

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 Updating Daily Solution of CORS in Japan Using New GEONET 5th Analysis Strategy

測地観測センター 村松弘規・高松直史・阿部聡・古屋智秋¹・加藤知瑛²・大野圭太郎

Geodetic Observation Center MURAMATSU Hiroki, TAKAMATSU Naofumi,
ABE Satoshi, FURUYA Tomoaki, KATO Chiaki and OHNO Keitaro

地理地殻活動研究センター 畑中雄樹

Geography and Crustal Dynamics Research Center

HATANAKA Yuki

測地部 攪上泰亮

Geodetic Department KAKIAGE Yasuaki

企画部 大橋和幸

Planning Department OHASHI Kazuyuki

要 旨

国土地理院では、国家座標の維持や地殻変動の監視を主な目的として、GEONET の定常解析を実施し、全国約 1300 点の電子基準点の座標を「電子基準点日々の座標値 (F3 解・R3 解)」として公開してきた。この解析ストラテジ (解析の手法や使用するソフトウェア等をまとめた方策の総称) は開発から 10 年以上経過し、最新の GPS 衛星に対応していないことや、準拠する測地基準座標系が古くなるなどの課題が明らかになっていた。そこで、これらの課題を解決するため、解析ストラテジを更新した。新しい解析ストラテジ (第 5 版) の主な更新点は (1) 解析ソフトウェア、(2) 準拠測地基準座標系、(3) 対流圏遅延推定方法、(4) 固定点座標の計算手法の 4 点であり、特に、(3) 対流圏遅延推定方法の更新により上下成分の安定性が向上し、(4) 固定点座標の計算手法の更新により、国際的に計算された解析結果と ± 1 cm 程度で整合する解を得ることができるようになった。これらの結果を踏まえ、2021 年 4 月 1 日より、GEONET 定常解析を第 5 版の解析ストラテジに切り替え、運用を開始した。計算された座標解を「電子基準点日々の座標値 (F5 解・R5 解)」として公開した。

1. はじめに

国土地理院は、全国約 1300 点の電子基準点と中央局により構成される GNSS 連続観測システム (GEONET) を 1996 年から運用している。全電子基準点の観測データは GEONET 中央局へ集められ、基線解析により各電子基準点の座標解が求められる。1 日分の観測データを用いて計算された座標解は「電子基準点日々の座標値」としてホームページ等で公開されている。

「電子基準点日々の座標値」は、測量で用いられる、測量成果と観測結果を相互に変換するセミ・ダ

イナミック補正のパラメータ作成にも用いられるほか、近年では、みちびき (準天頂衛星システム) が提供するセンチメートル級測位補強サービスに用いられ、高精度測位社会を支える資料として重要性が増している。また、平時のプレート運動、地震時地殻変動及び火山活動に伴う地殻変動だけでなく、余効変動やスロースリップの存在を明らかにし、地球物理学をはじめとした多様な研究において使用されている。我が国の地殻・地貌の変動を表す基礎資料として、地震調査委員会や地震予知連絡会、火山噴火予知連絡会等の資料にも用いられている。

「電子基準点日々の座標値」を求める際の解析ストラテジは、1996 年に初版が作成されて以降、3 回の更新 (Hatanaka et al., 2003; 測地観測センター, 2004; 中川ほか, 2009) が実施されている。2009 年に開発された第 4 版の解析ストラテジによる最終解は「電子基準点日々の座標値 (F3 解)」として利用されていたが、開発以降 10 年以上が経過し、2 つの課題が生じた。

1 つは、第 4 版の解析ストラテジの解析ソフトウェアである Bernese 5.0 (Dach et al., 2007) が、近年打ち上げられている新型の GPS 衛星 (Block III) を含めた解析ができないことである。このため、第 4 版の解析ストラテジでは Block III 衛星を除外して解析していた。2021 年 1 月 1 日時点で Block III 衛星は 4 基が運用され、今後 6 基が打ち上げ予定であり、さらに、後続の Block IIIIF 衛星も開発が進められている。したがって、現時点では座標解の精度を低下させるほどの影響は出ていないものの、近い将来、Block III 衛星の除外に伴う座標解の精度低下が問題となることが想定されていた。

もう 1 つは、地殻変動監視で主に用いられる相対座標への影響は小さいものの、絶対座標の精度が開発当時に比べ低下していることであつた。これは、第 4 版の解析ストラテジで採用した測地基準座標系

現所属: ¹ 地理地殻活動研究センター, ² 測地部

(以下「準拠座標系」という.)と固定点解析における拘束点の選択の2つが主な原因と推測された。

第4版の解析ストラテジの準拠座標系は ITRF2005 (正確には、その実現系である IGS05 (IGSMail-5447, 2006)) である。この座標系は 1980 年～2006 年の観測技術・観測データを用いて構築されたものであり、平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震等の巨大地震に伴う地殻変動が反映されていないことなど、最新の座標系である ITRF2014 との乖離が大きくなり、座標解に系統差が生じていた。

また、第4版の解析ストラテジにおける基線解析の固定点 (通常は電子基準点「つくば1」) の座標値を求める固定点解析においては、拘束点として用いる日本周辺の IGS 観測点 (IGS (International GNSS Service : 国際 GNSS 事業) に登録されている GNSS 連続観測点) の数が少なく、また、前記の地震による地殻変動の影響を強く受け、ITRF2005 で設定された初期座標・速度により計算された座標値は現実の座標値から乖離していると推測された。固定点解析は、初期座標・速度により計算された座標値を確からしいものと想定して解析するため、現実の座標値との乖離が大きくなるにしたがい、精度の高い座標解を維持することが困難になっていた。また、平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震以降は現実との乖離が非常に大きい IGS 観測点を拘束点から除外して解析を行っているため、より拘束点数が少なくなり、拘束点に欠測等があると固定点解析により計算する固定点 (つくば1) の座標解への影響が大きくなり、座標安定性の低下に繋がることとなった。

固定点座標の ITRF2014 からの乖離や座標安定性の低下は、全電子基準点の座標に影響する。この影響は、2 点の電子基準点座標値の差 (基線) の変化を用いた地殻変動監視に対しては小さいが、最新の座標系を用い、絶対座標を参照する精密単独測位技術による座標値とは乖離が発生し、これらのサービスを支援する上で障害となり得る。

これらの課題を解決するため、解析ストラテジを第5版に更新した。このストラテジによる最終解は「電子基準点日々の座標値 (F5 解)」と呼び、2021 年 4 月 1 日に公開した。なお、更新前の第4版の解析ストラテジによる最終解は「電子基準点日々の座標値 (F3 解)」と呼ばれていたが、今回の更新で、ストラテジのバージョンと名称の不統一を解消した。

本報は第5版の解析ストラテジを解説することを目的とし、2 章で解析の種類と構成を述べ、3 章、4 章でストラテジを構成する解析 (全点解析、固定点解析) の手法や評価結果を解説する。

2. 解析ストラテジの概要

2.1 解析プロダクトの種類

第5版の解析ストラテジにより計算されるプロダクト (解析結果等) の種類は、第4版と同じである。解析は、IGS が作成した精密暦の公開に合わせて実施され、1 週間ごとに公開される最終暦を用いた最終解、1 日ごとに公開される速報暦を用いた速報解、6 時間ごとに公開される超速報暦により 6 時間のデータ窓を 3 時間ずつシフトさせて解析する迅速解を生成する。本報ではこれらのプロダクトをそれぞれ F5 解、R5 解、Q5 解と呼ぶ。また、それぞれの解析手法を F5 解析、R5 解析、Q5 解析と呼ぶ。なお、以降は F5 解析の手法について主に解説するが、R5 解析、Q5 解析についても、注釈等が無い限り同一の手法を採用している。各解のうち、精度の高い F5 解、R5 解をそれぞれ「電子基準点日々の座標値 (F5 解、R5 解)」として公開し (表-1)、特に、F5 解については、GEONET の運用開始直前の 1996 年 3 月 21 日まで遡って解析した結果も公開した。

なお、第5版の解析ストラテジによるプロダクトで用いる衛星系は GPS のみであるが、これとは別に、研究者向けのデータとして GLONASS を使用したプロダクトも開発している。

表-1 公開される「電子基準点日々の座標値」の諸元

	最終解 (F5 解)	速報解 (R5 解)
IGS 精密暦	最終暦	速報暦
セッション長	24 時間	24 時間
公開頻度※1	毎週月曜日	毎朝※2
解析対象期間	21-15 日前※3	2 日前
固定点座標	世界中の IGS 観測点から固定点解析により取付け	

※1 IGS 精密暦の公開が遅れた場合、解析の実施・提供も遅れる

※2 R5 解は国土地理院 FTP サイトのみで公開

※3 IGS 最終暦は 7 日分まとめて公開されるため、7 日間を 1 日毎に解析する

2.2 解析の構成

F5 解析は、大きく分けて「固定点解析」と「全点解析」の 2 つの解析から成る。まず、世界中の観測点から日本の電子基準点「つくば1」の座標を求める固定点解析を行い、その座標を固定して全点解析によりその他の電子基準点の座標を求める。最終的に得られる各電子基準点の座標は、全点解析の結果であるため、本報では全点解析から解説する。

3. 全点解析

3.1 全点解析の考え方と手法

全点解析の目的は、全国の電子基準点座標を求めることであるが、この座標は精度が良いだけでなく、解析手法によるノイズが時空間的に均質であることが求められる。電子基準点の観測データは 1990 年代前半より存在する。しかし、データの取得間隔や品質、観測点配置は時期や観測点によって異なり、

電子基準点配置にも偏りがあるため、均質な条件で解析することは難しい。そこで、全点解析は GEONET が運用を開始した 1996 年春以降のデータを対象とする。なお、1996 年以降であっても、一部観測点のデータ取得間隔が異なる等、時期によって観測データのフォーマットが異なることがある。解析ストラテジは、このような観測データの多様性に対応可能な設定である必要がある。

表-2 F3 全点解析と F5 全点解析の解析設定

	F3 全点解析	F5 全点解析※1
解析ソフトウェア	Bernese 5.0	Bernese 5.2
使用衛星	GPS	GPS
準拠座標系	ITRF2005 (IGS05)	ITRF2014 (IGb14)
衛星軌道情報	IGS 暦 2006 年 11 月 4 日以前は Steigenberger et al. (2006) を IGS05 に変換して使用	IGS 暦 (ITRF2014 に変換) ※2
地球姿勢パラメータ (EOP)	IGS 暦に付随する EOP	IGS 暦に付随する EOP
アンテナ位相特性モデル	豊福ほか (2009) に基づく絶対位相特性モデル	豊福ほか (2009) に基づく絶対位相特性モデル (IGS 観測点については IGS のモデルを適用)
衛星最低仰角	15°	15°
固体地球潮汐モデル	IERS2003	IERS2010
海洋潮汐荷重	GOTIC2 (Matsumoto et al., 2001)	GOTIC2 (Matsumoto et al., 2001)
電離層補正	電離層フリー線形結合 (1 次項) IGS モデル (2 次項)	電離層フリー線形結合 (1 次項) IGS モデル (2 次項)
対流圏遅延推定間隔	3 時間 (天頂遅延)・24 時間 (水平勾配)	1 時間 (天頂遅延)・3 時間 (水平勾配) ※3
対流圏遅延マッピング関数	NMF	VMF1※4
天頂遅延量の初期値	Saastamoinen (1973)	VMF1※4
固定点	通常は電子基準点「つくば 1」を使用し、固定点解析に基づき計算※5	通常は電子基準点「つくば 1」を使用し、固定点解析に基づき計算※5
ネットワーク構造	ネットワーク (基本網・追加網) - バックボーンクラスタ (基本網のみ) - 固定点 - 観測点 - 地域クラスタ - 放射基線中心点 - 観測点	ネットワーク (基本網・追加網・特殊網) - バックボーンクラスタ (基本網のみ) - 固定点 - 観測点 - 地域クラスタ - 放射基線中心点 - 観測点

※1 F5 全点解析の詳細な解析設定 (英語) は、国土地理院 FTP サイトで公開されている解析設定ファイル (ftp://terras.gsi.go.jp/data/coordinates_F5/DOC/GSI_F5.acn) を参照。

※2 2015 年 2 月 14 日以前については IGS による再解析結果 (repro2) を変換して使用。座標変換には ITRF2008 から ITRF2014 の変換パラメータを使用。

※3 Q5 解析のみ 3 時間 (天頂遅延)・24 時間 (水平勾配) を用いる。

※4 R5 解析・Q5 解析のみ GMF を用いる。

※5 R3・Q3 解析は電子基準点「前原」(福岡県)を使用し、区分直線モデルによる固定値を与えていたが、R5 解析は F3、F5 解析と同様に電子基準点「つくば 1」(茨城県)を使用し固定点解析を実施する。Q5 解析は Q3 解析と同様である。

F5 全点解析の設定及び第 4 版 (F3 解析) との比較を表-2 に示す。全点解析の基本的な手順は、F3 解析と解析の流れは同様であるが、解析ソフトウェアは Bernese 5.2 (Dach et al., 2015) を用いている。大量の電子基準点を均質な条件で解析するために、独自の工夫がなされている。主な特徴を下記に示す。

3.1.1 推定パラメータ

一般的な GNSS 基線解析は、固定点から観測点までの基線ベクトルを推定するが、F5 解析ではこれに加え、対流圏遅延 (天頂遅延量及び水平勾配) も推定する。F3 解析では天頂遅延量を 3 時間、水平勾配を 24 時間ごとの区間で推定していたが、気象条件 (主に大気中の水蒸気量) の時間変化をより反映させるため、F5 解析では天頂遅延量を 1 時間・水平勾配を 3 時間ごとの区分線形関数として推定する。

また、対流圏遅延推定時に使用するマッピング関数は、F5 解析では数値天気予報データを用いて 6 時間ごとに計算される VMF1 (Vienna Mapping Function: Böhm et al., 2006a, 2009) を用い、R5・Q5 解析では、経験的なモデルである GMF (Global Mapping Function: Böhm et al., 2006b) を用いる。

3.1.2 準拠座標系

F5 解析は ITRF2014 (正確には、その IGS による実現系である IGB14 (IGSMail-7921, 2020)) に準拠する。F5 全点解析において準拠座標系が関連する入力ファイルは、衛星軌道・EOP (地球姿勢パラメータ)・位相特性モデル・固定点座標の 4 つである。

衛星軌道の展開に用いる精密軌道情報と EOP については、IGS が公開している精密暦を使用するが、2015 年 2 月 14 日以前については、IGS による再解析結果 (repro2) (Reischung et al., 2016) を用いる。2017 年 1 月 28 日以前の IGS 暦及び repro2 については、準拠座標系が ITRF2008 の IGS による実現系である IGB08 (IGSMail-6663, 2012) であるため、ITRF2014 に座標変換 (ITRF2008 から ITRF2014 のヘルマート変換パラメータを使用) した上で解析に使用する。

位相特性モデルは、IGS が作成したモデルを採用するが、大半の電子基準点は IGS に登録されていないレドームを持つため、それらは独自に位相特性モデルを計算している。近年使用されているアンテナ・レドームについては豊福ほか (2009) の手法に基づいて観測結果から推定したモデルを用いる。使用頻度の低い、あるいは古いアンテナ・レドームについては F3 解析で使用していた IGS05 に準拠する位相特性モデルに対して、基準アンテナにおける IGS05 と IGS14 の位相特性モデルの差分を付与することにより、変換したモデルを用いる。

固定点座標については、4 章にて詳述する固定点解析により ITRF2014 (IGB14) に準拠した座標を求める。

なお、ITRF2014 は近い将来に ITRF2020 (仮称) へ更新されると想定される。その場合の F5 解析の対応については、座標への影響等により判断される。

3.1.3 前処理

電子基準点は上空視界の開けた地点に設置されているものの、周辺環境や観測機器の状態等により、観測データの品質には差がある。データ品質の悪い電子基準点が含まれると、3.1.5 項で述べるネットワーク結合を行う際に、周辺の電子基準点座標に影響を及ぼすため、事前に解析から除外するか、品質の悪い衛星の観測データを除外する。除外の判断には、観測データ処理ソフトウェアである teqc (Estey and Meertens, 1999) を用いて計算した観測時間、観測データ数、マルチパス、サイクルスリップ数等の品質情報を用いる。

3.1.4 アンビギュイティの整数化手法

基線解析により精度の高い座標を得るためには、観測方程式に含まれるアンビギュイティ (波数の整数値不確定性) を整数化することが必要である。

基線解析における基線の組み方は、次項のネットワーク結合手法に基づくが、電子基準点は離島にも点在するため、その距離は数 km～数百 km と様々である。したがって、アンビギュイティの整数化手法は基線長によって異なる。具体的には、まず基線長が 100 km 以上の基線に対し、コード・位相線形結合 (Melbourne-Wübbena 結合: 電離層遅延の影響が小さい線形結合) を観測量としたワイドレーンのアンビギュイティの整数化が図られ、次に基線長が 300 km 以下のものに位相線形結合を観測量としたワイドレーンのアンビギュイティの整数化が図られ、最後に、全基線に対して電離層フリー線形結合を観測量としたナローレーンのアンビギュイティの整数化が図られる。

3.1.5 ネットワーク結合手法

解析においては、アンビギュイティを整数化した後、正規方程式を作成し、座標解と対流圏遅延を推定する。

全点解析の固定点は電子基準点「つくば 1」を用いるが、全ての電子基準点について固定点との基線解析を直接行っている訳ではない。解析の質の維持と解析時間の短縮を図るため、F5 解析は F3 解析と同様に、階層的なネットワーク (解析クラスタの集合) を作り、それらを結合する手法を採用している。これらの手順を総称して「ネットワーク結合手法」

という。解析ネットワークの例を図-1 に示す。

事前準備として、全電子基準点は「基本網」と「追加網」のどちらかに分類される。基本網は 2000 年頃までに設置された電子基準点 (約 950 点) で、構成する電子基準点が移設した場合は移設後の点も含まれる。追加網はそれ以外の電子基準点が該当する。

なお、F5 解析には「特殊網」という新たな網を設定しているが、これは評価等のために正規の観測点以外の観測点等を含めて、正規の観測点の解析に影響を与えずに解析する必要がある場合に設定するものである。

ネットワーク結合の第 1 段階として、基本網に属する点のうち、データ品質が良く、長期間観測されている点を、全国に可能な限り均等に配置するように事前に選定した約 20 点の電子基準点から成る「バックボーンクラスタ」が形成される。最短のものから自動で基線を組み、固定点 (通常は電子基準点「つくば 1」) の座標を固定して約 20 点の座標・対流圏遅延を推定する。

次に、残りの基本網を解析する。基本網を構成する電子基準点は、以下のアルゴリズムにより、放射状の基線を組む一つあたり 2~20 点程度から成る網と、放射状の基線の中心点同士を結ぶ網に分割される。まず、放射状の基線の中心となる観測点 (以下「放射基線中心点」という。) として、前述したバックボーンクラスタの点と、予め選定した電子基準点を合わせた計 60 点程度が設定される。さらに、放射基線中心点以外の電子基準点について、最寄りの放射基線中心点との間で基線を組み、一つのユニットを構成する。また、放射基線中心点同士を結ぶ基線も一つのユニットを構成する。ユニットごとに基線間の相関を考慮して基線解析を行い、アンビギュエティを消去して座標値と対流圏遅延をパラメータとした正規方程式を生成する。最後に、これらの正規方程式を結合し、前段階で推定されたバックボーンクラスタの電子基準点座標・対流圏遅延を固定することにより、放射基線中心点及びバックボーンクラスタ以外の電子基準点の座標と対流圏遅延を求める。なお、この際に、日本全国を 1 つの網として扱うと処理が膨大となるため、解析は 5 つの地域 (以下「地域クラスタ」という。) に分けて行われる。地域クラスタ間で対流圏遅延推定にギャップが生じないように、バックボーンクラスタの解析をあらかじめ実施している。

最後に、追加網の解析を行う。追加網の解析では、基本網の解析に用いた放射基線中心点を使用する。追加網の全ての電子基準点は最寄りの放射基線中心点と基線を組み、地域クラスタごとに基本網の解析から得られた放射基線中心点の電子基準点座標及び対流圏遅延を固定して解析を行う。

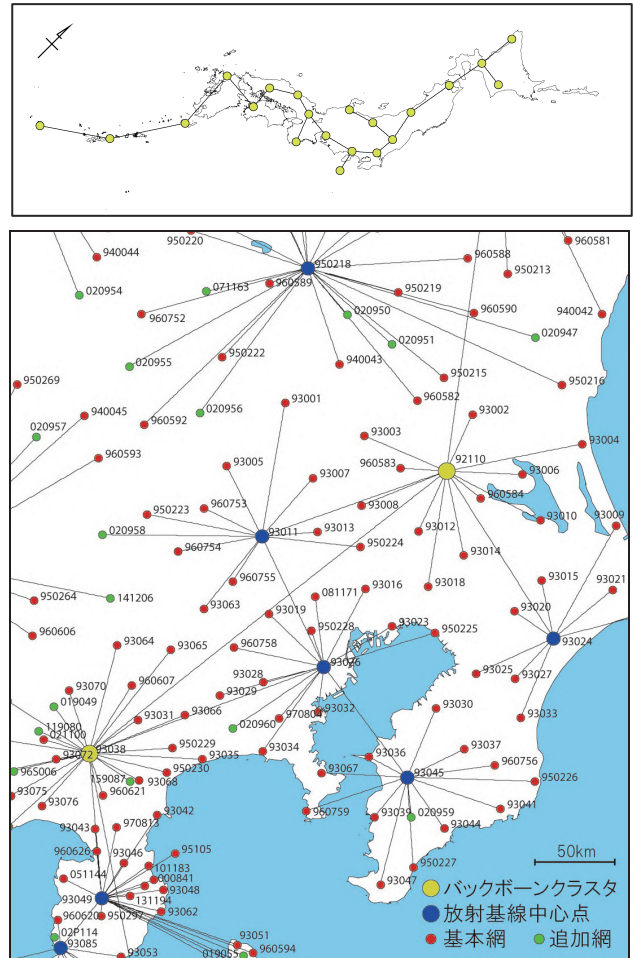


図-1 F5 全点解析の階層的な解析クラスタの例。欠測等により、形状は日ごとに異なる。上図がバックボーンクラスタの全形で、下図が関東地方を拡大したもの。なお、バックボーンクラスタは放射基線中心点の役割を兼ねている。また、電子基準点は点名ではなく点番号をプロットしている。

3.2 F3 解析からの更新点及び評価

全点解析における F5 解析と F3 解析の違いや、F5 解の精度評価について述べる。

3.2.1 F3 解析からの更新点

全点解析において、F3 解析から更新した点は 3.1 節で述べたが、まとめると、概ね下記のとおりである。

1) 解析ソフトウェア

F3 解析では Bernese 5.0 を使用したが、F5 解析では Bernese 5.2 を使用する。これにより、GPS Block III 衛星のデータが使用可能となった。

2) 準拠座標系

F3 解析は ITRF2005 (IGS05) に準拠したが、F5 解析は ITRF2014 (IGb14) に準拠する。これに伴い、アンテナ位相特性モデルも ITRF2014 に対応させたものを使用する。

なお、2015 年 2 月 14 日以前においては、使用する精密暦及び EOP が異なり、F3 解析は IGS の精密暦・EOP を用いたのに対し、F5 解析では 3.1.2 項のとおり IGS の再解析結果 (repro2) を ITRF2014 に変換して用いている。

3) 固定点座標

F3 解析と F5 解析では、固定点である「つくば 1」の座標計算手法が異なる。詳細は 4 章で述べる。

4) 対流圏遅延の推定間隔及びマッピング関数

F3 解析では天頂遅延量を 3 時間、水平勾配を 24 時間ごとに推定したが、F5 解析では、それぞれ 1 時間、3 時間間隔に変更している。

また、対流圏遅延推定時に使用するマッピング関数は、F3 解析では NMF (Niell Mapping Function; Niell, 1996) を用いたが、F5 解析では VMF1 (R5・Q5 解析では GMF) を用いる。天頂遅延量の初期モデルは、F3 解析では Saastamoinen (1973) を用いたのに対し、F5 解析では VMF1 (R5・Q5 解析では GPT (Böhm et al., 2007) 及び GMF)) を用いる。

3.2.2 対流圏遅延の解析設定変更の効果

3.2.1 項で述べたとおり、F5 解析では対流圏遅延推定時の間隔及びマッピング関数を F3 解析から変更している。この効果を評価した。

対流圏遅延の推定間隔の変更により、湿潤大気の変化をより正確に評価でき、解析に含まれるノイズを軽減させる効果が想定される。この効果は、大気中の水蒸気量が不均質になりやすい夏季に強く表れる。また、マッピング関数の変更については、NMF を使用した精密単独測位結果の高さ成分には、VMF1 を使用した解析結果に比べ、中日本以北の地域で最大 3 mm 程度の見かけの年周変動 (冬季沈降・夏季隆起) が生じることが Munekane et al. (2008) で確認されており、VMF1 等のより新しいマッピング関数を使用することが推奨されている。中緯度地域の観測点を基準とした基線では、この見かけの上下年周変動は低緯度地域において冬季隆起・夏季沈降として現れるものと考えられる。

F3 解析と F5 解析の間には、対流圏遅延推定に関する変更の他にも変更点がある。VMF1 は Bernese 5.2 のみで扱えるため、解析は Bernese 5.2 を用い、対流圏遅延の推定に関する設定変更による効果のみを評価するために、対流圏遅延の推定に関する解析設定以外は同一の設定とした。対流圏遅延の推定に関する解析設定は、F3 解析で使用した設定を基準として、マッピング関数を変更した設定、マッピング関数と対流圏遅延推定間隔を変更した設定 (F5 解析の設定) の 3 つを設定した (表-3)。評価期間は、2019 年の 1 月 1 日～12 月 31 日とした。評価対象は、まず、固定点座標による差を消去するために、電子基

準点「八郷」(茨城県)を固定し、その他の全電子基準点への基線ベクトルを各解析それぞれで形成した。なお、全点解析の固定点である「つくば 1」を使用しないのは、地下水のくみ上げによる年周変化 (飛田ほか, 2004; Munekane et al., 2004) を避けるためである。次に、直線トレンド及び年周・半年周成分を除去した。最後に、はずれ値 (回帰曲線に対する残差が RMS の 2 倍を超過した値) を除外した上で、再度上記トレンド等を除去したものを作成し、評価対象基線とした。

表-3 対流圏遅延推定の効果を検証するための解析設定
定. 表の設定以外は同一の設定で解析した。

解析設定	マッピング関数	推定間隔 (時間)	
		天頂遅延	水平勾配
基準設定※1	NMF	3	24
マッピング関数変更	VMF1	3	24
マッピング関数変更+推定間隔変更※2	VMF1	1	3

※1 F3 解析で使用した設定

※2 F5 解析で使用した設定

マッピング関数を VMF1 に変更した効果について示す。図-2 は電子基準点「城辺」(沖縄県)との基線における上下成分の時間変化グラフである。マッピング関数を NMF, VMF1 とした解析設定で得られた 2 種類の解が示されており、さらに、両者の差分を棒グラフで表示している。これらのグラフから、マッピング関数を VMF1 に変更することにより、NMF を用いた解析で見られた上下年周変化に改善が見られることが分かる。8 月の月平均値と 2 月の月平均値の差を「振幅」と定義し、NMF の解を基準とした VMF1 の解との差をとり、これを全点についてプロットしたものを図-3 に示す。この図は、値が小さいほど見かけの変位が抑えられたことを示し、この改善量は中日本以南で増加する傾向にあり、先行研究 (Munekane et al., 2008) で示された見かけの変位の改善効果と同等の傾向が示された。改善量は最大で 0.8 mm 程度であり、先行研究で見られたものに比べると小さいが、これは先行研究がシミュレーションで生成された観測データに精密単独測位を適用することによって得られた絶対変位を評価したものであるのに対し、今回の解析は実測データを解析して得られた相対変位を評価していることによるものであると推測された。

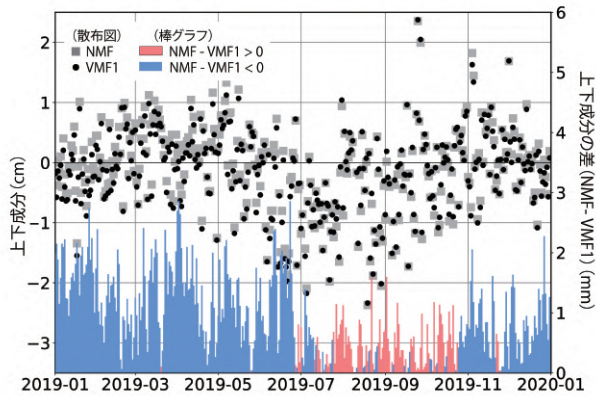


図-2 八郷（茨城県）－城辺（沖縄県）基線における上下成分の時間変化グラフ（基準設定及びマッピング関数を変更した解）。棒グラフは基準設定（NMF）による解析結果に対する差を表し、VMF1 への変更により冬季沈降，夏季隆起し見かけの年周変位が改善された。

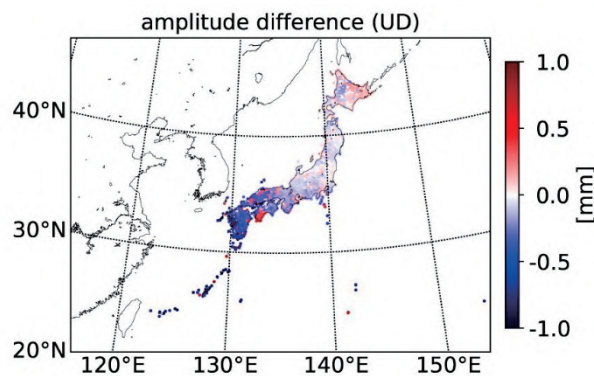


図-3 マッピング関数変更による上下成分の振幅の改善効果。2019 年 8 月の月平均値と 2 月の月平均値の差を「振幅」と定義し、マッピング関数を VMF1 に変更した設定の振幅から、基準設定の振幅を減じた値を全電子基準点で計算し、プロットしている。

次に、対流圏遅延の推定間隔を変更した効果を図-4 に示す。この図は、対流圏遅延推定間隔（天頂遅延・水平勾配）を 3 時間・24 時間とした解析と、1 時間・3 時間とした解析（マッピング関数はいずれも VMF1）（表-3）それぞれの評価対象基線の上下成分に、年周・半年周成分を考慮した回帰曲線を求め、その残差の RMS を計算し、両者の差分をとったものをプロットしている。つまり、値が小さいほど、推定間隔を変更したことにより上下成分のばらつきが低減されたことを示す。この図から、全国にわたって上下成分のばらつきが改善されたことが推測された。その影響は最大で 1.3 mm 程度であった。

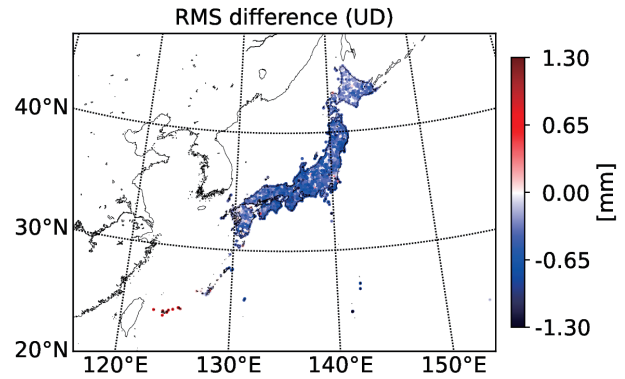


図-4 対流圏遅延の推定間隔変更による上下成分のばらつきの改善効果。対流圏遅延推定間隔（天頂遅延・水平勾配）を 3 時間・24 時間とした解析と、1 時間・3 時間とした解析それぞれで回帰曲線に対する RMS を計算し、後者から前者を減じた値を全電子基準点で計算し、プロットしている。

3.2.3 F5 解の安定性評価

F5 解の基線ベクトルにおける安定性を畑中ほか（2005）と同様の手法で評価した。まず、固定点座標による差を消去するために、電子基準点「八郷」（茨城県）に対するその他の全電子基準点への各基線について、基線ベクトル成分の時系列を F3 解・F5 解それぞれについて求め、保守作業に伴うオフセット補正（岩下ほか，2009）を F3 解・F5 解それぞれで適用したうえで直線トレンド・年周・半年周成分を考慮した回帰曲線からの残差の RMS を評価した。評価期間は 2017 年 1 月 1 日から 2019 年 12 月 31 日の 3 年間とした。

評価結果を表-4 に示す。F3 解と F5 解では、水平成分については F3 解と F5 解は同程度であるが、上下成分は F5 解の方がより安定していることが分かる。これは、対流圏遅延の推定間隔を変更した効果が表れたものと思われる。上下成分の RMS の差（F3 解基準）をプロットしたものを図-5 に示す。この図は、値が小さいほど安定性が向上していることを示し、全国的に安定性が向上したことが分かる。

表-4 F3 解・F5 解の安定性 (RMS) (単位: mm)

	東西	南北	上下
F3 解	2.82	2.62	7.38
F5 解	2.79	2.56	7.03

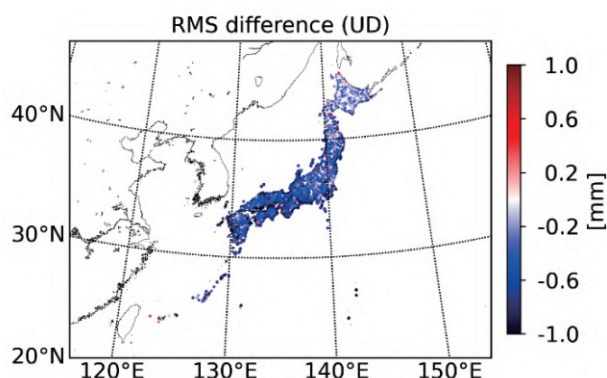


図-5 F5 解の上下成分の安定性向上効果. F3 解・F5 解それぞれで回帰曲線に対する RMS を計算し、F3 解を基準とした差を全電子基準点で計算し、プロットしている。

3.2.4 F5 解で確認される座標の外れ値

解析結果の座標時系列には、実際の地殻変動の他に、それ以外の原因による変化（ノイズ）が含まれる。これについては、F3 解も F5 解も基本的に同様のはずであるが、F5 解への更新によって改善あるいは改悪となる場合があるかもしれない。したがって、下記のように評価した。

まず、1996 年 3 月 21 日～2020 年 8 月 29 日の全ての F3 解、F5 解について、電子基準点「三隅」（島根県）に対するその他の全電子基準点への各基線について、基線ベクトル成分（東西・南北・上下）の時系列を F3 解・F5 解それぞれで求めた。各基線の毎日の各成分値に対して、その日を含まない前 14 日間平均値、後 14 日間平均値と比較し、両者ともに 3 cm を超えるものを「外れ値」としてカウントした。ただし、この手法では地震時地殻変動や余効変動の影響で、実際の地殻変動を外れ値としてカウントする可能性を排除できないため、F3 解で 10 cm 以上の地殻変動が確認された地震（全 12 地震）の前後 15 日間はカウント対象の期間から除いた。F3 解・F5 解それぞれで外れ値が発生した日・点（件数）を集計した。

集計した結果、F3 解のみで検出され、F5 解では検出されない外れ値は 10722 件あったのに対し、F5 解のみで検出された外れ値は 6564 件であり、F5 解では外れ値の数が減った一方、F5 解に固有の外れ値が存在する。F5 解のみで確認された外れ値のうち、特定できた要因のいくつかは下記のとおりである。

1) アンビギュイティの整数化が不十分である場合

外れ値が見られた観測点の中で、アンビギュイティの整数化が不十分であった点が見られた。F5 解析時には前処理を施すものの、必ずしも品質の良いデータのみが解析されるわけではない。データの品質が低い等の要因により、アンビギュイティの整数化

が不十分であった場合、解析結果に影響する可能性がある。この影響が F3 解では偶然小さく見えたが、F5 解では大きく現れて外れ値となったケースが外れてしまったと推測される。

なお、整数化されたアンビギュイティの数は解析時に出力されるサマリーファイルに記録されるので、これを解の品質の参考とすることが可能である。

2) 対流圏遅延の推定間隔を短縮した影響

F3 解析・F5 解析では、座標解と同時に対流圏遅延パラメータも推定する。これらのパラメータの間には相関があり、解析におけるノイズは、座標解だけでなく対流圏遅延に現れるため、対流圏遅延パラメータが座標解のノイズの手掛かりとなる場合がある。外れ値のいくつかについては、推定された対流圏遅延パラメータが非現実的な値となっているものが見られた。F5 解析は F3 解析に比べ対流圏遅延の推定間隔を短くしている。このことは、3.2.2 項で述べたようにパラメータの追随性を向上させ、座標解の安定性を向上させるメリットがある一方、パラメータ数の増加によって F3 解析に比べモデル化されていないノイズに影響されやすくなるデメリットがあると考えられる。メリットとデメリットのバランスは、対流圏遅延推定時の拘束条件や、ネットワークの分散・結合処理の方法等にも影響される可能性があり、最適化することが今後の課題である。

4. 固定点解析

4.1 固定点解析の考え方と手法

全点解析の固定点である電子基準点「つくば 1」（欠測した場合は近傍の代替点）の座標を、国内外の IGS 観測点から決定する解析が固定点解析である。

「つくば 1」の座標については、日々の解析を実施せずに、地殻変動を考慮したモデルを過去のデータから推定し、これを適用して計算することも可能で、第 3 版の解析まではその手法を用いていた（区分線形モデルの適用）。しかし、このモデルでは「つくば 1」の地下水の汲み上げによる周期的な変位（飛田ほか、2004；Munekane et al., 2004）は考慮されておらず、また、地震等による地殻変動のトレンドの変化が小さかった場合は、それを考慮したモデルの見直しは必ずしも行われていなかった。したがって、モデルによって計算された座標値（以下「モデル値」という。）は、現実の座標値から乖離し、その差が全点解析時に全ての電子基準点座標値にバイアスを与える。このため、F3 解析・F5 解析では固定点の絶対座標値を日々計算する固定点解析を採用している。

なお、電子基準点「つくば 1」を全点解析の固定点として選定した理由は、1992 年から長期にわたり、ほとんど欠測することなく観測が続けられていて、解析の安定性を維持する上で適しているためである。

表-5 F3 固定点解析と F5 固定点解析の解析設定.

	F3 固定点解析 ^{※1} (GPS1400 週以降)	F5 固定点解析 ^{※2}
解析ソフトウェア	GAMIT (ver. 10.3-10.6), GLOBK	Bernese 5.2
準拠座標系	ITRF2005 (IGS05)	ITRF2014 (IGb14)
衛星軌道情報	IGS 暦	IGS 暦 ^{※3} ^{※4}
地球姿勢パラメータ (EOP)	IGS 暦に付随する EOP	IGS 暦に付随する EOP
アンテナ位相特性モデル	IGS による絶対位相特性モデル (電子基準点については全点解析と 同じモデルを適用)	IGS による絶対位相特性モデル (電子基準点については全点解析と 同じモデルを適用)
衛星最低仰角	10°	7°
固体地球潮汐モデル	IERS2003	IERS2010
海洋潮汐荷重	FES2004	FES2004
電離層補正	電離層フリー線形結合	電離層フリー線形結合
対流圏遅延推定間隔	2 時間 (天頂遅延・水平勾配)	1 時間 (天頂遅延)・ 24 時間 (水平勾配)
対流圏遅延マッピング関数	GMF	GMF
天頂遅延量の初期値	GPT	GPT
使用観測点	解析目標点 3 点 (つくば 1 等) 拘束点 10 点 (日本周辺) 非拘束点 12 点	解析目標点 3 点 (つくば 1 等) 拘束点 100 点程度 (国外 IGS 点) 非拘束点 6 点 (国内 IGS 点)
拘束点初期座標値	ITRF2005 モデル値	IGb14 モデル値
拘束方法	暦及び地球姿勢パラメータは初期値 に強く拘束 拘束点に対して最小拘束 (no-net- rotation)	暦及び地球姿勢パラメータは初期値 に強く拘束 拘束点に対して最小拘束 (no-net- translation)

※1 GPS1399 週以前の設定は小谷ほか (2009) を参照.

※2 F5 固定点解析の詳細な解析設定 (英語) は, 国土地理院 FTP サイトで公開されている解析設定ファイル
(ftp://terras.gsi.go.jp/data/coordinates_F5/DOC/GSI_F5FIX.acn) を参照.

※3 R3 解析では固定点解析を実施していなかったが, R5 解析では固定点解析を実施する. R5 固定点解析では
IGS 速報暦を使用し, そのほかの解析設定は, F5 固定点解析と同様である.

※4 2015 年 2 月 14 日以前については IGS による再解析結果 (repro2) を変換して使用. 座標変換には ITRF2008
から ITRF2014 の変換パラメータを使用.

固定点解析では, 世界中に設置された IGS 観測点を用いた解析を行うもので, 4.1.2 項で述べる方法で選定した観測点 (拘束点) の座標値を, 特定の基準座標系に整合した値に拘束することにより, その基準座標系に整合した解析結果が得られる (座標系の実現). 固定点解析の目的は, 全点解析で使用するための固定点座標を, 特定の基準座標系に整合するものとして安定的に求めることである.

F5 固定点解析の設定及び第 4 版 (F3 固定点解析) との比較を表-5 に示す. また, F5 固定点解析の主な特徴を以下の各項で述べる. なお, 解析ソフトウェアは Bernese 5.2 を用いている.

4.1.1 準拠座標系

全点解析と同様に, 準拠座標系は ITRF2014 (正確

には, その IGS による実現系である IGb14) であり, 準拠座標系は, 衛星軌道, EOP, 位相特性モデル, 拘束点初期座標の 4 種の設定により実現される.

衛星軌道, EOP, 位相特性モデルについては, 全点解析と同様であるが, 次項で説明する拘束点の初期座標については, 次項に示す手法で選定した拘束点において, IGb14 モデル (基準エポックにおける座標値, 速度, PSD (余効変動) モデル・オフセット補正量) から計算される計算対象日の座標 (IGb14 モデル値) を用いる.

4.1.2 使用観測点

F5 固定点解析の特徴は, 使用する IGS 観測点と初期座標の選択である. 使用観測点は日によって異なるが, 一例を図-6 に示す. 固定点解析で用いる観測

点は、以下の3種類に分類される。

1) 解析目標点

固定点解析において座標計算の目標とする点であり、全点解析における固定点（又は固定点候補）となる。電子基準点「つくば1」、「つくば3」及びIGS観測点「TSKB」が該当する。

2) 拘束点

解析目標点の座標値の算出において基準座標系を実現するために、初期座標を拘束させる点を指し、日本国外のIGS観測点のうち、IGb14の基準局から選択した観測点が該当する。

拘束点は、あらかじめ設定した拘束点候補リストの中から、観測データが存在するものが自動的に選択される。このリストは常に同じではなく、不定期に更新される（2020年12月31日までにおいては、1年ごとに更新されている）。拘束点候補リストの作成方法は以下のとおりである。

拘束点候補はIGb14モデルが存在する233点から選ばれる（<ftp://igs-rf.ign.fr/pub/IGb14/IGb14.snx>）。この233点の全てを拘束点候補とすることも可能だが、その場合、観測点配置が偏り、日本周辺の拘束点が欧米よりも少ないことから、解析目標点の座標に飛びが発生することがある。一方で、拘束点数が少なく、解析目標点の座標値のばらつきが大きくなる。また、IGb14モデルが存在する点の多くは、データ品質が良く、長期にわたって解析されているIGS観測点であるが、アンテナ交換や地殻変動、データ品質の低下等により、モデル値と現実の座標値の間に差が発生することがあり、座標系の実現に悪影響を及ぼす。したがって、この233点の中から、観測点数と配置を考慮した上で、座標が安定している観測点を抽出し、拘束点候補とする。具体的には、観測点配置については、IGb14で設定されたコアサイト（IGb14モデルを作成した際に設定された地域ネットワークの中心となる観測点）をまず選定し、その上でコアサイトから遠い観測点を拘束点候補リストに追加する。この時、モデル値と現実の座標値の乖離を調べるために、IGb14モデル値とIGSが計算した日々の座標値（daily solution、ただし、2015年2月14日以前においては再解析解（repro2））の残差のRMSを一定期間（例えば一年間）を対象に計算し、可能な限り良好なものを追加する。一方で、IGS観測点の空間分布やモデル値と現実座標のずれ等の状況は、観測点の新設・廃点や地殻変動、保守作業等により時間経過と共に変化するため、定期的に拘束点の見直しが必要となり、概ね1年ごとに拘束点候補リストを見直している。ただし、地震等に伴う地殻変動によるモデル値と現実の座標の乖離や、解析目標点の座標のばらつき等によっては、より短い間隔で見直すこともある。

これらの処理により、常に100点以上が固定点解析の拘束点候補となるように拘束点候補リストを作成する。ただし、2000年代以前においては、稼働しているIGS観測点が少ないため、100点を下回ることもある。

3) 非拘束点

固定点解析において、基線網は自動的に作成されるが、基線が長くなることが多く、観測点の欠測等によって網が組み替わると、座標解のばらつきが大きくなる場合がある。したがって、解析目標点周辺において網の切り替わりの影響を小さくするため、国土地理院が管理する日本国内のIGS観測点のうち、6点（STK2, ISHI, TSK2, CCJM, CCJ2, AIRA）を非拘束点として固定点解析に使用する（MCILはIGb14のコアサイトとして使用されているため、拘束点候補とする）。ただし、これらの観測点はIGb14モデル値を持たないため、解析時の条件は、解析目標点と同一とする。

4.1.3 推定パラメータ

全点解析と同様に、座標解及び対流圏遅延（天頂遅延量及び水平勾配）を推定する。天頂遅延量を1時間ごと、水平勾配を24時間ごとの区分線形関数として推定する。また、対流圏遅延推定時に使用するマッピング関数はGMFを用いる。

4.1.4 前処理

解析前の処理についても、3.1.3に記載した全点解析の前処理と同様である。

4.1.5 アンビギュイティの整数化手法

固定点解析は全球を覆う100点程度の観測点を用いた基線解析を行う。基線は、使用可能な観測点の全てが線で結ばれるように自動的に組まれる（図-6）。このときの基線の組み方は、観測点間の距離が極力短くなるものとするが、その距離は1000 kmを超えることも多い。したがって、アンビギュイティの整数化手法は基線長によって異なっている。具体的には、まず基線長が200 km以上の基線にコード・位相線形結合（Melbourne-Wübbena 結合）を観測量としたワイドレーンのアンビギュイティの整数化が図られ、電離層フリー線形結合を観測量としたナローレーンのアンビギュイティが整数化される。次に基線長が20～200 kmのものに位相線形結合を観測量としたワイドレーンのアンビギュイティの整数化が図られ、電離層フリー線形結合を観測量としたナローレーンのアンビギュイティの整数化が図られる。最後に、20 km未満の基線に対してL1・L2の各搬送波位相を観測量としたアンビギュイティの整数化が行われる。

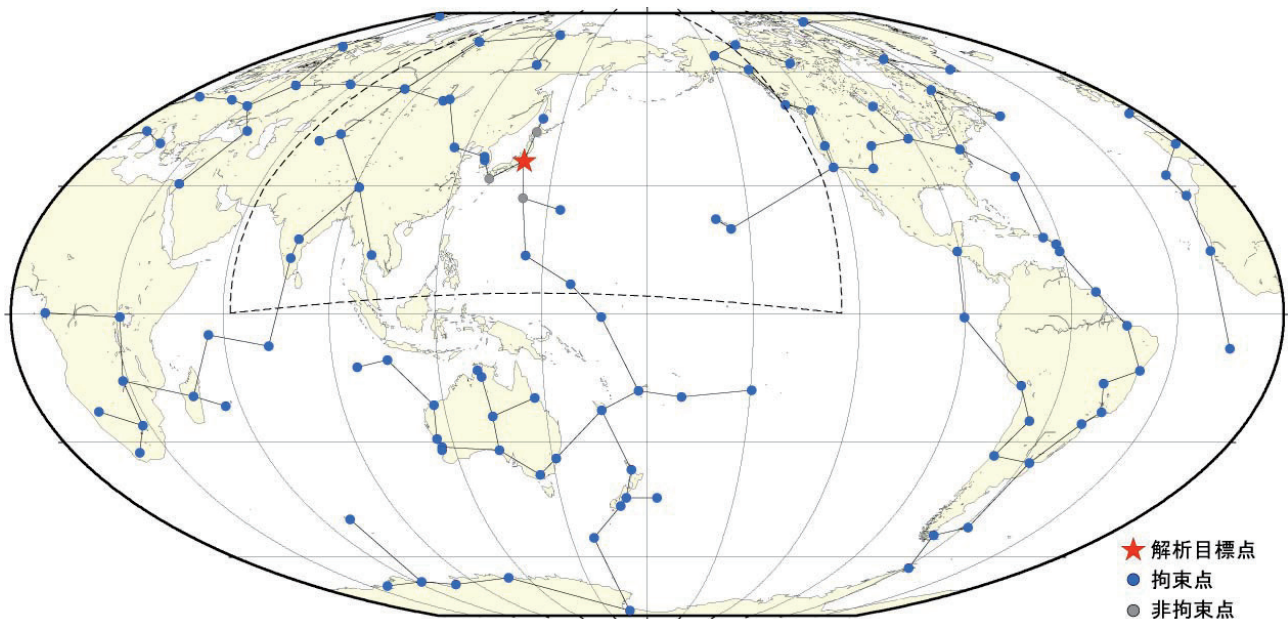


図-6 F5 固定点解析の基線図の例。欠測等により、基線の組まれ方は日によって異なる。点線は F3 固定点解析で用いられた拘束点の範囲の目安（F3 固定点解析で用いる拘束点については、小谷ほか（2009）を参照）。

4.1.6 ネットワーク結合手法

固定点解析においては、アンビギュイティを整数化した後、基線間の相関を考慮して解析を行い、アンビギュイティパラメータを消去して観測点座標値と対流圏遅延をパラメータとする正規方程式を生成する。固定点解析のネットワークは単一（図-6）であるため、階層的な構造をとる全点解析とは異なり、複数の正規方程式を結合する必要はない。

座標値の拘束には、最小拘束を用いる。最小拘束では、座標値の移動量に対する拘束を緩くし、代わりにその移動がヘルマート変換に従うという条件を与える。F5 固定点解析では、この際に推定するネットワークの重心（座標原点）が拘束点初期座標値によるネットワークの重心から動かないように拘束する（No-net-translation）ことで、準拠座標系との整合性を保つ。一方、この手法では、初期座標値と現実の座標値との差が大きいと、その差がノイズとなり、時間と共に座標値が ITRF2014 の実現系（IGb14）から乖離するおそれがあるため、定期的に 4.1.2 項で解説した拘束点の見直しを行うことで、その影響を軽減する。

4.2 F3 解析からの更新点及び評価

固定点解析における F5 解析と F3 解析の違いや、F5 解の精度評価について述べる。

4.2.1 F3 解析からの更新点

固定点解析に関して、F3 解析から更新した点は主

に下記のとおりである。

1) 解析ソフトウェア

F3 解析では GAMIT/GLOBK を使用していたが、F5 解析では Bernese 5.2 を用いる。

2) 準拠座標系

F3 解析は ITRF2005（IGS05）に準拠したが、F5 解析は ITRF2014（IGb14）に準拠する。これに伴い、アンテナ位相特性モデルと観測点初期座標に与えるモデルを変更した。

なお、2015 年 2 月 14 日以前においては、使用する精密暦及び EOP が異なり、F3 解析は IGS の精密暦・EOP を用いたが、F5 解析では IGS の再解析結果（repro2）を ITRF2014 に変換して用いた。

3) 拘束点

F3 解析と F5 解析では、拘束点の空間分布及び数が大きく異なる。F3 解析は日本周辺の IGS 観測点 10 点程度を拘束点としていたが、F5 解析では全球の IGS 観測点 100 点程度を拘束点とする。また、F3 解析では常に同じ拘束点候補リストを使用していたが、観測点の新設や廃点に十分に対応できないため、F5 解析では拘束点候補リストを不定期に更新することで、その影響を軽減させる。

4.2.2 固定点解析の評価

IGS 観測点の日々の座標値については、IGS による解（以下「IGS 解」という。）が公開されている。これは、IGS の複数の解析センターが日々計算した結果を、IGS 解析センター・コーディネーターが統

合処理したものである。IGS 解は ITRF の実現値として高い確度を保持しているものと考えられるため、F5 固定点解析の評価として、IGS 解と F5 固定点解析結果を比較した。なお、IGS 解は、2015 年 2 月 14 日以前は再解析解 (repro2) を使用したが、repro2 及び 2017 年 1 月 28 日以前の IGS 解は IGB08 の座標系で計算されているため、ITRF2014 に座標変換 (ITRF2008 から ITRF2014 への変換パラメータを使用) し、また、F3 解も ITRF2014 に座標変換 (IGS05 から ITRF2005 (IGSMail-5447, 2006) 及び ITRF2005 から ITRF2014 への変換パラメータを使用) した上で比較した。

図-7 は、固定点解析の解析目標点の 1 つである IGS 観測点「TSKB」(茨城県)において、IGS 解を基準とした F3 固定点解析結果 (以下「F3 固定点解」と呼ぶ。)・F5 固定点解析結果 (以下「F5 固定点解」と呼ぶ。)を比較したものである。F3 固定点解は 2010 年頃から IGS 解からドリフトが目立ち、IGS 解からの乖離が 2020 年時点で 3cm 程度に達している。これは、固定点解析の拘束点の座標値が、平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震を始めとした巨大地震による地殻変動や、観測点の保守作業等により ITRF2005 で表現されるモデル値から乖離してしまっていることが原因の一つであると推測される。

一方、F5 固定点解は、IGS 解と概ね ± 1 cm 程度の差で整合している。ただし、2000 年以前は IGS 解との差が上下成分で大きくなってしまっている。これは、GPS の SA (Selective Availability) により精度劣化措置が施されている期間であることと、F5 固定点解析で使用可能な拘束点数が少ない (IGb14 のモデル値を持つ点、古い期間ほど少ない) ことが原因であると推測されるが、解析設定の変更や基線の組み方等で改善できる可能性があり、今後の課題である。

図-8 は、2016~2020 年の 5 年間について、固定点解析によって得られた座標解の各成分の時系列を示したもので、前述のとおり、F3 固定点解析結果は IGS 解から乖離しているため、F5 固定点解析結果に対してバイアスがある。図-8 より、F5 固定点解析結果のばらつきは、特に上下成分について、F3 固定点解析結果よりも小さいことが分かり、F5 固定点解析で拘束点を増やした効果が表れていると推測される。一方で、F5 固定点解析は基線長が F3 固定点解析よりも長くなることが多く、観測点の欠測等による基線の組み替わりの影響が、F3 固定点解析よりも大きくなる場合があり、F3 固定点解析よりもばらつきが大きくなる期間も存在する。

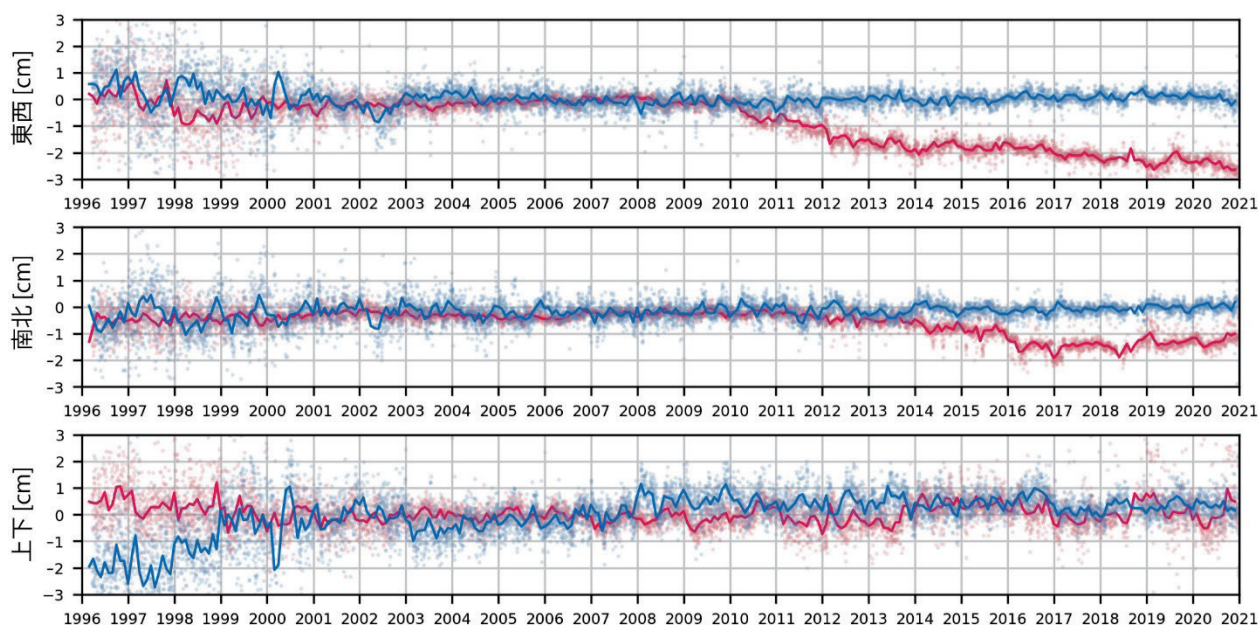


図-7 TSKB における IGS 解を基準とした固定点解析結果 (F5 解: 青・F3 解: 赤) の差分。実線は月平均値。

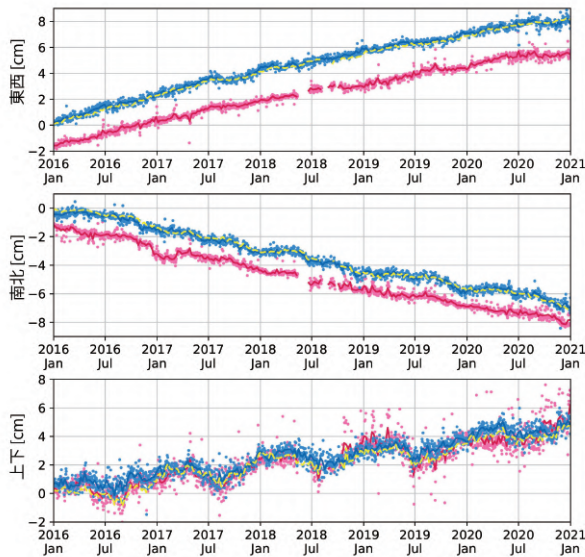


図-8 過去5年間のF5固定点解析結果(青)・F3固定点解析結果(赤)・IGS解(黄)の成分変化グラフ。観測点はTSKB。2016年1月1日のIGS解を0としている。F5固定点解・F3固定点解は日々の座標値及び週平均値を、IGS解は週平均値をプロットしている。

5. まとめ

今般、GEONETの解析ストラテジを更新し、「電子基準点日々の座標値(F5解・R5解)」として令和3年4月1日に公開した。地殻変動監視等で主に用いられる相対座標の安定性は旧版の「電子基準点日々の座標値(F3解・R3解)」と大きく変わらないが、高さ成分のばらつきが改善された。これは、対流圏遅延の推定間隔を短くしたことが寄与している。

また、絶対座標について、IGS解をITRF2014に変換した結果と±1 cm程度で整合することが確認された。

「電子基準点日々の座標値」は、高精度測位社会の実現や地殻変動の把握を通じた防災への貢献において基盤となる情報であり、今般の解析ストラテジの第5版への更新により、第4版で将来発生する座標解の精度劣化を防止すると同時に、絶対座標の精度が向上した。今後も様々な分野における活用が期待される。

謝 辞

解析設定にあたっては、解析ソフトウェアであるBernese 5.2のマニュアル(Dach et al., 2015)やチュートリアルを参照しました。解析及び評価において、IGS(<https://www.igs.org/>)のプロダクトを多数使用しました。VMF1はVMF Data Server(doi:/10.17616/R3RD2H)のプロダクトを使用しました。海洋潮汐荷重ファイルの作成にはM.S. Bos氏、H.-G. Scherneck氏によるサイト(<http://holt.oso.chalmers.se/loading/>)を一部使用しました。図の作成には、Generic Mapping Tools(Wessel et al., 2013)を使用しました。

解析設定の確認、評価に当たっては、測地部の宮原伐折羅計画課長、地理地殻活動研究センターの宗包浩志地殻変動研究室長をはじめ、国土地理院内関係者より多くの御助言をいただきました。記して感謝申し上げます。

(公開日：令和3年8月12日)

参 考 文 献

- Böhm, J., B. Werl. and H. Schuh (2006a): Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data, *J. Geophys. Res.*, 111, B02406, doi:10.1029/2005JB003629.
- Böhm, J., A. Niell, P. Tregoning and H. Schuh (2006b): Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L07304, doi:10.1029/2005GL025546.
- Böhm, J., J. Kouba, and H. Schuh (2009): Forecast Vienna Mapping Functions 1 for real-time analysis of space geodetic observations. *J Geod* 83, 397–401, doi:10.1007/s00190-008-0216-y.
- Dach, R., U. Hugentobler, P. Fridez, M. Meindl (eds.) (2007): Bernese GPS Software Version 5.0. User manual, Astronomical Institute, University of Bern.
- Dach, R., S. Lutz, P. Walser, and P. Fridez (eds.) (2015): Bernese GPS Software Version 5.2. User manual, Astronomical Institute, University of Bern, Bern Open Publishing. doi: 10.7892/boris.72297.
- Estey, L. H. and C. M. Meertens (1999): TEQC: The Multi-Purpose Toolkit for GPS/GLONASS Data, *GPS Solutions*, 3(1), 42-49, doi:10.1007/PL00012778.
- Hatanaka, Y., T. Iizuka, M. Sawada, A. Yamagiwa, Y. Kikuta, J. M. Johnson and C. Rocken (2003): Improvement of the Analysis Strategy of GEONET, *Bull. Geogr. Surv. Inst.*, 49, 11-37.

- 畑中雄樹, 山際敦史, 湯通堂亨, 宮原伐折羅 (2005): GEONET のルーチン解の精度評価, 国土地理院時報, 108, 49-56.
- IGSMail-5447 (2006): Proposed IGS05 Realization, <https://lists.igs.org/pipermail/igsmail/2006/006818.html> (accessed 18 Feb. 2021) .
- IGSMail-6663 (2012): IGB08: an update on IGS08, <https://lists.igs.org/pipermail/igsmail/2012/000497.html> (accessed 18 Feb. 2021) .
- IGSMail-7921 (2020): Switch to IGB14 reference frame, <https://lists.igs.org/pipermail/igsmail/2020/007917.html> (accessed 18 Feb. 2021) .
- 岩下知真子, 梅沢武, 川元智司, 野神憩 (2009): GPS 連続観測システム (GEONET) 解析結果に生じる人為的要因によるオフセットの補正手法について, 国土地理院時報, 118, 23-30.
- 小谷京湖, 吉田賢司, 畑中雄樹, 宗包浩志 (2009): GPS 連続観測システム (GEONET) 解析固定点座標算出手法について, 国土地理院時報, 118, 17-21.
- Matsumoto, K., T. Sato, T. Takanezawa, and M. Ooe, (2001): GOTIC2: A Program for Computation of Oceanic Tidal Loading Effect, *Journal of the Geodetic Society of Japan*, 47, 243-248.
- Munekane, H., Y. Kuroishi, Y. Hatanaka, and H. Yarai (2008): Spurious annual vertical deformations over Japan due to mismodelling of tropospheric delays, *Geophys. J. Int.*, 176, 831-836, doi:10.1111/j.1365-246X.2008.03980.x.
- Munekane, H., M. Tobita and K. Takashima (2004): Groundwater-induced vertical movements observed in Tsukuba, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L12608, doi:10.1029/2004GL020158.
- 中川弘之, 豊福隆史, 小谷京湖, 宮原伐折羅, 岩下知真子, 川元智司, 畑中雄樹, 宗包浩志, 石本正芳, 湯通堂亨, 石倉信広, 菅原安宏 (2009): GPS 連続観測システム (GEONET) の新しい解析戦略 (第 4 版) によるルーチン解析システムの構築について, 国土地理院時報, 118, 1-8.
- Niell, A. (1996): Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. *J. Geophys. Res.* 101, 3227-3246.
- Reischung P, Altamimi A, Ray J and Garayt B (2016): The IGS contribution to ITRF2014. *J Geod* 90(7), 611-630. doi:10.1007/s00190-016-0897-6.
- Saastamoinen, I. I. (1973): Contribution to the theory of atmospheric refraction, *Bulletin Geodesique*, 107, 13-34.
- Steigenberger, P., M. Rothacher, R. Dietrich, M. Fritsche, A. Rülke and S. Vey (2006): Reprocessing of a global GPS network, *Journal of Geophysical Research*, 111 (B05402), doi:10.1029/2005JB003747.
- 測地観測センター (2004): 小特集「電子基準点 1,200 点の全国整備について」, 国土地理院時報, 103, 1-51
- 飛田幹男, 宗包浩志, 海津優, 松坂茂, 黒石裕樹, 眞崎良光, 加藤敏 (2004): つくば市周辺の地下水位と地盤の季節変動, 測地学会誌, 50, 27-37.
- 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.
- Wessel, P., Smith, W. H. F., Scharroo, R., Luis, J. and Wobbe F. (2013): Generic Mapping Tools: Improved Version Released, *EOS Trans. AGU*, 94(45), 409-410, doi:10.1002/2013EO450001.