

令和 4 年 6 月 3 日現在

機関番号：82109

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03809

研究課題名（和文）地殻内大地震の発生予測に向けた応力蓄積分布の推定

研究課題名（英文）Estimation of stress accumulation distribution toward predicting large crustal earthquakes

研究代表者

野田 朱美（Noda, Akemi）

気象庁気象研究所・地震津波研究部・研究官

研究者番号：80793992

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,600,000円

研究成果の概要（和文）：地震発生メカニズムを理解するためには地殻内の応力蓄積状況を知ることが重要だが、その実現には課題が残されている。本研究課題では応力蓄積推定のための重要な基礎理論である弾性・非弾性歪み解析手法に関して、推定精度を向上するための改良を加えた。また、応力蓄積・解放を表す指標としてせん断歪みエネルギー変化が有効な物理量であることを理論的に示し、観測データから推定されたせん断歪みエネルギー変化が地震活動と有意に関係することを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地殻内地震の発生予測は、これまで活断層調査等に基づいた過去の地震発生履歴という経験的情報に依存してきたが、経験のない地震を予測することはできなかった。それに対し、地震発生の物理モデルが明らかになれば、それに基づいて未知の地震イベントを予測することが可能となる。本研究課題では、測地データや地震データという活断層とは全く独立の情報に基づく物理モデルによって地殻内地震の発生を理解することを目指して、観測データから応力蓄積を推定するための解析手法の改良、応力蓄積を表す新たな指標の提案を行った。

研究成果の概要（英文）：To understand the mechanism of earthquake generation, it is important to know the state of stress accumulation in the Earth's crust. However, some challenges remain in achieving this goal. In this study, the elastic/inelastic strain analysis method, which is an important basic theory for estimating stress accumulation, was modified to improve the estimation accuracy. It was also shown that shear strain energy change is an effective parameter as an indicator of stress accumulation/release, and the shear strain energy change estimated from observation data is related to seismic activity.

研究分野：地震発生物理学

キーワード：地殻内地震 歪みエネルギー GNSS 2016年熊本地震 地震シナリオ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地震発生予測のためには、地殻内の応力蓄積状況を知ることが重要である。GNSS 等の測地観測データから地殻内地震を引き起こす応力蓄積を推定するためには、GNSS で直接観測される地殻歪みを、応力と関係する「弾性歪み」と、それ以外の地震やクリープ運動等の非弾性歪みに対応する「非弾性歪み」を分離する必要がある。弾性・非弾性歪みの分離推定の問題については、研究代表者らが提案した解析手法により基本的に解決された (Noda & Matsu'ura, 2010)。しかしながら本手法には、データ量に対して未知数が大幅に多いために、歪みの推定精度が低いという課題があった。

2. 研究の目的

- (1) 弾性・非弾性歪みの分離推定問題に対し、GNSS 観測データに加えて新たにテクトニック応力場のパターンを先験情報として取り入れることで歪みの推定精度を向上する。
- (2) 弾性・非弾性歪み解析を通じて推定される地殻内応力変化から応力蓄積マップを作成する手法を開発する。応力蓄積マップと地殻内地震の活動との比較を通じて、応力の蓄積から大地震発生に至るまでの物理過程を明らかにする。

3. 研究の方法

西南日本の解析に用いる GNSS 観測データには、本研究の検討対象となる地殻変動以外に、南海トラフプレート境界におけるプレート間固着による地殻変動も含まれている。そこで、固着により生じる地殻変動をプレート間すべり遅れ速度分布 (Noda et al. 2018) から計算して元の GNSS データから差し引き、本研究の弾性・非弾性歪み解析に用いるデータを整備する。

2 階テンソルである応力に関して「応力蓄積」「応力解放」を定量評価するために「せん断歪みエネルギー変化」を用いることとし、その計算手法を定式化する。

弾性・非弾性歪み解析において、非弾性歪みの方向をテクトニック応力場と同じ向きに固定することで未知数を減らした解析モデルを構築する。

4. 研究成果

- (1) 歪みエネルギーを用いた応力蓄積・解放の評価手法の開発

弾性・非弾性歪み解析を通じて推定された地殻内の応力変化が「応力蓄積」と「応力解放」の何れにあたるかは、背景応力場 (テクトニック応力場) との対応関係によって決まる。応力変化と背景応力はそれぞれ 6 つの独立な成分を持つ 2 階テンソルであるため、応力蓄積・解放を表す指標として何らかのスカラー量を用いる必要があった。そこで、せん断歪みエネルギー変化が応力蓄積・解放を表す指標として有効な物理量であることを理論的に示し、背景応力と応力変化からせん断歪みエネルギー変化を計算する手法を定式化した (Saito, Noda et al., 2018)。また、弾性・非弾性歪み解析からせん断歪みエネルギー変化の推定に至る一連の手順を地殻内応力蓄積・解放を評価する手法として提案した (野田, 日本地球惑星連合 2019 年大会)。

- (2) 歪みエネルギー変化と地震活動の関係

顕著な応力変化・せん断歪みエネルギー変化が生じた例として 2016 年熊本地震に着目し、熊本地震によるせん断歪みエネルギー変化とその後の余震活動を比較した。

熊本地震時の GNSS 変位データ解析によって推定した地殻内の応力変化と、中小地震のメカニズム解から推定されたテクトニック応力場の情報 (Terakawa & Matsu'ura, 2010) を入力として、周辺地殻内のせん断歪みエネルギー変化を求めた。これにより熊本地震発生によるせん断歪みエネルギー変化 (応力蓄積・解放) を 3 次元的にマッピングすることができた (図 1)。このマッピング結果を本震後 1 週間の余震分布と比較し、エネルギーの増加した領域 (応力蓄積領域) で余震の約 75% が発生したことを示した。そして、余震が完全にランダムに発生したと仮定して作成した 100,000 通りのデータセットと比較し、エネルギー増加域での余震の発生割合が統計的に有意であることを確認し

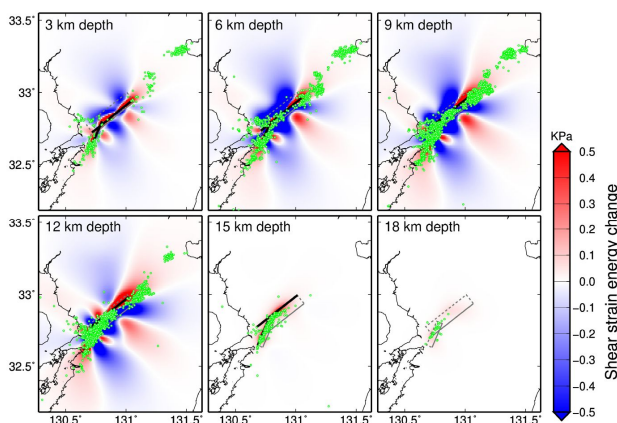


図 1 : 2016 年熊本地震によるせん断歪みエネルギー変化と地震後 1 週間の余震の分布 (Noda et al. 2020 より)。赤 (エネルギー増加) が応力蓄積、青 (エネルギー減少) が応力解放に対応する。緑色の丸は各深さの余震の震央を示す。余震は主に応力蓄積領域で発生した。

た (Noda et al. 2020) .

(3) 弾性・非弾性歪みの分離推定手法の改良

まず、非弾性変形は基本的にテクトニック応力場に従って生じるという考えのもと、非弾性歪みの方向をテクトニック応力場 (Terakawa & Matsu'ura, 2010) と同じ向きに固定し、その大きさのみを推定パラメータとする解析モデルを設定した。これにより、モデルの自由度は従来の6分の1となった。本解析モデルを熊本地震前のGNSS変位速度データに適用して弾性・非弾性歪み解析を実施した結果、熊本地震震源域の北東側の九重 - 阿蘇にかけての領域で、地震前に顕著な非弾性歪みが生じていたことが分かった。また、この結果から熊本地震前のせん断歪みエネルギー変化を計算したところ、熊本地震の震源断層のうち布田川断層の東側領域で応力蓄積していたことを示唆する結果が得られた (Noda et al., 2018 AGU Fall Meeting) .

次に、より柔軟にテクトニック応力場等の先験情報を取り込むことを目的として、マルコフ連鎖モンテカルロ法の一つであるハミルトニアンモンテカルロ法を用いてL2正則化と非負の条件を取り入れたインバージョン手法を実装した (野田・齊藤, 日本地震学会 2021 年秋季大会) . これにより非弾性歪みがテクトニック応力場と逆向きにならないようにモデルを拘束することが可能となった。日本列島で最も顕著な定常変形を示す地域の一つである新潟 - 神戸歪み集中帯に本手法を適用した。その結果推定された非弾性歪みは、地殻深部ではシンプルな帯状の分布を示すのに対し、地震が発生する地殻浅部では深部と全く異なる複雑な空間分布を示した。地殻内の非弾性変形が内陸の応力蓄積に寄与することを考慮すると、この結果は、地殻浅部で複雑な非弾性変形が生じることによって複雑な応力場が形成されていることを示唆する。そのため、地殻内の非弾性変形を地殻のブロック分割によって表現する単純なブロック運動モデルでは、現実の応力蓄積プロセスを正しく説明できない場合があると考えられる。本研究で推定された非弾性変形の描像を基に、今後は複雑な地殻浅部の非弾性変形と応力蓄積を表現するモデルを構築することが必要となる。

(4) 歪みエネルギーに基づく地震発生シナリオ構築手法の開発

地殻内応力蓄積と地震発生との関係の理解に向けて、地殻内に蓄積した歪みエネルギーを用いて地震発生準備過程を可視化するための技術開発に取り組んだ。その第1歩として取り扱いやすいプレート境界地震を対象とし、歪みエネルギーの蓄積に基づいて将来発生する可能性のある地震のシナリオを作成する手法を開発した (Noda et al. 2021) .

本手法を南海トラフプレート境界に適用した。まず、GNSS変位速度データのインバージョン解析によりプレート境界でのすべり遅れ速度分布 (固着分布) を推定し、その結果から応力蓄積速度を計算した (Noda et al. 2018) . 次に、前回の地震発生からの応力蓄積量が次の地震により解放されるという仮定のもと、次に発生する地震の震源モデル (地震シナリオ) を推定し、その地震によって解放される歪みエネルギーを見積った。エネルギー保存則から、解放される歪みエネルギーが、地震時に断層面で散逸するエネルギー (破壊エネルギー) より大きい場合に地震が発生し得ると考えられる。この手順をプレート境界の様々な領域に適用して複数の地震シナリオを作成し、解放されるエネルギーと破壊エネルギーを比較して、各シナリオの実現可能性を評価した (図2) .

地震時に解放される歪みエネルギーは、その地震発生前までに蓄積した歪みエネルギーと見なすことができる。前回の地震からの経過時間を変えて歪みエネルギーの蓄積を評価すると、時間の経過に従い実現可能性のあるシナリオが増加し、地震発生のポテンシャルが高まる様子を可視化することができた。

今後、(1)で開発した歪みエネルギー変化の推定手法と組み合わせることで、本シナリオ作成手法の地殻内地震への拡張が期待できる。

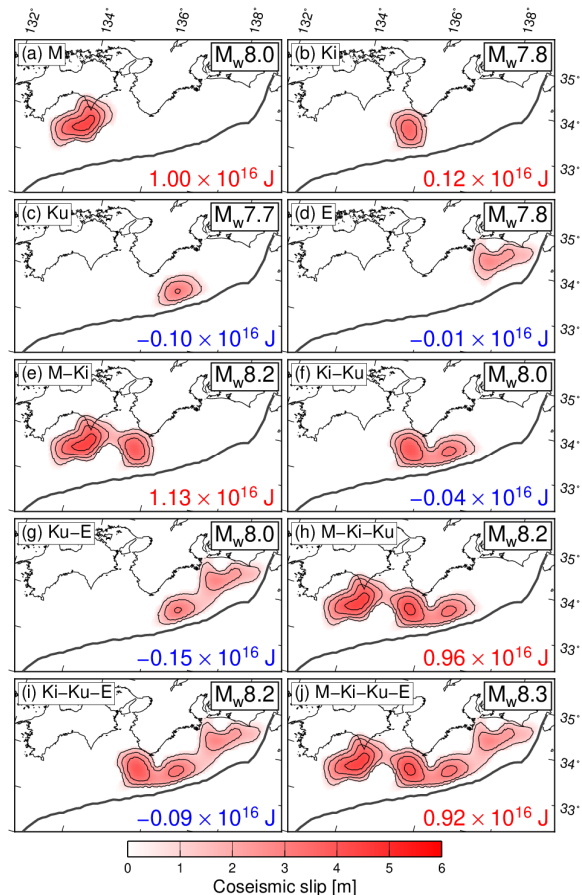


図2: 南海トラフで想定される複数のプレート境界地震のシナリオ (Noda et al. 2021 より) . カラーコンターは地震時すべり量、右上の数字は地震規模 (モーメントマグニチュード) を示す。右下の数字は残差エネルギーの推定値で、正 (赤字) の場合にエネルギー保存の観点での地震発生の必要条件が満たされている。

< 引用文献 (本研究課題の成果以外) >

Noda, A. & M. Matsu'ura (2010). Physics-based GPS data inversion to estimate three-dimensional elastic and inelastic strain fields, *Geophysical Journal International*, 182(2), 513-530.

Terakawa, T. & M. Matsu'ura (2010). The 3-D tectonic stress fields in and around Japan inverted from centroid moment tensor data of seismic events, *Tectonics*, 29, TC6008.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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 Noda Akemi, Saito Tatsuhiko, Fukuyama Eiichi, Urata Yumi	4. 巻 126
2. 論文標題 Energy Based Scenarios for Great Thrust Type Earthquakes in the Nankai Trough Subduction Zone, Southwest Japan, Using an Interseismic Slip Deficit Model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 e2020JB020417
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020JB020417	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 Noda Akemi, Saito Tatsuhiko, Fukuyama Eiichi, Terakawa Toshiko, Tanaka Sachiko, Matsu'ura Mitsuhiro	4. 巻 47
2. 論文標題 The 3 D Spatial Distribution of Shear Strain Energy Changes Associated With the 2016 Kumamoto Earthquake Sequence, Southwest Japan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 e2019GL086369
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019GL086369	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 Saito Tatsuhiko, Noda Akemi, Yoshida Keisuke, Tanaka Sachiko	4. 巻 123
2. 論文標題 Shear Strain Energy Change Caused by the Interplate Coupling Along the Nankai Trough: An Integration Analysis Using Stress Tensor Inversion and Slip-Deficit Inversion	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 5975 ~ 5986
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2018JB015839	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 -
1. 著者名 Noda Akemi, Saito Tatsuhiko, Fukuyama Eiichi	4. 巻 123
2. 論文標題 Slip-Deficit Rate Distribution Along the Nankai Trough, Southwest Japan, With Elastic Lithosphere and Viscoelastic Asthenosphere	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 8125 ~ 8142
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2018JB015515	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16件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 野田朱美・齋藤竜彦
2. 発表標題 測地データと地震データを併用した非弾性変形の解析：新潟神戸変形集中帯への適用
3. 学会等名 日本地震学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Akemi Noda, and Tatsuhiko Saito
2. 発表標題 Energy-based scenarios for megathrust earthquakes in the Nankai trough subduction zone, southwest Japan
3. 学会等名 International Joint Workshop on Slow Earthquakes 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Akemi Noda, Tatsuhiko Saito, Eiichi Fukuyama, and Yumi Urata
2. 発表標題 Energy-based method to generate rupture scenarios for megathrust earthquakes in the Nankai Trough subduction zone, southwest Japan: A necessary Condition for earthquake generation
3. 学会等名 AGU Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Akemi Noda, Tatsuhiko Saito, Eiichi Fukuyama, and Yumi Urata
2. 発表標題 Mechanics-based scenarios for great thrust earthquakes in subduction zones using GNSS data analysis: Released strain energy and dissipated energy
3. 学会等名 EGU General assembly 2020 Online (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野田朱美、齊藤竜彦、福山英一、浦田優美
2. 発表標題 破壊力学に基づいた南海トラフプレート境界地震の発生シナリオ：地震発生の必要条件の検討
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野田 朱美、齊藤 竜彦、福山英一、寺川寿子、田中佐千子、松浦充宏
2. 発表標題 2016年熊本地震による地殻内せん断歪みエネルギー変化の定量評価：余震活動との関係
3. 学会等名 日本地震学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野田朱美
2. 発表標題 歪みエネルギーの蓄積・解放に基づく地殻内地震の発生メカニズムの解明
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akemi Noda, Tatsuhko Saito, Eiichi Fukuyama, Toshiko Terakawa, Mitsuhiro Matsu'ura
2. 発表標題 Shear strain energy change and aftershock activity of the 2016 Kumamoto earthquake sequence, southwest Japan
3. 学会等名 27th IUGG General Assembly (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野田朱美・齋藤竜彦・福山英一
2. 発表標題 測地データと物理モデルに基づいたプレート境界地震発生シナリオの構築
3. 学会等名 日本地震学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野田朱美・齋藤竜彦・福山英一・松浦 充宏
2. 発表標題 弾性・非弾性歪み解析を用いた地殻内応力蓄積・解放の評価：2016年熊本地震への適用
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野田朱美・齋藤竜彦・福山英一・寺川寿子・松浦充宏
2. 発表標題 弾性・非弾性歪み解析を用いた地震間の応力蓄積・解放の推定：別府 - 島原地溝帯周辺域への適用
3. 学会等名 日本地震学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 齋藤竜彦・野田朱美・吉田圭佑・田中佐千子
2. 発表標題 剪断ひずみエネルギーと地震活動
3. 学会等名 日本地震学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Akemi Noda, Tatsuhiko Saito, Eiichi Fukuyama, Toshiko Terakawa, and Mitsuhiro Matsu'ura
2. 発表標題 A New Methodology for the Estimation of Crustal Stress from the Comparison of Coseismic Shear Strain Energy Change with Aftershock Activity
3. 学会等名 10th ACES International Workshop (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tatsuhiko Saito, Akemi Noda, Keisuke Yoshida, and Sachiko Tanaka
2. 発表標題 Shear Strain Energy and Seismicity
3. 学会等名 10th ACES International Workshop (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Akemi Noda, Tatsuhiko Saito, Eiichi Fukuyama, Toshiko Terakawa, and Mitsuhiro Matsu'ura
2. 発表標題 Estimation of gradual stress changes before the 2016 Mw7.0 Kumamoto, Japan, earthquake
3. 学会等名 2018 AGU Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tatsuhiko Saito, Akemi Noda, Keisuke Yoshida, and Sachiko Tanaka
2. 発表標題 Shear Strain Energy Change and Aftershock Patterns
3. 学会等名 2018 AGU Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

2016年熊本地震による地殻内エネルギーの増減を3次元的に推定
https://quaketm.bosai.go.jp/~noda/noda_etal_2020_GRL/

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------