

大気中の水蒸気によるマイクロ波の遅延と 宇宙技術利用精密測位の誤差について

田 中 寅 夫

EXCESS PATH DELAY OF MICROWAVES DUE TO WATER VAPOR IN THE TROPOSPHERE AND THE ERROR IN PRECISE POSITIONINGS WITH SPACE TECHNIQUES

By *Toraō* TANAKA

Synopsis

We have calculated excess path delays (EPD) of microwave due to water vapor in the troposphere in February and August 1982, using routine radiosonde data on the Aerological Data of Japan. EPD is about 2-3 cm above Hokkaido and northeastern Japan in February, while EPD reaches 28-33 cm on southwestern Japan and the Ryukyu Islands in August. An estimate of EPD by a linear regression model gives standard errors of residuals in February and August as 0.9 and 4 cm, respectively.

1. 序 論

GPS (Global Positioning System 汎地球測位システム) とか VLBI (Very Long Baseline Interferometry 超長基線電波干渉計) のように、数十 km から何千 km も離れた2地点間の距離を cm の桁の精度で決定できる技術が開発されてくると、単に地球上の相対位置決定のみでなく、その時間的変化も検出できることになる¹⁾。例えば、VLBI 観測の繰り返しからは大陸間の相対位置変化、すなわちプレート運動が検出されていることは周知の通りである²⁾。GPS についてはその装置の手軽さからこれまでの「測量」の分野に一大変革をもたらすものと予想されており、われわれの関心のある地殻変動の検出にも、ひいては地震予知の有力な手段として、将来大いに利用される可能性がある。これらの宇宙技術における距離の決定には、電波の伝播時間を計測することが基本になっている。従って、距離を正確に決定するためには、伝播媒質内における電波の伝播速度をその伝播経路に沿って正確に知っている必要がある。宇宙技術で利用されるマイクロ波の場合、cm の桁での測距を目的とするときに問題としなければならないのは、電離層中での電子密度の変化と、大気中における伝播速度の変化である³⁾。前者についてはその振動数にたいする依存性、すなわち分散を利用して、相異なる周波数のマイクロ波を観測することによって、たとえば多色レーザー測距のように、原理的にはその影響を補正することが可能である。現に GPS においてもこのために L1 (1575.42 MHz) と L2 (1227.6 MHz) の2周波が発信されている。

後者の、大気中における伝播速度の変化は、次節で述べるように、二つの場合に分けて考えることができる。その一つは空気の密度の変化にともなう生じる伝播速度の変化であるが、これは地表における気圧測定の結果を使って少なくとも真上の方向には mm の桁の精度で補正できると考えられる⁴⁾。これに対し、水蒸気の影響による伝播速度の変化は簡単なやりかたで補正することが難しい。これは水蒸気が大気中で一

様に分布していないことによるものである。従って、GPS や VLBI による精密測位の精度を左右するものはこの水蒸気の影響であると考えられている。このために、水蒸気による伝播速度の変化をうまく補正する方法を開発することが、これらの宇宙技術を最大限に生かすために必要である。そこで、わが国の上空で水蒸気がどのように分布し、どのように変化しているかをまず知っておかなければならないと考えた。

本論文では、わが国において水蒸気の影響が最小及び最大となる2月と8月について、その伝播速度への影響がどの程度の大きさに達するのかを計算した結果について述べ、次に、これらの結果を使って、その影響量を推定する試みをおこなった結果について述べる。

2. 冬季と夏季における Excess Path Delay (EPD)

空気のマイクロ波に対する屈折率を n とすると、 n と気温 $T(^{\circ}\text{K})$ 、気圧 $P(\text{Pa})$ および水蒸気圧 $e(\text{Pa})$ の間の関係は、

$$n-1 = (0.776 P/T + 3.73 \times 10^8 e/T^2) \times 10^{-6} \dots\dots\dots(1)$$

で与えられている⁵⁾。このうち第1項は乾燥空気の密度のみに依存する項、第2項がここで考えようとしている水蒸気による屈折率の変化項であり、それぞれ dry term および wet term と呼ばれている。(1)式を電波の通路に沿って積分した

$$\Delta L = \int (n(s)-1) ds \dots\dots\dots(2)$$

は、真空の場合にくらべて空気がある場合には電波の速度が減少するので、そのために生ずる遅れを距離によって表したいわば見かけの電波通路長の変化であり excess path delay (EPD) と呼ばれている。

さて、気象庁によって行われている定時ラジオゾンデ観測のデータは「Aerological Data of Japan」に掲載されている。その中で significant levels として与えられている各高度における相対湿度と気温から、その高度での水蒸気圧を求め、台形公式によって(2)式を積分し、天頂方向から入射してくるマイクロ波のEPDを計算した⁴⁾。ラジオゾンデは通常午前8時30分と午後8時30分に上げられているので、1カ月で約60回の観測値が与えられている。

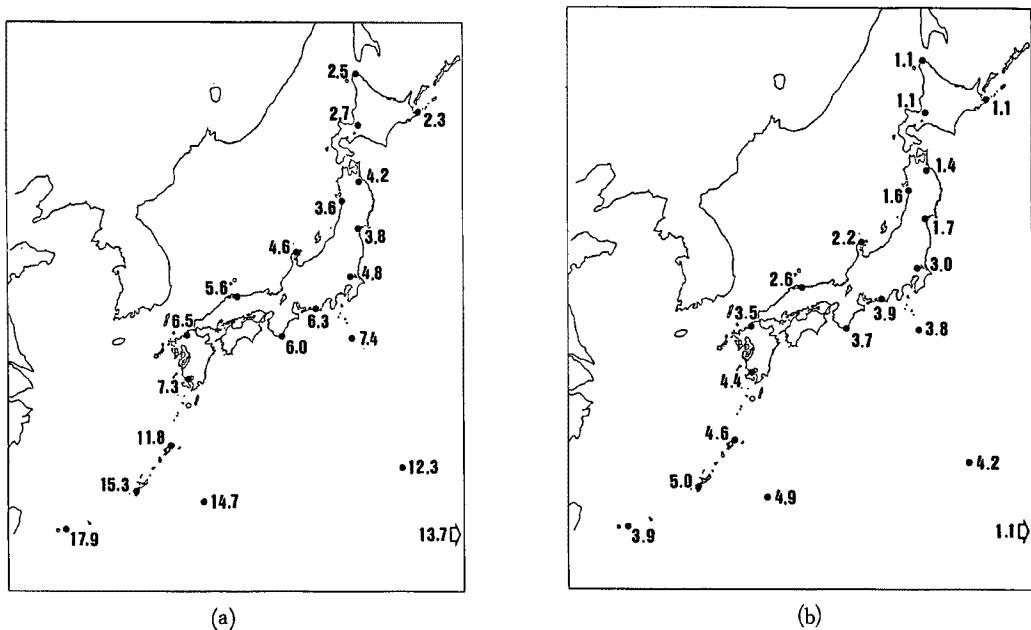


Fig. 1. Mean excess path delays (a) and standard deviations (b) from the means in February 1982 (in cm).

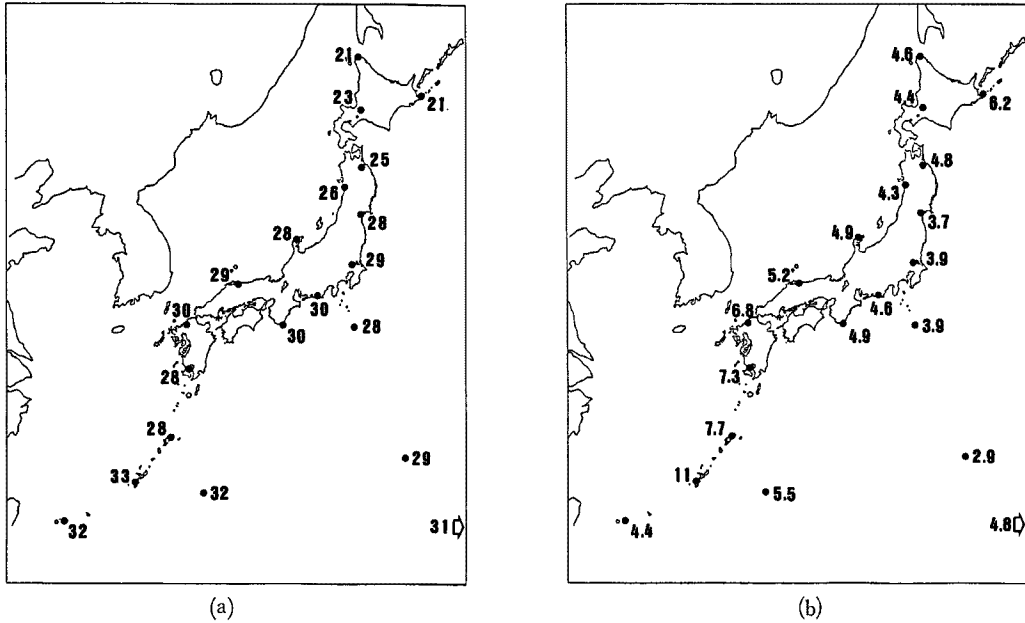


Fig. 2. Mean excess path delays (a) and standard deviations (b) from the means in August 1982 (in cm).

Fig. 1 (a) には、1982年2月の観測値から得られた EPD の平均値を、Fig. 1 (b) にはこの平均値からの標準偏差を示した。Fig. 2 (a) と 2 (b) には、同様に1982年8月の平均値と標準偏差を示した。これらの水蒸気量が最小となる2月と、最大となる8月の図を比較することによって、わが国における EPD の概略の傾向を把握することが可能である。大気中の水蒸気量は気温に大きく依存することから、寒冷地域で EPD が小さいことは当然であるが、夏季において、石垣島、父島で EPD の値自体が大きいかかわらず、標準偏差が冬の値なみに小さいことは注目値する。これがたまたま1982年だけの特別な気象状況であったのか、あるいは一般的な傾向であるのかについては今後の調査が必要である。もしそうであれば、これらの離島における夏季の宇宙技術測位の誤差が低く抑えられることを示すものであり、われわれにとっては望ましい傾向であるといえる。

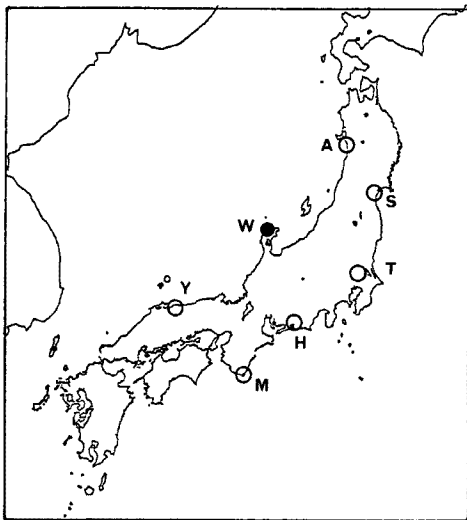


Fig. 3. Stations used for fitting of the excess path delays at Wajima(solid circle).
A: Akita, S: Sendai, T: Tateno, H: Hamamatsu, M: Shionomisaki and Y: Yonago.

3. EPD の推定に関する一つの試み

GPS による精密測位は、野外において小型の装置を使って簡便に実施できることに大きい利点がある。従って水蒸気による EPD を推定するために水蒸気ラジオメータのような装置を併用することは出来るだけ避けることが望ましい。もし前節で述べた気象庁などによる定時ラジオゾンデの観測データを使って水蒸気による EPD の補正ができればその有効性は大きい。そこで、上述のラジオゾンデのデータを利用してどの

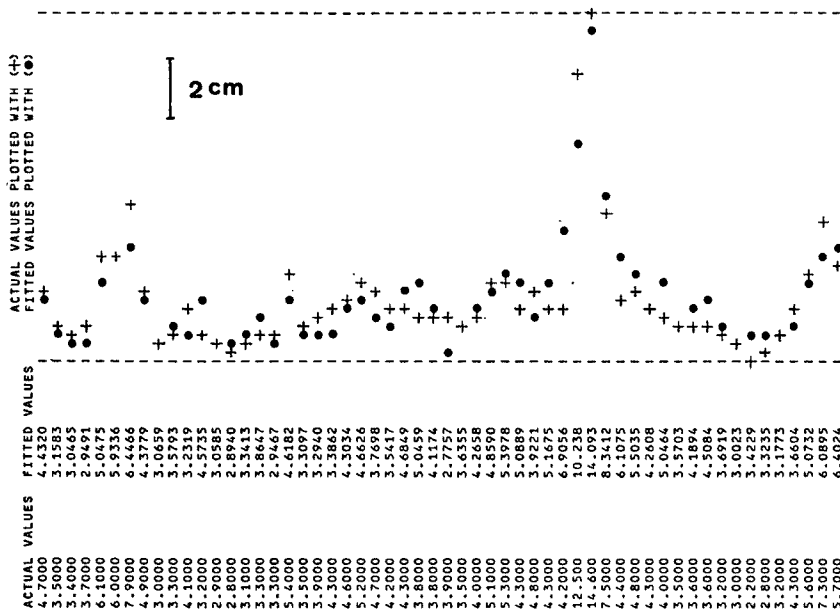


Fig. 4. Fitted excess path delay at Wajima (solid circle) by using the data at the six stations shown in Fig. 3 and the actual excess path delay (cross) in February 1982.

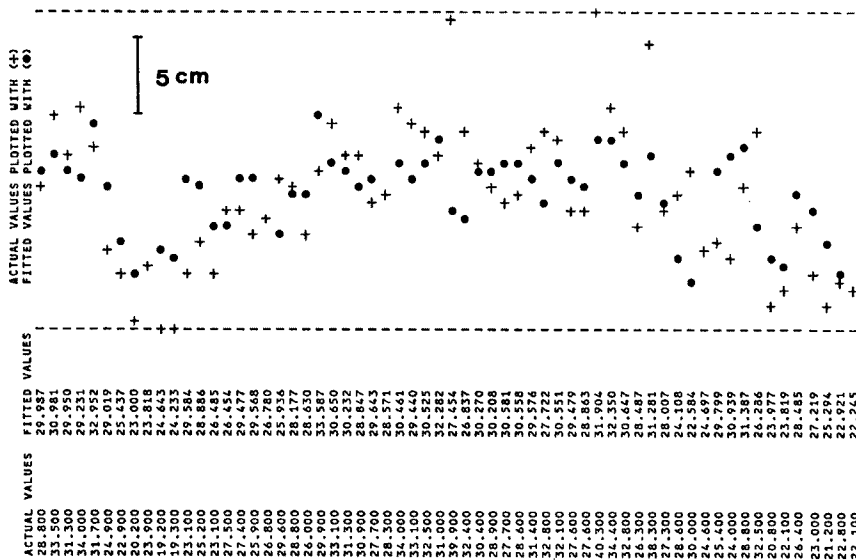


Fig. 5. Fitted excess path delay at Wajima (solid circle) by using the data at the six stations shown in Fig. 3 and the actual excess path delay (cross) in August 1982.

程度まで EPD の推定が可能であるか、簡単に調べてみた。

Fig. 3 に示すように、輪島の値を求めるために、秋田、仙台、館野、浜松、潮岬、米子の6地点における観測値を独立変数とし、輪島の値を従属変数とする線形回帰モデルを仮定して Ridge 推定法でそれぞれの係数を決定した。**Fig. 4** および **Fig. 5** に、前節と同じ1982年2月および8月のデータと上で求めた回帰係数とを使って得られた輪島の EPD と実際の観測値との比較を示す。図は京都大学大型計算機センターのアプリケーション・プログラム「SCOPE」からの出力である。この場合、2月と8月の推定値の Standard error (平均自乗誤差の平方根) は、それぞれ0.9および4 cm である。これらの結果より、状況の悪い夏季においては、EPD を1 cm の精度で推定していくことはかなり難しいことが分かる。もっとも、実際の GPS 観測の場合には、推定すべき観測点はラジオゾンデ観測点の中間に入るわけであるから、今回の計算に比べ多少精度があがることになるかもしれない。さらに、気象学的な特徴をモデルに組み込むことによっても精度の改善が期待できる。

4. 結 論

わが国の上空におけるラジオゾンデのデータを使って、水蒸気による EPD の地域分布とその季節的な変動について調べた。われわれが今後使うことになるであろう GPS による精密測位は、絶対測位ではなく、ある基準点に対して相対位置を決める相対測位が主体をしめると考えられる。この場合、両方の測定に共通して入ってくる誤差はお互いに相殺されることになる。また、実際の測定に際しては水蒸気の多い雨天などの悪天候を避けるとか、冬季に測定をするとか、時間をかけて測定を繰り返し短周期変動を平均化する、などさまざまな対策をたてることができる。このように、測位の仕方や補正方法を開発することによって、水蒸気による EPD を1 cm 以内の精度で推定することも不可能ではないと結論できる。

終わりに臨み、データの入力に援助を頂いた平原直美氏に謝意を表す。また、数値計算は京都大学大型計算機センターおよび防災科学資料センターの電子計算機によって行ったものであることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 例えば、藤下光身：地殻変動研究における宇宙技術の応用—観測の現状—、測地学会誌、第31巻、1985、pp. 12-19.
- 2) Kondo, T., K. Heki and Y. Takahashi: Pacific Plate Motion Detected by the VLBI Experiments Conducted in 1984-1985, Proc. Symp. Application of Space Techniques to Astronomy and Geophysics Tokyo 1986, ed. by H. Kinoshita et al., 1986, pp. 98-107.
- 3) 日本測地学会：GPS —人工衛星による精密測位システム—、日本測量協会、1986、pp. 147-167.
- 4) 田中寅夫：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、31、1985、pp. 305-312.
- 5) Resch, G. M.: Water Vapor Radiometry in Geodetic Applications, *Geodetic Refraction*, ed. by F. K. Brunner, Springer-Verlag, Berlin, 1984, pp. 53-83.