

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2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

地殻変動研究室 川畑 亮二 小沢 慎三郎
桑原 將旗 山田 晋也
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、今後の推移を予測するための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) 内陸活断層帯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、上記1)及び2)に関する研究として、粘弾性変形計算プログラムの導入及び試験計算、並びに時間依存のインバージョンを用いた南海トラフ域のプレート間すべりの時空間変化の推定を実施した。

2.1 粘弾性変形計算プログラムの導入及び試験計算

①PyLith及びRelaxを用いた粘弾性変形の試験計算

有限要素解析ソフトウェアPyLith (Aagaard et al, 2013) 及び準解析的粘性変形計算ソフトウェアRelax (Barbot 2014) を用いて、平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震後の粘弾性変形の導入及び試験計算を行った。スラブ形状はSlab2 (Hayes et al. 2018) のデータを用い、大陸地殻の厚さは40 kmとした。有限要素解析用の四面体メッシュは、CUBITを用いて作成した。粘弾性層の粘性率は 1.0×10^{19} Pa sを仮定した。

②MCMC法による粘弾性変形を考慮した余効すべりの推定

Tomita et al. (2020) の手法に倣い、測地観測データから平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震後の余効すべりと粘弾性変形それぞれの寄与を同時に推定し、最適な粘性率を決定する試みを行った。粘弾性グリーン関数の計算では、弾性層及びMaxwell粘弾性層の2層からなる半無限媒質を仮定した (Fukahata and Matsu'ura 2005)。観測データには、GEONET及び海底地殻変動観測点のデータを用い、地震前の速度を取り除くことで、地震後の余効変動による変位を計算した。余効すべりの推定

には、マルコフ連鎖モンテカルロ（MCMC）法を用いた。

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 2019 年春頃からの四国中部における長期的スロースリップに起因する地殻変動、及び 2021 年 1 月頃の四国西部から中部における短期的スロースリップに起因する地殻変動から、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。長期的スロースリップの解析では、2019 年 1 月 1 日～2021 年 1 月 21 日の 3 日平均の GNSS データを 3 日毎に使用した。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、2017 年 1 月から 2018 年 1 月のデータから推定して除去した。プレート境界面はグリッド間隔 20km 程度のスプライン曲面で表現し、フィリピン海プレートの形状は Hirose et al. (2008) を採用した。時間スムージング及び空間スムージングは尤度が最大となる値を使用した。また、短期的スロースリップの解析では、2021 年 1 月 14 日～2021 年 1 月 30 日までの日毎のデータを使用した。周期成分とトレンド成分は長期的スロースリップの解析と同様に除去している。また、時系列データに含まれる共通成分は、解析中に取り除くようにしている。

3. 得られた成果

3.1 粘弾性変形計算プログラムの導入及び試験計算

①PyLith 及び Relax を用いて、地震から 10 年後における変位速度を計算した（図-1）。得られた最大変位速度は、PyLith で水平 0.06 m/yr 及び上下-0.02～+0.05 m/yr, Relax で水平 0.08 m/yr 及び上下-0.11～+0.1 m/yr であった。断層面から離れた陸域における水平方向の変位速度の特徴は、両者とも概ね一致しているが、断層面に近い場所や上下方向の変位速度には違いが見られる。これらの違いについては、数値計算上での断層面のすべりの扱い方や地下構造に対する分解能の違い等に起因する可能性があり、今後詳細に調査を行う必要がある。なお、陸域における水平方向の最大変位速度は、観測されている最大変位速度と概ね調和的である。実際に観測されている余効変動の時空間パターンと整合させるためには、より詳細な粘性構造や余効すべりによる寄与を考慮する必要がある。

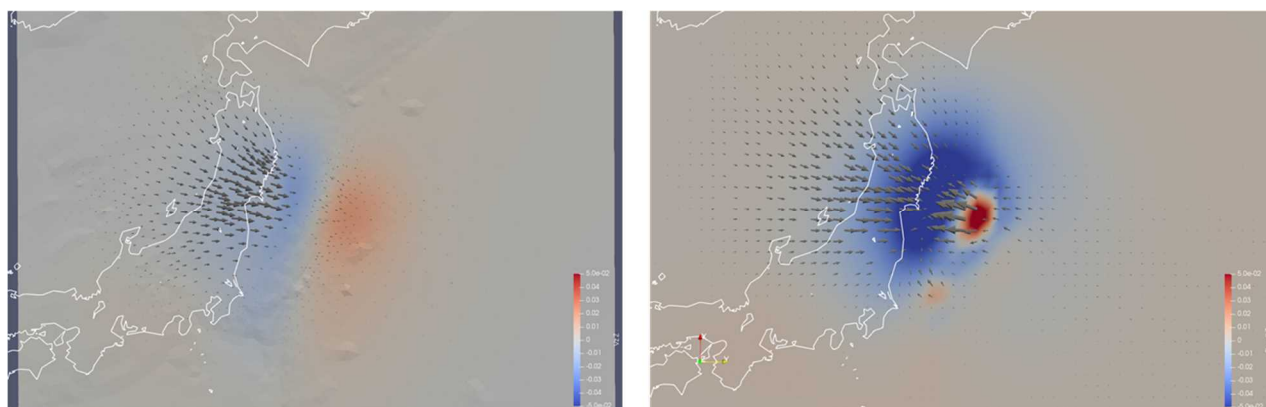


図-1 粘弾性変形計算プログラム PyLith（左）及び Relax（右）を用いて計算した、東北地方太平洋沖地震から 10 年後の粘弾性変形による変位速度。矢印は水平方向の変位速度、カラーコンターは上下方向の変位速度を表す。

②地震後 5 年間の観測データを用いて推定された余効すべり及び計算された変位量を図-2 に示す。東北地方の太平洋側は、余効すべりの寄与が卓越し、海溝向き及び隆起方向の余効変動を示す。また、

遠方の観測点では、粘弾性変形の寄与が大きくなる事が分かる。一方、海底では、余効すべりと粘弾性変形の寄与が相殺することで、各観測点における比較的小さな変動を説明している。

粘性率を変えた場合、東北地方の太平洋側の変動は余効すべりの分布を調整することで説明可能であるが、海底及び遠方の観測点の変動を説明することが難しくなる。これにより、残差が最も小さくなる粘性率は、 1×10^{19} Pa s 程度と推定され、Tomita et al. (2020) とも調和的な結果が得られた (図-3)。

同様の解析を地震後3年間及び地震後9年間の観測データを用いて行ったところ、最適な粘性率は、それぞれ 5×10^{18} Pa s 程度、 3×10^{19} Pa s 程度と推定された。これらの結果は、粘弾性層における粘性率の時間変化を示唆している可能性がある。

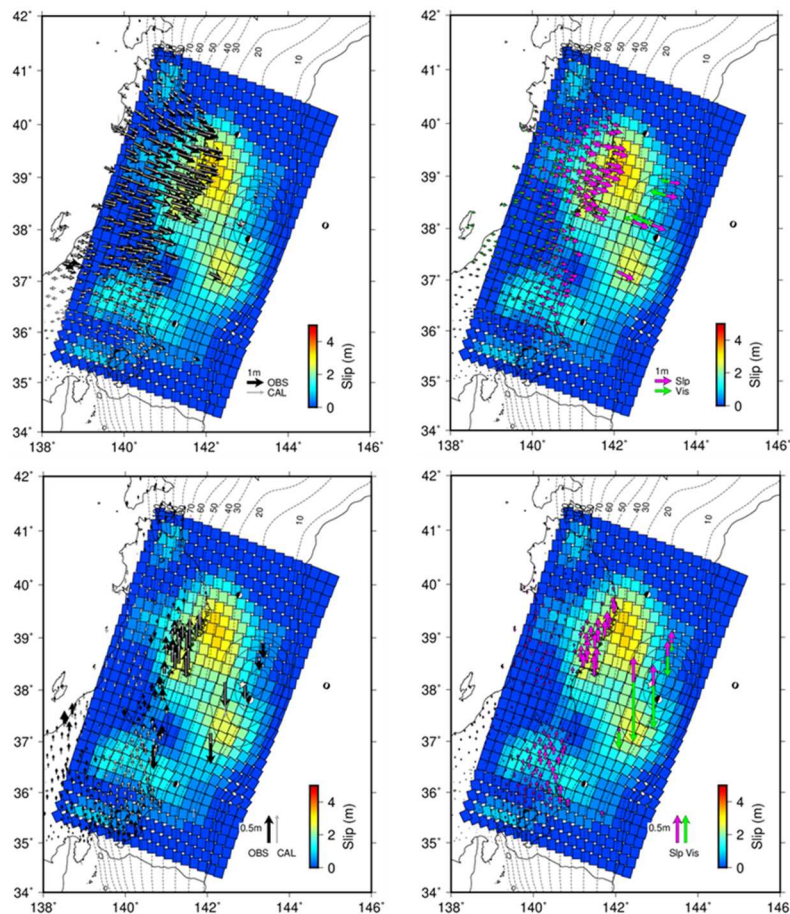


図-2 東北地方太平洋沖地震後5年間の変動量から推定した余効すべり分布。左上及び左下の図は、それぞれ水平及び上下方向の観測値(黒)及び計算値(白)を示す。また、右上及び右下の図は、それぞれ水平及び上下方向の計算値のうち、余効すべり(マゼンタ)及び粘弾性変形(緑)の寄与を示している。粘性率は 1×10^{19} Pa s を使用した。本震の推定すべり分布(黒等値線)、震央(星印)、並びに本震及び主な余震の発震機構解(気象庁)を重ねて表示している。

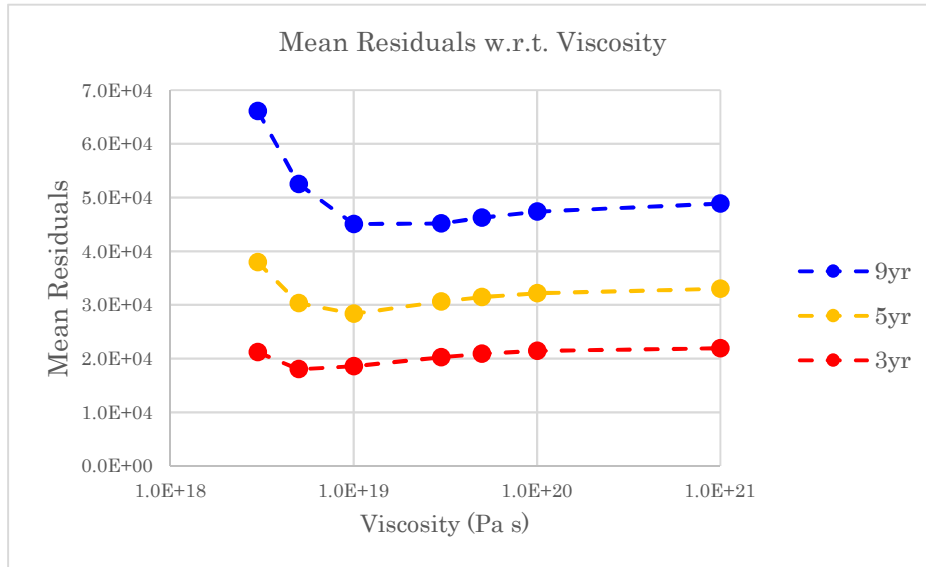


図-3 各粘性率に対する，地震後3年間（赤），5年間（橙），9年間（青）の変動量から推定した結果の残差の平均値．

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-4，図-5に示す．長期的スロースリップの解析では，2019年1月から2021年1月までの間に，四国中部において最大15 cmのすべりが推定された．同領域において推定されたモーメントマグニチュードは6.2である．短期的スロースリップの解析では，2021年1月に四国西部において，プレート境界上のすべりを検出することができた．推定された最大すべり量は2 cmで，モーメントマグニチュードは6.2である．短期的スロースリップのシグナルは数 mm程度と小さいが，時系列に含まれる共通成分を取り除きながらネットワークフィルターをかけることによって，小さなシグナルでもすべり成分を検出することが可能となっている．

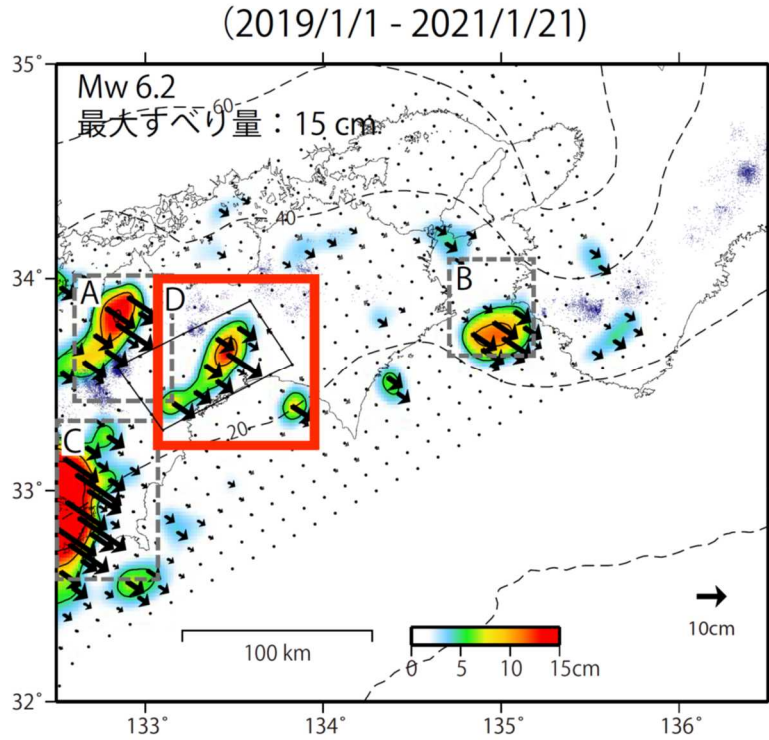


図-4 四国中部において推定されたフィリピン海プレート上の滑り（赤枠 D 領域）。黒破線はプレート境界の等深線、矢印（カラーコンター）はすべり量のベクトル（大きさ）を示す。なお、A 領域、B 領域、C 領域は、それぞれ四国西部の短期的スロースリップ、紀伊水道の長期的スロースリップ、豊後水道の長期的スロースリップに対応している。

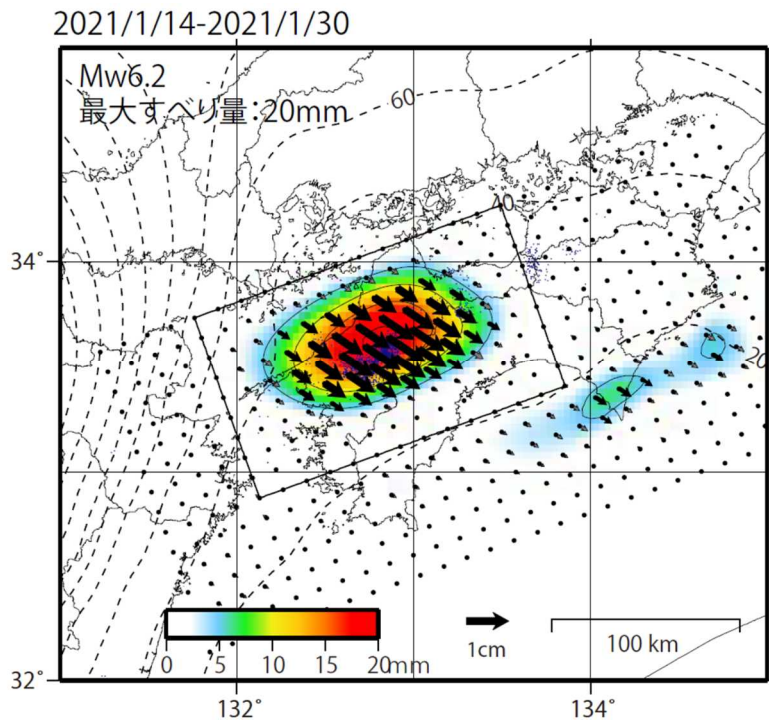


図-5 2021 年 1 月に四国西部から中部において推定されたフィリピン海プレート上の滑り。黒破線はプレート境界の等深線、矢印（カラーコンター）はすべり量のベクトル（大きさ）を示す。青丸は同時期に観測された低周波微動の震源を表す（気象庁一元化震源より）。

4. 結論

粘弾性変形計算プログラムの導入及び試験計算においては、PyLith 及び Relax の動作確認を行うことができた。今後は、両者の結果の違いを調査した上で、課題に応じた使い分けを検討し、より現実的な地下構造モデルでの計算を行う。また、MCMC 法による粘弾性変形を考慮した余効すべりの推定では、簡易な2層構造のもとではあるが、粘弾性変形及び余効すべりの寄与を同時に推定することができた。今後は、スラブの沈み込み等、現実的な地下構造を考慮した推定を行うため、前述の粘弾性変形計算プログラム等を用いた解析を行っていく。

プレート間すべりの時空間変化の推定では、時間依存インバージョンにより、南海トラフ域のプレート間滑りの時空間変化を推定した。その結果、四国中部における長期的スロースリップ及び四国西部から中部における短期的スロースリップを検出できた。今後気象庁の歪データを取り入れた解析を行えるように時間依存のインバージョン解析の改良を行っていく。

参考文献

- Aagaard, B. T., Knepley, M. G. and Williams, C. A. (2013): A domain decomposition approach to implementing fault slip in finite-element models of quasi-static and dynamic crustal deformation, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118, doi: 10.1002/jgrb.50217.
- Barbot, S. (2014): RELAX v1.0.7, Computational Infrastructure for Geodynamics, <https://geodynamics.org/cig/software/relax> (accessed 12 March, 2021).
- Fukahata, Y. and Matsu'ura, M., (2005): General expressions for internal deformation fields due to a dislocation source in a multilayered elastic half-space, *Geophys. J. Int.*, 161, 507-521.
- Hayes, G., Moore, G., Portner, D., Hearne, M., Flamme, H., Furtney, M. and Smoczyk, G. (2018): Slab2, a comprehensive subduction zone geometry model. *Science*. 362. eaat4723, doi:10.1126/science.aat4723.
- Hirose, F., Nakajima, J. and Hasegawa, A. (2008): Three-dimensional seismic velocity structure and configuration of the Philippine Sea slab in southwest Japan estimated by double-difference tomography, *J. Geophys. Res.*, 113, B09315, doi:10.1029/2007JB005274.
- Tomita, F., Inuma, T., Ohta, Y., Hino, R., Kido, M. and Uchida, N. (2020): Improvement on spatial resolution of a coseismic slip distribution using postseismic geodetic data through a viscoelastic inversion, *Earth Planets Space*, 72, 84, doi: 10.1186/s40623-020-01207-0.