

## 研究課題終了時評価書

1. 研究課題名： 迅速・高精度なGNSS定常解析システムの構築に関する研究
2. 研究期間： 平成29年4月～令和2年3月（3年間）
3. 予算： 特別研究経費 26,443円（3年間の総額）

### 4. 成果の概要

#### (1) プロトタイプシステムの構築

従来手法と同程度の精度でより迅速にGNSSの解析を行うことが可能なPPP-AR法を用いて、全国の電子基準点の位置を従来よりも迅速・高時間分解能に算出できる準リアルタイムPPP定常解析システムのプロトタイプを開発した。

プロトタイプシステムは、最初に①グローバル観測データからPPP-ARに用いる直近24時間の衛星軌道、衛星クロック、その他の補正情報（以下「補正情報等」）を推定し、次に②推定した補正情報等を用いて全国の電子基準点の24時間座標時系列（1秒間隔）を計算するという2段階で構成した。①の補正情報等を推定する段階では、IGS、UNAVCO、JAXA等が運用しているグローバル観測局およそ100点のデータを用いて後処理により過去24時間の補正情報等を推定する。その際、長時間の欠測が生じている観測局が含まれていたり、衛星クロック推定の基準に用いる観測局の基準時計が不安定だったりすると補正情報等の安定性が低下し、それらを用いて計算した電子基準点の座標時系列にばらつきや系統的な差が生じるようになる。そこで、補正情報等の推定にあたっては、1時間以上の欠測を含むグローバル観測局を除外することとした。また、安定した基準時計を選定するために、グローバル観測局の中から基準時計に用いる候補局を複数あらかじめ選定しておき、補正情報等を推定する際には、それぞれの候補局を基準時計として衛星クロックを推定し、それらを用いて電子基準点1点の座標時系列を計算した上で、ばらつきの最も小さい座標時系列を与えた候補局を基準時計として選定することとした。

また、②の全国の電子基準点の座標時系列を計算する段階においては、複数の計算機を用いてそれぞれの上で複数のプロセスを並行して実行することによって解析時間の短縮を図った。

このプロトタイプシステムにより、全国の電子基準点の24時間座標時系列（1秒間隔）をおよそ2時間半程度で算出できた。

#### (2) 推定した衛星軌道情報の品質評価

2018年7月から2019年6月の1年間の試験期間について、推定した日々のGPSの衛星軌道とIGS最終暦との差の標準偏差を計算したところ、その値は2～5cm程度となった。これはIGS超速報暦（予測部分）と最終暦との差の標準偏差（数～十cm程度）よりも良好だった。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。IGSの速報暦と超速報暦（観測部分）（いずれも1～2cm弱）に比べると本研究による衛星軌道情報はIGS最終暦との差は大きいものの、IGSのこれらの軌道情報は、提供までにそれぞれ17時間日および3時間を要することから、15～20分程度で軌道情報を算出する本研究の方が迅速性に秀でている。また、IGSの超速報暦や速報暦で見られる標準偏差の大きさとびは本研究では見られず、安定性が高いことがわかった。

#### (3) 座標時系列の品質評価

(2) で述べた1年間の試験期間について、1日1回、電子基準点全点の24時間座標時系列(1秒間隔)を求め、その東西成分と南北成分の標準偏差について評価を行った。その際、「外的な要因」で座用時系列の品質が劣化する電子基準点、具体的には、①機器(受信機、アンテナ)の不調により試験期間中に機器を交換した電子基準点、②観測環境が不良な(樹木による遮蔽等)電子基準点、③近隣の携帯電話基地局等の電波発生源から電波干渉を受けていることが明確な電子基準点計136点を除外し、残りの1170点を用いて評価を行った。その結果、標準偏差の平均値は通年で平均値が約1.00cmとなり性能目標をほぼ達成できた。また、夏期は約1.15cm、冬期は約0.90cmであり、夏期にばらつきが大きく冬期に小さいという季節変化がみられた。

#### (4) 2016年熊本地震に伴う地殻変動検出による有効性評価

2016年熊本地震の前震とその約3時間後に発生した余震について、本プロトタイプシステムにより地殻変動の検出を試みた。国土地理院のGNSS連続観測システム(GEONET)の従来の定常解析では最も時間分解能が高い迅速解(時間分解能6時間)でもこの二つの地震による地殻変動を分離できなかったが、本研究ではこれを分離することができた。さらに、変動量の時系列をREGARDと比較したところ、4時間程度のスパンでは本研究の方がREGARDよりも解の安定性が高いことが示された。

### 5. 当初目標の達成度

当初目標は、詳細な地殻変動メカニズムの解明と迅速な防災への活用のために、全国の電子基準点の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し、将来の定常解析での活用を想定してこれを実装したプロトタイプシステムを開発するというものである。このプロトタイプシステムについて

(1) 精度(再現性)：座標時系列の水平成分の代表的な標準偏差 約1cm

(2) 迅速性：解が算出されるまで約2時間

(3) 解の時間分解能：1秒

を性能目標とした。

これに対して、PPP-ARを用いて全国の電子基準点の座標時系列を算出するプロトタイプシステムを開発した。その性能については、

(1) 解の精度(再現性)については、通年では標準偏差の平均値が1.00cmとなり、ほぼ目標を達成した。

(2) 迅速性及び解の時間分解能については、電子基準点全点の24時間座標時系列(1秒間隔)を、通常は約2時間半で算出できた。迅速性が若干目標に届かないが、将来的に計算機の台数を増やす、分散ファイルシステムの導入などによりディスク入出力を高速化するなどの対策をとることにより、解析時間はより短くできると思われる。

さらに、このプロトタイプシステムを用いて、GEONET定常解析の迅速解では分離できなかった2016年熊本地震前震とその約3時間後に発生した前震の最大余震の地殻変動を分離できることが示され、地殻変動監視における有効性が示された。

以上により、目標は概ね達成されていると言える。

### 6. 成果公表状況

研究報告書 3件

学会発表等 7件

## 7. 成果活用の見込み

今後は処理の迅速性や座標時系列の安定性向上を図った後に、国土地理院において定常的にシステムを運用し、その結果を国土地理院による地震・火山活動に伴う地殻変動の迅速な検出や震源過程のモデル化等へ活用する。これにより、政府の防災会議の各種会議による地震・火山に伴う地殻変動監視や評価への貢献が期待される。

さらに将来的には、解析した座標時系列やその過程で推定した衛星軌道情報等を外部に提供する可能性についても検討を行う。

## 8. 達成度の分析

### (1) 有効性の観点からの分析

本研究では、開発するプロトタイプシステムの性能目標を、精度は水平成分の標準偏差約1cm、迅速性と時間分解能は電子基準点全点の24時間座標時系列（1秒間隔）を2時間で算出することと定めた。この目標に対して精度と時間分解能についてはほぼ達成された。解析時間については2時間半程度と目標よりも若干長いものの、これは機器の増強等により短縮が可能だと思われる。したがって、本研究で設定した目標は有効であった。

また、プロトタイプシステムを用いて2016年熊本地震の地殻変動検出を試みたところ、GEONET定常解析では迅速解を用いても時間分解能が不足して分離できなかった前震とその約3時間後に発生した前震の最大余震による地殻変動をGEONET定常解析と同程度以上の迅速性を持って分離できることが示された。このことは、本研究が、地震に伴う地殻変動を高い時間分解能で高精度に検出する上で有効であることを示している。

### (2) 効率性の観点からの分析

補正情報等の推定には、JAXAと国土地理院の包括的協力の枠組みに基づいて貸与を受けたJAXA開発のソフトウェアMADCOCAを使用した。またPPP-ARには特別研究「精密単独測位型RTK(PPP-RTK)を用いたリアルタイム地殻変動把握技術の開発」（平成27～29年度）で改良したGNSS解析ソフトウェアRTKLIBを用い、補正情報推定のためのグローバル局のデータの収集にも上記特別研究で構築したシステムの一部を用いるなど、過去の研究資源を有効活用した。さらに座標時系列の精度評価のうち定型作業については外注を行い、効率化を図った。

## 9. 残された課題と新たな研究開発の方向

### (1) 実行速度の高速化

現在のプロトタイプシステムでは、定常的に実行している処理の他に臨時的な解析（再解析など）などの処理が重なると、ディスクへの読み書きが集中し、実行速度が極端に低下する（3時間～10時間程度）ことが判明している。そこで、今後は機器の増強や分散ファイルシステムの導入などを行い、安定して高速な処理が行えるようにする必要がある。

### (2) 座標時系列の安定性の向上・解析結果の品質監視体制の構築

座標時系列の再現性の評価において、外的な要因によって標準偏差が大きく外れる電子基準点を除外したが、標準偏差の時系列を見るとまだ「とび」が見られる電子基準点が残っている。これらの原因には、未だ特定出来ていない外的要因、もしくは、解析システムの不具合の双方が想定されるため、本研究の成果は、未知の外的要因の可能性をチェックする品質チェック機能としても有効である。外的要因が特定されない場合には、ばらつきがシステムに起因するものか否かを調査し、システム内に原因が特定された場合に改善のための適切な措置を行う必要

がある。また、定常的にシステムを運用するためには、補正情報等や座標時系列の品質を体系的に監視する仕組みを構築する必要がある。

### (3) 運用を支援するソフトウェアの開発

課題提案時の計画では「運用を支援するGUIを有したソフトウェアの開発」を行うことも予定していたが、座標時系列の安定性の評価と向上を優先しこれを今後の課題とした。現在のプロトタイプシステムの運用は、スクリプト群をOSの機能によって定時に実行することで実施しているが、実運用を行う上では、各種パラメータ設定や解析ログの確認、座標時系列の可視化などの運用を支援するソフトウェアの開発が必要である。

### (4) (将来的に) 他の測位衛星系への対応

現在のプロトタイプシステムはGPSとGLONASSのみを用いているが、これを準天頂衛星システムやGalileoに拡張することで使用できる衛星数が増え、座標時系列がより安定することが期待できる。そのためにはこれらの衛星系について、補正情報等を作成するためのグローバルデータの有無の調査や、PPP-ARに用いる電子基準点のアンテナ位相装特性モデルの作成等を実施する必要がある。その可能性についても検討を行う。

## 10. その他、課題内容に応じ必要な事項

特になし。

## 11. 提案課・室名、問合せ先

国土地理院 地理地殻活動研究センター 宇宙測地研究室

TEL:029-864-1111(内8341)

FAX:029-864-2655

e-mail:nakagawa-h96aj@mlit.go.jp

代表担当者：宇宙測地研究室 中川弘之