

令和 2 年 6 月 30 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H04612

研究課題名(和文) エネルギー開発リスクとなる断層活動性の定量評価に関する研究

研究課題名(英文) Study on quantitative evaluation of fault activity for energy resource development

研究代表者

伊藤 高敏 (Ito, Takatoshi)

東北大学・流体科学研究所・教授

研究者番号：00184664

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 8,500,000円

研究成果の概要(和文)：エネルギー資源開発で実施されるフラクチャリングにおいて、ボーリング孔を通して地下岩体に負荷した流体圧が、地表で人が感じる程度に大きな地震を発生させる原因を数値シミュレーションに基づいて考察した。その結果、負荷した流体圧が付近の既存断層に及ぶと、MPaオーダーの変化でもkm<sup>2</sup>オーダーの広い範囲が瞬間的にすべり得ることがわかった。ただし、すべり速度が増えると摩擦係数が減少する特性と、断層面に作用するせん断応力が比較的大きい臨界状態にあることが条件となる。したがって、開発対象地域にある断層の摩擦特性と、周囲の応力状態を事前に把握することで有感地震の発生を予測し、さらに、その対策が可能と考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

フラクチャリングとは、ボーリング孔を通した地下岩体への流体圧負荷でフラクチャー(割れ目)を発生させる技術であり、化石燃料を初めとするエネルギー資源回収の効率化に必須となっている。しかし、フラクチャリングと有感地震の関係が社会問題化して開発が中止になる事態も起きており、その対策が求められている状況にある。本研究では、両者の因果関係を明確に示し、かつ、その関係が測定可能な因子(断層面の摩擦特性および岩体応力)によって支配されていることを明らかにした。したがって、有感地震の発生防止と、地域特性に応じた開発が計画的に進められるようになると期待される。

研究成果の概要(英文)：Fracturing is a key technique for energy source industries to create fractures by injecting massive fluid into rock. We examined by numerical simulations why felt earthquakes are triggered by the fracturing. As a result, we found that when injected fluid propagates to raise pore pressure in a preexisting fault even by the MPa order, the raised pressure can generate dynamic slip of fault in area of the km<sup>2</sup> order. However, such large dynamic slip of fault requires two conditions that friction coefficient of fault plane decreases with increasing slip velocity, and the fault is subjected to a large shear stress at critical level. The slip velocity dependency of friction coefficient and the stress state can be measured. This means that we can predict the felt earthquake possibility due to fracturing from those measured frictional characteristics and stress values.

研究分野：岩石力学

キーワード：誘発地震 フラクチャリング 断層すべり 数値シミュレーション

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

米国で近年始まったシェールガス(オイル)開発は急速に世界に拡大しつつあり、日本でも商業生産に向けた取組が始まっている。これが世界に与えたインパクトは非常に大きく、エネルギー情勢を一変させたのみならず、開発を可能にした革新技术、すなわち、水平坑井を掘削し、高水圧を負荷して坑井と交差するフラクチャーを並列に多数作成する多段フラクチャリング技術が、地熱開発、炭層ガスの回収、次世代のバイオメタン鉱床造成/生産など、岩盤浸透性の改善が必要な他分野へ応用拡大されようとしている。一方、シェールガス開発の拡大に伴ってフラクチャリングの施工数が近年急増し、それと呼応するように米国で有感の地震が増えている。この事実から、たとえ地震の規模が小さく、またフラクチャリングとの因果関係が不明確であっても、地震という異常に対する嫌気から住民の強い反対を受けて開発中断ないし計画中止となる例も起きている。この問題を不用意に放置すれば、シェールガス開発のみならず多段フラクチャリング技術の応用が期待されている他分野、さらには、地球温暖化対策と期待され、より大量の流体注入が必要な二酸化炭素地中貯留でも開発が停滞する可能性が高い。

### 2. 研究の目的

エネルギー資源開発を目的とした流体注入に伴う近傍の断層活動などが大きく社会問題化し、その評価如何で開発計画が左右される事態となっている。このため、フラクチャリングと地震の関係を調べる研究が活発化している。しかし、その多くは自然地震に対して培われてきた統計的手法を応用し、フラクチャリング中に観測される微小地震の状況から有感地震を予測することを目的としている。これに対して本研究では、現象の理解に偏った理学的視点ではなく、岩盤工学で培われた力学をよりどころにして各種の力学因子と断層すべりの関係を定量化する。これにより、力学因子の事前調査を根拠とした定量的な安全性評価を可能とする手法を新たに提案することを目的とした。

### 3. 研究の方法

地表から地下に圧入した流体が、何らかの経路をたどって既存の断層に流入し、断層のせん断すべりを引き起こす問題を考え、2次元の平面ひずみ問題として解析する。断層面は平滑ではなく、多少なりとも凹凸がある。この凹凸のかみ合いは、断層面と直交する方向のパネとして機能し、有効応力に応じて断層の開口幅が変化する。また、有効応力が低下してせん断すべりが生じると、相対する断層面の凹凸のかみ合いがずれて断層の開口幅が大きくなる。このようなせん断すべりに伴うき裂の開口幅変化とすべり量の変化を、Willis-Richards et al. (1996) のモデルで表す。

一方、過去の実験的研究から、断層の摩擦力がすべり速度に依存して変化することが知られている。その依存性は、いわゆる Rate and state friction law でしばしば表現される(Ruina, 1983)。同規則は同じ断層で繰り返し地震が発生する現象を統一的に解釈するために考え出されたものであり、停止中に断層のせん断強度が回復する過程が組み込まれていて複雑である。これに対して本研究で着目している注水に伴って起こる地震の特に発生と規模を考える上では、すべり出してから停まるまでの断層挙動が問題となり、せん断強度の回復過程は含まれない。この場合、すべり出した後に摩擦係数がすべり速度によって変化する効果のみを考慮すれば良い。そこで、静止状態を含めたすべり速度と摩擦係数の組み合わせを複数与えて、それらを結ぶ折れ線分布としてすべり速度と摩擦係数の関係を与える。これらの関係を Swenson et al. (1995) が開発した Geocrack2D に組み込む改良を行って、き裂内の流体移動と周囲岩体の変形の連成問題を数値シミュレーションする。想定した断層を含む岩体モデルが図1である。対角線に沿って断層があり、左右と上下方向にそれぞれ 20 および 15 MPa の地殻応力が作用している。初期の断層内水圧を 10 MPa とする。その状態で断層の中央にある注水点の水圧を 10 MPa から 100 秒かけて一定勾配で 16 MPa まで上昇させ、それ以降は一定とする。注水によって断層内の水圧が上昇すると断層面間の摩擦力が有効応力の原理にしたがって減少し、せん断応力を下回ると断層がすべり始める。摩擦力と初期のせん断応力が釣り合うときの水圧を以下では臨界水圧と呼ぶ。

### 4. 研究成果

#### (1) 摩擦係数一定の場合

加圧開始から 2000 sec 後の断層に沿った水圧とすべり量の分布を求めた結果が図2である。ただし、摩擦係数が 0.740 で一定とした。水圧が臨界値を超えた領域のやや外側まで断層がすべっている。すべり領域の先端において、水圧が初期の大きさ(10MPa)より小さくなるという特異な挙動が現れている。これは、すべりが生じたことによる断層の開口を補う水が、注水点から遠いために十分に供給されないためである。図3は、注水点からの距離が異なる幾つかの位置におけるすべり量の時間変化である。いずれの場所でも時間経過に対して連続的にすべり量が増加しており、地震を起こすような動的にすべる挙動は見られない。

#### (2) 摩擦係数がすべり速度で変化する場合

次に摩擦係数がすべり速度で変化すると仮定してシミュレーションを行った。摩擦係数の速度依存性は様々であるが、ここでは現象の解釈がなるべく容易になるように単純化した関係を仮定した。すなわち、すべり速度が零のときの摩擦係数つまり静摩擦係数を 0.740 とし、すべり速度が 10  $\mu\text{m/s}$  になるまで 0.740 から線形に減少して 0.687 となり、すべり速度がそれ以上で

は一定とした。

注水点からの距離が異なる幾つかの位置におけるすべり量の時間変化を求めた結果が図4である。全体的な傾向は大きさを含めて摩擦係数を一定にした図3と同様であるが、全ての位置ですべり量が階段状に変化している。これは、動的すべりが発生し、かつ、すべった後にしばらく停止するサイクルが繰り返し起きていることを示している。

### (3) 動的すべり発生メカニズム

動的すべりが発生した前後のせん断応力と摩擦力の分布を詳細に検討した結果、その発生過程が図5のようであることが明らかとなった。すなわち、すべり領域ではせん断応力が減少し、それを補うようにすべり領域の端でせん断応力が初期値より大きくなってピークを持つ。一方、注水圧の伝播によって静止状態の摩擦力が減少する。そして、静止状態の摩擦力がせん断応力のピークを下回ったとき、その位置ですべりが開始する。いったんすべり始めると摩擦力が静止状態よりも低下するのですべりが加速される。また、岩体は連続体なので、すべりが生じた点に隣接する点においても引きずられてすべりが生じ、これが連鎖してすべり領域が拡大する。ただし、摩擦係数には下限値があるので、それに対応する大きさを摩擦力の低下が止まる。こうして全領域でせん断応力が摩擦力の下限値まで低下すると、力が平衡してすべりが停止する。その結果、摩擦係数のすべり速度依存性によって逆に摩擦力が増加し、面全体で摩擦力がせん断応力を上回る安定状態に戻る。このため、水圧が断層に沿ってさらに伝播するまですべらない状態がしばらく続く。

上記のメカニズムによれば、代表的な因子である注水圧力、摩擦係数およびせん断応力が動的すべりに及ぼす影響を次のように予想できる。まず注水圧力は、すべり発生から停止に至る過程の摩擦力とせん断応力の変化挙動と無関係である。よって、図4のケースに比べて注水圧力を大きくしても、動的すべり量は変わらないが、圧力伝播が早くなるので動的すべりの間隔が短くなるはずである。これに対して図4のケースに比べてすべり状態の摩擦係数の下限を小さくすると、静止状態の摩擦力とすべっている状態の摩擦力の差がより大きくなるので、動的すべり量がより大きくなるはずである。さらに、すべりに伴って起こるすべり領域の拡大量がより大きくなるため、水圧伝播により長い時間を要するようになり、その結果、次の動的すべりが起こるまでの時間が長くなるはずである。また、図4のケースに比べてせん断応力の初期値を大きくすると、すべり状態の摩擦係数を小さくすることと同じ効果が生じ、一回の動的すべり量が大きくなり、動的すべりの間隔が長くなるはずである。一方、せん断応力の初期値が大きくなると臨界水圧が小さくなるので注水圧力を大きくすることと同じ効果が生じ、動的すべりの間隔が逆に短くなるはずである。これら両者の相乗効果によって、動的すべり量が大きくなるが、動的すべりの間隔は図4の結果よりは短くなるはずである。そこで、実際に注水圧力、摩擦係数およびせん断応力のそれぞれを変化させたシミュレーションを行ったところ、いずれの結果も上記の予想通りとなり、動的すべり発生メカニズムの妥当性が示された。

### (4) 断層面全体すべりの発生

先述したようにすべり領域ではせん断応力が減少し、それを補うようにすべり領域の端でせん断応力が初期値より大きくなってピークを持つ。そのピークは、すべり領域の拡大と共により大きくなる。そのようにすべりとせん断応力の増加が続けば、やがてせん断応力が静止状態の摩擦力を越える可能性がある。その結果として新たな動的すべりがもし起こるとするならば、上記とは異なるモードのすべりが起こる可能性がある。つまり、せん断応力が静止状態の摩擦力を越える状態となったときに、動的すべりせん断応力ピークの移動移動先での新たな動的すべり、のプロセスが繰り返し起こる可能性がある。このとき、水圧伝播を待つことなくすべり範囲が広がっていくので、断層面全体が一気にすべると予想される。また、このようなすべりは、せん断応力の初期値が大きいほど起こりやすくなるはずである。そこで、地殻応力の大きさを調整し、断層面の垂直応力は変えずにせん断応力のみを少しずつ大きくしたシミュレーションを行った。得られた断層面に沿ったすべり量の分布が図6である。ただし、いずれも注水開始から動的すべりが初めて生じた直後の分布であり、各曲線でせん断応力の初期値が異なる。上記の予想通りにせん断応力が大きくなると、断層面全体にすべりが生じる、つまり、1回の動的すべりで断層面全体がすべる現象が起こっている。なお、注水点からの距離が300mより大きい範囲で、その手前よりもすべり量が大きくなっている。これは、本解析に用いたモデルでは図1のように断層が境界まで伸びており、境界付近ですべりが起こりやすくなっているためである。よって、注水点からの距離が300mまでを、より遠くまで伸びる断層の一部と見なすことができる。

地震の規模にはすべり領域の大きさとすべり量が影響する。本研究によって、すべり領域の大きさがせん断応力と対象層の摩擦特性によって決まることが明らかになった。したがって、現位置応力測定を行うとともに、実験による断層の対象層の摩擦特性を把握することで、有感地震発生の可能性を予測することが可能と考えられる。

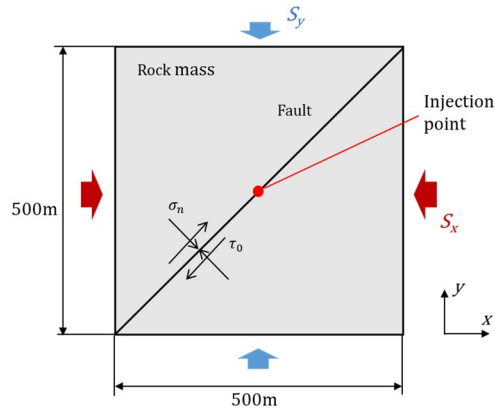


図1 シミュレーションモデルの形状と境界条件

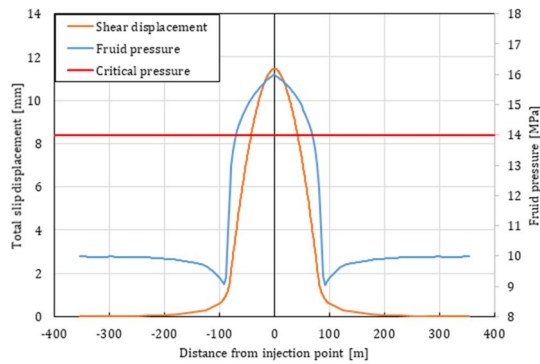


図2 注水から 2000sec 後の水圧とすべり量の分布

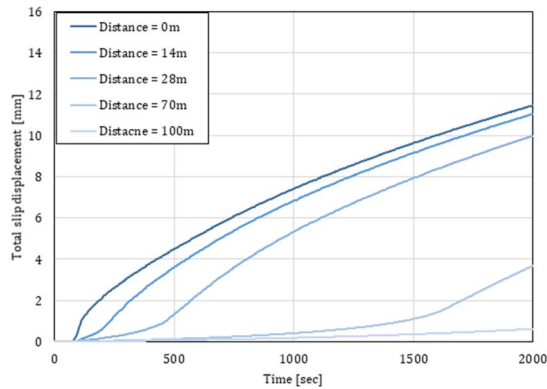


図3 注水点からの距離が異なる位置におけるすべり量の時間変化 (摩擦係数一定の場合)

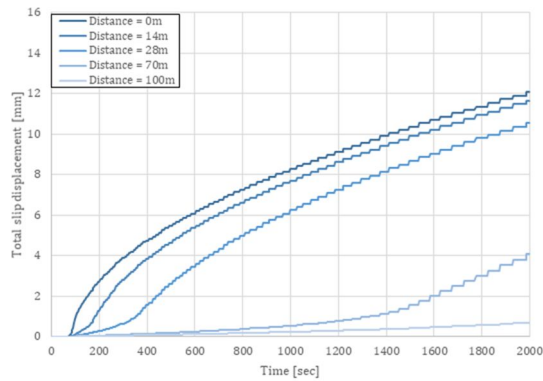


図4 注水点からの距離が異なる位置におけるすべり量の時間変化 (すべり速度で摩擦係数が変化する場合)

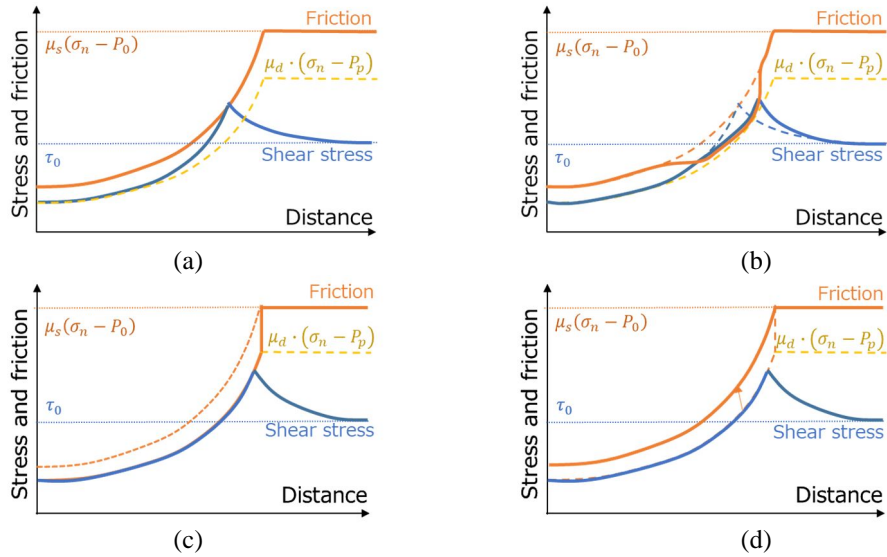


図5 本研究で明らかになった動的すべり発生メカニズム、(a)動的すべり開始、(b)すべり領域の拡大、(c)力の平衡状態に達してすべりが停止、(d)摩擦力の復活

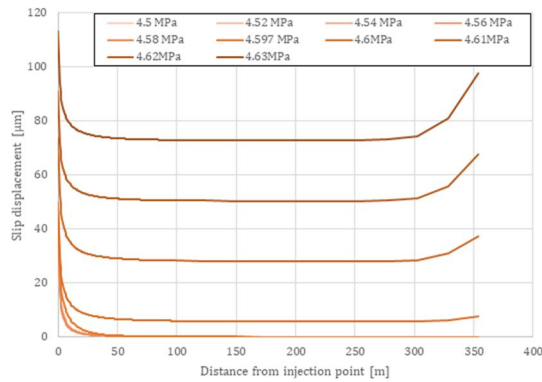


図6 初期せん断応力による断層面に沿ったすべり量分布の変化

< 引用文献 >

Ruina, A., 1983. Slip instability and state variable friction law, *J. Geophys. Res.*, v. 88, p.10359 – 10370.

Swenson, D., DuTeau, R. and Sprecker, T., 1995. Modeling Flow in a Jointed Geothermal Reservoir, *Proc. World Geoth. Cong.*, Florence, pp. 2553-2558.

Willis-Richards, J., Watanabe, K. and Takahashi, H., 1996. Progress toward a stochastic rock mechanics model of engineered geothermal system, *J. Geophys. Res.*, v. 101, pp.17481-17496.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 伊藤高敏, 横山佳祐, 椋平祐輔, 手塚和彦, 小川浩司, 横山幸也, 船戸明雄
2. 発表標題 流体圧伝播に伴う断層すべり発生のメカニズムと対策
3. 学会等名 資源素材学会秋季大会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊藤高敏・横山佳祐・椋平祐輔
2. 発表標題 注水に伴う断層の動的すべり発生メカニズムの検討
3. 学会等名 石油技術協会春季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 横山佳祐, 椋平祐輔, 伊藤高敏
2. 発表標題 注水による断層すべりの発生機構に関するシミュレーション
3. 学会等名 日本地熱学会令和元年学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤高敏, 横山佳祐
2. 発表標題 エネルギー資源開発のための注水による断層すべりに及ぼす岩盤応力の影響
3. 学会等名 第53回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊藤高敏, 横山圭祐
2. 発表標題 連続注水に伴う非正常断層滑りの発生機構に関する数値解析に基づく考察
3. 学会等名 資源・素材2017(札幌) - 平成29年度資源・素材関係学協会合同秋季大会 -, 札幌
4. 発表年 2017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
研究協力者	スウェンソン ダニエル  (Swenson Daniel)	サンダーヘッドエンジニアリング社(米国)	
研究協力者	椋平 祐輔  (Mukuhira Yusuke)	東北大学・流体科学研究所・助教	
研究協力者	雷 興林  (Lei Xinglin)	産業技術総合研究所・地質調査総合センター・研究グループ長	