

弾生体力学の不変量による深部ボアホール歪・応力連続観測の精度確認 How precise is continuous observation of stress-strain in deep borehole? Examination by invariants of elastic theory.

石井 紘^{1*}, 浅井 康広¹, 川崎 一朗¹
ISHII, Hiroshi^{1*}, ASAI, Yasuhiro¹, KAWASAKI, Ichiro¹

¹ 地震予知総合研究振興会 東濃地震研

¹Tono Research Institute of Earthquake Science

東濃地震科学研究所ではボアホール地殻活動総合観測装置を開発し、深部ボアホール(最深は1030m)に設置し地殻活動のデータを蓄積している。地震に関連した種々の現象を検知し確実にするためには1本のボアホールにおいて多成分・多項目の観測をすることが重要である。このために1本の深部ボアホールで多成分・多項目の観測を可能にする地殻活動総合観測装置を開発してきた。この装置は4成分水平成分歪計または応力計、2成分の斜め成分歪計または応力計、2成分の鉛直歪計または応力計、2成分傾斜計、4成分の地磁気計、3成分速度型地震計、3成分加速度計、水晶温度計、IC温度計などを搭載することが可能であり、任意の組み合わせも可能である。ここで歪計、応力計、傾斜計と地磁気計は当研究所で新しく開発したものであるが他は市販の計器を搭載している。

この総合観測装置は現在10カ所の深部ボアホールにおいて観測を実施し良好なデータを蓄積している。2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震(M9.0)は震央距離約600kmであったがすべてのボアホール観測点の応力計と歪計において応力地震動や歪地震動が記録された。

そこでこれらのボアホール計器がどの程度精度のよい観測をしているかを調べることを試みた。弾性体力学においては応力や歪には不変量というものが存在する。この不変量は座標が異なっても同じ値であることが証明されている。それぞれのボアホール観測点では応力や歪の複数の観測をしている。従って計器の異なる成分から複数の不変量を計算することが出来る。それぞれの観測点においてこの異なる観測成分から合成した複数の不変量は初動から後続波まで完全に一致した。従ってボアホールによる応力や歪の観測の精度は非常によいことが明らかになった。

更に異なる観測点の不変量を比較してみた。その結果は異なる観測点の不変量を比較してもほとんど一致することが明らかになった。また、地震波ではなく地球潮汐の記録の比較も行ったが同様の結果が得られた。このことから深部ボアホールの観測データは信頼性のある観測をしていることが明らかになった。これらの結果を報告する。

キーワード: 深部ボアホール, 応力・歪連続観測, 弾性体力学の不変量, 観測精度確認, 3.11地震の応力地震動波形, ボアホール地殻活動総合観測装置

Keywords: deep borehole observation, continuous observation of stress and strain, invariants of elastic theory, observation accuracy, stress seismogram of 3.11 earthquake, multi-component borehole instrument

茂住祐延断層近傍における歪連続観測結果

Results of continuous crustal strain observation in vicinity of Mozumi-sukenobe fault

浅井 康広^{1*}, 石井 紘¹

ASAI, Yasuhiro^{1*}, ISHII, Hiroshi¹

¹ 東濃地震科学研究所

¹Tono Research Institute of Earthquake Science, ADEP

陸域地下構造フロンティア研究 (Ando, 2007) により掘削された活断層調査坑道 (跡津川断層系の一つである茂住 - 祐延断層を貫く延長 480m、地表下 300m の坑道 ; 例えば Takeuchi et al, 2007) の 2 カ所、それぞれ破碎帯 (断層) の近傍約 100m、坑道床面から深さ 10m に石井式ボアホール歪計 (長さ 113.8 cm、歪計部の直径 6 cm) が埋設設置され観測が行われていた (Ishii et al, 2007)。フロンティア研究としての観測は 2001 年度に終了しているが、その後 2006 年 7 月より東濃地震科研が歪計観測システムを管理、連続観測 (サンプリング間隔 1 分) を継続している。

2006 年 7 月以前の観測では、歪計埋設設置前の初期応力測定とその後の歪観測の結果から、断層近傍の主応力と主歪は、テクトニックな作用よりも活断層の運動が反映されることが判明している (Ishii et al, 2007)。

本講演では、2006 年 7 月以降の観測結果を紹介し、Ishii et al (2007) が示した断層運動を反映した主歪場が現在も観測されているかについての検証を行う。

キーワード: 石井式ボアホール歪計, 現位置応力測定, 歪連続観測, 茂住 - 祐延断層, 活断層近傍観測

Keywords: Ishii-type borehole strainmeter, in-situ stress measurements, continuous strain observation, Mozumi-Sukenobe fault, Observation in vicinity of active fault

2009年駿河湾地震(M6.5)前後のひずみの挙動

A strain behavior before and after the 2009 Suruga-Bay earthquake (M6.5)

高波 鐵夫^{1*}, 平田 直¹, 北川源四郎², 上垣内修³, アラン・リンデ⁴, セルウィン・サックス⁴

TAKANAMI, Tetsuo^{1*}, Naoshi Hirata¹, Genshiro Kitagawa², Osamu Kamigaichi³, Alan T Linde⁴, Selwyn I Sacks⁴

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

¹ERI University of Tokyo, ²Research Organization of Information and Systems, ³Japan Meteorological Agency, ⁴DTM Carnegie Institution of Washington

On 11 August 2009 the intraslab earthquake (M6.5) struck the Tokai area. The largest seismic intensity observed was VI- in JMA scale, and it was a felt earthquake in a wide area including the Kanto and Koshin'estu Regions. Tsunamis were observed at and around the Suruga Bay. In the Tokai area, the Japan Meteorological Agency (JMA) continuously monitors strain data by the real time automated processing in the Tokai network. According to JMA, it is unconnected to the anticipated Tokai Earthquake (M8) judging from the acceptable reasons. For instance, it is an intraslab earthquake in the Philippine Sea plate, while the anticipated earthquake is a plate boundary earthquake on the upper side of the Philippine Sea plate. We consider it as an appropriate earthquake for validation of the Tokai network, though the feature of earthquake is different from one of the anticipated earthquake. We here tried to investigate the strain behavior before and after the 2009 Suruga Bay earthquake occurred in the fault zone of the anticipated Tokai earthquake. In actual, the Tokai network of strainmeters has been monitoring the short-term slow slip events (SSE) synchronized with nearby low frequency earthquakes or tremors since 2005 (Kobayashi et al., 2006). However, the earth's surface is always under the continuous influence of a variety of natural forces such as earthquakes, wave, wind, tide, air pressure, precipitation and a variety of human induced sources, which create noise when monitoring geodetic strain. Eliminating these noise inputs from the raw strain data requires proper statistical modeling, for automatic processing of geodetic strain data. It is desirable to apply the state space method to noisy Tokai strain data in order to detect precursors of the anticipated Tokai earthquake. The method is based on the general state space method, recursive filtering and smoothing algorithms (Kitagawa and Matsumoto, 1996). The first attempt to apply this method to actual strain data was made using data from the 2003 Tokachi-oki earthquake (M8.0) recorded by the Sacks-Evertson strainmeter, which has been operating since 1982 at Urakawa Seismological Observatory (KMU) of Hokkaido University in the southern part of the Hidaka Mountains (Takanami et al., 2009). KMU is far 105 km NW of the epicenter of the 2003 Tokachi-oki earthquake. After the earthquake, the data showed a clear episode of contraction for 4 days followed by expansion for 23 days. These signals correlate with increased aftershock seismicity for events greater than M4. The strain changes, together with surface displacements detected by the GPS network, are indicative of propagation of slow slip at depth (e.g. Geographical Survey Institute, 2004). We here review the computational approach to state space method and the results of its application to the strain data from the 2009 earthquakes (M6.5) occurred off Sagami in the Tokai area. Interestingly, for the 2011 Tohoku Earthquake off the Pacific coast no pre-slip was detected by land-based observations even though its magnitude was M9. In order to detect the nucleation of such an earthquake occurring far offshore, high-precision strain data is necessary but was not available.

キーワード: 2009年駿河湾地震(M6.5), ひずみ, 想定東海地震, 状態空間モデル

Keywords: 2009 Suruga-Bay earthquake(M6.5), Strain, Anticipated Tokai earthquake, State-space model

京都大学付近の花折断層周辺の地殻上下変動 京都大学における一般教育科目としての地球科学実験 (続報)
 Vertical Crustal Movements in the vicinity of Hanaori fault nearby the campus of Kyoto University(Subsequent Report)

大塚 成昭^{1*}, 加藤 護², 金子 克哉², 石川 尚人², 酒井 敏²
 OTSUKA, Shigeaki^{1*}, KATO, Mamoru², KANEKO, Katsuya², ISHIKAWA, Naoto², Satoshi SAKAI²

¹ 神戸学院大学 人文学部, ² 京都大学大学院人間・環境学研究科
¹Faculty of Humanities and Sciences, Kobe Gakuin University, ²Graduate School of Human and Environmental Studies, Kyoto University

京都大学における一般教育科目(全学共通科目)の一つとして開講されている「地球科学実験B」の実験テーマ「測地」での学生による1982年から2008年までの測量成果を2009年の日本地震学会秋季大会において報告した。ここでは、前回の報告以後に実施された2009年~2011年の3年間の測量成果を加え、続報として報告する。

実験テーマ「測地」では、地殻活動としての地殻変動や地震現象に関心を持たせるため、キャンパス近傍に存在する活断層である「花折断層」を取り上げ、『京都大学~吉田山付近の花折断層周辺の地殻上下変動』を監視する」ことを目的の一つとして行う精密水準測量を継続してきた。一等水準儀と精密標尺とを用い、一等水準測量の精度を確保するよう努力している。学生実験であるので時間の制約により年度によっては、一等の精度を確保できなかった年もあるが、概ね一等水準測量に準じた精度の測定ができています。

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震(M9.0)では、京都市内においても震度2を記録しており、2011年度の授業では、地盤へのその影響の有無について関心をもって測量が行われた。

図1に京都大学キャンパスおよび吉田山付近に配置した水準点および花折断層の推定位置を示す。成果の一例として、図2に水準点(1)-(4)間の標高差変化を示す。また、図2には、1988年-2002年および1999年-2011年の二つの期間に対する回帰直線を示した。2000年頃までの変化率が0.001cm/年であったものが、2000年頃以降、0.05cm/年と吉田山の隆起速度が増加した。これが、何に起因しているかは、今のところはっきりしない。一方、最近数年間は増加率が変化しておらず、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震の影響も全くないことが確認された。

[文献]

大塚成昭・加藤護・金子克哉・石川尚人・酒井敏:「京都大学付近の花折断層周辺の地殻上下変動 京都大学における一般教育科目としての地球科学実験」, 日本地震学会講演予稿集 2009年秋季大会, D21-02, p126, 2009.

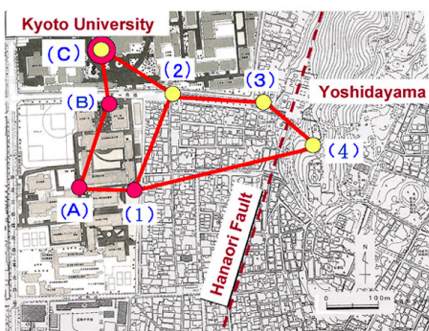


Fig. 1 Leveling net in and around the campus of Kyoto University and Yoshidayama.

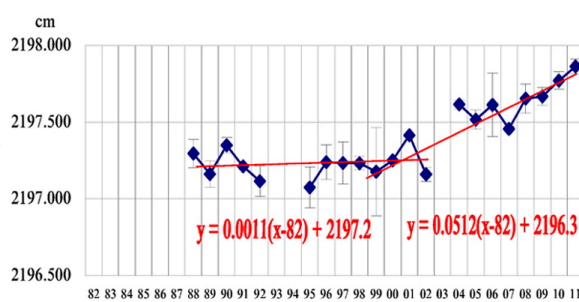


Fig. 2 Height difference change between the bench marks (1) and (4).

日本列島の地殻変動の3次元解析 3D Analysis of crustal motions of Japan

原田 靖^{1*}, 加藤 忠義¹
HARADA, Yasushi^{1*}, KATO, Tadayoshi¹

¹ 東海大学 海洋学部 海洋資源学科

¹School of Marine Science and Technology, Tokai University

国土地理院では、約1400のGPS観測点からなるGEONETの観測結果から得られたF3解を基に日本列島の地殻変動アニメーションを作成し公開している。これはF3解で得られた水平変動量を40万倍に誇張して地形データに加算した数枚の地形図を動画にしたものである。しかしこれらは日本列島の地殻変動の詳細を理解する上で十分なものではない。

本研究では国土地理院のF3解を使い、同様な方法で垂直変動を含めた3次元時間変動の可視化を行った。時間分解能を上げるため30日分のデータを平均して月変動を求めた。これにより東北地方太平洋沖地震以前の日本列島の収縮運動や、地震後の余行変動を月毎により詳細に可視化することができた。また垂直変動を含めることで非常に特徴的な隆起・沈降変動の可視化も可能になった。求められた東北地方太平洋沖地震以前の日本列島の隆起・沈降量を、約100年の歴史がある水準測量のデータ、及び約200万年間の地質学的な隆起・沈降量と比較を行ったところ、定性的な日本列島の隆起・沈降変動の大局的特徴はどの時間スケールにも見られ、GPSデータと水準測量のデータは定量的にも調和的であることが分かる。

キーワード: GPS, 日本列島, 地殻変動

Keywords: GPS, crustal deformation, 3D Analysis

GPS 観測網 (AGNeSS) によるスマトラ断層の断層固着の空間変化 Spatial variations in Fault Coupling on the northern portion of the Great Sumatran Fault

伊藤 武男^{1*}, Endra Gunawan¹, 木股 文昭¹, 田部井 隆雄², 太田 雄策³, Meilano Irwan⁴, Agstan⁵, Nurdin Irwandi⁶
ITO, Takeo^{1*}, ENDRA, Gunawan¹, KIMATA, Fumiaki¹, TABEL, Takao², OHTA, Yusaku³, MEILANO, Irwan⁴, Agstan⁵, Irwandi Nurdin⁶

¹名古屋大学, ²高知大学理学部応用理学科, ³東北大学, ⁴ITB, ⁵BPPT, ⁶Syah Kala University

¹Nagoya University, ²Faculty of Science, Kochi University, ³Tohoku University, ⁴ITB, ⁵BPPT, ⁶Syah Kala University

インドネシアのスマトラ島には約 1200km に渡るスマトラ断層帯がある。右横ずれの断層のスマトラ断層帯はいくつかのセグメントに分かれており、それらの多くのセグメントは最近 100 年以内に地震がすでに発生している。しかしながら、スマトラ島北部の約 200km の長さのセグメントでは最近 170 年間に地震が発生していない。我々は 2004 年スマトラ-アングマン地震 (Mw9.2) の発生後から GPS 観測網 (Ache GPS Network for the Sumatran fault System : AGNeSS) を構築してきた。現在は、AGNeSS は連続 GPS 観測とキャンペーン GPS 観測点を合わせて 24 点で構成されている。AGNeSS の観測を維持・発展させるために、バンダアチェにあるシアクラ大学と協力して、観測システムを維持できる体制を整備してきており、現在では、シアクラ大学だけで観測網を拡張できる体制が整いつつある。

AGNeSS で得られた地殻変動データには 2004 年スマトラ-アングマン地震の余効変動も含めて観測しているため、それらをモデル化して影響を取り除く必要がある。それらの影響を取り除いた後にプレート境界の影響とスマトラ断層の固着、断層の位置などをモデル化し、マルコフ連鎖モンテカルロ法によってそれらの推定を行った。その結果、北側のセグメントと南側のセグメントで断層固着の不均質がみられた。北側のセグメントではほぼクリープしており、南側のセグメントでは、深さ約 15km までの断層固着が推定された。また、すべり欠損速度は約 1.6cm/yr が得られた。これらから換算するとこの地域では、マグニチュード 7 クラスの地震の発生ポテンシャルがすでに蓄積していると考えられる。

キーワード: スマトラ断層, カップリング, モンテカルロ法

Keywords: Sumatran fault, fault coupling, Monte Carlo method

GPS データから求められた地震発生前の表面変位 Surface motions prior to mega earthquakes by using GPS data

鶴田 夏実^{1*}, 服部 克巳¹, Han Peng¹
TSURUTA, Natsumi^{1*}, HATTORI, Katsumi¹, HAN, Peng¹

¹ 千葉大学院理学研究科

¹ Graduate School of Science, Chiba University

地震の過程には地震前の応力蓄積、地震時の岩石破壊、および地震後の弾性および粘弾性反発というサイクルがある。このサイクルにおいて地震時と地震後の変位は全地球測位システム (GPS) を用いた研究が進められてきた。しかし、地震準備過程で地震短期予測を実現するために重要な地震前の地下応力の変化 (たとえば前兆すべりに対応する地表変位) を検出することは課題として残っている。

そこで本研究では、日本で発生した最近の海溝型地震について地震前と GPS 変位について詳細に調べ、調査し、従来の研究ではあまり指摘のなかった前兆すべりに関連する変位の有無を確認する。

本研究では 2003 年 9 月 26 日に発生した十勝沖地震 (M8.0) と 2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震 (M9.0) に関して調査を行った。

GPS 変位データの短周期解析より、2003 年 9 月 26 日の十勝沖地震 (M8.0) では本震の 1 日前に前兆すべりを示唆する結果が得られた。2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震 (M9.0) では、本震の 2 日前から東方向の変位が卓越した。ただし、前震に相当する 9 日の M7.3 の co-seismic な変動及び余効変動の影響を含有している。

そこで、東北地方太平洋沖地震に関して、GPS 変位データから長周期解析を行うと、海溝型巨大地震の発生モデルを支持するテクトニックな力が東北日本に加わっていることを示唆する結果を得ることができた。

2011年東北地方太平洋沖地震による東海地域の地殻変動への影響 Effects to the crustal movements of the Tokai region by 2011 Tohoku Earthquake

野村 晋一^{1*}, 里村 幹夫¹, 生田 領野¹, 島田 誠一², 加藤 照之³, 原田 靖⁴

NOMURA, Shinichi^{1*}, SATOMURA, Mikio¹, IKUTA, Ryoya¹, SHIMADA, Seiichi², KATO, Teruyuki³, HARADA, Yasushi⁴

¹ 静岡大学理学部地球科学科, ² 防災科学技術研究所, ³ 東京大学地震研究所, ⁴ 東海大学海洋学部

¹Department of Geosciences, Shizuoka University, ²NIED, ³ERI, University of Tokyo, ⁴School of Marine Science and Technology, Tokai University

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震は、日本全域にわたって地震時および地震後の地殻変動や地震活動の変化に大きな影響を与えた。

一方、東海地方は、プレート境界に位置し、大規模地震の発生が想定されている地域である。この地域では、東北地方太平洋沖地震の誘発地震とみられる地震も発生した。したがって、今回の巨大地震は東海地域の地殻変動にも影響を与えていると考えられる。そこで、我々はこの地震が東海地方の地殻変動に与えた影響について調べた。

東海地方には国土地理院のGEONET点と大学連合の観測点をあわせ、大変稠密なGPS観測網が設置されている。そこで、我々は、静岡県、愛知県、長野県、山梨県に亘る84点のGPSデータについて、2011年2月から9月にかけての200日間のデータを解析し、日々の座標値を求めた。解析ソフトはGAMIT ver.10.4で、基準座標系としてITRF2008を採用した。

まず地震時の変動を求め、続いて地震後の速度場とひずみ速度の変化を求めた。その結果を、以前に求めていた2005年8月から2006年12月までの結果(橋本・ほか、2010地惑連合大会要旨)と比較した。

その結果は、東北地方太平洋沖地震の前のひずみの分布と地震後のひずみの分布に明らかな違いがみられた。地震後は、静岡県北部の長野県や山梨県の県境周辺には東北地方太平洋沖地震に伴う余効変動とみられる変動が見られるほか、この北部地域と南部の御前崎周辺に明瞭な膨張域が現われ、その中間に収縮域が見られた。このことは東北地方太平洋沖地震の影響により、フィリピン海プレートの潜り込みに伴うプレートのカップリングの状態にが変化している可能性があることを示唆している。

キーワード: GPS, 地殻変動, 東海地域, 東北地方太平洋沖地震, ひずみ速度, 時間変化

Keywords: GPS, crustal movements, Tokai region, Tohoku Earthquake, strain velocity, temporal change

西南日本におけるプレート間固着と前弧スリバーの運動の推定 Plate Coupling and Deformation of Forearc Sliver in Southwest Japan

一谷 祥瑞^{1*}, 田部井 隆雄², 田中 幹人¹
ICHITANI, Shozui^{1*}, TABEL, Takao², TANAKA, Mikito¹

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

¹Graduate School of Integrated Arts and Sciences, Kochi University, ²Faculty of Science, Kochi University

フィリピン海プレートは四国南方の南海トラフより西南日本の下に沈み込んでいる。地震間にプレート境界面が強く固着し、プレート進行方向がプレート境界の走向に斜行していることにより、西南日本の地殻は北西-南東方向の弾性圧縮変形を受けながら、中央構造線 (MTL) を境に前弧スリバーが横すべり運動をしている。本研究では、国土地理院 GEONET および MTL トラバース稠密 GPS 観測データを用い、弾性圧縮変形と横すべり運動という異なる様式の地殻変動の分離を試みる。

プレート境界面上の固着分布の推定には、GEONET 座標最終解 (2004-2009 の F3 解) から求めた近畿から九州まで計 333 点の水平および上下速度を用いる。観測値には弾性圧縮変形と前弧スリバーの横すべりの運動の両方が含まれるため、最初に横すべり運動を取り除く補正を行う。MTL の走向方向に前弧スリバーのブロック運動を仮定し、これに一樣な速度を与える。速度の値として 3mm/yr から 10mm/yr までを 1 mm/yr 刻みで採用する。次に、MTL の断層面上部は地表から深さ 15km まで固着していると仮定し、この面にブロック運動と同じ大きさのすべり欠損速度を与えることで、断層面固着の影響を算出する。ブロック運動と断層面固着の影響を観測値から差し引き、前弧スリバーの横すべり運動を取り除く。続いて、補正した GPS 速度場を用い、500 枚以上の三角要素で近似したプレート境界面上でのすべり欠損速度を推定する。こうして推定されたすべり欠損速度から陸上の変位速度を計算し、もとの観測値との残差を求めると、プレート間固着に起因する弾性圧縮変形が消え、MTL に沿う横すべり運動のみが現れる。このときの観測値として、GEONET 速度場に加え、四国東部 (1998-2000) と西部 (2002-2007) で行われた MTL トラバース稠密 GPS 観測の水平速度を併用する。残差には MTL 断層面上部の固着による影響とブロック運動が含まれている。残差から最初に仮定したブロック運動を取り除き、MTL 断層面上部の固着分布を推定する。最初に仮定したブロック運動速度の妥当性の評価は、推定された MTL 断層面上部のすべり欠損速度との比較によって行う。MTL では断層の地表トレスをはさんでクリープは観測されておらず、両者は基本的に一致すべきであるとの判断に基づく。本研究では、ブロック運動として 5 mm/yr を採用したとき、最適値が得られたと判断した。MTL 断層面上部のすべり欠損速度分布を見ると、四国東部では 2-4 mm/yr の純粋な横ずれを示すのに対し、四国西部では最大で約 5 mm/yr の横ずれ以外に顕著な正断層成分が認められた。

上述のモデルでは前弧スリバーのブロック運動を仮定したが、スリバー内部の弾性変形を調べるため、プレート沈み込みの影響を除去した後ひずみ分布を作成した。四国東部では東西方向の圧縮が認められるのに対し、四国西部から九州中部へかけては伸長ひずみが卓越し、伸長軸が東西から南北へと反時計回りに回転する。このようなひずみ分布と四国西部の MTL が開口成分を含むことは、前弧スリバーの横すべり運動の駆動力がプレート斜め沈み込みによる引きずりだけではないことを示している。こうしたメカニズムを解明するには、対象を四国から紀伊半島、九州にも拡大し、総合的なモデル化が必要である。

キーワード: フィリピン海プレート, 中央構造線, GPS, 南海トラフ

Keywords: Philippine Sea plate, the Median Tectonic Line, GPS, Nankai Trough

東海スロースリップの再解釈

A new interpretation of the slow slip event in the Tokai region

落唯史^{1*}, 加藤照之¹

OCHI, Tadafumi^{1*}, KATO, Teruyuki¹

¹ 東京大学地震研究所

¹ERI, Univ. Tokyo

In the Tokai region, central Japan, anomalous displacements had been detected by GEONET during the period from mid-2000 to mid-2005 and they seem to have been caused by a slow slip event (SSE) beneath the Lake Hamana and have been called as “Tokai SSE”. Previous studies introduced the Tokai SSE by the inversion of data which is the difference between the observed displacements and the displacements due to the continuous plate coupling. However, this model has no physical meaning. The present study claims that the combined effects of the slow slip events (or forward slip) and the plate coupling (or so-called back slip) should represent the state of the plate interface. In addition, the temporal change of the plate coupling has not been taken into account in the previous studies. In this study, we estimated the state of the plate interface by the geodetic inversion method without the assumption of the steady state coupling in order to estimate the temporal change of the coupling and slip process on the plate interface.

The data used in this study are the GPS data taken from the GEONET and the leveling data published by GSI for the period from July 1996 to June 2009. In order to examine the temporal change, we divided the entire period into 12 epochs. The duration of each epoch is two years and the neighboring two epochs overlap one year. The two-year averaged rate of crustal deformation are derived from the GPS data and the leveling data separately and are taken into the geodetic inversion simultaneously.

The estimated distributions of the strain accumulating and releasing areas, by which “strain accumulating area” indicates a area of slip deficit and accumulates in the continental wedge and vice versa, suggested that the whole period was able to be divided into three sub-periods depending on the emergence of the strain releasing area. The strain releasing area emerged in the period from 2000 to 2005, which is consistent with the duration of the Tokai SSE in the previous studies. The maximum value of the strain releasing was about 20 mm/yr and the depth was around 30-40 km, while the maximum value of the Tokai SSE was about 35-50 mm/yr in the previous studies. Compared with the previous studies, the present study showed that only the deeper portion of the Tokai SSE really released the strain. The total amount of the released strain was equivalent to the seismic moment of Mw ~ 6.6, while the Tokai SSE was equivalent to Mw ~ 7.0 to 7.1. Therefore the previous studies overestimated the released strain.

The spatial distribution of the interplate coupling also changed temporally, whereas the coupling of the area had been assumed to be time invariant in the previous studies. It had extended along the plate interface to a point beneath the Lake Hamana before the emergence of the strain releasing area, and then became narrower with the emergence of the strain releasing area, and then had not recover the original distribution after the end of strain releasing process. Although the distribution of coupling changed with time, the maximum value of the interplate coupling did not change; 35 mm/yr through the entire period from July 1996 to June 2009. The maximum value estimated in this study were almost the same as the maximum coupling estimated by the previous studies.

The results also revealed that the distribution of the strain releasing area well coincide with the hypocenters of the low frequency events which occurred repeatedly near the plate boundary. The previous studies inferred that the distribution of the Tokai SSE is shallower than that of the strain releasing area in the present study.

Therefore the Tokai slow slip and the low frequency events were thought to be spatially segregated. The results of present study may require a change of the view about the relationship between these two sorts of strain releasing processes, which may be important for the study of background physics.

小さく短期的な変化を検出するためのひずみ計の降水補正 (2) A rainfall correction of the strainmeter for detecting a small short-term change (2)

木村 一洋^{1*}, 露木 貴裕², 菅沼 一成², 藤田 健一²

KIMURA, Kazuhiro^{1*}, TSUYUKI, Takahiro², SUGANUMA, Issei², FUJITA, Kenichi²

¹ 気象研究所, ² 気象庁

¹Meteorological Research Institute, ²Japan Meteorological Agency

気象庁で東海地震予知に用いているひずみ計の現在の降水補正は、完全ではない。現在の降水補正は、降水による急激な変化を滑らかにしてノイズの極大を抑える効果があるものの、降水の影響を緩和的に長く引きずる傾向がある。そのような緩和的な変化の中では、小さく短期的な変化を検出することは難しい。小さく短期的な変化を検出するためには、トレンドが一定に収まっている期間ができるだけ長いことが望ましい。

降水によるひずみ計の応答は降水による荷重の影響と考え、体積ひずみ計について1層か2層の単純なタンクモデルによる降水補正を試みたところ、現在の降水補正よりも良い結果を得ることができた(木村、日本地震学会 2011 年秋季大会)。これは、タンクモデルは累積降水量の増大に伴う流失係数の増加を表現できるためである。

今回は、気象庁における土壤雨量指数の算出にも用いている3層のタンクモデルを用いた降水補正を試みた。3層のタンクモデルを構成する多数のパラメータを SCE-UA 法によって推定した。一部の観測点については、タンクモデルが複雑になったことによって、さらに良好な結果を得ることができた。ここでは、これらの結果を紹介する。

キーワード: ひずみ計, 降水補正, タンクモデル, SCE-UA 法

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

GPS データからの余効変動の除去について The removal of the postseismic crustal deformation from the GPS data

木村 一洋^{1*}, 小林 昭夫¹, 長谷川 浩²
KIMURA, Kazuhiro^{1*}, KOBAYASHI, Akio¹, Hiroshi HASEGAWA²

¹ 気象研究所, ² 気象庁

¹Meteorological Research Institute, ²Japan Meteorological Agency

気象庁では東海地震予知のために国土地理院の GPS データを面的監視手法 (小林,2007) によって監視し、地震防災対策強化地域判定会の資料として HP 等で公表している。GPS データは、保守作業に伴うオフセットや地震によるオフセット、定常トレンド、その他異常と思われるデータはあらかじめ除去している。しかし、東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0) の発生に伴い大きな余効変動が生じたため、GPS データを監視できない状況に陥った。余効変動の影響は長期間に渡って継続するが、今起きている現象を監視するにはこの余効変動を除去することが必要である。そのため、余効変動の推移を示すパラメータを早い段階で求めることを試みた。

余効変動の推移には指数関数と対数関数を組み合わせる式を用いた。調査期間の 30 日階差の合計が最小になるように SCE-UA 法でパラメータの推定を行った。2003 年十勝沖地震と 2011 年東北地方太平洋沖地震について、この方法による結果を紹介する。

キーワード: GPS, 余効変動, SCE-UA 法

Keywords: GPS, postseismic crustal deformation, SCE-UA method

六甲高雄観測室で観測された東北地方太平洋沖地震後の短期的な透水係数の変化 Short-term Change of Permeability after Tohoku Region Pacific Coast Earthquake Observed at Rokko-Takao Station

向井 厚志^{1*}, 大塚 成昭²

MUKAI, Atsushi^{1*}, OTSUKA, Shigeaki²

¹ 奈良産業大学, ² 神戸学院大学

¹Nara Sangyo University, ²Kobe 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} オーダの歪変化がステップ状に生じたことに加え、湧水量が550ml/sから800ml/sへと増大した。気圧変化に対する湧水量変化の応答係数を求めたところ、地震前と比べて地震直後の応答係数は約1.8倍となった。その後、応答係数は約1年かけて元の値に戻りつつある。六甲高雄観測室は万福寺断層の破碎帯に位置することから、この応答係数の時間的变化は、地震動によって破碎を目詰まりさせていた泥分等が流出し、周辺岩盤の透水係数が一時的に上昇したことを反映していると考えられる。本発表では、地震前後の湧水量変化、地下水位変化および歪変化を用いて観測室近傍の破碎帯における透水係数の経年変化を推定し、泥分等の蓄積によって短期間に生ずる破碎の再封鎖の特徴について報告する。

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), N69°E方向の伸縮計3台(EX2, EX3, EX4)、湧水量計および水位計などが設置されており、0.5秒間隔および10分間隔で連続観測を実施している。1993年以降に観測された歪変化に潮汐解析プログラムBAYTAP-G (Tamura et al., 1991)を適用して潮汐歪を推定したところ、その潮汐振幅は年間数%以下の割合で経年的に変化していた。このことは、1995年兵庫県南部地震後に断層破碎帯の固着が進行し、岩盤強度が経年的に上昇しつつあることによって説明できた(向井・大塚, 2008)。

六甲高雄観測室では、定常的に約550ml/sの湧水が生じている。湧水量は、東北地方太平洋沖地震の直後に800ml/sへと増大したが、その後、数日程度の時定数で300ml/sまで減少し、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。そのため、周辺岩盤の伸張に伴う間隙水圧の低下が生じ、地震後に湧水量が減少したものと考えられる。一方、地震直後に生じた急激な湧水量の増大は、地震動によって破碎を目詰まりさせていた泥分等が流出し、周辺岩盤の透水係数が上昇したことに起因する可能性がある。

気圧の低下で湧水量が増大する場合を正として、気圧変化に対する湧水量変化の応答係数を求めたところ、東北地方太平洋沖地震前の2010年における応答係数は+3.4ml/s/hPaとなった。気圧が低下することによって周辺岩盤から地下水が吸い出され、湧水量が増大していることがわかる。2011年3月12日以降に観測された湧水量変化にBAYTAP-Gを適用して、応答係数の時間的变化を推定した。このとき、90日間の解析区間を67日ずつ移動させながら、計4区間で応答係数を推定した。第1区間である地震直後の応答係数は+6.1ml/s/hPaと求められた。この大きな応答係数は、上記で述べた地震直後の湧水量増大の原因と同様に、地震に伴い周辺岩盤の透水係数が上昇したことに起因すると考えられる。その後、応答係数は時間経過とともに低下し、2011年末には+4.0ml/s/hPaまで回復した。このことは、約1年という短い期間で破碎内に泥分等が再び蓄積し、目詰まりを起こさせて透水係数の低下を引き起こしたことを示唆する。こうした破碎内での泥分等の蓄積が破碎帯の回復過程への発端となり、歪観測値から推定された岩盤強度の経年的な上昇を引き起こすことになるものと考えられる。

キーワード: 湧水量, 歪, 透水係数, 東北地方太平洋沖地震

Keywords: groundwater discharge, strain, permeability, The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

様々なボアホール型多成分歪計に対する原位置キャリブレーション In-situ calibration for various multi-component borehole strainmeters

松本 則夫^{1*}

MATSUMOTO, Norio^{1*}

¹産総研地質

¹GSI, AIST

産業技術総合研究所では、四国・紀伊半島・東海地域の14地点で東南海・南海地震予測研究のために地下水位や地殻変動の観測を継続している。これらの観測点にはボアホール型の石井式多成分歪計や Gladwin Tensor Strain Meter(GTSM)が設置されている。また、いくつかの活断層の近傍などでアナログ式の石井式多成分歪計や坂田式歪計での観測を行っている。ここでは、これらのさまざまなボアホール型多成分歪計に対する原位置におけるキャリブレーション結果とその妥当性の評価について報告する。

原位置キャリブレーションは潮汐に対する歪データの応答と理論潮汐を用いた松本・他(2010)と同じ方法を用いた。理論潮汐のうち海洋潮汐加重の影響については、Kamigaichi(1998)による埋設深度ごとの荷重グリーン関数とその荷重グリーン関数を使用できる改良 GOTIC2 プログラムを用いた。長周期歪波形やキャリブレーション行列の対角成分・非対角成分を用いて原位置キャリブレーションの妥当性を検討した。

石井式歪計については、11観測点すべてにおいて原位置キャリブレーションが妥当におこなわれたことがわかった。GTSMの原位置キャリブレーション結果については、1観測点では妥当で、3観測点ではキャリブレーション手法の改善および検討が必要であることがわかった。アナログ式の石井式多成分歪計や坂田式歪計の原位置キャリブレーション結果についても評価を行った。

キーワード: 歪計, 原位置キャリブレーション

Keywords: strainmeter, in-situ calibration

水準測量から推定される 1972 年から 2009 年の紀伊半島の地殻上下変動 Vertical crustal deformation in Kii Peninsula from 1972 to 2009 deduced from leveling data

小林 昭夫^{1*}

KOBAYASHI, Akio^{1*}

¹ 気象庁気象研究所

¹ Meteorological Research Institute

南海トラフ沿いでは浜名湖付近や豊後水道で長期的スロースリップイベント (SSE) が GPS により観測されており、小規模な長期的 SSE は四国西部や四国中部でも見つかっている。また、南海トラフのプレート沈み込み帯に沿って深部低周波微動の震源が分布しており、その活発化に伴っていくつかの地域では短期的 SSE による地殻変動も観測されている。これら長期的および短期的 SSE の発生域は、将来の巨大地震発生に向けて歪が蓄積されているプレート境界の固着域に隣接しており、その過去からの発生状況を把握することは、南海トラフ沿いの巨大地震の発生予測のための重要な情報となる。

過去の地殻変動を調査する手段として、水準測量は観測精度が高いが実施頻度が低い。潮位記録は海況の影響除去が難しいために水準測量より地殻変動の観測精度は悪いが、連続記録でありイベントの時期の特定には有力な情報を提供する。これらを組み合わせることにより、過去に発生した非正常なイベントによる地殻変動の場所と時期を推定できる可能性がある。これまで、四国西部や四国中部の水準測量と潮位観測から、豊後水道地域の繰り返し長期的 SSE などを推定した。ここではまず水準測量の解析により、紀伊半島の過去の地殻変動について調査した。

最近の GPS の上下変動データから定常的な地殻上下変動速度を推定し、それを水準測量結果による各測量間の上下変動から差し引くことにより、各期間に発生した非定常的な地殻変動を抽出する。GPS データは国土地理院 GEONET の日座標値 F3 解を使用した。GEONET 観測点のアンテナ交換などに伴う人為的要因によるオフセットは、国土地理院 Web ページで公開されているデータセットを用いて補正した。ここでは 1997 年 1 月から 2000 年 1 月および 2007 年 1 月から 2010 年 1 月のデータから定常的な地殻上下変動速度を推定した。この期間には紀伊半島の地殻上下変動に影響を与えるイベントは発生していない。

四国の地殻上下変動には 1970 年頃まで南海地震の余効変動が見られたため、紀伊半島についても 1972 年以降について調査した。水準路線により測量実施時期は多少異なるが、全国改測に合わせて数年に一度の測量が実施されている。水準測量データは地殻活動観測データ総合解析システム (INCA) [鷲谷・他 (2003)] および地震予知連絡会会報から入手した。GPS から推定された定常的な地殻上下変動速度に測量期間の長さに乗じた変化量を、水準測量間の地殻上下変動から差し引く。期間中に非定常な地殻変動が発生していなければ、上下変動の分布はゼロを中心とするばらつきの範囲内に入るはずである。

1972.0 - 1979.6 年の期間には、明らかに潮岬付近をピークとする隆起が見られ、1944 年東南海地震または 1946 年南海地震の余効変動が継続している。続く 1979.6 - 1983.5 年の期間にも値は小さいが潮岬付近の紀伊半島南部が隆起、北部が沈降の傾向が続いている。このことから、1944 年東南海地震または 1946 年南海地震の余効変動は紀伊半島付近では四国よりも長く 1980 年代初めまで継続していたことがわかる。1983.5 - 1989.9 年、1989.9 - 2000.9 年、2000.9 - 2009.0 年のいずれの期間にも、ばらつきの範囲を超える非定常な上下変動域は見られない。紀伊半島付近では水準測量では検出できない小規模な長期的 SSE は発生しているかもしれないが、少なくとも豊後水道や浜名湖付近で発生したと同程度の長期的 SSE は 1972 年以降には発生していないようである。

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

キーワード: 水準測量, 地殻上下変動, 紀伊半島

Keywords: leveling, vertical crustal movement, Kii Peninsula

Hi-net 高感度加速度計による傾斜変動データの原位置キャリブレーション In-situ calibration of NIED Hi-net tiltmeter data

木村 武志^{1*}, 廣瀬 仁², 松本 則夫³, 上垣内 修⁴

KIMURA, Takeshi^{1*}, HIROSE, Hitoshi², MATSUMOTO, Norio³, Osamu Kamigaichi⁴

¹ 防災科学技術研究所, ² 神戸大学大学院理学研究科, ³ 産業技術総合研究所, ⁴ 気象庁

¹National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, ²Graduate School of Science, Kobe University, ³National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, ⁴Japan Meteorological Agency

防災科学技術研究所が展開する高感度地震観測網 Hi-net の各観測点に併設された、高感度加速度計水平成分（傾斜計）による傾斜変動データは、西南日本の沈み込み帯深部で深部低周波微動を伴い繰り返し発生するスロースリップイベント [例えば, Obara et al., 2004] の微小な地殻変動を捉えるなど、地殻活動の研究やモニタリングにとって重要な記録を提供している。これらの震源モデルの推定やモニタリングを精度良く行う為には、得られる傾斜変動データの振幅値について原位置で確認することは重要である。本研究では松本・他 [2010] と同様に、潮汐応答成分を用いた傾斜変動データの原位置キャリブレーションを行う。

キャリブレーションは、M2, O1 分潮の振幅・位相について傾斜変動データから得られる値と理論潮汐の値を比較することにより行う。まず傾斜変動データから BAYTAP-G [Tamura et al., 1991] を用いて、地球潮汐の M2, O1 分潮の振幅・位相を推定する。理論振幅・位相については、GOTIC2 [Matsumoto et al., 2001] を用いて計算する。ただし、海洋潮汐荷重の応答成分については、Kamigaichi [1998] によるセンサー埋設深度を考慮した荷重グリーン関数を用い、この荷重グリーン関数が使用できるよう上垣内により改良された GOTIC2 を用いる。

四国の Hi-net 観測点 31 点についてキャリブレーションを行った。ここでは 2009 年から 2010 年の各観測点・成分の傾斜変動データに対して、データ長 90 日間の解析区間（移動幅 1 日）に BAYTAP-G を適用し、得られた振幅・位相の平均値を観測値とした。観測振幅値は理論値の 0.7-1.5 倍であり、松本・他 [2010] による紀伊半島の産業技術研究所の観測点に関する結果と調和的である。また、位相の差はほとんど無く、汐見・他 [2003] によるセンサー設置方位の補正値が適当であると言える。ただし、三崎観測点については、南北成分の観測振幅値が理論値の 0.4 倍、M2 分潮の位相差が約 50 °となり、他点と比べると差が大きかった。三崎観測点は海岸線の非常に複雑な佐田岬半島に位置するため、海洋潮汐荷重の影響を適切に見積もれていないことがこの差異の原因と考えられ、今後検討が必要である。

キーワード: 傾斜変動データ, 原位置キャリブレーション, Hi-net

Keywords: ground tilt data, in-situ calibration, Hi-net

Search for Creep Signals along the Sagaing Fault Using ALOS/PALSAR Interferometry Search for Creep Signals along the Sagaing Fault Using ALOS/PALSAR Interferometry

古屋 正人¹, 孫 碩帥^{1*}

FURUYA, Masato¹, SUN, Shuoshuai^{1*}

¹ 北海道大学大学院理学院自然史科学専攻

¹Department of Natural History and Sciences, Hokkaido University

Sagaing fault is known as a ~1000 km continental transform fault between the India and Sunda plates, and it is one of the great right-lateral strike-slip faults of Southeast Asia. As slip rate is the important aspect of Sagaing fault, during the past 30 years, seismologists did their best to estimate the slip rate in order to get a close value. The value of slip rate estimated from 35.4 mm/yr by Curray et al. (1982) to 18.5 mm/yr suggested by Myint Thein et al. (1998) changes by different seismologists. Since GPS become useful around 21st century, Vigny et al. (2003) used two years GPS observations to estimate 18 mm/yr of elastic deformation across the central Sagaing fault, and Meade (2007) estimated the rate using GPS observations in a block model which suggests that the strike-slip rate between the Indian and Southeast Asian Plate is 17 and 49 mm/yr at across the central and northern Sagaing fault, respectively.

Whereas InSAR is a powerful technique to map the Earth's surface deformation, to our knowledge, no previous studies have been performed along the Sagaing fault, presumably because shorter-wavelength SAR data did not allow preserving interferometric coherence over the densely vegetated regions. The L-band ALOS/PALSAR, however, could keep good coherence even in vegetation, so that we can map out the surface deformation if the fault is deforming with detectable amplitude. As a preliminary study, we applied InSAR technique to such PALSAR data pairs that span 2-3 years if the fault is undergoing creeping signals like found along the San Andreas Fault in the US west coast.

Keywords: creeping signals, right-lateral, strike-slip, slip rate, InSAR

稠密な GPS 連続観測で得られた別府島原地溝帯およびその周辺での地殻変動 Crustal deformation in and around Beppu-Shimabara Graben by continuous dense GPS Network

中尾 茂^{1*}, 松島 健², 大倉 敬宏³

NAKAO, Shigeru^{1*}, MATSUSHIMA, Takeshi², OHKURA, Takahiro³

¹ 鹿児島大学大学院理工学研究科, ² 九州大学大学院地震火山観測研究センター, ³ 京都大学大学院火山研究センター

¹GSSE, Kagoshima Univ., ²SEVO, Kyushu Univ., ³AVL, Kyoto Univ.

Beppu-Shimabara Graben located in central Kyushu. In this area, there is north-south extension field. It is important to study the crustal deformation in this area to research tectonics in Kyushu district. We started 20 continuous GPS observation added to GEONET sites from 2009 in and around Beppu-Shimabara Graben.

GPS data observed at our stations, GEONET and 15 IGS sites are analyzed by Bernese GPS Software Ver. 5.0 (Dach et al., 2007) with IGS precise orbit and Earth rotation parameters. We can get daily coordinates of the sites (Nakao, et al., 2010).

Displacement velocities, which are coefficient of linear trend, are estimated by least squares method.

When these velocities, which are relative to 960688 GEONET site, plotted, clear boundary can see. 960688 GEONET site is located in the northern part of Kyushu. The displacement velocities of northern part from this boundary, where fixed site 960688 is located, are almost zero. On the other hand, those of southern part are from several to 10 mm. This boundary is from the northern part of Beppu Bay to Uki City in Kumamoto Prefecture via Aso Volcano. There are a lot of active faults on this boundary. The western part of this boundary seems the south boundary of Beppu-Shimabara Graben. However, the eastern part is not the south boundary but the north boundary.

There is the clear boundary of crustal deformation in Beppu-Shimabara Graben..