

奨励金No.1480

不連続性岩盤に対する連成数値シミュレーション技術の高度化と持続可能な地熱発電実現への展開

緒方 奨

大阪大学大学院 工学研究科 助教

Advancement of coupled numerical simulation for discontinuous rock mass and its application to sustainable geothermal systems

Sho Ogata,

Graduate School of Engineering Osaka University, Assistant Professor



本研究では、地熱貯留層となる亀裂群を高温岩盤中に人工造成するタイプの地熱発電促進技術（Enhanced Geothermal System: EGS）を駆使した地熱発電の長期性能評価に資する数値シミュレータを創出した。具体的には、EGS実施時の複雑な連成現象の発生とそれが人工造成した亀裂群に与える影響を正確に予測するため、コンピュータ上で“亀裂”という不連続領域を精密に表現可能な不連続体解析手法を基盤とした、革新的連成数値シミュレータの開発に成功した。

In this study, a numerical simulator was developed to evaluate the long-term performance of geothermal power generation using the Enhanced Geothermal System (EGS), a type of geothermal power generation technology in which fractures are artificially created in hot bedrock to serve as geothermal reservoirs. Specifically, an innovative coupled numerical simulator based on a discontinuity numerical analysis method that can precisely represent a discontinuity called a “fracture” on a computer, has been successfully developed to accurately predict the occurrence of complex coupled phenomena during implementation of EGS and their effects on artificially created fractures that works as geothermal reservoir.

1. 研究内容

1.1 背景と研究目的

持続可能な地熱発電に資する新技術の一つとして、高温の深部岩盤に人工の地熱貯留層となる亀裂群を造成し、そこに流体を注入し流動させることで蒸気を生産し発電を行う貯留層造成EGSという地熱発電技術が近年注目を集めている。この貯留層造成EGSの実施時には、地熱貯留層（亀裂）内で熱、流体、力学、化学に関する様々な現象間の相互作用（連成現象）が生じ、その影響により時々刻々と亀裂の構造・透水性が変わると共に蒸気生産量も変動することが想定される。しかし、

この蒸気生産量の時間変動を長期間精度よく予測する手法は未だ確立されておらず、持続可能な地熱発電の実現は世界的にも難航している。

本研究では、地熱貯留層（亀裂）内で生じる連成現象とそれが亀裂に与える影響を正確に予測するため、コンピュータ上で“亀裂”という不連続領域を精密に表現可能な不連続体解析手法を基盤とした、他に類を見ない革新的連成数値シミュレータを開発する。これにより、地熱発電実施時の水圧破碎による亀裂造成からその後の長期間にわたる亀裂の透水性変化まで正確にシミュレート可能とし、蒸気生産量の長期変動に対する高精度

予測評価の実現を目指す。

これを実現すべく、(1) 不連続体解析を組み込んだ熱－流体－応力－破碎－化学連成数値シミュレータの開発、(2) 地熱貯留層を模擬した室内試験（水圧破碎試験、透水試験）の再現計算を通じたシミュレータの妥当性検証、(3) 高温岩盤での貯留層造成 EGS を想定した長期予測解析、という三つの研究項目に取り組む。

1.2 結果

(1) 不連続体解析を組み込んだ熱－流体－応力－破碎－化学連成数値シミュレータの開発

水圧破碎による岩石内の亀裂の造成過程からその後の流体・熱・物質輸送及び岩石鉱物－流体間の溶解・沈殿反応等の連成現象に伴う長期透水性変化過程を不連続体解析によって計算する解析法を構築した。具体的には、まず、連続体－不連続体統合解析手法（連続体型有限要素法 FEM と不連続体型個別要素法 DEM のハイブリッド手法：FDEM）を用いた陽解法型岩石破碎解析と、不連続亀裂ネットワークモデル（DFNM）を用いた陰解法型の流体流動 FEM 解析（DFNM-IFEM）を連結した岩石の水圧破碎解析手法を構築した。次に、この解析手法を研究代表者がこれまで開発してきた熱－流体－応力－破碎－化学連成解析システム¹⁾に導入することで、不連続体解析ベースの熱－流体－応力－破碎－化学連成数値シミュレータを構築した。各実施内容の概要を以下に述べる。

まず、構築すべき連成数値シミュレータの基盤的解析手法である FDEM の応力・変形計算の精度改善と計算高速化を図った。具体的には、FDEM で一般的に用いられている亀裂モデルである Intrinsic Cohesive Zone Model (ICZM) よりも高い精度で破碎前の応力・変形計算を可能とする Extrinsic Cohesive Zone Model (ECZM) を実装した。また、計算高速化については、GPU カードを用いた独自の並列計算を搭載し 200 倍以上の超高速化を達成した（図 1 参照）。その上で、開発手法

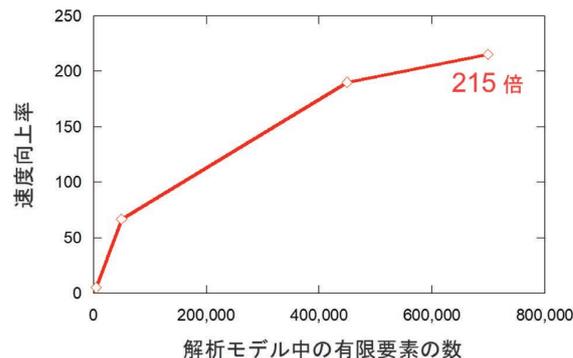


図 1 有限要素数に対する GPGPU 並列化の速度向上率

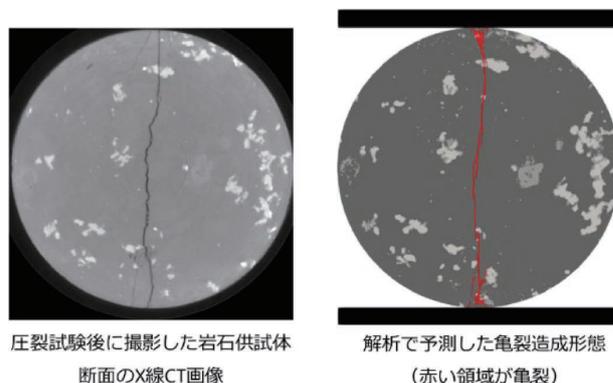


図 2 開発した亀裂造成解析手法の予測結果と実際の亀裂造成形態との比較

により実際の岩石破碎挙動を高精度に再現可能であることを確認した（図 2 参照）。

続いて、構築した FDEM を岩石破碎に加え流体流動過程も記述可能な形へと拡張し、岩石の水圧破碎過程（流体の圧入・流動に伴う岩石破碎過程）を計算可能な解析手法を構築した。なお、FDEM は陽解法に基づき定式化されているため、瞬間的に生じる実際の岩石破碎現象を安定的に計算できる一方で、解析の時間刻みを極めて短く設定する必要がある。ゆえに、そのままでは流体流動等を実現と一致した時間スケールで計算困難となる。

この問題に対し当初の研究計画では、陰解法（より長い時間刻みを適用可能）を用いて FDEM 解析を行う新技術を構築する予定であった。しかし、その様なアプローチでは、FDEM が陽解法に基づいている利点（岩石破碎過程の安定的計算性能）が完全に損なわれることから新たな改善策を

提案した。具体的には、FDEMによる陽解法型の岩石破碎解析とDFNMによる陰解法型の流体流動FEM解析（DFNM-IFEM）を連成させるとともに、FDEM計算では実時間（グローバルタイム）とは対応しない仮想の時間軸（サブタイム）を取り扱う解析手法を提案した（図3参照）。最後に、この解析手法を研究代表者がこれまで開発してきた連成解析システム¹⁾に実装した。

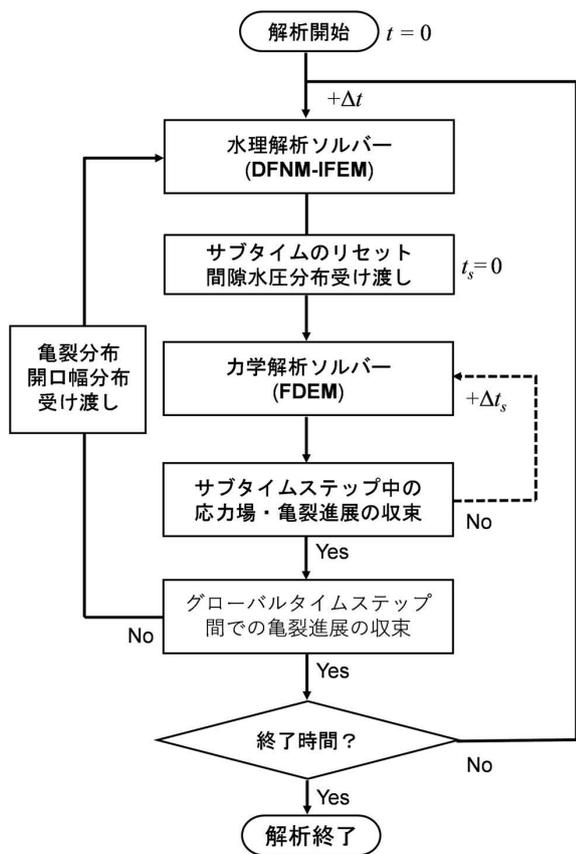


図3 陽解法と陰解法を併用した水圧破碎解析手法の計算フロー

(2) 地熱貯留層を模擬した室内試験（水圧破碎試験、透水試験）の再現計算を通じたシミュレータの妥当性検証

まず、構築したシミュレータを用いて、地熱貯留層環境を模擬した岩石水圧破碎実験の再現計算を実施し水圧破碎による亀裂造成に対するシミュレータの妥当性を検証した。再現対象となる水圧破碎実験は、玄武岩を用いて温度 250℃、拘束圧

30 MPaの高温高压条件で実施された。図4に、水圧破碎による亀裂造成形態に関する実験と計算結果の比較を示す。図4より、構築したシミュレータは実際の亀裂造成形態の特徴を的確に再現できており、地熱貯留層環境での水圧破碎による亀裂造成についてシミュレータの妥当性が確認された。

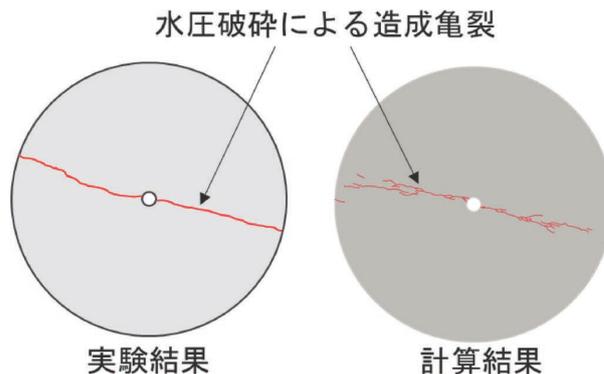


図4 水圧破碎時の亀裂造成形態に関する実験と再現計算の結果の比較（赤い領域が巨視亀裂領域）

続いて、地熱貯留層環境を模擬した岩石亀裂への透水試験の再現計算を通じて亀裂造成後の透水性経時変化に対するシミュレータの妥当性を検証した。再現対象となる透水実験は、花崗岩亀裂を用いて、最大温度 350℃（室温～350℃）・有効拘束圧 20 MPa という亜臨界を含む高温高压条件下で実施された²⁾。再現計算の結果、世界的に見てもはじめて、超臨界地熱貯留層で想定される亜臨界条件下での亀裂の透水性経時変化を的確にシミュレートすることに成功した（図5中の左図参照）。また得られた計算結果から、亀裂の透水性を左右する開口量変化にどのような化学反応がどれだけ寄与しているかを定量評価し（図5中の右図参照）、これまで未解明であった亜臨界条件下での岩石亀裂の透水性変化メカニズムを提示することに成功した。

(3) 高温岩盤での貯留層造成 EGS を想定した長期予測解析

構築したシミュレータを用いて、高温岩盤での

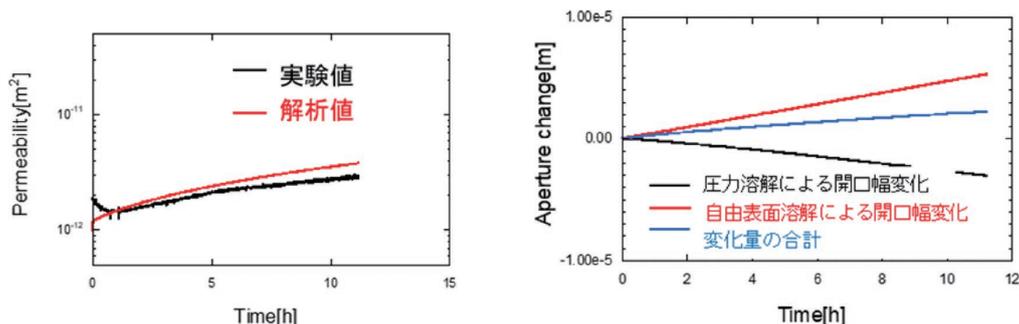


図5 温度 350℃・有効拘束圧 20 MPa 下での花崗岩亀裂透水試験²⁾で計測された亀裂の透過率変化と再現解析結果との比較（左図）、化学反応別の亀裂の開口量変化の比較（右図）



図6 高温岩盤での水圧破碎時の造成亀裂の進展挙動

貯留層造成 EGS の実施過程を想定した長期予測解析を行った。具体的には、① 200℃の岩盤に対し注入井を通じた水圧破碎による亀裂群造成（人工的な地熱貯留層の造成）過程の解析を行い、②造成亀裂群の最大到達地点近傍に抽出井を設置した上で 40℃の水を注入井から抽出井に向かって流動させ回収する地熱流体流動過程の解析を行った。その結果、水圧破碎によって造成された亀裂群（図6参照）の内、岩石鉱物－流体間の溶解または沈殿反応が卓越した亀裂においてのみ、数オーダー以上もの顕著な透水性経時変化が生じ得ることが示された（図7参照）。

引用文献

1) S, Ogata., H, Yasuhara., N, Kinoshita., K, Kishida., Coupled thermal-hydraulic-mechanical-chemical modeling for permeability evolution of rocks through fracture generation and

subsequent sealing, *Computational Geosciences*, Vol. 24, pp. 1845-1864, 2020.

2) A, Okamoto., H, Tanaka., N, Watanabe, H, Saishu., N, Tsuchiya., Fluid pocket of generation in response to heterogeneous reactivity of a rock fracture under hydrothermal conditions, *Geophysical Research Letters*, Vol. 44, pp. 10306-10315, 2017.

2. 発表（研究成果の発表）

1. Sho Ogata, Eita Nishira, Hideaki Yasuhara, Naoki Kinoshita, Toru Inui, Kiyoshi, Kishida, Multi-physics numerical analyses for predicting the alterations in permeability and reactive transport behavior within single rock fractures depending on temperature, stress, and fluid pH conditions, *Soils and Foundation*, Vol. 62, No. 6, 101207 (2022).

化学反応が卓越した亀裂でのみ透水性が顕著に変化
→この様な反応による亀裂の不均質な透水性変化は不連続体解析ベースの熱－流体－応力－破碎－化学連成計算ではじめて解像可能

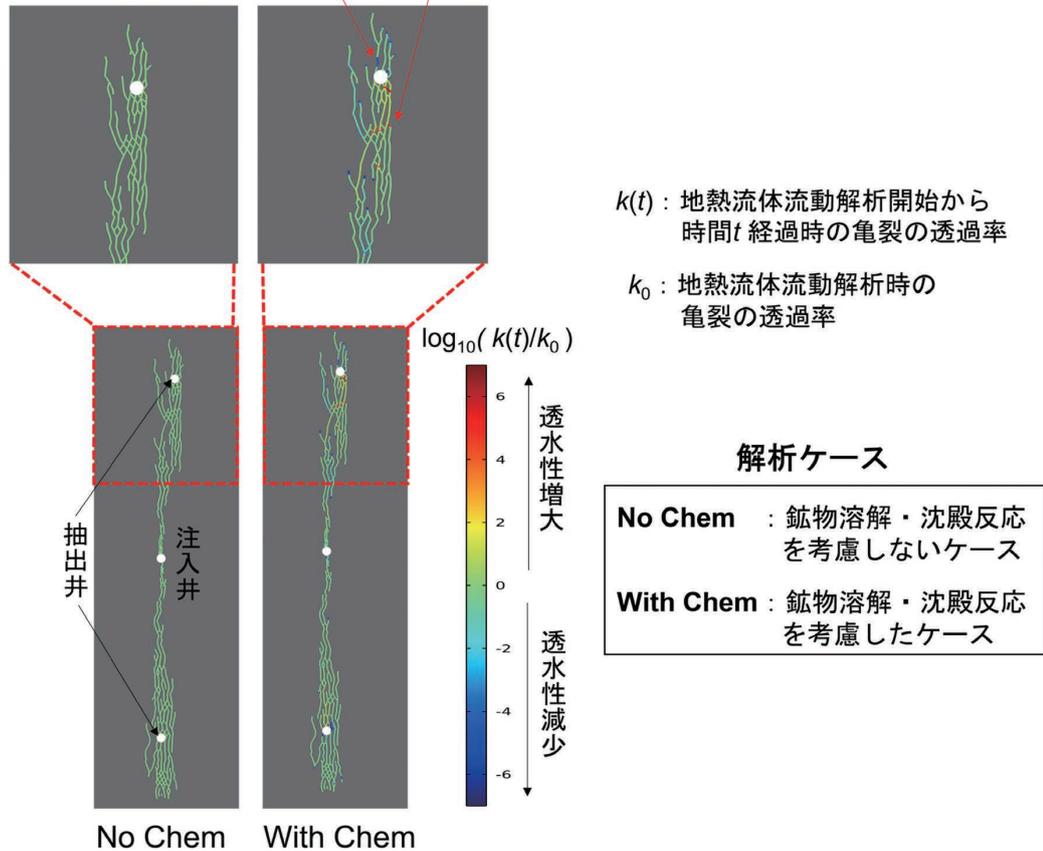


図7 地熱流体流動解析開始後20年時点での亀裂の透水性変化割合の分布（化学反応を考慮した場合と考慮しない場合の比較）

- 緒方奨、前田悠太朗、福田大祐、陳友晴、陽解法－陰解法連成解析法を用いた水圧破碎解析、日本地熱学会令和4年学術講演会講演要旨集、令和4年度日本地熱学会（東京、2022）。
- Yutaro Maeda, Sho Ogata, Daisuke Fukuda, Hideaki Yasuhara, Toru Inui, Development of hydraulic fracturing simulator based on explicit and implicit methods, CouFrac 2022 – International Conference on Coupled Processes in Fractured Geological Media (Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), 2022)。
- Sho Ogata, Yutaro Maeda, Daisuke Fukuda, Hideaki Yasuhara, Toru Inui, Kiyoshi Kishida, Coupled THMC Simulation Based on Explicit Fracture Representation Using Extrinsic Cohesive Zone Model, Proceedings of 56TH US ROCK MECHANICS/GEOMECHANICS SYMPOSIUM, Paper No. ARMA-2022-0642 (2022)。
- Sho Ogata, Hideaki Yasuhara, Naoki Kinoshita, Toru Inui, Eita Nishira, Kiyoshi Kishida, Numerical analyses of coupled thermal-hydraulic-mechanical-chemical processes for estimating permeability change in fractured rock induced by alkaline solution, *Geomechanics for Energy and the Environment*, Vol. 31, No. 100372 (2022)。