

## 2011年東北地方太平洋沖地震発生前のスロースリップイベント Episodic slow slip events in the Japan subduction zone before the 2011 Tohoku-Oki earthquake

伊藤 喜宏<sup>1\*</sup>, 日野 亮太<sup>1</sup>, 木戸 元之<sup>1</sup>, 藤本 博己<sup>1</sup>, 長田 幸仁<sup>1</sup>, 稲津 大祐<sup>1</sup>, 三浦 哲<sup>2</sup>, 太田 雄策<sup>1</sup>, 内田 直希<sup>1</sup>, 辻 健<sup>3</sup>, 芦寿一郎<sup>4</sup>, 三品 正明<sup>1</sup>

ITO, Yoshihiro<sup>1\*</sup>, HINO, Ryota<sup>1</sup>, KIDO, Motoyuki<sup>1</sup>, FUJIMOTO, Hiromi<sup>1</sup>, OSADA, Yukihiro<sup>1</sup>, INAZU, Daisuke<sup>1</sup>, MIURA, Satoshi<sup>2</sup>, OHTA, Yusaku<sup>1</sup>, UCHIDA, Naoki<sup>1</sup>, TSUJI, Takeshi<sup>3</sup>, ASHI, Juichiro<sup>4</sup>, MISHINA, Masaaki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 東京大学地震研究所, <sup>3</sup> 京都大学大学院工学研究科, <sup>4</sup> 東京大学大気海洋研究所

<sup>1</sup>Graduate School of Science, Tohoku University, <sup>2</sup>Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, <sup>3</sup>Department of Civil and Earth Resources Engineering, Kyoto University, <sup>4</sup>Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

We describe two transient slow-slip events that occurred before the 2011 Tohoku-Oki earthquake that occurred near the high coseismic slip region near the Japan Trench. A transient crustal deformation, which occurred over 7 days in November 2008, was measured using ocean-bottom pressure gauges and an on-shore volumetric strainmeter simultaneously; this deformation has been interpreted as an Mw 6.8 slow-slip event with a slip magnitude of 0.4 m at most. The other transient crustal deformation was observed in mid-February 2011, just before the 2011 Tohoku-Oki earthquake: the source model of this deformation is probably almost the same as that of the 2008 transient slow slip. The two transient slow deformations preceded interplate earthquakes of magnitudes M 6.1 and M 5.8 in December 2008 and February 2011, respectively. The hypocenters are located at the down-dip ends of the slow-slip area. Our findings indicate that the slow-slip events induced an increase in shear stress, which in turn triggered the interplate earthquakes. The slow-slip area is also located within the large coseismic slip area of the 2011 earthquake; in particular, the slow-slip area is mainly located in the down-dip end of the high coseismic slip region near the Japan Trench. The result suggests that a fault segment where velocity strengthening occurs at low slip velocity and velocity weakening occurs at high slip velocity probably exists in the down-dip portion of the high coseismic slip area of the 2011 Tohoku-Oki earthquake.

キーワード: スロースリップ, 2011年東北地方太平洋沖地震, 海底圧力観測

Keywords: Slow slip event, The 2011 Tohoku-Oki earthquake, Ocean-bottom pressure observation

## 紀伊半島における深部低周波微動の移動方向・速度に見られる深さ依存性 Depth-dependency on direction and velocity of tremor migration in Kii peninsula

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>

OBARA, Kazushige<sup>1\*</sup>, MATSUZAWA, Takanori<sup>2</sup>, TANAKA, Sachiko<sup>2</sup>, MAEDA, Takuto<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>Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, <sup>2</sup>National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

西南日本や Cascadia の沈み込み帯で検出される深部低周波微動 (Obara, 2002) は, プレート境界の巨大地震発生域深部延長部で短期的スロースリップイベントに同期して発生し (Obara et al., 2004), その領域が弱いながらも固着していることを示している。従って, これらの現象を理解することは, プレート間カップリングの状態把握の点においても重要である。微動は, 半年等のほぼ規則的の間隔でバースト的に発生し, それぞれのエピソード期間中に 1 日約 10km の速度で沈み込むプレートの走向方向に移動する (Obara, 2010) が, 他にも, この長期的低速移動方向とは逆方向に 100km/day のオーダーで移動する Rapid Tremor Reversal (RTR) (Houston et al., 2011), 1000km/day のオーダーでプレートのすべり方向に移動する超高速移動 (Shelly et al., 2007; Ide, 2012) が報告されている。このような移動様式は, すべり破壊過程を明らかにする上でも重要であり, シミュレーション研究においても観測事実を説明する試みがなされている。そこで, 微動移動現象の特徴を客観的に把握するため, 移動イベントを自動的に検出する手法を開発した。

本研究に用いる微動カタログは, 観測点間のエンベロープ時間差を用いるエンベロープ相関法に振幅情報に加え, 1 分間隔で微動源を推定するハイブリッド法 (Maeda and Obara, 2009) によって構築されたものである。解析対象は, 2001-2010 年に紀伊半島中部から北東部の地域に発生した 43 回のエピソードで, 微動の時空間分布の回帰分析に基づいて外れ値を取り除き, 平面と時間の 3 次元空間で線形的に分布する微動群を主成分分析に基づいて抽出した。できるだけ様々な速度を有する移動イベントを検出するため, 4 種類の時間スケール (30 分, 1 時間, 2 時間, 4 時間) を用い, それぞれの半分の時間ずつシフトさせながら解析を行った。その結果, 各時間スケールで 200 前後の移動イベントが検出された。30 分スケールでは, ほとんどが北西-南東方向に速度 20-100 km/h で移動するイベントであり, 既に知られているプレートすべり方向の高速移動と同じである。しかし, 1 時間以上のスケールでは, 時間が長くなるに従って速度も遅くなり, 北東-南西方向の移動が顕著となる。さらに, この北東-南西方向の移動イベントのほとんどは, 微動域の浅部端に集中する。移動方向は, 北東に向かうものに比べて南西に移動するイベントが多く, この地域で発生するエピソードの大半が南西方向に移動することと調和的である (Obara, 2010)。以上から, やや速度の遅い移動イベントはプレート走向方向が支配的で, 微動域の最も浅い側に分布するのに対し, 高速移動はプレートすべりの方向でやや深部側に分布する, という深さ依存性を有することが明らかになった。

本解析では, RTR も自動的に検出される。例えば, 2006 年 1 月の北東に向かう大規模な微動エピソードの際には, それとは逆に南向きで 16-18km/h の速度を有する RTR が 5 時間の間に 2 つ検出された。興味深いことに, これらの RTR を繋ぐように北向き 50km/h の高速移動が存在する。つまり, 微動は往復運動しており, 破壊フロント付近におけるすべりの揺らぎを反映している可能性がある。これらの RTR は, 微動域の最深部から最浅部に移動しており, やや斜交したプレートすべり方向の移動とみなすこともできる。そこで, 全ての移動イベントを長期的移動方向に投影すると, RTR とプレートすべり方向の高速移動イベントは, いずれも 10-20km/h と同様の移動速度を有する。このことは両者とも既存の線状不均質に沿って発生したもので, 北東-南西方向に伝播する平面波的な揺らぎパルスとのなす角度によって, 速度の異なる移動イベントとして検出された可能性を示している。

ところで, 微動域最上端に存在する走向方向の配列は何を意味するのであろうか? これは, 長期的低速移動エピソードとの類似性から, その低速移動を駆動するプースター的な役割を果たすのかもしれない。Nakata et al. (2011) のシミュレーション研究に見られるように, 微動移動は本来拡散的であるが, その運動によって一定速度で移動する現象が再現可能であることと調和的である。また, 微動は陸側モホ面よりも下側のプレート境界で発生すると考えられており, スラブ内から脱水した水がプレート境界に沿って上昇する際に, 浸透性の低いモホ面で遮られ, 水溜めの状態になっている可能性がある (片山・平内, 2010) が, その豊富な流体が走向方向の微動移動と関連するのかもしれない。

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, プレート境界

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

## 2011年東北地方太平洋沖地震とその余震のラブ波によって誘発された西南日本の深部低周波微動

### Triggered non-volcanic tremor in SW Japan by the Love waves from the 2011 M9.0 Tohoku earthquake and its aftershocks

Enescu Bogdan<sup>1\*</sup>, Chao Kevin<sup>2</sup>, Peng Zhigang<sup>2</sup>, 小原 一成<sup>3</sup>, 松澤 孝紀<sup>1</sup>, 田中 佐千子<sup>1</sup>, 武田 哲也<sup>1</sup>

ENESCU, Bogdan<sup>1\*</sup>, Kevin Chao<sup>2</sup>, Zhigang Peng<sup>2</sup>, OBARA, Kazushige<sup>3</sup>, MATSUZAWA, Takanori<sup>1</sup>, TANAKA, Sachiko<sup>1</sup>, TAKEDA, Tetsuya<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 防災科学技術研究所, <sup>2</sup> ジョージア工科大学, <sup>3</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, <sup>2</sup>Georgia Institute of Technology, <sup>3</sup>Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

The March 11, 2011 M9.0 Tohoku earthquake was followed by large aftershocks and broad seismic activation both inland and offshore Japan (e.g., Hirose et al., 2011; Ogata, 2011; Toda et al., 2011). Previous studies (Enescu et al., 2011; Miyazawa, 2011; Obara and Matsuzawa, 2011) reported remotely triggered seismicity at distances up to about 1350 km from the mainshock. Deep non-volcanic tremor in south-west Japan (Obara, 2002) was also clearly activated following the Tohoku earthquake. We focus here on the detailed analysis of the triggered tremor.

We detect tremor that correlates with the passage of the mainshock surface waves at several Hi-net seismic stations in Shikoku region, at distances of about 1000 km from the Tohoku earthquake epicenter. We use an envelope cross-correlation technique to locate the tremor sources. The best tremor location is determined using a 3D grid-search that minimizes the residuals between observed and calculated travel time differences at pairs of recording stations. While the depth of the tremor source is not well constrained by our grid search, the signal originates from a deep source in the lower crust. Our location results show that the mainshock triggered tremor in two distinct areas, in western and central Shikoku, in regions where ambient (i.e., not triggered) tremor occurs (e.g., Obara et al., 2010). The triggered tremor in western Shikoku also occurs close to the tremor triggered by previous large, remote earthquakes (e.g., Miyazawa and Mori, 2006).

We have also detected triggered tremor during the passage of the incoming surface waves from the earliest aftershock (M7.4) of magnitude above 7.0, which occurred about 23 min. after the mainshock, as well as from the largest aftershock (M7.7) that occurred about 30 min from the mainshock. However, we did not find any evidence of triggered tremor by the M7.3 foreshock, occurred on March 9th, 2011.

We have estimated the peak dynamic stresses during the passage of surface waves from the mainshock and the two aftershocks, using the observed peak ground velocity at nearby F-net and KiK-net stations. The obtained values are roughly between 10 KPa and 180 KPa (the upper value corresponds to the mainshock), higher than the apparent triggering threshold found in this and other regions (Chao et al., 2011).

We have checked whether the detected tremor was triggered by the passage of the Love or Rayleigh waves from the Tohoku mainshock and its aftershocks. Our results indicate that the Love waves were the main triggering factor. The tremor triggered by the mainshock and the M7.4 aftershock, in particular, correlate well with the Love waves cycle. Our results are consistent with theoretical modeling that shows that Love wave displacement to the south-east (sea-ward) would promote up-dip shear on the plate interface in the Shikoku region (Hill, 2010). In a related study, Chao et al. (2011) report Love wave triggering in Shikoku by other remote earthquakes. While the triggering by Rayleigh waves in south-west Japan has been well documented (e.g., Miyazawa and Mori, 2008), our recent work shows for the first time clear evidence of Love wave triggering in the region.

Keywords: Non-volcanic tremor, SW Japan, triggering, Love waves, 2011 M9.0 Tohoku earthquake

## 準火山性深部低周波地震 Semi-Volcanic Deep Low-Frequency Earthquakes

麻生 尚文<sup>1\*</sup>, 太田 和晃<sup>1</sup>, 栗原 義治<sup>1</sup>, 井出 哲<sup>1</sup>

ASO, Naofumi<sup>1\*</sup>, OHTA, Kazuaki<sup>1</sup>, KURIHARA, Yoshiharu<sup>1</sup>, IDE, Satoshi<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>The University of Tokyo

### 【背景】

深部低周波地震 (LFE) は、主にその震源位置から、活火山直下のモホ面で発生する Volcanic LFE と、プレート境界面で発生する Tectonic LFE と、活火山から離れた島弧モホ面で孤立的に発生する Isolated Intraplate LFE とに大別される。これら三種類の LFE はそれぞれ地理的に、火山噴火やプレート境界型巨大地震や内陸型巨大地震といった大規模自然現象に近く、関連が疑われている。Tectonic LFE は今世紀初頭の発見以降、多くの特徴が分かってきたものの、Volcanic LFE や Isolated Intraplate LFE に関する理解は未だに乏しく、多くの先行研究は各地域の局所的な活動に注目しがちである [ e.g., Hasegawa *et al.*, 1991; Ohmi and Obara, 2002 ]。異なる種類の LFE を比較する研究としては、Aso *et al.* [ 2011 ] が大阪湾における Isolated Intraplate LFE の活動に注目し、Volcanic LFE に近いことを示した。本研究では、LFE の普遍的特徴や三種類の根本的差異を探るため、複数の地域の Isolated Intraplate LFE について活動を調べることで、Isolated Intraplate LFE に共通の特徴を引き出すと同時に、Volcanic LFE や Tectonic LFE にも同様の解析を行うことで、共通の基準で LFE の活動の比較を行った。

### 【データ・手法】

大阪湾と島根県東部の Isolated Intraplate LFE、桜島の Volcanic LFE、高知県北部と愛媛県中部の Tectonic LFE について、Aso *et al.* [ 2011 ] の手法を更に改良し、活動の解析および比較を行った。具体的には、気象庁が検出した LFE は統計的解析に不十分であるため、本研究では Hi-net の連続波形記録に対して波形相関を用いた自動イベント検出と最大振幅比に基づくマグニチュード推定を行った。そして、時間的特徴を調べるため、活動スペクトルから潮汐応答の有無を確認した。また、空間的特徴を調べるため、NCC 震源再決定法 [ Ohta *et al.*, 2008 ] を用いて気象庁イベントの震源再決定も行い、震源分布の詳細な構造を精査した。

### 【結果・考察】

最大振幅に基づくマグニチュードの分布からは、Tectonic LFE は冪乗則に従うというよりも顕著な上限が確認された一方、Isolated Intraplate LFE と Volcanic LFE は  $b=2$  の Gutenberg-Richter 則に従うことが分かった。活動スペクトルからは、Tectonic LFE が  $M_2$  の潮汐応答を示す一方、Isolated Intraplate LFE と Volcanic LFE では潮汐応答が確認されなかった。また、震源の空間分布からは、Tectonic LFE はプレート境界に沿うような面上や線上の分布を示した一方、Isolated Intraplate LFE と Volcanic LFE は水平方向と同程度かそれ以上に鉛直方向に幅を持つ分布をした。以上のように三種類・五地域の LFE の活動を解析した結果、Isolated Intraplate LFE は Tectonic LFE とは異なり Volcanic LFE に顕著に近い特徴を示した。また、Kurihara *et al.* [ 2012 (本学会) ] による離散的トリガリングモデルを適用した結果、その時間減衰特性においても同様の類似性が確認された。多くの Isolated Intraplate LFE が第四紀火山周辺で発生している知見に加えて、これらの活動に関して新たに得られた特徴から、Isolated Intraplate LFE も Volcanic LFE と同様に流体の移動現象によって発生していると考えられる。従って、我々はこれを Semi-Volcanic LFE と呼ぶことを提案する。今後の LFE に関する研究では、Semi-Volcanic LFE は Volcanic LFE と複合的にとらえる必要性があり、Volcanic LFE や火山活動の理解へ貢献する可能性がある。その中で、流体の移動現象などといった実際の物理プロセスを特定するため、Aso *et al.* [ 2012 (本学会) ] のように信頼性の高い震源メカニズム推定を行う必要がある。

キーワード: 深部低周波地震, 準火山性 LFE

Keywords: Low-Frequency Earthquake, Semi-Volcanic LFE



## GPS データによる西南日本の短期的スロースリップの検出 (その2) Detection of short-term slow slip events using GPS data in southwestern Japan (Part 2)

西村 卓也<sup>1\*</sup>, 松澤 孝紀<sup>2</sup>, 小原 一成<sup>3</sup>

NISHIMURA, Takuya<sup>1\*</sup>, MATSUZAWA, Takanori<sup>2</sup>, OBARA, Kazushige<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 国土地理院, <sup>2</sup> 防災科学技術研究所, <sup>3</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>GSI of Japan, <sup>2</sup>NIED, <sup>3</sup>ERI, Univ. of Tokyo

西村・水藤(2011)は、従来傾斜計や歪計によって観測されてきた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)が GPS 観測によっても検出可能であることを報告した。本公演では GPS データを用いた四国西部から東海地方にかけての SSE に伴うと考えられる地殻変動の検出と断層モデルの推定手法の現状を紹介するとともに、防災科学技術研究所による深部低周波微動カタログ(Maeda and Obara, 2009; Obara et al., 2010)や傾斜計データに基づく断層モデル(Sekine et al., 2010)との比較について報告する。

SSE に伴う地殻変動の検出には、西南日本の GEONET565 点の日座標値データを用いた。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北 130°東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、観測地殻変動が概ね説明出来ているイベントを SSE として認定した。

1996 年 6 月 19 日から 2011 年 8 月 14 日の期間に、SSE に伴う地殻変動の候補であると検出されたものは 201 回あったのに対し、断層モデルのフィッティングに基づき SSE であると認定したものは 88 イベント、SSE の可能性が高いと認められたものは 51 イベント、SSE ではなく誤検知だと思われるのが 62 イベントであった。137 個の SSE (確実でないものを含む)の  $M_w$  は 5.4 から 6.4 の範囲に分布するが、 $M_w$  6.2 を超える SSE は、四国西部・中央部のみに 7 回発生している。SSE であることが確実であるイベントは、137.5 °(浜名湖付近)より東側と紀伊水道には認められなかったが、微動があまり発生していない伊勢湾奥部には多くのイベントが推定された。また、SSE の可能性が高いイベントの中には、微動が発生していない紀伊水道や東海地方の浅部の滑りを示すものもあるが、GPS のデータの誤差である可能性もあり、SSE が起きているのかどうかは他のデータによる検証が必要である。

傾斜計データに基づく断層モデル(Sekine et al., 2010)と GPS データに基づく断層モデルを比較すると、27 個のイベントが両手法によってともに検出され、推定された  $M_w$  に系統的な違いは見られない。 $M_w$  6.1 を超える SSE は、両手法とも検出できているが、それより小さなイベントでは GPS データでのみしか検出されていないイベントが 25 個、傾斜計データでのみしか検出されていないイベントが 17 個見つかった。これらのイベントでは微動活動の活発化が見られるため、実際に SSE が発生していたのは確実だと考えられ、小規模な SSE に対する検知能力がどちらの手法とも十分ではないことを意味している。また、地域別に SSE によって解放されたモーメントの積算の時間変化を見ると、四国西部においては、15 年間ほぼ一定の速度でモーメントが解放されているが、四国東部においては、2006 年から解放速度が増加している。GPS のアンテナ交換による精度向上や観測点の新設による見かけのものである可能性も否定できないが、Obara et al.(2010)による微動積算回数においても 2005 年頃から発生率の増加が見られるため、中長期的なプレート境界の状態変化を表している可能性もある。

キーワード: 短期的 SSE, GPS, 西南日本

Keywords: short-term SSE, GPS, southwestern Japan

## 2009-2010年豊後水道長期的スロースリップイベントによる短期的スロースリップイベントと微動活動の活発化 Activation of short-term slow slip events and deep non-volcanic tremors due to the Bungo-Channel slow slip event

岸本 剛<sup>1\*</sup>, 須田 直樹<sup>1</sup>, 小沢 慎三郎<sup>2</sup>, 矢来 博司<sup>2</sup>  
KISHIMOTO, Tsuyoshi<sup>1\*</sup>, SUDA, Naoki<sup>1</sup>, OZAWA, Shinzaburo<sup>2</sup>, YARAI, Hiroshi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 広島大・院裡, <sup>2</sup> 国土地理院

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

西南日本などの沈み込み帯深部では、様々な時定数を持つスロー地震が発生している。特に、豊後水道地域では数ヶ月間隔で発生する短期的スロースリップイベント（以下 SSE）や深部非火山性微動（以下微動）の他に、それらの震源域よりも浅部のプレート境界において長期的 SSE が約 6 年間隔で発生している (Hirose et al. 1999 ; Ozawa et al. 2004 ; Hirose et al. 2010)。これらの発生に伴い、南海トラフ沿いの浅部では超低周波地震が、深部では微動が活発化しており、長期的 SSE がその他のスロー地震発生域に与える影響が示唆されている (Hirose et al. 2010)。

前回大会では、豊後水道地域における長期的 SSE と微動の発生域に矩形断層を設定し、長期的 SSE のすべり量から微動発生域におけるクーロン応力速度変化を計算した。そして、速度・状態依存摩擦則に基づく地震発生率理論 (Dieterich 1994) に基づき、それを微動発生時間と比較することで微動活発化の説明を試みた。具体的には、豊後水道において微動活動の極大が見られる日振島の南西側と北東側、そして四国最西部のそれぞれに対して 2009 年と 2010 年の各月についてクーロン応力速度と微動発生時間との対応を調べた。その結果、両者の変化は各地域において定性的に一致していた。

しかし、その後クーロン応力速度と微動発生数を定量的に比較したところ、クーロン応力速度の増加に対して微動発生数の増加が、地震発生率理論で示されるよりも大きかった。微動発生に必要な応力速度の増加は 1 [kPa/day] のオーダーであり (Nakata et al., 2008)、1<sup>2</sup> 桁小さい長期的 SSE による応力速度の増加では観測された微動活発化を説明することは困難である。そこで今回は、現在考えられているスロー地震の発生モデルを考慮して、長期的 SSE の発生と微動の活発化の間に短期的 SSE の活発化があると考へて、前回同様に地震発生率理論に基づく定量的な説明を試みた。

広島大学では、豊後水道の日振島と大分県佐伯市の鶴御崎に STS-2 型広帯域地震計を設置し、臨時観測を行っている。データは、これらの臨時観測点に加えて JDXnet で配信されている豊後水道周辺の Hi-net<sup>2</sup> 気象庁<sup>3</sup>九州大学の観測点の連続波形記録を使用した。微動検出および震源決定には、広島大学の微動自動モニタリングシステム (Suda et al., 2009) のソフトウェアを用いた。

微動の活動は短期的 SSE のすべり域と時空間的に一致している (Hirose and Obara, 2010) ことから、豊後水道において 2~3 ヶ月間隔で発生する微動活動は、測地的観測からは検知が困難なものも含め、短期的 SSE の発生を表すものと仮定した。2005 年から 2008 年の 4 年間を長期的 SSE 発生以前の基準となる定常的な期間、2009 年 9 月から 2010 年 10 月を長期的 SSE 発生による微動活動が活発化した期間とし、この 2 つの期間において微動活動期数 (短期的 SSE 発生数) をそれぞれ調べた。その結果、定常期と活発期の発生率の比はおよそ 3.5 となった。長期的 SSE のすべりが加速した 2010 年 2~5 月では微動がほぼ連続的に発生しており、活動を区切る (個々の短期的 SSE を特定する) のは困難であるが、今回は決定された微動震源の数を基準とし、震源数 10 [個/day] という値を境界として活動を区分した。一方、基準となる定常的な応力速度を Sagiya et al., (2000) のひずみ速度から約 0.03 [kPa/day] と仮定し、長期的 SSE のすべり量から計算される豊後水道地域のクーロン応力速度を用いると、定常期と活発期のクーロン応力速度の比はおよそ 3.5 であった。両者の値の一致は、長期的 SSE による短期的 SSE の活発化は地震発生率理論で説明できることを示している。今回の微動活動期の区分では、定常期と活発期で平均的な微動活動期間 (短期的 SSE 継続時間) は同程度になっている。従って、微動発生時間は短期的 SSE の発生数に比例している。つまり、前回大会で示した長期的 SSE によるクーロン応力速度と微動発生時間の見かけの比例関係は、両者の間に短期的 SSE の発生を挟むことによって定量的に説明できると考えられる。発表では、微動活発化を時間的に詳細に調べた結果についても示す。

謝辞 ; 日振島における観測では日振島漁協および NTT 西日本の、鶴御崎における観測では佐伯市役所鶴見支所のご協力を頂いています。データ解析には JDXnet で配信された連続記録を使用しました。応力計算には Coulomb 3.2 (Toda et al., 2005) を使用しました。また、気象研究所の弘瀬さんによるプレート形状の数値データを使用しました。ここに謝意を表します。

キーワード: スロースリップイベント, 深部非火山性微動, クーロン応力速度, 豊後水道  
Keywords: slow slip event, deep non-volcanic tremor, coulomb stress rate, Bungo Channel

## 2011年房総半島スロースリップイベントのすべり過程と群発地震活動 Slip history for the 2011 Boso peninsula slow slip event and the accompanying earthquake swarm

廣瀬 仁<sup>1\*</sup>, 木村 尚紀<sup>2</sup>, 木村 武志<sup>2</sup>, 松澤 孝紀<sup>2</sup>

HIROSE, Hitoshi<sup>1\*</sup>, KIMURA, Hisanori<sup>2</sup>, KIMURA, Takeshi<sup>2</sup>, MATSUZAWA, Takanori<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 防災科学技術研究所

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Kobe University, <sup>2</sup>National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

房総半島沖ではフィリピン海プレートの沈み込みに伴い、5-7年間隔で約1-2週間継続するスロースリップイベント(SSE)がくり返し発生していることが、国土地理院のGPS観測網(GEONET)や防災科研の高感度地震観測網(Hi-net)で観測されている。この房総半島SSEは、日本の他地域で発生しているSSEでは見られない、SSEの継続期間中に群発地震活動を伴うという特徴を持つことが知られている(Sagiya, 2004; NIED, 2003; Ozawa et al., 2003, 2007)。その房総SSEが、2011年10月下旬に再来した。これは前回2007年8月のイベントから4年2か月ぶりの発生となる。この2回のSSEによる地殻変動は、GEONETだけでなく、防災科研Hi-net高感度加速度計(傾斜計)でも複数の地点において観測されている。これらSSEと群発地震活動との関係を明らかにするためには、SSEの詳細なすべり過程を推定し、地震活動の時間的・空間的变化と比較することが重要である。そこで本研究では、房総半島周辺のHi-net傾斜データおよびGEONETデータから、2007年および2011年のSSEのすべり過程を求めた。

両者のSSEで共通する特徴として、大局的には、すべりが千葉県勝浦市付近の東方沖の領域からはじまり、すべりの加速とともに、すべりの中心が徐々に西方に移動すること、そしてそのすべりと対応するように、地震活動も東方沖の領域から西方の陸域に活動の中心位置を移していくことがわかった。これらのことから、群発地震活動はSSEのすべりによって誘発されていることが強く示唆される。しかしながらより子細なすべり過程を見ると、両者で違いが見られる。2007年イベントの初期の段階では、すべりが勝浦市の東方沖の領域から開始し、それが北方へ伝播し、初期の地震活動がその先端で発生している。これに対し、2011年イベントでは、そのような初期過程はあまり明瞭ではないが、すべりの加速と地震活動の活発化ののち、すべりが若干浅部(南方)へ移動しつつ西へ伝播して行った。両者の解析で観測点配置が同一ではないため、その影響がすべり過程の違いに現れている可能性もあるが、両者の違いはSSEのくり返しサイクルにおけるすべり領域の変化を示しているとも考えられる。後者の場合、SSE発生領域は相模トラフに沿って発生するプレート境界型巨大地震震源域に隣接しており、その地震間での準備過程を知る上でも重要な現象である。

謝辞: 国土地理院のGPS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: 相模トラフ, 沈み込み帯, GPS, 傾斜変動, 群発地震

Keywords: Sagami trough, subduction zone, GPS, tilt change, earthquake swarm



## 速度強化型摩擦の原子論的起源 Atomistic origin of velocity-strengthening friction

波多野 恭弘<sup>1\*</sup>  
HATANO, Takahiro<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東大地震研

<sup>1</sup>ERI, Univ. Tokyo

小原による非火山性深部低周波微動の発見以来、様々な種類のスロー地震が次々と発見されてきたが、それら多様なすべり現象を生み出す物理過程は未だ謎に包まれている。プレート境界における応力蓄積過程の理解は、スロー地震のエネルギー解放機構やその発生サイクルの理解と不可分であるため、スロー地震を再現するさまざまなモデルがこれまで提出されてきた。すべりが加速せず進行するためには何らかの安定化機構が必要であり、実際に従来モデルの多くは速度・状態依存摩擦法則（あるいは類似の法則）を仮定し、正の速度依存性をもたせることによってゆっくりしたイベントを再現している。

複数の異なるモデルが雌雄を決するためにはマクロ観測データの更なる精緻化を待つ他ないが、モデルで仮定される様々な摩擦法則のミクロな物質科学的根拠の理解を深めておくことも必要であると考えられる。物質科学から帰結される摩擦特性はモデルへの拘束条件となり得るし、その拘束条件のもとでマクロな振る舞いを観測データとつきあわせることによってモデルの更なる高度化を目指すことも可能になる。

このような目論みのもと、ここではスロー地震のモデル化にしばしば用いられる速度・状態依存摩擦法則の原子論的基礎について論じる。これまで速度・状態依存摩擦法則は実験結果をまとめた経験則として確立してきたが、その微視的実体は必ずしも明確に理解されていない。たとえば、いわゆる「すべり弱化」を支配する長さ定数が法則の中に現れるが、その統計的性質は明確に定義されていない。また、摩擦係数の速度依存性がどのような物質定数から決まるのかも分かっていない。高温高压で水が存在すると正の速度依存性が観測されやすいことが経験的には分かっているが、そのような実験事実を第一原理的に理解する枠組はこれまで存在しない。

本研究では、原子論的構成法則からスタートして速度・状態依存摩擦法則を導出することにより、長さ定数と速度依存性を表す定数についてそれぞれ原子論的表式を与える。この結果によって、摩擦力のすべり速度依存性を物質定数だけから論じることが可能になる。これらの結果を踏まえ、スロー地震の理解に重要な以下の点を論じる。1. 正負の速度依存性が切り替わるクロスオーバー速度について。2. 摩擦特性における水の影響。

キーワード: 摩擦, 速度状態依存摩擦法則, クリープ

Keywords: friction, rate- and state-dependent friction, creep



## ゆっくり地震の地質学的実体 Geological process of the slow earthquakes

北村 有迅<sup>1\*</sup>, 木村 学<sup>2</sup>, 川端 訓代<sup>3</sup>  
KITAMURA, Yujin<sup>1\*</sup>, KIMURA, Gaku<sup>2</sup>, KAWABATA, Kuniyo<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構地球内部ダイナミクス領域, <sup>2</sup> 東京大学・理・地球惑星科学, <sup>3</sup> 台湾国立中央大学地球物理研究所  
<sup>1</sup>IFREE, JAMSTEC, <sup>2</sup>Dept. Earth Planet. Sci, Univ. Tokyo, <sup>3</sup>Inst. Geophys., National Central Univ.

本研究では沈み込みプレート境界におけるゆっくり地震の本質的過程を地質学的に明らかにし, ゆっくり地震発生の一つの仮説モデルを提案する. これまでに我々は陸上及び海洋掘削による試料を用いて, 沈み込みチャンネル内での変形の発達を捉えてきた. 研究対象とした西南日本四万十帯に分布するテクトニックメランジュはプレート境界断層帯と考えられており, そこに記録された変形履歴を明らかにする事でプレート境界過程の各段階の情報を抽出する事ができる. 沈み込む初期物質は主として単調な砂泥互層であるが, 剪断条件下におかれるとその物性差から砂岩が破壊され, より粘性的に振る舞う泥岩中に離散する. これがテクトニックメランジュの形成過程であり, この砂岩の破壊の度合いは沈み込みの進行に伴って増加する. 一方, 徳島県牟岐地域のテクトニックメランジュはその上部境界断層にシュードタキライトを産する. 我々の解釈では, プレート境界は厚い断層帯を形成し変形の時空間的分離が起こっている, すなわち, 上部境界では間欠的に高速な滑りが生じ, 断層帯本体では低速で継続的に変形している. これらの変形がそれぞれプレート境界地震とゆっくり地震に関係すると仮定し, 本研究ではさらに, このような変形機構が現実のゆっくり地震を担うだけのエネルギーを放出可能か理論的に検証した. 近年観測されている浅部超低周波地震を想定したモデルによる理論的見積りは, 観測されているデータと矛盾しない結果を得た. この結果は地震のエネルギー収支問題の解決の端緒ともなり, 地質学から地震学への貢献を可能とする試みである.

キーワード: ゆっくり地震, 四万十帯, 南海トラフ, プレート境界地震, テクトニックメランジュ

Keywords: Slow earthquake, Shimanto Belt, Nankai Trough, plate boundary earthquake, tectonic melange