

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400447

研究課題名(和文)沈み込み帯における深部低周波地震活動の全容解明

研究課題名(英文)Elucidation of activity of deep low-frequency earthquakes in subduction zone

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、南海トラフ巨大地震の震源域深部の遷移領域において発生している通常の地震と異なる深部低周波地震の活動を網羅的に調べることで、長期的、且つ、検出限界に迫る低周波地震の力タログを新たに構築した。その結果、既往研究では捉えるのが困難であった低周波地震の時空間発展の特性を高精度に把握することに成功した。例えば、短期的スロースリップ中に低周波地震活動の高速な移動現象が複数回起きていることを明瞭に示した。また、高速移動現象が拡散様式に従って発展している点や、ゆっくり滑り様式の空間変化に関する新たな知見も得られた。

研究成果の概要(英文)：In the present study, we performed a systematic search for events with seismograms similar to those observed for a number of low-frequency earthquakes (LFEs), those have taken place at the down-dip extension of locked region associated with megathrust earthquake along the Nankai Trough. We constructed a new catalog of LFEs from April 2004 to August 2015 (during 11.5 years). Then, the analysis of this catalog led to new understanding of spatial-temporal evolution of LFEs. For example, we clearly showed that high-speed migrations of LFEs repetitively occur during a short-term slow slip events. It is interesting that the high-speed migrations of LFEs evolve in a diffusional manner; i. e., the migration front speed decays with ongoing time. Furthermore, we found out a lateral variation of slow-slip recurrence property along the deep tremor belt in Nankai Trough.

研究分野：地震学

キーワード：低周波地震 ゆっくり滑り スロー地震

1. 研究開始当初の背景

南海トラフ巨大地震の震源域深部の遷移領域においては、通常の地震と異なる深部低周波微動(以下、微動)や深部低周波地震(以下、低周波地震)が発生していることが知られている(e.g., Obara 2002; Katsumata and Kamaya, 2003)。近年、南海トラフに留まらず、世界中の沈み込み帯やプレート境界においても、低周波微動・地震の存在が確認されている(e.g., Rogers and Dragert, 2003; Nadeau and McEvilly, 2004)。Shelly et al. (2007)によると、微動とは低周波地震が時空間的に群発的に発生し、それらが重ね合わさった現象を見ているという概念が提唱されている。実際、低周波地震の発生域と微動域とは空間的にも重なり合っており、上記の仮説を支持する。さらに、低周波地震はプレート境界面上近傍に分布し、且つ、その発震機構解がプレートの沈み込みを反映する低角逆断層型を示しており、低周波地震がプレート境界面上の微小滑りに対応することも明らかにされている(e.g., Ide, 2007; Kato et al., 2010; Royer and Bostock, 2013)。つまり、低周波地震は海溝型巨大地震震源域の遷移領域における観測可能なプレート境界面上の滑りの最小単位と捉えることができ、低周波地震の活動を明らかにすることは、微動活動自体の理解に直接的に繋がり、本質的に重要であることを意味する。

これまでの多くの先行研究では、微動波形全体を対象にしており、低周波地震のパルス幅(0.2~1秒)に比べて解析窓の長さが2分~5分と桁違いに長い。すなわち、数分間に集中して発生する複数の低周波地震からのシグナルを平滑化して、それらの平均的なエネルギー放射を見ていることに対応する。このため、微動の震源決定精度は低周波地震に比べて格段に劣るとともに、時間分解能が悪く、滑りの微細な時空間発展(高速移動、動的な誘発現象)を捉えることは極めて困難な状況であった。一方、低周波地震は、国内に多数展開されている短周期地震計(Hi-net等)の解析帯域(1-20 Hz)において信号対雑音比が高いパルス的な波形であり、その一部は、気象庁一元化処理震源リスト(カタログ)にも掲載されている。しかしながら、この低周波地震の活動を長期間に渡り網羅的に調べた研究例は国内・国外においても稀である。その原因として、既存の低周波地震のカタログが不完全である点が挙げられる。そこで、本計画で提案する手法により、既存の地震カタログには掲載されていない小さな低周波地震の検出・震源決定を遂行し、より高品質で均質な低周波地震カタログの構築を目指した。

2. 研究の目的

上記の問題点を解決するために、低周波地震を基準地震として、連続波形記録との相互相関処理を施すことで、基準地震と類似のイ

ベントを検出し(Matched Filter法)、長期的、且つ、検出限界に迫る深部低周波地震のカタログを新たに構築する(e.g., Shelly et al., 2011)。この新たな低周波地震カタログを系統的に分析することで、プレート境界面上におけるゆっくり滑りの高分解能な検出とその現象理解を深めることを目指す。特に、低周波地震の時空間発展の特性把握、低周波地震活動に基づくゆっくり滑り様式の定量的評価やb値の推定に焦点を当てる。

3. 研究の方法

本研究では、気象庁一元化処理震源リストに記載されている東海・紀伊半島・四国地域で発生した深部低周波地震の波形をプレート波形として用いて、相互相関処理法に基づく波形パターン検索(Matched Filter法)を実施した。そのために、東海・紀伊半島・四国地域の低周波地震の震源域近傍の地震観測点(約140点分)で収録された過去11.5年分の連続波形記録(2004年4月から2015年8月まで)を収集し、それらの統合処理をおこなった。高感度・広帯域、且つ、低ノイズレベルの性質を有する基盤地震観測網Hi-netのデータを用い、それらのデータを外付けのハードディスクドライブに複写し保存した。また、相互相関処理法の計算コードの高速化も併せて実施した。

南海トラフの帯状の深部低周波地震発生帯を解析対象とし、発生帯に沿ってお互いが重なるように10個の領域に分割した(図1)。そして、それぞれの領域に含まれる定常観測点(Hi-net)の連続波形データを解析に使用した。さらに、気象庁一元化処理震源カタログの情報を基に波形を切り出し、波形の信号対雑音比の高い低周波地震を基準地震として選択した(図1)。基準地震として、解析対象期間内に発生した低周波地震を用いた。そして、11.5年分の連続波形記録に対してMatched Filter法を適用した。その際、検出に用いた波形の窓の長さは6秒間で、2-6 Hz帯域のバンドパスフィルターを適用した。

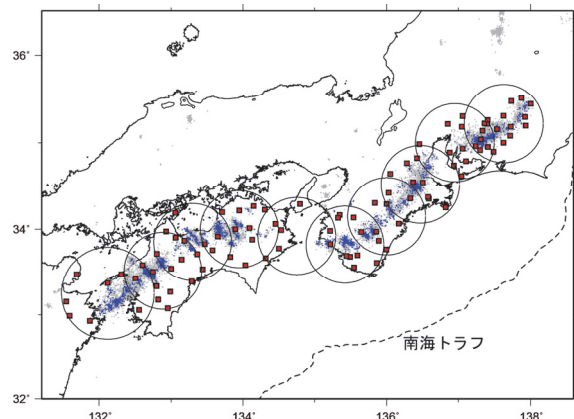


図1. 解析を行った10個の領域を丸印で表す。灰色点は、気象庁一元化処理に基づく深部低周波地震の分布、青色点はMatched Filter法解析に用いた低周波地震(基準地震)を示す。赤色の四角印は解析に用いた地震観測点(Hi-net)の位置を表す。

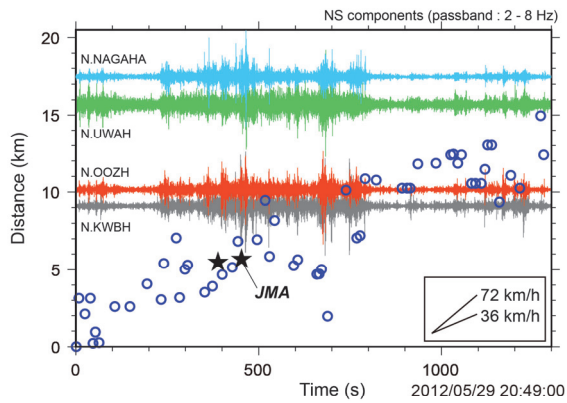


図2. Matched Filter法解析によって検出された低周波地震活動の時空間発展図の例。青色の丸印が検出された低周波地震、黒色の星印は気象庁一元化処理震源を示す。背景は、解析対象の低周波地震の近傍に位置する地震観測点で記録された地震波形の南北動成分を表す。

イベント検出の閾値として、一つの基準地震に対して計算される平均相互相関係数の1日分の時系列データから中央絶対偏差値(MAD)を計算し、その9倍の値を閾値として採用した。新たに約53万個の深部低周波地震の検出に成功した。この検出数は、同期間に南海トラフ沿いで得られている気象庁一元化処理による低周波地震数の約24倍にもものぼる。検出結果の一例を地震波形記録とともに図2に示す。地震波形記録に見られる複数のパルス的なシグナルが、検出された低周波地震に概ね対応していることがわかる。さらに、気象庁一元化処理震源では認識できない低周波地震の移動が明瞭に捉えられている。

4. 研究成果

本研究で構築した低周波地震カタログを用いて描画した深部低周波地震の時空間発展図を図3に示す。横軸に時間、縦軸に南海トラフに沿う(平行な)方向の距離を示す。東海地域~四国地域にいたる低周波地震が青色の点で表示されている。既存の低周波地震カタログに比べて、短期的スロースリップ発生中の低周波地震の活動度は非常に高くなり、時空間的に明瞭なクラスタリングを示す。また、領域によっては短期的スロースリップが観察されていない時期においても、低

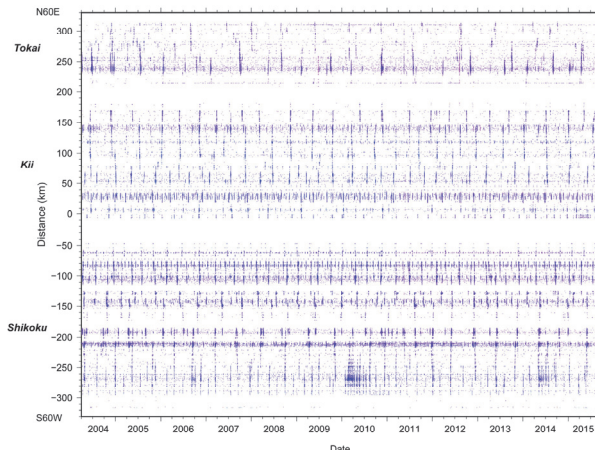


図3. 新たに検出された低周波地震活動の時空間発展図。

周波地震活動が定常的に起きていることがわかる。

さらに、多様な時間スケール・空間スケールにおいて低周波地震の移動現象が起きていることが明らかになった。代表的なものとしては、移動速度が1日約10 kmで、移動距離が約50~100 kmにわたる短期的スロースリップに伴うモードが挙げられる。既往研究で指摘されているように、短期的スロースリップに伴う低周波地震活動域のフロントは拡散的な様式に従って移動することが確かめられた。

次に、帯状の低周波地震活動域の複数領域において、時速50~100 kmで生じる低周波地震の高速移動現象が、頻繁に起きていることが新たに発見された。このような高速移動現象は、南海トラフ沿いの深部低周波微動発生域において、複数の箇所で見出されていることが明らかになった。特に、短期的スロースリップが発生している間に、多数回にわたる低周波地震の高速移動現象が起きていることが見出された(図4)。

上記で述べた高速度で移動する低周波地震活動域のフロントも、拡散様式にしたがって発展することが示され(図5)、拡散係数の大きさは約 $2 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{s}$ 、移動距離は約10 kmに及ぶ。拡散的な発展様式は、短期的スロースリップに伴う震源移動現象と類似しており、背後に両方の現象に共通した物理機構が寄与していることが考えられる。高速移動時においても、拡散様式に従って低周波地震活動が移動することはこれまで指摘されておらず、スロー地震の発生機構を理解する上で重要な知見が得られた。また、四国西部域において、低周波地震の移動速度の経年変化を調べたところ、推定誤差を優位に超えるよう

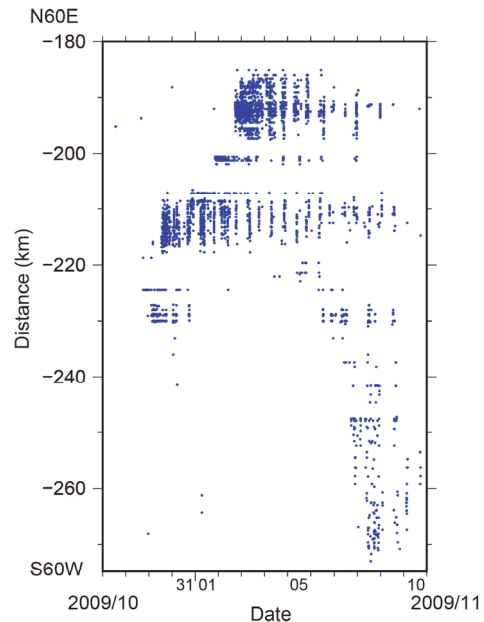


図4. 2009年10月~11月に四国西部域で発生した短期的スロースリップ中の低周波地震活動の時空間発展図を示す。横軸は日付、縦軸は南海トラフに沿う方向(プレートの沈み込み方向と直交方向)の距離を表す。筋状の活動が頻繁に発生していることがわかる。

な特段の変化は確認できなかった。

図3より、豊後水道における2010年と2014年に発生した長期的スロースリップに伴う低周波地震活動の活発化が、四国西部の領域で起きていたことがわかる。低周波地震活動は2010年の方が活発であり、図3より筋状の活動が複数回確認できる。このことは、長期的スロースリップの進行中に、低周波地震が短い間隔で多数回にわたり間欠的に活動していたことを意味する。測地学的観測により捉えられた豊後水道の長期的スロースリップは、2010年の方が2014年に比べて解放された地震モーメントが大きく、本結果で得られた活動度の差とも一致する。一方、2006年にも低周波地震活動のわずかな増加が見られ、小規模なスロースリップが起きていたことが示唆される。このように、豊後水道の長期的スロースリップの振る舞いは、以前考えられていた程単純ではなく、スロースリップの規模自体にゆらぎが存在することがわかる。

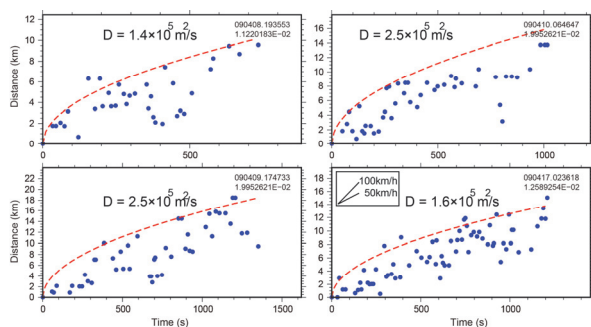


図5. 低周波地震活動の高速移動時の時空間発展図の例を示す。横軸は時間、縦軸は距離を表す。青色の丸印が低周波地震、赤色破線が拡散様式（時間のルートに比例）に従う移動フロントの位置を表す。

最後に、プレート傾斜方向の低周波地震の活動様式の平均的な特徴を調べた。その結果、深さ約30kmよりも浅いところでは、低周波地震の発生様式が深部よりも間欠的であることが示された。この特徴は、低周波微動の解析を行った先行研究の指摘と調和的である (e.g., Obara et al., 2010)。しかし、より深い低周波地震域の下端付近になると間欠的な振る舞いが再度強くなる傾向が見られる。このように、低周波地震に基づくゆっくり滑りの様式には、深さ依存性があることがわかる。このようなゆっくり滑り様式の深さ依存性は、短期的スロースリップ発生域に高圧な流体が局所的に存在するというモデル (Gao and Wang, 2017) で定性的に説明が可能である。更に、b値の深さ依存性を調べたところ、間欠的な滑り様式を示す浅い側の方が、深い側に比べてb値が大きくなる傾向が見られた。

活動様式の水平方向の変化をみると、東海地域や紀伊半島においては、全体的にゆっくり滑りが間欠性の強い振る舞いを示す。一方で、四国地域においては、連続的な活動様式を示す領域が複数存在する。GNNSデータを用いた短期的スロースリップによる滑り速度分布 (Nishimura et al., 2013) を見て

みると、東海地域や紀伊半島での短期的スロースリップによる滑り速度は、四国地域に比べて小さい特徴を示す。つまり、東海地域や紀伊半島のスロー地震発生域では、四国地域に比べて固着率が高く、より脆性的な振る舞いを示すと解釈できる。この特徴は、低周波地震の活動様式が東海地域や紀伊半島において四国地域よりも間欠性が強い傾向にある点と一致し、興味深い性質である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2件)

- ① Obara Kazushige, and Aitaro Kato, Connecting slow earthquakes to huge earthquakes, *Science*, 353(6296), 253-257, doi:10.1126/science.aaf1512, 2016, 査読有.
- ② Kato Aitaro, Toshihiro Igarashi, and Kazushige Obara, Detection of a hidden Boso slow slip event immediately after the 2011 Mw9.0 Tohoku-Oki earthquake, *Japan, Geophys. Res. Lett.*, 41, doi:10.1002/2014GL061053, 2014, 査読有.

[学会発表] (計 4件)

- ① Kato Aitaro, Partial Unlocking of Faults by Mixed Aseismic and Seismic Slip Processes prior to Earthquake, *American Geophysical Union Fall Meeting 2016, (Invited), San Francisco, California, USA, Dec. 14, 2016.*
- ② Kato Aitaro, Hiroshi Tsuruoka, Shigeki Nakagawa, and Naoshi Hirata, High-speed migration of tremor along the Nankai subduction zone, Japan, *日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 2016 年 5 月 22 日、幕張メッセ (千葉県千葉市).*
- ③ Kato Aitaro, Hiroshi Tsuruoka, Shigeki Nakagawa, and Naoshi Hirata, Repeatability of high-speed migration of tremor along the Nankai subduction zone, Japan, *American Geophysical Union Fall Meeting 2015, San Francisco, California, USA, Dec. 16, 2015.*
- ④ Kato Aitaro, Slow slip transients and large earthquakes, *9th International Workshop on Statistical Seismology (Invited), Potsdam, Germany, June 16, 2015.*

[その他]

ホームページ等

<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/people/akato/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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