

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：17401

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K15493

研究課題名（和文）岩盤不連続面の時間依存性挙動を考慮した高精度断裂型地熱貯留層モデルの構築

研究課題名（英文）Development of high-accuracy geothermal reservoir model, considering the time-dependent behaviour of rock mass discontinuities

研究代表者

オノ木 敦士 (Sainoki, Atsushi)

熊本大学・大学院先端科学研究部（工）・准教授

研究者番号：70802049

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：断裂型地熱貯留層の高精度化に関係する3つの課題に対して研究を実施した。一つ目は、き裂性岩盤内の不均質な応力分布のシミュレーション手法開発である。本研究では、等価連続体モデルを用いて複雑なき裂ネットワークを有する岩盤内部の応力不均質性をメートルスケールで考慮する手法を考案し、その妥当性を検証した。また、流体注入によって生じる岩盤不連続面の力学的挙動を高精度をシミュレーションする手法を拡張有限要素法をベースに開発した。最後に、岩盤不連続面表面に存在する微小な凹凸内部の応力状態をCT撮影および画像解析から調査し、局所的な応力集中が発生していることを実験的に明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

き裂性岩盤内部の応力分布は極めて複雑であり、局所的な応力集中領域が点在していることが明らかとなった。この局所的な応力集中は、地熱貯留層や地下鉱山で生じる誘発地震と密接に関係している可能性が高く、誘発地震の高精度予測手法を開発する上で極めて重要になると考えられる。また、今回開発した拡張有限要素法をベースとした誘発地震シミュレーションコードにおいても、今後、水圧破碎や超臨界地熱発電など様々な分野への応用が期待される。最後に、不連続面表面アスペリティの微視的な応力状態は、不連続面の非線形挙動や時間依存性の水理特性変化を明らかにするための鍵になると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, three study problems related to the development of high-accuracy geothermal reservoir model have been addressed. First, the method to simulate the heterogeneous stress distribution in a fractured rock mass has been developed. To achieve this, we employed the crack tensor model to simulate the metre-scale heterogeneity of stress state in the rock mass. Next, the simulation method that considers fluid leak-off from a rock discontinuity to the surrounding rock matrix has been developed in the framework of the finite element method. The method considers not only fluid flow in a macro-scale rock discontinuity but also fluid permeation to the surrounding rock mass with micro fractures. Finally, the stress state of discontinuity surface asperities was experimentally investigated on a micro scale by means of micro-focused X-ray CT and image analysis. Then, it was clarified that stress concentration locally takes place in the asperities.

研究分野：地下資源開発

キーワード：地下資源 誘発地震 き裂性岩盤 地殻応力 拡張有限要素法 等価連続体モデル

1. 研究開始当初の背景

(1) 世界の二酸化炭素排出量増加と我が国の地熱開発の現状

大気への二酸化炭素排出量は 2030 年までに 1990 年と比較して 90%増加すると見積られており(IEA、2004)、大気中に放出される二酸化炭素を削減するための技術開発に注目が集まっている。日本においても、地球温暖化対策・エネルギー自給率向上の観点から持続可能な再生エネルギーへの転換が急務となっている。その方策として、大気中への二酸化炭素の排出量が少なく我が国に豊富に存在する地熱エネルギーを利用した地熱発電開発が進められており、2050 年には 2010 年と比較して最大で 15 倍の設備容量の増加が見込まれている(NEDO)。

(2) 地熱貯留層数値モデリングに関する過去研究と解決すべき課題

地熱開発において、地熱貯留層から持続的に安定してエネルギーを抽出するためには熱水賦存領域・流動経路・流体圧力を考慮した坑井位置決定や熱水生産・還元レートの最適化を行う必要がある。そのために、岩盤不連続面の水理特性の解明や、地熱貯留層数値シミュレーションモデルの精緻化に関して、これまで数多くの研究が行われてきた。

岩盤不連続面の水理特性は、不連続面表面粗度(JRC)や充填物質に大きく依存し、不連続面で生じるせん断すべりの影響を受け変化することが明らかにされている。特に、非地震性・地震性せん断すべりによる表面摩耗、ダイレーション、充填物質の物理的・力学的特性変化、またはせん断すべり速度などが不連続面の水理特性に与える影響が徐々に解明され、様々な構成則が考案されている。

しかしながら、これまでの地熱貯留層数値モデルの多くは、岩盤不連続面の力学的挙動・水理特性を連続体モデルで近似することによって構築されてきた。近年、き裂ネットワークを有する断裂型地熱貯留層モデルの構築も試みられているが、不連続面の準静的・動的せん断挙動に起因する水理特性変化を考慮したモデルは少なく、貯留層の観測データを用いた妥当性検証も十分に行われていない。すなわち、複雑なき裂ネットワークを有する断裂型地熱貯留層の数値シミュレーション手法は未だ確立されていない。このような中、日本の地熱発電利用率は低下を続けており、貯留層管理の最適化が求められている。したがって、地熱発電の持続性・効率性向上のため、岩盤不連続面の力学的挙動・水理特性を厳密に考慮した高精度地熱貯留層数値モデリング手法の確立が必要である。

2. 研究の目的

本研究の最終目的は、複雑なき裂ネットワークを含む岩盤で構成された断裂型地熱貯留層において、坑井位置の決定、生産・還元レートの最適化を可能とする高精度断裂型地熱貯留層モデルを構築することである。そのために、まず、岩盤不連続面表面アスペリティの時間依存性挙動を微視的な観点から解明し、水理特性への影響を明らかにする。そして、岩盤不連続面の準静的・動的挙動に伴う水理特性変化を考慮した断裂型地熱貯留層数値モデルを構築し、熱水生産・還元に伴って生じる微小地震をシミュレーションする。最後に、数値解析結果と微小地震観測結果を比較することによって、開発された構成則の妥当性検証、および広域的モデル補正を行い、高精度地熱貯留層モデル構築手法を確立する。

3. 研究の方法

(1) 岩盤表面アスペリティの応力分布の解明

岩盤表面のアスペリティの時間依存性挙動を解明するためには、アスペリティ内部の応力状態を微視スケールで定量的に評価する必要がある。そのために、円柱形状の均質な疑似岩石供試体を無収縮モルタルを用いて作製し、三点曲げ試験の要領で破断させ、不連続面を導入した。供試体の直径は 10 mm、長さは 20 mm 程度であり、中央部に不連続部を有する。この供試体を用いて、マイクロフォーカス X 線 CT スキャナ内部で一軸圧縮試験を実施し、供試体に作用する軸荷重を 0 N から 2000 N まで 8 段階で増加させた。各荷重ステージにおいて、載荷荷重を一定に保った状態で CT 撮影を実施した。その後、デジタル画像相関法(DIC)を用いて、供試体内部のひずみ分布をマイクロスケールで評価した。同時に、個別要素法を用いて CT スキャナ内部での圧縮試験の再現解析を実施した。再現解析のために、別途同様の無収縮モルタルを用いて直径 50 mm、長さ 100 mm の円柱供試体を作製し、圧縮試験を実施した。その結果から、各種力学物性値を同定し、数値解析モデルに入力した。

(2) き裂性岩盤内部の応力シミュレーション手法の開発

断裂型地熱貯留層モデル作製において、き裂ネットワーク内の応力分布は非常に重要になるため、き裂性岩盤内部の応力分布シミュレーションを実施した。そのために、断層ダメージ領域のき裂特性(密度、配向、長さ)を統計的に評価し、数百万本のき裂から構成される Discrete Fracture Network (DFN)を生成した。そして、クラックテンソル理論に基づき、生成した DFN から等価連続体モデルを構築した。この等価連続体モデルは、数百万の要素から構成され、各々の要素が異なった完全異方性の弾性コンプライアンスマトリックスを有している。すなわち、等価連続体モ

デル内部は力学的に不均質な状態となる。そして、構築した等価連続体モデルの外部境界に広域応力を付加し、静的解析を実施することによって、き裂性岩盤内部の不均質な応力状態のシミュレーションを実施した。

(3) 流体注入によって生じる誘発地震シミュレーション手法の開発

岩盤不連続面から岩盤基質部への流体移動を考慮することができる流体浸透および岩盤変形を考慮することができる連成解析コードを拡張有限要素法に基づき構築した。コードの開発に際して、過去に実施された断層への流体注入実験の再現解析を準静的および動的状態で実施し、計測結果と比較することによって妥当性の検証を行った。

4. 研究成果

(1) 岩盤表面アスペリティの応力分布の解明

図1は、DICによって算出された圧縮された疑似岩石供試体内部のひずみ分布を示している。図1-(a)は断面図、図1-(b)は各高さにおいて平均化されたひずみを示している。(a)で供試体内部に局所的に発生している大きなひずみは、DICにおけるエラーや、供試体内部の空隙の変形が考えられるが、平均化することによって不連続面周囲における局所的なひずみの発生を確認することができた。すなわち、アスペリティの非線形挙動と関係している可能性が示唆された。

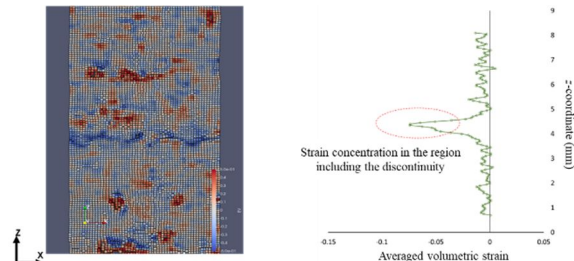


図1:(a)疑似岩石供試体内部のひずみ分布 (b)各高さレベルで平均化したひずみ (Hasegawa et al., 2023)

(2) き裂性岩盤内部の応力シミュレーション手法の開発

従来の数値シミュレーション手法では、断層系の不均質な応力分布を再現することは難しかった。本研究では、断層ダメージ領域におけるき裂ネットワーク内部の岩盤剛性の不均一性を等価連続体モデルで再現し、初期応力状態を再現する手法を新たに考案した。本研究で提案した手法の妥当性を個別要素法を用いた不連続体解析で検証したのち、断層ダメージ領域内部の応力解析を

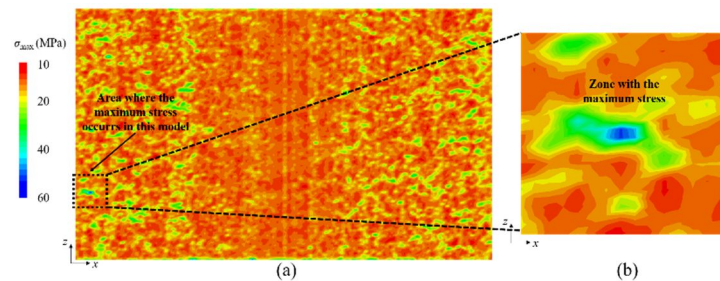


図2:(a)シミュレーションされたき裂性岩盤内部の複雑な応力分布 (b)高剛性領域における応力集中 (Sainoki et al., 2021)

実行した。図2-(a)は三次元数値解析モデルの断面を示しており、中央に z 軸と平行に断層コアが存在している。図から分かるようにき裂が密に存在する断層コアでは大きな応力集中が発生していないが、断層ダメージ領域においては、き裂密度が小さい領域の岩盤剛性が大きくなり、応力集中領域が点在していることが分かる。特に図2-(b)に示すように広域的な応力の二倍以上の異常応力が発生する可能性があることが示唆された。また応力集中の度合はき裂の剛性に大きく影響を受け、断層から離れた母岩内で異常応力が発生する可能性は低いことが示された。今回開発した手法を用いて大深度地下岩盤の初期応力解析を実施することによって、大規模誘発地震の発生予測に大きく貢献することが期待される。

(3) 流体注入によって生じる誘発地震シミュレーション手法の開発

図3に拡張有限要素法による断層への流体注入シミュレーション結果を示す。図の中央部に x 軸と平行な方向に断層が存在しており、その中央部に流体を注入したときの変位分布を示している。本研究で開発したコードは、岩盤不連続面内の流体が周囲の岩盤基質部へ浸透を考慮することができる。シミュレーション結果は、流体注入箇所の断層の垂直変位、水平変位、および間隙水圧の計測結果と比較し、その妥当性を検証した。また、動的な解析を実施し、実際に流体が注入された断層において発生した微小地震のマグニチュードと同等の地震がシミュレーションされていることを確認した。今後、断層ダメージ領域を構成するき裂性岩盤の透水特性を等価連続体モデルを用いて導入し、拡張有限要素法を用いた高精度断裂型貯留層モデルの構築を試みる。

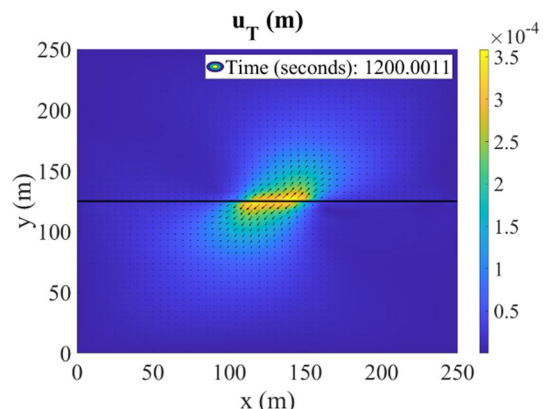


図3:拡張有限要素法を用いた断層への流体注入シミュレーション (Schwartzkopff et al., 2021)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Sainoki A., Schwartzkopff A. K., Jiang L., Mitri H. S.	4. 巻 126
2. 論文標題 Numerical Modeling of Complex Stress State in a Fault Damage Zone and Its Implication on Near Fault Seismic Activity	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	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） 10.1029/2021JB021784	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 Schwartzkopff Adam K., Sainoki Atsushi, Elsworth Derek	4. 巻 147
2. 論文標題 Numerical simulation of mixed aseismic/seismic fault-slip induced by fluid injection using coupled X-FEM analysis	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences	6. 最初と最後の頁 104871 ~ 104871
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijrmms.2021.104871	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 Schwartzkopff Adam K, Sainoki Atsushi	4. 巻 861
2. 論文標題 Characterization of seismic energy during fault-slip induced by fluid injection using coupled and dynamic X-FEM analysis	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IOP Conference Series: Earth and Environmental Science	6. 最初と最後の頁 032078 ~ 032078
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1755-1315/861/3/032078	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 Sainoki A, Iwata N, Asahina D	4. 巻 861
2. 論文標題 Characterization of Fault-slip Taking Place in a Fractured Fault Damage Zone	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IOP Conference Series: Earth and Environmental Science	6. 最初と最後の頁 052038 ~ 052038
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1755-1315/861/5/052038	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 Schwartzkopff Adam K., Sainoki Atsushi, Elsworth Derek	4. 巻 54
2. 論文標題 Numerical Simulation of An In-situ Fluid Injection Experiment into a Fault Using Coupled X-FEM Analysis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Rock Mechanics and Rock Engineering	6. 最初と最後の頁 1027 ~ 1053
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00603-020-02301-1	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 Sainoki Atsushi, Maina Duncan, Schwartzkopff Adam Karl, Obara Yuzo, Karakus Murat	4. 巻 127
2. 論文標題 Impact of the intermediate stress component in a plastic potential function on rock mass stability around a sequentially excavated large underground cavity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences	6. 最初と最後の頁 104223 ~ 104223
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijrmmms.2020.104223	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 Sainoki Atsushi, Hirohama Chiaki, Schwartzkopff Adam Karl	4. 巻 177
2. 論文標題 Dynamic Modelling of Induced Seismicity by Using Seismic Efficiency Constraints and a New Scaling Law for Slip-Weakening Distance	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Pure and Applied Geophysics	6. 最初と最後の頁 637 ~ 659
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00024-019-02342-w	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 Sainoki Atsushi, Schwartzkopff Adam Karl, Jiang Lishuai, Mitri Hani	4. 巻 10
2. 論文標題 Numerical modelling of spatially and temporally distributed on-fault induced seismicity: implication for seismic hazards	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 International Journal of Coal Science & Technology	6. 最初と最後の頁 1 ~ 16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s40789-022-00560-7	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

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件／うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Atsushi Sainoki, Adam Karl Schwartzkopff, and Lishuai Jiang
2. 発表標題 Methodology to simulate triggered and induced seismic activities on a fault plane
3. 学会等名 5th International Symposium on Mine Safety Science and Engineering (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長谷川文悠 オノ木敦士
2. 発表標題 岩盤不連続面アスペリティ内部の微小領域における応力分布の定量評価
3. 学会等名 第15回岩の力学国内シンポジウム
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 Atsushi SAINOKI
2. 発表標題 Methodology to Back-analyze the Slip-weakening Distance of Induced Seismicity, Considering Seismic Efficiency
3. 学会等名 Rock Dynamics Summit (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Atsushi SAINOKI
2. 発表標題 Numerical Study on Fluid Injection into Faults: the Importance of Considering Leak off into the Surrounding Rock Mass
3. 学会等名 YSRM2019 & REIF2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Chiaki HIROHAMA
2. 発表標題 Estimation of the Kinetic Friction of Rock Discontinuities Undergoing Dynamic Failure during Seismic Events
3. 学会等名 YSRM2019 & REIF2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Adam SCHWARTZOPFF
2. 発表標題 Rock Mechanics for Natural Resources and Infrastructure Development
3. 学会等名 Rock Mechanics for Natural Resources and Infrastructure Development (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Atsushi Sainoki
2. 発表標題 Numerical modelling of induced seismicity considering metre-scale stress heterogeneity in a fault damage zone
3. 学会等名 15th ISRM Congress 2023 & 72nd Geomechanics Colloquium (国際学会)
4. 発表年 2023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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------