

地中熱を利用した貯水槽集熱システムの性能評価

福原輝幸¹・小寺健太郎²・浅田興志男³・河合源悟³

¹正会員 工博 福井大学教授 工学部建築建設工学科 (〒910-8507 福井県福井市文京 3-9-1)

²正会員 工修 福井大学産学官連携研究員 (〒910-8507 福井県福井市文京 3-9-1)

³国土交通省 近畿地方整備局 豊岡河川国道事務所 (〒663-0025 兵庫県豊岡市幸町 10-3)

兵庫県美方郡村岡町を通る国道9号沿いの道の駅「ハチ北」において、1998年6月から2002年7月現在まで、貯水槽集熱システム(RHCS)の稼働時間、貯水槽水温、貯水槽周辺地温および舗装体温度の計測を行っている。RHCSは貯水槽と集熱器で構成され、地中熱を夏期には冷熱源として、冬期には温熱源として利用し、無散水舗装体の温度を通年にわたり制御する。運転プログラムは無散水舗装体の温度、貯水槽水温および降雪によって変更する。

本論文では、RHCSの稼働に伴う貯水槽およびその周辺地盤の熱的挙動を調べ、RHCSの運転制御方法が稼働時間、貯水槽水温、RHCSの地中熱採集性能および舗装体融雪性能に及ぼす影響を明らかにした。

Key Words : RHCS, heat transfer, thermal energy storage, snow melting performance

1. はじめに

京都議定書が批准され、日本のCO₂削減はいよいよ本格的な実行段階に入った。その一環として太陽エネルギーや風力などの自然エネルギーの活用がいろいろな工学の分野で実施されている。土木分野ではさらに地中熱、下水熱などが対象になるが、その利用技術は緒についた段階と思われる。ここで注目する地中熱は地表から100m程度の浅層地中熱であり、太陽エネルギーや風力と比較してエネルギー密度は低いものの、気象条件に左右されにくく、賦存量が豊富な特徴を有する。地中熱採集方法は2つに分けることができる。1つは熱交換器を地盤中に挿入し、液体の循環を介して地中熱を採集する方法であり、熱交換杭や熱交換パイプが使用される。もう1つは帯水層や地盤に数ヶ月から半年にわたって蓄えた熱を採集する方法であり、季節蓄熱(あるいは季節蓄熱)と呼ばれる。

欧米では掘削費が安価なことから¹⁾、熱交換杭や帯水層蓄熱の実施例は数多くある^{2)~6)}。その目的は建物空調および道路融雪の熱源採集である。我国においても道路融雪に関する事例がいくつかある^{7)~11)}。ただし、帯水層蓄熱では長期利用に伴う地下水汚染、特に熱汚染および地下水位の低下が懸念されるので、水質・水量のアセスメントと定期的な監視が必要である。

我国の約60%は積雪地であり、毎年道路融雪に多く

のエネルギーが消費されている。こうした状況の中で、国道9号沿線の多雪地帯、兵庫県美方郡村岡町(標高:340m)に道の駅「ハチ北」の構想が持ち上がった。ここでの基本構想にはチェーン着脱という基本機能を満たすだけでなく、自然環境に恵まれた地域、積雪地帯、維持管理費の削減、水源に乏しいことおよびCO₂排出削減といった社会的・地域的制約条件より、化石燃料は極力使わないことが加味された。そこで水源確保、新たな自然エネルギー利用技術の開発、さらには夏期には路温の上昇に伴う舗装体の流動防止の観点から、地中熱を利用した貯水槽集熱システム(Reservoir Heat Collection System: RHCS)¹²⁾が、1998年に国内外を通じて初めて実用化された。

設計の思想は「道の駅」という広大な駐車場下の大規模な地下空間利用に由来する。事業の新規性、RHCSの今後の展開および地中熱利用への学術的貢献のために、160ヶ所にわたる多点同時計測を供用後から現在まで、4年間にわたり行っている。長年のデータは、長期安定的な地中熱利用の保証および設計に供与される。

そこで本論文では、貯水槽流体と周辺地盤との熱的相互作用およびその際に生ずるRHCSの熱の流れと熱量を調べ、RHCSの運転制御方法が稼働時間、貯水槽水温、RHCSの地中熱採集性能および舗装体融雪性能に及ぼす影響について述べる。

表-1 RHCS の運転制御方法

期間 (年, 月)	運転 方法	熱の流れ	開始温度	停止温度
第1期 (1998, 6 ~ 1999, 11)	冷1	➤ 舗→集→貯1	$T_p \geq 25^\circ\text{C}$	$T_p \leq 22^\circ\text{C}$
	冷2	➤ 舗→集→貯2		
	融1	➤ 舗→集→貯1	$T_p \leq 2^\circ\text{C}$ 降雪感知	$T_p \geq 10^\circ\text{C}$
	融2	➤ 舗→集→貯2		
凍防	➤ 舗→集	$T_p \leq 7^\circ\text{C}$	$T_p \geq 9^\circ\text{C}$	
第2期 (1999, 12 ~ 2000, 11)	冷1	➤ 舗→集→貯1	$T_p \geq 25^\circ\text{C}$	$T_p \leq 22^\circ\text{C}$
	冷2	➤ 舗→集→貯2		
	融1	舗→集→貯1 ↑	2000/1/23 まで $T_p \leq 5^\circ\text{C}$ $T_p \geq 8^\circ\text{C}$	
	融2	舗→集→貯2 ↑	2000/1/24 以降 $T_p \leq 8^\circ\text{C}$ $T_p \geq 11^\circ\text{C}$	
第3期 (2000, 12 ~ 2001, 11)	冷1	➤ 舗→集→貯1	$T_p \geq 25^\circ\text{C}$	$T_p \leq 22^\circ\text{C}$
	冷2	➤ 舗→集→貯2		
	融2	➤ 舗→集→貯2	$T_p \leq 5^\circ\text{C}$	$T_p \geq 8^\circ\text{C}$
第4期 (2001, 12 ~ 2002, 7)	冷1	➤ 舗→集→貯1	$T_p \geq 25^\circ\text{C}$	$T_p \leq 22^\circ\text{C}$
	冷2	➤ 舗→集→貯2		
	融3	➤ 舗→貯1	$T_p \leq 3^\circ\text{C}$ 降雪感知	$T_p \geq 9^\circ\text{C}$
	融4	➤ 舗→貯2		
凍防	➤ 舗→集	$T_p \leq 5^\circ\text{C}$	$T_p \geq 6^\circ\text{C}$	

(T_p : 路面温度)

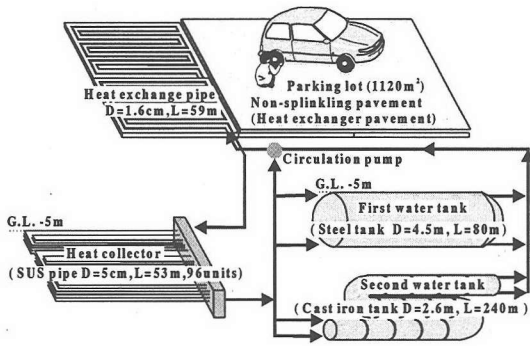


図-1 RHCS 運転方法の熱移動概念図

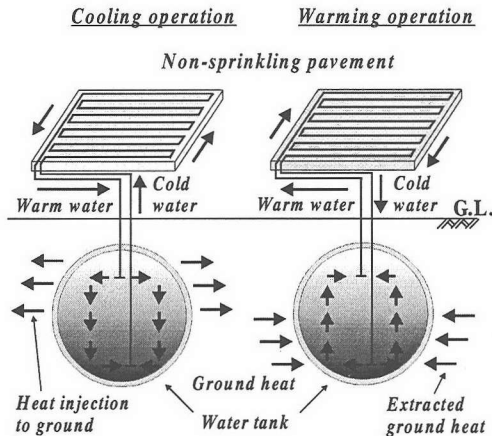


図-2 RHCS の熱移動

2. RHCS の運転方法

ここでは、1998年～2002年までを4期4種に分けて行った運転制御を基に、貯水槽への熱的負荷となる稼働時間に及ぼす運転の開始・停止温度と集熱器による凍結防止運転の影響に関する考察を目的とする。

(1) RHCS の概要および熱移動

RHCSは、被り厚を5mとして浅層地盤中に埋設された2基の貯水槽および集熱器で構成され、無散水舗装体と連結する(図-1参照)。集熱器は直径0.05m、長さ53mのステンレス管96本で構成された熱交換器である。第1貯水槽と呼ばれる鋼製貯水槽は直径4.5m、長さ80m、第2貯水槽と呼ばれる鋳鉄製貯水槽は直径2.6m、長さ240mであり、両者の体積はほぼ同じ(1270m³)である。第1貯水槽と第2貯水槽で形状を変えた理由は、施工性や集熱性能に及ぼす貯水槽の幾何形状(貯水槽体積に対する表面積、すなわち地盤との接触面積)の影響を検討するためである。

無散水舗装体は、面積が1120m²であり、厚さ0.28mの珪石入りコンクリートパネルの上に、厚さ0.03mのアスファルト舗装を被覆して作られる。コンクリートパネルに埋設された放熱管は、内径0.016mの配管用炭素鋼管(SGP)であり、被り厚は0.05mである。

RHCSの熱の流れと路面の加温・冷却機構を図-2に示す。貯水槽内の流体は温度成層状態を保持しており、路面融雪時、貯水槽上部から出てきた温かい流体は、無散水舗装体を循環する間に放熱し、温度を下げて貯水槽下部に戻る。流体は貯水槽内を上昇する間に地盤との熱交換で昇温する。こうして貯水槽は集熱槽として働き、舗装体に対して一種の“湯たんぽ”の役割を果たす。

一方、路面冷却時に貯水槽下部から出た冷たい流体は、無散水舗装体を循環する間に吸熱し、温度を上げて貯水槽上部に戻る。流体は貯水槽内を下降する間に地盤へ放熱を続け、温度を下げる。こうして夏期、貯水槽は放熱槽として働き、舗装体に対して一種の“水枕”の役割を果たす。

表-2 RHCS の月間稼働時間 (単位: 時間)

装置名	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月
第1期	第1貯水槽	13	113	100	1	36	55	54	63	145	53	1
	第2貯水槽	1	99	106	0	13	55	59	53	189	79	1
	集熱器	50	504	538	234	127	9	0	0	0	0	7
第2期	第1貯水槽	65	219	154	227	0	41	51	492	154	42	2
	第2貯水槽	1	0	196	143	15	21	71	11	591	341	0
	集熱器	8	219	350	370	0	0	0	0	0	0	0
第3期	第1貯水槽	17	0	159	170	8	37	54	111	89	31	1
	第2貯水槽	40	456	39	0	0	23	61	164	155	62	0
	集熱器	1	456	39	0	0	0	0	0	0	0	1
第4期	第1貯水槽	43	176	188	32	5	18	61	114	—	—	—
	第2貯水槽	0	0	0	0	1	10	63	150	—	—	—
	集熱器	34	50	92	58	17	8	0	0	—	—	—

(2) RHCS の運転制御条件

RHCS の運転方法は、夏期路面冷却運転が2種類、融雪運転が4種類、凍結防止運転が1種類および冬期採熱運転が7種類である。またRHCSは、無散水舗装体の温度と貯水槽水温をトリガーとして、無散水舗装体の第1・第2貯水槽および集熱器を連結する配管に設置された電動バルブと、循環ポンプを電子制御することで自動運転する。

1998年6月～2002年7月現在までの4期4種の運転制御条件を表-1に示す。1998年6月～1999年11月までを第1期、1999年12月～2000年11月までを第2期、2000年12月～2001年11月までを第3期、2001年12月～2002年7月までを第4期と区別する。表中の冷1・2はそれぞれ路面冷却運転1・2を、融1～4はそれぞれ融雪運転1～4を、凍防は凍結防止運転を示す。また、各運転方法における流体の移動は、表-1中の熱の流れ欄に模式的に示してあり、舗は無散水舗装体を、集は集熱器を、そして貯1・2はそれぞれ第1・第2貯水槽を表す。

a) 第1期 (1998年6月～1999年11月)

まず、夏期の運転制御条件について述べる。路面冷却運転は、路面温度が25℃まで上昇すると、下部水温の低い貯水槽を自動的に選択して開始し、路面温度が22℃まで低下すると停止する。

次に冬期の運転制御条件について述べる。凍結防止運転は、路面温度が7℃まで低下すると開始し、9℃まで上昇すると停止する。また融雪運転は、路面温度が2℃まで低下するか、降雪を感知すると、上部水温の高い貯水槽を自動的に選択して開始し、路面温度が10℃まで上昇すると停止する。

b) 第2期 (1999年12月～2000年11月)

夏期の運転制御条件は、a)と同じである。融雪運転

は、前半に路面温度が5℃まで低下すると開始し、8℃まで上昇すると停止する条件としたが、融雪の違いを調べる目的で、後半は2000年1月24日以降、路面温度が8℃まで低下すると開始し、路面温度が11℃まで上昇すると停止する条件に変更した。冬期、貯水槽は、初め第1貯水槽が使用され、融雪運転の連続稼働を防止するため、第1貯水槽上部水温が9℃まで低下すると、第2貯水槽に切り替わる。ただし、集熱器の有無による融雪状態の変化を比較するため、凍結防止運転は行わなかった。

c) 第3期 (2000年12月～2001年11月)

夏期の運転制御条件は、a)およびb)と同じである。また、この期間も集熱器による凍結防止運転は行わなかった。融雪運転は、路面温度が5℃まで低下すると開始し、路面温度が8℃まで上昇すると停止する。第1貯水槽と第2貯水槽の融雪性能を比較するため、この期間は第2貯水槽を先に使用した。前年において貯水槽水温は8℃を下回らなかったことから、第2貯水槽上部水温が9℃まで低下すると、第1貯水槽に切り替わる。

d) 第4期 (2001年12月～2002年7月)

夏期の運転制御条件は、a)～c)と同じである。一方、冬期の運転は、集熱器のみによる凍結防止運転で予熱を行い、融雪運転3および融雪運転4で融雪を行う場合の融雪性能を検討した。凍結防止運転は、路面温度が5℃まで低下すると開始し、6℃まで上昇すると停止する。また融雪運転は、路面温度が3℃まで低下するか、降雪を感知すると開始し、路面温度が9℃まで上昇すると停止する。冬期は、初めに第1貯水槽が使用され、第1貯水槽の上部水温が9℃まで低下すると、第2貯水槽に切り替わるように設定したが、結局、第2貯水槽は稼働しなかった。

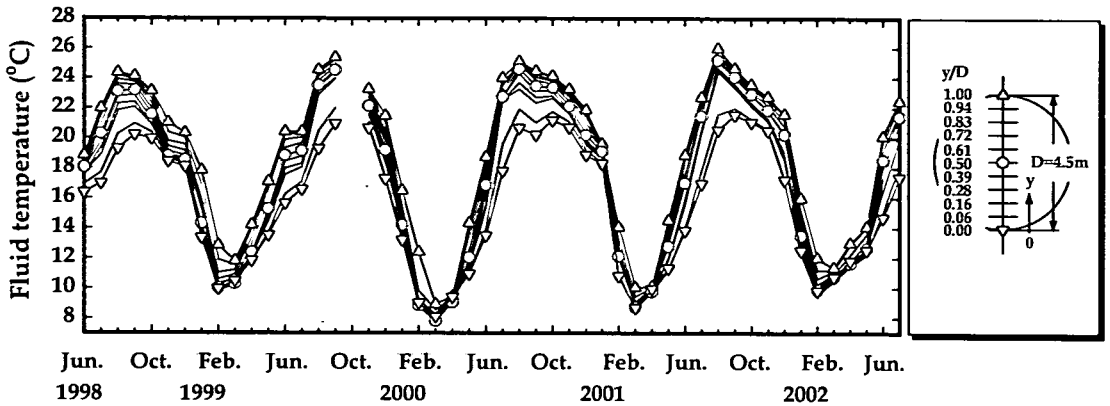


図-3 第1貯水槽水温の経月変化

(3) 稼働時間

表-2に第1期中途中の1998年12月から第4期までに至る第1貯水槽、第2貯水槽および集熱器の月間稼働時間を示す。表中において集熱器の稼働時間は、凍結防止運転と融雪運転1・2の和を表す。

a) 第1期 (1998年12月～1999年11月)

冬期(12月～3月)の総稼働時間は、集熱器で1326時間、第1貯水槽で227時間および第2貯水槽で206時間であり、両貯水槽の総稼働時間は集熱器のその33%となる。従って、集熱器は67%(893時間)が凍結防止のために稼働する。

夏期(5月～9月)では、路面冷却運転が行われており、第1・第2貯水槽ともに、8月の稼働時間が最も長い。また、11月はほとんど稼働していない。10月は計測機器の故障のため、データが欠損した。

b) 第2期 (1999年12月～2000年11月)

冬期(12月～3月)において、第1貯水槽の総稼働時間は665時間、第2貯水槽のそれは340時間である。

1月を見ると、2.(2)b)で述べたように、最初に第1貯水槽が稼働し、2月17日以降は第2貯水槽に切り替わる。しかし、第2貯水槽に切り替わった後の3月においても第1貯水槽が稼働している。これは、両貯水槽上部水温が貯水槽切り替え温度(9°C)まで低下したためと考えられる。

一方、7月において第1貯水槽の稼働時間が長いのは、貯水槽水温の上昇限度を調べる目的で、路面冷却運転1を連続稼働させたためである。また8月および9月において第2貯水槽の稼働時間が長いのは、路面冷却運転2を連続稼働させたためである。前年同様、10月および11月に、RHCSはほとんど稼働しない。

c) 第3期 (2000年12月～2001年11月)

2.(2)c)で述べた運転制御条件に従って、1月は第2貯水槽のみが稼働し、2月以降に第1貯水槽が稼働する。

冬期(12月～3月)の第1貯水槽の稼働時間は346時間、第2貯水槽のそれは535時間である。また、7月および8月において路面冷却運転時間が長く、10月および11月の稼働時間が短いことは、例年通りである。

d) 第4期 (2001年12月～2002年7月)

2.(2)d)で述べたように、冬期(12月～3月)では第1貯水槽と集熱器のみが稼働している。第1貯水槽の総稼働時間は439時間、集熱器のそれは234時間である。

第1期に比べて集熱器の稼働時間が短い理由は、次の(4)で説明する。

(4) 運転制御方法と稼働時間

初めに、貯水槽の稼働時間と融雪制御温度の関係を見る。第2期(1月24日以降、8°Cで融雪開始、11°Cで停止)と第3期(5°Cで融雪開始、8°Cで停止)の比較より、融雪運転の開始・停止温度を下げることで、貯水槽の稼働時間は短縮する。ちなみに第2期に比べて第3期の稼働時間は12%(124時間)短縮した。

次に、貯水槽稼働時間と集熱器による凍結防止運転の関係調べる。2.(2)d)で述べたように凍結防止運転の間、貯水槽は稼働しない。凍結防止運転を行った第1期と第4期の貯水槽稼働時間は、それぞれ433時間と439時間であり、この平均稼働時間は凍結防止運転を行わなかった第2期(1005時間)と第3期(881時間)の平均稼働時間に比べて、54%短縮した。

最後に、集熱器の稼働時間と凍結防止運転の制御温度との関係を見る。第1期(7°Cで凍結防止開始、9°Cで停止)および第4期(5°Cで開始、6°Cで停止)における凍結防止稼働時間を比較すると、制御温度を低く設定することで、稼働時間は74%(659時間)短縮できた。

ただし稼働時間は気象の影響も受けるので、ここで記述した短縮率は参考値と考えるのが妥当と思われる。

3. 貯水槽水温および周辺地温

ここでは、夏期において貯水槽に流入する温水によって生じる貯水槽水温上昇と周辺地盤温度上昇(蓄熱)の時間変化と広がり、および冬期の冷水流入に伴う貯水槽水温低下と周辺地盤から貯水槽への熱移動を考察することを目的とする。

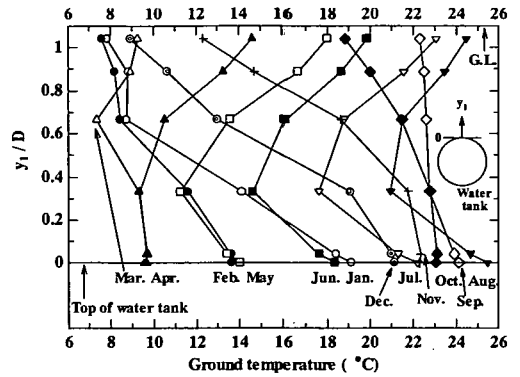
(1) 貯水槽水温特性

図-3は、第1貯水槽円形断面中央の異なる11ヶ所の高さにおける月平均水温の経時変化である。水温測点の場所は、貯水槽入口端と、その逆側面出口端の間の中央部である。なお計測位置は図-3右端のように y/D で表されており、 y は貯水槽底部から鉛直上方の距離、 D は貯水槽内径(4.5m)である。1999年10月のデータは、前述したように計測機器の故障により欠損する。 Δ が上部水温($y/D=1.00$)、 \circ が中央部水温($y/D=0.50$)および ∇ が下部水温($y/D=0.00$)を表す。いずれの時点でも、水温は頂部(Δ)で最高、底部(∇)で最も低くなるような単調分布となり、貯水槽内流体は成層化している。

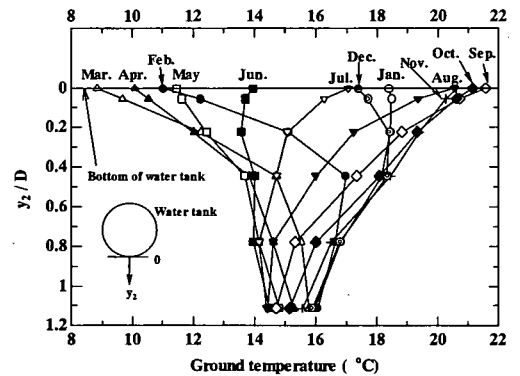
まず夏期に注目すると、1999年における貯水槽水温の月最高値は9月に25.4℃となる。2000年においては、7月における第1貯水槽の稼働時間が長いため、7月に水温が大きく上昇する。月最高水温は、8月の25.0℃である。2001年においても、月最高水温は、8月に26.0℃となる。

次に冬期に着目する。1999年~2002年の12月初期において、貯水槽の平均水温は21℃~22℃の範囲にある。同深度における施工前の地盤温度は約15℃であることから、夏期の蓄熱による影響が認められる。1999年において第1貯水槽は、表-2に示すように1・2月に集中して稼働したため、1月および2月の水温低下が著しく、貯水槽水温の月最低値は、2月に10.0℃となる。第1貯水槽は、3月にはほとんど稼働せず、貯水槽水温は、頂部近傍を除く範囲($0.00 \leq y/D \leq 0.83$)で上昇する。2000年の月最低水温は、3月に7.8℃となり、1999年のそれよりも2.2℃低い。また、2001年の月最低水温は、3月に8.7℃である。最後に2002年の月最低水温を見ると、2月に1999年とほぼ等しい9.8℃となる。

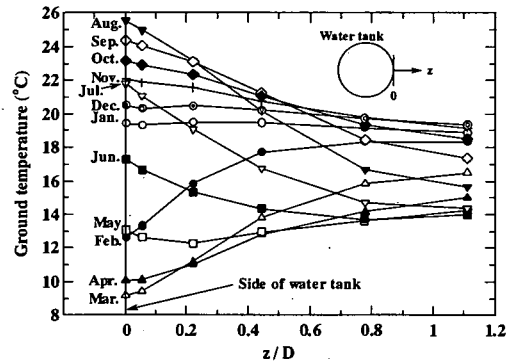
以上より、貯水槽水温の低下に影響を及ぼす因子は2つある。1つは稼働時間であり、稼働時間が増加すると水温は低下しやすい。もう1つは気象条件である。これを反映するのが2002年の結果である。2002年は1、2月の降雪量は多く、稼働時間は長い、3月は降雪量が少ないため、3月に水温は上昇して、上述したように月最低水温は2月に現れた。



(a) 貯水槽上部地温



(b) 貯水槽下部地温



(c) 貯水槽側部地温

図-4 貯水槽周辺地温分布

(2) 貯水槽周辺地温分布

図-4に2001年における貯水槽周辺地温(月平均)の鉛直および水平分布を示す。計測位置は、 y_1/D 、 y_2/D または z/D で表され、 y_1 は貯水槽上部外壁からの鉛直上方距離を、 y_2 は貯水槽下部外壁からの鉛直下方距離を表す。また、 z は貯水槽中央、高さ $y/D=0.5$ における側壁からの外向き水平距離である。

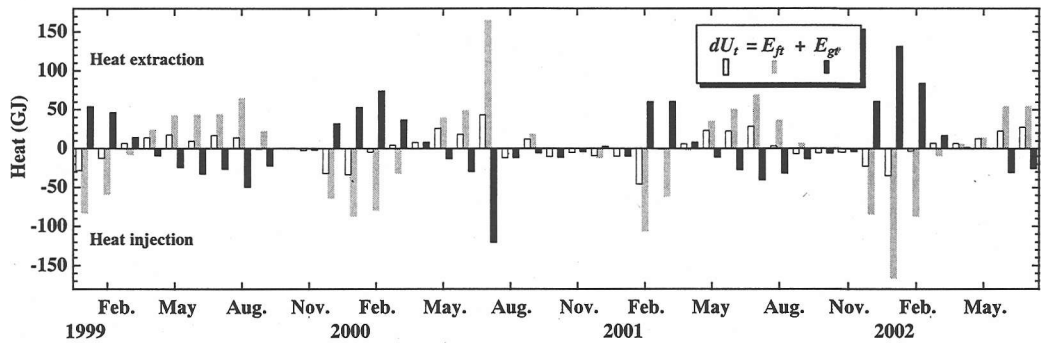


図-5 第1貯水槽の熱エネルギー収支

表-3 第1・第2貯水槽の稼働時間と熱量および熱フラックス

Year	第1貯水槽				第2貯水槽
	第1期 冬期	第2期 冬期	第3期 冬期	第4期 冬期	第1期 冬期
O.T.(h)	226	665	346	439	206
dU_t (GJ)	-41.1	-66.9	-67.6	-54.5	-38.2
E_{gt} (GJ)	122.6	195.8	113.5	293.5	107.6
E_{ft} (GJ)	-163.7	-262.7	-181.1	-348.0	-145.8
F_{ft} (kW)	-201.2	-109.7	-145.4	-220.2	-196.6

a) 貯水槽上部地盤

$y_1/D=1.04$ (地表面からの深さ 0.3m) の地温は, 8月 (▼) に最高 24.5°C, 2月 (●) に最低 7.6°Cとなる。一方, 貯水槽上部 ($y_1/D=0.01$) での地温は, 8月 (▼) に最高 25.5°C, 3月 (△) に最低 9.6°Cとなる。また, 地表付近と貯水槽上部の温度差は夏期放熱運転の間 (6月~9月) で小さく, 12月で最も大きいことが分かる。1月 (○) から4月 (▲) までの期間において, $y_1/D=0.66$ の地温が低いのは, 駐車場の一部に用いられる散水融雪時に同地温が連動して低下することより, 散水による雪解け水が同深度に流れ込むためと考えられる。

b) 貯水槽下部地温

貯水槽下部近傍 ($y_2/D=0.01$) の地温は, 9月 (◇) に最高で 21.6°C, 3月 (△) に最低で 8.8°Cとなる。これより約 5m 深い $y_2/D=1.12$ での地温は, 2月 (●) に最高 16.1°C, 7月 (▽) に最低 14.4°Cとなる。両地点において, 地温の増減は4ヶ月ずれる, すなわち $y_2/D=0.01$ の地温は4月から上昇し, $y_2/D=1.12$ のそれは8月から上昇する。地温低下についても同様に, $y_2/D=0.01$ においては10月から, $y_2/D=1.12$ では2月から地温は低下する。また, $y_2/D=1.12$ (貯水槽下部より5m下方) においても年較差は 1.7°Cあり, 貯水槽水温変化の影響範囲内にある。

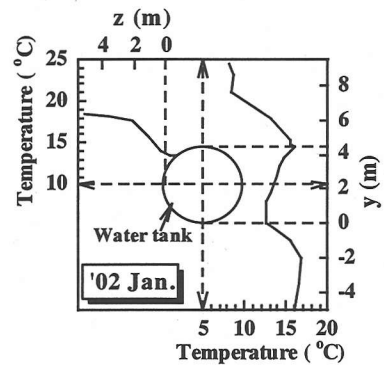
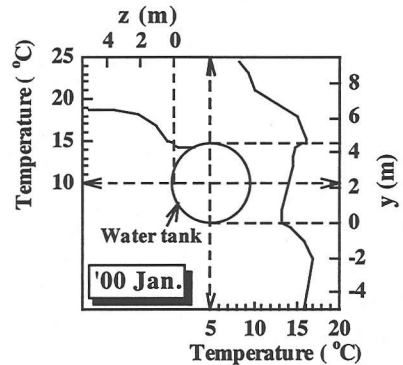
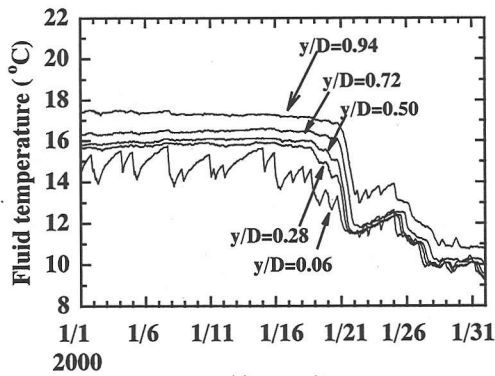


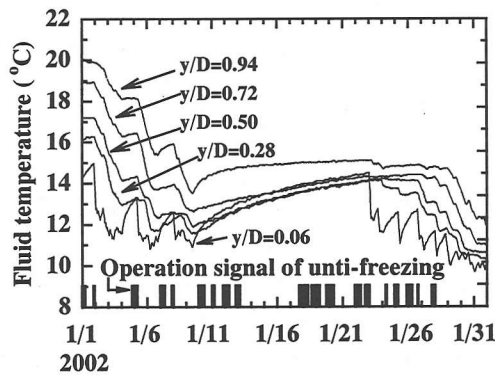
図-6 第1貯水槽の水温および周辺地温の鉛直・水平分布

c) 貯水槽側部地温

貯水槽側部近傍 ($z/D=0.01$) の地温は, 8月 (▼) に最高 25.5°C, 3月 (△) に最低 9.2°Cとなる。 $z/D=1.11$ (貯水槽側壁より5m離れた地点) の地温は, 12月 (◎) に最高 19.3°C, 6月 (■) に最低 14.0°Cとなり, その差 5.3°Cは, 貯水槽下部から同距離 ($y_2/D=1.12$) のそれ 1.7°Cよりも大きい。これは, 貯水槽側部の年水温較差が下部よりも大きいためである。 $z/D=1.11$ における地温変化は, $z/D=0.01$ におけるそれより約3ヶ月遅れており, これは水平方向の熱伝導のためと推察される。



(a) 2000年



(b) 2002年

図-7 第1貯水槽水温の経時変化

4. 熱エネルギー収支

ここでは、今後のRHCSの熱移動解析および貯水槽の集熱性能で重要となる貯水槽流体と周囲地盤との間の熱移動、さらには貯水槽が蓄熱槽として作用するか熱交換器として作用するかを明らかにする目的で、貯水槽集熱器およびシステム全体の熱収支を調べる。

(1) 第1貯水槽の熱エネルギー収支

図-5は、1999年1月～2002年7月までの第1貯水槽の1ヶ月ごとの熱エネルギー収支をヒストグラム表示したものである。熱エネルギー収支は次式で与えられる。

$$dU_i = E_{fi} + E_{gi} \quad (1)$$

$$E_{fi} = \rho c Q \Delta T_i \quad (2)$$

ここに dU_i : 貯水槽の内部エネルギー変化量, E_{fi} : 循環流体によって生じる貯水槽の流入・流出熱量の差, E_{gi} : 貯水槽壁を横切る熱量, ρc : 流体の体積熱容量, Q : 循環流量, ΔT_i : 貯水槽流入水温から流出水温を引いた温度差, を表す。 E_{gi} は式(1)より逆算して求められ、

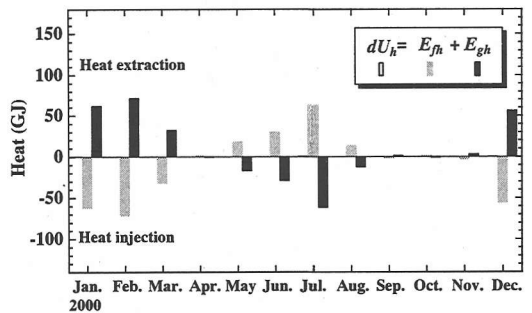


図-8 集熱器の熱エネルギー収支

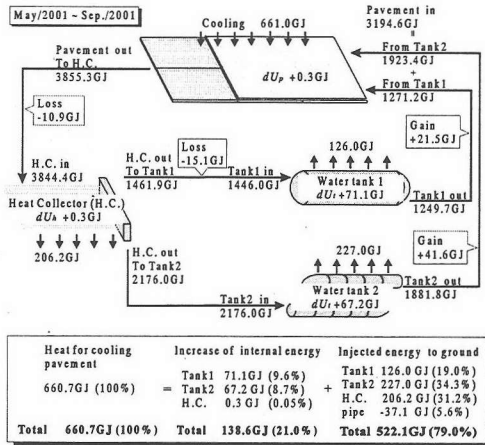
表-4 集熱器の稼働時間と採熱性能

	第1期 冬期	第2期 冬期	第3期 冬期	第4期 冬期
稼働時間(h)	1326	947	496	234
E_{gh} (GJ)	221.0	167.0	111.3	133.3
F_{gh} (W/m ²)	57.9	61.2	77.9	197.8

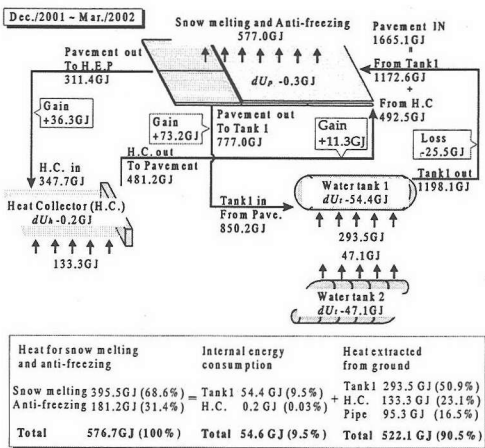
$E_{gi} > 0$ は地盤から貯水槽への熱移動を, $E_{gi} < 0$ は貯水槽から地盤への熱移動を表す。 $dU_i > 0$ は内部エネルギーの増加(貯水槽内水温の上昇)を, $dU_i < 0$ はその減少(貯水槽内水温の低下)を表す。 $E_{fi} > 0$ は貯水槽にとってエネルギー利得(舗装体から貯水槽への熱供給)を, $E_{fi} < 0$ はエネルギー損失(貯水槽から舗装体への熱供給)を表す。

式(1)の熱エネルギー収支を基に、第1期(1999年)～第4期(2002年)までの冬期(12月～3月)における第1貯水槽の稼働時間(O.T.), dU_i , E_{gi} , E_{fi} および E_{fi} を稼働時間で除した F_{fi} ($= E_{fi}/O.T.$) を表-3に示す。同表中には、第1期における第2貯水槽の各熱量と熱フラックスも記す。

第4期を除けば、稼働時間が増大すると E_{fi} は増加, F_{fi} は減少する。第4期の F_{fi} が大きいのは, E_{fi} および E_{gi} が大きいためである。そこで, E_{gi} 増大の原因を究明するため, まず第2期(2000年)と第4期(2002年)の1月における第1貯水槽の平均水温と, 第1貯水槽周辺の平均地温の鉛直・水平分布を比較した。その結果, 図-6に示すように両分布に大きな差異は見られなかった。よって次に2000年および2002年の1月における第1貯水槽水温の経時変化に着目する(図-7参照)。水温計測位置は図-3中の右端に示した $y/D=0.94, 0.72, 0.50, 0.28$ および 0.06 である。(b)の水温経時変化には, 集熱器による凍結防止運転の稼働状況を柱状で示す(柱状部分が稼働)。まず(a)の2000年に着目すると, 水温が急激に低下した21日以降の最長停止時間は, 24



(a) 第3期夏期 (2001年5月~9月)



(b) 第4期冬期 (2001年12月~2002年3月)

図-9 RHCSの熱エネルギー収支

日の約1日間であり、この期間に貯水槽内には2.1GJの E_{gr} が供給され、平均水温は12.3°Cから12.7°Cに上昇した。一方(b)の2002年における第1貯水槽は、1月10日から22日までの約13日間停止しており、この期間に12.7GJの E_{gr} によって、貯水槽内の平均水温は12.0°Cから14.4°Cまで上昇した。これより稼働停止時間が増えるとともに、 E_{ge} (地中熱採集)によって dU は増大することが分かる。

(2) 集熱器の熱エネルギー収支

図-8に、2000年各月における集熱器の熱エネルギー収支をヒストグラム表示する。集熱器の熱エネルギー収支は次式で表される。

$$dU_h = E_{fh} + E_{gh} \quad (3)$$

表-5 夏期の舗装体からの吸収熱量

	第1期 夏期	第2期 夏期	第3期 夏期
吸収熱量	620.0 GJ	659.5 GJ	661.0 GJ
稼働時間	814 h	1432 h	785 h
F_{xp}	189 W/m ²	114 W/m ²	208 W/m ²
全天日射量	2251.7 GJ	2497.5 GJ	2434.4 GJ
吸収熱量 全天日射量	27.5%	26.4%	27.2%

$$E_{fh} = \rho c Q \Delta T_h \quad (4)$$

上式において、 dU_h :集熱器の内部エネルギー変化量、 E_{fh} :循環流体によって生じる集熱器の流入・流出熱量の差、 E_{gh} :集熱器の管壁を横切る熱量、 ΔT_h :集熱器流入水温から流出水温を引いた温度差、を表す。

熱エネルギー収支を見ると、採熱は2月、放熱は7月に最大となる。また、 $dU_h=0$ であることより集熱器は、 E_{fh} に対応してほぼ同じ値の E_{gh} を得ることができる。

表-4に第1期~第4期間での冬期(12月~3月)における集熱器の採熱性能を示す。表中の稼働時間は、集熱器の総稼働時間を表す。すなわち、第1期は凍結防止運転および融雪運転1・2、第2期は融雪運転1・2、第3期は融雪運転2、そして第4期は凍結防止運転の稼働時間をそれぞれ表す。また、 F_{gh} は E_{gh} を稼働時間と集熱器の表面積(800m²)で除して求められる。 F_{gh} に着目すると、第4期に最大となる。これは、第4期の E_{gh} は第3期のそれに続いて2番目に小さいものの、稼働時間が第1期~第3期の約1/2~1/6となり、非常に短いためである。集熱器についても、凍結防止運転の開始および停止温度を低くし、稼働時間を短くすると地盤採熱性能は向上する。

(3) RHCSの熱エネルギー収支

図-9に第3期夏期(2001年5月~9月)および第4期冬期(2001年12月~2002年3月)の、RHCS熱エネルギー収支を示す。図中には、無散水舗装体の内部エネルギー変化量: dU_p 、流入熱量、夏期採熱量または融雪・凍結防止熱量、集熱器の流入熱量と地盤採・放熱量、第1・2貯水槽の内部エネルギー変化量、流入熱量、地盤採・放熱量および各配管系の採・放熱量が示される。下部の熱収支式内の各熱量値には、夏期は舗装からの採熱量660.7GJで、冬期は融雪・凍結防止熱量576.7GJで除した割合(%)が示される。

最初に、夏期の熱エネルギー収支に注目する。夏期は路面冷却運転1が321時間、路面冷却運転2が464時間稼働した。その結果5月~9月の間に放熱管を通して舗

表-6 融雪・凍結防止フラックス密度と稼働時間

第1期 冬期	12月	1月	2月	3月
融雪(W/m ²) (貯水槽)	360 (14h)	220 (212h)	177 (206h)	105 (1h)
凍結防止 (集熱器)	193 (8h)	82 (292h)	48 (332h)	20 (233h)
第2期 冬期	12月	1月	2月	3月
融雪 (貯水槽)	493 (66h)	199 (219h)	113 (350h)	72 (370h)
第3期 冬期	12月	1月	2月	3月
融雪 (貯水槽)	504 (57h)	164 (456h)	189 (198h)	133 (170h)
第4期 冬期	12月	1月	2月	3月
融雪 (貯水槽)	495 (43h)	251 (176h)	153 (188h)	124 (32h)
凍結防止 (集熱器)	447 (34h)	246 (50h)	125 (92h)	102 (58h)

装体から吸収した熱量(舗装体吸収熱量) 661.0GJのうち、0.3GJは舗装体の温度上昇に費やされ、その残り660.7GJの21%に当たる138.6GJがRHCSに蓄えられ、79%に相当する522.1GJが貯水槽から地盤に放熱される(図-9(a)下部の熱収支式を参照)。内部エネルギーの増加量は、第1貯水槽が71.1GJ、第2貯水槽が67.2GJであり、大きな差異は見られない。一方、地盤への放熱量は、第1貯水槽が126GJ、第2貯水槽が227GJであり、第2貯水槽が第1貯水槽よりも約1.8倍多い。これは、第2貯水槽の稼働時間(464h)の方が、第1貯水槽のそれ(321h)よりも長いためである。

次に冬期の熱エネルギー収支に注目する。舗装体と集熱器を結ぶ矢印が凍結防止運転による熱移動を、舗装体と第1貯水槽を結ぶ矢印が融雪運転による熱移動を示す第4期冬期(2001年12月~2002年3月)までの間に放熱管を通して舗装体が放出した熱量、すなわち融雪・凍結防止熱量は577.0GJであり、このうち0.3GJが舗装体の内部エネルギー消費により、576.7GJが地中熱により賄われる。さらに同図b)下部のエネルギー収支で示すように、576.7GJは、その9.5%(54.6GJ)がRHCSの内部エネルギー、残りの90.5%(522.1GJ)が地盤採熱によるものである。これより、貯水槽は蓄熱槽よりも集熱槽としての役割を果たすことが判る。

表-5は第1期~第3期までの夏期(5月~9月)に、舗装体から吸収した熱量(吸収熱量)を示す。表中の F_{sp} は吸収熱フラックス密度であり、吸収熱量を稼働時間と無散水舗装体の表面積(1120m²)で除した値である。第2期の F_{sp} は第1期および第3期の F_{sp} に比べて

表-7 融雪・凍結防止熱量と降雪高さの関係

	第1期 冬期	第2期 冬期	第3期 冬期	第4期 冬期
供給熱量	593 GJ	710 GJ	663 GJ	576 GJ
換算融雪高	10.6 m	12.6 m	11.8 m	10.3 m
降雪高さ	4.4 m	—	6.3m	3.8m
換算融雪高 降雪高さ	2.4	—	1.9	2.7

小さい。これは3.(1)で述べたように第2期(2000年)7月の第1貯水槽の稼働時間(492h)が長かったためである。また、吸収熱量を全天日射量で除した割合は、どの年においても約27%であり、掘削杭熱交換システム(BHES)で得られた値とほぼ一致する⁷⁾。今後はこの吸収熱量の有効利用が望まれる。

5. システム評価

システム性能評価は熱量および経済的観点から考える必要がある。言い換えれば、如何に稼働時間を短縮しながら融雪性能を維持するか、また貯水槽の規模を縮小しても融雪性能が維持できるか、である。ここでは、システムの構成上重要な舗装体の融雪・凍結防止のエネルギーフラックス密度を評価し、4期に分けて行った試験結果を基に、今後の貯水槽と集熱器の好ましい組み合わせ運転およびRHCSと融雪面積の関係に関する考察を目的とする。

(1) 融雪フラックス密度の評価

表-6に、第1期~第4期までの冬期(12月~3月まで)における、融雪・凍結防止エネルギーフラックス密度(W/m²)と稼働時間を示す。

12月の融雪エネルギーフラックス密度は、360 W/m²~500 W/m²の範囲にあり、すべての年で月最大となる。これは、12月は舗装体への流入水温が約20℃と高いこと、および稼働時間が短いために舗装体への流入水温が低下しにくいことに起因する。また、融雪運転の開始温度を8℃、停止温度を11℃とした第2期を除けば、3月の融雪エネルギーフラックス密度は100 W/m²以上となることから、融雪運転の開始温度を5℃、停止温度を8℃とした方が稼働時間を短くして高い熱フラックスを舗装体に供給できることが判る。実際にこの温度設定で、現地における融雪性能の低下は認められなかったことから、この制御温度は実用上問題ないと思われる。

さらに表-3を基に、第1貯水槽と第2貯水槽の融雪

性能の比較を行う。第1期の融雪運転は両貯水槽がほぼ交互に稼働したため、表-3に示すように第1貯水槽と第2貯水槽の稼働時間はほぼ等しい。また、融雪運転1の開始から融雪運転2の開始までの平均時間は3時間、その逆は2.5時間であることから、両貯水槽の使用頻度もほぼ同じである。これより、2つの貯水槽のどちらかが、昼または夜に卓越して稼働することはなく、一冬を通して得られる両貯水槽の平均的融雪性能に及ぼす気象の影響は小さいと推察される。熱解析の結果、両貯水槽の E_g と F_p はほぼ等しいことから、両貯水槽の融雪性能に大差はないと言える。

(2) 集熱器のRHCSへの貢献

表-6に注目すると、1月の融雪エネルギーフラックス密度は、集熱器による凍結防止運転を行った第1期と第4期で大きい。ここで、凍結防止運転が融雪エネルギーフラックス密度の増大に貢献することを、図-7(b)を用いて説明する。(b)の期間において、凍結防止運転中、第1貯水槽を用いた運転はない。仮に、この期間中に第2期のように凍結防止運転も第1貯水槽で行ったとすると、図-7(b)に示した凍結防止運転の信号に従って貯水槽に低温水が流入するために、水温はさらに低下し、融雪エネルギーフラックス密度も低下する。従って、凍結防止運転は貯水槽の稼働を抑制し、4.(1)で述べたように貯水槽の水温回復に寄与するため、融雪エネルギーフラックス密度の増加に貢献する。

また、第1期と第4期における凍結防止エネルギーフラックス密度を比較すると、どの月においても第4期の方が大きい。4.(2)で述べたように、凍結防止運転も開始温度および停止温度を低く設定した方が好ましいと言える。

(3) 融雪面積の検討

表-7に第1期～第4期までの冬期における融雪・凍結防止熱量(舗装放熱量)と降雪高さの関係を示す。舗装放熱量は、凍結防止運転および融雪運転によって舗装体から放出される熱量の総和である。また、換算融雪高は舗装放熱量が全て融雪に使用されると仮定した時の、融雪可能な降雪高さ(m)を表す。現地での実測より、積雪密度は $100\text{ kg/m}^3\sim 200\text{ kg/m}^3$ であったので、 150 kg/m^3 と設定した。降雪高さは、現地での観測結果をもとに算出した。第2期(2000年)の降雪高さは計測機器故障のため不明である。

換算融雪高を降雪高さで除した値は、1.9～2.7となる。換言すれば、舗装放熱量の約 $1/3\sim 1/2$ が融雪に使用されたことになる。今後は、この値を1に近づけながら性能が保証されるようなRHCSの規模と融雪面積の関係について検討する必要がある。

6. おわりに

1998年6月から2002年7月までの道の駅「ハチ北」における温度計測結果を基に、RHCSの運転制御方法と稼働時間の関係および稼働時間が貯水槽水温、RHCSの地中熱採集性能、舗装体融雪性能に及ぼす影響について検討を行った。

以下に、得られた知見を列挙する。

1. 融雪運転の開始・停止温度を 8°C 、 11°C から 5°C 、 8°C に下げると貯水槽の稼働時間は短くなり、融雪エネルギーフラックス密度は増大することより、効率的な制御であることが分かった。
2. 集熱器による凍結防止運転は、貯水槽の停止時間を長くさせ、水温の上昇、地盤採熱量および融雪エネルギーフラックス密度の増加に貢献する。従って、現状では集熱器による凍結防止運転と貯水槽による融雪運転の組み合わせがシステムとして有効である。
3. 12月初期の貯水槽平均水温($21^{\circ}\text{C}\sim 22^{\circ}\text{C}$)は、同深さにおける施工前の地盤温度よりも $6^{\circ}\text{C}\sim 7^{\circ}\text{C}$ 高く、夏期における蓄熱の影響が認められ、12月の融雪エネルギーフラックス密度は $360\text{ W/m}^2\sim 500\text{ W/m}^2$ で高い値を示す。これより夏期の路面冷却運転に伴う貯水槽から地盤への放熱は、冬期初めの高い融雪性能に貢献することが分かった。
4. 第1貯水槽と第2貯水槽の地中熱採集および融雪性能に、大きな差は見られない。
5. 貯水槽は蓄熱槽としてよりも、熱交換器としての役割が大きいことが分かった。
6. 舗装放熱量の約 $1/3\sim 1/2$ が融雪に利用され、残りが予熱熱運転に消費されることが分かり、融雪効率を高めるようなRHCSの設計が必要となる。

本研究によって、RHCSの熱移動解析に関するデータを得ることができたので、今後はRHCSの解析モデルを用いて、貯水槽の大きさと融雪面積の関係およびRHCSのさらに合理的な運転制御方法について検討を行う。

参考文献

- 1) 例えば Nilsson, G., Gabriellsson, A., Hellstrom, G., Rosen, B. and Sundberg, J.: Ground source heat pump systems for the conservation of electrical heat, Design and expected performance of Possible Demonstration Plants, Proceeding of 8th International Conference on Thermal Energy Storage, TERRASTOCK2000, Vol. 1, pp. 233-237, 2000.
- 2) Iihola, H. and Ala-peijari, T.: Removal of iron and manganese from groundwater, in situ oxidation of an esker aquifer-hameenlinna, Finland, Proceeding of 7th International

- Conference on Thermal Energy Storage, MEGASTOCK'97, Vol. 2, pp. 709-714, 1997.
- 3) Andersson, O. and Rudling, H. : Aquifer Storage of Natural Cold for the Stockholm District Cooling System, Proceeding of 8th International Conference on Thermal Energy Storage, TERRASTOCK2000, Vol. 1, pp.123-128, 2000.
 - 4) The Sussex ATEs Steering Committee: Sussex health center aquifer thermal energy storage, January 25, 1994.
 - 5) Dalenback, J., Hellstrom, G. and Schroeder, K.: Evaluation of the borehole heat store at infra city, sweden, Proceeding of 8th International Conference on Thermal Energy Storage, TERRASTOCK2000, Vol.1, pp. 207-212, 2000.
 - 6) Seiwald, H. and Hahne, E.: Underground seasonal heat storage for a solar heating system in Neckarsulm / Germany, Proceeding of 8th International Conference on Thermal Energy Storage, TERRASTOCK2000, Vol. 1, pp.213-219, 2000.
 - 7) 大木政弘, 渡邊 洋, 福原輝幸, 森山和馬: 掘削抗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 卷, pp. 587-592, 1997.
 - 8) 渡辺洋, 清水亨, 宮風均, 福原輝幸: 掘削抗熱交換システムによる国道 8 号線中川峠の無散水融雪-第 2 報-, 第 54 回年次学術講演会, V-171, 1999.
 - 9) 上村靖司, 小松崎通雄, 梅村晃由, 戸井田隆行: 融雪地中熱交換井の性能評価, 日本雪氷学会全国大会講演予稿集, pp. 80, 1998.
 - 10) 盛田耕二: マグマからの熱抽出をめざして -杭井内同軸熱交換器 (DCHE) 方式の開発-, 地下水学会誌, 第 36 巻, 第 3 号, pp. 243-357, 1994.
 - 11) 竹内正紀, 宮本重信, 木村照夫, 坪田諭治: 基礎くい利用地熱融雪法の開発と数値シミュレーション, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 52, pp. 59-69, 1993.
 - 12) 渡辺洋, 福原輝幸, 横山孝男, 伊藤利和, 河合源悟: 道の駅「ハチ北」の貯水槽集熱システム (RHCS) による路面温度制御と融雪効果, 雪工学会誌, Ser. No. 64, pp. 11-23, 2002.

EVALUATION OF PERFORMANCE OF

RESERVOIR HEAT COLLECTION SYSTEM USING GROUND HEAT

Teruyuki FUKUHARA, Kentaro KODERA, Yoshio ASADA and Shingo KAWAI

"MICHINO-EKI", "HACHI-KITA" has been in operation on Route 9 in Hyogo Prefecture since March 1998. A Reservoir Heat Collection System (RHCS) that set two water tanks and a heat collector in underground and is used to control the pavement temperature of parking, which is needed to melt snow and to cool it in summer. Data collected continuously include flow rate of heat carrier fluid, pavement temperatures and temperatures of the fluid in the water tank and the surrounding ground temperatures.

This paper describes the effects of the control method for the pavement temperature on the operation time, the fluid temperature in the water tank and snow-melting performance besides the thermal behaviors between the water tank and the surrounding ground.