沖縄本島における SSE 検出の試み An Attempt to Detect SSEs around Okinawa Island

○畔蒜尚幸・西村卓也・宮崎真一・松島 健○Naoyuki ABIRU, Takuya NISHIMURA, Shin'ichi MIYAZAKI, Takeshi MATSUSHIMA

Slow slip events (SSEs) have been observed around the Ryukyu Trench, particularly offshore of southern Okinawa Island. However, the occurrence of SSEs in northern Okinawa remains unclear, primarily due to limited observation points. This study analyzed GNSS data from institutions including Kyoto University, applying processes such as outlier removal and common error correction before time-series stacking. Comparing observed and modeled displacements suggests SSEs rarely occur in northern Okinawa alone. Additionally, stacking of GNSS displacements synchronized with very low-frequency earthquakes (VLFEs), reveals large trenchward movements in both the southern and back-arc sides. These findings indicate that the source location of SSEs may lie farther south than previously proposed, warranting a revision of existing fault models.

1. はじめに

スロー地震の中でも、測地学的なシグナルとし て観測されるものはスロースリップ(以下: SSE)と呼ばれ、世界各地で発生している。琉球 海溝周辺では沖縄本島周辺など、複数の地域で SSE が確認されており (e.g., Nishimura, 2014)、沖縄本島周辺の SSE は、超低周波地震 (VLFE) や低周波地震(LFE) と同期して発生す ることが報告されている (Nakamura, 2017)。し かし、琉球海溝周辺では GNSS の設置が島嶼部に 限られるため、観測点密度が低く、GNSS による SSE の検出が可能な地域は限られている。沖縄本 島においては、先行研究では主に南部の沖合で SSE が発見されているが、SSE に伴う地表変位は 2-3mm 程度と小さく、北部の観測点数が少ないこ とから、本当に南部のみで発生しているのかは不 明であった。京都大学では、2019年に3つの観 測点を沖縄本島北部に設置しており、このデータ を用いることで、この地域の SSE の検出が向上す ることが見込まれる。

2. 解析手法

本研究では、国土地理院GEONETの観測点27点、 京都大学の観測点3点、海上保安庁の観測点2点 と九州大学の観測点1点(Fig. 1)において、京都 大学防災研究所で計算した、1997年4月から2024 年9月までの日座標値を使用した。GNSS観測点周 辺の植生などにより、座標値が乱れることがある ため、データの取捨選択を行なった。具体的には、 観測の 1/3 以上が欠測しているか、目視にて明ら かに外れ値が多い観測点は解析から除外した。

次に、アンテナ交換などに伴うオフセット補正 を行った後、地心座標系のデータを東西・南北成 分の局所座標系に変換した。その後、外れ値を取 り除くため、21日間での四分位偏差の1.8倍以 上を外れ値として除去した。また、観測点の欠測 値の線形補完を行なった。その後、共通誤差を取 り除くため、沖縄本島を取り囲む国土地理院 GEONETの観測点7点を使用して、共通誤差を東 西、南北成分それぞれ推定し、元データから共通 誤差を取り除いた。さらに、SSEに伴う変動を見 えやすくするために、21日間の移動中央値を計 算した。

2-1. 時系列スタッキング

これらの処理で得られたデータを用いて、時系 列スタッキングを実施した。スタッキングには、 Bletery & Nocquet (2023)で提案された手法を一 部改変した式(1)を使用した。

$$\mathbf{s}(t) = \sum_{i=1}^{N} \vec{u}_i(t) \cdot \vec{g}_i \qquad (1)$$

s(t):スタック時系列, *i*: 任意の観測点番号,
 ū_i(t):観測変位時系列, *N*:観測点数,
 ğ_i:断層モデルによる計算変位

計算変位は 0kada (1992) の手法を利用し、 Nishimura (2014) で推定された南部断層モデル、 およびそれを海溝に沿って北東方向に 30 km 平行 移動させた北部断層モデル(Fig. 1)を仮定した。 それぞれの断層モデルによる計算変位を求め、個 別にスタッキングを行い、スタッキング時系 列 s(t)を算出した。得られた s(t)から、統計的 手法を用いて、客観的に SSE の発生を確認するた め、s(t)を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、180 日間の移動ウィンドウ を1日ずつずらしながら 2 つの関数に対する AIC (式 (2))の差 (Δ AIC)を計算した。また、予 測される変位の方向を特定しやすくするため、正 のステップ以外では Δ AIC を 0 になるように処 理を行った。

$$AIC = n \ln\left(\frac{RSS}{n}\right) + 2k$$

$$RSS = \sum_{i=1}^{n} (o_i - c_i)^2$$
(2)

n:観測データのサンプル数、 RSS:残差平方和,

o_i:観測値、c_i:予測値,

k:モデルの自由パラメーター数

(フィティングに使用したパラメーター数)

2-2. VLFE 発生時の変位スタッキング

Nakamura et al. (2017)などでは、VLFE と同期 して SSE が発生することが報告されている。本研 究では、VLFE と SSE が同期して発生すると仮定 し、2004 年から 2014 年に発生した沖縄本島周辺 の VLFE データ (Asano et al., 2015)を使用し て、VLFE のバースト的活動に同期した変位分布 をスタッキングすることにより、平均的な SSE に 伴う変位分布を求めた。VLFE のバーストは、1 日 に 5 回以上 VLFE が発生した日と定義した。



Fig.1 使用した観測点と断層モデル。青点が共通誤差推定に使用した 観測点、赤点がそれ以外の使用した観測点、青四角が北部断層 モデル、赤四角が南部断層モデルの位置をそれぞれ表す。上記 の他に、北大東島および南大東島の観測点を使用した。

- 3. 結果
- 3-1. 時系列スタッキング

時系列スタッキング(Fig. 2)の妥当性を確認す るため、国土地理院が公表している「GEONET に より地殻変動を観測した地震一覧」を用い、地震 時の変位が時系列に現れていることを確認した。 また、AIC を用いた SSE の同定では、南部断層モ デルと北部断層モデルの ΔAIC を比較したとこ ろ、両者の変動が概ね一致していた。この結果か ら、沖縄本島北部単独では SSE が発生していない 可能性が示唆される。

3-2. VLFE 発生時の変位スタッキング

スタッキングの結果、多くの観測点でNS 成分 が南方向、EW 成分が東方向への地殻変動を示し た(Fig. 3)。この変位ベクトルをプロットしたと ころ、沖縄本島南部だけでなく、北部および背弧 側の一部でも変位が顕著であった。また、変位の 方向は本研究で仮定した南部断層モデルよりもさ らに南側に位置することが考えられる。

・謝辞

本研究では、国土地理院 GEONET 観測点および海 上保安庁観測点の GNSS データと VLFE (Asano et al., 2015) データを使用させていただきました。 また、西川友章博士には、多大なるご指導いただ きました。ここに感謝の意を表します。







Fig. 2 時系列スタッキングより算出した s(t)と ΔAIC の時系列変動。縦黒線は京大観測点の観測開始日、縦赤線は GEONET により地殻変動を観測した地震を表す。