

令和 3 年 5 月 21 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13639

研究課題名(和文) 浅部低周波微動の検出効率化と活動定量化

研究課題名(英文) Increasing detection efficiency and quantifying activities of shallow tectonic tremors

研究代表者

矢部 優 (Yabe, Suguru)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・研究員

研究者番号：30802699

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：日本周辺ではスロー地震と呼ばれる通常の地震とは異なるプレート境界断層運動が生じている。南海トラフの深さ30kmで発生するものは深部スロー地震と呼ばれ、南海トラフや日本海溝の深さ10-20kmで発生するものは浅部スロー地震と呼ばれる。本研究では、日本周辺で発生する浅部スロー地震の規模推定を行い、過去に推定された深部スロー地震の規模と比較を行った。その結果、全く異なる温度圧力環境で発生する浅部と深部スロー地震は、最大規模には相違点がある一方、地震波放出効率は同程度という共通点があることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スロー地震は沈み込み帯の歪蓄積・解放プロセスの一翼を担っているため、その活動を把握することが将来の巨大地震発生の検討に向けて重要である。陸上の観測網で捉えられる深部スロー地震は20年を超える観測実績がある一方、海域の観測網で捉えられる浅部スロー地震の観測の歴史は浅い。海域観測が整備される以前の浅部スロー地震活動を陸上観測網を用いて復元する試みがされているが、本研究結果は陸上観測網で検出されないことが必ずしも現象が発生していないことを意味しないということを指摘しており、これまでの研究の解釈に注意を喚起している。

研究成果の概要(英文)：Slow earthquakes are fault motions different from regular earthquakes in many ways, which have been detected around Japan. Slow earthquakes at 30 km depth at the Nankai Trough are called "deep" slow earthquakes, whereas slow earthquakes at the 10 - 20 km depth at the Nankai Trough and the Japan Trench are called "shallow" slow earthquakes. This study investigated event size of shallow slow earthquakes and compared with results of deep slow earthquakes in the past studies. As a result, shallow and deep slow earthquakes, which occur at very different temperature and pressure condition, have differences in the maximum event size and commonalities in the efficiency in seismic wave radiation.

研究分野：地震学

キーワード：スロー地震 南海トラフ 日本海溝

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

スロー地震とは、通常の地震と同様に断層がずれ動く現象であるが、その滑り速度がゆっくりとしているなど、通常の地震とは異なる様々な特徴を持つ地震現象である。観測される周波数帯域によって、シグナルに名称が付けられており、2-8 Hz の地震波として観測されるシグナルは低周波微動(地震)、0.01 - 0.1 Hz の地震波として観測されるシグナルは超低周波地震、測地学的なシグナルはスロースリップ、と呼ばれる。

沈み込み帯プレート境界の地下 30km 程度の深さで発生する深部スロー地震は、陸上の地震・測地観測網で観測可能であったことから、2000 年前後からその存在が検知され、様々な研究がなされてきた。それに対し、沈み込み帯プレート境界の地下 10km 程度で発生する浅部スロー地震は、陸地から遠く離れた海溝近傍で発生しているため、陸上観測網ではその検知が難しい。しかし、南海トラフにおける「地震・津波観測監視システム」(DONET)や日本海溝における「日本海溝海底地震津波観測網」(S-net)が整備され、日本周辺における浅部スロー地震の分布が明らかになりつつあった。

深部と浅部のスロー地震は、南海トラフにおいては将来予測される巨大地震発生域の周辺で発生しており、沈み込み帯における歪蓄積・解放プロセスの一翼を担う重要な現象である。海域観測の進展によりその様子が明らかになってきた浅部スロー地震は、低周波微動の波形の特徴や低周波微動と超低周波地震が同時に観測されるなど、深部スロー地震と類似の特徴を持っている。しかし、両者が発生する深さが大きく異なることから、温度や圧力といったスロー地震の発生環境は大きく異なる。それは、深部と浅部のスロー地震震源域に存在する岩石の種類やその物性・摩擦特性、そこで働く鉱物学的プロセスなど断層運動を支配する要因が異なっている可能性を意味しており、両者が全く同一のものであるのかについて疑問が生じる。同じスロー地震と名前がつく 2 つの現象の比較研究を行うために、本研究計画を立案した。

2. 研究の目的

上記の背景を受け、本研究計画では以下の研究目標を設定した。以下の中でも(2)が特に中心的な研究目的であり、(3)は発展的な目標と位置付けた。

(1) 浅部低周波微動の検出効率化

海域の地震観測データには、陸域のデータには見られない特有のノイズが含まれる。例えば、航行する船などを励起源とする海中音波などが挙げられる。また、通常の地震のシグナルも、海底地震計が設置されている海底堆積物の影響を受けて紡錘形に伸びた波形となったり、地震波が海中音波に変換された T-phase と呼ばれる波形を含んだりするなど、複雑な形状を持つことで低周波微動との判別が難しくなる。そこで、機械学習などの手法を用いることで、効率的な検出手法の開発を行うことを目指した。

(2) 浅部スロー地震の震源パラメータの推定

浅部スロー地震と深部スロー地震が全く同一の現象であるのか、類似の異なる現象であるのかを明らかにするためには、両者の特徴を定量的に評価した上で比較する必要がある。研究代表者の過去の研究において、深部スロー地震の震源パラメータの推定を行っていた。そこで本研究計画では、浅部スロー地震の低周波微動と超低周波微動の震源パラメータを推定し、その時空間分布を明らかにすることで、浅部スロー地震と深部スロー地震の共通点・相違点を明らかにすることを目指した。研究代表者がそれまで深部スロー地震の震源パラメータの解析に用いていた手法を浅部スロー地震に応用し、統一的な手法で深部と浅部のスロー地震の震源パラメータの比較を行うこととした。

(3) 浅部スロー地震の物理モデルの構築

スロー地震の発生メカニズムは深部・浅部ともに明らかになっていない。スロー地震は巨大地震の震源域の周辺で発生している上、浅部スロー地震の発生する浅部プレート境界は大きな被害をもたらす津波の発生源となるため、浅部スロー地震の発生メカニズムの理解は地震災害リスクの評価の上でも重要な課題である。そこで、上記の震源パラメータの解析などから得られた知見をもとに、浅部スロー地震の発生メカニズムについて考察し、数値モデルを構築することを目指した。構築した数値モデルは、巨大地震や津波の発生可能性と浅部スロー地震の関係などの検討に活用する。

3. 研究の方法

効率的な浅部低周波微動検出手法の開発のため、ニューラルネットワークをはじめとする機械学習手法を用いる。既存のカタログや自作のカタログをもとに、低周波微動・普通の地

震・ノイズのラベルデータを準備し、識別器を作成する。入力する特徴量としては、地震波形の生波形やスペクトル形状などを試して検討する。この解析のため、GPUを用いた高速計算が可能なワークステーションを購入し、計算環境を整備する。

震源パラメータの推定は低周波微動の地震波エネルギーレート推定と超低周波地震の地震モーメントレート推定の2種類を行う。前者は低周波微動の観測される帯域における各地震観測点での地震波エネルギーを波形の2乗積分から産出し、サイト増幅特率や地震波減衰の補正を行った上で震源から放出された地震波エネルギーを推定する。波形のエンベロープ形状から破壊継続時間を推定し、推定した地震波エネルギーと比をとることで地震波エネルギーレートを算出する。後者は超低周波地震の観測される帯域においてCMT解析を行い、地震モーメントと破壊継続時間を推定し、両者の比から地震モーメントレートを算出する。観測地震波形データを蓄積するためのHDD類を購入し、DONETやS-netのデータを整頓して利用可能な状態とする。

4. 研究成果

(1) 浅部低周波微動の検出効率化

既存の浅部低周波微動カタログと通常の地震カタログをもとに、教師あり学習による検出の効率化を検討した。しかし、イベント数の少なさとカタログ化されていない様々な種類のノイズ（船舶によるノイズ・地震波探査のための海中音波など）の教師データの準備に苦慮し、手法開発には至らなかった。Nakano et al. (2016, 2018)やNishikawa et al. (2018)などで南海トラフや日本海溝の浅部低周波微動カタログが公開されたこともあり、テーマ(2)の震源パラメータの推定に注力することとした。

(2) 浅部スロー地震の震源パラメータの推定

浅部スロー地震のシグナルのうち、低周波微動の地震波エネルギーレートと超低周波地震の地震モーメントレートの推定を行った。前者は2-8Hzの帯域で、後者は0.01-0.1Hz程度の帯域で算出されるものである、両者の比であるScaled Energyと呼ばれる量は、地震波放出効率を表す。

海域観測網で捉えられる浅部低周波微動の地震波エネルギーレートを、陸域観測網で捉えられる深部低周波微動の地震波エネルギーレートと比較可能な形で推定するためには、海域の地震計のサイト増幅率を推定することが重要である。そこで、南海トラフと日本海溝で発生する通常の地震（スラブ内地震）の地震波形を用いて、陸上と海底の地震計のサイト増幅率の比較を行った。その結果を用いてサイト増幅の補正を行った上で、Nakano et al. (2016, 2018)やNishikawa et al. (2018)のカタログに掲載されている浅部低周波微動の地震波エネルギーレートを推定しカタログ化した。その結果は、浅部低周波微動の発生しうる最大サイズは深部低周波微動に比べて1桁ほど大きいことを示しており、深部と浅部のスロー地震の特徴の違いが明らかとなった。

浅部超低周波地震の地震モーメントレートについても推定を行った。南海トラフの浅部超低周波地震はDONETの広帯域地震計を用いてNakano et al. (2016, 2018)によるカタログ化されているのでそれを参照した。一方で、日本海溝のS-netには広帯域地震計が設置されていないため、浅部超低周波地震を解析することはできない。そこで、陸上の広帯域地震観測網であるF-netのデータを用いて、浅部超低周波地震の解析を行った。Nishikawa et al. (2018)で報告されている浅部低周波微動のタイミング周辺で浅部超低周波地震を探索したところ、比較的規模の大きい浅部低周波微動に伴って浅部超低周波地震が検出された。

浅部低周波微動の地震波エネルギーレートと浅部超低周波地震の地震モーメントレートの解析結果から、両者の比であるScaled Energyを計算したところ、概ね 10^{-9} の値が得られた。普通の地震については、Scaled Energyは 10^{-5} 程度であり、浅部スロー地震の値はずっと小さい値を持つ。一方、過去の研究で推定した深部スロー地震のScaled Energyは 10^{-9} 程度である。つまり、Scaled Energyの観点では浅部スロー地震は深部スロー地震と定量的に共通の特徴を持つことが明らかになった。

推定された震源パラメータの空間分布には地域的な特徴が見られた。南海トラフの熊野沖では、浅部スロー地震域の中でもより浅部側でイベントの規模が小さくより深部側で規模が大きいという、深さ方向の系統的な変化が見られた。過去の研究において、深部スロー地震ではその発生域の浅部側でイベントの規模が大きく深部側で小さいという深さ方向の系統的な変化が見られており、熊野沖の浅部スロー地震は深部スロー地震と固着域を挟んで対称的な振る舞いをしていることが明らかになった。このことは、深さ方向に系統的に変化する地震発生環境がスロー地震の発生に重要な役割を果たしていることを示唆している。また、日本海溝の浅部スロー地震では沈み込み帯の走向方向に地域性が見られた。十勝沖の浅部スロー地震は規模の大きいイベントが発生する一方、岩手沖などの浅部スロー地震は規模の小さいイベントしか発生していなかった。浅部スロー地震の震源域は深部スロー地震と比べて、地震波探査などの方法でより詳細な構造を推定できることが期待されるため、今回観測された走向方向の震源パラメータの変化とプレート境界の構造の関係を明らかにしていくことが今後の課題となる。

また、今回得られた結果は、海域観測網が整備される以前の浅部スロー地震活動を陸

上観測網を用いて解析する際に注意が必要であることを示している。海域観測網が整備される以前の浅部スロー地震活動は、陸上観測網の広帯域地震計を用いて浅部超低周波地震を検出することで遡って解析することが可能である。しかし、今回明らかになった浅部スロー地震の震源パラメーターの地域性によると、岩手沖や茨城沖の浅部スロー地震活動は海域観測網では低周波微動として検出することが可能であるが、イベントの規模が大きくないため超低周波地震を陸上観測網で検出することは難しい。つまり、これらの地域では陸上観測網で超低周波地震が観測できないからといって浅部スロー地震が起きていないということにはならないということである。陸上観測網を用いた解析結果を解釈するにはこの点について十分注意する必要がある。

(3) 浅部スロー地震の物理モデルの構築

本研究計画の開始直前に国際的な科学掘削の枠組みである International Ocean Discovery Program (IODP) の船上ワークショップに参加したことを契機として、本研究計画の期間中には南海トラフのプレート境界掘削を目指す IODP Expedition 358 に検層データ担当の乗船研究者として参加するなど、浅部スロー地震の発生する南海トラフ浅部プレート境界を研究ターゲットとする地質学者と多くの交流を図ることができた。その議論の中で、浅部プレート境界では巨大地震の際に津波を引き起こす高速滑りと巨大地震の間に繰り返し発生する浅部スロー地震の低速滑りの両方が同一の断層上でどのように発生するかという問題意識が生まれた。浅部プレート境界断層から回収された掘削試料の観察から、プレート境界断層では高速滑りに伴う摩擦発熱の痕跡と低速滑りに伴う空隙生成の痕跡が見られるという地質学的な観察に基づき、浅部プレート境界断層滑りの物理モデルの構築に着手した。前者は Thermal Pressurization と呼ばれる断層滑りを促進するプロセスが、後者は Dilatancy Hardening と呼ばれる断層滑りを抑制するプロセスが断層上で働いていることを示唆する。そこで、これら2つの競合するプロセスが浅部プレート境界上でどのように断層滑りに影響するかを数値計算により明らかにすることとした。その結果、普段の浅部プレート境界では Dilatancy Hardening が優勢であるためにスロー地震が発生するが、巨大地震の最中に深部の破壊による応力集中が生じた場合には Thermal Pressurization が優勢に転じ津波を引き起こす高速滑りにつながることが分かった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Nakano Masaru, Yabe Suguru, Sugioka Hiroko, Shinohara Masanao, Ide Satoshi	4. 巻 46
2. 論文標題 Event Size Distribution of Shallow Tectonic Tremor in the Nankai Trough	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 5828 ~ 5836
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2019GL083029	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Yabe Suguru, Tonegawa Takashi, Nakano Masaru	4. 巻 124
2. 論文標題 Scaled Energy Estimation for Shallow Slow Earthquakes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 1507 ~ 1519
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2018JB016815	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Takemura Shunsuke, Yabe Suguru, Emoto Kentaro	4. 巻 223
2. 論文標題 Modelling high-frequency seismograms at ocean bottom seismometers: effects of heterogeneous structures on source parameter estimation for small offshore earthquakes and shallow low-frequency tremors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	6. 最初と最後の頁 1708 ~ 1723
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/gji/ggaa404	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yabe Suguru, Baba Satoru, Tonegawa Takashi, Nakano Masaru, Takemura Shunsuke	4. 巻 800
2. 論文標題 Seismic energy radiation and along-strike heterogeneities of shallow tectonic tremors at the Nankai Trough and Japan Trench	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Tectonophysics	6. 最初と最後の頁 228714 ~ 228714
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.tecto.2020.228714	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Nakano Masaru, Yabe Suguru	4. 巻 48
2. 論文標題 Changes of Event Size Distribution During Episodes of Shallow Tectonic Tremor, Nankai Trough	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 e2020GL092011
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020GL092011	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計8件(うち招待講演 1件/うち国際学会 4件)

1. 発表者名 矢部優, 利根川貴志, 中野優
2. 発表標題 南海トラフ浅部低周波微動のScaled Energy 推定
3. 学会等名 日本地震学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Yabe, T. Tonegawa, S. Baba, and M. Nakano
2. 発表標題 Seismic energy estimation for shallow tremors
3. 学会等名 Science of Slow Earthquake workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Yabe, T. Tonegawa, S. Baba, and M. Nakano
2. 発表標題 Seismic energy estimation for shallow tremors
3. 学会等名 AGU fall meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 矢部優, 利根川貴志, 中野優
2. 発表標題 浅部低周波微動の地震波エネルギー
3. 学会等名 日本地震学会秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Yabe, T. Tonegawa, and M. Nakano
2. 発表標題 Seismic energy estimation of shallow slow earthquake
3. 学会等名 American Geophysical Union fall meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Yabe, T. Tonegawa, and M. Nakano
2. 発表標題 Seismic energy estimation of shallow slow earthquake
3. 学会等名 International Joint Workshop on Slow Earthquake 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Yabe, and T. Suzuki
2. 発表標題 Coexistence of slow earthquakes and megathrust earthquakes on the shallow plate boundary fault: Numerical simulation study on fault ruptures along the fault rock samples acquired by ocean drilling science
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Yabe, M. Nakano, T. Tonegawa, S. Baba, and S. Takemura
2. 発表標題 Seismic energy estimation for shallow tremors in the Nankai trough and Japan trench
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

「論文ナビ」での著者（矢部優）による解説記事 https://rnavi.org/59502/

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	武村 俊介 (Takemura Shunsuke)	東京大学・地震研究所・助教 (12601)	
研究協力者	中野 優 (Nakano Masaru)	海洋研究開発機構・海域地震火山部門・副主任研究員 (82706)	
研究協力者	鈴木 岳人 (Suzuki Takehito)	青山学院大学・理工学部・助教 (32601)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	濱田 洋平 (Hamada Yohei)	海洋研究開発機構・高知コア研究所・副主任研究員 (82706)	
研究協力者	利根川 貴志 (Tonegawa Takashi)	海洋研究開発機構・海域地震火山部門・副主任研究員 (82706)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関