

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：11301  
 研究種目：基盤研究(C)（一般）  
 研究期間：2020～2022  
 課題番号：20K05394  
 研究課題名（和文）坑井検層による地球物理データが導く微小地震き裂面方向逆解析のベイズ統計学的展開  
  
 研究課題名（英文）Bayesian Statistical Development of Microseismic focal mechanism Inversion with Well Logging Geophysical Data  
  
 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） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：(1) 微小地震を対象とした、坑井検層から得られる地球物理学情報（例えば地殻応力）を直接MTインバージョンに組み込み、ベイズ統計学的インバージョン法にて解を拘束する試みは、使用する微小地震データの質の問題もあり、必ずしも期待した成果が得られなかった。  
 (2) 資源工学分野で、坑井検層から得られる地球物理学情報をもとに提案されてきた、地震活動と関与する流体の量を結びつける物理モデルを群発地震に適用し、その要因と考えられている流体量の特定を行った。沈み込み帯の流体ダイナミクスを解明するための、これまでにない時間・空間解像度で流体を定量化する新たなアプローチを提案し、その有用性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

(1) 高品質の微小地震データと、地殻応力（絶対値・方向）が全て揃う例は、中々稀であり、今後の様々なフィールドからのデータの蓄積が待たれる。微小地震はマグニチュードが小さく、中々波形の振幅情報を完全に使いづらいが、本研究で目指した方向性は、以前有効であると思われる。  
 (2) 2011年3月に山形-福島県境で発生した群発地震について、群発地震発生前に地殻内に蓄積されていた流体量を推定した結果、流体量を具体的に定量化できた。この様な、浅部近くに流体として貯留されていた水の、定量的な推定は世界で初めての試みである。さらにこの推定量を基にM9クラスの地震、鉾脈生成とのリンクなど新たな議論が展開できた。

研究成果の概要（英文）：(1) An attempt to directly incorporate geophysical information (e.g., crustal stress) obtained from well logs into MT inversion and to constrain the solution by Bayesian statistical inversion method for microseismic events did not necessarily produce the expected results, partly due to the quality of the microseismic data used.  
 (2) We applied the physical model that links seismic activity to the amount of fluid involved, which has been proposed in the field of resource engineering based on geophysical information obtained from well logging, to subduction earthquakes to identify the amount of fluid that is considered to be a factor in the seismicity.  
 We proposed a new approach to quantify the fluid with unprecedented temporal and spatial resolution to elucidate the fluid dynamics in subduction zones, and demonstrated the usefulness of this approach.

研究分野：地球物理学

キーワード：坑井検層 誘発地震 ベイズ統計学 断層面解 群発地震 流体量

## 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微小地震は、透水性が改善したき裂位置として解釈される。これらのき裂面の向きは、き裂の透水性と直接関連するため、その向き情報の抽出は資源生産に関わる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。

せん断滑りを起こしたき裂面(断層面)の向きは、地震学的解析により断層面解を推定することができる。自然地震の場合、マグニチュードが大きく、多観測点で SN 比が良い波形が取得され、波形の押し引き極性情報や、振幅・位相情報から精度良く断層面の向きを求められる。一方、本分野では、微小地震計測の目的は震源位置決定であり、精度良い震源位置決定に必要な観測点を置くことは稀である。よって、限定的な観測点数からの押し引き極性情報のみでは、き裂面の向きを精度良く評価することは困難であり、さらに、微小地震の波形はマグニチュードが小さいために SN 比が低く、振幅・位相情報を利用することは難しく、地震学分野の手法：モーメントテンソル(MT)インバージョンをそのまま微小地震に適用することは難しい。

### 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、坑井内既存き裂分布等の物理情報を直接計測する。これらは坑井沿いの一次元情報であるが、坑内計測によって得られた現位置の物理量であり、貯留層内の物理量をある程度代表する値である。誘発微小地震は、人為的行為により、既存き裂面上の応力状態が臨界状態になった際に発生する。通常は破壊現象の結果である微小地震のみを解析するが、直接計測した破壊現象に関わる地球物理情報を生かさないう手はない。よって、本研究では検層により得られた地殻応力・既存き裂データを事前情報として、微小地震の情報を融合させることにより、不足している地震学的情報をベイズ統計学的に補完し、これまで困難であったき裂面の向き・空間分布を高精度に評価する方法の開発を目的とする。

それに加えて、この研究提案の根底にある、異なる地球物理情報の地震データへのさらなる統合・補完も目的とする。資源工学分野では、主に坑井の検層等を介して得られてきた地球物理学情報に加え、それらを統合することにより、この 10 年で、様々な地震に係る現象が明らかになってきた。本研究の発展項目として、資源工学分野で得られてきたその様な知見も、地震学分野の様々な現象に還元することも加えて目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究で使用する研究方法を以下の様に概念的に示す。

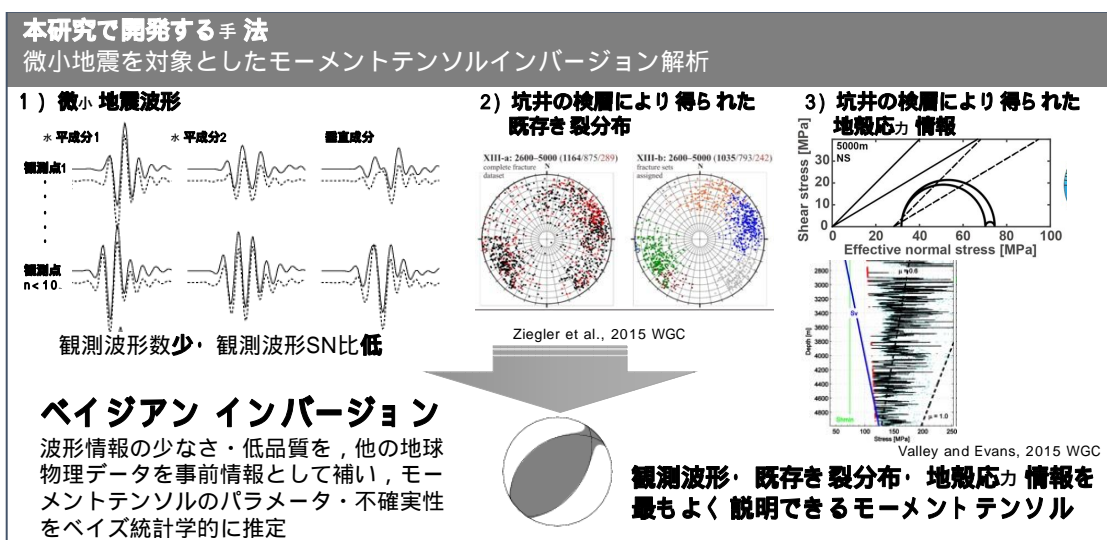


図 1：本研究で提案する手法の全体像

自然地震の解析（例えば気象庁）で用いられるモーメントテンソル(MT)インバージョンは、多くの観測点で SN 比の良い波形が取得されるため、破壊解析から、モデルの解はよく拘束される。しかし、資源開発分野での微小地震の観測波形少なさ、低 SN 比という難点を、本分野でのみ計測可能な既存き裂・地殻応力を事前情報として融合し、ベイズ統計学的インバージョン法にて MT 解の拘束を目指す。

#### 4. 研究成果

(1) まず、微小地震を対象とした、坑井検層から得られる地球物理学情報（例えば地殻応力）を直接 MT インバージョンに組み込み、ベイズ統計学的インバージョン法にて解を拘束する試みは、使用する微小地震データの質の問題もあり、必ずしも期待した成果が得られなかった。やはり、高品質の微小地震データと、地殻応力（絶対値・方向）が全て揃う例は、中々稀であり、今後の様々なフィールドからのデータの蓄積が待たれる。また、必ずしも、MT インバージョンで断層面解を解く必要もなく、例えば、P 波 S 波の振幅比と坑井検層から得られる地球物理学情報を融合させるのも、シンプルではあるが、現実的なアプローチである。微小地震はマグニチュードが小さく、中々波形の振幅情報を完全に使いづらいが、本研究で目指した方向性は、以前有効であると思われる。研究期間は終了するが、さらなる研究継続をする所存である。

#### (2) 群発地震を誘発した流体量の推定

一方で、研究分担者との共同研究は、思わぬ方向への研究展開を見せた。研究分担者は、ここ数年、群発地震の研究に従事してきており、その特徴と、研究代表者が研究対象としてきた資源工学分野で発生する誘発微小地震の特徴が類似することを明らかにしてきた。よって、本研究の目的 2 に鑑みて、資源工学分野で、坑井検層から得られる地球物理学情報をもとに提案されてきた、地震活動と関与する流体の量を結びつける物理モデルを、群発地震に適用し、その要因と考えられている流体量の特定を行った。

ここでは、2011 年 3 月 11 日に起きた東北地方太平洋沖地震の 7 日後から山形-福島県境で発生した群発地震について、群発地震発生前に地殻内に蓄積されていた流体量を推定した。ここでは McGarr, (2014), Shapiro et al. (2010) の誘発微小地震をもとにしたモデルと、水理学的な解析モデルを用いた。その結果、流体量は  $10^6$ - $10^8$   $m^3$  と推定できた(図 2)。この様な、浅部近くに流体として貯留されていた水の、定量的な推定は世界で初めての試みである。

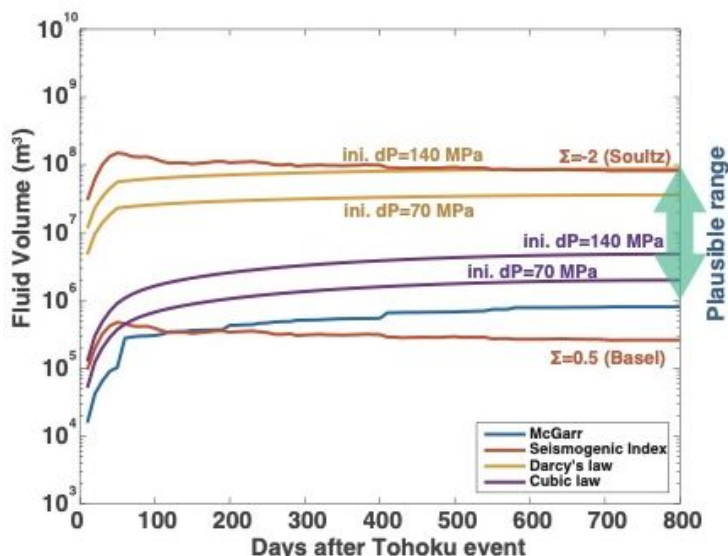


図 2 推定した流体量

群発地震を誘発する流体は、沈み込むプレートから脱水した水に由来すると考えられている。海洋プレートが沈み込む過程で脱水した水は、直接、または、マグマを経て浅部地殻に到達する。そこで、地質学分野の知見を活かし、海洋プレートからの理論的脱水量を用いて、この流体量が蓄積される期間を推定した。その結果、群発地震を誘発した流体は、沈み込み帯の平均脱水量から 100~10000 年で再チャージされることを明らかにした(図 3)。この期間は、M9 クラスの大地震の周期を含んでおり、群発地震と M9 クラスの大地震との関連が示唆されている。さらにこれらに加え、推定した流体量から予想される SiO<sub>2</sub> 沈澱量が、概ね  $1.4 \times 10^2$ - $10^6$  kg と見積もっており、これは水晶脈、鉱床を十分生成する量である。群発地震発生深度は通常、鉱物脈・鉱床の生成反応が起きる温度で発生しているため、鉱物脈・鉱床と群発地震のリンクを示したことになる。それ以上に、通常の鉱物脈・鉱床形成は 100 万年単位であるが、より短い期間（群発地震の期間）でも鉱物脈・鉱床が形成されることを示唆している。沈み込み帯の流体ダイナミクスを解明するための、これまでにない時間・空間解像度で流体を定量化する新たなアプローチを提案し、その有用性を示した。

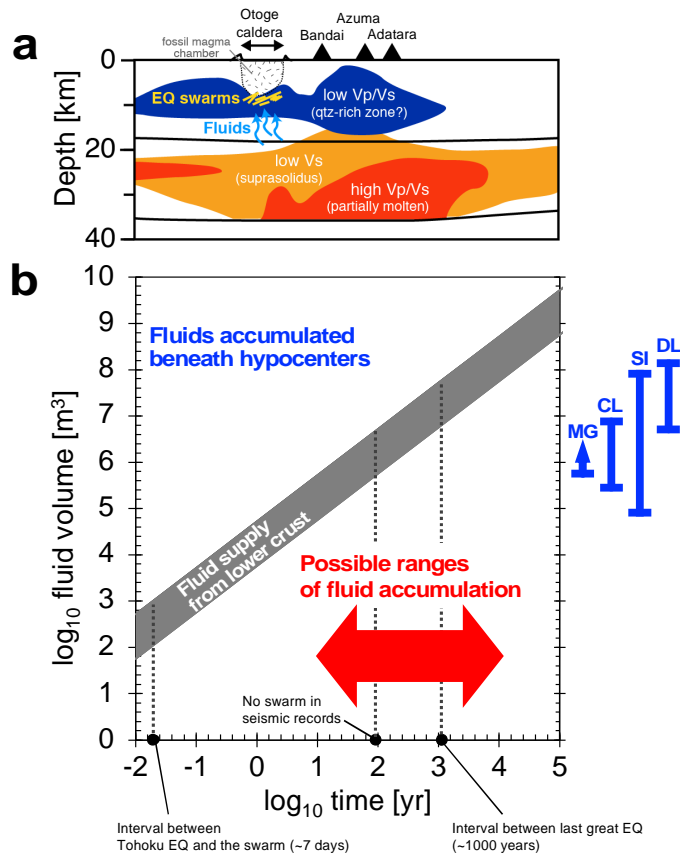


図3 推定した流体量

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Mukuhira Y., Fehler M. C., Ito T., Asanuma H., Haring M. O.	4. 巻 48
2. 論文標題 Injection Induced Seismicity Size Distribution Dependent on Shear Stress	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	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） 10.1029/2020GL090934	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 Mukuhira Yusuke, Uno Masaoki, Yoshida Keisuke	4. 巻 3
2. 論文標題 Slab-derived fluid storage in the crust elucidated by earthquake swarm	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Communications Earth & Environment	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） 10.1038/s43247-022-00610-7	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 Yoshida Keisuke, Uno Masaoki, Matsuzawa Toru, Yukutake Yohei, Mukuhira Yusuke, Sato Hiroshi, Yoshida Takeyoshi	4. 巻 -
2. 論文標題 Upward earthquake migration in the northeastern Noto Peninsula, Japan, initiated from a deep ring shaped cluster: Possibility of fluid leakage from a hidden magma system	5. 発行年 2023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） 10.1029/2022JB026047	査読の有無 有
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 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 2件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 椋平祐輔
2. 発表標題 Slab-derived fluid storage in the crust elucidated by earthquake swarm
3. 学会等名 「地震活動の物理」2022年度 研究集会（招待講演）
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 椋平祐輔
2. 発表標題 微小地震，岩石力学的視点からのせん断滑りによる透水性改善評価
3. 学会等名 日本地熱学会令和4年学術講演会
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 Yusuke Mukuhira
2. 発表標題 On the permeability enhancement perpendicular to the shear slip direction from the microseismic perspective
3. 学会等名 CouFrac 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 Yusuke Mukuhira
2. 発表標題 Permeability Enhancement Process by Shear Slip on Existing Fractures from the Microseismic Perspective
3. 学会等名 Stanford Geothermal Workshop (国際学会)
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 Dian Darisma
2. 発表標題 Building the Fracture Network Model for Okuaizu Geothermal Field Based on Microseismic Data Analysis
3. 学会等名 Stanford Geothermal Workshop (国際学会)
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 椋平 祐輔
2. 発表標題 地殻応力にスケールされる微小地震クラウドの成長過程
3. 学会等名 日本地熱学会令和3年学術講演会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 Yusuke Mukuhira
2. 発表標題 Characteristic of Pore Pressure Migration Clarified by Multidisciplinary Microseismic Analysis
3. 学会等名 World Geothermal Congress 2020+1 (国際学会)
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 Yusuke Mukuhira
2. 発表標題 Microseismic Cloud Growth Process Mainly Controlled by In-Situ Stress During Hydraulic Stimulation
3. 学会等名 JpGU 2021
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 Yusuke Mukuhira
2. 発表標題 Inverse analysis of seismic swarm induced by slab-derived fluids
3. 学会等名 JpGU 2021
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 椋平 祐輔
2. 発表標題 主応力比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2 年学術講演会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 椋平 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限定
3. 学会等名 令和2年度石油技術協会学術大会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 Yusuke Mukuhira
2. 発表標題 The physics of induced seismicity discovered by geomechanics and microseismic analysis
3. 学会等名 CouFrac 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年～2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>Yusuke Mukuhira personal homepage  <a href="https://yusukemukuhira.com">https://yusukemukuhira.com</a></p> <p>東北大学 流体科学研究所 伊藤・椋平研究室  <a href="http://www.ifs.tohoku.ac.jp/geo/">http://www.ifs.tohoku.ac.jp/geo/</a></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 分 担 者	吉田 圭佑  (Yoshida Keisuke)  (20743686)	東北大学・理学研究科・助教    (11301)	

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