

GEONET のルーチン解の精度評価  
 Evaluation of Precision of Routine Solutions of GEONET

測地観測センター 畑中雄樹・山際敦史・湯通堂 亨・宮原伐折羅

Geodetic Observation Center

Yuki HATANAKA, Atsushi YAMAGIWA, Toru YUTSUDO and Basara MIYAHARA

要 旨

2002 年度に行われた改造後の GEONET (GPS Earth Observation Network System) の 3 種類のルーチン解析について、その精度を評価した。最終解では、基線ベクトルのバラツキの RMS は水平成分が約 2 mm、鉛直成分が約 1 cm で、基線長への依存性は小さい。速報解のバラツキには基線長に比例する項が、水平成分で 2 ppb 程度、鉛直成分で 9 ppb 程度あるが、200~300km 以内であれば、最終解の精度と大きな差はない。迅速解のバラツキは速報解の約 2 倍であり、24 時間分の平均値を取ると速報解とほぼ同程度である。

現在のルーチン解析には、解析ソフトの固体地球潮汐補正にバグがあるため、年周および日周期的な誤差が含まれている。ルーチン解の網スケールには振幅 6.5ppb 程度の顕著な年周変化が見られるが、その約半分がこの影響により説明される。

3 時間ごとの迅速解の時系列には、日周期的なノイズが卓越する。特に、2002 年度よりも前に建てられた観測点では、日照に伴うアンテナ架台が熱変形している様子が捉えられている。2002 年度以降に作られた二重管構造の架台ではこの影響は小さくなっている。

1. はじめに

現在の GEONET のルーチン解析は、その前身である F1 解析(Hatanaka, 2003)を土台として改良を加えたもので(測地観測センター, 2004)、システムの試験・評価を経て、2004 年 3 月から正式に運用されている。2005 年現在、表-1 に挙げた 3 種類のルーチン解析が稼働している。ここで、解析種別を表す記号の最初の 1 文字は、それぞれ Final, Rapid, Quick の頭文字である。以後、この記号を用いて、解析仕様の種別を「F2 解析」のように、解析結果を「F2 解」のように記す。

本稿では、現在のルーチン解の精度評価結果をまとめ、運用開始後に明らかになった解析ソフトのバグの影響と、網のスケールの年周変化に及ぼす影響を見積もる。また、短時間セッションの解析で問題となる誤差要因のうち、日照によるピラーの熱変形の影響について評価を試みる。

2. ルーチン解の再現性

2. 1 F2 解の長期再現性の評価

Hatanaka et al. (2003)は、1996 年 3 月から 1999 年 12 月までの解析結果を用いて、F1 解の長期再現性を評価した。同じ期間の解析結果を用い、同様の評価を F2 解について行う。八郷(93002)から各点への基線ベクトルの時系列から、直線トレンド、年周・半年周成分、主な地震に伴う地殻変動のステップを取り除いた後の残差の RMS を、基線長を横軸にプロットする(図-1)。比較のため、図には F1 解の残

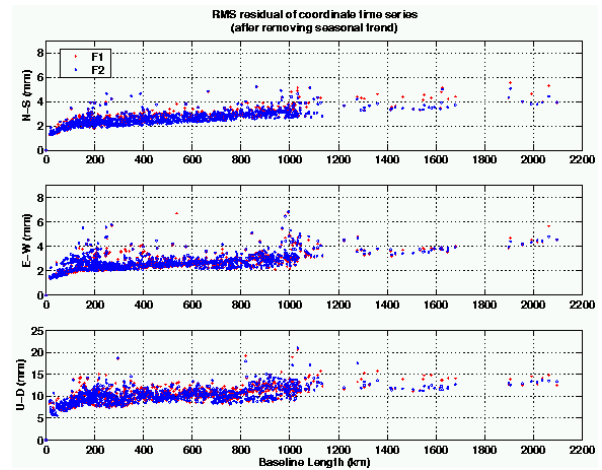


図-1 F1 解及び F2 解の長期再現性の比較  
 基線長(八郷観測点からの距離)を横軸にとり、F1 解(赤)、F2 解(青)の基線ベクトルの短期再現性をプロットした。上から順に、南北成分、東西成分、及び上下成分。

表-1 2005 年現在運用されている GEONET のルーチン解析

種別	記号	軌道情報	セッション	頻度	遅延時間*)
最終解析	F2	IGS 精密暦	00:00-24:00UT	日毎	約 2 週間
速報解析	R2	IGS 超高速暦(IGU)	00:00-24:00UT	日毎	約 2 時間
迅速解析	Q2	IGS 超高速暦(IGU)	6 時間	3 時間毎	約 2 時間

\*)「遅延時間」は観測セッション終了時点から解析結果が得られるまでの時間。

差 RMS もプロットされている。網全体の残差 RMS は表-2 の項目「all」に示す通りである。これらの数値は F1 解の評価結果 (Hatanaka et al., 2003) とほぼ同じ数値であり、全体としては、F1 解と同程度の精度であることが示された。

F1 解析では網全体を機種毎のサブネットワークに分割し、サブネットワーク毎に異なる観測点を固定していた。そのため、サブネットワークによって誤差の特性が異なり、異なるサブネットワークをまたぐ基線ではノイズが大きかった。F2 解析では機種毎のサブネットワーク分割を廃し、単一の観測点で固定することで、この欠点の解決を図った。その効果の評価するため、F1 解析で用いていた旧サブネットワーク毎に残差 RMS の統計をとった (表-2)。旧 Trimble サブネットワークに属していた八郷観測点 (93002) から各点を結ぶ基線のバラツキを評価しているため、旧 Trimble サブネットワークでは F1 解と F2 解の違いは極めて小さい。旧 TOPCON (Ashtech) サブネットワークと旧 Leica サブネットワークでは F2 解の RMS が F1 解のそれに比べて明らかに小さく、F1 解に見られたサブネットワーク間のノイズ特性の違いが改善されたものと考えられる。

表-2 F1 解及び F2 解の長期評価 (残差の RMS)

Sub-network	Comp.	F1(mm)	F2(mm)
all	NS	2.78	2.70
	EW	2.78	2.80
	UD	10.26	10.28
Trimble	NS	2.68	2.68
	EW	2.75	2.82
	UD	9.88	10.18
TOPCON	NS	3.14	2.85
	EW	2.88	2.84
	UD	11.83	10.74
Leica	NS	2.53	2.38
	EW	3.16	2.45
	UD	9.83	9.63

2. 2 短期再現性の評価

次に、R2 解と Q2 解の精度を評価するが、これらの解析結果は試験運用以後の期間しかないため、短期再現性での評価となる。評価期間は、R2 解の解析仕様が確定した直後の 2004 年 2 月 1 日から、目立った地震活動のない 4 月 30 日までの 3 ヶ月間 (90 日間) に揃える。八郷 (93002) に対する各点の基線ベクトル成分の時系列から直線トレンドを取り除き、残差の RMS を評価する。評価期間が短く、年周成分の推定精度が低いため、年周成分の補正は行わない。

F2 解についても同じ条件で短期再現性を評価した。評価結果を図-2 に示す。図の横軸は基線長 L で、基線ベクトル成分のバラツキの RMS を縦軸にプロットした。基線長による RMS の変化を評価するため、図-2 の各グラフに  $RMS = a + b \times L$  で表される

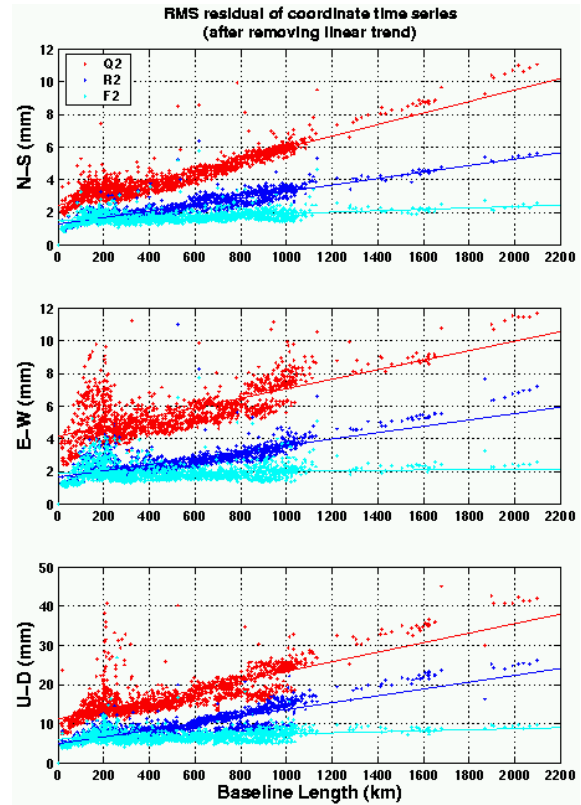


図-2 ルーチン解の短期再現性  
基線長 (八郷観測点からの距離) を横軸にとり、F2 (水色)、R2 (青)、Q2 (赤) の基線ベクトルの短期再現性をプロットし、回帰直線を当てはめた。上から順に、南北成分、東西成分、及び上下成分。

表-3 回帰直線のパラメータ

Solution type	Comp.	a(mm)	b(ppb)
F2	NS	2.5	0.4
	EW	1.9	0.1
	UD	6.1	1.3
R2	NS	1.3	2.0
	EW	1.7	1.9
	UD	4.9	8.7
Q2	NS	2.4	3.5
	EW	4.2	2.9
	UD	11.3	12.1
Q2 (8-session moving ave.)	NS	1.4	1.4
	EW	2.0	1.3
	UD	5.6	5.2

回帰直線を当てはめ、定数項  $a$  と基線長による傾き  $b$  を推定し、表-3 にまとめた。F2 解のばらつきは、長期再現性の評価結果と同様、150km 以上の範囲では基線長への依存性が小さく、水平成分で 2mm 程度、鉛直成分で 1cm 程度である。一方、R2 解のバラツキは水平成分が約 2ppb、鉛直成分が約 9ppb で、基線長と共に増大するものの、基線長 200~300km 程度までは F2 解と大きな差はなく、地域スケールで地殻変動を監視するには十分な精度を持っている。F2 解析と R2 解析の主な違いは使用する暦である。一般に軌道情報の誤差による基線解のバラツキは基線長に比例するので、R2 解のグラフの傾きは IGS 超高速暦の誤差を反映しているものと考えられる。Q2 解の残差 RMS は概ね R2 解の 2 倍程度である。

### 2. 3 Q2 解の移動平均について

Q2 解析のセッション長は R2 解析の 1/4 なので、Q2 解のバラツキの RMS が R2 解の約 2 倍であることは、バラツキの RMS がセッション長の平方根とほぼ逆比例の関係にあることを示している。これは、誤差が統計的に独立で正規分布に従う場合、平均値の標準偏差がデータ数の平方根に逆比例することに類似している。GPS データの誤差は時間的な相関があるため、データ数との関係を単純に当てはめるわけ

にはいかないが、もし、24 時間までの時間スケールにおいて 6 時間の時間分解能でノイズの時間相関がないものと見なせるなら、24 時間分の Q2 解析を平均すると R2 解と同程度のノイズレベルになることが期待される。

そこで、8セッション分の平均期間で Q2 解の移動平均を求め、R2 解と比較した(図-3)。図-4 は、図-2 と同様のデータ期間と方法で、Q2 解の移動平均結果のバラツキの RMS を評価して基線長を横軸にプロットし、R2 解と比較したものである。移動平均結果の RMS の回帰直線のパラメータは表-3 の下段に示してある。Q2 解の移動平均結果のバラツキは、400km 程度以下の基線長では R2 解とほぼ同程度で、長距離基線では移動平均結果の方がややバラツキが小さいという結果になった。Q2 解析の方が R2 解析よりも条件が厳しいことを考えると、Q2 解の移動平均のバラツキの方が小さいのはやや奇妙だが、計算条件に若干の違いがあるためかも知れない。例えば、Q2 解析では 6 時間のセッションを 3 時間ずつ重複してセットしているの、8セッション分の平均を取るとは、正確には 24 時間分のデータではなく、27 時間分のデータのうち前後各 3 時間分のデータの重みを半分にして平均することに相当する。また、R2 解は 1 日毎の独立な解を評価しているが、移動平均解は 3 時間毎の相関する解を評価している。

上の結果は、Q2 解の移動平均が現在の R2 解の代用として用いることができることを示している。そ

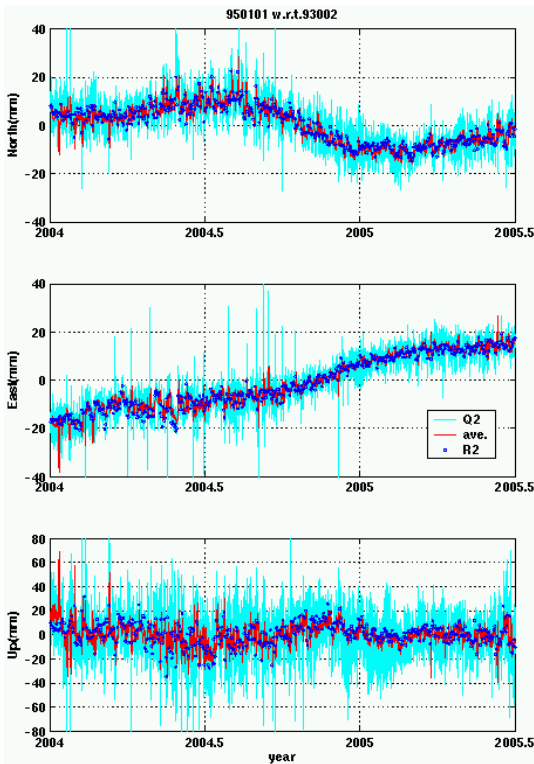


図-3 Q2 解の移動平均の時系列  
Q2 解 (水色) を 8セッション平均窓で移動平均し (赤), R2 解(青)と比較する。八郷-礼文基線 (基線長約 1025km) の例。

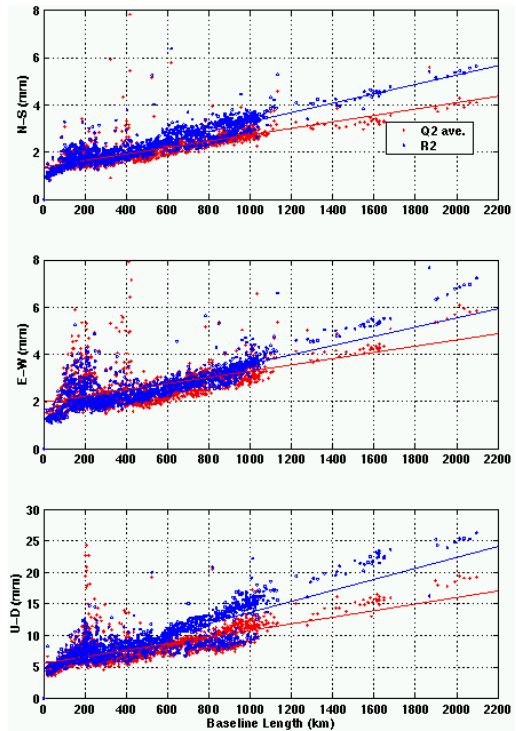


図-4 Q2 解の移動平均 (赤) と R2 解 (青) のバラツキの RMS の比較

の場合、R2 解の仕様を、IGS 超高速暦に比べて遅延時間が長い代わりに精度の高い IGS 速報暦を使うように変更し、現在の性能を失うことなく、より高い精度の R2 解を 1 日遅れで得ることも可能だろう。

### 3. 固体地球潮汐補正のバグの影響評価

#### 3. 1 バグの性質

ルーチン解析に使用している解析ソフトウェア BERNese ver. 4.2 の固体地球潮汐効果の計算ルーチンに誤りがあることが判明し、2004 年夏に Bern 大学からアナウンスされた (Hugentobler, BSW mail #0190, 2004). BERNese ver. 4.2 の固体地球潮汐補正は IERS conventions 1996 (McCarthy, 1996) を採用しているが、誤りはそのうちの step2 の補正 (Love 数の周波数依存性の補正) にあった。緯度  $\phi$ 、経度  $\lambda$  の位置における、この補正の radial 成分  $\delta r$  と transverse 成分  $\delta \bar{i}$  は以下の式で表される。

$$\delta r = \delta R_f \sin 2\phi \sin(\theta_f + \lambda)$$

$$\delta \bar{i} = \delta T_f [\sin \phi \cos(\theta_f + \lambda) \bar{e} + \cos 2\phi \sin(\theta_f + \lambda) \bar{n}]$$

ここで、 $\bar{e}$  および  $\bar{n}$  は、それぞれ東向きおよび北向きの単位ベクトル、 $\delta R_f$ 、 $\delta T_f$  は振幅係数である。誤りは、この中の位相  $\theta_f$  の計算に用いられる時刻の単位にあり、毎日の最初の 1 時間分の補正値が 1 日分の補正値として計算されていた。この補正は K1 分潮が特に大きいので、影響の大部分は、補正されるべき K1 分潮が補正されず、その代わりに偽物の年周変化 (厳密には日毎に不連続のある階段状の変化) が加えられるというものである。つまり、この補正誤差 (間違った補正と正しい補正の差) には、主として K1 成分と年周成分が含まれる。

上式からわかるように、この補正の振幅は緯度に、位相は経度に依存する。K1 分潮の場合、 $\delta R_f$  が 12.04mm、 $\delta T_f$  が -0.72mm、位相差は日本国内では最大 30 度程度である。このバグによる補正誤差は空間波長が長いため、短基線の基線ベクトル解にはほとんど影響しないが、1000km オーダーの長基線では数 mm オーダーで影響が現れる。補正誤差の大部分が上下成分 (地球の半径方向) なので、経度による位相差はあるものの、地域網では影響の大部分が網のスケール変化として現れるはずである。プログラムの誤りを修正して、1999 年の 1 年分のデータを再解析し、ルーチンの F2 解と比較した (図-5 左)。ルーチン解 (赤) で目立っていたスケールの年周変化の振幅が、修正版による解析結果 (緑) では小さくなっているのがわかる。

#### 3. 2 網のスケールの年周変化への影響

この問題を完全に解決するにはバグ修正版のプロ

グラムで全期間のデータを再解析しなければならないが、多少の厳密性を犠牲にすれば、前節の式を用いて、解析結果の座標値を簡便に修正することも可能である。まず、BERNESE の固体地球潮汐補正の計算ルーチンのバグ未修整版と修正版を用いて、各点の補正誤差 (間違った補正と正しい補正の差) の時系列を計算する。各解析セッションにおける補正誤差の時間平均値を求め、各点と固定点との相対値を座標値に加味すればよい。この簡易な修正を行った結果をバグ修正版プログラムによる再解析結果と比較すると、1 ppb 程度の差でほぼ一致し (図-5 右)、モデル計算された補正誤差 (固定点との相対値) をルーチン解の座標値から単純に差し引くだけで、大部分が補正されることがわかる。

再解析結果と簡易補正の間に残る約 1 ppb の差は、簡易補正が相対座標に現れる直接的な効果のみを補正し、間接効果が補正されないことで説明できる。補正誤差のため固定点座標が鉛直方向にずれると、直接的には網全体に並進成分が加わるが、それだけではなく網のスケールにもバイアスが生じる (Beutler et al., 1989)。図-6 は、この間接効果を例示したものである。固定点の *a priori* 座標値の上下成分を 10mm 高く設定して解析した結果に、固定点座標が元の値になるように並進成分を加え、元の座標解との差の水平成分をプロットした。これは、固定点が 10mm 低い位置に変動したときに、それを考慮しなかった場合の効果に相当する。この時、スケールが約 0.4ppb 小さめに推定される。バグによる補正誤差の日平均をとると、固定点のつくば (92110, 緯度 36.1 度) は、夏は約 11mm の低め、冬は逆に約

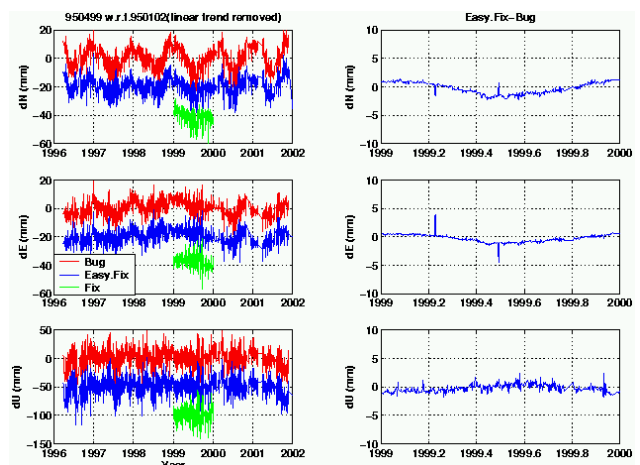


図-5 固体地球潮汐補正のバグ修正・簡易補正の比較  
礼文-与那国基線の基線ベクトル時系列 (左)。F2 解 (赤) とバグ修正版プログラムによる解析結果 (緑, 1999 年の 1 年分), および、簡易補正を施した解 (青)。右は、バグ修正版プログラムによる解と簡易補正を施した解との差。

11mm 高めに固定される。上記の結果を基にスケールに生じるバイアスを計算すると、冬に比べて夏が約 0.9ppb 大きくなるものと見積もられ、図-5 右に示した差がこれではほぼ説明される。

上記の簡便な方法で全点の座標時系列を補正し、1996-1999 年のデータでスケール等の系統差の年周成分を評価し直した。その結果、スケールの年周成分の振幅が 6.5ppb から 3.4ppb に減少し、前述の 0.9ppb 程度の差を加味すると、2.3ppb となる。Hatanaka(2003)は、大気遅延勾配推定の影響評価のため、同じ期間のデータを GIPSY/OASIS II ソフトで解析した。GIPSY/OASIS II で大気遅延勾配を推定せずに解析した結果はスケールの年周変化の振幅が 3.5ppb であり、ルーチン解の評価結果 6.5ppb と大きな違いがあったが、その違いが 1 ppb 程度にまで縮まる。

F2 解のスケールの年周変化には、解析ソフトのバグ以外にも幾つかの要因が重なって関与しているものと考えられる。その一つは、地下水のくみ上げによる固定点（つくば 1）の上下変動である。夏場に固定点が約 2 cm 沈降することに伴い、前述の間接効果によって網のスケールが 0.6ppb 変化することが予想されている(飛田他, 2004)。ただし、夏場に固定点が沈降することは、*a priori* 座標値を実際よりも高めの位置に固定することになるため、座標解に見られる年周変化とはセンスが逆で、夏にスケールを小さめに推定することになる。もう一点考慮しなければならないのは、現在のルーチン解析では無視

されている大気遅延勾配の効果である。GEONET のデータを GIPSY/OASIS II を用いて解析した検討結果からは、大気遅延勾配を推定した場合の方が、推定しない場合に比べて、スケールの年周変化の振幅が peak to peak で 3 ppb 程度小さくなることが示されている (Hatanaka, 2003)。

潮汐補正のバグによる年周変化と気象や地下水くみ上げによる年周変化は位相が 1~2 ヶ月ずれているので、数値を単純に累計するのは厳密性に欠ける議論ではあるが、以上の結果を総合すると、GEONET のルーチン解析でもバグ修正を施したうえで勾配推定を導入し、つくばの固定点の変動を加味することにより、スケールの年周変化の振幅（夏と冬の差）が概ね 1 ppb 以下になることが期待される。ただし、2000 年付近を境とする年周パターンの変化 (山本, 2002)は、潮汐補正のバグ修正では解決しないので、その原因は現在も謎である。

### 3. 3 大気遅延量推定値への影響

F2 解析および R2 解析では、座標値に対するバグの影響は見かけの年周変化として表れるが、日周変化は 24 時間セッションで平均化されるため、座標値にはほとんど影響しない。その代わりに、3 時間ごとに推定される大気遅延量にその影響が現れる。ルーチン解とバグ修正版プログラムによる解析結果で大気遅延量推定値の差をとり、プロットしたのが図-7 である。バグの影響による大気遅延量推定値のバイアスには、年周変化はほとんど見られないが、日周変化が顕著で、その振幅は地域によらずほぼ一定である。1 恒星日の周期を持つ K1 分潮が卓越するため、位相は徐々にずれ、夏と冬で逆転する。振幅は ±5mm (可降水量に換算して、±0.8mm) あるので、

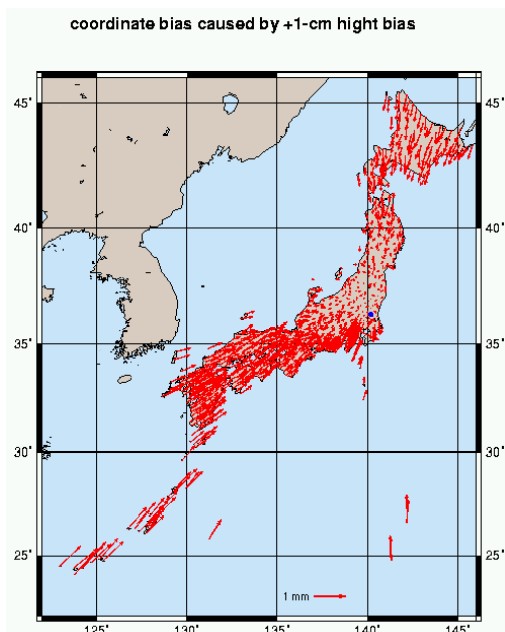


図-6 固定点の高さのバイアスによる間接効果  
固定点の *a priori* 座標の高さ成分を 10mm 上方に変更した場合の、水平座標解の変化。

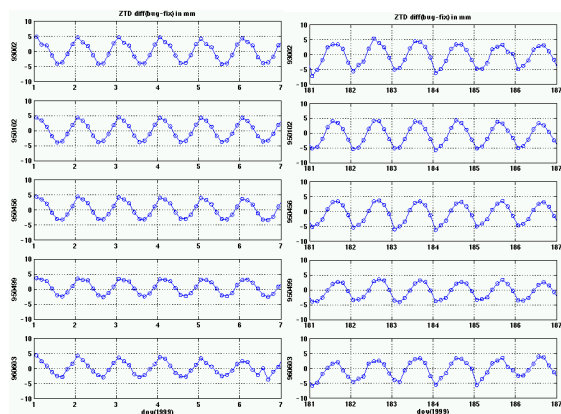


図-7 ルーチン解析結果の天頂遅延推定値の、バグ修正版プログラムによる解析結果からの差  
冬(右)および、夏(左)の例。上から順に、八郷(93002)、礼文(950102)、上対馬(950455)、与那国(950499)、母島(960603)。

気象データとの比較の際には無視できない大きさである。

#### 4. 日射による架台の熱変形および二重管構造の効果

電子基準点の従来のアンテナ架台は、日射で日向側が熱膨張することによって架台が変形し、アンテナ部が日陰側に変位することが問題点として知られていた(阿部他, 1997, 1999; 田村他, 1999)。この熱変形は、日向側と日陰側の温度差によって日陰側に湾曲する、いわゆるバイメタル効果によるもので、鉛直方向の変位はほとんど見られないが、水平方向に太陽と反対向きの変位が生じる。この変位は、GPSアンテナが設置されている架台上部付近で1 cm程度に達する場合がある(阿部他, 1997)。

2002年以降に増設された電子基準点では、架台を二重管構造にしてアンテナの取り付けられている内管を日射から遮ることによって、日射による架台の熱変形を防ぐ措置が講じられた。本節では、2002年度以降に設置された電子基準点とそれ以前の電子基準点のバラツキを比較することによって、架台を二重管構造にしたことによる効果を評価する。

図-8は、衛星軌道追跡局 022006(つくば2-A)に対する電子基準点 92110(つくば1)の変動時系列(Q2解)の水平成分を気象庁のアメダスによるつくばの日照時間と対照したものである。022006の架台は二重管構造、92110は従来型の架台で、基線長は

約60mである。どちらもつくばの国土地理院構内の日当たりの良好な場所にあり、気象庁のアメダス観測地点はそこから南東に約6kmの距離にある。基線解には振幅5mmほどのスパイク状のノイズが見られ、日照によって92110の架台が熱変形しているとすると、その特徴がよく説明できる。まず、変位は日周的で、朝は西、正午は北、夕方は東と太陽の方角と反対向きであり、南向きの変位はほとんど見られない。これは、太陽に照らされた面が膨張することによるバイメタル効果で説明できる。振幅には年周的な変化があり、東向きおよび西向きの変位は夏に振幅が大きい。夏場は日の出・日の入りの方向が東西方向から30度程度北にずれるので、東または西の方角から日照を受ける時間が長くなると考えれば辻褃があう。これとは逆に、北向きの変位の振幅は夏に小さい。これは、太陽の南中高度が高くなり(夏至では約77度にまで達する)架台側面を鋭角に照射するため、日向と日陰の温度差が生じにくくなるためであろう。また、日周変位の見られる日と見られない日があるのは、天気による日照時間の違いによるものと考えられる。夏至の前後で東西成分の振幅が小さいのは、梅雨時で天候が悪く、日照が少ないことを反映している。

以上の説明は022006が不動であるという仮定に基づいているが、92110変動が日照変形でこれほどうまく説明できることは、この仮定がよく成り立っていることを意味しており、二重管構造の有効性を

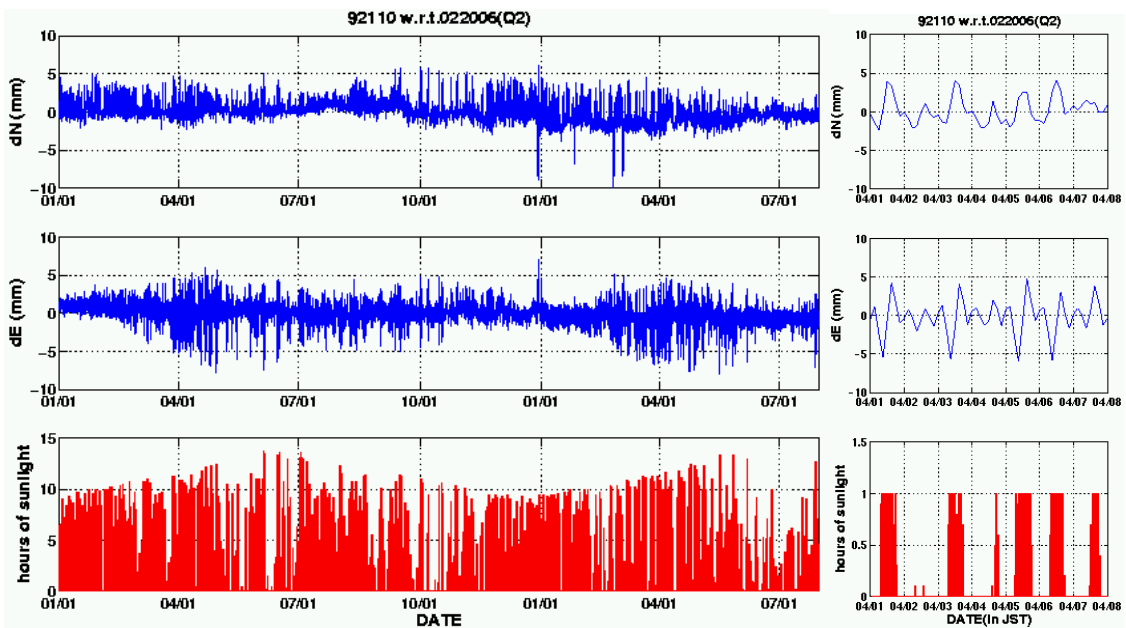


図-8 Q2解の水平成分に見られるノイズと日照時間の比較

022006→92110 基線の水平成分の時系列(上, 中)及び気象庁のアメダス点の日照時間(下)。左図の期間は2004年1月1日から2005年7月4日、下は1日あたりの日照時間。右図は2005年4月1～7日の部分を拡大し、日照時間は1時間あたりのものとした。横軸は日本時間である。

表-4 架台構造による基線再現性の違い(単位, 再現性: mm, 基線長: km)

		ターゲット点							
		従来型				二重管型			
		NS	EW	UD	L	NS	EW	UD	L
最寄り点	従来型	2.51	3.61	11.69	17.1	2.54	3.55	12.23	15.1
	二重管型	2.74	3.88	12.96	34.3	2.39	3.29	11.78	27.2

も示している。

上記では1基線のみの時系列を詳細に検討したが、GEONET 全体で影響を評価するために、2004年2月1日～4月30日のQ2解を用い、二重管型と従来型の架台の組み合わせで基線の種類を分類し、再現性を評価した(表-4)。ターゲットとする観測点に対し、従来型の観測点と二重管型の観測点のそれぞれから最寄り点を選び基線を組む。各基線の座標時系列の回帰残差の分散を求め、4種類の各組み合わせについて、分散の平均値の平方根と基線長の平均を表にした。再現性の評価結果には、架台型による違いだけではなく、基線長への依存性も反映している。しかし、二重管同士の基線が、平均基線長が比較的長いにも関わらず再現性が高いことがわかる。この結果から、日射に伴う熱変形の影響および二重管構造の効果が、統計的にも裏付けられる。

5. おわりに

GEONET の3種類のルーチン解析結果の精度を評価した。Q2解の移動平均がR2解と同等の精度をもつことから、現在のR2解の代わりに用いることが可能である。解の移動平均はローパスフィルターをかけることに相当するが、移動平均の幅を自由に選べるようにすれば、より融通の利く解の表示方法も可能となる。

解析ソフトの固体地球潮汐の補正のバグの影響を見積もり、網のスケールの年周変化のうち4ppb程度がこれで説明できることがわかった。バグの影響は極めて規則正しく予測可能であり、経験的な年周項の推定によって取り除くことも可能であることから、ルーチン解析では2005年現在のところ修正せず

に運用している。できれば修正することが望ましいが、運用途中でバグ修正すると解の年周変化が変わってしまうので、地殻変動の監視の立場からはかえって処理が難しくなる。修正する場合には過去のデータの再解析が必要となるため、機会を慎重に見定めたい。将来修正すべきである。

Q2解を用いて、従来型の観測点と主として2002年度以降に設置された二重管構造の架台を用いた観測点の座標時系列のバラツキを評価し、従来の観測点では日照によるアンテナ架台の熱変形によるノイズがみられること、また二重管構造の観測点ではそのノイズが小さいことがわかった。熱変形の影響は、24時間セッションによる解析では平均化されるためそれほど問題にはならなかったが、6時間のセッション長ではそれを十分に検出できる程度の影響を生じている。2002年度以前に建てられた従来型の架台についてはこの問題は未解決であり、その対策は今後の課題である。

これまで、GEONET のルーチン解析は24時間データによるものが主であり、1日より短い時間スケールのノイズについては平均化されるため、あまり注目されてこなかった。ここで取り上げた日射によるピラーの変形はその一例である。この時間スケールでは、マルチパスのような衛星配置の変化に同期するノイズも目立つが、系統的な研究は少なく、原因が未知の問題が多い。Q2解のような高い時間分解能の解を用いた地殻変動監視の精度を向上させるには、24時間セッションでは無視することのできた誤差要因についても、更なる研究が必要となる。

参考文献

阿部 馨, 大滝 修, 渡辺一禎, 都筑三千夫, 菊田有希枝, 堀 弘, 錦 輝明(1997): 電子基準点ピラー部の変形によるアンテナ中心の変位, 平成9年度調査研究年報, 国土地理院技術資料A・1-No. 201, 179-180.  
 阿部 馨, 日下正明, 畑中雄樹, 堀 弘, 石原 操, 大滝 修, 菊田有希枝, 堀田暁子, 菅富美男, 田村 孝, 藤咲淳一(1999): 電子基準点の日照変位, 平成11年度調査研究年報, 国土地理院技術資料A・1-No. 225, 109-110.  
 Beutler, G., I. Bauersima, S. Botton, W. Gurtner, M. Rothacher, T. Schildknecht (1989): Accuracy and biases in Geodetic Application of the Global Positioning System, Manuscripta geodetica, 14, 28-35.  
 Hatanaka, Y. (2003): Seasonal variation of scale of GEONET network and TZD biases, Abstracts of XXIII General assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics IUGG2003, June 30-July 11, 2003,

- Sapporo, Japan, JSG01/07P/A01-013.
- Hatanaka, Y., T. Iizuka, M. Sawada, A. Yamagiwa, Y. Kikuta, J. M. Johnson, and C. Rocken (2003): Improvement of the Analysis Strategy of GEONET, Bulletin of Geographical Survey Institute, 49, 11-34.
- McCarthy D. D. (1996): IERS conventions (1996), IERS Technical Note 21, Central Bureau of IERS, Observatoire de Paris, Paris.
- 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.
- 田村 孝, 高原正勝, 菅富美男, 藤咲淳一, 河和 宏, 都筑三千夫, 堀田暁子, 阿部 馨(1999): 凍上, 日射による電子基準点の変形に関する調査研究, 平成11年度調査研究年報, 国土地理院技術資料A・1-No. 225, 103-106.
- 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.
- 山本剛靖(2002): GEONET 座標データに見られる年周パターンの変化, 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会予稿集, D058-005.