

平成 30 年 5 月 10 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17748

研究課題名(和文)GPSデータに基づく余効変動の物理モデルの構築とそのパラメータ推定手法の開発

研究課題名(英文)Development of a physics-based model of postseismic deformation and methods for parameter estimation based on GPS data

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

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文):巨大地震の余効変動の2つの主要な物理プロセスであるプレート境界面における余効すべりとマンツルの粘弾性応力緩和の双方を考慮した余効変動の三次元物理モデルを構築した。余効すべりとマンツルの粘弾性応力緩和は地震時の応力変化により駆動され、余効すべりの時間発展は速度・状態依存摩擦構成則に従うと仮定した。このモデルを用いて2011年東北地方太平洋沖地震の余効変動モデルを構築し、GPS・海底地殻変動観測データと比較した。その結果、摩擦構成則のパラメータ、マンツルの粘性率などの物理モデルのパラメータが観測データから推定できることが分かった。

研究成果の概要(英文):We develop a three-dimensional physics-based model of postseismic deformation following large earthquakes that incorporates two primary processes, afterslip on the plate interface and viscoelastic stress relaxation in the mantle. We assume that afterslip and viscoelastic relaxation are driven by coseismic stress changes and the evolution of afterslip is assumed to follow the rate-state friction law. Based on this physics-based model, we develop a model of postseismic deformation following the 2011 Tohoku-oki earthquake and compare the model predictions with geodetically observed postseismic deformation. We find that parameters in the physics-based model, such as fault friction parameters and mantle viscosity, can be constrained based on the geodetic data.

研究分野:固体地球物理学

キーワード:余効変動 余効すべり 粘弾性緩和 GPS 断層摩擦特性 物理モデル

### 1. 研究開始当初の背景

プレート境界の巨大地震に引き続いて観測される余効変動を引き起こす主要な物理プロセスとして、(1)プレート境界面における地震時の応力変化を緩和する余効すべり、及び(2)震源域周辺のマントルにおける地震時の応力変化の粘弾性緩和が知られており、地表で測地学的に観測される余効変動は主にこれらの2つのプロセスからの寄与の和であると考えられる。これらのプロセスは地震時の応力変化によって引き起こされ、余効すべりの時空間パターンはプレート境界面の摩擦特性に、マントルの粘弾性緩和による余効変動の時空間パターンはマントルの粘弾性レオロジーに支配される。従って、測地学的に観測された余効変動からプレート境界面の摩擦特性やマントルのレオロジーを推定することが可能である。しかし、これまでの多くの研究では、余効すべりの時空間変化は運動学的にモデル化されていたため、プレート境界面の摩擦特性は推定されてこなかった。また、このようなモデルを用いた場合、測地学的に観測された余効変動に対する余効すべりとマントルの粘弾性緩和の寄与を分離することが困難であるため、プレート境界の摩擦特性やマントルのレオロジーを正確に推定することが難しい。

### 2. 研究の目的

(1) プレート境界面における余効すべりとマントルの粘弾性応力緩和の双方を考慮した余効変動の三次元物理モデルを構築する。このモデルでは、余効すべりの時間発展は摩擦構成則に従うと仮定する。

(2) GPS により観測された余効変動からプレート境界面上の摩擦パラメータやマントルの粘性率など、物理モデルのパラメータを推定するための手法を開発する。この手法を2011年東北地方太平洋沖地震後のGPSデータに適用し、プレート境界の摩擦特性とマントルのレオロジーを推定する。

### 3. 研究の方法

(1) プレート境界面における余効すべりとマントルの粘弾性応力緩和の双方を考慮した余効変動の三次元物理モデルを構築する。三次元的な弾性・粘弾性媒質の内部にプレート境界を設定し、プレート境界面における余効すべりの時間発展は速度・状態依存摩擦構成則に従うと仮定する。地震時のすべり分布から計算される応力変化により、余効すべりとマントルの粘弾性応力緩和が駆動されるものとする。

(2) (1)のモデルを用いて、2011年東北地方太平洋沖地震の余効変動モデルを構築する。モデルにより計算された余効変動をGPS・海底地殻変動データと比較し、観測データを説

明できるパラメータの範囲について検討する。

(3) モデルのパラメータの推定手法として、粒子フィルタとアンサンブルカルマンフィルタについて検討する。

### 4. 研究成果

(1) プレート境界面における余効すべりとマントルの粘弾性応力緩和の双方を考慮した余効変動の三次元物理モデルを構築した。モデルでは海洋プレート・陸側プレート・スラブを弾性体、海洋マントル及びマントルウェッジを粘弾性体でモデル化した。余効すべりの時間発展は速度・状態依存摩擦構成則に従うと仮定した。マントルの粘弾性緩和については、定常的な粘弾性レオロジーに加えて地震直後の過渡的なレオロジーを考慮するために、Burgers レオロジーを用いた。さらに、余効すべりと粘弾性緩和の力学的な相互作用をモデルに取り入れた。余効すべりと粘弾性緩和の時間発展は、地震時のすべり分布から求められた応力変化を初期条件として計算するものとした。

(2) (1)のモデルを用いて2011年東北地方太平洋沖地震の余効変動モデルを構築し、モデルにより計算された余効変動の時間発展とGPS・海底地殻変動の時系列データを比較した。例として、モデルで仮定した地震時のすべり分布、プレート境界面上における地震時の応力変化、計算された余効すべりの積算すべり分布を図1に示す。また、モデルから計算された余効変動とGPS時系列データとの比較を図2に示す。

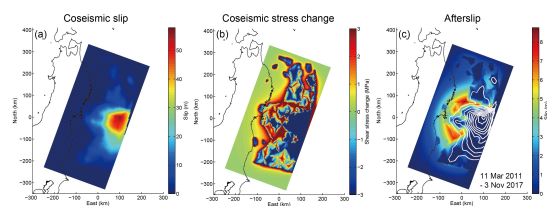


図 1: (a) モデルで仮定した地震時のすべり分布 (Hooper et al., 2013)。 (b) (a)のすべり分布から計算されたプレート境界面における地震時の剪断応力変化。 (c) (b)を初期条件として計算した余効すべりの積算すべり分布(2011年3月11日~2017年11月3日)。白のコンターは地震時のすべり分布を5m 間隔で示す。

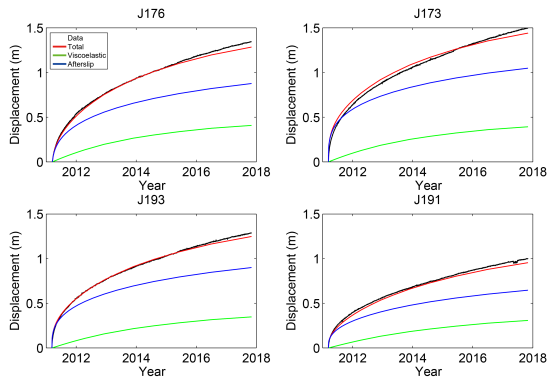


図 2: 4 つの GPS 観測点における GPS 時系列データ (黒線) とモデル計算値の東西成分の比較。緑、青線はそれぞれ粘弾性緩和及び余効すべりの弾性応答による変位の時系列を表す。赤線は粘弾性緩和と余効すべりによる寄与の和を示す。

(3) (2) で構築した東北地方太平洋沖地震の余効変動モデルのパラメータを変化させて計算を行い、各パラメータが余効すべり、粘弾性緩和、及び地表の余効変動に与える影響を調査した。モデル計算の結果はプレート境界面の摩擦パラメータ、固着域の分布、マンツルの粘性率、プレート及びスラブの厚さ、地震時のすべり分布に敏感であることが分かった。プレート境界面の摩擦パラメータとマンツルの粘性率はそれぞれ余効すべりと粘弾性緩和の時間変化に影響を与える。一方、プレート境界の固着域の分布は余効すべりの空間分布に、プレート及びスラブの厚さは粘弾性緩和の空間パターンに強い影響を与える。地震時のすべり分布は余効すべりと粘弾性緩和の双方の時空間変化に影響を及ぼすが、特に余効すべりの時空間変化に対する影響が大きい。また、これらのパラメータは水平変位に比べて上下変位に対してより大きな影響を及ぼすことが分かった。このことから、観測データからパラメータを推定する際には、上下変位の観測データが重要になる。

(4) モデル計算の結果を東北地方太平洋沖地震後の GPS・海底地殻変動の時系列データと比較し、観測データを説明するパラメータの値を推定することを試みた。マンツルの粘性率を空間的に一様と仮定したモデルでは観測データの水平成分を再現することはできたが、上下成分を再現することは困難だった (図 3)。一方、海洋マンツルとマンツルウェッジに異なる粘性率を与えたモデルでは、上下変動の空間パターンが粘性率を一様と仮定したモデルに比べて大きく変化し、観測された上下変動を概ね再現することができた (図 4)。この結果は、観測データを説明するためにマンツルの粘性率の不均質性が重要であることを示す。

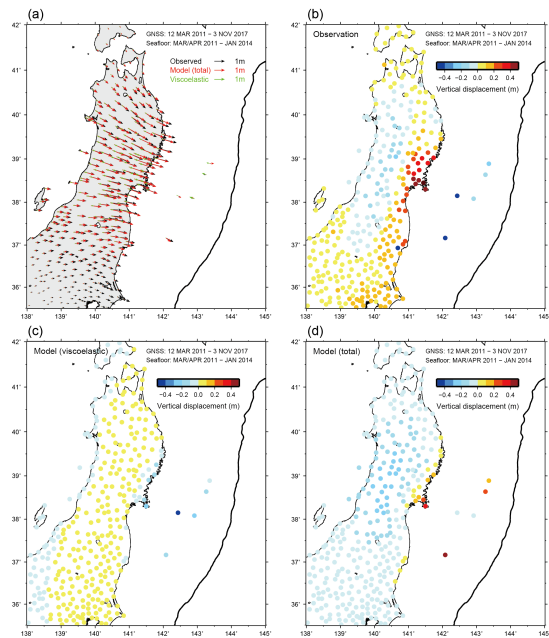


図 3: 空間的に一様な粘性率を仮定したモデルから計算された余効変動と観測された余効変動の比較。(a) 水平成分。黒、赤、緑矢印はそれぞれ、観測値、モデルによる計算値、モデル計算値に対する粘弾性緩和の寄与分を表す。(b) 観測値の上下成分。(c) モデル計算値の上下成分に対する粘弾性緩和の寄与分。(d) モデル計算値の上下成分。

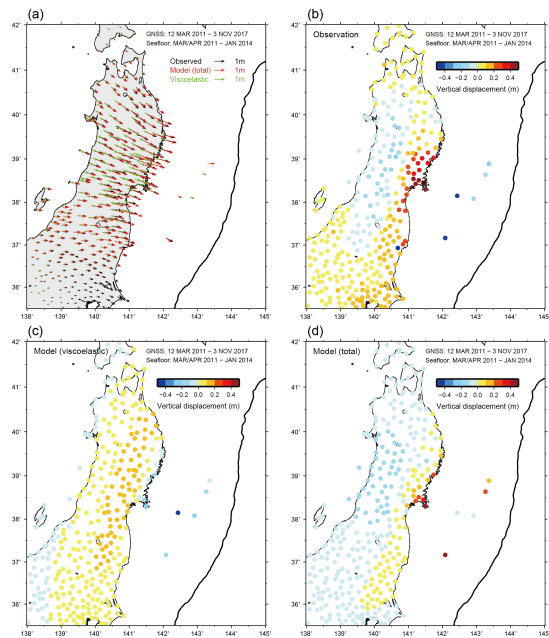


図 4: 海洋マンツルとマンツルウェッジに異なる粘性率を仮定したモデルから計算された余効変動と観測された余効変動の比較。(a) 水平成分。記号は図 3 と同じ。(b) 観測値の上下成分。(c) モデル計算値の上下成分に対する粘弾性緩和の寄与分。(d) モデル計算値の上下成分。

(5) モデルパラメータを逆問題として客観

的に推定することを目指し、摩擦構成則に基づく断層すべりモデルと人工的に作成した観測データを用い、粒子フィルタとアンサンブルカルマンフィルタによるパラメータ推定の可能性を検討した。ここでは簡単のため、モデルの媒質としては弾性体を仮定した。媒質中に断層面を仮定し、すべりは速度・状態依存摩擦構成則に従うと仮定した。このモデルにより、地震時のすべり分布を与えて余効すべりのシミュレーションを行い、それを基に人工的な余効変動の観測データを作成した。このデータを用いて、摩擦パラメータ及びモデル初期条件(地震直後のすべり速度と状態変数の空間分布)の推定を行った。その結果、粒子フィルタはパラメータの推定精度や計算コストに問題があることが分かったため、このようなモデルのパラメータ推定には適さないと考えられる。一方、アンサンブルカルマンフィルタは比較的少ない計算コストでパラメータを推定できることを確認できたため、検討した手法の中では適用可能性が高いと考えられる。

#### 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 6 件)

1. Fukuda, J. (2018), Variability of the space-time evolution of slow slip events off the Boso Peninsula, central Japan, from 1996 to 2014, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123, 732-760, doi:10.1002/2017JB014709 (査読有) .
  2. Wang, Z., T. Kato, X. Zhou, and J. Fukuda (2016), Source process with heterogeneous rupture velocity for the 2011 Tohoku-Oki earthquake based on 1-Hz GPS data, *Earth, Planets and Space*, 68, 193, doi:10.1186/s40623-016-0572-4 (査読有) .
  3. Kato, A., J. Fukuda, S. Nakagawa, and K. Obara (2016), Foreshock migration preceding the 2016 Mw 7.0 Kumamoto earthquake, Japan, *Geophysical Research Letters*, 43, 8945-8953, doi:10.1002/2016GL070079 (査読有) .
  4. Yoshida, S., N. Kato, and J. Fukuda, (2016), Forecast experiment on the Kamaishi repeating earthquakes based on numerical simulations using friction law, *Earth, Planets and Space*, 68, 71, doi:10.1186/s40623-016-0448-7 (査読有) .
5. Kato, A., J. Fukuda, T. Kumazawa, and S. Nakagawa (2016), Accelerated nucleation of the 2014 Iquique, Chile Mw 8.2 Earthquake, *Scientific Reports*, 6, 24792, doi:10.1038/srep24792 (査読有) .
  6. Yoshida, S., N. Kato, and J. Fukuda, (2015), Numerical simulation of the Kamaishi repeating earthquake sequence: Change in magnitude due to the 2011 Tohoku-oki earthquake, *Tectonophysics*, 651-652, 44-57, doi:10.1016/j.tecto.2015.03.012 (査読有) .
- [学会発表](計 10 件)
1. 福田 淳一, A coupled model of stress-driven frictional afterslip and viscoelastic relaxation following the 2011 Tohoku-oki earthquake, 2017 American Geophysical Union Fall Meeting, 2017.
  2. 福田 淳一, A coupled model of stress-driven frictional afterslip and viscoelastic relaxation following the 2011 Tohoku-oki earthquake, IAG- IASPEI 2017, 2017.
  3. 福田 淳一, A coupled model of stress-driven frictional afterslip and viscoelastic relaxation following the 2011 Tohoku-oki earthquake, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 2017.
  4. 福田 淳一, 物理モデルと測地データに基づく地殻変動のモデリング, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 2017.
  5. 福田 淳一, A coupled model of stress-driven afterslip and viscoelastic relaxation following the 2011 Tohoku-oki earthquake, 2016 American Geophysical Union Fall Meeting, 2016.
  6. 福田 淳一, 2011 年東北地方太平洋沖地震の余効変動の物理モデル, 日本地震学会 2016 年度秋季大会, 2016.
  7. 福田 淳一, データ同化手法による断層すべり数値モデルのパラメータ・初期条件の同時推定, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 2016.
  8. 福田 淳一, Imaging the spatiotemporal evolution of a slow slip event near the Boso Peninsula, central Japan, 2015

American Geophysical Union Fall Meeting, 2015.

9. 福田淳一,GNSS 時系列データの状態空間モデリングによる非地震性断層すべりの時空間イメージング,日本地震学会 2015 年度秋季大会,2015.
10. 福田淳一,データ同化手法による断層すべり数値モデルの状態・パラメータ推定,日本地球惑星科学連合 2015 年大会,2015.

#### 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

##### (4)研究協力者

なし