

GPSによる浮体運動計測技術 (第1報：システムの設計と基礎的 運用結果について)

工藤 君明 *1 北野 義信 *2

GPSは人工衛星による新しい測位システムであり、次世代の航法装置となることが期待されているものである。GPSの簡易・精密位置決定装置としての特長を活かして、海洋開発における利用技術の研究開発が進められている。海洋科学技術センターと日立造船情報システム(株)は低速移動体の位置を相対測位法を用いて高精度に求める手法の開発を目的として共同研究を実施している。

移動体測位システムを設計・製作するため、GPSによる測位法の現状について調査を行った。1点測位法による測位精度は15mが限界であり、数mの位置決定精度を必要とする分野では相対測位法を応用した測位システムの開発が必要であることが分かった。

本システムの基礎的運用を目的として、GPSによる基準点測量を行った。この結果、基線長の100万分の1の測位精度が得られ、新しい測量手段として十分使用できることを確認した。

キーワード：GPS, 浮体式海洋構造物, 測量, 相対測位

Positioning System for Moving Floater by GPS (1 st, Report: System Design and Test Results of Basic Operation)

Kimiaki KUDO *3 Yoshinobu KITANO *4

The GPS is a new satellite navigation system. It is designed to provide continuous, accurate position all over the world. In the field of marine research and development, the GPS applications are developing, using its easy and accurate positioning system.

The Japan Marine Science and Technology Center (JAMSTEC) and Hitachi Zosen Information Systems Co., Ltd. are developing a method to measure the slowly oscillating motion of the floating offshore structure with high accuracy using

*1 海洋開発研究部

*2 日立造船情報システム(株)

*3 Marine Research and Development Department

*4 Hitachi Zosen Information Systems Co.,Ltd.

the GPS relative positioning system.

In order to design the measuring system for floater motion, the state of positioning technologies is researched. The accuracy of the point positioning is limited to about 15 m. So, it is necessary to develop a new positioning system using the GPS relative positioning method in the field which requires a few meters accuracy.

To operate this system, a basic geodetic survey was carried out. From repeatability analysis, it is concluded that 1 ppm accuracy of baseline length can be obtained with GPS interferometric positioning, even under the imperfect satellite configuration in Japan.

Key word: GPS, floating offshore structure, survey, relative positioning

1 はじめに

GPS (Global Positioning System : 汎地球測位システム) は米国によって開発され実用化されつつある人工衛星による新しい測位システムである。その主要な目的は航空機や船舶のための航法援助であり、約30mの精度で位置を決定することができる。さらに、GPSは複数の高精度な受信機を用いることにより、1cmの桁の精度が得られ近い将来の測量技術、科学観測手段としての実用化が期待されている。

一般にGPSによる測位法には受信機1台による1点測位法、同時に複数の受信機を利用する相対測位法がある。

1点測位法に利用される受信機は取り扱いが容易であり、リアルタイムに位置を得ることができるが計測精度は30m程度である。

相対測位法は既知点に1台、未知点に1台のGPS受信機を設置し、同時に同じ衛星を観測し共通の誤差要因の影響を除去することによって高精度の測位を行うものである。観測データとして擬似距離を用いるもの、搬送波位相を用いるものがありそれぞれトランスロケーション法、干渉測位法と呼ばれている¹⁾ 観測データに搬送波位相を用いる干渉測位法では基線長の100万分の1の精度が得られている。

GPSを応用する分野では、近年、人間、自動車、船舶、航空機など、移動体の位置を高精度、かつリアルタイムに測位するシステムの研究が活発となっている。^{2),3)}

海洋科学技術センターと日立造船情報システム(株)は、浮体式海洋構造物や観測調査船など海洋において比較的低速で移動する物体の位置を相対測位法を用いて高精度に求める手法の開発を目的として共同研究を実施している。

本稿では、GPSを利用する移動体測位手法の現状について、調査結果の概要を述べるとともに、浮体移動計測システム、GPSの基礎的運用結果として干渉測位法による測地測量の結果について報告する。

2 GPS測位システムの概要

GPSは宇宙部分、制御部分、及び利用者部分から構成されている。図1にGPSのシステム構成を示す。⁴⁾

2.1 宇宙部分

宇宙部分は衛星である。GPS衛星からはLバンドの2つの周波数1575.42MHz(L1), 1227.60MHz(L2)の電波が送信されている。この電波は擬似雑音符号(Pseudo Random Noise Code)と呼ばれる乱数的な暗号の形をしている。受信時には乱数表に相当するコードを参照し信号内容を解読する。このコードパターンには2種類あり、C/Aコード(Clear and Acquisitionまたは, Coarse and Access)は公開されているが、Pコード(Precisionまたは, Protect)は機密扱いである。L1波にはC/Aコード、Pコードの両方が乗っているがL2波にはPコードのみが乗っている。このコードパターンを用いてGPS衛星より

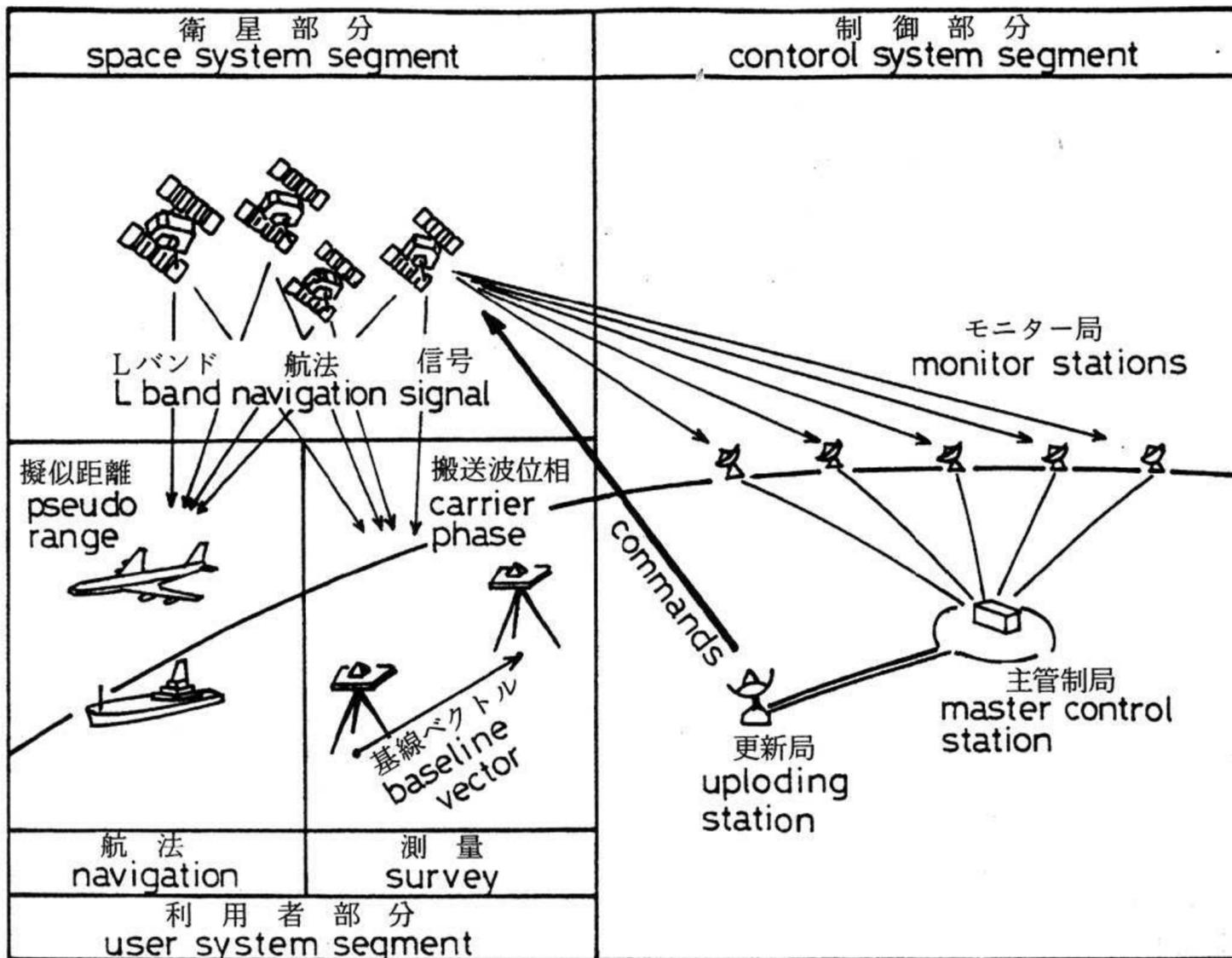


図1 GPSのシステム構成
Fig. GPS System Organization

送信される信号を解読することにより、航法メッセージ (Navigation message) を取り出すことができる。

航法メッセージには次に示す情報が送信されている。

① アルマナックデータ (Almanac Data)

利用可能な全衛星の概略の軌道情報、及び時刻情報である。このアルマナックデータは1度取得すれば約1週間は利用できるように考慮されており、また少なくとも6日に1度は更新されることになっている。このデータを用いて観測計画を検討することができる。

② エフェメリデータ (Ephemeris Data)

観測衛星自身の軌道情報で、約100 mの精度で衛星の位置を求めることができるとされている。このエフェメリデータは1度取得すれば1時間半は利用できるようになっており、少なくとも1時間に1回は更新されることになっている。このデータを用いて衛星の位置を求め測位計算を行うことができる。

③ GPS時刻情報

GPS衛星には原子時計が装備されており、1980年1月6日0時UTC (協定世界時) に同期してスタートしている。また、毎週日曜日0時UTCに時計はリセットされる。GPS衛星は1980年1月6日から受信時刻までの週の数、軌道要素の基準時刻 (日曜日0時からの秒数)、GPS時間補正パラメータ、時刻同期パターン、を送信している。これらのデータを用いて受信機時計と衛星時計の時刻同期を行うことができる。

④ 電離層補正パラメータ

電離層による電波伝搬遅延時間を受信機の設置されている現地時間の関数で表している。伝搬遅延モデルを直流項と余弦 (COS) の半サイクルで近似する。このCOS波形は、直流項、位相、振幅、周期で表現することができ、衛星からはこれらのパラメータを決定するため $\alpha_0 \sim \alpha_3$, $\beta_0 \sim \beta_3$ の8個のデータが送信されている。電離層補正パラメータを用いて遅延量を約60%

程度補正できるとされている。

2.2 制御部分

制御部分は衛星の動作を監視し、制御するための地上施設である。GPSの地上追跡管制局はコロラドスプリングス（米国）を主管制局に、南太平洋、ハワイの各地に計5局の管制局が配置されている。管制局は常時すべての衛星を観測している。観測されたデータは主管制局であるコロラドスプリングスで解析処理され、各衛星の状態、衛星軌道、時計の予測データを作成し、1日1回の頻度で衛星に送信している。衛星はこれらのデータをもとに航法メッセージを更新している。

2.3 利用者部分⁵⁾

利用者部分はGPS受信機を含めて、航空機、船舶、自動車などに搭載される航法装置である。また、GPSは測量に利用され、目的により使用されるGPS受信機の仕様は異なる。

航法用に使用されるGPS受信機は擬似距離を計測し、1点測位法による測位機能を有している。受信方式はL1一周波、C/Aコード解読型の受信機で、受信チャンネル数は1チャンネル、または2チャンネルのものが多く、4～8衛星の信号を高速で切り換えて受信する。使用されるアンテナは水平方向の受信感度を重視したヘリカルアンテナが用いられる。

測量用に用いられるGPS受信機は搬送波位相を計測できる受信機で、1点測位の機能も持っている。受信方式はC/Aコード解読型で、L1一周波、または、L1、L2二周波の受信機がある。二周波受信機では、電離層による電波伝搬遅延量が周波数に反比例する性質を利用し、電離層による誤差を高精度に補正するものである。また、受信チャンネル数は、各衛星からの電波をそれぞれ独立したチャンネルで受信するために4チャンネル以上装備している。使用されるアンテナは電波受信の中心である位相中心の誤差の小さいマイクロストリップアンテナ、クロスダイポールアンテナなどが使用される。

2.4 GPSシステム完成の見通し

GPSシステムは当初の計画では1988年中には世界中どこでも3衛星を用いた2次元測位が可能となる予定であった。しかし、衛星を打ち上げる予定であったスペースシャトルが1986年1月28

日に大事故を起こし、スペースシャトルそのものの計画の遅れとともにGPS衛星の打ち上げも大幅に遅れている。⁵⁾

1989年4月現在、稼働中の衛星の数は8個であり日本では4衛星を用いて観測可能な時間帯はごくわずかであり、3衛星による時間帯も限られている。現在、主に使用されている衛星はブロックI衛星と呼ばれ、GPSシステム開発のための実験衛星である。7年の設計寿命を過ぎたものが3個（SVNo.6, 8, 9）あり、このうち8番の衛星は衛星時計の誤差が大きく1点測位では用いることができない。また、6番の衛星は使用できる規格ぎりぎりの状態である。しかし、1989年2月14日によろやく本格実用衛星であるブロックII衛星が打ち上げられ、今後2ヶ月に1個の割合で打ち上げられる予定である。1990年に衛星の打ち上げが完了した時点ではA～Fの6軌道面に4個ずつ計24個の衛星で構成され、24時間連続して4～7個の衛星が観測可能となる。表1に1989年3月での衛星軌道面が発表されている衛星の打ち上げ予定を示す。⁶⁾

3 GPSによる測位の方法

GPSによる測位法は大きく分けて、受信機1台による1点測位法と同時に複数の受信機を用いる相対測位法がある。相対測位法はさらに観測量として搬送波位相を用いた干渉測位法、キネマティック測量、擬似距離を用いたトランスロケーション法、ディファレンシャルGPSがある。図2にGPSによる測位の概念図を示す。

1点測位法、トランスロケーション法、ディファレンシャルGPSは船舶、航空機等の移動体の測位を目的に開発されたものであり、干渉測位法、キネマティック測量は静止している観測点の測位を目的に開発されたものである。また、1点測位法、ディファレンシャルGPSは時々刻々の位置が即座に得られるのに対して、その他の方法は、基本的には観測終了後の後処理で位置が求められる。

3.1 1点測位法¹⁾

1点測位法では衛星の位置を既知とし、衛星と観測点との間の距離を計測し未知量である観測点の位置を求める。この距離はC/Aコードを用い

表 1 GPS 実用衛星の打ち上げスケジュール
Table 1 GPS Satellites (Block II) launch schedule

打ち上げ番号 launch No.	製造番号 prod. No.	信号コード番号 SV No.	軌道面 plane	打ち上げ予定 launch
1	14	14	E	Feb 14. 89
2	13	—	D	late Apr 89
3	16	—	F	late Jun 89
4	17	—	D	late Jun 89
5	18	—	D	mid Aug 89
6	19	—	F	Oct -Nov 89
7	20	—	F	Nov -Dec 89
8	21	—	B	Jan 90
9	15	—	A	Mar 90

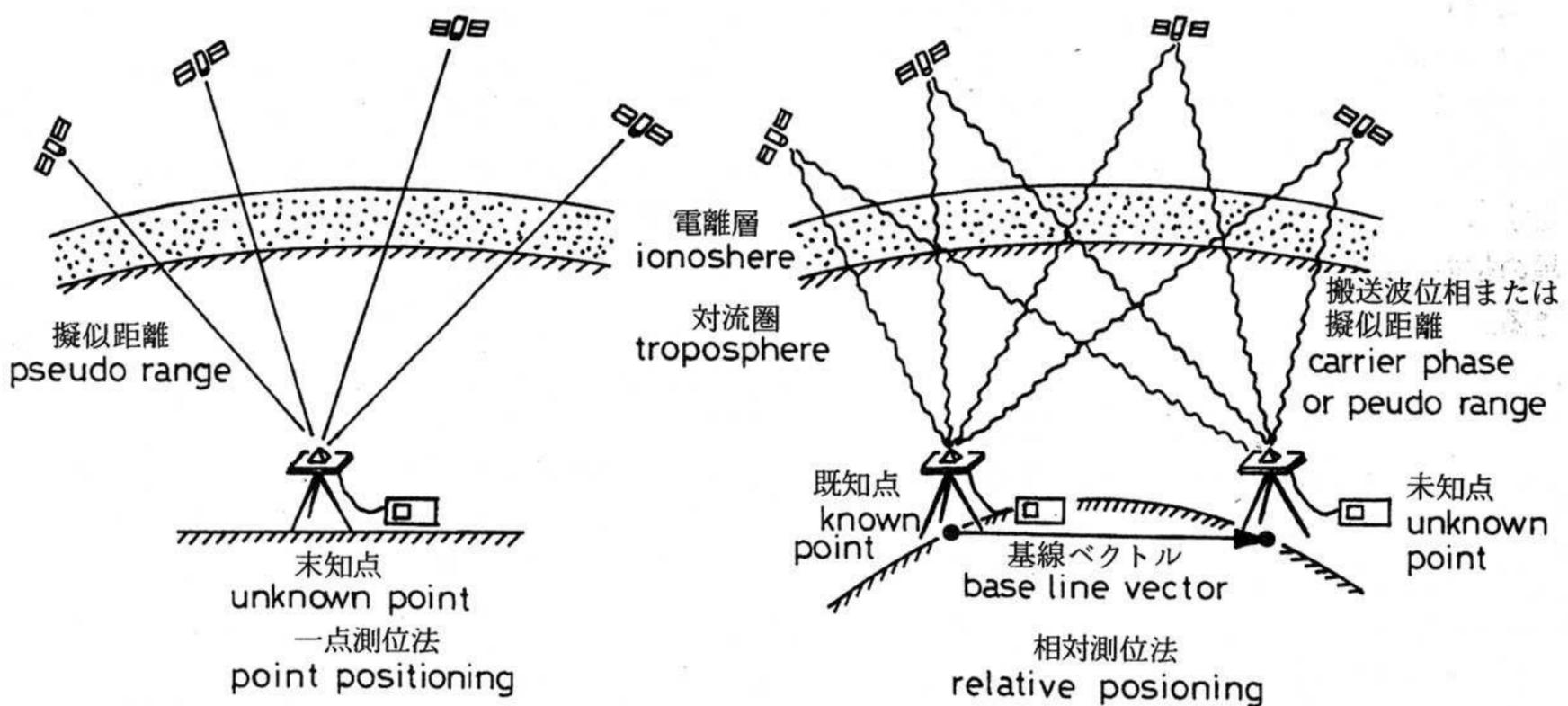


図 2 GPS による測位の概念図
Fig.2 Schematic diagram of positionig system by GPS

て、衛星から電波が発射された時刻と受信機が電波を受信した時刻との差から電波の到達所用時間を求め、光速を乗じることによって得られる。擬似距離の分解能は約 3 m である。

衛星と受信点間の距離は次に示す誤差を含むため擬似距離と呼ばれている。

- ① 衛星に搭載されている時計の誤差
- ② 受信機に搭載されている時計の誤差
- ③ 電離層による電波伝搬遅延

④ 対流圏による電波伝搬遅延

⑤ 放送暦より計算される衛星位置の誤差

1点測位法ではこれらの誤差のうち衛星時計の誤差、電離層による電波伝搬遅延については航法メッセージに含まれる補正パラメータによってある程度補正することができる。また、受信機時計の誤差については位置の計算の過程で除くことができるが、その他の誤差要因は1点測位法では補正することができない。

時刻の差を計測するためには衛星時計と受信機時計が完全に同期していなければならない。しかし、時計を同期させるためには高価な受信機を必要とするため、時計のずれ量も未知数とし位置を計算する。未知数の数は観測点の3次元の座標と時計のずれ量の計4個であるため、受信機1台により同時に4個以上の衛星を観測する。衛星*i*の位置を(X_i, Y_i, Z_i) $i=1,4$ とし、受信点の位置を(X_p, Y_p, Z_p)とすると次の式が得られる。

$$\begin{aligned} \{(X_p - X_1)^2 + (Y_p - Y_1)^2 + (Z_p - Z_1)^2\}^{1/2} + C \cdot \delta_t &= r_1 \\ \{(X_p - X_2)^2 + (Y_p - Y_2)^2 + (Z_p - Z_2)^2\}^{1/2} + C \cdot \delta_t &= r_2 \\ \{(X_p - X_3)^2 + (Y_p - Y_3)^2 + (Z_p - Z_3)^2\}^{1/2} + C \cdot \delta_t &= r_3 \\ \{(X_p - X_4)^2 + (Y_p - Y_4)^2 + (Z_p - Z_4)^2\}^{1/2} + C \cdot \delta_t &= r_4 \\ &\dots\dots\dots(1) \end{aligned}$$

ここに、 C ：光速、 δ_t ：受信機時計のずれ、 r_i ：擬似距離である。

(1)式の連立方程式を解き、未知量である観測点の位置は各衛星を中心とし、衛星からの距離を半径とする4つの球面上の交点として求められる。衛星の位置は衛星より送信される放送暦より計算できる。

1点測位法の精度は約30mであるが、受信機1台でリアルタイムに絶対位置が得られるため、船舶、航空機等の航法援助装置として利用されている。

3.2 相対測位法

3.2.1 干渉測位法^{1), 7)}

GPSによる測位法の中で測地測量の分野で広く用いられる方法に干渉測位法があり、基線長の100万分の1の精度で観測点間の相対位置を求めることができる。この方法は同時に既知点を含む複数の受信機を用いて、受信機を静止させて1時間以上観測する。観測終了後、各々のデータを持ち寄り解析することにより、既知点からの基線ベクトルを求めることができる。

1点測位法では、観測量としてC/Aコードによる擬似距離を用いるのに対し、干渉測位法では搬送波の位相を用いる。GPS衛星は地上2万km上空を秒速約4kmで地球をまわっており、衛星より発射される電波の受信周波数はドップラー効果により±約5kHzの範囲で変化する。一方、受信

機は内部の水晶発振器より衛星の搬送波の発信周波数に等しい信号を作り衛星からの送信周波数との差を積算する。この積算波数は位相として2mmの分解能で衛星と受信点との距離の変化を測定する。したがって、搬送波位相は衛星と観測点との距離を直接測定するのではなく、ある一定のバイアス値からの変化量が測定される。

搬送波位相を差し引きして一重差、二重差と呼ばれる量を構成し最小二乗法により位置を求める。衛星*i*(1~4)と受信点*j*(1~2)の搬送波位相 $\phi(i, j)$ は次式で定義される。衛星*i*の座標、受信点1の座標は既知とする。

$$\begin{aligned} \phi(i, j) &= f \cdot \rho(i, j)/C + \phi_s(i) + \phi_r(j) + N(i, j) \\ &\quad + \phi_p(i, j) \dots\dots\dots(2) \end{aligned}$$

ここに、 f ：搬送波の周波数、 C ：光速、 ρ ：衛星*i*と受信点*j*の距離、 $\phi_s(i)$ ：衛星*i*の時計による誤差、 $\phi_r(j)$ ：受信機*j*の時計による誤差、 $N(i, j)$ ：位相の初期値バイアス、 $\phi_p(i, j)$ ：電離層、対流圏による遅延である。衛星*i*と受信点1, 2との間で(2)式の差を取ることで衛星時計による誤差は消去され次式で一重差が計算される。

$$\begin{aligned} \phi(i, 1) - \phi(i, 2) &= f/C \{ \rho(i, 1) - \rho(i, 2) \} + \phi_r(1) \\ &\quad - \phi_r(2) + N(i, 1) - N(i, 2) \\ &\quad + \phi_p(i, 1) - \phi_p(i, 2) \dots\dots\dots(3) \end{aligned}$$

衛星1を基準に一重差の差、すなわち二重差を取ると受信機時計の誤差が消去され次式が得られる。

$$\begin{aligned} \{ \phi(i, 1) - \phi(i, 2) \} - \{ \phi(1, 1) - \phi(1, 2) \} \\ = f/C \{ \rho(i, 1) - \rho(i, 2) - \rho(1, 1) + \rho(1, 2) \} \\ + N(i, 1) - N(i, 2) - N(1, 1) + N(1, 2) \\ + \phi_p(i, 1) - \phi_p(i, 2) - \phi_p(1, 1) + \phi_p(1, 2) \\ \dots\dots\dots(4) \end{aligned}$$

電離層、対流圏による遅延の項は受信点間の距離が十分短ければ両者の間ではほぼ共通であると考えられ、この項を小さいとして無視し、(4)式を整理すると次式が得られる。

$$\{\phi(i, 1) - \phi(i, 2)\} - \{\phi(1, 1) - \phi(1, 2)\} - f/C \{\rho(i, 1) - \rho(1, 1)\} = f/C \{-\rho(i, 2) + \rho(1, 2)\} + N$$

.....(5)

ただし、 $N = N(i, 1) - N(i, 2) - N(1, 1) + N(1, 2)$ である。(5)式において、衛星の座標、受信点1の座標は既知であるから、未知量は右辺の受信点2の座標と初期値バイアスNである。最小二乗法では位置を求めるのと同時に未知量である初期値バイアスも決定する必要がある。また、搬送波位相の差を取ることににより両受信点間に共通の誤差要因は効果的に除去されていることが分かる。

干渉測位法は長時間受信機を静止させたまま観測する必要があるが、高精度の位置が求められるため、測地測量や地震予知のための地殻変動の検出手段への応用が期待されている。また、すべての相対測位法では、少なくとも1つの観測点の位置が正確に分かっている必要があるため、干渉測位法を用いて基準点の座標を決定することができる。

3.2.2 キネマティック測量⁸⁾

干渉測位法では未知量である搬送波位相の初期値バイアスを求める必要があるため、長時間アンテナを静止させて観測する必要があった。この初期値バイアスが観測の最初に求められればアンテナを移動させることができ、多数の測量点を短時間に通常の干渉測位法と同等の精度で求めることができる。キネマティック測量とは1台の受信機は既知点に固定し、もう1台の受信機は初期値バイアス決定後、目標の測量点に移動し数分間計測した後、次の測量点に移動し次々計測していく方法である。ただし、移動中も受信機は連続して衛星を追跡する必要がある。

未知数である初期値バイアスを求めるには次の3つの方法がある。

- ① 既に位置の分かっている2点で観測する。
- ② 既知点と未知点で十分な時間観測する(通常の干渉測位法)。
- ③ 2台の受信機のアンテナ交換を行う。

①, ②の方法を用いて行われた実験の結果では約500mの基線長に対して1cmの精度が得られている。⁹⁾ ③の方法で行われた実験の結果では約

7000mの基線長に対して5mmの精度が得られている。¹⁰⁾ アンテナ交換による方法は簡便であるため、工事現場での測量への応用が期待されている。

現在実用化されつつあるキネマティック測量では、静止した測量点の位置を求めるのが目的であるため、解析に使用されるデータは静止観測中のデータのみで移動中のデータは使用されない。しかし、移動中のデータを解析することによって移動中のアンテナの位置を求めることができる。この方法を応用すれば、移動体の位置は初期値バイアス決定後のデータすべてについて時々刻々の位置を解析することによって得られる。観測量に搬送波位相を用いるため、測量と同程度の精度で移動中の位置が求められるものと期待される。

3.2.3 トランスロケーション法¹⁾

干渉測位法が観測量として搬送波位相を用いるのに対して、トランスロケーション法は擬似距離を用いるため、搬送波位相のように初期値バイアスやサイクルスリップが存在せずデータの取り扱いが容易であるため、移動体の測位に用いられ、数mの精度で位置を求めることができる。干渉測位法と同様、擬似距離に対して一重差、二重差を構成し、最小二乗法を用いて未知点の位置を求める。

トランスロケーション法は海図、港湾図、水深図等を作成するための水路測量への応用が期待されている。²⁾

3.2.4 ディファレンシャルGPS³⁾

米国の国防省及び運輸省の共同文書である連邦電波航法計画では港湾内の船舶の安全航行には8m~20mの測位精度が必要であるとしている。1点測位法による測位精度は15mが限界であり、さらに、将来測位精度を意図的に100mに劣化させるといわれている。ディファレンシャルGPSはこの要求を満足するためにアメリカ沿岸警備隊(U.S. Coast Guard)を中心に開発されたものである。

ディファレンシャルGPSは既に正確な位置の分かった基準局と利用者である船舶とで構成され、基準局は観測できるすべての衛星を追跡し、各衛星についてそれぞれ擬似距離の補正値を計算し、この補正値を同じ地域で運行する船舶に送信する。船舶は受信した補正値を用いて擬似距離の誤差を

消去し高精度測位を行うものである。

衛星 i の座標を (X_i, Y_i, Z_i) $i = 1, 4$, 基準局の座標を (X_r, Y_r, Z_r) とすると, 擬似距離の誤差の補正値は次の式で求めることができる。

$$\begin{aligned} \delta r_1 &= r_{1r} - \{(X_r - X_1)^2 + (Y_r - Y_1)^2 + (Z_r - Z_1)^2\}^{1/2} \\ \delta r_2 &= r_{2r} - \{(X_r - X_2)^2 + (Y_r - Y_2)^2 + (Z_r - Z_2)^2\}^{1/2} \\ \delta r_3 &= r_{3r} - \{(X_r - X_3)^2 + (Y_r - Y_3)^2 + (Z_r - Z_3)^2\}^{1/2} \\ \delta r_4 &= r_{4r} - \{(X_r - X_4)^2 + (Y_r - Y_4)^2 + (Z_r - Z_4)^2\}^{1/2} \\ &\dots\dots\dots(6) \end{aligned}$$

ここに, δr_i は擬似距離の補正値, r_{ir} は基準局と各衛星との擬似距離である。

船舶などの移動局では, この擬似距離の補正値を用いて次式で位置を計算することができる。

$$\begin{aligned} \{(X_p - X_1)^2 + (Y_p - Y_1)^2 + (Z_p - Z_1)^2\}^{1/2} + C \cdot \delta_1 &= r_1 - \delta r_1 \\ \{(X_p - X_2)^2 + (Y_p - Y_2)^2 + (Z_p - Z_2)^2\}^{1/2} + C \cdot \delta_2 &= r_2 - \delta r_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \{(X_p - X_3)^2 + (Y_p - Y_3)^2 + (Z_p - Z_3)^2\}^{1/2} + C \cdot \delta_3 &= r_3 - \delta r_3 \\ \{(X_p - X_4)^2 + (Y_p - Y_4)^2 + (Z_p - Z_4)^2\}^{1/2} + C \cdot \delta_4 &= r_4 - \delta r_4 \\ &\dots\dots\dots(7) \end{aligned}$$

ここに, (X_p, Y_p, Z_p) は移動局の座標である。海上実験の結果 8 m 程度の測位精度が達成されている。¹¹⁾

4 浮体運動計測のためのシステム設計

3章では既に実用化されつつある, または実用化のための実験が行われている GPS 測位システムについて調査し, その概要を述べた。これらの測位システムを応用し, 当センターが山形県鶴岡市由良漁港沖合い約 3 km の海域に弛緩係留している浮体式海洋構造物の長周期運動を計測できるような高精度の測位システムを設計する。

図 3 に計測システムの概念図を, 図 4 に計測システムの構成を示す。相対測位法による浮体運動

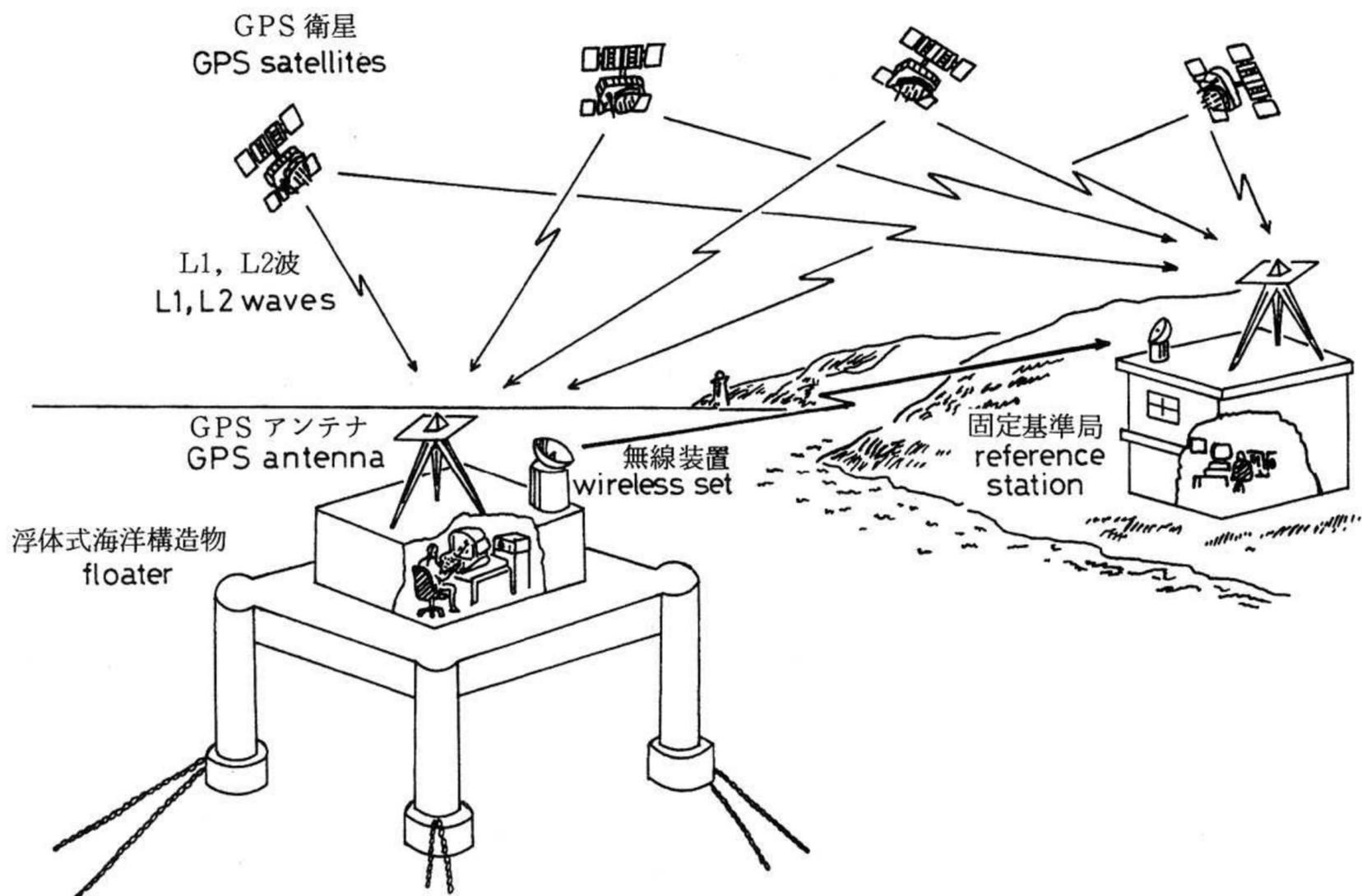


図 3 GPS による浮体運動計測システムの概念図
Fig.3 Schematic diagram of measuring system for floater motion by GPS

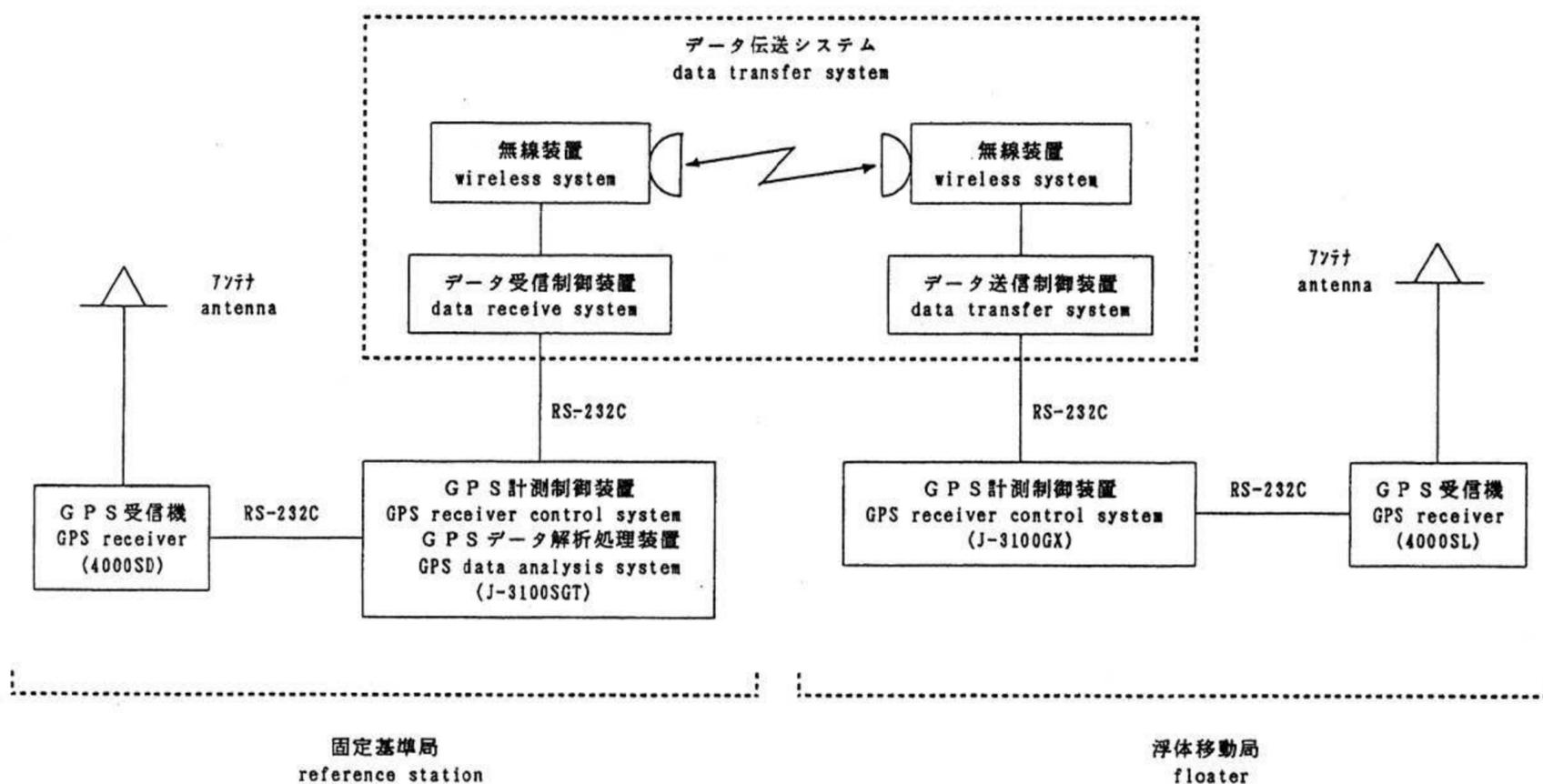


図 4 GPS による浮体運動計測システム
Fig.4 Measuring system of moving floater by GPS

計測システムは、陸上側の固定基準局と海上側の浮体移動局からなり、この間をデータ伝送システムで接続し、リアルタイムで測位結果が得られるシステムとしている。

4.1 陸上側固定基準局

陸上側固定基準局はGPS計測制御装置、GPSデータ解析装置、GPS受信機、データ受信制御装置から構成されている。

計測制御装置は観測スケジュールに従いGPS衛星を観測し、観測データをデータ解析処理装置に引き渡す部分である。

データ解析処理装置は固定基準局で観測したデータ、海上浮体で観測したデータを相対測位法により解析処理を行い、浮体の時々刻々の位置を求め、表示、保存する。図5に解析の流れを示す。

データ受信制御装置は海上浮体で観測したデータを受信し、データ解析処理装置に引き渡す。また、海上側と同時観測を行うため観測スケジュールを海上側に送信する。浮体式海洋構造物には居住設備はなく無人であり、浮体へは海象が穏やかな時には機器類の保守、点検などのため通船で行くことができるが、荒天時、特に冬季には長期にわたり浮体に近づくことが困難となる。したがって、海上側計測制御装置、GPS受信機はデータ

転送システムを用いて陸上固定基準局より遠隔操作によって計測制御、計測データの取得を行えるシステムとしている。

固定基準局のGPS受信機は移動体の位置を求めると同時に、既知点として正確な座標が分かっている必要があるので、精密測量の行える受信機である必要がある。表2に基準局用として採用したGPS受信機Trimble 4000SDの基本仕様を示す。写真1にTrimble 4000SDの写真を示す。Trimble 4000SDには次に示す特長がある。

① L1, L2の二周波受信機

GPS測位システムの誤差要因の1つとして衛星より送信される電波が電離層を通過する際の伝搬遅延があげられる。電離層による電波伝搬遅延量は周波数に反比例する性質を利用し、L1, L2の二周波の電波を同時に計測することにより電離層による遅延を高精度に補正することができる。

② L1はC/Aコード解読型、L2はコードレスの受信機

L1はC/Aコードを用いてGPS衛星より送信される信号を解読し、航法メッセージを出力できる。得られた時刻情報より受信機単独で衛

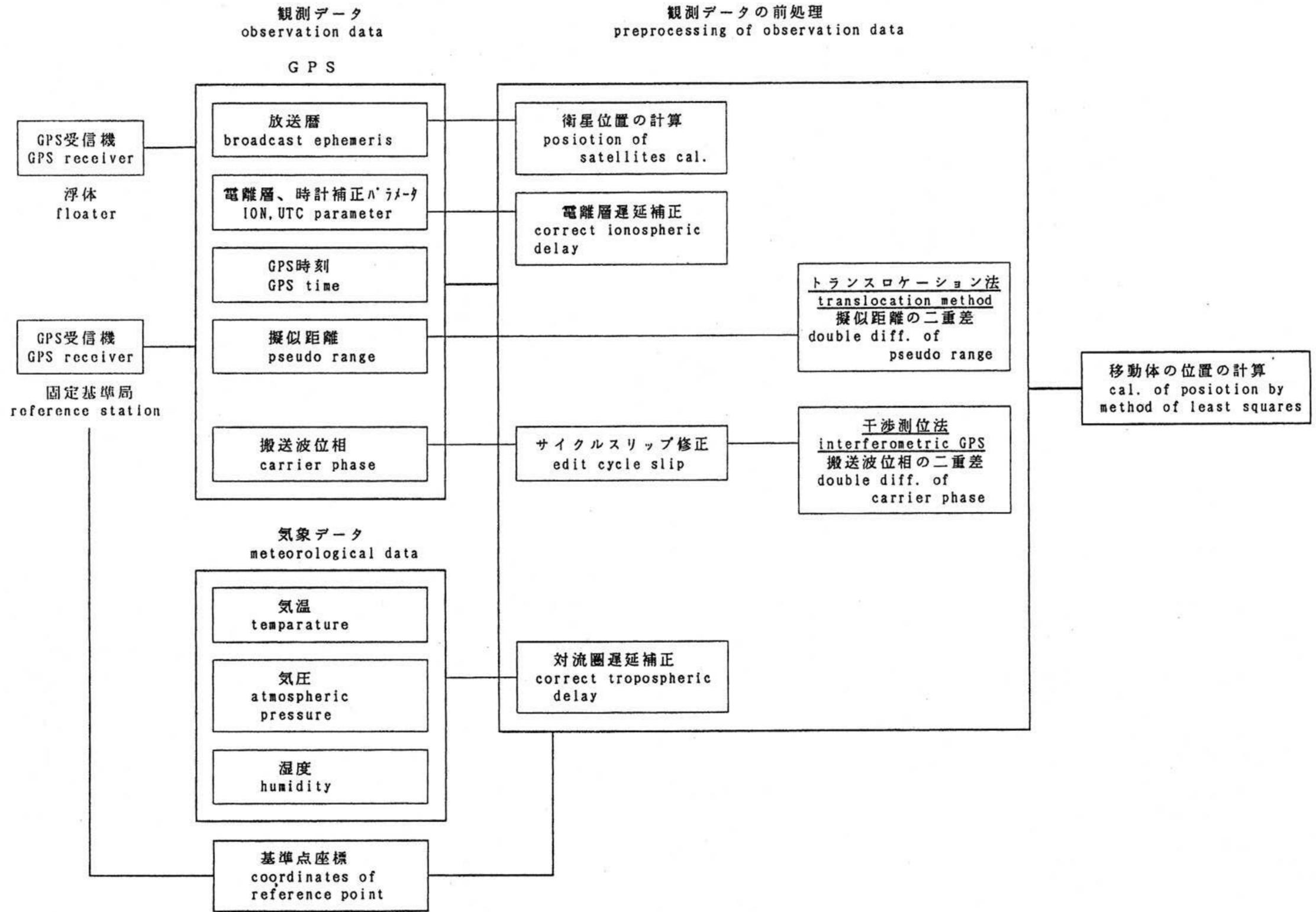


図 5 GPS による浮体運動の解析ブロック図
 Fig.5 Block diagram of analysis of moving floater by GPS

表 2 GPS受信機Trimble 4000 SDの
基本仕様

Table 2 Principal specification of GPS
receiver Trimble 4000 SD

受信周波数 frequency	L1 5 ch. L2 5 ch.
受信機方式 receiver type	C/A コード解読 C/A code L2 コードレス L2 codeless
計測項目 outputs	GPS時刻 GPS time 擬似距離 pseudo range L1 搬送波位相(1mm以内) L1 carrier phase L2 搬送波位相(2mm以内) L2 carrier phase
サンプリング時間 sampling time	1~600 sec
計測精度 accuracy	1cm + 1ppm × 基線長 baseline
インターフェース I/O port	RS-232C × 2
データ記録媒体 memory	1MバイトRAM
アンテナ antenna	マイクロストリップ micro strip 変動誤差 3mm以内 error
振動 vibration	1gで0~50Hzまで耐用 1g, 0 to 50Hz
衝撃 shock	30gまで耐用 30g half sine wave

星時計と受信機時計の時刻同期を取り、計測データに時刻情報が付加され、複数の受信機間で受信タイミングを合わせる必要がなく独立して



写真 1 GPS 受信機トリンブル 4000 SD
Photo 1 GPS receiver Trimble 4000 SD

計測できる。L2はPコードが軍事上の機密扱いで有事の際には変更される可能性があるため、コード情報を用いないで搬送波を再生し位相を計測するコードレス方式の受信機である。

③ 5チャンネルの複数受信方式の受信機

同時に5個以上の衛星の信号を自動補足し、それぞれ独立したチャンネルで連続して計測できる複数チャンネル方式の受信機である。1チャンネルまたは2チャンネル順次切り換え方式の受信機では、5個の衛星を全部測定するのに数秒の時間を必要とし、移動体の高精度測位を行うには適さない。また、3次元測位を行うためには少なくとも4衛星からの電波を同時に受信する必要がある。

④ 航法メッセージ、擬似距離、搬送波位相を出力

相対測位方式には観測量として擬似距離を用いる方式、搬送波位相を用いる方式がある。擬似距離の測定精度は3m程度であるのに対して搬送波位相は3mm程度の精度が得られ、より高精度の測位を行うことができる。データのサンプリング間隔は1~600秒と可変であり移動体の測位や測地測量に適する。

⑤ アンテナ

高精度測位のためのアンテナとして必要な特性には指向性、マルチパスの影響の除去、電波受信の中心である位相特性が重要である。測位計算によって得られる受信点の位置はアンテナの位相中心であり、アンテナの位相特性が特に重要である。

反射板付きのアンテナを使用し、水平仰角10度以下の入力電波を阻止し反射波による計測誤差を避けると共に、位相中心の変動誤差が3mm以内の無指向性マイクロストリップアンテナを採用している。

4.2 海上側浮体移動局

海上側浮体移動局はGPS計測制御装置、データ送信制御装置、GPS受信機から構成されている。計測制御装置は陸上側固定基準局より送られてくるGPS衛星観測スケジュールに従いGPS衛星を観測し、データをデータ送信制御装置に転送する部分である。

データ送信制御装置は陸上より観測スケジュールを受信し、計測制御装置に引き渡す。また、観測データを計測制御装置より受け取り、陸上側受信制御装置に送信する。

移動局用GPS受信機はL1一波の受信機である以外は固定局用の受信機と同様の性能を有している。

5 基礎的運用結果

5.1 サンゴ礁造園モデル海域の基準点測量

当センターではサンゴ礁造園技術の研究開発を実施するため、サンゴ礁造園モデル地区である沖縄県知念村地先海域において、観測ステーションを構築するとともに、水深約5mの海底に人工ノル(人工サンゴ基盤)を設置することを計画している。観測ステーション、人工ノルの設置予定地点をあらかじめ測量するために、2台のGPS受信機を用いてサンゴ礁造園モデル海域の基準点を決定した。

使用したGPS受信機はTrimble社の4000SL L1一周波受信機、4000SD L1, L2二周波受信機である。平和祈念公園内三角点(摩文仁)を既知点(4000SL)として、未知点であるモデル海域内の基準点位置(4000SD)を求めた。図6にGPS観測点の配置を示す。

観測は1989年1月26日、27日の2日間2:00より6:00 UTC(11:00~15:00 JST)まで4時間行った。観測した衛星は、SV 3, 6, 9, 12,

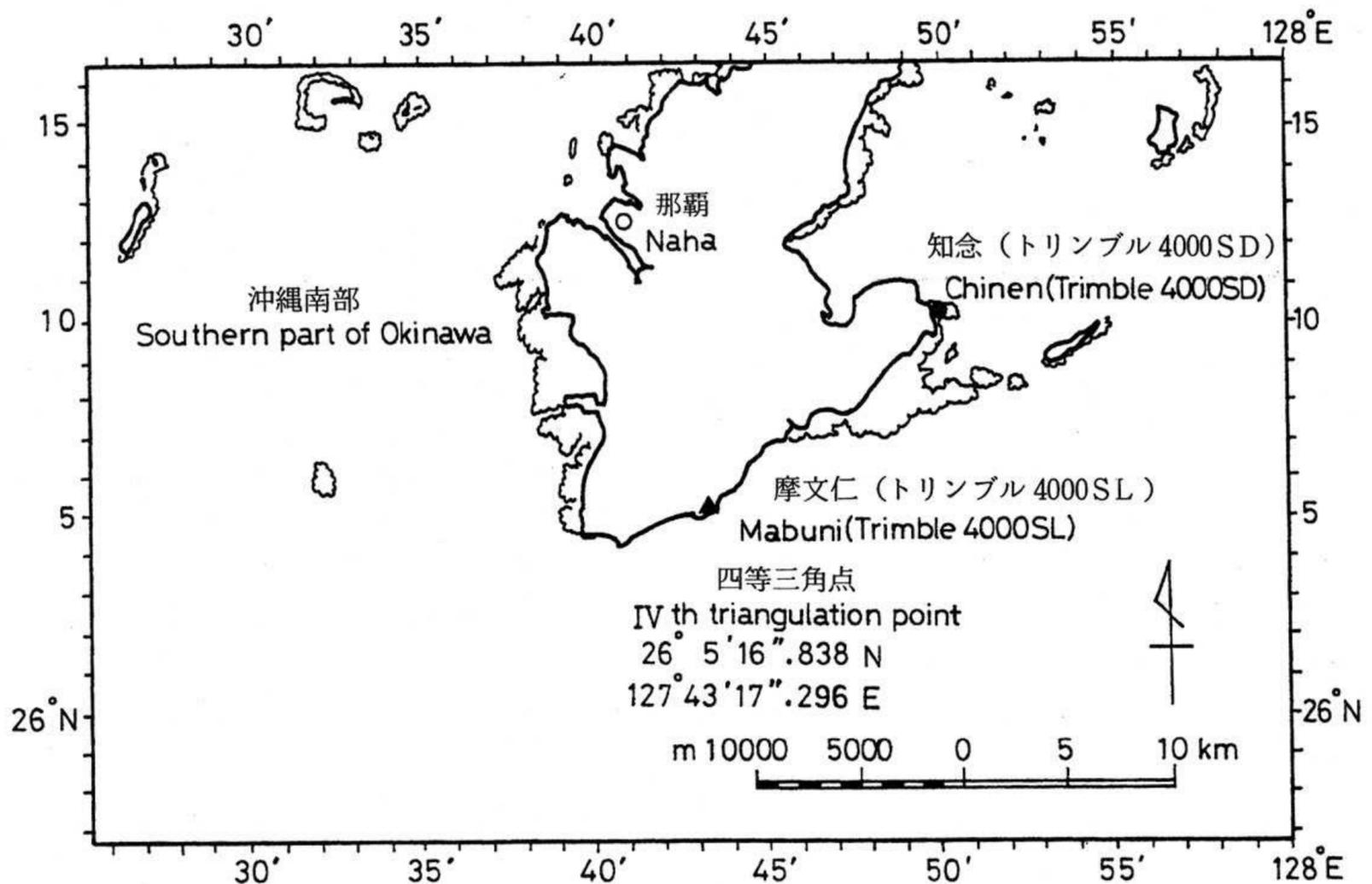


図 6 サンゴ礁造園モデル海域における基準点測量の観測点の配置

Fig.6 Location of observation point at the area of the coral reef project.

13である。また、東京大学理学部の固定観測局¹²⁾ (鎌倉) と合同観測を行い超長基線における再現性を検討した。解析はTrimble社の提供する解析プログラムTrimvec™を用いている。

表3に摩文仁-知念基線の解析結果を示す。2日間の再現性は悪く34cmの差がある。また、Trimvec™ソフトウェアでは解析結果を評価する目安として10-20km程度の基線長であればRMSは0.06-0.09の範囲であれば良いとしている¹³⁾が表3に示す結果は0.136, 0.121と大きな値となっている。原因として、反射波によるノイズや、サイクルスリップが考えられる。また、1月26日から27日にかけて衛星番号SV, 6, 9, 12は衛星状態がたびたび劣化しており、原因を特定することはできていない。そこで、ノイズの大きいデータを積極的に削除するため、データ削除のための倍率係数(Edit Multiplier)を2.5として解析を行った。Edit MultiplierはRMS(Root Mean Square)の倍率で指定し標準値は3.5である。

解析結果を表4に示す。RMSの値は小さくなったが、2日間の基線長解析結果には依然19cmの差がある。

GPSは地心座標系の1つであるWGS-84系に準拠しており、衛星の軌道情報や基線解析処理はWGS-84系で行われている。一方、三角点の成果である、緯度、経度は局所座標系の1つである東京測地系に準拠している。このため、モデル海域の基準点の解析では、三角点成果をWGS-84系に変換し、WGS-84系で基線解析を行い、

求められた緯度、経度を東京測地系に変換し基準点の位置とした。2日間の計測値を平均して表5に基準点の解析結果を示す。

表6に鎌倉-知念基線の解析結果を示す。鎌倉-知念基線では、両者とも正確な位置が分からないため、鎌倉での1点測位の結果を既知点の座標として与えている。表では鎌倉を基準にした知念の緯度、経度、高さの差を示している。

摩文仁-知念基線と同様、2日間の解析結果には64mもの差があり、1月27日の解析結果に変動が大きい。そこで、倍率係数を指定し再解析を行った結果を表7に示す。

1月26日の解析結果はあまり変化していないが、27日の解析結果は大きく改善され基線長の差は、1.5m程度となっている。

5.2 名古屋大学・東京大学・静岡大学・茨城大学・岐阜大学 GPS研究グループとの合同観測

名古屋大学・東京大学・静岡大学・茨城大学・岐阜大学では、南関東・東海地域での地殻変動に大きな影響を与えているフィリピン海プレートの日本付近での動向を検出することを目的としてGPS合同観測を計画していた。観測点はほぼ定常的にGPS観測が行われている10点(水戸, 東京弥生, 東京本郷, 伊豆大島, 静岡, 竜洋, 名古屋, 犬山, 高山, 岐阜)に臨時観測点として2点(八丈島, 下里)である。¹⁴⁾

当センターでは、サンゴ礁造園モデル海域の基準点である知念において合同観測に参加し、1000km

表 3 摩文仁-知念基線の計測結果 (倍率係数 = 3.5)
Table 3 Test results of baseline measurement (Mabuni-Chinen)

WGS84

観測日 data	緯度 latitude [d,m,s] 26°10'	経度 longitude [d,m,s] 127°49'	高さ height [m]	斜距離 distance [m]	標準 偏差 σ [m]	二乗平均 の平方根 RMS [cycle]	倍率係数 edit multiplier
1/26	29".8609	48".3927	31.346	14374.895	0.0838	0.136	3.5
1/27	29".8559	48".3814	31.461	14374.556	0.0620	0.121	3.5
差 diff.	0".0050	0".0113	0.115	0.339			

表 4 摩文仁 - 知念基線の計測結果 (倍率係数 = 2.5)

Table 4 Test results of baseline measurement edit multiplier specified (Mabuni-Chinen)
WGS84

観測日 data	緯度 latitude [d,m,s] 26°10'	経度 longitude [d,m,s] 127°49'	高さ height [m]	斜距離 distance [m]	標準 偏差 σ [m]	二乗平均 の平方根 RMS [cycle]	倍率係数 edit multiplier
1/26	29".8601	48".3904	31.427	14374.831	0.0164	0.078	2.5
1/27	29".8566	48".3847	31.469	14374.639	0.0103	0.070	2.5
差 diff.	0".0035	0".0057	0.042	0.192			

表 5 サンゴ礁造園モデル海域の基準点計測結果

Table 5 Test results of reference point measurement at
the area of the coral reefs project

東京測地系
Tokyo datum

観測日 date	緯度 latitude [d,m,s]	経度 longitude [d,m,s]	高さ height [m]
1/26	26°10'15".2490	127°49'55".4403	2.005
1/27	26°10'15".2455	127°49'55".4345	2.047
mean	26°10'15".2472	127°49'55".4374	2.026

表 6 鎌倉 - 知念基線の計測結果 (倍率係数 = 3.5)

Table 6 Test results of baseline measurement (Kamakura-Chinen)

WGS84

観測日 DATE	緯度差 δ lat. [d,m,s] -9°8'	経度差 δ lon. [d,m,s] -11°42'	高さの差 δ ht. [m]	斜距離 dist. [m]	標準 偏差 σ [m]	二乗平均 の平方根 RMS [cycle]	倍率係数 edit multiplier
1/26	14".0836	58".1522	-23.609	1505878.088	0.5419	0.037	3.5
1/27	14".5696	60".7616	1.966	1505942.218	4.4308	0.605	3.5
差 DIFF.	0".4860	2".6094	25.575	64.130			

表 7 鎌倉－知念基線の計測結果 (倍率係数指定)

Table 7 Test results of baseline measurement, edit multiplier specified. (Kamakura-Chinen)

WGS84

観測日 date	緯度差 δ lat. [d, m, s] -9° 8'	経度差 δ lon. [d, m, s] -11° 42'	高さの差 δ ht. [m]	斜距離 dist. [m]	標準 偏差 σ [m]	二乗平均 の平方根 RMS [cycle]	倍率係数 edit multiplier
1/26	14".1046	58".1935	-24.019	1505878.525	0.2090	0.115	2.5
1/27	14".1328	58".3764	-26.827	1505879.976	0.1200	0.058	2.0
差 diff.	0".0282	0".1829	2.808	1.451			

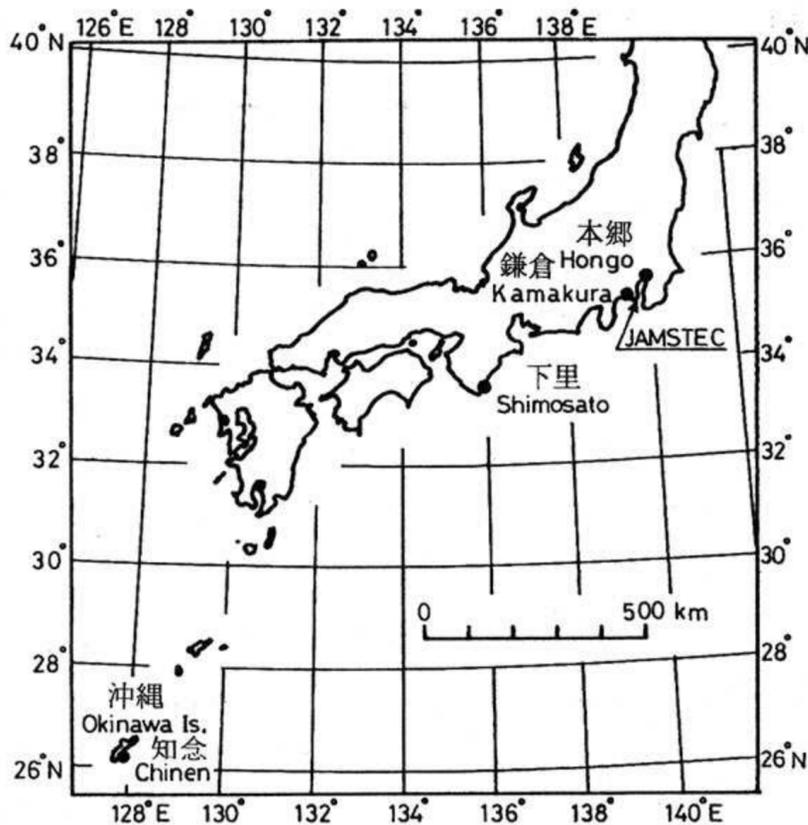


図 7 合同観測における観測点の配置
Fig.7 Location of observation sites for joint observation

以上の超長基線における再現性を検討した。観測に使用されたGPS受信機はすべてTrimble 4000 SDでL1, L2二周波受信機である。今回、データの提供を受けた下里, 鎌倉, 本郷と知念との間で解析を行った。図7に観測点の配置を示す。下里－知念間で約1130 km, 下里－鎌倉間で約380 kmの距離がある。

下里は海上保安庁水路部により, 人工衛星レー

ザー測距 (SLR: Satellite Laser Ranging) を用いてcmの桁の精度で位置が求められており, 下里を既知点として解析を行った。

観測は1989年3月9日から11日までの3日間, 1日12時間の観測を3つのセッションに分けて行った。図8-1から8-3に各セッションの知念におけるGPS衛星の飛来状況を示す。衛星番号SV3, 8, 11, 13が1つの軌道面に乗っており, SV6, 9, 12がもう1つの軌道面にある。現在の日本上空での衛星配置状況は貧しく, 同一軌道面上の衛星しか観測できない時間帯が多く, 同時に観測できる衛星は上空1ヶ所に集中している。

1989年2月14日に打ち上げられた衛星が非健康ながらも使用できる状態となり衛星配置の改善が期待されたが, 新衛星を含めて解析を行うと結果が大きく変動し今回は削除している。

図9-1から9-4に各基線ごとに, 観測日, 観測衛星の組合せに対する基線長の変化を示す。また, L1一波の解析, L1, L2二波の解析を行い比較を試みた。L1一波の解析では, 電離層による電波伝搬遅延の補正をGPS衛星より送信される航法メッセージに含まれている電離層遅延補正パラメータによっているため, 観測時間帯ごとに大きく変動している。電離層活動が小さい夜間では観測日ごとの変化は比較的小さいが, 活動が活発となる昼間では観測日ごとに大きく変動している。一方, L1, L2二波の解析では電離層による電波伝搬遅延量が周波数に反比例する性質を利

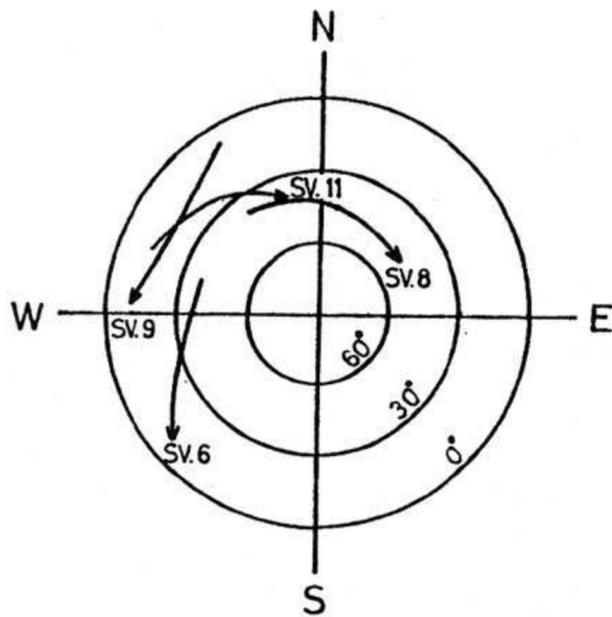


図8-1 1989年3月8日17:00~19:15UTC
知念における衛星の見え方
Fig8-1 Sky trucks of the satellites combination A at Chinen, Mar. 8, 1989, from 17:00 to 19:15 UTC

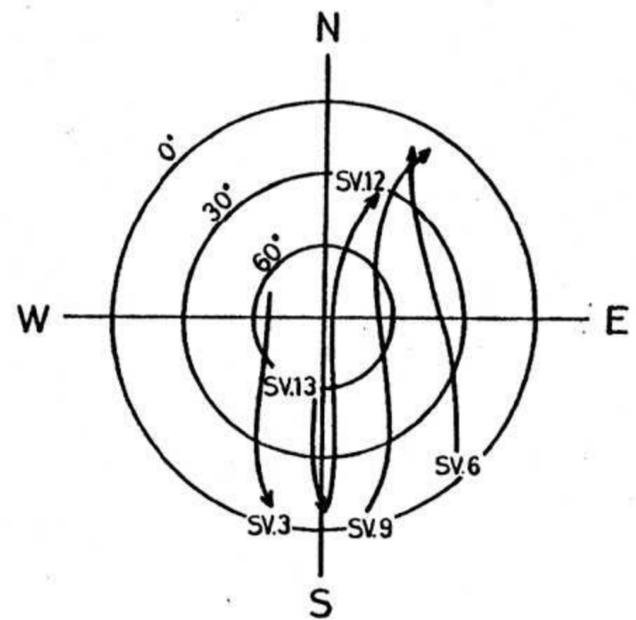


図8-3 1989年3月8日, 9日23:15~5:30
UTC知念における衛星の見え方
Fig8-3 Sky trucks of the satellites combination C at Chinen, Mar. 8-9, 1989 from 23:15 to 5:30 UTC

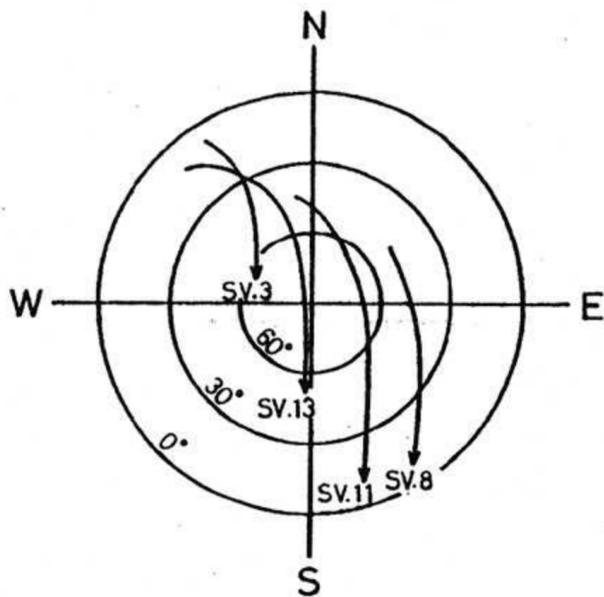


図8-2 1989年3月8日19:15~23:15 UTC
知念における衛星の見え方
Fig8-2 Sky trucks of the satellites combination B at Chinen, Mar. 8, 1989, from 19:15 to 23:15 UTC

用し効果的に補正できるため、観測時間帯ごとの変化、観測日ごとの変化は小さくなっている。

図10に各基線ごとの再現性を示す。各基線ごとに、解析値の標準偏差を求め、標準偏差を平均の基線長で除して再現性としている。図中、実線、破線はそれぞれ、基線長 $\times 1 \text{ ppm}$ (1×10^{-6})、 2 ppm (2×10^{-6}) の線である。L1, L2 二周波の解析結果は衛星配置の悪い現在の状況でも約 1 ppm が達成されており、今後ブロックII衛星が打ち上げられ、衛星配置が改善された場合の観測結果が期待される。

図11-1, 11-2に、計測データ数は少ないが、下里を既知点として求めた知念、鎌倉の緯度、経度、高さの各方向成分の相関関係¹⁵⁾を示す。各方向成分には特に強い相関関係はなく、緯度方向、高さ方向の成分に比べて経度方向の成分に変化が大きい。これは、衛星配置が南北方向に偏っているため東西方向の成分が決まりにくいものと考えられる。

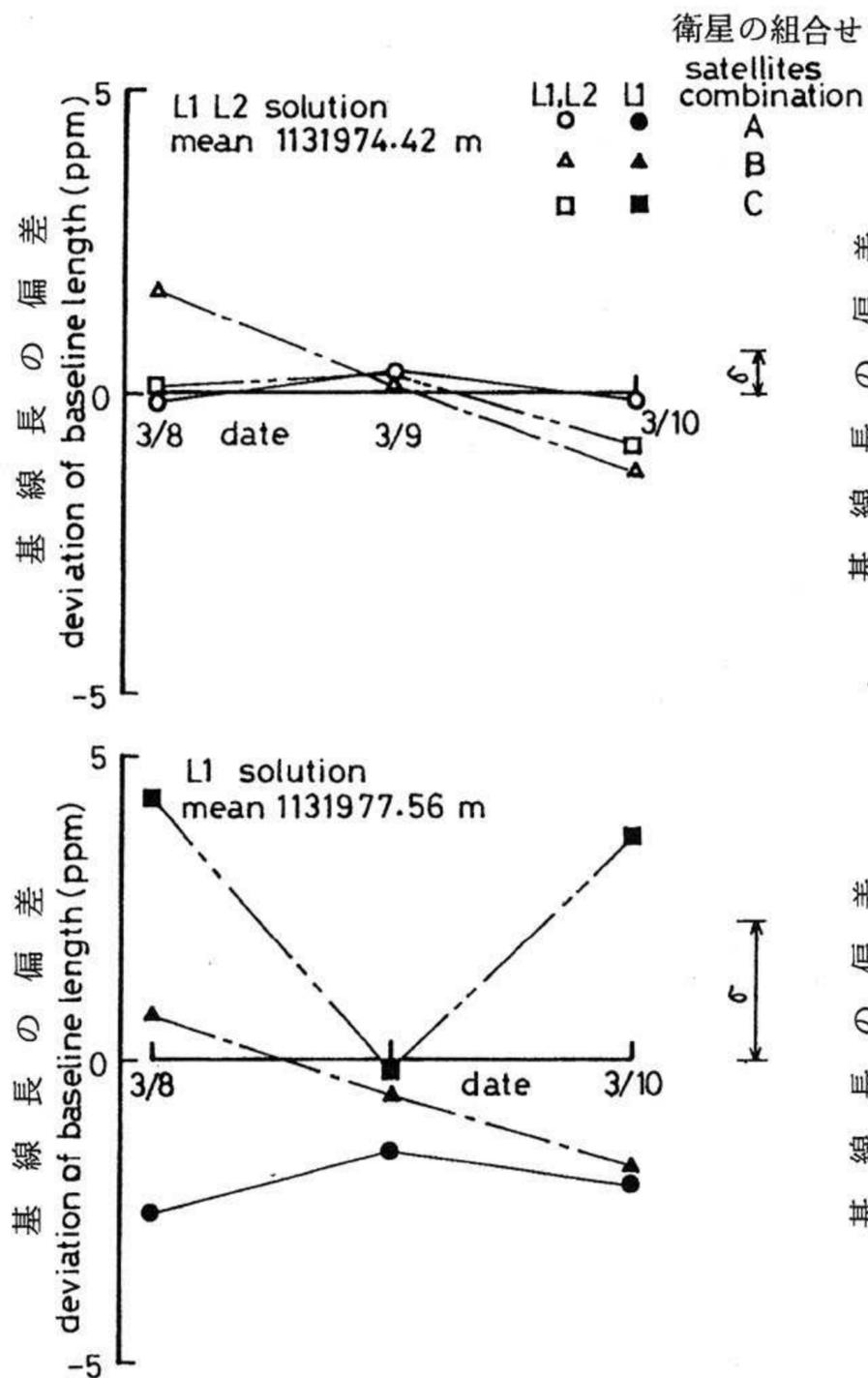


図9-1 下里-知念基線における基線長計測結果の観測日ごとの変化
Fig9-1 Daily deviation of baseline length. (Shimosato-Chinen)

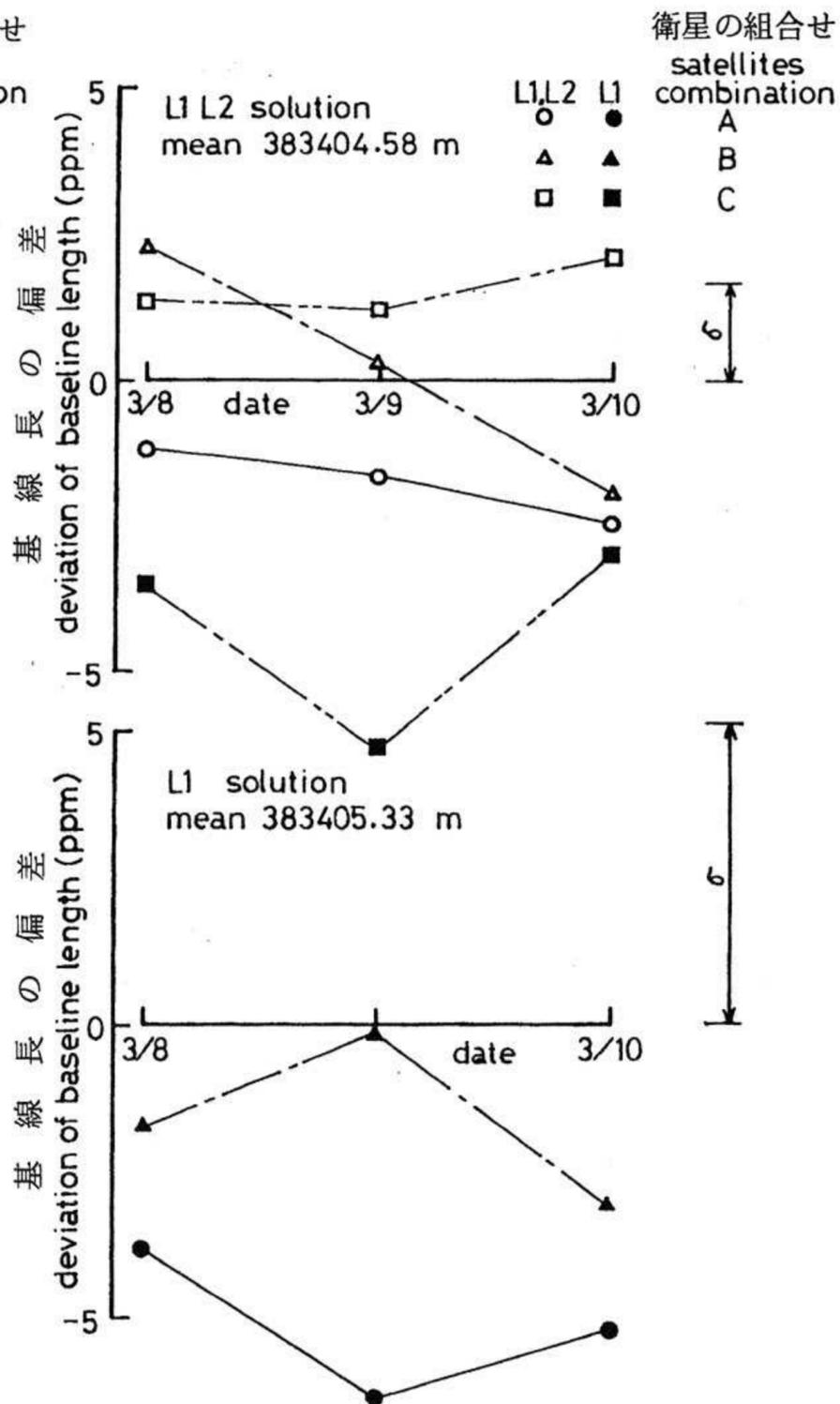


図9-2 下里-鎌倉基線における基線長計測結果の観測日ごとの変化
Fig9-2 Daily deviation of baseline length. (Shimosato-Kamakura)

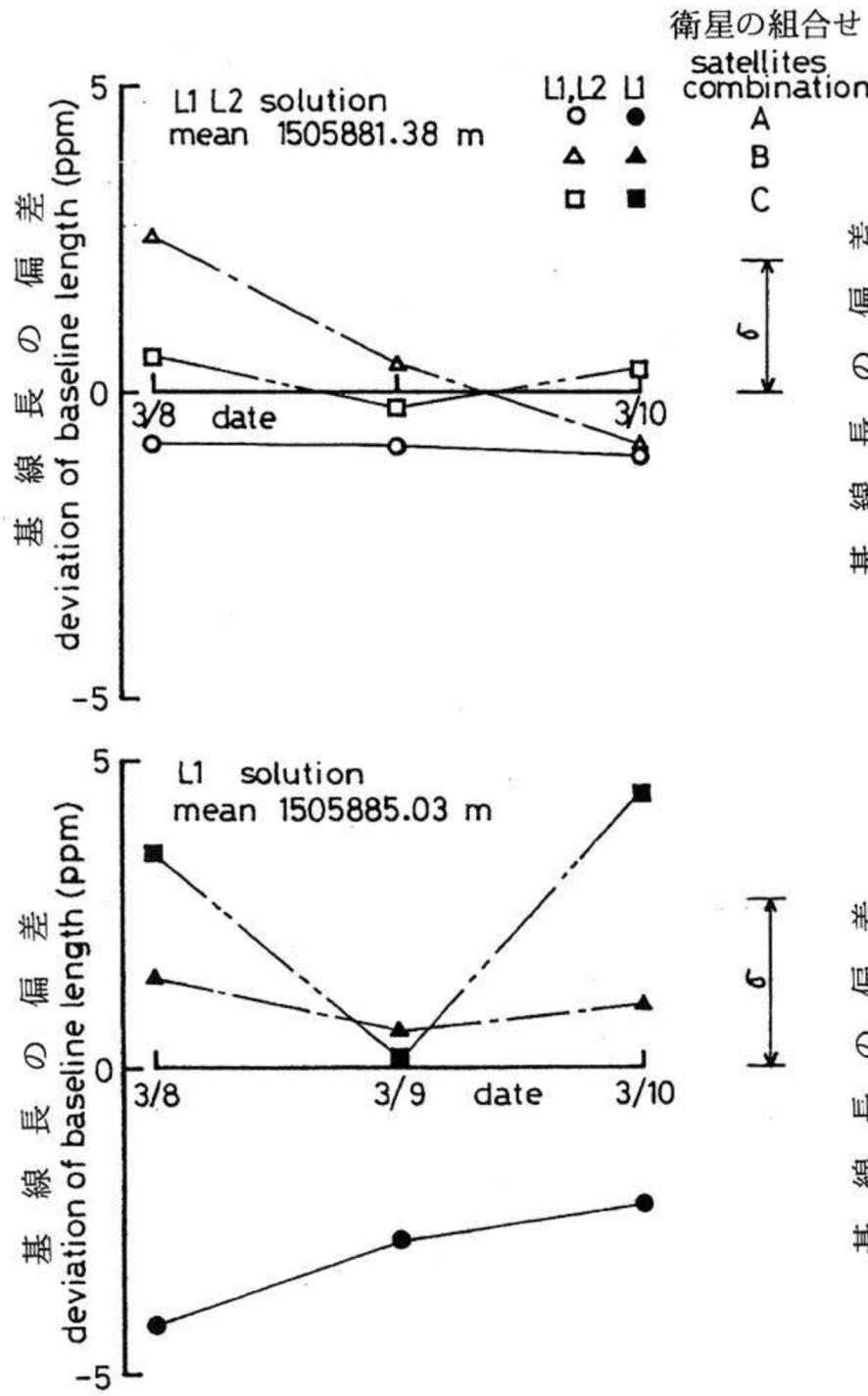


図9-3 鎌倉-知念基線における基線長計測結果の観測日ごとの変化
 Fig9-3 Daily deviation of baseline length. (Kamakura-Chinen)

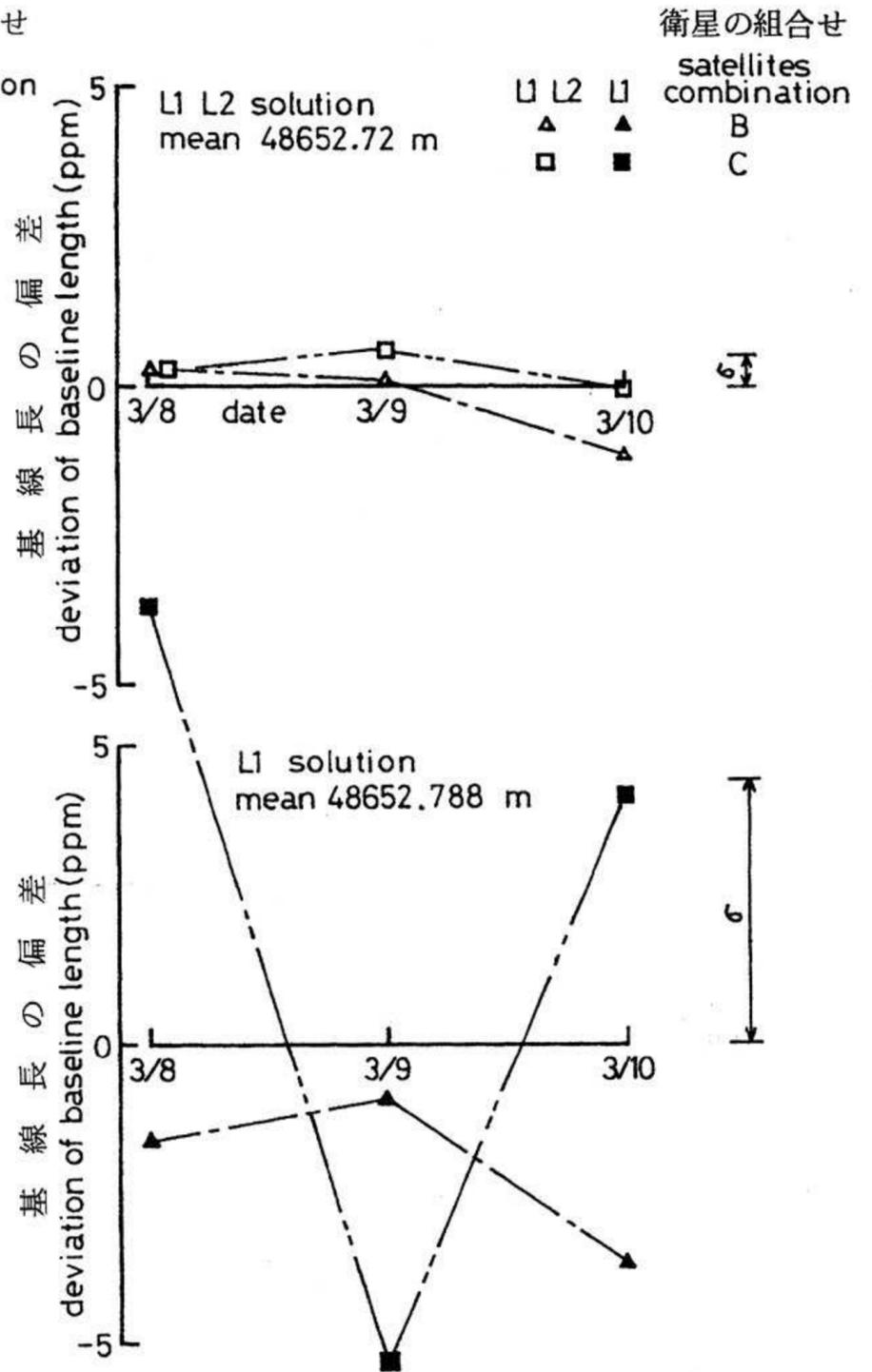


図9-4 鎌倉-本郷基線における基線長計測結果の観測日ごとの変化
 Fig9-4 Daily deviation of baseline length. (Kamakura-Hongo)

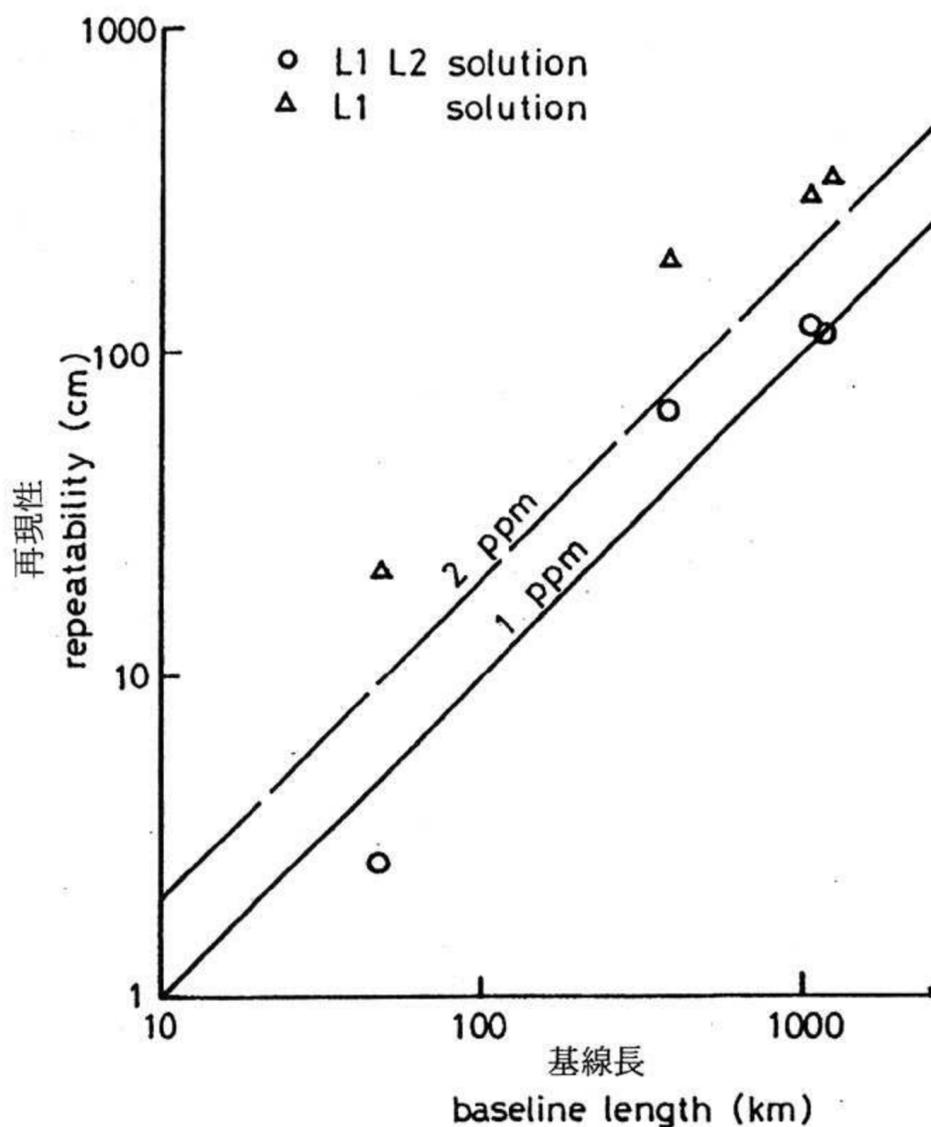


図 10 合同観測における基線長の再現性
 Fig 10 Relation between baseline length and repeatability

衛星の組合せ satellites combination	観測日 date	衛星の組合せ satellites combination	観測日 date	衛星の組合せ satellites combination	観測日 date
○ A	3/8	△ B	3/8	□ C	3/8
◐ A	3/9	△ B	3/9	◐ C	3/9
● A	3/10	△ B	3/10	■ C	3/10

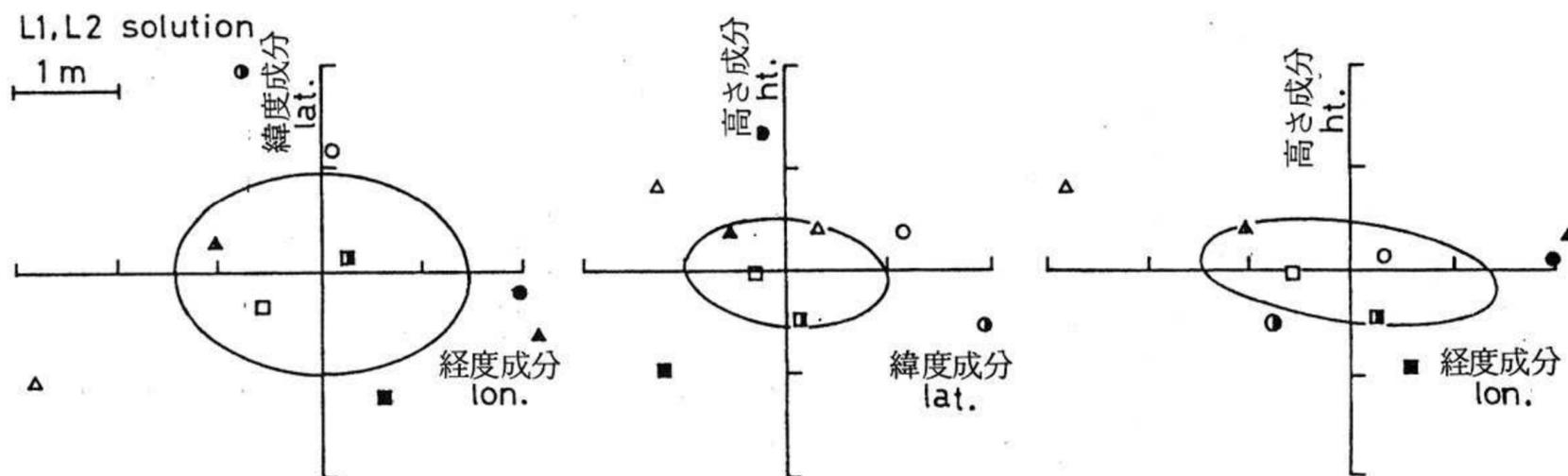


図 11-1 下里-知念基線における緯度、経度、高さ成分の偏差と誤差楕円
 Fig 11-1 Distributions of deviation about latitude, longitude, height component and error ellipsoids. (Shimosato-Chinen)

衛星の組合せ satellites combination	観測日 date	衛星の組合せ satellites combination	観測日 date	衛星の組合せ satellites combination	観測日 date
○ A	3/8	△ B	3/8	□ C	3/8
● A	3/9	▲ B	3/9	■ C	3/9
● A	3/10	▲ B	3/10	■ C	3/10

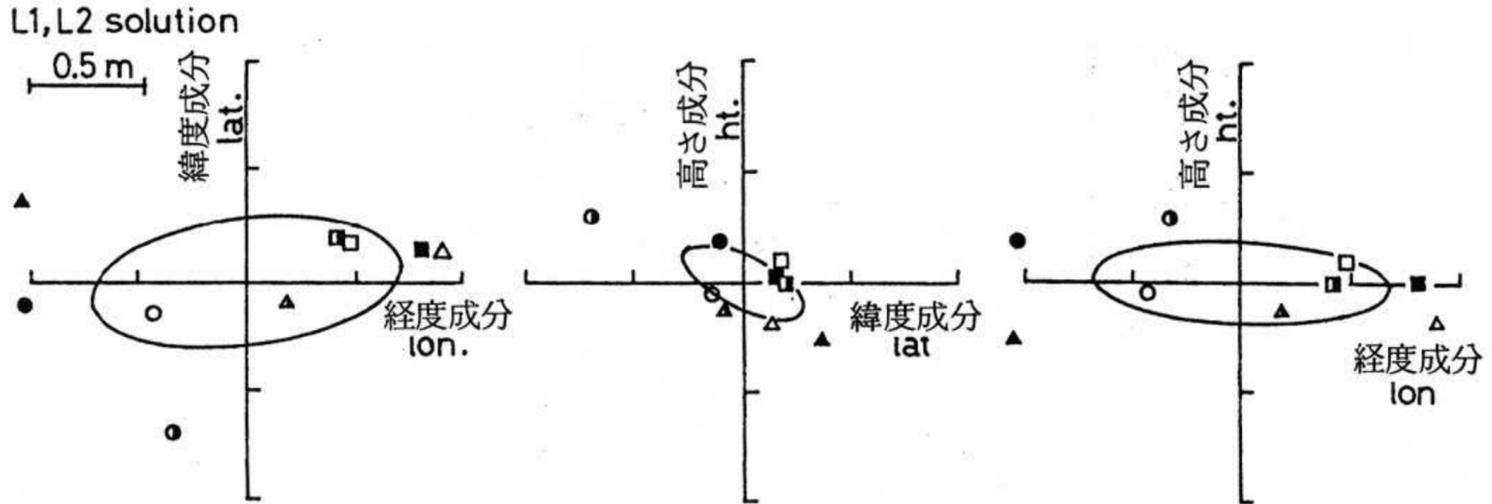


図 11-2 下里 - 鎌倉基線における緯度, 経度, 高さ成分の偏差と誤差楕円
Fig11-2 Distributions of deviation about latitude, longitude, height component and error ellipsoids. (Shimosato - Kamakura)

6 おわりに

GPSによる移動体測位システムを設計するために, 測位法の現状について調査した。その結果, 1点測位法による測位精度は15mが限界である。さらに, 将来, 1点測位法による測位精度を意図的に100mに劣化させるといわれており, 港湾内での船舶の安全航行, 水路測量, 海洋土木, 海洋建設, 海洋域における学術調査, など高い位置決定精度を必要とする分野では, 相対測位法を応用した測位システムの開発が不可欠である。相対測位法の中でも観測量に搬送波位相を用いた干渉測位法による手法は, 位相の初期値バイアスを決定した後アンテナを移動させるができ, 数10cmの精度で移動体の位置が求められるものと期待される。

測位システムの現状を踏まえ, 浮体運動計測システムの設計を行った。本システムは搬送波位相の計測できる高精度なGPS受信システムとデータ伝送システム, データ解析処理システムとで構成されており, 擬似距離を用いたトランスロケーション法, 搬送波位相を用いた干渉測位法により, リアルタイムに浮体の位置を求めることができる。今後, 本システムを当センターが山形県鶴岡市由良漁港沖合い約3kmに弛緩係留している浮体式海

洋構造物や海中作業実験船「かいよう」に設置し実証試験を行う予定である。

基礎的運用結果として, 干渉測位法による測量を行った結果, GPS衛星の配置が, 南北方向に偏っている時間帯が多いため基線ベクトルの経度方向の成分が緯度方向の成分に比べて誤差が大きいことが分かった。また, 衛星の健康状態が突然悪くなる時があり, 安定した結果が得られない場合もあるが, 打ち上げられているGPS衛星の数が少ない現在の状態においても, 基線長の100万分の1の測位精度が得られ, 新しい測量手段として十分使用でき, これを用いて基準点位置を決定できることが分かった。

最後に, 本システムの一部は日本自転車振興会の補助金を得て製作したものである。また, 合同観測において, 観測データを提供して頂いた東京大学理学部金沢敏彦先生, 同大学院矢吹哲一朗氏, 名古屋大学理学部木股文昭先生に感謝いたします。

参考文献

- 1) 日本測地学会編: "GPS-人工衛星による精密測位システム", 社団法人日本測量協会,

- 263 p, (1986)
- 2) 金沢輝雄, 仙石 新, 淵田晃一: "GPS トランスロケーション法による船位の決定", 海洋調査技術, pp43 - 47, 1989年3月
 - 3) Quill, j: "U.S.Coast Guard Differential GPS System Development", Radio Technical Commission for Maritime Services Assembly Meeting, April/May (1986)
 - 4) 緒方 勇, 木村小一: "衛星航法NAVSTAR/GPSとその利用", 漁船, 第273号 昭和63年2月
 - 5) 日本測地学会編: "GPS -人工衛星による精密測位システム- 追補", 社団法人日本測量協会, 69p, (1987)
 - 6) "GPS BULLETIN" Global Positioning System Subcommittee, March-April (1989)
 - 7) 村上 亮, 辻 宏道, 黒石裕樹: "GPS 干渉測位の幾何学的考察", 測地学会誌, 第34巻, 第2号, pp125-135, (1988)
 - 8) Goad, C.C: "A Kinematic Survey of the Clinton Lake Dam", ASCE Specialty Conference GPS-88 Engineering Applications of GPS Satellite Surveying Technology, (1988)
 - 9) Goad, C.C: "On the Move With GPS" P.O.B April-May pp36-44, (1989)
 - 10) Wert, j.v.: "Kinematic Stop and GO GPS", P.O.B April-May (1989)
 - 11) Pietraszewski, D., Spalding, J., Viehweg, C., Luft, L.: "U.S.Coast Guard Differential GPS Navigation Field Test Findings", Journal of Institute of Navigation Vol. 35, No. 1, spring 1989, pp, 55-72
 - 12) 矢吹哲一郎, 金沢敏彦, 脇田 宏: "固定点GPS観測網による地殻変動試験観測" 日本測地学会第71回講演会要旨, 日本測地学会, pp158-159 (1989)
 - 13) "Trimvec GPS Survey Software User's Manual and Technical Reference Guide", Trimble Navigation, Oct. (1988)
 - 14) 名古屋大学・東京大学・静岡大学・茨城大学

- ・岐阜大学・海洋科学技術センター GPS研究グループ: "南関東・東海地域における広域GPS干渉測位観測(1)" 日本測地学会第71回講演会要旨, 日本測地学会, pp172-173 (1989)
- 15) 田島 稔, 小牧和雄: 最小二乗法の理論とその応用, 東洋書店, 477p, (1986)

(原稿受理: 1989年6月5日)