

関東・東海固定点GPS観測網による
対流圏電波伝搬遅延量の推定(1)

藤縄幸雄*・島田誠一**・岸井徳雄***・
関口渉次⁺・江口孝雄⁺⁺・岡田義光⁺⁺⁺

国立防災科学技術センター

**Estimation of Tropospheric Path Delays using the Fixed-Point
Simultaneous Baseline GPS Determination Network of NRCDP (1)**

by

**Yukio Fujinawa, Seiichi Shimada, Tokuo Kishii,
Shoji Sekiguchi, Takao Eguchi and Yoshimitsu Okada**

National Research Center for Disaster Prevention

Abstract

Geodetic baseline measurements using the fixed-point GPS baseline determination network have been undertaken in the Kanto-Tokai district, central Japan. Various ways of estimation of the wet term tropospheric path delays were evaluated.

Surface and vertical profile meteorological measurements were used to estimate the wet term tropospheric path delay. These values were compared with the analytically estimated wet term tropospheric delays at zenith. It was noted that the analytically estimated values are the most deviated among the values evaluated. This seems to be caused by the present unfavorable satellite constellation over Japan, insufficient accuracy of satellite orbit parameters and an inaccurate reference frame that has been adopted.

Key words : GPS, path delay, troposphere, accuracy

キーワード : GPS, 遅延量, 対流圏, 測位精度

1. はじめに

GPS受信機を用いた地殻変動の観測で、 10^{-7} 以上の高精度の達成の為に考慮すべき項目一つに、マイクロ波の電離層および対流圏における電波伝搬媒質遅延(Excess Path Delay, EPD)がある。電離層における遅延の方は、L1, L2の2周波を受信することにより、マイクロ波の分散特性を使って、十分な精度で補正できるとされている(例えば、日本測地学会、

*流動研究官, **第2研究部地殻力学研究室, ***第1研究部風水害防災研究室,

⁺第2研究部地震活動研究室, ⁺⁺第2研究部主任研究官, ⁺⁺⁺第2研究部主任研究官(地震予知総括)

1986, P153). 対流圏における遅延は, 乾燥大気による成分と, 大気中の水蒸気による成分に, 更に分けられる. 前者のdry termの天頂方向の値 ΔL_d (cm)は, P_1 を地表における大気圧(hPa), λ を緯度, h を高度(km)としてHopfield(1969)の経験式,

$$\Delta L_d = 0.2276P_1 \quad (1)$$

あるいは, Saastamoinen(1972)の経験式

$$\Delta L_d = 0.2277P_1/F(\lambda, h), \quad (2)$$

$$F(\lambda, h) = 1 - 0.00266\cos(2\lambda) - 0.00028h \quad (3)$$

により, mmの桁の精度まで推定できることが田中(1985)らの研究で示されている. ジオイド面上において約230cmの大きさとなるdry term ΔL_d の推定には, これ等の式で十分である. これに対して, wet termの天頂方向の値 ΔL_w (cm)についても, e_1 を地表における水蒸気圧(hPa), T_1 を地表温度(K)として, Saastamoinen(1972)は経験式,

$$\Delta L_w = 0.2277e_1(0.05 + 1255/T_1)/F(\lambda, h)$$

を提案しているが, 温度・湿度の対流圏における平均的な構造を仮定したものであり, これ等の高度分布が変動に富む為に, dry termに比べて高い精度で求めることが難しい. この為, ΔL_w を推定・測定する幾つかの方法が提案され, 又観測データとの比較がされている(例えば, 日本測地学会, 1986, P159). その中では, 水蒸気ラジオメーター(Water Vapor Radiometer; WVR)による直接測定が今後広く行われるであろうが, その為には, 信頼性が高く安価で取り扱いの簡便な計測器の開発が前提となる.

最近Tralli *et al.*, (1988)は, GPS測位精度とwet termの取り扱いの方法との関係について詳細な報告をし,

- 1) 地上気象データを用い, (2)式と類似のChao(1973)の経験式と, wet termの任意の天頂角方向での値を求めるためのMapping function(投影関数)として, Lanyi(1984)の提案した式を使って推測する方法,
- 2) 水蒸気ラジオメーターによる直接測定,
- 3) GPSデータ解析ソフトウェアによる推定,

の3つを比較した. 更に, 彼等は ΔL_w を一定とする場合と, 確率モデルに従って変動するとした場合の検討を行っている. 湿度の低い場合($\Delta L_w \leq 10$ cm)には, これ等の方法による推定値の間には, 大きな差がないものの, 大きい場合($\Delta L_w \approx 20$ cm)には, 基線長測定のrepeatability(再現度)は, 1)の地上気象データによる場合が最も悪いとしており, WVRを用いて検定を行い, 観測期間中の変動を考慮することにより, 0.01ppm(parts per million: 10^{-6})のレベルのrepeatabilityが達成されることを示した.

本稿では、当センターが関東・東海地域に設置した固定点GPS地殻変動連続観測網によるデータを用いて、 ΔL_w を推測し、それを気象庁のラジオゾンデによる高層気象観測データから算出した値などと比較した結果を述べる。

2. データと解析の方法

対象とするデータは、1988年4月6日(97DOY: Day of yearの略で1月1日からの通算日)から5月7日(128DOY)の当センターの関東・東海固定点GPS観測網(Shimada *et al.*,

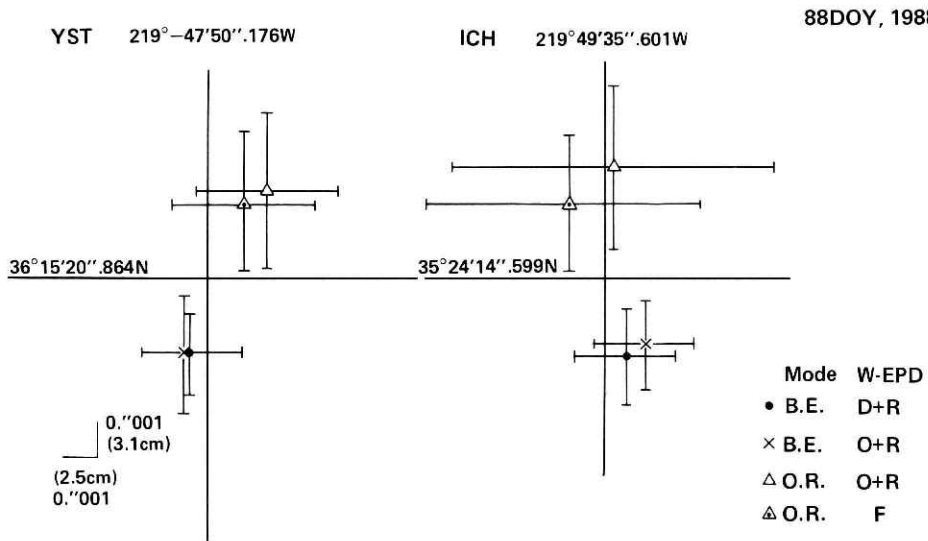


図1 計算条件による測位解の違いの例1. 計算モードは、衛星軌道パラメーターを精密暦(Aero Service社提供)に固定し、観測点の位置を求める場合(Baseline Estimation Mode: B. E.)と、解析ソフトウェアにより観測データを使って衛星軌道パラメーターを補正する場合(Orbit Relaxation Mode: O. R.)の二つ、水蒸気によるEPDの取扱いは、1)地上標準気象値による計算値に補正を施す場合(D+R)、2)初期値を与えず全量を推定する場合(O+R)、3)気象庁のラジオゾンデによるデータより求めた値に固定する場合(F)、の3種類である。

Fig. 1 An example of the dependence of GPS geodetic solution on several computational conditions. There are two types of experiments: baseline estimation mode (B. E) and orbit relaxation mode (O.R.). In the baseline estimation mode, the coordinates of stations are treated unknown with the orbital elements being held fixed, and in the orbit relaxation mode, station coordinates and orbital elements are treated unknown.

The wet tropospheric path delays are calculated by three ways. 1) Estimation of residual zenith delays starting from the value obtained using the formula of Saastamoinen (1972) with the standard atmospheric model (pressure $P_0 = 1013.25$ mb, temperature $T = 20.0^\circ\text{C}$, relative humidity $h = 50\%$): (D + R). 2) Evaluation of total zenith delay without any prior calibration: (O + R). 3) Adoption of a fixed value estimated using the radio sonde data of Japan Meteorological Agency (JMA): (F).

1989)の各点において取得された地上気象データ(気圧P, 気温T, 相対湿度e), 気象庁のラジオゾンデによる高層気象観測データ, 測位解析ソフトウェアによる推定値, の3種類である。米国Aero Service社の測位解析ソフトウェア“SONAP”では, ΔL_w を初期値なしに推定する方法と, 初期値に対する補正値を求める方法とがある。

ラジオゾンデによる気象要素P, T, eの鉛直分布の特異点(significant level)における値P, T, eから, 飽和水蒸気圧を与える経験式を使って, その層での空気の屈折率nが求まる。具体時な方法は, 田中(1985)によった。ラジオゾンデによる観測では, 湿度データの得られる高度の上限は, 日によって変るが, 約10kmであり, 水蒸気による項 ΔL_w の計算にはこの高度までのデータが考慮できる。一方, dry term ΔL_d の場合には, 気圧, 気温のデータの得られる約27kmが上限である。

3. パラメーター等の設定

当センターで使用している解析ソフトウェアでは, データ処理の過程で幾つかの選択肢がある。全部で20余りにもなるが, 主要なものは, 1)計算モード, 2)遅延量計算モデル, 3)解の推定精度である。これ等の選択肢を, 今後の試験・評価により最適なものとして行く必要があるが, ここではEPDの推定に関して, 幾つかの検討結果を述べる。

図1は, 計算モードの違いと, 得られた測位解との関係を例示するものである。1988年の第88日に行った観測において, 国土地理院の筑波VLBI点を固定点として, 解を求めたもので, 八郷(YST)と市原(ICH)の位置が示してある(各観測点の位置は, Shimada *et al.*, 1989を参照のこと)。計算は,

- 1) Baseline Estimation mode (B. E., 衛星軌道を固定する)
- 2) Orbit Relaxation mode (O. R., 衛星軌道のパラメーターの補正値を求める)

の2つの場合について, 又wet termの取り扱いは,

- 1) 地表標準気象値($P_0=1013.25\text{mb}$, $T_0=20.0^\circ\text{C}$, 相対湿度50%)を用いる場合(D),
- 2) 輪島における高層気象データより算出した値に固定する場合(F),
- 3) 解析ソフトウェアで初期値なしに推定する場合(O)

の3種類である。なお(+R)は, 解析ソフトウェアで補正値を推定したこと(Relaxation)を示す。又Mapping functionとしては, Davis *et al.* (1985)による水蒸気圧, 気温, 気圧の地表値 e_1 , T_1 , P_1 に依存する定数を使ったCFA-2.2モデルを使っている。なお, 場合2), 3)においては, dry termは測定点における地表気圧値により推定している。この図より, 計算モードにより計算誤差(求められた座標値の標準偏差, 図中の点に付けた線分の長さで大きさを示す)より大きい有意な差が生ずることがわかる。図には水平方向の座標値のみを示したが, 上下方向の場合は, 解の誤差はその2~3倍となる。又, その差は, 固定点とした筑波

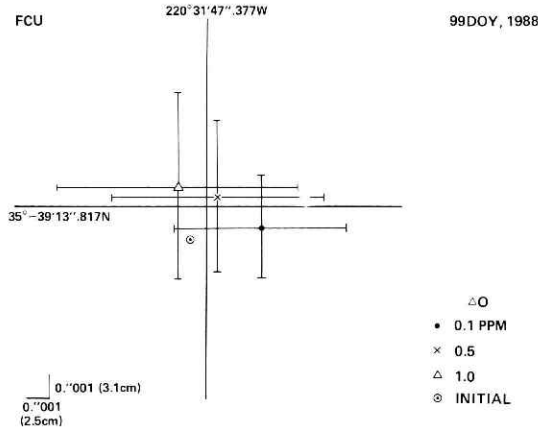


図2 計算条件の違いによる測定解の違いの例2. 衛星軌道パラメーターの不確かさの度合い(ΔO)を変えた時の府中(FCU)の水平位置を初期位置(\odot 印)より出発して求めたもので、三つの場合の解は誤差の範囲で一致している。

Fig. 2 Another example of the dependence of GPS geodetic solution on computational conditions. Coordinates of FCU are shown for three choices of assumed accuracy of the orbit parameters (ΔO) starting from the initial positions shown by the symbol (\odot). Three solutions are coincident in the range of estimation error shown by the cross through data point.

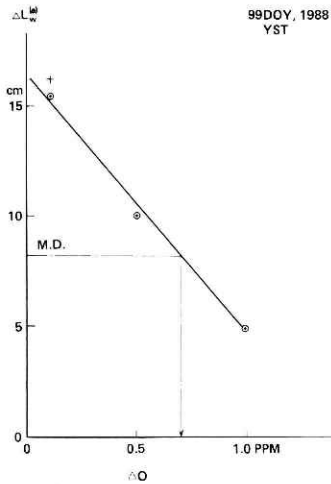


図3 解析ソフトウェアによるwet term EPD値 $\Delta L_w^{(e)}$ の推定値と、設定軌道精度 ΔO との関係。 ΔO が0.1~1ppmの範囲では、 ΔO と $\Delta L_w^{(e)}$ とは直線的な関係にある。観測点の初期座標値精度 ΔX が二通りの場合(全ての観測点について、水平方向を10cm, 上下方向を20cmとする場合 \odot)と2点以外に対しては、3方向とも100cmとする場合 $+$ について示したが、 $L_w^{(e)}$ は ΔX にはあまり依存しない。M. D. は高層気象観測によるデータより推定した値。

Fig. 3 Relation between the wet tropospheric delays at zenith $\Delta L_w^{(e)}$ estimated by the GPS simultaneous orbit and network adjustment software ("SONAP" of Aero Service Division, Western Atlas International Inc.) and the adopted accuracy of the orbital parameters ΔO . $\Delta L_w^{(e)}$ depends linearly on ΔO in the range 0.1 ~ 1 ppm under the condition of the GPS satellite constellation over Japan in April, 1988. On the other hand, the zenith delay $\Delta L_w^{(e)}$ does not depend significantly on the choice of the accuracy of the coordinates of stations (ΔX). The horizontal line "M.D." indicates the wet term excess path delays estimated on the radio sonde meteorological data.

よりの距離が大きいかほど大きくなる。但し、測位解の水平面座標値は、EPDの取り扱い方の相違には、誤差の範囲内で影響されない。このような計算モードによる解の偏りは、後に示すように衛星軌道情報の精度の悪さ(Aero Service社提供の精密歴を用いても初期座標値に対する補正値は、数10mに達する)と、観測点の幾つかをVLBI等によって十分な精度で位置の決定された固定点として取り扱えないことの為である。今後これ等の問題点及び衛星配置等の改善により、ここに例示した解の偏りは大幅に減少するものと期待される。

今一つの主要な選択肢は軌道情報の精度であるが、現在ではよくわからないので、図2には、軌道精度(ΔO)が0.1ppm, 0.5ppm, 1ppmとした3つの場合についての測位解を示している(0.1ppm: "・"印, 0.5ppm: "×"印, 1ppm: "△"印)。計算の条件は、Aero Service社より提供された精密軌道パラメーターに対する補正を行うモード(O.R.)とし、遅延量のwet termは初期値なしに推定するものとし、市原(ICH)を固定とするものである。図には1988年の第99日の府中(FCU)の位置を示している。この図より、各解は誤差(図中のデータを中心として上下・左右に延ばした線分で示す)の範囲内で一致しており、かつ初期座標値(⊙印)からも近い解となっている。

一方で、解析ソフトウェアにより推定して得られたEPDのwet term $\Delta L_w^{(e)}$ は、図3に示す如く、横軸の設定軌道精度 ΔO と、少なくとも0.1~1ppmの範囲では、1次比例の関係がある(解析ソフトウェアではEPD全体の補正値を推定するが、dry termは経験式(2)で十分良く求められていると仮定する)。本来独立であるはずのこれ等二つの量が何故線形関係を有するのか、提供されたソフトウェアであるため、現在は不明である。図3には、高層気象観測のデータより推定したwet termの"真"の値(M. D.)も示しており、この値を与える軌道精度 ΔO は0.7ppmとなる。しかし、次に示すように、現在のところ、wet termの推定値 ΔL_w が、真の値から大きくずれているので、今回は、再計算を行わず、 $\Delta O = 0.1\text{ppm}$ と固定する。

又、初期座標値の精度も一つを選択肢となっているが、図3に示すように全ての初期座標値の精度を、水平位置 ΔX について0.1m, 高さ Δh について0.2mとした場合(⊙印)と、大部分を $\Delta X = 1\text{m}$, $\Delta h = 1\text{m}$ とした場合(+印)では、 $\Delta L_w^{(e)}$ の大きさに殆んど相違がなく、又測位解についても同様である。

4. 解析ソフトウェアによるwet term EPD ($\Delta L_w^{(e)}$)の推定値

高層気象観測点は、当センターのGPS観測網周辺では、潮の岬、輪島、浜松、仙台にある。GPS受信機を設置した位置にはないので、上記内の内の三点(潮の岬、輪島、仙台)での毎日8時半における高層気象観測データから求めたwet term $\Delta L_w^{(m)}$ を比較した所、輪島と仙台では良い相関を示し、数cmの精度で大部分の日について一致した。但し、潮の岬は他の点とはやや異なる動きを示した。仙台と輪島の高い相関は、解析期間の天候が安定していたこと、

全体として $\Delta L_w^{(m)}$ の大きさが3~20cmに分布するものの、殆んどの日で10cm以下であった為と考えられる。このような状況では、我々の観測網上空における ΔL_w を輪島と仙台における値の平均値としても大きな誤差がないことがわかった。より高精度な推算には、田中(1985)の試みたように複数点における観測値の一次結合を使うこともよいであろう。図4には、輪島での気象庁による高層気象観測データによる値 $\Delta L_w^{(m)}$ (▲印)、同観測の地表面近く(高さ14m)での気象データより、(2)式を使って求めた $\Delta L_w^{(s)}$ (+印)、当センターのGPS観測網の

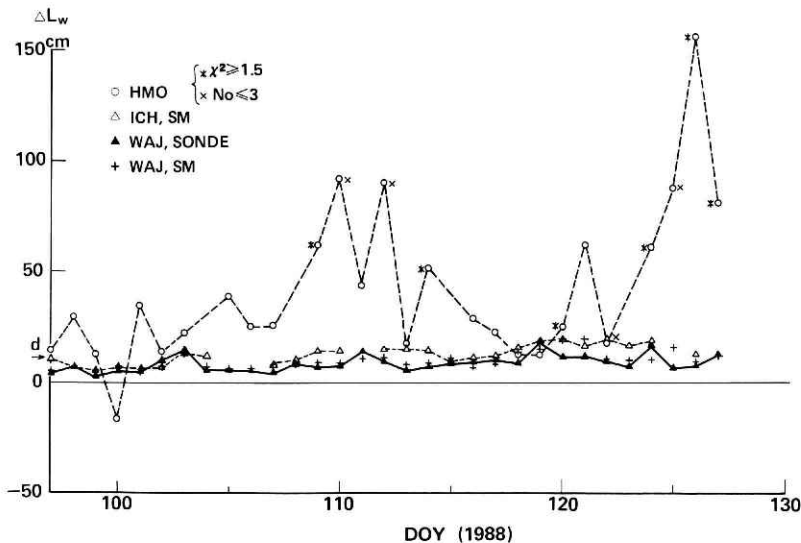


図4 種々の方法により求めた1988年97DOYから128DOYの期間のwet term EPD (ΔL_w)。○印は、解析ソフトウェアにより推定した浜岡(HMO)における値で、位相データ取得中(約2時間半)一定と仮定して求めたもの。データの点に付けた*印は正規化した χ^2 値が1.5より大きく、最小二乗解において系統誤差が大きいことを示唆し、×印は、データの取得された点が3点と通常の半分以下であることを示す。△印は地上気象観測データよりSaastamoinen(1972)の式を使って算出した市原(ICH)における値 $\Delta L_w^{(s)}$ 、▲印は気象庁高層気象観測データより田中(1985)の方法で求めた輪島の値 $\Delta L_w^{(m)}$ を示す。+印は高層気象観測のデータの最下層(14m)における気象データを使って求めた値 $\Delta L_w^{(s)}$ 。

Fig. 4 Wet tropospheric path delays at zenith ΔL_w estimated by several methods during the period between DOY 97 and DOY 128, 1988. The value at HMO(○) was obtained by the GPS data analysis software assuming constant during a tracking session lasting about 2.5 hr. Data attached by a symbol (*) have normalized χ^2 -value large than 1.5 suggesting a large systematic error and those attached by a symbol (x) correspond to observations which obtained data only at three stations, the number being nearly half compared with other ordinary observations. Also are shown the wet term zenith delay $\Delta L_w^{(s)}$ (△) based on surface meteorological data at ICH using the formula of Saastamoinen (1972), the delay $\Delta L_w^{(m)}$ (▲) based on the radio sonde data of JMA at Wajima, north of the NRCDP network, using the algorithm of Tanaka (1985), and the delay $\Delta L_w^{(s)}$ (+) on the near surface (h=14m) meteorological data at Wajima using the formula of Saastamoinen (1972).

市原(ICH)における地上気象データより求めた $\Delta L_w^{(s)}$ (Δ 印)を、解析ソフトウェアにより推算して得た値 $\Delta L_w^{(e)}$ の浜岡(HMO)におけるもの(\circ 印)と共にプロットしてある。この図から、以下のことがわかる。

1) 解析ソフトウェアによる測定値 $\Delta L_w^{(e)}$ は、 $-10 \sim +150 \text{cm}$ に求まり、ラジオゾンデのデータより求めた値 $\Delta L_w^{(m)}$ に比べて、相当地に大きく、両者の差 $|\Delta L_w^{(e)} - \Delta L_w^{(m)}|$ は、 $\Delta L_w^{(e)} \leq 30 \text{cm}$ では、 $(\Delta L_w^{(e)} - 5 \text{cm})$ 程度、 $\Delta L_w^{(e)} \geq 50 \text{cm}$ では、 $20 \sim 30 \text{cm}$ となる。負の値となる日も一日ある。 $\Delta L_w^{(e)}$ が極端に大きく求まった($\geq 50 \text{cm}$)日について調べて見ると、最小二乗法により解の正規化 χ^2 値が平均的な値(≈ 1.35)より有意に大きい($\chi^2 \geq 1.5$ 、図4中に“*”印で示す)ことや、観測データの得られた地点の数が3点と少なかったり(図中に“x”印)することが大部分の原因であることがわかる。

2) $\Delta L_w^{(e)}$ の変化には、実測値 $\Delta L_w^{(m)}$ のそれと殆んど相関がない。但し図には示さなかったが他の点における $\Delta L_w^{(e)}$ と比較したところ、 $\Delta L_w^{(e)}$ の各点における日変化の相関は高い。

3) 高層気象観測データに基づく遅延量 $\Delta L_w^{(m)}$ と地表気象データに基づく遅延量推定値 $\Delta L_w^{(s)}$ は、 $\Delta L_w^{(e)}$ に比べて、田中(1985)が述べている如く、相互に高い相関を示し、大きさの差も小さい。但し当センターの気象観測データによる値 $\Delta L_w^{(s)}$ は、他の2つの方法によるものに比べて、偏りが大きいのが、これは、地上気象要素観測の条件例えば風通し等が基準を満たしていない為であろう。又縦軸に地表標気象値の場合の値(d印)も示しているが、 $\Delta L_w^{(e)}$ に

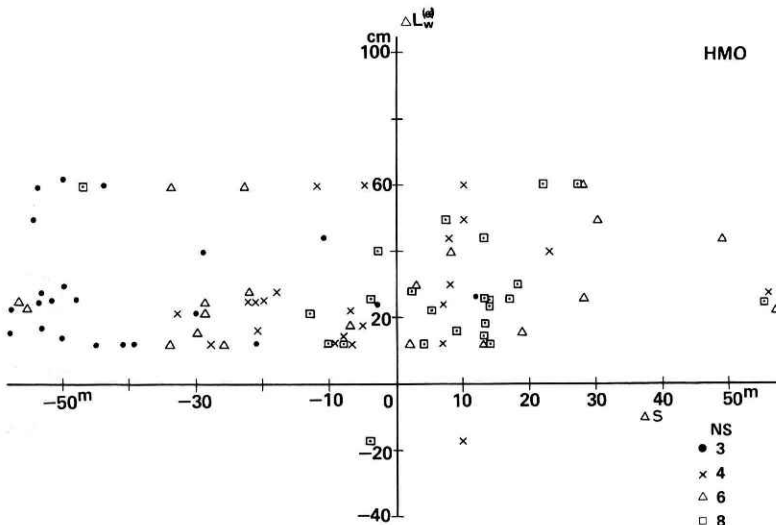


図5 浜岡(HMO)における $\Delta L_w^{(e)}$ と4つの衛星(NS=3, 4, 6, 8)の軌道補正量 ΔS との関係。殆んど相関が見られない。

Fig. 5 Wet tropospheric path delays at zenith $\Delta L_w^{(e)}$ at HMO obtained by the GPS data analysis software versus to the correction of initial coordinates of four satellites (NS=3, 4, 6, 8) ΔS , here ΔS is the value of the component of the correction vectors with maximum absolute value. There seems little relationship between these two quantities.

比べると、ずっと真の値 $\Delta L_w^{(e)}$ に近い。現在我々が入手している軌道情報の精度は2ppm前後で、あまり高精度とはいえない。このことが、 $\Delta L_w^{(e)}$ の精度の悪さの一つの大きな原因であると思われる。軌道パラメーター補正量の代表値として衛星位置初期値に対する補正ベクトルの3つの成分の中で、絶対値の最大のものを取り ΔS する。この ΔS と浜岡における $\Delta L_w^{(e)}$ とをプロットしたのが図5であるが、相互に殆んど相関がない。図中NSは衛星番号(Navstar Number)である。 $\Delta L_w^{(e)}$ と絶対値 $|\Delta S|$ との相関も殆んどなかった。相関のないことは、 $\Delta L_w^{(e)}$ の精度の悪さの原因が、衛星軌道情報ではないことを示唆するものである。

5. 結 論

以上の解析結果を総合すると、少なくとも北西に偏った現在の衛星配置、現在の衛星軌道パラメーターの精度では、対流圏における電波伝播遅延量のwet term ΔL_w を解析ソフトウェアで推測することは、精度が悪くて、現実的でない。解析にある程度の遅れが許容される場合には、気象条件を留意しながら、観測網周辺のラジオゾンデによる高層気象観測データを用いて直接算出して、内そう法でGPS受信機上空の値を算出し、測位解析に使用するのがよい。より簡便には、地上気象データを用いても十分である。解析ソフトウェアの改善の面では、最小二乗解において ΔL_w の変動幅についても、拘束条件の導入がなされることが望ましい。更に気象庁で運用・開発している数値予報モデルを使って、より合理的に内そうする方法(市川ら, 1989; 後藤ら, 1989)も有望であろう。

将来衛星の数が多くなり、更に精確な軌道情報が得られれば、0.01ppmのオーダーの測位精度を達成することが可能となろう。その際にはTralli *et al.* (1988)が提唱するように、 ΔL_w の確率変動モデルの導入、WVRによる検定の実施などが必要となり、更には地球潮汐の効果の補正さえ問題となろう(Bock, Y., 私信)。この域に達するのが当面の目標である。

参 考 文 献

- 1) Chao, C.C. (1973) : A new method to predict wet zenith range corrections from surface measurements, Tech. Rep. Calif. Inst. Technol. Jet Propul. Lab., 32-1256, XIV, 33-41.
- 2) Davis, J.L., T.A. Herring, I.I. Shapiro, A.E.E. Rogers, G. Elgered (1985) : Geodesy by radio interferometry : Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length, Radio Science, **20**, 1593-1607.
- 3) 後藤常男, 後藤幸夫, 花田英夫(1989) : 気象庁数値予報モデルによる電波伝搬遅延量補正プログラムの開発(II), 日本測地学会第71回講演会要旨集, 85.
- 4) Hopfield, H.S. (1969) : Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data, J. Geophys.R., **74**, 4487-4499.
- 5) 市川隆一, 笠原稔, 内藤勲夫(1989) : 気象庁全球客観解析データに基づく電波伝播遅延補正の試み, 日本測地学会第72回講演会要旨, 69.
- 6) Lanyi, E.G. (1984) : Tropospheric and delay effects in radio interferometry, Telecommun. Data

- Acquis. Prog. Rep. 42-78, pp. 152-159, Jet Propul. Lab., Pasadena, Calif., April-June.
- 7) Marini, J.W., C.W. Murray (1974) : Correction of radio range tracking data for atmospheric refraction at elevations above 10 degrees, (unpublished memorandum).
 - 8) 日本測地学会(1986) : GPS-人工衛星による精密測位システム-, pp263, 日本測量協会.
 - 9) Saastamoinen, J. (1972) : Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites, in The Use of Artificial Satellites for Geodesy, Geophys. Monogr. Ser., vol. 15, edited by S.W. Henriksen et al., pp.247-251, American Geophysical Union. Washington, D.C.
 - 10) Shimada, S., S. Sekiguchi, T. Eguchi, Y. Okada, and Y. Fujinawa (1989) : Preliminary results of the observation by fixed-point GPS simultaneous baseline determination network in Kanto-Tokai district. J. Geodetic Soc. Japan, **35**, 85-95.
 - 11) 田中寅夫(1985) : 大気中の水蒸気による電波屈折率の変化とGPSによる測位への影響, 測地学会誌, 第**31**巻, 305-312.
 - 12) Tralli, D.M., T.H. Dixon and S.A. Stephens (1988) : Effect of wet tropospheric path delays on estimation of geodetic baselines in the Gulf of California using the Global Positioning System, J. Geophys. Res, **93**, 6545-6557.

(1989年11月29日原稿受理)