



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	<a href="https://hdl.handle.net/2115/89583">https://hdl.handle.net/2115/89583</a>
Rights(URL)	<a href="https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</a>
Type	doctoral thesis
File Information	Yutaka_Shoji_abstract.pdf, 論文内容の要旨



## 学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 小司 優陸

### 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さ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、特にその予測精度と計算負荷に課題が残されている地下水流れを伴う複層地盤を考慮した GHE モデル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/簡便化することを検討するものである。

本論文は全 6 章から成る。各章の要旨を以下に述べる。

第 1 章では序論として研究の背景、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た。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ものであった。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が確認される結果を得た。

第 3 章では、前章 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を開発した。現在の一般的な GHE シミュレーションでは、GHE が埋設された地点の地盤熱物性値についてはその深度分布は考慮せず、空間的に一様な熱物性値を用いて計算を行うものがほとんどである。しかし、GHE が埋設された地盤において一部の帯水層のみ卓越した地下水流れ等があることは珍しくなく、このような条件においては空間的に一様な熱物

性値を用いた計算では誤差が大きくなることがある。本研究で提案するモデルでは、地盤に対して深度ごとに異なる熱物性値を考慮することができる。このモデルは、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の結果と非常によい一致を示した。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は計算負荷やモデル構築に要する時間的コストが大きく、これに比較して本研究で提案したモデルによって、簡便に地下水流れの卓越した地層を伴う、熱物性値の深度分布を考慮した高精度 GHE シミュレーションが可能となった。

第4章では、データ同化手法を応用した GHE 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た。モデルが実際の現象をよく再現するためにはモデルパラメータを精度良く推定することが、よいモデルを開発することと同程度に重要である。GHE シミュレーションの文脈においては土壌物性値、とりわけその予測精度を左右するモデルパラメータの一つが土壌有効熱伝導率である。本章では観測データの情報を数値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た。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 シミュレーションに対し適用することで、実際の運用観測データを用いて事後的に土壌有効熱伝導率を推定する手法を示した。アンサンブルカルマンフィルタによる土壌有効熱伝導率推定値は、標準的な推定試験である熱応答試験による推定値とよく一致する結果を示し、GHE 数値シミュレーションの文脈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た。

第5章では、同じく上記に示したアンサンブルカルマンフィルタによるデータ同化を用いた地下水流速と土壌有効熱伝導率の同時推定手法を提案した。第3章に示した MICS-ANN モデルを利用した準3次元 GHE モデルのような地下水流れを考慮したモデルにおいては、そのモデルパラメータとして土壌有効熱伝導率と同様に帯水層における地下水流速についても GHE 温度場の再現精度に大きく関わるものである。一方で、地下水流速に関しては地中熱利用の文脈においてその推定手法は確立されていないのが現状である。本手法では、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た。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、数値シミュレーションの再現精度が向上した。

最後に第6章に本論文を総括した結論を述べた。本研究において 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 数値シミュレーション、とく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た。