

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2017

課題番号：25800253

研究課題名(和文) 自然地震データと物理モデルを用いた広い速度レンジでの摩擦特性の推定

研究課題名(英文) Inferring frictional properties at wide range of slip rate based on natural earthquake data and physical modelling

研究代表者

安藤 亮輔 (Ando, Ryosuke)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・准教授

研究者番号：10455256

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：2011年東北地方太平洋沖地震について、前震による低速な余効滑りと本震による高速滑りの観測データをも用いて、広い速度レンジでの天然断層の摩擦特性を推定した。摩擦特性の推定のために、境界積分方程式法を用いた数値計算を行い、観測により求められた滑りを入力として得られた応力変化を計算した。その結果、前震の余効滑り領域において、 10^{-6} [m/s]程度の低速滑り時には弱い速度強化特性を示したのに対し、1 [m/s]程度の高速滑り時には強い速度弱化特性を示していたことが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：We investigated a wide range of the slip rate dependences of the frictional strength on the natural fault surface by targeting the after-slip area found associated with the foreshock of the 2011 Tohoku-oki earthquake. We numerically compute the shear stress change by using the boundary integral equation method with the inputs of the kinematically obtained slip profiles. As the result, the after-slip exhibits the frictional properties of the weak rate-strengthening at the low rate of 10^{-6} [m/s] and of the strong rate-weakening at the high rate of 1 [m/s].

研究分野：地震学

キーワード：地震 スロー地震 摩擦 破壊 東北地方太平洋沖地震 断層 沈み込み帯 シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

一般に地震とは、断層面上の強固に固着した領域が、プレートの沈み込み等による応力の蓄積によって、断層滑りを生じる破壊現象である。この際、断層面の固着状態を決めるのが、断層面の摩擦であり、摩擦によって支えられる応力レベルが摩擦強度と呼ばれる。これまでの極めて多数の室内実験によって、摩擦強度は、断層の滑り速度に依存して変化することが分かっている。地震を起こすような脆性破壊を生じさせる環境下では、摩擦は、断層における滑りが遅い時には、摩擦強度が比較的高く、滑りが高速になると摩擦強度が低下する(滑り速度弱化特性と呼ぶ)ことが知られている(例えば、Dieterich, 1979 J. Geophys. Res.)。一方で、断層面には、普段は強固に固着している領域(固着域)とほとんど固着せず普段から滑っている領域(非固着域)が存在しており、非固着域の摩擦特性は滑り速度が上がると強化すること(滑り速度強化特性)が観測によって推定されてきた。それらをベースにして、地震時に不安定に拘束で滑る固着域と地震時にはほとんど滑らない非固着域というように、二分法的に定義するアスペリティーモデルが確立してきた(例えば、Lay and Kanamori, 1981, AGU Monog.)。

一方、最近の室内での岩石摩擦実験が広範囲の滑り速度レンジで可能になってきたことによって、岩石の摩擦特性はそのように単純なものではないことが分かってきた。例えば、Di Toro et al., 2011, Natureによると、プレート沈み込み速度を含む 10^{-6} (m/sec) 程度以下の低速域では弱い滑り速度弱化特性が見られるが、 10^{-5} - 10^{-1} (m/sec) 程度の中速領域では逆に滑り速度強化特性を見せ、地震時の滑り速度に匹敵するさらなる高速の 1 (m/sec) 程度では、一転し強い滑り速度弱化特性を示すことが分かりつつある。しかしながら、地震発生層深度の実環境化での実験データは無く、室内実験の環境下ですら関連する素過程もほとんど理解されていない。そのため、天然断層の摩擦特性を明らかにするためには、単に実験結果を外挿することは大きな問題を抱え、直接的に自然地震の観測データを基にして解明することが必須である。

このようなもとの、東北沖地震の発生が、二分法的アスペリティーモデルの見直しを強く迫っている。すなわち、従来はこの地域で頻発するマグニチュード(M)7級の地震の震源域のみが固着域で、それを囲む領域は非固着域であると見なされていた(例えば、地震調査研究推進本部, 2003)。しかし、今回のM9地震では、その従来非固着域と見なされていた領域でも、地震時に相当程度滑ったとの推定が示され、それへの解釈として、非固着と見なされていた領域でも、低・中速滑り時には滑り速度強化を示すが、高速滑り時には逆に摩擦強度の低下が発生し地震時に

大きく滑る可能性、すなわち、固着域の周辺は“条件付き不安定特性”を持つ可能性が定性的に多々指摘されている(例えば、Lay et al., 2012, J. Geoph. Res.)。しかし、それらは抽象的な解釈に留まっており、摩擦特性を実際に評価して、提唱される摩擦特性の存在が実証されたり、地震発生様式の再現性が示されたりしたのではない重大問題のあることを指摘しなければならない。

2. 研究の目的

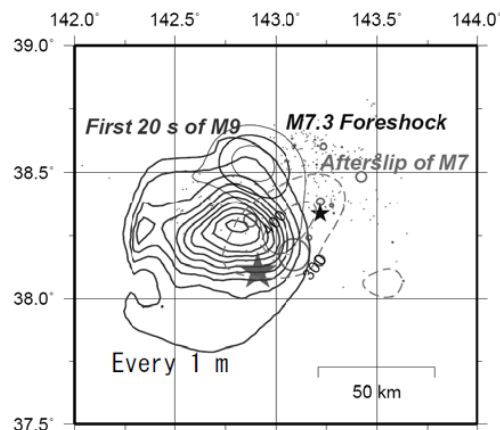


図1. 前震の滑りとその余効滑り、本震の最初の20秒間の滑り分布。密なコンターが本震滑り分布。疎なコンターは、破線が前震の余効滑り、実線が前震時滑りの分布。破壊は開始点(星印)から北方に伝播したが、前震余効滑り域と重なりながらもそこでの滑り量は小さい。

本研究は、東北沖地震の本震時滑り分布のみで断層の摩擦特性を議論するのではなく、新しい発想で、本震に先立つこと二日前に発生したM7.3の前震の余効滑りについての観測データをも用いて、広い速度レンジでの天然断層の摩擦特性を推定することを通じ、“条件付き不安定特性”の存在を検証することを目的とする。この前震の余効滑りは、申請者が世界に先駆けて本震のトリガー要因となったことを示したものである(Ando and Imanishi, 2011; Earth, Planet, Space)。東北沖地震では、膨大で詳細なデータが集積された。本研究では特に1)前震によって生じた低速な余効滑りの測地学的解析データ(Ohta et al., 2012, Geophys. Res. Lett.)と、2)本震が発生してから20秒程度の、破壊開始点近傍での断層滑りの地震学的解析データ(Uchide, 2013, Geophys. Res. Lett.) (図1)を用いる。これらのデータは、前震の余効滑りが生じた領域で、本震時にある程度の滑りが生じたことを示す重要な観測データである。本研究では、観測データから摩擦特性を推定する手法を開発し、断層摩擦特性を実証的に解明する。

3. 研究の方法

まず、低速度での滑り現象を代表する前震の余効滑り現象について、測地学的インバージョン解析による断層滑りの推定結果を整理する。本解析については、Ohta et al., 2012 (Geophys. Res. Lett.) において、陸上と海底での測地観測データとその結果を用いて解析されたものをデータとして用いる。次に、高速度での滑り現象を代表する本震の地震破壊現象について、Uchide, 2013 で得られた地震学的インバージョン解析による断層滑りの推定結果を用いて、本研究での入力データとして用いるために滑りの時間関数の形で整理する。

なお、余効滑りが発生した領域は、本震時の破壊領域の中に含まれており、さらに一定の滑りとその破壊初期において発生していることが、Uchide (2013, Geophys. Res. Lett.) で明らかになっている。このことが、同一領域における異なる滑り速度での断層摩擦特性が、本研究の手法により解析できる根拠となっている。なお、地震時滑りは、従来のインバージョン手法では、空間解像度が最終的な破壊領域（断層）サイズで決まってしまう、破壊の初期を十分に解像することができない。一方、Uchide, 2013 の手法はそれを3段階の異なるスケールごとに解析することで、初期の小さな破壊領域サイズまで解像度を上げることの出来るマルチスケールインバージョンという新しい手法 (Uchide and Ide, 2009, J. Geophys. Res.) であり、破壊初期の過程を詳細に推定することができる。本研究は、このすぐれた特徴を初めて断層摩擦特性の推定に応用するものである。

次に、摩擦特性を求めるために、断層面上の剪断応力変化を数値計算により求める手法を構築する。数値計算手法には、境界積分方程式法を用いる。このような数値計算は、逆解析により運動学的に推定された滑りの時空間分布を入力データとして用いて、線形弾性体の応答を以下の様な時空間の畳み込み積分を表す積分方程式

$$\sigma(x, t) = \iint K(x - \xi; t - \tau) D(\xi, \tau) d\xi d\tau$$

を数値的に評価することにより実行する。ここで D は滑り速度、 K はグリーン関数、 σ は応力変化量である。なお、余効滑りのような準静的変化の場合は、時間積分は不要となりグリーン関数と滑り量の空間の畳み込み積分のみとなる。ここで用いる滑りのデータは、Ohta et al., 2012 の余効滑りと Uchide, 2013 の本震破壊開始初期の動的滑りという二種類の運動学的な推定結果である。

さらに、滑り量と剪断応力変化量、および滑り速度と剪断応力変化量の関係をコンパイルして、前震の余効滑り領域における摩擦強度の滑り速度依存性を求める。最後に得られた結果を物理的にモデル化して、天然の断

層面上の摩擦滑り挙動についての普遍性を明らかにする。

4. 研究成果

数値計算の結果求められた前震発生領域での剪断応力変化量を図2に示す。青色が断層滑りにより応力が低下した領域、赤色が反対に応力が増加した領域に対応する。青色の領域が概ね、前震時に滑った領域を示し、その周辺に反対に応力が増加した領域が存在することが分かる。

応力解析の結果、余効滑り領域では、前震後に一旦応力が上がり、52時間継続した余効滑りと共に少し応力が低下するということが分かった。しかしながら、余効滑りの最中には応力が初期レベルまで低下することは無く、図2に示すように、まだ0.5 [MPa]程度の増加分が残留しているという結果が得られた。

このような前震とその余効滑りによる応力変化の特徴は、図3に示した、黒丸で囲んだ領域で得られた滑り量と応力変化量との関係で明瞭に分かる。ここでは、当該領域に含まれる各小断層（数値的に離散化した断層の各境界要素）での、前震時と余効滑り時の2つのタイミングでの滑りと応力変化の値がプロットされている。これらの値を見ると、応力が前震時のタイミング（2点の内で左側に位置する点）でまず大きく上昇し、その後余効滑りに伴い（右側に位置する点）若干減少する様子が見て取れる。このように、余効滑りが生じたとしてもまだ剪断応力は解放されていない。

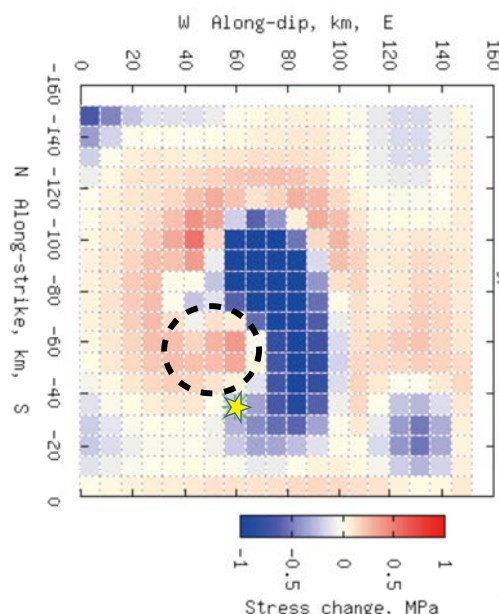


図2. 前震とその余効滑りによる断層面上の応力変化量。黒点線により囲った領域が余効滑り領域であり、応力が増加した状態にあることが分かる。星印は、本震の破壊開始点を示す。

次に、本震発生時の破壊開始から 20 秒間の滑りを用いてせん断応力変化を計算した (図 4)。これによると、前震の余効滑りを経験した領域においても、せん断応力の顕著な低下が生じていることが分かる。個々で示された最大の応力低下量は、15 [MPa]程度と見積もられた。

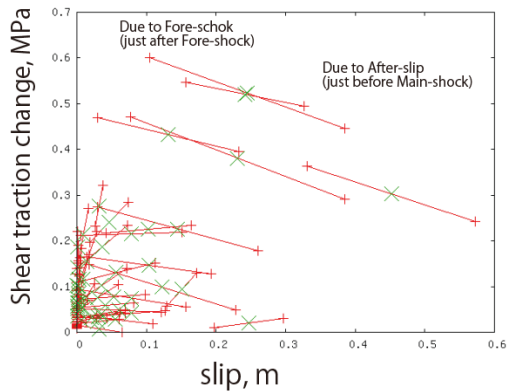


図 3. 前震と前震の余効滑りによる断層滑り量とせん断応力変化の関係。多数あるデータポイントは、図 2 の黒丸で囲った、前震の余効滑りを生じた領域内の各小断層上での滑りと応力変化量である。各小断層での前震滑りによる応力変化 (左側の点) と余効滑りによる応力変化 (右側の点) が線で結ばれ、その平均値が緑の×印で示される。各小断層で、前震後に一旦上昇したせん断応力が余効滑りで若干減少している様子が分かる。

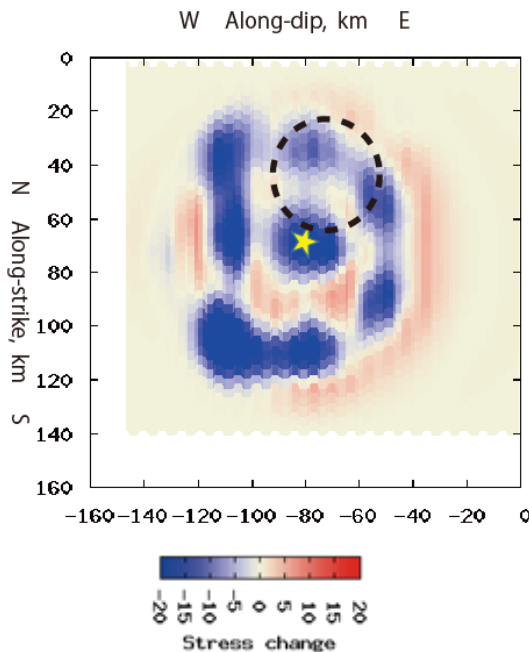


図 4. 本震の破壊開始後 20 秒間での断層滑りによる断層面上の応力変化。星印は本震の破壊開始点、黒丸は前震の余効滑りが発生した領域を示す。(図 2 のモデルとは、断層走向が少しずれていることに注意)

余効滑りの場合と同様に、応力変化と滑り量との関係を、本震時のデータについても求めたものが図 5 である。小断層ごとに、その滑り量は異なるものの、ほとんどの小断層で動的な滑りに伴う応力の低下が生じている。このことは、図 4 で、丸で囲んだ領域内が応力の低下を示す青色を示していることと整合的である。動的な応力低下量の最大値は 30 [MPa]程度であり、その後の、応力の上昇により図 4 で示された 15 [MPa]程度となったことが分かる。

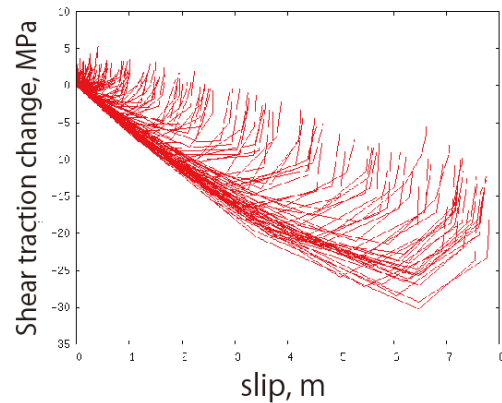


図 5. 本震時滑りによる断層滑り量とせん断応力変化の関係。多数あるデータポイントは、図 4 での黒丸で囲った、前震の余効滑りを生じた領域内の各小断層上での滑りと応力変化量である。全体的に、滑りに伴って顕著に応力の低下が生じていることが分かる。なお、滑りの停止に伴い応力が多少上昇しているが、全体的な応力低下の傾向は変わらない。

Observationally constrained rate-dependent friction

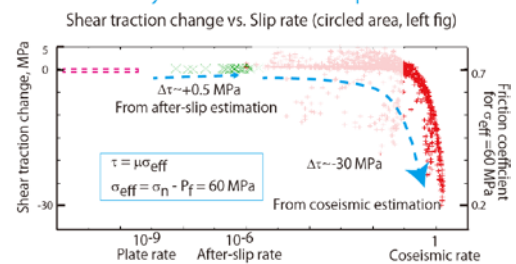


図 6. せん断応力変化と滑り速度との関係。余効滑りの速度領域を緑色の×印で、地震時滑りの速度領域を赤色の+印で示す。低速側では応力の上昇が、高速側では応力の低下が見られる。

以上の結果をコンパイルして、せん断応力変化の滑り速度依存性を求めた (図 6)。ここでは、低速側は余効滑りのデータを用いて、高速側は本震の地震時滑りのデータを用いている。余効滑り時の滑り速度は、滑り量とその継続時間である 52 時間で平均したものととして算出した。低速側では顕著な滑り速度依存性を示さず、高速側では地震時速度となる数 [m/s]程度の速さで、動的な弱화가起こ

ったことが分かった。

ここに示された結果は、Di Toro et al., 2011などで示された、岩石実験の結果とも調和的である。すなわち、高速側で顕著な動的な弱化が起こるといえるものである。

次に、ここまでで得られた摩擦特性を考慮して、断層破壊の物理モデルを構築した。モデルの数値解析には、準動的な境界積分方程式法を用いた。その結果、低速と高速で滑り速度依存性が異なる摩擦則を仮定することによって、実際に観測されたような、余効滑り域での高速滑りの発生という現象が再現されることが確認された。

本研究の結果は、天然の断層では、余効滑りを生じるような、低速滑り時には滑り速度強化特性を持つような断層領域であっても、高速滑り時には滑り速度弱化作性を示している。そのような議論は、これまで可能性の一つとして概念的には行われてきたが、本研究は実際の観測データに基づいて、そのような現象の存在を定量的に示したものである。

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 3 件)

1. Ando, R., K. Imanishi, Y Panayotopoulos and T. Kobayashi, 2017, Dynamic rupture propagation on geometrically complex fault with along-strike variation of fault maturity: insights from the 2014 Northern Nagano earthquake, *Earth, Planets and Space*, 69:130, <https://doi.org/10.1186/s40623-017-0715-2>, 査読有り.
2. Ando, R., 2017, On Applications of Fast Domain Partitioning Method to Earthquake Simulations with Spatio-temporal Boundary Integral Equation Method, *Mathematical Analysis of Continuum Mechanics and Industrial Applications II - Proc. of the Intl. Conf. CoMFoS16*, Springer, 30, 87-99, https://doi.org/10.1007/978-981-10-6283-4_8, 査読有り.
3. Ando, R., 2016, Fast Domain Partitioning Method for dynamic boundary integral equations applicable to non-planar faults dipping in 3-D elastic half-space, *Geophys. J. Int.*, 207, 833-847, doi: 10.1093/gji/ggw299, 査読有り.

[学会発表] (計 7 件)

1. Ando, R., T. Uchide and Y. Ohta, 2016, Foreshock, After-slip: 2011 Tohoku-oki case, AGU Chapman conference, Am. Geoph. Union, Ixtapa (Mexico), 2/22. 招待講演
2. Ando, R., 2016, Application of dynamic earthquake rupture simulation to the 2016 Kumamoto earthquake, International Conference of Continuous Mechanics Focusing on Singularity, Jpn. Soc. Indst. App. Math., Fukuoka, 10/23. 招待講演
3. Ando, R., T. Uchide and Y. Ohta, 2015, Mechanically understand foreshock-afterslip-mainshock sequence of 2011 Great Tohoku-oki earthquake, Am. Geophys. Union Fallmeeting., San Fransisco.
4. 安藤亮輔・内出崇彦・太田雄策, 2015, 2011年東北沖地震の前震・本震過程の力学的理解, 日本地震学会秋季大会, 神戸.
5. Ando, R., T. Uchide, 2015, Rupture dynamics inferred from early stage of the 2011 great Tohoku-oki earthquake, Jpn Geosci. Union, Chiba.
6. Ando, R., 2014, New Efficient Dynamic 3-D Boundary Integral Equation Method applicable to Non-Planar Fault Geometry Dipping in Elastic Half Space, Am. Geophys. Union Fallmeeting., San Fransisco.
7. 安藤亮輔, 3次元非平面断層に適用可能な動的境界積分方程式法の高速化, 2014, 日本地震学会秋季大会, 新潟.

〔図書〕（計 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
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

安藤 亮輔 (ANDO, Ryosuke)
東京大学・大学院理学系研究科・准教授
研究者番号：10455256

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()