

GPS 試験観測 —半固定 GPS 観測システムと試験観測—

平原 和朗・田中 寅夫・細 善信・林 泰一
藪田 豊・田部井隆雄・中村佳重郎・綿田 辰吾
藤森 邦夫・藤原 智・伊藤 潔・加藤 照之
村田 一郎

GPS EXPERIMENTS —SEMI-FIXED GPS OBSERVATION SYSTEM AND GPS MEASUREMENTS—

By Kazuro HIRAHARA, Torao TANAKA, Yoshinobu HOSO, Taiichi HAYASHI
Yutaka YABUTA, Takao TABEL, Kajuro NAKAMURA, Shingo WATADA
Kunio FUJIMORI, Satoshi FUJIWARA, Kiyoshi ITO, Teruyuki KATO
and Ichiro MURATA

Synopsis

For the monitoring of crustal movements and the long-term earthquake prediction, GPS observation systems were introduced into Japanese universities and institutes in 1988. This report gives the detailed description of the semi-fixed GPS observation system introduced into D.P.R.I., Kyoto University and the results of some experimental GPS observations. The preliminary results, which are derived from only a few observations, show the order of 1 ppm or better repeatability of GPS measurements in 1988, when the constellation of the GPS satellites over Japan is not so good.

1. まえがき

宇宙技術の測地測量への応用により、超高精度の測定が可能になり、従来の測地測量のイメージは大きく変わろうとしている。そういった宇宙技術として、VLBI (Very Long Baseline Interferometry, 超長基線干渉法), SLR (Satellite Laser Ranging, 衛星レーザー測距) 及び GPS (Global Positioning System, 汎地球的測位システム) が挙げられる。前二者は 1000 km を超える超長基線においても威力を発揮するが、非常に高価であり、又大きなシステムを必要とし、多くの観測点にばらまくわけにも行かないので、主として地球規模の大スケールでの変動等 (例えば、汎地球的なプレートの運動) の検出に用いられている。一方、GPS は、小システムで機動性に富んでいて、その持ち場は数十から数百 km の基線長であり、このスケールでの地域的な地殻歪の変動 (例えば、プレート境界での複雑な歪パターン) の検出に役立つと思われる。従来の測地測量技術、例えば光波測量に比べて、1) 測点間の視通を要しない、2) 3 次元ベクトルの 2 点間の相対位置が決定可能である、3) 観測が比較的天候に左右されない、4) 百 km 位の基線長でも高精度 (0.1 ppm)

が期待される、などの点で優れている。

BLOCKII と呼ばれる実用段階の GPS 衛星の一号機が1989年2月に打ち上げられ、これからいよいよ本格的な GPS 時代に突入して行こうとしているが、それに先立つ1988年に、日本の大学及び官庁の研究諸機関に数十台の GPS 受信機が導入され、日本における GPS 測地・地殻変動学の口火が切られた。京都大学にも、地震予知を目的として、防災研究所と理学部に6台ずつ、計12台の受信機が導入された。またこの他に火山噴火予知を目的として、桜島火山観測所に6台、理学部附属火山研究施設に3台導入されている。

本稿では、防災研究所地震予知関係で導入された半固定観測用 GPS 2周波受信機システム(Aero Service 社製 MINI-MAC 2816)のハードウェアとソフトウェアの概要を紹介する。1988年時点では、GPS 衛星は実験的なもので、主として米国内でうまく働くように配置されているだけで、日本における衛星配置は劣悪なものであるが、こういった環境においてどのくらいの精度が得られたかについても、予備的な観測結果ではあるが併せて報告する。この機種他に、Wlid-Magnavox 社製 WM101 という主として移動観測用の GPS 受信機も導入されていて、これについては L1 一波のみを用いた予備的な解析が藪田他により報告されている¹⁾、2周波受信機に現在バージョンアップ中であるので、いずれ2周波を用いた解析について詳しく報告したい。

2. MINI-MAC 2816

2周波 GPS 受信機システム MINI-MAC 2816 シリーズには、国立防災科学技術センターが導入したハードディスクを持ちデータを自動収録する固定点ネットワーク用のモデル AT (Automated Tracking) から国土地理院が導入したフィールド用のポータブルなものまでさまざまなタイプがある。

京都大学防災研究所(3台)及び東京大学地震研究所(1台)に導入されたものは、両者の中間をいくもので、フィールドタイプのものにモデムを付けて公衆回線を介して、遠隔地観測点のデータ転送や観測時間の設定ができ、無人固定観測も可能であるが、電話の無い所では、データをフロッピーディスクに収録して普通の野外有人観測を行う。我々が現在想定している使用形態は、電話及び電源を使用できる地震・地殻変動観測所及び大学その他の施設を借用して、専用アンテナ取り付け台を設け、数点で数週間～1カ月単位で連日観測を行い、観測点を適当に移動させて、広範囲の領域にわたるネットワークを構築するものである。この意味で、我々はこれを半固定 GPS システムと呼んでいる。

この章では、半固定用 GPS 2周波受信機 MINI-MAC 2816 のシステムについて、簡単に紹介する。国土地理院の Macrometer II を用いたシステムについての紹介が既にあり²⁾、かなり重複する部分もあるが、GPS 観測及び解析の実態を知っていただくために、実際のファイル名やプログラム名を挙げてやや詳しく述べてみよう。

2.1. ハードウェア

MINI-MAC 2816 は、GPS 衛星からの L1, L2 帯の搬送波の位相を観測量とする測位干渉計である。京都大学防災研究所のシステムは、3組の受信装置と1台のデータ解析装置からなり、4台のモデムを介して公衆電話回線でつながれている。アンテナ(重量約18 kg, 大きさ91×91 cm)はクロスダイポールで、電波の入射方位及び高度による位相中心のずれはほとんど無い(Aero Service 社によれば、1 mm の精度を持つと言われている)。通常、アンテナは専用台に取り付けるが、フィールドでは三脚の上に乗せて観測を行う。このアンテナは、30 m まで延ばすことができるケーブルで受信機(重量約20 kg, 大きさ33×19×51 cm)とつながれている。こう言った大きさや重量を考えると、フィールドでの観測は、車で行けるところに限られてくる。フィールドでは、内部電池で1～2時間の観測が可能である。また、12 VDC の自動車用バッテリーを外部電源として用いれば、8時間の観測が可能であるが、通常は室内にて AC 電源を使用している。

受信機は、L1 の C/A コード情報を使って、時刻同期及び衛星広報暦(軌道情報他)の取得を行い、同時に受信可能な8衛星までの L1, L2 の搬送波の位相を自動的に測定し、内蔵のラムディスク(容量64キロバイト)

と3.5インチのフロッピーディスク（容量720キロバイト）に同時に記録する。観測の最小サンプリング間隔は1秒であるが、通常は1分サンプリングでデータを取得している。1回のサンプリング（これを1エポックと呼ぶ）でのデータ量は、約150バイト程度である。導入した当初は、1観測（これを1セッションと呼ぶ）当たり、最大208エポック（データ量32キロバイト）という制限があり、通常1分間隔で3時間28分の観測を行ってきた。最近、この208エポックという制限は取り外され、1セッションでフロッピーディスクの容量1杯のエポック数を取得することが可能になった。なお、他の受信機がGPSタイムを用いているのに対して、MINI-MACはUTタイムに基づいているので、異機種を受信機での共同観測及びデータ処理を実施するときは注意を要する。

衛星の識別をするため、前もって受信点の概算座標を受信機にキーボードから入力する必要がある。精密測位には、100 mの精度が必要と言われている。時間がある場合には、L1コードを使うNavigation Modeで観測を行い、観測点の位置を30 m精度（これは理想的な衛星配置の場合で、現在の日本では100 m程度である）で、観測点座標の概算値をWGS84系（GPSで使用している座標系）で得る。日本での観測では地図上で観測点の位置を読み取り、東京測地系からWGS84系へ座標変換して観測座標の概算値として、観測することも可能である。いずれにしても高精度のネットワークを構成するには、VLBIまたはSLRで決められた観測基準点と結びつけて（コロケーション）、各観測点座標を最終的に決定しておく必要がある。

解析装置は、IBM-PC ATコンパチの32ビットパーソナルコンピュータ（コンパック社製 Compaq Deskpro 386/20）で、130メガバイトのハードディスクと10メガバイトのメモリーを持っている。

2.2. 解析ソフトウェア

電話のある観測点で観測されたデータは、宇治にある京都大学防災研究所に公衆電話回線を使って集められる。現在の所、電話回線を介してはラムディスク中のデータしかアクセスできないので、フロッピーディスク中のデータは、電話の無い野外観測データ同様、後日フロッピーディスクベースで集められる。

これらのデータは、Aero Service社から提供された解析ソフトウェア AIMS10（この場合、10は10観測点までのデータを同時に解析できることを表わしている）を用いて、MS-DOSベースで処理され、通常、以下の様な手順で解析される³⁾。

(0) 観測準備：観測時間帯の設定。

衛星配置の良くない状態では、少しでも良い衛星配置（同一軌道面でない衛星を、同時にできるだけ多く観測できる衛星配置）の時に、観測時間を設定することが重要となる。プログラム PPERAR を用いて、GPS衛星から取得した広報暦ファイル（BEーファイル）または Aero Service 社提供の GPS 衛星の暦ファイル（Eーファイル）を基に、ある観測地点及び時刻における衛星配置状態を知り、最適の観測時間帯を設定する。

(1) 解析準備。

(1.1) データファイル（Xーファイル）の作成。

各観測点で取得した生データファイル（Rーファイル）を、解析装置のハードディスクに転送して、プログラム MXMAKE を用いてこの Rーファイルから、解析に直接使用する位相データファイル（Xーファイル）を作成する。なお、モデムを介したデータ転送には、通信ソフト Cross talk を用いている。

(1.2) パラメータファイルの作成。

解析に必要な地球回転等の以下のパラメータのテーブルファイルを、解析に先立って準備する。以下のファイルは一括してハードディスク上に蓄えておき、解析する時、こちらで用意したコマンド CPYTBL を用いて解析中のディレクトリにまとめてコピーすることにしている。

- GDETIC. DAT：WGS84 等といった座標系のテーブルファイル。
- LEAP. SEC：国際原子時（TAI）と協定世界時（UTC）との差（TAI-UTC）即ちうるう秒のテー

ブルファイル。

- UT1 : TAIと世界時 (UT1) との差 (TAI-UT1) のテーブルファイル。
- POLE : 極運動のテーブルファイル。
- NUTABL : 章動運動を表わすテーブルファイル。
- LUNTAB : 月の運行位置テーブルファイル。
- SOLTAB : 太陽の運行位置テーブルファイル。

(1.3) 観測時間帯の衛星位置ファイル (T-ファイル) の作成。

(1.3.1) 広報暦を用いる場合

GPS 観測中に取得した BE-ファイルを入力ファイルとして、プログラム CATOT を使用して、観測時間帯の一定時刻毎の衛星位置を計算し、衛星位置テーブルファイル (T-ファイル) を作成する。

(1.3.2) 精密暦を用いる場合

Aero Service 社から提供される、ある時刻における衛星の位置と速度が入っている精密暦ファイル (G-ファイル) を入力ファイルとし、プログラム NAVS10 を用いて衛星位置を計算し、T-ファイルを作成する。

(2) 解析。

(2.1) 解析単位 (セッション) を指定する D-ファイルの作成。

使用する軌道情報 (T-ファイル) 及び処理したい観測点のデータ (X-ファイル) を指定して、基線モード (観測点間の基線ベクトルを 1 本ずつ求める解析モード) かセッションモード (一連の観測をまとめて解析するモード) を選択し、D-ファイルを作成する。

(2.2) 解析計算を自動的に行うバッチファイル (B-ファイル) を作成するプログラム DRIV10 の実行。

解析を自動的に行うバッチモードと対話的に行うモードがあるが、通常はバッチモードを使用して解析を行っている。プログラム DRIV10 は 4 つのプログラム群を制御するバッチプログラムを作成するが、これを実行して、(2.1) で定義した D-ファイルを入力すると、次に以下の解析方法に関係したパラメータ入力を要求してくる。

1) 解析タイプの選択

観測量は 360 度の不確定性がある位相であり、距離にすると波長の整数倍の不確定性を含んでいる。これをバイアス項と呼ぶが、色々なノイズの為、整数倍に決めることが困難なことがある。従って、最初の 1 回ないし 2 回、このバイアス項を整数に固定しないで (biases-free) 求めて (これを quick solution と呼ぶ)、最後に色々な組合せを考え、統計的に有意であれば、バイアス項を波長の整数倍に固定して (biases-fixed)、解を求める。実際のバイアスサーチには、L1 と L2 に対してではなく、L1 と L2-L1 のバイアスを対象にしている。このバイアス項に関連して、ざっとデータの善し悪しを見る type 1 (1 quick solution)、通常使用する type 2 (1 quick solution+biases-fixed solution)、そして type 3 (2 quick solutions+biases-fixed solution) のオプションがある。

2) 観測量及び解析法の選択

L1 と L2 の 2 重位相差 (double differences) を観測量としているが、L2 の位相データの扱いによりいくつかの解析法を選択できる。理論的には、L1 と L2 の位相データの線形結合 (Linear Combination, LC : $LC = L1 - (g/(1-g^2))(L2 - gL1)$; $g = f2/f1$, ここで $f1, f2$ は L1, L2 の周波数) を作れば、電離層による見かけの距離の変動を除いた観測量となる。しかし、LC を作れば他の要因による誤差を増大させることになるので注意を要する。電離層の影響が相殺されるような短基線では、L1 と L2 を独立に扱い、相殺されないような長基線では、LC を観測量として用いる。その中間では、電離層による影響を表わす L1 と L2 の線形結合を考え、これを電離層による拘束条件 (Ionospheric Constraints) として、電離層の影響と誤差の増大の調整を適当な重みを付けて、解を求めている⁴⁾。

具体的には、次の5つのオプションがある。

- 1：1波（L1）用の受信機で取得したデータの解析。
 - 2以降は2波用受信機による解析。
 - 2：上述の Ionospheric Constraints を考慮した解析。
 - 3：L1 だけを用いた解析。
 - 4：電離層の影響を取り除いた LC を観測量とする長基線用の解析。
 - 5：L1 と L2 を独立の観測量とする短基線用の解析。
- 3) 各種パラメーターの入力。

以下のパラメーターの入力要求に答えて DRIV10 を終了する。

観測誤差及び電離層の影響の重み等に対する先見情報。

大気中水蒸気による天頂方向のみかけの距離の伸びを解析に加えるかどうかの選択。

各観測点の情報，気象要素等。

(2.3) バッチ処理での標準的な解析（解析タイプ2）の流れ。

起動される順に各プログラムモジュール名とその機能を以下に示す。

- 1) COMP10：セッションに含まれる各観測点に対し，入力した概算座標位置に基づいて位相観測量の理論値を求め，観測値との残差，及び解析に要するパラメータの微係数を計算して，C-ファイルに蓄える。
- 2) CE10：位相観測値中の大きなサイクルスリップ（例えば衛星が一次的に見えなくなる等の理由で，位相がサイクルの整数倍だけ前のデータとずれる現象）を検出し，観測値をスリップに対応する整数値だけ修正する。次に2重位相差を作り，サイクルスリップ及び異常値（一連のデータのばらつきの4倍以上かけ離れている観測値）を検出し，それがどの位相観測値によるものか判断して，観測データを削除したり，適当な整数だけ修正する。このようにして修正されたL1とL2の位相データと残差の入ったC-ファイルを編集する。
- 3) MRG10：次のステップで使用するパラメーターを定義するM-ファイルを作成する。
- 4) LSQ10：2重位相差をデータとして，最小二乗法を用いて，固定した観測点を除く観測点の測地座標と独立な組合せのバイアス項を未知数として解（quick solution）を推定する。
- 5) CE10：4)の解に基づいて2重位相差の残差を計算し，残っているサイクルスリップや異常値を修正し，C-ファイルを編集する。
- 6) COMP10：改良された位相の残差と必要な微係数を計算し，C-ファイルに納める。
- 7) MRG10：次の最小二乗解を得るのに必要なM-ファイルを作成する。
- 8) LSQ10：再度，改良された2重位相差をデータとして観測点座標とバイアス項を最小二乗推定(biases-free solution)し，統計的に有意であれば，求められたバイアス項をもっともらしい整数値に丸め込み固定して，観測点座標値(biases-fixed solution)を推定する。
- 9) CE10：さらに残っているサイクルスリップや異常値を捜して，無ければ次のセッションの計算に移る。まだ残っていれば，6)～9)を繰り返して解を求める。

(2.4) バッチファイルの実行

DRIV10で作られたバッチファイル(B-ファイル)を実行させると，データを読み取り上述した順に自動的に解析を実行する。

(2.5) 対話モード

解の入っているO-ファイル・Q-ファイルを調べて得られた結果を吟味して，問題があるようだと，対話モードでCE10を実行して残差を検討し，マニュアルでサイクルスリップ等を編集し，MRG10・LSQ10を実行して解を得ることができる。

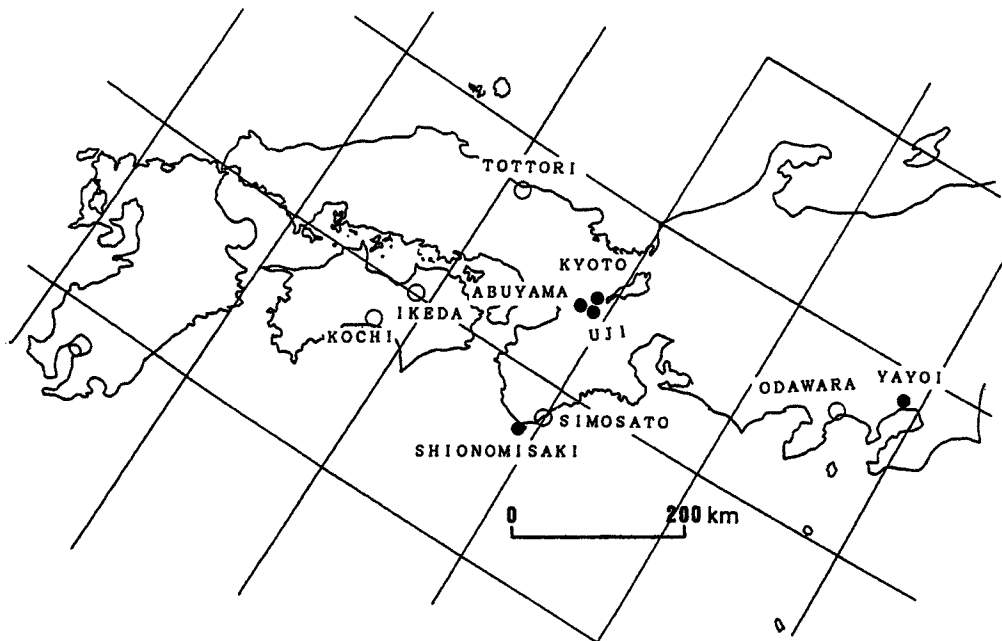


Fig. 1 GPS observational stations.

● : stations, which results are reported in this paper.

○ : other stations.

3. GPS 試験観測

3.1. 観測点配置

Fig. 1 に、1989年5月現在までに観測を行った点や、観測はまだ行っていないが既に観測台を設置してあるGPS観測点配置を示す。本稿では、このうち1988年4月～7月に行った試験観測（図中で黒丸の点）について報告する。1988年12月の相模湾合同観測中に行ったSLRの基準点である海上保安庁水路部下里水路観測所との結合の結果を用いてこれまでのデータを再解析中であるが、これについては稿を改め報告する。今回報告する解析に使用した初期観測点座標は、NAVIGATION Modeで決定した座標値や地図上で読みとった東京測地系の値をWGS84系に変換したものを用いている。

3.2. 観測時間帯

異なる軌道の上に2つずつ4つの衛星が見える時間帯を挟んで3時間28分を観測時間帯として採用した。1分サンプリングで208エポックの観測である。Fig. 2は、4月12日の宇治における観測時間帯の衛星のスカイプロットである。これから分かるように北西上空のかなり低高度方向に衛星が偏っており、これが1988年の日本における最適の衛星配置であるのだから、まえがきにも述べたようにかなりひどい衛星状況であると言える。これに加えて、衛星#8は時計が良くなくunhealthyで、受信状態が悪い時も見られる。現在の所、MINI-MACはunhealthyの衛星からの広報暦は取得しないので、解析にはエアロサービス社から提供されている精密暦を用いている。

3.3. 解析結果

1988年4月から7月の間で、色々な観測点の組合せで延べ約40日間の観測を行った。標準大気を仮定して基線モードで、一応すべての基線について解析を行ったが、解を得ることができたのはその半数以下であっ

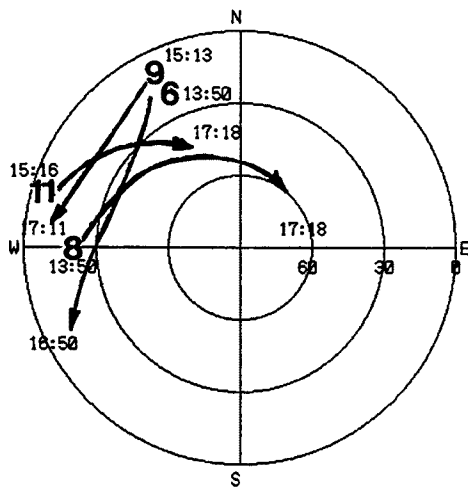


Fig. 2 Sky plot of GPS satellites in Uji station for 13:50-17:18, April 12, 1988 (UTC).

Numbers indicate SV numbers of GPS satellites.

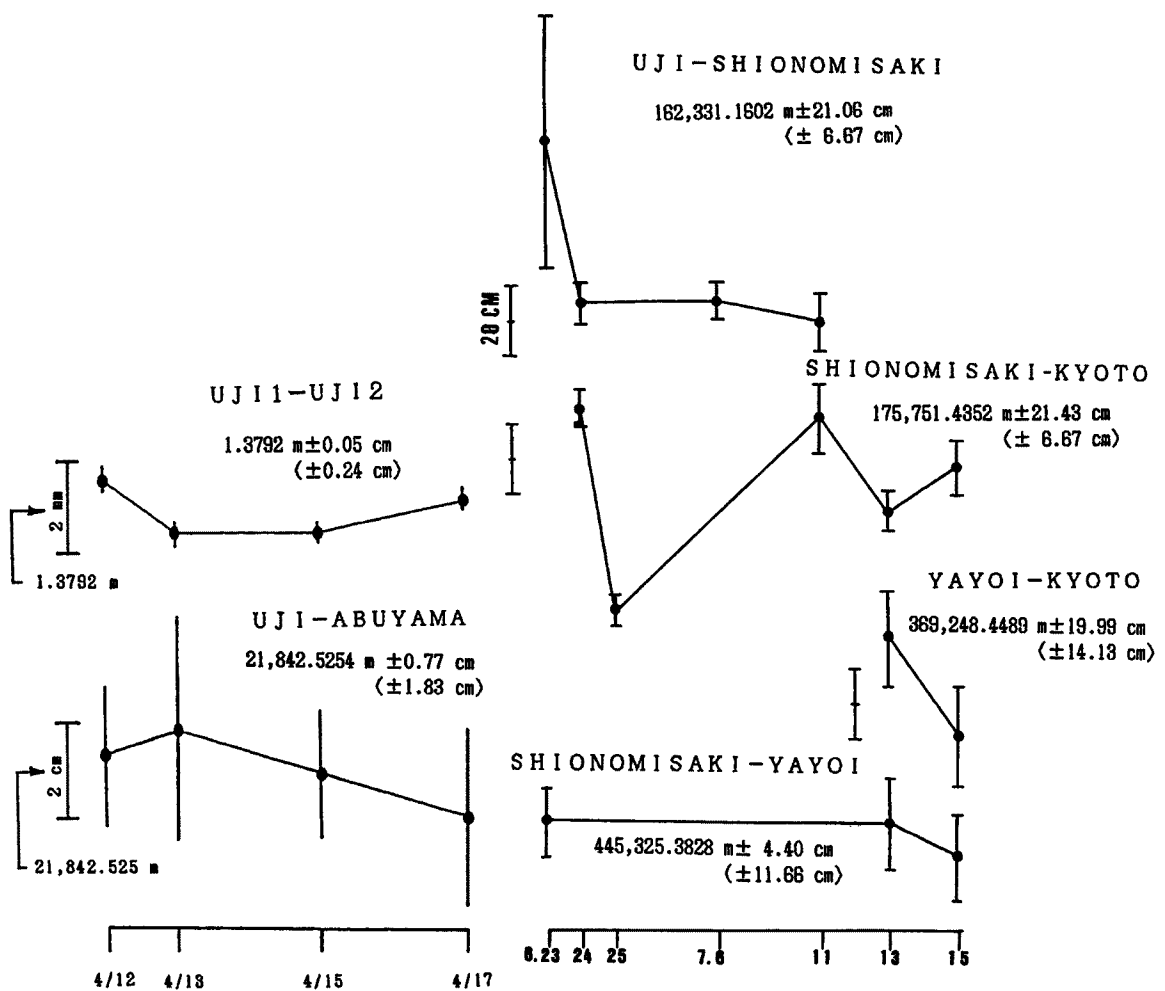


Fig. 3 Results of baseline-length measurements.
 Formal uncertainties are indicated by bars.

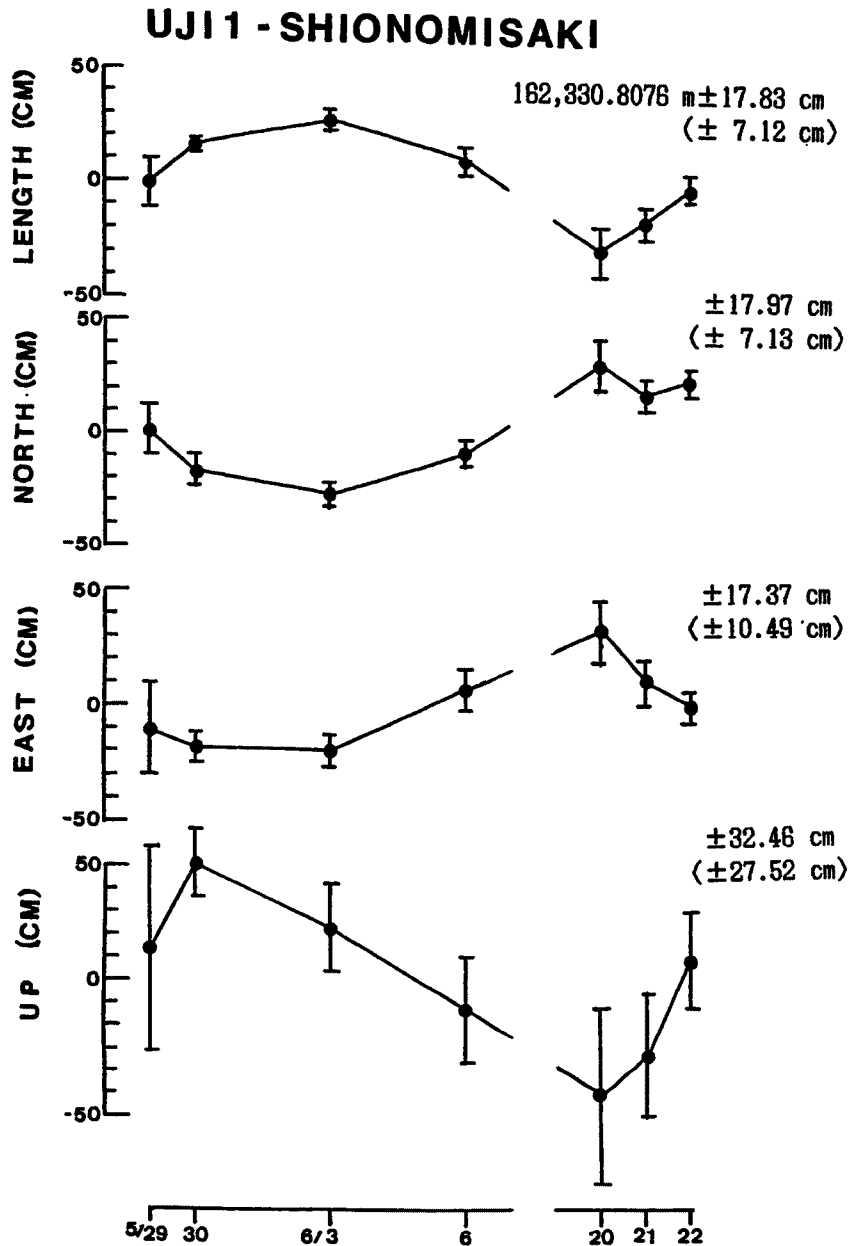


Fig. 4 Uji-Shionomisaki baseline result.

た。解が発散してしまうのは、サイクルスリップの編集がうまく行っていないケースが多かった。サイクルスリップの編集を手動でやれば解を得る場合も増えてこようが、ここでは完全に自動モードで解析を行っている。最初と言うこともあり、ボード不良等ハード的トラブルが目だった。また、フィールド用に完全防水になっているため、連続的に動かしていると発熱して、誤動作を起こすことがあった。この点は完全には解消されていないが、高温になる室内では裏側のパネルをはずし通気を考える必要があるようである。このように、特に7月の観測については、あまりうまく解析できていない。

Fig. 3 に、1.3 m の宇治短基線から 445 km の潮岬—弥生基線のうち解析できた結果を、基線長でその再現

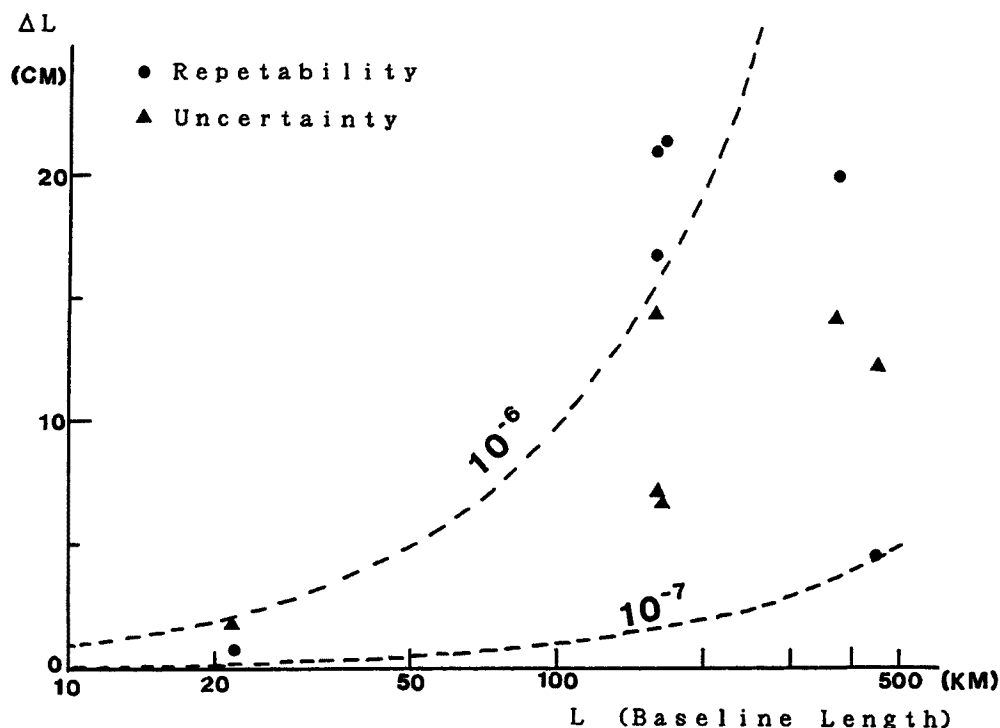


Fig. 5 Baseline length-repeatability relation.

● : repeatability of measurements.

▲ : average of formal uncertainties of solutions.

性を示す。Fig. 4 に、宇治―潮岬の基線で、基線長及び宇治を固定した時の潮岬の動きを南北、東西、上下動の成分で見てみた。上下方向は水平方向の約 2 倍のばらつきを示している。そんなに多くの測定の結果ではないので、繰り返し精度を論じるのは難しいが、Fig. 5 に基線長に対して繰り返し精度をプロットしてみた。この図で黒丸は再現性、三角の印は得られた解の標準偏差の平均である。予備的な結果ではあるが、1 ppm 近くないしはこれを超える精度が出ているようである。

4. あとがき

本稿では、京都大学防災研究所の半固定型 GPS 測位システムの詳細と試験観測結果について報告した。7 月以降の観測では、10 月から 11 月にかけて、高知―宇治、京都で 1 月間の観測を行っている。また、12 月には、相模湾合同観測で、ネットを SLR 系に結びつけた。先にも述べたようにこの座標系による再解析結果はいずれ報告したい。余談ではあるが、2 月に新しい衛星が上がり、すぐに使えるかと思っていたら、ロムを交換しないと受信できない、また交換して受信できるようになったのだが、今度はソフトが対応していない等、まだまだ色々なトラブルが生じそうである。しかしながら、色々操作してみて、一応ハードとかソフトの癖のようなものはつかむことができたと思える。

最近、日本でもグローバルなネットで決めた精密軌道要素を用いれば、500 km の長基線でも 0.1 ppm の精度が達成できそうであるとの報告があり⁵⁾、軌道要素の重要性が指摘されている。国土地理院や通信総合研究所でプロジェクトが組まれているが、日本上空の精密衛星軌道の決定を急いで頂きたい。これから活発になる電離層や大気中水蒸気の影響等のためそうたやすくはないだろうが、これから衛星の配置が良くなり、精密軌道を使って解析できるようになれば、0.1 ppm の精度はなんとか達成できそうである。米国でさんざん議

論されている, 0.01 ppm の精度になると大気中水蒸気との戦いを始めなければならないように思える。

最後に, 観測に協力して頂いたり解析に助言を頂いた, 海上保安庁水路部下里, 国立防災科学技術センター, 国土地理院, 及び観測現場でお世話になった方々にお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 藪田豊・中川一郎・藤森邦夫・藤原智・中村佳重郎・伊藤潔・平原和朗・田中寅夫・細善信: WM101 による GPS 繰り返し測定 of 再現性, 測地学会誌, 第34巻, 第3〜4号, 1988, pp. 221-222.
- 2) 辻宏道・井上康司・坂橋昭房・黒石裕樹・村上亮・増田実: 日本における GPS 干渉測位法の精度—Macrometer II による観測結果—, 測地学会誌, 第34巻, 第2号, 1988, pp. 109-123.
- 3) Aero Service Division Western Atlas International Inc.: AIMS TM Processing Manual, March 2, 1988.
- 4) Schaffrin, B., and Y. Bock: A unified scheme for processing GPS dual-band phase observations, Bull. Geod., Vol. 62, 1988, pp. 142-160.
- 5) 村上亮・辻宏道・井上康司・根元恵造・坂橋昭房, 国内追跡データを用いた GPS 衛星の軌道決定について, 日本測地学会第71回講演会要旨, 1989, pp. 27-28.