

京都大学	博士（総合学術）	氏名	山本 駿
論文題目	広域水理地質構造の三次元モデリング法の開発による地下水流動系の解明と地中熱ポテンシャル評価への応用 (Development of a Three-Dimensional Modeling Method for Regional Hydrogeological Structures and Its Application to Groundwater Flow System Analysis and Assessment of Geothermal Potential)		
(論文内容の要旨)			
本論文は、広域スケールにおける地下水流動系および地中熱ポテンシャルの解明を目的として、観測データに基づく三次元水理地質構造モデリング手法を新たに構築し、その有効性を実地域において検証した研究である。 特に、地層の三次元構造を明示的に取り込んだ地下水流動解析および熱輸送解析を一体的に実施し、京都盆地をはじめとする地域への応用を通じて、地下水の流動特性と地中熱利用可能性を定量的に評価している点に、本論文の大きな特徴がある。 さらに、熊本地域における地震に伴う地下水位変動解析を通じて、地殻変動と地下水応答との関係についても検討しており、地下水解析に関する基礎研究から応用・社会実装に至るまでを包含した、総合的かつ実践的な研究成果を取りまとめた論文である。本論文は、以下の章から構成される。 第1章では、本研究論文の目標と、それを取りまく学問的状況についてまとめている。まず本章では、地下水資源が人類社会の生存基盤を支える重要な要素であること、ならびに気候変動対策・脱炭素化の観点から地中熱利用の重要性が高まっている現状を整理した。その上で、地下水流動系および地中熱ポテンシャルを適切に評価するためには、広域スケールでの三次元水理地質構造の把握が不可欠であることを示し、本研究の背景を明確化した。さらに、既存研究の課題を整理し、広域地下水流動系の解明と地中熱ポテンシャル評価を統合的に扱う研究目的および研究課題を設定した。 第2章では、本研究で用いた研究手法の全体像をまとめている。三次元地質モデリング手法、地下水流動解析および熱輸送解析の理論的枠組みを示すとともに、地中熱ポテンシャル評価の考え方を整理した。また、地下の熱物性を実測するための熱応答試験（Thermal Response Test, TRT）の手法を説明した。さらに、熊本地域における地下水位時系列解析のために、多変量線形回帰モデルを用いた解析手法を示し、本研究で採用した演繹的・モデル駆動型アプローチと帰納的・データ駆動型アプローチの位置づけを明確にした。 第3章では、京都盆地を対象として、三次元水理地質構造モデルの構築および地下水流動・熱輸送解析を実施した具体的内容についてまとめている。ボーリングデータ、反射法地震探査データ、既存の基盤岩深度モデルなど複数の地質情報を統合し、浅部から深部に至る三次元地質構造を整理した。これらを基に定常地下水流動解析を行い、盆地内の地下水流動場を推定した。さらに、地下水流動場と地質構造を考慮した熱輸送解析を行い、見かけ有効熱伝導率を指標とした地中熱ポテンシャルの空間分布を推定した。 第4章では、熊本地域における長期地下水位観測データに基づく時系列解析についてまとめている。地下水位変動に影響を与える降水量、気圧、地球潮汐を説明変数とした多変量線形回帰モデルを構築し、これらの外的要因を統計的に除去した残差成分を抽出した。抽出した残差成分を用いて、地殻変動に関連する地下水			

位変動の検出を試み、地質条件や帯水層構造の違いが地下水位応答特性に与える影響を整理した。

第5章では、地中熱利用の実用化を念頭に、産学官連携による実証および社会実装に関する取り組みをまとめている。京都盆地内の複数地点において熱応答試験（TRT）を実施し、地下の熱伝導率および熱抵抗を実測した。これらの実測結果と数値解析結果を比較することで、地中熱ポテンシャル評価の妥当性を検討した。また、地中熱利用に関する技術ワークショップを開催し、研究成果を行政・関係機関と共有する取り組みについて整理した。

第6章では、本研究で得られた成果をまとめている。三次元水理地質構造モデリング手法の構築とデータ統合の枠組みを示し、京都盆地において地下水流動系および地中熱ポテンシャルを広域的に評価した結果を整理した。また、熊本地域における地下水位時系列解析を通じて、地殻変動と地下水位変動との関係を検討した。さらに、地中熱利用に関する実証および社会実装の取り組みを含め、本研究が提示した統合的解析枠組みについてまとめた。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、広域地下水流動系の解明と地中熱ポテンシャル評価という、水理地質学および応用地下水学の中核的課題に対し、三次元水理地質構造モデリングを基盤として体系的に取り組んだ水理地質学および地下水学分野に関する研究成果がまとめられ、評価できる点は次のとおりである。

1. 論文の導入部分である第1章および第2章では、地下水資源と地中熱利用を人類社会の持続性という観点から位置づけ、研究目的と手法を明確に整理している。演繹的・モデル駆動型アプローチと、帰納的・データ駆動型アプローチを意識的に使い分ける研究設計は、以降の各章の解析内容を論理的に支える基盤となっており、博士論文としての構成上の妥当性を有している。
2. 京都盆地の解析の章においてはボーリングデータ、反射法地震探査、基盤岩深度情報など、形式や精度の異なる多様な地質データを統合し、浅部から深部までを対象とした三次元地質構造モデルを構築した点は、技術的にも労力的にも高度な成果である。この地質構造モデルを基に地下水流動解析および熱輸送解析を行い、地中熱ポテンシャル評価へと展開している点は、地下水学と地中熱利用研究を接続する実践的な枠組みを提示している。地球統計学を駆使して、京都盆地浅部の砂・礫・粘土の3次元分布を高分解能でシミュレーションできたとともに、深部に位置する複数の海成粘土層の分布形態を推定し、これらを組み合わせることで水理地質構造の全体像の解明に至った点にも新規性が認められる。この水理地質構造モデルにより、従来よりも詳細な地中熱ポテンシャルマップを作成でき、地中熱利用の経済的メリットが大きい場所を特定することが可能になった。
3. 数値解析結果については、計算の再現性や限界を踏まえた慎重な解釈が行われており、モデルによる推定結果を過度に一般化せず、適用範囲と課題を明確に示している点は、学術的妥当性の観点から評価できる。さらに、熱応答試験 (TRT) による実測値との比較を通じて、数値解析結果の検証を行っている点は、博士論文として重要な検証姿勢を備えている。
4. 熊本地域の地下水位時系列解析は、3次元水理地質構造モデルをベースとし、地殻変動に伴う地下水位の時間・空間的応答を統計的に抽出しようとする試みであり、長期観測データを活用した応用性の高い研究である。降水量・気圧・地球潮汐といった外的要因を明示的に分離し、残差成分に着目する解析手法は、地下水位変動の解釈に新たな視点を与えている。地質条件や帯水層構造の違いが応答特性に反映され、これを地殻歪みと関連させた点は、広域地下水流動系の理解を補完する成果として位置づけられる。
5. 地中熱利用に関する実証試験および産学官連携の取り組みが整理されており、学術研究成果を実務・設計・運用へと接続する過程が具体的に示されている。数値解析、実測 (TRT)、社会実装を一連の研究としてまとめている点は、総合生存学の学位論文としての性格を明確に体现している。

以上のように、本論文は、三次元水理地質構造モデリングを核として、広域地下水流動系の理解、地中熱ポテンシャル評価、地下水位時系列解析を最終的に社会活動にまで応用したものであり、水理地質学および地下水学の発展に寄与するところ

が大きい。

よって、本論文は博士（総合学術）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和8年1月16日、論文内容とそれに関連した事項について試問した結果、合格と認めた。

なお、本論文は京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。