

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 Construction of the New Antenna Phase Characteristic Models for the Revision of the National Elevation Results

地理地殻活動研究センター 中川弘之・小林知勝

Geography and Crustal Dynamics Research Center

NAKAGAWA Hiroyuki and KOBAYASHI Tomokazu

測地観測センター 宮崎隆幸・橋本繭未・村上真亮・高松直史

Geodetic Observation Center

MIYAZAKI Takayuki, HASHIMOTO Mayumi, MURAKAMI Shinsuke

and TAKAMATSU Naofumi

測地部 古屋智秋・阿部聡

Geodetic Department FURUYA Tomoaki and ABE Satoshi

要 旨

電子基準点のアンテナ機種と架台タイプの組合せ 18 ペアについて、GEONET 定常解析用の新たなアンテナ位相特性モデルを構築した。構築に当たっては、複数の観測セッションデータによるアンテナ位相特性推定値を平均する新たな手法をとった。次に、構築したアンテナ位相特性モデルの品質を評価するために、検証解析として、構築したアンテナ位相特性モデルを使用したデータに適用して基線解析を実施した。その結果、いずれのアンテナ機種・架台タイプについても、検証解析の楕円体高は、比較として現在 GEONET 定常解析で用いられているアンテナ位相特性モデルを適用した場合よりも、位相特性モデルの推定において固定した座標値をよく再現しており、RMS が 1 cm 未満で整合した。

続いて、この新たなアンテナ位相特性モデルを適用して GEONET 定常解析のうちの F5 解析と同じスキームで電子基準点の解を求め、座標値を F5 解と比較した。F5 解析の固定点である電子基準点「つくば 1」からの基線長の標準偏差は、新たなアンテナ位相特性モデルを適用した解と F5 解とではほぼ一致し、再現性の劣化は見られなかった。また、楕円体高では、F5 解との間に、検証解析の結果に整合した差が見られた。検証解析では新たなアンテナ位相特性モデルを適用した方が、位相特性モデル構築で固定した座標値の再現性が高いことから、GEONET の解析においても新たなアンテナ位相特性モデルを適用した方が楕円体高の正確度が高い可能性がある。

1. はじめに

異機種のアンテナを用いた GPS 解析では鉛直方向に系統的なオフセットが生じ、これを補正するためにはアンテナ位相特性モデルを解析に適用する必要がある（越智・畑中，1996）。

アンテナ位相特性とは、測定の基準となるアンテ

ナ参照点（Antenna Reference Point；ARP。通常はアンテナ底面の中心）と、衛星からの信号を実際に受信する点（以下「位相中心」という。）とのずれを表す量である（図-1）。アンテナ位相特性は衛星からの電波の入射方向に依存する量で、「位相中心オフセット（Phase Center Offset）」（以下「PCO」という。）と、「Phase Center Variation」（以下「PCV」という。）の和として表される。PCO は ARP からの位相中心の平均的な位置へのベクトルであり、入射方向によらない。PCV は PCO と位相中心のずれの量であり、GNSS 信号の入射方向（天頂角と方位角）に依存する。アンテナ位相特性モデルの構築とは、あるアンテナについて定ベクトルの PCO と、天頂角と方位角の関数としての PCV を求めることをいう。

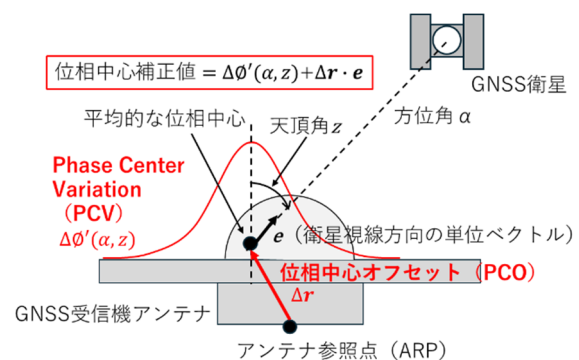


図-1 GNSS アンテナ位相特性モデルの模式図。

一般的にアンテナ位相特性はアンテナの機種によって異なる。さらに、電子基準点においては、電子基準点頭部の形状の影響も無視できないほど大きい（田中ほか，2003）。そのため、現在の GEONET 定常解析では、電子基準点で使用しているアンテナ機種と頭部形状を模した架台のタイプの組合せ（以下「アンテナ・架台タイプ」という。）ごとに屋外での GPS 観測データを用いて構築したアンテナ位相特性

モデル（以下「GSI14 モデル」という。）を適用している（村松ほか，2021）。なお，GSI14 モデルでは，PCV は天頂角への依存性のみ考慮し，方位角に対しては同様としてモデル化している。

この GSI14 モデルは 24 時間長の 1 セッションの観測データのみから構築されている。そのため，観測した日の推定値が偶然に平均的な値からずれており，その結果，楕円体高の精度が悪化するという可能性がないとはいえない。

一方で国土地理院では，2025 年 4 月 1 日に電子基準点等の基準点の標高成果を，衛星測位を基盤とする最新の値へ改定する（古屋，2024）。従来，電子基準点の標高成果は，近傍の水準点を既知点とする水準測量による取付観測により算出していたが，新しい標高体系においては，衛星測位により得られる楕円体高と新しいジオイド・モデルから算出する。さらに，水準点や三角点等の標高成果は，この電子基準点の標高成果を固定値として算出されることとなる。そのため，すべての基準点の標高成果の基となる電子基準点の楕円体高は，高精度に算出することが求められる。

そこで本研究では，まず，2021 年度と 2023 年度に行った検定観測データを用いて GSI14 モデルの品質を把握した。その上で，新しい標高体系で用いられる，より高精度な電子基準点の楕円体高を算出することを念頭に，複数の観測セッションを平均する新たな方法により電子基準点のアンテナ位相特性モデルを構築し，GSI14 モデルとの比較を行った。

2. 電子基準点のアンテナ位相特性モデル構築方法の概要

前述の通り，GSI14 モデルは屋外での検定観測データを用いて構築された。その概要を図-2 に示す（豊福ほか，2009；村松ほか，2021）。

その原理は，アンテナ位相特性モデルを固定してアンテナの座標を推定する通常の基線解析とは反対に，アンテナ位相特性が既知のアンテナ（以下「基準アンテナ」という。）とアンテナ位相特性を推定するアンテナ（以下「検定アンテナ」という。）を結ぶ基線について，両アンテナの座標値を固定して検定アンテナのアンテナ位相特性を推定するというものである。

その手順は，①検定アンテナの正確な座標値を算出する観測・解析（以下「基線ベクトル算出セッション」という。）と，②アンテナ位相特性を推定するための観測・解析（以下「位相特性算出セッション」という。）の 2 つのステップからなる。基線ベクトル算出セッションでは，基準アンテナと検定アンテナの間の基線ベクトルを正確に算出し，検定アンテナの座標値を求める。以下この座標値を「真値」とい

う（統計学用語の「誤差を含まない母集団の実際の値」という意味とは異なることに注意）。位相特性算出セッションでは，基線ベクトル算出セッションで求めた検定アンテナの真値を固定して，それを再現するように L1 帯と L2 帯の PCO と PCV をそれぞれ推定する。

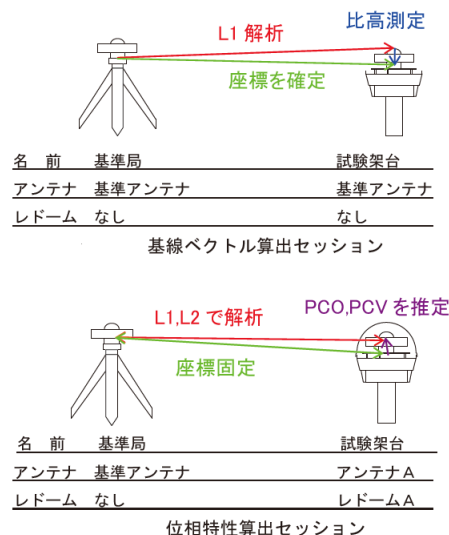


図-2 アンテナ位相特性モデル構築方法の概要（豊福ほか（2009）を一部改変）。

3. 検定観測と基線ベクトルの算出

3.1 検定観測の概要

検定観測は，国土地理院の宇宙測地館屋上に設置された，主要な年式の電子基準点の頭部を模した 4 種類（このうち 1 台は上部部品の交換により 2 つの年式の電子基準点に対応する）の検定架台を使用する（写真-1）。これらの検定架台に電子基準点で使用されているアンテナを設置することで，各種のアンテナ・架台タイプの検定観測を実施することができる。また，この検定架台の近傍約 10 m のところに三脚を据え，基準アンテナを設置する（写真-2）。

本研究では，表-1 に示す 18 ペアのアンテナ・架台タイプについて検定観測を行い，アンテナ位相特性モデルを構築した。これらの組合せの電子基準点は，2023 年 12 月における全電子基準点のおよそ 9 割を占めている。



写真-1 検定架台の概観。



写真-2 基準アンテナ。

表-1 新たにアンテナ位相特性モデルを構築したアンテナ・架台タイプ。

アンテナ	架台タイプ（電子基準点の年式）
TPSCR.G5	GS16（93 年式）、GS13（94 年式）、GS14（95 年式）、GS15（02 年式）
TPSCR.G5C	GS16（93 年式）、GS13（94 年式）、GS14（95 年式）、GS15（02 年式）、GS19（03 年式）
TRM159900.00	GS16（93 年式）、GS13（94 年式）、GS14（95 年式）、GS15（02 年式）、GS19（03 年式）
TRM59800.80	GS16（93 年式）、GS13（94 年式）、GS14（95 年式）、GS15（02 年式）

本研究で使用した検定観測データは、①2022 年 1 月 14 日から 3 月 28 日まで実施した検定観測（以下「2021 年度の検定観測」という。）と、②2023 年 12 月 26 日から 2024 年 2 月 13 日まで実施した検定観測（以下「2023 年度の検定観測」という。）のものである。いずれも、基準アンテナは TRM59800.80 を、また GNSS 受信機は基準アンテナ、検定アンテナとも、Trimble Net R9 を使用した。

GNSS 観測は、基線ベクトル算出セッション、位相特性算出セッションとも仰角マスク 5 度としている。アンテナを取り付けてから取り外すまでの一連の連続観測を 1 観測セッションとし、その長さはいずれも 24 時間以上であるが、アンテナ位相特性の推定では取得された観測データ全てを使用しているため必ずしも同じ長さではない。

なお、現在の GEONET 定常解析では GPS のみを用いているため、本研究で構築するのは GPS に対するアンテナ位相特性モデルである。したがって、本研究ではこれに必要な GPS 観測データのみを使用するが、将来 GPS 以外のアンテナ位相特性モデルを構築することも念頭に、これらの検定観測では

GLONASS 等も含めたマルチ GNSS 観測を行っている。

3.2 2021 年度の検定観測と基線ベクトル算出セッション

2021 年度の検定観測の基線ベクトル算出セッションでは、豊福ほか（2009）と同様に、GNSS 基線解析と直接水準測量の組合せによって基準アンテナと各検定アンテナ間の基線ベクトルを決定した。

観測は各検定架台に基準アンテナと同じ TRM59800.80 を設置し、レドームを外して行う。解析では最初に、国土地理院構内の IGS 観測点 TSKB を観測日の ITRF2014 座標値に固定して、GNSS 基線解析によって基準アンテナの座標値を取り付ける。次に、基準アンテナの座標値を固定して、各検定アンテナへの基線ベクトルを求める。この GNSS 基線解析は短基線で精度が高い GPS L1 帯の 1 周波解析で行い、仰角マスクは 15 度、天頂遅延量を 4 時間ごとに推定している。また、TRM59800.80 のアンテナ位相特性モデルは IGS から公表されている ITRF2014 準拠のモデルを適用する。

続いて、直接水準測量によって基準点から各検定アンテナ架台上面への比高を測定する。観測は 2 名がそれぞれ行い、その平均値を採用した。

最後に、GPS 基線解析で求めた基線三成分の上下成分を直接水準測量による比高に置き換え、検定アンテナの真値を算出した。

3.3 2023 年度の検定観測と基線ベクトル算出セッション

GNSS 解析によって検定アンテナの真値を算出する場合、検定アンテナのアンテナ位相特性モデルは IGS 等から公開されているモデルを適用する。しかし、前述のとおりアンテナ位相特性は検定架台の影響を強く受ける。したがって GNSS 基線解析により求めた真値には、架台の影響による系統差が生じている可能性がある。

そこで 2023 年の検定観測では新たな試みとして、基準アンテナと検定アンテナの基線の水平成分についてはトータルステーション（以下「TS」という。）で測定することとした。観測の概略を図-3 に示す。

前準備として宇宙測地館屋上の検定架台近傍に固定点を、国土地理院構内で基準アンテナから約 200 m 離れた視通がある場所に方位標を設け、それぞれに基準アンテナと同じ受信アンテナ TRM59800.80 を設置する。次に、国土地理院構内の電子基準点「つくば 1」「つくば 3」及び「石下」の 3 点の座標値を固定して、基準アンテナ、固定点及び方位標の座標を算出する。基線解析には測量用の解析ソフトウェア TOWISE を使用し、基線長が

10 km を超える電子基準点「石下」と固定点間の基線のみ GPS L1 帯と L2 帯の 2 周波で、その他の基線は GPS L1 帯の 1 周波で解析を行った。

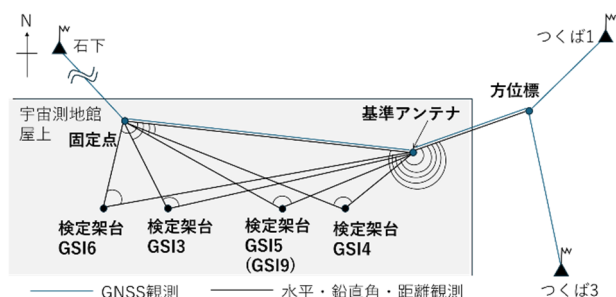


図-3 2023 年度の検定観測。基線ベクトル算出セッションの概略図。

TS 観測は、水平角は 2 対回、高低角は 1 対回 2 方向以上とし、観測の制限値は倍角差 15 秒、観測差 8 秒、高度定数 10 秒を標準とした。ただし、これを満たすことが困難な架台については、基準アンテナから独立な 2 経路によりそれぞれ架台の座標を算出し、その較差が十分小さいことをもって精度を確認した。続いて TS の観測値から公共測量の作業規程の準則に準じた方法により検定アンテナの平面直角座標を算出し、基準アンテナからの基線の東西成分、南北成分を求めた。これにより、1 mm 程度の精度で基線ベクトルの水平成分を算出した。

なお、比較のために別途 24 時間以上の GNSS 観測を行い従来と同様の手法によって基線を算出したが、その結果は TS 観測から求めた基線水平成分とミリメートルのオーダーで整合した。

基線の上下成分については従来と同様、直接水準測量によって基準アンテナとの比高を算出した。基準アンテナから各検定アンテナ及び固定点を経由して基準アンテナに戻る環をつくり、閉合差により精度管理を行った。2 名の観測者がそれぞれ観測を行い、その平均値から基準アンテナと各検定アンテナの間の高低差を算出した。こうして得られた基準アンテナ、検定アンテナ間の基線三成分に基づいて各検定アンテナの真値を求めた。

3.4 位相特性算出セッション（観測）

位相特性算出セッションでは、電子基準点での観測と同様に検定アンテナにレドームを装着して観測を実施する。前述のとおり、2021 年度も 2023 年度も、観測セッション長はセッションごとに異なり一定ではない。2021 年度の位相特性算出セッションでは、観測セッション数はアンテナ・架台タイプによって異なっている。また、2023 年度の位相特性算出セッションでは、各アンテナ・架台タイプとも、ア

ンテナの方位角を通常どおりゼロ度にした観測セッションと、アンテナを反転させて方位角 180 度とした観測セッションをそれぞれ 2 セッションずつ、交互に実施した。これは、一般的に GNSS 衛星は北方向上空の被覆が少ないため、アンテナ方位角ゼロ度と 180 度で推定した PCO と PCV の推定値をそれぞれ平均することで、衛星配置がより均一になると考えたためである。しかし、後述するとおりこの方法は期待した結果をもたらさなかった。

4. アンテナ位相特性モデルの構築と検証

4.1 位相特性算出セッション（解析）

位相特性算出セッションでは、アンテナ位相特性を安定的に推定するために、以下の 3 ステップで解析を行う。最初に、各観測セッションについて、基準アンテナと検定アンテナの座標を真値に固定して、各基線の L1 と L2 のアンビギュイティを決定する。データ間隔は 30 秒、仰角マスクは 15 度、天頂遅延量の推定間隔は 4 時間とし、アンテナ位相特性は IGS から公表されているアンテナ位相特性モデルを適用する。

次に、各観測セッションについて、基準・検定両アンテナの座標値を真値に、前段で決定したアンビギュイティの値を固定して、各検定アンテナの L1 と L2 の PCO を推定する。データ間隔、仰角マスクはアンビギュイティ推定の時と同じく 30 秒、15 度であるが、対流圏パラメータは推定しない。検定アンテナのアンテナ位相特性の初期値は、PCO は IGS から公表されている値を用い、PCV は適用しない。こうして求められた各セッションの PCO 推定値を検定アンテナごとに平均する。

最後に、各観測セッションについて、両アンテナの座標値を真値に、アンビギュイティ及び前段で求めた各検定アンテナの PCO の平均値を固定して、各検定アンテナの L1 と L2 の PCV を推定する。PCV は仰角方向の次数 18、方位角方向の次数はゼロ（方位角方向には一様）の球面調和関数としてその係数を推定する。また、仰角マスクは 10 度とする。その他の解析条件は PCO 推定の場合と同じである。最後に、各検定アンテナについて、得られた PCV の推定値を天頂角ごとに平均する。こうして平均した PCO と PCV を最終的なアンテナ位相特性モデルとする。

これらの解析には、IGS 最終暦を使用する。GEONET 定常解析は ITRF2014 に準拠しているため、構築するアンテナ位相特性モデルも ITRF2014 に準拠していなければならないが、IGS の暦は 2022 年 11 月 27 日より ITRF2020 系に移行している。そのため、2023 年度の検定観測データの解析に当たっては、事前に暦を ITRF2014 系に変換した上で解析を実施した。

なお、ソフトウェアは Bernese GNSS Software Version 5.0 を使用した。

4.2 検証解析

構築したアンテナ位相特性モデルの品質を評価するために、アンテナ位相特性の推定に用いた観測データを使用し、構築したアンテナ位相特性モデルと比較対象のアンテナ位相特性モデルを適用して各観測セッションの基線解析を行い、算出された検定アンテナの座標値と真値との差を求める（以下「検証解析」という。）。

検証解析の解析条件は F5 解析を参考に、電離層フリー結合を用いて、データ間隔 30 秒、仰角マスク 15 度とし、天頂遅延量を 1 時間間隔、大気勾配パラメータを 3 時間間隔で推定する。

4.2.1 従来のアンテナ位相特性モデル（GSI14 モデル）の品質検証

まず GSI14 モデルの品質を評価するために、2021 年度の検定観測データ及び 2023 年度のアンテナ方位角ゼロ度の観測セッションの検定観測データを用いて、4.2 の方法で GSI14 モデルを適用した検証解析を行った。アンテナ位相特性モデルの影響を大きく受ける上下成分について、各セッションの真値からの差を平均した結果と真値に対する RMS を図-4 に示す。

真値からの差についてはおおむね 2 cm 以内であったが、アンテナ・架台タイプ TPSCR.G5_GSI4 が 4 cm 以上ずれており、また他に 2 cm を超えるものは 3 ペア (TRM159900.00_GSI3, TRM159900.00_GSI4, TRM59800.80_GSI4) あった。RMS も、最大は TPSCR.G5_GSI4 の約 4.3 cm であり、前述の 3 ペアについても RMS が 2.5 cm 以上だった。新しい標高体系では、電子基準点（正確には付属標）の標高成果を固定値として水準点の標高成果が算出される。公共測量では、1～3 級水準測量における既知点間の閉合差の許容範囲は $15 \text{ mm} \sqrt{S}$ (S は観測距離 (km)) となっており、電子基準点の平均密度 (20 km) では 6.7 cm となる。前述のアンテナ・架台タイプについて、現在の GSI14 モデルでは、RMS だけで許容範囲のほぼ半分を占めてしまうため、アンテナ位相特性モデルの品質が不十分であると考えられる。他のアンテナ・架台タイプについては、この結果を見る限り得られる楕円体高の精度は不足していないと思われるが、一貫した方法で算出するべく、全 18 ペアについて新たにアンテナ位相特性モデルを構築することとした。

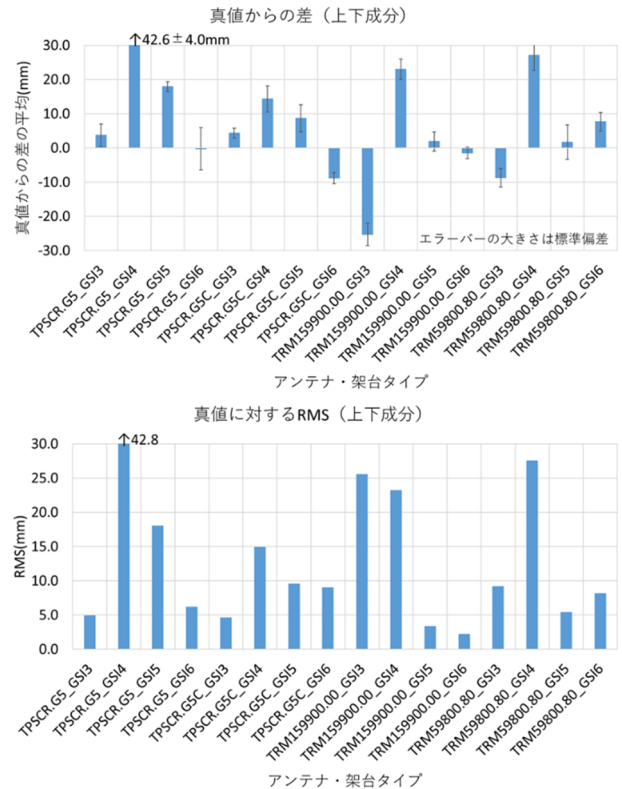


図-4 2021 年度と 2023 年度のアンテナ方位角ゼロ度の検定観測データに GSI14 モデルを適用した検証解析の結果 (上下成分). 上図: 真値からの差の平均, 下図: 真値に対する座標値の RMS.

4.2.2 アンテナ方位角反転の効果の検証

次に、アンテナ機種 TRM59800.80 で、架台タイプ GSI3 (94 年式), GSI4 (95 年式), GSI5 (02 年式), GSI6 (93 年式) の 4 ペアについて、2023 年度に行った検定観測データを用いて、アンテナ方位角がゼロ度と 180 度の観測セッションから求めたアンテナ位相特性を平均して構築したアンテナ位相特性モデルが、解の精度にどのような効果を及ぼすかについて調査を行った。

調査にはアンテナ方位角がゼロ度の観測セッションと、アンテナ方位角が 180 度の観測セッションのそれぞれ 2 セッションずつのデータを使用した。解析は 4.1 に沿って行ったが、アンテナの反転を考慮して、PCO 推定値の平均の際にアンテナ方位角 180 度の PCO 推定値については北向き成分、東向き成分の符号を逆転してから平均をとっている。

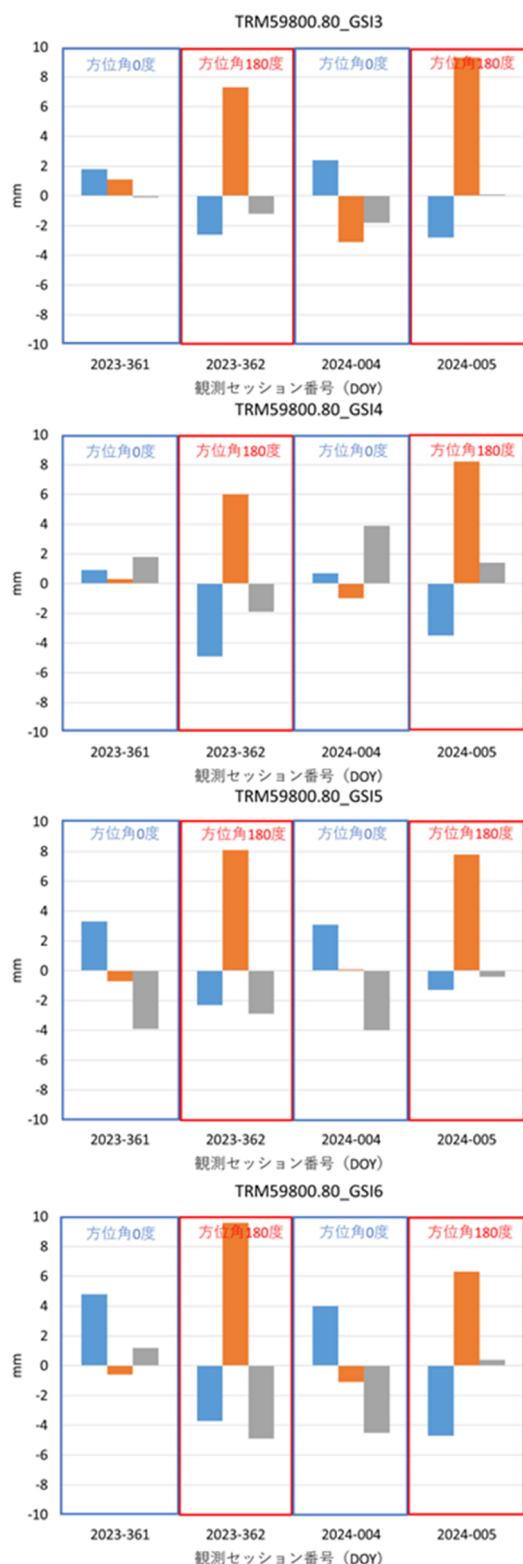


図-5 アンテナ方位角ゼロ度と 180 度のアンテナ位相特性推定値を平均して作成したアンテナ位相特性モデルの検証解析の結果。青：南北成分，橙：東西成分，灰：上下成分。青枠で囲った観測セッションがアンテナ方位角ゼロ度，赤枠がアンテナ方位角 180 度。

こうして構築したアンテナ位相特性モデルについて

て、4.2 の方法で検証解析を実施した。図-5 に各セッションについての座標値と真値とのずれを示す。どの観測セッションについても、いずれのアンテナ・架台タイプでも上下方向（灰色）の真値からのずれは同程度である。一方で、南北成分（青）及び東西成分（橙）については、アンテナ方位角ゼロ度の観測セッション同士とアンテナ方位角 180 度の観測セッション同士は真値からのずれは同程度であるが、方位角ゼロ度と 180 度ではずれの程度が大きく異なり、さらにほとんどのアンテナ・架台タイプではずれの方向が反対になっている。

一因として、アンテナは方位角を 180 度反転させたが、検定架台は反転していないことが挙げられる。前述のとおりアンテナ位相特性には架台の影響が大きいため、「架台に設置したアンテナ」全体としては方位角を反転したことにならなかったと考えられる。現在の検定架台の構造上、検定架台ごとアンテナを反転させ、かつ元の位置に正確に設置することは非常に困難である。そこで、以降のアンテナ位相特性モデル構築では、2023 年度の検定観測についてはアンテナ方位角 180 度の観測データは用いず、方位角ゼロ度の 2 つの観測セッションのデータのみを使用することとする。なお、将来的に架台ごとアンテナを反転させて観測を行うには、例えば架台を回転台の上に設置するような構造にすることが必要だと思われる。

4.3 アンテナ位相特性モデルの構築

表-1 に示した 18 ペアのアンテナ・架台タイプについて、2021 年度 of 全検定観測データと 2023 年度のアンテナ方位角がゼロ度の検定観測のデータを用いて、4.1 に沿ってアンテナ位相特性モデルを構築した（以下「新たなアンテナ位相特性モデル」という。）。続いて、新たなアンテナ位相特性モデルを適用した場合と、比較用に GSI14 モデルを適用した場合について、4.2 に従って検証解析を実施した。各アンテナ・架台タイプについて、真値に対する RMS を図-6 に示す。

これを見ると、上下成分についてはほとんどのペアで新たなアンテナ位相特性モデルを適用した場合の方が、GSI14 モデルを適用した場合よりも RMS が小さい。南北成分、東西成分は全て RMS が 5 mm 未満、上下成分については、GSI14 モデルでは RMS が 2 cm を超えていた 4 ペアも含めて、全て RMS が 1 cm 未満になっている。すなわち、新たなアンテナ位相特性モデルを適用した場合の解は GSI14 モデルを適用した場合よりも真値との整合性が高く、このモデルを用いて求めた電子基準点の楕円体高は GSI14 モデルのものよりも、より高い正確度が得られることが期待される。

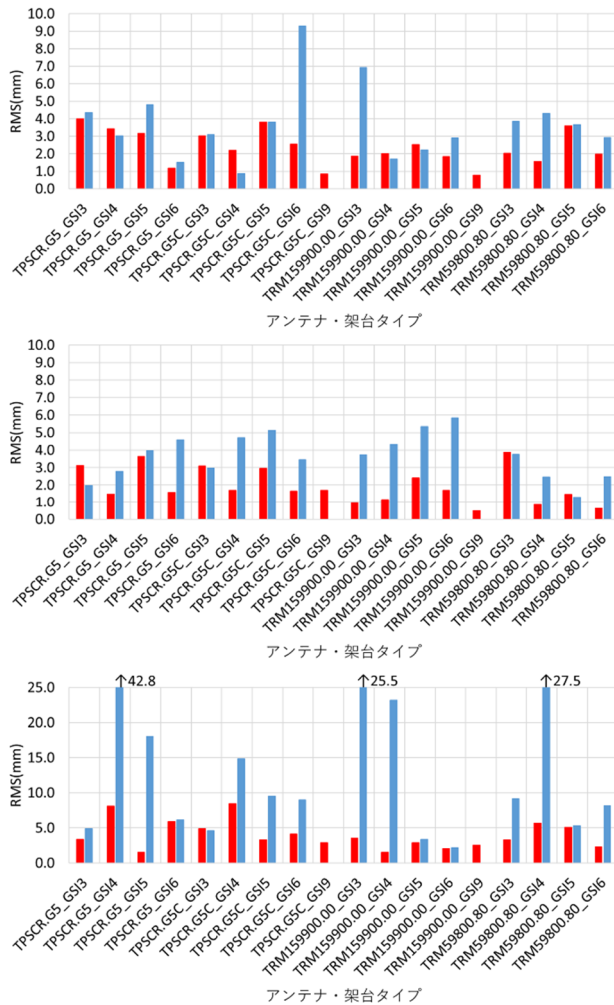


図-6 新たなアンテナ位相特性モデル（赤）と GSI14 モデル（青）を適用した基線解の、真値に対する RMS。上から南北成分、東西成分、上下成分。なお、TPSCR.G5C_GSI9 と TRM159900.00_GSI9 については GSI14 モデルが作成されていないため、青棒は描画していない。

5. 新たなアンテナ位相特性モデルを適用した解と F5 解との比較

最後に、こうして構築した新たなアンテナ位相特性モデルを F5 解析と同じ解析スキームに実際に適用して F5 解相当の解（以下「新たなモデルの解」）を算出し、F5 解との比較を行ってその品質を評価した。評価を行った期間は 2023 年 6 月 1 日から 12 月 31 日までの半年間である。F5 解の詳細については、村松ほか（2021）を参照のこと。

5.1 解の再現性の比較

最初に、新たなモデルの解と F5 解について、電子基準点「つくば 1」からの基線長の標準偏差の比較によって、解の再現性を評価した。結果を図-7 に示す。新たなモデルの解のプロットと F5 解のプロット

とはほとんどの観測点で重なっている。

より詳しく調べるために、新たなモデルの解と F5 解について、電子基準点「つくば 1」からの基線長の標準偏差の差の絶対値のヒストグラムを作成した（図-8）。これを見ると、両解の標準偏差の差は約 9 割の観測点で 0.1 mm 以下である。すなわち、ほとんどの観測点で標準偏差はほぼ一致しており、新たなモデルの解の再現性は F5 解と同程度であるといえる。

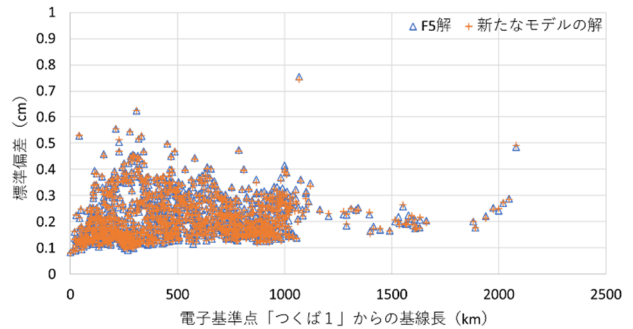


図-7 新たなモデルの解（橙）と F5 解（青）についての、電子基準点「つくば 1」からの基線長の標準偏差（2023 年 6 月 1 日から 12 月 31 日まで）。

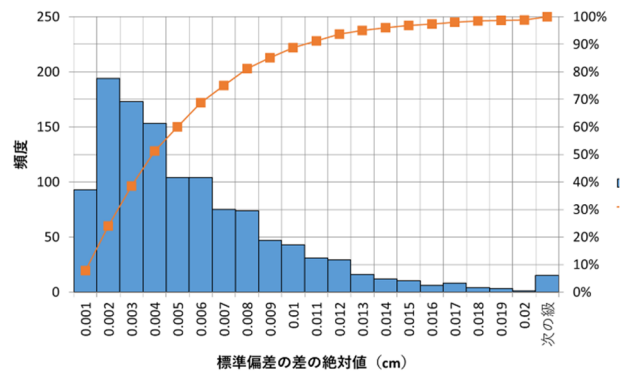


図-8 F5 解と新たなモデルの解の、電子基準点「つくば 1」からの基線長の標準偏差の差の絶対値（2023 年 6 月 1 日から 12 月 31 日まで）。棒グラフがヒストグラム、折れ線グラフが累積度数。

5.2 座標値の比較

次に、解の値そのものへの影響を把握するため、アンテナ位相特性モデルの影響が大きい上下成分について、新たなモデルの解と F5 解との比較を行った（図-9）。これを見ると、新たなモデルの解と F5 解との間の差は、アンテナ・架台タイプごとに明瞭に分かれていることがわかる。差が最大のペアは TPSCR.G5_GSI4 で 4～5 cm 程度、次に TRM59800.80_GSI4 で 3～4 cm 程度である。

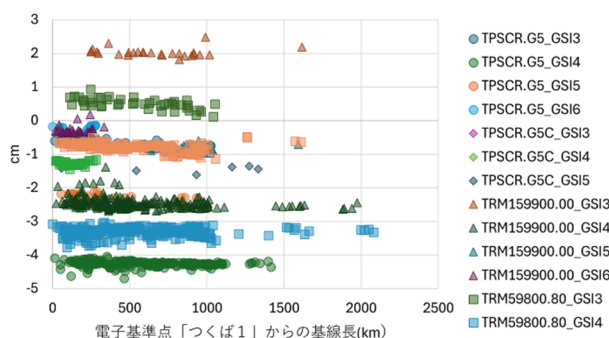


図-9 F5 解に対する新たなモデルの解の差（上下成分）．新たにモデルを構築したアンテナ・架台タイプのみ記載．2023 年 6 月 1 日から 12 月 31 日までの平均．

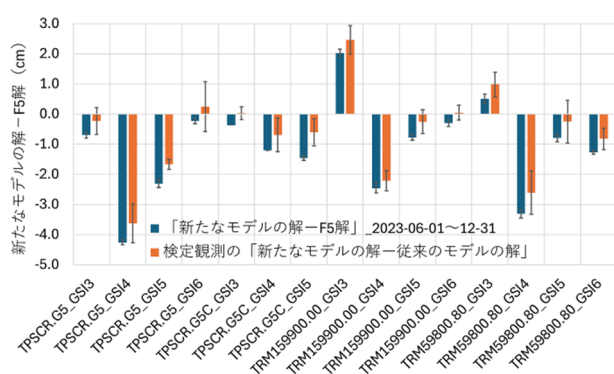


図-10 上下成分について、F5 解に対する新たなモデルの解の差の平均（青）と、検定観測における GSI14 モデルを適用した基線解に対する新たなモデルを適用した基線解の差の平均（橙）．エラーバーはそれぞれの標準偏差．

図-10 は、図-9 に示した新たなモデルの解と F5 解との差のアンテナ・架台タイプごとの平均（青）と、検証解析で求めた新たなアンテナ位相特性モデルを適用した基線解と GSI14 モデルを適用した基線解との差の上下成分の平均（橙）を示したグラフである．エラーバーはそれぞれの標準偏差を示している．両者は 1σ の範囲ではほぼ一致している．すなわち、図-9 に見られる新たなモデルの解と F5 解との差は、検証解析の結果と整合的である．検証解析において、新たなモデルを適用した基線解の方が GSI14 モデル

を適用した解よりも、位相特性モデル構築で固定した座標値をより再現していたことを考えると、新たなモデルの解の方がこれまでの F5 解よりも、楕円体高の正確度がより向上することが期待できる．

6. まとめ

2021 年度と 2023 年度の検定観測データを用いて、電子基準点の 18 ペアのアンテナ・架台タイプについて、複数の観測セッションで推定した PCO, PCV を平均する方法によってアンテナ位相特性モデルを構築した．検証解析の結果、新たなアンテナ位相特性モデルを適用した基線解の楕円体高はいずれのアンテナ・架台タイプでも、現在用いられている GSI14 モデルを適用した場合よりも真値に近く、RMS が 1 cm 未満で真値と整合した．

新たに構築したアンテナ位相特性モデルを適用して F5 解析と同じ手法で解析した解は、電子基準点「つくば 1」からの基線長のばらつきは F5 解とほぼ等しく、再現性の低下は見られなかった．また、新たなモデルの解の楕円体高と F5 解の楕円体高との差は、検定観測の上下成分の真値との差の結果と整合した．検証解析では新たなモデルを適用した基線解の方が GSI14 モデルを適用した場合よりもより真値に近いことを考えると、新たなモデルの解の楕円体高は F5 解の楕円体高よりもより正確度が高くなると期待できる．

以上の結果を踏まえ、国土地理院では 2025 年 4 月 1 日の電子基準点等の標高成果改定のための解析に、本稿で新たに構築したアンテナ位相特性モデルを適用することに決定した．なお、F5 解を算出する日々の GEONET 定常解析では、これまでの解との整合性を保つためアンテナ位相特性モデルの変更は行わず、従来の GSI14 モデルを引き続き使用する．

謝 辞

本研究の実施にあたっては、当時の畑中雄樹地理地殻活動研究センター長に多くの助言と支援をいただいた．ここに感謝の意を表する．

（公開日：令和 6 年 11 月 6 日）

参 考 文 献

- 古屋智秋（2024）：全国の標高成果の改定～衛星測位を基盤とする新しい標高へ～，第 53 回国土地理院報告会，https://www.gsi.go.jp/REPORT/HAPPY/2024/pdf/53_07.pdf (accessed 26 June 2024)．
- 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，doi: 10.57499/JOURNAL_134_03
- 越智久巳一，畑中雄樹（1996）：GPS 異機種間解析における系統誤差の補正方法について，国土地理院時報，85，23-28．

- 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.
- 豊福隆史，岩下知真子，畑中雄樹，湯通堂亨（2009）：電子基準点のアンテナ絶対位相特性モデルの構築と評価，国土地理院時報，118，9-15.