

## 深部低周波微動の活動様式に見られる特徴 Activity style of nonvolcanic tremor in southwest Japan

小原 一成<sup>1\*</sup>, 松澤 孝紀<sup>2</sup>, 田中 佐千子<sup>2</sup>, 前田 拓人<sup>1</sup>  
Kazushige Obara<sup>1\*</sup>, Takanori Matsuzawa<sup>2</sup>, Sachiko Tanaka<sup>2</sup>, Takuto Maeda<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 防災科学技術研究所

<sup>1</sup>ERI, Univ. of Tokyo, <sup>2</sup>NIED

西南日本や Cascadia などの沈み込み帯では、巨大地震震源域より深部のプレート境界でスロー地震、つまり短期的スロースリップイベントと深部低周波微動などがカップルした現象が生じていることが知られている。このスロー地震現象は、西南日本では全長約 600km、Cascadia では約 1200km の範囲に渡って帯状に分布するが、活動様式の違いからいくつかのセグメントに分けることができ、それぞれのセグメントで数ヶ月～数 10 カ月の固有の周期で繰り返し発生し、セグメント内での移動や隣接セグメント間での連動が観測されている。スロー地震のこのような活動様式は、巨大地震の発生仕方ともよく似ており、頻繁に発生するスロー地震の活動様式を支配する要因を明らかにすることは、巨大地震発生の理解にも重要である。そのような観点で、スロー地震の中で最も検出・決定精度の高い深部低周波微動を取り上げ、活動様式、とくにセグメンテーションに関する特徴について、クラスタリングカタログ (Maeda and Obara, 2009, Obara et al., 2010) に基づいて整理した。

微動分布は帯状領域の中でも一様ではなく、沈み込むプレート形状の走向方向に大きく変化し、活動の空白域が随所に存在する。紀伊水道や伊勢湾などの明瞭な空白域はセグメント境界として振舞うが、四国東部と中部の微動クラスター間に存在する空白域では、その両側に発生する微動活動が空白域を挟んで時空間的に連続するなど、微動を伴わずにすべりが連続的に伝播していることを示す (Obara et al., 2011)。セグメントは、ほぼ固有の周期で繰り返す微動エピソードの活動範囲で定義されるが、しばしば微動エピソードがセグメント全域を破壊するには至らず、その一部のみにとどまることがあり、このような中・小規模エピソードが短期間のうちに相次いで発生することによってセグメント全域をカバーする。これらの中・小規模エピソードはそれぞれ棲み分けており、あとから発生する微動エピソードの活動範囲を規定する。ただし、その活動開始点は、直前の微動エピソードの移動の停止点とは一致しないことが多い。したがって、微動の移動、つまりスロースリップの破壊の進展によってその先に応力集中することよりも、セグメントの随所で破壊しやすい状態となり、最も弱い場所から破壊が始まるものと考えられる。

これらの中・小規模エピソードはその都度破壊領域が変化するが、ある程度固定した範囲に起きる場合がある。それをサブセグメントと呼ぶことにすると、サブセグメントの境界は、微動活動が定常的に発生している sweet spot に対応する。この sweet spot は上述の活動の開始点になることも多く、プレート境界面上の不均質性が強い場所がスロースリップイベントの破壊の開始及び停止を規定する役割を有することを示している。

この研究は、科学研究費助成事業基盤研究 (A)「沈み込みプレート境界遷移領域におけるすべり特性の解明」によって実施されている。

キーワード: 深部低周波微動, スロー地震, 沈み込み帯, 震源移動, セグメンテーション

Keywords: non-volcanic tremor, slow earthquake, subduction zone, source migration, segmentation

## 西南日本における深部低周波微動の移動速度の空間依存性

### Spatial dependency of migration velocities of non-volcanic low frequency tremor active area at southwest Japan

武田 直人<sup>1\*</sup>, 今西 和俊<sup>1</sup>, 安藤 亮輔<sup>1</sup>

Naoto Takeda<sup>1\*</sup>, Kazutoshi Imanishi<sup>1</sup>, Ryosuke Ando<sup>1</sup>

<sup>1</sup>産総研, 活断層・地震研究センター

<sup>1</sup>AIST, GSJ

西南日本の沈み込み帯の深部低周波微動(LFT)は九州・豊後水道付近から長野県南部まで帯状に分布しているが、数日以上継続する大きめのLFT活動においては約10km/dayの速度でその活動域がフィリピン海プレートの走向方向に移動していくことが知られている(例えばObara 2010)。その移動の様子は、細かい空間スケールで見えていくと移動の向きや速度の変化、プレートの沈み込み方向への動きが加味されるなど、その振る舞いは単純ではないが、おおまかにいくつかのパターンに分類されている(Obara 2010, Obara et. al. 2011)。

LFTの移動速度の空間的变化は、プレート上の摩擦特性等に依存している事が示唆されており(Ando et. al. 2012, Gosh et. al. 2012)、移動速度の空間分布の特徴から摩擦特性などの知見が得られる可能性がある。本報告では、LFTの移動速度を推定し、活動場所との関係について整理した。エンベロープ相関法によるLFT震源カタログを用い、2008年7月以降の約4年半の数日以上継続する大きめのLFT活動域の移動速度を抽出した。前述のとおり個々のLFT活動の全体的な移動パターンは様々な様相を示すが、同じ方向に伝播する場合を比べると、領域毎に速度のばらつきは小さいことが明らかになった。

#### 参考文献

Ando, R., N. Takeda, and T. Yamashita (2012), Propagation dynamics of seismic and aseismic slip governed by fault heterogeneity and Newtonian rheology. *J. Geophys. Res.*, 117, B11308, doi:10.1029/2012JB009532.

Gosh, A., J. E. Vidale, and K. C. Creager (2012), Tremor asperities in the transition zone control evolution of slow earthquake. *J. Geophys. Res.*, 117, B10301, doi:10.1029/2012JB009249.

Obara, K. (2010), Phenomenology of deep slow earthquake family in southwest Japan: Spatiotemporal characteristics and segmentation. *J. Geophys. Res.*, 115, B00A25, doi:10.1029/2008JB006048.

Obara, K., T. Matsuzawa, S. Tanaka, T. Kimura, and T. Maeda (2011), Migration properties of non-volcanic tremor in Shikoku, southwest Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L09311, doi:10.1029/2011GL047110.

謝辞: 本研究において、防災科研 Hi-net, 気象庁, 東京大学の連続地震波形データを使わせていただきました。記して、感謝いたします。

キーワード: 深部低周波微動, 移動, 沈み込み帯, 不均質構造

Keywords: Non-volcanic low frequency tremor, migration, subduction zone, fault heterogeneity

## 西南日本における深部非火山性微動の規模別頻度分布の空間的変動 Spatial variation in size distribution of deep non-volcanic tremor in southwest Japan

岸本 剛<sup>1\*</sup>, 須田 直樹<sup>1</sup>

Tsuyoshi Kishimoto<sup>1\*</sup>, Naoki Suda<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 広島大院理

<sup>1</sup>Hiroshima Univ.

西南日本などの沈み込み帯で発生する深部非火山性微動では、規模を表す Reduced Displacement (RD) (Aki and Koyanagi, 1981) の頻度分布は指数分布に従うことが示されている (Hiramatsu et al. 2008)。一方、通常の地震では規模の頻度分布はべき分布に従い、マグニチュードに関してグーテンベルグ・リヒター則 (GR 則) が成り立つ。この GR 則の傾きを表す  $b$  値は、震源域の差応力状態を反映する (Schorlimmer et al. 2005) ことなどが報告されており、地震発生域に関する重要な情報を与える。このことから微動の場合の指数分布の傾きも、プレート境界面上の微動発生域の情報を与えると考えられる。本研究では、西南日本で発生する微動について RD 値の指数分布の傾きの空間分布図を作成し、その空間的変動を微動クラスターごとに調べた。

データには JDXnet で配信されている西南日本の Hi-net・気象庁・東大地震研・京大防災研・高知大学・九州大学の観測点データを使用した。広島大学の微動自動モニタリングシステム (ATMOS) (Suda et al. 2009) のソフトウェアを用いて微動の検出と震源決定を行い、RD 値を計算した。そして宇津 (1965) の式を用いて 1 km 間隔のグリッドごとに傾きを推定し、その空間分布図を作成した。その際、最小 RD 値は Wiemmer and Wyss (2000) の手法を用いて決定した。また誤差推定にはブートストラップ法を用いた。

微動発生域において指数分布の傾きは空間的に不均質であり、およそ 100~400 の範囲で変動していた。また、微動クラスターごとに傾きを見ると、特に四国西部、四国東部、紀伊半島のそれぞれで、傾きと微動クラスターの活動間隔に負の相関が見られた。これは微動の活動間隔が長いクラスターほど規模の大きな微動が相対的に多く発生していることを意味する。微動はプレート境界面上に分布する多数の微小なパッチの破壊であると考えられている (Ito et al. 2007)。また、室内実験の結果からは、静止時間が長いほど小さなパッチの成長や結合などにより、サイズの大きなパッチができることが分かっている (Dieterich and Kilgore, 1994)。このことから、従って、規模の大きな微動と小さな微動の割合を示す値である指数分布の傾きと活動間隔の関係は、境界面上でのパッチの結合などによるパッチサイズの分布の時間変化を示している可能性がある。

キーワード: 深部非火山性微動, 規模別頻度分布

Keywords: non-volcanic tremor, size distribution

## 深部低周波微動深さ推定の新手法 A New Method to estimate the tremor depth accurately

矢部 優<sup>1\*</sup>, 井出 哲<sup>1</sup>  
Suguru Yabe<sup>1\*</sup>, Satoshi Ide<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地球惑星科学専攻  
<sup>1</sup>The University of Tokyo, EPS

深部低周波微動は環太平洋の沈み込み帯を中心に多くの場所で見ついている。微動の発生を理解する上で、微動の震源を正確に求め、特にプレート境界面上、海洋地殻内、上盤のどこで起きているかを明らかにすることは重要な課題である。しかし、微動のシグナルは小さいため、普通の地震に用いられる(P波とS波の到達時刻を読み取る)方法を適用することは難しい。そこで代わりにエンベロープ相関法(e.g., Obara, 2002)や matched filter 法(e.g., Shelly et al., 2007)がよく用いられるが、これらの方法による位置推定の正確性は詳細な検討を行うには不十分である。

本研究では、微動の深さを正確に求めるための新たな手法を考案した。この方法では鉛直成分の速度波形と微動のモーメントレート関数を比較することで、微動のS-P時間を得ることができる。微動のモーメントレート関数は微動のエネルギーレート関数で近似することができ、エネルギーレート関数は速度波形の二乗に比例する。この方法は、微動のグリーン関数をも明らかにできる可能性があり、それにより微動の震源メカニズム解を得ることができる可能性もある。

キーワード: 沈み込み帯, 深部低周波微動, S-P 時間  
Keywords: Subduction Zones, Tectonic Tremors, S-P times

## Non-volcanic tremor characteristics in Taiwan and their stress interaction with local earthquakes

## Non-volcanic tremor characteristics in Taiwan and their stress interaction with local earthquakes

Kevin Chao<sup>1\*</sup>, Kazushige Obara<sup>1</sup>, Hsin-Chieh Pu<sup>2</sup>, Ya-ru Hsu<sup>3</sup>, Aaron Wech<sup>4</sup>, Zhigang Peng<sup>5</sup>

Kevin Chao<sup>1\*</sup>, Kazushige Obara<sup>1</sup>, Hsin-Chieh Pu<sup>2</sup>, Ya-ru Hsu<sup>3</sup>, Aaron Wech<sup>4</sup>, Zhigang Peng<sup>5</sup>

<sup>1</sup>ERI, the University of Tokyo, <sup>2</sup>Central Weather Bureau, Taiwan, <sup>3</sup>Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, Taiwan, <sup>4</sup>Victoria University of Wellington, Wellington, New Zealand, <sup>5</sup>School of Earth and Atmospheric Sciences, Georgia Institute of Technology, USA

<sup>1</sup>ERI, the University of Tokyo, <sup>2</sup>Central Weather Bureau, Taiwan, <sup>3</sup>Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, Taiwan, <sup>4</sup>Victoria University of Wellington, Wellington, New Zealand, <sup>5</sup>School of Earth and Atmospheric Sciences, Georgia Institute of Technology, USA

Recent findings of tremor in Taiwan have shown it to be an ideal region in which we can study the relationship between tremor and earthquakes. Although several studies (Chao et al., GJI, 2012; Chao et al., SSA Meeting, 2011) have identified triggered and ambient tremor beneath the southern Central Range of Taiwan, a number of fundamental characteristics of tremor in Taiwan remain unclear. In this study, we auto-detected eight-year (2004~2011) continuous seismic waveforms and obtained tremor episodes under the southern Central Range using the Waveform Envelope Correlation and Clustering (WECC) method and a spatio-temporal clustering criterion. We also quantified tremor activity before and after the local 4 March 2010, Mw6.3 Jiashian earthquake, the hypocenter of which is located about 30 km away from active tremor sources, and the 2010 Mw8.8 Chilean earthquake, which occurred six days before the Jiashian mainshock. This special dataset provides a means of studying the relationships among ambient tremor, triggered tremor, and local and regional earthquakes.

Analysis of the data shows that ambient tremor in the southern Central Range of Taiwan is characterized by frequent recurrence of short duration (5~24 min. per day); however, unlike other subduction environments, the Nankai tremor zone exhibits a continuous occurrence of tremor episodes from a period of hours to days. The analysis also shows that ambient tremor in Taiwan surrounds an active triggered tremor source and that its spectrum is similar to that of triggered tremor, but with lower amplitude, which confirms the theory that triggered tremor is a sped-up result of ambient tremor. We found that background noise in this region during the local daytime period exhibits larger amplitude than that of ambient tremor, implying that if we employ borehole seismometers in the study region, we should be able to detect more tremor episodes. Our findings also show that maximum tremor activity occurred within ten days after the Jiashian mainshock, indicating a static stress interaction between the tremor rate and locally occurring earthquakes, and that tremor rate gradually returned to its previous status six months after the mainshock. Although the dynamic stress from the Chilean earthquake exceeded the tremor-triggering threshold of 8-9 kPa in Taiwan, it neither triggered tremor nor influenced local seismicity. The study found no evidence that significant change in tremor activity correlated with that of the Chilean earthquake or local seismicity. Finally, we examined potential slow slip events in nearby regions with geodetic observations from GPS data and found no direct evidence of a connection between the GPS observations and tremor episodes. Our investigation of ambient tremor in Taiwan can lead to more thorough understanding of tremor-generated zones and geological structures in this region.

キーワード: non-volcanic tremor, dynamics and static triggering, Taiwan, tectonic tremor

Keywords: non-volcanic tremor, dynamics and static triggering, Taiwan, tectonic tremor

## 無限弾性体中の平面ポアズイユ流れの線形安定性と火山微動 Linear stability of plane Poiseuille flow in infinite elastic medium and volcanic tremors

櫻庭 中<sup>1\*</sup>, 山内 初希<sup>2</sup>

Ataru Sakuraba<sup>1\*</sup>, Hatsuki Yamauchi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻, <sup>2</sup> 東京大学理学部地球惑星物理学科

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo, <sup>2</sup>Department of Earth and Planetary Physics, University of Tokyo

火山微動の発生メカニズムへの応用を目的として、2つの半無限弾性体に挟まれた圧縮性流体の平面ポアズイユ流れの線形安定性を考察した。これまでの研究では、流体層の厚さが広がったり狭まったりする対称モードにおいては、流体および固体の運動の波長が非常に長い場合、系が不安定化するために必要な流れの速さがいくらかでも小さくなりうることが知られていた (Balmforth et al., 2005; Dunham and Ogden, 2012)。われわれは、同様の不安定現象が、流体層の厚さがほとんど変化しない反対称モードでも起こることを見いだした。反対称モードの不安定では、不安定化するために必要な流れの速さが対称モードのときよりも小さく、波の伝搬方向は主流の向きと逆向きである。さまざまなパラメータのもとで、圧縮性ポアズイユ流れが不安定になるための臨界マッハ数を計算した結果、われわれは反対称モードの不安定のほうが火山微動の原因としてよりふさわしいと結論した。

キーワード: 流体力学, 弾性体力学, 流れ誘起振動, 弾性表面波

Keywords: fluid dynamics, dynamics of elasticity, flow-induced vibration, elastic surface wave

## 東北地方太平洋沖地震に先行したプレート間固着のゆるみとそれに起因する地震活動の長期静穏化

### Long-term seismic quiescence caused by partial decoupling of the plate boundary prior to the 2011 Tohoku earthquake

勝俣 啓<sup>1\*</sup>

Kei Katsumata<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 北大・地震火山センター

<sup>1</sup> Hokkaido University

Katsumata(2011)は、2011年東北地方太平洋沖地震(M=9.0)が発生する23年前から地震活動の長期静穏化が起きていたことを明らかにした。解析には気象庁の一元化震源カタログを用いた。1965年から2010年までに発生したM4.5以上、深さ60以浅の地震5770個を選択し、ZMAPで解析した。その結果、本震で最もすべり量の大きかった領域の深部側で、1988年頃から本震発生までの23年間に渡り、地震発生率が低下していたことが分かった。発生率は3.0個/年から1.5個/年に低下していた(減少率50%)。また、Ozawa et al. (2012)は、1994年から2011年までのGEONETのデータを解析し、2003年以降、東北地方太平洋沖地震の震源域付近では、プレート間固着にゆるみが生じていたことを明らかにした。固着率は最大で50%程度低下していた。本研究では、Katsumata(2011)の地震活動静穏化領域とOzawa et al.(2012)の固着のゆるみ域とがほぼ一致することを指摘し、固着のゆるみが地震活動の静穏化を引き起こしたという仮説を提唱する。

Katsumata, K., A long-term seismic quiescence started 23 years before the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (M = 9.0), *Earth Planets Space*, Vol. 63 (No. 7), pp. 709-712, 2011.

Ozawa, S., T. Nishimura, H. Munekane, H. Suito, T. Kobayashi, M. Tobita, and T. Imakiire (2012), Preceding, coseismic, and postseismic slips of the 2011 Tohoku earthquake, Japan, *J. Geophys. Res.*, 117, B07404, doi:10.1029/2011JB009120.

キーワード: 2011年東北沖地震, 地震活動静穏化, スロースリップ

Keywords: 2011 Tohoku earthquake, seismic quiescence, slow slip

## 短期的SSEの客観検出とカタログ化 Objective detection and catalog of short-term SSE

板場 智史<sup>1\*</sup>, 松本 則夫<sup>1</sup>, 大久保 慎人<sup>2</sup>, 木村 武志<sup>3</sup>  
Satoshi Itaba<sup>1\*</sup>, Norio Matsumoto<sup>1</sup>, Makoto OKUBO<sup>2</sup>, Takeshi Kimura<sup>3</sup>

<sup>1</sup>産総研 活断層・地震研究センター, <sup>2</sup>東濃地震科学研究所, <sup>3</sup>防災科学技術研究所

<sup>1</sup>Geological Survey of Japan, AIST, <sup>2</sup>Tono Research Institute of Earthquake Science, <sup>3</sup>National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

産業技術総合研究所(産総研)では、四国～東海地方において地下水等総合観測網を展開し、地下水・歪・傾斜・地震等の観測を行っている。これらのデータに加えて、防災科学技術研究所(防災科研)が整備した高感度地震観測網 Hi-net に併設されている高感度加速度計で取得される傾斜データ、東海地方における気象庁の多成分・体積歪データを統合解析して、短期的スロースリップイベント(SSE)をモニタリングしている。現状では、短期的SSE発生の有無や期間は、基本的に深部低周波微動や、鉛直方向の地震計アレイによるセンブランス値などを手がかりとして、目視で判断している。プレート境界の固着域深部側～遷移領域の固着・すべり状態や、短期的SSEの発生間隔等を把握することは、プレート境界大地震の短期～中期予測や規模予測に有効であると考えられるが、現状では特に小規模の活動について見落としがあると考えられる。

板場ほか(2012)は、ボアホール歪計の冗長成分(4つの水平歪センサー)を用いて、多成分歪観測データからテクトニックな変動に伴う歪変化を抽出する手法を開発し、紀伊半島における短期的SSEにともなう歪変化の客観検出に有効であることを示した。そこで本研究では、この手法をチューニングした上で、複数の観測点でテクトニックな変動を検出したイベントに対して短期的SSEのすべりモデルを推定した。

本講演では、いくつかの地域における検出結果、短期的SSEのすべりモデルや特徴を紹介し、短期的SSEカタログ化に向けた取り組みについて紹介する。

キーワード: 短期的スロースリップイベント, 歪, ボアホール歪計, 傾斜, 地下水, 深部低周波微動

Keywords: short-term SSE, strain, borehole strainmeter, tilt, groundwater, tremor

## 日向灘と相模トラフにおける GNSS データによる短期的スロースリップイベントの検出

### Detection of short-term slow slip events along Hyuganada and the Sagami trough using GNSS data

西村 卓也<sup>1\*</sup>Takuya NISHIMURA<sup>1\*</sup><sup>1</sup> 国土地理院<sup>1</sup> Geospatial Information Authority of Japan

#### はじめに

西村・他(2012)は、GNSS データ時系列に含まれる地殻活動に伴うオフセットを AIC により抽出し、南海トラフ沿いのフィリピン海プレート上面で発生する短期的スロースリップイベント(以下、SSE)の断層モデルを多数推定した。本公演では、西村他の手法を用いて四国西部から九州にかけての地域と東海から関東にかけての地域の GNSS データに基づき、日向灘と相模トラフに発生する短期的スロースリップイベントの検出を試みた結果について報告する。

#### データ及び解析手法

日向灘の SSE 解析には、四国西部から九州地方における 314 観測点分の日座標値(F3)データを用いた。誤差軽減を施した日座標値に対してステップ関数をフィッティングし、フィリピン海プレートの運動方向と反対方向である N135°E 方向に有意な変動が見られた日付を SSE に伴う地殻変動の候補日とする。そしてその候補日の変位量 3 成分(東西、南北、上下)に対し、インバージョンにより矩形断層モデルのパラメータ推定を行って、観測値が概ね説明出来ているイベントを SSE として認定した。その際、矩形断層を表す 9 個のパラメータのうち、深さ、走向、傾斜については、フィリピン海プレート上面の形状に合うように水平位置の関数として、残り 6 個のパラメータの推定を行った。なお、解析の対象としたのは 1996 年 7 月から 2012 年 10 月までの期間に発生した SSE である。また、相模トラフの SSE 解析には、関東から東海地方における 327 観測点分のデータを用いて N160°E 方向の変動を抽出し、同様に断層モデルの推定を行った。相模トラフの GNSS データについては、1996 年 3 月の GNSS 観測網再編以前の日座標値(畑中, 2004)を用いることにより、1994 年 8 月から 2012 年 10 月までの期間に発生した SSE を解析対象とした。

#### 結果

日向灘では、豊後水道に発生する深部低周波微動を伴う SSE の南南西延長である大分・宮崎県境付近の海岸線付近では少なくとも 8 回の  $M_w$  5.9-6.1 に相当する SSE が推定された。これより南の宮崎県延岡市以南では SSE の数が少なくなるが、2012 年 8 月 19 日頃の  $M_6.0$  程度のイベントを含め何回かの SSE が推定された。大隅半島付近より南では再び SSE の発生数が増加し、種子島近海では、最大で  $M_w$  6.2 程度の SSE に相当する変動が 5 回以上見つかった。これらは  $M_4-6$  程度の地震活動を伴う場合もある。これらの SSE の発生深度は、大分・宮崎県境付近では深さが 30km 程度であるが、より南側では深さ 10?50km の様々な深さで発生しており、四国沖では見られないプレート境界浅部における SSE も推定される。

相模トラフ沿いの房総半島勝浦沖では、1996 年 5 月、2002 年 10 月、2007 年 8 月、2011 年 10-11 月に  $M_w$  6.4-6.6 程度の SSE が発生したことが知られているが、この領域付近では多くの小規模な SSE と考えられる変動が検出された。顕著なものとしては 2009 年 12 月 18 日頃に発生した SSE で、 $M_w$  が 5.8 と推定されており、防災科研によって傾斜計データに基づき発生が指摘されているものと同様のものと考えられる。また、2007 年 4 月 14 日頃、銚子や九十九里浜周辺の時系列データに継続時間が約 2 週間で最大 4mm 程度の比較的明瞭な遷移的变化が認められた。この変動の断層モデルは、房総半島東方沖のフィリピン海プレート東縁付近に推定されるが任意性が大きく、その規模も  $M_w$  6.3-6.7 の範囲で陸域からの距離とトレードオフの関係がある。滑り方向から判断するとフィリピン海プレート上面での SSE と考えられ、本解析の中でも最大級の SSE である。これらの SSE は深さ 30km 以浅のプレート境界の比較的浅部で発生している。また、茨城県南西部や東京湾北部でも SSE が数回検出されたが、ノイズと同程度の变化であり必ずしも明瞭ではない。また、駿河湾と相模トラフの中間の神奈川県西部から山梨県では SSE と疑われるような変動は検出されなかった。

#### まとめ

顕著な非火山性微動活動が見つからない相模トラフや日向灘でも GNSS データにより多数の SSE が検出された。これらの SSE の中には群発的な地震活動を伴うものがあるが、必ずしも明瞭な地震活動の変化を伴わないものも少なくない。また、東海地方の解析においては、解析範囲を変えることによって SSE の検出頻度に大きな違いがあり、複数の結果を比較することにより SSE を誤検知していると認められる例が複数見つかった。GNSS データにおける SSE に伴う変動はほとんどがノイズと同程度であり、断層モデル推定の精度向上や継続時間を推定するためには地殻変動連続観測データ等との統合解析を進める必要がある。

キーワード: スロースリップイベント, GNSS, 地殻変動, 沈み込み帯, 日向灘, 相模トラフ

# Japan Geoscience Union Meeting 2013

(May 19-24 2013 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2013. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



SCG62-09

会場:103

時間:5月20日 11:15-11:30

Keywords: Slow slip event, GNSS, Crustal deformation, Subduction zone, Hyuganada, Sagami Trough

## スロー地震にともなう地殻変動の観測をめざした短スパン伸縮計の開発 Development of a short-span strainmeter for observation of deformation of slow slip events

加納 靖之<sup>1\*</sup>, 細 善信<sup>1</sup>, 坂 靖範<sup>1</sup>, 尾上 謙介<sup>1</sup>

Yasuyuki Kano<sup>1\*</sup>, HOSO, Yoshinobu<sup>1</sup>, Yasunori Ban<sup>1</sup>, Kensuke Onoue<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京大・防災研

<sup>1</sup> DPRI, Kyoto Univ.

紀伊半島や四国周辺では、深部低周波微動の発生域を中心に、同じ時期に地殻変動（伸縮・傾斜変化）の発生が認められている。たとえば、京都大学防災研究所の紀州観測坑での伸縮計観測では、この地殻変動は発生域に近いほど大きく、低周波微動発生域から 30?40 km の距離で、 $10^{-9}$ ? $10^{-8}$  程度のひずみ変化が数日にわたって生じることがわかっている。このひずみ変化は、地球潮汐によるひずみ変化と同程度の大きさである。このようなひずみを観測するには従来の伸縮計（横坑式あるいはボアホール式）が有効であるが、観測点数が限られており、詳細な解析には不十分である。

伸縮計による多点観測のために、安価で観測点の設置が容易な方法と計器の開発が必要である。そこで従来の数十メートルの基準尺をもつ伸縮計の技術を応用し、基準尺の長さ約 1.5 ? 2 m 程度の短スパンの伸縮計を開発した。基準尺はスーパーインバーの丸棒で、自由端（変位測定部）側で吊り枠を 1 か所設けている。変位の検出には差動トランスを使用した。安定した観測のためには、固定端および測定部を岩盤に強固に固定することが必要と考え、深さ 30 cm 程度掘削した穴に測器のステージにネジ止めしたアンカー（ステンレス棒）をモルタルで固定する方式とした。

このような短スパン伸縮計の試験機（1 成分）を製作し、京都大学防災研究所の屯鶴峯観測坑（奈良県香芝市）に設置し性能試験を実施している。この試験観測では潮汐変動が明瞭に記録され（図）、遠地震によるひずみ地震動もとらえている。基準尺長さ 1.5m 程度であっても、低周波微動にともなう地殻変動の観測が可能となることが期待される。

比較的簡便に観測点の追加が可能であることから、今後、紀伊半島西部の低周波微動発生の南端周辺にも観測点を設置し、既存の伸縮計観測点も含め、深部低周波微動の発生域をとり囲むような観測網を構築する。これらのデータから、深部低周波微動にともなう発生する地殻変動の時空間分布を把握し、その発生様式について調べる予定である。

キーワード: 伸縮計, スロー地震, アレイ観測

Keywords: strain meter, slow earthquakes, array observation

## 紀伊半島における深部低周波地震 (LFE) 発生域周辺の異方性構造 Anisotropic structures of oceanic slab and mantle wedge in a deep low-frequency tremor zone beneath the Kii peninsula

雑賀 敦<sup>1\*</sup>, 加藤 愛太郎<sup>2</sup>, 蔵下 英司<sup>2</sup>, 飯高 隆<sup>2</sup>, 大久保 慎人<sup>1</sup>, 津村 紀子<sup>3</sup>, 岩崎 貴哉<sup>2</sup>, 酒井 慎一<sup>2</sup>, 平田 直<sup>2</sup>  
Atsushi Saiga<sup>1\*</sup>, Aitaro Kato<sup>2</sup>, Eiji Kurashimo<sup>2</sup>, Takashi Iidaka<sup>2</sup>, Makoto OKUBO<sup>1</sup>, Noriko Tsumura<sup>3</sup>, Takaya Iwasaki<sup>2</sup>, Shin'ichi Sakai<sup>2</sup>, Naoshi Hirata<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東濃地震科学研究所, <sup>2</sup> 東京大学地震研究所, <sup>3</sup> 千葉大学大学院理学研究科

<sup>1</sup>Tono Research Institute of Earthquake Science, <sup>2</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo, <sup>3</sup>Graduate School of Science, Chiba University

地震波速度異方性は、地球内部構造を調べる上で重要な地震波伝播特性の1つであり、クラックのような割れ目や異方性鉱物の選択的な配向等の異方性媒質中を地震波が伝播することによって生じる。我々は紀伊半島において深部低周波地震 (LFE) 発生域周辺の構造を明らかにするため、2009年12月から2010年5月までの約半年間、LFE発生域に沿って66台の地震計からなる高密度アレイ観測を行った。地殻内地震 (~30km) とスラブ内地震 (30km~60km) の中から入射角35度以内の地震を選び、S波偏向異方性の解析を行った。2つのパラメータ (速いS波の振動方向:  $\theta$ , 速いS波と遅いS波の到達時間差:  $\Delta t$ ) を推定し、計1816個について異方性パラメータを得た。

速いS波の振動方向は、地殻内地震とスラブ内地震共に東西方向 (海溝軸に平行な方向) を示した。速いS波と遅いS波の到達時間差は、地殻内地震よりもスラブ内地震で大きくなる傾向があり、さらにスラブ内地震の中でもアレイの北側から到来する波動で大きくなる傾向が見られた。これらの結果は、異方性が上部地殻だけでなく、マントルウェッジや、下部地殻もしくはスラブ内に存在することを示唆している。地震波速度トモグラフィの結果からはマントルウェッジに蛇紋岩の存在が示唆されており、本研究によりその蛇紋岩層が異方性を示すことを明らかにした。観測されたマントルウェッジでの異方性 (到達時間差で0.015~0.045秒) を説明するためには、1~15km程度の厚さの変形を受けた蛇紋岩層が存在する可能性がある。蛇紋岩層の存在が深部低周波地震の発生に影響を与えている可能性も考えられる。

キーワード: S波偏向異方性, 深部低周波微動, マントルウェッジ, 蛇紋岩, 沈み込み帯, 西南日本

Keywords: shear wave splitting, LFE, mantle wedge, serpentine, subduction zone, SW Japan

## 蛇紋岩の摩擦ヒーリング特性とスロー地震の関連性 Slow earthquake associated with frictional healing of serpentinites

片山 郁夫<sup>1\*</sup>, 岩田 睦美<sup>1</sup>, 岡崎 啓史<sup>1</sup>, 平内 健一<sup>2</sup>  
Ikuko Katayama<sup>1\*</sup>, Mutsumi Iwata<sup>1</sup>, Keishi Okazaki<sup>1</sup>, Ken-ichi Hirauchi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 広島大学地球惑星システム学, <sup>2</sup> 京都大学人間環境学

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University, <sup>2</sup>Department of Interdisciplinary Environment, Kyoto University

沈み込み帯で発生するスロー地震は通常の地震とは異なり、比較的小さな応力降下量と長い継続時間で特徴づけられる。間隙流体が存在すると有効応力が減少するため、前者の応力降下量はプレート境界での流体の存在に起因すると考えられるが、後者の継続時間の違いは流体の存在だけで説明することは難しい。我々は、スロー地震と通常地震での継続時間の違いはプレート境界における物質の違いに原因があるとの仮説をたて、物質による摩擦特性の違いに注目した摩擦ヒーリング実験を行った。沈み込むプレートから脱水反応によって放出される水は、上盤側のマントルと反応して局所的に蛇紋岩などの含水層を形成していると予想される。そこで本研究では、蛇紋石と無水鉱物である石英/かんらん石の摩擦強度回復とピーク摩擦から定常摩擦に遷移する臨界すべり量に注目した。その結果、蛇紋岩は石英/かんらん石に比べると強度回復が弱く、また臨界すべり変位が系統的に長い特徴をもつことが分かった。数値モデルではスロー地震は臨界すべり量が長い場合に起きやすいとの報告もあり、蛇紋石が比較的長い臨界すべり変位を持つことがスロー地震の一因になっている可能性がある。このことから、プレート境界での水の存在により変質（蛇紋岩化）した領域がスロー地震の発生域に対応するのに対し、変質せずに固着した領域はアスペリティとして働き通常の地震の震源域となっていると予想される。なお、スロー地震の発生深度が深さ30 km付近に集中することから、そこでは蛇紋岩に加え高間隙水圧が発生しているのに対し、さらに深部では流体圧が低下するため脆性的な変形ではなく塑性変形によって歪みが解放されていると考えられる。

キーワード: 蛇紋岩, 摩擦実験, 強度回復, スロー地震

Keywords: serpentinite, frictional experiment, frictional healing, slow earthquake

## 付加体内部で発生する超低周波地震の地質学的描像と摩擦特性 Geological and frictional aspects of very-low-frequency earthquakes in an accretionary prism

齋藤 翼<sup>1\*</sup>, 氏家 恒太郎<sup>1</sup>, 堤 昭人<sup>2</sup>, 亀田 純<sup>3</sup>, 芝崎 文一郎<sup>4</sup>

Tsubasa Saito<sup>1\*</sup>, UJIIE Kohtarō<sup>1</sup>, TSUTSUMI Akito<sup>2</sup>, KAMEDA Jun<sup>3</sup>, SHIBAZAKI Bunichiro<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 筑波大学生命環境系, <sup>2</sup> 京都大学大学院理学研究科, <sup>3</sup> 東京大学大学院理学系研究科, <sup>4</sup> 建築研究所国際地震工学センター  
<sup>1</sup>University of Tsukuba, <sup>2</sup>Kyoto University, <sup>3</sup>University of Tokyo, <sup>4</sup>IISEE, BRI

近年の陸上・海底における精密地震観測により、付加体内部のスラストやプレート境界において超低周波地震が発生していることが明らかとなった。しかし、超低周波地震の地質学的描像や摩擦特性は明らかになっていない。そこで、超低周波地震発生深度で発達した沖縄本島四万十付加体始新統嘉陽層に発達するスラストの特徴を明らかにするとともに、スラスト物質の摩擦速度依存性を検討した。スラストは砂質タービタイトを構成する石英質アレナイトを起源とし、粘土鉱物からなる面構造を伴う断層岩と伴わない断層岩が発達する。また、石英脈を伴った剪断面や癒着した剪断面が認められ、断層運動に流体が密接に関与したことが示唆される。面構造を伴う断層岩と伴わない断層岩から試料を採取して粉末状にし、含水状態ですべり速度 0.0028 - 0.028 - 0.28 mm/s の範囲で摩擦の速度依存性を検討した結果、面構造を伴う断層岩から得られた試料は速度強化する摩擦挙動を示すのに対し面構造を伴わない断層岩は速度弱化する摩擦挙動を示した。また、すべり速度 0.28 - 2.8 mm/s の範囲ではすべての試料が速度強化する摩擦挙動を示した。XRD 分析・微細構造観察の結果、速度弱化の挙動を示した試料は、石英に富み (58.9 - 75.8 wt.%), 粘土鉱物に乏しく (4.9 - 7.6 wt.%), 剪断の局所化が観察された。一方、速度強化の挙動を示した試料は、石英により乏しく (51.5 wt.%), 粘土鉱物をより多く含み (23.5 wt.%), せん断帯に沿った粘土鉱物の配列といった剪断の分散化が認められた。これらの結果は、不安定すべりは石英に富む断層に沿って局所化して生じやすいが、高速になると断層の構成鉱物によらずすべりが安定化することを示している。本研究で示されたスラスト物質の摩擦特性は、超低周波地震の発生を説明付けるものであり、スラストにおける石英の含有率や粘土鉱物からなる面構造の発達は、超低周波地震の発生と空間分布を決める重要な要因であることが示唆される。

キーワード: 超低周波地震, 付加体, 摩擦速度依存性, 断層帯構造

Keywords: very-low-frequency earthquakes, accretionary prism, frictional velocity dependence, fault zone structure

## フラクタル解析によって推定された、微動活動の時間的な活動特性の空間変化 Spatial variations of the temporal clustering properties of tectonic tremor activities inferred from a fractal analysis

出原 光暉<sup>1</sup>, 矢部 優<sup>1\*</sup>, 井出 哲<sup>1</sup>

Koki Idehara<sup>1</sup>, Suguru Yabe<sup>1\*</sup>, Satoshi Ide<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

<sup>1</sup>Department of the Earth and Planetary Science, The University of Tokyo

The spatial variation of tremor activities is characterized by means of a fractal analysis. The temporal distribution of tremor activity exhibits fractal behavior, and its fractal dimension ( $D$ ) and the characteristic time ( $t_c$ ) reflect the degree of temporal clustering and the recurrence interval of episodic tremors. By applying one-dimensional box-counting method for the tremor catalogs from the following tectonic regions: Nankai, Cascadia, Mexico, and New Zealand, we identify transitions of the temporal clustering properties in both the dip and the strike directions. A transition in the dip direction is possibly associated with the change in the thermal condition depending on the tremor depths, while significant variations in the strike direction is likely to be affected by other factors such as pore-fluid pressure and geometrical irregularities, as well as local temperature variations. The characteristic time has modest positive correlation with the tremor duration, probably representing the inherent correlation between the seismic moment release rate and the recurrence interval of tremors controlled by the frictional properties along the plate interface.

キーワード: 微動活動, フラクタル, 沈み込み帯, 活動周期, エピソードシテティ, 時間的なクラスタリング

Keywords: tremor activity, fractal, subduction zone, recurrence interval, episodicity, temporal clustering

## 立体アレーを用いた深部低周波地震 (LFE) の P 波・S 波の検出とその震源決定への応用

### P- and S-wave detection of the low frequency earthquakes (LFE) using 3D array. Application to hypocenter determination

鈴木 貞臣<sup>1\*</sup>, 大久保 慎人<sup>1</sup>, 雑賀 敦<sup>1</sup>, 今西 和俊<sup>2</sup>, 北川 有一<sup>2</sup>, 武田 直人<sup>2</sup>

Sadaomi Suzuki<sup>1\*</sup>, Makoto OKUBO<sup>1</sup>, Atsushi Saiga<sup>1</sup>, Kazutoshi Imanishi<sup>2</sup>, Yuichi Kitagawa<sup>2</sup>, Naoto Takeda<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東濃地震科学研究所, <sup>2</sup> 産業技術総合研究所

<sup>1</sup>TRIES, <sup>2</sup>AIST

東濃地震科学研究所 (TRIES) は深部低周波地震 (LFE) を研究するため、愛知県豊田市下山に地震観測点のアレーを 2010 年 3 月までに設置した。また産業技術総合研究所 (AIST) は同じ地域に 3 つの深度 (約 600m, 200m, 50m) に地震計を持つボアホールアレーを設置した。これらのアレーの観測点と防災科学技術研究所 (NIED) の Hi-net 観測点 SMYH を組み合わせて立体アレーとした。この立体アレーの 14 観測点のデータを使って、東海地域で発生した LFE の波形データを semblance 解析 (Neidel and Terner, 1971) し、P 波と S 波の検出を試みた。P 波の検出には上下動記録、S 波の検出には水平動記録を使った。アレー領域内を均質な速度、 $V_p=4.5$  km/s,  $V_s=2.2$  km/s で伝播する平面波を仮定し、その波がそれぞれの地震計に到着する時間差と station correction の和を lag trajectory として semblance 値を計算した。semblance 値は、アレーの基準位置に平面波が到着する時刻、波の到来方向 (back-azimuth)、入射角の 3 つをパラメータとして求めた。LFE を解析する前に、震源決定精度が良く、LFE 発生領域の近くで発生した 5 個の普通地震を使って、P 波と S 波それぞれの station correction を求めた。

2010 年 11 月 11 日から 30 日までに東海地方で発生した LFE を立体アレーで観測することができた。観測されたデータの中から、気象庁によって震源が報告されている LFE を 13 個選び、上記 semblance 解析を行った。そして振幅が小さく微動状に続く LFE の波形の中から、対となる P 波と S 波に対応する semblance の極大値を持つ時間帯をさがした。P 波の semblance の極大値が 0.5 以上で、S 波の極大値が 0.6 以上である 2 つの条件を満たし、さらに P 波と S 波の入射角の差が小さい ( $20^\circ$  以下) 条件を付けると、最終的に 5 個の LFE が選びだされた。これらの LFE の波形記録について、semblance の極大値を持つ時間帯付近にある P 波と S 波の初動を読み取った。これらの対となる P 波と S 波到着時刻と気象庁による読取データを併合し、震源決定を行った。得られた 5 個の LFE の震央位置は気象庁震源と比べて余り変わらないが、震源の深さが浅くなった。これらの震源はこの辺りのプレート境界面付近に位置し、Hirose et al.(2008) の LFE の研究結果と調和する。

謝辞：解析には気象庁一元化データと防災科学技術研究所の Hi-Net データを使用した。

参考文献

Neidell, N. S. and Terner M. T., Semblance and other coherency measures for multichannel data, *Geophysics*, 36, 482-497, 1971.

Hirose, F., J. Nakajima, and A. Hasegawa, Three-dimensional seismic velocity structure and configuration of the Philippine Sea slab in southwestern Japan estimated by double-difference tomography, *J. Geophys. Res.*, 113, B09315, doi:10.1029/2007JB005274, 2008.

キーワード: 深部低周波地震, 立体アレー, P 波と S 波, センブランス, 震源決定, プレート境界

Keywords: deep low-frequency earthquakes, 3D array, P and S waves, semblance, hypocenter determination, plate boundary

## 四国西部における深部低周波微動活動と地下構造解明のための稠密アレイ観測 Seismic array observations for study of nonvolcanic tremor activity and underground structure in western Shikoku

小原 一成<sup>1\*</sup>, 加藤 愛太郎<sup>1</sup>, Chao Kevin<sup>1</sup>, 武田 哲也<sup>2</sup>  
Kazushige Obara<sup>1\*</sup>, Aitaro Kato<sup>1</sup>, Kevin Chao<sup>1</sup>, Tetsuya Takeda<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 防災科学技術研究所  
<sup>1</sup>ERI, Univ. of Tokyo, <sup>2</sup>NIED

深部低周波微動は、沈み込むプレート境界面上の巨大地震震源域から安定すべり域に遷移する領域における過渡的現象としての短期的スロースリップイベントに伴う地震現象である。西南日本では約600kmの範囲に渡って幅20~50kmの帯状の領域に微動が分布しているが、狭い幅の中でも微動の活動様式は深さとともに徐々に変化する。つまり、浅部側ではスロースリップイベントによる地殻変動が検出されるほどのエピソードが数カ月間隔の周期で発生するのに対して、深部側では比較的小規模のエピソードが頻繁に発生する。この活動周期の深さ依存性はCascadiaでも全く同様であり、深さとともにプレート間の摩擦特性が徐々に変化することを示していると考えられる。この原因の一つとしては、深さとともに間隙圧が変化することが考えられ、流体の量が影響する場合には、プレート境界付近の構造の変化として捉えられる可能性がある。そのため、微動のプレート沈み込み方向の幅が最も広い四国西部において、微動幅内での構造変化や微動活動特性の変化を詳細に捉える目的で、高感度地震計による稠密アレイ観測を実施した。

観測は線状アレイとマルチプルアレイの2種類の観測方式を採用した。線状アレイは70台の1Hz3成分地震計から構成され、愛媛県八幡浜市をL字の屈曲点として西は佐田岬半島の突端、南は高知県四万十市に至る全長100kmの範囲に約1~2kmの間隔で設置された。このアレイは、トモグラフィ及びレシーバ関数解析に基づくプレート境界付近の構造変化の把握が目的であるため、微動域の上端・下端部が完全にアレイ内に収まるように設計された。マルチプルアレイは、30台の地震計から構成される大アレイ1ヶ所と9台の地震計から構成される小アレイ4ヶ所の組み合わせであり、アレイ解析による微動源追跡が主目的である(武田・他, 2012)。観測は2011年9月から実施され、2013年3月には撤収する予定であり、その1年半の観測期間中に四国西部では2011年12月~2012年1月、2012年5月~6月、2012年11月~12月の3回の主要な微動エピソードが発生し、2012年4月11日にはスマトラ沖で発生したMw8.6の地震の表面波通過に伴って微動の動的トリガリングが観測された(Enescu et al., 2012)。この誘発微動は最初は約30秒間隔で発生していたが、後半は約20秒間隔と表面波の分散に応じて発生間隔が短くなった。また、観測点間の走時差や振幅比も変化しているため、場所やメカニズムが変化している可能性がある。

この研究は、科学研究費助成事業基盤研究(A)「沈み込みプレート境界遷移領域におけるすべり特性の解明」によって実施されている。

キーワード: 深部低周波微動, スロー地震, 沈み込み帯, プレート境界

Keywords: non-volcanic tremor, slow earthquake, subduction zone, plate interface

## Improvement of tectonic tremor detecting and locating methods: Case study in western Shikoku and central Kyushu

## Improvement of tectonic tremor detecting and locating methods: Case study in western Shikoku and central Kyushu

Kevin Chao<sup>1\*</sup>, Kazushige Obara<sup>1</sup>, Aaron Wech<sup>2</sup>

Kevin Chao<sup>1\*</sup>, Kazushige Obara<sup>1</sup>, Aaron Wech<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ERI, the University of Tokyo, <sup>2</sup>Victoria University of Wellington, Wellington, New Zealand026416

<sup>1</sup>ERI, the University of Tokyo, <sup>2</sup>Victoria University of Wellington, Wellington, New Zealand026416

Recent findings of triggered tectonic tremor in recently discovered regions in Hokkaido (Obara, GRL, 2012), Kyushu, and Kanto (Chao and Obara, AGU Meeting, 2012) provide an ideal dataset with which we can test the clock-advanced model, which predicts the occurrence of triggered tremor in regions where ambient tremor occurs. Obtaining accurate tremor sources in time and space is important because it provides essential information that reveals the mechanism of tremor activity. In this study, we improve upon two existing tremor detecting and locating methods: 1) the WECC (Waveform Envelope Correlation and Clustering) auto-detecting algorithm (Wech and Creager, GRL, 2008), which auto-detects tremor episodes, and 2) the improved conventional envelope cross-correlation technique (Obara, Science, 2002; Chao et al., BSSA, 2013), which accurately pinpoints the locations of short duration tremor sources in space. Using WECC, we detected tremor episodes in western Shikoku and compared the results with existing NIED tremor catalogs (Maeda and Obara, JGR 2009; Obara et al., GRL, 2010). Our preliminary results indicate that during the testing period, the WECC was able to successfully auto-detect the same ambient tremor episodes listed in the NIED tremor catalogs. Our next step will be to apply the WECC to the entire dataset to determine whether it can successfully detect all tremor episodes while minimizing noise. Using the modified envelope cross-correlation technique, we plan to conduct a 3D grid search to locate accurate triggered tremor sources in central Kyushu following several teleseismic earthquakes. This modified technique has been used to locate micro-earthquakes ( $M \leq 0.5$ ) in western Shikoku, and a comparison of the hypocenter of these micro-earthquakes with those from the JMA earthquake catalog showed that they were located within 5km of one another. We plan to apply the WECC to search for potential ambient tremor in central Kyushu and present the updated results at an upcoming meeting. The improved tremor detecting and locating techniques, which combine the strengths of various algorithms, will be instrumental in the construction of an accurate tremor catalog in Japan.

キーワード: non-volcanic tremor, tremor locating/detecting methods, central Kyushu, Shikoku tremor zone

Keywords: non-volcanic tremor, tremor locating/detecting methods, central Kyushu, Shikoku tremor zone

## 西南日本において検出した超低周波地震のブートストラップ検定法を用いた検討 Statistical hypothesis test for the detection of very low-frequency earthquakes in south-west Japan

仁里 太郎<sup>1\*</sup>, 須田 直樹<sup>1</sup>, 松澤 孝紀<sup>2</sup>

Taro Nizato<sup>1\*</sup>, Naoki Suda<sup>1</sup>, Takanori Matsuzawa<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 広島大・院理, <sup>2</sup> 防災科学技術研究所

<sup>1</sup>Hiroshima Univ., <sup>2</sup>NIED

西南日本では、短期的スロースリップイベントに付随して深部非火山性微動や超低周波地震が発生している。先行研究では、超低周波地震のメカニズムがフィリピン海プレート上部境界面のジオメトリーや、プレートの運動方向と調和的であることが明らかにされている (Ito et al. 2007, 2009; Takeo et al. 2010)。これらはモーメントテンソル解析の手法を超低周波地震の検出に使用している。そのため、検出の際に多くのパラメータを同時決定する必要があり、多くの小イベントを検出し損ねている可能性がある。そこで我々は、これまでに超低周波地震の検出に特化した手法を開発した。

その手法では、Hi-net 傾斜計データから得られる観測波形と、仮想的な超低周波地震の理論波形の相互相関と Variance Reduction (VR) を計算し、検出を行う。理論波形は、フィリピン海プレート上部境界面のジオメトリーやプレートの運動方向から超低周波地震のメカニズムを仮定して計算する。前回の地震学会秋季大会では、この手法が超低周波地震の検出に有効であることを示した。検出の閾値を下げていくと、これまで報告されていない小イベントからのシグナルも検出できたが、それらの有意性については十分検討していなかった。

そこで今回は、検出したイベントに対してブートストラップ法による統計的仮説検定を適用し、ノイズであるかどうかを検討する。VR を検定統計量として、帰無仮説「得られた VR は、ランダムなノイズをフィッティングした結果である」を検定する。一般にブートストラップ法による p 値は次のように求められる。

$$p = \# \{ t^* > t_{obs} \} / N$$

ここで  $t^*$  は帰無仮説にもとづいて計算した検定統計量の値、 $t_{obs}$  は観測された検定統計量の値、 $N$  はブートストラップ実験の回数、 $\#$  はカッコ内の条件を満たした実験の数である。p 値が与えられた有意水準より小さいとき、帰無仮説を棄却する。 $t^*$  はブートストラップ複製波形を実際と同様に解析した VR の値である。ブートストラップ複製波形は以下のように求める：(1) 観測波形のフーリエ変換を計算する。(2) 超低周波地震の卓越周波数帯である 0.02~0.05Hz におけるフーリエ変換の実部・虚部に対して重複を許したランダムなサンプリングを行い、卓越周波数帯の値を置き換える。卓越周波数帯の外はそのままとする。(3) 逆フーリエ変換を計算する。このようなブートストラップ仮説検定を用いることにより、これまでより客観的にイベントの検出を行うことができる。発表では実際の波形への適用結果を示す。

キーワード: 超低周波地震, スロー地震, 統計的仮説検定, ブートストラップ法

Keywords: very low-frequency earthquake, slow earthquake, statistical hypothesis test, bootstrap method

## 2011年東北沖地震により誘発された紀伊半島沖の浅部低周波イベント Broadband features of the shallow low frequency events in Nankai trough, excited after the 2011 Tohoku-Oki earthquake

藤 亜希子<sup>1</sup>, 尾鼻 浩一郎<sup>1\*</sup>, 高橋 成実<sup>1</sup>, 深尾 良夫<sup>1</sup>  
Akiko To<sup>1</sup>, Koichiro Obana<sup>1\*</sup>, Narumi Takahashi<sup>1</sup>, Yoshio Fukao<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構

<sup>1</sup> Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Low frequency events are seismic events, which have longer duration and less energy radiation compared to regular earthquakes. The low frequency events detected in the shallow part of the Nankai trough (depth < 10 km), reported by previous studies, can roughly be divided into two groups depending on the observable frequency ranges of the signal, where the frequency ranges actually depend on the observed instrument.

The events of the first group are very low frequency earthquakes (VLFs), which were originally detected by broadband seismographs on-land (Ishihara et al., 2003; Ito & Obara, 2005), dominant in the frequency around 0.1-0.05 Hz. More recently a close-in observation was successfully made by temporally deployed broadband ocean-bottom seismometers (BBOBS), which revealed many intriguing features of the VLFs (Sugioka et al., 2012). The events of the second group are low frequency tremors (LFT), which are recorded by OBSs equipped with 4.5 Hz short-period seismometer sited close to the source regions. They are dominant in the frequency range of 2-8 Hz with a lack of energy above 10 Hz (Obana & Kodaira, 2009). The classification between LFTs and VLFs must be an important step toward estimating the physical process of the shallow low frequency events.

After the 2011 Mw9.0 Tohoku-oki earthquake, many shallow low frequency events were recorded at a cabled network of ocean bottom broadband stations (DONET) deployed in the northern part of Nankai trough. The characteristics of the events are similar to previously observed LFTs at the frequency range around 2-8 Hz. In addition, some of the events are accompanied by a lower frequency signal, clearly visible around 0.02-0.05 Hz, whose features are similar to those previously observed as VLFs by Sugioka et al. (2012). One of such features of VLFs is the ramp-type motion of the instrument-corrected seafloor displacement, which corresponds to a subsidence of up to 0.04 mm with a rise time of 10-20 s.

In order to examine whether the events accompanied by the 0.02-0.05 Hz signal are intrinsically different from those without the 0.02-0.05 Hz signal, the amplitudes of each event measured at 2-8 Hz and 0.02-0.05 Hz are compared. The comparison shows that the events without the 0.02-0.05 Hz signal tend to have lower amplitude in 2-8 Hz than those accompanied by the 0.02-0.05 Hz signal. The result indicates that there is no such event, which is intrinsically missing the 0.02-0.05 Hz components but has large amplitude in 2-8 Hz. In other words, the events without the 0.02-0.05 Hz signal are likely to be either smaller in size or occurred further away from the stations, compared to the events accompanied by the 0.02-0.05 Hz signal. Our dataset shows that the two types of low frequency events are likely the same phenomenon.

キーワード: 浅部低周波微動, 浅部低周波地震

Keywords: very long frequency earthquake, low frequency tremor

## 四国東部から紀伊水道にかけて発生した長期的スロースリップ (2) Long-term slow slip events around eastern Shikoku and Kii Channel (2)

小林 昭夫<sup>1\*</sup>, 畑中雄樹<sup>2</sup>

Akio Kobayashi<sup>1\*</sup>, HATANAKA, Yuki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 気象庁気象研究所, <sup>2</sup> 国土地理院

<sup>1</sup>Meteorological Research Institute, <sup>2</sup>Geospatial Information Authority of Japan

日本では近年の稠密な GNSS 観測網 GEONET [ 国土地理院測地観測センター (2004) ] の展開により、様々な時定数を持つプレート境界でのすべり現象が発見されている。そのうち南海トラフ沿いでは、数か月から数年の継続時間を持つ長期的スロースリップイベント (SSE) が、東海地域で 2001~2005 年に [ Ozawa et al. (2002)、国土地理院 (2007) ]、豊後水道付近で 1996~1997 年 [ Hirose et al. (1999) ]、2003 年 [ Ozawa et al. (2004) ]、2009~2010 年 [ 国土地理院 (2010) ] に発生したことが観測された。この他に小規模な長期的 SSE が 2005 年に四国西部 [ 小林 (2010) ] や 2005~2010 年にかけて四国中部 [ 気象研究所 (2012) ] でも発生していたことが報告されている。

同じ南海トラフの沈み込み帯においても、長期的 SSE の発生する領域が限られていたり、発生間隔、発生規模が異なっていたりすることが明らかになってきている。長期的 SSE の過去および現在の発生を把握することは、プレート境界面の領域による状態の違いに関する情報を提供する。ここでは、GNSS の解析から明らかになった四国東部から紀伊水道における長期的 SSE について報告する。

データは、国土地理院 GEONET の GNSS 日座標値 (F3 解) を用いた。非定常な地殻変動を見るため、プレートの沈み込みなどに伴う定常的な成分を除去する。中国・近畿地域で豊後水道付近を除いて目立った地殻変動を生じる地震や長期的 SSE などがなかった、2006 年 1 月から 2009 年 12 月の 4 年間のデータから直線トレンド係数を求め、全期間からその係数を用いて定常成分を差し引いた。年周変化については補正をしていない。また、GEONET 観測点のアンテナ交換などに伴う人為的要因によるオフセット [ 岩下・他 (2009) ] は、国土地理院ホームページで公開されているデータセット [ 国土地理院 corr30.dat ] を用いて補正した。

2001 年 4 月から 2 年間の非定常変位を見ると、四国北西部から中国地方の多くの観測点の水平変位は小さく、これらの地域の観測点はこの 2 年間に定常的な変動をしていたことを示している。一方、四国東部の観測点には南東向きの 1 cm 弱の水平変位が見られる。水平変位の見られた観測点の座標時系列と、周辺の観測点との基線長変化を見ると、2001~2004 年にかけて定常とは異なる南東向きの変化が見られる。これらの変位は不適当な直線トレンドや、オフセットの除去によるものではない。さらに基線長には 1996 年にも伸びの変化が見られるが、伸びの開始時期はデータの存在する 1996 年 3 月より前である。同様の変化は複数の基線長にも見られ、特定観測点の設置後の不安定とは考えにくい。

現在、国土地理院からは GEONET 日座標値として 1996 年 3 月以降の F3 解が公開されている。一部の GNSS 観測点では 1996 年 3 月以前の観測値がある。F3 解と同じ条件の解析はされていないが、一つ前の解析戦略である F2 解に整合するように求められた解析結果がある (畑中・他、2004)。F2 解は年周変化成分が大きく、大気遅延勾配による誤差が含まれるなど F3 解と比較して精度が落ちるが、短い距離の基線長を取ることで誤差をある程度抑え込むことができる。岡山県の 940077 笠岡と徳島県の 940081 阿南 1 との基線長変化について、F2 整合解を 1994~1995 年を定常としてトレンド除去した。F3 解と解析の重複した期間の両者の値はよく一致し、非定常変化は 1996 年初めに開始したことがわかる。

観測された 1996~1997 年の非定常変位がプレート境界上のすべりによるものとして、すべり分布をインバージョンにより求めたところ、紀伊水道付近にすべりが推定された。南海トラフ沿いに深部低周波微動 [ Obara(2002) ] が分布する中で、この領域には微動の活発な発生が観測されていない。深部低周波微動の活発な発生の見られない領域でも長期的 SSE が発生していることになる。また、非定常変位の出現パターンから、1996 年と 2001~2004 年の長期的スロースリップの変動源がほぼ同じ領域だと思われる。これから、同じ領域で規模や時間経過が異なる長期的スロースリップが発生しうることになる。これらのことはプレート境界の状態推定について重要な情報を提供する。

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

キーワード: 長期的スロースリップ, GNSS, 地殻変動, 四国東部, 紀伊水道

Keywords: long-term slow slip, GNSS, crustal deformation, eastern Shikoku, Kii Channel

## 沈み込み帯における余効すべり再訪: すべり速度と本震マグニチュードのスケールリング関係および定義拡張の可能性について

### Afterslip revisited: Scaling relation of slip rate versus mainshock magnitude and possible expansion of the definition

三井 雄太<sup>1\*</sup>, 日置 幸介<sup>1</sup>  
Yuta Mitsui<sup>1\*</sup>, HEKI, Kosuke<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学理学研究院  
<sup>1</sup> Grad. Sch. Sci., Hokkaido Univ.

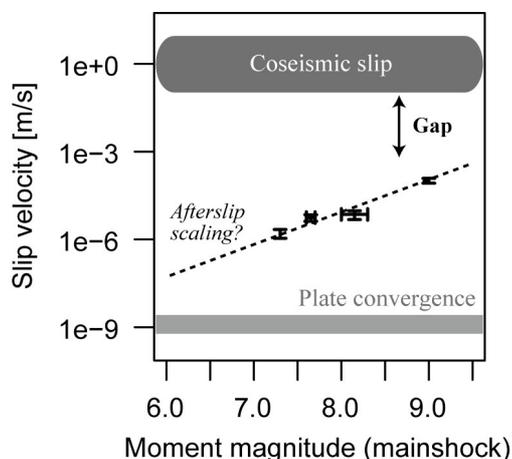
2011年東北地方太平洋沖地震前後のGPSデータ(国土地理院 GEONET 観測網による)を基に、プレート境界地震後の余効すべりイベントに関する2つの話題を提供する。

Mitsui and Heki (in revision) では、2011年東北地震直後約30分間の三陸沖における余効すべり量を、津波の伝播に伴う陸の沈降と独立に見積もった。その結果、平均的なすべり速度は0.1 mm/sのオーダーに達することがわかった。この値は、1994三陸はるか沖地震、2003十勝沖地震、2011宮城県はるか沖地震(東北地震2日前のイベント)といった、近隣で過去に発生したプレート境界地震直後の余効すべりのそれを桁で上回る。我々の知る限り、観測史上最大のすべり速度である。これらの直後余効すべりの平均すべり速度と本震のモーメントマグニチュード( $M_w$ )との関係をプロットすると、すべり速度が $10^{M_w}$ に比例するかのようなスケールリング関係が得られた(下図参照)。もし0.1 mm/sという値が余効すべりという現象自体のすべり速度の最大値に近いとするならば、摩擦係数の速度依存性が0.1 mm/s近辺で変化して速度強化的振る舞いを見せるようになる、とするWeeks (1993)の岩石実験からの示唆と調和的と考えられる。

Heki and Mitsui (2013, EPSL) では、2003年十勝沖地震と2011年東北地震のそれぞれ直後から、破壊されたセグメント近傍のGPS点の海向き速度増大(旧来の余効すべり)と同期する形で、隣接セグメント近傍のGPS点の陸向き速度が増加することが発見された。また、同様の現象は、2012年に樺太沖で発生した深発地震の直後にも遠く離れた道東の観測点で見出されている(日置・三井, 本大会発表)。これらの事実から我々は、プレート運動の抵抗喪失に伴う一時的なスラブ沈み込みの加速、という仮説を提唱している。このスラブ沈み込みの加速は、プレート上面および下面の広域における広義の「余効すべり」と捉えることもできる。旧来の狭義の余効すべり(例えばHeki et al. (1997))は、地震破壊が停止した端における応力集中がゆっくりと伝播しながら解放されていく力学的プロセス、と解釈されてきた。一方、広義の余効すべりは、より広域の力のバランスが調整されるプロセスと解釈できる。広義の余効すべりをモニターすることによって、沈み込み帯の浅部から深部までの新たな地球科学的な情報を得ることが可能となるかもしれない。

キーワード: GPS, 余効すべり, 摩擦特性, 2011年東北地方太平洋沖地震, プレート沈み込みの加速, 深発地震

Keywords: GPS, afterslip, frictional property, 2011 Tohoku-oki earthquake, plate subduction acceleration, deep earthquake



## メキシコ沖沈み込み帯で発生するスロースリップイベントのモデル化 Modeling of slow slip events along the subduction zone off the Pacific coast of Mexico

芝崎 文一郎<sup>1\*</sup>  
Bunichiro Shibazaki<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 建築研究所国際地震工学センター

<sup>1</sup>International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Building Research Institute

Recent high-resolution geodetic observations have revealed the occurrence of slow slip events (SSEs), along the Mexican subduction zone. In the Guerrero gap, large slow slip events of around Mw 7.5 have been observed (Lowry et al., 2001; Radiguet et al., 2012), and the 2006 Guerrero slow slip propagated at an average velocity of 0.8 km/day. Recurrence intervals of SSEs are around every 3-4 years. On the other hand, in the Oaxaca region, SSEs of Mw 7.0-7.3 repeat every 1-2 years and last for 3 months (Correa-Mora et al., 2009). The present study models SSEs along the subduction zone off Mexico, based on a model by Shibazaki and Shimamoto (2007).

We use a rate- and state-dependent friction law with a small cut-off velocity for the evolution effect. We also consider the 3D plate interface, which dips at a very shallow angle at 100-150 km from the trench. We set the unstable zone from a depth of 10 to 20 km, and the zone of SSEs from 20 to 30 km. By setting the effective normal stress at around 1 MPa and the cut-off velocity for the evolution effect at  $10E-7.5$  m/s at the SSE zones, we reproduce SSEs occurring at intervals of around 5 years with propagation velocities of 1.0 km/day. In the present model, velocity strengthening occurs at a velocity greater than  $10E-7.5$  m/s, and therefore only small slips occur at the SSE zone when earthquakes occur in the seismogenic zones. A Mw 7.4 subduction earthquake occurred beneath the Oaxaca-Guerrero border on March 20, 2012, and the 2012 SSE coincided with this thrust earthquake (Graham et al., 2012). We verify our model by comparing numerical results with the observations.

キーワード: スロースリップイベント, メキシコ, 沈み込み帯, すべり速度・状態依存則

Keywords: slow slip event, Mexico, Subduction zone, a rate- and state-dependent friction law