

地震での地殻変動検出におけるだいち2号の貢献

ALOS-2 contributions for detection of crustal deformation associated with earthquakes

*三浦 優司¹、宮原 伐折羅¹、仲井 博之¹、本田 昌樹¹、攪上 泰亮¹、藤原 智¹、矢来 博司¹、小林 知勝¹、森下 遊¹

*Yuji Miura¹, Basara Miyahara¹, Hiroyuki Nakai¹, Masaki HONDA¹, Yasuaki Kakiage¹, Satoshi Fujiwara¹, Hiroshi Yara¹, Tomokazu Kobayashi¹, Yu Morishita¹

1. 国土地理院

1. GSI of Japan

地震活動に伴う地殻変動を捉える技術の一つに人工衛星に搭載された合成開口レーダーによるSAR解析がある。この技術を活用して地殻変動を検出する主な長所として、地上観測機器の設置が不要であることや高い空間分解能で広域を面的に観測できることが挙げられる。

2014年5月24日に陸域観測技術衛星「だいち2号」(ALOS-2)がJAXAによって打ち上げられた。だいち2号は、この先行機であり2006年から2011年に運用された「だいち」(ALOS)に比べ、回帰日数(46日から14日へ)や空間分解能(最高で10mから3mへ)などの性能が向上した。また、だいち2号は、だいちとは異なり、左向き観測や広域観測モードの干渉解析が可能になった。このような性能の進歩により、地震発生時のSAR観測の迅速性や地殻変動の計測能力が大きく向上した。

地震予知連絡会SAR解析ワーキンググループ(地震SAR解析WG)は、地震予知連絡会の下にある専門家のグループで、だいち2号によるSAR画像の分析から地震に伴う地殻変動の把握、手法の高度化、地震発生機構の解明、災害対応・災害軽減へのSARデータの活用を調査・検討してきた。国土地理院は、地震SAR解析WGの事務局を担当しており、だいち2号の打上げから3年間の活動で得られた地震SAR解析WGの成果に関する報告書を取りまとめているところである。

本発表では、これまで地震SAR解析WGで観測を要求し、検討を行った代表的な地震について、国土地理院の解析結果をもとにだいち2号の成果を示す。特に、2016年は、平成28年熊本地震や鳥取県中部を震源とする地震(Mj6.6)といった内陸を震源とする地震において詳細な変動を検出しており、それらの地震を中心に説明する予定である。

キーワード：だいち2号(ALOS-2)、SAR、地震、地殻変動

Keywords: ALOS-2, SAR, Earthquake, Crustal deformation

宇宙測地技術により検出された1995年兵庫県南部地震の余効変動 Postseismic Deformation following the 1995 Kobe, Japan, Earthquake Detected by Space Geodesy

*橋本 学¹、小澤 拓²、西村 卓也¹、宗包 浩志³、飛田 幹男⁴

*Manabu Hashimoto¹, Taku Ozawa², Takuya NISHIMURA¹, Hiroshi Munekane³, Mikio Tobita⁴

1. 京都大学防災研究所、2. 防災科学技術研究所、3. 国土地理院、4. 宇宙航空研究開発機構

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. National Research Center for Earth Sciences and Disaster Resilience, 3. Geospatial Information Authority, 4. Japan Aerospace Exploration Agency

A Mw 6.8 earthquake hit the city of Kobe, southwest Japan, and its surrounding area on January 17, 1995, and claimed more than 6,400 fatalities. The source faults, trending in the NE-SW direction, are estimated beneath the foothill of the Rokko Mountains, which are located north of the city and the highest peak is 931 m high, but it has a dominant right lateral strike slip components. The Rokko Mountains may have been built by the motion of active faults, but the uplift during the 1995 earthquake may not be enough. Therefore there is a possibility that postseismic deformation contributes to the building of the Rokko Mountains.

In order to study the postseismic deformation following the Kobe earthquake, we collected all available space geodetic data during about 20 years, including ERS-1/2, Envisat, JERS-1, ALOS/PALSAR and ALOS-2/PALSAR-2 images and continuous GPS data, and reanalyzed them. Especially, temporal continuous GPS observation made by the Geographical Survey Institute (present the Geospatial Information Authority), Japan in and around the Kobe area is important. We recalculated coordinates of these continuous GPS stations with recent PPP procedure using reanalyzed orbits and clocks of satellites. We made DInSAR and PSInSAR analyses of SAR images using ASTER-GDEM ver.2 or GSI DEM.

Time series analysis of JERS-1 images revealed line-of-sight (LOS) decrease of the Rokko Mountains. PSInSAR results of ALOS/PALSAR also revealed slight uplift north of the Rokko Mountains that uplifted by 20 cm coseismically. These observations suggest that the Rokko Mountains might have uplifted during the postseismic period.

LOS increase in a wedge shaped region between two active faults east of the Rokko Mountains in the vicinity of the NE terminus of the source fault of the Kobe earthquake. The LOS increase is also confirmed by ERS-1/2, Envisat and ALOS/PALSAR images. These facts indicate that the subsidence between these two faults continued up to 2010. Continuous GPS observation during the first two years of the postseismic period shows north-south extension with right lateral motion between these two faults.

These observations suggest that the Rokko Mountains may have uplift till 2010. On the other hand, active faults near the NE terminus continued to slip with the formation of graben-like structure, due to coseismically loaded stress.

キーワード：1995年兵庫県南部地震、余効変動、GPS、合成開口レーダー干渉法、六甲断層帯

Keywords: 1995 Kobe earthquake, Postseismic deformation, GPS, SAR interferometry, Rokko fault zone

2014-2015年Bárðarbungaダイク貫入イベントに伴う氷帽・地殻変動の検出

Detection of both icecap and crustal deformation associated with the 2014-2015 Bárðarbunga rifting episode

*姫松 裕志¹、古屋 正人¹

*Yuji Himematsu¹, Masato Furuya¹

1. 北海道大学大学院理学院

1. Graduate School of Science, Hokkaido University

The 2014-2015 Bárðarbunga rifting episode is one of the largest event in Iceland. Previous studies have already reported that the earthquake swarm migrated from Bárðarbunga to Holhraun where the fissure eruptions occurred at northern edge of Vatnajökull icecap. There were few ground-based GPS observation points near the epicenters of the swarm. While the nearby crustal deformation associated with the episode have also been detected by using satellite InSAR-data, phase decorrelation problems have hampered detecting the icecap deformation during the rifting episode. Although the icecap has been known to flow steadily, one of our motivations is to see if the rifting episode affected the flow speed of ice in light of the well-known Jökulhlaups event by subglacial eruption. Moreover, phase-based InSAR measurement does not allow for the detailed measurement of the subsidence over the graben, which is indispensable to constrain the volume and geometry of intruded dike.

In this study, we processed COSMO-SkyMed images to simultaneously detect both the flow signals on the icecap and the crustal deformation associated with the rifting event. The offset tracking data derived from COSMO-SkyMed images showed the displacement signals that consist of both the crustal deformation over land and the icecap flow. Two displacement discontinuities were detected not only on the land but also on the icecap, while we could not capture the entire image of the both deformations due to the limited SAR image coverage. The 3D displacements revealed a graben structure with over 8 m subsidence at the graben floor. At the graben floor, approximately 1 m of the rift-parallel motion which caused by the dog-bone seismicity was detected. Using these observation results, we will estimate the dike intrusion model and discuss the possible interaction between the ice and the crustal deformation during the 2014-2015 Bárðarbunga rifting episode.

キーワード：ダイク貫入イベント、プレート発散境界、合成開口レーダ、アイスランド、ピクセルオフセット法

Keywords: Dike intrusion episode, Divergent plate boundary, Synthetic Aperture Radar, Iceland, Pixel offset technique

2016年10月21日鳥取県中部の地震(M6.6)の地殻変動

Crustal deformation of the 2016 October 21th M 6.6 earthquake in central Tottori prefecture.

*西村 卓也¹、橋本 学¹、細 善信、坂上 啓²、伊東 優治²

*Takuya NISHIMURA¹, Manabu HASHIMOTO¹, Yoshinobu HOSO, Hiromu SAKAUE², Yuji ITOH²

1. 京都大学防災研究所、2. 京都大学大学院理学研究科

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Graduate School of Science, Kyoto University

1. はじめに

山陰地方には、海岸線に沿うように微小地震の活発な領域が存在し、過去に1943年鳥取地震 (M_{JMA} 7.2) や2000年鳥取県西部地震 (M_{JMA} 7.3) などの大地震が発生したことが知られている。西村・他 (2014) は、国土地理院のGEONET観測データから、微小地震の活発な領域とひずみ速度の大きい領域がほぼ一致することを指摘し、「山陰ひずみ集中帯」と呼ぶことを提唱した。

我々は山陰ひずみ集中帯における詳細地殻変動の解明を目指して、2014年の夏から冬にかけて鳥取県と岡山県に13点のGNSS観測点を新設した。観測点は、既存のGEONET観測点と併せて、ひずみ集中帯を横切るように鳥取県東部、中部、西部に南北方向の稠密線状アレイとなるように配置し、観測を継続していた。

そのような中、2016年10月21日14時7分に M_{JMA} 6.6の地震が鳥取県中部で発生し、鳥取県倉吉市、湯梨浜町、北栄町で震度6弱を観測した。この地震の震源域は、鳥取県中部に構築したGNSS稠密アレイと交差しており、この規模の地震としては前例がないほどの地震前・地震時・地震後の地殻変動が詳細に捉えられた。本講演では、稠密GNSS観測とSAR干渉解析によって捉えられた鳥取県中部の地殻変動について報告する。

2. 地震前の地殻変動

山陰ひずみ集中帯における地殻変動の特徴は、南部の瀬戸内海側に対してひずみ集中帯より北側が相対的に東へ動いていることである。岡山県中部を固定して2014年から2016年の地震前の平均的速度を見ると、鳥取県の日本海沿岸では約5mm/年の東向きの変動が見られ、その変動は南ほど小さくなる。岡山県に入ると変動速度がほぼ0となり、瀬戸内海沿岸までは顕著な変動は見られない。この分布から、鳥取県を東西に横断する幅20km程度の領域で右横ずれ運動をひずみ集中帯があることが読み取れる。このひずみ集中帯内で M_{JMA} 6.6の地震が発生した。

3. 地震時の地殻変動

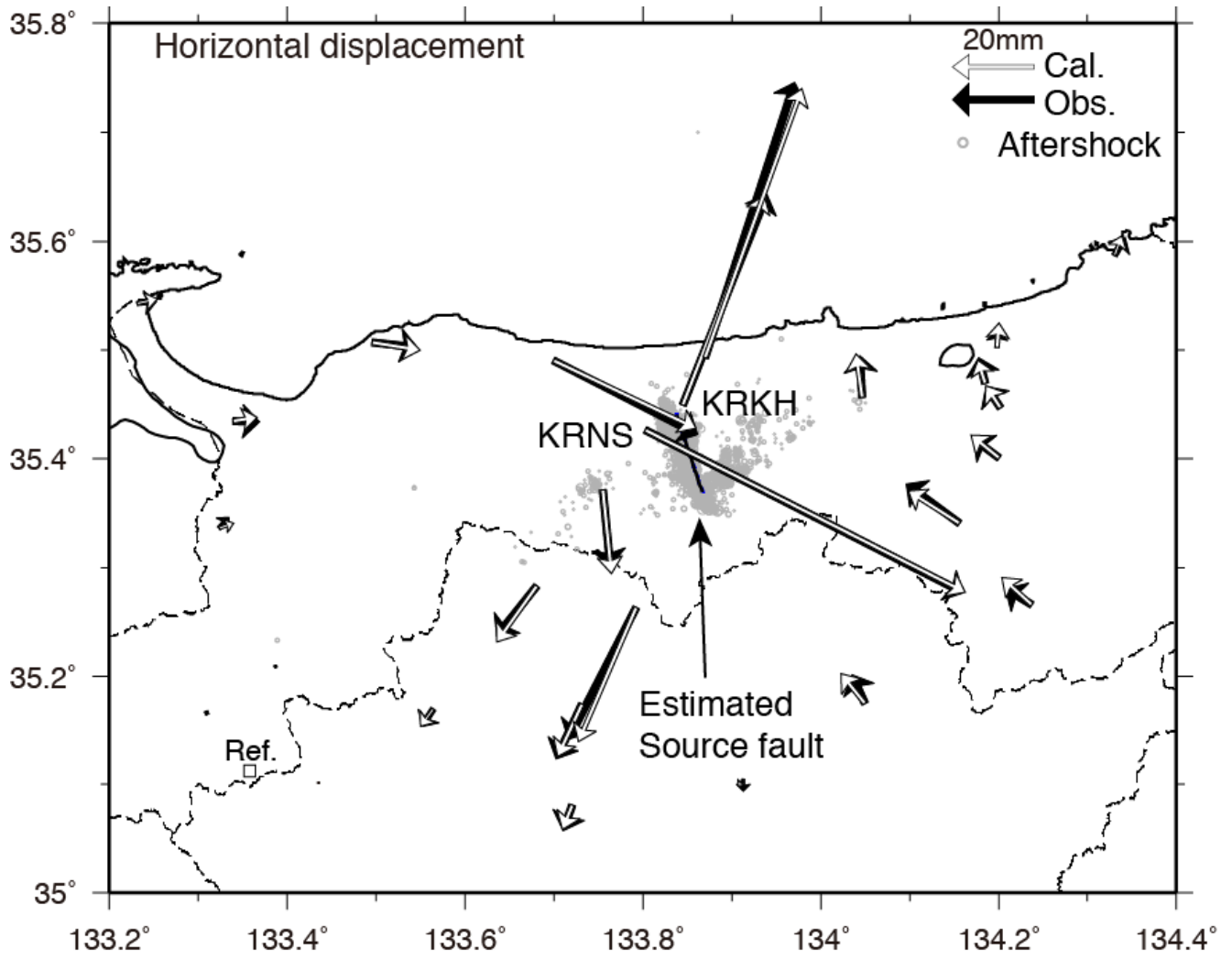
地震時の地殻変動は、鳥取県及び岡山県の観測点で観測された。最大の地殻変動を観測したのはKRNS観測点で、水平変位は東南東方向へ9cmに達し、4cmの沈降も観測された。地震時地殻変動と地殻変動から推定した震源断層モデルを図に示す。この地震の余震分布は北北西-南南東方向に並んでいるが、GNSSデータより、KRKH観測点とKRNS観測点の間を通るほぼ鉛直な震源断層が推定され、その位置は余震分布とほぼ一致している。この断層で約90cmの左横ずれのすべりが生じ、モーメントマグニチュード (M_w) は約6.2と推定された。また、ALOS-2データの干渉SAR解析によっても、横ずれ断層による4象限型の変動パターンを示唆する地殻変動の面的分布が明らかとなっており、GNSSデータから推定された断層モデルと調和的である。

4. 地震後の地殻変動

余効変動は、地震直後の急激な変動に比べるとかなり減速したが、2016年12月末までに最大約2cmの達している。余効変動の変位パターンは、地震時変動と似ているが、地震時変動と比較すると震源断層近傍のKRKH観測点とKRNS観測点での変動量が周辺の観測点に比べて大きいという特徴がある。このような特徴は、浅部での余効すべりによって説明できると考えられる。

キーワード：地殻変動、GNSS、InSAR、山陰ひずみ集中帯

Keywords: Crustal deformation, GNSS, InSAR, San'in shear zone



Post-seismic deformation of 2016 Kumamoto Earthquake by continuous GNSS network

*中尾 茂¹、松島 健²、田部井 隆雄³、大久保 慎人⁴、山品 匡史⁴、大倉 敬宏⁵、西村 卓也⁶、澁谷 拓郎⁶、寺石 眞弘⁶、伊藤 武男⁷、鷺谷 威⁸、松廣 健二郎⁷、加藤 照之⁹、福田 淳一⁹、渡邊 篤志⁹、三浦 哲¹⁰、太田 雄策¹⁰、出町 知嗣¹⁰、高橋 浩晃¹¹、大園 真子¹¹、山口 照寛¹¹、岡田 和見¹¹

*Shigeru Nakao¹, Takeshi Matsushima², Takao Tabei³, Makoto OKUBO⁴, Tadashi Yamashina⁴, Takahiro Ohkura⁵, Takuya NISHIMURA⁶, Takuo Shibutani⁶, Masahiro Teraishi⁶, Takeo Ito⁷, Takeshi Sagiya⁸, Kenjiro Matsuhira⁷, Teruyuki Kato⁹, Jun'ichi Fukuda⁹, Atsushi Watanabe⁹, Satoshi Miura¹⁰, Yusaku Ohta¹⁰, Tomotsugu Demachi¹⁰, Hiroaki Takahashi¹¹, Mako Ohzono¹¹, Teruhiro Yamaguchi¹¹, Kazumi Okada¹¹

1. 鹿児島大学大学院理工学研究科地球環境科学専攻、2. 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、3. 高知大学理学部応用理学科、4. 高知大学理学部附属高知地震観測所、5. 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、6. 京都大学防災研究所、7. 名古屋大学大学院環境学研究科附属地震山研究センター、8. 名古屋大学減災連携研究センター、9. 東京大学地震研究所、10. 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、11. 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

1. Department of Earth and Environmental Sciences, Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University, 3. Department of Applied Science Department, Faculty of Science, Kochi University, 4. Kochi Earthquake Observatory, Faculty of Science, Kochi University, 5. Aso Volcanological Laboratory, Institute for Geothermal Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University, 6. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 7. Earthquake and Volcano Research Center, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 8. Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University, 9. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 10. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, 11. Institute of Seismology and Volcanology, Graduate School of Science, Hokkaido University

The 2016 Kumamoto Earthquake (M 7.3) attacked to Kumamoto prefecture in Japan on April 16, 2016. Seismic intensity 7 was observed twice in the 2016 Kumamoto Earthquake. Post-seismic deformation was observed after the large earthquake occurred in land and trench. Twenty-one continuous GNSS observation sites were occupied after the 2016 Kumamoto Earthquake to observed post-seismic deformation. Thirteen of our twenty-one sites were near Futagawa and Hinagu fault zones, four of our sites were around Aso Volcano, which is east from Futagawa fault zones and the others were in Ohita Prefecture, which is east of Kumamoto Prefecture

Bernese GNSS Software Ver. 5.2 is used for GNSS data analysis of our newly sites together with GEONET and JMA GNSS sites for volcanoes in Kyushu for the period from April 15 to December 31, 2016. We used CODE precise ephemerides and CODE Earth rotation parameters. The coordinates of the GNSS sites are estimated respect to ITRF2008.

Large post-seismic deformation in horizontal component was observed at CGNSS sites near Hinagu and Futagawa fault zone. However, there is almost no observation in vertical component. Largest post-seismic deformation of 11cm from April to December, 2016 is observed in NS-component at MIFN, which is located east side of Hinagu fault zone. It seems that post-seismic deformation does not come to stop. After slip model is assumed for initial post-seismic deformation from April to July, 2016. We assumed two faults, one is located in Futagawa fault zone and the other is Hinagu fault zone. Fault parameters of length, width, strike, dip, amount of slip, position are estimated by simulated annealing method. Top and

bottom of fault plane are 0.1 to 40 km in Hinagu fault and 0.8 to 32 km in Futagawa fault. Two fault planes extended to mantle. It suggests that there are several phenomena in initial post-seismic deformation, effect of viscoelastic etc.

キーワード : GNSS連続観測、余効変動

Keywords: Continuous GNSS observation, post-seismic deformation

Afterslip, viscoelastic relaxation, poroelastic rebound: A possible mechanism in the short and long term postseismic deformation following the 2011 Tohoku earthquake.

*Hidayat Panuntun¹, SHINICHI MIYAZAKI¹, Yoshiaki Orihara²

1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Department of Physics, Tokyo Gakugei University

Postseismic deformation of the Tohoku earthquake has been investigated by Ozawa et al. (2011), Wang et al. (2012), Diao et al. (2013), Sun et al. (2014), Perfettini and Avouac (2014), Shirzaei et al. (2014), Silverii et al. (2014), and Yamagiwa et al. (2015). Of these studies, Diao et al. (2013) investigated rheological model inferred from postseismic deformation of the Tohoku earthquake using 1.5 years GPS data following the mainshock. Because reliable investigation of the viscosity and its transient behavior require observation with longer time period, we build postseismic deformation model of the Tohoku earthquake using longer GPS data than that of used by previous studies and estimated the inferred rheological model. In addition, we also evaluate the possibility of the poroelastic relaxation signal due to the Tohoku earthquake.

We used observed surface deformation recorded by inland GEONET stations from 12 March 2011 to 12 October 2016 (~ 5.6 years). Afterslip model was inverted by assuming a homogeneous elastic half-space (Okada 1992). Viscoelastic relaxation due to coseismic stress change of the Tohoku earthquake is estimated using the Fortran code PSGRN/PSCMP (Wang et al. 2006). We estimated poroelastic relaxation following Gahalaut et al. (2008) and compared the result with observed ground water-level change to investigate relaxation time of poroelastic rebound.

Observed postseismic displacement for 5.6 following the mainshock show that deformation is characterized by seaward movement and is more broadly distributed than the coseismic displacement. Our model show an effective thickness of the elastic crust (D) and an asthenosphere viscosity (η) are 50 km and 5.6×10^{18} Pa s, respectively. This result is consistent with most estimated viscosity in NE Japan area (e.g., Rydelek and Sacks 1990; Suito and Hirahara 1999; Ueda et al. 2003; Hyodo and Hirahara 2003). Incorporating viscoelastic and poroelastic rebound in the early stage of postseismic deformation improve the agreement between predicted and observed displacement. It implies that postseismic deformation following the Tohoku earthquake is likely driven by multiple mechanism instead of single mechanism. Poroelastic relaxation is consistent with the ground water-level change during the first 140 days after the mainshock, suggesting that poroelastic rebound after the Tohoku earthquake have longer relaxation time than 60 days of poroelastic rebound following the 2000 South Iceland earthquake (Jonsson et al. 2003). Landward displacement of poroelastic rebound at offshore area indicate that this mechanism, along with viscoelastic relaxation, could have contributed to the postseismic deformation of the Tohoku earthquake.

Keywords: afterslip, viscoelastic relaxation, poroelastic rebound, GNSS, Postseismic deformation

GNSSデータを用いた日本海東縁周辺の地震間地殻変動場の時空間変化 Interseismic spatiotemporal change of the crustal deformation field estimated from GNSS around western coast of Tohoku region

*佐藤 未佳¹、大園 真子²、長谷見 晶子¹

*mika sato¹, Mako Ohzono², Akiko Hasemi¹

1. 山形大学大学院理工学研究科、2. 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

1. Graduate School of Science and Engineering, Yamagata University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Graduate School of Science, Hokkaido University

日本海東縁は、地質学的・測地的にひずみ集中帯が存在することが知られており、測地学のデータからは、「新潟-神戸ひずみ集中帯」と呼ばれる周辺よりもひずみ速度が大きい地域が分布する。先行研究である Sagiya et al. (2000) は、1997年から1999年までのGEONETデータを用いて定常地殻変動場を推定することで、新潟-神戸ひずみ集中帯とその北部延長の沿岸部での、ひずみ蓄積状態の違いを示した。またYokota and Koketsu. (2015) では、1996年からのGNSSデータを用いて、2011年東北地方太平洋沖地震発生前に東北地方の広域でスロースリップが発生していた可能性を示唆した。これらのことから、日本海東縁を含む東北地方の地震間の定常的な変動を詳細に考察することは重要であると考えられる。よって本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震前までの定常変動の時期を対象に、GNSSデータを用いた地殻変動速度場の時空間分布を求め、観測点の増加に伴う先行研究との比較、より長期の観測に伴う地殻変動場の時間変化の有無について検討する。

本研究では東北地方全域に設置されているGEONET観測点194点の日座標値(F3解)を使用する。1997年から2011年までの各点・各成分の日座標時系列に対し、地震時・人為的ステップを補正し、2年間のデータを1年間ずつずらしたデータセットを用意し、それに対して、定常変動を仮定した直線、年周、半年周の時系列モデルを最小二乗法によって近似し、直線の傾きとして速度を得た。得られた各点の水平速度ベクトルを太平洋プレート沈み込み方向(N22°W)へ分解し、その速度の時間変化を求める。東北地方を横断する南北幅20km毎の速度プロファイルを作成し、各プロファイル内での速度の時間変化、並んだプロファイルの空間的変化の特徴を調べる。

予備的解析結果として、新潟県北部から秋田県南部の日本海沿岸部のプロファイルを作成したところ、南部ではひずみ集中帯に対応すると思われる速度の変化域が現れ、北部ではその分布は明瞭ではない。これらは先行研究と概ね同じ傾向を示す。また時間変化に関しては、内陸地震やその余効変動に伴う一時的なプロファイルの変化は見られるが、それ以外に大きな特徴は見られない。今後、観測領域を拡大したことにより、その時空間的特徴の把握と日本海東縁北部におけるひずみ集中帯の変形の有無やその原因について議論を進める予定である。

東北地方太平洋沖地震前後の跡津川断層周辺における地殻変動の時間変化 Crustal deformation in and around the Atotsugawa fault before and after the Tohoku-Oki earthquake

*稲松 知美¹、高田 陽一郎¹、鷺谷 威²、西村 卓也³

*Tomomi Inamatsu¹, Youichiro Takada¹, Takeshi Sagiya², Takuya NISHIMURA³

1. 北海道大学大学院理学院、2. 名古屋大学減災連携研究センター、3. 京都大学防災研究所

1. Graduate School of Science, Hokkaido Univ., 2. DMRC, Nagoya Univ., 3. DPRI, Kyoto Univ.

2011年3月11日、Mw9.0の東北地方太平洋沖地震(以下、東北沖地震と呼ぶ)が発生した。歪集中帯や活断層のM9クラスの地震に対する応答を、密に配置されたGPSの観測データを用いて調べた例はほとんどなく、東北沖地震が初めての機会である。本発表では、新潟神戸歪集中帯(Sagiya et al., 2000)の一部である跡津川断層周辺について、東北沖地震前・地震時・地震後の地殻変動をGPSデータから計算し、互いに比較した結果を報告する。

解析には国土地理院のGEONETに加えて、大学が設置した観測点も用いた。地震前については時系列解析により年周・半年周変動を除去し、定常速度場を求めた。地震後については2014年11月25日から2016年7月2日を切り出し、地震前と同じ手法で定常速度場を求めた。地震時については2011年3月5日～10日および2011年3月12日～17日それぞれ5日間の座標平均を計算し、それらの差から変位を求めた。これらの変位・速度からShen et al (1996)の手法を用いて歪速度場(地震時変動については歪場)を求めた。

東北沖地震前後の歪速度場と地震時の歪場は空間パターンが全く異なるものとなった。地震時の歪は弾性歪であり、その空間変化は弾性歪の不均質性に起因する。従って、これと異なる地震前・地震後の歪は非弾性歪であると結論づけられる。一方、対象地域全体としては東北沖地震前と地震後で歪速度のパターンは良く似ている。このことは、非弾性歪(粘性流動など)が絶対差応力によって駆動されることにより説明できる。すなわち、長い時間スケールのプレート間相互作用により蓄積された絶対応力は東北沖地震に伴う応力変化よりもはるかに大きいため、地震前と地震後で歪速度が大きく変化しなかったと考えられる。この成果は、新潟地域について同様の解析を行った先行研究(Meneses-Gutierrez and Sagiya, 2016)と調和的である。

東北沖地震前後の歪速度場の特長としては、跡津川断層両端の火山地帯と跡津川断層上で歪速度が大きくなっていることが挙げられる。前者では高温による粘性流動、後者では断層深部の断層すべりの進行が期待される。つまり、跡津川断層の周囲では場所によって異なるメカニズムの非弾性歪が進行していると考えられる。

また、詳しくみると東北沖地震前後で、飛騨山脈南部や御嶽山の東側などで局地的に歪速度のセンスが逆転していることが分かった。これらの地域では地下の温度が高いことが知られており、また群発地震も頻発しているため、歪速度の時間変化は火山性の地殻変動に起因している可能性もある。

今回得られた結果には東北沖地震の余効変動の効果が含まれているため、地震前後の非弾性歪速度を定量的に比較できていない。東北沖地震の断層モデルを用いてこの効果を取り除く予定である。

キーワード：東北地方太平洋沖地震、GPS、非弾性歪

Keywords: Tohoku-Oki earthquake, GPS, inelastic strain

GPS-A観測点に影響を与える2004年紀伊半島南東沖地震後地殻変動の推定

Estimation of postseismic deformation at the seafloor GPS-A sites following the 2004 off the Kii Peninsula earthquakes

*渡邊 俊一^{1,2}、Bock Yehuda²、石川 直史¹、横田 裕輔¹、田所 敬一³

*Shun-ichi Watanabe^{1,2}, Yehuda Bock², Tadashi Ishikawa¹, Yusuke Yokota¹, Keiichi Tadokoro³

1. 海上保安庁海洋情報部、2. スクリプス海洋研究所、3. 名古屋大学地震火山研究センター

1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. Scripps Institution of Oceanography, 3. Earthquake and Volcano Research Center, Nagoya University

Dense near-fault GPS-A seafloor geodetic and on-shore GPS GEONET observations provide significantly improved resolution of the interseismic slip deficit in the Nankai trough, Japan [Yokota et al., 2016]. In a previous study, we included additional seafloor data at the Kumano basin collected by Nagoya University [Tadokoro et al., 2012] to estimate expected seafloor deformation during a large subduction zone earthquake as input to tsunami models [Watanabe et al., 2016 AGU]. However, in order to derive the stable velocities from GPS-A or GNSS data, the displacements caused by episodic events should be quantitatively estimated. Whereas the coseismic and postseismic deformations at the GPS-A sites associated with the 2011 Tohoku-oki earthquake had been already removed in the previous studies, the postseismic deformation of the southeastern off the Kii Peninsula earthquakes (on Sep. 5, 2004 JST, M_{JMA} 7.1, 7.4) have not been quantified. In this study, we constructed the FEM model to calculate the viscoelastic relaxation following these events. At first, we re-estimated coseismic finite fault source models, referencing the source parameters provided by Yamanaka [2004], Saito et al. [2010], Tadokoro et al. [2006] and Kido et al. [2006] for the mainshock, and those by Bai et al. [2007] and Yamanaka [2004] for the foreshock. The viscoelastic deformation was calculated using a 3D FEM model with a realistic subduction geometry. Whereas the oceanic slab and the continental lithosphere were assumed to be an elastic body, the oceanic mantle, the mantle wedge, and the weak asthenosphere which underlay the slab were assumed to have a biviscous Burgers rheology. The displacements due to afterslip occurring around the rupture planes were also estimated to reproduce the residuals between observed and FEM-calculated viscoelastic displacements. Calculating the observation-calculated misfit values, the different parameter sets for viscosities of the mantle and the asthenosphere, and thickness of the continental lithosphere were tested. The preferred model with the lowest misfit value provided the southward displacements of up to 1 cm/year (between July 2006 and July 2009) in the Kumano Basin. Our result affects the estimation of the slip deficit rate in the Nankai subduction zone, such as provided by Yokota et al. [2016], where megathrust earthquakes have repeatedly occurred. In the presentation, we will show the possible impacts of these events and their postseismic deformation on the slip deficit estimate.

キーワード：地震後地殻変動、有限要素法モデリング (FEM)、GPS-A海底地殻変動観測、2004年紀伊半島南東沖地震、粘弾性緩和

Keywords: Postseismic deformation, Finite element method (FEM) modeling, GPS-A seafloor geodetic observation, 2004 southeastern off the Kii Peninsula earthquakes, Viscoelastic relaxation

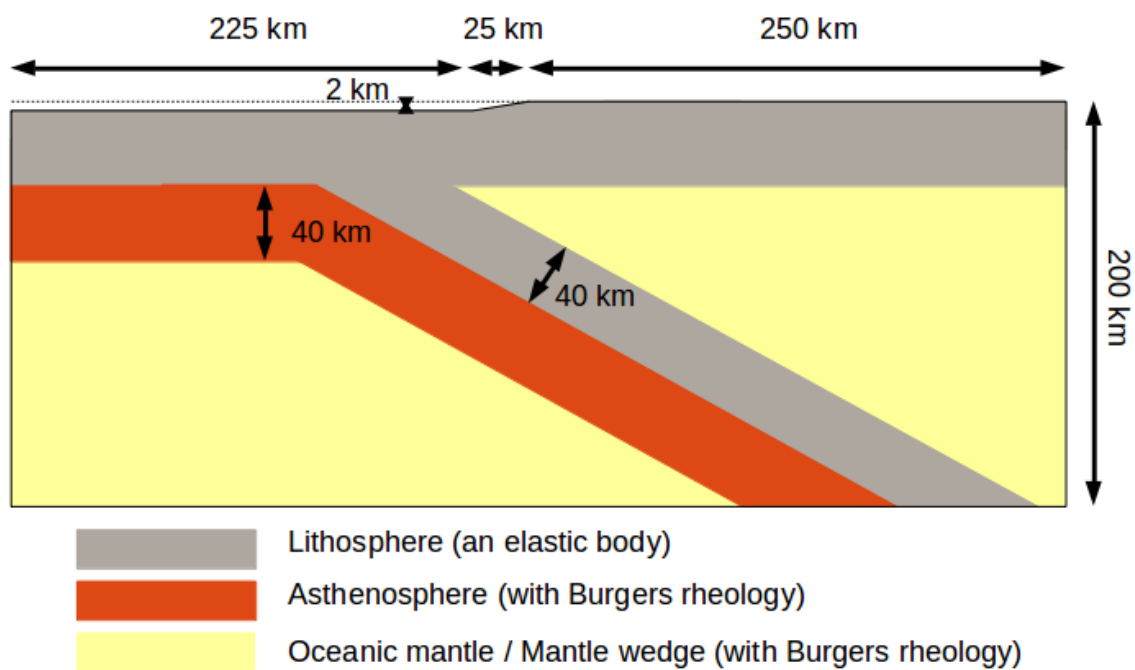


Fig. Schematic picture of FEM structure (cross section)

過去20年間のGNSSデータに基づく西南日本の上下速度プロファイルと速度変化の有意性

Vertical velocity profile and possible velocity changes in SW Japan from GNSS data over the last 20 years

*岩佐 優太郎¹、日置 幸介²

*Yutaro Iwasa¹, Kosuke Heki²

1. 北海道大学大学院理学院自然史科学専攻地球惑星ダイナミクス講座宇宙測地学研究室、2. 北海道大学大学院理学研究院地球惑星科学部門

1. Space Geodesy Laboratory, Earth and Planetary Dynamics, Natural History Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University, 2. Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, Hokkaido University

GNSS(Global Navigation Satellite System 全地球航法衛星システム)の観測は、地殻変動の研究において大きな役割を果たしている。GNSSを用いて観測された地殻変動から、地震の断層運動や震源メカニズムが解明されており、火山活動に伴う地殻変動は火山防災にも寄与している。またプレート境界地域に置ける歪の蓄積を表す地震間地殻変動は、プレート間の力学的な結合(カップリング)に関する情報を与えてくれる。しかしそれらの研究成果の多くは、地殻変動のうち主に水平成分の解析に基づいており、本来3次元の情報であるGNSSの観測量の全てを有効に利用できていない。これは上下成分が水平成分と比べて信号対雑音比が低いためである。プレート境界領域では、地殻変動の水平成分が剛体プレートの動きとプレート間カップリングの双方を含むのに対して、上下成分には後者の情報のみが含まれており、プレート間カップリングの議論をする上で扱いやすい。Aoki and Scholz (2003)は1996-1999の3年間のデータを用いて日本列島の地殻上下変動を解析しているが、我が国のGNSS連続観測システムGEONET (GNSS Earth Observation Network) ではすでに20年を超える期間のデータが蓄積しており、長期のデータにより上下速度が高精度で推定できる。本研究では、1996-2016の局位置の時系列データを用いて、地殻上下速度の推定した。特に、西南日本の室戸岬から隠岐諸島にかけて得られた上下速度のプロファイルを用いて、西南日本のプレート間カップリングについて解析を行った。その結果を用いて、南海トラフのフィリピン海プレート上面を五つのセグメントに分け、それぞれのカップリング係数を推定した。2011年東北沖地震の数年前から日本海溝におけるプレート間カップリングが段階的に弱くなっていたことが知られており、また粘弾性効果によって島弧の地殻変動が地震サイクルの位相に依存するという古典的な研究もある。南海トラフはフィリピン海プレートが沈み込むプレート境界であるが、そこを震源域とする超巨大地震が、数年から数十年以内に発生することが予想されている。本研究では、上下位置を時間の二次式でモデル化することにより、カップリングの時間変化の有無を議論した。南海トラフに近いGNSS局は沈降、少し離れたGNSS局は隆起を示すが、カップリングの時間変化があればそれらの局に現れる加速度の大きさや符号は様々になるはずである。一方、加速度が単に基準点の動きによる見かけのものであれば、二次の項はすべての局に一様な値として現れる。本研究では、GNSS局の上下の動きに関し、推定された一次のトレンドと二次の加速度成分の関係から、時間の二次の項が実際の変化なのか見かけの変化なのかを検証した。その結果、基準点の動きによる可能性が高いという結論を得た。

キーワード：上下速度

Keywords: Vertical Velocity

西南日本の地震間地殻変動：前弧スリバーのブロック運動と内部変形

Interseismic Strain Partitioning in Nankai Subduction Zone, Southwest Japan: Block Movement and Internal Deformation of the Forearc Sliver

*塩見 雅彦¹、田部井 隆雄²、伊藤 武男³、大久保 慎人²

*Masahiko Shiomi¹, Takao Tabei², Takeo Ito³, Makoto Okubo²

1. 高知大学大学院総合人間自然科学研究科、2. 高知大学理学部、3. 名古屋大学地震火山研究センター

1. Graduate School of Science, Kochi University, 2. Faculty of Science, Kochi University, 3. EVRC, Nagoya University, Nagoya, Japan

西南日本の地殻変動場は、フィリピン海プレートの斜め沈み込みによる弾性圧縮変形が支配的である。先行研究における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と、MTL断層面の部分的固着による剪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、南海トラフ・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断層面上の固着分布の同時推定を試みた。推定にはマルコフ連鎖モンテカルロ（MCMC）法を用いた。MCMC法は、マルコフ連鎖に基づく極めて多数の反復計算によりパラメータの事後確率分布を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。

解析には、2004-2009年の期間の近畿から九州へ至る291点のGEONET最終座標解から算出した3次元GPS変位速度に加え、MTLトラバース稠密GPS観測37点と海底地殻変動観測12点を加えた、合計340点の変位速度を使用する。この変位速度場を、グローバルプレートモデルMORVELを基に、アムールプレート準拠に変換する。深さ5-50 kmのプレート境界面を1000枚以上の三角形要素群で近似し、さらに四国西部から東部に至る長さ約250 kmのMTL断層面を、深さ下限15 km、傾斜角45度の56枚の三角形要素群で表現する。推定するモデルパラメータは、各断層面上のカップリング率と、アムールプレートに対する前弧スリバーのブロック運動のオイラーベクトルである。陸上のGPS変位速度のみから推定した結果をCASE-A、陸上データに海底地殻変動観測結果を加えたデータセットから推定した結果をCASE-Bとした。本研究の特色は、陸域から海域にわたる変位速度データを全て使用し、MCMC法を導入したことによって、前弧スリバーとその境界のより詳細な変動を議論した点にある。

解析の結果、深さ15 km以浅のプレート境界面で、CASE-Bの方がAより大きなすべり欠損速度が推定された。CASE-Bではトラフ軸付近まで50 mm/yr以上の値が推定されたのに対し、CASE-Aでは30 mm/yr程であった。一方、15 km以深ではCASE-A、Bともに、類似したすべり欠損速度分布が得られた。土佐湾の深さ15-25 kmのプレート境界面上に50 mm/yrを超える最大すべり欠損速度が推定された。この領域は1946年南海地震（Mw8.1）の主破壊域とほぼ一致し、次の地震に向けてひずみを蓄積している状態であると解釈できる。25 kmより深部では、豊後水道（深さ30-40 km）を除いて、すべり欠損速度が急激に減衰する。豊後水道では、40-50 mm/yrのすべり欠損速度が推定された。この領域では、6-7年間隔で長期的スロースリップが発生し、1回あたり約300 mmの累積すべり量が見積もられている。発生間隔とすべり欠損速度を考慮すると、この領域に蓄積されたひずみは繰り返しスロースリップの発生により解放されていると考えられる。推定された前弧のブロック運動は反時計回りの回転を示し、アムールプレートに対する相対速度は約5-7 mm/yrであった。MTL断層面浅部の固着は一様ではなく、四国東部ではほぼ完全に固着しているのに対し、西部や中部では固着が弱い。MTL断層面の北傾斜構造と固着分布から、MTLの北側に剪断帯が形成されていることが示唆される。本研究により、プレート間固着による地殻の弾性変形やブロック運動を定量的に分離できただけでなく、従来は分離が困難であったMTL断層面の固着による影響も同時推定できたとと言える。

キーワード：地殻変動、西南日本、フィリピン海プレート、中央構造線、GPS

Keywords: Crustal deformation, Southwest Japan, Philippine Sea plate, Median Tectonic Line, GPS

Block motion model in Colombia, using GNSS Observation network (GEORED)

Block motion model in Colombia, using GNSS Observation network (GEORED)

*伊藤 武男¹、Paez Hector Mora²、Juan Ramor Pelaez²、鷺谷 威³

*Takeo Ito¹, Hector Mora Paez², Juan Ramor Gaviria², Takeshi Sagiya³

1. 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、2. コロンビア地質調査所、3. 名古屋大学減災連携研究センター

1. Earthquake and Volcano Research Center, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2. Servicio Geológico Colombiano, 3. Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University

Introduction

Colombia is located at the boundary between South-America plate, Nazca Plate and Caribrian plate. This region is very complexes such as subducting Caribrian plate and Nazca plate, and collision between Panama and northern part of the Andes mountains. Although, the effect of subducted Caribrian plate is not clear, the previous large earthquakes occurred along the subducting boundary of Nazca plate, such as 1906 (M8.8) and 1979 (M8.2). These previous earthquakes caused huge damage to life infrastructure and also lost the life along the subduction zone. And also, earthquakes occurred inland, too. So, it is important to evaluate earthquake potentials for preparing huge damage due to large earthquake in near future.

GNSS observation

In the last decade, the GNSS observation was developed in Columbia. The GNSS observation is called by GEORED, which is operated by servicing Geologico Colomiano. The purpose of GEORED is research of crustal deformation. The number of GNSS site of GEORED is consist of 93 continuous GNSS observation site at 2016. The number of GEORED's GNSS site is increasing now. The sampling interval of almost GNSS site is 30 seconds, a part of GEORED is 1 second of sampling interval. In addition, there are campaign type of GNSS observations around the main active faults. A part of campaign type of GNSS observation was started at 1990's. These GNSS data were processed by PPP processing using GIPSY-OASYS II software. GEORED can obtain the detailed crustal deformation map in whole Colombia.

Method

We developed a crustal block movements model based on crustal deformation derived from GNSS observation. Our model considers to the block motion with pole location and angular velocity and the interplate coupling between each block boundaries, including subduction between the South-American plate and the Nazca plate. And also, our approach of estimation of crustal block motion and coefficient of interplate coupling are based on MCMC method. The estimated each parameter is obtained probably density function (PDF). This definition of crustal block model is evaluated by Akaike's information criteria (AIC).

Result

We tested 11 crustal block models based on geological data, such as active fault trace at surface. The optimal number of crustal blocks is 11 for based on geological and geodetic data. These results obtained rigid block motion model with linear problem. This model selection is based on AIC, which based on the number of parameters and residual between calculation and observation. In this presentation, we will

discuss spatial interplate coupling ratio and also earthquake potential at inland faults.

キーワード：地殻ブロックモデル、GNSS

Keywords: crustal block model, GNSS

東北地方の活火山におけるGNSSデータの統合解析

Integrated analysis of GNSS data for volcano surveillances in Tohoku region, Japan

*岡田 純¹

*Jun Okada¹

1. 気象庁気象研究所火山研究部

1. Volcanology Research Department, Meteorological Research Institute - Japan Meteorological Agency

GNSS 測位技術を用いた火山監視は、近年、世界中の活動的な火山の現場で実践され、大きな成果を上げている。例えば、Eyjafjallajokull (アイスランド) の2010年の噴火活動(Sigmundsson *et al.*, 2010)、Santorini カルデラ (ギリシャ) の2011年の火山危機 (Newman *et al.*, 2012)、El Hierro (スペイン) の2011–2012年の噴火危機 (Lopez *et al.*, 2012) では、GNSSによる地殻変動の解析により地下のマグマ供給系が明らかにされつつある。国内のGNSSを用いた火山監視は、気象庁などが火山近傍で行っている観測 (連続およびキャンペーン観測) と山の麓のやや広域に展開された国土地理院のGEONETによる観測の組み合わせによって行われている。これらのデータは、それぞれ別のシステムで独立に解析されることが多く、解析ソフトウェアや解析戦略、パラメータや基準点の取り方などの違いのために、両者の解の整合性には疑問が残る。火山の近傍から遠方まで均質な解を得るために、本研究では、気象庁と国土地理院のGNSSデータを統合し、統一した解析戦略とパラメータによって解析する。火山近傍と遠方のGNSSデータは、それぞれ、地下浅部と深部の情報に敏感であるため、本手法は、火山の深部から浅部に至る全体場を統一的に評価することが可能である。解析には、Bern大学の研究者らによって開発されたBernese5.2 (Dach *et al.*, 2013)を用い、IGS精密暦を用いた24時間毎の後処理解析を行った。また、解はIGb08基準点の座標値を用いてゆるく拘束した。東北地方の最近の地殻変動には、2011年の東北地方太平洋沖地震の大きな余効変動の影響が含まれているため、先行研究 (例えばTobita (2016)など) を参考にこの影響を評価する。年周変動とプレート運動の推定には、Geirsson *et al.* (2006)の手法を用いる。統合解析の火山への応用例として、福島県と山形県の県境に位置する吾妻山の2014年–2015年の火山活動の検出を試みた。

キーワード：地殻変動、GNSS、火山監視、余効変動、吾妻山

Keywords: deformation, GNSS, volcano surveillance, postseismic deformation, Azumayama

火山性地殻変動における深さに依存した地殻内粘性率の役割

The role of depth-dependent background crustal viscosity in volcano deformation

*山崎 雅¹*Tadashi Yamasaki¹

1. 産業技術総合研究所

1. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Geodetic (GPS and/or InSAR) observations have provided precise constraints on the mechanism that drives volcanic crustal deformation. Viscoelastic relaxation may play an important role in a long-term component of the deformation because in volcanic region the crustal viscosity is likely weakened by high geothermal gradient. A model with spatially uniform viscosity may be reasonably simple to examine the response of viscoelastic crust in a first-order approximation. But, in more detail, the crustal viscosity spatially varies in rich variety of ways, but the variation with depth is probably the most essential on which further variation would be superimposed, because the crust constitutes a part of the thermal boundary layer in which temperature increases with depth. This study investigates the role of depth-dependent viscosity (DDV) structure in viscoelastic crustal deformation by magmatic intrusion.

The linear Maxwell viscoelastic response of the crust and mantle to the inflation of a magmatic sill is solved, using a parallelized 3-D finite element code, OREGANO_VE [e.g., Yamasaki and Houseman, 2015, *J. Geodyn.*, 88, 80-89]. The viscoelastic crust has depth-dependent viscosity (DDV) structure; the viscosity η_c exponentially decreases with depth: $\eta_c = \eta_0 \exp[c(Z_c - z)/L_0]$, where η_0 is the viscosity at the bottom of the crust, c is a constant; $c > 0$ for DDV model but $c = 0$ for uniform viscosity (UNV) model, Z_c is the thickness of the crust, z is the depth and L_0 is a reference length-scale. The viscoelastic mantle has spatially uniform viscosity η_m . For UNV model, so high viscosity is given to the uppermost layer with a thickness of H that it deforms in elastic fashion. DDV model however avoids having such an artificial elastic layer. The sill inflation is introduced by using the split node method developed by Melosh and Raefsky [1981, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 71, 1391-1400]. The geometry of the sill is approximated as an oblate spheroid whose depth is D , equatorial radius is W and thickness at the centre is d_c . The inflation occurs instantaneously at time $t = 0$.

UNV model ($c = 0$) behaviour shows that an inflation-induced surface uplift abates with time by means of viscoelastic relaxation, whose subsidence rate is higher and slower if the sill is inflated at deeper in elastic and viscoelastic layer, respectively, and accordingly maximised by the inflation at the boundary between elastic and viscoelastic layers. The rate also depends on the artificially assumed elastic layer thickness H . DDV model ($c > 0$), on the other hand, shows that for a given c the subsidence rate is greater for greater D , which reflects the viscosity variation with depth. The available magnitude of the subsidence is greater for greater c , which is consistent with the UNV model behaviour that the subsidence is smaller for smaller H . Even if the viscosity gradient is very small, however, the model, having W and D being relatively small to a length-scale over which the viscosity decreases with depth, enhances the rate and available magnitude of subsidence as if the elastic layer is effectively thickened.

The DDV model behaviour requires an effective elastic thickness (EET) to be constrained for a given viscosity gradient in order to properly evaluate the deviation from UNV model behaviour. We thus in this

study constrain EET by applying a UNV model behaviour that the post-inflation subsidence rate is slower for a deeper inflation if the inflation occurs in the viscoelastic layer. The DDV model is compared with a UNV model with $H = EET$, showing that at each surface point the UNV model approximates DDV model behaviour to some extent, but the apparent UNV which best fits the DDV model displacement history is smaller at greater distance from the centre of the uplift and that DDV model displacement is characterised by higher viscosity later in post-inflation period.

地球内部力学を記述する方程式系の物理的基礎の確かな新しい形

A new form of the equation system for geodynamics with clear and solid physical basis

*松野 太郎¹

*Taroh Matsuno¹

1. 国立研究開発法人 海洋研究開発機構

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

プレートテクトニクスやマントル対流など固体地球の力学を支配する基礎方程式として、これまで長い間、地球内部は「マックスウェル粘弾性体」であるとの考えのもと、その力学を記述する方程式系が用いられてきた。しかし、「固体地球が長い時間スケールで粘性流体の力学に従う」という主張 (Tarcotte and Schubert, 2002他多数) は現実には地球内部に適用される粘性の大きさ (例えば 10^{21} Psec) を考えると超光速の運動量拡散を意味し物理の原理に反して受け入れられない。地球内部が固体で鉱物として決まった結晶構造を持つ以上時間スケールに関わらず同じ弾性の法則に従うはずである。粘性流体とみなす根拠として岩石を含む固体のクリープと粘性流体の流れの類似性が考えられる (例えばMcKenzie, 1967他多数)。しかし、クリープは弾性歪の緩和による固体の塑性流動と解釈するべきで、それを直接表す方程式と弾性体の力学方程式とを組み合わせる基礎方程式系とするのが妥当である。こうした場合、伝統的粘弾性体力学方程式の粘性変位を塑性変位と対応付ければ伝統的方程式系と数学的にはそっくりな形となる。しかし、伝統的方程式系は物理的プロセスを正しく表現できていないので原理的に適用限界があるはずである。実際、近年の研究でマントルとプレートの力学を同時に扱う場合、基本的な変数として粘性流体速度を採用する従来型のシミュレーションでは固体であるプレートの振る舞いを表現し難いと指摘されている。新しい方程式系は力学方程式が固体のものであることによってこの問題が回避されるばかりでなく、地震 (脆性破壊) のプロセスを取り入れるように拡張できるなど地球内部科学にとって重要な多くの問題を取り扱う共通の基盤となる可能性を持つ。

キーワード：地球内部力学、マントル対流とプレート運動、マックスウェル粘弾性体

Keywords: geodynamics, mantle convection and plate motion, Maxwellian viscoelastic media

地下水流動の観測に基づいて推定された断層破碎帯近傍の非一様な透水性構造

Permeability heterogeneous structure nearby a fracture zone estimated by observed groundwater migration

*向井 厚志¹、大塚 成昭²、福田 洋一³

*Atsushi Mukai¹, Shigeaki Otsuka², Yoichi Fukuda³

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. Fukuyama City University, 2. Kobe Gakuin University, 3. Graduate School of Science, Kyoto Univ.

断層破碎帯では、地震動によって透水性構造に変化が生じる場合があるが、それがどの程度の空間スケールで生じるものなのかについては明らかではない。本発表では、兵庫県南部にある六甲高雄観測室内の3点において地震動に伴う間隙水圧変化を観測し、断層破碎帯近傍の局所的な透水性構造の変化を推定した結果について報告する。

断層破碎帯はその周辺岩盤と比べて透水性が高いことから、地下水流動は主に破碎帯内で生ずると考えられる。そのため、断層破碎帯は均質な透水性をもつ一枚の板で近似することができる。向井他(2015)は、その内部を移動する一次元地下水流動をモデル化し、湧水量変化および間隙水圧変化から透水係数の変化を推定する方法を導出した。万福寺断層を貫く六甲高雄観測室での観測データにこのモデルを当てはめた結果、2011年東北地方太平洋沖地震の際に断層破碎帯の透水係数が地震後数ヶ月間にわたって低下したことが明らかになった(向井他,2016)。このように、断層自身が震源断層にはなくても、外部から伝わってきた大きな地震動によって断層破碎帯の透水性構造が変化する可能性があると言える。

六甲高雄観測室では、湧水量計と水位計各1台を用いて地下水流動の連続観測を実施してきたが、地下水流動を空間的に把握することを目的に、2016年に2台の水位計を新たに設置した。その間隙水圧観測値と湧水量観測値を用いて透水係数の変化を推定したところ、2016年の熊本地震および鳥取県中部地震直後においても透水性構造が変化したことが確認された。しかし、その変化の大きさは、どの場所の間隙水圧観測値を用いるのかによって異なっており、透水係数の変化の程度が断層からの距離に依存することが示唆される。例えば、熊本地震の直後では、断層近傍で透水係数が約7%上昇したのに対して、断層から数10m離れた地点では、透水係数が約22%低下した。こうした違いは、地震動によって流出した泥分等によって生じている可能性がある。亀裂の大きな断層近傍の破碎帯では泥分等そのまま流出するのに対して、断層からやや離れた亀裂の発達十分ではない地点では泥分等が目詰まりを引き起こし、透水係数の低下をもたらしたことが考えられる。

キーワード：断層破碎帯、透水性構造、2016年熊本地震

Keywords: fault fracture zone, permeability structure, 2016 Kumamoto earthquake

Dynamic initiation of decollement in accretionary prisms

*Arthur Bauville¹, Mikito Furuichi¹

1. Department of Mathematical Science and Advanced Technology, JAMSTEC

The decollement of the Nankai accretionary prism is a shallow dipping thrust that cuts through an unremarkable and homogeneous sedimentary layer. This observation contradicts the intuition that (1) decollements develop at the favor of weaker sedimentary levels; and that (2) thrusts form at about 30 degrees from horizontal (Andersonian theory of faulting).

There are many examples of accretionary prisms and fold and thrust belts where weak sedimentary levels act as decollement (e.g. evaporites in the Jura and Zagros, shale in the Alberta foothills). Prediction of the taper angle using the critical Coulomb wedge theory also suggests that decollements are often weaker than the rocks composing the bulk of the wedge (e.g. Davis, 1983). On the other hand, it is well documented that rheological weakening can be a consequence of fracturing, rather than its cause, e.g. because fractures act as fluid pathways that can change the local lithology and raise the fluid pressure. In this contribution, we derive an analytical solution for the stress orientation in a compressed region of homogeneous perfectly plastic material near the surface. We show that for a perfectly plastic rheology the stress orientation is a function of the push direction, the intensity of the push, the surface topography and material properties. All those parameters collapse into a dimensionless number.

Since we consider homogeneous material properties, it is less suited to analyze present day accretionary prism than the critical taper theory. However, it is particularly suited to study the initiation of decollement, before fault-induced weakening takes place. Our analytical solution (1) is general for any surface topography described by a function differentiable in x ; (2) predicts generally non-planar decollement; and (3) does not make use of small angle approximation, even for the case of cohesive plasticity.

The analytical solution is tested against a series of static ($\ll 1\%$ shortening) numerical models including visco-elasto-plastic rheology.

Keywords: decollement, accretionary prism

Crustal anisotropy of Cascadia subduction zone revealed by ambient noise tomography

*Tzu-Ying Huang¹, Ban-Yuan Kuo¹, Ying-Nien Chen², Yuancheng Gung³

1. Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, Taipei, Taiwan, 2. Institute of Oceanography, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, 3. Department of Geosciences, National Taiwan University, Taipei, Taiwan

We construct 3D crustal shear wave velocity models for the Gorda-Juan de Fuca region using ambient seismic noises. Continuous data from Cascadia Initiative Community Experiment - OBS component were used. In our wavelet-based multi-scale inversion technique, both the isotropic and anisotropic components are taken into account. Previous studies of shear-wave splitting (SWS) with SKS and SKKS using OBSs pointed out that fast directions in this region rotate increasingly towards the absolute plate motion direction with increasing distance from the mid-ocean ridge. However, our preliminary result of 2D phase velocities for Rayleigh waves show a trench-parallel fast direction at periods 2 –25 s, i.e., the crustal and shallow upper mantle anisotropy differs from the results of SWS studies. This disparity between our result and the plate motion-parallel fast direction from the earlier studies implies that there might be a two-layer structure with different deformation fabrics in this region. We will integrate our models with the 3D models from body wave tomography and seismic anisotropy from SWS, and discuss their tectonic implications.

Keywords: Crustal anisotropy, Ambient noise tomography, Cascadia subduction zone

Recent crustal movements and deformations of the southeast of Russia as seen from continuous GNSS measurements

*Nikolai Shestakov^{1,2}, Mikhail Gerasimenko^{1,2}, Dmitry Sysoev^{1,2}, Andrey Kolomiets^{1,2}, Grigory Gerasimov^{1,2}, Nikolai Vasilenko³, Alexander Prytkov³, Victor Bykov⁴, Victor Pupatenko⁴, Mikhail Serov⁵, Hiroaki Takahashi⁶, Mako Ohzono⁶, Meng Guojie⁷

1. Institute of Applied Mathematics, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia, 2. Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia, 3. Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, 4. Institute of Tectonics and Geophysics, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia, 5. Institute of Geology and Nature Management, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Blagoveschensk, Russia, 6. Institute of Seismology and Volcanology, Graduate School of Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan, 7. Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing, China

The Far East geodynamic GNSS network was established in 2009-2010. It covers the southeast of Siberia and Sakhalin Island and consists of more than 15 continuously operating GPS/GLONASS stations. Its data along with observations stemming from IGS and other available GNSS networks were used to estimate the crustal velocity and deformation field of the investigated region before and after March 11, 2011 when the Great 2011 Tohoku earthquake struck the Pacific coast of northern Honshu, Japan and caused measurable coseismic displacements through Northeast Asia. The BERNESE 5.2 software was used for GNSS data processing. The ITRF2008 and ITRF2014 reference frames were adopted for data analysis. The calculated interseismic GNSS velocities indicate relative internal (between network sites) and external (with respect to the Eurasian tectonic plate) stability of continental part of the investigated region. The velocity boundary between Sakhalin Island and continent was discovered which possibly tells on their relation to different tectonic plates/microplates. The intense postseismic crustal displacements caused by the Great 2011 Tohoku earthquake have also been observing in the Russian southeast near the triple junction of Russia, China and North Korea national boundaries. The maximum observed cumulative postseismic displacements have already exceeded 70-80 mm (the corresponding coseismic shift is equal to ~50 mm). Afterslip or viscoelastic rebound models separately cannot reproduce properly all parts of the observed GNSS site position time series, however, viscoelastic approximation is working well on the time interval of 0.5-3 yrs after the mainshock. Two-layers viscoelastic model with Maxwell's viscosity of about $5 \cdot 10^{18}$ Pa·s adequately fits horizontal components of the observed postseismic displacements but fail to explain vertical component. The 2013 Okhotsk deep focus earthquake generated measurable coseismic displacements which were detected by Kamchatka and our GNSS network. The annual velocities of GNSS sites located in the northern part of Sakhalin Island demonstrate notable change after the mainshock of the Okhotsk deep earthquake which, probably, could be explained by the existence of notable postseismic mantle response.

Keywords: crustal displacements and deformations, GNSS observations, secular and postseismic motion modeling

Crustal anisotropy and deformation of the Tibetan Plateau based on the Pms of the receiver functions

*Yan Cai¹, Jianping Wu^{1,2}, Weilai Wang¹, Lihua Fang^{1,2}

1. IGP Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2. Key Laboratory of Seismic Observation and Geophysical Imaging, Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

As the frontier of the plateau uplift and extension, the northeastern margin of the Tibetan Plateau (NE Tibetan Plateau) is an ideal place to study the crustal and upper mantle deformation characteristics and coupling relationship of the Tibetan Plateau. However, the resolution and reliability of previous studies in this region are suffered from insufficient observations. In this paper, with an array of 675 dense seismic stations in the NE Tibetan Plateau, we obtained the crustal anisotropy parameters by using the Pms phase in receiver functions. The results show that the average splitting time of Pms wave is approximately 0.5 s, which is mainly caused by the middle and lower crust. In the Tibetan Plateau, the fast polarization directions of Pms are mainly NW-SE, which are parallel to the directions of SKS and the maximum shear strain directions. In the outside of the plateau, such as Alxa block and western Ordos block, the fast polarization directions of Pms are NE-SW, which have large intersection angles with the directions of SKS. We infer that the deformation of the crust and upper mantle in the Tibetan Plateau is coupled and is controlled by simple shear deformation with the direction of NW-SE, while the crust-mantle deformation in the outside of the plateau is decoupled, and the crustal deformation is mainly caused by the differential movement of the middle and lower crust with the direction of NE-SW. The observations show an interesting finding that the Alxa block and Ordos block, which are always considered to be the stable blocks, may be experiencing crustal deformations at this stage.

Keywords: Tibetan Plateau, crustal deformation, anisotropy, receiver functions

The Study of Nowadays 3D Crustal Movement in Fenwei Graban System

*Duxin Cui¹, Ming Hao¹, Yuhang Li¹, Shanlan Qin¹, Zhangjun Li¹

1. The Second Center of Monitoring and Application of China Earthquake Administration

Fenwei rift zone located in the east and south of the Ordos block is still active in China mainland, and it is tectonic boundary separating the Ordos block, Qinling tectonic belt and north China block. Due to the limited observation technique, the current tectonic movement and deformation of Fenwei rift zone are still not very clear and the formation mechanism of the Fenwei rift zone has no consensus. GPS data observed from 2009 to 2014 were collected at 527 campaign-mode and 32 continuously operating GPS stations are processed and get a precise and high spatial resolution horizontal velocity field and strain field. The results reveal that the belt between Shanxi basin and western mountains is under extension with strain rate of 0.01-0.03 ppm/a. Meanwhile the belt between Shanxi basin and eastern mountains is under contraction with strain rate of 0.02-0.03 ppm/a. The western boundary faults of Shanxi basin such as Loyunshan fault, Jiaocheng Fault et al. have 2-3 mm/a of left-lateral slip and 2-3 mm/a of normal-fault extension. But the eastern boundary faults of the basin such as Taigu fault have 1-2 mm/a of right-lateral slip and 1-3 mm/a of normal-fault contraction. There is 2.1 mm/a of shortening motion in southwest of Ordos Block as well as the velocity gradually changes near Lupanshan fault system. It reveals that the fault system is locked in deeper. Weihe fault system show left-lateral slip of 1.0 mm/a and weak extension deformation.

The present crustal vertical velocity field image relative to ITRF2008 is obtained by the precise leveling data from 1970 to 2014 and the vertical velocity of the continuous GPS stations within this region were as a priori constraints. The image reveal that the Ordos block shows overall uplift rates of 3mm/a and Liupanshan-longxi block shows uplift rates of 4-5mm/a. Weihe basin shows subsidence rates of 3-5mm/a relatively Ordos block, while subsidence rates of 2-4mm/a relatively the North Qinling Mountains. Relatively Ordos block and Zhongtiaoshan, the Linfen - Yuncheng Basin demonstrate a subsidence rates of 4-5mm/a. Using the block model and dislocation model, the slip rates and locking depths of the major faults in the Fenwei rift zone were obtained. Our research results provide an important basis for the study on the interaction mechanism between the Qinhai-Tibet block and north China block and long-term risk prediction of regional large earthquakes.

In our study, we suggest a flow model by combing the results of FEA, analysis of Crustal movement profiles with lithospheric mantle deformation from the SKS fast-wave direction. The soft materials beneath the upper crust of Tibet plateau flow towards NE direction, because of the obstruction from the deep root of the Ordos block, the west part flow to Yinchuan along the edge channel, and the south part flow towards the North China across channel under the Fenwei graben.

Keywords: Fenwei graben, Crustal movement, Block model

2012 Indian Ocean Coseismic Model: Joint Evaluation in 3-D Heterogeneous Earth Structure Inferred from GPS and Tsunami Data

*Cecep Pratama¹, Takeo Ito^{1,2}, Takao Tabei³, Ignatius Ryan Pranantyo⁴

1. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Japan, 2. Earthquake and Volcano Research Centre, Nagoya University, Japan, 3. Department of Applied Science, Faculty of Science, Kochi University, Japan, 4. Research School of Earth Sciences, the Australian National University, Australia

Determination of conjugate fault orientation in a complex oceanic intraplate earthquake is remaining challenging. Lack of observation network around the fault source region and extremely rare event give the estimation of fault structures become debatable. On April 2012, Mw 8.6 earthquake struck off the west coast of northern Sumatra about 300 km west of the Sunda trench. The 2012 Indian Ocean Earthquake, which is the largest intraplate earthquake in the history of instrumentally recorded events, has been reported to have a complex conjugate fault ruptured within multiple fault segments. The complex conjugate fault has been found to be NNE trending left-lateral fracture zones as the main features (Wei et al. 2013, Satriano et al. 2012) while other found to be WNW trending right-lateral faults structure had greater slip (Yue et al. 2012, Hill et al. 2015). Here, we propose a joint evaluation based on Global Navigation Satellite System (GNSS), ocean bottom pressure sensors, and tsunami waveform recorded at tide gauges by assuming heterogeneous earth structure to resolve the fault orientation. In this study, we develop three-dimensional heterogeneous earth models including subducting slab, 3-D earth velocity structure, topography and bathymetry as well as spherical earth using 3-D Finite Element Method (FEM) to evaluate previous coseismic model. In order to obtain the actual slip distribution within our model, we adjust slip distribution using slip scaling. We conduct iterative model-observation best fit calculation of reduced chi-squared until reach minimum misfit. Furthermore, we propose chi-squared misfit based on slip scaling as another consideration to evaluate the coseismic model.

Keywords: Coseismic, FEM, GNSS, Tsunami

Coseismic deformation and tectonic implications of the 2016 M6.6 Meinong earthquake, Taiwan

*Ray Y Chuang¹, Kuo-En Ching², Manabu Hashimoto³, Ruey-Juin Rau⁴, Ling-Ho Chung⁵

1. Department of Geography, National Taiwan University, 2. Department of Geomatics, National Cheng Kung University, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4. Department of Earth Sciences, National Cheng Kung University, 5. Department of Earth and Environmental Sciences, National Chung Cheng University

A M6.6 earthquake occurs at Meinong, Taiwan at 03:57:27 on February 6, 2016 local time (UTC+8). This earthquake caused severe damage and 117 deaths around several towns of Tainan City. We estimate coseismic displacements from continuous GPS and InSAR images. We process GPS daily solutions and calculate coseismic displacements from the differences between average positions for seven days before the earthquake and average positions for four days after the earthquake. The maximum horizontal displacement is about 5 cm and maximum vertical displacement is about 9 cm from GPS. We conduct dislocation models to estimate fault slip and fault geometry and the results show that the main slip area is at depths of 10-20 km and the orientation of the fault plane is E-W dipping to the north. In addition, we process ALOS2 images and the results show a region of deformation 10 km west of the hypocenter. The deformation region shown in InSAR results indicates deformation in mudstone at shallow depths, which is different from the dislocation model. This shallow deformation pattern is consistent with preseismic deformation pattern constrained from PS-InSAR and leveling. The shallow deformation might be controlled by local stress condition in the mudstone area.

Keywords: Coseismic deformation, InSAR, GPS

Characteristics of postseismic deformation associated with the 2016 Meinong earthquake

*Wan Tzu Liu¹, Ray Y Chuang¹

1. Department of geography, National Taiwan University

The $M_L=6.6$ Meinong earthquake on February 6, 2016, which caused 117 deaths and severe damage in southern Taiwan, is the most destructive seismic event in the recent decade. The epicenter is in Meinong but major coseismic deformation occurred in Guanmiao and Longqi, about 10 km to the west of the epicenter. In addition to the seismogenic fault at ~ 15 depth, there may be a triggered fault at shallower depth based on an inversion of InSAR and GPS observations. Therefore, it is important to examine if the postseismic deformation continues being triggered by two faults like the coseismic deformation and if the location of postseismic deformation is around the coseismic slip area.

We use InSAR and GPS to identify the distributions of postseismic deformation of the Meinong earthquake, and then infer the location and magnitude of the afterslip, which will be helpful for us to better understand the characteristics of surface deformation and the active tectonics of the area.

Keywords: Meinong earthquake, postseismic deformation, InSAR, GPS

Surface Creep Analysis of the Fengshan Fault in SW Taiwan from GPS observations and PSInSAR

*Chuan-Min Chao¹, Kuo-En Ching², Ruey-Juin Rau³, Ray Y Chuang¹

1. Department of Geography, National Taiwan University, 2. Department of Geomatics, National Cheng Kung University, 3. Department of Earth Science, National Cheng Kung University

Previous studies based on GPS observations have found that the Fengshan fault may be a major active structure with surface creep in southwestern Taiwan. However there was no historic earthquake along this fault and no solid geologic evidence to confirm whether the fault exists. Therefore, the geometry and activity of the Fengshan fault remain unclear. Whether the fault acts like stick-slip or creeping will make great impacts on the national constructions and public properties. Thus, it is necessary to evaluate the potential activities of the Fengshan fault.

We use 56 continuous GPS stations and 167 campaign mode GPS stations in the study area for the horizontal displacements and also 483 leveling points for vertical displacements. In addition, we use ascending data of the ALOS image with PS-InSAR techniques to analysis the Fengshan fault. We remove vertical signals from the line-of-sight (LOS) velocities based on leveling data. The fault parallel component has about 14.3 mm/yr differences across the fault at the northern, 12.6 mm/yr differences across the fault at the middle segment and 17.4 mm/yr differences across the fault at the southern segment, and the fault normal component has 3.5 mm/yr, 2.6 mm/yr and 3.6 mm/yr differences extension components across the each segments.

The Fengshan fault is a left-lateral strike-slip fault in about 15 mm/yr and lengthening of about 3 mm/yr. This fault is creeping in the middle and southern segments. The northern segment of the fault is probably locked in about 1.5 km width. The locations of mud volcanos in the Niasong, Kaoshung and the Wandan, Pingtung, are consistent with the fault trace of the Fengshan fault well and are proposed as the geological evidence of this fault.

Keywords: GPS, PSInSAR, Fengshan fault, Velocity profile, Creeping fault, Locked fault

ALOS-2/PALSAR-2で検出された2016年にイタリアで発生した地震の地殻変動

Crustal deformation of earthquakes that occurred in Italy on 2016 detected by ALOS-2/PALSAR-2

*安藤 忍¹

*Shinobu Ando¹

1. 気象研究所 地震津波研究部

1. Seismology and Tsunami Research Department, Meteorological Research Institute

2016年のイタリアでは、M6クラスの地震が3回発生した（8月24日：深さ約4km, Mw6.2, 10月26日：深さ約10km, Mw6.1, 10月30日：深さ8km, Mw6.6）。いずれもイタリア中部地方の都市Norcia近傍で発生し、震源付近では、多数の建物が崩壊し甚大な被害をもたらした。また、今回の震源付近近傍では、過去にもM6.0以上の地震が時々発生しており、最近では、2009年4月に、今回の地震から数十km南に離れたラクイラ周辺で、Mw6.3の地震が発生しており、やはり死者295人以上、負傷者1,000人以上等の甚大な被害が発生している。

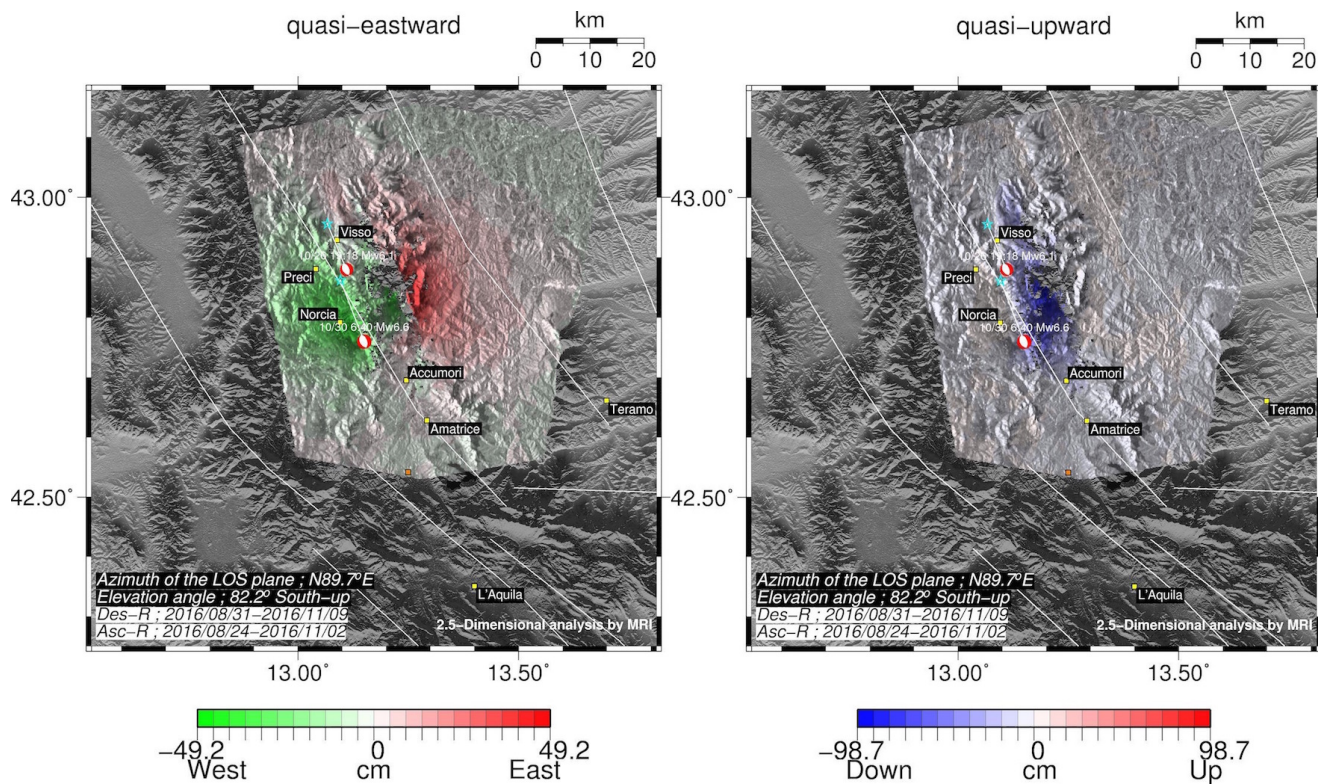
イタリア国立地球物理学火山学研究所の資料によれば、当該地域の活断層は非常複雑で複数報告されている。その理由は、当該地域はアフリカプレートとユーラシアプレートが衝突し、互いに押し合っている地域であり、テクトニクス的にも地質学的にも複雑な地域であるためである。特に今回地震が発生したアペニン山脈付近では、局所的に東西方向に伸長する力が働き地震が発生している領域であり、震源過程解析による地震のメカニズム推定でも、いずれも正断層解が得られている。

2014年5月24日に打ち上げられた陸域観測技術衛星「だいち2号（ALOS-2）」は、高分解能なLバンドSAR衛星であり、全球的に常時観測を行っている。我々は、2016年に発生した3つの地震について差分干渉解析を実施し、地震に伴う地殻変動の検出を行った。また、震源過程解析で得られた滑り分布との比較を行い、断層面の推定を試みた。10月26日と30日に発生した地震では、震央の西側では西向き、東側では東向きの変位が検出されたほか、震央付近では沈降成分が検出された。この結果、この地震のメカニズムは西傾斜の正断層であると推定した。

本解析で用いたPALSAR-2データの一部は、国土地理院が中心となって進めている防災利用実証実験（地震WG）に基づいて観測・提供されたものである。また、一部はPIXELで共有しているものであり、宇宙航空研究開発機構(JAXA)と東京大学地震研究所との共同研究契約によりJAXAから提供されたものである。PALSAR-2に関する原初データの所有権はJAXAにある。なお解析には、防災科学技術研究所の小澤拓氏により開発されたRINCを使用させていただいた。なお、干渉画像の処理過程においては、SRTM4.1を元にしたDEHMを使用し、地図の描画にはGMTを用いた。関係者各位におかれては、ここに記してお礼申し上げます。

キーワード：ALOS-2/PALSAR-2、干渉SAR、地殻変動、イタリアの地震

Keywords: ALOS-2/PALSAR-2, InSAR, Crustal deformation, Italy Earthquakes



時間変化を含めた日本のブロック断層モデリング

Time dependent block fault modeling of Japan

*小沢 慎三郎¹

*Shinzaburo Ozawa¹

1. 国土交通省国土地理院

1. Geographical Survey Institute of Japan

要旨

時間変化を含めた日本のブロック断層モデリングを行った。その結果、東北地方太平洋沖地震前のデータから、2003年十勝沖地震のアフタースリップ、2005年の宮城県沖の地震による宮城県沖での太平洋プレートと陸側プレート間の固着の弱化、2008年の茨城県沖、福島県沖の地震後の福島、茨城沖での太平洋プレートと陸側プレート間の固着の弱化が推定された。フィリピン海プレートにおいては、豊後水道のスロースリップ、九州東岸のスロースリップ、東海のスロースリップが検出された。東北地方太平洋沖地震後の解析では、豊後水道のスロースリップ、九州東岸のスロースリップ、紀伊水道のスロースリップが推定された。九州東岸のスロースリップは、矢来&宗包(2015)、西村&越智(2015)によってはじめて発見されているが、本解析でも捉えられることが示された。また、紀伊水道のスロースリップでは、紀伊半島沖でプレート間の固着が次第に小さくなっていく様子が捉えられた。以上の結果から、定常状態を仮定しなくても、ある程度遷移的な事象を本解析手法で捉えられることがわかった。

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、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、マイクロプレートの運動を取り入れて、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、日本全国に適用してみた。

解析手法

日本地域のブロック断層モデルは、橋本他(200)によってGNSS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、ブロック断層モデリングの解析を時間変化まで含めて解析する時間依存のインバージョンを開発・適用し、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。日本全国の1200点程のGNSS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、1997-2011年、2013-2015年とした。元の座標時系列データから、地震に伴う地殻変動と周期変動成分を取り除いて解析に使用している。

結果と考察

東北地方太平洋沖地震前の結果では、2003年十勝沖地震のアフタースリップが推定された。十勝沖地震のアフタースリップは2003年の地震の震源域で推定され、時間と共に北東にすべりの中心が移動している様子が推定された。2005年の宮城県沖の地震後には、宮城沖での固着の弱化とその回復の様子が推定されている。2008年の茨城県沖、福島県沖の地震後には、福島、茨城沖での固着の弱化が推定された。福島・茨城沖の固着の弱化は2011年東北地震の前まで続いている。フィリピン海プレートにおいては、1997, 2003, 2010年に豊後水道のスロースリップが検出された。また、九州東岸の固着が2002年、2006年に弱まる様子が推定され、九州東岸のスロースリップの発生が示唆された。また東海のスロースリップが2001年以降検出された。東北地方太平洋沖地震後の解析では、豊後水道のスロースリップ、九州東岸のスロースリップ、紀伊水道のスロースリップが検出された。これらの結果は、定常状態を仮定することなく推定されており、定常状態を仮定しない解析でも、各種スロースリップをモニターすることがある程度可能であることが示された。また日本全国の解析なので、境界条件等を考慮することなく解析することができるようになっている。

キーワード：ブロック断層モデル、プレート間カップリング、スロースリップ

Keywords: block fault model, interplate coupling, slow slip

東北地方におけるGNSS速度場のクラスタ解析

Cluster Analysis of the GNSS Velocity Field in the Tohoku Area, northeastern Japan

*伊藤 嘉秋¹、三浦 哲¹、太田 雄策¹

*Yoshiaki Ito¹, Satoshi Miura¹, Yusaku Ohta¹

1. 東北大学大学院理学研究科

1. Graduate School of Science, Tohoku University

Recently, the cluster analysis technique has been applied to GNSS velocity data by Simpson et al. (2012) to reveal tectonic boundaries around the western USA. Assuming a number of clusters, the technique classifies GNSS velocities into some clusters, which shows similar characteristics. The optimal number of clusters can be determined by a statistical test (e.g. the gap statistic by Tibshirani et al., 2001). The advantage of this technique is to extract block-like behavior and to identify tectonic boundaries without considering geological and/or geographical informations. Loveless and Meade (2010) constructed a model composed of 20 blocks in Japan (JB1 model). This model in Tohoku area has two block boundaries, one along the Ou backbone range and the other along the eastern margin of the Japan Sea. The purpose of this research is to apply this clustering technique to the GNSS velocity field of the Tohoku Area, and compare with the JB1 model and the known fault system. GNSS data obtained from 298 continuous GNSS stations operated by the Geospatial Information Authority of Japan and Tohoku University are analyzed using the precise point positioning strategy of the GIPSY/OASIS-II software. We obtain the site velocities by fitting a linear function into coordinate time series from 1 January 2010 to 8 March 2011. We performed the cluster analysis for the horizontal components of the GNSS velocity field with the k-means clustering method. First, assuming the number of clusters we label every site with a cluster randomly. Then, we calculate the centroids of each cluster, and relabel each site with the closest centroid. This procedure is repeated until no more relabeling occurs. This method, however, has a disadvantage, namely the result sometimes depends on the initial random labeling. To avoid this problem, we carry out a thousand of clustering, and calculate the sum of L2 norm of every site pair in each cluster. Then the case of minimum sum is adopted as the optimal clustering. There is ambiguity in assuming the number of clusters. We decide the optimal cluster number by the gap statistic, which compares an ensemble mean of the logarithm of the sum of the L2 norm calculated from a random data, and the logarithm of the L2 norm calculated from the observed data. The gap statistic usually increases with the number of clusters and become stable around the optimal cluster number. The optimal number is 2 for our data set. The result demonstrates a cluster boundary, which runs along the Ou backbone range, and roughly coincides with the boundary of the JB1 model. There are two regions where our clustering result mismatches the boundary in the JB1 model. The reasons may be the ambiguity in the clustering method and/or the possible failure in estimating the site velocities.

テクトニックな変動から推定した東北地方太平洋沖地震前のプレート間の固着と非地震性すべりの時空間分布

Spatiotemporal interplate locking and aseismic slip distributions estimated by tectonic crustal deformation prior to the 2011 Tohoku-Oki earthquake

*田中 もも¹、吉岡 祥一²

*Momo Tanaka¹, Shoichi Yoshioka²

1. 神戸大学理学研究科、2. 神戸大学都市安全研究センター

1. Graduate School of Science, Kobe University, 2. Research Center for Urban Safety and Security Kobe University

東北地方のGEONETの電子基準点で得られた観測データを用いて、プレート運動によるテクトニックな水平・上下変動を求め、インヴァージョン解析を用いてプレート間の固着状態と非地震性すべりの時空間分布を推定した。解析期間は2011年東北地方太平洋沖地震(M9.0)直前の7年間である。新潟県内の村上、黒川、新発田の3点のテクトニックな変動を平均し、参照点での変動とした。本研究では、チェビシェフ多項式を用いてテクトニックな変動を高精度で求めることを可能にし、最適の多項式の次数はAICの値を最小にするように求めた。地震時とアンテナ交換に伴うステップを除去した後、水平成分において、顕著な余効変動がみられた2003年十勝沖地震(M8.0)、2004年釧路沖地震(M7.1)、2006年宮城県沖地震(M7.2)、2008年岩手宮城内陸地震(M7.2)について、余効変動を対数関数で近似することでその影響を取り除いた。さらに、解析に使用した全観測点の時系列データから求めた共通誤差成分と、年周・半年周成分を取り除くことでテクトニックな変動を抽出した。結果を1年ごとにプロットすることで、テクトニックな変動の時空間変化を詳しく調べた。解析期間を通して、岩手県、宮城県の太平洋側の観測点では2cm/年の西向き水平変位が継続してみられた。上下変位は、太平洋側で沈降、日本海側で隆起という傾向がみられた。福島県の太平洋側では2008.0年から2011.0年にかけて西向きの変動が小さくなっていることが見出された。時系列データから得たテクトニックな地殻変動を基にインヴァージョン解析を行い、1年ごとのタイムステップで、プレート間の固着状態とすべりの時空間分布を推定した。太平洋プレート上面の形状はNakajima and Hasegawa(2006)を使用した。解析には、すべりの空間分布がなめらかである、すべりは主にプレート収束方向を向く、すべりの時間変化はなめらかであるという3つの先験的情報を与えたインヴァージョン法[Yoshioka et al.(2015)]を用いた。これらの最適な超パラメータの値はABIC[Akaike(1980)]最小化条件によって推定した。その結果、2004年~2010年の期間、宮城県沖では約10cm/年のプレート間の固着が得られた。また、三陸沖中部では2004年に約2cm/年だった固着が、徐々に小さくなり2010年にはほぼ見られなくなった。

キーワード : GNSS、プレート運動

Keywords: GNSS, plate motion

Reexamination of the fault model for transient slow slip event in the Japan Trench before the 2011 Tohoku-Oki earthquake

*西間木 佑衣¹、太田 雄策¹、日野 亮太¹

*Yui Nishimagi¹, Yusaku Ohta¹, Ryota Hino¹

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

1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University

Slow slip events are one of the important phenomena in the plate interface. Ito et al. (2013) investigated two transient slow slip events that occurred before the 2011 Tohoku-Oki earthquake deduced from the dense ocean bottom pressure (OBP) gauge data. They adopted differential pressure record between neighboring two OBPs for the effective removal of the remaining non-tidal oceanic mass variation. Their approach, however, can only know the relative displacement between two adjacent stations. Thus, it is difficult to understand the absolute displacement in each OBP station. Based on these background, we reexamined the SSE fault model using reprocessed OBP data set.

We used 8 OBP stations (TJT1, GJT3, P09, P08, P06, P02, P03, and P07) which is the almost same data set with Ito et al. (2013). The ocean tide and by non-tidal oceanic mass variation are removed by the model. We fitted the drift model (combination of an initial exponential and a linear component) to each of the observed time series to estimate the drift function of individual sensors. Even though the such procedure, the residual component still appeared. Thus, we calculated the differential time series of the OBPs in the eastern part (TJT1, GJT3, P09, and P08) relative to the averaged time series in the distant OBP stations (P06, P02, P03, and P07). Furthermore, we calculated the displacement field in each OBP station of eastern part according to the same definition of the time window with Ito et al. (2013).

We obtained the characteristic result between 19 Feb. to 8 March, 2011. TJT1 site, which located in the most eastern site, showed clear uplift. In contrast, GJT3 site, which is the neighboring site of the TJT1, shows small subsidence. Based on these data, we reexamined the SSE fault model. Obtained result shows the possibility of two fault locations. First model located in the very shallow part of the plate interface, the second model located in the slightly deeper part compared with the first one.

キーワード：スロースリップイベント、東北地方太平洋沖地震、海底水圧計

Keywords: Slow Slip Event, Tohoku-Oki earthquake, Ocean Bottom Pressure Data

南海トラフ沿い短期的スロースリップの客観的検知

Detection of short-term slow slip events along the Nankai Trough

*小林 昭夫¹

*Akio Kobayashi¹

1. 気象庁気象研究所

1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

南海トラフ沿いでは短期的スロースリップイベント(SSE)や長期的SSEなどのスロー地震が発生しており、その分布や規模、発生頻度などを均質的に把握することは、プレート境界の特性の時空間変化に関する理解をもたらすことが期待される。Nishimura et al. (2013, JGR) は、南海トラフ沿いの短期的SSEについてGNSSを用いて客観的な検知を行った。小林・木村 (2016、地震学会) は南海トラフ沿いの長期的SSEについてGNSSによる客観的検知を行った。ここでは、小林・木村 (2016) の手法を応用して南海トラフ沿いの短期的SSEの客観的検知を試みる。

GEONETのF3解座標値を用い、各点についてアンテナ交換などによるオフセット、地震によるオフセットの補正を行う。また、長期的な非定常変位を除くため365日移動中央値を差し引く。次に、短期的SSEの影響が見られない中国地方の観測点について1日ずつの領域内中央値を求め、各点の座標値から領域内中央値を差し引く。この領域固定により、Wdowski et al. (1997) の空間フィルターと同じ効果が期待できる。各点の水平成分からフィリピン海プレートの沈み込みと逆方向の成分を計算し、南海トラフ沿いのプレート等深線30 kmに設定した経度0.1度間隔の地点を中心とする50×100 kmの矩形範囲内の各点の平均値を求める。最後に、任意の傾斜期間を持つランプ関数との相互相関を求め、時空間の相関値の分布を作成する。このとき、対象期間の変化量も考慮する。

傾斜期間0.02年 (約7日) について、相関係数0.8以上、変化量1 mm以上の分布を見ると、検出された期間が深部低周波地震活動が活発な時空間分布と合う例が多数見られる。その期間のGNSS水平変位分布には1 cm未満だが地域的にまとまった非定常変位が見られており、実際のプレート境界におけるすべり現象の存在を示唆する。一方、深部低周波地震とは無関係に相関が高い時期もあり、傾斜期間、相関係数、変化量、矩形範囲の大きさなどを調整して最適検知ができるよう調整する必要がある。

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：スロースリップイベント、南海トラフ、GNSS

Keywords: slow slip events, Nankai Trough, GNSS

MCMC法を用いたプレート間カップリングを含むブロック運動モデルの構築

Development of crustal block motion model, including elastic plate coupling based on MCMC method.

*木村 洋¹、伊藤 武男¹、田所 敬一¹

*Hiroshi Kimura¹, Takeo Ito¹, Keiichi Tadokoro¹

1. 名古屋大学大学院環境学研究科

1. Department of Earth and Planetary Sciences, Nagoya University

はじめに

プレートの運動により、プレート境界面では大地震が発生している。大地震の発生のモデル化にはプレートの相対運動を考慮する必要がある。Hashimoto and Jackson., 1993は小さなプレートを地殻ブロックとして導入することにより、日本列島及び周辺領域の地殻ブロック運動を三辺・三角測量データから推定した。その後、陸域のGNSS観測 (GEOENT) の導入によって、より正確な内陸のブロック相対運動が明らかになるとともに、プレート収束帯のような地殻ブロック境界面におけるカップリングの空間分布も推定できるようになってきた。また、陸域の地殻変動観測データの精度向上と蓄積に加え、海底地殻変動観測技術の向上により海域の地殻変動場も明らかになりつつあり、プレート境界面上のカップリングを精度よく推定するためには、地殻ブロック相対運動及びブロック間のカップリングの相互作用を考慮する必要がある。そこで本研究では、プレートカップリングの空間分布を含む地殻ブロック相対運動、地殻ブロック間のカップリング空間分布を推定する新たな地殻ブロック相対運動モデルを構築した。本発表ではこれらの詳細について報告する。

既存の地殻ブロック運動解析プログラム

多くの先行研究で使用されている地殻ブロック運動解析プログラムにDEF-NODE (McCaffrey., 1995)がある。DEF-NODEでは地殻ブロックの境界に矩形小断層を配置し、地殻ブロックの運動、地殻ブロック内歪、地殻ブロック境界面上のカップリングを未知パラメータとして非線形逆解析手法で推定する (例えば、Wallace et al., 2005)。

一方、Loveless and Maede., 2010は日本列島およびその周辺領域を20個の地殻ブロックに分割し、陸域のGNSS観測データを用いることによって、プレート運動、地殻ブロック境界でのすべり速度、プレート境界面でのカップリングを重みづけ最小二乗逆解析手法で推定した。しかし、これらの手法では推定された未知パラメータの共分散を求めることができない。

本研究の地殻ブロック運動解析手法

ある2つの地殻ブロックの境界 Br_{ij} における地殻ブロックの相対運動 Bv_{ij} は、2つの地殻ブロックのオイラーポールを用いて、 $Bv_{ij}=Br_{ij} \times (\omega_i - \omega_j)$ と記述できる。地殻ブロック間の相互作用には、固着に伴う弾性的な応答が含まれるため、ブロック境界面に三角形小断層を配置し、バックスリップモデルで表現する。まず、地殻ブロック間の滑り欠損量 χ_{ij} はカップリング係数 C_{ij} を用いて、 $\chi_{ij}=C_{ij}Bv_{ij}$ で求められる。弾性応答 v_e はブロック間の滑り欠損量と弾性応答関数 G を用いて、 $v_e=G\chi$ と表現できる。カップリング係数は地殻ブロック境界面上での滑り欠損量を、地殻ブロックの相対運動で規格化した値である。観測された地殻変動データ d は地殻ブロック運動と地殻ブロック間の滑り欠損に起因する弾性応答を用いて $d=v_e+Bv=GC_{ij}(r_{ij} \times (\omega_i - \omega_j)) + r \times \omega$ となる。これは、地殻ブロック間の滑り欠損に起因する弾性応答に対して地殻ブロックの相対運動の関数になっているために非線形となっている。これらの方程式を各地殻ブロックの幾何学的な配置を考慮して組み合わせることで、地殻ブロックモデルを構築した。

本研究では、地殻ブロック間のカップリングをマルコフ連鎖モンテカルロ法 (MCMC) で推定する。MCMCは推定パラメータ間の共分散の評価が可能であり、これによってプレート境界深部のカップリング

と上盤側の地殻ブロック運動との解の相関などを定量的に解釈することができる可能性がある。

地殻ブロック運動解析プログラム

本研究で作成したプログラムの利点は、問題設定が容易にできることである。そのため、初期の段階で様々なモデルで試行錯誤することが可能であり、詳細なデータを与えることによって、より複雑なモデル設定も可能となっている。さらに、有限要素解析（FEM）を用いて作成した弾性応答関数を取り込むことができるようにする予定である。

テスト解析

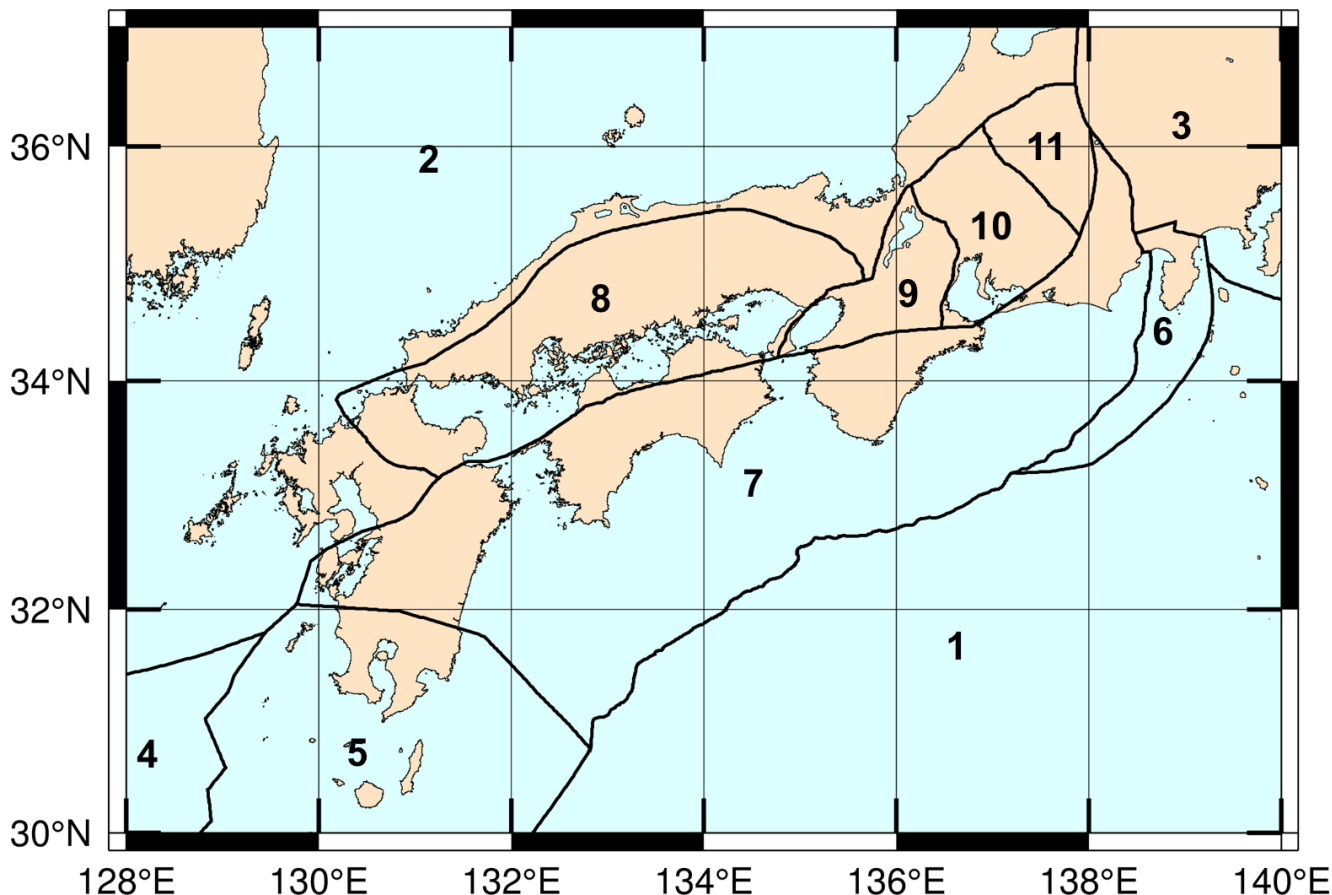
本解析プログラムを用いて西南日本及び周辺領域を11個の地殻ブロックに分割した地殻ブロックモデルを構築した。入力データは11個の地殻ブロック境界データのみで、これは最も簡単な問題設定の例である。図に各ブロックの配置を示した。

今後の予定

本研究で構築した地殻ブロック運動モデルを用いることによって、ブロック運動を考慮したプレート間カップリングを求めることが可能になった。今後の予定としては、このモデルを用いて日本全体のプレート間カップリングを推定していく。さらに次の段階として、FEMを用いてプレート間の固着分布を求めていく方針である。

キーワード：地殻ブロック運動モデル、ブロック相対運動、プレート間カップリング、マルコフ連鎖モンテカルロ法、GNSS

Keywords: Crustal block motion model, Block relative motion, interplate coupling, Markov Chain Monte Carlo method, GNSS



四国地方の遷移領域における固着速度の揺らぎ Fluctuation of the coupling rate along the transient zone in the Shikoku region

*落 唯史¹、武田 直人¹

*Tadafumi Ochi¹, Naoto Takeda¹

1. 国立研究開発法人産業技術総合研究所 地質調査総合センター 活断層・火山研究部門

1. Institute of Earthquake and Volcano Geology, Geological Survey of Japan, The National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

西南日本ではフィリピン海プレートの沈み込みに伴うプレート間固着が進行している。また東海地域や豊後水道などで発生するスロースリップイベント(SSE)は積算の固着のうちいくらかを解放するから、固着とスロースリップの時空間変化を推定することは地震の予測にとって重要な課題である。西南日本の中でも四国周辺の領域に注目すれば、室戸岬下ではほぼプレート収束速度で固着する一方、豊後水道では数年おきに繰り返す長期的SSEによって蓄積した歪の30%程度が解放されている[Ochi (2015, EPSL)]。この結果はSSEの発生する領域でも将来の地震では破壊しうるということを示している。議論を豊後水道から四国地方の遷移領域全体に広げれば、破壊の下端の評価に寄与することが期待できる。この観点から、本研究では四国付近の遷移領域全体にわたるプレート間固着の時間変化を論じる。中国・四国地方のGEONET日座標値を用いて遷移領域のプレート間固着を推定したところ、遷移領域での固着速度は3cm/yr程度で、かつ幾つかの場所ではその固着速度に2-3cm/yr程度の揺らぎがあることがわかった。GEONETの観測点分布から得られるこの領域の推定精度は、GEONETと同程度の空間分解能に対して1cm程度であるので、この揺らぎは有意であると考えられる。落・武田(2015, JpGU)は、豊後水道のSSE発生領域周辺の揺らぎと微動活動の関係について議論したが、本発表ではさらに東側に領域を広げ、固着の揺らぎと微動活動の時間遅れなどについても議論する。

キーワード : SSE、プレート間固着、西南日本

Keywords: SSE, interplate coupling, southwestern Japan

西南日本の地殻水平ひずみ：クリギング法を用いた局所変動抽出の試み Horizontal Crustal Strain in Southwest Japan: Attempt to extract local deformation using a Kriging method

*折中 新¹、田部井 隆雄²、塩見 雅彦¹、大久保 慎人²

*Arata Orinaka¹, Takao Tabei², Masahiko Shiomi¹, Makoto Okubo²

1. 高知大学大学院総合人間自然科学研究科、2. 高知大学理学部

1. Graduate School of Science, Kochi Univ., 2. Faculty of Science, Kochi Univ.

西南日本の地殻変動場は、フィリピン海プレートの沈み込みに支配されながらも、変動様式は複雑である。沈み込みの方向がプレート境界である南海トラフの走向に斜交し、プレート境界面が強く固着していることにより、上盤側の西南日本弧は弾性圧縮変形を受けながら、同時に中央構造線を境に相対ブロック運動が生じている。また、九州中部や近畿地方には多数の活断層が存在し、断層面の固着状態によって周辺の変動場は局所的擾乱を受けている。このように、西南日本では「プレート運動起因の弾性圧縮変形と広域ブロック運動」と「活断層や地質構造に影響される局所変動」の両方が混在している。西南日本の地殻変動場の理解には、これらの定量的分離が必要である。本研究では、空間最適補間法で知られるクリギング法（間瀬・武田，2001）を用いたひずみ解析を行い、局所変動の抽出を試みた。クリギング法の特徴は、観測データ固有の空間従属性に従って、場を代表する広域変動と空間スケールの小さな変動の両者を適切にモデル化できる点である。本研究ではさらにShen et al. (1996) による空間平滑化処理を用いたひずみ解析も行い、手法間の違いを検証した。空間平滑化処理においては、距離減衰定数の値を15-35 kmの範囲で複数設定した。

解析には、近畿から九州へ至る569点のGEONET最終座標解F3解（2006-2009年）より算出した平均変位速度を使用した。ひずみ解析手法に関わらず、四国地方南部では、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0.15-0.30 ppm/yrの圧縮が非常に顕著である。四国西部から九州南部へかけて、圧縮方向は反時計回りに回転し、沈み込みの影響は徐々に減少する。また、太平洋側から日本海側へ向かって、圧縮の大きさは数分の1に減少する。空間平滑化法による結果と比較すると、クリギング法によるひずみ分布には局所的擾乱がより顕著に認められる。しかし、プレート沈み込みによる大きな圧縮変形に支配されて、中央構造線周辺や山陰地方に予想された、断層や地質構造に起因するであろう系統的な局所変動を検出するには至らなかった。GEONET点間の平均間隔は15-20 kmであり、局所変動の検出にはなお空間分解能が不足していると考えられる。その意味で、対象を限定してGEONETを補完する目的の稠密観測は、今後も重要な役割を持つと言える。

キーワード：地殻変動、西南日本、ひずみ、局所変動、クリギング法、GPS

Keywords: Crustal deformation, Southwest Japan, Strain, Local deformation, Kriging method, GPS

2016年鳥取県中部の地震に伴う地殻変動と震源断層モデル

Crustal deformation and a fault model of the 2016 central Tottori prefecture earthquake

*矢来 博司¹、小林 知勝¹、森下 遊¹、檜山 洋平¹、三浦 優司¹

*Hiroshi Yarai¹, Tomokazu Kobayashi¹, Yu Morishita¹, Yohei Hiyama¹, Yuji Miura¹

1. 国土地理院

1. Geospatial Information Authority of Japan

1. はじめに

従来、山陰地方では地殻変動が比較的小さいと考えられてきたが、近年、GNSS連続観測点網（GEONET）などのGNSS観測により、兵庫県北部から鳥根県東部の海岸線に沿ってひずみ速度が大きい領域が存在することが明らかとなりつつある。その領域において、2016年10月21日に鳥取県中部でM6.6の地震が発生した。

この地震に伴う地殻変動がGEONETおよびだいち2号（ALOS-2）のSAR干渉解析により捉えられた。本発表では、観測された地殻変動と、その地殻変動から推定された震源断層モデルについて紹介する。

2. 地殻変動

この地震に伴う地殻変動が、GNSS連続観測点網（GEONET）およびだいち2号のSAR干渉解析により捉えられた。

GEONETでは、震央の北方に位置する羽合観測点で北北東へ約7cmの変位、約2cmの隆起が観測されるなど、震央周辺で地殻変動が観測された。概ね、北西－南東方向に短縮、北東－南西方向に伸長の地殻変動となっている。

また、地震後にだいち2号により観測方向の異なる4回の観測が行われ、SAR干渉解析によって地震に伴う地殻変動が詳細に得られた。これらの4方向からの干渉SAR結果に基づき、地殻変動の3次元成分の分布を求めた（図）。その結果、本震震央の北東側と南西側では隆起、北西側と南東側では沈降となり、上下成分は深奥を中心としてほぼ4象限型の分布となっていることが明らかとなった。この特徴は、鉛直の断層が横ずれ運動した際の理論的な変動分布と調和的である。水平成分は、北東側で北東方向、北西側で南東方向、南西側で南西方向、南東側で北西方向への変位を示していることから、北北西－南南東走向のほぼ鉛直の断層が左横ずれ運動したと考えられる。

3. 震源断層モデル

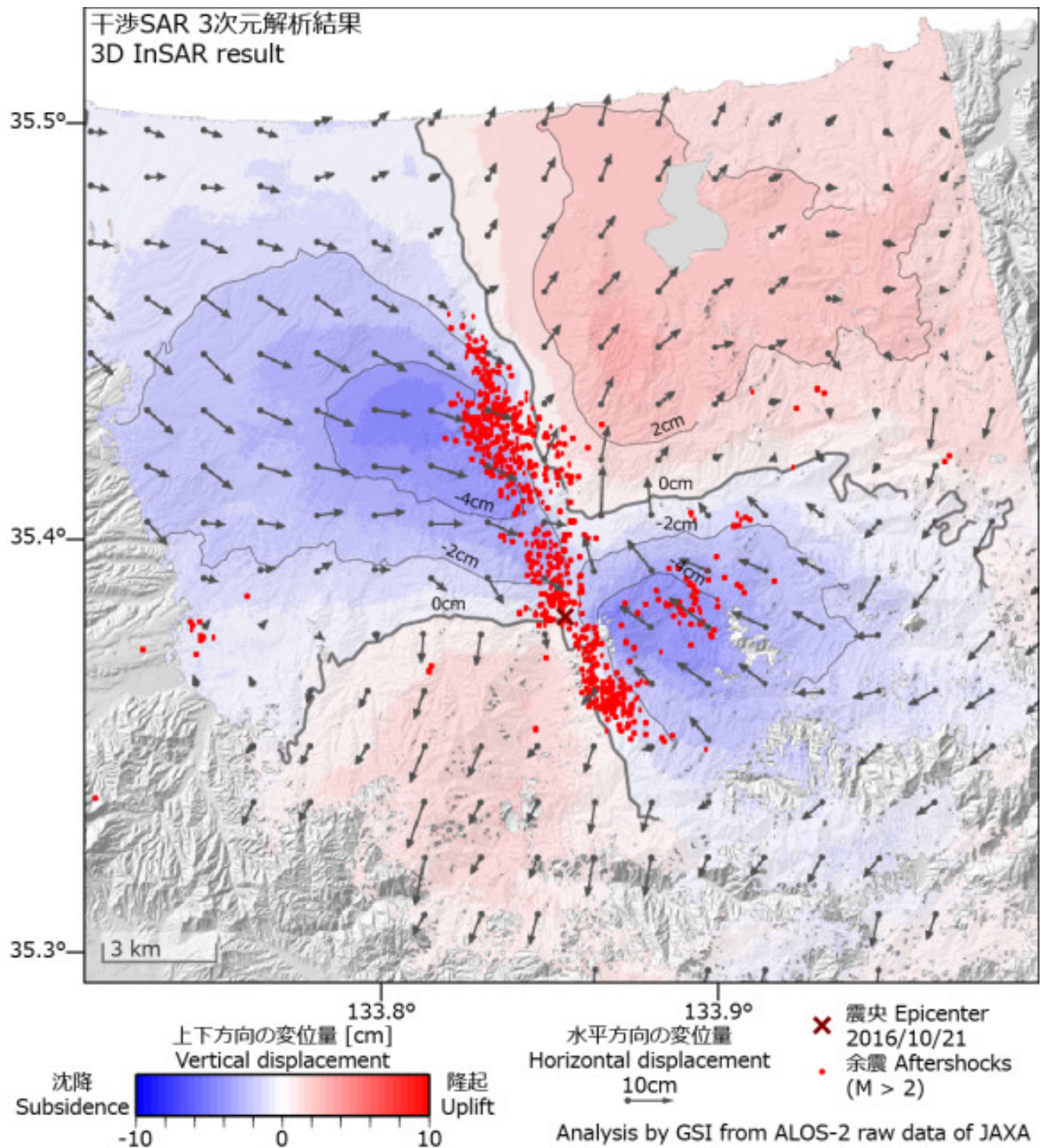
GEONETおよびだいち2号のSAR干渉解析により得られた地殻変動に基づき、震源断層モデルの推定を行った。一様すべりの断層面を仮定した推定では、北北西－南南東走向のほぼ鉛直で長さ約8km、幅約7kmの断層が左横ずれに約1.3m滑ったと推定された。計算されるモーメントマグニチュードは約6.2となった。また、断層面上の滑り分布の推定を行った。断層面の走向は干渉画像の位相変化分布を参考に調整し、165°とした。断層面の傾斜は90°と設定した。推定された滑りは左横ずれで、本震震源より北側のやや浅い側で主要な滑りが見られ、滑りの中心域は深さ約5kmに位置している。推定されたモーメントマグニチュードは約6.2と求められた。

謝辞

本研究で用いただいち2号データは、地震予知連絡会SAR解析ワーキンググループ（地震WG）を通じて、（国研）宇宙航空研究開発機構（JAXA）から提供を受けました。ここで使用しただいち2号の原初データの所有権は、JAXAにあります。

キーワード：干渉SAR、GNSS、鳥取県中部の地震

Keywords: InSAR, GNSS, the central Tottori prefecture earthquake



Estimation of the coseismic slip history deduced from the “GNSS carrier phase to fault slip” approach

*田中 優介¹、太田 雄策¹、宮崎 真一²

*Yusuke Tanaka¹, Yusaku Ohta¹, SHINICHI MIYAZAKI²

1. 東北大学、2. 京都大学

1. Tohoku University, 2. Kyoto University

Detecting aseismic slip within several hours to days is important for understanding a postseismic process in a plate interface. Conventional kinematic GNSS analysis, however, has disadvantage in such slow deformation, because it shows the large noise in the low frequency. Cervelli et al. (2002) developed the new method for such transient crustal deformation. They investigated the aseismic slip history of the fault in Kilauea volcano, directly from the GNSS carrier phase data. In contrast, there are small number of previous researches for the coseismic slip estimation based on their method. Thus, we applied their method (hereafter, PTS (Phase to Slip)) for the estimation of the coseismic slip history for the 2016 Kumamoto earthquake (M_{jma} 7.3) in this study.

The method of PTS used double-differenced carrier phase data as the observation. The observation related to the fault slip directly via the Green' s function. In the PTS, we adopted Kalman filtering approach for the unknown parameters estimation. We adopted the Green' s function solution to the elastic half space problem (Okada, 1992).

We used every 30s carrier phase data in eight GNSS stations (GEONET) in and around the focal area of the 2016 Kumamoto earthquake. For simplification of the inversion, we assumed the geometry of the single rectangular fault model estimated by Kawamoto et al. (2016). Then we assumed the white noise stochastic model with a process noise value $3 \times 10^2 \text{ m s}^{-1/2}$ for the fault slip parameter.

As a result, we obtained the 3.6m coseismic offset within two minutes after the origin time. Obtained result, however, shows a slightly smaller than the result of Kawamoto et al. (2016), which reached 4.2m. Furthermore, our result clearly shows the long-period disturbance reaching approximately 1m. It should be caused by the difficulty of the strict separation between each unknown parameters such as the tropospheric delay and the fault slip. To avoid such problem, the adoption of the optimum process noise value for each unknown parameters is one of the possibilities (e.g. Hirata and Ohta, 2016).

In the presentation, we will describe the more detail characteristics of the PTS not only about coseismic behavior but also the time dependence of the postseismic one.

GNSS観測に基づく2016年熊本地震の余効変動の時系列解析

Estimation of postseismic deformation of 2016 Kumamoto earthquake based on GNSS observation network

*不破 智志¹、大園 真子¹

*Satoshi Fuwa¹, Mako Ohzono¹

1. 北海道大学

1. Hokkaido University

2016年4月16日に発生した熊本地震 (M7.3) に伴う余効変動について九州本土と天草諸島に設置されている GEONET 点の日座標時系列解析を行い、その特徴を調べた。余効変動の主な要因については余効すべりと粘弾性緩和が挙げられ、それぞれ対数関数、指数関数での時間発展が予測されている。本研究では、九州の GEONET 観測点134点について、国土地理院が提供する日座標系 (F3解) を使用した。2013年1月1日から2016年4月14日までの時系列を定常変動と仮定して、直線、年周、半年周成分で近似し、2016年熊本地震以降2016年11月12日までの時系列からその成分を差し引いて余効変動時系列を抽出した。時間発展を対数関数でモデル化された余効すべりの理論式で近似期間を本震後50日、100日、211日に区切って近似し、振幅と時定数を求めると共に、余効すべりをよりよく説明するための近似期間を推定した。求められた各観測点の時定数は中尾・他 (2016) が示す0.8~36日の余効すべりの時定数と調和的である。またこの結果より熊本地震の余効すべりは50日から100日で収束しているように見える。余効すべりが1つの現象であると仮定して、求められた各観測点の時定数に対し統計的処理を行う事により熊本地震の共通の時定数を推定した結果、その値は1.84~2.50日となった。この結果は2004年新潟県中越地震 (M6.8) の際にTakahashi et al, (2005) によってGNSS観測の解析結果から得られた値0.03~1.69日よりわずかに大きい値であった。これらの定数を用いて観測時系列に再近似を行うと、大きな振幅は震源域周辺で見られ、また、別府など震源断層から北東部の地域でも比較的大きいことが分かった。観測された余効変動時系列から余効すべりの理論時系列を差し引いた残差時系列には線形的な時間発展をする観測点と時間発展する観測点が見られた。本研究では時間発展する変動分を粘弾性緩和による変動とみなして、指数関数でモデル化された粘弾性緩和の理論式で残差時系列に対する近似を行い、振幅と時定数を求めた。この結果、震源域周辺では時定数が10000以上となる事から粘弾性緩和が11月12日時点で継続中である、または、近似する関数について再検討する必要があると考えられる。今後、観測期間を延長することにより定量的評価が行える可能性がある。

キーワード：2016年熊本地震、余効すべり、粘弾性緩和

Keywords: 2016 Kumamoto earthquake, afterslip, viscoelastic relaxation

精密水準測量によって検出された御嶽山2014年噴火後の上下変動 (2014-2016)

Vertical Deformation Detected by the Precise Levelling Survey after the 2014 Mt. Ontake Eruption (2014-2016)

*村瀬 雅之¹、森 濟¹、大淵 一樹¹、南部 光賢¹、前田 裕太²、堀川 信一郎²、奥田 隆²、松島 健³、内田 和也³、手操 佳子³、光岡 郁穂³、山本 圭吾⁴、吉川 慎⁵、井上 寛之⁵、木股 文昭⁶、柳澤 宏彰⁷、今井 良彰⁷、木村 一洋⁷

*Masayuki Murase¹, Hitoshi, Y. Mori¹, Kazuki Ofuchi¹, Mitsusato Nannbu¹, Yuta Maeda², Shinichiro Horikawa², Takashi OKUDA², Takeshi Matsushima³, Kazunari Uchida³, Yoshiko Teguri³, Ayaho Mitsuoka³, Keigo Yamamoto⁴, Sin Yoshikawa⁵, Hiroyuki Inoue⁵, Fumiaki Kimata⁶, Hiroaki Yanagisawa⁷, Yoshiaki Imai⁷, Kazuhiro Kimura⁷

1. 日本大学文理学部地球科学科、2. 名古屋大学大学院環境学研究科、3. 九州大学大学院理学研究院、4. 京都大学防災研究所、5. 京都大学大学院理学研究科、6. 東濃地震科学研究所、7. 気象庁

1. Department of Earth and Environmental Sciences, College of Humanities and Sciences, NIHON University, 2. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 3. Graduate School of Science, Kyushu University, 4. Disaster Prevention Research Institute Kyoto University, 5. Graduate School of Science, Kyoto University, 6. Tono Research Institute of Earthquake Science, 7. 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。御嶽山の2014年噴火の過程および次の噴火への準備過程を議論するため、御嶽山東山麓の水準路線において、2014年噴火直後の10月15日～17日、噴火約半年後の2015年4月21日～24日、噴火約2年後の2016年9月19日～22日に測量を行った。

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（約17km）、木曾温泉路線（約8km）、2014年噴火直後の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（約8km）さらに2015年4月に御岳ロープウェイ路線を約3km（中の湯路線）、屋敷野路線を約2km延長している。

2014年10月-2015年4月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。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。

2015年4月-2016年9月の期間で、上松の不動点に対して、御岳ロープウェイ・中の湯路線で約6mmの隆起・屋敷野路線で約3mmの沈降のわずかな上下変動が検出された。

2014年噴火前の準備過程において屋敷野路線と木曾温泉路線は両方の路線とも隆起であり、また噴火後は両方の路線とも沈降が検出された。2014年噴火時やその準備過程では屋敷野路線・木曾温泉路線の両路線まで及ぶような比較的広い変動があったと考えられる。それに対し、2015年4月～2016年9月の結果では、屋敷野路線はわずかな沈降を示しているのに対し、中の湯路線は隆起を示している。隆起を示した中の湯路線は前回2015年4月に設置した路線であり、今回初めて変動を得たため噴火前の結果は無いが、路線近傍の局所的な変化を捉えてしまっている可能性も考えられる。今後観測を継続することによって、今回の隆起が御嶽山地下のマグマの蓄積過程による変動を示しているかを見極める必要があると考える。

キーワード：御嶽山、精密水準測量、上下変動

Keywords: Mt. Ontake, precise leveling survey, vertical deformation

氷河性海水準変動の地球物理モデルと地形・地質学的情報を組み合わせた長期の地殻上下変動量の復元について

Long term crustal movement estimated from glacio-hydro isostatic modeling and relative sea level observation

*尾崎 達也¹、横山 祐典¹、Purcell Anthony²、Lambeck Kurt²

*Tatsuya Ozaki¹, Yusuke Yokoyama¹, Purcell Anthony², Lambeck Kurt²

1. 東京大学大気海洋研究所、2. オーストラリア国立大学 地球科学研究所

1. Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, 2. Research School of Earth Sciences, The Australian National University

過去の海水準変動の復元は、長期の地殻上下変動量を定量する上で重要である。日本列島は変動帯に位置し、このデータは地殻の安定性を評価する上で重要である。これまで地質学的手法に基づいた多くの海水準復元研究がなされてきたが、氷河性および海水荷重による地殻均衡 (GIA) の効果については十分な検討は行われておらず、いくつかの研究例が存在するのみである (Nakada et al., 1991 Palaeo3; Yokoyama et al., 1996; Okuno et al., 2014 QSRなど)。そのため、これらの影響を考慮した地殻上下変動量の長期的かつ定量的な研究は十分ではない。地殻の長期的な安定性を考える上でも、1,000年を超える時間スケールでの考察は重要である。

本研究では、過去のジオイドを近似していると考えられる海水準に着目し、これまで発表された日本各地の100点以上の地形学的・地質学的海水準データのコンパイルを行った。またGIAの不確実度の原因である地球内部領域パラメータの範囲を再検討し、海水準変動モデルの予測値を得た。さらに収集した最終氷期最盛期以降の海水準指標データを、モデル予測値と比較することで地殻上下変動量の定量を行った。その結果、最終氷期以降の地殻上下変動量を海成段丘データと海水準変動モデルを用いて求め、先の隆起量と比較することで、短期・長期で異なる地殻隆起速度を示す地域を特定した。

本発表ではそれらの地質学的・地球物理学的解釈と得られた知見について述べる予定である。

キーワード：海水準変動、氷河性地殻均衡、海成段丘、地殻上下変動、最終間氷期、最終氷期最盛期

Keywords: sea-level change, GIA, coastal terrace, vertical tectonic movement, last interglacial, LGM