

地下水流れを伴う地中熱交換器周囲温度計算手法の開発  
その2 地中熱ヒートポンプシステムシミュレーションへの適用

Development of Calculation Method for Ground Heat Exchangers Field Temperature  
involving Groundwater Advection

Part 2 Application of Neural Network Model for Ground Source Heat Pump System Simulation

学生会員 ○小司 優陸 (北海道大学) 正会員 葛 隆生 (北海道大学)  
正会員 阪田 義隆 (北海道大学) 正会員 長野 克則 (北海道大学)  
Yutaka SHOJI\*<sup>1</sup> Takao KATSURA\*<sup>1</sup> Yoshitaka SAKATA\*<sup>1</sup> Katsunori NAGANO\*<sup>1</sup>

\*<sup>1</sup> Hokkaido University

The regression model of the moving cylindrical source temperature response function by the artificial neural network is demonstrated in the previous report (Part 1). In this paper, the simulation method under the time-variable heat flux and the multiple GHE condition was shown by using the principle of superposition on the regression model obtained by the previous report. The calculation time required for the simulation in one-hour increments for two years was 180.3 s, indicating that this method can rapidly simulate the change in the temperature of the ground heat exchangers field considering the groundwater flow.

## はじめに

前報の序論において述べた様に、地中熱ヒートポンプ (GSHP) システムの普及にはライフサイクルコストを削減する設計が課題となっており、これに対し、GSHP システムの設計段階において地下水流れによる熱輸送を考慮することで導入する地中熱交換器 (GHE) 規模を削減できることが考えられる。

その1 ニューラルネットワークによる温度応答回帰モデルでは、地下水流れ場における地中熱交換器周囲温度場の非定常高速計算手法として、無限円柱周りのポテンシャル流れ場における遺留拡散問題：移動無限円筒 (MICS) 問題について、数値解析により得られた定常加熱条件下での温度応答関数をニューラルネットワークによって回帰したモデルを構築した。

ここで、前報において示されたニューラルネットワークによる MICS 温度応答関数回帰モデルは定常加熱条件下での GHE 周囲温度変化を表すものである。この MICS 温度応答関数のニューラルネットワークによる回帰モデルは、重ね合わせの原理により温度応答関数と GHE 放熱量変化の時間領域における畳み込みを行うことで、非定常加熱条件下での GHE 周囲温度場を計算することができる<sup>1)</sup>。

本報 その2 地中熱ヒートポンプシステムシミュレーションへの適用では、前報に示したニューラルネットワークによる MICS 温度応答関数回帰モデルを用いて非定常加熱条件下における GHE 周囲の地中温度計算を行う

手法について示す。

## 1. 温度応答関数と放熱量関数の畳み込み計算

前報において示した MICS の無次元温度応答 $\Theta$ は、一定加熱条件下での温度変化の記述である。しかしこの応答関数が時刻によってその形状が変化しない時、非定常加熱条件下での地中温度変化は、以下の様に GHE 放熱量変化 $q'$ と温度応答関数 $G = \Theta/2\pi k$ の畳み込み積によって表すことができる<sup>1)</sup>。

$$\Delta T(r, t) = \sum_{i, t_i \leq t} q'(t_i) \cdot G(t - t_i) \\ = (q' * G)(t)$$

ここで、 $q'(t_i) = q(t_i) - q(t_{i-1})$ である。この様にして、一定加熱条件下での MICS 温度応答関数を非定常加熱条件下でのシミュレーションに応用することができる。

## 2. 複数埋設管条件における地中温度計算

前報に示した MICS 温度応答関数のニューラルネットワークによる回帰モデルを、上記の手法により非定常加熱条件下での GHE 周囲温度場シミュレーションに適用する。

実際の地中熱利用システムでは複数本数の GHE を利用することが考えられ、この複数埋設管による温度場への相互干渉が発生する。図-1 に示す様に、注目する埋設管を $i$ として、埋設管 $i$ を含め埋設管を $n$ 本任意地点に埋設したとする。また、地中には水平方向に一定速度の地下水

流れが存在するものとする。この時、埋設管*i*の管表面温度変化 $\Delta T_i$ は以下の様に表すことができる。

$$\Delta T_i(r_b, t) = \Delta T(r_b, t) + \sum_{j=1}^n \Delta T(r_{d,i,j}, t)$$

ここで、*i*は注目する GHE、*j*は注目する GHE の周囲の GHE であり、 $i \neq j$ である。即ち、上式において、右辺第一項が注目する GHE 自身の放熱による温度変化を表し、第二項がその周囲の GHE からの干渉による温度変化を表している。前報に述べた様に、GHE 近傍での温度場に関しては移動線源モデル<sup>2),3)</sup>は誤差が生じるため、MICS モデルの温度応答関数を用いる必要がある。しかし、GHE から十分に離れた地点では移動線源モデルと MICS モデルの解は一致するとみなすことができる。従って、本研究では注目する GHE の管表面温度計算に対し前報に示した MICS 温度応答関数のニューラルネットワークによる回帰モデルを用い、周囲の GHE による温度変化に関しては移動線源理論の解を用いて地中温度計算を行うこととする。

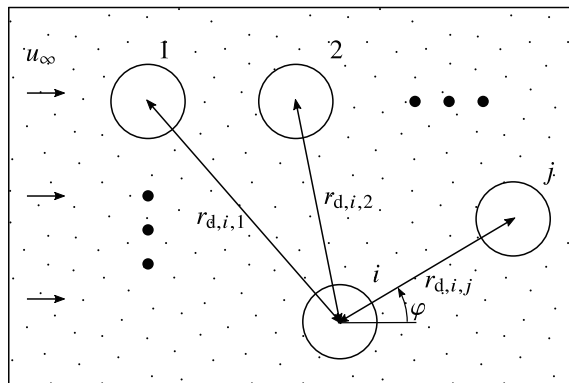


図-1 複数埋設管概念図

### 3. MICS 温度応答のニューラルネットワーク回帰モデルによる GHE 表面温度計算

地中熱利用システムにおいては地中熱交換器内部の熱媒温度の値を得ることが重要となる。この熱媒温度を得るための地中熱交換器周囲温度場計算手法として、GHE 表面の平均温度を計算し、その GHE 表面と GHE 内部 U チューブ間の熱抵抗モデルを用いる手法が示されている<sup>4),5)</sup>。従って、本研究においても MICS 温度応答について円筒表面の平均値を算出しシミュレーションに適用する。円筒表面平均温度の計算においては、温度応答の対称性を考え、 $0 \leq \varphi \leq \pi$ の範囲で等間隔に点を取り、それらの点の平均値を円筒表面平均温度とする。

平均値を取る点数を決定するため、点数を変化させた時の誤差の評価を行った。 $u_\infty = 100 \text{ m year}^{-1}$ の条件において 1 時間刻み 1 年間のそれぞれの時刻における温度応答関数を計算し、 $0 \leq \varphi \leq \pi$ の範囲で 50 点をとった平

均値に対する MSE を算出する。設定点数に対する GHE 表面平均温度の MSE 推移を図-2 に示す。点数を増やすほど MSE が小さくなっていることがわかるが、点数が 10 点程度の条件でも MSE は無次元温度にして  $1.5 \times 10^{-6}$  と十分に小さい。従って、本手法における GHE 表面の MICS 温度応答平均値を求める点数は 10 点とした。

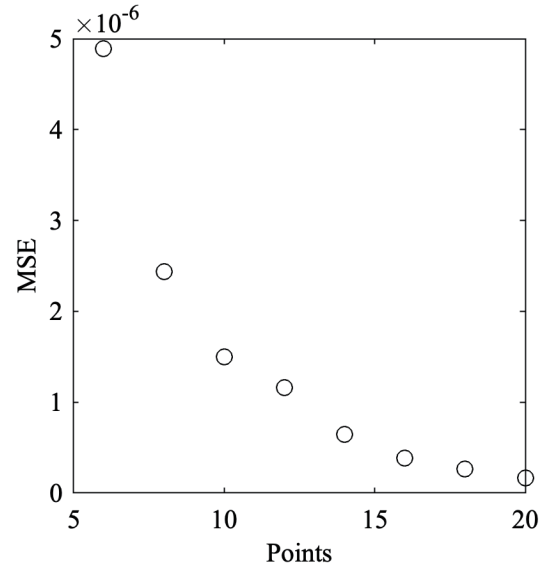


図-2 設定点数に対する GHE 表面平均温度の MSE 推移

### 4. MICS 温度応答関数のサブサンプリングによる計算負荷削減

エネルギーシミュレーションにおいては、その時間刻みを 1 時間に設定しているものが多く、MICS 温度応答関数の 1 時間ごとの値を計算する必要がある。この計算負荷を削減するため、温度応答関数が時間に対して対数的に変化することを考慮し、対数間隔でサンプリングした点のみで温度応答関数を評価し、それ以外の点については内挿補間によって値を得る手法が提案されている<sup>6)</sup>。図-3 に温度応答関数のサブサンプリング概念図を示す。

本研究では、対数的に等間隔なサンプリング幅を決定するため、時間軸（フーリエ数軸）に対して  $\ln(Fo) = n \times (\ln 10 / N_{\text{smp}})$ ,  $n = 1, 2, \dots$  とサンプリング点を設定して、 $N_{\text{smp}}$ の値を  $N_{\text{smp}} = 5, 10, \dots, 100$  と変化させた時の誤差と計算時間を検証した。

図-4 に  $N_{\text{smp}}$  に対する MSE を、図-5 に  $N_{\text{smp}}$  に対する最大絶対誤差を示す。なおここでの MSE 及び絶対誤差については内挿補間を用いずに 1 時間ごとの温度応答を計算した時の温度応答間数値に対して計算されている。これらの図から、サンプリング点数が多くなるに伴って MSE や最大絶対誤差は小さくなっていることがわかる。しかし、MSE は  $N_{\text{smp}} = 10$  でも  $9.69 \times 10^{-11}$  であり、最大絶対誤差についても  $N_{\text{smp}} = 10$  で  $9.80 \times 10^{-5}$  であった。前報において示した MICS 温度応答のニューラルネ

ットワーク回帰モデルの最大絶対誤差が 0.0212 であったことから、 $N_{\text{smp1}}$ の値は 10 で十分であると考えられる。また図-6 に $N_{\text{smp1}}$ に対する計算時間の変化を示す。いずれの $N_{\text{smp1}}$ の値の条件においても 2 秒以下で 8760 時間のそれぞれの時刻での MICS 温度応答関数の値が計算できており、 $N_{\text{smp1}}$ の増加に伴い計算時間が増加していることがわかる。なお、同条件においてサブサンプリングを用いずに 1 時間ごとに MICS 温度応答関数の計算を行う場合では、その計算時間は 26.3 s であった。このことから、MICS 温度応答関数のサブサンプリングによる計算負荷削減効果が示された。本研究では、必要となる精度に対する計算時間を考え $N_{\text{smp1}}$ の値は 10 とした。

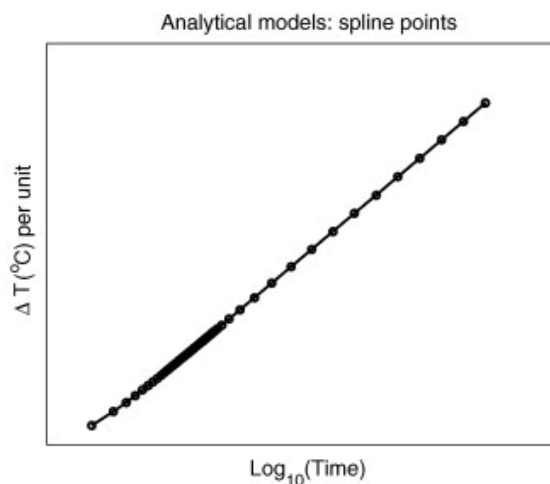


図-3 温度応答関数のサブサンプリング概念図  
(D. Marcotte et al., 2008<sup>6)</sup>)

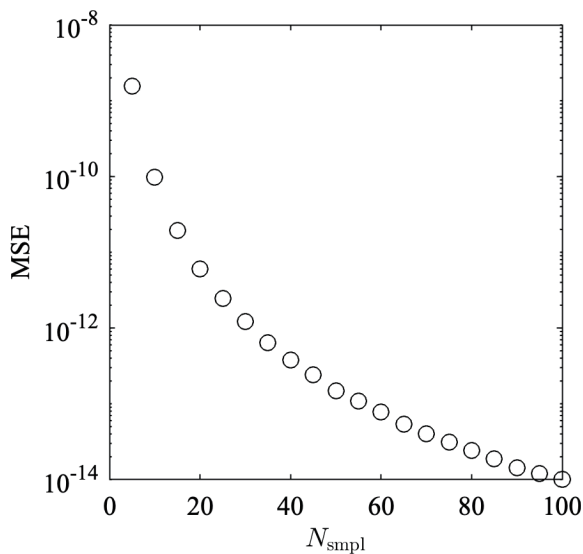


図-4  $N_{\text{smp1}}$ に対する MSE

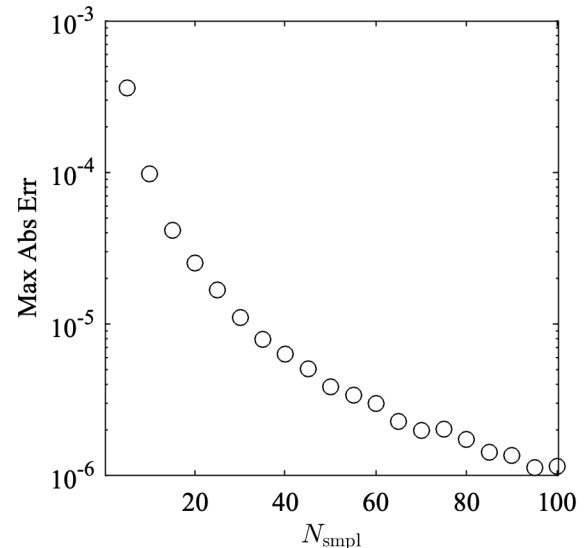


図-5  $N_{\text{smp1}}$ に対する最大絶対誤差

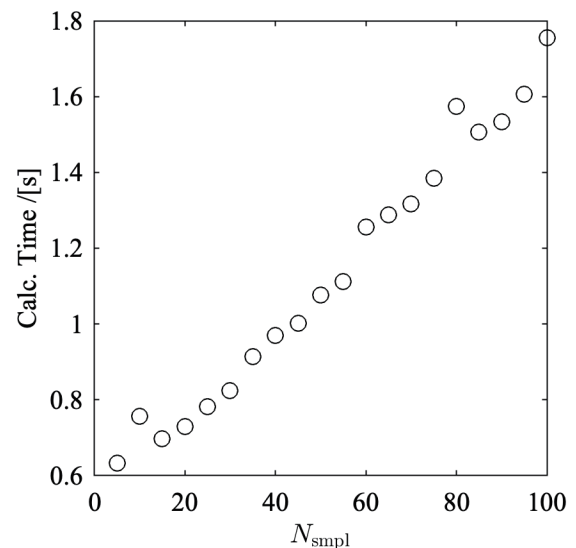


図-6  $N_{\text{smp1}}$ に対する計算時間

## 5. 非定常放熱条件におけるシミュレーション

上述の手法によって一定加熱条件下での MICS 温度応答関数を非定常放熱条件下でのシミュレーションに応用することができる。本手法によるシミュレーションの検証のため、また計算速度の測定のため以下の様なシミュレーションを行った。

図-7 にシミュレーションにおける GHE の配置図を、図-8 に GHE の非定常加熱量条件を、表-1 に地中物性条件をそれぞれ示す。8 本の GHE を  $2 \times 4$  の配置に設置し、GHE 間隔は 3 m とする。また地下水流速は、 $0 \text{ m year}^{-1}$ 、 $100 \text{ m year}^{-1}$  の 2 条件を設定した。また計算期間は 2 年間 (17520 h) とした。

図-9 にシミュレーションによって得られた GHE 表面の 1 時間ごと地中温度変化を示す。地下水流速が  $0 \text{ m year}^{-1}$  の条件に比べ、 $100 \text{ m year}^{-1}$  の計算結果では地下水流れによって長期的な地中からの採熱による地中

温度の低下が抑えられており、地下水流れを考慮した地中温度の計算が可能となっていることがわかる。また、この時の1時間刻み2年間のシミュレーションに要した計算時間は180.3 sであった。計算負荷の大きな数値解析と比較して、本手法によって計算速度の向上が示される結果となった。

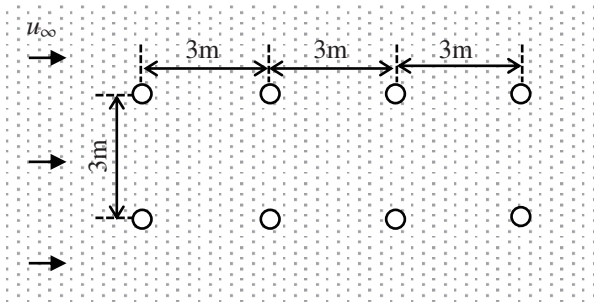


図-7 GHE 配置図

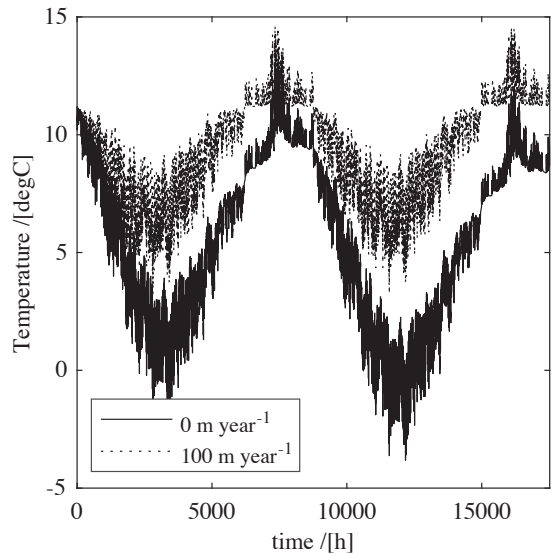


図-9 GHE 表面平均温度変化

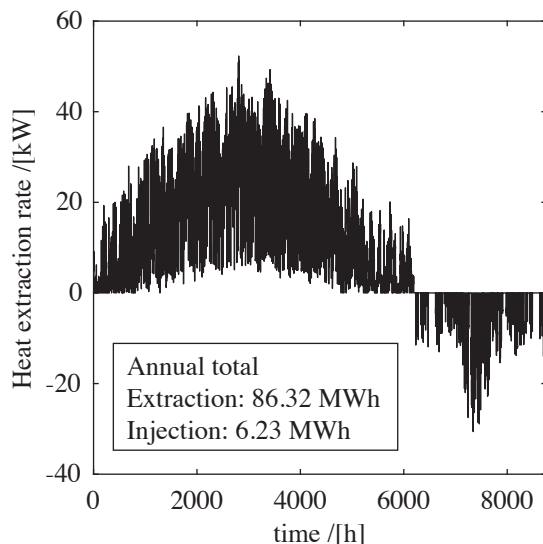


図-8 GHE 非常加熱条件

表-1 地中条件

物性	値
初期地中温度 / [K]	11.2
有効熱伝導率 / [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	2.0
密度 / [kg m <sup>-3</sup> ]	1500
比熱容量 / [kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	2.0
地下水流速 / [m year <sup>-1</sup> ]	0, 100

記号

$Fo$  : フーリエ数,  $G$  : 温度応答関数,  $k$  : 熱伝導率 [W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>],  $Pe$  : ペクレ数,  $q$  : 単位長さあたり放熱量 [W m<sup>-1</sup>],  $q'$  :  $q$ の時間増分 [W m<sup>-1</sup>],  $r$  : 半径 [m],  $T$  : 温度 [K],  $t$  : 時間 [s],  $u$  : 流速 [m s<sup>-1</sup>],  $\alpha$  : 熱拡散率 [m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>],  $\theta$  : 無次元温度,  $\varphi$  : 角度 [rad],  $N_{smpi}$  : サンプリングパラメータ

結論

前報 その 1 によって得られたニューラルネットワークによる回帰モデルに重ね合わせの原理を用いて、非常加熱条件、また複数 GHE 条件におけるシミュレーションを行う手法について示した。

この時の1時間刻み2年間のシミュレーションに要した計算時間は 180.3 s であり、本手法によって高速に地下水流れを考慮した地中熱交換器周囲温度変化のシミュレーションが可能であることが示された。

参考文献

- 1) Yavuzturk, Cenk, and Jeffrey D Spitler, 'A Short Time Step Response Factor Model for Vertical Ground Loop Heat Exchangers', *Ashrae Transactions*, 105 (1999), 475-85
- 2) Diao, Nairen, Qinyun Li, and Zhaohong Fang, 'Heat Transfer in Ground Heat Exchangers with Groundwater Advection', *International Journal of Thermal Sciences*, 43 (2004), 1203-11
- 3) Molina-Giraldo, Nelson, Philipp Blum, Ke Zhu, Peter Bayer, and Zhaohong Fang, 'A Moving Finite Line Source Model to Simulate Borehole Heat Exchangers with Groundwater Advection', *International Journal of Thermal Sciences*, 50 (2011), 2506-13
- 4) Nagano, Katsunori, Takao Katsura, and Sayaka Takeda, 'Development of a Design and Performance Prediction Tool for the Ground Source Heat Pump System', *Applied Thermal Engineering*, 26 (2006), 1578-92
- 5) 葛隆生, 長野克則, 武田清香, 中村靖, '地下水流れを有する地中温度の計算方法とその応用', *空気調和・衛生工学会 論文集*, 31 (2006), 9-17
- 6) Marcotte, Denis, and Philippe Pasquier, 'Fast Fluid and Ground Temperature Computation for Geothermal Ground-Loop Heat Exchanger Systems', *Geothermics*, 37 (2008), 651-65