

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 27 日現在

機関番号：22701

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25870600

研究課題名(和文) 水圧破砕によって誘発される地震のメカニズムの解明

研究課題名(英文) Source Characterization of Hydraulic Fracturing Induced Micro Seismicity

研究代表者

金 亜伊 (KIM, AHYI)

横浜市立大学・総合科学部・准教授

研究者番号：00633851

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)：シェールガス開発における誘発地震のメカニズム解明のために剪断破壊を仮定した発震機構解析と見かけ応力解析を組み合わせ、体積変化の有無について調べる手法を開発した。その手法を米国・テキサス州における水圧破砕により誘発された微小地震に適用した結果、見かけ応力は貯留層内の最大水平応力軸に低角な走行を持つ地震について低く見積もられる事が明らかになった。これより誘発地震のメカニズムは既存の断層方向と貯留層内の応力の状態によって剪断破壊となるかTCとなるかが決まる可能性が示唆された。さらに、より直接的に震源解析を行うために水圧破砕の地震に特化して、解を制約し、安定したメカニズムを得る手法を開発した。

研究成果の概要(英文)：Understanding the source characteristics of hydraulic-fracturing-induced microearthquakes is expected to provide better understanding of both the fracturing process and the influence of pre-existing structures on the distribution of events. However, details of the source characteristics of microearthquakes remain largely unknown. To address this issue, we estimated the apparent stress of the microearthquakes observed during the hydraulic fracturing in the Carthage Cotton Valley Gas Field. As a result, lower apparent stress was observed for the events striking subparallel to the maximum horizontal compressional stress axis. This implies the mechanism of these events could be different from that of events optimally oriented for failure. In addition, we developed more direct method to retrieve non-double couple component from hydraulic fracturing induced microearthquakes constraining the mechanism to be shear slip, tensile displacement, or combination of these mechanisms.

研究分野：地球物理学

キーワード：地震 微小地震 みかけ応力 応力降下量 発震機構 誘発地震 水圧破砕 シェールガス

## 1. 研究開始当初の背景

### ● **水圧破砕モニタリングの現状**

現在シェールガス開発などの資源開発現場において、水圧破砕はルーチ的に観測され、数kmに及び、数百、数千の微小地震の広がりをリアルタイムで観察する事が可能である。しかし、これらの地震が貯留槽内でガスの流路となるフラクチャーの形成、成長とどのような関係があるのかは誘発地震のメカニズムがわからないために、詳細は不明である。

### ● **誘発地震のメカニズム解析の問題点**

上記の誘発地震のメカニズムは、その発生理由から主に以下の二つであると考えられる。

- I. 体積変化を伴う：流体圧入により新たなクラックを形成、または小断層が急激に押し広げられる (Tensile crack)。この場合、体積増加(減少)により孔隙率の上昇(低下)を伴う。これはフラクチャーの形成、成長、収縮そのものを観測している事となり、流体の流れをリアルタイムで把握することができ、フラクチャーの進行を制御する事が可能である。
- II. 剪断破壊：間隙水圧の上昇により既存の小断層がすべった結果で、テクトニックな応力解放によるものであり、体積変化は伴わず、貯留層の孔隙率に変化はない。この場合、発震機構から貯留層内の応力軸の変化や、断層同士の相互関係を調べる事が可能である。

誘発地震のメカニズムがうまく決まらない主な原因は、コスト面の制約から観測井が1, 2個しか確保できないため、発震機構の推定に必要な多方位からの観測ができない事が一因である。そのため通常は剪断破壊を仮定して解の安定を得るが、体積変化の有無の検証にはその拘束条件を用いる事は適当ではない。さらに、地震のマグニチュードが主に-1以下と微小であるため、良好な波形記録を得る事が難しく、通常P波やS波の振幅のみが使われる。

## 2. 研究の目的

本研究では、近年資源開発において注目される技術の一つである、水圧破砕によって誘発される地震のメカニズムを解明することで、それらの地震と圧入流体によって生成、成長するフラクチャーとの関係を明らかにする。現時点ではこれらの誘発地震が体積変化を伴うのか、剪断破壊で説明できるのか決定的な結論に至っていないが、本研究では震源スペクトル解析と様々な拘束条件を用いたモーメントテンソル解析によりそれを明らかにし、誘発地震の物理的モデルの確立を試みる。これにより、フラクチャー自身と貯留層の特性に対する理解が進み、資源の生産性の向上、帯水層汚染等の環境破壊や、周辺断層の刺激による災害の抑制に貢献する事を目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究では誘発地震のメカニズムを考察する第一段階として、発震機構の決定をする前に、比較的大きな地震を基準地震、同じ場所で起きた小さな地震を経験的グリーン関数とし、基準地震の震源スペクトルを求め、そして、求めたスペクトルが通常の自然地震に見られるダブルカップル(剪断破壊)(Brune, 1970) もしくは Tensile Crack(Walter and Brune, 1993)で説明できるのかを検証する。この方法では断層パラメータや応力軸を求めることはできないが、求められたコーナー周波数とモーメントの比較から、通常のテクトニックな地震との相違点や類似点を探り、誘発地震のメカニズムについて考察する。経験的グリーン関数を使う利点は、観測点の影響や、構造の影響、特に震源スペクトル解析の時に問題となる Q の影響を無視できることが大きい。

第2段階として、これらの地震の震源解析をより直接的に行うために、剪断破壊とテンサイル(TC)のメカニズムで制約することにより解の安定を得る手法を開発した。水圧破砕においては観測方位が1、2個と限られる

場合が多いため、クラスターごとのメカニズムを同じと仮定し、観測点と震源を逆転させることで観測方位の確保を可能にした。

#### 4. 研究成果

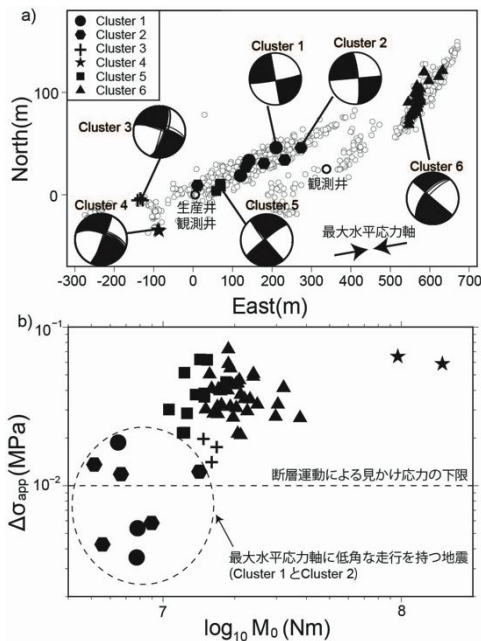


図 1. a) CV 水圧破碎実験の震源分布と断層面解。矢印は貯留層の最大水平応力軸の方向を示す。b) 見かけ応力を地震モーメントに対してプロットしたもの。凡例は a) に倣う(Kim and Iida, 2015)。

水圧破碎による誘発地震のメカニズムを検証するために、米国・テキサス州 Cotton Valley(CV)における水圧破碎実験で誘発された微小地震について解析を行った。発震機構を知る上で、これらの地震が A) 流体圧入により亀裂が押し広げられた(体積変=テンサイルクラック(TC)) ものか、 B) 既存の断層に流体が入り隙水圧を上昇させることによって間接的な断層運動(剪断破壊)を起こしたもののかの特定を試みた(図 1a))。これらの発震機構の推定が困難な原因は、マグニチュード(M)の小ささと、様々な制約により観測方位が十分に確保できないため事であるが、この実験においても観測井は 2 つと少なくサイズも M -0.68 以下と微小であり、従来のモーメントテンソル(MT)を用いた体積変化の検

証は困難である。そこで申請者は視点を変え、直接 MT 解析を行わず見かけ応力から体積変化の有無の検証を試みた。見かけ応力とは放射エネルギーと地震モーメントの比に比例する量で、断層運動で発生する地震についてはその大きさに関わらず一定であることが知られている。しかし火山性地震や地下流体が関係するような地震では有意に低くなる事が多々あり、本研究においてもこの値が体積変化の指標として扱えると考えた。観測方位が少ない場合、剪断破壊を仮定して解の安定を得る場合があるが、申請者はこの解析と見かけ応力解析を組み合わせることで、体積変化の有無の推定を試みた。そこでこれらの発震機構解と震源の時空間分布から地震をいくつかのクラスターに分け解析を行い、その結果見かけ応力は貯留層内の最大水平応力に低角な走行を持つ地震について低く見積もられる事が明らかになった(図 1b)。これにより誘発地震のメカニズムは既存の亀裂方向と貯留層内の応力状態によって剪断破壊となるか TC となるかが決まる可能性が示唆された。しかし見かけ応力解析はあくまでも間接的な指標にすぎないので、やはり直接的に発震機構解から体積変化成分の有無を調べられる方法が求められる。そのため次のステップとして申請者は上記での発震機構解析の難しさを克服するため、水圧破碎の地震に特化して、剪断破壊と TC で解を制約することで解の安定を試みた。これらの手法を数値実験を繰り返し妥当性を検証した結果、半無限媒質を仮定し、P 波、SH 波、SV 波の振幅比を使用できる条件下において Cotton Valley の観測条件に適用した場合、TC 成分 20%までならば解析可能であるという結果が得られた。Cotton Valley の観測条件では TC 成分が 30%を超過すると P 波はすべて押しになることが示されているが、観測された P 波は引きも多数見られるため整合しない。故に Cotton Valley の微小地震では TC

成分は多くとも 20%程度であると考えられ、本研究で開発した手法により TC 成分を検出できる可能性が示された(図 2)。

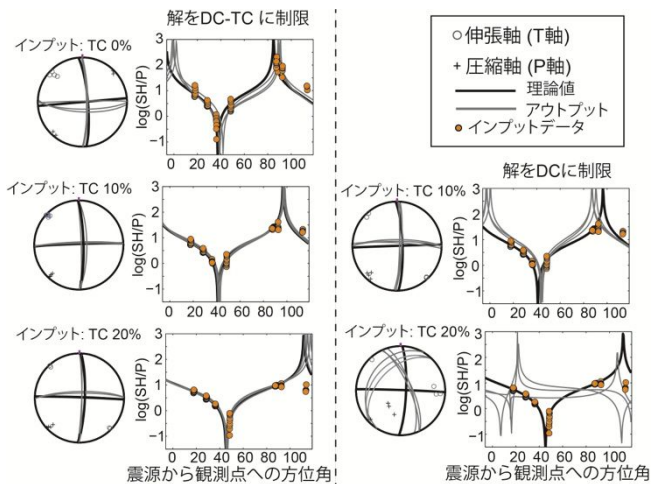


図 2. 拘束条件を用いた数値実験の例。インプットの TC を 0, 10, 20%を仮定し、CV の観測点を想定してデータを作成した。左では解を DC+TC に制限、右では DC に制限した。インプットの TC が 20%以上で DC のみの解析では説明が困難になる (Iida and Kim, 2015)。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

##### [雑誌論文](計 5 件)

1. Ahyi Kim, Douglas S. Dreger, Taka'aki Taira, Robert, M. Nadeau (2016), Changes in repeating earthquake slip behavior following the 2004 Parkfield main shock from waveform empirical Green's functions finite-source inversion, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(3), 1910-1926, 2016, DOI: 10.1002/2015JB012562, 査読有り。
2. Ruijia Wang, Yu Jeffrey Gu, Ryan Schultz, Ahyi Kim, and Gail Atkinson (2016), Source analysis of a potential hydraulic-fracturing-induced earthquake near Fox Creek, Alberta, *Geophysical Research Letters*, 43, 564-573, 2016, DOI:10.1002/2015GL066917, 査読有り。
3. Ryan Schultz, Shilong Mei, Dinu Pană, Virginia Stern, Yu, Jeffrey Gu, Ahyi Kim, David Eaton (2015), The Cardston Earthquake Swarm and hydraulic fracturing of the Exshaw Formation (Alberta Bakken play), *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(6), 2871-2884, 2015, DOI: 10.1785/0120150131, 査読有り。
4. Shuhei Iida and Ahyi Kim (2015), Toward understanding focal mechanism of hydraulic fracturing induced earthquakes using constrained inversion: method and synthetic

tests, *Proceedings of the 12th SEGJ International symposium*, 224-227, 2015, doi: 10.1190/segj122015-073, 査読有り。

5. Ahyi Kim and Shuhei Iida (2015), Low Apparent Stress Observed for  $M_w < -0.6$  Microearthquakes Recorded during Hydraulic Fracturing Stimulation in the Carthage Cotton Valley Gas Field, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(4), 2313-2320, 2015, DOI: 10.1785/0120140319, 査読有り。

##### [学会発表](計 10 件)

1. 飯田 周平, 金 亜伊 (2015), 水圧破碎によって誘発された微小地震の震源メカニズム～解を制限したインバージョン手法～, 日本地震学会 2015 年度秋季大会, S08-P19.
2. Shuhei Iida and Ahyi Kim (2015), Towards Understanding Source Mechanism of Hydraulic Fracturing Induced Earthquakes: Sensitivity Analyses using a DC-Tensile Constrained Focal Mechanism Inversion Method, *SSA Annual Meeting 2015*, Pasadena, USA.
3. 飯田 周平, 金 亜伊 (2015), Retrieving Focal Mechanism using Double Couple - Tensile Constrained Inversion: Method and Synthetic Tests, 日本地球惑星科学連合 2015 大会, STT13-P04.
4. Ruijia Wang, Yu Jeffrey Gu, Ryan Schultz, Ahyi Kim and Yunfeng Chen (2015), Source Parameters from Full Moment Tensor Inversions of Potentially Induced Earthquakes in Western Canada, 2015, AGU Fall meeting, S13B-2813.
5. Shuhei Iida and Ahyi Kim (2014), Source Characteristics of the Hydraulic Fracturing Induced Microearthquakes: Spatio-temporal Variation of Stress Drop Observed at Carthage Cotton Valley Gas Field, Texas, *Asia Oceania Geosciences Society 2014 annual meeting*, SE35-D5-PM2-P-012.
6. 金 亜伊, 飯田周平, 藤原了 (2014), 水圧波砕による誘発地震の検出に向けた地震波形の検出, 日本地球惑星科学連合 2014 大会, STT57-P02.
7. 飯田周平, 金 亜伊 (2014), 水圧破碎によって誘発された微小地震の応力降下量の時空間変化, 日本地球惑星科学連合 2014 大会, SSS29-P09.
8. A. Kim and S. Iida (2013), Towards detection of low frequency events during fluid injection: method and synthetic test, 2013 AGU Fall meeting, S33D-2463.
9. 金 亜伊, 飯田周平, James Rutledge (2013), 水圧破碎によって誘発された地震の震源特性: 経験的グリーン関数を用いた解析からの考察, 日本地球惑星連合大会, S-SS28-P17.

10. A. Kim, S. Iida, and James Rutledge (2013),  
Source Characteristics of Hydraulic  
Fracturing induced Microearthquakes:  
Implication from Source Parameter Study  
using Empirical Green's Function, SSA  
Annual Meeting 2013.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

金垂伊 (KIM, Ahyi)  
横浜市立大学・国際総合科学部・准教授  
研究者番号：00633851

(2)研究分担者  
( 無し )

研究者番号：

(3)連携研究者  
( 無し )

研究者番号：