

GPS 干渉測位法による基礎実験

東京大学地震研究所	}	村田一郎
		加藤照之
		綿田辰吾 ¹⁾
		平田安廣
東京大学東京天文台 ³⁾	}	井筒屋貞勝 ²⁾
		土屋淳 ⁴⁾
		伊賀章
SONY (株)		

(平成元年8月11日受理)

要 旨

NAVSTAR/GPS 衛星からの電波を地上の複数点においた受信機で受信し、搬送波の位相を比較することによって地上の観測点の間の相対位置並びに基線長を精度良く求める方法が考案され、GPS 干渉測位法と呼ばれている。本報告ではその原理と方法を概説し、このような目的で導入した受信機について紹介する。この受信機を用いて基礎的な実験を行ったのでその結果についても報告する。実験は地震研の屋上に設置された約 4.6 m の基線において実施した。経緯儀による地上測量と比較した結果、座標値で数 mm、基線長で高々 2 mm の差となり、良好な結果が得られた。

1. ま え が き

地球上を航行する船舶、航空機等の移動物体の位置を正確に決めるためのいわゆる航法衛星は1960年代より米国を中心に打ち上げられてきた。当初から運用されてきた NNSS (Navy Navigation Satellite System) の改良発展型として、1970年代はじめ頃より NAVSTAR (NAVigation System with Time And Ranging) 衛星による GPS (Global Positioning System) システムが米国により開発、実験が進められつつある。このシステムを応用して相対測位を行い、地上における複数の点の間の相対位置をこれまでの地上測量よりはるかに精度よく決めようというのがここでの GPS 干渉測位法である。(以後、特に断わらない限りこれを GPS と呼ぶ。)

GPS を用いると、地上の2地点間の相対位置関係や基線長を相対精度 10^{-7} かそれ以上の精度で推定することが可能であるとされている。しかも、その適用範囲は点間距離数 km から数 100 km 乃至数 1000 km にまでも及ぶと考えられ、プレートテクトニクスや地震予知をはじめとする地球科学の広い分野において新たな道を開くことができる可能性

- 1) 現: カリフォルニア工科大学 3) 現: 国立天文台
2) 当時 4) 現: 宇宙開発事業団

が指摘されている（例えば、測地学会編著，1986）。

小論では、まずこの方法の原理について簡単に紹介する。つぎに、このような高精度相対測位を目指した受信機を導入し、基礎的な実験を実施して良好な見通しを得たのでこれを報告する。

2. GPS 干渉測位法

2-1. GPS の原理

GPS を用いるとなぜ精度よく相対位置が決まるのか、という説明は既に解説書も多数出ているので、詳しい説明はそちらに譲り（例えば測地学会編著，1986；WELLS *et al.*，1987），ここでは地殻変動研究者などの応用研究をめざす利用者にとって知っておくべき最少の説明にとどめる。

GPS で使用される NAVSTAR 衛星は21個でシステムを構成する。それぞれが半径約 26600 km（地上高度 20000 km）の円軌道上を周期 0.5 恒星日で周回運動する。軌道自体は 6 本あり、軌道傾斜 55°，互いに昇交点を 60° ずつずらしながら配置されている。各軌道に 3 個ずつの衛星が投入される。（さらに、3 個の予備衛星が運用状態で付加される）。この配置で地上の任意の地点で常時 4 個以上の衛星が利用できるようになる。

衛星からは L_1 ， L_2 と呼ばれる 2 種類の電波（それぞれ 1.575 GHz と 1.228 GHz）が地上に向けて発射される。

射出される電波は基本的に次のような式で表される形式をもっている（測地学会編著，1986）。

$$S_{L_1}(t) = A_P P(t) D(t) \cos \omega_{L_1} t + A_C C(t) D(t) \sin \omega_{L_1} t$$

$$S_{L_2}(t) = A_P P(t) D(t) \cos \omega_{L_2} t$$

ここで、

$S_{L_1}(t)$ ：すべての信号が乗った L_1 の電波の波形

$S_{L_2}(t)$ ：すべての信号が乗った L_2 の電波の波形

A_P ：P コードの振幅

A_C ：C/A コードの振幅

$P(t)$ ：P コードの符号列（10.23 MHz；+1 または -1）

$C(t)$ ：C/A コードの符号列（1.023 MHz；+1 または -1）

$D(t)$ ：情報メッセージ（50 bps）

ω_{L_1} ： L_1 帯の角周波数（1575.42 MHz）

ω_{L_2} ： L_2 帯の角周波数（1227.60 MHz）。

P コード，C/A コードの P あるいは C/A はそれぞれ Precision，Clear/Acquisition の略である。両コード信号はチップレート 10.23 Mbps および 1.023 Mbps の擬似乱数符号系列であり、時刻信号として発射されている。この時刻信号を受信機の時計の表示する時刻と比較して電波伝搬時間を測定するのが、GPS の基本利用法である。コード信号を解読できると、さらに信号の一部に含まれる衛星の識別番号、軌道要素、衛星時計の補正項、電離層遅延補正係数などの情報が利用できるようになる。これらを用いることで測

位が可能となる。また、上記 t で示される時刻は衛星に搭載されたセシウム原子時計と地上局の監視業務によってきわめて精度高く保持されている。

GPS の基本的な利用法である 1 点測位においては地上の受信点において 4 衛星から同時に射出された電波を受信し、到達時刻の差から地上の位置を求める (第 1 図(a))。この手続きは、地震計 (衛星) を用いて地震の電源 (受信点) の位置を求めるのと基本的には同一である (但し、信号の進行方向が逆であるが)。このような 1 点測位においては地上点は、 C/A コードを用いた場合、数 10 m の精度で求められる。

このような 1 点測位方式はほとんどリアルタイムで測位結果が得られるので、航空機・船舶などの航法には重要であるが、精度がそれほど高くないので、地殻変動の検出にそのまま利用することはできない。そこで、情報を解読するだけでなく、波長のずっと短い搬送波 ($L1$, $L2$) 自身の位相を検出し、さらに地上の複数の受信点において電波を受信することにより、それら受信点の相対的な位置関係を飛躍的な高精度で求める方式が考案された。

地球科学研究への応用という面で GPS は、航法測位 (1 点測位) 方式自体も海洋観測における観測点の位置決定、大気・海洋大循環の追跡など広範な利用法が考えられるが、とくに、相対測位方式を地殻変動の検出手段に利用する高精度測位に大きな関心が寄せられている。

2-2. 干渉測位法

高精度相対測位法では、地上に 2 点またはそれ以上の地点に同型の受信機をおき、衛星のある時刻に射出された電波をこれらの受信機で受信し、搬送波の位相を求め、受信点間の到達位相の差から点間の相対位置ベクトルを求めようというものである。そのやり方や、VLBI (Very Long Baseline Interferometry) とのアナロジーから干渉測位方式とも呼ばれ、本論文でもこの言葉を用いる。

搬送波の波長は $L1$ が約 19 cm, $L2$ が約 24 cm であるから、電波の位相を数度 (波長の 1/100) の精度で計測すれば 2~3 mm 程度の分解能が得られる。干渉測位法ではこの搬送波位相と高精度の時刻を原データとして基線ベクトルを算出しようというわけである。

各受信点では、衛星からの電波をあるサンプリング間隔で受信し、衛星からの射出時刻と受信時の位相を求める。観測は数十分から数時間を要し、さまざまな衛星配置によるデータを取得する。2 点で取得したデータからある同一時刻において受信した、ある衛星のある時刻に射出した電波の位相の差を求める (第 1 図(b))。この位相差は、衛星の位置や受信点間の位置ベクトルの関数である。従って、(衛星の位置は別途わかっているものとすると) このような多数のデータから最小自乗法により位置ベクトルを推定することができる。データ解析の流れを簡略第 2 図に示す。

この方式を用いた場合の主な誤差因は衛星の位置推定誤差、電離層や大気の伝搬媒質の影響、受信点付近での多重反射の影響などが考えられている。衛星の位置については衛星から放送される広報暦ではなく、逆に地上の衛星追跡局網などで精密に推定した精密暦を用いる。電離層については $L1$, $L2$ の 2 周波を用いて補正する。大気については水蒸気

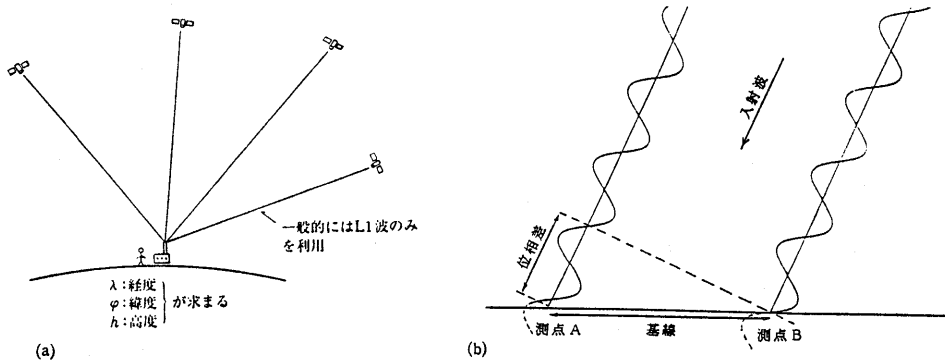


Fig. 1. Schematic diagrams of (a) One point positioning (from Geod. Soc. Jap. ed., 1986) and (b) Interferometric use of GPS.

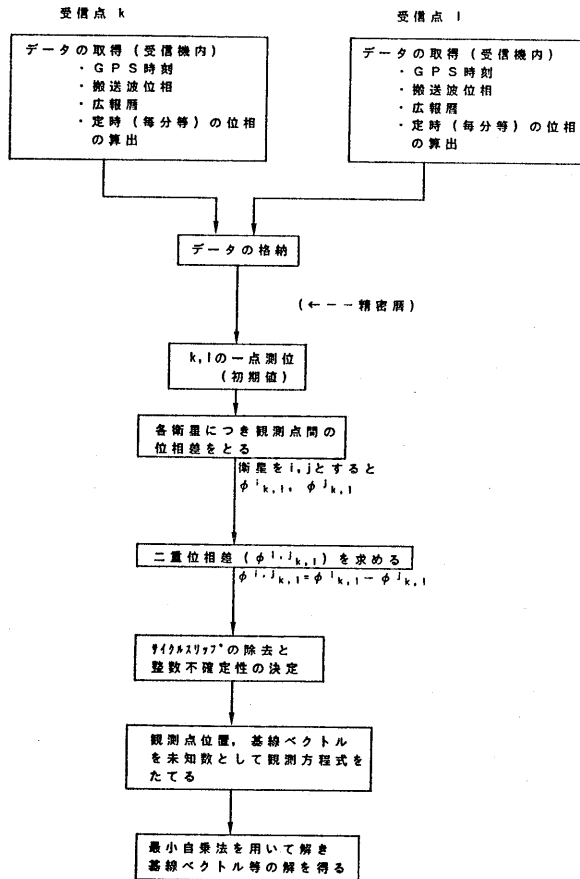


Fig. 2. A simplified flow chart of GPS data acquisition and analysis.

ラジオメータを用いたり、気象観測などによって補正するなどの方法によってある程度改善することができる。

これらの誤差因を注意深く取り除くことにより、点間の相対位置の決定精度は 10^{-7} の桁またはそれ以上になることが期待されている。現在日本の地殻歪の進行速度は1年間でおよそ 10^{-7} 程度と考えられているから（例えば、中根、1973）、GPS の観測を数年間繰り返し返せば地殻歪の進行状況が捕らえられる可能性がある。

このようなことから我々は GPS の受信機を導入し、基礎的な実験を行うこととした。

3. GPS 受信機

我々が入手したのは SONY 社製 GTT-4000 と呼ばれる機種（2台）である。表1に仕様を示す。仕様では2周波受信できているが、本研究の時点では1波の受信機である。アンテナ、受信機の外観を写真1、写真2に示す。アンテナは平面アンテナのきわめて簡単なもので三脚上に容易に乗る。アンテナ直下には受信搬送波を中間周波数に落とすダウンコンバーターが付いている。アンテナケーブルは約 50 m で、受信機にとりこまれる。このためアンテナが屋外に設置されても、近くに建物があるときはその中で各種操作ができるというメリットもある。もちろんアンテナは天空のよく開けた場所に設置しなくてはならない。

第3図は受信機の内部処理装置のブロックダイアグラムである。アンテナで受信した信号は一旦ダウンコンバーターで周波数を落として受信機に導かれる。受信機内ではフィルタ、A/D 変換器などを通してデジタル化される。さらに各チャンネルに分配された後コード発生器によって逆拡散され、デジタルシグナルプロセッサ (DSP) にはいる。DSP では搬送波の位相検出、航法データの復調などが行われる。受信機は 8 ch で、同

Table 1 Specifications of SONY GTT-4000.

製作会社:	SONY 株式会社
型名:	GTT-4000
[アンテナ/プリアンプ部]	
型式:	マイクロストリップ
受信バンド:	L1, (L2)
形状:	直径 24 cm, 厚さ 6 cm
重量 (kg):	4 kg (含アダプター)
[受信機本体]	
チャンネル数:	8
同時受信衛星数:	8
コード利用:	C/A, (P)
CPU:	8086
サンプル周期:	1~9 秒
データ収録媒体:	IC メモリ (1Mb×2)
外部出力:	RS232C 及び GP-1B
サイズ (cm):	44(W)×17(H)×43(D)
重量 (kg):	16.5 kg
消費電力:	100 W 以下 (AC 100V 使用)



Picture 1 A plane antenna used for SONY GTT-4000.



Picture 2 An appearance of the GTT-4000 receiver.

時に8衛星が取得できるようになっている。デジタル処理されたデータは受信機内部のRAMディスク(1Mbyte)にため込まれる。受信機にはRS232C端子とGP-IB端子が装着されていて、これを通じて処理装置にデータが転送される。

処理装置はVLBIなどと異なり、パソコン程度の小型計算機で充分である。ここでは日本電気社製PC-9801VXを用いた。解析用のソフトウェアについてはSONY社によって試験的に開発されたものを用いた。ソフトウェアにおいては上述したように観測点間の位相差をまず求める。さらに異なる衛星間の差をとっていわゆる二重位相差を求める。これらは受信機内部や衛星に搭載された時計に関する誤差要因を除くために行うものである。このようにして求めた位相差データにはデータの欠落や飛び(いわゆるサイクルスリ

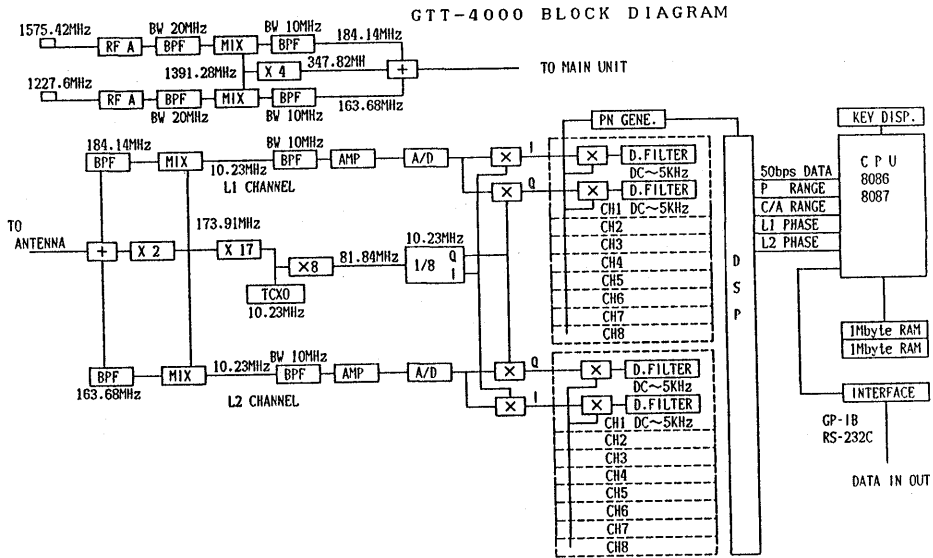


Fig. 3. The block diagram of GTT-4000.

ップ)が含まれている。これらを修復した上で、場合によってはエポック(一連の観測時)間の差をとり(いわゆる三重位相差)、最後に観測方程式から行列を作成して最小自乗法を用いて基線ベクトルの解を求めるという手順を踏む(詳しくは測地学会編著、1986を参照)。

4. 基礎実験および結果

受信機の基礎的な性能を確認するため、地震研の屋上において、受信実験を行った。地震研屋上ペントハウスの屋上にアンテナを約 4.6 m 離して設置した。まず、地上測量で 2 点間の位置関係を導き出すため、2 点の北側に補助点を設け、GPS 観測に先だって、経緯儀によってアンテナ間の点の位置関係が求められた。第 4 図に地上測量結果を示す。南側の基線が GPS 観測で用いられた基線で、基線長は 4.626 m と求められた。また、天測を行って 3 次元的な相対位置を WGS84 系に準拠して決めてあり、その成分はそれぞれ $X=1.048$ m, $Y=4.504$ m, $Z=0.117$ m である。なお、本研究では使用していないが、これら 4 点の中央に以前光波測量用に設置されたといわれる基台があり、そこに 5/8 インチφのステンレスネジを埋め込んで以後の GPS 観測で使用している。

GPS 受信機を用いた実験は 1987 年 5 月 14 日及び 15 日に行われた。アンテナを三脚上に固定し、アンテナケーブルは地震研側面をはわけて 3 階の研究室内においた受信機に接続し、ここでデータを収録した。

第 5 図に衛星の見える状況を示す。この衛星配置のパターンは定常的なもので周回と共に変化することはないが、地球の自転速度と衛星の周回周期との差から、1 日に 4 分ずつ衛星が水平線上に現れる時刻が変わっていく。この図でわかるように、現在は全天を常時

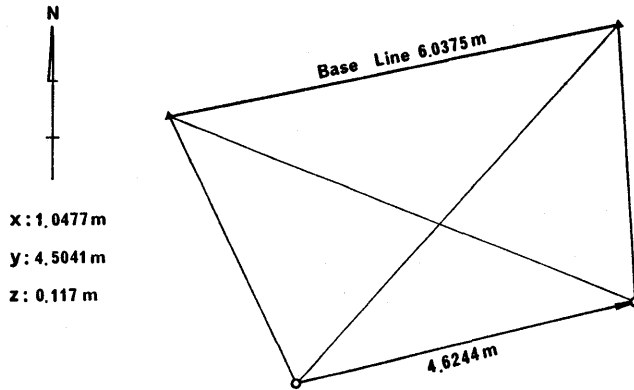


Fig. 4. Results of baseline surveys using a theodolite at the roof of ERI.

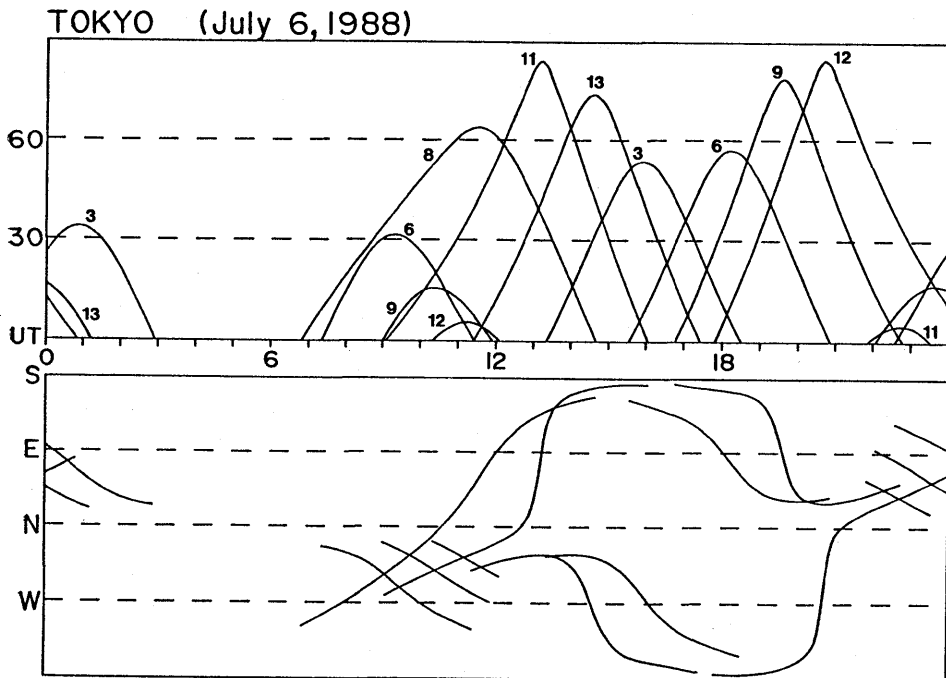


Fig. 5. Locas charts of visible satellites. Upper figure draws inclinations and the lower shows directions of each satellite.

覆うようには衛星は配置されていない。現在はまだ、実験開発の段階であって使用できる衛星は7つと少なく、かつそれらが米国で適切な配置になるように軌道が設定されていて、日本では必ずしも配置はよくない。そこで、本実験では上記の2日間にわたって、識別番号 (PRN No.) が 6, 9, 12, 11, 13 の各衛星の見える時間帯と 8, 11, 13, 6, 9 の各衛星の見える時間帯を一日1回ずつ計4回観測を行った。ここでは仮にこれらの各セ

Table 2. Results of the baseline using theodolite and differences between theodolite and GPS measurements. Alphabet denotes each session name.

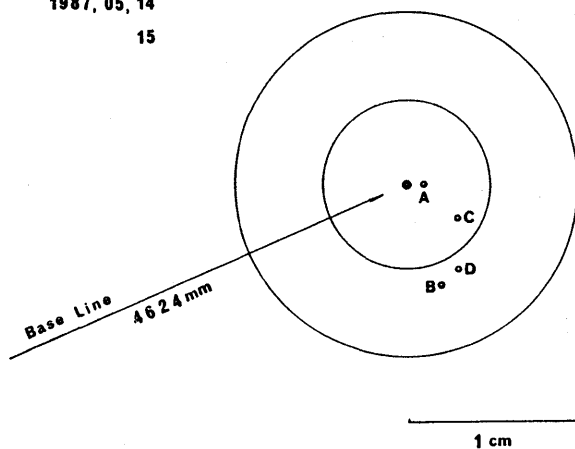
GTT-4000 TEST OBSERVATION

Difference from Conventional Survey (Unit: mm)

TEST	x	y	z	L
	1048	4504	117	4626
A	0	+1	+2	+1
B	-6	+2	-6	+1
C	-2	+3	+5	+2
D	-5	+3	-6	+1

1987, 05, 14

15



	SV	Sample
A	6, 9, 12, 11, 13	652
B	8, 11, 13, 6, 9	556
C	6, 9, 12, 11, 13	652
D	8, 11, 13, 6, 9	556

Fig. 6. Horizontal plots of the resulted benchmark positions using theodolites (double circle) and each session (single circles). Alphabet denotes the each session name (Table 2). Right hand inset shows SV numbers and sample numbers used for each experiment.

セッションを A, B, C, D と呼ぶ。サンプリングは 2 秒に 1 回行い、得られたサンプル数は A, C が 652 個, B, D が 556 個である。

表 2 に解析して得られた結果を示す。表中最上欄に地上測量による結果 (単位: mm)

を示し、以下 A, B, … の各欄はそれぞれのセッションで得られた基線ベクトルの地上測量との差を示す。どの成分とも数 mm 以内に収まっていることがわかる。また、基線長では最大 2 mm と、地上測量とほとんどかわらないという結果になった。地上測量から WGS84 系に変換するときの誤差などや、基線長の回転不変性を考えると、基線長で比較するのが最も簡単であるので、ここで得られた結果は、満足のいくものである。第 6 図にこの結果を図示してある。これは上からみて西側の点を基準とし、東側の求められた水平座標値をプロットしたものである。二重丸が地上測量による点である。各セッションで得られた点は地上測量による点から南東側に 1 ないし数 mm 程度ずれているようにみえる。この程度の基線長では地上測量の方が精度が高いと考えられるから、このずれは GPS の側に起因するものであろう。途中の伝搬媒質はあまり影響はないと思われるので、衛星の配置などによる偏差ではないかと考えられる。いずれにせよ、数 mm 以内に収まっているのは望ましい結果と言える。

この試験観測は国産機による相対測位観測としてはわが国で最初のものである。試作機による観測であるうえ、基線長もわずか 4.6 m 程度の極短いものであり、測定精度を検討するほどの結果ではないが、一応、有望な結果が得られたと判断できる。この結果に意を強くして、我々はこの基線より距離の長い南関東の光波基線網において野外実験を行ったが、その結果については別報を参照されたい (KATO *et al.*, 1990)。

謝 辞

本研究の一部は文部省科学研究費補助金（課題番号：61420011）によって行われた。資料の解析には SONY 株式会社井上真氏にお世話になった。ここに謝意を表する。

文 献

- KATO, T., I. MURATA, A. TSUCHIYA, S. WATADA, S. MATSUMOTO, Y. HIRATA and T. TAKAHASHI, A baseline experiment of GPS at the EDM network in the south ern Kanto area, Japan, to be submitted to J. Geod. Soc. Japan, 1990.
- 中根勝見, 日本における定常的な水平地殻歪 (I) (II), 測地学会誌, 19, 190-199, 1973.
- 測地学会編著, GPS—人工衛星による精密測位システム—, 日本測量協会出版 1986, 263 pp.
- SPIPKER, J. J., GPS signal structure and performance characteristics, *Navigation*, 25, 121-146, 1978.
- WELLS, D. (ed.), Guide to GPS Positioning, Canadian GPS Associates, 1987.

*A Fundamental Experiment of High Accurate
GPS Interferometer*

Ichiro MURATA, Teruyuki KATO, Shingo WATADA,
Yasuhiro HIRATA, Sadakatu IZUTUYA,

Earthquake Research Institute

Atsushi TSUCHIYA

Tokyo Astronomical Observatory

and

Akira IGA

SONY Corporation

Interferometric use of Global Positioning System (GPS) serves us with a tool of high accurate relative positionings. The accuracy expected from GPS may reach to the order of 0.1ppm or better, which is one degree of order better than the conventional techniques such as electromagnetic distance measuring instruments. The present research introduces the SONY GTT-4000 receivers that have been manufactured for such interferometric use. The first experiment was conducted at the baseline of about 4.6 m on the roof of ERI. Results showed only less than 6 mm difference in coordinates and less than 2 mm in length from the ground surveys using a theodolite.