

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 13 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22740290

研究課題名（和文） GPS のデータ同化手法の開発とプレート境界の摩擦特性の推定

研究課題名（英文） Development and application of data assimilation methods for GPS data to estimate frictional properties on plate boundary faults

研究代表者

福田 淳一（FUKUDA JUNICHI）

東京大学・地震研究所・助教

研究者番号：70569714

研究成果の概要（和文）：プレート境界におけるすべり時空間変化を支配する摩擦特性を推定するために、GPS 観測データから摩擦法則のパラメータ（摩擦パラメータ）を推定するデータ同化手法の開発を行った。この手法を 2011 年東北地方太平洋沖地震（Mw 9.0）の余効すべりに適用し、余効すべり発生領域の摩擦特性の推定を行った。その結果、従来は一定であると考えられてきた摩擦パラメータは、高速のすべり速度に対してすべりの安定性が減少するようなすべり速度依存性を示すことを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Spatial and temporal variations in slip on plate boundary faults is primarily governed by frictional properties on faults. To estimate frictional properties on faults, we develop data assimilation methods to estimate parameters in fault friction laws (friction parameters) using GPS data. We apply this method to afterslip following the 2011 Mw 9.0 Tohoku-oki earthquake to estimate frictional properties in the afterslip area. The results show that the friction parameter, which has been estimated to be constant in previous studies, is dependent on slip rate and higher slip rates result in less stable frictional properties.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	500,000	150,000	650,000
2011 年度	700,000	210,000	910,000
2012 年度	700,000	210,000	910,000
総計	1,900,000	570,000	2,470,000

研究分野：固体地球物理学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：データ同化、GPS、断層すべり、摩擦法則、摩擦パラメータ

1. 研究開始当初の背景

プレート境界面では、断層が高速ですべる地震のほかに、地震後の余効すべりやスロースリップイベントといった非地震性すべりのイベントが起きていることが、GPS などの測地データの解析から知られている。このようなプレート境界断層の多様なすべり様式は、

断層の摩擦特性によって規定される。従って、プレート境界断層で発生する様々なすべり現象を理解するためには、その摩擦特性を知ることが必要不可欠である。

2. 研究の目的

(1) GPS データと摩擦構成則に基づく断層す

べりの物理モデルを用いて、断層面上の摩擦特性を規定するパラメータ（摩擦パラメータ）を推定するためのデータ同化手法を開発する。

(2) 開発したデータ同化手法を GPS により地震後に観測された地殻変動に適用し、プレート境界面上の余効すべり発生領域の摩擦特性を推定する。

3. 研究の方法

(1) 速度・状態依存摩擦法則に基づく地震サイクルモデルを用いて人工的な余効すべりの観測データを作成し、そのデータからこれまでの研究で用いられてきた様々な余効すべりの物理モデルを用いて摩擦パラメータを推定することで、それらの物理モデルで仮定されている断層形状、摩擦法則、余効すべりの初期条件が摩擦パラメータの推定値やすべりの時空間変化に与える影響についての評価を行った。

(2) 逐次データ同化手法の一つである粒子フィルタのコードの開発を行った。

(3) 粒子フィルタを用いて GPS 時系列データから断層すべりの時空間変化を推定する逆解析手法を 2011 年東北地方太平洋沖地震後に GPS で観測された余効変動に適用し、プレート境界面上における余効すべりの時空間変化を推定した。

(4) 東北地方太平洋沖地震の余効すべりが速度・状態依存摩擦法則に整合的かどうか検討した。

(5) 東北地方太平洋沖地震の余効すべりとそれに伴うプレート境界面上における剪断応力の時間発展から、プレート境界面の余効すべり発生領域の摩擦特性を推定した。

4. 研究成果

(1) これまで余効すべりのモデリングに用いられてきた 1 自由度のバネ・スライダーモデルは摩擦パラメータの推定値に偏りが生じる可能性があることが分かった。同様に、これまでのモデリングで行われてきたように地震時の応力変化をステップで近似した場合、摩擦パラメータの推定値に偏りが生じる可能性があることが分かった。一方、速度・状態依存摩擦法則の定常状態近似である定常速度強化摩擦法則を仮定しても、摩擦パラメータ推定値への影響は小さいことが分かった。

(2) 2011 年東北地方太平洋沖地震の余効すべり発生領域における摩擦特性を推定するた

め、プレート境界面上における地震後約 7 カ月間の積算余効すべり及びすべり速度の時空間変化を GPS データに粒子フィルタに基づく時間依存逆解析法を適用することによって 1 日毎に推定した。地震直後の余効すべり速度は最大で 100 m/yr を超えており、2003 年十勝沖地震 (Mw=8.3) や 2005 年 Nias 地震 (Mw=8.7) の地震直後の最大余効すべり速度（それぞれ 7 m/yr, 6 m/yr）より一桁以上大きい。これに引き続いて、10 m/yr を超えるすべり速度が地震後 15 日間程度続いた (図 1)。この結果は、東北地方太平洋沖地震の余効すべりを使用することにより、他の地震の余効すべりから摩擦特性を推定した研究と比較して、より広いすべり速度領域に対して摩擦特性を定量化できる可能性があることを示す。

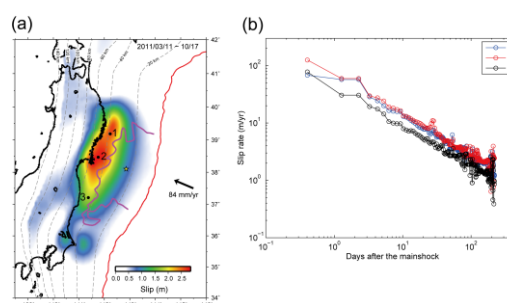


図 1: (a) 2011 年 3 月 11 日から 10 月 17 日までの東北地方太平洋沖地震の積算余効すべり。(b) 図(a)の点 1, 2, 3 における余効すべり速度の時間変化。

(3) これまで、余効すべりの時間発展は、速度・状態依存摩擦法則から導かれた速度強化の定常摩擦を用いてモデル化されており、このようなモデルでは、摩擦の速度依存性を表す摩擦パラメータは空間的には変化するが時間的には一定であると仮定されてきた。多くの余効すべりの時間発展が摩擦パラメータを一定と仮定したモデルで説明できることが既に明らかにされているが、本研究では東北地方太平洋沖地震の余効すべりの時間発展はこのモデルでは説明できないことを示した (図 2)。

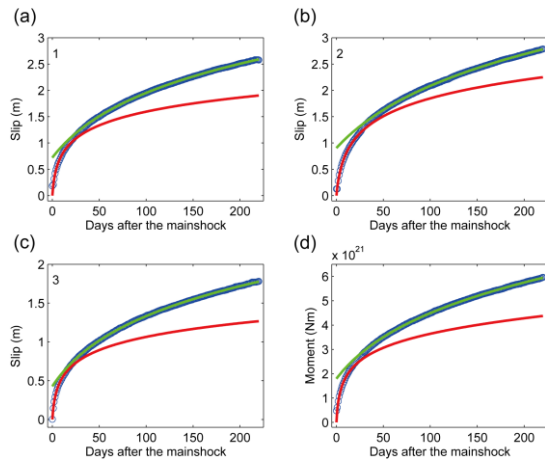


図 2: (a, b, c) 図 1(a) の点 1, 2, 3 における余効すべりの時間変化 (青丸) と摩擦パラメータが時間的に一定と仮定したモデルからの予測値の比較。赤線・緑線はそれぞれモデルを地震直後 15 日間及び地震後 51 日目以降の余効すべりに合わせた結果である。(e) 余効すべりのモーメントの時間変化 (青丸) とモデルの予測値の比較。赤線・緑線はそれぞれモデルを地震直後 15 日間及び地震後 51 日目以降のモーメントに合わせた結果である。

(4) 余効すべりが、摩擦パラメータが時間的に一定な速度強化の定常摩擦に従う場合、余効すべりによるプレート境界面上における剪断応力変化はすべり速度の対数に比例する。これまで、2003 年十勝沖地震 (Mw 8.3) や 2005 年 Nias 地震 (Mw 8.7) の余効すべりに対して、剪断応力変化とすべり速度の対数が線形の関係を示すことが確認されてきた。本研究ではこれらの研究とは対照的に、東北地方太平洋沖地震の余効すべりに対して、剪断応力変化とすべり速度の対数が非線形の関係を示すことを明らかにした (図 3)。この結果は摩擦の速度依存性を表す摩擦パラメータが一定ではなく、高速になるにつれて安定性が減少するようすべり速度に依存性を持つことを示す。このようなすべり速度に依存する摩擦特性が、現実の断層に対して地球物理学的な観測から明らかにされたのは、世界で初めての成果である。

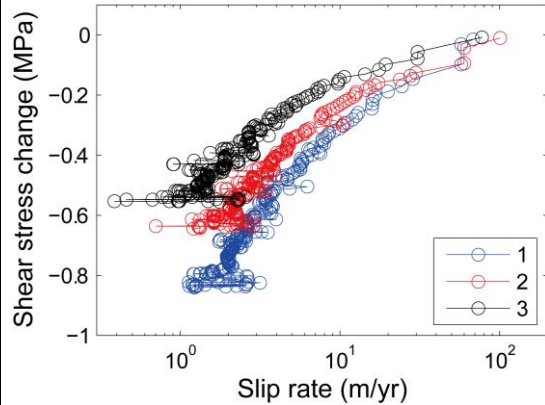


図 3: 図 1(a) の点 1, 2, 3 における余効すべり速度と余効すべりによる剪断応力変化の関係。

(5) 東北地方太平洋沖地震後の余効すべり速度と剪断応力の時間発展から摩擦パラメータ (速度・状態依存摩擦法則のパラメータ $a-b$ と有効法線応力の積) をすべり速度の関数として推定したところ、10 m/yr 以下のすべり速度に対しては 0.1 MPa 程度であり、2003 年十勝沖地震 (Mw 8.3) や 2005 年 Nias 地震 (Mw 8.7) 等 10 m/yr 未満の最大すべり速度を持つ余効すべりから推定された値と同程度であるが、10~100 m/yr のすべり速度に対しては 0.01 MPa 程度であり、10 m/yr 以下に対する推定値より一桁小さいことが分かった (図 4)。

速度強化領域における摩擦パラメータの値が 0 に近づくほど、隣接する速度弱化領域で発生した地震は速度強化領域に伝播しやすくなる。従って、本研究で見つかった、すべり速度が高速になるにつれて摩擦パラメータが 0 に近づくようなすべり速度に依存する摩擦特性は、摩擦パラメータが一定の場合と比較して、速度強化領域が地震時のすべりの伝播に対してバリアとして働くことを妨げるため、地震の空間的な広がりを決める一つの要因となっている可能性がある。

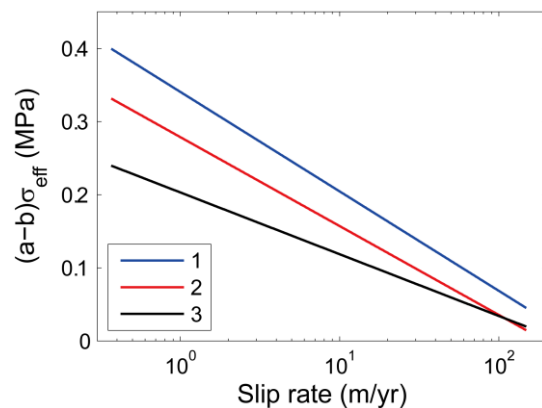


図 4: 図 3 に示されたすべり速度と剪断応力変化の関係から推定した摩擦パラメータのすべり速度依存性。縦軸は摩擦パラメータの値を示す。

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 1 件)

(1) Johnson, K. M., J. Fukuda, and P. Segall, Challenging the rate-state asperity model: Afterslip following the 2011 M9 Tohoku-oki, Japan, earthquake, Geophysical Research Letters, 査読有, Vol. 39, 2012, L20302, DOI: 10.1029/2012GL05291

[学会発表] (計 12 件)

① 福田淳一、2011 年東北沖地震の高速な余効すべりから推定される摩擦すべりの安定性の低下、日本地球惑星科学連合 2013 年大会、2013 年 05 月 19 日～2013 年 05 月 24 日、幕張メッセ国際会議場、千葉市

② 福田淳一、Evolution of afterslip following the 2011 Tohoku-oki earthquake, 2012 American Geophysical Union Fall Meeting, 2012 年 12 月 03 日～2012 年 12 月 07 日、Moscone Convention Center, San Francisco, California, USA

③ 福田淳一、2011 年東北地方太平洋沖地震の余効すべりの時間発展、日本地球惑星科学連合 2012 年大会、2012 年 05 月 20 日～2012 年 05 月 25 日、幕張メッセ国際会議場、千葉市

④ 福田淳一、Spatial and temporal evolution of afterslip following the 2011 Tohoku-oki earthquake inferred from GPS data, 2011 American Geophysical Union Fall Meeting, 2011 年 12 月 5 日～2011 年 12 月 9 日、Moscone Convention Center, San Francisco, California, USA

⑤ 福田淳一、2011 年東北地方太平洋沖地震の余効すべりの時空間発展、日本地震学会 2011 年秋季大会、2011 年 10 月 12 日～2011 年 10 月 15 日、静岡県コンベンションセンターグランシップ、静岡市

⑥ 福田淳一、GPS データから推定した 2011 年東北地方太平洋沖地震の地震時すべりと余効すべり、日本地球惑星科学連合 2011 年大会、2011 年 5 月 22 日～2011 年 5 月 27 日、幕張メッセ国際会議場、千葉市

⑦ 福田淳一、Network Inversion Filter に基づく非定常地殻変動のリアルタイム検出アルゴリズム、日本地球惑星科学連合 2011 年大会、2011 年 5 月 22 日～2011 年 5 月 27 日、幕張メッセ国際会議場、千葉市

⑧ 福田淳一、地殻変動データの線形・非線形混合インバージョン：モデルパラメータとハイパーパラメータのベイズ推定、日本地球惑星科学連合 2011 年大会、2011 年 5 月 22 日～2011 年 5 月 27 日、幕張メッセ国際会議場、千葉市

⑨ 福田淳一、Online transient deformation detection using a particle-based Network Inversion Filter, 2010 American Geophysical Union Fall Meeting, 2010 年 12 月 13 日～2010 年 12 月 17 日、Moscone Convention Center, San Francisco, California, USA

⑩ 福田淳一、Effects of model assumptions and initial conditions on inversions of geodetic data using rate-and-state friction models of afterslip, 2010 Western Pacific Geophysics Meeting, 2010 年 6 月 22 日～2010 年 6 月 25 日、Taipei International Convention Center, Taipei, Taiwan

⑪ 福田淳一、GPS データへのデータ同化手法の適用、第 59 回理論応用力学講演会、2010 年 6 月 8 日～2010 年 6 月 10 日、日本学術会議、東京都港区

⑫ 福田淳一、測地データの逆解析による断層摩擦パラメータの推定、日本地球惑星科学連合 2010 年大会、2010 年 5 月 23 日～2010 年 5 月 28 日、幕張メッセ国際会議場、千葉市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福田 淳一 (FUKUDA JUNICHI)
東京大学・地震研究所・助教
研究者番号：70569714

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし