

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 28 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24540453

研究課題名(和文)GPS衛星の電波から断層すべりを直接求める手法の開発：地震前後のすべりの解明へ

研究課題名(英文)Estimating fault slip directly from GPS phase data: For understandings of postseismic slip

研究代表者

宮崎 真一(miyazaki, shinichi)

京都大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00334285

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：GPSの位相データから断層すべりが一様であると仮定した場合のすべりの時間発展を推定するプログラムを作成した。ただし、GPSデータに含まれる各種誤差の補正をしていないため、数キロ～十数キロ程度の範囲でしか適用できない。また、短時間の余効すべりと長期的な余効滑りの比較を目的として、東北地方太平洋沖地震後2.5年間の余効すべりと粘弾性緩和をインバージョンによって同時推定し、海底地殻変動観測点の変位方向が陸上地殻変動点のそれと逆向きになることを定量的に評価した。

研究成果の概要(英文)：We developed a program to infer the slip on the fault under the condition that the slip is uniform over the entire fault. This is applicable only for a limited area up to 10km because the error is not corrected. We also estimated 2.5 years of afterslip and viscoelastic rebound simultaneously for the 2011 Tohoku-Oki earthquake. We quantitatively evaluated contributions of afterslip and viscoelastic relaxation. The latter causes landward movements at the ocean bottom GPS/Acoustic stations.

研究分野：測地学

キーワード：GPS 断層すべり

1. 研究開始当初の背景

GPS を用いた地殻変動研究では、基線解析によって GPS 衛星からの電波 (搬送波位相) から観測点の位置を求め、ある基準時刻に対する変位時系列に直し、それをデータとして断層すべりを求めるという手順がとられる。このうち、余効すべり (地震後の準静的すべり) の推定については 1 時間から 1 日ごとの変位時系列から (例えば Miyazaki et al., 2004a), 地震時の高速破壊の推定については 1 秒ごとの変位時系列から (例えば Miyazaki et al., 2004b), それぞれ求められてきた。両者の間の時間スケールである 1 分から 3 時間程度のすべり過程も、30 秒または 1 秒ごとの変位時系列から推定されている。この手法を用い、Miyazaki and Larson (2008) は 2003 年十勝沖地震直後 4 時間の余効すべりを、Miyazaki et al. (2011) は 2011 年東北地方太平洋沖地震の 2 日前に発生した前震の余効すべりの解析を行った。破壊から余効すべりに遷移し、余効すべりが伝播していく過程を観測データから捉えた例は皆無に等しい。それは、30 秒ないし 1 秒ごとの GPS 変位時系列が顕著な非白色ノイズを含むため、S/N が非常に小さい 1 分~数時間スケールでの準静的すべりの推定は困難であったからである。

2. 研究の目的

上記の背景を受けて設定した本研究の具体的な目的は、

- (1) GPS 搬送波位相から断層すべりを直接求める手法の開発
- (2) 合成データによる手法の利点・欠点の調査
- (3) 2011 年東北地方太平洋沖地震の GPS 搬送波に適用して地震直前・直後の準静的すべりを推定し、得られたすべりの履歴から、破壊 (本震) 直前および、破壊から余効すべりに遷移する過程を解明することである。

3. 研究の方法

最初に GPS 搬送波位相から断層すべりを直接推定する手法のプロトタイプを開発した。

まず本研究で開発する手法の観測モデルを示す。GPS 基線解析のサンプリング時刻ごとの観測モデルは、主要項のみ示すと、

$$\begin{aligned}
 & \text{(GPS の搬送波位相)} \\
 = & 1/(\text{信号の波長}) \times \\
 & \{ |(\text{時刻 } t \text{ における GPS 観測点 } i \text{ の位置}) \\
 & - (\text{時刻 } t \text{ における GPS 衛星 } j \text{ の位置}) | \\
 & + (\text{仰角 } e \text{ 依存を表すマッピング関数}) \\
 & \quad \times (\text{時刻 } t \text{ における天頂対流圏遅延}) \\
 & + (\text{光速}) \times (\text{GPS 観測点 } j \text{ の時計の遅れ}) \\
 & - (\text{光速}) \times (\text{GPS 衛星 } i \text{ の時計の遅れ}) \\
 & + (\text{潮汐荷重}) \} \quad (1)
 \end{aligned}$$

ここで未知パラメータは

- (時刻 t における GPS 観測点 i の位置),
- (時刻 t における天頂対流圏遅延)

である。断層すべりの推定は

$$\begin{aligned}
 & (\text{時刻 } t \text{ における GPS 観測点の変位}) \\
 = & (\text{時刻 } t \text{ における GPS 観測点の位置}) \\
 & - (\text{時刻 } 0 \text{ における GPS 観測点の位置}) \\
 = & (\text{すべりに対する変位応答関数}) \\
 & \times (\text{時刻 } t \text{ における断層すべり量}) \\
 & + \dots \quad (2)
 \end{aligned}$$

本研究では、(2) 式を (1) 式に代入して得られる次式を解く。

$$\begin{aligned}
 & \text{(GPS の搬送波位相)} \\
 = & 1/(\text{信号の波長}) \times \\
 & \{ |(\text{すべりに対する変位応答関数}) \\
 & \quad \times (\text{時刻 } T \text{ における断層すべり量}) \\
 & + (\text{時刻 } t \text{ における GPS 観測点 } i \text{ の位置}) \\
 & - (\text{時刻 } 0 \text{ における GPS 衛星 } j \text{ の位置}) \\
 & + (\text{仰角依存を表すマッピング関数}) \\
 & \quad \times (\text{時刻 } t \text{ における天頂対流圏遅延}) \\
 & + (\text{光速}) \times (\text{GPS 観測点 } j \text{ の時計の遅れ}) \\
 & - (\text{光速}) \times (\text{GPS 衛星 } i \text{ の時計の遅れ}) \\
 & + (\text{潮汐荷重}) \} \quad (3)
 \end{aligned}$$

パラメータ推定には拡張カルマンフィルタを用いる。(3) 式は、GPS 受信機が衛星から搬送波位相を受信する各時刻に対して成立するので、30 秒ごとあるいは 1 秒ごとに得られる搬送波位相を扱えば、この時間間隔で断層すべりの時間発展を推定することができる。カルマンフィルタは、従来の手法で (2) 式をデータサンプリング時刻ごとに解く際に用いられてきた (例: Miyazaki et al., 2004a; Miyazaki and Larson, 2008)。また、GPSY でも (1) 式を解く際に用いられており、本研究においても、これらの延長として自然に導入出来る。

しかしながら、本研究では大気遅延の推定をインプリメントしておらず、また、地球の極運動などの補正も施していないので、ごく狭い範囲 (~10km 四方程度) での適用に限られる。

搬送波位相に含まれるモデル化されていない非白色ノイズの存在と、すべり応答関数の誤差のため、カルマンフィルタを適用してもノイズが断層すべりとして推定されるなどの問題点がある。本研究では、これらの非白色ノイズの振る舞いを調べるため、平常時のデータのスペクトルを調べたところ、ランダムウォークとフリッカーノイズの間の周波数依存性を示した。

短時間の余効変動と対比する目的で、東北地方太平洋沖地震の長期的な余効変動に関する研究も副次的に実施した。2年半のGEONETデータに加えて海上保安庁の海底GPS音響観測(GPS/A)のデータを用い、地震後の余効変動を余効すべりと粘弾性緩和の和としてモデル化し、それぞれの時間発展の推定を行った。観測方程式は以下ようになる。

(時刻 t 、位置 x における変位)
 $= d \quad dS()$
 (時刻 t 、位置 x における単位のすべりによる、時刻 t 、位置 x における粘弾性変位応答関数)
 ンバージョンを実施した。

4. 研究成果

GPSの位相データから断層すべりが一様であると仮定した場合のすべりの時間発展を推定するプログラムを作成した。ただし、地球回転や、大気遅延をはじめとするGPSデータに含まれる各種誤差の補正をしていないため、数キロ~十数キロ程度の範囲でしか適用できない。この効用を確認するため、移動架台を用いた実験を東北大から提案をうけて検討したが、研究期間が終了となり、実験の実施とそれへの手法の応用には至らなかった。研究期間全体を通してGPS位相データの時間に依存するノイズの扱いに苦しんだ。本年度は暫定的にランダムウォークモデルを適用してプログラムを作成したが、実際のノイズの周波数依存性はよりフリッカーノイズに近く、ノイズの高周波成分が残ってしまう。このノイズと実際のシグナルとの分離が難しく、地殻変動が起こっていない時期の観測データを用いて行った試験解析においても、かなりのノイズ成分がシグナルとして推定されている。この扱いは今後の課題であるが、近年、スタンフォード大学の Paul Segall 教授のグループがフリッカーノイズを状態空間表現にのせることに成功したので、本研究でも今後取り入れられると考えている。

東北地方太平洋沖地震の長期的な余効変動に関する研究の方は順調に進捗した。得られた余効すべりは地震時すべり域の深部隣接領域に求まった(図1)。また、粘弾性緩和により陸上の観測点が海溝方向を向くのに対し、震源付近のGPS/A観測点が反対向きの変位を示すことが示された(図2)。この成果を、最終年度に2つの海外学会において発表した。

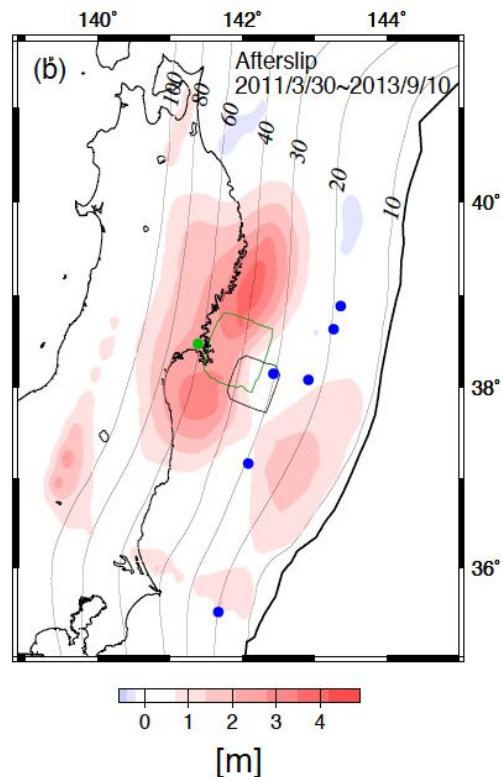


図1 2011年東北地方太平洋沖地震にともなう、地震後2年半の余効すべり

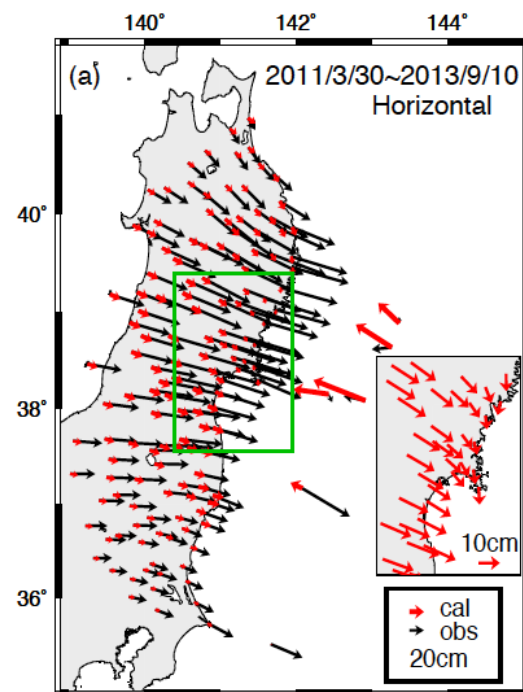


図2 地震後2年半の間の観測累積変位(黒)と推定された粘弾性緩和による変位の理論値(赤)

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)

Yamagiwa, Shuji, Shin'ichi Miyazaki, Kazuro Hirahara, and Yukitoshi Fukahata, Afterslip and viscoelastic relaxation following the 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw9.0) inferred from inland GPS and seafloor GPS/Acoustic data, Geophys. Res. Lett., 査読有, 2015, 42(1): 66-73, doi:10.1002/2014GL061735.

〔学会発表〕(計2件)

Yamagiwa, Shuji, Shin'ichi Miyazaki, Kazuro Hirahara, and Yukitoshi Fukahata, Inversion of GNSS and GPS/Acoustic data for afterslip and viscoelastic relaxation following the 2011 Tohoku earthquake, European Geosciences Union, General Assembly 2015, Vienna, Austria, 12 - 17 April 2015.

Yamagiwa, Shuji, Shin'ichi Miyazaki, Kazuro Hirahara, and Yukitoshi Fukahata, Coseismic Slip, Afterslip, and Viscoelastic Relaxation Following the 2011 Tohoku Earthquake Inferred from Surface Displacement Data, AOGS 12th Annual Meeting, Singapore, 2 - 7 August 2015.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0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0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〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮崎真一 (MIYAZAKI, Shinichi)

京都大学・理学研究科・准教授

研究者番号：00334285

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者