

超稠密 GNSS データを用いた沖縄本島周辺で発生する短期的 SSE の検出 Detection of Short-Term SSEs Around Okinawa Island using an Ultra-Dense GNSS Observations

○畔蒜尚幸・西村卓也・宮崎真一・松島 健

○Naoyuki ABIRU, Takuya NISHIMURA, Shin'ich MIYAZAKI, Takeshi MATSUSHIMA

Slow Slip Events (SSEs) are a type of slow earthquake that radiates little seismic energy and is detected mainly by geodetic signals. Around Okinawa Island, short-term SSEs lasting days to weeks have been reported, often synchronized with other slow earthquakes such as Very Low Frequency Earthquakes (VLFES). However, their spatial distribution remained uncertain due to sparse GNSS coverage in northern Okinawa Island. Using daily coordinates at 61 GNSS stations, we detected short-term SSEs with two approaches: time-series stacking based on the method of Bletery & Nocquet (2023) combined with AIC-based event screening and MCMC-based rectangular-fault inversion, and displacement stacking centered on VLFE-active days. From 2020 to 2024, 32 candidates were extracted, and 8 short-term SSEs were identified after removing cases contaminated by regular earthquakes. We found not only the previously reported southern-offshore type but also a newly recognized type extending significantly offshore of northern Okinawa Island. Displacement stacking showed larger southeastward horizontal motions in southern stations and systematic increases with higher daily VLFE counts. Furthermore, fault modeling indicates an approximately proportional relationship between VLFE counts and SSE seismic moment.

1. はじめに

Slow Slip Event (以下: SSE) は、地震波を放出せず、測地的なシグナルのみが観測されるスロー地震の一種である。沖縄本島周辺の琉球海溝沿いのプレート沈み込み帯では、数日から数週間の継続時間を持つ短期的 SSE の発生が報告されており、超低周波地震 (VLFE) や低周波地震と同期して発生することが報告されている。先行研究で報告されていた SSE は主に沖縄本島南部の沖合に集中するが、この地域では SSE に伴う地表変位は 2-3mm と小さく、GNSS 観測点の本島南部に集中して検出能力に偏りがあったことから、本当に南部のみで発生しているかは不明であった。

近年、沖縄本島周辺では京都大学などの研究機関とソフトバンク株式会社の GNSS データが利用可能となり、観測点数が約 3 倍の超稠密 GNSS 観測網が形成されたことで、沖縄本島南部と北部の SSE の検知能力は同等となった。そこで、本研究では、沖縄本島周辺で発生する SSE の発生様式を明らかにすることを目的として、これらの観測網によって得られた GNSS データを用いた SSE の検出を試みた。

2. 解析手法

本研究では、2002 年 1 月から 2024 年 12 月までの期間における、国土地理院 GEONET、京都大学、海上保安庁、九州大学、ソフトバンク観測点、計 61 点の GNSS 日座標値を用いた。GNSS データの前処理として、アンテナ交換などに伴うオフセット

補正を行った後、地心座標系から東西・南北・上下成分の局所座標系に変換した。そして、目視や四分位偏差を用いた外れ値の除外と欠測値の線形補間を行った。次に、GNSS 観測点周辺の共通誤差を取り除くため、沖縄本島周辺のノイズレベルの低い観測点 8 点に共通する短周期変動を共通誤差とみなして、全観測点の座標時系列から共通誤差を除去した。これらの処理から得られた GNSS データを用いて、時系列スタッキングと変位スタッキングの 2 種類の手法を使って短期的 SSE の検出を試みた。

時系列スタッキングでは、Bletery & Nocquet (2023) で提案された手法に基づき、観測変位を、各観測点の理論変位およびノイズレベルで重みづけしてスタックすることで SSE の検出を試みた。はじめに、沖縄本島周辺の沈み込みプレート境界面に沿って、10km 間隔で仮想の小断層を配置した。次に、各小断層のすべり方向を相対プレート運動から計算し、断層パラメータを算出した。GNSS データのノイズレベルの推定には、比較的時系列が安定している 2023 年の 1 年間を用いて、各観測点各成分の GNSS 時系列に一次関数をフィッティングし、その残差の標準偏差をノイズレベルとみなした。これらの処理で得られたスタック時系列に対して 180 日間の移動ウィンドウを 1 日ずつずらしながら、一次関数およびステップ付き一次関数でフィッティングし、2 つの関数に対する赤池情報量基準(AIC)を算出して、SSE に伴う地表変位の有無の時空間的な変化を調べた。最後に ΔAIC に

に基づき検出された SSE の候補となる地表変位イベントに対して、マルコフ連鎖モンテカルロ (MCMC) 法を用いて、矩形断層モデルのパラメータ推定を行なった。

変位スタッキングでは、短期的 SSE が VLFE などと同期して発生する性質を利用し、SSE 発生時の平均的な地表変位を得ることを目的として、先行研究によって得られた 2003-2014 年の VLFE カタログを使用して、VLFE の多発日を中心として GNSS 時系列を各観測点、各成分ごとのスタッキングを行なった。その後、1 日あたりの発生回数に基づいて、各観測点の平均変位を算出した。

3. 結果と議論

時系列スタッキングを行った結果、2020-2024 年に 32 件の SSE 候補イベントを検出した。そのうち、通常の地震など SSE ではないと考えられるイベントを除外すると 8 つの SSE が検出された。検出された SSE には、沖縄本島南部沖のみですべり領域が見られるタイプと本研究ではじめて明らかとなった本島北部沖まですべり領域が広

がるタイプがあった。また、継続時間は概ね 2 週間程度、観測点における最大変位量は 2-3mm 程度であり、発生間隔に周期性は見られなかった。推定された SSE のすべり域は、沖縄本島南部沖に集中し、中小の通常地震と空間的に相補的な傾向が認められた (Fig. 1)。また、SSE の発生前後に中小地震がバースト的に発生し、特に SSE のすべり域の端部にそれらの震源が集中することがわかった。

変位スタッキングを行った結果、沖縄本島では南部の観測点ほど VLFE に同期する SSE に伴う南東向きの水平変位量が大きくなる傾向が認められた。加えて、VLFE の発生回数が増えるにつれ、水平変位量が大きくなる傾向があった (Fig. 2)。そこで、VLFE の回数に基づき 4 段階の階級でスタック変位から矩形断層を推定し、SSE の地震モーメントを算出した。そして、VLFE の平均発生回数と SSE の地震モーメントの関係を検討したところ、両者は比例することがわかった。同様の関係は、先行研究において他地域で示唆されているものの、琉球海溝で発生する SSE と VLFE の定量的な関係は、本研究により初めて見出したものである。

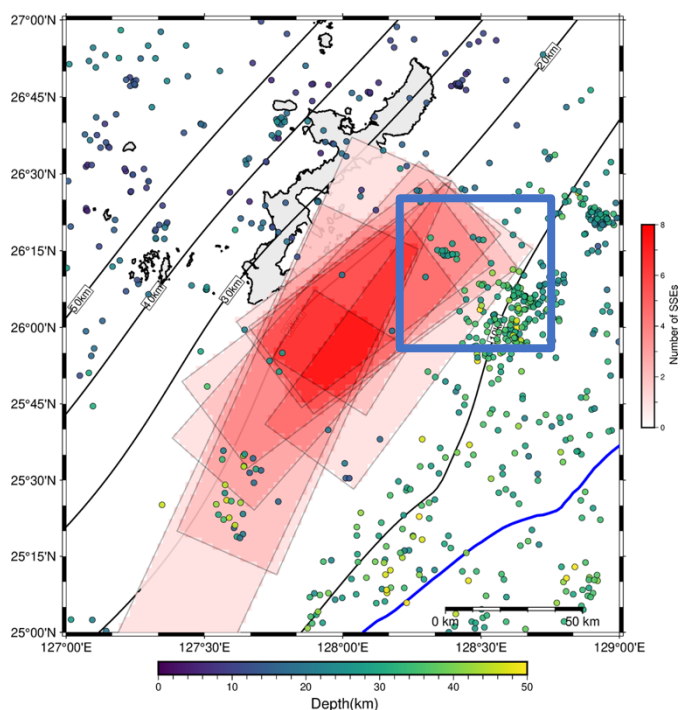


Fig. 1. SSE と通常の地震の分布の比較。本研究で推定した SSE の累積値をカラースケールで表し、2020 年 1 月 1 日から 2024 年 12 月 31 日までの通常の地震（深さ 50km 以浅）をプロットした。青線は海溝軸を示し、等深線は JAMSTEC (2021)、震源分布は気象庁による。青枠で示す領域は、SSE の発生前後にバースト的な地震活動が多く見られる。

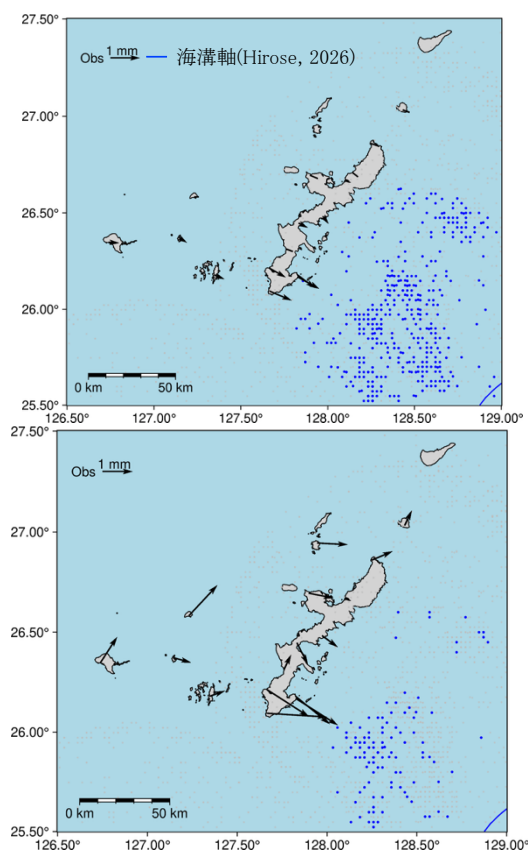


Fig. 2. VLFE の発生回数ごとの変位スタッキングによる変位分布。灰色丸は 2003 年～2014 年に発生した VLFE の震源、青丸がバースト日に発生した VLFE の震源 (Asano et al., 2015)。(上) 3～8 回。(下) 21 回以上。