地中熱交換器内の熱媒体温度挙動を用いた 地層別有効熱伝導率の推定

阪田 義隆¹・葛 隆生²・翟 健³・長野 克則⁴

¹正会員 北海道大学大学院特任助教 工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北13西8)

E-mail: y-sakata@eng.hokudai.ac.jp

²非会員 北海道大学大学院准教授 工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北13西8)

E-mail: katsura@eng.hokudai.ac.jp

³非会員 新菱冷熱工業株式会社・元 北海道大学大学院博士後期課程 (〒160-8510 東京都新宿区四谷2-4)

E-mail: zhajjian0117@gmail.com

⁴非会員 北海道大学大学院教授 工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北13西8)

E-mail: nagano@eng.hokudai.ac.jp

本研究では、地中熱交換器の熱応答試験において、2本の光ファイバー温度計をUチューブに挿入し、熱媒体の行き還りの温度挙動を測定することで、地層別の有効熱伝導率を推定する手法を提案する。従来の線熱源理論に基づく解析法を適用し、計算に必要となる温度の時間変化は光ファイバー温度計の多点測定データから層内で平均し、熱交換量は温度の深度勾配の行き還りの和から求める。その際、測定データは系統誤差の校正と偶然誤差を最小とする平均処理で補正する。北海道旭川市での解析事例では、有効熱伝導率は層厚20m以上で安定した推定値が得られ、最上位の砂礫層の値は他2層より約1.5倍高い結果となった。また3層の層厚重み付け平均は従来法の結果と整合し、スムージング、ブートストラップ法、回復時法とデータ処理を変えても結果に差はなかった。

Key Words : *effective thermal conductivity, thermal response test, fiber-optic distributed temperature sensor, line heat source theory, multi-layered formation*

1. はじめに

(1) 研究の背景

地球温暖化対策としてのCO₂排出抑制と東日本大震災以降のエネルギー需給の急変により、一層の省エネルギー化と再生可能エネルギーの利用拡大が求められている。最新のエネルギー基本計画¹⁾によれば、2030年度には2013年度に比べ省エネルギーと再生可能エネルギーの利用により約4割の総発電電力量の削減を目標としている。また再生可能エネルギーの利用は現在、太陽光発電などへ偏りが見られ、多様なエネルギーへの分散による安定利用と導入コスト削減が課題となっている。

再生可能エネルギーの内、地中熱は深度200 mより浅い地盤に賦存する温度が数10℃以下の低温の熱エネルギーとして定義される²⁾。地中熱の起源は、太陽光が地表面を通じ地中へ伝熱したエネルギーの蓄積であり、深部熱流体を起源とする地熱エネルギーと区別される。地温は一般に気温に比べ安定するため、特に夏、冬での温度

差を利用し、建物の空調設備の熱源として利用する。このための地中熱交換器（ボアホール）、ヒートポンプ、二次側設備など一体を地中熱利用ヒートポンプシステム（Ground Source Heat Pump System: GSHPs）と呼ぶ。

地中熱は、他エネルギーに比べ、どこでもだれでもいづつでも利用できるユニバーサル性が特徴であるほか、地中熱ヒートポンプは特に暖房運転時には高いエネルギー消費効率（COP）を実現し、また冷房運転時には大気へ排熱せず環境負荷が小さいメリットがあり、特に欧米を中心に普及が進んでいる³⁾など。一方、わが国では諸外国に比べ普及が遅れており、その要因として、冷房用として高効率の空気熱源ヒートポンプ（エアコン）が既に普及していることに加え、地中熱交換器設置時の初期コストが挙げられる。わが国の場合、土地の制約や地下水揚水規制などから、鉛直方向に地中熱交換器を埋設し、水や不凍液などの熱媒体を循環させ間接的に採放熱する、垂直埋設方式のクローズド型が主流である。その設置深度は100 m前後が多く、大規模施設になると10～100 本単位、

掘削の総延長は数～数10 kmに達することもある。このため、更なるGSHPsの普及促進のためには、地中熱交換器の設置コストの軽減や適正化が課題となっている。

(2) 地盤の有効熱伝導率と熱応答試験

地中熱交換器の熱交換量を左右する地盤特性が有効熱伝導率である。有効熱伝導率は、地層を構成する土粒子などの個体部分と間隙率と飽和度により決まり、粘土や火山灰のように間隙が大きい材料の場合、有効熱伝導率は1.0 W/(m·K)程度と低く、緻密な花崗岩の場合3.0 W/(m·K)程度の高い値となる⁴⁾。比較的地質が単調な欧米に対し、わが国の場合、地質はより複雑であり、特に地中熱利用が期待される都市部の堆積平野には、異なる有効熱伝導率の地層が互層を形成し、地中熱交換器の性能は地域や箇所で異なることが多い。これら地層の内、早い地下水流れがある帯水層が分布する場合、熱の移流効果により見かけ上、有効熱伝導率が高くなる。わが国の代表的なGSHPs設計性能予測ツールであるGround Clubを用いた感度解析の結果では、地下水流速が300 m/yを超えると、有効熱伝導率は見かけ上、数～10倍以上になる⁵⁾。特に地下水流動系の流出域（湧水箇所）、高い動水勾配と透水性が期待できる地域（扇状地など）あるいは、地下水との交流が活発な河川周辺などで、移流効果による地中熱交換器の性能向上が期待できる。

熱応答試験（サーマルレスポンステスト）は、GSHPs設計時あるいは設計後の性能確認時に、実際の地中熱交換器を用いて、地盤の有効熱伝導率を推定する試験である。80年代より欧米で開発が進み⁶⁾⁷⁾、我が国でも紹介されてきた⁸⁾⁹⁾。現在は、そのガイドラインが環境省や国交省にて策定され¹⁰⁾¹¹⁾、環境省や東京都の関連補助金の交付を受ける際も実施が義務付けられている。

熱応答試験では、地中熱交換器の採熱管（Uチューブ）内で熱媒体を一定条件で加熱し、その循環温度を地表部で測定する。熱媒体の行き還りの温度差から、熱交換器全体での地盤との熱交換量を求め、Kelvinの線熱源理論を地中熱交換器の温度挙動に適用した解析的手法¹²⁾により、有効熱伝導率を推定する。得られる有効熱伝導率は、地中熱交換器全体の平均的な値として解釈される。熱媒体を加熱・循環して行うため、「加熱時法」あるいは「循環時法」とも呼ばれるが、ここでは提案する手法と比較するため、「従来法」と称することとする。

(3) 熱応答試験における地層別有効熱伝導率の推定

地質が複雑なわが国の場合、地中熱交換器を埋設する深度100 m程度まで単一の地層で構成されることは稀であり、地盤の有効熱伝導率は深度毎に変化すると想定される。特に地下水が豊富な地域では、高透水性の地層に地下水流れが卓越する可能性もある。こうした有効熱伝

導率の地層別の分布を把握できれば、値の高い地層に着目した地中熱交換器の配置により、効率的な地中熱利用が可能になると期待される。

熱応答試験により、地層別有効熱伝導率を把握する最も直接的な方法は、異なる深度に地中熱交換器を設置し、それぞれで熱応答試験を行うことである¹³⁾。しかしながら、試験用の熱交換器の設置費用を考えると現実的ではない。このため、単一の地中熱交換器を用いて、従来の熱応答試験の延長として、地層毎あるいは一定深度毎の有効熱伝導率を推定する手法が求められる。

有効熱伝導率の分布は試験中の地下温度の挙動や分布に反映される。この地下温度測定に際し、熱応答試験においては、光ファイバー温度計の利用が着目される。光ファイバー温度計では、光ファイバーにパルス光を入射し、ファイバーに沿った各点で生じる後方ラマン散乱効果の温度依存を利用して温度を測定する¹⁴⁾。数km先まで光信号の損失が少ないため、深度100 m程度の地中熱交換器内でも多点測定が可能である。また、光ファイバーの径も小さく、内径数10 mmのUチューブに挿入しても熱媒体の循環を妨げることなく、温度測定が可能である。既往研究^{15)~19)}では、1本の光ファイバー温度計をUチューブの行き還りのいずれかに挿入もしくはUチューブ外に埋設し、測定温度の挙動が理論解や数値モデルと整合するよう、深度毎の有効熱伝導率を同定する、逆解析的アプローチが採用されてきた。これら研究成果により従来の熱応答試験では得られなかった地中熱交換器周辺の深度別有効熱伝導率が推定可能となったが、特殊な数値計算技術や収束判定が必要であり、実務での活用は未だ少ないのが現状である。

(4) 本研究の目的及び内容

本研究では、2本の光ファイバー温度計を用いて、垂直埋設方式のクローズド型地中熱交換器周辺の地層別有効熱伝導率を推定する熱応答試験法を提案する。先行研究が1本の光ファイバー温度計を用いて測定した温度挙動から深度毎の有効熱伝導率を逆解析するのに対し、本研究では、2本の光ファイバー温度計をUチューブに挿入し、熱媒体の行き還りの温度挙動を測定することで、地層毎の熱交換量を求め、線熱源理論に基づく解析法から地層別有効熱伝導率を推定する。無限線熱源近似が成り立つためには、一定以上の層厚の地層が対象となるが、地中熱交換器の埋設深度が100 m程度、掘削単位が10 m単位であることを考慮すると、地層別有効熱伝導率の推定でも実務上十分であり、従来の熱応答試験の試験・解析法の延長として、より積極的な利用が期待できる。

本論文ではまず、2本の光ファイバー温度計を用いた熱応答試験の概要を示す。次いで線熱源理論に基づく解析的手法を解説し、これを複層地盤へ適用手法を提案す

る。また光ファイバー温度計の測定誤差について考察し、室内試験にて系統誤差の校正と偶然誤差を最小化する平均処理を行う。最後に、北海道旭川市での解析事例を紹介し、有効熱伝導率の推定値の層厚に対する安定性や、従来法での解析結果やデータ処理を変えた場合における解析結果の比較を通じ、本手法の有効性を示す。

2. 試験・解析方法

(1) 光ファイバー温度計を用いた熱応答試験

2本の光ファイバー温度計を用いた熱応答試験の概要を図-1に示す。図-1では、地中熱交換器の下底まで N 層の複層地盤を想定し、 i 層 ($i=1\sim N$) の有効熱伝導率を λ_{si} 、層厚 L_i 、層下底の地表からの深度を z_{bi} としている。各地層の深度分布は、地中熱交換器の施工記録(柱状図)により既知であるとする。また実際の地層構造は水平とは限らないが、熱応答試験で行う加熱時間では周辺温度の影響は限定的なため、近似的に水平多層構造と見なす。

通常の熱応答試験の試験機器は、地中熱交換器、熱媒体の加熱ヒーターと循環ポンプ、Uチューブの地表部で行き還り温度を測定する白金測温抵抗体(Pt100温度計)とデータ集積器(ロガー)で構成される。これらに加え、新たに2本の光ファイバー温度計をUチューブの行き還りにそれぞれ挿入し、試験中の熱媒体の行き還りの温度挙動を測定する。図-1では、熱応答試験での加熱経過時間 τ 、地表からの深度 z に対し、行き・還りの熱媒体の温度がそれぞれ $t_j(z, \tau)$, $j=1, 2$ で示されている。添字の j は熱媒体を、 $j=1, 2$ は行き、還りを表す。光ファイバー温度計は様々なメーカーで販売されているが、本研究では、エーピー・センシング社の測定器(DTS N4385A型)を光信号の受発信機とするエヌケーシステム社の光ファイバー温度情報システム(NK-OPTIS)を用いた。

熱応答試験中、光ファイバー温度計による熱媒体の温度測定を連続的に行う。本研究で用いる光ファイバー温度計の場合、測定の距離間隔 dz 及び時間間隔 $d\tau$ が大きいほど1回あたりの測定値は安定するが、本研究では、 dz , $d\tau$ を小さくすることで分解能を高めるとともに、測定値を各層内で平均化することで精度を高めることとし、深度間隔は地中熱交換器の掘削記録単位が0.5~1 mのため、 $dz=0.5$ m、時間間隔は加熱開始や停止直後に分単位で温度が変化するため、 $d\tau=1$ minとそれぞれ設定した。

(2) 線熱源理論に基づく解析的手法

a) 地中熱交換器全体での有効熱伝導率の推定(従来法)

まず、従来の熱応答試験における線熱源理論に基づく解析的手法を解説する。等方、均質で初期温度一定の無限遠領域にて、地中熱交換器の中心軸に、試験時の熱交

図-1 従来の熱応答試験への光ファイバー温度計の適用概念図

換量(加熱量)を深度当り均等に与えた無限延長の線熱源を考える。この場合、地中熱交換器の周辺温度 t ($^{\circ}\text{C}$)は、加熱経過時間 τ (hr)の対数に対し比例的に上昇する。

$$t(\tau) = k \ln \tau + l \quad (1)$$

ここで、 k は対数時間サイクルにおける温度上昇の勾配($\text{K}/\ln \text{cycle}$)、 l は時間に依存しない定数項($^{\circ}\text{C}$)である。 $t(\tau)$ は、Pt100温度計で測定する地表での行き還り熱媒体温度 $t_{p1}(\equiv t_1(0, \tau))$, $t_{p2}(\equiv t_2(0, \tau))$ の平均とすることが多い。 k は、地中熱交換器内外の温度差が無視できる $\tau=12\sim 60$ hr (最低48 hr)の加熱時間に対し、熱媒体温度を片対数プロットし目視で引いた直線の対数1目盛での変化量として、あるいは式(1)を仮定した最小二乗法から求める⁹⁾。

地中熱交換器の地盤との熱交換量 Q (W)は、熱媒体の行き還りの地表での温度差 Δt (K)から下式で計算する。

$$Q = c_f \rho_f v_f \Delta t = c_f \rho_f v_f (t_{p1} - t_{p2}) \quad (2)$$

ここで、 c_f は熱媒体の比熱($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$)、 ρ_f は密度(kg/m^3)、 v_f は循環流量(m^3/s)である。試験中の加熱ヒーターの出力を一定とすると、 k を推定する一定時間経過した後は、 Q の値もほぼ安定する。これらの値を用いて、地中熱交換器を設置した深度全体での平均的な地盤の有効熱伝導率 $\bar{\lambda}_s$ ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)が求まる。

$$\bar{\lambda}_s = \frac{Q}{4\pi L k} \quad (3)$$

ここで、 L は地中熱交換器の設置深度(m)である。また熱交換器の熱抵抗 R_b ($(\text{m}\cdot\text{K})/\text{W}$)が、加熱を開始した初期段階での温度挙動と地盤の初期温度との差及び熱特性を用いて下式により求まる。

$$R_b = \frac{L(t(\tau) - t_0)}{Q} - \frac{1}{4\pi\lambda_s} \left[\ln \left(\frac{4\bar{a}_s\tau}{r_b^2} \right) - \gamma \right] \quad (4)$$

ここで $t(\tau)$ は加熱後経過時間 τ での熱媒体の平均温度であり、 $\tau = 1 \text{ hr}$ の場合、式(1)の切片 l と一致する。 t_0 は地盤の初期温度(°C)、 $\bar{a}_s$ は温度伝導率(m^2/hr)で、 λ_s を α 及び ρ_s で除した値、 γ はオイラー定数(= 0.5772)である。

近年では、線熱源理論での高次項に着目し逆解析法により、有効熱伝導率のみならず体積熱容量を含めて同定する手法も提案されている²⁰⁾。また加熱中だけでなく、加熱停止後の温度挙動に対しても、線熱源理論を適用することも可能であり、 τ と加熱停止後の経過時間 τ' を用いて λ_s が下式で求めることができる。

$$t = k' \ln \frac{\tau}{\tau - \tau'} + l' \quad (5)$$

$$\bar{\lambda}_s = \frac{Q}{4\pi L k'} \quad (6)$$

ここで、 k' は温度の回復(冷却)過程での温度の対数時間に対する勾配(K/ $\ln \text{cycle}$)であり、 l' は時間に依存しない定数項(°C)である。本手法は加熱時の熱媒体の温度挙動を用いる加熱時法(従来法)に対し、「回復時法」と呼ばれる。回復時法は、試験時間を余分に必要とするが、加熱停止後の温度挙動は、地中熱交換器の熱抵抗の影響を受けず、有効熱伝導率を直接反映するため、深度毎の有効熱伝導率の推定にしばしば用いられる¹¹⁾。

b) 複層地盤の各層の有効熱伝導率の推定(提案法)

本節では、線熱源理論に基づく解析的手法(式(1)~(3))を、光ファイバー温度計による多点測定データを用いて、図-1に示す複層地盤の各層に適用する手法を示す。本来、線熱源理論は無限線熱源を仮定するが、点熱源の重ね合わせで求まる有限線熱源の温度分布も一定層厚以上あれば、熱応答試験が対象とする1~2日程度の短い時間範囲では周辺の温度挙動は一致する²¹⁾。

各層に線熱源理論が成立できると仮定すると、従来法と同様、 i 層($i = 1, 2, \dots, N$)の有効熱伝導率 λ_{si} (W/(m·K))は、式(3)に基づき下式により求まる。

$$\lambda_{si} = \frac{Q_i}{4\pi L_i k_i}, i = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

ここで、 Q_i は i 層の熱交換量(W)、 k_{ij} は i 層を流れる熱媒体温度の対数時間1サイクルの変化勾配(K/ $\ln \text{cycle}$)である。 k_{ij} は、 i 層中の光ファイバー温度計の各測定点での、往き還りの熱媒体温度の時間変化勾配 $k_{ij}(z)$, $j = 1, 2, \dots, n_{zi}$ ≤ $z \leq z_{b(i-1)}$ を従来法と同様、加熱時間(例えば $\tau = 12 \sim 60 \text{ hr}$)に対し、最小二乗法で求め、層内全体で平均して求める。

$$k_i = \frac{1}{2n_{zi}} \sum_{j=1}^{n_{zi}} \sum_{j=1}^2 k_{ij}(z_{b(i-1)} + (jj-1)dz) \quad (8)$$

ここで、 n_{zi} は i 層の光ファイバー温度計の測定点数であ

り、 $n_{zi} = (z_{bi} - z_{b(i-1)}) / dz + 1 = L_i / dz + 1$ である。解析対象層は、線熱源理論が適用できる一定以上の L_i が必要であると考えられるが、その値は各層内の不均質性や試験条件などに依存すると考えられる。このため、本研究では、解析する各層で n_{zi} を徐々に増加させて計算し、その収束性を確認することで、線熱源理論に基づく解析法の各層への適用の妥当性を評価した。

Q_i の計算は、式(2)の Δt_i の代わりに、 i 層での熱媒体の往き還りの深度方向の温度変化の和とする。すなわち、

$$Q_i = c_f \rho_f v_f (\Delta t_{n_i}^{(i)} + \Delta t_{n_i}^{(i)}) \cong c_f \rho_f v_f (-m_i^{(i)} + m_i^{(i)}) L_i \quad (9)$$

ここで、 $\Delta t_{n_i}^{(i)}$, $\Delta t_{n_i}^{(i)}$ は i 層での熱媒体の往き還りの深度方向の温度変化(K)である。測定温度の精度が十分高い場合、 $\Delta t_{n_i}^{(i)}$, $\Delta t_{n_i}^{(i)}$ は各層の上下端の温度差を計算すればよいが、本研究では温度計の測定誤差を考慮し、測定温度の深度分布を線形式で近似し、その勾配から推定する。

$$t_{ij}(z) \cong m_j^{(i)} z + b_j, z_{b(i-1)} \leq z < z_{bi}, j = 1, 2 \quad (10)$$

ここで、 $m_i^{(i)}$, $m_i^{(i)}$ は各層での熱媒体温度の深度方向の勾配(K/m)である。加熱した熱媒体温度が往き還りの過程で徐々に低下する場合、 $m_i^{(i)}$ が負値、 $m_i^{(i)}$ が正値となる。 $m_i^{(i)}$ は、ある観測時点 τ での i 層の温度分布 t_{ij} から、解析する加熱時間(例えば $\tau = 12 \sim 60 \text{ hr}$, 1min間隔の場合, 2880時点)全てに対し最小二乗法で計算し、平均する。厳密には、Uチューブ内の熱媒体温度の深度分布は線形ではないが²²⁾、近似的な線形を仮定することで、効率的に $m_i^{(i)}$ を計算する。なお各層の Q_i の和は、Pt100温度計の往き還り温度から、式(2)で計算する Q との一致を確認する。

$$Q = \sum_{i=1}^N Q_i \quad (11)$$

式(7)~(10)を繰り返すことで、各層の λ_{si} が推定できる。これらと層厚 L_i の重ね合せ平均は、地中熱交換器全体の有効熱伝導率に相当する¹³⁾ことから、従来法の式(3)で求まる $\bar{\lambda}_s$ との一致を確認する。

$$\bar{\lambda}_s = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^N \lambda_{si} L_i \quad (12)$$

なお各層の層厚の和は、全体層厚に等しい($L = \sum L_i$)。

3. 光ファイバー温度計の測定誤差と補正

(1) 熱応答試験における測定温度の誤差

光ファイバー温度計は、熱媒体の循環を損なうことなく、深度100 mの地中熱交換器内での多点測定が可能な利点がある一方、測定精度は従来用いるPt100温度計などに比べ劣り、測定誤差は±1 K程度とされる¹⁴⁾。本研究で用いた測定機器は、光ファイバーの両端から交互に

光信号を発信することで距離減衰の影響を相殺するループ測定法を採用しているが、その場合も誤差は ± 0.5 K程度である。これらの誤差は施設の温度監視など用途によっては十分だが、熱応答試験での熱媒体の行き還りの温度差は通常4 K程度⁸⁾に対し、相対誤差は10～数10%以上となるため、解析への影響が懸念される。

温度計の誤差は、機器特有の系統誤差と、ランダムな偶然誤差に分けられる。Pt100温度計など測定が安定する温度計を使う場合、系統誤差のみに着目し、校正式で補正する²³⁾。一方、光ファイバー温度計は各測定時でのゆらぎによる偶然誤差が大きい。ここで、系統誤差と偶然誤差を合成した標準誤差をそれらの算術和で表す²⁴⁾。

$$e = \gamma_{\alpha} \frac{u}{\sqrt{n}} + \delta \quad (13)$$

ここで、 e は標準誤差 (K)、 u は偶然誤差 (平均ゼロ) の標準偏差 (K)、 n は観測点数、 γ_{α} は標本数 (測定点数) n に対する信頼区間 α (両側) でのスチューデントの分布値で、例えば、 $n=20$ 、 $1-\alpha=0.99$ の場合は $\gamma_{\alpha}=2.845$ である。 δ は系統誤差 (K)であり、一定温度条件下において、十分な観測点数による平均と真値との差とする。

式(13)より n を多くすれば、第1項の偶然誤差が小さくなり、 e は小さくなる。しかしながら熱応答試験では熱媒体の温度が上昇し続けるため、平均区間を増やし n を多くしすぎると、温度上昇が平滑化され、式(8)における各測定点での温度上昇勾配 k_0 の推定精度が低下する。

ここで、光ファイバー温度計の測定を毎分測定とする場合、平均区間の観測時間(min)と観測点数は一致し、これを n_t とする。平均区間での加熱による変動量 $k \ln(60\tau + n) - k \ln \tau$ の1/2を、式(13)に加えた標準誤差を設定する。

$$e = \gamma_{\alpha} \frac{u}{\sqrt{n_t}} + \delta + \frac{k}{2} \ln \left(1 + \frac{n_t}{60\tau} \right) \quad (14)$$

式(14)において、 k は試験毎で異なるが、わが国の一般的な地盤⁴⁾として、式(3)に $q=40$ W/m、 $\lambda_s=1\sim 3$ W/(m·K)を代入すると、 $k=1\sim 3$ K/ln cycleとなる。式(14)より毎分測定で n_t を大きくすると、第1項の偶然誤差が小さくなるが、第3項の加熱による温度上昇による変動が大きくなる。測定誤差 e を最小とする、系統誤差の補正量 ($-\delta$) 及び平均処理区間 n_t は、使用する機器の特性に依存するため、室内実験などで設定することになる。

(2) 室内実験による測定誤差の評価と補正

用いた光ファイバー温度計の測定誤差について、恒温水槽を用いた室内実験により評価を行った。2本の光ファイバー温度計 (ch1, ch2, 各延長100m) を恒温水槽に浸し、恒温水槽内の基準温度を3パターン ($t_c = 11.4$, 28.2, 45.1 °C) に設定し、距離間隔0.5 m, 時間間隔1 min にて、各パターン1時間 (計61点) での度測定を行った。

測定結果の統計値を、表-1にまとめる。表-1では、各

点の測定値と基準水温 t_c の偏差の1時間平均を系統誤差 δ 、偏差の標準偏差を偶然誤差の標準偏差 u とした。また標準偏差 u の正規性の仮説検定結果 (p 値) も示し、検定水準0.05では測定誤差の正規性の仮定を否定しない結果を得た。 δ 'は以下に述べる校正式と平均処理 ($n=20$) で補正した後の偏差平均である。なお、当然ながら温度計は個々で温度特性が異なるため、表-1の結果は今回の観測機器のみに適用される。

表-1より、本研究で用いた測定機器の系統誤差 δ は、恒温槽の基準温度が $t_c=28.2$ °Cの場合にはほぼゼロとなり、それより t_c が低いと測定値は実際より高め、それより t_c が高いと実際より低めに計測される。このため、系統誤差の校正は、単純オフセットによる校正ではなく、 t_c の1次校正式を用いることとし、その係数は、3パターンの t_c におけるch1, ch2での平均測定温度 δ から、最小二乗法により設定した ($\delta = -0.0282 t_c + 0.705$)。

一方、標準偏差は、ch1, ch2とも $u=0.2\sim 0.4$ Kであり、 t_c を変えた場合もその差は比較的小さい。そこで平均化する光ファイバー温度計の観測点数を $n_t=5, 10, 20, 30, 60$ とした場合の、3パターンの t_c に対するch1, ch2での標準誤差 e を、式(14)により計算し比較した (図-2)。なお計算は、 $\tau=12$ hr、 $k=2$ K/ln cycleの条件で行った。これより測定温度を、 $n=20$ (毎分測定で20 min) として平均処理することで、いずれの t_c でも、ch1とch2の標準誤差は、 $e=0.14\sim 0.21$ Kの範囲で最小となる。なお0.2 Kの標準誤差は、熱媒体温度差4°Cの場合の相対誤差5%に相当する。また各層の有効熱伝導率の推定時には、式(8)及び式(10)により各層内の測定データを平均化するため、測定誤差

表-1 2本の光ファイバー温度計(ch1, ch2)の室内実験結果

t_c (°C)	δ (K)		u (K)		p		δ' (K)	
	ch1	ch2	ch1	ch2	ch1	ch2	ch1	ch2
11.4	0.35	0.33	0.24	0.25	0.13	0.84	-0.02	0.13
28.2	0.02	-0.03	0.25	0.32	0.24	0.13	0.12	0.06
45.1	-0.67	-0.55	0.34	0.40	0.19	0.48	-0.12	0.01

図-2 平均区間 n_t を変えた場合の標準誤差 e の変化

の影響は更に軽減される。以上から、本研究では、光ファイバー温度計の測定値は上述の1次校正式と $n=20$ の平均処理により補正した後に、解析に用いることとした。

図-3に、ch1の光ファイバー温度計の測定値、補正値の基準水温に対する偏差 Re (K)を示す。各基準温度で補正前後(上下)を比べると、系統誤差の校正と偶然誤差の平均化で測定誤差が軽減されているのが分かる。補正後の平均偏差は、 $\delta' = -0.06 \sim 0.12$ K (表-1)であり、期待される誤差範囲 (± 0.2 K以内) に収まっている。

測定精度をより高めるには、まず恒温水槽の基準温度のパターンを増やし、系統誤差の校正式の精度を高めることが挙げられる。また偶然誤差の平均時間を超えた長周期の誤差あるいは、誤差自体の自己相関性の議論も必要である。例えば、室内実験では、恒温槽の基準温度が室温よりも20 K以上高い場合 ($t = 45.1^\circ\text{C}$)、ヒーターの加熱周期の影響が現れている(図-3の右下図)。実際の試験でも、昼夜の気温の変動や熱応答試験機に供給する電源のゆらぎやノイズにより平均処理の時間区間を超える長周期の誤差が発生する。この場合、偶然誤差は無相関ではなくなり、熱媒体の温度の時間勾配の推定に際し単純な最小二乗法では最適解が得られないことになる。

このため、次章の解析事例では、系統誤差の校正と偶然誤差の平均処理を行った補正データでの解析に加え、様々なノイズから一定勾配の温度上昇(試験時間相当の長周期信号)を取り出すための高速フーリエ変換(FFT)によるローパスフィルターによりスムージングしたデータでの解析を行った。また誤差の自己相関の影響の可能

性に対し、補正データからランダム標本を作成し、それぞれで有効熱伝導率を計算し、その中央値を採用する、ブートストラップ法²⁵⁾の解析も行い、結果を比較した。

4. 地層別有効熱伝導率の解析事例

(1) 試験の概要

光ファイバー温度計を用いた熱応答試験の解析事例として、北海道上川支庁旭川市街地のGSHPs導入予定現場(北緯 $43^\circ 48.1'$ 東経 $142^\circ 25.1'$)での結果を紹介する。旭川は、大雪山系を源とする石狩川と忠別川など大小支川が合流する氾濫低地に位置し、地下には基盤となる堆積岩や火山噴出物が分布し、それらを覆って砂、泥、礫などの氾濫堆積物が分布する。試験箇所は石狩川の左岸約1 kmに位置し、氾濫堆積物は粗粒な礫層が主体となる。

地中熱交換器の施工は、ボアホールを $\phi 179$ mmで深度101 mまで掘削した後、PE100シングルUチューブ(呼び径32 A, OD: 40 mm, ID: 32 mm)を挿入後、珪砂を充填している。掘削時の記録より深度65 m以深に新第三系の泥岩が基盤、その上位に深度30 mまで更新統の礫混じり粘性土～粘性土が分布し、更にそれを覆って完新統の砂礫層が粘性土や砂を挟みながら地表まで堆積する。このため、地中熱交換器周辺の地層は大きく、第1層(Ag: $L_1 = 30$ m, $z_1 = 30$ m)、第2層(Dc: $L_2 = 35$ m, $z_2 = 65$ m)、第3層(T: $L_3 = 36$ m, $z_3 = 101$ m)に分類することができる。柱状図及び地中熱交換器の模式図を、図-4に示す。

図-3 光ファイバー温度計(ch1)の測定点(縦軸)・時間(横軸)毎の、測定温度—基準温度(上)及び補正温度—基準温度(下)

熱応答試験は、2015年4月20日にPt100温度計を用いて深度0.5m毎に初期地温を測定した後、熱応答試験機を設置し、5月7日9時から5月9日17時まで計56時間に渡り、熱媒体（エチレングリコール40 %wt水溶液）の循環流量を $v=15 \text{ L/min}$ 、地表の行き還り温度差 $\Delta t=4.2 \text{ K}$ を一定として行われた。加熱停止後、5月10日21時まで回復時の温度挙動の測定を行った。光ファイバー温度計は、行き還りのUチューブそれぞれに測定間隔0.5 mで深度101 mまで設置し、試験中は毎分測定を行い、系統誤差の校正及び偶然誤差に対する平均処理($n=20$)を行った。

図-5は、Pt100温度計での地表での熱媒体の行き還り温度測定による従来法の解析結果である。加熱開始後から終了まで（ $\tau=12\sim 56 \text{ hr}$ ）まで、対数時間に対し熱媒体の平均温度 t_f は良好な直線関係を示した（ $k=1.76 \text{ K/ln cycle}$ ）。その結果、 $L=101 \text{ m}$ に対し、式(3)より $\lambda_s=1.77 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 、式(4)より $R_b=0.12 \text{ (m}\cdot\text{K)/W}$ と求められた。

(2) 地中熱交換器内の熱媒体の温度挙動

図-6は、試験前及び試験中の熱交換器内での熱媒体の温度プロファイルの抜粋である。試験前に測定した温度プロファイルによれば、地温は春先の気温の影響で地表

付近が低く、深度10 mまで上昇した後、再び深度50 m付近まで低下を続け、深度50 m以深では、約 1 K/100 m で緩やかに上昇する。このため、結果的に試験直前の地温分布は全体に変化が小さかった。なお試験直前の非加熱で熱媒体を循環した時の平衡水温は 11.1°C であった。

試験中の地中熱交換器内の熱媒体の温度プロファイルは、行き還りで滑らかに温度が減少せず、細かいゆらぎが認められる。これは、校正及び平均処理では未だ光ファイバー温度計の測定誤差を除去しきれなかったことを示唆する。ただし大局的には、温度プロファイルは実際の温度分布を反映すると考えられる。表-2に、地層毎の熱媒体温度の深度勾配をまとめている。深度勾配は熱媒体の温度分布が深度に対して線形とし、最小二乗法により求めた。加熱後 $\tau=1 \text{ hr}$ で往きの温度分布が、 $\tau=2 \text{ hr}$ で還りの温度分布が最大となり、 $\tau=24 \text{ hr}$ を除き、 0.01 K/m 程度の範囲で安定する。 $\tau=24 \text{ hr}$ で一旦勾配が小さくなるのは、光ファイバー温度計の長周期の測定ゆらぎ（誤差）と考えられる。このことから、式(10)での熱媒体温度の深度勾配の計算は、単一の加熱時間だけで行わず、加熱時間の各測定時で行い、それらを平均した方がよいと言える。また行き還りの比較では、いずれの層も往きの方が還りより深度勾配は大きい。これは、往きの

図-4 試験サイトの柱状図と地中熱交換器 模式解説図

図-6 試験中の熱媒体温度の分布と時間変化（初期地温 2015年4月20日測定、2015年5月7日9時に加熱開始）

図-5 試験サイトでの熱応答試験解析結果（従来法）

表-2 地層毎の熱媒体温度の深度勾配（往き:上, 還り:下）

Inlet: $-m_1$						
τ (hr)	0.1	1	2	5	24	55
Layer 1	0.019	0.041	0.045	0.044	0.039	0.042
2	0.013	0.019	0.021	0.021	0.017	0.017
3	0.018	0.021	0.021	0.019	0.019	0.020
(K/m)						
Outlet: m_2						
τ (hr)	0.1	1	2	5	24	55
Layer 1	0.000	0.002	0.015	0.016	0.003	0.014
2	-0.001	0.005	0.017	0.017	0.012	0.016
3	0.012	0.007	0.014	0.016	0.012	0.015
(K/m)						

熱媒体がより周辺地盤との温度差が大きいためである。

(3) 層厚を変えた場合の有効熱伝導率の収束性

各層の有効熱伝導率は、式(7)~(10)を用いて推定する。その際、各層の線熱源理論の適用性を示すべく、 k_i の計算(式(8))において、 n_{zi} を層中心のデータのみ用いた場合($n_{zi}=1$)から、層厚1 m毎で層全体($n_{zi}=L_i/dz+1$)まで増やし、それぞれの λ_{si} を計算した。その際、 Q_i は加熱開始後 $\tau=12\sim 56$ hr、時間間隔を20 min ($n_t=20$)として平均処理し抽出した132データそれぞれで m_j^0 を最小二乗法で計算した平均を用いた。計算結果を図-7に示す。

図-7によれば、いずれの層も $n_{zi}=41$ (層厚20 m) 付近まで、 λ_{si} の値は安定しない。特に $n_{zi}=21$ (層厚10 m) 以下では推定値のゆらぎが大きく、無限線熱源の仮定が成り立たなくなるほか、層厚が小さいと平均化する測定点が限られ、測定誤差が影響していると推測される。一方、 $n_{zi}=21\sim 41$ (層厚10~20 m) になると、 λ_{si} の値は第2,3層ではおおむね収束するが、第1層では依然ゆらぎが大きい。第1層は主に砂礫で構成されるが、砂や粘性土が狭在し、その不均質性が反映されたと推測する。 $n_{zi}=41$ (層厚20 m) を超えると、 λ_{si} の値は安定し、各層の推定値として妥当と判断できる。以降は、各層とも層内の全測定点のデータ ($n_{zi}=L_i/dz+1$) で解析した結果を示す。

(4) 異なるデータ処理による解析結果の比較

図-8は、地表及び孔底での熱媒体温度の経時変化を示している。光ファイバーの測定値(左図)に見られる細かいノイズは校正及び平均処理で軽減されている(中図)。ただし、補正後もまだ細かいゆらぎが特に加熱時に残るため、FFTローパスフィルター(周波数透過率10%以下)でスムージングを行うとより滑らかな温度変化が得られる(右図)。なおスムージング後の両端はFFT特有の不連続が生じるため、計算では除外している。

熱応答試験での観測誤差は、互いに自己相関性を有する可能性があり、この場合、最小二乗法による k_i の推定は最適解を得られない。このため、ランダムサンプリングで作成した多数の観測標本で解析するブートストラップ法とも比較した。ここでは加熱後 $\tau=12\sim 56$ hrでの平均抽出処理した132データより、エクセルrand関数によりランダムに50点抽出した100ケースを用意し、それぞれのケースにて、 $\bar{\lambda}_s$ 及び λ_{si} ($i=1,2,3$)を計算している。

図-9に、ブートストラップ法による計算結果を示す。100ケースの個々では解析結果が変わるものの、その変化は10%以内で安定している。このことより、本試験の場合、観測誤差に含まれる自己相関性の影響は小さく、最小二乗法により十分な精度の推定が可能と判断する。

表-3に、解析結果をまとめる。上段が光ファイバー温度計データから3層として解析した結果、下段がPt100温

図-7 データ数 n_{zi} を変化させた場合の有効熱伝導率 λ_s の推移

図-8 光ファイバー温度計による熱媒体の温度経時変化
(上線：行き深度 $z=1$ m, 下線：行き深度 $z=101$ m,
左：測定値, 中央：補正後, 右：スムージング後)

図-9 ブートストラップ法(100ケース)による有効熱伝導率の推移

表-3 試験サイトでの熱応答試験 解析結果

Model	i-th Layer	L (m)	Q (kW)		q (W/m)		λ_s (W/(m·K))			
			H	H	H	H	F	B	R	
Multi-layer (Sensor)	1	30	1.52	50.8	2.39	2.36	2.40	2.48		
	2	35	1.22	35.0	1.56	1.54	1.58	1.53		
	3	36	1.20	33.3	1.52	1.49	1.53	1.42		
	1-3	101	3.95	39.1	1.79	1.76	1.80	1.76		
Single-layer (PT100)	1-3	101	3.93	38.9	1.77					

H：校正及び平均処理（加熱時），F：H+FFT スムージング，
B：H+ブートストラップ法，R：校正及び平均処理（回復時）

度計データから単一層として解析した結果である。 Q_i 及び、それらを層厚で除した単位深度あたりの熱交換量 q_i (W/m)は、校正及び平均処理による補正データ(H)で計算した値のみ示した。なお他データ処理でもほぼ同じ値が得られている。 $\bar{\lambda}_s$ 及び λ_{si} ($i=1,2,3$)は、補正データを用いた結果(H)に加え、FFTフィルターによるスムージングデータを用いた結果(F)、ブートストラップ法を用いた結果(B)及び、回復時データを用いた結果(R)を比較した。熱交換量の総和(式(11))は $\Sigma Q_i=3.95$ kWであり、Pt100温度計の測定データから式(2)で計算される値 $Q=3.93$

kWとほぼ一致し、熱収支の整合を確認できる。また単位深度当りの熱交換量は、第1層で $q_1 = 50.8 \text{ W/m}$ で、第2層の値($q_2 = 35.0 \text{ W/m}$)や第3層の値($q_3 = 33.3 \text{ W/m}$)に比べ、約1.5倍高い値となった。有効熱伝導率も、式(12)による層厚重ね合わせ平均した値(Layer 1-3)は、データ処理を変えても $1.76 \sim 1.80 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ の範囲にあり、従来法による推定値 $\lambda_s = 1.77 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ と相対誤差2%の範囲でほぼ一致する。また各層の有効熱伝導率は、いずれのデータ処理でも中央値(補正データでの結果(H))に対し、 $\pm 5\%$ の範囲で互いに一致する。以上より、光ファイバー温度計の校正及び平均処理を行うとともに、一定層厚以上(20 m以上)で解析を行えば、その後のデータ処理によらず、安定した解析結果が得られることが示された。

(5) 結果の考察

本研究では、旭川市の複層地盤において、2本の光ファイバーを用いた熱応答試験を実施し、多点測定を活かした線熱源理論による解析的手法を各層に適用することで、地層別の有効熱伝導率を推定した。

試験箇所の地盤を構成する3層の有効熱伝導率の層厚重み付け平均は、Pt100温度計による従来法での値と相対誤差2%の範囲に収まる。また光ファイバー温度計の測定データに対し、校正及び平均処理の補正のみならず、スムージングやブートストラップ法、回復時法など、データ処理を変えて解析しても安定した結果が得られた。したがって、2本の光ファイバー温度計を用いて、熱媒体の行き還り温度のUチューブ内の深度分布とその挙動を測定し、提案するデータの補正と線熱源理論に基づく解析を行うことで、一定層厚以上(層厚20m以上)の地層の有効熱伝導率を、従来法と同精度で推定可能であると判断できる。

各層の有効熱伝導率の推定値は、最上位の砂礫層で $\lambda_{s1} = 2.4 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ であり、中間層(粘性土層)の値($\lambda_{s2} = 1.5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$)、最下層(泥岩)の値($\lambda_{s3} = 1.5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$)に比べ、約1.5倍高かった。また砂礫層の一般値($2.0 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$)⁴⁾と比べても20%高い値である。この要因として、試験箇所が石狩川近傍に位置することから、特に表層を流れる地下水流れ(伏流水)による移流効果が推測される。第1層の単位深度当りの熱交換量は、 $q_1 = 50.8 \text{ W/m}$ と他層の約1.5倍であり、同層に地中熱交換器を集中させれば、必要な採放熱量に対し掘削総延長を減らすことができる可能性がある。実際は、掘削本数の増加によるコストや土地の制約などを考慮する必要があるが、各層の有効熱伝導率の違いが明らかとなれば、その分布に応じた適正な地中熱交換器規模の検討が可能となる。

最後に、本研究での今後の課題を述べる。光ファイバー温度計は、Pt100温度計などと比べて未だ高価であり、本手法について様々な試験・地質条件で適用し、有

効性や適用限界を更に詳細に評価していく必要がある。特に線熱源理論が適用できる試験条件は、数値解析を含めた議論が必要であり、今後の課題としたい。また実務者向けのマニュアルや解析ツールの提供も本手法の理解や普及に必要と考える。こうした課題が残るものの、提案する光ファイバー温度計を組み合わせた熱応答試験は、従来法の試験・解析の延長で地層毎の有効熱伝導率の推定を可能とし、研究のみならず実務での利用を通じて、地中熱利用の普及・促進に貢献することが期待される。

5. まとめ

本研究では、間接型地中熱交換器の熱応答試験において、2本の光ファイバー温度計を行き還りのUチューブに設置し、熱媒体の温度挙動を測定することで、地層別の有効熱伝導率の分布を推定する手法を示した。

以下に研究成果をまとめる。

- 1) 先行研究が1組の光ファイバー温度計を用いるのに対し、2本の光ファイバー温度計を用いることで、地中熱交換器内の熱媒体の温度挙動を行き還りともに把握することで、地層毎の熱交換量をより正確に推定することが可能となる。
- 2) 提案する解析法は、従来法と同じ線熱源理論に基づく解析的手法を各層に適用する。解析に用いる熱媒体の時間変化勾配は、光ファイバー温度計の各測定点で計算し、それらの層内平均とし、熱交換量は行き還りそれぞれの熱媒体温度の深度勾配を線形近似して、熱容量と層厚を乗じた和として推定した。
- 3) 光ファイバー温度計の測定値は、系統誤差の校正及び偶然誤差の平均処理による補正を行った。本研究では、恒温水槽での室内実験から、系統誤差の1次校正式を設定するとともに、平均処理の時間区間を20 minとした結果、想定する標準誤差は $\pm 0.2 \text{ K}$ 以内になった。
- 4) 北海道旭川市での解析事例では、第1層(砂礫層)、第2層(粘性土層)、第3層(泥岩)の有効熱伝導率は、層厚20 m以上の区間で解析することで、いずれも安定した値に収束した。3層の値の層厚重み付け平均や地盤との熱交換量の和は、従来法で推定した有効熱伝導率や熱交換量の値と、ほぼ一致する結果が得られた。
- 5) 解析に用いるデータを、加熱時の校正と平均処理した補正データのほか、FFTローパスフィルターによるスムージングデータ、多数標本を生成したブートストラップデータ、回復時データと変えた場合も、有効熱伝導率の推定値は、互いにほぼ一致した結果が得られた。
- 6) 試験箇所で推定された有効熱伝導率は、最上位の砂礫層の値が他2層よりも約1.5倍高い結果となった。試験箇所近傍を流れる石狩川に繋がる砂礫層中の地下水の

移流効果を反映した可能性があり、同層に集中的に地中熱交換器を配置することで、熱交換器全体の掘削延長を減らせる見込みとなった。このように、本手法により地層毎の有効熱伝導率を把握することで、地中熱交換器の配置や掘削延長などの適正な規模の検討が可能になる。

謝辞：本研究に際し、株式会社アリガプランニングには試験サイトの提供並びに試験実施に際し、多大なご支援を頂いた。試験実施に際しては、当研究室の中村真人氏および橋本隼樹君の協力を得た。3名の匿名の査読者からの有益なご意見により、本論文の改善がなされた。本研究は、NEDO再生可能エネルギー熱利用技術開発事業（研究代表者：長野克則）の一環として進められた。ここに記して謝辞とします。

参考文献

- 1) 経済産業省・資源エネルギー庁：エネルギー基本計画，<http://www.meti.go.jp/press/2014/04/20140411001/>，pp. 1-78, 2014.
- 2) 長野克則：地下熱利用技術 2. 地下熱利用技術とは，地下水学会誌，Vol. 53, No. 1, pp. 83-90, 2011.
- 3) Spitler, J. D.: Ground-source heat pump system research—past, present and future, *International Journal of HVAC & R Research*, Vol. 11, pp. 165-167, 2005.
- 4) 北海道大学地中熱利用システム工学講座：地中熱ヒートポンプシステム，pp. 92-99, オーム社，2007.
- 5) 葛隆生，長野克則，中村靖：複層地盤を考慮した地中熱交換器のシミュレーションツールの開発とその応用，日本冷凍空調学会論文集，Vol. 32, No. 3, pp. 335-344, 2015.
- 6) Mogensen, P.: Fluid to duct wall heat transfer in duct system heat storages, *Proc. Int. Conf. on Subsurface Heat Storage in Theory and Practice*, Stockholm, Sweden, pp. 652-657, 1983.
- 7) Gehlin, S.: Thermal response test-method development and evaluation, Ph.D. Dissertation, Luleå University of Technology, 2002.
- 8) 長野克則：ボアホール型地中熱交換器に対する加熱法による熱応答試験の標準試験方法 ver. 2.0, ヒートポンプ・蓄熱センター，pp. 1-13, 2011.
- 9) 藤井光，駒庭義人：地下熱利用技術 7. サーマルレスポンス試験の原理，地下水学会誌，pp. 391-400, 2011.
- 10) 環境省水・大気環境局：地中熱利用にあたってのガイドライン改訂版，<http://www.env.go.jp/press/files/jp/26796.pdf>，pp. 28, 2015.
- 11) 国土交通省大臣官房：官庁施設における地中熱利用システム導入ガイドライン（案），www.mlit.go.jp/common/001016159.pdf，pp. 12-21, 2013.
- 12) Ingersoll, L. R., Plass, H. J.: Theory of the ground pipe heat source for the heat pump, *ASHVE Trans.*, Vol. 54, pp. 167-188, 1948.
- 13) Banks, D.: *An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling*, 2nd Edition, pp. 285-286, 410-431, Wiley-Blackwell, 2008.
- 14) Grattan, K. T. V. and Sun, T.: Fiber optic sensor technology: an overview, *Sensors and Actuators*, Vol. 82, pp. 40-61, 2000.
- 15) Günzel, U. and Wilhelm, H.: Estimation of the in-situ thermal resistance of a borehole using the distributed temperature sensing (DTS) technique and the temperature recovery method (TRM), *Geothermics*, Vol. 29, pp. 689-700, 2000.
- 16) 藤井光，大久保博晃，糸井龍一，小助川洋幸：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，Vol. 27, No. 3, pp. 223-232, 2005.
- 17) 藤井光，大久保博晃，糸井龍一，小助川洋幸：不均質地層における U 字管型地中熱交換井の温度挙動解析，日本地熱学会誌，Vol. 28, No. 2, pp. 199-210, 2006.
- 18) Freifeld, B. M., Onstott, T. C., Toole, T. and Pratt, L. M.: Ground surface temperature reconstructions: Using in situ estimates for thermal conductivity acquired with a fiber-optic distributed thermal perturbation, *Geophysical Research Letters*, Vol. 35, L14309, 2008.
- 19) Fujii, H., Okubo, H., Nishia, K., Itoi, R., Ohyama, K. and Shibata, K.: An improved thermal response test for U-tube ground heat exchanger based on optical fiber thermometers, *Geothermics*, Vol. 38, pp. 399-496, 2009.
- 20) 上原健人，藤縄克之：ケルビンの線源関数の高精度漸近解とパウエル共役傾斜法を用いた熱応答試験関連パラメータの逆解析法とその適用，地下水学会誌，Vol. 55, No. 3, pp. 253-268, 2013.
- 21) 永坂茂之，横山真太郎，落藤登，中村真人，長野克則，濱田靖弘：線源理論を用いた垂直埋設管の平均表面温度の推定，空気調和・衛生工学会論文集，No. 59, pp. 143-151, 1998.
- 22) Zeng, H., Diao, N. and Fang, Z.: Heat transfer analysis of boreholes in vertical ground heat exchangers, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, No. 23, pp. 4467-4481, 2003.
- 23) 岡田益己：温度の正しい測り方（2）温度計の校正，生物と気象，Vol. 10, A-3, 2010.
- 24) 吉澤康和：新しい誤差論，pp. 104-146, 共立出版，1989.
- 25) Witte, H. J. L., van Gelder, G. J. and Splitter, J. D.: In situ measurement of ground thermal conductivity: the Dutch perspective, *ASHRAE Trans: Research*, Vol. 108, pp. 263-273, 2002.

(2015. 11. 6 受付)

ESTIMATION OF EFFECTIVE THERMAL CONDUCTIVITIES ACCORDING TO MULTI-LAYERS BY THERMAL RESPONSE TEST WITH A SET OF FIBER OPTICS IN A U-TUBE

Yoshitaka SAKATA, Takao KATSURA, Jian ZHAI and Katsunori NAGANO

This study improves thermal response test (TRT) by using a set of fiber-optic distributed temperature sensors (DTSs) to estimate effective thermal conductivities in multi-layered formations. These sensors are installed into both inlet and outlet pipes (a U-tube) to obtain vertical profiles of heat transfer fluid temperature at TRT in more detail than those obtained by single DTS as in previous studies. When the borehole is constructed in a formation with several horizontally layers, this study analyzes the effective thermal conductivity in each layer under the assumption of line heat source. In the analysis, the slopes of fluid temperature on logarithmic elapse time are averaged within each layer, and heat exchange rate is calculated using a sum of linear slopes of temperature with depth in both inlet and outlet pipes. Offset and averaging span for DTS calibration are evaluated by laboratory sink tests at constant temperatures. Finally, an example of the proposed method at Asahikawa City, Hokkaido, Japan, is shown. In the example, the formation consists of three layers; unconsolidated gravel, clay, and pre-Quaternary shale. The solutions of the effective thermal conductivity in each layer are converged commonly when the thicknesses for analysis are larger than 20 meters. The conductivity in the upper-gravelly layer is about 1.5 times larger than those in the mid-clayey and lower-shale layers, probably due to groundwater flow advection. The thickness-weighted average of conductivities in the three layers is almost equal to the conductivity by conventional TRT with Pt100 sensors. The solutions are also valid in terms of total heat exchange rate. In addition, a series of effective thermal conductivities is invariable among the cases of DTS data: 1) calibrated in the heating period, 2) smoothed additionally by the FFT low-pass filter, 3) randomly sampled as the boot-strap method, and 4) calibrated in the recovery period.