

## GEONET の次世代化（第 6 年次）

実施期間	令和元年度～令和 6 年度
企画部測量指導課	川元 智司
測地観測センター電子基準点課	大森 伸哉 宮崎 隆幸 吉永 光樹 大野 圭太郎 高松 直史 若杉 貴浩

### 1. はじめに

測地観測センターでは、GNSS 衛星からのデータを 24 時間、1 秒間隔で受信する電子基準点を全国に約 1,300 か所設置している。電子基準点で観測したデータは、国土地理院内にある GEONET 中央局に集められ、ホームページから提供される。一連のシステムは GNSS 連続観測システム（GEONET）と呼ばれ、1996 年の運用開始から連続観測を実施し、測量、地殻変動の監視及び各種位置情報サービス等において広く活用されている。一方、近年、GPS の次世代衛星の運用が拡大しているほか、準天頂衛星システム「みちびき」(QZSS) は 7 機体制へ向けた打ち上げが進んでおり、測位をめぐる環境は急速に変化している。また、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。これらの課題を解決し、高精度測位環境の構築に寄与するため、GEONET の次世代化を進めている。令和 6 年度は IGS 解析センターの運営、みちびき新信号への対応、電子基準点データ処理ソフトウェアの改修、アンテナ位相特性モデルの推定を行った。

### 2. IGS 解析センターの運営

GNSS 衛星の正確な軌道情報である精密暦は、高精度な衛星測位の基盤であり、「電子基準点日々の座標値 (F5 解)」(Takamatsu et al., 2023) の算出や、センチメートル級測位補強サービス (CLAS) に代表されるような高精度測位サービスの基盤として利用されている。この GNSS の精密暦に関して中心的な役割を果たしているのが国際 GNSS 事業 (IGS) であり、IGS から認定された解析センターが算出する精密暦を IGS が結合することで、世界最高精度のプロダクトを算出している。国土地理院は宇宙航空研究開発機構 (JAXA) と共同で、国産の GNSS 軌道計算ソフトウェア「MADOCA」(Kawate et al., 2023) を用いた国内独自の精密暦算出を実施している。IGS による精密暦を含む各種プロダクトの評価を経て、2023 年 12 月には日本初の IGS 解析センター「JGX」として認定され、衛星測位における国土地理院の国際的な役割は重みを増している。

IGS 解析センター JGX は、国土地理院が精密暦を算出し、JAXA がその運用結果に基づき MADOCA を改良する協力体制により、精密暦の安定的な算出を実現している。GPS、GLONASS 及び Galileo を対象とした最終、速報、超速報の各プロダクトを運用 (OPS) プロダクトとして算出している。最終プロダクトと速報プロダクトについては、2023 年 7 月以降、IGS に定常的に提供しており、世界最高精度の精密暦の算出に貢献している (Ohno et al., 2024)。また、IGS 解析センターとしての品質を確保すべく、内部評価として、プロダクトの品質監視を行っている。一例として、精密暦の日ごとのばらつき指標である 3DRMS を示す (図-1)。期間を通して、GPS、GLONASS、Galileo いずれについても、他解析センターと遜色ない品質が維持されていることが分かる。

超速報プロダクトについては、精度に課題があり、IGS への提供に至っていなかったが、zonal tide と呼ばれる潮汐力に伴う地球自転軸周りの角速度の変動モデルを新たに考慮することで、ほかの解析

センターと同程度まで精度が改善したことを確認した。その後の IGS による評価を経て、2024 年 11 月 11 日のプロダクトから、超速報プロダクトの定常的な提供を開始した。今後は IGS 解への結合に取り込まれるよう更なる精度改善に取り組む。

OPS プロダクトの運用のほかに、QZSS の精密暦の精度向上にも重点を置き、現在は JAXA を中心に、衛星に働く重力外乱モデルの高精度化に取り組んでいる。静止軌道を持つ QZS-3 号機については、従来精緻なモデリングが困難であったが、衛星本体やアンテナが及ぼす影の力学的な影響を考慮したモデルを開発し (Akiyama et al., 2024)、精度を向上させている。2024 年度から国土地理院が運用を開始した GNSS 精密暦提供サービス (<https://jgxnet.gsi.go.jp/ja/top/>) では、OPS プロダクトのほか、QZSS を含めて算出した試験プロダクトを提供している。QZSS の更なる配備の拡大を念頭に、引き続き QZSS の精度改善を目指す。

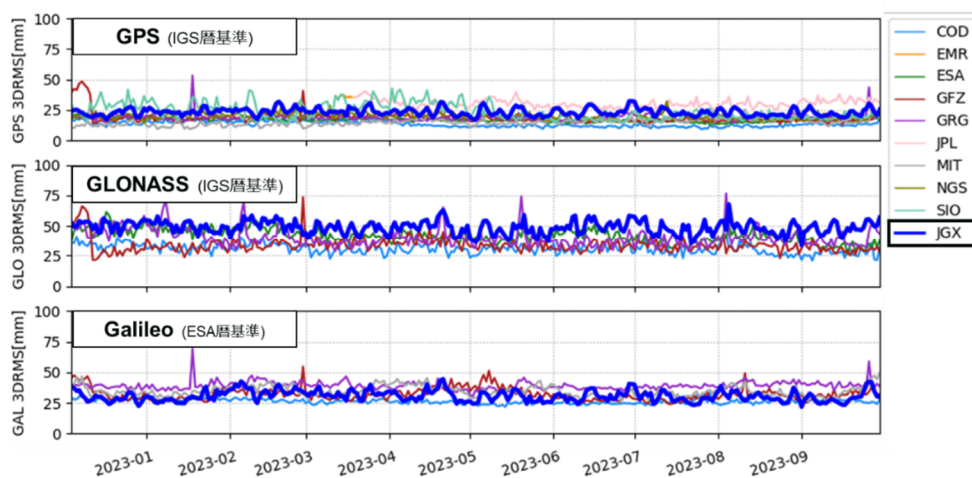


図-1 精密暦の品質評価

2024 年 1 月から 12 月までを対象期間として、基準からの 3DRMS を計算。各解析センターについて 3DRMS を計算し、基準からの乖離度を指標として品質評価。国土地理院・JAXA によるプロダクトは青線の「JGX」である。(上：IGS 最終暦基準の GPS の精密暦評価，中：IGS 最終暦基準の GLONASS の精密暦評価，下：ESA 最終暦基準の Galileo の精密暦評価)

### 3. みちびき新信号への対応

QZS-5~7号機及び初号機後継機からは L1C/A 信号と変調方式の異なる L1C/B 信号が配信される(内閣府, 2025)。L1C/B 信号は 2021 年に導入された RINEX バージョン 4 形式に定義が追加されており, RINEX バージョン 3 形式から衛星軌道情報の記録形式を新しい定義に改修した形式である(Romero, 2021)。今後, QZSS から L1C/B 信号が配信されるに当たり, これに対応した RINEX バージョン 4 形式での電子基準点データの提供を行う必要がある。そこで, 国土地理院では令和 6 年 9 月 3 日から RINEX バージョン 4.01 形式による電子基準点観測データの試験公開を開始した(国土地理院, 2025)。今回, 観測データの RINEX 形式への変換には新たに RINEX ファイル前処理ソフトウェア RINGO (Kawamoto et al., 2023) を使用することとした。今後は, システム調整を経て, 令和 7 年夏頃に正式公開を予定している。

### 4. 電子基準点データ処理ソフトウェアの改修

#### 4.1 前処理ソフトウェア RINGO の更新

令和 6 年度は, GNSS データの標準フォーマット RINEX4.02 (IGS/RTCM RINEX Committee, 2024) の公開, 国際標準地球磁場モデル (Alken et al., 2021) の最新版 IGRF14 の公開があった。これに伴い, 国土地理院が開発したマルチ GNSS に対応したデータ前処理ソフトウェア「RINGO」(Kawamoto et al., 2023) の更新を行った。

令和 6 年度に実施した「RINGO」の主な更新内容としては, 最新の RINEX4.02 形式への対応, 2024 年に更新された国際標準地球磁場モデル IGRF14 への対応, BINEX 形式データの RINEX 形式への変換において準天頂衛星で新たに配信される予定の L1C/B 信号への対応強化がある。また, 今回の RINEX4.02 形式では, オプションとして観測時刻の桁がピコ秒まで保存できるよう拡張された。それに伴う Compact RINEX 形式 (Hatanaka, 2008) の拡張にも対応した。その他, 利用者からの要望等を踏まえ, 方位角依存仰角マスク適用機能, サンプリング間隔 0.1 秒 (10 Hz) までの観測データのサポートや, 利便性向上のための改良, バグ修正等も実施した。これらの機能は, RINGO バージョン 0.9.2 (令和 6 年 9 月公開) で一部提供しているほか, 今後公開予定のバージョン 0.9.3 に全て盛り込まれる。

今回の更新により最新の GNSS 観測データを取扱うことができるようになるなど, より広い利用者のニーズに応えることが可能となった。今後もデータ形式の更新等の測位環境の変化への対応を続け, 利用者の利便性を確保していく。

#### 4.2 GNSS データ圧縮形式「Compact RINEX」及び圧縮ソフトウェア「RNXCMP」の更新

RINEX4.02 において, オプションではあるが観測時刻がピコ秒まで保存できるよう 5 桁拡張された。これに伴い, GNSS データ圧縮形式である Compact RINEX 形式を拡張し, Compact RINEX3.1 とした。また, 圧縮ソフトウェア RNXCMP も更新し, バージョン 4.1.1 として公開した。

今回の RINEX 形式の拡張では観測時刻の小数点以下に 5 桁追加で保存できるようになった。Compact RINEX3.1 では, この数値を保存できるよう, 受信機時計誤差の差分値を保存している箇所に続けて記載することとした。保存形式はエポック間の差分テキストとして保存する。

今回の RINEX4.02 で拡張された観測時刻の追加桁についてはオプション扱いであり, 現状では低軌道衛星に搭載される GNSS 受信機での利用を想定したものであることから, 測量における利用は非常に限られると思われる。だが, これまでの Compact RINEX3.0 及び RNXCMP4.1.0 では対応していないため, RNXCMP4.1.0 によって圧縮すると拡張部分が消去されてしまうことに注意が必要である。その

ため、RNXCMP の利用者においては、最新版への更新が強く推奨される。

## 5. 全国の標高成果改定に向けた GNSS アンテナ位相特性の推定

国土地理院は令和 7 年 4 月 1 日に電子基準点、三角点、水準点等の標高成果を、衛星測位を基盤とする最新の値「測地成果 2024」に改定する（国土地理院，2025）。衛星測位を基盤とする標高体系では GNSS 測量による高さ決定が従来にも増して重要となるが、一方で GNSS 測量による高さの決定には高精度なアンテナ位相特性モデルが必要不可欠である。国土地理院が運用する電子基準点には主に設置時期に応じて複数のアンテナ架台形状が存在し、同一の GNSS アンテナ機種を使用しても、架台頭部形状の差が解析結果に影響を及ぼすことが知られている（田中ほか，2003）。国土地理院が公共測量のために提供するアンテナ位相特性モデルではこれまでアンテナ架台形状は区別されなかったが、測地成果 2024 の公開と合わせて電子基準点架台形状に応じたアンテナ位相特性モデルを公開し、GNSS による高精度な高さの決定のニーズに対応することとした。本章はこのアンテナ位相特性モデルの推定及び検証結果について報告する。

GNSS アンテナ位相特性の推定手法、使用した観測データは（したがって推定対象としたアンテナ・架台タイプについても）中川ほか（2024）と同一である。ただし、基準アンテナとして使用した TRM59800.80 アンテナのアンテナ位相特性モデルについて、米国国家測地測量庁（NGS）から公開されている相対アンテナ位相特性モデルを使用した。これにより、推定対象としたアンテナ・架台タイプについて、国内の測地測量で使用される相対アンテナ位相特性モデルを求めることができる。

推定された相対アンテナ位相特性モデルを使用して、測量作業を模した検証解析を実施した。使用した観測データは 2024 年 1 月 1 日 0:00–5:00、2024 年 7 月 1 日 0:00–5:00 の 2 期間における電子基準点「鶴居（950122）」、「阿寒 1（950124）」、「釧路市（940010）」、「音別（950112）」の観測データである。基線解析にはソフトウェアには TOWISE を使用した。基線ごとのアンテナ機種・架台タイプを表-1 に、測地成果 2024 暫定成果値に対する楕円体高の閉合差を図-1 に示す。従来モデル（NONE モデル）では最大 4 cm 程度の閉合差が見られるが、今回推定を実施したモデル（GSI モデル）を適用することで最大で 2 cm 程度にまで閉合差が低減されている様子が分かる。ここに記載した以外の検証対象基線においても、今回推定を実施したモデルを適用することでほとんどの場合に楕円体閉合差が改善することを確認している。

表-1 アンテナ機種・架台タイプ

基線	始点			終点		
	点名	アンテナ	架台	点名	アンテナ	架台
1	鶴居	TRM59800.80	GSI4	阿寒 1	TPSCR.G5	GSI4
2	鶴居	TRM59800.80	GSI4	釧路市	TRM159900.00	GSI3
3	鶴居	TRM59800.80	GSI4	音別	TRM59800.80	GSI4
4	阿寒 1	TPSCR.G5	GSI4	音別	TRM59800.80	GSI4
5	阿寒 1	TPSCR.G5	GSI4	釧路市	TRM159900.00	GSI3
6	釧路市	TRM159900.00	GSI3	音別	TRM59800.80	GSI4

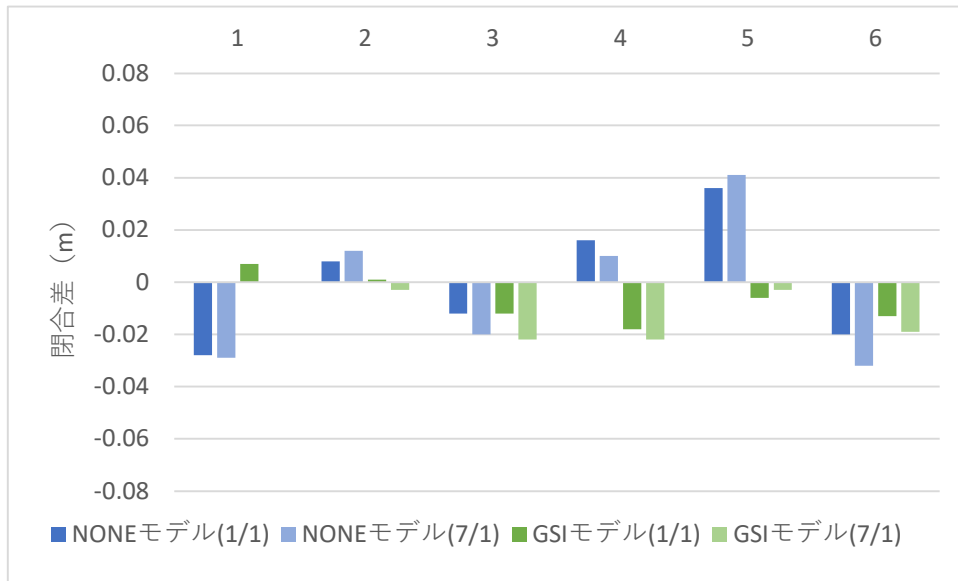


図-2 基線節ごとの測地成果 2024 暫定成果値に対する楕円体高閉合差 (m)

## 6. 結論

令和 6 年度は、IGS 解析センターの運営、みちびき新信号への対応、電子基準点データ処理ソフトウェアの改修、アンテナ位相特性モデルの推定を行った。今後、GEONET を持続的に運用しつつ高精度測位を発展させるために、GEONET に対するニーズを踏まえて課題を整理しつつ、引き続き調査・研究を進める。

## 参考文献

- Akiyama, K., Kawate, K., Igarashi, Y., Sasaki, T., and Kogure S. (2024): Simplified shadow model of solar radiation pressure for GNSS satellites with large communication antenna, IGS Symposium & Workshop 2024.
- Alken, P., Thébaud, E., Beggan, C.D. et al. (2021): International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation, *Earth, Planets and Space* 73 (49). doi:10.1186/s40623-020-01288-x
- Hatanaka, Y. (2008): A Compression Format and Tools for GNSS Observation Data, *Bulletin of the Geographical Survey Institute*, 55, 21–30.
- IGS/RTCM RINEX Committee (2024): The Receiver Independent Exchange Format Version 4.02, [https://files.igs.org/pub/data/format/rinex\\_4.02.pdf](https://files.igs.org/pub/data/format/rinex_4.02.pdf) (accessed 13 Mar. 2025).
- Kawamoto, S., Takamatsu, N., and Abe, S. (2023): RINGO: A RINEX pre-processing software for multi-GNSS data, *Earth, Planets and Space*, 75 (54).
- Kawate, K., Igarashi, Y., Yamada H., Akiyama, K., Okeya, M., Takiguchi, H., Murata, M., Sasaki, T., Matsushita, S., Miyoshi, S., Miyoshi, M., and Kogure, S. (2023): MADOCA: Japanese precise orbit and clock determination tool for GNSS, *Advances in Space Research*, 71(10), 3927–3950. doi:10.1016/j.asr.2023.01.060
- 国土地理院 (2025) : 全国の標高成果の改定【予告】 , <https://www.gsi.go.jp/sokuchikijun/hyoko2024rev.html> (accessed 15 Jun. 2025).
- 国土地理院 (2025) : RINEX ver.4.01 による電子基準点データの試験公開開始について , [https://terras.gsi.go.jp/geo\\_info/information/information\\_20240902.html](https://terras.gsi.go.jp/geo_info/information/information_20240902.html) (accessed 30 Jan. 2025).
- 内閣府 (2025) : みちびき 6 号機の概要 | みちびき 6 号機特設サイト, <https://qzss.go.jp/qzs-6/outline.html>

(accessed 30 Jan. 2025).

中川弘之, 小林知勝, 宮崎隆幸, 橋本繭未, 村上真亮, 高松直史, 古屋智秋, 阿部聡 (2024) : 全国の標高成果の改定に向けた新しいアンテナ位相特性モデルの構築, 国土地理院時報, 137, 25–33. doi: 10.57499/JOURNAL\_137\_05

Ohno, K., Takamatsu, N., Akiyama, K., and Kawate, K. (2024): IGS Analysis Center in Japan - JGX Product Operations and Prospects -, IGS Symposium & Workshop 2024.

Romero, I (2021): RINEX The Receiver Independent Exchange Format Version 4.00, German.

Takamatsu, N., Muramatsu, H., Abe, S., Hatanaka, Y., Furuya, T., Kakiage, Y., Ohashi, K., Kato, C., Ohno, K., and Kawamoto, S. (2023): New GEONET analysis strategy at GSI: daily coordinates of over 1,300 GNSS CORS in Japan throughout the last quarter century, *Earth, Planets and Space*, 75 (49). doi: 10.1186/s40623-023-01787-7

田中愛幸, 加川亮, 川原敏雄, 辻宏道 (2003) : GPS アンテナ位相特性の検定とその課題, 国土地理院時報, 102, 63–69.