

## 鋼管杭による土壤採熱実験と性能予測手法の適用性の検討

森野 仁夫  
(技術研究所)

### §1. はじめに

土壤の恒温性と熱容量に着目し、ヒートポンプなどの熱源として利用する技術の研究開発は、自然エネルギー利用技術や代替エネルギー開発の一手段として位置づけられ、古くから国内外で行われてきた。近年においては1970年代後半から北欧や北米で研究開発が盛んに行われ、水平式および垂直式など各種の地中熱交換器の性能確認実験<sup>1-3)</sup>、土壤熱源ヒートポンプ(GSHP: Ground Source Heat Pump)の冷暖房への適用に関する実証的な研究<sup>4-6)</sup>、土壤との熱交換量やシステム性能を評価する解析方法の開発や実験結果との比較による検証<sup>7-9)</sup>、空気熱源ヒートポンプとの比較による経済性の評価<sup>10,11)</sup>などの成果が数多く報告されている。そしてBallらは欧米におけるGSHPに関する研究開発の進展を歴史的に整理し、地中熱交換器の設計・施工方法や設計評価技術について報告をまとめている<sup>12)</sup>。また、BoseらはGSHPの技術概念を分類し、基本的な設計方法と設計評価のための数値計算法などを設計マニュアルとしてまとめている<sup>13)</sup>。このような研究開発の経緯を背景に、Bose<sup>14)</sup>やMogensen<sup>15)</sup>が報告するように、北米や欧州では住宅や事務所ビルの空調や給湯を対象としたヒートポンプ熱源としての土壤の利用が積極的に進められており、大規模建物への適用例も報告されている<sup>16,17)</sup>。また、最近においても、GSHPの性能改良に関する研究<sup>18,19)</sup>や土壤中の水分移動を考慮した計算方法の研究<sup>20,21)</sup>などが継続的に行われている。

日本においては、落藤らが水平管方式、垂直管方式および直膨方式の土壤熱源ヒートポンプについて空調や融雪を対象にした研究を行っており<sup>22-24)</sup>、最近では、土壤の凍結・融解を考慮した実験と理論解析を進めている<sup>25)</sup>。西岡らは寒冷地における垂直管方式による土壤採熱ヒートポンプの適用可能性

を、北海道各地における実証実験と解析によって明らかにしている<sup>26)</sup>。松本らは、降雨や土壤の水分移動を考慮した解析方法を提案し<sup>27,28)</sup>、垂直管方式についての実験を基にそれらの影響を明らかにするとともに、土壤のヒートポンプ熱源としての有効性を示している<sup>29)</sup>。また、竹内らは比較的温暖な多雪地域を対象として、ヒートポンプを用いずにコンクリート杭中の水の循環のみで土壤からの採熱を行う融雪システムの研究開発を行っている<sup>30)</sup>。

しかし、現状において日本では土壤熱利用システムが実用化されている例は少なく、寒冷地や塩害の被害が大きい地域における空気熱源ヒートポンプの代替としての利用や<sup>31)</sup>、地下水を汲み上げない点が評価された融雪熱源としての利用<sup>32)</sup>など、数件の実施例が見られる程度である。

この原因の一つとしては、土壤採熱システムでは土中へ埋設する熱交換器の設置費用が高く、既存の熱供給システムと比較してライフサイクルコストの面で経済的に優位な水準には達していないという点がある。この点で、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ができれば建設コストが軽減され、土壤熱利用システムが実用的な競争力を持ったシステムとして成立する可能性が出てくる。

我々は、このような観点から鋼管杭を土壤熱利用システムの熱交換器とする可能性に着目して研究を行ない、既報では、短期の実験結果を基にした鋼管杭と土壤との熱交換特性やその予測方法について報告して来た<sup>33,34)</sup>。

しかし、土壤を採熱源として利用する場合、鋼管杭のような土中に埋設した採熱管で採熱できる熱量は、初期には大きな値を示すが土壤の熱応答性が低いいため時間の経過とともに減少し、土壤からの熱回収量と平衡した時点で安定する。したがって、長期にわたって使用する土壤採熱システムの設計に際し

ては、土壌との熱交換が安定した時点での採熱量を知ることが必要となる。

この点で、既報<sup>33,34)</sup>で示した結果は短期の実験を基にしており、長期にわたって使用する土壌採熱システムの設計技術を確立するために、実験的には、土壌との熱交換が安定した状態におけるシステムの運転特性を把握すること、また、解析的には、本計算方法の土壌採熱システムの長期性能評価に対する適用性を実験データとの比較検証によって実証することが課題として残されていた。

本報では、1993年11月から半年余りにわたって行った長期採熱実験の結果を基に、上記の課題を検討した結果について述べる。

## § 2. 実験方法

### 2.1 実験装置と計測方法

実験装置の概要を図-1に示す。鋼管杭は外径600mmφ、肉厚14mm、長さ22.5mの打込み杭で土中に垂直に打設されている。鋼管杭は底部を閉塞して内部に水を封入し、冷凍機への水の循環用に2本の塩化ビニル管(呼び径40mmφ)を、一方はその開口が杭上端から100mm、他方は杭底部から300mmに位置するように設置している。鋼管杭内部の容積は約5.9

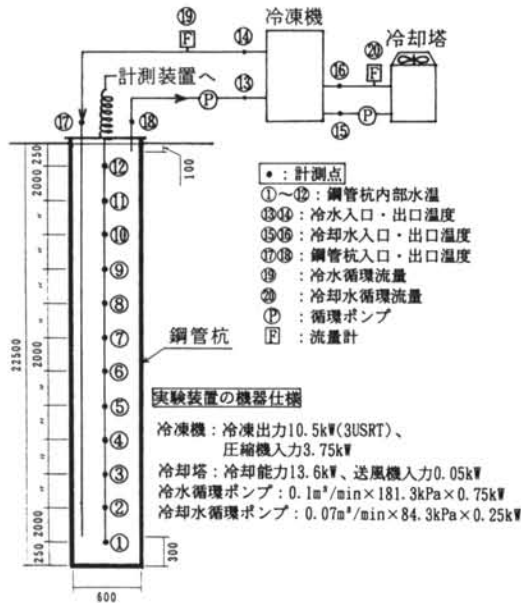


図-1 実験装置

m³である。実験装置の機器仕様を図-1中に示す。冷凍機は低温用ブライン冷凍機で出力は10.5kW(3USRT)、圧縮機入力は3.75kWである。

実験では鋼管杭内部の水を上部から取り出し、下部へ注水するように循環させて冷凍機の熱源水とする採熱運転を行った。採熱運転は平日の9時~17時までを基本的な運転時間として、循環水配管の凍結防止のため鋼管杭内部の平均水温が3℃となった時点で停止とし、休日は採熱を行わず自然状態に放置した。実験期間の循環水量は、実験開始から第2週まで3.6m³/h、第3週と第4週は5.0m³/hとしたが、以降は3.0m³/hで一定とした。鋼管杭の換水回数は循環水量3.0m³/hにおいて約0.5回/hである。実験は1993年11月25日から1994年6月30日までの約7か月間にわたって、東京都江東区にある当社技術研究所の敷地内で行った。

主な計測点を図-1中に示す。鋼管杭内部水温の垂直分布(計測点①~⑫)、冷凍機出入口水温(⑬, ⑭)、冷却塔(⑮, ⑯)および鋼管杭(⑰, ⑱)の出入口水温はT熱電対で計測した。冷凍機(⑲)と冷却塔(⑳)の循環流量は電磁流量計で計測し、冷凍機と冷却塔ならびに冷水循環ポンプと冷却水循環ポンプの消費電力量は積算電力量計で計測した。計測は自動計測で行い、データは5分間隔で記録した。鋼管杭周囲の土壌温度は計測していない。なお、参

深度 m	土質 記号	土質 名
3.9		砂質シルト
7.4		互層混り シルト質細砂
16.9		砂質シルト
26.6		シルト
30.0		砂質粘土

図-2 土質柱状図

属性	物性値
熱伝導率 λ [W/(m·K)]	0.93
密度 γ [kg/m³]	1700
比熱 Cp [kJ/(kg·K)]	1.88
熱拡散率 a [m²/h]	1.1×10⁻³
透水係数 k [m/h]	3.6×10⁻⁶
含水比 w [%]	45
間隙比 n [-]	1.4
土粒子の密度 ρ [kg/m³]	2650

照データとして実験期間にわたる土壌温度の垂直分布を、実験場所から約50m離れた地点の観測孔で深度40mまで15点、6時間おきに計測した。

## 2.2 地盤性状

実験場所の土質は図-2の地盤柱状図に示すとおり、シルトと細砂で代表される。ボーリング時の孔内水位はGL-1.8mであり、実験場所の土壌は飽和状態にあると判定される。土質試験によって得られた土壌の物性値を表-1に示す。ここにおいて、土壌の密度、土粒子の密度、透水係数、含水比、間隙比は、実測値の加重平均値である。土壌の熱伝導率は、含水比、間隙比と土壌の乾燥密度から、KerstenとJohansenの実験式<sup>35)</sup>を参考にして求めた。土壌の比熱は含水比と土壌成分の構成比から決定した。熱拡散率は $a = \lambda / (C_p \cdot \gamma)$ の関係から求めた。

## §3. 計算方法

### 3.1 基礎方程式

土壌中の熱拡散は、円筒座標系において、3次元非定常熱伝導方程式に地下水の流れを考慮して(1)式で表現される<sup>36)</sup>。

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + u_r \frac{\partial T}{\partial r} + u_\theta \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} = a \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad \dots\dots(1)$$

鋼管杭内部への土壌からの熱伝導量 $q_e$ は、仮想流体温度<sup>37)</sup> $T'_r$ を用いて(2)式より求められる。

$$q_e = 2\pi\lambda(T'_r - T_s) / \ln(r_p / (r_p - \Delta r)) \quad \dots\dots(2)$$

鋼管杭内部の水温 $t_w$ は平均温度として扱い、(3)式により $n$ 時点の第1次仮定水温 $t'_{wn}$ を算出し、鋼管杭内部水温が $t'_{wn}$ に $\Delta\tau$ 時間保持されるとして、(1)式より土壌温度分布を計算した後、(2)式より $q_e$ を求めて(4)式により算出する。この過程では収束計算を行っている。

$$t'_{wn} = t_{wn-1} \times (1 - f_w / V_p) + t_i \times f_w / V_p \quad \dots\dots(3)$$

$$t'_{wn} + t'_{wn} - q_e / V_p / \gamma_w / C_{pw} \quad \dots\dots(4)$$

鋼管杭内部の水の吸放熱量 $q_w$ は、鋼管杭内部の水温変化より(5)式で求め、

$$q_w = V_p \times (t_{wn} - t_{wn-1}) \times \gamma_w \times C_{pw} \quad \dots\dots(5)$$

鋼管杭からの採熱量 $q_r$ は(6)式から求める。

$$q_r + q_e + q_w \quad \dots\dots(6)$$

一方、採熱運転が停止している場合は、鋼管杭内

部水温が $\Delta\tau$ 時間前の水温 $t_{wn-1}$ に $\Delta\tau$ 時間保持されるとして、(1)式より土壌温度の分布を求め、(2)式より $q_e$ を計算し、 $t_{wn}$ を(4)式より算出する。

土壌温度の数値解析は、陽解法による差分方程式によって行った。計算方法の詳細は、既報<sup>33,34)</sup>を参照されたい。

ここで  $T$ : 土壌温度[°C]  $a$ : 熱拡散率[m<sup>2</sup>/h]

$T'_r$ : 仮想流体温度[°C]

$t_w$ : 鋼管内部平均水温[°C]

$U_r, U_\theta$ :  $r$ 方向,  $\theta$ 方向の地下水流速[m/h]

$\lambda$ : 土壌の熱伝導率[W/mk]

$r_p$ : 鋼管杭半径[m]

$T_s$ : 鋼管杭表面の土壌温度[°C]

$f_w$ : 循環水流量[m<sup>3</sup>/h]

$V_p$ : 鋼管杭内部の容積[m<sup>3</sup>]

$t_i$ : 循環水入口温度[°C]  $\tau$ : 時間間隔[h]

$\gamma_w$ : 水の密度[kg/m<sup>3</sup>]  $C_{pw}$ : 水の比熱[kJ/kgK]

$r, \theta, z$ : 円筒座標系の半径・接線・深さ方向

### 3.2 計算条件の設定

#### 3.2.1 鋼管杭内部水温の扱い

本計算方法では(3)式に示したように、鋼管杭内部水温を平均温度として扱っている。これは、既報で示した短期実験では、鋼管杭内部の水温がほとんど均一で変化し、顕著な垂直方向の水温分布が観測されなかったことによる。しかし、今回の実験では既報の実験と比べて鋼管杭の直径と長さが大きくなり鋼管杭の容積に対する換水回数が少なくなったため、鋼管杭内部の水温には図-3に示すような垂直分布が観測された。

図-3は、採熱実験時の鋼管杭内部水温の垂直分布の典型的な変動パターンとして第14週目の計測結果を示したものであり、鋼管杭内部水温の計測点から奇数番号と⑫の計測点のデータを示した。換水回数は約0.5回/hである。計測点①と⑫の温度差は、採熱運転時間において3~3.5°C程度、採熱運転停止後では1.5~3°C程度となっており、鋼管杭の垂直方向に温度勾配を形成して推移している。このうち毎日8時の時点における水温の垂直分布を図-4に示す。図-4において2月26日、27日は前週の採熱運転が終了した後の自然放置状況における水温分布であり、2月28日の8時は採熱運転開始直前の水温分布である。3月1日から3月5日までは冷凍機の採熱運転が行われた翌日の水温分布で、3月6日はこの週の採熱運転が終了し再び自然放置状況にお

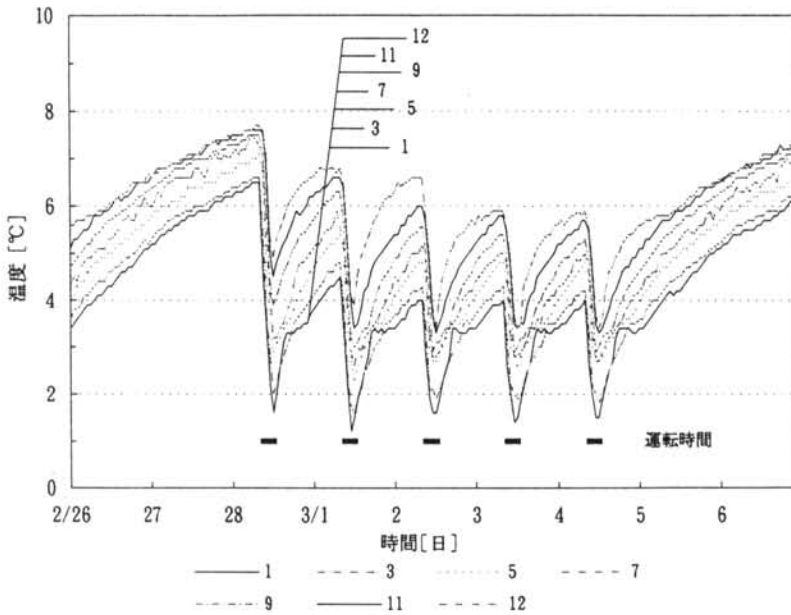


図-3 鋼管杭内部水温の変動状況

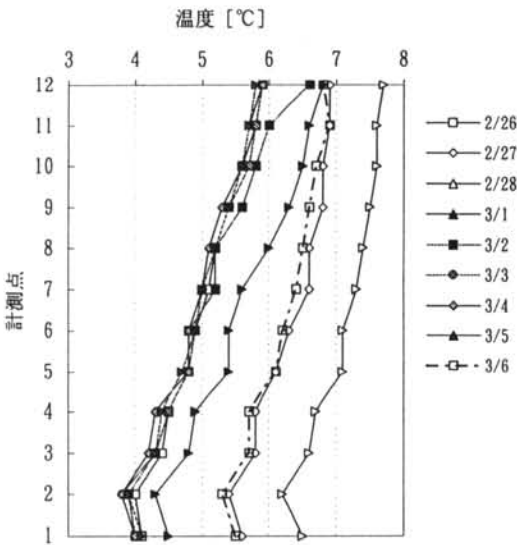


図-4 鋼管杭垂直水温分布の変動 (8時)

かれたときの水温分布である。この図より、採熱運転が開始された3月1日と外界気象の影響を受けやすい計測点⑫を除いて、鋼管杭内部の垂直水温分布は1日の運転サイクルにおいて鋼管杭の深度方向にほぼ直線的でほぼ同様な温度勾配を形成して推移するとみなすことができる。

このような鋼管杭内部水温の変動状況から見て、鋼管杭と土壌との熱交換は深さ方向にほぼ均等に行

われているものと考えられることから、本計算では鋼管杭内部水温を平均値として扱っても交換熱量の積分に関する誤差は小さいものと判断して計算を行った。

### 3.2.2 外気温度の扱い

本実験において、鋼管杭から水平距離で約50m離れた地点で計測した土壌温度の垂直分布の変動状況を図-5に示す。図-5より、外界気象の影響は浅いところに留まっており、また、地下4mの地点では17.2°Cの平均値を基準に±1.2°Cの等振幅で変動していることが分かる。

また、図-6には各土壌温度計測点について実験期間中の最大値、最小値と平均値を示す。図-6から地下4m以深の土壌温度は実験期間にわたって変動幅が小さく、17°C程度の一定温度として取り扱うことができると判断される。

土壌温度は地表面における外界気象の変動を受けた結果として形成され、その影響は計測された土壌温度に既に反映されている。よって、これらの計測結果は、本実験土壌においては、地表面からの外界気象の変動の影響は土壌の比較的浅い部分までにしかおよばないことを示している。

すなわち、このような土壌温度の変動状況において、鋼管杭による土壌熱利用システムでは鋼管杭が地下深くまで埋設されるため土壌温度の変動を受ける部分が少ないこと、また、地下数mから不易層ま

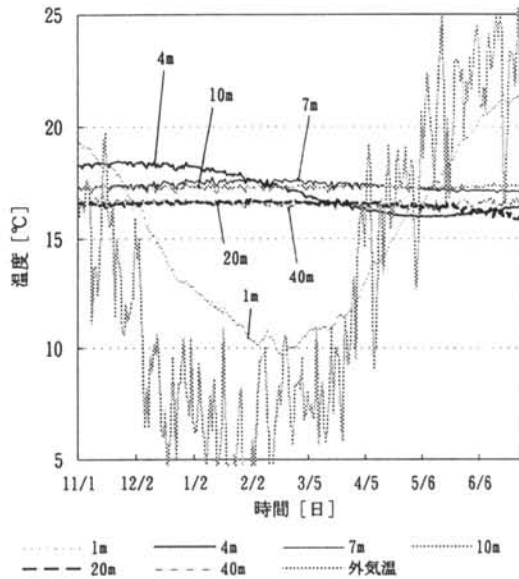


図-5 土壌温度の変動状況

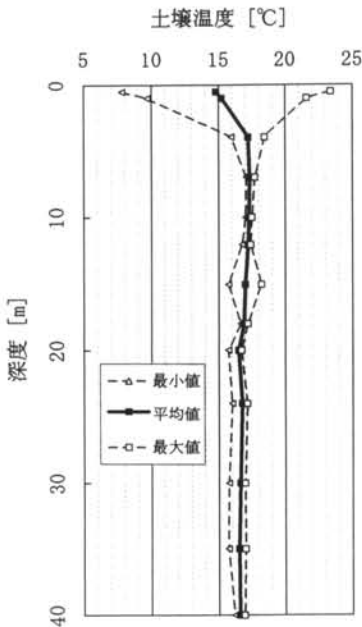


図-6 土壌温度の垂直分布

での間の土壌温度は深さに応じた一定温度を中心として外界気象の年周期の変動に対して時間遅れを伴いながら振動するため、計算において地表面の境界温度として設定する温度から大幅にずれる期間が短いことなどの理由により、地表面における外界気象の変動が土壌採熱システムの熱的性能におよぼす影響は少ないと判断される。

よって、本計算では地表面からの外界気象の影響は考慮せず、境界条件となる地表面土壌温度を計算対象期間中17°Cで一定として計算を行った。

### 3.2.3 鋼管杭内壁における熱伝達率

採熱運転時の循環水と鋼管杭内壁との間の熱伝達率 $\alpha$ は、竹内らの論文<sup>30)</sup>を参考に層流の自然対流と強制対流の共存状態として扱い、(7)式から $\alpha=58 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ とした。

$$\left(\frac{\alpha D}{\lambda_w}\right)^3 = (3.657)^3 + \left[0.75 \left(\frac{RaD}{L}\right)^{\frac{1}{4}} \left\{1 + \left(\frac{0.492}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right\}^{\frac{4}{9}}\right]^3 \quad \dots(7)$$

ここで  $D$ : 鋼管杭の直径[m]

$L$ : 鋼管杭の長さ[m]

$\lambda_w$ : 水の熱伝導率[W/mK]

$Ra$ : レイノルズ数[-]

$Pr$ : プラントル数[-]

### 3.2.4 計算領域と境界条件

土壌温度の計算領域は、円筒座標系の半径方向に鋼管杭表面から5m、深さ方向に地表面から25.5mの範囲とした。計算において半径方向の分割幅 $\Delta r$ は0.025m、 $\theta$ 方向の分割幅 $\Delta \theta$ は $30^\circ$ 、深さ方向の分割幅 $\Delta z$ は1.5mとし、計算時間間隔 $\Delta \tau$ は0.01hとした。また、計算条件として、地下水の水位ポテンシャルは0.01m/m、初期土壌温度は実験場所から十分に離れた土壌温度の記録(図-6)より計算領域全体にわたって17.0°Cとした。境界条件としての地表面温度は土壌温度と同一の17.0°Cで計算期間中一定とした。土壌の物性は表-1の値で均一と想定した。計算において採熱運転中は鋼管杭入口温度と冷水循環流量を計算入力値として与えた。

## §4. 実験結果および計算値との比較

実験結果の整理では以下に示す記号で各熱量を表した。

QQP : 鋼管杭からの採熱量

QQG : 土壌からの熱伝導量

QQW : 鋼管杭内部水の吸放熱量

QQR : 冷凍機採熱量

QQC : 冷凍機供給熱量

QLOS : 陸上部における冷水循環システムの熱損失

ここにおいて、QQPは鋼管杭内部の水が熱源水として冷凍機へ供給した熱量であり、冷水循環流量

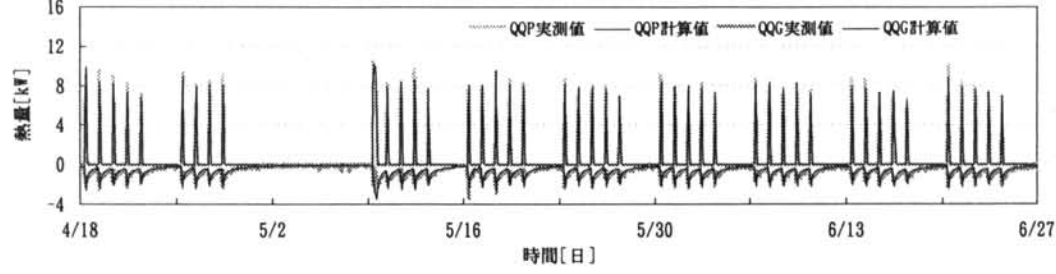
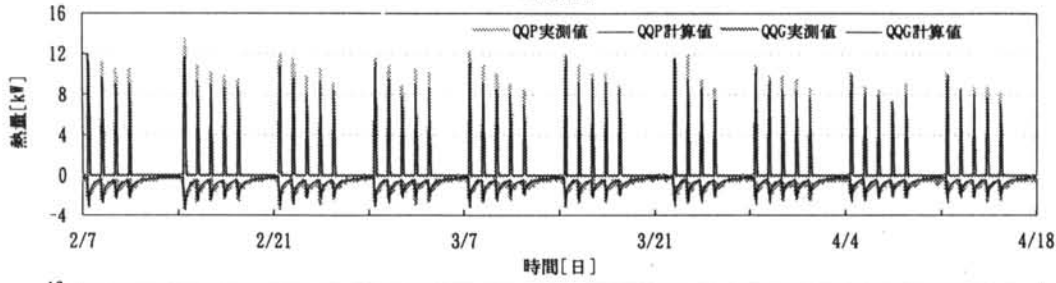
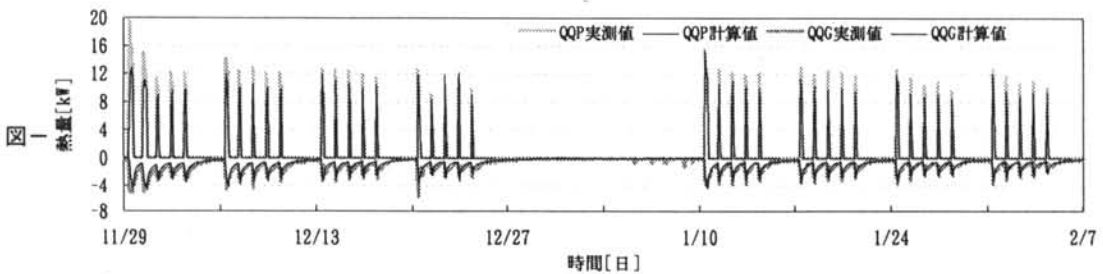
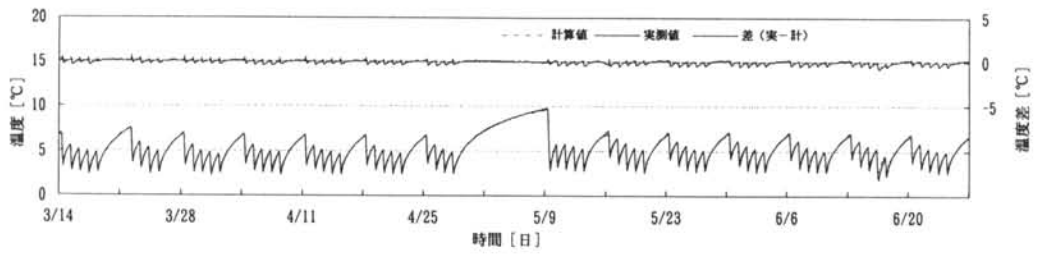
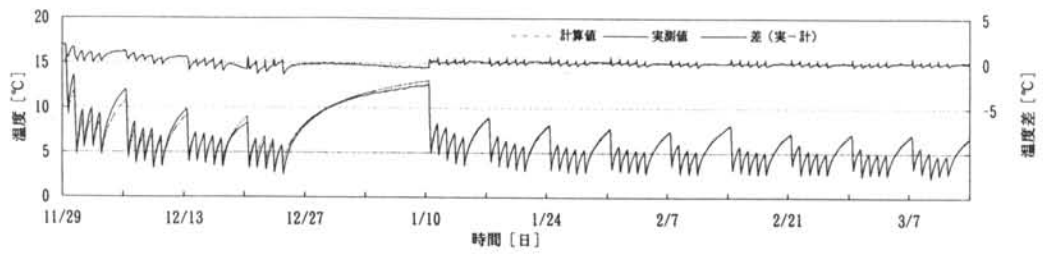


図-8 鋼管杭からの採熱量と土壌からの熱伝導量 (実測値と計算値の比較)

と循環水の鋼管杭出入口における温度差から求めた、QQWは冷凍機の運転・停止に伴う鋼管杭内部水の吸放熱量で、鋼管杭内部の水の熱容量と、計測点

①から②を容積加重平均した鋼管杭内部平均水温の単位時間当たりの変化から求めた、QQGは鋼管杭内部水への周囲土壌からの熱伝導量であり、直接計



測ることができなかつたため、 $QQG=QQP-QQW$ として求めた。QQRは冷凍機の蒸発器が循環水から採取した熱量で、冷水循環流量と冷凍機の蒸発器出入口温度差から求めた。なお、実験では陸上部における冷水循環システムの熱損失が存在するため、 $QQR=QQP+QLOS$ となる。QQCは、本システムの熱出力となる冷却水の放熱量で、冷却水の循環流量と冷凍機の凝縮器出入口温度差から求めた。

本報では、採熱実験データのうち1993年11月29日から1994年6月26日までの30週間の実験結果をまとめた。

なお、熱量計算は5分間隔の計測データの1時間毎の平均値を基にして行った。また、図-7および図-8に示す実験結果と計算値の比較においては、実測値および計測値とも1時間毎の値を示している。

#### 4.1 鋼管杭内部水温の変動

鋼管杭内部の平均水温について実測値と計算値の変動状況を図-7に示す。実測値より鋼管杭内部水温は、採熱運転開始から数日で急激に低下し、採熱運転停止後、また土曜、日曜や長期の運転休止期間に自然回復しているが、採熱運転の繰り返しにより徐々に低下する傾向を見せている。しかし、1週間毎の運転サイクルにおける初日の採熱運転開始直前の水温を見ると、3月以降は7℃程度で、5月の連休以降を含めてほぼ一定値となっており、採熱運転に伴う鋼管杭内部水温の変化のパターンは、3月以降はほぼ定常的な状態となっているものと判断される。

計算値と実測値の差は初期において1~2℃程度となっているが、1994年1月以降は採熱時および採熱停止後とも、また、長期運転停止時の自然温度回復状況を含めて、実測値と良好一致を示している。実測値に対する計算値の誤差は、実験期間全体の平均で-0.032℃であり、その標準偏差は0.3℃であった。

#### 4.2 鋼管杭からの採熱量

鋼管杭からの採熱量と土壌からの熱伝導量の実測値と計算値の変動状況を図-8に示す。図において正の値は鋼管杭からの採熱量を示し、負の値は土壌からの熱伝導量を示している。

図-8より鋼管杭からの採熱量の実測値について時間当たりのピークの変化を見ると、採熱運転開始直後には20kWと高い値を示しているが、採熱運転の継続にしたがって徐々に低下し、実験終盤では8

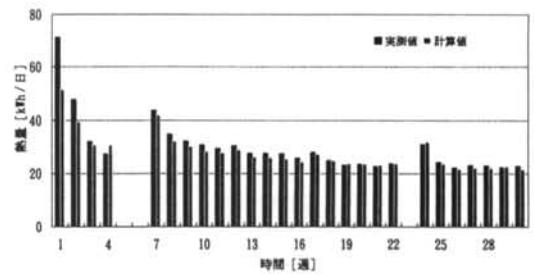


図-9 鋼管杭からの採熱量（週毎の日平均熱量）

kW程度となっている。採熱運転パターンを5日運転2日休止としているため運転休止後の採熱量が大きく、週末に向かって徐々に低下していく傾向がある。長期運転休止後は水温が回復しているため運転時間が長くなり1日当たりの採熱量が大きくなっている。採熱運転時間は、実験初期では8時間程度であったが、第3週以降実験終了までは休日明けで5時間程度、それ以外の日は3~4時間程度であった。

鋼管杭からの採熱量の1週間の合計をその週の運転日数で除した1日当たりの平均熱量の変化を図-9に示す。週毎の日平均採熱量は第1週には約70kWh/日と高い値を示しているが第4週にかけて急激に低下し、長期運転休止後に一時回復したのち徐々に低下して行き、実験終盤では約23kWh/日で安定した状況となっている。

採熱量の計算値は、時間当たりのピークが実測値と比べてやや小さいものの実測値の変化の傾向と良く一致している。実測値に対する計算値の誤差は、運転時間の平均で-0.41kWであり、その標準偏差は1.9kWであった。また、図-9に示した週毎の日平均採熱量も実験初期を除いて実測値と良く一致している。鋼管杭からの採熱量の実験期間の総計は実測値で3945kWh、計算値で3716kWhであり、実測値に対する計算値の差は-6%であった。

#### 4.3 土壌からの熱伝導量

図-8において土壌からの熱伝導量の実測値の変化を見ると、土壌からの熱伝導量は、採熱運転開始と共に鋼管杭内部水温が低下するため急激に増加するが、採熱運転中にも次第に低下を始めていることが分かる。この原因は土壌の熱拡散率が小さいために、冷凍機の運転時間における土壌からの採熱領域が鋼管杭近傍に限られ、採熱による土壌温度の低下速度が、冷凍機の運転による鋼管杭内部水温の低下速度より大きくなり、両者の相対的な温度差が徐々

に小さくなって行くことによるものと考えられる。また、採熱運転終了後も周囲土壌からの熱回収は継続しているが、冷凍機運転停止後は鋼管杭内部水温が土壌からの熱回収によって徐々に上昇するため、周囲土壌との温度差はさらに小さくなって行く。このため、土壌からの熱伝導量は時間の経過と共に徐々に低下しており、週末の運転休止2日目にはほぼ0に漸近している。実測値に関して時間当たりの熱伝導量のピークの変化を見ると、採熱運転開始直後は5kW程度を示しており、長期運転休止後にも土壌温度が自然回復しているため大きな値となっているが、採熱運転の繰り返しにともない徐々に低下して行き、第30週では2kW程度となっている。

土壌からの熱伝導量の1週間の合計をその週の運転日数で除した1日当たりの平均熱量の変化を図-10に示す。週毎の日平均熱伝導量は第1週には約60kWh/日を示しているが第4週にかけて急激に低下し、長期運転休止後に回復したのち採熱運転の継続と共に徐々に低下して行き、実験終盤では約23kWh/日で安定した状況となっている。

図-8に示した土壌からの熱伝導量の実測値と計算値を比べると、計算値はピークにおいて実測値よりやや小さいものの実測値の変化と良く一致している。実測値に対する計算値の誤差は、全時間の平均で-0.14kWであり、その標準偏差は0.78kWであった。また、図-10に示す週毎の日平均熱伝導量の計算値も、実験初期を除いて実測値と良く一致している。土壌からの熱伝導量の実験期間の総計は実測値で3837kWh、計算値で3646kWhであり、実測値に対する計算値の差は-5%であった。

実測値を基にした1週間当たりの鋼管杭からの採熱量に対する土壌からの熱伝導量の割合を図-11に示す。鋼管杭からの採熱量に対する土壌からの熱伝導量の割合は、採熱運転開始直後や鋼管杭内部水温が回復している長期の運転休止直後を除いてほぼ100%であり、本実験の採熱運転条件では、鋼管杭からの採熱量のほとんどは土壌からの熱伝導量でまかなわれている。

#### 4.4 冷凍機の供給熱量と採熱量

冷凍機供給熱量と冷凍機採熱量について、それぞれの熱量の1週間の合計をその週の運転日数で除した、1日当たりの平均熱量の変化を図-12に示す。

週毎の日平均冷凍機採熱量は採熱初期には80kWh/日程度であり、実験中盤にかけて30kWh/日

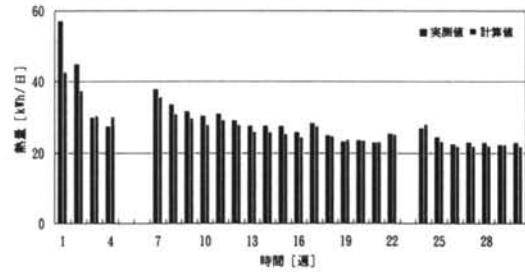


図-10 土壌からの熱伝導量（週毎の日平均熱量）

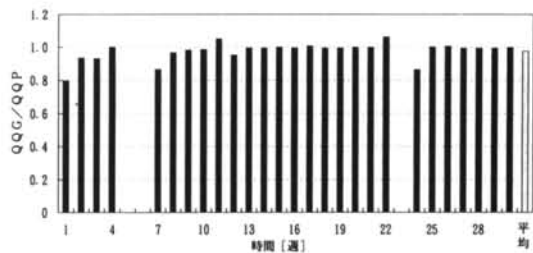


図-11 採熱量に対する土壌からの熱伝導量の割合

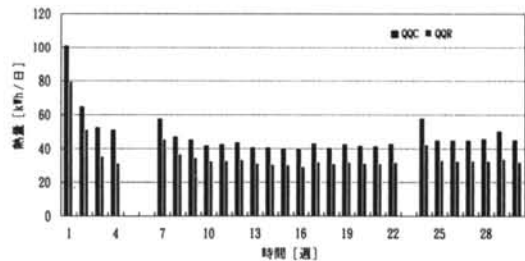


図-12 冷凍機供給熱量と冷凍機採熱量

程度の最低値を示し、実験終盤にかけては33kWh/日程度と若干増加している。冷凍機採熱量と図-9に示した鋼管杭からの採熱量の差は、循環水が鋼管杭を出た後の冷凍機回りの配管系からの熱損失によるものである。冷凍機採熱量に対する配管系からの熱損失の割合は2月、3月の寒冷期には10%程度であったが、4月以降の外気温が高い季節には30%に達した。実験終盤にかけて冷凍機採熱量が多少増加したのは配管系統における熱損失の影響を受けたもので、本実験では熱損失が採熱システムの運転にプラスの方向に作用している結果となった。

冷凍機供給熱量の週毎の日平均熱量は、採熱初期には100kWh/日程度であり、実験中盤にかけて約40kWh/日の最低値を示し、実験終盤では45kWh/日程度と若干増加した。実験終盤にかけて冷凍機供給熱量が増加したのは、冷凍機採熱量が増加したた



めである。

#### 4.5 採熱運転における定常状態の判定

鋼管杭からの採熱量、土壌からの熱伝導量、冷凍機採熱量ならびに冷凍機供給熱量について、それぞれの第30週の日平均熱量を基準とした各週の日平均熱量の割合の変化を図-13に示す。

図-13より各熱量の比率は第19週以降ほぼ1.0となっており、採熱運転は定常状態になっていると判断される。

定常状態におけるそれぞれの日平均熱量は表-2に示すとおりであり、鋼管杭からの採熱量は23kWh/日、土壌からの熱伝導量は23kWh/日、冷凍機採熱量は30kWh/日、冷凍機供給熱量は40kWh/日となった。各熱量の第1週の日平均熱量と比べた定常状態における値の割合は、鋼管杭からの採熱量がおよそ30%となり、その他の熱量についてはいずれも40%程度となった。

なお、本論文で述べる定常状態とは、土壌採熱システムの半年程度の運転期間において、鋼管杭と土壌との熱交換量が安定的に一定と見なせる状態を指している。

#### 4.6 成績係数

冷凍機供給熱量(QQC)と冷凍機採熱量(QQR)の成績係数(COP)、および、冷凍機の蒸発器と凝縮器の出入口平均水温を週平均値として求めた値の変動状況を図-14に示す。ここでCOPは、週間の冷凍機供給熱量または冷凍機採熱量を週間の冷凍機消費電力量で除したものである。

冷凍機供給熱量に対するCOPは、実験開始直後は4に近い値を示しているが定常状態では3.3程度となった。冷凍機採熱量に対するCOPは実験開始直後は3程度を示し、定常状態では2.4程度となった。

この時の蒸発器出入口水温の平均値は、第9週目以降ほぼ安定して約4℃で推移している。一方、凝縮器の出入口平均水温は、放熱に冷却塔を使用しているため外気温の季節的変動の影響を受けて変化しており、第26週以降の凝縮器温度の上昇が、採熱運転が定常状態に達したと推定される第19週以降もCOPの低下傾向が続いている原因となっている。

本実験における冷凍機供給熱量に対するCOPは、低水温熱源での運転にもかかわらず比較的高い値を示した。

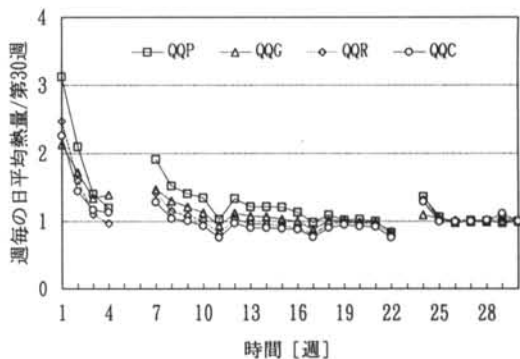


図-13 各熱量の変化の状況(週毎の日平均熱量)

項目	初期値	定常状態	定常/初期
鋼管杭からの採熱量	72kWh/日	23kWh/日	0.32
土壌からの熱伝導量	57kWh/日	23kWh/日	0.40
冷凍機採熱量	80kWh/日	30kWh/日	0.38
冷凍機供給熱量	101kWh/日	40kWh/日	0.40

表-2 定常状態における熱量と初期値に対する割合

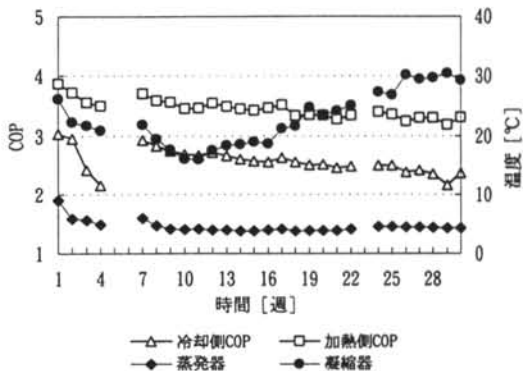


図-14 土壌採熱システムの成績係数

## §5. 計算における仮定の適用範囲

### 5.1 鋼管杭内部水温の平均値としての扱い

本報告では3.2.1に示した考え方により、鋼管杭内部水温を平均値として扱って計算を行った。この結果、鋼管杭内部水温の計算値は、鋼管内部の垂直方向に温度成層を形成した実測値の平均値に対して長期にわたって良い一致を見せ、また、鋼管杭と土壌との熱交換量に関する計算値と実測値も十分良く一致した。

これより、本研究が対象とする鋼管杭のような、比較的直径が大きく、かつ、換水回数の少ない熱交換器を有する土壤採熱システムの性能評価においては、実際の現象として鋼管杭内部の水に深さ方向の温度成層が生じて、その温度差が小さく温度勾配が直線的であるような場合には、鋼管杭内部の水温を平均値として扱っても、実用上十分な精度をもって熱的性能の計算が可能であると判断される。

なお、熱交換器内部の水温を平均値として扱うことができる上下温度差の範囲や、より大きな直径の鋼管杭や地下蓄熱槽などに対する適用性については、今後の検討課題である。

## 5.2 外気温度の一定値としての扱い

本報告では、3.2.2に示した考え方により、地表面における外気温度を一定として計算を行った。この結果、鋼管杭内部水温は実測値に対して長期にわたって良い一致を示し、鋼管杭と土壤との熱交換量の計算値と実測値の差も十分小さい範囲に収まった。

これより、本実験条件のように土壤温度に対する外界気象の影響が比較的浅い範囲に留まり、長期間にわたって深さ方向の土壤温度が均一、あるいは、その垂直分布がほとんど無いと見なせる場合には、本研究が対象とする土壤の深度方向に十分深く埋設された鋼管杭のような熱交換器を有する土壤採熱システムの性能評価においては、地表面における外界気象の影響を考慮しなくても、長期にわたる熱的性能の評価が実用上十分な精度を持って可能であると判断される。

しかし、外気温度の変動以外に雨水の浸透などの現象を含む外界気象の影響に関する厳密な検証は、実測値を基準として、その変動を考慮した計算との比較で論ずるべきであり、この点に関しては今後の課題として検討して行きたい。

## §6. まとめ

本報告は、地中に埋設した直径0.6m、長さ22.5mの鋼管杭によって土壤からの採熱実験を行い、鋼管杭と土壤との長期にわたる熱交換特性を明らかにすると共に、既報で示した計算モデルの長期にわたる採熱性能の予測に対する適用性を検討したものである。

本研究において得られた結論を要約して以下に示

す。なお、ここで示す結論は、本実験条件の範囲で成立するものである。

- 1) 実験結果から、
  - ①定常状態における鋼管杭からの採熱量は23kWh/日で、初期採熱量のおよそ3分の1となった。
  - ②定常状態における土壤からの熱伝導量は23kWh/日で初期熱伝導量の約40%となった。
  - ③本実験条件における1週間の運転サイクルにおいて、定常状態における鋼管杭からの採熱量は、土壤からの熱伝導量によってほぼ100%まかなわれている。
  - ④冷凍機供給熱量に対するCOPは、定常状態において3.3と高い値を示した。

2) 実験結果と計算結果の比較から、

- ①鋼管杭内部水温、鋼管杭からの採熱量および土壤からの熱伝導量に関して、計算値は実測値に良好に一致し、本計算モデルが長期の採熱性能の予測に適用できることが確認された。
- ②実現現象として鋼管杭内部の水に温度成層が生じて、その深さ方向の温度差が小さく、温度勾配が直線的であれば、鋼管杭と土壤との伝熱計算においては、鋼管杭内部水温を平均温度として取り扱うことができる。
- ③十分深く埋設された鋼管杭を有する土壤熱利用システムの熱的性能評価においては、地表面における外気温度の影響を考慮しなくても、実用上十分な精度を持った評価が可能である。

本研究の結果から、鋼管杭を用いた土壤採熱システムの定常状態における熱交換特性を明らかにすることができ、実験結果との検証により既報で開発した計算モデルによって、鋼管杭を土壤との熱交換器とした場合の長期の採熱性能の予測が可能であることが確認された。

これによって、鋼管杭を土壤との熱交換器とした土壤採熱システムの長期にわたる信頼性を持った設計が可能になったと判断される。

しかし、本計算方法の適用範囲については、§5で述べたような、さらなる検討の予知が残されており、これらについては今後の課題としたい。

また、土壤採熱システムの実用化に際しては、数年間にわたる周期的な採熱運転に伴う土壤温度の変動状況を評価することが必要であり、今後は、この点についても検討を進めて行きたい。

**謝辞** 本研究の実施とまとめに当たっては、宇都宮

大学・建設学科・岡建雄教授にご指導をいただいた。また、本研究の進め方に対しては、設備技術研究部・小林部長に適切なご助言をいただき、実験の実

施とデータのまとめについては、設備技術研究部・内田泰雄氏に多大なご協力をいただいた。記して感謝の意を表します。

#### <参考文献>

- 1) J.E.Bose: "Earth coil/heat pump research at Oklahoma state university" Proc 6th Heat pump Technol Conf 1982 (1982) pp.XVI.1-XVI.16.
- 2) V.C.Mei and S.K.Fischer: "Vertical Concentric Tube Ground - Coupled Heat Exchanger" ASHRAE Transactions, Part 2B (1983) pp.391-406.
- 3) L.H.Soderholm: "Ground - source heat pumps utilizing horizontal coils" Pap Am Soc Agric Eng. ASAE -85-3526 (1985).
- 4) P.D.Metz: "Ground - Coupled Heat Pump System Experimental Results" ASHRAE Transactions, Part 2B (1983) pp.407-415.
- 5) M.Fordsmand: "Earth as storage medium and heat source for heat pumps" EUR Rep Comm Eur Commun, EUR-9852-EN (1985).
- 6) B.Sanner: "Ground source heat pump systems R&D practical experiences in FRG" A collection of international papers on ground-source heat pumps, Heat Pump Technology Development Center of Japan, HPTC-44 (1991) pp.107-116(in Japanese).
- 7) R.J.Couvillion: "Field and laboratory simulation of earth - coupled heat pump coils" ASHRAE Transaction Pt 2B(1985) pp.1326-1334.
- 8) V.C.Mei and C.J.Emerson: "New Approach for Analysis of Ground - Coil Design for Applied Heat Pump Systems" ASHRAE Transactions, Part 2B (1985) pp.1216-1224.
- 9) V.C.Mei: "ORNL ground coil analytical and experimental studies" US DOE Rep ,CONF -841231 (1985) pp.133-137.
- 10) R.D.Fischer,G.H.Stickford and F.E.Jacob: "An assessment of ground-coil heat-pump technology" Proc 7th Heat Pump Technol Conf 1984 (1984) pp.XIV.1-XIV.17.
- 11) T.G.Statt: "A regional economic comparison of ground - source heat pump systems" A collection of international papers on ground-source heat pumps, Heat Pump Technology Development Center of Japan, HPTC-44 (1991) pp.61-77(in Japanese).
- 12) D.A.Ball and R.D.Fisher: "Design methods for ground - source heat pumps" US DOE Rep CONF -830640-5 (1983).
- 13) J.E.Bose,J.D.Parker and F.C.McQuiston: "Design/data manual for closed-loop ground-coupled heat pump systems" ASHRAE, (1985).
- 14) J.E.Bose: "The north American market" A collection of international papers on ground - source heat pumps, Heat Pump Technology Development Center of Japan, HPTC-44 (1991) pp.13-18(in Japanese).
- 15) P.Mogensen: "The European market" A collection of international papers on ground - source heat pumps, Heat Pump Technology Development Center of Japan, HPTC-44 (1991) pp.19-28(in Japanese).
- 16) B.Sanner and K.Knoblich: "Subsurface Cold Storage in Ground Coupled Heat Pump Systems" Proceedings - 5th Inter. Conf. on Thermal Energy Storage (1991) pp.2.4.
- 17) R.T.Tamblin: "Heating with ice" Proceedings - 5th Inter. Conf. on Thermal Energy Storage (1991) pp.4.11.
- 18) R.J.Hopkirk and R.Burkart: "Earth - Coupled Heat Pumps" Proceedings of the 3rd International Energy Agency Heat Pump Conference, Tokyo, Japan (1990) pp.411-421.
- 19) C.P.Remund and J.T.Lund: "Thermal enhancement of bentonite grouts for vertical GSHP systems" Heat Pump and Refrigeration Systems Design, Analysis, and Applications American Society of Mechanical Engineers, AES, Vol.29 (1993) pp.95-106.
- 20) V.M.Lukin: "Calculation of a borehole soil heat exchanger for storing heat in the water - bearing stratum

- taking into account free convection of the formation fluid" Journal of Engineering Physics, Vol.58, No.5 (1990) pp.603-611.
- 21) V.R.Tarnawski and W.H.Leong: "Computer analysis, design and simulation of horizontal ground heat exchangers" International journal of energy research, Vol.17, No.6 (1993) pp.467-477.
- 22) 長野克則, 落藤澄, 中村真人, 中村卓司, 西片一成, 若山尚之: "水平埋設管による土壌の採熱実験と採熱特性のシミュレーション" 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集 (1992) pp.33-36.
- 23) 落藤澄, 西岡純二, 長野克則, 中村真人: "垂直埋設管を用いた不凍液循環型ヒートポンプによる土壌採熱の実験と解析" 空気調和・衛生工学会論文集, No.51, (1993) pp.103-111.
- 24) 落藤澄, 長野克則, 山田健一, 中村卓司: "土壌採熱における直膨式ヒートポンプのシミュレーション" 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集 (1991) pp.737-740.
- 25) 長野克則, 落藤澄, 西方一成: "凍結・融解による土壌の熱伝導率の変化と熱伝導モデル" 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集 (1992) pp.5-8.
- 26) J.Nishioka: "Operating Experience with Ground - Source Heat Pumps" Proceedings - The 3rd International Energy Agency Heat Pump Conf (1990) pp.297-306.
- 27) 松本衛, 古寺典彦: "熱水分同時移動方程式による地盤蓄熱過程の解析" 日本建築学会大会学術講演梗概集 (1982) pp767-768.
- 28) M.Matsumoto and N.Kotera: "An analysis of the heat storage process in wet soil solved as a coupled problem" Energy and Buildings, Vol.11, No.1-3 (1988) pp.239-247.
- 29) 松本衛, 永井久也, 牛尾智秋: "ヒートポンプ熱源としての地盤熱利用に関する研究 (その1)" 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集 (1993) pp.217-220.
- 30) 竹内正紀, 木村照夫, 宮本重信, 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 (1993) pp.59-69.
- 31) 岡建雄, 藤田尊志: "土壌熱利用ヒートポンプシステム" 建築設備と配管工事, (1989.10) pp.73-77.
- 32) 宮本重信: "環境にやさしい融雪をめざして" 土木学会誌, VOL.78, No.5, (1993) pp.6-9.
- 33) 森野仁夫, 岡建雄: "鋼管杭による土壌放熱・採熱に関する研究" 日本建築学会計画系論文報告集, No.404 (1989) pp.49-57.
- 34) K.Morino and T.Oka: "Study on heat exchanged in soil by circulating water in a steel pile" Energy and Buildings, Vol.21, No.1 (1994) pp.65-78.
- 35) O.T.Farouki: "Thermal Properties of Soils" Trans Tech. Publications (1988) pp.103-107.
- 36) 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) pp.887-892.
- 37) 建築学大系編集委員会: "建築学大系8" 彰国社 (1969) pp.315-316.