

## 内陸断層・弾性衝突を考慮した伊豆半島周辺の地殻変動モデリング

A crustal deformation model around the Izu Peninsula considering inland faults and elastic collision

\*望月 一磨<sup>1</sup>、三井 雄太<sup>2</sup>

\*kazuma Mochiduki<sup>1</sup>, Yuta Mitsui<sup>2</sup>

1.静岡大学大学院総合科学技術研究科、2.静岡大学理学部地球科学科

1.Graduate School of Integrated Science and Technology, Shizuoka University, 2.Department of Geoscience, Faculty of Science, Shizuoka University

This study models crustal deformation focusing on inland faults and elastic collision around the base of the Izu Peninsula using GNSS(Global Navigation Satellite System) time-series data. First, in order to extract steady deformation, we correct the F3 solution data about antenna replacement from January., 2000 to January., 2010, and remove non-stationary variations using models of earthquakes, volcanic deformation and slow slip events. Next, we set elastic collisional power sources around the base of the Izu Peninsula, locking of plate boundaries, a deep creep of inland faults and a stationary volcanic deformation with a dislocation model and rotational motion of rigid bodies of the Izu micro plate and the Izu arc block (Nishimura, 2011). Then we perform an inverse analysis for the crustal deformation in this region.

The inversion result exhibits that elastic collisional power sources work at -12.7 mm/yr on the eastern foot of Mt. Hakone, 6.2 mm/yr on the northern foot, 11.6 mm/yr on the western foot and -0.5 mm/yr in the eastern Suruga bay. The plate boundaries are locked at 6 - 43.8 mm/yr beneath the Sagami trough, 3.6 - 39.3 mm/yr beneath the Suruga trough, 10 - 15.9 mm/yr in a southern edge of the Itoigawa Shizuoka Tectonic Line and 11 - 105.5 mm/yr on the boundary between the Izu micro plate and the Izu arc block. The inland faults creep at 23.3 mm/yr in deep extension of the Northern Izu fault zone and 23.4 mm/yr in deep extension of the Sagiriko Rokuroba fault group. In addition, the stationary volcanic deformation source at Mt. Mihara in the Izu-oshima island expands at  $2.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$ . Furthermore, for the Honshu, the Izu micro plate rotates at -3.1 °/Myr with the Euler pole of 36.57 °N, 139.72 °E and the Izu arc block rotates at -11.3 °/Myr with the Euler pole of 34.95 °N, 140.46 °E. The spatial variations of the elastic collisional power sources correspond to actual terrain around the base of the Izu Peninsula.

キーワード：弾性衝突、内陸断層、プレート沈み込み、火山活動、伊豆衝突帯、地殻変動

Keywords: elastic collision, inland fault, plate subduction, volcanic inflation, Izu collisional zone, crustal deformation

## 有限要素法を用いた断層すべりによる地殻変動の解析

## Analysis of crustal deformation due to slip across faults using finite element method

\*井田 喜明<sup>1</sup>、菊池 愛子<sup>1</sup>、戸田 則夫<sup>1</sup>\*Yoshiaki Ida<sup>1</sup>, Aiko Kikuchi<sup>1</sup>, Norio Toda<sup>1</sup>

1.アドバンスソフト株式会社

1.Advance Soft Co.

アドバンスソフト社では有限要素法を用いて断層すべりやマグマの移動に伴う地殻変動を解析するプログラム（プログラムの総称はFrontSTR/GEOS）の開発を進めている。このプログラムは、文部科学省次世代IT基盤構築のための研究開発「革新的シミュレーションソフトウェアの研究開発」の成果プログラムFrontSTRを有限要素法の計算に利用し、それに断層やマグマを表現する機能を独自につけ加えたものである。有限要素法の行列計算には繰り返し法の1種であるCG法を主に用いる。プログラムはパソコンでも大型計算機でも実行でき、並列計算にも対応できる。

有限要素法のメッシュは独自に開発したプログラムmeshgenで自動的に作成される。その手順はまず対象となる領域を六面体要素で分割して全体メッシュをつくり、そこに断層を組み込む。この2段階の操作は独立なので、断層を定義する際にメッシュを意識する必要がない。

全体メッシュは1個または複数のブロックで構成される。各ブロックは六面体要素で分割され、要素の大きさは一定であっても、位置とともに一定の割合で変化させてもよい。全体メッシュの作成時に、地表に接する最上部のメッシュの厚さを調整して地形を組み込むことができる。計算領域の側面と底を区切る人工的な境界には無限要素を設定して、境界条件の影響を抑えることができる。各要素の弾性定数は地震波速度の3次元分布と整合的に設定できる。

断層面は三角形や四角形の集合体で定義され、断層面上のすべりは三角形や四角形の頂点で指定されて内部に内挿される。断層は複数あってもよいが、互いに交差してはならない。また各々の断層は1つのブロックの内部におさまらなくてはならない。

全体メッシュに断層を組み込むときに、断層面が通る要素は断層面でさらに複数の要素に分割される。分割によって断層面上には新しい要素の境界となる節点がつくられるが、この節点は断層面の両側が独立に動けるように変位の値を2重にもつ。すべりや開口はこの2重変位の差によって表現される。有限要素法の計算を実行するときは、2重変位はMPC法で処理される。すなわち、2重変位はその他の変位とともに弾性平衡の条件と2重変位間の拘束条件を両方満たすように計算される。

このプログラムは断層の各点に指定された変位差によって生じる弾性変形の計算を基礎にする。粘弾性変形の効果は弾性変形に働く外力の形で計算に組み込めるので、この性質を利用して粘弾性による変形の緩和を時間とともに追跡することができる。粘弾性緩和の計算には変形によって生じる重力の効果も考慮される。断層面上の二重変位間の拘束条件を調整すれば、断層面に応力条件を設定することも可能である。

計算の事例として2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震を取り上げて、断層の形状や断層すべりの分布が地殻変動にどう影響するかを議論する。また、粘性率に適当な分布を仮定して、粘弾性による変形の緩和を推定する。さらに、この事例を用いて、断層すべりを二重変位で表現する利点について説明する。

キーワード：有限要素法、断層すべり、東北地方太平洋沖地震

Keywords: finite element method, fault slip, the great earthquake east off the northern district of Japan

## 西南日本における地震間の地殻変動:プレートの斜め沈み込みと前弧のブロック運動

## Interseismic Crustal Deformation in Southwest Japan: Oblique Plate Convergence and Forearc Block Motion

\*塩見 雅彦<sup>1</sup>、田部井 隆雄<sup>2</sup>、伊藤 武男<sup>3</sup>\*Masahiko Shiomi<sup>1</sup>, Takao Tabei<sup>2</sup>, Takeo Ito<sup>3</sup>

1.高知大院総合人間自然科学、2.高知大理、3.名大院環境

1.Graduate School of Science, Kochi Univ., 2.Faculty of Science, Kochi Univ., 3.Earthquake and Volcano Research Center, Nagoya Univ.

西南日本の地殻変動場は、フィリピン海プレートによる斜め沈み込みによる弾性変形が支配的である。GPS変位速度データの解析から、量的には小さいながらも、中央構造線(MTL)を境とする前弧スリバーのブロック運動を含んでおり、さらにMTL断層面の部分的な固着によるせん断変形が確認されている。地殻変動場の理解には、これらの定量化と分離が必要である。本研究では、プレート境界面上の固着分布、前弧スリバーのブロック運動、MTL面上の固着分布の同時推定を試みた。

解析には、2004~2009年における近畿から九州へ至る291点のGEONET最終座標解から算出したGPS3次元変位速度に加え、37点のMTLトラバース稠密GPS観測結果も併用し、合計328点の変位速度を使用する。この地殻速度場はREVEL (Sella et al., 2002)を基に、アムールプレート準拠で議論する。プレート境界面を深さ5kmから60kmまで1000枚以上の三角形要素群でモデル化し、さらにMTLは4つのセグメントに分割し、それぞれ下限深さ15km、傾斜角50度の矩形要素でモデル化した。

本研究では、同時推定にMCMC法を用いた。MCMC法は、マルコフ連鎖に基づくサンプリングから事後確率分布をパラメータの確率密度関数として求める手法で、パラメータが高次元であるようなモデルに対しても解を推定することができる。モデルの構成は次の通りである。前弧ブロック、背弧ブロック、フィリピン海プレートの運動をオイラー極によって算出し、さらに、ブロック間ではMTL面上の固着により弾性変形が生じていることから、すべり欠損モデルを適用し、前弧と背弧のブロック運動から算出された相対ブロック運動の値を上限として、MTL面上の固着率の推定を行った。また、前弧に対するフィリピン海プレートの相対運動速度をすべり欠損速度として、プレート境界面のグリーン関数に与え、固着率を推定した。固着率は0から1の値で表現し、1は完全な固着を示す。さらに、前弧スリバーの運動はほぼ純粋な右横ずれであるため、相対ブロック運動の方向が、MTL断層面の走向に直交する成分の二乗和が最小となるように先験情報を導入した。

解析の結果、プレート境界面のすべり欠損速度分布は、先行研究で得られたものと同程度であった。また、土佐湾沖の深さ15-25 kmにおいて60mm/yrを超えるすべり欠損速度を推定した。この領域は、1946年の南海地震の主破壊領域とほぼ一致する。さらに、前弧スリバーのブロック運動の相対速度は、約4mm/yrであった。MTL断層面の浅部の固着は、東部のほぼ完全な固着から西のセグメントに向かうにつれ、わずかに変化しながら固着が弱まる。セグメント間の歪蓄積率や地震発生間隔の違いが関連しているのか興味深い結果となった。

キーワード: マルコフ連鎖モンテカルロ法、中央構造線、西南日本、GPS観測

Keywords: Markov Chain Monte Carlo method, Median Tectonic Line, Southwest Japan, GPS observation

## GPS連続観測および繰り返し観測によって捉えられたアゾレス諸島プレート三重点のテクトニクスと火山性地殻変動

Tectonic and volcanic deformation at the Azores Triple Junction, observed by continuous and campaign GPS analysis

\*岡田 純<sup>1</sup>、アラウージョ ジョアン<sup>2</sup>、ボンフォーテ アレクサンドロ<sup>3</sup>、グウジェルミーノ フランチェスコ<sup>3</sup>、ロレンツォ マリア<sup>2</sup>、フェレイラ テレーザ<sup>2</sup>

\*Jun Okada<sup>1</sup>, João PM. Araújo<sup>2</sup>, Alessandro Bonforte<sup>3</sup>, Francesco Guglielmino<sup>3</sup>, Maria FP. Lorenzo<sup>2</sup>, Teresa JL. Ferreira<sup>2</sup>

1.気象庁気象研究所、2.アゾレス地震火山監視情報センター (CIVISA)、3.イタリア国立地球物理学火山学研究所 (INGV) カターニア支部

1.Meteorological Research Institute - Japan Meteorological Agency, 2.Centro de Informação e Vigilância Sismovulcânica dos Açores (CIVISA), 3.Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Catania

ポルトガルのアゾレス諸島は、ユーラシア、ヌビア、そして北米プレートが互いに接するプレートの3重点に位置し、地震・火山活動が活発な地域である (Gaspar *et al.* 2015)。北米プレートと他の2つのプレートの境界線 (いわゆる大西洋中央海嶺の部分) は明確に定義されている一方、ユーラシアとヌビアプレートの境界線は不明瞭であり、よくわかっていない部分が多い。地質・地球物理・地球化学に基づく先行研究は、このプレート境界部が、diffuse (ひずみが空間的に分散しているということ) かつ複雑なプロセスで形成されてきたことを示している。近年のGPSなどによる宇宙測地技術の応用は、こうしたdiffuseなプレート境界に対する理解 (例えば、Fernandes *et al.* 2004, 2006; Trota 2009; Marques *et al.* 2013) やプレート拡大域における火山活動の検出 (例えばFogo火山 - Trota 2009) に重要な貢献をもたらしている。しかしながら、広域テクトニクス場とそこに発生する火山活動との関係性やその時空間プロセスの詳細については十分な研究がなされていない。アゾレス諸島のサンミゲル島では、近年データの蓄積が進んでおり、そのような一歩踏み込んだ研究が可能となってきた。

本研究では、サンミゲル島に展開されているGPS連続観測点9点 (2008~2013年) と繰り返し観測のデータを解析ソフトウェアBernese5.0 (Dach *et al.* 2007) を用いて解析した。解析解を国際測地系ITRF2005に準拠させるため、アゾレス諸島外部の複数のIGS点基準点データを同時に解析している。プレートの角速度 (DeMets *et al.* 2010) との比較から、2011年から2012年にかけて群発地震の発生したFogo火山の東側で、ひずみ集中帯 (0.28 ppm/yrの伸長場) の存在が明らかとなった。その領域では、ユーラシア - ヌビアプレート間に予測されるひずみ速度の約半分が解消されていることがわかった。

プレート運動によるトレンドを除去したGPS時系列の解析により、Fogo火山周辺では、2011-2012年の群発地震の発生に関係したタイプの異なる2種類の地殻変動があることがわかった。一つは、Fogo山頂部を中心とする「全山規模の変動」であり、高周波の構造性地震の発生に対応している。もう一つは、Fogoの東側での「膨張-収縮反転」である。後者は、2012年8月のやや低周波の地震活動の急激な減衰に対応している。1965-66年の松代地震やイタリアのカンピ・フレグレイの火山危機 (1969-72年と1982-85年) との地殻変動の強い類似性は、Fogo火山の熱水系の存在を示唆しているかもしれない。Fogoの2011-2012年の火山活動については、次のような解釈が可能である：(1)全山規模の圧力源の増圧によって励起された地殻流体の流れが、選択的に広域ひずみの伸長場 (岩石中のクラックや割れ目の多い場所) へ促進された。(2)Fogoの東側における高圧間隙水のクラックへの流入は、地殻浅部を局所的に膨張させる一方で、岩石の破壊強度を低下させるため、やや低周波の地震を発生させた。(3)全山規模の膨張が収まり、間隙水圧が低下すると、間隙水のクラックからの流出に伴って岩石の体積は収縮し、地震活動は終息する (dilatancy recovery)。山頂圧力源について、遺伝的アルゴリズムを用いたインバージョン解析を行った結果、アゾレス諸島の広域応力場ならびにFogo火山周辺で卓越する応力場の特性と整合的なモデルが得られている。

キーワード：地殻変動、GPS、GNSS、プレートテクトニクス、アゾレス、火山測地学

Keywords: crustal deformation, GPS, GNSS, plate tectonics, Azores, volcano geodesy

## 火山性地殻変動における粘弾性緩和

## Visco-elastic relaxation in volcano deformation

\*山崎 雅<sup>1</sup>\*Tadashi Yamasaki<sup>1</sup>

## 1.産業技術総合研究所

## 1.Geological Survey of Japan, AIST

Satellite-based observation (GPS and/or InSAR) has precisely measured surface deformation, but by itself does not derive a mechanism of the deformation. We therefore need to employ some theoretical model in order to understand characteristic deformation pattern for a given source mechanism, only based on which the deformation source mechanism can be objectively deduced from the observation. Magmatic activity in depth is particularly considered as the source mechanism in this study. We employ a parallelized 3-D finite element code, OREGANO\_VE [e.g., Yamasaki and Houseman, 2015, *J. Geodyn.*, 88, 80-89], to solve the linear Maxwell visco-elastic response to a given internal inflation/deflation of magma chamber. In a rectangular finite element model domain, the crust is mechanically two-layered, in which an elastic layer with thickness of  $H$  is underlain by a visco-elastic layer, but the entire mantle behaves as visco-elastic material. A depth-dependent viscosity (DDV) is adopted for the visco-elastic crust, where the viscosity exponentially decreases with depth due to temperature-dependency:  $\eta_c = \eta_0 \exp[c(1 - z/L_0)]$ , where  $\eta_0$  is the viscosity at the bottom of the crust,  $c$  is a constant;  $c > 0$  for DDV model and  $c = 0$  for uniform viscosity (UNV) model,  $z$  is the depth, and  $L_0$  is a reference length-scale. The visco-elastic mantle is contrarily assumed to have a spatially uniform viscosity  $\eta_m$ . A sill-like magma chamber is approximated as a spheroid, and its inflation/deflation is implemented by using the split node method developed by Melosh and Raefsky [1981, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 71, 1391-1400]. We first employ UNV model with  $c = 0$ , which shows that visco-elastic relaxation abates the inflation-induced surface uplift with time; The post-inflation subsidence would erase the uplift in  $\sim 50 - 100$  times Maxwell relaxation time of the crust unless the inflation occurs within the uppermost elastic layer. The rate of the subsidence is governed by a depth of the inflation and the equatorial radius of the sill; but the latter is not important for the earliest post-inflation period. Time-dependent inflation always accompanies visco-elastic relaxation, and any significant surface uplift is not expected if the inflation has occurred over the time-scale greater than  $\sim 50 - 100$  times crustal relaxation time. DDV model with  $c > 0$  is also employed in this study to examine how a spatio-temporal deformation pattern at the surface is deviated from that for UNV model. The predicted model behaviour shows that UNV model behaviour approximates DDV model behaviour, but the apparent UNV which best fits a DDV displacement history depends on distance from the centre of the inflation; smaller viscosities are required at greater distances from the centre of the inflation. Such a model behaviour would expect that the spatio-temporal ground movement also depends on the depth of the sill inflation. Furthermore, a UNV model behaviour that the post-inflation subsidence depends on the thickness of the uppermost elastic layer requires us to examine the DDV model behaviour in terms of an effective elastic thickness for a given DDV structure. The model predictions obtained in this study provide important insights into geodetically detectable ground movement in volcanic provinces.

キーワード：火山性地殻変動、粘弾性緩和、マックスウェル緩和時間

Keywords: Volcano deformation, Visco-elastic relaxation, Maxwell relaxation time



## 2015年11月14日に薩摩半島西方沖で発生した地震による地殻変動

Crustal deformation by the West Off Satsuma Peninsula earthquake occurred on November 14, 2015

\*中尾 茂<sup>1</sup>、八木原 寛<sup>2</sup>、平野 舟一郎<sup>2</sup>、後藤 和彦<sup>2</sup>、内田 和也<sup>3</sup>、清水 洋<sup>3</sup>

\*Shigeru Nakao<sup>1</sup>, Hiroshi Yakiwara<sup>2</sup>, Shuichiro Hirano<sup>2</sup>, Kazuhiko Goto<sup>2</sup>, Kazunari Uchida<sup>3</sup>, Hiroshi Shimizu<sup>3</sup>

1.鹿児島大学大学院理工学研究科地球環境科学専攻、2.鹿児島大学大学院理工学研究科附属南西島弧地震火山観測所、3.九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター

1.Department of Earth and Environmental Sciences, Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University, 2.Nansei-Toko Observatory for Earthquakes and Volcanoes, Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University, 3.Institute of Seismology and Volcanology, Kyushu University

The earthquake (JMA Magnitude 7.1) occurred on November 14, 2015 in the area of west off Satsuma peninsula. The epicenter is located in Okinawa Trough where is in about 160 km west from Makurazaki City in Kagoshima Prefecture. This earthquake is one of the largest earthquakes in this area. Seismicity in this area is low in last twenty years. Two continuous GNSS sites are operated by Kagoshima University, one is UJIS site in Uji island which is 84 km to east from the epicenter and the other is MESM site in Meshima island which is 121 km north from the epicenter. At UJIS seismic observation is also operated by Kagoshima University and it is operated by Kyushu University at MESM. We went to those sites in order to get GNSS and seismic data because GNSS and seismic data are not telemetered at those sites. In this research, co-seismic crustal deformation and activity of aftershocks are reported. We relocated the main shock and aftershock until 10:00 on November 16. Length of aftershock area is about 60 km. Its Strike is the same of Okinawa Trough. The epicenter of the main shock is located at the south-west end of the aftershock area and maximum aftershock, which is occurred on November 15, is at north-east end. Activity of aftershock in northern part of aftershock area is high. However, in southern part it is low except aftermath of occurrence of the main shock. GNSS data analysis is by Bernese GNSS software Ver. 5.2 with CODE precise ephemeris. Daily site coordinates of UJIS and MESM are calculated with GEONET sites. Coseismic deformation is estimated by the difference between two days averages before and after the main shock. Displacement at UJIS and MESM is 0.82 cm and 0.65 cm, respectively. The theoretical coseismic deformation is estimated by a strike slip fault model (Okada, 1992). Fault length, strike, dip angle and fault position are estimated by the length of aftershock area. Fault width is assumed a half of the fault length. Amount of fault slip is estimated by the relationship between earthquake magnitude and moment (Sato, 1979). JMA moment magnitude 6.7 is used (JMA, 2015). Theoretical displacement at UJIS and MESM is 1.3 cm and 1.1 cm. Direction of observed displacement is coincident with that of theoretical displacement. However, amount of observed displacement is smaller than theoretical one.

## 2016年台湾美濃地震による地表面変動

## Surface deformation associated with the Meinong, Taiwan, earthquake

\*橋本 学<sup>1</sup>\*Manabu Hashimoto<sup>1</sup>

1.京都大学防災研究所

1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

2016年2月6日、台湾南部高雄市付近を震源とするMw6.4の地震が発生し、台南市でビルの倒壊による100名以上の犠牲者が出る等、大きな被害が発生した。この地震による地表面変動を検出するために、宇宙航空研究開発機構（JAXA）が運用するALOS-2/PALSAR-2画像を解析した。

地震後の観測は、2月9日に北行軌道から高分解モードで、14日に南行軌道から広域観測モードで行われた。特に、広域観測モードの観測は震央を含む台湾南部をカバーし、変動の全体像を議論することができる。Gammaを用いて、2パス干渉処理を行った。DEMはASTER-GDEM ver. 2を用いた。広域観測モードの干渉画像に、20km×20km四方の最大9 cm程度の視線距離伸長の領域と、その西隣に南北約20km×東西約10kmの最大12cmにおよぶ視線距離短縮領域が認められた。西側の視線距離短縮領域は、高分解モードの干渉画像に認められ、この地域は隆起したものと考えられる。これらの観測結果派、現地台湾国立成功大学のグループによるGNSS観測結果とデコルマの逆断層運動とする解釈（Ching et al., 2016, personal communication）と整合する。興味深いのは、さらに西側に2つの視線距離短縮領域に挟まれた視線距離伸長の領域があることである。この視線距離伸長領域の周辺部では、道路等に亀裂も見つかったという報告がある（Ray Chuang, personal communication）。この結果は、デコルマの西端に副次的な断層運動が生じたことを示唆する。台南市の北東部にも視線距離伸長領域を検出した。この地域は、河川に沿った沖積平野であることから、液状化現象が生じたものと考えられる。

3月に現地を訪れ、特に変動域を中心に調査する予定である。この結果も合わせて報告する。

ALOS-2/PALSAR-2画像は、地震予知連絡会SAR解析WGの活動の一環として、JAXAより提供されました。ALOS-2/PALSAR-2画像の所有権・著作権はJAXAにあります。

キーワード：2016年台湾美濃地震、地表面変動、合成開口レーダー、ALOS-2/PALSAR-2

Keywords: 2016 Meinong Taiwan earthquake, surface deformation, SAR, ALOS-2/PALSAR-2

## Block Rotation and Intra-plate Deformation in Java, Indonesia based on GPS observations

\*Henri Kuncoro<sup>1</sup>, Satoshi Miura<sup>1</sup>, Irwan Meilano<sup>2</sup>, Susilo Susilo<sup>3</sup>

1.Graduate School of Science, Tohoku University, 2.Geodesy Research Division, Institute Technology of Bandung, 3.Geospatial Information Agency of Indonesia

Using the 1998-2013 horizontal velocity field including continuous and campaign Global Positioning System (GPS) phase data, we interpret the kinematics of Sunda Block and the present deformation of Indonesia. Four major earthquakes, the 2006 Java (M7.7, e.g. Ammon et al., 2006), The 2009 West Java (M7), and the 2012 Indian Ocean earthquakes (M8.6 and 8.2) occurred around southern boundary of the Sunda Block that affected the horizontal velocity field within the block. Since we only have the short span of time series for several sites especially in the Java island, we should remove the offsets and the exponential or logarithmic trends in the time series due to the earthquakes. By means of TDEFNODE (McCaffrey, 2009), we invert GPS site velocities simultaneously to estimate the Euler rotation parameter of blocks, earthquake slip vectors, and uniform horizontal strain rate tensor within the blocks. We constructed several block models for the Sunda Block kinematics and deformations. We assume one to four faults extending from the western part off the southern coast of Java and estimate the slip distributions. We also assume the different constraints on the nodes on these faults. From a series of the block models, we determine a preferred model by applying F-distribution tests between two models. The preferred model here is the one consisting of four faults along the java trench with unconstrained nodes without a homogeneous strain rate tensor, and produces the reduced chi-square of 0.754. This model generates the Euler rotation parameters of  $48.917^\circ\text{N}$  for latitude,  $86.876^\circ\text{W}$  for longitude, and  $0.330 \pm 0.002^\circ/\text{Myr}$  for angular velocity with an error elliptic axes of  $0.96^\circ$  and  $0.15^\circ$  for the pole location. The distributions of interseismic locking on the plate boundary along the Java trench demonstrates the low coupling rate of  $\sim 30$  mm/yr in the western part, the very low rate  $< 10$  mm/yr in the middle part, and the very high rate of  $\sim 65$  mm/yr in the eastern part. The residual velocities derived from this model indicate the effect of the postseismic deformation in the western part of Java and the extensional pattern in the eastern part of Java, which may suggest volcanic deformation.

## References:

Ammon, C. J.; Kanamori, H.; Lay, T.; Velasco, A. A. (2006), "The 17 July 2006 Java tsunami earthquake" (PDF), *Geophysical Research Letters* (American Geophysical Union) 33 (24): 1, doi:10.1029/2006gl028005

McCaffrey, R. (2009), "Time-dependent inversion of three-component continuous GPS for steady and transient sources in northern Cascadia", *Geophysical Research Letters*, 36, L07304, doi:10.1029/2008GL036784

Keywords: Sunda Block, Euler rotation, Block kinematics

## 水準測量より明らかにした東北地方太平洋沖地震後の鳴子地域の上下地殻変動

Vertical displacement in Naruko Volcano area after the 2011 Tohoku earthquake deduced from precise leveling survey

\*高橋 菜緒子<sup>1</sup>、畠山 雅将<sup>1</sup>、百合本 はる妃<sup>1</sup>、本田 雄生<sup>1</sup>、塚本 雄也<sup>2</sup>、後藤 章夫<sup>3</sup>、太田 雄策<sup>4</sup>

\*Naoko Takahashi<sup>1</sup>, Masayuki Hatakeyama<sup>1</sup>, Haruhi Yurimoto<sup>1</sup>, Yuuki Honda<sup>1</sup>, Yuya Tsukamoto<sup>2</sup>, Akio Goto<sup>3</sup>, Yusaku Ohta<sup>4</sup>

1.東北大学理学部地球惑星物質科学科、2.東北大学大学院理学研究科地学専攻、3.東北大学東北アジア研究センター、4.東北大学大学院理学研究科附属地震・噴火予知研究観測センター

1.Division of Earth and Planetary Materials Science, Faculty of Science, Tohoku University,

2.Department of Earth Science, Graduate School of Science, Tohoku University, 3.Center for

Northeast Asian Studies, Tohoku University, 4.Research Center for Prediction of Earthquakes and

Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University

2011年3月11日の東北太平洋沖地震に伴い、東北地方を中心に大きな地殻変動が生じた。海岸付近では1mを越える沈降が起き、沈降量は内陸（西）に行くに従い小さくなるのがGEONETの観測で示されている（<http://www.gsi.go.jp/common/000059956.pdf>）。東北大学理学部地球惑星物質科学科の夏季フィールドセミナーでは、内陸まで及んだ上下地殻変動を検出すべく、2011年8月に、宮城県鳴子地域をほぼ東西に走る国道47号線に沿った二等水準路線で、10kmに渡り水準測量を行った。その結果、太平洋側（東側）ほど大きく沈降しているという調査前の予想に反し、2009年の国土地理院の測量結果との比較により、この区間では地震に伴う沈降が内陸側（西側）ほど大きいことが示された（塚本ほか、2014）。Ozawa and Fujita (2013), Takada and Fukushima (2013)はInSAR解析により、栗駒山から鳴子にかけての火山地帯で、地震に伴い沈降が起こったことを明らかにした。測量区間はこの沈降域にかかっており、2011年の測量結果はこの変動を捉えていたと解釈された。その後の変動有無を確認するため、2013年8月に同じ路線で再度測量を行ったところ、沈降が2011年の夏以降も続いており、その変動パターンが2009-2011年で得られた結果とほぼ同じであることがわかった（塚本ほか、2014）。

これら過去2回の測量結果を踏まえて、さらにその後の変動を検出するために、我々は2015年8月27日-31日に、過去2回と同じ二等水準路線区間（東から水準点番号 047-064, 066, 068, 070, 072, 074；以下BM64などと表記）の水準測量を行った。標尺にはLeica GPCL3, 水準儀にはLeica DNA03を用いた。いずれの水準点間も往復測量を行い、往復残差はすべて一等水準測量の許容範囲内に収まった。

2015年8月の測量結果を2013年8月と比較すると、BM64を基準としたときのBM66, 68, 72, 74はそれぞれ7.6mm, 14.6mm, 31.8mm, 36.2mm沈降しており、変動量こそ小さくなったものの、2009-2013年で得られた結果と同様に沈降が続いていることが確認された。これに対し、BM70だけは4.6mmの隆起に転じていた。測量区間内で隆起が確認されたのはこれが初めてである。

東北大学によって整備された、国道47号線にほぼ平行するGPS路線で上下余効変動を見ると、水準測量を行った区間は、東側の隆起が西側の沈降へと遷移する位置に相当する。BM64と経度がほぼ等しい0174を基準に見ると、測量区間に対応する西側の2点はいずれも沈降し続けており、測量結果と調和的である。一方、BM70で見られた隆起に対応する変動は見えていない。

国土地理院による1969年と2009年の水準測量結果を比較すると、BM68に対して72と74は隆起しているのに対し、BM70は沈降している。Prima and Yoshida (2010)やOgawa et al. (2014)によると、鳴子カルデラのリムの東端がBM68と70の間を横切っていると見られる。BM70の特異な変動は、このような局地的な地質構造が影響しているかもしれない。

キーワード：東北地方太平洋沖地震、鳴子カルデラ、水準測量、沈降

Keywords: Great East Japan Earthquake, Naruko caldera, precise leveling survey, subsidence

伊豆の群発地震（1997年3月）の前兆的歪・傾斜変動とM5.5地震の発生について

Precursory Strain and Tilt Variations of Earthquake Swarm Occurring in Izu Peninsula in March 1997 and Occurrence of M5.5 Earthquake.

\*石井 紘<sup>1</sup>

\*Hiroshi Ishii<sup>1</sup>

1.公益財団法人 地震予知総合研究振興会 東濃地震科学研究所

1.Tono Research Institute of Earthquake Science, Association for the Development of Earthquake Prediction

伊豆半島には1995年、1996年、1997年と1998年の4回活発な群発地震が発生した。今回は1997年3月伊豆半島に発生した群発地震について前兆的な歪・傾斜変動とM5.5地震の発生に至る変動について検討した結果を報告する。東京大学地震研究所はボアホール地殻活動総合観測装置を群発地震が発生している地域に設置し観測を行っていた。この装置は歪計、傾斜計、地震計、磁力計や温度計を搭載している。群発地震の発生に対応して歪計および傾斜計に異常な変動が観測されている。予備的な解析結果は予知連会報等に報告してあるが改めて解析を試みた結果を報告する。

群発地震は3月3日10時30分頃から始まりマグニチュード5.5の大粒の地震が23時9分に発生している。

明らかになってきた主な点は以下のようなものである。

1. 群発地震発生から震源の深さは大体200m/hour程度の割合で浅くなりM5.5の大粒の深度の浅い地震が発生した
  2. 下降ベクトルの図を作成して変化を見ると傾斜計には群発発生前の3月2日頃から通常の変動とは異なる変化が記録されており、群発地震発生後に変動が加速しM5.5が発生した
  3. 主歪の変動は群発地震発生後にそれまでと異なる異常変動を記録し、変動が加速してM5.5が発生した
  4. 群発地震発生前から終了までの傾斜・歪変動の様子が明らかになった
- そのほか震源分布、深度などと傾斜・歪変動との関連性についても議論する。

キーワード：前兆変動、伊豆群発地震、地殻活動総合観測装置、歪変動、傾斜変動

Keywords: Precursory Phenomena, Earthquake Swarm in Izu Peninsula, Multi-component Borehole Instrument for Crustal Activity Observation, Strain Variation, Tilt Variation

地下水流動の気圧応答を用いて推定された地震に伴う透水性変化

Permeability change due to the earthquake estimated by using atmospheric effect on groundwater migration

\*向井 厚志<sup>1</sup>、大塚 成昭<sup>2</sup>、福田 洋一<sup>3</sup>

\*Atsushi Mukai<sup>1</sup>, Shigeaki Otsuka<sup>2</sup>, Yoichi Fukuda<sup>3</sup>

1.福山市立大学都市経営学部、2.神戸学院大学人文学部、3.京都大学大学院理学研究科

1.Faculty of Urban Management, Fukuyama City University, 2.Faculty of Humanities and Sciences, Kobe Gakuin University, 3.Graduate School of Science, Kyoto University

大気荷重変化による地下水流動は帯水層の水理学的特性に依存しており、観測された湧水量および間隙水圧の気圧応答には周辺岩盤の透水性構造に関する情報が含まれている。本発表では、断層破碎帯で観測された湧水量および間隙水圧の気圧応答を用いて、2011年東北地方太平洋沖地震に伴う透水係数および貯留係数の変化を推定した結果について報告し、透水性変化の原因について考察した。

断層破碎帯はその周辺岩盤と比べて透水性が高く、大気荷重による地下水流動は主に破碎帯内で生ずると考えられる。向井・他(2015)は、断層破碎帯内で水平方向にのみ移動する一次元地下水流動をモデル化し、大気荷重変化に伴う湧水量変化の周波数依存性を表す理論式を導出した。この理論式を観測された湧水量の気圧応答に当てはめることによって、透水係数 $k$ と貯留係数 $S$ の積 $k \cdot S$ の変化を推定することができる。

同じモデルを用いて、断層破碎帯内における間隙水圧の気圧応答の理論式を導出することもできる。このとき、その理論式は透水係数と貯留係数の比 $S/k$ を変数にもつ。その結果、湧水量と間隙水圧の気圧応答観測値を同時に解析することによって、透水係数と貯留係数の変化を個々に推定することが可能となる。

2010年8月～2011年12月に六甲高雄観測室で得られた湧水量および間隙水圧の観測値、ならびに神戸地方気象台の地上気圧観測値を用いて、同観測室が貫く万福寺断層破碎帯の透水係数および貯留係数の変化を推定した。このとき、観測期間を512データ(21.3日)の解析区間で分割し、FFTを用いた周波数解析によって各区間の気圧応答の周波数依存性を計算した。その後、得られた気圧応答に一次元地下水流動モデルの理論式を当てはめ、最適なモデル・パラメータとして透水係数および貯留係数の変化を推定した。

推定された貯留係数は地震直後に約3倍に増大した。向井・大塚(2012)は、水源から観測室へ流れ出す地下水流動モデルを用いて六甲高雄観測室周辺の水源の間隙水圧を推定し、水源の間隙水圧が地震直後に低下し、数ヶ月間回復しなかったことを報告した。これらのことから、亀裂を目詰まりさせていた泥分等が地震動によって流出し、水源を含め、周辺岩盤から間隙水が過剰に排出されたことが示唆される。

一方、推定された透水係数は地震直後に約4割縮小した。このことは、一見、地震動が泥分等を流出させたとの上記の推察と矛盾する。これに関しては、地震動による透水性の変化が周辺岩盤で非一様に生じた可能性が考えられる。周期的な気圧応答による間隙水の移動は狭い範囲に限定されることから、本発表で推定された透水係数は観測室近傍の透水性を反映していると考えられる。地震動によって亀裂から流出した泥分等が間隙水の出口である観測室近傍に集中して亀裂に目詰まりを引き起こした結果、観測室近傍では地震直後に透水性が低下した可能性が示唆される。

キーワード：透水性変化、地下水流動、2011年東北地方太平洋沖地震

Keywords: permeability change, groundwater migration, 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

## 地殻変動即時把握について

## Real-time monitoring of crustal deformation

露木 貴裕<sup>1</sup>、近澤 心<sup>1</sup>、棚田 理絵<sup>1</sup>、\*木村 久夫<sup>1</sup>、長谷川 浩<sup>1</sup>、沼野 あかね<sup>2</sup>、山田 尚幸<sup>1</sup>、中村 雅基<sup>1</sup>、橋本 徹夫<sup>1</sup>、宮岡 一樹<sup>3</sup>

Takahiro Tsuyuki<sup>1</sup>, Sin Chikazawa<sup>1</sup>, Rie Tanada<sup>1</sup>, \*Hisao Kimura<sup>1</sup>, Hiroshi Hasegawa<sup>1</sup>, Akane Numano<sup>2</sup>, Naoyuki Yamada<sup>1</sup>, Masaki Nakamura<sup>1</sup>, Tetsuo Hashimoto<sup>1</sup>, Kazuki Miyaoka<sup>3</sup>

1.気象庁、2.静岡地方気象台、3.気象研究所

1.Japan Meteorological Agency, 2.Shizuoka Meteorological Office, 3.Meteorological Research Institute

気象庁は、東海地震の前兆を捉えることを目的として、東海地域周辺の地殻変動を監視している。これまでの監視システムでは、個々の観測データの変化量について、定常状態で変化しうるレベル（ノイズレベル）を越える異常を検知する（小林・松森（1999））ことにより監視を行ってきた。昨年度導入した新システムでは、さらにスタッキング法（宮岡・横田（2012））により作成したデータの異常を自動検知させて変動源の位置を把握するとともに、断層モデル推定までを自動で行うことにより、地殻変動の即時的異常把握を目指している。

スタッキング法は、あらかじめプレート境界面上のグリッドごとに断層すべりを想定し、このすべりによる理論値の極性を基にして観測値を重ね合わせることで観測データのシグナルを増幅し、変化を検知するものであるが、観測点の配置やノイズレベル等によっては、実際にすべりの生じていないグリッドのスタッキングデータにも変化が生じてしまう場合がある。そこで、このような偽の変化を自動的に除外するために、観測された変化量と仮定した断層すべりによる理論変化量が似ている程度の指標として決定係数を閾値に用いて、変化を検知したグリッドの位置を限定する手法を開発し、これを新システムに採用した。また、異常を検知したスタッキングデータを基に、改めて断層モデル推定を行うことによって、結果の信頼性を高めることを目指している。この新システムにより、プレート境界の断層すべりがこれまでより早く正確に検知できることが期待される。

この新システムに導入した解析手法の概要と、短期的ゆっくりすべりによる異常変化の検出事例について紹介する。

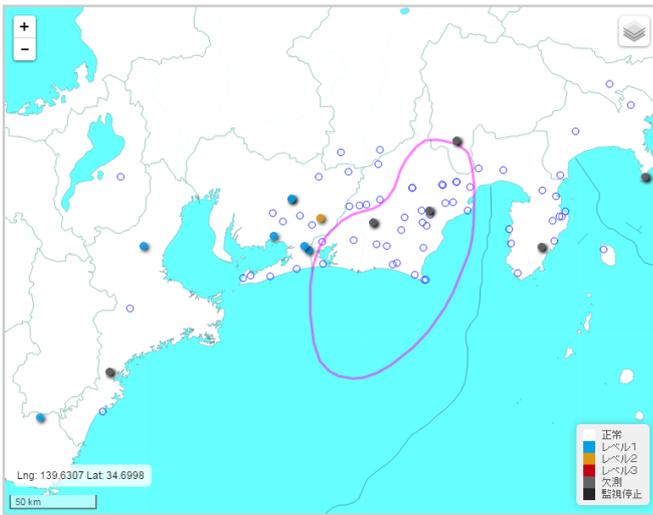
キーワード：ひずみ計、スタッキング、ゆっくりすべり

Keywords: strainmeter, stacking, slow slip event

地殻活動総合監視画面

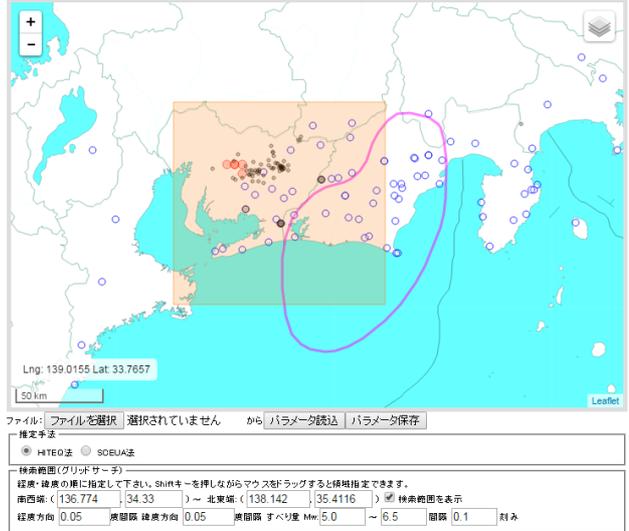
表示時刻: < 2016/1/5 8:35 > | 最新 | 60分ごと | 自動更新 | 更新停止 | 動画 | 印刷

2016/1/5 8:35 現在の状況



断層推定結果

観測値設定 | すべり推定開始 (ID = 95aa100ac420) | 推定位置登録  
 2016/01/05 00時~2016/01/06 23時の変化量を使って得られた推定結果



キネマティックPPPデータ解析にもとづく2011年東北地方太平洋沖地震直後の余効変動にともなう内陸ひずみ異常の特徴

Characteristic of inland strain anomalies caused by the postseismic deformation immediately after the 2011 Tohoku-Oki earthquake based on kinematic PPP data analysis

平田 雄一郎<sup>1</sup>、\*太田 雄策<sup>1</sup>、大園 真子<sup>2</sup>、日野 亮太<sup>1</sup>  
Yu'ichiro Hirata<sup>1</sup>, \*Yusaku Ohta<sup>1</sup>, Mako Ohzono<sup>2</sup>, Ryota Hino<sup>1</sup>

1.東北大学大学院理学研究科附属地震・噴火予知研究観測センター、2.山形大学理学部地球環境学科  
1.Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, 2.Department of Earth and Environmental Sciences, Faculty of Science, Yamagata University

We have investigated spatial and temporal development of anomalous crustal strain in the northeastern Japan region associate with a postseismic deformation immediately after the 2011 Tohoku-Oki earthquake. Ohzono et al. (EPS, 2012) found the characteristic strain anomalies associate with the step-like stress change caused by the large coseismic displacement. Their results, however, should contaminate the crustal deformation by the early postseismic within one day.

Based on these backgrounds, we adopted the kinematic precise point positioning (PPP) analysis for understanding the crustal deformation caused by the early postseismic immediately after the mainshock. We used GIPSY-OASIS II Ver. 6.3 software for kinematic PPP processing of whole GEONET sites in 10 March 2011. We applied every 6 hours nominal wet and dry zenith tropospheric delay value as a priori information based on the ECMWF global numerical climate model. For the coordinate time series and tropospheric parameters, we assumed white noise and random walk stochastic process, respectively. These unknown parameters are very sensitive to assumed process noise for each stochastic process. Thus, we searched for the optimum two variable parameters; wet zenith tropospheric parameter and its gradient.

Furthermore, we applied the principal component analysis for eliminate the spatial correlated noise from the kinematic PPP time series. The strain calculation from the displacement data is based on the method developed by Shen et al. (JGR, 1996). Obtained dilatation strain clearly shows the inhomogeneous distribution. Compared with the seismic tomography results by Nakajima et al. (JGR, 2001), large expansion area by this study mostly just correspond to the low Vp region at the 10km depth. This results suggested that these localized expansion areas correspond to the lower elastic moduli in the upper crust and/or shallower portion. Furthermore, we assessed the amount of strain anomalies by the early postseismic deformation relative to strain anomalies by the coseismic deformation. Our early postseismic results suggest that the 20-30% of strain anomalies by Ohzono et al. (2012) may be caused by the postseismic deformation. This result suggested that the early large postseismic deformation behaved as "step-like" stress change to the crust as well as the coseismic deformation.

GNSSのキネマティック解から見る2011年東北沖地震直前と直後の動きとピラーの熱膨張  
Surface movements immediately before and after the 2011 Tohoku-oki earthquake from  
kinematic solution of GNSS and thermal expansion of the pillars

\*三枝 優輝<sup>1</sup>、日置 幸介<sup>1</sup>

\*Yuki Saegusa<sup>1</sup>, Kosuke Heki<sup>1</sup>

1.北海道大学大学院理学院自然史科学専攻

1.Department of Natural History Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University

2011年3月11日に発生したMw9.0の東北地方太平洋沖地震（以下、東北沖地震と呼ぶ）は、プレートの沈み込み境界である日本海溝における断層すべりによって生じ、その地震と同時に日本列島は大きく東向きに変位した。Ohta et al. (2012) は、東北沖地震の地震直前の地表の動きについて、GNSS局の三時間毎の測位解を報告している。またHino et al. (2014) は、海底圧力計を用いて震源に近い海底の上下運動について地震直前の観測結果をより高い時間分解能で報告している。さらにHirose (2011)はHi-net傾斜計で地震直前の傾斜変化について報告している。それらのデータに共通して見られるのは、本震二日前の前震の余効変動が徐々に減衰する様子であり、地震直前に特別な動きは見られていない。

一方地震直後のGEONET、全球航法衛星システム(GNSS)局の動きについては、キネマティック解析の結果がいくつか報告されている。例えばMunekane (2012)は、比較的大規模な前震に伴う変動や本震の余効すべりにともなう変動をEOF解析によって抽出しており、またMitsui & Heki (2012)は地球自由振動に伴う周期的な動きを解析した。Munekane (2012)によると、それらの実際の地殻変動に加えて、地震と関係なく均一な北上と南下が見られる時刻があったことが報告されている。それらはアンテナが取り付けられた金属製ピラーの日向と日陰の温度差によって生じた、熱膨張の影響だろうと解釈されている。

本研究では、地震直前直後に比較的広域で均一に見られた水平変位について、より細かい時間および空間スケールで、これらの変位と日照を関係付けられないかを議論する（添付図参照）。用いたデータは、GNSSキネマティック測位データについてはMitsui and Heki (2012)と同じくGEONET局（GNSS測位局）の30秒ごとの位置データ（UNAVCOの岩淵博士によるRTnetを用いた精密単独測位）を、日照の時空間分布については気象庁HP (<http://www.data.jma.go.jp/risk/obsdl/index.php>)から得られた気象データを用いた。

添付図の説明

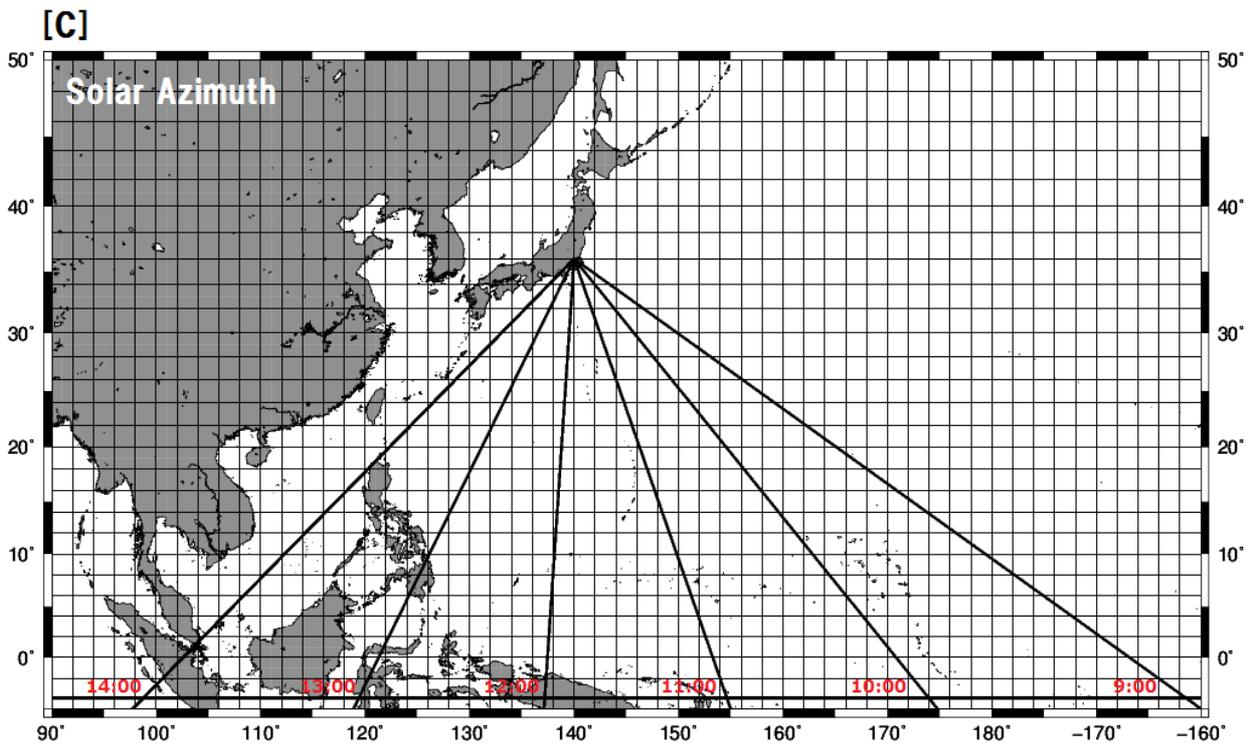
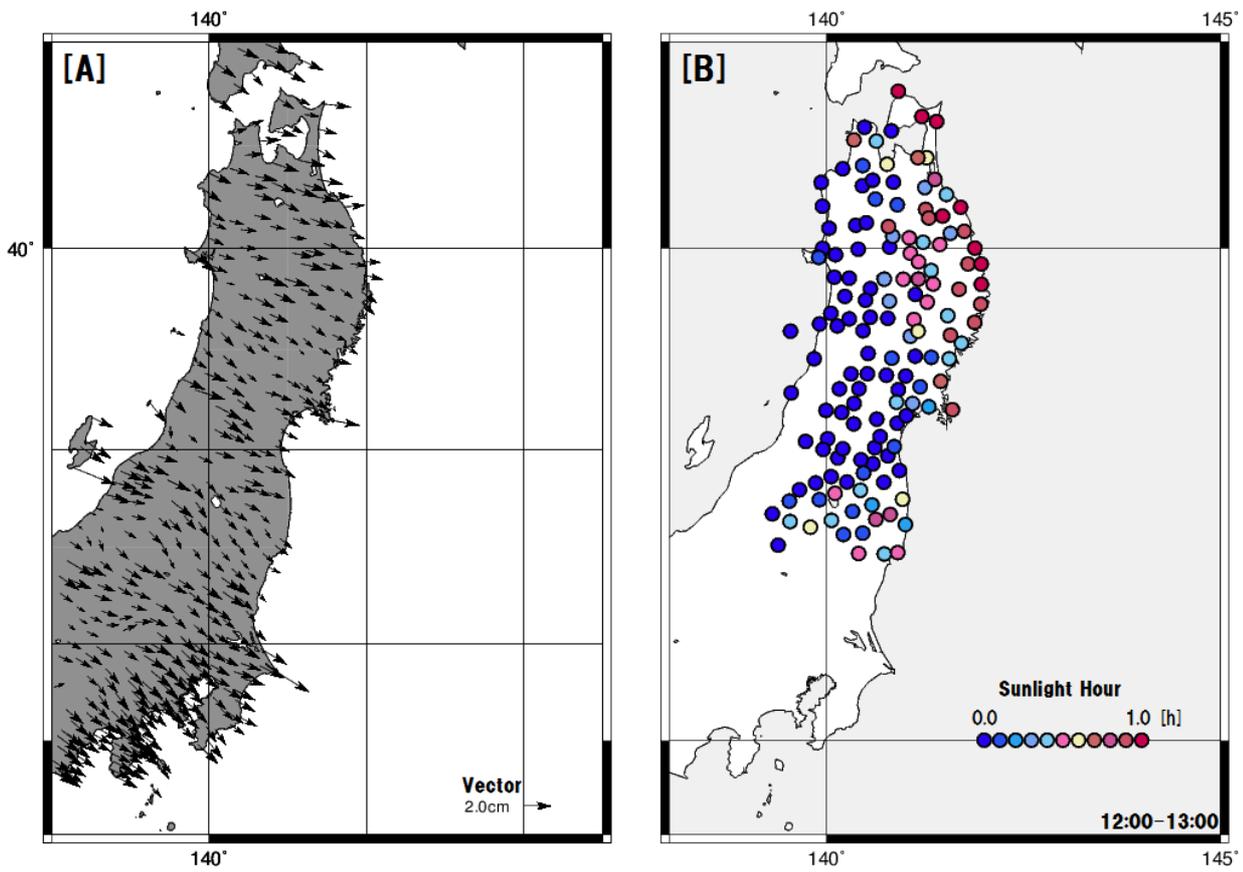
[A]:kinematic解が示した、日本時間12:00から13:00までのGNSS局の位置変化

[B]:各アメダス観測地点における、日本時間12:00から13:00までの日照時間

[C]:各時間における太陽方位角

キーワード：地殻変動、GNSS、熱膨張

Keywords: crustal movement, GNSS, thermal expansion



## 東北地方太平洋沖地震後の日本列島の地殻変動の変化とその解釈

## Change of crustal deformations after the 2011 Tohoku-oki earthquake

\*水藤 尚<sup>1</sup>\*Hisashi Suito<sup>1</sup>

## 1.国土交通省国土地理院

## 1.GSI of Japan

平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震は日本列島の地殻変動に多大な影響をもたらしている。地震時には震央に最も近い宮城県牡鹿半島先端部で最大5.4mの水平変動と1.1mの沈降に代表されるように大規模な地殻変動が観測された。引き続き発生している余効変動は地震発生から5年弱が経過した現在も継続している。本発表では、東北地方太平洋沖地震後の日本列島の地殻変動の変化をGNSS連続観測の結果に基づいて報告する。

水平変動ベクトルは、地震直後から震源域に向かう東方向の変動が卓越し、時間とともに変動量は減衰し、その傾向にほとんど変化は見られない。しかしながら、水平ひずみ場で見ると、大きく変化が見られる。地震直後の1年間は、東日本の広範囲で伸張ひずみが卓越しているが、宮城県の太平洋側では東西方向の短縮ひずみが卓越していた。東西方向の伸張ひずみは時間とともに減衰し、地震発生3年後からの1年間で見ると、東北地方太平洋側では東西方向の短縮、奥羽山脈付近では南北方向の短縮、日本海側では東西方向の伸張が卓越している。奥羽山脈付近を境にして太平洋側では短縮、日本海側では伸張という特徴が見られる。この最近1年間の特徴的なひずみ場は粘性緩和によって概ね説明できる。

上下変動は、地震直後の1年間は岩手県北部を除く太平洋側では隆起、岩手県北部と東北地方内陸から日本海側にかけては沈降が広がっていた。関東から甲信越地方と北海道南部では隆起が観測されていた。地震発生直後は沈降が観測されていた岩手県北部では、1年程度で沈降が止まり、その後は隆起に転じている。そのほかの地域では地震直後の傾向とほとんど変化はない。東北地方での隆起と沈降の境界は奥羽山脈付近にあり、この場所は地震直後からほとんど変化がない。

地震後の地殻変動は余効すべりや粘性緩和等によって生じていると考えられるが、前述の地殻変動の変化は単一のメカニズムでは説明できない。地殻変動から2つのメカニズムの影響を分離して推定することは難しいが、各メカニズムによる変動の特徴を抽出することで、今後、地殻変動の変化という観点から両者のメカニズムを系統的に分離していきたいと考えている。

キーワード：東北地方太平洋沖地震、余効変動

Keywords: 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, postseismic deformation

## Insight into poroelastic rebound deformation following the tohoku earthquake

\*hidayat panuntun<sup>1</sup>, SHINICHI MIYAZAKI<sup>1</sup>

1. Graduate School of Science, Kyoto University

K. Wang, Hu, and He (2012) proposed 3 primary processes that dominate the deformation following an earthquake at subduction zones; (1) afterslip, (2) viscoelastic relaxation, (3) re-locking of subduction fault. However, if the upper crust was saturated by fluid, the crust must be treated as a fluid-saturated poroelastic medium instead of elastic medium. Coseismic stress change disrupts pore fluid equilibrium and causes fluid migration from high pressure to zone of low pressure. Fluid migration drives transient surface deformation which is known as poroelastic rebound. Pore fluid flow induced by coseismic stress change is usually ignored due to the fact that; (1) this effect occurs in short time at early postseismic deformation just around the rupture area, (2) and no clear evidence of fluid-rich existence in the upper crust of the rupture. Due to the fluid-rich existence detected in the upper crust (Z. Wang, Huang, Zhao, & Pei, 2012; Yamamoto, Obana, Kodaira, Hino, & Shinohara, 2014; Zhao, Huang, Umino, Hasegawa, & Kanamori, 2011), pore fluid flow induced by coseismic stress change can produce contribution to the surface deformation.

Therefore, poroelastic rebound should be included in the analysis of early postseismic deformation following the Tohoku earthquake. Previous modeling studies in poroelastic rebound used various values for undrained and drained Poisson's ratio (e.g., Peltzer, Rosen, Rogez, and Hudnut (1998); Jonsson, Segall, Pedersen, and Bjornsson (2003)). Instead of just assuming the values of drained and undrained Poisson's ratio, we use grid search to estimate undrained and drained Poisson's ratio value by combining forward calculation of poroelastic rebound and afterslip inversion of inland and offshore GPS data. In total, we build 400 poroelastic rebound models with different combinations of undrained and drained Poisson's ratio. Grid search approach obtained optimum values of 0.23 and 0.29 for drained and undrained Poisson's ratio, respectively. Poroelastic rebound produced by the optimum values of drained and undrained Poisson's ratio estimated horizontal displacement up to 0.28 m in the rupture area. Majority of large uplift due to poroelastic rebound occurred in and around the vicinity of the rupture area where maximum uplift estimated up to 0.37 m around the maximum slip area of the mainshock.

Keywords: poroelastic rebound, undrained and drained Poisson's ratio, grid search, co- and after-slip inversion

## GPSデータに基づく2013年以来の東海地方スロースリップイベント

The slow slip event in the Tokai region, central Japan, since 2013 as seen from GPS data

\*坂上 啓<sup>1</sup>、福田 淳一<sup>1</sup>、加藤 照之<sup>1</sup>

\*Hiromu Sakaue<sup>1</sup>, Jun'ichi Fukuda<sup>1</sup>, Teruyuki Kato<sup>1</sup>

1.東京大学地震研究所

1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

時空間的に密な測地観測網が整備されて以来、スロースリップイベント(SSE)と呼ばれる海洋プレートの沈み込み帯で発生する非地震性の非常にゆっくりとした非正常なすべりが観測されるようになった。日本列島ではGPSのデータを用いて1997年に豊後水道で発生したSSEが発見されて以来、房総半島、東海地方、琉球海溝等で観測されるようになった。また、西南日本では防災科学技術研究所の高感度地震観測網に設置された傾斜計を用いて継続時間の非常に短い短期的SSEが検出された。これらの短期的SSEは非火山性の微動や深部低周波微動を伴う。

東海地方では前回2000年から2005年にかけて長期的なSSEが発生しており、これまでに発見されたSSEの中ですべりの継続時間が最も長い。2013年以降、前回の長期SSEが発生した場所でSSEが発生したと報告があった(小沢・矢来, 地震学会, 2014)。

本研究ではGPSのデータを用いて2013年以降の東海地方で発生したSSEの時間発展を推定する解析を行った。解析期間は2008年1月1日から2015年4月30日の期間で、東海地方にあるGEONETの226点のGPS観測点のデータに対し、GIPSY OASIS IIを用いて日々の座標値を推定した。推定された日々の座標値の時系列データには、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)の余効変動の影響が見られる。従って、東北地方太平洋沖地震の前までのデータを用いて定常トレンドと季節成分をフィッティングし、求められた定常トレンドを2015年4月30日まで外挿、除去した。

次に、東北地方太平洋沖地震の余効変動の影響を取り除くために、余効すべりや粘弾性緩和といった物理的なモデルの構築は行わず、指数関数と対数関数の和の時系列が余効変動の時系列に近似できると仮定し、時系列から除去した。そして除去後の時系列に対しインバージョン解析を行い、フィリピン海プレート上でのすべりを推定した。

すべりの時間発展の解析にはFukuda et al. (2008)によって開発された改良型のNetwork Inversion Filter (NIF)を用いた解析を行った。この手法は、Segall and Mathews (1997)によって導入されたNetwork Inversion Filter (NIF)と呼ばれる時間依存インバージョンの手法を改良したものである。NIFではハイパーパラメータが定数であることから、推定されるすべりに過度なスムージングがかかるという問題点があったが、改良型のNIFではこの問題点を改善したことによりすべりの時空間発展をより高い解像度で推定することが可能となった。

推定結果より2013年の中頃から浜名湖の西で長期的なSSEが発生し、またこの非常にゆっくりとした長期的SSEが発生している期間に6個の短期的SSEが推定された。本研究では、検出された長期的SSEと短期的SSEについて詳細に調べた。

まず、2013年10月~12月と2014年8月~10月に静岡県北西部で2~3か月継続する短期的SSEが推定され、この期間に深部低周波微動が観測された。また、2014年1月初めから2月にかけて伊勢湾周辺部で短期的SSEが推定され、すべりの加速とともに深部低周波微動が観測された。他にも2015年の4月にも同様に深部低周波微動が伴った速いすべりが推定された。これに加えて、この2つよりもすべり速度は遅いが、伊勢湾周辺部で継続時間が1週間程度の短期SSEが2回発生したと推定された。

今回検出された長期SSEは、2000年から始まったSSEとほとんど同じかやや南に推定され、2013年1月1日からの最大積算すべり量は約6cmであった。この長期SSEは2015年4月30日時点で継続中であると考えられ、今後も継続的な調査が必要であると考えられる。

## 日本海東縁、佐渡海嶺の地殻短縮量

Crustal contraction of the Sado Ridge estimated from geologic structure, eastern margin of Japan Sea

\*岡村 行信<sup>1</sup>

\*Yukinobu Okamura<sup>1</sup>

1. 独立行政法人産業技術総合研究所活断層・火山研究部門

1. Research Institute of Earthquake and Volcano Geology, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

日本海東縁の佐渡海嶺で、地質構造から東西圧縮による地殻短縮量の推定を試みた。日本海東縁には約350万年前から東西方向圧縮応力によって、多くの逆断層が形成されてきた。逆断層の多くは中新世の正断層が再活動したもので、インバージョンテクトニクスとして知られている。佐渡海嶺は佐渡島の北側に位置する長さ約250 km、幅約70 kmの海底の高まりで、その内部には多くの逆断層が発達し、それぞれが幅10~20 kmの非対象な断面を持つ背斜構造を伴う。この背斜構造が上部地殻全体を切る逆断層のすべりによって形成された断層関連褶曲であると仮定すると、背斜構造の断面積は、断層下端深度と上部地殻の短縮量の積となるはずで、地殻短縮量を推定することができる。

本解析には、旧地質調査所（産業技術総合研究所）が1989年~1992年にかけて取得した反射断面を用いた。探査システムはシングルチャンネルの高速曳航型で、地下深部の地質構造は不明瞭であるが、海底下数百 mまでの地質構造は十分に観察できる。また東西圧縮方向に近い290度方向の測線が約3 km間隔で存在する。

これらの反射断面の解析から、佐渡海嶺で逆断層が形成される前はほぼ平行な反射面からなる地層が広がっていたが、逆断層の活動によって背斜構造が隆起し始めると、地層中に不整合が形成されたことが明らかになっている。この不整合面の背斜形状と、背斜両側の同じ層準の地層を結ぶ直線との間の面積を計測した。この際、背斜構造全体が堆積層からなり、山頂も浸食されていないことが望ましいが、隆起量の大きい背斜構造は頂部が浸食されて失われている。また、一部の背斜構造は基盤からなり、反射面が認められない。このような場合には、不整合面より下位の地層や隆起域周辺の地質構造から、背斜構造内の背斜形状を推定した。このような解析を約50断面について行った。

佐渡海嶺は複数の背斜列からなる。それぞれの背斜列の走向方向には背斜の断面積が大きく変化するが、佐渡海嶺全体を横断する反射断面のすべての背斜面積を合計すると、測線間の差はかなり小さくなる。断層下端深度を15 kmと仮定すると、佐渡海嶺全体の地殻短縮量は平均して約2 km弱という値が推定された。また、反射断面の方向が290度であるが、実際の短縮方向はより東西に近いことが推定された。このような地質構造に基づいた地殻短縮量の推定手法の課題と意義についても議論する。

キーワード：日本海東縁、地殻短縮、断層関連褶曲

Keywords: eastern margin of Japan Sea, crustal contraction, fault-related fold

## 2011年東北地方太平洋沖地震の余効変動と余震の時定数の関係

Relation of decay time constants between postseismic deformation and aftershocks of the 2011 Tohoku-Oki earthquake

\*飛田 幹男<sup>1</sup>

\*Mikio Tobita<sup>1</sup>

1.国土交通省国土地理院

1.Geospatial Information Authority of Japan

平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震(以下、東北沖地震)の余効変動と余震はそれぞれ減衰しつつも継続している。それぞれの時定数の関係を検討したので報告する。

### 1. はじめに

飛田(2014, 2015, 2016)は、東北沖地震の余効変動時系列が対数関数と指数関数の和で近似されることを示し、モデル1:対数+指数、モデル2:対数+対数+指数、モデル3:対数+指数+指数を提案した。それぞれの関数項の緩和時定数(に相当する係数)と余震の緩和時定数を比較することで、関数項が代表する地下の現象は何であるかが見えてくる可能性があるため、今回は次式で表されるモデル2について調査した。

$$D(t) = a \ln(1+t/b) + c + d \ln(1+t/e) - f \exp(-t/g) + Vt$$

しかし、そもそも地震の積算回数は、対数関数・指数関数で近似できるかどうかも疑問であったため、既存の大森公式、改良大森公式、ETASモデルを含め、まずは、地震の積算回数の関数近似から検討を始めた。

### 2. 結果

図1内の地図に示された矩形範囲内で2011年3月11日から2015年10月31日の間に観測されたM5以上の地震の積算回数を、太線で示した。この積算回数に対し、まず、指数関数での近似を試みたが、Utsu et al. (1995)の指摘通り、まったく適合しなかった。次に、対数関数での近似を試みたが、適合度は十分ではなかった。そこで、常時地震活動(background seismicity)を考慮したところ、対数関数で非常に良く近似できることが判明した。

次に、モデル2の3つの関数項の時定数 $b=0.03$ 日(短期:暫定値)、 $e=49.6$ 日(中期:暫定値)、 $g=4610$ 日(長期:暫定値)それぞれの時定数を持つ関数と常時地震活動を用いて、観測された地震の積算回数への回帰曲線を求めた(振幅のみを推定)結果、図1のとおりとなった。中期と長期の時定数による対数関数と指数関数による回帰曲線は、観測値に全く適合しないが、短期の対数関数は観測値に良く適合する。

### 3. 考察

東北沖地震の余震の積算回数は余効変動時系列に適合するモデル2の内の短期の対数関数項成分とほぼ同じ時定数(暫定値)で推移していることが判明した。飛田(2016)は、中期の対数関数と長期の指数関数は比較的広い帯域の時定数をもつ粘弾性緩和に伴う余効変動を代表する可能性があり、一方、短期の対数関数は余効滑りに伴う余効変動を表す可能性があるかと主張しているが、今回の結果はこの考えと矛盾しない。

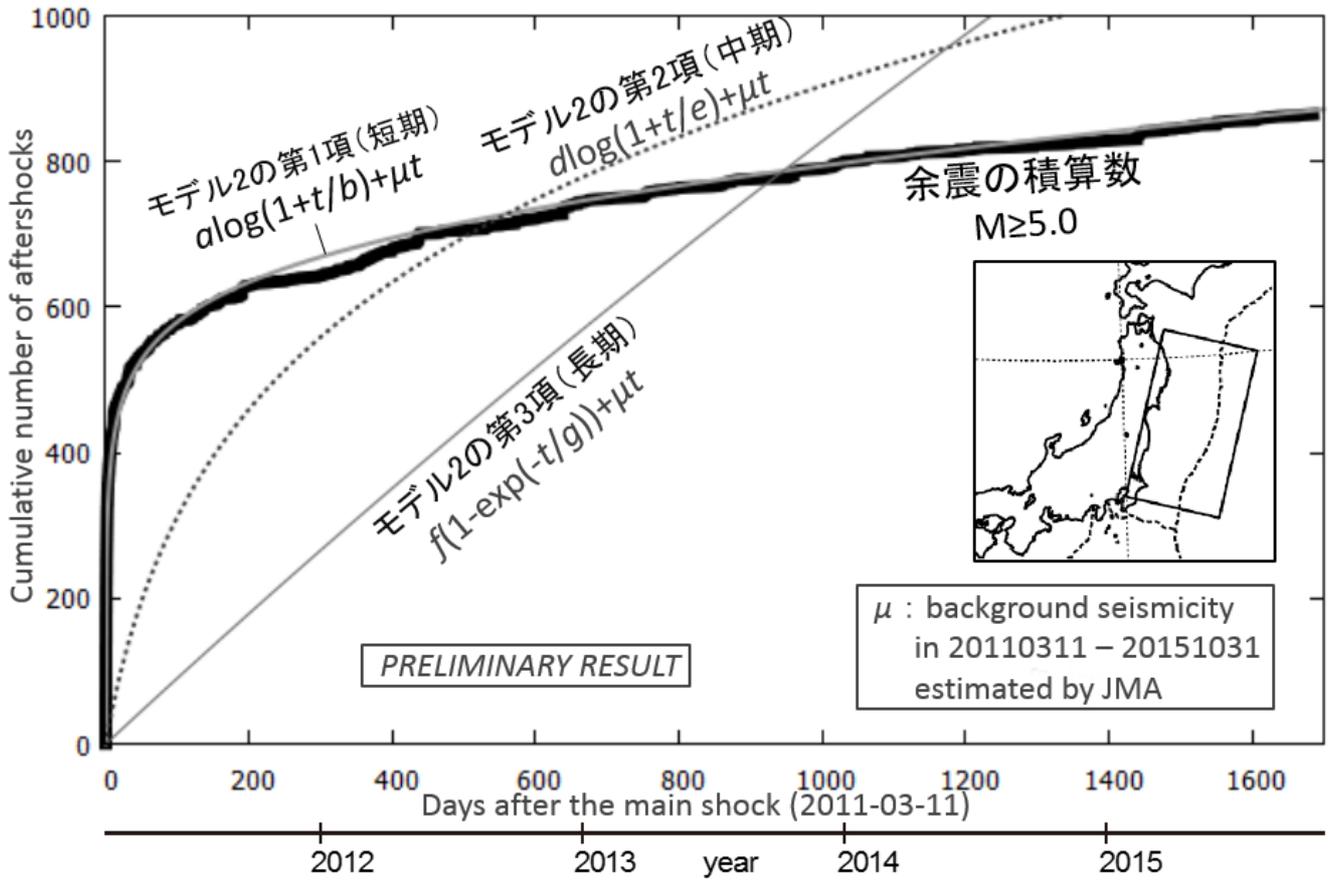
地震積算回数が対数関数で良く近似できることは、すなわち大森モデルが有効であることに他ならない。なぜなら、大森公式の時間積分は対数関数となるからである。

謝辞

矩形範囲の設定、地震データ、モデルパラメータは気象庁によるものです。ここに記して感謝致します。

キーワード:平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震、余効変動、関数近似、余震、粘弾性緩和、緩和時間

Keywords: 2011 Tohoku-Oki earthquake, postseismic deformation, function fitting, aftershock, viscoelastic relaxation, decay time



## 東北地方太平洋沖地震による余効変動時系列のモデル化

## Time series modeling of the postseismic deformation after the 2011 Tohoku earthquake

\*三浦 俊介<sup>1</sup>、大園 真子<sup>2</sup>\*Shunsuke Miura<sup>1</sup>, Mako Ohzono<sup>2</sup>

1.山形大学大学院理工学研究科、2.山形大学理学部

1.Department of Earth and Environmental Sciences Graduate School, Yamagata University, 2.Faculty of Science, Yamagata University

太平洋沿岸部のGNSS観測点で得られた2011年東北地方太平洋沖地震後の余効変動時系列は、余効すべりの時間発展を仮定した対数関数、粘弾性緩和の時間発展を仮定した指数関数を重ねて近似することで、概ねよく説明される（例えば、飛田，2015測地学会）。また、これまで地震後4年間の間に観測された東北地方全域を占めるGEONET観測点93点の余効変動時系列に対しても、三浦・大園（2015測地学会）で対数関数と指数関数の重ね合わせで近似できることを示し、水平成分におけるその時定数はそれぞれ約7日程度、約2500日となることを報告している。また、上下成分では太平洋側を中心に粘弾性緩和による変動が卓越しているといった結果が得られた。本研究では、時系列近似から得られた各余効変動シグナルの空間分布に注目し、他の手法から推定される余効変動モデルとの比較を行った。地震後4年間の時系列近似から得られた累積の余効すべりによる地殻変動の空間分布は、水平成分で岩手県の沿岸部で最もそのシグナルが大きくなり、最大は山田での100cmと予想される。比較的シグナルが大きい、80cm以上となる範囲は前弧域の川井2から利府の地域に広がる。これらの空間分布は、先行研究の余効すべりモデル（例えば、Silverii *et al.*, 2014; Yamagiwa *et al.*, 2014）で得られている空間分布と概ねよく対応する。一方、上下成分も比較すると、沿岸部の一部で変動パターンに違いがみられた。時系列が示す隆起・沈降の傾向をモデルが説明しきれないためと考えられる。粘弾性緩和のシグナルの最大値は、余効すべりのそれよりは小さいものの、空間の広がりや背弧域まで広域に分布する。一様な余効変動場が粘弾性緩和によって形成されていることが予想できる。今後、この一様な変動を説明するためのモデル化を行い、時系列近似によって推定される粘弾性緩和の時空間分布の説明も試みていきたい。

キーワード：余効変動、東北地方太平洋沖地震

Keywords: postseismic deformation, tohoku earthquake

## 2011年東北地方太平洋沖地震後の関東平野における地殻変動の局所性

## Heterogeneous surface deformation of the Kanto plain after the 2011 Tohoku earthquake

\*石塚 師也<sup>1</sup>、西村 卓也<sup>2</sup>、松岡 俊文<sup>3,1</sup>

\*Kazuya Ishitsuka<sup>1</sup>, Takuya Nishimura<sup>2</sup>, Toshifumi Matsuoka<sup>3,1</sup>

1.公益財団法人 深田地質研究所、2.京都大学 防災研究所、3.京都大学 学際融合教育研究推進センター

1.Fukada Geological Institution, 2.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University,

3.Center for the Promotion of Interdisciplinary Education and Research, Kyoto University

2011年東北地方太平洋沖地震後の大域的な地殻変動は、下部地殻/上部マントルの粘弾性変形および震源断層の非地震性滑りによって説明がされている。しかし、今回関東平野の一部では従来のモデルでは説明できない局所的な地殻変動が発生していることが解った。本研究では、GEONETデータおよびTerraSAR-Xデータを用いたPS干渉SAR解析によって、地震後に関東平野で発生した地殻変動を検討した。既往研究により、関東平野一帯では、2011年地震後から、継続的に隆起しており、震源方向に向かって隆起量が大きいことが知られている。しかしながら、本研究においてGEONETのデータを用いて関東平野の地表変動を推定したところ、大域的には既往研究と整合的であるものの、神奈川県北部から東京西部にかけて、周囲より年間5-10 mmほど局所的に隆起量が大きい地域が存在していることが明らかとなった。この局所的な隆起は地震直後から発生し、時間とともに減衰している。我々の知っている限りでは、2011年東北地方太平洋沖地震後に当該地域において地下水位利用の急激な変化等の人為的な地下利用の変化は報告されておらず、この局所的な隆起は地震後に、地下構造に起因し、自然発生的に起こったものと考えられる。また、PS干渉SAR解析によって、地殻変動の詳細な空間分布を推定したところ、約10-15km<sup>2</sup>の空間的スケールでの地殻変動であることが示唆された。今後このような局所的な地殻変動の検討を進める事により、地域的な応力変化や従来は考慮されていない地殻変動メカニズムが明らかになる可能性がある。

キーワード：2011年東北地方太平洋沖地震、関東平野、地殻変動、GEONET、PS干渉SAR解析

Keywords: The 2011 Tohoku earthquake, The Kanto plain, Crustal deformation, GEONET, PS-InSAR analysis

## 千葉県北部の地震活動と同期した非地震性すべり

## Aseismic slips synchronized with earthquakes in northern Chiba Prefecture, Japan

\*小林 昭夫<sup>1</sup>、弘瀬 冬樹<sup>1</sup>\*Akio Kobayashi<sup>1</sup>, Fuyuki Hirose<sup>1</sup>

## 1. 気象庁気象研究所

1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

東北日本では1992年三陸はるか沖の地震 (M6.9) [Kawasaki et al. (1995)]、1994年三陸はるか沖地震 (M7.6) [Heki et al. (1997)] や2003年十勝沖地震 (M8.0) [Miyazaki et al. (2004)] 後に、地震と同等や地震を上回る規模の非地震性の余効変動が観測されている。より小さな地震としては、2001年2月25日福島県沖の地震 (M5.8) や2002年11月3日宮城県沖の地震 (M6.1) で地震の規模を上回る余効すべりが推定されている [三浦・他 (2005)]。Sato et al. (2004) は、2001年青森県東方沖の地震 (M6.4) について地震時の3倍のすべりが地震後に発生したことを報告し、この地域では相対的に小規模な地震についても大きな余効変動を伴うことを示唆した。同様の性質は、これまで大きな余効変動が報告されていない関東地方に沈み込む太平洋プレート上面の地震についても見られるのだろうか。ここでは、銚子付近と千葉市付近の太平洋プレート上面の地震活動域周辺で、M6クラスの地震と同じ時期に非地震性の地殻変動が観測されたこと、この地殻変動から推定された非地震性すべりが本震の規模を上回ることを報告する。

GNSSデータは、国土地理院GEONET [国土地理院測地観測センター (2004)] の日座標値 (F3解) を用いた。GEONET観測点のアンテナ交換などに伴う人為的要因によるオフセット [岩下・他 (2009)] は、国土地理院Webページで公開されているデータセットを用いて補正した。ここでは1997年6月1日から2000年6月1日を定常期間として、全期間からその係数を用いて定常成分を差し引いた。年周補正はしていない。2000年1年間の非定常変位には、銚子付近に1.5 cm程度の隆起が見られる。2005年1年間の非定常変位には、千葉県北東部から中部にかけて1~1.5 cmのまとまった隆起が見られる。これらの変化は地震による1日でのオフセット的な変化ではなく、2000年は1か月から数か月、2005年は数か月から1年ほどかけて変化しているように見える。ただし、変化量が小さいため、非定常変位が地震の前から始まっているかについては不明である。

銚子の西側には活発な地震活動域があり、過去30年間にM6以上の地震が5回 (1989年3月6日M6.0、1990年6月1日M6.0、2000年6月3日M6.1、2005年4月11日M6.1、2011年4月21日M6.0) 発生している。千葉市付近には活発な地震活動域があり、過去30年間にM6以上の地震が1回 (2005年7月23日M6.0) 発生している。Nakajima et al. (2009) のプレート等深線から、これらの地震はフィリピン海プレートの下に沈み込む太平洋プレートの上に位置していることがわかる。

2000年6月の銚子付近、2005年4月の銚子付近と2005年7月の千葉市付近の地震による理論的な上下変位では、GNSSで観測された隆起量を説明できない。これらの変位が地震活動と同じ場所でのすべりによるものと仮定したときの断層パラメータについて検討した。MICAP-G [内藤・吉川 (1999) ; 山本 (2005)] を用い、先験的情報に基づいたMatsu'ura and Hasegawa (1987) の非線形インバージョン手法により変動源の傾斜角、すべり角、すべり量の3パラメータを推定した。2000年については2000年伊豆諸島北部の地震火山活動に伴う水平変位が大きいので、上下変位のみを用いた。

2000年のすべり角は東向きで、傾斜角はプレート形状 (約22度) に近い値となった。一方、2005年のすべり角は銚子、千葉とも東向きだがやや両者に差があり、傾斜角はいずれも等深線から計算される角度 (銚子、千葉とも約22度) より15~18度大きかった。1995年以降に発生したM5.0以上の気象庁CMT解について見ると、銚子付近の地震の傾斜角は16~32度 (類似の発震機構のみ) である。一方、千葉市付近の地震のCMT解の傾斜角は35~38度と、その場所のプレート境界の傾斜角よりやや大きい。2000年と2005年に銚子付近で発生した地震の規模が同じで、ともにプレート境界の地震と考えられるため、2005年についても2000年について推定されたものと同様のすべりが銚子付近の地震に伴って発生していたと仮定する。その上で2005年の千葉市付近のすべりについてのみ傾斜角、すべり角、すべり量を推定したところ、千葉市付近のすべりの傾斜角は約37度で、2005年の千葉県北東部の上下変位の観測値は理論値とほぼ合った。これらのことから、2005年については、銚子付近では2000年と同様のほぼプレート境界に沿った断層面ですべりが生じ、千葉市付近ではその付近

の地震と同様にプレート境界よりやや高角な断層面におけるすべりが発生したとしても説明できる。すべりの規模は、いずれも発生したM6クラスの地震の数倍であり、明らかに地震性より非地震性のすべりの方が大きく、M6クラスを除いたすべりの規模は銚子付近で2000年、2005年ともMw 6.3相当、2005年の千葉市付近でMw6.5相当である。

本調査には国土地理院GEONETの座標値およびオフセット値を使用させていただきました。

キーワード：非定常すべり、千葉県北部、GNSS

Keywords: Aseismic slip, Northern Chiba Prefecture, GNSS

## 時間変化を含めた西南日本のブロック断層モデリング

## Time dependent block fault modeling of southeast Japan

\*小沢 慎三郎<sup>1</sup>\*Shinzaburo Ozawa<sup>1</sup>

1.国土交通省国土地理院

1.GSI of Japan

## 要旨

時間変化を含めて、西南日本のブロック断層モデリングを行った。その結果ブロック運動をいれた場合、陸側プレートとフィリピン海プレート間のカップリングが入れない場合に比べて若干小さくなる結果が得られた。得に内陸付近まで見られたプレート間カップリングが小さくなることが確認された。

## はじめに

日本付近の沈み込み帯のプレート間カップリングを精度よく求めることは、将来の海溝型大地震の発生の場所・規模を推定する上で大変重要である。特に西南日本の駿河・南海トラフ沿いで発生する東海・南海地震は比較的高い発生確率が推定されている。このような中、西南日本のプレート間カップリングの研究が数多く行われてきた。しかしながら、これまでの研究では、時間変化まで含めたモデル化はあまり行われていない。ここでは、時間変化まで含めたブロック断層モデリング手法を開発し、西南日本に適用してみた。

## 解析手法

日本地域のブロック断層モデルは、橋本他によってGPSの観測結果から行われている。本研究では、橋本他(2000)のブロックモデルの形状を使用して西南日本のブロックモデルを構築した。即ち、内陸では、橋本他(2000)の矩形断層をブロック境界として用い、海溝域のプレート境界は、矢吹&松浦によって提唱されたスプライン補間の関数を用いた。このブロック形状の下、時間依存のインバージョンを行い、内陸域及び海溝域のプレート間カップリングを推定した。西南日本の500点程のGPS観測点の東西、南北、上下の座標時系列を使用している。解析期間は、2008-2009年とした。

## 結果と考察

時間変化を含めたブロック断層モデリングにより、ブロック運動をいれない場合といれない場合で海溝域でのプレート間カップリングが小さくなる傾向が得られた。また東海地方では内陸深部まで及ぶプレート間カップリングが、ブロック運動を取り入れた場合、消えることが確認された。

キーワード：時間依存のインバージョン、ブロック断層モデル、西南日本

Keywords: time dependent inversion, block fault modeling , southeast Japan

## 2003年十勝沖地震 (M8.0) における北海道地方の歪み異常分布の検出

Abnormal strain distribution in Hokkaido, Japan, inferred from the 2003 Tokachi-oki earthquake (M8.0)

\*石森 健太郎<sup>1</sup>、大園 真子<sup>2</sup>

\*Kentaro Ishimori<sup>1</sup>, Mako Ohzono<sup>2</sup>

1.山形大学大学院理工学研究科、2.山形大学理学部

1.Department of Earth and Environmental Sciences Graduate School, Yamagata University, 2.Faculty of Science, Yamagata University

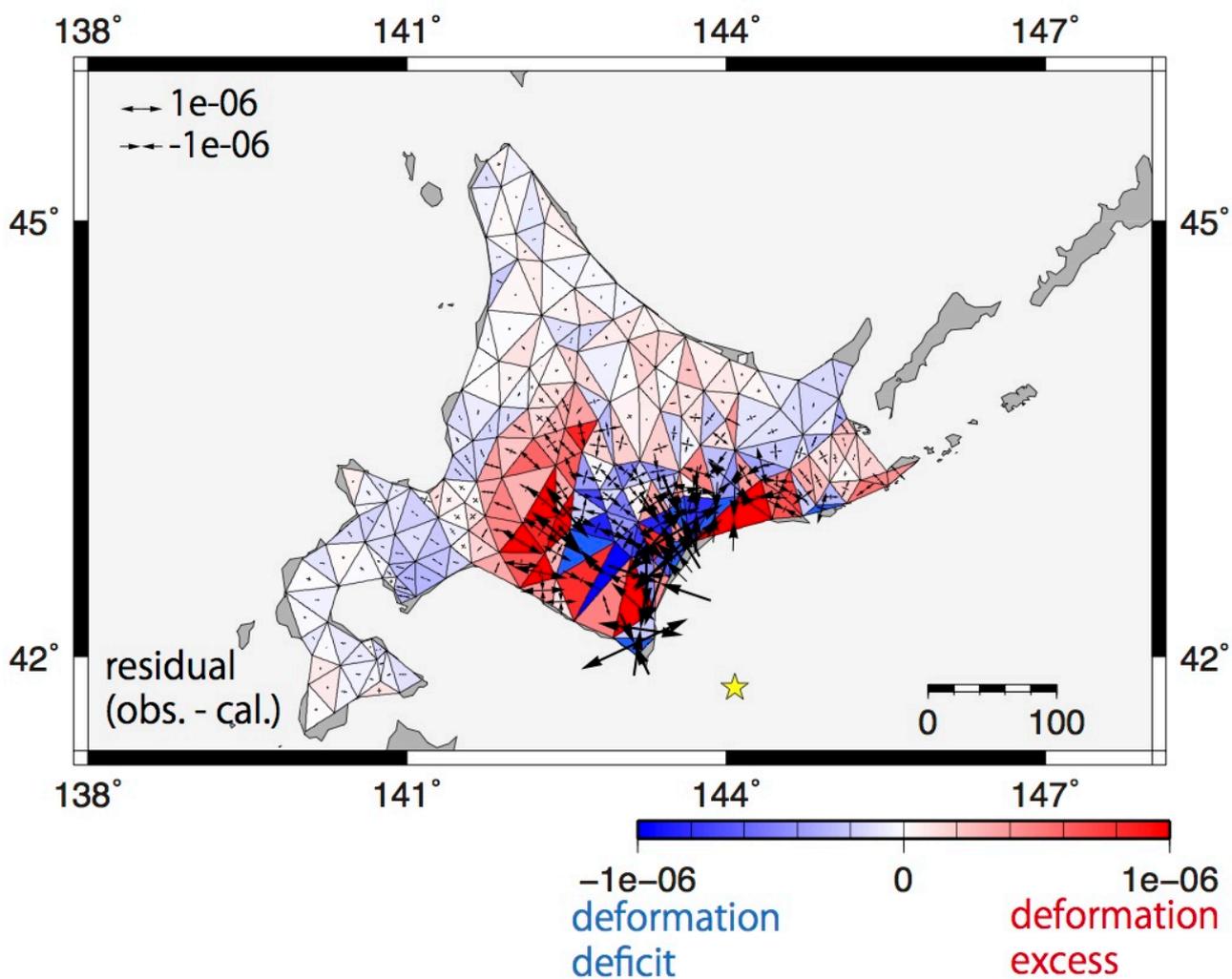
GPSにより観測される地震時地殻変動を、半無限均質弾性体を仮定した断層モデルによる理論値と比較することで、実際の地下構造を反映した歪み異常分布を検出できる (Ohzono et al., 2012)。石森・大園 (2015, JpGU) は2003年十勝沖地震 (M8.0) の地震時地殻変動から北海道地方の歪み異常分布の検出を試みた (図)。GEONET観測点を頂点とするドロネー三角形から各地域における地震時の面積歪みを観測値・理論値でそれぞれ求め、その差となる歪み異常分布について考察した。その結果、日高山脈西側の厚い堆積層と膨張過多域の分布が一致した。これはYabe et al. (2015) で検証されているように、弾性定数が小さい堆積層の応答が地震時の歪み異常として反映された結果と考えられる。

以上のことから、これまでM9級の巨大地震でのみ議論されていた歪み異常と地下構造との関係について、M8級の地震でも同様に検出できることがわかった。加えて本研究では、どの程度の歪み異常で地下構造の不均質性と議論できるかを検討した。2011年東北地方太平洋沖地震 (M9.0) では最大 $10^{-6}$ 程度、2003年十勝沖地震では $10^{-7}$ 程度の地震時歪み異常と地下構造との対応が見られた。北海道地方で最大数cmの変位が生じた2011年東北沖地震における歪み異常分布の検出を試みたところ、そのオーダーは $10^{-8}$ スケールとなり、地下構造との明瞭な対応関係はみられなかった。このことから、歪み異常として $10^{-7}$ 以上の変形が検出された場合は、地下構造との関係について議論できる可能性があるといえる。

また、石森・大園 (2015, JpGU) で得られた道東部の釧路・根室地域の歪み異常分布について、主歪みの大きさと向きに着目して考察したところ、太平洋プレートが収束する北西-南東方向の収縮過多が卓越しており、2004年釧路沖地震 (M7.1) との関係が示唆される。1952年十勝沖地震 (M8.2) の翌年にも釧路沖でM6.1の地震が発生しており類似性が考えられ、今後これらの地震が大地震による地震時歪み異常によって誘発された可能性について検討していく予定である。

キーワード：2003年十勝沖地震、地下構造、歪み異常

Keywords: 2003 Tokachi-oki earthquake, subsurface structure, abnormal strain



## Coseismic and Postseismic Deformation Related to The 2012 Indian Ocean Earthquake using Three-Dimensional FEM

\*Cecep Pratama<sup>1</sup>, Takeo Ito<sup>1,2</sup>, Fumiaki Kimata<sup>3</sup>, Takao Tabei<sup>4</sup>

1.Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2.Earthquake and Volcano Research Center, 3.Tono Research Institute of Earthquake Science, 4.Department of Applied Science, Faculty of Science, Kochi University

On April 11, 2012, a Mw 8.6 earthquake struck off the west coast of northern Sumatra approximately 100 km west of the Sunda trench. The 2012 Indian Ocean earthquake, which is the largest intraplate earthquake in recorded history, yields a total seismic moment of  $13.6 \times 10^{28}$  dyne cm. Aceh GPS Network for Sumatran Fault System (AGNeSS) observed a predominantly ENE coseismic offset of up to 10 cm while the sites on the Andaman Island and southern part of Sumatra GPS Array (SuGaR) network observed southward and northward, respectively. In order to construct more realistic surface displacement due to complex subduction region, we consider developing inhomogeneous three-dimensional finite element model incorporate subducting slab, three-dimensional velocity earth structure, realistic topography and bathymetry. We infer uniform slip for six fault planes using fault geometry as reported from Hill et al. (2015). In the other hand, the time series of continuous GPS site coordinates clearly exhibit postseismic displacements. We parameterized the displacements time series due to previous earthquakes and remove pre-earthquake trend from the time series. The corrected time series of permanent GPS data shows that the relaxation time in the vertical component displacement is longer than horizontal component displacements. This discrepancy indicates multiple physical mechanisms. We proposed a mechanical model, which refer to afterslip and viscoelastic relaxation, to explain postseismic deformation following to the 2012 Indian Ocean Earthquake.

Keywords: Coseismic, Postseismic, GPS, FEM

## Investigating the crustal deformation on the Hazar-Palu segment of the East Anatolian Fault (EAF), Turkey

\*WUMITI JULAITI<sup>1</sup>, Semih Ergintav<sup>1</sup>, Ziyadin Cakir<sup>2</sup>, Ugur Dogan<sup>3</sup>, Selver Senturk<sup>2</sup>, Seda Cetin<sup>3</sup>, Hayrullah Karabulut<sup>1</sup>, Fuat Saroglu, Haluk Ozener<sup>1</sup>

1.Bogazici University, 2.Istanbul Technical University, 3.Yildiz Technical University

As well known, strike-slip faults are a fault type widely spread around the world. Many of them are located at boundaries between two tectonic plates. For instance, the East Anatolian Fault (EAF), the one in this study, forms a 400-km-long boundary between the Anatolian and the Arabian plates. It is a typical left-lateral slip fault with an ENE-WSW strike and a total offset of 33 km. As it is easy to obtain velocity solution from GPS raw data on a specific block or plate with the software, here is GAMIT/GLOBK, one can estimate the long-term slip rate as well as creeping zone, locking depth and the offset between two nearly-rigid blocks of a fault or between the fault's surface trace and the dislocation below the seismogenic zone by using inter-seismic GPS velocities and proper models. However, not many suchlike studies have been carried out along the whole EAF as those done on North Anatolian Fault (NAF) during the last 20 years. Most of them are focused on the area around the triple junction where the Dead Sea Fault connects to the EAF and the overall deformation using mainly InSAR. Moreover, there are only a few large earthquakes documented since the last century and InSAR based studies indicate that low seismicity can be related with a creep mechanism that may reach to 10 mm/yr creep rate, along different segments of the EAF. Based on the recent published GPS velocities, the slip rate on EAF is estimated about 8 to 10 mm/yr, which seems that the strain accumulation will not occur and therefore the creeping zone of EAF will not produce a remarkable earthquake. But the extent of the creeping zone is not well constrained, which still implies the potential of the seismic hazard arising.

The aim of this study here is to perform the velocity solutions from the present-day cGPS sites' data (Turkey's National Permanent GPS Network-ACTIVE data, i.e. TUSAGA-ACTIVE data) and new sGPS observations (up-to-date surveys based on proper profiles) on particular segment of EAF, the Hazar-Palu segment, which may be combined with the more recent InSAR observations, to develop an appropriate inter-seismic deformation model around this region with a multidisciplinary perspective.

Keywords: creep, GPS, East Anatolian Fault, slip rate

## アラスカ南東部における現代氷河の融解による隆起速度の算出

## Computation of uplift rate caused by present-day ice melting in Southeast Alaska

\*長縄 和洋<sup>1</sup>、風間 卓仁<sup>1</sup>、福田 洋一<sup>1</sup>\*Kazuhiro Naganawa<sup>1</sup>, Takahito Kazama<sup>1</sup>, Yoichi Fukuda<sup>1</sup>

1.京都大学理学研究科

1.Graduate School of Science, Kyoto University

アラスカ等の氷河地域では氷河融解に伴う地殻隆起現象が観測されており、この隆起は弾性変形によるものと、粘弾性変形によるものの二つの現象が合わさった形で観測されている。粘弾性変形による隆起現象はPost glacial rebound (PGR)、弾性変形による隆起現象はPresent-day ice melting (PDIM)と呼ばれ、これらを分離することによって、マンツルの粘性率など地学的に重要なパラメータを詳しく知ることができる。

本研究の対象地域であるアラスカ南東部はGPS等の測地データが豊富にあり、先行研究も幾つか存在する地域である。その一つであるSun et al. (2010)では2006年~2008年まで重力観測を行い、重力変化・地表隆起速度の観測データからPDIMによる隆起速度 ( $d\Delta/dt$ ) を見積もった。一方で、彼らは、PDIMモデル(氷河融解速度の空間分布を示すデータ)の数値積分からも $d\Delta/dt$ を求めているが、これは観測から求めたものと一致しなかった。この原因として、彼らのモデル計算が単純化されていたことと、使用したPDIMモデル自身が現実の氷河融解分布に合致していない可能性などが考えられる。

そこで本研究は、重力データ等の測地データを用いてアラスカ南東部におけるPDIMを精度よく議論するために、PDIMモデルと測地観測データのそれぞれから絶対重力基準点(計6点)におけるPDIM起源の地殻隆起量 ( $d\Delta/dt(\text{cal})$ および $d\Delta/dt(\text{obs})$ )を見積もった。まずモデル計算による方法では、半無限媒質上での円荷重に対する応答関数(Farrell, 1972)を用い、UAF07(Larsen et al., 2007)というPDIMモデルを数値積分することで各重力基準点における $d\Delta/dt(\text{cal})$ を見積もった。一方観測データによる方法では、Wahr et al. (1995)に基づき、2006~2013年における絶対重力変化速度とGPS隆起速度の観測データ(風間ほか, 2015)の線形演算によって $d\Delta/dt(\text{obs})$ を見積もった。

その結果、本研究の $d\Delta/dt(\text{obs})$ の値は $14.7 \pm 2.2$  mm/yearとなり、先行研究(Sun et al., 2010)の値( $10.7 \pm 7.3$  mm/year)よりも小さな誤差で見積もることができた。これは、本研究で用いた重力観測データ(風間ほか, 2015)の収録期間が長くなったことで、重力変化速度の決定精度が増したためと考えられる。また、本研究の $d\Delta/dt(\text{cal})$ の値は $10.3 \pm 1.4$  mm/yearであり、先述の $d\Delta/dt(\text{obs})$ の約7割に相当することが分かった。先行研究では $d\Delta/dt(\text{cal}) = 5.5 \pm 3.2$  [mm/year]で、 $d\Delta/dt(\text{obs})$ の約5割しか説明できていなかったため、本研究のモデル計算は観測データをより正確に再現できていると言える。この理由としては、本研究のモデル計算で単純化を行わず、より現実に近い氷河・観測点配置で数値積分を実施したためである。一方、本研究の $d\Delta/dt(\text{cal})$ は依然として $d\Delta/dt(\text{obs})$ から約3割乖離しているが、この差をより小さくするにはモデル計算で地球曲率・地形形状・地球内部構造を考慮することや、より現実的なPDIMモデルを作成する必要があると考えられる。

キーワード：荷重変形、氷床融解、重力変化、地殻隆起、アラスカ

Keywords: load deformation, ice sheet melting, gravity change, crustal uplift, Alaska

## GNSS年周地殻変動と積雪荷重の対比から見る地盤構造の地域性

## Spatial variation in Earth structure inferred by GNSS seasonal deformations due to snow loads

栗栖 理恵<sup>2</sup>、\*廣瀬 仁<sup>1</sup>、西村 卓也<sup>3</sup>Rie Kurisu<sup>2</sup>, \*Hitoshi Hirose<sup>1</sup>, Takuya Nishimura<sup>3</sup>

1.神戸大学都市安全研究センター、2.神戸大学大学院理学研究科、3.京都大学防災研究所

1.Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, 2.Graduate School of Science, Kobe University, 3.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

GNSSで観測される座標時系列データには、地震時のステップ的な変動や地震間のほぼ一定速度の変動などに加え、年周変動も見られる（例えば、Murakami and Miyazaki, 2001; Munekane et al., 2004）。Heki (2001)は、国土地理院GEONETの座標値データに基づき、期間1999.0~2001.0において東北地方の年周変動を調査し、東北地方が冬季に沈降していること、そして、この年周変動が積雪荷重で説明できることを示した。しかし、その後のデータが10年以上蓄積したこと、解析戦略の改定によって年周変動成分が小さくなる場合があったこと（中川・他, 2009）などから、この問題を再検討する必要性が出てきた。そこで、本研究では、より長期のデータに基づき、年周変化と積雪量との相関を調べた。その結果、一部の地域では両者に良い相関があること、また、両者の比率には地域性が見られること、そしてこの地域性は、地下構造の違いによって説明可能ということが分かった。

東北地方の年周変動を調べるために、国土地理院から提供されたGEONET観測点の位相データを、GIPSY-OASIS II (version 6.3) (Zumberge et al., 1997)によって解析し、1日ごとの座標値データを求めて使用した。この座標時系列データから、年周・半年周を仮定し、年周変動成分を1年ごとに推定した。なお、本研究では上下成分のみを議論する。また、年周変動と比較するために、気象庁AmEDASの日別積雪深度データを使用した。期間は1999.5~2009.5の10年間、使用する観測点は東北地方のGEONETの観測点135点とAmEDAS観測所102点とした。地域ごとに積雪量と年周変動を比較するため、東北地方を大きさ0.5x0.5のエリアに分割した。そして、1年ごとに推定した各観測点の年周変動をエリア内で平均し、その値をエリアの年周変動とした。同様に、AmEDAS観測所の積雪深度をエリア内で平均し、これをエリアの積雪深度とした。エリアの年周変動から、1999年8月1日に対する毎月の年周変動の変位（「年周変位」と定義する）を算出した。同様に、エリアの積雪深度から、毎月の積雪深度を推定した。エリアごとの年周変位と積雪深度の時間変化を調べたところ、最大積雪深度が150 cm以上となる積雪の多いエリアでは、概ね、両者の相関係数が0.6以上と良い相関を示すことが分かった。このため、これらの相関が高いエリアについて、さらに、両者の比である、積雪深度1 cmに対する年周変動の変位量（ $b$ とする）を計算した。

その結果、期間1999.5~2009.5において、最大積雪深度が150 cm以上となった8つのエリアのうち、地下水くみ上げの影響を受けた可能性があるエリア3つを除く、5つのエリア（青森のエリア1つ、新潟周辺のエリア4つ）において、年周変位と積雪深度の比率 $b$ を調べたところ、0.021-0.053 mm/cmだった。

この観測で得られた比率 $b$ の値と対比するため、地下構造の違いによって比率 $b$ にどの程度の値が期待されるのかをモデル計算により見積もった。まず、地下構造としてGutenberg - Bullen Aモデル (Sato et al., 1968)を仮定し、積雪密度が0.2~0.5 g/cm<sup>3</sup> (河島・他, 2007)、積雪深度が100 cmの荷重を置いた場合の沈降量をSPOTL (Agnew, 1996)を用いて計算すると0.83-2.1 mmだった。この沈降量と積雪深度100 cmから求めた比率 $b$  ( $b_{\text{basement}}$ )は、0.0083-0.021 mm/cmとなった。観測で得られた比率 $b$ の範囲は、 $b_{\text{basement}}$ の範囲よりも大きい、すなわち、同じ荷重に対して、より変形が大きくなっている。

次に、本研究の対象領域には、厚い堆積層をもつ新潟平野が含まれるので、堆積層における比率 $b$ を見積もった。全国1次元地下構造モデル（暫定版）(Koketsu, 2008)における第1層~第12層を基に、新潟平野における堆積層の平均的なP波速度を2600 m/s, S波速度を1100 m/s, 密度を2140 kg/m<sup>3</sup>と仮定すると、ヤング率7.2 GPaを得る。これに、基盤の場合と同様な積雪荷重を仮定すると、2.7-6.8e-7の歪みとなる。防災科学技術研究所J-SHIS (<http://www.j-shis.bosai.go.jp>)で公開されている地震基盤面の深度を基に、新潟平野での堆積層の厚さを8 kmとし、荷重変形はここでのみ生じると仮定すると、求めた歪みは変位2.2-5.4 mmに対応す

る。これは、比率 $b$  ( $b_{\text{sediment}}$ ) が $0.022\text{--}0.054$  mm/cmであることに相当する。粗い見積もりではあるが、堆積層での変形を考慮することで、観測で得られた大きい比率 $b$ の値を説明できる。このことから、比率 $b$ の地域差は、積雪密度の違いだけでは説明できず、地下構造の違いによる影響が含まれていると考えられる。本研究の結果は、GNSS測位によって、積雪荷重に対する固体地球の弾性レスポンスの地域性が議論できる可能性を示す重要な成果である。

キーワード：地球の荷重変形、地殻変動の季節変動、堆積層

Keywords: Deformation by surface load, Seasonal variation in crustal deformation, Sedimentary layer

地震によって生じる地球内部の歪・応力の理論計算：丸い地球における相反定理の有効性  
 Theoretical calculation of internal stress/strain changes caused by earthquakes: the effectiveness of the reciprocity theorem in a spherical earth

\*高木 悠<sup>1</sup>、大久保 修平<sup>2</sup>

\*Yu Takagi<sup>1</sup>, Shuhei Okubo<sup>2</sup>

1.東京大学大学院理学系研究科、2.東京大学地震研究所

1.School of Science, The University of Tokyo, 2.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

地震によって地球の内部に生じる応力や歪などの内部変形は、これまでOkada (1992) によって導かれた一様半無限媒質モデルの公式を用いて推定されてきた。クーロンの静的応力変化の推定はその一例である。しかし、2011年東北沖地震による応力変化が震央距離400kmの地点でも0.1barに達したように (Toda et al., 2011)、超巨大地震によって生じる広範囲に及ぶ応力・歪変化は、地球の曲率や成層構造を考慮したより現実的な丸い地球モデルを用いて推定する必要がある。丸い地球モデルで地震時の変形を計算するための定式化自体は、Takeuchi & Saito (1972) によってなされた。しかし、実際に計算機で内部変形の計算を実現するためにはいくつかの課題を解決する必要がある。その一つが桁落ちの問題である。我々は、Okubo (1993) の相反定理を拡張することによって、この桁落ちの問題が解決されることを見いだした。本発表では、従来のオーソドックスな方法では桁落ちの問題が不可避であることと、相反定理を用いた方法では桁落ちの問題が回避されることを示す。

Takeuchi & Saito (1972) の定式化に従って、変位、応力などを球面調和関数で展開すると、運動方程式などの支配方程式は、半径に関する一階の非斉次常微分方程式に帰着する。この微分方程式を解くために、オーソドックスな解法では、(i) まず斉次方程式の解を求め、(ii) 次に特解を求め、(iii) 最後に地表での境界条件を満たすように斉次解と特解を足し合わせる。今、震源の半径を $r_s$ とし、解を求めたい場所の半径 $r_p$  ( $>r_s$ 、つまり震源の方が深い) とすると、求めたい解は $(r_s/r_p)^n$  ( $n$ は球面調和関数の次数) のオーダーとなる。それに対して、(i)と(ii)のプロセスで求められる斉次解と特解は、 $(r_p/r_s)^n$  のオーダーとなる。つまり、(iii)のプロセスでは、本来の解よりも $(r_p/r_s)^n/(r_s/r_p)^n=(r_p/r_s)^{2n}$  倍だけ大きいもの同士を足し合せていることになり、次数 $n$ が大きくなると桁落ちの問題が避けられない。例えば、深さ20km ( $r_s=6351$  km) の震源によって深さ10km ( $r_p=6361$  km)に生じる変形を計算する場合、 $n=8,000$ で、 $(r_p/r_s)^{2n}\sim 10^{12}$ となる。数値的な計算でも $n=8,000$ 程度から桁落ちの問題が無視できなくなり、実際にこの現象が確認された。

一方、相反定理を用いた方法では、(a) まず潮汐等、外部に起源を持つ励起源によって半径 $r_s$ に生じる変形を表す解 $x_1$ を得、(b) 次に解を求めたい半径 $r_p$ で単位ステップを持つような解 $x_2$ を得る。これらは数値積分によって容易に得られる。(c) 最後に相反定理から、求めたい解が解 $x_1$ と $x_2$ の「掛け算」で得られる。つまり、足し算によって生じるような桁落ちの問題を回避することが出来る。

キーワード：地震時変形、内部変形、球対称地球、相反定理

Keywords: co-seismic deformation, internal deformation, spherically symmetric earth, reciprocity theorem

## 水準測量の繰り返し観測結果から推定する地殻上下変動の傾斜変化把握の試み

A change of the crustal vertical ground deformation estimated from the repetition observation of a leveling

\*高野 和友<sup>1</sup>

\*Kazutomo Takano<sup>1</sup>

1.国土交通省国土地理院

1.GSI of Japan

国土地理院では、静岡県周智郡森町から御前崎市に至る地域において、水準測量の繰り返し観測を実施している。当該地域は「大規模地震対策特別措置法」において地震防災に関する対策を強化する必要がある地域であり、同法および災害対策基本法に基づく指定行政機関である国土地理院では、地震観測体制の基礎となり地震防災に資するべく、当該地域における高精度な地盤の上下変動把握を目的として、1979年以降は原則年複数回、水準測量を実施している。

当該地域を含む東海地方では2000～2005年頃に、国土地理院が全国に展開している電子基準点等から構成されるGNSS連続観測網（GEONET）の観測結果から、従来とは異なる非定常的な地殻変動が観測された。この非定常地殻変動は、プレート境界面上での固着による引きずり込まれる方向とは逆向きの滑りにより引き起こされたと考えられており、その滑りの中心は浜名湖および浜名湖周辺直下にあると推定されている。

水準測量を繰り返し観測している地域は浜名湖の東方向に数十km離れたところであり、同様の非定常地殻変動が発生していた可能性が考えられるが、これまでこの水準測量の観測結果について当該現象を詳細に検討したものはない。そのため、本研究ではこの繰り返しによる水準測量の観測結果から、東海地方において2000～2005年頃に発生していたと考えられている非定常地殻変動についての把握を行った。

使用した観測結果は、静岡県掛川市に設置されている水準点140-1から御前崎市に設置されている水準点2595まで行われた水準点間の高低差である。この2点に加えてこの2点間に設置されている14の水準点についても同様に扱い、合計16点の標高の経年変化（水準点間の高低差の経年変化）を議論の対象とした。なお、1996年4月以降に実施された観測結果を用いることとし、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震の影響が当該地方においても見られることから、当該地震発生前までに実施された観測結果を使用した。

これら2点間の高低差の経年変化についてそれぞれ回帰モデルを作成した。なお、GEONETによる観測結果を参考にし、当該地域では議論の対象とした期間（1996年4月～2011年2月）に地殻変動が3パターン発生した（定常、非定常、定常）と考え、3つの傾斜および2箇所の折れ曲がりからなる、折れ線による回帰モデルを推定した。これは、地殻変動の傾向が変わることで高低差の経年変化に有意な傾斜の変更が発生するという考えによるものである。なお、従来とは異なる地殻変動が発生した場合、発生前後において傾斜は変わるもののその変化そのものは連続しているはずである。そのため、折れ線による回帰モデルを採用した。これについて、前述の16点におけるすべての2点間の高低差、合計120通りについて行った。

得られた結果は、全体として傾きの変化をうまく再現している回帰モデルがある一方で、水準点の一時的な局所的変動や、観測誤差に起因すると考えられる機械的に求められたモデルがあった。前者については、高低差の時間変化にステップ状の変位が見られるが、このステップ状の変位を追従するようなモデルが推定された。後者については、測定値のばらつきに機械的に追従するモデルが推定されている。これらのモデルは1つ目の折れ曲がり点と2つ目の折れ曲がり点の間隔が1年未満であることが多く、傾斜の変化をうまく再現しているとは考えにくい。そのため、この期間が1年未満の回帰モデルは議論の対象外とした。

上記回帰モデルを除外した残りのモデルについて検討したところ、その1つ目の折れ曲がり点と2つ目の折れ曲がり点の分布に明瞭な類似性があった。2点間の直線距離が7km以下の高低差についてはまとまりが見られなかったが、7km以上の2点間の高低差については、すべての回帰モデルの1つ目の折れ曲がり点が1999～2000年に、2つ目の折れ曲がり点が2004～2005年に求められた。この結果は、これら2つの折れ曲がり点の時期に、当該地域の地盤の上下変動の傾向が変化したことを示唆する。これらはGEONETにより得られた非定常地殻変動が発生していた時期と概ね一致している。

発表では、これらの解析によって得られた地殻上下変動の傾斜変化をプレート境界面上において発生した滑り

によるものと考え、より詳細に議論した結果について報告する。

キーワード：水準測量、地殻変動、東海地方

Keywords: leveling, crustal vertical deformation, Tokai region

## 精密水準測量によって検出された2014年御嶽山噴火前後の上下変動とその解釈 (2006-2015)

## Vertical Deformation Detected by the Precise Levelling Survey in the Periods of Before and After the 2014 Mt. Ontake Eruption and Their Interpretations (2006-2015)

\*村瀬 雅之<sup>1</sup>、木股 文昭<sup>2</sup>、山中 佳子<sup>3</sup>、堀川 信一郎<sup>3</sup>、松廣 健二郎<sup>3</sup>、松島 健<sup>4</sup>、森 濟<sup>5</sup>、吉川 慎<sup>6</sup>、宮島 力雄<sup>2</sup>、井上 寛之<sup>6</sup>、内田 和也<sup>4</sup>、山本 圭吾<sup>7</sup>、大倉 敬宏<sup>6</sup>、中元 真美<sup>4</sup>、吉本 昌弘<sup>3</sup>、奥田 隆<sup>3</sup>、三島 壮智<sup>6</sup>、園田 忠臣<sup>7</sup>、小松 信太郎<sup>7</sup>、片野 凱斗<sup>1</sup>、池田 啓二<sup>8</sup>、柳澤 宏彰<sup>8</sup>、渡辺 茂<sup>8</sup>、中道 治久<sup>7</sup>

\*Masayuki Murase<sup>1</sup>, Fumiaki Kimata<sup>2</sup>, Yoshiko Yamanaka<sup>3</sup>, Shinichiro Horikawa<sup>3</sup>, Kenjiro Matsuhira<sup>3</sup>, Takeshi Matsushima<sup>4</sup>, Hitoshi, Y. Mori<sup>5</sup>, Shin Yoshikawa<sup>6</sup>, Rikio Miyajima<sup>2</sup>, Hiroyuki Inoue<sup>6</sup>, Kazunari Uchida<sup>4</sup>, Keigo Yamamoto<sup>7</sup>, Takahiro Ohkura<sup>6</sup>, Manami Nakamoto<sup>4</sup>, Masahiro Yoshimoto<sup>3</sup>, Takashi OKUDA<sup>3</sup>, Taketoshi Mishima<sup>6</sup>, Tadaomi Sonoda<sup>7</sup>, Shintaro Komatsu<sup>7</sup>, Kaito Katano<sup>1</sup>, Keiji Ikeda<sup>8</sup>, Hiroaki Yanagisawa<sup>8</sup>, Shigeru Watanabe<sup>8</sup>, Haruhisa Nakamichi<sup>7</sup>

1. 日本大学文理学部地球科学科、2. 地震予知総合研究振興会東濃地震科学研究所、3. 名古屋大学大学院環境学研究科附属地震火山研究センター、4. 九州大学 大学院理学研究院 附属地震火山観測研究センター、5. 北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター、6. 京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設火山研究センター、7. 京都大学防災研究所附属火山活動研究センター桜島観測所、8. 気象庁

1. Department of Earth and Environmental Sciences, College of Humanities and Sciences, NIHON University, 2. Tono Research Institute of Earthquake Science, Association for the Development of Earthquake Prediction, 3. Research Center for Seismology Volcanology and Disaster Mitigation, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 4. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University, 5. Institute of Seismology and Volcanology, Graduate School of Science, Hokkaido University, 6. Aso Volcanological Laboratory, Graduate School of Science, Kyoto University, 7. Sakurajima Volcano Research Center, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 8. Japan Meteorological Agency

長野県・岐阜県境の御嶽山において2014年9月27日に水蒸気噴火が発生した。紅葉シーズンの休日の昼間であったため山頂付近では多くの登山者が噴火に遭遇し、多数の死傷者が発生する戦後最大の火山災害となった。2014年噴火後の10月15日～17日に測量した御嶽山東山麓の水準路線を2015年4月21日～24日に再測した。再測された水準路線は、2014年噴火以前から繰り返し測量されていた屋敷野路線（16km）、木曾温泉路線（7km）、2014年噴火後の2014年10月に、より山頂に近い領域での上下変動の検出をめざし新設された御岳ロープウェイ路線（8km）である。噴火後の半年間における上下変動として、水準路線の南東端の上松（御嶽山山頂南東側約20km）を不動点として、御岳ロープウェイ路線・屋敷野路線で約4mmの隆起が検出された。2014年噴火をはさむ2009-2014年の測量結果が屋敷野路線・木曾温泉路線において約10mmの沈降であるのに対し、噴火後半年間では概してわずかな山頂方向の隆起を示す結果となった。さらに、御岳ロープウェイ路線を3.1km、屋敷野路線を1.7km延長し第一回目の測量を行った。

また、2006年—2014年の水準測量データを用い、2014年噴火に至る噴火準備過程の解明を試みた。名大・他では2006年以降に限っても、2006年4月、2007年4月、2008年5月、2009年4月に路線の大部分が測量されている。また2013年8月にも短い距離ではあるが既存路線の一部が測量され、2014年噴火後は2014年10月に測量が行われている。過去の水準測量結果から上下変動の時間変化を検討すると、2006年以降は山頂方向の隆起を示す変動パターンであることが明らかとなった。2007年の小噴火後も、その隆起は沈降に転ずることはなく、2009年まで隆起傾向が継続している。短い区間の測量ではあるが2013年の測量結果からも、山頂方向の隆起が2013年まで継続していたことが示唆される。そして、2014年噴火をはさむ2009-2014年の測量では、山頂方向の沈降が検出された。

2014年噴火をはさむ沈降の期間（2009-2014）と、2014年噴火前の隆起の期間（2006-2009）において、それぞれ圧力源モデルを推定した。2014年噴火をはさむ沈降の期間の圧力源モデルとして、収縮する山頂直下の浅いシル状のクラックが推定された。また噴火前の隆起の期間のモデルとして、山頂直下の浅いシル状クラックと、その下の深いダイク状クラックの開口が推定された。

上下変動の時間変化と圧力源モデルから、以下のような火山活動の推移が示唆される。2006年に山頂直下へのマグマ貫入が発生し山頂直下の浅いシルと深いダイク状のクラックが開口し、2007年噴火が発生した。しかし2007年噴火後もマグマ供給は継続し2014年噴火が発生した。2014年噴火後、浅いシル状のクラックは収縮に転じた。

キーワード：御嶽火山、精密水準測量、地殻変動

Keywords: Ontake volcano, precise leveling survey, deformation

## 干渉SARデータから推定される箱根火山2015年噴火に伴う開口割れ目

Opening crack associated with the 2015 eruption of the Hakone volcano estimated from InSAR

\*道家 涼介<sup>1</sup>、原田 昌武<sup>1</sup>、本多 亮<sup>1</sup>、行竹 洋平<sup>1</sup>、萬年 一剛<sup>1</sup>、竹中 潤<sup>1</sup>\*Ryosuke Doke<sup>1</sup>, Masatake Harada<sup>1</sup>, Ryou Honda<sup>1</sup>, Yohei Yukutake<sup>1</sup>, Kazutaka Mannen<sup>1</sup>, Jun Takenaka<sup>1</sup>

1. 神奈川県温泉地学研究所

1. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture

## はじめに

神奈川県西部に位置する箱根火山では、2015年4月下旬より地震活動が活発化し、6月29日～7月1日にかけて小規模な水蒸気噴火が発生した。地震活動の活発化以後、ALOS-2/PALSAR-2の緊急観測が繰り返し行われ、大涌谷において局所的な隆起が観測された（小林ほか、2015など）。加えて、水蒸気噴火を挟む干渉ペアにおいては、大涌谷から南東方向に延びる直線を境とした位相の変化も観測されている（道家ほか、2015）。本発表では、この直線状の位相変化をもたらした開口割れ目について干渉SAR解析結果のインバージョンより推定した結果について報告する。

## 使用データおよび解析方法

ALOS-2/PALSAR-2データについては、水蒸気噴火を挟む干渉ペアの内、観測間隔が短く、衛星視線方向が異なる以下の2ペアを選択した。

1) 2015/6/18 -2015/7/2 Path:18 南行軌道・右観測 オフナディア角38.2°

2) 2015/6/7 -2015/7/5 Path:125 北行軌道・右観測 オフナディア角29.1°

干渉SAR解析にはsarmap社製のSARscapeソフトウェアを用い、国土地理院による10mDEMデータを使用し解析を行った。また、同ソフトウェアのモデリングツールを使用し、Okada (1985) による開口割れ目断層をインバージョンにより推定した。インバージョンの際、噴火を挟む期間の長さを考慮し、1)と2)の各データの重みを2:1とした。加えて、大涌谷においては局所的な隆起が認められることから、その変動を含む範囲のデータは、モデルの推定からは除外した。

## 結果および考察

1)のペアでは、大涌谷から南東方向に1.5～2kmの直線を境とする変位が推定され、その東側で衛星視線方向に4～6cm近づく変位が観測された。また2)のペアでは、大涌谷の東から南の範囲で全体として衛星から遠ざかる変位が推定された。

インバージョンによって推定された開口割れ目は、大涌谷付近を北端とする長さ1320m、幅292m、上端の標高約863m、走向319.9°、傾斜82.2°、開口量約14.5cmであり、その体積変化量は、約 $5.6 \times 10^4 \text{ m}^3$ であった。ただし、特に幅と開口量の間でトレードオフの関係があり、最適解は単一には求まらなかった。そこで、開口割れ目の位置、走向・傾斜を固定し、先の開口割れ目面の周囲延長部を含め、面上を50×50mのパッチに区切り、パッチ毎の開口量を線形インバージョンにより推定した。その結果、割れ目面の中央浅部（大涌谷の南200～500m）、南端部付近の2ヶ所で開口量のピークが得られた。このモデルによる体積変化量は $6.6 \times 10^4 \text{ m}^3$ と推定された。

推定された開口割れ目両端の深さ2km以浅には、6月29日～7月1日に発生した地震の震源（行竹ほか、2015）の集中域が認められる。また、開口割れ目が推定された位置は、過去の活動により形成された火口様の凹地が集中して分布する位置（小林、2008）と概ね対応する。加えて、箱根火山で現在活発な噴気地帯である大涌谷、早雲山、湯ノ花沢が、この開口割れ目の近傍に分布することから、北西-南東走向の既存の構造に熱水や水蒸気が入り込んだことにより、地表面の変位がもたらされたと考えられる。

傾斜変動からは、2015年6月29日の午前7時33分頃からの約1分間で、開口割れ目が形成されたことが示されており（本多ほか、2015）、干渉SARから推定される開口割れ目も、この時間に形成された可能性が高い。すなわち、開口割れ目の貫入が、その北端に位置する大涌谷の浅部の膨張源を励起し、6月29日からの水蒸気噴火に至ったと考えられる。

### 謝辞

ALOS-2/PALSAR-2データは火山噴火予知連絡会衛星解析グループを通してJAXAよりご提供頂きました。本研究は、文部科学省の「都市の脆弱性が引き起こす激甚災害の軽減化プロジェクト」による支援を受けました。ここに記して感謝します。

キーワード：箱根火山、2015年水蒸気噴火、干渉SAR、開口割れ目、モデル化

Keywords: Hakone Volcano, 2015 phreatic eruption, InSAR, Opening crack, Modeling

## 松代の伸縮計における降水補正

## Rainfall correction of the Extensometer at Matsushiro

\*木村 一洋<sup>1</sup>、小林 昭夫<sup>1</sup>、舟越 実<sup>2</sup>\*Kazuhiro Kimura<sup>1</sup>, Akio Kobayashi<sup>1</sup>, Minoru Funakoshi<sup>2</sup>

1.気象研究所、2.気象庁地震火山部 地震津波監視課松代地震観測所

1.Meteorological Research Institute, 2.Matsushiro Seismological Observatory, Earthquake and Tsunami Observation Division, Seismological and Volcanological Department, Japan Meteorological Agency

気象庁が松代（長野県長野市）の大坑道のトンネル内に設置している100mの石英管伸縮計は、長期間にわたる安定したデータが連続観測されている。この松代の伸縮計は、他の場所のトンネル内に設置された伸縮計の多くと同様に降水の影響を受ける。特に伸縮計の南北成分は降水の影響が大きく、西前・涌井（1996）は1990年の1年間の伸縮計の南北成分の観測データと坑道外の露場の雨量計の降水量データを用いてタンクモデルによる降水補正に取り組み、良好な結果を得た。しかし、松代地震観測所の各種刊行物における伸縮計のデータには、残念ながらこの降水補正が反映されていない。

近年、木村・他（2015）は気象庁が東海地域から南関東地域にかけて設置した複数のボアホール式の体積ひずみ計データについてタンクモデルによる降水補正に取り組んだ。その調査結果は2014年1月より気象庁業務に導入され、地震防災対策強化地域判定会の資料や地震予知連絡会会報のひずみ計のデータにも反映されるようになり、特に体積ひずみ計については長期的なデータの品質が向上した。そこで、松代の伸縮計についても木村・他（2015）による降水補正手法を適用した場合に長期的なデータの品質が向上するかどうかについての調査を行うこととした。

西前・涌井（1996）は試行錯誤によってパラメータを推定していたが、本調査は現在の恵まれた計算機資源を生かしてSCE-UA法（Duan, 1994）によって計算機で力任せに推定したことが大きな違いである。西前・涌井（1996）と本調査は形状が異なるものの3段のタンクモデルを用いた点では共通であり、本調査で用いたタンクの形状で西前・涌井（1996）を表すことも可能である。本調査で2011年から2014年の4年間の伸縮計の観測データと露場の雨量計の降水量データを用いて推定したパラメータのうち、各タンクの水位を伸縮（ひずみ）に換算する補正係数に着目すると、伸縮計の南北成分については1段目のタンクの補正係数が2段目や3段目に比べて1桁小さく、2段目と3段目のタンクの補正係数の符号が反転して推定された。これは、西前・涌井（1996）によって試行錯誤で決めたパラメータ（1段目は無視、2段目は $-0.5e-6$ strain/mm、3段目は $+0.17$ strain/mm）とも整合する。

その他、伸縮計の南北成分だけでなく東西成分の降水補正の調査結果や、用いる降水量データ（坑道外の露場の雨量計、長野・聖高原・上田・菅平の各アメダス）を変えた場合の比較調査結果についても紹介する。

キーワード：伸縮計、降水補正、SCE-UA法

Keywords: Extensometer, rainfall correction, shuffled complex evolution method developed at the university of arizona

## 侵食地形量を用いた邑知瀧断層帯北部の地殻変動

Morphometric evaluation of tectonic activity in the northern Ochigata fault zone in the Southern Noto Peninsula, north-central Japan

\*山口 弘幸<sup>1</sup>、竹内 章<sup>2</sup>

\*Hiroyuki Yamaguchi<sup>1</sup>, Akira Takeuchi<sup>2</sup>

1.富山大学大学院理工学教育部、2.富山大学大学院理工学研究部

1.Graduate School of Science and Engineering for Education, University of Toyama, 2.Graduate School of Science and Engineering for Research, University of Toyama

石川県中央部の宝達丘陵北縁から西部には、北東-南西方向に伸びる邑知瀧断層帯と呼ばれる長さ44kmの活断層帯が分布する。邑知瀧断層帯は北部に分布する石動山断層、古府断層および南部の3条に分岐している野寺断層、坪山-八野断層、内高松付近の断層に分けられる。これらはいずれも逆断層で、石動山断層、野寺断層北部、内高松付近の断層は東側隆起、古府断層、野寺断層南部、坪山-八野断層は西側隆起とされている。邑知瀧断層帯の最新活動や活動間隔等の活動性については、石動山断層中央部のトレンチ調査等によって明らかにされており、石動山断層南部では地質構造等から中期更新世以前に隆起運動が終了したと指摘されているが、断層帯全体の地殻変動の傾向については良く分かっていない。そこで、本研究では地殻運動による活動性を表す地形指標である $S_{mf}$ と $V_f$ を用いて、東側隆起の逆断層が分布する邑知瀧断層帯北部の地殻変動について検討した。

$S_{mf}$ は山麓沿いの平野-山地境界 (mountain front) の湾入距離とmountain frontの直線距離の比で表され、隆起的な地域ほど湾入の程度は悪く $S_{mf}$ 値は小さな値を示す。 $V_f$ とは谷底幅と尾根-谷底間の標高差の比で表され、隆起的な地域ほどV字形の断面形状を示し、 $V_f$ 値は小さくなる。 $V_f$ 値は、mountain frontから山側200mの位置で断面図を作成し算出した。解析には国土地理院公表の5m-DEMを使用し、mountain frontの判読には5m-DEMから作成した斜度図と地上開度図を重ね合わせた地形図を使用した。

邑知瀧断層帯北部の隆起傾向を表すために、石動山断層の分布範囲でMountain front を22区間、野寺断層北部では3区間に分けて地形解析を行った。その結果、 $S_{mf}$ 値は石動山断層北部区間で3~6程度、中央部で2~3.5程度、南部区間で4~25程度、野寺断層北部区間で3.5~11程度となった。 $V_f$ 値は石動山断層北部区間で2~6程度、中央部で0.5~3程度、南部区間で4~35程度、野寺断層北部区間で4~6程度である。 $S_{mf}$ 、 $V_f$ 値ともに石動山断層中央部で小さく、石動山断層端部および野寺断層北部に向かって増加する傾向が見られる。このことは、石動山断層中央部で最も活動性が高く、石動山断層北部と南部および野寺断層北部に向かって活動性が減少していることを示唆している。

本研究で用いた $S_{mf}$ と $V_f$ はこれまで日本における研究事例はなく、今回得られた値と隆起速度の関係を検討するためには、他の断層帯で地質学的に得られている平均変位速度と侵食地形量に関するデータを蓄積していく事が重要である。

キーワード：地形解析、地殻変動、邑知瀧断層帯

Keywords: morphometric analysis, tectonic activity, Ochigata fault zone