

## 2013-2014年房総スロースリップイベントにおけるすべりと地震活動の時空間発展 Spatial and temporal evolution of slip and seismicity during the 2013-2014 Boso slow slip event

福田 淳一<sup>1\*</sup>; 加藤 愛太郎<sup>1</sup>; 小原 一成<sup>1</sup>; 三浦 哲<sup>2</sup>  
FUKUDA, Jun'ichi<sup>1\*</sup>; KATO, Aitaro<sup>1</sup>; OBARA, Kazushige<sup>1</sup>; MIURA, Satoshi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 東北大学理学研究科

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

GPS time series data show that transient crustal deformation has been occurring in the Boso peninsula, central Japan, since December 2013. Observed spatial and temporal patterns of surface displacements suggest the occurrence of transient aseismic slip on the subducting Philippine Sea plate. In addition, an increased rate of seismicity was observed from 31 December 2013 to 9 January 2014 off the east coast of the Boso peninsula. The location of the increased seismicity partly overlaps with the areas of seismic activity during the past Boso slow slip events.

To estimate spatial and temporal evolution of aseismic slip, we use GPS data from 71 stations of the GEONET in the Kanto region and data from 6 stations located along the east coast of the Boso peninsula, which are operated by Earthquake Research Institute of University of Tokyo and Tohoku University. The data are analyzed with GIPSY-OASIS II software to obtain daily coordinate time series at the 77 stations. Secular velocities, seasonal variations, and postseismic deformation following the 2011 Tohoku-oki earthquake are removed from the time series. We use a modified version of the Network Inversion Filter to estimate spatial and temporal evolution of daily cumulative slip and slip rate on the Philippine Sea plate. Slip slowly started around 20 December 2013 off the east coast of the Boso peninsula and then slip rapidly accelerated around 28 December and propagated to the west. Slip continued to accelerate until 3 January and then rapidly decelerated until 9 January.

To investigate spatial and temporal correlation of slip and seismicity, we use a matched-filter technique to detect earthquakes in the area of increased seismic activity. The detected earthquakes are located along the northern edge of the large aseismic slip and migrated from east to west during the period of rapid aseismic slip (31 December to 9 January). This migration pattern is consistent with the propagation of rapid aseismic slip, suggesting that the earthquakes are triggered by stress loading due to the propagation of aseismic slip. We do not identify significant seismic activity before 28 December, indicating that the slow slip event started well before the initiation of the seismic activity.

キーワード: スロースリップイベント, 地震活動, GPS  
Keywords: slow slip event, seismic activity, GPS

## 2011年東北沖地震に誘発された房総スロースリップイベント A slow slip event near the Boso Peninsula immediately triggered by the 2011 Tohoku-Oki earthquake

加藤 愛太郎<sup>1\*</sup>; 五十嵐 俊博<sup>1</sup>; 小原 一成<sup>1</sup>  
KATO, Aitaro<sup>1\*</sup>; IGARASHI, Toshihiro<sup>1</sup>; OBARA, Kazushige<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所  
<sup>1</sup> ERI University of Tokyo

It has been recognized that a series of slow slip events, accompanying with ordinary earthquakes, take place with recurrence intervals from 5 to 7 years near the Boso Peninsula along the plate interface of the subducting Philippine Sea plate [e.g., Hirose et al., 2012]. Immediately after the 2011 Tohoku-oki earthquake, intensive afterslip have been detected to start along the plate interface of the Pacific plate from off Tohoku region to southward Kanto region [e.g., Munekane et al., 2012; Fukuda et al., 2013]. It is well known that both the Pacific and the Philippine Sea plates are subducting beneath the Kanto region, and interacting with each other. Therefore, it is expected that the Philippine Sea plate might be dragged by the speeding Pacific plate during the intensive afterslip. We hypothesize that the dragging of the Philippine Sea plate by the Pacific plate leads to triggering of a slow slip event near the Boso Peninsula immediately after the Tohoku-Oki earthquake.

In order to verify the above hypothesis, we analyzed the seismicity including small repeating earthquakes, applying the matched filter technique to continuous waveforms. We used all available earthquakes associated with three sequences of slow slip events in 2007, 2011, and 2014 as template events. Then, we searched for events those have similar waveforms to ones of each template event from continuous waveforms. Based on the new earthquake catalog, we found out an abrupt increase in the swarm-like seismicity at the slow slip source area from March 12 to 14, 2011. In addition, some repeating earthquakes were extracted in the swarm, indicating aseismic slip transient. We, thus, interpret that the seismic swarm were linked to a newly detected slow slip event, which has not been previously recognized. However, based on the amount of aseismic slip deduced from the repeating earthquakes, moment released by the slow slip event is estimated to be smaller than by previously recognized slow slip events. We thus conclude that a small slow slip event might be triggered through the dragging of the Philippine Sea plate by the Pacific plate immediately after the Tohoku-Oki earthquake.

## 房総半島沖のスロースリップイベントに伴う群発地震活動と地球潮汐の関係 Tidal correlations of earthquake swarms associated with slow slip events off Boso Peninsula

田中 佐千子<sup>1\*</sup>  
TANAKA, Sachiko<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 防災科研  
<sup>1</sup> NIED

### 1. はじめに

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、数年間隔でスロースリップイベントが発生し、その北縁域では、これらの活動に同期して、群発地震活動が活発となることが知られている (Hirose et al., 2012). 2013年12月末から2014年1月上旬にかけて発生したスロースリップイベントでは、約1週間にわたって地震活動の活発化が観測され、12/24時間の周期で消長を繰り返す特徴が見られた。群発地震活動の発生に地球潮汐が影響を及ぼしている可能性が示唆される。本研究では、2000年以降に捉えられた4回のスロースリップイベント (2002年, 2007年, 2011年, 2014年) に注目し、各イベントに伴う群発地震活動と地球潮汐の関係を調査した。

### 2. データ・解析方法

スロースリップイベントに伴う群発地震活動は、Hirose et al. (2012) に従い、深さ 28 km 以浅の Hi-net 震源データに基づいて抽出した。地球潮汐による応力変化は Tanaka et al. (2012) の方法を用い、海洋荷重の効果も含めて理論的に計算した。応力成分は断層面上のクーロン破壊応力 (摩擦係数 0.2) に着目した。断層幾何は、2014年の活動の最大地震 (Mw 4.9) について得られた F-net モーメントテンソル解を参考に、プレート走向に沿う陸側傾斜の逆断層を仮定した。計算した理論地球潮汐から地震発生時刻の潮汐位相角を読み取り、Schuster (1897) の方法を用いて位相選択性の有無を検定した。この検定で得られる p 値は帰無仮説「地震発生は地球潮汐の位相角によらない」を棄却する危険率を表す。

### 3. 解析結果

2014年の活動について、活動推移を地球潮汐によるクーロン破壊応力と比較すると、地震の発生数は応力変化に対応して増減を繰り返し、地球潮汐の特定の位相に集中する傾向が見られた。活動の全期間について得られた p 値は 0.01% で、地震の発生が地球潮汐の応力変化に対して強い位相選択性を示すことが明らかとなった。地震の発生頻度は、地球潮汐による応力変化が断層面上のすべりを最も強く促進する位相角 0 度付近に集中する傾向を示す。スロースリップによって周辺の応力状態が高まり、地球潮汐の応力変化が加わることで地震が誘発されたと考えることができる。

一方、2002年, 2007年, 2011年の活動については、活動推移と地球潮汐との間に明瞭な対応関係は見られない。各期間について得られた p 値は、87% (2002年), 16% (2007年), 14% (2011年) である。房総半島周辺で観測された地殻変動データからは、これら3回の活動では、2014年よりも変動量が大きく、スロースリップイベントの規模が大きかったと考えられる (Hirose et al., 2013; 木村, 2014)。2002年, 2007年, 2011年の活動では、スロースリップの影響が大きく、地震の誘発に地球潮汐による応力変化はほとんど影響を及ぼさなかったと推察される。

キーワード: 房総半島スロースリップ, 地球潮汐, 地震トリガリング

Keywords: Boso Peninsula slow slip events, Earth tides, earthquake triggering

## 水準データから推定される1981年以降の東海地方の固着・スロースリップ Interplate coupling and SSE in the Tokai region after 1981 using leveling data

落唯史<sup>1\*</sup>  
OCHI, Tadafumi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>産総研  
<sup>1</sup>AIST

2000年から2005年にかけて発生した東海長期スロースリップイベント(SSE)は約5年間継続したイベント[水藤・小沢(2009)]で、他の地域で発生したSSEと比べても継続期間が極めて長い[例えば、Schwartz and Rokosky(2007)]。2005年以降は顕著なイベントは発生していないため、現段階では繰り返しの全体像は得られていないし、そもそも繰り返す現象なのかどうか不明かではない。Ochi and Kato(2013)は固着・すべりの時間発展を推定したが、これはGNSSデータによる面的な地殻変動が容易に得られるようになった1996年以降の解析であるから、上記の問題の解決には足りない。固着・スロースリップの時間発展をモデリングし物理過程を考察するためには、次のSSEが発生するまで待つか、過去の同様なイベントを探索するかの二通りの選択肢があるが、現段階でできる研究は明らかに後者である。

過去にも様々な測地観測は行われており、これらのデータを用いた固着の時間変化の研究はこれまでもいくつも行われている。たとえば木股・山内(1998)ではEDMの、小林・吉田(2004)では潮位記録のデータを解析して、過去の地殻変動の変化を検出している。本研究では1981年以降、1999年までの水準測量データを解析し、東海地方の上下地殻変動のパタンによる時間変化を推定した。掛川・御前崎の水準路線に対しては年4回の、また舞阪を西端、静岡を東端とする三角形の水準路線に対しては年1回のデータが国土地理院により提供されている。これらのデータを用いて、2年平均の年間鉛直変動速度をFujii(1991)の時間依存網平均方法により推定した。推定誤差は2mm/yr程度であり、同様のモデルをGNSSデータに適用したときの鉛直変位速度の推定誤差の2倍程度である。他の測地データと比較して水準データを用いることの最大の利点は、網平均をとることによって、比較的誤差の小さい鉛直変動データが面的に得られることである。

解析の結果、SSEの有無に対応すると考えられる2つの空間パタンが交互に現れ、2000-05年のSSEと似たパタンが1982-83、1988-90、1997年に現れた。このうち1982-83年のイベントは継続時間が短いのにに対して、1988-90年のイベントは長期間継続しており、2000-05年のイベントと合わせると、継続期間に多様性があることがわかった。1997年の小さなイベントを含めると、大小の現象が交互に発生し、大きなイベントの後には間隔が広がるようにも見える。ただし、1997年のイベントは2000年以降のSSEと近接しているため、時間方向の平滑化による見かけ上の結果である可能性があり、この点は検討中である。

さらに得られた結果からプレート境界面の固着・スロースリップの分布の時間変化を推定した。スロースリップの中心の位置はOchi and Kato(2013)の結果にしたがって浜名湖北東深さ30-40km程度の場所に固定し、大きさのみをフォワード計算で合わせたところ、1982-83年、1988-90年のいずれの現象も、2000-05年のSSEと比べてすべり量は数割程度小さくする必要があることがわかった。一方、固着に関しては御前崎直下ではほぼ一定に30-40mm/yr程度のすべり欠損に相当する量が必要であり、これは2000-05年のイベントと同様である。

キーワード: 水準データ, プレート間固着, スロースリップ, 東海地方  
Keywords: leveling data, interplate coupling, slow slip event, the Tokai region

## 道北で2012年後半に発生した浅いSSE：地震動によるトリガー A shallow slow-slip-event in northern Hokkaido in 2012-2013: An event triggered by seismic waves.

池田 将平<sup>1\*</sup>; 日置 幸介<sup>2</sup>  
IKEDA, Shohei<sup>1\*</sup>; HEKI, Kosuke<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学理学院, <sup>2</sup> 北海道大学大学院理学研究院自然史科学部門

<sup>1</sup>Graduate School of Science, Hokkaido University, <sup>2</sup>Department of Natural History Sciences, Faculty of Science, Hokkaido University

GPS (Global Positioning System) に代表される全球衛星測位システム GNSS (Global Navigation Satellite System) が登場し、地震動を伴わない断層すべりであるスロー地震 (Slow Slip Event, SSE) が観測できるようになった。従来、房総沖や南海トラフなど、海域のプレート境界で起こった SSE については多くの報告があるが、内陸部での浅い SSE の報告はなかった。本研究では、プレート境界から離れた内陸部である道北 (北海道北部) で 2012 年夏から 2013 年初頭にかけて、GEONET (GNSS Earth Observation Network System) の点である幌延と中頓別の間の距離が 2 cm 近く縮んだことを見出し、その原因を SSE と仮定し、断層パラメータ等を推定した。SSE が起こった道北には南北にブロック境界が走り、年間 1 cm 程度の東西方向の収束が起こっていると考えられている (Loveless and Meade, 2010)。この SSE は内陸部のブロック境界におけるイベントとしてユニークな観測例である。

本研究では、幌延と中頓別に、天塩や浜頓別等の近隣 GNSS 局も加えて、それらの相対位置の時系列を解析した。今回推定されたスロー地震の断層パラメータによると、解放された地震モーメントはマグニチュード 5.9 に相当するものであった。すべり量は約 10 cm と推定されたが、道北のブロック境界の平均的な収束速度 (1cm/yr) から、この程度の SSE は、十年に一度程度の間隔で繰り返している可能性がある。残念ながら幌延と中頓別の GNSS 局はいずれも 2002 年に運用を開始しており、2012 年の前の回の SSE についての情報は得られていない。

幌延—中頓別の基線長変化は 2012 年夏と 2013 年初頭に折れ曲がりを持つ折れ線で最も良く近似される。折れ曲がりの位置を、残差が小さくなるように最適化すると、開始が 2012.64、終了が 2013.08 となった。開始時期にはサハリン深部で深さ 600 km を超える Mw7.7 の深発地震が 8 月 14 日に発生している。また同年 7 月には幌延局の近傍で四度の M4 級地震が発生している。SSE の開始は、これらの地震による地震動が関わっている可能性が高い。また SSE が終わった時期 (2013/1/3) には SSE の断層の深部延長の深さ約 24 km のところで M4.8 の地震が発生している。力学的にはこの地震が SSE の終了を促すことは考えにくいいため、SSE の終了と断層深部延長における地震の発生は偶然である可能性も高い。

キーワード: GPS, スロー地震, 道北, 地震動

Keywords: GPS, Slow Slip Event, Northern Hokkaido, seismic waves

## DONET 内で同時期に観測された地震活動変化と圧力変動 Seismicity and pressure changes observed around DONET at the same time

鈴木 健介<sup>1\*</sup>; 高橋 成実<sup>1</sup>; 堀 高峰<sup>1</sup>; 神谷 眞一郎<sup>1</sup>; 中野 優<sup>1</sup>; 金田 義行<sup>1</sup>  
SUZUKI, Kensuke<sup>1\*</sup>; TAKAHASHI, Narumi<sup>1</sup>; HORI, Takane<sup>1</sup>; KAMIYA, Shin'ichiro<sup>1</sup>; NAKANO, Masaru<sup>1</sup>; KANEDA,  
Yoshiyuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構

<sup>1</sup>JAMSTEC

海洋研究開発機構は、南海トラフで発生する地震・津波を常時監視することを目的として、熊野灘海域に地震・津波観測監視システム（Dense Oceanfloor Network system for Earthquakes and Tsunamis: DONET）を展開している。DONET の各観測点には、広帯域地震計・強震計・ハイドロフォン・微差圧計・水晶水圧計・温度計が設置され、海底ケーブルに接続されているためにデータがリアルタイムで常時陸上に伝送されてきている。陸から離れた海域に地震計が設置されているため、陸上観測点のみでは捉えることのできない微小地震を検知することが可能であり、微小地震を含めた詳細な地震活動およびその変化を捉えることができる。同様に、水圧計が常時海底に設置されているため、連続的に水圧変化を監視し、ローカルな地殻変動を捉えることが可能である。上述された地震・測地学的情報は、地震発生のメカニズムを考える上で基礎的かつ重要な情報となる。

現在、海洋研究開発機構では、気象庁一元化カタログとは独自に DONET の広帯域地震計記録から地震の検知をおこなっているため、気象庁一元化カタログには載っていない微小地震も検知することができる。鈴木・他（2013）は、2011年01月から2013年9月までの地震活動に対して ETAS モデル（Ogata, 1989）を適用し、2013年2月以降はモデルから予測されるよりも地震活動が低下していることを示した。また、同時期の圧力計の記録に注目すると一部の近接した観測点（KMB05, KMB06, KMB07）においてトレンドからのずれ（圧力変動）が観測された。

本研究では、鈴木・他（2013）が用いたデータに2014年1月までのデータを追加し、同様の解析をおこなった。その結果、2013年2月以降の地震活動は依然としてモデルから予測されるよりも低調である。一方、3点の圧力計で観測された変動は2013年9月以降も続いており、鈴木・他（2013）では変動が確認されなかった3観測点に近接した KMB08 においても新たに変動が観測された。同時期に地震活動と圧力計に変動がみられたことから両者の間になんらかの関係性が存在することが期待される。地震活動変化と圧力変動を引き続き監視するとともに圧力変動を説明可能な断層運動を推定し、地震活動に与える影響を評価することが今後の課題である。

キーワード: 地震活動, 海底圧力計, DONET, ETAS モデル

Keywords: seismicity, ocean bottom pressure gauge, DONET, ETAS model

## 地下水位（水圧）観測による南海トラフの短期的ゆっくり滑りの検出 Detection of short-term slow slip events along the Nankai Trough by observations of groundwater level or pressure

北川 有一<sup>1</sup>; 小泉 尚嗣<sup>1\*</sup>

KITAGAWA, Yuichi<sup>1</sup>; KOIZUMI, Naoji<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所地質調査総合センター

<sup>1</sup> Geological Survey of Japan, AIST

非火山性の深部低周波微動（以降、単に深部低周波微動と記す）が世界のいろいろな沈み込み帯で発見されている [Obara, 2002; Ide, 2012].（地殻変動のみを生じて通常の地震波をださない）短期的ゆっくり滑りも同様に世界の沈み込み帯で検出されている [Rogers and Dragert, 2003; Schwartz and Rokosky, 2007; Sekine et al., 2010]. 深部低周波微動と短期的ゆっくり滑りについては時空間的に密接な関係があるが、詳細に見てみると、深部低周波微動が発生している所で必ずしも短期的ゆっくり滑りが発生していない場合があるし、その逆の場合もある。したがって、沈み込み帯のプレート境界で何が起きているのかを知る為には、深部低周波微動と短期的ゆっくり滑りの時空間的な関係を、より詳細に明らかにする必要がある。しかしながら、地殻変動観測による短期的ゆっくり滑りの検出能力は、地震観測による深部低周波微動のそれより一般に劣ることを考慮する必要がある。双方の検出能力が異なる大きな理由の1つは、地殻変動の距離減衰は、地震波の距離減衰よりずっと大きいということである。したがって、この検出能力の差異を小さくするために、短期的ゆっくり滑り検出のための新たな観測技術を開発する必要がある。我々は、三重県のANO観測点における地下水圧観測とそのデータの解析によって、南海トラフの短期的ゆっくり滑りを検出することを試みた。ANO観測点での地下水・地殻ひずみ観測は2010年2月にスタートしたが、観測データが安定したのは2011年6月以降である。2011年6月～2013年4月の観測データを調べた所、ANO観測点周辺で発生した6度の短期的ゆっくり滑りに対してANO観測点のひずみだけでなく、地下水圧も変化していることがわかった。この地下水圧変化は、短期的ゆっくり滑りのモデルを用いて定量的に説明出来た。また、地下水圧（地下水位）観測で短期的ゆっくり滑りが検出可能な条件についても考察した。南海トラフの短期的ゆっくり滑りに伴う体積歪変化は、大きくても10-20 nstrain/day (nstrain=10<sup>-9</sup>strain) なので [Kobayashi et al., 2006], 体積歪に換算して、ノイズレベルを5 nstrain/day 以下にする必要がある。実際の地下水観測条件を考慮すると、この条件を満たすためには、地下水位や地下水圧の体積ひずみ感度が1mm/nstrain 以上で、ノイズレベルが50mm/day 以下であることが必要条件である（十分条件ではない）。

キーワード: ゆっくり滑り, 深部低周波微動, 地下水, 多孔質弾性論, ひずみ, 地震予測

Keywords: Slow slip event, Deep low-frequency tremor, Groundwater, Poroelastic theory, Strain, Earthquake forecast

## 深部低周波微動エピソードの時間発展に見られる特徴 Time evolution of non-volcanic tremor episode

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

西南日本などの沈み込み帯に発生する深部低周波微動 (Obara, 2002) は、プレート境界の巨大地震発生域と安定すべり域との間の遷移領域を震源とするスロー地震現象であり、数日以上継続する規模の大きな微動エピソードは短期的スロースリップイベント (SSE) を伴って発生することから、微動の時間発展は SSE のすべり破壊過程を反映すると考えられる。巨大地震と類似した特性を示す微動・SSE の活動様式を明らかにすることは巨大地震の理解にも重要であることから、本研究では微動エピソードの時間発展について解析を行なった。

西南日本に発生する深部低周波微動は、それぞれのエピソードの移動範囲や繰り返し性から数個のセグメントに分割される (Obara, 2010)。また、一つのセグメント内でも複数のサブセグメントが存在し、微動エピソードの活動を規定する (小原・他 2013)。微動エピソードは幅の狭い帯状領域の深部側から開始することが多く、浅部側に達する場合に規模の大きなエピソードとして発達するが、浅部側でも不均質の強い場所から微動エピソードが始まることもある (Obara et al., 2011)。これらの微動エネルギーの成長速度を比較すると、深部で微動が開始した場合は、はじめは成長速度が遅く浅部に達した途端に速度が急増するの比べ、浅部から開始した場合には、活動開始直後から成長速度が速い。このことは、強いエネルギーを放射する微動源が浅部側に集中していることを示す。また、微動エピソードの最終的規模は、開始時の成長速度に依存せず、大きなエピソードに発展するかどうかは、途中のひずみエネルギーの蓄積状況によると考えられる。このことは、微動エピソードの走向方向への進展についても同様であり、移動する微動エピソードがサブセグメント境界を越えるかどうかは、その先のサブセグメントのすべり欠損の状況に依存する。微動活動のギャップであるサブセグメント境界では、移動速度が一旦減速する場合が認められた。一方、ある場所では、微動エピソードがそこを通過する際に加速することが何度か確認されている。この場所は、定常的に小規模な微動が発生する sweet spot に対応し、エピソードの開始点となる場合も多いことから、不均質性が強いことが考えられる。このような不均質がスロースリップのすべり破壊過程に影響を及ぼしているのであろう。

※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」によって実施された。

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, source migration, segmentation

## 深部低周波微動カタログの基本的特性 Fundamental properties of non-volcanic low frequency tremor catalogues

武田 直人<sup>1\*</sup>; 小泉 尚嗣<sup>1</sup>; 松澤 孝紀<sup>2</sup>; 田中 佐千子<sup>2</sup>; 小原 一成<sup>3</sup>; 前田 拓人<sup>3</sup>  
TAKEDA, Naoto<sup>1\*</sup>; KOIZUMI, Naoji<sup>1</sup>; MATSUZAWA, Takanori<sup>2</sup>; TANAKA, Sachiko<sup>2</sup>; OBARA, Kazushige<sup>3</sup>; MAEDA, Takuto<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所, <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, AIST, <sup>2</sup>NIED, <sup>3</sup>ERI, Univ. of Tokyo

西南日本での深部低周波微動 (non-volcanic low frequency tremor; NVT) の発見 (Obara Science 2002) 以来, 日本のみならず世界の様々な沈み込み帯や断層深部において NVT が発見され, それに関する研究が盛んにおこなわれている. その中でもエンベロープ相関法を用いた NVT の検出, カタログ化は NVT 活動の時空間分布の特徴を知る上で重要な役割を果たしている (例えば, Maeda & Obara, JGR, 2009; Ide, Nature, 2010; Nakata et al., Nature Geoscience, 2008; Imanishi et al., GRL, 2011). これらの研究で用いられる NVT カタログは全て同じでは無く, 研究者毎に異なった解析プログラムを使っており, それぞれ独自の工夫がこらされている. また, 同じ解析プログラムでも, カタログの用途に応じて検出パラメータを調整する場合もある. したがって, NVT 活動の様子を詳細に見ると, カタログ毎にところどころ異なる場合があるが, 現状ではその相違点は無視されがちである. そこで本報告では, 気象庁一元化震源の低周波地震, 防災科研及び産総研それぞれの NVT カタログを対象に, カタログの基本特性としての位置分解能, NVT 規模感度特性等に関して比較した結果を紹介する.

位置分解能の推定手法は Ide (Nature 2010) の相対位置の標準偏差を拡張し, いくつかのカタログ間の相対位置標準偏差から個々のカタログ単体の位置分解能を導出した. その結果, 気象庁, 防災科研, 産総研のカタログ共に大きな差はなく, 水平位置分解能は 2~3km となった.

NVT 規模感度特性は各カタログを基にし, その他のカタログのマグニチュード (気象庁カタログを基にした場合) もしくは NVT エネルギー (防災科研・産総研カタログを基にした場合) に対する感度の変化を調べた. その結果, カタログ毎に感度が高くなる NVT 規模 (マグニチュード, NVT エネルギー) が異なることが分かった. この感度特性は, 検出パラメータを変えることでも変化する場合があった. また, どのカタログにおいても NVT 規模が大きくなるにつれ感度が低下していた. NVT の特徴の一つとして連続して起こることが挙げられるが, 発生頻度が高くなった場合, NVT であるか否かの判断が難しくなる. また, この時 NVT 規模が大きくなると予想される. これが, NVT 規模が大きくなるにつれ感度が低下する原因と考えられる. 講演では, これら感度特性の違いが NVT 活動の時空間分布の見え方が変わる例をいくつか紹介する.

今回明らかにした NVT カタログの基本的特性は, 様々なカタログを比較する場合の指標になるだけでなく, 用途に応じ検出パラメータを調整する場合にも役立つものと考えている.

謝辞: 本研究において気象庁一元化震源リスト及び防災科研 Hi-net, 産総研, 気象庁, 東京大学, 京都大学, 九州大学, 高知大学, 名古屋大学の連続地震波形記録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, カタログ, 位置分解能, NVT 規模感度特性

Keywords: non-volcanic low frequency tremor, catalogue, position resolution, NVT scale-sensitivity property

## S波の振動方向を用いた深部低周波微動の発震機構解推定—S波スプリッティングの補正— Determination of focal mechanisms of non-volcanic tremors using S-wave polarization: Correction for shear wave splitting

今西 和俊<sup>1\*</sup>; 内出 崇彦<sup>1</sup>; 武田 直人<sup>1</sup>  
IMANISHI, Kazutoshi<sup>1\*</sup>; UCHIDE, Takahiko<sup>1</sup>; TAKEDA, Naoto<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所

<sup>1</sup> Geological Survey of Japan, AIST

世界各地のプレート境界域で発見された深部低周波微動は、巨大地震の発生機構を解明するための重要な手掛かりとして注目されている。微動に有効な震源決定法はいち早く開発され (Obara, 2002)、発生場所や活動様式についての理解に繋がっている。一方、どのような運動で発生しているのかを表す発震機構解は、同じ場所で発生している微動を数多くスタックして SN 比を上げることで可能となるが (Ide et al., 2007; Bostok et al., 2013)、結果としてごく一部の解しか推定できないという問題点が残される。

今西・武田 (2010) は連続波形の Polarization 解析により、微動が発生している時間帯になると振動方向のばらつきが小さくなることを明らかにした。同様の結果はカスケードの微動においても報告されている (Bostock and Christensen, 2012)。微動は主に S 波で構成されていることから (例えば、Obara, 2002)、ここで見ている振動方向は S 波によるものである。S 波の振動方向は発震機構解に依存しているので、複数観測点の振動方向を使うことで発震機構推定が可能となる。しかし、S 波は異方性媒質中を伝播するとスプリッティングを起こすため、その影響を正しく評価しないと発震機構解の推定に影響を及ぼしてしまうことに注意が必要である。実際に通常地震を用いた研究では、スプリッティングの影響を考慮しないで求めた振動方向は発震機構解から計算される振動方向と矛盾することが報告されている (例えば、Zhang and Schwartz, 1994)。

本研究ではまず始めに、微動データに対して異方性解析 (Silver and Chan, 1991) を行い、スプリッティングが存在しているか否かを調べた。解析においては観測波形に 2-8Hz のバンドパスフィルターを掛け、1 分のタイムウィンドウ毎に早い S 波の振動方向 (LSPD) および早い S 波と遅い S 波の到着時間差 (DT) の推定を行った。推定された DT は 0.1 秒ほどあり、震源放射に関係した S 波の振動方向を正しく求めるためにはスプリッティングの補正が必要である。推定された LSPD はプレートの沈み込み方向にほぼ直交するものと平行するものの 2 パターンが卓越しており、それぞれ明瞭な空間分布を示す。これらの結果は通常地震を用いた既存研究 (例えば、Saiga et al., 2011) と調和的であり、SN 比の悪い微動であっても異方性パラメータの推定が可能であることが確認できた。

次に以下の手順に従い、スプリッティングの影響を補正して発震機構解を推定した。

(1) 水平 2 成分を早い S 波の振動方向と遅い S 波の振動方向に回転し、遅い S 波の振動方向を時刻 DT だけ進める。その後逆回転させて東西、南北方向に戻す。

(2) 1 分のタイムウィンドウ毎に Polarization 解析を行い、振動方向を推定する。

(3) 振動方向の平均値と標準偏差を 1 時間ごとに計算する。

(4) 複数観測点の振動方向を最も良く説明できる発震機構解 (ダブルカップルを仮定) を 1 時間ごとにグリッドサーチにより推定する。この際、震源の深さは 35km と仮定し、震央はエンベロープ相関法で決められた位置の 1 時間平均とする。

(5) ブートストラップ法により解の推定誤差を評価する。

以上の解析を 2013 年 4 月上旬に三重県北部で発生した微動活動に適用した。周辺の定常地震観測点に加え、この地域に展開している臨時観測点 (7 地点) のデータも利用した。推定結果を見ると、北西側が低角で南東側が高角の節面を持つ解が多い。振動方向に 180 度の曖昧性があるため本手法のみでは P 軸と T 軸を決めることができないが、周辺で起こっている超低周波地震の結果 (Ito et al., 2007) を考慮すると、低角逆断層型とみなすのが妥当であろう。また、推定誤差を考慮しても横ずれ成分を多く持つ微動も起こっていることが明らかとなった。発表においてはさらに多くの活動を解析することで、発震機構解の空間分布や時間分布の特徴について報告する。

謝辞：解析には防災科学技術研究所 (Hi-net)、気象庁、東京大学地震研究所の波形データを利用させていただきました。本研究は JSPS 科研費 (24540463) の助成を受けたものです。

キーワード: 深部低周波微動, 発震機構解, Polarization 解析, S 波スプリッティング

---

SCG64-10

会場:501

時間:4月30日 14:45-15:00

Keywords: Non-volcanic tremors, Focal mechanism, Polarization analysis, Shear wave splitting

## 深部低周波微動活動全体像把握のための微動輻射エネルギー推定法の改良 Improved estimation of seismic energy radiation from deep low-frequency tremor

案浦 理<sup>1\*</sup>; 小原 一成<sup>1</sup>; 前田 拓人<sup>1</sup>  
ANNOURA, Satoshi<sup>1\*</sup>; OBARA, Kazushige<sup>1</sup>; MAEDA, Takuto<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup> Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

南海トラフをはじめとする沈み込み帯で発生する深部低周波微動 [Obara, 2002] は、プレート境界の固着域に隣接する領域でスロースリップと同期して発生するため、この現象の解明は巨大地震発生メカニズムの理解に重要な役割を果たす可能性がある。これまで、微動活動の全体像を把握するため発生数の時空間分布に関する研究が盛んに行われてきた。本研究では微動の輻射エネルギー量をより定量的に見積もるための手法の改良を行った。

ハイブリッド法 (HM) [Maeda and Obara, 2009] は、エンベロープの観測点間の走時差情報に加えて振幅情報も利用する手法であり、微動の震央位置と地震波輻射エネルギー量を同時に求めることができる。これまでノイズによる誤決定の混入を極力避けるため、震源決定の際の VR (Variance Reduction) の閾値を  $VR > 90$  と高い値に設定した HM selected カタログが微動研究に用いられてきた。しかし、微動の活動度が高い場合には、複数箇所でも同時に微動が発生するなど波形が複雑になるため、微動エンベロープ波形間の相関が悪くなる。その結果、検出された微動の VR は総じて低くなり、HM selected カタログから漏れてしまう傾向がある [武田・他, 2014]。ゆえに、微動活動のエネルギー放出量を正確に調べるためには波形データを用いて再評価を行う必要がある。

本研究では、エンベロープ波形と HM カタログから微動の継続時間を決めることで微動のエネルギーを推定する方法を開発した。HM selected カタログに震源が決まっている時刻周辺で、近接した複数の観測点の振幅がほぼ同時にノイズレベルより高い時間帯を探し、それを微動の継続時間として抽出した。抽出された継続時間ごとに、該当する時間内に含まれる HM selected カタログの震央から求めた重心位置を震央とし、 $VR > 60$  の微動のエネルギーを合計することで輻射エネルギー量を求めた。

本研究で微動のエネルギー推定法の改良を行った結果、微動の輻射エネルギーの空間分布に特徴的な傾向がみられた。個数の分布では微動発生域の深さ方向に2つのピークがあることが知られていたが、エネルギー量の高い領域は微動域の浅部側のみ走向方向に沿って線状に分布していることがわかった。これは、微動発生域である脆性?延性領域の中でも浅い部分の方が脆性が強く、せん断すべりの際に大きな地震波エネルギーを輻射することと対応する。本研究は沈み込み帯での応力解放プロセスにおける微動の役割の定量的な評価につながるものである。

キーワード: 深部低周波微動, 南海トラフ, スロー地震  
Keywords: tremor, Nankai trough, slow earthquake

## ゆっくり地震における微動の役割 The role of tectonic tremor in slow earthquake

矢部 優<sup>1\*</sup>; 井出 哲<sup>1</sup>  
YABE, Suguru<sup>1\*</sup>; IDE, Satoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院理学系研究科

<sup>1</sup>Dept. EPS, The University of Tokyo

ゆっくり地震の発見以来、それを構成する様々な周波数帯の現象（深部低周波微動・超低周波地震・スロースリップ）は強く関連していると考えられているが、両者の現象サイズを定量的に比較した研究が少ないため、どのように関係した現象であるかはまだよく分かっていない。特に深部低周波微動の定量的評価はあまり進んでいない。そこで本研究では深部低周波微動の地震波エネルギー（もしくは地震波エネルギーレート）を推定することで、定量的な評価を試みる。地震波エネルギーを推定するために、地震波の距離減衰とサイト増幅についても微動の地震波シグナルを用いて推定を行った。特に地震波の距離減衰については、微動の地震波エネルギーを調べた先行研究で十分な取り扱いがなされていなかった。地震波エネルギーについては2-8Hzの限られた周波数帯でのエネルギーを推定した。対象とした地域は、南海・カスケード・ハリスコ（メキシコ）・南チリの四つの沈み込み帯である。

本研究で明らかにされた微動活動とエネルギーレートの関係は、三タイプに分類できる。一つは、推定したエネルギーレートが空間的に不均一に分布する地域での微動活動である。このタイプの活動は南海やカスケード北部で主に見られる。そのような場所では微動活動は常にエネルギーレートの小さい場所で発生し、小規模な活動の場合はそのまま収束する。稀に大きい場所へ移動した場合には大規模な活動に発展し、走向方向に長く移動して収束する。また、南海地域において推定された超低周波地震のサイズ分布と微動のエネルギーレート分布はよく一致することから、ゆっくり地震の特徴は空間的には変化するものの、周波数にかかわらず似た振る舞いをする事が示唆される。二つ目は、孤立的な微動活動で、四国東部やハリスコ・南チリで見られる微動活動である。ここでは、各パッチの活動は独立に発生している。三つ目はエネルギーレートが均一に分布する場所で発生する微動活動であり、カスケード南部の一部地域で見られる。そのような場所では全体の微動活動がまとまって発生する。

本研究により明らかにされた微動のエネルギーレートと微動活動の関係は、微動のエネルギーレートの空間分布がゆっくり地震の活動様式を規定している可能性を示唆する。エネルギーレートが不均質に分布する地域では、高エネルギーレートの領域がスロースリップを引き起こすスイッチとなっていることが示唆される。微動パッチが孤立的な場所では、その活動はテクトニックな応力载荷に支配され、受動的に微動が発生する。エネルギーレートが均一に分布する場所では、その地域の一部のみでの小規模な活動は発生できず、テクトニックな応力载荷と周囲での応力擾乱に応じて活動する。

キーワード: ゆっくり地震, 深部低周波微動, 地震波エネルギー  
Keywords: Slow Earthquake, Tectonic Tremors, Seismic wave energy

## 長期的スロースリップイベントと巨大地震の微動活動への影響 Effect of long-term SSE and megathrust earthquake on tremor activity

井戸 未季<sup>1\*</sup>; 須田 直樹<sup>1</sup>  
IDO, Miki<sup>1\*</sup>; SUDA, Naoki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 広島大学大学院理学研究科

<sup>1</sup> Graduate school of Science, Hiroshima University

微動活動は、およそ 10 km/day でプレート境界の走向方向に伝播する。その移動フロントは微動の時空間分布において放物線状であり、微動の伝播は拡散の現象であることが指摘されている [Ide, 2010]。我々はこれまでに四国西部における 2001 年から 2013 年までの大規模な活動を解析し、全ての活動について  $10^4 \text{ m}^2/\text{s}$  のオーダーの拡散係数を得た。また、豊後水道での長期的スロースリップイベント (SSE) の発生期間および 2011 年東北地方太平洋沖地震後の活動については、比較的大きな拡散係数 ( $>1.5 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{s}$ ) を得た (地震学会 2013)。本研究では、これら高い拡散係数を示す微動活動と外部から受ける応力擾乱との関係を探った。

これらのイベントによる誘発の影響を評価するため、Coulomb 3.3 [Toda et al., 2011] を用いて、プレート境界面におけるクーロン応力変化 ( $\Delta\text{CFF}$ ) を計算した。その結果、2003 年と 2010 年の長期的 SSE による四国西部での  $\Delta\text{CFF}$  は、それぞれ 28.7 kPa と 5.4 kPa となった。これは微動発生に影響する潮汐の効果と同じオーダーであり、微動活動の誘発に関与していると考えられる。一方、2011 年東北地震による  $\Delta\text{CFF}$  は 0.4 kPa であった。この値は潮汐による効果より 1 桁小さいが、粘弾性応答による長期間にわたる応力変化があれば、微動発生に影響を与えることは可能である。また、この応力擾乱は四国下のプレート境界全域に広がっている。これらによって加速された微動活動の伝播が、高い拡散係数として観測された可能性が考えられる。発表では速度・状態依存摩擦則から得られた地震発生率理論にもとづく考察についても述べる。

キーワード: 深部非火山性微動, 震源移動, クーロン応力変化, 長期的スロースリップイベント, 海溝型巨大地震, 沈み込み帯

Keywords: deep non-volcanic tremor, tremor migration, Coulomb stress change, long-term slow slip event, megathrust earthquake, subduction zone

## Improvement of tectonic tremor detecting and locating methods: Case study in Shikoku and Kanto

### Improvement of tectonic tremor detecting and locating methods: Case study in Shikoku and Kanto

CHAO, Kevin<sup>1\*</sup> ; OBARA, Kazushige<sup>1</sup>  
CHAO, Kevin<sup>1\*</sup> ; OBARA, Kazushige<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ERI, the University of Tokyo

<sup>1</sup>ERI, the University of Tokyo

Obtaining accurate tremor sources in time and space is important because it provides essential information that reveals the mechanism of tremor activity. 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. 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 testing period (i.e., tremor episodes between 2012/05/25 and 2012/06/02), the WECC was able to successfully auto-detect the same ambient tremor episodes listed in the NIED tremor catalogs. The tremor detections by WECC show similar tremor migrations pattern as the features from the NIED tremor catalog. In addition, the WECC is able to capture more small tremor episodes that are not included in the NIED catalog. 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 Kanto 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.

キーワード: ambient tremor, Shikoku, Kanto, tremor auto-detection technique

Keywords: ambient tremor, Shikoku, Kanto, tremor auto-detection technique

## 火山性深部低周波地震とマグマ冷却 Volcanic Deep Low-Frequency Earthquakes and Cooling Magma

麻生 尚文<sup>1\*</sup>; Tsai Victor<sup>2</sup>; 井出 哲<sup>1</sup>  
ASO, Naofumi<sup>1\*</sup>; TSAI, Victor<sup>2</sup>; IDE, Satoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学 大学院理学系研究科, <sup>2</sup> カリフォルニア工科大学 Seismological Laboratory

<sup>1</sup> Graduate School of Science, The University of Tokyo, <sup>2</sup> Seismological Laboratory, California Institute of Technology

深部低周波地震 (LFE) は深部で発生し低周波の地震波を放出する地震である。プレート境界で発生する Tectonic LFE は断層すべり運動であると考えられている一方で、主に火山直下のモホ面付近で発生する Volcanic LFE のメカニズムは未だによく分かっていない。震源域の温度圧力条件で脆性的な初期破壊が発生するためには、高い歪みレートが必要である。

密度境界であるモホ面では上昇過程のマントルダイアピルが停滞しやすいため、停滞マグマが冷却して熱収縮することにより、Volcanic LFE が駆動されているのではないかと考えた。そこで本研究では、火山直下のモホ面付近でマグマが冷却する際に発生する熱歪みレートを推定した。

初期条件として、板状と管状の貫入岩体内に 400K の温度擾乱を仮定し、温度の時間発展を計算した。そして、弾性的に振る舞うと考えられる、温度擾乱が 200K 以下の領域について、ポアソン媒体を仮定して熱歪みレートを見積もった。部分溶融状態の相転移による潜熱の解放と密度変化の影響を加味し、熱拡散率  $6 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$  と熱膨張係数  $2 \times 10^{-5}/\text{K}$  を用いた。

得られた偏差歪みレートは、幅 200m 以下の板状マグマや半径 160m 以下の管状マグマで、プレート運動による効果よりも大きい ( $>5 \times 10^{-14}/\text{s}$ )。初期破壊は観測されないような剪断滑りであったとしても、大きな変形へと成長して LFE として観測されている可能性がある。

また、発生する歪みレートの向きは、マグマの形状によって異なる。マグマの形状が震源分布に対応し、歪みレートが LFE の震源メカニズムに対応するのならば、Volcanic LFE の震源分布と震源メカニズムとの対応関係が期待される。島根県東部の LFE について、その関係が部分的に確認できたが、本モデルの検証のためには、更なるメカニズム研究が必要である。

キーワード: 火山性深部低周波地震, マグマ冷却, CLVD

Keywords: volcanic low-frequency earthquakes, cooling magma, CLVD

## 南海トラフおよび南西諸島海溝における浅部超低周波地震の時空間分布 Spatiotemporal Distribution of Shallow Very Low Frequency Earthquakes along the Nankai Trough and the Ryukyu Trench

浅野 陽一<sup>1\*</sup>; 松澤 孝紀<sup>1</sup>; 小原 一成<sup>2</sup>  
ASANO, Youichi<sup>1\*</sup>; MATSUZAWA, Takanori<sup>1</sup>; OBARA, Kazushige<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 防災科学技術研究所, <sup>2</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>Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

防災科学技術研究所の高感度地震観測網 Hi-net に併設された高感度加速度計の記録のアレイ解析によって、南海トラフ近傍で発生する浅部超低周波地震活動は半ばルーチン処理的にモニタリングされている [例えば、防災科学技術研究所 (2013: 予知連会報)]. 一方、観測点が少ない南西諸島海溝の近傍においても、既知の地震や浅部超低周波地震の記録との相関解析によって、連続記録中から浅部超低周波地震の検出が可能であることが分かってきた [浅野・他 (2013: 秋季大会)]. そこで我々は、より広域にわたって浅部超低周波地震活動の地域性を比較することを目的として、日本およびその周辺の全域をこの手法によって準リアルタイムで解析する準備を進めている. 本稿ではその途中経過として、南海トラフおよび南西諸島海溝に沿った領域における解析結果を報告する.

本研究では、広帯域地震観測網 F-net のうちの西南日本に位置する 40 点における 2003 年以降の広帯域速度計 (STS-1 型または 2 型) の三分記録を使用した. ここでは、100 Hz サンプリングによる原記録を通過帯域 0.02 から 0.05 Hz のバンドパスフィルターに通した後に、1 Hz にリサンプリングして解析した. テンプレートには、既知の通常の地震 17 個と浅部超低周波地震 6 個を選んだ. 解析手法は基本的には浅野・他 (2013) と同様であるが、相関係数の評価のみでは観測点カバリッジが悪い領域において空間的なエイリアシングによる誤検出や誤推定が起りやすい. これを軽減するために我々は、相関係数を評価する時間窓とその直前の時間窓における波群の振幅比を S/N 比と定義して、複数の観測点における平均の相関係数のみならず、平均の S/N 比も大きな値をとるような未知イベントの発生時刻と位置をグリッドサーチで調べる方法を採用した.

解析の結果、浅野・他 (2013) で報告した日向灘以南の浅部超低周波地震活動に加えて、紀伊半島沖や四国沖における浅部超低周波地震を検出することができた. 具体的には、紀伊半島沖では 2004 年の紀伊半島南東沖の地震 (M7.4) の後および 2009 年に、室戸岬沖では 2003 年および 2009 年に、足摺岬沖では 2003 年および 2010 年の豊後水道スローリップとほぼ同時期にそれぞれ顕著な活動が検出された. この結果は、これまでに報告されてきた浅部超低周波地震の活動 [たとえば、Obara and Ito (2005) および防災科学技術研究所 (2013)] と矛盾せず、今回の解析法が広域における浅部超低周波地震モニタリングに適していることを示す. 一方、南海トラフから南西諸島海溝までの広域を単一の解析法によって調べた今回の結果から、紀伊半島沖、室戸岬沖および足摺岬沖では、高い頻度で浅部超低周波地震活動が発生する日向灘以南の南西諸島域と比べて、活動の頻度が著しく低いことも明らかとなった. この地域では、1944 年東南海地震および 1946 年南海地震を始めとする巨大地震が繰り返し発生してきたことが知られており、地震間にあたる近年は固着状態にあると考えられている. これに対して、南西諸島域では巨大地震の繰り返し発生は知られておらず、プレート間の固着はおおむね弱いと考えられている. このような固着状態の違いは、上に述べた浅部超低周波地震の活動度にも影響を及ぼすかもしれない. すなわち、紀伊半島沖、室戸岬沖および足摺岬沖では、プレート間の地震発生層における強い固着が、浅部延長に位置する浅部超低周波地震の発生を抑制している可能も考えられる.

キーワード: 浅部超低周波地震, 南海トラフ, 南西諸島海溝, プレート間固着  
Keywords: Very Low Frequency Earthquakes, Nankai Trough, Ryukyu Trench

## 琉球弧南部の繰り返しスロースリップイベントと超低周波地震活動の関係 Relationship between very low frequency earthquakes and repeating slow slip events in the south Ryukyu Trench

中村 衛<sup>1\*</sup>; 砂川 尚也<sup>1</sup>  
NAKAMURA, Mamoru<sup>1\*</sup>; SUNAGAWA, Naoya<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 琉球大学理学部  
<sup>1</sup> Faculty of Science, Univ. Ryukyus

琉球弧南部では深さ 30~50km の沈み込んだプレート上面で繰り返しスロースリップイベントが発生している (Heki & Kataoka, 2008)。またその西側の与那国島付近では、2002 年 3 月の台湾近海地震 (Mw6.8) によるアフタースリップが 2002 年から 2005 年にかけて発生した (Nakamura, 2009)。

最近、琉球海溝に沿って定常的に超低周波地震が発生していることが明らかになってきた (Ando et al., 2012)。琉球海溝に沿って発生するスロースリップイベントと超低周波地震は、この地域のプレート間すべりと密接に関係していると考えられる。そこでこれらスロースリップイベント・アフタースリップに対する超低周波地震活動との関係を明らかにした。

防災科学技術研究所の広帯域地震計記録網 (FNET) の広帯域地震計記録および IRIS の観測点を使用した。使用した観測点は琉球弧の島々および九州地域に設置された観測点 15 点および IRIS の TATO (台北) と SSE (上海) である。これらの観測点で記録された上下動成分の連続観測記録を解析に使用した。解析期間は 2002 年 1 月 1 日~2013 年 9 月 30 日である。連続波形に 0.02-0.05Hz のバンドパスフィルターをかけ、目視で低周波イベントを検出した。次に検出した低周波イベントを地震カタログおよび 2Hz 以上の高周波波形記録と比較し、遠地地震および近地地震を除去した。さらに低周波イベントとして観測される波が Raleigh 波であると仮定して手動で最大振幅到達時刻を読み取り、震源再決定を行った。

約 11 年間で震源決定できた VLFE は合計 6299 個であった。VLFE の震源は大部分が琉球海溝軸付近に分布する。VLFE は西表島南方沖および沖縄本島南方沖、沖縄本島北東沖から奄美大島付近に集中する。沖縄トラフ付近にもトラフ軸に沿って震源が分布する。しかしこれは、琉球弧の観測点配置が直線的なために生じた震源決定のエラーによる可能性が高い。

次に、震源が密集した各領域で累積地震個数を調べた。まず八重山諸島南方沖では、2002~2004 年の活動と比較して 2005~2010 年に活動が低下、さらに 2011 年後期から活発化の傾向が見られた。この傾向は 2002~2005 年にかけて与那国島周辺で発生したアフタースリップの影響が考えられる。沖縄本島南方沖では、長期的にはほぼ定常的な VLFE 活動が見られる。短期的活動としては、VLFE が 2, 3 カ月間隔で群発的・バースト状に発生する様子が見られた。奄美大島沖では沖縄本島南方沖よりもさらに群発的に VLFE が発生している。奄美大島沖では 2002 年中旬と 2010 年後半に大きな活動の増加が見られる。しかしこの活動に対応する地殻変動等のイベントは確認できなかった。

西表島直下の繰り返し SSE との対応を比較したところ、期間中に発生した SSE24 イベント中 14 イベントに対して VLFE が活発化する傾向が見られた。SSE 発生中の VLFE 発生率は、通常の VLFE 発生率に対して約 2~3 倍に増加する。一方、通常の地震活動に対して SSE 発生との関係は明瞭ではなかった。西表島直下の SSE によって VLFE が特に活発化する理由として、SSE 発生による周辺での応力変化が、低角逆断層型地震である超低周波地震 (Ando et al., 2012) に対して特に活発化を促した可能性がある。

キーワード: 超低周波地震, スロースリップイベント, 琉球海溝  
Keywords: very low frequency earthquake, slow slip event, Ryukyu Trench

## 深部超低周波地震の活動様式とすべり遷移域の構造 Activity characteristics of deep very low frequency earthquake and asperity structure

仁里 太郎<sup>1</sup>; 須田 直樹<sup>1\*</sup>; 松澤 孝紀<sup>2</sup>  
NIZATO, Taro<sup>1</sup>; SUDA, Naoki<sup>1\*</sup>; MATSUZAWA, Takanori<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 広島大学, <sup>2</sup> 防災科技研  
<sup>1</sup>Hiroshima Univ., <sup>2</sup>NIED

### 【はじめに】

南海沈み込み帯のプレート境界深部では、短期的スロースリップイベントに付随して超低周波地震（VLF）と非火山性微動（微動）が発生している。先行研究では、VLFの震源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やプレート収束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]。我々はこれまでに VLF の検出に特化した検出法を開発し、VLF の活動と微動活動との関連性について調べてきた。今回さらに検討を進めた結果、新たな知見が得られたので報告する。

### 【検出法の概要】

沈み込むフィリピン海プレート上部境界面上に設定した仮想震源に対して計算された理論波形と Hi-net 高感度加速度計で得られる観測波形に対して計算される相互相関と Variance Reduction (VR) にもとづいて検出を行う。仮想震源は、水平方向に 10 km 間隔、深さ方向に最大で 8km 間隔で設定されている。それらにおける震源メカニズムは、プレート境界面のジオメトリとプレート収束方向から求め、理論波形をあらかじめ計算しておく。先行研究と同様に本手法でも VR を検出基準に用いており、通常の地震やノイズを VLF として検出してしまうことがある。そのような誤検出を減らすため、観測波形の振幅に関する基準を設けている。

### 【結果】

Hi-net 高感度加速度計の水平動 2 成分の記録を用いて、2006 年 9 月 6-21 日と 2007 年 3 月 10-20 日の四国西部における活動について解析を行った。その結果、VLF の活動には次の特徴があることが分かった：(1) VLF の活動は微動に比べて急速に活発になり、その時間的極大は微動より遅れている、(2) 活動期によって VLF を伴ったり伴わなかったりする微動クラスターが存在する、(3) VLF にも微動の rapid tremor reversal に相当する現象が存在する、(4) VLF と微動のモーメント解放量の空間的極大は異なっている、(5) プレート境界における VLF のモーメント解放が最も大きい場所は SSE のすべりが最も大きい場所の浅部に隣接する。これらのうち (1) と (2) はすでに報告済みである。

### 【議論】

すべり遷移域の構造として、フラクタルアスペリティモデル [Seno, 2003] のようなアスペリティが入れ子になったモデルを考える。このモデルでは、ある階層のアスペリティは比較的ゆっくりとすべるバリアに囲まれている。間隙流体圧の上昇などによりバリアがゆっくりとすべる状態になることをバリア浸食と呼び、そのときアスペリティが連続的に破壊する。逆に、アスペリティの連続的な破壊がバリア浸食を加速する。今回の場合は、微動のアスペリティの周りのバリアが VLF のアスペリティであり、その周りのバリアが短期的 SSE のアスペリティとなっている。このモデルでは、微動が VLF に先行する現象は次のように説明できる：(1) 短期的 SSE により微動クラスター全体でバリア浸食が進み、微動が連続的に発生するが、VLF を発生するまでにはいたらない、(2) 微動発生の影響でバリア浸食が加速されることで、VLF が連続的に発生する。また、バリア浸食の速さや広がりやすさに地域差があれば、微動と VLF の時空間的な活動様式の違いも説明できる。

キーワード: 南海沈み込み帯, スロー地震, 超低周波地震, 非火山性微動, 自動検出, アスペリティ

Keywords: Nankai subduction zone, slow earthquake, very low frequency earthquake, nonvolcanic tremor, automatic detection, asperity

速度・状態依存摩擦を用いた階層アスペリティの動的地震サイクルシミュレーションで現れる大地震前の挙動  
Preseismic behaviors involving slow slip in rate-state earthquake sequence models with a hierarchical asperity concept

野田 博之<sup>1\*</sup>; 中谷 正生<sup>2</sup>; 堀 高峰<sup>1</sup>  
NODA, Hiroyuki<sup>1\*</sup>; NAKATANI, Masao<sup>2</sup>; HORI, Takane<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構, <sup>2</sup> 東京大学  
<sup>1</sup>JAMSTEC, IFREE, <sup>2</sup>The University of Tokyo, ERI

Understanding preseismic phenomena before large earthquakes is of critical importance in assessing possibility of disaster mitigation by detecting and recognizing them. The 2011 Tohoku-Oki earthquake has long recorded geophysical data for tens of years prior to it. Since the earthquake, multiple studies have reported potentially important phenomena involving slow slip which may be particular to ripe asperities. It is our mission for modelers to see if they are consistent with, or appear naturally without fine tuning of numerical models of earthquake sequences accounting for interseismic processes, as well as earthquake ruptures.

The off-Miyagi to off-Fukushima region was locked at least from Apr. 1995 to Mar. 2002 [Nishimura et al. 2004], with the shallower region not being able to be constrained by on-land GPS stations [Loveless and Mead, 2011]. The region started creeping from 2005 [Ozawa et al., 2012]. Recently, Katsumata [2013, JpGU] pointed out that seismic quiescence [Katsumata, 2011] correlates with the locked period, and inferred that this region may have been creeping at least from 1980 to 1988. In the shallower region near the hypocenter of the Tohoku-Oki earthquake, a couple of slow slip events were reported by Ito et al. [2013], one in Nov. 2008 and the other in Feb. 2011. This interval is much shorter than that for the larger scale events inferred by Katsumata [2013].

Suito et al. [2011] reported that M7-class earthquakes along the Japan Trench after 2005, including the Mw 7.3 preshock 2 days before the Tohoku-Oki earthquake, had unusually large amount of afterslips. The postseismic moment releases are comparable to or even larger than the coseismic ones, with the centroid being located close to the epicenters, not deeper than them.

In the present talk, we present that qualitatively similar behaviors to those observations are recognized in numerical models reported by Noda et al. [2013, JGR]. They presented rate-state earthquake sequence simulations accounting for a hierarchical asperity concept [Ide and Aochi, 2005]; a large tough patch has a small fragile patch in it. Importantly, those simulations were not meant to mimic the Tohoku-Oki earthquake through fine tuning of the model, and are representing general behaviors characteristic to the rate-state (aging law) earthquake sequence with a certain kind of heterogeneity in the parameter distribution.

In those simulations, interseismic penetration of a creep front into a locked velocity-weakening patch often becomes non-steady and accompanied by aseismic transients before nucleation. This is because the critical length scale for impossibility of coherent steady-state slip [Rice et al., 2001] can be smaller than the nucleation size [Rubin and Ampuero, 2005]. In the simulation, the transients take place both in the large tough patch and in the small fragile patch when a creep front penetrates inwards to a certain extent. A transient does not necessarily, but may lead to nucleation. In addition, such an elevated aseismic slip rate in the large patch seems to be a necessary condition for cascade-up rupture growth from the small patch if it is smaller than the nucleation size of the large patch.

A small event which only ruptures the small patch is sometimes followed by a large event before the afterslip smearing out. Such small events are classified as precursory events, since clear causality is recognized between them and the following large ones; the large ones are initiated either by delayed cascade-up or by large nucleation hosted by the afterslip. The precursory small events tend to have larger afterslip than non-precursory ones.

In the rate- and state-dependent friction law, logarithmic slip rate is, by definition, proportional to stress minus strength which correlates with fracture energy. Therefore temporal changes in the aseismic slip rate in a so-called asperity, if detectable, could be used to infer the ripeness of it.

Keywords: Earthquake sequence, Preseismic phenomena, Hierarchical asperity, Numerical simulation

## 2011年東北地方太平洋沖地震の前に発生したスロースリップイベントの数値シミュレーション Numerical simulation of slow slip events before the 2011 Tohoku-Oki Earthquake

中田 令子<sup>1\*</sup>; 有吉 慶介<sup>1</sup>; 兵藤 守<sup>1</sup>; 堀 高峰<sup>1</sup>  
NAKATA, Ryoko<sup>1\*</sup>; ARIYOSHI, Keisuke<sup>1</sup>; HYODO, Mamoru<sup>1</sup>; HORI, Takane<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構  
<sup>1</sup> JAMSTEC

東北地方の日本海溝沿いでは、2011年3月11日に、M9.0の巨大地震(東北地方太平洋沖地震)が発生し、震源域は岩手県沖から茨城県沖まで広範囲に及んだ。この巨大地震の震源域内で特にすべりの大きかった領域の近くで、2011年2月頃から、スロースリップイベント(SSE)が発生していたことが、海底観測から明らかになった[Ito et al., 2013]。このSSEは、少なくとも巨大地震の2日前(2011年3月9日)に発生したM7.3の地震(巨大地震の前震)時まで継続していた。そして、前震の余効すべりは、本震の震源まで伝播し、巨大地震をトリガーしたとみられている[e.g., Ando & Imanishi, 2011]。

本研究では、スロー地震による前震と本震のトリガーに着目して、地震発生サイクルの数値シミュレーションを行った。数値計算では、プレート境界で発生する地震の繰り返しを、プレート相対運動からのずれの蓄積と解放過程としてモデル化した[e.g., Rice, 1993]。プレート境界面の摩擦は、すべり速度・状態依存摩擦則[Dieterich, 1979]に従うと仮定し、断層の構成則と強度の定義はNakatani[2001]を用い、強度の時間発展則にはslowness law[Dieterich, 1979; Ruina, 1983]を用いた。プレート境界面形状は、構造探査に基づいた3次元曲面[Baba et al., 2006]を使用した。各イベントの震源域では、円形断層上のすべりのふるまいを支配する破壊核の臨界サイズ[Kato, 2003; 2004]と半径の比が、地震性すべりまたは非地震性すべりの条件を満たすような摩擦特性を与えた。

2008年11月にも2011年2月と同様の場所・規模でSSEが発生していることから、この領域は周囲と異なる摩擦特性を持つと考えた。そこで、巨大地震の震源域内では、特にすべりの大きかった領域、前震の震源域、非地震性すべり(SSE)を起こす領域がそれぞれすみ分けるように存在していると仮定し、3つの領域に、それぞれ異なる摩擦特性を与えたモデルで、計算を行った。その結果、SSE→前震→本震という順での発生を定性的に再現することができた。このモデルの結果では、まず、浅部で始まったSSEが深部へと伝播しMw7.1の地震(前震)をトリガーした。その後、前震の余効すべりは浅部へ伝播し、Mw8.6の地震(本震)の破壊をトリガーした。しかし、SSEの規模や継続期間、本震の破壊開始点、前震-本震の時間間隔などに関して、定量的には再現できていなかった。これは、本震で特にすべりの大きかった領域・前震の震源域・SSE域が互いに近接していることが主な要因であると考えられる。異なる大きさの円形パッチで近似したこれらの領域の場所や大きさと摩擦特性との間にトレードオフがあり、その結果、前震やSSE発生のタイミングがモデルによって大きく異なっていた。

現在、本震の震源域内での摩擦特性の不均質の与え方を改良した新たなモデルで同様の数値シミュレーションを行っている。さらに、様々な観測データから示唆されているプレート境界面上の不均質の分布等を参考にしたいいくつかのモデルについて同手法を適用し、2011年に観測されたM9地震発生に至る過程を、定量的に再現できるモデルの構築を試みる。モデルの良否は、シミュレーション結果から見積もられる地震時や地震間のすべり分布や地殻変動等と、観測データとの整合性を基に判断する。そして、どのような条件下で、東北地方太平洋沖地震の前に観測されたようなシナリオが起こり得るのか検討する。

謝辞：本研究は文科省のプロジェクト「南海トラフ広域地震防災研究プロジェクト」の補助を受けて行われました。数値計算には海洋研究開発機構の地球シミュレータを使用しました。