

## SEQUENCE OF SIX M7-SIZED EARTHQUAKES IN THE NORTHEASTERN JAPAN PRECEDING TOHOKU-OKI EARTHQUAKE MARCH 11, 2011 SEQUENCE OF SIX M7-SIZED EARTHQUAKES IN THE NORTHEASTERN JAPAN PRECEDING TOHOKU-OKI EARTHQUAKE MARCH 11, 2011

Deasy Arisa<sup>1\*</sup>, Kosuke Heki<sup>1</sup>

Deasy Arisa<sup>1\*</sup>, Kosuke Heki<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Natural History Sciences, Faculty of Science, Hokkaido University

<sup>1</sup>Department of Natural History Sciences, Faculty of Science, Hokkaido University

A sequence of M 7-class interplate earthquakes and postseismic slips following each of these earthquakes occurred along the Japan Trench before the occurrence of the giant earthquake on March 11, 2011. Several calculations of the earthquakes in northeastern Japan area including 2003 to 2011 M7-sized earthquakes are conducted to analyze the plate deformations on the Northeastern Japan. The analyzing processes include the measurement of the coseismic jumps of six M7-sized events occurring in October 31, 2003; August 16, 2005; May 8, 2008; July 19, 2008; March 14, 2010 and March 9, 2011. The postseismic slips which continuously occur following the earthquakes (some earthquakes in Miyagi, Fukushima, Iwate and Ibaraki) are also calculated. Both coseismic and postseismic slips are believed to closely relate to 3.11 Tohoku-oki earthquakes. Two mathematical models are used in the calculation and followed by the parameter adjustment using Okada formula to obtain the best parameter of the plate displacement. The parameter adjusted in Okada formula are included the length of displacement/rupture area, together with width, depth, dip angle, and dislocation length and rake angle. These parameters are then used to calculate the seismic moment and magnitude moment based on geodetic approach. These calculations revealed that the total moment released by these slips was much larger than the coseismic ones. These seismic moments will lead us to the conclusion about characteristic of coseismic and postseismic deformations in the Northeastern Japan area which differs from our understanding about the postseismic process that the postseismic deformation and slip are smaller than the coseismic deformations.

キーワード: Interplate earthquakes, Postseismic, Coseismic, Deformation, Slip, Seismic moment

Keywords: Interplate earthquakes, Postseismic, Coseismic, Deformation, Slip, Seismic moment

## 大きな地震の余震数と余効変動との関係

### Relation between the number of the aftershocks and the postseismic deformation of large earthquakes

小林 昭夫<sup>1\*</sup>, 武藤 大介<sup>1</sup>, 上野 寛<sup>1</sup>, 横田 崇<sup>1</sup>

Akio Kobayashi<sup>1\*</sup>, Daisuke MUTO<sup>1</sup>, Hiroshi UENO<sup>1</sup>, YOKOTA, Takashi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 気象庁気象研究所

<sup>1</sup> Meteorological Research Institute

大きな地震後に観測される余効変動のメカニズムとして、震源域およびその周辺域でのゆっくりとした余効すべり、粘弾性媒質中での応力緩和に伴うゆっくりとした変動である粘性緩和、流体が本震に伴う圧力変化に応じて時間遅れを伴って移動する結果として生じる間隙弾性緩和の主に3つが考えられており、それぞれのメカニズムによる余効変動の時定数は、間隙弾性緩和は数日～数週間、余効すべりは数か月～数年、粘性緩和は数年～数十年である [水藤・小沢、2009]。余効変動を近似するモデルとして、指数関数と対数関数がよく用いられ、指数関数が粘弾性体の緩和、対数関数はすべり速度・状態依存摩擦構成則に伴う緩和 [Marone et al., 1991] を表している [三品・他、2009]。一方、川田・他 (2009) は、粘弾性構成則から様々な時間スケールの緩和挙動の総和が時間のべき乗則として表れているとし、三陸沖の地震に伴う余効すべりについて、時間の対数関数よりべき乗則の方が変位をよく説明するとした。

大きな地震の発生後には、多数の余震が発生する。余震数の時間に伴う減少については、改良大森公式が知られており、十分な時間が経つとべき乗則となっている。余効変動も余震数も時間に対してべき乗で近似できるとすると、片方の時間経過を把握することで、簡便にもう一方の時間経過を推定することができるかもしれない。時間軸と余震数（または余効変動）を両対数で見たときに直線関係になる場合は、両者はべき乗モデルの関係にあり、時間軸と余震数（または余効変動）を片対数で見たときに直線関係になる場合は、両者は対数モデルの関係にある。ここでは、2000年以降に日本付近で発生した主な地震について、余震数とGNSSで観測された余効変動の時間経過を比較した。

2003年9月26日十勝沖地震 (M8.0) の場合、余震数は対数モデルが良く合い、余効変動も地震後10日以降に対数モデルが良く合う。2005年3月20日福岡県西方沖の地震 (M7.0) の場合、余震数はべき乗モデルが良く合い、余効変動も地震後10日以降にべき乗モデルが良く合う。2008年6月14日岩手・宮城内陸地震 (M7.2) の場合、余震数は地震後数日以降ならべき乗モデル、対数モデルどちらでも合い、余効変動はべき乗モデルが良く合う。2011年3月11日東北地方太平洋沖地震 (M9.0) の場合、余震数は対数モデルが良く合い、余効変動はべき乗モデルが良く合う。

余震数については、改良大森公式に対応するべき乗モデルだけではなく、対数モデルの方が合う場合も見られる。余効変動もべき乗モデルに合う場合、対数モデルに合う場合がある。地震により余震数と余効変動が同じモデルに合う方が多いが、東北地方太平洋沖地震のように異なる場合もある。余震数は下限とするマグニチュードの大きさにより時間経過が異なる。また、余効変動は基線長変化を見たが、震源域が大きな場合など、特定の基線長変化が余効現象全体の時間経過と異なることもありうる。これらのことも考慮し、例数を増やして余震数と余効変動との関係を考察する。

本調査には国土地理院 GEONET の座標値を使用させていただきました。記して感謝いたします。

キーワード: 余震数, 余効変動, 改良大森公式

Keywords: number of aftershocks, postseismic deformation, modified Omori formula

## レーダー・アメダス解析雨量を用いたひずみ計の降水補正について A rainfall correction of the strainmeter by the Radar-AMeDAS rainfall

木村 一洋<sup>1\*</sup>, 露木 貴裕<sup>2</sup>, 秋山 加奈<sup>2</sup>, 見須 裕美<sup>2</sup>

Kazuhiro Kimura<sup>1\*</sup>, TSUYUKI, Takahiro<sup>2</sup>, AKIYAMA, Kana<sup>2</sup>, MISU, Hiromi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 気象研究所, <sup>2</sup> 気象庁

<sup>1</sup>Meteorological Research Institute, <sup>2</sup>Japan Meteorological Agency

気象庁で東海地震予知に用いているひずみ計について、タンクモデルによる降水補正を試みたところ良好な結果を得た。(木村・他 2012)。これは、タンクモデルを用いることによって、ひずみ計に及ぼす降水荷重の影響を表すことができるからと考えられる。

今回は、気象庁の解析雨量を用いたひずみ計の降水補正を試みた。降水量の実観測データが近隣にある場合にはそのデータが有効であるが、近隣にそのような実観測データが無い場合にはレーダー・アメダス解析雨量が有効なこともあることが確かめられた。ひずみ計の降水補正には、その場所に降った降水量が最も重要である。

なお、降水補正に用いたタンクモデルの段数は3段で、各タンクに蒸発過程・側面流出過程・土壌水分構造を導入しており、パラメータの値はSCE-UA法で求めた。目的関数として2006年から2009年の4年間における各年のトレンドを除去するとともに降水補正を行ったひずみ計のデータの24時間階差の絶対値の和を定義し、それぞれの降水量ごとに最適パラメータの値を求めた際の目的関数の値を比較することによって、どの降水量が降水補正に有効かを判断した。

キーワード: ひずみ計, 降水補正, タンクモデル, SCE-UA法, 解析雨量

Keywords: Strainmeter, Rainfall correction, Tank model, SCE-UA method, Radar-AMeDAS rainfall

近畿地方北部における地殻歪の長期的変化に見られる 2010 年頃の変化  
The change of about 2010 to be seen in the long-term crustal strain observed in the Northern-Kinki region.

木村 一洋<sup>1\*</sup>, 小林 昭夫<sup>1</sup>  
Kazuhiro Kimura<sup>1\*</sup>, Akio Kobayashi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 気象研究所

<sup>1</sup>Meteorological Research Institute

気象研究所では、1996年に近畿地方北部の福井県敦賀市と滋賀県高島市に石井式のひずみ計を設置し、観測を続けてきた。山本・小林(2009)は、これらの長期的な観測データの2000年頃と2005年頃に歪速度変化が見られることについて、東海地域で同時期に発生した長期的SSEの時間的な経過と類似していること、また主歪方向がGNSSによる変化と整合的であることを指摘した。

今回は、山本・小林(2009)と同様の手法でひずみ計の長期的な観測データに各種処理を行ったところ、2010年頃に歪速度変化が見られた。この変化について、同時期のGNSSとの比較などの調査報告を行ったので報告する。

キーワード: 地殻変動, ひずみ計

Keywords: crustal movement, strainmeter

## 日向灘のスロースリップ Slow slip events in the Hyuga-nada, southwestern Japan

小沢 慎三郎<sup>1\*</sup>, 矢来 博司<sup>1</sup>  
Shinzaburo Ozawa<sup>1\*</sup>, Yarai Hiroshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 国土地理院

<sup>1</sup> Geospatial Information Authority of Japan

1996年10月、12月の日向灘の地震(Mw6.8, 6.9)の後に余効変動が発生した。余効変動の減衰係数を推定すると、1.5年程になる。余効変動が収束したように見えた2004年以降に矢来&小沢(2010)により日向灘でスロースリップが余効すべりの領域で発生していることが報告されている。この日向灘のスロースリップは2年程の周期で発生しているが2013年1月現在では、スロースリップは停止している。日向灘のスロースリップが明瞭になったのは、2005年1月くらいからであるが、2004年以前にも起きていた可能性がある。

### はじめに

大きな海溝型地震発生の後に、余効変動が継続して起きることが知られている。余効すべりに伴うと思われる余効変動は概ねロガリズム的に減衰する。1996年10,12月に日向灘で2つの地震(Mw6.8, Mw6.9)が発生し、その余効すべりがロガリズム的に2004年くらいまでに減衰していたが、2005年くらいからスロースリップ的なプレート間滑りに変化している。本研究では、GPS網で捉えられた余効変動から時間発展のインバージョンを使用して、地震後の余効すべり及びスロースリップの時空間的な様子を推定し、余効すべり、スロースリップ、本震との関係を調べる。

### 解析方法

日向灘の地震後のプレート間すべりの時・空間発展を、時間依存のインバージョンで推定した。解析は、はじめに座標時系列データから年周成分及びトレンド成分を取り除いたデータを作成し、1996年1月~2013年1月までのデータを時間発展のインバージョン解析に使用した。トレンド成分は2008年10月~2009年3月までのデータから推定している。観測点は日向灘地域の60点程の観測点を使用している。東西、南北、上下変動の重みは1:1:3の割合で解析している。

### 結果と考察

インバージョンの結果、1996年の地震後に余効すべりが発生し、2004年頃までに収束している。しかし、2005年1月からスロースリップが発生し2006年1月に収束した。そして2007年1月~2007年1月にかけてまたスロースリップが発生している。2009年1月から発生したスロースリップは2011年くらいに収束しており現在まで継続している。非地震性の滑りのモーメントの時間変化は全体を通してロガリズム的に変化しており、かつ1997年~2004年間でも、ロガリズム的は時間発展から外れる時期が見られ、スロースリップが1997年~2004年間で発生していた可能性が示唆される。

キーワード: 日向灘, スロースリップ, アフターズリップ

Keywords: Hyuga-nada, slow slip event, afterslip



## 東海地震想定域での多様なひずみ変化

### A variety of strain changes in the anticipated Tokai earthquake area

高波 鐵夫<sup>1\*</sup>, 平田 直<sup>1</sup>, Hui Peng<sup>2</sup>, 北川源四郎<sup>3</sup>, 上垣内修<sup>4</sup>, Alan T. Linde<sup>5</sup>, Selwyn I. Sacks<sup>5</sup>

Tetsuo Takanami<sup>1\*</sup>, Naoshi Hirata<sup>1</sup>, PENG, Hui<sup>2</sup>, KITAGAWA, Genshiro<sup>3</sup>, KAMIGAICHI, Osamu<sup>4</sup>, LINDE, Alan T.<sup>5</sup>, SACKS, Selwyn I.<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 中南大学, <sup>3</sup> 情報システム研究機構, <sup>4</sup> 気象庁, <sup>5</sup> カーネギー研究所

<sup>1</sup>ERI University of Tokyo, <sup>2</sup>CSU China, <sup>3</sup>Research Organization of Information and System, <sup>4</sup>Japan Meteorological Agency,

<sup>5</sup>DTM Carnegie Institution for Science

Great interplate earthquakes have occurred at the Nankai Trough at a recurrence interval of approximately 100 to 150 years due to the subduction of the Philippine Sea plate beneath southwestern Japan. In addition to such a regular Nankai Trough earthquake cycle, there is a hyperearthquake cycle of 300 to 500 years. A Tokai earthquake has not occurred for more than 150 years since the 1854 Ansei Tokai earthquake. Tokai, Tonankai, and Nankai consolidated earthquakes have not occurred for more than 300 years since the 1707 Hoei earthquake. The Japanese government is taking the Tokai earthquakes seriously and has charged the Japan Meteorological Agency (JMA) with predicting the next one. There is now a dense array of instruments placed to accumulate a continuous stream of data related to seismicity, strain, crustal expansion, tilt, tidal variations, ground water fluctuations and other variables. They are watching for an anomaly in these data that might precede the next major Tokai earthquake. However the earth's surface is continuously influenced by a variety of natural forces such as earthquakes, waves, winds, tides, air pressure changes, precipitation and by a number of human induced sources. These generate variations in geodetic data that may mask precursory signals. Eliminating unwanted changes in the raw data requires appropriate statistical modeling, for detailed and accurate processing of geodetic data. We show that applying state space modeling is valuable for removing extraneous influences in order to enhance detection of possible precursors of the anticipated Tokai earthquake. On 11 August 2009 the intraslab Suruga Bay earthquake (M6.5) occurred in the Philippine Sea plate under the Tokai area. The JMA network of strainmeters has already been monitoring short-term slow slip events (SSE) synchronized with nearby low frequency earthquakes or tremors since 2005 (Kobayashi, et al., 2006). Although the 2009 Suruga Bay earthquake was an intraplate earthquake in the Philippine Sea plate, it was immediately followed by a sudden increase in interplate earthquakes in the Tokai area for the following month (Aoi et al., 2010). No pre-slip was detected by land-based observations in the Tokai area, even though it appears that the post-stress state at the subducting plate boundary was strongly affected. We here try to isolate tectonic strain behavior before the 2009 Suruga Bay earthquake by applying the state space modeling and Kalman filtering/smoothing to the volumetric strain data at the Tokai network of JMA. In summary we show: (1) The strain extracted by the state space modeling demonstrates that the shallow volumetric strainmeters deployed at depths less than 200m can provide high quality strain behavior. (2) The resulting strain time series can be divided into three groups: one composed of stations near Omaezaki, characterized by a very stable behavior; a second group, at large distance from the hypocenter, shows no significant changes; and a third group, the west coastal stations of Suruga Bay, is characterized by a synchronous change except for an irregular change just before the 2009 Suruga Bay earthquake. The unusual irregular changes occur at stations located on the landward side of tectonic boundary extended from Suruga Trough. Finally, the present study reveals an uncommon strain change just before the 2009 Suruga Bay earthquake.

キーワード: 状態空間モデル, 体積ひずみデータ, 2009年駿河湾地震, 想定東海地震, フィリピン海プレート, ゆっくり地震

Keywords: State space modeling, Volumetric strain data, 2009 Suruga Bay earthquake, Anticipated Tokai earthquake, Philippine sea plate, Slow slip event

## 東海-東南海地域におけるスロースリップとプレート間固着の時間変化 Temporal Change of Plate Coupling and Slow Slip Events in the Tokai-Tonankai Region in Japan

落唯史<sup>1\*</sup>

Tadafumi Ochi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>産総研

<sup>1</sup>AIST

In the southwestern part of the Japanese Islands, many large earthquakes have been reported and many geodetic or seismic observations have been operated to monitor the crustal deformation due to the interplate process between subducting Philippine Sea plate and the overriding continental plate along the Suruga-Nankai trough. The precise observation provides us insight into aseismic stress releasing process such as (long-term) slow slip events (SSEs).

Although some part of accumulated stress in the hanging wall would be released by SSE, the interplate coupling always takes place in the surrounding area and affect stress accumulating process. Thus, monitoring temporal change of the interplate coupling is as important as that of aseismic events such as SSE. On the basis of this standpoint, the interplate coupling should not be treated as steady state but be inferred together with SSE.

I have done the geodetic inversion analyses for the Tokai region, which is the easternmost end of the Suruga-Nankai trough, and for the area around the Bungo Channel, which is near the westernmost part of the trough. The results of the former case are already reported (JpGU 2012, SSS32-10; Ochi and Kato, submitted). In both of the analysis, I mainly used the daily coordinate of the GPS(GNSS) data from 1996 to 2010.

In the Tokai case, the SSE occurred around the deeper edge of the distribution of the interplate coupling and the width of it in the dipping direction becomes narrower as the occurrence of the SSE. After cessation of the SSE, the distribution of the coupling does not return to the state before the SSE. Therefore, the SSE really affect the interplate coupling.

In the Bungo Channel case, on the other hand, the SSE also occurred around the edge of the distribution of the interplate coupling but had little effect on it. Therefore, the interplate states before and after the occurrence of the SSE are very similar and the interplate coupling can be regarded as the steady state in this case.

The obviously different nature between these two cases is the duration of the SSE; about five years in the Tokai case and one year in the Bungo Channel case. Considering the stress change on the plate interface, I will discuss the difference in the spatial pattern and underlying physics further.

キーワード: スロースリップ, プレート間固着, GNSS

Keywords: slow slip events, interplate coupling, GNSS

## 地震・火山活動に伴う地殻変動の地形補正 Topographic corrections for crustal deformations associated with earthquakes and volcanic activities

五島 仁志<sup>1\*</sup>, 宮崎 真一<sup>1</sup>, 風間 卓仁<sup>1</sup>, 加納 将行<sup>1</sup>

Hitoshi Goshima<sup>1\*</sup>, Shin'ichi Miyazaki<sup>1</sup>, Takahito Kazama<sup>1</sup>, Masayuki Kano<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学理学研究科

<sup>1</sup> Kyoto University

地震・火山活動に伴う地殻変動を見積もる際には、有限矩形断層や球状圧力源による半無限弾性体の変位場の近似式が用いられてきた (Okada 1992; Mogi 1958)。しかし、東北地方太平洋沖地震のように自由表面まで断層が滑った可能性のある海溝型地震では、Okada (1992) の半無限弾性解によって「正しい震源深さ」と「自由表面まで断層が滑る」という2つの条件を両立させることは不可能であり、どちらか片方の条件しか成り立たせることが出来ない。

そこで、本研究では Williams and Wadge (2000) に従い、半無限弾性解に補正項を加えることによって、地形を考慮した地表面変位応答の計算を行った。具体的には、フラットでない地形に対する応力の境界条件を考え、(地形の鉛直スケール) / (地形の水平スケール) に対する地殻変動の0次項 (すなわち半無限弾性解) と1次項 (補正項) を抽出した。この方法は、有限要素法に比べて少ない計算量で変位応答を求めることが可能である。さらにこの方法は、「正しい震源深さ」「自由表面まで断層が滑る」という2つの条件に加えて、「観測点の標高」も考慮に入れて地表面での変位応答を求めることを可能にする。

Mogi (1958) を用いた桜島の地殻変動 (Takayama and Yoshida, 2007) の地形補正を行った結果、膨張源直上と山頂付近で半無限解との違いが大きく、上下変位で最大 12%、水平変位で最大 24% の違いが生じた。また、Okada (1992) を用いた東北地方太平洋沖地震における地殻変動 (国土地理院, 2011) の地形補正を行った結果、断層上 (特に上端上) で半無限解との違いが大きく、上下変位で最大 10%、水平変位で最大 9% の違いが生じた。

今後は、実際に GPS で観測された変位データを用いて断層すべり分布のインバージョンを行い、地形を考慮に入れた解と半無限弾性解・有限要素法の解析結果を比較していく予定である。

キーワード: 地殻変動, 地形, 地震, 火山活動, 東北地方太平洋沖地震, 桜島

Keywords: crustal deformation, topography, earthquake, volcanic activity, the 2011 Tohoku earthquake, Sakurajima Volcano



## GPS 観測データから見た信越地域の地殻変動と地体構造

### Crustal movement analyzed from GPS geodetic data and tectonic provinces in the Shin'etsu region, central Japan

今井 雄輝<sup>1\*</sup>, 竹内 章<sup>2</sup>

Yuki Imai<sup>1\*</sup>, Akira Takeuchi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 富山大学大学院理工学教育部, <sup>2</sup> 富山大学大学院理工学研究部

<sup>1</sup>Graduate school of Science and Engineering for Education, University of Toyama, <sup>2</sup>Graduate school of Science and Engineering for Research, University of Toyama

本州中部の信越地域は新潟-神戸構造帯 (Sagiya et al., 2000) に含まれ, 近年では 2004 年新潟県中越地震 (M6.8), 2007 年新潟県中越沖地震 (M6.8), 2011 年長野県北部地震 (M6.7) のような中規模の地殻内地震が多く発生している. 地殻ひずみの分布は上部地殻の地震活動帯に対応し, 背弧域における地殻内地震の発生メカニズムを議論する上では, 地殻ひずみの状態と特徴を把握する必要がある. しかし, 測地学的ひずみ分布と地質学的な地体構造がどのような関係にあるのかは明らかになっていない. そこで本研究では, 信越地域におけるひずみ分布の特徴, ならびにひずみ分布と地体構造の関係を明らかにすることを目的として, ひずみ速度分布を求めるために国土地理院 GEONET の GPS 観測データの解析を行い, 信越地域の最近 4 年 6 カ月間の地殻変動を明らかにした.

GPS 観測データの解析結果から, それまで西北西-東南東方向の短縮を示していた信越地域は, 2011 年東北地方太平洋沖地震の発生によって東西伸張に変化したこと, また, 同地震前後でそれぞれのひずみ速度分布は地域的に不均質であることが明らかになった. 同地震直前の約 3 年間, 新潟から松本にかけて短縮ひずみの集中域が北東-南西方向に分布していることが確認された. このひずみ集中域は, 厚い被覆層が存在して基盤が深い新潟堆積盆や信越堆積盆の構造区水内帯に対応する. さらに, ひずみ分布は地域間での被覆層の厚さの相違にも対応しているように見えることから, 同地震前の信越地域の地殻変動は地体構造に規制されていると考えた. 一般的に, 堆積盆の被覆層は越後山脈や中央隆起帯などの山岳地域の硬い基盤岩類に比べて軟らかく塑性変形しやすい. このような地殻最上部の物性の違いが測地学的なひずみ場の不均質性を表している可能性がある. しかし, ひずみ集中帯の成因として下部地殻の変形に注目するモデル (飯尾, 2009) もある. 地表のひずみ分布を決定する要因は被覆層の厚さ変化だけではなく, 堆積盆の基盤の挙動を含む複合的な規制があると考えられる. 一方, 同地震後のひずみ速度分布は広域的に一様であり, 地体構造に対応する形跡はない. このことについては, 余効変動が非常に大きいこと, 地震前のようにひずみ分布が地体構造と対応するパターンがあったとしても, そのシグナルがより大きな余効変動に埋もれて見えない可能性が指摘できる.

信越地域の地体構造に対応したひずみ集中が起きていたメカニズムを理解するためには, 余効変動の影響を効果的に除去する工夫とともに, 何らかの方法で下部地殻の挙動を抽出する必要がある.

キーワード: 2011 年東北地方太平洋沖地震, 地殻変動, ひずみ集中帯, 地体構造

Keywords: the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, crustal movement, strain concentration zone, tectonic province

## 新潟県室野泥火山における重力異常と最近半年間の地盤上下変動

### Vertical movement during recent half year and gravity anomaly in the Murono mud volcano, Niigata, Japan

楠本 成寿<sup>1\*</sup>, 須藤 慶也<sup>2</sup>, 川端 美花<sup>2</sup>, 福田 洋一<sup>3</sup>

Shigekazu Kusumoto<sup>1\*</sup>, Keiya Sudo<sup>2</sup>, Mika Kawabata<sup>2</sup>, Yoichi Fukuda<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 富山大学大学院理工学研究部 (理学), <sup>2</sup> 富山大学理学部地球科学科, <sup>3</sup> 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻地球物理学教室

<sup>1</sup>Graduate School of Science and Technology for Research, University of Toyama, <sup>2</sup>Department of Earth Sciences, the Faculty of Science, University of Toyama, <sup>3</sup>Department of Geophysics, Graduate School of Science, Kyoto University

新潟県十日町市松代室野に位置する泥火山 (以下では, 単に, 室野泥火山とよぶ) は, 近隣の比較的大きな地震の度に激しい地盤の上下変動を生じることが知られている。しかしながら, 地震間地盤上下変動は知られていない。本研究では, 水準測量による, 室野泥火山の地震間変動観測を実施した。また, 地下の密度構造を知り, 地盤変動と地下構造の関係を知るために, 水準測量を実施する点上で重力探査を実施し, ブーゲー重力異常を求めた。

室野泥火山は, 100m × 70m 程度の規模の小さな泥火山であり, 現在もガスや泥水を活発に噴出している。我々は, この泥火山領域に数 m ~ 20m 間隔で 61 点の水準点を設け, 2012 年 6 月, 7 月, 10 月, 11 月, 12 月の 5 回, 水準測量を実施した。水準測量にはデジタルレベルを用い, 各水準測量での標高値は網平均によって求められた。各測量での決定誤差は, 概ね 1.96mm/km であった。この半年間の水準測量から, 室野泥火山は最大で 26mm の隆起と 14mm の沈降が観測された。今回の観測で検出された隆起域は, これまでの地震活動の際に生じた隆起域とほぼ同じ場所であった。

室野泥火山で観測された重力異常は, ブーゲー密度を  $2400\text{kg/m}^3$  と仮定したとき,  $-8.5\text{Gal}$  の重力異常値をもつ。大きな隆起や沈降が観測される領域は, 特に低重力異常となっており, 地下浅部に低密度層の存在が示唆される。我々は, 地下浅部低密度層として, 泥水層或いはそれに近いものを考えている。

低重力異常部と上下変位の大きな領域がほぼ一致することから, この低密度層内の過剰圧変化が地表面の上下変動を起こしていると推察される。しかしながら, このことを明らかにするには, もうしばらく観測を続けて行く必要があると思われる。また, 高さ変化だけでなく, 精密重力計測を繰り返すことで, 地下構造の変化を計測していく必要もあるかと思われる。

[謝辞] 本研究は, 平成 24 年度富山大学学長裁量経費「精密重力測定による泥火山下の質量分布の推定とその時間変化のモニタリング」により実施されました。記して感謝致します。また早稲田大学には, 敷地内での重力測定と水準測量の実施許可をはじめ, 様々な便宜をおはかり頂きました。記して深謝致します。

キーワード: 泥火山, 水準測量, 重力異常, 上下変動

Keywords: Mud volcano, Leveling, Gravity anomaly, Vertical movement

## フィリピン・ミンダナオ島における GPS 観測-地震発生ポテンシャル評価にむけて- GPS observation in Mindanao, Philippines

大倉 敬宏<sup>1\*</sup>, 木股 文昭<sup>2</sup>, 田部井 隆雄<sup>3</sup>, Teresito C. Bacolcol<sup>4</sup>  
Takahiro Ohkura<sup>1\*</sup>, Fumiaki Kimata<sup>2</sup>, Takao Tabei<sup>3</sup>, Teresito C. Bacolcol<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 京都大学火山研究センター, <sup>2</sup> 東濃地震科学研究所, <sup>3</sup> 高知大学理学部, <sup>4</sup> フィリピン火山地震研究所

<sup>1</sup>AVL,Kyoto Univ., <sup>2</sup>Tono Research Institute of Earthquake Science, <sup>3</sup>Faculty of Science, Kochi University, <sup>4</sup>PHIVOLCS

フィリピンは世界で最も地震・火山の活動が活発な国の一つである。フィリピン海溝ではフィリピン海プレートが東側から、マニラ海溝ではユーラシアプレートが西側から沈み込み、その中央にはフィリピン弧を縦断する長さ約 1250km の長大な左横ずれのフィリピン断層が存在している。これらのプレート境界と内陸活断層では、1976 年ミンダナオ島沖地震 (M7.8)、1990 年ルソン島地震 (M7.7) などが発生し大きな被害がもたらされた。そこで、これらの地震や火山噴火による災害を軽減する目的で、JST-JICA 地球規模課題対応国際科学技術協力事業「フィリピン地震火山監視能力強化と防災情報の利活用推進」が 2009 年度に開始された。我々は、この事業の一環として、ミンダナオ東部地域における GPS キャンペーン観測を実施してきたので、それについて報告する。

フィリピン断層では、過去の研究から一部の地域でクリープが検出されている。ミンダナオ島北部のフィリピン断層は、顕著な地震空白域となっているが、これがクリープによる定常的な歪解放によるものか、固着によるものかは分かっていない。一方、ミンダナオ島の東に位置するフィリピン海溝は、最近の GPS 観測から年間 6 cm のプレート沈み込み速度が推定されているが、最近 300 年間に発生した M8 級の地震は 2 回しかなく、ミンダナオ島北東部に大きな未破壊域が残っていると推定される。そこで我々は、フィリピン断層の各セグメントの歪み分布推定、および海溝におけるプレート間の固着度推定を行なうため、2010 年 3 月にミンダナオ東部の 15 箇所において GPS キャンペーン観測を開始した。

観測は 2013 年 3 月まで、1 年おきに実施されている。それぞれのキャンペーンでは、PHIVOLCS が設置したベンチマークの上に三脚をたて、アンテナを設置し、3-5 日間の連続観測をおこなっている。

キャンペーンで得られたデータを IGS の BAKO,DARW,GUAM,PIMO,TCMS のデータとともに Bernese5.0 を用いて解析した結果、ミンダナオ島東部沖のフィリピン海溝でのプレート間カップリングが基本的に強く、またセグメント固有の固着が示唆されることが明らかになった。また、ミンダナオ島北部のフィリピン断層の運動として、約 2cm/year の左横ずれ成分が検出された。

この事業では、ミンダナオ島におけるフィリピン断層のトレンチ調査や海岸地形調査も実施されており、過去の地震の繰り返し間隔が明らかにされつつある。それらの情報と GPS 観測結果をあわせて、将来発生する海溝型巨大地震と内陸直下型大地震の発生ポテンシャルを明らかにすることが本事業の目的の一つである。

キーワード: フィリピン海溝, フィリピン断層, GPS 観測, 地震発生ポテンシャル

Keywords: Philippine Trench, Philippine fault, GPS observation, Earthquake potential

## フィリピン・マニラ首都圏南部のマリキナ断層における断層クリープの観測 Monitoring of fault creeping at south part of Metro Manila, Philippines

栗田 勝実<sup>1\*</sup>, 衣笠善博<sup>2</sup>, 出口知敬<sup>3</sup>, ローリーリマンド<sup>4</sup>, 笹川正<sup>5</sup>, 野中崇志<sup>5</sup>

Katsumi Kurita<sup>1\*</sup>, KINUGASA, Yoshihiro<sup>2</sup>, DEGUCHI, Tomonori<sup>3</sup>, RIMANDO, Rolly E.<sup>4</sup>, SASAGAWA, Tadashi<sup>5</sup>, NON-  
AKA, Takashi<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 東京都立産業技術高等専門学校, <sup>2</sup> 地震予知総合研究振興会, <sup>3</sup> 日鉄鉱コンサルタント, <sup>4</sup> フィリピン火山地震研究所, <sup>5</sup> 株式会社パスコ

<sup>1</sup>Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology, <sup>2</sup>Association for the Development of Earthquake Prediction, <sup>3</sup>Nittetsu Mining Consultants Co.,Ltd., <sup>4</sup>Philippine Institute of Volcanology and Seismology, <sup>5</sup>PASCO

Metro Manila, in the Philippines, is the nation's center of politics, economy, and culture. It has rapidly grown into an overcrowded mega city with an economically active population of at least 10 million. On the eastern portion of Metro Manila lies the active Marikina Valley fault system (MVFS). According to results of a trench survey (Nelson et al., 2000, Rimando et al. 2006), it has a potential for a M6-M7 earthquake occurring along the northern part of MVFS' western segment. At the southern part of Metro Manila, while structures and pavements are damaged recently by ground deformation along the MVFS, no big earthquake whatever is involved. From a safety point of view of an urban area, it is important to monitor such the ground deformation.

In this study, monitoring of ground deformation was done through repeated leveling surveys and continuously through a creep measuring device installed across the MVFS' creeping zone in the southern part of Metro Manila.

To monitor the slip rate, periodic leveling surveys across the creeping fault zone at six sites had been done since September 1999. Since there is little or no horizontal slip, the survey employed a simple leveling method using an electronic digital level and barcode leveling staff. Overall accuracy is estimated to be 2-3mm. Survey interval was initially every three months and later, every six months. At first, eight survey lines at four sites were set up but two survey lines at two locations were lost due to road repairs. Two new lines at other one site were set up on September 2012.

Three survey lines (VOS, JUA-A, JUA-B) show continuous creep dislocation. The average slip rate is 1.70cm/y. One survey line (NPC-A) shows no creep dislocation since the survey started in 1999 even though echelon cracks on the pavements are still visible. Two survey lines (NPC-B, NPC-C) and three survey lines (GRV-A, GRV-B, GRV-C) show continuous creep dislocation until December 2007 and March 2010, respectively. The average slip rate of these five survey lines ranges from 1.07cm/y to 2.61cm/y. However, movement direction by creep was changed from East-up (West-down) to East-down (West-up) since December 2007 and March 2010.

To track detailed displacement changes at the creeping fault segments, continuous monitoring at NPC-B has been carried out since September 2008. The sampling interval is 3 hours. Until January 2009, the average slip rate gathered from this site is 0.01mm/day (3.65mm/y), the east side of the fault subsided (or the west side uplifted). Although the fluctuation of the displacement is +/-0.5mm, the fault creep appears to have stopped as of July 2009.

There are two hypotheses for the triggering mechanism of the continuous dislocation of the MVFS' creeping zone segment. One is excessive withdrawal of groundwater due to rapid urban growth; the other is tectonic.

Several ground deformation anomalies were detected in Metro Manila through the InSAR time series analysis (Deguchi et al. 2011). Most of the vertical movements can be correlated with groundwater level changes. Some of the deformation are independent of the groundwater level changes in the areas surrounding MVFS. Therefore, the possibility that some of the deformation by creep are tectonic in nature cannot be denied.

キーワード: 活断層, クリープ, モニタリング, マニラ首都圏

Keywords: Active fault, Creep, Monitoring, Metro Manila



## 六甲高雄観測室で観測された地震後の地下水流動に伴う歪変化 Strain Changes due to Groundwater Migration after Earthquakes Observed at Rokko-Takao Station

向井 厚志<sup>1\*</sup>, 大塚 成昭<sup>2</sup>

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

<sup>1</sup> 奈良産業大学, <sup>2</sup> 神戸学院大学

<sup>1</sup>Nara Sangyo University, <sup>2</sup>Kobe Gakuin University

兵庫県南部の六甲高雄観測室では、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震において、 $10^{-7}$  オーダの歪の伸張とともに250ml/sの湧水量の増大がステップ状に生じた。本発表では、地震時および地震後の歪変化、湧水量変化および地下水位変化の観測値を用いて、東北地方太平洋沖地震などの大地震に伴う破砕帯の変形および地下水流動が歪変化に及ぼす影響について調べた結果について報告する。

六甲高雄観測室は新神戸トンネル緊急避難路に開設された地殻変動観測室であり、その通路はほぼ東西方向に走向をもつ万福寺断層を横切っている。観測室内には、3成分ポアホール型歪計(ST1:N81°W, ST2:N39°E, ST3:N21°W)、湧水量計および水位計などが設置されており、0.5秒間隔で連続観測を実施している。

万福寺断層の破砕帯を貫く観測室の側壁からは定常的に約550ml/sの湧水が生じており、東北地方太平洋沖地震の直後に800ml/sへと増大した。湧水量は10日程度の時定数で300ml/sまで減少した後、数ヶ月以上かけてほぼ元の値へと戻った。国土地理院が発表した東北地方太平洋沖地震の地震断層モデルに基づいて歪ステップを計算したところ、同観測室周辺は $10^{-7}$ の伸張場であった。一般に伸張場では間隙水圧が低下し、湧水量の減少が期待される。当該地震において伸張場であるにもかかわらず、地震直後に湧水量の増大が観測されたことは、地震動および岩盤の伸張によって水路が開いた結果、地下水が観測室内へと流出したためと考えられる。このことは、地震後の数ヶ月間にわたって歪の収縮および湧水量の減少が継続したと矛盾しない。地震に伴い水源から地下水の大部分が流出した結果、長期間にわたって湧水量が減少するとともに、観測室直上の地下水荷重が低下することによって水平歪の収縮が生じたと考えられる。

東北地方太平洋沖地震時に観測された歪ステップの最大および最小主歪は、それぞれ $+0.9 \times 10^{-7}$  および $-3.8 \times 10^{-7}$  であり、最大主歪の方向はN31°Eであった。一方、地震断層モデルに基づいて計算された歪ステップの最大および最小主歪は、それぞれ $+1.7 \times 10^{-7}$  および $-0.9 \times 10^{-7}$  であり、最大主歪の方向はN54°Eと求められた。このように、歪ステップの観測結果と理論値の間には、主歪の大きさで約 $10^{-7}$ 、主歪の方向で約20°の差異がみられた。これらの差異は、地震時の破砕帯の収縮および間隙水圧の上昇によって生じたと考えられる。地震によって空隙が圧縮され、破砕帯が収縮すると、周辺岩盤の間隙水圧が上昇する。当該地震の場合では、破砕帯が約 $10^{-7}$ で収縮し、それに伴い約9kPaの間隙水圧の上昇が歪計周辺で生じたと仮定すると、歪ステップの観測結果と断層モデルによる理論値のずれをうまく説明することができる。

地下水流動および間隙水圧変化に伴う歪変化は、東北地方太平洋沖地震以外の地震においても観測されている。本発表では、M7以上の地震時に観測された歪変化を用いて、地震に伴う歪変化に対する地下水の影響を明らかにする。

キーワード: 歪変化, 湧水量変化, 六甲高雄観測室, 東北地方太平洋沖地震

Keywords: strain change, groundwater discharge, Rokko-Takao station, 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake



## 稠密水準測量による御前崎地域における地殻変動の把握

### Vertical ground deformation in the Omaezaki region obtained from the net adjustment of precise leveling survey

高野 和友<sup>1\*</sup>

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

<sup>1</sup> 国土交通省国土地理院

<sup>1</sup> 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水準路線において、精密基盤傾動測量（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（地震防災対策強化地域）となっており、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の基礎に資するべく、1981年以降は原則年4回、当該水準路線において繰り返し観測を実施している。近年は精密基盤傾動測量により、より高精度に地盤の上下変動を求めており、森町側と比較して御前崎市側の相対的な沈降（上下地殻変動）が継続して得られている。

精密基盤傾動測量の作業は通常の水準測量とは異なり、既設の固定点（測点数が多い水準点間において、観測精度を点検するために堅固な自然物等に適宜設置をする鉾など）が使用可能な場合は、使用をするようにしている。固定点は水準点とは設置方法や形状が異なることから安定性は望めないが、これに関する精度等を評価した上で水準点と同様に見なせば、空間分解能が高まることになり、上下地殻変動に関するより詳細な議論が可能となる。

また、水準測量は通常、水準点間の往復観測を実施してこの往復観測値の算術平均により点間の高低差を決定しているが、この往復観測値はそれぞれ独立した観測であることから測定誤差等により較差が存在する。従来の研究でこの較差が議論されることはあまりなかったが、本研究ではこの往復観測については往復それぞれを独立した片道観測と考えた。このため、点間ごとに環を形成していると見なすことができ、全点間をつなぎ合わせることで一つの水準網と考えて、網平均計算を行うことで、固定点を含む水準点の標高を決定すると共に精度も評価し、より詳細な上下地殻変動の把握に努めた。

本発表ではこれらの解析によって得られた水準測量の観測精度と御前崎市の相対的な沈降について報告する。

キーワード: 水準測量, 水準点, 上下地殻変動, 東海地震, 網平均計算, 御前崎

Keywords: Leveling survey, Benchmark, Vertical crustal deformation, Tokai earthquake, Net adjustment, Cape Omaezaki

## 立坑掘削に伴う地球物理学的変動観測

### The continuous stress, tilt, and pore-pressure observation at Mizunami Underground Research Laboratory

浅井 康広<sup>1\*</sup>, 石井 紘<sup>1</sup>  
Yasuhiro Asai<sup>1\*</sup>, Hiroshi Ishii<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東濃地震科研  
<sup>1</sup> TRIES, ADEP

東濃地震科学研究所は、瑞浪超深地層研究所（日本原子力研究開発機構；JAEA）の主立坑（6.5m）と換気立坑（4.5m）の掘削によって生じる地下水位変動を能動的地下水制御と見なし、地下水位変動と地殻歪・傾斜変化等の関連性を調査・研究している。

この一環として、2007年2月、瑞浪超深地層研究所の主立坑・換気立坑を繋ぐ深度100m予備ステージにある深度23.3mの既存孔利用しSTG100観測点を整備（ボアホール傾斜計を設置）続いて2008年3月より、深度200mボーリング横坑（換気立坑側）にある既存孔を利用、STG200観測点整備した（ボアホール応力計・傾斜計）。2012年11月には、深度300m研究アクセス坑道11m計測横坑に新規ボアホール孔を掘削、STG300観測点を整備した（ボアホール応力計）。

これまで、立坑掘削に伴う傾斜変動や調査孔掘削によって生じた湧水に伴う応力変化、傾斜変化等、興味深い観測記録が得られている。本報告では、観測点の概略とこれまで得られた観測記録および解析結果を報告する。

キーワード: 応力連続観測, 傾斜連続観測, ボアホール

Keywords: continous crustal stress observation, continous crustal tilt observation, borehole