

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：31303

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06190

研究課題名(和文) 巨大地震予兆に相関する地殻変動とGNSSデータの変化に対する解析処理の実践研究

研究課題名(英文) Study on practical procedure for predicting great earthquakes based on observed GNSS data and numerical simulation of crustal movements

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) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：GPSなどのGNSSによる人工衛星から得られる地表面の位置情報データ(GEONETデータ)の時系列変化を用いて、巨大地震発生の事前探知に繋がる可能性がある有効なパラメータを見いだした。そして、GEONETのF3データ及びRINEX形式の30秒ごとのデータを自動解析するシステムにこのパラメータの変動の検知機能を追加し、さらに、それらにマッピング処理の表示機能を加え、「予測判定システム」に繋がるプロトタイプを完成させた。同時に、海洋プレートと大陸プレートの相互作用のシミュレーションにより、巨大地震発生の事前探知と関連づけられる地殻変動の検知の可能性をFEM解析から見いだした。

研究成果の概要(英文)：This study has derived effective parameters, which are available to detect precursory information leading to the prediction of great earthquakes, using observed GNSS data and numerical simulation of crustal movements. The parameters were comprehensively included in a software named "aPros-G" to construct a practical procedure for predicting the occurrence of great earthquakes. The software system uses both GNSS data of the F3 product and RINEX provided by the GEONET observation system. This study also has conducted numerical analyses of crustal movements simulating the interaction between the continental and sea plates based on the FEM technique. The analytical results were effectively used as a reference to construct the aPros-G system.

研究分野：土木工学

キーワード：GNSS 巨大地震 地殻変動 GEONET F3 GPS

### 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。この一般的に想定外と言われる巨大地震発生に起因し、地震の事前探知について学術的に困難とする考え方が広まる一方、様々な分野の研究者による短期・長期的な事前探知に関する様々なアプローチによる研究も開始された。

本研究グループでは、これまでに、国土地理院により日本全国約1,300点に展開されている地殻変動観測システム GEONET による GNSS のデータを解析することで、東北地方太平洋沖地震を含む東北地方の過去の地震においてプレスリップに関連すると思われる時系列変動を見いだした。また、それと並行し、GEONET によるデータを自動的に処理するシステム Automatic Processing System of GPS data: (aPros-G、アプロス-G) の原型を完成させていた。

以上のことから、アプロス-G を更に活用し、巨大地震の事前探知に有効な新たなパラメータを GEONET から提供される GNSS データから導き出し、当該パラメータの異常変動等を自動検知するソフト(システム)をアプロス-G に組み込むことで、「予測判定システム」の構築が可能になると考えた。

本研究課題は、このような背景と動機の下、開始した。

### 2. 研究の目的

「GNSS(GPS など)観測データ解析」と「地殻変動シミュレーション」の併用により、東北地方での発生が再び懸念される巨大地震を1週間単位で事前探知するための「予測判定システム」のプロトタイプを完成させる。

なお、「予測判定システム」は、「GNSS 観測データ解析」のシステム(研究開始当初のアプロス-G)内に、GNSS 観測データから導かれるパラメータの時系列変動の異常を自動検出する「自動検知ソフト(システム)」を組み込むことで構築する。

### 3. 研究の方法

以下の内容についてそれぞれ研究を遂行した。

#### (1) 「GNSS 観測データ解析」システムの改良

研究開始当初のアプロス-G に対し、GEONET の RINEX 形式の 30 秒サンプリングデータを自動処理する R 機能を、より高精度化するよう改良する。さらに、それを用いて、静的及び準動的な PPP(Precise Point Positioning) 解析を容易に行える環境にする。

また、下記(2)において新たに必要となる統計データ処理、マッピング処理機能を追加する。

#### (2) 「自動検知ソフト(システム)」及び「予測判定システム」の開発

改良した「GNSS 観測データ解析」のシステム(アプロス-G)を用い、GEONET の RINEX 形

式の 30 秒サンプリングデータ及び F3 データを利用して様々な解析を行い、巨大地震の事前探知に関連づくパラメータを見いだす。

そして、見いだされたパラメータ値の時系列変動の異常を自動検知するソフトをアプロス-G に組み込むことで、巨大地震発生の「予測判定システム」のプロトタイプを構築する。

#### (3) 地殻変動シミュレーションについて

海洋プレートと大陸プレートとの境界部分について、様々な仮定(摩擦係数、アスペリティ等)を設定し、簡易的な有限要素解析を行い、プレート型の巨大地震発生に伴う事前探知に繋がる大陸プレートの事前変動が、大陸側地表面での位置情報(GNSS データ)の変動として検知できることを示す。これにより、GNSS データを用いた巨大地震の事前探知には、その可能性があることを示す。

### 4. 研究成果

#### (1) 「GNSS 観測データ解析」について

既に関済済みであった研究開始当初のアプロス-G(図1)に対し、GEONET 観測点全てを対象に R 機能(RINEX 形式の 30 秒サンプリングデータを自動処理する機能)を改良した。これにより、高精度の静的および準動的な PPP 解析が一連の作業として実行可能となった。



図1 アプロス-Gの研究開始当初の構成

#### (2) 活性度係数 $I_a$ の事前探知への適用

アプロス-G の R 機能を用いた静的な PPP (S-PPP) 解析の結果、地殻変動の異常を検知するのに資する新たなパラメータを見いだした。30 秒サンプリングの RINEX データを 24 時間継続して得ることで導き独自に定義した「活性度係数  $I_a$ 」である。  $I_a$  は、24 時間を通じた地殻の日変動の大きさ(活性度)を表現するパラメータである。

$I_a$  の地震発生の事前探知パラメータとしての有効性についての検討の一例を以下に示す。

東北地方で発生した既往の被害地震を中心に、2014年11月22日発生 of 長野県神城断層地震(マグニチュード M6.7)などの内陸地殻内地震も対象に Ia の算定を実行した。この結果、Ia の時系列変動の変化パターンが地震発生の事前探知に利用できる可能性のあることを見いだした。

この結果より、アプロス-G の機能に追加モジュールとして Ia の算定システムを組み込んだ。

### (3) ひずみ成分の時系列変動の事前探知への適用

アプロス-G を使い、(2) で示した Ia とは異なる、地殻変動の異常を検知するのに資する新たなパラメータを見いだした。

2016年4月14~16日に2016年熊本地震の連続地震が発生し、甚大な被害をもたらされた。この地震は内陸地殻内地震の典型であり、当初の研究計画を発展的に拡大して、アプロス-G を用いたこの地震の「GNSS 観測データ解析」を集中的に行った。

その結果、地殻変動の変位ベクトルに加えて、GEONET 観測点を基本として構成した各三角網において算出したその空間変動である各種のひずみ成分(最大せん断ひずみ、体積ひずみなど)の時空間変動の解析は、異常検知に極めて有効な情報を提供するものであることを見いだした。特に、最大せん断ひずみ、体積ひずみなどの時系列変動には異常に関する短期的事前情報とともに被害地震発生の2~3年前に遡って継続的に現れる長期的事前情報が存在することが明らかになった。その一例を図2に示す。

図2は、2016年熊本地震で最大の被害が生じた地域の GEONET 観測点を基本として構成

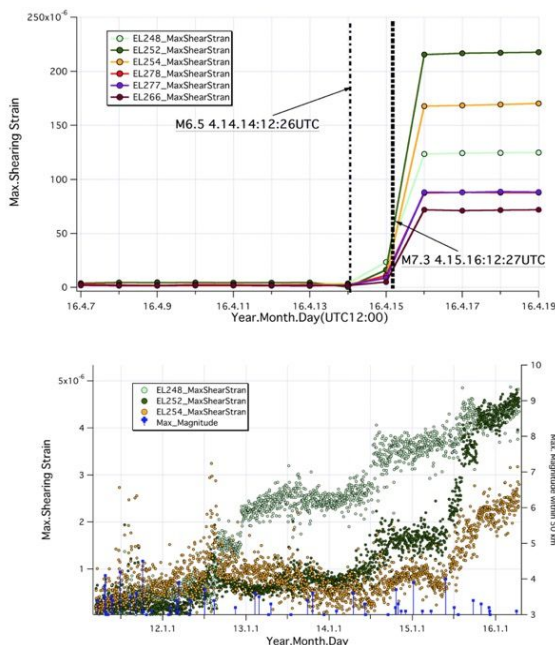


図2 2016年熊本地震における代表的領域での最大せん断ひずみの時系列変動  
(上図; 本震前後12日間、下図; 本震前の約5年間)

した各三角網を用いて算出した、代表的領域での最大せん断ひずみの時系列変動を示したものである。

図2の上図は、本震(2016年4月15日16時12分27秒UTC)に発生、マグニチュード M7.3)を挟んだ前後計12日間の時系列変動を、震央に近い6領域の三角網について示し、下図は、本震前の約5年間(2011年東北地方太平洋沖地震翌日の2011年3月12日から2016年4月14日まで)の時系列変動を、本震時に大きな最大せん断ひずみが生じた3領域の三角網について示している。下図から、本震時に大きな最大せん断ひずみが生じた領域では本震発生の2~3年前からひずみ蓄積が始まり、2つの領域で同じレベルの「飽和」と思われる状態に達して半年余りで被害地震の本震が発生していることがわかる。

これらの結果より、アプロス-G の機能に追加モジュールとして、各種のひずみ成分(最大せん断ひずみ、体積ひずみなど)の時空間変動の算定システムを組み込んだ。

### (4) 「地殻変動シミュレーション」について

海洋プレートの変形を考慮することに着目し、2次元の有限要素モデルにより、長さ400km、高さ100kmの2つの長方形で簡易化した海洋プレート(下部)と大陸プレート(上部)の境界滑りのシミュレーションを行なった。

海洋プレートの変形を考慮すると、下部の海洋プレートの右から左への移動をモデル化する際、海洋プレートを右端から押すのか、左端から引くのか、右端から押し同時に左端から引くのかの条件により観測される現象が異なる。上記の解析において、海洋プレートを剛体と仮定した場合も含めた4つのケースについて比較した結果、右端からの押しと、左端からの引きを同時に作用させた状態での解析が妥当と判断された。

地殻変動の時刻歴応答シミュレーションは、プレート間の滑りがない期間を静的釣合いの時系列解析で求め、滑り開始以後を運動方程式による動的解析で求めた。境界面の静止摩擦係数を一定とした場合は、巨大地震(全面滑りあるいはそれに近いもの)を短期的・長期的に事前探知できそうな滑りが発生しなかったが、アスペリティ(境界面の固着が強い部分)を模擬して静止摩擦係数の大きい部分を設けた場合は、事前探知が可能と思われる滑りが認められた。

結果の一例を図3に示す。図3は、10年間で、海洋プレートの移動開始後10,000年から11,500年までに両プレート境界面97節点(左端側節点番号509から右端側節点番号605まで)の中で、滑りが発生した節点を印で示したものである。このシミュレーションの条件設定においては、1,500年間に、図の上部に、で示す10回の巨大地震(プレート境界面上のほぼ全節点での滑りが発生)が起こり、その内6回(で示す)はそれぞれの

10 年前以内に局地的な滑りが発生しており、巨大地震の事前探知に活用できる現象である可能性が考えられた。

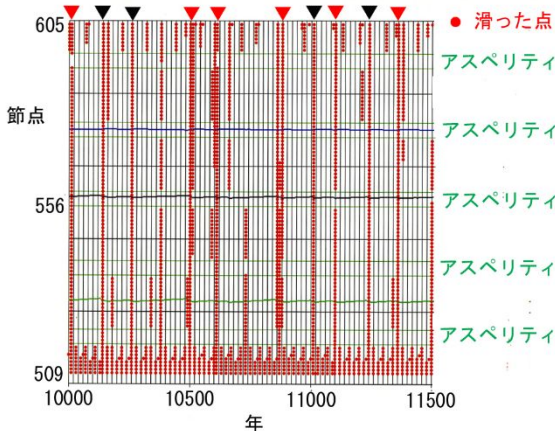


図 3 両プレート境界面の各節点における滑り発生有無の時刻歴応答シミュレーションの結果

また、これらプレート境界面での滑りが、GNSS 等で観測できる地表面の変位として現れ、「巨大地震発生前の地殻変動」として検知できる可能性も示した。

(5) 「自動検知ソフト(システム)」と「予測判定システム」のプロトタイプについて

被害地震発生の「予測判定システム」のプロトタイプとして、「GNSS 観測データ解析」システムであるアプロス-G に対して、巨大地震の事前探知に有効である可能性がある(3)で示した各種のひずみ成分(最大せん断ひずみ、体積ひずみなど)の時空間変動の算定システム(ST機能)を図4に示すように組み込み、構築した。

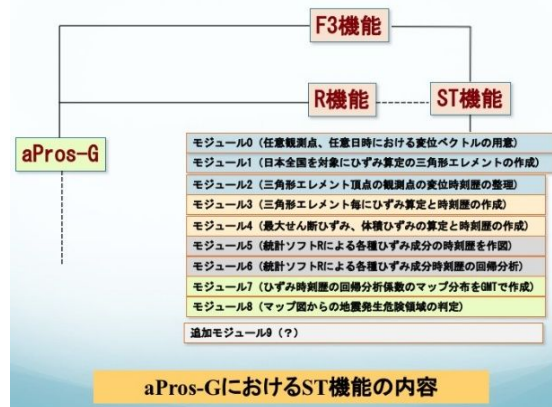


図 4 アプロス-G への自動検知システムの組み込み (ST 機能)

ST 機能は大別して、変位時刻歴の用意、各種ひずみ成分算定のための有限要素法で適用する GEONET 観測点を基本として構成する三角網の作成、各種ひずみ成分算定と時刻歴の作成、ひずみ時刻歴の作図と統計解析(各種時刻範囲における回帰分析)、ひずみ統計のマップ処理と判断などのモジュール群か

ら構成している。なお、ひずみ時刻系列図の作成と統計解析ではフリーウェアの統計解析ソフト R、マップ処理ではフリーウェアのマッピングソフト GMT を用いている。

ST 機能は、GEONET の F3 データを自動処理する F3 機能とは連続的に稼働できるように設計されている。一方、GEONET の RINEX 形式の 30 秒サンプリングデータを自動処理する R 機能とは、現時点での「予測判定システム」のプロトタイプにおいては、計算処理速度等の理由から、連続処理は対応できていない。全国に約 1,300 点の GEONET 観測点を対象とすると、全国のひずみ成分を算定するために構成される各三角網は約 2,500 個となり、各モジュールの処理は実行にかなりの時間を要する。さらに、各 GEONET 観測点には各種事情による観測データの欠損が生じることがあり、そのことに起因する対応には、本プロトタイプでは手動による判断とデータ処理の介入が必要となっている。

(6) 成果の国内外での位置づけと今後の展望

現在では地震発生の情報提供を目的に有料で運営する地震予測ビジネスが国内で発達している。これらは本研究課題と同じく、地殻変動観測の利用による地震発生予測を図るもの、あるいは電磁波の観測により地震発生予測を意図したもの、に大別される。前者では GEONET による GNSS データの鉛直成分の地殻変動値の単純な異常等を見つけるものであり、事前探知の信頼性については問題も多い。後者については、そもそもその原理についての妥当性から信頼性について否定的な意見もある。

このような状況の中で、本研究課題で見出した各種ひずみ成分には物理的意味があり、当初の研究目的である 1 週間単位での事前探知とはならなかったものの、各種ひずみ成分の時系列変動の地震発生の事前探知における有効性を有していると考えられる。そして、国外の研究、実務での応用との比較による位置づけとして、GEONET のような高い観測密度の地殻変動観測システムは世界的に皆無な状況を勘案すれば、その精密な観測データを有効利用して被害地震の事前探知に資すると考えられる本研究課題の成果は、大きな意義を有していると考えられる。

今後の展望として、「予測判定システム」のプロトタイプの機能を強化し、R 機能から ST 機能への連続処理を可能とさせ、実務的に発展を図る必要が求められるとともに、事例検証を重ねて、ひずみ成分の時系列変動の異常検知レベルの定義と設定に関する詳細な検討が必要であると考えられる。

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 4 件)

秋田 宏、小出 英夫、神山 眞、沢田 康次、千葉 則行、プレート相互の作用と変形を考慮した地震発生シミュレーション、東北工業大学紀要、査読有、第 38 号、2018、27 - 42、  
<http://id.nii.ac.jp/1241/00000063/>

神山 眞、三神 厚、小出 英夫、沢田 康次、秋田 宏、千葉 則行、GEONET の地殻変動データを利用した 2016 年熊本地震の被害解析、土木学会論文集 A1、査読有、Vol.73、No.4、2017、pp. 1\_270 - 1\_281、  
[https://doi.org/10.2208/jscejsee.73.1\\_270](https://doi.org/10.2208/jscejsee.73.1_270)

Makoto KAMIYAMA、Hideo KOIDE、Yasuji SAWADA、Hiroshi AKITA and Noriyuki CHIBA、Monitoring of Crustal Deformation and Its Application to Mitigation of Earthquake Disasters、Journal of JSCE Division A、査読有、Vol.5、No.1、2017、pp.206 - 225、  
[https://doi.org/10.2208/journalofjsce.5.1\\_206](https://doi.org/10.2208/journalofjsce.5.1_206)

神山 眞、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、日本地震工学会論文集、査読有、第 15 巻、第 7 号、2015、pp.428 - 443、  
[https://doi.org/10.5610/jaee.15.7\\_428](https://doi.org/10.5610/jaee.15.7_428)

〔学会発表〕(計 14 件)

秋田 宏、小出 英夫、沢田 康次、神山 眞、千葉 則行、プレート間滑りの地震発生シミュレーションにおける境界条件等の意外性、平成 29 年度土木学会東北支部技術研究発表会、2018

神山 眞、小出 英夫、沢田 康次、秋田 宏、千葉 則行、地殻変動データによる 2016 年熊本地震の震源断層の逆解析と被害分布の関係、平成 29 年度土木学会東北支部技術研究発表会、2018

神山 眞、三神 厚、小出 英夫、沢田 康次、秋田 宏、千葉 則行、2016 年熊本地震の地殻変動とサイズシシティ、第 37 回土木学会地震工学研究発表会、2017

神山 眞、小出 英夫、沢田 康次、秋田 宏、千葉 則行、2016 年熊本地震における地殻ひずみの日変動特性と地震発生過程、平成 29 年度土木学会全国大会 第 72 回年次学術講演会、2017

神山 眞、小出 英夫、沢田 康次、秋田 宏、千葉 則行、2016 年熊本地震の地殻変動とその逆解析、平成 28 年度土木学会東北支

部技術研究発表会、2017

神山 眞、小出 英夫、沢田 康次、秋田 宏、千葉 則行、三神 厚、南海トラフ領域における近年のサイズシシティと地殻変動の併合解析、日本地震工学会・年次大会 2016、2016

神山 眞、三神 厚、小出 英夫、沢田 康次、秋田 宏、千葉 則行、GEONET の地殻変動データを利用した 2016 年熊本地震の被害解析、第 36 回土木学会地震工学研究発表会、2016

神山 眞、小出 英夫、沢田 康次、秋田 宏、千葉 則行、サイズシシティと GNSS データの時空間変動からみた 3.11 地震の先行過程、平成 28 年度土木学会全国大会 第 71 回年次学術講演会、2016

秋田 宏、小出 英夫、沢田 康次、神山 眞、千葉 則行、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選定、平成 27 年度土木学会東北支部技術研究発表会、2016

神山 眞、小出 英夫、沢田 康次、秋田 宏、千葉 則行、被害地震に先行する地殻変動の活性度変化-3.11 巨大地震の例-、平成 27 年度土木学会東北支部技術研究発表会、2016

神山 眞、小出 英夫、沢田 康次、秋田 宏、千葉 則行、三神 厚、長野県神城断層地震の地殻変動 -PPP 特性値の日変動と地震発生-、日本地震工学会・年次大会 2015、2015

神山 眞、小出 英夫、沢田 康次、秋田 宏、千葉 則行、GNSS データによる地震時地殻変動の Mw、R 依存に関する回帰分析、平成 27 年度土木学会全国大会 第 70 回年次学術講演会、2015

## 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：20225353

### (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：00104133

神山 眞 (KAMIYAMA, Makoto)  
東北工業大学・工学部・名誉教授  
研究者番号：50085461

秋田 宏 (AKITA, Hiroshi)  
東北工業大学・工学部・名誉教授  
研究者番号：40085452

(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：80028133