

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 25 日現在

機関番号：31303

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630197

研究課題名(和文) 巨大地震発生予測に関するGPSデータを用いたプレスリップの検出

研究課題名(英文) Pre-slip related with crustal movements using GPS data on great earthquake prediction

研究代表者

小出 英夫 (KOIDE, HIDEO)

東北工業大学・工学部・教授

研究者番号：20225353

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：以下の研究成果を得た。国土地理院GEONET提供のF3データやRINEXデータを用いて、東北地方を中心とする国内の地殻変動を観察するためのシステムの基礎を構築した。プレート境界型の巨大地震における、発生数日前からの「プレスリップ(予兆すべり)」の2次元有限要素法による数値シミュレーションを実施する過程において、両プレート間の摩擦係数の時間的・空間的変動の考慮の必要性が明確になった。過去10年間に発生した東北地方における8個の被害地震では、その地殻変動の時間履歴にプレスリップに関係すると思われる本震直前の2～3日前頃に水平変位の方位角の日変動に変化が生じることがわかった。

研究成果の概要(英文)：The outcomes of this research are summarized as follows: (1) A basic processing system was established to effectively observe crustal movements in the Tohoku district using GPS data such as F3 and RINEX types of GEONET. (2) Numerical simulations for the pre-slip phenomena during a few days prior to great inter-plate earthquakes were made to some tectonic plate models by using 2-dimensional FEM. The numerical simulations showed that further studies based on more sophisticated temporal-spatial-dependent model for the friction law peculiar to plate interaction are required to obtain final conclusion regarding the pre-slip phenomena. (3) Some precursory behaviors of the crust preceding 8 damage earthquakes occurred in the past 10 years in the Tohoku district including the 2011 Tohoku Earthquake were studied focusing on their time variations of the displacement azimuth. The results made it clear that some unusual temporal variations in azimuth appeared a few days prior to the main events.

研究分野：土木工学

キーワード：GPS 巨大地震 プレスリップ GEONET F3 RINEX 数値シミュレーション

### 1. 研究開始当初の背景

2011年東北地方太平洋沖地震の発生により想像を絶する被害がもたらされた。地震規模も地震位置も諸学会の事前想定を越えたものであり、改めて「地震予知」がなされなかったことに対して強い社会的な非難の声が上げられた。

そのような背景の中、本研究分担者の一人である神山眞氏によって、東北地方太平洋沖地震発生の5日前から発生日3月11日まで、日本列島の基盤であるプレートがプレスリップ(Pre-slip: 予兆滑り)を続けていたと理解できるGPSデータの解析結果を発表した。

日本におけるプレート境界型巨大地震の発生メカニズムは、相対的に移動する2つのプレートが、固着(Stick)状態から滑り(Slip)状態へ遷移し、弾性体であるプレートに蓄えられたエネルギーが解放されることよると考えられている。このように考えられるメカニズムに対して、既往の実験結果として、ビーズを介し水平に重ねた2面の上面を水平方向に引っ張った時、固着状態から滑り状態への遷移の直前に有限時間のプレスリップの存在が発表されている。

以上のことから、GPSデータの解析結果や実験室でのモデル実験ではプレスリップの存在を肯定する指摘がなされているものの、以下の2点については十分な研究がなされていない状態であった。

- (1) プレスリップの発生を数値解析的な側面から理論づけること
- (2) プレスリップの発生を常時観察し「地震予知」に役立てるためのシステムを築くこと

### 2. 研究の目的

上述のように、2011年東北地方太平洋沖地震では短期的な直前の地震発生予測が行われなかった。その一方、近年、様々な観測システムの充実が目を見張るものがあり、これらの膨大なデータが地震予知に有機的に有効利用されていない現実も存在する。また、本研究代表者の小出、研究分担者の一人である秋田宏氏は、コンクリート等の各種破壊現象に関する実験的研究経験から、「巨大地震発生前に破壊の前兆現象が生起しないことは考え難い」と考えている。

以上のことから本研究では、新たな視点から、巨大地震の発生予測に資するプレスリップ検出の有効性について、GPSデータの実測結果と数値シミュレーション解析の両方向から検討を行い、GPSデータの常時観測に基づくプレスリップ検出の価値を明らかにすることを目的としている。

### 3. 研究の方法

本研究はGPSデータ処理と数値シミュレーションから成る。

- (1) GPS観測データの処理研究は以下の方法による。

まず、全国を網羅する国土地理院の高精度なGPS観測点網(GEONET)観測データを自動的にダウンロード・処理・図化などを行う定時自動システムを開発する。GEONETの提供するデータはF3と称される各観測点の絶対位置座標データと生の人工衛星観測データであるRINEXデータに大別される。本研究ではF3データに対して全観測点について自動的にダウンロードすると同時に、基準観測点を固定した固定点法により、東西、南北、上下の3成分の変位を算定して、これらをベクトル分布表示するとともに時系列変動として解析する定時自動システムを開発する。一方、RINEXデータについては30秒間隔のサンプリングデータとして公開されているが、これらのデータを準リアルタイムでダウンロードするソフトを開発する。併せてIGS(International GNSS Service)が公開する精密なGPS衛星軌道情報とクロック情報を準リアルタイムでダウンロードするソフトを開発する。これらのデータから各観測点のmm単位精度の絶対座標を30秒間隔で算定し、観測点における地殻変位の時系列を求める。同時にこれらの膨大なデータを自動的に時系列として整理して、可視化するソフトを開発する。これらの整理された地殻変化の時系列のパターン化を実施して地震発生との相関を考察する。

また、GPSデータを対象とした解析は、2011年東北地方太平洋沖地震以前のデータに対しても実施し、例えば、過去10年間に東北地方で発生した被害を与えた地震(被害地震)について、その予兆的な地殻変動の存在について検証する。

- (2) 数値シミュレーションは以下の方法による。

2011年東北地方太平洋沖地震を想定し、先ず、大陸プレート、海洋プレートともに弾性体と仮定し、両者の変形と相互作用を考慮した、東西方向の断面に関する2次元有限要素解析(図1)を行う。プレートは物性一定、プレート間の摩擦係数も一定とする。

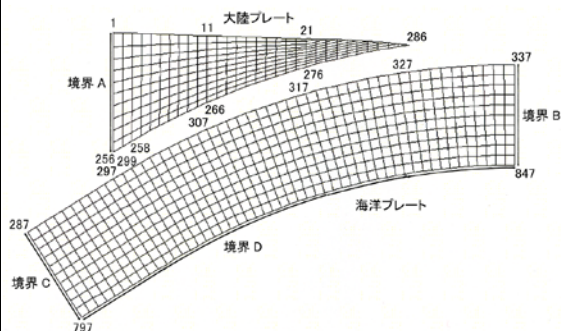


図1 2次元有限要素モデル

このシミュレーション結果を得た後、境界面の自由度増加、摩擦係数の不均一性付与、物性の不均質性付与、動的解析への移行を行う。

#### 4. 研究成果

##### (1) GPS データの自動解析システムの開発

国土地理院 GEONET データを自動的にダウンロード、所定処理、解析、描画などを一連の流れとするシステムを開発した。このシステムは Automatic Processing System of GPS data : (aPros-G、アプロス-G) と内部的に仮称している。これは部分システムとして F3 機能と R 機能から成り、前者は F3 データを対象としたもので地殻変動の長期的な変動解析をする機能を主として、後者は RINEX データを対象として、よりリアルタイムで最新の地殻変動(解析時点の6時間程度以内)の解析を意図したものである。図 2 に、aPros-G 全体のシステム概要を構成するサブモジュール集合を示す。

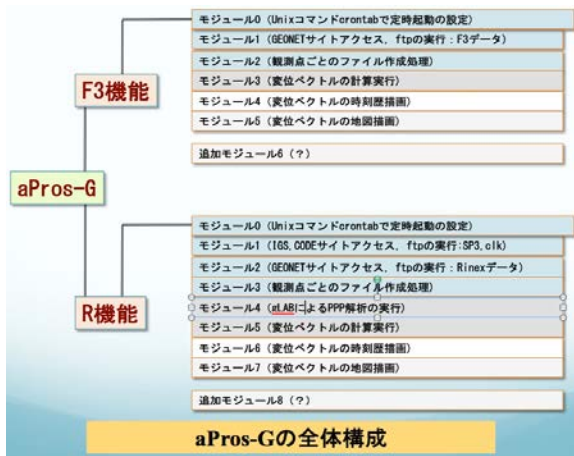


図 2 aPros-G 全体のシステム概要

aPros-G の F3 機能は以下の処理を施すサブモジュールから構成されている。

- ①定められた曜日・日時に自動的に起動する。
- ②起動時における最新の F3 データを提供する GEONET サイトにアクセスして全観測点の F3 データをダウンロードして、指定観測点毎にデータファイルを整理して保存する。
- ③全観測点を対象に変位を算定して、日変動時刻歴を求める。
- ④指定観測点を対象に変位の日変動時刻歴を各種の指定描画方法で描画して、描画グラフを保存する。
- ⑤指定期日間の変位累積量を算定してベクトル分布図として地図上に描画して、それらのグラフファイルを保存する。

以上の機能を利用した成果の例として、指定観測点を対象に変位の日変動時刻歴の描画結果を図 3 に、指定期日間の変位累積量を算定したベクトル分布図を図 4 に示す。

一方、aPros-G の R 機能は以下の処理を施すサブモジュールから構成されている。

- ①毎日、定時に定められた処理を自動的に起動して実行する。
- ②GEONET 全観測点を対象にアクセス時点で最新の RINEX 30 秒サンプリングデータをダウンロードする。

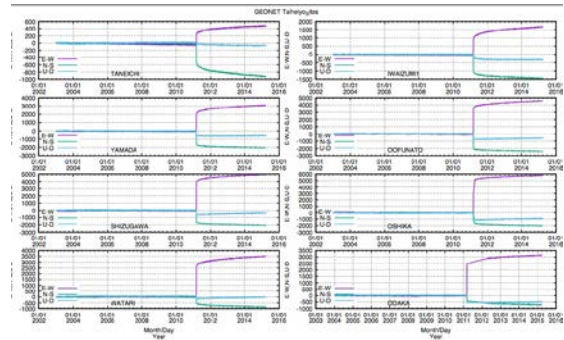


図 3 変位の日変動時刻歴の描画結果の一例

2015 4 4 from 2011 3 10

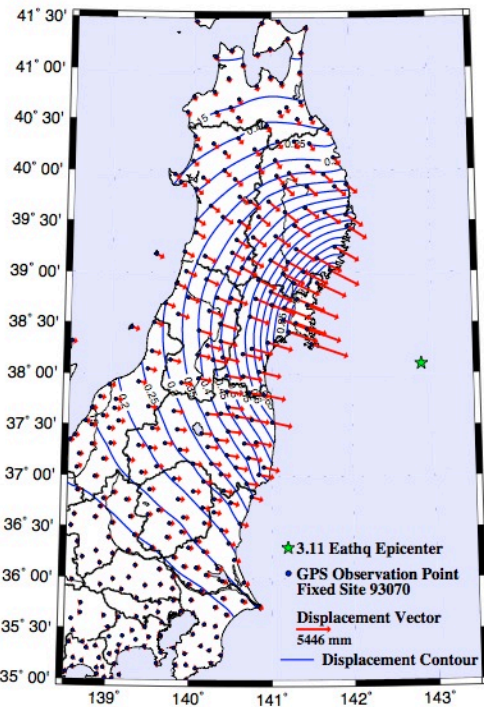


図 4 変位累積量を算定したベクトル分布図の結果の一例

- ③IGS にアクセスしてアクセス時点で最新の衛星軌道情報およびクロック修正情報をダウンロードする。
- ④指定観測点を対象に RINEX 30 秒観測データ対象に測位算定ソフト gLAB により PPP 解析を施し、30 秒間隔の変位時刻歴を算定する。
- ⑤上記④プロセスの結果を各種形式で描画する。

上記の処理結果の例として 2011 年東北地方太平洋沖地震の発生する 10 日前の 3 月 1 日から発生日の 3 月 11 日までの GEONET 釜石観測点における東経座標の各日 30 秒間隔の時刻歴変動を図 5 に示す。

##### (2) 数値シミュレーションの結果

まず、プレートの物性を一定、プレート間

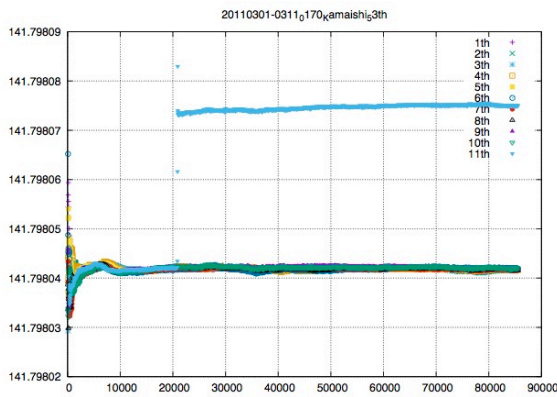


図5 釜石観測点における東経座標の各日30秒間隔の時刻歴変動

の摩擦係数を一定として、両プレートの形状に既往の知見を反映させたモデル(図1)を用いて解析し、以下の結果を得た。

- ①物性一定、摩擦係数一定の単純なモデルで固着-スリップが起こる
- ②部分的滑りを繰り返したのち全面滑りに至る、ほぼ定常的サイクルが見られる
- ③大陸プレートが薄い東側ほど滑りが頻繁である
- ④滑り面が一斉に滑るのではなく1点または2点から東西に滑りが伝播する

しかしながら、この解析条件ではプレスリップは認められなかった。そこで、プレスリップの起こりそうな条件として、境界面の自由度増加、摩擦係数の不均一性付与、物性の不均質性付与、動的解析への移行を前提に、以下のように条件にて更に解析を行った。

- ①境界面の自由度を58から192に増やした。
- ②摩擦係数を3種類(一様乱数、sin波状、矩形波状)に変化させた。
- ③静的つり合いの時系列変化を求めるだけでなく、滑りの開始から動的解析に移行させた。
- ④物性の不均質性を2種類(一様乱数、深さに応じた変化)に変化させた。

しかしながら、この条件内でも全面すべての数日前に発生するプレスリップは再現できず、今後、摩擦係数と物性の不均質性に関して、それらの変動範囲や両者の組み合わせについて、さらに詳しく解析を行う。

なお、本解析では、海洋プレートを弾性体とみなしたために、剛体とみなせば表面化しない以下の問題点を解明することができた。

- ①海洋プレートが剛体であれば、それをモデル化する必要も無く、大陸プレートをローラー支点で支えるのみであるが、弾性体とみなせば全体をローラー支点で支えるか、マントルからの浮力で支えるかの違いは大きく、後者が適当である。
- ②海洋プレートの移動を実現するために、東側から押すか、西側から引っ張るか、両作用同時かは、剛体では同じことになるが、弾性体では明瞭な差があり、マントルの対

流により移動することから両作用同時が適当である。

- ③両プレートの自重とマントルからの浮力のみが作用した状態での变形や応力がきわめて大きく、無視するのは不適當である。

### (3) aPros-Gを用いた地殻変動の時刻歴解析

2011年東北地方太平洋沖地震を含む過去約10年間にわたって北日本で生じた被害を与えた地震8個について、水平成分変位の方位角(東側軸から反時計方向への変化を正)の日変動について詳しく分析した。

その結果、地震発生予兆として、方位角の変動には特徴的な日変化が存在することがわかった。

成果の一例を図6に示す。図6は、2011年東北地方太平洋沖地震における震源に近いGEONETの代表的観測点における水平成分変位の方位角の3月1日から本震発生の3月11日までの日変動である。8観測点に共通して明確に方位角が加速的に東側へ変化することが明らかとなった。一方、本震が発生した後の方位角の変化は認められないことがわかる。

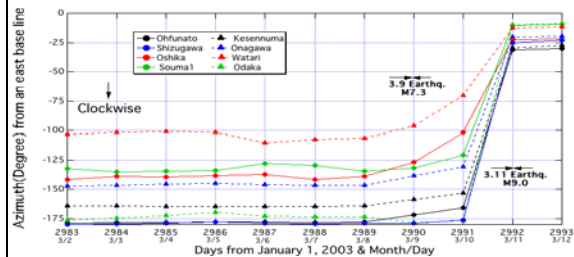


図6 水平成分変位の方位角の日変動の一例

ただし、これらの予兆変動はそれぞれの被害地震で異なる個性的な特徴がみられており、それらの特徴パターンを巨大地震発生予測情報として認識する方式の開発が課題として残されている。

### 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1件)

- ① 神山真、小出英夫、沢田康次、秋田宏、千葉則行、GPS観測による地震時地盤ひずみと地震被害との関係、第14回日本地震工学シンポジウム論文集、査読無、14巻、2014、897-906

[学会発表] (計6件)

- ① 秋田宏、小出英夫 他、プレート間滑りの地震挙動シミュレーションにおける境界条件等の影響、平成26年度土木学会東北支部技術研究発表会、2015年3月7日、東北学院大学工学部(宮城県・多賀城市)
- ② 神山真、小出英夫 他、地震時の地殻変動ひずみと構造物被害との関係(3.11地震

を中心として)、土木学会第 69 回年次学術講演会、2014 年 9 月 10 日、大阪大学豊中キャンパス(大阪府・豊中市)

- ③ 小出英夫、神山眞、千葉則行 他、GEONET システムの GPS データ自動取得処理システムの構築、平成 25 年度土木学会東北支部技術研究発表会、2014 年 3 月 8 日、八戸工業大学 (青森県・八戸市)

他 3 件

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

特にありません。

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小出 英夫 (KOIDE, Hideo)  
東北工業大学・工学部・教授  
研究者番号：2 0 2 2 5 3 5 3

### (2) 研究分担者

千葉 則行 (CHIBA, Noriyuki)  
東北工業大学・工学部・教授  
研究者番号：0 0 1 0 4 1 3 3

神山 眞 (KAMIYAMA, Makoto)  
東北工業大学・工学部・名誉教授  
研究者番号：5 0 0 8 5 4 6 1

秋田 宏 (AKITA, Hiroshi)  
東北工業大学・工学部・名誉教授  
研究者番号：4 0 0 8 5 4 5 2

### (3) 連携研究者

沢田 康次 (SAWADA, Yasuji)  
東北工業大学・工学部・名誉教授  
研究者番号：8 0 0 2 8 1 3 3