

南海トラフ沿いの巨大地震発生に対応するための 高精度な地殻活動把握手法の研究開発（第3年次）

実施期間

令和元年度～令和5年度

地理地殻活動研究センター

水藤 尚 小沢 慎三郎

地殻変動研究室

桑原 將旗 小清水 寛

宗包 浩志

1. はじめに

南海トラフでは、プレート境界を震源とする大規模な地震が100～150年程度の間隔で繰り返し発生しており、前回の地震から70年以上が経過し、次の巨大地震の発生が切迫している状況にある。本研究は、南海トラフ周辺の地殻活動をより正確に把握し、プレート間の固着状態の変化に関する正確な情報を提供することによって、南海トラフの巨大地震等の発生に備えることを目的としており、そのために、以下の3つの内容を通して、海溝型地震発生直後を含むプレート間の固着状態の変化に関する正確な情報の提供を可能とすることを目標とする。

- 1) 南海トラフでの海溝型地震発生後の粘性緩和による変形を正確に予測できる地下構造モデルを構築し、地震後の余効すべりを正確に推定できるようにする
- 2) 短い時間スケールの現象を含めたプレート間固着変化のモニタリング手法の高度化を行い、短期的ゆっくりすべり等のモニタリングに貢献する
- 3) 内陸活断層周辺の地殻変動を詳細に把握し、内陸のブロック運動等のプレート内変形のモデルを高精度化して、プレート間固着の推定精度を向上させる

2. 研究内容

今年度は以下の項目を実施した。

2.1 有限要素メッシュの作成

南海トラフで発生する海溝型地震の粘性緩和による変形の計算に必要となる西南日本周辺を対象とした3次元有限要素メッシュの作成を外注にて行った。

2.2 プレート間すべりの時空間変化の推定

GNSSによって検出された2018年夏頃からの九州地方と四国西部地域における長期的スロースリップ（以下「長期的SSE」という。）に起因する地殻変動を、平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震はSuito（2017）、平成28年（2016年）熊本地震は水藤（2017）の粘弾性計算でそれぞれ補正し、時間依存インバージョンを用いてプレート間すべりの時空間変化を推定した。長期的SSEの解析では、2018年1月1日～2021年7月1日の3日平均のGNSSデータを3日ごとに使用した。GNSSデータに含まれる周期成分は、あらかじめ除去して使用している。トレンド成分は、Takagi et al.（2019）の領域分けに基づいて、それぞれの領域でSSEの発生していない時期で推定している。プレート境界面はグリッド間隔20km程度の四辺形で表現し、フィリピン海プレートの形状はHirose et al.（2008）を採用した。短期的スロースリップ（以下「短期的SSE」という。）の解析では、気象庁のひずみ計データとGNSSデータの統合解析を行った。GNSSデータは2017年11月16日～2017年12月6日までの日

ごとのデータを使用している。GNSS データの周期成分は、2017 年 1 月～2022 年 1 月までのデータで推定し、補正している。トレンド成分は 2017 年 1 月～2018 年 1 月のデータで推定し除去している。ひずみ計データは、2017 年 11 月 1 日～2017 年 11 月 16 日のデータでトレンドを補正し、2017 年 11 月 16 日～2017 年 12 月 6 日までのデータを使用した。また、時間依存のインバージョンによって 2012 年以降の四国地方の短期的 SSE を調べた。

2.3 干渉 SAR 時系列解析を用いた平成 28 年（2016 年）熊本地震の余効変動の時空間分布の推定

平成 28 年 4 月 14 日 21 時 26 分に熊本県熊本地方で発生した M6.5 の地震以降、一連の地震に伴う余効変動を把握するため陸域観測技術衛星 2 号（ALOS-2）の SAR データを用いて干渉 SAR 時系列解析を実施した。解析には、南行右観測及び北行右観測の軌道から撮像した StripMap モードのデータを使用した。今回の解析にあたっては、時系列解析を行うことから地震発生後から解析時点までで、繰り返し撮像されているパスとフレームを解析に用いた。南行右観測ではパス 23、フレーム 2950 から 2960 で 2016 年 4 月 18 日から 2021 年 9 月 13 日の 45 枚を使用した。また、北行右観測ではパス 131、フレーム 640 で 2016 年 4 月 26 日から 2021 年 6 月 15 日の 25 枚を使用した。解析に使用したプログラムは国土地理院で開発した干渉 SAR 時系列解析システム「GSITSA」（小林ほか、2018）であり、干渉 SAR 時系列解析の手法として SBAS 法（Berardino et al., 2002）を用いた。干渉画像の誤差低減として、Range Split-Spectrum 法（Gomba et al., 2016）を利用した電離層遅延誤差低減処理を適用した。また、位相連続化処理では MCF 法（Costantini, 1998）を適用した。

3. 得られた成果

3.1 有限要素メッシュの作成

西南日本全域をカバーする概ね水平方向 $1375 \times 1345 \text{ km}$ 、深さ方向は 500 km までの領域の 3 次元有限要素メッシュを作成した（図-1）。陸側プレート、ウェッジマントル、海洋プレート、海洋マントルの 4 つの媒質を考慮している。粘性構造の不均質を考慮できるように、ウェッジマントルは沈み込み方向と深さ方向、海洋マントルは深さ方向に沿った区分分けを入れている。

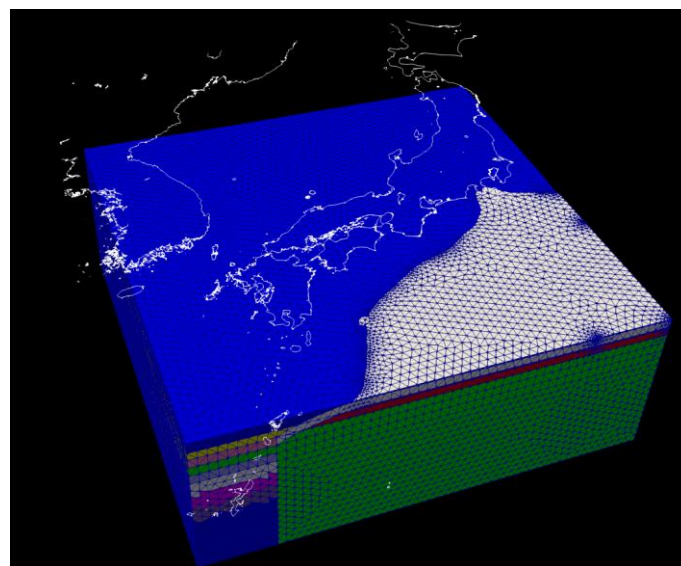


図-1 西南日本周辺の 3 次元有限要素メッシュ

3.2 プレート間すべりの時空間変化の推定

推定されたプレート境界上のすべりの時空間変化を図-2 に示す．長期的 SSE の解析では，2018 年 7 月頃から日向灘北部で SSE が発生し，2019 年 7 月頃までに豊後水道域に SSE が広がっている．2018 年 7 月～2019 年 1 月に日向灘南部で SSE が発生している．2019 年 1 月の種子島の地震 ($M_w6.3$) 後にアフタースリップが推定された．2020 年 7 月頃から日向灘南部で SSE が推定されている．日向灘では 2019 年 5 月に $M_w6.2$ の地震が発生している．シグナルが小さいが，2021 年 1 月頃から日向灘北部で SSE が推定されている．短期的 SSE の解析では，GNSS のみ，GNSS とひずみ計データの統合解析，ひずみ計データのみの解析を行った．GNSS とひずみ計のデータの重みの調整の問題はあるものの，GNSS とひずみ計の統合解析により，低周波微動の空間分布とより調和的なすべり分布が得られることがわかった (図-3)．2012 年以降の四国域の短期的 SSE を時間依存のインバージョンで検出し，図-4 に示した．ひずみ計データやその他の手法に比べて，数は多くないが調和的な結果が得られている．

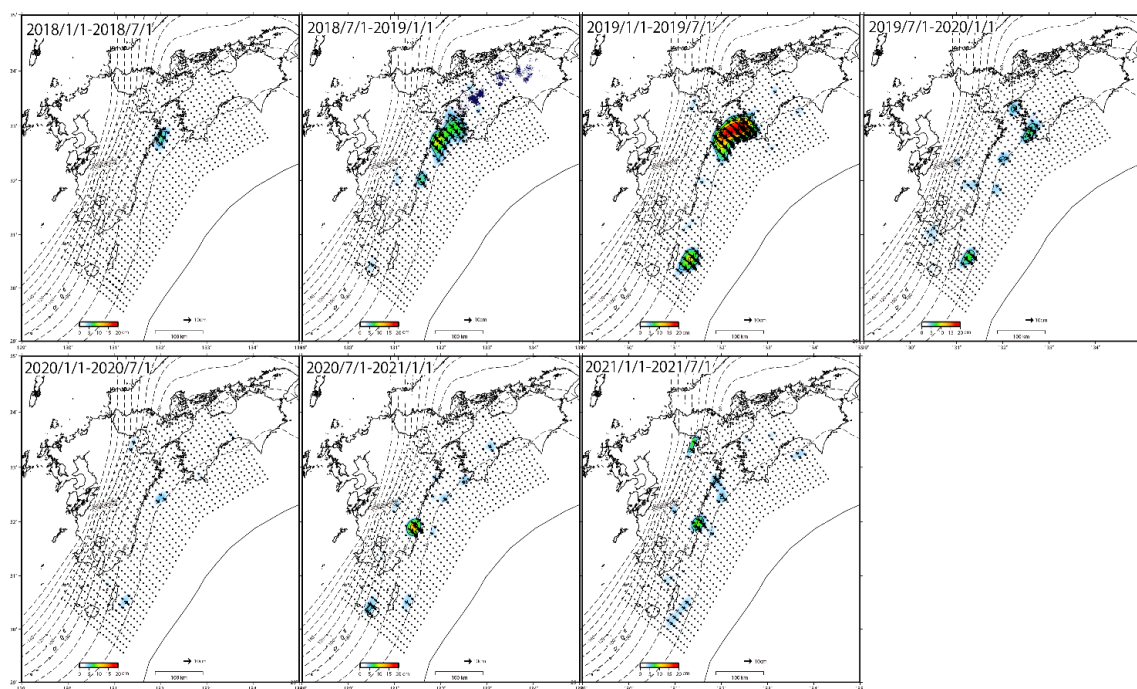


図-2 プレート境界のすべりの時空間変化

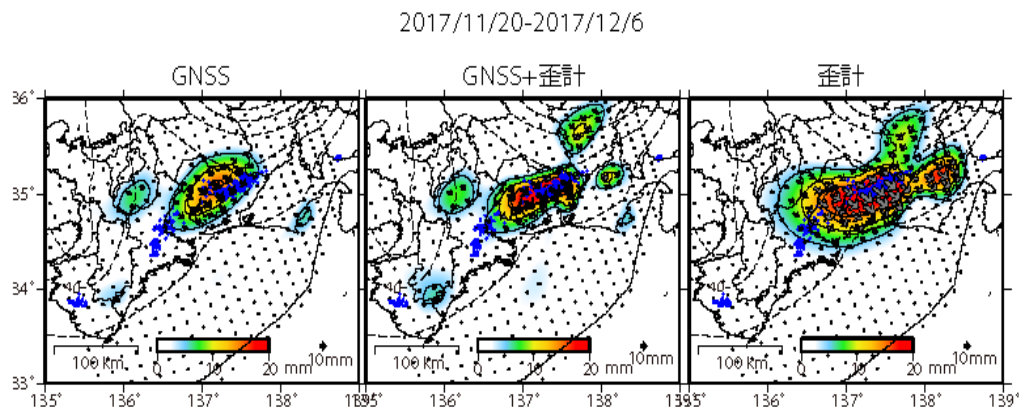


図-3 推定された短期的 SSE. コンター間隔は 5mm. 3σ 以上のすべりは黒矢印で示される．GNSS とひずみ計の統合解析では，低周波微動（青点）とより整合的なすべり分布が得られている．

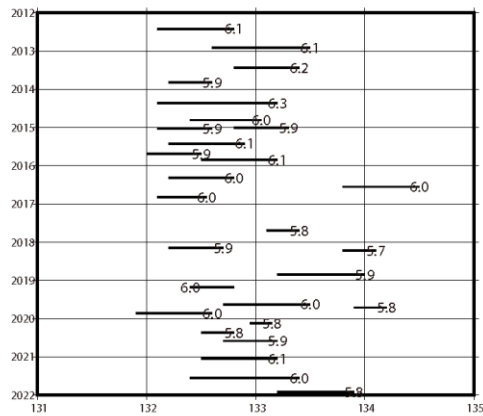


図-4 時間依存のインバージョンで検出された 2012 年以降の短期的 SSE

3.3 干渉 SAR 時系列解析の結果

南行右観測及び北行右観測で時系列解析を実施した結果をそれぞれ図-5 と図-6 に示す．各図の左側は解析期間での変位速度 (cm/year)，右側に代表的な点での変位時系列を示す．両者とも衛星に近づく方向を正として表している．これらの解析結果から，布田川断層帯周辺や阿蘇山の外輪山内部では沈降，その周囲では隆起の傾向があることがわかる．得られた変位速度分布は，Himematsu and Furuya (2020) の結果と調和的である．また，代表的な点での変位時系列からは，指数関数的な変動が現在もなお続いていることが確認でき，余効変動の一つである粘性緩和が現在もなお続いていることが把握できた．

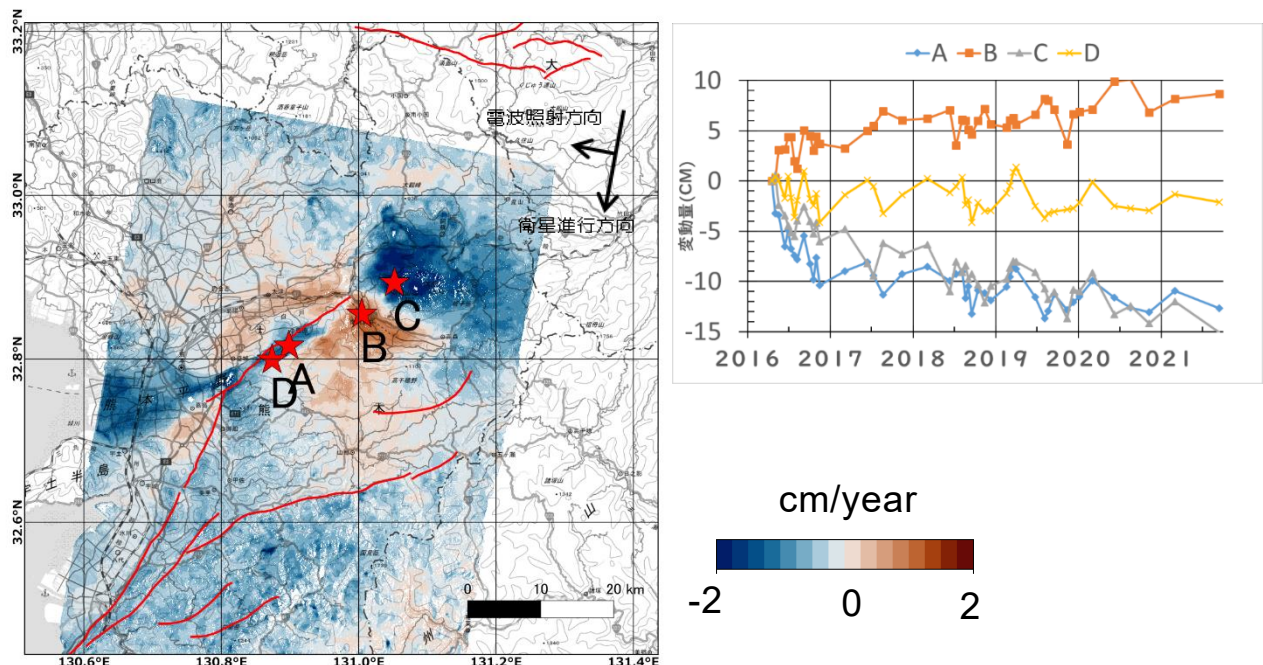


図-5 南行右観測の干渉 SAR 時系列解析の結果．左図は解析期間での変位速度 (cm/year) を示す．正を衛星に近づく方向とする．右図は各点 A, B, C, D における変位量を時系列で示したものである．正を衛星に近づく方向とする．赤線は活断層を示す．

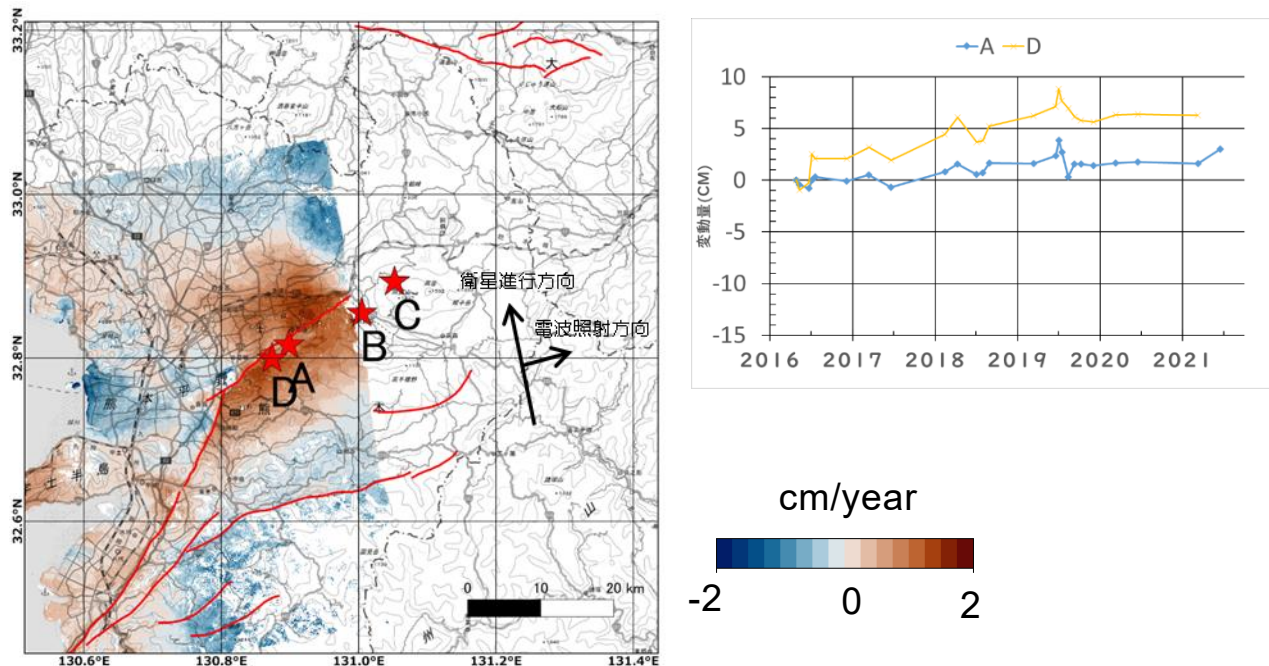


図-6 北行右観測の干渉 SAR 時系列解析の結果。左図は解析期間での変位速度 (cm/year) を示す。正を衛星に近づく方向とする。右図は各点 A, D における変位量を時系列で示したものである。正を衛星に近づく方向とする。赤線は活断層を示す。

4. 結論

本年度は以下の成果が得られた。

- ・西南日本全域をカバーする 3 次元有限要素メッシュを作成し、粘弾性変形計算の準備が整った。
- ・平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震及び平成 28 年 (2016 年) 熊本地震の粘弾性変形を補正したデータから、時間依存のインバージョンにより、西南日本のプレート境界のすべりの時空間変化が推定された。ひずみ計との統合解析により、低周波微動と調和的な解が得られることが示された。2012 年以降の時間依存のインバージョンでの短期的 SSE の検出事例がまとめられた。
- ・プレート内部変形の把握として干渉 SAR 時系列解析により、平成 28 年 (2016 年) 熊本地震の余効変動の時空間分布の検出を試みた。

参考文献

- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R. and Sansosti, E. (2002): A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 40, 2375-2383.
- Costantini, M. (1998): A novel phase unwrapping method based on network programming, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 36, 813 – 821.
- Gomba, G., Parizzi, A., Zan, F.D., Eineder, M. and Bamler, R. (2016): Toward operational compensation of ionospheric effects in SAR interferograms: The split-spectrum method, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 54, 1446-1461.
- Hirose, F., Nakajima, J. and Hasegawa, A. (2008): Three-dimensional seismic velocity structure and configuration of the Philippine Sea slab in southwestern Japan estimated by double-difference tomography, *J. Geophys. Res.*, 113, B09315, doi:10.1029/2007JB005274.

- Himematsu, Y. and Furuya M. (2020): Coseismic and postseismic crustal deformation associated with the 2016 Kumamoto earthquake sequence revealed by PALSAR-2 pixel tracking and InSAR. *Earth Space Sci.* 7:e2020EA001200. <https://doi.org/10.1029/2020EA001200>.
- 小林知勝, 森下遊, 山田晋也 (2018) : 干渉 SAR 時系列解析プロトタイプシステムの開発, 国土地理院時報, 130, 123-133.
- Suito, H. (2017): Importance of rheological heterogeneity for interpreting viscoelastic relaxation caused by the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Earth Planets Space.*, 69, 21 <https://doi.org/10.1186/s40623-017-0611-9>.
- 水藤尚 (2017) : 2016 年熊本地震の余効変動モデル, 日本地震学会 2017 年度秋季大会.
- Takagi, R., Uchida, N. and Obara, K. (2019): Along-Strike Variation and Migration of Long-Term Slow Slip Events in the Western Nankai Subduction Zone, Japan, *J. Geophys. Res.*, 124.4, 3853-3880.