

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：82102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26800240

研究課題名(和文)プレート沈み込み形状を考慮したスロースリップイベントの数値モデリング

研究課題名(英文) Numerical modeling of slow slip events considering the configuration of subducting plate

研究代表者

松澤 孝紀 (Matsuzawa, Takanori)

国立研究開発法人防災科学技術研究所・地震・津波防災研究部門・主任研究員

研究者番号：90500744

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：スロースリップイベントの数値シミュレーションを、実際のプレートの沈み込み形状およびスロー地震の分布に基づいて実施した。本課題における対象領域としては、南海トラフ地域および北米 Cascadia 地域を対象とした。この数値シミュレーションにより、地域毎の短期的スロースリップイベントの分布や繰り返しが生再現され、豊後水道等では長期的スロースリップイベントの発生が再現された。さらに、未だ長期的スロースリップイベントの発生が知られていない紀伊半島や Cascadia においても、大地震発生サイクルの後半にこれらのイベントの発生を予測する結果を得た。また、地球潮汐の影響についても数値シミュレーションを実施した。

研究成果の概要(英文)：We numerically modeled slow slip events considering actual configuration of subducting plate and distribution of slow earthquakes. Target regions in this study are Nankai trough in Japan and Cascadia in North America. Our model reproduced characteristic recurrence and segmentation of slow slip events. Long-term SSEs are also reproduced as observed in Japan. In addition, our model predicts that long-term SSEs occur at later stage in a seismic cycle in both of the Kii region and the Cascadia region, where they have not been reported yet. We also examined the effect of earth tides on slow slip events by numerical simulation.

研究分野：地震学

キーワード：スロースリップイベント 数値シミュレーション 沈み込み帯 スロー地震

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 西南日本のプレート沈み込みに伴う低周波微動の発見(Obara, 2002)以降、世界各地の沈み込み帯において、通常の地震に比べ長い時定数をもつ、低周波微動やスロースリップイベント(以下、SSE)などのゆっくりすべり現象(スロー地震)が世界各地で発見されてきた(例えば、Beroza and Ide, 2011)。現在も、様々な研究により新たな知見が得られている状況である。しかし、これを解釈する物理モデルは未だ明らかでない。巨大地震の想定される領域の周辺で発生する SSE などのゆっくりすべり現象の物理過程は、プレート沈み込み過程の理解において重要であるとともに、巨大地震域への歪集中と地震発生の過程を理解するうえでもきわめて重要である。実際、研究代表者は巨大地震発生域への歪蓄積に伴って SSE の発生間隔が短くなる可能性をすべり速度・状態依存摩擦則に基づく数値モデルから予測している(Matsuzawa et al., 2010)。

(2) 研究代表者はこの研究を発展させ、四国地域について、沈み込むプレート形状および実際の微動活動の分布を考慮した数値シミュレーションを行った(Matsuzawa et al., 2013)。その結果からは、詳細な発生状況が観測データに基づいて調べられてきた短期的 SSE や豊後水道の長期的 SSE だけでなく、最近発見された高知市付近の長期的 SSE(小林, 2012)についても、同一のモデルで包括的に再現できることが示された。さらに、高知市付近の長期的 SSE については、沈み込むプレート形状がその挙動を規定している可能性を指摘した。

(3) 北米 Cascadia の沈み込み帯は、日本と同様、スロー地震の研究が進んだ地域であり、巨大地震の発生が予想される領域の深部で短期的 SSE と低周波微動が発生している。また、定量的なモデルに基づいていないものの、Wech and Creager (2011)は低周波微動の解析から、Cascadia でも日本と同様の長期的 SSE が、将来発生する可能性を指摘している。しかしながら、Cascadia 地域における短期的 SSE の数値モデルとしては2次元モデルによる先駆的研究が Liu and Rice (2007)でなされているものの、最近でも平板状のプレートモデルでの短期的 SSE の再現(例えば、Colella et al., 2012)にとどまっており、プレートの沈み込み形状を考慮した数値計算研究は未だ行われていなかった。この地域に沈み込むプレート形状はバンクーバー島南端付近で湾曲しており、四国地域と同様にプレート形状の効果が予想される。さらに短期的 SSE のすべりは、南海トラフおよび Cascadia の両方で浅い側ほど間欠的なすべり、深い側ほど連続的なすべりとなっていることが観測から得られている(Obara et al., 2011; Wech and Creager, 2011)。この特

徴についても、四国地域については研究代表者は数値モデルにより再現することに成功しており(Matsuzawa et al., 2013)、Cascadia のモデリングでも同様の説明が可能であるかも興味深い点である。

(4) 以上のように、研究代表者による既往の研究では四国地域については様々な SSE の特徴を再現することに成功していたものの、他地域への適用は行われていなかった。加えて、南海トラフ領域においては、四国沖から東南海、東海に至る領域で同時あるいは、相次いで大地震が発生することがある。四国地域のみ既往のモデルでは領域が狭く、大地震の繰り返し発生の時空間スケールで問題を扱うには、不十分であった。このため、より大規模な数値シミュレーション研究を実施する必要があった。

## 2. 研究の目的

南海トラフおよび Cascadia における短期的・長期的 SSE の発生について数値シミュレーション研究により、プレート形状の影響を明らかにする。また、巨大地震サイクル間での挙動の時間変化の可能性について議論する。さらに日本周辺や世界の他地域における本課題以外の研究から得られた結果との比較を行い、SSE の発生する沈み込み帯における共通性や差異を議論する。

## 3. 研究の方法

(1) 数値計算手法としては、沈み込むプレート境界面を多数の三角形要素でモデル化したのち、半無限弾性体内部におかれた各要素上のすべりに関する応力変化を与えるグリーン関数を Stuart et al. (1997)のプログラムにより計算する。一方、要素上の摩擦力については、カットオフ速度をもつすべり速度・状態依存摩擦則を仮定する。この両者で与えられる連立常微分方程式の時間発展を、大規模計算によって求める。これは、Matsuzawa et al. (2013)と同様の手法となる。

(2) プレート形状のモデルとして、南海トラフにおいては、海域に関して Baba et al. (2006)によるフィリピン海プレート上面のモデルを、陸域については、Shiomi et al. (2008)によるレーンバー関数解析から得られたフィリピン海プレートの海洋モホ面深さをもとに、Ide et al. (2010)による研究結果を加味して、形状を設定した。Cascadia においては、McCroly et al. (2004)の結果に基づいて形状を設定した。図1に設定したプレート境界面の深さを示す。

(3) パラメーター分布の設定としては、Matsuzawa et al. (2013)と同様のアプローチをとった。基本的には深さに依存する関数として与え、短期的 SSE 発生領域については、観測より得られている深部低周波地震の分布

から設定し、この内側ではすべり速度・状態依存摩擦則における a-b が負となるように、またその周辺領域では正となるように設定した。豊後水道の長期的 SSE 領域については、周囲より若干有効法線応力が小さくなるように設定した。

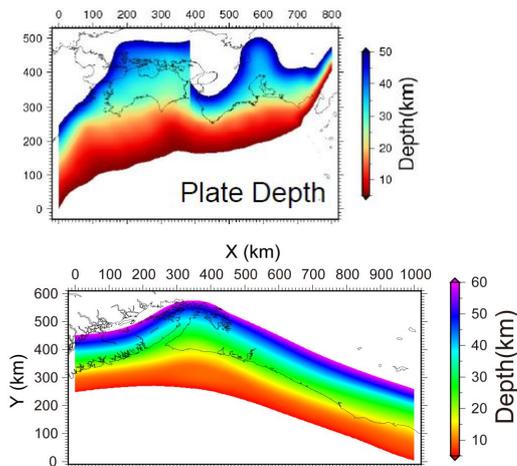


図1 南海トラフ(上段)および Cascadia(下段)のモデルにおけるプレート境界面深さ。

(4) 本課題においては大規模計算が必要となる。そのため、これまで共有メモリ型の環境で動作していた計算プログラムを、分散メモリ環境において実行可能なように、MPIによる並列計算コードを作成する。Matsuzawa et al. (2013)による四国地域のモデルに適用し、プログラムの妥当性を検証し、高速化による長期計算の能力を評価する。

(5) 開発されたプログラムを南海トラフの沈み込み領域に適用し、現象の再現を試みる。その後 Cascadia の沈み込み帯にこれを適用し、どの程度挙動を再現できるかを検討し、本シミュレーション研究以外による結果も併せて議論し SSE を特徴づけているものを探る。

(6) 本課題の申請後に、地球潮汐や海洋荷重による応力の擾乱が SSE や地震の発生に、影響を与えている可能性も指摘された(Ide and Tanaka, 2014)。これを受け、四国地域のモデルにおいて、地球潮汐のうち主要な 10 分潮による応力擾乱を与えた数値シミュレーションも実施し、SSE 発生に与える影響の評価も試みる。

#### 4. 研究成果

(1) 大規模数値計算コードを開発し、四国地域のモデルにおいて結果の検証と地震サイクルスケールでの試験計算を行った。このコードにより、三角形要素で表現されるプレート形状について、1000km 程度の長さおよび大規模なモデル(約 20 万要素)においても、数百年間のプレート間地震発生サイクルスケールでの数値計算が可能となった。計算に

は、防災科学技術研究所の大型計算機(HA8000-tc/HT210; CPU: Intel Xeon E5-2697v2)を用いたが、1ケースにつき 1536 コアの使用で延べ数か月程度の計算時間が必要であった。このため、本課題では多くのパラメータについての計算は実施できなかった。パラメータ分布を変化させた場合の議論については、今後より高速な計算機を利用するか、H-matrix 法のような高速計算手法の導入を検討する必要がある。

(2) 南海トラフのモデルにおける計算結果の例を図2に示す。左図の白に近い色が SSE 時のすべり速度に相当する。深部低周波微動の活動は、短期的 SSE によるすべりを反映していると考えられる(例えば、Hiramatsu et al., 2008)。実際のプレート形状を考慮するとともに、観測された深部低周波微動の分布に基づいたパラメータ分布を設定することで、短期的 SSE の特徴的なセグメントや発生間隔の長短を再現できていることが、図2から分かる。また、豊後水道長期的 SSE についても、数年間隔で発生する挙動が再現されている。

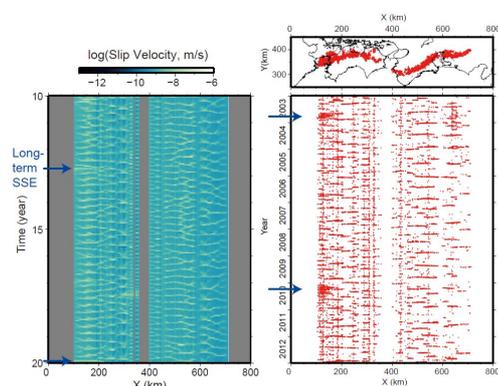


図2 南海トラフにおける、短期的 SSE 発生深さでの数値シミュレーションによる平均すべり速度(左図)と実際に観測された深部低周波微動の時空間分布(右図)。微動の分布は、Maeda and Obara (2009)の手法によって決定された震動源を Obara et al. (2010)の手法でクラスタリング処理した結果。青矢印は、数値シミュレーションと観測それぞれによる、豊後水道長期的 SSE の発生時を示す。

さらに、この数値シミュレーションにおいては、地震発生サイクルの後半に紀伊半島においても長期的 SSE が発生している。数値モデルの紀伊半島地域においては、固着域と短期的 SSE 領域が他に比べて近い位置にあり、長期的 SSE 領域の幅が狭くなっている。得られた結果は、このような特徴に長期的 SSE の発生パターンが規定されることを示唆している。これまでの観測データに基づいた研究では、紀伊半島については長期的 SSE の発生が報告されていないが(例えば、Kobayashi, 2014) この結果は将来長期的 SSE がこの領域においても発生する可能性を示唆して

り、今後も観測研究を継続することによる本研究の検証が待たれる。

(3) Cascadia 地域においても、同様のパラメータ設定を行って数値シミュレーションを実施した。その結果の例を図3に示す。バンクーバー島南部からオリンピック半島にかけてのプレートの湾曲部周辺で短期的 SSE の大きなセグメントが形成されている様子が、数値シミュレーションにおいて再現された。また SSE の発生間隔も約 1 年程度であり、実際の発生間隔（約 14 か月）に近い値となっている。このように同様なパラメータ設定のアプローチでその活動の概要を再現することができた。また、短期的 SSE 領域の深部では連続的なすべりになっているなど、Wech and Creager (2011)による観測結果を再現することにも成功している。

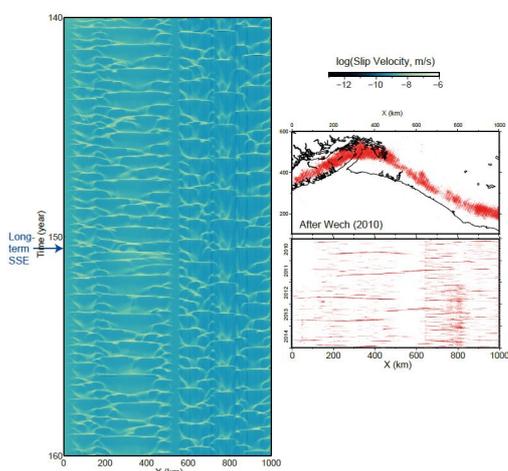


図3 Cascadia 地域における、短期的 SSE 発生深さでの平均すべり速度（左図）と実際の深部低周波微動（右図）の時空間分布。深部低周波微動のデータとしては、Wech (2010)によって公開されているカタログを用いた。左図青矢印は、数値シミュレーションによって長期的 SSE が発生した時間を示す。

さらには、図3の青矢印で示すように、数値シミュレーション結果においては、大地震発生域と短期的 SSE 域の間で、長期的 SSE が発生している。この SSE は地震発生サイクルの中盤以降で発生しており、将来この地域でも長期的 SSE が観測される可能性を示唆する結果となっている。

観測データにおいては、2011 年後半以降、Cascadia 地域南部において、微動活動が断続的に発生している。本シミュレーションでは、そのような挙動はみられておらず、こういった挙動の差異を説明可能なモデリングは、今後観測データのより詳細な解析と平行して進めていく必要がある。もし、実際に SSE の発生挙動が変化するのであれば、地域的な特性の差異を示唆するものとなるため、知見を深める端緒となることが期待される。

(4) 地球潮汐による、プレート境界面上での応力擾乱を加えた、四国地域のモデルの数値シミュレーション結果の例を、図4に示す。短期的 SSE の発生間隔のばらつきが、地球潮汐による応力擾乱を導入することで、とくに四国東部の、比較的孤立した SSE 領域で、小さくなっていることが分かる。潮汐による応力擾乱は大きくても数 kPa 程度の振幅しか持たないにも関わらず、発生挙動が変化しており、地球潮汐による応力変化と実際の SSE 領域の分布、プレート形状との関係が、SSE シミュレーション結果を詳細に検討する際に重要となる可能性を示唆する。この点については、2016 年度より開始した、科研費 新学術領域研究「スロー地震学」において、さらに数値計算を進めており、今後さらなる理解を目指していきたい。

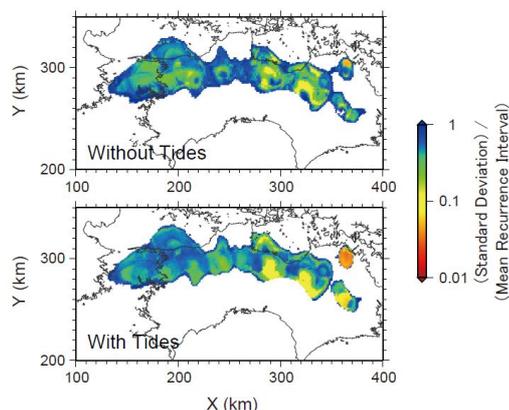


図4 地震後 5-20 年における短期的 SSE の再来間隔の標準偏差を平均再来間隔で割った値。上段は地球潮汐による応力擾乱を考慮しない場合、下段は考慮した場合。暖色系の色ほど、発生間隔のばらつきが小さいことを示す。

(5) 本課題では、研究代表者による他課題の研究および、研究代表者が研究協力者と別途実施する研究による結果を交えた議論を目標としていた。本課題と同様の手法を他の地域に適用した研究としては、学会発表、などがあり、メキシコやニュージーランドにおいて発生する SSE についても、同様のアプローチによって、その発生挙動の概要を再現することができた。また研究協力者の研究グループとの共同研究による学会発表 および、その後の Li and Liu (2016, 2017)では、Cascadia について同様のアプローチを行い、重力異常との関係を考慮した数値シミュレーションも行っている。本課題および関連した別課題の研究における結果は、深さに依存する摩擦挙動変化、プレートの沈み込み形状と実際の短期的 SSE の発生領域を与えることにより、世界の様々な沈み込み帯における SSE 活動の概要を再現できることを示唆している。こうした結果は SSE の発生メカニズムの普遍性を示すものであり、短期的 SSE 発生領域を規定しているものは何かという次な

る課題へとつながる。さらに、本課題では考慮しなかったものの、前述の重力異常との関係や、Cascadia 南部地域での観測との差異など、地域的な特性や別の要因の可能性も考えられるため、今後もさらなる研究の余地がある。

本研究で示した長期的および短期的 SSE の大地震発生域周辺における発生は、大地震発生自体にも強くかかわる問題である。東北地方太平洋沖の領域についても、これまで研究協力者との共著論文(Shibazaki et al., 2012)によって地震サイクルスケールの数値シミュレーションを実施していたが、雑誌論文においては、観測に基づく超低周波地震の時間空間分布の研究結果と本課題で得られつつあった SSE に関する洞察をもとに、東北地方太平洋沖のゆっくりすべり領域分布の不均質性や、大すべり領域との重なり、間欠的な SSE の存在を示唆している。このような大地震域周辺における SSE 発生という描像について、本課題では南海トラフと Cascadia について定量的なレベルでの議論を試みている。この点も、地震とスロー地震という現象の理解において新たなインパクトをもつのではないかと考えている。現在開始している 2016 ~ 2020 年度までの新学術領域研究「スロー地震学」においては、多くの研究者が様々な分野から参加しており、本課題を含むこれまでの様々な研究による現象の理解が、さらに多角的に深化していくことが期待される。

#### < 引用文献 >

- Obara (2002), *Science*, **296**, 1679-1681.  
Beroza and Ide (2011), *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **39**, 271-296..  
Matsuzawa et al. (2010), *J. Geophys. Res.*, **115**, B12301.  
Matsuzawa et al. (2013), *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 5125-5130.  
小林 (2012), *地震* **2**, **64**, 63-73.  
Wech and Creager (2011), *Nat. Geosci.*, **4**, 624-628.  
Liu and Rice (2007), *J. Geophys. Res.*, **112**, B09404.  
Colella et al. (2012), *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L20312.  
Obara et al. (2011), *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L09311.  
Stuart et al. (1997), *J. Geophys. Res.*, **102**, 27623-27633.  
Baba et al. (2006), *Tectonophysics*, **426**, 119-134.  
Shiomi et al. (2008), *Geophys. J. Int.* **173**, 1018-1029.  
Ide et al. (2010), *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L21304.  
McCrorry et al. (2004), *USGS Data Series*, **91**, 1-13.  
Ide and Tanaka (2014), *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 3842-3850.

- Asano et al. (2015), *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 331-338.  
Maeda and Obara (2009), *J. Geophys. Res.*, **114**, B00A09.  
Obara et al. (2010), *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L13306.  
Hiramatsu et al. (2008), *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L13304.  
Wech (2010), *Seismol. Res. Lett.*, **81**(4), 664-669.

- ② Li and Liu (2016), *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **121**, 6828-6845.  
② Li and Liu (2017), *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **122**, 3138-3157.  
③ Shibazaki et al. (2012), *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L21305.

#### 5 . 主な発表論文等

##### [ 雑誌論文 ] ( 計 2 件 )

- Takanori Matsuzawa, Youichi Asano, Kazushige Obara. Very low frequency earthquakes off the Pacific coast of Tohoku, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, 査読有, Vol. 42, 2015, pp. 4318-4325, doi:10.1002/2015GL063959.  
松澤孝紀、南海トラフにおける長期的・短期的スロースリップイベントとプレート間地震準備過程の数値モデリング、地震予知連絡会会報、査読無、Vol. 93、2015、pp. 432-436.  
<http://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/index93.html>

##### [ 学会発表 ] ( 計 14 件 )

- Takanori Matsuzawa, Yoshiyuki Tanaka, Bunichiro Shibazaki. Numerical modeling of tidal modulation of slow slip events in the Shikoku region, JpGU-AGU Joint Meeting 2017 (招待講演), 2017年5月24日, 幕張メッセ(千葉県千葉市).  
Takanori Matsuzawa, Yoshiyuki Tanaka, Bunichiro Shibazaki. Numerical modeling of short-term slow slip events in the Shikoku region considering the effect of earth tides and plate configuration. American Geophysical Union 2016 Fall Meeting, 2016年12月13日, サンフランシスコ市(アメリカ合衆国).  
松澤孝紀, 田中愛幸, 芝崎文一郎. 潮汐の影響を考慮した四国地域における短期的スロースリップイベントの数値シミュレーション. 日本地震学会 2016年秋季大会, 2016年10月6日, 名古屋国際会議場(愛知県名古屋市).  
松澤孝紀, 田中愛幸, 芝崎文一郎. 潮汐の影響を考慮したスロースリップイベントの数値シミュレーション. 日本地球惑星科学連合 2016年大会, 2016年5月25日, 幕張メッセ(千葉県千葉市).  
芝崎文一郎, Laura Wallace, Yoshihiro Ito,

Takanori Matsuzawa. Modeling long- and short-term slow-slip events and their interaction with large earthquakes along the Hikurangi subduction zone. 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).

小原一成, 高木涼太, 山下裕亮, 浅野陽一, 松澤孝紀, 田中佐千子, 廣瀬仁, 前田拓人. Interaction between slow earthquakes in and around Bungo channel, Nankai subduction zone, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会(招待講演), 2016 年 5 月 22 日, 幕張メッセ (千葉県千葉市).

Takanori Matsuzawa, Bunichiro Shibazaki, Kazushige Obara, Hitoshi Hirose. Numerical modeling of slow slip events in Nankai and Cascadia, considering plate configuration and tremor distribution, AGU Chapman Conference on the Slow Slip Phenomena (招待講演), 2016 年 2 月 24 日, イスタパ市 (メキシコ合衆国).

Bunichiro Shibazaki, Takanori Matsuzawa. Modeling slow slip events and their interaction with large earthquakes along Hikurangi and Mexican subduction zone, AGU Chapman Conference on the Slow Slip Phenomena, 2016 年 2 月 24 日, イスタパ市 (メキシコ合衆国).

Takanori Matsuzawa, Bunichiro Shibazaki. Numerical modeling of ETS in the Cascadia region – An application of Nankai model –, American Geophysical Union 2015 Fall Meeting, 2015 年 12 月 16 日, サンフランシスコ市 (アメリカ合衆国).

松澤孝紀, 浅野陽一, 田中佐千子, 木村武志, 小原一成, 前田拓人, 伊藤喜宏, 廣瀬仁, 芝崎文一郎, 日本列島周辺におけるスロー地震モニタリングと数値モデリング, 日本地震学会 2015 年秋季大会 (招待講演), 2015 年 10 月 28 日, 神戸国際会議場 (兵庫県神戸市).

松澤孝紀, 芝崎文一郎. 沈み込み形状を考慮したスロースリップイベントの数値モデル—南海トラフにおけるモデルの Cascadia 地域への適用の試み, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 2015 年 5 月 24 日, 幕張メッセ (千葉県千葉市).

Takanori Matsuzawa, Bunichiro Shibazaki, Kazushige Obara, Hitoshi Hirose. Numerical Modeling of slow slip events in the seismic cycles of megathrust earthquakes in southwestern Japan, American Geophysical Union 2014 Fall Meeting, 2014 年 12 月 14 日, サンフランシスコ市 (アメリカ合衆国).

Duo Li, Yajing Liu, Takanori Matsuzawa, Bunichiro Shibazaki. Episodic slow slip events in a non-planar subduction fault model for northern Cascadia, American

Geophysical Union 2014 Fall Meeting, 2014 年 12 月 14 日, サンフランシスコ市 (アメリカ合衆国).

松澤孝紀, 芝崎文一郎, 小原一成, 廣瀬仁. 南海トラフの大地震発生サイクル間におけるスロースリップイベントの数値シミュレーション, 日本地震学会 2014 年秋季大会, 2014 年 11 月 25 日, 朱鷺メッセ (新潟県新潟市).

#### [その他]

防災科学技術研究所 第 11 回成果発表会 (概要集)

<http://www.bosai.go.jp/event/2015/seika11/index.html>

防災科学技術研究所 第 12 回成果発表会 (講演・ポスター概要集)

<http://www.bosai.go.jp/event/2016/seika12/index.html>

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

松澤 孝紀 (MATSUZAWA, Takanori)

国立研究開発法人 防災科学技術研究所・地震津波防災研究部門・主任研究員

研究者番号: 90500744

##### (2) 研究協力者

芝崎 文一郎 (SHIBAZAKI, Bunichiro)

国立研究開発法人 建築研究所・国際地震工学センター・上席研究員

Yajing Liu (LIU, Yajing)

McGill University・Department of Earth and Planetary Sciences・Assistant Professor