

小型 GNSS 機器を用いた詳細かつ迅速な地殻変動把握手法の開発（第 4 年次）

実施期間 令和 3 年度～令和 7 年度
地理地殻活動研究センター
宇宙測地研究室 服部 晃久

1. はじめに

国土地理院が整備・運用する電子基準点網（GEONET）は、日本全国に約 1,300 点の GNSS 観測点を有し、地殻変動の常時監視において中核的な役割を果たしている。GEONET の平均観測点間隔は全国で約 20 km と比較的高密度ではあるものの、地盤沈下や局地的な地殻変動といった小スケールの現象を高精度に把握するには、なお不十分な場合がある。

宇宙測地研究室では、既存の観測網では捉えきれない局所的な地殻変動、地盤沈下、地震後の余効変動、さらには火山活動の兆候などを、より高い空間分解能で検出することを目的として、小型かつ可搬性に優れた GNSS 観測装置の開発及び実証的な運用を進めてきた。本装置は、近年普及が進む小型 GNSS アンテナ及び受信機を活用したものであり、必要な地域に対して機動的に観測点を展開し、高密度なデータ取得を可能とすることが期待されている。

これまでに実証実験の一環として、令和 2 年度に千葉県房総半島に 10 基、令和 4 年度に更に 20 基の小型 GNSS 観測装置を設置し、計 30 基による継続的な観測を実施してきた（古屋, 2023）。令和 6 年度にはこのうち 11 基を撤去し、残る 19 基については引き続き運用を継続している。

また、令和 2 年度からは石川県珠洲市においても小型 GNSS 装置の試験設置を行ってきたが、令和 6 年能登半島地震の発生を受け、同年中に石川県輪島市に新たに 3 基の観測点を設置した。これら珠洲市の 1 基と合わせた計 4 基の装置により、地震時及び地震後の余効変動を検出した後、いずれも当初の目的を達成したため、観測装置の撤去を実施した。

本研究課題でこれら小型 GNSS 装置による観測を開始してから、令和 6 年度末時点まで、最長でも 3 年、短い場合には 1 年未満と観測期間が限られている。これは GEONET の長期時系列データと比べると、限定的である。このため令和 6 年度には、短期間のデータに対しても地殻変動成分を推定可能とするため、カルマンフィルタを用いたスムージングの適用とその有効性の検討を行った。

2. 研究内容

2.1 千葉県房総半島

千葉県房総半島は、これまでに顕著な地盤沈下が報告されているほか、スロースリップイベントも複数回観測されてきた地域である。こうした地盤変動の多様な時空間スケールを高密度に把握することを目的として、本研究では房総半島における小型 GNSS 観測装置の展開を進めてきた。

令和 2 年度には、千葉県内に 10 基の小型 GNSS 観測装置を設置した。さらに令和 4 年度には、観測対象範囲の拡張と空間分解能の向上を目的として、新たに 20 基を追加設置し、計 30 基による高密度な観測体制を構築した。これらのうち、地盤沈下が報告されている地域に設置された装置では、継続的な沈降傾向が確認されており、地盤沈下の空間的分布及び時間変化を把握する上で有効なデータが取得されている（図-1）。

令和 6 年度には、設置から 3 年が経過した令和 2 年度設置分 10 基に加え、令和 4 年度に設置した 1 基の、計 11 基の装置について撤去を実施した。これにより、現在も観測を継続している装置は 19 基

となり、地殻変動の検出及び時系列データに基づく変動解析を引き続き実施している（図-2）。

また、これらの小型 GNSS 観測装置を加えたことによる観測網の稠密性向上によって地殻・地盤変動推定がどのように改善されたかを評価するため、GEONET のみを用いた場合と、小型 GNSS 装置を含めた場合の双方について、普通クリギング法による空間内挿を適用し、地盤沈下範囲の推定結果を比較した。その結果、小型 GNSS 観測装置を加えた場合の方が、より短い空間波長の変動を捉えることができ、衛星 SAR 解析から得られる上下方向の変位成分との整合性も高い結果が得られた（図-3）。

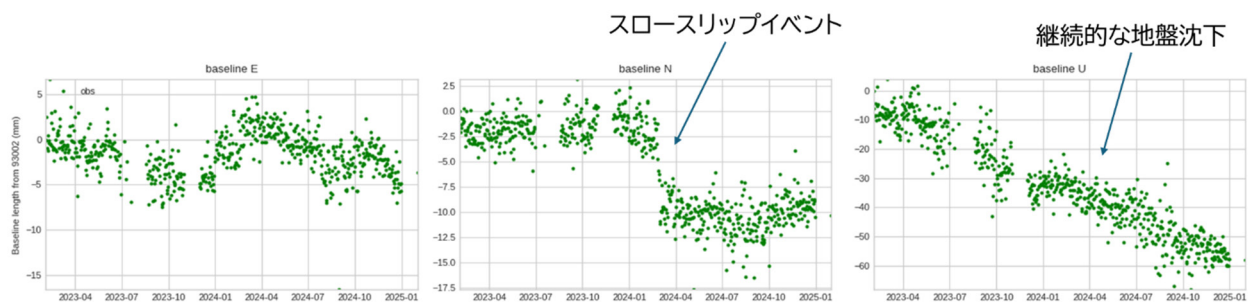


図-1 令和 4 年 11 月に千葉県富里市に設置した小型 GNSS 観測点で観測された変動（固定局：電子基準点「八郷（93002）」）。左から、東西成分、南北成分、上下成分を示す。

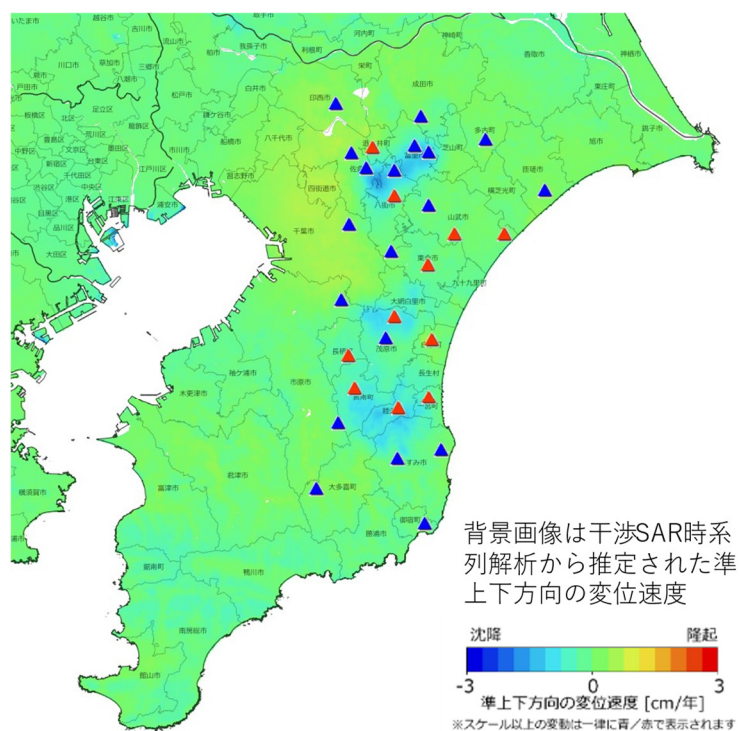


図-2 千葉県房総半島に設置している小型 GNSS 観測点の配点図。赤点は令和 6 年度に撤去を実施した 11 点、青点は継続して観測を実施している 19 点を示す。

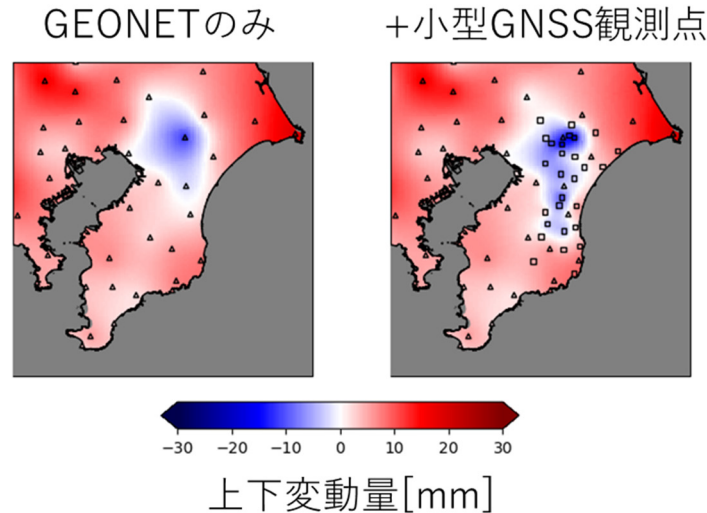


図-3 GNSS 観測結果から普通クリギングによって空間内挿した房総半島における 2023 年に生じた上下変動。
 (左) 電子基準点のみを使用した場合, (右) 小型 GNSS 観測点を加えた場合.

2.2 能登半島での試験観測

2.2.1 珠洲市狼煙町での試験観測

石川県珠洲市狼煙町においては, 小型 GNSS 観測装置の観測性能の検証及び可搬型 GNSS 連続観測装置 (REGMOS) との比較を目的として, 令和 4 年より REGMOS と同一敷地内に小型 GNSS 観測装置を設置し, 観測性能及び設置安定性の評価を段階的に実施してきた. これまでの観測では, 座標推定精度において REGMOS と同等の結果が得られており, 特に令和 6 年 1 月 1 日に発生した能登半島地震の際には, 通信障害により一時的に通信が困難となったものの, 地震時の地殻変動を確実に観測していたことが確認されている. これらの結果から, 小型 GNSS 観測装置は簡易な構成ながらも, 地殻変動の検出手段として実用に耐える性能を有することが示された (松本, 2024; 小林ほか, 2024).

こうした比較検証の目的がおおむね達成されたことを受け, 珠洲市に設置していた小型 GNSS 観測装置は令和 6 年 6 月に撤去を実施した.

2.2.2 輪島市での観測

令和 6 年 1 月 1 日に発生した能登半島地震では, 能登半島全域で顕著な地殻変動が観測された. なかでも輪島市西部では, 約 4 m の隆起が確認されるなど, 特に大きな変動が発生した (国土地理院, 2024). 当該地域には電子基準点が設置されていなかったため, 地震後の余効変動を把握することを目的として, 立入制限が一部緩和された令和 6 年 1 月 20 日及び 21 日に, 輪島市門前町内の 3 地点に小型 GNSS 観測装置を設置した (図-4). 各装置には太陽電池パネルを搭載し, 電源確保が困難な現地環境下においても, 自律的な長期観測が可能な構成とした.

設置以降, 一部で通信機能に障害が発生したものの, 測位機能は安定して稼働を継続し, 地震後の余効変動を良好に捉えることができた (図-5). 観測目的が十分に達成されたことを受け, 令和 6 年 11 月に 3 基全ての観測装置を撤去した. 得られた時系列データは, 地震後変動モデルの検証に活用されており, これらの観測点で記録された地殻変動の詳細については, 小林ほか (2024) において報告されている.

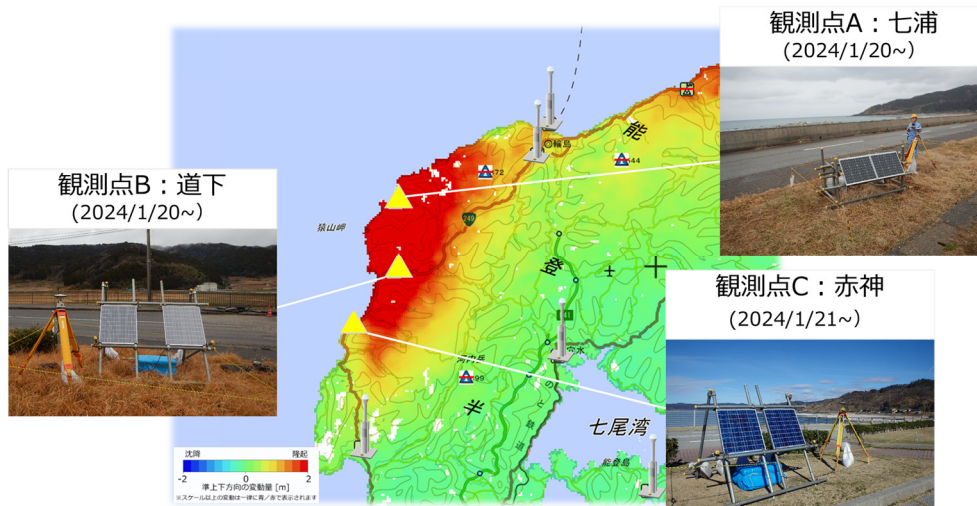


図-4 小型GNSS観測装置の設置場所（輪島市門前町）.

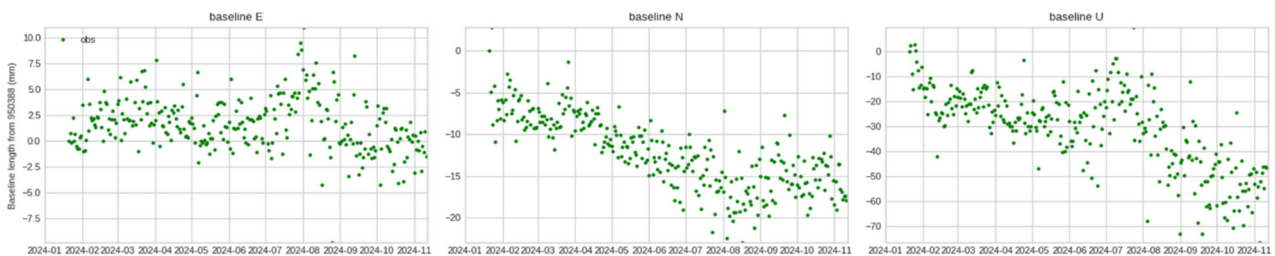


図-5 石川県輪島市門前町赤神に設置した小型 GNSS 観測点で観測された能登半島地震後の変動（固定局：電子基準点「三隅（950388）」）。左から，東西成分，南北成分，上下成分を示す。

3. トレンド成分の推定手法

小林ほか（2022，2023）では，F5 解に基づく地表変動モデルの作成に当たり，年周変動成分を三角関数で，地震後の地殻変動を指数関数及び対数関数で表現する関数フィッティングを用いて，GNSS 時系列のモデル化を行っている．この関数フィッティング手法は，異常値に対して比較的堅牢であるという利点を有する一方，精度の高いモデル推定には長期間の観測データが必要となる．

一方で，小型 GNSS 観測装置は機動的な設置，観測を前提としており，地震後の余効変動観測や火山活動が活発化している地域に機動的に設置する場合などでは，長期間の観測データが蓄積される前に観測点を撤去する場合も想定される．そのため，得られる観測データは必然的に比較的短期間に限られる場合がある．このような場合，小林ほか（2022，2023）の手法のように，三角関数で年周変動を，指数関数や対数関数で地震時の地殻変動を表現する関数フィッティングを用いる方法では，短期的な変動を適切にモデリングすることが難しい．これは，関数フィッティングが年周変動などの周期成分や，余効変動の漸近的な収束を前提とした関数形に基づいており，モデルパラメータの安定した推定には一定のデータ期間が必要となるためである．短期間の観測では，周期的成分や非線形な緩和挙動を十分に捉えきれず，過剰適合やモデル不安定性が生じやすくなる．

そこで令和 6 年度は，短期間の時系列データに対しても柔軟に変動成分を推定可能とするため，カルマンフィルタを用いた時系列モデルの試験的な検討を行った（図-8）．カルマンフィルタを用いた場合には，フィルタの強度設定により変動の細部を追いやすくなる一方で，観測値とモデル値との乖離も低減される傾向が確認された．ただし，フィルタの設定によっては異常値を過剰に追従する傾向も

認められたため、今後は異常値の除去・抑制手法を含めた更なる適用条件の検討が必要である。

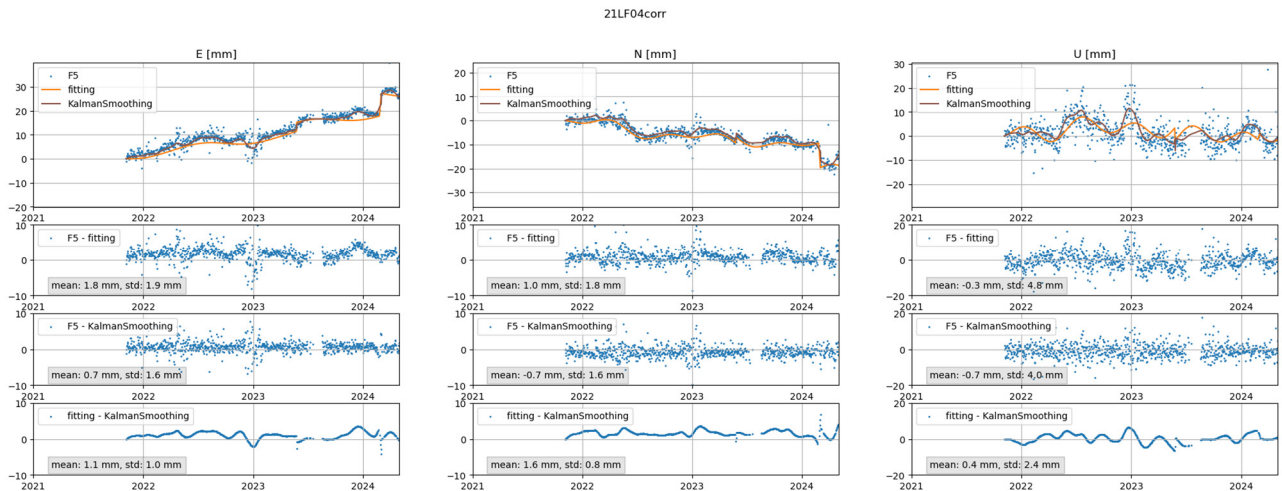


図-8 千葉県長柄町に設置した小型 GNSS 観測装置で観測された変動（青点）に対して、関数フィッティング（オレンジ線）とカルマンフィルタ（赤）を使用した場合の比較。左から、東西成分，南北成分，上下成分を示す。

4. まとめ

地殻変動把握手法の開発に向けて、引き続き小型 GNSS 観測装置の性能について検証を実施した。本研究課題は令和 7 年度に終了を予定しており、令和 6 年度は順次設置した観測装置の撤去も進めてきた。今後は、これまでの開発、実験から蓄積が進められてきた小型 GNSS 観測装置の観測データを用いて、分解能が高く、かつ迅速性の高い地殻変動把握手法の開発を進める。

参考文献

- 古屋智秋（2023）：小型 GNSS 機器を用いた詳細かつ迅速な地殻変動把握手法の開発（第 2 年次），国土地理院令和 4 年度調査研究年報，140–146。
- 小林知勝，中川弘之，古屋智秋，森下遊，松尾功二（2022）：災害に強い位置情報の基盤（国家座標）構築のための宇宙測地技術の高度化に関する研究（第 2 年次），国土地理院令和 3 年度調査研究年報，168–174。
- 小林知勝，中川弘之，古屋智秋，松尾功二（2023）：災害に強い位置情報の基盤（国家座標）構築のための宇宙測地技術の高度化に関する研究（第 3 年次），国土地理院令和 3 年度調査研究年報，168–174。
- 小林知勝，中川弘之，松尾功二，松本紗歩，服部晃久，宗包浩志，桑原将旗，宮本純一，加古考範，岩本健吾，岩田和美，古屋智秋，植田勲，多田直洋，畔柳将人，小川拓真（2024）：小型 GNSS 観測装置で捉えた令和 6 年能登半島地震の地震時・地震後の地殻変動，国土地理院時報，138，25–32。doi:10.57499/JOURNAL_138_04
- 国土地理院（2024）：「だいち 2 号」観測データの解析による令和 6 年能登半島地震に伴う地殻変動（2024 年 1 月 19 日更新）https://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/20240101noto_insar.html (accessed 28 Mar. 2024)。
- 松本紗歩（2024）：小型 GNSS 機器を用いた詳細かつ迅速な地殻変動把握手法の開発（第 3 年次），国土地理院令和 5 年度調査研究年報，134–139。