GEONETにおけるマルチパス及びレドームの影響

Influence of Multipath and Radome on GPS Earth Observation Network (GEONET)

測地観測センター　　澤田正典・堀田暁子・日下正明
Geodetic Observation Center
Masanori SAWADA, Akiko HORITA, Masaaki KUSAKA

地理地殻活動研究センター　　畑中雄樹
Geography and Crustal Dynamics Research Center　Yuki HATANAKA

要　旨

GEONET上で行われている定常解析において，未解決の誤差要因として可能性があるピラー上面の反射によるマルチパス，およびレドームによる位相遅延の影響について調査研究を行った。調査観測の結果，マルチパスおよびレドームによる位相遅延が基線解析結果に4cm程度の影響を与えていることが明らかになった。そこで位相特性を求めるための試験観測を実施し，その結果マルチパス及びレドームによる位相遅延を位相特性として算出することができた。さらに，GEONETの定常解析ルーチンにおいてマルチパスとレドームによる位相遅延の影響を補正するために，補正量を決定するための検証方法について考察した。

1　はじめに

近年GPSの応用が向上してゆくにつれて，国内のGPS観測の基準点として大きな役割をもつGPS連続観測システム（GEONET）の定常解析に対して，精度の向上が求められるようになってきた。また電子基準点の観測データをリアルタイムで取得して高精度の測位を行うRTK技術の進展（後藤他，1998）等を背景に，連続観測局で取得している観測データに対する品質の向上についても今後のGEONETの運営に関する重要なテーマとなっている。

一方，GPS観測局において取得している観測データに含まれる誤差要因として，マルチパス及びレドームによる位相遅延といった現象が近年世界的にも注目されるようになってきた。マルチパスとは，衛星から発信された電波が直接アンテナに受信される経路以外に，ピラーなどによって反射した電波を複数の経路より受信してしまうことによって位相観測値が変化してしまう現象である(Elósegui et al., 1995)。またレドームの有無によって解析値が影響を受けることも報告されていて（Meertens et al., 1996），衛星から送られてきた電波がレドームを通過する際に位相遅延が生じるためと推測されている。GEONET観測局においてもこれらの影響が懸念されるところである。

この研究では，ピラー（GPSのアンテナを設置している架台）上面の反射によるマルチパス，およびレドーム（風雨雪よりアンテナを保護するための，電波透過性を持つ樹脂製の覆い）による位相遅延が解析値に与える影響に対象を絞ってGEONET上における影響調査を行うことに始まり，調査観測を通じて影響の大きさや性質を定量的に明らかにすることにした。さらに観測条件を実際に設置されている連続観測点とほぼ等しい形に再現して試験観測を行い，実際のGPS連続観測点に即したアンテナ位相特性を算出することにした。調査結果と，位相特性算出を目的とした試験観測の結果について報告する。GEONETの定常解析ルーチンに対してマルチパスとレドームによる位相遅延がもたらす影響について考察した。

2　GEONETの観測条件と位相特性

GEONETで用いられているピラー及びレドームは，形状や素材が異なる3種類のものがそれぞれ使用されている。それらは幾つかの例外を除き，設置年度毎に特定のものが採用されている（表－1）。ピラーは高さ5m，幅50cmの円柱もしくは角柱の構造を持っている。アンテナの取り付け部分は93，94年度型では一枚の金属板による構成になっており，95年度型のみ，2枚の金属板による二階建ての構造になっている。レドームの形状は円錐型と半球型とにわけられ，半球型はさらに素材によってFRP製とプラスティック製とに分かれる。またGPS受信機及びアンテナ機種についてもTrimble, Ashtech, Leicaの3社の製品が採用されている。これらの受信機に用いられるアンテナは機種固有の位相特性を持っているため，ピラーやレドームの種類が同じ場合においてもアンテナ機種が異なる際には，観測データがそれらによって受ける影響も異なる。

GPSアンテナにおいては，アンテナ位相特性（Antenna Phase Center Offsets and Variations）と呼ばれているそれぞれの機種に特有な性質がある。これは，アンテナがGPS衛星から送られてくる電波を受信するとき，衛星仰角に対応する位相観測値に特定のオフセットが加わってしまう性質である。この位相特性が正確に補正されていないと，異なるアンテナ機種が含まれる基

表－1　GEONETで使用されているアンテナ，レドーム，ピラーの主な組み合わせ

アンテナ	受信機	ピラー	レドーム	設置年度	電波吸収体
Permanent L1/L2	Trimble4000SSE(SSI)	93年度型	無、円錐型レドーム	93年度	無
Permanent L1/L2	Trimble4000SSE(SSI)	95年度型	ﾌﾟﾗｽﾁｯｸ半球型ﾚﾄﾞｰﾑ	95年度以降	無
AshtechGeodeticL1/L2	Ashtech Z-XII-3	94年度型	FRP半球型ﾚﾄﾞｰﾑ	94年度	無
AshtechGeodeticL1/L2	Ashtech Z-XII-3	95年度型	ﾌﾟﾗｽﾁｯｸ半球型ﾚﾄﾞｰﾑ	96年度	無
Leica AT303	Leica SR-9600	95年度型	ﾌﾟﾗｽﾁｯｸ半球型ﾚﾄﾞｰﾑ	96年度	無

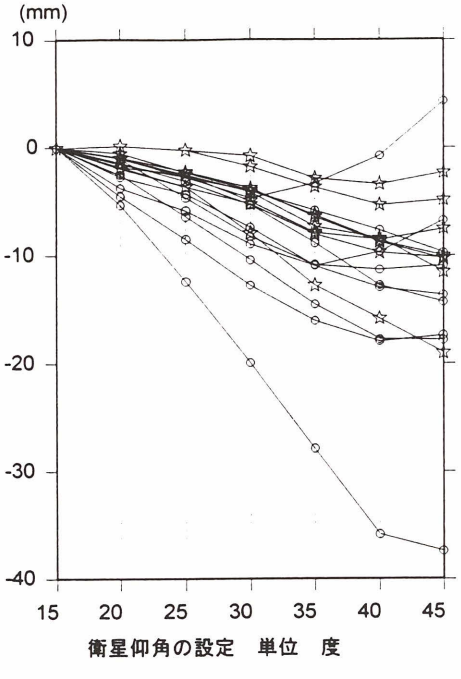
線を解析するとき誤差の要因となってしまう（越智・畑中，1996）。アンテナ位相特性は，代表的なアンテナ機種についてのみ，各衛星仰角に対するＬ１，Ｌ２それぞれの位相観測値に対応する補正量としてIGS（International GPS Service）やNOAA（National Oceanic and Atmospheric Administration）といった機関から公表されている（http://igscb.jpl.nasa.gov/, http://www.grdl.noaa.gov/GRD/GPS/Projects/ANTCAL/）。この補正量は解析計算の際，アンテナ位相特性の影響を受けた位相観測値を補正するために使用され，GEONETの定常解析において重要な役割を持っている。

3　GEONETに見られる系統誤差

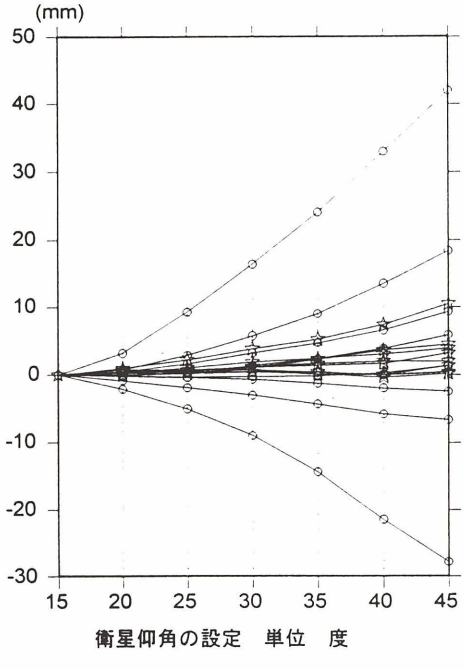
図－１は，GEONETの観測局「小田原」を一点固定して周辺の観測局に対して放射状の基線を組み，解析に使用する衛星の最低仰角を15度から45度まで変化させて基線解析した結果である。「小田原」は，93年度設置観測点であり，93年度型ピラーと円錐型レドームが使用されている。95年度設置観測点では，95年型ピラーとプラスティック半球型レドームが使用されている。

すべてのプロットは，仰角を15度としたときの解析結果を仮の基準値としている。座標解は衛星仰角の設定が変わるにつれて水平方向，高さ方向ともに変化が生じることが読み取れる。大きなものでは設定が５度変わると鉛直方向に対して５cm近くのオフセットが現れている。また鉛直方向に対するオフセットが水平方向に対するものより大きく，95年度設置観測局よりも93年度設置観測局に対して，より大きなオフセットが現れていることが読み取れる。さらに最低仰角15度から25度までの範囲を見ると，水平成分の変化が１cm以内であるのに対し，鉛直成分の変化が10cm以上にも及んでいる観測局があることがわかる。

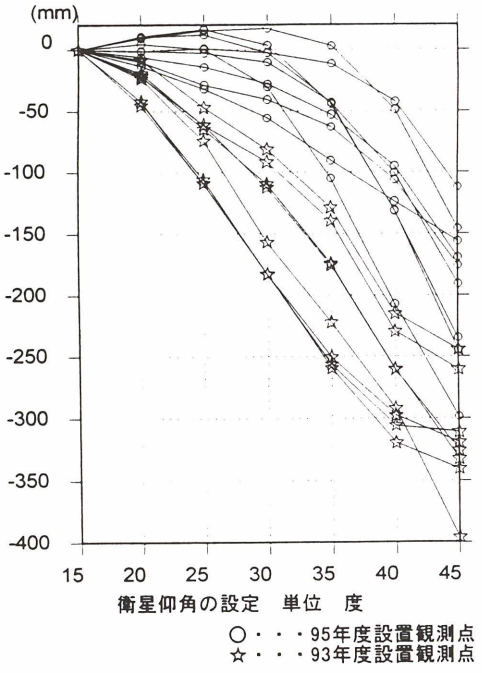
解析値がこのような変化を示す原因としては，位相観測値が衛星仰角によって異なった誤差要因を持っていて，それが補正されていないことなどが考えられる。この基線グループに含まれる観測局はいずれもPerma-



図－１ａ　解析値の東西成分差



図－１ｂ　解析値の南北成分差



図－１ｃ　解析値の上下成分差

nent L1/L２アンテナを使用しているため，アンテナ固有の位相特性については解析結果に影響していない。したがって，アンテナ位相特性がもたらす誤差要因以外に，仰角によって異なった影響を与えうる何らかの誤差要因が存在する可能性がある。GEONETの通常解析において衛星仰角の設定は１５度に定義されているが，設定値を５度ほど変化させるだけでも１～５cmのオフセットの出現を覚悟せねばならない現状は，解析座標値の信頼性に大きな疑問を投げかける。仰角を15度に設定したときの解析結果が真の座標値である保障は全くない。

図－１に見られるようなオフセットは，計算に使用されているアンテナ位相特性の補正量と，実際の観測局が抱えているマルチパス及びレドームによる位相遅延といった誤差要因を含めた位相特性との差によることが推測されるので，GEONETにおけるマルチパス及びレドームによる位相遅延に対象を限定した調査観測を実施することになった。

4　マルチパス及びレドームによる位相遅延を対象とした調査観測

GEONETにおけるマルチパス及びレドームによる位相遅延の影響を調査するため，平成９年８月から10月にかけて調査観測を行った。誤差要因を極力小さくするために，観測環境に対して幾つかの条件が求められた。電波の受信環境という点においては，周辺に電波を遮るような障害物が存在せず，かつ電波に悪影響を与えるような構造物や反射物が近辺に存在しないことが条件になる。加えて観測期間が長期間に渡るため，安定した構造を持った観測局が必要になる。また，基線長は短い方が望ましく，これにより大気に関連する誤差要因を無視することができる。これらの条件のもとで調査観測を行う場所を選定し，国土地理院構内の天文棟付近においてTSKA局とGPS端点11番を使用することにした。TSKA局はIGS補点であり，チョークリングアンテナとAOAの受信機が使用されている。チョークリングアンテナはマルチパス除去の効果があるので，この観測点を基準観測局として基線の一端に使用した。GPS端点11番は高さ1.7mほどの金属製ピラーでありアンテナ架台部分が金属板で構成されているため，マルチパスの影響調査に適している。この二つの観測点間距離は20mほどなので，これで一通りの観測条件を満たすことができると判断された。

GPS端点11番に対して表－２に述べる観測条件を作成し，それぞれの条件において24時間単位の複数日観測を実施した。アンテナ機種に関わらず，ピラー上面に電波吸収体を敷いてマルチパスの発生を物理的に消去した条件において数日の観測を行っている。加えてレドームを設置した状態と電波吸収体を取り除いた状態においても観測を行った。

解析計算はBernese ver. 4.1を用いて行った。解析に使用した位相はＬ１，Ｌ２，Ｌ３それぞれの場合に分け，さらに大気遅延量を推定した場合としない場合について別々に解析を行った。解析結果のうち，マルチパス及びレドームによる位相遅延の影響が著しく現れたものについて図－２に示す。これらはＬ３位相を用いて大気遅延量を推定して解析した場合の結果である。グラフの基準値には，チョークリングアンテナとAOAの受信機を用いて，ピラー上面に電波吸収体を敷き詰めて観測したデータをもとに，大気遅延量を推定せずに衛星仰角の設定を15度に定義した条件においてＬ１波を解析したときの座標値を用いている。これは観測データの品質が最も良好であるものをもとに，基線解として最も正確と思われる値を得られるように解析条件を設定して計算した値を基準としたためである。

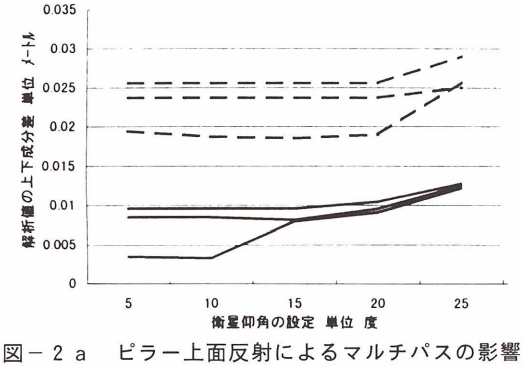
図－２ａ中で，実線が電波吸収体を敷き詰めた観測条

表－２　調査観測を行った受信機及びアンテナの組み合わせと，観測条件

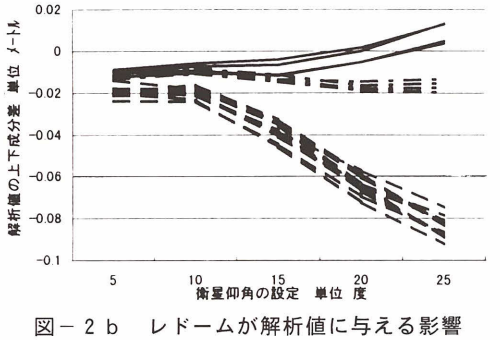
アンテナ	受信機	レドーム	電波吸収体
Dorne Margolin T	AOA SNR-8100	FRP半球型、ﾌﾟﾗｽﾁｯｸ半球型、円錐型	有、無
Permanent L1/L2	Trimble 4000SSE	ﾌﾟﾗｽﾁｯｸ半球型、円錐型	有、無
AshtechGeodeticL1/L2	Ashtech Z-XII-3	FRP半球型、ﾌﾟﾗｽﾁｯｸ半球型	有、無

件の下で行った観測データの解析結果，破線は取り除いた観測条件における解析結果である。それぞれ3日間ずつの観測を行っている。グラフより，衛星仰角の設定によって解析値が変化し，衛星仰角設定15度の付近において2cmのオフセットが現れていることが読みとれる。図－2bはレドームによる位相遅延の影響について調査した解析結果であり，破線で示されたものが円錐型レドーム，一点鎖線がプラスティック半球型レドーム，実線がレドームを取り除いた観測条件における解析結果である。電波吸収体をピラー上面に敷いた状態で観測を行ったため，グラフに現れているオフセットのほとんどはレドームによる位相遅延の影響によるものと推測される。円錐レドームが解析結果に与える影響はプラスティック半球型レドームと比べて大きいことが読みとれる。衛星仰角15度付近において，プラスティック半球型レドームの場合に生じているオフセットが1cmであるのに対し，円錐レドームでは3cmに及んでいる。

調査観測データを総合的に判断した結果，マルチパス及びレドームによる位相遅延の影響を受けた観測データの解析結果からは，基準値と比較して水平方向には2mm前後のオフセットが見られる程度であるのに対し，鉛直方向には1cm以上のオフセットが生じることがわかった。GPSでは一般に，水平方向の精度に対し鉛直方向の精度が劣るが，マルチパスとレドームによる位相遅延の影響も同様の特徴を示すことがうかがえる。また大気遅延量推定の有無によってもオフセット量が変化することが確認され，大気遅延量の推定によってオフセット量も大きくなる傾向を示した。観測条件が等しい状態で取得した複数日の観測データからは，ほぼ同じオフセットと傾きを持つ解析結果のグラフが得られたことから，誤差が系統的でありかつ再現性を持っていると考察できる。



図－2a　ピラー上面反射によるマルチパスの影響（AOA受信機）



図－2b　レドームが解析値に与える影響（Trimble受信機）

これらの結果からマルチパス及びレドームが，位相特性に影響していることが推察される。したがって，実際の観測局の条件に即した試験観測を行い，位相特性を算出することによってこれを確認する必要がある。

5　マルチパス及びレドームの位相特性算出

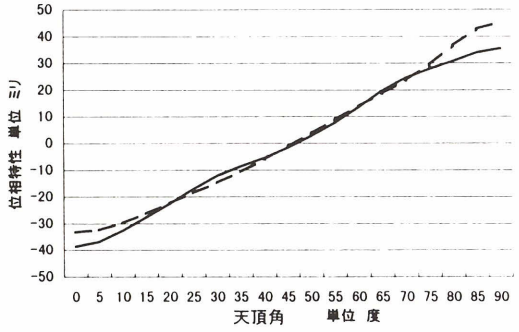
前章までで，ピラー上面からのマルチパスやレドームによる位相遅延がGPSの解析結果に大きく影響することがはっきりした。この結果を踏まえ，本章ではGEONET観測点におけるマルチパスとレドームによる位相遅延の影響を位相特性として評価するための試験観測を平成10年8月より約3ヶ月間にわたり実施した。GEONETにおける観測条件をできるだけ正確に再現するため，アンテナ架台部分のみを正確に複製した試験観測用架台を各年度型毎に作成し，GEONETで使用されているものと全く同じレドームを使用した。また，1.2mほどの高さに架台高を確保することにより，設置面からの電波反射の影響をある程度防ぐ工夫をしている。基準観測点からは安定した品質の観測データを取得する必要があるため，木製三脚を使用して1.7mの高さにTrimbleチョークリングアンテナを設置した。観測場所には国土地理院構内の宇宙測地館屋上を選んだ。試験観測として行った各観測条件を示す（表－3）。

観測作業については，マルチパスやレドームによる位相遅延の影響を対象とした試験観測を行う前に，基準観測局と試験ピラー局それぞれの正確な座標値をもとめるため，Trimbleチョークリングアンテナを使用して6日間にわたる観測を行った。この観測データによるL1位相を解析して得た座標値を座標真値と仮定し以後の計算に使用している。

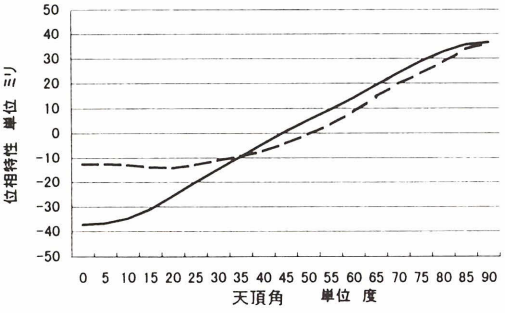
今回用いた計算法は，アンテナ単独の位相特性を求めるために用いられている手法（Rothacher et al., 1995; Mader, 1995）と同様である。この計算法は，基準局に用いられているアンテナの位相特性を仮定したうえで行われる。したがって，マルチパスとレドームによる位相遅延の影響を加味したアンテナ位相特性は，基準局アンテナの位相特性に対する相対的な数値として算出される。基準局のアンテナ位相特性はIGSやNOAAで仮定しているものと同じ位相特性を用いた。解析作業はBernese ver. 4.1を用いて行った。Berneseにはアンテナ位相特性のオフセット値と衛星仰角に対する位相特性の変化量を，観測局の正確な座標値を固定した条件にお

表－3　補正量を求めるために行った試験観測の観測条件

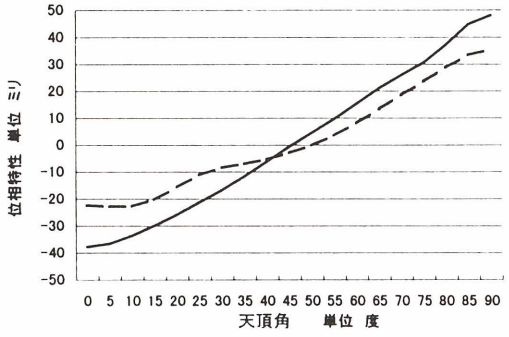
アンテナ	受信機	ピラー	レドーム	電波吸収体
Permanent L1/L2	Trimble 4000SSE	93年度型	無し	有、無
Permanent L1/L2	Trimble 4000SSE	93年度型	円錐型レドーム	有、無
Permanent L1/L2	Trimble 4000SSE	95年度型	ﾌﾟﾗｽﾁｯｸ半球型ﾚﾄﾞｰﾑ	有、無
AshtechGeodeticL1/L2	Ashtech Z-XII-3	94年度型	FRP半球型ﾚﾄﾞｰﾑ	有、無
AshtechGeodeticL1/L2	Ashtech Z-XII-3	95年度型	ﾌﾟﾗｽﾁｯｸ半球型ﾚﾄﾞｰﾑ	有、無
Leica AT303	Leica SR-9600	95年度型	ﾌﾟﾗｽﾁｯｸ半球型ﾚﾄﾞｰﾑ	有、無



図－3ａ　93年型ピラー，Trimble，円錐型レドーム，電波吸収体無



図－3ｂ　94年型ピラー，Ashtech，FRP半球型レドーム，電波吸収体無



図－3ｃ　95年型ピラー，Ashtechプラスティック半球型レドーム，電波吸収体

いて算出する計算ルーチンが含まれており，計算作業はすべてその機能を使用した。このアルゴリズムでは，衛星の方位仰角に対する位相特性を球面調和関数でモデル化し，方位・仰角方向に対して次数を設定できる。今回の計算作業においては水平方向に対して4次，仰角方向に対して9次の次数を設定して解析作業を行った。図－3に，算出された位相特性をグラフ化したものを示す。グラフは得られた各衛星仰角に対応する位相特性を全水平方向で平均した値をもとに作成している。実線がＬ１，破線がＬ２の位相特性を示している。

今回算出された位相特性は，低仰角付近においてマイナス40mm，高仰角付近においてはプラス50mmに近い数値が現れている。この値は，現在定常解析において使用しているアンテナ位相特性と比較すると，Trimble社のParmanent Ｌ１/Ｌ２アンテナの場合において最大30mm以上の差があることがわかった。また，受信機が同じでも観測条件が異なると位相特性も変化し，94年型ピラーと95年型ピラーの間でＬ２波の位相特性が最大10mmの違いを見せている。但し，今後解析条件を変えて再計算の作業を行う予定であり、最終的に決定される位相特性はここに紹介したものとは異なる可能性がある。

6　考　察

調査観測の結果，観測条件が等しい状態で取得した複数日の観測データからはほぼ同じオフセットと傾きを持つ解析結果のグラフが得られ，マルチパスとレドームによる位相遅延が解析結果に与える影響が系統的であり，かつ再現性を持っていることがわかった。また試験観測の結果より，マルチパスとレドームによる位相遅延の影響をGEONET観測点と同じ条件下で定量的に評価することができた。算出された位相特性を現在定常解析において使用しているアンテナ位相特性と比較すると，Trimble社のPermanent Ｌ１/Ｌ２アンテナの場合，最大30mm以上の差がある。マルチパスとレドームによる位相遅延の影響は，一連の調査の結果位相特性に対して大きな影響を及ぼしていることが確認されたので，現在の定常解析ルーチンにおける解析値の誤差要因として無視できないといえる。

このようなことは，一日単位で地殻変動をモニターする場合のように座標の変化だけを問題にする分野では，

問題は比較的小さいかも知れない。しかし，特に座標値の絶対値が重要な意味を持つ基準座標系の構築や，RTKのような高い時間分解能の解析手法を測量に応用する場合には大きな問題となるであろう。

今後，GEONETの解析においてマルチパスとレドームの影響を補正することが必要となろう。今回，これらの効果を含んだ位相特性を観測点のタイプ毎に求めたが，同じタイプであればいつも影響が同じかどうかはまだはっきりしていない。例えば，実際の観測局では，低仰角付近に何らかの障害物を持っているのが普通である。したがって，観測局は常に一定の方向に対して電波の死角を持っていることになるため，マルチパスとレドームによる位相遅延の影響を受ける方向も観測局により異なるという可能性も考えられる。今後，これらの補正の可能性を探るうえで，こういったことも評価してゆく必要がある。

7 おわりに

試験観測の結果算出された位相特性を元に，観測局の実際の観測条件に適合した位相特性を定常解析ルーチン上に適用するための準備として以下のような手順で精度検証を行うことを考えている。

1）GEONET内の観測局において，ピラーやレドームの条件の異なる観測局同士で基線を組む。新しい補正量を適用して基線解析を行い，衛星仰角による座標値の安定性を確認する。

2）実際の定常解析ルーチンと同じ条件で新補正量を適用した試験解析を行う。従来の計算結果に対して，どの程度のオフセットが生ずるのかを調査し，オフセットの大きな観測点に対しては別途調査を行い詳しく原因を究明する。

これら一連の検証を通じて，最終的に決定される位相特性に対する信頼性を向上させてゆくことを考えている。

参考文献

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，第85集 23-28

後藤勝広，石原 操，井上武久（1998）：電子基準点を利用したRTK-GPS実験，国土地理院時報，第83集 20-26

CMeertens, C. Alber, J. Braun, C. Rocken, B. Stephens, R. Ware: Proceedings of 1996 IGS Analisys Center Workshop Proceedings, 107-116 (1996)

M. Rothacher, S. Schaer, L. Mervart, G. Beutler:Proceedings of IGS Analisys Center Workshop (1995)

P. Elósegui, J. L. Davis, R. T. K. Jaldehag, J. M. Johansson, A. E. Niell, I. I. Shapiro: J. Geophys. Res., 100, 9921-9934 (1995)