

平成30年4月24日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2017

課題番号：25287109

研究課題名(和文) 海底圧力計観測とモデルシミュレーションによる房総沖スロースリップの解明

研究課題名(英文) Study on the Boso slow slip events through observation using ocean bottom pressure gauges and model simulation

研究代表者

佐藤 利典 (SATO, Toshinori)

千葉大学・大学院理学研究院・教授

研究者番号：70222015

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円

研究成果の概要(和文)：房総沖スロースリップ(SSE)を解明するために以下を行った。観測研究では、すべり分布を明らかにするため海底圧力計を用いた観測を行った。2014年1月ごろSSEが発生しその変動を捉えることに成功した。この際、圧力計データをパラメトリックモデルで解析する方法を開発した。シミュレーション研究では、その基礎となる房総沖の構造の決定と房総沖SSEを再現するモデルの開発を行った。構造では、房総沖のフィリピン海プレート上面の形状が面的に求まった。また、SSE領域から強い反射波を確認した。房総沖SSEの再現については、2011年まではほぼ再現できたが2014年については再現できず、今後の課題となった。

研究成果の概要(英文)：We conducted the following studies to reveal the Boso slow slip events (SSEs). We observed crustal movements using ocean bottom pressure gauges to estimate slip distribution of the Boso SSE, and obtained them successfully caused by the 2014 Boso SSE. We developed an analysis method using a parametric model for data of pressure gauges. We conducted analyses on seismic structure of off the Boso area and simulation studies that reproduce a series of the Boso SSEs. We obtained a configuration of the upper surface of the Philippine Sea plate at off the Boso area. We found strong reflections from the upper surface around the Boso SSE region. We could make a simulation model which reproduced the Boso SSEs before 2011, but could not reproduce the 2014 SSE. To make a simulation model reproducing all of the Boso SSEs is an issue to be addressed to the future.

研究分野：地震学

キーワード：スロースリップ 海底圧力計 シミュレーション 房総沖 海底地殻変動 プレート境界構造 反射波
強度分布

1. 研究開始当初の背景

日本列島が位置するプレートの沈み込み帯では、繰り返し巨大地震が発生している。この地震による災害を軽減するためには、地震発生過程を解明し、地殻活動のシミュレーションを通じて、地震発生予測を行うことが不可欠である。このためには、摩擦の構成則等を取り入れた地震発生の物理モデルを構築することが重要となる。1980年代以降、多くの研究者がモデルを提案し(e.g. Tse and Rice, JGR, 1986; Stuart, Pageoph, 1988; Rice, JGR, 1993; Hashimoto and Matsu'ura, Pageoph, 2002)、現在では、地震は以下の4つの過程を繰り返して発生すると認識されている(Matsu'ura, AGU Fall Meeting, NG52A-09, 2002)。

(1) プレートの相対運動によるテクトニック応力の蓄積
 (2) 震源核(破壊核)の準静的成長
 (3) 動的破壊の伝播
 (4) 応力の再配分と断層強度の回復

以上の過程を記述する基礎方程式についても、すべり速度・状態依存の摩擦構成則(e.g., Dieterich, JGR, 1979; Ruina, JGR, 1983)やすべり・時間依存の摩擦構成則(e.g., Ohnaka et al., Tectonophysics, 1987; Aochi and Matsu'ura, Pageoph, 2002)など様々なものが提案されている。これらのモデル、基礎方程式の大きな問題点は、それらは主に実験室での結果を用いたものであるということである。これらのモデルの良し悪しを評価し、地震の予測を行うためには、実際の地震にモデルを適用し、予測をし、実際とのずれからモデルを修正するという作業を繰り返す必要がある。この作業を普通の地震に当てはめた場合、通常繰り返し間隔が100年以上なので、数百年以上の時間がかかることになる。

GNSSによる地殻変動観測が行われて以降、プレート境界では、振動を伴わずゆっくりすべるスロースリップ地震(SSE)が発生していることが知られてきた(reviewとして Schwartz and Rokosky, Rev. Geophys, 2007)。房総沖で発見されたSSE(Ozawa et al. GRL, 2003, Ozawa et al. EPS, 2007)は、10日ほどかけてゆっくりすべり、繰り返し間隔が4-7年で、すべり量は最大約20cm、マグニチュードはMw6.6程度である。このSSEは、普通の地震のような地震時の振動を引き起こさないが、地震間でのカップリング率は100%に近く、これは応力蓄積が普通の地震と同様である可能性を示している。SSE発生中、周辺に微小地震も発生し、応力の再配分も起きている。また、このSSEが起こっている深さは10-20kmでこれも普通の地震の起こる深さである。これらのことから、我々は、房総沖SSEはこれまでの地震発生のモデルを用いて解析できると考えている。実際にモデルを使って房総沖のSSEのシミュレーションが進められ、繰り返し間隔やすべり量などおおまかな再現に成功している(芝崎 他, JpGU SSS023-03, 2010)。このことを逆から見ると、房総沖のSSEを用いて地震

発生の物理モデルの検証を行うことができる。房総沖のSSEが他のSSEと比べて有利な点は以下の点である。

(1) 震源核の準静的成長のような小さなすべり(本震の1/10-1/20と言われる)でも観測可能なほど十分に規模が大きい。他の地域では小さな規模のSSEが多い。

(2) 普通の地震と同じ深さ(10-20km、地震発生領域)で発生している。よって普通の地震で用いる摩擦構成則やstiffnessが使える。これは構築したモデルをそのまま普通の地震に応用できることになる。

(3) 発生間隔が4-7年であり、2-3サイクル観測するのに15年ほどしかかからない。

このSSEを用いた研究が実現できれば、モデルの検証、修正、確立が15年程度で出来ることになり、地震予測の実現に大きく近づく。現在この研究を行うべく、統合国際深海掘削計画(IODP)に、房総沖SSE領域に掘削孔を掘り、そこに傾斜計、広帯域地震計等を設置して長期観測を行う計画を出している。

2. 研究の目的

本研究は、上記の「房総沖のSSEを用いて地震発生の物理モデルの検証、修正、確立を行う」という研究の第1歩として以下の研究を行う。

(1) 海底圧力計を用いたスロースリップのすべり分布の推定

上記の研究を行うためには、海底傾斜計などを設置して震源核の準静的成長などの小さな変動を捉える必要がある。海底測器の最適配置をするには、まず、房総沖SSEのすべり分布を正確に捉える必要がある。現在は陸上観測(GNSSと傾斜)のみによりすべりを推定しているため、海側(すべりの南東側)の分布がよくわかっていない。そのため、本研究では、SSEのすべり領域に海底の上下変動を捉えることのできる海底圧力計を設置して長期観測を実施し、SSEのすべり分布を求める。また、本観測は、長期間同じ場所で観測が行われることから、海底圧力計の精度向上のために必要な均質なデータが得られることになる。これを用いて精度向上手法の開発も行う。

(2) 房総沖スロースリップを再現するための、データ同化とシミュレーションモデルの開発

地震発生の物理モデルの検証を行うためには、様々なモデルを用いて上記観測により求められたすべり分布を再現するかどうかを調べなければならない。このためには、同じ構造(プレート境界形状も含む)、同じ媒質の性質(弾性や粘弾性、延性など)の下で、摩擦の構成則やそのパラメータなどが異なるモデルを用いて調べる必要がある。また、得られたデータから、個々のモデルに必要なパラメータを推定するデータ同化も行わなければならない。そのためのシミュレーション手法やデータ同化手法の開発を行う。

3. 研究の方法

(1) 海底圧力計を用いたスロースリップのすべり分布の推定

房総沖 SSE は陸域から海域にかけてすべり領域があるため、海底での連続した地殻変動観測が必要となる。海底圧力計は上下変動を連続して観測でき、その精度は 1 cm ほどであるといわれていることから、本研究の観測機器として製作し使用した。本研究ではすべり領域を把握するため、主にすべりの南東側に海底圧力計を配置して観測を行った。

海底圧力計によって得られたデータの解析手法は、まだ確立されていないため、解析手法についても研究を進めた。従来は、複数の観測点の差分を取る方法などが行われていたが、それに代わる方法について研究を行った。

(2) 房総沖スロースリップを再現するための、データ同化とシミュレーションモデルの開発

地震発生の物理モデルの検証を行うための基礎として、房総沖のプレート境界を含めた構造を確立することが必要である。房総沖は地震が少なく、海底の常時観測点もほとんどないので、自然地震を用いた研究では構造が決まっていなかった。本研究では、房総沖で行った人工地震観測データを解析し、詳細な構造を求めるとともに、既存の研究を精査し房総沖のプレート境界の決定を行った。

シミュレーションモデルの開発では、これまですべり速度・状態依存の摩擦構成則を用いて房総沖 SSE の基本的な性質（発生間隔やすべり量など）の再現を試みている（芝崎 他、JpGU SSS023-03, 2010）ので、このモデルを用いて研究を進めた。房総沖 SSE は発生間隔にゆらぎがあることが知られているので、この原因を探る研究を進め、実際の SSE を再現するモデルの確立を目指した。

4. 研究成果

(1) 海底圧力計を用いたスロースリップのすべり分布の推定

房総沖 SSE のすべり領域において、海底圧力計 (OBP) 観測を実施した。2-4 台の OBP を 1-2 年間隔で設置・回収を繰り返すことにより、連続した観測を行った。この観測期間中、2013 年 12 月から 2014 年 1 月にかけて房総沖 SSE が発生し、房総沖 SSE 発生時の海底地殻変動の観測に成功した (図 1)。発生時には 3 台の OBP が設置されていたが、そのうちの 2 台で良好なデータが得られた。

得られたデータから、SSE による変動を抽出する解析を行った。解析では、まず、潮汐の除去において 2 種類の潮汐推定プログラムを比較し、より良好な推定プログラムを採用した。次に従来行われていた、海洋変動を取り除くための 2 観測点の差分を取る方法を試みたが、有意な変動は見られなかった。

これに対して、海洋変動に囚われず、陸上 GNSS などで行われている関数を当てはめてフィッティングする方法 (パラメトリックモデルを用いる方法) を、OBP データに初めて適用してみた。パラメトリックモデルの関数としては、下記のような線形関数 (圧力計の経年変化と地殻の長期変動に対応)、1 年と半年の周期関数 (季節変動に対応)、対数関数 (2011 年東北地震による余効変動に対応)、ステップ関数 (房総沖 SSE の変動に対応) を組み合わせたものを用いた。

$$d(t) = at + b + s_1 \sin(\omega t) + c_1 \cos(\omega t) + s_2 \sin(2\omega t) + c_2 \cos(2\omega t) + p_1 \ln(1 + (t + t_0)/P_2) + gH(t - t_1)$$

(記号の詳細については、「5. 主な発表論文等」の②参照)

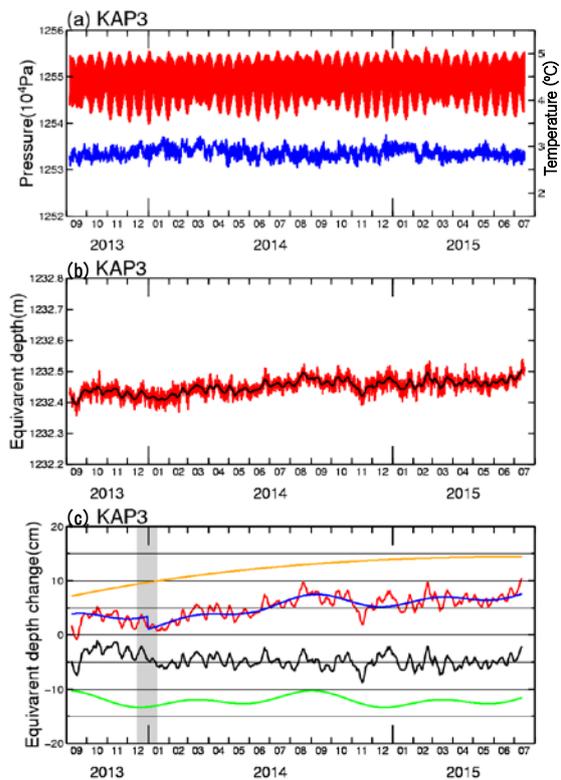


図 1. 観測された OBP データとその解析結果 (観測点 KAP3。位置は図 2 参照)。(a) 圧力値 (赤線) と温度 (青線)。横軸は時間。圧力値に潮汐成分があることがわかる。(b) 潮汐成分を除去したもの (赤線) とその 7 日移動平均 (黒線)。(c) パラメトリックモデルのフィッティング結果 (青線)。赤線は 7 日移動平均、オレンジ線は線形 + 対数関数成分、緑線は周期関数成分を示す。黒線は、7 日移動平均から線形、対数、周期関数成分を除去したもの。グレー部分は房総沖 SSE 発生期間を示す。この結果から SSE 発生時にギャップがあることがわかる。

フィッティングの結果、残差 (ノイズと季節変動以外の海洋変動) は約 10 mm となり、パラメトリックモデルを用いることにより、

10 mm の精度を出すことに成功した。2 観測点からは、SSE 領域に近い KAP3 観測点で 23.6 mm の隆起の変動が、領域から遠い BOSO2 観測点で 0.9 mm の隆起の変動が推定された。観測精度から KAP3 での隆起は有意と認められ、OBP で SSE による地殻変動を捉えることに成功した (図 1)。これは、観測精度も適切に評価したものとしては世界初となる。

この結果を用いて、2013 年 12 月から 2014 年 1 月に発生した房総沖 SSE のすべり分布の推定を行った。データは、上記 2 観測点と陸上の GNSS 観測点のデータを用いた。陸上 GNSS データには、OBP と同じく上記のパラメトリックモデルをフィッティングし、SSE 時の変動を求めた。推定方法は、すべりの滑らかさとすべり方向に拘束を与え、その拘束の強さを ABIC を用いて客観的に求める方法を用いた。推定の結果、すべり領域の南東側での推定精度が上がり、南東側がどこまですべっているかが捉えられた (図 2)。

以上の成果は、雑誌論文 1 編、学会発表 4 編として発表した。

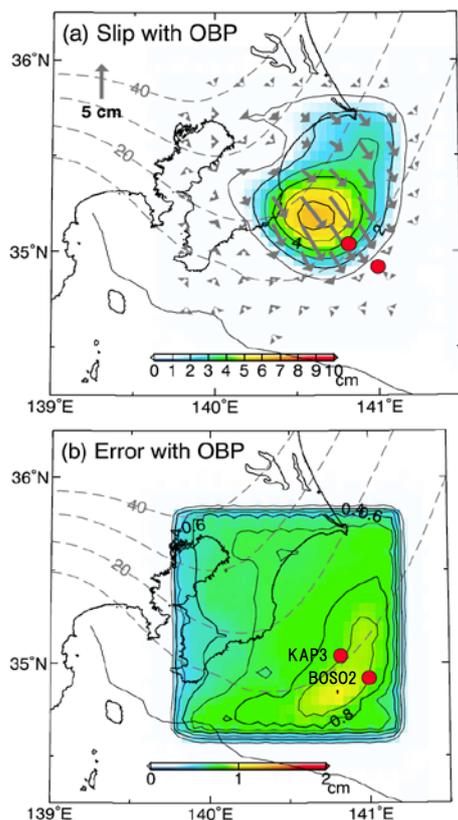


図 2. OBP と陸上 GNSS のデータから推定した 2013 年 12 月から 2014 年 1 月の房総沖 SSE のすべり分布。(a)すべり分布。赤点は OBP 観測点。(b)推定誤差。

(2) 房総沖スロースリップを再現するための、データ同化とシミュレーションモデルの開発

房総沖のプレート境界を含めた構造を確立するために、2009 年に行われた人工地震観測データの解析を進めた。この観測では、4 本の

測線があるが、まずは 1 番長い東西測線の解析を進めた。解析では各地震計から初動を読み取り、Progressive model development method (Sato and Kennett, GJI, 2000)を用いて初期モデルを作り、First arrival seismic tomography (Zelt and Barton, JGR, 1998)を用いて 2 次元 P 波速度構造を求めた。

解析の結果、西から東にかけて緩やかに下がる構造がみられた。また、西端に速度の速い凸状のものがみられることがわかった (図 3)。従来の研究により、フィリピン海プレート上面付近の速度は、約 5.0 km/s であることが知られているので、今回の測線下のフィリピン海プレート上面は、図中の破線であることがわかった。西端の高まりは沈み込んだ海山であることも推定された。

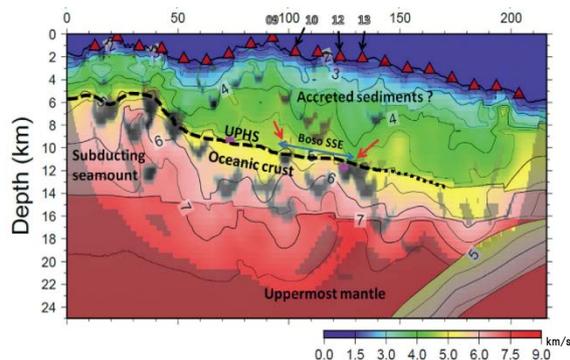


図 3. 房総沖の地震波速度構造。測線は図 4 参照。三角は海底地震計の位置を示す。破線は推定したフィリピン海プレート上面を示す。周辺の薄くグレーがかかっている部分は波線が通っていない部分。青矢印は房総沖 SSE のすべり領域。図中の下に凸のグレー部分は、Travel time mapping 法による反射の候補点。

この結果と既存の研究から、房総沖のフィリピン海プレート上面の形状を推定した (図 4)。上面の 10 km の等深線はほぼ相模トラフに沿う形となり、15 km 等深線は東西、20 km 等深線は西南西-東北東を向いている。これはフィリピン海プレート上面は沖合にいくほど緩やかに沈み込んでいることを示している。

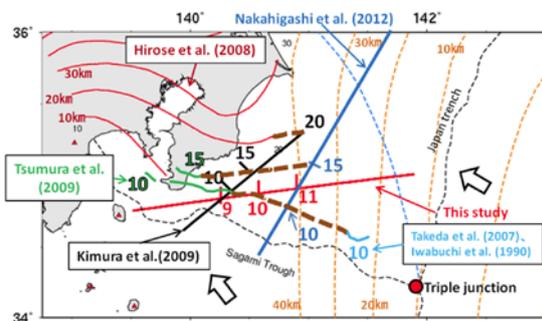


図 4. 推定したフィリピン海プレート上面 (茶色破線)。赤直線は本研究で解析した測線を示す。既存研究の上面位置は、その出典とともに示している (出典の詳細は、「5. 主な発表論文等」の①参照)。

本解析を行う際、波形データに顕著な後続波がみられる観測点が複数存在することに気が付いた。顕著な後続波は反射波と推定された。反射の強弱は反射面の性質を知る手掛かりであり、摩擦法則の推定にも重要である。そのため、当初の目的には明示していなかったが、この顕著な後続波の反射点やその成因についても研究を進めた。

反射点位置は、Travel time mapping 法 (Fujie et al. PEPI, 2006) を用いて顕著な後続波を構造断面上に投影することで推定した。強い反射を出す構造は、E3D (Larsen and Grieger, SEG Conf. Proc, 1998) を用いて波形計算を行い推定した。

その結果、プレート上面から強い反射波が出ているのは、房総沖 SSE 領域と西端の沈み込んだ海山付近であることがわかった(図3)。海山からの反射波は求めた速度構造のコントラストから説明できるが、SSE からの反射波は求めた速度構造からは説明できない。そのためプレート境界に薄い低速の物質を置いて波形計算をしたところ、周囲より 1 km/s ほど速度が遅い物質があれば説明できることがわかった。この結果は房総沖 SSE 領域の摩擦特性を推定する上で、重要な知見を与えると考えられる。

以上に引き続き、残りの 3 測線も含めた全測線による 3 次元の構造解析の研究を進めた。特に顕著な反射波の面的分布を求める研究を進めた。このため、従来 2 次元断面にのみ用いられていた travel time mapping 法を 3 次元に拡張した。その結果、フィリピン海プレート上面からの強い反射が房総沖 SSE 付近とその東側の沖合にあることがわかった。スロースリップ付近では、構造に大きな変化がないことから、上記同様、薄い遅い物質がプレート境界にあることが示唆された。また、東側の沖合の反射は、この付近に速い構造が認められ、この影響で強い反射が出ていることがわかった。この 3 次元の結果は、千葉大学大学院の河野昭博の博士論文としてまとめられ受理された(「5. 主な発表論文等」の[その他]参照)。

房総沖の構造については、上記以外に自然地震を用いた解析(「5. 主な発表論文等」の[学会発表]③等)も行っていて、フィリピン海プレート上面の形状等、上記の研究と矛盾ない結果を得ている。

以上の成果は、雑誌論文 1 編、学会発表 11 編として発表した。

シミュレーションモデルの開発では、すべり速度・状態依存の摩擦構成則を用いたモデル(芝崎 他, JpGU SSS023-03, 2010) を使って、房総沖 SSE が再現できるかについて研究を進めた。まず、Ozawa et al. GRL, (2003) や長谷川・他, JpGU SSS025-04, (2011) から、千葉県東方沖地震発生前約 20 年間の房総沖 SSE の平均発生間隔を 72 ヶ月とし、それに合わせて房総沖 SSE をモデル化する。そして千葉県東方沖地震、三宅島の火山

活動、東北地方太平洋沖地震による房総沖周辺の応力場(法線応力、せん断応力)の変化を計算し、房総沖 SSE のモデルに組み込んで計算結果と観測結果が合うかどうかを検証した。せん断応力の変化量は、千葉県東方沖地震ではすべりを抑制する方向に最大約 0.1MPa、東北沖地震ではすべりを促進する方向に最大約 0.03MPa となった。また、モデルのパラメータスタディから、主に有効圧の分布によって SSE の発生間隔が変化することがわかったので、様々な分布の有効圧を用いて房総沖 SSE の再現を試みた。

1983 年から 2011 年までの 6 回のイベントと比較すると、有効圧を SSE 発生領域の浅部で約 3MPa、深部で約 7MPa と設定した場合に、房総沖 SSE の発生間隔が、1 回(2002~2007 年の間)を除き、観測された発生間隔とおおよそ一致した(図 5)。各イベントのモーメントマグニチュードは 6.2~6.4 であった。千葉県東方沖地震発生後のイベントは前回から約 91 ヶ月後に発生し、また東北沖地震発生後のイベントは前回から約 55 ヶ月後に発生した。どちらも実際の観測結果とのずれは 6 ヶ月以内に収まった。さらに、90 年と 96 年のイベントの間隔も計算結果と観測がほぼ一致している。計算から得られた SSE の応力降下量は 0.3~0.4MPa であり、Hirose et al. PNAS, (2012) の値とほぼ一致した。外部イベントによるせん断応力の変化は応力降下量の 10~30% にあたり、無視できない量である。

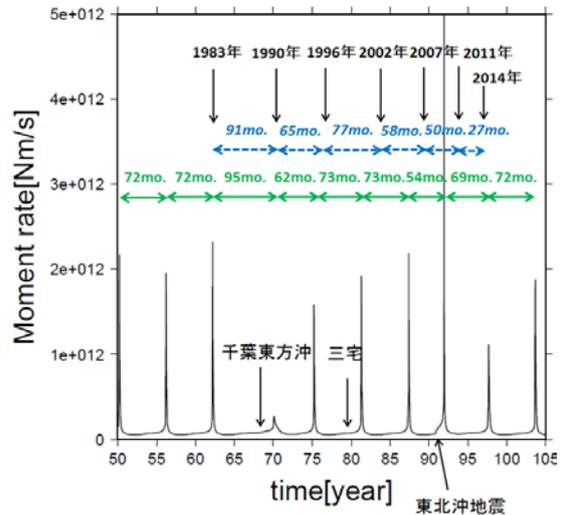


図 5. 房総沖 SSE 発生間隔のシミュレーションとの比較。青が実際の SSE の発生間隔、緑がシミュレーションから得られた発生間隔。縦軸はすべりのモーメントレートを示す。線が立ち上がった時に SSE が発生していることになる。

2011 年までのイベントに対しては、ほぼ再現できたが、2014 年のイベントについては、その発生間隔が 27 か月と短く、シミュレーションでは 69 か月と 2 倍以上の間隔となり大きく異なってしまった。このような間隔の大幅な短縮を実現するためには、2011 年東北地

震以上の促進要因が必要であるが、その要因を突き止めることはできなかった。これについては、今後の課題としたい。

以上の成果は、学会発表 1 編として発表した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Akihiro Kono, Toshinori Sato, Masanao Shinohara, Kimihiko Mochizuki, Tomoaki Yamada, Kenji Uehira, Takashi Shinbo, Yuya Machida, Ryota Hino, Ryousuke Azuma, Geometry and spatial variations of seismic reflection intensity of the upper surface of the Philippine Sea plate off the Boso Peninsula, Japan, Tectonophysics, 709, 44-54, doi:10.1016/j.tecto.2017.05.001, 2017.
- ② Toshinori Sato, Seiya Hasegawa, Akihiro Kono, Hajime Shiobara, Takeo Yagi, Tomoaki Yamada, Masanao Shinohara, Norihisa Usui, Detection of vertical motion during a slow-slip event off the Boso Peninsula, Japan, by ocean-bottom pressure gauges, Geophysical Research Letters, 44, doi:10.1002/2017GL072838, 2017.

[学会発表] (計 16 件)

- ① Akihiro Kono, Toshinori Sato, Masanao Shinohara, Kimihiko Mochizuki, Tomoaki Yamada, Kenji Uehira, Takashi Shinbo, Yuya Machida, Ryota Hino, and Ryousuke Azuma, Spatial distribution of reflection intensity of the upper surface of the Philippine Sea plate, near the main slip area of the Boso Slow Slip Events, 2017 AGU Fall Meeting, New Orleans (USA), S41C-0776, 14, December, 2017.
- ② 佐藤利典、長谷川晟也、河野昭博、塩原肇、八木健夫、山田知朗、篠原雅尚、碓氷典久、海底圧力計を用いた房総沖スロースリップ域の上下変動の検出、日本地震学会 2016 年度秋季大会、名古屋国際会議場(名古屋)、S03-16, 10 月 7 日、2016.
- ③ 寺田麻美、佐藤利典、水野真理子、篠原雅尚、望月公廣、山田知朗、植平賢司、眞保敬、小平秀一、町田祐弥、日野亮太、東龍介、村井芳夫、伊藤喜宏、八木原寛、平田賢治、房総沖における自然地震を用いた 3 次元地震波速度構造、日本地球惑星科学連合 2016 年大会、幕張メッセ (千葉)、SSS26-P05、5 月 22 日、2016.
- ④ 河野昭博、佐藤利典、篠原雅尚、望月公廣、山田知朗、植平賢司、眞保敬、町田祐弥、日野亮太、東龍介、房総沖プレート沈み込帯の速度構造と反射波強度分布、日本地震学会 2015 年度秋季大会、神戸国際会議場 (神戸)、S06-11, 10 月 28 日、2015.
- ⑤ 尾形尚樹、佐藤利典、山田知朗、篠原雅尚、海底圧力計 (Paroscientific depth sensor) の傾斜による測定値の変化について、日本地球惑星科学連合 2014 年大会、パシフィコ横浜 (横浜)、STT57-P05、4 月 30 日、

2014.

- ⑥ 山崎 隆史、佐藤 利典、芝崎 文一郎、橋間 昭徳、廣瀬 仁、外部イベントによる応力変化が房総沖スロースリップの発生間隔に与える影響の定量的評価、日本地震学会 2013 年度秋季大会、神奈川県民ホール (横浜)、P1-43, 10 月 7 日、2013.

[その他]

- ① 学位論文 (博士): 河野昭博、Spatial distribution of reflection intensity on the upper surface of the Philippine Sea plate, off the Boso Peninsula, Japan, 2018.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 利典 (SATO, Toshinori)

千葉大学・大学院理学研究院・教授

研究者番号: 70222015

(2) 研究分担者

篠原 雅尚 (SHINOHARA, Masanao)

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号: 90242172

(3) 連携研究者

芝崎 文一郎 (SHIBAZAKI, Bunichiro)

建築研究所・国際地震工学センター・上席
研究員

研究者番号: 20344012

望月 公廣 (MOCHIZUKI, Kimihiko)

東京大学・地震研究所・准教授

研究者番号: 80292861

山田 知朗 (YAMADA, Tomoaki)

東京大学・地震研究所・助教

研究者番号: 40323654

伊藤 久男 (ITO, Hisao)

海洋研究開発機構・地球深部探査センター・
調査役

研究者番号: 10356470

小林 励司 (KOBAYASHI, Reiji)

鹿児島大学・理工学研究科・准教授

研究者番号: 50433066

山本 由弦 (YAMAMOTO, Yuzuru)

海洋研究開発機構・地球内部ダイナミクス
領域・研究員

研究者番号: 10435753