

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¹

*Mikio Tobita¹

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。

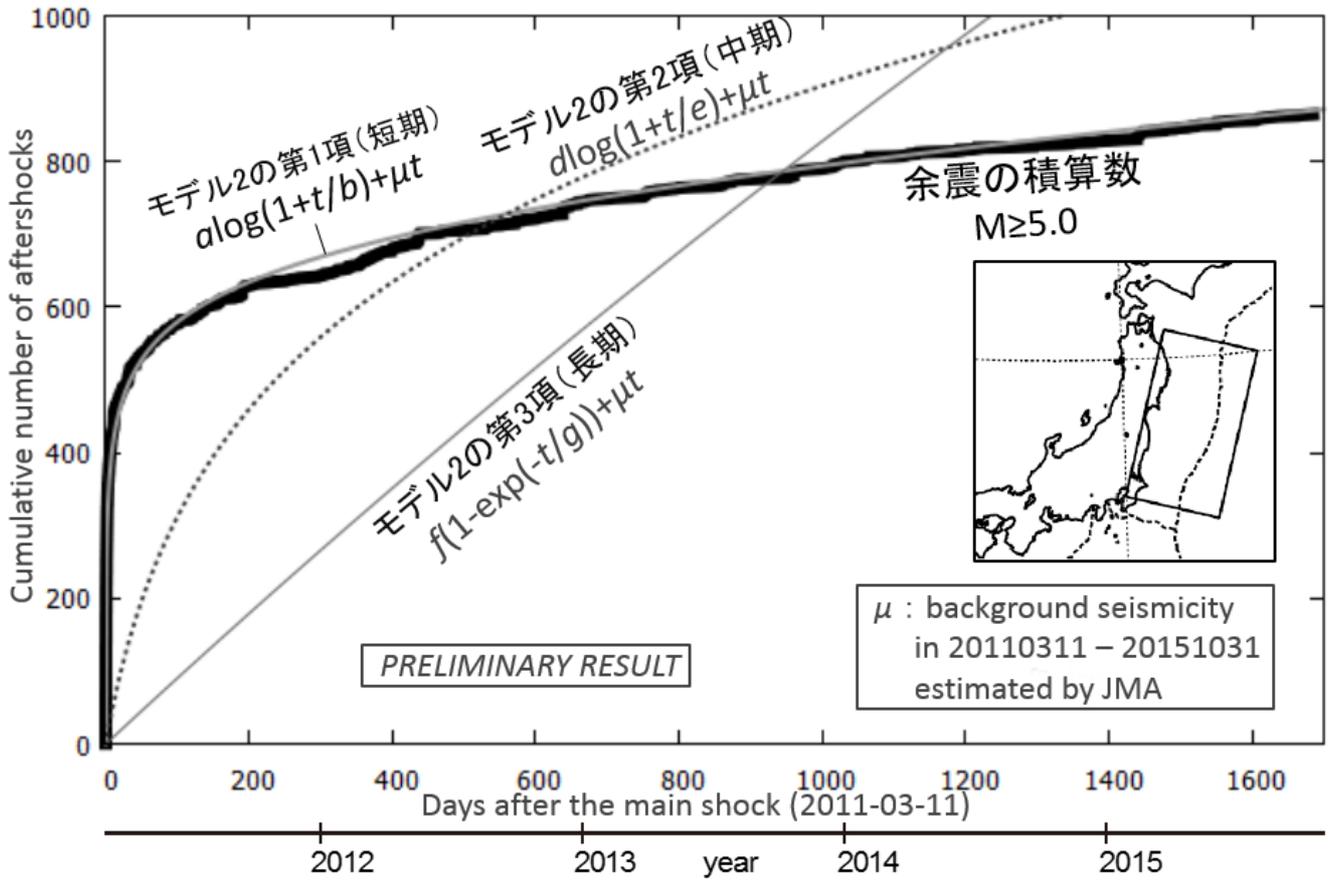
地震積算回数が対数関数で良く近似できることは、すなわち大森モデルが有効であることに他ならない。なぜなら、大森公式の時間積分は対数関数となるからである。

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¹、大園 真子²*Shunsuke Miura¹, Mako Ohzono²

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¹、西村 卓也²、松岡 俊文^{3,1}

*Kazuya Ishitsuka¹, Takuya Nishimura², Toshifumi Matsuoka^{3,1}

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10-15km²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¹、弘瀬 冬樹¹*Akio Kobayashi¹, Fuyuki Hirose¹

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¹*Shinzaburo Ozawa¹

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¹、大園 真子²

*Kentaro Ishimori¹, Mako Ohzono²

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

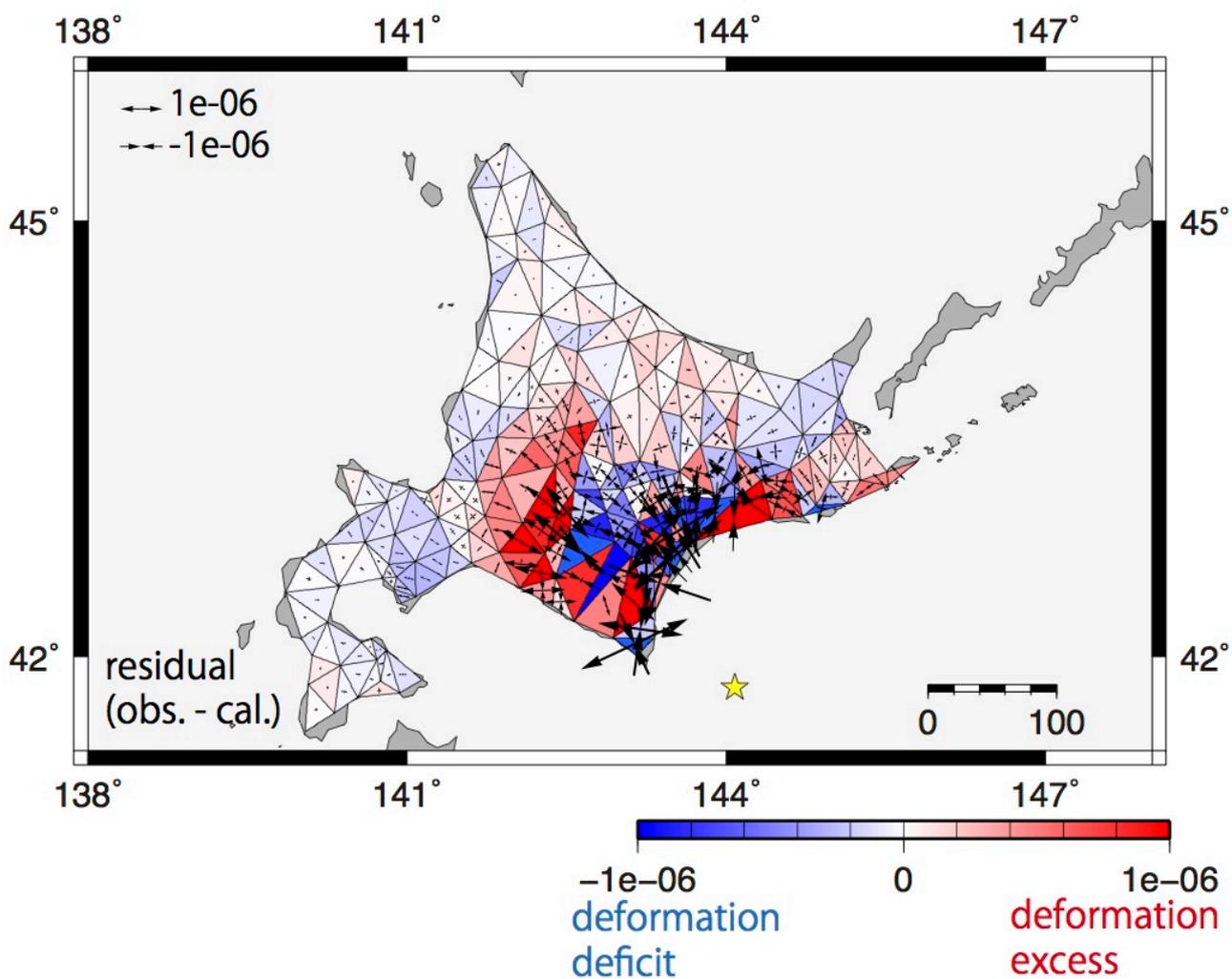
GPSにより観測される地震時地殻変動を、半無限均質弾性体を仮定した断層モデルによる理論値と比較することで、実際の地下構造を反映した歪み異常分布を検出できる (Ohzono et al., 2012)。石森・大園 (2015, JpGU) は2003年十勝沖地震 (M8.0) の地震時地殻変動から北海道地方の歪み異常分布の検出を試みた (図)。GEONET観測点を頂点とするドロネー三角形から各地域における地震時の面積歪みを観測値・理論値でそれぞれ求め、その差となる歪み異常分布について考察した。その結果、日高山脈西側の厚い堆積層と膨張過多域の分布が一致した。これはYabe et al. (2015) 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 Pratama¹, Takeo Ito^{1,2}, Fumiaki Kimata³, Takao Tabei⁴

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 13.6×10^{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 JULAITI¹, Semih Ergintav¹, Ziyadin Cakir², Ugur Dogan³, Selver Senturk², Seda Cetin³, Hayrullah Karabulut¹, Fuat Saroglu, Haluk Ozener¹

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¹、風間 卓仁¹、福田 洋一¹*Kazuhiro Naganawa¹, Takahito Kazama¹, Yoichi Fukuda¹

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 ± 2.2 mm/yearとなり、先行研究(Sun et al., 2010)の値(10.7 ± 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 ± 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²、*廣瀬 仁¹、西村 卓也³Rie Kurisu², *Hitoshi Hirose¹, Takuya Nishimura³

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/cm³ (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_{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_{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/m³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_{sediment}) が $0.022-0.054$ 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¹、大久保 修平²

*Yu Takagi¹, Shuhei Okubo²

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¹*Kazutomo Takano¹

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

*Masayuki Murase¹, Fumiaki Kimata², Yoshiko Yamanaka³, Shinichiro Horikawa³, Kenjiro Matsuhira³, Takeshi Matsushima⁴, Hitoshi, Y. Mori⁵, Shin Yoshikawa⁶, Rikio Miyajima², Hiroyuki Inoue⁶, Kazunari Uchida⁴, Keigo Yamamoto⁷, Takahiro Ohkura⁶, Manami Nakamoto⁴, Masahiro Yoshimoto³, Takashi OKUDA³, Taketoshi Mishima⁶, Tadaomi Sonoda⁷, Shintaro Komatsu⁷, Kaito Katano¹, Keiji Ikeda⁸, Hiroaki Yanagisawa⁸, Shigeru Watanabe⁸, Haruhisa Nakamichi⁷

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¹、原田 昌武¹、本多 亮¹、行竹 洋平¹、萬年 一剛¹、竹中 潤¹*Ryosuke Doke¹, Masatake Harada¹, Ryou Honda¹, Yohei Yukutake¹, Kazutaka Mannen¹, Jun Takenaka¹

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¹、小林 昭夫¹、舟越 実²*Kazuhiro Kimura¹, Akio Kobayashi¹, Minoru Funakoshi²

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¹、竹内 章²*Hiroyuki Yamaguchi¹, Akira Takeuchi²

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