

## 講座「地中熱利用ヒートポンプシステム」

### Lecture Note : Geothermal Heat Pump System

#### 温度応答試験の実施と解析

藤井 光\*

(平成18年1月24日受付, 平成18年2月17日受理)

#### Practice and Interpretation of Thermal Response Tests

Hikari FUJII\*

Keywords : thermal response test, geothermal heat pump system, ground heat exchanger, ground-water flow, thermal conductivity

#### 1. はじめに

地中熱利用ヒートポンプシステム (以下 GeoHP と略す) において, 利用側の必要熱負荷に応じた適正規模の地中熱交換井本数・長さを正確に推定し, 初期コストを最小化することはシステムの採算性向上に重要である。温度応答試験は, 熱交換井内に熱負荷を与えた熱媒体を循環して得られる熱媒体温度や地中温度の経時変化より, 地盤の熱物性や熱交換能力を推定する地盤調査試験であり, 適正な地中熱交換器の本数・長さを決定するために不可欠である。温度応答試験は1970年代に考案されたが, GeoHP システム設計のベースとして一般的に実践されるようになったのは1990年代に入ってからである (Sanner et al., 2005)。

GeoHP システムにおいて, 地中熱交換井から得られる熱交換量は, 地質や地下水流動状況によって大きく異なることが, これまでに実施された温度応答試験結果や GeoHP システム運転状況などから明らかになっている。一例として, 実在する地中熱交換井 A および B において, 温度応答試験より推定された地層の見かけ熱伝導率 (地下水流動の影響を含む熱伝導率, 以下熱伝導率と呼ぶ) および地中熱交換量を Table 1 に示す。表中の熱伝導率は 3 - (2) 節にて解説する円筒型熱源関数を用いたヒストリーマッチング法により求め, 熱交換量は一定の熱媒体の熱交換井入口温度 (熱交換井 A, 熱交換井 B ともに 30℃) および循環流量 (熱交換井 A : 25L/min, 熱交換井 B : 30L/min)

\*九州大学大学院工学研究院 〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1

Department of Earth Resources Engineering, Graduate School of Engineering, Kyushu University, 6-10-1, Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka 812-8581, Japan

© The Geothermal Research Society of Japan, 2006

Table 1 Interpretation results of thermal response tests.

GHE	Location	$\lambda_s$ (W/m/K)	Heat Exch. Rate (W/m)	Groundwater Flow	Geology	Reference
A	Akita City, Akita	1.2	40@3days	Not active	Silt & sand	Fujii et al. (2005)
B	Nishimeya, Aomori	6.0	85@3days	Very active	Tuff	Takahashi (2003)

のもとで3日間の熱媒体循環後に測定した。熱交換井Aは地下水流れが存在しない熱伝導型地盤に位置するが、熱交換井Bは良好な地下水流れの影響を受けるため、熱交換井Bは熱伝導率および熱交換量に関して熱交換井Aのそれぞれ5.0倍、2.1倍と非常に高い値を示している。地中熱交換井における熱交換量は、熱交換井Aのような地下水流れのない熱伝導型地盤が示す 30~40W/m (濱田ほか, 1996) を用いてシステム設計されることが多いため、熱交換井Bの位置において事前調査をせずに GeoHP システムの熱交換井本数・長さを設計した場合、過剰な地中熱交換器の設計をする可能性が高い。地中熱交換井を設置する地盤の情報は周辺地域の地質情報などよりある程度推定できるが、日本国内における居住地域の多くを占める平野部においては、地層の不均質性が大きく、また熱交換能力に大きな影響を与える地下水流れの存在も局所的な推定が容易でないため、地中熱交換井の掘削前に熱交換量を高精度で推定することは困難である。したがって、温度応答試験の実施と信頼性の高い解析は GeoHP システムの採算性向上にきわめて重要と考えられる。本稿は温度応答試験に関して、実施方法、解析方法および最近の技術動向について、フィールドでの実施例を交えた解説をまとめたもので、GeoHP システムの設計における一助となることを目指す。

## 2. 温度応答試験の実施

温度応答試験の実施に関する世界的な統一基準は、これまで国内外を問わず確立されていないが、Sanner et al. (2005) が世界地熱会議2005において発表した“Guidelines for thermal response testing -draft-”が現時点ではもっとも標準的なものといえるだろう。本章ではこの指針を一部参考に、温度応答試験の試験装置、実施方法および実

施における注意事項などについて解説する。

### 2 - (1) 試験装置

温度応答試験装置は熱媒体を加熱し、循環を行うための循環系と、熱媒体温度・消費電力・循環流量などを計測する計測系より構成される。循環系の主な構成要素は循環ポンプ、電気ヒーター、水タンクなどであり、計測系は温度センサー、流量計、電力計、データロガーなどである。温度応答試験装置の概念図を Fig.1 に示す。この装置では、水タンク内に設置した電気ヒーターにより熱負荷を与えられた熱媒体が、循環ポンプにより熱交換井内を循環し、放熱する。また水タンクとは別に、熱媒体の熱膨張による漏水を防ぐためにバッファタンクを設ける場合がある。試験装置の設計・設置における注意点を以下に記す。

- 熱負荷には電圧の安定した電源に接続した電気ヒーターを用いる。
- 地上配管における熱損失が大きいと負荷が不安定になるので、地上配管の長さは最小限にし、

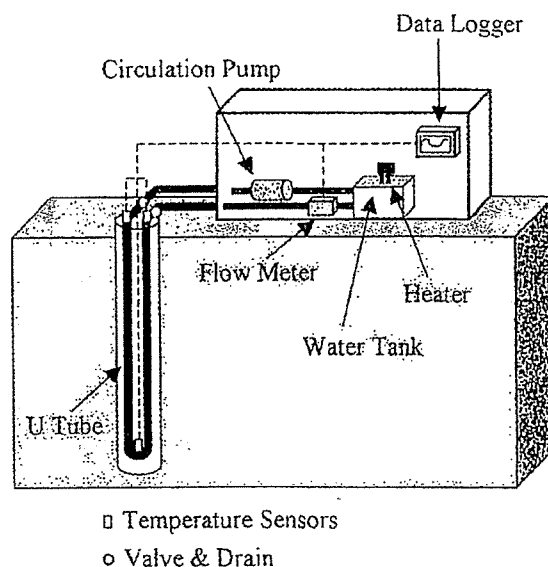


Fig.1 Schematic drawing of thermal response test equipments.

十分な断熱を施す。

- 配管にはエア抜きを設置する。漏水やこれによる水タンクの空焚きには細心の注意をする。
- 熱媒体としては、安価で取り扱いが容易な水が最も適当である。ただし、凍結の恐れがある場合は不凍液を用いる。

欧米では温度応答試験装置はトレーラーに搭載して牽引し、試験現場に運搬設置することが多いが、国内では近年パーツの小型軽量化や設計の改善により、小型温度応答試験装置が開発されている。北海道大学の長野研究室が開発した温度応答試験装置は、幅 50cm 奥行 50cm 高さ 80cm の金属ケースに電気ヒーター、循環ポンプ、パuffers タンク、電力計、データロガーを収納したもので (Fig.2)、普通乗用車のトランクで運搬可能である (長野ほか, 2004)。ヒーター出力は電源電圧が 100V では 1.1kW, 200V では 4.3kW であり、電圧設定を変えることにより様々な熱交換能力をもつ坑井における試験に対応可能である。初期投資

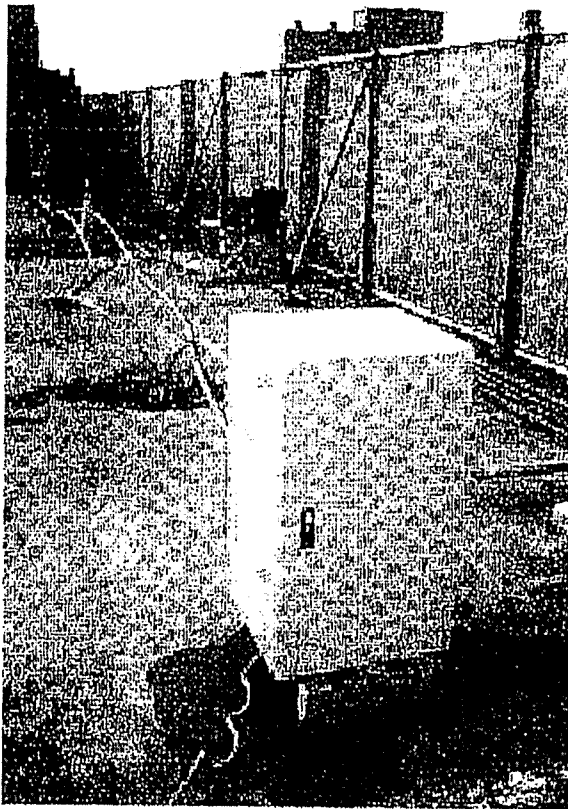


Fig.2 Photo of compact thermal response test device (Nagano et al., 2004).

の削減が大きな課題である GeoHP システムでは、温度応答試験の実施において低コスト化・簡便性が強く要求されるため、今後このような小型試験装置の開発・普及は極めて重要と考えられる。

## 2-(2) 試験方法

温度応答試験の標準的な実施手順を以下に記す。

- ① 温度応答試験装置と熱交換井を断熱を施したホース等で接続し、配管を熱媒体で満たした後、エア抜きをする。
- ② 温度センサー、流量計をデータロガーに接続する。温度測定は熱交換井の出入口における熱媒体温度については必ず行い、可能であればあらかじめ温度センサーを熱交換井内に深度を変えて埋設し地中温度を数点測定する。
- ③ 地中に温度センサーが設置されておらず、初期地層温度の推定が必要な場合は、ヒーターをオフにしたまま30分程度熱媒体の循環を行い、熱交換井出入口における熱媒体温度が安定するのを確認した後、出入口温度の平均より初期地層温度を決定する。
- ④ ヒーターに通電し、熱媒体の循環を開始する。流速は熱媒体の循環が乱流域 (レイノルズ数  $> 2,300$ ) となるように設定する。参考までに、内径 26mm のダブル U 字管を用いて  $30^{\circ}\text{C}$  の水を循環する場合、熱媒体流動が乱流域となる最小流量は約  $4.5\text{L}/\text{min}$  である。
- ⑤ 熱負荷は実際に設置予定の GeoHP システムの負荷に近い大きさとする。目安として、Sanner et al. (2005) は熱伝導率の低い地盤では  $30\text{W}/\text{m}$ 、熱伝導率の高い地盤では  $80\text{W}/\text{m}$  を提案している。
- ⑥ 熱媒体循環時間は、時間と熱媒体平均温度の片対数プロットにおいて、地中熱交換井の影響がなくなり、その後出現する地層の熱伝導率により傾きが決まる直線部において十分な長さの直線が得られる時間とする。Sanner et al. (2005) では50時間以上の熱媒体循環時間を推奨している。
- ⑦ データ取得間隔はデータロガーの記憶容量によるが、少なくとも10分以下とする (Sanner et al., 2005)。

⑧ 循環終了後は速やかに温度応答試験装置と地上配管の水抜きをし、その後試験装置を撤収する。

通常の温度応答試験は循環停止の時点で試験を終了するが、循環終了後の温度回復データを用いた解析により、地下熱物性の推定精度を改善できる場合がある。温度回復データを用いた解析法については3-(1)節に解説する。循環終了後の温度回復データを測定する場合は、地中温度の測定を循環期間の2倍程度継続する。回復期間中は温度応答試験装置および坑口における温度センサーは不要であるので、必要に応じて撤収してもよい。

以上で紹介した温度応答試験は、地中への熱負荷を一定としている。別の方法として、サーモスタットによるヒーターのオンオフ制御により、熱交換井流入温度を一定として循環試験を行う場合がある。この方法では、地下への熱負荷が一定とならないため、3-(1)節に示す循環時法を用いた解析法は適用できないが、他手法での解析は容易であり、また坑井における熱交換量を直接評価できるという長所を持つ。

### 3. 解析方法

温度応答試験により得られた温度データより、以下の情報を推定することができる。

- ① 地盤に関する情報— 見かけ熱伝導率、熱容量
- ② 熱交換井に関する情報— 地中熱交換量、熱抵抗

温度応答試験で得られる地盤の熱伝導率は必ずしも岩石や土壌固有の熱伝導率ではなく、地下水流れの影響を受けた「見かけ熱伝導率」の場合もある。地下水流速が大きい地盤では、地下水の熱移流効果により、見かけ熱伝導率は地下から採取したコアについて熱伝導率計を用いて測定される岩石や土壌固有の熱伝導率と比べて大きな値が示されることが多い。地盤に関する他の情報としては、熱容量は数値モデルを用いた解析法（たとえば盛田・田子，2002）により良好に推定できる。

地中熱交換量は地下への熱負荷を一定とした温度応答試験では推定できないが、前述のように熱交換井への熱媒体流入温度を一定とした試験では推定可能であり、熱交換井の能力を評価する目安

となる。ただし、熱媒体流入温度を一定とした場合においては、地下水流速の小さい熱伝導型地盤では熱交換量は時間の経過とともに減少し続けるため、評価するタイミング（たとえば Fujii et al. (2002) では循環開始5日後）を固定する必要がある。熱抵抗はグラウト材・熱交換器材質・坑径などにより決定され、過度に大きい場合熱交換の障害となるため、十分な評価をすることが望ましい。

温度応答試験の代表的な解析法としては、ケルビンの線源関数や円筒型熱源関数（いずれも Ingersoll et al. 1954）に基づく解析的手法、および有限差分法・有限要素法を用いた数値モデルによる解析法がある。数値モデルを用いた解析法は、地層の不均質性・地下水流動・複雑な坑井仕上げなどを扱うことができるという長所を持つ一方、計算時間の大きさ、入力データ・グリッド作成の煩雑さといった短所を持つ。本稿では、適用が容易であり、かつ温度応答試験の解析においてより広汎に用いられている解析的手法についての解説を行う。なお、数値モデルを用いた解析法は盛田ほか（1984）、長野ほか（1994）、田子・盛田（2006）などに詳説されている。

解析的手法には、地盤に熱負荷を与えた状態での地盤温度の変化率より熱伝導率を推定する作図法、および地盤の熱伝導率などをマッチングパラメータとして解析解に基づく熱交換井モデルを用いて熱交換井出口温度を予測し、実測値とのマッチングにより地盤情報を推定するヒストリーマッチング法がある。いずれの手法もケルビンの線源関数や円筒型熱源関数などの解析解を用いて、円筒座標系における熱伝導を仮定し、地層内の熱伝達挙動を計算する。

#### 3-(1) 作図法

作図法には、循環時における熱媒体の温度を用いる解析法（以下、循環時法と呼ぶ）と循環停止後の地中温度の回復データを用いる方法（以下、回復時法と呼ぶ）がある。以下に両解析法の理論を簡単に述べる。

ケルビンの線源理論より、地中熱交換量を一定とした場合の熱交換井での熱媒体温度 $T$ （入口温度と出口温度の平均値）の経時変化は式(1)～式

(2)を用いて表される。

$$T - T_i = \frac{q}{2\pi\lambda} I(X) \quad \text{ただし} \quad X = \frac{r}{2\sqrt{\alpha_s t}} \quad (1)$$

$$I(X) = \int_0^\infty \frac{\exp(-Y^2)}{Y} dY \quad (2)$$

式(2)における無次元温度応答  $I(X)$  は  $X < 0.3$  の範囲において式(3)により近似される。

$$I(X) = -\ln(X) - 0.2519 \quad (3)$$

したがって、式(1)は式(4)により表される。

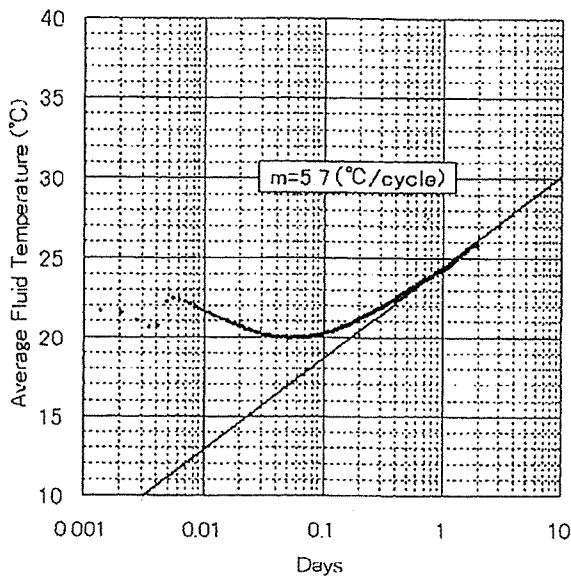


Fig.3 Example of a semi-log plot in a circulation test (Fujii et al., 2002).

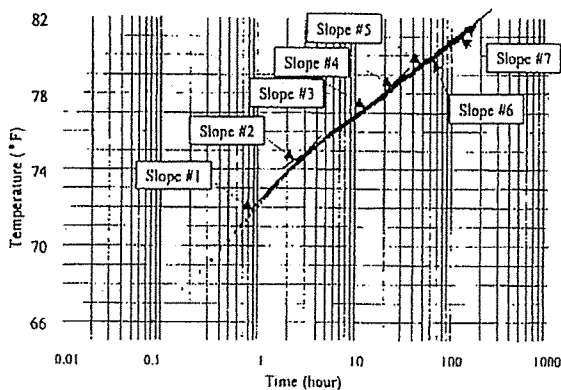


Fig.4 Example of difficult determination of slopes in circulation test (Austin, 1998).

$$T - T_i = \frac{q}{2\pi\lambda_s} \left( -\ln \frac{r}{2\sqrt{\alpha_s t}} - 0.2519 \right) \quad (4)$$

式(4)において、熱交換量一定条件の下で時間とともに変化する変数は時間  $t$  のみであるので、 $m' = q/4\pi\lambda_s$  として時間に依存しない項を定数  $b$  にまとめると、式(4)は式(5)に示すように簡略化される。

$$T - T_i = m' \ln(t) + b \quad (5)$$

式(5)において  $m' = m/\ln(10)$  とすると、自然対数が常用対数に変換され式(6)となる。

$$T - T_i = m \log(t) + b \quad (6)$$

$m' = q/4\pi\lambda_s$  および  $m' = m/\ln(10)$  より、熱伝導率  $\lambda_s$  は式(7)に示すように地中熱交換量  $q$  と  $m$  値を用いて表される。

$$\lambda_s = 0.183q/m \quad (7)$$

循環時法では式(6)に基づいて、熱媒体平均温度の経時変化を示す片対数グラフの傾きより  $m$  値を決定し、式(7)より熱伝導率を求める。地中熱交換井では、熱交換器やグラウト材などの熱伝導率・熱容量が地盤の熱物性と異なるため、循環開始直後には地盤の熱伝導率を表す直線部は得られないことが多い。Fig.3 に示す例では、試験開始から約0.5日後がこの領域に相当する。十分な時間経過後では、温度挙動が地盤の熱伝導率を反映して直線部が観察されるため (Fig.3 では0.5日後以降)、この区間のデータより  $m$  値を決定する。したがって、循環時間としては熱交換井の坑径にもよるが、Sanner et al. (2005) において50時間が推奨されているように十分な時間が必要である。

循環時法は循環中の熱交換井入口・出口水温の平均値を平均地層温度として用いるため、地中での地層温度の測定を必要とせず試験が簡便に行える長所を持つ。一方、実際の温度応答試験では地上配管からの熱損失、電源電圧の変化などにより一定の熱負荷を地下に与える事が容易ではなく、Fig.4 に示す例のように  $m$  値の決定が困難な場合がある。

回復時法は、循環時法と同様にケルビンの線源理論を地層内温度挙動計算に適用するが、熱媒体の循環終了後の温度回復データを用いて熱伝導率を決定するため、循環中の熱負荷変動に影響され

ない。式(4)において熱媒体の総循環時間を  $t_b$  とすると、初期地層温度と循環終了後時間  $t$  経過後の温度  $T_s$  の関係は、式(4)に重ねあわせの原理を適用した式(8)で表される。

$$T_s - T_i = m \log \frac{t + t_b}{t} \quad (8)$$

ただし、式(8)中の  $m$  は式(7)中の  $m$  と同一である。回復時法では式(8)に基づき、ホーナー時間  $(t+t_b)/t$  と温度  $T_s$  の片対数プロット（ホーナープロット）における直線部の傾き  $m$  より、見かけ地層熱伝導率を決定する。ホーナープロットの一例を Fig.5 に示す。回復時法は、循環時に発生しやすい熱負荷の不安定さの影響を受けないため、循環時法より得られた温度挙動と比べて明瞭な直線部分を得られる場合が多い。また、回復時法では、熱媒体の熱交換井入口温度を一定とする試験などの熱負荷が一定でない試験において、式(7)に循環終了時の熱交換量  $q_{final}$  を使用し、循環時間  $t_b$  として式(9)に示す有効循環時間  $t_{p(effective)}$  を用いることにより、熱交換量変動の影響を解析に反映することができる（藤井・秋林, 2002）。

$$t_{p(effective)} = (\text{循環期間中の累計熱交換量}) / q_{final} \quad (9)$$

一方、回復時法では熱交換井内に温度センサー

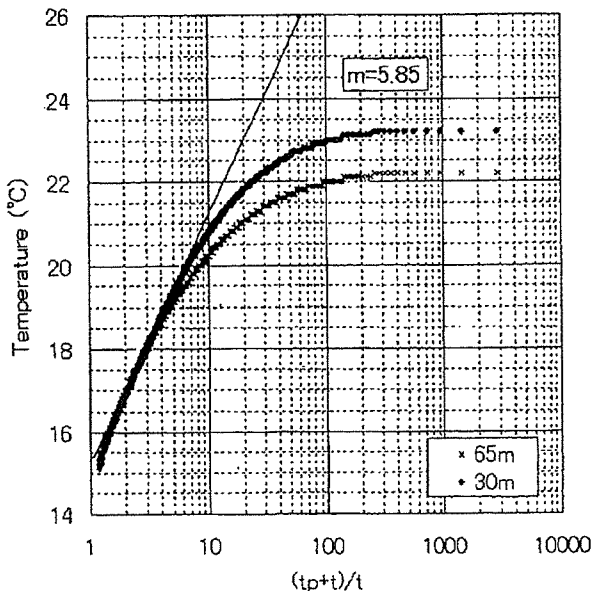


Fig.5 Example of a Horner plot in a recovery test (Fujii et al., 2002).

を埋設する必要がある。循環時法と比べると実施に追加費用が必要である。しかし、熱交換井内に埋設した温度センサーは GeoHP システム設置後のモニタリングに重要であるため、数点設置しておくことが望ましい。また回復時法では、不均質性の大きい地盤においては深度方向の熱交換量に差があるため、式(7)における各温度センサー位置での単位長さ当たり熱交換量  $q$  は総熱交換量を坑井長さで除した値とは異なる。不均質性の大きい地盤における  $q$  の決定法などを含む温度応答試験解析については、4-(2)節に紹介する。

熱交換井における熱抵抗は、グラウト材や熱交換器における熱通過、熱交換器内の熱媒体と熱交換器との対流熱伝達において生じる。  $R$  [mK/W] の熱抵抗とは、単位長さ当たり 1W 熱交換する場合に、  $R$  [K] の熱抵抗による温度低下があることを表し、熱抵抗を考慮すると式(4)は以下のように書きかえられる。

$$T - T_i = \frac{q}{2\pi\lambda L} \left( -\ln \frac{r}{2\sqrt{\alpha_c t}} - 0.2519 \right) + qR \quad (10)$$

熱交換井の熱抵抗は、作図法を用いて熱伝導率  $\lambda$  を求めた後、式(10)を用いて求めることができる。

### 3-(2) ヒストリーマッチング法

ヒストリーマッチング法は、循環時における熱媒体の熱交換井入口温度を入力値とし、地盤の見かけ熱伝導率などをマッチングパラメータとして解析解に基づいて熱交換井出口温度を計算し、計算値と実測値のヒストリーマッチングにより地盤の見かけ熱伝導率などを推定する。地層内の熱伝導計算には、ケルビンの線源関数と比べて熱交換量の大きな変化や熱交換井周辺の温度挙動を精度よくあらわすことができる円筒型熱源関数の利用が好ましい (Deerman and Kavanaugh, 1990)。円筒型熱源関数  $G$  は以下の条件下における地層内の熱伝導について導かれた解析解である。

- 熱交換量は時間とともに変化せず、また深度方向に関して一定である。
- 地層は均質である。
- 熱の移動は半径方向のみである。

円筒型熱源関数  $G$  は熱源の中心からの無次元

距離  $P$  の点における、フーリエ数  $Z$  に相当する時間経過後の温度変化を示し、式(11)であらわされる。

$$G(Z,P) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{e^{-\beta^2 Z} - 1}{J_0^2(\beta) + Y_0^2(\beta)} [J_0(P\beta)Y_1(P\beta) - J_1(P\beta)Y_0(P\beta)] \frac{d\beta}{\beta^2} \quad (11)$$

$$Z = \alpha_s t / r_0^2 \quad (12)$$

$$P = r / r_0 \quad (13)$$

ただし、 $J_0$  および  $J_1$  は第1種ベッセル関数、 $Y_0$  および  $Y_1$  は第2種ベッセル関数である。式(11)であらわれる  $G$  は数値積分を用いた計算が必要のため、多ステップの計算には大きい計算時間が必要とされる。通常の熱交換井の温度挙動計算は、式(13)において  $P=1$  のケースに相当するので、 $P=1$  とした場合の  $G$  の近似式を用いることにより、計算時間の大幅な削減が可能となる (Fuji et al. 2003)。以下に  $Z$  の範囲に応じた  $G$  の近似式を示す。

$$Z < 1 \quad G = 0.1443Z^{0.3374} - 0.0162 \quad (14)$$

$$1 < Z < 100 \quad G = 0.5414Z^{0.0036} - 0.4166 \quad (15)$$

$$100 < Z \quad G = 0.1827 \log_{10} Z + 0.0668 \quad (16)$$

ヒストリーマッチング法では以下の式(17)を用いて熱交換井外壁温度  $T_m$  を計算し、式(18)に基づいて熱媒体平均温度  $T_{ave}$  を求める。

$$T_i - T_m = \frac{q_{ec}}{\lambda_s L} G(Z,P) \quad (17)$$

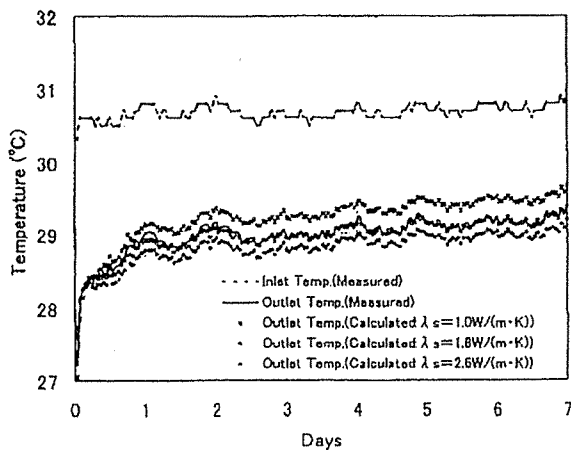


Fig.6 Example of history matching in a circulation test (Fuji and Akibayashi, 2002).

$$q_{ec} = (T_{ro} - T_{ave}) h_{ec} / L \quad (18)$$

熱媒体平均温度は入口温度と出口温度の平均値であるため、入口温度を与えることにより出口温度が計算され、この出口温度の計算値と実測値のマッチングを行う。式(18)中の総括熱伝達率  $h_{ec}$  はグラウト材や熱交換器における熱抵抗と熱交換器内の熱媒体と熱交換器との対流熱伝達率より算出する。

なお、熱交換量  $q_{ec}$  が一定ではない温度応答試験では、式(17)に重ね合わせの原理を適用し熱交換量の変動を考慮する。ヒストリーマッチング法の理論については藤井 (2002) に詳説されている。Fig.6 に地盤の熱伝導率を変化させて求めた熱交換井出口温度のマッチング例を示す。熱伝導率が  $1.8 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  において熱交換井出口温度の良好な一致が得られている。

#### 4. 最近の技術動向

本章では、近年の温度応答試験や地中熱交換法に関して発表された新技術や知見について簡単に紹介する。

##### 4 - (1) 地下水流れの影響

前出の Table 1 に示されるように、地下水流れの存在は温度応答試験において見かけ熱伝導率に

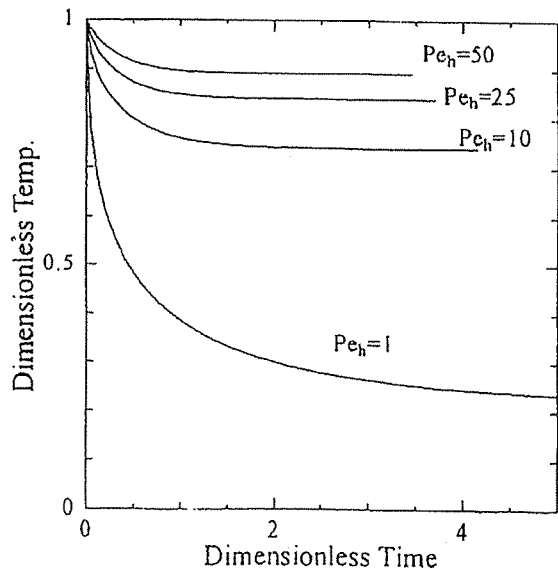


Fig.7 Dependency of the average temperature in the heat extraction region on the Peclet number, Peh (Niibori et al., 2002).

大きな改善効果を与える場合がある。地下水流れが地中熱交換に影響を及ぼす流速については、新堀ほか (2002) が有限差分法を用いた数値モデルにより検討を行い、ペクレ数 ( $Pe_h = \frac{ul}{\alpha_s}$ ,  $u$ : 地下水流速,  $l$ : 地中熱交換器外周/2,  $\alpha_s$ : 地層温度伝導率) が1以下の場合、熱伝導による熱移動が移流による熱移動と比較して優勢であることを示した。Fig.7 は異なる  $Pe_h$  における、無次元時間と熱抽出部における温度低下の関係を示す (新堀ほか, 2002)。 $Pe_h=1$  においては熱抽出に伴い坑井温度は低下し続けるが、 $Pe_h=10$  以上では坑井温度は抽熱開始後短時間のうちに (実際の時間に換算して数時間) に定常状態になることがわかる。なお、地中熱交換器外径0.128m (外径0.034m のダブル U 字管を1本の熱交換器とみなす)、地層温度伝導率  $3.0 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$  とした場合、 $Pe_h=1$  は  $u=0.129\text{m/day}$  に相当する。また、新堀ほか (2002) が示した地下水流れが地中熱交換に影響を及ぼす  $Pe_h$  の範囲は、木村ほか (1988) が積分法を用いた解析と数値計算との比較によって得た結果と良く整合している。

岩田ほか (2005) は、長野県大町市の地下水流速が極めて大きい (約12m/day) 地盤において、非充填、および珪砂またはセメント充填と、坑井内の充填条件を変えたダブル U 字管型熱交換井において強制負荷試験を行った。夏季強制負荷試験における熱交換量は、セメント充填試験において 208W/m、珪砂充填において 247W/m、非充填の場合 368~383W/m となり、いずれの場合も地下水流れのない熱伝導型地盤が示す 30~40W/m (濱田ほか, 1996) と比べてきわめて高い熱交換量が得られた。また、坑井内を充填せず地下水で坑内を満たす坑井仕上げは、流速の大きい地下水の流れのある地盤では、地下水が直接地中熱交換器と接触して大きな熱交換量が得られるため、低コストで高効率な仕上げ法であることが示された。

上記のように、流速の大きい地下水流れが存在する場合、温度応答試験において大きい見かけ熱伝導率と地中熱交換量が得られる。一方、温度応答試験において存在が推定されない程度の遅い地下水流速下でも、複数の熱交換井が存在する

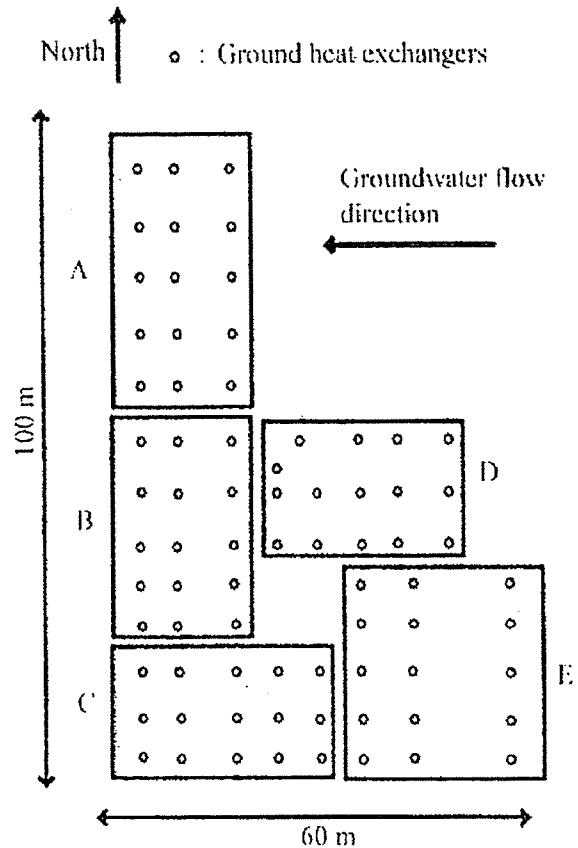


Fig.8 Location of heat exchange wells in a large-scale GeoHP system in Akita Plain (Fujii et al., 2005).

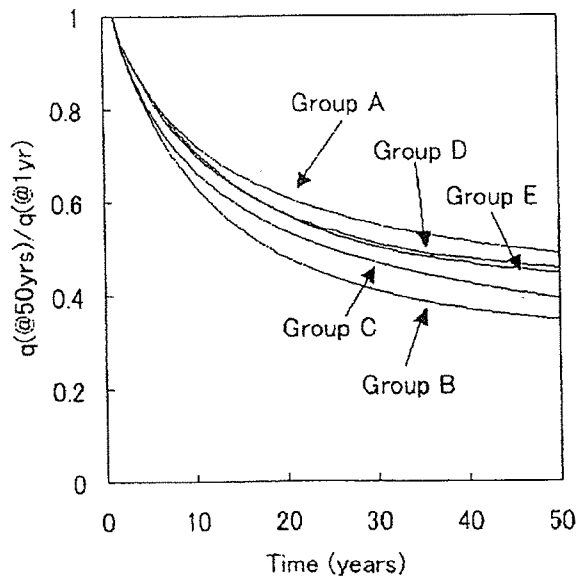


Fig.9 Comparison of heat extraction rates in each well group (Modified from Fujii et al., 2005).



GeoHP システムでは、熱交換井の配置が長期的な熱交換挙動に影響を及ぼす場合がある。Fig.8 は 秋田市内に設置された大型 GeoHP システムにおける、深度 50m の熱交換井配置を表す (Fujii et al. 2005)。75本の熱交換井は位置に応じてグループ A から E の5グループに分けられている。現位置での地下水流向・流速は広域流動系モデリングより東から西に向けて  $1.4 \times 10^{-4} \text{m/day}$  と推測されており、対応する  $Pe_h$  は約 0.001 となるため、熱交換井における熱移動は熱伝導が支配的と考えられる。地下水シミュレーションソフト FEFLOW (Diersch, 2002) を用いて計算した、それぞれのグループにおける50年間の平均採熱量の変化を Fig.9 に示す。なお、採熱においては熱媒体平均温度を  $0^\circ\text{C}$ 、採熱期間は年間4ヶ月とし、夏期の蓄熱運転は行わないこととした。Fig.9 に示されるように、地下水流れの上流に位置するグループ A, D, E と、これらグループの下流に位置するグループ B, C においては長期的な採熱量の低下に大きな差が認められた。すなわち、複数坑井が存在する GeoHP システムにおいて長期的なシステム運転挙動を予測する場合には、流速の小さい地下水流動の存在も考慮すべきと考えられる。

なお、広域的な地下水流動系のモデリング、地下水面の探査、地下水流速などについては、今後の本講座において解説される予定である。

#### 4 - (2) 光ファイバー温度計を用いた温度応答試験

これまでに述べたように、一般的な循環時の温度データを用いた温度応答試験では、U字管や同軸管などの地中熱交換器に熱媒体を循環し、熱交換井入口出口温度の経時変化より地盤の熱伝導率を推定する。したがって、推定される熱伝導率は熱交換井全体の平均値であるため、不均質性の大きい地盤において熱伝導率分布を推定し、熱伝導率の大きい区間から重点的に採熱を行うといった、地盤情報に基づく熱交換井長さの最適化を行うことはできない。

光ファイバー温度計は、光ファイバに入射したレーザーパルス光により、光路のガラス分子から発生するラマン散乱光の強さの温度による違いを

用いて温度を測定する温度計である。光ファイバー温度計は坑井の深度方向に連続的な温度測定が可能であるため、不均質性の大きい地盤において熱物性値の深度方向分布の推定に用いることができる。

光ファイバー温度計を用いて地盤の熱伝導率分布を推定する試みは神宮司ほか (2002) による貫入試験装置と組み合わせた測定法、藤井ほか (2005) による地中熱交換井を用いた測定法がある。神宮司ほか (2002) の測定法では、直径 0.02~0.04m の中空ロッドを地盤に貫入して、その後ロッド中に光ファイバーセンサーとケーブルヒーターを挿入する (Fig.10)。温度応答試験では、ヒーターに通電して地盤に熱負荷を与え、加熱に伴う温度上昇データにケルビンの線源理論を適用し、地盤の熱伝導率の深度方向分布を算出する。

#### 光ファイバ温度計測装置

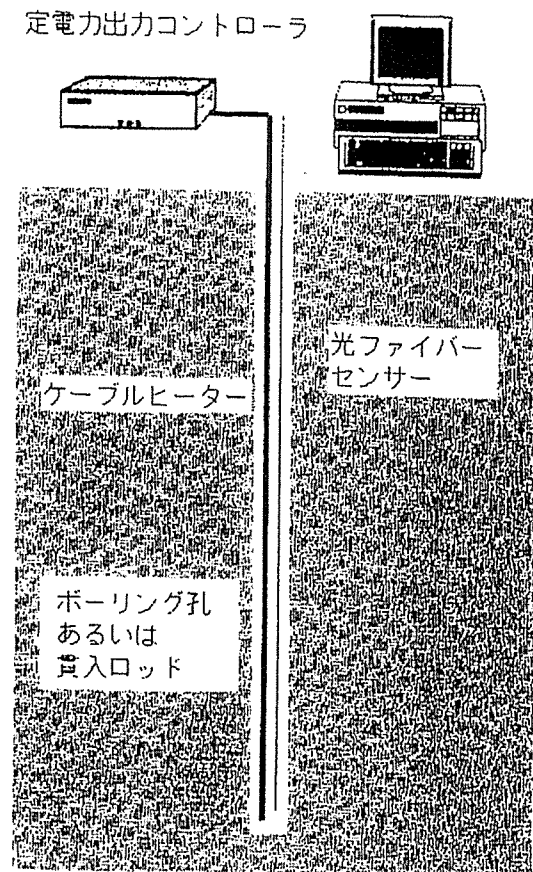


Fig.10 Schematic drawing of thermal response test equipments using optical fiber temperature sensors by Jinguji et al. (2002)

この方法は、地層の熱物性の不均質性によらず均一な熱負荷を地盤に与えることができるため、熱伝導率推定の信頼性が高いと考えられる。また小口径の孔を用いることができるため、地盤と熱容量や熱伝導率が異なる熱交換井内の素材の影響が短時間で無視できるようになり、計測時間が短縮できるという長所も有する。一方、貫入試験機装置の使用は、岩盤やれき層などにおいては難しいため、このような場合は掘削装置の併用が必要となる。

地中熱交換井を用いた藤井ほか(2005)の方法では、同軸型熱交換井やU字管型熱交換井に光ファイバー温度計を埋設して、熱媒体循環中に熱交換井全体の温度変化を計測する。この方法では循環中の熱交換量が深度方向に対して一定ではなく、各深度の熱伝導率と相関しているため、試験解析では地層を深度方向に0.5m~1m間隔程度

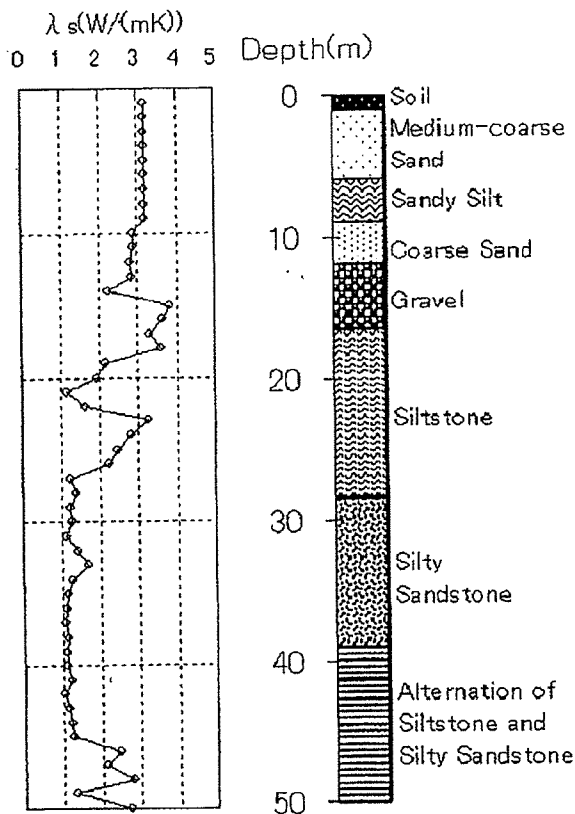


Fig.11 Estimated thermal conductivity distribution from thermal response tests and geological column in Fukuoka city, Japan (Fujii et al., 2005).

(一般的な光ファイバー温度計の最小分解能)に分割し、熱伝導率分布をパラメータとして、非線形回帰法を用いて試行錯誤的に深度ごとの熱交換量と熱伝導率を推定する。福岡市東区の九州大学箱崎キャンパス内で実施された温度応答試験データを用いて推定された地盤の熱伝導率と、同坑井での地質柱状図を Fig.11 に示す。同坑井では地表より深度17mまでは透水性の高い砂礫層であり、周辺の揚水井の実績より地下水流れが存在すると推定されるが、この区間において高い熱伝導率が算出されている。一方、17m以深は透水性の低いシルト岩や泥岩からなるが、これは推定された低熱伝導率と調和している。地中熱交換井に設置した光ファイバー温度計を用いる温度応答試験は解析がやや複雑であるが、実際に使用する熱交換井を使用できるため、小さい追加コストで有用な地盤情報が得られる試験法と考えられる。

#### 4-(3) 自然対流を考慮した解析

水の熱伝導率(20℃において $\lambda_w=0.594W/(mK)$ )は地盤の熱伝導率(土壌では $\lambda_s=1.0W/(mK)$ 以上、岩盤では $\lambda_r=5.0W/(mK)$ 以上のこともある)と比べて小さいため、4-(1)に示したような地下水流速が大きいケースを除くと、非充填の熱交換井仕上げは熱交換量を減少させると推測される。しかし、熱媒体温度と地盤の温度差による熱交換井内の自然対流が生じる場合には、非充填仕上げにおいても充填仕上げと変わらないか、またはそれ以上の熱交換量が得られる場合がある(藤井ほか, 2002)。

自然対流の程度を表すグラスホフ数  $Gr$ 、レイリー数  $Ra$  はそれぞれ式(19)、(20)で表される。

$$Gr = g\beta\Delta TW^3/\nu^2 \quad (19)$$

$$Ra = Gr Pr \quad (20)$$

レイリー数などの範囲により、自然対流の形態は層流境界層型および乱流型に分類され、それぞれにおけるヌセルト数  $Nu$  は式(21)および(22)で表される。(MacGregor and Emery, 1969)。

$$Nu = 0.42Ra^{1/4} (W/L)^{0.30} Pr^{0.012} \quad (21)$$

ただし、 $10^4 < Ra < 10^7$ ,  $1 < Pr < 20000$ ,

$$10 < L/W < 40$$

$$Nu = 0.046Ra^{1/3} \quad (22)$$

ただし、 $10^6 < Ra < 10^9$ ,  $1 < Pr < 20$ ,  $1 < L/W < 40$

熱交換井のアニユラス部（熱交換器の外壁と坑壁の間）における有効熱伝導率  $\lambda_e$  は、Nu の熱伝導率  $\lambda_w$  より式 (23) を用いて計算される (Holman, 1976)。

$$\lambda_e = Nu \lambda_w \quad (23)$$

3-(2)節にて紹介したヒストリーマッチング法と式(19)~(23)を組み合わせて行った温度応答試験解析結果を Fig.12 に示す。温度応答試験では秋田市のシルト混じり細粒砂層に設置された非充填仕上げ熱交換井において、シングル U 字管を深度 50m まで挿入して熱媒体の循環を行った。Fig.12 における熱媒体の熱交換井出口温度の実測値と計算値の比較より、非充填仕上げ熱交換井における温度応答試験の結果の再現には自然対流の考慮が不可欠であることがわかる。

次に、採熱時（暖房時）および排熱時（冷房時）における非充填仕上げの地中熱交換井のアニユラ

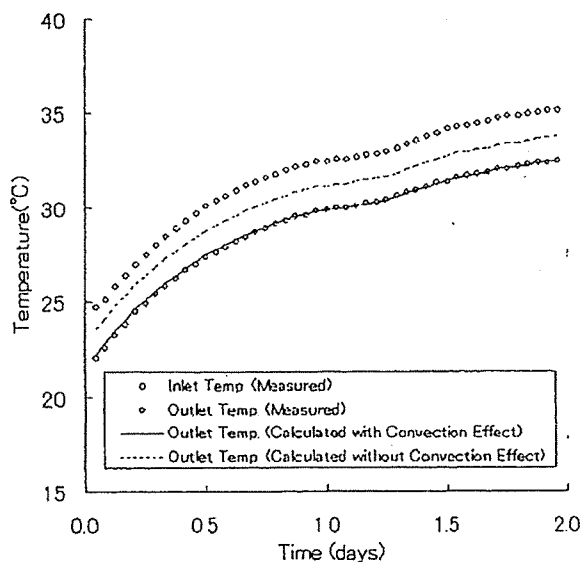


Fig.12 History matching result of well outlet temperatures using an analytical model considering natural convection effects (Fujii et al., 2002).

Table 2 Effective thermal conductivities in cooling and heating operation modes.

Operation Mode	Ave. Water Temp. (°C)	Pr	Ra	Nu	$\lambda_e$ (W/(mK))
Cooling	35.0	5.55	$6.11 \times 10^6$	8.41	5.15
Heating	5.0	11.59	$1.77 \times 10^5$	1.12	0.63

ス部における有効熱伝導率を式(19)~(23)を用いて試算する。試算では熱交換井外壁温度と坑壁との温度差を 2℃、距離を 0.05m、熱交換井深さを 50m とし、採熱時・排熱時における熱交換井外壁温度はそれぞれ 5℃、30℃ とする。計算結果を Table 2 に示す。有効熱伝導率はアニユラス部を満たす水の物性値の温度依存性により異なり、排熱時・採熱時でそれぞれ、5.15W/(mK)、0.63W/(mK) と計算された。これより、上記の試算で与えた限られた条件下であるが、排熱時における有効熱伝導率は良熱伝導性のグラウト材である珪砂の熱伝導率（水飽和状態にて測定した 2 号珪砂の熱伝導率 2.22W/(mK)）を上回り、排熱が主目的の GeoHP システムでは、非充填仕上げはコストを削減しつつ熱交換量を改善する仕上げとなりうると判断された。一方、採熱時の有効熱伝導率は一般的なグラウト材の熱伝導率を下回るため、採熱が主目的の GeoHP システムでは熱交換井内を充填するべきという結果が得られた。

## 5. まとめ

システム設置における初期コストに関して、空気熱源エアコンとの競争力が充分ではない GeoHP システムの現状を考えると、適正規模の地中熱交換井本数・長さの決定は GeoHP システムの採算性向上にきわめて重要である。したがって、精度の高い温度応答試験の実施は今後一層の GeoHP システムの普及に重要な役割を果たすと考えられる。温度応答試験が一般的に行われるようになったのは1990年代であり、これまでの研究開発では明らかにされていない要素が多く存在すると考えられる。したがって、今後も研究・実践を通じて、より簡便かつ信頼性の高い温度応答試験方法を確立することが重要と考えられるが、本稿が GeoHP システム設計者や研究者に参考になれば幸いである。

## 謝辞

本稿の作成において貴重な助言を賜った九州大学大学院系井龍一教授および一連の温度応答試験の実施においてご支援をいただいた三菱マテリアル資源開発株式会社の皆様に感謝の意を表します。

## 記号の説明

$g$	: 重力加速度	[m/s <sup>2</sup> ]
$G$	: 円筒熱源関数	[-]
$Gr$	: グラスホフ数	[-]
$h_{eq}$	: 管壁における総括熱伝達率	[W/(m <sup>2</sup> K)]
$J$	: 第一種ベッセル関数	[-]
$l$	: 地中熱交換器外周	[m]
$L$	: 地中熱交換器長さ	[m]
$m$	: 傾き	[°C/cycle]
$Nu$	: ヌセルト数	[-]
$P$	: 無次元距離	[-]
$Pe_h$	: ペクレ数	[-]
$Pr$	: プラントル数	[-]
$q$	: 単位長さあたり熱交換量	[W/m]
$q_{gr}$	: 地中熱交換量	[W]
$r$	: 坑井中心からの半径	[m]
$r_o$	: 地中熱交換器外側の半径	[m]
$R$	: 熱抵抗	[mK/W]
$Ra$	: レイリー数	[-]
$t$	: 時間	[s]
$t_p$	: 循環時間	[s]
$T$	: 温度	[°C]
$T_{ave}$	: 熱媒体平均温度	[°C]
$T_i$	: 初期地層温度	[°C]
$T_{ro}$	: 熱交換外管外壁温度	[°C]
$T_s$	: 循環停止後温度	[°C]
$u$	: 地下水流速	[m/s]
$W$	: 熱交換器外壁と坑壁との距離	[m]
$Y$	: 第2種ベッセル関数	[-]
$Z$	: フーリエ数	[-]
$\alpha_s$	: 地層温度伝導率 (熱拡散率)	[m <sup>2</sup> /s]
$\beta$	: 膨張率	[1/K]
$\lambda_e$	: 有効熱伝導率	[W/(m·K)]
$\lambda_r$	: 岩石の熱伝導率	[W/(m·K)]
$\lambda_s$	: 地層の熱伝導率	[W/(m·K)]
$\lambda_w$	: 水の熱伝導率	[W/(m·K)]
$\nu$	: 動粘性係数	[m <sup>2</sup> /s]

## 引用文献

Austin, W.A. III (1998) M.S. Thesis, Oklahoma State Univ., 164p.  
 Deerman, J.D. and Kavanaugh, S.P. (1990) Simulation of

vertical U-tube ground-coupled heat pump systems using the cylindrical heat source solution. ASHRAE Transaction, 3472, 287-295.  
 Diersch, H.-J.G. (2002) FEFLOW reference manual. Institute for Water Resources Planning and Systems Research Ltd, 278 p.  
 藤井光・秋林智 (2002) 大地結合ヒートポンプシステム熱交換井設計における温度応答試験解析. 資源と素材, 118, 75-80.  
 藤井光 (2002) 大地結合ヒートポンプシステムにおける熱交換井設計についての最適化手法の検討. 日本地熱学会誌, 24, 29-46.  
 Fujii, H., Akibayashi, S. and Ohshima, K. (2002) Interpretation of Thermal Response Tests in Shallow Deposits. GRC Transactions, 26, 143-148.  
 藤井光・秋林智・大島和夫 (2002) 大地結合ヒートポンプシステムにおける熱交換井の評価 - 熱交換井内の地下水自然対流の影響 -. 日本地熱学会誌, 24, 329-338.  
 藤井光・久保博晃・中尾利豊・糸井龍一 (2005) 不均質地層における同軸型熱交換井の温度挙動解析. 日本地熱学会誌, 27, 223-232.  
 Fujii, H., Itoi, R., Fujii, J. and Ishikami, T. (2004) Improvements on Analytical Modeling for Vertical U-Tube Ground Heat Exchangers. GRC Transactions, 28, 73-77.  
 Fujii, H., Itoi, R., Fujii, J. and Uchida, Y. (2005) Optimizing the design of large-scale ground-coupled heat pump systems using groundwater and heat transport modeling. Geothermics, 34, 347-364.  
 濱田浩弘・落藤澄・長野克則・中村真人・永坂茂之 (1996) 垂直埋設 U 字管を用いた地中蓄熱型冷暖房システムの実験と解析. 空気調和・衛生工学会論文集, 61, 44-55.  
 Ingersoll, L.R., Zobel, O.J. and Ingersoll, A.C. (1954) Heat conduction with engineering, geological, and other applications. McGraw-Hill, New York, 325p.  
 岩田宜己・小林利文・深谷彦三郎・横原恵一・新堀雄一 (2005) 地下水流動を考慮した地中熱利用ヒートポンプの実証試験. 日本地熱学会誌, 27, 307-320.  
 神宮司元治・竹原孝・山口勉・国松直 (2002) 貫入試験装置を用いた原位置地盤熱伝導率探査法. 日本地熱学会誌, 24, 349-356.  
 木村繁男・米谷道夫・池庄司民夫・白石正夫 (1988) 地熱貯

- 留層内に埋設された超大型ヒートパイプへの集熱量評価方法 (第2報). 日本地熱学会誌, 10, 51-68.
- 盛田耕二・山口勉・唐澤広和・速水博秀 (1984) 地熱井内温度解析プログラムの開発と検証 - 地熱井内外の温度挙動の解析 (第1報) -, 日本鉱業会誌, 100, 1045-1051.
- 盛田耕二・田子真 (2002) 青森市内の浅部未固結堆積層の有効熱伝導率と熱容量の推定. 日本地熱学会平成14年学術講演会講演要旨集, A13.
- 長野克則・落藤澄・西岡純二 (1994) 土壌熱源ヒートポンプシステムに関する研究 (第2報). 空気調和・衛生工学会論文集, 56, 25-34.
- 長野克則・葛隆生・野川貴史・武田清香・土屋敦史・成田樹昭・岡本淳・寺嶋由香利・生駒裕勝・中村靖・柴田和夫 (2004) 小型熱応答試験機の製作と実測結果の解析. 地下熱利用とヒートポンプシステム研究会第2回研究発表会資料集, 9-10.
- 新堀雄一・岩田宜己・森不可止・深谷三郎 (2002) 坑井を用いた地中熱利用 HP の設計と地下水流動の関係についての一考察. 日本地熱学会誌, 24, 339-348.
- Sanner, B., Hellstrom, G., Spitler, J. and Gehlin S. (2005) Thermal Response Test -Current Status and World-Wide Application. Proc. WGC2005, CD, 1-9.
- 田子真・盛田耕二 (2006) 講座「地中熱利用ヒートポンプシステム」熱交換器の地中への設置. 日本地熱学会誌, 25, 125-139.
- 高橋洋 (2003) 白神山地での地中熱利用. 地熱エネルギー, 28, 47-56.

