

関門海域における海上測位のためのリアルタイム GPS システムの高度化と性能検証

浜田賢二¹・福森利夫²・中井 修³・林 忠夫⁴・清水則一⁵・中川浩二⁶

¹正会員 運輸省港湾局技術課 技術調査官 (〒100 東京都千代田区霞が関 2-1-3)

²運輸省第四港湾建設局下関機械整備事務所 調査課長

³正会員 運輸省第四港湾建設局 前次長

⁴古野電気(株)技術研究所 第3研究室長

⁵正会員 博(工) 山口大学助教授 工学部社会建設工学科

⁶正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科

GPS 海上測位技術を関門地区のほぼ全海域に普及させるため、筆者らがこれまでに開発した GPS 海上測位システムをさらに高度化し、その測位性能と信頼性の向上を図った。

高精度かつ確実なリアルタイム海上測位のためには、基準局・移動局間の無線通信と整数値バイアスを決定する初期化の性能向上が不可欠であり、このために無線通信アンテナを改良するとともに通信エラー訂正機能を追加して無線通信システムを高度化し、また2周波方式オンザフライ初期化技術も導入した。

関門海域においてこの高度化実用測位システムの現地実験を行った結果、高度化された測位性能、現地への適用上問題となる関門橋の影響範囲等が明らかになった。

Key Words: GPS, marine surveying, wireless transmission, On The Fly calibration, field tests

1. まえがき

近年、人工衛星を用いた高精度測位システム GPS (Global Positioning System) が測量や交通機関の航行援助等に利用されてきている。筆者らも、GPS を港湾の工事や深浅測量に応用するために、これまでリアルタイム海上測位システムの開発を行ってきた¹⁾²⁾。その結果、試作された実用システム(以下、一号機と記す)は、関門海峡海域における現地実験により、所期の実用性能を有していることが確認されている²⁾。

GPS による高精度測位は、一般には相対測位法によって行われ、観測点の3次元座標は座標既知の基準点からの相対座標として求められる。この相対測位法には、測位に必要な衛星と測位点間の距離計算を、衛星電波に乗っているコードの解読によって行うトランスロケーション測位法³⁾(以下 DGPS と記す)と、衛星電波の搬送波の位相計測によって行う干渉測位法の2種類がある。干渉測位法は、測位を開始する前に衛星電波の整数波長分、いわゆる整数値バイアスを決定する初期化と呼ばれる作業が必要であるが、測位精度は GPS による測位方法の中で最も高い。

筆者らの開発した一号機は、一点測位法(単独測位法)から干渉測位法まで適用できるものであり、さらに測位点(以下移動局と記す)の連続した移動にも追従可能な

キネマティック(動的)測位システムである。また同機は、衛星電波の L1 帯(周波数 1.5754 GHz)を使用する1周波方式のオンザフライ(On The Fly, 以下 OTF と記す)初期化技術を採用している。OTF は、DGPS の解を基に最小自乗法の原理を用いて整数値バイアスを精度良く求めるものであり¹⁾、初期化の完了までに時間がかかる反面、移動局が動いていても初期化の作業を行うことができ、海上でのリアルタイムキネマティック測位に適している。さらに同機は、適用範囲を広くするために、基準局から移動局への測位演算補正データの送信に、周波数 70 MHz 帯の独自の無線通信システムを採用している¹⁾。

筆者らは、関門地域における高精度海上測位のためのリアルタイム GPS システムの開発を行ってきたが、同地域は海峡の両岸に山地が多いため、無線通信の観点からはかなり不利な地域である。事実、GPS 相対測位に必要な基地局・移動局間の無線通信では、山の影や海面反射などによる干渉のために複数箇所において通信エラーの発生が観測されている²⁾。海上において OTF 初期化やリアルタイム相対測位を迅速かつ正確に行うためには、基地局・移動局間の無線通信が正常であることが必要であり、この無線通信能力によって相対測位の性能が左右される。

前報¹⁾²⁾までに、GPS 海上測位技術の関門地区全域へ

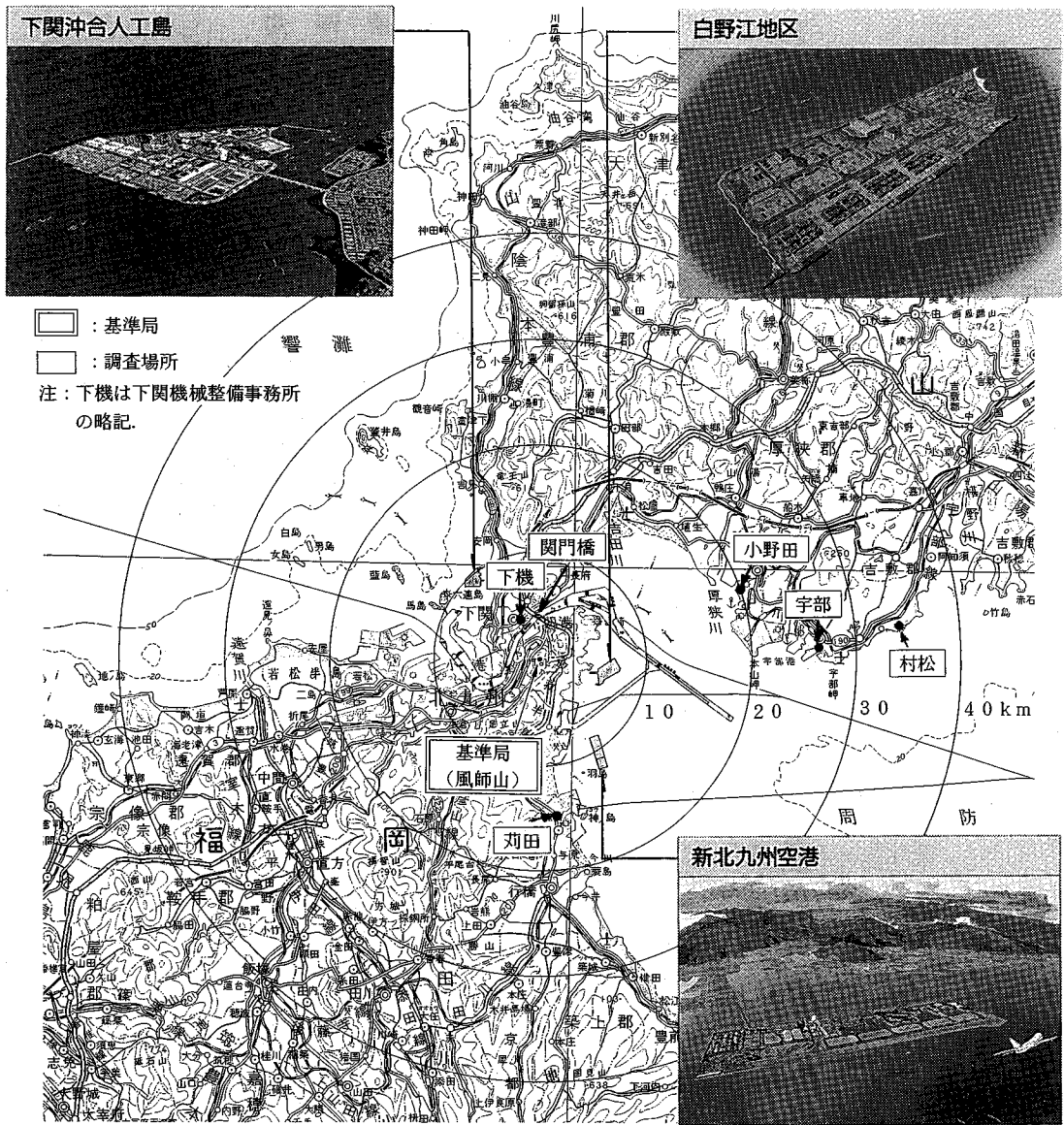


図-1 GPS海上測位システムの適用海域

の普及を促進するためには、上記の無線通信エラーの発生場所を減らすとともに、人工島等の港湾工事の沖合展開にも対応できるように適用範囲を拡大して、操作性や信頼性をより高める必要があることが認められた。このためにアンテナを含む無線通信送・受信機を改良するとともに、新たに開発した無線通信エラー訂正機能を追加して無線通信システムの高度化を図った。さらに、近年実用化された2周波方式OTF初期化技術も導入し、GPS海上測位システム実用機のレベルアップを図った。この普及型実用システムを以下二号機と記す。

本論文は、無線通信システムの高度化を図った実用二

号機の特徴と、関門地域における測位性能について、1) 無線通信システムの高度化改良効果、2) 初期化性能と測位精度、3) 関門橋の影響、4) 船上アンテナの最適設置場所、に関する調査結果を述べることにより本地域における適用性を示すものである。

2. 無線通信システムの高度化と実用二号機の構成

(1) GPS無線通信システムの高度化

開発したGPS海上測位システムでは、基準局と移動

局それぞれに、電波の伝搬経路による誤差を相殺するために同一のGPS電波受信機を設置する。本システムでは、無線により基準局から移動局へ補正データが送信され、OTF初期化や基準局に対する移動局の3次元相対座標のリアルタイム測位が行われる。本方式は、基準局・移動局間の3次元基線ベクトルが計測されることから3次元方式と呼ばれる³⁾。

基準局から移動局への補正データの送信には、一号機、二号機とも基本的には障害物に対する電波の回折効果等を考慮して、周波数72.65 MHz、占有周波数帯域幅16 kHz、出力3 wattのFM無線通信システムを採用している。

適用海域である関門地区(図-1)においては、風師山(北九州市門司区、図-1参照)を基準局の最適地として選んだが、一号機の無線通信システムは、屈曲した関門海峡と兩岸の山地という地域特性から、電波の受信レベルが低下し、通信エラー発生率が增大する範囲が存在する²⁾。通信エラー発生時はOTF初期化や相対測位を行うことができないため、GPS測位技術の実用レベルでの普及を図るためには、通信エラーの発生を押さえ、無線通信の信頼性を向上させることが重要である。

上記理由から一号機の無線通信システムの高度化改良を行い、海峡部のみならず広範な関門海域全域への普及を目的とした実用二号機を開発した。風師山を基準局としたGPS海上測位システムの適用区域、将来本システムの適用計画がある沖合人工島構想等を図-1に示す。

今回の無線通信システムの高度化により、二号機では以下の2項目について一号機の性能が改善された。一つは送・受信アンテナ部の改良によって移動局における受信能力が高められ、これにより通信エラーの発生そのものが減少して通信範囲の拡大が図られる。もう一つは、移動局で発生した無線通信エラーがソフト的に訂正されて正しいデータが復元されることである。これらの詳細について以下に記述する。

a) 送・受信アンテナ部の高度化

無線通信エラーを減少させるためには、移動局において必要レベル以上の電波を安定して受信できるようにすることが重要である。このために二号機では、技術的により高度な送・受信アンテナシステムを導入した。

基準局の送信アンテナは、一号機では $1/2\lambda$ 単一型(アンテナ長さが波長 λ の $1/2$ 倍のもの1本を使用する型式)であったが、これを $5/8\lambda$ 2段単一型(長さが λ の $5/8$ 倍のアンテナ2本を組み合わせた型式)に変更した。後者は前者に比べて垂直指向特性が下向きとなり、地表伝搬成分が大きくなり、空間上方への電波の放散割合が減少する。これにより、送信機の出力値を変えずに送信アンテナの出力レベルを実質的に増加させることができる。

一方、移動局の受信アンテナについては、これまでは $1/2\lambda$ 単一型1本だけであったが、二号機システムでは、空間的に隔てた一对のアンテナを使用するスペースダイバーシティアンテナ(以下、SDアンテナと記す)を採用した。SDアンテナ方式は複数のアンテナを用い、フェージングによって変動する無線電波受信レベルの空間的、時間的変動に対して、最も受信レベルの高いアンテナを選択して使用方法である。なお、フェージングとは、電波が伝搬する通路上の媒質の動揺や直接波と間接波の干渉などによって電波の受信電界強度が空間的、時間的に急速に変動する現象である。

リアルタイムGPS干渉測位法の場合には、SDアンテナの切り換え時にも、空間的に隔たった両アンテナの受信電波の位相差に起因するデータの不連続性のために発生する伝送エラーを防止する必要がある。このために二号機では、アンテナばかりでなく受信機も2台用意されている。これによってデジタル変換した受信信号をチェックして切り換えの処理を行うため、データの連続性を保つことができる。

単一アンテナ方式では、フェージングの影響を考慮して、受信機の必要入力レベルを余裕分(フェージングマージン)だけ高めに設定する必要がある。しかしながら、SDアンテナ方式の場合にはフェージングマージンを低い値とすることができ、この分だけ必要入力レベルを低減できるため、より遠方の地点でも受信可能となる。

上記の送・受信アンテナの高度化改良により、障害物がない場合の無線通信可能距離は、アンテナ配置や送信出力等の条件をもとに電波の伝搬理論⁴⁾等によって概算すると、一号機の約15~20 kmと比べて二号機では約35~40 kmとなる。

b) 通信エラー訂正機能の追加

無線電波は、障害物、通信距離の増大、建物等からの反射波による干渉などによって減衰し、通信エラーの発生する確率が增大する。開発したGPS海上測位システムでは、1秒単位で基準局から移動局に補正データを送信するため、この単位時間中の1ビットでもエラーになれば、1秒全体の補正データが無効となる。そこで通信エラーが発生してもソフト的にこれを訂正し、OTF初期化や干渉法測位を中断しない機能を新たに開発して二号機に組み込んだ。この通信エラー訂正の基本的な処理手順は以下の通りである。

まず基準局において、デジタル化した送信すべき補正データ8ビット毎に、そのデータの値に対応した4ビットのエラー訂正コードを作成する。次に、これらを結合した12ビット単位のエラー訂正符号付き補正データをFM変調して移動局に送信する。移動局では復号機によって受信データを復元し、エラー訂正コードを検定してエラーの検出および訂正を行う。本訂正機能を組み込

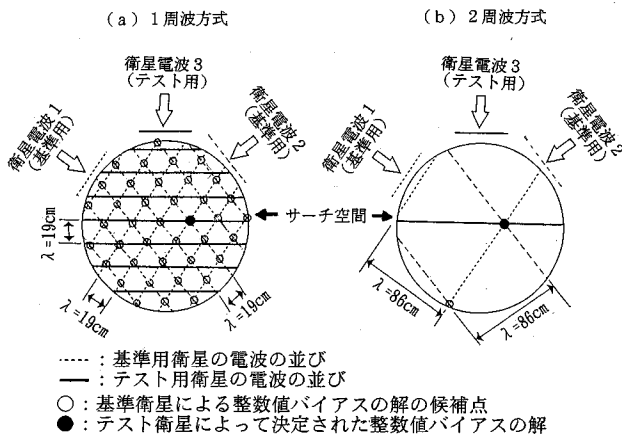


図-2 OTF 初期化の概念図

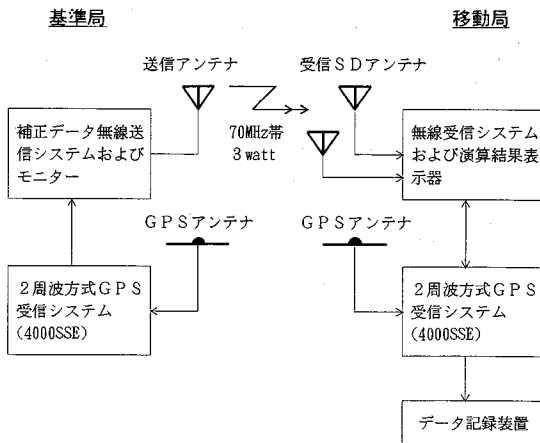


図-3 二号機システムの構成

んだ二号機を用いてその能力を検査した結果、連続20ビットの通信エラーまで訂正できることが確認された。

通信エラー訂正機能の追加によって上記の性能向上が得られるが、その反面、無線送信データ量は大幅に増加する。一号機の無線免許登録データ伝送速度は2,400 BPS (Bits Per Sec.)であったが、二号機の場合には、後述の2周波方式OTFに伴う増加分も含めたデータについて上記通信エラー訂正コードを付加する必要があるため、9,600 BPSに変更した。

(2) 2周波方式OTF初期化技術⁵⁾の導入

一号機の場合のOTF初期化は、GPS衛星の発する2種類の電波(L1帯および周波数1.2276 GHzのL2帯)のうちのL1帯を使用する1周波方式であった。一号機の場合の実用上のOTF初期化可能距離は約6 kmであり²⁾、関門海峡部には対応できるが、今後の関門海域全域への普及を想定すると必ずしも十分とはいえない。この

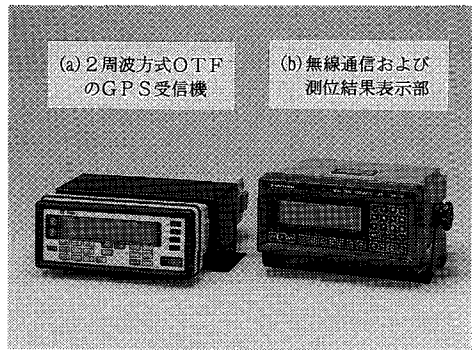


写真-1 GPS 二号機システムの構成

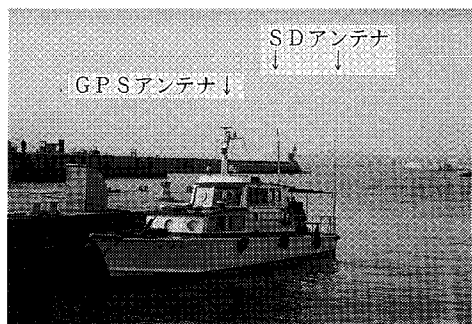


写真-2 海上航行実験船の外観とアンテナの配置

ため、近年開発された2周波方式OTF初期化技術を二号機に導入し、所要時間の短縮と初期化可能範囲の拡大を図った。

1周波方式および2周波方式OTF初期化の概念を図-2に示す。実際のサーチ空間は3次元であるが、同図は簡素化して2次元表示としてある。

2周波方式OTFにおいて整数値バイアスを決定する基本的な概念は1周波方式と同様である。すなわち、まずトランスロケーション法によって求めた仮の測位解を中心とし、真の解を含む球状のサーチ空間を定める。次に基準衛星の電波(図-2では衛星電波1および2)を用いて、サーチ空間内の整数値バイアスの解の候補点(図中の○印)を求める。そして基準衛星以外のテスト衛星の電波(図中の衛星電波3)によるテスト用の解と、サーチ空間内のすべての解の候補点の残差について最小自乗法を適用し、これらの中から真の整数値バイアスの値(図中の●印)を算定するものである¹⁾。

1周波方式OTFにおけるサーチ空間内の解の候補は、L1帯の電波の波長19 cmピッチで形成される。一方2周波方式では、L1帯とL2帯の搬送波の差をとって生成した周波数約348 MHzの電波を使用するため(ワイドレイン方式とも呼ばれる⁵⁾)、サーチ空間内の解の候補

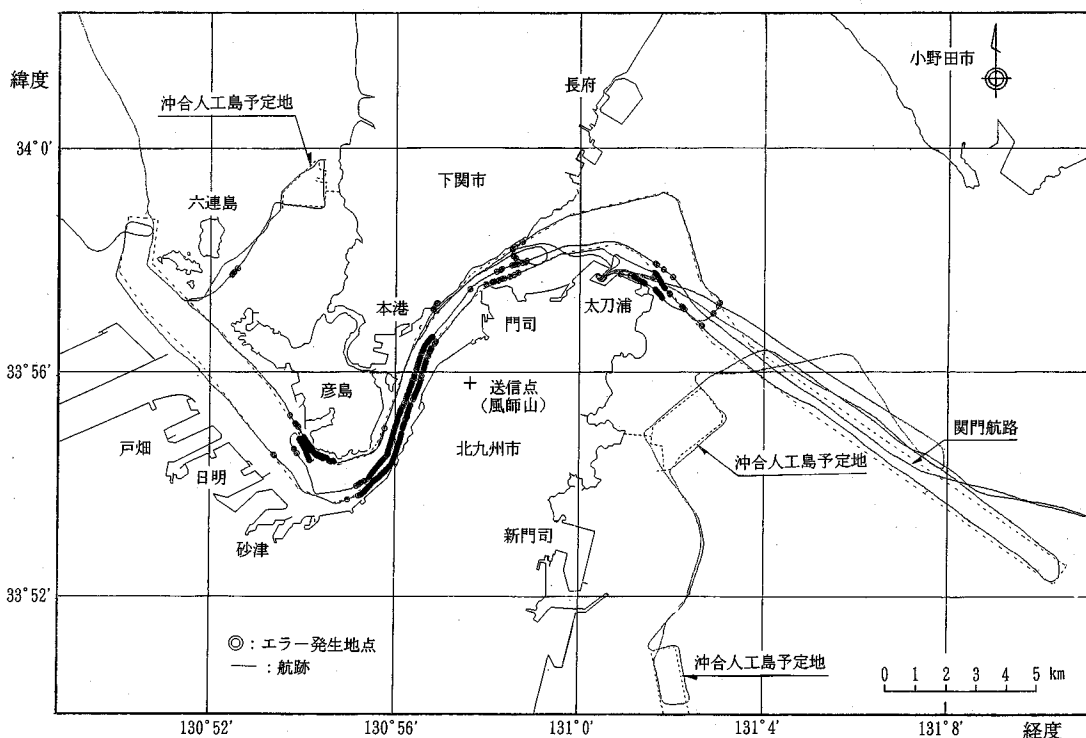


図-4 一号機無線通信システムの場合のエラー発生分布

はその波長約 86 cm のピッチで形成される。したがって 2 周波方式の場合は、1 周波方式と比べるとサーチ空間内の解の候補点数が約 $1/100$ ($(19/86)^3$) に減少するため、サーチ時間が短縮すると同時に誤った解を採用する確率も減少する。

一方、基準局・移動局間の距離が長くなると、電離層や対流圏による電波遅延誤差の程度が両局間で異ってくる。したがって両局における電波計測値の差をとって誤差をキャンセルすることができなくなり、初期化が不能となる。この電波遅延誤差によってサーチ空間内の解の候補点の位置が変動するため、同一変動に対してはサーチ空間内の解の候補点の間隔が広いほど影響の比率が小さい。すなわち、初期化に使用する電波の波長が長い 2 周波方式の方が電波遅延誤差に対する許容値が大きいいため、初期化可能範囲も拡大することになる。

二号機システムは、2 周波方式 OTF の GPS 受信機と筆者らが開発した無線通信および測位結果表示部から構成されている。二号機システムの外観を写真-1 に、また基準局および移動局における機器の構成を図-3 に示す。2 周波方式 GPS 受信機は、単独測位演算と無線通信部が受信した基準局の補正データを基にした OTF および相対測位演算を行い、その結果を WGS-84 座標系 (World Geodetic System 1984) として測位結果表示部に伝送する。測位結果表示部では、これを必要な座標系

(基準局からの相対座標値、日本測地系への変換値等) に変換して表示する。また同表示部には、移動局の速度および進行方向、無線通信状況、衛星情報、各種警報等も表示される。

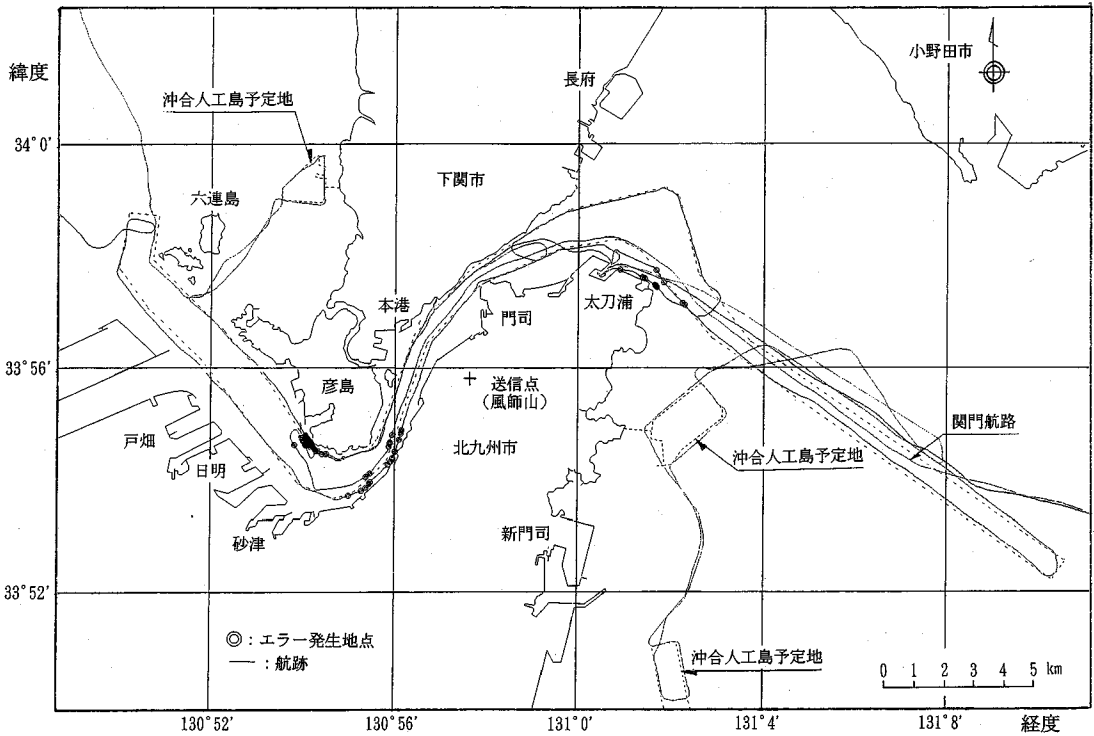
なお二号機システムでは、OTF 初期化は 2 周波方式であるが、初期化後の測位は一号機と同様に L1 帯による 1 周波方式である。

3. GPS 二号機システムの測位性能の検証

GPS 海上測位システム二号機の高度化改良の効果およびその測位性能を検証するため、図-1 に示す今後の適用海域において現地調査を行った。調査項目は大別すると、無線通信システムの高度化改良効果、初期化性能および測位精度、関門橋の影響評価、GPS 受信アンテナの最適船上設置場所の 4 項目であり、これらの結果は以下のとおりである。

(1) 無線通信システムの高度化改良効果

図-1 に示した広範な海域を無線通信の対象とした場合、基準局は地理的に中心部に位置し、しかも全体の見通しがよい高所に設置することが望ましい。このために風師山を選定したが、関門海域の地理的条件から、基準局からの見通しが良好でない海域が数カ所存在する。70



図一五 二号機無線通信システムの場合のエラー発生分布（通信エラー補正機能なし）

MHz帯の無線電波は、障害物の影の部分でもある程度は回折して到達する。しかしながら、その回折の程度が急な場合には電波が届きにくくなって受信電波の入力レベルが低下し、通信エラー発生の確率が高くなる。

上記の地理的要因による通信エラー発生個所の分布と高度化改良の効果を調べるために、移動局を実験船（20総トン、全長16.5m）に装備して関門海域を航行してデータを収集した。実験船の外観とGPSアンテナおよび無線受信アンテナ（この場合はSDアンテナ）の配置状況を写真一2に示す。

この海上航行実験は、一号機無線システム（送信側： $1/2\lambda$ 単一型、受信側：単一アンテナ）と、二号機無線システム（送信側： $5/8\lambda$ 2段単一型、受信側：SDアンテナ）の両方の場合を実施した。計測された無線通信エラー発生個所の航跡上の分布を一号機無線システムの場合を図一4に、二号機無線システムの場合を図一5にそれぞれ示す。ただし、図一4、5とも通信エラー訂正機能なしの場合の結果である。

風師山を基準局とした場合の一号機無線システムでは、図一4より関門海峡内の山影となる海域と太刀浦（北九州市）沖合において受信レベルが低下して通信エラーが発生している。しかしながら図一5より、二号機無線システムの場合には無線システムの高度化（送・受信アンテナの改良）によって、受信レベルが低下しても通信

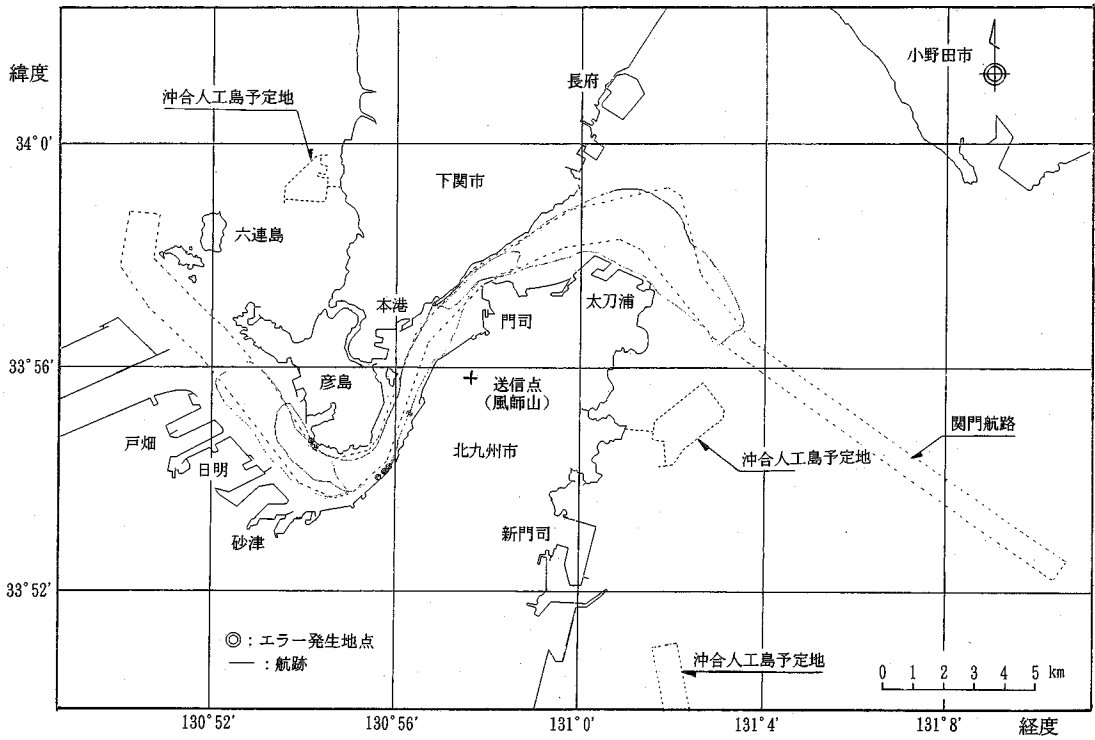
エラーの発生が大幅に抑制されていることがわかる。

さらに二号機の通信エラー訂正機能を用いた効果を図一6に示す。これを図一5と比較すると、太刀浦沖のエラー発生がなくなると同時に、彦島沖合のエラー発生個所も大幅に減少しており、より一層の適用範囲の拡大が図られたことが示されている。

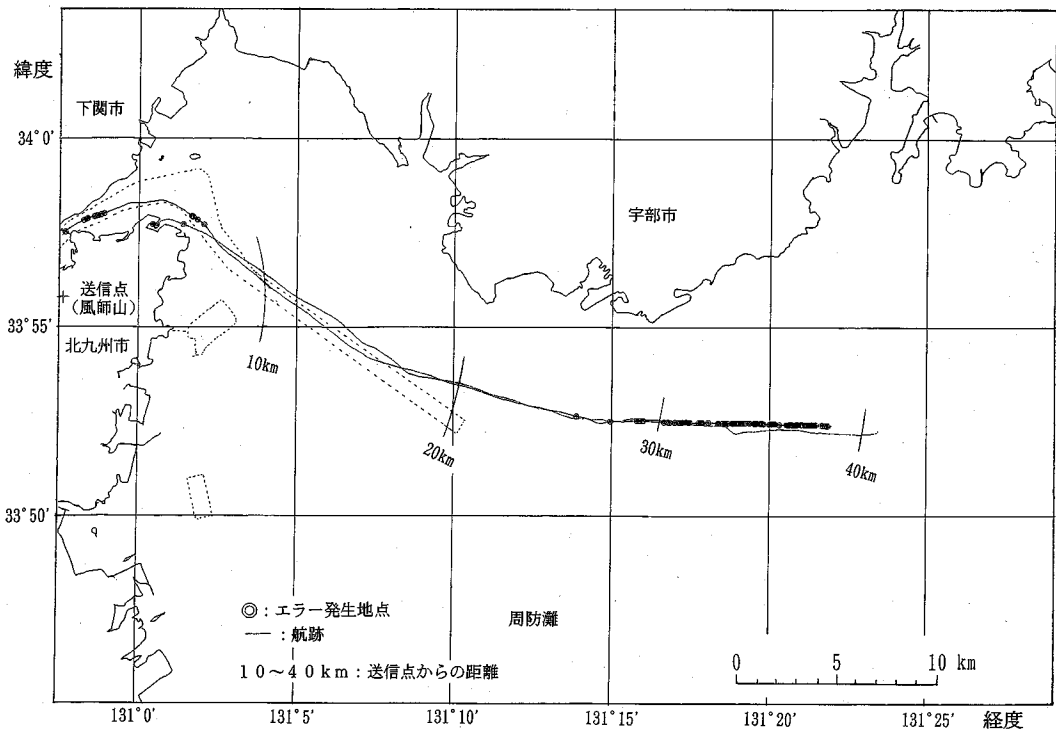
一方、障害物がなく通信条件が良い場合には、一号機無線システムの通信可能範囲は約15~20km¹⁾、二号機無線システムのそれは前述のように約35~40kmと推定される。これらの条件を満足する関門航路東部海域、新門司沖海域等は図一4、5より、一号機や二号機の通信エラー訂正機能がない場合でも無線通信状態は良好である。

無線システムについてはさらに、上記の障害物がない場合の通信可能範囲を確認するため、実験船を遠距離まで航行させて通信エラー発生限界に関する実験を行った。その結果を一号機無線システムについて図一7に、二号機無線システムについて図一8にそれぞれ示す。ただし、両図とも通信エラー訂正機能なしの場合である。

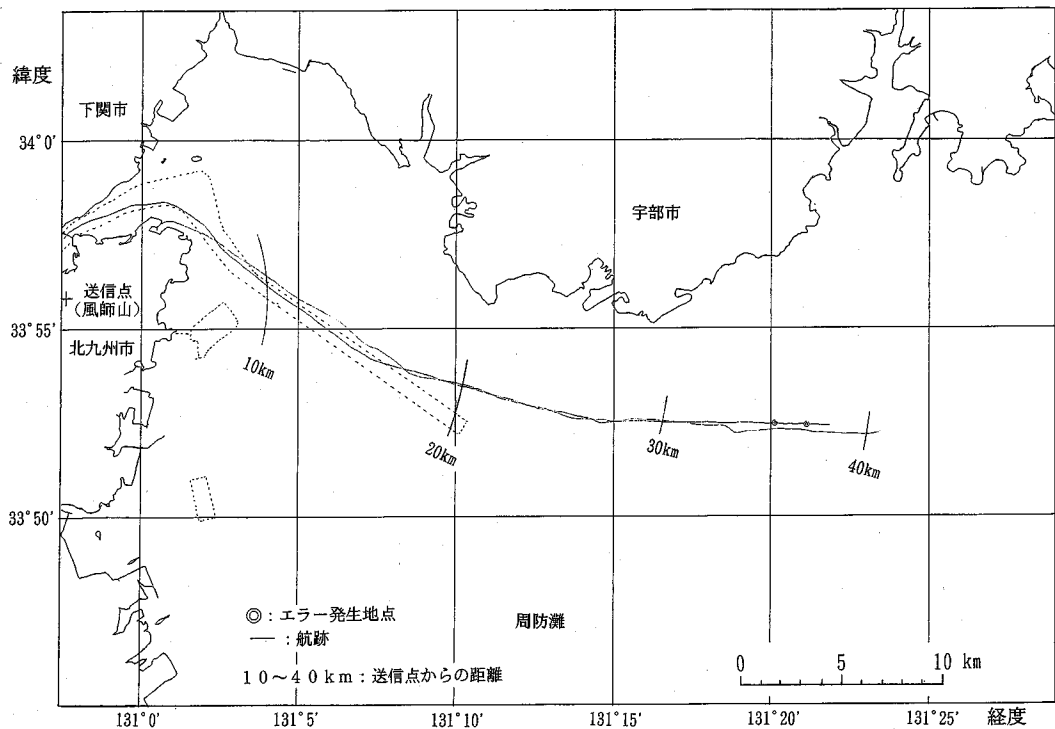
図一7より、一号機無線システムの場合には約26kmまで通信可能となっているが、これは観測時の通信条件が良く、単一アンテナ方式の能力算定時に考慮するフェージングマージン（2.(1)a参照）の余裕量が通信可能距離の増大となって現れたものと考えられる。また図



図一六 二号機無線通信システムの場合のエラー発生分布（通信エラー補正機能あり）



図一七 一号機無線通信システムの場合の通信可能距離



図一八 二号機無線通信システムの場合の通信可能距離 (通信エラー補正機能なし)

一八より二号機無線システムの場合には、約35km程度までは信頼性の高い無線通信が可能と考えられる。

以上より、風師山に基準局を設置した場合の二号機無線システムの高度化の効果が明らかになり、その通信性能から同システムは、今後GPS測位技術の関門地区におけるより広範な普及に適用可能と考えられる。ただし、図一六における通信エラー発生海域において正確かつ迅速にGPS測位を行う場合には、見通しの良い場所に基準局を別途設置することなども一案と考えられる。

(2) 二号機システムの初期化性能および測位精度

今回の2周波方式OTF初期化技術の導入は、初期化範囲の拡大と所要時間の短縮を目的としたものであり、これを確認するため、基準局を風師山とした場合の初期化性能を種々の基線長(調査地点は図一参考)について計測した。計測方法は、初期化完了後一定時間(本調査では5分間)干渉法キネマティック測位モード(以下KGPSと記す)が継続すれば、強制的に衛星電波を遮断して再度初期化を開始する。この手順を衛星配置が見かけ上一巡する約24時間実施する。

この調査結果を表一に示す。表中の測位精度は、上記初期化実験における初期化完了後のKGPS測位状態のデータを集計した結果である。また同表のうち、基線長と初期化成功率の関係を図一九に示す。ただし関門地

表一 2周波方式OTF初期化性能調査結果

基線長 (km)	計測 場所	初期化 試行回数 (回)	初期化 成功率 (%)	平均所 要時間 (秒)	測位精度(標準偏差)(cm)		
					緯度	経度	高さ
3	下機*1	197	100	92	0.6	0.5	1.7
10*2	神戸*2	143*2	92*2	214*2	1.3*2	0.9*2	2.8*2
16	刈田	70	87	478	1.6	2.0	2.8
20	小野田	46	85	1019	1.3	1.6	4.0

注) *1: 下機は下関機械整備事務所の略記

*2: 同型機を用いて神戸地区で計測した参考値

区では、基線長約10kmで無線通信条件が良好かつ電源の確保等長時間計測に適した観測場所が得られなかったため、二号機の原型機を用いて筆者らが神戸地区で24時間計測した基線長10kmのデータを参考値として併記した。ここで二号機の原型機は、二号機開発初期にその基本性能調査を行ったものであり、前述の2周波方式GPS受信機や高度化無線通信システム(ただしエラー訂正機能は無し)、演算結果等表示用パソコンなどを組み合わせたものである。なお、ここでの初期化成否の判定基準は、初期化完了後KGPSが5分以上継続すること、およびテスト用衛星の解との残差(2.(2)参照)がL1帯

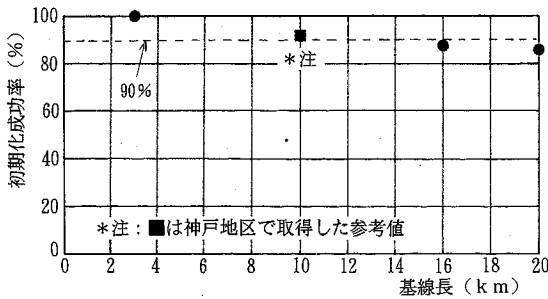


図-9 OTF 初期化成功率と基線長の関係

表-2 DGPS 測位精度

基線長 (km)	計測 場所	測位精度 (標準偏差) (cm)		
		緯度	経度	高さ
1.6	刈田	23.4	16.5	48.5
2.0	小野田	23.3	16.2	48.4
2.7	宇部	22.0	16.4	46.1
3.4	村松	22.1	14.6	39.7

電波の半波長 (9.5 cm) 以内であることとした。

表-1 より KGPS の測位精度 (標準偏差) は、20 km の基線長に対しても緯度方向に対して 1.3 cm、経度方向に対して 1.6 cm、高さ方向に対して 4.0 cm であり、良好な結果が得られた。

また今、実用上要求される初期化の成功率を 90% 以上とすると、図-9 より二号機の初期化可能距離は約 14 km と推定される。また初期化所要時間は現実には幅があるため、基線長 14 km 場合の所要時間の特定は困難であるが、基線長 16 km の場合よりも大きくはないとすると、その平均所要時間は約 8 分以下と考えられる。

ここで一号機の場合には、初期化可能距離約 6 km (成功率 85%)、平均所要時間約 30 分であったため²⁾、これと比較すると二号機の初期化性能は大幅に向上していることがわかる。また初期化後の測位精度 (標準偏差) に関しては、一号機の基線長約 3 km の場合には緯度方向：0.90 cm、経度方向：0.68 cm、高さ方向：2.26 cm であったため²⁾、これらを表-1 の値と比較するとほぼ同程度と見なして差し支えないであろう。これは初期化完了後の測位は、二号機の場合にも一号機と同様に L1 帯による一周波方式であるためである。

一方、図-1 に示す広範な GPS の適用海域は、上記計測結果から KGPS によってすべてカバーできないため、KGPS の適用範囲外は DGPS を適用することになる。今回の無線通信システムの高度化によって通信可能

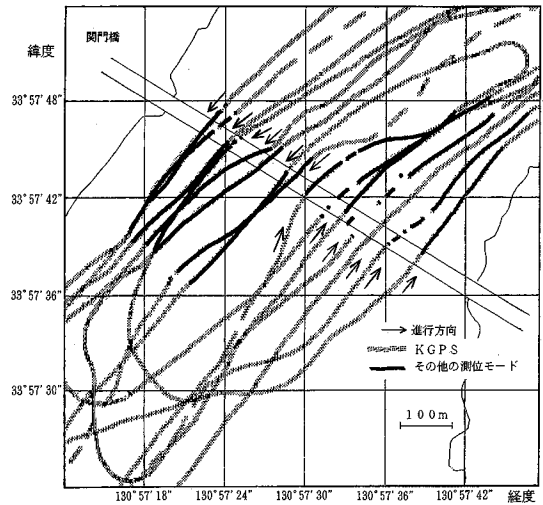


図-10 関門橋影響調査時の航跡と測位モードの変化

範囲が拡大したため、これまで測定されていなかった遠距離における DGPS の測位精度の計測を行った。4 種類の基線長に関する計測結果を表-2 に示す。計測時間は原則 24 時間としたが、基線長 34 km の場合のみ計測場所の制約から 12 時間とした。

表-2 より DGPS の場合には、基線長の増加に対する測位精度の変化は少なく、基線長 34 km 程度までの標準偏差は、水平方向：20 数 cm 以下、高さ方向：50 cm 以下となっている。これらは作業船等の遠距離における高精度測位に十分適用可能な値と考えられる。

(3) 関門橋の GPS 測位への影響

関門海域への GPS の適用を考える場合に必ず問題となるのが関門橋の影響である。GPS 機器を装備した作業船等が関門橋 (長さ：1,068 m、幅：29 m、海面からの高さ：61 m、位置は図-1 参照) 下を航行する際には、橋桁によって衛星からの電波が遮断され、GPS による測位が困難または不可能となる²⁾。衛星電波が遮断されて使用可能衛星数が 3 個以下になれば KGPS が維持できなくなり、次に KGPS を再開するためには、改めて初期化操作を行わなければならない。

上記理由から、実験船を約 8 ノットで関門橋下を往復航行させ、関門橋の GPS 測位への影響範囲、再初期化性能等を調査した。

実験船の航跡と航行中の測位モードの変化を図-10 に示す。図中のその他の測位モードは DGPS と単独測位を意味する。図より、関門橋下では衛星電波が遮断されて KGPS に必要な衛星電波の位相積算が中断され (サイクルスリップと呼ばれる)、KGPS が維持できなくなっていることがわかる。関門橋通過後はその他の測位モー

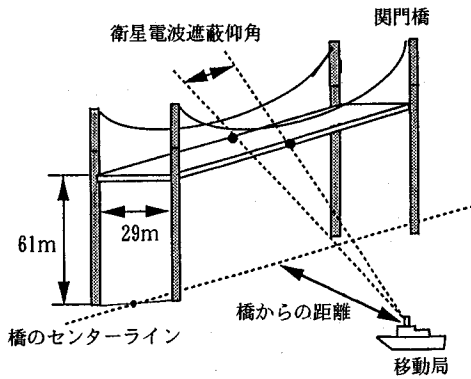


図-11 関門橋下の移動局航行状況

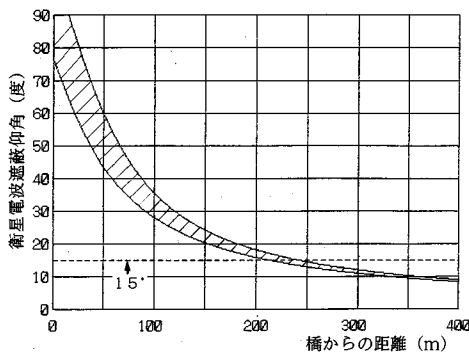


図-12 衛星電波が遮られる仰角と橋からの距離の関係

ドで計測しながら再初期化が行われ、KGPSが再開されている。図-10において実験船は反時計回りの航行であり、この測位モードの変化状況が理解されよう。なお再初期化に要した時間は平均69秒であった。

次に、図-11に示す移動局の航行状況をもとに、関門橋の影響範囲について検討する。衛星電波は周波数が高いことから直進性が強いので、橋桁に遮られる範囲では電波が移動局まで到達しないものと想定する。この条件のもとに、衛星電波が遮られる仰角と橋から移動局までの距離(起点は橋の中央真下の海面上のセンターライン)の関係を計算すると図-12が得られる。図中の斜線部が衛星電波が遮蔽される仰角の範囲である。一方衛星電波受信アンテナは、海面や周囲の物体からの反射波による干渉(マルチパスと呼ばれる)の影響を避けるため、15°以下の仰角から入射する電波の感度を下げる指向性を持たせている。したがって図-12において、仰角15°以上の部分を対象とすると、橋からの距離が約250m以下の範囲において衛星電波遮断の影響が現れることになる。

上記の考え方を確認するため、今回の航行実験結果について補足衛星数が減少した範囲を求めると図-13の航跡部分となる。図中の黒線部では補足衛星数が4個以

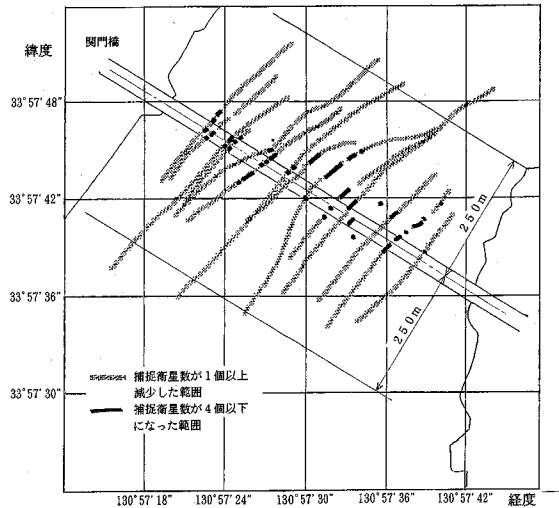


図-13 関門橋による捕捉衛星数減少範囲

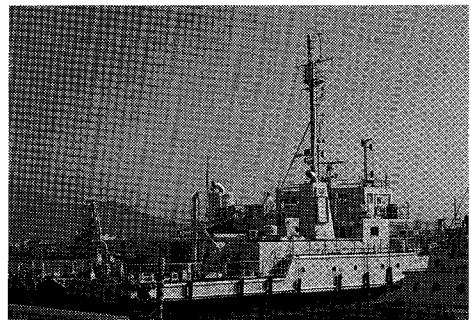


写真-3 GPSアンテナ設置場所調査用の調査観測船

下となり、この間はOTF初期化を行うことができない。

図-13より、おおむね上記の考え方に基づいて関門橋の影響範囲を推定することができるものと考えられる。

なお、調査期間中のPDOP (Position Dilution of Precision, 衛星の空間における配置状態が3次元測位精度に及ぼす度合いを表す指数)^{3),5)}は、2.3~3.4の範囲で良好であった。

(4) GPS受信アンテナの最適船上設置場所

作業船の船上には、マスト、煙突等の船体構造物や種々の作業施設があるため、GPS受信アンテナの設置場所を選定するには周囲の構造物等によるマルチパスの影響に注意する必要がある。このマルチパスの影響を調べるため、運輸省第四港湾建設局(以下四建と記す)所属の調査観測船(254総トン、全長25.8m)を例として、複数箇所の衛星電波受信状況を調べた。調査場所は、ケース①:マスト上で周囲に障害物がない最も受信条件が良い場所、ケース②:マスト上で一部障害物(電波測距儀)があるが設置しやすい場所、ケース③:周囲に障害物が

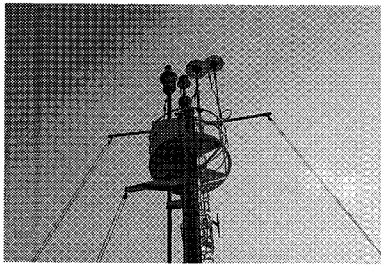


写真-4 GPSアンテナ設置状況(1)

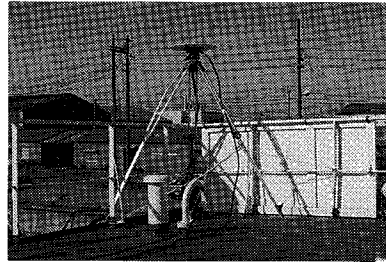


写真-5 GPSアンテナ設置状況(2)

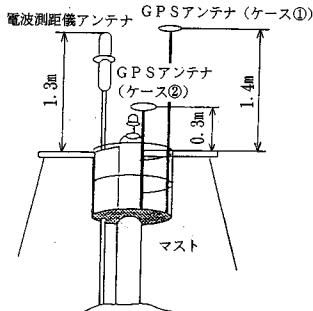


図-14 GPSアンテナ設置状況図

表-3 マルチパスの初期化性能への影響

GPS アンテナ 設置条件	試行 回数 (回)	成功率 (%)	平均所 要時間 (秒)
ケース①	180	99.5	121
ケース②	120	98.3	335
ケース③	206	97.1	175

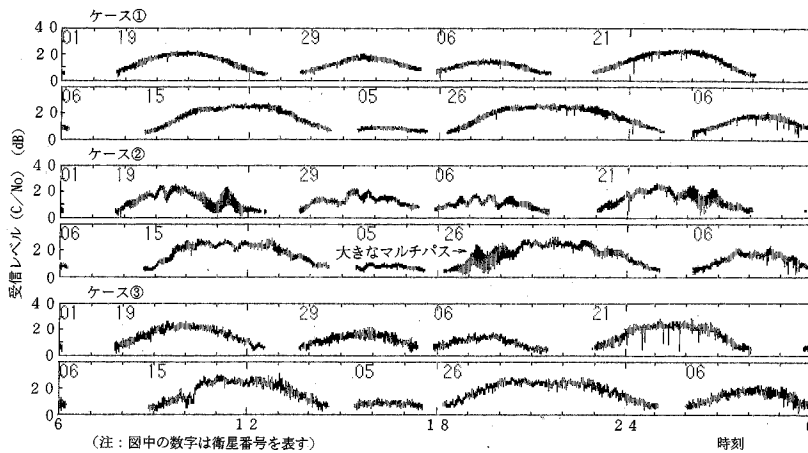


図-15 アンテナ位置の違いによる衛星電波受信レベルの変化

あるが上空が開けた甲板上、とした。使用した調査観測船を写真-3に、GPSアンテナ設置状況をケース①、②について写真-4および図-14に、ケース③について写真-5にそれぞれ示す。

上記調査の結果を、衛星電波のC/N₀ (Carrier to Noise Density Ratio, 周波数帯域幅1 Hzあたりの信号/雑音比)の時間的変化として図-15に示す。図より、ケース①の場合には変動幅が小さい良好な受信状況が観測されているが、ケース②の場合には、電波測距儀アン

テナによるマルチパスの影響が受信レベルの大きい変動幅として顕著に現れている。またケース③の場合はケース②の場合よりも小さいが、マルチパスの影響が受信レベルの変動に現れている。

マルチパスの影響はOTF初期化性能にも影響する。ケース①～③における初期化成功率および所要時間の計測結果を表-3に示す。これよりマルチパスによって初期化成功率が低下するとともに所要時間が増加する傾向があることがわかる。

以上より、GPS アンテナはマルチパスを生じる構造物等から離れ、アンテナ上方が十分開けている場所に設置することが望ましい。したがって作業船に対しては、写真-4 に示されているようなマスト等の上部が最適設置場所と考えられる。

4. まとめ

筆者らがこれまでに開発した GPS 海上測位システムの適用範囲の拡大、初期化性能の向上を目的として一号機を改良、発展させ、無線通信システムの高度化と 2 周波方式 OTF 初期化技術の導入による実用普及システムを開発した。関門海域のほぼ全域を適用対象として行った現地実験の結果、以下の性能の向上や現地適用上の留意点が確認された。なお、一号機は構成要素が少なく低コストであり、また初期化後の測位精度は二号機と同等であるため、近距離や無線通信条件が良好な場合の測位に有効である。

(1) 基準局・移動局間の無線通信アンテナシステムの高度化により、山影等による通信エラー発生海域が減少するとともに通信可能範囲も拡大する。本システムの場合、途中で障害物がなければ 35~40 km まで適用できるものと考えられる。

また移動局に組み込んだ通信エラー訂正機能は、山影等において無線電波の受信レベルが変動することによって発生するエラーの訂正に有効であることが確認された。

(2) 2 周波方式 OTF 初期化技術を導入した効果として、初期化成功率の向上、所要時間の短縮、初期化可能範囲の拡大が得られた。実用上要求される初期化成功率を 90% 以上とすると、二号機システムの有効初期化可能範囲は約 14 km、平均所要時間 8 分程度と考えられる。

(3) 初期化可能範囲内の KGPS の測位精度(標準偏差)は、表-1 より水平方向:約 2 cm 以下、高さ方向:約 3 cm 以下である。

また DGPS の測位精度も基線長約 34 km まで今回の調査で明らかになり、その値(標準偏差)は、水平方向:20 数 cm 以下、高さ方向:50 cm 以下の程度である。

(4) 関門橋下は衛星電波が遮断されて GPS 測位能

力が低下する。その影響範囲は橋の両側約 250 m の範囲である。また関門橋下航行時に KGPS が中断された場合の再初期化に要する時間は、二号機システムについて衛星条件がよい場合には平均約 70 秒であった。

(5) 作業船の船上に GPS アンテナを設置する場合、電波の遮蔽物やマルチパスによって電波干渉を起こす物体や構造物がアンテナ周囲にないことが望ましい。これはマルチパスの発生により、初期化成功率の低下や所要時間の増大が生じるからである。実験の結果、作業船等では GPS アンテナは、マスト等の上部に取り付けるのが最適であることが示された。

5. あとがき

本研究において開発した普及型二号機は、一号機よりも構成要素の増加や複雑化によってコスト高となっているが、適用範囲の拡大や初期化性能の改善によって測位性能が向上している。これにより、筆者らの目的とした関門海域における海上測位のためのリアルタイム GPS システムの開発は一通り完了したものと考えている。

現在四建においては、直営の作業船に二号機システムを装備して海域毎のより詳細な測位データの収集を行っているところである。これらを基に今後本システムを、広範な関門海域における航路整備、沖合人工島造成等の港湾工事に適切に応用していく計画である。

参考文献

- 1) 浜田賢二、石崎武、三浦英夫、林忠夫、清水則一、中川浩二:海上作業船の位置測用のためのリアルタイム GPS 測量システムの開発、土木学会論文集 No. 510/VI-26, pp.153-163, 1995.
- 2) 浜田賢二、外戸保勝、中井修、林忠夫、清水則一、中川浩二:リアルタイム GPS 海上測位システムの実海域実験と実用性の検証、土木学会論文集 No. 534/VI-30, pp. 19-30, 1996.
- 3) 日本測地学会編著:GPS-人工衛星による精密測位システム-、(社)日本測量協会、1986.
- 4) 渋谷茂一:電波伝搬基礎図表、コロナ社、1976.
- 5) 土屋敦、今給黎哲朗:GPS 測量と基線解析の手引、(社)日本測量協会、1992.

(1995.11.27 受付)

IMPROVEMENT AND VERIFICATION OF THE REAL-TIME GPS MARINE SURVEYING SYSTEM FOR THE KANMON STRAIT AREA

Kenji HAMADA, Toshio FUKUMORI, Osamu NAKAI, Tadao HAYASHI,
Norikazu SHIMIZU and Koji NAKAGAWA

The real-time GPS (Global Positioning System) marine surveying system has been completed in this research. In order to improve the applicability of the system, the following two items are adopted: (1) a new wireless transmission apparatus; and (2) the dual frequency OTF (On The Fly) calibration method.

To verify the system, the field investigation was conducted around the Kanmon strait area.

Results showed that the system developed here is available for a range (35-40 km) twice the size of the former system. The reliability of wireless data transmission and OTF calibration was also improved.