

GEONET の次世代化（第 2 年次）

実施期間	令和元年度～令和 2 年度
測地観測センター	古屋 智秋
測地観測センター衛星測地課	齋田 宏明
測地観測センター電子基準点課	村松 弘規 高松 直史 影山 勇雄 山中 雅之 熊谷 光起
測地観測センター地殻監視課	都筑 三千夫

1. はじめに

測地観測センターでは、高密度かつ高精度な測量網の構築、広域の地殻変動の監視、高精度な位置情報サービスの支援を目的として、全国約 1,300 か所に設置された電子基準点と GEONET 中央局からなる GNSS 連続観測システム（GEONET）を運用している。GEONET では、GPS を始めとする複数の衛星測位システムに対応しているが、近年、GPS の次世代衛星の打上げ開始や準天頂衛星システムの運用開始等、衛星測位システムを巡る環境は急速に変化している。それに伴い、新たな信号が測位衛星から提供され、GEONET もこれに対応させる必要がある。また、GEONET は防災・減災並びに国民の経済・生活を支える重要インフラとして位置づけられており、災害時等のために電子基準点の機能を強化する必要があるほか、GEONET は運用コストが大きく、持続的に運用していくために維持管理の効率化を図っていく必要もある。さらに、高精度な衛星測位に向けて高品質のデータを取得する観測点をさらに高い密度で配置することを目的とした、民間等の GNSS 連続観測局のデータを取り入れる仕組みの検討もまた課題である。

これらの課題を解決し、GEONET を持続的に運用しつつ効率化し高精度測位を広げるため、「新たな衛星系、測位信号に対応するための研究開発」、「設置・運用・監視業務を効率化するための研究開発」、「民間基準点を GEONET に取り込むための研究開発」を実施している。

2. 新たな衛星系、測位信号に対応するための研究開発

GEONET では、電子基準点の観測データを解析し、その位置を「電子基準点日々の座標値」としてホームページで公開しているほか、地殻変動監視やセミ・ダイナミック補正に用いるパラメータの作成に活用している。「電子基準点日々の座標値」の解析ストラテジは、平成 21 年 4 月 1 日に第 4 版に更新して以降 12 年間、同じ解析ストラテジで運用してきたが、第 4 版では昨今運用が開始された次世代の GPS 衛星である Block III の解析ができないことが課題として存在した。そのため、Block III の解析が可能な第 5 版を正式な解析ストラテジとするため、第 5 版を用いた過去解析やその検証を進め、令和 3 年 4 月 1 日から正式運用を開始する。

第 5 版の主な特長としては、以下の 3 点である。

- ① 第 4 版では準拠する座標系として ITRF2005（IGS05）を採用してきたが、第 5 版では最新の ITRF2014（IGS14）に準拠する。
- ② 「電子基準点日々の座標値」の解析ストラテジは、電子基準点「つくば 1」を固定点としており、この固定点の座標値の解析手法（以下「固定点解析」という。）について、第 4 版では日本周辺のみ IGS 点を拘束点として計算するが、第 5 版ではグローバルな IGS 点を拘束点として計算す

る。これにより、「電子基準点日々の座標値」は、IGS 点の欠測により発生していた座標値の外れ値の発生頻度が軽減するとともに、IGS 解（IGS が公開する ITRF2014 の実現値として高い確度がある座標値）と±1cm 程度の精度で整合する（図-1）。

- ③ 各電子基準点の座標値と同時に推定している対流圏遅延に関して、第 5 版では推定間隔を短くし、使用するモデル（マッピング関数）を更新する。これにより、「電子基準点日々の座標値」の上下成分における見かけ上の年周変動やばらつきが改善し、座標値の安定性が向上する。

今後、国土地理院で実施する地殻変動監視やセミ・ダイナミック補正では第 5 版をベースとして取り組んでいることになるが、第 5 版では IGS 点の新設・廃点や地殻変動等による位置の変化に対応するため、固定点解析に用いる拘束点の見直しを定期的実施していく予定である。これは第 4 版では実施していない新たな試みである。

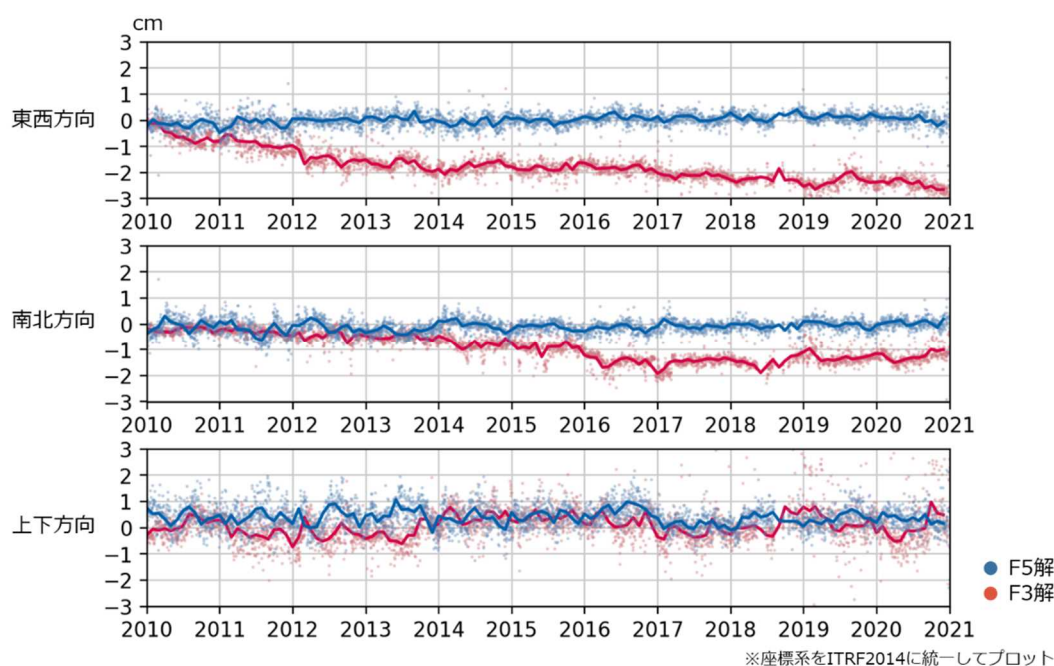


図-1 IGS 点「TSKB」における第 5 版（F5 解）と第 4 版（F3 解）の IGS 解に対する較差

3. 設置・運用・監視業務を効率化するための研究開発

3.1 長期間の停電でもリアルタイムデータ配信を継続させる技術

電子基準点にはバッテリーが搭載されており、災害時等に商用電源が停止した際も 72 時間以上機能を維持できるようになっている。しかし、令和元年房総半島台風において商用電源が長期間停止し、搭載されているバッテリーの容量では機能を維持できない事態が発生した。このことを契機として、災害時等に商用電源が長期的に復旧しないことが見込まれる電子基準点に対して、2 週間以上継続してリアルタイムデータを配信するための電源を確保できる補助電源装置を検討し、その試験を実施した。なお、補助電源装置は、人の手により容易に接続可能なものを検討した。



写真-1 DMFC 燃料電池システム

試験では、補助電源装置としてメタノールを燃料とする FC-R&D 社製の「DMFC 燃料電池システム（写真-1）」（以下「DMFC」という。）を、岩手県岩泉町にある電子基準点と同様の機器が搭載されて

いる GNSS 連続観測局に導入し、バッテリーと DMFC を用いてリアルタイムデータの配信が継続する期間を検証した。DMFC の導入には、無停電電源装置「APS24016」の改造を実施するとともに、DMFC 用の収納ボックスを観測点基礎に固定し、ケーブルを引き込むための穴を観測点外管に開けた。

試験の結果、試験開始から 14 日目に DMFC が停止したものの、正常に稼働すればメタノール燃料 20 リットルを搭載した DMFC で約 37 日間リアルタイムデータの配信を継続させることが可能であることを確認した。今後、DMFC が停止した原因を調査するとともに、実際に電子基準点に導入する場合には、DMFC の稼働に必要な空気を取り込みつつ、防水対策が可能な収納ボックスを検討する必要がある。

3.2 周辺状況の写真と観測データから効率的に仰角マスクを作成する技術

衛星測位では、上空を遮る建物等により反射・回折した品質の悪い信号の影響を受け、測位精度が悪化することがある。その影響はマルチパス等を発生し得る樹木や建造物等の位置を方位角・仰角で示した仰角マスクファイルにより、品質の悪い信号を排除することで、その影響を軽減することができる(多田ほか, 2018)。仰角マスクファイルの作成には、魚眼レンズを用いた上空写真を撮影することが最適ではあるが、令和元年度に電子基準点の周辺樹木の生長等を常時監視するためのカメラの設置試験を実施し、電子基準点の周辺状況の写真を撮影しており、今回、その写真から仰角マスクファイルを作成する方法、並びに電子基準点の観測データの品質情報から樹木や建造物等の位置を推定し仰角マスクファイルを作成する方法を検討した。また、本検討では独立した仰角マスクファイルが複数作成できるため、それらを合成する方法も合わせて検討した。

① 電子基準点の周辺状況の写真から仰角マスクファイルを作成する方法

カメラの歪み等をパラメータとして推定し、そのパラメータを用いて写真を校正した後、カメラの取付姿勢や撮影方位、写真の時刻、太陽位置等から水平パノラマ画像を合成した。その後、水平パノラマ画像の画素値分布を混合ガウス分布 (GMM) として推定・分類し、オープンスカイ領域を判定することで、仰角マスクファイルを作成した (図-2)。

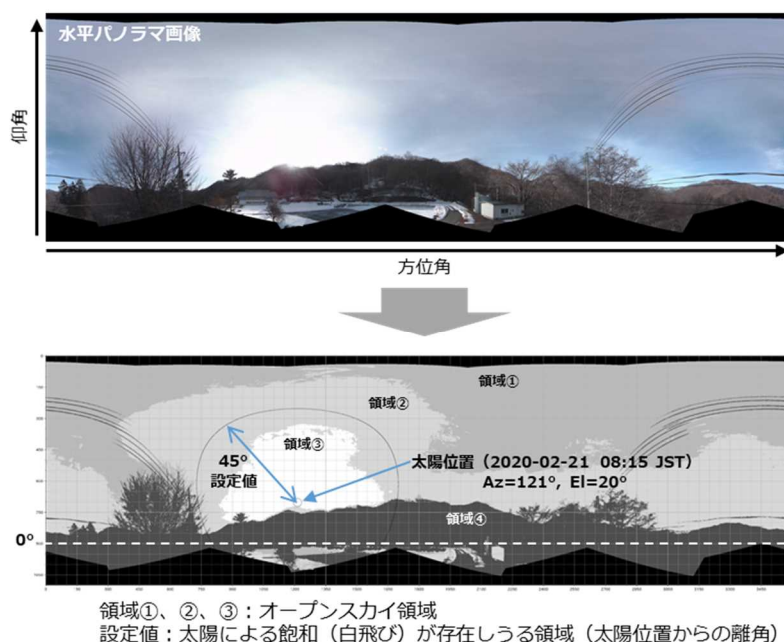


図-2 混合ガウス分布 (GMM) によるクラスタリング結果

② 電子基準点の観測データの品質情報等から仰角マスクファイルを作成する方法

あらかじめ決定した衛星毎の観測値（信号強度等）の閾値（LOS/NLOS 信号の存在確率）を基に、観測データからマスク領域を判定し、仰角マスクファイルを作成した。検討では NLOS 信号の存在確率が 50%を超える領域をマスク領域とした。

③ 複数の仰角マスクファイルを合成する方法

複数の仰角マスクファイルのうち LOS/NLOS 信号が競合するマスク領域に対し、測位誤差を指標値とした一つ抜き交差検定結果を基に、当該領域をマスク領域とすべきか判定し、複数の仰角マスクファイルを合成した。

これらの方法を単独又は複数組み合わせ、複数の仰角マスクファイルを作成し、その仰角マスクファイルを基に当該電子基準点の観測データを編集した上で精密単独測位を実施したところ、編集しない（仰角マスクファイルを適用しない）場合と比較して、RMS が改善することを確認し、最も改善したのは①の方法による仰角マスクファイルだった（図-3）。一方、②の方法は、①の方法と比較して改善量は小さかったが、観測データのみから仰角マスクファイルの作成が可能であり、汎用性が高い。今後、実際に電子基準点の観測データに適用するには、衛星毎の観測値の汎化性能向上が必要である。これは、今回の検討では、電子基準点の周辺状況写真に基づいて見なし真値の仰角マスクを作成した上で閾値を決定したが、この結果は閾値の決定に使用した観測データ（特に観測日時や受信機）に依存しており、より汎化された推定結果を得るためには、複数の観測点、期間の推定結果を統合的に分析する必要がある。

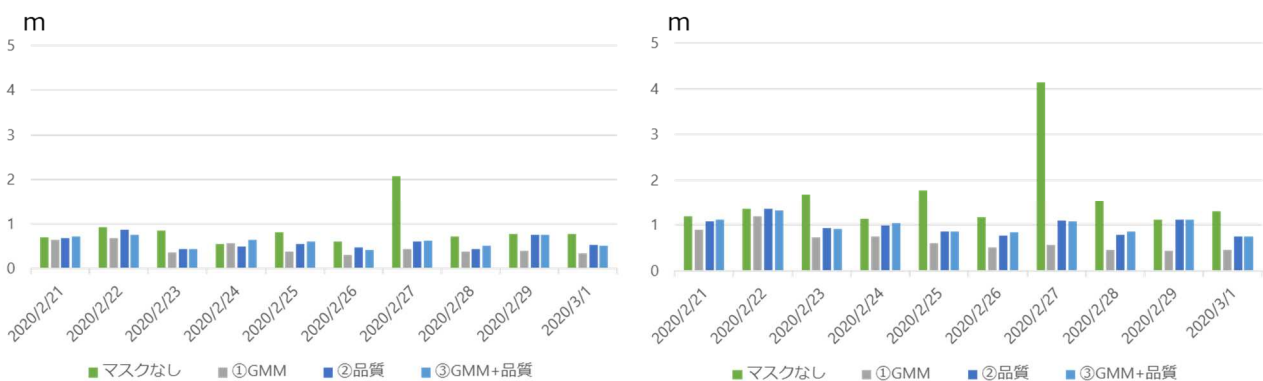


図-3 仰角マスクファイルの適用有無による精密単独測位の F5 解に対する RMS（左：水平，右：上下）

4. 民間基準点を GEONET に取り込むための研究開発

国土地理院では、民間等が独自に設置している GNSS 連続観測局の性能を評価し、級別に登録する制度として「民間等電子基準点の性能基準及び登録要領」（以下「登録要領」という。）を制定し、令和 2 年 4 月から登録の受付を開始している。しかし、登録に際し、当該 GNSS 連続観測局の品質評価を国土地理院において実施するが、その品質評価において、解析に用いる周波数帯により楕円体高の値が大きく変化する事象を確認した。具体的には、解析に L1 のみを用いた場合に楕円体高が 92.5217m、L1+L2 を用いた場合に 92.5539m と、本来は結果がほぼ一致することが期待される場所、32.2mm の差が生じた。

この事象の検証のため、令和 2 年 10 月～12 月に国土地理院宇宙測地館屋上で、当該アンテナと同機種アンテナ（以下「検証アンテナ」という。）を 2 台用いた観測及び解析を実施した。その結果、

①解析に用いる周波数帯の違いにより、楕円体高に 20～29mm の差が生じた一方で、②アンテナの違い（個体差）による楕円体高の差は 4mm と比較的小さかった。また、③別途チョークリングアンテナにより決定した座標値との差が存在し、その量は設置架台により異なった（表-1）。これらのことから、周辺環境の違いにより検証アンテナのアンテナ位相特性が変化する可能性が高いことが推測された。

この結果は、民間等電子基準点の登録に当たって付与される国家座標の信頼性に疑念が生じることが懸念されるため、級別分類 B 級に関して、使用する GNSS アンテナの要件を級別分類 A 級と同様に、「測量機器性能基準」において推定される座標値の確度が検証される 1 級 GNSS 測量機とし、新たな級別分類として C 級を設けるよう登録要領を令和 2 年 11 月 25 日に改正した。

表-1 検証アンテナの楕円体高の結果の比較

（架台 1）	L1のみ	L1+L2	周波数差
検証アンテナ（S/N①）	83.033m	83.008m	-25mm ①
検証アンテナ（S/N②）	83.030m	83.001m	-29mm ①
平均値	83.032m	83.005m	
チョークリングアンテナ	83.030m	83.030m	0mm
チョークリングアンテナとの差	2mm	-25mm	
（架台 2）	L1のみ	L1+L2	周波数差
検証アンテナ（S/N①）	82.998m	82.978m	-20mm ①
チョークリングアンテナ	82.987m	82.988m	1mm
チョークリングアンテナとの差	11mm	-10mm	

- ① 周波数の違い（L1のみ/L1+L2）による差は大きい
- ② 個体差は比較的小さい
- ③ 設置架台の違いにより、チョークリングアンテナとの差が異なる

5. 今後

本報告では割愛したが、上記のほかにも、電子基準点から GEONET 中央局に至るまでの新たな通信網の検討や民間等電子基準点を用いた RTK 法の検討等、GEONET に関して様々な調査・研究を実施してきている。今後、GEONET を持続的に運用しつつ効率化し高精度測位を発展させるために、引き続き調査・研究を進めていくとともに、GEONET に対するニーズ等を踏まえた優先順位や課題等も整理していく必要がある。

参考文献

多田直洋, 大中泰彦, 宮川康平, 酒井和紀, 古屋智秋, 鎌苅裕紀, 山尾裕美, 檜山洋平, 畑中雄樹 (2018) : 屋外 3 次元空間における高精度衛星測位の適用範囲拡大のための技術開発, 国土地理院時報, 130, 109-117.