

令和元年6月4日現在

機関番号：17401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2017～2018

課題番号：17H06967

研究課題名(和文)地熱貯留層や帯水層への流体注入によって生じる誘発地震の予測手法開発

研究課題名(英文) Development of a methodology to estimate potential for seismic activity caused by fluid injection into a geothermal reservoir or an aquifer

研究代表者

オノ木 敦士 (Sainoki, Atsushi)

熊本大学・国際先端科学技術研究機構・IROAST准教授

研究者番号：70802049

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：現在、持続可能なエネルギー開発に向けて地熱発電や二酸化炭素の地下貯留が注目を集めているが、大深度地下の帯水層へ流体を注入する必要があるために微小地震を発生させる可能性がある。本研究では、大深度地下へ圧入された流体による断層の活性化を高精度でシミュレーションすることのできる数値解析プログラムを拡張有限要素法を基に構築した。このプログラムは断層内での流体挙動、断層から周囲岩盤への流体の移動、および断層の力学的挙動(開口・せん断すべり)を同時にシミュレーションすることが可能であり、今後高精度地熱貯留層モデルや流体注入によって発生する微小地震の規模予測への適用が期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで流体注入による断層の再活性化をシミュレーションすることのできる様々な数値解析プログラムが開発されてきた。しかしながら、その多くは、周辺岩盤への流体移動や連続体モデル内での断層の不連続性を考慮しておらず、数値シミュレーションの精度が必ずしも高いとはいえなかった。本研究で開発したプログラムは、これらの欠点に対して改良されており、かつ過去の流体注入実験の結果を用いてその妥当性を検証した。

研究成果の概要(英文)：At present, considerable attention is being paid to geothermal energy development and Carbon Capture and storage with the aim of realizing sustainable energy development. Although these technologies are attractive, there is a possibility that seismic activities are induced by fluid injection into a deep saline aquifer. In this study, we have developed a numerical analysis code based on extended finite element method, which is capable of reproducing the reactivation of faults pressurized by fluid injected into deep underground. This analysis code can simulate fluid flow in the fault, fluid leak-off into the surrounding rock mass, and the mechanical behaviour of the fault including opening and shear failure, simultaneously. Thus, this code is expected to be applied to the development of high-accuracy geothermal reservoir model and prediction of the magnitude of induced seismicity caused by fluid injection.

研究分野：資源開発

キーワード：資源開発 岩盤工学 拡張有限要素法 微小地震 流体注入

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

二酸化炭素の大気中への排出量は今後も増加し続けると予想されており、地球温暖化への影響が特に危惧されている。地熱貯留層の地熱流体を利用した地熱発電や、火力発電所から生じる二酸化炭素の地下貯留は、大気への二酸化炭素排出量を削減する技術として今後ますます重要となってくる。これら二つの技術が二酸化炭素削減や再生可能エネルギー利用技術として社会に貢献する割合は非常に大きいですが、同時に解決すべき課題も数多く存在する。その一つが**誘発地震**（人工地震）である。地熱発電における発電後の冷水の地下への還元、または二酸化炭素地下貯留における超臨界状態の二酸化炭素の地下への注入は、断層やき裂ネットワークといった岩盤不連続面の応力状態を変化させ地震を誘発することが知られており、問題となっている。

2. 研究の目的

大深度地下帯水層への流体注入によって引き起こされる微小地震の規模をより正確に見積もる手法を開発する。特に断層の動的せん断挙動を正確に表現することのできる動摩擦則や、岩盤内に存在する**様々なスケールのき裂ネットワーク**を数値モデリングするための手法を開発する。

3. 研究の方法

1. 拡張有限要素法を用いた連成解析プログラムの作成

断層への流体注入によって生じる断層すべりをシミュレーションするために、拡張有限要素法に基づき流体-力学変形を考慮した連成解析プログラムの開発する。

2. 誘発地震シミュレーション

独自に開発した拡張有限要素法プログラムを用いて、断層、き裂ネットワークを含む地下岩盤の三次元数値解析モデルを作成し、ケーススタディを基に誘発地震の数値シミュレーションを行う。

3. 誘発地震観測

地熱貯留層において誘発地震観測を行う。必要に応じて、最新の高精度地震計を設置して、観測の精度を向上させる。観測結果を基に、誘発地震データベースを構築する。

4. 研究成果

拡張有限要素法を用いた連成解析プログラム作成

本研究では、拡張有限要素法に基づき浸透流-力学変形連成解析プログラムをマトラボをベースにして独自に構築した。拡張有限要素法とは、不連続性を与えた形状関数（エンリッチ関数）を適用し、連続体モデル内の物理量に対して不連続特性を持たせる手法であり、従来の不連続体解析手法と比較して大規模モデル内での不連続面の挙動を効率よく高精度にシミュレーションすることが可能となる。また、不連続面内の流体挙動のみではなく、不連続面から周囲の物体への流体移動も考慮することが可能となるため、周辺岩盤内の水の流れを考慮したより精度の高い断層挙動シミュレーションが可能となる。

本研究においてはケーススタディとして、上記で開発したプログラムを用いて過去に行われた断層への流体注入実験 (Guglielmi et al., 2015) の再現シミュレーションを実施した。この実験では、地下 300 メートルに位置する断層に流体が圧入され、それによって生じる断層の開口、せん断変位、および間隙水圧変化の詳細なモニタリングが行われた。図 1 は、数値解析から得られた流体注入による断層周囲の変位増分を示しており、X 軸と平行に入っている太い黒線が断層である。断層の周辺岩盤は、断層ダメージ領域を考慮した物性値が適用されており、ダメージ領域内のフラクチャーネットワークによる透水性の増加、および断層からの流体移動を考慮している。図から断層へ流体が注入されることによって断層、および周辺岩盤に変形生じていることが分かる。図 2 は、実験中に計測された流体注入点における間隙水圧変化と数値解析結果の比較である。図に示すように計測結果と数値解析結果は十分に一致しており、開発した数値解析プログラムが流体注入による間隙水圧上昇を十分正確にシミュレーションできることを示している。同様に、断層の開口、およびせん断挙動に関しても十分に計測結果と一致した解析結果を得ることができた。帯水層において生じる微小地震の規模を正確に予測するためには、三次元で断層すべりをシミュレーションする必要があるが、そのための基礎となる二次元解析プログラムを本研究において構築することができた。

断層の動摩擦則に関する検証

上記の数値解析プログラムの構築に加え、断層すべり発生中の応力低下を記述する動摩擦則に関して、より正確な誘発地震シミュレーションを行うためにパラメータの検証を行った。特に、slip-weakening distance と呼ばれる断層すべり中の応力低下とすべり量の関係を表すパラメータのスケール効果に関して、数値モデルを用いて検証を行い、微小地震における slip-weakening distance を定量的に評価した。図 3 は、誘発地震の規模 (M) と slip-weakening distance (D_s) の関係性を示しており、地震発生時のエネルギー収支に不等式を拘束条件用いることによって地震規模との関係性を導出した。これまで誘発地震に対する slip-weakening

distance の検討はほとんど行われてこなかったが、本研究から得られた関係性を適用することによって、地震の規模だけではなくエネルギー条件においても従来の手法と比べてより正確な誘発地震シミュレーションが可能となった。

微小地震観測

誘発地震観測に関しては、計6台の地震計を熊本県阿蘇郡小国町と大分県玖珠郡九重町に設置し、小国地域の地熱貯留層で生じる微小地震を計測するための微小地震観測システムを構築した。当初は観測した誘発地震の地震パラメーター推定まで行う予定だったが、微小地震観測予定地の変更や地震計設置許可に関する手続きなどで、地震計設置およびデータ取得に留まっている。

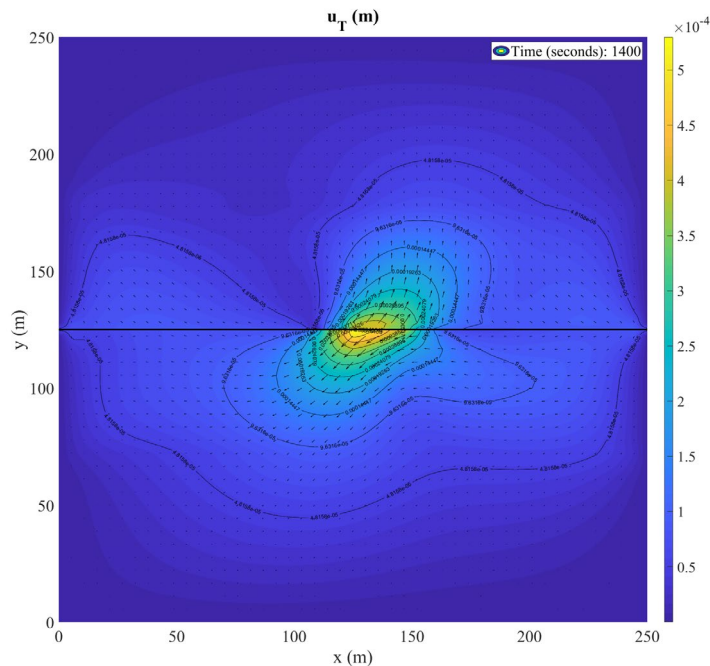


Fig. 1. 数値シミュレーションから得られた断層への流体注入による断層、および周辺岩盤内の変位。図中の黒線が断層、→は変位ベクトルを示す。

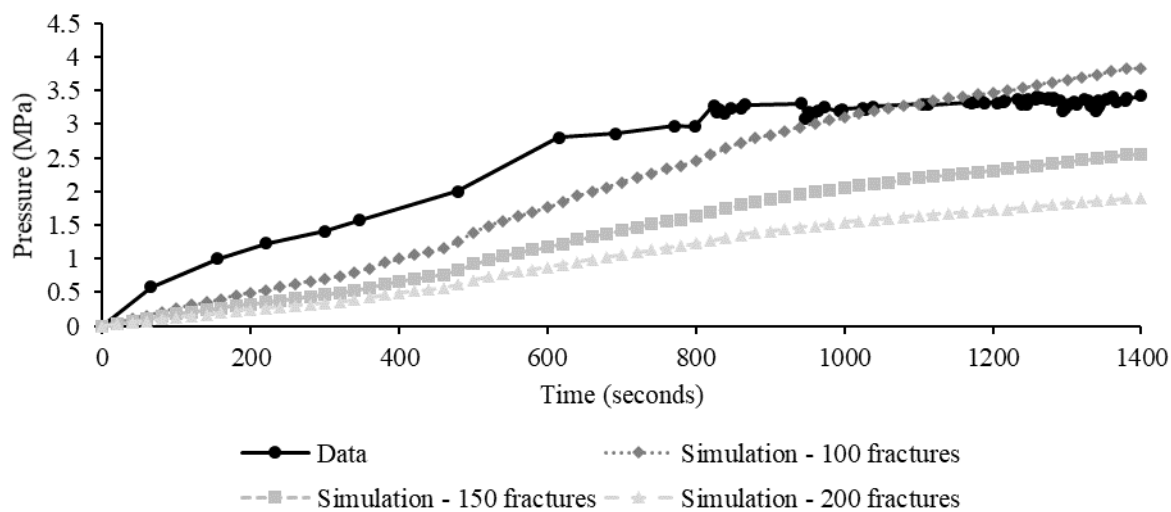


Fig. 2. 数値解析結果と現場計測結果の比較 (断層への流体注入箇所における間隙水圧上昇)

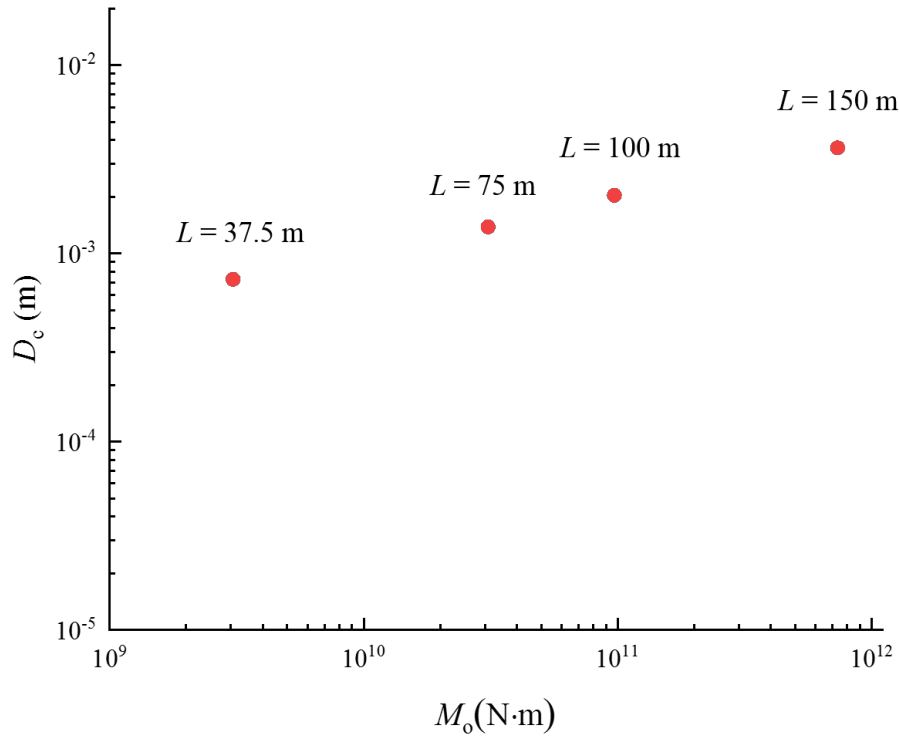


Fig. 3. 断層すべりの動摩擦角に関するパラメーターの検証



Fig. 4. 熊本県阿蘇郡、および大分県玖珠郡に設置した微小地震観測点の一部

<引用文献>

Guglielmi Y, Cappa F, Avouac J-P, Henry P, Elsworth D. Seismicity triggered by fluid injection-induced aseismic slip. *Science* (80-). 2015;348(6240):1224 LP-1226. <http://science.sciencemag.org/content/348/6240/1224.abstract>.

〔雑誌論文〕（計 件）

〔学会発表〕（計 7 件）

- Sainoki, A. and Hirohama, C. (2019) Methodology to back-analyze the slip-weakening distance of induced seismicity, considering seismic efficiency. Rock Dynamics in Okinawa
- Schwartzkopff, A. and Sainoki, A. (2019) Coupled X-FEM approach to reproduce the mechanics due to direct fluid injection into a natural in-situ fault. ISRM 14th International Congress of Rock Mechanics
- 才ノ木敦士・廣濱千明 (2019) Seismic efficiency を考慮した誘発地震深度と動摩擦係数の関係 資源素材学会春季大会
- Schwartzkopff, A. and Sainoki, A. (2018) Numerical simulation of an in-situ fluid injection experiment with a coupled X-FEM analysis. International Conference on Mine Safety Science and Engineering, Beijing, China
- Sainoki, A. and Hirohama, C. (2018) Numerical study on apparent rockmass shear stiffness and radiated energy during induced seismicity. International Conference on Mine Safety Science and Engineering, Beijing, China
- Sainoki, A., Obara, Y., and Mitri, H. (2018) Numerical simulation of stress distribution within a rock discontinuity asperity. EUROCK2018 The ISRM European Rock Mechanics Symposium, Russia
- 才ノ木敦士・廣濱千明 (2018) Seismic efficiency を考慮した誘発地震の逆解析手法の確立 資源素材学会 2018 年秋季大会

〔図書〕（計 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

○取得状況（計 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8 桁）：

(2) 研究協力者
研究協力者氏名：
ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。