



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	地中熱交換器数値シミュレーションにおけるデータ科学手法の応用に関する研究 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	小司, 優陸
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第15376号
Issue Date	2023-03-23
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/89583
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Yutaka_Shoji_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士(工学) 氏名 小司 優陸

審査担当者 主査 准教授 葛 隆生
副査 教授 長野 克則
副査 教授 石井 一英
副査 教授 森 太郎

学位論文題名

地中熱交換器数値シミュレーションにおけるデータ科学手法の応用に関する研究
(Application of data science methods in numerical simulation of ground heat exchanger)

現在の社会において地球温暖化に起因する気候変動は人類が直面する喫緊の課題であり、再生可能かつ地産地消・ユビキタスな安定的再生可能エネルギー源として地中熱利用が注目されている。一方でその普及拡大のためにはライフサイクルコストの低減が必要とされており、このため導入コストの大きくを占める地中熱交換器 (Ground Heat Exchanger: GHE) の必要十分な規模を推定する最適設計が求められている。

GHE 最適設計を行う上では、GHE およびその周囲地盤を対象とした熱的数値シミュレーションが不可欠である。しかしながら設計プロセスにおいて GHE 数値シミュレーションを利用するためには、その解析の高精度化および高速/簡便化が必要である。一方で近年では計算機資源の高度化・コモディティ化やセンサー増大によるデータの蓄積とそのオープン化などによりデータ科学的手法の隆盛が分野を問わず著しい。本論文はこのような背景のもと、GHE 数値シミュレーションに対しデータ科学手法を応用することで、その解析を高精度化および高速/簡便化することを示している。以下に各章の内容を記載する。

第1章は序論であり、研究の背景、既往の研究とその課題、およびこれに対する本研究の方針を述べ、論文の骨子を示している。

第2章では、地下水流れを考慮した GHE シミュレーションを実現する移流拡散型無限円筒熱源 (MICS) モデルに対して、その有限体積法による数値解析結果を学習させた人工ニューラルネットワーク (Artificial Neural Network: ANN) モデルを構築することで、MICS モデル温度応答関数の高速・高精度な計算を可能とする手法を提案している。開発された ANN モデル—MICS-ANN モデル—は、有限体積法による解析では通常数十分から数時間程度を要する計算を 10 秒以下のごく短時間で行うことができ、またその再現精度についても十分要求精度を満足することを示している。高負荷計算を要するようなモデル計算を事前に実施し、その結果を学習し再現するような ANN モデルを構築する、いわゆるサロゲートモデルの有効性を確認している。

第3章では、前章の MICS-ANN モデルを利用した、地下水流れの卓越した地層を伴う複層地盤を考慮した準3次元ボアホールモデルの開発と検証である。本章で提案されているモデルでは、従来の一般的な GHE シミュレーションと異なり、地盤に対して深度ごとに異なる熱物性値や地下水流速を考慮することが可能である。また、汎用数値熱流体解析による3次元非定常シミュレーションとの比較検証を実施し、非常によい一致を示している。以上より、開発されたモデルにより短時間で

簡便に熱物性値や地下水流れの深度分布を考慮した高精度 GHE 数値シミュレーションを実施できることが示されている。

第 4 章では、データ同化手法を応用した GHE 数値シミュレーションの状態・モデルパラメータ及びその不確実性推定について述べている。本章では観測データの情報をシミュレーションに取り込みより正確な状態・モデルパラメータ推定を実現する統計的手法—データ同化の応用に焦点を当て、そして代表的なデータ同化手法であるアンサンブルカルマンフィルタを GHE 数値シミュレーションに対し適用している。GHE 数値シミュレーションに対して、実際の運用観測データを同化することによってシミュレーションの予測精度を向上できることを示しており、またモデルパラメータとして推定される土壌有効熱伝導率は、標準的な推定試験である熱応答試験で得られる土壌有効熱伝導率とよく一致する結果となっている。以上より GHE 数値シミュレーションにおいてもデータ同化による状態・モデルパラメータ推定精度の向上が有効であることを示している。

第 5 章では、第 4 章で示したデータ同化を用いて地下水流速と土壌有効熱伝導率の同時推定する手法を提案している。第 3 章で開発した MICS-ANN モデルを応用した準 3 次元ボアホールモデルに対して、汎用数値熱流体解析モデルの計算結果に乱数を付加したものを擬似観測データとして同化する観測システムシミュレーション実験を行い、真のモデルパラメータの再現性を確認している。その結果、モデルパラメータは一定の誤差を伴うものの真値の近傍に推定値が収束し、GHE 数値シミュレーションの再現精度が向上することを示している。

第 6 章は本論文の総括した結論を述べている。

これを要するに、著者は ANN による機械学習、データ同化といったデータ科学的手法を応用することによって GHE シミュレーション、特に地下水流れを伴う複層地盤を考慮した GHE モデルに対して予測計算の高速/簡便化及び高精度化を実現している。これは GHE 最適設計の実現、ひいては再生可能エネルギー導入の拡大に貢献し、エネルギー環境工学の発展に寄与するところが大きいと考える。よって筆者は北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格があるものと認める。