

光ファイバー温度計を用いた長距離地中温度測定による地中熱交換器群の性能評価 Evaluating performances of multiple ground heat exchangers through an analysis of sequential temperature measurements along a long-distance optic fiber sensor

正会員 ○阪田 義隆 (北海道大学) 正会員 葛 隆生 (北海道大学)
正会員 長野 克則 (北海道大学) 正会員 大江 基明 (イノアック住環境)
Yoshitaka SAKATA*¹ Takao KATSURA *¹ Katsunori NAGANO*¹ Motoaki Ooe *²

*¹ Hokkaido University, *² Inoac Housing & Construction Materials

This study demonstrated to measure ground temperatures in multiple ground heat exchangers by using a sequential optic fiber of a length over one kilometer, at a site in Bibai City, Hokkaido. The measurements were analyzed to determine ground thermal conductivity, heat exchange rate, and Darcy velocity in each borehole through an iterative procedure. As a result, ground thermal conductivity in boreholes No.3 is 2.5 times higher than others, and the layer for high-conductivity might be seen in shallow depths with Darcy's velocity over 200 m/y. The heat pump simulation revealed that the electricity consumptions were different by only less than 3% among comparison cases with and without groundwater flows.

はじめに

地中熱ヒートポンプシステムの設計において、複数本の地中熱交換器の設置を検討する場合、一般には、全ての地中熱交換器の採熱性能は同一、例えば深度当たりの採熱量を $40\sim 60\text{ W/m}^1$ と仮定して行う。しかしながら、その幅は 1.5 倍あり、設計の不確実要因である。実際、地下構造は均質ではなく、箇所や深度で地層構成や地下水流れの有無が異なるため、同一サイトでも地中熱交換器によって性能が異なると予想される。例えば、地下水流れが速く移流効果が期待できる場合の深度当たり採熱量は $80\sim 100\text{ W/m}^2$ とされ、これを考慮することで地中熱交換器規模を削減できる可能性はあるが、全ての熱交換器に適用できるかについての議論が必要である。

地中熱交換器施工時には、熱応答試験により有効熱伝導率やボアホール熱抵抗を把握する。地下水流れがある場合、有効熱伝導率は移流も反映し、熱伝導のみに比べて、値が見かけ上、増加することで知られている。しかし試験に要する時間や費用の観点から、複数本設置する場合も代表 1 本の試験に留まるのが通常である。すべての地中熱交換器群に対して、単一の試験結果を適用できるかは必ずしも明らかではない。

本研究では、北海道美唄市に設置された 8 つの地中熱交換器全てに対し、熱応答試験を実施するとともに、施工時に光ファイバー温度計を一連で埋設することで、その観測温度から深度別の有効熱伝導率や地下水流速を分析した。これにより地下の熱物性の不均質性の実態を示すとともに、地中熱交換器群による地中熱利用システムの運転性能や設計への影響について考察する。

1. 研究手法

1.1 研究サイト

研究サイトは、北海道美唄市の北海道イノアック工場敷地内である。同工場では、冬季ロードヒーティング(対象面積 80 m^2) を目的とした地中熱ヒートポンプシステム導入を目的に、2018 年 10~11 月かけて、鉛直型の地中熱交換器を 8 本 (No.1~8) が埋設された。地中熱交換器 No.1~8 は全て鉛直型で互いに 4 m 離し、直線状にボアホールを深度 84 m で掘削した後、珪砂を充填材に HDPE 製の U チューブ (32A) を深度 81 m まで埋設した。U チューブは従来製品 (Circle) に加え、北海道大学・イノアック住環境が NEDO 「自然再生可能熱エネルギー技術開発」 にて共同開発した扁平 U チューブ (Oval) を使い分けた。すなわち、No.1, 2 はダブルで掘削径は 139 mm, No.1 が通常ダブル (Cd), No.2 が同スペーサー付き (Cd+), No.3~8 はシングルで掘削径は 127mm, No.3 は通常シングル (Cs), No.4 は同スペーサー付き (Cs+), No.5 は扁平シングル (Os), No.6~8 は同スペーサー付きでスペーサー長さが 10, 40, 82 m である。

地盤構成は、柱状図では深度 15 m まで礫、深度 15~84 m まで礫混じり粘土であった。近傍の高速 IC における地質調査³⁾では深度 28 m まで砂質土主体で、N 値が 14~50 以上であり、良く締まっており、自然水位は 2.1~6.1 m にあるとのことであった。

1.2 光ファイバー温度測定

地中熱交換器工事に併せ、埋設土圧に耐えるスパイラル鋼で保護された光ファイバーを U チューブにテープ固定させて、No.1~8 が一連になるように施工した。埋設

延長はNo.1～8が深度81mの往復で162m×8孔、孔間距離4m×7区間、建屋内の観測機へ繋がるようループとなり、余裕長含め、その総延長は1.4kmに達する。地中熱交換器の測定例としては、わが国でこれまでで最長となる。光ファイバー温度測定機は、A.P. Sensing社のN4385A-008を用いた(表-1)。同機は、両端点から交互に光信号を発信し、伝搬による信号ロスに伴う誤差を緩和することが可能である。測定は距離0.5m間隔で、1分毎に行い、誤差を相殺するため、20分間移動平均処理を行った。これにより測定誤差は約±0.2Kとなる⁴⁾。

表-1 光ファイバー温度計 測定諸元

| 測定機器 | N4385A-008 (A.P. Sensing, Ltd) |
|--------|--|
| 最大測定長 | 8 km |
| 深度解像度 | 0.5 m |
| 測定時間 | 1 min |
| 測定精度 | +/- 0.2 K (moving average per 20 min) |
| 光ファイバー | SKF-VP13L404CC140 (NK Systems, Ltd.) |
| 構造 | Dual fibers in a single water-proofed tube |
| 径 | 4 mm (18 mm at the top) |

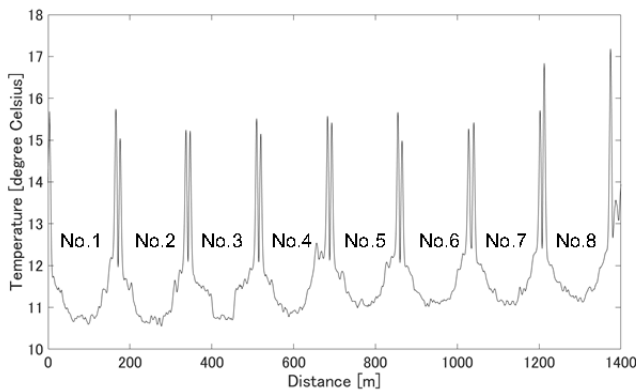


図-1 光ファイバー温度計データ例 (2018年10月16日13:00)

1.3 熱応答試験

(1) Pt100 温度計データによる解析 (従来法)

No. 1～8に対し、熱応答試験を実施した。試験では、ヒーターによる一定加熱条件(約4kW)で地中熱交換器内に、熱媒(水)を48時間以上循環させ、流量を電磁流量計、地中熱交換器での行き還り熱媒温度をPt100温度計で毎分測定した。また光ファイバー温度計により加熱中の熱交換器内部の温度を測定した。

地中熱交換器を線熱源と仮定すると、熱交換器周辺の地中温度上昇 ΔT_s は、円筒座標系における熱伝導方程式の解として以下となる。

$$\Delta T_s = T_s - T_0 = \frac{q}{4\pi\lambda} \int_{r^2}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad (1)$$

ここで T_s は半径 r における地中温度[°C]、 T_0 は初期地盤温度 T_0 [°C]、 λ は有効熱伝導率[W/(m・K)]、 a は温度拡散率[m²/s]、 t は加熱開始からの経過時間、 q は単位深度

での放熱量[W/m]である。通常の熱応答試験の解析では、行き還り熱媒温度の平均 T_b が観測結果であるため、ボアホール内部熱抵抗を R_b とし、かつ一定時間経過後(例えば12時間後)で(1)式を近似した下式を用いる。

$$\Delta T_b = T_b - T_0 = \frac{q}{4\pi\lambda} \left[\ln \frac{4at}{r^2} - \gamma \right] + qR_b \quad (2)$$

なお γ はオイラー定数(0.572)である。熱媒温度のUチューブ行き還り端部の平均温度が時間対数に比例するため、その比例勾配を m および切片 T' を最小二乗法により求め、有効熱伝導率を下式で計算する。

$$\lambda = \frac{q}{4\pi m} \quad (3)$$

またボアホール熱抵抗は下式で計算する。

$$R_b = \frac{T' - T_0}{q} + \frac{1}{4\pi\lambda} \left[2.303 \log_{10} \left(\frac{4a}{r^2} \right) - \gamma \right] \quad (4)$$

(2) 光ファイバー温度計データを用いた逆解析

光ファイバー温度計では、No.1～8の各深度10～20m(深度0～10mは地表温度の影響があるため除外)、20～40m, 40～60m, 60～80mの4層に分類し、各深度区間での平均温度を計算した後、各深度区間が無限線熱源に近似できると仮定し、加熱開始から加熱停止後の温度回復までの温度挙動を解析することとした。なお加熱停止後の温度上昇は以下となる。

$$\Delta T_s(t > t') = \Delta T_s(t) - \Delta T_s(t - t') = \frac{q}{4\pi\lambda} \ln \frac{t}{t - t'} \quad (5)$$

ここで t' は加熱停止した加熱開始からの経過時間である。地下水流れの影響を評価するため、(1)式に代わり、移動線熱源理論⁵⁾を適用して併せて解析した。

$$\Delta T_s = \frac{q}{4\pi\lambda} \exp \left(\frac{Ur}{2a} \cos \varphi \right) \int_0^{\frac{4at}{r^2}} \frac{1}{\eta} \exp \left(-\frac{1}{\eta} - \frac{U^2 r^2 \eta}{16a^2} \right) d\eta$$

(6)

$$U = \frac{\rho_w C_w}{\rho C_p} u \quad (7)$$

ここで u は地下水流速(ダルシー流速)[m/s]、 φ は地下水流向[rad]、 $\rho_w C_w$ 、 ρC_p はそれぞれ水、土の体積熱容量[J/(m³・K)]で、それぞれ4180、3000[kJ/(m³・K)]と仮定した。(5)(6)式により計算される理論温度上昇 ΔT_{cal} 、光ファイバー温度計データで測定される観測温度上昇を ΔT_{obs} とし、両者の平均二乗根誤差(RMSE)が最小となるよう未知パラメータを決定した。なおRMSE計算区間は加熱時で0～30時間、回復時で温度停止から加熱による温度上昇の90%が低下するまでの時間とした。未知パラメータは、 λ 及び q であり、地下水流速を仮定する場合には、 u も含まれる。未知パラメータ同定は、MATLABの最適化ツールボックス(Optimization Tool Box)より、条件付き非線形最適化関数fminconを用いた。

1.4 地中熱交換器群の性能評価

地中熱交換器群の性能評価として、融雪条件⁹⁾を300 W/m²、対象路面80 m²=24 kW (1本当たり3kW)を11~3月(5か月)、週5回(月~金)、各10時間(8~18時)に連続する熱負荷を想定し、Ground Clubを用いた地中温度及びヒートポンプ消費電力のシミュレーションを行った。比較ケースとして、有効熱伝導率が高いNo.3を除く他7本の平均有効熱伝導率($\lambda = 1.94 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$)を用いたケース1と、No.3の平均有効熱伝導率($\lambda = 4.93 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$)を全てに仮定したケース2と、実際に近い1本のみ有効熱伝導率が高く、他の7本の値が平均値であるケース3で、5年間のシミュレーションを行い、融雪に必要な消費電力並びにヒートポンプ成績係数(COP)を計算し、比較した。なお自然地中温度は11.6°C、熱媒はエチレングリコール40%溶液とし、ヒートポンプの都度の成績係数はS社の実機性能曲線を簡略化した下式より計算した。

$$COP = 0.15T_{in} + 3.7 \quad (8)$$

ここで、 T_{in} は地中熱交換器からのヒートポンプへ入る熱媒温度である。

2. 結果と考察

2.1 熱応答試験結果

表-1に、熱応答試験結果の一覧を示す。有効熱伝導率はNo.3を除き、 $\lambda = 1.76 \sim 2.07 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ であった。これらの平均は $1.94 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ であり、幅±10%は熱応答試験の測定精度と考えると、ほぼ様な地盤と言える。この値は、よく締まった砂質土の値として理解できる。

一方、No.3の有効熱伝導率は $\lambda = 4.93 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ と他に比べ約2.5倍大きい。No.3周辺で断層など大きな地質構造の変化はないと考えると、局所的な地下水流れがNo.3周辺(幅4m程度)に卓越していると予想される。

ボアホール熱抵抗については、 $Cs+ \approx Cs > Os \approx Os+ > Cd \approx Cd+$ の傾向が確認された。特にCs, Osの比較では、約10%の低減があり、扁平Uチューブによる熱抵抗の減少が期待できる。一方、スぺーサーの有無による熱抵

表-2 熱応答試験結果一覧

| No. | U-tube | L_s [m] | λ [W/(m·K)] | R_b [m·K/W] |
|-----|--------|-----------|---------------------|---------------|
| 1 | Cd | | 1.95 | 0.077 |
| 2 | Cd+ | 82 | 2.17 | 0.089 |
| 3 | Cs | | 4.93 | 0.114 |
| 4 | Cs+ | 82 | 1.76 | 0.129 |
| 5 | Os | | 2.07 | 0.109 |
| 6 | Os+ | 10 | 1.87 | 0.110 |
| 7 | Os+ | 40 | 1.94 | 0.098 |
| 8 | Os+ | 82 | 1.83 | 0.106 |

C: 従来(円形)Uチューブ, O: 扁平Uチューブ, s: シングル, d: ダブル, +: スぺーサーあり, L_s : スぺーサー挿入長(地表より)

抗の差は顕著ではなかった。CFD解析では、スぺーサー設置によって熱抵抗が低下することが期待できることから、本試験では土圧によりスぺーサーが閉塞し、その効果を発揮しなかった可能性がある。

2.2 逆解析結果

図-2に例として、No.2及びNo.3の第1層(深度10~20m)における光ファイバー温度計データおよび、パラメータ決定後の最適解による理論解を示す。No.2は地下水流れのない条件、No.3は地下水流れ条件で解析を行っており、ともに観測データによると理論解によるがとにもよく一致していることが分かる。RMSEはNo.2で0.20°C、No.3で0.17°Cであった。

図-3に、第1~4層での光ファイバー温度計データから逆解析した結果を示す。No.1~8すべてにおいて各層の有効熱伝導率は $2 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ の前後に集中し、深度方向の変化傾向は顕著ではない。なお採放熱量は紙面の都合で割愛するが、同様にNo.1~8すべてで一定であった。一方、ダルシー流速は、No.3以外で $u < 100 \text{ m/y}$ であるが、No.3では、 $u > 100 \text{ m/y}$ であり、特に第1,2層では 200 m/y を超える結果となった。このことから、No.3での高い有効熱伝導率は地下水流れによって引き起こされていると考えられる。

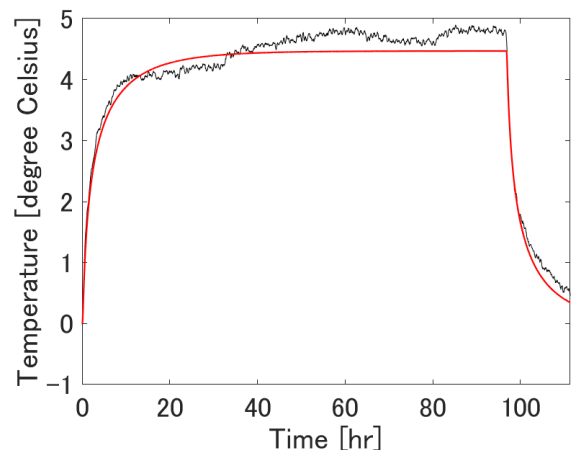
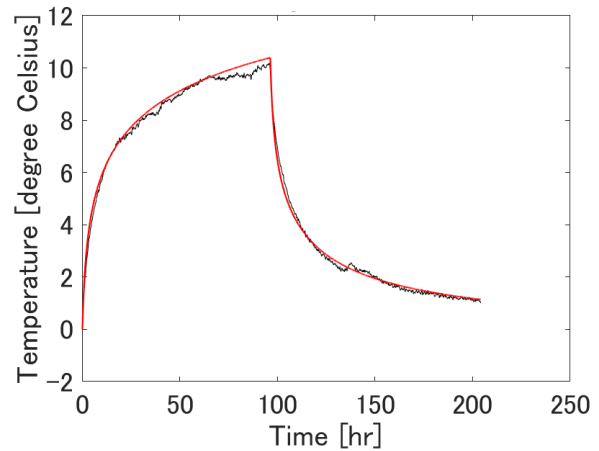


図-2 光ファイバー測定温度と逆解析結果 (No. 2, No. 3 第1層)

2.3 性能評価結果

図4に、ケース1,2での稼働5年目における融雪期間での地中温度計算結果を示す。5年目の融雪開始当初(11月1日)の地中温度は自然地中温度11.6℃に比べ低く、運用とともに地中温度は低下し、融雪期末(3月31日)で、ケース1では5.7℃、ケース2では7.1℃まで低下する。有効熱伝導率の違いによる最低温度の差は1.4℃と計算された。表-3に、地中熱交換器性能比較を示す。融雪負荷 $Q=108.9$ GJ/y に対し、ヒートポンプ消費電力はNo.1~8 全て有効熱伝導率が低いと仮定するケース1で23.5GJ/y (平均 COP=4.63), No.1~8 全てで高いと仮定するケース2で22.7GJ/y (平均 COP=4.79), 実際の有効熱伝導率分布に近いケース3で23.4 GJ/y (平均 COP=4.65) であり、その差は3%程度であり、大きな差はなかった。

本サイトでは1本当たりの熱負荷が3kWと大きくなく、かつ融雪期間のみ断続運転を仮定している。熱負荷がそれほど高くなく有効熱伝導率が2 W/(m・K)前後とある程度高い値である場合、地下水流れの効果は顕著ではない⁴⁾。このことから本サイトの場合、実際の設計で起こりうるケース1あるいは2のいずれの場合にもシステム設計への影響は小さいと言える。しかし、より熱負荷が大きい施設で、有効熱伝導率が低い場合、地下水流れの有無によって地中熱交換器規模の算定が異なると予想される。

まとめ

本報では、8本の地中熱交換器に一連で光ファイバー温度計を全長1.4kmに渡り設置し、熱応答試験における温度挙動から深度別の有効熱伝導率と地下水流速を推定した。その結果、8本の内、1本の地中熱交換器でのみ地下水流れの影響が認められ、局所的な地質・地下水条件がありうることを確認した。他サイトでも熱応答試験を1本のみ行う場合には過大あるいは過小評価する可能性が指摘される。本サイトでは熱負荷条件から、その影響は大きくないが、より熱負荷の大きいサイトでは熱物性の不均質性の可能性を考慮した調査解析が求められる。

参考文献

1) 地中熱利用促進協会(2014)地中熱ヒートポンプシステム施工管理マニュアル. 2) VDI(Verein. Deutscher Ingenieure) (2001): Thermal use of the ground. Ground source heat pump systems. VDI Richtlinien 4640, Part 2,15-19. 3) 日本道路公団 (1979) 道央自動車道 (岩見沢~鷹栖) 北美唄地区第一次土質調査報告書. 4) 阪田ほか(1998) 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. 土木学会論文集 G (環境), 72(3), 50-60. 5) Diao et al.(2004) Heat transfer in ground heat exchangers with groundwater advection. Int. Jour. Thermal Sci., 43, 1203-1211. 6) 平成31年度北海道開発局道路設計要領 第5集第4章ロードヒーティング設備, 5-4-17.7) Sakata et al. (2018) Importance of groundwater flow on life cycle costs of a household ground heat pump system in Japan. Trans. JSRACE, 35(4), 89 - 94.

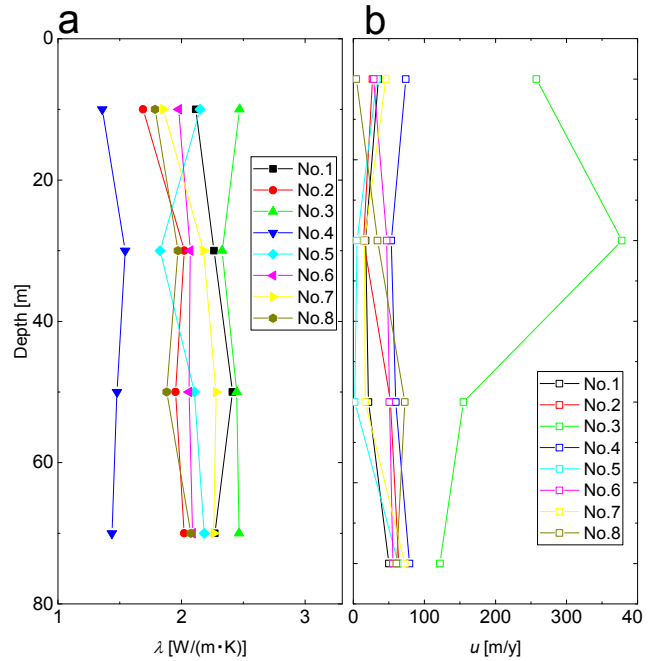


図-3 逆解析結果 (a:有効熱伝導率, b:ダルシー流速)

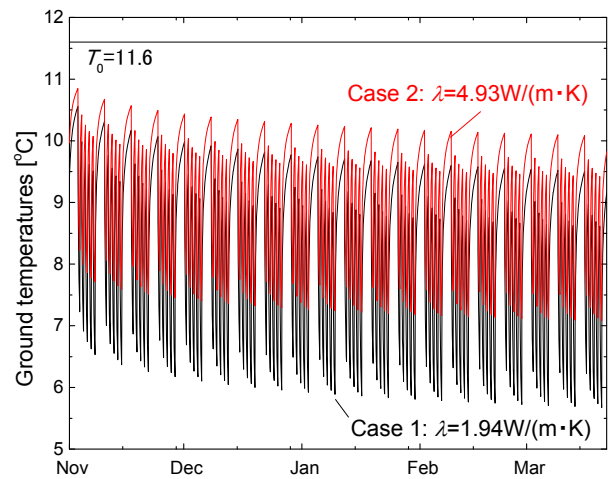


図-4 地中温度計算結果(融雪期間11~3月, 稼働5年目)

表-3 異なる有効熱伝導率ケースでのGSHP性能比較(稼働5年目)

| | Case 1 | Case 2 | Case 3 |
|---------------|--------|--------|--------|
| Q [GJ] | | 108.9 | |
| E_{hp} [GJ] | 23.5 | 22.7 | 23.4 |
| COP | 4.63 | 4.79 | 4.65 |