

令和 2 年 6 月 12 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K19084

研究課題名（和文）地下き裂ネットワークの効率的推定と持続的地熱フィールドデザイン

研究課題名（英文）Efficient Fracture Network Estimation and Sustainable Design for Geothermal Fields

研究代表者

鈴木 杏奈（Suzuki, Anna）

東北大学・流体科学研究所・助教

研究者番号：60796449

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,500,000円

研究成果の概要（和文）：地熱開発における持続的なフィールド設計を目指し、トレーサーデータに基づく解析モデルの開発を行った。地熱貯留層解析モデルにするため、トレーサー移動と熱移動とを組み合わせた井戸間のネットワークモデルについて検討した。トレーサー応答とともに温度応答を用いることで流路内の表面積推定を可能にした。数値計算ならびにいくつかのフィールドデータ（トルコBalcovaフィールド、米国Fenton Hillフィールド）を用いて、手法の妥当性を示すことができた。推定したき裂表面積は可視化し、感覚的にもわかりやすい結果の表示方法を開発した。異なる還元流量ごとの将来の電力予測等も行い、一連の還元設計を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地熱貯留層内の水の枯渇により発電量の減衰が発生しており、貯留層内の圧力・水量維持を目的とした能動的な水の還元が求められている。しかしながら、還元冷水によって生産地域を冷却する可能性もあるため、持続的な還元井の設計（位置・温度・流量など）が極めて重要な課題である。トレーサー試験は還元流体の流動を直接的に評価できるため、トレーサー応答を用いて対象き裂岩体の流動を特徴づけることができれば、地熱開発における経済的、時間的メリットが極めて大きい。本研究で提案したトレーサー解析手法は、従来よりも簡単にトレーサーを解析し、還元に伴う温度低下などの将来予測まで行うことができる。

研究成果の概要（英文）：A tracer data-based analysis method was developed to design sustainable fields in geothermal developments. To consider geothermal reservoirs, combinations of tracer transport and heat transfer between wells were used for the analysis. The temperature response was analyzed to estimate surface area in the fractures. Numerical simulation and actual field data from several fields (Balcova field, Turkey; Fenton Hill, USA) were used to demonstrate the validation of the analysis method. The estimated fracture surface area was visualized. A series of reinjection designs for different flow rates were also developed by predicting the future power of the systems.

研究分野：貯留層工学

キーワード：地熱 トレーサー ネットワーク 熱応答 解析モデル 将来予測 最適化

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

日本は、世界第3位の地熱資源を有しているものの、開発が停滞している。日本最大の地熱発電所(福島県柳津西山地区)において、貯留層内の水の枯渇により発電量の減衰(43.6%)が発生しており、貯留層内の圧力・水量維持を目的とした能動的な水の還元が求められている。しかしながら、還元冷水によって生産地域を冷却する可能性もあるため、持続的な還元井の設計(位置・温度・流量など)が極めて重要な課題である。

トレーサー試験は還元流体とともに特定の試薬を投入し、生産井でその濃度変化を計測する試験方法である。還元流体の流動を直接的に評価できるため、トレーサー応答を用いて対象き裂岩体の流動を特徴づけることができれば、地熱開発における経済的、時間的メリットが極めて大きい。従来型流体流動モデルはき裂(割れ目)間の機敏な流体挙動を表現するために詳細なデータを必要とし、モデル構築に多大な時間を要するため、開発者は得られたトレーサー応答を矢印で繋いで定性的に評価するに止まっている。

石油工学分野では、トレーサーデータに基づいた井戸間ネットワークモデルが開発されている(Wen et al., 2016)。本研究では、応募者がこれまで開発してきた、き裂間の流体流動を記述できる非整数階微分を含む偏微分方程式(以下非整数階微分モデルと呼称)を組み込むことで、既存流体流動モデルと大きく異なるアプローチのトレーサー解析手法を提案する(Fig. 1)。

2. 研究の目的

以下を本研究の研究目的とする。

- (I) 数値モデルを組み込んだ井戸間き裂ネットワーク解析モデルの開発
- (II) 解析モデルの可視化
- (III) 地熱フィールドへの適用
- (IV) 地熱フィールドにおける還元設計の提案

3. 研究の方法

多孔体中の石油移動挙動を対象として開発されたモデルを新たに地熱貯留層対象のモデルに作り変えるため、トレーサー移動と熱移動とを組み合わせた井戸間のネットワークモデルについて検討した。既存数値シミュレータにより、流体流動を計算し、開発したネットワークモデルが適用できるかを検証した。その後、可視化のためのプログラムコードを作成し、ビジュアルに結果を示すことで作業時間の効率化を図った。地熱関連会社よりフィールドのトレーサーデータの提供を受け、開発したモデルを用いて解析し、還元井の最適な場所・流量・温度の提案を行った。

4. 研究成果

トレーサー移動と熱移動とを組み合わせた井戸間のネットワークモデルについて検討した(Figure 2)。一対の井戸間に対し、流体が流路内の外部に流出、外部から流入する場合に対応するモデルを作成し、また還元井が複数ある場合についても検討を行った。研究計画では、非整数階微分を含むモデルの利用を検討していたが、温度応答と組み合わせる方向でモデルを開発した。一方、非整数階微分を含むモデルについては、放射性物質移行に関するモデルの解析解を導出し、他分野への展開を検討した。

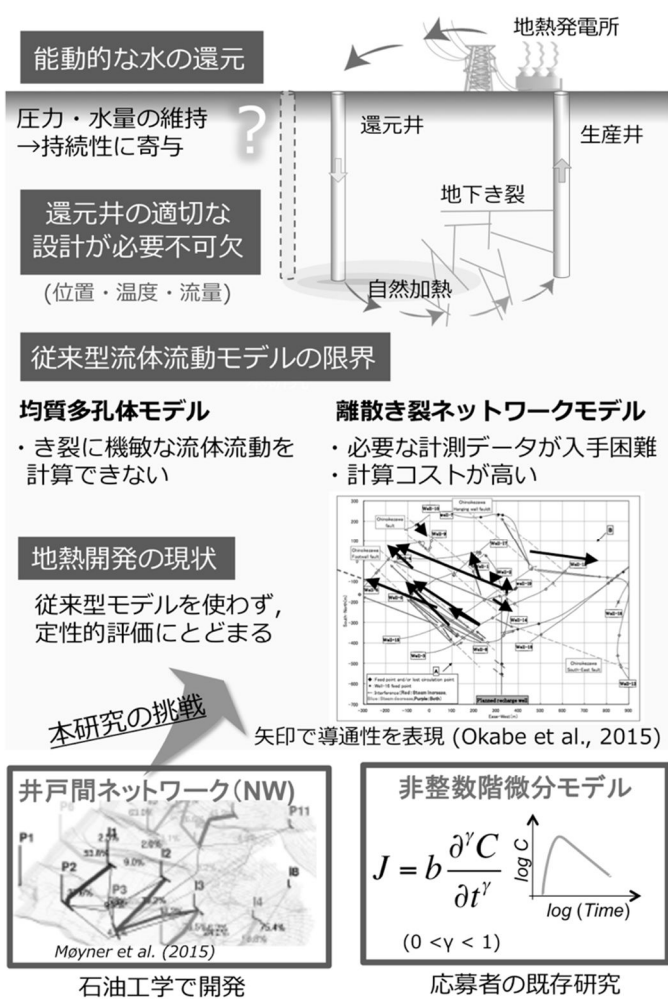


Fig. 1: 研究背景

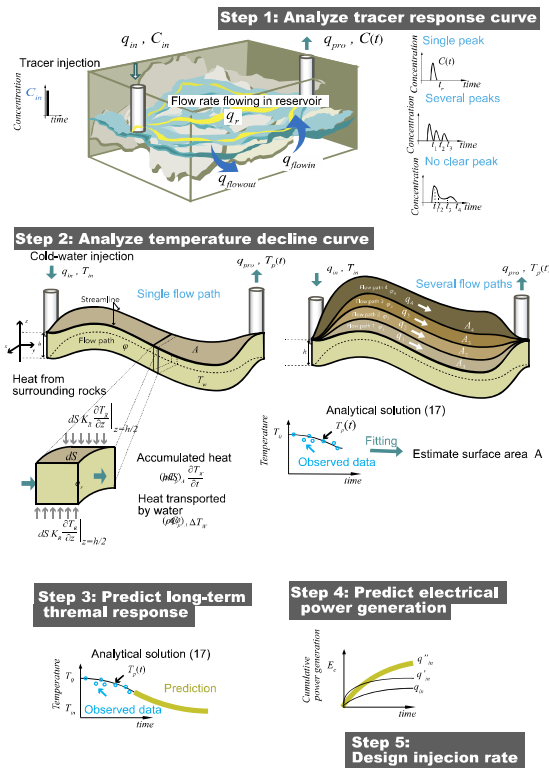


Figure 2. Workflow of procedure for estimating fracture surface area and predicting temperature decline and future power generation.

数値計算結果でその妥当性を示した。また、温度応答を用いることで、流路内の表面積を推定した。この手法については、数値計算ならびにトルコ Balcova フィールド、米国 Fenton Hill の実データを用いて妥当性を検証した (Figure 3)。これにより、地熱開発において持続可能なフィールドデザインに必要な、熱供給に關与する地下構造を推定できる可能性を示した。

また、推定結果を可視化し (Figure 4)、理にかなった推定ができていることが示され、感覚的にもわかりやすい結果の表示方法を開發することができたと言える。新たにエラー解析について検討し、計測エラーやモデルエラーから生じる予測誤差について議論ができるモデルを考案した。

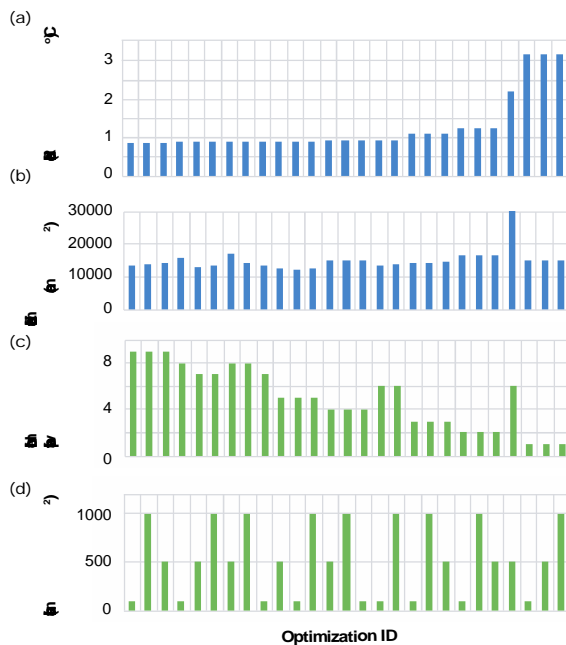


Figure 3. Optimization of surface area between well B4 and B9 in Balcova geothermal field. (a) residual errors between field data and calculated curve, (b) estimated surface area, (c) number of flow paths, and (d) initial value for optimization. The optimization ID was arranged in order from the smallest residual errors.

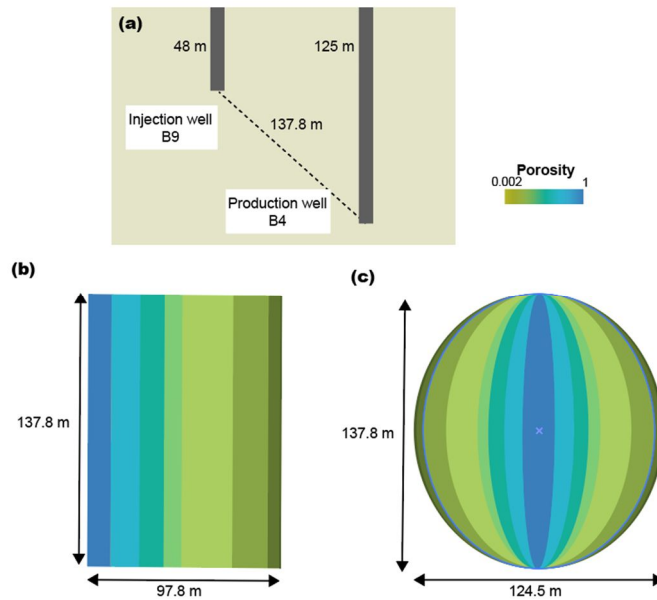


Figure 4. Estimated results of heat transfer area between well B4 and B9 in the Balcova geothermal field. (a) Schematic of well position, (b)(c) estimated surface areas with nine flow paths, and (d)(e) estimated surface area with two flow paths, assuming the area is (b)(d) rectangular or (c)(e) circle, respectively.

得られたき裂表面積を用いて、異なる還元流量ごとの将来の電力予測等も行い、一連の還元設計を示した (Figure 5)。

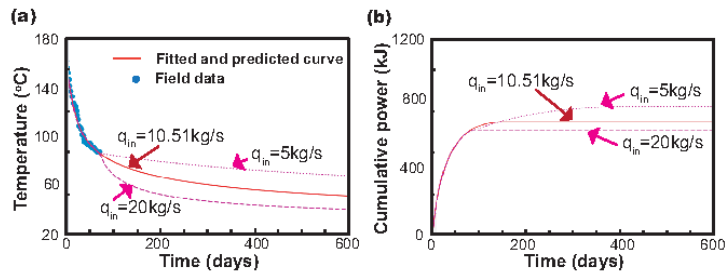


Figure 5. Future prediction by using Fenton Hill data. (a) Temperature declines for different injection rates and (b) cumulative power for different injection rates.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Suzuki, Ikhwanda, Yamaguchi, Hashida	4. 巻 9
2. 論文標題 Estimations of Fracture Surface Area Using Tracer and Temperature Data in Geothermal Fields	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geosciences	6. 最初と最後の頁 425 ~ 425
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/geosciences9100425	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 A. Suzuki, J. Cui, Y. Zhang, S. Uehara, K. Li, R. N. Horne, and T. Ito	4. 巻 -
2. 論文標題 Experimental study on nano-/microparticles transport to characterize structures in fractured porous media	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Rock Mechanics and Rock Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00603-020-02081-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 A. Suzuki, J. Minto, N. Watanabe, K. Li, and R. N. Horne	4. 巻 129
2. 論文標題 Contribution of 3D printed fracture networks to development of flow and transport models	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Transport in Porous Media	6. 最初と最後の頁 485 ~ 500
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11242-018-1154-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 鈴木杏奈	4. 巻 38
2. 論文標題 地下資源開発における「かたち」と「ながれ」	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ながれ	6. 最初と最後の頁 21 ~ 25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Suzuki Anna, Fomin Sergei, Chugunov Vladimir, Hashida Toshiyuki	4. 巻 10
2. 論文標題 Mathematical Modeling of Non-Fickian Diffusional Mass Exchange of Radioactive Contaminants in Geological Disposal Formations	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Water	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/w10020123	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Suzuki Anna	4. 巻 41
2. 論文標題 Estimation of Fracture Surface Area Based on Tracer and Temperature Histories	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Geothermal Resources Council Transactions	6. 最初と最後の頁 2865 ~ 2879
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ikhwanda Fuad, Suzuki Anna, Hashida Toshiyuki	4. 巻 -
2. 論文標題 Development of Numerical Methods for Estimating Fluid Flow Path in Fractured Geothermal Reservoir	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the 43rd Stanford Workshop on Geothermal Reservoir Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 A. Suzuki
2. 発表標題 Characterization of Relationships between Flow and Fracture Structures by Persistent Homology
3. 学会等名 九州大学エネルギーウィーク2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 A. Suzuki, Y. Mukuhira, R. N. Horne, A. Abe, A. J. Hawkins, T. Ishibashi, and P. K. Kang
2. 発表標題 Link between tracer and microseismic analysis to comprehensive understanding of hydraulic feature of fractured geothermal reservoir
3. 学会等名 The 19th International Symposium on Advanced Fluid Information (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 E. K. Bjarkason and A. Suzuki
2. 発表標題 Accounting for model and observation error in geothermal thermal breakthrough models
3. 学会等名 the 16th International Conference of Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山口碧, 鈴木杏奈, 橋田俊之
2. 発表標題 持続的地熱開発を目的とした還元に伴うトレーサー及び熱応答を利用した地下流路の推定
3. 学会等名 第49回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Suzuki Anna, Mukuhira Yusuke, Horne Ronald N., Fehler Michael C., Kang Peter K.
2. 発表標題 Link between tracer and microseismic analysis to comprehensive understanding of hydraulic feature of fractured geothermal reservoir
3. 学会等名 The 18th International Symposium on Advanced Fluid Information (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Suzuki Anna
2. 発表標題 3D printing of controllable fracture network and evaluating of flow characteristics
3. 学会等名 2018 Flow and Transport in Permeable Media (GRS) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木杏奈
2. 発表標題 デジタル・テクノロジーを駆使した貯留層評価研究の挑戦
3. 学会等名 日本地熱学会, 地熱貯留層に関する研究会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Suzuki Anna
2. 発表標題 Estimation of Fracture Surface Area based on Tracer and Temperature Histories
3. 学会等名 Geothermal Resources Council 2017 Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 鈴木 杏奈
2. 発表標題 トレーサー・熱応答を用いたき裂表面積の推定
3. 学会等名 日本地熱学会平成29年学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Ikhwanda Fuad、Suzuki Anna、Hashida Toshiyuki
2. 発表標題 Development of Numerical Methods for Estimating Fluid Flow Path in Fractured Geothermal Reservoir
3. 学会等名 The 43rd Stanford Workshop on Geothermal Reservoir Engineering (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考