

GPS異機種間解析における系統誤差の補正方法について

Calibration of error in solutions of baselines observed with mixed GPS receiver types

測地部 越智久巳一・畑中雄樹

Geodetic Department Kumikazu OCHI, Yuki HATANAKA

要旨

異機種間の解析での問題点を調べるため、調査実験を行った。その結果、異機種間の解析ではL1解及びL2解の水平方向は数mm以内で一致するが、鉛直方向は系統的なオフセットが生じ、特に大気遅延量を推定する際にそのオフセット量も大きく変化することが解った。原因を追求するため、シミュレーションを行い、位相中心のずれやアンテナの位相パターンの違いがオフセットを生じる重要な原因であることを確認した。オフセットは各位相の解によって異なっているが、基線長には依存せず、異機種の種類によってほぼ定量（一定時間以上の観測）で、その組合せの間には整合性がある。この特徴を利用し、試験観測からオフセット分を補正量として求めて、解析結果に補正量を加えることによるキャリブレーションが可能である。ただし、解のバラツキを小さくするためにはアンテナの位相パターン全体の特性を反映させるためにできるだけ長い観測時間を必要とする。

1. はじめに

異機種間のGPS受信機のデータ解析は、データの有効利用の面から重要な課題であった。特に国土地理院のGPS連続観測網を電子基準点として利用する場合を考えると、利用者は必ずしも基準点と同じタイプの受信機を使用するとは限らないので、異なる受信機間のデータでも十分な解析精度を得られるようにすることは、将来の電子基準点の運用を考える上できわめて重要な課題である。異機種間解析の際に特に影響が大きいと思われるアンテナの位相特性の違いについては、アンテナの位相特性を無反射室内で直接測る方法（辻・他、1992；Schupier, 1995）、およびフィールド観測データからアンテナ位相特性を求める方法（Rothacher, 1995）によって報告されている。しかし、方位や高度角に依存するアンテナ位相パターンを補正する機能は、一般に市販されているGPS解析ソフトにはない。そこで、本研究では、フィールド観測を基に、アンテナの位相特性が解析結果に与える影響について調査し、解析結果をキャリブレーションする実用的な方法を提案する。

2. 実験観測による予備調査

はじめに、異機種間のデータ解析でどのような解が実際に得られるかを、フィールドでの観測データによって調査した。実験観測は国土地理院構内の天文棟周辺で行った。50m以内の範囲に4種類のアンテナを2カ所ずつ計8カ所に設置し、同時観測を行った。サンプリング間隔は30秒で、観測時間は1994年8月1日8時UTから始まる24時間である。観測に用いた機種は表-1の通りである。

なお、Minimac2816は器械不調のため約2時間分しかデータがとれなかった。また、TurboRogue SNR 8000は解析の結果、データ不良であった。したがって、同機種での解析はTOPCON, Trimbleの24時間分、およびMinimacの2時間分のみである。

解析にはBERNENE ver. 3.4を使用した。解析に際しては、1) 同機種と異機種、2) L1解、L2解及びL3解、3) デフォルト大気モデルでの計算結果と天頂方向の大気遅延量推定した場合を比較出来るように条件を変え、6時間毎の4セッションにわけて解析した。天頂方向の大気遅延量を推定する場合は、パラメータを2

表-1 使用機種の一覧および本研究で使用したアンテナ位相中心位置

	受信機	アンテナタイプ
A	TOPCON GP-R1DY	GP-R1DY
B	Trimble SSE	Compact
C	TurboRogue SNR 8100,8000	Dorne Margorin T
D	Minimac2816AT, 2816	Minimac
	アンテナの参照点の位置	位相中心の位置
A	グランドプレーン上面 グランドプレーン上面	L1 0.000m L2 0.000m
B	プリアンプ底面 プリアンプ底面	L1 +0.063m L2 +0.063m
C	プリアンプ底面 プリアンプ底面	L1 +0.110m L2 +0.128m
D	グランドプレーン上面 グランドプレーン上面	L1 +0.0481m L2 +0.0327m

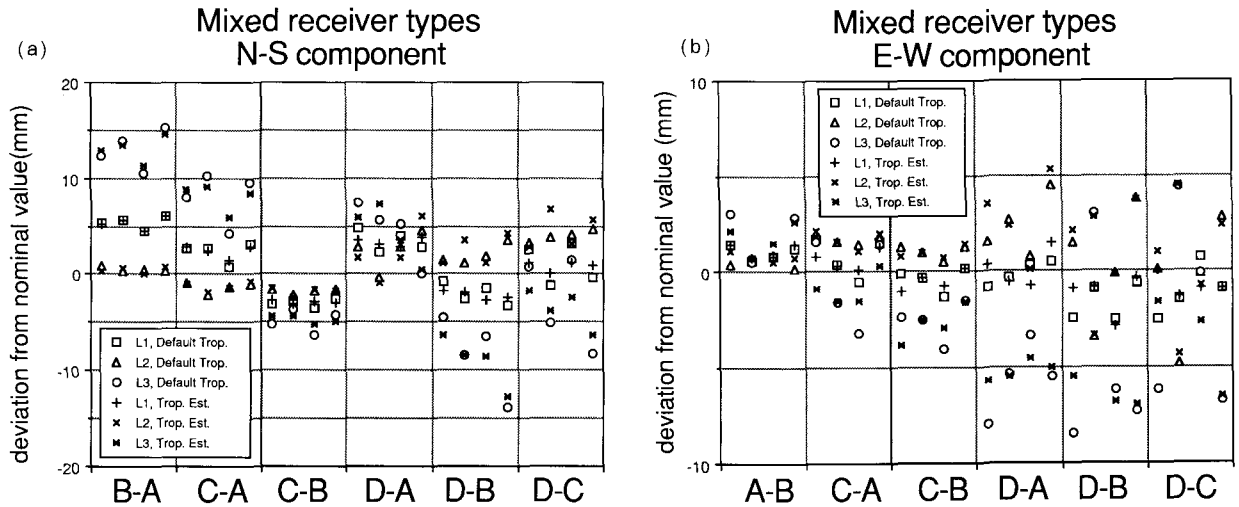


図-1 異機受信期間で解析した解の水平成分のずれ。(a) 南北成分、(b) 東西成分。

時間毎に設定した。なお、純粋に受信機の組合せによる違いを見るために、ネットワークを組まずに単基線で解析を行った。アンテナの位相中心の位置のデータは公称値またはIGS推奨値を用いたが、方位仰角によるアンテナ位相パターンは補正していない。使用したアンテナの位相中心の位置は表-1の通りである。位相中心の位置は、アンテナ参照点からの高さで示してある。

解析の結果、同じ機種同士の基線解析では、L1解とL2解はほぼ一致するが、機種によって水平方向に4~5mmの系統的なずれを生じるものがあつた。解のずれ方には異機種間での相対的な位置関係に整合性があり、L1とL2の位相中心の位置が水平方向にずれているとすれば説明できる。デフォルト大気モデルによる異機種間での解析では、L1、L2解の間に水平方向で数mm(図-1)、鉛直方向に2~3cmのオフセットを生じる組合せがあつた(図-2中、□△)。また、L3解の鉛直方向のずれはさらに大きく、5~6cmに達するものがあつた(図-2中、○)。天頂方向の大気遅延量を推定した場合の鉛直方向は、L1、L2ともデフォルト大気モデルで計算した結果に比べて数cm、大きいもので10cm以上のずれが生じた(図-2中、+×)。原因としては、アンテナの位相パターンを考慮していないために、パラメータを推定する際に、アンテナの位相パターンの相異が大気遅延量の高度角依存性を表すマッピング関数と相関を持ち、そのためアンテナの位相パターンの相異を大気遅延量と誤って解釈された可能性が考えられる。基線長は最大でも50m以内なので、現実の大気遅延量はどこでもほぼ一定、すなわち大気遅延量の差は0と考えて良い。解析によって推定された天頂方向の大気遅延量の差は、同機種間の解析では高々数mmであるのに対し、異機種間では数cmに達する。基線の両端で推定された天頂方向の遅延量の差は、解析された解のずれと明らかな相関がある。

予備調査の実験から考察すると、L1、L2解の水平

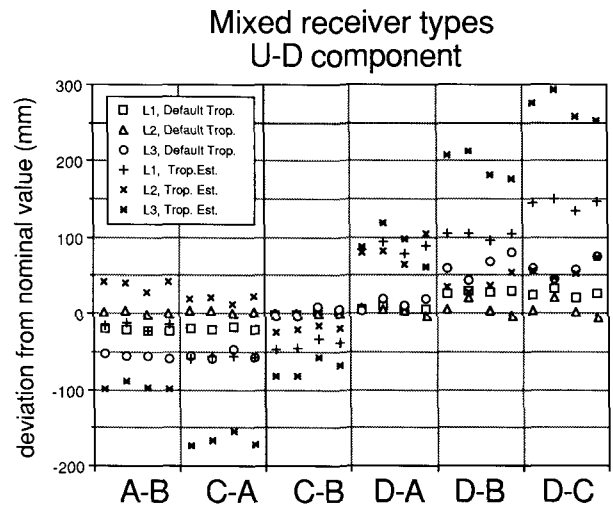


図-2 異機受信期間で解析した解の鉛直成分のずれ。

方向のずれは大きいもので5mm程度と、同機種間、異機種間でもあまり変わらなく、水平方向には機種差の影響を受けにくいと考えられる。鉛直方向のずれについては、異機種間解析ではL1解とL2解いずれも大きく、また、アンテナの位相パターンの相異が天頂方向の大気遅延量の推定に悪影響を与える。

3. シミュレーションによる調査実験

アンテナの位相特性と鉛直方向のずれの関係ををより詳細に調べるためシミュレーションを行った。

3.1 アンテナ位相中心の偏心による影響調査

シミュレーションによる調査方法は、全く同じデータ(アンテナが全く同じ位置にあり、基線長が0であることに相当する)を2つ用意して、片方のデータのL2位相中心のオフセット量を変化させて解析を行った。使用したデータは表-1中のA(Topcon)のデータである。

解析ソフトはBERNESE Ver. 3.5を使用した。解析の結果、解のずれの向きは位相中心のオフセットを変化させた方向に完全に一致し、L1解とL2解の差は変化させたオフセット量に同じだった。また、理論上から導かれた、

$$(L3 \text{ 解} - L1 \text{ 解}) = [f_2 / (f_1^2 - f_2^2)] (L1 \text{ 解} - L2 \text{ 解}) \approx 1.5 (L1 \text{ 解} - L2 \text{ 解}) \quad (\text{式-1})$$

の式とも一致し、予備調査の実験観測においてもほぼ一致している。また、変化させたオフセット量は、大気遅延量を推定した場合としない場合とに関係なく、解析結果から同量の変化を検出できた。

3.2 異なる位相パターンの特性調査

解析ソフトはBERNESE ver. 3.5を使用し、距離による依存性を見るため、基線の長さが100km, 500km, 1000kmの基線を想定し、異機種別の組合せの解析ができるよう模擬データを作成した。高度角に依存する位相パターンを持つ3種類のアンテナを想定して30秒間隔の24時間分を作成した。解析に際しては、機種別の異なるアンテナの位相特性の影響だけを見るため、大気や電離層の影響は無いものとし、データに組み込まれたアンテナの特性を補正せず、異なるアンテナの位相パターンの組合せで行った。また、ネットワークは組まずに単基線で解析した。観測時間や大気遅延量の推定による影響を調査するために、データのタイムウインドウや解析手法を変えて解析を行った。

デフォルト大気モデルによる解析では、水平方向のずれは大きいもので2mm程度であった。鉛直方向は予備実験の観測結果と同様に、数cmのずれを生じることが確認された(図-3a)。このずれはアンテナの組合せによって異なり、またL1解とL2解でも異なる。ただし、0~1000kmの範囲では、ずれの量は基線長に大きく依存しない。また、ずれの大きさには整合性があり、

同じ位相の解の中ではほぼ、

$$(A - B) + (B - C) + (C - A) = 0 \quad (\text{式-2})$$

の式が成り立つ。観測時間の長さを変化させて、ずれのバラツキを見た。較差は観測量が1時間では3cm程度、3時間では約1cmであった(図-4)。観測時間が短いと較差が大きくなるのは、データ数が少ないために解の標準偏差が大きくなることに加え、衛星の移動量が小さいために位相パターンの相異の影響が平均化されずに、一部分の特性のみが反映されるため、と考えられる。また、天頂方向の大気遅延量を推定した場合は、推定しない場合に比べてずれが大きくなり、位相の解の種類によって異なる。各位相解のずれは基線長に依存せず、アンテナの組合せによって解は変化する(図-3b)。推定された天頂方向の大気遅延量の差と鉛直方向のオフセット量には明らかな相関がある(図-5)。これは、アンテナ位相パターンの相異とマッピング関数の間に相関があるために、位相シフトがマッピング関数として解釈されたものと考えられる。また、大気遅延量を推定した場合としない場合との高さ方向の差を比較すると、推

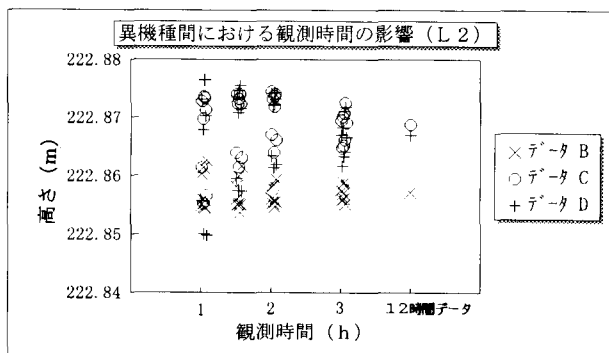


図-4 シミュレーションで観測時間を変えたときの、セッション間の高さ成分のばらつき。

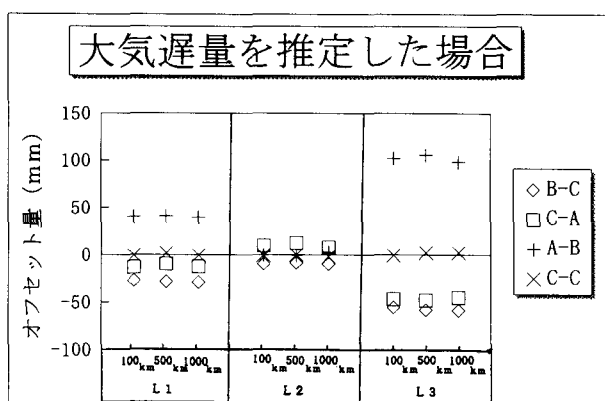
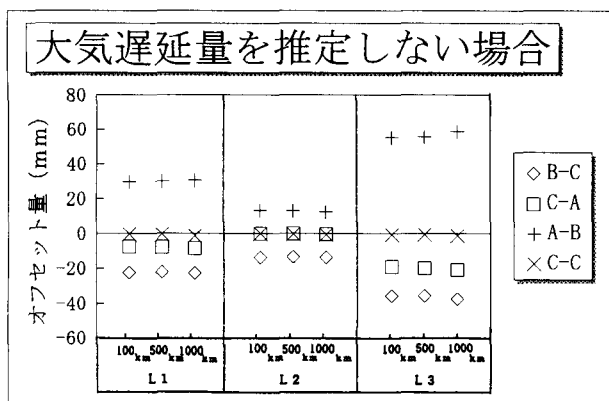


図-3 シミュレーションによる解の鉛直方向へ真値からのずれ。

(a) デフォルト大気モデルを使用した場合、(b) 大気遅延量を推定した場合。

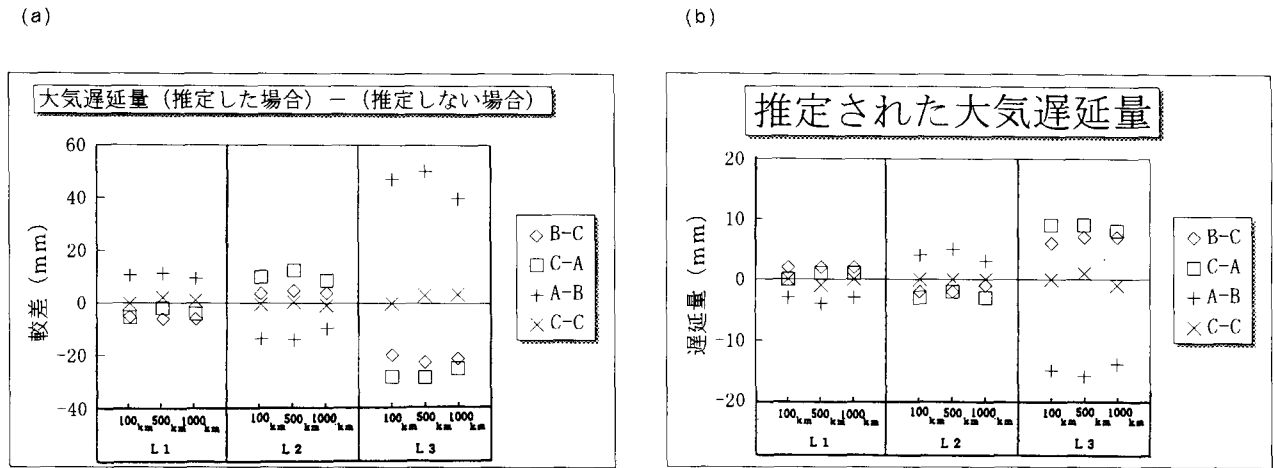


図-5 図3aと図3bの差 (a)、及びシミュレーションで推定された大気遅延量 (b)。

定された遅延量は高さ方向の差の半量以下で、逆のセンスであった。このシミュレーションによるオフセットの結果と予備実験の観測結果とは定量的には一致していない。シミュレーションで仮定した位相中心の位置や位相パターンが現実と異なっているためと思われる。

4. キャリブレーション方法の提案

学術用のGPS解析ソフトでは、機種によって異なるアンテナの位相中心の位置のずれや方位、高度角に依存する位相特性を実験等で求め解析処理の際に、補正を行うことが可能である。しかし、一般に市販されている解析ソフトではこのようなアンテナの特性を考慮して解析できないため、簡便に異機種間解析で生じるオフセットを補正する方法を提案する。これまでの調査実験からアンテナの位相パターンの相異によるずれは基線長に依存せず、組み合わせる機種および使用する位相によってほぼ決まった大きさ（一定量の観測による）があり、その間には式-2の整合性を持つという特徴がある。この特徴を利用し、異機種の解から真値を引いたものをオフセット量として、アンテナ高を補正することによってキャリブレーションを行う方法である。

5. 高さ方向のオフセット量を求める実験観測

5.1 実験観測方法

50m程度の範囲に表-1のA~Cの3種類のアンテナを1台ずつ3カ所に基準用として固定し、その他に同じ3種類のアンテナを別の3カ所の観測点に設置して3セッションの観測を行った。後者のアンテナは各観測点で3種類のアンテナのデータを取得できるようにセッション毎にアンテナをローテーションした。サンプリング間隔は30秒で1995年通算日の313, 324, 325日に各20時間程度の観測を行った。ただし、直射日光の加熱によるピラーの変形の影響を避けるため、9時UTから21時UTの日没時間帯のデータを解析に使用した。解析には

BERNESE Ver. 3.5と市販されているソフトのGPS-Survey ver. 2.00dを使用した。

5.2 BERNESE Ver. 3.5による解析

基準用に設置された点と各観測点に設置された3種類の機種間で解析を行った。基準用に設置した点とローテーションした各観測点間と同機種のアンテナによるデータで解析し、その解を基準比高として異機種間の解析結果と比較した。また、通常、市販のソフトウェアではデフォルト大気モデルで解析が行われるため、大気モデルはデフォルト値とした。

解析の結果、バイアスは整数化されRMSも小さく、ほぼ良好な解析であった。同機種間による解は、高さ方向の較差が1mm程度で、事前に行っておいた直接水準測量による比高とも1mm程度で一致している。それに対して、異機種の組合せによっては較差が6mm程度であった。オフセット量を解析の手法別およびアンテナの組合せ別にまとめた(図-6)。

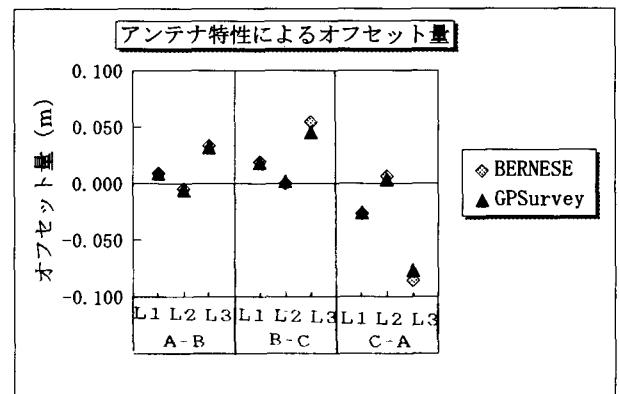


図-6 解析ソフトによるオフセット量の比較。表1の位相中心オフセット量を除いた残差。

5.3 GPSurvey ver. 2.00dによる解析

市販されているソフトのGPSurvey ver. 2.00dでは、観測データはローテーションした観測点のデータを一度RINEXフォーマットに変換してから読み込んで使用した。セッションごとで3種類の異機種組合せの解析を行った。解析ではサンプリング間隔を120秒で、9時UTから21時UTの12時間のデータを使用した。観測時間による変化を見るため、9時、12時、15時、18時UTから始まる1時間、2時間、3時間のデータを解析した。

解析結果と基準比高の間のずれを図-7に示した。電離層補正を行うことによって鉛直方向のオフセットが、L1解、L2解とも数cmシフトする(図-7)。電離層補正をしていないL1解、L2解からのずれは式-1にほぼ一致するので、電離層補正を行った場合はL3による解ではないかと考えられる。電離層補正を行った場合(L3)のC-Aのオフセットは較差が1cm程度あるが、L3位相の場合はL1とL2に比べてS/Nが小さいために大きめの較差が生じた可能性が考えられる。L2位相データの解は機種組合せに関係なく、基準比高に1cm以内で一致した。また、観測時間によるオフセットのバラツキは3時間観測データの解析結果から異機種

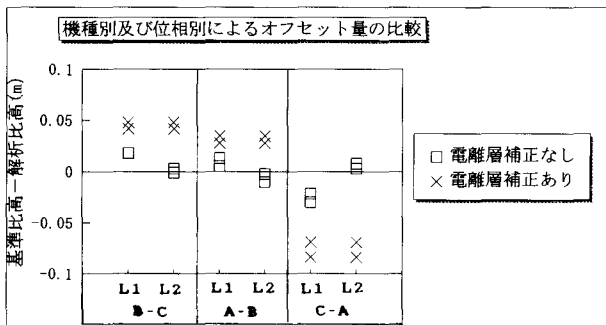


図-7 GPSurvey ver. 2.0dによって求めた高さ方向のオフセット量。

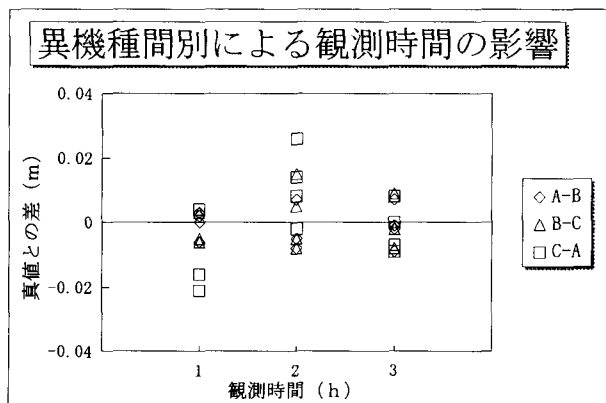


図-8 異機種間で解析した場合の、観測時間による解のばらつき(L1解)。

組合せによる場合は2cm程度であった(図-8)。このバラツキは観測時間を増すことにより、アンテナの位相パターンの影響を均一にし、さらに小さくできる。そのため精度を高めるには、観測時間を長くする必要がある。ここでは電離層補正をしないL1、L2位相の解と電離層補正を行った場合(LC位相)の解のオフセットを計算した。オフセット量は異機種組合せや位相によって異なるため、機種組合せ別および位相別に整理し、図-6にまとめた。また図-6から、BERNESEとGPSurveyの解析から求められたオフセットはほぼ1~2mm程度で一致し、ソフトウェアに依存していないことが確認できた。

5.4 求められた補正值とその利用法

表-1に示したアンテナ位相中心オフセットの公称値と図-6をもとに、各機種における高さ方向の補正量を計算し、表-2に示した。表-2中の補正量は、Aのアンテナを基準として表してあり、解析を行う基線両端点のアンテナ高に加えて補正するものである。この補正量には、各機種のアンテナ位相中心オフセット量も加味してあるので、これを使用する際には、解析ソフトでは両方のアンテナの位相中心オフセット量が同じであるとして解析を行う必要がある。ただし、アンテナ高は、表-1のアンテナの参照点の位置まで、鉛直高を測定する。なお、このオフセットは、組み合わされたアンテナの相対的な位置関係であり、アンテナの位相中心の絶対的な位置を表す値ではない点に注意する。

表-2 位相別による補正量

位相	補正量 (m)		
	A	B	C
L1	0.000	+0.054	+0.092
L2	0.000	+0.068	+0.125
L3	0.000	+0.030	+0.033

注) この補正量を基線各端点のアンテナ高に加える。

6. おわりに

本稿では、異機種間解析での系統的誤差の性質を調べ、それを補正するための簡便な方法を提案した。比較的短い基線を市販のソフトで解析するユーザーには十分に役立つものである。今回は3機種のアンテナについてオフセットを求めたが、他の機種についても実験観測と同じ方法によってオフセットを求め、キャリブレーションを行うことが可能である。目標精度ごとに観測時間を設定するには、より多くのデータを必要であり、他の市販ソフトについても比較解析を行い、ソフトウェアへの依存性を調べること重要なことである。

参 考 文 献

- 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 (1992) :
電波無反射室におけるGPS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.
- 飯村友三郎, 森下 一, 嵯峨 論 (1994) : GPSアンテナの位相特性の測定, 国土地理院時報, 第81集, 8-16.
- Rothacher, M., W. Gurtner, St. Schaer, R. Weber, D. Schneider, A. Wiget and U. Wild (1995) :
Azimuth-and Elevation-Dependent Phase Center Correction for Geodetic GPS Antennas Estimated
from Special GPS Calibration Campaigns., IUGG XXI General Assembly Abstracts, A20.
- Schupler, B. R., T. A. Clark, and R. L. Alshouse (1995) : Characterizations of GPS User Antennas :
Reanalysis and New Results., IUGG XXI General Assembly Abstracts, A20.