

粘弾性応答を考慮した2011年東北沖地震の余効すべりの時空間分布 Spatio-temporal afterslip distribution of the 2011 Tohoku-Oki earthquake considering viscoelastic response

鈴木 翔太¹; 伊藤 武男^{1*}; 里 嘉千茂²; 兵藤 守³
SUZUKI, Syota¹; ITO, Takeo^{1*}; SATO, Kachishige²; HYODO, Mamoru³

¹名古屋大学大学院環境学研究科, ²東京学芸大学教育学部, ³海洋研究開発機構 地球内部ダイナミクス領域
¹Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, ²Faculty of Education, Tokyo Gakugei University, ³Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

1. はじめに

2011年3月11日に東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)が発生した。この地震による地殻変動がGEONETや海底地殻変動観測点により観測されており、地震時には日本列島が東向きに変動した。地震後の変動は陸上の観測点では東向きの変動であるが、「宮城沖1」などの海底地殻変動観測点では西向きの変動を示している。地震後の地殻変動の主な原因としては、余効すべりと粘弾性応答があげられる。余効すべりは地震時に破壊した領域の周辺で応力が集中し、その応力集中を緩和するために発生するゆっくりとしたすべりであり、主に地震時と同じ方向の地殻変動が地表では観測される。また、粘弾性応答は地震時のすべりによりアセノスフェアに再分配された応力の緩和現象にともなう地殻変動であり、変動パターンは複雑である。本研究では、これらの2つの現象を考慮し、GEONETと海底地殻変動観測のデータをインバージョン解析することで、2011年東北沖地震の地震時、地震後のすべりの時空間分布を見積もる。

2. 解析手法

断層面上のすべりと地表面での変位の関係を表すグリーン関数は有限要素法を用いて計算した。有限要素法を用いることで、3次元的なプレートの沈み込みの形状や地殻・マントルなどの物性値を考慮した上で弾性的・粘弾性的な地殻変動を計算できる。本研究では東日本の2600×1500×400kmの領域をモデル化した。上部マントルの粘性率はOhzono et al. (2012)を参考に $4.0 \times 10^{18} \text{Pa} \cdot \text{s}$ を採用した。地殻変動データはGEONETと海底地殻変動観測点から得られたものを用いた。観測されたデータには年周変化が含まれているため、最小二乗法によりそれらを取り除いた。インバージョン解析には、すべりがなめらかになるような先験情報を導入した。このすべりのなめらかさの強さを決めるハイパーパラメータは、ノイズリダクションや地震時のMwから最適と思われる値を選択した。

3. 結果・考察

地震時のすべりは宮城沖の海溝付近に位置しており、最大すべりは海溝付近で約60mとなった。また、余効すべりの領域は地震時の破壊領域とは相補的な関係があり、過去のプレート境界での大地震の破壊領域とも相補的な関係があった。余効すべりの大きさは粘弾性を考慮した解析の場合は地震後2.5年間で最大で2mに達し、粘弾性を考慮しない場合では最大で4mに達した。余効すべりによるモーメントマグニチュードは地震後2.5年間で8.06に達しており、余効すべりは今後も発展すると思われる。また、余効すべりの分布は粘弾性を考慮しない場合に比べ、福島沖の余効すべりは顕著に小さくなっており、海底地殻変動観測によって観測された、「宮城沖1」の西向きの変動も粘弾性応答で説明可能であった。このことから上部マントルの粘弾性応答に起因する地殻変動の影響は大きく、逆解析にて考慮する必要がある。

キーワード: 余効すべり, 粘弾性応答, 有限要素法
Keywords: Afterslip, Visco-elastic response, FEM

水準測量より明らかにした東北地方太平洋沖地震による鳴子地域の上下地殻変動 Vertical displacement in Naruko Volcano area following the 2011 Tohoku earthquake deduced from precise leveling survey

塚本 雄也^{1*}; 杉山 賢一¹; 藤田 和果奈¹; 渡辺 慶太郎¹; 渡邊 虹水²; 高畑 明拓²; 松岡 萌²; 後藤 章夫³; 太田 雄策²
TSUKAMOTO, Yuya^{1*}; SUGIYAMA, Kenichi¹; FUJITA, Wakana¹; WATANABE, Keitaro¹; WATANABE, Kosui²; TAKAHATA, Akihiro²; MATSUOKA, Moe²; GOTO, Akio³; OHTA, Yusaku²

¹ 東北大学理学部, ² 東北大学大学院理学研究科, ³ 東北大学東北アジア研究センター

¹Fac. Sci., Tohoku University, ²Grad. School Sci., Tohoku University, ³CNEAS, Tohoku University

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴い、太平洋沿岸で大きな沈降が起きた。沈降量は、内陸（西側）に行くに従って小さくなっていることが、GPSの広域観測で示されている (<http://www.gsi.go.jp/common/000059956.pdf>)。我々は、この変動を捉えるべく、東北大学理学部地球惑星物質科学科の野外実習の一環として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の約10km区間（水準点番号047-064から047-074；以下、BM64, BM74などと表記）の水準測量を行った。測量は2011年8月23日から28日までと2013年8月19日から25日までの2回行い、いずれにも標尺はライカGPCL3、水準儀はライカDNA03を用いた。2009年の国土地理院の測量成果と比較することで、最も東側のBM64に対するほかの水準点の比高変化を求めた。いずれの水準点間も往復測量を行い、往復残差が一等水準測量を満たさないものは再測を行った。但し、実習期間の制約から、2011年のBM66-BM68間、2013年のBM72-BM74間は、片道測量しか行われていない。

測量前の予想に反し、この区間では、西に行くほどBM64に対して沈降していることがわかった。地震の5か月後に行われた2011年8月の測量では、BM66からBM74はそれぞれ、13.0mm (BM66), 21.4mm (BM68), 81.7mm (BM70), 91.1mm (BM72), 113.9mm (BM74) 沈降し、10kmの基線にも関わらず大きな地震時変位とそれに引き続く余効変動が観測された。さらに2013年8月の測量の結果を2011年8月と比べると、8.5mm (BM66), 16.2mm (BM68), 23.7mm (BM70), 41.9mm (BM72), 46.2mm (BM74), それぞれ沈降していた。2011-2013年で得られた変位の空間パターンは2009-2011年で得られた結果とほぼ同一である。

Ozawa and Fujita (2013), Takada and Fukushima (2013) は In-SAR および GPS データの解析から、東北地方では主な火山地域で沈降が見られることを明らかにした。この沈降は、火山帯の地下にある軟らかな高温岩体が東西方向に引き伸ばされたことで起きたとされている。今回の調査区間はこの地域に含まれ、我々の測量結果はこれと調和的である。一方でこれらの先行研究は地震に伴う変動のみに着目しているが、我々の結果は地震後も鳴子周辺域では継続して沈降が継続していることを示唆する結果となった。特に、鳴子カルデラの縁にかかると見られるMB68とBM70の間で、沈降量が急増するのは注目に値する。

謝辞

2011年の水準測量に参加された小林諒平さんと原永美さんに感謝いたします。

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

超伝導重力計による 2011 年東北地方太平洋沖地震後の重力変化 Postseismic gravity changes after the 2011 Tohoku earthquake recorded by superconducting gravimeters

今西 祐一^{1*}; 田村 良明²; 名和 一成³; 池田 博⁴

IMANISHI, Yuichi^{1*}; TAMURA, Yoshiaki²; NAWA, Kazunari³; IKEDA, Hiroshi⁴

¹ 東京大学地震研究所, ² 国立天文台, ³ 産業技術総合研究所, ⁴ 筑波大学

¹ERI, The University of Tokyo, ²NAOJ, ³AIST, ⁴University of Tsukuba

2011 年東北地方太平洋沖地震は、広い範囲で大規模な地殻変動を引き起こしたが、地表における重力にも大きな影響を与えていることが、松代（長野県）および神岡（岐阜県）の超伝導重力計の記録から明らかになってきた。いずれの観測点においても、地震以前には重力はほぼ一定だったが、地震発生後はほぼ同じレート（およそ 10 マイクロガル/年）で重力が減少し、現在もその傾向が続いている。これらの観測点は、震源域からはある程度離れており（震央距離はそれぞれ約 420km および約 490km）、GEONET のデータによれば余効変動は比較的小さい。したがってこの重力減少は観測点の隆起では説明できず、地下の物質の粘弾性的な流動による密度分布の変化を反映していると考えられる。発表の際は、本州にあるもう一つの観測点である水沢（岩手県）の記録もあわせて紹介する。

キーワード: 超伝導重力計, 2011 年東北地方太平洋沖地震, 余効変動, 粘弾性

Keywords: superconducting gravimeter, 2011 Tohoku earthquake, postseismic gravity changes, viscoelasticity

2013年樽前山近傍の地震活動に先行した地殻変動の圧力源モデル (詳報) Pressure Source Model Inferred from Crustal Deformation Preceding Seismic Swarm in 2013 beneath Tarumae Volcano

小四郎丸 拓馬¹; 村上 亮^{1*}
KOSHIROMARU, Takuma¹; MURAKAMI, Makoto^{1*}

¹ 北海道大学大学院地震火山研究観測センター
¹ ISV, Hokkaido University

樽前山は北海道の南西部に位置する標高 1,041m の活火山である。歴史時代には、1667 年と 1739 年に大規模なプリニー式噴火が発生した。また、1909 年噴火では、山頂に溶岩ドームを形成する噴火を起こしており、本格的なマグマ噴火を頻繁に繰り返している。

しかし、近年の火山活動は、噴気や浅部の火山性地震活動に限られていて、概ね低調である。気象庁などの GPS 繰り返し観測では、溶岩ドーム付近で変動が見いだされているが、力源は比較的浅部に推定されている。一方、国土地理院や気象庁が実施しているやや広域の GPS 連続観測では、深部の火山活動によると考えられる地殻変動は認められていない。これまで、樽前山深部の流体活動を示唆する地殻変動は捉えられてこなかった。

2013 年 7 月上旬頃から、従来は顕著な地震活動が無かった山頂ドームの西方 2km の深さ約 3-5km の領域において、活発な地震活動が始まったが、それに先立ち地殻変動が進行していたことが、傾斜及び歪変化が樽前山周辺の複数の連続地殻変動観測点の記録から確認された。変化の大きさは、およそ $1 \mu \text{ rad}/\mu \text{ strain}$ レベルであった。複数の観測点に同期して現れており、その出現期間は、降雨及び遠地震の影響の可能性が低いことから、地下の力源の何らかの活動に起因する可能性が高い。地殻変動は 7 月中旬までに集中して発生しており、それ以降は、2014 年 2 月時点に至るまで、認められていない。

地殻変動は球状圧力源及びシルを仮定して、グリッドサーチを試みた。山頂ドームの北北西方向の深さ 4.2km (海拔) に体積変化量 $3.4 \times 10^5 \text{ m}^3$ の膨張性球状圧力源が最も良く観測値を説明する。力源の位置は、2013 年 7 月頃より増加した地震活動の震源域のやや東方である。

力源の位置や活動時期が地震活動のそれらと近接しているため地殻変動と地震活動の間には何らかの関連性があると考えられる。講演では、示唆される両者の関係についても議論する。

キーワード: 地殻変動, 活火山, 群発地震活動, 樽前山

Keywords: Crustal Deformation, Active Volcano, Swarm Earthquake, Tarumae Volcano

繰り返し GPS 観測による雌阿寒岳及び十勝岳の火山性地殻変動の検出 Campaign GPS for detection of the volcanic deformation on and around Mt.Meakan and Mt.Tokachi

和田 さやか^{1*}; 森 済¹; 奥山 哲¹

WADA, Sayaka^{1*}; MORI, Hitoshi, Y.¹; OKUYAMA, Satoshi¹

¹ 北海道大学院理学院地震火山研究観測センター

¹ Hokkaido University, Institute of Seismology and Volcanology

雌阿寒岳は北海道の東部に位置し、1996年、1998年、2006年および2008年には水蒸気噴火が発生しており、数年おきに水蒸気噴火を起こしている。また、十勝岳は北海道の中央部に位置し、道内でも有数の活動的火山である。最近の活動は活発で、ここ100年間では、1926年、1962年および1988~89年には大規模なマグマ噴火が発生している。本発表では、雌阿寒岳および十勝岳における広域繰り返しGPS観測の結果について議論する。

雌阿寒岳においては2006年から、十勝岳では2007年から繰り返しGPS観測を行っている。観測点は、雌阿寒岳では8点、十勝岳では12点を設置し、毎年数日~数週間の繰り返しGPS観測を行っている。本発表では、これらの毎年の観測データのうち、十勝岳では2007年以降、雌阿寒岳では2008年噴火以降の観測データを用いた。さらに、これらの繰り返しGPS観測と同期間の気象庁の観測点における観測データを同時に用いて、各火山における地殻変動の時系列変化を推定した。データ解析には、解析ソフトウェアRTKLIB(高須ほか、2007)を用い、観測データから各火山における地殻変動の時系列変化を推定した。これらの時系列変化のデータには、火山性と思われる地殻変動だけでなく、地域的なテクトニックな変動や、2011年3月11日の東北沖太平洋地震による変動が含まれている。これらの変動の補正を行うために、各火山周辺の国土地理院の電子基準点(GEONET)における連続観測データを用いた。2007年から2013年までのGEONETのデータを用いて、各火山地域におけるテクトニックな変動と東北沖太平洋地震に伴った変動を空間的に線形近似して推定した。また、より詳細に変動を推定するためには、季節変化による影響をも考慮に入れる必要があると考えられる。地域的なテクトニックな変動や、地震による変動、そして季節変化の補正を行うことで、推定された火山性地殻変動について、詳細な議論を行う。

謝辞

本研究においては、気象庁札幌管区气象台にGPS観測データを提供していただきました。感謝致します。また、国土地理院の電子基準点GPS連続観測データを使用させていただきました。

キーワード: 繰り返しGPS観測, 火山性地殻変動, 十勝岳, 雌阿寒岳

Keywords: campaign GPS observation, volcanic crustal deformation, Mt. Tokachi, Mt. Meakan

蔵王山の火山活動に伴う地殻変動 Crustal deformation associated with the unrest of Zao Volcano

三浦 哲^{1*}; 西村 太志¹; 太田 雄策¹; 山本 希¹; 出町 知嗣¹; 立花 憲司¹; 近江 克也²; 篠原 英一郎²
MIURA, Satoshi^{1*}; NISHIMURA, Takeshi¹; OHTA, Yusaku¹; YAMAMOTO, Mare¹; DEMACHI, Tomotsugu¹; TACHIBANA, Kenji¹; OHMI, Katsuya²; SHINOHARA, Eiichiro²

¹ 東北大学理学研究科, ² 仙台管区気象台

¹ Graduate School of Science, Tohoku University, ² Sendai District Meteorological Observatory

はじめに

宮城県と山形県の県境に位置する蔵王山では、2013年1月に初めて火山性微動が観測されて以降、その後も月に1回程度の頻度で繰り返し観測されている(気象庁, 2013)。蔵王山は2011年東北地方太平洋沖地震の震源域に最も近い火山でもあり、今後の活動の推移が注目される。

東北大学では、蔵王山周辺の火山活動をより詳細に把握するため、2013年新たに地震計4点、傾斜計1点、GPS連続観測5点、全磁力2点等の観測網を展開した。本報告では、これまでの観測により得られている蔵王山周辺の火山活動に伴う地殻変動について報告する。

GPS 連続観測網

これまで、蔵王山周辺のGPS連続観測網は、国土地理院によるGEONETに加えて気象庁の坊平観測点(J310)のみであったが、2013年4月末に本学蔵王観測所に設置したのをはじめ、9月末までに白石スキー場、セントメリースキー場、宮城県営山頂レストハウス、蔵王ロープウェイ地蔵山頂駅への設置を行った。

新設観測点においては、GPSアンテナは既存の建物や構造物の外壁、屋上等に固定した金属製ポールに取り付けた。データは携帯通信端末によりインターネットに接続し、毎日定時に自動で収集している(出町・他, 2011)。

データ解析には、GIPSY-OASIS II ver. 6.2の精密単独測位法(Precise Point Positioning, PPP)を用いた。衛星の軌道情報はITRF2008に準拠したIGS08を、中性大気中の水蒸気に対する補正にはGMF(Boehm et al., 2006)を用いた。

傾斜観測

蔵王山周辺では、本学蔵王火山観測所及び気象庁坊平観測点においてボアホール型傾斜計による観測が行われていたが、いずれも火口湖である御釜からそれぞれ約3 km, 5 kmの距離に位置している。本学では蔵王山の火山活動活発化に対応して、超長周期地震(VLP)の震央となっている御釜の南西約500mの位置(馬の背)に深度約10mのボーリング坑を掘削し、Pinacle社の傾斜計を設置した。

結果

東北地方においては、2011年東北地方太平洋沖地震後の顕著な余効変動が今なお継続しており、蔵王山の火山活動に関連する地殻変動を抽出するためには、余効変動成分を除去する必要がある。余効滑りや粘性緩和などを考慮した余効変動の時間発展を精確に再現する物理モデルが構築されれば、それに基づいて余効変動成分を取り除くことも可能であるが、現段階ではそれ自体が重要な研究課題であることから、本研究では余効変動が広域で長期間継続していることを利用してフィルタリングによる除去を試みた。

蔵王山を含む約100 km四方の範囲にあるGPS連続観測点において2013年5月から11月までの7ヶ月間のデータから得られた変位場に対して、余効変動を緯度経度の3次関数により近似して除去したところ、蔵王山周辺の観測点ではいずれも数mm程度以下の残差変位場を抽出できたが、全体的に東方向への変位が卓越する傾向が見られた。仮定した次数が不十分である可能性があり、今後さらなる検討が必要である。

一方、すべり速度/状態依存摩擦法則によれば、大地震の余効滑りは時間に対する対数関数で近似できるとされている(例えばMarone et al., 1991)。PPP法による解析結果にはプレート運動による剛体回転成分も含まれることを考慮して、さらに1次関数も加えて東北地方太平洋沖地震後の各観測点の変位時系列を近似したところ、残差は非常に小さくなり観測結果をよく説明できることがわかった。残差時系列に基づいた2013年10月から12月までの蔵王山周辺の地殻変動をみると、数mm程度ではあるが山体の膨張傾向を示しているものの、まだノイズレベル以下の変動であり、今後の傾向を注意深く見ていく必要がある。

傾斜計による観測データについては、一般に降雨や季節変動等の影響もあって、数ヶ月程度以上の時定数をもつわずかな現象を捉えることは困難であり、蔵王山周辺の傾斜計でも、今回の火山活動に関連すると思われる長期的変化は現在のところ見られない。一方、2013年1月以降に発生している大きめのVLPに伴った変化が傾斜計でも捉えられており、周期数秒程度の傾動変化は広帯域地震計による粒子軌跡と同様に震源方向を向いている。さらに、これらの短周期変動に先行して約5分前からramp関数的な変動が見られる場合もあり、VLPの発生機構を考える上で重要と考えられる。

参考文献

Boehm et al. (2006), GRL, 33, L07304, doi:10.1029/2005GL025546.

出町・他(2011), 2011年JpGU大会.

SSS33-06

会場:315

時間:4月30日 10:15-10:30

気象庁 (2013), http://www.seisvol.kishou.go.jp/tokyo/STOCK/kaisetsu/CCPVE/shiryo/127/127_no06_2.pdf
Marone et al. (1991), JGR, 96, 8441-8452.

キーワード: GPS, 傾斜変動, 火山性地殻変動, 火山活動

Keywords: GPS, Ground Tilt, Volcanic deformation, Volcanic activity

The acceleration episode of the back-arc rifting in the Izu-Bonin Arc possibly triggered by a remote earthquake in 2004

The acceleration episode of the back-arc rifting in the Izu-Bonin Arc possibly triggered by a remote earthquake in 2004

ARISA, Deasy^{1*}; HEKI, Kosuke¹
ARISA, Deasy^{1*}; HEKI, Kosuke¹

¹Department of Natural History Sciences, Faculty of Science, Hokkaido University

¹Department of Natural History Sciences, Faculty of Science, Hokkaido University

The Izu-Ogasawara (Bonin)-Mariana Island arc lies along the convergent boundary between the subducting Pacific plate (PA) and the overriding Philippine Sea plate (PH) in the western Pacific. Nishimura (2011) found that the back-arc rifting goes on behind the Izu arc by studying the horizontal velocities of GNSS stations on the Izu Islands. Here we show that this rifting has accelerated in 2004 using GNSS data at stations such as Aogashima, Hachijojima, Mikurajima, Shikinejima, and Nijima (we excluded stations in the Miyake Island because of the volcanic deformation).

The back-arc rifting behind the Izu islands can be seen as the increasing distance between stations in the Izu Islands (they are located to the east of the rifting axis) and stations located in the stable part of PH, e.g. Minami- and Kita-Daito islands. We found that their movement showed clear acceleration around the third quarter of 2004. Such an accelerated eastward movement could be interpreted not only as the acceleration of the back-arc rifting, but also as the trenchward movement of the arc due to a slow slip episode at the PH-PA boundary.

We first rule out the second possibility by constraining the onset time of the acceleration episode, and by correlating it with other inter-plate earthquakes in the PH-PA boundary. There was an inter-plate earthquake occurred on May 29, 2004 (M6.5) at the PA-PH boundary just to the south of the Boso-oki triple junction. However, the time series clearly lacked the jump which should mark the onset of the eastward slow movement. Moreover, the additional velocity vectors do not converge to the epicenter, and the onset time that minimizes the post-fit residual is significantly later than May. We therefore conclude that the accelerated eastward movement started in 2004 was not due to the afterslip of the interplate earthquake in May.

We found that the onset time coincides with the occurrence of the September 5, 2004, Kii-Hanto-oki, September 5, 2004, earthquake (M7.4), which occurred in the PH slab subducting at the Nankai Trough off the Kii Peninsula. We found that the accelerated movement vectors of these islands are almost parallel with each other, and perpendicular to the rift axis. We hypothesize that the seismic wave radiated from the epicenter of this earthquake dynamically triggered the acceleration of the back arc opening in the Izu Arc.

キーワード: GPS, GNSS, Izu-Bonin Arc, time series, back-arc opening, acceleration

Keywords: GPS, GNSS, Izu-Bonin Arc, time series, back-arc opening, acceleration

GPS 変位速度場から推定した中央構造線の深部構造と運動様式 Subsurface structure and slip pattern of the Median Tectonic Line, SW Japan inferred from GPS displacement rate field

枝川 乃舞子¹; 田部井 隆雄^{1*}; 一谷 祥瑞²; 中村 保彦²
EDAGAWA, Nobuko¹; Tabei, Takao^{1*}; ICHITANI, Shozui²; NAKAMURA, Yasuhiko²

¹ 高知大学理学部, ² 高知大学大学院総合人間自然科学研究科
¹Fac. Science, Kochi Univ., ²Grad. School Int. Arts Sciences, Kochi Univ.

西南日本を東西に縦断する中央構造線 (MTL) は、南海トラフにおけるフィリピン海プレートの斜め沈み込みに起因する右横ずれ断層で、西南日本を外帯と内帯に分割する。外帯はプレート沈み込みによる北西-南東方向の強い圧縮を受けながら、MTL を境に内帯ブロックに対してわずかに西向きに横ずれ運動し、前弧スリバーを形成している。こうした地殻変動場の解明には、南海トラフにおけるプレート境界面上の固着分布に加え、MTL 断層面の構造と運動様式が重要な要因となる。加えて、MTL はそれ自身が将来に内陸直下型の大地震を引き起こす可能性を有しており、地震災害リスク評価の面からも重要な監視対象である。

我々は国土地理院 GEONET を補完する MTL 横断稠密 GPS 観測を実施し、プレート沈み込みの影響を除去した変位速度場から、MTL 北側の幅 20-30km の領域に外帯/内帯の相対運動の遷移帯が存在することを示した (Tabei et al., 2002)。これを説明するため、MTL 周辺の地質構造は北傾斜であるという反射法地震探査結果 (Ito et al., 1996) を用い、北傾斜した断層面の上部が深さ 15 km まで固着し、それより深部で定常的右横ずれが起きているというモデルを提唱した。このモデルで速度場の遷移帯をうまく説明できるものの、傾斜断層面上の純粋な横ずれ運動という、応力場の観点からはいささか不自然な点が残った。さらに、MTL 北側の讃岐平野、燧灘、高縄半島では高角断層面上の右横ずれメカニズムを示す地震が MTL と平行に帯状に発生し (久保・岡田, 2007)、MTL の地表トレースや北傾斜構造と整合しない。こうした問題の解明には MTL 北側での地殻変動観測が重要であるが、瀬戸内海存在により GEONET 観測点密度は低い。そこで、これを補完する目的で、燧灘とその周辺に計 3 点の GPS 連続観測点を設置し、2010 年 11 月より観測を実施している。

MTL 周辺の北傾斜構造と、MTL の北側に連なる高角/右横ずれメカニズムの地震分布の両方を説明するものとして、以下の運動学的モデルを提唱する。北傾斜した MTL 断層面上の盤内に、MTL と平行に複数の鉛直/右横ずれ断層が存在し、断層面が固着して外帯/内帯の相対運動を分散して阻害することで、全体として変位速度場の遷移帯を形成する。今回は深さの異なる 4 枚の平行断層を仮定した。ブロック速度の 1/4 に相当するすべり欠損速度を各断層に与え、それぞれが作る変位場とブロック運動を合算すると、1 枚の傾斜断層による遷移帯とほぼ同等の結果が得られた。

なお、2011 年東北地方太平洋沖地震の発生が西南日本の地殻変動場に及ぼした影響を調べるため、GEONET 574 点の F3 解を用いて地震前 (2006 年 1 月-2009 年 12 月) と地震後 (2011 年 3 月-2013 年 7 月) の変位速度場を算出した。地震後の変動場には東北東に 1-4 cm/yr の広域の速度が重畳しており、震源域に向かう伸張ひずみが認められる。しかし、フィリピン海プレートの沈み込みに伴う北西-南東方向の圧縮場に有意な変化は認められない。

キーワード: 中央構造線, 南海トラフ, GPS, 地殻変動

Keywords: Median Tectonic Line, Nankai Trough, GPS, Deformation

南西諸島北部における GPS 連続観測 Continuous GPS observation in northern part of Nansei Islands

中尾 茂^{1*}; 八木原 寛²; 平野 舟一郎²; 後藤 和彦²
NAKAO, Shigeru^{1*}; YAKIWARA, Hiroshi²; HIRANO, Shuichiro²; GOTO, Kazuhiko²

¹ 鹿児島大学工学研究科, ² 鹿児島大学南西島弧地震火山観測所
¹GSSE, Kagoshima Univ., ²NOEV, Kagoshima Univ.

GEONET, which is a nationwide GPS observation in Japan cover on all over Japan. However, there is a GEONET site in Toshima-mura which is located in northern part of Nansei Islands. This region is defined the boundary between Northern and Central part of Ryukyu arc (Nishimura et al., 2004). It is not clear that where is the boundary because there is almost no GPS site. Goto (2013) concluded that the great earthquake occurred in 1911 is the interpolate event in this region. We set up the continuous GPS in islands of this region due to observe crustal deformation in this region.

In Akuseki Island (AKSK), Takarajima (TAKR) and Kuchinoshima (KCHI), continuous GPS (CGPS) observation started in March 2007, July 2007 and September 2010, respectively. CGPS set up on Gajyajima (GJYA) and Ujishima (UJIS), where is a deserted island, in May 2009. CGPS in Yokoatejima (YKAT) started in September 2013. Data is recorded at CGPS sites. Electric power system at GJYA, UJIS and YKAT is composed of batteries and photovoltaic cells.

Bernese GPS Software ver. 5.0 are used with IGS precise ephemerides and IERS rotation parameters. We also estimated tropospheric delays every hour and their horizontal gradients every six hours.

The short-term repeatabilities are from 1.6 to 3.0 mm in horizontal component and from 6.5 to 7.9 mm in vertical components. These observation is expected to make contribution to resolve rigid movement and crustal deformation in this region.

合成開口レーダを用いたタンザニアの群発地震における地殻変動の検出とその発生メカニズムについて The detection of crustal deformation associated with earthquake swarm in Tanzania observed by SAR

姫松 裕志^{1*}; 古屋 正人¹
HIMEMATSU, Yuji^{1*}; FURUYA, Masato¹

¹ 北海道大学大学院理学院
¹ Graduate School of Science, Hokkaido University

東アフリカ地溝帯は、陸域で発散するプレート境界がある数少ない地域である。この地域は東西に年間数 cm 拡大し続け、数百万年後には大陸が分断するとされている。また、この地域では中規模の地震や火山活動が活発にみられ、至る所に断層や火山が存在する。

2007年7月にタンザニア北部で最大 Mw5.9 の地震を含む群発地震が発生し、およそ2ヶ月にわたって続いた。Global CMT の発表によると、この群発地震の間に M>5 の地震は8回発生しており、それらはいずれも正断層型の地震である。また群発地震が始まって1週間後には、震源域に近い Oldoinyo Lengai が噴火を始め、群発地震が終息に近づいた頃に噴煙中を伴う噴火をした。

Biggs et al.(2009,2013) では、主に C バンド衛星である ENVISAT/ASAR のデータに基づいて時系列的な群発地震と Oldoinyo Lengai の噴火に伴う地殻変動を検出した。しかし位相アンラップが部分的にできていない領域もあり、データが欠落している領域もある。いずれも Descending のみのデータであるため、地殻変動の詳細を検出できていない可能性がある。そこで本研究では、より位相アンラップが容易な長波長のマイクロ波を用いている L バンド衛星である ALOS/PALSAR の Ascending と Descending のデータを用いて地殻変動の検出を行った。

本研究の目的は、群発地震に伴う地殻変動の検出を行い、その地殻変動をより詳細に説明するために断層モデルを推定することで、陸域のプレート境界における地殻変動のメカニズムを解明する手掛かりを得ることである。

Ascending と Descending の InSAR による解析結果は、北東-南西方向にのびる沈降した領域がみられ、この領域を境に北西-南東方向に拡大する地殻変動が明らかになった。この地殻変動の空間変動パターンは、東アフリカ地溝帯が拡大している方向とほぼ一致する。さらに Azimuth Offset の結果は、沈降した領域がやや南に変動していることを示している。以上の3つの結果を用いて3次元変位を求めた。沈降した領域では、鉛直方向に最大 62cm の沈降と南南東方向に最大 33cm の水平移動がみられ、それを挟む東西の領域では、わずかな隆起と北西-南東方向へ 50cm 程度の水平移動がみられた。

これらの変動を詳細に説明するために、半無限均一弾性体を仮定して断層モデルを推定した。断層形状の複雑性を考慮するために、三角形の食い違い要素を用いた非平面断層モデルを推定した。求められた3次元変位とこの地域が引張場であることを鑑みて、西落ちと東落ちの2枚の断層をおいた。

InSAR によって得られた変位量を説明する断層のすべり量をインバージョン解析によって求めた。いずれの断層も 2-4km の深さで同じ程度のすべり量を示し、Strike 方向には最大 75cm、Dip 方向には最大 1m のすべり分布を示した。そのすべり量から得られる変位量は、観測値を良く説明するものである。

推定した断層モデルによるモーメントの解放量 (Geodetic Moment: GM) は群発地震で解放されたモーメント解放量 (Seismic Moment: SM) を上回り、その比 (SM/GM) は 37.2 % となった。この値が小さいほど非地震性の地殻変動が多く発生したことを示している。

群発地震の発生期間中に Oldoinyo Lengai が噴火し、InSAR によっても、この噴火活動に伴う地殻変動も検出された。群発地震と噴火との関連性についても議論する予定である。

キーワード: 干渉 SAR, 地殻変動, 東アフリカ地溝帯, 群発地震, 大陸形成, タンザニア

Keywords: InSAR, Crutal deformation, East Africa rift valley, Earthquake swarm, Continental techtonics, Tanzania

合成開口レーダーで捉えた2009年 Cinchona 地震 (Mw6.1, コスタリカ) に伴う地殻変動と断層モデリング Coseismic Deformation Detected by SAR and Fault Source Modeling of the 2009 Cinchona Earthquake (Mw6.1), Costa Rica

梅村 宗太郎^{1*}; 古屋 正人¹
UMEMURA, Shutaro^{1*}; FURUYA, Masato¹

¹ 北海道大学大学院理学院自然史科学専攻
¹Department of Natural History Sciences, Hokkaido University

2009年1月8日に中米コスタリカで Mw6.1 の浅い地震が発生した。Cinchona 地震と呼ばれるこの地震は多数の地すべりを引き起こし、20名以上の死者を出す大きな被害となった。付近には NNW-SSE 走向の Angel-Vara Blanca 断層があり、それが震源断層だと推定された (Montero et al., 2009)。地震発生後4日後 (2009年1月12日) には震源から6km西に位置する Poas 火山が1年ぶりに噴火した (VEI 1)。この火山は2006年に10年ぶりの噴火をして以来活動的な状態が続いていた。本研究では地震と火山の関係性を調べる第一歩として、ALOS/PALSAR のデータを用いて地震時地殻変動を検出し、InSAR データを説明する断層モデルを作成した。

本研究では ALOS/PALSAR の北行軌道 (path162, frame190) と南行軌道 (path465, frame3410) のデータを用いた。地形効果の補正に ASTER GDEM の数値標高モデルを、SAR データの解析には Gamma Remote Sensing のソフトを用いた。干渉処理においては大気ノイズの除去を行った。断層要素のグリーン関数の計算には Meade(2007) で公開されている半無限均質弾性体を仮定した triangular dislocation elements による変位の解析解のスク립トを利用した。

InSAR 解析の結果、北行軌道で最大20cm、南行軌道で最大22cmの地震時地殻変動による LOS (Line of Sight) 変位が認められた。断層モデルをトライアンドエラーで探したところ、strike/dip が 133/65、中央での rake が -163 の断層で変位をうまく説明できた。これは Angel-Vala Blanca 断層とは違う断層パラメーターであり、未知断層が震源となったと考えられる。また、断層運動によって Poas 火山の直下の圧力が増加した。この圧力変化が噴火にどう関連するか、さらなる議論が必要である。

キーワード: InSAR, 地震時地殻変動, 断層モデル, コスタリカ
Keywords: InSAR, Coseismic Deformation, Fault Source Model, Costa Rica

精密水準測量による台湾台東縦谷断層中部における クリープ滑りの加速イベント
(2010-2013)
An acceleration event of creeping slip detected by precise leveling survey at the central
part of the Longitudinal valle

村瀬 雅之¹; 松多 信尚^{2*}; Lin Cheng-Hong³; Chen Wen-Shan⁴; Lin Jui-Jen³; 西川 由香⁴; 和田 絵里香¹; 小泉 尚嗣⁵
MURASE, Masayuki¹; MATSUTA, Nobuhisa^{2*}; LIN, Cheng-hong³; CHEN, Wen-shan⁴; LIN, Jui-jen³; NISHIKAWA, Yuka⁴
; WADA, Erika¹; KOIZUMI, Naoji⁵

¹ 日本大学文理学部地球システム科学科, ² 名古屋大学環境学研究所, ³ 中央研究院地球科学研究所 (中華民国台湾), ⁴ 国立台湾大学 (中華民国台湾), ⁵ 産業技術総合研究所

¹Department of Geosystem, College of Humanities and Sciences, NIHON University, ²Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, ³Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, ⁴National Taiwan University, ⁵The National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Precise levelling surveys were conducted across the central Longitudinal Valley Fault, eastern Taiwan, to understand the deformation of the transition zone between the stable fault creep area and the locked area, which maybe correspond to an asperity. In order to investigate the surface relationship between the fault creep area and the geological condition of the transition zone, we established levelling routes in the Yuli, and Chike-san areas. The Yuli area forms the geological boundary of the Lichi Melange Formation, which is composed of chaotic mudstones containing numerous exotic blocks of various sizes and lithologies. Along the Yuli route, located on the Lichi Melange, an uplift rate of 30 mm/yr was detected during the period 2010-2013, suggesting that aseismic fault creep might be continuing with long-term stability. Along the Chike-san route, located on no Lichi Melange, a vertical deformation rate of 8 mm/yr, 40mm/yr, and 20mm/yr were detected in the period 2010-2011, 2011-2012, and 2012-2013, respectively.

The creep slip distribution was estimated by using a two-dimensional single-fault model proposed at Chike-san in the period 2012-2013. Large slip rates were estimated at 4-5 km of the fault plane. At the previous periods 2010-2011 and 2011-2012, relatively large slip rates were estimated at two parts of the fault plane-one at a depth of about 1.5 km and another at a depth of 4-5 km-. We believe that the acceleration event of creeping slip was continued at the depth of 4-5 km in the period 2012-2013. The northern limit of the stable creep area may be the Yuli area. The episodic creep event occurred in the transition zone between the stable fault creep area and the asperity area. The boundary between the stable creep area and the episodic creep area is consistent with the geological boundary of the Lichi Melange Formation.

キーワード: 台東縦谷断層, クリープ, 精密水準測量

Keywords: Taiwan, Longitudinal valley fault, precise leveling survey, aseismic creep motion

コサイスミックな内部応力変化の理論計算-丸い地球の場合 Internal stress changes due to point dislocations in a spherical earth

高木 悠^{1*}; 大久保 修平¹
TAKAGI, Yu^{1*}; OKUBO, Shuhei¹

¹ 東京大学地震研究所

¹Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

地震によって生じる応力変化などの内部変形は、一様半無限弾性体モデルについては Okada (1992) によってシンプルかつ完全な形で示された。この一様半無限媒質モデルは、例えば、地震間の「相互作用」を考える上での指標を与える Δ CFF の計算に用いられるなど、現在幅広い研究で使われており、地震の理解に貢献してきた。一方、巨大地震に伴う広範囲な応力変化などのグローバルな変形は、より現実的な地球モデルである球対称モデルで計算する必要がある。Sun and Okubo (1993) は球対称モデルで、点震源によって生じる地表の変位や重力変化の計算に成功した。しかし、内部の応力や変位については、球対称モデルで計算された例はない。それは、原理的な方法は示されているものの (Takeuchi and Saito, 1972)、実際に計算しようとするに困難が生じるためである。そこで本研究では、球対称モデルで、点震源によって生じる内部変形を計算する手法を提案し、実際に計算を行った。

本講演では、以下の点について述べる。

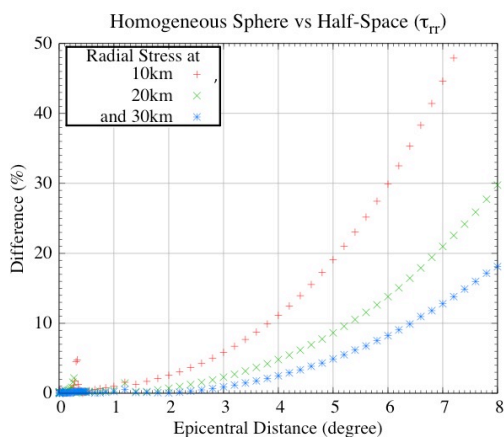
- i) 内部変形を計算するための手法の概説。
- ii) 解析解が分っている一様半無限媒質の結果と本研究で計算された一様球の結果との比較。
- iii) PREM のような成層構造モデルでの計算結果。

一様球と一様半無限媒質の結果を詳細に比較すると (ii)、例えば、深さ 32km の横ずれ断層によって生じる鉛直方向の垂直応力では、両者の差が 10 % になる角距離は、観測の深さが 10km、20km、30km でそれぞれ 4 度、5 度、6.5 度であることが分った (図)。4 度はおおよそ 400km であり、東北地方太平洋沖地震の断層の長さに相当する。

図. 一様球と一様半無限媒質との差。深さ 32km の横ずれ断層によって生じる鉛直方向の垂直応力変化を比較した。横軸が震央距離、縦軸がモデル間の差 (%) である。赤、緑、青はそれぞれ観測点の深さが 10、20、30km を表す。

キーワード: 内部応力変化, 球対称地球, 点震源, 成層構造

Keywords: internal stress change, spherically symmetric earth, point dislocation, stratification



GPS 津波計を活用した GPS—音響システムによる海底地殻変動の連続観測 Continuous measurements of ocean bottom crustal movements based on GPS-acoustic system using GPS buoy

今田 成之^{1*}; 寺田 幸博²; 坂上 啓³; 田所 敬一⁴; 加藤 照之⁵

IMADA, Naruyuki^{1*}; TERADA, Yukihiro²; SAKAUE, Hiromu³; TADOKORO, Keiichi⁴; KATO, Teruyuki⁵

¹日立造船株式会社, ²高知高専, ³所属なし, ⁴名古屋大学大学院環境学研究科地震火山研究センター, ⁵東京大学地震研究所

¹Hitachi Zosen Corporation, ²Kochi National College of Technology, ³None, ⁴Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, ⁵Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

GPS ブイを活用した GPS—音響システムに基づく海底地殻変動の連続観測の試験観測について報告する。

我々は GPS ブイを用いて津波を早期に検知するシステムを開発してきた。一方, Spiess らによって提唱され, 日本の海上保安庁や大学で開発が進められてきた GPS—音響を用いた海底地殻変動計測では海上の位置決めには船舶や船舶に曳航されたブイに設置された GPS を用いた間欠観測が行われてきた。2011 年東北地方太平洋沖地震の発生を受けてこのような海底地殻変動観測の重要性が改めて指摘されたが, 今後の課題として, これまでの間欠的観測から, より詳細な地殻変動観測のための連続観測の技術開発が重要であることが認識された。

我々が実施している津波の早期検知をめざした GPS ブイに海底地殻変動連続観測の機能を付加すれば, 海底地殻変動の連続的な計測が行えるはずである。そこで, GPS ブイに音響装置を設置して海底地殻変動の連続観測の可能性を検証する実験を行った。室戸岬西方沖 13km に設置していた GPS 津波計を用いた予備的な実験の後, 2013 年 8 月から室戸岬南方沖 35km の GPS 津波計 (黒牧 16 号ブイ) を用いて 2 カ月間の連続計測を実施した。この GPS 津波計設置位置の水深が 726m であることから, ブイの周囲 3 地点の海底に水深と同程度の距離を相互に離して音響トランスポンダーを配置した。海底に設置した 3 局とブイとの測距は, ブイの側面の海面下に音響送受波器 (周波数 10kHz) を設置し, PSK 変調をした 5 次の M 系列音波を用いて 1 分間隔でシーケンシャルに送受信する方式で行った。

現在得られたデータの解析中であり, 2 カ月間のデータから雑音特性や日々の座標値の繰り返し誤差, ブイの動揺による雑音等についての予察の結果を報告したい。現在日本周辺には津波監視用の GPS ブイが 15 基程度展開されているが, 今後 GPS ブイをさらに展開し, 津波の早期監視と共に海底地殻変動の連続的な監視が可能となれば日本列島の地殻変動と津波の監視に極めて効果的な監視体制が構築できると期待される。海岸から 100km を超える沖合での海面変動監視の可能性についての技術的課題が既にクリアされているが, ブイからのデータの伝送に関しては次世代の通信衛星が必要であり, 海面変動及び海底地殻変動をあわせた衛星データ通信の仕様の検討にも本試験による成果が有用であろうと期待される。

揚水・湧水により発生する断層の動きと間隙弾性体による理解 — 東濃地震科学研究所地域の NNW 断層の場合 —
Movement of a fault arised by a pumping or a spring water and its understanding by poroelasticity -a case of NNW fault-

石井 紘^{1*}; 浅井 康広¹
ISHII, Hiroshi^{1*}; ASAI, Yasuhiro¹

¹ 東濃地震科研
¹ TRIES, ADEP

東濃地震科学研究所では深部ボアホールで連続観測可能な総合観測装置や応力計を開発している。現在、研究所周辺の 10km 四方の地域に約 15 カ所の深部ボアホール観測を実施し、地殻変動や地下水の振る舞いなどを調べている。最も深いボアホールの深度は 1030m である。

東濃地震科学研究所の近くでは原子力研究開発機構 (JAEA) が直径 6.5m と 4.5m のそれぞれ主立坑と換気立坑を掘削しており、現在深度 500m に達している。両立坑は 40m 離れており、立坑はステージと呼ばれる横坑で繋がっている。この立坑の近くには右横ずれの NNW 断層が存在している。

地下水の変動と地球物理学的観測量との関連を実験や発生した現象を利用して調べている。それらは (1) 断層近くのボアホールにおいて揚水実験を行いボアホール観測点における歪変化や水位変化を観測・解析した。(2) 立坑において大規模な湧水が発生した時のボアホール観測点における歪変化や水位変化を観測・解析した。

その結果以下のような結果が得られた。

1. 立坑内における湧水や近傍のボアホールにおける揚水実験により TGR350 孔の水位は低下するが深度 350m に設置された歪計は NNW 断層が右横ずれの動きをするような観測結果を示した。
2. 湧水の止水や揚水後の TGR350 孔の水位の上昇に伴って深度 350m に設置された歪計は NNW 断層が左横ずれの動きをするような観測結果を示した。
3. 堆積層に設置した伸縮計や浅い深度 (深度 165m) に設置した歪計は断層運動などを反映したデータを示さない。
4. 間隙弾性体としての理解に基づいてこの地域の地下水流動とそのメカニズムを説明できる一つのモデルを考察した。

観測と解析結果の詳細を報告する。

キーワード: 深部ボアホール観測, 揚水・湧水と断層運動, 地下水流動, 間隙弾性体による理解, 連続観測応力計

Keywords: Deep borehole observation, Fault movement by spring and pumping water, Groundwater flow, Understand by poroelasticity, Continuously observable stressmeter

正馬様地殻活動総合観測点の整備 —石井式ボアホール応力計の埋設・設置— Construction of Syobasama crustal activity observatory ?Installation of Ishii-type borehole stressmeter?

浅井 康広^{1*}; 石井 紘¹
ASAI, Yasuhiro^{1*}; ISHII, Hiroshi¹

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

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

1. はじめに

瑞浪超深地層研究所 (MIU) の立坑や調査孔の掘削に伴う大量湧水の発生と調査孔における水理試験によって、亀裂性岩盤である土岐花崗岩中の間隙水圧に大きな変動が生じている。この水圧変動が原因となって MIU から約 0.5km 範囲内に位置する戸狩観測点 (TGR350, TGR165) と研究所観測点 (TRIES) および MIU 立坑内観測点 (STG100, STG200, STG300) では、地殻応力・歪・傾斜、地下水位・水圧の連続観測記録に地球潮汐変化の 100 倍以上の変化が記録されている (例えば浅井・石井, JPGU2013)。MIU の近傍には北北西走向のほぼ垂直変位の地質断層がある。

変化の特徴は、断層の南西側で間隙水圧変化が生じると、そのインパクトは同領域の観測点の水位/水圧記録にみられ、かつ、応力、歪、傾斜記録にもみられる。一方、断層の北東側の観測点ではその影響は水位・水圧観測に見られないが、応力、歪、傾斜記録に見られる。断層の北東側で水圧変化が生じる場合でも同様である。この観測結果は、断層は遮水性を持つが、間隙水圧変化によって生じた岩盤の弾性変形は断層に関係なくその周囲に及んでいることを示している。

2. 観測点整備の目的

MIU の北西約 1km に既存の正馬様観測点ボアホール (SBS110; 深度 110m 孔) がある。SBS110 の地下水位記録には MIU 近傍で見られるような水圧変動の影響が見られない。しかしながら、水圧変動に伴う地殻応力・歪変化が正馬様に及んでいるかどうかは、地殻応力・歪の観測を行っていないため不明であった。MIU 立坑掘削の影響がどのように、かつ、どの範囲まで及んでいるかの調査・研究を行うことを目的として、東濃地震科学研究所は、2013 年 12 月に正馬様観測点に新規 100m 深ボアホールの掘削を開始、2014 年 2 月 3 日現在整備を進めている。2 月中には当研究所で開発した石井式ボアホール応力計をボアホール孔底付近の岩盤状態の良い個所に埋設・設置し連続観測を開始する予定である。

講演では観測点整備の概要と最新の観測記録についての議論を行う。

キーワード: 間隙水圧変化, 弾性変形, 瑞浪超深地層研究所, 石井式ボアホール応力計

Keywords: Pore pressure change, Elastic deformation, Mizunami Underground Research Laboratory, Ishii-type borehole stress meter