

令和 2 年 5 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K05537

研究課題名(和文) ミッシングな誘発スローイベント検出によるプレート境界に関する物理状態の解明

研究課題名(英文) Detection of missing triggered slow events toward understanding physical characteristics of the plate interface

研究代表者

宮澤 理稔 (Miyazawa, Masatoshi)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号：80402931

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：南海トラフの沈み込み帯で発生する超低周波地震が、大地震の表面波によって誘発される現象を調査した。これまでに他の種類のスロー地震の誘発現象は、単純な信号処理によって発見されている。本研究では、誘発されたかも知れない超低周波地震のシグナルを検出し、その震源パラメータを推定するためのベイズ手法を考案した。この手法を四国西部で記録された2016年紀伊半島沖の地震(M5.9)の地震波形記録に用いた。6個の超低周波地震(M3.4-4.3)が深部低周波地震の発生域近傍に発生していたと推定され、深部低周波地震に比べて応力擾乱に敏感であると考えられる。本研究は超低周波地震の動的誘発に掛かる初めての発見である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

沈み込み帯で発生するスローイベントのうち、超低周波地震だけが動的誘発されていることが見つかっていなかった。本研究により、超低周波地震も他のスローイベントと同様に動的に直接誘発される事が確認され、プレートの沈み込み帯におけるプレート境界の特徴についての理解が進み、巨大地震発生に掛かるメカニズムの解明に貢献すると考えられる。

研究成果の概要(英文)：Remote triggering of very low-frequency (VLF) earthquakes in the Nankai subduction zone by surface waves from a moderate to large, distant earthquake was examined using a new approach. The triggering of another type of tectonic slow earthquake/tremor and slow slip was previously discovered using simple signal processing techniques. A Bayesian technique was developed to detect seismic signals and estimate the maximum likelihood source parameters of VLF earthquakes that might have been remotely triggered. This approach was applied to seismograms of the 2016 Mw 5.9 off-Kii Peninsula earthquake, recorded in western Shikoku. Six VLF earthquakes with magnitudes from 3.4 to 4.3 likely occurred in the seismogenic regions of ambient low-frequency earthquakes/tremors (LFEs), and were likely triggered by the arrivals of high-amplitude surface waves. These VLF earthquakes were more sensitive to stress changes than LFEs. This is the first reported example of dynamic triggering of VLF earthquakes.

研究分野：地震学

キーワード：超低周波地震 動的誘発 ベイズ推定 粒子フィルタ 2016年紀伊半島沖(三重県沖)の地震

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

21世紀に入り、世界のプレートの沈み込み帯のいくつかでは、「スローイベント」と呼ばれる通常の地震と比べて規模(マグニチュード)が同程度であっても時間スケールの長い、ゆっくりとした断層滑りが続々と発見されてきた。プレート間地震発生域より深いところでは深部低周波地震・微動(非火山性微動)、深部超低周波地震、スロースリップ、浅いところでは浅部超低周波地震等があり、深さに対して多様性のある現象である。それらの現象の多くは、プレート間巨大地震の発生が危惧されている領域の付近で起きているため、その発生メカニズム解明と役割の理解が重要であり、世界中で積極的に研究が行われている。しかしながらスローイベントの信号は微弱であるために、通常の地震に比べると十分なメカニズム解析が進められていない。

スローイベントは、些細なきっかけで誘発される事が知られている。例えば地震波の通過や地球潮汐といった、時間的に変動する誘発作用(動的トリガリング)が働くことによっても発生する。このような動的トリガリングについて、かつてはそのような小さな力の変化で地震等のイベントが誘発されること自体懐疑的であったが、この十数年で観測事例が多く報告され、地震学における一分野を形成している。この様な、大地震の地震波による動的トリガリングを利用すれば、誘発されたイベントがどのような力を受けて発生したかを数秒という短い時間スケールで明らかにすることができ、イベント誘発に直接関与した力学的情報を高時間分解能で調べることができる。更にこの手法は、地震発生メカニズム解明に用いられてきたどの地震学的手法ともアプローチを全く異にしており、これまでの研究では分かり得ない発生メカニズムの情報も得ることができる。

### 2. 研究の目的

スローイベントのなかで、特徴的周期が1秒程度の低周波地震・微動と、特徴的周期が数日から数ヶ月に亘るスロースリップとについては、地震波によって動的に誘発される事がこれまで分かっており、この特徴を調べることでメカニズム解明に役立てられている。一方、特徴的周期が数十秒の超低周波地震についても、地震波の通過中に動的に誘発される可能性が高いが、まだ観測に至っておらずミッシング・イベントである。観測に至らない理由は、それらの特徴的周期が誘発する地震波の周期帯と重なっていること、さらに超低周波地震の振幅が極めて小さいことにある。これまでの地震学的な解析手法のみに頼っているのは、これ以上のメカニズム解明の進展が期待できない。そこで本研究では、既存の観測網の記録を使って超低周波地震が動的トリガリングを受けて発生することを検出し、その上で動的トリガリングを利用して発生メカニズムを明らかにする。これによりプレート境界の力学的物理状態を拘束すると共に、スローイベントがそこに存在する理由を見いだす。

### 3. 研究の方法

観測記録から、ほぼ同じ周期帯の波である「遠地震の表面波」と「超低周波地震からの波」を分離する手法開発を行う。低周波地震の振幅は、到来した表面波の振幅に比べて4桁以上も小さいことがあるため、単純な信号処理ではこれらを分離することはできない。しかし個別に発生する超低周波地震は、そのシグナルが極微弱であっても観測されるレベルがあるため、もし超低周波地震が誘発されているのであれば分離する波の到来方向が平行でない限り、これらは分離することが可能であり、原理的に誘発された超低周波地震も検出可能である。

このためにベイズ推定に基づき、観測波形に対する時空間フィルタの開発を行う。波の到来に関して事前情報を与え、複数の観測点における観測波形を予測し(ベイズ推定)、「遠地震の表面波」と「超低周波地震からの波」を分離する手法である。特に本研究では、条件付分布に寄らないモンテカルロ・フィルタ(粒子フィルタ)を用いることで汎用性を高め、低周波地震のような極微弱なシグナルでも分離することを目指す。開発された手法について、既存の観測網に即した「超低周波地震からの波」の検出能力と精度に関する数値実験を行う。なお観測点の条件として、鉛直アレイのボアホール記録が存在している必要がある。誘発する表面波の予測は地中観測点により、また超低周波地震の波形予測は大型計算機を通じた波動場シミュレーションによる。

この手法を、2016年紀伊半島沖の地震(Mw5.9)の記録のうち、低周波地震がこれまで観測された事のある四国西部の記録に対して適用する。この地震を用いる理由として、本手法を用いる都合上、用いるべき記録が地表と地中に観測点ペアのあるKiK-net(防災学技術研究所 強震観測網)の記録である必要があり、またKiK-netは元々強震記録網であるため、そもそも低振幅の遠地震が記録として残っていないという制約があるためである。従って、この地震が本解析に適した唯一の地震であると考えられる。

### 4. 研究成果

#### (1) 超低周波地震の誘発現象検出のためのボアホール観測網に即したプログラムコードの開発

本研究における解析に必要なプログラムのコードを作成し、数値実験を通じてその精度を検証した。周期約20秒程度の波に、その1/1,000以下の振幅でほぼ同様の周期を持つ超低周波地震が同時に観測されている記録を人工的に作り出した。更にノイズを加えて、この人工的な記録から超低周波地震を尤度関数の評価により検出した。この結果、ノイズのレベルにも寄るが、表面波の振幅の1/10,000程度まで小さな振幅を持つ超低周波地震を検出することに成功した。これは予測される超低周波地震の振幅レベルにほぼ一致する。

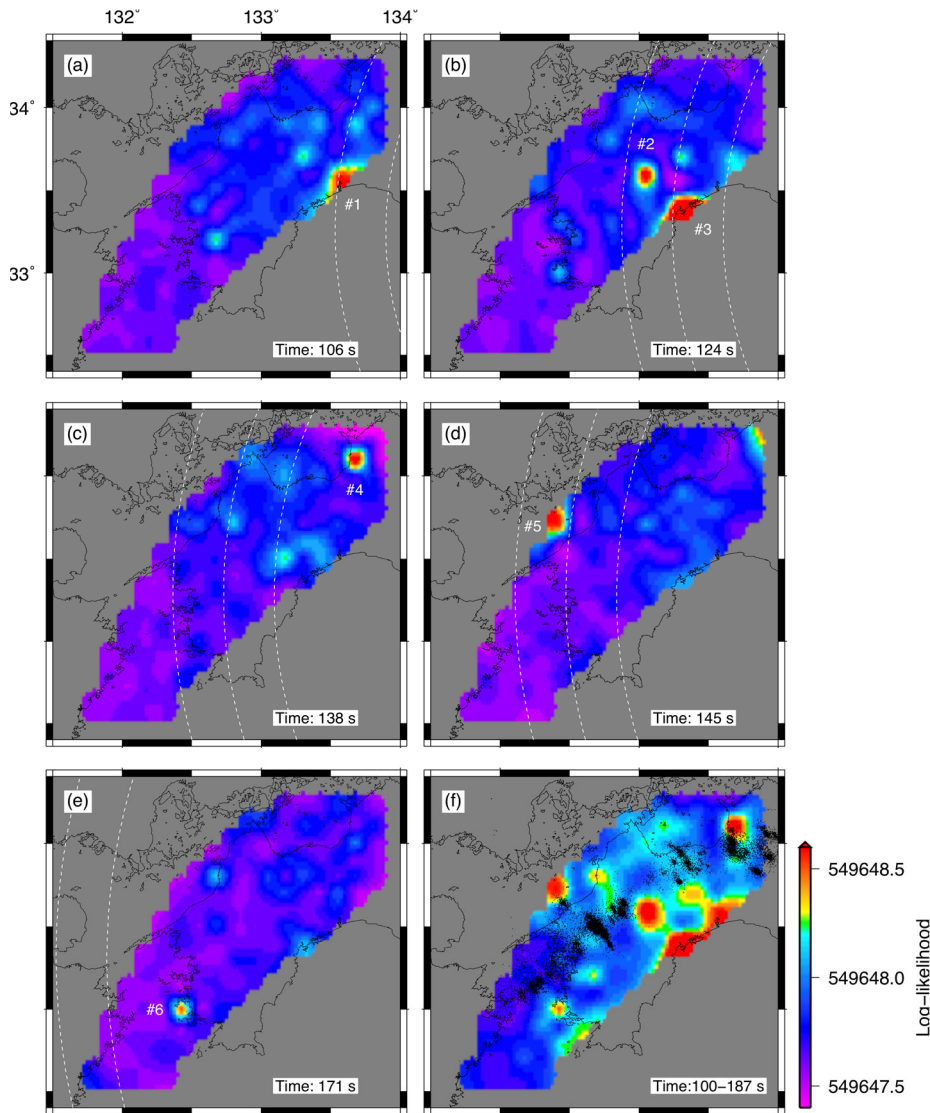


図1. 2016年紀伊半島沖（三重県沖）の地震によって誘発された超低周波微動の検出の様子。暖色系程、尤度が大きく、超低周波地震が発生した可能性が高い（#印と数字の物）。(a)-(e)は地震発生からの各時間帯におけるスナップショット。白点線は顕著な表面波のおおよその通過位置を示している。(f)は解析した全時間帯での最大対数尤度の分布を示す。

## (2) 2016年紀伊半島沖（三重県沖）の地震記録への適用

2016年紀伊半島沖の地震を記録したKiK-net記録に対して、本解析に適用できるように前処理を行った。具体的には超低周波地震のシグナルを含むと考えられる周期帯のフィルタを施し、更に地中・地表記録の方位回転の補正を行った。両者の記録の相関を評価し、相応の差がない場合にのみ解析記録として用いた。また、地表・地中観測点で予測される超低周波地震の波形について、大型計算機を用いて行ってもそれらの到来時間の差については空間分解能の問題から適切に与えることが難しい。超低周波地震に顕著に含まれるS波の到来を評価すれば良いため、2016年紀伊半島沖の地震のS波について、地表と地中の記録に対し地震波干渉法を適用することで二点間を伝播する波の時間差を1/100秒の精度で求めて、これを解析に用いた。

以上のような前処理を行った記録に対して、開発した手法で解析を行った。図1は、2016年紀伊半島沖の地震発生からの各時刻における、超低周波地震の発生の可能性を地図上に対数尤度として表している。各図において、暖色系ほどその場所その時刻において、超低周波地震が発生した可能性が高いことを示している。#印は発生したと判断した箇所である。マグニチュードが3.4から4.3の超低周波地震が合計6個発生していた可能性がある。白い弧は上下成分において速度振幅の大きな表面波の到来を示している。超低周波地震は、大振幅の表面波通過時に誘発されていることが分かる。またそれらの位置は、低周波地震が発生している場所とは相補的な関係にあり、低周波地震発生域に近接した浅い、或いは深い場所に認められた。特にこれまで（超）低周波地震が発生すると考えられている領域よりも浅い所にも尤度の高い場所が認められた。また検出した波形を観測記録と比較したところ、その振幅は約 $1\mu\text{m/s}$ であり、表面波の振幅約 $1\text{mm/s}$ の1/1,000程度であった（図2）。本手法では、この程度までの振幅であれば検出可能な

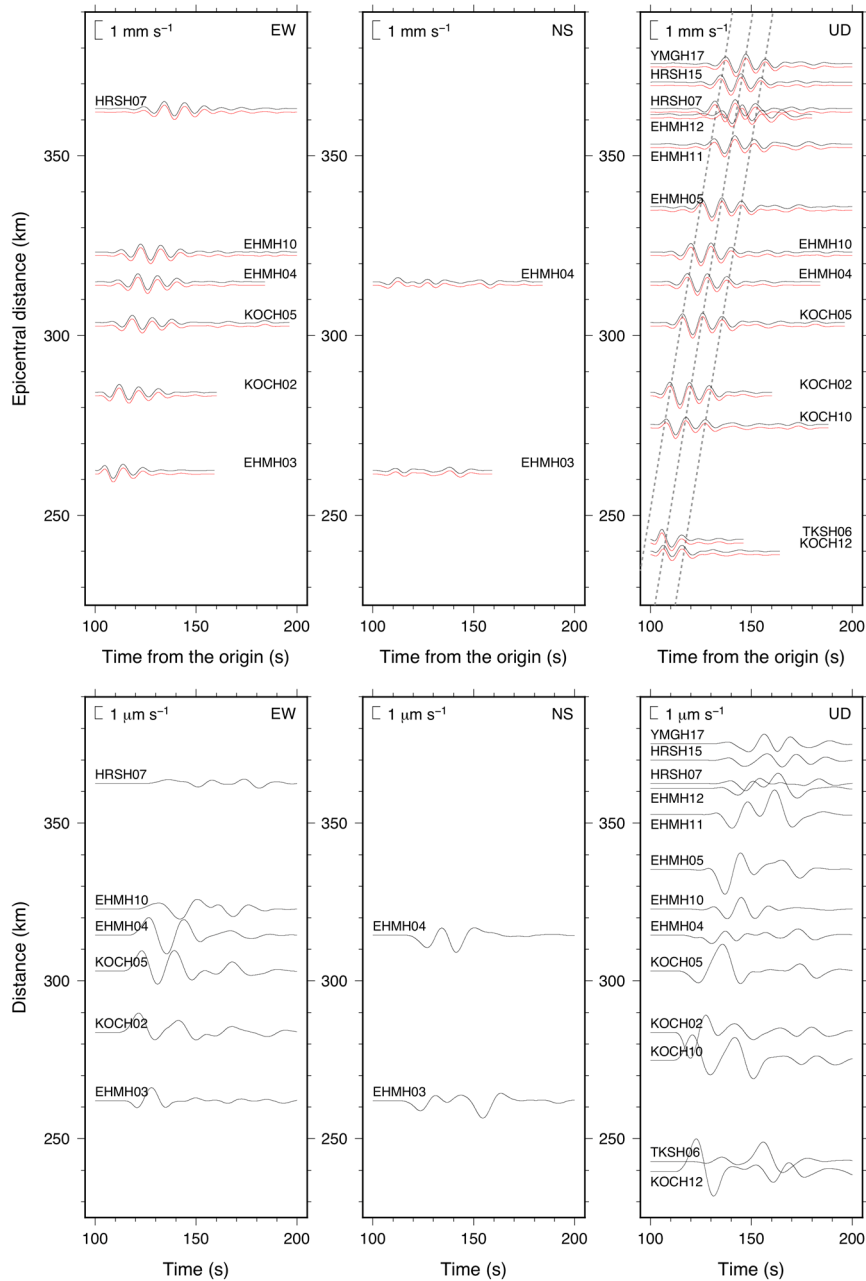


図 2. (上) 四国で観測された 2016 年紀伊半島沖の地震。前処理後の波形の東西(EW)、南北(NS)、上下(UD)成分を震央距離順に並べている。黒色は地表観測、赤色は地中観測の波形を示す。UD 成分の点線は、大振幅の波形の到来を示しており、図 1 にその広がりを見せている。(下) 検出された超低周波地震からのシグナル。その振幅は誘発した表面波の 1/1,000 しかないことが分かる。

大きさであることを確認しているが、図 2 上の観測波形と検出した下のシグナルを比べると、いかにシグナルが小さく、既存の手法では検出することが困難であることが明らかである。

以上の様に、この研究では超低周波地震が地震波によって動的に直接誘発されたことを世界で初めて発見し、見つけていなかった誘発スロー地震現象の穴を埋めることが出来た。このために、粒子フィルタ、大型計算機による波動場シミュレーション、地震波干渉法等の手法を効果的に組み合わせた新たな解析手法を開発して、データの解析に適用した。

### (3) メキシコの沈み込み帯における誘発微動の研究

この他にメキシコのプレート沈み込み帯における誘発微動の研究も行った。2017 年に発生した M8.2 のテワンテペク地震に伴い、北西に約 1,000km 以上離れたメキシコ中部のハリスコ州で低周波微動が誘発されたことを発見した。この地域における、表面波による直接的な微動誘発現象の初めての発見事例である。この誘発過程を調べるために全波動場シミュレーションを通じプレート境界面上での波動伝播に伴う動的な変化を調べたところ、ハリスコ州の微動発生域では周囲に比べプレート沈み込み帯の形状により効果的にひずみ変化が大きくなっていることが分かった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Miyazawa Masatoshi	4. 巻 217
2. 論文標題 Bayesian approach for detecting dynamically triggered very low-frequency earthquakes in the Nankai subduction zone and application to the 2016 Mw 5.9 off-Kii Peninsula earthquake, Japan	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	6. 最初と最後の頁 1123 ~ 1140
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/gji/ggz073	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 Miyazawa Masatoshi	4. 巻 218
2. 論文標題 Erratum: Bayesian approach for detecting dynamically triggered very low-frequency earthquakes in the Nankai subduction zone and application to the 2016 Mw 5.9 off-Kii Peninsula earthquake, Japan	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	6. 最初と最後の頁 977 ~ 977
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/gji/ggz218	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5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Miyazawa, M. & Ohta, K.
2. 発表標題 Very low-frequency earthquakes in western Shikoku remotely triggered by the 2016 Mw5.9 off-Kii Peninsula earthquake
3. 学会等名 JpGU 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Miyazawa, M & Santoyo M.A.
2. 発表標題 Remotely triggered tectonic tremor at Jalisco in the Mexican subduction zone by the 2017 Mw8.2 Tehuantepec earthquake
3. 学会等名 RAUGM 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Miyazawa, M & Santoyo M.A.
2. 発表標題 Characteristics of tectonic tremors in the northern Mexican subduction zone remotely triggered by the 2017 Mw8.2 Tehuantepec earthquake
3. 学会等名 JpGU 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮澤理稔
2. 発表標題 粒子フィルタによるボアホール地震記録を用いた低周波微動検出の試み
3. 学会等名 平成29年度京都大学防災研究所研究発表講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮澤理稔
2. 発表標題 粒子フィルタによる低周波微動検出の試み
3. 学会等名 平成28年度京都大学防災研究所研究発表講演会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------	---------------------------	-----------------------	----