

GEONET の次世代化（第 4 年次）

実施期間	令和元年度～令和 4 年度		
測地観測センター電子基準点課	高松 直史	阿部 聡	
	大野 圭太郎	川元 智司	
	宮崎 隆幸		
測地観測センター地殻監視課	三浦 優司	大橋 和幸	
	大脇 温子	仲井 博之	

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 1300 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 年の運用開始から約 25 年にわたり絶え間なく観測を継続し、測量、地殻変動の監視、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「みちびき」（QZSS）は 7 機体制構築に向けて 2023 年度から 2024 年度にかけて順次打上げが予定されており、測位を巡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 の次世代化を図り、その一環として「新たな衛星系、測位信号に対応するための研究開発」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

2.1 マルチ GNSS 暦作成

GNSS の高精度測位に必要な衛星軌道情報は、現在は国際 GNSS 事業（IGS）が提供する情報に依存しており、QZSS についても国家座標に準拠した衛星軌道情報が提供されていない現状である。QZSS の精密な軌道情報がない現状では、仮に QZSS 以外の GNSS が利用できなくなった場合、「電子基準点日々の座標値（F5 解）」（Takamatsu et al.,2023; 村松ほか, 2021）の算出が不可能となるため、測量や ICT 施工、自動運転における基準位置を提供できなくなり、円滑な社会・経済活動に支障を及ぼす恐れがある。このような背景を踏まえ、他国に頼らず QZSS を含めた我が国独自の精密な衛星軌道情報を安定的に生成・提供することが不可欠である。

測地観測センターでは JAXA（宇宙航空研究開発機構）が開発した高精度 GNSS 軌道推定ツール「MADDOCA」を用いて衛星軌道情報を推定し、その評価を行っている。図-1 は IGS 最終プロダクトを基準とした衛星動径方向（R）、衛星移動方向（A）及びそれらに直行する方向（C）における GPS 軌道情報の Root Mean Square Error（RMSE）をプロットしたものである。比較として 9 つの解析機関による結果を描画している。IGS 最終プロダクトが GSI/JAXA 以外の各機関の解析結果を結合して生成していることに留意すると、MADDOCA のパフォーマンスは比較的ばらつきのない大きい解析機関と同等もしくはそれ以上であるといえる。今後は長期安定性、GPS 以外の衛星系の評価を進めるとともに、定常的に衛星軌道情報を生成・公開するための体制を構築していく。

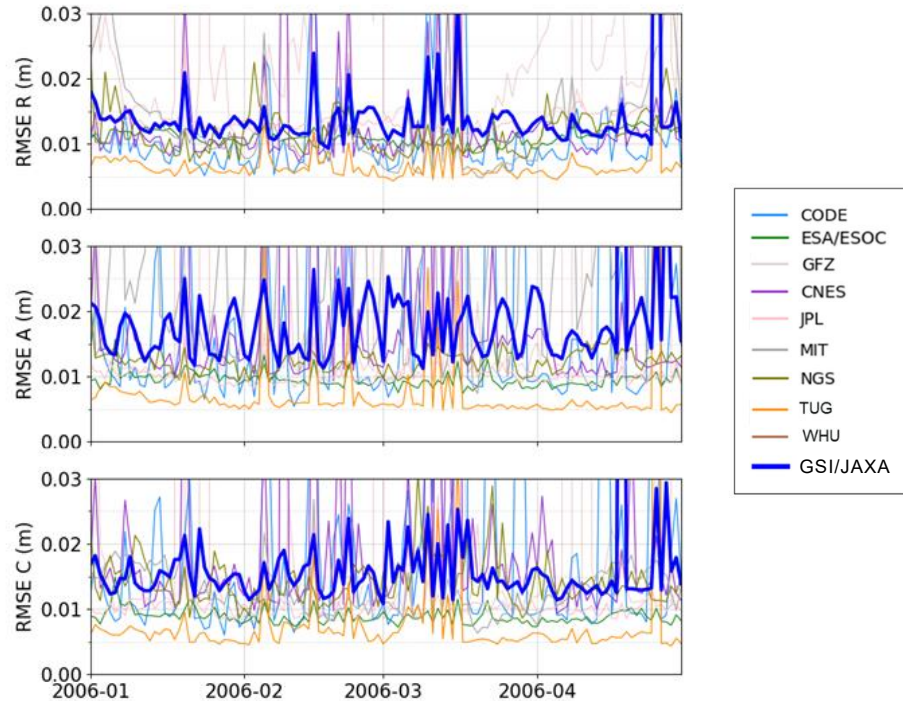


図-1 各解析機関による GPS 軌道情報の推定精度

IGS 最終プロダクトを基準として、衛星動径方向 (R)、衛星移動方向 (A) 及びそれらに直行する方向 (C) の RMSE をプロットした。

2.2 電子基準点観測データ前処理ソフトウェア RINGO の開発

GEONET データの提供・解析には、GNSS データの標準フォーマットである RINEX 形式が利用される。2021 年 12 月に最新版である RINEX version 4 が公表され、各衛星系・世代固有の衛星軌道情報が保存できるようになった。その一方で、これまでの RINEX version 3 から大きく形式が変更されたことから、その対応が求められることとなった。このような背景を踏まえ、マルチ GNSS データの管理を目的とした、RINEX 最新版のデータを簡便に前処理できるソフトウェア「RINGO」を開発した (Kawamoto et al.,2023)。

RINGO は GPS, QZSS, GLONASS, Galileo を含むマルチ GNSS データの管理が可能で、RINEX の一連のバージョンに対応している。データ管理等に便利なコマンドラインツールを採用しており、個々の機能はサブコマンドにより使い分ける方式となっている。主な機能は RINEX ファイル編集、クロックジャンプ補正、電離層遅延補正、品質評価、バイナリデータからの変換、html ファイルによるインタラクティブなグラフ描画等である (表-1, 図-2)。RINEX ファイル編集機能としては、ファイル結合や切り抜き、ソート (ある時間帯や衛星系を絞る等)、ヘッダー編集等を実装している。今後は RINGO を国土地理院技術資料に登録し、一般ユーザが利用できる体制を整えていく。

表-1 RINGO でサポートしている主な機能

主な機能	備考
RINEX ファイル編集	<ul style="list-style-type: none"> ● ファイル結合, 切り抜き, ヘッダー編集 等 ● バージョン変更機能
クロックジャンプ補正	<ul style="list-style-type: none"> ● タイムタグ 又は 疑似距離 のクロックジャンプを補正
電離層遅延補正(1次項, 2次項)	<ul style="list-style-type: none"> ● 補正には IONEX ファイルを使用 ● 2次項の補正には国際標準磁場 IGRF13 モデル)を使用
観測データの品質評価	<ul style="list-style-type: none"> ● MP 線形結合によるデータ雑音計算 ● ジオメトリフリー線形結合, 電離層フリー線形結合を用いたサイクルスリップ検出
グラフ描画機能	<ul style="list-style-type: none"> ● 単一の HTML 形式でグラフを出力
BINEX ファイルの RINEX 変換	
RTCM ファイルの RINEX 変換	

```

$help
ringo [command]

Available Commands:
bingo          Convert a BINEX file to RINEX files
clicover      Correct obs.rinex by timing smoothing
completion    Generate the auto-completion script for the specified shell
help          Help about any command
loncor        Correct ionospheric delay of rinex obs file
merge         Merge observation or navigation RINEX files
qc            Quality check of a rinex obs file
rtcm2rinex    Convert a RTCM file to RINEX files
shiftcor      Correct quarter cycle phase shift
version       Show version
vminv         Generate a HTML5-based vminv

Flags:
  -config string  config file (default is $HOME/.ringo.yaml)
  -debug          enable debug print to stderr (default: false)
  -end-of-time string  end of time window (e.g. "2017/01/01 23:59:59") (default "2099/12/31 23:59:59")
  -exclIPN string  list of PBN to exclude (e.g. "01,02") (default: "")
  -exclSat string  list of satays to exclude (e.g. "G", "REJ") (default: "")
  -help          help for ringo
  -inclIPN string  list of PBN to include (e.g. "01,02") (default: "")
  -inclSat string  list of satays to include (e.g. "G", "REJ") (default: "")
  -interval int    time interval to output (seconds)
  -outfile string  output file (default: STDOUT)
  -sort           sort timing and PBN (default: false)
  -start-of-time string  start of time window (e.g. "2017/01/01 00:00:00") (default "1980/01/05 00:00:00")
  -t, -toggle     Help message for toggle
  -v, -verbose    enable verbose print to stderr (default: false)
  -version       version for ringo

Use "ringo [command] -help" for more information about a command.

```

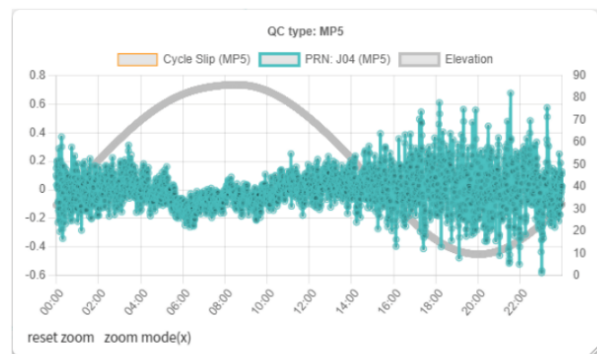


図-2 RINGO インターフェイスと RINEX データ品質評価結果の例

(左: コンソール画面の実行例.

右: 品質評価グラフの出力例. データは 2022 年 7 月 19 日における QZSS 初号機後継機の L1-L5 信号のマルチパス線形結合のばらつきで, 電子基準点「小松」のもの.)

2.3 電子基準点日々の座標値の地殻変動監視への適用 (東海地域の地殻上下変動)

高精度比高観測点 (以下「H 点」という.) は, GNSS 連続観測により東海地域の掛川から御前崎にかけての地殻上下変動の監視を強化するために, 1999 年頃に設置された (河和・菅, 2000). 点間距離 1~2km 程度で 25 点設置するとともに, 電離層補正モデルを用いた 1 周波解析 (以下「HVAN 解析」という.) により, GEONET 定常解析の精度を凌ぐ高さ成分の解析結果の安定性が確認されている (Rocken et al., 2000, 畑中ほか, 2013). その後, 様々な経緯から, 2013 年頃に 6 点 (御前崎地域) にまで減数した. GEONET 定常解析は, 畑中ほか (2013) で比較した当時の第 4 版 (F3) から, 2021 年 4 月に第 5 版 (F5) に更新され, 運用されている. 第 5 版では対流圏遅延量の推定方法等を変更したことにより, 第 4 版に比べて特に高さ成分の精度の向上が確認されている (Takamatsu et al., 2023). したがって, 当該地域での観測点が減少し, 生成した電離層モデルの精度が比較した 2013 年当時よりも低くなっている可能性のある HVAN 解析と, 第 5 版で高さ成分の精度向上が図られた GEONET 定

常解析を比較し、適した解析手法を採用していく必要がある。

上記のことから、掛川から御前崎にかけての地殻上下変動の監視基線に用いる日々の座標値について、HVAN 解析 (HI5 解) から算出した結果と GEONET 定常解析 (F5 解) から算出した結果のどちらを適用するかの検討を行った。検討は、それぞれの解析結果の日々の座標値から得られた基線の時系列に対して、線形近似式からのばらつきを比較することで行った。

比較したところ、HVAN 解析と GEONET 定常解析の線形近似式に対する高さ方向のデータのばらつきは、同程度であった (図-3)。また、御前崎周辺にある H 点を使用せず、周囲の電子基準点を用いても、同程度の精度で地殻上下変動の監視が可能であることが確認できた (図-3, 図-4)。上記の結果から、国土地理院が公表する資料に採用する解析について、HVAN 解析から GEONET 定常解析に変更するとともに、継続的な運用を加味し、H 点周囲の電子基準点を用いた地殻上下変動監視に変更した。なお、2022 年 9 月開催の「南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会」の資料から、H 点周囲の電子基準点を用いた GEONET 定常解析のものを採用している。

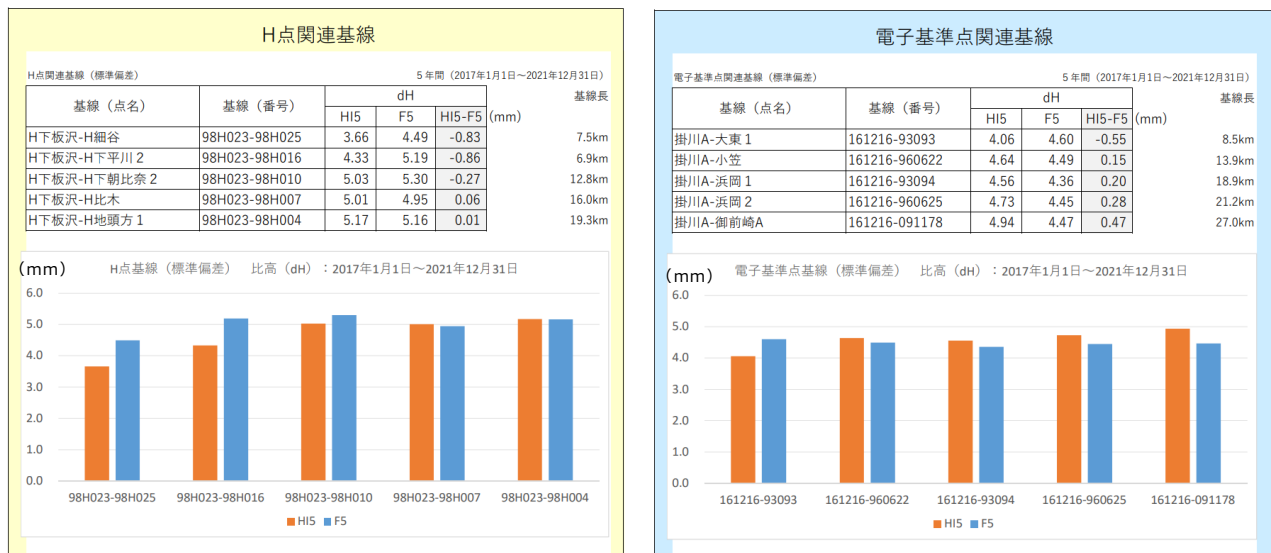


図-3 線形近似式に対しての基線変化 (比高) のばらつき (2017 年 ~ 2021 年)

左 : H 点 (橙色 : HI5 解, 青 : F5 解), 右 : 周囲の電子基準点 (橙色 : HI5 解, 青 : F5 解)

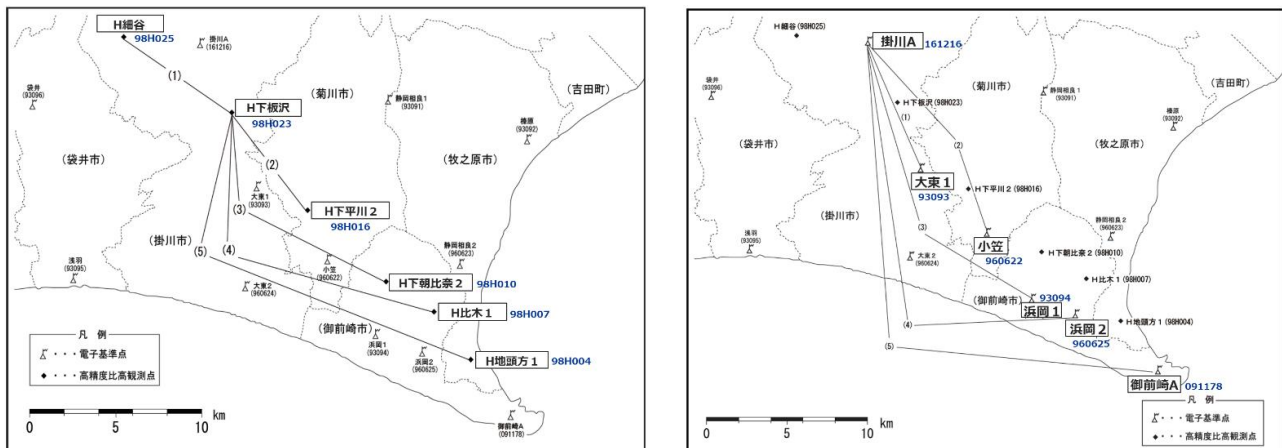


図-4 地殻上下変動の監視基線

左 : H 点を活用 (資料 : 2022 年 8 月まで), 右 : 周囲の電子基準点を活用 (資料 : 2022 年 9 月以降)

3. 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安定的なリアルタイムデータ配信に向けたシステムの設計等、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

- 畑中雄樹, 中川弘之, 檜山洋平, 影山勇雄, 加川亮, 宮原伐折羅 (2013) : GPS 測量等における電離層補正効果に関する研究 (第 1 年次), 国土地理院平成 24 年度調査研究年報, 142-145.
- Kawamoto, S., Takamatsu, N., and Abe, S. (2023) : RINGO: A RINEX pre-processing software for multi-GNSS data, *Earth Planets and Space*, 75 (54).
- 河和宏, 菅富美男 (2000) : 高精度比高観測点 (電子基準点) による東海地域の地殻変動監視について, 国土地理院時報, 93, 34-43.
- 村松弘規, 高松直史, 阿部聡, 古屋智秋, 加藤知瑛, 大野圭太郎, 畑中雄樹, 攪上泰亮, 大橋和幸 (2021) : 新しい GEONET 解析ストラテジによる電子基準点日々の座標値 (F5 解・R5 解) の公開, 国土地理院時報, 134, 19-32.
- Rocken, C., Johnson, J. M., Braun, J. J., Kawawa, H., Hatanaka, Y., and Imakiire, T. (2000) : Improving GPS surveying with modeled ionospheric corrections, *Geophys. Res. Lett.*, 27 (23), 3821-3824.
- 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).