

迅速・高精度な GNSS 定常解析システムの構築に関する研究（第 3 年次）

実施期間 平成 29 年度～令和元年度
地理地殻活動研究センター
宇宙測地研究室 中川 弘之

1. はじめに

GEONET の定常解析による電子基準点の座標時系列は、地震活動の評価や噴火時の噴火活動の推移監視等における基礎的な資料として活用されている。

しかし、地殻変動の監視においては、現在の定常解析の性能では現象のタイムリーな把握において、迅速性や時間分解能が不十分な場合がある。平成 28 年（2016 年）熊本地震（以下「熊本地震」という。）においては、もっとも迅速な Q3 解でも地殻変動情報が得られたのは 5 月 14 日夜の前震の翌朝になった。地震調査委員会の臨時会は通常、大地震発生の半日後には開催されるため、地殻変動情報提供が会議に間に合わず、地震像の把握が遅れる可能性があった。また、時間分解能については、もっとも高い Q3 解でも 6 時間である。例えば、火山において噴火直前の山体膨張や噴火後の収縮を監視するような場合、Q3 解では時間分解能が不足して、火山活動の評価に支障をきたす可能性がある。また、複数の地震が短時間に連続して生じた場合には、各々に起因する変位を適切に分離できない可能性がある。

一方、現在津波早期警報の支援のために国土地理院において運用されている REGARD では、リアルタイムに時間分解能 1 秒で地殻変動を捉えることができる（Kawamoto, 2018）。しかし、その水平精度はおおよそ 10cm で GEONET 定常解析より劣っている。

そこで全国の GEONET データを、従来よりも迅速・高時間分解能に解析できる手法を開発するとともに、将来の地殻変動監視における定常運用を想定したプロトタイプシステムの構築を目的とした特別研究を 2017 年度から 3 年計画で開始した。

上記の目的を達成するために、プロトタイプシステムの性能目標として、①座標の水平成分の再現性は現在の Q3 解と同程度である約 1cm、②地震後に政府の臨時の会議に断層モデルを適切なタイミングで提出するためにデータ取得後 2 時間以内に解を算出、③火山噴火や地震後の余効滑り域の監視を念頭に解の時間分解能は 1 秒、の 3 点を設定した。この目標を達成するために、昨年度までに波数の整数不確定性を決定する精密単独測位法（Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution. 以下「PPP-AR」という。）を用いてプロトタイプシステムを構築した（中川, 2019）。図-1 にその概要を示す。

2. 研究内容

本年度は前年度までに構築したプロトタイプシステムを用いて試験解析を行い、①推定した衛星軌道の品質の評価、②座標時系列の再現性の評価、③有効性の検証として熊本地震の前震及び前震の最大余震を事例とした地殻変動の検出、を行った。本稿ではその結果とともに、3 年間の研究の当初目標の達成度と今後の展望についても記す。

3. 得られた成果

3.1 推定した衛星軌道の品質の評価

推定した衛星軌道の品質評価として、2018年7月から2019年6月の1年間について、IGS最終暦との差の標準偏差を計算し、合わせてIGS超速報暦（予測部分）、IGS超速報暦（観測部分）及びIGS速報暦とIGS最終暦との差の標準偏差と比較した。その結果を図-2に示す。

本研究で推定した衛星軌道のIGS最終暦との差の標準偏差は2~5cm程度となった。IGS超速報暦（予測部分）では、IGS最終暦との差の標準偏差は、数cm~十cm程度であるので、本研究の成果の方が整合性が高い。その理由は、本研究で推定した衛星軌道は予測を含まないためだと考えられる。一方、IGSの速報暦と超速報暦（観測部分）と比べると本研究の標準偏差は大きい。ただし提供に要する時間は、IGS速報暦とIGS超速報暦（観測部分）ではそれぞれ17時間及び3時間に対し、本研究では15~20分程度と迅速性にははるかに秀でている。さらに、図-2でIGS超速報暦やIGS速報暦で

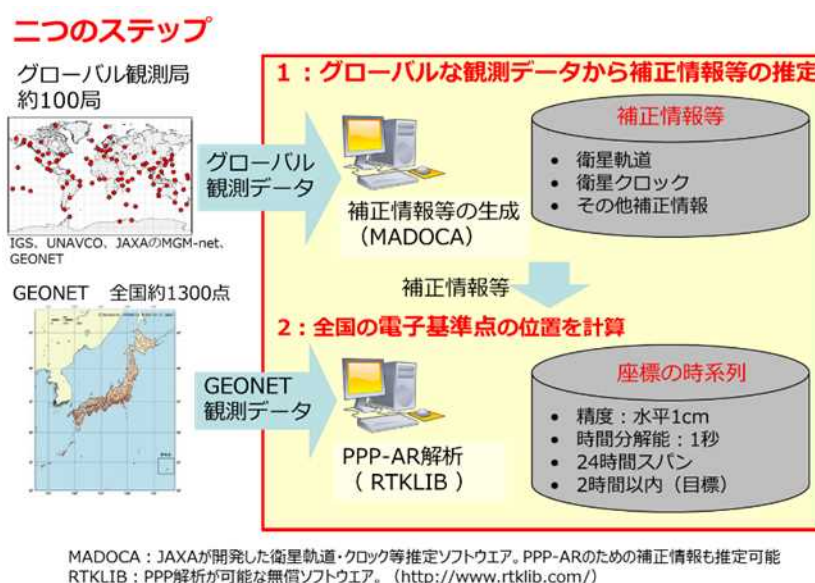


図-1 プロトタイプシステムの模式図。

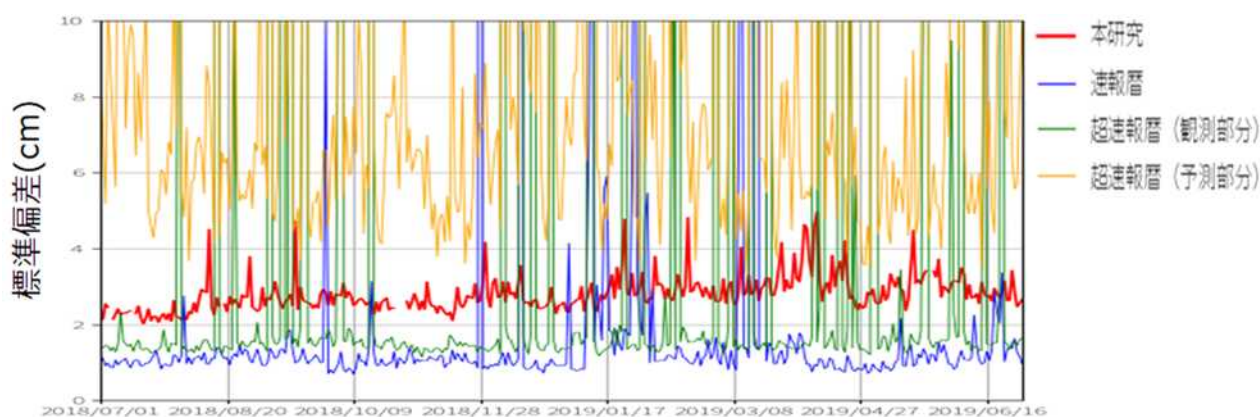


図-2 GPSの衛星軌道：IGS最終暦との差分の標準偏差

見られる標準偏差の大きさとびは本研究では見られず、本研究の方が安定性が高いことがわかる。

3.2 座標時系列の再現性の評価

2018年7月1日から2019年6月30日の1年間について、全電子基準点の1秒間隔座標時系列を算出し、日々（UTC0時から24時間）の水平成分の標準偏差を計算した。その際、本評価の目的がプロ

トタイプシステムの解析手法の品質を評価することから、点固有のデータ品質の低下を生じる「外的な要因」によって座標解のばらつきが増加したことが明確な電子基準点 136 点を除外した 1170 点について評価を実施した。「外的な要因」とは具体的には、アンテナ又は受信機の不調による試験期間内での機器の交換、樹木等によるマルチパスの増大、および携帯電話中継局等の電波干渉源の影響である。

座標時系列水平成分の標準偏差のヒストグラムを図-3 に示す。全体のおよそ 85%の時系列が 1.2cm 以内に収まっていることがわかる。また、これらの標準偏差を通年で平均した値は約 1.00cm となり、目標をほぼ達成することができた。

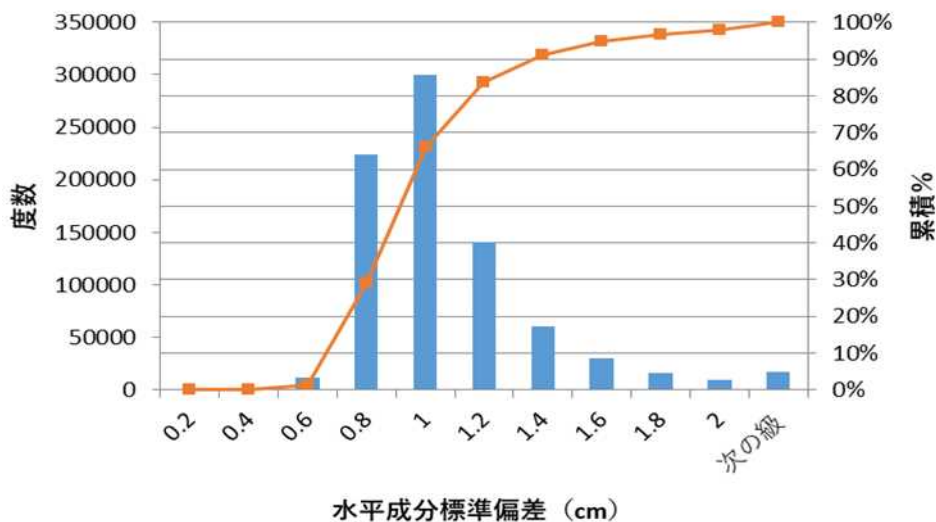


図-3 座標時系列水平成分の標準偏差のヒストグラム。青い棒グラフは度数、橙の折れ線は累積%を表す。

3.3 有効性の検証

熊本地震では 4 月 14 日 12 時 26 分 (UTC. 以下同じ) に前震 (M6.5) が発生し、その約 2 時間半後の 15 時 03 分に前震と同規模 (M6.4) の前震の最大余震が発生したが、この二つの地震による地殻変動は、GEONET の定常解析では時間分解能が不足していたため分離できなかった。そこで本研究で構築したプロトタイプシステムの有効性の検証として、この地震の前震と前震の最大余震について、地殻変動の検出を試み、その結果を REGARD がリアルタイムで推定した結果と比較した。

図-4 に本研究と REGARD についてこの二つの地震を含む 4 時間の変動量の時系列を示す。本研究、REGARD とも水平成分には二つの地震前後でステップが見られ、地殻変動を検出できている。一方で期間全体では本研究の方が安定しており、迅速性は REGARD に劣るが精度は高いことがわかる。

4. まとめ

本年度は研究計画の最終年度として、昨年度までに構築したプロトタイプシステムによる座標時系列の品質評価および実際の地震に伴う地殻変動の試験解析による有効性の評価を行った。1 年間の試験解析の結果、推定された GPS の衛星軌道暦の品質は、IGS 最終暦を基準とした場合、超速報暦の観測部分や速報暦には劣るが、超速報暦の予測部分よりは整合性が高いという結果が得られた。また、座標時系列の水平成分の標準偏差の平均値は約 1cm となり、従来の GEONET と同程度の精度の地殻変動情報が得られる見通しがたった。さらに、熊本地震では約 2 時間半の間に発生した M6.5 規模の

二つの地震の地殻変動を精度良く分離できることが示され、地殻変動の検出に有効であることが確認された。

今後は解析の迅速化、システムの安定性の向上、座標時系列の安定性の向上等を図るとともに、補正情報等や座標時系列の品質チェックの方法を検討し、その後に定常的な運用へと移行していきたい。また、座標時系列の安定性の向上のために、推定する補正情報等の準天頂衛星システムや Galileo 等への拡張について、特別研究「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」（令和 2～6 年度）に引き継いで実施していく予定である。

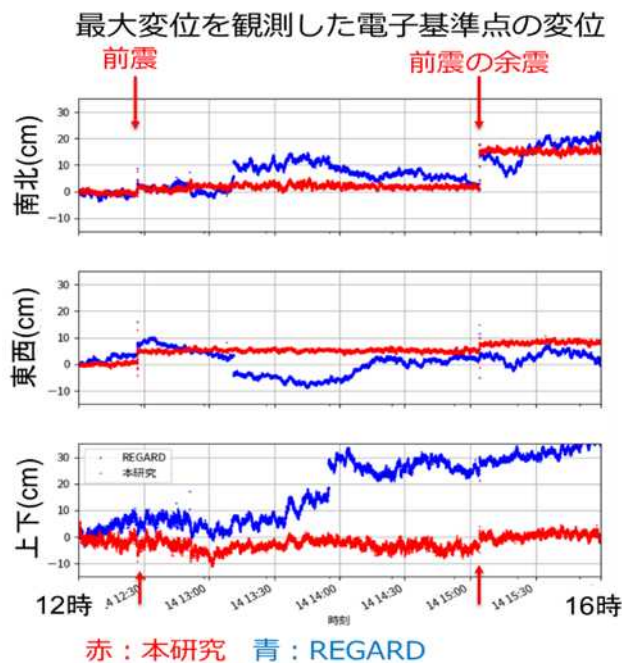


図-4 最大変位を観測した電子基準点の変位の時系列

謝辞

IGS 及び UNAVCO からはリアルタイム GNSS データストリームを提供いただいた。MADOCA 及び MGM-net のデータは、(国研)宇宙航空研究開発機構 (JAXA) と国土地理院の包括的協力の協定書に基づき JAXA から貸与を受けた。測位計算には、東京海洋大学の高須知二研究員が開発したオープンソースのソフトウェア RTKLIB に国土地理院の宗包浩志氏が改良を加えたものを使用した。

参考文献

Kawamoto, S., Takamatsu, N., Abe, S., Miyagawa, K., Ota, Y., Todoriki, M. and Nishimura, T. (2018) : Real-Time GNSS Analysis System REGARD: An Overview and Recent Result, Journal of Disaster Research, Vol.13, No.3, 440-452.

中川弘之 (2019) : 迅速・高精度な GNSS 定常解析システムの構築に関する研究 (第 2 年次), 平成 30 年度調査研究年報, 146-149.