

## 船舶用GPSの測位精度とその応用に関する研究

合 田 政 次

## Studies on the Accuracies of Position Fixes Obtained by Marine GPS and their Applications

Masaji GODA

**1) Development of a ship's position measurement systems and their accuracies**

From the view point of safety and economy, it is very important for a ship on the ocean to find its position. For a long time, terrestrial navigation by taking of cross bearings and celestial navigation making use of celestial bodies were available. In the 1940s, radio navigation developed for military use progressed rapidly with the advance of electronic techniques after that. Especially, Omega and Navy Navigation Satellite System (NNSS) are epochal systems, because their coverage are worldwide. But, the accuracy of Omega is not good enough, and NNSS has a disadvantage of uncontinuity. Global Positioning System (GPS) was initiated in the 1970s, and was completed in 1994. This system makes up for several disadvantages of usual navigation systems of all sorts; not only it enabled us to find the ship's position but also make the applications of the ship's movement and current measurement possible. The purpose of this study is to make clear the positioning accuracy of the GPS and usefulness of using the GPS by elucidating the accuracy of Loran C, the measurement of surface current and the analysis of a ship's movement with GPS.

**2) Process of the development and positioning accuracy of GPS**

According to the development of GPS, the author measured the GPS position fix at the standing fixed station and several ports of call of the training ship in our country and overseas, and obtained the positioning accuracy of each of them and made clear the yearly variation. There were six or seven satellites available in the early stage of development till October 1989, so the usable time for position fixes was limited to six or seven hours. But the accuracy of three dimensional high level positioning was better than at the present completed stage. Namely, the standard deviation (SD) was only ten meters odd, and maximum position error was about fifty meters. Since November 1989, full-scale working-type satellites has been launched, so the number of usable satellites has increased. But, the Department of Defense (DOD) turned on Selective Availability (SA) to the working-type satellites since March 1990, and, moreover, positioning accuracy was not stable till the first half of 1990 because of some system test. Since August 1990, when Iraq Army invaded Kuwait, positioning accuracy has improved and good accuracy has been continuously obtained after the end of the Gulf War, that is to say, fourteen or fifteen satellites were available in September 1990, and DOD turned off SA or decreased its error. Constant error was less than 10 meters of difference of latitude (D.lat), and about 40 meters of departure (Dep), and SD was about 10 meters. SA was reactivated on GPS satellites in November 1991, and it is continuing now in 1994. We see the effect of SA, having an increase of SD (about 30 meters), but, constant error and SD are stable now with constant value.

**3) Application examples****① Measurement of Loran C error**

However superior GPS may be, it is necessary for us to use another system at the same time as a backup system. So, the author combined, for the simultaneous measurement, GPS and Loran C, which was the most suitable as a backup system, and made clear the Loran C errors. The Loran C errors are variable according to various factors. Therefore, we must obtain the positioning accuracy in each area of the sea. So the author showed the Loran C errors in and around the Goto-nada, the eastern area of the East China Sea and the western area of the North Pacific Ocean, respectively. The ship's position obtained by Loran C in and around the Goto-nada was 100~400 meters southward and 10 meters westward ~30 meters eastward from the datum position. The constant error in the eastern part of the East China Sea was large for the long propagation distance over the land, that is, 600~900 meters southward, and 200~300 meters eastward. In the western area of the North Pacific Ocean, the author evaluated the accuracy in three different areas. Positioning error was less than 0.5 nautical miles (n.m.) in the two areas where theoretical semi-diameter error is within 1 n.m., and the positioning error in the other area which was more than 1000 n.m. distant from each transmitting station was less than 1 n.m., if the reception of signals was good.

**② Measurement of the surface current**

It was confirmed that the direction and velocity the surface current obtained by pursuit of a Radar Buoy in relation to the ship's position with GPS are almost the same as those of the current measured with electric current meter so we measured surface current in the ocean too. In this chapter we discuss a comparative study of two surface

currents; one obtained by pursuit of Reflector, the other calculated by the direction and velocity of ultrasonic current meter. As a result, it was found that surface current was obtained by position of GPS which was information over the ground and information through the water of ultrasonic current meter.

### ③Measurement of turning circle

The turning test of a training ship with 1000 gross tonnage and the maneuverability of a small ship for research test were done with GPS. Generally, a turning test is conducted at full speed and the maximum rudder angle only when the ship is build up. No turning test is done at slow speed and a sharp rudder angle in consideration of the ship's arrival or, leave and the ship handling for avoidance. So, the author set up three stages of the speed and rudder angle, that is to say, Full, Half and Slow, and 30, 15 and 5 degrees, and measured the left and right turning circles.

Maximum advance and transfer were obtained by turning tracks, and therefore, the measurement of turning circle with GPS was found useful and practical enough.

As mentioned above, this study clarified the usefulness of GPS by means of applications of the specific quality of the high accuracy position fixes of GPS.

## 第1章 緒言

洋上を航海する全ての船舶において、その位置すなわち船位を任意の時に随時知することは、船舶航行の安全性および経済性の面から極めて重要である。特に漁船では、沿岸海域における魚礁の位置決定や、岩礁その他の障害物のある海域でも極めて狭い安全地帯をも漁場とする底曳網漁業での位置決定等、漁業での位置決定には、誤差が0.1海里以下の高い精度が要求されることもある。さらに現在の200海里経済水域における占有権が認められるという時代において、領海や境界線ギリギリのところでは操業を行うことも多く、領海侵犯の問題もからみ、測位システムの評価と精度の把握は操業上欠くことのできない重要な問題である。

船位の決定は、帆船で沿岸のみを航海していた時代では陸上物標を視認して行われていた。クロス方位法に代表されるこの方法は、コンパスで複数個の陸上物標の方位を測定することにより得られる方位線の交点を船位とするものであり、現在でもなお沿岸航海における主要な測位方法である。この時代には船位精度に関する問題はそれほど重要なものではなく、大略推測できれば十分であった。汽船の誕生とともに風向に関係なく最短コースを短時間で経済的に航海することが要求されるようになってから、より正確な船位が必要となってきたが、特に漁船が遠く外国の沿岸近くまで出漁するようになってきて要求される精度は一段と高くなった。第2次世界大戦以後発達した各種電波航法システムは、天候や昼夜により制限されることなく船位の測定を可能とし、その測位精度も天体高度の測定による天測と同等かそれ以上であった。

この間、沿岸から沖合いへ、沖合いから遠洋へと発展してきた日本の漁業は1955年には有史以来最大の漁獲量を揚げるに至った。それは漁船の大型化、漁労設備の発展、電波航法システムの開発と航海計器の搭載などが漁獲量の増大に大きく寄与したものと見える。1973年国連第三次海洋法会議において、領海12海里、経済水域200海里の設定が相次ぎ、わが国も1977年領海を12海里に拡大し、わが国の200海里法とも称すべき「漁業水域に関する暫定措置法」<sup>1)</sup>が公布され、新しい形の漁業に対応することになった。

遠洋漁船の位置決定は、日本の基地出港後、漁場到着までは、一般の商船における航海と同じであり、特にそれほど高い精度は要求されない。しかし、漁場においては、200海里

経済水域外であることを、電波航法や衛星航法によって確認しながら操業を行ってきた。また、200海里体制制定後、各国の200海里内操業は、有償入漁でさえ、金額の上昇・漁獲量規制の強化等による、操業条件の厳しさが、コストの上昇を来している。残された漁場は公海域のみとなりつつあり、その公海域における操業でさえ、資源管理規制や環境問題により、漁場そのものが失われつつある。さらに、相互入漁の日本・ロシア間にあっても、違反操業防止を目的にロシア水域への入出時に特定地点の通過が義務づけられる等<sup>2)</sup>、漁場の遠隔地化、各国の規制強化という厳しさの中で、領海、経済水域侵犯のトラブルを解消するためには、船位の精度を高めると共に、当事国間で共通の船位決定方法が採用されることが必要である。

これまでの種々の航法システムは、その時点では最良のシステムであっても、さまざまな欠点があった。例えば、常時測位出来るわけではないこと、利用範囲が限定されること、誤差が大きくなる場合があること等である。我が国での測位精度に関する研究は、航法システムの利用範囲の関係から、日本近海に関するものがほとんどである。また、航行中、漁労中を含め大洋における航法システムの評価には、基準とすべき位置すなわち、天測やレーダ等による位置に含まれる誤差が特定できず、絶対誤差が得られないことから、主として各種測位方法間の相対誤差による評価が行われてきた。この様に船位精度についての研究は、ますます重要性を増すにもかかわらず、その評価の困難さと、長い時間を要することから最近では極めて少なくなっている。

200海里体制下の厳しい状況にある漁業界に大きな期待をもって迎えられたのがGPS (Global Positioning System) である。GPSは米国で1972年以降、次世代の衛星航法システムとして、開発が進められ、1994年現在、初期運用機能 (IOC, Initial Operational Capability) に入ったことが、米国の国防長官より運輸長官に通告されたとの報告<sup>3)</sup>があり、保証された業務レベルでの民間使用ができるようになった。GPSは全天候性はもちろん全世界をカバーし、しかもその精度はNNSS (Navy Navigation Satellite System) と同等かそれ以上であり、更に連続測位が可能である。本システムの完全運用機能 (FOC, Full Operational Capability) の達成は1995年と計画されているが、民間使用に関する標準測位

業務 (SPS, Standard positioning Service) は運用状態となり、理想的な測位システムが完成されたのである。

ますます狭められる漁場と、200海里体制下での船位決定の重要性、更に国際的に統一された測地系のもとでの船位精度の評価の必要性を鑑みて、これからの船位測定の主システムとなるGPSにより日本近海のみならず、できるだけ広い範囲における測位精度を求めることは必要不可欠なことである。

本研究は、以上の様な現状を踏まえ、船舶運航者としての観点から、広範囲にわたってGPSの測位精度を確かめるとともに、GPSを利用することによって現在最も普及しているロランCの測位精度を解明し、船舶航行の安全性、経済性の向上に寄与すること、また、漁業において、漁場をより詳細に決定し、漁労の合理化に寄与することを目的とするものである。さらにGPSの測位精度が極めて高いことを利用して、海流の測定や船体運動解析について応用することの有効性についての検討を試みたものである。

本論文は、第2章で船位測定システムの発展の歴史と各システムの測位精度についての研究史について述べた。第3章では、GPSの開発の経緯とシステム構成および測位方法等について概要を述べ、GPS開発の進展に伴う測位精度の変化を明らかにし、その測位精度が極めて良好なことを示した。第4章ではGPSを応用することの有効性を確認するための実例を3例示した。

## 第2章 船位測定システムの発展とその精度の研究史

洋上の船舶が、どの方向へ、どれ位の速さで、どれ位の距離航走すれば、何時、目的地に到着できるかを予測するためには、まず第一に基点となる現在位置を知る必要がある。航海学の第一の目的は船舶の現在位置をいつでも、どこでも、かつ正確に求めることにあると言える。

船位の測定方法は、その手段によって、陸上物標を利用する地文航法、天体を利用する天文航法、さらに電波計器による電波航法、人工衛星を利用する衛星航法等に分けられる。これらのうち大洋航海における船位の測定は天体の高度と時刻を測定し、位置を算出する天文航法と1940年代から軍用として開発されてきた電波計器による電波航法が並存する形で発展してきた。その後、電子技術の発達とともに各種の電波航行援助システムが開発され、わずか20年あまりの間に著しい発展をとげた。特に1966年に試験電波を発射したオメガシステムや1967年に民間の使用が許可された衛星航法システムのNNSSは、その完成により、全世界的、全天候的かつ自動的に船位をもたらすシステムとして、天文航法に代わり広く利用されるようになった。これらの航法システムはいずれもその時点においては最良のシステムであり、その測位精度を明らかにするための評価、研究がなされてきた。しかし、これらの航法システムには、それぞれ何らかの欠点が存在していた。そのような中で、理想的な測位システムと言えるGPSが開発された。

## 1 地文航法

沿岸海域において、陸上物標を視認しながら数個の物標の方位をコンパスによって測定し、船位を求めるクロス方位法は簡便で通常の航海には十分な精度であることから、現在でもなお主要な測位方法である。その精度は平岩<sup>4,5)</sup>によれば、物標からの距離、方位線の交角、コンパスの誤差、測定技術および海図記入上の誤差などに左右されるが、0.5海里前後と言われている。また現在では視界不良時や視認距離外の数十海里的距離から、レーダを使用しての船位測定も行われている。これは電波航法の一つとも言えるが、沿岸海域に限られるし、地文航法と同様に船位の決定要素は方位、距離の測定によることからレーダ航法と呼ばれて電波航法とは区別されている。その精度は機器の誤差のほか、映像の判別や測定技術の巧拙によって左右され、鯨島<sup>6)</sup>によれば一般に測定距離の2~3%の距離誤差を含むとされている。しかし、中根ら<sup>7)</sup>によれば、測定範囲12海里以内で、方位を0.1度単位、距離を0.01海里単位で読み取るように努めることにより、クロス方位法以上の高精度の船位が得られることを明らかにしている。

## 2 天文航法

1843年、米国のサムナー艦長は一つの日体の高度を測定することにより、その高度角でその天体を見る点の軌跡、すなわち一つの位置の線が得られ、別な天体の高度を測定することによって得られたもう一つの位置の線との交点から、自船の位置を求めることができるという「位置の線」という考え方を公表した。日本においては、この考え方を基礎として、二種類の計算表が作られた。その一つ、1920年当時海軍中佐だった米村末喜によって作られた表は米村表として現在なお広く利用されている。このように天文航法は天体の高度と時刻を測定することによって、位置の線を計算するもので、かつての大洋航海中には唯一の船位測定方法として広く利用され、一般に天測と呼ばれた。天測では測定対象が天体であるため、その測定は天候や昼夜によって制限される。米田<sup>8)</sup>は、霧の多い北洋海域で6~8月の間行った調査では、星の場合はほとんど測定不能状態であり、太陽でも5~6日連続して測定不能になることも多かったとしている。

天測では天体高度の測角技術の巧拙が誤差量を支配する。さらに、高木ら<sup>9,10)</sup>は計算が煩雑で間違いを生じ易いなど、船位の精度は人為的な要因に左右されることを示した。一般に通常の技術を持つ航海士でも測角誤差の標準偏差は±0.5海里と言われ、他の要因を加味した位置の誤差は、平岩<sup>11)</sup>の研究によると±0.75海里と言われる。最近ではプログラム内蔵の卓上小型計算機が利用できるため、計算ミスは少なく、すばやく位置の線を得られる。しかし、全世界的航法システムである、オメガ、NNSSさらにGPSが開発されたことにより、今日では天測の必要性はほとんどなくなり、単にそれら航法システムによる位置のチェックのためやシステムあるいは受信機の故障の時などに行われるにすぎない。

### 3 双曲線航法

1895年、イタリアのマルコニが無線電信による通信に成功して以来、電波技術は目覚ましい進歩を遂げ、それと同時に電波の直進性、等速性および反射性などの特性を利用して測位を行うことが考案された。その始めは方向探知機による電波の到来方向の測定であったが、その後ロランやデッカが開発された。電波航法システムには各種のシステムがあるが、ここでは双曲線航法システムのロラン、デッカおよびオメガについて述べる。

#### 3.1 双曲線航法の概要

2点からの距離の差が一定な点の軌跡は、それらの2点を焦点とする双曲線である。この幾何学的原理に基づいて一対の送信局からの距離の差を測定して位置の線を求める航法を双曲線航法と言う。双曲線航法にはロラン、デッカおよびオメガなどの諸方式がある。本航法の特徴は、定点に送信局を設けることにより、船上では受信機だけを装備すれば、広範囲にわたって高精度の位置測定が可能となり、電波を使用するので全天候性であることなどがあげられる。他方、電波の伝搬速度や位相の変動、雑音の混入などにより測位に誤差を生ずる。さらに送信局と受信点との幾何学的な関係から、地域により誤差の大きさが異なるという双曲線航法固有の誤差が生ずるなどの欠点はあるが、優れた航法システムとして世界中で最も広く普及している。

1943年に正式運用が開始されたロランAは、2つの送信局で一対のロラン組局が構成される。船舶ではこの2局から発射されるパルス電波の到達する時間差を測定し、両局からの距離差を求めるものである。この場合2つの送信局をパルス電波の送信順序によって主局、従局の識別を行う追従パルス送信方式を採用している。ロランAは1.8~2.0MHzの中短波帯を使用した方式で、最大有効距離は、海上で昼間約700海里、夜間約1400海里である。我が国では昭和25年に1号機が輸入されて、実験的に使用された。自然現象に関係なく、荒天暗夜、霧中においても船位の測定が可能であることや使用の容易さ、受信機価格の安価なことから、漁船の大小、漁業の種類を問わず急速に普及した。しかし、その後、船舶、航空機が大型化し、高速化するに従い、ロランAの有効範囲の拡大と精度向上および取扱の簡便化などの要求が高まってきた。そして、1955年米国においてロランCの運用が開始された。また英国においてはデッカシステムが開発され、我が国でも1967年に北海道チェーンの、1969年には北九州チェーンの運用が始まった。しかし、その後もさらに広い利用範囲、より良い精度そして利用法の簡便な双曲線航法システムの開発を目指して研究が続けられた。この結果、米国海軍は航法システムとして最終的なものであるという意味から、ギリシャ文字のアルファベットの最終文字Ωにちなんだオメガシステムを開発した。それに伴い双曲線航法システムの評価、研究はこれらの新しいシステムを中心に行われるようになった。

米国では1980年末までに全てのロランAチェーンが廃止され、我が国でも廃止の方向で検討が進んでいる。1993年7月

からは、2S1（落石局—大釜崎局）、2S2（大釜崎局—波崎局）、2S0（波崎局—八丈島局）、2H6（八丈島局—慶佐次局）の各レートが廃止されている。また、我が国によるロランCの運用開始後（1994年10月）、韓国と共に東アジアチェーンの運用を図り、さらに隣接諸国とのロランCの国際協力チェーンの構築を推進して、できるだけ早期に、我が国周辺海域全体をロランCの有効範囲とし、その場合にはロランAとデッカは全て廃止することが公表されている。

#### 3.1.1 ロランC

ロランAよりも利用範囲を拡大し、さらに測位精度を向上するためにロランCが開発された。時間差の測定は、ロランAと同様にパルス波形によるエンベロープマッチング（粗測定）で10μsec単位の測定を行い、次いでパルス波内部のサイクルマッチング（精測定）による位相差測定方式を取り入れた。遠距離まで伝搬させるために、使用周波数は100KHz帯を用いた。しかし、受信機自身は電算技術を基本としたものであり、その価格が著しく高価であったことから、本来の機能をもつロランC専用受信機は民間の需要にマッチしたものではなかった。そのため、ロランAを基本にした簡易型ロランA/C受信機が開発された。この種の受信機では、時間差測定をCRT上で目視により行うため、地表波と空間波が合成された波形となった場合、波形の歪による誤差を除去できず、位相整合では数サイクルずれたまま測定されて10μsec単位の誤差を生じ易く、一般使用者はロランCでは測定不可として、位置決定を放棄する場合が多かった。このため精度の面でも期待通りの結果が得られず、普及度は低いものであった。

1970年代以降の半導体技術の進歩により、安価で本来の機能を持った小型のロランC専用受信機の製作が可能となり、急速に普及した。特に、箕原ら<sup>12)</sup>による、船位を連続的に自画する自動追尾航跡自画装置の開発により、漁場において同一海域を反覆曳網するトロール漁船に重用され、再現性確度の高いことが認められさらに普及していった。最近の我が国周辺においては、海外のロランCは全て廃止するという米国の方針で、まず1993年7月からグアム局が廃止された。

しかし、我が国では約3万3000隻がロランCを利用していると言われており、その内約2万8000隻は漁船である。このようにロランCは航行安全上、また、漁業操業上欠くことのできないものとなっており、我が国がこれを引継ぎ運用するよう漁業団体を中心に強い要望がなされた。これらの状況を踏まえ検討した結果、海上交通の安全を確保するため米国から移管受けし、海上保安庁が引継ぎ運用することとなった。そのための整備が1991年から開始され、1994年10月から主局をこれまでの硫黄島から新島に移して、新たに8930チェーンとして運用が開始された。ロランCの有効範囲の変化をFig. 1・1に示した。

#### 3.1.2 デッカ

長波（70~130KHz）の持続波を利用して、一対の送信局からの距離差を、位相差を測定して求める方式で、英国のデ

ッカ社で開発された。第二次大戦中、ノルマンディー上陸作戦の際に利用され、その優秀性が認められ、戦後ヨーロッパ各地に普及した。送信局は3~4局が1組となっており、これをチェーンと呼んでいる。送信局間の距離は50~110海里と短く、そのため有効範囲も350海里程度であるが、中距離航行援助方式として重視された。我が国ではロランA、Cともに利用できない北海道の日本海側やオホーツク海側をカバーするため、1965年まず北海道チェーンが開設された。次いで北九州チェーンが1969年から運用に入り、その後、東北、関東、四国および北陸チェーンが開設された。しかし、我が国によるロランCの運用に伴い、ロランCと有効範囲が重複するロランAおよびデッカは段階的に廃止の予定であり、1993

年6月には北海道および北九州以外の各チェーンは廃止され、その有効範囲はFig. 1・2のように縮小された。

### 3. 1. 3 オメガ

10KHz帯の超長波（VLF電波）は地表面と電離層の間の空間をあたかも導波管内を伝わるマイクロ波のように伝搬する。この伝搬特性によって送信局間の距離を5000~6000海里と極めて長くとることができるため、有効範囲が広く、わずか8局で地球上の全域をカバーできる。このため天文航法に代わる全世界的、全天候的なシステムとして期待された。当初は過度の期待感から、まだ使用できない時期から買い求められるほどの目覚ましい普及が見られ、1975年の対馬局完成時

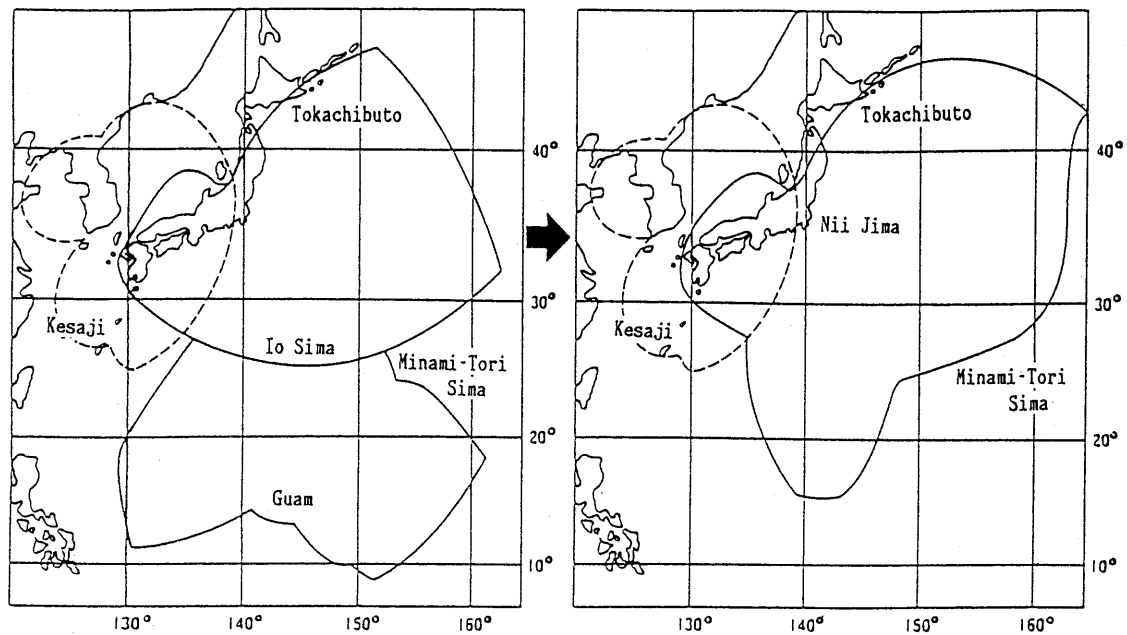


Fig.1・1 Alteration of Loran C coverage.

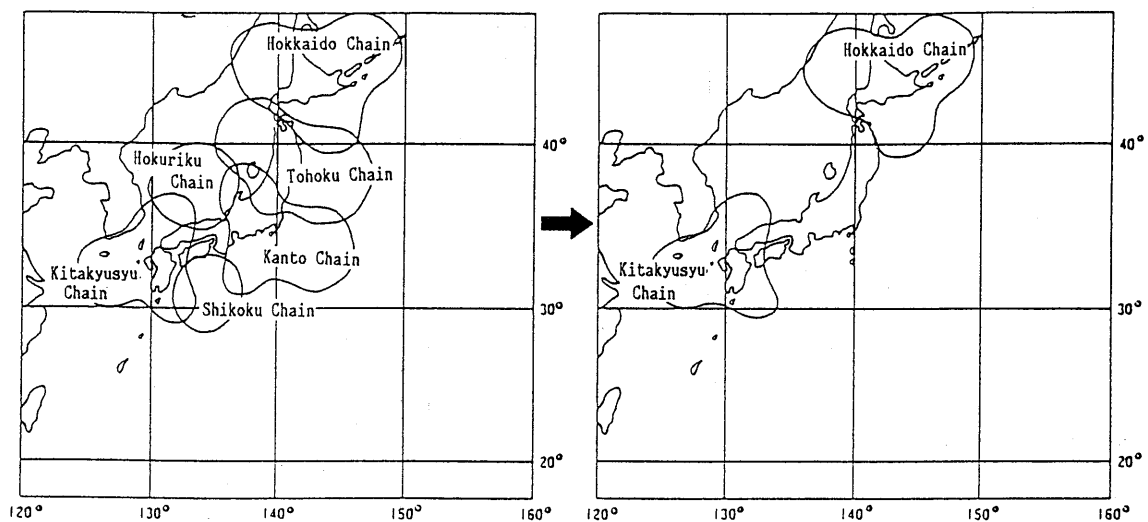


Fig.1・2 Alteration of Decca coverage.

における国内メーカー各社のアンケートでは、商船342台、漁船1041台が装備していた。田口<sup>13)</sup>によると、これは装備予想商船の25%に、また60トン以上のロラン装備漁船の約35%にあたる。1966年からハワイ、ニューヨーク、ノルウエー、トリニダードに設置された4つの実験局により、ほぼ現行のシステムと同様な形で試験電波が発射され、理論値に対する評価試験が行われて、さらに改善された補正表が得られている。その結果、公称の測位精度は昼間1海里、夜間2海里とされている。

しかし、オメガ電波に影響を与える種々の位相擾乱についての研究が十分になされていないため、伝搬モデルが不完全で、伝搬補正表の補正値の精度が低いことと、その表から補正値を算出する方法の煩雑さなど、オメガ位置精度についての理論的、基礎的知識が不十分でシステムの長所短所が理解されないまま、単に測位精度が低いというだけで、システムへの不信感が増し、利用度は低下した。オメガ局の配置をFig. 1・3に示した。

### 3. 2 双曲線航法の測位精度

#### 3. 2. 1 ロランA

鯨島<sup>14)</sup>は、沿岸航行中においては交叉方位法またはレーダにより、大洋航行中には天測により求めた船位を正しいものとして、主従両局をのぞむ夾角との関係によるロラン位置の線の実測中央誤差の変化を、地表波と空間波の場合に分けて求めた。その結果、夾角が30度以上であれば中央誤差は、地表波で1.0海里以下、空間波でも0.1~0.2海里大きくなる程度であった。豊田<sup>15)</sup>は航海者の利用の立場から、日本近海に

おける2本のロラン地表波位置の線による船位誤差の分布状況を求め、測定船位の95%半径誤差がほぼ1海里以内であること、また半径誤差が2海里となる区域は、距岸400海里内外の沖合いにおよび、日本海のほぼ全域と東シナ海方面の大部分はこの範囲になるとしている。

一方、市瀬ら<sup>16,17)</sup>は精度の向上と利用範囲の拡大のために、空間波の伝搬誤差特性についてPierceの式とほぼ一致することを確認した。また、数分間に数回の測定値の平均値を求めることによって、空間波伝搬誤差を軽減でき、船位決定の精度が向上されることを示した。また、田口<sup>18)</sup>は電波の伝搬速度について述べている。すなわち、海上ではロラン表算出に使用した基準速度値(299708km/sec)よりも速くなり、伝搬経路上に山岳があると電波の回り込みによる遅れを生じるが、海上を8海里伝搬すると回復効果により復帰する等の変動原因について示している。

#### 3. 2. 2 ロランC

我が国周辺海域をカバーするロランCチェーンは、主として太平洋側をカバーする9970チェーンと西日本をカバーする5970チェーンである。これまでの9970チェーンについての評価試験では、米澤ら<sup>19)</sup>が陸上定点で1年間の観測を行った結果、観測点までの偏位の平均(以下定誤差と記す)は直線距離で昼間約0.6海里、夜間約1.5海里であり、時間差の標準偏差はともに $0.1\mu\text{sec}$ 前後で非常に安定した値が得られている。著者ら<sup>20~22)</sup>が日本海南西部の海上定点で錨泊して、一週間にわたり測定した結果、定誤差は昼夜ともに約0.4海里、標準偏差は約0.03海里で日差は小さく、短期間ながら安定性

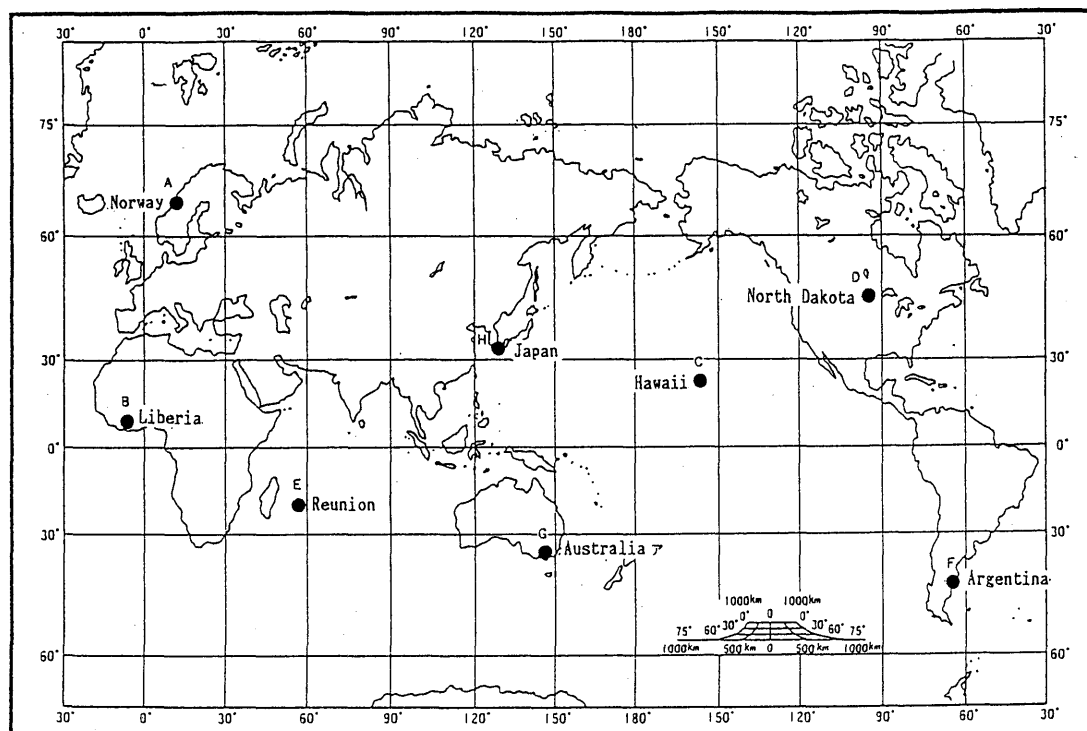


Fig.1・3 The arrangement of Omega stations.

と再現性の良さが見られた。また、航走中の測位精度について、レーダ位置との比較により日本海沿岸海域で、その評価を行った。その結果、定誤差は九州北西部では西偏し、山陰沖を境にして北東部に移るにつれて東偏する傾向があった。その値は海域によって差があるものの0.07~0.38海里、標準偏差は0.25~0.40海里で、デッカとはほぼ同じ精度であった。新潟以北の海域ではスリップの発生率が高く、他の測位システムとの併用を考える必要がある。また海域により適正なチェーンの利用をはかる必要がある。そこで、同様の方法により、同海域における5970チェーンの評価を行った。その結果、有効範囲は9970チェーンと同様、Y局（沖縄、5970と9970に共通）からの伝搬距離800海里程度で、137°E以西の海域までである。定誤差は132°E付近を境にして東西で異なり西側では約0.3海里、東側では約0.6海里となり、測定船位の95%確率円の半径は約0.3海里が得られた。このように海域によって定誤差が異なる原因として、田口ら<sup>23)</sup>は電波の伝搬速度が陸上と海上で異なることや、陸上伝搬では、地形や地質によっても速度が異なること、さらにロランテーブル作成に用いられた値と実際の値との不一致をあげている。このようなことから、小野ら<sup>24)</sup>はロランCの使用にあたり、陸上伝搬速度の影響を考慮してその補正を行い、定誤差の改善を行うための試みについて報告している。

### 3. 2. 3 デッカ

北海道チェーンのデッカチャートを作成するための計算に、海上保安庁水路部が使用した電波伝搬速度は陸上伝搬299.25km/ms、海上伝搬299.60km/msであった。しかし、渡辺<sup>25)</sup>が開局後に行った9測点での測定結果、海上伝搬299.73km/ms、陸上伝搬298.23km/ms~299.30km/msの幅があり、位相差の測定値には地域的な変動と季節的な変化が見られた。これらは北海道チェーンの基線がすべて陸上であり、伝搬経路上の山岳地帯や、冬期の降雪や氷結などに起因するものである。

北九州チェーンについては、実測による伝搬速度を用いてデッカチャートが作成された。従ってかなり改善されたが、それでも季節的な変化や、地域誤差を生じている。地表波伝搬速度は大地の導電率によって異なると共に山岳の影響を受けて変化する。渡辺<sup>26)</sup>は北海道チェーンの大雪山系における伝搬について解析した結果、平均標高が700~800m程度になると伝搬速度の実測値と計算値の間に違いが生じることを示した。また、海岸線付近での速度変化は大変複雑になるため、田口ら<sup>27,28)</sup>は壱岐島をモデルにして実験した結果、島の前面で多少不安定となり、中央付近では光速より遅れ、後面では光速より速くなるとしている。また、気象の影響による位相の変化については、鹿児島における測定結果と、海上保安庁

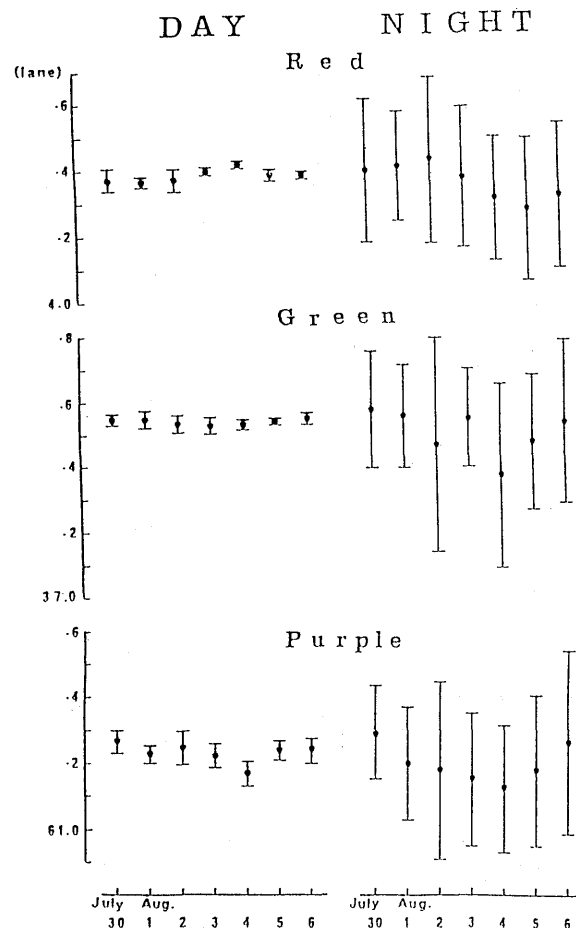


Fig.1・4 The mean values and standard deviations of Decca observation lanes every day and night for a week off the coast of Taisya.

のモニタ点の結果を検討して、日変化の存在を明らかにし、大気屈折率が主因としている。デッカ電波で最も問題なのは、空間波の混入による位相誤差の発生である。中根ら<sup>29,30)</sup>が島根県の大社沖で錨泊し、一週間にわたって昼夜連続測定を行い、昼夜別の平均値と標準偏差を示したFig. 1・4に見られるように夜間の標準偏差は大きく、変動が著しい。本海域においては紫局と赤局による測位が最も安定していた。また、五島灘東部においてデッカ電波の安定している昼間に、2物標の見透し線と、適当な交角となる第3の物標との水平夾角を測定し、デッカ位置の偏位量を求めた結果、定誤差は南西の方向へ約500mであり、その68%信頼区間は半径約170mの円となった。

### 3. 2. 4 オメガ

郵政省大吠電波観測所では伝搬特性や異常伝搬の発生について研究するため、1969年頃よりオメガ各局の信号を測定している。石井ら<sup>31)</sup>によるそれらの検討の結果、中緯度を伝搬するハワイ(C局)の13.6KHzでは1年を通じて標準的な台形の位相日変化を示したが、夜間において異常な位相遅れや位相進みが多く現れていた。田口<sup>32~34)</sup>は我が国で航行上問題となるほど発生数の多いC局のサイクルジャンプ(位相の急変量が1サイクル単位のもの)について、東京と鹿児島定点における約2年間の測定より、その出現時刻帯と信号パターンの特性について明らかにした。また、1969年当時の北太平洋における海上実験では、位置の線が1本しか得られない場合が多いため、その場合にはコースラインと交わる位置の線の間隔によって、その誤差量を推定し、オメガ船位が得られる場合には、これとロランA船位を比較して、船位誤差は昼間では少なくとも0.5海里以上、日没時頃には2~3海里以上と推定している。矢吹<sup>35~37)</sup>は航海訓練所の練習船「銀河丸」、「日本丸」および「海王丸」の遠洋航海で、ほぼ全世界での船位の評価を行っている。当時、大洋における精度が十分に吟味されている船位決定法としては天測のみで、主にこれよっての評価を行い、その誤差として1.0~2.0海里程度としている。他航法システムとの比較では、長尾<sup>38)</sup>は北洋トロールで利用されることの多いロランCとの比較をベーリング海で行い、A-CとA-Dのペアによる位置は $1.42 \pm 2.27$ 海里の相対誤差が見られたと報告している。また、米田ら<sup>39)</sup>は日本とオーストラリアとの往復航海中にC-H、E-Hペアによる測定を行い、衛星航法システムによる位置との相対誤差を求めた結果、比較的良好な位置が得られる昼間においても、相対誤差が3海里以内であったのは全体の87.6%であったと報告している。さらに三好ら<sup>40)</sup>は一般商船10隻から得られたデータをもとに大西洋南部海域において、レーダ、天測位置との相対誤差を調査した。その結果、相対誤差の平均は2.0海里、標準偏差は1.5海里で、3海里以内に約76%がおさまる。これを時間帯別にみると、昼間では $1.9 \pm 1.4$ 海里、夜間では $2.1 \pm 1.7$ 海里であり、相対誤差は昼間に小さく現れると報告している。これらの結果には大洋航海中における基準船位そのものにも誤差が含まれているし、受信局の組み合わせによっても誤差が変化するが、いずれも公称精度より低いも

のであった。

1982年にオーストラリアのG局が運用を開始して、全世界的な利用が可能となった。しかし、沿岸や近海においてはロランCの整備が進み、全世界的にはGPSの完成した現状では、今後利用者の増加は期待薄であるが、南半球におけるGPSのバックアップシステムとしての利用を含め、有効な利用を図るべきであろう。

## 4 衛星航法

### 4. 1 概要

1957年ソ連は世界最初の人工衛星スプートニク1号を打ち上げた。この衛星からの電波を受信した米国のジョーンズ・ホプキンス大学では衛星からの電波がドップラシフトを示すことから、衛星の軌道要素を求めることに成功した。さらにこの結果を逆に利用して、軌道の明かな衛星からの電波のドップラシフトから受信点の位置を求めることができることを提案した。こうしてこの原理に基づいた航法システムの開発が始まり、1964年、海軍航行衛星システムとして正式運用に入った。そして1967年には民間の使用が許可され、全世界的、全天候性そして受動的に高精度の位置決定を行うシステムとして急速に普及した。

衛星は400MHzと150MHzの2つの周波数の電波を送信するとともに、その送信電波に乗せて、2分毎の時間信号と、その時の衛星の位置が計算できるような一連のデータを送信している。その2分間における衛星と受信点の距離の変化を求め、その時の距離差一定の点は、衛星位置を焦点とする双曲面となる。船が地球表面にいたる条件を加えると、この双曲面と地球面の交わった線が位置の線になる。こうして得られる何本かの位置の線の交わりが受信点となる。このようにNNSSの測位原理はロランやオメガと同じ一種の双曲線航法である。

受信装置は150MHz帯と400MHz帯の両方の電波を受信し利用するものと、400MHz帯1波だけを受信するものがある。前者は電波の電離層屈折による測位誤差の影響を除いて精密測位を行う本来の受信装置であるが高価になるため、一般船舶用としては測位精度を多少犠牲にしても、なるべく安価な1波のみの受信装置を製作することによってその普及を図った。

衛星は地球上約1000kmの高度を、ほぼ円形の極軌道で、4~6個が運用されているが、最大仰角が75度以上の頭上近くを通った場合は位置の線が平行に近くなるので測位が不可能かあるいは大きな測位誤差を生じ、最大仰角が15度以下では、ドップラカウントの取得数が少なく、電波伝搬上の誤差も大きくなる。従って、測位に有効な軌道を最大仰角15~75度とすると測位間隔は受信点の緯度によって異なるが、低緯度地方では平均2~3時間の待ち時間があり、時には約半日の測位の機会がないこともある。

### 4. 2 測位精度

我が国では、1970年に電子航法研究所の木村<sup>41)</sup>は400MHz帯1波の受信を約1ヵ月にわたり行った結果、測地系の変換は



行っていないものの、定誤差は北北西へ約600mで、標準偏差は約900mと報告している。その後、一般船舶に搭載された装置の主力は400MHz帯1波の装置であるが、測量船や海洋調査船などに2波用の受信装置が装備されるようになった。また多くの受信装置でショート・ドップラと呼ばれるデータ処理方式がとられるようになった。これは普通の2分間のドップラの積算カウント値をさらに短時間の積算カウント値に細分してデータをとる方式で、2分間を5つの時間帯に細分する方式が最も多く用いられている。しかし、この方式は400MHz帯1波の受信装置では電波の電離層屈折による誤差の影響が大きいため、その効果は余り期待できないとされている。

海上保安庁水路部が導入した受信装置を使用して行った3日間の測位実験の結果を木村ら<sup>42)</sup>が解析した結果、測位データが少ないため断定はできないものの2分間ドップラ方式の方が標準偏差は0.4~13.9m小さくなった。これは、ショート・ドップラの場合は、2分間のドップラ値が得られなかった低高度でのデータが含まれ、そのデータに何等かの誤差が含まれるためではないかとしている。また、東京で測位した1波受信では定誤差約196m、標準偏差約136mに対し、2波受信ではそれぞれ約128mと75mに減少している。その後、1波受信の場合でも、電離層による屈折効果を避けるための研究<sup>43~45)</sup>がなされ、水路部からは測地系変換図が刊行された<sup>46)</sup>。1977年4~7月に樽美ら<sup>47)</sup>が神戸で1波受信と2波受信を行い、測地系の変換を行った結果、2波受信の定誤差は約11mにすぎず、その標準偏差は57mで、1波受信のそれは約105mと93mであった。航行中の測位精度について、西野ら<sup>48)</sup>は、基準船位として天測船位やレーダ船位を用いると、それらの精度そのものに問題があるので、直進航行中のNNS S船位から最小自乗法により直進航跡を求め、それからのバラツキにより評価し、定誤差0.33海里、標準偏差0.68海里を得た。また、安田ら<sup>49)</sup>は、沿岸航行中はクロス方位法やレーダ船位との比較を行い、前者で1海里以内、後者で1.3海里以内、大洋航行中は天測位置との比較で、太陽測定で2.67海里、星の測定では1.91海里と報告している。さらに、測位精度の改善のために定点における2波受信での測位結果を1波受信に修正するいわゆるディファレンシャル方式の効果についての報告<sup>50)</sup>も見られる。吉村ら<sup>51)</sup>が長崎港において約120日間にわたり、1波受信機で測定した結果では、定誤差は0.115海里(約213m)、標準偏差は0.085海里(約157m)で、一般に言われる昼間0.3海里、夜間0.1海里の精度をほぼ満足するものであった。

樽美<sup>52)</sup>は1979年の2~4月の間、遠洋区域航行船舶に対するNNS Sの使用実態についてのアンケート調査を行った。その報告に見られるように、本システムの最大の欠点は「希望時に船位が求められない」ことであり、中緯度でも1日に測定できる回数は十数回にすぎない。その欠点を補うために、オメガやロランCと組み合わせたハイブリッド航法が用いられ、NNS Sで測位ができた時にオメガやロランC位置を補正し、次の受信までそれらのシステムによる位置を連続的に表示する方法が用いられている。非連続性の欠点はあっても、高精度の船位が得られることから、オメガよりもはるかに高い普及率である。

## 5 まとめ

船舶や航空機の位置を求める航法システムには、いろいろな種類があるが、その理想は何時でも、何処でも、そして高精度でという条件、さらにできれば自動的にまた安価な方法でということが満たされることである。しかし、これまでこれらのすべてを満足する方法は開発されていなかった。

地文航法や天文航法は視界の良否や気象条件に左右される。各種の電波航法システムの発展は気象という制約を外して、全天候性を達成したが、電波伝搬上の制約がある。これまで、その有効範囲を拡大するための努力がなされてきた。しかし、第二次大戦中に開発されたロランAシステムは、70の送信局をもってしても北半球の海域の約1/3をカバーするにすぎず、デッカの有効範囲はさらに狭い。その後開発されたロランCシステムは同じ地球上の面積をカバーするための送信局の数は減少したが、有効範囲はそれほど広がらなかった。木村<sup>53)</sup>によれば、上記各システムは、南半球では陸地の分布の關係上、どんなに局数を増やしても全世界的に有効とはなり得ないとされている。最終的な航法システムとしての期待をになって、8局の送信局で全世界をカバーするオメガ航法システムが1982年に完成した。しかし、10.2~13.6 KHzの超長波の長距離伝搬の不安定さから、測位精度の点で全ての利用者を満足させるには至らなかった。

宇宙技術の発達により人工衛星を利用した衛星航法システムが開発された。衛星航法の一つであるNNS Sは、高精度で何処でも測位できることから急速に普及したが、まだ何時でもという要件は満たされなかった。実用上はNNS Sと他システムとのハイブリッドあるいは推測航法を組み合わせる全時間性を確保しているが、それでは本来の測位精度が得られない場合もあり、必ずしも満足されていない。ここに、先の全ての条件を満たすシステムとして開発されたのがGPSである。

## 第3章 GPSの開発過程と測位精度

### 1 GPSの概説

#### 1.1 開発の経緯

一般船舶において使用されている衛星航法システムには、NNS SとGPSがある。人工衛星を航法に利用することは、1957年にソ連の人工衛星スプートニク1号の追跡中に、ドップラ効果により送信周波数が変化することが発見されたことに始まり、1964年には米国海軍のシステムとしてNNS Sが完成した。その後、NNS Sは1967年に民間の使用が許可され、全世界的で自動的に高精度の船位をもたらすシステムとして急速に普及した。しかしながら、公開が宣言されてから、いくばくも経ていない頃に作られたNNS S衛星の追跡管制装置のマニュアルの中には、はやくもGPSの文字が見られた。そして、150MHzと400MHzのNNS Sのための受信チャンネルに、1.2GHz帯および1.5GHz帯のGPS用のチャンネルを増設するための準備がなされていた。それは、NNS Sに2つの大きな欠点があることによる。つまり、衛星が利用者の頭上に回って来た時以外は測位が出来ないため、連続測位ができず、測位の間隔も緯度によって異なる。

さらに、測位には6～16分の時間を要し、その間の利用者（船舶）の移動状況を測位計算の中に加えなければならず、その値に誤差が含まれていると、測位誤差が大きくなる。従って、ジェット機のような高速の移動物体では利用できない。これらのNNSSの欠点を補い、かつ地球上のどこでも、航空機、ロケットなどを含むあらゆる移動物体で受動的に連続して、しかも高精度の測位ができる衛星航法システムとしてGPSの開発が始められたのは1972年である。

米国の軍用の航行用衛星として最初の実験用GPS衛星が国防総省により1978年に打ち上げられた。本システムの開発、評価といったテストのためのブロックIと呼ばれる実験用衛星は11個打ち上げられ、現在でもそのうちの1個が測位に使用できる。当初はこのブロックI衛星に引き続き、1986年から本格実用衛星としてブロックII衛星（運用型衛星）を12個打ち上げ、1988年の初め頃に、ほぼ全世界で24時間連続して2次元の測位が行えるようになるはずであった。しかし、1986年1月28日のスペースシャトルの事故で計画が延び、そ

のスケジュールにかなりの遅れが生じた。

ブロックII衛星の打ち上げは1989年から開始され、その後、1990年末からは改良型のブロックIIA衛星が打ち上げられ、1991年には16個の衛星が使用でき、ほぼ24時間2次元測位が可能となった。1993年には21個の運用型衛星が揃い、これをもって一応、本システムの完成が予定されていたが、国防総省が初期運用状態に入った事を公式に宣言し、それが報じられたのは1994年に入ってからである。

## 1.2 システムの構成

本システムは、Fig. 2・1に示したようにGPS衛星群からなる宇宙部（Space Segment）、この衛星を監視し衛星内部のデータを制御する運用制御部（Operational Control Segment）、そして衛星の信号を受信し受信位置を決定する利用者部（User Segment）の3つの部門から構成されている。

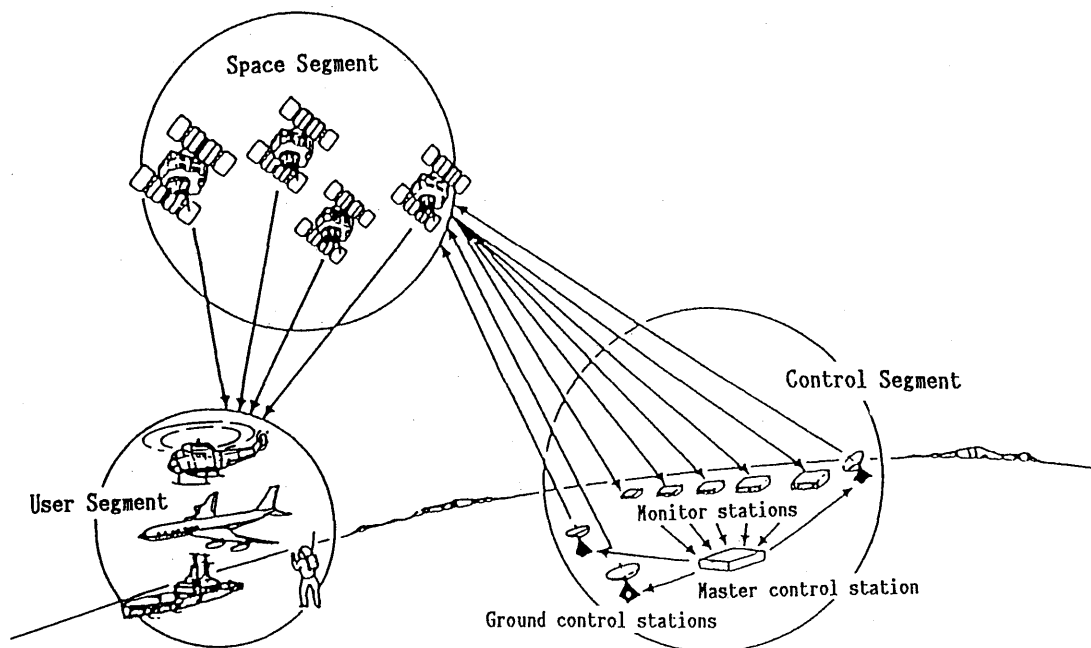


Fig.2・1 Major segments of Global Positioning System.

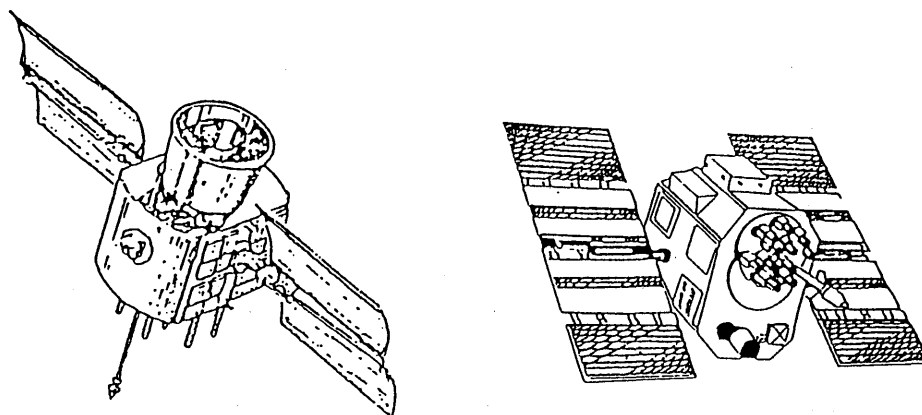


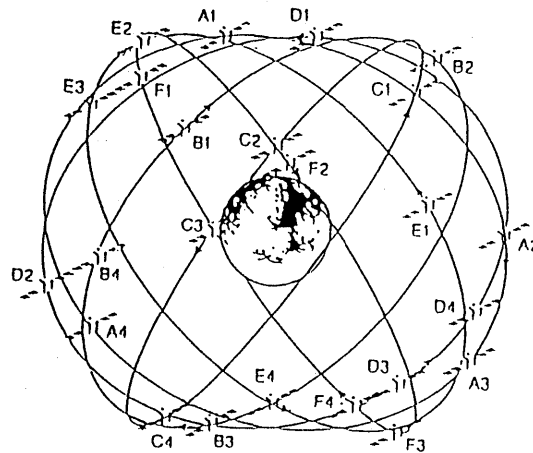
Fig.2・2 Block I and Block II NAVSTAR/GPS satellites.

### 1. 2. 1 宇宙部

宇宙部としてのブロック I およびブロック II 衛星の外観図を Fig. 2・2 に示す。ブロック I 衛星は重量450Kg、発生電力418Wで、初期の衛星はルビウム発振器と水晶発振器を備えていたが、5号衛星からはルビウム発振器3台とセシウム発振器1台が装備された。全部で11個が製作され、すべての衛星が打ち上げられた。ブロック II の運用型衛星は、重量787Kg、発生電力700Wと大型になっている。これらGPS衛星は、Fig. 2・3 に示した様に昇交点赤経60度間隔、軌道傾斜角約55度、軌道半径約20180Kmのほぼ円形の6つの軌道にそれぞれ4個ずつ合計24個が配置され、その内の3衛星は運用衛星と同様に運用されている予備衛星である。この軌道上を衛星は約12時間の周期で地球を回りながら、衛星の位置を求めるのに必要な衛星軌道情報や、距離測定に必要な時刻信号などを送信している。

GPS衛星から送られてくる電波は、NNS Sと同様に電離層による電波の屈折にもとずく誤差を補正するために二つ

の周波数が用いられている。それぞれ $L_1$ 、 $L_2$ と呼んでいるが、 $L_1$ は $10.23\text{MHz} \times 154 = 1575.42\text{MHz}$ 、 $L_2$ は $10.23\text{MHz} \times 120 = 1227.6\text{MHz}$ である。したがって $L_1$ と $L_2$ は154:120で正しく位相関係の一定した搬送波として送られてくる。GPSではこれらの周波数を持つ搬送波に二つの符号を載せている。一つはC/A (Clear and Acquisition または Coarse and Access) コードで $L_1$ のみに用いられている。もう一つはP (Precision または Protect) コードと呼ばれ $L_1$ と $L_2$ の両波に載せられている。電波の周波数帯別名称をTable 2・1に、またGPSに使用している信号をTable 2・2に示す。C/Aコードは粗測定用にコードは一般に公開されており、公称100m程度の位置決定誤差を目標としている。これに対してPコードは軍用として用いられるものであって一般には公開されないものであるが、Pコードを使うときは $L_1$ と $L_2$ 両波による電離層の屈折誤差を取り除くことができ誤差は10m程度と言われている。 $L_1$ の1波しか使えないC/Aコードはそのままでは電離層屈折による距離の延び (excess path)



Navstar/GPS 6 orbit planes, 24 satellites configuration

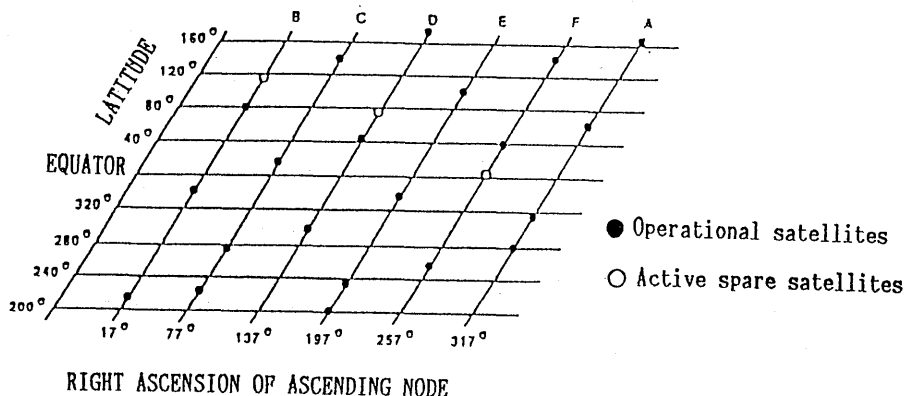


Fig.2・3 GPS satellite orbits and constellation.

Table 2・1 Name of radio wave on each frequency band

Frequency	Name	Frequency	Name
3KHz	_____		
	VLF		
30KHz	_____		
	LF	225MHz	_____
300KHz	_____		P band
	MF	390MHz	_____
3MHz	_____		L band
	HF	1.55GHz	_____
30MHz	_____		S band
	VHF	5.2GHz	_____
300MHz	_____		X band
	UHF	11GHz	_____
3GHz	_____		K band
	SHF	33GHz	_____
30GHz	_____		Q band
	EHF	55GHz	_____
300GHz	_____		

Table 2・2 GPS signal component

	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>
Frequency	1575.42 MHz	1227.60 MHz
Wave-length	about 19cm	about 24cm
C/A code	C/A code	/
chip rate	1.023 MHz	/
code length	1 ms	/
P code	P code	P code
chip rate	10.23 MHz	10.23 MHz
code length	7 days	7 days
Navigation message	50 BPS	50 BPS

を修正できないので、電離層の電子の状態を仮定して航法メッセージの中に入れて送ってくる。このデータを用いて計算によりexcess pathを補正する。

### 1. 2. 2 運用制御部

運用制御部 (OCS:Operational Control Segment) はGPS衛星から送信されている情報や信号の精度を維持するため、主制御局、モニター局および地上アンテナとそれらを結ぶ通信回線から構成されている。

主制御局は、米国中部のコロラドスプリングスのファルコン空軍基地の宇宙集中管制センターに置かれており、OCSの唯一の有人施設である。モニター局は、コロラドスプリング

ス、大西洋上のアセンション島、インド洋上のディエゴガルシア島、西太平洋上のクエゼリン島とハワイの5局が設置され、Fig. 2・4に示したように仰角5度で、南米の西海岸沖の小部分を除いて95%余りの全世界的なカバレッジを持っている。これらのモニター局は無人局で、利用部で受信される周波数と同じLバンドの信号を受信する施設であり、視野の中の全衛星からの信号を連続受信するための多チャンネル受信機を備えている。局には原子周波数標準が置かれ、また、対流圏における電波の伝搬遅延を補正するのに用いられる気圧、気温と露点計測のための遠隔指示センサが含まれている。これら5局のうち、主制御局から衛星に送信する地上アンテナが、アセンション島、ディエゴガルシア島、クエゼリン島の3局に設置され、これらの施設は、遠隔制御による迅速な試験、故障警報と診断のほか、衛星から航法メッセージとして送信されている軌道情報等の更新の能力を持っている。

### 1. 2. 3 利用者部

利用者部はGPS受信機で衛星からの信号を受信し、測位計算をする利用者群であり、利用目的により種々の受信機が用いられているが、一般船舶で使用されているのはGPS航法装置と呼ばれるものである。

#### (1) 受信機の基本構成

C/Aコード受信のための受信機の基本構成をFig. 2・5に示す。アンテナは水平指向性と半球形の垂直指向性を持つものが要求されることから、船舶用としては通常ヘリカルアンテナが用いられているが、自動車用や航空機では平板アンテナが用いられる。船のようにアンテナから受信処理器までの距離が長い場合はその間を結ぶ同軸ケーブルの損失を補うためのプリアンプが必要である。その信号は中間周波数に変換された後、スペクトル逆拡散が行われる。スペクトル逆拡

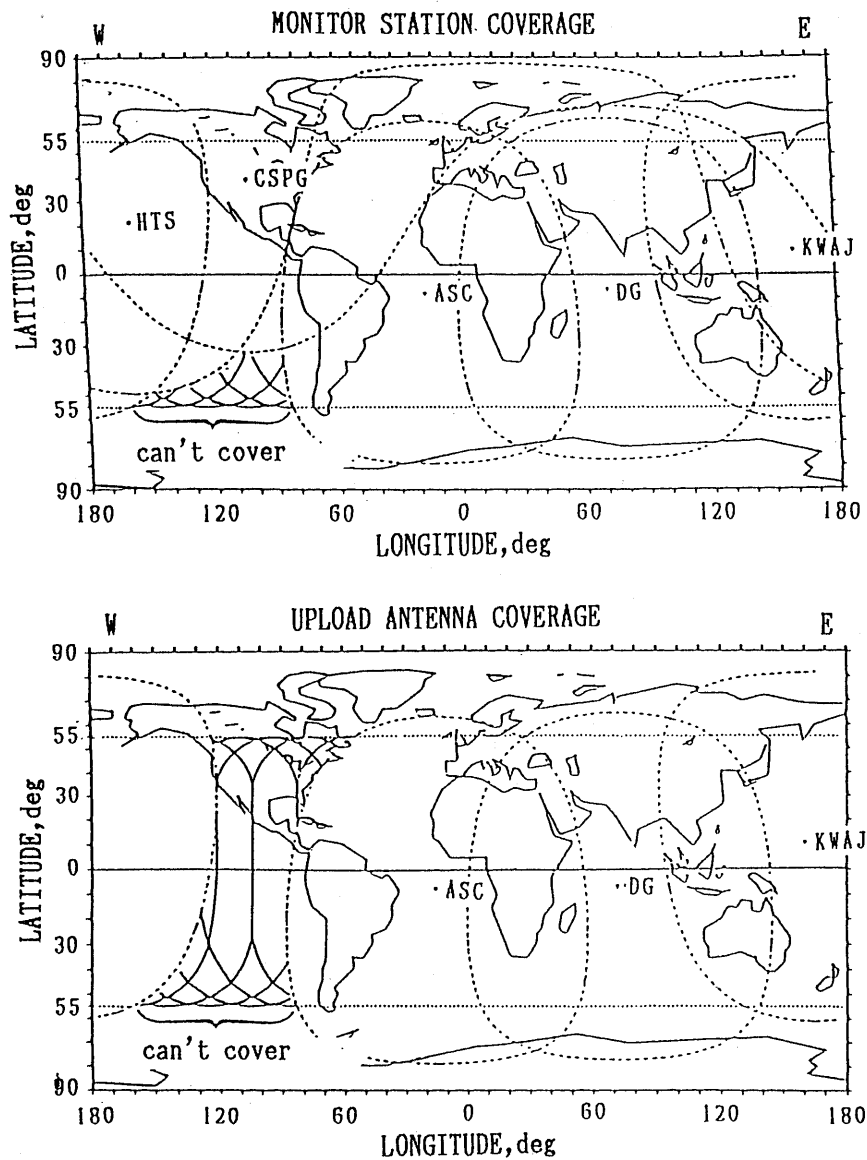


Fig.2・4 Monitor station and upload antenna locations, and their coverage for elevation angle above 5 degrees.

散復調の過程において、受信機内部で発生させた C/Aコードの位相を制御して、送信されてくる C/Aコードとの相関が最大となるようにすれば、発生された C/Aコードの位相は、GPS信号の C/Aコードの位相と一致したことになる。従って、発生された C/Aコードの位相から衛星と受信点間の距離を求めることが出来る。このように受信機内部で作った C/Aコードと受信信号との相関をとって、電波の到達時間を測定する部分は、GPS衛星から地上までの電波の遅れ時間 (delay time) に C/Aコードに対応する擬似雑音符号 (PRN Code:Pseudo Random Noise Code) をロックさせるという意味から delay lock 部と呼ばれる。スペクトル逆拡散復調した信号に含まれる搬送波の周波数を測定することによりGPS信号のドップラ偏移を算出することができ、衛星と受信点間の距離変化率を知ることができる。したがって衛星から送られてくる軌道データによってたとえば、4個の衛星の運動を正確に算出することによって逆に受信点の移動速

度と移動方位を求めることができる。このようにしてGPS受信機では位置だけではなく、速度と進路も表示されるのが常である。

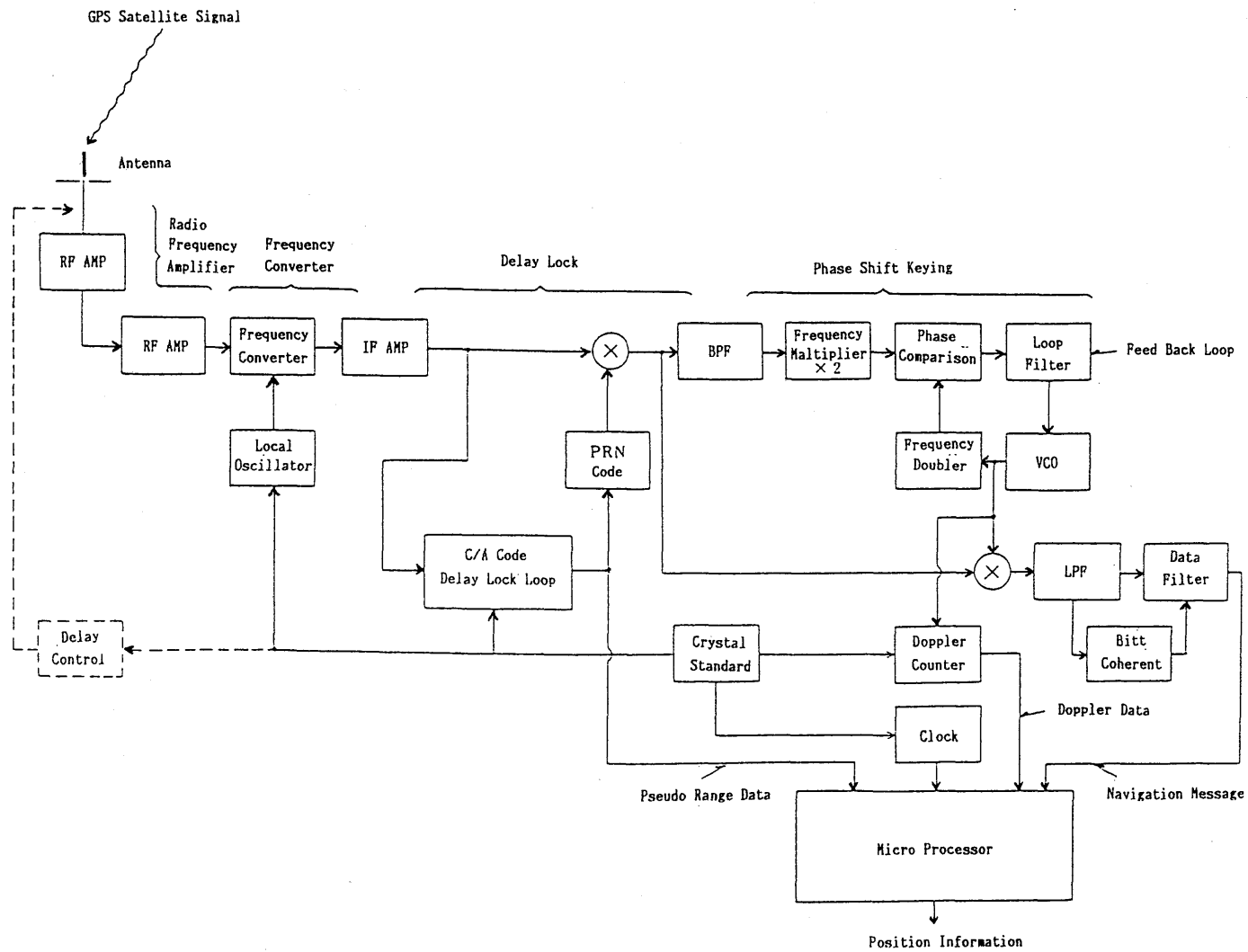
## (2) 種々の受信機

前述の基本構成における機能はどんな受信機にも備えなければならない基本的な機能であるが、その細かな内容については受信機によって種々異なっている。これらの受信機の一つの分類方法は受信チャンネルによるものであっておおよ次の三つに分けることができる。

- 1チャンネルシーケンシャル受信方式
- 1チャンネル高速シーケンシャル受信方式
- 複数チャンネル受信方式

Fig.2・6にそれらのブロック図を示す。

a) 1チャンネルシーケンシャル受信方式は5個の衛星からの信号を次々と切り替えて受信するものであって、ハードウェアをできる限り簡素化してコストを下げることを目的と

Fig.2・5 Block diagram of L<sub>1</sub> band C/A code GPS receiver.

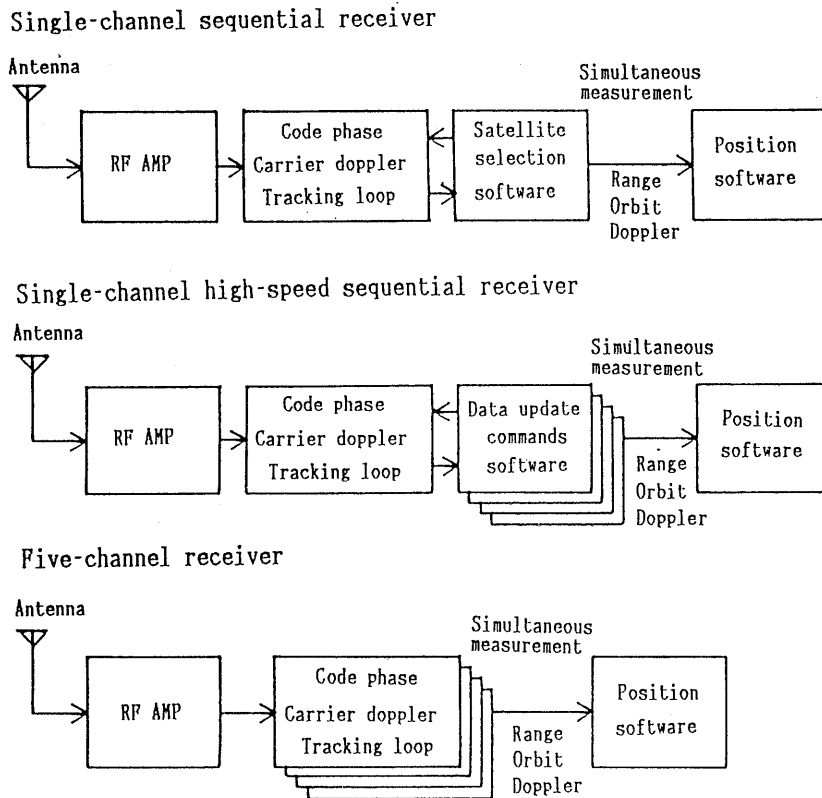


Fig.2・6 Receiving method of GPS receiver.

したものである。この方式の欠点は1つの衛星のデータを収集している間は他の衛星の測定は行えないことである。したがって5衛星の測定が全部完了するまでには5秒という時間がかかり、移動速度の速い航空機などでは測位誤差が生ずる。また一つの衛星から次の衛星に受信を切り替える毎に衛星信号の探索、捕捉、追尾と一連の動作を繰り返さなければならないので、信号のS/Nが低下すると探索、捕捉に要する時間が長くなり、1秒間では擬似距離すなわち受信されたままの距離 (Pseudo Range) の測定ができなくなる。

b) 1チャンネル高速シーケンシャル受信方式はa)の受信機の簡素化という特徴を生かし、欠点を修正することを狙ったもので、一つの衛星について4msの間サンプリングを行って5個の衛星で20msで擬似距離測定を完了する。こうすることにより、受信を他の衛星に切り替えても、その都度衛星の探索、捕捉、追尾の必要がなく、5個の衛星を連続して追尾でき、距離測定と、軌道データ収集が同時に行えるものである。この受信機の欠点は信号を短時間サンプリングして利用するためS/Nが7dB劣化するためにS/Nの悪い衛星信号は捕捉できないことである。

c) 複数チャンネル受信方式は、a), b)の欠点を無くすることができるものであるが、ハードウェアが複雑化して高価となる。

上記3者の得失をTable 2・3に示した。

### 1. 3 測位方法

GPSで用いられる位置の決定法は衛星からの距離による

ものである。これは、例えば、レーダで既知の陸地までの距離を数カ所測定して船位を定めるのと同じ方法である。しかしGPSの場合、衛星は常に移動しているので、先ずある瞬間における衛星の位置を決定し、その位置で発射された電波を地上で受信するまでの時間を測定し、その伝搬時間に光速を乗じて距離を求めるので、この内容についてFig. 2・7に示した。

測定した距離を擬似距離というのは次式のように種々の誤差が入っており、真の距離ではないからである。

$$R_p = R_t + C(\Delta t_r - \Delta t_s) + C \times \Delta t_d$$

ここで

$R_p$ : 擬似距離  $R_t$ : 真の距離  $C$ : 光速

$\Delta t_r$ : 受信機内時計のGPS時間からのずれ

$\Delta t_s$ : 衛星時計のGPS時間からのずれ

$\Delta t_d$ : 電離層や対流圏通過時の電波伝搬遅延時間

この式からもわかるように真の距離  $R_t$  を求めるには  $\Delta t_r$ ,  $\Delta t_s$ ,  $\Delta t_d$ などの補正を行わなければならない。 $\Delta t_s$ は衛星から航法メッセージとして送られて来る。 $\Delta t_d$ は  $L_1$ と  $L_2$ を用いると消去できるがC/Aコードの場合は  $L_2$ が使用できないので、2周波による消去の方法は利用できない。しかし、C/Aコードのみを利用する受信機のために  $\Delta t_d$ 補正のための推定データは衛星から航法メッセージとして送られて来るので、ある程度の補正は可能である。従って残る  $\Delta t_r$ がわかれば真の距離  $R_t$  が求められ正しい位置を求めることが出来るが、 $\Delta t_r$ は未知数として計算式の中に入れられ、連立方程式の形で解かれることになる。

Table 2・3 Comparison of receiving method of GPS receiver

receiving method item of comparison	1 channel sequential	1 channel high-speed sequential	5 channel
deterioration of accuracy by dynamics	large	middle	small
interruption time of positioning	long	nothing	nothing
form	small	small	large
cost	small	small	great
propagation delay correction	needless	needless	need
receiving ability	low	middle	high
power consumption	small	small	great

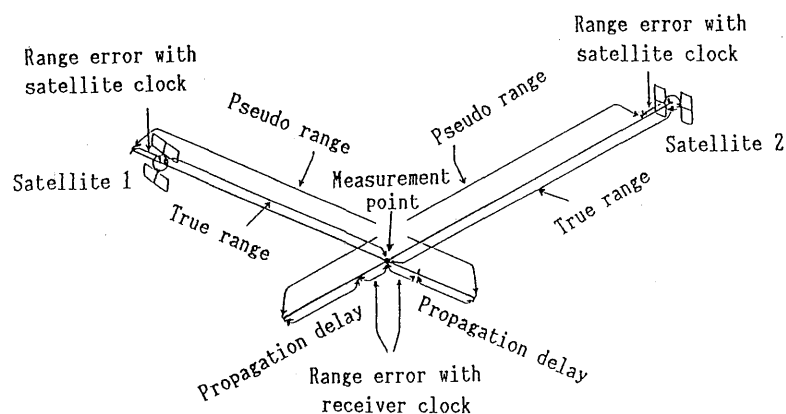


Fig.2・7 Contents of measuring data.

衛星からの距離がわかれば、衛星を中心とし、その距離を半径とする球が決定できる。3個の衛星で3個の球が決定されるとそれらの球の交点が受信点の位置となる。しかし、Fig. 2・8に示すように $\Delta tr$ があるので一点では交わらない。同図は2次元位置の場合を示しているから、2個の衛星で位置決定ができるはずであるが、 $\Delta tr$ による位置誤差修正のために三つの衛星を用いている。そしてコックドハット（誤差三角形）ができているが、これがなくなって3個の円が一点で交わるまで、3個の円を順次等量ずつ修正して行き、3個の円が一点で交わったとき、 $\Delta tr$ が修正されたことになる。

#### 1. 4 測位精度

ある物標の測定によって位置を決定するとき、その位置の誤差は、測定に用いるシステムの測定誤差と、位置の線の交角即ち、測定目標の幾何学的配置によって決まるものである。Fig. 2・9 (a),(b) は測定誤差が何れも $\pm\epsilon$ であるものが、位置の線の交角が異なることによって測位誤差の大きさが異なることを示した例である。このように測定誤差が一定でも、測位誤差は位置の線の交角によって異なり、その大きさは測定誤差 $\epsilon$ に位置の線の交角によって決まる係数を掛けて得られる。この係数のことを GDOP (Geometric Dilution of



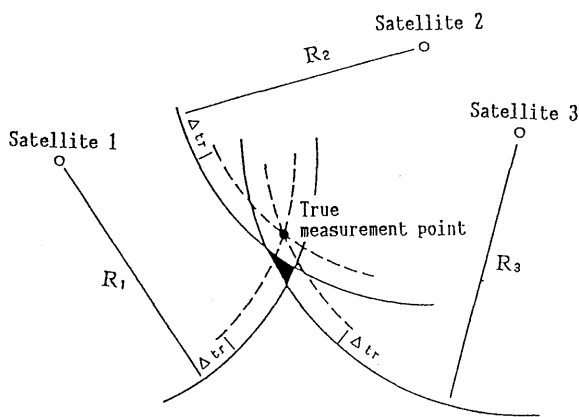


Fig.2・8 The circle of position near the measurement point.

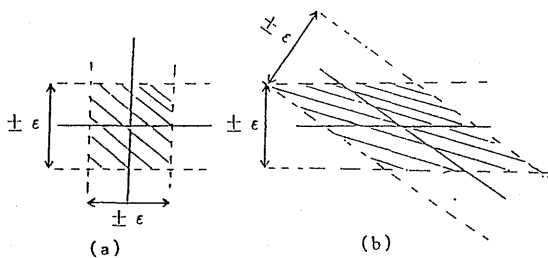


Fig.2・9 The error diamond.

Precision) という<sup>54~56)</sup>。もともと GDOP という言葉は GPS の測位誤差の研究において出てきた言葉であって、その日本語は未だないが、幾何学的精度低下率とでも訳されるものである。また、GDOPを空間座標に関する部分と時計に関する部分とに分けて、3次元的位置の GDOPを PDOP (Position Dilution of Precision)、2次元的位置のそれをHDOP (Horizontal Dilution of Precision) と呼び、時間に対する精度の低下率を TDOP (Time Dilution of Precision) という。衛星を結ぶ4面体の体積が大きいほど、GDOPは小さくなり、測位精度は向上する。GDOP の大きさは1~20まで整数化され数値の小さいほど精度のよいことを示すもので、本システム完成時には、PDOPが6以下の時をカバレッジと規

定している。

前述のように GPS は、受信機と衛星の距離を求め、その結果から受信機の位置を求めるが、その距離を測定するうえで別の誤差が影響してくる。これらの誤差を総称してレンジエラー (Range Error) という。

レンジエラーには、衛星から受信機に電波を送る際の、電波が通る電離層、対流圏の影響、衛星の時計の影響、衛星の軌道の誤差、受信機の雑音による誤差、マルチパスによる誤差、SA (Selective Availability) による誤差がある。これらのもたらす誤差とその補正は、ほぼ Table 2・4 のようになる。

#### ①電離層遅延 (Ionospheric Delay)

地球の表面は大気で覆われている。その密度は地表付近では大体  $1\text{kg}/\text{m}^3$  であり、上空へ行くほど急速に希薄になる。この大気層の上部は太陽からの輻射によって電離しており、電離層を形成している。電離層は地上からの高さが50~90 Km, 90~130Km, 130~210Km および210Km 以上の四つの層に分けられ、それぞれD層、E層、F<sub>1</sub>層およびF<sub>2</sub>層と呼ばれている。これら各層の電子密度と高さは、太陽の活動度、時刻、緯度、経度等によって複雑に変化する。Fig. 2・10は標準的な電子密度の高さ分布を示している。電離層による遅延は、太陽からの紫外線、太陽の黒点の変化、受信機からみた衛星の仰角、昼夜の違い等から最大約30mになると言われる。

#### ②対流圏遅延 (Tropospheric Delay)

対流圏による遅延は、受信機から見た衛星の仰角によって変化するが、低い仰角の場合は15~30m位の遅延になる。しかし、対流圏遅延に対しては補正は容易で、補正後は、1~3mの遅延になる。対流圏屈折誤差と仰角の関係は、Fig. 2・11のようになる。

#### ③マルチパス (Multipath)

マルチパスとは、衛星からくる電波がいろいろな物に反射してからアンテナに入射されることで、これが起こると正常な測位結果が得られなくなる。理由は、距離を計る際に反射された電波の影響を受けて衛星側の時計が、遅れることになるからである。マルチパスは、建物や周辺の地形、時には航空機などでも影響を与え、船舶においてはアンテナ位置と

Table 2・4 Correction of the error

Error Contributor	before correction	after correction (mean)
Satellite clock delay	0~300 km	1 m
Ephemeris uncertainty	1~5 m	4 m
Ionospheric delay	0~30 m	4 m
Tropospheric delay	0~30 m	0.5 m
Pseudorange noise (receiver)	0.4 m	0.4 m
Multipath	0.5 m	0.5 m
Selective Availability	30 m	30 m

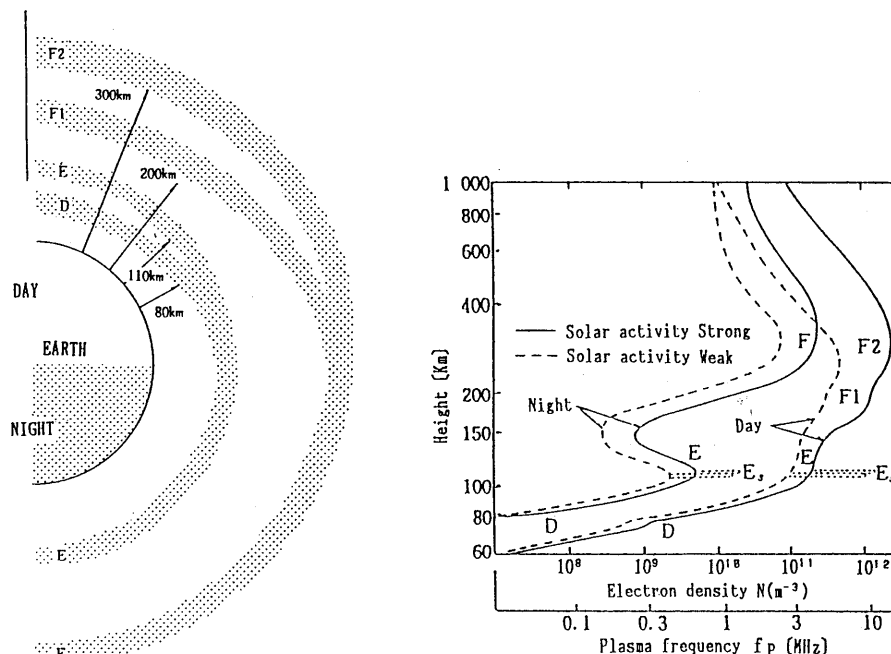


Fig.2・10 The frame of the Ionosphere and the change of day and night.

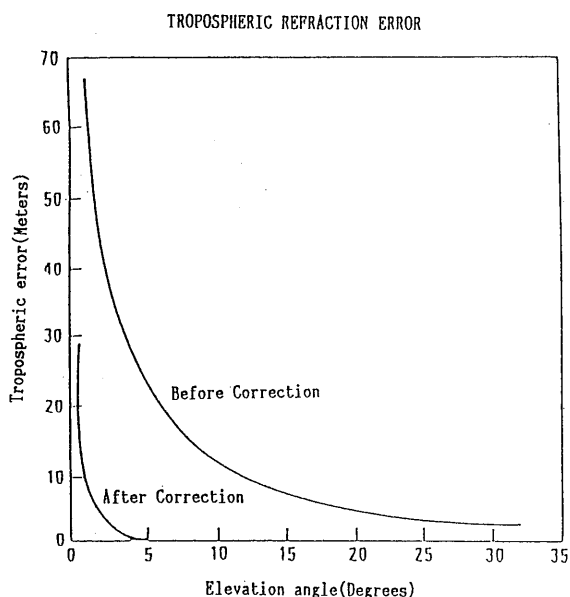


Fig.2・11 Tropospheric refraction error.

レーダマストやその他の高い構造物との位置関係によっては反射波の影響を受ける場合も考えられる。

#### ④SA (Selective Availability)

SAは、GPSのシステムの精度に大きな影響を与えている。これは、米国国防総省が国防上の理由から、故意に精度を劣化させる機能である。開発当初のブロックⅠ衛星ではSAを掛けることができなかったが、現用のブロックⅡ、ⅡA衛星には、SAを掛けることが可能で、現在は実際に掛けられている。

精度は、GPSのどのサービスを使うかによって基本的に違ってくる<sup>57-59)</sup>。現在、GPSは、SPS (Standard Positioning Service) とPPS (Precise Positioning Service)

の2つのサービスが行われており、SPSは、無許可で使えるスタンダードなサービスであり、PPSは、基本的には米国の許可を必要とするサービスで、軍用のほかは特別に許可を受けたもののみが使用できる。SPSはC/Aコードと航法メッセージだけを使い測位するものであり、PPSは、 $L_1$ 、 $L_2$ の両周波数でPコードと航法メッセージを使うものである。SPSを使用して測位する精度は、半径100mの円に95%、半径300mで99.9%の確率で入るものである。これは、SAが掛けられた状態でPDOPが6以下の時の2次元測位させた場合の精度である。SAが解除されれば、同様の状態で半径38mの円に95%となる。

これらの精度は、真の位置に対してどの程度の誤差をもつかを意味しているが、GPSのシステムからこれらとは別の見方で精度を計ることができる。異なる2地点で同じ衛星を使い測位した場合、この2地点の距離が、前記の示したところの誤差が等しいと考えられれば、その2地点の距離の精度は、SPSでSAが掛けられた場合でも数mほどになる。これは相対測位と呼ばれているが、これを応用したものがDGPS (Differential GPS) である。DGPSは、基本的には既に測量された(正確な)位置にGPSを置き、この位置に対するGPSの測位誤差を他の受信機に送りこの誤差分を加味し測位させる技法である。何種類かの方法があるが擬似距離を補正する方法が一般的である。

#### 1.5 まとめ

船舶の航海は、古くから位置の確認と見張りが基本であり、安全性と経済性の視点で様々な測位方法が試みられてきた。ロラン、オメガ、NNS Sなどの電波航法機器の発達により、従来から行われていた天測はほとんど不要となった。特に大洋航海では、NNS Sの出現は、自動的に高精度で全世界をカバーするという大きな変革をもたらしたが、以上のいずれ

の電波航法も常時連続的に世界中どこでも高精度な位置を求めることはできなかった。現時点におけるGPSは、従来の電波航法の欠点のほとんどを補い、常時、世界中で高精度な位置が得られるシステムとして大きな期待が寄せられている。GPSを船舶で試験的に使い始めたのは、1986年頃であるが当時はまだ利用できる衛星が少なく使用できる時間帯に限られていた。受信機も当初は非常に高価でほんの一部の船舶で試験的に使われたに過ぎない。現在、すでにGPSの利用経験のある航海士は、その優秀さを十分認識し、大型船舶では、大多数の船舶がGPS受信機を装備している。また、我が国の船舶はNNS S、GPSの併設が多くさらに米国、欧州など航路によりロランC、デッカなどと併用されている。

最近、位置だけでなくGPSにより計算された対地速度情報も利用しており、針路情報として利用しようとする動きもある。高速船では電磁ログやソナーによる速度計測より簡単に高精度の対地速度が得られるセンサーとしてGPSが有望視されている。

従来は、航海士が測定した位置を一定時間ごとに海図にプロットしていたが、最近のような少人数の運航では自動的に航跡がプロットされるチャートプロッタを使うことが多い。これらの自動化の際には、センサーの高信頼性は必要条件であるがGPSは位置、速度情報センサーとしてまさにこの条件を備えている。最近では、このチャートプロッタからさらに一歩進んで、航海計画、自動航行、見張り、などを電子的に統合した総合航法装置には、GPSが基本的構成要素としてますます重要になっている。さらに、航海関連で昨今、国際的に注目されている技術課題は、電子海図装置とGPSである。電子海図は、1985年より国際海事機関(IMO)と国際水路機関(IHO)の協力のもとに関連機関で検討されているもので、従来の紙海図と同等の電子的(グラフィック)表示装置であり、総合航法装置では重要な意味を持つものである。同時にこの電子海図は自船位置を基に表示されるためGPSによる位置も重要な意味を持つ。

以上のように本システムは、民間に開放されているC/Aコードを使用するSPSで、SAが掛けられた状態でも高精度の測位が期待できるものであり、オメガシステムに代わる理想的な測位システムとすることができる。

## 2 定点における測位精度

### 2.1 概要

測定は、本システムの実験、評価のためのブロックⅠ衛星が7個であった1986年4月から長崎大学水産学部において開始した。7個の衛星のうち8号衛星は電波は出しているもののルビジウム発振器の故障によって、水晶発振器で運用されていたため、航法用としては測位誤差が大きく、同年12月には使用できなくなり、衛星数は6個であった。その後再び短期間使用できたものの、1988年6月以降は送信を停止した。この後、1989年の10月までは新たな衛星の加入はなかった。従って、この間はブロックⅠ衛星6個のみによる測定のため、測位可能時間は1日に6時間30分程度にすぎなかった。いわばGPSの開発期とも呼べよう。

1989年の11月以後本格的な運用型のブロックⅡ衛星が徐々に増加して、ブロックⅠ、Ⅱ衛星両者が並行して測定された。1989年の衛星数は11月に9個、12月には10個となった。しかし、この頃から1990年の前半にかけては米国による何らかのシステムテストのためか測位精度は安定しなかった。なお、この間、1990年の3月からSAがブロックⅡ衛星に掛けられており、その試験のための影響も一因と考えられる。1990年8月、イラク軍のクウェート侵攻が行われ、その頃、民間の利用者からSAは中止されたか少なくとも大きく減少されたようであると報告があった。これに対して軍の担当者は、この事実を公式に確認することを渋ったと言われる。この間の本学部における測定でも1990年の9月には14~15個の衛星を使用でき、測位精度も基準位置からの変緯(D.lat)は10m以内、東西距(Dep)は40m程度ではほぼ一定であり、両者の標準偏差も10m程度であった。この様に、この間の測位精度が極めて良好であったのは、湾岸戦争のためにSAを解除していたものと考えられる。衛星数の増加にもかかわらず測位精度の不安定な時期を経て、極めて良好な結果が得るに至ったこの時期はいわばGPSの試験期とも呼べよう。

1991年11月には再度SAが掛けられ、その後SAは掛けられたまま1994年現在も継続している。本学部における測定でも、その影響は標準偏差の増大(30m程度)として見いだされるが、基準位置からの平均偏位(以下定誤差と記す)と標準偏差の値はほぼ安定しており、1994年になって、運用状態に入った事が公式に通告された点からも、この時期は本システムの確立期と呼べよう。

以上の様なGPSの開発の流れのなかで、常設の定点として長崎大学水産学部における測定、長崎の異なる定点での同時測定、本邦における練習船の寄港地での測定、1986年以降の長崎における経年変化さらに海外の寄港地との同時測定など、これまでの測定結果をもとに、その測位精度の変化について述べる。

測定地点の名称と略号および緯度、経度とGPSで使用されている測地系(WGS-84)<sup>60,61)</sup>への補正值の一覧表をTable 3・1に示す。

### 2.2 測定方法

定点測定のうち常設の長崎大学における測定は、本学部屋上にアンテナを設置して行った。そのアンテナ位置を国土地理院発行の1/25,000の地図から求め、その他の国内外の各地については本学部練習船の受信装置を用いての測定で、同船のアンテナ位置を各地の港泊図から求めた。これらをTable 3・1に示した補正值により測地系変換したものを基準位置とした。各測定点の位置をFig. 3・1~3・3に示す。

使用した受信機は日本無線(株)製JLR-4000で、受信周波数 $1575.42 \pm 1\text{MHz}$ 、C/Aコードの航法信号を4個の衛星から順次受信するシーケンシャル受信機である。測定は衛星数によって自動的に切り換えられ、4個以上の衛星から受信できる時は3次元測位、3個の場合は2次元測位を行う。受信機の使用モードは航行中の使用を想定して、航法モードおよび最適衛星選択モードに設定した。GPS受信機とデータ

Table 3・1 Observation positions and their code address, and position of the chart and correction value

Observation position	code address	position of the chart		correction value	
		latitude	longitude	latitude	longitude
Nagasaki University	NU	32° 46.964' N	129° 52.075' E	0.199' N	0.140' W
Nagasaki Yanagi 1	NY1	32° 42.134' N	129° 50.847' E	0.199' N	0.140' W
Nagasaki Yanagi 2	NY2	32° 42.117' N	129° 50.840' E	0.199' N	0.140' W
Hakodate	HK	41° 46.916' N	140° 43.787' E	0.154' N	0.216' W
Hamada	HM	34° 53.228' N	132° 03.873' E	0.189' N	0.152' W
Makurazaki	MK	31° 15.763' N	130° 17.602' E	0.211' N	0.137' W
Kagoshima	KG	31° 30.238' N	130° 31.797' E	0.211' N	0.138' W
Naha	NH	26° 13.932' N	127° 40.962' E	0.242' N	0.116' W
Apra	AP	13° 27.767' N	144° 39.023' E	0.000'	0.000'
Honiara	HO	9° 25.324' S	159° 57.531' E	0.420' S	0.050' E
Sydney	SD	33° 52.108' S	151° 11.712' E	0.090' N	0.060' E
Auckland	AU	36° 50.562' S	174° 46.116' E	0.100' N	0.000'

Table 3・2 The value of PDOP, level and code address

level	High	Middle	Low
code address	H	M	L
PDOP	1~5	6~10	11~20

取り込み機器関係のブロック図をFig. 3・4に示した。

システムの完成時には24個の衛星が軌道上に配置される予定であるが、測定開始当初の利用可能な衛星は、実験衛星6個のみであった。そのために、測位可能時間は限定されるものの、衛星の配置条件が良好な場合には、システム完成時とはほぼ同等の精度で測位でき、この衛星配置の状況はPDOP値で示される。測位精度を示す係数として表示されるPDOP値は、その値によって3段階に分けられ、要求精度に応じたレベルに設定できる。PDOP値とレベルの区分およびその略号をTable 3・2に示す。

測位結果をH, M, Lの各レベル毎に区分して精度を検討し、また各レベル毎の測位可能時間を調べることにした。これまでに行われた測位精度の評価は全てHレベルに関するもので<sup>62~70)</sup>、M, Lレベルについては報告されていない。当

初の子定では1987年末には、3衛星による2次元測位(2D3)ならば24時間(常時)測定が可能となる計画であったが、1986年初頭のスペースシャトル チャレンジャー号の事故により計画が遅れていたため、M, L両レベルの評価も行えば、利用時間の大幅な拡大になる。従って、PDOP値をLレベルに設定して全レベルについて測定を行った。さらに、測位可能時間を延長するために受信機に高安定発振器を接続して、1988年5月からは2衛星による2次元測位(2D2)も行った。衛星数と測位法および測位レベルと各略号をTable 3・3に示した。

2D2は当初、約4時間測位出来、全測位の30%を占めたが、衛星数の増加に従ってその割合は減少し、1990年10月に衛星数15個となった時点で1%のみとなり、その役割を終えたと言える。また衛星数の増加に従って、3Dの割合も増加し、6個の時には5%程度に過ぎなかったが、1991年、15個になると約70%になり、16個で約80%、17個になると95%を越え、1992年11月には19個でほぼ100%となった。1993年2月からは21個となり、この後は3DのHレベルで100%測位できるようになり、その後は衛星数の増加に従って、HレベルでもPDOP 2~3での測位が増加した。そこで、経年変化については、3DのHレベルのみについて解析し評価した。

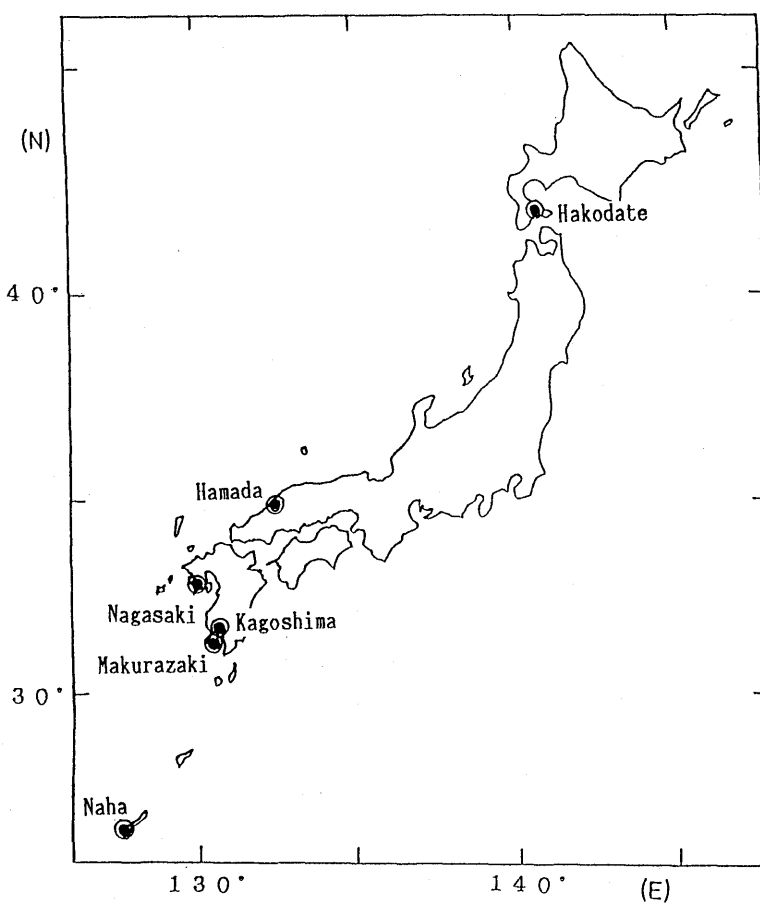


Fig.3・1 Observation positions in Japan.

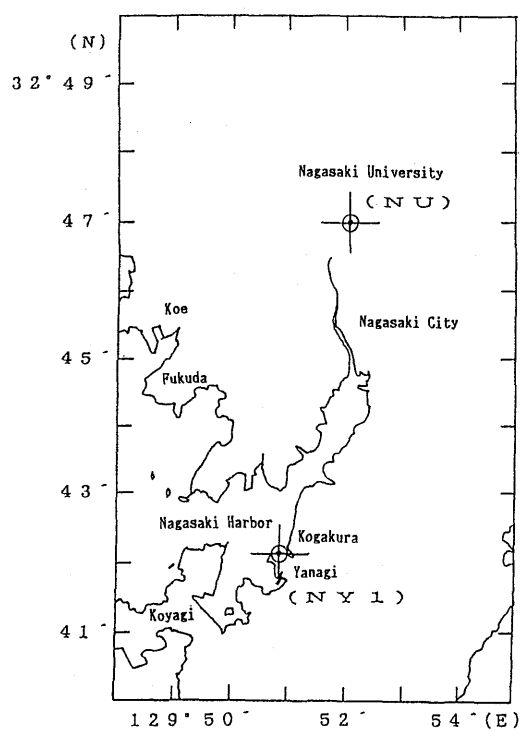


Fig.3・2 Observation positions in Nagasaki.

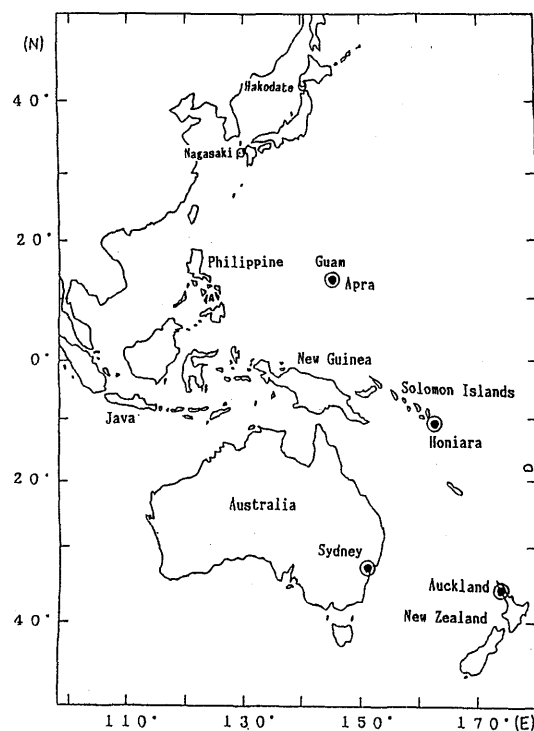
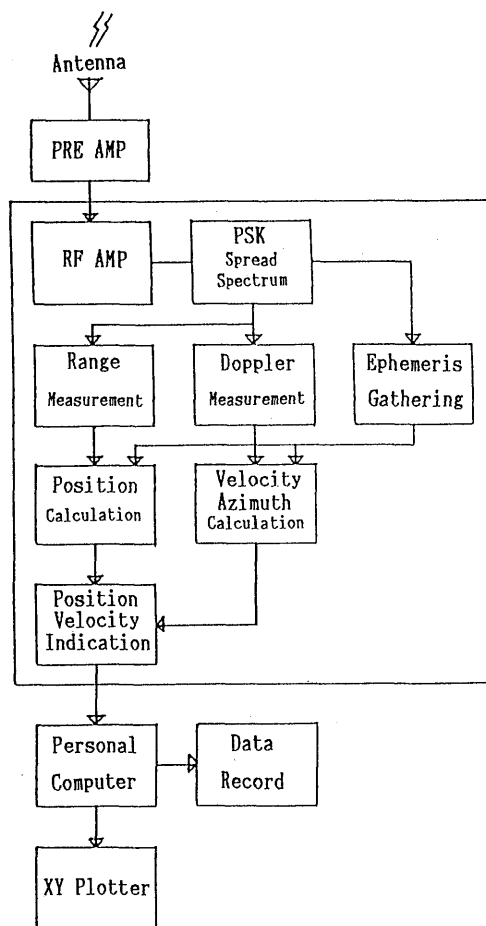


Fig.3・3 Observation positions at the port of call of the foreign countries.

**Table 3 • 3** The number of satellites, positioning method and level, and code address

Number of satellite	positioning method	code address	level	code address
4	three dimensional positioning	3D	H	3DH
			M	3DM
			L	3DL
3	two dimensional positioning	2D3	H	2D3H
			M	2D3M
			L	2D3L
2	two dimensional positioning	2D2	H	2D2H
			M	2D2M
			L	2D2L

**Fig.3 • 4** Block diagram of the GPS receiver.

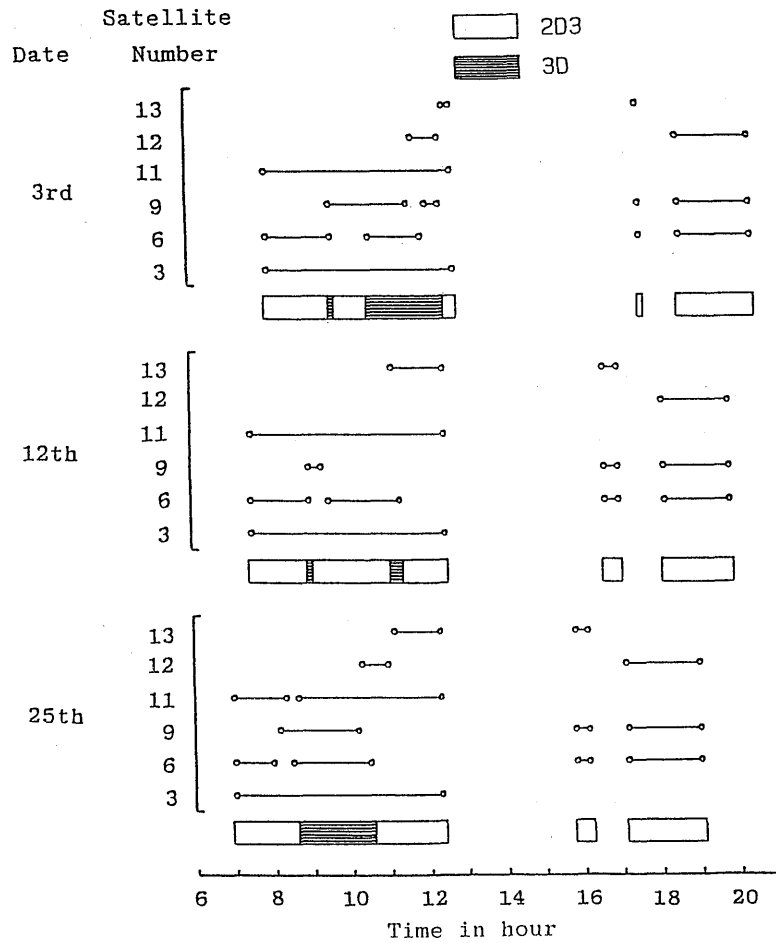


Fig.3・5 The usable time of each satellite and the method of position fixes.  
2D3:two-dimensional positioning  
3D :three-dimensional positioning

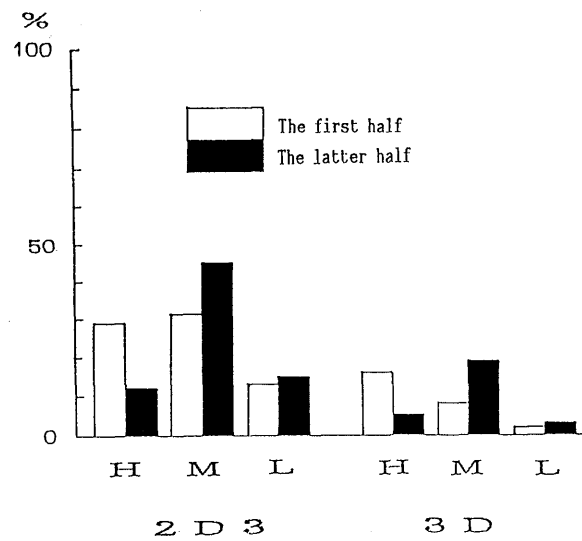


Fig.3・6 The ratio of the mean value of the usable time.  
H:high level; M:middle level; L:low level  
2D3:two-dimensional positioning  
3D :three-dimensional positioning

測位精度を検討する場合、測位結果が基準位置から著しく偏位したデータがあると、それらがシステムの測位精度を不当に低下させる事もある。そこで、基準位置からの緯度方向の偏位（変緯，以下D.lat と記す）と経度方向の偏位（東西距，以下 Dep と記す）についてそれぞれ平均値と標準偏差を求め、各データの D.lat または Dep が標準偏差の3倍以上になったものは棄却した。

## 2.3 結果および考察

### 2.3.1 開発期

#### (1) 陸上定点における測定<sup>71)</sup>

定点NUでは1986年4月から測定を開始したが、各月の測定日数が数日間だけであったので、より長い日数の日変化を併せて調べるために同年12月1日から同27日まで連続して、受信可能時間帯に10分間隔で測定した結果について述べる。

測定期間内において、1日のうち2D 3または3Dの測位が可能であった時間（測位可能時間）と、その間に受信でき

Table 3・4 Positioning accuracy at station NU (unit in meter)

Dimension	Level	No. of Data	D.lat		Dep		Distance	
			Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
2D3	H	206	-10.2	45.6	42.0	39.4	43.2	60.3
	M	393	18.9	62.4	10.6	78.0	21.7	99.9
	L	128	7.2	90.6	22.0	129.3	23.2	157.9
	Total	727	8.7	65.4	21.5	82.6	23.2	105.4
3D	H	103	-4.6	16.1	27.2	13.9	27.6	21.3
	M	148	8.0	34.8	13.0	27.4	15.3	44.3
	L	25	3.3	105.2	-13.1	62.0	13.5	122.1
	Total	276	3.0	41.7	15.9	30.7	16.2	51.8
Total		1003	7.0	59.8	20.0	72.2	21.2	93.8

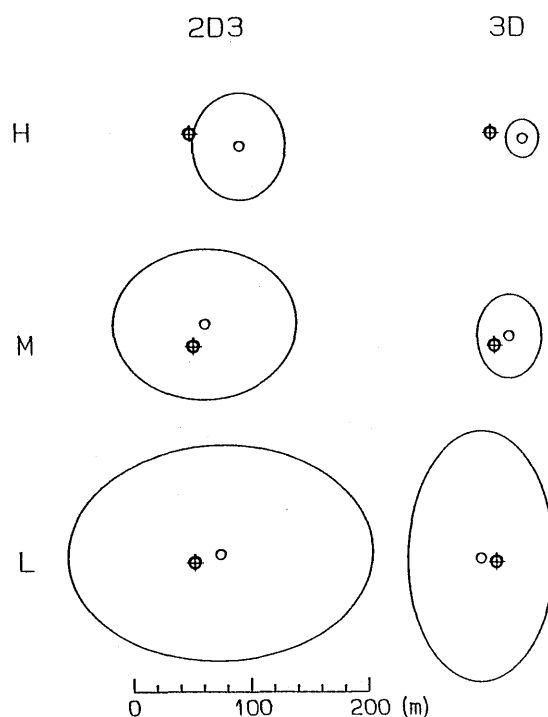


Fig.3・7 The mean position and error ellipses of 1σ at station NU.



た各衛星の組み合わせを、上・中・下旬の各1日についてFig. 3・5に示した。また17日以降Hレベルでの測位可能時間の減少が顕著であったので、16日以前と以後に分けて、各レベル毎の2D3と3Dの平均測位可能時間の割合をFig. 3・6に示した。測位可能時間は全期間を通じてほとんど変化なく1日当たり約6時間30分であった。前半は6時間21分のうち、2D3Hが29%、3DHが16%で、Hレベルでの測位可能時間は2時間52分で45%を占めたが、後半は6時間49分のうち、わずか17%に減少した。一方、Mレベルは前半の40%から後半には65%となったが、Lレベルは3%増加したのみで、Hレベルの減少分がMレベルの増加分に相当する。従って、M、Lレベルでの測位精度が低いと、利用可能な時間が大幅に減少することになる。

測定した1023個のデータから、位置が8.3海里、31.6海里と大きくずれていた2個と、受信レベルが記録されなかった9個のデータを除外して測位精度の解析を行った。2D3、3Dのレベル毎のデータ数とD.lat、Depの平均値および標準偏差を示したものがTable 3・4で、それを基準位置からの平均偏位（定誤差）とともに誤差楕円で図示したものがFig. 3・7である。

平均位置は2D3HでESE方向に約43m、3DHでは同方向に約28mであった。2D3、3Dいずれの場合も、Hレベルの偏位はほぼ同方向であるが、距離が大きく、M、Lレベルでは3DLの約14mから、2D3Lの約23mの範囲であるが、方向は3DLがWNW方向、他はいずれもNNE～ENE方向であった。即ち、Hレベルでは経度方向の誤差が大きく、緯度方向の誤差は小さいが、M、Lレベルでは両者がほぼ同程度である。D.latの標準偏差は、3DH、3DM、2D3Hではいずれも50m以下であり、Depの標準偏差は40m以下であった。従って、基準位置から平均位置までの距離に標準偏差を加えて、その偏位距離が最大になる

（以下 最大位置誤差と記す）のは、3DH、3DMでは50～60m、2D3Hでも約100mにすぎず、これらによる測位は、1994年現在の値と比較しても、2D3Hが現在の3DHと同程度であり、当初から高精度の測位が可能であった。同様に求めた3DL、2D3Mおよび2D3Lの最大位置誤差は、それぞれ約135m、120mおよび180mであり、いずれも0.1海里未満であった。

6個の衛星による約一ヶ月にわたる測定のうち、Hレベルは月の前半では45%であったが、後半には17%に急減した。このように、1986年当時においてはM、Lレベルでの測位を利用しなければ、測位可能時間が著しく短くなった。そこで、PDOP値11～20のLレベルまで利用すると測位可能時間は約6時間30分となった。定誤差は3DH、3DMおよび2D3Hでは、D.latが約±10m以内であり、Depは30m程度と予測でき、標準偏差は、3DHで10～20m、その他でも30～50m程度であった。最大位置誤差は3DH、3DMで50～60m、2D3H、2D3Mでは3DMのほぼ2倍であり、3DLでも約136mで、2D3Mよりも多少大きくなるのみであった。

これまでの測位システムの利用可能な場所や時期の条件、求められた位置の誤差、そのシステムの信頼性に関する主なもの、そして位置決定における自動化の可否についてまとめられた今津<sup>72)</sup>の報告を引用してTable 3・5に示した。この表より、従来の測位システムでは各項目について全てを満足するシステムはなく、それに対し本システムの測位誤差は、2D3Hでも100mにすぎず、開発期のこの時点では測位可能時間は6時間半にすぎないが、従来のあらゆるシステムと比べ、測位精度は最も高く、他の各項目を併せて究極のシステムと言える。その高精度という利点を利用して、GPSは船の航行海域によって、デッカやロランA、CあるいはオメガやNNS等との組み合わせによるハイブリッド航法にいち

Table 3・5 Comparison of the positioning system of every kind

Positioning system	Usable place	Usable time	Position error	Reliability	Automation
Cross bearing	Range condition Cross angle	Weather condition Day or night	about 100 m	Technique Chart	
Radar fixes	Range condition Cross angle	Weather condition	about 100 m	Technique Chart	Partial automation
Celestial navigation	Global	Weather condition Day or night	several miles	Technique Time	
Decca	Range condition Cross angle	All times	about 100 m	Operation	Automation
Loran C	Range condition Cross angle	All times	about 500 m	Operation	Automation
Omega	Global	All times	several miles	Operation Correction	Automation
NNS	Global	Altitude condition	about 500 m	Operation	Automation

早く取り入れられた。

## (2) 異なる二定点での測定<sup>73)</sup>

陸上定点における測位可能時間と測位精度は把握出来たが、衛星数が少ない段階では観測点周辺の地形によって、測定可能な衛星数が異なるし、時期によって衛星の配置も変化するから、測位可能時間や衛星の組み合わせが異なり、それに伴って測位精度の変化が予想される。そこで、まず長崎における異なった二定点で同時に連続測定を行い、その違いについて検討を行った。また、この場合、同型式の受信機でも、受信機の違いにより誤差が異なる事も予想されるので、先に同型式の受信機 2台を使用して測位精度の検討を行い、ほぼ同程度の精度で測位できることを確認した<sup>74)</sup>。

測定は1987年1月にNUとNY1の二定点において10日間にわたり、10分間隔で行った。

受信できた衛星は6個であり、2D3と3Dの割合は、両観測点とも約70%と30%で、ほぼ同じであった。

データ数はNUの328個とNY1の339個であり、それらについて測位精度を検討した。

両点で使用できた衛星の組み合わせと各レベル毎のデータ数をTable 3・6、3・7に示した。これらの衛星の組み合わせのうち、NUだけに出現した組み合わせは3Dで3組、2D3で3組あり、NY1だけのものは、3Dで2組、2D3で1組見られた。しかし、これらの組み合わせでのデータ数はいずれも少ない。また両点とも約30%の3DのうちLレベルが約7

割を占め、特にHレベルは少なく、約1割にすぎなかった。

2D3でも両観測点でHレベルが測定できたのは3・6・9の組み合わせのみであった。これらのうちデータ数が10個以上のものについて、D.lat, Depの平均値および標準偏差を求め、Table 3・8、3・9に示し、平均位置の分布状態をFig. 3・8に示した。このように衛星の組み合わせ別に見ると両点での測位精度にかなりの違いが見られる。特にNY1での3・9・11と6・12・13は南北に大きく偏位した。しかし、これらはいずれもデータ数が10、19個と少ない。その他の場合は、ほぼ北60m～南40m、東80m～西20mで東西、南北ともに100mの範囲内であった。

NY1はNUから192度、距離4.9海里(約9km)の地点であり、両点での測位の開始、終了時刻にはほとんど差がない。また、衛星の高度は約20,000kmであり、両点から衛星を見る場合の視差角は約0.015度にすぎない。それにもかかわらず、測位に利用する衛星が異なる場合や、同時刻でも、NUでは3Dで測定できたのに、NY1では2Dのことがあった。これは両点とも周囲が山に囲まれた地形であるから、衛星が近くの山の陰になったことによるものと考えられる。

このように多少の差は見られたが、両点での測位精度を2D3と3Dのレベル別に求めるとTable 3・10のようになる。2D3H、3DHの平均位置はほぼ東方へ約20～30mであり、2D3MではD.latはほとんど同じであるが、NY1が大きく東偏し、3DMでは両点ともSE方向に偏位した。

Table 3・6 Number of position fixes taken by combination of satellites at station NU

		Combination of satellites						Level			
		3	6	9	11	12	13	H	M	L	Total
2 D 3	●	●	●					33	4	3	40
	●	●		●				1	7	6	14
	○	○					○	2			2
	●		●	●				3	14	1	18
	○			○	○				5		5
	●			●	●	●			7	31	38
	○				○	○			1		1
		●	●	●		●				8	8
		●	●		●			72	36		108
		●	●			●		21			21
		Total						39	131	85	255
3 D	●	●	●	●					3	44	47
	○	○		○	○			3	2		5
	●	●		●	●	●		1	2		3
	●		●	●	●	●		2	5	8	15
	●		●	●	●	●				1	1
	○		○		○	○			1		1
	○			○	○	○				1	1
								6	13	54	73
		Total						6	13	54	73

2D3:two-dimensional positioning; 3D:three-dimensional positioning; ●:measured at station NU and NY1;  
○:measured at station NU; H:high; M:middle; L:low

Table 3・7 Number of position fixes taken by combination of satellites at station NY1

	Combination of satellites						Level			
	3	6	9	11	12	13	H	M	L	Total
2 D 3	●	●	●				28	2	2	32
	●	●		●				7	8	15
	●		●	●			5	10	2	17
	●			●		●		5	34	39
		●	●	●			3		6	9
		●	●		●			72	42	114
		●	●			●		19		19
			○	○		○	1			1
Total							37	115	94	246
3 D	●	●	●	●				8	52	60
	○	○	○		○		2			2
	○	○	○			○		2		2
	●	●		●		●			2	2
	●		●	●	●		2	10	8	20
	●		●	●		●	2	2	3	7
Total							6	22	65	93

2D3:two-dimensional positioning; 3D:three-dimensional positioning; ●:measured at station NU and NY1;  
○:measured at station NY1; H:high; M:middle; L:low

Table 3・8 The mean values and standard deviations of D.lat, Dep and Distance by combination of satellites at station NU (unit in meter)

Dimension	Level	No. in Fig. 3・8	Combination Satellite No.	D.lat		Dep		Distance	
				Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
2 D 3	High	1	3, 6, 9	1.0	26.6	13.9	50.8	13.9	57.3
		2	3, 9, 11	- 20.4	72.3	18.0	75.7	27.2	104.7
		3	6, 9, 12	22.6	37.5	25.2	98.0	33.9	104.9
		4	6, 9, 13	60.8	74.9	- 2.4	68.3	60.7	101.3
	Low	5	3, 11, 13	- 40.1	103.3	- 3.1	77.4	40.2	129.1
		3	6, 9, 12	27.5	52.1	10.3	140.3	29.3	149.5
3 D	Low	1	3, 6, 9, 11	0.7	50.1	- 16.2	83.8	16.1	97.6

SD:standard deviation

2 D 3 Lは差が最も大きい、その間の距離は約40mにすぎない。3 D Lでは観測点からの偏位量は小さいもののNUでは、平均位置が西偏した。しかし、各レベルの平均位置は南北方向±20m、西側3m、東側55mの範囲に存在している。標準偏差も、Fig. 3・9に示したように、3 D HでNY1の方が小さく、3 D Mではほぼ等しい以外は、いずれもNY1の方がやや大きくなったものの誤差楕円はよく似た形状であった。

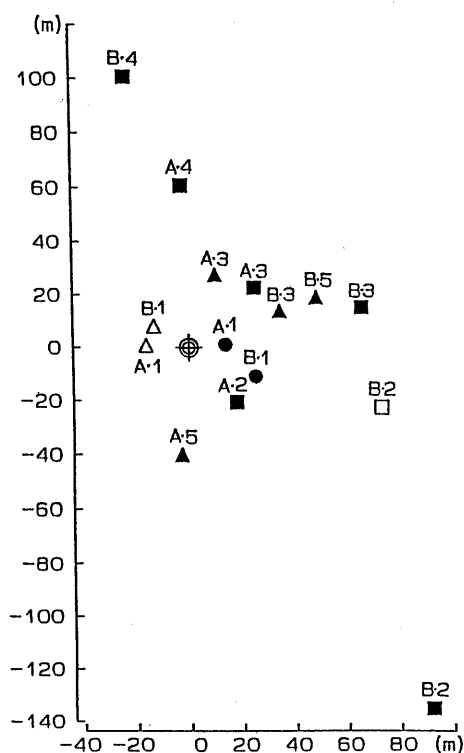
測定した位置の最大位置誤差は、3 D H以外はNY1の方が大きく、特に2 D 3 Lでは281mで約0.15海里であった。

このようにNY1で測位誤差が大きくなったのは、Depの標準偏差が192mにおよんだことが影響している。その一因として”長崎丸”の係留岸壁がほぼ東西方向であるため、風潮により船体が移動することが考えられるが、その距離は数メートル以下であり、無視してよい。熊谷ら<sup>75)</sup>はある衛星から来る電波にシンチレーションが起きると、電波の位相が変動するので、GPS測位では誤差の原因になると述べている。これは、4個の衛星で測定する3 Dの場合よりも、3個の衛星で測位する2 D 3の方が影響が大きいためと考えられる。また、田口<sup>76)</sup>は、デッキ電波のようなLF波では網船の船体が

**Table 3・9** The mean values and standard deviations of D.lat, Dep and Distance by combination of satellites at station NY1 (unit in meter)

Dimension	Level	No. in Fig. 3・8	Combination Satellite No.	D.lat		Dep		Distance	
				Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
2 D 3	High	1	3, 6, 9	-10.9	50.1	25.3	86.1	27.4	99.7
	Middle	2	3, 9, 11	-135.2	72.5	91.9	112.4	163.5	133.8
		3	6, 9, 12	15.3	42.5	66.1	104.9	67.8	113.1
		4	6, 12, 13	100.7	78.3	-23.2	88.2	103.3	117.9
	Low	5	3, 11, 13	19.0	157.3	48.7	140.7	52.2	211.0
3 D	Middle	3	6, 9, 12	13.8	87.9	34.7	224.9	37.4	241.4
		2	3, 9, 11, 12	-22.2	35.4	73.2	36.1	76.7	50.6
	Low	1	3, 6, 9, 11	8.0	73.5	-13.3	120.7	15.6	141.2

SD:standard deviation

**Fig.3・8** Distribution of position fixes obtained by combination of satellites.

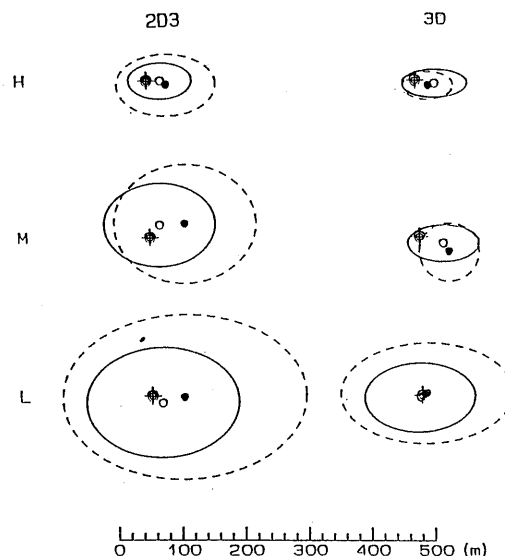
A:station NU; B:station NY1;

⊙:observation position; □:3DM; △:3DL;

●:2D3H; ■:2D3M; ▲:2D3L

Numbers refer to combinations shown in Table 3・8 and 3・9

垂直円形ループアンテナとなり、電波を再放射すると、電波の位相が変化することによる誤差が考えられる。この対策としては最も誤差の少ない位置にアンテナを設置すべきであり、アンテナ位置の選定が重要である。と述べていることから、使用電波の周波数は異なるが、電波の特性である直進性、反射性は同じであり、アンテナ位置による受信波の変動も影響したものと考えられる。

**Fig.3・9** The mean position and error ellipses of 1σ at two stations.

⊙:observation position; ○:station NU; ●:station NY1;

2D3:two-dimensional positioning;

3D:three-dimensional positioning

H:high level; M:middle level; L:low level

以上のように長崎の二定点において、10日間の同時測定を行った結果、受信できた衛星はいずれも6個であり、測位可能時間はほぼ同じであった。測位精度は3DH、3DMではほとんど差はなかったものの、両観測点の距離が近いにもかかわらず、測位に利用した衛星番号や衛星数が異なる場合が見られ、そのような場合には測位精度に多少の違いが見られた。また同一時刻における測位での偏位量は、その偏位の方角と距離の一方または双方とも一致しないことが多かった。衛星数が少ないこの段階では、衛星の配置により多少の地域差が生じることが明らかになった。

(3) 各地における地域差について<sup>77,78)</sup>

これまで長崎での測位精度について評価を行い、2D3Lでも最大位置誤差は300m程度であり、大洋航行中の一般船

Table 3・10 The accuracy of two measurement stations (unit in meter)

Dimension	Level	No. of Data	D.lat		Dep		Distance		
			Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	
N U	2 D 3	H	39	0.1	28.4	21.6	50.6	21.7	58.0
		M	131	19.9	65.6	15.7	88.7	25.4	110.3
		L	85	-11.0	85.1	16.1	120.8	19.5	147.7
	Total	255	6.6	70.1	16.7	96.1	18.0	119.0	
	3 D	H	6	-4.9	21.7	30.6	51.6	31.3	55.9
		M	13	-10.4	28.9	37.6	56.7	39.1	63.6
		L	54	-3.9	53.3	-3.4	87.5	5.2	102.4
	Total	73	-5.1	47.7	6.7	81.6	8.5	94.5	
	Total	328	4.0	65.9	14.5	93.1	15.0	114.1	
	2 D 3	H	37	-6.6	48.6	30.8	78.9	31.7	92.6
		M	115	21.2	92.9	55.6	112.6	59.4	146.0
		L	94	-2.8	127.2	50.4	192.1	50.6	230.4
Total	246	7.8	103.3	49.9	144.5	50.4	177.6		
N Y 1	3 D	H	6	-8.6	21.6	20.3	39.4	22.0	45.0
		M	22	-24.1	45.4	46.5	47.5	52.4	65.8
		L	65	2.4	77.4	7.6	136.1	7.8	156.6
	Total	93	-4.6	69.2	17.6	117.3	18.1	136.3	
	Total	339	4.4	95.2	41.0	138.2	41.1	167.8	

NU:Nagasaki Univ.; NY1:Nagasaki Yanagi;  
H:high; M:middle; L:low; SD:standard deviation

Table 3・11 The usable time and the ratio of each level at each station

		2 D 3				3 D				Total			
		H	M	L	T	H	M	L	T	H	M	L	T
HK	Time (h-m)	2-25	2-38	2-07	7-10	1-08	0-16	0-15	1-39	3-33	2-54	2-22	8-49
	Percentage (%)	27	30	24	81	13	3	3	19	40	33	27	100
HM	Time (h-m)	2-36	1-10	2-55	6-41	1-06	0-35	0-05	1-46	3-42	1-45	3-00	8-27
	Percentage (%)	31	14	34	79	13	17	1	21	44	21	35	100
N Y 2	Time (h-m)	2-12	1-39	1-48	5-39	0-20	0-26	0-13	0-59	2-52	2-05	2-01	6-38
	Percentage (%)	33	25	27	85	5	7	3	15	38	32	30	100

HK:Hakodate; HM:Hamada; NY2:Nagasaki(Aug.)

2D3:two-dimensional positioning; 3D:three-dimensional positioning; H:high; M:middle; L:low; T:total

船にとっては十分有効な測位システムであることが解明できた。しかし、長崎の二定点同時測定の結果、多少の差があったので、国内の異なる二定点での測定をもとに、場所による測位精度の違いについて検討した。

測定は1988年本学部練習船「長崎丸」の練習航海における寄港地2港、函館港（HK）と浜田港（HM）および長崎港柳埠頭に係留中の本学部練習船「鶴洋丸」（NY2）で、ほぼ同時期に実施した。

#### 1) 測位可能時間

この研究段階では衛星数は7個である。各測点で2D3および3Dでの測定が可能であった測位可能時間を各レベル毎にまとめ、その割合とともにTable 3・11に示した。

Table 3・11より、各測点での測位可能時間を比較すると、HKとHMの两点では22分の差にすぎないが、NY2で

は两点より2時間あまり少なくなっている。その原因はNY2での測定時には、8号衛星が受信できず、衛星数が6個となったためであると考ええる。Table 3・12は、東京から函館、函館から日本海沿岸を浜田を経て長崎まで航行する間の各1日間の測位可能時間を表したもので、各海域と陸上定点を総合してみると、緯度が高くなれば測位可能時間が長くなる傾向が見られる。これは、この時点においては、衛星数が少なく各軌道上の配置がアンバランスであるためと考える。

#### 2) 測位精度

各寄港地における測位精度を検討する場合、練習船の日程によって停泊日数が異なるため、データ数にバラツキが生じる。そこで、HKとNY2における1日分と2日分の測位結果を比較したものをTable 3・13に示した。その結果、両測点ともデータ数の多少にかかわらず、Depに10数mの差が

Table 3・12 The usable time classified by sea area

Observation area	Date	2D3 (h-m)	3D (h-m)	Total (h-m)
1	May 24	8-15	0-21	8-36
2	May 30	7-06	1-36	8-42
3	June 3	6-13	1-54	8-07

1:off Shioyazaki; 2:off Akita; 3:near Iki channel

2D3:two-dimensional positioning; 3D:three-dimensional positioning

Table 3・13 Comparison between the data of one day's measurement and two day's measurement in HK and NY2 (unit in meter)

Station	Dimension	No. of Data	D.lat		Dep	
			Mean	SD	Mean	SD
HK	1 day	2D3	421	- 7.3	35.7	35.0
		3D	99	- 0.9	16.4	44.1
		Total	520	- 6.0	32.9	36.7
	2 days	2D3	868	-11.8	39.4	19.6
		3D	176	0.9	13.9	32.6
		Total	1044	- 9.7	36.7	21.8
NY2	1 day	2D3	333	12.7	43.6	- 4.3
		3D	54	45.7	16.3	- 8.9
		Total	387	17.3	42.4	- 4.9
	2 days	2D3	687	10.4	51.2	-12.7
		3D	95	51.5	16.5	-10.7
		Total	782	15.4	50.2	-12.4

HK:Hakodate; NY2:Nagasaki Yanagi

2D3:two-dimensional positioning; 3D:three-dimensional positioning

Table 3 • 14 The accuracy of three fixed stations (unit in meter)

Dimension	Level	No. of Data	D.lat		Dep		Distance	
			Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
2 D 3	H	143	12.0	19.6	38.6	48.5	40.4	52.3
	M	156	-18.3	25.3	7.8	50.5	19.9	56.5
	L	122	-15.7	49.8	65.5	87.5	67.5	100.7
	Total	421	-7.3	35.7	35.0	67.0	35.8	75.9
HK	H	68	-3.0	12.4	44.5	11.2	44.6	16.7
	M	16	3.3	19.0	31.5	25.7	31.7	32.0
	L	15	4.2	26.2	55.4	28.3	55.5	38.6
	Total	99	-0.9	16.4	44.1	18.6	44.1	24.8
Total		520	-6.0	32.9	36.7	60.9	37.2	69.2
2 D 3	H	156	-2.0	30.4	55.2	55.5	55.2	63.3
	M	58	-20.9	38.9	18.4	96.7	27.8	104.2
	L	175	-26.7	34.1	26.0	92.4	37.3	98.5
	Total	389	-15.9	35.3	36.6	81.7	39.9	89.0
HM	H	66	-12.3	15.5	34.3	12.6	36.4	20.0
	M	34	16.1	21.5	7.1	39.6	17.6	45.1
	L	4	-6.6	38.7	23.5	6.6	24.4	39.3
	Total	104	-2.8	22.8	25.0	27.7	25.2	35.9
Total		493	-13.2	33.5	34.1	73.8	36.6	81.0
2 D 3	H	132	29.6	21.8	8.8	30.4	30.9	37.4
	M	98	-2.1	49.7	21.1	71.7	21.2	87.2
	L	103	5.2	50.8	-45.3	68.9	45.6	85.6
	Total	333	12.7	43.6	-4.3	64.1	13.4	77.5
NY 2	H	20	44.7	5.7	-27.1	12.7	52.3	13.9
	M	26	44.0	18.5	2.5	25.5	44.1	31.5
	L	8	53.6	24.9	-0.5	87.7	53.6	91.2
	Total	54	45.7	16.3	-8.9	39.8	46.6	43.0
Total		387	17.3	42.4	-4.9	61.2	18.0	74.5

HK:Hakodate; HM:Hamada; NY2:Nagasaki  
H:high; M:middle; L:low; SD:standard deviation

見られるほかは、いずれも数mの差にすぎない。従って、各測点とも1日分のデータについて、基準位置からの D.lat, Dep の平均値および標準偏差を求めた。

NY 2での測定結果は、測定時期がHK, HMでのそれに近い8月の測定を用いて、三定点における測位精度の比較を行った。2 D 3と3 Dのレベル毎のデータ数とD.latとDepの平均値および標準偏差をTable 3 • 14に示した。また各観測点を原点として、各レベルの平均位置とその点を中心とする1 $\sigma$ の誤差楕円をFig. 3 • 10に示した。各測点の次元別、レベル別の定誤差と標準偏差を個々に見ると、条件によってバラツキはあるが、全般的には次のような傾向が見られる。

(a) HK, HM両点では平均位置が ENE~SE へ約30

~50m偏位し、NY 2では、NNW~NNE方向へ同程度偏位する傾向が見られる。

(b) 各測点とも、同じレベルで比べると Dep の標準偏差は2 D 3が3 Dの2倍またはそれ以上であるが、D.lat の標準偏差はいずれも50m以下であり、南北方向のバラツキは小さい。

(c) 全般的には Dep の標準偏差の方が D.lat のそれよりも大きく、東西方向にバラツキ、誤差楕円は横長の形状を示している。しかし、最も大きいHMの2 D 3 Lの場合でも Dep の標準偏差は100m以下である。マクロな見方をすれば、いずれの場合も68%誤差楕円の長半径は0.1海里以下にすぎない。

(d) 3 Dの測位精度には明らかな地域差は認められない

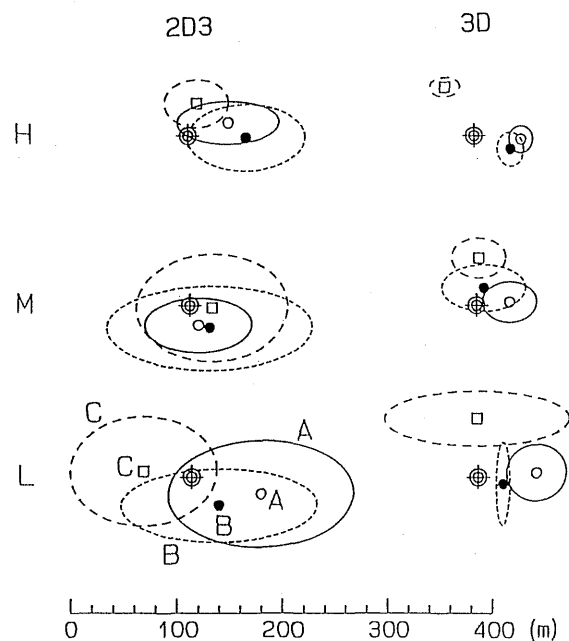


Fig.3・10 The mean position and error ellipses of  $1\sigma$  at three stations  
A(○):Hakodate; B(●):Hamada; C(□):Nagasaki yanagi  
⊕:observation position

Table 3・15 The usable time and the ratio of each level

Observation Position	2 D 2				2 D 3				3 D				Total			
	H	M	L	T	H	M	L	T	H	M	L	T	H	M	L	T
Hakodate	Time (h-m)	3-57		3-57	2-25	2-38	2-07	7-10	1-08	0-16	0-15	1-39	7-30	2-54	2-22	12-46
	Percentage (%)	31		31	19	21	16	56	9	2	2	13	59	23	18	100
Hamada	Time (h-m)	3-59		3-59	2-36	1-10	2-55	6-41	1-06	0-35	0-05	1-40	7-41	1-45	3-00	12-26
	Percentage (%)	32		32	21	9	23	53	9	5	1	15	62	14	24	100
Nagasaki	Time (h-m)	3-45		3-45	2-12	1-35	1-48	5-35	0-20	0-26	0-13	0-50	6-17	2-01	2-01	10-19
	Percentage (%)	36		36	21	16	18	55	3	4	2	9	60	20	20	100

2D2:two-dimensional positioning with two satellites; 2D3:two-dimensional positioning;  
3D:three-dimensional positioning; H:high; M:middle; L:low; T:total

が、2 D 3では測点によって2 D 3 Mや2 D 3 Lのデータ数に著しい差がある。これは、地理位置の変化により、同じ組み合わせでも僅かながら高度と方位角に差があり、PDOP値が変化することによるものと考えられる。

#### (4) 測位可能時間の延長について<sup>79)</sup>

これまでの測定により、3次元測位では、極めて高精度で測位可能なことが把握できた。しかしながら開発期のこの時点では、利用できる衛星数は6個であり、PDOP値20以下で測位できる時間を測位可能時間とすれば、長崎では時期により多少の差はあるが、測位可能時間は6～8時間に限られる。

そこで、測位可能時間を延長するために、GPS受信機に高安定発振器を接続すれば2衛星しか受信できない場合でも2次元測位が可能で、測位可能時間を延長することができるので、その場合の測位精度の評価を行った。ただし、この場合の測位は原則として、PDOP値が5以下の時に限られる。

測定は、前項の3地点で同時に、受信機に高安定発振器(NDM-13A)を接続して行った。

2個の衛星による2次元測位(2 D 2)、3個の衛星による2次元測位(2 D 3)および3次元測位(3 D)での各レベル毎の測位可能時間とその割合をTable 3・15に示す。全



測位可能時間はHKとHMでは約12時間半であったが、NY2では8号衛星からの信号が受信出来なくなったため約10時間半であった。しかし、2D2はいずれも約4時間で、全体の約30%を占めた。2D2では測位に利用する衛星が2個のみであるため、衛星の総数が6個~7個で測位可能時間が6~8時間に限定されていた1988年当時において、それが4時間近く長くなる事は、コスト面での問題はあがあるが、利用者にとってかなり有益なものであった。

衛星数が少ない場合、測位に利用できる衛星の組み合わせが限定され、同一組み合わせでの測位が比較的長時間継続する。そのため測定位置の偏位方向に方向性が見られる場合が多く、そのような測定位置の分布特性が2D2の場合にも生ずるものと考えられる。測定位置の分布の一例として、その分布特性が比較的顕著であったHKでの衛星番号8と11の組み合わせおよびNY2での11と13の場合についてFig. 3・11, 3・12に示した。これらはいずれも時間の経過と共に北東方向へ偏位し、やがて2衛星とも高高度に達し、PDOP値が5以上になり測定不能となった。

2D2での測位精度をTable 3・16に示す。また観測点を原点、平均位置を中心に1 $\sigma$ の誤差楕円をFig. 3・13に示す。

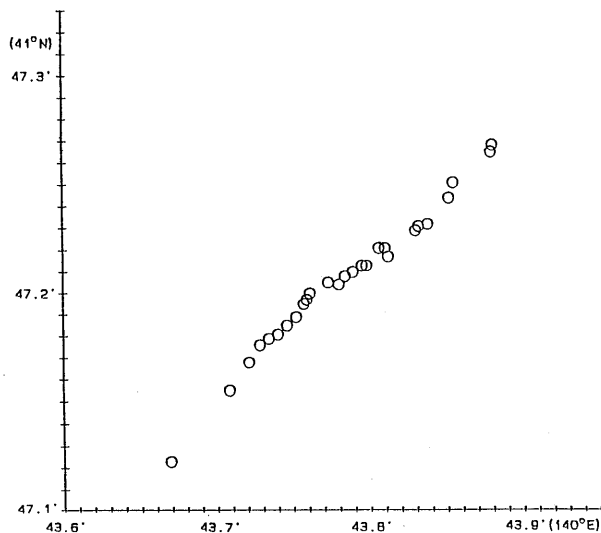


Fig.3・11 Distribution of position fixes obtained by two satellites at Hakodate(satellite No.8 and 11).

函館、浜田での最大位置誤差はそれぞれ約131mと約145mで、これは2D3M~Lとほぼ同じ値であった。NY2でのそれは約184mで、これは2D3Lよりも約50m大きくなったのみである。

この様に、GPS受信機に高安定発振器を接続することにより、2衛星のみによる測位も可能となり、各地とも測位可能時間が約4時間長くなった。なお、高安定発振器使用による誤差が加わるが、その精度は2D3Lと同程度であった。すなわち、開発期における測位可能時間の延長に十分な効果が認められた。

#### (5) 海外の定点における測位精度<sup>80)</sup>

GPSは全世界をカバーする航法システムであり、その測位精度については、日本近海だけでなく、出来るだけ広範囲について把握しておくことが望まれる。そこで本学部練習船「鶴洋丸」の実習航海中に寄港した海外の3地点、すなわち、北半球の低緯度帯にあるアブラと南半球の低緯度帯にあるホニアラおよび中緯度帯にあるシドニーにおいて測位精度の評価を行った。なお、ここでは完成時におけるGPSの測位がほぼ3DHのみと予想されることと、その経年変化を知るために、3DHについて評価した。

港名とその略号および基準位置等はTable3・1に示した。

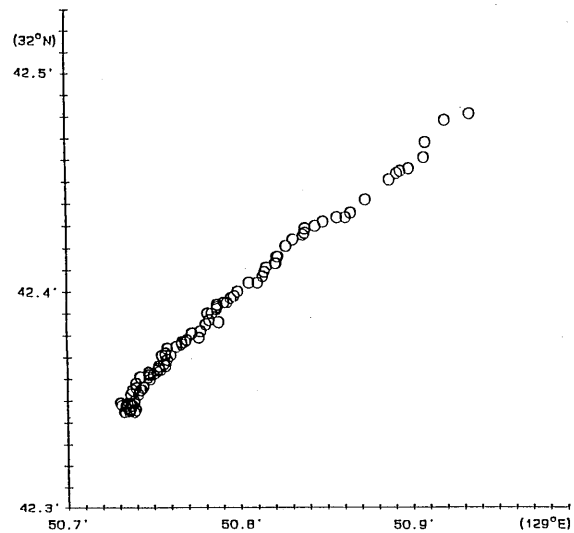


Fig.3・12 Distribution of position fixes obtained by two satellites at Nagasaki(satellite No.11 and 13).

Table 3・16 The accuracy of three fixed stations for 2D2 (unit in meter)

Observation position	No. of Data	D.lat		Dep		Distance	
		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
HK	219	-24.6	49.7	17.1	88.1	30.0	101.2
HM	236	16.5	39.6	68.1	63.5	70.1	74.8
NY2	217	61.3	68.4	36.0	89.5	71.1	112.6

HK:Hakodate; HM:Hamada; NY2:Nagasaki Yanagi

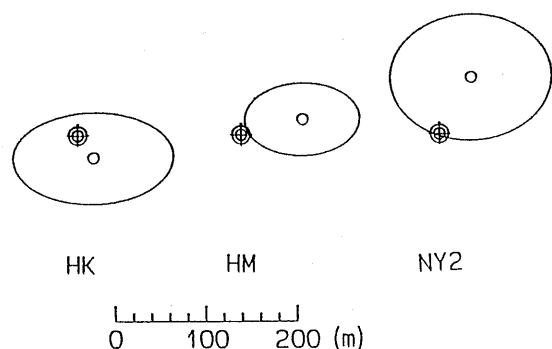


Fig.3・13 The mean position and error ellipses of  $1\sigma$  for 2D2.  
HK:Hakodate; HM:Hamada; NY2:Nagasaki yanagi  
⊙:observation position

測定日数は、寄港地によって差があったので、測定日数が複数の場合は1日当りの平均を求めた。寄港地での測位精度をTable 3・17に示し、開発期の本邦各地におけるそれをTable 3・18に示した。

1988年の測定では各地とも利用可能な衛星数は6個で、測位可能時間は7～9時間であった。そのうち3DHは、アプラで約14%、南半球のホニアラ、シドニーでは、各々29%、42%であり、いずれも長崎における割合（10%未満）よりも多かった。この期における、長崎での最大位置誤差は50～90mで、1988年のそれは66mであった。それに比べ、ホニアラでは60mであるが、アプラでは標準偏差は20m未満と小さいものの、D.lat、Depの定誤差はともに大きく、シドニーでは、

標準偏差が大きいので、最大位置誤差はそれぞれ180m、125mであった。

以上のことから、1986年の測定開始当時は、ブロックI衛星6個のため一日の測位可能時間は約6時間30分であり、そのうち3DHは全体の10%にも足りない程度であった。しかし、1986年は極めて高精度な測位ができ、D.latの定誤差は-5m、Depのそれは27m、標準偏差はいずれも約15mで最大位置誤差は50m程度であった。1988年は本邦の各地で測定したが、その標準偏差はいずれも20m未満に過ぎずバラツキは小さかった。しかし、その定誤差はD.latで-12～45m、Depでも-30～45mと定点によりかなりの差異が見られた。

海外においても測位可能時間は短かったものの、標準偏差は小さく、比較的安定していた。この頃は衛星の配置が北半球中心であったため、南半球の中緯度帯にあるシドニーでは測位可能時間がやや短くなったが、他方、衛星が集中するために3Dでの測位時間が長くなるというような、地域差が見られた。

### 2.3.2 試験期<sup>81,82)</sup>

試験期は、1989年11月から湾岸戦争前の1990年6月頃までの、測位精度が低い前期と1990年7月から1991年10月までの極めて高精度な測位が可能であった後期に分けられる。

前期はブロックII衛星が徐々に増加した時期である。この間、米国による何等かのシステムテストのためか、測位に利

Table 3・17 The accuracy of ports of call of overseas in a development stage (unit in meter)

Year and Month	Station	D.lat		Dep		Distance	
		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
'88 8	AP	50.8	15.8	154.6	6.5	162.7	17.4
'88 11	HO	19.3	12.1	34.0	15.6	39.1	19.7
'88 11	SD	12.1	33.4	48.2	67.2	49.7	75.0

AP:Apra; HO:Honiara; SD:Sydney

Table 3・18 The accuracy in a development stage (unit in meter)

Year and Month	Station	D.lat		Dep		Distance	
		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
'86 12	NU	- 4.6	16.1	27.2	13.9	27.6	21.3
'87 1	NU	- 4.9	21.7	30.6	51.6	31.3	55.9
'88 8	NU	44.7	5.7	-27.1	12.7	52.3	13.9
'88 12	KG	11.6	21.2	-40.9	27.0	42.5	34.3
'89 8	NU	20.5	15.2	- 1.6	45.8	20.6	48.3

NU:Nagasaki Univ.; KG:Kagoshima

用できた衛星数は同じ月でも6~10個の間で増減を繰り返した。この間に測定した11, 12月および2, 3, 4月の結果をTable 3・19に示した。

11月に衛星数は9個に増加したものの、同表に見られるように、D.lat, Dep の定誤差はいずれもほぼ100mにおよび、標準偏差はさらに大きく、Dep のそれは200m以上であった。12月には衛星数は10個になったものの、D.lat, Dep の定誤差はさらに大きくなり、特に Dep のそれは符号も逆で約-730mであった。しかし、標準偏差は11月の1/4~1/7に減少した。2月には衛星数は再び6個となった。この時も Dep の定誤差が200m以上であった。3月には再び10個の衛星が利用でき、3 DHでの測位は一時的ではあったが79%になり、この時のD.latの定誤差はほとんど無く、標準偏差は40m程度、Dep の定誤差は35m、標準偏差は25m程度であった。しかし、4月の衛星数は再び6個となり、最大位置誤差は2000mを越えた。このように試験期の前期における測位精度は一定せず変動し、定誤差、標準偏差ともに大きい場合が多かった。

前期において、増減を繰り返した利用可能な衛星数は、1990年9月には14個、10月には15個となった。また、同年8月にイラクのクウェート侵攻があり9月には SA は解除されていたと考えられるが詳細は不明である。1991年11月には再び

SA が掛けられたと言われる。湾岸戦争をはさむ1990年7月~1991年10月の間は特に測位精度が安定していたので、試験期の後期とした。この間の3 DHの測位精度の数例をTable 3・20に示す。

1990年の9月と10月に各3日間の測定を1分間隔で行った結果、3 DHでの測位は64%を占めた。この時点での測位可能時間はほぼ19時間30分で、そのうち2 D 2での測位は1%に過ぎず、高安定発振器を利用した測位は、その役割を終えたものと言える。1991年の衛星数は15~16個で、測位可能時間は2次元測位を含めればほぼ24時間となり、そのうち3 DHは64~77%を占めた。1990年の3月以降 SA が実施され、測位精度を低下させる方策がとられていると言われていたもののTable 3・20に示したように、D.lat の定誤差は10m未満、Dep のそれは40m程度で、この頃から定誤差はほぼ安定してきたと言える。この時点での標準偏差は、衛星数の増加のためか、依然として小さく、この傾向は湾岸戦争後も続き、1991年の10月までの標準偏差は D.lat, Dep とともに15m以下であった。

この期における海外での測定はアプラとシドニーで行った。その時の3 DHの測位精度をTable 3・21に示す。

前期における3 DHの割合は、長崎では5%に過ぎなかったが、アプラで10%、シドニーは51%であった。衛星数が少

Table 3・19 Variation of the accuracy in a former term of the test stage (unit in meter)

Year and Month	Station	D.lat		Dep		Distance	
		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
'89 11	NU	98.2	161.3	112.6	205.8	149.4	261.5
'89 12	NU	473.8	46.9	-732.1	29.2	872.0	55.2
'90 2	NU	-34.6	23.5	228.9	50.1	231.5	55.3
'90 3	NU	-0.1	42.2	34.9	25.2	34.9	49.2
'90 4	NU	214.5	1215.7	887.4	548.1	913.0	1333.5

NU:Nagasaki University

Table 3・20 Variation of the accuracy in a latter term of the test stage (unit in meter)

Year and Month	Station	D.lat		Dep		Distance	
		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
'90 9	NU	8.7	13.4	39.2	13.3	40.2	18.9
'90 10	NU	5.4	12.1	42.6	11.5	42.8	16.7
'90 12	MK	11.8	11.2	25.4	14.5	28.0	18.3
'91 4	NU	5.6	12.5	39.8	12.9	40.2	17.9
'91 5	NU	5.2	12.4	42.0	12.9	42.3	17.9
'91 6	NU	3.6	11.7	41.0	11.3	41.2	16.3

NU:Nagasaki University; MK:Makurazaki

Table 3・21 Variation of the accuracy in the test stage at overseas stations (unit in meter)

Stage	Year and Month	Station	D.lat		Dep		Distance	
			Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
Former Term	'89 8	AP	-124.6	22.9	69.7	141.8	142.8	143.6
	'89 12	SD	15.8	41.9	53.1	53.9	55.4	68.3
Latter Term	'90 8	AP	76.5	11.6	163.1	11.3	180.1	16.2
	'90 11	SD	- 6.9	12.0	50.4	11.3	50.9	16.5

AP:Apra; SD:Sydney

なかったこの頃までは、各軌道上の衛星配置がアンバランスであることにより、南半球では測位可能時間は短いものの、衛星が集中するため3DHでの割合が多くなる傾向を示し、経度はNUとほぼ同じ130~150°Eでも南緯と北緯で地域差が認められた。シドニーにおける最大位置誤差は1988年のそれとほとんど変わらなかったものの、アブラではD.latの標準偏差以外はいずれも大きく、最大位置誤差は280mであった。また、この時の長崎におけるD.lat, Depの定誤差、標準偏差はともに安定せず、定誤差は98~113m、標準偏差は161~206mの範囲で変化し、最大位置誤差は410mにも及んだ。

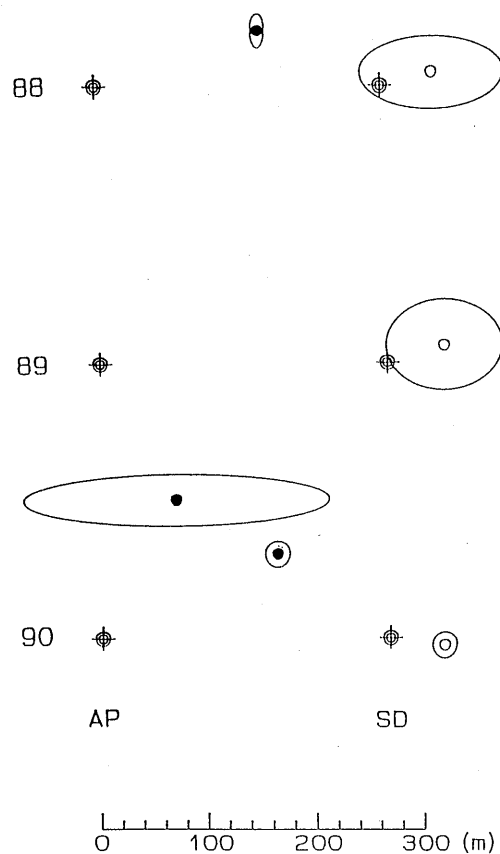
後期の測定点は、1990年のアブラとシドニーである。従って、両地では3年間連続して測定したことになる。両地での3年間の測位精度の変化について、平均位置と1 $\sigma$ の誤差楕円をFig.3・14に示した。

この期における衛星数は14~16個に増加するとともに、一部の衛星の軌道変更も実施され、3DHの割合は長崎と比べほとんど差がなくなり、アブラ、シドニーで65%前後、長崎でも64%であった。

両地における標準偏差はD.lat, Depともに12m程度でバラツキは小さく、極めて安定していた。シドニーにおけるD.latの定誤差は、 $\pm 10$ m未満であり、Depは長崎でのそれよりも10m程度大きくなったにすぎない。しかし、アブラではD.latが76.5m、Depが163mで、やや大きな値となった。練習船では海外の港に寄港する場合、当港の最新の海図を用いるが、アブラの港泊図は同じ測地系を基にした海図でありながら1989年版と1993年版では緯度、経度が異なっていた。従って、断定はできないものの、アブラの基準位置がズレていた事によると思われる。ちなみに1993年版の海図により補正を行うとD.latは2.4m、Depは47.6mになり、長崎における値とほぼ同程度になった。

### 2.3.3 確立期

1991年11月には再びSAが掛けられ、1994年現在も継続しており、今後も解除はされないと予想されている。1991年11月におけるD.lat, Depの標準偏差は約20mであり、12月に

Fig.3・14 The mean position and error ellipses of 1 $\sigma$  at Apra and Sydney for three years.

AP(●):Apra; SD(○):Sydney

⊙:observation position

は30m前後になった。Table 3・22に確立期における各年の11月、12月と1994年5月の測位精度を示した。同表に見られるように定誤差はこの間ほとんど変化なく、D.latは10m未満、Depはほぼ40~50mであった。1992年の衛星数は7月は17個、12月は19個で、3DHの割合は、7月が96%、12月は98%になった。1992年の測位精度は、一年間を通じて、1991年の12月とほぼ同じであったが、衛星数の増加により3Dでの測位の割合が増加した。1993年に入り、衛星数はさらに増加して1月に20個となり、この時から3Dが100%になった。2月には21個になって3DHが100%になり、これ以後は衛星数の増加によって、3DHでもPDOPが2の割合が増

Table 3 • 22 Variation of the accuracy in the establishment stage (unit in meter)

Year and Month	Station	D.lat		Dep		Distance	
		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
'91 11	NU	9.2	17.8	41.8	19.9	42.8	26.7
'91 12	NU	9.8	29.2	40.4	32.5	41.6	43.7
'91 12	KG	10.8	28.7	21.1	30.6	23.7	42.0
'92 11	NU	8.9	26.3	45.7	26.6	46.6	37.4
'92 12	NU	8.9	24.8	47.2	24.4	48.0	34.8
'93 11	NU	4.5	29.9	43.9	25.9	44.1	39.6
'93 12	NU	10.1	28.3	48.6	26.1	49.6	38.9
'93 12	MK	0.2	27.4	23.4	24.7	23.4	36.9
'93 12	NH	3.3	27.1	31.0	27.5	31.2	38.6
'94 5	NU	6.0	29.1	47.6	25.0	48.0	38.4

NU:Nagasaki University; KG:Kagoshima; MK:Makurazaki; NH:Naha

加した。つまり測位条件の良い衛星を選択して測位できる時間が長くなったと言える。

本システムの完成時には、6軌道に各4個の衛星を配置し、そのうちの3個は予備衛星とされていること、1991年の12月以降、測位精度に変化が見られないことを併せて考えれば、この段階ではば初期運用状態 (I O C) に入ったとも考えられる。しかし、その公式の通告は1994年に入ってからであった。衛星数はその後も増加して、4月には23個、8月には24個、12月には26個となった。しかし、1994年の2月からブロック I の3号衛星が、さらに3月からは同じく13号衛星が信号の送信を停止している。ブロック I 衛星には SA の機能がないため、残り1個のブロック I 衛星も追って送信を停止するものと考えられ、その段階で本システムの完全運用状態 (F O C) が達成されたことになるものと考えられる。

この期における海外の寄港地での測定は、1991年にホニアラ、オークランドで、1992、1993年はオークランドで行った。1991年の衛星数は16個で、ホニアラでは97%、オークランドでは92%が3 DHであった。1992年には衛星数は17~19個、1993年には19~25個に増加し、3 DHのみとなった。この期におけるホニアラとオークランドの測位精度をTable 3 • 23に示し、1991年~1993年のオークランドと長崎については平均位置と1 $\sigma$ の誤差楕円をFig. 3 • 15に示した。

1991年のホニアラ、オークランドの D.lat はほぼ-20mで、1992、1993年のオークランドの値と比べると、符号が逆であり、その値もやや大きかったものの、最大位置誤差は90mであった。1992、1993年のオークランドの D.lat は10m未満、Dep は40~50m程度、それらの標準偏差は25~35mで、長崎における値とはほぼ同程度となり、最大位置誤差は80~90m程度で符号、大きさともほぼ一定の値となった。

本システムは1994年初期運用状態に入ったことが公式に宣言され、各地ではほぼ同じ精度で測位することが可能になったものと言える。今後、測位精度が急に変化することはないも

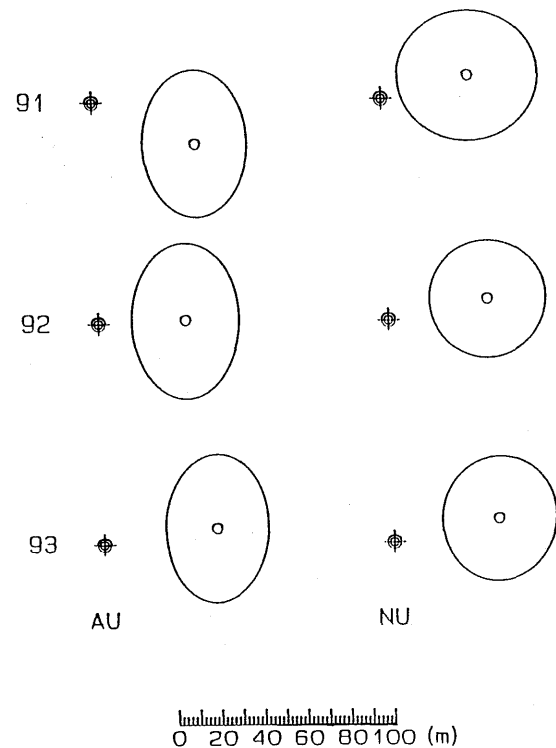


Fig.3 • 15 The mean position and error ellipses of 1 $\sigma$  at Auckland and Nagasaki for three years.

AU:Auckland; NU:Nagasaki University

⊕:observation position

のと考えられるが、本システムは米国の軍用に開発されたものであり、有事の際の測位精度の変化については疑問な点も多く、バックアップとして、常に他システムとの併用を考慮する必要がある。

## 2. 4 まとめ

G P S の定点における測位精度を把握するため、1986年以

Table 3・23 Variation of the accuracy in the establishment stage at overseas stations (unit in meter)

Year and Month	Station	D.lat		Dep		Distance	
		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
'91 11	HO	-20.1	19.7	57.5	22.1	60.9	29.6
'91 11	AU	-19.0	33.0	46.6	24.0	50.3	40.8
'92 11	AU	1.0	34.9	39.7	24.7	38.5	43.8
'93 11	AU	6.9	34.1	51.7	23.7	52.2	41.5

HO:Honiara; AU:Auckland

来その測定を続けてきた。測定開始当初は実験衛星6個のみであったため、測位可能時間は約6時間半に限られた。従って、本システムを有効に利用するためには測位可能時間を長くする必要があった。そこで1988年から高安定発振器を受信機に接続することにより、測位可能時間を約4時間延長することが出来た。これは利用者にとって、極めて有益なものであるが、コストの問題もあり、全ての船舶に装備することは考えられなかった。また本システム開発の進展状況によっては、いずれ不要になるものであり、必要度とのかねあいになる。1986年初頭のスペースシャトル「チャレンジャー号」の事故により、本システムの開発スケジュールはかなりの遅れがあると見込まれていたが、1989年6月以降、2ヵ月に1回の割合で、また1990年に入ってから、年5回のペースでブロックIIと呼ばれる新しい運用型の衛星が打ち上げられて、利用可能な衛星数は、1990年9月には14個、同年10月には15個となった。この時点での測位可能時間は、2D3と3Dで約20時間となり、高安定発振器を利用した測位はほぼ必要なくなったものと言える。

測位精度についても、本システム完成後は3DHまたは悪くても3DMで測位可能と考えられるが、測定開始当初は先にも述べたように衛星数6個のみであったため、3Dのみでは測位可能時間が極めて短くなる。そこで可能な限り本システムを利用するため、2Dでの測位精度も併せて検討した。その結果、定誤差を確定するまでには至らなかったものの、ほぼ次のような傾向が得られた。

利用可能衛星数が6~7個の間の国内における測位の平均位置は基準位置の西側15mから東側50m以内、緯度方向では南偏あるいは北偏の場合があるが、その値は3DH、2D3Hおよび3DLで10m以内、3DM、2D3Mおよび2D3Lでも20m程度の範囲内に存在した。標準偏差は、3DHではD.lat, Depともに20m未満、3DM、2D3HのD.latは50m未満、Depは3DMの60m未満と2D3Hでの80m未満を見込めばよい。最大値を示した2D3LではD.lat 30~130m, Dep 70~200mの範囲であった。従って、最大位置誤差は3DではHレベル50~90m, Mレベル60~120mおよびLレベル60~170m程度であり、Lレベルでも0.1海里未満にすぎなかった。2D3のそれはHレベルがほぼ3DMに、Mレベルが3DLに相当し、Lレベルは3DMの2倍程度で

あった。

1989年6月以降、運用型衛星が順次打ち上げられ、利用可能な衛星数は1990年には14個、同年10月には15個となった。そこで、この段階における測位精度の状況を把握するための測定を行った結果、3DH、3DMと2D3Hでデータ数の90%以上を占めた。その定誤差はD.latが10m以内、Depが40m前後で、標準偏差はいずれも20m以内であった。その後、SAが掛けられ、Depは40mとやや大きくなったものの、衛星数の増加により、高レベルでの測定割合が90%以上となったことで、標準偏差が20m未満となり、極めて安定してきた。最大位置誤差は60~65m程度で、安定性も増して測位精度は一層向上したと言えよう。

1994年に入って、GPSシステムが初期運用状態に入ったことを国防省が公式に宣言したことが報じられた。そこで、1994年4月に測定を行った結果、測位に利用した衛星数は25個で全測定が3DのHレベルであり、しかも、PDOPが2での測定が87%を占めた。その定誤差はD.latが7.2m, Depが46.5mで1990年の測位精度とほぼおなじであった。標準偏差はD.latが26.5m, Depが24.5mとやや大きくなったものの、本システムの運用状態における測位精度はほぼ固まったものと言える。

但し、GPSの運用はアメリカが行っており、システムに問題が発生した場合、いつ一般の利用者に知らせるか、あるいは保証する精度を変更することはないのかなど、いろいろな問題点に対する公式の決定はなされていない。しかし、民間利用に対するGPS受信機はすでに数多く生産され、使用されていることから、正式の運用状況になった今後も現状と大きく変更されることはないだろうと考えられる。また、これからさまざまな分野でGPSを有効利用するためにも、変更されないことが強く希望されている。

#### 第4章 GPSの開発完成による応用の実例とその有効性

本システムを民間に開放する方針が1991年米国防総省より出されて以来、日本ではカーナビゲーション用を中心にその利用について注目を浴び始めた。本システムの開発がスタートしたのは、1970年代初期の頃であるが、この間の半導体技術の急速な進展とデジタル処理技術の進歩に支えられて、

受信機の高性能化, 小型化, 低価格化が一段と進んだ。1991年中頃は, 本システムそのものが未だ運用実験途上にあり, 一般化するには多少のリスクを伴っていたが, それでも船舶, 航空機, 海洋計測機器, 測量, カーナビゲーション等の幅広い分野で商品化が進んだ。ここに来ていよいよ本システムの完成を迎え, 飛躍的な利用者拡大と市場の広がりが予想されると共に, それがさらに商品化技術開発を促すという好循環に入りつつあると見る事が出来よう。

本システムは「誰でも」「何時でも」「何処でも」「何の規制もなく」「同時に」利用できる。このような特性を有効に利用するために, 現在世界各国で様々な分野, 領域においてそれぞれ活用方法や新サービス事業などが開発されつつある。Table 4・1にその代表例を分野別に示した。

本章では, GPSを応用して, ロランCシステムの誤差の測定, 表層流の測定, 旋回圏の測定を行いGPSの有効性を確認した結果について述べる。

## 1 ロランCシステムの誤差測定への応用

第3章において, GPSの定点における測位精度が極めて優れていることを明らかにした。しかしながら, どのように優れたシステムであっても, 受信機の故障や運用システム自体に問題が生じた場合のバックアップとして他システムを併用する必要がある。種々ある他システムの中から, システムの精度, 利用者数, 利用範囲等を考慮するとロランCが最適であると考えられる。GPSの精度がよいことは開発期の定点測定の段階で明らかになったので, その時点から, GPSの全レベルについてGPS位置を基準位置として, ロランC位置の誤差について評価を行ってきた。本章では3DHを用いて評価した結果について述べるが, 開発期にあっては3DHのみでは測位可能時間が極めて短い場合もあるため参考までに2D3Hについても述べる。

### 1.1 測定方法

海上において, GPSとロランC9970チェーンの同時測定

Table 4・1 Improvement examples of every kind

① Position fixes of movement thing	
The cosmos:	Aviation:
• launching a rocket	• navigation aid
• control the position of a satellite	• approach to airport, landing lead
• landing lead	• DGPS in airport
• rendezvous in orbit	• area navigation
	• operation control of helicopter
Ship:	Fishery:
• navigation aid	• fishing (search of fish school)
• chartering control	• watch of fishing gear
• arrival, lead of alongside	• speed control
• position control	Car navigation:
• yacht race	• general car, business car, track
• salvage	• sightseeing bus
• monitor of safety in yacht harbour	
(General transportation)	(Defense, Finance, Public society)
• efficiency operation of car	• movement control
• movement, operation record	• watch of safety
	• patrol car, fire engine, ambulance car
(Railway vehicles)	(Radio broadcasting station)
• train schedule control	• operation of relay car
• transport container control	
② Position fixes at fixed station, Geodetic survey, Measurement	
• investigation and development of resources • geology/research of water resources • movement of the earth's crust • prediction of a volcanic explosion and earthquake • oceanography (tidal observation)	
• survey of contour line • detail mapping • monitoring and record	
• detail survey of the ocean • detail and efficiency agriculture	
• forest service (forest keeper, determine the point of forest fire, efficiency fire fighting) • detail map of archaeology	
③ High precision time, Time synchronism	
• international datum of time synchronism • control of digital circuit	

を行い、両者間の相対誤差を求めた。測定海域と測定時期等をTable 4・2に示した。また、ロランC 9970チェーンの局の配置をFig. 4・1に示した。使用したロランC受信機は光電製作所製 LR-717である。

GPS受信機の使用モードは、定点における測定の場合と同様に設定し、全レベルについて測定した。またGPSによる測位が可能な場合のみ、ロランCのデータの取り込みを行うようにプログラムを改良し、時間差値および緯度、経度を測定した。

## 1. 2 結果および考察

ロランCでは陸上と海上における精度に差のあることが考えられるため、実用に供するためには、海上における測位精度の評価が必要である。そこで、海上における両システムの同時測定を行い、GPS位置に対するロランC位置の相対誤差を次元別およびレベル別に評価した。

### 1. 2. 1 判定基準<sup>83)</sup>

GPS位置を基準にしてロランC位置の相対誤差を求めるに際し、いずれかの測定位置が正常でない場合のデータは除外する必要がある。

Table 4・2 Measurement stage and sea area, and number of satellites

Stage		Sea area	Loran C pair	Number of satellites
Development	1989/ 6	around Goto-nada	XY	6
Latter term of the test	1990/ 7	Eastern area of East China Sea	XY	13
Latter term of the test	1990/ 8	Eastern area of East China Sea	XY	13
Latter term of the test	1990/10 ~12	Western area of North Pacific Ocean	YZ	14~15
Latter term of the test	1991/ 7 ~12	Western area of North Pacific Ocean	YZ	15~16

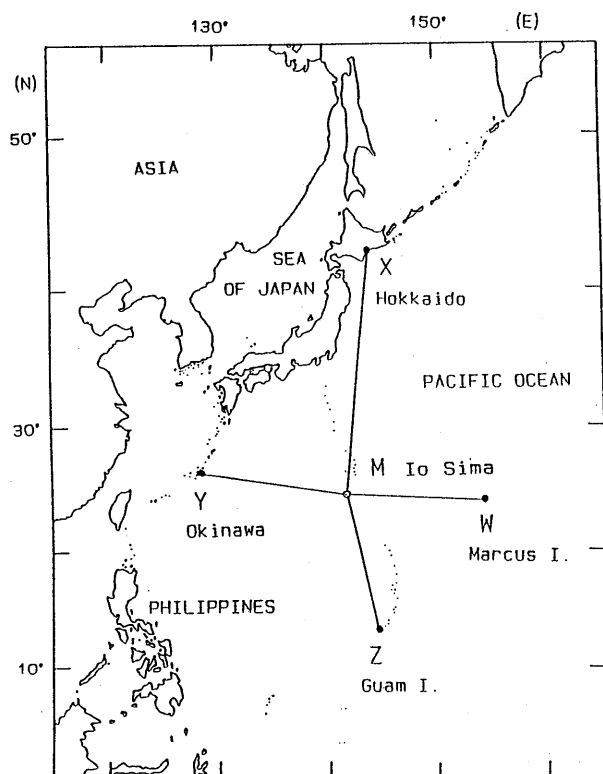


Fig.4・1 Configuration of Loran C stations, 9970 chain.

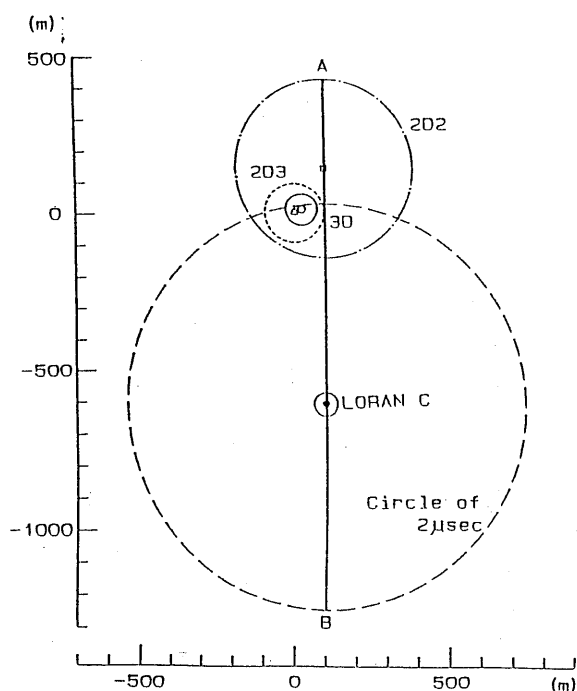


Fig.4・2 The mean position and error circles of  $1\sigma$  with GPS and Loran C at fixed station, and the circle of  $2\mu\text{sec}$  with Loran C.

○:3D; △:2D3; □:2D2; ●:Loran C

Solid line(AB):maximum relative error



五島灘周辺海域におけるロランC位置の線の方向と時間差  $1\mu\text{sec}$  に相当する幅は, Xが83~263度で0.124海里 (約230m), Yが337~157度で0.150海里 (約280m) であり, その交角は約74度である。Trimble社の10X型受信機では, それぞれ独立したロランC受信機とGPS受信機を組み合わせる船位測定を行っているが, その場合に, ロランCデータを取り込むことが出来る条件の一つとして, 測定時間差とGPS位置による推定時間差の差が $2\mu\text{sec}$ 以内であるとしている<sup>84)</sup>。従って, 本測定の場合も $2\mu\text{sec}$ を基準とした。

五島灘周辺海域での測定と同時に陸上定点におけるロランCの平均位置と $1\sigma$ の誤差円を描き, さらに時間差測定値に $2\mu\text{sec}$ の誤差がある場合の船位の誤差界を平均位置を中心にして描くと, 半径が約640mの円になる。またGPSの測定位置を次元毎に求め, それらの平均位置を中心として $1\sigma$ の誤差円を描いたものが Fig. 4・2 である。これよりロランC位置とGPS位置との相対誤差が最大になる場合を求めると約1700mとなる。これに地域差や船体の影響による誤差<sup>85~90)</sup>も考慮して, 本測定では1海里未満の相対誤差であれば, 両受信機による測位がほぼ正常に行われていたものと判断した。

### 1. 2. 2 五島灘周辺海域<sup>91)</sup>

測定は, 陸上定点での測定と同時に両システムとも同型式の受信機を用いて, 長崎大学水産学部の調査船「鶴水」により, 五島列島周辺海域を航走しながら1分間隔で行った。この間の両システムによる測定位置 (航跡) をプロットしたものが Fig. 4・3 である。

なお, GPSによる測位が可能な場合のみロランCのデータの取り込みを行うようにプログラムを改良して用いたので, Fig. 4・3 にみられるようにGPSの測位不能の場合には, 航跡のプロットが中断された。

全航程におけるロランCと3DHおよび2D3Hとの相対誤差 ( $L-3DH$ ,  $L-2D3H$ ) の D.lat (以下 Re-D.latと記す。その他についても同様に記す), Re-Dep 及び Re-Dist について, その平均値と標準偏差を Table 4・3 に示す。

Table 4・3 より3DHでの両システム間の相対誤差は  $S/E \sim 310 \pm 83\text{m}$  となる。

このようにロランC位置は南寄りに偏るが, 東西方向の偏りは小さい。標準偏差は70~90mであるが, 緯度方向のバラツキがやや大きい。

相対誤差は, 陸上の場合のそれ (Fig. 4・2) よりもかなり小さくなっている。これは, ロランCの測位誤差が海上で

小さく, 陸上で大きいことを示している。このため, ロランCでは陸上定点における測定で得られた誤差量を海上での測定値の補正量とすることはできない。

電波の伝搬経路に陸地が存在すると伝搬速度が変化し, 測位誤差が変化するロランCと異なり, GPSでは海上と陸上とで誤差がほとんど変わらないと考えられるから, 近くの陸上定点における測定値を補正すれば, 正確な位置を求められることになるが, 標準偏差に相当する誤差が含まれている。その値は3DHと2D3Hでは30~40m程度である。

同時測定を行った陸上定点での3DHとロランCの測定位置の分布を Fig. 4・4 に示した。この場合の相対誤差とロランCの実測誤差を Table 4・4 に示す。

同表より相対誤差とロランCの誤差との差は, 緯度方向が約10m, 経度方向が約30mである。この時のGPS自体の誤差の平均値は D.lat 12.4m, Dep 18.4mであるから, この値を Table 4・4 の相対誤差の値に補正すると, 3DHの Re-D.lat は約595m, Re-Dep は約94mとなる。これはロランCの誤差と5~10mの差にすぎない。但し, この補正を行うためには常に各地での測定が必要であり, さらにその測定値を送受信するための装置も必要となる。たとえこの補正を行わなくても, 両者の差は10~30mにすぎず, これはGPSの標準偏差とはほぼ同じ値である。従って, 以後は相対誤差そのものをロランCの誤差と見なして検討した。

ロランCでは送信局と船舶を結ぶ電波伝搬経路上の種々の

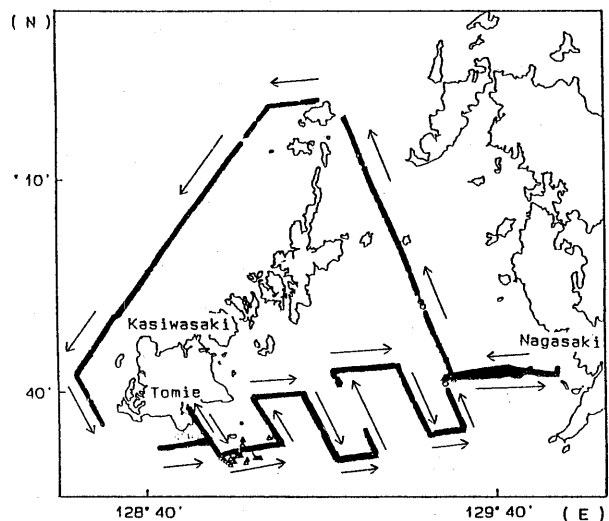


Fig. 4・3 Observation area and the wake with GPS and Loran C position.  
○:GPS; △:Loran C

Table 4・3 Relative error on the whole distance (unit in meter)

	No. of data	Re-D.lat		Re-Dep		Re-Dist	
		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
L-3DH	55	-286.3	86.3	66.7	72.2	309.5	83.2
L-2D3H	287	-270.0	237.7	-2.2	102.1	329.7	189.1

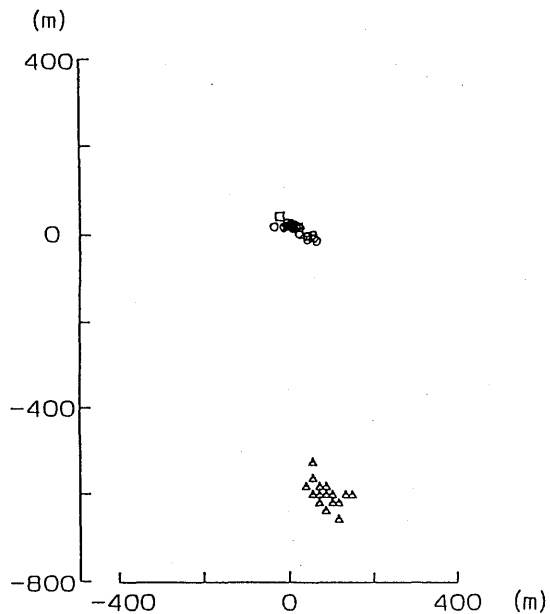


Fig.4-4 Distribution of position fixes obtained by GPS(3DH) and Loran C.

○:GPS position on June 16; □:GPS position on June 17;  
△:Loran C position; Point(0,0):observation position

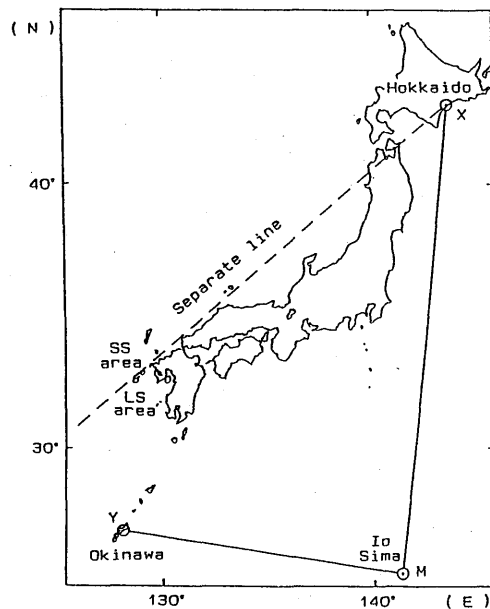


Fig.4-5 Configuration of Loran C stations(M,X,Y) and separate line.

SS area:North of the separate line;  
LS area:South of the separate line

条件によって、その信号の伝搬速度が変化するが、特に通過する陸上距離による影響が大きい。そこで測定海域をX局、Y局からの電波がともに海上を伝搬する海域（以下SS海域と記す）と、X局からは陸上、Y局からは海上を伝搬する海域（以下LS海域と記す）とに分けた。なお主局からの伝搬はX、Yに共通であるため、考慮しないものとした。ここではX局と五島列島の福江島の柏崎（32°47'N, 128°40'E）を結ぶ線（50～230度）以北をSS海域とし、それ以南をLS海域とした。これをFig.4・5に示す。SS海域のうちY局の電波が五島列島を越えて伝搬する場合があるが、海上伝搬距離に比べて極めてわずかであり、また”鶴水”の離岸距離もほぼ10海里以上を保っていたので、ここでは一応海上伝搬とみなした。以上のように区分して求めた両海域のRe-D.lat, Re-DepとRe-Distの平均値と標準偏差をTable4・5に示すとともに、分布状態をFig.4・6に示した。

3DHを基準位置とするデータ数はLS海域で19個、SS海域で29個と少ないため断定はできないが、LS海域のほうがより南に分布し、南北差は約260mである。これはXの時間差にして約1.2μsec 大きい事になる。2D3Hでも同様に

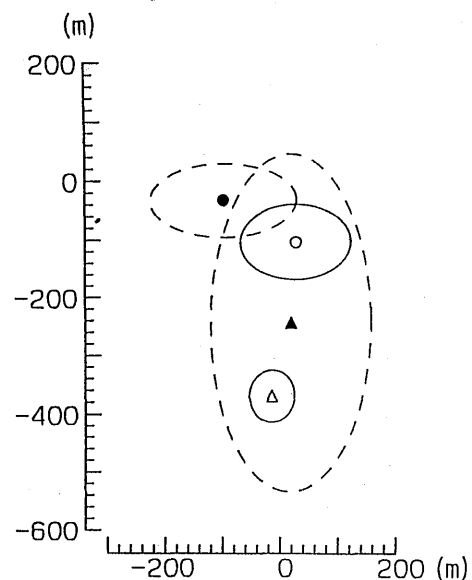


Fig.4-6 Relative error and error ellipses of 1σ at every observation area.

○:3DH(SS); ●:2D3H(SS)  
△:3DH(LS); ▲:2D3H(LS)

Table 4-4 Relative error and actual error of Loran C (unit in meter)

Table 4・5 Relative error of every observation area (unit in meter)

Area		No. of data	Re-D.lat		Re-Dep		Re-Dist	
			Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
SS	L-3DH	29	-102.9	64.8	28.6	95.5	159.6	56.1
	L-2D3H	111	-32.1	62.4	-96.5	127.3	164.2	117.9
LS	L-3DH	19	-368.7	43.9	-13.6	38.8	372.4	42.1
	L-2D3H	173	-243.7	290.2	19.1	138.5	322.0	259.0

約1.1 $\mu$ sec 大きい。これらが陸上伝搬の影響によるものと考えられる。

以上の結果、五島列島周辺海域における相対誤差は、緯度方向では南にはば100m～370m、経度方向では西へ約14m～東へ約30mの範囲であった。しかし、ロランC電波の伝搬経路が海上のみの場合と陸上を経由する場合とは差があり、X、Yともに海上伝搬の場合は、GPSとロランCによる位置は、ほぼ160m程度の差であった。

### 1. 2. 3 東シナ海東部海域<sup>92)</sup>

実用的見地からさらに測定海域を広げ長崎～沖縄間で、航走中における相対誤差を測定した。また、たまたま錨泊したので、その間の相対誤差も得られた。

測定時期はTable 4・2に示したように、衛星数が13個に増加した試験期後期であり、1990年7月14日～同15日の間、長崎大学水産学部練習船鶴洋丸で、又同年8月18日～同21日の間、同長崎丸で、3分間隔で行った。なお測位可能時間は19時間前後であった。測定海域を鶴洋丸と長崎丸の航跡について示したものがFig. 4・7である。測定は五島灘の場合と同様にロランC 9970チェーンのXとYの時間差値および緯度、経度を測定した。本海域ではX局からの電波が最も長く陸上を伝搬する。その長さは、32°N 付近までは約350海里、それ以南は徐々に増加して400～450海里程度になる。そのためX局電波の伝搬速度の遅れが全域で影響している。Y局からの電波はほぼ海上伝搬のみと考えられ、M局からの電波は九州南端の佐多岬と同局とを結ぶ線を境にして、それ以南はほぼ海上伝搬のみであるが、それ以北では九州横断の陸上伝搬が含まれる。従って、Fig. 4・7に示したように、M局と佐多岬を結ぶ線（以下境界線と記す）の北側と南側で測位誤差が変化するであろうと考えた。そこで境界線の北側と南側とに分けて前と同様に評価を行った。なお両船の航跡が異なり、特に境界線以南では東西に約40～50海里離れていたのが両海域とも別々に計算し、また、長崎丸が境界線の北側の二地点で、それぞれ約20時間と17時間錨泊したので、この間のデータは航走中とは区別して計算した。以下測定海域をTable 4・6の様に記す。計算結果をTable 4・7～4・9に示した。

#### (1) 境界線以北

Table 4・7に示したように、N-EN における測定では、

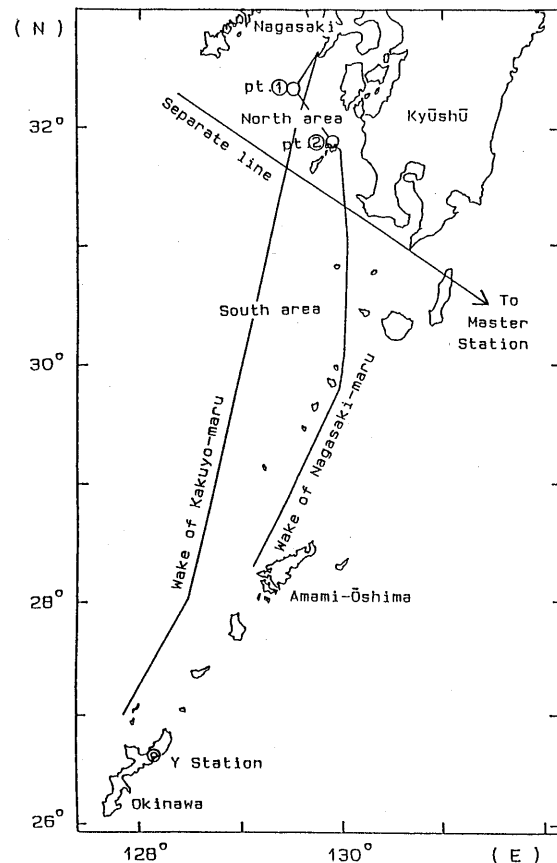


Fig.4・7 The wake of Kakuyo maru and Nagasaki maru on the observation area and the separate line.  
Pt.①, Pt.②:anchoring position

Table 4・6 Code address of observation area

Ship's Name	North of Separate line	South of Separate line
Kakuyo Maru	K-WN	K-WS
Nagasaki Maru	N-EN	N-ES

Table 4・7 Relative error at north of the separate line (unit in meter)

Area		No. of  data	Re-D.lat		Re-Dep		Re-Dist	
			Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
K-WN	L-3DH	43	-664.9	96.6	234.9	68.0	711.7	104.8
	L-2D3H	34	-596.4	69.7	185.5	205.4	660.0	88.1
<hr/>								
N-EN	L-3DH	48	-727.2	87.4	293.3	64.7	788.9	100.9
	L-2D3H	7	-809.1	125.1	276.2	29.8	860.0	125.4

Table 4・8 Relative error at south of the separate line (unit in meter)

Area		No. of  data	Re-D.lat		Re-Dep		Re-Dist	
			Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
K-WS	L-3DH	173	-864.4	115.8	690.9	162.9	1114.7	146.5
	L-2D3H	86	-864.5	168.4	734.8	226.4	1148.9	212.7
<hr/>								
N-ES	L-3DH	98	-934.1	125.8	492.6	109.3	1061.3	143.8
	L-2D3H	48	-770.0	153.9	469.7	76.4	905.0	161.7

Table 4・9 Relative error for anchoring (unit in meter)

Position		No. of data	Re-D.lat		Re-Dep		Re-Dist	
			Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
Point ①	L-3DH	121	-675.8	41.5	289.4	44.0	740.5	48.6
	L-2D3H	103	-648.0	42.0	244.0	37.8	698.2	45.8
Point ②	L-3DH	99	-686.6	93.9	313.9	58.7	757.8	106.3
	L-2D3H	75	-631.7	66.4	306.4	43.9	705.0	70.7

基準位置からの Re-D.lat -725~-810m, その標準偏差は 3 DHで87mであった。Re-Dep の平均値は275~300mで, その標準偏差は約65mであった。従ってこの海域での最大相対誤差 (平均偏位+標準偏差) は900~1000mとなる。

K-WN では, Re-D.lat の平均値は-600~-670m, その標準偏差は100m以内であった。Re-Dep の平均値は180~235mで, その標準偏差は 3 DHでは N-ENの場合とほぼ同程度であった。従ってこの場合の最大相対誤差は750~800mとなる。

この海域における両船での測定結果, 3 DHではほぼ同程度であった。従って, この海域における最大相対誤差は800~900mと言えよう。

## (2) 境界線以南

Table 4・8に示したように, N-ES における測定では, Re-D.lat の平均値は-770~-935mとやや大きくなり, 特に 3 DHでは N-EN の場合よりも約200m大きくなった。Re-Dep の平均値は470~490mで, これも N-EN の値に比べ150~200m大きかった。標準偏差はRe-D.lat, Re-Dep ともに80~155mであった。従って, この海域での最大相対誤差は1000~1200mとなり, 境界線以北の海域よりやや大きな相対誤差となるが, それでも0.7海里程度であった。

K-WS の測定では, Re-D.lat の平均値は境界線以北の場合よりも200~270m大きくなった。特に Re-Dep のそれは以北のそれよりも450~540m大きくなり, 東西方向の相対誤差が増大した。標準偏差は 3 DHの Re-Dep と 2 D 3 Hの Re-D.lat, Re-Distで以北のそれよりも100m程度大きかっ

た。従ってこの場合の最大相対誤差は1250～1350mとなる。

以上のように、本海域では境界線以北の場合と比べ N-ES で Re-D.lat, Re-Dep とともに約200m (1μsec), K-WS では Re-D.lat が約200m (1μsec), Re-Dep が約450m (2μsec) 大きくなった。

本海域におけるXの位置の線は70°～80°方向で、主に緯度の誤差に関係し、Yの位置の線は160°～170°方向で、経度の誤差に関係する。また、測定時間差の増加により、Xの位置の線は南へ、Yの位置の線は東へ移動する。従って、Re-D.lat の南への誤差と Re-Dep の東への誤差が大きくなるのは、本海域ではX、Yともに測定時間差が大きくなる場合である。

ロランCの時間差値は次式によって示される。

$$T = T_S - T_M + \delta + \beta$$

ただし T : 計算時間差値

$T_S$  : 従局から測定点までの伝搬時間

$T_M$  : 主局から測定点までの伝搬時間

$\delta$  : コーディングディレイ

$\beta$  : 伝搬時間で表した基線長

従って、従局からの伝搬時間が大きくなるか、主局からの伝搬時間が小さくならなければならない。すなわち、境界線以南で Re-D.lat の南への誤差が増大する主な原因は、Xの陸上伝搬距離が増加することにより伝搬時間が大きくなるためと考える。また、Re-Dep の東への誤差の増大については、Y局と主局からの電波はいずれもほぼ海上伝搬のみであり、距離の近いY局からの伝搬時間が大きくなったためとは考えられない。測定点までの距離は主局からが730～780海里なのに対し、Y局からは約320海里から40海里まで徐々に近くなっている。従って、断定はできないが、LF帯電波の伝搬に影響を与える大気屈折率が、温度、湿度、大気圧等の気象条件により変化し、その値が洋上と陸岸近くでは異なることなどの理由で、海上伝搬速度が、位置の線算出に使用される値 (299.6929m/μsec) よりも速くなり、海上伝搬距離が長い主局からの伝搬時間が小さくなったため、測定時間差値が大きくなったのではないかと考えられる。さらに、位置の線の交角の関係からXの時間差が増加すればYの時間差が一定でもその船位は東偏する。

また、本海域において、長崎丸は陸岸に沿って航走し、鶴洋丸はその西方約40～50海里沖を航走した。Re-D.latの平均値は3DHでは K-WS の方が小さく、2D3Hでは N-ES の方が小さくなったが、その差は100m未満であり、標準偏差はほぼ同程度であった。しかし、Re-Depの平均値は K-WS の方が200～270m大きくなり、標準偏差は N-ES で 100m前後であるのに対し、K-WS では200m前後と大きくなった。東西方向の位置の変化が主にYの位置の線に左右されることは既に述べたが、本海域では 1μsec 当りの位置の線の幅はX、Yともに K-WS の方が N-ES よりも広く、その違いはXでは10m程度であるが、Yでは約55mにおよぶ。従って、同じ時間差の誤差に対する位置のバラツキは西側の方が大きくなるのがその一因と考えられる。

### (3) 錨泊中

長崎丸は測定中2回錨泊した。Fig. 4・7 に示したように、この時の錨泊地点である Point ①と②はいずれも境界線以北であるが Point ②は①より南東へ約35海里離れていた。Table 4・9 に示した様に、両点のRe-D.lat の平均値はほぼ同程度であったが、Re-Dep のそれは Point ②の方が20～60m大きくなった。しかし、Re-D.lat の標準偏差は Point ②の方が約2倍の大きさであったのに対し、Re-Dep のそれはほぼ同じであった。全体的には Point ②の方が平均値、標準偏差ともにやや大きくなった。これは、Point ②では荒天避難のため甌島の岸近くに錨泊したため、陸上伝搬により遅れた電波が回復しないまま受信されたこと、さらに荒天のため船の振れ回りが大きかったことなどが影響したものと考えられる。

これらの値を境界線以北の両船の航走中のものと比べると、Point①の平均値はN-ENの場合より小さく、K-WN の場合より大きいが標準偏差は両船のいずれのものより小さい。Point ②の値は航走中の両者とほぼ同程度である。従って、相対誤差を検討する場合、航走中と錨泊中の差は標準偏差以下であり、無視できると言えよう。

### 1. 2. 4 北太平洋西部海域<sup>93,94)</sup>

ロランC局からの電波の伝搬経路がすべて海上伝搬である北太平洋西部海域において、両システムの同時測定を行い、それらの相対誤差を求めるとともにロランCの利用範囲の限界について検討した。

測定は、1990年10月～12月および1991年7月～12月の間の4航海にわたって長崎大学水産学部練習船鶴洋丸で行った。この時期はGPSの試験期後期であり、1990年には衛星数が13～14個で、測位可能時間は19時間前後、1991年では衛星数が15～16個に増え、測位可能時間は20時間前後であった。各航海を往路と復路に分けてルート1～8とし、それぞれの時期をTable 4・10 に示す。

本海域ではロランC9970チェーンの位置の線の最適組み合わせはY局とZ局のペアであるから、YとZの時間差値および緯度、経度を3分間隔で測定した。本海域では、主局、従局からの信号はいずれも海上伝搬のみであるから、GPS位置を基準として求めたロランC位置の相対誤差が航路によって変化するのは、測定地点と両従局との位置関係によるもの

Table 4・10 Routes and period of the observation

Route	Year	Date
R-1	1990	26th Oct.～ 30th Oct.
R-2	1990	11th Dec.～ 15th Dec.
R-3	1991	6th Jul.～ 10th Jul.
R-4	1991	20th Jul.～ 26th Jul.
R-5	1991	26th Aug.～ 3rd Sep.
R-6	1991	7th Sep.～ 11th Sep.
R-7	1991	26th Oct.～ 30th Oct.
R-8	1991	12th Dec.～ 16th Dec.

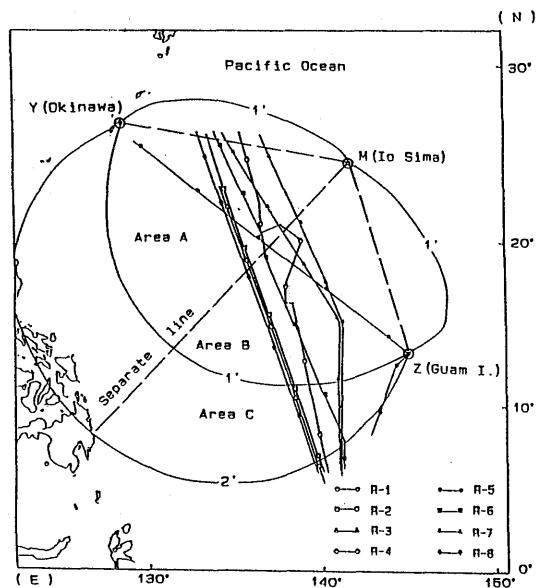


Fig.4・8 The wake on the observation area and the separate line.

The routes of figure are shown in Table 4・10.

Arabic numerals indicate the 95% radial error(unit in mile)

と考え、各従局からの距離と方位を考慮して相対誤差について検討した。すなわち、ロラン位置の線2本を用いて船位を決定した場合に、時間差の中央誤差を $\pm 1\mu\text{sec}$ とすれば半径誤差 $r$ が1および2海里の等精度曲線は、Fig.4・8のようになる。そこで、 $r$ が1海里となる曲線の範囲内でY局とZ局を結んだ線の間中点と主局(M局)を結んだ線のY局側(以下A区域と記す)とZ局側(以下B区域と記す)とに分け、さらに $r$ が1および2海里となる曲線で囲まれる海域(以下C区域と記す)とに分けて相対誤差をGPS測位の次元別およびレベル別に計算した。

各航路における除外データ数、棄却データ数および使用データ数とその割合をTable 4・11に示す。Re-D.lat, Re-Dep, および Re-Dist について、それぞれの平均値と標準偏差をA～Cの区域別にまとめたものがTable 4・12～4・14である。但し、そのデータ数が10%以下のものについては省略した。

各航路の3DHと2D3HにおけるRe-D.latとRe-Depの平均値による位置(以下平均位置と記す)をFig.4・9～4・11に示した。

(1) A区域

Table 4・11 The number of data and the ratio of used data

Area	Route	Number of data				Percentage of used data (%)
		Total	Eliminated	Rejected	Used	
A	R-1	329	68	9	252	76.6
	R-2	706	0	18	688	97.5
	R-3	408	0	17	391	95.8
	R-4	598	0	23	575	96.2
	R-5	705	80	28	597	84.7
	R-6	592	0	12	580	98.0
	R-7	372	0	11	361	97.0
	R-8	600	0	9	591	98.5
B	R-1	555	53	11	491	88.5
	R-2	571	508	0	63	11.0
	R-3	757	0	30	727	96.0
	R-4	1087	121	22	944	86.8
	R-5	707	0	17	690	97.6
	R-6	653	256	13	384	58.8
	R-7	779	0	23	756	97.0
	R-8	533	0	2	531	99.6
C	R-1	416	101	11	304	73.1
	R-2	395	376	0	19	4.8
	R-3	341	0	12	329	96.5
	R-4	264	22	3	239	90.5
	R-5	237	27	4	206	86.9
	R-6	310	245	1	64	26.1
	R-7	358	126	3	229	64.0
	R-8	369	287	1	81	22.0

Table 4・12 The accuracy of each route in area A (unit in meter)

Route	Dimension and Level	No. of Data	Percentage (%)	D.lat		Dep		Distance	
				Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
R-1	3DH	115	35.0	4.5	39.1	-69.8	25.6	69.9	46.8
	2D3H	103	31.3	10.2	52.2	-56.1	29.0	57.0	59.7
R-2	3DH	492	69.7	-35.4	47.5	-57.1	30.4	67.2	56.4
	2D3H	148	21.0	-34.6	53.4	-58.5	30.0	68.0	61.3
R-3	3DH	283	68.9	42.2	38.0	-85.9	27.0	95.7	46.6
	2D3H	78	19.1	55.1	49.3	-87.1	32.8	103.1	59.2
R-4	3DH	392	65.6	0.8	41.6	-65.8	24.1	65.8	48.0
	2D3H	134	22.4	25.7	50.2	-67.8	23.0	72.5	55.2
R-5	3DH	416	59.0	23.0	81.8	-70.2	61.4	73.9	102.3
	2D3H	123	17.4	23.6	83.8	-71.1	62.8	74.9	104.7
R-6	3DH	441	74.5	11.7	50.5	-59.0	36.2	60.1	62.1
	2D3H	118	19.9	7.0	46.5	-44.9	37.8	45.4	60.0
R-7	3DH	293	78.8	51.1	35.6	-83.2	30.0	97.6	46.5
	2D3H	47	12.6	66.0	40.8	-80.9	19.7	104.4	45.3
R-8	3DH	444	74.0	159.5	261.3	-474.0	109.5	500.1	283.3
	2D3H	101	16.8	86.9	222.9	-442.8	96.9	451.3	243.1

Table 4・13 The accuracy of each route in area B (unit in meter)

Route	Dimension and Level	No. of Data	Percentage (%)	D.lat		Dep		Distance	
				Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
R-1	3DH	344	62.0	14.6	70.2	-108.6	56.8	109.5	90.3
	2D3H	94	16.9	19.4	64.5	-89.3	57.7	91.3	86.5
R-3	3DH	580	76.6	16.5	57.6	-113.4	44.4	114.5	72.8
	2D3H	124	16.4	25.1	45.3	-110.9	33.2	113.7	56.2
R-4	3DH	672	61.8	-19.9	37.2	-108.4	34.2	110.2	50.5
	2D3H	215	19.8	-29.3	45.5	-114.5	39.4	118.2	60.2
R-5	3DH	536	75.8	26.8	62.4	-124.6	74.7	127.4	97.4
	2D3H	108	15.3	26.4	40.3	-112.2	53.3	115.2	66.8
R-6	3DH	327	50.1	-27.9	87.1	-103.5	93.2	107.2	127.6
R-7	3DH	639	82.0	30.1	47.2	-103.1	37.1	107.4	60.1
R-8	3DH	468	87.8	558.4	76.5	-626.7	53.2	839.5	93.2

Table 4・11 に示したように、R-1 と R-5 に除外データが10~20%程度ある外は、解析に使用したデータ数は95%以上であったが、M, Lレベルのデータはどの航路においても10%に満たなかった。R-1の除外データには、M, Y局から近い海域で昼間にもかかわらず、Y局の信号が追尾不能になる場合がみられた。また、R-5で、Y局付近ではZ局信号にレーンスリップが生じていた。この海域はZ局よ

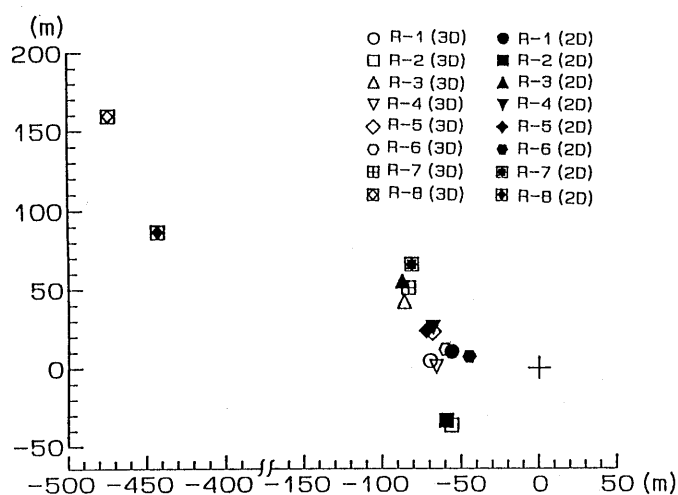
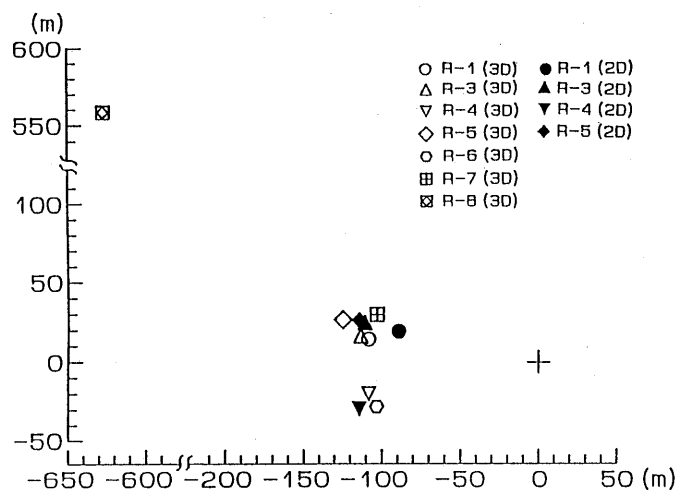
り約1000海里と遠いため、受信信号が弱くてレーンスリップが生じたものと思われる。

Fig. 4・9 に示したように、平均位置は全て基準位置から西偏していたが、Re-DistはR-8を除けば、いずれも45~105mであった。この区域での最大相対誤差は、R-8を除くすれば、0.1海里以下にすぎなかった。

## (2) B区域

**Table 4 • 14** The accuracy of each route in area C (unit in meter)

Route	Dimension and Level	No. of Data	Percentage (%)	D.lat		Dep		Distance	
				Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
R-1	3DH	217	52.2	121.3	277.0	-146.2	155.0	190.0	317.4
R-3	3DH	253	74.2	89.0	480.0	-149.8	172.5	174.3	510.0
	2D3H	58	17.0	179.2	489.0	-95.0	181.1	202.8	521.5
R-4	3DH	171	64.8	33.8	214.6	-138.5	128.1	142.5	249.9
	2D3H	61	23.1	76.5	201.2	-111.0	111.6	134.8	230.1
R-5	3DH	200	84.4	204.1	391.5	-216.7	68.1	197.7	397.4
R-6	3DH	62	20.0	-100.4	870.9	-286.6	452.4	303.7	981.4
R-7	3DH	169	47.2	46.8	382.8	-195.0	187.2	200.6	426.1
R-8	3DH	81	22.0	864.7	676.3	80.1	363.3	868.4	767.6

**Fig. 4 • 9** The relative error between position fixes obtained by Loran C and the high level of GPS in area A. 3D:three-dimensional positioning; 2D:two-dimensional positioning; +:GPS position**Fig. 4 • 10** The relative error between position fixes obtained by Loran C and the high level of GPS in area B. 3D:three-dimensional positioning; 2D:two-dimensional positioning; +:GPS position



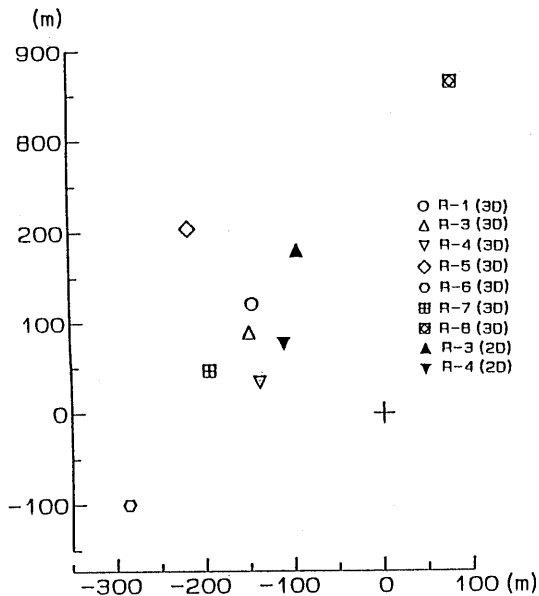


Fig.4・11 The relative error between position fixes obtained by Loran C and the high level of GPS in area C.  
3D:three-dimensional positioning; 2D:two-dimensional positioning; +:GPS position

この区域では、A区域より除外データが多く、特にR-2では、全データの11%しか利用できなかった。また、除外データは、R-2, 4, 6のように復路で多く発生していた。いずれもY局の信号にレーンスリップや信号が正常に捕捉されていないと思われる状態が多くみられた。また、R-8で除外データが極めて少ないのは、測定データからでは明かなレーンスリップとは判断できなかったためであるが、解析の結果 Table 4・13のように平均値が他と比べて非常に大きくなった。

平均位置は、Fig.4・10に示した様にA区域と同様、すべて西偏していた。そのRe-DistはA区域の場合よりやや大きく、R-8で840m、その他は90~130mであった。理論的には、A区域と同精度の海域であるが、A区域では、各航路は始点と終点がM局からはほぼ等距離で、M局-Y局の基線を横切っているのに対し、B区域の各航路は始点または終点の一方が $r=1$ 海里の等精度曲線と交わる点であり、Y局からの距離は1000海里を越える。すなわち、その付近のレーン幅は拡大し、さらに位置の線(LOP)の交角は小さくなる。これらが誤差量の増大した一因と考えられる。しかし、最大相対誤差は0.5海里以下にすぎず理論値を充分満足する値であった。

### (3) C区域

この区域の各航路は、 $11^{\circ}30'N \sim 8^{\circ}N$ の範囲であり、Y局より約1000~1200海里、M局より約800~1000海里である。従って、A, B両区域に比べて信号の捕捉や追尾が困難となり、除外データが非常に多かった。

Fig.4・11に示したように、A, B区域に比べRe-Distが増大し、ことにR-8は北方に870m、R-6では西南西に300mと大きく偏し、その他のルートも130~200mであった。しかし、最大相対誤差は、0.2~0.9海里程度を見込めば

よく、測定不能の場合が多い海域ではあるが、受信状態が良好ならば、理論値は1~2海里の範囲であるものの1海里以下の位置が得られる。

各局の信号の受信強度を測定していないので断定はできないが、A, B区域と比較してかなり受信状態が悪かったようである。ロランCの地表波の場合、到達距離は昼間で約1200海里程度で、日没時および夜間は若干減少するといわれており、赤道に近く雑音レベルの高いこの海域では、Y局から約1000~1200海里が利用範囲の限界付近とみるべきで、誤差が急激に変化することを考慮して利用すべきである。

以上のように北太平洋西部海域においては、同じ等精度曲線の範囲内でもA, B両海域で差が生じ、B海域ではA海域の約1~1.5倍の値となったのは、船から主従局までの距離が異なり、そのためレーン幅の変化のみならず、遠い方の従局信号の信号強度の低下も平均値とバラツキの両者に影響を及ぼすためである。また、C海域では、遠い方の従局信号のS/N比の低下に伴うレーンスリップがしばしば発生することに留意すべきである。その判別には、短い間隔の測定による連続的なプロットが有効である。

### 1.3 まとめ

ロランCでは電波の伝搬経路に陸地が存在すると伝搬速度が遅くなり、時間差測定値に影響する。そのため測位誤差も変化するが、誤差の量および方向は、どの局からの伝搬経路が陸上になるか、またその距離がどの程度であるかなどによって異なるので、陸上定点で得られた誤差量を海上での測定値の補正量とすることはできない。従って広範囲にわたる評価が必要である。まず、五島灘においてX局、Y局からの電波がともに海上を伝搬する海域と、X局からは陸上、Y局からは海上を伝搬する海域とに分けて評価した結果、前者の海域では南に約160m、後者の海域では同じく南に約370mの相対誤差であった。

次いで、東シナ海東部海域の長崎~沖縄間における相対誤差を求めた。この海域における相対誤差は800~900mの範囲となり、境界線以南の海域では約1300mとなった。

さらに北太平洋西部海域におけるY局とZ局の相対誤差を求めた。この海域は全海域が海上伝搬のみの海域であるから、相対誤差の変化は、測定地点とロランC局との距離の遠近や位置の線の交角の大小など、幾何学的な位置関係によるものと考えられる。従って、同海域を3海域に分けて相対誤差を求めた。その結果、半径誤差が1海里以内の2海域では、相対誤差は最大でも0.5海里以下にすぎず、理論値を充分満足する値であった。残りの海域では、Y局から約1000~1200海里、M局からも約800~1000海里と遠いため、信号の捕捉や追尾が困難な場合が多く、利用範囲の限界付近とみるべきであるが、受信状態が良好な場合には、理論値は1~2海里の範囲であるものの、1海里以下の位置が得られる。

以上のように、極めて高精度で測位可能なGPSを利用して、GPSとロランCの相対誤差を広範囲にわたって求め、これまで精度の面でやや不確定であった洋上におけるロランCの誤差量を、ほぼ正確に把握できた。これによって、パッ

クアップシステムとしてのロランCの信頼性を高め、また、主としてロランCを利用している小型漁船や近海を航行する船舶の運航上、その安全性や経済性を高めることができる。これはGPSでの高精度な測位が可能となったことによるものであり、その有効性を示す一例と言える。

## 2 表層流の測定への応用<sup>95,96)</sup>

日本近海における漁海況情報は、各海区水産研究所、水産試験所の調査船や漁船、航空機その他、気象庁や海上保安庁などから送られる観測データや漁船の操業状況などをもとに解析され、有効に利用されている<sup>97-100)</sup>。漁船の操業に有用な資料は水温、塩分濃度、透明度等種々考えられるが、その中でも海流は重要な要素の一つである。海流の測定は、係留ブイ・システムを利用して定点で水温や流速などの時間的変化を追う試みがなされるようになって来たが、依然として主要な資料は観測船を用いて集められている。また今後重要性を増すと考えられる人工衛星を用いての宇宙からの観測も、まだほんの限られた要素にしか適用されていない<sup>101-104)</sup>。従って、大洋を航走中の船舶や漁船が操業の合間に簡易な方法により概略の海流を把握できれば、その資料はこれまでの数倍もの量となり、世界の海流の動向をより詳しく把握でき、海洋観測や漁業情報への有効な資料になると考える。

現在、長崎大学水産学部練習船鶴洋丸は超音波式潮流計を使用して海潮流の流向・流速を測定し、旋網操業に有効に利用している。また海潮流のデータは操業には不可欠な要素である。この超音波式潮流計は水深が浅い場合（約600mまで）は対地の海潮流を表示するが、水深がそれよりも深くなると対水測定となり、表層流を基準として任意に設定した3層の潮流差を海潮流として表示する。従って水深が600m以深の場合においては、表示されている各層の値は真の海潮流ではない。旋網操業においては、表層に対する各層の流向、流速が分かれば、それらによる網成りも予測できるため、操業には大きな支障はないと考えられるが、本章では、GPSで高精度な測位ができることを利用して表層流の測定を試みた。

GPS船位を基準として、レーダ・ブイを追跡することにより得られる表層流を電流速計による測定結果と比較し

た。その結果、流向はほぼ一致し、流速は0.1ノット前後の差で測定できることを確認した。さらに大洋におけるブイ追跡による表層流を求め、GPS位置と潮流計の測定値を用いてベクトル解析により求まる表層流と比較検討した。その結果、これまでのようにブイ追跡方法によらず、表層流を求められることが確認できた。

### 2.1 測定方法

#### 2.1.1 レーダブイ追跡と電流速速計

測定は1991年6月27日長崎県野母崎の南方海域（橘湾の湾口部付近）で、長崎大学水産学部調査船鶴水を使用して行った。測定海域をFig.5・1に示す。

なお本測定海域の潮流は早崎瀬戸のそれが大きく影響すると考えられるので、潮汐表により同瀬戸の潮時を調べ、流向がほぼ一定であるような時間帯に行った。早崎瀬戸の潮流をTable 5・1に示す。

船位の測定にはGPS受信機（JLR-4000）を使用した。潮流は、（株）光電製作所製のレーダ・ブイ（RB-830型）を、レーダ・ブイ受信装置（RB-825型）と接続した鶴水のレーダ（古野電気（株）製FR-8100DA型）で追跡して測定した。

レーダ・ブイは、アンテナ部分のみを空中に出し、発信部は直径13cmで、水面下約1m内にあって漂流するので表層流のみによって移動するものとした。まず、ブイの測定を開始する前に鶴水を船首尾錨で固定し、その時の流向・流速を（株）東邦電探製電流速速計（CM-2S型）で測定した。その後、鶴水を漂流させてブイを投入し、GPSにより1分間隔で測位しつつ、ブイの方位と距離を10分間隔で測定し、さらに、測定終了直後に再び錨泊して電流速速計で流向・流速を測定した。本流速計は0.01m/s（0.02ノット）から流向を指示し、測定可能な最大流速は1.10m/s（2.14ノット）である。

#### 2.1.2 コーナーレフレクタ追跡

大洋において簡易に海流を測定するための基礎実験として、漂流物の追跡による表層流の測定を試みた。

測定は1990～1992年の間、鶴洋丸の遠洋航海における旋網漁業実習中に実施した。測定海域と測定点を年度別に示したものがFig.5・2である。超音波式潮流計（古野電気（株）製カラー潮流観測装置CI-30型）は表層、および旋網操業に利用するための20、70、120mの3層に設定して、それ

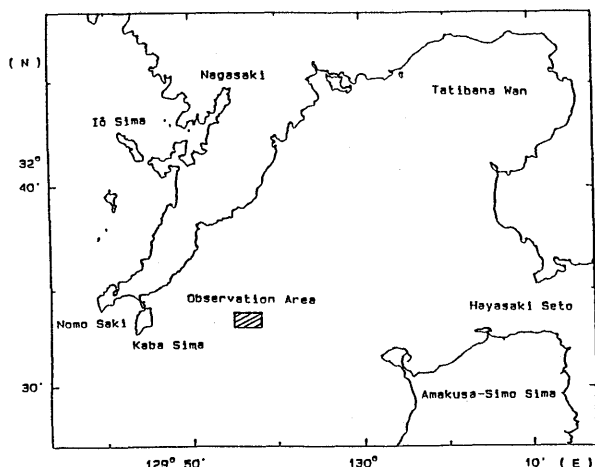


Fig.5・1 Observation area.

Table 5・1 Tidal stream of Hayasaki Seto (June 27,1991)

Hayasaki Seto	latitude 32° 34' N		longitude 130° 10' E	
	+ : toward East		- : toward West	
	Slack		Maximum	
	h	m	h	m kn
	02	42	05	43 +4.3
	08	52	12	06 -5.9
	15	05	18	19 +5.4
	21	42		

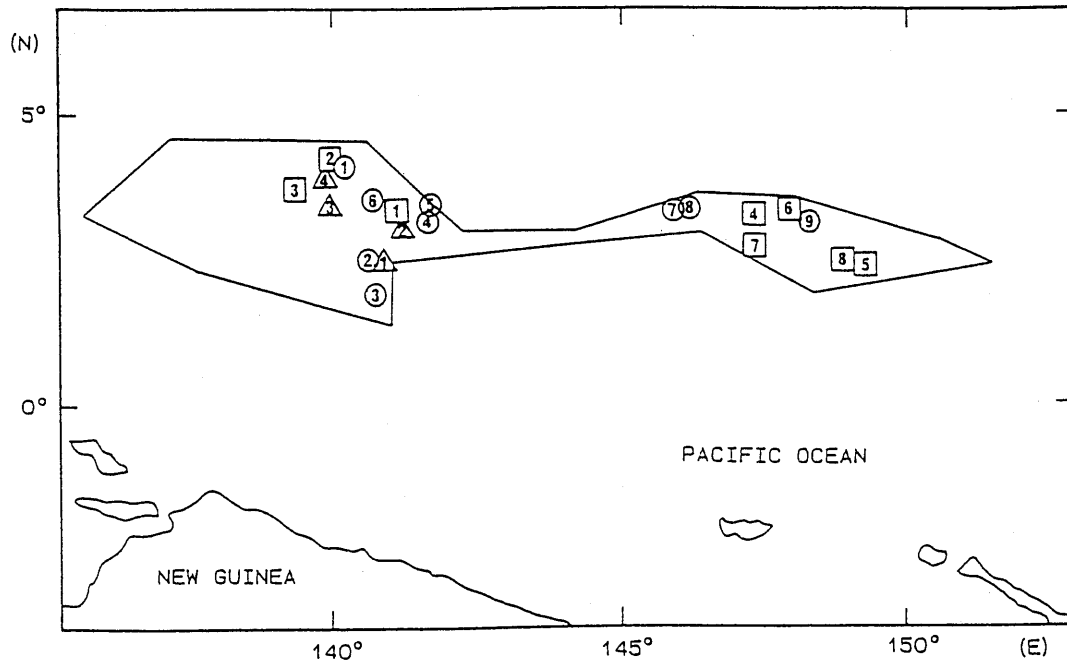


Fig.5・2 Permission sea area for training of fishery and observation position.

○:1990; □:1991; △:1992

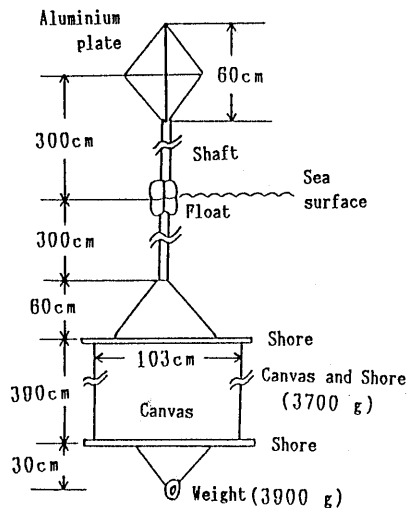


Fig.5・3 Components of Corner Reflector.

その流向, 流速をGPS位置と同時に自動記録した。また表層流を測定するため, Fig. 5・3に示すコーナレフレクタ (以下レフレクタと記す) を作成した。すなわち, 長さ3mの支柱と頂部にあたる風圧で流されるのを防ぐため, 支柱の下端に帆布と重錘を付けて直立性を保つとともにシーアンカーの機能を持たせた。レーダ (古野電気 (株) 製, FR-2030 S型) でレフレクタの方位・距離を測定し, 同時にGPS位置と各層の流向, 流速を測定した。

### 2. 1. 3 超音波式潮流計

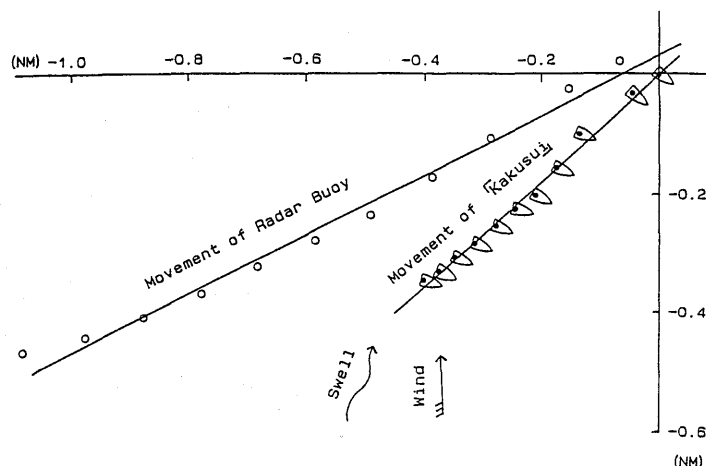
測定は先のレフレクタ追跡時にGPSにより同時刻の船の対地の移動方向と速度を求め, さらに同時に求めた超音波式潮流計による船の対水のそれら (5分間の平均値) より, ベクトル解析 (対地-対水=海流) を行って, 計算による表層流 (表層流2と記す) の流向と流速を求めた。

Table 5・2 Ship's position, bearing and distance of Radar Buoy

Time	Ship's Position		Radar Buoy		radar range	remarks
	latitude	longitude	bearing	distance		
12:22	32° 33.863' N	129° 54.062' E				set the bouy
12:50	33.616	53.829	286.1°	0.069	0.25(NM)	started the observation
13:00	33.581	53.777	273.9	0.109		
13:10	33.516	53.666	267.7	0.150		
13:20	33.461	53.622	265.9	0.212	0.50	
13:30	33.414	53.577	263.9	0.281		
13:40	33.389	53.537	261.4	0.341		
13:50	33.362	53.496	260.7	0.407		
14:00	33.333	53.452	259.8	0.467		
14:10	33.310	53.412	259.5	0.535	0.75	
14:20	33.286	53.380	259.6	0.607		
14:30	33.270	53.349	260.5	0.691		finished the observation
14:39	33.102	52.459				took in the bouy

**Table 5・3** Variation of the position of ship and buoy (unit in mile)

Time	Ship		Buoy	
	D.lat	Dep	D.lat	Dep
12:50	datum point		+0.019	-0.066
13:00	-0.035	-0.044	-0.028	-0.153
13:10	-0.100	-0.137	-0.106	-0.287
13:20	-0.155	-0.174	-0.170	-0.385
13:30	-0.202	-0.212	-0.232	-0.491
13:40	-0.227	-0.246	-0.278	-0.583
13:50	-0.254	-0.281	-0.320	-0.683
14:00	-0.283	-0.318	-0.366	-0.778
14:10	-0.306	-0.351	-0.403	-0.877
14:20	-0.330	-0.378	-0.440	-0.975
14:30	-0.346	-0.405	-0.460	-1.087

**Fig.5・4** Displacement of ship and buoy from the datum point and regression line.

## 2. 2 結果および考察

### 2. 2. 1 レーダブイ追跡と電流速速計

船の位置およびレーダ・ブイの相対方位・相対距離を測定した結果をTable 5・2に示した。ブイ投入時の位置とブイ収納時の位置よりこの間のブイの流れた方向と平均の速さは239度方向へ0.657ノットであった。

測定開始の12時50分の船位を基準点として、その後の船位とブイの位置の変化を南北 (D.lat), 東西 (Dep) に分解してTable 5・3に示した。

また、それらをプロットしたものがFig.5・4である。同図における直線はそれらの回帰直線で、それぞれ、

$$Y=0.00080+0.88256X \text{ (鶴水)}$$

$$Y=0.02855+0.48674X \text{ (ブイ)}$$

であった。

これにより直線の傾きを求めると48.6度(鶴水)と64.0度(ブイ)になる。つまり表層流は244.0度方向へ、鶴水は228.6度方向へ流れていたことになる。またTable 5・3のD.lat と Dep の変化より移動速度を求めると、ブイは0.677ノット、鶴水は0.320ノットであった。なお、この間、鶴水の船首方向はほぼ105~115度で、階級2程度の南南西のうねりと約5 m/sec の南風を右舷正横付近から受けていた。また、ブイの10分間毎の位置の変化から、その間に流れた方向と速さを求めたものをTable 5・4に示した。

同表より、測定中はほぼ240~250度方向へ0.6~0.7ノットで流れており、それらと回帰直線より求めた流向とTable 5・3より算出した流速とはほぼ一致した。なお、測定が終了する頃に流向が西方へやや大きく変化し、早崎瀬戸の転流が始まったものと考えられる。また、これらの解析結果と比較検討するために測定開始前と終了後に電流速速計で流向・流速を測定し、その平均値を求めた。その際鶴水の船体(船尾喫水2.2m)の影響による流向・流速の乱れを避けるため電流速速計は4mの深さに垂下した。測定結果をTable 5・5に示す。

本流速計による流速は、

$$\text{流速}=0.1373N+0.0097 \text{ (m/sec)}$$

但し、Nは毎秒における流速計回転翼の回転数

**Table 5・4** Drifting direction and velocity of Radar Buoy

Time	D.lat	Dep	Direction	Velocity
12:50~13:00	-0.047	-0.087	241.6°	0.594kt
13:00~13:10	-0.078	-0.134	239.8	0.930
13:10~13:20	-0.064	-0.098	236.9	0.702
13:20~13:30	-0.062	-0.106	239.7	0.738
13:30~13:40	-0.046	-0.092	243.3	0.618
13:40~13:50	-0.042	-0.100	247.2	0.648
13:50~14:00	-0.046	-0.095	244.2	0.636
14:00~14:10	-0.037	-0.099	249.5	0.636
14:10~14:20	-0.037	-0.098	249.3	0.630
14:20~14:30	-0.020	-0.112	259.9	0.684

**Table 5・5** Result of measurement with electric current meter

Time	Current		
	Direction	Velocity	
11:49	245°	0.428m/s	0.832kt
11:51	240	0.412	0.802
11:53	240	0.428	0.832
11:55	240	0.435	0.846
11:58	240	0.426	0.828
Mean	241	0.426	0.828
14:48	285	0.264	0.513
14:50	285	0.259	0.504
14:52	290	0.252	0.490
14:54	290	0.248	0.481
14:56	300	0.243	0.473
Mean	290	0.253	0.492

で求められ、これをノットに換算した。その結果、開始前の測定では流向はほぼ一定で240度方向へ0.828ノットであった。終了後の流速計による測定では、流向は9分間で285度から300度まで変化し、流速も0.513ノットから0.473ノットま

で変化した。電流速計で流向・流速を測定するためには船を船首尾錨で固定する必要があるため、測定海域が沿岸の浅海域に限られる。従って、時間の経過による潮流の変化が影響し、本方式による解析結果と電流速計による流向・流速

は一致しない部分も見られた。なお、10分間隔の変位量から求めた流向の変化から、測定海域では早崎瀬戸の転流時15時05分より約30分前から流向が変化し始めることを示している。以上の結果から、水深の深い海域においても、GPSで

Table 5・6 Approximate position of observation position and surface currents

Year	Observation Position			Surface Current 1		Surface Current 2	
	code address	latitude (N)	longitude (E)	Direction (deg.)	Velocity (kt)	Direction (deg.)	Velocity (kt)
1990	90-1	4° 08.5	140° 12.0	83	1.57	84	1.77
	90-2	2 38.0	140 39.0	63	0.55	77	0.55
	90-3	1 55.0	140 46.0	285	0.54	253	0.24
	90-4	3 10.0	141 41.0	116	0.56	114	0.75
	90-5	3 24.0	141 42.0	45	0.99	80	1.03
	90-6	3 32.5	140 50.0	74	1.07	84	1.01
	90-7	3 23.0	145 55.0	66	1.27	64	0.86
	90-8	3 26.5	146 02.0	103	1.35	99	0.80
	90-9	3 06.0	148 15.0	111	1.10	122	0.91
1991	91-1	3 20.0	141 03.0	104	1.82	104	1.73
	91-2	4 10.0	140 10.0	96	1.42	92	1.24
	91-3	3 45.0	139 25.0	88	1.72	85	1.58
	91-4	3 23.0	147 20.0	123	1.22	114	0.90
	91-5	2 20.0	149 12.0	126	1.12	130	0.84
	91-6	3 28.0	147 56.0	108	1.19	111	0.89
	91-7	2 46.0	147 22.0	112	0.76	115	0.56
	91-8	2 24.0	148 54.0	131	0.63	138	0.26
1992	92-1	2 28.0	140 43.0	80	1.26	73	1.11
	92-2	3 02.0	141 08.0	71	0.82	73	0.70
	92-3	3 19.0	139 55.0	117	0.71	120	0.56
	92-4	4 06.0	139 57.0	135	0.52	146	0.30

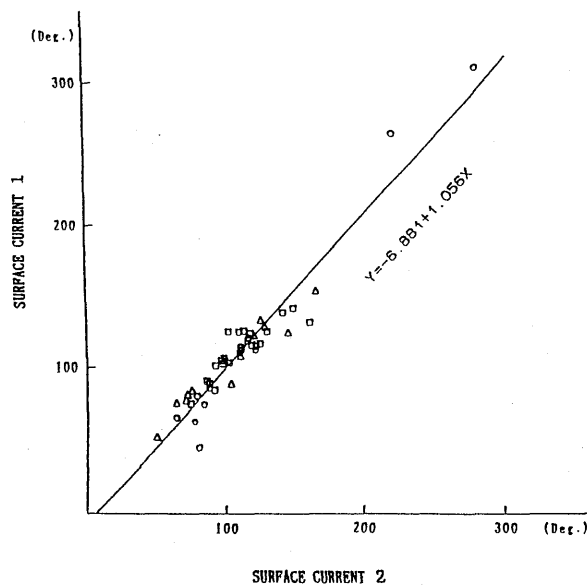


Fig.5・5 Scatter diagram and regression line about current direction of surface current 1 and 2.

○:1990; □:1991; △:1992

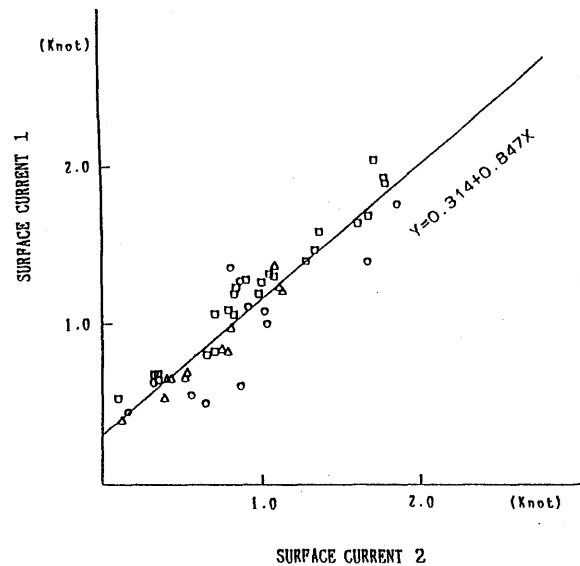


Fig.5・6 Scatter diagram and regression line about current velocity of surface current 1 and 2.

○:1990; □:1991; △:1992

測位を行い、船からレーダ・ブイの相対位置の変化を追跡することにより、表層流をほぼ正確に求めることができることを確認できた。

## 2. 2. 2 表層流の比較

レフレクタの方位、距離とGPS船位より、レフレクタの位置を算出した。レフレクタ投入位置から測定終了時の位置まで、測定時刻毎のD.lat.とDep.を算出し、その回帰直線を求めることにより流向を、また10分毎の漂流距離の平均値より流速を求めた。なお測定は1990年のSt.90-1, 90-3, 90-4ではそれぞれ2回、1991年と1992年には全ての測定点で3回ずつ行ったが、流向には5~20度、流速には0.1~0.4kt程度の差が見られたので、各測定点の複数回の測定結果を平均した。これらの測定による表層流（以下表層流1と記す）は、先の測定で確認したように同海域のほぼ正確な表層流と考えられる。コーナレフレクタ追跡による表層流1とベクトル解析による表層流2について、各測定点で2~3回、合計48回の測定を行った。表層流2の流向、流速を表層流1と共にTable 5・6に示した。測定結果より表層流1の流向、流速を縦軸に、表層流2のそれらを横軸にとって、流向の散布図をFig. 5・5、流速のそれをFig. 5・6に示した。

両者の関係はほぼ直線的傾向であるから、相関係数と回帰直線を求めた。その結果は以下の通りであった。

流向（度）

$$Y = -6.881 + 1.056X \quad r = 0.9580 \quad S = 12.7$$

流速（ノット）

$$Y = 0.314 + 0.847X \quad r = 0.9308 \quad S = 0.157$$

但しY=表層流1      X=表層流2

$r$ =相関係数     $S$ =推定値の標準誤差

両式はt分布検定の結果何れも危険率95%で統計的に有意であった。以上のように表層流1と2は相関が高く、従って、両式を使用すれば、レフレクタを流すことなく表層流1を求めることができる。

両者間に生じた差の原因として、GPS測位の誤差は両者共通であり、レーダ測定はほぼ3海里以内であったこと、またレフレクタへの風圧の影響は微少とすれば、漂流中に一定方向から受けるうねりや風浪などのために生じる船体動揺により超音波に混入する雑音に起因した潮流計の誤差が影響したものと考えられる。

## 2. 3 まとめ

大洋における海流の最新の動向を広範囲に得ることができれば、海洋学の面から又漁船が操業を行う上からも、極めて貴重な情報となる。そこで、GPSを利用して簡易に海流の測定を行うための基礎実験として、表層流の測定を行い、GPSを利用することの有効性について検討した。

① 基礎実験として、長崎県の橋湾で、GPS船位を基準にして、レーダ・ブイの軌跡を求め、流向と流速を算出した。その結果を電流速計で測定した値と比較し、ほぼ一致することを確認した。

② 鶴洋丸の漁業実習の間にコーナレフレクタを漂流させ、

GPS位置を基準にしてレフレクタ追跡による流向・流速（表層流1）と潮流計による流向・流速のベクトル解析結果（表層流2）を比較検討した。その結果、両者の相関は高く、レフレクタを使用しなくてもGPSを利用することにより表層流を求め得ることを確認出来た。なお、両者は完全には一致せず、わずかながら差があるが、その原因としては、漂流中に一定方向から受けるうねりや風浪などのために生じる船体動揺が潮流計に誤差を誘発しているものと考えられる。

以上のように、表層流測定にGPSの正確な対地移動情報を利用することによる有効性を確認できた。

## 3 旋回圏の測定への応用

GPSはその測位精度がすぐれていることから、狭水道航行時の利用、漁労における利用、海図プロッタの利用などさまざまな分野で応用面での研究が進められている<sup>105~107</sup>。本システムはこれからも多方面で利用されるであろうが、船舶の操縦性能試験への応用も、重要なものの一つと考えられる。すなわち、船舶の航行の安全を確保するためには、操船者は常に自船の喫水や速力に応じた正確な性能を把握しておく必要がある。そこで、操縦性能試験のうち、GPSによる旋回圏の測定を行い、その有効性について検討した。

旋回圏の測定は、竣工時の試運転（公試運転）で全速力、最大舵角で行われるのみで、入出港時や他船の避航を考慮した低速航行における旋回試験は行われていない。また竣工後、年月の経過による船のコンディションの変化や積荷による喫水の変化に応じた旋回試験が行われるということもほとんどない。これは測定に多くの労力と費用さらに時間を要するためである。そこで、GPSを用いて簡易に旋回圏の測定をすることが出来れば、操船者は容易に自船の性能を確認でき、船舶の安全運航に寄与できる。また、船舶が輻輳する入出港時やその他低速力航行状態での自船の操縦性能についても十分活用可能である。

### 3. 1 測定方法

#### 3. 1. 1 練習船「鶴洋丸」の旋回圏<sup>108)</sup>

測定を行った長崎大学水産学部練習船「鶴洋丸」の主要目をTable 6・1に示した。GPSのアンテナは船橋甲板中央部の高さ約3mの位置に設置した。測定は1990年4月（衛星数6個）と、1991年4月（衛星数15個）に行った。また測定海域は九州西岸の五島灘で、水深は70~120mであった。速力はTable 6・2のように3段階に、また各速力においてそれぞれ舵角30, 15, 5度で左右両方に旋回した。ただし、天候と海況の悪化やGPSの欠測時間の関係で舵角5度では右旋回のみの実験である。

船位は、GPS受信機にパソコンを接続し、10秒間隔で自動記録した。測定時の風向、風速は、各旋回の前に風向風速計より、潮流は潮流計（対地）より読み取り記録した。

GPS船位よりXYプロッタで旋回時の航跡を作図し、旋回径を読み取った。旋回縦距（最大縦距、以下DAと記す）は転舵位置から90度回頭位置までの原針路上での進出距離、旋回径（最大横距、以下DTと記す）は原針路線と180度回

頭位置までの距離とした。これをFig. 6・1に示す。

Table 6・1 Principal particulars of Kakuyo Maru

Gross tonnage	1044.38 ton
Length between perpendiculars	58.00 m
Breadth	11.85 m
Mean draft	4.28 m
Rudder area	8.67 m <sup>2</sup>
Block coefficient	0.546
Displacement	1586.06 ton
Propeller	3 Blades C.P.P.
Prop.Dia.	2.85 m

Table 6・2 Setting speed, revolution per minute and blade angle

Setting Speed	Revolution per minute	Blade angle (deg.)	Speed (kt)
Full	250	15	12
Half	230	15	7
Slow	150	10	5

### 3. 1. 2 調査船「鶴水」の旋回圏<sup>109)</sup>

旋回圏が小さい小型船の場合に、GPSを用いて行う旋回圏の解析が実用に適する程度に有効であるかについて検討するため、同学部調査船「鶴水」で旋回試験を行った。

測定は1991年12月(衛星数16個)に、長崎県野母崎西方の水深約80mの海域で行った。測定中の気象海象は東の風2~3 m/s, 風浪およびうねりはほとんどなく平穏な状態であった。但し、月令9.8の小潮で、高高潮時の約2時間前から高高潮時にかけて測定したので、約0.3 Knotの北流があった。

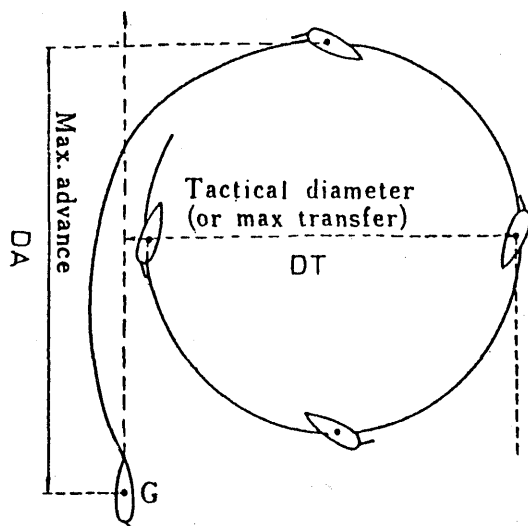


Fig.6・1 Turning circle.

船位の測定方法は鶴洋丸の場合と同様であるが、測定間隔は鶴水のGPS受信機(日本無線(株)製JLR-6000)の最短時間間隔である4秒とした。鶴水は固定ピッチ(715mm)、4翼の1軸右回転推進器船で、その速力は回転数によって制御する。測定中の速力はTable 6・2と同様に3段階に設定し、舵角も30, 15, 5度の3段階に設定した。鶴水の主要目と設定速力をTable 6・3に示す。

## 3. 2 結果および考察

### 3. 2. 1 練習船「鶴洋丸」の旋回圏

測定結果をTable 6・4に、気象海象をTable 6・5に示した。旋回圏の大きさについて、これまで示されている結果は<sup>110,111)</sup>、いずれも全速力試運転状態で、最大舵角の場合である。また速力と旋回圏の関係については、低速の場合、旋回圏はやや小さくなると言われ、右旋回と左旋回の相違については、各船で異なり一定した結果が出ていないが、一軸右回転推進器では一般的に右旋回の方が大きくなるとされている<sup>112)</sup>。なお舵角15度と5度について測定した理由は、通常の航海中における変針や避航のためにとられる舵角は15度以下の場合が多く、それらの舵角における、新針路距離を把握するためである。GPS利用により求めた旋回圏の大きさの妥当性を検討するため、公試運転時の成績を参考にした。

#### (1) 舵角30度の場合

##### (a) 全速

Table 6・4に示した測定結果の測定番号1~3(以下No. 1~No.3の様に記す)の航跡をFig. 6・2に示した。なお風向、風速は真の風向と風速を求めたが、風向については転舵前の直進時における針路に対して相対的に示した。また流向についても同様に原針路に対する相対方向で示した。

No.1は無風状態で風の影響はなくDAとDTはほぼ等しい。しかし180度回頭位置(A点)から360度回頭位置(C点)までの進出距離(対地速力)が著しく小さく、そのまま2旋

Table 6・3 Principal particulars of Kakusui and setting speed

Gross tonnage	27.80 ton
Length between perpendiculars	16.70 m
Breadth	3.90 m
Mean draft	1.48 m
Rudder area	1.088 m <sup>2</sup>
Block coefficient	0.635
Displacement	53.46 ton
Propeller	4 Blades
Prop. Pitch	715 mm
Prop.Dia.	1150 mm

Setting Speed	Revolution per minute	Speed (kt)
Full	1600	10
Half	1200	7.5
Slow	600	5

Table 6・4 Measurement results

No.	Rudder angle(deg.)	Speed	Turning side	Maximum advance(DA)	Maximum transfer(DT)
1	30	Full	Starboard	210 m	205 m
2	30	Full	Starboard	214	197
3	30	Full	Port	179	152
4	30	Half	Starboard	228	204
5	30	Half	Port	191	148
6	30	Slow	Starboard	197	192
7	30	Slow	Port	241	299
8	15	Full	Starboard	396	419
9	15	Full	Port	348	360
10	15	Half	Starboard	382	475
11	15	Half	Port	371	527
12	15	Slow	Starboard	435	547
13	15	Slow	Port	427	358
14	5	Full	Starboard	815	1112
15	5	Full	Port	1010	1186
16	5	Half	Starboard	587	1543
17	5	Slow	Starboard	618	1050

Table 6・5 Weather and Sea condition

No.	Wind		Current	
	Relative direction (deg.)	Velocity (m/s)	Relative direction (deg.)	velocity (m/s)
1	calm		left 125	0.5
2	left 15	16	left 110	0.4
3	right 15	16	left 100	0.3
4	left 10	25	right 65	0.3
5	right 5	16	left 130	0.6
6	right 5	10	left 15	0.3
7	right 110	6	left 130	0.4
8	right 5	16	left 90	0.3
9	right 20	16	left 100	0.4
10	right 10	7	right 85	0.4
11	right 10	16	left 130	0.9
12	right 105	4	right 30	0.4
13	right 105	4	right 40	0.4
14	left 150	16	right 100	0.5
15	right 5	16	left 120	0.5
16	right 5	16	left 115	0.7
17	calm		left 160	0.5



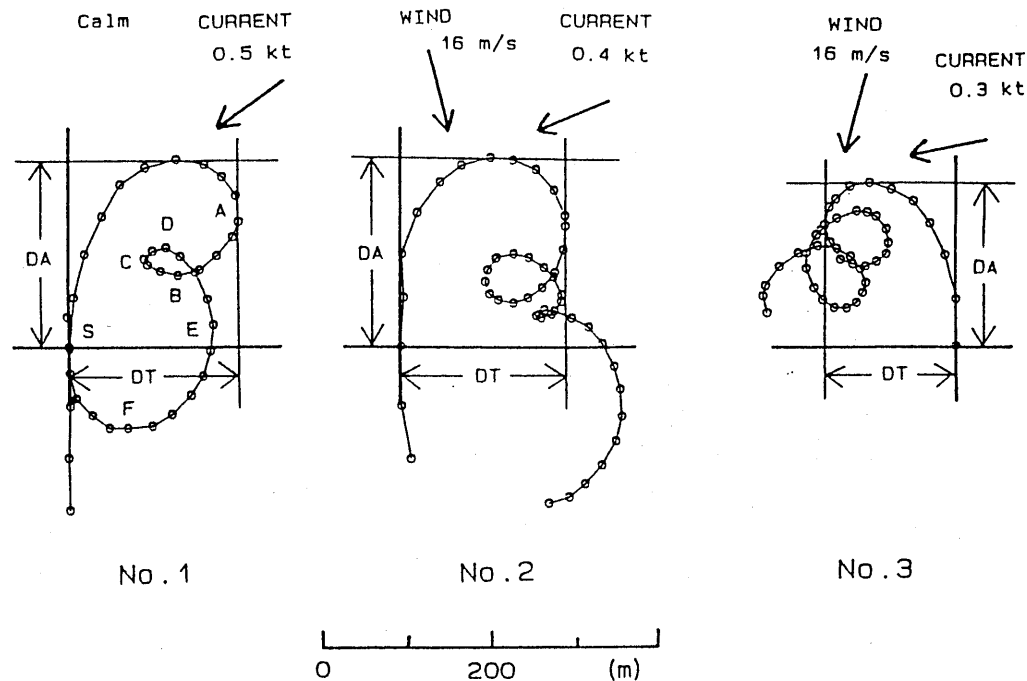


Fig.6・2 The tracks of measurement No.1~No.3(Full speed, Rudder angle 30 deg.).

DA:maximum advance; DT:maximum transfer; S:start turn

A:180 deg. turning position(first turning)

B:270 deg. turning position(first turning)

C:360 deg. turning position(first turning)

D: 90 deg. turning position(second turning)

E:180 deg. turning position(second turning)

F:270 deg. turning position(second turning)

Table 6・6 Comparison of the GPS measurement with official trial measurement

	Rudder angle(deg.)	Speed	Turning side	DA(m)	DT(m)
GPS	30	Full	Starboard	210	205
	30	Full	Starboard	214	197
	30	Full	Port	179	152
Official trial	35	Full	Starboard	196	234
	35	Full	Port	166	153

DA:maximum advance; DT:Maximum transfer

回目に入り2旋回目の90度回頭位置 (D点) までは、わずか30m程度進出しただけであった。潮流の影響を受けていたとしても、このように小さくなるとは考えられない。しかも右旋回のときにその傾向が著しいことから、旋回による船内磁場の変化が受信電波の位相に何等かの影響を与えることや、アンテナ位置と衛星の高度と方位によっては、付近の構造物からの反射波を受信することにより、GPSの測定位置に誤差を生じることが一因と考えられる。その後90度回頭位置 (D点) から270度回頭位置 (F点) までの距離は約200mでDA, DTとはほぼ等しいが、それと直交するE点とS点間の

距離は約170mでDTより約15%小さく、DEFSの各点を結べば、ほぼ楕円に近い航跡となった。これは潮流の影響によるものと考えられる。No.2はNo.1と同様右旋回でDAとDTもほぼ同じであったが、相対風向は左舷15度で風速16 m/s の強い風を受けたので、風下側へかなり圧流された。2旋回目と3旋回目の航跡は No.1のそれらよりも更に変形した楕円形状となった。No.3は No.2とほぼ同じ海況で右舷15度から風を受けて左旋回したものであるが、右旋回の場合よりDA, DTとも約20%小さかった。また、右旋回と同様に2~3旋回目では向い風の時と追風の時には対地速力に差があ

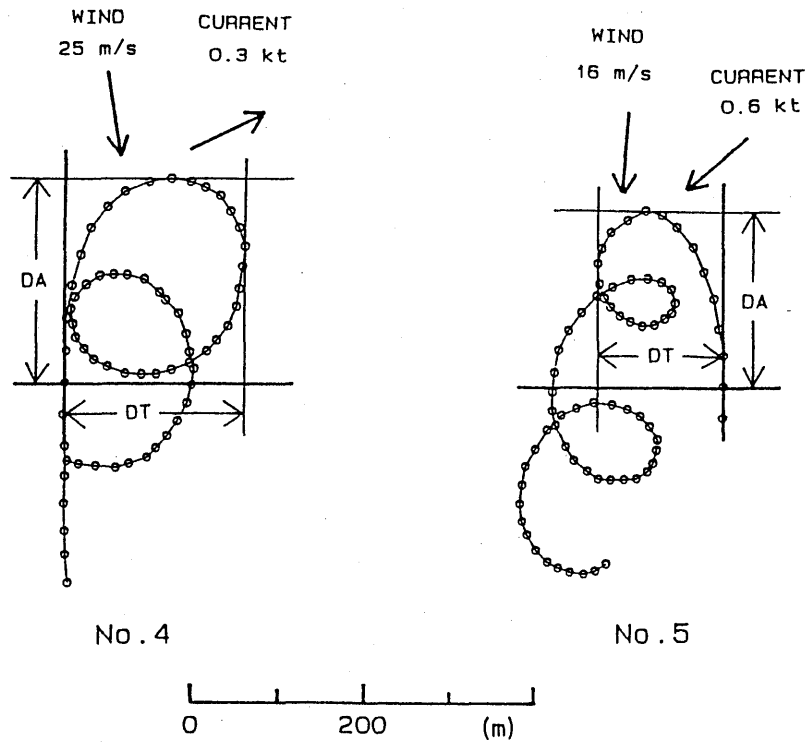


Fig.6・3 The tracks of measurement No.4 and No.5(Half speed, Rudder angle 30 deg.).  
DA:maximum advance; DT:maximum transfer

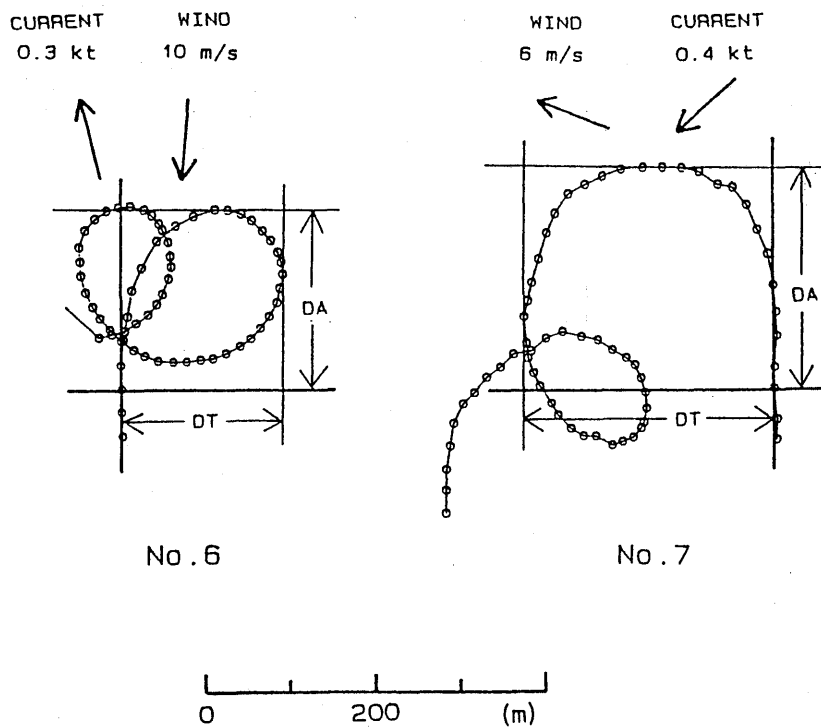


Fig.6・4 The tracks of measurement No.6 and No.7(Slow speed, Rudder angle 30 deg.).  
DA:maximum advance; DT:maximum transfer

り、航跡は楕円形になってはいるが、右旋回の時の様に極端に小さくはない。なお、鶴洋丸の公試運転における成績との比較をTable 6・6に示した。

公試運転は、速力全速、舵角35度で左右旋回を行ったもの

である。GPSでの測定結果と比較すると、その時のDTは右旋回で234mとやや大きく、左旋回はほぼ同じであった。しかしDAは左右旋回とも13~18m小さくなった。当時のコンディションは今回のそれとは多少異なり、またその時の潮

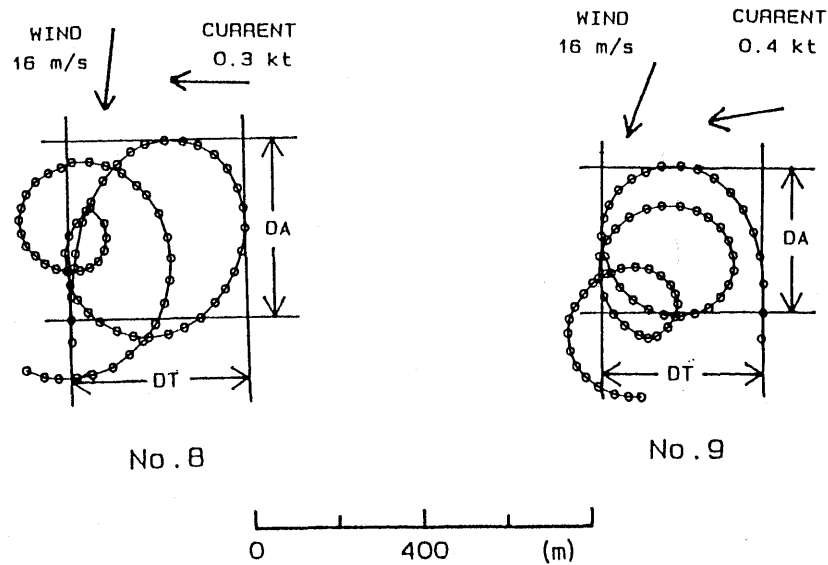


Fig.6・5 The tracks of measurement No.8 and No.9(Full speed, Rudder angle 15 deg.).  
DA:maximum advance; DT:maximum transfer

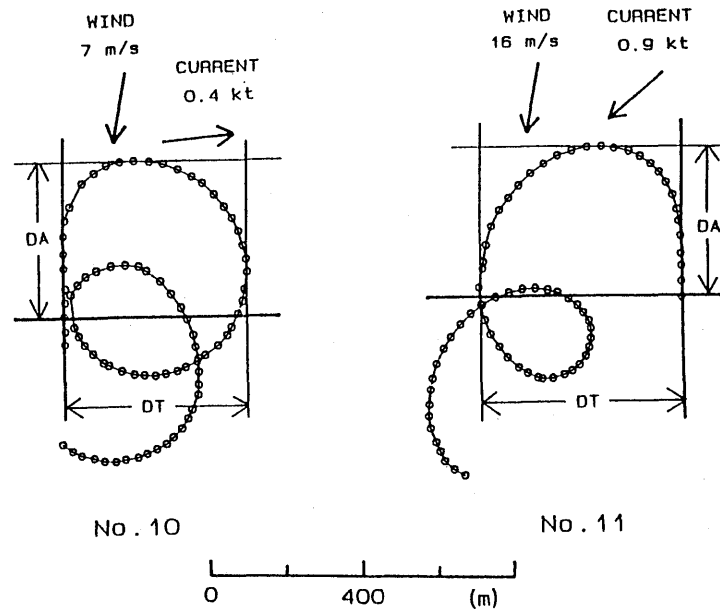


Fig.6・6 The tracks of measurement No.10 and No.11(Half speed, Rudder angle 15 deg.).  
DA:maximum advance; DT:maximum transfer

流の資料がないためその影響については断定はできないが、舵角が5度大きかった事を考慮すると、今回の測定結果は、ほぼ妥当な値であったと言える。

#### (b) 半速

半速での航跡 (No.4, 5) をFig.6・3 に示す。左右旋回とも全速の場合と比べDAはそれぞれ10m程度大きくなり、DTはほぼ同じであった。またこの場合も No.5のように左旋回の方が小さくなる傾向がみられた。No.4では風速が25 m/s で測定可能な限界に近い海況であり、風圧による影響はあるものの、円形に近い航跡が得られた。なお、この航跡

は2衛星による二次元測位によるものである。測点間隔にややバラツキが見られるものの、3衛星による測位のLレベル程度の精度で測位可能であり、他の次元による航跡と比較する上では十分な精度と考えられる。左旋回のNo.5は全速のNo.3 (Fig.6・2) に比べ、風潮下に大きく圧流された航跡となった。

#### (c) 微速

微速での航跡 (No.6, 7) をFig.6・4 に示す。

No.6では風向と流向が反対で、風速は10m/s、流速は0.3 kt であったが、低速で、原針路に対してほぼ真向いの風で

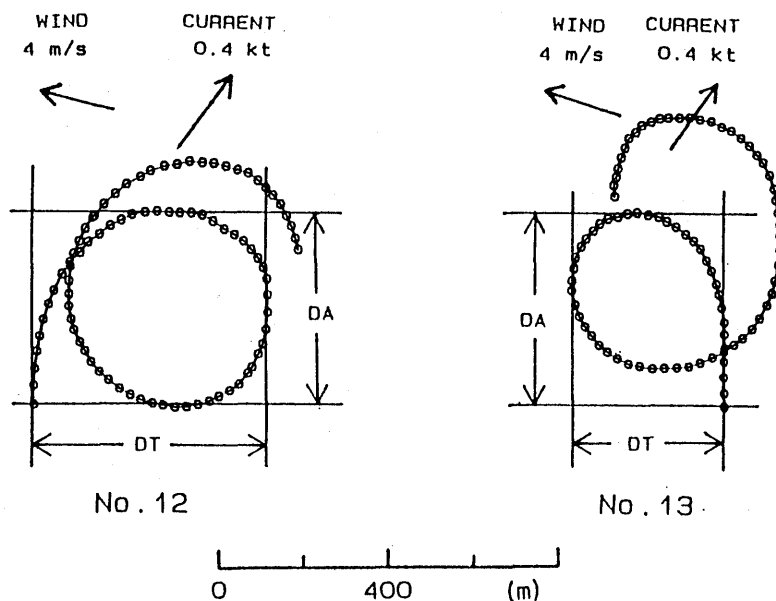


Fig.6・7 The tracks of measurement No.12 and No.13(Slow speed, Rudder angle 15 deg.).  
DA:maximum advance; DT:maximum transfer

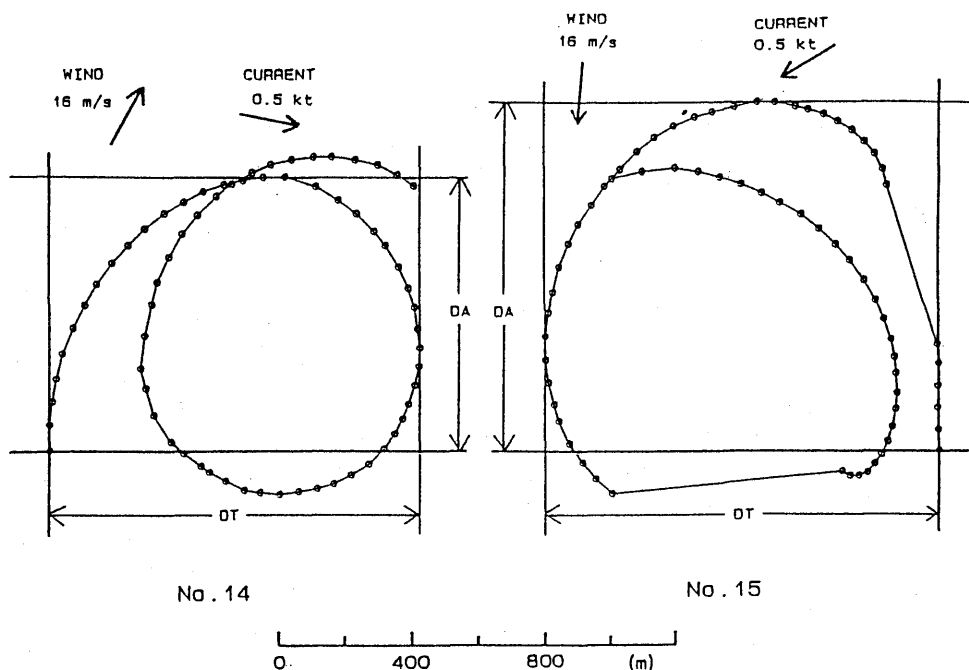


Fig.6・8 The tracks of measurement No.14 and No.15(Full speed, Rudder angle 5 deg.).  
DA:maximum advance; DT:maximum transfer

あったのでDAがDTとほぼ同じになり、90度回頭後180度回頭までの航走距離が著しく少なく、270度回頭後、原針路より左方へ進出しながら旋回し、低速のため、風圧と潮流の影響が大きいことを示している。また、全速や半速の場合と同様に1旋回目に比べ2旋回目が小さくなる傾向がみられた。No.7では左旋回にもかかわらず、DA、DTとも最大にな

った。これは、風速はわずかに6m/sであったが、風向と流向がほぼ同方向であったので、旋回するにつれて追い風、追い潮になり、対地速力が右旋回のときのように減少しなかったためである。

GPSを用いて測定した旋回圏は、2旋回目の旋回圏の形が変形し、DA、DTの一方または両方が著しく小さくなっ

た。これは風潮による圧流の影響のみとは考えられない。ことに全速で、しかも右旋回の際にその傾向が著しいことから、旋回による船内磁場の変化が受信電波の位相に何等かの影響を与えることや、アンテナ位置と衛星の高度と方位によっては、付近の構造物からの反射波を受信することにより、測定位置に誤差を生じることが一因と考えられる。しかし、公試運転の結果と比較しても、DA、DTはほぼ妥当な値が得られたことから、GPSでの旋回圏の測定は実用的に可能と考える。

## (2) 舵角15度の場合

### (a) 全速

全速での航跡 (No.8, 9) をFig. 6・5 に示す。

DAとDTはいずれも船の長さのほぼ6~7倍であるがDAよりもDTが大きく、特にDTは舵角30度の場合の2倍強であった。舵角30度の場合と同様にDA、DTはともに右旋回よりも左旋回の方が小さくなり、また2~3旋回目の旋回圏が小さくなる現象が見られたものの、舵角30度の場合ほど著しくはなく、特に1旋回目はより円形に近い航跡を示した。舵角が小さくなると、転舵による速力の低下率が小さくなり、風潮の影響による旋回圏の変形が少なくなるためであると考えられる。

### (b) 半速

半速での航跡 (No.10, 11) をFig. 6・6 に示す。

No.10では右10度から7m/sの風、No.11では同方向から16m/sの向い風であるが、風速によるDAの差は少ない。90~180度回頭時はともに追い潮であるが流速の差により、DTに約50mの差があった。No.10, No.11ともにFig. 6・5のNo.8 (右5度から16m/sの風) の場合よりも風下に大きく圧流されており、速力の違いにより風圧の影響に差が見られる。これは左旋回の場合のNo.9とNo.11においても同様で、No.11では風に加えて潮流も0.9ktと速かったことにより大きく圧流され、それらの合成方向に伸びた細長い楕円形の航跡となった。

### (c) 微速

Fig. 6・7に微速での航跡 (No.12, 13) を示す。

No.12とNo.13はほぼ同一の海況下での旋回であるが、180度回頭時の船位は流速にはほぼ対応する距離だけ原針路より右方にずれている。そのためDTは右回頭の方が190m大きくなった。風潮の方向と速さによって、DAとDTのいずれが大きくなるかが決まるが、全般的に舵角15度では低速の方がやや大きくなる傾向が見られる。風速が5m/s以下ならば潮流の速さが0.3~0.4ktでも、その影響の方が顕著に現れる。

## (3) 舵角5度の場合

舵角5度については、全速で左右両方の旋回を行ったが、

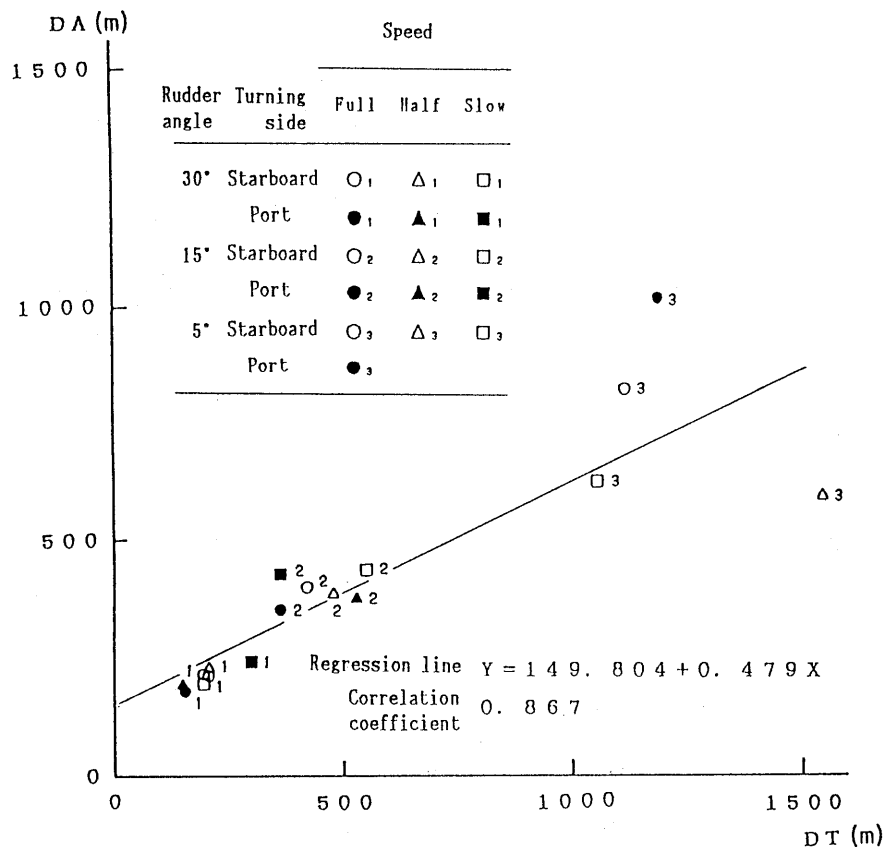


Fig.6・9 Correlational diagram and regression line for DA and DT.  
DA:maximum advance; DT:maximum transfer

半速と微速では右旋回のみであった。全速での航跡 (No.14, 15) をFig. 6・8に示す。

DA, DTは舵角30度の場合の4~5倍で1000m前後になる。ことに風圧, 流圧の大きさや方向によっては, DA, DTが1000m以上になることがある。このように, 小角度の転舵では, 潮流の影響が大きく, ことに順潮, 追い風では回頭中の進出距離が予想外に大きくなることに注意すべきである。なお, この測定値は小角度の転舵で避航を行おうとする場合には, どの程度の余裕を持って対処すればよいかの目安となる。

#### (4) DAとDTの相関関係

鶴洋丸の速力と舵角の組み合わせにより, DAを縦軸に, DTを横軸にとってその散布図を描き, 回帰直線を求めてFig. 6・9に示した。

同図に見られるように舵角30度では速力の違いによる差はほとんどないが, 左旋回の方がDA, DTともに小さい。舵角15度では多少バラツキが見られ, 特にDTは最大と最小で約190mの差があった。舵角5度ではDAは速力が速いほど大きくなる傾向があり, DTは1000m以上になった。この場合のバラツキが大きくなった一因は, 風潮流によるものと考えられる。全データによる相関係数は0.867で回帰直線は $Y=149.804+0.479X$ となる。なお, この場合, 主に風潮流の影響でDAが587mと小さく, DTが1543mと大きくなった舵角5度, 半速前進の右旋回を除くと, 相関係数は0.961となりDA, DTの相関関係はさらに高くなった。この場合の回帰直線は $Y=85.625+0.658X$ となった。

以上のように, GPSを用いて測定した旋回圏は, 全速で舵角30度の場合, 公試運転での測定結果とほぼ一致した。従って, その他の測定においても, ほぼ正確な値が得られたものと考えられ, 実用に適する精度で旋回圏の測定が可能と言える。なお, 測定中, 利用衛星の切り換えによる位置の変化や, 測位誤差による旋回圏の微少な乱れが見られる場合もあったが, DA, DTの測定はいずれの場合も可能であった。従って, GPSを用いての旋回圏の測定は, 一般の船舶にも十分応用できるものとする。ただし, 速力が速い場合の右旋回時に見られた, 2旋回目の旋回圏が小さくなる現象は, DA, DTの測定には, 直接影響するものではないが, 今後, 広くGPSを応用していくためには, その原因を解明しなければならない。

### 3.2.2 調査船「鶴水」の旋回圏

GPS船位よりXYプロッタで旋回時の航跡を作図し, 旋回圏の大きさを読み取った。その結果をTable 6・7に示した。

#### (1) 舵角30度の場合

各速力における旋回時の航跡をFig. 6・10に示した。航跡の形状は, 全速および半速では, ほぼ円に近い形状であった。Table 6・7に示したように, 右旋回と左旋回のDAとDTの間に10m程度の差が見られる場合もあるが, それらの値はいずれも50~60m程度であった。また速力の違いによる差もほとんど見られなかった。なお, 半速の左旋回で270度旋回時に船位が旋回方向と逆行したが, 約40秒後に正

常値に復帰した。これは, 測位に利用した衛星の切り換え時における測位の乱れであった。

微速の右旋回では, 全速, 半速の旋回圏に近い形状を示したものの, 360度旋回時には船位がかなりずれた。左旋回ではかなり大きく歪んだ形状となり, DTと90度~270度旋回までの進出距離はそれぞれ34m, 37mと小さく, また180~360度旋回までの進出距離は68mと大きくなった。これは, 船速が微速のため, 2~3m/sではあったが東からの風と北方向への潮流が影響したものと考えられる。DAは60mで, 全速や半速の場合とはほぼ同程度であった。

#### (2) 舵角15度の場合

舵角15度の各速力における航跡をFig. 6・11に示した。航跡の形状は, 半速の右旋回で, 衛星の切り換え時に位置のジャンプが見られたものの, 全速および半速ではほぼ円に近い形状が得られた。微速では, GPS測位の中断や測定位置の著しいジャンプが見られたが, 各々のDA, DTを読み取することは出来た。

いずれの速力の場合においても, また, 右旋回, 左旋回に関係なく, DTは110~150mで, DAの60~130mよりも大きく, 横方向への偏位が大きくなった。またDTは速力が遅

Table 6・7 Measurement results

Rudder angle(deg.)	Speed	Turning side	DA(m)	DT(m)
30	Full	Starboard	56	49
		Port	63	52
	Half	Starboard	52	53
		Port	36	53
	Slow	Starboard	49	64
		Port	60	34
15	Full	Starboard	95	137
		Port	78	107
	Half	Starboard	62	156
		Port	65	109
	Slow	Starboard	126	145
		Port	73	111
5	Full	Starboard	267	547
		Port	180	333
	Half	Starboard	244	396
		Port	182	329
	Slow	Starboard	360	622
		Port	147	363

DA:maximum advance; DT:Maximum transfer

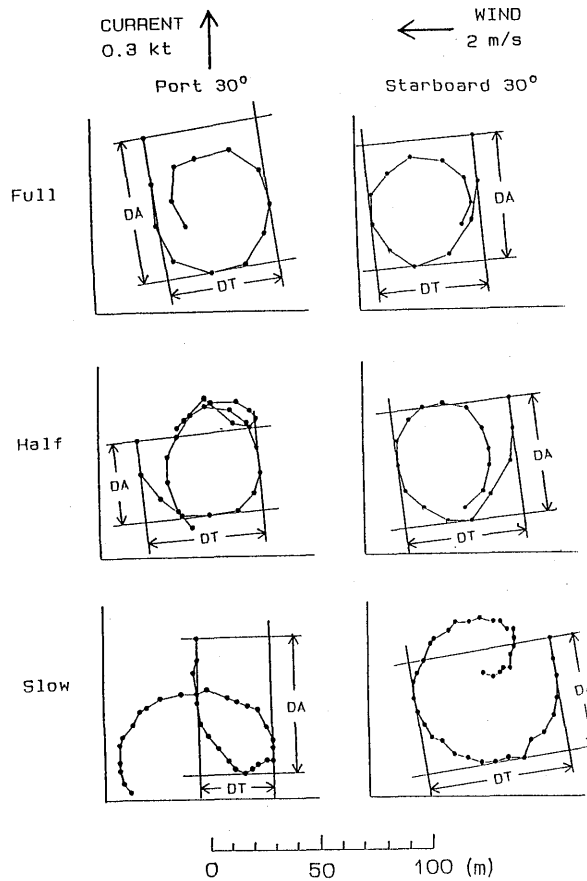


Fig.6 • 10 The tracks of Kakusui with rudder angle 30 deg.  
DA:maximum advance; DT:maximum transfer

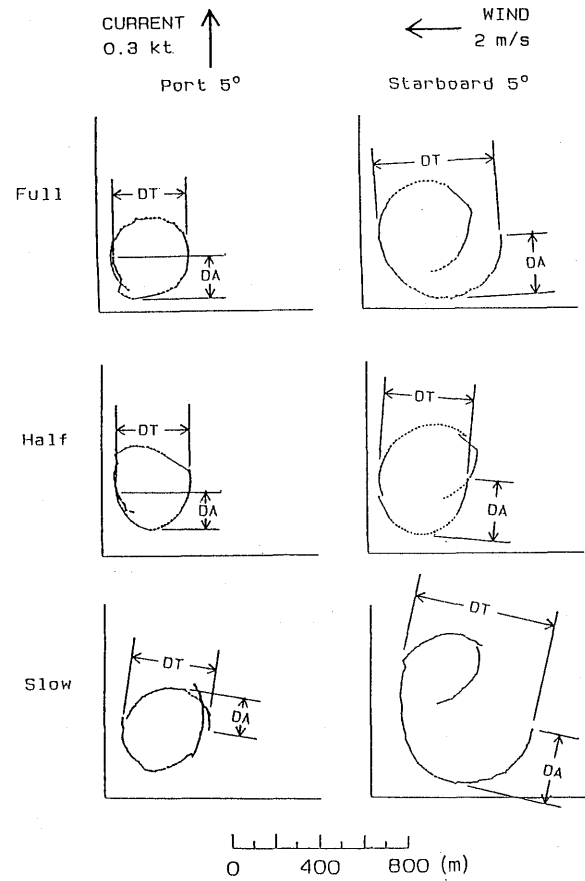


Fig.6 • 12 The tracks of Kakusui with rudder angle 5 deg.  
DA:maximum advance; DT:maximum transfer

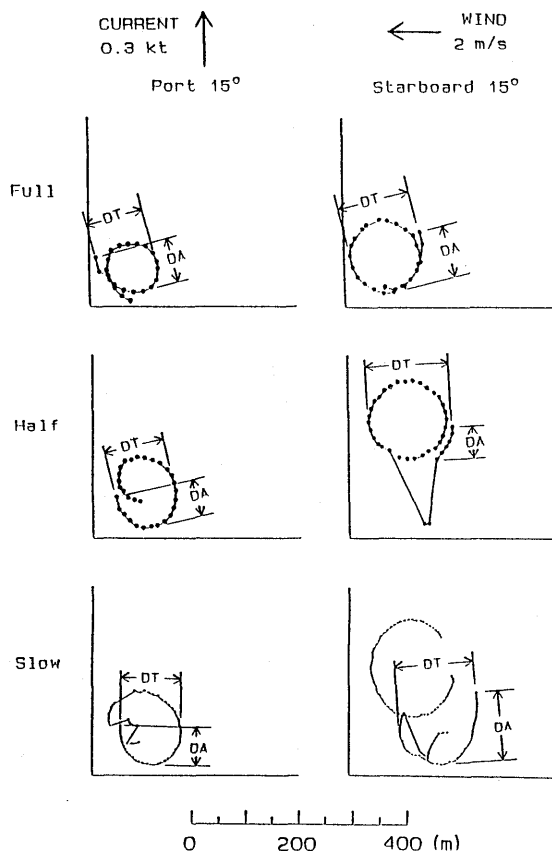


Fig.6 • 11 The tracks of Kakusui with rudder angle 15 deg.  
DA:maximum advance; DT:maximum transfer

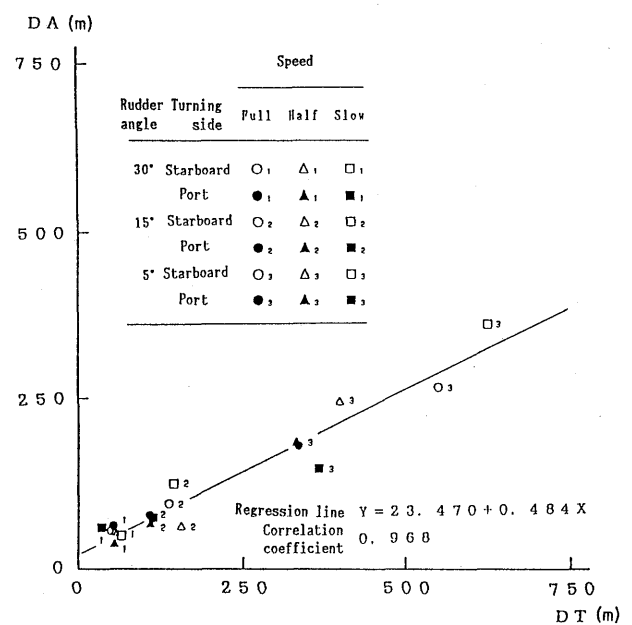


Fig.6 • 13 Correlational diagram and regression line for DA and DT.  
DA:maximum advance; DT:maximum transfer

いほどやや大きくなる傾向があった。半速のDAは右旋回62m、左旋回65mで、その大きさはほとんど同じであるが、その他の場合の各DA、DTはいずれも右旋回の方が大きかった。舵角15度は一般に述べられているのと同様、右旋回の方が左旋回よりもやや大きくなった。

### (3) 舵角5度の場合

舵角5度の航跡をFig. 6・12に示した。これらの場合もほぼ円に近い形状のものが得られた。しかし、微速の右旋回では360度旋回時の位置が、旋回開始時の位置と大きくずれた。これは舵角30度の微速の右旋回と良く似た形状であった。舵角5度の場合、各速力とも、衛星の切り換えによる測位のジャンプがあった。DAは左旋回で150~180m程度であるが、右旋回では250~360mと倍近くの大きさになった。DTも左旋回では330~360mで速力の違いによる差はほとんどなかったが、右旋回では400~600mとなり、しかも速力によるバラツキも大きかった。従って、左旋回の方が旋回性能がよいことを示している。速力の変化とDA、DTの大きさの間には特定の傾向は見られなかった。

### (4) DAとDTの相関関係

鶴洋丸の場合と同様に、鶴水でもDAとDTの相関関係を求めた。散布図と回帰直線をFig. 6・13に示した。この場合も舵角30度では速力による差はほとんど見られず、また左右旋回の差もほとんど見られない。舵角15度では、左旋回は速力による差はほとんどないが、右旋回ではDAで60mの差があった。また左旋回の方がDA、DTともに小さかった。舵角5度においても左旋回ではDA、DTにほとんど差は見られず、またともに右旋回よりも小さい。右旋回では、DAで約120m、DTで約230mの差が見られた。しかし、相関係数は0.968でその相関は高く、回帰直線は  $Y=23.470+0.484$  となった。

以上のように、GPSを用いることによって、小型船舶の極めて小さい旋回圏をかなり詳細に測定できた。すなわち、小型船舶は微速の場合、どの舵角でも、また舵角5度では全速であっても風潮流の影響を受けて、その旋回圏がズレたり歪んだりする。GPSによる測定で、そのようなDA、DTの大きさについてもかなり正確に求めることができ、操船に際して極めて有効な資料になるものと言える。

## 3.3 まとめ

総トン数1000トン型の漁業練習船鶴洋丸と総トン数27トンの小型船鶴水の旋回圏をGPSを用いて測定し解析した。旋回試験は、速力、舵角をそれぞれ3段階に分けて行った。その結果、速力の違いによる最大縦距や最大横距の大きさに定性的な傾向は認められなかった。

鶴洋丸では舵角30度の最大縦距は船の長さの3~4倍であり、通常の操船で使用されることの多い舵角15度では6~7倍、舵角5度では10倍以上にもおよぶことが確認できた。いずれの舵角においても、微速の場合、旋回圏の大きさは海象条件に影響される。そして、小舵角であればあるほど旋回に要する時間が長くなり、旋回圏は風や潮流に影響され、その大きさ形状とも多様な変化をする。この場合、最大縦距が1000m

(船の長さの17倍)以上になる場合もある。従って小角度の転舵のみによって避航を行おうとする場合は十分余裕をもって対処しなければならない。

鶴水では、使用頻度の最も高い舵角15度および舵角5度では、左旋回の方が右旋回よりも旋回圏が小さくなった。しかし、舵角30度では、速力の違いや、左旋回と右旋回での旋回圏の大きさに違いは認められなかった。舵角30度での旋回圏は船の長さの3倍程度の50~60mであったが、GPSを利用することによって簡易にその大きさを測定することができた。

一般に鶴水のような小型船は、小型漁船、釣り船、レジャーボート等の多い沿岸海域を航行する。その場合、15度以下の舵角によって各船の間を縫って航走することが多い。従って、小角度の転舵で他船を避航しようとする場合、原針路に沿った進出距離は船の長さの6倍(舵角15度)~16倍(舵角5度)にも達することを考慮して操船すべきである。

以上の様に、GPSによる測位結果から速力と舵角の組み合わせによる旋回縦距と旋回径の関係を回帰直線で求めることが出来、実用的な旋回圏が容易に測定できることを確認することが出来た。旋回圏の形状、大きさは風潮流の方向と強さの影響を受けるから、精測するためにはそれらの外力のない場合を選ぶべきである。

今後はさらに速力試験や惰力試験等の各種試験にもGPSを応用すれば、操船者は随時自船の運動性能を簡易に把握することが可能であると言えよう。

## 第5章 結 言

洋上における船位の測位精度に関する研究は、新しい航法システムが実現される度に行われてきた。しかし、洋上で船位を確定する手段がないことと、これまでのシステムは、いつでも、どこでも、高精度で測位できるのではないため、限られた場所や、他システムとの比較という形で行われたにすぎず、そのシステム自体の誤差量を広範囲にわたって示したものは見られなかった。しかし、ここで次世代の航法システムと呼ばれるGPSの開発がなされ、極めて高精度の測位が可能となった。そこで本研究では、GPSの測位精度を求めるとともに、今後ますます重要になると考えられるその応用について示し、その有効性を確認した。

第2章では、GPSが開発されるまでの、船位測定システムの発展とその精度の研究史について概要を述べた。

電波航法の開発により、従来の天文航法では得られなかった「何時でも」は達成されたが、「何処でも」と言う目標は達成されなかった。この間は天文航法と電波航法の並存期間であった。その後、全世界的測位システムのオメガやNNSSが開発された。しかし、オメガは精度の面で不満が残り、NNSSは「何時でも」の面を満足できなかった。その様ななかで、海洋開発、地球物理など測位精度に対する要望は一段と高いものになった。さらに、水産界にあっては、200海里経済水域の設定により、操業位置の確認は極めて重要な問題となった。すなわち、各国間の船位測定方法の違いにより、領海侵犯の有無に関するトラブルも見られ、当事者間で同じ測位方法により船位を決定する必要があった。また、魚礁や



瀬付き魚群の位置確認、さらに底曳網における反覆操業などには、高精度と共に再現性の高いシステムが要望されてきた。測位精度の研究はその時点で最も信頼できるシステムを、いかに有効に利用することができるかの研究であったと言える。

第3章では、GPSの開発の経緯やシステム構成および測位方法や測位精度等、本システムについての概要を述べた。

GPSは前述のすべての条件を満足するシステムと言われているものの、開発途上においては、何時でも測位できたのではなく、また、衛星配置の関係で地域的な差も生じることが考えられた。そこで、陸上の定点における測定により、本システムの測位精度を求めると共に、異なる数地点で測定を行い、測位可能時間の違いやそれぞれの測位精度を明らかにした。また、衛星数の増加や軌道配置の変更により、本システムが本来の測位精度を確立するまでの経年変化を連続して求めてきた。これらにより、衛星数が少ない時点に見られた測定点による多少の差異も、ほぼ完成した現在ではほとんど見られなくなり、また測定時期による差もなく、極めて安定した測位システムであることを示した。

第4章では、高精度の測位が可能なGPSを応用することの有効性を確認するため、①GPSのバックアップシステムとして最適なロランCの定点における誤差を明かにした。五島灘、東シナ海東部および北太平洋西部海域などで測定し、洋上におけるロランCの誤差について示した。これに依って、洋上における測位をロランCに全面的に依存している小型漁船においても、より正確な位置を求めることができ、安全操業や経済運航に寄与出来るものと考えられる。

②表層流の測定への応用を試みた。まず、GPS船位を基準にして求めたレーダ・ブイの軌跡から流向・流速を求め、その結果と電流速計による測定結果がほぼ一致することを確認した。次いで、中部太平洋の漁業実習許可海域において、表層流の測定を行い、GPSが表層流測定に有効に利用できることを示した。

③船舶の操縦性能試験の一つである旋回圏測定への応用例として、総トン数1000トン型船（鶴洋丸）と小型船（鶴水）で測定を行った。その結果、鶴洋丸では公試運転によるものとはほぼ一致し、GPSを用いれば任意の速力と舵角による旋回圏が容易に求められることを示した。また、旋回圏が極めて小さい小型船においても、実用に適する精度で簡易に求め得ることを示した。これによって、操船者が任意のコンディションにおける操縦性能を簡便に確認でき、ひいては海難事故の減少に貢献できるものと考えられる。

今後の応用研究としては、

①GPSは一応完成された、すぐれた測位システムではあるが、米国の管理下にあり、いつその精度が変更されるかは不明である。従って、今後もGPSを有効に利用するためには、定点での測定を続け、常にその精度を確認していく必要がある。

②北西太平洋ロランCチェーンは、1994年10月から新島に主局を設置して新たに運用が開始された。従って、新チェーンの洋上における精度についても、GPSを用いた評価試験

を行う必要がある。

③航走中にもGPSと潮流計を利用して、簡易にかつ短時間で、表層流を求め得る方法を確立する。

④船舶の操縦性能試験のうち旋回圏の測定は簡易に行えることを示したが、それ以外の各種試験にも適用し、GPSを有効に利用する。

以上の様な諸問題を今後さらに研究し検討したいと考えている。いずれにしても、上記の研究はGPSの測位精度が維持されるという前提に立つものであり、米国が運用管理の上で測位精度を劣化させることのないよう願う次第である。

## 謝 辞

本研究に際し、当初より終始懇切丁寧な御指導、御鞭撻を頂いた長崎大学水産学部海洋情報科学講座 中根重勝教授に深く感謝し、厚く御礼を申し上げる。

なお本研究は海上での測定が中心であり、そのために多くの方々の御援助と御協力を頂いた。特に、長崎大学水産学部練習船鶴洋丸船長 秋重祐章助教授、長崎丸船長矢田植朗教授 初め両船乗組員の方々には、データ収集に際して多大の御便宜と御協力を頂いた。また同学部調査船鶴水の船長 古川素直技官始め乗組員各位には、かなり無理な運航もして頂いた。またデータ収集に際しては、日本無線（株）に便宜を計って頂き、ワイズ・パーソナルコンピュータ（株）森田正人氏、山田穰司氏に御協力頂いた。ここに併せて深謝の意を表す。さらに、海上実験でのデータ収集、図表作成にも常に多大の御協力を頂いた鶴洋丸二等航海士の久野俊行助手に厚く御礼を申し上げる。

## 参考文献

- 1) 高梨正夫：海洋法の知識，P106～143，成山堂，1979.
- 2) 多紀保彦 編著：世界の中の日本漁業，P22～65，成山堂，1993.
- 3) 木村小一：船の科学，船舶電子航法ノート（201），Vol. 47, No. 3, P81～85，船舶技術協会，1994.
- 4) 平岩節：交叉方位法，三点両角法による測定船位の精度分布，日本航海学会誌，41，P55～60，1969.
- 5) 平岩節：船位論，P24～44，成山堂，1971.
- 6) 鮫島直人：レーダプロットングによる他船の航過距離の誤差について，日本航海学会誌，22，P105～108，1960.
- 7) 中根重勝，吉村浩，合田政次：レーダ方位・距離の精度について，長崎大学水産学部研究報告，55，P33～37，1984.
- 8) 米田国三郎：北洋海域における漁船の位置測定，日本航海学会誌 航海，67，P11～15，1981.
- 9) 高木保昌，合田政次，中根重勝，久野俊行，吉村浩：天測計算における誤計算の出現頻度について，長崎大学水産学部研究報告，47，P83～89，1979.
- 10) 合田政次，高木保昌，中根重勝，久野俊行，吉村浩：天測計算における誤りの内容について，長崎大学水産学部研究報告，48，P65～70，1980.

- 11) 平岩節：太陽観測による船位測定について－Ⅲ，日本航海学会誌，26，P29～34，1961.
- 12) 箕原喜代美，加藤増夫，今吉文吉：ロランC信号の自動追尾航跡自画受信について，日本航海学会誌，41，P73～80，1969.
- 13) 田口一夫：オメガシステムの技術的展望，日本航海学会誌 航海，47，P9～17，1975.
- 14) 鮫島直人：ロラン位置の線の実測誤差について，日本航海学会誌，9，P35～41，1953.
- 15) 豊田清治：日本近海に於けるロラン測定精度の分布図について，日本航海学会誌，13，P35～42，1955.
- 16) 市瀬信夫，西谷芳雄，前田文郎：ロランに於ける空間波の伝搬誤差特性Ⅰ，日本航海学会誌，15，P57～62，1956.
- 17) 市瀬信夫，西谷芳雄，前田文郎：ロランに於ける空間波の伝搬誤差特性Ⅱ，日本航海学会誌，17，P15～21，1957.
- 18) 田口一夫：ロラン地表波測定値に変動を与える要因－Ⅴ，日本航海学会誌，37，P15～21，1967.
- 19) 米澤弓雄，大久保隆，三好雄一，西谷芳雄：ロランC自動受信指示器による観測結果に対する考察－Ⅰ，日本航海学会論文集，59，P67～74，1978.
- 20) 合田政次，中根重勝，日高昇：ロランCシステムの評価－Ⅰ，長崎大学水産学部研究報告，52，P55～61，1982.
- 21) 合田政次，中根重勝，吉村浩：ロランCシステムの評価－Ⅲ，長崎大学水産学部研究報告，53，P27～32，1982.
- 22) 合田政次，中根重勝，吉村浩：日本海南部沿岸海域における5970チェーンの精度，日本航海学会誌 航海，79，P9～14，1984.
- 23) 田口一夫，松野保久：航行用100KHz電波帯の伝搬特性の解析とそれらによる船位精度の改善－Ⅲ，日本航海学会誌，40，P89～95，1968.
- 24) 小野房吉，長森享二：ロランC電波の陸上伝搬効果の評価と補正図，日本航海学会誌 航海，85，P24～30，1985.
- 25) 鈴木裕一，原田幸夫：北海道デッカ波の位相速度，日本航海学会誌，40，P107～110，1968.
- 26) 渡辺泰夫：デッカ電波の山岳地における伝搬速度に関する一考察，日本航海学会論文集，55，P113～117，1976.
- 27) 田口一夫，山下享子：海洋中にある円形の島によるLF帯地表波の位相じょう乱，電子通信学会論文集，63B-3，P195～202，1980.
- 28) 田口一夫，山崎孝助，豊田瑞義，塩山寿男：航行用100KHz電波帯の伝搬特性の解析とそれらによる船位精度の改善，日本航海学会論文集，49，P129～135，1973.
- 29) 中根重勝，合田政次：北九州デッカチェーンの評価試験－Ⅳ，長崎大学水産学部研究報告，51，P41～49，1981.
- 30) 中根重勝，合田政次，高木保昌：北九州デッカチェーンの評価試験－Ⅲ，長崎大学水産学部研究報告，39，P17～23，1975.
- 31) 石井隆広雄，羽倉幸雄，永井清二，大内長七：オメガ電波の伝搬，日本航海学会誌 航海，47，P18～29，1975.
- 32) 田口一夫，木村小一：オメガ信号のCycle jump－ことに日本近海のハワイ局－，日本航海学会論文集，57，P47～55，1977.
- 33) 田口一夫：オメガ信号のCycle jump－Ⅱ，日本航海学会論文集，60，P21～28，1979.
- 34) 田口一夫：オメガ/VLF航法システムの海上実験，日本航海学会誌，43，P113～120，1970.
- 35) 矢吹英雄：オメガ船位の精度について，日本航海学会誌 航海，60，P36～43，1979.
- 36) 矢吹英雄，斉藤重信：オメガ船位の精度についてⅡ，日本航海学会誌 航海，67，P1～10，1981.
- 37) 矢吹英雄：オメガ船位の精度についてⅢ，日本航海学会誌 航海，69，P9～18，1981.
- 38) 長尾修爾：ベーリング海におけるロランCとオメガとの比較実験について，日本航海学会誌 航海，47，P47～50，1975.
- 39) 米田国三郎，佐々木成二：オメガシステムによる測得位置について，日本航海学会論文集，60，P13～19，1979.
- 40) 三好雄一，前田文郎：オメガ航法システムの利用実績についての調査結果－Ⅱ，日本航海学会論文集，61，P39～60，1979.
- 41) 木村小一：Navy Navigation Satellite Systemによる位置測定実験について，日本航海学会誌，44，P81～91，1970.
- 42) 木村小一，奈須英臣，庄司和民：NNSSによる測位の精度について，日本航海学会誌 航海，42，P67～72，1974.
- 43) 木村小一，奈須英臣：電波伝搬上の屈折効果がNNSS測位に及ぼす影響，日本航海学会論文集，49，P103～108，1973.
- 44) 奈須英臣，木村小一：電離層屈折によるNNSS測位誤差の一計算方法，日本航海学会論文集，52，P117～123，1974.
- 45) 奈須英臣，木村小一：400MHz 1波NNSS受信測位精度改善の一方法，日本航海学会論文集，59，P99～107，1978.
- 46) 進士晃：測地系変換図（海図6019号）の刊行，日本航海学会誌 航海，50，P47～52，1976.
- 47) 樽美幸雄，和気博嗣，上原雅：NNSSの定点における測位精度－Ⅰ，日本航海学会論文集，58，P41～50，1977.
- 48) 西野朝生，木村小一：星光丸における船位決定システムの評価について，日本航海学会論文集，47，P35～44，1972.
- 49) 安田岩男，松原昭一，矢吹英雄，津留勇：大成丸によるNNSSの評価，日本航海学会誌 航海，40，P41～50，1973.
- 50) 樽美幸雄，和気博嗣，春名浩一，米澤弓雄，岩本誠之，松本修典：NNSSの定点における測位精度－Ⅲ，日本航海学会論文集，62，P23～31，1980.

- 51) 吉村浩, 中根重勝, 合田政次: 長崎港内の定点における衛星航法システムの評価について, 長崎大学水産学部研究報告, 48, P41~47, 1980.
- 52) 樽美幸雄: 商船における NNSS の使用実態について, 日本航海学会誌 航海, 62, P20~27, 1979.
- 53) 木村小一: 衛星航法システム, 航法システムシンポジウム, P83~108, 日本航海学会, 1985.
- 54) 飯島幸人: NAVSTAR/GPS <全世界測位システム>, GPS電波の受信と位置の決定, P50~67, 1987.
- 55) 木村小一: 双曲線航法と衛星航法の G D O P, 日本航海学会論文集, 72, P41~48, 1985.
- 56) E.R.Swanson: Geometric Dilution of Precision, NAVIGATION, Vol.25, No.4, P425, 1978.
- 57) J.F.Roebera: Accuracy: What Is It? Why Do I Need It? How Much Do I Need?, NAVIGATION, Vol.30, No.2, P171~178, 1983.
- 58) Stelios Mertikas, David Wells, Peter Leenhouts: Treatment of Navigational Accuracies: Proposals for the Future, NAVIGATION, Vol.32, No.1, P68~84, 1985.
- 59) Richard L.Greenspan, James I.Donna: Measurement Errors in GPS Observables, NAVIGATION, Vol.33, No.4, P319~334, 1986.
- 60) 木村小一: 船の科学, 船舶電子航法ノート (128), Vol.41, No.1, P104~108, 船舶技術協会, 1988.
- 61) 西周次: NAVSTAR/GPS (全世界測位システム) の紹介, 日本航海学会誌 航海, 62, P9~19, 1979.
- 62) 山田耕司, 山岡登, 奥山昭, 中村幹男, 羽田陸雄, 川添利洋: GPS航法装置, 日本無線技報, 24, P16~23, 1986.
- 63) 木村小一: 衛星航法システムの現状と将来, 日本航海学会誌 航海, 84, P8~13, 1985.
- 64) 隅川芳雄, 長友洪太, 貞包弘之, 実藤了, 水谷壮太郎: GPS航法装置の定点における測位精度について, 日本航海学会誌 航海, 90, P58~63, 1986.
- 65) Patrick Fell: Geodetic Positioning Using a Global Positioning System of Satellites, IEEE PLANS 80 POSITION LOCAT NAVIG SYMP REC, P42~47, 1980.
- 66) Walter J.Senus, Robert W. Hill: GPS Application to Mapping, Charting and Geodesy, PROC NATL AEROSP MEET, P51~55, 1981.
- 67) John T.Carr, James W.O'Toole: Point Positioning with the Navstar Global Positioning System, REC IEEE PLANS 82 POSITION LOCAT NAVIG SYMP, P166~170, 1982.
- 68) Marc Weiss: Position Location Using Sequential GPS Measurements, REC PLANS 82 POSITION LOCAT NAVIG SYMP, P275~278, 1982.
- 69) Rudolph M.Kalafus, Gerald Y.Chin: Measures of Accuracy in the NAVSTAR/GPS: 2DRMS VS. CEP, PROC NATL TECH MEET INST NAVIG, P49~54, 1986.
- 70) Francis W.Mooney: Terrestrial Evaluation of the Global Positioning System(GPS), Standard Positioning Service(SPS), PROC NATL TECH MEET INST NAVIG, P81~88, 1986.
- 71) 合田政次, 中根重勝, 久野俊行: GPSの測位精度-I 陸上定点における測定, 長崎大学水産学部研究報告, 62, P33~40, 1987.
- 72) 今津隼馬: 海技士コース (1月号), GPS-Global Positioning System-, P53~56, 海文堂, 1992.
- 73) 合田政次, 久野俊行, 中根重勝: GPSの測位精度-II 二定点における同時測定, 長崎大学水産学部研究報告, 63, P55~63, 1988.
- 74) 久野俊行, 合田政次, 中根重勝, 趙 乙済: GPSの測位精度-III 同型受信機による同時測定, 長崎大学水産学部研究報告, 64, P17~22, 1988.
- 75) 熊谷博, 皆越尚紀: GPS測位に及ぼす電離圏の影響(b) 電波シンチレーション, GPSの測地利用および応用に関するシンポジウム集録, P78~81, 1987.
- 76) 田口一夫: ロランCとデッカ電波の伝搬-II, 日本航海学会誌 航海, 93, P93~100, 1986.
- 77) 合田政次, 久野俊行, 中根重勝: GPSの定点における測位精度, 日本航海学会誌 航海, 102, P27~33, 1989.
- 78) 合田政次, 久野俊行, 中根重勝, 趙 乙済: GPSの測位精度-IV 三定点における測定, 長崎大学水産学部研究報告, 65, P45~53, 1989.
- 79) 合田政次, 久野俊行, 中根重勝: GPSの測位精度-V 高安定発振器の利用について, 長崎大学水産学部研究報告, 66, P31~36, 1989.
- 80) 久野俊行, 合田政次, 中根重勝: GPSの測位精度-VI 海外の二定点における測定, 長崎大学水産学部研究報告, 67, P21~29, 1990.
- 81) 合田政次, 久野俊行, 中根重勝: GPSの測位精度-VII 陸上定点における測定 (2), 長崎大学水産学部研究報告, 69, P43~48, 1990.
- 82) 久野俊行, 合田政次, 中根重勝: GPSの測位精度-VIII 海外の定点における測定 (2), 長崎大学水産学部研究報告, 70, P19~28, 1991.
- 83) 合田政次, 久野俊行, 中根重勝: GPSとロランCの陸上定点における相対誤差, 長崎大学水産学部研究報告, 68, P53~60, 1990.
- 84) 木村小一: 船の科学, 船舶電子航法ノート (119), Vol.40, No.4, P82~85, 船舶技術協会, 1987.
- 85) 田口一夫: ロランCとデッカ電波の伝搬-I, 日本航海学会誌 航海, 92, P45~53, 1987.
- 86) 濱田悦之, 斎藤清隆, 鈴木裕: ロランCの陸上伝搬速度による補正とその効果について, 日本航海学会論文集, 63, P71~75, 1980.
- 87) 濱田悦之, 斎藤清隆: ロランCの陸上伝搬速度による補正とその効果について-II, 日本航海学会論文集, 65, P83~87, 1981.

- 88) 斎藤清隆, 濱田悦之, 春日功, 栗田嘉有, 喜多澤彰: ロランCの陸上伝搬速度による補正とその効果について—Ⅲ, 日本航海学会論文集, 67, P109~114, 1982.
- 89) 河口信義, 澄川修一, 新井康夫, 米澤弓雄, 微原和栄, 新井勉: ロランC時間差測定値の修正に関する考察, 日本航海学会論文集, 70, P79~84, 1984.
- 90) Robert B.Doherty, J.Balgh JOhler: Loran-C: An Overview of Operational and Propagation Characteristics, AGARD CONF PROC, P39-1~39-4, 1982.
- 91) 合田政次, 久野俊行, 中根重勝: 五島灘におけるGPSとロランC9970チェーンの相対誤差, 日本航海学会誌航海, 106, P1~8, 1990.
- 92) 合田政次, 久野俊行, 中根重勝: 東シナ海東部海域におけるGPSとロランCの相対誤差, 長崎大学水産学部研究報告, 71, P177~185, 1992.
- 93) 久野俊行, 合田政次, 中根重勝: 北太平洋西部海域におけるGPSとロランCの相対誤差, 長崎大学水産学部研究報告, 74, 75合併号, P1~7, 1993.
- 94) 久野俊行, 合田政次, 中根重勝: 北太平洋西部海域におけるGPSとロランC9970チェーンの相対誤差, 日本航海学会誌 NAVIGATION, 121, P31~35, 1994.
- 95) 合田政次, 久野俊行, 中根重勝: GPSを用いての表層流の測定, 日本航海学会誌航海, 110, P21~24, 1991.
- 96) 合田政次, 久野俊行, 中根重勝: GPSを用いての海流の測定, 日本航海学会誌 NAVIGATION, 118, P9~14, 1993.
- 97) 小倉通男 編著: 水産と情報, P1~29, P92~127, 成山堂, 1988.
- 98) 竹内正一, 小倉通男: サケ, マス延縄漁業における漁業情報の信頼性, 東水大研報, 67(2), P97~102, 1981.
- 99) 佐藤祐二: 北部太平洋における近海資源の漁況予測の現水産海洋研報, 35, P83~86, 1979.
- 100) 平野敏行: 漁海況予報の歴史的展望, 海洋科学, 16(1), P656~659, 1984.
- 101) 為石日出生: 漁業における衛星リモートセンシングの応用, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.5, No.3, P51~69, 1985.
- 102) 為石日出生: 漁業情報のための赤外リモートセンシング, 海洋科学, Vol.17, P453~463, 1985.
- 103) 小長谷庸夫, 内田誠, 藤田弘一: 漁業情報のための衛星画像の等温線解析, 日本水産学会誌, 54(2), P161~166, 1988.
- 104) 小倉通男, 竹内正一: 漁業情報学概論, P152~176, 成山堂, 1990.
- 105) 奥田成幸, 岡本康裕: 狭水道におけるGPSの受信状況, 日本航海学会誌航海, 111, P9~18, 1992.
- 106) 林忠夫: 漁労におけるGPSの利用, 日本航海学会誌航海, 111, P19~29, 1992.
- 107) 東海林明, 並木由美子: GPSを用いた海図プロッタの利用について, 日本航海学会誌航海, 112, P60~66, 1992.
- 108) 合田政次, 久野俊行, 中根重勝: GPSを用いての旋回圏の測定, 日本航海学会誌航海, 114, P32~37, 1992.
- 109) 合田政次, 久野俊行, 中根重勝: GPSを用いての旋回圏の測定—Ⅱ, 日本航海学会誌 NAVIGATION, 121, P36~39, 1994.
- 110) 大串雅信: 理論船舶工学 (下巻), P247~264, 海文堂, 1975.
- 111) 日本海難防止協会編: 超大型船操船の手引き, P4~35, 日本海難防止協会, 1970.
- 112) 志波久光: 舵と旋回, P28~47, 成山堂, 1971.