

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23540493

研究課題名(和文)地震メカニズムトモグラフィーによる地殻内三次元間隙流体圧場の時間発展解析

研究課題名(英文)Evolution of pore fluid pressures inferred from earthquake focal mechanisms

## 研究代表者

寺川 寿子(Terakawa, Toshiko)

名古屋大学・環境学研究科・助教

研究者番号：30451826

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：地震の発生における間隙流体の役割を解明することを目的に、従来の地震メカニズムトモグラフィー法(Terakawa et al., 2010)を発展させ、地震のメカニズム解から地殻内間隙流体圧場の時間発展を推定する手法を開発した。本手法をスイス・バーゼルの注水実験で得られた最新かつ高品質の誘発地震データに適用し、注水刺激により地熱貯留層内に間隙流体圧場が形成されてゆく様子(10日間)を再現することに成功した。これにより、地震の発生における地殻流体や応力の役割を定量的に分析することが可能となり、大地震の発生過程を評価できる可能性が見えてきた。

研究成果の概要(英文)：The method of Focal Mechanism Tomography (FMT) is an inversion method to estimate pore fluid pressures from earthquake focal mechanism solutions (Terakawa et al., 2010). We improved the original method so that we can estimate the evolution of pore fluid pressure fields for the purpose of understanding roles of fluid and stress in earthquake generation (Terakawa, 2014). Application of the method to induced seismicity in the Basel enhanced geothermal system in Switzerland shows the evolution of pore fluid pressure in response to fluid injection experiments. The induced events were primarily controlled by a decrease in fault strength due to an increase in pore fluid pressures. However, the largest event (the mainshock) was not directly related to a drastic decrease in fault strength at the hypocenter. The precise relative location of the hypocenters indicated that substantial stress loading by the preshocks on the same fault plane promoted the dynamic rupture of the mainshock.

研究分野：地震学

キーワード：間隙流体 応力 地震の発生 断層強度 インバージョン解析 注水実験 モール円

#### 1. 研究開始当初の背景

本研究申請時の 2010 年には、2008 年岩手・宮城内陸地震や 2009 年イタリア・ラクイラ地震の発生を受けて、大地震の発生への高圧間隙流体の関わりが注目されていた。従来、地殻流体の存在は、地震波速度構造や電気伝導度構造の解析を通じて推定されてきたが、これらの手法では間隙流体圧そのものを推定することができない。申請者は、2010 年当時、地震のメカニズム解から（静的）間隙流体圧場を三次元的に推定する手法を開発し、ラクイラ地震の地震データからこの地震が地下の高圧 CO<sub>2</sub> ガスに駆動されて発生した証拠を世界に先駆けて示すことに成功していた。次のステップとして、間隙流体圧場の時間発展を再現できれば、地震活動と間隙流体圧分布の時間発展を直接比較することを通じて、これまで漠然ととらえられてきた地震の発生における間隙流体の役割を解明することが可能となることが期待されていた。

#### 2. 研究の目的

地震の発生における間隙流体の役割を解明する。

#### 3. 研究の方法

従来の地震メカニズムトモグラフィー法（FMT 法, Terakawa et al., 2010）を発展させ、地震のメカニズム解から地殻内間隙流体圧場の時間発展を推定する手法を開発する。

##### (1) FMT 法の有効性の定量的評価

従来法をスイス・バーゼルの地熱貯留層での注水実験で誘発された地震データに適用し、貯留層内の間隙流体圧場を推定した。解析結果を注水井で加えた水圧の履歴比較することを通じて、手法の有効性を定量的に示した（Terakawa et al., 2012）。

##### (2) 広域応力場への適用を考慮した改良

従来の FMT 法では、対象領域の応力場は一様としていたが、広域な領域を対象とするために、「応力場の空間変動を考慮する機能」を追加開発した。開発した手法を用いて、日本列島域の広域応力場（Terakawa & Matsu'ura, 2010）と名古屋大学の地震観測で得られた高精度な地震データを解析し、御嶽山周辺域の 3-D 間隙流体圧分布を推定し、間隙流体圧場と地震の発生の関係を分析した（Terakawa et al., 2013）。

##### (3) 間隙流体圧場の時間発展機能の開発

本研究課題で開発した改良 FMT 法に、ABIC を用いたインバージョン法（Fukahata et al., 2003, 2004）を応用して、間隙流体圧場の時空間発展解析機能を開発した（Terakawa, 2014）。本手法をバーゼルの注水実験で得られた最新かつ高品質の誘発地

震データ（Deichmann et al., 2014）に適用し、貯留層内の間隙流体圧場の時間発展を示した。

#### 4. 研究成果

本研究では、当初計画（H23-25 年度）を 1 年間延長し、掲げた目標をほぼ達成できた。具体的には、H23-24 年度に、スイス・バーゼルの地熱貯留層での注水実験で誘発された地震データから地熱貯留層内の間隙流体圧場を推定し、FMT 法の有効性を定量的に確認した（Terakawa et al., 2012）。H24-25 年度には、より広域な領域を対象とするために、「応力場の空間変動を考慮する機能」を開発し、名古屋大学の地震観測で得られた地震データから御嶽山周辺域の 3-D 間隙流体圧分布を推定すると共に、間隙流体圧場と地震発生の関係を分析した（Terakawa et al., 2013）。H25-26 年度には、間隙流体圧場の時空間発展解析機能を開発にし、本手法をバーゼルの注水実験で得られた最新かつ高品質の誘発地震データに適用した。その結果、注水刺激により地熱貯留層内に間隙流体圧場が形成されてゆく様子（10 日間）が初めて再現され、地震の発生における地殻流体や応力の役割を定量的に分析することが可能となった（Terakawa, 2014）。

地下の高圧流体が断層の強度を弱めて地震の発生を促すことは、Hubbert & Rubey (1959) による理論的な研究で示され、その重要性は広く認識されてきた。本研究課題の成果として、地震時に震源での間隙流体圧場の時間変化を評価することが可能になり、注水実験による誘発地震の大部分は間隙流体圧場の上昇、つまり断層強度の低下により発生しているというデータを世界に先駆けて示すことができた。これは大変重要な成果である。その一方で、貯留層内で発生した最大地震（Mw 2.95）は、断層強度の低下が直接的な影響ではないこともわかった。最大地震の発生前に、その震源域付近でほとんど同じメカニズム解を持つイベントが多発し、これらの loading 効果が重要であることが示された。これは、最大地震の発生に至るまでに、すでに応力状態が M3 クラスの地震に対応した臨界状態に近づいており、強度の弱い部分から破壊が始まり、これらが最大地震を引き起こす準備期間になっていたことを示唆する。これらは、大地震の発生の多様性を研究する上で重要な情報を与える。

一方、2011 年東北地方太平洋沖地震の余震・誘発地震の発生メカニズムについて、本震前後の応力場の変化とクーロンの破壊規準に基づく地震のメカニズム解の分析を通じて、余震・誘発地震の発生に間隙流体圧の上昇による断層強度の低下は重要な役割を果たすことを示した（Terakawa et al., 2013）。

#### 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 4 件)

(1). Terakawa, T., S. A. Miller, and N. Deichmann, High fluid pressure and triggered earthquakes in the enhanced geothermal system in Basel, Switzerland, Journal of Geophysical Research, Vol. 117 (B7), doi:10.1029/2011JB008980, 2012 (査読有り).

(2). Terakawa, T., C. Hashimoto, and M. Matsu'ura, Changes in Seismic Activity Following the 2011 Tohoku-oki Earthquake: Effects of Pore Fluid Pressure, Earth and Planetary Science Letters, 365(1), 17-24, 2013 (査読有り).

(3) Terakawa, T., Y. Yamanaka, H. Nakamichi, T. Watanabe, F. Yamazaki, S. Horikawa, T. Okuda, Effects of pore fluid pressure and tectonic stress on diverse seismic activities around the Mt. Ontake volcano, central Japan, Tectonophysics, 608, 138-148, 2013 (査読有り).

(4) Terakawa, T., Evolution of pore fluid pressures in a stimulated geothermal reservoir inferred from earthquake focal mechanisms, Geophysical Research Letters, 41 (21), 7468-7476, 2014 (査読有り).

〔学会発表〕(計 2 2 件)

(1) 寺川寿子・橋本千尋・尾形良彦・松浦充宏, 東北地方太平洋沖地震による誘発地震の発生メカニズム, 日本地震学会 2011 年秋季大会, A12-10, 静岡, 2011.10.

(2) Terakawa, T., S.A. Miller, and N. Deichmann, High fluid pressure and triggered earthquakes in the enhanced geothermal system in Basel, Switzerland, AGU 2011 Fall Meeting, S41C-2201, San Francisco, USA, 2011.12.

(3) 寺川寿子, L'Aquila 地震の特徴, 貯留層から発生する微小地震に関する WS, 仙台, 2012.1.21.

(4) 寺川寿子, 東北地方太平洋沖地震による誘発地震の発生メカニズム, 連動性研究会, 名古屋, 2012.2.2.

(5) Terakawa, T., High fluid pressure and triggered earthquakes in the enhanced geothermal system in Basel, Switzerland, International Symposium on Statistical

Modeling and Real-time Probability Forecasting for Earthquakes, 17, Tokyo, JAPAN, 2012.1.

(6) 寺川寿子, 2011 年東北地方太平洋沖地震による余震・誘発地震発生メカニズムの多様性, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, SSS31-05, 千葉, 2012.5. (招待講演)

(7) 寺川寿子・中道治久・山中佳子・渡辺俊樹・奥田隆・堀川信一郎・山崎文人, 地震メカニズムトモグラフィ法による御嶽山周辺域の 3D 間隙流体圧分布, 日本地震学会 2012 年秋季大会, A11-08, 函館, 2012.10.

(8) 寺川寿子, 2011 年東北地方太平洋沖地震による余震・誘発地震の発生メカニズムの多様性, 内陸地震研究グループ次期計画検討シンポジウム, 東京, 2012.11.28.

(9) Terakawa, T., C. Hashimoto, M. Matsu'ura, Changes in Seismic Activity Following the 2011 Tohoku-oki Earthquake: Effects of Pore Fluid Pressure, The 8th ACES International Workshop, Maui, USA, 2012.10.

(10) Terakawa, T., C. Hashimoto, M. Matsu'ura, Changes in Seismic Activity Following the 2011 Tohoku-oki Earthquake: Effects of Pore Fluid Pressure, AGU 2012 Fall Meeting, S33-2493, San Francisco, USA 2012.12.

(11) 寺川寿子, 地震メカニズムトモグラフィ法による御嶽山周辺域の 3D 間隙流体圧分布, (公財)地震予知総合研究振興会・東濃地震科学研究所・平成 24 年度第 2 回地殻活動委員会, 岐阜, 2012.12.25(招待講演).

(12) Terakawa, T., C. Hashimoto, M. Matsu'ura, Changes in Seismic Activity Following the 2011 Tohoku-oki Earthquake: Effects of Pore Fluid Pressure, CORSSA (the Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis) 2.0 Workshop, Tokyo, JAPAN, 2013.1.

(13) 寺川寿子, 2011 年東北地方太平洋沖地震による余震の発生メカニズムの多様性, 地震研共同利用研修会「室内実験と数値実験から探る地震活動の物理」, 東京, 2013.3.4.

(14) Terakawa, T., Miller, S. A., and Deichmann, N, High fluid pressure and triggered earthquakes in the enhanced geothermal system in Basel, Switzerland, 10<sup>th</sup> International Workshop on Water Dynamics & ICDP Japan Beyond-Brittle Project, 56, Sendai, JAPAN, 2013.3.

(15) Terakawa, T., C. Hashimoto, M. Matsu'ura, Changes in Seismic Activity Following the 2011 Tohoku-oki Earthquake: Effects of Pore Fluid Pressure, Knowledge for the future IAHS-IAPOSO-IASPEI IUGG, S303PS.03, Gothenburg, SWEDEN, 2013.7.

(16) 寺川寿子・Stephen A. Miller・Nicholas Deichmann, 地震メカニズムトモグラフィ法によるパーゼル地熱貯留層での間隙流体圧分布の推定, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, SMP47-03, 千葉, 2013.5.

(17) 寺川寿子, 地震の発生における応力と流体の役割: 2011 年東北地方太平洋沖地震による誘発地震の発生を例に, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, SCG66-08, 千葉, 2013.5.24 (招待講演).

(18) 寺川寿子・Stephen A. Miller, 地震メカニズムトモグラフィ法によるパーゼル地熱貯留層での間隙流体圧分布の時間発展解析, 日本地震学会 2013 年秋季大会, A21-01, 横浜, 2013.10.8.

(19) Terakawa, T., Y. Yamanaka, H. Nakamichi, T. Watanabe, F. Yamazaki, S. Horikawa, T. Okuda, Effects of pore fluid pressure and tectonic stress on diverse seismic activities around the Mt. Ontake volcano, central Japan, AGU 2013 Fall Meeting, T51D-2492, San Francisco, USA, 2013.12.

(20) 寺川寿子・Nicholas Deichmann, 地震メカニズムトモグラフィ法によるパーゼル地熱貯留層での間隙流体圧分布の時間発展解析, 日本地震学会 2014 年秋季大会, A22-02, 新潟, 2014.11.25.

(21) Terakawa, T., and N. Deichmann, Evolution of pore fluid pressures in a stimulated geothermal reservoir inferred from earthquake focal mechanisms, AGU 2014 Fall Meeting, S54A-07, San Francisco, USA, 2014.12.

(22) Terakawa, T., N. Deichmann, and S. A. Miller, Evolution of pore fluid pressures in a stimulated geothermal reservoir inferred from earthquake focal mechanisms, AGIS Workshop on Induced Seismicity, S3P09, Davos, SWITZERLAND, 2015.3.11.

〔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:  
出願年月日:  
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

寺川寿子 (TERAKAWA, Toshiko)  
名古屋大学・大学院環境学研究科・助教  
研究者番号: 30451826