

超臨界地熱発電を志向した超臨界地熱環境下での 人工地熱貯留層造成シミュレーション

緒方 奨

大阪大学 大学院工学研究科

1. はじめに

日本は世界第三位の地熱賦存量を誇る地熱資源大国であり、そのポテンシャルは約 2300 万 kW と非常に高く、世界最高水準に位置する。このような豊富な資源を使用する地熱発電は普及が渴望されるエネルギー源である。しかし、現状として日本の総発電量に占める地熱発電の割合はわずか 0.3 % にとどまり、ほとんど普及していない。近年、このような状況を背景に、地熱発電の促進を目的とした地熱増産システム（Enhanced Geothermal System: EGS）の研究開発が活発化している。その中でも特に、貯留層造成型 EGS は、深度約 2~5km に存在する高温岩体（Hot Dry Rock: HDR）を人工的に改変し、地熱貯留層として機能させる技術である。地熱貯留層とは、発電に必要な熱エネルギーを持ち、透水性が確保され、水を保持できる地質構造を指す。このような地熱貯留層を人工的に造成する手法の一つに水圧破砕（Hydraulic Fracturing）がある。これは、高压の流体を岩体に注入し、亀裂を形成することで水の流れを促進し岩体の透水性を向上させる技術である。こうして形成された亀裂群が地熱貯留層として機能し、効率的な地熱回収が可能となる。また、水圧破砕手法の中でも高い有効性が確認されているのが粘性の低い超臨界流体（超臨界 CO₂ や超臨界水）を活用した破砕である。例えば、既往の室内実験[1][2]から、特に高温環境下での超臨界 CO₂ を用いた破砕により複雑な三次元的亀裂ネットワークが形成されるため、熱交換面積が大きく抽熱に有利な地熱貯留層が造成できる可能性があることが報告されている。そのため、このような超臨界 CO₂ を用いた破砕を貯留層造成 EGS にも適用する方針が検討されつつある。しかし、地下深部での水圧破砕法の一回当たりの実施コス

トは非常に高価（少なくとも数億~数十億円程度）となるため、大規模な実岩体が対象となる実施工の場合、上述した既往の室内実験[1][2]等で確認されている様な複雑な亀裂ネットワークが十分に発達・連結し、発電に供し得る大規模貯留層が形成され得る可能性があるのか、といった点を数値解析により事前予察しておくことが極めて重要となる。しかし、超臨界流体による破砕プロセスを実岩体規模で計算可能な数値シミュレータはこれまで開発されておらず、上述した様な事前予察は未だ実現していない。

そこで本研究では、超臨界流体（超臨界 CO₂）を用いた破砕プロセスを実岩体規模で計算可能な解析コードを新たに開発し、超臨界 CO₂ を用いた人工貯留層造成過程に対する数値シミュレーションを実現することを目的とする。これにより、超臨界 CO₂ を用いた場合の人工貯留層造成過程を仮想の計算機空間上で表現可能となり、これまでは室内実験規模のみで観察されてきた複雑な亀裂ネットワークが発電に供し得る大規模貯留層（メートル規模）を形成し得るのかどうかといった点を検討する。

2. 開発したシミュレータの概要

超臨界流体圧入に伴う岩石破砕過程を計算するシミュレータは力学-水理連成型であり、シミュレータを構成する力学計算（岩石の変形・亀裂発生進展過程の計算）と水理計算（岩石実部・亀裂部における単相・二相流体の流動計算）のそれぞれにおける計算性能を 3 次元でのより大規模な数値解析に供し得るレベルへと向上させた。具体的には、力学計算で用いている解析手法である陽解法ベースの ECZM -FEM（Extrinsic Cohesive Zone Model : ECZM を導入した FEM）と、水理計

算で用いている解析手法である陰解法ベースの DFM-FEM（Discrete Fracture Matrix：DFM モデルを導入した FEM）をそれぞれ、GPU（Graphics Processing Unit）による並列計算と CPU（Central Processing Unit）による並列計算によって高速化させた。なお、ECZM は要素分離を伴う亀裂発生進展計算に用いられる代表的な結合モデルの一種であり、DFM は亀裂部要素と岩石実部要素の双方での流体流動を計算可能な離散亀裂ネットワークモデルの一種である。また、従来の一般的な ECZM と DFM を用いて岩石破碎解析を行う場合は、シミュレーション中に亀裂が発生するたびに新たに亀裂面要素を挿入するという煩雑なリメッシュ作業が必要であり、このような逐次的処理は並列計算の高速化を大きく妨げる要素となる。これを鑑み本研究では、リメッシュを必要としない独自の亀裂面挿入アルゴリズムを導入した ECZM と DFM を用いている。リメッシュを必要としない ECZM の詳細については既報 [3] を参照されたい。また、GPU 並列計算と CPU 並列計算においては、複数枚の GPU カード及び複数個の CPU コアに基づく複数マシン間（分散メモリ型）での並列計算に対応可能な形へとプログラムコードを改良（分散メモリ型に適した並列計算規格である MPI：Message Passing Interface に基づき改良した）しており、スパコン上でも問題なく実行可能である。なお、上述した様に、要素分離可能な三次元亀裂発生進展解析手法に対して、複数枚の GPU カードを用いた高性能並列計算の実装に成功した事例は国際的にも稀有であり、岩石破碎シミュレーションツールとして高い優位性を有している。また、搭載した並列計算の性能を検証するため、GPU を 1 枚、2 枚、4 枚と変更して同一の 3 次元破碎解析を実施したところ、GPU1 枚の場合に対し 2 枚で平均 2.0 倍、4 枚で平均 3.5 倍の高速化を示しており、GPU 枚数に応じた良好なスケーラビリティを確認できた(図1)。

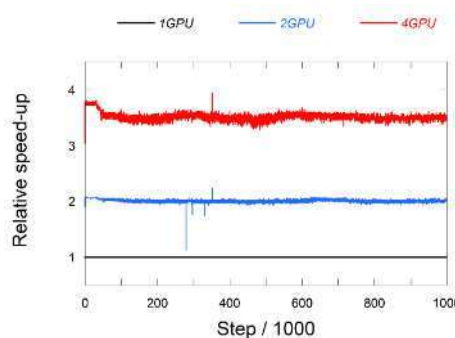


図 1-3 次元破碎解析実行中の GPU1 枚の場合の計算速度と 2 枚、4 枚の場合の計算速度の比

3. 数値シミュレーションの事例

3.1 数値シミュレーションの妥当性検証

実験との比較より開発シミュレータの妥当性を検証するため、東北大で実施された大型の火山岩サンプルに対する真三軸応力下における超臨界 CO₂ 水押破碎実験の数値解析を行った。

具体的には、温度が 150℃、鉛直応力 σ_v が 50MPa、最大水平応力 σ_{Hmax} が 35 MPa、最小水平応力 σ_{Hmin} が 20 MPa の条件において実施された、一辺 10 cm の立方体状の江持安山岩サンプル（直径 1 cm、長さ 10 cm のボアホールを有する）に対する水飽和状態からの超臨界 CO₂ 水押破碎実験を模擬した数値解析を実施した。解析領域は実験で用いたサンプル（10 cm×10 cm×10 cm の立方体、中央に直径 1cm、長さ 10 cm のボアホール）を模擬した 3 次元モデルを設定し、外端境界には、実験同様に鉛直応力 σ_v を 50MPa、最大水平応力 σ_{Hmax} を 35 MPa、最小水平応力 σ_{Hmin} を 20 MP とえた（図 2）。また、実験同様にボアホール中央の長さ 10 mm の区間を破碎流体圧入区間に設定した（図 2 中の赤色領域）。破碎流体圧入区間からの流体注入については、実験では CO₂ の水押開始から後押水（粘度が約 100 mPa・s の 0.25 wt% のスクレログルカン水溶液）がボアホールに到達する約 7 秒までは超臨界 CO₂ のみが圧入され、それ以降は後押水が岩石内に圧入されていることを考慮した設定を行った。

具体的には、超臨界 CO₂ の水押開始後 7s 以前では圧入区間内の円孔壁面境界における超臨界 CO₂ の飽和度を 1 とし、それ以降では飽和度を 0 に規定するという条件を設定した。また、圧入区間での注入圧 P_{in} [MPa]については、実験におけ

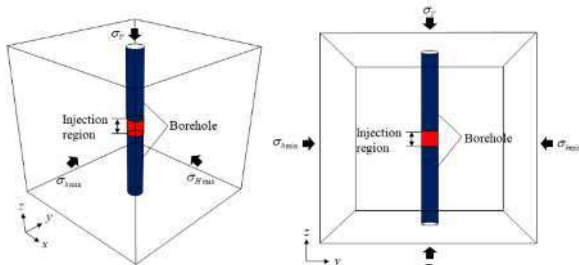


図 2: 解析モデルにおける拘束応力条件

表 1: 解析に用いたパラメータの

パラメータ名	設定値
孔隙率 [%]	23.5
浸透率 [m ²]	3×10^{-16}
ヤング率 [GPa]	8.0
ポアソン比 [-]	0.2
引張強さ [MPa]	5
粘着力 [MPa]	20

る注入圧の時間履歴をトレースした近似関数を圧入区間内の円孔壁面境界に与えることで表現した。解析領域内の温度は一律に 150℃ の等温条件、初期の岩石内の間隙流体圧は一律 10MPa とし、間隙内は増粘されていない水で飽和されている設定とした。解析モデルの物性値には、これまでに計測済みの江持安山岩の物性値[4]を適用した(表 1)。

以下、数値解析より得られた結果を紹介する。解析において亀裂がサンプル外端に到達した時点(注入開始後 7.4 s)での、岩石サンプル内の三次元的な亀裂造成形態についての実験と解析結果の比較を図 3 に、岩石サンプル内の鉛直方向中央深度の断面における亀裂造成形態についての実験と解析結果の比較を図 4 に示す。図 3 より数値解析では、三次元的な亀裂造成形態をよく再

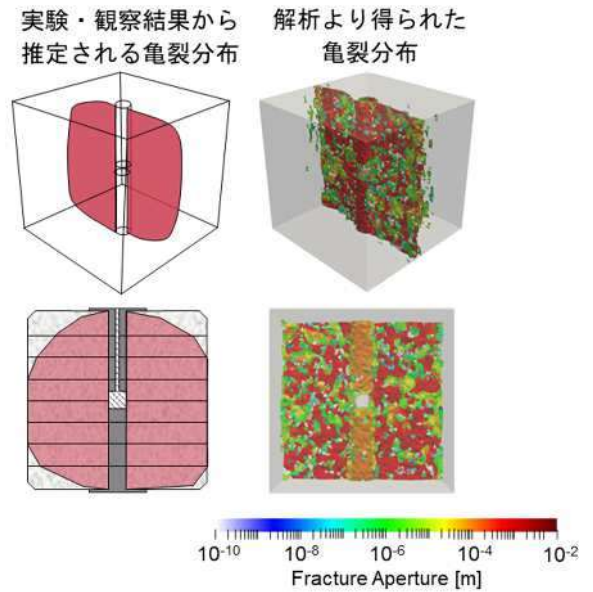
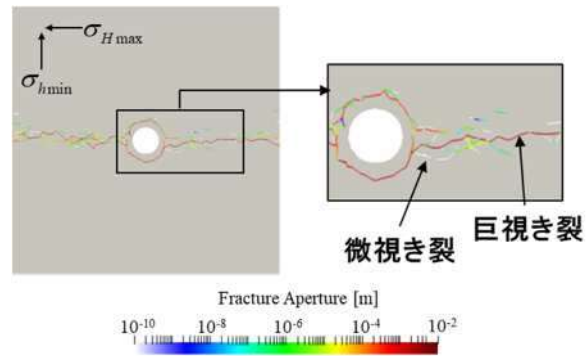
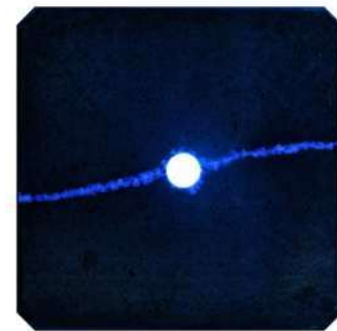


図 3: 岩石サンプル内の三次元的な亀裂造成形態の比較



(a) 数値解析より得られた江持安山岩サンプル断面内の亀裂の開口幅分布



(b) 実験で観察された江持安山岩サンプル断面の亀裂形態

図 4: 岩石サンプル断面の亀裂造成形態の比較

現できていることが確認できる。また、図 4 より、岩石サンプル内の二次元断面で見た場合でも亀裂進展方向に加え、巨視亀裂周辺に複数の微視亀裂が形成されているという点など、実際の亀裂形態を数値解析により再現できていることが確認

され、開発したシミュレータの岩石破碎プロセスに関する妥当性が確認された。

3.2 メートル規模の実岩体を想定した破碎解析

続いて、 $1\text{m} \times 1\text{m} \times 50\text{cm}$ の規模の岩体を想定した破碎解析を行った。対象とする破碎問題は、水飽和した岩体における超臨界 CO_2 の圧入による破碎とした。解析で用いた有限要素メッシュを図5に示す。注入域については集中的な亀裂が造成されることが予想されるため、円孔から半径 10cm 以下の領域では要素サイズを 5 mm 以下に設定し、半径 30 cm 以上の領域については最大要素サイズが 10 mm となるように設定した。円孔から半径 $10 \sim 30\text{cm}$ の領域については $5 \sim 10\text{ mm}$ の遷移域となるように設定した。作成された有限要素メッシュは四面体で作成され、要素数約 300 万、節点数約 50 万となった。なお、解析では超臨界 CO_2 の注入流量は 50 mL/min とした。

以下に得られた解析結果を紹介する。円孔境界の間隙水圧の平均値の時間推移を図6に、岩体中の亀裂造成形態を図7に示す。超臨界 CO_2 の粘性の低さに起因し、超臨界 CO_2 を用いた破碎では注入開始後早い段階（ 12 秒段階）で急激に円孔内の流体圧が低下しており（図6）、この圧力低下により図7の様に岩体内の亀裂進展に伴う人工貯留層の造成規模の拡大が抑制される可能性が明らかになった。

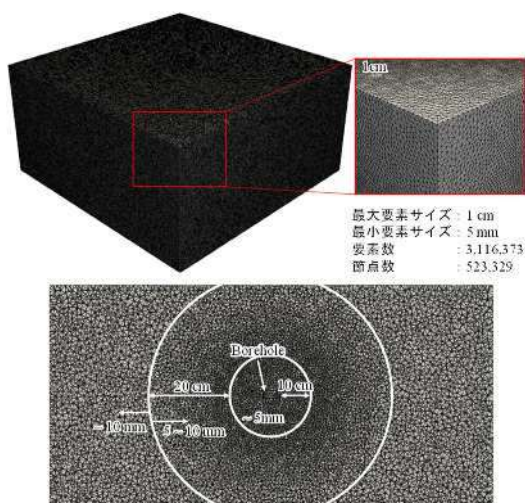


図5：解析に用いた有限要素モデルとメッシュ

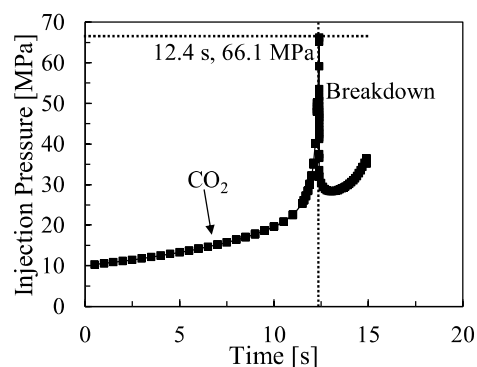


図6：解析より得られた円孔圧の時間推移

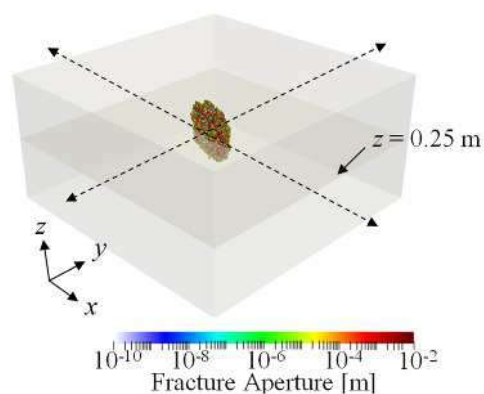


図7：円孔圧低下後の亀裂進展分布

4. おわりに

本研究では、超臨界 CO_2 を用いた破碎プロセスを実岩体規模で計算可能な解析コードを新たに開発し、超臨界 CO_2 を用いた人工貯留層造成過程に対する数値シミュレーションを実施した。その結果、超臨界 CO_2 の粘性の低さに起因し、超臨界 CO_2 を用いた破碎では注入開始後早い段階で注入圧が低下しやすいため、亀裂が進展しづらく岩体中での大規模な人工貯留層を造成することが困難である可能性が明らかになった。

参考文献

- (1) X. Zhang, et al., Fuel, **190**,370-378, (2017)
- (2) Z. Zhao, et al., J. Pet. Sci. Eng., **166**, 739-746, (2018)
- (3) Y. Maeda, et al., Comput. Geotech., **166**, 105942, (2024)
- (4) K. Takuma, et al., Geothermics, **120**, 103007, (2024)