

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K14167

研究課題名（和文）ボアホール検層と微小地震解析を融合させたハイブリッド断層面解推定法の開発

研究課題名（英文）Development of hybrid focal mechanism method by combining borehole logging and microseismic information

研究代表者

椋平 祐輔（Mukuhira, Yusuke）

東北大学・流体科学研究所・助教

研究者番号：60723799

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：地熱開発時等の地下開発時に計測する微小地震は、地下流体資源開発時に資源の流路や貯留部分として大変重要な役割を果たす地下既存き裂のせん断滑りにより発生する。しかし、従来の微小地震観測網からのみの地震学的情報では、断層面解、つまり微小地震を発生させた既存き裂の方向を推定することは困難であった。

本研究はボアホール検層から得られた地殻応力、既存き裂といった微小地震の発生に関する地球物理学データを、地震学的解析手法に組み込み、発生した微小地震の断層面解の範囲を制限することに成功した。つまり地震学的に不足する地球物理学的情報を資源工学的なボアホール検層からの情報によって補うことに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は地震学的解析手法に初めて検層から得られた地球物理データを融合させたものであり、不足する地震学的情報を他のデータで補完できることを示した。これまで難しかった微小地震の断層面解を工学的な実用に耐えうる精度で絞り込むことに成功した。これは地下地熱貯留層のき裂ネットワークシステムを把握する上で画期的な技術の進歩であり、資源生産予測等に有効に利用できると考えられる。

研究成果の概要（英文）：Microseismicity occurs from the shear slip on existing fractures at the sub-surface fluid resource developments such as geothermal development. Existing fractures play a very important role in resource development because they storage the resources and act as flow paths. However, estimating the orientation of existing fractures is difficult due to the limitation of seismological information acquisition from microseismicity. This study utilizes the geophysical information such as in-situ stress and existing fractures both from borehole logging and combined into the seismological analysis process. This attempt successfully constrains the range of the focal mechanism of microseismicity. In other words, the geophysical information from borehole logging compensates for the lack of seismology information in the seismological analysis.

研究分野：地球物理学

キーワード：ボアホール検層 誘発地震 地熱 微小地震 断層面解

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

能動的地熱開発、シェールガス開発等の地下流体エネルギー開発分野では、地下3~5kmの貯留層に対し透水性改善の為に、流体を圧入する水圧刺激(フラッキング)を実施する。その際に既存き裂のせん断滑りにより発生する誘発微小地震は、発生位置を決定され、透水性が改善したき裂位置として解釈される。さらに、これらのき裂面の向きは、透水性と関連するため[1]、き裂面の向き情報の抽出は、生産井位置等の貯留層システムの設計や、貯留層内き裂ネットワークの理解、持続可能な地下資源開発のために、極めて重要である[2]。

せん断滑りを起こしたき裂面(断層面)の向きは、地震学の分野では多観測点で取得された地震波形の押し引き極性情報から精度良く求められる。一方で、本分野では、コストの問題より多数の観測点数を置くことは稀であり、精度良くき裂面の向きを評価することは困難である。

近年、本分野でも、波形情報を用いたより高度な地震学的手法でき裂面の向きを推定する事例もあるが[3]、波形情報は不均質な地下速度構造に大いに依存するため、依然観測点数が少ないという難点を克服するには至らず、高精度にき裂面の向きを求められていない。よって、少ない微小地震観測点下において、誘発微小地震の発生したき裂面の向きを精度良く求めることは本分野の重要な課題である。

Reference

- [1] Ito and Zoback, 2000 GRL
- [2] Majer et al., 2013 Geothermics
- [3] Mukuhira et al., 2016 JGR

2. 研究の目的

地下流体エネルギー開発分野では掘削した坑井に対して、様々な物理検層が実施され、地殻応力情報、坑井内既存き裂分布等の情報を直接計測する。これらは坑井からの一次元情報であるが、直接計測によって得られた物理量であり、貯留層の地殻応力・既存き裂分布などの物理量のある程度代表する値と解釈できる。そこで、本研究ではボアホール検層により得られた地殻応力・既存き裂データと、微小地震の情報を融合させることにより、誘発微小地震を発生させたき裂面の向きを推定する手法の開発を目的とする。

3. 研究の方法

本研究は以下の各ステップで、各内容の研究方法を取った。ここでは、利用可能な地球物理学データである地殻応力、既存き裂データを段階的に地震学的な解析に組み込み、どのように断層面解を限定できるか検証する。

(1) 地震波形データ+地殻応力

地殻応力の絶対値・方向が既知である際、水圧刺激時のある間隙水圧上昇(送水圧力)下で、せん断滑りを起こすことができるき裂面の向きは限定することができる。押し引き極性情報によって求められたき裂面の向きに、地殻応力・送水圧力に調和的なき裂面の向きを融合させることによって、き裂面の向きを絞り込む。

(2) 地震波形データ+既存き裂統計モデル

微小地震の多くは既存き裂から発生する為、ボアホール検層から得られる既存き裂分布を事前情報として、フィールドに存在する既存き裂の統計モデルを作成する。これと観測点の押し引き極性情報によって求められたき裂面の向きを融合させる事によって、き裂面の向きを絞り込む。

(3) 地震波形データ+地殻応力+既存き裂統計モデル

(1)と(2)で用いた地殻応力・既存き裂統計モデルを同時に使用し、押し引き極性情報によって求められたき裂面の向きと融合させ、き裂面の向きを最大限絞り込む。

4. 研究成果

3で述べた研究方法にて得られた研究成果は以下の通り。

(1) 地震波形データ+地殻応力

地殻応力の絶対値・方向が既知である際、水圧刺激時のある間隙水圧上昇(送水圧力)下で、せん断滑りを起こすことができるき裂面の向きは限定することができる。押し引き極性情報によって求められたき裂面の向きに、地殻応力・送水圧力に

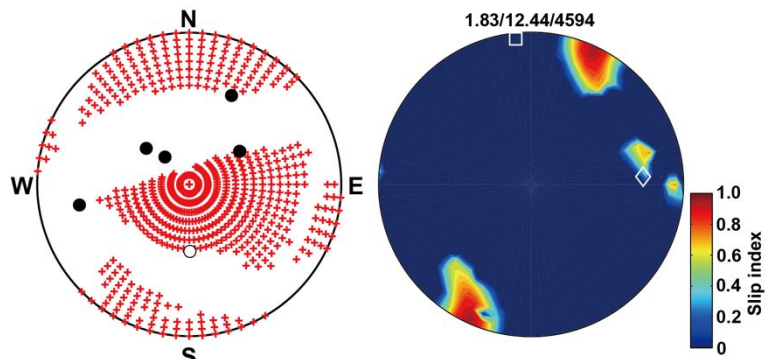


図1 本研究で開発した断層面解限定手法適用結果。
左：微小地震情報のみから求めた断層面解の候補
右：地殻応力情報により解の範囲を限定した結果。
カラーで示した部分に解が存在する。

調和的なき裂面の向きを融合させることによって、き裂面の向きを絞り込む。上記コンセプトを実現するためのプログラムを実装し、実フィールドデータを用いて本手法の有効性を検証した。

その結果、ほとんどの場合で、工学的に有効なほど、断層面の範囲を限定することができた。特に、注水圧力が小さい時、つまり水圧刺激の初期に発生する微小地震の断層面解の限定に非常に有効であることがわかった。図1は実際のフィールドデータに本研究で開発した手法を適用した結果であり、図1左で示された多くの断層面解の候補は、地殻応力情報を組み合わせる事により、図1右で示す範囲まで減少した。さらに、実際の断層面解も限定された解の範囲に含まれており、本手法により、断層面解の範囲が正しく、かつ有意に限定できた。

これらの微小地震は、注水井戸近傍で起きることが多い。これらの断層面解の限定は井戸近傍のき裂システムを理解する上で大変重要であり、貯留層管理にとって非常に重要な情報が抽出できたことを意味する。さらに、かなりの不確定要素を含む実フィールドデータを用いた場合でも同様であった。地殻応力が不確実性を含む場合に関しても、シミュレーションを実施した結果、本手法によって限定される解の範囲は安定的であり、本手法が入力データが不確実な場合でも、多数の地球物理データを組み合わせることで、有意にかつ、正しく断層面解の範囲を限定することに成功したと言える。

(2) 地震波形データ + 既存き裂統計モデル

微小地震は、既存き裂から発生する為、ポアホール検層から得られる既存き裂分布を、微小地震の断層面解の事前情報として、フィールドに存在する既存き裂から統計モデルを作成する。これと観測点の押し引き極性情報によって求められた断層面解を比較し、融合させる事によって、微小地震を発生させたき裂面の向きを絞り込む。

本概念を実現するためのプログラムを実装し、実フィールドデータを用いて本手法の有効性を検証した。既存き裂情報は、(1)で使用した地殻応力情報よりも拘束力が弱い、膨大な量の断層面解の解を限定するには有効であることがわかった。かつ(1)で使用した地殻応力よりもよりルーティーン的に求められる物理量であり、より実現可能性が高い。

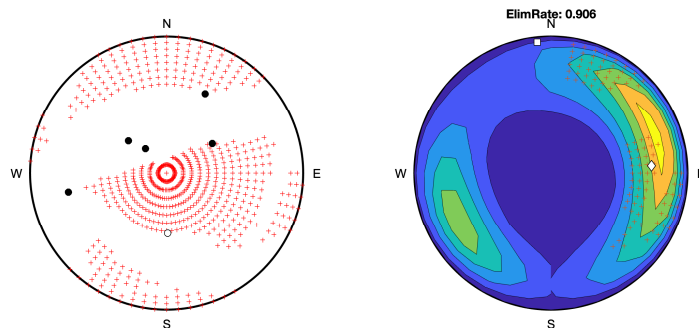


図2 本研究で開発した断層面解限定手法適用結果。

左：微小地震情報のみから求めた断層面解の候補

右：既存き裂情報を基に求めた既存き裂統計モデル（カラー）。さらに、同モデルの閾値より高い部分に、限定した断層面解もプロットした。

(3) 地震波形データ + 地殻応力 + 既存き裂統計モデル

(1)と(2)で用いた地殻応力・既存き裂統計モデルを同時に使用し、押し引き極性情報によって求められたき裂面の向きと融合させ、き裂面の向きを最大限絞り込む。残念ながら単純に地殻応力情報の断層面解に対する拘束力はかなり高く、地殻応力のみの大差なかった。よって、地殻応力情報のみを導入した(1)の結果と、地殻応力と既存き裂情報を導入した(3)の結果はほぼ同様であり、き裂方向を限定するのにかなり有効であることがわかった。

(1)の解析が可能な地殻応力情報は、ここで示した断層面解の拘束の他に、様々な解析にとって有益であり重要な情報ではあるが、高コストや検層以外のオペレーションの難しさから、取得される事例は多くはない。その場合は、既存き裂情報のような、検層からより一般的な解析ルーティーンで得られる地球物理情報を有効に使うことが、微小地震を発生させた既存き裂の方向を推定する際には有益であることがわかった。

ここで示したように、自然地震の理論・観測状況を前提とした地震学的な解析技術に、資源工学的な開発のプロセスで得られる地球物理学的データを初めて組み込み、地震学的な情報の不足を補うことに成功した。これはこのアプローチの研究の第一ステップであり、岩石力学的な理論に基づいて、いくつかの地球物理学情報を単純に重合させただけである。本研究の次のステップは幾つかの地球物理学データをより解析手法内に組み込んでいくことであり、その際には、各データに対する不確実性等の評価も必要になる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 9件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Mukuhira Y, Fuse K, Naoi M, Fehler MC, Moriya H, Ito T, Asanuma H, Haring MO	4. 巻 215
2. 論文標題 Hybrid focal mechanism determination: constraining focal mechanisms of injection induced seismicity using in situ stress data	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	6. 最初と最後の頁 1427 ~ 1441
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1093/gji/ggy333	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 Y. Mukuhira, K. Fuse, M. Naoi, M. C. Fehler, T. Ito, H. Moriya, H. Asanuma, M. O. Haring	4. 巻 -
2. 論文標題 Introduction of in-situ stress information from borehole logging to source characterization of microseismic events	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. SEGJ symposium 2018	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) なし	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 Y. Mukuhira, K. Fuse, M. Naoi, M. Fehler, T. Ito, H. Moriya, H. Asanuma, M. Haring	4. 巻 -
2. 論文標題 Constraining of Focal Mechanisms of Induced Seismicity Using Borehole Logging Information	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceeding Stanford Geothermal Workshop 2018	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) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Y. Mukuhira, M. Naoi, M. Fehler, K. Fuse, T. Ito, H. Moriya, H. Asanuma, M. Haring	4. 巻 -
2. 論文標題 Constraint of focal mechanisms of induced seismicity by analyzing consistency of slip vector using in-situ stress	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Abstract presented at 2018 AGU Fall Meeting	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) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Y. Mukuhira , T. Ito , M.C. Fehler , M. Naoi , H. Moriya , H. Asanuma , M. O. Haring	4. 巻 -
2. 論文標題 In-situ stress constraints on the focal mechanisms of induced seismicity	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc.. ISRM2019	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) なし	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 Y. Mukuhira , M. Ziegler , T. Ito , H. Asanuma , M.O. Haring	4. 巻 -
2. 論文標題 Introduction of natural fracture information to induced seismicity analysis	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. YSRM2019 & REIF 2019	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) なし	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 椋平祐輔, 直井 誠, Michael C. Fehler, 森谷祐一, 伊藤高敏, 浅沼 宏, Markus Haring	4. 巻 -
2. 論文標題 地殻応力情報を用いた微小地震の断層面解範囲絞り込み	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本地熱学会 令和元年学術講演会 講演要旨集	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) なし	査読の有無 無
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 Y. Mukuhira , M. Ziegler , T. Ito	4. 巻 -
2. 論文標題 Understanding of the physics of induced seismicity from natural fracture and in-situstress information from borehole logging	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Abstract presented at 2019 AGU Fall Meeting	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) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Y. Mukuhira, M. Naoi, M.C. Fehler, H. Moriya, T. Ito, H. Asanuma, M. O. Haring	4. 巻 -
2. 論文標題 Constraint of focal mechanisms of induced seismicity by using misfit angles based on known in-situ stress	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Abstract presented at 2019 JpGU	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) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Yusuke Mukuhira
2. 発表標題 Constraint of focal mechanisms of induced seismicity by analyzing consistency of slip vector using in-situ stress
3. 学会等名 AGU Fall meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年 ~ 2019年

1. 発表者名 Yusuke Mukuhira
2. 発表標題 Introduction of in-situ stress information from borehole logging to source characterization of microseismic events
3. 学会等名 SEGJ2018 International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2018年 ~ 2019年

1. 発表者名 Yusuke Mukuhira
2. 発表標題 Constraining of Focal Mechanisms of Induced Seismicity Using Borehole Logging Information
3. 学会等名 Stanford Geothermal Workshop 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年 ~ 2019年

1. 発表者名 椋平 祐輔
2. 発表標題 坑井を通した人工注水によってき裂が発生する弾性波を用いた地下深部き裂構造の評価
3. 学会等名 第22回 表面探傷シンポジウム 「表面探傷技術による健全性診断, 品質検査」(招待講演)
4. 発表年 2018年~2019年

1. 発表者名 椋平 祐輔
2. 発表標題 注水にともなうAE(誘発微小地震)解析の最前線
3. 学会等名 第25回AE技術研究会(招待講演)
4. 発表年 2018年~2019年

1. 発表者名 Yusuke Mukuhira
2. 発表標題 Estimation of Fracture Permeability by Integrating Microseismic Observational data and reservoir engineering modeling
3. 学会等名 International Conference on Flow Dynamics, OS19: IFS Collaborative Research Forum (AFI-2018)(国際学会)
4. 発表年 2018年~2019年

1. 発表者名 椋平 祐輔
2. 発表標題 き裂システムに対する注水時の間隙水圧伝播
3. 学会等名 日本地熱学会平成30年学術講演会
4. 発表年 2018年~2019年

1. 発表者名 Yusuke Mukuhira
2. 発表標題 Understanding of the physics of induced seismicity from natural fracture and in-situstress information from borehole logging
3. 学会等名 AGU fall meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 Yusuke Mukuhira
2. 発表標題 Introduction of natural fracture information to induced seismicity analysis
3. 学会等名 YSRM 2019 & REIF 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 棕平 祐輔
2. 発表標題 地殻応力情報を用いた微小地震の断層面解範囲絞り込み
3. 学会等名 日本地熱学会 令和元年学術講演会(熊本大会)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 Yusuke Mukuhira
2. 発表標題 In-situ stress constraints on the focal mechanisms of induced seismicity
3. 学会等名 ISRM2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 Yusuke Mukuhira
2. 発表標題 Constraint of focal mechanisms of induced seismicity by using misfit angles based on known in-situ stress
3. 学会等名 JpGU2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年～2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>Yusuke Mukuhira personal homepage https://yusukemukuhira.com</p>

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	直井 誠 (Naoi Makoto)		
研究協力者	伊藤 高敏 (Ito Takatoshi)		