

令和元年6月17日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2018

課題番号：26400451

研究課題名(和文) 理論と観測に基づく東北日本弧・プレート境界面の絶対強度の推定

研究課題名(英文) Fault strength of the plate interface along the northeastern Japan Arc inferred from tectonic loading model and inversion analysis

研究代表者

寺川 寿子 (Terakawa, Toshiko)

名古屋大学・環境学研究科・准教授

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)：間隙流体圧をパラメータとし、地震のメカニズム解から地殻内の絶対応力場をモデル化する手法を開発した。本手法では、応力6成分の値が直接得られるため、地震前後の様々な物理量を拘束条件に、絶対応力場を推定する。とりわけ、弾性歪エネルギーの時間変化を用いて絶対応力場を拘束する試みは、他に例がなく画期的である。また、地震CMTデータを用いた応力インバージョン法(CMTデータインバージョン)に関して、手法の特長を生かして、統計的に誤差を評価する手法を確立した。この方法により、2011年東北地方太平洋沖地震前後の応力場のパターンの変化を評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地震は、地殻やマントル内に蓄えられた応力を断層運動によって一気に解放する物理過程である。しかし、応力は直接測ることの難しい量であり、地殻にどれくらいの応力が働いているのかは40年以上にわたって論争の対象となってきた。本研究は、地震発生を物理を考慮し、地震データからベイズの統計推論に基づいて、地殻の絶対応力レベルを推定したものである。

研究成果の概要(英文)：I developed a method to model and estimate the absolute stress field from earthquake focal mechanism solutions using a single parameter of pore fluid pressures, based on the Bayesian statistical inference. In this method we can obtain 6 components of a stress tensor, which enables us to evaluate temporal changes in various kinds of physical quantities following large events. Especially, it is important to estimate the absolute stress level, based on the temporal change in elastic strain energy. I also proposed a method to evaluate the estimation errors for a stress inversion method.

研究分野：地震学

キーワード：絶対応力場 応力インバージョン 誤差推定

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

本研究申請時は、2011年東北地方太平洋沖地震の発生から間もない頃で、これまで日本が経験(記録)したことの無い超巨大地震の引き起こした様々な現象が議論になっていた。とりわけ興味深いことの1つに、東北日本弧のプレート境界周辺域で観測される地震のメカニズム解が、超巨大地震を境に、東西圧縮の逆断層型から東西伸張の正断層型へと変化したことがある。地震のメカニズム解をデータとした応力インバージョン解析からは、地震前後で大きく応力場のパターンが変化したことが示された。これらのほとんどの研究では、インバージョン解析の結果(応力場のパターン)の変化量を拘束条件に、震源域のプレート境界強度が実験室で得られる摩擦係数から期待される値よりも1桁以上小さく見積もられた(e.g., Hasegawa et al., 2011)。しかし、地震時の断層運動の様式(メカニズム解)は、応力の変化だけでなく、間隙流体圧場の上昇等による断層強度の低下にも影響を受けて変化する(Terakawa et al., 2013)。多くの研究では、この影響を考慮していないため、絶対応力レベルを過小評価している可能性があった。地震の発生を理解するための重要な物理量である絶対応力レベルを精度よく推定するためには、信頼性の高い応力インバージョン解析と解の推定誤差評価が必要であった。また、データ解析だけでなく、応力蓄積モデルを用いた絶対応力場の計算など、別のアプローチによる研究も急務であった。

2. 研究の目的

地震は地殻やマントルに蓄えられた応力を断層運動によって一気に解放する物理過程である。地震の発生を理解するためには、地震の根本的な原因である地殻の絶対応力場と破壊過程を直接支配する剪断(断層)強度を推定することが正攻法であり、本質的に重要である。本研究では、収束運動を伴う横ずれ型プレート境界での応力蓄積モデル(Terakawa & Matsu'ura, 2009)を発展させ、東北日本弧における沈み込み帯での応力蓄積理論モデルを構築すると共に、プレート境界面及び内陸活断層の摩擦係数を複数仮定して、東日本全域の絶対応力場の数値計算を実施することを目指した。一方、地震のメカニズム解をデータとした応力インバージョンを行い、2011年東北地方太平洋沖地震による応力変化が引き起こす絶対応力場のパターンの変化を、間隙流体圧の変化を考慮して、推定誤差と共に捉えることを目指した。東北沖地震による応力変化が既知であるため、地震前後の応力場のパターンの時間変化は、東北日本弧のプレート境界面の剪断強度及びこれが支配する広域絶対応力場を決める拘束条件となる。これらの考察に基づき、理論に基づくフォワードモデルと観測データによるインバージョン解析の両者を組み合わせることで、東北日本弧の地殻の絶対応力場を推定することを最終的な目標とした。

3. 研究の方法

当初は、沈み込み帯の三次元形状を考慮した応力蓄積モデルの構築とCMTデータインバージョン法(Terakawa & Matsu'ura, 2008)を組み合わせ、東北地方太平洋沖の震源域の絶対強度を推定することを目指した。しかし、応力蓄積モデルの構築に関しては、沈み込むプレート境界面上の応力蓄積を計算することが難しく、納得のゆく成果が得られなかった。このため、従来の応力インバージョン法を更に発展させ、間隙流体圧をパラメータとして、地震のメカニズム解から地殻の絶対応力場をモデル化及び推定法を開発するように計画を変更した。

一方、地震前後の応力場のパターンの変化を高精度に推定誤差とともに推定するために、CMTデータインバージョン法の特長を生かした誤差評価法を開発することを目指した。また、インバージョンで得られた結果には、応力の変化だけでなく、断層強度の変化が含まれていることを考慮し、これらの情報から震源断層(プレート境界)の強度を見積もる方法について検討した。

更に、計画実施期間中の2014年に御嶽山の噴火が発生した。興味深いことに、御嶽山直下の火山性地震のメカニズム解も噴火を境に大きく変化する様子がとらえられ、本研究課題に関連したテーマであると考えられた。このため、火山直下の応力場の推定についても一部検討した。

4. 研究成果

本研究では、当初の目的であった「東北日本弧の沈み込み帯の絶対応力場を推定すること」はできなかったが、当初計画(H26-29年度)を1年間延長し、地震のメカニズム解の持つ情報と応力場の関係を理論的に考察し、これらのデータから無次元間隙流体圧をパラメータとして地殻の3次元絶対応力場をモデル化・推定する方法を開発することができた(Terakawa & Hauksson, 2018)。この方法では、間隙流体圧が剪断応力の大きさに関係することに着目し、それを定式化した点が画期的である。地震による応力変化は、断層すべりモデルと応力のすべり応答関数を用いれば評価できるため、本研究で開発した手法を用いると、地震前後の応力6成分が直接得られる。このため、地震前後の弾性歪エネルギーの変化と与えた間隙流体圧パラメータとの関係を定量的に示すことができる(図1)。地震によって解放される弾性歪エネルギーは、破壊面を作るための破壊エネルギー、地震波の放射エネルギー、断層運動に伴う熱エネルギーとして消費される。これらのうち、地震波の放射エネルギーは地震波の解析から本手法とは独立に推定できる物理量であることから、地震によって解放される弾性歪エネルギーは、少なくとも放射エネルギーを賄うものである必要がある。これを拘束条件とし、観測結果をもっともよく説明する間隙流体圧パラメータを決定すると共に、地殻の(地震前の)絶対応力場を

推定することができる。従来の研究では、大地震前後の応力場のパターンの変化がほぼ唯一の拘束条件であり、本研究の当初の計画でも、応力場のパターンの変化から絶対応力を見積もる計画であった。しかし、本課題の成果として、より安定した物理量である弾性歪エネルギーの変化を評価し、絶対応力場を推定する方法を提示した点は大きな進歩である。

また、ベイズの統計推論と赤池情報量規準 (ABIC) を用いた応力インバージョン法 (CMT データインバージョン法) に関して、応力場の様々な量に関する誤差を評価する手法を確立した (Terakawa, 2017)。一般に、6つの独立な成分を持つ応力の解の推定誤差を評価することは容易ではないが、本手法ではインバージョンの解が各モデルパラメータの最適値と分散・共分散行列で得られることから、多変量の正規乱数を利用して、応力のあらゆる量 (応力場のパターン、主軸の向きなど) の推定誤差を統計的に求めることに成功した。とくに、応力場のパターンの時間変化に関する誤差評価は、絶対応力のレベルを知るためには重要な役割を持つ。さらに、間隙流体圧の上昇による影響で、見かけの応力変化が引き起こされることに対しても、テンソルの内積の値を利用して評価する方法を提案するに至った (寺川, 2017 地震学会秋季大会)。

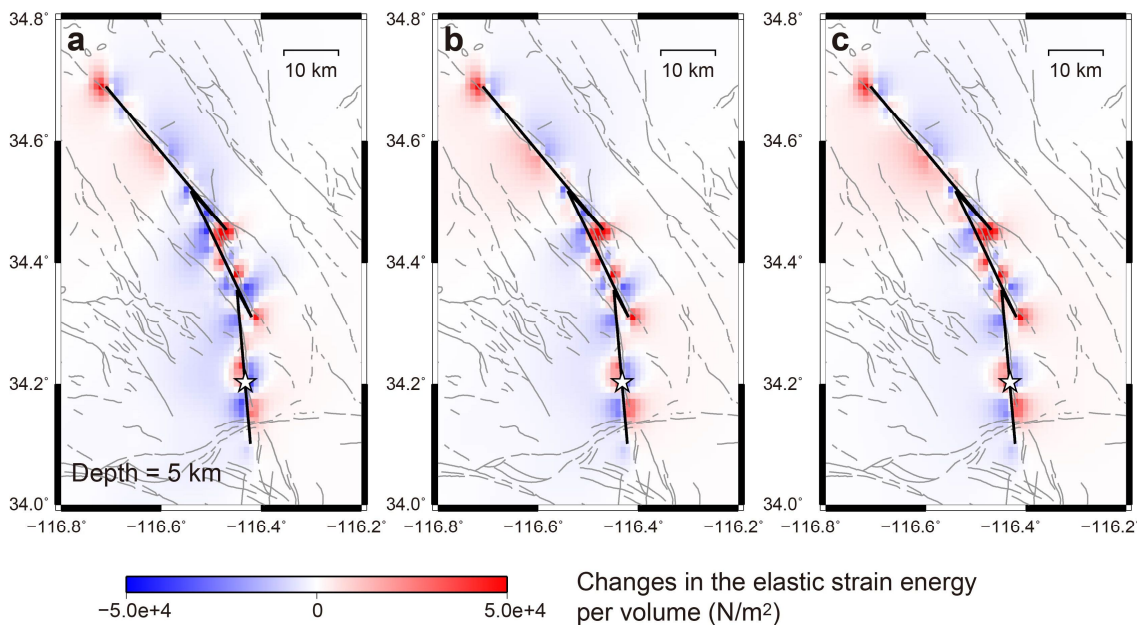


図1 1992年ランダース地震による弾性歪エネルギーの変化。(a) $C = 0.0$, (b) $C = 0.5$, (c) $C = 0.8$ 。Cは間隙流体圧レベルを示す無次元パラメータであり、 $C = 0.0$ は静水圧状態、 $C = 1.0$ は静岩圧状態に対応する。カラースケールは弾性歪エネルギーの変化であり、地震後にエネルギーが解放されたところは青、上昇したところは赤で示されている。Cの値が大きいほど、地殻の絶対応力レベルは低くなり、地震によって解放される弾性歪エネルギーは小さくなる(赤い領域が多くなる)。(Terakawa and Hauksson, 2018)。

5. 主な発表論文等

雑誌論文 1, 学会発表 1-5 及び 8 は、関連業績。

[雑誌論文](計 3件)

1. Terakawa, T. and E. Hauksson, Absolute Stress Fields in the Source Region of the 1992 Landers Earthquake, *Journal of Geophysical Research*, 査読有り, Vol. 23 (B10), 8874-8890, doi: 10.1029/2018JB015765, 2018.
2. Terakawa, T., Overpressurized fluids drive microseismic swarm activity around Mt. Ontake volcano, Japan, *Earth Planets and Space*, 査読有り, 69, 87, 2017.
3. Terakawa, T., A. Kato, Y. Yamanaka, Y. Maeda, S. Horikawa, K. Matsuhiro, and T. Okuda, Monitoring eruption activity using temporal stress changes at Mount Ontake volcano, *Nature Communications*, 査読有り, Vol. 7, 10797, doi:10.1038/ncomms10797, 2016.

〔学会発表〕(計 14 件)

1. Terakawa, T., and E. Hauksson, 3D Absolute Stress Fields in the Source Region of the 1992 Landers Earthquake, AGU 2018 Fall Meeting, S21E-0484, 2018, Washington D.C., USA.
2. 寺川寿子・Egill Hauksson, 1992 年ランダース地震震源域の絶対応力場, 日本地震学会 2018 年秋季大会, 郡山, 2018.10.11.
3. 寺川寿子, 間隙流体圧をパラメータとした絶対応力場のモデル化と推定, 東濃地震科学研究所・平成 30 年度第 1 回地殻活動研究委員会, 瑞浪, 2018.9.5. (招待講演)
4. Terakawa, T., Roles of tectonic stress and pore fluid pressure in earthquake generation, 2nd Asia-Pacific Workshop on Lithosphere and Mantle Dynamics, Yokohama, 2018.8.7.(invited).
5. Terakawa, T., 3D tectonic stress stress field in and around Japan inferred from CMT data inversion, AOGS, Hawaii, 2018.6.8.(invited).
6. 寺川寿子・Egill Hauksson, 1992 年ランダース地震震源域の絶対応力場, 日本地球惑星連合大会, 千葉, 2018.5.22.
7. 寺川寿子, CMT データインバージョン法による応力場の推定と誤差評価: 東北地方太平洋沖地震前後の応力場の解析例, 日本地震学会 2017 年秋季大会, S08-14, 鹿児島, 2017.10.25.
8. Terakawa, T., Y. Yamanaka, Y. Maeda, S. Horikawa, and T. Okuda, Monitoring eruption activity using temporal stress changes at Mount Ontake volcano, IASPEI 2017.8.1, S01-4-03, Kobe, Japan.
9. 寺川寿子, 御嶽山周辺の群発地震発生域の間隙流体圧分布の再評価, 日本地球惑星科学連合 2017 年大会, SSS17-P07, 千葉, 2017.5.21.
10. 寺川寿子・山中佳子・前田裕太・堀川信一郎・松廣健二郎・奥田隆, 応力場の時間変化に基づく御嶽火山のモニタリング, 日本地震学会 2016 年秋季大会, S08-P13, 名古屋, 2016 年 10 月 6 日.
11. Terakawa, T., Temporal stress changes at Mt. Ontake volcano, Crustal Dynamics 2016, A08, 2016, Takayama, Japan.
12. Terakawa, T., A. Kato, Y. Yamanaka, Y. Maeda, S. Horikawa, K. Matsuhiro, and T.

Okuda, Monitoring eruption activity from temporal stress changes at Mt. Ontake volcano, Japan, AGU 2015 Fall Meeting, V14B-04, 2015, San Francisco, USA.

13. 寺川寿子, 応力場の時間変化に基づく御獄火山のモニタリング, (公財)地震予知総合研究振興会・東濃地震科学研究所・平成 27 年度第 2 回地殻活動研究委員会, 2015. 12.10 (招待講演).
14. 寺川寿子・加藤愛太郎・山中佳子・前田裕太・堀川信一郎・松廣健二郎・奥田隆, 応力場の時間変化に基づく御獄火山のモニタリング, 日本地震学会 2015 年秋季大会, S08-12, 神戸, 2015.10.27.
15. 寺川寿子・加藤愛太郎・山中佳子・前田裕太・堀川信一郎・松廣健二郎・奥田隆, 2014 年御獄山噴火に伴う地震メカニズム解の時間変化, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, SVC45-14, 千葉, 2015.5.28.

〔図書〕(計 1 件)

1. 『図説 地球科学の事典』, 朝倉書店, 鳥海光弘・Simon Wallis・入船徹男・岩森光・小平秀一・小宮剛・阪口秀・鷺谷威・末次大輔編, 6.2 節「地震のメカニズムと応力分布」の項目を執筆 (2018).

〔産業財産権〕

出願状況 (計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況 (計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）:

(2)研究協力者（連携研究者）

研究協力者氏名：橋本千尋

ローマ字氏名：Chihiro Hashimoto

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。