アンサンブルカルマンフィルタの地殻変動研究への応用に関する研究（第 1 年次）

実施期間　　令和 3 年度～令和 4 年度
地理地殻活動研究センター
地殻変動研究室　　宗包　浩志

1. はじめに

アンサンブルカルマンフィルタ（以下「EnKF」という.）は，観測データの時系列から，観測データを説明するモデルに関する最も確からしい状態を逐次推定する，逐次データ同化と呼ばれる手法の一つである．EnKF は，Evensen（1994）により提案されたアルゴリズムで，アンサンブルと呼ばれるモデルの状態の推定値の集合体を逐次推定するものである．アンサンブルのばらつきから推定値のばらつきを知ることができること，モデルが非線形の場合にも適用可能であること，また，逐次推定に必要な行列をアンサンブルの統計量から直接計算することができ実装が簡便であることなどの利点を有し，特に数値気象予報の分野で広く使われている.

本研究では，EnKF による地殻変動解析ツールを整備した上で，マグマだまりの位置・体積変化量の推定や，長期的ゆっくりすべりの推定など，地殻変動研究におけるさまざまな問題に適用し，その適用可能性を調査する.

2. 研究内容

2.1 手法の開発

地殻変動解析プログラム pydeform（国土地理院, 2017）に，EnKF によるモデル状態推定機能を実装した．EnKF のアルゴリズムとしては，Ensemble Square Root Filter （Whitaker and Hamill, 2002）を用いた．また，平滑化手法として固定ラグ平滑化法（Cohn et al., 1994）を導入した.

地殻変動解析においては，観測誤差の影響を低減するため，プレート境界面上のすべりがプレートの収束方向にほぼ平行であることを要請するなど，先見情報に基づき推定する状態の範囲を制約することがしばしば行われる. そのような場合に対応するため, 指定した範囲の外にあるアンサンブルは, 範囲内に強制的に移動した上，平均値が変わらないよう係数をかけて調整する処理を導入した（Ying et al., 2018）.

2.2 解析対象

令和 3 年度は，2020 年夏頃から九州南部で観測されている，長期的ゆっくりすべりに伴う地殻変動（e.g., 国土地理院，2021）の解析を行った.

3. 得られた成果

解析には，九州から四国東部，中国地方の電子基準点のうち，平成 28 年（2016 年）熊本地震の余効変動の影響が顕著に見られる観測点(主に熊本県内)を除く計 213 点を用いた. 固定点は三隅(950388)とし，各電子基準点の GNSS 時系列から，2012 年 1 月～2013 年 3 月の期間で推定した定常成分を除去した後, 1 ヶ月ごとにリサンプリングした. その上で, フィリピン海プレートを Hirose et al.（2008）の等深線に従い，一辺の長さが約 10km の小矩形領域に分割し，すべり分布の時間推移を推定した.

その際，すべりの方向は，MORVEL56 （Argus et al., 2011）に従い，フィリピン海プレートとアムールプレートの収束方向に固定した．

図-1 に，2020 年 6 月から 2022 年 1 月までのすべり分布を示す．日向灘南部（赤枠で囲った部分）に顕著なすべりが見られる．図-2 に赤枠で囲った部分の地震モーメントの時系列を示す．地震モーメントの増加は，最近は停滞している．これらの結果は，国土地理院（2021）と整合的である．

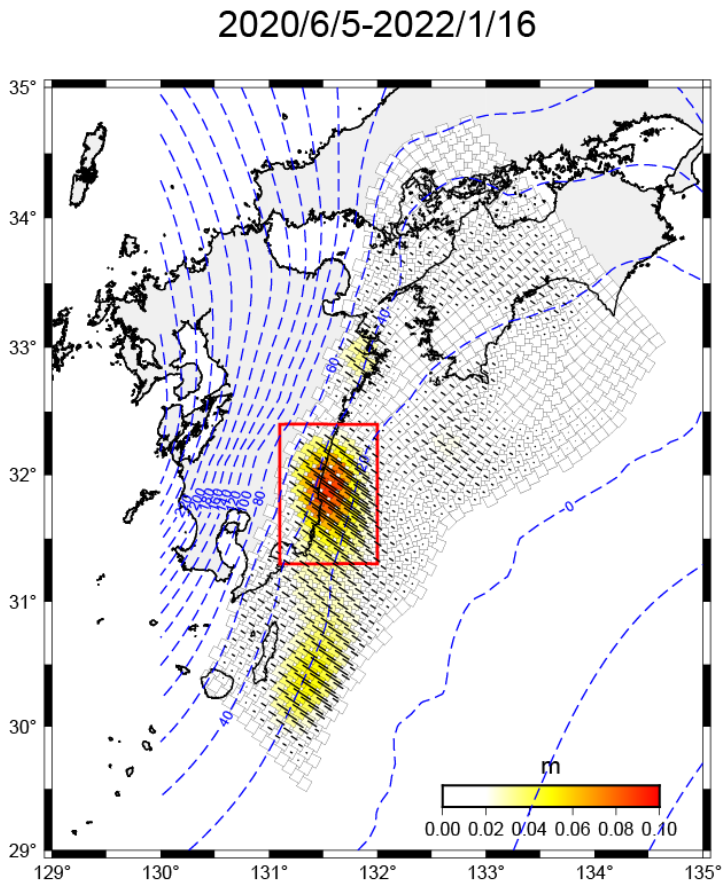

図-1　推定された日向灘南部の長期的ゆっくりすべり（2020 年 6 月～2022 年 1 月）

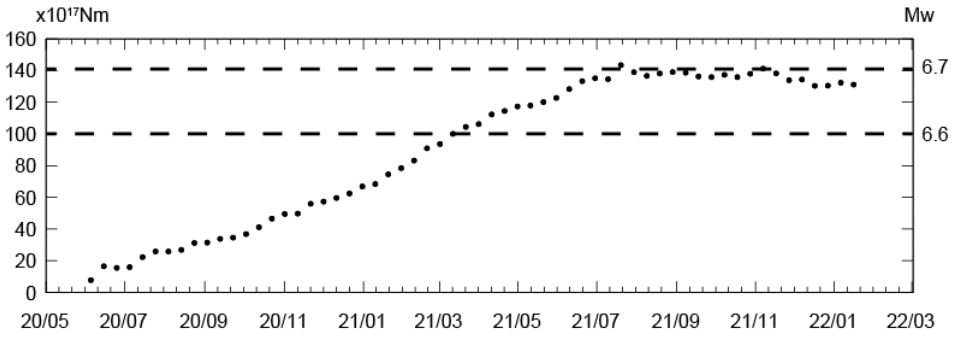

図-2　図-1 赤枠内の地震モーメント時系列

4. 結論

EnKF による地殻変動解析ツールを整備した．日向灘南部の長期的ゆっくりすべりの推定に適用した結果，先行研究と整合的な結果を得ることができた．

参考文献

Argus, D.F., Gordon, R.G., and DeMets, C. (2011): Geologically current motion of 56 plates relative to the no-net-rotation reference frame, Geochem. Geophy. Geosyst. 12, Q11001, https://doi.org/10.1029/2011GC003751.

Cohn. S.E., Sivakumaran, N.S., andTodling,R. (1994): A fixed-lag Kalman smoother for retrospective data assimilation, Mon. Weather Rev., 122(12), 2838-2867.

Evensen, G. (1994): Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics, J. Geophys. Res., 99(C5), 10143-10162.

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.

国土地理院（2017）: 特別研究「GNSS による地殻変動推定における時間分解能向上のための技術開発」終了時評価書，http://www.gsi.go.jp/common/000236913.pdf (accessed 31 Jan. 2022).

国土地理院（2021）: 第 51 回南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会及び南海トラフ沿いの地震防災対策強化地域判定会　記者会見資料（国土地理院分），http://www.gsi.go.jp/common/000187023.pdf (accessed 31 Jan. 2022).

Whitaker. J.S. and Hamill, T.M. (2002): Ensemble data assimilation without perturbed observations, Mon. Weather Rev., 130(7), 1913-1924.

Ying.Y., Chen, X., Zhang, Y., Minamide, M., Nystrom, R., Chen, H., Poterjoy, J., Melhauser, C., Weng, Y., Meng, Z., Aksoy, A., and Zhang, F. (2018): PSU WRF WnKF/4DVar hybrid regional data assimilation system: Technical notes, https://github.com/myying/myying.github.io/tree/master/software/PSU_WRF_EnKF_system_technote.pdf (accessed 31 Jan. 2022).