

## GPS 連日観測とその大気屈折誤差

田中 寅夫・土居 光・平原 和朗  
林 泰一・末峯 章

### DAILY GPS OBSERVATIONS AND THEIR TROPOSPHERIC REFRACTION ERROR

By Torao TANAKA, Hikaru DOI, Kazuro HIRAHARA, Taiichi HAYASHI and Akira SUEMINE

#### Synopsis

In order to monitor the crustal movement in Kinki District, southwest Japan, we are continuing daily relative positionings with MINI-MAC2816 GPS receivers. The results show that a relative displacement of 5 cm or smaller will be successfully detected on the Uji-Shinomisaki baseline (162 km), which means that a linear strain of  $3 \times 10^{-7}$  is detectable. One of main errors in GPS observation is the excess path delay due to water vapor in the troposphere which is hard to be corrected to the level of a few cm by using only meteorological data on the ground surface. We introduced two water vapor radiometers and have started parallel observations with GPS receivers for developing effective correction methods for excess path delay due to water vapor.

#### 1. はじめに

地殻変動の観測は、地殻内部に蓄積されつつある応力の状態を知ると同時に、大地震の前に出現すると期待されている前兆的な地殻変動を検知して大地震の発生を予知するという観点から、極めて重要であると考えられている。防災研究所では、数 10 km から 100 km のオーダーの広域地殻変動の観測には GPS (Global Positioning System) による精密相対測位が有効である、との考えのもとに、1987年度に MINI-MAC2816 および WM101 (これは現在では WM102 に改良されている) の二つのタイプの GPS 受信機を購入した。以来、各地において実験的な観測が繰り返され、地殻変動観測への応用について研究が進展させられてきている。

われわれは、GPS による精密測位を繰り返して地殻変動を連続的に監視するためには、長期にわたり観測が継続できること、このためにあまり費用がかからないこと、誰でも容易に操作できて結果が得られることが大切であると判断した。ただしこの場合、採用した観測方法で得られた結果にはどのような誤差がどの程度入っているかを十分に調べておくことが重要である。その上で、これらの誤差が有効に補正できれば、観測精度は一段と増して、より短い時間間隔での地殻変動の監視ができることになる。

本論文では最初に、宇治、潮岬、池田において実施してきている MINIMAC-2816 による連日測位観測の結果とその誤差について述べ、次に、大気中の水蒸気によるマイクロ波の伝播遅延について論ずる。最後に、この遅延誤差を補正するのに有効と考えられている水蒸気ラジオメータによる大気中水蒸気の予備的な観測結果について述べる。宇治—潮岬基線 (162 km) の場合、冬季においては 5 cm 以内の精度で基線長が

決定できると推定でき、このことは  $3 \times 10^{-7}$  の地殻変動の検出が可能であることを示している。2台のラジオメータの観測結果は、冬季には、雨の日などを除き、1 cm 程度の伝播遅延の推定が可能であることを示している。

## 2. GPS による観測

### 2.1 基線の配置

この観測の主要な目的の一つは、近畿地方の広域地殻変動の監視であるため、Fig. 1 に示すような4点からなる基線網を設定した。ほぼ北西方向を向いているこの地域でのフィリピン海プレートの沈み込み、およびそれに関連すると考えられている紀伊半島および四国での同じ方向の平常の縮み、太平洋プレートの沈み込みあるいはフォッサマグナを境界としているかも知れない北米プレートの運動とも関連があると考えられている近畿北部の東西方向に近い圧縮は、この基線配置においてその概略は監視できると考えられる<sup>1),2)</sup>。ただし、観測の労力・経費などについて今後検討を進め、受信機の数を増やして、将来さらに網を充実させることが望まれる。これによって、遅くとも40~50年後には再来すると予想される次回の南海道大地震に至るまでの広域地殻変動の推移が明らかに出来るであろう。なお、鳥取については、観測スケジュールの都合上、今日に至るまで観測を実施していない。

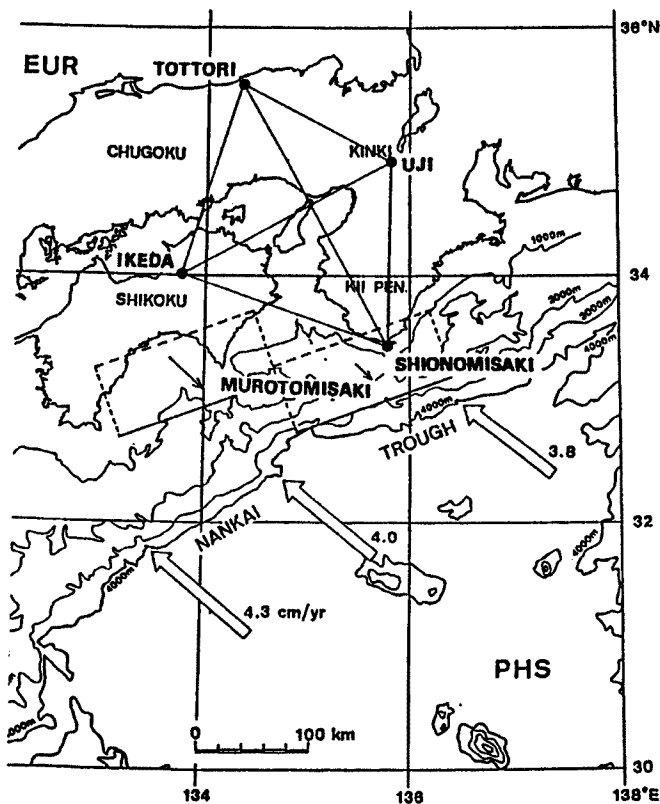


Fig. 1. The four-station network for GPS observation. Arrows show the direction and velocity of subduction of the Philippine Sea Plate by Seno<sup>3)</sup>. Rectangles are horizontal projections of fault planes of the 1946 Nankaido earthquake by Ando<sup>4)</sup>. (Modified from Tabei et al.<sup>5)</sup>).

2.2 観 測

この連日観測は宇治 (UJI) および潮岬 (SHIO) に、MINIMAC-2816 受信機510および508をそれぞれ配置して、1990年7月26日から開始した。同8月8日からはさらに池田 (IKD) に509を設置、観測を始めた。これらの受信機は公衆電話回線を使って観測の設定、データの集録ができるが、この場合転送できるデータは64 KB の RAM メモリ上のデータだけである。このため、通常、観測は1日に1回、30秒のサンプリング間隔で3時間12分行うこととしている。池田の509はその後故障のため、90年10月25日に撤収した。12月に入り、宇治屋上に UJI 点から約 6.7 m 離して UJI-B 点を新設し、12月14日から19日まで潮岬との間で観測を実施した。その後、アンテナを再び UJI 点に移し、潮岬との観測を続行した。1991年2月11日からは、これに UJI-B 点での509を加えて3点での観測を6月19日まで実施した。6月26日からは509を UJI 点に戻し、510を池田 (IKD) に置いて、宇治 (UJI)―潮岬 (SHIO)―池田 (IKD) の観測を9月まで実施した。9月末には受信機の周波数検定のため全観測を中断した。1992年に入り、508を UJI 点に、509を SHIO に設置して UJI-SHIO で観測を再開し、現在に至っている。

観測時間は、開始当初の1990年7月26日では 15 h15 m55 s (UT) から3時間12分、以後同じ衛星配置を使用することとして、毎日4分ずつ開始時刻を進ませた。Block II の新しい衛星が使用可能になり、また、不良になる衛星も生じたため、1991年1月11日には観測時間を変更して 17 h16 m55 s (UT) から開始、1992年1月8日からは 15 h47 m55 m (UT) の開始、さらに3月10日からは 17 h00 m55 s (UT) の開始として現在に至っている。Fig. 2 は、1991年8月7日に宇治上空で受信できた衛星の状況を示している。ちなみにこの日の観測時間は12時24分55秒 (日本標準時) 開始の3時間12分であった。

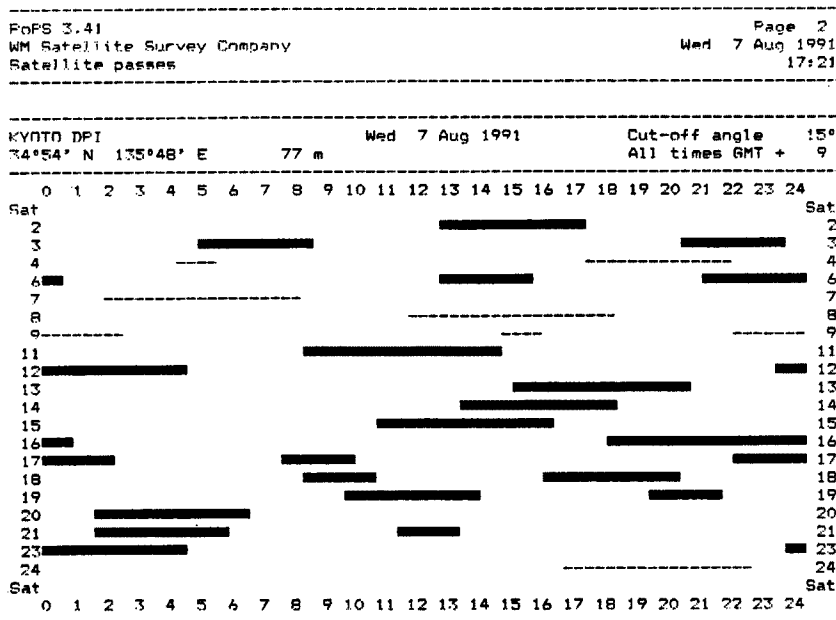


Fig. 2. Satellite availability at Uji on Aug. 7, 1991. The observation started from 12h24m55s and continued for 03h12m this day.

2.3 解析結果と誤差

観測データはメーカーから提供を受けた解析ソフトウェア AIMS10 によって行っている。このソフトウェアでは、地表での気象データあるいは水蒸気ラジオメータから得られた伝播遅延量を入力して自動的に補正を加えることが出来るが、この研究では作業を単純にするため、実測値は使用しないで、仮定の標準値を

入力している。電離層の影響については、UJI-UJIB といった短い基線の解析を除き、2周波受信により自動的に補正している。

Fig. 3 から 7 までには、得られた結果のうちから1991年の1年間についてそれぞれの基線長を示す。相對測位の場合、ベクトル成分ごとに誤差は異なり、例えば上下成分は水平成分より誤差が大きく、また衛星軌道の関係で東西成分は南北成分に較べ誤差が大きいといった傾向が存在するが、ここでは便宜上求められた基線長のみを示した。なお、これらの図の縦軸の単位は cm であるが、図ごとにスケールが異なっているので注意されたい。これらの結果について、以下のようにその特徴をまとめることができる。

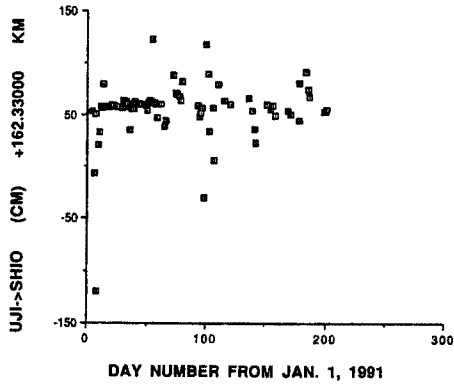


Fig. 3. Baseline lengths of UJI-SHIO obtained in 1991.

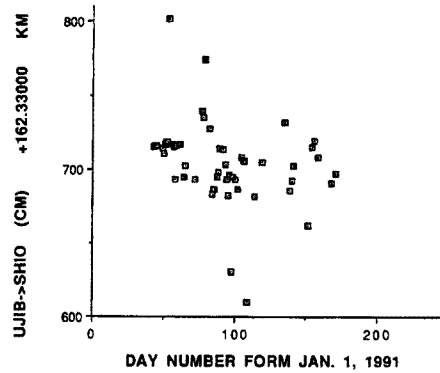


Fig. 4. Baseline lengths of UJIB-SHIO obtained in 1991.

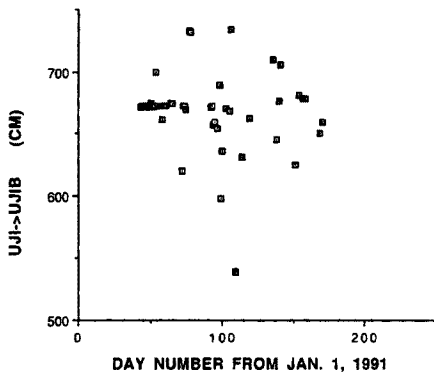


Fig. 5. Baseline lengths of UJI-UJIB obtained in 1991.

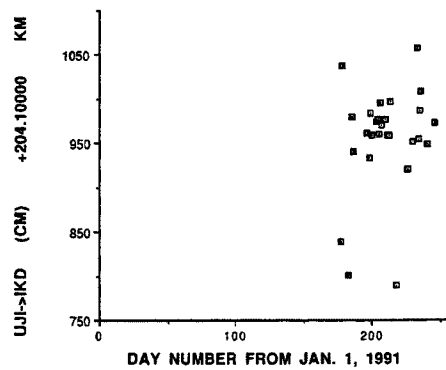


Fig. 6. Baseline lengths of UJI-IKD obtained in 1991.

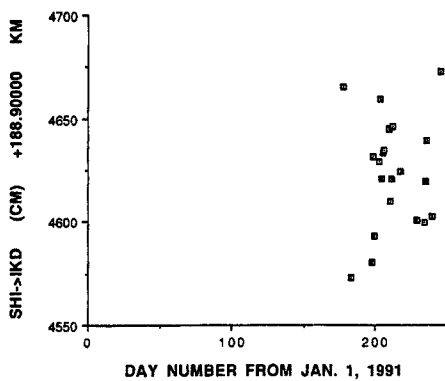


Fig. 7. Baseline lengths of SHIO-IKD obtained in 1991.

1) UJI-SHIO (Fig. 3) および UJIB-SHIO (Fig. 4) 両基線の観測回数は多くとれているが、データのばらつきは1~2月を除き、数10 cm に達している。年周変化の一部と思われる、夏期における基線長の減少という傾向が見える。

2) 上記2基線について、とくに1月から2月にかけての最も寒い時期にはばらつきの小さい良好な再現性が見られ、1週間程度の観測結果の単純な平均によって2~3 cm の精度で基線長が決定できると予想される。

3) Fig. 5 に示した、6.7 m 基線を含めた UJI-UJIB-SHIO の解として求まる 6.7 m の基線長 UJI-UJIB は、やはり、冬季には良い結果を与えているものの、気候が温暖になるにつれて解が大きくばらついてくる。上の事実は、このように短い基線を基線網の中に含ませることによって、それを解全体の評価に有効に使用することが出来ることを示している。

4) 池田を含む基線長、UJI-IKD (Fig. 6) および SHIO-IKD (Fig. 7) は、UJI-SHIO に較べてばらつきがかなり大きい。これは南北方向に較べて誤差が大きいという一般的な傾向によるものか、例えば、視野が狭いとか、多重伝播の影響が大きいといった池田観測点の環境条件によるものであるのか、現時点では不明である。ばらつきの小さい冬季の観測がなくて結論が出せないため、今後冬季の観測を実施する必要がある。

以上のように、観測結果では気温が上昇すると観測誤差が大きくなっているが、これは主として、大気中の水蒸気量が多くなるため、正確な解が得られなくなったものと推定される。田中<sup>6)</sup>は大気中の水蒸気による伝播遅延  $\Delta L$  (cm) は、地表の気温  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) によっておおよそ  $\Delta L = 4.0 \exp(0.075T)$  なる式で与えられることを示したが、これを見ても、気温が上昇すると、平均的に云って急激に水蒸気量も増加することが分かる。従って、水蒸気によるマイクロ波の伝播遅延を有効に補正できれば、恐らく前述の図中に見られるばらつきはかなり小さくできると予想される。

このために、大気中の水蒸気量を測定する方法の一つであり、これまでに VLBI (超長基線電波干渉計) 観測に併用されて実験が行われてきた、水蒸気ラジオメータによる観測を実施する計画を立てた。

米国 RADIOMETRICS 社製の水蒸気ラジオメータ WVR1000 は小型であり、しかも取扱が簡単であって、精度も電波遅延量に換算して 1 cm 以上が期待できることから、GPS 観測結果の精度向上に利用する方策を研究するため、これを2台購入して1990年11月から予備的な観測を開始した。

### 3. 水蒸気ラジオメータによる予備的観測

#### 3.1 水蒸気ラジオメータ

2台のラジオメータは WVR-1000 形式の WVR5 および WVR6 であり、23.8 および 31.4 GHz の2周波について輝度温度を 0.5 K の精度で測定し、これによってアンテナ視線方向の積分水蒸気量を水滴と分離して推定することができる<sup>7)</sup>。WVR-1000 は1988年度に気象研究所に導入され、降雪雲中の過冷却水の測定を目的として使用されている(水野 量, 私信)。1989年2月の筑波におけるラジオゾンデとの比較観測では、求められた可降水量は誤差 1 mm 以内で一致したとの結論が得られている。

#### 3.2 観測および結果

最初に、信頼性をチェックする一つの実験として、2台のラジオメータを宇治研究所の屋上に並べて、天頂方向の測定を実施した。1992年1月16日にはこれを終了し、ラジオゾンデとの比較観測を行うために、2台を滋賀県信楽町にある京都大学超高層電波研究センターの信楽 MU 観測所に移設して1月28日まで観測を行った。1月29日から2月7日までは、宇治研究所室内においてアンテナに金属の覆いをかけて入力を遮り、システムの安定性をチェックした。2月7日から20日までは再び宇治研究所屋上に2台を並べて平行観測を実施した。2月21日には WVR6 を防災研究所潮岬風力実験所に移設し、気象庁の潮岬測候所で行われているラジオゾンデとの比較および GPS との平行観測を実施するための観測を開始した。これにより、宇

治 (UJI) における MINI-MAC2816 508 と WVR5, および潮岬 (SHIO) における 509 と WVR6 との組合せ観測となり, 現在までこれを継続している。なお, 現時点までは, 天頂方向のみの水蒸気量の観測に限っているが, 方位変更の制御装置を製作中であり, 完成後は空間的に広範囲の観測も行う計画である。

宇治において1992年1月1日から8日までの期間に2台のラジオメータによって観測された天頂方向のマイクロ波遅延量 (単位は cm) を並べて Fig. 8 に示した。この図から明らかな通り, 2台の出力の間には一定の差は見られるものの, 降雨時のようにレドームに雨滴が付着して天空の正しい輝度温度の測定が乱されているときを除いて, 非常によい平行性を示している。このことから, 少なくとも水蒸気量の少ない冬季ではこの水蒸気ラジオメータによって 1 cm 以内の誤差で伝播遅延が測定できるものと推定できる。

Fig. 9 にはアンテナを金属で覆い, 入力を遮った室内実験の結果を示す。実験の周辺環境を整備していないため, 電源などから入ったと考えられるスパイク状のノイズが 31.4 GHz のチャンネルに多くみられるものの, 2周波数とも検定用の Black body の温度とほとんど同じ温度を記録していることから, このラジオメータのシステムそのものの安定性も良好であると結論出来るようである。

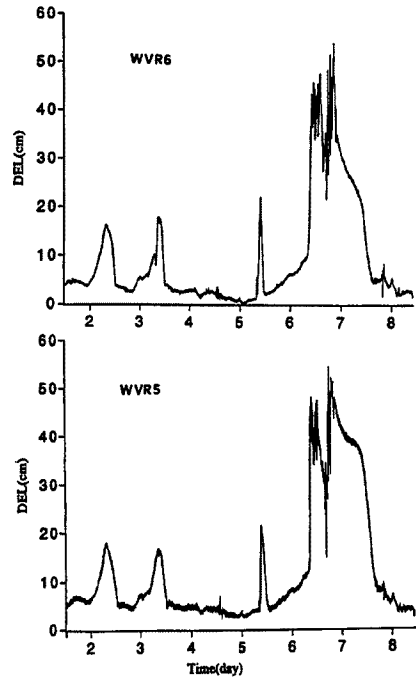


Fig. 8. Excess path delays DEL (cm) observed with water vapor radiometers, WVR5 (lower) and WVR6 (upper), at UJI.

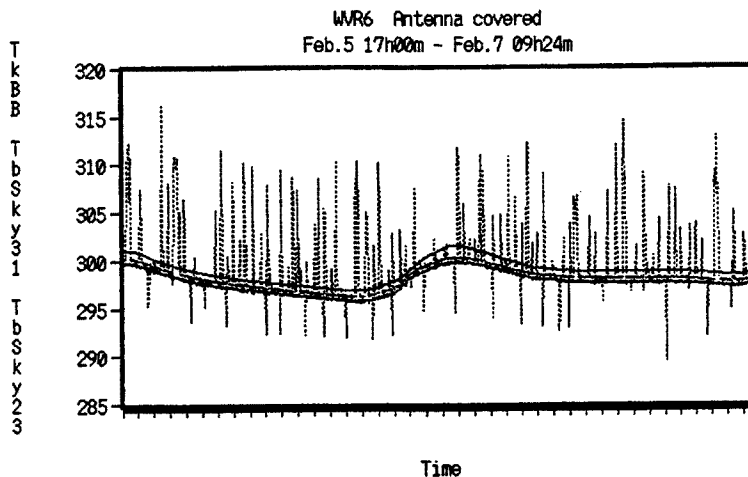


Fig. 9. Brightness temperatures of 23.8 (lowermost) and 31.4 GHz (middle) and the black body (uppermost) under the condition that the antenna was covered by aluminum foil in order to cut off radiation from the outside (WVR6).

#### 4. 結 論

1990年から実施している MINI-MAC2816 による連日観測によって、距離 162.330 km の宇治一潮岬基線長が冬季では1週間程度の観測で5 cm 以上の精度で決定できることが分かった。これは線歪に換算すれば  $3 \times 10^{-7}$  に相当するため、ほぼ1年の時間間隔で近畿地方の歪変化を追跡することが出来ることを意味している。

温暖期においては、観測誤差が大きくなるが、衛星の軌道決定誤差、電離層および大気層中におけるマイクロ波の伝播速度の推定誤差、多重伝播による誤差など GPS の誤差要因のうちでも、これは主として大気中の水蒸気による影響と考えられるため、水蒸気ラジオメータを導入して大気中の水蒸気量の観測を開始した。2台のラジオメータの観測結果は、冬季においては、雨の日などを除き、1 cm 程度の精度で伝播遅延の推定が可能であることを示している。

今後は、ラジオゾンデとの比較を通してラジオメータのアルゴリズムの再決定を行い、GPS 観測への水蒸気による遅延誤差の補正法を開発して行く予定である。

#### 謝 辞

おわりに臨み、観測のための便宜を与えて頂いている附属潮岬風力実験所並びに徳島地すべり観測所に対しお礼を申し上げます。また、GPS 観測などに協力頂いた中村佳重郎、細 善信、尾崎壽秀、河内伸治の各氏に感謝の意を表します。

この研究の一部は文部省科学研究費補助金一般研究(A) (課題番号03402014) によるものであることを付記します。

#### 参 考 文 献

- 1) 橋本 学：測地測量により求めた日本列島の地震間の平均的な地殻水平歪速度 (I)：本州・四国・九州，地震 第II輯，第43巻，1990，pp. 13-26.
- 2) 伊藤 潔：西南日本の地震活動とテクトニクス，地震 第II輯，第43巻，1990，pp. 555-569.
- 3) Seno, T.: Instantaneous Rotation Vector of the Philippine Sea Plate Relative to the Eurasian Plate, *Tectonophysics*, Vol. 42, 1977, pp. 209-226.
- 4) Ando, M.: Fault Model of the 1964 Nankaido Earthquake Derived from Tsunami Data, *Phys. Earth Planet. Inter.*, Vol. 28, 1982, pp. 320-336.
- 5) Tabei, T., K. Hirahara and T. Tanaka: Tectonics and GPS Observation Project in Shikoku Region, Southwest Japan, *Proc. Japanese Symp. GPS at Kyodai Kaikan on Dec. 6-8, 1989*, pp. 24-31.
- 6) 田中寅夫：冬季における大気中の水蒸気の地域的分布とマイクロ波の伝播遅延，測地学会誌，第32巻，1986，pp. 167-173.
- 7) 田中寅夫・中村佳重郎・平原和朗：宇治市における2台の水蒸気ラジオメーターによる予備観測結果，1991年経緯度研究会集録，1992，pp. 153-156.