

新解析戦略の組み込みによる産総研 GPS 定常解析システムの更新

大谷 竜^{1,*}・板場智史²・梅田康弘²・北川有一²・松本則夫²・高橋 誠²・小泉尚嗣²

Ryu Ohtani, Satoshi Itaba, Yasuhiro Umeda, Yuichi Kitagawa, Norio Matsumoto, Makoto Takahashi, and Naoji Koizumi (2011) Implementation of a New Analysis Strategy to the Routine Processing System of the Continuous GPS Network of the Geological Survey of Japan, AIST, *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol.62 (7/8), p. 319-328, 3 figs.

Abstract: We implemented a new analysis strategy for the routine GPS data analysis system of the continuous GPS network of the Geological Survey of Japan, AIST when two new continuous GPS observation stations in Shikoku and Kii Peninsula were installed in 2010. We updated the Bernese GPS software package from Version 4 to 5, and implemented some new methods such as estimation of the troposphere delay gradient as well as the zenith total delay. Comparing the result with that of the previous analysis strategy, we found that the repeatability of the GPS station coordinates were reduced especially in summer, which we inferred was due to the reduction of troposphere delay errors caused by the spatial variation of water vapor that dominated in summer season.

Keywords: continuous GPS network, displacement, new analysis strategy, Bernese software, atmospheric delay gradient, seasonal variation

要 旨

2010 年に行った四国と紀伊半島への新たな GPS 観測局の新設を契機として、産業技術総合研究所地質調査総合センターの GPS 連続観測網で得られたデータの定常解析戦略の更新を行った。今回の更新では、解析ソフトウェアを、従来の Bernese ソフトウェアの Version 4 から Version 5 に切り替えると共に、大気遅延勾配の推定などの新たな定常解析戦略を導入した。従来の GPS 連続観測システムの定常解析結果と比べた結果、新解析で推定された GPS 局の座標値のばらつきが夏季において見られた。

1. はじめに

産業技術総合研究所（以下、産総研と呼ぶ）地質調査総合センターでは 2009 年までに、愛知県から紀伊半島～四国にかけて、GPS 連続観測局の増設、及び定常解析システムの全面的な改定を行った（大谷ほか、2010）。また 2010 年には、高知県須崎市と三重県安濃町に新たな 2 局が設置された。その結果、2011 年 2 月現在、観測局は 11 局に上る。2010 年の観測局の新設に伴い、座標値算出用のソフトウェアを、Bernese ソフトウェア（Astronomical Institute, University of Berne, 2001）の Version 4 から Version 5 に切り替えると共に、新たな

解析戦略の導入も行い（以降、解析戦略第 4 版と呼ぶ）、2010 年より新たな定常解析を開始した。これは同時期に国土地理院が、GPS 連続観測網（GEONET）の定常解析の戦略（国土地理院、2004）を新たなものに切り替えたことにも対応したものである（中川ほか、2009）。本報告では、今回の GPS 連続観測システムの定常解析戦略の更新について説明すると共に、その初期成果について紹介する。なお、解析戦略第 4 版のコアとなる解析処理については、一つ前の解析戦略（大谷ほか、2010）をベースとしている。そのため、本報告では大谷ほか（2010）の記述に基づきつつ、新たに追加された機能に重点を置いた紹介を行う。

2. GPS システムの定常解析戦略の更新

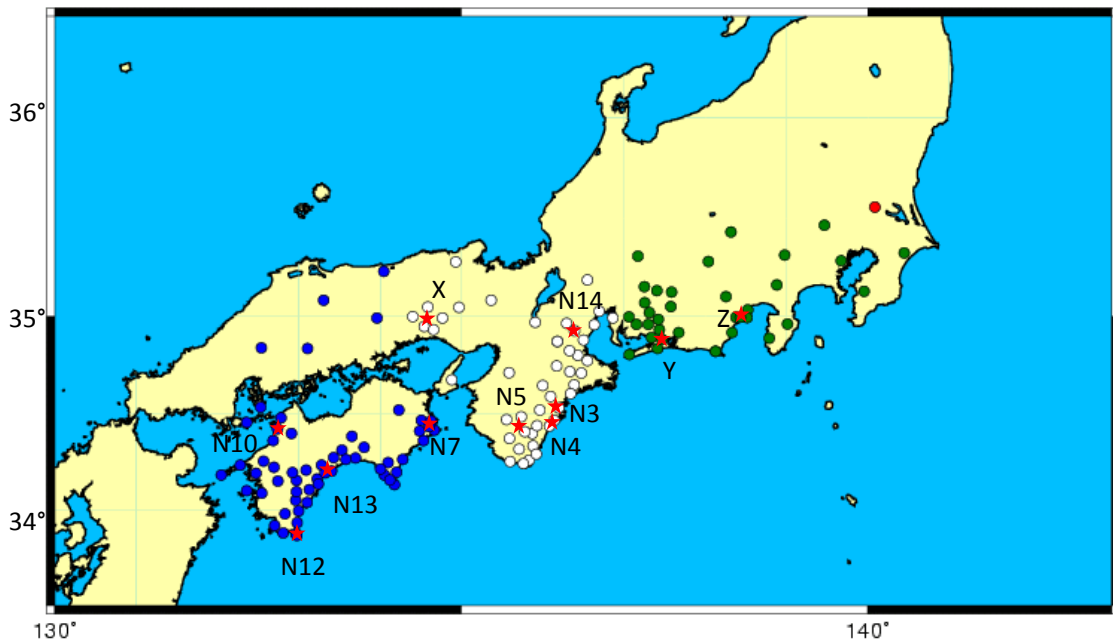
2.1 GPS 連続観測システムの概要

2010 年においては新たに 2 局の GPS 観測局が、高知県須崎市（第 1 図の N13）と三重県安濃町（第 1 図の N14）に新設された。受信機のタイプとしては、これまでに新設されたものと同じ Trimble 社製の NetRS を使用しており、30 秒サンプリングでの観測を行っている。受信データは一日一回、アナログ回線で茨城県つくば市にある産総研つくばセンターに転送され、観測局座標値を推定するためのデータ解析が行われる。ピラーも

¹ 地質情報研究部門（Institute of Geology and Geoinformation, GSJ）

² 活断層・地震研究センター（Active Fault and Earthquake Research Center, GSJ）

* Corresponding author: R. OHTANI, Central 7, Higashi 1-1-1, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan. E-mail: ohtani-ryu@aist.go.jp



第1図 産総研 GPS 連続観測網の定常解析に使われている GPS 観測局分布. 産総研の GPS 観測局は赤い☆で示してある. これらの記号は便宜的に大谷ほか (2010) で使用されたものと統一してある (観測局の正式名称等については第1表を参照). また, 赤丸は解析基準局 (国土地理院のつくば観測局 (92110) もしくは IGS のつくば観測局 (TSKB). 緑丸はクラスター1, 白丸はクラスター2, 青丸はクラスター3の国土地理院の GPS 観測局.

Fig.1 Location of the new GPS stations of the Integrated Groundwater Well Network for Earthquake Observation of the Geological Survey of Japan, AIST. Red stars represent the AIST GPS stations, and blue, white, and green dots represent the GEONET GPS stations of the Geospatial Information Authority of Japan (former Geographical Survey Institute) used in the daily routine analysis of AIST. The red dot is the location of the reference stations of TSKB and 92110 in Tsukuba.

第1表 産総研 GPS 連続観測網の観測局の概要

Table 1 Summary of the GPS stations of the AIST network. From left to right, the symbol (corresponding to Fig.1), name, and code of the stations, the location, monument type, and installed or re-installed date of the stations, are shown.

| | 名称 | 名称(英語) | コード | 住所 | モニュメント | 新設・更新時期 |
|-----|--------|--------------|------|----------|--------|-----------|
| N3 | 海山 | Miyama | GYM | 三重県紀北町 | 観測小屋屋上 | 2008.3.17 |
| N4 | 井内浦 | Ichiura | A002 | 三重県熊野市 | 5mピラー | 2007.3.9 |
| N5 | 本宮三越 | Hongumikoshi | A001 | 和歌山県田辺市 | 5mピラー | 2007.3.8 |
| N7 | 阿南桑野 | Anankuwano | GANK | 徳島県阿南市 | 観測小屋屋上 | 2008.3.24 |
| N10 | 松山 | Matsuyama | GMAT | 愛媛県松山市 | 5mピラー | 2008.3.5 |
| N12 | 土佐清水 | Tosashimizu | GTSS | 高知県土佐清水市 | 3mピラー | 2008.3.4 |
| N13 | 須崎AIST | SusakiAIST | GSSK | 高知県須崎市 | 5mピラー | 2010.1.26 |
| N14 | 安濃 | Anou | GANO | 三重県安濃町 | 6mピラー | 2010.1.26 |
| X | 安富 | Yasutomi | YSTM | 兵庫県姫路市 | 5mピラー | 2007.2.14 |
| Y | 豊橋 | Toyohashi | TYHS | 愛知県豊橋市 | 建物屋上 | 2007.3.3 |
| Z | 草薙 | Kusanagi | KSGI | 静岡県静岡市 | 観測小屋屋上 | 2007.3.4 |

これまでの物と同様で, 二重管構造により日射による熱膨張変形を押さえ, マルチパス防止のための電波吸収材が設置されている, 誤差軽減のための最新の構造のものとなっている. 2011年現在設置されている GPS 観測局を第1図, 第1表に, それぞれの観測局の写真を第2図

に示す.

2.2 定常解析戦略について

座標値推定の定常解析において, これらの観測局の基準となる局として, 国際 GNSS サービス (International



第2図 産総研 GPS 観測局の外観。
各写真の記号は第1図を参照のこと。
Fig.2 Appearance of the GPS stations of AIST.

GNSS Service : IGS) の TSKB 観測局と、92110 という GEONET の観測局の 2 つを選んでいるのは従前通りである。またこれまで通り、速報暦、精密暦、2 種類の衛星暦による解析をそれぞれ実施している。その結果、上記の基準局の違いによる 2 種類の解析と併せて、合計 4 種類の解析結果が一日のデータについて得られることになる (第 2 表)。

今回、国土地理院の定常解析で使用されている GPS データ解析ソフトウェアである Bernese ソフトウェアが、旧来の Version 4.2 から 5.0 へ更新されたことに伴い、国土地理院の定常解析に準じた新たな解析戦略を導入した。前述のように、産総研においてこれを我々は「解析戦略第 4 版」と呼んでいる。この解析戦略のもと、速報暦、精密暦を用いた解析を行っており、更にそれぞれについて、つくばにある 92110 局、TSKB 局を基準とした解析を行っている。こうした様々な解析による結果は、使用する暦や基準局による違いを表す「アルファベット 1 文字」+ 解析戦略の版を表す「数字」の組合せのコードとして表しており、解析戦略第 4 版では、精密暦を用いた解析 (92110 基準 : G4, TSKB 基準 : T4)、速報暦を用いた解析 (92110 基準 : H4, TSKB 基準 : U4) の

4 種類の解析を行っている。なお、産総研の定常解析では従来の Version 4.2 を使った定常解析 (解析戦略第 3 版) も併行して行っている。即ち、精密暦を用いた解析 (92110 基準 : G3, TSKB 基準 : T3) と、速報暦を用いた解析 (92110 基準 : H3, TSKB 基準 : U3) である (大谷ほか, 2010)。その結果、現行では合計で 8 種類の解析結果が得られることとなる (第 2 表の、G3, T3, H3, U3, と G4, T4, H4, U4)。第 2 表には参考のため、産総研の旧来の解析結果のもの (大谷ほか, 2003) も加えている。

解析方法としては、以下の通りである。まず産総研の一つの観測局につき、最低 4 局以上の周囲の GEONET 観測局を含めた 3 つの「地域クラスター」を作り、各地域クラスターに含まれる「バックボーン観測局 (BB 局)」を軸として、全観測局の変位をつくばの観測局を基準として推定する。その上で、まず前処理として、データの品質の悪いものやはずれ値の除去を行った後、対象となるクラスター内の解析局で構成される最短基線を結成する。サイクルスリップを検出・修復する処理を行い、整数バイアスを推定した後、固定した整数バイアスを既知のものとして、対流圏遅延量を与えられたパラメータ数にセットして推定し、そこで整数化できなかったバイア

第2表 産総研 GPS 連続観測網の定常解析戦略の変遷

Table 2 Summary of the routine analysis strategy of the AIST GPS network. From left to right, the analysis GPS software, period, reference station, the names of the strategies with ambiguity fix and free (both using precise orbit analysis), and the rapid orbit analysis, are shown.

| ソフトウェア | 解析実行期間 | 固定点 | 精密暦 1 ambiguity fix | 精密暦 2 ambiguity free | 速報暦 |
|-------------------|--------------------|----------|------------------------|-------------------------|-----|
| gipsy | 1999 年以前 | tskb-IGS | T1 | A1 | - |
| | 1999 年以降 | tskb-IGS | T2 | A2 | - |
| | 池田 IKDA (1999 年以降) | tskb-IGS | I2 | B2 | - |
| | 王滝 GOTK (1999 年以降) | tskb-IGS | O2 | C2 | - |
| Bernese ver4.2 | 2007/2~ | 92110 | G3 | - | H3 |
| | | tskb-IGS | T3 | - | U3 |
| Bernese ver5.0 | 2010/2~ | 92110 | G4 | - | H4 |
| | | tskb-IGS | T4 | - | U4 |

スの整数化を試みる。これらの一連の処理で整数化できなかったバイアスを正規方程式から消去した後、基準局観測局について強い拘束条件を与えた条件で正規方程式を解くことで、観測局座標を求めている (Astronomical Institute, University of Berne, 2001)。GPS データ解析手法の詳細に関して、辻 (1998) や日置ほか (1998) を参照されたい。

2.3 更新内容の詳細

こうした解析の過程において、以下のような新しい変更が行われている。まず、旧来の Bernese Version 4.2 には、固体地球潮汐補正においてバグがあることが報告されている。中川ほか (2009) によれば、このバグは、座標値解のスケールで、4ppb 程度の季節変動の原因となっており、その修正が急がれていた。今回の Bernese Version 5.0 の導入により、このバグは修正された。

次に、大気遅延による誤差軽減のため、天頂大気遅延量のみでなく、新たにその勾配成分 (大気遅延の空間不均質の内の一次成分) も推定することにした。大気遅延勾配パラメータは 3 時間毎の線型関数として推定すると共に、天頂遅延量の推定についても、従来の 3 時間毎に“区間内での定数”として推定する方式から、3 時間間隔の“区分的線型関数”によりモデル化する方式に変更し、大気の変動をよりよく追従できるような変更を行った (GPS 解析における大気遅延推定の分かりやすい解説については、大谷・内藤 (1998) を参照されたい)。

また、受信アンテナの位相特性モデル (越智・畑中, 1996) は、これまでの National Geodetic Survey (NGS)

の検定による相対位相モデルから、絶対位相モデルのものに変更した。IGS では既に、受信アンテナの位相特性モデルを“相対”モデルから“絶対”モデルに変えており、これに整合させるため、電波の送信側である GPS 衛星のアンテナについても絶対位相特性モデルを採用している。そこで、これに対応して新解析戦略でも、GPS 衛星の送信側のアンテナの位相特性モデルについても IGS05 モデルに変更を行って、整合性を保つようにした。

更に、座標系として ITRF2005 の導入を行った。この座標系は、既に 2006 年 11 月 5 日より IGS が軌道や暦など、その種々の成果物を計算する際に使われていたものである。しかし従来の解析では、国土地理院の定常解析に合わせて、ITRF2000 を使っていた。今回の新たな解析戦略では、解析が準拠する座標系として ITRF2005 を正式に採用し、この点についても整合性の調整を行った (座標系については飛田 (2004) に詳しい)。

こうした新戦略の導入により、GEONET の標準的な解析方法となっている、国土地理院の定常解析にできるだけ近い解析方法にするようにした。解析方法、及び以上の変更をまとめたものを第 3 表に示す。

3. 結果

解析結果の内、精密暦による G3 解析、G4 解析の結果を第 3 図に示す。つくばにある国土地理院の観測局 92110 に対するそれぞれの観測局の変位 (斜距離、東西、南北、高さ各成分) を示す。但し、2010 年以降に設置されたため、G3 解析による解析結果の存在しない安濃局と須崎 AIST 局及び受信機の調子の悪い本宮三越局の

第3表 解析戦略第3版と第4版の違い

Table 3 Difference between the previous and current routine analyses.

| | 解析戦略第3版 | 解析戦略第4版 |
|-----------------|--|--|
| GPS解析ソフトウェア | Bernese version 4.2 | Bernese version 5.0 |
| 大気遅延推定 | 天頂大気遅延: 観測局毎に3時間毎の区間内で定数としてモデル化 大気遅延勾配: 推定しない | 天頂大気遅延: 観測局毎に3時間毎の区分的線形関数としてモデル化 大気遅延勾配: 観測局毎に3時間毎の区分的線形関数としてモデル化 |
| 固体地球潮汐モデル | バグあり | バグ修正済み |
| 座標系 | ITRF2000 | ITRF2005 |
| 地上受信アンテナ位相特性モデル | NGSによる相対位相モデル | NGSによる絶対位相モデル |
| 衛星送信アンテナ位相特性モデル | 位相中心の公称値 | IGS05モデル |

結果は除いてある。

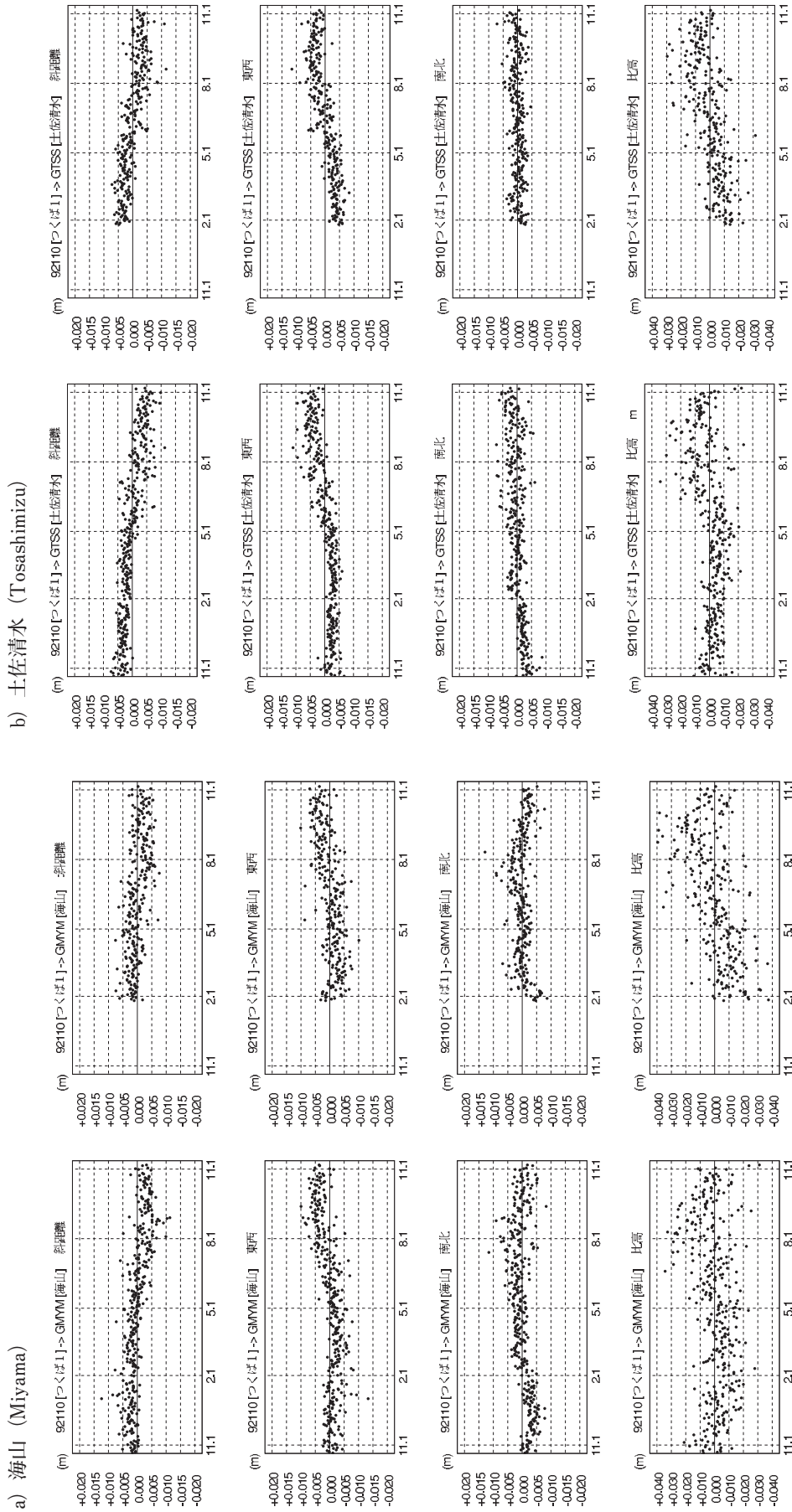
大きな傾向としては、新解析戦略の導入による大きな差が出ていないことが分かる。そのことから、旧来のG3解析においても十分に安定した解析が行われていたことが示唆される。但し、詳細に見てみるといくつかの点について違いが見られる。

まず多くの観測局で、6月から9月くらいの間を中心に、座標値のばらつきは新解析による結果の方が小さくなっていることが分かる。また、どの観測局にも振幅は異なるものの季節的な変動が見られているが、新解析戦略による結果では夏季における座標値のばらつきの減少の効果もあり、若干ではあるがその振幅が減少する傾向が認められる。

前者の原因の一つとしては、新解析戦略の導入によって、大気遅延誤差が減少したためであることが考えられる。夏季における座標値のばらつきが小さくなった点については、夏季に多くなる水蒸気による大気遅延誤差が、新解析戦略によって導入された大気遅延勾配の推定によって軽減されたためだと思われる。実際、両貝・石本(2007)は、国土地理院のGPS連続観測網の定常解析に見られる広域的な系統の変位が、前線の時空間的な変動とよく対応しており、こうした系統的な変動が真の

地殻変動ではなく、大気中の水蒸気の不均質な分布に起因する可能性があることを示している。彼らは、大気遅延勾配を新たに推定することによって、そうした系統的な変位を特に夏季を中心に減少させることに成功しているが、本新解析でも夏季のばらつきが他の季節に比べて小さくなっていることから、大気遅延勾配推定が座標値推定の誤差軽減に貢献しているものだと考えられる。実際、本新解析と同様の解析戦略を導入した国土地理院の定常解析においても、こうした改善が見られたことが報告されている(中川ほか, 2009)。

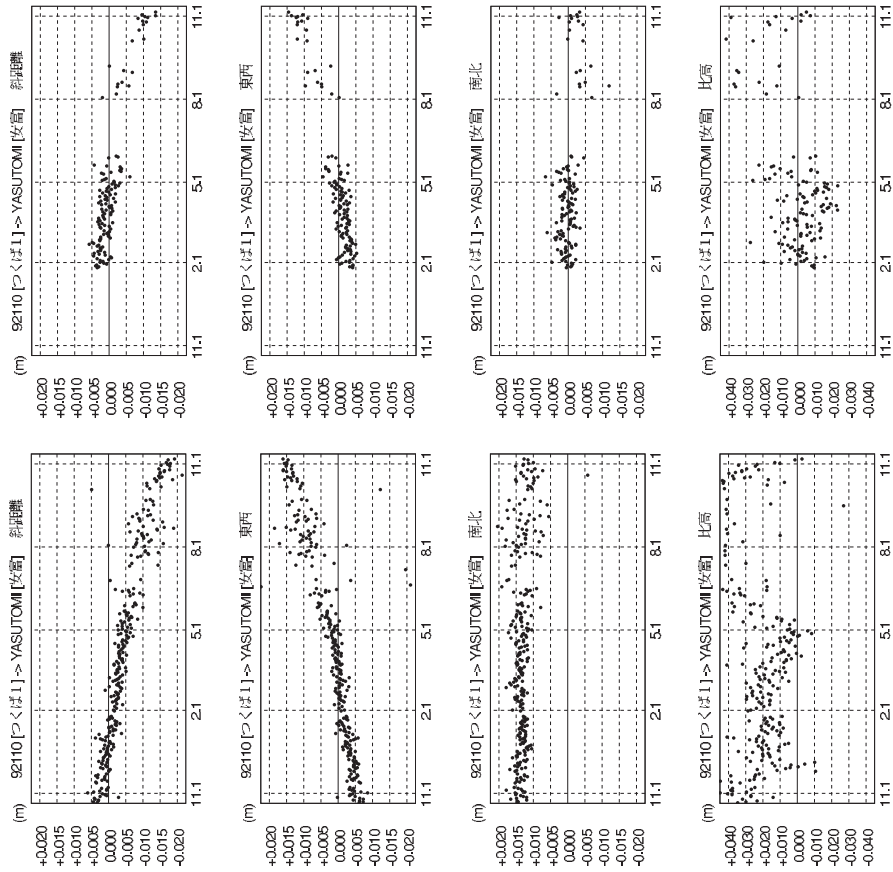
一方、季節変動の振幅の減少については、新解析戦略では、国土地理院の結果で見られたような顕著な効果(中川ほか, 2009)は見られていない。但し、国土地理院でも全ての観測局について改善が見られたというわけでは必ずしもなく、いくつかの観測局では逆に季節変動の振幅が大きくなるといった現象が見られるところもあった。中川ほか(2009)によれば、解析戦略の変更に伴う季節変動の振幅の減少の程度は、観測局周辺の個々のローカルな環境にも影響されることが指摘されており、単純ではない。本新解析戦略でも今後データの蓄積を待ってそうした点についても検証を行っていく必要がある。



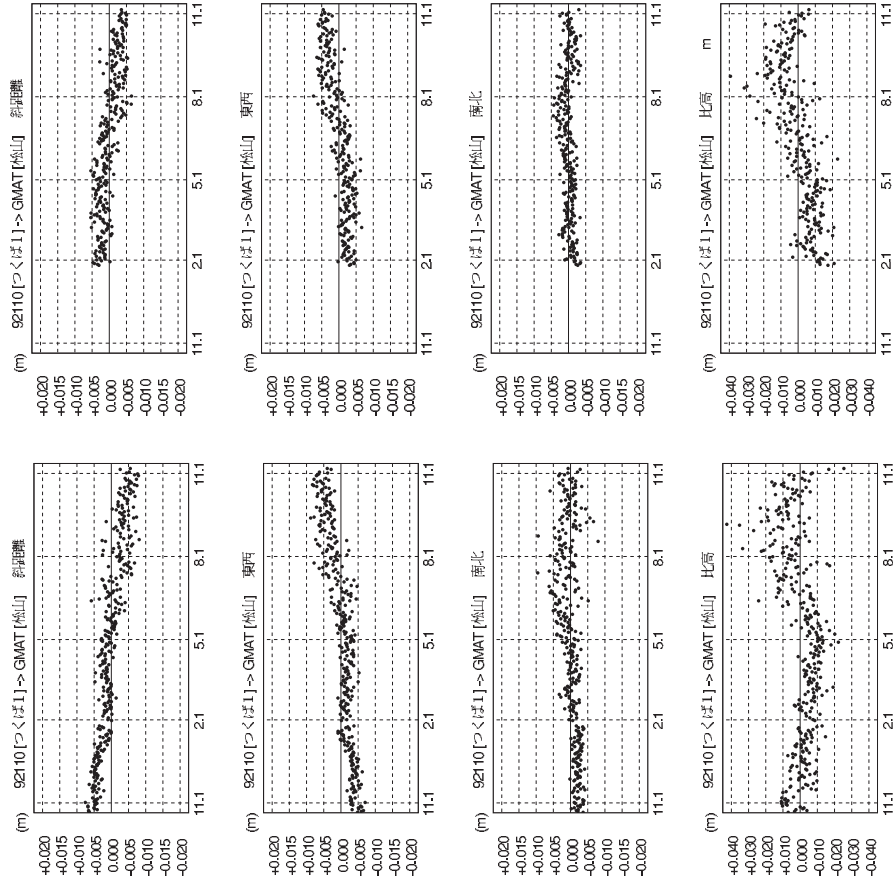
第3図 つくばにある基準局92110に対する、産総研GPS観測局の相対変位(斜距離, 東西, 南北, 高さ成分). 各局の左段はG3解析, 右段はG4解析によるもの. 座標系はWGS-84. 横軸は2009年11月1日~2010年11月1日までの日付(例えば3.1は3月1日). 高さ方向の目盛りは, 他の成分と違うことに注意.

Fig. 3. Relative displacement in meter (slope distance, EW (east-west), NS (north-south), and difference height components) of the AIST stations with respect to the 92110 station in Tsukuba from November 1, 2009 to November 1, 2010 obtained by the G3 (left) and G4 (right) analysis strategies. Note that the unit in height is different from the other components. The coordinate system is WGS-84.

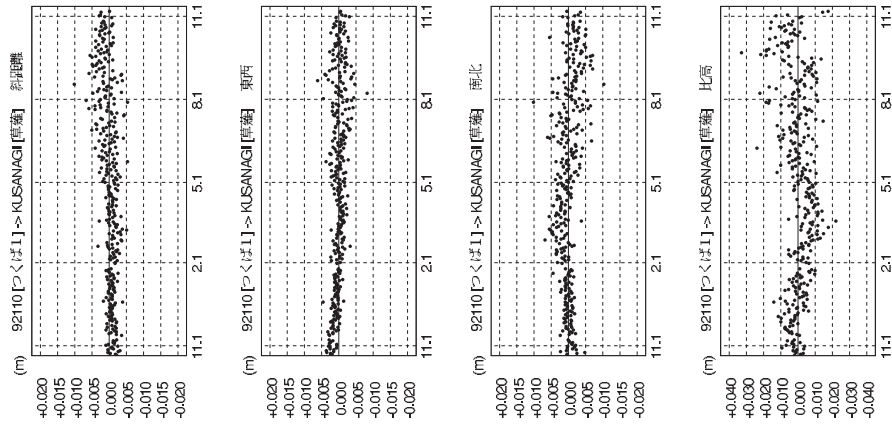
c) 安富 (Yasutomi)



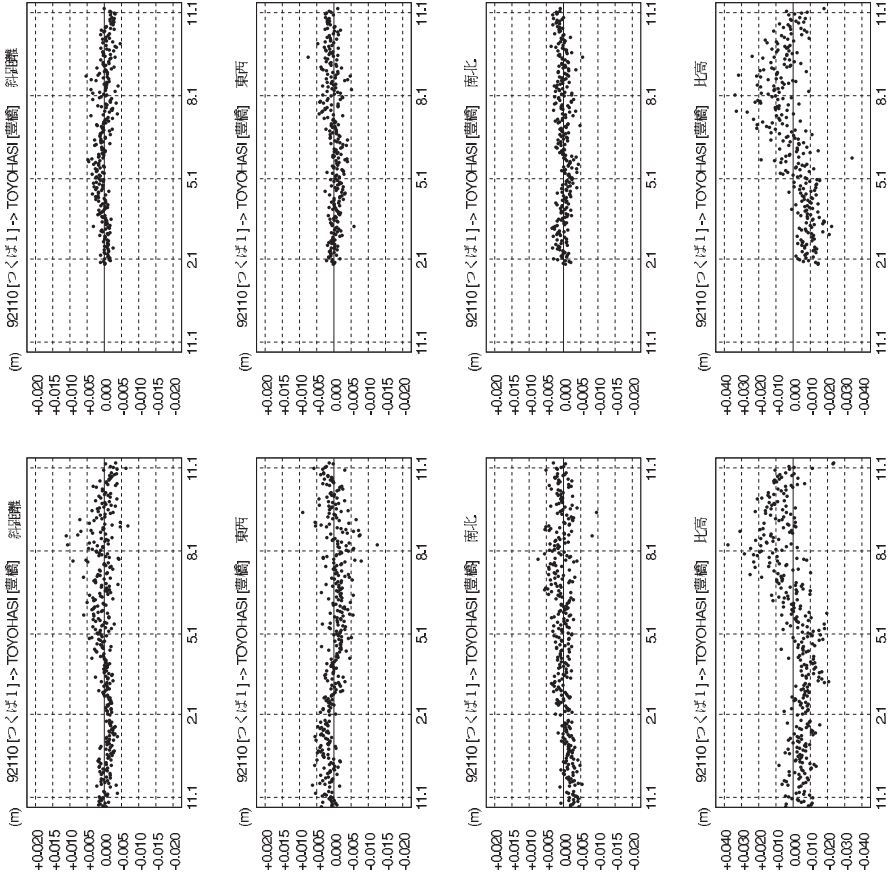
d) 松山 (Matsuyama)



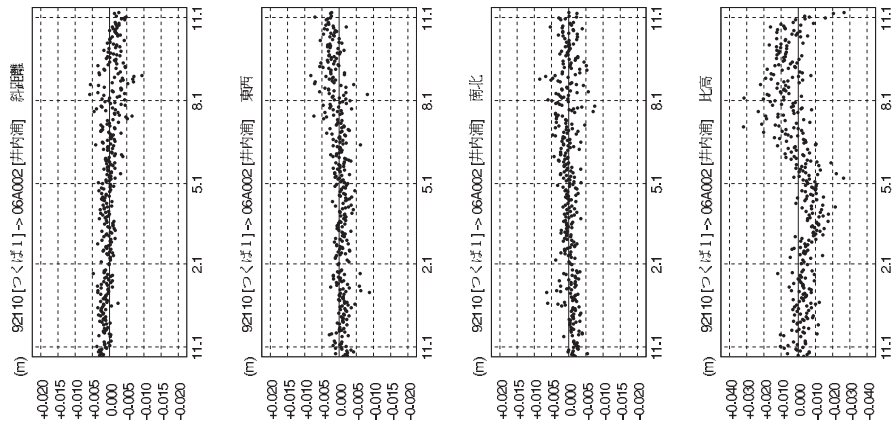
e) 草薙 (Kusanagi)



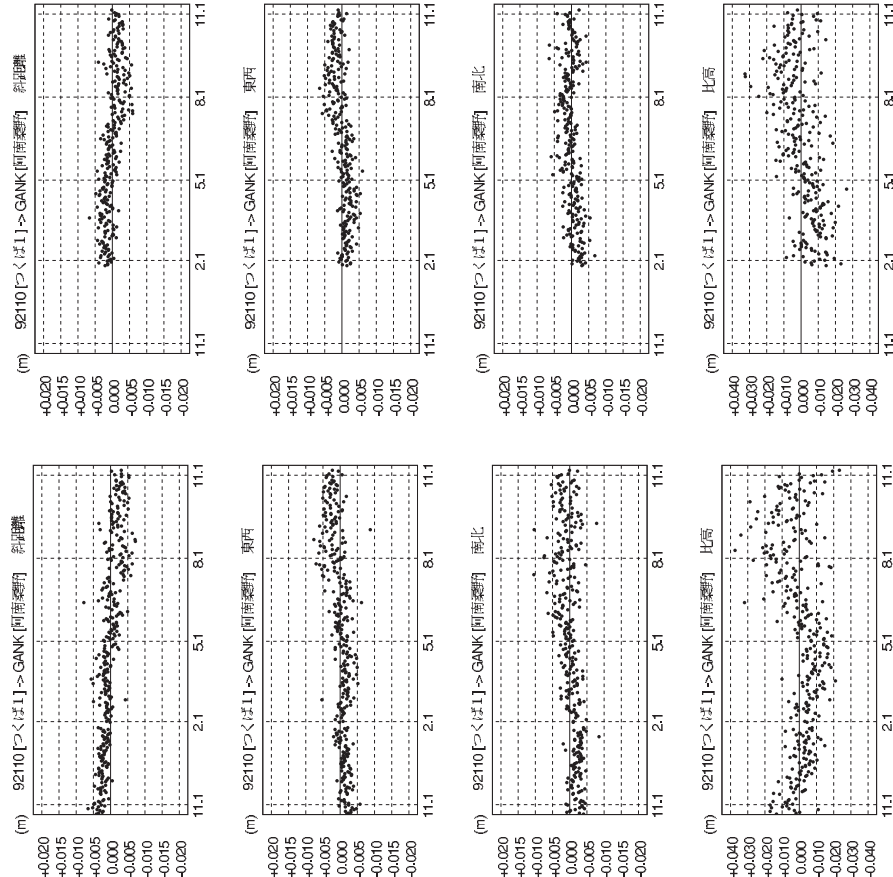
f) 豊橋 (Toyohashi)



g) 井内浦 (Ichiura)



h) 阿南桑野 (Anan Kuwano)



謝辞：国土地理院にはGPSの観測データと定常解析システムによって得られた座標値データの提供を受けております。図表の一部は日立造船の松浦友紀氏から提供を受けました。地下水等総合観測網の観測局設置においては産総研、地方自治体を始めとする多くの関係者の協力を得ています。ここに記して感謝します。

文 献

- 雨貝知美・石本正芳 (2007) GEONETに見られる大気擾乱の広域的な影響について, 国土地理院時報, 112, 41-49.
- Astronomical Institute, University of Berne (2001) Documentation of the Bernese GPS Software Version 4.2, Edit. U. Hugentobler, S. Schaer, P. Fridez.
- 日置幸介・島田誠一・大谷竜 (1998) GPS解析ソフトウェア, 気象研究ノート, 192, 日本気象学会, 73-92.
- 国土地理院 (2004) 電子基準局1200局の全国整備について, 国土地理院時報, 103, 3-51.
- 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・菅原安広 (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.
- 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.
- 大谷竜・内藤勲 (1998) GPS可降水量の物理と評価, 気象研究ノート, 192, 日本気象学会, 15-33.
- 大谷竜・松本則夫・小泉尚嗣・高橋誠・佐藤努・北川有一・佃栄吉・佐藤隆司・伊藤久男・桑原保人 (2003) 産業技術総合研究所地質調査総合センターにおけるGPS連続観測, 地質調査研究報告, 54, 193-212.
- 大谷竜・塚本斉・佐藤努・木口努・重松紀生・板場智史・北川有一・松本則夫・高橋誠・小泉尚嗣 (2010) 産総研地質調査総合センターにおける新GPS連続観測システム, 地質調査研究報告, 61, 57-74.
- 飛田幹夫 (2004) 世界測地系と座標変換, 日本測量協会, p 174.
- 辻宏道 (1998) GPSの原理, 気象研究ノート, 192, 日本気象学会, 1-13.

(受付2011年1月31日;受理2011年7月27日)