

令和 2 年 6 月 25 日現在

機関番号：82706

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K17798

研究課題名(和文)豊後水道スロースリップから精査する断層面上の摩擦特性の不均質分布

研究課題名(英文) Spatial distribution of slow slip events beneath the Bungo Channel under sparsity constraints

研究代表者

中田 令子 (NAKATA, Ryoko)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・海域地震火山部門(地震津波予測研究開発センター)・特任技術研究員

研究者番号：00552499

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：豊後水道で繰り返し発生している長期的スロースリップイベントすべり域の推定を行った。これまでより明瞭にすべり域を推定するために、スパースモデリングの一種である一般化結合正則化を用いた。1997年、2003年、2010年、2018～2019年に発生したイベントの地殻変動観測データを解析したところ、すべり域内部ですべり量が急変する不連続な境界があることが明らかになった。また、すべり域の浅部境界も、これまでよりも大きな空間勾配であることが示された。すべり域浅部および内部の不連続な境界は、地震発生帯の下限および深部低周波微動の上限の位置とほぼ一致していた。房総沖でも同様に解析し、固着域との関係を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでのスムーズネスを制約とした解析よりも、明瞭にすべり分布を推定するために、この分野ではあまり使われていなかったスパースモデリングという手法を用いた。長期的スロースリップイベントのすべり域浅部および内部の不連続な境界が、1996年から2019年までほぼ同じ位置であり、かつ地震発生帯の下限および深部低周波微動の上限の位置とほぼ一致していたという結果は、長期的スロースリップイベントの浅部延長上で起きている地震発生帯および深部延長上で発生している深部低周波微動や短期的スロースリップイベントに至る、異なる時間的特徴を持った様々な地震発生メカニズムの系統的な理解に役立つ重要な知見となり得る。

研究成果の概要(英文)：We estimated spatial distribution of the long-term slow slip events (L-SSEs) beneath the Bungo channel in southwest Japan that occurred on 1997, 2003, 2010, and 2018-2019. The slip distributions of these L-SSEs estimated by geodetic data have been smoothed to some extent due to prior constraints on inversion analyses. We have applied an inversion method called fused regularization, a type of sparsity constraint, suitable for detecting discontinuous changes in the model parameters, for evaluation function. As a result, the L-SSE areas showed two sharp boundaries. The shallow boundary corresponds to the down-dip limit of the seismogenic zone. The deep boundary corresponds to the up-dip limit of the deep low-frequency tremor area. Such along-dip correspondences imply that some thresholds exist in the generation processes for both L-SSEs and deep tremors. The sharp variation in the slip amount of L-SSEs suggest that frictional properties, which control slip behaviour, may change sharply.

研究分野：地震学

キーワード：スパースモデリング 長期的スロースリップイベント

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

豊後水道では、地殻変動データの解析によって、長期的スロースリップイベント(long-term slow slip event, L-SSE)が5~7年の繰り返し間隔で発生している[Hirose et al., 1999]。L-SSEは、沈み込むフィリピン海プレートの境界面上(深さ20~40 km)が、約1年かけてゆっくりとすべる現象である。このL-SSE領域より浅部側は地震発生帯であり、1946年南海地震(M8.0)や1968年日向灘地震(M7.5)の震源域となっている。将来の南海トラフ地震震源域の西限に係る重要な場所であるため、南海トラフ地震発生サイクルとの関連性も強く示唆されている。一方、L-SSE領域より深部側では、繰り返し間隔・継続期間ともにL-SSEよりも短い「深部低周波微動と短期的スロースリップイベント(episodic tremor and slip, ETS)」と呼ばれるスロー地震が起きている。これらの現象は、全て同一のプレート境界面上で発生していると考えられている。

豊後水道周辺で発生した3つのL-SSE(1997年、2003年および2010年)は、すでにすべり分布の解析が行われており、3回ともほぼ同じ中心から外側へ向かって緩やかに変化する分布が推定されている。すべり域は、深部のETS領域から浅部の地震発生帯まで連続的に広がっているようにも見える。しかし、従来の手法では、地殻変動観測データの不十分さを補うためにすべり分布のなめらかさを前提として解析していることから、すべり域の境界が本当になめらかな分布をしているかは、明らかではなかった。プレート境界面上のL-SSEやETSの発生域では、通常の地震の発生頻度は高くない。従って、浅部における大地震の発生メカニズムや準備状況を理解するうえで、豊後水道におけるL-SSEの発生領域や地震発生帯との空間的なすみわけを正確に把握することは非常に重要である。

研究代表者らの先行研究において、日向灘におけるフォワードシミュレーション[Nakata et al., 2012]で得られたM6.8の地震による余効すべりは、震源域を取り囲むようにドーナツ状に分布しており、その断面図はなめらかではない2つの急なピークを示していた。数値実験として、この余効すべりから求めた地殻変動の模擬データを用いて、従来から行われているなめらかさを仮定した手法[Segall & Matthews, 1997]によってすべり分布を推定した結果、緩やかなピークが2つ見られ、中心のすべり0の領域と分離できなかった[Nakata et al., 2014b]。

そこで、従来行われてきたなめらかさ以外の前提を制約として、スロー地震のすべり域を推定するインバージョン手法について検討を行なった。まず、スパースモデリング(\*1)という手法を取り入れ、すべり分布のなめらかさに加えてスパース性と不連続性を考慮したところ、2つのピークが明瞭になり、固着域とすべり域を分離することができた[Nakata et al., 2016]。なお、このインバージョン数値実験では、既存の陸上観測点の座標に加え、すべり域直上の海域にも観測点があると仮定して模擬データを作成した。しかし、陸域観測点しか使わない場合や、ノイズの大きさによっては、十分な空間分解能は得られなかった。また、MCMC法を用いてすべりの推定を行ったため、計算に時間を要し、問題の大規模化(領域を広げる、メッシュサイズを小さくする)は難しい手法であった。そのため、計算の効率化やハイパーパラメタ推定手法の改善について、議論を進めていた。

豊後水道L-SSEを対象とした理由は、南海トラフ地震との関連性・日向灘余効すべりよりも陸上観測点分布の空間的な偏りが小さい・地殻変動観測網が整備されてから少なくとも3回発生しており、実際の観測データが豊富である・Nakata et al. [2014a]でフォワードシミュレーションモデルを既に構築しており、計算に必要なデータの多くが準備できており、すぐに取りかかれる地域であった、等が挙げられる。このようなスロー地震現象は、日本海溝やカスカディアなど、過去にM8以上の海溝型地震を経験している沈み込み帯でも起きている。豊後水道周辺は、比較的観測網が充実しているため、最も多様な現象が繰り返し確認されている地域である。

近年、地震発生サイクルの数値シミュレーションによって、このようなスロー地震の発生について、観測による知見をある程度定量的に再現できるようになりつつある[e.g., Matsuzawa et al., 2013]。研究代表者らは南海トラフに沿った日向灘~四国沖で地震発生サイクルの数値シミュレーションを行い、M8クラスの南海地震・日向灘のM7前後の地震・豊後水道L-SSEを定性的に再現した[Nakata et al., 2012; 2014a]。これらの現象をシミュレーションでより現実的なすべり分布を再現するには、各現象の発生領域を規定する細かい空間的な不均質を、観測データに基づいてなるべく正確にモデルに組み込むことが必要である。

(\*1)スパースモデリングとは、高次元データから本質的な低次元空間を抽出する数理的手法の総称である。自然科学データから未知の科学的知見を抽出する革新的なデータ解析技術として、様々な自然科学分野で注目されている。データへの適合性と同時に、拘束条件としてスパース性(変数の少なさなど)を取り入れることで、質・量の不足したデータからでも、知りたい情報を正確に抽出することができるため、様々な観測・計測分野の解析に応用されつつある。

### 2. 研究の目的

豊後水道で繰り返し発生しているL-SSEの発生領域を正確に把握したり、数値シミュレーション

ョンで精度よく再現したりすることは、豊後水道 L-SSE と南海トラフ地震との相互関係の理解を深めることにつながる。さらに、南海トラフ地震の発生が差し迫っているかどうかの議論や、今後の推移予測の信頼性をあげる上でも、非常に重要である。しかし、既存研究で推定されたすべり分布の分解能は十分ではない。そこで、L-SSE についての理解を深め、地震発生サイクルシミュレーションのより良い初期モデルを得るために、モデル構築に必要なパラメタのうち、L-SSE のすべり域に関する情報を、地殻変動観測データから高分解能で推定する。本研究では、地殻変動観測データの不十分さを補い、知りたい情報を正確に抽出することが可能となるスパースモデリングと呼ばれる手法を適用し、L-SSE の詳細なすべり分布を推定する。

### 3. 研究の方法

スパースモデリングと呼ばれるデータ解析手法を使って、地殻変動データのインバージョン解析を行い、プレート境界面上における豊後水道 L-SSE のすべりの空間分布を高分解能で推定する。本研究にあたっては、代表的な解析手法の一つである一般化結合正則化法 (generalized fused lasso) [Tibshirani et al., 2005] を適用した。評価関数が、隣り合うモデルパラメタのスムーズネスおよびフラットネスに関する項と、スパースの項からなっており、すべっている領域とすべっていない領域との境界が明瞭に検出されやすい手法である。

地殻変動観測の実データは、Yoshioka et al. [2015] による、定常変動等が取り除かれているデータを使う。1997 年・2003 年・2010 年ごろに約 1 年間継続した 3 つの L-SSE について、各期間のトータルの変位量を扱う。観測点増設等の理由で、最近のイベントほど観測点が多く、1997 年は 33 点、2003 年は 65 点、2010 年は 106 点である。すべりを求めるプレート境界面は、Baba et al. [2002] による豊後水道周辺の 3 次元のフィリピン海プレート形状を、メッシュサイズ 9km で 781 個に離散化したものを用いた。実データ解析と並行して、模擬データで数値実験を行い、手法の妥当性についても検証した。

また、計算時間を短縮するために、Obuchi & Kabashima [2016] の近似手法を取り入れて、2018 ~ 2019 年に発生した L-SSE についても同様に解析を行った。さらに、地域による違いや共通点を検討するために、房総沖で発生した 6 イベントについても同様に解析を行った。房総沖では、豊後水道と同様に、長期的 SSE が過去に発生した M8 クラス地震の震源域のそばで発生している。2018 年 6 月に発生した SSE は過去最大規模であった。そこで、1996 年から 2018 年までに発生した 6 回の SSE について、豊後水道 L-SSE と同様の手法で、すべり域の空間分布を推定した。

### 4. 研究成果

1997 年・2003 年・2010 年の 3 イベントとも、すべり域はおおよそ同じ位置に推定された。すべり域の浅部側では、従来考えられていたよりも急な空間変化であることが明らかとなった (図 1b) [Nakata et al., 2017]。すべり域の深部側でも、すべり量が半分近くまで急に減少する部分があった。さらに、浅部の急変位置は地震発生帯の下限および 350 の等温線と、深部の急変位置は深部低周波微動発生域の上限と一致していた (図 2・図 3)。つまり、L-SSE のすべり域は、地震発生帯や深部低周波微動発生域まで緩やかに広がっているのではなく、地震・L-SSE・深部低周波微動における発生領域の空間的なすみわけが、これまでより明瞭に示された。

なお、本結果が解析手法や観測点分布に起因するものではないことを確認するため、従来のなめらかな分布、および今回得られたすべりの急変を模擬データとして同様に解析したところ、本結果を支持する空間変化をほぼ再現することができた。さらに、計算時間を短縮するために、近似的に解く手法を取り入れて、同様な結果が得られることを確認したうえで、2018 ~ 2019 年に新たに発生した L-SSE についても同様に解析した結果、浅部境界の位置は、これまでの 3 イベントとほぼ同じ位置であることが分かった。1997 年から 2018 年の間に、このようなインバージョンで得られる規模 (解像度) では、プレート間固着の変化はなかったといえるかもしれない。

房総沖で 1996 年から 2018 年までに発生した 6 回の SSE について、すべり域の空間分布を推定した結果、すべり量の大きかった 2002 年、2011 年、2018 年を比較すると、2011 年と 2018 年のすべり域は 2002 年よりも南側に分布していた。地震発生サイクルシミュレーションから、SSE 域の広がりや、M8 クラスの地震震源域の固着状況と関係している可能性があることがわかった。

本成果では、スパースモデリングを地殻変動観測データの解析に用いることで、L-SSE 域の構造を詳細に推定することができた。これは、従来なめらかな空間変化しか捉えられないと考えられてきた地殻変動観測データに対する解析で初めて見出された結果であり、今後の地殻変動解析研究の解像度向上にも大きく貢献するものである。すべり量の急変位置では応力が集中しやすくなる。詳細な空間分布をすべりの力学モデルにより再現することは、L-SSE 領域深部側の ETS から浅部側の地震発生帯に至るまで、異なる時間的特徴を持った様々なすべりの発生メカニズムに関する統一的理解につながるだろう。

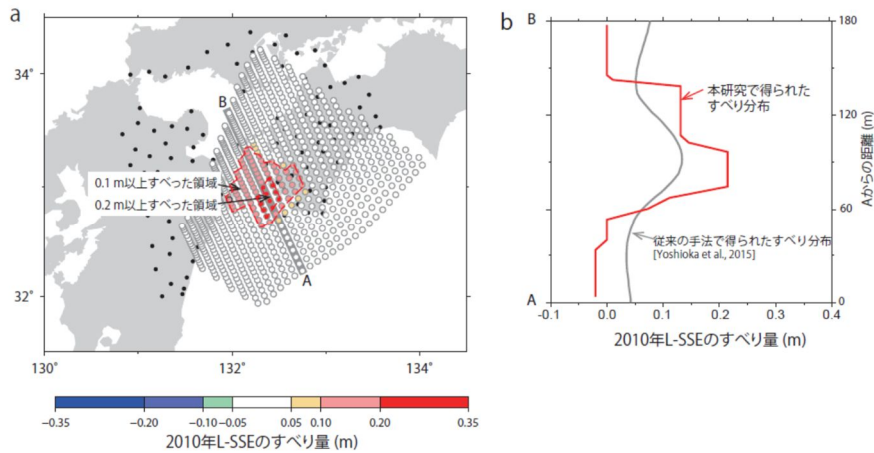


図 1(a) 本研究で得られた 2010 年の L-SSE によるすべり分布。0.1m 以上すべった領域を薄い赤、0.2m 以上すべった領域を濃い赤で示している。 はすべりを推定したプレート境界面上の小断層の中心位置を地表に投影したもの。 は解析に使用した地殻変動観測点の位置。  
 (b) 図 1(a)の灰色線 AB に沿ったすべり量の分布(赤線)、従来の手法で得られたもの(灰線)。

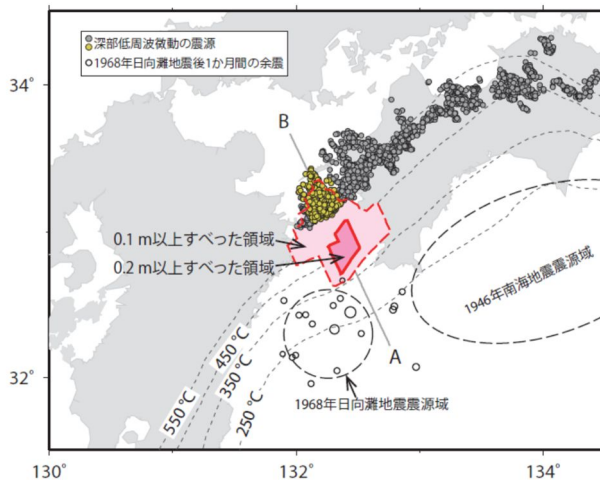


図 2 本研究で得られた 2010 年 L-SSE のすべり分布(赤線)と、他の地震学的知見との空間分布の比較。黄・灰色の○は深部低周波微動の震央(防災科学技術研究所による)、白抜きの○は、1968 年日向灘地震の余震。沈み込むプレート境界面での等温度線(点線) [Ji et al., 2016]。

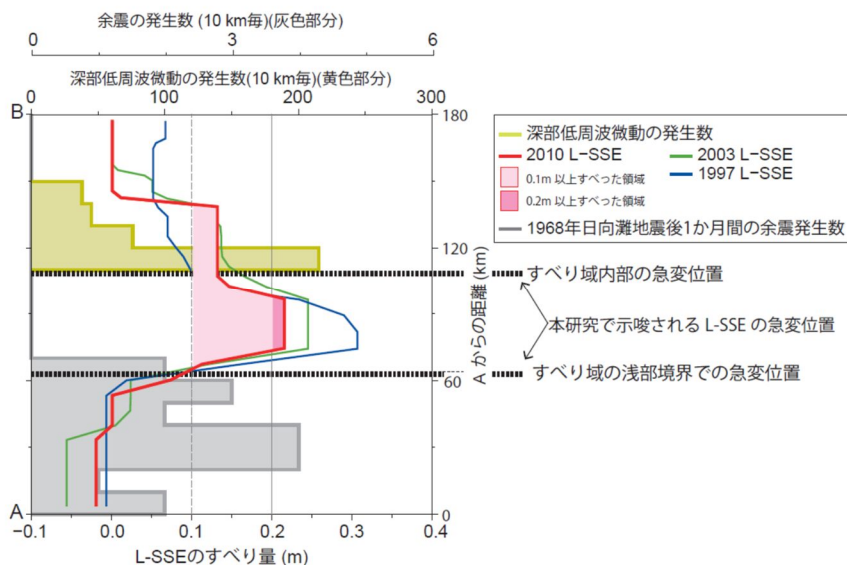


図 3 図 1(b)に、1997 年(青線)・2003 年(緑線) L-SSE の結果も加えたもの。灰色は 1968 年

の日向灘地震後 1 か月間の余震の頻度分布、黄色は 2010 年 L-SSE 中に発生した深部低周波微動の頻度分布である。ともに図 2 に示したものと同一である。

< 引用文献 >

- Nakata, R., M. Hyodo, and T. Hori (2012), Numerical simulation of afterslips and slow slip events that occurred in the same area in Hyuga-nada of southwest Japan, *Geophys. J. Int.*, 190, 1213-1220. 査読あり
- Nakata, R., M. Hyodo, and T. Hori (2014a), Possible slip history scenarios for the Hyuga-nada region and Bungo Channel and their relationship with Nankai earthquakes in southwest Japan based on numerical simulations, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 119, 6, 4787-4801. 査読あり
- Nakata, R., S. Miyazaki, M. Hyodo, and T. Hori (2014b), Reproducibility of spatial and temporal distribution of aseismic slips in Hyuga-nada of southwest Japan, *Mar. Geophys. Res.*, 35, 311-317. 査読あり
- Nakata, R., T. Kuwatani, M. Okada, and T. Hori (2016), Geodetic inversion for spatial distribution of slip under smoothness, discontinuity, and sparsity constraints, *Earth Planets Space*, 68(1), 1-10. 査読あり
- Nakata, R., H. Hino, T. Kuwatani, S. Yoshioka, M. Okada, and T. Hori (2017), Discontinuous boundaries of slow slip events beneath the Bungo Channel, southwest Japan, *Sci. Rep.* 7. 査読あり
- Baba, T., Y. Tanioka, P. R. Cummins, and K. Uhira (2002), The slip distribution of the 1946 Nankai earthquake estimated from tsunami inversion using a new plate model. *Phys Earth Planet Inter* 132, 59-73.
- Hirose, H., K. Hirahara, F. Kimata, N. Fujii, and S. Miyazaki (1999), A slow thrust slip event following the two 1996 Hyuganada earthquakes beneath the Bungo Channel, southwest Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 26(21), 3237-3240.
- Ji, Y., S. Yoshioka, and T. Matsumoto (2016), Three-dimensional numerical modeling of temperature and mantle flow fields associated with subduction of the Philippine Sea plate, southwest Japan. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 121.
- Matsuzawa, T., B. Shibasaki, K. Obara, and H. Hirose (2013), Comprehensive model of short- and long-term slow slip events in the Shikoku region of Japan, incorporating a realistic plate configuration, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 5125-5130.
- Obuchi, T. and Y. Kabashima (2016), Cross validation in LASSO and its acceleration, *J. Stat. Mech.*, 053304.
- Segall, P. and M. Matthews (1997), Time dependent inversion of geodetic data, *J. Geophys. Res.*, 102(B10), 22391-22409.
- Tibshirani, R., Saunders, M., Rosset, S., Zhu, J. and K. Knight (2005), Sparsity and smoothness via the fused lasso. *J. Royal. Statist. Soc. B.* 67, 91-108.
- Yoshioka, S., Y. Matsuoka, and S. Ide (2015), Spatiotemporal slip distributions of three long-term slow slip events beneath the Bungo Channel, southwest Japan, inferred from inversion analyses of GPS data, *Geophys. J. Int.*, 201, 1437-1455.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Nakata Ryoko, Hino Hideitsu, Kuwatani Tatsu, Yoshioka Shoichi, Okada Masato, Hori Takane	4. 巻 7
2. 論文標題 Discontinuous boundaries of slow slip events beneath the Bungo Channel, southwest Japan	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-017-06185-0	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7件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Ryoko Nakata, Hideitsu Hino, Tatsu Kuwatani, Takahiro Akiyama, Shoichi Yoshioka, Masato Okada, Takane Hori
2. 発表標題 Spatial distribution of slow slip events off the Boso peninsula from 1996 to 2018 under sparsity constraints
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryoko Nakata, Hideitsu Hino, Tatsu Kuwatani, Takahiro Akiyama, Shoichi Yoshioka, Masato Okada, Takane Hori
2. 発表標題 Spatial distribution of long-term slow slip event from 2018 to 2019 beneath the Bungo Channel under sparsity constraints
3. 学会等名 International Joint Workshop on Slow Earthquakes 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中田 令子、日野 英逸、桑谷 立、田中 もも、吉岡 祥一、岡田 真人、堀 高峰
2. 発表標題 疎性モデリングで得られた豊後水道長期的スロースリップイベントのすべり分布（2）
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryoko Nakata, Hideitsu Hino, Tatsu Kuwatani, Shoichi Yoshioka, Masato Okada, Takane Hori
2. 発表標題 Geodetic data inversion for spatial distribution of long-term slow slip events beneath the Bungo Channel, southwest Japan, using sparse modelling
3. 学会等名 Asia Oceania Geoscience Society 15th Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryoko Nakata, Hideitsu Hino, Tatsu Kuwatani, Shoichi Yoshioka, Masato Okada, Takane Hori
2. 発表標題 Discussion based on spatial distribution of long-term slow slip events beneath the Bungo Channel
3. 学会等名 International Joint Workshop on Slow Earthquakes 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中田 令子、日野 英逸、桑谷 立、吉岡 祥一、岡田 真人、堀 高峰
2. 発表標題 疎性モデリングで得られた豊後水道長期的スロースリップイベントのすべり分布
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2017年大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中田 令子・日野 英逸・桑谷 立・岡田 真人・堀 高峰
2. 発表標題 疎性モデリングを用いたスロー地震のインバージョン - Fused Lassoの適用
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2016年大会
4. 発表年 2016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
--	---------------------------	-----------------------	----