

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 On an Estimation Method of GEONET Fixed Point Coordinates

測地観測センター 小谷京湖¹・吉田賢司

Geodetic Observation Center Kyoko KOTANI and Kenji YOSHIDA

地理地殻活動研究センター 畑中雄樹・宗包浩志

Geography and Crustal Dynamics Research Center

Yuki HATANAKA and Hiroshi MUNEKANE

要 旨

GPS 連続観測システム (GEONET) の新たな解析戦略第 4 版で用いるつくばの固定点の座標値を、従来のモデル値から、広域解析により取り付けた値に変更し、従来の GEONET 解析の座標値に見られた見かけ上下変動を軽減した。IGS よりアンテナ絶対位相特性モデルを用いた暦が提供されている GPS1400 週以降では、解析地域をアジア太平洋地域に限り、提供されている暦を強く拘束した上で固定点座標値を推定し、それ以前は、全世界の IGS 観測局と GEONET 観測局を併せてグローバル解析を行い、暦と座標を同時推定する。GPS1400 週をはさんだ解析の整合性について検討した結果、一部の期間で水平方向に 3 – 4 mm、上下方向に 4 – 5 mm 程度のずれが見られるものの、日々の解析結果の揺らぎと同程度であり、両者が十分に整合することを確認した。

1. はじめに

つくば市周辺では、農業用地下水のくみあげの影響で、特に上下座標が peak-to-peak で 2 cm にも達する大きな年周変化を持つことが知られている (飛田ほか, 2004; Munekane et al., 2004)。GEONET の従来の解析戦略 (解析戦略第 3 版) では、GEONET の固定点であるつくば 1 (92110) の座標値を区分直線による nominal な座標モデルで与えているため、上下成分の年周変化が固定点の座標値に反映されず、GEONET 全点の解析座標解に見かけの上下年周変動が生じていた。また、地震に伴う地殻変動や地盤の不安定による短期的でローカルな移動など、区分直線モデルで予測できない変動も、考慮することができなかった。GEONET の解析戦略を変更することを期に、これらの変動を反映できるよう、固定点座標値を広域解析により取り付けて解析する手法を試みた。

本稿では、固定点座標の算出手法について紹介するとともに、両者の整合性について検討した結果について報告する。

2. 解析手法

2. 1 基本方針

変動を考慮して固定点の座標値を与えるためには、安定な座標フレームの中で、固定点の座標値を

日々推定する必要がある。国土地理院は、IGS 地域準解析センターとして、日本を含むアジア地域の IGS 観測網の解析を行っており、その手法をこの目的に応用することができる。この解析手法では、衛星軌道を IGS 暦に強く拘束して用いる。

GPS1400 週 (2006 年 11 月 5 日の週) より IGS の公開暦がアンテナ絶対位相特性モデルに基づく暦 (以下、「IGS 相対暦」という。) からアンテナ絶対位相特性モデルに基づく暦 (以下、「IGS 絶対暦」という。) へと変更され、同時に、IGS が準拠する座標系も ITRF2005 (Altamimi et al., 2007) の IGS による実現である IGS05 (詳細は IGS Mail #5447 参照) に更新された。現時点で IGS 暦が採用している座標系は IGS05 であるため、解析戦略第 4 版解析では、IGS05 に準拠した座標系を当面は採用するので、ここで求める固定点座標値としては、IGS05 に準拠した値を求める必要がある。

GPS1399 週以前 (2006 年 11 月 4 日以前) の期間については、IGS 暦の座標系や品質がそれ以後と大きく異なるため、衛星軌道を IGS 暦に強く拘束する、上記の手法を用いることはできない。そのため、GPS1400 週前後では異なる固定点座標値の算出方法を用いることとした。また、アンテナ位相モデルについては、全期間について絶対位相特性モデルを適用する。

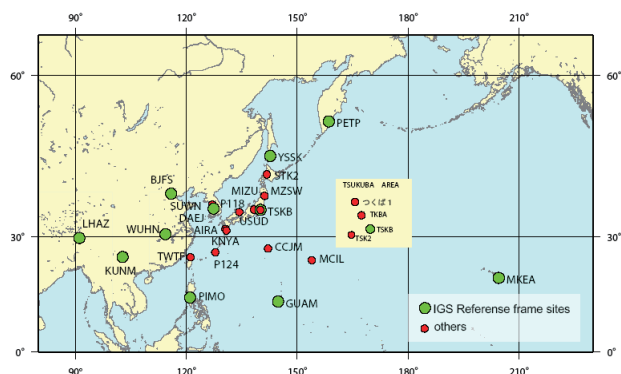
2. 2 GPS1400 週以降の期間における解析手法

IGS1400 週以降の期間についての解析仕様を、表 1 の第 2 列に示す。解析を迅速に行うため、解析地域をアジア太平洋地域に限定し、地域内の IGS Reference Frame 局に対し ITRF2005 で与えられる初期座標に対する最小拘束を与え、全解析局の IGS05 に準拠した座標を推定している。その際、暦は IGS 絶対暦に、また地球回転パラメータは IGS より公表される値に対して強く拘束する。

解析局は、解析地域において IGS05 における Reference Frame 局がつくばを取り囲むように配置した (図 1)。固定点の第一候補は「つくば 1 (92110)」であるが、つくば 1 が使用できない場合の代用局として、つくば 1 付近に設置されている「TSKB」、「つくば 2 A (TSK 2)」、「TKBA」の観測点

表－1 IGS 点からの取り付け解析の主な仕様

	GPS1400週以降	GPS1399週以前
使用ソフトウェア	GAMIT10.32, GLORG5.12	GAMIT10.32, GLORG5.12
地球回転パラメータ	IGS暦に付随するIGS地球回転パラメータ	IERS Bulletin B
衛星軌道情報	IGS暦	IGS暦
解析局	IGS観測局： BJFS, DAEJ, KUNM, GUAM, LHAZ, PETP, TSKB, WUHN, YSSK, MKEA, PIMO その他のIGS観測局： MIZU, SUWN, TWTF, USUD GEONET観測局： 92110*, TSK2*, TKBA*, AIRA, CCJM, MCIL, MZSW, STK2, P118, P124, KNYA (*はGEONET固定点の候補点)	グローバル観測点： IGS観測局GEONET観測局 計342点
位相特性モデル	衛星・アンテナとも絶対位相特性モデル（仰角依存性のみを考慮，GEONET観測局についてはGSIモデルを適用）	衛星・アンテナとも絶対位相特性モデル（仰角依存性のみを考慮，GEONET観測局についてはGSIモデルを適用）
初期座標値	ITRF2005座標値を使用	ITRF2005の座標値を使用
座標系の実現方法	IGS観測局に対し最小拘束．暦および地球回転パラメータは初期値に強く拘束．	IGS観測局に対し最小拘束．暦および地球回転パラメータは初期値に弱く拘束．
衛星最低仰角	10度	10度
大気遅延推定	2時間おきに推定	2時間おきに推定
マッピング関数	GMF	VMF1



図－1 GPS1400 週以降の解析地域

を解析に含め、同時に座標を推定する。

解析戦略第4版解析では、GEONET 観測局に対するアンテナ位相特性モデルとして、国土地理院にて算出した、アンテナ+レドーム+架台の絶対モデル(以下、「GSI モデル」という。)を使用する(豊福ほか, 2007)。一方で、IGS より提供されているアンテナ位相特性モデルは、GEONET で使用しているレドームを含まず、また、元々架台を含まないモデルである。本解析では解析戦略第4版解析との整合性を重視し、GEONET 観測局についてはGSI モデルを使用する。IGS 観測局についてはIGS モデルを使用する。

解析に使用する観測データの最低仰角については、

解析戦略第4版解析では GEONET の設置環境を考慮し、マルチパスを避けるため 15 度に設定しているが、一般的にグローバルな解析では、上下座標値と大気遅延量の間の分離を向上させるため、5－10 度程度の比較的低仰角まで使用されている(詳細は IGS の HP FTP サーバを参照)。試験的に、最低仰角を 10 度と 15 度に設定した場合に推定される固定点座標値を比較した結果(図－2)、水平方向での差はほとんど見られないものの、上下方向では 15 度の結果が 10 度の結果と比べ数 mm 程度高い値を示すことが分かった。しかしながら、その差は今回ターゲットとしているつくばの上下年周変動と比べて十分に小さい。そのため、解析戦略第4版解析との整合性を低めることにはなるが、グローバルな解析との整合性を重視し、本解析では最低仰角を 10 度とする。

マッピング関数については、実際の気象データを元に算出されている VMF 1 (Vienna Mapping Function) モデル (Boehm et al., 2006a) の使用が望ましいが、モデルの取得までに時間を要し、解析開始前に取得することが難しい。そのため多少精度が低下するが、数値予報データから構築された簡便な経験的マッピング関数である GMF (Global Mapping Function) モデル (Boehm et al., 2006b) を使用する。

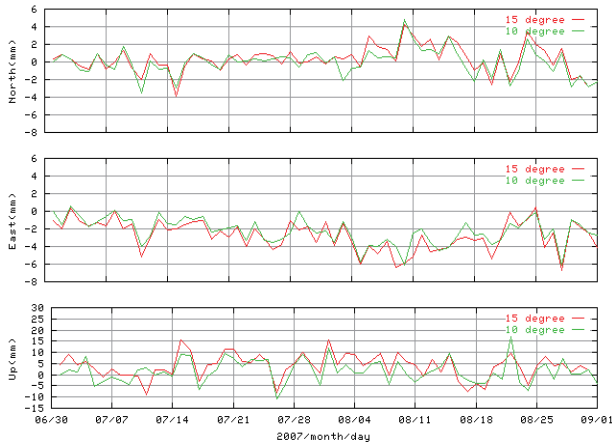


図-2 仰角の違いによる固定点座標値差
※10degree グラフ内初日の値を基準

2. 3 GPS1399 週以前の期間における解析手法

GPS1399 週以前の期間における解析仕様を、表-1 の第3列に示す。

2009 年 2 月現在、IGS 絶対暦は GPS1400 週以降について公表されている。現在各解析センターにおいてさかのぼり解析が進められているが、GEONET の運用期間すべてにわたって IGS 絶対暦が公表されるまでにはしばらく時間を要する。従って、現段階において、過去にさかのぼって固定点座標を計算する際には、既に公開されている IGS 相対暦を使用することとなる。しかしながら、IGS 相対暦はアンテナ相対位相特性モデルを用いて得られた暦であること、準拠している座標系が IGS05 ではなく、これまでの IGS での座標系の更新によって、期間毎に準拠する座標系が異なることなど、今回の解析手法と整合しない点がある。その場合、暦を強く拘束すると正しい解が得られない恐れがある。

従って、本解析では、GPS1399 週以前については、全世界の IGS 観測局と GEONET 観測局を併せてグローバル解析を行い、暦と座標とを同時推定することとする。その中で IGS05 の Reference Frame 局に対し、ITRF2005 で与えられる初期座標に対する最小拘束を与え、全解析局における IGS05 に準拠した座標および暦、地球回転パラメータを推定する。解析では、暦は IGS 相対暦、また地球回転パラメータとして IERS Bulletin B を用いるが、それぞれ再推定されるため、初期値依存性はほとんどない。

解析局は、IGS 観測局および GEONET 観測局から計 342 点を使用した。(図-3)。固定点として「つくば1」、およびその代用局として、つくば1付近に設置されている「TSKB」、「つくば3 (0627)」、「TKBA」の各点を解析に含み同時に座標を推定する。

GEONET 観測局に適用するアンテナ位相モデルには GSI モデルを使用し、最低仰角は 10° とする点は、

GPS1400 週以降の解析と同様である。また、マッピング関数については、既に VMF 1 モデルが整備されていることから、VMF 1 モデルを用いる。

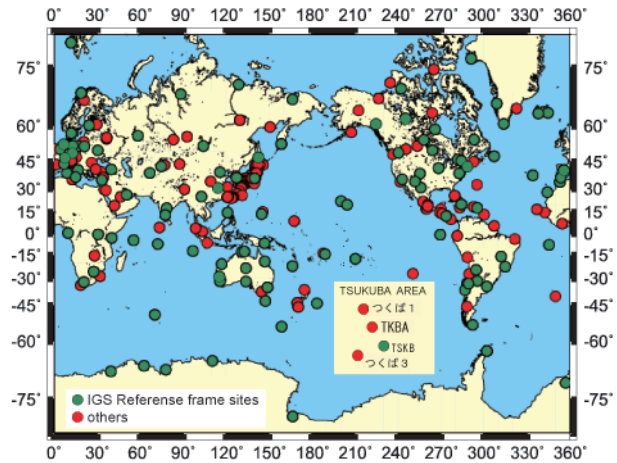


図-3 GPS1399 週以前の解析地域

3. GPS1400 週前後の手法を用いた解析結果の整合性

3. 1 固定点座標値の整合性

2006 年 11 月 5 日から 2007 年 12 月 31 日までの期間について、GPS1400 週前後用のそれぞれの解析手法を適用して固定点座標の推定を行い、「つくば1」について座標値を比較した(図-4)。

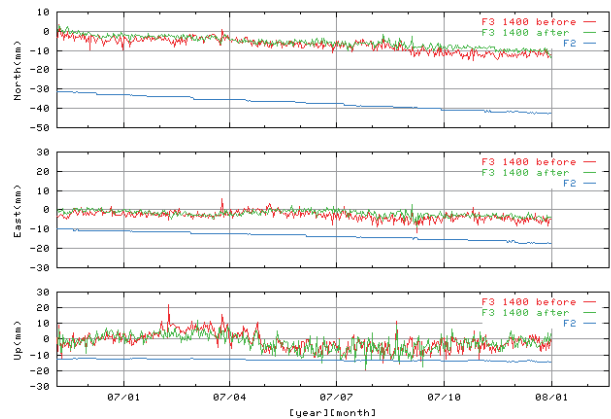


図-4 解析手法の違いによる固定点「つくば1」の座標時系列

GPS1400 週前後の解析手法を用いて得られた固定点座標解において、一部の期間で水平方向では 3 - 4 mm、上下方向では 4 - 5 mm 程度と多少ずれがあるが、日々の解析結果の揺らぎと同程度であり、その範囲で両者の整合性はとれているといえる。

3. 2 基線ベクトルの整合性

3. 1 と同じ解析結果について、TSKB-固定候補

点 (92110) 基線のベクトル値について、2つの解析手法の間の差の時系列を示した (図-5)。北南、東西、上下方向のバイアスはそれぞれ0.4mm, 0.4mm, 3.1mmであり、バイアスからのばらつきRMSは0.7mm, 0.8mm, 2.1mmと小さな値に収まっている。

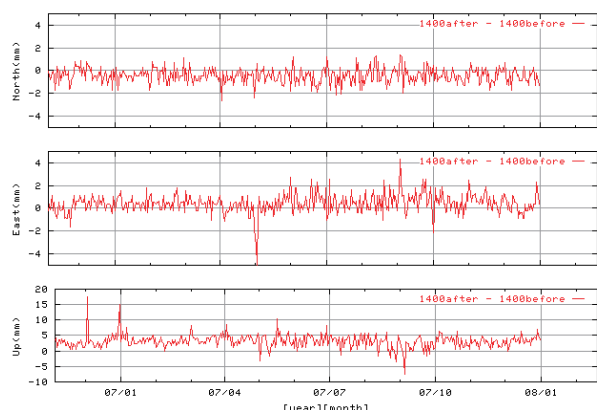


図-5 GPS1400 週前後の解析手法の違いによる TSKB-固定点間の基線ベクトル差の時系列

3. 3 衛星最低仰角の影響

本解析の解析仕様には、GEONET のルーチン解析の解析仕様と異なる点がいくつかある。そのうち、解析に用いる衛星最低仰角の違い (2.2 参照) が、両者の整合性に及ぼす影響を検査した。

複数の衛星最低仰角と解析戦略による解から、TSKB-固定点候補 (92110) の基線 (基線長 55.6m) についての基線ベクトルを、例として図-6 に示す。比較した解析設定は、次の4種類である (カッコ内にグラフの線の色を示す)：

- ① GPS1400 週以前, 最低仰角: 10° (赤)
 - ② GPS1400 週以降, 最低仰角: 10° (緑)
 - ③ GPS1400 週以降, 最低仰角: 15° (青)
 - ④ 解析戦略第4版解析, 最低仰角: 15° (紫)
- このうち、④は解析戦略第4版解析の解である。

水平成分に関してはどれもほとんど差が見られない。以下、系統的な差が見られる上下成分についてコメントする。①と②の間の差は、既に3.2に記載したものである。最低仰角のみが異なる②と③の間には4mmのバイアスがある。また、最低仰角が15°である③と解析戦略第4版解析の解 (④) の間のバイアスは小さい (1mm)。本解析 (①および②) と解析戦略第4版解析の間には、4~7mmのバイアスがあり、そのうち最低仰角の違いによる差は4mm程度で、その大きさは、①と②の間に見られる解析戦略の違いによる差と同程度の大きさである。

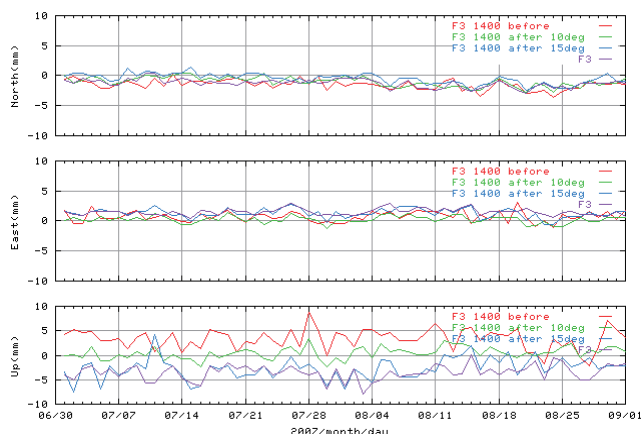


図-6 解析手法の違いによる TSKB-固定点間の基線ベクトル差の時系列

4. GEONET 解析結果への効果

解析戦略第3版と解析戦略第4版解析の固定点および GEONET 観測局「八郷」の上下座標値の比較を行った (図-7)。解析戦略第3版解析では区分直線で与えられていたつくば1の上下座標値が、解析戦略第4版解析では実際の変動を反映した年周変動を示していることが分かる。一方、解析戦略第3版解析で見られた「八郷」の見かけ年周変化が、解析戦略第4版解析ではほぼ解消されており、固定点座標値を区分直線で与えることに起因する、見かけの年周変化が軽減されていることがわかる。解析戦略第3版から解析戦略第4版解析への解析仕様の変更内容には、様々な項目が含まれるが (畑中ほか, 2008)、座標値の見かけの年周変化のうち、観測網全体の並進運動成分の軽減は、本報告で述べてきた固定点座標値算出手法の変更の効果と考えられる。

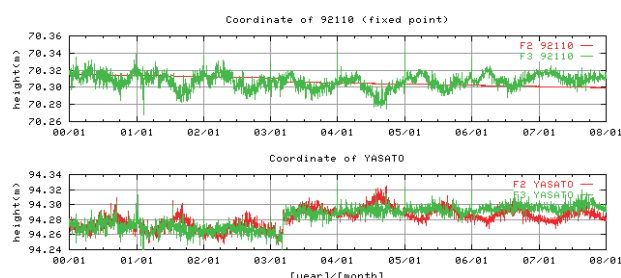


図-7 上下方向における年周変化の軽減
※上: 固定点の橢円体高の時系列
※下: 八郷 (固定点以外の地上点) の橢円体高の時系列

5. おわりに

解析戦略第4版解析に用いる固定点の座標値を、従来のモデル値から、広域解析により取り付けた値に変更するのに対応するため、固定点の座標値を日本周辺の IGS 観測局から取り付ける解析手法を構築

した. IGS の解析仕様の変更が行われた GPS1400 週を境に異なる解析手法を適用するが, その固定点座標値の差の RMS は水平で 1.5mm, 上下方向では 3 mm 程度で整合していることが確認された. GPS1400 週前後を含む解析戦略第 4 版解析全期間に渡り, 固

定点のあるつくば地区で見られる農業用地下水のくみ上げの影響による上下年周変化が適切に固定点座標値に反映され, 従来 GEONET の座標解に見られたつくば固有の年周変動の影響が軽減された.

参 考 文 献

- Altamimi, Z., P. Sillard and C. Boucher (2002): ITRF2000: A new release of the International Terrestrial Reference Frame for earth science applications, *J. Geophys. Res.*, 107, 2214, doi:10.1029/2001JB000561.
- Altamimi, Z., X. Collilieux, J. Legrand, B. Garayt and C. Boucher (2007): ITRF20005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters, *J. Geophys. Res.*, 112, B09401, doi:10.1029/2007JB004949.
- Boehm, 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.
- Boehm, 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.
- 畑中雄樹, 宗包浩志, 古屋智秋, 豊福隆史, 小谷京湖 (2008): GEONET の新しい解析戦略, 日本測地学会第 110 回講演会要旨集, 48, 95-96.
- 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.
- 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, 湯通堂亨, 岩下知真子, 畑中雄樹 (2007): GEONET におけるアンテナ絶対位相特性モデルの適用について, 日本測地学会第 108 回講演会要旨集, 10, 19-20.
- IGS Mail #5447, <http://igscb.jpl.nasa.gov/mail/igsmail/2006/msg00170.html>
- IGS HP の FTP サーバ, <ftp://igscb.jpl.nasa.gov/pub/center/analysis/>