

## 鋼管杭による土壤放熱・採熱に関する研究

森野仁夫  
(技術研究所)

## § 1. はじめに

土中にパイプを埋設し、長期蓄熱システムとしたり、ヒートポンプの加熱用熱源として利用する研究は内外において古くから行なわれている。我国では、中島等が熱核式蓄熱を中心に、太陽熱を長期蓄熱する土中蓄熱システムの研究<sup>1)~3)</sup>を幅広く行なうとともに、含水率と土の物性値の関係を求めるための基礎研究の成果<sup>4)~6)</sup>も発表している。落藤等は、垂直管を対象に蓄採熱実験<sup>7)~13)</sup>を行なうとともに、土壤の温度変動や埋設管の熱伝導に関して理論解析<sup>14)</sup>を発表している。中原等は、土中蓄熱の効率的利用のための制御を対象とした研究<sup>15)~16)</sup>を行なっている。田中等は、土中パイプや土中埋設水槽の実証的な研究成果<sup>17)~19)</sup>を報告している。また、松本等は土壤中の水分移動や水分の吸放湿を考慮した伝熱について理論解析<sup>20)~21)</sup>を行なっている。海外においても、長期蓄熱や採熱を目的として土中パイプを利用した研究は多数実施されており、土中パイプを設置しヒートポンプによって暖房を行なう実験住宅の運転実績<sup>22)~26)</sup>、世界各国における実験値をまとめ、パイプ単位長さ当たりの最大採熱量、年間採熱量を報告した研究<sup>27)</sup>などが報告されている。

しかし、現状において土壤熱利用システムは一部を除いて実用化されている例は少なく、その要因の一つとして熱交換器の設置費用が高く、他のエネルギー供給システムと比較して経済的に優位に立つ水準には達していない点がある。本研究は、建築基礎に用いられる鋼管杭を土壤との熱交換器として使用することにより熱交換器の設置費用を軽減することを狙いとしており、ヒートポンプ等の熱源あるいは放熱用ヒートシンクとして土壤を利用する場合の、鋼管杭と土壤の熱交換特性を明らかにすることを目的としている。

本報告では、土中に埋設した鋼管杭に温水あるいは冷水を循環させた場合の放熱量、採熱量を実験的に求めた結果を示すとともに、鋼管杭を使用した土壤熱利用シ

テムの設計手段として開発した、土壤の熱伝導解析と土壤熱利用システムを一体化した計算モデルについて、その計算精度を実験値との比較で検証した結果について示す。なお、本報告の研究内容は1987年に行なった夏、冬それぞれ10日間程度の短期的な実験結果を基にしたものであり、単一管の1日単位の放熱・採熱の基本的な熱交換特性を明らかにしたものである。

以下に、本報告で使用される記号を示す。

- $\alpha$  : 温度伝導率 ( $\text{m}^2/\text{h}$ )
- $C_p$  : 比熱 ( $\text{kcal}/\text{kg}\cdot\text{C}^\circ$ )[ $\text{W}/\text{kg}\cdot\text{K}$ ]
- $C_{pw}$  : 水の比熱 ( $\text{kcal}/\text{kg}\cdot\text{C}^\circ$ )[ $\text{W}/\text{kg}\cdot\text{K}$ ]
- $D_{10}$  : 土粒子の10%粒径 (cm)
- $f_w$  : 鋼管杭への注水量 ( $\text{ml}/\text{h}$ )
- $h$  : 水頭勾配 (m/m)
- $k$  : 透水係数 (m/h)
- $n, i, j, k$  : 差分方程式の時間座標,  $r$  方向座標,  $\theta$  方向座標,  $z$  方向座標
- $q_e$  : 土壤と鋼管杭との熱伝導量 ( $\text{kcal}/\text{h}$ )[ $\text{W}/\text{h}$ ]
- $q_r$  : 熱源装置による投入熱量, 採熱量 ( $\text{kcal}/\text{h}$ )[ $\text{W}/\text{h}$ ]
- $q_w$  : 鋼管杭保有水の熱量 ( $\text{kcal}/\text{h}$ )[ $\text{W}/\text{h}$ ]
- $r_b$  : 半径方向の境界長さ (m)
- $r_p$  : 鋼管杭半径 (m)
- $r, \theta, z$  : 円筒座標の半径方向, 接線方向, 深さ方向
- $T$  : 土壤温度 ( $^\circ\text{C}$ )[ $\text{K}$ ]
- $T_f$  : 流体温度 ( $^\circ\text{C}$ )[ $\text{K}$ ]
- $T_f'$  : 仮想流体温度 ( $^\circ\text{C}$ )[ $\text{K}$ ]
- $T_s$  : 鋼管杭表面の土壤温度 ( $^\circ\text{C}$ )[ $\text{K}$ ]
- $t_w$  : 鋼管内平均水温 ( $^\circ\text{C}$ )[ $\text{K}$ ]
- $t_w'$  : 第1次仮定鋼管内平均水温 ( $^\circ\text{C}$ )[ $\text{K}$ ]
- $u_r, u_\theta$  :  $r$  方向,  $\theta$  方向の地下水流速 (m/h)
- $V_p$  : 鋼管杭中の水の容積 ( $\text{m}^3$ )
- $w$  : 含水比 (%)
- $\alpha$  : 水の表面熱伝達率 ( $\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}\cdot\text{C}^\circ$ )[ $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ ]
- $\gamma$  : 土の比重量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
- $\gamma_w$  : 水の比重量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
- $\lambda$  : 熱伝導率 ( $\text{kcal}/\text{mh}\cdot\text{C}^\circ$ )[ $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ]
- $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2$  : 有効熱伝導率, 主流方向の熱伝導率, 主流と垂直方向の熱伝導率 ( $\text{kcal}/\text{mh}\cdot\text{C}^\circ$ )[ $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ]
- $\rho$  : 土粒子の比重量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
- $\tau$  : 計算時間間隔 (h)
- $\phi$  : 水位ポテンシャル (m)

## § 2. 実験方法

### 2.1 実験装置と計測

図一に実験装置(千葉県船橋市に設置)の概要と計測点を示す。鋼管杭は外径400mm,長さ20m,肉厚12mmで,土中に垂直に埋設されている。鋼管杭を土壌との熱交換器としたのは,建築基礎との兼用を図るとともに,鋼管内の水の熱容量によって急速な熱需要に対する応答性を向上させる点にある。鋼管杭の内部には,水の循環用に2本の直径25mmの塩化ビニル管を設置した。塩化ビニル管の先端0.5mの管壁には,局所的な注水,取水を避けるため直径10mmの開口を150個開けており,1本は鋼管杭上部から1.5m,他の1本は19.5mの箇所にも管の先端が位置している。

実験は,鋼管内の水を熱源装置で加熱あるいは冷却して循環し,熱源装置停止後自然放置とする状態を1日サイクルで繰り返した。注水は温水投入時(放熱)は上部から,また冷水投入時(採熱)には下部から行なった。循環水量は実験期間を通してほぼ一定で,放熱実験時65 l/分(3.9 m<sup>3</sup>/h),採熱実験時30 l/分(1.8 m<sup>3</sup>/h)であり,鋼管杭内部での水の交換時間はそれぞれ約35分,約75分である。加熱装置としては太陽熱集熱器,冷却装置と

しては冷凍機を用いた。機器仕様を図一1中に示す。

放熱実験は1987年8月19日~8月30日,採熱実験は1987年11月22日~11月30日に行なった。

温度計測は,鋼管内垂直水温分布(①~⑩),循環水出入口温度(⑪,⑫),加熱装置(⑬,⑭)と冷却装置(⑮,⑯)の出入口水温をT熱電対によって計測した。土壌温度の計測は,T熱電対により鋼管杭中心から半径方向1,2,4mの点において,深度で2.0mで行なった。

流量はパドル式流量計で計測した。計測は5分間隔の自動計測である。

### 2.2 地盤性状

図一2に実験地の地盤柱状図と試料採取位置を示す。実験地の土質は,砂質とシルトで代表される。地下水位はGL-1.1mであった。

表一は,ボーリングによって得られた土壌の物性値をまとめたもので,本報の計算にはこの物性値を用いている。表一に示す物性値のうち,熱伝導率,比重量,含水比,土粒子の比重および粒径( $D_{10}$ )は試料から求めた測定値の加重平均値である。なお,比熱の算定には文献(28), (29)の考え方をを使用した。また,温度伝導率は熱伝導率と比熱から算定した。

土壌の物性の測定値は土質によって異なっており,採用値に対して含水率が-25%~+15%の分布を示したが,他の物性値の分布は±10%以内に収まっていた。

透水係数( $k$ )は, $k=100 \times D_{10}^2$ の関係<sup>(30)(31)</sup>から求めた。なお, $k$ と実測による水頭勾配( $h$ )から,地下流速( $u=k \cdot h$ )を求めると $u=10^{-8}$ (cm/sec)となった。

## § 3. 計算方法

### 3.1 基本方程式

鋼管杭周囲の地下水の流れの扱いには文献(32)を参考に, Darcyの法則を適用した。Z成分を無視し,土壌を均質媒体と想定すれば,

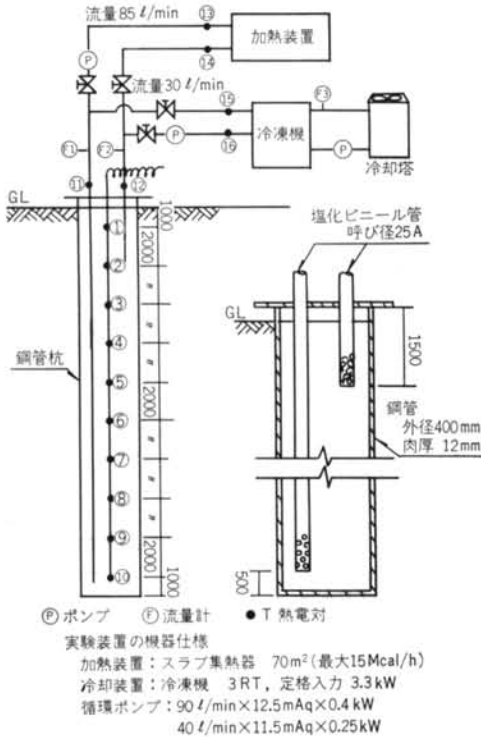
$$U_r = -k \frac{\partial \varphi}{\partial r}, \quad U_\theta = -k \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} \quad \dots(1)$$

$\varphi$ は,

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \theta^2} = 0 \quad \dots(2)$$

$\varphi$ の境界条件として鋼管杭表面では式(3)を,鋼管杭から十分離れた点では式(4)を使用した。

$$\frac{\partial \varphi}{\partial r} = 0 \quad \dots(3)$$



図一1 実験装置の概要と計測点

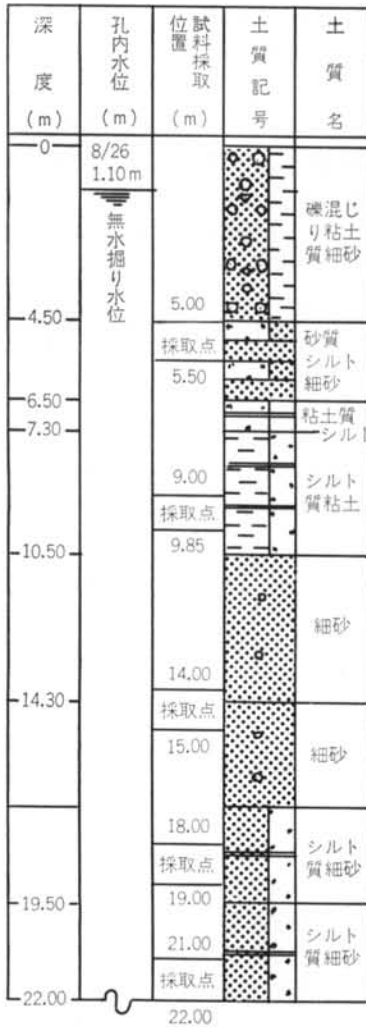


図-2 地盤柱状図

属性	物性値
熱伝導率 $\lambda$	1.0 (kcal/mh°C) [1.16 W/m·K]
比重 $\gamma$	1,800 (kg/m³)
比熱 $C_p$	0.45 (kcal/kg°C) [1.88 kJ/kg·K]
温度伝導率 $\alpha$	$1.23 \times 10^{-8}$ (m²/h)
透水係数 $k$	$3.6 \times 10^{-6}$ (m/h)
含水比 $w$	45.0(%)
土粒子比重 $\rho$	2,720 (kg/m³)
土粒子10%粒径 $D_{10}$	0.0001 (cm)

表-1 土壌物性値

$$\varphi = \frac{h}{2} r_b \cos \theta \quad \dots\dots(4)$$

土壌中の熱拡散は、Z成分も考慮して次式で表現される。

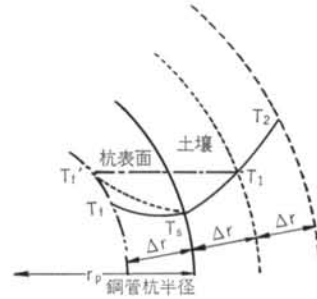


図-3 鋼管杭表面の境界条件

$$\frac{\partial T}{\partial r} + U_r \frac{\partial T}{\partial r} + U_\theta \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} = a \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad \dots(5)$$

鋼管杭から十分離れた点における境界条件としての土壌温度は、実験開始前の自然水温変動の状態では鋼管内の水温に垂直温度分布が見られないこと、また半無限固体の周期熱伝導計算により本実験条件では地表面温度変化の影響が深度0.6m以上に及ばないことから、深さ方向では一定とし、深度2.0mにおける実測値から放熱実験時は20.0°C、採熱実験時は17.8°Cとした。

鋼管杭表面における境界条件は、文献33)、34)より仮想流体温度  $T_f'$  を用いて図-3のごとく表現する。 $T_f'$  は鋼管杭内部に土壌が充填されていると仮想した場合の温度で、流体温度  $T_f$  を与えた場合と伝熱量が等価になる温度である。鋼管杭近傍は定常状態と想定し、半径  $r_1$ 、 $r_2$  における土壌温度の差を  $\Delta T$  とすると、

$$q_e = 2 \pi \lambda \Delta T / \ln(r_1/r_2) \quad \dots\dots(6)$$

鋼管杭表面では、

$$-\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \alpha (T_f - T_s) \quad \dots\dots(7)$$

式(6)の  $\Delta T$  に  $(T_f' - T_1)$  を当てはめ、式(7)と組み合わせると、

$$\frac{2 \pi \lambda (T_f' - T_1)}{\ln \{ (r_p + \Delta r) / (r_p - \Delta r) \}} = 2 \pi r_p \alpha (T_f - T_s) \quad \dots\dots(8)$$

したがって、 $T_f'$  は、

$$T_f' = r_p \frac{\alpha}{\lambda} (T_f - T_s) \ln \left( \frac{r_p + \Delta r}{r_p - \Delta r} \right) + T_1 \quad \dots\dots(9)$$

差分方程式を解いていく過程では、時刻  $n$  における  $nT_f$ 、 $nT_s$  を式(9)に代入し、 $nT_f'$  を求める。次いで、差分方程式により  $nT_f'$  を境界条件として、 $n+1T_s$ 、 $n+1T_f$ 、 $\dots\dots$  を順次計算する。

土壌と鋼管杭内の水との伝熱量  $q_e$  は、  

$$q_e = 2 \pi \lambda (T_f' - T_s) / \ln(r_p / (r_p - \Delta r)) \quad \dots\dots(10)$$
 で求められる。

なお、地下水の存在する場合の $\lambda$ に関しては、ペクレ数の広い範囲にわたり流れのない場合の飽和地盤の有効熱伝導率 $\lambda_0$ とほとんど変わらず、また主流方向の $\lambda_i$ 、主流と垂直方向の $\lambda_e$ も $\lambda_0$ とほとんど変わらないことが河原等によって報告されていることから<sup>32)</sup>、本報告では $\lambda$ として測定値より求めた値を使用した。

### 3.2 差分方程式

差分方程式は陽解法によるもので、流速項に関しては風上差分を使用した。式(5)を差分方程式に変換すると、

$$\begin{aligned} n_{+1}T_{ijk} &= nT_{ijk} + \Delta\tau a \left[ \frac{1}{r} \frac{1}{\Delta r^2} \left( \left( r + \frac{\Delta r}{2} \right) (nT_{i+1jk} - nT_{ijk}) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \left( r - \frac{\Delta r}{2} \right) (nT_{ijk} - nT_{i-1jk}) \right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{r^2} \frac{1}{\Delta\theta^2} (nT_{ij+1k} + nT_{ij-1k} - 2nT_{ijk}) \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{\Delta z^2} (nT_{ijk+1} + nT_{ijk-1} - 2nT_{ijk}) \right] \\ &\quad - \Delta\tau Ur_{ij} \frac{1}{\Delta r} Tr - \Delta\tau U\theta_{ij} \frac{1}{r} \frac{1}{\Delta\theta} T\theta \quad \dots\dots(11) \end{aligned}$$

$Tr$ に関しては風上差分を適用し、次式のごとく計算する。

$$\begin{aligned} \text{if } Ur_{ij} \geq 0, \quad Tr &= nT_{ijk} - nT_{i-1jk} \\ \text{if } Ur_{ij} < 0, \quad Tr &= nT_{i+1jk} - nT_{ijk} \quad \dots\dots(12) \end{aligned}$$

$T\theta$ も同様である。

なお、計算において計算時間間隔 $\Delta\tau$ はすべて0.05hとし、 $\Delta r=0.025$  m,  $\Delta\theta=30^\circ$ ,  $\Delta Z=2$  m, 外気温は日変動の影響が少ないとして一日の平均気温で一定とした。境界長さは事前の計算結果を参考に半径方向は1.0 m, 深さ方向は22.0 mとした。水位ポテンシャルの勾配は0.01 m/mとした。

### 3.3 水温および土壌との伝熱量の計算方法

単位時間内に鋼管杭に投入された熱量は、鋼管内の水温を上下させる熱量と鋼管杭表面から土壌へ伝導される熱量に分類される。熱源装置が停止し、鋼管杭への投入熱量が零の場合には、杭内の水温の変動に相当する熱量が土壌への熱伝導量となるとした。

計算では、熱源装置運転中は鋼管杭に投入される水量および注水温が熱源装置によって決定されるとして、水量と注水温を与条件とした。

杭内平均水温 $t_w$ は、 $\Delta\tau$ 時間内に注水される注水温度 $t_i$ と $\Delta\tau$ 時間前の杭内平均水温 $t_{w_{n-1}}$ から算出する。すなわち、 $n$ 時点の第1次仮定杭内平均水温を $t_w'$ 、 $\Delta\tau$ 時間に注水される水量を $f_w$ とすると、

$$t_{w_n}' = t_{w_{n-1}} \times (1 - f_w/V_p) + t_i \times f_w/V_p \quad \dots\dots(13)$$

式(13)により $t_{w_n}'$ を算出し、杭内平均水温が $t_{w_n}'$ に $\Delta\tau$ 時間保持されるとして、式(11)より土壌温度分布を計算する。次に、式(10)より杭内水と土壌との間の伝熱量 $q_e$ を求め、杭内水温 $t_{w_n}$ を式(14)により算出する。

$$t_{w_n} = t_{w_n}' - q_e/V_p/r_w/c_{pw} \quad \dots\dots(14)$$

したがって、水温変化により $\Delta\tau$ 時間内に鋼管杭内の水に保有される熱量 $q_w$ は、

$$q_w = V_p \times (t_{w_n} - t_{w_{n-1}}) \times r_w \times c_{pw} \quad \dots\dots(15)$$

熱源装置による投入あるいは採取熱量 $q_r$ は、

$$q_r = q_e + q_w \quad \dots\dots(16)$$

となる。

一方、熱源装置が停止している状態では、杭内水温が $\Delta\tau$ 時間前の水温 $t_{w_{n-1}}$ に $\Delta\tau$ 時間保持されるとして式(11)より土壌温度分布を求め、式(10)より杭内水と土壌との伝熱量 $q_e$ を算出する。 $t_{w_n}$ は $q_e$ から式(14)により算出する。

以上の計算方法により、土壌への伝熱量、熱源装置による投入・採取熱量と杭内水の自然水温が算出される。

## § 4. 実験結果および実測値と計算値との比較

### 4.1 鋼管内垂直水温分布の変動

図-4、図-5に放熱実験時と採熱実験時の鋼管内垂直水温分布の変動状況を示す。

熱源装置の運転停止後、鋼管内に滞留している水は自然水温変動の影響を受けるため、熱源機運転開始前における水温の垂直分布は放熱実験時、採熱実験時とも鋼管杭上部から1 mの水温①が他の水温と比べてやや高い温度を示しているが、②~⑩の水温は1℃以内でほぼ均一な温度分布を示している。

一方、鋼管内の水が循環している運転時間帯では、放熱実験時、採熱実験時とも水温は①~⑩までほぼ均一になっており、最大温度差は放熱実験時で1℃、採熱実験時には循環水量が放熱実験と比べて少ないため温度差はやや大きくなり、1.5℃程度になっている。

この結果、放熱実験時、採熱実験時とも鋼管内垂直水温分布の温度差が1~1.5℃程度と少なく、温度勾配が直線的と見なせること、また自然水温変動時には鋼管内の各点が土壌からほぼ均一な加熱を受けていると考えられることから、計算において鋼管内の水温は平均値で取り扱って差し支えないと判断した。

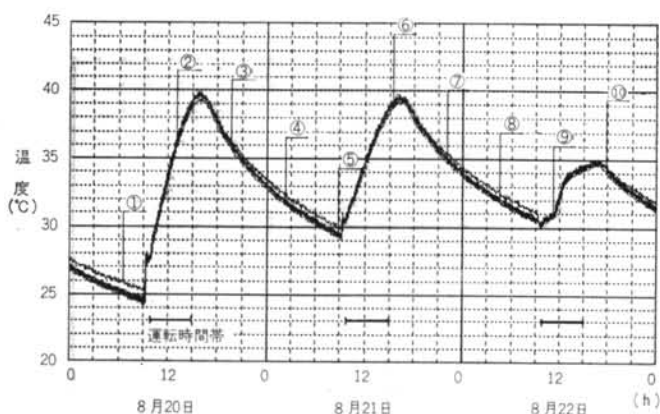


図-4 放熱実験時の杭内水温の分布

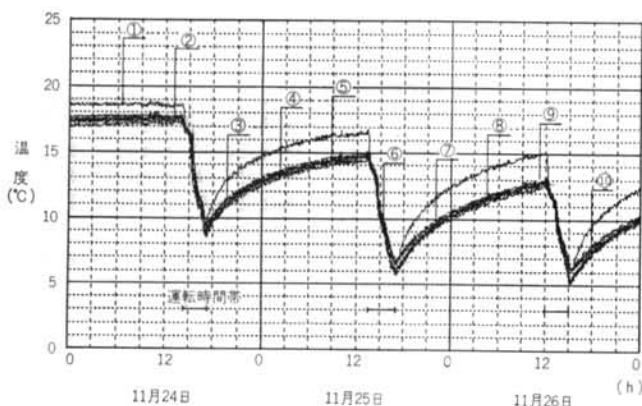


図-5 採熱実験時の杭内水温の分布

## 4.2 実測値と計算値の比較

図-6～図-9に、実測値および計算値との照合結果を示す。図において、実測値と計算値の杭内平均水温は放熱実験、採熱実験とも15分毎の値を示している。加熱装置の投入熱量、冷凍機の採熱量は、実測値では5分毎に循環水の鋼管杭出入口温度差と流量から求めた熱量を、また計算値は計算時間間隔0.05h毎に求めた熱量をそれぞれ1時間分積算した値である。土壌との熱伝導量は、1時間毎の杭内平均水温の変動から求めた杭内保有水の熱量変化分と、熱源装置による投入熱量あるいは採熱量との差とした。計算の与条件である注水温は、放熱実験では1時間毎、採熱実験は水温の変化が急激であったため15分毎の実測値を与えた。

本報告では、地下水流の影響を考慮した計算を行なったが、本実験では地下水の流速が遅いため( $u=10^{-8}$ (cm/sec))移流項を無視しても計算結果に差は生じなかった。しかし、地下流速が評価対象期間の放熱、採熱サイクル時間内に鋼管周囲の熱を移動させる場合には地下水の影響を考慮する必要がある。

### 4.2.1 放熱実験

図-6、図-7に実験期間の2日目～4日目を対象にした結果を示す。放熱実験の(2)で述べる熱伝導量に関する結果は、晴天日で投入熱量が十分であった(50 Mcal/日{209.3 MJ/day}以上)8日間を対象にしたものである。

#### (1)温度変動

放熱実験時における加熱装置稼働時の鋼管杭入口水温、出口水温の実測値、ならびに自然放熱状態を含めた杭内水温変化の実測値と計算値を図-6に示す。

加熱装置の運転時間帯は10:00～17:00である。鋼管杭内部の水温は熱量投入が始まる10:00から上昇し始め、投入熱量と比べて土壌への熱伝導量が卓越する16:00位から低下を始めている。投入熱量が大きい8月20日と8月21日における、熱量投入停止から翌日の投入開始までの土中放熱に伴う杭内水温の低下は約10°Cであった。熱量投入開始時の杭内平均水温が日経過とともに徐々に上昇していることから、鋼管杭近傍の土壌温度が次第に高くなっていることが推察できる。

計算値と実測値を比べると、計算値の方が水温上昇時にやや高い値を示し、水温低下時にはやや低い値を示す傾向が見られる。しかし、その差は1～2°C程度であり、計算値は実測値の変化によく追従している。

#### (2)熱量変動

放熱実験時の投入熱量と土壌への熱伝導量について、実測値と計算値の比較を図-7に示す。

土壌への熱伝導量は、加熱装置運転開始と同時に大きくなり、杭内水温の変動に追従して変化し、運転停止とともに小さくなる。

実験の結果を雨天日や曇天日を除き、投入熱量が十分あった場合(50 Mcal/日{209.3 MJ/day}以上)についてまとめると、鋼管杭単位長さ当たりの土壌への熱伝導量は、加熱装置運転時には約250 kcal/mh{1.05 MJ/mh}、停止時では50～60 kcal/mh{0.21～0.25 MJ/mh}、24時間平均値では100～120 kcal/mh{0.42～0.5 MJ/mh}であった。

加熱装置運転時間中の投入熱量に対する土壌への熱伝導量は60～70%であり、30～40%が杭内水温の上昇となっていた。1日当たりの投入熱量に対する土壌への熱伝

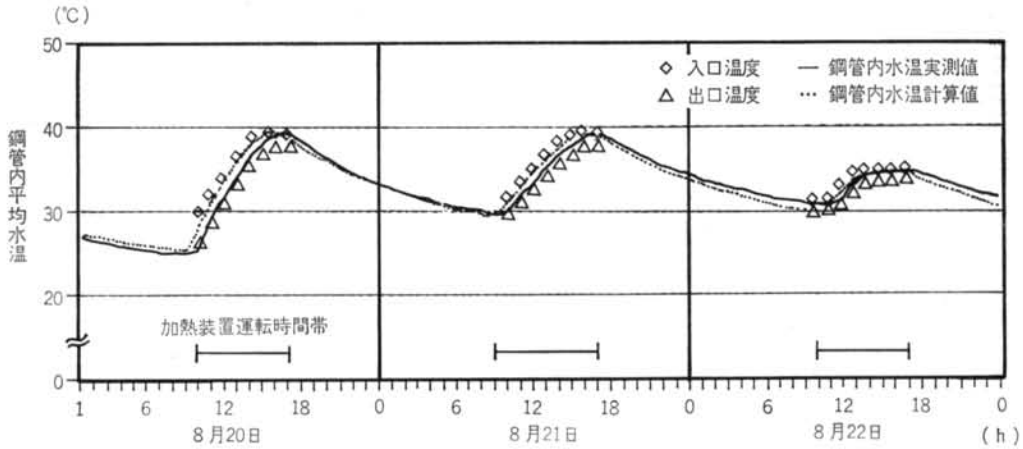


図-6 加熱実験時の杭内水温の変化

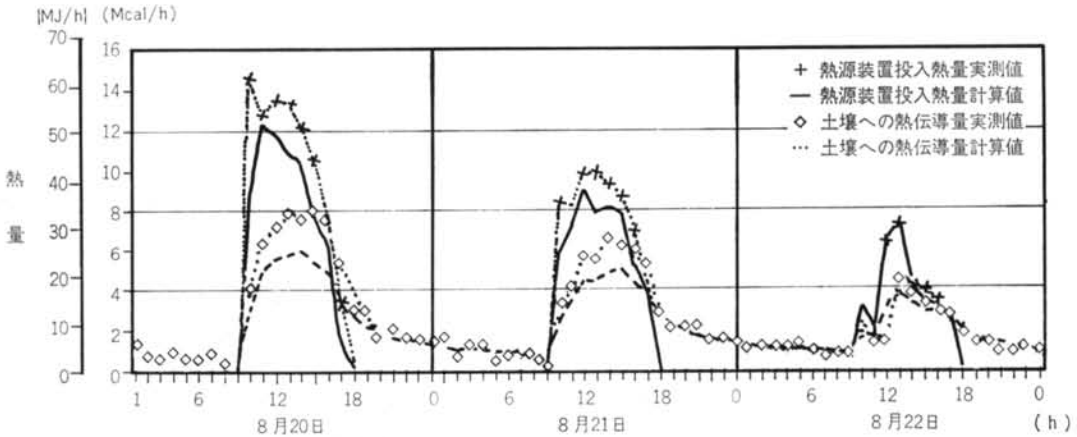


図-7 熱源装置投入熱量と土壌への熱伝導量

導量の比は投入熱量によって異なったが、80～95%を示した。鋼管杭1本当たり1日当たりの土壌への熱伝導量は約50 Mcal{209.3 MJ}であった。

実測値と計算値を比べると、投入熱量は計算値の方が実測値よりやや少なく5～20%の差を示しており、加熱装置運転中の土壌への熱伝導量の差は5～25%であり、計算値の方がやや少ない傾向を示している。一方、加熱装置停止後の自然放熱状態における土壌への熱伝導量は良い一致を示している。

#### 4.2.2 採熱実験

図-8、図-9に実験期間1日目～3日目の結果を示す。なお、採熱実験の(2)で述べる熱伝導量に関する結果は、予備実験期間を除く7日間を対象にしたものである。

##### (1)温度変動

採熱実験時における、冷却装置稼働時の鋼管杭入口水温、出口水温の実測値、ならびに自然温度回復時を含め

た杭内水温変化の実測値と計算値を図-8に示す。

杭内水温は、冷凍機の運転による採熱開始時から急速に低下し、採熱運転の終了時点から回復を始める。日経過とともに採熱開始時の杭内水温が低下していることから、1日の時間サイクルでは土壌からの熱回収が採熱量を十分賄っていないことが分かる。

実測値と計算値を比較すると、冷凍機運転停止後の杭内水温回復時に計算水温が実測値に比べてやや低く、運転開始前後に1～2℃の差になっているが、杭内水温の変化に良く一致している。

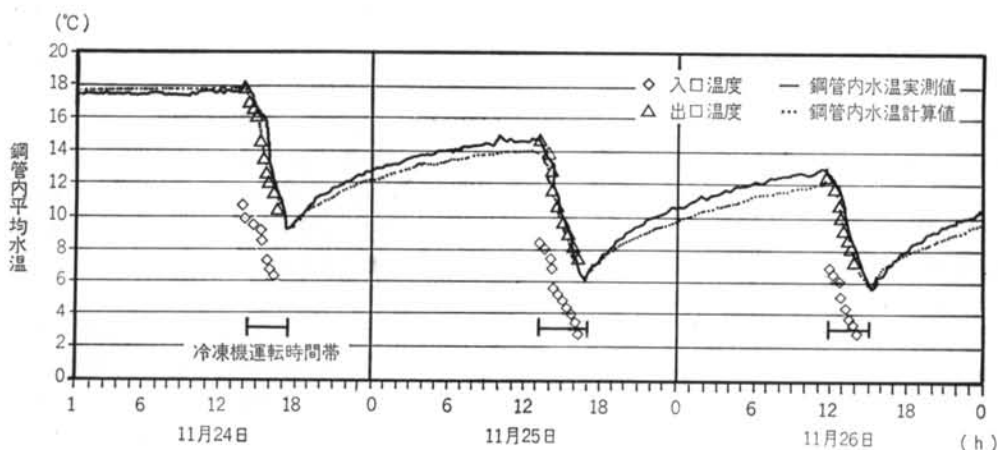
##### (2)熱量変動

採熱実験時における冷凍機の採熱量と土壌からの熱伝導量について、実測値と計算値の比較を図-9に示す。

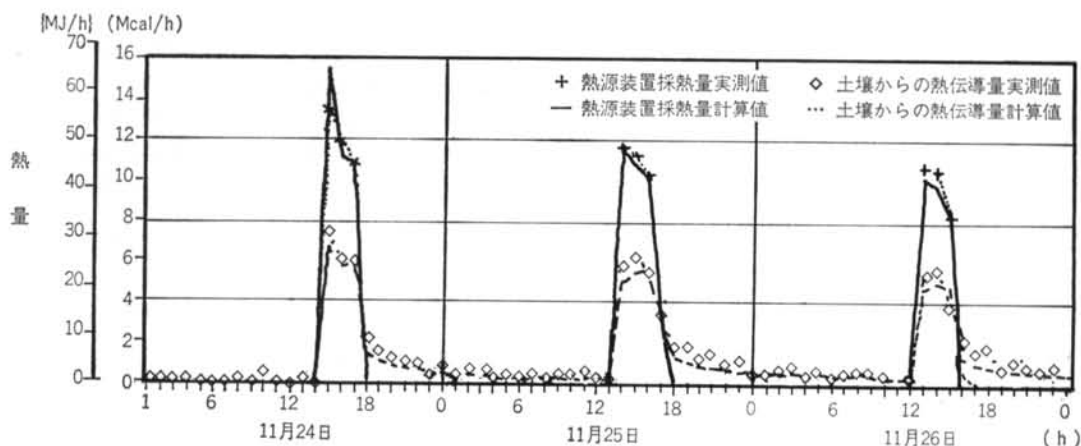
土壌からの熱伝導量は冷凍機の運転開始とともに急激に増加し、停止後は急速に少なくなっている。

実験の結果、鋼管杭単位長さ当たりの土壌からの熱伝導量は、冷凍機運転時に200～350 kcal/mh{0.84～1.47





図一八 採熱実験時の杭内温水の変化



図一九 熱源装置採熱量と土壌からの熱伝導量

MJ/mh}, 停止時には 25~35 kcal/mh{0.1~0.15 MJ/mh}, 24時間平均値で 60~75 kcal/mh{0.25~0.31 MJ/mh} となった。冷凍機運転中の採熱量に対する土壌からの熱伝導量はおよそ50%であり, 残り50%が杭内水の温度低下によるものであった。1日当たりの採熱量に対する土壌からの熱伝導量の比は平均95%であり, 杭内水温が徐々に低下する原因となっていた。鋼管杭1本当たり1日当たりの土壌からの熱伝導量は 27~36 Mcal/日{113.0~150.7 MJ/day}, 冷凍機の採熱量は 28~37 Mcal/日{117.2~154.9 MJ/day}であった。

熱量に関しては, 冷凍機の採熱量および鋼管杭と土壌との熱伝導量とも実測値と計算値は良い一致を示し, その差は5~10%であり, 水温が急激に変化する運転時間帯においても実測値の変化に対して良い一致を示している。

## § 5. 結論

本報告は, 地中に垂直に埋設した直径 0.4m, 長さ 20m の鋼管杭によって土壌との放熱・採熱実験を行ない, 土壌との間の短期的な熱交換性能を明らかにするとともに, 開発した計算モデルの精度を実測値と計算値の照合によって明らかにしたものである。

結論を要約して以下に示す。

(1)放熱実験より,

雨天日や曇天日を除いた鋼管杭への投入熱量が十分な場合 (50 Mcal/日{209.3 MJ/day}) 以上の場合):

(a)鋼管杭単位長さ当たりの土壌への熱伝導量は, 加熱装置運転時には約 250 kcal/mh{1.05 MJ/mh}, 停止時を含めた24時間の平均値では 100~120 kcal/mh{0.42~0.5 MJ/mh}であった。

(b)加熱装置運転時間中の鋼管杭投入熱量に対する土壌への熱伝導量は60~70%であった。

(c)鋼管杭1本当たり1日当たりの土壌への熱伝導量は約 50 Mcal {209.3 MJ} であった。

(2)採熱実験より、

(a)鋼管杭単位長さ当たりの土壌からの熱伝導量は、冷凍機運転時に 200~350 kcal/mh {0.84~1.47 MJ/mh}、停止時を含めた24時間の平均値で 60~75 kcal/mh {0.25~0.31 MJ/mh} であった。

(b)冷凍機運転中の採熱量に対する土壌からの熱伝導量は約50%であった。

(c)鋼管杭1本当たり1日当たりの土壌からの熱伝導量は 27~36 Mcal {113.0~150.7 MJ/day}、冷凍機の採熱量は 28~37 Mcal/日 {117.2~154.9 MJ/day} であった。

(3)実測値と計算値の照合より、

(a)水温に関する計算値と実測値の差は1~2℃程度であった。

(b)熱量に関する実験値と計算値の差は、鋼管杭と土壌と間の熱伝導量で放熱時に5~25%、採熱時に5~10%であり、熱源装置の投入熱量と採熱量については各々5~20%、5~10%に収まった。

以上より、土壌熱利用システムの設計手段として開発した三次元熱伝導方程式による水温変動、土壌と鋼管杭

との熱伝導量、熱源装置の投入・採熱熱量の計算値は、いずれも実測値の変動傾向に良好な一致を示し、本計算方法は鋼管杭を利用した土壌との熱伝導に関する水温および熱量の予測に適用できると判断された。

なお、本報告で述べた結論は短期間の実験から得られたものであり、その適用範囲は本実験条件の範囲に限定される。また、計算モデルの適用条件として鋼管内部の水温を平均値で扱えること、土壌温度の深さ方向の変化が定常的であることが必要である。

本研究では短期の放熱、採熱実験の結果について報告したが、本来土壌への放熱や土壌からの採熱の実用化には長期間を対象にした評価が必要であり、数年にわたる長期的な実証や予測が必要であるが、この点は今後の課題である。また、長期間の実測のほか多数管の熱解析、地下水流の影響の実証的な評価、寒冷地や直膨式蒸発器における凍結現象の解析方法などが今後の課題である。

謝辞 本研究の解析方法に関してご指導をいただいた宇都宮大学工学部建築工学科岡建雄助教授、研究の実施、報告書のまとめに助言をいただいた環境技術研究部小林昌弘主席研究員、実験にご協力いただいた高橋時行氏に深謝いたします。

## ＜参考文献＞

- 1) 中島康孝, 他: “太陽熱の長期蓄熱とヒートポンプ方式に関する研究 (その1) ~ (その7)” 日本建築学会大会学術講演梗概集 (昭和56年~昭和59年)
- 2) 中島康孝, 他: “ヒートポンプを用いた熱核式地中蓄熱槽の実験研究” 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集 (昭和58年)
- 3) 中島康孝, 他: “地中蓄熱システムの有効利用に関する研究 (その1) ~ (その3)” 日本建築学会大会学術講演梗概集 (昭和62年~昭和63年)
- 4) 中島康孝, 他: “蓄熱材料における土壌の熱的性質に関する研究 (その1) ~ (その6)” 同上 (昭和55年~昭和60年)
- 5) 中島康孝, 他: “土壌の熱物性値に対する調査および分析” 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集 (昭和58年)
- 6) 中島康孝, 他: “土壌の熱物性値の経時変化に関する研究” 同上 (昭和61年)
- 7) 落藤澄, 他: “寒冷地における太陽熱による季節間地中蓄熱の熱回収に関する実験” 同上 (昭和58年)
- 8) 落藤澄, 他: “寒冷地における季節間地中蓄熱の熱回収に関する実験と解析” 同上 (昭和60年)
- 9) 落藤澄, 他: “垂直管による季節間地中蓄熱の熱回収に関するシミュレーション” 同上 (昭和61年)
- 10) 落藤澄, 他: “太陽熱による垂直管方式の長期地中蓄熱の特性と暖房への応用に関する研究 (第1報)” 空気調和・衛生工学会論文集 No.27 (1985年2月)
- 11) 落藤澄, 他: “太陽熱による垂直管方式の長期地中蓄熱の特性と暖房への応用に関する研究 (第2報)” 同上 No.32 (1985年2月)
- 12) 落藤澄, 他: “太陽熱による垂直管方式の長期地中蓄熱の特性と暖房への応用に関する研究 (第3報)” 同上 No.32 (1986年10月)
- 13) 落藤澄, 他: “太陽熱による垂直管方式の長期地中蓄熱の特性と暖房への応用に関する研究 (第4報)” 同上 No.32 (1986年10月)
- 14) 落藤澄, 金南燦: “長期蓄採熱における地中垂直埋設管の熱伝導に関する理論解析” 同上 No.36 (1988年2月)
- 15) 中原信生, 他: “ソーラーシステムの最適制御に関する研究 (その7)” 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集 (昭和



60年)

- 16) 中原信生, 奥宮正哉: “ソーラーシステムの最適制御に関する研究 (その9)” 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集 (昭和61年)
- 17) 田中辰明, 安江進: “垂直型蓄熱コイルによる長期土中蓄熱の研究 (第2報)” 同上 (昭和57年)
- 18) 田中辰明, 他: “長期蓄熱システムに関する研究” 同上 (昭和60年)
- 19) 田中辰明, 他: “長期蓄熱システムに関する研究” 日本建築学会大会学術講演梗概集 (昭和61年)
- 20) 松本衛, 芝池英樹: “熱・水分同時移動系の積分方程式による解析 (その1)” 同上 (昭和57年)
- 21) 松本衛, 古守典彦: “湿った地盤の伝熱性状” 同上 (昭和59年)
- 22) J. Bose & J. Parker: “Ground Coupled Heat Pump Research” ASHRAE Transactions, Vol.89, Part 2B(1983)
- 23) P. Mets: “Ground-Coupled Heat Pump System Experimental Results” 同上, Vol.89, Part 2B (1983)
- 24) A. J. Wijsman & C. Ouden: “The Groningen Project; a Group of 100 Solar Houses with Seasonal Heat Storage in the Soil” Proceedings of Solar World Congress, 1983, Vol.1 (1984)
- 25) D. Ball, R. Fischer & D. Hodgett: “Design Method for Ground-Source Heat Pumps” ASHRAE Transactions, Vol. 89, Part 2B (1983)
- 26) J. Parker, J. Bose & F. McQuiston: “The ASHRAE Design/Data Manual for Ground-Coupled Heat Pumps” 同上, Vol.91, Part 2B (1985)
- 27) V. Mei & C. Emerson: “New Approach for Analysis of Ground-Coil Design for Applied Heat Pump-Systems” 同上, Vol.89, Part 2B (1983)
- 28) 松本順一郎, 大久保俊治: “土の伝熱特性に関する実験的研究” 土木学会論文報告集 第257号 (1977年1月)
- 29) 大久保俊治, 松本順一郎: “土の熱伝導率の推定について” 土の熱的性質に関するシンポジウム発表論文集 (昭和61年2月)
- 30) 土質試験法改訂編集委員会編: “土質試験法” 土質工学会 (昭和44年) p.259
- 31) 森田定一: “応用土質基礎工学 (上)” 東海大学出版会 (1979年) pp.53~55
- 32) 河原能久, 後迫茂, 後藤巖: “地下水流水中に設置されたヒートパイプ蒸発部の熱伝達解析” 第29回水理講演会論文集 (1985年)
- 33) 西岡利晃: “地中埋設管による地盤温度と熱損失の計算” 日本建築学会大会学術講演梗概集 (昭和47年)
- 34) 建築学大系編集委員会編: “音・光・熱・空気・色 (建築学大系, 8)” 彰国社 (昭和44年) pp.315~316

