



Title	Development of a Novel 3D Hydro-Mechanical Simulator Based on Explicit Fracture Models and Parallel Computing Techniques for Predicting Hydraulic Fracturing Process
Author(s)	前田, 悠太郎
Citation	大阪大学, 2026, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/105474
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 ＜a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">大阪大学の博士論文について をご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏 名 (前 田 悠 太 朗)

論文題名

Development of a Novel 3D Hydro-Mechanical Simulator Based on Explicit Fracture Models and Parallel Computing Techniques for Predicting Hydraulic Fracturing Process
 (明示的亀裂モデルと並列計算手法に基づく水圧破碎過程予測のための新規3次元水理-力学連成シミュレータの開発)

論文内容の要旨

Hydraulic fracturing is a key process for creating permeable reservoirs in Enhanced/Engineered Geothermal Systems (EGS). In hydraulic fracturing, high-pressure fluid (e.g., water, CO₂) is injected to artificially generate or expand fracture networks that function as an engineered geothermal reservoir. Because fluid pressure drives fracture initiation/propagation, and the created fractures serve as dominant flow paths whose permeability depends on their aperture, hydraulic fracturing is governed by strong hydro-mechanical interactions. However, predicting fracture initiation/propagation under realistic three-dimensional (3-D) field-scale conditions remains challenging due to the complexity of fracturing behavior, the influence of injection fluids, mechanical properties including mineral-scale heterogeneity, and in-situ stress conditions, as well as the high computational cost involved. To address these issues, this study developed a fully 3-D hydro-mechanical simulator capable of accurately reproducing complex fracture behavior under realistic injection conditions during hydraulic fracturing. The simulator employs an extrinsic cohesive zone model (ECZM), enabling precise simulation of fracture initiation/propagation, including branching, coalescence, and intersection. An advanced parallel computing technique using multiple general-purpose graphics processing units (GPGPUs) is implemented to address the substantial computational cost associated with large-scale analyses.

This study follows two main directions: (1) improving the fracture-mechanics model and (2) enhancing the coupled hydro-mechanical simulator. Chapters 3, 5, and 7 focus on model improvements, while Chapters 4, 6, and 8 develop the simulator.

In Chapter 1, the thesis's objectives and content were clearly outlined.

In Chapter 2, the factors influencing hydraulic fracturing, the computational techniques required to account for these factors, and existing 3-D, field-scale hydraulic fracturing simulators were systematically examined.

In Chapter 3, a new ECZM was developed, replacing conventional adaptive remeshing with a master-slave algorithm, thereby improving accuracy and enabling efficient parallel computing using a single GPGPU.

In Chapter 4, a coupled hydro-mechanical simulator was developed by applying the ECZM proposed in Chapter 3 together with a coupling scheme capable of representing realistic injection time scales, to evaluate injection-fluid effects, successfully reproducing key differences between hydraulic fracturing using water and CO₂ in laboratory experiments.

In Chapter 5, the 2-D ECZM proposed in Chapter 3 was implemented with single-GPGPU parallel computation. The GPGPU-parallelized ECZM achieved higher accuracy and substantial speedup in benchmark rock-fracturing simulations.

In Chapter 6, a simulator was developed by integrating the coupling scheme from Chapter 4 with the 2-D GPGPU-parallelized ECZM from Chapter 5, and was further extended to incorporate mineral-scale heterogeneity. Numerical analyses confirmed that the mechanical properties of rock, particularly mineral spatial distribution, play a critical role in governing fracture behavior.

In Chapter 7, the 2-D GPGPU-parallelized ECZM developed in Chapter 5 was extended to fully 3-D analysis and was further accelerated using multi-GPGPU parallel computation, enabling large-scale simulations of complex fracture processes.

In Chapter 8, a hydraulic fracturing simulator was developed using the 3-D multi-GPGPU-parallelized ECZM introduced in Chapter 7, combined with a multiphase-flow scheme capable of modeling CO₂-water interactions. Predictive simulations assuming actual field operations were conducted, and the results provided key field-scale insights, confirming the effectiveness of water-assisted CO₂ fracturing as a combined approach that integrates the advantages of both CO₂ and water fracturing methods.

In Chapter 9, the main conclusions and recommendations for future work were summarized.

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (前 田 悠 太 朗)			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	准教授	緒方 奨
	副 査	教授	乾 徹
	副 査	教授	鎌田 敏郎
	副 査	教授	三上 欣希

論文審査の結果の要旨

Enhanced/Engineered Geothermal Systems (増産型地熱システム: EGS) という次世代型地熱発電技術において、水圧破砕は特に重要性の高いプロセスである。EGS では、流体 (例: 水、CO₂) を高圧で注入し岩盤を破砕する水圧破砕により人工的に亀裂ネットワークを造成または拡張し、エネルギー源となる地熱流体を円滑に循環・回収するために必要なレベルの岩盤の浸透性を担保する。したがって、水圧破砕によって形成される亀裂ネットワークは EGS における発電性能の支配的要素であり、この亀裂ネットワークの形成過程、すなわち水圧破砕時の亀裂の発生・進展挙動を正確に予測し得る数値シミュレータの開発が高性能な EGS の確立に向けた最重要課題の一つとして強く求められている。水圧破砕時の亀裂発生・進展は注入流体の性質、構成鉱物に依存した岩石内の不均質な力学特性、原位置の 3 次元応力環境といった種々の水理学的・力学的な要因に依存している。したがって、大規模な岩盤における実際の亀裂発生・進展挙動を予測するためには、上述した各種要因を考慮した精緻な水理-力学連成解析手法やフィールドスケールにも対応できる高度な並列計算手法が実装された数値シミュレータが必要となる。しかしながら、その様なシミュレータの開発は未だ十分に進んでいないのが現状である。本研究では、これらの課題を克服し、水圧破砕時の複雑な亀裂発生・進展挙動を高精度に予測し得る、3 次元水理-力学連成シミュレータを開発している。シミュレータ開発にあたっては、亀裂面を明示的に挿入し亀裂の分岐・連結等の破砕過程を精緻に表現可能な Extrinsic Cohesive Zone Model (ECZM) を基盤とした水理-力学連成モデリングや、3 次元フィールドスケールにも対応可能な GPGPU (General-Purpose computing on Graphics Processing Units) を用いた並列計算を組み合わせ、水圧破砕に対する数値解析の新たな体系を提案している。

第 1 章では、本論文の研究目的および全体構成を示している。

第 2 章では、水圧破砕に影響を与える主要な要因、それらを考慮するために必要な計算手法、ならびに 3 次元フィールドスケールに適用可能な既存の水圧破砕シミュレータについて体系的に整理している。

第 3 章では、従来の ECZM で用いられてきた逐次的リメッシングを完全に回避可能な Master-Slave アルゴリズムを導入した新たな ECZM を開発している。これにより、ECZM が本来有する利点である応力計算の正確性は維持しつつ、単一の GPGPU を用いた効率的な並列計算にも対応できる画期的な ECZM の枠組みの確立に成功している。

第 4 章では、陰解法ベースの水理計算を第 3 章で提案した ECZM と組み合わせた連成スキームを構築することで、水圧破砕で想定される注入時間スケールに対応可能な水理-力学連成シミュレータを開発し、注入流体の破砕挙動への影響を評価している。その結果、火山岩を用いた室内破砕実験で観測された、注入流体に水および CO₂ を用いた場合の破砕挙動の違いを再現することに成功し、それらの違いが生じるメカニズムも提示している。さらに、水と CO₂ の利点を併せ持つ手法として、CO₂ 注入後に水を注入する CO₂ 水押破砕法の有効性を実験と解析から明らかにしている。

第5章では、第3章で提案した2次元 ECZM に単一の GPGPU による並列計算を実装し、基礎性能を検証した結果、ECZM の利点である高い応力計算精度を損なうことなく、大幅な計算高速化が達成できることを明らかにしている。

第6章では、第4章で提案した連成スキームに第5章で提案した2次元の GPGPU 並列型 ECZM を組み込んだ水理-力学連成モデルに対し、構成鉱物分布に依存した力学特性の不均質性を導入することで水圧破碎時の亀裂発生・進展経路をより高精度に再現可能なシミュレータを開発している。また、本シミュレータを用いて花崗岩に対する水圧破碎実験の数値解析を行った結果、実験で観察された亀裂進展経路の屈曲度等のミクロな性状まで再現可能であることが示されている。さらに、数値解析結果の分析を通じ、岩石中の亀裂の進展経路は亀裂先端近傍の応力集中と鉱物分布に由来した局所的な強度特性との間の相互作用に強く依存していることを明らかにしている。

第7章では、第5章で構築した2次元 GPGPU 並列型 ECZM を3次元解析へと拡張し、さらに複数の GPGPU を用いたマルチ GPGPU 並列計算を導入することで、3次元空間における複雑な亀裂発生・進展過程を対象とした大規模破碎シミュレーションを可能としている。

第8章では、第7章で導入した3次元マルチ GPGPU 並列型 ECZM に、CO₂-水相互作用を表現可能な多相流スキームを組み合わせた水圧破碎シミュレータを開発している。さらに、実際のフィールドでの各種破碎法の実施行程を想定した予察解析を実施し、フィールドスケールにおいても室内規模での実験・数値解析の傾向と同様に水および CO₂ を用いた各破碎の特徴が発現し得ることを示している。さらに、これらの知見に基づき、CO₂ 水圧破碎の実フィールドにおける有効性に関する示唆を得ている。

第9章では、本研究の主な結論と今後の課題についてまとめている。

以上のように、本論文は、岩石内の複雑な水理-力学連成現象やミクロスケールの不均質性等を考慮した高度な岩石・岩盤力学モデルと GPGPU 並列計算等の最先端の計算科学を融合させることで、高精度な水圧破碎過程の予測を実現するための数値シミュレーション技術の体系を新たに開発しており、EGS による地熱発電を筆頭に水圧破碎を用いた種々の地下資源開発における多大な貢献が期待される。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。