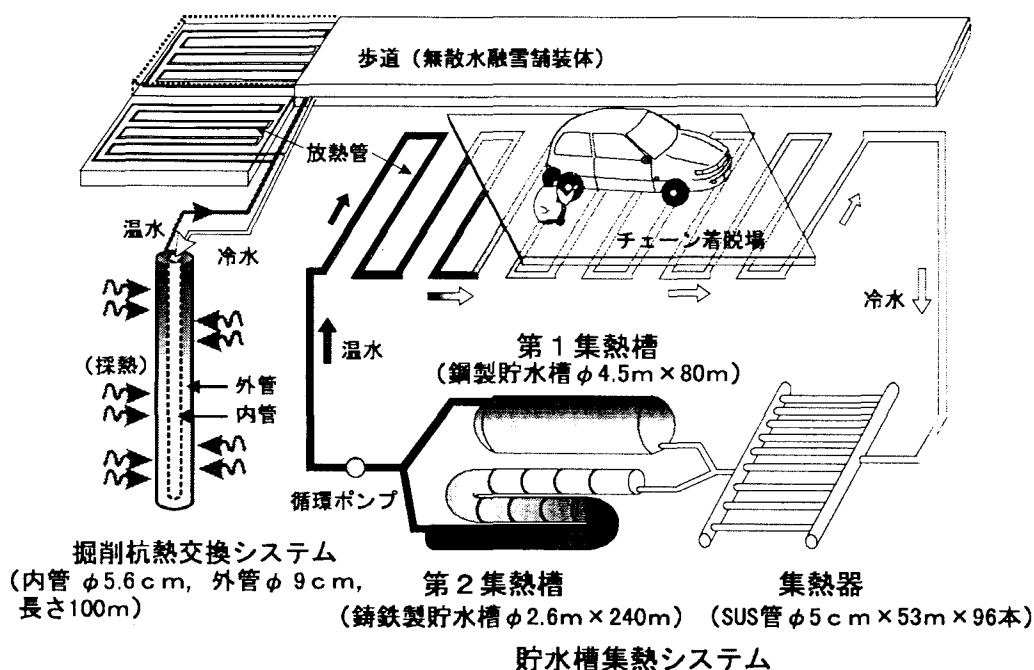


図-1 地中熱利用による路面温度制御システム (融雪時)

冷熱源として、冬期には路面を暖める温熱源としてなり得ること、および気象条件に左右され難く、賦存量が豊富なためである。

このように「ハチ北」の地中熱利用の基本的考え方は、地中熱により路面温度の季節変動(夏期の高温化および冬期の低温化)を抑制し、快適な休憩地を創生する点にある。技術的信頼性を高めるために、1997年冬期には予備試験でBHESの融雪能力および夏期の路面冷却効果が調査され、その有効性が事前評価された^{1),2)}。

そこで本論文では、昨冬初めて稼動したRHCSに注目し、路面融雪や凍結防止に伴う貯水槽水温および地盤温度の挙動を調査したので、その結果および考察について述べる。

2. 「ハチ北」の温度制御システム

駐車場で快適にチェーン着脱ができるように、さらに足元の雪を気にすることなく休憩施設へ行けるように、融雪は図-1のような無散水方式を採用した。融雪面積は1430m²で、このうち駐車場が1120m²、歩道が310m²である。駐車場融雪は貯水槽集熱システム(RHCS)により、歩道融雪は掘削杭熱交換システム(BHES)による。特にRHCSでは、ステンレス製の熱交換器(図-1の集熱器)を無散水舗装体と貯水槽の間に設け、流体と地盤の熱交換を促進させて冬期にはできるだけ高い温度レベルで、夏期にはできるだけ低い温度レベルで貯水槽に流体を返す工夫を行った。

貯水槽は2基あり、第1集熱槽と呼ばれる鋼製貯水

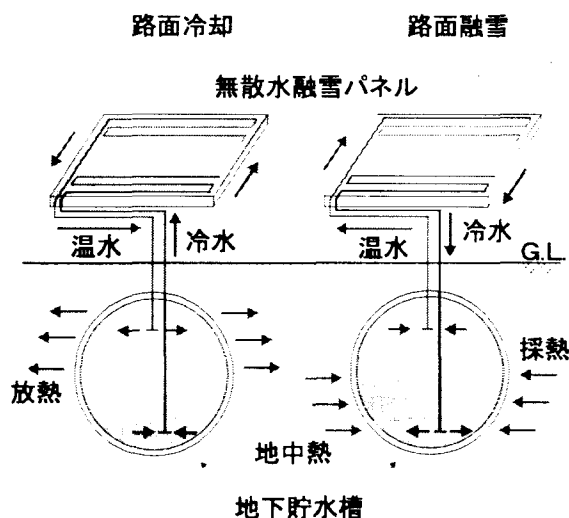


図-2 貯水槽集熱システムの熱の流れと路面温度制御

槽は直径4.5m、長さ80mおよび、第2集熱槽と呼ばれる鋳鉄製貯水槽は直径2.6m、長さ240mである。

RHCSの熱の流れと路面の融雪および冷却機構を図-2に示す。路面融雪時、図-1の循環ポンプ側の貯水槽端上部(流出口)から出てきた暖かい流体は、無散水舗装体を循環する間に放熱して温度を下げるが、集熱器を通る間に地盤との熱交換で昇温し、流出口から80m離れた上流側の貯水槽端下部(流入口)に戻る。その後流体は、貯水槽から再び出て行くまでの間に地中熱を吸収し暖められる。

こうして冬期、貯水槽は集熱槽として一種の“湯たんぽ”の役割を果たす。一方、BHESの熱の流れにつ

いては参考文献 3) を参照されたい。

さらに、舗装体の熱伝導率を高めることが融雪能力の向上につながることを考慮して⁹⁾、鋼製放熱管（内径 1.5cm、0.1m 間隔で多重平行型に配置）を有するコクリート舗装体（放熱パネル）の骨材には珪石を使用した。この高热伝導（普通コンクリートの約 2 倍高い熱伝導率）放熱パネルの大きさは縦 4.5m、横 6m、厚さ 0.28m であり、放熱管はパネル上面より下方 3cm の位置に埋設される。放熱パネル上の表層は厚さ 3cm のアスファルトで仕上げられる。

3. 融雪結果および水温・地盤温度の挙動

(1) 融雪状況

降雪のあった平成 11 年 1 月 12 日～14 日に亘り、融雪状況が調査された。写真-1 および写真-2 は 1 月 12 日における駐車場（チェーン着脱場）および施設周辺の歩道の融雪状況を示す。この前夜、1 晩で約 40cm の降雪があり、撮影時の非融雪部の積雪深は 60cm 程度であったが、残雪はなく、チェーンの着脱は容易になった。

写真-3 は 1 月 12 日 18 時における無散水舗装と通常舗装路面温度の比較を示しており、前者（7.3℃）は後者（4.9℃）に比べて 2.4℃高い。これより、降雪前の温水の舗装体内循環に伴う予熱効果が認められる。

(2) 貯水槽水温

図-3 は貯水槽流出口より上流側へ 40m 離れた場所において、貯水槽を鉛直に二分する面（V-面）内の水温分布を表す。図中の z/D （ D :貯水槽内径）は貯水槽内の無次元高さを表し、 $z/D=0$ が貯水槽底部、 $z/D=1$ が頂部に対応する。施工前の地盤温度が約 15℃であったことを考慮すると、融雪運転前の最上部水温 19.8℃はこの時期としては高い。この原因は夏期の蓄熱と推察される。12 月 31 日システムの稼動とともに無散水舗装体から低温流体が貯水槽最下部に流入し、水温は 18.3℃から 14.0℃に急激に低下する。その後、運転が停止すると貯水槽下部水温は急激に上昇し、その後上昇は緩慢になる。この水温の低下および上昇は上方へ順次伝播するが、変動の振幅は小さくなる。1 月 7 日時点で最上部 $z/D=0.94$ の水温は 19.3℃であり、融雪水温としては高いレベルにある。最下部 $z/D=0.06$ の水温は 1 月 8 日の降雪によって 15.8℃から 12.2℃に変化するのに対して、最上部 $z/D=0.94$ の水温は約 2℃低下する。1 月 11 日以降水温は上下を繰り返しながら徐々に低下する傾向にあり、昇温時（運転停止時）ではおおよそ 2 日間に、水温は 1℃程度上昇する。結果、1 月 20 日の時点で $z/D=0.94$ の水温は約 14.6℃となる。



写真-1 駐車場（チェーン着脱場）の融雪状況

（平成 11 年 1 月 12 日）



写真-2 歩道部の融雪状況（平成 11 年 1 月 12 日）



写真-3 無散水舗装と通常舗装の路面温度比較

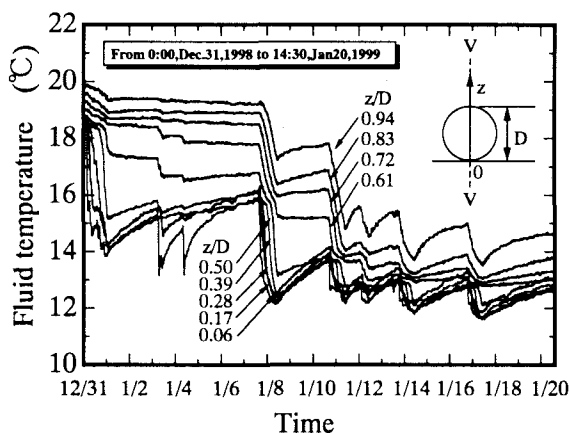


図-3 貯水槽水温の時系列

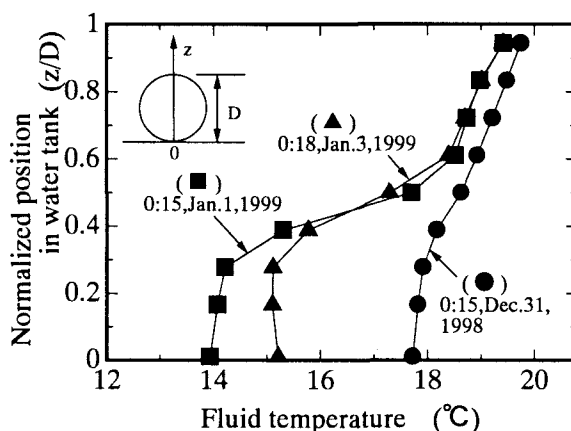


図-4 貯水槽水温の鉛直分布

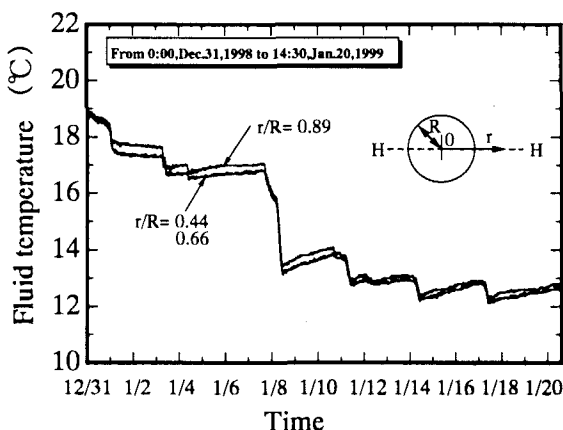


図-5 貯水槽中央高さにおける水平面内水温時系列

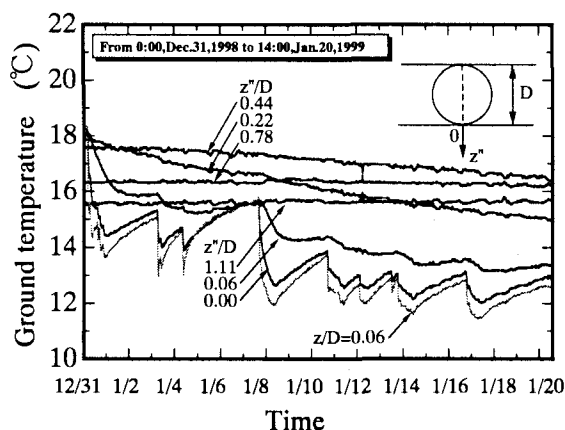


図-6 貯水槽下方の地盤温度時系列

ただし、1月11日以降、上部での水温低下が下部よりも大きくなっており、路面温度制御運転状況と流体の流れを調べる必要がある。

時間経過とともに水温低下が緩慢になるのは、貯水槽流体が地盤からの熱供給を受けることに起因すると思われる。

図-4は12月31日0:15から1月3日0:18までの水温鉛直分布を表わす。12月31日の融雪運転前の水温は、貯水槽頂部から底部に向かって低下しており、成層化している。貯水槽下部からの冷水流入によって $z/D \leq 0.3$ では約 3.7°C の水温低下が生じるのに対して、 $z/D \geq 0.6$ では約 0.5°C の低下に留まる。そのために、 $0.3 \leq z/D \leq 0.6$ において大きな温度勾配が発生する。その後1月3日までの昇温は、 $z/D \leq 0.4$ において明瞭である。昇温幅は底面に近づくにつれて増加し、底面で約 1.2°C 昇温する。

図-5は貯水槽を水平に二分する面(H-面)内の半径方向水温分布である。図中の r/R (R :貯水槽半径)は、貯水槽中心からの無次元距離を表し、 $r/R=0$ が貯水槽中心、 $r/R=1$ が貯水槽内壁に対応する。内壁から 0.5m 内側 ($r/R=0.89$) の水温は、それ以外の水温 ($r/R=0.44$ および 0.66) より約 $0.1\sim 0.3^\circ\text{C}$ 高い。しかしながら、水

温は常に水平方向に同じように上下しており、ほぼ鉛直1次元的に変化するとみなされる。この水温分布特性は福井大学内にあるRHCSでも確認されている⁵⁾。

(3) 地盤温度

図-6は貯水槽の流出口より上流 40m のV-面内における深さごとの地盤温度の時系列である。座標は貯水槽底部外壁を $z'=0$ として鉛直下方を正とする。貯水槽より 5m 下方 ($z'/D=1.11$) の地盤温度は、期間中徐々に上昇しており平均値は 15.6°C である。貯水槽に最も近い(底部から 0.012m 離れた) $z'/D=0.00$ 地点の地盤温度は、図-3の貯水槽最下部 ($z/D=0.06$) の水温時系列と同じ挙動を呈する。この地盤温度は最下部水温より高く、地盤から貯水槽底部への熱移動が生じ、貯水槽水温の上昇に寄与する。貯水槽から 0.25m 離れた $z'/D=0.06$ の地盤温度時系列も貯水槽最下部の水温時系列との間に正の相関は認められるものの、その変化は緩慢となる。貯水槽底部より 1m および 2m 下方 ($z'/D=0.22$ および 0.44) の地盤温度は、もはや単調低下するようになるが、時間的低下率は後者の方で小さい。また、 $z'/D=0.44$ の地盤温度は1月2日から1月20日の期間中最も高く、1月20日の時点でも 16.5°C である。しかし、これよりも深い $z'/D=0.78$ および 1.11

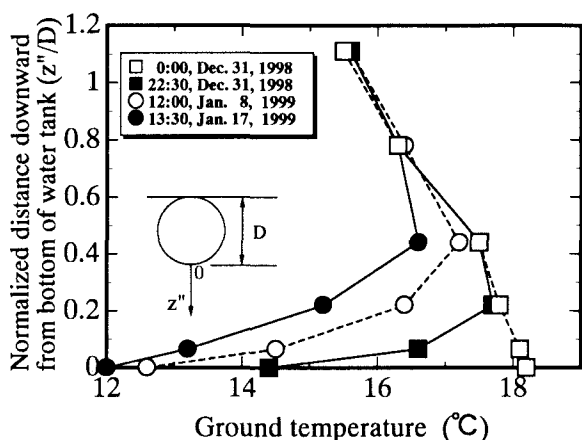


図-7 貯水槽下方地盤温度の鉛直方向変化

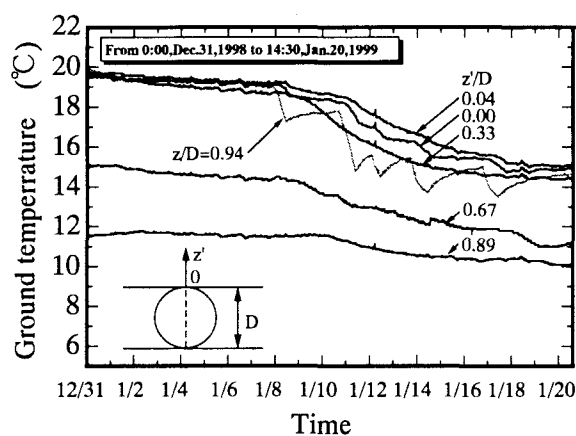


図-8 貯水槽上方の地盤温度時系列

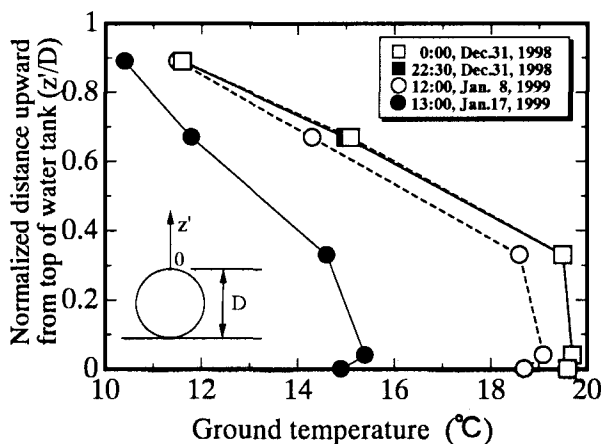


図-9 貯水槽上方地盤温度の鉛直方向変化

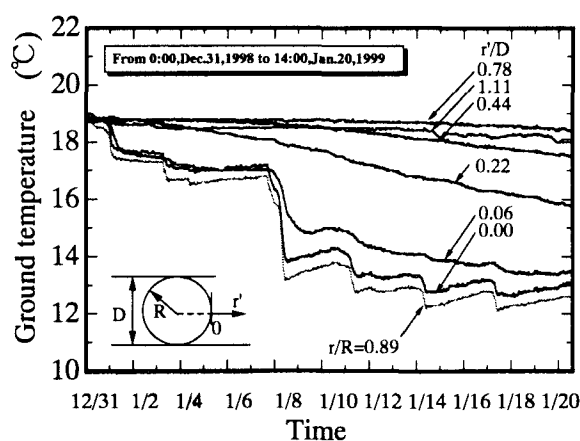


図-10 貯水槽中央高さの水平面内地盤温度時系列

では、地盤温度は一定を保つ。

図-7は1998年12月31日から1999年1月17日にわたる貯水槽下方の地盤温度鉛直分布である。初期には水温が高いために、地盤温度は貯水槽底面から下方に向かって離れるにつれて低下する。通常15℃ぐらいの地盤温度であることを考慮すれば、地盤は貯水槽からの放熱の影響を受けて温度が高い。その後、水温低下にともなって貯水槽底部の地盤温度の低下が進み、低温域が時間とともに広がる。1月17日に低温域は $z''/D=0.8$ にまで及ぶ。こうして最高温度の位置は $z''/D=0$ から $z''/D=0.44$ に移動する。

以上より、初め貯水槽から地盤へ向かっていった熱移動(放熱)は、水温低下(融雪運転)に伴って逆に地盤から貯水槽へ向かうような熱移動(採熱)に変わることが判る。

図-8は貯水槽より上部のV-面内における地盤温度時系列である。座標は貯水槽頂部外壁を $z'=0$ として鉛直上方に正の距離を選ぶ。全体的に観て、貯水槽上方の地盤温度は貯水槽に近い場所 $z'/D=0.04$ で最も温度が高く、 $z'/D=0.89$ (地表面下0.5m、貯水槽頂部より4m上方)で最も低い温度レベルにある。貯水槽頂部より0.012m高い地点($z'/D=0.00$)の地盤温度は、貯

水槽最上部の水温時系列に呼応しているように観えるが、図-6で示したような貯水槽底部近傍の水温と地盤温度のような強い相関はない。地表面下0.5mの地点($z'/D=0.89$)の地盤温度の変動パターンは、 $z'/D=0.00$ のそれと同じであることから、貯水槽頂部より4mまでの地盤は、水温変化の影響範囲にあると思われる。

1998年12月31日から1999年1月17日にわたる貯水槽上方地盤温度の鉛直分布を図-9に示す。貯水槽上部水温が下部よりも高いために、貯水槽上部周辺地盤温度は貯水槽下部周辺のそれよりも高くなる。さらに下部に比べると水温の時間的低下率が小さいために、図-7で観られるような明瞭な低温域の広がりはなく、地盤温度は全体的に低下するようになる。

図-10はH-面内の地盤温度時系列である。図中の r' は、 $z/D=0.5$ の高さにおける貯水槽外壁から外向き距離である。貯水槽外壁より0.012m離れた地点($r'/D=0.00$)および0.25m離れた地点($r'/D=0.06$)の地盤温度は、図-5の $r/R=0.89$ の水温時系列に対応して変動する。水温より地盤温度は常に高く、地盤から貯水槽への熱供給が知れる。貯水槽壁から離れるにつれて温度は上昇し、貯水槽壁から3.5mの地点($r'/D=0.78$)で最高温度が現れる。ちなみに、ここでの1月20日の

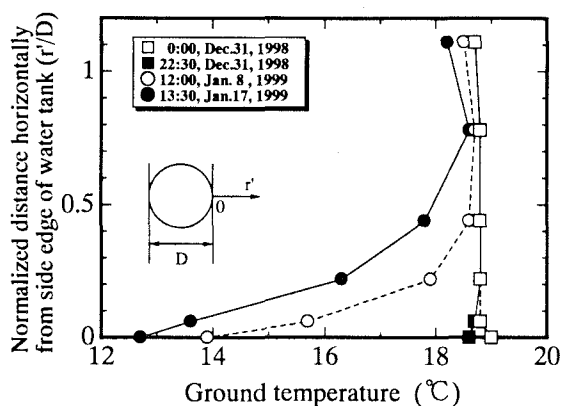


図-11 水平方向の地盤温度変化

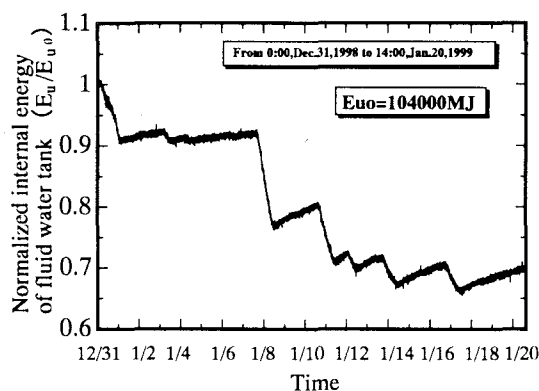


図-12 貯水槽内部エネルギーの時間的減

地盤温度は 18.5°C であり、通常地盤温度 (約 15°C) よりも高い。また、当然ながら地盤温度の時間的低下率は貯水槽壁から離れるに従って小さくなる。

図-11は1998年12月31日から1999年1月17日にわたる $z/D=0.5$ での地盤温度の水平温度分布を示す。 $r/D=1.11$ まで水平方向の地盤温度は貯水槽極近傍を除き、初期は一樣である。これより水平方向の地盤蓄熱の範囲は鉛直方向に比べて広いことが知れる。貯水槽周辺地盤の低温化の範囲は、1月17日の時点で $r/D=0.80$ まで及んでおり、貯水槽下方地盤のそれと同程度である。 $r/D>1.11$ では、 r/D の増加とともに地盤温度は低下すると予想されるので、この外向き熱移動に起因して $r/D=1.11$ の地盤温度は、時間的に低下すると推察される。

(4) 貯水槽内部エネルギー

最後に、貯水槽内部エネルギー E_u (温度 0°C を基準) を12月31日の初期値 E_{u0} で除した値、 E_u/E_{u0} の経時変化を図-12に示す。初期には融雪によって E_u は1日で10%ぐらいのエネルギー損失があり、その後も E_u は時間と共に減少する。しかしながら特に1月11日以降、降雪があるのにも係わらず、 E_u/E_{u0} の時間的減率は小さくなる。これは3.(2)で述べたように、貯水槽の地中熱採熱に起因すると思われる。

1月20日時点で $E_u=72800\text{ MJ}$ であり、 $E_u/E_{u0}=0.7$ となる。これは約1.9mの積雪を融雪するのに必要なエネルギーであり、平成10年冬期の八井谷における累積積雪深4mの約半分に相当する。

4. おわりに

平成10年3月、国道9号兵庫県美方郡村岡町に道の駅「ハチ北」が完成した。初めて融雪システムが稼動した昨冬の貯水槽集熱システムの融雪能力および、融雪や凍結防止に伴う貯水槽水温と地盤温度の挙動を調

査した。

その結果、以下の結論を得た。

- (1) RHCS および BHES によるチェーン着脱および歩道の無散水融雪は十分機能する。
- (2) 本来の地盤温度が約 15°C であることを考慮すると、12月31日、融雪運転前の最上部水温 (19.8°C) はこの時期としては高く、夏期の蓄熱効果が貯水槽内で認められる。さらに、夏期における貯水槽から地盤への熱供給によって、貯水槽を囲むように温度の高い地盤の存在が明らかとなった。
- (3) (2) で述べた地盤蓄熱の範囲は鉛直方向より水平方向で広い。

今後は、さらにデータを積み重ねシステムの信頼性、および熱エネルギー収支を明らかにする。

参考文献

- 1) 川崎和来・山下良男・福原輝幸：季節蓄熱方式による八井谷チェーン着脱場の無散水融雪システム，土木学会第52回年次学術講演会講演梗概集，VII-36，pp.125-126，1997。
- 2) 福原輝幸・渡邊 洋・脇 敬一・阪本信弘・石野圭史郎：八井谷チェーン着脱場「道の駅ハチ北」における融雪システムの稼動状況－1998年冬季－，土木学会第54回年次学術講演会，VII-123，1999。
- 3) 大木政弘・渡邊洋・福原輝幸・森山和馬：掘削杭熱交換方式による地盤蓄熱と路面温度制御，水工学論文集，第41巻，pp.587-592，1997。
- 4) 福原輝幸・森山和馬・大木政弘・渡邊洋：掘削杭熱交換システムと高熱伝導舗装体による路面融雪，寒地技術論文・報告集，Vol.13，pp.101-106，1997。
- 5) 松村量行・福原輝幸・渡邊洋・川崎和来・山下良男：浅層貯水槽と地盤との間の季節的な熱相互作用と採熱特性，水工学論文集，第43巻，pp.199-204，1999。

(1999. 9. 30受付)