

北海道北部のブロック境界で繰り返し発生する浅いスロー地震 Repeating Shallow Slow-Slip-Events along the Block Boundary in the Northern Hokkaido

池田 将平^{1*}; 日置 幸介²
IKEDA, Shohei^{1*}; HEKI, Kosuke²

¹ 北海道大学大学院理学院自然史科学専攻, ² 北海道大学大学院理学研究院自然史科学部門

¹Department of Natural History Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University, ²Department of Natural History Sciences, Faculty of Science, Hokkaido University

留萌以北の北海道北部(道北部)では過去数十年間を見ても M6 クラス以上の大きな地震は発生していない。しかしこの地域には南北に縦断するブロック境界があり、アムールプレートの東進の結果東西方向で約 1cm/yr の収束があると考えられている (Loveless and Meade, 2010)。また、2012 年夏から 2013 年の初頭にかけて幌延-中頓別間の基線長が四ヶ月かけて約 1cm 短縮したが、数少ない内陸部でのスロー地震 (Slow Slip Events, SSE) であったことが報告されている (Ohzono et al., 2014)。

本研究では 2012 年の幌延 SSE 以外にも、ブロック境界の別のセグメントで SSE があったのではないかと考え、国土地理院による GEONET の点の F3 解を用いて稚内から留萌にかけてこの境界をまたぐ様々な GNSS 点間の距離の時系列を解析した。その結果、幌延-中頓別間より約 20 km 程の中川-音威子府間で 2005 年半ばと 2007 年半ばの 2 回、さらに南の羽幌-幌加内間で 2002 年後半と 2004 年前半に、いずれも 1-2 ヶ月で数 mm ほどの基線長が短縮するイベントが見られた。この基線長変化の検出には、Nishimura et al. (2013) に倣って、SSE を仮定した場合としない場合の AIC (Akaike's Information Criterion) の差の大きいものについて、SSE が存在すると見なした。なお幌延より北の地域では、はっきりした SSE は見つからなかった。

道北部を対象に過去 20 年分の浅い地震活動を調べたところ、震源は上記のブロック境界に沿って分布しているとともに、留萌付近の緯度 (N44.1) から西に曲がるように並び、日本海東縁のプレート境界に続いていた。留萌では 2004 年 12 月に M6 クラスの地震が発生、M3 以上の余震が 20 回以上発生し (高橋・笠原, 2005)、より北部の地域に比べて多く地震が起こっていた。留萌以北での境界でのブロック収束運動は通常地震によるのではなく、SSE によって解消されるため、通常地震は発生しにくいのかも知れない。反対に留萌以南では SSE ではなく通常地震によってブロック運動に伴う歪みが解消されているのだろう。

キーワード: 北海道, 内陸部, スロー地震, SSE, GNSS, GPS
Keywords: Northern Hokkaido, inland, SSE, GPS, GNSS

DONETで捉えた紀伊半島沖のスロースリップの断層推定 Estimation of fault parameters of slow slip event, off the Kii Peninsula, detected by DONET

鈴木 健介^{1*}; 中野 優¹; 堀 高峰¹; 高橋 成実¹
SUZUKI, Kensuke^{1*}; NAKANO, Masaru¹; HORI, Takane¹; TAKAHASHI, Narumi¹

¹ 海洋研究開発機構
¹ 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。我々はこれまでに、DONETに設置されている水晶水圧計記録から海底面変動成分を抽出し、一部の観測点において2013年2月頃から圧力変動が生じていることを検出した(鈴木・他, 2014)。この圧力変動と同時期かつ近傍において地震活動の低下も見られた。この圧力変動は海底の上下変動によるものと解釈でき、スロースリップによって生じた地殻変動と解釈できるが、断層推定はおこなわれていない。そこで、本研究では地殻変動を引き起こした断層の推定を試みた。

半無限弾性体中の矩形断層の断層すべりを用いて計算された理論上下変位 (Okada, 1992) を得られた観測上下変位と比較することによって地殻変動を引き起こした断層の推定を試みた。鈴木・他 (2014) では圧力変動から上下変動を得る際に次のような手法を用いた。すなわち、圧力計記録から潮汐成分を除去し、さらに潮汐成分以外の海面変化に由来する変動を除去するために、同じノードに接続された観測点の圧力計記録の平均を引いた。そのため、本研究においても理論変位を計算する際に同じノードに接続された観測点の平均変位を個々の観測点の理論変位から引いている。

観測された4観測点の上下変動に対して推定すべき9つのパラメータが存在する。そのため、パラメータを一意に推定することができず、インバージョンをおこなう際に拘束条件が必要となる。本研究では、地殻変動をおこした断層としてプレート境界および付加帯内の分岐断層を想定して、断層推定をおこなった。プレート境界を想定した断層では、走向・傾斜・すべり角を固定し、他のパラメータをグリッドサーチによって推定した。ただし、深さについてはプレート境界に一致するようにした。一方、分岐断層を想定した断層の場合では、プレート境界よりも浅部で深さと傾斜についてもグリッドサーチによって推定した。

プレート境界を想定した断層の場合では、観測された相対的な上下変動のパターンを説明することができるが、観測点の平均変位量が大きくなる。このような変動があるとすれば、水圧計記録においても観測されるはずだが、実際の記録では観測されていない。したがって、プレート境界上の断層運動では観測を説明することは難しい。一方、分岐断層を想定した断層の場合では、観測された相対的な上下変動パターンを説明できるとともに、観測点の平均変位量も小さくなる。そのため、こちらのモデルの方が観測を説明することができる。今後は、他のタイプの断層モデルを検討するとともに、断層運動と地震活動変化間の関係について考察する予定である。

キーワード: DONET, 海底圧力計, スロースリップ, 地震活動変化
Keywords: DONET, ocean bottom pressure change, slow slip event, seismicity change

スロースリップイベント時空間分布のスイッチングモデルによるロバストな推定 Robust estimation of spatio-temporal distribution of slow slip event by switching model

荒木 貴光^{1*}; 落 唯史¹; 松本 則夫¹; 赤穂 昭太郎¹
ARAKI, Takamitsu^{1*}; OCHI, Tadafumi¹; MATSUMOTO, Norio¹; AKAHO, Shotaro¹

¹ 産業技術総合研究所

¹National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

短期的スロースリップイベント (SSE) の正確な計測には、埋め込み式歪計や傾斜計といった微小な地殻変動も感知可能な感度の高い計測器が必要である。一方、そのような感度の高い計測器は、様々な外乱因子の影響を受けやすく、計測したデータにはスケールの大きい複雑な時間的構造を持つノイズが含まれる。

本研究では、それら感度の高い計測器から得られたノイズなデータを用いて SSE の時空間分布を推定する。SSE 時空間分布推定の標準的な手法としてネットワークインバージョンフィルター (NIF) があり、主に GNSS データのようなノイズの少ないデータを用いた長期的 SSE の推定に適用されてきた。しかし、NIF はノイズや断層すべりによる信号に対して常に同じダイナミクスを仮定しており、大きく変動するノイズを除去できない。そのため、NIF はノイズな歪計・傾斜計の全期間のデータから SSE 時空間分布を適切に推定できない。

本研究では、モデルを2つの時点で切り替えるスイッチングモデルを用いてロバストに SSE 時空間分布を推定する方法を提案する。観測期間を

(1) 断層すべりが起こる前 (2) 断層がすべっている間 (3) 断層が滑り終えた後の3つの期間に分けてそれぞれの期間ごとに次のようにモデルをあてはめる。

- (1) の期間：滑り量と滑り速度が0で一定なモデル
- (2) の期間：断層が滑り続けるモデル
- (3) の期間：すべり量が一定なモデル

モデルの切り替え時点とパラメータは最尤法で推定し、パラメータの推定アルゴリズムには Expectation-Maximization (EM) アルゴリズムを用いる。EM アルゴリズムは初期値依存性が低いため安定したパラメータ推定が可能となる。SSE の時空間分布は、切り替え時点とモデルパラメータを推定した後にカルマンフィルターを実行して推定する。①③の期間で断層すべり量を物理的に合理的な値で固定したことで、これら期間のノイズをほとんど除去でき、②の期間の断層すべりにおいても安定した推定値を得ることができる。

提案手法と NIF を次の2つのデータに適用して性能を比較した。一つは、SSE による歪のシミュレーション値にスケールの大きなノイズを加えて生成した人工データ、もう一つは、東海地方・紀伊半島で2012年に発生した短期的スロースリップによる微小な地殻変動を計測した歪計のデータである。人工データに対しては、提案手法が NIF より正確に断層すべり分布を推定できた。歪計データに対しても、NIF は地震学的に生じえない断層すべり分布を推定したが、提案手法はより物理的に矛盾しない断層すべり分布を推定した。また、SSE の開始時点を客観的に検出することは重要であるが、提案手法では、NIF では捉えることができなかった人工データ、歪計データ両方において正確に SSE 開始時点を検出できた。

キーワード: スロースリップイベント, 歪計データ, スwitchingモデル, 最尤法, カルマンフィルター
Keywords: Slow slip event, Strain data, Switching model, Maximum likelihood method, Kalman filter

GNSS データのスタッキング手法を用いた西南日本の短期的 SSE の継続時間推定の試み An attempt to estimate duration for short-term SSEs in southwest Japan using the stacking method of GNSS data

西村 卓也^{1*}; 松澤 孝紀²; 木村 武志²; 小原 一成³
NISHIMURA, Takuya^{1*}; MATSUZAWA, Takanori²; KIMURA, Takeshi²; OBARA, Kazushige³

¹ 京都大学防災研究所, ² 防災科学技術研究所, ³ 東京大学地震研究所

¹Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, ²National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, ³Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

はじめに

西南日本の沈み込み帯では、数日から 10 日間程度の継続時間でプレート境界がゆっくりとずれる短期的スロースリップイベント (SSE) が発生していることが知られている。Nishimura et al.(2013) 及び Nishimura(2014) は、国土地理院の GNSS データ (GEONET) の解析から、東海地方から豊後水道にかけての南海トラフ沿いの深部 (深さ 20~40km) だけでなく、日向灘から八重山諸島にかけての琉球海溝沿いにおいても短期的 SSE が多数発生していることを示した。短期的 SSE のシグナルは GNSS のノイズレベルぎりぎりであるため、Nishimura et al.(2013) では、短期的 SSE の継続時間は 0 と仮定して、時系列データに 1 次トレンド付ステップ関数をフィッティングし、得られたステップの大きさをを用いて断層モデルの推定を行っていた。そのため、この手法で検出された短期的 SSE がどの程度の時定数を持っているのかは不明であった。

西南日本で観測されている SSE は、その継続時間が短期的 SSE と長期的 SSE の間でギャップがあり、その中間の 1 ~ 2 ヶ月程度の継続時間を持つような SSE は報告されていない。しかし、このような中間的な時定数の SSE は地殻変動連続観測と GNSS の得意とする時定数の間にあるため、今まで見つかっていないという可能性もある。

本研究は、この問いに答えるため GNSS データを用いた短期的 SSE の検出手法 (Nishimura et al., 2013) と地殻変動データのスタッキング手法 (宮岡・横田, 2012) を組み合わせて、短期的 SSE の継続時間の推定を試みた。

データ及び解析手法

本研究で用いたデータは、国土地理院から公開されている GEONET の日座標値 (F3 解) である。まずは、Nishimura et al.(2013) 及び Nishimura(2014) の手法で短期的 SSE の検出と矩形断層モデルの推定を行う。この矩形断層モデルの計算値を用いて、宮岡・横田 (2012) の手法に準拠して時系列データのスタッキングを行った。スタッキング手法の具体的な手順は以下の通りである。まず、各 GNSS 観測点の南北・東西成分毎に短期的 SSE の発生日を中心とする 181 日間の時間窓のデータをとりだして、中心の 60 日間を除いた時間窓の両端の期間を使って 1 次トレンドの除去と RMS の計算を行う。この RMS を各データのノイズレベルとし、時系列をノイズレベルで規格化する。次に、矩形断層モデルから計算されるシグナルと上記のノイズレベルから、各観測点各成分毎の S/N 比を計算する。そして、S/N 比の大きい順に時系列データのスタッキングを行い、時間窓の両端の期間を用いてスタッキングしたデータのノイズレベルを計算して、スタッキングデータの S/N 比が最大となるまでスタッキングを行う。最後に、得られたスタッキング時系列に対してランプ型の関数をフィッティングし、短期的 SSE の継続時間を推定した。

結果

南海トラフ沿い深部での短期的 SSE に関しては、概ね 30 から 100 のデータをスタッキングすることにより S/N 比が最大となり、スタッキング時系列では、目視でも SSE の継続時間を認識することが可能となった。GNSS の各観測点各成分の時系列では短期的 SSE の時定数を目視で確認することが難しいことから、スタッキング手法の有効性を確認することができた。比較的 S/N 比の良いスタッキングデータから推定された短期的 SSE の継続時間は、数日から 1 ヶ月程度である。この継続時間は、傾斜計データから短期的 SSE の継続時間を推定した先行研究 (e.g., Sekine et al., 2010) よりも明らかに長いものも含まれる。このような長いイベントは、休止期間を挟んで連続した SSE を 1 つのイベントとして誤認したものも含まれるが、それだけでは説明できないイベントも存在する。講演では、継続時間の地域性や微動活動との比較、防災科学技術研究所の Hi-net 傾斜計データと比較した結果についても報告する予定である。

謝辞 本研究では国土地理院の日々の座標値 (GEONET F3 解) を使用しました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

宮岡・横田 (2012) 地震 2, 65, 205-218.

Nishimura, T., T. Matsuzawa, and K. Obara (2013) JGR Solid Earth, 118, 3112-3125.

Nishimura, T. (2014) PEPS, 1:22.

Sekine, S., H. Hirose, and K. Obara (2010) JGR Solid Earth, 115, B00A27.

SCG62-04

会場:303

時間:5月27日 15:00-15:15

キーワード: スロースリップイベント, GNSS, 西南日本, 継続時間
Keywords: Slow Slip Event, GNSS, Southwest Japan, Duration

四国中西部における微動発生域と固着域の中間領域で発生するスロースリップイベント Slow slip event within a gap between tremor and locked zones in midwestern Shikoku

高木 涼太^{1*}; 小原 一成¹; 前田 拓人¹
TAKAGI, Ryota^{1*}; OBARA, Kazushige¹; MAEDA, Takuto¹

¹ 東京大学地震研究所

¹ Earthquake Research Institute, UTokyo

西南日本に沈み込むフィリピン海プレート境界の深さ 30-40 km の領域では、深部低周波微動と短期的スロースリップイベント (SSE) が同期して発生することが知られているが、この微動発生域とより浅部の巨大地震を発生させる固着域との間には空白域が存在する。本研究では、GNSS 変位データから定常変動成分と大地震後の余効変動を取り除くことで、四国中西部の微動発生域と固着域の中間領域で発生する長期的な SSE を検出した。

使用したデータは、国土地理院 GEONET の日座標値 (F3 解) である。まず、地震時オフセットとアンテナ交換などによる人為的なオフセットを補正した後、Nishimura et al. (2013) と同様の手法を用いて、観測点間にコヒーレントなノイズ成分を除去した。その後、2007 年から 2008 年の 2 年間の変位から定常変動成分を推定し、その定常成分を全体の時系列から差し引いた。2011 年以降の期間の変位場には定常成分からの変化が見られ、東北沖地震の余効変動の影響による長波長の空間変動に加えて、四国中西部において短波長の空間変動が確認された。そこで、長波長の変位場を空間の二次関数で近似して四国中西部を除く領域の変位場から推定し、それを全体の变位場から差し引くことで、東北沖地震の余効変動の影響を除去し、短波長変動のみを抽出した。

四国中西部における短波長の変位場は、南東方向への変位を示し、プレート境界における低角逆断層すべりで説明できる。Okada (1992) の式に基づき矩形断層を用いてモデリングしたところ、観測された変位場は、微動発生域と固着域の中間領域における年間 2 cm 程度のプレート収束方向のすべりで説明できることがわかった。この SSE は少なくとも 1 年半継続する。2011 年 4 月、2011 年 10 月、2012 年 4 月、2012 年 10 月からそれぞれ 1 年間の変位場をデータとして推定した矩形断層は、四国中西部から豊後水道に位置し、長さ 150-180 km、幅 20-40 km で、走向はプレート形状とほぼ平行である。断層長は 2011 年以降のイベントに比べて短いものの、同様の現象は 2004 年から 2005 年にも確認でき、その一部は小林 (2010) でも報告されている。検出された長期的な SSE は、2003 年と 2010 年の豊後水道長期的 SSE の後にすぐ東側で発生することから、豊後水道長期的 SSE のすべりが東に移動し、微動発生域と固着域との間の空白域で小規模な SSE が発生したことが示唆される。

四国西部における深部低周波微動は約半年間隔で発生し、プレート走向方向に数日から 1 週間かけて震源移動することが知られているが、2011 年以降にはその移動パターンが変化した。各微動エピソードにおけるプレート走向方向の移動距離を測定すると、四国西部において 2011 年以降には 120 km 以上という、それまでよりも長距離移動するエピソードが存在したことがわかった。本研究で検出された長期的な SSE は、移動パターンが変化した微動発生域の浅部に位置しているため、浅部の長期的な SSE がその深部の短期的 SSE の伝播を促進し、結果として深部低周波微動の移動距離が長くなった可能性がある。

微動発生域と固着域の間の空白域は北米のカスケード沈み込み帯にも存在し、その領域でのすべり様式の理解は、巨大地震時すべり域の dip 方向の下限の推定 (Hyndman, 2013) や固着域への応力蓄積過程の理解 (Wech and Creager, 2011; Yokota and Koketsu, 2015) のために非常に重要である。本研究では、GNSS 変位データから定常変動成分と大地震後の余効変動を取り除くことで、四国中西部の空白域における長期的な SSE を検出し、この長期的な SSE によりプレート沈み込みによる歪み蓄積の一部を解消していることが明らかになった。

キーワード: スロースリップイベント, スロー地震, GNSS, 深部低周波微動, 沈み込み帯
Keywords: slow slip event, slow earthquake, GNSS, non-volcanic tremor, subduction zone

南西諸島波照間島付近の繰り返し SSE の発生頻度変化とその原因 The properties and variations of repeating slow slip events near Hateruma Island, south-western Japan

Tu Yoko^{1*}; 日置 幸介¹
TU, Yoko^{1*}; HEKI, Kosuke¹

¹ 北海道大学理学院自然史科学専攻
¹Department of Natural historical sciences, Hokkaido University

スロースリップイベント (SSE) はプレート境界で繰り返し起こるゆっくりした滑りであり、カナダ西海岸、アラスカ、中部日本、西南日本等の沈み込み帯で見いだされている。南西諸島沖の琉球海溝では一般的にプレート間カップリングが弱いと信じられているが、実際には GNSS データの解析によって、最西端の西表島から波照間島にかけて領域 (Heki & Kataoka, 2008) を始め、沖縄本島を含む様々な領域で繰り返し SSE が検出されている (Nishimura, 2014)。西表?波照間地域の SSE は、平均 Mw6.6 で約半年に一度発生しているが、Nakamura (2009) は台湾付近で 2002 年に起こった Mw7.1 の地震のアフタースリップに伴う応力変化によって、その長期的なモーメント解放率が変化したことを示唆した。一方我々は 2002 年と 2013 年に与那国島が南向きの transient な動きを示していることを見だし、与那国島北部海域の地震活動の消長も考慮して、沖縄トラフでスロー拡大事件 (Slow Rifting Episode) が発生したと考えている。本研究では、これらに伴う南琉球ブロックの南進による応力変化も西表の SSE の発生率に影響を及ぼしていると考えて様々な定量的議論を行った。数値の詳細は英文要旨を参照のこと。

キーワード: SSE, 波照間島, 発生頻度変化, 琉球海溝
Keywords: SSEs, Hateruma Island, variations, Ryukyu subduction zone

2013年4月沖縄トラフの群発地震とダイク貫入について The Apr 2013 earthquake swarm and dyke intrusion in the Okinawa trough

安藤 雅孝^{1*}; 生田 領野²; Tu Yoko³; Chen Horng-Yue⁴; Lin Cheng-Horng⁴
ANDO, Masataka^{1*}; IKUTA, Ryoya²; TU, Yoko³; CHEN, Horng-yue⁴; LIN, Cjeng-horng⁴

¹ 静岡大学防災総合センター, ² 静岡大学大学院理学研究科, ³ 北海道大学自然史科学部門, ⁴ 中央研究院地球科学研究所
¹Center for Integrated Research and Education of Natural Disasters, ²Graduate School of Science, Shizuoka University, ³Department of Natural Historical Sciences, Hokkaido University, ⁴Institute of Earth Sciences, Academia Sinica

2013年4月17日与那国島北北西50kmの沖縄トラフ内で、最大Mw5.2の群発地震が発生し、ほぼ1週間で活動は収束した。この地域では、2002年の群発地震以来の地震活動であった。活動期間中、Mw4.5を超える地震は28回起きた。メカニズム解はすべて東西走向の正断層地震であり(F-NETによる)、地震モーメントの総和はMw5.7であった。

地震活動と同時に、与那国島や周辺の島のGPSが急激な変動を示した。KGPS解析の結果、4月17?18日の2日間にわたり周辺の島がゆっくり変動したことが分かった。観測された水平変動は、与那国島で南南東に4.7cm、西表島で西に1cm、石垣島ではmmオーダーであった。台湾東部の観測点では有意な地殻変動は検出されなかった。これらのGPSデータを総合すると、群発地震域にMw7.0相当の正断層地震またはマグマ貫入が生じたと推定された。ただし、地殻変動データだけでは、二つのモデルの優劣はつけられない。

この群発地震発生前、与那国島の水平方向の経年変化(2006?2013.3)は南南東方向に6.5 cm/yrであったが、群発地震後は8.4 cm/yrに増え、2014年には9.5 cm/yrになっている。このような長期にわたる地殻変動は、浅い正断層上のslow slipより、マグマ貫入モデルの方が説明しやすい。2013年の群発地震は、沖縄トラフ中の急激なマグマ貫入により引き起こされたもので、その後も通常より活発にマグマ貫入は継続していると推測される。

ただし、この種のマグマ貫入が、琉球弧を南に押し出す(琉球弧の南進)原因とは考えにくい。なぜならば、西表島と波照間島は琉球弧に対しほぼ垂直に並ぶが、両島間のGPS基線長は1mm/yの速度で定常的に伸びている。琉球弧は、海溝に垂直方向に引き伸ばされていると言える。つまり、琉球弧が南進するのは、琉球海溝が後退するため、マグマ貫入はその結果により引き起こされている。2013年の急激なマグマ貫入は、1997年GPS観測開始以降初めて起きたもので、この種の現象は稀に起こるものであろう。通常は、琉球弧の南進に伴い、マグマは受動的に沖縄トラフに貫入すると考えられる。

キーワード: 群発地震, 正断層, 沖縄トラフ, 背弧海盆拡大, ダイク貫入, 琉球海溝

Keywords: earthquake swarm, normal fault, Okinawa trough, back-arc rifting, dyke intrusion, Ryukyu trench

潮汐に応答する琉球海溝の超低周波地震 Correlation of activity of very low frequency earthquakes with tide in the Ryukyu Trench

中村 衛^{1*}; 嘉数 圭人¹
NAKAMURA, Mamoru^{1*}; KAKAZU, Keito¹

¹ 琉球大学理学部
¹ Faculty of Science, University of the Ryukyus

琉球海溝に沿って超低周波地震 (VLFE) が発生していることが明らかになってきた (Ando *et al.*, 2012; 浅野・他, 2013, 2014, Asano *et al.*, 2015; Nakamura and Sunagawa, 2015)。VLFE は応力降下量が非常に小さいため、地球潮汐 (数 kPa) 程度の小さな応力変化で活発化しやすいと考えられる。そこで琉球海溝で発生する浅部超低周波地震活動について、地球潮汐との対応を調べた。

2002年1月1日~2014年12月31日に琉球海溝で発生した Mw3.5 以上の VLFE イベントを解析に用いた。使用した VLFE カタログは Nakamura and Sunagawa (2015) の手動読み取り法による震源リストである。海洋潮汐の記録として気象庁の検潮記録 (那覇・石垣・名瀬) の3点を使用した。また、地球潮汐による理論歪と VLFE 活動を比較するため、GOTIC2 (Matsumoto *et al.*, 2001) を用いて、各領域での地球潮汐と海洋荷重による歪成分を計算した。

まず琉球海溝で VLFE が集中する5領域を選択し、それぞれの地点で検潮記録による海洋潮汐の位相と VLFE 活動を比較した。その結果、南西琉球弧 (与那国南方) 以外の全ての地域で干潮時に活動が活発化し、満潮時に活動が静穏化する傾向が見られた。活動は M2 分潮に対応するものが最も顕著であった。また、VLFE 活動を地球潮汐と海洋荷重による理論水平歪と比べた結果、圧縮歪の時期に活発化、拡張歪の時期に静穏化する傾向が見られた。さらに理論歪を用いてプレート面でのせん断応力を計算したところ、せん断応力が最大となる位相のときに VLFE 活動が活発化することが明らかになった。琉球海溝で起こる VLFE は低角逆断層型地震である (Ando *et al.*, 2012) ため、せん断応力が強くなることで VLFE は発生しやすいと考えられる。海洋荷重による歪の影響と琉球海溝の走向の関係により、プレート面に働くせん断応力は中~北部琉球弧では振幅が大きく南西琉球弧では小さい。この影響のために VLFE 活動は琉球海溝中北部では潮汐に応答するものの琉球海溝南西部では応答しなかったと考えた。

キーワード: 超低周波地震, 潮汐, 琉球海溝
Keywords: very low frequency earthquake, tide, Ryukyu Trench

深部低周波微動の潮汐応答性 Tidal sensitivity of tectonic tremors in subduction zones

矢部 優^{1*}; 田中 愛幸²; Houston Heidi³; 井出 哲¹
YABE, Suguru^{1*}; TANAKA, Yoshiyuki²; HOUSTON, Heidi³; IDE, Satoshi¹

¹ 東京大学理学系地球惑星科学専攻, ² 東京大学地震研究所, ³ ワシントン大学
¹EPS, UTokyo, ²ERI, UTokyo, ³ESS, Univ. of Washington

Tectonic tremor, which is one of slow earthquakes occurring in subduction zones, have been known to be triggered by small stress perturbation such as passing surface wave from distant earthquake and tidal stress. Tidal sensitivity of tremors can be detected by investigating the frequency of tremor catalog, but more quantitative comparison gives us useful information. By comparing tremor activity with calculated tidal stress on the plate interface, some previous studies estimate frictional property on the plate interface, such as frictional parameter in rate and state friction (Tanaka et al., 2008), friction coefficient (Thomas et al., 2012; Houston, 2015). Furthermore, recent studies reveal the relation between tremor rate and tidal stress is exponential (Ide and Tanaka, 2014, Houston, 2015), which would represent the frictional property of plate interface. However, the analyses of previous studies are limited to specific places in subduction zones. Hence in this study, we try to estimate the spatial variation of tidal sensitivity in Nankai, Cascadia and Mexican subduction zones.

Tidal stress calculation includes both body tide and ocean tide. Tidal stress is converted to normal stress and shear stress on the plate interface based on the local plate model and plate movement.

Tremor catalog is from Yabe and Ide (2014). We calculate tremor rate at each tidal stress level following Ide and Tanaka (2014) and Houston (2015). Tidal sensitivity is calculated from this data using maximum likelihood method. The uncertainty of estimated parameter is assessed as well.

In this study, we categorize tremors in the catalog into four types. Tremors occurring between major ETS episodes are categorized into inter-ETS events. Tremors in ETS events are categorized into three categories ("early", "front", and "later" as Houston, 2015). Spatial variations of tidal sensitivity for each type of tremors are estimated. Nankai and Cascadia subduction zones have both ETS tremors and inter-ETS tremors, while tremors in Mexican subduction zone do not show significant along-strike migration, and all tremors are categorized into inter-ETS tremors.

As for tremors in ETS, early tremor and later tremor show high sensitivity in Nankai subduction zone, while front tremor does not. In Cascadia, only after tremor does show tidal sensitivity. The absence of tidal sensitivity in early tremor in Cascadia is considered to be due to the smaller amplitude of tidal stress and/or stronger coupling of slow earthquake region. In the front period, stress perturbation due to SSE slip would be larger than tidal stress, and tidal sensitivity disappears. After the SSE front passes, plate interface get weakened, and strong tidal sensitivity will appear. Comparing with the amplitude of tremors estimated by Yabe and Ide (2014), tidal sensitivity tends to increase from early tremors to later tremors where the amplitude of front tremors is large. Because the amplitude of tremors is proportional to moment rate (Ide and Yabe, 2014), this observation is consistent with the interpretation presented above. Tidal sensitivity also tends to be higher in shorter duration tremors, which is defined as the half value width of tremor envelope. Considering the tremor model by Ando et al. (2010, 2012) and Nakata et al. (2011), shorter duration might imply smaller tremor patch, which would not endure higher strain accumulation than larger tremor patch, resulting in higher tidal sensitivity.

キーワード: 深部低周波微動, スロー地震, 沈み込み帯, 潮汐応答性, 速度状態依存摩擦則

Keywords: Tectonic Tremor, Slow Earthquake, Subduction Zone, Tidal Sensitivity, Rate and State Friction Law

潮汐と海洋の長期変動によるプレート沈み込み速度のゆらぎを見積もる An estimate of fluctuating plate subduction velocities caused by tidal modulations and decadal variations in the ocean

田中 愛幸^{1*}; 矢部 優²; 菊池 亮佑²; 井出 哲²
TANAKA, Yoshiyuki^{1*}; YABE, Suguru²; KIKUCHI, Ryosuke²; IDE, Satoshi²

¹ 東京大学地震研究所, ² 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻
¹ERI, Univ. Tokyo, ²Department of Earth and Planetary Science, Univ. Tokyo

プレート沈み込み帯の遷移域で、非火山性微動やスロースリップが検出されている。これらの震源域付近には脱水反応により生じた海洋プレート起源の水がたまっているため、有効法線応力が非常に低くなっていると考えられている。そのため、非常に弱い外力に対しても微動がトリガーされることがある。実際に、短周期の潮汐に同期した周期的な微動発生数の変化が観測されている。我々は先行研究において、日周や半日周潮の振幅が長期的に変調していくことに着目し、微動の長期的な変動を予測する単純なモデルを構築した。微動やスロースリップの発生はプレート境界のすべりにより生じるので、それらの発生の長期的な変動はプレート沈み込みのゆらぎを生み出す。南海トラフのデータにそのモデルを適用したところ、モデルから求めた微動の発生率が巨大地震の発生時期も含む地震活動とよく対応することが分かった。しかしながら、そのモデルでは観測された潮位に基づいているために、海洋変動の非潮汐成分を明示的に扱っておらず潮汐との分離が行われていなかった。海洋や大気の新潮汐変動と大地震の発生時期との関連を調べた研究は過去にもあったが、遷移域の外力に対する敏感さを考慮していなかったため、それらの応力は地震をトリガーするには不十分だと考えられてきた。本研究では、遷移域に対する海洋の長期的な変動を初めて見積もった。気象庁の海洋モデルで再現された海底圧力データを用いたところ、潮汐の振幅変調がもたらすすべり速度の変化よりも非潮汐変動のもたらすすべりの方が大きいことが分かった。微動の応答から決定した摩擦パラメータを用いて見積もったすべり速度のゆらぎは非潮汐の海洋変動と似た時間変動パターンを示し、振幅は年平均値で 1 mm/yr を超え得る。これらはゆっくりした変動であり測地観測で検証できる可能性がある。地震活動やスロースリップの一部もすべりゆらぎの時期に対応するので、海洋の新潮汐変動のような外力を地震サイクルのシミュレーションに取り入れ、定量的にトリガリングが生じるか検証することが今後の課題となる。

キーワード: 潮汐, スロースリップ, 微動, 地震, 地震活動, プレート沈み込み帯
Keywords: tides, slow slip, tremors, earthquake, seismicity, subduction zone

西南日本における深部低周波微動と上盤側の構造不均質 Tremor activity and slip modes controlled by the permeability of the megathrust boundary

中島 淳一^{1*}; 長谷川 昭¹
NAKAJIMA, Junichi^{1*}; HASEGAWA, Akira¹

¹ 東北大学大学院理学研究科

¹ Graduate School of Sci. Tohoku Univ.

西南日本の非火山性の深部低周波微動は東海から豊後水道にかけての領域で活発であるが、例えば紀伊水道では微動が発生していないなど、島弧走向方向で活動度が変化することが知られている (Obara, 2002)。さらに、関東から伊豆半島では微動が報告されておらず、九州でも微動の活動は活発ではないことも大きな特徴の一つである。このような微動活動の変化の原因として、関東、紀伊水道、九州における島弧性のスラブ地殻の沈み込み (Seno and Yamasaki, 2003) や微動発生域の上盤の蛇紋岩化 (Matsubara et al., 2009) が考えられてきた。しかしながら、紀伊水道で長周期スロースリップが発生していること (Kobayashi, 2014)、九州-パラオ海嶺に沿ってやや活発な微動活動がみられ (Yabe and Ide, 2013)、長期的スロースリップが発生していること (Yarai and Ozawa, 2013) など、最近の研究によれば沈み込むスラブの性質とスロースリップの分布が必ずしも対応しない。また、スロースリップの再来間隔はスラブの不均質構造とは相関がないことも指摘されている (Audet and Burgmann, 2014)。

本研究では、西南日本の微動活動の島弧走向方向の変化を理解するために、フィリピン海プレート境界付近の詳細な地震波速度構造を推定した。その結果、プレート境界直上の構造不均質と微動活動の間に明瞭な関係が存在し、(1) 微動が活発な領域では、上盤側の速度が高速であること、(2) 紀伊水道や伊勢湾、関東?伊豆、九州のように微動が発生していない、または極めて少ない領域では、上盤側の速度は低速であることが明らかになった。このような上盤側の速度と微動活動の関係を説明する1つのモデルはプレート境界直上の岩石の透水性の違いである。つまり、上盤側の透水性が小さい場合には、プレート境界の間隙水圧が静岩圧と同程度まで上昇し、プレート境界の強度が著しく低下することで微動が多く発生すると考えられる。一方、透水性が大きい場合、上盤側に水が供給されるためにそこでの変成が進み、結果としてプレート境界の間隙水圧が高くなるならない。そのため、微動を発生させるほど強度を低下させることができず、微動ではなく長期的スロースリップが発生すると考えられる。このような透水性の違いから期待される間隙水圧の変化によるスリップモードの違いは、数値シミュレーション結果と調和的である (例えば、Liu, 2014)。

キーワード: 透水性, 地震波速度, プレート境界, スロー地震

Keywords: permeability, Philippine Sea plate

四国西部でのスローイベント域における人工地震探査 Seismic explosion survey on the episodic tremor and slow slip area in western Shikoku

武田 哲也^{1*}; 汐見 勝彦¹; 上野 友岳¹
TAKEDA, Tetsuya^{1*}; SHIOMI, Katsuhiko¹; UENO, Tomotake¹

¹ 防災科学技術研究所
¹ NIED, Japan

最近、内閣府により、南海トラフ沿いで発生する考慮すべき最大規模の地震の震源モデルが公開された。この震源モデルの深部境界は、非火山性低周波微動や深部超低周波地震、短期的スロースリップ (SSE) 等の低周波イベントの発生域に基づき設定されているが、これらの活動と南海トラフにおいて発生する巨大地震の関係は必ずしも明確ではない。低周波イベントの発生に関しては沈み込むプレートからの脱水が強く関与していると考えられており、低周波イベント発生域周辺のプレート境界では、プレート形状やその物性等の変化が予想される。本研究では、Episodic に低周波イベントが発生する四国西部を対象とし、低周波イベントとフィリピン海プレートおよび陸側モホ面の相対的位置関係や構造的な特徴の変化を詳細に調べるため、四国西部において人工地震探査を実施した。

探査測線は北北西—南南東方向に広がる活発な深部低周波微動クラスター上を通過するよう愛媛県伊予市から高知県黒潮町に至る約 80km の直線とした。人工震源として 300kg のダイナマイト震源を設け、微動クラスターの北端周辺の直上に配置した。人工地震を観測するための臨時観測点は、平均約 450m 間隔で 180 点展開した。探査は 2014 年 12 月 11 日未明に実施し、良好な探査データを得ることができた。

得られたレコードセクションからは反射波と考えられる多くの位相を確認することができ、特に強い振幅を持つ波群が往復走時 11-12 秒と 14 秒付近に確認できる。特に前者の波群は他の波群と比べ継続時間が長く、厚みを伴う反射面の存在が示唆される。過去の探査データおよびプレートモデルからこの反射波はプレート境界からのものだと推測され、Shelly et al. (2006) で指摘された高圧の流体が存在する領域周辺から起因するものと考えられる。今後、解析を進め、プレート境界の正確な位置を把握し、プレート境界の物性変化について評価する予定である。

※本研究は、文部科学省委託「南海トラフ広域地震防災研究プロジェクト」の一環として行いました。本研究における地下構造探査の実施にあたり、周辺自治体を始めとする関係の皆様にご協力頂きました。記して感謝致します。

キーワード: 人工地震構造探査, 南海トラフ, プレート境界
Keywords: Seismic survey, Nankai trough, Plate boundary

2種類の地震性ローディングによるSSE発生間隔変化 Recurrence interval modulation of slow slip events by two types of earthquake loading

三井 雄太^{1*}
MITSUI, Yuta^{1*}

¹ 静岡大学理学研究科
¹Institute of Geosciences, Shizuoka University

測地学的研究によって、これまでに多くの自発的スロースリップイベント (SSE) が主に沈み込み帯で観測されてきた。SSE の繰り返し間隔は断層の力学的状態を反映する。これには、隣接域で生じる大きな地震に関連する載荷の影響も含まれるだろう。そこで本研究では、SSE 繰り返し間隔の時間的变化に注目する。速度・状態依存摩擦則を用いた数値モデル実験により、地震に関連する載荷の効果を調べた。一つの結果として、既存のいくつかの研究でも指摘されたように、近隣の大地震の震源核生成過程が進行するにつれて、SSE 発生間隔の短縮が見られた。SSE 発生域と大地震の震源域の距離がほぼゼロのときのみ、大地震の発生に 10 年程度先行して、SSE 発生間隔の更なる急短縮が生じた。もう一つの結果として、0.1MPa 程度の外的な応力擾乱を系全体に加えたとき、同様の SSE 発生間隔の急短縮が生じることがわかった。さらに、応力擾乱後に SSE の発生間隔の揺らぎが起こり、次の大地震が発生するまで継続することもわかった。これら双方の効果が現在房総半島沖において進行しているのかもしれないが、現状では、両者を切り分けるのは難しい。

キーワード: スロースリップイベント, 応力擾乱, 速度・状態依存摩擦則, 地震準備過程

Keywords: Slow slip events, Stress perturbation, Rate- and state-dependent friction law, Earthquake preparatory process

東北沖プレート境界物質の摩擦特性からみるスロー・スリップ・イベント Frictional properties of materials along the plate boundary of Tohoku subduction zone: implications for slow slip events

澤井 みち代^{1*}; Niemeijer Andre²; 廣瀬 丈洋³; Plumper Oliver²; Spiers Christopher²
SAWAI, Michiyo^{1*}; NIEMEIJER, Andre²; HIROSE, Takehiro³; PLUMPER, Oliver²; SPIERS, Christopher²

¹ 広島大学・院・理学研究科, ² ユトレヒト大学, ³ JAMSTEC・高知コア研究所
¹Hiroshima University, ²Utrecht University, ³Kochi / JAMSTEC

Episodic tremor and slip occurred just before the 2011 Tohoku-oki earthquake on a shallow portion (less than 20 km depth) in the Tohoku subduction zone (Ito et al., 2013). The area where slow slip occurred overlapped with the seismogenic zone. To understand such diverse slip behaviour around the Japan Trench, not only the major earthquakes but also the slow slip events, it is essential to reveal the frictional properties of rocks distributed at the Tohoku subduction zone. We thus conducted friction experiments using a rotary shear apparatus on powders of blueschist (probably distributed at hypocenters at major Tohoku earthquakes) and smectite-rich pelagic sediments (distributed along the shallow portion of the Tohoku plate boundary (Chester, et al 2013)). Simulated gouges were sheared at temperatures of 20-400°C, and effective normal stresses of 25-200 MPa and pore fluid pressures of 25-200 MPa. We conducted velocity-stepping sequences (0.1 to 100 micron/s) to determine the rate and state parameter (a-b) and investigated the effects of temperature, effective pressure and slip rate on slip stability.

Blueschist gouges show a friction coefficient of about 0.75 and positive (a-b) values which decrease to become negative with increasing temperature. At 200°C, the behavior is velocity weakening and shows negative (a-b) values with a background friction of ~0.75. At 300°C, friction is ~0.65 and the gouges show neutral to positive values of (a-b), showing larger (a-b) values than at 200 °C. (a-b) values slightly decrease at 400°C with a background friction of ~0.7. There is also effective normal stress dependence: even at temperature conditions where (a-b) tends to be positive, (a-b) values are negative at low effective pressure and increase to positive with increasing effective normal stress. This suggests that increasing pore pressure is a possible factor causing unstable slip, leading to slow slip events.

Smectite-rich pelagic sediments show that at low temperatures of 20 and 50°C, the simulated gouges exhibit negative values of (a-b) with a background friction coefficient of 0.38, except at the highest slip rate of 0.1 mm/s. However, the gouges show neutral to positive values of (a-b) at temperatures of >100°C with the same background friction coefficient as at lower temperatures. In addition, the value of parameter (a-b) depends significantly on slip rates: at temperatures of 20 and 50°C it increases from negative to neutral (or slightly positive at 20°C) with increasing slip rates to 0.1 mm/s, whereas it tends to decrease with increasing slip rate at temperatures higher than 100°C. The downdip temperature limit of the slow slip events at Japan Trench (Ito et al., 2013) seems to be in the range between 100 to 150°C. The transition in (a-b) value from neutral to positive, particularly at lower slip rates, occurs at the same temperature range. Hence, this could correspond to the observed downdip limit of the slow slip events.

稠密地震計アレイを用いた深部低周波微動高速移動の詳細な観測 Precise observation of migration of non-volcanic low frequency tremors by using dense seismic array

武田 直人^{1*}; 今西 和俊¹; 内出 崇彦¹; 松本 則夫¹
TAKEDA, Naoto^{1*}; IMANISHI, Kazutoshi¹; UCHIDE, Takahiko¹; MATSUMOTO, Norio¹

¹産総研
¹GSJ, AIST

世界各地の沈み込み帯などで観測されている深部低周波微動は数日規模のゆっくりとした動きから50km/hを超える高速移動等、いくつかの移動パターンが報告されている。これらの移動はその速度と移動方向がそれぞれのパターンによって異なっている。50km/hを超える高速移動はおおむね沈み込むプレート方向に平行であることが報告されている[例えば Ghosh et al. G3 2010, Ide JGR 2012]。産総研ではこの高速移動を含めた深部低周波微動の発生機構を調査するために、2011年3月から三重県松阪市で稠密地震計アレイ観測を行っている。アレイの周辺では3ヵ月~6ヵ月間隔で活発な深部低周波微動活動が起きており、これまで十数回の大規模な微動活動時のアレイ記録が取得することができた。今回は高速移動の詳細な時間発展の様子を知るために、このアレイ記録を用いて Ghosh et al. [G3 2010]と同様の手法で深部低周波微動の震源位置を求めた。

稠密地震計アレイを用いた微動検出感度はエンベロープ相関法よりも高いが、エンベロープ相関法と同様に活動が活発な際に検出能力が低下する場合がある[武田他 JpGU 2014]。また、震源位置決定精度はアレイと震源間の速度構造や距離の影響を受けやすい。

我々のアレイ観測で見たアレイ周辺(半径25km以内)での微動の高速移動は、3年程の観測期間全体ではおおむね同方向を向いている。その方向はプレートの沈み込み方向と若干のずれがあるが、これはアレイ解析の位置決定精度に起因している可能性があり、先行研究の結果を否定するものではない。一方、十数回の大規模な微動活動毎にこの高速移動方向を整理すると、必ずしも全て同じではなく、イベントによっては大きく異なる場合があった。また、同一イベントに於いて高速移動の方向が時間とともに変わる場合も観測された。

今回の解析では、イベント内での詳細な高速移動方向の抽出に Ghosh et al. [G3 2010]の手法を用いており、アレイの半径25km以内の微動を発生期間全体もしくはいくつかの期間に分けて、その期間内の微動をまとめて処理している。今回観測された高速移動方向の変化は、微動発生場所に固有の場合も考えられるため、詳細な微動発生域とその高速移動の関係を明らかにするのは課題の一つである。また、高速移動方向の抽出方法に関しても検討の余地があると考えられる。

キーワード: 深部低周波微動, 稠密アレイ観測, 紀伊半島
Keywords: non-volcanic low frequency tremor, seismic array, Kii Peninsula

日奈久断層帯下部で定常的に発生する非火山性微動の活動特性 Activities about non-volcanic tremor beneath the Yatsushiro fault zone

宮崎 真大^{1*}; 松本 聡²; 清水 洋²
MIYAZAKI, Masahiro^{1*}; MATSUMOTO, Satoshi²; SHIMIZU, Hiroshi²

¹ 九大・理, ² 九大・地震火山センター
¹Grad. Sch. Sci., Kyushu Univ., ²SEVO, Kyushu Univ.

日奈久断層帯において、遠地震の表面波がもたらした動的応力により非火山性微動が誘発されていることが明らかになっている (Chao and Obara, 2012, 地震学会秋季大会)。微動は断層帯の深部延長部で発生し、地震波トモグラフィー (Matsubara and Obara, 2011) との比較では、震源域の深部に P 波速度の低速度域、地震発生層に対応する浅部に高速度域という速度構造の変化があることが明らかになっている (Miyazaki et al., 2015, submitted)。解像度が十分ではないものの、このことは、誘発された微動が脆性領域と延性領域の遷移している場所で起きている可能性がある。

外部からの応力擾乱がない場合でも断層の深部において非火山性微動が発生しているかを知ることは、地震発生過程を理解するうえで重要である。誘発微動波形をテンプレートとして、Matched Filter 法 (Gibbons and Ringdal, 2006) により定常的な活動の検出を行った結果、そのほとんどが、ノイズレベルと同等の振幅を持ち、相関係数の総和の値も閾値をやや上回る程度のものであった (宮崎他, 2014, 地震学会秋季大会)。そこで、Shelly et al. (2006) で行われた検知能力のテストと同様の方法で、連続波形記録に対し振幅のスケールを変化させたテンプレートを混入させ、どの程度の相関係数の総和が得られるか計算した。その結果、テンプレートのスケールをノイズレベルと同等の大きさにした場合、実際のデータに適用したものとほぼ同じ値を示すことが確認できた。したがって、日奈久断層下部で定常的に発生する非火山性微動の 1 つ 1 つの規模は、非常に微小であったことが示唆される。

キーワード: 非火山性微動, 八代海, 日奈久断層, 活断層
Keywords: non-volcanic tremor, Yatsushiro, Hinagu, active fault

MT法連続観測により示された四国西部における地殻比抵抗変化 Temporal variation of crustal resistivity in western Shikoku revealed by continuous MT observations

山下 太¹; 本蔵 義守^{1*}
YAMASHITA, Futoshi¹; HONKURA, Yoshimori^{1*}

¹ 防災科学技術研究所
¹ NIED

フィリピン海プレートの沈み込み帯に属する四国西部においては、深部低周波微動 (Obara, 2002, Science) をはじめ、深部超低周波地震 (Ito *et al.*, 2007, Science), 短期的スロースリップイベント (Obara *et al.*, 2004, GRL) および長期的スロースリップイベント (Hirose *et al.*, 1999, GRL) 等のさまざまなスロー地震が観測されている。一方、MT法探査により、当該地域の地殻深部には特徴的な低比抵抗構造が存在することが明らかとなっている (Yamashita and Obara, 2009, AGU fall meeting)。この低比抵抗構造はプレート沈み込みにもなう脱水によって生じた流体に由来すると考えられるため、スロー地震活動との関連性を調べる目的でMT法連続観測が実施されている。本稿では、詳細なデータ解析により有意と考えられる地殻比抵抗変化の検出に成功したため、その結果について報告する。連続観測は2008年9月から2010年3月までは愛媛県西予市城川町窪野 (KBN) および野村町惣川 (SGW)、2010年4月以降はKBNおよび北宇和郡鬼北町生田 (IKT) でおこなわれている。ノイズによる影響を軽減し信頼性の高い結果を得るため、データ解析はHonkura *et al.* (2013, Nature Communications) の手法を踏襲し、電場と磁場のコヒーレンシーがしきい値を超えたデータのみを使用している。これらのデータを用いて見かけ比抵抗と位相の日平均値を計算し、さらにMT法の原理に基づいて生じる本質的なばらつきの影響を抑えるため31点移動平均をおこなった。見かけ比抵抗には気温変化に起因する年周変化も見られたため、MT法観測点に近い気象庁観測点 (久万) における気温データを用いて補正をおこなった。なお、解析した周波数は0.00055~0.141 Hzの9周波数である。解析の結果、次の3つの条件を満たす時間変化を複数回、検出することに成功した。(1) 見かけ比抵抗と位相が同じタイミングかつ逆位相で変化する。(2) (1)の変化が複数の周波数帯に渡って同様に見られる。(3) 2つの観測点で同時期に同様の変化が見られる。以上のことから、これらの変化は地殻内で生じた比抵抗構造変化に起因するものと考えられる。そこでYamashita and Obara (2009) が示した2次元構造を参考にして1次元構造モデルを作成し、フォワード計算をおこなって観測結果の1例と比較したところ、深さ20~25 kmにおける比抵抗変化で観測結果を概ね説明可能であることを確認した。今後は2次元比抵抗構造を基に、観測された比抵抗の時間変化がどのような構造変化によって説明できるかの詳細な検討をおこなうとともに、スロー地震活動との関連性を調べていく予定である。

キーワード: 地殻比抵抗, MT法, スロー地震, 沈み込み帯

Keywords: Crustal resistivity, Magneto-telluric method, Slow earthquake, Subduction zone

ニュージーランド北島沖合ヒクラング沈み込み帯における地震活動および地震波速度構造 Seismic activity and velocity structure in the Hikurangi subduction zone offshore the North Island of New Zealand

靄島 大資¹; 望月 公廣^{1*}; Henrys Stuart²; 塩原 肇¹; 山田 知朗¹; 篠原 雅尚¹; Fry Bill²; Bannister Stephen²

HAIJIMA, Daisuke¹; MOCHIZUKI, Kimihiro^{1*}; HENRYNS, Stuart²; SHIOBARA, Hajime¹; YAMADA, Tomoaki¹; SHINOHARA, Masanao¹; FRY, Bill²; BANNISTER, Stephen²

¹ 東京大学地震研究所, ²GNS Science

¹Earthquake Res. Inst., Univ. of Tokyo, ²GNS Science

ニュージーランド北島沖合のヒクラング沈み込み帯では通常の海洋性地殻のおよそ1.5倍である12kmもの厚い地殻を持つヒクラング海台がオーストラリアプレートの下に沈み込んでいる。プレート境界面の深さが浅いため、反射法地震探査によりプレート境界の構造が詳細に求められており、沈み込む海山や、反射強度の強い領域(HRZ: High-amplitude Reflectivity Zone)などの不均質構造の存在が明らかになっている[Bell et al., 2010など]。北島では2000年頃から沿岸のGPS観測網が整備され、この沈み込み帯におけるプレート間のカップリング係数が推定された。ヒクラング沈み込み帯北部(南緯40°以北)では固着域が狭く、下限が深さ10km程度と浅い。固着域のほぼ全域が海底下となるが、海底地震観測はこれまで行われてこなかったため、海域での地震活動や震源分布については良く分かっていない。固着域の下限付近ではスロースリップイベント(SSE)が観測されており、他の沈み込み帯と比べて非常に浅いところで起こることが特徴的である。これらのイベントには微動や群発地震が伴うことが知られている[Kim et al., 2010; Delahaye et al., 2009]。

海域下の地震やSSEに伴う低周波イベントを調査するため、ヒクラング沈み込み帯で初めての海底地震観測が行われた。2012年4月に4台の海底地震計が設置され、約一年後に回収された。北側2台は広帯域地震計で南側の2台は1Hz地震計である。広帯域地震計のうちひとつがレコーダーの不具合により記録が断続的になってしまっているが、他の3点では良好なデータが得られた。観測期間終盤の2013年2月中旬から観測網の南でSSEが発生した。まずSTA/LTAアルゴリズムによってイベント波形を抽出し、手動検出により震源を求めた。そのイベントをテンプレートとして用いてマッチドフィルター法を適用することでさらにイベント数を増やすことに成功した。これらのイベントはP波、S波それぞれ相互相関を取ることでより相対走時差を求め、絶対走時と相対走時を用いた震源再決定および構造決定手法(TOMODD[Zhang and Thurber, 2003])を用いて震源が決定された。初動極性からメカニズム解も求めた。陸の観測点だけでは捉えられない、イベントを多く捉えることができた。プレート境界近傍のイベントに注目すると、固着域や沈み込む海山、HRZでのイベントはほとんど見られず、HRZの縁辺で地震活動が活発な領域が見られた。速度構造解析ではおおむね先行研究と同様の結果が得られたが、今まで解像できなかった領域の構造も求めることができた。また、SSEに伴いすべり域北限付近で活発化した地震活動を捉えることができた。過去のSSEでもそれに伴ってすべり域の縁辺で地震活動が活発化した事例が数例確認できる。これらはいずれも局所的な活動で、定常的に地震活動が活発な地域と一致する。これらの地域にはプレート境界の不均質に起因する小規模な固着域が存在する可能性がある。

キーワード: 地震活動, スロースリップ, プレート境界, 構造

Keywords: seismicity, slow slip, plate interface, structure

「低周波地震」を用いた地震波異方性の検出にむけて Detection of seismic anisotropy from low frequency earthquake

石瀬 素子^{1*}; 西田 究¹
ISHISE, Motoko^{1*}; NISHIDA, Kiwamu¹

¹ 東京大学地震研究所

¹ Earthquake Research Institute, University of Tokyo

地震観測網の稠密化に伴い、通常地震とは特徴が異なる様々な振動現象(スロー地震)が相次いで発見されてきている。そのひとつである深部低周波微動は、スロー地震のなかで最も発生頻度の高い現象であり、他のスロー地震と連動して時空間的に発展することが知られている(例えば、Rogers and Dragert, 2003)。また、これらスロー地震は西南日本のフィリピン海プレート境界の巨大地震の震源域と接するように発生しており、深部低周波微動のメカニズム解明は、一連のスロー地震活動の理解だけでなく、プレート境界地震の発生準備過程の研究にも重要な情報をもたらすと考えられる。そのため、深部低周波微動の発生メカニズムに関する研究は、その活動の発見以来(Obara, 2002)、すでに数多く報告されている。しかし、これらからは、共通して流体との関連性が示唆されてはいるが(例えば、Katsumata and Kamaya, 2003; Shelly et al., 2006)、その詳細は未だ明らかではない。そこで、我々は、流体の特性に非常に敏感な性質である「地震波異方性」に注目し、その「時空間変化」という観点から、流体と深部低周波微動活動との関連性の解明を進めていくことを計画した。

その第一歩として、本研究では、西南日本のフィリピン海プレート境界付近で発生した「低周波地震」を対象とした異方性測定を実施したのでその暫定結果を報告する。ここでいう「低周波地震」とは、気象庁地震月報の情報に従っている。これは、深部低周波微動の微動波群に含まれる孤立的な位相に対応しており、S波として検出され震源決定に用いられている(西出・他, 2000)。従って、異方性の測定にはS波スプリッティング解析を用いる(例えば、Ando, 1983)。この手法では、分裂したふたつのS波のうち、速いS波の振動方向と両者の到達時間差で、異方性の方向と強さが記述される。これらのパラメータは、直交した水平動2成分の相互相関係数が高くなるような回転角と、時間軸方向の移動によって求められる。

ここでは、愛媛県と香川県の県境付近を震源とする微動活動から得られた異方性の特徴を記す。なお、以下の結果は、2-8Hzのバンドパスフィルターを適用して得られたものである。

異方性を決定する際の指標とした相互相関係数は、測定の確からしさともいえる。しかし、本研究で実施した解析の相関係数は通常地震を対象とした場合に比べて有意に低く、現時点では、相関係数0.8を超えるイベントはない。このよう状況ではあるが、比較的相関の高いイベント間では互いに似た異方性が得られており、その方向は東西系で大きさは0.2-0.4秒程度であった。ただし、時空間変化の議論については、これまでの解析数が十分でないため、今後の課題とする。

さらに、もうひとつの課題として、S波スプリッティング法を用いた解析で得られる異方性の不確定性の問題がある。この方法で得られる異方性は、波線が通過した領域にある全ての異方性の影響がかけ合わさったものとなる。従って、本解析で得られた異方性には、少なくとも上部地殻や下部地殻の異方性が含まれている。そのため、異方性の変化の検出はできても、震源付近の異方性についての厳密な議論には、剥ぎ取り法(Oda, 2011)などを用いて浅部の異方性を補正し、震源付近の異方性を明らかにする必要がある。

キーワード: 低周波地震, 地震波異方性, 流体
Keywords: low frequency earthquake, seismic anisotropy, fluid

東濃十字アレー深部ボアホール地震観測網を用いた深部低周波地震の観測. 東海地域2014年8-9月の活動
Observation of the deep low-frequency earthquakes using deep borehole-seismograph network. Activity in Tokai area

鈴木 貞臣^{1*}; 大久保 慎人¹; 石井 紘¹; 浅井 康広¹
SUZUKI, Sadaomi^{1*}; OKUBO, Makoto¹; ISHII, Hiroshi¹; ASAI, Yasuhiro¹

¹ 東濃地震科学研究所
¹ TRIES

東濃地震科学研究所 (TRIES) は深部低周波地震 (以後 LFE と呼ぶ) を研究するため、2009 年より愛知県豊田市に地震観測点を設置し観測を続けてきた。これら観測点に加えて、産業技術総合研究所 (AIST) ボアホール観測点及び防災科学技術研究所 (NIED) の Hi-net 観測点 SMYH を組み合わせて 3D (立体) アレー (SMY 立体アレー) とした。この 3D 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 の波形について semblance 解析を行い、P 波と S 波を検出する方法を開発し、震源決定を試みた (鈴木・他, 2012, 2013)。これにより 3D アレーが LFE を研究するために有効であることが分かった。この成果を基に、東海 LFE の震源域から北方に 30-40 km 離れた東濃十字アレー深部ボアホール観測網と超高密度地震観測網の観測点が、地震観測用 3D アレー (「東濃十字アレー」と呼ぶ) として使えるのではないかと考え、その可能性を検討した。東濃十字アレーは、地殻活動総合観測用 (浅井&石井, 2012) の 1000m 級深度が 2 か所 (BYB, JRJ) と 500m 級深度が 3 か所 (TRI, HYS, TOS) のボアホール観測点を含む合計 17 の地震観測点で構成され、立体アレーとして見なすことができる。2014 年 8-9 月に東海 LFE が発生したので、この東濃十字アレーでこれらの LFE がどのように観測されたか調べた。

東濃十字アレーの全ての観測点に加速度計 (Akashi JEP-6B3) が配置され、それにより観測されたデータは東濃地震科学研究所のデータベースに記録されている。それらの記録を次のような手順で処理した。1. 観測点によってサンプリング周波数が異なるので、波形記録を全て 100Hz に揃えた。2. ボアホール観測点の水平動記録の方位を N S と E W に揃えた。また、上下動記録の極性を揃えた。3. それぞれの加速度記録を積分して速度記録に変換し、さらに LFE 記録の主要周波数帯であるさらに 2-8Hz のバンドパスフィルターをかけた。

気象庁により報告された LFE 震源の中から、マグニチュードが最大 ($M=0.6$) である LFE のうちの 1 つである LFE108 (震源時: 2014/9/1, 15h26m40.77s) を選び出し、その UD 成分と E W 成分の波形を調べた。その結果、UD 成分からは LFE108 の P 波と思われる波群が、明瞭ではないが検出された。また E W 成分からはその S 波と思われる波群が検出された。解析前の予想では、グラウンドノイズが小さい深井戸観測点の方が浅い観測点に比べて「LFE のシグナルを明瞭に記録している」と思っていたが、予想に反して両者に著しい違いがないことが分かった。その理由は、個々の LFE のシグナルを不明瞭にしている主要原因は、グラウンドノイズの大小ではなく、LFE がイベントとして連続的に多数発生しているため、P 波、S 波、コーダ波が互いに重なりあっていることによるものと思われる。

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

浅井康広・石井 紘, 2012, 陶史の森/日吉地殻活動総合観測点の整備と新デジタル式地殻活動総合観測装置について, 東濃地震科学研究所報告 No.29 (H23 年度), pp9-18.

鈴木貞臣・大久保慎人・今西和俊・北川有一・武田直人, 2012, 立体アレーによる深部低周波地震 (LFE) の semblance 解析, 東濃地震科学研究所報告 No.29 (H23 年度), pp69-79.

鈴木貞臣・大久保慎人・今西和俊・北川有一・武田直人, 2013, 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 (2), 日本地震学会講演予稿集, 2013 年度秋季大会, p152.

キーワード: 深部低周波地震, 深部ボアホール地震観測網, アレー観測, センブランス解析

Keywords: deep low-frequency earthquakes, deep borehole-seismograph network, array observation, semblance analysis

Matched Filter 法を用いた西南日本の深部低周波地震の自動検出 Automatic detection of low-frequency earthquakes in Southwest Japan using matched-filter technique

森脇 健^{1*}
MORIWAKI, Ken^{1*}

¹ 気象庁地震火山部
¹ Japan Meteorological Agency

気象庁では一般地震より低周波成分が卓越する孤立的な位相を S 相として検出、震源決定を行い深部低周波地震として気象庁地震カタログに掲載している [西出・他 (2000)]。気象庁地震カタログには、1999 年 9 月～2014 年 7 月の間に西南日本の南海トラフ沿いの深部低周波地震が約 24000 個ある。最近の研究 [Shelly et al., 2007] は、南海トラフの深部低周波微動はプレート境界のすべりにより発生する深部低周波地震の集合体であると主張している。それゆえに深部低周波地震活動を監視することはプレート境界の状態を推定する上で重要であると考えられる。しかし、深部低周波地震は一般地震のようなパルス的な相の立ち上がりがないために振幅比により検知することが難しく、震源決定にも時間がかかる。

そこで自動的、効率的に深部低周波地震の検出と震源決定を行うために matched-filter 法を西南日本の深部低周波地震活動に適用した。matched-filter 法で用いるテンプレートには気象庁地震カタログに掲載されている 1263 個の震源データを利用した。解析の際には、最初にテンプレート及び連続波形データに対し、2-8Hz のバンドパスフィルタと 100 から 20Hz へのデシメーション処理を施し、テンプレートの S 相の理論到達時の 1.5 秒前から 4 秒間の波形と連続波形データ間との相関係数を 0.05 秒刻みで連続的に計算した。その後、各時間ステップ、テンプレートごとに解析で用いた全観測点（全チャンネル）の相関係数を足し合わせて、相関係数の和がある閾値を超えた場合に低周波地震のイベントが検知されたとした。最終的には検知したイベントのより詳細な震源を得るためにグリッドサーチを行った。解析の結果として、2014 年 7 月以降の期間で気象庁の地震カタログよりも多くの低周波地震のイベントが検知された。

キーワード: 深部低周波地震, matched-filter 法
Keywords: low-frequency earthquakes, matched-filter technique

輻射エネルギーと継続時間の解析による深部低周波微動活動の空間的不均質性 Spatial inhomogeneity of deep low-frequency tremor activity evaluated from seismic radiation energy and duration

案浦 理^{1*}; 小原 一成¹; 前田 拓人¹
ANNOURA, Satoshi^{1*}; OBARA, Kazushige¹; MAEDA, Takuto¹

¹ 東京大学地震研究所

¹ Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

西南日本や Cascadia 等の沈み込み帯で発生する深部低周波微動は、深部超低周波地震 (VLF) やスロースリップイベントと同期して活動するプレート境界におけるひずみの解放現象であることが知られている。これらの現象は、プレート境界固着域の深部隣接側の領域で発生することから、巨大地震発生と何らかの関係を有すると考えられており、その活動特性の解明は重要である。これまで、微動活動の全体像を把握するため、微動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。しかし、微動の振幅が大きく活動度の高い時間帯には、波形が複雑になるため、相関解析等に基づく個々の微動の検出は困難となる。一方、観測速度波形の 2 乗振幅を通じて評価される微動源からの輻射エネルギーについては、個々の波形が複雑であってもエネルギー総量は安定して求められる可能性がある。

そこで本研究では、ひとまとまりの微動活動をまず抽出した後に、そこからの輻射エネルギーと輻射源セントロイドを決定する新しい解析手法を開発した。この手法によって特に活発な時間帯における微動検出の取り逃がしを減らすことができ、微動の輻射エネルギーや継続時間といった観点からの定量的な評価が可能となった。この手法を、西南日本全域で発生した 2004 年 4 月から 2014 年 9 月までの微動活動に適用し、微動活動特性について解析を行った。

微動輻射エネルギー総量の空間分布から、西南日本の中では四国西部で非常に大きなエネルギーが輻射されていることが明らかになった。このことは、先行研究では取り逃がしていた部分も含め、活発な微動活動を適切に評価できたことを示している。同時に推定された微動エネルギー輻射の累積継続時間と輻射エネルギーレートの空間分布の特徴から、微動発生域は 2 種類の領域に大別できることが明らかになった。ひとつは、四国西部や東海地方西部のように、エネルギーレートが高く、かつ累積継続時間も長い領域であり、もうひとつは、四国中西部や紀伊半島中部のように、エネルギーレートが低く、かつ累積継続時間も短い領域である。一方、四国西部の一部の地域では、エネルギーレートは低いものの累積継続時間が長く、上記 2 種類どちらにも属さないような性質を示した。さらに、本研究で得られた微動活動の空間分布と、規模の大きな VLF の震央分布と比較したところ、微動のエネルギーレートが高く、かつ累積継続時間の長い領域に VLF の震央が集中していることが分かった。

微動のエネルギーレートは、その値が高いほど微動のサイズは大きいものと解釈される。また、エネルギーレートは継続時間と相関するという観測結果から、微動発生域は、サイズが大きく継続時間の長い微動が発生する領域と、サイズが小さく継続時間の短い微動が発生する領域に大別できることが示唆される。一方、四国西部の一部地域は、微動のサイズは小さいものの継続

時間の長い微動が発生する領域であると解釈され、微動サイズと継続時間は必ずしも比例関係があるとは限らず、微動の発生様式には空間的不均質性があることが明らかになった。

キーワード: 微動, エネルギーレート, 継続時間

Keywords: tremor, energy rate, duration

深部低周波微動活動から見た2014年豊後水道スロースリップイベントについて 2014 Bungo channel slow slip event inferred from deep low-frequency tremor activity

小原 一成^{1*}; 高木 涼太¹; 前田 拓人¹; 松澤 孝紀²; 田中 佐千子²; 廣瀬 仁³
OBARA, Kazushige^{1*}; TAKAGI, Ryota¹; MAEDA, Takuto¹; MATSUZAWA, Takanori²; TANAKA, Sachiko²;
HIROSE, Hitoshi³

¹ 東京大学地震研究所, ² 防災科学技術研究所, ³ 神戸大学
¹ERI, UTokyo, ²NIED, ³Kobe Univ.

西南日本では、フィリピン海プレートの沈み込みに伴って深部低周波微動と短期的スロースリップイベント (SSE) が同時に発生することが知られており、通常はそれぞれのセグメントで数カ月というほぼ一定の間隔で自然発生的に生じ数日間継続する。ところが、豊後水道ではこの微動域の updip 側において 6-7 年間隔で長期的 SSE が発生し、特にそのすべりレートが大きい期間中は、SSE 域に隣接する領域、つまり微動域の updip 側に限って微動活動が数か月間活発化する。これまで、このような長期的 SSE によってトリガーされる微動活動は 2003 年と 2010 年に観測されており、その周期性から次は 2016 年ごろと予想されていたが、2014 年に長期的 SSE の発生を示唆する微動の活発化が見られ、その後、国土地理院の GNSS 観測によって、長期的 SSE の発生が報告された (国土地理院, 2014)。本講演では、これまでの観測履歴に基づき、豊後水道におけるスロー地震活動の推移について議論する。

豊後水道付近の微動活動は、長期的 SSE の影響を受ける updip 側と、その影響をほとんど受けない downdip 側に分かれる。両側の微動発生数密度 (単位面積当たりの微動発生個数) は、長期的 SSE 発生期間以外の通常期ではほぼ等しいレートで推移し、通常期の微動活動は深さ方向によらず一定であることを意味している。長期的 SSE が発生した際は、updip 側の微動のみが通常レートに追加される形で活発化することになるため、通常レートから外れる微動活動は長期的 SSE の活動指標とみなすことができる。その updip 側微動活動が 2014 年初め以降、通常レートよりも活発化し始め、GNSS でも 2014 年半ばから変化が見られた。同様の変化は過去に 2 度観測されている。2006 年後半には微動活動と GNSS に僅かな変化が生じ (国土地理院, 2010)、ごく小規模な長期的 SSE が発生したことを示唆する。また 2009 年は微動活動が僅かに増加した後 GNSS にも緩やかな変化が現れ、2010 年の SSE 加速に繋がった、つまり、2009 年に始まった微動活動の増加は、2010 年長期的 SSE に対する先行過程とみなすことができる。もし、2014 年に生じた微動の活発化が 2006 年の現象と同じであれば、6-7 年周期の長期的 SSE の間に生じる小規模な SSE として、既に終息したのかもしれない。一方、2009 年の現象と同じであるとすると、間もなく 2010 年と同規模の長期的 SSE に発展する可能性がある。

ところで、四国西部の微動活動の長期トレンドを良く観察すると、豊後水道から 50km 以内の内陸域では 2003 年や 2010 年の長期的 SSE の後に僅かに微動活動が増加する傾向にある。このような 7 年周期のトレンドの変化は updip 側の微動についてのみ存在し、downdip 側には見られない。さらに、このトレンドの変化は豊後水道から東に非常に遅い速度で移動しているようにも見える。この現象は、豊後水道の長期的 SSE 後に続いて小規模な SSE が生じ、巨大地震震源域と微動域との間の領域を東に移動したことを示唆するものかもしれない。

キーワード: 深部低周波微動, スロースリップイベント, スロー地震, 相互作用, 沈み込み帯
Keywords: non-volcanic tremor, slow slip event, slow earthquake, interaction, subduction zone

日向灘における海底地震計・圧力計を用いたプレート境界浅部スロー地震の長期モニタリング Long-term ocean bottom monitoring for slow earthquakes on the shallow plate interface in the Hyuga-nada region

山下 裕亮^{1*}; 篠原 雅尚¹; 山田 知朗¹; 中東 和夫²; 塩原 肇¹; 望月 公廣¹; 前田 拓人¹; 小原 一成¹
YAMASHITA, Yusuke^{1*}; SHINOHARA, Masanao¹; YAMADA, Tomoaki¹; NAKAHIGASHI, Kazuo²;
SHIOBARA, Hajime¹; MOCHIZUKI, Kimihiro¹; MAEDA, Takuto¹; OBARA, Kazushige¹

¹ 東京大学地震研究所, ² 神戸大学大学院理学研究科

¹Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, ²Graduate School of Science, Kobe University

九州東方の日向灘では、スロー地震の1つである浅部超低周波地震 (VLFE) の発生が知られており、特に活発な活動領域の1つであることが陸上観測から明らかになっている [Obara and Ito, 2005; Asano *et al.*, 2008]. 最近では、2013年に海底地震計による直上観測により、VLFE とほぼ同じ領域で発生する浅部低周波微動が捉えられ、プレート境界深部で発生する深部低周波微動とよく似たマイグレーション特性 [例えば, Obara, 2010] を持つことが初めて明らかにされた [Yamashita *et al.*, in revision]. 2013年の微動活動は、VLFE 活動とその時間変化が良く一致しており、プレート境界深部の ETS エピソード中に見られる微動と VLFE の同期現象によく似ていることから、プレート境界浅部においても短期的な SSE が発生していることが強く示唆される。しかしながら、海溝軸に近い領域での短期的 SSE は陸上・海底のどちらでもこれまで直接観測されていない。プレート境界浅部での低周波微動・VLFE・短期的 SSE の同時観測によってこれらのスロー地震の関係を明らかにすることは、津波を伴う海溝型巨大地震、特に発生が予想される南海トラフ沿いの巨大地震のポテンシャル評価にとって重要である。このような背景のもと、文部科学省委託研究「南海トラフ広域地震防災研究プロジェクト」における広帯域海底地震観測として、日向灘におけるスロー地震の長期海底モニタリングを2014年3月より開始した。第1期目の観測網は2013年の低周波微動活動をもとに構築しており、長期観測型短周期海底地震計7台と圧力計を搭載した広帯域海底地震計3台の計10台で構成されている。2015年1月に最初の機器入れ替えを行い、1期目の海底観測機器を回収し、全10観測点において良好な波形記録を取得することができた。今期間中、2014年6月1~3日に観測網内で浅部低周波微動と VLFE の活動があり、海底地震観測データの解析から浅部低周波微動活動は2013年の活動領域の北西端付近で発生していたことが明らかになった。しかしながら、今回の活動では2013年の微動活動で見られた明瞭なマイグレーションが予備的な解析においては確認できず、圧力計で捉えられるような SSE が発生していたかどうかは今のところ明らかでない。第2期目の観測では、2014年中頃からの豊後水道 SSE の発生をふまえ、足摺沖まで観測網を広げて観測を行っている。豊後水道での SSE が本格的に進行すれば、2003年と2010年に見られた深部 SSE と浅部 VLFE の同期発生現象 [Hirose *et al.*, 2010] が再び起こる可能性が高く、プレート境界浅部における SSE を含めた活動の時空間変化を詳細に捉えられると期待される。

キーワード: 浅部スロー地震, 日向灘, 長期海底モニタリング

Keywords: shallow slow earthquake, Hyuga-nada, long-term ocean bottom monitoring

2011年東北沖地震後に発生した熊野灘沖の浅部超低周波地震 Very low frequency earthquakes in the shallow Nankai accretionary prism, following the 2011 Tohoku-Oki earthquake

藤 亜希子^{1*}; 尾鼻 浩一郎¹; 杉岡 裕子¹; 荒木 英一郎¹; 高橋 成実¹; 深尾 良夫¹
TO, Akiko^{1*}; OBANA, Koichiro¹; SUGIOKA, Hiroko¹; ARAKI, Eiichiro¹; TAKAHASHI, Narumi¹;
FUKAO, Yoshio¹

¹ 海洋研究開発機構

¹ Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

A large number of shallow low frequency events were recorded after the 2011 Mw 9.0 Tohoku-oki earthquake by the cabled network of broadband ocean bottom seismometers (DONET) deployed in the eastern part of the Nankai trough. This low frequency event activity was intense for the first few days after the great earthquake and gradually decreased. Signals of the events are most clearly visible at the frequency range around 2-8 Hz. Some of the events are accompanied by a very long frequency (VLF) signal, which is clearly observed at around 0.02-0.05 Hz. The magnitude and source duration estimated by waveform analysis for one of the largest very low frequency earthquakes (VLFEs) was 3.0~3.5 and 17 s. This source duration is extremely long compared to ordinary earthquakes of comparable magnitude. These newly detected VLFEs are likely to be normal fault earthquakes located at shallow depths within the accretionary prism, in contrast to the previously reported VLFEs that were explained by a low angle thrusting along the decollement zone. On the other hand, the low frequency events with no clear VLF signal were previously regarded as being low frequency tremors (LFTs). We show that events with and without the VLF signal likely represent the same phenomenon, and the VLF signal is only observed when a large magnitude event occurs near the station. The waveforms of VLFEs are characterized by the coexistence of long source duration and high-frequency radiation of signals, and such features were previously explained by the co-occurrence of shear failure and hydrofractures under the influence of fluid brought into the decollement zone. Our result indicates that the stress state and the mechanical environment, which promote the occurrence of VLFEs, exist not only along the decollement zone but also in the shallower part of the accretionary prism.

キーワード: 低周波微動, 超低周波地震, 南海トラフ, 付加体

Keywords: Low frequency tremor, Very low frequency earthquake, Nankai trough, accretionary prism

南部琉球弧で発生した超低周波地震に伴う低周波地震活動 Low frequency earthquakes associated with a very low frequency earthquake in southern Ryukyu arc

高橋 努^{1*}; 石原 靖¹; 三浦 誠一¹; 小平 秀一¹; 金田 義行²

TAKAHASHI, Tsutomu^{1*}; ISHIIHARA, Yasushi¹; MIURA, Seiichi¹; KODAIRA, Shuichi¹; KANEDA, Yoshiyuki²

¹ 海洋研究開発機構, ² 名古屋大学

¹JAMSTEC, ²Nagoya University

琉球弧はユーラシアプレートの南東部に位置する島弧で、琉球海溝においてフィリピン海プレートが北西方向に沈み込んでいる。この地域では多数の超低周波地震 (Ando et al. 2012) やスロースリップ (Heki and Kataoka, 2008) の発生が報告されている。(独) 海洋研究開発機構では文部科学省の受託研究「南海トラフ広域地震防災研究プロジェクト」の一環として、琉球弧南部の宮古・八重山諸島周辺の震源分布や地下構造、低周波地震活動などを解明するため、島嶼部の臨時観測点と海底地震計による自然地震観測を実施した。島嶼部では広帯域地震計や短周期地震計を用いて6観測点(宮古島・多良間島・石垣島・西表島・黒島・波照間島)を設置し、短周期海底地震計は南部琉球弧前弧側および沖縄トラフ南縁に30台設置した。この観測期間中に八重山諸島付近で一つの超低周波地震が発生し、島嶼部の広帯域地震計により明瞭なシグナルが得られた。またこの超低周波地震の発生時に、海底地震計では異なるスペクトルをもつ2種類の低周波地震(以下、Events-A, B)が観測された。Events-Aは、超低周波地震の発生直後に約20分間繰り返し発生し、卓越周波数が5Hz以下で継続時間が60sec前後という特徴を示した。一方Events-Bは超低周波地震発生から約3時間繰り返し発生し、多くのイベントは継続時間が100sec以上であった。Events-Bの卓越周波数は2~3Hz付近で、高周波数成分(>5Hz)の励起はEvents-Aより小さい傾向が見られた。Events-Bの地震波形は立ち上がり不明瞭で、P波やS波の到達時刻の解析による震源決定は困難であるが、振幅分布などからEvents-Aよりも北側に分布すると考えられる。またEvents-Aの幾つかの地震は震央付近の海底地震計でP波が観測され、周囲の観測点のS波到達時刻と合わせて震源決定を行った結果、石垣島南方のForarc basin南縁付近の深さ15~20km付近で発生したことが分かった。構造探査の結果(Hsu et al. 2013; Arai et al. 2015, JpGU)から、これらの震源はプレート境界付近に位置していると考えられる。今後エンベロープ相関や振幅を考慮した解析を行い、これらの低周波地震の震源分布や超低周波地震との関係について詳しく調べる計画である。

キーワード: 低周波地震, 琉球弧

Keywords: Low frequency earthquake, Ryukyu arc

浅部超低周波地震の検出および位置決定方法の再検討 Development on a method for automatically detection and location of very low frequency earthquakes in Japan

浅野 陽一^{1*}

ASANO, Youichi^{1*}

¹ 防災科学技術研究所

¹ NIED

防災科学技術研究所では、高感度地震観測網 Hi-net に併設された高感度加速度計記録のアレイ解析によって、ほぼ自動での浅部超低周波地震の検出と位置決定を行なってきた [たとえば, Asano et al. (2008), 防災科学技術研究所 (2014)]. また、近年では既知の浅部超低周波地震をテンプレートとする波形相関解析によって、より精度が高い位置の推定も可能となった。後者では、距離が2イベント間での波形相関を評価するため、前者の観測点アレイのように密な観測網は要求されない。しかしながら、この解析法もまたアレイ解析の一種であることから、南西諸島における広帯域地震観測網 F-net のように観測点カバリッジが悪い場合には、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 [浅野・他 (2014)]. そこで、本稿ではその状況より詳細に調べ、検出および位置決定法の改良策を検討する。

本研究では、八重山諸島で超低周波地震活動があった2014年11月29日のF-net記録を浅野・他(2014)の方法で解析した。まず、バンドパスフィルター(通過帯域0.02から0.05 Hz)による処理の後に、連続記録波形と既知イベント(通常地震17個, 超低周波地震6個)のトリガ記録波形との相互相関関数を観測点ごとに評価する。そして、複数観測点における平均相互相関が高いイベントを検出するとともに、相互相関関数の観測点間での位相差から未知イベントの位置をグリッドサーチで推定する。発生時刻が180秒以内の複数のグリッドで平均相関係数が閾値を超えた場合には、同一イベントとみなして平均相関係数が最大となるグリッドを検出し、このイベントに対する最適な発生時刻・位置を推定した。また、異なる既知イベントから近接した時間帯に重複してイベントが検出された場合には、既知イベントから100 km以内に検出されたイベントの中から、平均相関係数が最大のものを選んだ。さらに浅野・他(2014)では、誤検出や誤推定を減らすために、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S/N比が小さいイベントを除去した。この条件によって、観測点間での波群の到達時刻順が既知イベントと大きく異なるものは排除されることが期待される。

解析の結果、2014年11月29日の12時から18時頃にかけて、複数の超低周波地震を検出した。それらの多くは石垣島の沖で発生したイベントと推定され、目視確認による波群の到達時刻順と矛盾しない。しかしながら、ほぼ同じ時間帯に沖縄本島と宮古島との間に位置決定されるイベントもあった。これらは、同じ波群に対して異なる既知イベントとの相関解析から検出されたイベントである。観測点が少ない南西諸島では4から5観測点での解析となり、検出しようとするイベントからやや離れた既知イベントについても平均相関係数が高い値をとりやすいことが原因と考えられる。さらに、座間味観測点と石垣観測点の間(約350km)には観測点がないため、波群の到達時刻順もこの2点が入り替わる程度の差異である。そのため、平均S/N比もほぼ同様の値となり、結果として誤検出されたイベントを排除できなかったことが分かった。

以上のことから、誤検出、誤決定を減らすには、平均相関係数を評価関数として位置決定したイベントの中から平均S/N比が低いイベントを除去する方法では不十分であり、波群の到達時刻順の情報を位置決定の評価関数に取り入れることが有効と考えられる。

キーワード: 超低周波地震, 自動検出, 位置決定

Keywords: very low frequency earthquake, automatic detection, automatic location

Detection and mechanism determination of VLF earthquakes in the Guerrero subduction zone
Detection and mechanism determination of VLF earthquakes in the Guerrero subduction zone

MAURY, Julie^{1*} ; IDE, Satoshi¹

MAURY, Julie^{1*} ; IDE, Satoshi¹

¹Grad. Sch. Sci., Univ. Tokyo

¹Grad. Sch. Sci., Univ. Tokyo

Very Low Frequency (VLF) earthquakes have been observed with tremors in a few subduction zones suggesting a common source for the two phenomena. However to investigate more precisely the relation between these phenomena, VLF signal should be looked for in other subduction zones where tectonic tremor occurs. The Guerrero subduction zone is such an area where tremors have been consistently detected. Following the method of Ide and Yabe [2014], by stacking signals in the VLF band between 0.02-0.05 Hz at the time of occurrence of tremors, we confirm that VLF earthquakes are also observed.

MASE experiment data from 2005 to 2007 are used to determine the location of tremors and VLF earthquakes. They are found in two places tremors are detected, the southern transient cluster and the northern, more persistent, cluster. Both are located near the flat part of the subduction interface. This seems to confirm that VLF earthquakes are produced by shear failure near this interface. The VLF signals are then inverted to estimate the moment tensor of these events. Due to the linear geometry of the MASE experiment the mechanism is not well constrained but one of the nodal plane is generally nearly horizontal in accordance with the distinctive geometry of the subduction and the slip direction is globally coherent with the convergence direction. Moreover, the plunge of the P and T axis are well constrained with values of about 40° adding a constraint on the principal stress directions.

カスケディア沈み込み帯におけるスロースリップイベントの広帯域震源スペクトル Broadband source spectrum of a slow slip event in the Cascadia subduction zone

竹尾 明子^{1*}; Houston Heidi²; Creager Kenneth²
TAKEO, Akiko^{1*}; HOUSTON, Heidi²; CREAGER, Kenneth²

¹ 北海道大学理学院, ² ワシントン大学

¹Hokkaido University, ²University of Washington

Slow earthquakes have been discovered in various time scales: non-volcanic tremor at high frequency range of 1-10 Hz, very low frequency earthquake (VLFE) at intermediate range of 10-100 s, and slow slip event (SSE) at geodetic time-scale longer than one day. Since these phenomena occur simultaneously, tremor and VLFEs can be regarded as the high frequency components of SSE. Based on this idea and to discuss the source time function of a SSE for the first time, we estimated source spectrum of Mw 6.8 episodic tremor and slip (ETS) event in the Cascadia subduction zone in 2010 from tremor band to the VLFE band. The source spectrum in the tremor band can be simply obtained by correcting the effect of attenuation and geometric spreading. The source spectrum in the VLFE band is more complicated because the signal-to-noise ratio is about one. We first improved the signal-to-noise ratio by stacking waveforms at a period range of 20-50 s with an assumption that the VLFEs coincide with peaks of tremor amplitudes. We then obtained source spectrum at 30-100 s by dividing the spectrum of stacked waveforms by the spectrum of synthetic waveforms corresponding to the obtained focal mechanism. The obtained source spectrum is proportional to inverse of frequency in both tremor and VLFE bands. In addition, the spectrum in both bands could be roughly fit by a synthetic source spectrum corresponding to a boxcar shaped source time function whose duration is about ten hours and the total moment release is Mw 6.8. The apparent duration of ten hours is shorter than the observed duration of the ETS, one month. This result indicates that the moment release during the one-month ETS consisted of slip pulses with typical durations shorter than a day.

Keywords: very low frequency earthquake, tremor, slow slip event, Cascadia

GPS と傾斜計を用いたスロースリップ検出の基礎的研究 Basic study on detecting short-term SSE by using GPS and tiltmeter data

青木 夏海^{1*}; 葛葉 泰久²; 木村 武志³
AOKI, Natsumi^{1*}; KUZUHA, Yasuhisa²; KIMURA, Takeshi³

¹ 三重大学生物資源学部, ² 三重大学生物資源学研究科, ³ 防災科学技術研究所

¹Faculty of Bioresources, Mie University, ²Graduate School of Bioresources, Mie University, ³National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

多くの研究で、短期的スロースリップイベントの検出がなされている。本研究では、GPS 位置座標のデータ、傾斜計のデータの両方を用いて短期的 SSE の可能性のあるイベントを検出することを試みた。GPS のデータにおいては、Nishimura(2013)を参考にし、赤池の情報量基準を用いて SSE の可能性のある位置座標の変位を検出した。手法はほぼ Nishimura(2013)と同じであるが、一定の大きさの空間内に同時にシグナルが見えるとき短期的 SSE とみなす等、若干手法が違う。傾斜計のデータにおいては、Kimura et al. (2011)を参考にしたが、これも若干異なる。つまり、観測データがどの程度ランダムウォークの卓越したものとなっているかを調べたら、ほぼすべてのデータが Bm (ブラウンモーション) であることが分かったので、Bm の歩幅が有意に大きい範囲にある、つまり異常な傾きの変化を示したイベントを SSE の可能性があるイベントとして抽出した。これも、GPS データの解析と同じく、近隣地域で、同じ時間に異常な変化が見られた場合、SSE の可能性が高いと判断し、そのような時間と場所を検出した。最後に、GPS データにより検出された短期的 SSE と、傾斜計データにより検出されたそれを比較した。結果的に、どちらか一方のみで検出されたイベントがとても多く、両データから検出されたイベントは少なかった。また、傾斜計のデータから検出されたイベントには、近地での地震、遠地での大地震、台風や豪雨の影響が含まれることが疑われるものが多く混在していた。そのような誤検出が含まれている可能性があるため、GPS データ、傾斜計データから検出された日について、その信憑性を検討した。結果は発表時に示す。

謝辞

国土地理院の電子基準点日々の座標値、及び、防災科学技術研究所の傾斜計データを使用させて頂いた。

参考文献

Takeshi Kimura, Kazushige Obara, Hisanori Kimura, and Hitoshi Hirose, Automated detection of slow slip events within the Nankai subduction zone, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL.38, L01311, doi:10.1029/2010GL045899, 2011.

Takuya Nishimura, Takanori Matsuzawa, and Kazushige Obara, Detection of short-term slow slip events along the Nankai Trough, southwest Japan, using GNSS data, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH: SOLID EARTH, VOL.118, 3112-3125, doi:10.1002/jgrb.50222, 2013.

キーワード: スロースリップ, GPS, 傾斜計, AIC

Keywords: SSE, GPS, Tiltmeter, AIC

地震活動データと統計モデルに基づく日本周辺でのゆっくり変形検出の試み A test for detecting slow deformation around Japan based on seismicity data and statistical model

片岡 純¹; 三井 雄太^{2*}
KATAOKA, Jun¹; MITSUI, Yuta^{2*}

¹ 静岡大学理学部, ² 静岡大学理学研究科
¹Faculty of Science, Shizuoka University, ²Institute of Geosciences, Shizuoka University

スロースリップは、GPS など測地学的手法に基づく観測によって主に検出されてきた。しかし、震源域の近傍に観測点がない地域や、稠密な GPS 観測が始まる以前については、検出が困難である。したがって本研究では、気象庁の地震カタログデータに統計モデルの一種である ETAS モデルを適用することで、日本周辺におけるスロースリップの検出を試みる。具体的には、余震の影響を取り除いた定常地震活動度というパラメータの値の増大に注目する。既知のスロースリップ発生期間におけるパラメータ推定の結果、数日から数週間に渡って発生するスロースリップイベントに関しては検出可能であることがわかった。さらに、伊豆・小笠原海溝北部、喜界島周辺でのスロースリップイベント、および2011年直後に富士山周辺でのマグマの貫入によるゆっくり変形を示唆する結果を得た。また、奥尻島周辺、喜界島周辺、種子島周辺、東北沖では、大地震後のアフタースリップの減衰、あるいは地震活動の静穏化を検出できた可能性がある。

キーワード: スロースリップ, ETAS モデル, 地震活動, 定常地震活動度
Keywords: slow slip, ETAS model, earthquake activity, background seismicity rate

EnKFを用いたスロースリップ断層面上の摩擦パラメータの推定 Estimation of frictional parameters on the SSE fault through Ensemble Kalman Filter

奥田 亮介^{1*}; 平原 和朗¹; 宮崎 真一¹; 加納 将行²; 大谷 真紀子¹
OKUDA, Ryosuke^{1*}; HIRAHARA, Kazuro¹; MIYAZAKI, Shinichi¹; KANO, Masayuki²; OHTANI, Makiko¹

¹ 京都大学理学研究科, ² 東京大学地震研究所

¹Graduate School of Science, Kyoto University, ²Earthquake Research Institute, University of Tokyo

海溝型地震震源域の下部プレート境界上で発生する、スロースリップイベント (SSE) の活動は、海溝型大地震発生の前に変動する可能性が指摘されており (Peng and Gomberg, 2010)、SSE を引き起こすプレート境界面の摩擦特性を知ること、海溝型大地震の発生を知る上で重要な鍵を握る。我々の最終目標は、GPS によって得られた SSE 発生時の地表での変位データに対して、データ同化の手法の一つであるアンサンブルカルマンフィルタ (EnKF) を用いることにより SSE の原因となる断層面上の摩擦パラメータを推定し、海溝型地震の発生の予測に役立てることにある。本研究では、シミュレーション計算によって得られた SSE 発生時の断層面上のすべり速度に誤差を加えた疑似データを作成し、EnKF を用いて数値実験を行い、断層面の摩擦パラメータの推定およびその推定誤差について検証を行う。

今回対象とした SSE は琉球弧南西部に位置する八重山諸島沖で繰り返し起きている SSE (以下八重山 SSE とする) である。Heki and Kataoka (2008) によると、この SSE には以下のような特徴がある。1) SSE の発生に影響を与える大きな地震が観測期間中に近傍であまり起きていない、2) SSE は深さ 20-40km で発生している、3) 平均発生間隔は 6.3 ヶ月、4) その発生間隔の標準偏差は 1.2 ヶ月、5) 12.5cm/yr と推定される非常に速い収束速度に対して SSE により解放されるすべり速度は 11.0cm/yr。

まず、上記の八重山 SSE の特徴を再現するモデル構築を行う。断層モデルとして均質半無限弾性体中の深さ 20-40km のプレート境界上に傾斜断層を設定した。断層面上の摩擦力は速度状態依存構成則に従うものとし、また発展則にはスローネス則 (Dietrich, 1979) を用い、準動的計算ですべり速度の時空間発展を求めた。本研究では Kato (2003) に従い、摩擦パラメータ A , B , L に対して、 $A - B < 0$ (速度弱化) かつ摩擦パラメータによって決まる臨界半径 (nucleation radius) (Chen and Lapusta, 2009) に対する断層のアスペリティの半径の比が 1 より少し小さい領域を作ることにより、半径約 30km の円形の一つのアスペリティに対して $V_{pl}=12.5\text{cm/yr}$, $A=50\text{kPa}$, $B=57.5\text{kPa}$, $L=2.5\text{mm}$ と設定することで、平均発生間隔約 6 ヶ月の SSE を再現する物理モデルを作成した。

本研究では、このモデルを用いて EnKF を用いた断層面上の摩擦パラメータの推定についての数値実験を行う。EnKF は物理モデルの計算によって得られた値を各タイムステップで観測値、それらの分散共分散行列を用いて統計的に修正することで最適な解を推定する手法である。この分散共分散行列は初期値に乱数を与えて作った大量のアンサンブルメンバーを計算することで得られる。今回の実験を行うために、まず、上記のモデルとパラメータを用いて計算した断層面上の速度に乱数を加えて、観測値の模擬データを作成した。この時用いたパラメータと計算された速度は実験において真値であると考え、そして、この観測値と真値から少しずらした初期値を用いて EnKF による摩擦パラメータの推定を行い、その結果を真値と推定値の比較を通して検証する。本講演ではその検証結果を話す。

キーワード: スロースリップ, アンサンブルカルマンフィルタ

Keywords: slow slip events, Ensemble Kalman Filter

ヒクランギ沈み込み帯における多様なスロースリップイベントのモデル化 Modeling various slow slip events along the Hikurangi subduction zone

芝崎 文一郎^{1*}; 松澤 孝紀²

SHIBAZAKI, Bunichiro^{1*}; MATSUZAWA, Takanori²

¹ 建築研究所国際地震工学センター, ² 防災科学技術研究所

¹International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Building Research Institute, ²National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

Recent high-resolution seismic and geodetic observations have revealed the occurrence of slow slip events (SSEs) along various subduction plate interfaces. Long-term SSEs with a duration of 1.5 years (e.g., Manawatu SSEs) occur at the deeper portion (25–60 km) of the Hikurangi subduction zone, and shallow (5–15 km) SSEs with a duration of 1–3 weeks occur along the northern and central parts of the subduction zone. Wallace et al. (2012) reported a sequence of simultaneous short-term and long-term SSEs at the Hikurangi subduction zone during 2010–2011.

We modeled short-term and long-term SSEs along the Hikurangi subduction zone using a rate- and state-dependent friction law and considered realistic configurations of the plate interface. We set the coupling region where $a-b$ is negative based on the study of interseismic coupling by Wallace et al. (2009). By setting the effective stress and the critical displacement of shallow short-term SSEs to approximately 1.5 MPa and 2.4 mm, respectively, we could reproduce SSEs with a duration of 1–3 weeks and recurrence interval of 3 years. Additionally, by setting the effective stress and the critical displacement of the Manawatu long-term SSEs to approximately 3.0 MPa and 7.2 mm, respectively, we were able to reproduce SSEs with a duration of 0.5 years and recurrence interval of 5 years. The effective stress of the Manawatu SSE zone is two times larger than that of the short-term SSE zones. However, the ratio of the effective stress to the critical displacement of the Manawatu SSE zone is smaller than that of the short-term SSE zones. We could also reproduce a sequence of simultaneous short-term SSEs and a long-term Manawatu SSE as observed by Wallace et al. (2009). The occurrence of the various slow slip events suggests heterogeneous distributions of constitutive law parameters along the Hikurangi subduction zone.

キーワード: モデル化, スロースリップイベント, ヒクランギ沈み込み帯, すべり速度・状態依存則, 浅部短期的スロースリップイベント, Manawatu 長期的スロースリップイベント

Keywords: modeling, slow slip events, Hikurangi subduction zone, a rate- and state-dependent friction law, shallow short-term SSEs, Manawatu long-term SSEs

沈み込む海嶺列における地震発生サイクル：SSEの発生 Earthquake cycles on the bumpy plate interface assuming subducting ridge chain : generation of SSE

大谷 真紀子^{1*}; 平原 和朗¹
OHTANI, Makiko^{1*}; HIRAHARA, Kazuro¹

¹ 京大・理
¹Sci., Kyoto University

近年の地震・地殻変動観測網の発達により、沈み込み帯では様々な時空間スケールのすべり現象が発生していることが分かってきた。これらのすべり現象はプレート境界面上に密に分布し、互いに相互作用すると考えられる。そこで、次の巨大地震の発生予測を目指して、巨大地震とその他のすべり現象との相互作用の検証が、地震発生サイクルシミュレーション(ECS; Earthquake Cycle Simulation)を用いて現在行われはじめている(Ariyoshi et al., 2014; Matsuzawa et al., 2013)。

実際の巨大地震発生領域を考える際には、断層面形状がその場の環境が応力の蓄積等に影響を及ぼす。しかしながら、これまで行われてきた計算では比較的大きな波長の断層面形状のみしか考慮されていない(Hirose and Maeda, 2013)。本研究では、より小さなスケールの断層面形状の例として、南海トラフ東端に見られる沈み込む海嶺列に注目する。この領域では南方から海溝まで海嶺列が連なっているのが海底地形データから分かる(Hirose and Maeda, 2013)。東海沖で調べられた地震波速度構造では、これら海嶺列が海洋プレートと共に沈み込む様子が見られている(Kodaira et al., 2004)。また、浜名湖直下のプレート境界では長期的スロースリップが観測されている(東海 SSE)。本研究では海嶺列を地形的高まりとして表現し、これらが地震発生サイクルにどのような影響を及ぼすかを検証する。

ECSでは計算量の比較的少ない境界要素法準動的スキームがよく用いられる。この枠組み内では通常プレート境界面上の剪断応力変化のみしか考慮されない。全無限弾性体中の平坦な断層面においては、断層すべりによって垂直応力が変化しないからである。しかしながら、地表が存在する場合または断層面が平坦でない場合にはすべりによる垂直応力変化が生じる。そこで、本研究では、断層面上のすべりによる静的垂直応力変化を考慮した準動的ECSを導入し、断層面形状の効果を検証する。

断層面として、角度15度、速度3.25 cm/yearで定常的に沈み込む、走行・沈み込み方向に200 km×240 kmの平坦なプレート境界面を設定する。また、この平坦な面を基準としそこから高さ5 km 波長50 kmの突起が三個連なった形状のプレート境界面を考え、両断層面における地震発生サイクルの比較を行う。断層面上の摩擦として、垂直応力変化を考慮した速度状態依存摩擦則(Linker and Dieterich, 1992)を仮定する。初期剪断応力・垂直応力を一様とし、深さ40 km以浅の領域を地震発生領域として一様な摩擦パラメータ A, B, L を設定した。

$A - B = -0.2$ MPa, $L = 0.2$ mに設定したとき、臨界角形成サイズはおおよそ60 kmであり、平坦な断層面では通常地震が繰り返し発生した。一方、凸凹な断層面では、地震性のすべりと、断層面上で凹部を中心としたスロースリップがその地震間に発生した。地震間において、断層面上の垂直応力の初期値からの差は、連なる凸・凹部でそれぞれ増加・減少し、縞構造を示す。垂直応力の増加・減少はその地点の $|A - B|$ を増加・減少させ、働く摩擦力を変化させる。凹部では破壊が始まりやすくなるが、凸部では破壊がしにくくなり、これが地震間のスロースリップ発生の原因となったと考えられる。一方で、浜名湖下で観測される東海 SSEは海嶺列の凹部分に位置する。長期的スロースリップは豊富な流体による高間隙流体圧により説明されることが多いが、本研究は、これに加え断層面形状が東海 SSEの発生に影響を及ぼしている可能性を示している。

キーワード: 地震発生サイクルシミュレーション, 垂直応力, 海嶺列, 東海 SSE

Keywords: earthquake cycle simulation, normal stress, ridge chain, Tokai SSE

潮汐に影響を受けるスロー地震のシミュレーション Simulation of slow earthquakes affected by tide

栗原 亮^{1*}; 安藤 亮輔²; 矢部 優²; 田中 愛幸¹; 小原 一成¹
KURIHARA, Ryo^{1*}; ANDO, Ryosuke²; YABE, Suguru²; TANAKA, Yoshiyuki¹; OBARA, Kazushige¹

¹ 東京大学地震研究所, ² 東京大学大学院理学系研究科

¹Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, ²Graduate School of Science, University of Tokyo

南海トラフなどのプレート沈み込み帯の深部で発生するスロー地震は、巨大地震の発生とも関連があるとされ、このメカニズムを調べるのは重要である。また、Tanaka[2012]で大地震前に潮汐との地震活動の相関性が指摘されているように、潮汐と大地震の関連も注目されている。本研究では、スロー地震に対する潮汐の影響について、シミュレーションにより考察した。

まずはプレート沈み込み帯を再現するために2次元弾性体の半無限モデルを構築した。断層面の浅い領域を「固着域」として滑りにより摩擦強度が低下するすべり変位依存の構成法則に速度強化の粘性項を加えた強度になっている領域と、深い領域を「滑り域」として速度強化の摩擦則に従い常時滑っている状態の領域を設定した。加える潮汐は単純な正弦波の潮汐を使うケース、四国西部におけるフィリピン海プレートの境界面上での現実的な値を計算することで時空間によって振幅が変化する潮汐を加えるケースを用意し、その両者についてシミュレーションを行った。また、準動的な境界要素法を使用した。

以上の条件でシミュレーションを行った結果、潮汐によってスロー地震の発生間隔や伝播速度が変化すること、スロー地震の発生前に応力の蓄積された箇所でのみ事前に滑りが始まる”プレスリップ”が確認でき、それらは潮汐により変化することが確認された。スロー地震が停止するときの潮汐の状態が、その後の応力蓄積に影響を及ぼすようであることがわかった。

キーワード: スロー地震, 潮汐, 震源移動

Keywords: slow earthquake, tide, source migration