

高精度航法装置による複合マルチ LOP 測位について

野並 健二^{*1} 中西 俊之^{*1} 土屋 利雄^{*1}
網谷 泰孝^{*1} 南 克郎^{*2} 堀江 義雄^{*3}

6500m 潜水調査船支援母船「よこすか」搭載の高精度航法装置（電波測位）には、高精度の船位測定を実現するために種々の手法が採用されている。

その中でも、GPS (Global Positioning System) が 24 時間連続使用できない現状では、ロラン C とデッカによる複合マルチ LOP 測位が高精度測位の中心をなすものである。

本書では、高精度航法装置について紹介すると共に、複合マルチ LOP 測位の実海域試験について GPS と比較して、その有効性について述べる。

キーワード：複合マルチ LOP 測位, LOP, HDOP

Hybrid Multi-LOP Positioning by High Precision Radio Navigation System

Kenji NONAMI^{*4} Toshiyuki NAKANISHI^{*4}
Toshio TSUCHIYA^{*4} Yasutaka AMITANI^{*4}
Katsuro MINAMI^{*5} Yoshio HORIE^{*6}

A high precision radio navigation system installed on board R/V YOKOSUKA, the support ship for manned submersible designed for 6500m deep diving, has various high precision positioning methods.

In particular, the hybrid multi-LOP positioning based on Loran C and Decca makes up the core of the system, because GPS (Global Positioning System) does not operate on fulltime and worldwide coverage at present.

This paper introduces a high precision radio navigation system, and also descr-

^{*1} 深海開発技術部

^{*2} 川崎重工業(株)

^{*3} セナー(株)

^{*4} Deep Sea Technology Department

^{*5} Kawasaki Heavy Industries, Ltd.

^{*6} Sena Co., Ltd.

ibes the test results of hybrid multi-LOP positioning compared with GPS in an ocean experiment.

Key word: hybrid multi-LOP positioning, LOP, HDOP.

1 まえがき

6500m潜水調査船支援母船「よこすか」は、平成元年8月に6500m潜水調査船「しんかい6500」と組み合わせた最終の総合海上試運転（三陸沖）を成功裏に終了した。

本船には「しんかい6500」の潜航を支援するために必要な種々の機器が装備されている。高精度航法装置（以下本装置という）はこれらの潜航支援装置の一つとして、単に航行援助としての船位を提供するだけでなく、音響航法装置（潜航支援用）やマルチナロービーム音響測深装置（海底地形調査用）等で得られた潜水船測位データや海底地形データに地球上での位置を与えるためにも利用されており、本船における最も重要な機器の一つとして位置付けられている。

したがって、本装置には高精度の船位測定を実現するためにGPS、NNSS、ロランC（双曲線

及び円弧）、デッカによる測定データを複合して測位精度を高める手法が採用されている。しかし、GPSが24時間連続使用できない現状では¹⁾、ロランCとデッカの測定LOP（位置の線）を組み合わせた複合マルチLOP測位が高精度測位の中心をなしている。

本書では、高精度航法装置について紹介すると共に、本船建造時から総合海上試運転の間に実施した種々の高精度測位機能の確認試験の内、複合マルチLOP測位の実海域試験についてGPS測位と比較して、その有効性について述べる。

2 高精度航法装置の概要

本装置は地上系測位センサーとしてロランC（2台）とデッカ、衛星系測位センサーとしてGPSとNNSS、原子周波数発信器（セシウム及びルビジウム各1台）、基準時計及び主・副データ処

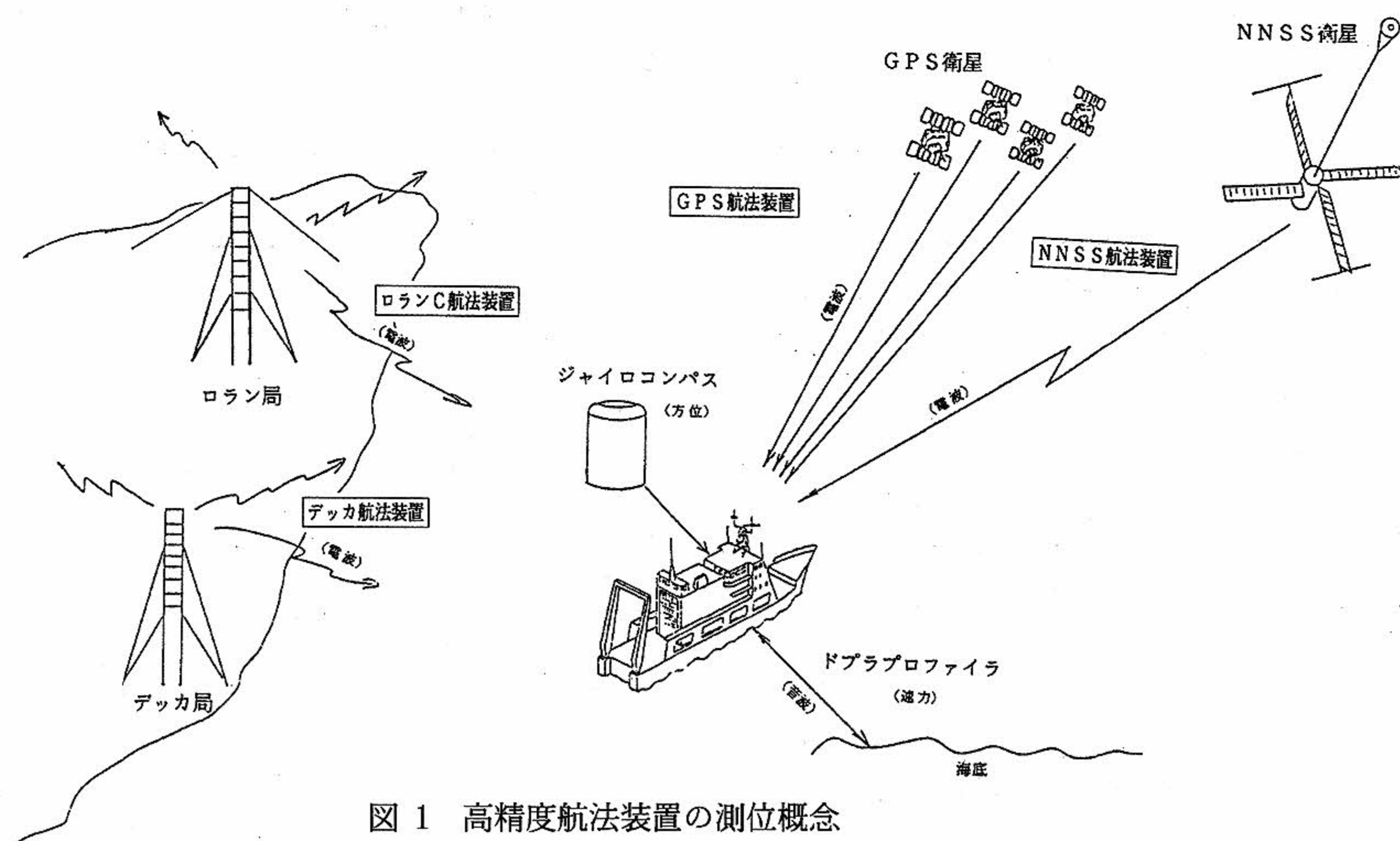


図 1 高精度航法装置の測位概念

Fig. 1 General idea of Positioning by the system

理装置から構成されている。これらの構成品を2連のラックに収納し、操舵室に装備している。図1に測位概念、図2に外観、図3に構成、表1に各

測位センサーを示す。
各測位センサーからの測定データは、主・副データ処理装置を経由して汎用コンピュータシステム

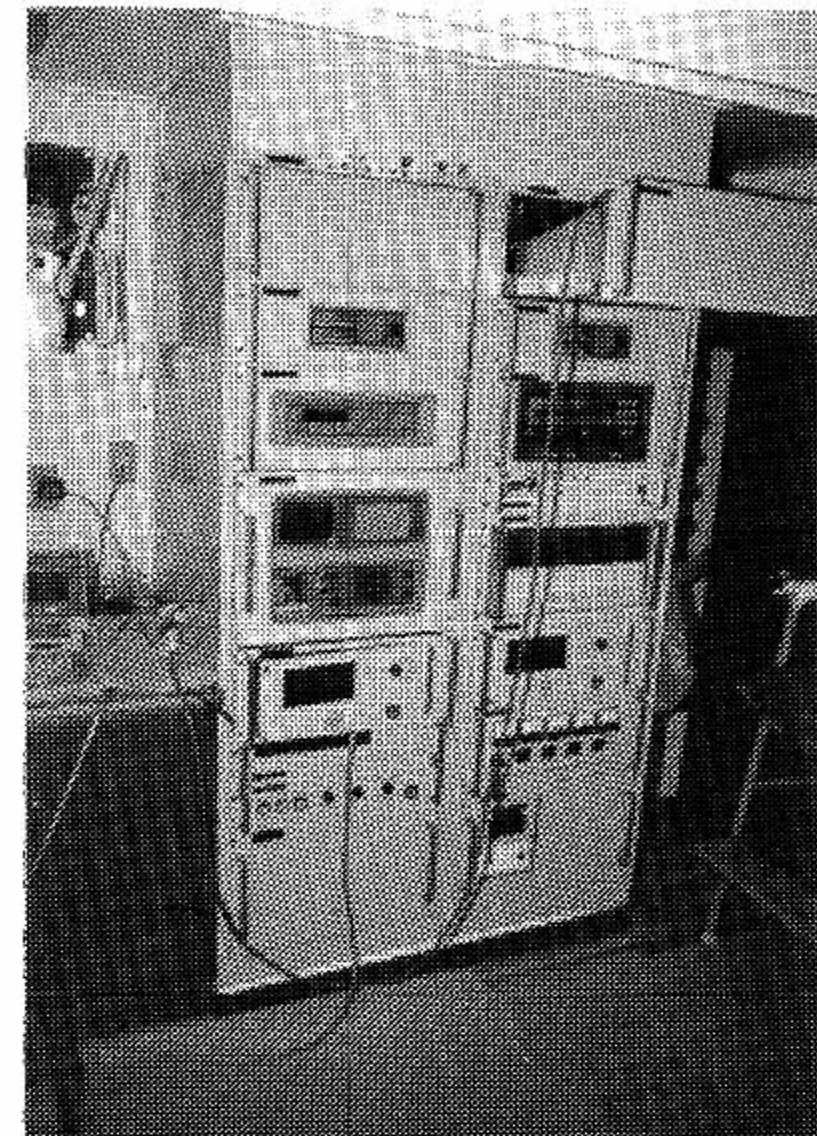
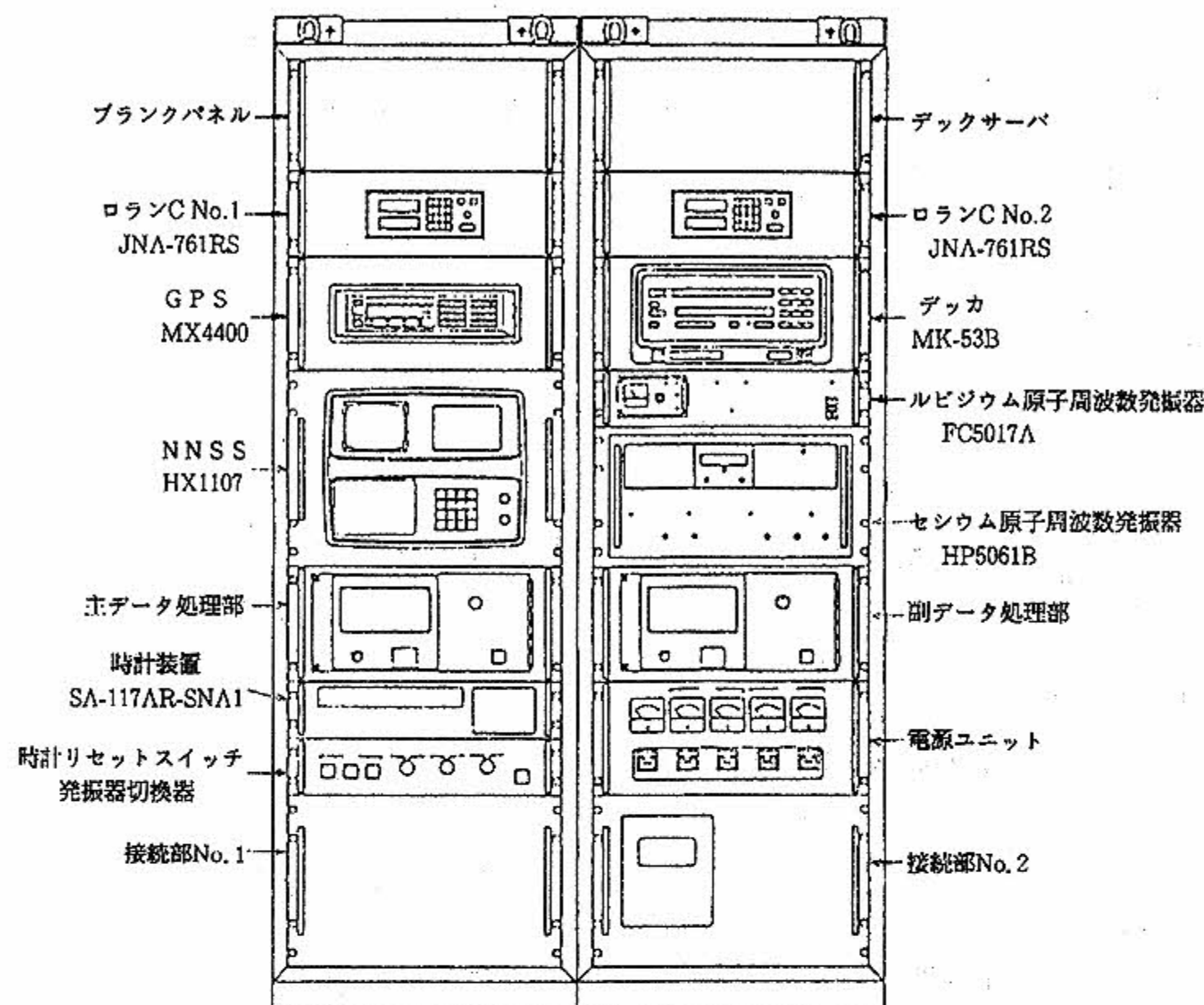


図 2 高精度航法装置外観
Fig. 2 External view of the system

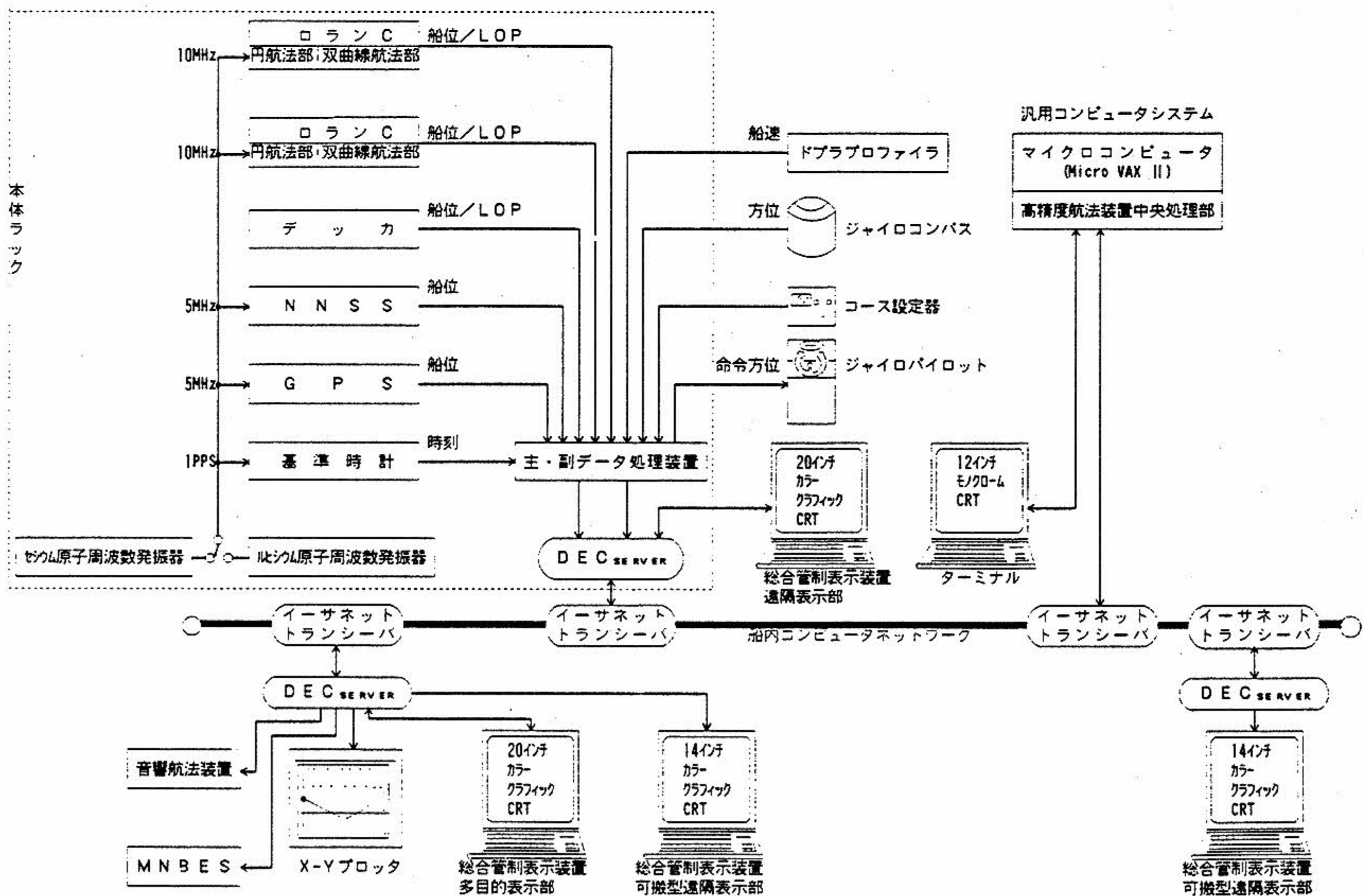


図 3 高精度航法装置の構成
Fig. 3 Construction of the system

表 1 高精度航法装置側位センサー

Table 1 Positioning Sensor of the system

測位センサー	メーカー及び型式	備 考
G P S	Magnavox MX4400	GPS衛星4～2(外部基準発信器)個 による測位
NNSS	横河ナビテック HX1107	NNSS衛星による測位
ロランC	日 本 無 線 JNA-761RS	双曲線航法(2LOP), 円航法(2LOP)
デ ッ カ	RACAL-DECCA(セナ-) MK-53B	双曲線航法(3LOP)
セシウム原子	HEWLETT PACKARD MK-53B	高精性チューブ, バッテリバックアップ付
ルビジウム原子 周波数発信器	富 士 通 FC6071A	セシウム原子周波数発振器のバックアップ
主・副データ 処 理 装 置	セ ナ ー	測位センサー等からのデータの集中管 理及び中央処理部とのデータ送受信 (主及び副データ処理部は同一仕様)
基準時計	シ ス テ ム ア ー ツ SA-117AR-SNA1	本装置の時間管制源(1秒パルス駆動)

の中央処理部(本装置用)に送出される。中央処理部では測定データを比較・監視・選択処理し、本船を高精度で測位する。さらに測位を基準として、予め設定した航路または測線に沿って本船を自動的に航走させる自動航行(ルートトラッキング)機能を有している。このため、ジャイロパイロットに対して命令方位を出力している。また、ジャイロコンパスからの方位信号とドプラプロファイラからの船速信号を入力し、推測航法を行っている。

処理された船位情報は船内コンピュータネットワークを経由して、船内各所(操舵室, 後部操舵室, 総合指令室, 研究室, 研究員居室, ラボラトリ, 計測

コンテナ)のモニタで表示するほか, XYプロッタで航跡としてリアルタイムで作画することができる。さらに船位信号を音響航法装置やマルチナロービーム音響測深装置等へ出力している。

本装置の操作は本体ラックの横に設置した12インチのVAXターミナルから会話形式で行うことができ, 「なつしま」や「かいよう」の同装置に比べて, 測位機能ではもちろん操作性の面でも優れたものとなっている。

なお, 汎用コンピュータシステムは2系統で構成されていて, 本装置用の系統が故障した場合はもう一方の系統でバックアップすることができるよう考慮している。

3 高精度測位機能

各測位センサーから出力される測定データを汎用コンピュータシステムの中央処理部で組み合わせて総合的に処理することにより、本船の最確船位を高精度で継続的に決定する機能で、主な特徴は以下の通りである。

- ① 地上系測位センサーの測定データであるLOPの分散、地上系及び衛星系測位センサーの測定データのHDOP²⁾(LOPの発散とLOPの交角による測位精度の劣化係数)等の評価を行い自動的に最適な測位系を選択して採用することができる。
- ② 地上系測位センサーであるロランC及びデッカによる測定LOPを組み合わせ、多数のLOPを利用することにより測位地域の拡大、LOPの分散計算によるLOPの重み付けを行い測位精度の向上を計っている。(複合マルチLOP測位という)
- ③ 地上系測位センサーで受信する電波の伝搬速度は海上と陸上では異なり測位誤差の要因となるので、電波伝搬経路における海陸区分処理を行い陸上での伝搬速度の補正を行う。
- ④ GPS、NNSの測定データまたは手動により地上系測位センサーの測位誤差(地域的な固定誤差)を補正する。
- ⑤ カルマンフィルタを採用し、本船の航行状態を考慮した測位出力の最適化処理を行う。なお、カルマンフィルタは航行状態を考慮し、ON/OFF可能としている。

3.1 高精度測位処理系の構成

高精度測位処理系は次の各系により構成されている。また、これらの系における高精度測位処理の流れを図4に示す。

- ① システム基準処理系
- ② バックアップ処理系
- ③ GPS処理系
- ④ NNS処理系
- ⑤ 比較・監視・選択処理系
- ⑥ 海陸区分処理系

以下に各処理系の機能と測定データの流れを図4に添って説明する。

3.1.1 システム基準処理系

システム基準処理系は高精度測位処理系の主要

部であり、地上系測定データと衛星系測定データを測位状況に応じ選択し、高精度の最確船位を1秒毎に出力している。本処理系は次の要素からなる。

(1) 基準測位部(地上系)

複合マルチLOP測位処理における座標変換機能(LOP→緯度・経度)を有し、比較・監視・選択処理系からのLOP選択指令により、ロランCとデッカから入力された測定LOPの選択を行い、LOPから緯度・経度に変換した測定データをシステム選択部へ出力する。

(2) システム選択部(地上系-衛星系)

比較・監視・選択処理系からのシステム選択指令により、基準測位部(地上系)出力と衛星系測位出力の選択を行う。なお、システム選択指令は手動処理と自動(プログラム)処理の2種類がある。

(3) カルマンフィルタ

基準測位部から出力される位置とドプラプロファイルから得られる速度データとにより、本船の航行状態(N:通常, S:旋回, L:直線)を考慮した測定データの最確推定処理を行う。

(4) 推測航法部

システム基準処理系のデータ更新周期(5秒で設定)の間を補う1秒周期の緯度・経度を出力する処理部で、基準測位部からの位置及びカルマンフィルタからの速度データにより作動する。

(5) 固定誤差補正部

地上系測定データの固定誤差の補正を行う。補正は手動入力、NNSデータまたはGPSデータによる3つの方法を任意に選択できる。

(6) 測地系変換部

測定データを本装置の内部基準測地系(WGS-72)から任意に選択された表示出力用の測地系(WGS-72, WGS-84, TD, NAD-1972, EUROPEAN等)へ変換する。

3.1.2 バックアップ処理系

バックアップ処理系は、システム基準処理系が正常に作動するよう各測定データとの比較出力を生成している。次の単独及び複合測位系が用意され、これらの出力は比較・監視・選択処理系へ送出される。(15~60秒の周期で作動)

- ① No.1 ロランC単独測位部(双曲線及び円弧)

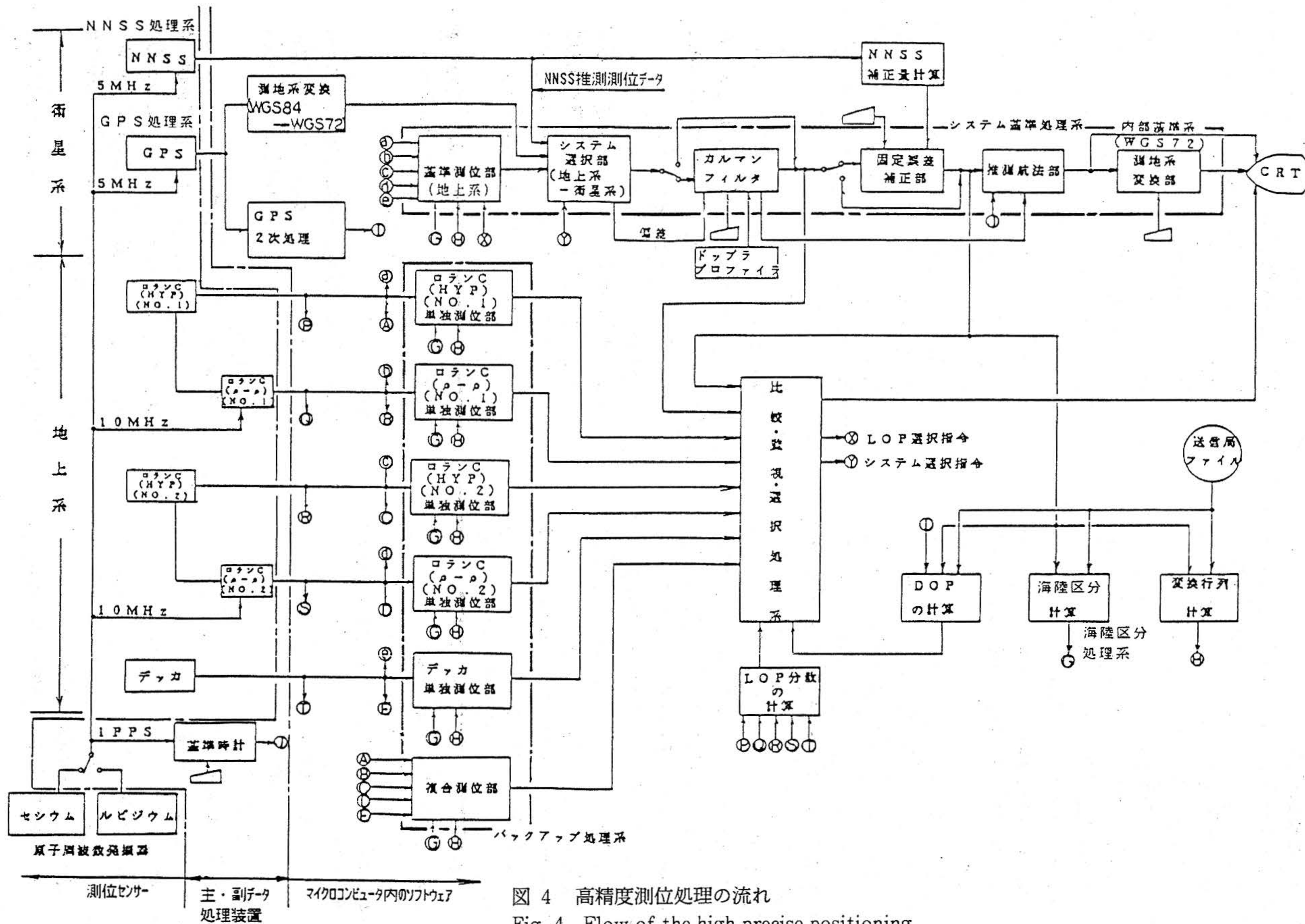


図 4 高精度測位処理の流れ

Fig. 4 Flow of the high precise positioning

- ② No. 2 ロランC単独測位部（双曲線及び円弧）
- ③ デッカ単独測位部（双曲線）
- ④ 複合マルチLOP測位部（バックアップ）

3.1.3 GPS処理系

GPSからの測定データは、測地系変換部（WGS-84→WGS-72）を経てシステム基準処理系に入力され選択することにより使用できる。さらに測定データはGPS 2次処理（精度評価及びスケジュールテーブル算出）を経由して、HDOPの計算のために利用されている。

3.1.4 NNSS処理系

NNSSによるFIX測定データは、地上系測定データの固定誤差の点検及び必要に応じその校正に使用される。さらにNNSSからの推測測位データは、システム基準処理系に入力され選択することにより使用できる。

3.1.5 比較・監視・選択処理系

本処理系はシステム基準処理系とバックアップ処理系の各測定データの比較・監視を行う。さらに地上系測位センサーの測定LOPの分散計算結果やHDOPの計算結果等を入力し、それらを総合評価することによりLOP及びシステム選択指令をシステム基準処理系に対して出力し、システ

ム基準処理系が正常に作動するように制御している。

3.1.6 海陸区分処理系

本船とロランC及びデッカ各局間の大圏上の軌跡計算を行い、その軌跡と海陸マップの対応により2点間の海陸区分距離を計算する。陸上では海上に比べて電波伝搬速度が遅くなるので、この計算値に基づいて電波伝搬経路の陸部の伝搬速度の補正を行う。補正量は $0.6\mu s/100km^3$ である。海陸マップの領域は日本本土及びその周辺諸島とし、予め磁気ディスクに登録している。なお、日本以外の領域についても必要に応じ登録可能である。

4 複合マルチLOP測位

4.1 複合マルチLOP測位の概要

複合マルチLOP測位はシステム基準処理系の中核をなすものであり、GPSが24時間連続使用できない現状では、本船を高精度で測位するための最も重要な機能といえる。その特徴は、地上系測位センサーであるロランC及びデッカによる同種及び異種の測定LOPを組み合わせ、多数のLOPを利用することにより測位地域の拡大、LOPの分散計算によるLOPの重み付けを行い測位精度の向上を計るものである。

表 2 複合マルチ側位で使用するLOP数
Table 2 Number of LOP used by hybrid multi-LOP positioning

装 置	LOP 種 類	測 定 対 象 LOP 数	同 時 使 用 LOP 数
No.1 ロランC	双 曲 線 (HYP)	4	2
	円 弧 (RHO)	5	2
No.2 ロランC	双 曲 線 (HYP)	4	2
	円 弧 (RHO)	5	2
デ ッ カ	双 曲 線 (HYP)	3	3

本装置で使用するLOP数を表2に示す。測定対象となる21本のLOPの内、同時に2～11本(最大)を使用することが可能である。船位測定においては未知数は2個(緯度・経度)であり、観測値として2本のLOPがあれば測位できる。しかし、2LOP測定の場合は次の欠点がある。

① 1本のLOPが欠落(送信断またはアラーム等)した場合、直ちに測位不能となる。

② 4.2 ⑧の平均二乗誤差の項で述べるように測

位の誤差量が計算できない。即ち測位の信頼度が判断できない。

従って、本装置では3本以上のLOPを常時使用して、LOPに冗長性を持たせ上記の欠点を取り除くと共に、同種及び異種のLOPの組み合わせにより、測位可能地域を拡大している。

4.2 LOPから緯度・経度への座標変換処理

複合マルチLOP測位におけるLOPからの緯

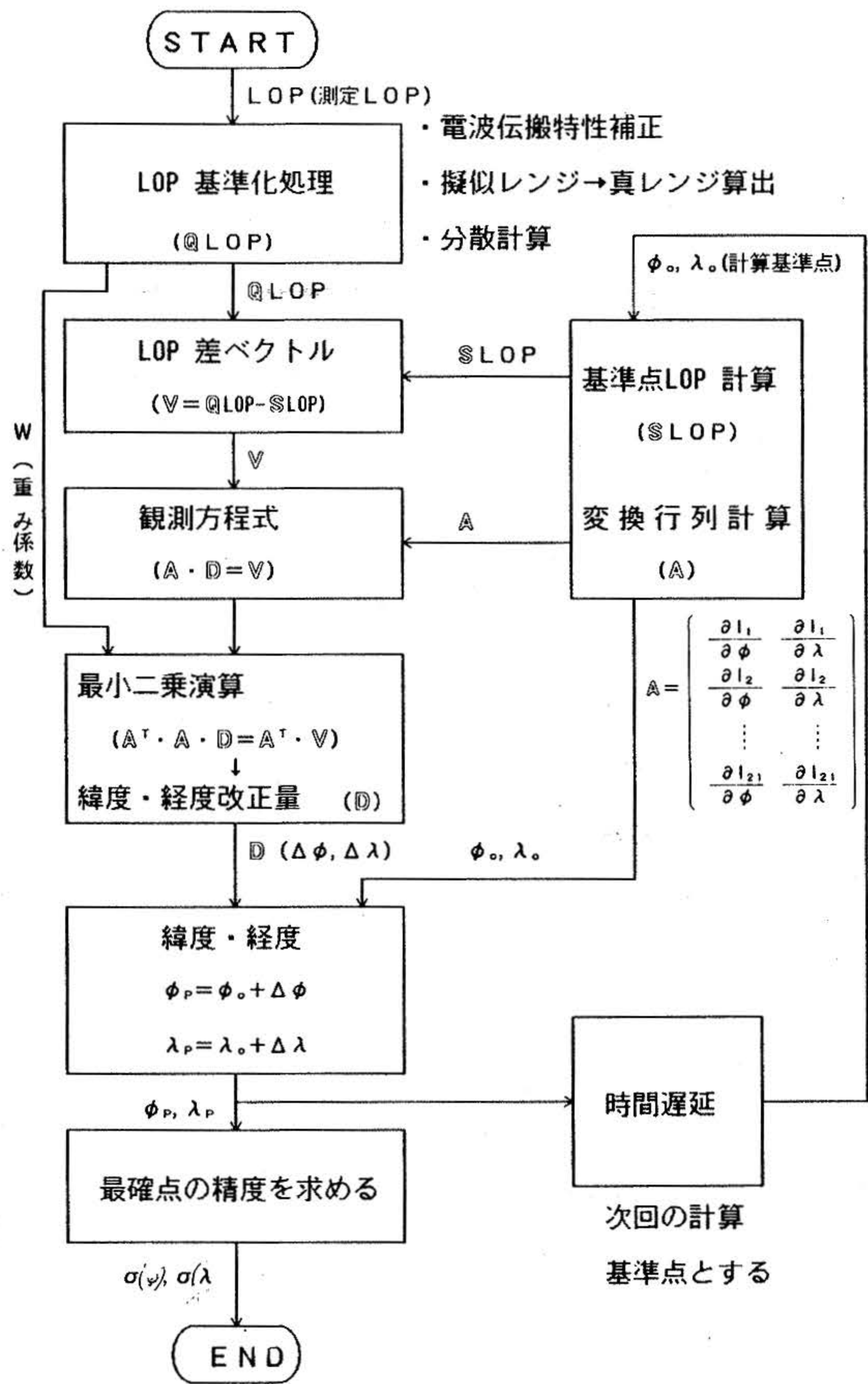


図 5 LOPから緯度・経度への座標変換処理の流れ
Fig. 5 Flow of the coordinates Translation from LOP to latitude/longitude

度・経度への座標変換処理の流れを図5に示す。この座標変換処理での特徴は、求めようとする未知数（緯度・経度）をLOPから直接計算するのではなく、

未知数＝近似値（計算基準点）＋微小修正値の形式で取り扱っている点である。この方法によると非線形である双曲線や円弧LOPを計算基準点近傍で線形として処理できるので、リアルタイムでの座標変換が容易となる利点がある。以下同図により座標変換処理の流れを示す。

- ① LOP基準化処理部で、入力される測定LOPの分散計算、双曲線LOPの電波伝搬特性⁹⁾に起因する誤差補正及び円弧LOPの擬似レンジから真レンジへの変換を行う（基準化処理されたLOPを◎LOPとする）。
- ② 分散計算に基づいて各LOP変動に対する信頼性を示す重み係数 W （0.0～1.0）を決定する（各LOP傾度（緯度・経度方向）に関する重みは、座標変換係数行列内で与えられている）。
- ③ 別途準備（バックグラウンドタスクで計算）した緯度・経度（ ϕ_0, λ_0 ）の判明している計算基準点におけるLOPの計算値（\$LOP）と基準化処理した◎LOPとのLOP差ベクトル V を求める。
- ④ 同時にバックグラウンドタスクで、計算基準点におけるLOP傾度の緯度・経度への座標変換係数行列 A （21行2列）を作成しておく。
- ⑤ 次に③、④を基に観測方程式を組み立てる（ $A \cdot D = V$ ）。求めようとする微小修正値（緯度・経度改正量） D （ $\Delta\phi, \Delta\lambda$ ）は、この観測方程式から行列演算によりLOPの指定が2本であれば通常の数学解として、また3本以上の場合は最小二乗解として求めることができる。このとき②で決定した重み係数 W を座標変換係数行列に乘じ、LOP分散計算による重み付けを行い測位精度の向上を計っている。
- ⑥ 改正量が求まったので、計算基準点（既値の緯度・経度）にそれらを加算することにより、新点の緯度・経度（ ϕ_p, λ_p ）を算出する。
- ⑦ さらに新点の値は、一定の時間遅延後次の計算基準点として採用する。
- ⑧ 新点について、測定の良否の目安となる平均二乗誤差 m^2 を求める。

$$m = \sqrt{\sum_{i=1}^n v_i^2 / (n-q)}$$

ここで、 v_i ：測定誤差、 n ：測定LOP数、 q ：未知数の個数（この場合は緯度・経度の2）を示す。

- ⑨ この m は緯度・経度の合成値なので、これから緯度・経度方向の測定精度を示す標準偏差 σ_ϕ 及び σ_λ を算出する。

以上のようにこの座標変換処理では、計算基準点近傍について線形処理として取り扱うので、実用上LOPの場の変化を意識しない程度の周期（60秒毎）で、処理プログラム内でのLOPの座標変換係数行列を更新し、リアルタイムでの高速座標変換を実現している。

5 複合マルチLOP測位試験

測位試験は、岸壁における本船停泊時の固定点測位と実海域における航走時の測位を実施し、両測位についての性能評価を行った。

5.1 固定点測位試験要領

固定点測位試験は、本船の建造所である川崎重工業（株）神戸造船工場木工浜岸壁で本船係留時に実施した。対比測位系をGPSとし、複合マルチLOP測位はロランCのLOPによる複合とした。（デッカ是最寄りの四国チェーンがあるが、デッカ局の配置上地理的に測位不良地域となるので、複合マルチLOP測位の対象LOPから外した。）測位地点の緯度及び経度は $34^\circ 40.449' N, 135^\circ 11.288' E$ （WGS-84）である。試験は次の長時間と短時間測位を実施し、各々GPS測位と複合マルチLOP測位の結果を磁気テープに収録し、後日解析した。さらに本試験では、停泊地がロランC各局からの電波伝搬経路に陸上部を含むことから、海陸区分処理の効果についても合わせ確認した。

- ① 長時間測位試験：昭和63年11月16日18:00～昭和63年11月17日15:00
- ② 短時間測位試験：平成元年7月20日18:15～19:15

この測位地点はロランC9970（北西太平洋）及び5970（韓国）チェーンの測位がほぼ良好に行える範囲である。従って、前記①ではロランC9970及び5970チェーン、前記②では9970チェーンの双曲線LOPを複合マルチLOP測位の対象とした。

5.2 固定点測位試験結果

1) 長時間測位試験

試験時のGPS測位と複合マルチLOP測位の測定データ（10秒間隔）を統計処理して（但し、GPS測位については3～4衛星測位時のHDOP ≤ 10 のデータを採用）表3に示す。また、同データに対する測位散布図を図6,7,8に示す。さらに、

GPS測位におけるHDOPの時系列変化を図9に示す。同図では横軸に経過時間を、縦軸にその時のHDOP値を示している。HDOPは利用者等価測距誤差⁶⁾（主に受信機における測定時間誤差を距離誤差に換算したもの）に乗じて測位誤差を算出するためのパラメータであり、その値が小さいほど測位誤差が小さいことを示すものである。

表3 固定点側位結果（長時間）

Table 3 Positioning results at fixed point (long term)

試験日時		昭和63年11月16日 18時00分～11月17日 15時00分					
基準点		34° 40.449' N. 135° 11.288' E (WGS-84)		場所	川崎重工(株) 神戸造船工場 木工浜		
測位系	測定条件	測定値(測位)			測定値(LOP)		備考
		緯度・経度平均値	標準偏差	基準点との差	LOP平均値	標準偏差	
GPS	3～4衛星	34° 40.458' N	0.0182' (33.63m)	0.009° (16.63m)			
	HDOP 10以下	135° 11.307' E	0.0289' (44.13m) (合成: 55.48m)	0.019° (29.01m) (合成: 33.44m)			
複合マルチ LOP	9970 X, Y	34° 40.4141' N	0.0134° (24.76m)	-0.0349° (64.50m)	9970 X: 36413.4 μ s Y: 59047.5 μ s	0.117 μ s 0.089 μ s	海陸区分 処理あり
	5970 W, Y 双曲線4LOP	135° 11.2349' E	0.0225° (34.36m) (合成: 42.35m)	-0.0531° (81.08) (合: 103.60m)	5970 W: 17807.2 μ s Y: 47445.2 μ s	0.111 μ s 0.081 μ s	
複合マルチ LOP	9970 X, Y	34° 40.1882' N	0.0133' (24.58m)	-0.2608' (482.0m)	9970 X: 36413.4 μ s Y: 59047.5 μ s	0.117 μ s 0.089 μ s	海陸区分 処理あり
	5970 W, Y 双曲線4LOP	135° 11.1205' E	0.0341' (52.07m) (合成: 57.58m)	-0.1675' (255.77m) (合成: 545.66m)	5970 W: 17807.2 μ s Y: 47445.2 μ s	0.111 μ s 0.081 μ s	

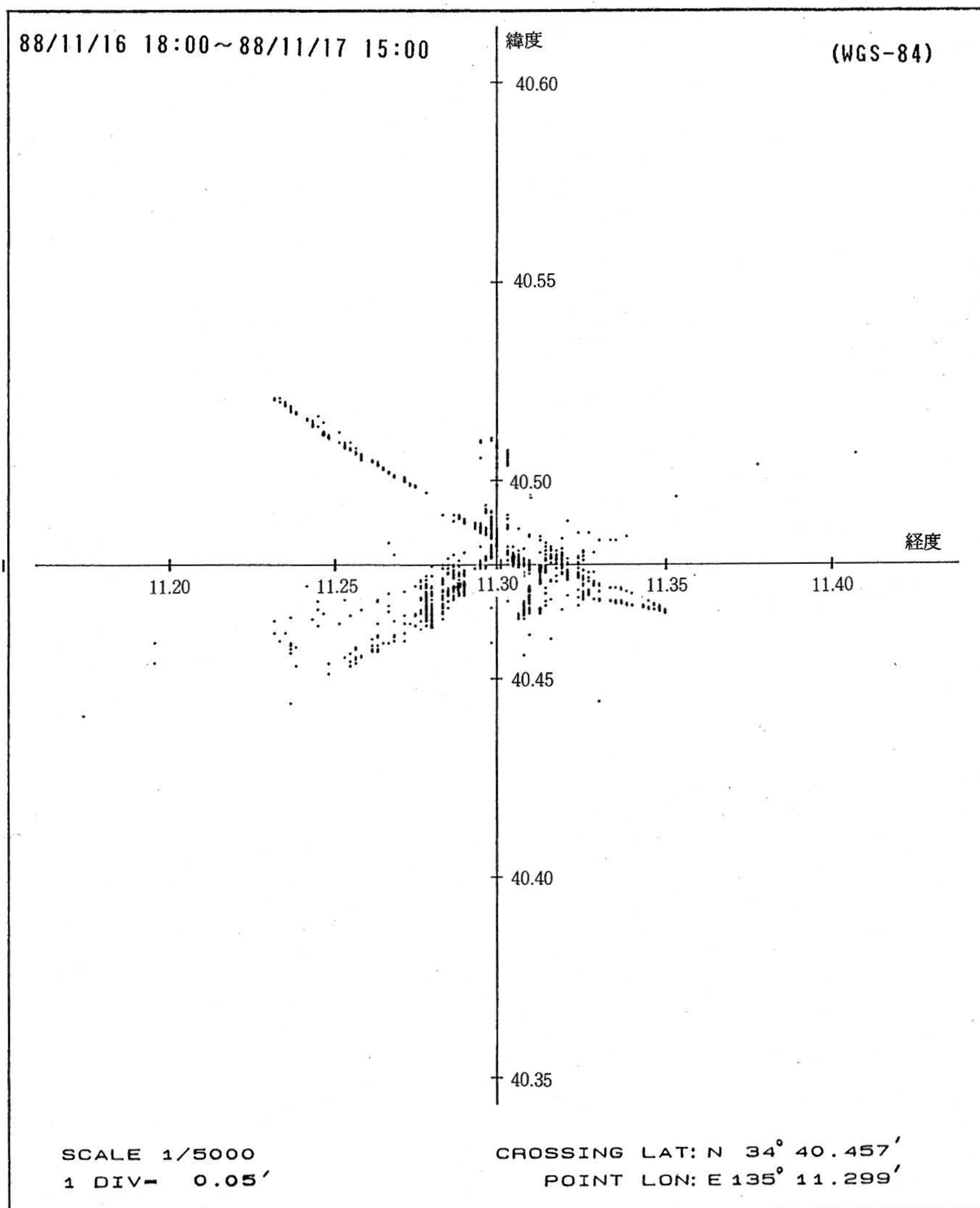


図 6 GPSによる固定点側位散布図 (長時間)

Fig. 6 Positioning plot by GPS at the fixed point (long term)

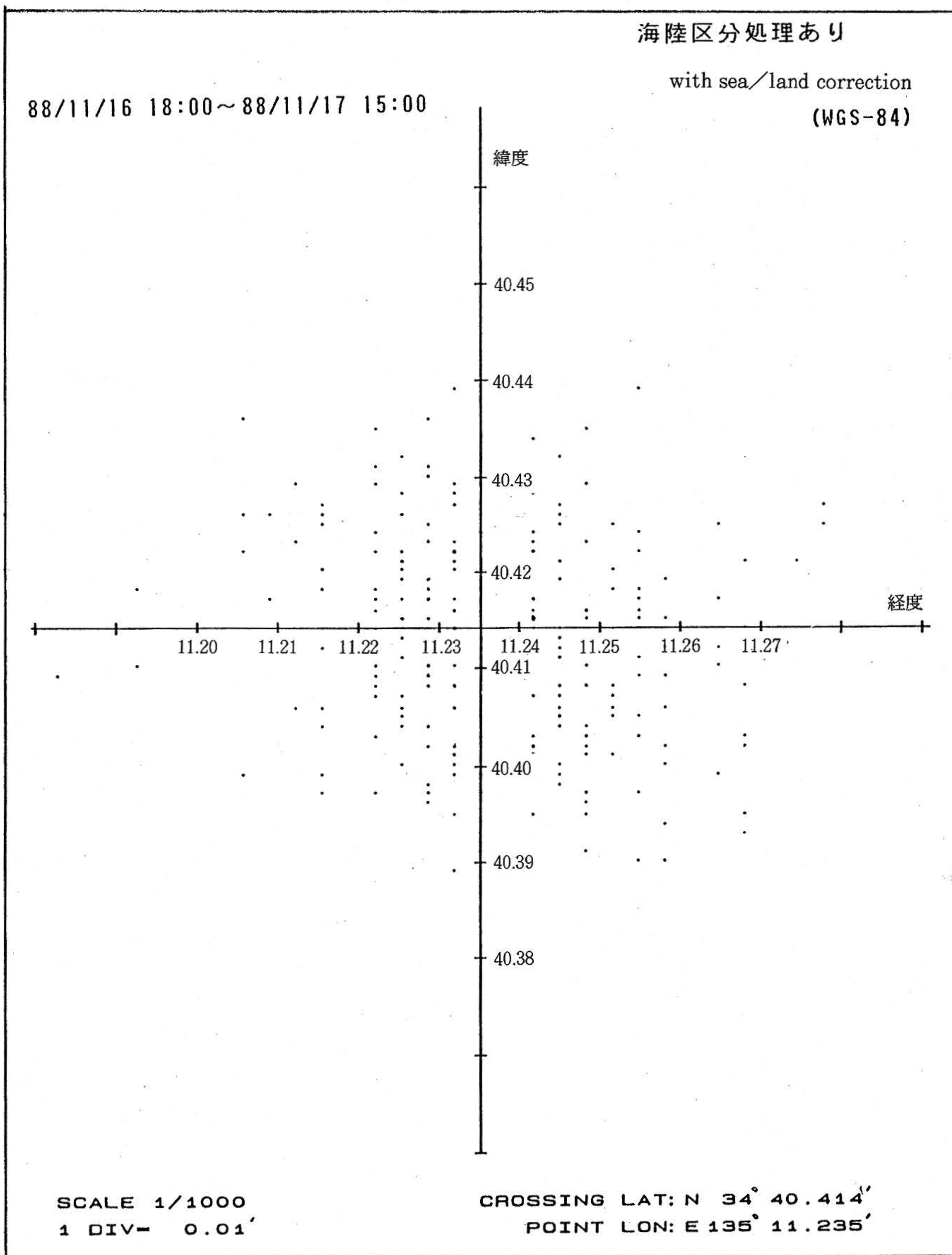


図 7 複合マルチLOP側位による固定点側位散布図 (長時間)

Fig. 7 Positioning plot by hybrid multi-LOP positioning at the fixed point (long term)

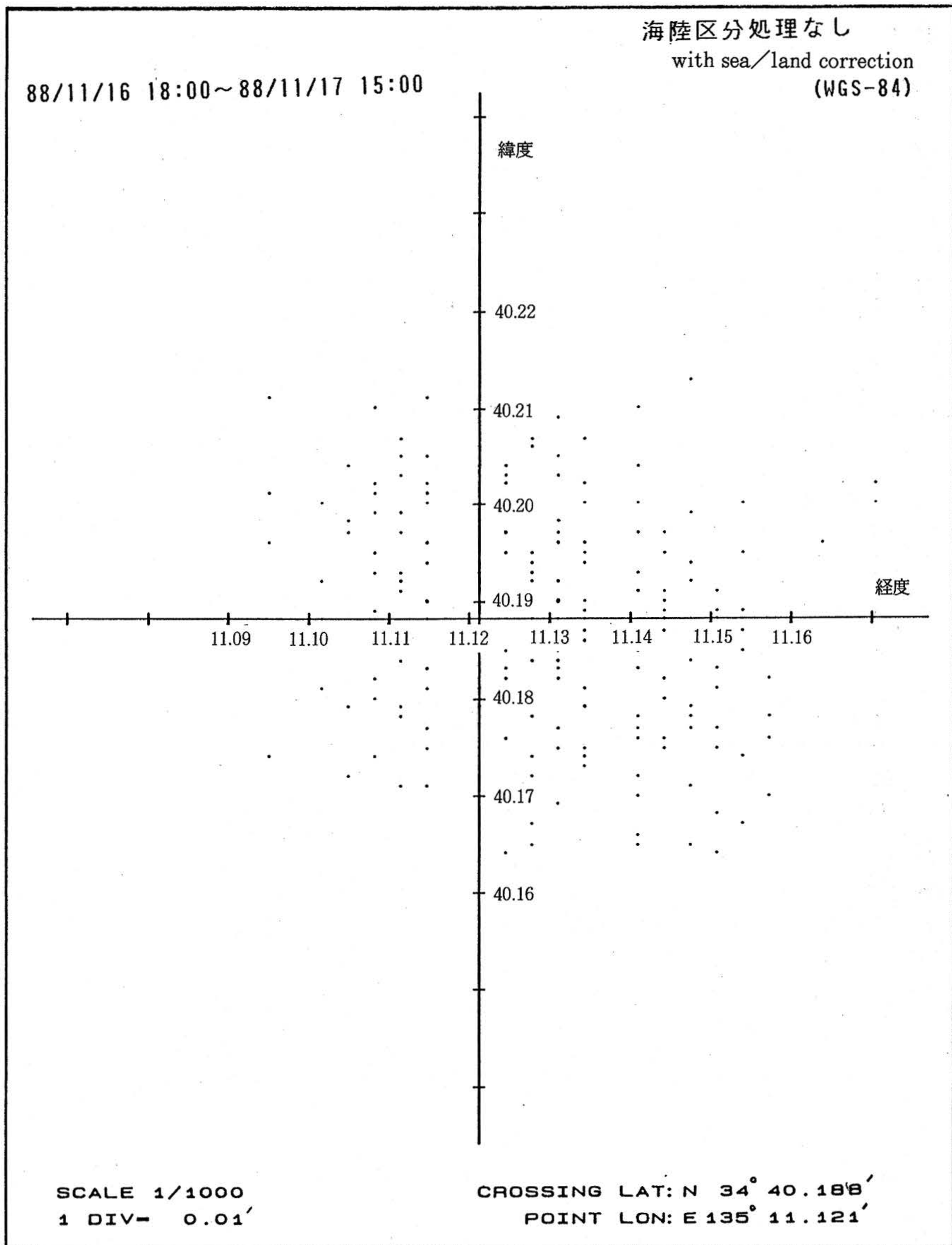


図 8 複合マルチLOP側位による固定点側位散布図 (長時間)

Fig. 8 Positioning plot by hybrid multi-LOP poistioning at the fixed point (long term)

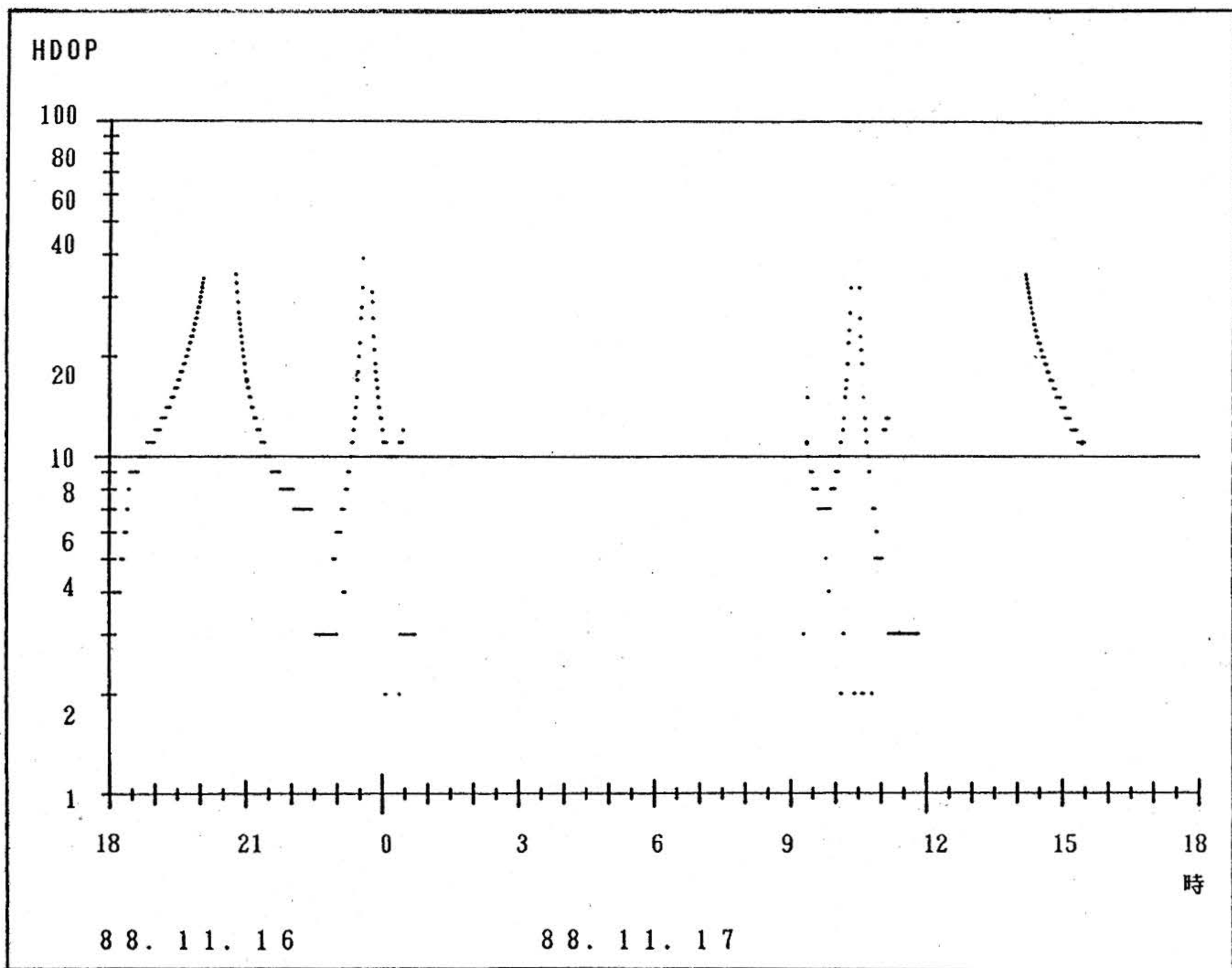


図 9 固定点側位時のGPSのHDOP変動 (長時間)

Fig. 9 Variation of HDOP for GPS during positioning at the fixed point (long term)

同図でHDOPが36程度まで徐々に大きくなった後データが飛び、その後再度36程度から徐々に小さくなっているのは衛星の切り換えがあったことを示している。これらの結果から次のことが分かる。

- ① GPS測位は $HDOP \leq 10$ のデータを採用しており、測位誤差は利用者等価測距誤差を 6.7 m^6 とすると 67 m (6.7×10)程度と予測できる。この予測値と測定した標準偏差(約 55 m)も良く合致していて、GPSは良好な測位状況であった。
- ② 複合マルチLOP測位はGPS測位と比較して、基準点との差(平均値)は大きい(GPS: 約 33 m , 複合: 約 104 m)が、標準偏差は小さい(GPS: 約 55 m , 複合: 約 42 m)。また、試験時

の双曲線LOPは各々 $HDOP \leq 2$ を示しており、基準点との差(平均値)はあるものの複合マルチLOP測位も良好であった。基準点との差(平均値)がGPSに比べて大きいのは、6①項で述べるように地域的な固定誤差であり、複合マルチLOP測位に問題があるのではなく、電波伝搬経路の海陸区分処理に起因するものと考えられる。なお、LOPの標準偏差では9970チェーンに比べ5970チェーンの方が若干小さくなっている。

- ③ 複合マルチLOP測位における海陸区分処理の比較では、海陸区分処理がない場合の基準点との差(平均値)が約 546 m (合成)であるのに対し、海陸区分処理がある場合は約 104 m (合成)であり、その効果が顕著に表れている。また、

海陸区分処理をした場合の緯度・経度方向の比較では、緯度方向の改正量（約482mから約65m）が経度方向の改正量（約256mから約81m）に比べて大きい。これは9970チェーンのX局（北海道）、Y局（沖縄）及び5970チェーンのW局（北海道）、Y局（沖縄）共に本船停泊地である神戸からは緯度方向に陸地が分布しており、海陸区

分処理の効果がこの方向に表れていることを示して、妥当な結果である。

2) 短時間測位試験

試験時のGPS測位と複合マルチLOP測位の測定データ（10秒間隔）を統計処理して表4に示す。また、同データに対する測位散布図を図10,11,12に示す。さらに、GPS測位におけるHDOP

表 4 固定点側位結果（短時間）

Table 4 Positioning results at the fixed point (short term)

試験日時		平成元年7月20日 18時15分～19時15分					
基準点		34° 40.449' N. 135° 11.288' E (WGS-84)			場所	川崎重工(株)神戸造船工場 木工浜	
測位系	測定条件	測定値(測位)			測定値(LOP)		備考
		緯度・経度平均値	標準偏差	基準点との差	LOP平均値	標準偏差	
GPS	3～4衛星	34° 40.4618' N	0.0061' (11.27m)	0.0128' (23.67m)			
	HDOP 3～26	135° 11.2988' E	0.0045' (6.86m) (合成: 13.19m)	0.0108' (16.43m) (合成: 28.81m)			
複合マルチ LOP	9970	34° 40.3601' N	0.0046' (8.50m)	-0.0889' (164.29m)	W:18307.4μs	0.127μs	海陸区分 処理あり
	W.V.X.Y 双曲線4LOP	135° 11.3746' E	0.0042' (6.41m) (合成: 10.65m)	0.0866' (132.24m) (合成: 210.90m)	Y:59047.4μs X:36413.6μs Y:59047.4μs	0.022μs 0.043μs 0.026μs	
複合マルチ LOP	9970	34° 40.1063' N	0.0048' (8.87m)	-0.3427' (633.31m)	W:18307.4μs	0.127μs	海陸区分 処理あり
	W.V.X.Y 双曲線4LOP	135° 11.4303' E	0.0042' (6.41m) (合成: 10.94m)	0.1423' (217.29m) (合成: 669.55m)	Y:59047.4μs X:36413.6μs Y:59047.4μs	0.022μs 0.043μs 0.026μs	
単独系 ロランC No.1	9970	34° 40.5397' N	0.0475' (87.81m)	0.0907' (167.68m)	W:18307.4μs	0.127μs	海陸区分 処理あり
	W. Y 双曲線2LOP	135° 11.3762' E	0.0053' (8.09m) (合成: 88.18m)	0.0882' (134.55m) (合成: 214.99m)	Y:59047.4μs	0.022μs	
単独系 ロランC No.2	9970	34° 40.3513' N	0.0047' (8.69m)	-0.0977' (180.62m)	X:36413.6μs	0.043μs	海陸区分 処理あり
	W. Y 双曲線2LOP	135° 11.3570' E	0.0044' (6.71m) (合成: 10.98m)	0.0690' (105.26m) (合成: 209.05m)	Y:59047.4μs	0.026μs	

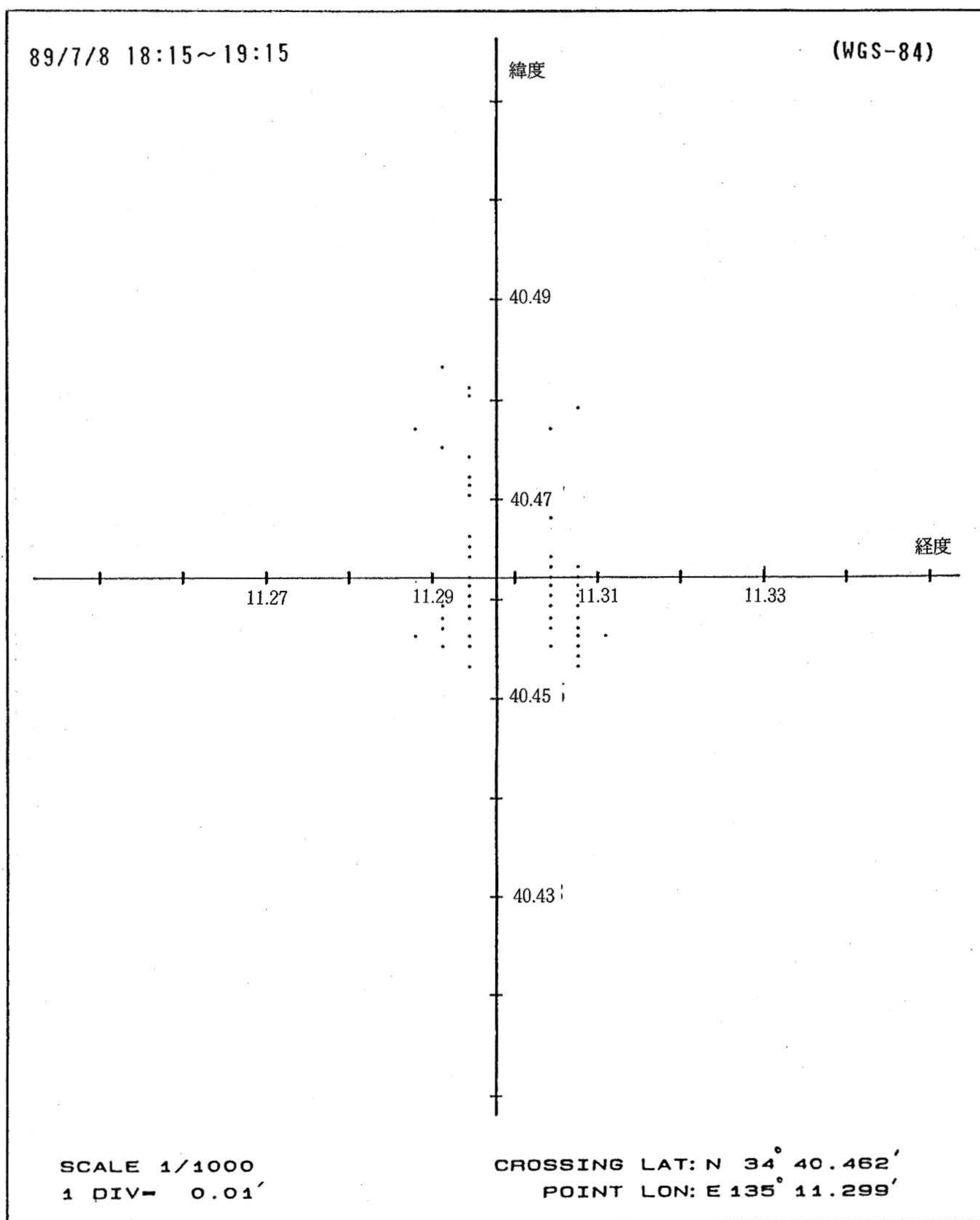


図 10 GPSによる固定点側位散布図 (短時間)

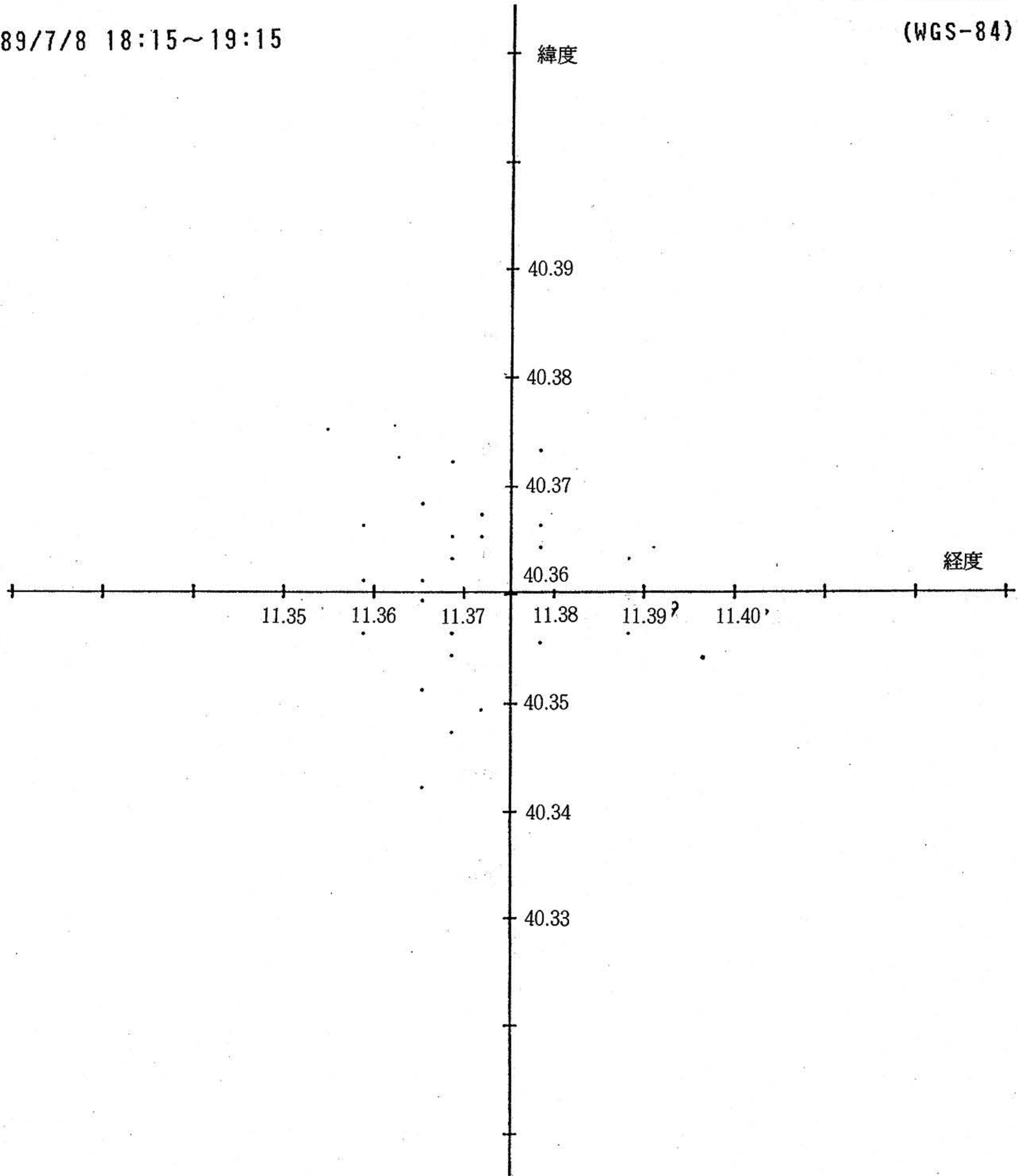
Fig. 10 Positioning plot by GPS at the fixed point (short term)

海陸区分処理あり

with sea/land correction

(WGS-84)

89/7/8 18:15~19:15



SCALE 1/1000
1 DIV= 0.01'

CROSSING LAT: N 34° 40.360'
POINT LON: E 135° 11.375'

図 11 複合マルチLOP側位による固定点側位散布図 (短時間)

Fig. 11 Positioning plot by hybrid multi-LOP positioning at the fixed point (short term)

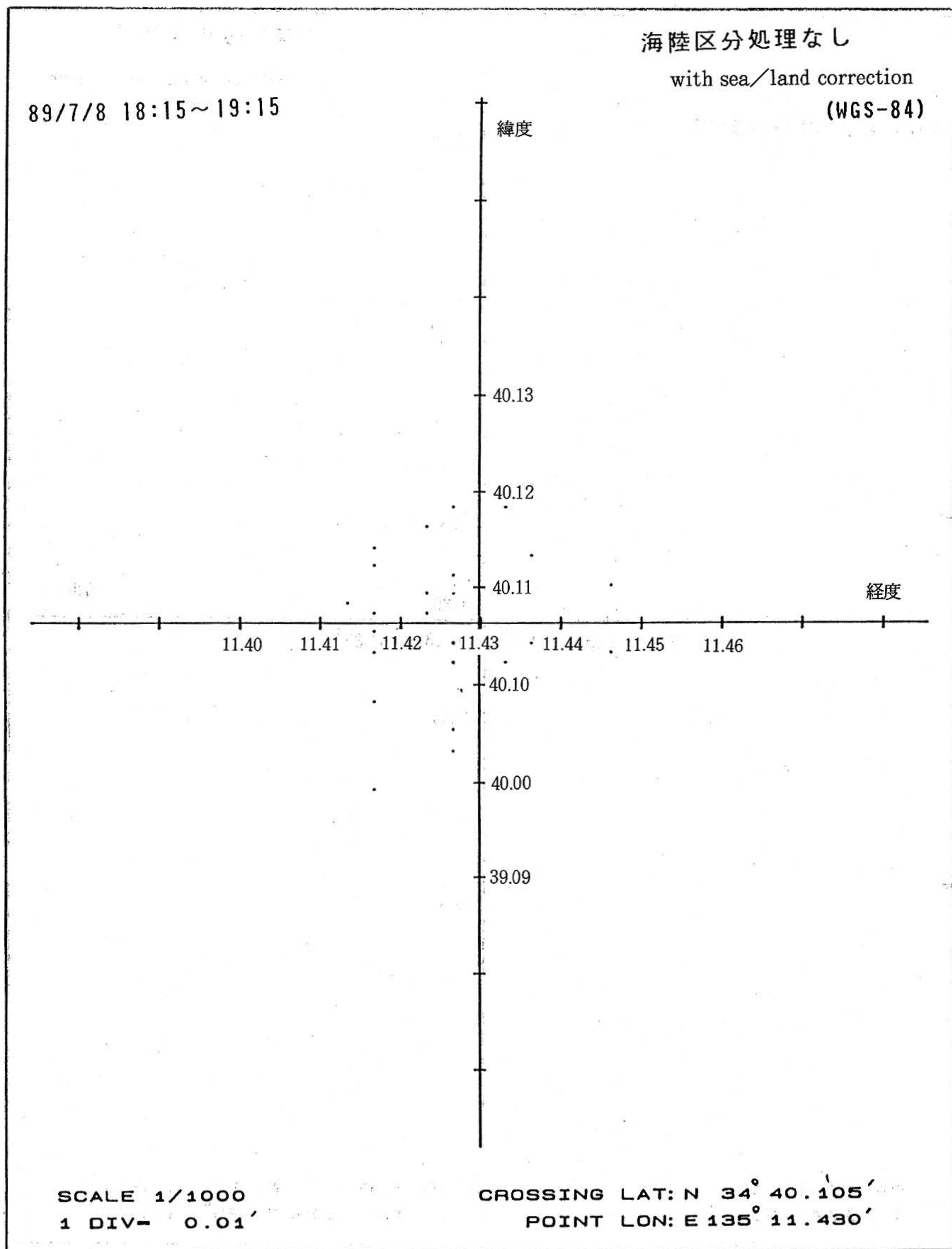


図 12 複合マルチLOP側位による固定点側位散布図 (短時間)

Fig. 12 Positioning plot by hybrid multi-LOP positioning at the point (short term)

の時系列変化を図13に示す。これらの結果から次のことが分かる。

- ① GPS測位はHDOP = 3~26(3~4衛星測位)の全データを採用しているが、図13に示すようにHDOP > 10の場合は少なく平均値で4程度であり、測位誤差は28m (6.7×4)程度と予測できる。この予測値と測定した標準偏差(約13m)も良く合致していて、GPSは良好な測位状況であった。
- ② 複合マルチLOP測位はGPS測位と比較して、基準点との差(平均値)は大きい(GPS: 約29m, 複合: 約211m)が、標準偏差は若干小さい(GPS: 約13m, 複合: 約11m)。また、試験時の双曲線LOPは各々HDOP ≤ 2 を示

しており、基準点との差(平均値)はあるものの複合マルチLOP測位も良好であった。基準点との差(平均値)がGPSに比べて大きいのは、6①項で述べるように地域的な固定誤差であり、複合マルチLOP測位に問題があるのではなく、電波伝搬経路の海陸区分処理に起因するものと考えられる。

- ③ 複合マルチLOP測位における海陸区分処理の比較では、海陸区分処理がない場合の基準点との差(平均値)が約670m(合成)であるのに対し、海陸区分処理がある場合は211m(合成)であり、その効果が顕著に表れている。また、海陸区分処理をした場合の緯度・経度方向の比較では、長時間測位試験と同様な結果となっている。

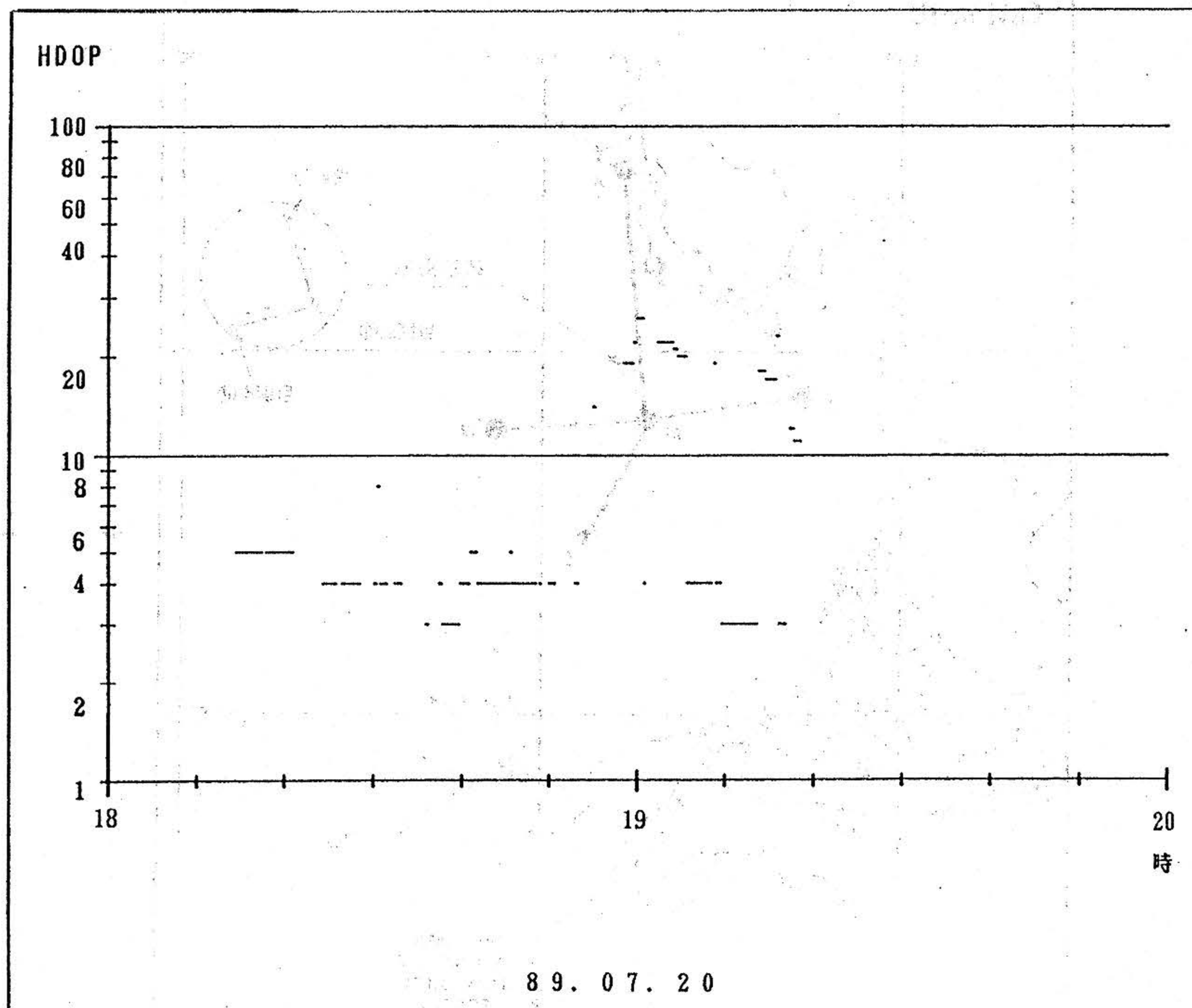


図 13 固定点側位時のGPSのHDOP変動(短時間)

Fig. 13 Variation of HDOP for GPS during positioning at the fixed point (short term)

④ 複合マルチLOP測位はNo.1及び2 ロラン単
独測位と比較して、基準点との差（平均値）は
ほとんどない（複合：約211m, No.1 ロランC：
約215m, No.2 ロランC：約210m）が、標準偏
差は小さくなって（複合：約11m, No.1ロラン
C：約88m, No.2ロランC：約11m）おり、複合
マルチLOP測位の効果がでている。即ち、こ
れはNo.1ロランCの受信しているW局の測定
LOPの標準偏差が他の局に比べて3～6倍程度
大きい（W局からは地理的な影響で測位誤差が

大きくなる）が、複合マルチLOP測位とする
ことで、LOP分散による重み付けを行いその
影響を取り除いているためである。

5.2 航走測位試験

5.2.1 航走測位試験要領

航走測位試験は、平成元年2月26日小笠原海域
(29° N, 142° E 近傍)で、対比測位系である
GPSが良好な状態で測位できる時間帯を選び実
施した。図14に航走試験海域を示す。試験ルー
トとして、一辺約15海里のL字型ルートを設定（ルー

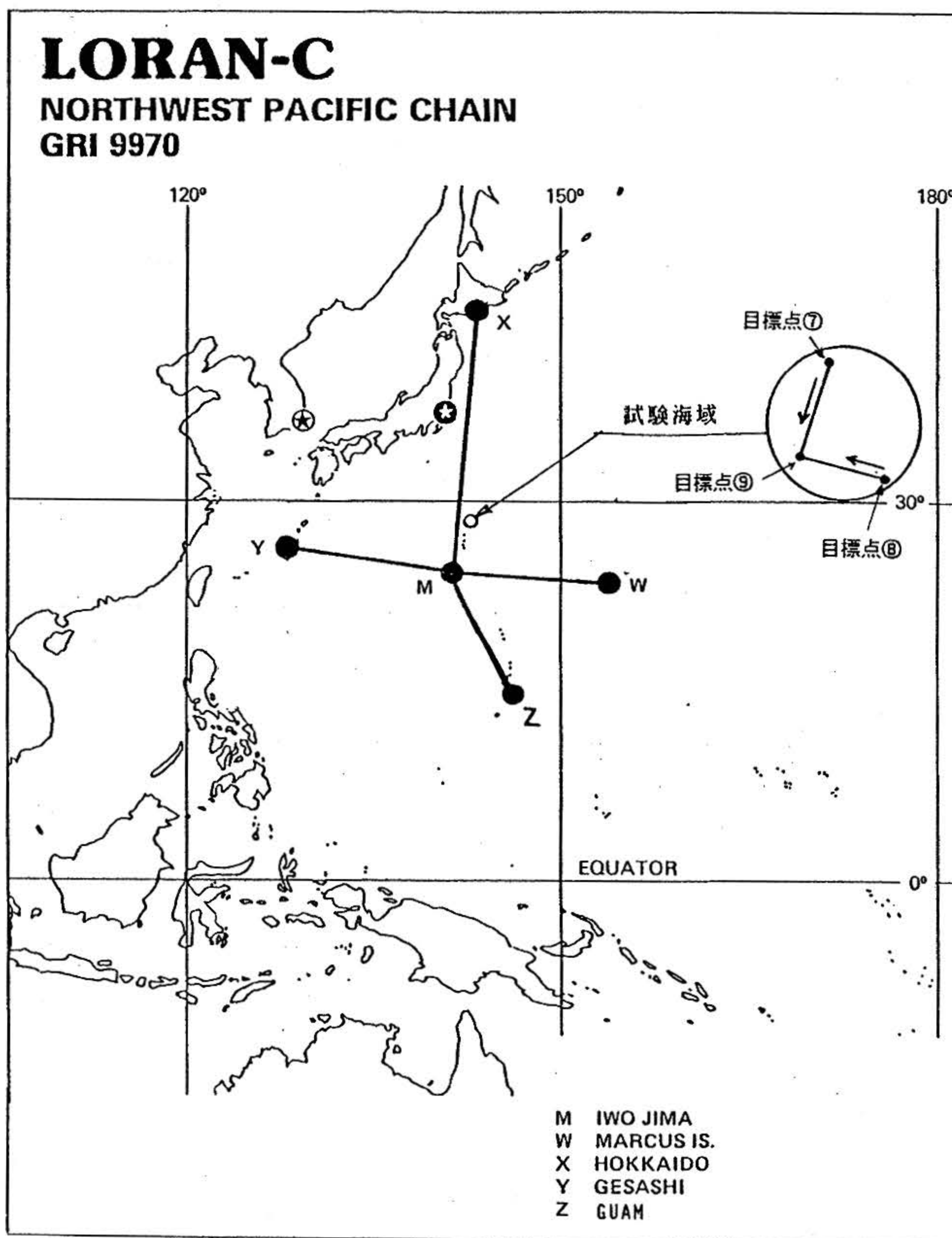


図 14 航走側位試験海域図

Fig. 14 Sea test area

ト上に始点, 中間点及び終点となる目標点7, 9及び8を設定) した。このルート上を本装置が出力する航行援助情報に従って往復航走(往航; 7:50~9:50, 復航; 10:00~12:00)し, この間複合マルチLOP測定データ, GPS測定データ等を磁気テープに収録するほか, 航跡をリアルタイムでXYプロッタに記録し, 自動航行援助機能の確認試験も合わせて実施した。なお, 当日の気象は風力SW7, 風浪SW4, うねりSW4であった。

5.2.1 航走測位試験結果

この海域はロランCの9970チェーン各送信局からの電波がすべて海上伝搬であり, ロランCの非常に良好な場所である。従って, ロランC電波の

陸上伝搬補正処理及びカルマンフィルタ処理を外した複合マルチLOP測位単独での性能評価を行うことができた。表5に試験時の各測位系の測定状況を示す。

複合マルチLOP測位は往航時を9970チェーンの双曲線4LOP, 復航時を円弧4LOPで実施し, 双曲線と円弧の測位結果も比較している。試験時の双曲線と円弧はHDOP ≤ 1.5 を示し, 良好な測位状況であった。図15に試験時のGPS測位におけるHDOPの時系列変化を示す。同図によるとHDOPは変動(3~36)しているが, HDOP >10 の場合は少なく平均値で6程度であり, GPSは4衛星測位を続けていることから判

表5 航走側位試験時の各側位系の測定状況

Table 5 Conditions of positioning sensor during sea test

測位系				往 航	復 航
1	複合マルチLOP			双曲線 4LOP 9970 X, Y, W, X	円弧 4LOP 9970 M, Y, W, X
2	GPS			7時50分~12時00分	4SV (03, 06, 09, 13) HDOP=3~36
3	単 独 系	双曲線	No. 1	9970 X, Y	
4			No. 2	9970 W, X	
5		円弧	No. 1	9970 M, Y	
6			No. 2	9970 W, X	

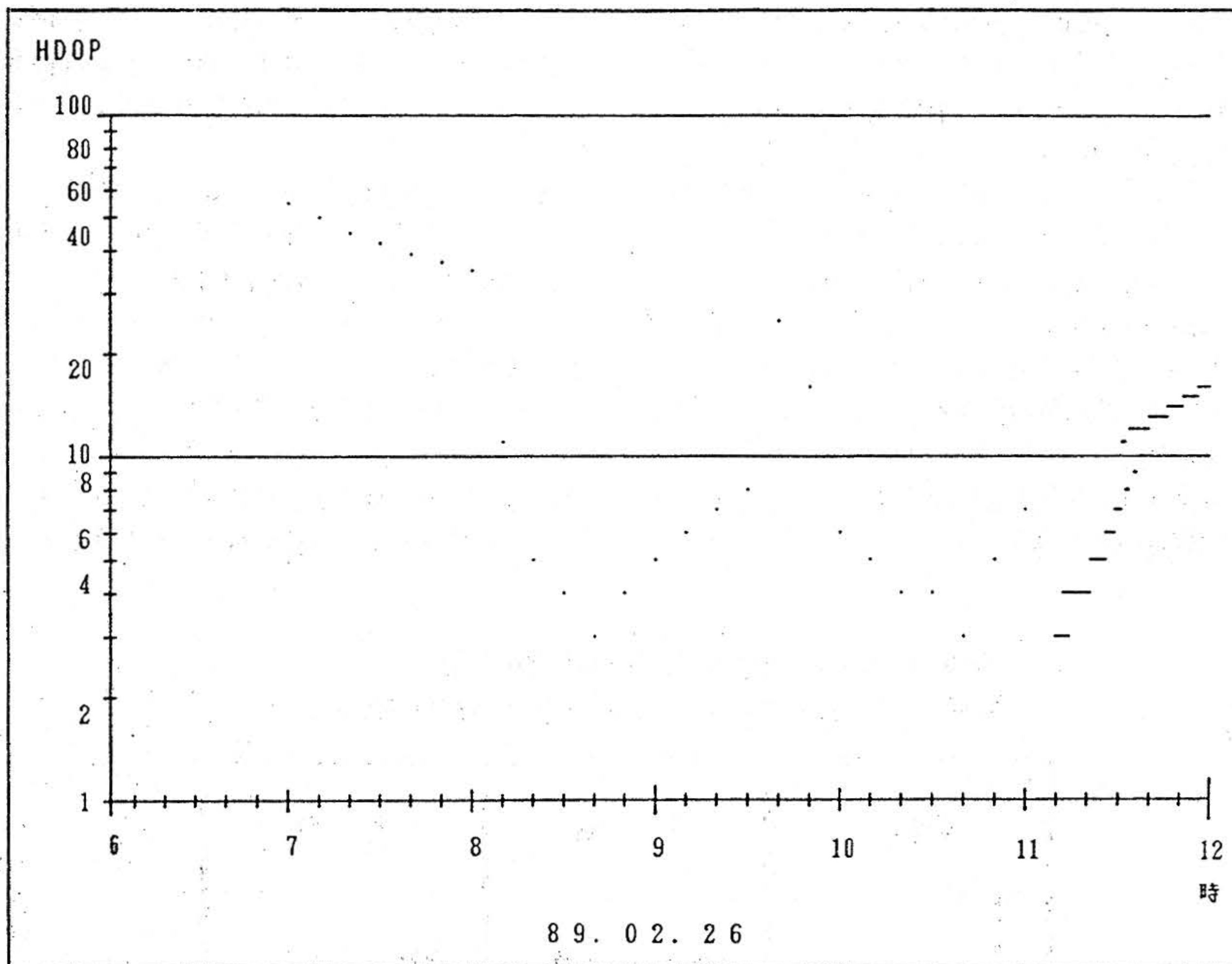


図 15 航走側位時のGPSのDHOP変動

Fig. 15 Variation of HDOP for GPS during sea test

断すると測位誤差は約40m(6.7×6)と予測され、良好な測位状況であった。

(1) 全区間測位の比較

試験ルート全区間について、磁気テープから再生したGPS測位及び複合マルチLOP測位の航跡図(1分間隔)を図16, 17に示す。また、同時期のGPS測位に対する複合マルチLOP測位の位置差(7:50~12:00までの10分間隔データについて)を統計処理して表6に示す。これらの結果から分かるように、GPS測位と複合マルチLOP測位との差は往復の平均偏位量で52mと両者は良好な一致を示し、航跡のばらつきも少ないことが分かる。

また、往航(双曲線複合)と復航(円弧複合)の測位結果も良く一致(GPS測位に対する平均偏位量は各々65m及び66m)しており、双曲線と

円弧による複合マルチLOP測位の差は見受けられず、両者共に正常に作動している。

(2) 短時間測位の比較

本装置では自船の航跡と経過時間(任意に設定可能で、本試験時は3分間に設定)により、針路及び船速(対地)を求めることができる。従って、これらのデータが適正に出力されている(逆にいえば、測位が正常におこなわれている)かを確認するためにこの比較を行った。

往航時(9:20~9:23)及び復航時(10:30~10:33)の各々3分間における同一地点のGPS測位と複合マルチLOP測位が出力する本船の針路及び速力(5秒間隔データ)についての短時間変動の比較を図18,19(横軸に経過時間、縦軸に針路または速力)に示す。また、同データを統計処理して表7,8に示す。これらの図・表で計算値(GPS

89/2/26 7:50~9:50

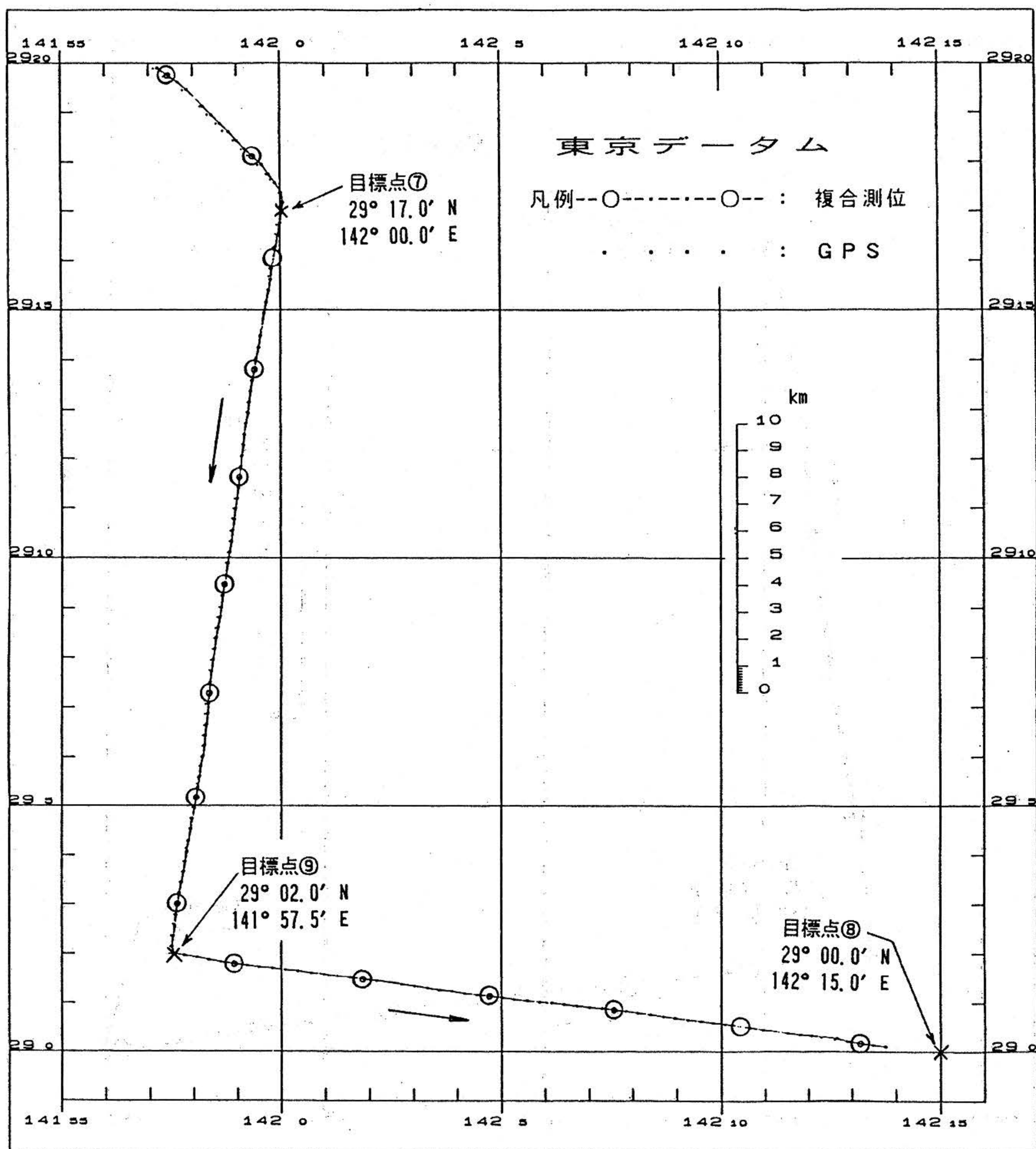


図 16 GPS側位と複合マルチLOP側位の航跡の比較 (往航)

Fig. 16 Comparison of positioning between GPS
 and hybrid multi-LOP positioning at sea test (going way)

89/2/26 10:00~12:00

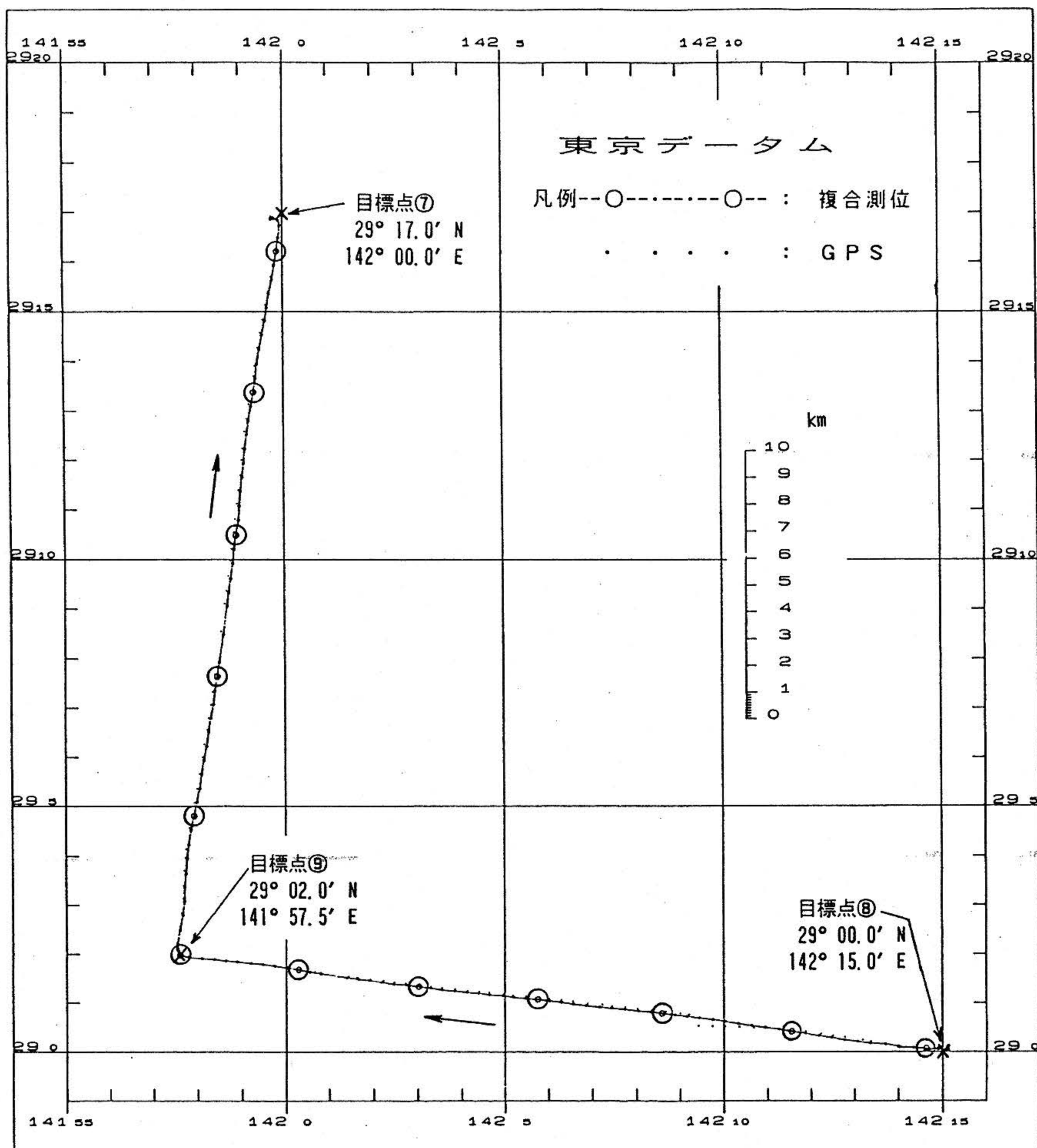


図 17 GPS側位と複合マルチLOP側位
 の航位の航跡の比較 (復航)

Fig. 17 Comparisom of positioning between GPS
 and hybrid multi-LOP positioning at sea test (backing way)

表 6 対GPS位置差の比較

Table 6 Comparison of positioning GPS
and hybrid multi-LOP positioning during sea test

対比システム			〈GPS〉				備 考
番 号	I D	項目 時刻	緯度差 (分)	経度差 (分)	極座標変換値		
					距離 (m)	角度 (度)	
1	70	07:50	-0.02	-0.04	75	240.3	往 航
2	80	08:00	0.02	-0.03	61	307.2	
3	90	08:10	-0.03	-0.05	98	235.6	
4	100	08:20	0.00	-0.04	65	270.0	
5	110	08:30	0.04	-0.06	122	307.2	
6	120	08:40	0.01	-0.05	83	282.8	
7	130	08:50	0.00	-0.04	65	270.0	
8	140	09:00	0.01	-0.04	67	285.9	
9	150	09:10	0.01	-0.03	52	290.8	
10	160	09:20	0.00	-0.02	32	270.0	
11	170	09:30	-0.01	-0.04	67	254.1	
12	180	09:40	-0.01	-0.01	25	221.3	
13	190	09:50	0.01	-0.07	115	279.2	
14	200	10:00	0.00	-0.01	16	270.0	復 航
15	210	10:10	0.04	0.03	88	33.4	
16	220	10:20	0.04	0.08	149	60.3	
17	230	10:30	0.04	0.05	110	47.6	
18	240	10:40	0.04	-0.02	81	336.3	
19	250	10:50	0.01	0.05	83	77.2	
20	260	11:00	0.04	-0.02	81	336.3	
21	270	11:10	0.04	-0.05	110	312.4	
22	280	11:20	0.05	-0.06	134	313.5	
23	290	11:30	0.06	-0.06	147	318.7	
24	300	11:40	0.03	-0.06	112	299.7	
25	310	11:50	0.02	-0.02	49	318.7	
26	320	12:00	0.05	0.00	92	0.0	
〈01-13〉							往 航
		MEAN	0.002	-0.040	65	273.8	
		SD	0.017	0.015			
〈14-26〉							復 航
		MEAN	0.035	-0.007	66	350.3	
		SD	0.016	0.045			
〈01-26〉							往 航
		MEAN	0.019	-0.023	52	312.5	
		SD	0.023	0.037			

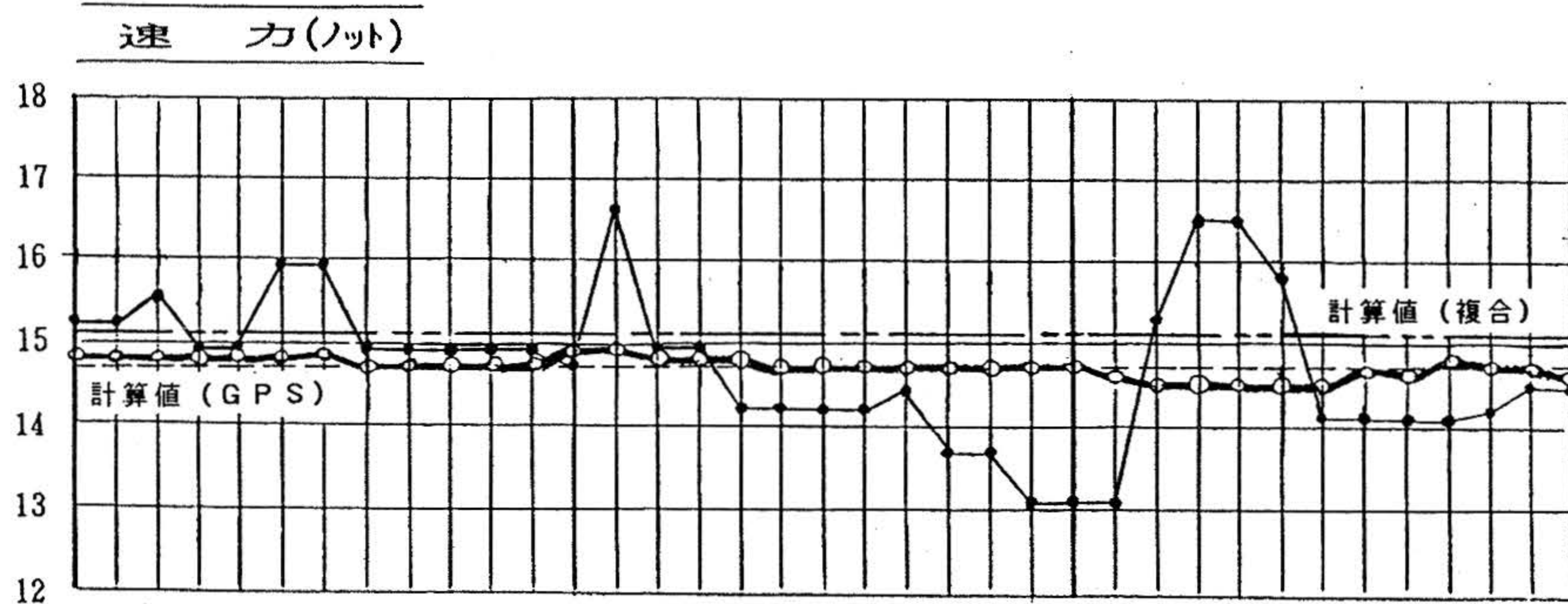
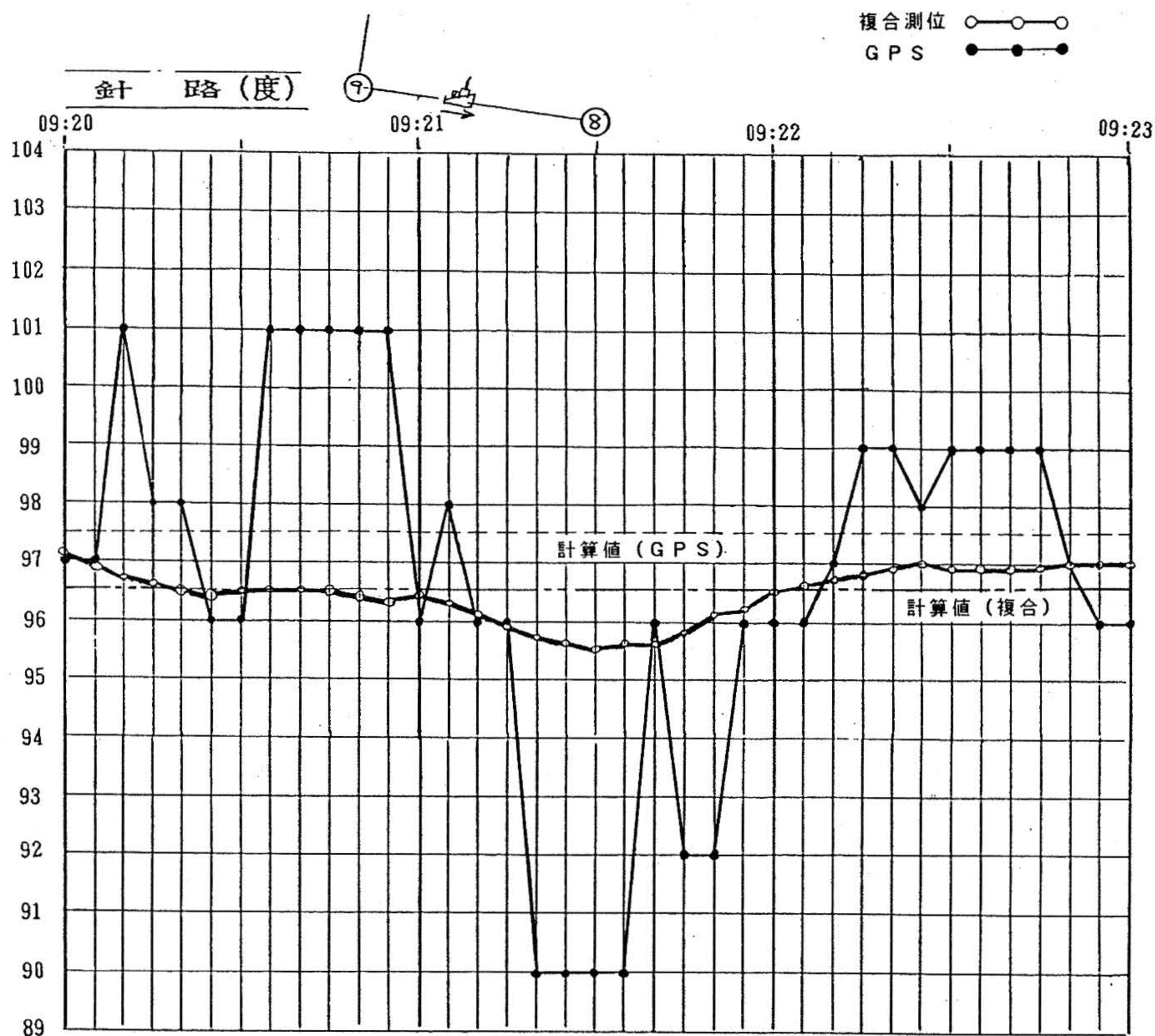


図 18 針路・船速の短時間変動 (往航)

Fig. 18 Variation of bearing and speed (going way)

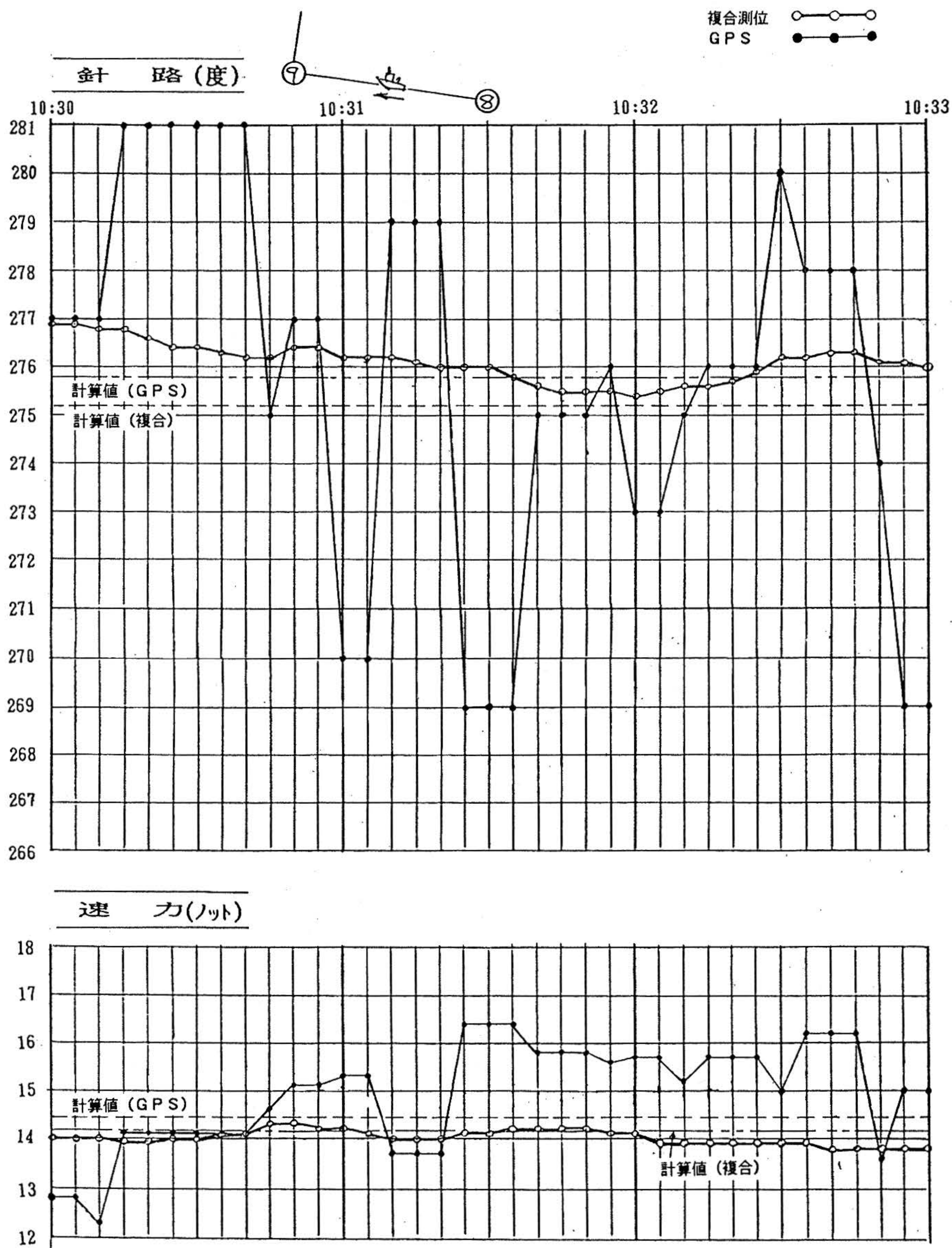


図 19 針路・船速の短時間変動 (復航)

Fig. 19 Variation of bearing and speed (backing way)

表 7 針路、船速の短時間変動（往航）

Table 7 Variations of bearing and speed (going way)

		針路（度）		速力（ノット）	
		複合測位	G P S	複合測位	G P S
範 囲	最大値	97.1	101.1	14.91	16.6
	最小値	95.5	90.0	14.50	13.1
平 均 値		96.45	96.76	14.71	14.72
標 準 偏 差		0.46	3.20	0.10	0.88
平均値のオフセット		- 0.31	基準	- 0.01	基準
比				1.00	基準
航跡（3 分間） からの計算値		96.5（複合測位） 97.5（G P S）		15.1（複合測位） 14.7（G P S）	

表 8 針路・船速の短時間変動（復航）

Table 8 Variation of bearing and speed (backing way)

		針路（度）		速力（ノット）	
		複合測位	G P S	複合測位	G P S
範 囲	最大値	276.9	281.0	14.32	16.4
	最小値	275.4	269.0	13.75	13.6
平 均 値		276.10	275.84	14.01	14.92
標 準 偏 差		0.41	3.87	0.15	1.09
平均値のオフセット		0.26	基準	- 0.91	基準
比				0.94	基準
航跡（3 分間） からの計算値		275.8（複合測位） 275.2（G P S）		14.1（複合測位） 14.4（G P S）	

または複合)とあるのは、GPS測位または複合マルチLOP測位における計測開始位置(往航時9:20,復航時10:30)と終了位置(往航時9:23,復航時10:33)により算出した針路及び速力である。

これらの結果から分かるように、GPS測位と複合マルチLOP測位では、針路及び速力共に平均値では表7,8に示すように良好な一致(例えば往航時の速力ではGPS:14.71kts,複合:14.72kts)が見られる。また、両測位共に平均値では計算値と良く合致している。

一方標準偏差では、GPS測位に比べて複合マルチLOP測位の方が図・表からも明らかなように針路及び速力共に測位変動が小さい(例えば往航時の針路ではGPS:3.20°,複合:0.46°のようにデータが計算値の近辺に集中している)。GPSからの針路及び速力の出力形態が不明であることから、GPSについての良否を論議することはできない。しかし、このような短時間で針路及び速力共に大きく変動することは考えられず、少なくとも複合マルチLOP測位は針路及び速力共に計算値と合致し、測位変動も小さく安定した測定値を出力していることが確認できた。

(3) 航行援助情報の確認

上記(1)(2)の結果、これらの測定データを基に出力される航行援助情報についても、航走時にターミナルに出力される情報(目標点に対する方位、距離等)を計算値と比較することにより良好であることを確認した。

6 まとめ

- ① 固定点測位試験の結果から判断すると、固定点での複合マルチLOP測位はGPS測位に比べ、その測位誤差(平均値)が大きいといえる。これは直接複合マルチLOP測位に不具合があるのではなく、むしろ電波伝搬の海陸区分処理に起因するものと考えられる。即ち現状では、電波伝搬経路の陸上部分を一律 $0.6 \mu s/100k$ mの遅延量で補正している。しかし、実際の地形は山岳等による高低があり電波の回折による遅延が生じ、必ずしも遅延量が一定ではない。現時点ではこの地形による影響の補正処理を本装置に組み込むことができないので、測位誤差(平均値)が大きいのはこのためと推察できる。

一方測位の標準偏差の点では、複合マルチLOP測位はGPS測位よりもばらつきが少ない。本試験結果からGPS測位の標準偏差は55m($HDOP \leq 10$),複合マルチLOP測位のそれは42m程度と予測でき、両者共に正常に測位していることが分かった。また、単独系ロランCで見られる標準偏差の大きいLOPの影響を複合マルチLOP測位とすることで取り除くことができおり、複合マルチLOP処理が有効に作動していることが確認できた。

- ② 今後海陸区分処理の方法についての改善(例えば補正係数の見直し)も一つの課題といえるが、本装置では地域的な固定誤差の補正は、先に述べたように3方法(手動/NNSS/GPS)で行うことができる。従って、利用の際にGPS測位等の結果を基に予め補正してやれば、著しい測位誤差の発生を未然に防ぐことが可能である。また、運航海域の電波伝搬経路がほとんど海上のみである場合は運用上は何ら問題はないと思われる。
- ③ 航走測位試験の結果によれば、複合マルチLOP測位とGPS測位の航跡は往復の平均偏位量で52mと良好な一致を示し、航走時の複合マルチLOP測位が正常に作動していると判断できる。この時のGPSの測位誤差は40m程度と予測され、GPSを基準とすれば複合マルチLOP測位は実際の位置から10~90m程度の範囲に収まっていると推定できる。さらに測位結果を基に出力される針路・速力情報のばらつきも少なく、GPS測位と比較して遜色なく、むしろ良質と思われる測位情報を出力していることが確認できた。これはロランCの良好な海域での試験であり、測位が正常であれば当然の結果ともいえる。

以上の結果は複合マルチLOP測位の有効性を示すものであり、今後GPSが24時間連続測位できるようになるまでの期間はもとより、GPSフル稼働後もGPSとの共用あるいは相互のバックアップとして運用することにより、本船の高精度測位を実現し、調査・研究活動に威力を発揮するものと期待できる。

参考文献

- 1) Rovert J.Weaver,Richard M.Piccioni:
Marine radionavigation of the future,Oceans' 88,proceedings,vol.4,pp.1362-1364,(1988)
- 2) 木村小一:双曲線航法と衛星航法のGDOP,
日本航海学会論文集,第72号,pp.41-48,(1985)
- 3) 小野房吉,長森亨二:ロランC電波の陸上伝
搬効果の評価と補正図,航海,第85号,pp. 24-30,
(1985)
- 4) 電波航法研究会:双曲線航法,海文堂,(1977)
- 5) 坪川家恒,大森又吉:測地学序説,山海堂,
(1969)
- 6) 木村小一:NAVSTAR/GPSの開発とその応
用,NAVSTAR/GPS<全世界測位システム>
その展望と利用技術の確立に向けて,株ジャパ
ン・インダストリアル・パブリッシング,pp.3-39,
(1987)

(原稿受理: 1989年11月17日)