

流体解析による分岐管方式地中熱交換器の性能評価手法の検討

原 嶋 寛

Performance Evaluation of Separate-Tube Ground Heat Exchanger Using Fluid Analyses

Hiroshi Harashima

Abstract

Obayashi Corporation has developed a separated-tube type ground heat exchanger with a higher heat exchange efficiency than that of conventional types and has accumulated operational data on the developed system. In addition to accumulating operational experience, simulation technology must be developed to support a reasonable design and an effective operation. This paper reports the performance prediction of ground heat exchangers using a commercial fluid analysis code and the results of performance comparisons between the developed separate-tube system and conventional systems. The method examined in this study predicted the results of a thermal response test with high accuracy. The prediction method confirmed that the developed system had a relatively high heat exchange efficiency than that of conventional systems. The only model constant required by this prediction method was the effective thermal conductivity of the soil, λ_a , rendering this method versatile.

概 要

大林組は、従来方式と比べ熱交換効率の高い分岐管方式地中熱交換器を開発し、その運転実績などを蓄積してきた。地中熱利用に関する運転実績の蓄積に加え、シミュレーション技術を整備し、合理的な設計や運用を支援できる技術も重要である。本報では、汎用流体解析コードを用いて地中熱交換器の性能予測を行うと共に、開発方式と従来方式との性能比較結果を報告する。本報で検討した予測方法は、熱応答試験 TRT の結果を精度よく再現した。本予測法を用いて、開発方式と従来方式を比較しても、開発方式は相対的に高い熱交換効率であることが確認された。本予測法で必要となるモデル定数は、地盤の有効熱伝導率 λ_a のみであり、汎用性は高い。

1. はじめに

脱炭素社会や持続可能な社会を構築していくため、再生可能エネルギーの利用拡大は、重要な課題のひとつである。再生可能エネルギーには、発電に利用できるものの他に、太陽熱や地中熱などのように熱として利用できる再生可能エネルギー熱がある¹⁾。建物スケールで考えた場合、太陽光発電などに加え、再生可能エネルギー熱を効率的に空調や給湯設備に活用していくことが、省エネルギー建築や ZEB (Zero Energy Building) の実現に寄与すると期待される。本報では、再生可能エネルギー熱の中で地中熱に着目する。地中熱に関して、東京都は「東京地中熱ポテンシャルマップ²⁾」を公開すると共に、地中熱を含めた再生可能エネルギー利用設備への助成事業を推進するなど、普及促進が図られている³⁾。

地中温度は、外気と比べて年間の温度差が少なく、特に 10m 以深は、ほぼ一定温度 (年平均気温相当) となる。よって、地中熱はどこでも利用でき、季節に左右されない安定的な熱源となり得る。また、凍結などの問題が発生しやすい寒冷地では、空気式ヒートポンプよりもメリットがあるため、地中熱利用は北海道や山形県での導

入件数が多い⁴⁾。

地中熱利用の大きな課題はインシヤルコストであり、ライフサイクルコストを抑えるためには、ランニングコストの削減が解決策の一つとなる。地中熱ヒートポンプの性能や一次側の熱交換効率を向上させることは、ランニングコスト削減に有効である。そこで大林組は、一次側の熱交換効率を高めるため、Photo 1 に示す分岐管方式

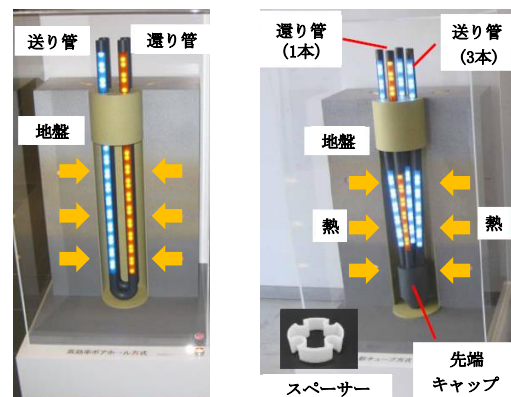


Photo 1 地中熱交換器 (左は従来, 右は開発方式)
Ground Heat Exchanger, Left: Conventional System, Right: Developed System

の地中熱交換器を開発してきた⁵⁾。従来方式は2本のU字型熱交換器を用いることが多いが、開発方式は先端部で熱交換器を分岐させた形状やスペーサーに特徴があり、こうした工夫により、従来と比べて高い熱交換効率を得られる。また、開発方式は、複数の実建物での運転実績が報告されている^{6,7)}。Fig. 1は、実建物における運転実績を示す。開発方式と地中熱ヒートポンプを組み合わせることで、高い省エネルギー効果が得られることが確認されている。また、シミュレーションによる性能予測に関しては、差分法による3次元熱伝導方程式を基礎とした独自コードが検討されたが、汎用的な検討ツールの開発までには至っていない⁸⁾。そこで、シミュレーション技術を整備し、合理的な設計や効果的な運用を支援できる技術開発に取り組んでいる。

このような背景のもと、本報では、汎用流体解析コードを用いて地中熱交換器の性能予測を行うと共に、分岐管方式と他の方式との性能比較結果を報告する。

2. 熱応答試験結果

熱応答試験(TRT, Thermal Response Test)とは、地中熱ヒートポンプシステムの設計時に必要となる地盤の有効熱伝導率 λ_a や地中熱交換器の熱抵抗 R を算出するために実施される試験のことをいう⁹⁾。具体的な方法としては、地中熱交換器内に熱負荷を与えた流体を循環させ、流体温度などの時刻歴データから地盤の有効熱伝導率 λ_a や熱交換器の熱抵抗 R を推定する。

Fig. 2に示される熱応答試験装置を製作し、東京都清瀬市にある大林組技術研究所内に設置された分岐管方式地中熱交換器(深さ70m)を対象に、2日間(2014年3月)の熱応答試験を実施した⁹⁾。循環流体は水を、流量は12L/minとした。Fig. 3は、熱応答試験結果を示す。初期循環温度は14.8°C、地中熱交換器1m当たりの平均加熱量は、27W/mであった。本報では、循環時法により地盤の有効熱伝導率などを推定する。ここで循環時法とは、温水循環試験中の地中熱交換器出入口温度の平均値にケルビンの線源理論を適用し、経時変化曲線の傾き m から地盤の有効熱伝導率 λ_a などを推定する手法である。

Fig. 4は、対数時間と平均循環水温度の関係を示す。加熱開始から10時間後の直線近似式((1)式)による傾き m を求め、(2)式より地盤の有効熱伝導率 λ_a を算定した結果、1.89W/m·Kとなった。熱抵抗 R は、(3)式より算定した結果、0.59m·K/Wとなった。「東京地中熱ポテンシャルマップ」では、当該地域の地盤の有効熱伝導率は、2.08W/m·Kとされ、今回の算定結果と概ね一致している。

$$T_{ave} = m \cdot \ln(t) + b \quad (1)$$

$$\lambda_a = \frac{q}{4\pi m} \quad (2)$$

$$R = \frac{T_{ave} - T_i}{q} - \frac{1}{4\pi\lambda_a} \left(\ln \frac{4at}{r^2} - 0.5772 \right) \quad (3)$$

ここに、 m, b : モデル定数, λ_a : 地盤の有効熱伝導率

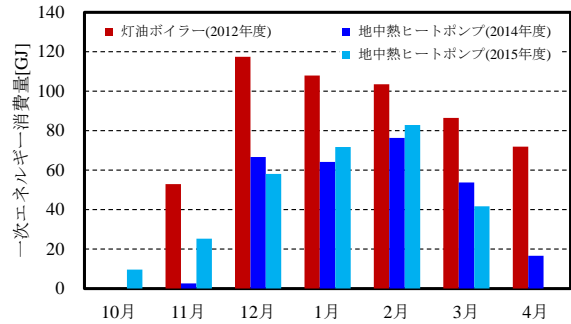


Fig. 1 実建物における運転実績
Operating Results in an Actual Building

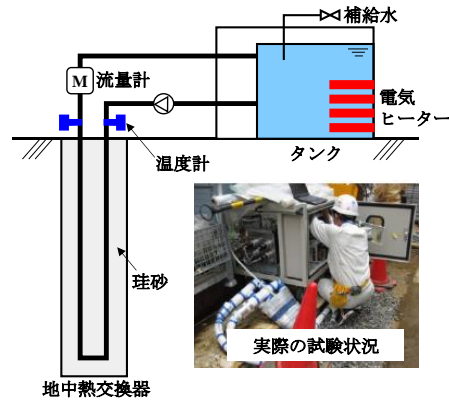


Fig. 2 熱応答試験装置の概要と試験状況
Overview of Thermal Response Test Equipment, and Condition during Testing

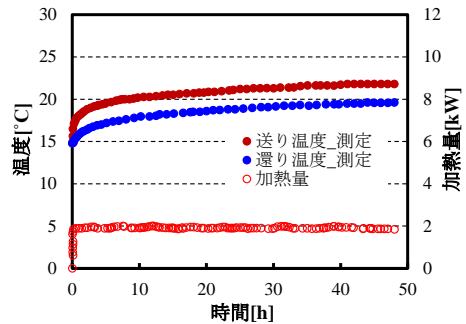


Fig. 3 熱応答試験結果
Results of Thermal Response Test

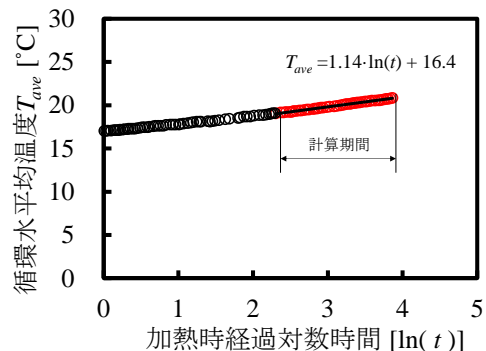


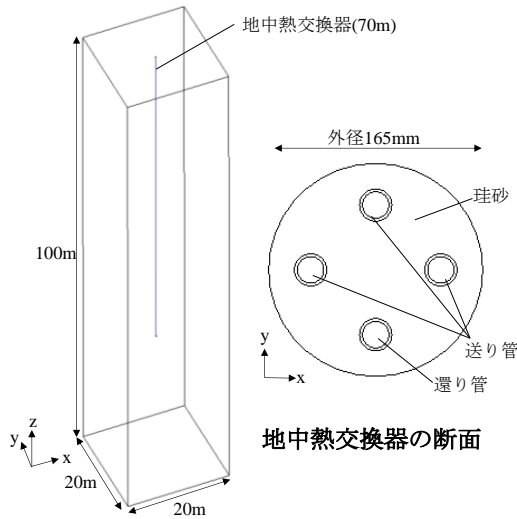
Fig. 4 対数時間と平均循環水温度の関係
Logarithmic Time vs. Averaged Circulating Water Temperature

[W/m·K], q : 単位深さあたりの熱交換量であり, 本報では加熱量に相当[W/m], T_i : 地盤の初期温度[°C], r : 掘削口半径[m], a : 地層の熱拡散係数[m²/s]

3. 熱応答試験の再現計算

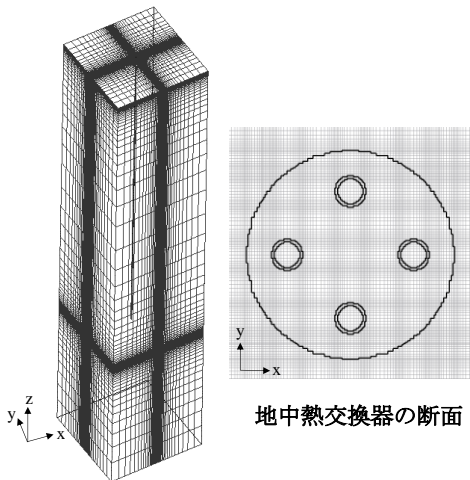
3.1 計算概要

本章では, 前述した熱応答試験の再現計算を実施する。Fig. 5 は計算対象モデルの概要を, Fig. 6 は計算対象のメッシュデザインを示す。計算領域は, 20×20×100mとした。Table 1 は, 計算および境界条件を示す。計算プロセスは, はじめに流れ場の定常計算を実施し, 得られた流れ場を用いて温度場のみの非定常計算を行う。熱応答試験のみを対象とするならば, 流れ場と温度場を連成さ



計算対象モデルの全体図

Fig. 5 計算対象モデル
Computational Model



計算対象モデルの全体図

Fig. 6 計算対象のメッシュデザイン
Grid Design for Analysis

せた非定常計算を行うことも可能である。しかしながら, 葛らは, 4000 時間後の計算結果を用いて地中熱交換器の単位採放熱係数を算出し, その妥当性を報告している¹⁰⁾。したがって, 長期間の計算を行うためには, 計算負荷を抑えた手法が実用的であり, その再現精度を検討する。本報で想定した計算領域であれば, 4000 時間後においても境界面まで熱交換器から発生した熱が到達しないことを確認している。Table 2 は, 物性条件を示す。地盤に関しては, 前章の有効熱伝導率を与える。熱交換器の循環流体は, 熱応答試験時に水が使用されたため, 水の物性値を与える。実運用時は, 不凍液 (ブライン) として濃度 40%のエチレングリコールが使用される。

3.2 測定値と計算値の比較

Fig. 7 は, 熱応答試験の測定値と計算値の比較結果を示す。送り温度と還り温度は, 測定値をよく再現している。Fig. 8 は, 48 時間後の平面温度分布を示す。Fig. 8 に示される通り, 熱が地盤方向へ同心円状に拡散していく様子がみられる。本報で検討した計算方法は, 実用上は十分な精度を有していると考えている。そこで, 次章では, 本手法を用いて分岐管方式と他の方式の性能比較結果を報告する。

4. 分岐管方式と従来方式の性能比較

4.1 計算対象

本章では, 前章で検証した手法の応用事例として, 分岐管方式と従来方式の性能比較結果を報告する。

Table 1 計算および境界条件

List of Calculation and Boundary Conditions

計算コード	STREAM V2022
乱流モデル	Standard $k-\epsilon$ model
圧力解法	SIMPLEC
移流項	QUICK
メッシュ	5,915,916メッシュ (186 ^x ×186 ^y ×171 ^z)
時間刻み	300秒
初期温度	全領域: 14.8°C
流入	速度: 12L/minを均等分配 温度: 還り温度と加熱量27W/mより算出
流出	0Pa
壁面 (速度)	一般化対数則
壁面 (温度)	流体固体界面: 一般化対数則 領域境界: 断熱

Table 2 物性条件

List of Material Properties

材料	熱伝導率 [W/m·K]	熱容量 [MJ/m ³ ·K]	
地盤 ¹¹⁾	1.89	3.0	
珪砂 ¹²⁾	2.45	1.9	
ポリエチレン樹脂 ¹³⁾	0.48	2.3	
材料	熱伝導率 [W/m·K]	熱容量 [MJ/m ³ ·K]	粘性係数 [mPa·s]
水(20°C)	0.60	4.2	1.0
エチレングリコール (40%, 20°C) ^{14, 15)}	0.46	3.7	2.3

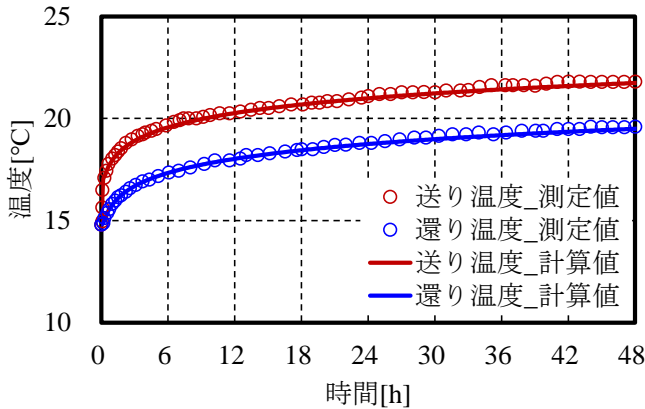


Fig. 7 熱応答試験の測定値と計算値の比較
Comparison of Measured and Calculated Values
for Thermal Response Test

Table 3 は、検討対象モデルの一覧を示す。分岐管方式(4way)との比較対象として、U字管(以下、Uチューブ)を2本使用したダブルUチューブ方式(DU1)を想定する。ダブルUチューブ方式は、施工のしやすさからテープなどで2本のUチューブを密着させた状態で施工されることが一般的である。Photo 2 は、そのイメージを示す。密着状態では、送り管と還り管で熱損失が発生しやすいと推測される。その影響を定量的に把握するために、密着状態を想定した断面形状(DU2)も比較対象とすることとした。補足として、分岐管方式は、Photo 1 に示すスペーサーを一定ピッチで装着しながら施工されるため、送り管と還り管の間隔を一定に保つことができる。

4.2 計算条件と検討ケース

前節の計算対象を基に検討を行う。検討項目は、対象モデル3ケース、地盤の有効熱伝導率4ケース、循環流量4ケースでの総数48ケースとなる。計算および境界条件は前章を踏襲する。ただし、循環流体はエチレングリコール(Table 2)に変更した。検討ケースの設定は、任意評定ガイドライン¹¹⁾を参考とした。計算期間は183日間(4392時間)とした。

4.3 検討結果

本報では、各方式の性能評価の指標として単位採放熱係数を採用する^{10, 16)}。単位採放熱係数 q'_p [W/m·K]は、以下に示す(4)式より求められる。

$$q'_p = \frac{q_p}{(T_{pm} - T_{s0})} = \frac{q_p}{\Delta T_{pm}} \quad (4)$$

ここに、 q_p : 熱交換器単位長さ当たりの採放熱量[W/m]、 T_{pm} : 時間経過後の循環流体平均温度[°C]、 T_{s0} : 初期地中温度[°C]

単位採放熱係数は、熱交換器長さ当たりおよび地中と循環流体の温度差当たりの採放熱量を表す。単位採放熱係数が大きいほど、性能が良いということを意味する。

Fig. 9 は、地盤の有効熱伝導率 2.0W/m·K、循環流量 15L/min のケースにおける単位採放熱係数の経時変化を

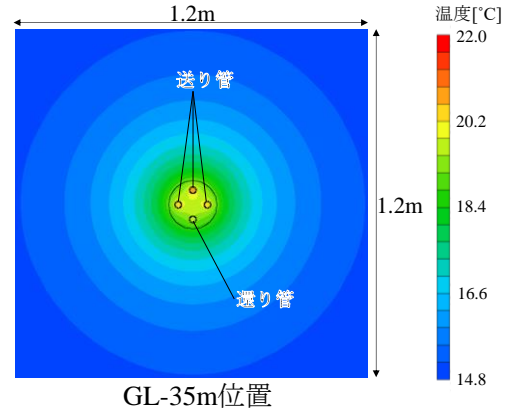


Fig. 8 48時間後の平面温度分布
Plane Temperature Distribution after 48 Hours

Table 3 計算対象モデル一覧
List of Calculation Models

名称	4way	DU1	DU2
断面形状			
方式	分岐管 (開発方式)	ダブルU (従来方式)	ダブルU (密着想定)
送り管 [本数]	3	2	2
還り管 [本数]	1	2	2
口径 [mm]	165	165	165
配管 外径 [mm]	25	34	34
配管 厚み [mm]	2.3	3.5	3.5
配管 間隔 d [mm]	67.2	50.5	35



Photo 2 2本のUチューブが密着状態となるイメージ
Image of Two U-Tubes in Close Contact

示す。Fig. 9 に示すように、単位採放熱係数は、計算開始直後にピークが発生し、その後はテーリングしていく様子が確認された。この傾向は、既往の報告と一致する¹⁰⁾。本報では、183日間の連続運転を想定した計算であるが、間欠運転を行うことで、熱交換効率を高めた運用が可能であることを示唆する結果である。

Fig. 10 は、地盤の有効熱伝導率 $2.0\text{W/m}\cdot\text{K}$ としたケースにおける循環流量と単位採放熱係数の関係を示す。Fig. 10 は、183日後の単位採放熱係数を比較した結果を示している。流量に関する依存性はみられるものの、本報の対象ケースでは、 10L/min 以上となると、その依存

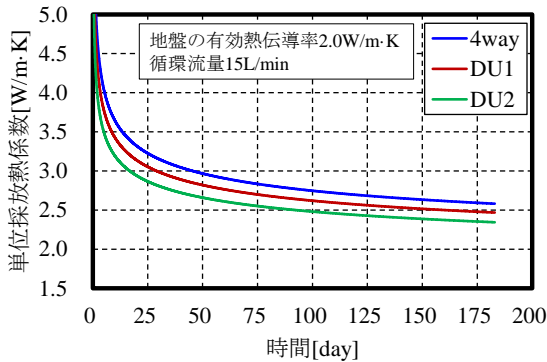


Fig. 9 単位採放熱係数の経時変化の例

Examples of Change over Time in Coefficient of Heat Extraction/Injection

性は小さくなることわかる。本評価法は、合理的な流量設定の検討にも有用である。

Fig. 11 は、地盤の有効熱伝導率と単位採放熱係数の関係を示す。Fig. 11 も 183 日後の単位採放熱係数により比較している。循環流量に関係なく各方式の性能は、高い順に 4way, DU1, DU2 となる。開発方式が従来方式よりも高い熱交換効率を有していることが改めて確認された。ただし、ケース 4way と DU1 の単位採放熱係数は、最大で約 5% の差、DU2 と比較すると約 10% の差となっている。Fig. 12 は、熱交換器の周辺の平面温度分布の一例を示す。分岐管方式は、従来方式と比べて、送り管からの

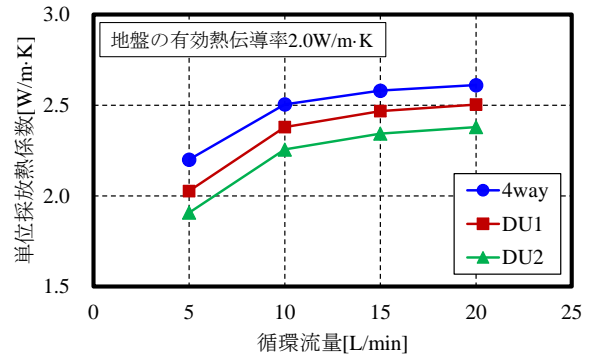


Fig. 10 循環流量と単位採放熱係数の関係

Relationship between Circulating Flow Rate and Coefficient of Heat Extraction/Injection

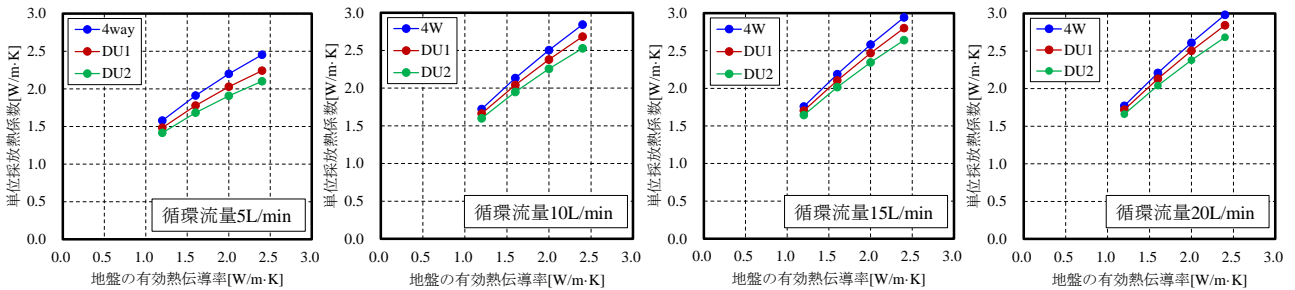


Fig. 11 地盤の有効熱伝導率と単位採放熱係数の関係 (左から循環流量5, 10, 15, 20L/minの順に示す)

Relationship between Effective Thermal Conductivity of Ground and Coefficient of Heat Extraction/Injection (Circulation Flow Rates of 5, 10, 15, and 20 L/min are shown from Left to Right.)

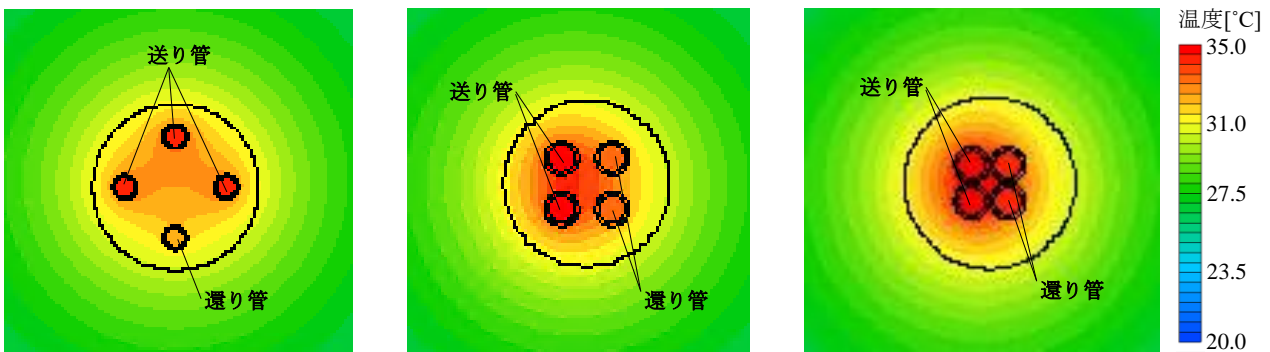


Fig. 12 熱交換器の周辺の温度分布の例 (左から4way, DU1, DU2の順に示す)

Examples of Temperature Distribution around Ground Heat Exchanger (Shown from Left to Right: 4way, DU1, DU2)

熱が還り管に影響する程度が相対的に小さいことが温度分布から確認できる。ダブルUチューブ方式は、配管間隔を確保して施工することが高い熱交換効率を得るために重要であるといえる。しかしながら、配管間隔を確保するためにスパーサーなどを利用するといった工夫がなされた実用報告は、見当たらないのが現状である。

4.4 本手法の活用例と今後の課題

本手法の活用例としては、新方式を開発する際の事前検討や妥当な掘削深さ、循環流量の決定、ラインの選定といった詳細設計の支援が考えられる。本手法は、地盤の有効熱伝導率を除き、物性値はカタログ値等を用いている。有効熱伝導率については、例えば東京都は、「東京地中熱ポテンシャルマップ」として、都全域の有効熱伝導率の分布状況を公開している³⁾。また、計算負荷の小さいケルビンの線源理論を応用することで、ヒートポンプの性能などを含めた年間の消費エネルギー評価への展開が考えられる。その際に、ケルビンの線源理論で必要となる熱交換器の熱抵抗 R は本手法で求めることができる。熱交換器の熱抵抗 R は、幾何形状に加えラインの物性や循環流量に依存するため、流体解析により求めることが妥当と考えられる。

今後の課題は、地下水流の考慮である¹⁷⁾。地下水流を考慮した解析ができれば、地盤のボーリング調査から推定される熱伝導率だけで、性能予測が行える可能性がある。今回使用した汎用流体解析コードでも地下水流を模擬した解析は不可能ではない。しかしながら、その再現には必要となるモデル定数類が格段に増えるため、解析精度の検証が難しいという課題がある。

5. まとめ

本報では、汎用流体解析コードを用いて地中熱交換器の性能予測を行うと共に、分岐管方式と他の方式との性能比較結果を報告した。得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 本報で検討した手法は、熱応答試験の結果を精度よく再現した。
- 2) 本手法で必要となるモデル定数は、地盤の有効熱伝導率のみであり、汎用性は高い。
- 3) 本手法を用いて、開発方式と従来方式を比較しても、開発方式は相対的に高い熱交換効率を有している。

今後は、年間のエネルギー評価への展開や解析方法のさらなる高度化などを行う予定である。

参考文献

- 1) 環境省：地中熱読本 2021，環境省，2021.3
- 2) [地中熱ポテンシャルマップ | 東京都産業労働局](#) [エ](#)

[エネルギー \(tokyo.lg.jp\)](#),

<https://www.tokyogeoheatmap.metro.tokyo.lg.jp>, (参照 2024-05-01)

- 3) 東京都，事業者・都内区市町村向け再エネ設備導入支援ガイド，令和5年度版
- 4) 環境省：令和4年度地中熱利用状況調査結果，2022
- 5) 三小田憲司，他：分岐管方式地中熱交換器の採熱実験，日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)，pp. 1061-1062, 2013
- 6) 三小田憲司，他：研究施設における地中熱利用システムの実測研究，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集(秋田)，pp. 13-16, 2014
- 7) 三小田憲司，原嶋寛：長野市の事務所におけるコンパクト分岐管方式地中熱ヒートポンプシステムの運転実績，日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)，pp. 1401-1402, 2016
- 8) 三小田憲司，土屋貴史：分岐管方式地中熱交換器の採熱実験および性能予測，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集(長野)，pp. 197-200, 2013
- 9) 地中熱利用促進協会：一定加熱・温水循環方式熱応答試験(TRT)技術書，2018.8
- 10) 葛隆生，他：地中熱ヒートポンプシステムにおける地中熱交換器仕様の設計方法に関する研究，その1 地中熱交換器の採放熱量の定量化とその応用，日本建築学会環境系論文集，第76巻，第659号，pp. 59-66, 2011.1
- 11) 住宅性能評価・表示協会：クローズドループ型地中熱ヒートポンプシステムにおける相当熱交換器長換算係数に関する任意評定ガイドライン，2022.3
- 12) 駒庭義人，他：砂利充填された地中熱交換井の熱交換能力に関しての室内実験による評価，日本地熱学会誌，第33巻，第4号，pp. 169-178, 2011
- 13) 八光電機物性データベース，[各種物質の性質：金属（固体）の性質 \(hakko.co.jp\)](#)，<https://www.hakko.co.jp/library/qa/qakit/html/h01020.htm>, (参照 2023-06-10)
- 14) 北海道大学環境システム工学研究室：地中熱ヒートポンプシステム改訂2版，オーム社，2020.10
- 15) 東京ファインケミカル，オーロラライン[®]Pカタログ，[aurora_brine_p.pdf \(tokyofine.jp\)](#)，https://www.tokyofine.jp/assets/document/aurora_brine_p.pdf, (参照 2023-06-10)
- 16) 成田樹昭：垂直型地中熱交換器の性能評価と設計法に関する研究，第一報単位採放熱係数と地中温度偏差による評価法，空気調和・衛生工学会論文集，196，pp. 1-9, 2013.7
- 17) 阪田義隆，長野克則：地中熱利用における課題と地下水学からのアプローチ，地下水学会誌，第62巻，第4号，pp. 515-524, 2020