

## 地中熱利用冷暖房システム採熱部の数値解析

Numerical simulation of heat exchange in the geothermal heat pump system

佐藤 諒 \*<sup>1</sup>  
Ryo SATO若嶋 振一郎 \*<sup>2</sup>  
Shin-ichiro WAKASHIMA星 朗 \*<sup>3</sup>  
Akira HOSHI

## Abstract

In recent years, wide use of natural energy resources such as solar power generation has been proceeded for reduction of CO<sub>2</sub> emissions in the world. Meanwhile, further reduction of the CO<sub>2</sub> emissions from domestic energy consumptions is required. As one of the solutions for the reduction, a heating and cooling system using geothermal heat has been developed and proposed. Geothermal heat is used as the heat source of the geothermal heat pump (GTHP) system for air-conditioning, which consists of a U-tube heat exchanger and a heat pump. The performance of the system is strongly affected by the heat exchange performance between the working fluid in the tube and the soil around the tube. Thus, it is necessary to know the characteristics of heat exchange (cf., heat extraction and subtraction rate into the soil) in detail. In this study, numerical simulations of heat exchange between the heat exchanger and the soil in the ordinary GTHP system were conducted, and the numerical results were presented. Parameters discussed in this paper were operating conditions (i.e., heat extraction and subtraction modes, and their period), and specifications and shape of heat exchanger tube.

キーワード: ジオサーマルヒートポンプ, 熱交換器, 熱伝導, 数値解析

Key Words: Geothermal Heat Pump, Heat Exchanger, Heat Conduction, Numerical Simulation

## 1. 結論

近年, 中国等の発展途上国の急激な経済成長により, 世界全体のエネルギー消費量は年々増加し続けている。しかし, 現在最も主要なエネルギー源である化石燃料は有限であり, 世界全体がエネルギー資源の枯渇の問題に直面していると言える。とくに, わが国はエネルギー自給率が低く, エネルギー供給の大半を化石燃料の輸入に依存しているため, 化石燃料が枯渇した場合には, 深刻なエネルギー不足に陥る状況にある。さらに, 化石燃料の燃焼時等に排出される CO<sub>2</sub> を原因の一つとする地球温暖化等の地球規模の環境問題の進行も懸念されている。

このような状況の下, わが国を含め世界中で太陽光発電等の CO<sub>2</sub> 排出削減が期待できる自然(再生可能)エネルギー利用の研究・開発が盛んに行われている<sup>(1)~(4)</sup>。わが国における CO<sub>2</sub> 排出削減の取り組みは, 産業部門を中心に進められているが, CO<sub>2</sub> 排出全体の約13%を占める一般家庭での排出削減はこれからであり, この対応策の一つとして自然エネルギーである地中熱を利用した冷暖房システムが考案・開発されている<sup>(1),(4)~(9)</sup>。

一般に自然エネルギーは希薄性・間欠性といった欠点があるが, 地中熱については, エネルギー密度は希薄であるものの, その量は莫大で, 大量に利用しても周囲環境に与える影響は比較的小さく, かつ長期的に安定した純国産のエネルギー源であると言える。この地中熱は, 主に地中熱交換器とヒートポンプ(Heat pump 以下 HP)を組み合わせ

たジオサーマルヒートポンプ (Geothermal Heat Pump 以下 GTHP)の熱源として使用される。

GTHP システムは, 通常の空気熱源 HP やケミカル HP とは異なり, 土壌の大きな蓄熱能力を利用するものであり, 夏季冷房時は土壌を HP の放熱源, 冬季暖房時には HP の採熱源として利用する事で, 季節を跨いで熱の有効利用を図り, 省エネルギー化や CO<sub>2</sub> 排出削減に貢献する空調システムを実現しようとするものである<sup>(1)</sup>。GTHP システムの動作としては, Fig.1 に示すように地下に配置された地中熱交換器にプロピレングリコール等の不凍液を混入した熱媒体を循環させて地中との熱交換を行い, HP を用いて熱を回収・放出することにより冷暖房を行うことが一般的である<sup>(10)</sup>。GTHP システムには, 冷房運転時の人工排熱を大気に放出しないため都市中心部やその近郊地域で問題となっているヒートアイランド現象を防止できるといった利点がある。一方で, 日本では地理的条件等により, 熱交換器を地中に埋めるための掘削費用が欧米に比べて2~4 倍ほど高く<sup>(1)</sup>, 欧米ほど普及していない。この GTHP の性能は, 地中熱交換器と土壌との熱交換性能により決定されるため, その性能評価には土壌と熱交換器の採熱・放熱特性を詳しく知ることが重要となる。

そこで本研究では, 現在, 熱交換器として最も一般的で埋設も容易な形状である U 字型熱交換器を対象として, とくに一般住宅での利用を想定した比較的小型の地中熱交換器と土壌との熱交換の数値解析を実施する。これにより, GTHP システムの運転条件, 熱交換器の形状・配置を計算パラメータとして, 地中からの採放熱量の年変化, 地中温度分布等を明らかにする。さらに, それらの計算パラメータが採放熱性能に与える影響について比較検討を行った結果について報告する。

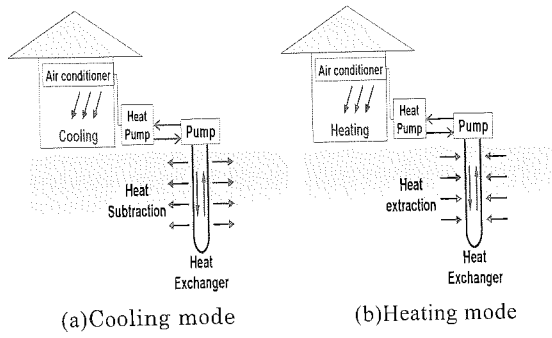
\*<sup>1</sup> 一関工業高等専門学校専攻科生産工学専攻

\*<sup>2</sup> 一関工業高等専門学校機械工学科 講師 (〒 021-8511 岩手県

一関市萩荘字高梨 e-mail:swaka@ichinoseki.ac.jp)

\*<sup>3</sup> 一関工業高等専門学校機械工学科 教授

(原稿受付: 2010 年 2 月 9 日)



(a)Cooling mode (b)Heating mode

Fig.1 GTHP system using U-tube heat exchanger

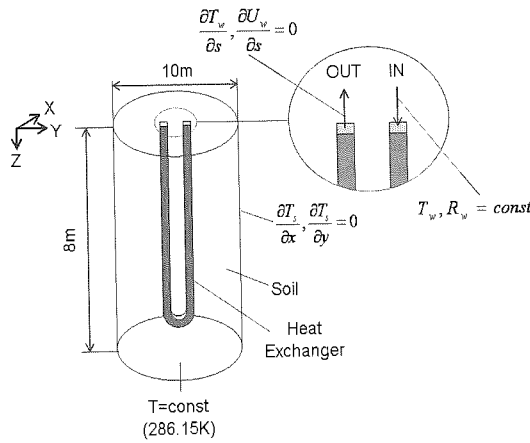


Fig.2 Schematics of numerical analysis model

2. GTHP の地中熱交換部の数値解析

2.1 数値解析の概要

本研究で対象とした数値計算モデルをFig.2に示す。直径10(m)、深さ(z方向)8(m)の円柱状の計算領域の中央に直径25(mm)、全長10(m)、パイプ間隔0.1(m)のU字型熱交換器を配置した。熱交換器内部に流す熱媒体はプロピレングリコール25(wt%)水溶液、体積流量は1.56(m<sup>3</sup>/hr)で一定とし、冷房時、暖房時で熱媒体温度のみ変化するとした。また、熱交換器の周囲は様な土壌(熱物性値一定)、地表面はアスファルトで覆われている。熱媒体を流すU字型熱交換器のパイプ直径は、計算領域に比べ非常に小さく線熱源と考えられるため、計算の効率化のために、正方形断面を持つ流れ方向1次元メッシュ列で近似した。この時、実際の使用を想定している円形パイプの断面積と同じになる様に一辺の長さを与えた。パイプの材質は架橋ポリエチレンであり、肉厚は2(mm)としている。

土壌の熱移動は、地下水流れを考慮せず、熱伝導のみと仮定して3次元非定常熱伝導方程式を用いた。なお、熱交換器内部の熱媒体から土壌への熱の移動は、管壁方向への熱通過率を算出して計算を行っている。熱媒体自体については、後に示す流れ方向の1次元非定常エネルギー方程式を用いて解く。これらの計算結果より、熱媒体の入口と出口の温度差、平均流量、熱物性値から地中からの採放熱量を求めている。なお、地表面においては太陽日射等を考慮した熱収支を考慮しているが、雨等の降水(水収支)については考慮していない。

解析の手順は、まず3D-CADで数値解析モデルを作成し、それを格子生成ソフト Gridgen に渡し、計算格子を生成する。その後、以下の基礎方程式を有限体積法に基づき離散化して Fortran90 によりプログラムコードを作成し、解析を行った。計算は、時間ステップ間隔 200(s)として、後述の初期条件から5年間同じ気象条件(年変化)を与えて計算し、最後の1年間について検討を行うこととした。

2.2 基礎方程式

本研究で用いた基礎方程式は、以下のように表される。

①土壌3次元非定常熱伝導方程式

$$\rho_s C_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_s \left( \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} \right) + q_s \quad \dots(1)$$

式(1)中の  $q_s$ (W/m<sup>3</sup>)は体積発熱量を示し、具体的には、地表面隣接計算メッシュでの熱収支や熱交換器との熱交換フラックスから、計算メッシュの表面積および体積を用いて体積量に換算して求められる。

②熱交換器内1次元エネルギー方程式(sは流れ方向距離)

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} = \frac{\lambda_w}{\rho_w C_w} \frac{\partial^2 T_w}{\partial s^2} - U_w \frac{\partial T_w}{\partial s} + \frac{q_w}{\rho_w C_w} \quad \dots(2)$$

ここで  $q_w$ (W/m<sup>3</sup>)は、土壌と熱媒体間の熱交換フラックスを上述のように換算した体積発熱量を示す。この計算に用いる熱交換器内部表面の対流熱伝達率  $h_m$ (W/(m<sup>2</sup>K))は、Dittus-Boelter の式による局所ヌセルト数  $Nu_d$  及び熱媒体の熱伝導率  $\lambda_w$ (W/(mK))を用いて次式で表される。

$$h_m = \frac{Nu_d \lambda_w}{d} \quad \dots(3)$$

$$Nu_d = 0.023 Re_d^{0.8} Pr^n \quad \dots(4)$$

$$Re_d = \frac{U_w d}{\nu_w}, \quad Pr = \frac{\rho_w \nu_w C_w}{\lambda_w} \quad \dots(5)$$

$U_w$ (m/s)は体積流量から求めた熱媒体平均流入速度で、 $d$ (m)は熱交換器内径、 $n$ は熱媒体が加熱される場合は0.4、冷却される場合は0.3である。これから、熱媒体・土壌間の熱通過率  $K_m$  は以下のように決定した。

③熱交換器の熱通過率  $K_m$  (W/(m<sup>2</sup>K))

$$K_m = \frac{1}{(1/h_m) + (r_m/\lambda_m)} \quad \dots(6)$$

ここで、 $r_m$ (m)は熱交換器の肉厚である。また、熱交換器外側と土壌との熱抵抗は無いものとしている。

④熱交換器単位長さあたりの平均採放熱量  $Q$  (W/m)<sup>(6)</sup>

$$Q = \frac{\Delta T R_w C_w \rho_w}{L_m} \quad \dots(7)$$

ここで、 $\Delta T$ (K)は熱交換器の出入口温度差、 $R_w$ (m<sup>3</sup>/s)は熱媒体の体積流量、 $L_m$ (m)は熱交換器の長さである。

⑤地表面熱収支

地下数mより深い土壌は、1年を通してほぼ一定温度(15~18℃)であるが、数10(cm)の表層は日射等の影響が大きい。そこで、本解析では太陽日射による地表面熱収支を考慮する。以下の  $Q_s$ (W/m<sup>2</sup>)は地表面から土壌への熱流束を示し、次式で表される(Fig.3)。

$$Q_s = R_{sun} + R_{sky} - R_{sur} - C_{sur} - E_{sur} \quad \dots(8)$$

また、式(8)の右辺各項は以下の式で表される。

太陽放射  $R_{sun}(W/m^2)$  :

$$R_{sun} = (1 - \alpha)(J_n \sin H + J_{sh}) \quad \dots(9)$$

$H(^{\circ})$ は太陽高度角,  $J_n(W/m^2)$ は地表面直達日射量,  $J_{sh}(W/m^2)$ は天空日射量,  $\alpha(-)$ は地表面日射反射率である。

大気放射  $R_{sky}(W/m^2)$  :

$$R_{sky} = \sigma T_a^4 (1 - 0.062 c)(0.526 + 0.076 \sqrt{f_{sur}}) \quad \dots(10)$$

$\sigma(W/(m^2K^4))$ はステファンボルツマン定数である。

地表放射  $R_{sur}(W/m^2)$  :

$$R_{sur} = \varepsilon \sigma T_a^4 (1 - 0.062 c) \quad \dots(11)$$

大気放射率  $\varepsilon(-)$ は 0.95 としている。

対流顕熱  $C_{sur}(W/m^2)$  :

$$C_{sur} = h_{sur}(T_s - T_a) \quad \dots(12)$$

地表面対流熱伝達率  $h_{sur}(W/(m^2K))$ は Jürges の実験式<sup>(1)</sup>における風速 0(m/s)の場合の 5.8 (W/(m<sup>2</sup>K))で固定した。

$T_s(K)$ は地表面隣接メッシュの温度である。

蒸発潜熱  $E_{sur}(W/m^2)$  :

$$E_{sur} = BC_{sur} \quad \dots(13)$$

ここでボーエン比  $B$ は、地表面における水収支を考慮していないためアスファルトでの値 2.84<sup>(11)</sup>で固定とした。

全天日射量  $J_n(W/m^2)$ , 外気温  $T_a(K)$ , 雲量  $c(-)$ , 地表面付近の水蒸気分圧  $f_{sur}(mmHg)$ に関しては、2008 年の気象庁データ(地方気象台毎時観測データ)を繰り返し用いた。

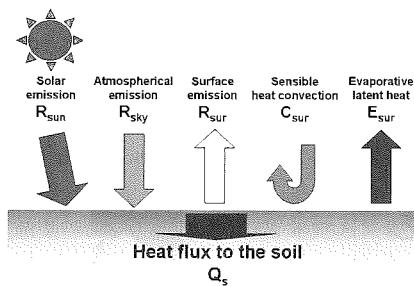


Fig.3 Heat budget at soil surface

Table 1 Thermal property of GTHP system<sup>(12)</sup>

	Thermal conductivity (W/(mK))	Specific heat (J/(kgK))	Density (kg/m <sup>3</sup> )
Heat Exchanger (Cross-linked polyethylene)	0.4	2100	950
Soil	1.5	840	1600
Working fluid (Propylene glycol 25wt%)	0.59	3680	1019

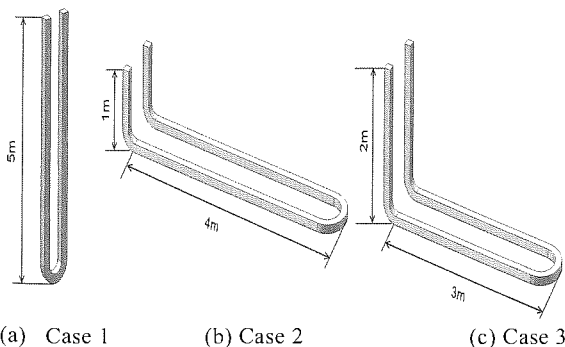


Fig.4 Heat exchanger types

### 2.3 計算条件

計算に用いた各部位の熱物性値を Table 1 に示す。初期条件は、熱交換器、土壌、地表面の各初期温度を 286.15(K)とした。熱媒体流入温度は、GTHP のカタログ<sup>(13)</sup>等を参考に暖房時は 278.15(K), 冷房時 298.15(K)とした。境界条件は、計算領域側面を温度勾配 0, 下面を初期温度で固定とし、熱交換器入口から一定温度一定流量の熱媒体が流入し、出口から温度勾配、速度勾配 0 で熱媒体が流出するものとした。地表面は前述の日射等を考慮した熱収支を解き、地表面に接する計算メッシュへの体積熱フラックスとして加える。また、計算領域下面での地温勾配は考慮していない。

### 3. 計算結果および考察

本研究では、地中熱交換器の配置方法の検討と、GTHP の冷暖房運転の配分を変更した場合の検討を行った。

まず、3.1 節の地中熱交換器の配置方法の検討では、通常の U 字配置した場合に加え、2 通りの深さで熱交換器を水平に折り曲げて配置した場合を比較した結果を述べる。熱交換器の配置には垂直、水平、あるいはループ状等、様々な方法が考えられ、熱交換器を最適な方法で設置することがその性能を生かすために重要と言えるが、GTHP システム普及のネックになっている敷設コスト低減のためには、比較的浅い位置に平らに熱交換器を敷設できるほうが良いとも考えられるためである。

また、3.2 節の冷暖房運転の配分を変更した場合の検討では、気象庁観測データや他の研究<sup>(7)~(9),(14)</sup>から、日本各地での GTHP の運転条件配分(冷暖房運転の期間や運転時間)を変更して比較を行い、冷暖房運転の条件配分が GTHP の採熱能力に、どのように変化を及ぼすのかを調べる。周知の通り、日本列島は縦に長く、地域によって冷暖房を行う期間(時間)が大きく異なるため、GTHP システムの設置にあたっては、この点もあらかじめ検討しておく必要がある。

#### 3.1 熱交換器の配置方法の影響

Fig.4 に示す垂直 U 字型熱交換器と 2 つの水平配置熱交換器に対して数値解析を行い、その違いについて調べた。垂直 U 字熱交換器を用いた場合を Case 1, 地中 1m の地点から水平配置した熱交換器を用いたものを Case 2, 地中 2m の地点から水平配置した熱交換器を用いたものを Case 3 とする。GTHP の運転条件は、冷房期間が 6/19~9/20(1 日の運転時間が 12:00~17:00), 暖房期間が 11/1~5/2(1 日の運転時間が 6:00~22:00)とした。気象データは 2008 年の盛岡地方気象台のものを繰り返し使用している。以上の計算条件を Table 2 にまとめて示す。

Case 毎の地中採熱量の時間変化を Fig.5~Fig.7 に示す。さらに Fig.8~10 は、Case 2 と Case 3 で地中からの採熱量の逆転が見られた 1 月 5 日の同時刻(AM8:00)における地中の z 断面の温度分布を 1(K)刻みの等温線で示したものである。Table 3 には、各 Case の冷房運転と暖房運転期間

における熱交換器単位長さ当たりの平均採放熱量を示す。

Fig.5~Fig.7を見ると、どのCaseでも地中からの採熱量は非定常な変化を繰り返している。これは、気象条件の影響だけでなく1日の間に運転を停止する時間があることによる。また、Fig.8~Fig.10を見ると、Case 1(Fig.8)では土壌深度が深くなるにつれて土壌温度が高くなり、熱交換器周辺に大きな水平方向温度勾配が発生しているのに対し、地中に熱交換器が水平配置されているCase 2(Fig.9)とCase 3(Fig.10)では、熱交換器周辺の土壌温度分布はほぼ一様である。これは、Case 2とCase 3では熱交換器が地中に水平配置されているため、主に設置深度での深さ方向の温度勾配による採放熱を行うためと考えられる。

Table 3を見ると、冷房・暖房運転共に地中からの期間平均採熱量は、Case 1>Case 3>Case 2の順になっている。これはFig.6とFig.7に示すように、Case 2とCase 3では暖房期間中に地中への放熱となる時期があり、さらに冷房期間中の地中への放熱量もCase 1に比べ少ないためである。このCase 2とCase 3で、採熱すべき暖房運転期間中に地中への放熱が行われてしまうのは、冬季に大気温度が土壌温度より低くなって地表近傍の地中温度が低くなることによる。すなわち、地表に対して水平配置された熱交換器が、地表面の影響を受けて低温となっている地中1~2m地点で採放熱を行うため、結果的に熱交換器付近の土壌温度が熱媒体温度よりも低くなるためである。逆にCase 1では地中に垂直に熱交換器を配置しているため、Fig.8に示すように地表の温度が低下しても、その影響を受けない深度から熱を採取することができており、最も地中からの採熱量が大きくなると言える。

以上より、盛岡の2008年の気象データを用いた計算では、地表面に対して水平に熱交換器を配置した場合、冷房期間中に地中から採熱、暖房期間中は地中へ放熱を行う現象が発生し、地中からの採熱量を上昇させることは出来ず、従来どおりの垂直配置の熱交換器が最も地中から効率よく採熱ができると言える。すなわち、寒冷地での冬季暖房用途を主としたGTHPシステムの熱交換器敷設の場合には、使用するHPの熱媒体設定温度にもよるが、一定の敷設深さが必要であることが示唆される。

Table 2 Computational cases for the three heat exchanger types

	Location	Meteorological data	Operation period (Cooling)	Operation period (Heating)	Heat exchanger type
Case 1	Morioka	2008	6/19~9/20	11/1~5/2	Fig.4 (a)
Case 2			(12:00~17:00)	(6:00~22:00)	Fig.4 (b)
Case 3					Fig.4 (c)

Table 3 Average extraction rate of heat per unit length

	Cooling(W/m)	Heating(W/m)
Case1	-7.96	3.89
Case2	-1.00	1.44
Case3	-1.61	2.74

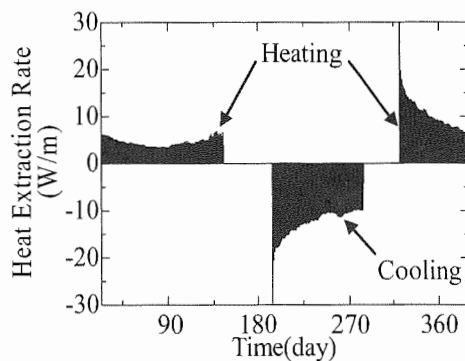


Fig.5 Time variation of heat extraction rate (Case 1)

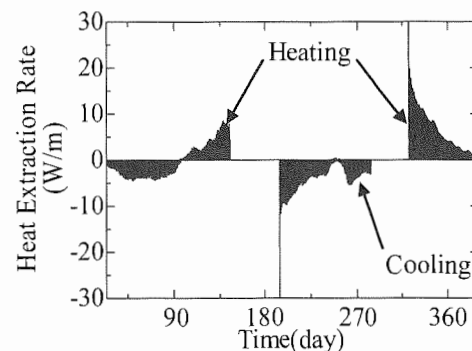


Fig.6 Time variation of heat extraction rate (Case 2)

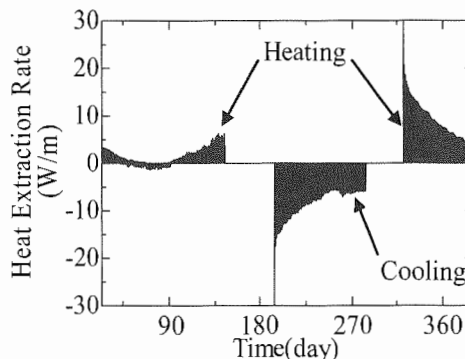


Fig.7 Time variation of heat extraction rate (Case 3)

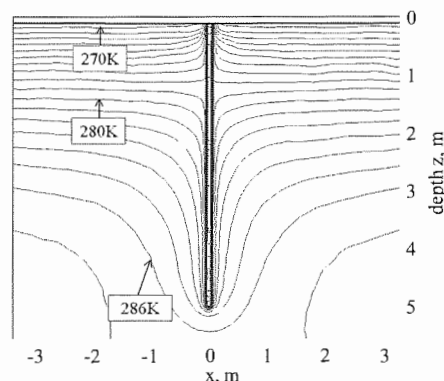


Fig.8 Temperature contours in the soil at 1/5 (Case 1)

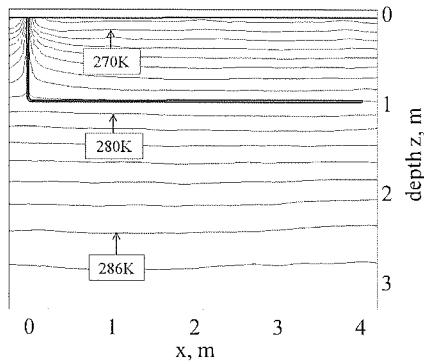


Fig.9 Temperature contours in the soil at 1/5 (Case 2)

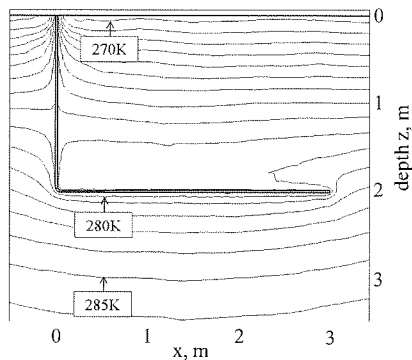


Fig.10 Temperature contours in the soil at 1/5 (Case 3)

3.2 冷暖房の運転条件の影響

ここでは、日本各地の気象条件に合わせ冷暖房運転の配分を変更した場合の検討を行う。具体的には、寒冷地である岩手県盛岡市を Case 4、東京を Case 5、温暖な気候の福岡県福岡市を Case 6 として、3つの地域に対して比較を行った。気象条件は、各地域の 2008 年地方気象台観測データを 5 年間繰り返し使用し、土壌パラメータや地中熱交換器形状は、Case 1 (垂直 U 字型熱交換器) の場合と同じとした。冷暖房運転期間中の 1 日の運転時間は、真夏や厳冬期等の時期により各地で変化させた。各計算 Case の概要および運転条件をそれぞれ Table 4、Table 5 に示す。

運転条件の違いによる地中からの採放熱量の違いを比較するため、Case 毎の地中からの採熱量の時間変化を Fig.11~Fig.13 に示す。Table 6 にそれぞれの Case の冷房運転と暖房運転期間における地中からの期間平均採放熱量をまとめて示した。また、Fig.14 には、太陽日射の影響が小さい地点として熱交換器中央部の地下 3.0m の点を選び、日平均温度の時間変化を比較して示した。

Fig.11~Fig.13 を見ると、Case 2 や Case 3 の様に冷暖房時にあらわれた地中への採放熱の逆転現象は見られない。このことから、垂直 U 字型熱交換器を用いた GTHP は、日本の広い地域での利用可能性があると考えられる。Table 6 を見ると、地中からの期間平均採熱量は冷房運転で Case 4>Case 5>Case 6、暖房運転では Case 6>Case 5>Case 4 という順に絶対値が大きくなった。

GTHP は、土壌との熱交換を行うため、熱媒体と熱交換

器近傍の土壌温度との差が大きいと地中からの採放熱量は大きくなる。しかし、GTHP の運転が長く続くと熱交換器付近の土壌が熱媒体温度に近づいてしまい採放熱量が低下していくという特性がある。このことから、冷房運転で Case 4 (盛岡) の放熱量が最も高くなったのは、熱媒体と土壌との温度差が他の Case よりも大きくなったためと考えられる。すなわち、他の Case に比べて冷房運転の期間が短く、放熱量が少ないために土壌温度が上昇しにくいことと、前年からの暖房運転期間が長いために採熱期間が長く、Fig.14 に示すように冷房運転開始時における土壌温度が他の Case より 2(K)ほど低いことによる。逆に暖房運転では、冷房運転期間が短いため放熱期間が短く、暖房開始時の土壌温度が他の Case より 3(K)ほど低いため、Case 4 の期間平均採熱量が最も少ない。この結果より、GTHP の運転期間の設定も重要な設計指標と言える。

以上より、GTHP の地中からの採放熱量は、その期間の運転時間よりも、前年の冷暖房期間における運転時間の寄与が大きいとと言える。具体的には、寒冷地における暖房運転での効率を向上させるためには、その前の冷房運転で十分に土壌の温度を上昇させておくことが有効であり、暖房運転期間自体の長さは相対的に重要ではない。

Table 4 Computational cases for the three locations

	Location	Meteorological data	Operation period	Heat exchanger type
Case 4	Morioka			
Case 5	Tokyo	2008	Table 5	Fig.4 (a)
Case 6	Fukuoka			

Table 5 Operating conditions

	Operation period(Cooling)	Operation period(Heating)
Case 4 (Morioka)	7/1~7/31,9/1~9/11 (12:00~19:00)	11/5~11/31,4/1~4/20 (6:00~9:00,17:00~22:00)
	8/1~8/31 (10:00~22:00)	12/1~3/31 (6:00~22:00)
Case 5 (Tokyo)	6/16~6/31,9/1~9/20 (11:00~19:00)	11/1~11/31 (6:00~9:00,17:00~22:00)
	7/1~8/31 (10:00~22:00)	12/1~3/31 (6:00~22:00)
Case 6 (Fukuoka)	6/10~6/31,10/1~10/15 (11:00~19:00)	12/1~3/31 (6:00~22:00)
	7/1~9/31 (9:00~22:00)	

Table 6 Average extraction rate of heat per unit length

	Cooling(W/m)	Heating(W/m)
Case 4	-6.25	4.25
Case 5	-5.14	7.21
Case 6	-4.74	7.26

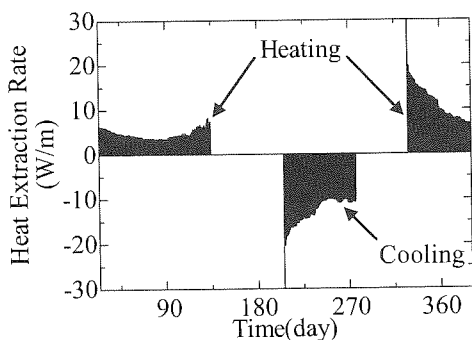


Fig.11 Time variation of heat extraction rate (Case 4: Morioka)

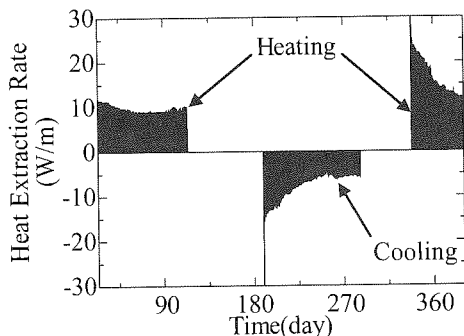


Fig.12 Time variation of heat extraction rate (Case 5: Tokyo)

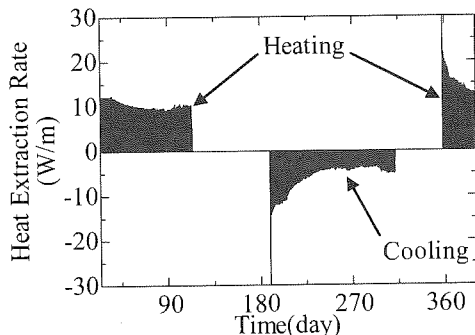


Fig.13 Time variation of heat extraction rate (Case 6: Fukuoka)

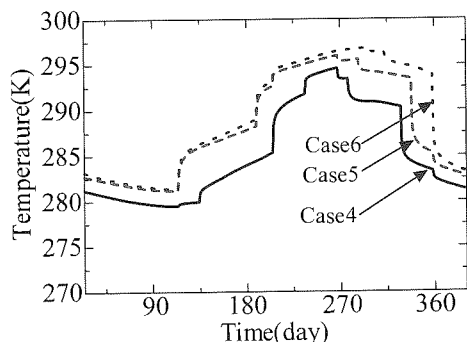


Fig.14 Time variation of soil daily-averaged temperature at 3m

#### 4. 結論

本研究では、地中熱を冷暖房に利用できるジオサーマルヒートポンプシステム(GTHP)の地中熱交換器と土壌との熱交換について数値解析により検討を行った。熱交換器の配置や冷暖房の運転条件(時間配分等)をパラメータとして、これらが採熱特性にどのように影響を与えるかを調べ、以下の知見を得た。

- (1) 盛岡の気象条件の場合、比較的浅く(1~2m)に水平配置した熱交換器は、外気温や太陽日射の影響を強く受けることになり、地中へ放熱を行うべき冷房運転期間では地中から採熱となり、地中から熱を採取すべき暖房運転期間では放熱が起きて効率が低下する。
- (2) これまで一般的に用いられている垂直U字型熱交換器を用いる場合は、盛岡、東京、福岡の3地域で季節を跨ぐ採放熱が可能であり、広い地域で冷暖房への利用可能性がある。
- (3) 地中からの採放熱量は、冷房運転であれば、当該期間の冷房運転の時間配分自体より、前年の暖房運転の採熱結果による土壌温度の影響が大きい。また、暖房運転の場合も、前年の冷房運転の放熱による結果によって地中からの採熱量が大きく影響される。

本研究では、土壌を一律な土壌と見なし、熱交換器配置の比較では、垂直U字型と水平配置の2つの比較のみを行った。実際の住宅向けには、多様な土壌条件が予想されることから、今後は地層分布を導入し、地中熱交換器の配置も水平配置以外について解析する必要がある。また、地域や利用条件によって求められる冷暖房負荷が異なるため、建物側での熱利用も含めたシステム解析を行い、GTHPの採熱特性について、様々な気象条件・運転条件下の検討を進める必要がある。今後の課題である。また、本研究の計算結果では、垂直U字熱交換器1本あたり(長さ10m)における採熱量は100(W)程度であった。一般住宅向けのHPとして用いるには、最低1(KW)程度の熱量が必要であるため、これを満たすことが出来る複数熱交換器を配置したシステムの検討も行う必要がある。

#### 謝辞

本研究の実施にあたり、(株)アトム環境工学より実際のGTHPシステムの情報提供等の多大な協力を得た。ここに記して謝意を表す。

記号表

記号	単位	名称・物理量
$B$	-	ボーエン比
$c$	-	雲量
$C$	J/(kgK)	比熱
$C_{sur}$	W/m <sup>2</sup>	対流顕熱フラックス
$d$	m	熱交換器内径
$E$	W/m <sup>2</sup>	蒸発潜熱フラックス
$f$	mmHg	水蒸気分圧
$h$	W/(m <sup>2</sup> K)	熱伝達率
$H$	°	太陽高度角
$J$	W/m <sup>2</sup>	日射量
$K$	W/(m <sup>2</sup> K)	熱通過率
$L$	m	熱交換器長さ
$n$	-	指数
$Nu_d$	-	ヌセルト数
$Pr$	-	プラントル数
$q$	W/m <sup>3</sup>	体積発熱量
$Q$	W/m	熱交換器の単位長さあたり平均採放熱量
$Q_s$	W/m <sup>2</sup>	地表面熱流束
$r$	m	熱交換器厚さ
$R$	m <sup>3</sup> /s	体積流量
$Re_d$	-	レイノルズ数
$R_{sun}$	W/m <sup>2</sup>	太陽放射フラックス
$R_{sky}$	W/m <sup>2</sup>	大気放射フラックス
$R_{sur}$	W/m <sup>2</sup>	地表放射フラックス
$s$	m	流れ方向距離
$t$	s	時間
$T$	K	温度
$U$	m/s	熱媒体流速
$x, y, z$	m	座標系
$\alpha$	-	地表面日射反射率
$\varepsilon$	-	大気放射率
$\lambda$	W/(mK)	熱伝導率
$\nu$	m <sup>2</sup> /s	熱媒体動粘性係数
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	密度
$\sigma$	W/(m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )	ステファンボルツマン係数
$\Delta$	-	差
(添え字)		
$a$		大気(外気)
$m$		熱交換器
$n$		直達日射
$s$		土壌
$sh$		天空日射
$sky$		大気
$sur$		地表面
$sun$		太陽, 日射
$w$		熱媒体

参考文献

- (1) 東京大学生産技術研究所・大成建設株式会社・ゼネラルヒートポンプ工業株式会社, 大都市における基礎杭を利用した地中熱空調システムの普及・実用化に関する研究, エネルギー使用合理化技術戦略的開発, (2005).
- (2) 新垣 武・名城 敏, 沖縄県における太陽光発電: 発電事例と設置方法に関する検討, 沖縄国際大学経済論集, (2006), pp.61-74.
- (3) 井坂 勉・塩田 剛・相良 啓太・関 和司, 風力発電システムと発電機の整合性に関する実験研究, 日本機械学会第12回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集, (2007), pp.345-348.
- (4) 田子 真・盛田 耕二・菅原 征洋・藤田 忠, 垂直U字管型地中熱交換器の採熱特性, 日本機械学会論文集(B編), Vol.74, No.07(2008), pp.153-161.
- (5) 関根 賢太郎・大岡 龍三・横井 陸己・黄 錫鎬, 場所打ち杭を用いた地中熱利用空調システムの普及・実用化に関する研究(その7)中規模ビルによる省エネルギー効果とコスト検討, 日本建築学会学術講演会概集, (2005), pp.663-664.
- (6) 青井 健史・関根 賢太郎・飯塚 宏・長野 晃弘・大塚 雅之・深尾 仁・新村 浩一・湯澤 正信, 熱交換杭を利用した空調システムに関する研究(その1)熱交換用パイプの種類差による熱特性の検討, 日本建築学会大会学術講演会概集(関東), (2006), pp.1303-1304.
- (7) 宮田 征門・吉田 治典・安岡 稔弘・竹川 忠克・名倉 義行・小林 陽一・金 政秀, 杭基礎を利用した自然エネルギーによる土壌蓄熱空調システムの分析(その2)シミュレーションによるシステムの運転方法の検討, 日本建築学会大会学術講演会概集(関東), (2006), pp.1301-1302.
- (8) 三浦 秀一・須藤 諭・渡辺 浩文・芳野 博, 東北地方における庁舎建築のエネルギー消費特性に関する調査研究, 日本建築学会計画系論文集, Vol.509, (1998), pp.85-91.
- (9) 浦野 良美・渡辺 俊行・林 徹夫・龍 有二・渡部 恭一・片平 義和・尾崎 明仁, 地熱利用住居の防寒防暑効果に関する数値シミュレーション, 日本建築学会計画系論文報告集, Vol.388, (1988), pp.38-46.
- (10) 茅 陽一, 新エネルギー大辞典, 株式会社工業調査会, (2002).
- (11) 環境省, 平成20年度ヒートアイランドに関する調査報告書(第2章)ヒートアイランド現象の実態に関する研究調査動向の整理・分析, (2008), pp.3-69.
- (12) 日本機械学会, 伝熱工学資料, 日本機械学会, (2005).
- (13) ECONAR, Engineering Specifications of GeoSource Geothermal Heat Pumps, <http://www.econar.com/>.
- (14) 旭硝子(株), 旭硝子板ガラス建材総合カタログ「技術資料編」第3章 光・熱・省エネルギー, (2009), pp.3-6-11.