

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

SEASONAL THERMAL INTERACTION BETWEEN GROUND
AND A WATER TANK BURIED AT SHALLOW DEPTH
INCLUDING ENERGY EXTRACTION RATES

松村量行¹・福原輝幸²・渡邊洋³・川崎和来⁴・山下良男⁴
Kazuyuki MATSUMURA, Teruyuki FUKUHARA, Hiroshi WATANABE,
Kazuki KAWASAKI and Yoshio YAMASHITA

¹学生員 福井大学大学院博士前期課程環境設計工学専攻 (〒910-8507 福井市文京3-9-1)

²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)

³学生員 福井大学大学院博士後期課程システム設計工学専攻 (〒910-8507 福井市文京3-9-1)

⁴正会員 建設省近畿地方建設局豊岡工事事務所 (〒668-0025 豊岡市幸町10-3)

A practical system for using terrestrial heat in shallow ground has been proposed by the authors' research group to control pavement temperature. This system comprises a water tank and a pavement incorporating a heat exchanger pipe system that was built on the campus of Fukui University.

A field experiment has been ongoing since July 1995. Water and ground temperatures have been measured continuously in and around the tank along with the heat carrier fluid flow rates.

The heat energy budget of the tank, obtained from the field experiments, confirmed our past result that terrestrial heat across the tank walls is effective in not only melting snow on roads in winter but also suppressing the rise in pavement temperatures in summer.

The proposed numerical model was able to reproduce the behavior of the water temperature in the tank including the effects of the inflow of cold water and the return flow to the pavement heat exchanger in winter.

Key Words : Water tank, Energy extraction, Terrestrial heat, Heat and mass transfer

1. はじめに

産業の発達, 経済の成長と並行するように生じた急速な地球温暖化は, 海水位の上昇や異常気象による自然災害(干ばつ, 豪雨など)として顕在化し始めている。そのため気候変動枠組み条約第3回締約国会議(COP3)において, 先進国を中心に温室効果ガスの削減目標が定められた。目標達成のためには, リサイクル, 化石エネルギーの効率的利用, 社会基盤の整備などに加え, 自然エネルギーや未利用エネルギーである太陽光, 地熱, 風力, 廃熱などを利用することも必要不可欠となる。

ここで, エネルギー利用の観点から日本国土の半分以上を占める積雪地域での道路融雪対策を考える。現在のところ, 融雪は電気・重油などの一次エネルギーを利用した方式が一般的であり, 二酸化炭素排出削減に向けた対策はこの分野でも必須である。加えて, 地下水や河川水による散水融雪に関しては,

適切な水管理を怠ると地下水位の低下, 地盤沈下および水質汚染などの環境問題にもつながりかねない。

そこで筆者らは, 自然エネルギーの中でも地域偏在性の少ない地中熱に注目した。積雪地域である福井においても, 年間を通して地温は地表面下 2mでも 10℃から 15℃の範囲にある¹⁾。このような地域の気象や地盤特性を考慮して, 地中熱を利用した地下貯水槽貯熱システムによる無散水融雪および路面温度制御方式^{2), 3)}を提案した。この方式は, 地下に埋設された貯水槽を蓄熱槽・熱交換器として捉え, 冬期は路面融雪や凍結防止の温熱源として, 夏期は路面冷却の冷熱源として, 年間利用できる³⁾。また, 貯水槽は非常時の生活および防火用水の確保に, あるいは雨量調節機能を兼ねた施設としても利用できる。

現在, 本システムの路面温度制御効果については冬期の路面融雪, 凍結防止, 夏期の路面冷却に有効であることを確認している⁴⁾。さらに, 数日間に渡る融雪時の冷水流入に伴う貯水槽の水温分布やエネ

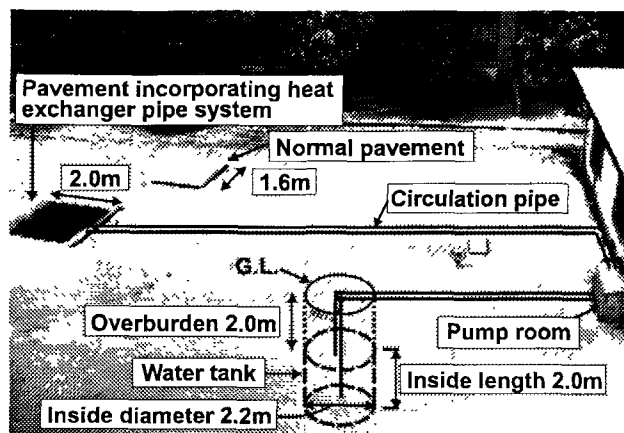


図-1 地下貯水槽貯熱システムの概要

ルギー収支などの熱的特性も明らかとなってきた⁵⁾。そこで今後このシステムを熱貯蔵施設としてみなすのか、あるいは温度差利用の施設として捉えるのかについては、貯水槽水温、貯水槽周辺地温(以下、周辺地温と呼称)および貯水槽壁を横切る熱エネルギーの季節変化を調べる必要がある。

この点を踏まえて本研究では、融雪運転時の貯水槽水温および周辺地温の変化過程、さらにシステムの稼動状況、貯水槽からの採熱量、貯水槽水温、周辺地温の季節的な変化特性を、実験的および解析的に明らかにする。

2. 地下貯水槽貯熱システムについて

(1) システムの概要および実験概要

図-1は福井大学構内に設置された本システムの概要を示す。システムは地下貯水槽および無散水融雪舗装(以下、貯水槽および無散水舗装体と呼称)から成る。

a) 貯水槽：内径2.2m(半径 $R=1.1$ m)、高さ2.2m(内高さ $L=2.0$ m)、厚さ0.2mのPC製ヒューム管である。底部基礎コンクリートには貯水槽と周辺地盤との間の熱交換を促進させるために、10本の金属板(幅0.1m~0.2m、長さ約1m)が打ち込まれる。貯水槽の流入口および流出口では水平方向にのみ流れが生じるように、整流装置(高さ0.05m、幅0.1m、奥行き0.1m)が設けられる。

b) 無散水舗装体：2m×2m×0.12mのコンクリート製であり、内部には循環パイプ(内径13mm)が多重平行流型に埋設される。その配管ピッチは0.1m、被り厚は0.03mである。

c) 実験概要：貯水槽は地表面下2.0mに埋設され、地表面下0.5mには遮水用のビニールシートが敷設される。貯水槽と無散水舗装体は循環パイプにより連結され(水理的に閉回路)、ラインポンプ(0.19KW)により流体が循環する。また、融雪状況を比較するために、循環パイプを埋設していない通常舗装体(1.6m×1.8m×0.12m)も併せて設置した。

気象データ(長波放射量および短波放射量)、貯

Cooling operation Warming operation

Pavement incorporating heat exchanger pipe system

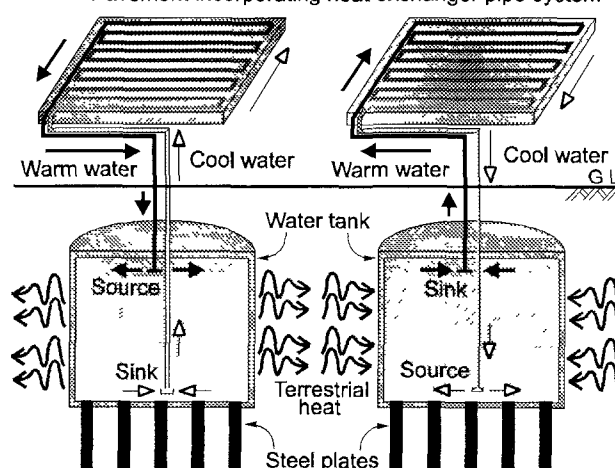


図-2 地下貯水槽貯熱システムの熱移動概念図

水槽出入口水温、舗装体出入口水温、貯水槽水温(約40点)および周辺地温(約80点)は30分毎にコンピュータにより自動計測される。さらに、システムの稼動および熱移動の状況は、コンピュータ画面上で常時管理される。

(2) 冬期と夏期の熱の流れ

図-2は本システムの熱移動の概念を示す。

主に冬期(同図右)の場合、地盤温度は舗装体温度より相対的に高い。舗装体温度よりも高温の流体が、貯水槽上部から無散水舗装体へ供給され、舗装体の温度低下を緩和する(これを昇温運転と呼称)。循環水は、無散水舗装体を通過する間に温度低下し、再び貯水槽下部へ戻る。ここで、貯水槽水温が周辺地温より低い場合には、周辺地盤から貯水槽へ向かって熱移動が生じ、貯水槽水温の低下が抑制される。

主に夏期(同図左)の場合、地盤温度は舗装体温度より相対的に低い。舗装体温度よりも低温の流体が、貯水槽下部から無散水舗装体へ供給され、舗装体の温度上昇を緩和する(これを冷却運転と呼称)。循環水は、無散水舗装体を通過する間に温度上昇し、再び貯水槽上部へ戻る。ここで、貯水槽水温が周辺地温より高い場合には、貯水槽から周辺地盤へ向かって熱移動が生じ、貯水槽水温の上昇が抑制される。

(3) 路面温度制御と運転方法

最適な運転とは、融雪能力や路面冷却効果を低下させることなく稼働時間を最短にすることである。この点については今後の検討項目として残るが、現状は以下の条件で運転が制御されている。昇温運転は無散水舗装体路面から深さ0.01mの温度が5℃以下の時に、冷却運転は同位置の温度が貯水槽上部水温よりも5℃以上高い時に行われる。

循環流量 Q は1996年1月までは5.0 l/minで、それ以降は3.0 l/minで運転されているが、実験のために適宜変更された。

Warming operation

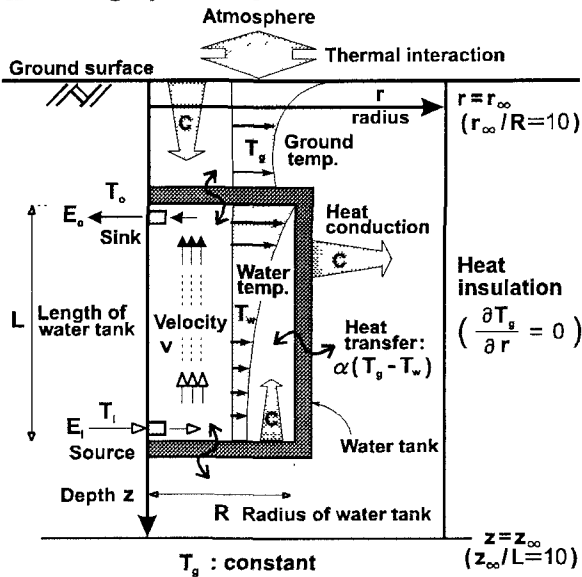


図-3 解析モデルの概略図

3. 解析モデルと解析条件

(1) 仮定

ここでは実用的見地より貯水槽の熱移動を許容できる範囲内で単純化して、モデル化を試みる。

a) 貯水槽水温は半径(r)方向には一様で、深さ(z)方向にのみ変化する。この分布特性は、建築分野での温度成層型蓄熱槽のそれ⁵⁾と同じであるが、貯水槽周辺の温度境界条件は非一様かつ非定常である。

b) 貯水槽に接続する流入口、流出口の流れは層流 ($Q=2.0 \text{ l/min}$ のとき、流入口でのレイノルズ数 $Re=83$) であり、かつ温度が安定的に成層化するように運転が行われる。従って、流入口、流出口近傍や貯水槽壁近傍での乱れおよびダイナミックな浮力効果は無視する。

c) 貯水槽水温の分散は分子拡散程度のオーダーとする。

d) 貯水槽と周辺地盤との間の熱移動フラックスは、貯水槽水温と周辺地温の差に比例するものとし、熱貫流率は貯水槽全周に渡り一定とする。

e) 貯水槽周辺地盤の熱移動は伝導のみとし、地下水流れによる顕熱効果は考慮しない。

(2) 解析モデル

貯水槽水温 T_w は図-3 に示すような解析モデルに従って、熱伝導、移流および貯水槽と地盤との間の熱移動で規定される。流入口での流入熱エネルギーフラックス E_i 、流出口での流出熱エネルギーフラックス E_o を考慮すると、基礎方程式は次式となる。

$$(\rho c)_w \frac{\partial T_w}{\partial t} = \lambda_w \frac{\partial^2 T_w}{\partial z^2} - (\rho c)_w v \frac{\partial T_w}{\partial z} + \eta \alpha (T_g - T_w) + E_i - E_o \quad (1)$$

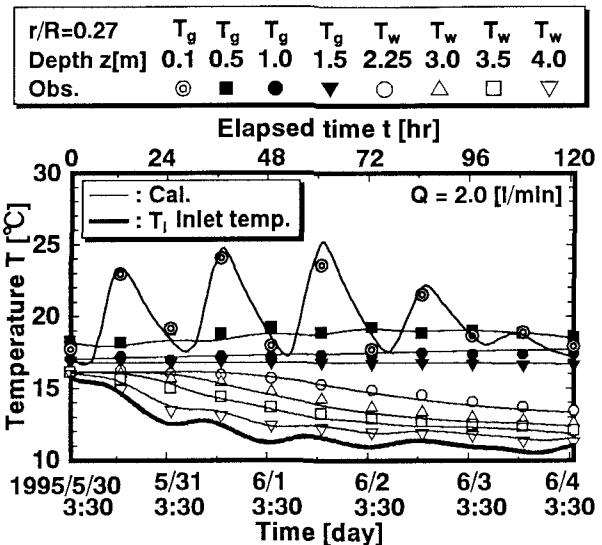


図-4 貯水槽水温および周辺地温の経時変化

ここに、 $(\rho c)_w$: 水の体積熱容量、 t : 時間、 T_g : 周辺地温、 λ_w : 水の熱伝導率 ($=0.57 \text{ W/mK}$)、 v : 鉛直方向移流速度、 α : 貯水槽の熱貫流率、 η : 貯水槽微小要素の体積に対する貯水槽内壁面と接する面積の比である。本計算では α を $8.0 \text{ W/m}^2\text{K}$ とする⁶⁾。

地盤中の熱移動に関する基礎方程式は、3. (1) の仮定 e) に基づいて次式で与えられる。

$$(\rho c)_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = \lambda_g \frac{\partial^2 T_g}{\partial z^2} \quad (2)$$

貯水槽周辺地盤は大学内の地盤柱状図を参考に、粘土地盤と考えた。その熱物性値は、 $(\rho c)_g$: 地盤の体積熱容量 ($=3100 \text{ KJ/m}^3\text{K}$)、 λ_g : 地盤の熱伝導率 ($=1.58 \text{ W/mK}$) である⁷⁾。

(3) 境界条件

図-3 には境界条件も示される。地表面温度は種々の気象データを基に計算される。半径方向の境界は本計算の場合、貯水槽の中心 ($r=0\text{m}$) から $r_\infty=11\text{m}$ とし、断熱条件とする。底面境界は地表面 ($z=0\text{m}$) 下の深さ $z_\infty=20\text{m}$ とし、温度一定条件とする。

貯水槽への流入水温 T_i は実測値が与えられる。

4. 実験結果および解析結果

(1) 採熱試験結果と解析結果の比較

計算モデルを構築する上で重要な貯水槽と地盤との間の熱的相互作用を詳細に検討するために、採熱試験 (連続的に冷水を貯水槽下部に抽入すると同時に、上部から温水を抽出する実験)⁵⁾ を $Q=2.0 \text{ l/min}$ のもとで行った (1995年5月30日午前3時30分から6月4日午後12時)。

図-4 は、流入水温 T_i および無次元半径方向距離 $r/R=0.27$ における深さ (z) 毎の実測値 T_w と T_g の経

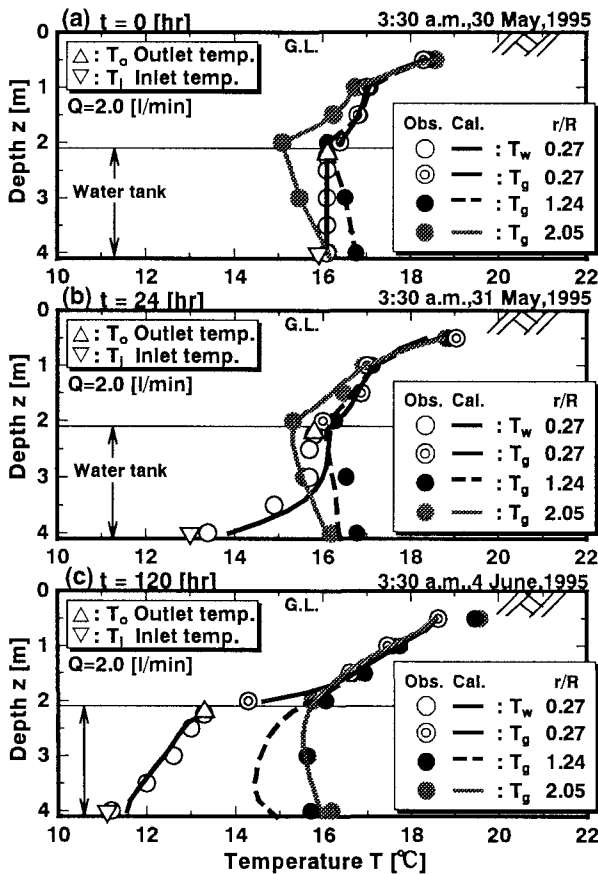


図-5 貯水槽水温および周辺地温の鉛直分布

時変化を示す。なお、同図にはそれぞれの計算値も併示されている。貯水槽底部 $z = 4.0\text{m}$ の T_w (▽)は、低温水流入により実験開始後すぐに、日周期的に変化しながら低下する。貯水槽上部 $z = 2.25\text{m}$ の T_w (○)は、約 $t = 33\text{hr}$ から単調に低下し始める。計算結果もまた、こうした貯水槽水温の経時変化を再現している。

図-5は、 $r/R = 0.27, 1.24$ および 2.05 における T_w と T_g の鉛直分布、 T_i (▽)および T_o (Δ)を、それぞれ(a)実験開始時($t = 0\text{hr}$)、(b)24時間後($t = 24\text{hr}$)および(c)120時間後($t = 120\text{hr}$)について示したものである。 T_w の実測値(○)と計算値(—)は、何れの時間においても良好に一致する。 T_g の実測値と計算値の分布形状は互いに類似する。しかしながら、 $t = 120\text{hr}$ では T_g ($r/R = 1.24$)の実測値(●)と計算値(—)の間に、約 1°C の誤差が生じた。この原因は、地盤の熱物性値および熱貫流率 α を一定としているためと考えられる。

(2) システムの年間稼動状況

図-6は、1996年4月から1997年4月までの冷却運転および昇温運転の月時間率 OP_M を示している。ここで、(冷却(昇温)運転の月時間率)[%]=(1ヶ月の冷却(昇温)運転の総時間数)/(1ヶ月の総時間数) $\times 100$ である。

1996年4月および5月は運転が停止していたために、

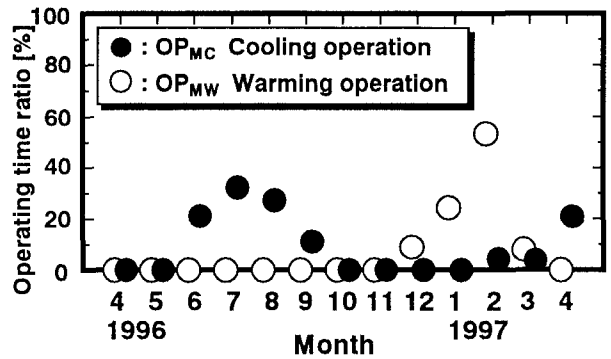


図-6 1996年4月から1997年4月までの月時間率

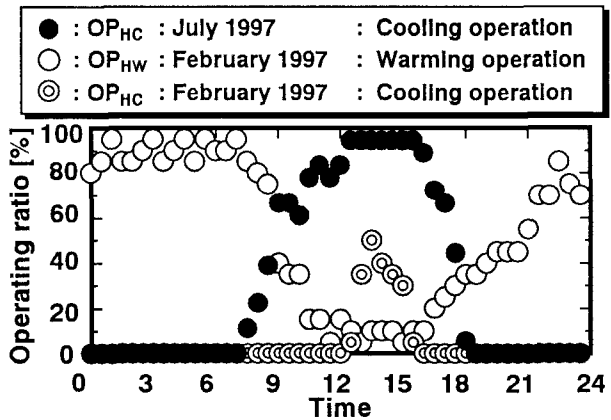


図-7 1996年7月および1997年2月の運転率

冷却運転の月時間率 OP_{MC} (●)および昇温運転の月時間率 OP_{MW} (○)の両者とも0%である。2.(3)の自動運転は6月から行われた。 OP_{MC} (●)は舗装体温度が上昇する6月から9月にかけて高い値をとり、7月に最大値(32%)となる。逆に、 OP_{MW} (○)は降雪や放射冷却により舗装体温度が低下する12月から3月の間に高くなり、2月には最大値(53%)となる。10月および11月の OP_{MC} および OP_{MW} は0%である。

次に1ヶ月間に渡る時刻毎の運転率を求めた。例えば、(7月12時の冷却運転率)[%]=(7月の1ヶ月間で12時に冷却運転をした回数)/(31日) $\times 100$ となる。このようにして計算された1996年7月の冷却運転率 OP_{HC} (●)、1997年2月の昇温運転率 OP_{HW} (○)および同月の冷却運転率 OP_{HC} (◎)を図-7に示す。7月の冷却運転率 OP_{HC} (●)はほぼ毎日、日出から日没までのほぼ8時から18時の間に高くなる。

一方、2月の昇温運転率 OP_{HW} (○)は日没頃から増加し、夜明けまで高い値(80%~95%)が続く。また、日中(13時~15時)の OP_{HW} (○)は平均8%であるのに対し、冷却運転率 OP_{HC} (◎)は平均38%となる。よって、2月の日中でも舗装体の熱回収が卓越することが判る。

(3) 貯水槽水温および周辺地温の月変化

4.(2)から判るように、7月は1年の中で冷却運転が最も恒常的に行われている月である。

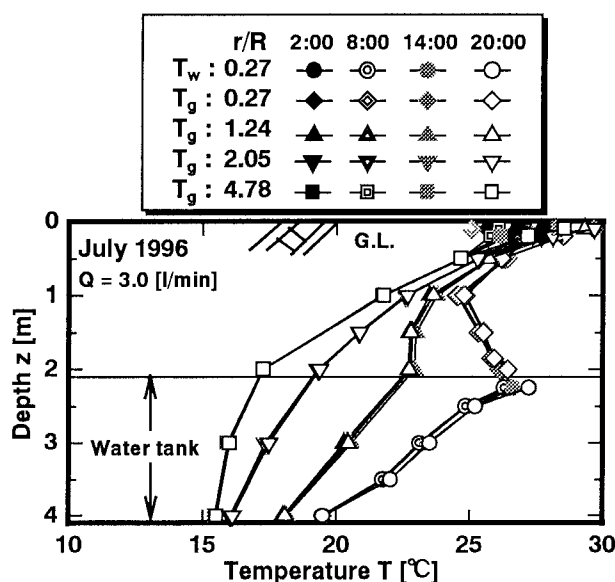


図-8 1997年7月のアンサンブル平均値による貯水槽水温および周辺地温の鉛直分布

図-8は、1997年7月の1日から31日までの間でアンサンブル平均された T_w および T_g の2時、8時、14時および20時の鉛直分布である。図-4からも判るように、地表面付近の T_g は変動の振幅が大きく、日周期的な気象の影響を受けている。 T_g は相対的に高温な T_w の影響を受けて、どの深さにおいても貯水槽に近づくほど高く、日変化は観られない。同時に T_w の日変化も無視できる。よって、年間の T_w および T_g の変化を検討する際には、 $z = 0.5\text{m}$ 以深の T_g および T_w の月代表値に、月平均値を用いても問題はない。

図-9 (a)は1996年2月、(b)は1996年5月、(c)は1996年8月、(d)は1996年11月における T_w および T_g の月平均鉛直分布である。

(a)の2月について、 T_w (○)は貯水槽下部への低温水流入に伴い底部へ向かうほど低く、2m以深の T_g は貯水槽に近づくにつれて低くなる。これは、 T_w の低下に伴い周辺地盤から貯水槽へ熱移動が生じているためと考えられる。さらに、この熱フラックスは貯水槽下部に向かうにつれて増大することが、 T_w と貯水槽周辺の T_g との差の鉛直方向変化より推察される。

(b)では4月および5月に運転が停止されていたことにより、 T_w と T_g は $z = 4.0\text{m}$ を除いてほぼ等しく、両者の間での熱移動は殆どない。

(c)の8月については、高温水の上部流入により T_w の鉛直勾配が大きくなる。この時期、貯水槽から地盤への熱移動は、貯水槽上面を除いた部分で明確となり、2m以深の T_w (○)と貯水槽近傍 ($r/R = 1.24$) の T_g (▲)の鉛直分布は類似した形状になる。

(d)の11月では、 $z = 2.25\text{m} \sim 3.0\text{m}$ の T_w (○)は T_g よりも高いが、 $z = 3.0\text{m} \sim 4.0\text{m}$ では、 T_w と T_g はほぼ等しい ($r/R = 4.78$ (■)は除く)。よって、貯水槽の熱損失は貯水槽の上半分で起こる。また、5月と同様に2m以深の T_w および T_g の鉛直温度勾配は共に小さい。

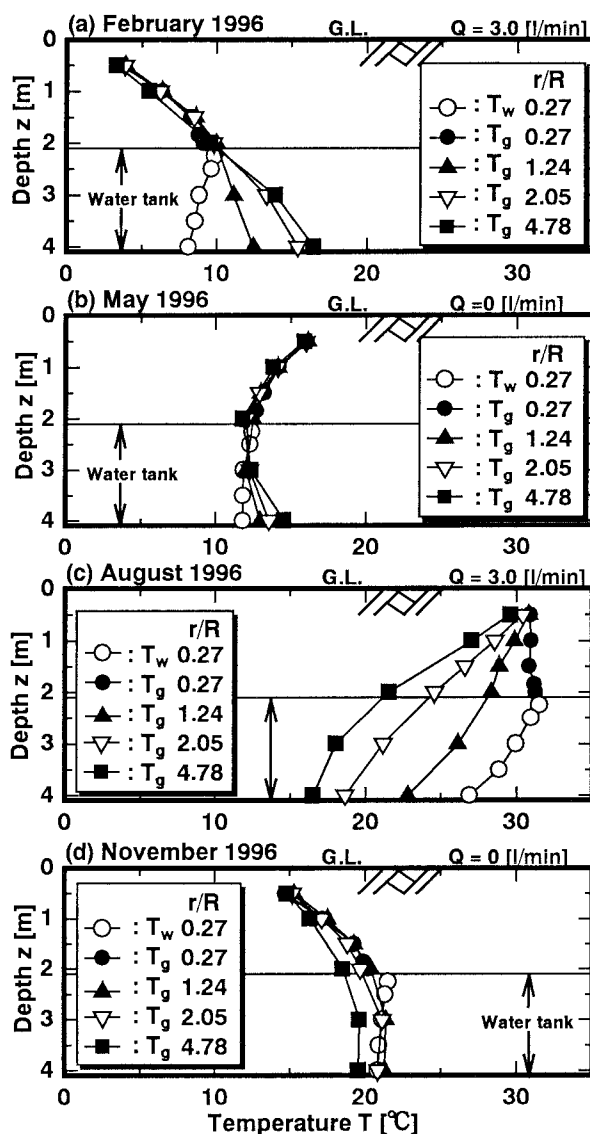


図-9 貯水槽水温および周辺地温の鉛直分布

(4) 貯水槽と周辺地盤との間の熱的相互作用

図-10は貯水槽高さのほぼ中央に位置する $z = 3.0\text{m}$ の $r/R = 0.27, 1.24, 2.05$ および 4.78 における、 T_w および T_g の月平均値の経時変化である (1995年7月から1997年5月)。どの r/R でも T_w および T_g には年周期変化が観られる。 T_w (○)は8月に年間の最高値 (約 30°C)、2月に年間の最低値 (約 9°C) が現れる。 T_g の振幅は貯水槽壁から半径方向へ離れるに従い小さくなり、最高値と最低値が現れる月は遅れる。例えば $r/R = 4.78$ (■)では10月に最高値 (約 20°C)、4月に最低値 (約 13°C) となる。これにより、 T_w の変化に伴う半径方向の熱伝導が認められる。 T_w と T_g の大小関係より6月から10月～11月までは、相対的に温度の高い貯水槽から温度の低い周辺地盤へと熱移動が生じる。逆に11月から3月の間で、貯水槽は地盤からの熱供給を受ける。

また、1995年～1996年および1996年～1997年の分布に大きな違いはなく、地盤蓄熱は判別し難い。

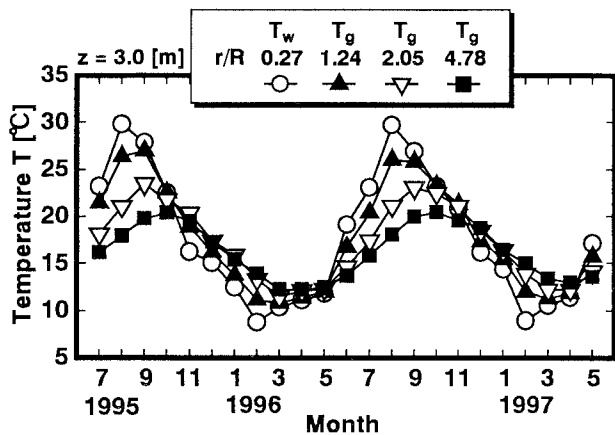


図-10 深さ 3m における貯水槽水温および
周辺地温の半径方向変化

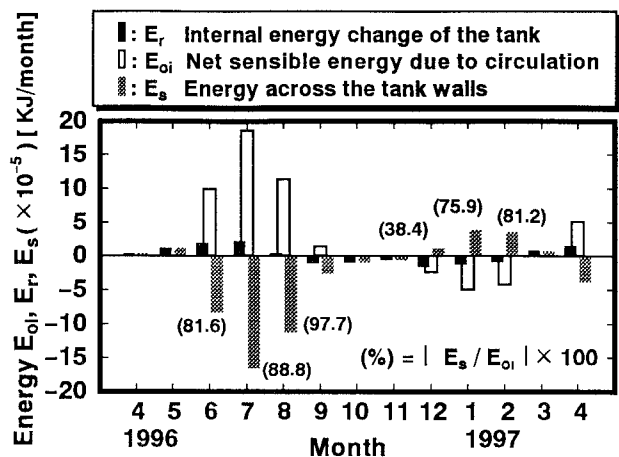


図-11 貯水槽に関する年間のエネルギー収支

(5) 貯水槽に関する熱エネルギー収支

貯水槽の熱エネルギー収支式は次式で表される。

$$E_r - E_{oi} + E_s = 0 \quad (3)$$

貯水槽内部熱エネルギーの月変化量(E_r)は、各月の1日0時の水温と翌月1日0時の水温差から求める($E_r < 0$: 水温低下, $E_r > 0$: 水温上昇を意味する)。また、循環水の出入りにより変化する熱エネルギー量(E_{oi})は、貯水槽からの流出水温 T_o 、貯水槽への流入水温 T_i および流量 Q を基に算出される($E_{oi} > 0$: $T_o - T_i > 0$, $E_{oi} < 0$: $T_o - T_i < 0$ を意味する)。

最後に、貯水槽壁を横切る熱エネルギー量(E_s)は($E_{oi} - E_r$)により求まる。このとき、 $E_s < 0$ は貯水槽から周辺地盤への熱移動を、 $E_s > 0$ はその逆を表す。

図-11は、1996年4月から1997年4月までの月別の貯水槽エネルギー収支を示す。なお、図中の()は、 E_{oi} に対する E_s の絶対値の百分率[%]($|E_s / E_{oi}| \times 100$)を表す。6月から8月については、冷却運転による E_{oi} の増加に伴い E_r も増加するが、同時に E_{oi} の90%前後の熱エネルギーが E_s として周辺地盤へ移動している。同期間において周辺地温が上昇するのは(図-10参照)、このためである。10月および11月は運転しないにもかかわらず、熱エネルギーは貯水槽から周辺地盤へ移動するために、 $E_r < 0$ となる。

12月から2月は昇温運転のために $E_{oi} < 0$ であり、その結果、 $E_r < 0$ となる。昇温運転の稼働率の高い1月および2月では、舗装体への熱供給として消費される E_{oi} に対して、 E_s (E_{oi} の約80%)がその熱損失を補うように周辺地盤から貯水槽内へ移動する。

このように夏期および冬期ともに、全エネルギー収支に対する E_s の貢献度は大きいことが判った。

5. おわりに

浅層貯水槽および無散水舗装体から成る路面温度制御システムについて、融雪運転時の貯水槽からの温水抽出による貯水槽水温および周辺地温の変化過程、さらにシステムの稼働状況、貯水槽水温および周辺地温の季節的な変化特性について、実験的およ

び解析的に検討を行った。

その結果、以下のような結論を得た。

- 1) 本論で提案された貯水槽熱解析モデルは、採熱試験における貯水槽水温および周辺地盤温度の経時変化を概ね再現できる。
- 2) 本システムは夏期の日中に冷却運転が行われ、舗装体から受け取った熱エネルギーの90%前後を地盤へ移行させ、貯水槽水温の上昇を抑えることにより舗装体の冷却効果が長期に渡り維持できる。
- 3) 冬期は主に夜間に昇温運転が行われ、貯水槽内部熱エネルギーは時間とともに低下するが、これをしてできるだけ抑えることが融雪機能としては重要である。本システムはこの内部熱エネルギー損失の約80%を周辺地盤からの熱供給で補えるために、融雪機能は実用上問題のないレベルにある。
- 4) 今回のデータからシステムの地盤蓄熱効果は識別されなかった。

参考文献

- 1) 笹谷茂雄・福原輝幸・宮本重信・田中明：アルミ棒を利用した地熱エネルギー抽出による路面凍結緩和、土木学会第45回年次学術講演会概要集、II-29, 1991。
- 2) 渡邊洋・福原輝幸・黒田典之・川崎和来：貯水槽季節蓄熱方式による路面温度制御—第一報—、土木学会第50回年次学術講演会講演概要集、CS, 1995。
- 3) 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概要集、VII, 1997。
- 4) 福原輝幸・渡邊洋・黒田典之・川崎和来：地下貯水槽季節蓄熱方式による路面温度制御、日本地下水学会1995年秋季講演会講演要旨、pp. 138-141, 1995。
- 5) 辻本誠・相良和伸・中原信生：蓄熱槽に関する研究—第1報—成層型蓄熱槽の混合機構に関する実験的研究、空気調和・衛生工学会論文集、No. 16, pp. 23-35, 1981。
- 6) 渡邊洋・福原輝幸・川崎和来：地下貯水槽季節蓄熱方式による融雪システムの熱的特性、土木学会第51回年次学術講演会講演概要集、VII-256, pp. 512-513, 1996。
- 7) 斎藤直輔・新田尚：オーク境界層の気候、朝倉書店、1981。

(1998. 9. 30受付)