

12 - 2 陸域地殻変動モニタリング展望

Prospects of Monitoring of Crustal Deformation on Land

畑中 雄樹 (国土地理院)

Yuki Hatanaka (Geospatial Information Authority of Japan)

1. はじめに

前世紀末から今世紀初めにかけて陸域地殻変動観測技術の大きな転換があり、GNSS 連続観測や干渉 SAR のような宇宙測地技術が主力となる一方、かつて主力であった三角点や水準点における繰り返し測量は縮小され、補強役となった。この傾向は今後も続くものと思われる。国土地理院では、他にも、VLBI 観測、験潮、重力等を行っているが、本稿では、干渉 SAR について簡単に触れた後、主として GNSS 連続観測網システム (GEONET) を展望する。

2. 干渉 SAR

2 時点間の地殻変動を面的に把握できる干渉 SAR は、ピンポイントを高精度・連続的に観測する GEONET とは相補的な技術である。その特徴は特に地殻変動の波長の短い陸域の浅い地震において遺憾なく発揮され、断層モデルの推定に制約条件を与えると同時に、地表断層変位やそれ以外のリニアメントを捉え、地質学的な断層変位の累積過程にも光をあてている¹⁾。

解析技術の進歩も著しく、近年、多数の SAR 画像を統計的に処理して、精度を上げつつ、変動の時間変化を追跡する干渉 SAR 時系列解析技術が進展し、活断層周辺の長期的な累積変位の検証などへの活用も期待される。国土地理院でも干渉 SAR 時系列解析を一部地域で実施しており、今後の全国への適用に向けた取り組みが行われている。SAR 衛星についても、新たな ALOS-4 の打ち上げが今後予定されており、植生に強い L-band でより頻度の高い観測が可能になるものと期待される。

3. GEONET による地殻変動モニタリングの現状

GEONET については、観測網の強化、リアルタイム化、マルチ GNSS 対応、解析システムの高制度化など、様々な機能強化をこれまでにやってきた²⁾。陸域地殻変動の基盤観測網として様々な役割を果たしてきたが、地震に伴う地殻変動や力源の迅速な把握以外に、地震後の余効滑り・粘性緩和、SSE (長・短期) やプレート固着といった地震サイクルにおける歪の蓄積・解放過程を理解するために重要な知見がこの観測によって発見され蓄積されつつあることは特筆すべきである。これらの現象の理解をさらに深めるには、長期に渡るモニタリングの継続が不可欠である。そのため、こうした変動を積分量として観測することができる GEONET にとって、観測の長期安定性は今後ますます求められる性能となるものと考えられる。

また、GEONET のデータをリアルタイムで解析して断層モデルを即座に推定する、REGARD が開発され、津波予測支援に活用されるようになった³⁾。その精度は 10cm 程度だが、地殻変動の規模がある程度以上大きければ超巨大地震以外にも適用可能であり、2016 年熊本地震の際には、地殻変動を地震直後に把握するのに役立った。地殻変動のより小さな地震への対応にはさらなる精度向上・安定化が望まれるが、現在使用している GPS および GLONASS 以外に、準天頂衛星や GALILEO を加えることが一つの方法と考えられる。そのためには、ある程度精密でかつリア

ルタイムで使用可能な軌道情報が必要であるため、国土地理院ではこれらの衛星の軌道決定にも取り組んでいる。

4. GEONET の新たな定常解析

GEONET の現行の定常解析戦略 F3 は運用開始から 10 年以上が経過し、採用している座標系が古くなり不安定になるなど、いくつかの問題が明らかになってきた。特に、地殻変動の評価には相対変位を用いることが多く、絶対変位の誤差が問題になることはこれまではほとんどなかったが、近年、絶対変位を用いて地殻変動を議論する研究も出てきているなど⁴⁾、基準座標系の安定性の保持はより重要になってきている。そのため、国土地理院では、これまでの解析仕様に改良を加えた新たな解析戦略 (F5) の開発に取り組んでいる。

F5 解析戦略では、対流圏遅延補正のモデルや座標系を最新のものに更新するとともに、解析における固定点の座標値の推定にグローバル解析を取り入れることにより座標系の安定化を図る。また、GPS による解の他に、それとは独立な解である GLONASS 解、GPS 補完効果が期待される結合解 (GPS+GLONASS) も算出する予定である。特に、座標系の更新とグローバル解析の導入によって、安定な座標系が実現され、F3 解に見られた座標系の不安定に起因する座標値のドリフトが解消される (第 1 図) とともに、上下成分の座標値 (絶対値) の再現性が改善する見込みである。

観測点間の相対変位の精度については、顕著ではないものの、F3 解に対する改善が認められることが、試験的な解析結果によって確認されている。GPS のスタティック解析技術はかなり成熟しているので、今後も、劇的な改善は期待薄だが、GNSS 衛星についてのモデリングなど改善の余地はある。近年、短期的 SSE の議論に GNSS 観測による微少な地殻変動が用いられるようになるなど、地殻変動の議論は、すでに生のデータでは変動シグナルが見えない領域に入りつつある。目測ではわからない微少なノイズ、特に、系統的誤差や時間・空間的に相関を持つノイズがデータ処理によるシグナル抽出に影響する場合も想定される。日々の座標値を用いた精密な議論にとっては、個々の観測点の精度も重要であるが、むしろ、対象地域の観測点のアンサンブルとしての統計的な精度向上とその検証の意味が、今後、より大きくなるかもしれない。

5. 精密単独測位

精密単独測位 (PPP; Precise Point Positioning)⁵⁾⁶⁾ は、近年、発展が著しい GNSS 解析技術で、グローバル観測網のデータを用いて衛星軌道や補正情報を生成するグローバル解析と、補正情報を適応した観測点座標値の算出の 2 つのステップからなる。やや大がかりなグローバル解析を一旦行えば、あとは基線を組まずに観測点毎に座標解を算出できるので、通常の基線解析に比べてアルゴリズムがシンプルになり、手軽に座標解を得ることができる。かつては、位相アンビギュイティーを決定できないのが弱点であったが、ここ 10 年ほどの間にそれを可能にする技術 (PPP-AR) も開発され、精度が向上したこともあり、PPP の利用は、今後ますます普及する可能性がある。(ただし、相対座標の精度については、原理的に、これまでの相対測位法よりも上回るものではない。また、ユーザが PPP を利用するためのサービスも出てきているが、基準座標系はグローバル解析を運用するプロバイダに依存する点には注意が必要である)。

国土地理院では、PPP-AR を用いて、2 時間以内に REGARD よりも高精度なキネマティック解を後処理で得られるシステムのプロトタイプを開発した (第 2 図)。現在、GEONET への導入を

目指して、システムの安定化や高度化に取り組んでいる。

6. 「基盤」観測システムとしての GEONET

GEONET は陸域地殻変動モニタリングの基盤的ツールであると同時に、様々な GNSS 観測との連携の中核としても基盤的役割を果たしているといえる。GEONET による陸域の広域観測結果を基準として与え、海底地殻変動観測をはじめとするその他の地殻変動観測データを解析することによって、それらの結果を合わせて統一された基準で議論することが可能となる。国土地理院においても、この方法を実装した GPS 統合解析システムが運用されており、協定により入手した他機関の GNSS 観測点のデータに適用して得られた解析結果を、F3 解と合わせて地殻変動の監視に使用している。将来、PPP-AR が GEONET の定常解析に採用されれば、他機関の観測点に対しても同じ手法を適用することによって、現在の GPS 統合解析と同様の効果をよりシンプルに実装することが可能となるだろう。

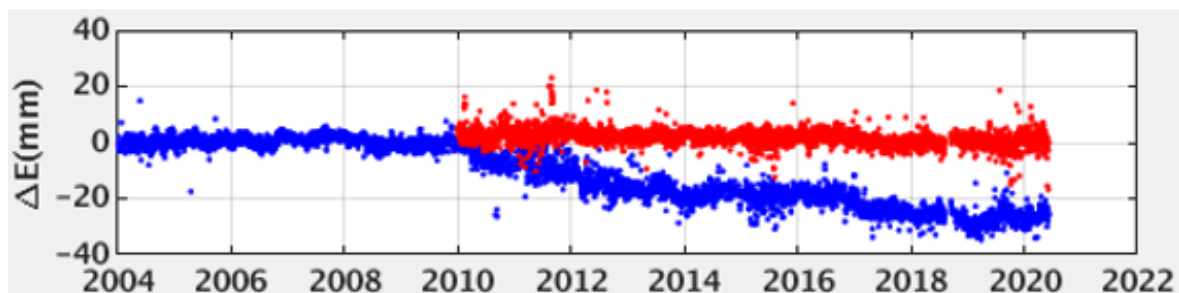
PPP では絶対的な座標値が観測点ごとに直接得られるので、GEONET に合わせなくても、各点の座標値から得られる変位をそのまま共有すればよいと思われるかもしれない。これは co-seismic な変位のような短期的な変動についてはある程度正しいが、長期的な変動を精密に追跡する場合には 2 点ほど注意すべき点がある。一つは、絶対変位が基準とする ITRF 座標系が必ずしも地殻変動の解釈に適さないことである。地殻変動を解釈・イメージするためには何らかのモデルが必要であり、そのモデルには暗黙裡に「不動の」座標フレーム（例えば無限遠で変位が 0 のような境界条件に対応した座標フレーム）が仮定される。しかし、ITRF 座標系はそういった地殻変動の解釈の枠組みとしての座標フレームとは別物である。そのため、地殻変動を解釈するには、得られた変位をそのモデルに適合する座標系に変換する操作が、いずれにしても、必要となる（例えば、地殻変動を表示する際に力源から離れた観測点を固定点として設定するのはそういった方法の一つである）。日本列島を広域的にカバーする GEONET は、その際の指針を与えるのに必要となろう。

もう一つの注意点は座標系の統一に関するものである（第 3 図）。IERS（国際地球回転および基準系サービス）によって維持され、現在最も権威ある座標系である ITRF（以下、「本家 ITRF」と記す）は、近年は 6～7 年に一度更新されている。GNSS に関しては、本家 ITRF ではなく、本家 ITRF に整合するように IGS（国際 GNSS サービス）によって実現された座標系（以下「IGS 版 ITRF」と記す）が通常使用される。IGS 版 ITRF は数年後に追加更新されることもあり、過去のデータを再解析し、本家 ITRF の更新に反映するのが最近の流れになっている。一方、GEONET の定常解析に使用されている座標系は、ITRF（本家、または IGS 版）に基づく独自の実現系である。同じ ITRF でも、その実現方法により微妙な違いがあるため、異なる組織・システム・手法・機関の GNSS 解析結果を組み合わせて長期的な変動について精密な議論をするためには、それぞれの解析において参照された座標系の素性とその整合性には細心の注意が必要となる。各座標系（実現系）間の不整合をその時間変化も含めて把握し、変換・補正する仕組みが必要になるであろう。

（国土地理院地理地殻活動研究センター 畑中 雄樹）

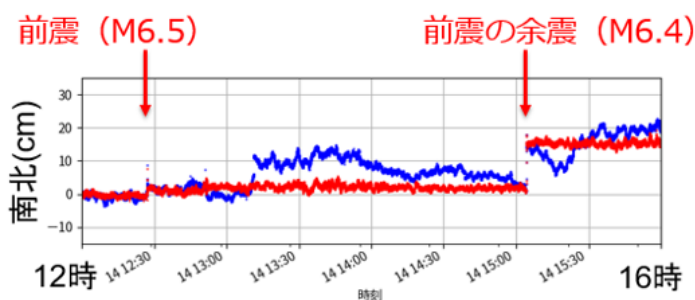
参考文献

- 1) Fujiwara, S., et al. (2016), *Earth, Planets and Space*, **68**, 160, DOI 10.1186/s40623-016-0534-x.
- 2) 辻宏道・他 (2017), *国土地理院時報*, **129**, 85-111.
- 3) Kawamoto, S., et al. (2018), *J. Disaster Res.*, **13**, No.3, 440-452.
- 4) Bedford, J.R. et al., *Nature* **580**, 628–635 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2212-1>.
- 5) Zumberge, J. F., et al. (1997), *J. Geophys. Res.*, **102**(B3), 5005–5017, doi:10.1029/96JB03860.
- 6) Ge, M., et al. (2008), *J. Geod.*, **82**, 389 – 399, DOI 10.1007/s00190-007-0187-4.



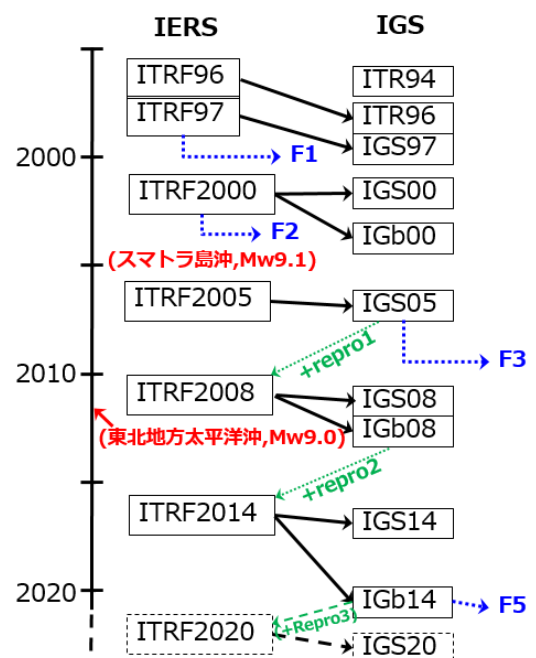
第 1 図 F3 解 (青) および F5 試験解 (GPS 解, 赤) の IGS 解からの差の時系列 (TSKB, 東西成分)

Fig. 1 Time series of deviation of the coordinates of the IGS site TSKB from the IGS final solutions (E-W component). The F3 solutions (blue) and the F5 test solutions (red).



第 2 図 2016 年熊本地震における、「福江」に対する「城南」の相対変位の時系列の比較. REGARD 解 (青) および後処理 PPP 解 (赤). 横軸は 2016/4/14 の時刻 (UT).

Fig. 2 Comparison of time series of N-S component of Fukue-Jounan baseline. The REGARD solutions (blue) and the post processed PPP-AR solutions (red). Horizontal axis shows time on 14 April, 2016 (UT).



第 3 図 最近 25 年間の国際地球基準座標系 (ITRF) の更新履歴

Fig. 3 ITRF update history for the last 25 years.