

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

伊藤 喜宏^{1*}, 日野 亮太¹, 木戸 元之¹, 藤本 博己¹, 長田 幸仁¹, 稲津 大祐¹, 三浦 哲², 太田 雄策¹, 内田 直希¹, 辻 健³, 芦寿一郎⁴, 三品 正明¹

ITO, Yoshihiro^{1*}, HINO, Ryota¹, KIDO, Motoyuki¹, FUJIMOTO, Hiromi¹, OSADA, Yukihiro¹, INAZU, Daisuke¹, MIURA, Satoshi², OHTA, Yusaku¹, UCHIDA, Naoki¹, TSUJI, Takeshi³, ASHI, Juichiro⁴, MISHINA, Masaaki¹

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

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

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

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

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

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

小原 一成^{1*}, 松澤 孝紀², 田中 佐千子², 前田 拓人¹

OBARA, Kazushige^{1*}, MATSUZAWA, Takanori², TANAKA, Sachiko², MAEDA, Takuto¹

¹ 東京大学地震研究所, ² 防災科学技術研究所

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

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

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

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

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

キーワード: 深部低周波微動, スロー地震, 沈み込み帯, 震源移動, プレート境界

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

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

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

Enescu Bogdan^{1*}, Chao Kevin², Peng Zhigang², 小原 一成³, 松澤 孝紀¹, 田中 佐千子¹, 武田 哲也¹

ENESCU, Bogdan^{1*}, Kevin Chao², Zhigang Peng², OBARA, Kazushige³, MATSUZAWA, Takanori¹, TANAKA, Sachiko¹, TAKEDA, Tetsuya¹

¹ 防災科学技術研究所, ² ジョージア工科大学, ³ 東京大学地震研究所

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

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

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

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

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

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

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

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

麻生 尚文^{1*}, 太田 和晃¹, 栗原 義治¹, 井出 哲¹

ASO, Naofumi^{1*}, OHTA, Kazuaki¹, KURIHARA, Yoshiharu¹, IDE, Satoshi¹

¹ 東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻

¹The University of Tokyo

【背景】

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

【データ・手法】

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

【結果・考察】

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

キーワード: 深部低周波地震, 準火山性 LFE

Keywords: Low-Frequency Earthquake, Semi-Volcanic LFE

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

西村 卓也^{1*}, 松澤 孝紀², 小原 一成³

NISHIMURA, Takuya^{1*}, MATSUZAWA, Takanori², OBARA, Kazushige³

¹ 国土地理院, ² 防災科学技術研究所, ³ 東京大学地震研究所

¹GSI of Japan, ²NIED, ³ERI, Univ. of Tokyo

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

SSEに伴う地殻変動の検出には、西南日本のGEONET565点の日座標値データを用いた。誤差軽減を施した日座標値に対してステップ関数をフィッティングし、フィリピン海プレートの運動方向と反対方向である北130°東方向に有意な変動が見られた日付をSSEに伴う地殻変動の候補日とする。そしてその候補日の変位量3成分(東西, 南北, 上下)に対しインバージョンにより矩形断層モデルのパラメータ推定を行って、観測地殻変動が概ね説明出来ているイベントをSSEとして認定した。

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

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

キーワード: 短期的SSE, GPS, 西南日本

Keywords: short-term SSE, GPS, southwestern Japan

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

岸本 剛^{1*}, 須田 直樹¹, 小沢 慎三郎², 矢来 博司²
KISHIMOTO, Tsuyoshi^{1*}, SUDA, Naoki¹, OZAWA, Shinzaburo², YARAI, Hiroshi²

¹ 広島大・院裡, ² 国土地理院

¹Hiroshima Univ., ²GSJ

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

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

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

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

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

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

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

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

廣瀬 仁^{1*}, 木村 尚紀², 木村 武志², 松澤 孝紀²

HIROSE, Hitoshi^{1*}, KIMURA, Hisanori², KIMURA, Takeshi², MATSUZAWA, Takanori²

¹ 神戸大学大学院理学研究科, ² 防災科学技術研究所

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

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

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

謝辞: 国土地理院のGPSデータを使わせていただきました。記して感謝いたします。

キーワード: 相模トラフ, 沈み込み帯, GPS, 傾斜変動, 群発地震

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

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

波多野 恭弘^{1*}
HATANO, Takahiro^{1*}

¹ 東大地震研

¹ERI, Univ. Tokyo

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

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

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

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

キーワード: 摩擦, 速度状態依存摩擦法則, クリープ

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

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

北村 有迅^{1*}, 木村 学², 川端 訓代³

KITAMURA, Yujin^{1*}, KIMURA, Gaku², KAWABATA, Kuniyo³

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

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

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

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

鉛直地震計アレイ観測網 (VA-net) で検出された紀伊水道における深部低周波微動 Non-volcanic low frequency tremors at Kii channel detected by vertical seismic array network (VA-net)

武田 直人^{1*}, 今西 和俊¹

TAKEDA, Naoto^{1*}, IMANISHI, Kazutoshi¹

¹産総研 活断層・地震研究センター

¹Geological Survey of Japan, AIST

産総研では2007年以降、西南日本において東南海・南海地震予測のための地下水等総合観測施設を展開しており、現在14の観測点で地下水位、歪、地震波等のリアルタイム観測を行っている。我々はこれらの観測点に配備されている三深度の鉛直地震計アレイ (VA-net) を用いた深部低周波微動の高感度検出手法 (鉛直地震計アレイ検出法: Vertical Seismic Array Detection VSAD) を開発し、エンベロープ相関法では同定できないような微弱な微動活動も検出できることを明らかにした (Imanishi et al. 2011)。

西南日本の深部低周波微動は九州・豊後水道付近から長野県南部まで帯状に分布しているが、その分布は一様でなくところどころに広範囲のギャップがある (Obara, 2010)。武田他 (2011) は VSAD により深部低周波微動活動の代表的なギャップ領域であった伊勢湾付近での活動を検出することに成功した。今回は紀伊水道に面している徳島県阿南市にある観測点の鉛直地震計アレイを用い、ギャップ領域の一つである紀伊水道付近の微動活動の状況を VSAD により調査したので報告する。

阿南市で観測を開始した2008年9月以降の約3年半の解析結果から、この付近で1日以上継続するような明瞭な深部低周波微動活動は見つからなかった。しかし、数分間継続するような小さな活動は数多く検知された。VSADの結果のみでは観測点付近での活動としか特定できないが、VSADで微動を検知した時間帯の地震計記録には時折かろうじて位相が判別できる場合があり、付近にある他機関の観測点の地震計記録とともに読み取りを行い震源位置を求めたところ、それらは阿南市から北東よりに定まった。

今後、この周辺の低周波微動活動の時空間分布の詳細な状況を整理する予定である。

参考文献

Imanishi, K., N. Takeda, Y. Kuwahara, and N. Koizumi (2011), Enhanced detection capability of non-volcanic tremor using a 3-level vertical seismic array network, VA-net, in southwest Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L20305, doi:10.1029/2011GL049071.

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

武田直人・今西和俊・小泉尚嗣 (2011), 鉛直地震計アレイ観測網 (V-net) のみで検出された深部低周波微動活動, 地球惑星科学連合2011年大会, SCG058-P03

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

キーワード: 鉛直地震計アレイ, VA-net, 深部低周波微動, 紀伊水道

Keywords: vertical seismic array, VA-net, Non-volcanic low frequency tremor, Kii channel

立体アレーを用いた深部低周波地震 (LFE) の P 波と S 波の検出 (3) P- and S-wave detection of the low frequency earthquakes (LFE) using 3D array (3)

鈴木 貞臣^{1*}, 大久保 慎人¹, 今西 和俊², 北川 有一², 武田 直人²

SUZUKI, Sadaomi^{1*}, OKUBO, Makoto¹, IMANISHI, Kazutoshi², KITAGAWA, Yuichi², TAKEDA, Naoto²

¹ 東濃地震科学研究所, ² 産業技術総合研究所

¹TRIES, ²AIST

東濃地震科学研究所 (TRIES) は東海地震・東南海地震と深部低周波地震 (LFE) の活動との関係を調べるため、愛知県豊田市下山に小アレーと中アレーを 2010 年 3 月までに設置した。また産業技術総合研究所 (AIST) は同じ地域に 3 つの深度 (約 600m, 200m, 50m) に地震計を持つボアホールアレーを設置した。これらのアレーの観測点と防災科学技術研究所 (NIED) の Hi-net 観測点 SMYH を組み合わせて立体アレーとした。この立体アレーの 14 観測点のデータを使って、東海地域で発生した LFE の波形データを semblance 解析し、P 波と S 波の検出を試みた。均質な速度、 $V_p=4.5$ km/s, $V_s=2.2$ km/s を持つアレー内媒質中を平面波が伝搬するモデルを仮定し、それぞれの地震計に波が到着する時間差と station correction の和を lag trajectory として semblance 値を計算した。semblance 値は、アレーの基準位置に平面波が到着した時刻、波の到来方向 (back-azimuth)、入射角の 3 つをパラメータとして計算された。LFE を解析する前に、震源決定精度が良く、LFE 発生領域の近くで発生した普通地震の解析を行い、これにより、P 波、S 波それぞれの station correction を得た。

東海地方で 2010 年 11 月 11 日から 30 日までに LFE が活動したが、それを立体アレーで観測することができた。観測されたデータの中から、気象庁によって震源が報告されている LFE を選び、上記 semblance 解析を行った。そして振幅が小さく微動状に続く LFE の波形の中から、対となる P 波と S 波の検出を試みた。現在解析されたのは比較的 M の大きい 2 つの LFE についてである。S 波については、2 つの LFE 両方とも水平動成分の semblance 値が極大値を持つ波群と対応していて、検出することができた。一方 P 波については、上下動の波形を使った semblance 値の分布より検出を試みた。その結果、2 つの内 1 つの LFE (LFE-A と呼ぶ) では P 波を検出できたが、他方については検出できなかった。LFE-A の対となる P 波と S 波到着時刻を使って、気象庁震源の震央は固定したまま、震源の深さを見積もると、28 km と浅くなった。この震源はこの辺りのプレート境界面付近に位置し、Hirose et al.(2008) の LFE の研究結果と調和する。

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

参考文献

Hirose, F., J. Nakajima, and A. Hasegawa, Three-dimensional seismic velocity structure and configuration of the Philippine Sea slab in southwestern Japan estimated by double-difference tomography, *J. Geophys. Res.*, 113, B09315, doi10.1029/2007JB005274, 2008.

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

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

四国西部における深部低周波微動マルチアレイ観測 (その2)

Multiple Seismic Array Observations of Non-volcanic Deep Tremor in Western Shikoku (Part2)

武田 哲也^{1*}, 松澤 孝紀¹, 汐見 勝彦¹, 小原 一成²

TAKEDA, Tetsuya^{1*}, MATSUZAWA, Takanori¹, SHIOMI, Katsuhiko¹, OBARA, Kazushige²

¹ 防災科学技術研究所, ² 東京大学地震研究所

¹NIED, ²ERI, Univ. of Tokyo

深部低周波微動が短期的スロースリップイベント(以下、SSE)とともに活発化することは、西南日本や Cascadia では知られている。微動とスロースリップとの関係を解明するためには、微動活動の推移を正確に知ることが重要であるが、微動はスロースリップが発生している断層面上の複数の場所で同時発生することが多く、また、微動の地震波エネルギーは弱く上にP波およびS波の立ち上がり不明瞭であるため、通常の震源決定法の適用は困難である。そのため、個々の位相を無視し、エネルギーの時間変化に着目したエンベロープ相関法(Obara, 2002)やハイブリッド法(Maeda and Obara, 2009)により、微動の全体像を把握する手法が採られてきたが、最近は稠密地震計アレイを用いたアレイデータ解析手法(Ueno et al., 2010; Ghosh et al., 2010)等により、個々の位相エネルギーの到来方向の推定が行われてきた。特にこの手法は、複数の場所で同時に微動が発生しても捉えることが可能である。そこで四国西部においてアレイ観測を実施し、取得されたデータを用いて MUSIC 法(Schmidt, 1986)により微動の到来方向の推定を行った。

アレイ観測は2011年1月より開始し、大小合わせて5つのアレイを展開した。その内の1つが、30個の観測点から構成される大アレイである。そのアレイ口径は2kmであり、平均観測点間隔は200mである。そして残りの4つは小アレイであり、9個の三成分地震計から構成され、そのアレイ口径は800mで、平均観測点間隔は150mである。大アレイは微動の帯の南側に配置し、小アレイはその大アレイを取り囲むように20-30km間隔で配置している。また、全ての観測点に固有周波数2Hzの三成分地震計を備え、200Hzサンプリングにて連続データを収録している。

2011年5月に、6ヶ月ぶりに四国西部でSSEが発生し、同時に微動活動も活発化した。アレイ観測点でも波形相関のよい微動波群の記録が得られた。アレイで収録されたデータを用いて MUSIC 法で解析したところ、到来する地震波は、防災科学技術研究所の微動モニタリングシステム(Maeda and Obara, 2009; Obara et al., 2010、以下、微動システム)によって推定された微動源の方向に検出された。微動がプレート境界で発生していると仮定しスローネスを座標(緯度・経度)に変換して、微動システムの震央と比較したところ、概ねスペクトルのピークは震央と一致する(特に5/21の活発な時期)。しかし、微動システムで震央が推定されていない場合でも、スペクトルピークが集中する場合がみられた。この時間帯の地震波形を確認したところ、微動活動に起因する波形が認められた。これは位相情報までを扱うことによって、微動システムでは検出されなかった微動についても推定できるようになったと考えられる。一方、微動システムの方が震央位置の精度が高いことから、微動システムと併用することによって、1エピソードを通じた微動活動推移を詳細にモニタリングすることが可能となる。

この観測は、文部科学省委託研究「東海・東南海・南海地震運動性評価研究」および科学研究費助成事業基盤研究(A)「沈み込みプレート境界遷移領域におけるすべり特性の解明」によって実施されている。

キーワード: 低周波微動, マルチアレイ

Keywords: Low frequency tremor, Multiple seismic array

西日本における深部微動のすべり分布の推定 Resolving slip evolution of deep tremor in western Japan

太田 和晃^{1*}, 井出 哲¹
OHTA, Kazuaki^{1*}, IDE, Satoshi¹

¹ 東大・理・地惑
¹EPS, Univ. of Tokyo

世界各地の沈み込み帯で発生している深部微動は、プレート境界面上のせん断すべりである低周波地震の群発活動であると考えられている。西日本においては、高精度の震源決定により、低周波地震の震源がプレート境界面を示唆する非常に薄い面状の領域に分布することもわかってきた (Ohta and Ide, 2011)。したがって、既知の低周波地震をテンプレートとして用いた Matched Filter 解析 (Shelly et al., 2006) によって示されているように、低周波地震の震源からプレート境界面上の各瞬間における微動源の位置とその移動パターンが推測可能である。しかし、微動が本当に低周波地震と同じ場所で発生するかは未だ明らかではない。微動の振る舞いは非常に多様であり、地域によっても異なる (Ide, 2010) ことから、空間的な制約がある既知の低周波地震を用いた従来の手法では検出されない微動の活動もあるかもしれない。また、従来の手法では、低周波地震の震源移動の様子から離散的な微動の描像は得られるものの、それらは微動のすべり過程全体を説明するには十分でない。微動やその他のゆっくり地震の背景にある物理過程を理解するためには、これらにより詳細なすべり過程を調べることが不可欠であろう。

本研究では、既知の低周波地震の空間的な制約を排して微動の詳細な時空間のすべり分布を調べることを試みた。まずは、精密に震源決定された低周波地震の震源分布から、対象領域のプレート境界の位置を推定し、これらの低周波地震の波形をスタックして断層面状の各グリッドを震源とする”合成テンプレート波形”を作成した。そして、この合成テンプレート波形を用いて微動の活動を含む連続波形に Matched Filter 解析を適用することで微動の破壊伝播の粗い描像を得た。さらに、この波形を経験的グリーン関数として用い、非線形断層すべりインバージョン解析によってすべり過程を詳細に調べた。

四国西部の Hi-net 観測点で観測された 2008 年 3 月 18 日 23:00-24:00 の 3600 秒の速度波形に手法を適用し、およそ 1200 秒の微動シーケンスの描像を得た。微動のすべりは断層面状を南から北へ伝播し、主な破壊の場所と継続時間から、次の 3 つのステージに分けられる:(1)80 秒 (断層南)、(2)数 100 秒 (断層中央)、(3)60 秒 (断層北)。平均の伝播速度は凡そ 10-50 m/s であり、(1)と(3)のステージは超低周波地震としても検出可能かもしれない。こうしたちがいはプレート境界面の不均質性を反映していると考えられる。

キーワード: 深部微動, スロー地震, 沈み込み帯, 南海トラフ, すべり分布
Keywords: deep tremor, slow earthquake, subduction zone, Nankai Trough, slip distribution

2011年東北地方太平洋沖地震により誘発された東南海付加体の低周波微動 Triggered low frequency tremors in Tonankai accretionary prism, by the 2011 Tohoku-Oki earthquake

藤 亜希子^{1*}, 尾鼻 浩一郎¹, 高橋 成実¹, 深尾 良夫¹

TO, Akiko^{1*}, OBANA, Koichiro¹, TAKAHASHI, Narumi¹, FUKAO, Yoshio¹

¹ 海洋研究開発機構

¹ Japan Agency for Marine-Earth Science & Technology

There have been many reports of triggered tremors and micro-earthquakes, by the 2011 Tohoku-Oki earthquake, most of which are based on land observations. Here, we report that numerous low frequency tremors are recorded by broadband ocean-bottom seismographs of DONET, a network of cabled observatory systems deployed in the Tonankai accretionary prism of the Nankai trough. Ten stations were in operation at the time of the earthquake. The tremors are observed at five of the stations, which are located on the landward slope of the Nankai trough. On the other hand, the signals are weak at stations near the coast, which are placed on the Kumano Forarc basin.

The tremors are dominant in a frequency range of 1-10Hz. Their duration ranges from tens of seconds to a few minutes. More than 20 events per hour can be detected in the first few days after the earthquake. The activity continues about one month with a decrease in the frequency of occurrence.

An intriguing feature of the observed tremors is that some of them are associated with a very low frequency (VLF) component, most clearly visible between 0.02 and 0.05 Hz. We found 74 such events within 5 days after the great earthquake. The VLF signals of the 72 events are observed at stations located above the shallowest part of the splay fault, and the remaining at a station above the up-dip toe of the main thrust. The instrument-corrected seafloor displacement corresponds to a subsidence of up to 0.04 mm with a rise time of 10-20 s. For each event, the VLF signal is detected only at one station in contrast to the high frequency signal (1-10Hz), which can be observed at more than a few stations. The disappearance of the large VLF signal at neighboring stations located only ~20km away indicates that the station which recorded this signal is well within the near field of the source.

In the presentation, we discuss the spacial and temporal variation of the triggered low frequency tremors during one month after the great earthquake.

キーワード: 低周波微動, 海底地震計, 2011年東北地方太平洋沖地震

Keywords: low frequency tremor, Ocean bottom seismometer, 2011 Tohoku-Oki earthquake

西南日本における超低周波地震の新しい検出法

A new detection method for very low-frequency earthquakes in southwest Japan

仁里 太郎^{1*}, 須田 直樹¹
NIZATO, Taro^{1*}, SUDA, Naoki¹

¹ 広島大・院理

¹Hiroshima Univ.

西南日本で発生する深部超低周波地震については、これまでの研究により断層面の走向・傾斜が沈み込むフィリピン海プレート境界面のジオメトリーとよく一致することや、すべりの方向がプレート運動方向と調和的であることが明らかになっている (Ito et al. 2007, 2009; Takeo et al. 2010)。超低周波地震の誘発源である短期的スロースリップイベントや、同時発生している非火山性微動との関係を詳細に調べることは、スロー地震の震源域であるプレート境界遷移域の摩擦の性質を調べる上で重要である。しかし、通常のモーメントテンソル解析の手法を適用する従来の方法では、多数のパラメータを同時決定する必要があるため、多くの小イベントを検出し損ねている可能性がある。本研究では、先行研究の成果を踏まえて、超低周波地震はプレート境界面における逆断層型すべりであると仮定して検出する方法を考案した。この方法では、検出の際に決定すべきパラメータ数が既存の方法よりも大幅に少なくなるので、S/Nの低い波形記録からの小イベントの検出が期待できる。

本検出法の概略を説明する。プレート境界面上に格子点を設定し、この格子点における点震源による各観測点での理論波形をあらかじめ計算しておく。格子点における断層パラメータは、既存のプレート境界面形状モデルとプレート運動モデルから決まるものである。また、時間軸上にも格子点を設定し、そこを開始時刻とする適当な長さの時間窓を考える。すべての時空間格子点について、時間窓内の観測波形と理論波形の相互相関を計算する。観測点ごとの相互相関の重み付きの和が、ある基準を満たしたとき、その時空間格子点またはその近傍で超低周波地震が起こったとする。

本検出法で重要な点は、各格子点に与える断層パラメータである。プレート境界面形状モデルには Hirose et al. (2008) を、プレート運動モデルには Sella et al. (2002) を使用した。走向・傾斜は、プレート境界面の局所平面の法線ベクトルから決定した。すべり角は、地表でのプレート運動ベクトルを次のように深部まで延長することで求めた：海溝軸でのベクトル(10万年分の変位)を、そこでの緯度・経度より求められるプレート境界面の局所平面の走向軸まわりに傾斜角だけ回転させる。回転後のベクトルの終点の緯度・経度におけるプレート境界面上の点を次の始点として、ベクトルを同様に回転させるという手順を繰り返す。すべり角は、このようにして得られる深部でのプレート運動ベクトルの逆ベクトルから求められる。グリッド上での値は、プレート境界面上の多数の点での値を内挿して求める。以上のようにして得られる想定メカニズム解の妥当性を検証するため、Ito et al. (2007) で得られた超低周波地震のモーメントテンソル解と比較した。モーメントテンソルの類似度の指標である moment-tensor difference function (Pasyanos et al., 1996) を計算したところ、両者はよく一致しており、本検出法的前提条件が満たされていることが示された。

次に、数値実験として Ito et al. (2007) によって得られたモーメントテンソル解を使用して計算した理論波形に合成ノイズを加えた「想定観測波形」を作成して本検出法で解析した。グリーン関数の計算には Saikia (1994) による波数積分法のプログラムを使用し、地震波速度構造として 鶴川ほか (1984) および Fukao (1977) のモデルを用いた。グリッド間隔は緯度経度方向にそれぞれ 10km とした。その結果、ほとんどの場合で Ito et al. (2007) の震源に最も近い格子点において重み付き相互相関和の最大値が得られ、本検出法が超低周波地震に適用できることが分かった。発表では、実際の観測波形への適用結果も示す。

キーワード: 超低周波地震, スロー地震, グリッド MT, 自動検出

Keywords: very low-frequency earthquake, slow earthquake, grid MT method, automatic detection

Distinguish between very low frequency earthquakes and landslides signal. Distinguish between very low frequency earthquakes and landslides signal.

Tu Yoko^{1*}, 安藤 雅孝¹, Lin Cheng-Horng¹, 熊谷 博之²

TU, Yoko^{1*}, ANDO, Masataka¹, LIN, Cheng-Horng¹, KUMAGAI, Hiroyuki²

¹ 中央研究院地球科学研究所, ² 防災科学技術研究所

¹Inst.Earth Science, Academia sinica, ²National Research Institute for Earth sc.

Almost every year, large typhoons strike Taiwan, which bring a huge rainfall sometimes up to 4000 mm in a few days. Such enormous rainfalls induces large landslides and submarine slumps in and around Taiwan. A series of landslides and submarine slumps due to the Typhoon Morako were identified and located by Lin et al. (2010) using band-pass filtered (0.02-0.05Hz) seismograms recorded at broadband stations of the BATS. This technique can be applicable to a real-time monitoring of landslides and submarine slumps. However, east of Taiwan and south of Ishigaki and Yonaguni islands near the trench axis of the Ryukyu subduction zone, a number of very low frequency earthquakes (VLFs) occur at shallow depths (Ando et al., 2012) where 600-700 VLFs occur every year and recorded at broadband even at the BATS stations. Although VLFs have not been found beneath Taiwan, there is a possibility that VLFs occur there from the point of view of tectonic situations. Nevertheless, the bandpass filtered (0.02-0.05 Hz) waveforms of the landslides and VLFs are quite similar; both contain a spectral peak between 0.03 and 0.08 Hz. It is very hard to distinguish the two different phenomena on the seismograms alone. To distinguish landslide events from VLFs and ordinary earthquakes, we take a method to identify landslides as follows: 1) Applying a bandpass filter (0.02 -0.05Hz) to raw broadband seismograms. 2) Picking up low frequency events from the filtered seismograms, 3) Removing ordinary earthquakes using an identification technique of P and S waves and surface waves, and hypocenter catalogues unless it is a real-time determination. 4) Locating the events with an inversion technique. 5) If the location of the event is at shallow depths beneath Taiwan or in submarine valleys, and if heavy rain-fall happened over the days, we assume the events a landslide. Our experiment with this method is still preliminary and further studies are required.

キーワード: VLFs, landslides, broadband seismic system

Keywords: VLFs, landslides, broadband seismic system

フィリピン海スラブの走向方向に変化する短期的スロースリップイベントと深部低周波微動・超低周波地震活動の関係 Along-strike variations in relationship among slow slip events, low-frequency tremor and very low-frequency earthquakes

木村 武志^{1*}, 廣瀬 仁², 松澤 孝紀¹, 木村 尚紀¹, 田中 佐千子¹, 小原 一成³

KIMURA, Takeshi^{1*}, HIROSE, Hitoshi², MATSUZAWA, Takanori¹, KIMURA, Hisanori¹, TANAKA, Sachiko¹, OBARA, Kazushige³

¹ 防災科学技術研究所, ² 神戸大学大学院理学研究科, ³ 東京大学地震研究所

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

西南日本のプレート沈み込み帯深部では、深部低周波微動 [Obara, 2002], 短期的スロースリップイベント (SSE) [Obara et al., 2004], 超低周波地震 [Ito et al., 2007] といった異なる時定数を持つ「スロー地震」が同期して発生していることが、防災科研 Hi-net 等の観測網により分かってきた。本発表では、2011 年 12 月 23 日から 2012 年 1 月 10 日頃にかけて豊後水道から四国中部で発生した短期的 SSE のすべり過程とそれに伴う微動・超低周波地震活動について比較・検討を行う。なお、矩形断層における一様すべりを仮定した予備的な解析によると、この短期的 SSE の規模は Mw 6.2 であり、この領域で発生する短期的 SSE としては最大級のものである。また、2001 年以降愛媛県西部では約半年毎に発生しているが、豊後水道から四国中部に及ぶ広範囲の領域で微動活動・短期的 SSE が捉えられたのは初めてである。

この短期的 SSE の詳細なすべり過程を推定するために、Hi-net 併設の高感度加速度計 (傾斜計) による傾斜変動データを用いた時間発展インバージョン解析 [Segall & Matthews, 1997; Hirose & Obara, 2010] を行った。この解析には Hi-net の 16 観測点の 1 時間サンプル傾斜データから、BAYTAP-G [Tamura et al., 1991] により潮汐・気圧応答成分を除去したものを使用した。断層モデルは、Shiomi et al. [2008] を参考に設定したフィリピン海プレート境界面に沿って 17 × 7 の小断層 (サイズ: 10 km × 10 km) に区分した。

推定された短期的 SSE の積算すべり分布には、愛媛県西部と中部にそれぞれすべり量の大きい領域が見られた。一方で両者の間の領域はすべり量が小さく、ギャップ領域となっている。愛媛県西部のすべり域は、この領域で過去に発生した短期的 SSE の際に繰り返し大きくすべった領域 [Hirose & Obara, 2010] と一致する。とくに大きなすべりが見られた 1 月 3 日以降についてすべりの進展と微動活動 [Maeda & Obara, 2010; Obara et al., 2011] を比較すると、すべりは愛媛県西部で発展し、数日後にギャップ領域を越えて愛媛県中部にジャンプしているように見えるが、微動活動は愛媛県西部から愛媛県中部までほぼ連続的に移動している。つまり、愛媛県西部・中部のすべりの大きい領域では、すべりの発生と微動活動の活発化の期間がよく対応しているのに対して、ギャップ領域では微動が活発に発生している期間であっても大きなすべりが見られなかった。また愛媛県西部のすべりの大きい領域では、超低周波地震がすべりと同期して発生し、愛媛県中部のすべり域でもすべりの進行中に 1 イベント発生している。一方でギャップ領域では微動活動の活発な期間でも超低周波地震は検出されていない。

この様に 2011 年 12 月?2012 年 1 月のエピソードでは、短期的 SSE によるすべりと微動・超低周波地震活動の関係が、フィリピン海スラブの走向方向に変化している可能性がある。この領域での過去の微動・短期的 SSE の活動を見ると、上述のギャップ領域をまたいで活動域が広がるエピソードはほとんどない。また、愛媛県西部のすべり域ではこれまでに超低周波地震が比較的活発に発生している一方、中部のすべり域では今回のエピソードを含めて 2 イベント、間のギャップ領域では全く検出されていない。これらのことから、今回のエピソードで見られた短期的 SSE のすべり分布と微動・超低周波地震の活動の差異は、この領域のプレート境界域に本来存在するすべり特性の空間的な不均質性を反映している可能性がある。

キーワード: 沈み込み帯, スロー地震, 短期的スロースリップイベント, 深部低周波微動, 深部超低周波地震, 傾斜変動

Keywords: subduction zone, slow earthquake, short-term slow slip event, deep low-frequency tremor, deep very low-frequency earthquake, tilt change

歪・傾斜・地下水統合解析による短期的スロースリップイベントのモニタリング Short-term slow slip event monitoring by joint analysis of crustal strain, tilt and ground-water changes

板場 智史^{1*}, 松本 則夫¹, 北川 有¹, 小泉 尚嗣¹, 松澤 孝紀²

ITABA, Satoshi^{1*}, MATSUMOTO, Norio¹, KITAGAWA, Yuichi¹, KOIZUMI, Naoji¹, MATSUZAWA, Takanori²

¹産総研 活断層・地震研究センター, ²防災科学技術研究所

¹Geological Survey of Japan, AIST, ²NIED

産業技術総合研究所(産総研)は防災科学技術研究所(防災科研)との間で、産総研が四国・紀伊半島・東海地方に展開する地下水等総合観測施設網で取得される歪等の観測データと、防災科研の高感度地震観測網 Hi-net に併設されている高感度加速度計で取得される傾斜等の観測データの交換を2011年より開始し、歪・傾斜データの統合解析による短期的スロースリップイベント(SSE)の断層モデルの推定を行っている[板場ほか, 2011]。これによると、四国~東海の広い範囲で Mw5.5 程度以上の短期的 SSE を検知することができる。

産総研の歪観測網は、上述の通り四国・紀伊半島・東海地方をカバーしているが、愛知県~静岡県の観測点密度は低い。一方、気象庁は、東海地震予知業務の一環として、同地域に多くの歪観測点を有している。また、近年、産総研の地下水観測網においても、短期的 SSE によると考えられる地下水変化が観測されている(北川ほか, 2011)。そこで、上述の歪・傾斜統合解析に、気象庁のボアホール多成分歪計および体積歪計と、産総研の地下水観測結果を加えた統合解析手法を開発した。

本講演では、この統合解析手法のほか、統合解析による短期的 SSE の検知能力、解析結果の例を紹介する。

キーワード: 短期的スロースリップイベント, 深部低周波微動, 歪, 傾斜, 地下水, 地殻変動

Keywords: short-term slow slip event, tremor, strain, tilt, groundwater, crustal movement

GEONETを用いた西南日本のスロースリップイベントのモニタリング Monitoring of small short-term SSEs in southwest Japan based on GEONET data

藤田 明男^{1*}, 里村 幹夫², 生田 領野², 島田 誠一³, 加藤 照之⁴

FUJITA, Akio^{1*}, SATOMURA, Mikio², IKUTA, Ryoya², SHIMADA, Seiichi³, KATO, Teruyuki⁴

¹ 静岡大学大学院理学研究科, ² 静岡大学理学部地球科学科, ³ 防災科学技術研究所, ⁴ 東京大学地震研究所

¹Graduate School of Science, Shizuoka University, ²Department of Geosciences, Faculty of Science, Shizuoka University,

³National Research Institute for Earthscience and Disaster Prevention, ⁴Earthquake Prediction Research Center, Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

西南日本では、南海トラフに沿ったプレート沈み込み帯で、深部低周波微動やそれに伴ったスロースリップイベントが発生していることが確認されている (Obara 2010 他)。このスロースリップイベントのうち、特に東海地域で発生している短期的なスロースリップは、規模が非常に小さくGPSによる検出は困難であるとされていた。本研究は、東海地域を含む西南日本でスロースリップに類する現象をGPS測地データを用いた断層インバージョンによりモニタリングする試みである。

我々は国土地理院GEONETの三次元座標値(F3解)を使用し、西南日本における1996年~2011年の16年間のプレート境界のスリップの検出を以下の手順で行った。

1. GPS時系列データに含まれている地震やアンテナ交換などによるオフセットを取り除く。
2. 各観測点に共通な誤差を取り除くために、時系列全体に主成分分析を行い、第一主成分を共通誤差として取り除く。
3. 7日間のギャップを挟んだ、その前後10日間の平均の位置の差をとる。
4. 上述の処理を行ったデータに対して、Yabuki and Matsuura.(1992)の断層インバージョンを行う。

インバージョンを行う際、制約条件として断層面上で十分な分解能がないところはすべり量が小さくなるとした。すべり方向はフィリピン海プレートの沈み込み方向とその逆方向に固定した。また今回新しく、すべり量をバックスリップ方向にはフィリピン海プレートの沈み込み速度を超えない、深部ではどちらの方向にもすべり量が0になるという条件を加えた。

今回加えた条件により、2011年本大会で報告した深部に見られたフォワードスリップや非現実的な大きなバックスリップが結果に生じてしまう問題が低減され、スロースリップと思われる変動のみが、より顕著に現れるようになった。本発表ではこの結果を精査し、防災科学研究所により報告されている歪計を用いて検出されたスロースリップに対する検出率を検討する。

今回、解析を行うにあたり国土地理院GEONETのF3解、気象庁の一元化震源データを使用させていただきました。ここに記して感謝いたします。

キーワード: スロースリップ, 深部低周波微動, GPS, インバージョン

Keywords: slow slip, deep low-frequency tremor, GPS, inversion

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

小林 昭夫^{1*}, 矢来 博司²

KOBAYASHI, Akio^{1*}, YARAI, Hiroshi²

¹ 気象庁気象研究所, ² 国土地理院

¹Meteorological Research Institute, ²Geospatial Information Authority of Japan

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

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

データは、国土地理院 GEONET の GPS 日座標値 (F3 解) を用いた。非定常な地殻変動を見るため、プレートの沈み込みなどに伴う定常的な成分を除去する。中国・近畿地域で豊後水道付近を除いて目立った地殻変動を生じる地震や長期的 SSE などがなかった、2006 年 1 月から 2009 年 12 月の 4 年間のデータから直線トレンド係数を求め、全期間からその係数を用いて定常成分を差し引いた。年周変化については補正をしていない。また、GEONET 観測点のアンテナ交換などに伴う人為的要因によるオフセット [岩下・他 (2009)] は、国土地理院ホームページで公開されているデータセット [国土地理院 corr30.dat] を用いて補正した。2001 年 4 月から 2 年間の非定常変位を見ると、四国北西部から中国地方の多くの観測点の水平変位は小さく、これらの地域の観測点はこの 2 年間に定常的な変動をしていたことを示している。一方、四国東部の観測点には南東向きの 1 cm 弱の水平変位が見られる。水平変位の見られた観測点の座標時系列と、周辺の観測点との基線長変化を見ると、2001~2004 年にかけて定常とは異なる南東向きの変化が見られる。これらの変位は不適当な直線トレンドや、オフセットの除去によるものではない。さらに基線長には 1996 年にも伸びの変化が見られるが、伸びの開始時期はデータの存在する 1996 年 3 月より前である。同様の変化は複数の基線長にも見られ、特定観測点の設置後の不安定とは考えにくい。一部の GPS 観測点では 1996 年 3 月以前の観測値があるものの、F3 解と同じ条件の解析はされていない。この追加解析をすることで、1996 年の変化の時期や変位量を明らかにする必要がある。

2001~2004 年の非定常変位がプレート境界上のすべりによるものとして、すべり分布をインバージョンにより求めたところ、四国東部から紀伊水道にかけてのすべりが推定された。南海トラフ沿いに深部低周波微動 [Obara (2002)] が分布する中で、この領域には微動の活発な発生が観測されていない。紀伊半島側の観測点における非定常変位について更に精査する必要があるが、深部低周波微動の活発な発生の見られない領域でも長期的 SSE が見られることは、プレート境界の状態推定について重要な情報を提供する。

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

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

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

豊後水道スロースリップ震源域近傍で得られた横坑内伸縮計記録の検討 Strain data obtained in a vault near the Bungo Channel, above an epicenter area of long term slow slip events

山崎 健一^{1*}, 寺石 眞弘¹, 小松 信太郎¹

YAMAZAKI, Ken'ichi^{1*}, TERAISHI, Masahiro¹, KOMATSU, Shintaro¹

¹ 京都大学防災研究所

¹ Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

GEONET 展開以前の SSE を調べるために参照できるデータの一つは、横穴内に設置された伸縮計・傾斜計により得られた地殻変動連続観測記録である。京都大学防災研究所は、豊後水道に面した高知県宿毛市の観測点 (SKM) において、1980 年台後半から地殻変動連続観測を実施している。宿毛観測点の伸縮計記録の中には、GPS 時系列から示唆されるのとほぼ同じ時期に特徴的な伸縮変化が見られるとともに、1990 - 1991 年頃にも同様の伸縮変化が見られると報告されている (寺石ほか、2007、測地学会講演要旨)。しかし、宿毛観測点の観測坑は地表からの距離が小さく、坑内には無視できない大きさ (2 程度) の気温変化が生じている。先行研究では気温変化の補正は十分には行われていないので、今回改めて気温変化を踏まえた伸縮計記録の再検討を行った。

気温による伸縮計記録への影響は十分な精度で線形であると考えられるので、伸縮計の温度記録があれば補正は可能である。しかし、宿毛では 1990 年代後半まで坑内温度の計測が行われていなかったため、1990 年前後の伸縮計記録を調べる際に坑内温度記録は利用できない。また、地表および入口から伸縮計までの距離が短いため、伸縮計の基準棒上でも温度は一樣とは考えられない。そのため、たとえ坑内温度が計測されていても補正は難しい。そこで今回は、観測点近傍の気象庁の気温データを参照した。外気温が地下に伝搬する際には位相遅れを伴いつつ減衰するはずなので、第一近似として移動平均をとることにより外気温の伸縮計への影響が再現できると考え、外気温の 12 カ月移動平均と伸縮計記録の比較を行った。

先行研究で伸縮計記録に SSE が捉えられていると報告されている時期には、外気温移動平均値の時系列にも同様の変化が認められた。このことは、伸縮計が記録していた変化は実際には気温変化によって生じた見かけのものであった可能性が高いことを意味する。

キーワード: 伸縮計, 横穴, スロー地震, 豊後水道, 気温変化

Keywords: extensometer, vault, slow slip event, Bungo Channel, changes in temperature

房総沖スロースリップのモデル化と東北地方太平洋沖地震がスロースリップに与えた影響

Modeling of the Boso slow slips and effects of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake on the slow slips

山 隆史^{1*}, 芝崎 文一郎², 佐藤 利典¹, 橋間 昭徳¹, 廣瀬 仁³

YAMAZAKI, Takafumi^{1*}, SHIBAZAKI, Bunichiro², SATO, Toshinori¹, HASHIMA, Akinori¹, HIROSE, Hitoshi³

¹ 千葉大・理, ² 建築研, ³ 神戸大学大学院理学研究科

¹Chiba Univ, ²BRI, ³Graduate School of Science, Kobe University

1. はじめに

房総半島沖では5~6年間隔でスロースリップイベント(SSE)が発生することが知られている(Ozawa et al. 2003, Sagiya 2004)。房総沖 SSE の特徴は深さ約 10~20km の地震発生領域で発生する点である。本研究では、すべり速度・状態依存摩擦則 (aging law) を用いた房総沖 SSE のモデル化を行い、観測された房総沖 SSE の特徴を再現できる摩擦構成則のパラメータの値を調べた。このようなパラメータスタディーは、房総沖 SSE が地震発生領域で発生する原因を特定するためや、また SSE が発生する領域の物質や状態を知るための手がかりを得るために重要である。また、2011 年 3 月の東北地方太平洋沖地震が房総沖 SSE に与えた影響についても研究を進めた。

2. 方法

シミュレーションでは、Hirose et al. (2008) の逆解析により得られたすべり領域を基に房総沖 SSE の領域を設定した。房総沖 SSE は自発的に発生するイベントと考えられるので、SSE 発生領域内ではすべり速度弱体化 (a-b が負) の性質を考慮し、発生領域外ではすべり速度強化 (a-b が正) とした。有効圧は深さとともに増加するものとし、SSE の発生領域では 5~7MPa とした。SSE 発生領域内のみ a-b、Dc についてそれぞれ異なった様々なパラメータを与えシミュレーションを行った。また、東北地方太平洋沖地震の影響は、地震時のすべりによる房総沖 SSE 領域でのプレート境界面に対する剪断及び法線応力変化をモデルに組み込んだ。

3. 結果

パラメータスタディーにより SSE が発生するパラメータの組み合わせは限られることが判明した。有効圧が 5~7MPa、a-b = -0.004、Dc = 1.0cm で、観測されている房総沖 SSE の発生間隔や継続時間、Mw を良く再現できることがわかった。また、東北地方太平洋沖地震による応力変化を加えてシミュレーションを行ったところ、応力変化がない場合にくらべて発生間隔が約半年短くなった。この結果は 1 つ前のイベントの発生間隔が 58 カ月 (2002 年と 2007 年) だったものが今回 50 カ月 (2007 年と 2011 年) と短くなったことを説明できる可能性がある。

キーワード: スロースリップ, パラメータスタディ, 2011 東北地方太平洋地震

Keywords: slow slip, parameter study, 2011 Tohoku Earthquake