

レイドーム位相特性の影響について

畑中雄樹、宮崎真一、日下正明（国土地理院）

はじめに

通常 GPS データ解析のモデルでは、衛星から届く直達波の位相を GPS アンテナの位相中心と呼ばれる 1 点で観測されるものと仮定されている。しかし、現実はその単純ではなく、直達波の他に地面や障害物からの反射波（マルチパス）が混入し、さらに、アンテナ固有の位相特性のために方位や仰角に依存するバイアスを伴って観測される。アンテナ位相特性の問題は単一型のアンテナを用いれば、二重位相差を取ることによりほぼキャンセルされるが、異なるアンテナを混在させて解析すると、基線成分や大気遅延推定値に cm、時には 10cm レベルの大きな誤差をもたらす（越知・畑中、1996）。マルチパスは位相差を取ることによってはキャンセルさせることができず、また観測点周囲の環境に依存するため、モデル化が非常に難しい。さらに、最近では、アンテナ保護のためにかぶせてあるレイドーム(Ray dome)の影響（例えば、Meertens et al., 1996）や、アンテナ上の積雪の影響（Jaldehag et al., 1996）も問題になっている。

現在、国土地理院の GPS 連続観測点で使用されているレイドームには 3 種類の異なる型・材質があり、レイドームの取り付けしていない観測点もある。したがって、レイドームの及ぼす影響を評価することは必須である。本稿では、国土地理院の GPS 連続観測点で見つかった、レイドームによるものと思われる大きな誤差について報告する。

GPS 観測網解析結果に見られる衛星仰角依存性

アンテナやレイドーム、マルチパスが位相観測値に与える影響は、衛星仰角（及び方位）に依存する。このため、解析に使用する衛星の最低仰角を変えると、基線ベクトル解にバイアスを与え、特に高さ成分に大きな影響がある（Elosegui et al., 1995）。更に大気遅延を推定すると、その影響が大きく拡大される場合がある。レイドームについても、同じ原理で基線ベクトルに仰角依存性が見られる可能性がある。

図 1 は、国土地理院の GPS 連続観測点のうち、Trimble の受信機を設置してある観測点（アンテナ機種は全て同じ）のデータを使い、衛星の最低仰角を変えて解析した場合の基線ベクトル解の変化である。基線はつくば Trimble 点(92110)とその他の各観測点との間で組み、つくばを固定して L3 で大気遅延量を推定した。1997 年 1 月 5～11 日の 1 週間分のデータを日毎に解析し、その平均から求めた各点の基線ベクトル成分の変化をプロットしてある。最低仰角が大きくなるとデータ数の減少と幾何学的な効果によって推定誤差も大きくなるので、ここでは仰角 15 度から 25 度までの範囲に絞って議論する。なお、図は衛星仰角 15 度の場合を 0 としてプロットしてあるが、15 度の場合が真値である保証は全くない。

図の中で菱形のプロットは 1995 年度に設置された観測点で、半球型のプラスチック製レイドームが被せられている。十字のプロットは 1992-1993 年度に設置された観測点で、そのうちのほとんどはレイドームが無く、基準にした 92110 を含む一部の観測点に円錐型のプラスチック製レイドームが被せられている。図の中で、この 2 種類の線が明瞭に分かれ、更に注意深く見ると、ほとんど仰角依存性が見られない 2 本の線があることに気がつく。これらが、92110 と同様の円錐型レイドームが取り付けられている観測点である。つまり、同じレイドーム同士の基線では、衛星仰角依存性が非常に小さいという結果になっており、

これらの仰角依存性の大部分がレイドームに起因している疑いが濃厚である。水平成分についても仰角依存性が見られるが、その影響は大きいもので1 cm 程度である。それに対して鉛直成分は観測点によって10cm を越える仰角依存性がある。水平・鉛直成分ともに、半球型レイドームつき（丸印）の仰角依存性が大きい、これは、円錐型レイドーム付きの92110 を基準にしているためであろう。

短基線での解析結果に見られる衛星仰角依存性

前節の調査ではつくばを中心とした長さ数10～数100kmの基線を用いたが、もし大気遅延や電離層遅延の違いを無視できる短基線のデータがあれば、問題点をより詳細に調査することができる。

現在、国土地理院構内には、前節で基準に用いた92110点から約286m離れたところに、もう一点Trimble受信機の観測点(960627)がある。92110と960627は同じアンテナを用いており、アンテナピラーとレイドームの形が異なる。960627には半球型レイドームが取り付けられている。そこで、この2点のデータ1週間分(1997年6月1～7日)を次のような様々な条件で解析し、基線ベクトル成分や大気遅延推定値の解析条件による依存性を調査した。

- ・衛星仰角(15度, 20度, 25度)
- ・周波数(L1, L2, or L3; L3は電離層補正線形結合)
- ・大気遅延推定(ON/OFF)

図2は基線ベクトルの高さ成分の1週間分の時系列を、各解析条件についてプロットしたものである。基線ベクトルの真値はわからないが、全て、衛星仰角15度以上で大気遅延を推定せずに解いたL1解の平均値を基準として、それとの差をプロットしてある。その理由は、あとで述べるように、大気遅延を推定すると、本来0であるべき相対値がある大きさの値で求められてしまうこと、一般にL2, L3にくらべL1のノイズレベルが低いこと、衛星仰角を低めにとった方が高さ方向の決まりがよいこと、などによってこの解が比較的真値に近いものと予想されるからである。しかし、これが本当に真値であるという保証はないということは注意しておく。実際、最低仰角15度の場合でもL1解とL2解の間に1cmを越える差があることが図から読みとれるが、L1解の方が本物であると断言することはできない。

この図から、どの場合にも衛星仰角依存性が見られる。L1, L2に比べ、L3の衛星仰角依存性が大きく、また、大気遅延量を推定しない場合よりも推定した場合の方が、周波数や衛星仰角の依存性が大きい。L1, L2の位相観測値にそれぞれ定誤差があった場合、L3位相の定誤差は

$$[L3 \text{ 位相の定誤差}] \approx 2.5 \times [L1 \text{ 位相の定誤差}] - 1.5 \times [L2 \text{ 位相の定誤差}]$$

と表現される。これらの定誤差は解の定誤差に直接影響するので、解の定誤差に対してもこの式が比較的よく当てはまる。L1とL2の定誤差がたまたま打ち消しあう場合は別として、L3の誤差は概して大きめになりやすい。

現在の国土地理院ルーチン解析では衛星仰角15度以上のデータをL3を用いて大気遅延を推定して解いているので、この場合には、約10cmの高さ方向のバイアスが生じていることになる。もし、衛星仰角を20度、25度と上げれば、バイアスは18cmにも達する。最低仰角15度を基準にして25度までの変化を見ると、図1の菱形でプロットした点群のほぼ中心に来るので、この結果と調和的であることがわかる。

図3は各解析条件による大気遅延推定値の時系列(30分ごと、1週間分)である。2つの観測点は286mしか離れていないので、大気遅延の相対値は本来ほとんど0になるべきである。しかし、実際には解析条

件によって異なるバイアスをはいていることがわかる。バイアスの大きさは、衛星最低仰角が低いほど小さい。また、基線ベクトル解と同様に、L3 解のバイアスは L1 解と L2 解のバイアスの線形結合にほぼ等しい。現在の国土地理院のルーチン解析と同じ条件(L3/15deg/Trop ON)の場合、大気遅延推定値には約 2.5cm のバイアスが生じ、更に約 1cm に及ぶばらつきが生じている。このばらつきには約 1 日のタイムラグで自己相関が明瞭に見られ、さらに週の最初の 1 日のデータを 1 エポック (=30 分) 前にずらして最後の 1 日のデータと重ねると、パターンが見事に重なる。これは、ばらつきの原因が衛星配置に同期した誤差要因であるとする説明がつく。衛星配置は 1 恒星日の周期を持つので、1 日 4 分ずつずれば 6 日後には 24 分 (=1 エポック弱) ずれて再現されるというわけである。そのような誤差要因は、アンテナ位相特性、レイドーム、マルチパス以外には考えられない。(IGS 精密暦を使用しているため、衛星軌道情報に起因する誤差は基線ベクトル解の場合 $300\text{m} \times 0.01\text{ppm} = 0.003\text{mm}$ 程度、大気遅延量に対しても同程度以下と考えられる。) このうち、アンテナの種類は両方共通なのでアンテナ位相特性の違いはないものと仮定すると、レイドームとマルチパスが候補として残る。このデータからは、マルチパスの可能性を否定することはできない。特に、この 2 点はアンテナピラーの形状も多少異なっており、特にピラー上面によるマルチパスが影響している可能性はある。

レイドームやマルチパスなどによって位相観測値に方位仰角に依存する系統誤差が生じ、これが大気遅延のマッピング関数と相関を持つと、誤って大気遅延と解釈されてしまう。この状況を引き起こすには、大気遅延パラメータの時間間隔の間に衛星が移動する範囲内で相関があれば充分であり、時間分解能を高くするほどその影響は大きくなる。図 3 のばらつきの大きさは大気遅延の時間分解能を 30 分に設定した場合であり、ルーチン解析 (3 時間間隔) の場合には、平均効果によって大部分が相殺されているものと思われる。もちろん、時間分解能をより高くする場合には、ばらつきはより大きくなるはずである。

ここでは、基線ベクトルへの影響についてはバイアス成分のみを問題視し、ばらつきについては議論しなかったが、これは、今のところ基線ベクトルの時間分解能を 1 日として計算しているため、影響が小さいためである。実際には、基線ベクトル解のばらつきにも影響がないというわけではない。特にキネマティック解析手法などによって時間分解能を上げる場合には、解のばらつきに与える影響は大きい (Hatanaka et al., 1995)。

終わりに

国土地理院の GPS 連続観測データを用い、解析結果に見られる衛星仰角依存性を皮切りに、主にレイドームの影響 (マルチパスの影響が混在している可能性もある) と見られる大きな誤差が存在することを示した。これは、基線ベクトル解に 10cm レベルの大きなバイアスをもたらすだけでなく、GPS 気象学にとって重要な観測量である大気遅延推定値にも cm レベルのバイアス及びばらつきをもたらす。今後の GPS 連続観測網の運用および応用を考えると、そのキャリブレーションは必須である。

参考文献

Elosegui, P., J. L. Davis, R. T. K. Jaldehag, J. M. Johansson, A. E. Neill, and I. I. Shapiro (1995), Geodesy using the Global Positioning System: The effect of signal scattering on estimates of site position, *J. Geophys. Res.*, 100, 9921-9934.

Hatanaka Y., H. Tsuji, Y. Iimura, K. Kobayashi, H. Morishita (1995), Application of GPS kinematic method for

detection of crustal movements with high temporal resolution, in "GPS trends in Precise Terrestrial, Airborne, and Spaceborne Applications", International Association of Geodesy Symposium No.115, 105-109.

Jaldehyag, R. T. K., J. M. Johansson, J. L. Davis, P. Elosegui (1996), Geodesy using Swedish permanent GPS network: Effect of snow accumulation on estimates of site positions., Geophys. Res. Letters, 23, 1601-1604.

Meertens, C., C. Alber, J. Braun, C. Rocken, B. Stephens, R. Ware, M. Exner, P. Kolesnikoff (1996), Field and Anechoic Chamber tests of GPS antennas, 1996 Analysis Center Workshop Proceedings, IGS Central Bureau, 107-116.

越知久巳・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.

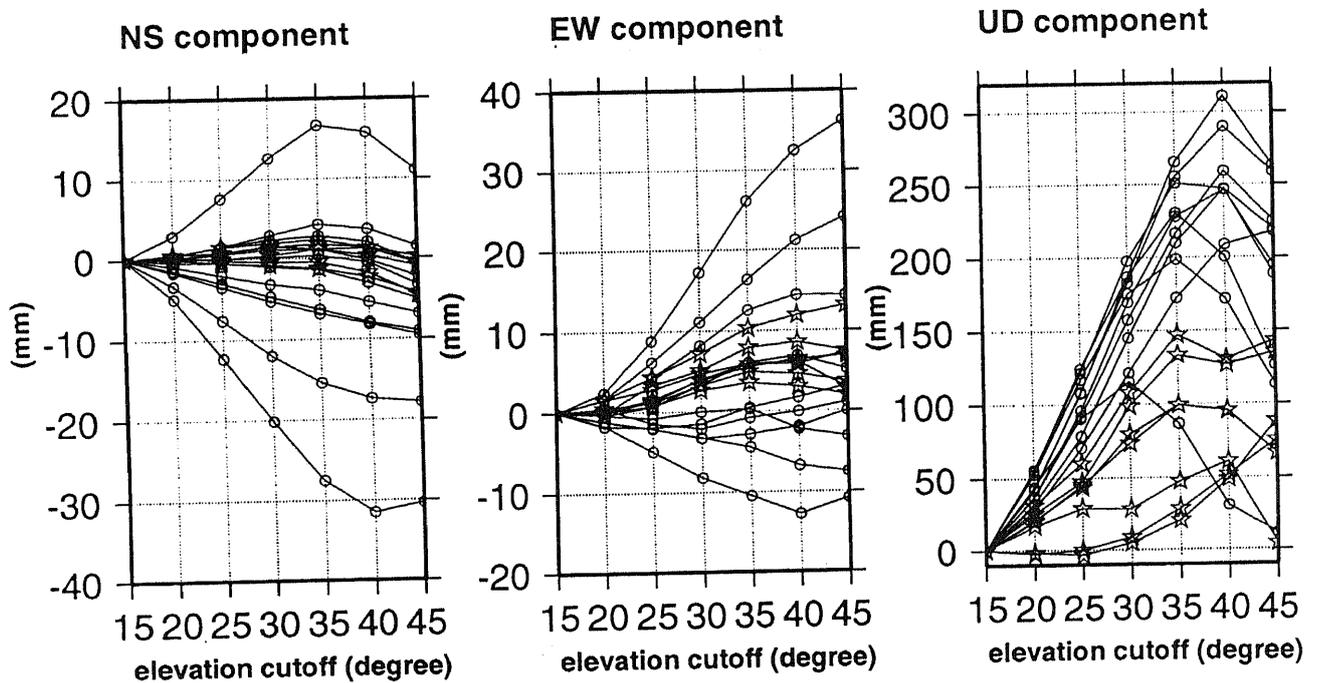


図1. 国土地理院のGPS観測網データによる、基線ベクトル成分の衛星仰角依存性。円錐型レイドーム付きの92110と各観測点の間で基線を組み、L3で大気遅延量を推定して解析した。プロットは仰角15度を基準にしてある。○は1995年度に設置された半球型レイドーム付きの観測点、◇は1992-1993年度に設置した観測点（一部円錐型レイドーム付き）と92110との基線である。

WITHOUT Troposphere Estimation

WITH Troposphere Estimation

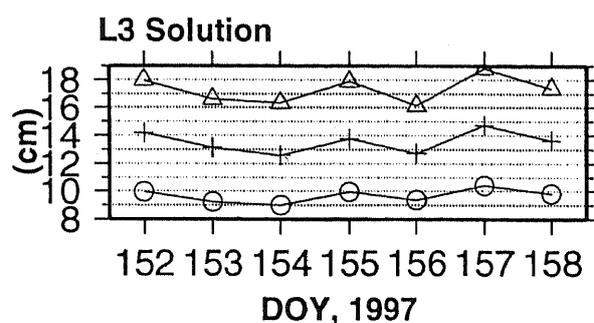
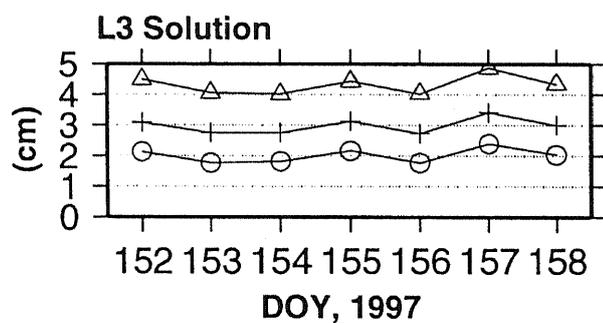
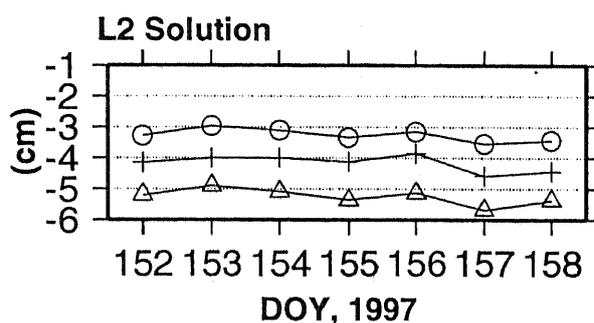
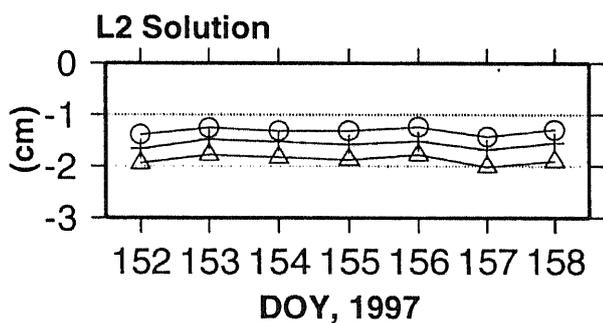
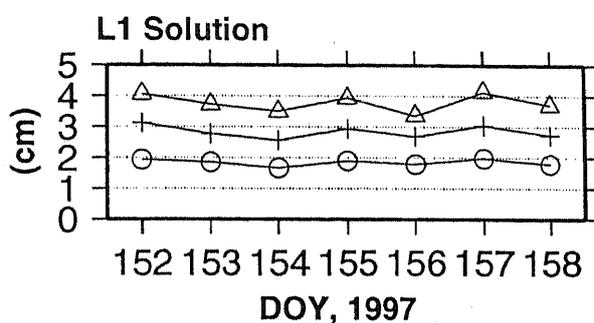
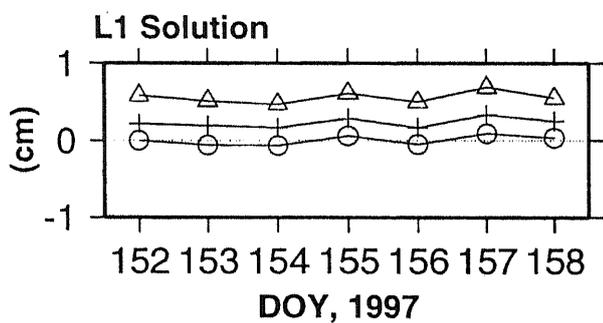


図2. 92110 に対する 960627 の基線解の、解析条件による変化。各プロットの衛星仰角は、それぞれ 15 度 (○)、20 度 (+)、25 度 (△) である。

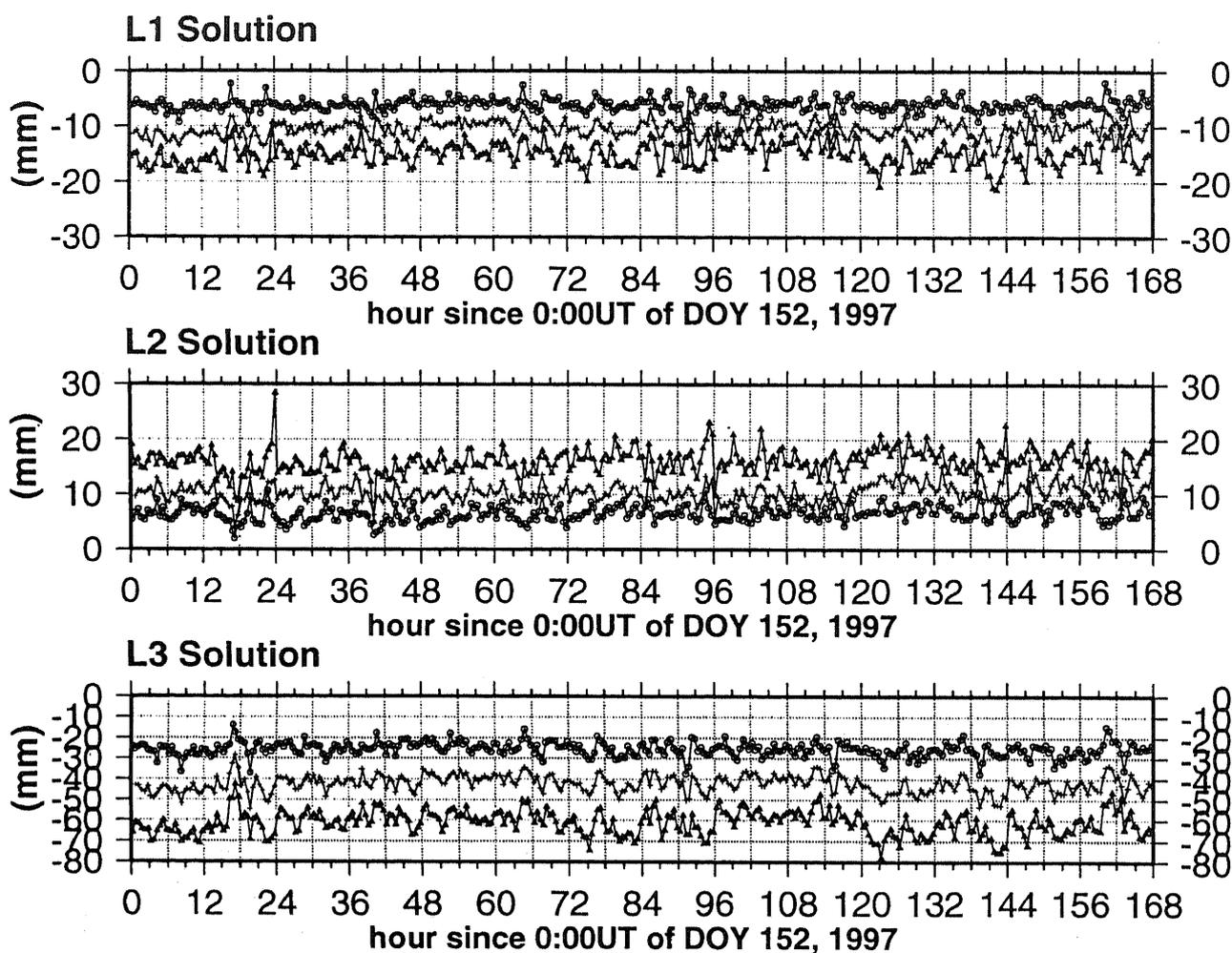


図3. 92110 に対する 960627 の大気遅延推定値の時系列。バイアスは周波数や衛星仰角に依存している。各プロットの衛星仰角は、それぞれ 15 度 (○)、20 度 (+)、25 度 (△) である。