

GPSアンテナ位相特性の検定とその課題 GPS Antenna Calibration and Its Issues

測地部 田中愛幸・加川 亮・川原敏雄・辻 宏道
Geodetic Department Yoshiyuki TANAKA, Akira KAGAWA,
Toshio KAWAHARA, Hiromichi TSUJI

要 旨

国土地理院では、2002年（平成14年）度より電子基準点データの一般公開を開始し、いつでもどこでも位置情報を提供するための基盤整備をさらに一歩押し進めた。それに伴い、電子基準点と利用者側受信機との間で行われる各種GPS測量の精度管理が重要となってきた。本稿では、今後増加が見込まれる異機種間のGPS観測における誤差要因となるアンテナ位相特性の問題を取り扱う。

異機種間観測では、アンテナの位相特性が互いに異なることによって測位誤差が生じるため、国土地理院では、米国の測地測量局（National Geodetic Survey）の公開する位相特性の補正值を使用してきた。これは基準点測量の精度がNGSの補正值が求められた環境（日本とは異なる気象条件や衛星配置、アンテナピラーの構造、独自の解析ソフトウェア等）に依存していることを意味する。そこで、この補正值の是非を検証するため、国土地理院においてほぼ同様の検定を実施し、NGSの結果と比較した。

代表的なアンテナに対して調査した結果、位相特性は、おおむねNGSのものと同じだったが、同時に問題点も明らかになった。位相特性は、検定に使用する架台の影響を受けやすく、アンテナによってはNGSとの較差が1 cmを越える機種が存在することが確かめられた。また、実際の観測データを使用して補正効果を比較したところ、NGSの補正值との差が数mmの場合でも、測位結果が数cmの差に拡大される場合があることが分かった。この結果、位相特性を検定手法によらず「一意に」決定することが重要であり、その際には実際の測量の状況を考慮することが必要である。

1. はじめに

異機種間GPS観測においては、アンテナの組み合わせによって高さ方向に数cm以上もの誤差を生じ得る。この原因は、アンテナごとに位相特性が異なることにあり、各国でそれらを検定する試みがなされてきた。米国測地測量局（以下、NGS）もそのような機関のひとつであり、ユーザの使用する様々なアンテナについて、独自の検定結果をウェブ上で公開している。

NGSでは、野外GPS観測によって基準として選んだチョークリングアンテナに対する試験アンテナの相対的な位相特性を求めている。この方法によって、アンテナオフセットおよび衛星高度角に依存する位相中心の変動

（Phase Center Variation: PCV）が決定される（Rothacher, 1995）。アンテナオフセットとは、アンテナ底面の物理的中心から測られた、アンテナがGPS電波を受信する位相中心の平均的な位置のことを指し、24時間程度の観測を行うことで既知の基線ベクトルからのずれとして求められる。PCVとは、その平均的位相中心から見た、電波の入射角に応じた衛星までの距離の見かけ上の変動のことを言う。これらはL1, L2周波数帯別々に決定され、機種ごとに補正值が表にまとめられている。

NGSの検定結果の一部は、国際GPS事業（IGS）観測点の位相特性の補正にも用いられ、また、日本で市販されている解析ソフトウェアの中にはそれらを内蔵しているものがある。このことは、NGSの検定結果が各種GPS測量に広く利用されていることを意味している。

さて、国土地理院では、精度を要する基準点の測量には原則として異機種間観測は行わず、電子基準点と取り付ける場合にのみ例外的に異機種観測を行いNGSの補正值を使用してきた。つまり、我が国の基準点の座標には、NGSの検定手法に依存した補正值が網平均された形で入り込んでいることになる。

ところが、NGSの検定環境で定められた補正值がどれだけ確かなものか検証されていない。例えば、日本との気象条件の違いによって、得られる補正值が異なる可能性がある。そこで、電子基準点データの公開に伴い異機種間観測の機会の増大が見込まれるのを機に、NGSとほぼ同等の位相特性の検定を実現し、補正值の検証を試みた。なお、これまでの国土地理院によるアンテナ位相特性の研究については参考文献を参照していただきたい（辻ほか：1993、飯村ほか：1994、越智・畑中：1996、今給黎ほか：1997、Hatanaka et al., 2001a; 2001b）。

2. 検証内容

2. 1 検定架台によるキャリブレーション

NGSと同様の方法で位相特性を検定するためには、予め精度よく求めた数m程度の基線が必要となる（Mader, Internet publication）。国土地理院では専用のピラーを国土地理院構内に設置した（写真-1、図-1）。各ピラーは二重管構造になっており、設置誤差やマルチパスを防ぐための対策が施されている。検定に使用した受信機およびアンテナは表-1のとおりである。測点間のベクトルは、水平に関しては表-1に示した2台のチョーク

リングアンテナを用いたGPS測量で、高さに関しては水準測量で決定した。5つの測点のうち任意の2測点に基準アンテナと試験アンテナとを設置し、同時観測を行う。オフセットおよびPCVを決定し、NGSの補正表が公開されている機種については比較を行った。

表-2は国土地理院およびNGSの検定手法の比較である。両者は、ほぼ同様となっているが、異なる点としてピラーの形状やソフトウェアの違いがあげられる。なお、チョークリングアンテナのオフセットの個体差は高々1mm以内であることが報告されているため(畑中, 1998), NGSの基準アンテナと本研究で使用する2台の基準アンテナの位相特性は同一と仮定した。

2. 2 架台状態の違いが及ぼす影響

位相特性は、マルチパス等のアンテナの電波環境によって大きく異なることが知られているため、上記の検定の他に、架台状態の違いによる位相特性の変化を調べた。試験機として使用した受信機およびアンテナを表-3に示す。表中の記号は受信機とアンテナの組み合わせで、表-1と対応する。これらについて、電波吸収材を使用した場合、三脚を使用した場合の同一アンテナの位相特性の変化を求めた。



写真-1 検定風景

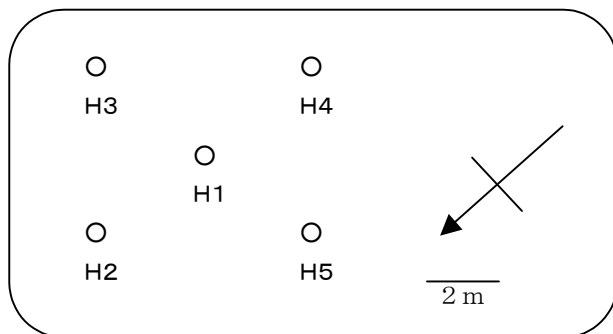


図-1 架台配点図

表-1 使用受信機アンテナ一覧

記号	受信機	アンテナ	台数	備考
A	Trimble 4000SSI	Micro Centered with GP	3	
B	Trimble 4000SSI	Compact L1/L2 with GP	3	
C	Trimble 5700	Zephyr with GP	3	
D	GPRI-DY	Geodetic III	2	
E	Legacy E GGD	Legant	2	
F	Trimble 4000SSI	Compact Dome	2	一周波
G		Trimble 4600LS	2	一周波
R	AOA Benchmark ACT	Dorne Margolin T (s/n 480)	1	基準機(正)
R	AOA Benchmark ACT	Dorne Margolin T (s/n 477)	1	基準機(副)

表-2 検定方法の比較

	NGS	国土地理院
ピラー	2基 (南北) 高さ1.8 m 間隔 5 m	5基 (放射状) 高さ1.6 m 間隔 2.5 m から 4 m
アンテナ取り付け	独自のアタッチメント	整準台(トプコン製) 架台~アンテナ底面まで0.160m
基準アンテナ	Dorne/Margolin choke ring antenna type T	同左
受信機	Ashtech Z12	それぞれのアンテナに対応する受信機
基線の確定	基準機2台によるGPS観測を複数回。L1、L2を用いて別々に求める	水平は同左(最低24時間の観測)。高さはL1、L2とも水準測量で決定
位相特性観測方法	基準機、試験機を2測点に設置しGPS観測	同左
観測時間と平均方法	同一機種アンテナ2台以上を用いて1台につき24時間観測した結果を平均	同一機種アンテナ2台以上を用いて24時間観測を複数基線で観測し平均
観測条件	高度角マスク10度	高度角マスク0度、データ取得間隔30秒、最小衛星数4
推定量	平均的位相中心及び衛星高度角に依存するPCV	同左
解析ソフト	PAGES (NGS独自のもの)	Bernese v.4.2位相特性推定モジュール
観測量	平均的位相中心については二重位相差 PCVは一重位相差	二重位相差
解析条件	大気遅延、電離層補正なし。平均的位相中心については高度角マスク15度。求めた位相中心を固定後高度角マスクを10度にし、PCVを推定	データ取得間隔は30秒、後は同左
基準アンテナの位相特性	U方向 L1:0.110m L2:0.128m N、E方向のオフセット、PCVはすべて0	同左
特性曲線の近似式	4次多項式	球面調和関数 (n=10, m=0)
その他	http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL	解析方法は、Bernese マニュアル参照

表-3 架台状態の影響の調査に使用されたアンテナ

受信機及びアンテナ	架台状態	場所
B, F	三脚	観測センター屋上
C, F	電波吸収材	検定架台

3. 観測

観測は、2002年6月から2003年6月まで断続的に行われた。本研究で使用した全ての観測のスケジュールを表-4に示す。表中の記号は受信機とアンテナの組み合わせで、表-1と対応する。番号は、同一機種内での区別をするためのものである。

検定に使用したデータは大部分が2002年6月と2003年1月に取得したものである。一回の観測時間はおおむね24時間であり、同機種間の個体差を平均するため1機種につき2台以上のアンテナを使用した。また、日間較差を見るために、ほとんどの場合、同一アンテナにつき2

日以上の観測を行っている。また、データを増やすため、表-1に示した2台の基準機を使用している。これらの観測でアンテナ高はすべて160mmにセットした。

架台状態の影響を調べるための観測のうち、三脚を使用した観測は、2002年12月ごろ国土地理院構内の測地観測センター屋上で行った。この検定では水平方向のオフセットは求めずに、レベルとの比較で高さ方向のオフセットとPCVのみ求めた。

電波吸収材の影響は、2003年6月に検定架台を使用して調べた(写真-2)。

表-4 観測スケジュール

検定			
記号	番号	観測日	基線
A	1	2002/6/19	3-2
			4-2
		2002/6/20	2-4
			3-4
	2	2002/6/21	2-4
			3-4
		2002/6/20	2-5
			3-5
	3	2002/6/19	3-1
			4-1
		2002/6/20	2-1
			3-1
B	1	2002/6/21	2-1
			3-1
		2002/6/22	2-4
			3-4
	2	2002/6/23	2-4
			3-4
		2002/6/24	4-2
			5-2
	3	2002/6/22	2-5
			3-5
		2002/6/23	2-5
			3-5
C	1	2002/6/22	2-1
			3-1
	2002/6/23	2-1	
		3-1	
	2	2002/6/24	4-1
			5-1
3	2003/1/6	1-4	
		3-4	
	2003/1/7	1-4	
		3-4	
D	1	2002/6/25	4-2
			5-2
	2	2002/6/25	4-3
			5-3
	3	2002/6/25	4-1
			5-1
2002/6/26	4-1		
		5-1	

記号	番号	観測日	基線
D	1	2002/9/4	1-2
	2	2002/9/4	1-3
E	1	2002/10/8	1-2
		2002/10/9	1-2
	2	2002/10/9	1-3
		2002/10/10	1-3
F	1	2003/1/6	1-2
			3-2
	2003/1/7	1-2	
			3-2
	2	2003/1/6	1-5
			3-5
G	1	2003/1/8	1-5
			3-5
	2	2003/1/9	1-5
			3-5

三脚との比較			
記号	番号	観測日	架台
B	3	2002/12/11	三脚
		2002/12/12	三脚
		2003/1/7	1-4
F	1	2002/12/11	三脚
		2002/12/12	三脚
		2003/1/6	1-4

電波吸収材の影響			
記号	番号	観測日	電波吸収材
C	1	2003/6/5	なし
		2003/6/5	あり
F	1	2003/5/27	なし
		2003/6/5	あり



写真-2 電波吸収材の設置

4. 結果

4. 1 アンテナオフセットの比較

表-4の個々の解析の結果を平均し、機種ごとのオフセットおよびアンテナ1台ごとのオフセットを求める。機種ごとのオフセットとは、ある機種について行われた全ての観測を平均したものをいう。同様にアンテナ1台ごとのオフセットとは、ある1台のアンテナについて行われた全ての観測を平均したものをいう。各解析では、衛星高度角に依存する重みづけはしていない。また、各々の解析結果において、基線の方向に関する有意な変化は見られなかった。

表-5は、機種ごとのオフセットである。ΔN, ΔE, ΔUは、それぞれオフセットの南北、東西、高さ成分を表す。図-2は、それらのうち対応するNGSの補正表が存在するAからDの4機種について、アンテナ1台ごとのオフセットをNGSのそれと差をとってプロットしたものである。同機種内で多少ばらつきがあるが、NGSとほぼ3mm以内で一致している。

表-5 機種ごとのアンテナオフセット

記号	L1			L2			# of obs.
	ΔN	ΔE	ΔU	ΔN	ΔE	ΔU	
A	-1.0	-1.5	71.9	1.1	-0.7	70.3	14
B	0.6	-1.3	71.7	-0.4	1.1	70.5	20
C	1.0	3.2	71.7	-1.3	0.9	65.0	10
D	-3.9	0.7	86.0	-0.3	-3.2	63.2	2
E	-0.4	-0.2	63.5	0.4	-0.4	60.9	4
F	-0.2	-1.6	73.5				10
G	0.5	1.0	135.7				8

単位:mm

4. 2 アンテナオフセットの個体差と再現性

NGSの検定では、同機種のアンテナ数台を用いて観測結果を平均しており、標準偏差は2~3mm程度である(Mader, Internet publication)。本検定の精度と比べるため、同機種内の個体差と再現性を求めた。

図-2から4種類のアンテナの個体差を読みとると、水平成分、高さ成分とも±1mm程度である。表-6は、7種類すべてのアンテナ1台ごとのオフセットの高さ成分と標準偏差を示したものである。標準偏差は1mm程度であることがわかる。次にオフセットの高さ成分の再現性を図-3に示した。使用したアンテナは、表-1のB-3である。観測した時期は6月と翌年の1月で、それぞれ連続した日で観測を行っている。これを見ると、同じ月の中では、ばらつきは1mm程度であるが、半年後とでは1~2mmの差が生じている。

結果として、個体差と再現性を考慮すると、今回の検定で求めたアンテナオフセットの精度は2~3mm程度であると考えられる。したがってAからDの4機種のオフセットは誤差の範囲でNGSと一致しているといえる。

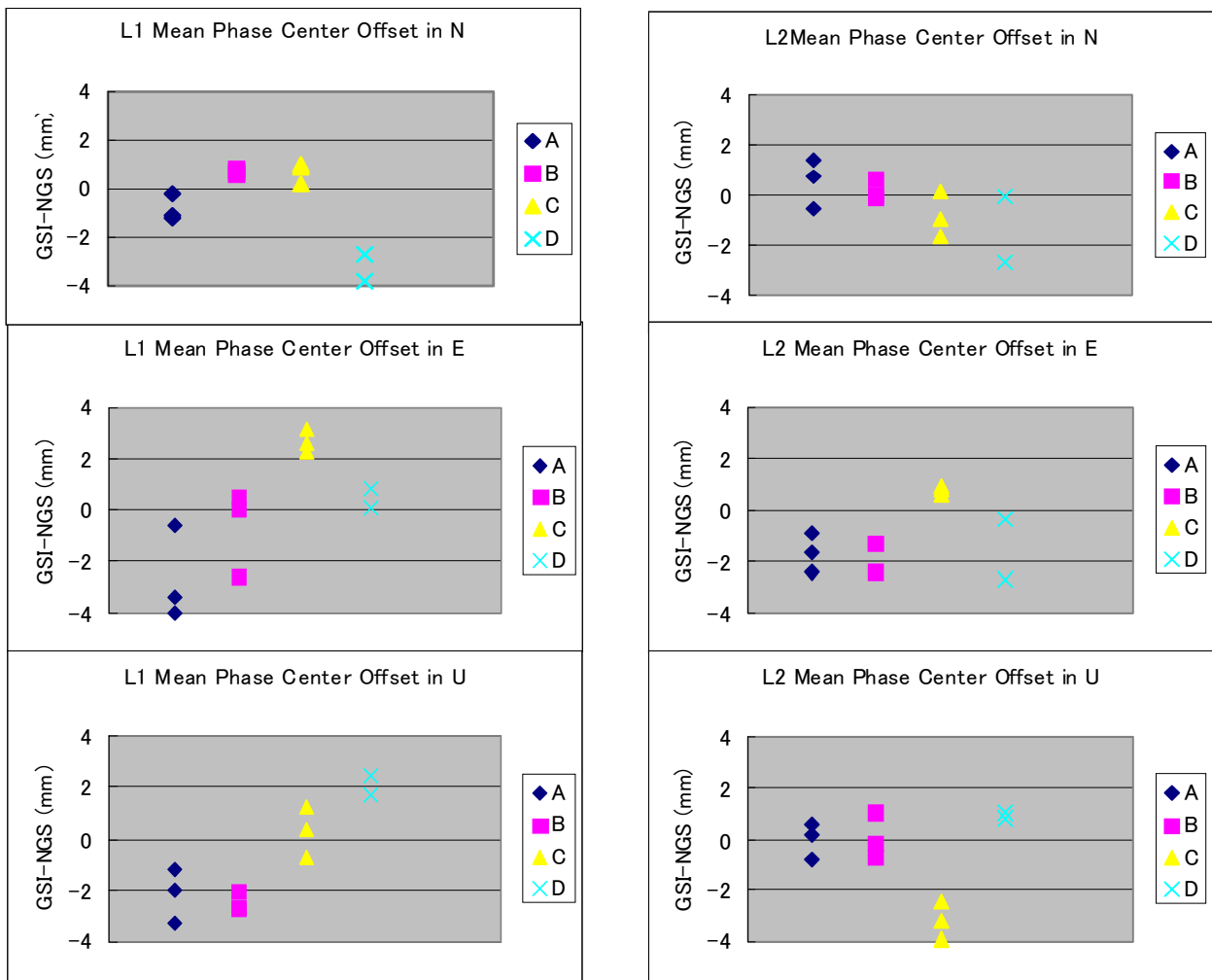


図-2 アンテナオフセットのNGSとの比較

4. 3 PCVの比較

24時間観測1回から求めたPCVをNGSのものと比較した。例として表-1のC-1のPCVを示す(図-4)。両者は同一の天頂角で比較すれば2~3mmで一致しているものの、曲率には違いがあるように見える。この違いは、NGSとの検定手法の違い(表-2)を反映していると考えられる。

また、図には示していないが、本検定でのPCVの日間較差は2~3mmであり、有意な曲率の変化は見られなかった。ただし、PCVを推定する区間の端(天頂角が0度と80度の付近)では、データがない、または残差が大きいため、ばらつきが大きくなる。

4. 4 NGSとの差の大きいアンテナ

2003年5月に別途行った検定の結果、表-1に示していないアンテナで、NGSとの高さ方向のオフセットの差が4.2で述べた検定精度を超えるものがあることがわかった(表-7)。NGSとの較差はアンテナごとに異なっており、アンテナと架台の組み合わせによってマルチパス等の電波環境が変化したことが原因と思われる。

表-6 高さ方向のオフセットの個体差

番号・記号	A	B	C	D	E	F	G
1	72.8	71.4	71.8	86.3	64.4	74.2	136.4
2	70.8	71.5	70.7	85.6	62.6	72.8	135.0
3	72.1	72.1	72.6				
平均	71.9	71.7	71.7	86.0	63.5	73.5	135.7
標準偏差	1.0	0.4	1.0	0.5	1.3	1.0	1.0

単位:mm

表-7 オフセットの高さ成分の差が大きいアンテナ

記号	H	I	J
L1 (GSI-NGS)	2.5	7.3	6.0
L2 (GSI-NGS)	-28.3	-15.2	-8.2

単位:mm

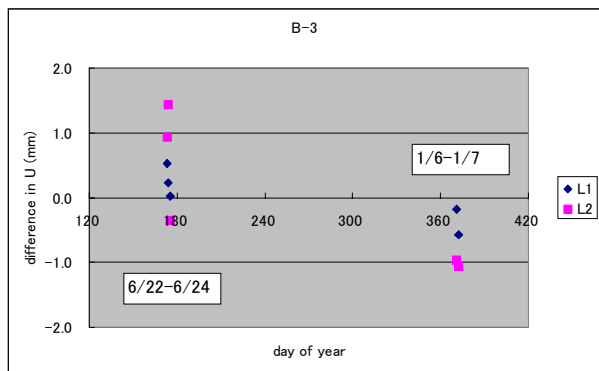


図-3 高さ方向のオフセットの再現性

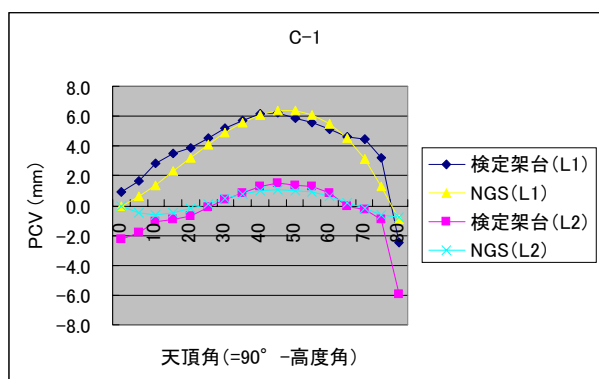


図-4 PCVのNGSとの比較

表-8 架台状態の変化が及ぼす影響

記号	B		F
	L1	L2	L1
周波数			
検定架台	71.4	68.9	74.2
三脚	70.7	69.4	72.7

記号	C		F
	L1	L2	L1
周波数			
検定架台	75.5	68.7	77.5
電波吸収材	74.0	67.9	74.2

単位:mm

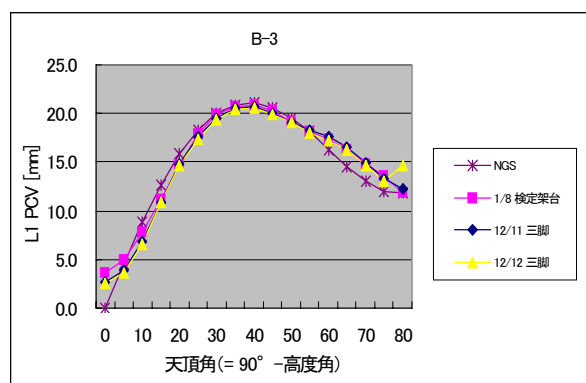


図-5 三脚を使用した場合のPCVの変化

4. 5 架台状態の違いが及ぼす影響

表-8に架台状態を変化させた場合のオフセットの変化を示す。4. 2で述べたように、季節によって2~3mm変化する可能性があるため、本節の比較は、観測時期が近いもの同士で行った。

三脚を使用した場合、B、Fの2種類のアンテナの高さのオフセットはL1で約1mm小さくただけで、顕著な差が見られなかった。また、PCVについても比較したが、ほとんど変化はなかった(図-5)。

電波吸収材を装着することにより生じるオフセットの変化は、C、Fの2機種についてL1の高さオフセットがそれぞれ1.5mm、3mm小さくなる事が確かめられた。PCVについては変化がほとんど見られなかった。

なお、4. 4で述べたNGSとの差の大きい機種については、2003年8月より日本測量機器工業会と共同で調査する予定である。

5. 検定結果が基線解析に及ぼす影響

これまで検定の手法や結果について述べてきたが、ここで検定結果の違いが基線解析にどれくらいの誤差を生じさせるか実際の観測データを用いて検証する。

使用したデータは、2002年7月19日の富士山地区試験観測のものである。電子基準点93072と、標高差800m、約8.6km離れた地点にある試験観測点とで異機種間観測を行い、NGSの補正値を使用した場合、本研究の検定架台で得られた補正値を使用した場合とで、測位結果の比較を行った。電子基準点のアンテナはTrimble Permanent、試験観測点のアンテナはTrimble Zephyrで、三脚上に設置してある。位相特性の補正効果を見るためには、一般には真の基線ベクトルが必要であるが、ここでは代替として独立な観測から求めた大気遅延量との一致度を指標とする。

電子基準点を固定して、試験観測点の座標と天頂遅延量の差を24時間の観測データからIonosphere-Free線形結合を用いて推定した。天頂遅延量は2時間ごとに推定し、仰角に依存した重みづけはしていない。電子基準点、試験観測点双方の両隣約5mには、2種類のアンテナが設置してあり、異機種観測の基線と並行して同機種同士の基線2本を組むことができる。この2本の基線から基準とする天頂遅延量の差を求めた。なお、電子基準点側にはGEONETで使用している、レドーム等の影響も考慮した補正値を使用している(Hatanaka, 2001a)。

図-6に天頂遅延量差の推定結果を示す。NGSの補正値を使用した場合は、同機種2基線から求めた天頂遅延量の差の平均に対し約1cmのバイアスが生じているのに

対し、本研究で求めた補正值(表-5のC, 図-4)を使用した場合、バイアスは2mm程度にすぎないことがわかった。このときの座標の変化は、高さ成分で約3cmであり、補正值を変更した際の天頂遅延量差の変化の向きと調和している。これは結果としてNGSの補正值を使用した場合では測位誤差が残っていることを示している。

本節の結果、mmオーダーの検定結果の差が、cmオーダーの測位誤差に拡大されることが判明した。これは注目すべきことである。

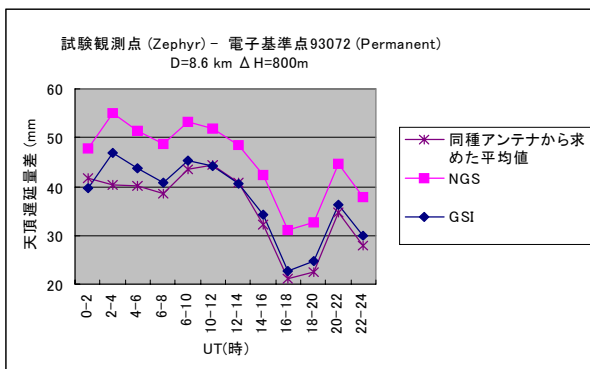


図-6 基線解析(大気遅延推定)に及ぼす影響

6. まとめ

国土地理院構内のアンテナ架台を使用した位相特性の推定が行われた。検定の結果、代表的なアンテナの位相特性は誤差の範囲、すなわち2~3mmでNGSの検定結果と一致した。しかし、アンテナによっては、検定環境の違いを敏感に感知し、オフセットの差が数cmに達する機種が存在することが明らかになった。また、たとえNGSとのオフセットおよびPCVの差が数mmにすぎない場合であっても、それが基線解析の高さ成分に、数cmの差をもたらす得ることがわかった。

これらの結果から、位相特性の検定が、異機種間観測

の精度に直接関わる重要なものであることがわかる。理想的には、どのようなアンテナに対しても真の位相特性が一意に定まるような検定手法が確立できればよいのであるが、現実には、架台の形状やソフトウェアの設定に依存した結果が算出される。

架台については、実際の測量が三脚を使用して行われることが多いため、三脚上に設置したアンテナの位相特性に近い結果を、できるだけ多くのアンテナに対して再現できる架台状態を実現することが解決の指標となる。本稿では架台状態の違いが及ぼす影響については若干の取り扱いにとどまったが、より詳細な検証を民間との共同で行う予定である。

解析ソフトウェアについては、さらに検証を進め、PCVのモデル化に使用する近似式等を統一する必要があるだろう。

最後に、NGSの補正值が日本で使用されていることを考えれば分かるように、位相特性の検定は国際的なものである。ドイツのハノーバー大学およびGeo++[®]では、NGSや本研究で採用している相対的なキャリブレーションを含む、より汎用的な検定方法が実現されつつある(Falko and Schmitz, Internet publication)。各機関の検定手法につながりをつけ、標準化する取り組みも行われるだろう。海外の動向も見つつ、現況の日本の測量に適した位相特性の検定方法を確立しなければならない。

謝 辞

検定の実施にあたり、社団法人日本測量協会測量技術センター、株式会社ソキア、株式会社トプコン、株式会社ニコン・トリニプル、日立造船情報システム株式会社、ライカ・ジオシステムズ株式会社、平成15年度部外研究員の四方正良氏には大変お世話になりました。厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 飯村友三郎, 森下一, 嵯峨諭 (1994): G P Sアンテナの位相特性の測定, 国土地理院時報, 第81集, 8-16.
- 今給黎哲郎, 飯村友三郎, 嵯峨諭, 森下一, 土屋淳, 工藤文夫, 石川伸一, 岩名泰典 (1997): 電波無反射室におけるG P S測量用アンテナの位相特性の測定(続報), 測地学会誌, 第43巻第2号, 79-90.
- 越智久巳一, 畑中雄樹 (1996): G P S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, 第85集, 23-28.
- 畑中雄樹, 村上真幸, 越智久巳一 (1998): 測地学会第90回講演会要旨, 52, 103-104.
- 辻宏道, 杉田要, 根本恵造, 益子栄, 後藤清, 岩田昭雄, 村上亮, 大津泉, 石川伸一, 土屋淳 (1993): 電波無反射室におけるG P S測量用アンテナの位相特性の測定, 測地学会誌, 第39巻第2号, 179-192.
- Falko Menge and Martin Schmitz: Results of absolute PCV field calibrations at IfE and Geo++[®], <http://www.geopp.de/> (31 July 2003).
- Bernese GPS Software version 4.2 Documentation, <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/BERN42/DOCU/> (31 July 2003).
- Hatanaka, Y., M. Sawada, A. Horita, and M. Kusaka (2001a): Calibration of antenna-radome and monument-multipath effect of GEONET-Part 1: Measurement of phase characteristics, Earth Planet Space, 53, 13-21.

- Hatanaka, Y., M. Sawada, A. Horita, M. Kusaka, J. M. Johnson, and C. Rocken (2001b): Calibration of antenna-radome and monument-multipath effect of GEONET-Part 2:Evaluation of the phase map by GEONET data, Earth Planet Space, 53, 23-30.
- Mader, G.:GPS antenna calibration at the National Geodetic Survey, <http://www.NGS.noaa.gov/ANTCAL/> (31 July 2003).
- Rothacher, M., S. Schaer., L. Mervart, and G. Beutler (1995) : Determination of antenna phase center variations using GPS data, Paper presented at the 1995 IGS Workshop, Potsdam, Germany, May 15-17.
- Schupler, B. and T. Clark (1991): How different antennas affect the GPS observable, GPS WORLD, Nov. /Dec., 32-36.