

投稿論文(和文報告)

**TECHNICAL
REPORT**

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

浜田賢二¹・外戸保勝²・中井修³・林忠夫⁴・清水則一⁵・中川浩二⁶

¹正会員 運輸省第四港湾建設局下関機械整備事務所 所長 (〒750 下関市阿弥陀寺町 6-9)

²運輸省第四港湾建設局下関機械整備事務所 調査課第二調査係長

³正会員 運輸省第四港湾建設局 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

港湾工事の測量や海洋観測における海上測位には、種々の従来測量技術が適用されているが、その精度、操作性、適用範囲等に関して不十分な部分があり、今後の改善が求められている。

筆者らは、GPS を応用したリアルタイム処理方式海上測位システムを開発し、これまでに基本的な性能調査実験を行ってきた。本研究ではそのシステムを改良して実用プロトタイプモデルを開発し、関門海峡地区においてその基本性能、耐久性、信頼性等を検証するために現地実用性検証実験を実施した。

その結果、本システムの測位精度、オンザフライ初期化性能、キネマティック測位可能範囲、電波障害要因、測位モードの切り替わり性能等が明らかになり、その実海域への適用性が確認された。

Key Words : kinematic GPS, real-time surveying system, prototype, field tests, work vessels

1. まえがき

港湾工事や海洋観測における海上の測位技術は、トランシットによるものから電波または光波を利用したものまで各種の測位技術が適用されている。電波式測位装置は、昭和40年代後半に日本でも実用化され、国直営の調査船や浚渫船等の各種作業船の海上測位システムとして採用されている。光波式測位装置は、昭和60年代の前半頃から港湾の調査や測量にも用いられるようになり、電波式測位装置よりも測定範囲は狭いものの、測位精度が高く、また3次元の測量も可能なため、民間の測量システム、施工システムにも数多く利用されている。

今後港湾工事の沖合い展開や水質、深淺測量等の調査業務の拡大が見込まれ、海上測位技術の必要性は益々増大するものと考えられるが、上記の電波式および光波式測位装置は以下のような問題点があり、運用上相当の制約を受けているのが現状である。

- ①電波式測位装置は、電波周波数の割当が少ないため、狭い海域では電波干渉を生じ易く、また地形が複雑な区域や海象条件、航行船舶等によって測位精度が低下する。さらに電波送信用の陸上従局の設置および維持管理の費用も大きい。
- ②光波式測位装置は測距範囲が狭く、広い海域や沖合いを十分にはカバーできない。また天候の影響を受ける。

上記のような背景から、筆者らは従来測位システムに代わるものとして人工衛星を使った測位システム GPS (Global Positioning System) を応用し、高精度かつ操作性に優れた海上測位システムの開発を行ってきた^{1)~3)}。

このシステムは、GPS の L1 帯の電波を利用し、キネマティック方式でリアルタイム処理を行うもので、特に海上測位を目的として開発されたものである。筆者らの前論文¹⁾においては、まず実験システムを試作し、その基本性能評価実験を行って実用化に向けての可能性を確認した。本研究では、これまでの実験で明らかになったいくつかの問題点を改善し、かつ操作性、経済性も向上させた実用プロトタイプシステムを新たに製作した。そしてこれを用いた実海域実験によって実用レベルでの有効性の検証を行った。本報告は、この実用プロトタイプ機を用いて関門海峡周辺の実海域で実施した一連の実用性検証実験の結果をとりまとめたものである。

2. 実験システムの実用化に向けての問題点とその改善

(1) リアルタイム GPS 海上測位システムの概要

港湾工事においては、多くの場合作業船が移動または航走している状態で連続測位を行う必要があり、その測

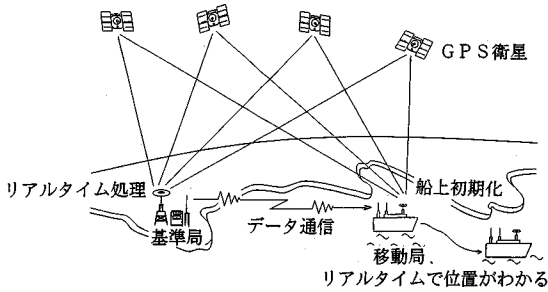


図-1 GPS 海上測位概念図

位精度としては概略 0.5 m 以下が求められている。

GPS は、一点測位法と相対測位法に大別され、後者は更にディファレンシャル方式(以下 DGPS と記す)、スタティック方式、キネマティック方式(以下 KGPS と記す)に分類され、それぞれの計測方法毎にその精度、所要時間等が異なる^{4)~6)}。上記港湾工事に要請される精度に対しては相対測位方式によらざるを得ないが、このうちスタティック方式は、衛星・受信点間の距離に含まれる波長の整数倍部分の不確かさ、いわゆる整数値バイアス(または波数不確かさ)の決定や測位に長時間の観測が必要となるため、リアルタイム性が要求される海上測位には不向きである。一方キネマティック方式では、整数値バイアスを決定する初期化処理に工夫すれば、リアルタイムかつ高精度な測位結果が得られることが明らかになってきており、筆者らが開発した測位システム¹⁾(実験機)では同方式を採用している。

そのシステムにおいては、陸上の座標既知の基準局において GPS 電波を受信し、これを処理して搬送波位相とコード位相に対する補正情報を海上の測位すべき移動局に無線で送信する。移動局は、この補正情報と自らの GPS 電波観測値から搬送波の二重位相差を求め、この搬送波二重位相差と衛星の 3 次元座標を既知の値とし、移動局の 3 次元座標を未知数とする観測方程式を作る。これを最小二乗法的に解くことによって移動局の 3 次元座標をリアルタイムに求めるものである(詳細は文献 1)参照)。この計測概念を図-1 に示す。

このようにして開発されたシステムは基本性能調査のための実験用システムであるが、種々の基礎実験により実際の海上測量に利用できる可能性が確認された¹⁾。

(2) 実用化における問題点とその改善

前節に述べた基本実験用システムは、実用レベルの使用を想定すると以下の項目に関して技術的な問題がある。

①初期化可能距離が短いこと、初期化所要時間が比較的に長いことなど初期化性能が十分ではない。

ここで初期化とは、前述の整数値バイアスを決定する

表-1 GPS 海上測位装置仕様の新旧比較

項目	実験機(旧)	実用機(新)
寸法(幅×奥行×高さ) (mm)	570×530×840	450×500×150
重量(kg)	22	9.8
消費電力(watt)	約 200	約 100

ことであり、オンザフライ初期化には GPS 電波の L1 帯を使用する一周波方式と、L1 および L2 帯を使用する二周波方式がある。二周波方式は一周波方式より初期化性能が優れているが、一周波方式は機器の構成要素が著しく少なく低コストである。また現状では初期化後の測位方法は両方式とも同じである。

②衛星電波受信部、信号処理部、演算部等の構成要素の配置が直列的であり、データ処理について効率が低い。
③受信機ノイズ、サイクルスリップ対策が十分とはいえない。

本研究では、上記実用化上の技術的問題点を解決するために以下の①'~③'の改善を行い、更に④'のコンパクト化を実施して実用機のプロトタイプを試作した。

①' オンザフライ(On-The-Fly; OTF)¹⁾初期化プログラムの改良

初期化の成否を判定する残差チェック機能改善を目的とした新たな重み付き平均処理法の採用、OTF サーチ空間確定のための DGPS プログラム誤差の除去、実現象に基づくデータ処理技術の論理的修正等を行い、初期化時間の短縮、成功率の向上、有効範囲の拡大を試みる。

②' GPS 受信部と信号処理部の一体化および高速演算プログラムの開発

GPS 信号受信部と信号処理部は、これまでは個々に独立した構成要素であったが、これらを一体化して独立した要素数を減らし、これによりデータ処理フローの簡素化、高速化の達成を図る。またこのハードウェアの改良に伴って、信号処理、測位演算、航法メッセージ処理等のソフトウェアも一括処理ができるように改良して高速演算が可能となる。

さらに改良した GPS 信号受信・処理部はこの部分だけを独立して操作することもできるため、記憶装置と結合してデータ収集を行い、後処理による解析も可能となる。これによって基準局-移動局間の無線通信エラーの有無に無関係な解析や、複数地点での同時観測による同時刻解析も行うことができる。

③' 受信機のノイズ低減およびサイクルスリップ対策

デジタル変換された GPS 信号のノイズ除去フィルターソフトウェアの改良によって受信機ノイズを低減させ、GPS 信号の再現性を高める。これによって GPS 信号の位相データエラーの検出能力が向上する。これに対応してエラー処理プログラムを改良し、ノイズに起因する GPS 信号の位相ずれによるサイクルスリップの発生率

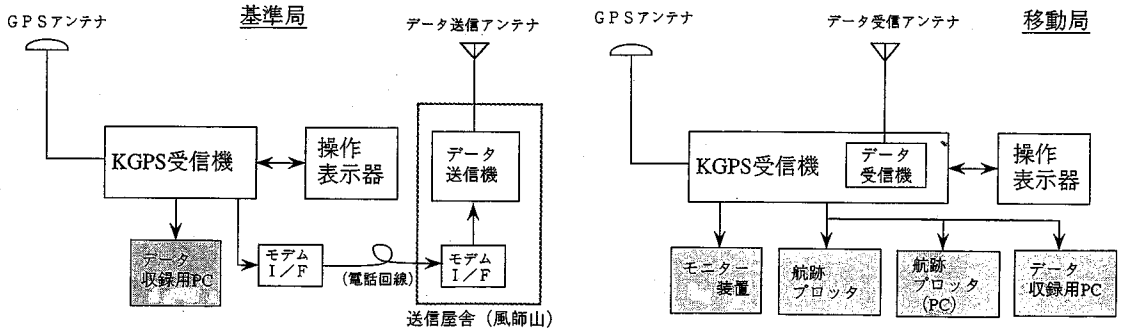


図-2 GPS海上測位システム系統図

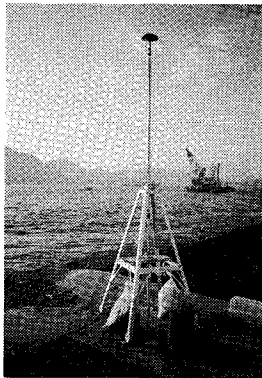


写真-1 GPS受信アンテナ外観

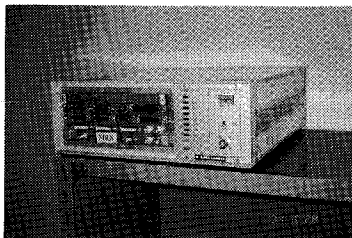


写真-2 GPS受信機外観

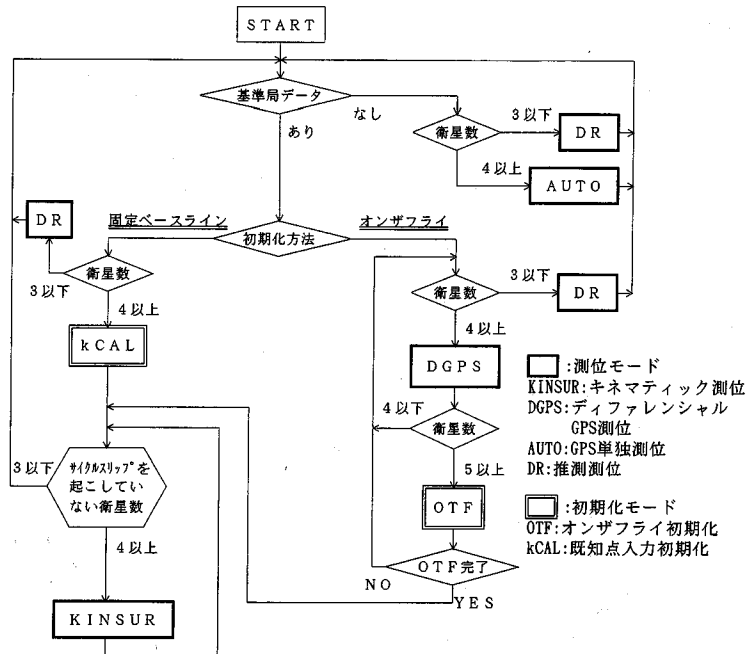


図-3 測位モード切換フロー

を低減させる。

またGPS信号処理管理ソフトウェアの改良によってサイクルスリップ発生後の衛星再捕捉時間を短縮し、測位可能状態への迅速な復帰を図る。

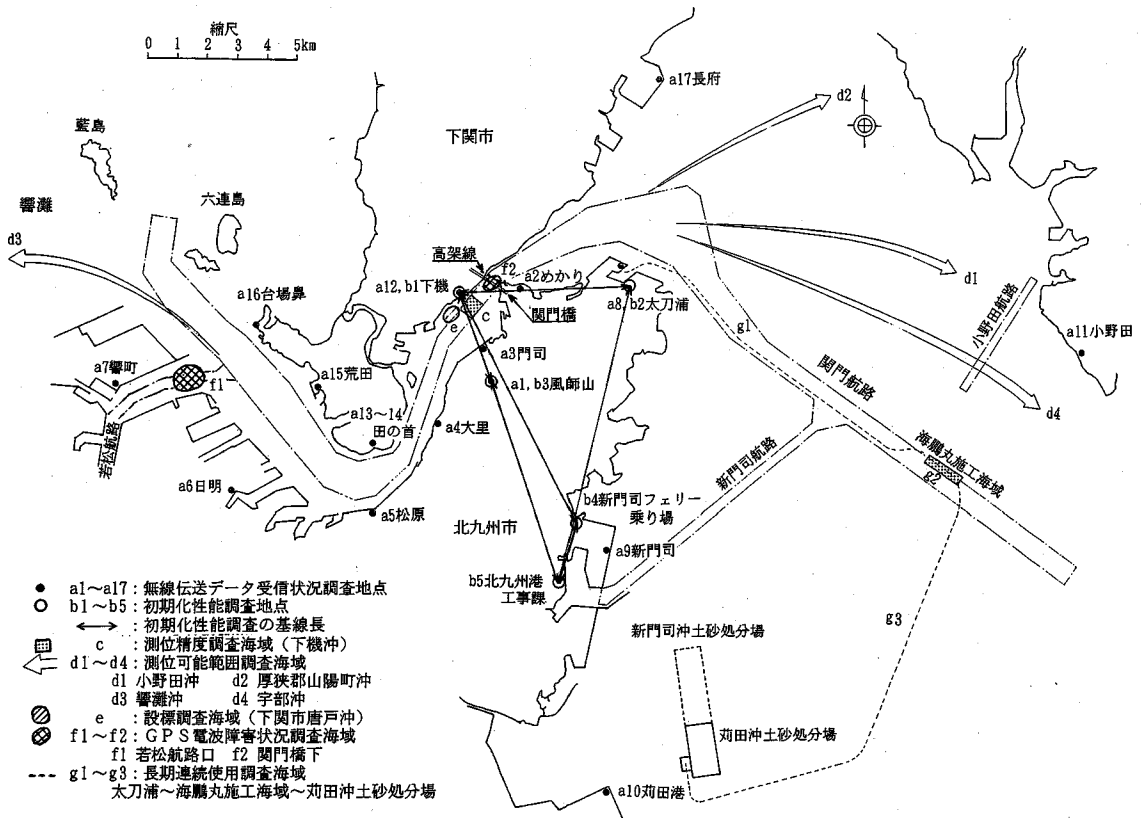
④ システムのコンパクト化，小電力化

旧実験システムは、個々の機能ユニットを単に結合した構成であるため、全体の寸法が大きく、またその取り扱い性，操作性が不十分であったが、実用機は、すべての構成要素をワンボックスにコンパクトにまとめた小型オールインワン構造とする。また上記②を含むハードウェアの合理化によって製作コストが減少するとともに消費電力も半減させる。これら新旧システムの主な仕様の比較を表-1に示す。

これらの改良を行ったリアルタイムKGPS海上測位

システムの実用プロトタイプモデルにおける構成機器のシステムを図-2に、GPS受信アンテナを写真-1に、オールインワン化したGPS受信機を写真-2に示す。

また本測位システムは、衛星の配置や電波の捕捉状況、無線データ通信状態の変動に対して自動的に最も精度の高いキネマティック、初期化ができない場合はディファレンシャル、相対測位ができない場合は単独測位、これもできない場合は推測測位（直前の速度，進行方向の傾向を一定時間延長し，外挿によって推測）に測位モードが切り換わるようにプログラムが組まれている。さらに精度が低い低位の測位モードの場合には，捕捉衛星数の増加，基準局との通信状況の改善等により，直ちに精度がより高い上位の測位モードに移行するように常に監視されている。この測位モード自動切換の処理フローを図



図一4 陸上および海上実験場所一覧

一3に示す。図中の表示では、初期化モードと測位モードを区別しており、前者については、OTF：オンザフライ初期化，kCAL：座標既知点を校正点とする静的初期化，である。ここでkCALは，陸上や沖合構造物の座標既知点に移動局GPSアンテナを静止させて行う初期化であり，基準局と移動局間のベクトルを既知の値として整数値バイアスを決定できるため，短時間の初期化が可能である。これは図一3に示す固定ベースラインによる初期化の選択によって実行される。また後者の測位モードは，KINSUR：キネマティック測位，DGPS：ディファレンシャルGPS測位，AUTO：GPS単独測位，DR：推測測位であり，精度を表す測位レベルはこれらの順に低下する。

なおOTFは初期化を行っている状態であるが，DGPS測位結果に別の衛星情報を加えて演算しているため，OTF完了まではDGPSと同じ精度で測位を行っている。また実際にはほとんど無いが，GPS信号が長時間全く受信できず，上述のGPS測位がすべて不可能な場合は，LOST：測位不能を表示する。

3. 実用性検証実験の方法および結果

実験システムを用いた基本実験は，前記2.(2)①の初期化性能の不十分性から，下関機械整備事務所(以下，下機と記す。場所は後述の図一4参照)内および同前面海域約2～3 km以内の狭い範囲で実施した¹⁾。しかしながら，実務上の適用区域は運輸省第四港湾建設局(以下四建と記す)管内の関門地区を対象としているため，今回のプロトタイプによる実用性検証実験場所として同管内区域を選定した。

実験は，大別して陸上と海上の2種類を実施した。前者に関しては，移動局機器を観測車に載せて所定の観測地点を移動し，無線伝送データの受信レベル，初期化性能等の調査を行った。また後者については，機器を四建所属の測量船(全長15.6 m，67総トン)等に搭載して海上を移動し，測位精度，測位可能範囲，電波障害海域の確認，ポンツーン又は船上から海中に位置出し用の標識を立てる設標実験および大型浚渫船(全長86.6 m，3,199総トン)を使用した長期連続測位実験を行った。

陸上および海上実験の調査場所一覧を図一4に示す。図中a1～a17，b1～b5，cは陸上地点であり，それぞれ



写真一三 陸上観測車

基準局からの無線通信範囲、初期化性能、固定点測位精度に関する実験を行った。またd1~d4, e, f1~f2, g1~g3は海上区域であり、それぞれ測位精度および測位可能範囲、設標、電波障害区域、長期連続測位に関する調査場所を表す。

以下実験方法およびその結果を記述する。

(1) 陸上実験

陸上実験に使用した観測車の外観を写真一三に示す。

a) 基準局からの無線通信範囲調査実験

基準局は、関門地区における無線データ通信が出来る限り広範囲に行える様に北九州市門司区の風師山(図一4中央付近、山頂標高362m)の標高287mの地点に設置した。

また無線電波はデータ通信容量2,400ボアを確保し、かつある程度の障害物に対する回折効果を考慮して周波数70MHz帯、出力3wattとした。

この無線通信能力によってKGPSおよびDGPSの測位範囲が決定される。したがってその通信可能範囲および障害物の影響の度合いを把握しておくことが実用上不可欠であるため、基準局を風師山(図一4中a1)とした場合の移動局における無線伝送データの受信状況を以下の4分類の場所について調査した。

- ①基準局から見通せる近・中距離の地点(図一4中のa1, a3, a6, a7, a9, a12, a16, a17)
- ②基準局から見通せる遠距離の地点(同a11)
- ③基準局背後の山陰の地点(同a2)
- ④基準局から見通しのきかない地点(同a4, a5, a8, a10, a13~a15)

実験は、基準局から2~20kmの範囲の上記17地点において無線伝送データを受信し、受信レベル、エラー率等を測定した。

無線通信の成否は主として受信レベルによって決定され、アンテナの指向特性や高さ、送信電力、周波数、大地の電導率が関係する。この受信レベルは、フェージン

表一2 無線電送データ受信状況一覧表

場所	測定場所	受信レベル(dBμV)	good注1)	全データ数	エラー率注2)	a1からの距離(km)
a1	風師山	90	471	471	0	0
a2	めかり公園	27	228	1000	772	3.1
a3	門司第三船止	72	1000	1000	0	1.8
a4	大里元町	29	498	500	4	2.1
a5	松原	26	999	1000	1	5.8
a6	日明	35	999	1000	1	9.2
a7	響灘一丁目	38	1000	1000	0	13.0
a8	大刀浦埠頭	42	999	1000	1	6.0
a9	新門司泊地	39	1000	1000	0	6.4
a10	新田港	24	1001	1012	11	14.0
a11	小野田	34	1000	1000	0	20.0
a12	下機事務所	52	1000	1000	0	2.8
a13	彦島田の首	21.5	932	948	16	4.4
a14	彦島山田の泉	26.5	1005	1007	2	4.4
a15	彦島小倉フェリー	28	977	999	22	5.6
a16	彦島台場鼻	39.5	1001	1001	0	7.9
a17	長府	41.5	1184	1184	0	11.0

注1): good;基準局から送信した検査用データを正常に受信した回数(1秒毎に通常1,000回検査用データを送信)
注2):エラー率;データ1000個あたりのエラー数

グマージン等を考慮すれば実用上は30~40dBμV以上必要と考えられ、これを本システムに適用して電波減衰理論⁷⁾等を適用すると、到達距離は15~20kmが限界と計算される。

測定結果を表一2に示す。これらの結果を要約すれば以下の通りである。

1) 基準局から見通せる地点では距離の大小にかかわらずエラーはほとんど無かった。ただし受信レベルは距離の増加に伴って減少するが、6km以上20kmまでほぼ30~40dBμVで横ばいとなる。したがって電波障害物が無い場合には、理論通り約20kmまで無線通信が可能である。

2) 近距離でも山影となるめかり公園(a2)では、受信信号レベルの変動が大きくかつエラー率も772/1000と大きい。

3) 基準局から直接見通せない地点では1/1000~22/1000のエラー率が観測された。したがって、ある程度の電波の障害物に対する回折効果は期待できるが、できる限り移動局の可動範囲から見通しのきく位置に基準局を設置することが重要である。

b) 初期化性能調査実験

初期化時における基線長(基準局-移動局間距離)の長短による初期化性能の差異および限界基線長を求めるため、図一4中のb1~b5の地点にGPS受信装置を設置して約22時間の連続観測を行った。5地点の中から距離を考慮して6種類の組み合わせを選び、それらの観測記録から事後処理によって同時刻データによるOTF初期化を実施してKGPSモードにおける初期化時間、初期化成功率等を調査した。6種類の基線長は1.8(b4~b5

表-3 OTF 初期化性能一覧表

基線長	1.8km	2.8km	5.6km
OTF信頼性			
OTF成功率	92%	81%	85%
OTF成功回数	69回	54回	34回
OTF失敗回数	6回	13回	6回
OTF所要時間			
平均	17分	19分	30分
標準偏差	15分	23分	49分
最短	3分	3分	4分
最長	1時間33分	2時間46分	3時間29分
データ収集延べ時間	20時間57分	22時間05分	20時間48分
移動局の設置場所	新門司7-11-乗り場, 図-4中b4	風師山 図-4中b3	太刀浦 図-4中b2
基準局の設置場所	新門司事務所 図-4中b5	下機 図-4中b1	下機 図-4中b1

間), 2.8(b1~b3間), 5.6(b1~b2間), 6.7(b3~b5間), 8.2(b1~b4間) および 9.7(b2~b5間)km である(図-4参照)。

なお観測時間を約22時間としたのは、衛星の地球周囲周期が0.5恒星日(約11時間58分)であるため、地球の自転周期も同時に考慮すると、約1日の周期で見かけ上衛星の出没が繰り返されるからである。

解析の結果、基線長が6.7km以上の場合はOTF初期化が成功しなかった。ただしこれは陸上における計測結果であるため、周囲の建物等によるGPS信号の反射、いわゆるマルチパスによる精度劣化も遠距離の初期化には影響しているものと考えられる。

なお初期化成否の判定条件は、整数値バイアス確定後の衛星、移動局間距離の解の残差が25mm以下、かつ継続時間が10分以上とした。

初期化が可能であった基線長5.6km以下の場合の解析結果等を表-3に示す。

これらの解析結果を基に判断すると、基線長が約6km以下の時、OTF初期化の所要時間は平均17~30分であり、また成功率は81~92%程度である。これにより、実験システム¹⁾の場合には基線長が数km以上では初期化が成功しない場合が多かったのに対して、本実用システムでは初期化性能が大幅に改善されていることがわかる。

c) 陸上固定点測位精度

上記b)の連続観測データを用いてKGPSおよびDGPSについて陸上固定点を連続観測し、測位の時間的変動を調べその測位精度を求めた。計算結果をまとめて、KGPSの場合を表-4に、DGPSの場合を表-5にそれぞれ示す。

表-4より、KGPSの測位精度は、基線長が5.6km以下の場合、水平および高さ方向の標準偏差で表せばそれぞれ1cmおよび2cm程度である。またDGPSの場合表-5より、水平および高さ方向の精度はそれぞれ標

表-4 KGPS 測位精度一覧表

基線長	2.8km	5.6km
測位精度(標準偏差)		
東西方向	0.68cm	0.50cm
南北方向	0.90cm	0.59cm
高さ方向	2.26cm	1.59cm
平均処理時間	1秒	1秒
データ数	54	34
移動局の設置場所	風師山, 図-4中b3	太刀浦, 図-4中b2
基準局の設置場所	下機, 図-4中b1	下機, 図-4中b1

表-5 DGPS 測位精度一覧表

基線長	2.8km	5.6km
測位精度(標準偏差)		
東西方向	0.25m	0.21m
南北方向	0.42m	0.33m
高さ方向	1.03m	1.41m
移動局の設置場所	風師山, 図-4中b3	太刀浦, 図-4中b2
基準局の設置場所	下機, 図-4中b1	下機, 図-4中b1

準偏差1mおよび1.5m程度である。

KGPSの測位精度は、これまでの実験機では基線長3kmまでしか確認されていないが、今回の実験により5.6kmまで前回の測位精度と同様に水平方向で標準偏差1cm程度であることが確認された。またDGPSの測位精度も今回新たに確認された。

(2) 海上実験

a) 測位精度調査実験

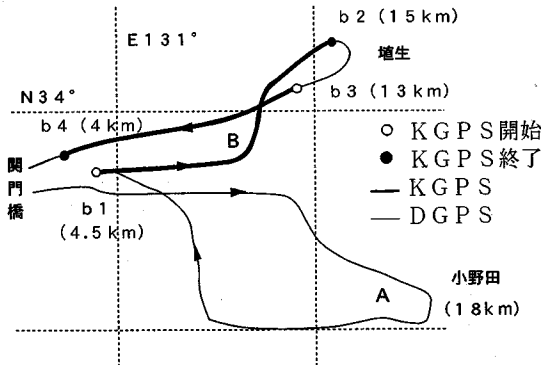
本実用システムは、旧実験機のハードウェアおよびソフトウェアの主要部を改造したため、その測位精度を再確認するために旧実験機の場合と同様に、海上における光波測距儀との精度比較実験を行った。使用した光波測距儀は、ジオジメータ(株)製ジオジメータ140T型、光源:GaAs赤外線15MHz、ビーム幅:2.5mrad、公称測距精度:±(5mm+5ppm)M.S.E.(Mean Square Error)である。

その結果、両者の航跡はよく一致し、また航跡全般についてGPSと光波式記録の差を統計処理すると平均値4.6cm、標準偏差8.2cmとなり、実験機の場合¹⁾と同等の精度があることが確認された。

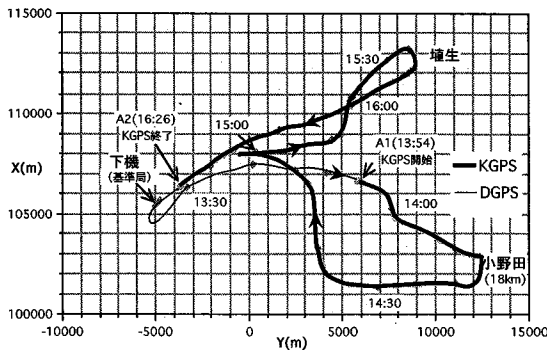
b) 測位可能範囲調査実験

基準局-移動局間の無線通信が良好という条件下でのキネマティック測位の測位可能範囲を調べるため、下機を基準局として最大約20kmの海域まで航行してデータ収集を行った。

解析はリアルタイム処理と事後処理の2種類を実施した。後者については、基準局、移動局間のデータ通信エラーの影響が無い場合のGPS性能を評価するために、航行中のGPS電波受信記録を用いて事後解析を行うも



図一五 測位可能範囲調査航跡図(リアルタイム処理)



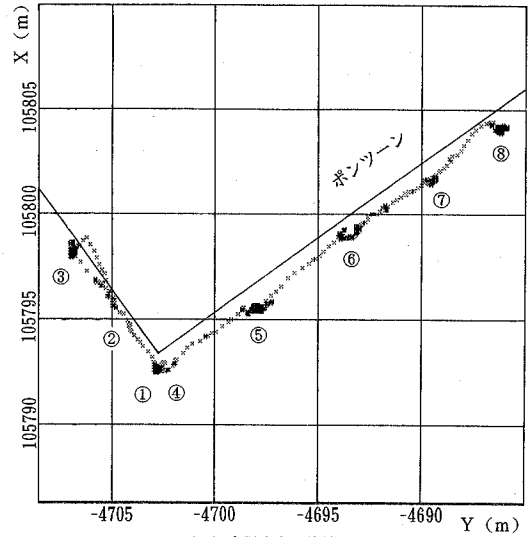
図一六 測位可能範囲調査航跡図(事後処理)

のである。

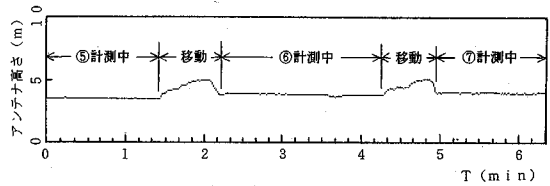
リアルタイム処理の場合の航跡を船上ディスプレイの表示形式で図一五に、事後処理の航跡を図一六にそれぞれ示す。

図一五において測量船は、関門橋通過後矢印の方向に小野田方面(図中A部)を周回した後b1点まで戻り、次に増生方面(図中B部)を周回して関門橋に戻るルートを行航した。同図において、()内は基準局からの距離であり、また太線部はキネマティック測位が可能であった海域、細線部はディファレンシャル測位しかできなかった海域を表している。

リアルタイム処理の場合は、関門橋通過時にサイクルスリップが発生し、その後の小野田方面航行中はキネマティック測位状態とならずディファレンシャル測位のままであるが、増生方面航行時には基準局から約15 kmの地点までキネマティック測位を継続している。これに対して事後処理では、図一六より小野田方面航行時にも約18 kmの地点までキネマティック状態が維持されている。これはリアルタイム処理の小野田方面航行時の場合、基地局-移動局間の無線通信状態が悪くOTF初期化が成功しなかったことを表している。したがってKGPS自体の性能としては、OTF初期化が成功する場合約18

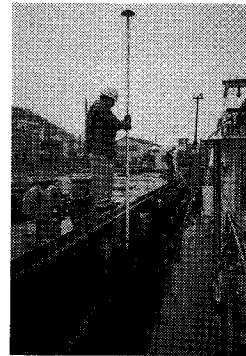


(a) 水平方向測位結果



(b) 高さ方向測位結果

図一七 設標実験結果



写真一四 設標実験状況

kmの地点まで測位可能と考えられる。

なお、これらのデータ収集期間は観測可能衛星数が概ね5個以上であり、また衛星配置の良好度を表す指標であるPDOP (Position Dilution of Precision)⁴⁾も3以下の場合が多く、測位条件は良好であったと判断される。

c) 設標実験

港湾工事における測量や構造物の据付等に際しては、所定の位置を指示するためにスタッフ等の位置表示標識を設置する必要がある。この場合、その位置決めはトランシットによる場合が多く、トランシット設置場所の確

保、設定位置の精度、所要時間等に問題がある。

これらを改善し、設置場所を迅速、正確に、かつ簡便に決定するために KGPS を応用することが考えられる。そこでこれに対する検証実験をここでは設標実験と称し、以下の要領で実施した。

下機構内のポンツーン（長さ 25 m、幅 9 m、深さ 3.2 m）上に KGPS 測位装置を設置し、航跡プロッタの表示を見ながらポンツーンの縁に沿って移動し、GPS アンテナを取り付けたポールを目標地点の海中に立てた状態で測位データを記録する。実験結果の例を図-7 に、また実験状況を写真-4 に示す。

図-7 の (a) 部はポールの水平位置測位結果のプロット図であり、またこの中の①～⑧は数十秒間停止して測位した場所である。GPS アンテナ付ポールの下端は、測定中は海底（水深約 3 m）に着底しているが、ポンツーン上では人力によって支持しているため、ポンツーンのわずかな動揺等によって 10 cm 程度固定位置が変動している状況が記録されていることが①～⑧からわかる。

また同図 (b) 部は上記⑤～⑧の区間における移動、停止時のアンテナ高さの時間的変化の記録であり、計測中のアンテナ高さの安定性、移動中の持ち上げ量の再現性も良好であることが理解される。

これらの結果より、港湾工事におけるスタップ等を用いた簡便な設標にも実用上十分な精度で GPS が適用可能であるといえよう。ただし、ポールの長さによる傾斜誤差や、設標を船上から行う場合の船体動揺による固定位置の変動等には十分配慮する必要がある。

d) 電波障害区域調査実験

GPS 電波受信の障害になると考えられる関門橋、高架線、大型工場および大型作業船の影響について調査した（図-4 中の f1, f2 部）。実験は、これらの障害物の直下および近傍の海域を航行し、衛星電波受信レベルの時間的変化を調べた。関門橋（主径間長 712 m、幅 29 m、海面からのクリアランス 61 m）直下通過状況、高架線直下通過状況、大型工場（新日鉄戸畑製鉄所）および大型作業船（コンクリートプラント船）近傍通過状況を写真-5～8 に示す。なお高架線は、関門橋の東側 230 m の位置に同橋とほぼ平行に海峡を横断しているものであり（図-4 参照）、送電線径 20 mm×4 本組、水平方向 2 組（間隔 28 m）×鉛直方向 4 段、海面との最低クリアランス約 70 m で配線されているものである。

本実用機の有する 8 衛星用 8 チャンネル分（CH 0～CH 7）の GPS 受信信号の C/No（Carrier to Noise Density Ratio、周波数帯域幅 1 Hz あたりの信号/雑音比）の時間的変化を、関門橋および高架線直下通過時について図-8 に、大型工場近傍通過時について図-9 にそれぞれ示す。

一般に、良好な受信状態では C/No は 40 デシベル

(dB) 前後の値を示しているが、図-8 より、経過時間約 36 分頃から 53 分頃までの関門橋直下通過時（往復して延べ 5 回）には、各衛星からの信号が遮断されて C/No が 35 dB 以下となり、図中最下段の ASN が表す使用可能衛星数が 3 個以下となりキネマティック測位の継続が不可能となることがわかる。また、関門橋通過の直後に高架線直下も航行しているが、C/No の変化からみた GPS 受信信号レベルの低下は認められない。

一方、図-9 より大型工場付近を航行した場合には、大型の煙突の影響と思われる電波の遮蔽が 2 衛星について観測されているが（図中 CH 2 および CH 7 の経過時間 30 分過ぎの矢印部分）、時間がずれているために、一時的に捕捉衛星数が 1 個減少しただけとなり、実質的な測位モードへの影響はなかった。このため図-9 では ASN の変化図は省略した。しかしながら測位中の捕捉衛星数が少ない場合には、KGPS は影響を受けるものと予想されるため注意が必要である。

このように上空が遮蔽されたり大型構造物が近傍に存在する場合には、GPS 信号が遮断されてキネマティック測位が継続できなくなる場合がある。この場合、再度初期化を行わなければならないが、このためには衛星電波を再捕捉する必要があり、その時間短縮に本実用システムの改良効果（2. (2)③参照）が発揮された。

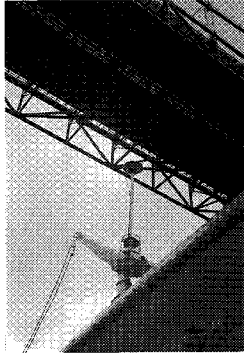
なお大型作業船の近辺を通過した場合の影響は特に認められなかったため、衛星信号受信状況図は省略する。

e) 連続測位実験

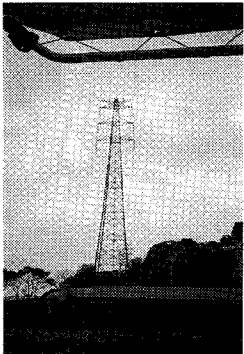
開発した GPS 測位システムの連続使用に対する安定性、測位モード自動切換の確実性、衛星配置の変化に対する追従性等を調べるため、四建所有のドラグ浚渫船海鵬丸に移動局を搭載し、図-4 の g1～g3 の実作業海域において連続測位実験を行った。本船は通常関門航路等の浚渫を 1 日 24 時間体制で実施している。写真-9 に海鵬丸航行状況を、写真-10 に船首側マストに取り付けたアンテナの取付状況を示す。

実験は風師山に基準局を設置して 1 日 24 時間、延べ 21 日間のリアルタイム連続観測とした。ただし、実作業の種々の準備や作業海域の調整等の理由から、この期間のうち太刀浦停泊の比率が結果として高かった。今回の調査海域、すなわち海鵬丸の基地港太刀浦、浚渫海域（関門航路南東水道）および土捨て海域（苅田沖土砂処分場）は、基準局から 6～16 km の範囲であり（図-4 参照）、前記 3. (1) b)、3. (2) b) より OTF 初期化および KGPS 測位とも適用限界付近の領域と考えられる。したがって、観測上は KGPS が安定しない部分が現れて測位モードが変動するものと予想され、これに対する機器の応答性や信頼性が高いことが実用上重要である。

太刀浦港停泊中および上記浚渫海域における作業中のリアルタイム観測結果例（24 時間分）を、図-10、11 に



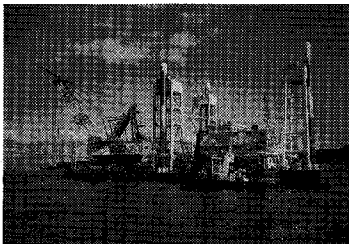
写真一五 関門橋下通過状況



写真一六 高架線下通過状況

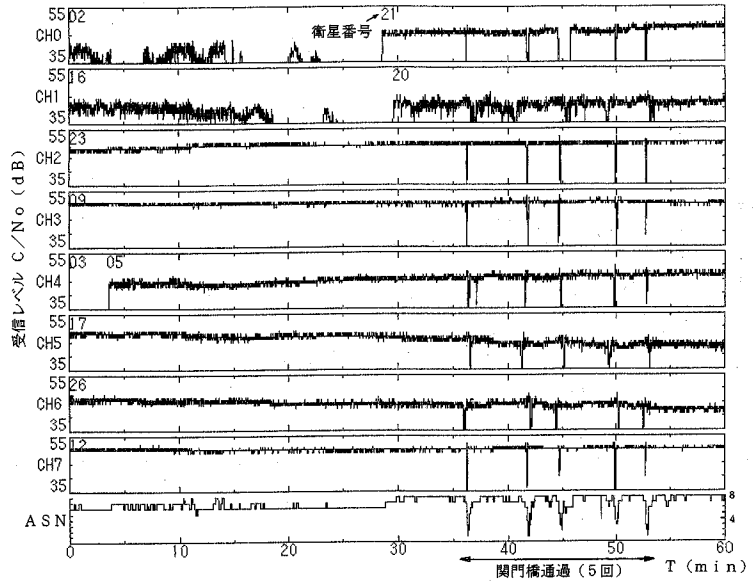


写真一七 大型工場近傍通過状況

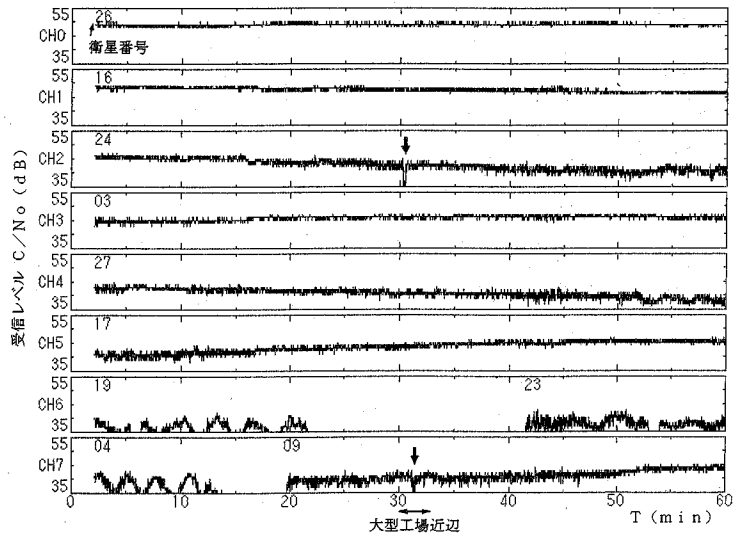


写真一八 大型作業船近傍通過状況

示す。図中 X, Y, H はそれぞれ水平南北方向, 同東西方向, 鉛直方向の測位座標の下 1 桁の値 (単位は m), CSN は捕捉衛星番号, ASN は使用可能衛星数, MOD は測位モード, REF は無線データ受信状況 (上端 on は正



図一八 衛星信号受信状況 (関門橋, 高架線通過時)



図一九 衛星信号受信状況 (大型工場通過時)

常, 下端 off は通信エラーであり, これらの間に現れている縦線部がエラーが発生した箇所) を表す。ただしこれらの結果はメモリー容量節約のため, 毎秒の計測値を 10 秒単位でまとめ, その代表値として記録した値をプロットしたものである。すなわち X, Y, H は 10 秒間隔でサンプリングした値, MOD は当該 10 秒間の中で用いられた種々の測位モードのうち最も精度の低いモードを表す。ただし前述のように, OTF 初期化状態は DGPS と同じ精度を有し, さらに上位の KGPS への移行段階であるため, 図一10, 11 の MOD 部では広義に解釈して独立の

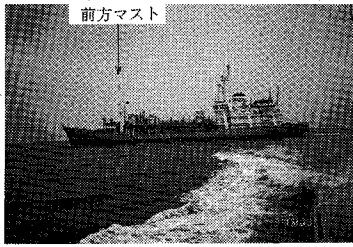


写真-9 海鵬丸航行状況

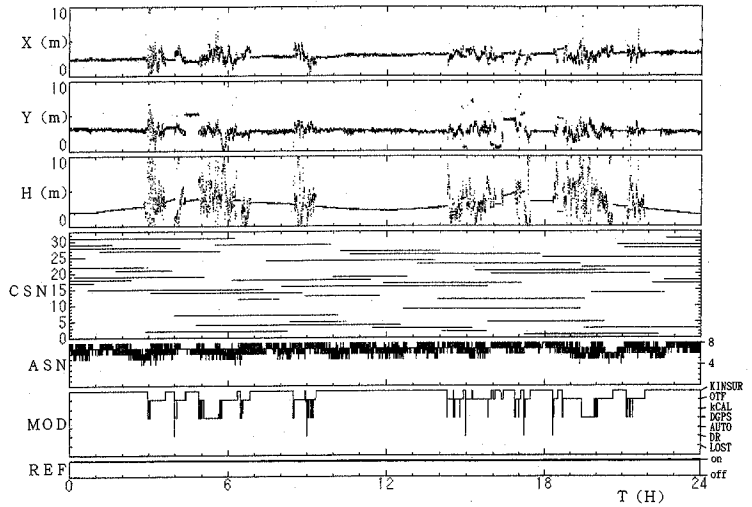


図-10 連続観測記録例 (太刀浦停泊中)

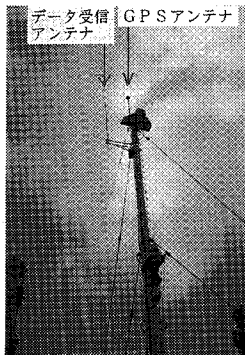


写真-10 アンテナ配置状況

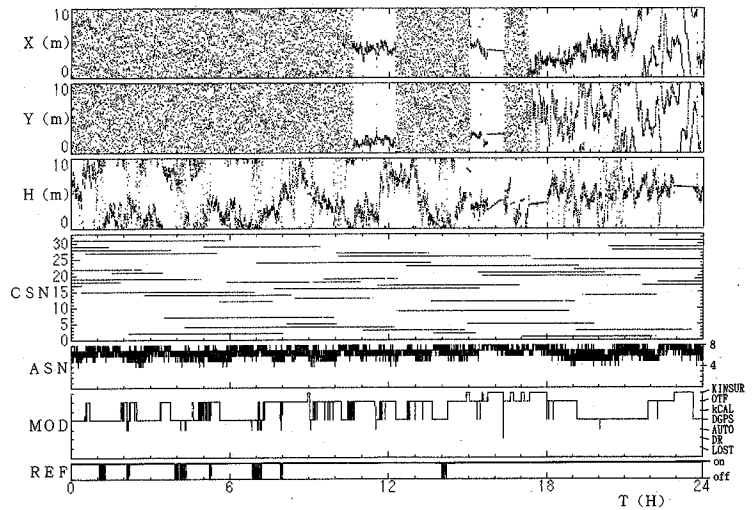


図-11 連続観測記録例 (浚渫等作業中)

測位モードとして扱った。また REF は当該 10 秒間全体が受信障害であった時に off, 正常通信の時 on を示すようにプログラムされている。

X, Y, H に関しては、図-10 において MOD を参照して、経過時間約 3~9 時間, 14~21 時間の変動が大きい部分はディファレンシャル以下の測位モードである。その他はキネマティック測位であり、変動がほとんど無く安定している。このうち H のデータ変化に関しては潮位の変動と考えられる約半日周期の変化も記録されている。一方図-11 においては船舶が数ノットから約 10 ノットの速度で航行している場合が多く、10 秒間に 10 m 以上移動するため、X, Y は不規則に大きく変動している。船舶が停止あるいはこれに近い状態の時は(図-11

中、経過時間 10 時間 30 分~12 時間 15 分, 15 時間~16 時間 30 分, 17 時間 20 分以降), 図-10 と同様に DGPS の精度で測位されていることがわかる。

また図-11 より、作業中は基地局から遠く離れたため(約 10 km 以上), OTF 初期化が成功しない場合が多く、さらに基地局からのデータ受信障害の頻度も増加しており、この海域は本 GPS システムの測位限界を実用上は越えているものと判断される。

また、時間の経過に伴って捕捉衛星番号および使用衛星数が増加しているが、これらの変動に関係なく測位モードは安定しており、本 GPS システムの測位モード自動切換機能は、十分実用性があるものと考えられる。なお図-10, 11 の MOD より、かなりの頻度で KGPS か

表一 6 連続観測時の測位モードの分布
(記録単位時間 10 秒の個数)

通算 観測 日数	林マイン GPS (KINSUR)	ワグワグ 初期化 (OTF)	ディフレ ンシ GPS (DGPS)	単独 測位 (AUTO)	推測 測位 (DR)	測位 中断 (LOST)	総数	備 考
1	4430	3381	818	3	8		8640	} 太刀浦 停泊中
2	4940	3086	601	2	11		8640	
3	1686	2332	795	12	11		4776	
4	1515	1415	253	35	1	5	3224	
5	4549	3687	398	3	2	7	8646	
6	4442	3551	640	1	6		8640	
7	3291	3515	788	1045	1		8640	
8	3828	4187	622		3		8640	
9	4528	3695	414		3		8640	
10	5470	2655	509		5		8639	
11	5564	2995	134		8		8641	
12	5389	3148	101	1	2		8641	
13	3837	4427	369		6		8639	
14	5065	3018	550	2	5		8640	
15	3077	5097	460	1	6		8641	
16	1488	4815	2321	9	1	2	8636	
17	902	3978	3729	29	1		8639	
18	587	2089	5727	199	38		8640	
19	612	4680	3301	32	4	4	8633	
20	2536	5325	777		2		8640	
21	2182	5656	798	1	3		8640	
合計	69918	76672	24045	1375	127	18	172155	} 作業中 停泊中
比率	40.61%	44.54%	13.97%	0.80%	0.07%	0.01%	100%	

ら OTF 又は DGPS にモードが低下しているが、これは
図中の REF が表わす基地局からの無線通信障害が実際
には数秒単位でしばしば観測されており(継続時間 10 秒
以下のため記録には現れていない)、この影響によるもの
と考えられる。

一方、捕捉衛星数が常時 7~8 個であるのに対して使
用可能衛星数が 1~2 個少ないのは、信号レベルの低い
低仰角の衛星を除去しているためである。

連続観測期間中の各測位モードの分布状況を、記録単
位時間 10 秒の個数の集計として表一 6 に示す。表中の各
測位モードの比率を用いて、停泊中および作業中の
DGPS レベル以上の測位モードを累計すると 99%以上
となっており、実用上は DGPS レベルの精度がほぼ确实
に維持できるものと考えられる。

なお OTF 初期化は使用衛星数が 5 以上で可能であ
り、初期化が完了すれば KGPS は衛星数 4 個以上で可能
である。連続観測期間中の使用可能衛星数が 4 個以上お
よび 5 個以上となっている割合は、図一 11 および 12 に
例示した ASN を全観測期間について集計した結果、そ
れぞれ約 100%、99.4%であった。

4. 結 論

GPS を港湾工事等の海上測位に適用するため、リアル
タイム処理キネマティック GPS 海上測位システムの実
用プロトタイプを開発した。この実用システムは、筆者
らがこれまでに開発していた実験機の実用上の問題点を
改善して、その性能、操作性、信頼性等を実用レベルに
高めたものである。

本システムの実用性を検証するため、関門地域におい

て現地実験を行った。その結果は以下の通りである。

(1) 無線通信可能範囲

本 GPS 測位システムにおいては、基準局から移動局
へのデータ通信は周波数 70 MHz、出力 3 watt の無線
テレメータを用いている。70 MHz 帯は障害物に対して
ある程度の電波の回折現象は期待できるが、両局間の見
通しを良くすることが第一に重要であり、この条件が満
たされれば本機の場合は約 20 km 離れた地点までの
データ伝送が可能であった。

(2) OTF 初期化性能

陸上 OTF 初期化実験の結果、本 GPS 測位システムは
基線長 5.6 km 以下において初期化が可能であった。こ
の時所要時間は平均 17~30 分、成功率は 81~92%で
あった。これと海上実験の結果より、本 GPS システムの
実用レベルでの初期化可能距離は、約 6 km と判断され
る。

(3) キネマティック GPS の測位精度

キネマティック GPS の測位精度は、基線長 5.6 km 以
下の場合、水平方向は標準偏差で 1 cm 程度、鉛直方向は
同 2 cm 程度であった。また、基線長が約 1 km 以下の場
合、光波測距儀との差は平均で 4.6 cm、標準偏差で 8.2
cm であり、本システムの精度は実用上光波測距儀と同
等といえよう。

(4) キネマティック GPS の測位可能範囲

基準局一移動局間の無線通信が良好という条件下での
キネマティック GPS の測位可能範囲を、リアルタイム
処理とデータ収集後の事後処理の 2 方式について求めた
結果、前者は約 15 km、後者は約 18 km の範囲まで測位
が可能であった。すなわち、基準局一移動局間の無線伝
送エラーを無くすことによって約 18 km の範囲までキ
ネマティック GPS 測位が可能であると考えられる。

(5) 衛星電波障害物体の影響

衛星電波の受信障害について、関門橋、大型工場、高
架線および大型作業船の影響を調べた結果、関門橋通過
時は受信衛星数が順次減少して 3 個以下となり、キネマ
ティック GPS を維持できなくなった。また大型工場の
近傍航行時には、大型煙突の影響と思われる電波の遮蔽
が 2 衛星について観測された。

このような障害物によってサイクルスリップが生じた
場合の再初期化には、本システムの衛星再捕捉時間短縮
の改造効果が発揮される。

一方、高架線および大型作業船の近傍を通過した際の
衛星電波受信レベルの低下は、特には認められなかった。

(6) 連続観測に対する機器の信頼性

本GPS測位装置を船上に搭載して長期連続観測を行った結果、衛星配置や無線通信レベルの変動に追従した測位モードの自動切替、正確なデータの記録や出力、耐振性等所期の性能と安定性が確認された。したがって本実用機は、適用範囲内で使用する限り、実用上十分信頼性のある海上測位システムであると考えられる。

5. あとがき

一周波方式GPS海上測位システムの実用プロトタイプを開発し、適用実海域において実用性検証実験を行った結果、本システムの有効性、適用限界、連続使用に対する信頼性等が確認された。

一方適用海域を拡大するためには、基地局-移動局間の無線通信能力の向上も重要であり、そのために例えばダイバーシティアンテナの導入等も今後検討する必要がある。

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定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) Hanson, P., P. Axelrad, T. Hayashi and T. Ishizaki: A real-Time GPS Kinematic Survey System (GKSS), Proc. ION GPS-92, New Mexico, The Institute of Navigation, pp.1005-1013, 1992.
- 3) T. Hayashi, Y. Nakazono, Y. Hanson and P. Axelrad: Test Results of Real Time GPS Kinematic Survey System (GKSS), Proc. ION GPS-93, Salt Lake City, the Institute of Navigation, pp.1115-1124, 1993.
- 4) 日本測地学会編著: 新訂版 GPS-人工衛星による精密測位システム, (社)日本測量協会, 1989.
- 5) 土屋淳, 今給黎哲朗: GPS 測量と基線解析の手引, 日本測量協会, 1992.
- 6) Hofman-Wellenhof, B., H. Lichtenegger and J. Collins: *Global Positioning System*, Springer-Verlag, 1992.
- 7) Atlas of radio Wave Propagation Curves for Frequencies Between 30&10,000 MC/S, THE RADIO RESEARCH LABORATORIES MINISTRY OF POSTAL SERVICES, 1958.
- 8) 飯島幸人, 今津隼馬: 電波航法, 成山堂, 1994.

(1995.3.27 受付)

FIELD TESTS FOR INVESTIGATION OF PRACTICAL APPLICABILITY OF THE REAL-TIME GPS MARINE SURVEYING SYSTEM

Kenji HAMADA, Masaru SOTOHEBO, Osamu NAKAI, Tadao HAYASHI, Norikazu SHIMIZU and Koji NAKAGAWA

The real-time GPS (Global Positioning System) marine surveying system, originally developed by the authors, has been improved for practical use in this research.

This paper outlines the improved system and details the results of the field tests conducted around the Kanmon international channel. The field tests were performed to investigate the ability of the system, i. e., the accuracy of the positioning, the stability of the On-The-Fly calibration, the availability of long baseline surveying, and the influence of obstacles on wave propagation.

The system developed by this research will be available for practical use in marine surveys. It will also improve work efficiency and reduce labor costs.