

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23244091

研究課題名(和文)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

研究課題名(英文) Study on slip property of the slow earthquake source region in the transition zone on the subducting plate interface

研究代表者

小原 一成 (OBARA, KAZUSHIGE)

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号：40462501

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 37,600,000円、(間接経費) 11,280,000円

研究成果の概要(和文)：西南日本に沈み込むフィリピン海プレート境界面で発生する深部低周波微動のカタログの再検討を行ない、新たな移動パターンや時空間発展の活動様式を明らかにした。特にプレート傾斜方向に微動活動が変化しており、プレート境界面における摩擦特性等が変化している可能性を示した。この変化の原因を解明するため、西南日本で微動の幅が最も広い四国西部において、約80台の地震計を2年間線状に展開し解析を行なった結果、微動発生域の海洋性地殻は低速度で高 V_p/V_s であり、微動活動度が低調な部分でプレートの傾斜が平坦なことが分った。これは、プレート形状がスロー地震活動様式に影響を及ぼすことを示すものである。

研究成果の概要(英文)：The catalog of the non-volcanic tremor occurring on the interface of the subducting Philippine Sea plate is reevaluated and new pattern of tremor migration and spatiotemporal evolution have been clarified. The tremor activity pattern indicates depth dependency along the dip direction. This suggests that the frictional property on the plate interface changes with depth. In order to reveal the depth dependency of tremor activity pattern, we deployed 80 seismometers for two years in western Shikoku which is one of most active tremor source areas in southwest Japan, changes along the dip direction of the plate interface. Our analysis of local and teleseismic seismograms revealed that the oceanic crust just beneath the tremor zone is characterized by low- V and high V_p/V_s . The flat geometry of the subducting plate interface corresponding to the inactive part of tremor zone may suggest that the geometrical irregularities of the plate control the slow earthquake activity.

研究分野：数物系

科研費の分科・細目：固体地球惑星物理学

キーワード：スロー地震 沈み込み帯 深部低周波微動 スロースリップ

1. 研究開始当初の背景

(1) 現象の発見と世界への波及

フィリピン海プレートの沈み込みに伴い、西南日本では約 100~150 年間隔で巨大地震が発生する。この強くカップリングした領域では、上盤プレートが海洋プレートによって引きずり込まれ、プレート間に高速すべりが生じる限界まで、ひずみ蓄積が継続する。その巨大地震発生域の深部側で、深部低周波微動と呼ばれる微小振動が発生していることが近年明らかにされた (Obara, 2002)。さらに、活発な微動活動に伴って、数日間継続するプレート境界面でのゆっくりすべり現象 (短期的スロースリップイベント) (Obara et al., 2004) や周期 20 秒程度に卓越する深部超低周波地震 (Ito et al., 2007) も検出され、このような微動とすべりの同時発生現象が四国西部などでは約半年周期で規則正しく繰り返されていることが明らかになった。これらのスロー地震は、固着域から安定すべり域への遷移的なプレート間カップリングを反映するすべり現象と考えられ、同様の現象は北米大陸西海岸のカスケード地方でも検出されている。短期的スロースリップはスケード地方で初めて発見され (Dragert et al., 2001)、その後、西南日本での微動発見を受けて、スロースリップと微動の同期現象を検出した (Rogers and Dragert, 2003)。カスケード地方と西南日本は、いずれも若く暖かい海洋プレートが沈み込む巨大地震発生域であり、巨大地震と微動・すべり現象との関係については大いに注目されており、世界中の他の沈み込み帯でも盛んに微動・すべり現象検出の試みがなされている。

(2) 研究の動向と本研究課題への経緯

プレート境界遷移領域で発生するスロー地震の中で、1 回のエピソード期間中に発生する微動の数や継続時間は、同時に発生するスロースリップイベントのモーメントと比例関係にある (Obara, 2010) ことから、微動活動はプレート間すべりを代表すると考えられる。その微動現象を解明するためには、微動源決定が大変重要である。Obara (2002) は、微動エネルギーの時間変化パターンの観測点間における同相性に着目したエンベロープ相関法を開発し、微動活動の全体像を初めて明らかにした。その後 Obara et al. (2010) はエンベロープ相関法を改良し、微動の深さとともに発生間隔が短くなる性質を見出した。しかし、現在のカタログ構築手法は活動規模の小さな微動の把握が困難であるなど、必ずしも十分ではなく、より精度の高いカタログ構築処理手法の改良が必要である。最近、米国では大規模稠密地震計アレイによる微動観測により微動の高精度震源決定などを行ない、プレート沈み込み方向に沿う高速の微動の移動を検出した (Ghosh et al., 2009)。従って、機動的な地震観測は微動活動パターンの詳細な把握に大変有効である。一方、微動

活動の深さ依存性は、プレート境界に沿う摩擦パラメータあるいは間隙水圧の変化に対応するものであり、地下構造の変化が期待される。Kato et al. (2010) は、東海地域における機動的な地震観測のデータに基づき、レシーバ関数解析と地震波速度構造トモグラフィ解析からプレート境界を特定し、微動がその境界面上で発生するとともに、微動発生域直下の海洋プレート内では間隙水圧が高いことを示した。この結果は、さらに稠密な機動的観測を実施することにより、構造の変化を捉える可能性のあることを示している。本研究分野は日本が開拓し世界を先導してきたが、近年米国で大規模な研究プロジェクトが進行しており、日本が主導的地位を確保するためにも日本における機動観測を主体とした研究が重要である。

2. 研究の目的

沈み込む海洋プレートと上盤プレートとのカップリングは、沈み込み帯の地形・地質形成や巨大地震発生等のプレート境界変形過程に大きな影響を及ぼす。巨大地震発生域から安定すべり域の間の遷移領域で発生された深部低周波微動等のスロー地震は、遷移的なプレート間カップリングを表わす現象と考えられるが、その詳しい活動パターンや地下構造との関連に関する知見はまだ十分ではない。そのため、微動カタログの高精度化を行って微動活動パターンを明らかにし、それに基づいた微動発生予測モデルを構築するとともに、機動的な地震観測に基づき微動活動と微動源周辺の地下構造との関係、特に遷移領域と安定すべり域との境界を規定する構造を抽出し、プレート境界遷移領域におけるプレート間すべり特性を解明することを目的とする。

3. 研究の方法

深部低周波微動の活動パターンを解明するため、まず既存の微動カタログを再検討し、移動現象や活動の時間発展を明らかにした上で、微動活動の発生予測モデルの構築のための基礎データを得る。微動カタログにしばしば見られる取り逃がし等を避け、エネルギーの定量的評価を可能とするための手法を開発し、新たな微動カタログ構築手法を提案する。さらに、微小振幅の微動検出手法開発等に基づいて、西南日本の沈み込み過程に関連した以外の微動活動を全国的に探索し、新たな微動カタログの構築に着手する。一方、微動活動の深さ依存性と地下構造との関連を調べるため、プレート沈み込み方向に平行に線状の機動的な地震観測を実施し、レシーバ関数解析等によってプレート境界面付近の地震波速度構造を推定し、プレート境界に沿う構造の変化と微動活動特性との関係を明らかにする。さらに、活発な微動エピソードにおける移動現象を正確に把握するため、微動発生域周辺に分散型アレイを構成する機

動的地震観測を実施し、マルチビームフォーミングに基づき、微動活動の高精度追跡を行う。

4. 研究成果

(1) 微動カタログ構築に関する研究

(1-1) ハイブリッド微動カタログによる移動現象に関する研究

ハイブリッド法処理において異なる選択基準の結果を比較し、最適なパラメタを検討したとともに、そのカタログに基づいて微動の移動方向や速度が活動場所によって異なることを明らかにした。紀伊半島直下で発生する微動の低速移動の中に含まれる高速移動については、1日100 km程度の移動が微動発生域の最も浅い部分に集中し、移動方向はプレートの走向に沿うものがほとんどであった。また、1日1000 km程度の高速移動が微動発生域全体に分布し、プレートの沈み込み方向に卓越するが、プレート走向方向に投影すると、1日100 km程度の速度になることから、沈み込み方向の高速移動現象は、その方向に存在する既存の弱線と、走向方向に移動するスロースリップのフロントが交差する際に生じる見かけの移動であると考えられる。また、微動域の浅部に集中する走向方向の移動は、低速移動の駆動的役割を果たし、逆方向移動の生成源にもなると考えられる。このように、移動のタイプが深さによって異なることは、プレート境界の性質とすべり破壊の進行との関係を反映する可能性がある。

(1-2) クラスタリングカタログによる微動エピソード時空間発展に関する研究

クラスタリング処理結果の時空間的連続性に基づいたグループ区分するアルゴリズムを開発し、空間範囲や時間幅等のパラメタ調整を行い、最適に区分されたグループにおける活動時系列の抽出を行った。その結果、大きなセグメントの中にいくつかのサブセグメントが存在し、エピソードの広がりや隣接域における直前の活動によって規定されるが、その境界は微動が不活発な領域に対応することが多いことが明らかになった。微動エピソードは幅の狭い帯状領域の深部側から開始することが多く、浅部側に達する場合に規模の大きなエピソードとして発達するが、浅部側でも不均質の強い場所から微動エピソードが始まることもある(Obara et al., 2011)。これらの微動エネルギーの成長速度を比較すると、深部で微動が開始した場合ははじめは成長速度が遅く浅部に達した途端に速度が急増するのに比べ、浅部から開始した場合には、活動開始直後から成長速度が速い。このことは、強いエネルギーを放射する微動源が浅部側に集中していることを示す。また、微動エピソードの最終的規模は、開始時の成長速度に依存せず、大きなエピソードに発展するかどうかは、途中のひずみエネル

ギーの蓄積状況によると考えられる。このことは、微動エピソードの走向方向への進展についても同様であり、移動する微動エピソードがサブセグメント境界を越えるかどうかは、その先のサブセグメントのすべり欠損の状況に依存する。微動活動のギャップであるサブセグメント境界では、移動速度が一旦減速する場合が認められた。一方、ある場所では、微動エピソードが通過する際に加速することが何度か確認されている。この場所は、定常的に小規模な微動が発生するsweet spotに対応し、エピソードの開始点となる場合も多いことから、不均質性が強いことが考えられる。

(1-3) 微動エネルギーの定量的評価に関する研究

従来の微動カタログは、エンベロープ相関に基づいて微動の抽出、震源決定を行うため、微動が活発化すると相関が悪くなり、微動の取り逃がしが生じる。そこで、微動判定の基準を下げ、複数観測点で基準振幅を同時に超えるという条件で微動の継続時間を定義し、継続時間ごとに微動源とエネルギーを評価した。その結果、四国西部では微動発生域の浅部側にエネルギーが集中し、従来のカタログを用いた結果を定量的に裏付けたとともに、豊後水道の沿岸部においては従来カタログでは見られないほどのエネルギー集積域が存在し、今後のカタログ構築手法改良に向けた大きな成果が得られた。

(1-4) 新たな微動検出手法の開発に基づく新たな微動活動の探索に関する研究

西南日本で発生する深部低周波微動域では、大地震の表面波通過時に微動がトリガーされることがあるが、それらの微動は、定常的な微動活動域の中でも特に小規模な微動が発生する場所に対応しており、局所的な構造不均質が影響していることが考えられる。このような小規模微動が、プレート沈み込み境界以外の場所でも発生する可能性があるため、長周期表面波波形とエンベロープとの比較から微動を検出する手法を開発し、トリガー微動の探索を行ったところ、北海道や関東北西部、九州南西部などの地域で、微動が新たに検出された。北海道の中部では、火山直下の深部低周波地震震源域の近傍に微動源が位置し、火山活動との関連性が指摘される。また、九州東方の日向灘では、周期10秒程度に卓越する超低周波地震が知られているが、これらの初動が微動と同様の周波数帯域を有することから、長周期表面波によって超低周波地震がトリガーされたと考えられる。一方、九州西部の八代海で検出された微動源が八代海底断層帯とほぼ一致し、その断層帯に対するせん断応力と微動発生タイミングが調和的であるため、断層深部滑りが加速され、微動が生じたものと考えられる。

(2) 微動発生源における構造変化抽出に関する研究

西南日本の中でも深部低周波微動活動が活発な四国西部では、プレート傾斜方向に微動活動が変化しており、プレート境界面における摩擦特性等が変化している可能性がある。プレート境界付近の地下構造と微動活動との関係を明らかにするため、愛媛県八幡浜市から佐田岬半島の先端、および高知県四万十市に至る総延長約 100km の測線に沿って、2-3km 間隔で 70 台の地震計アレイを設置し、2011 年 9 月から 2013 年 3 月の約半年間にわたって観測を行った。近地・遠地の地震波形を取得してレスーバ関数解析やトモグラフィ解析を行なった結果、微動発生源の海洋性地殻は低速度で高 V_p/V_s であり、微動活動度が低調な部分でプレートの傾斜が平坦なことが分かった。これは、プレート形状がスロー地震活動様式に影響を及ぼすことを示すものである。

(3) アレイ観測に基づく微動移動特性に関する研究

四国西部の 1ヶ所に 30 台の地震計から構成される大アレイ、4 か所にそれぞれ 9 台の地震計から構成される小アレイを構築した。地震計間隔は 150~200m、口径は大アレイで 2km、小アレイで 800m である。MUSIC 法を用いたアレイ解析により、微動波群の検出と到来方向の解析を実施したところ、ハイブリッドカタログで得られている微動源の位置と調和的であった。さらに既存カタログでは震央が推定されていない場合でも、MUSIC スペクトルピークが集中する場合がみられ、微動活動に起因する波形が認められたことから、アレイ解析による微動検出能力の向上を示している。さらに、アレイ解析では観測網直下の構造の影響が大きい、微同源付近で発生したスラブ内地震を用い、スローネス推定における補正値を得ることができた。この補正を行うことにより、微動の移動を詳細に追跡することができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 6 件)

K. Obara, 2014, Contribution of Slow Earthquake Study for Assessing the Occurrence Potential of Megathrust Earthquakes, *J. Disaster Research*, 9, 317-329. <http://www.fujipress.jp/finder/xslt.php?mode=present&inputfile=DSSTR000900030009.xml>. 査読有.

R. Ishida, Y. Hiramatsu and T. Matsuzawa, K. Obara, 2013, Average slip rate at the transition zone on the plate interface beneath the Kii Peninsula, Japan, estimated from deep low-frequency

tremors, *Earth Planets Space*, 65, 1047-1051. <http://www.terrapub.co.jp/journals/EPS/pdf/2013/6509/65091047.pdf>. 査読有.

K. Chao, Z. Peng, H. Gonzalez-Huizar, C. Aiken, B. Enescu, H. Kao, A. Wech, A. Velasco, K. Obara, and T. Matsuzawa, 2013, A Global Search for Triggered Tremor Following the 2011 Mw 9.0 Tohoku Earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103, 1551-1571, doi: 10.1785/0120120171. 査読有.

小原一成, 2012, 第 192 回地震予知連絡会重点検討課題「プレート境界に関する我々のイメージは正しいか? (その 1) 南海トラフ・南西諸島海溝」概要, 地震予知連絡会会報, 87, 493-494. 査読無.

K. Obara, 2012, New detection of tremor triggered in Hokkaido, northern Japan by the 2004 Sumatra-Andaman earthquake, *Geophysical Research Letters*, 39, L20305, doi:10.1029/2012GL053339. 査読有.

K. Obara, T. Matsuzawa and S. Tanaka, T. Maeda, 2012, Depth-dependent mode of tremor migration beneath Kii Peninsula, Nankai subduction zone, *Geophysical Research Letters*, 39, L10308, doi:10.1029/2012GL051420. 査読有.

[学会発表](計 33 件)

K. Obara and K. Chao, Triggered tremor in inland region in Japan, AGU Fall meeting, 2013.12.12, San Francisco.

K. Obara, Takanori Matsuzawa and Sachiko Tanaka; Takuto Maeda, Activity style of nonvolcanic tremor episode, AGU Fall meeting, 2013.12.12, San Francisco.

小原一成・松澤孝紀・田中佐千子, 前田拓人, 深部低周波微動エピソードの活動様式, 日本地震学会, 2013.10.8, 横浜.

K. Obara, Activity style of nonvolcanic tremor episode, スロー地震合同研究会, 2013.9.17, 東京.

K. Chao, K. Obara and Aaron Wech, Improvement of tectonic tremor detecting and locating methods: Case study in western Shikoku and central Kyushu, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 2013.5.20, 幕張.

小原一成・加藤愛太郎・K. Chao, 武田哲也, 2013, 四国西部における深部低周波微動活動と地下構造解明のための稠密アレイ観測, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 2013.5.20, 幕張.

小原一成・松澤孝紀・田中佐千子, 前田拓人, 2013, 深部低周波微動の活動様式に見られる特徴, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 2013.5.20, 幕張.

K. Obara, Tremor and slow slip; along-strike and along-dip variation in the

activity style, AGU Fall meeting, 2012.12.5, San Francisco.

武田哲也・松澤孝紀・汐見勝彦・小原一成, 微小地震を用いたマルチプルアレイの投影較正, 日本地震学会大会, 2012.10.18, 函館.

小原一成・Kevin Chao・松澤孝紀, 日本各地で検出された誘発微動の発生原因, 日本地震学会大会, 2012.10.18, 函館.

武田哲也・松澤孝紀・汐見勝彦・小原一成, 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), 日本地球惑星科学連合2012年大会, 2012.5.20, 幕張.

小原一成・松澤孝紀・田中佐千子・前田拓人, 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, 日本地球惑星科学連合2012年大会, 2012.5.20, 幕張.

K.Obara, Complex interactions of slow earthquakes in Nankai subduction zone, AGU Fall meeting, 2011.12.6, San Francisco.

小原一成, スロー地震モニタリングは巨大地震予測に有効か?, 日本地震学会大会, 2011.10.14, 静岡.
など

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/obara/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小原 一成 (OBARA, Kazushige)

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号: 40462501

(2) 研究分担者

加藤 愛太郎 (KATO, Aitaro)

東京大学・地震研究所・准教授

研究者番号: 20359201

岩崎 貴哉 (IWASAKI, Takaya)

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号: 70151719

酒井 慎一 (SAKAI, Shinichi)

東京大学・地震研究所・准教授

研究者番号: 00251455

武田 哲也 (TAKEDA, Tetsuya)

防災科学技術研究所・観測・予測研究領域
地震・火山防災研究ユニット・主任研究員

研究者番号: 80455253

浅野 陽一 (ASANO, Yoichi)

防災科学技術研究所・観測・予測研究領域
地震・火山防災研究ユニット・主任研究員

研究者番号: 00399362

汐見 勝彦 (SHIOMI, Katsuhiko)

防災科学技術研究所・観測・予測研究領域
地震・火山防災研究ユニット・主任研究員

研究者番号: 20500375

松澤 孝紀 (MATSUZAWA, Takanori)

防災科学技術研究所・観測・予測研究領域
地震・火山防災研究ユニット・主任研究員

研究者番号: 90500744

楠城 一嘉 (NANJO, Kazuyoshi)

防災科学技術研究所・観測・予測研究領域
地震・火山防災研究ユニット・契約研究員

研究者番号: 10549504

前田 拓人 (MAEDA, Takuto)

東京大学・地震研究所・助教

研究者番号: 90435579