

運輸省港湾技術研究所

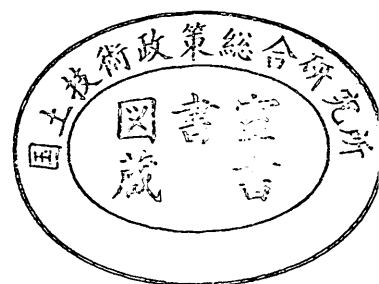
港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE

MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 35 NO. 3 Sep. 1996

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第35巻 第3号 (Vol.35, No. 3), 1996年9月 (Sep. 1996)

目 次 (CONTENTS)

1. 港湾で観測された長周期波の特性
..... 平石哲也・田所篤博・藤咲秀可 1
Characteristics of Long Period Wave Observed in Port
Tetsuya HIRAISHI, Atsuhiro TADOKORO, Hideyoshi FUJISAKU)

2. TSLに対応した水域施設の計画手及び入港支援システム
..... 高橋宏直・早藤能伸・酒井浩二・森満賢治・中本 隆・木阪恒彦 37
Study on Water Area Facilities Standrd and Support System of Entering
a Port for Techno Super Liner
Hironao TAKAHASHI, Yoshinobu HAYAFUJI, Koji SAKAI, Kenji MORIMITSU
Takashi NAKAMOTO, Tsunehiko, KISAKA)

3. PTK/OTF GPSによるTSL着岸システム
..... 高橋宏直・早藤能伸・酒井浩二・森満賢治・中本 隆・木阪恒彦
井潤健二・山下武広・井隼哲郎・宗円清明 73
Study on Sopport System of Berthing for Techno Super Liner
by RTK/OTF GPS
Hironao TAKAHASHI, Yoshinobu HAYAFUJI, Koji SAKAI, Kenji MORIMITSU
Takashi NAKAMOTO, Tsunehiko KISAKA, Kenji ITANI, Takehiro YAMASHITA
Tetsuro IHAYA, Kiyooki SOEN)

3. RTK/OTF GPSによるTSL着栈システム

高橋宏直*
早藤能伸**
酒井浩二***
森満賢治****
中本隆*****
木阪恒彦*****
井潤健二*****
山下武広*****
井隼哲郎*****
宗円清明*****

要 旨

近年、テクノスーパーライナー (Techno Super Liner) に代表される大型高速貨物船の開発が大きく進展してる。このような外洋を高速で航行できる船舶においても、着栈時は操船者の視覚情報に基づく判断が中心となるシステムに変化はないと考えられる。

このため、荒天時や視界不良時において視覚情報が十分に得られない場合に、このシステムのままでは定時性の確保はもちろん安全性に支障が生じることが想定される。

したがって、本研究ではこうした状況に対応するため、RTK/OTF GPSにより操船者に対して本船の位置を高精度 (誤差数cm) でリアルタイムに画像表示することを目的とした着栈システムを構築した。そして、TSL-Aタイプの実海域実験船である「飛翔」に実際に搭載し、このシステムの海上実験を実施し、精度確認、運行精度等を確認することによりこのシステムの有効性を明らかにした。さらに、このシステムの発展の可能性についても検討を加えた。

キーワード: TSL, GPS, 着栈支援システム

-
- | | |
|------------------|-----------------------------|
| * 計画設計基準部 | システム研究室長 |
| ** 前 計画設計基準部 | 主任研究官 (現 港湾空間高度化センター) |
| *** 前 計画設計基準部 | システム研究室 (現 港湾局 環境整備課) |
| **** 前 計画設計基準部 | システム研究室 (現 計画設計基準部 設計技術研究室) |
| ***** 計画設計基準部 | システム研究室 |
| ***** 計画設計基準部 | 部長 |
| ***** 古野電気株式会社 | 技術研究所 研究部 |
| ***** 古野電気株式会社 | 東京支店 |
| ***** 前 古野電気株式会社 | |

STUDY ON SOPPORT SYSTEM OF BERTHING FOR TECHNO SUPER LINER BY RTK/OTF GPS

Hironao	TAKAHASHI*
Yoshinobu	HAYAFUJI**
Koji	SAKAI***
Kenji	MORIMITSU***
Takashi	NAKAMOTO****
Tsunehiko	KISAKA*****
Kenji	ITANI*****
Takehiro	YAMASHITA*****
Tetsuro	IHAYA*****
Kiyooki	SOEN*****

Synopsis

As a new concept of high-speed marine transportation, the Techno Super Liner has already reached the practical stage of operations beyond the experimental stage. When even the TSL approaches the wharf, the motion of a ship relative to the wharf is confirmed directly by the human eyes in any weather conditions.

To improve the safety and efficiency of such berthing operation, we developed the support system using RTK/OTF GPS (Real Time Kinematic /On The Fly Global Positioning System). The RTK/OTF GPS can provide the position with accuracy of a few centimeters in real time.

Two RTK/OTF GPS systems were installed on the experimental high-speed ship, 'Hisho', and the effectiveness of the support system was verified for actual berthing operations.

Key Words : Words : Techno Super Liner, Global Positioning System,
Support System of Berthing

-
- * Chief, Systems Laboratory, Planning and Design Standard Division
 - ** Senior Research Engineer, Planning and Design Standard Division
(Waterfront Vitalization and Environment Research Center at present)
 - *** Member of Systems Laboratory, Planning and Design Standard Division
(Marine Environment Division, Port Bureau at present)
 - **** Member of Systems Laboratory, Planning and Design Standard Division
 - ***** Director, Planning and Design Standard Division
 - ***** Elemental Technology Development and Researching Laboratory, Furuno electric CO., LTD.
 - ***** Tokyo Office, Furuno Electric CO., LTD.
 - ***** Before, Furuno Electric CO., LTD.

目 次

要 旨	73
1. まえがき	77
2. RTK/OTF GPSによる着棧システム	77
2.1 RTK/OTF GPSの概要	77
2.2 システム構成	77
2.3 基地局	78
2.4 移動局	78
3. 実験概要	79
3.1 実験に関する基本的な事項	79
3.2 接岸岸壁，中ノ瀬航路位置情報の入力	79
3.3 評価手法	79
4. 実験結果及び評価	79
4.1 外洋航行中での実験結果	79
4.2 東京湾湾口部での実験結果	79
4.3 岸壁前面での実験結果	82
4.4 係岸中の実験結果	82
4.5 データ欠測の状況	82
4.6 タイムラグの状況	82
4.7 着棧システムとしての評価	89
5. あとがき	
謝 辞	
参考文献	
参考資料	

1. まえがき

近年、テクノスーパーライナーに代表される大型高速貨物船の開発が大きく進展してる。このような外洋を高速で航行できる船舶においても、着棧時は操船者の視覚情報に基づく判断が中心のシステムに変化はないと考えられる。

しかしながら、荒天時や視界不良時において視覚情報が十分に得られない場合に、このシステムのままでは定時性の確保はもちろん安全性に支障が生じることが想定される。

したがって、本研究ではこうした状況に対応するため、RTK/OTF GPSにより操船者に対して本船の位置を高精度（誤差数cm）でリアルタイムに画像表示することを目的とした着棧システムを構築した。そして、TSL-Aタイプの実海域実験船である「飛翔」に実際に搭載し、システムの海上実験を実施し、精度確認、運行性能等を確認することによりこのシステムの有効性を明らかにした。さらに、このシステムの発展の可能性についても検討を加えた。

2. RTK/OTF GPSによる着棧システム

2.1 RTK/OTF GPSの概要

RTK/OTF (Real Time Kinematic/On The Fly) GPSは、移動中においても搬送波の波数の確定による初期化機能を有し、即時に3次元方向(X, Y, Z軸方向)の測位結果が得られるGPSであり、近年、海上工事において実用化され始めているとともに、兵庫県南部地震における被災状況の把握においても大きな効力を発揮した。なお、現在のシステムにおいては、即時性に関して数秒間のタイムラグが生じている。

なお、GPS及びRTK/OTF GPSの詳細については、巻末の参考資料に示す。

2.2 システム構成

本システムは、大きくは陸上に構築される基地局と本船内に構築される移動局により構成される。その全体のシステム構成を図-1に示す。また、実験概要は3章において示すが、実験は「飛翔」が横須賀港新港埠頭に入出港するのに併せて実施したため、それに適したシステムとして構築している。

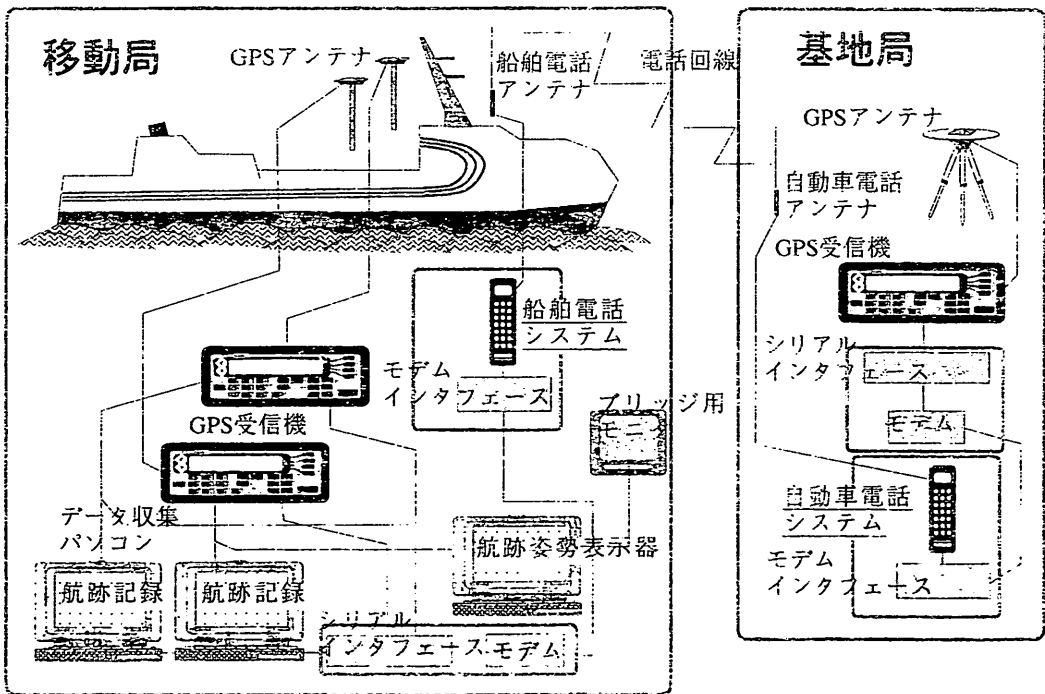


図-1 全体のシステム構成図

2.3 基地局

基地局は、図-1に示すようにGPSアンテナ、GPS受信機、モデム、自動車電話からなっている。

GPSアンテナは、衛星をできるだけ多く捕捉するため、展望が開けた高い場所として新港埠頭内にあるビルの屋上に設置した。その状況を写真-1に示す。この基地局で受信したGPS衛星のデータを移動局に転送するための手段として種々試みた結果、自動車電話が最も良好な結果を示したためこれを採用した。この自動車電話発信部分の状況を写真-2に示す。なお、自動車電話の伝送距離が東京湾の湾口部まで達していることを事前に確認した。

2.4 移動局

移動局は、GPSアンテナ、GPS受信機、航跡記録器(パソコン)、船舶電話アンテナ、船舶電話、モデム、航跡姿勢表示器(パソコン)、ブリッジ用モニターで構成されている。このうち、GPSアンテナは船舶の方向を

含めた形状を確定するため船舶の左舷及び右舷の2箇所に設置し、これに連動するGPS受信機及び航跡記録器もそれぞれ2台用意した。右舷におけるGPS受信機の状況を写真-3に、移動局側の船舶電話受信部分の状況を写真-4に示す。

基地局から伝送されてきたデータは、船舶電話で受信し、それぞれのGPS受信機に入力され、基地局との差動測位を行う。この際、船舶が外洋にあり、基地局からのデータが伝送されない場合には、それぞれのGPS受信機がいわゆる単独測位を行うように設定した。また、伝送距離内であっても電話回線が電波状況等により切断された場合には、再度電話をかけ直す機能を有したモデムを用意した。

それぞれのGPS受信機で測位計算された結果は、航跡姿勢表示器を経由してブリッジ用モニターでグラフィック表示を行うこととした。これにより実験終了後の解析を待たず、このモニター表示による現場での状況確認を実施した。

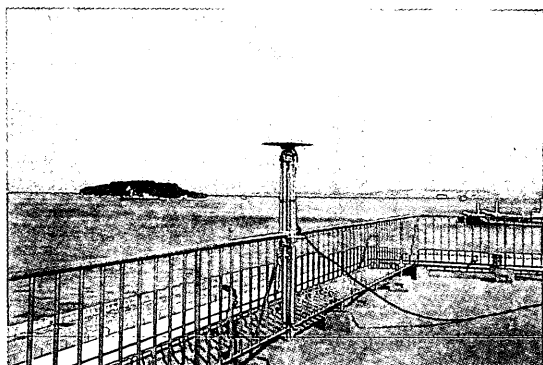


写真-1 基地局のGPSアンテナ

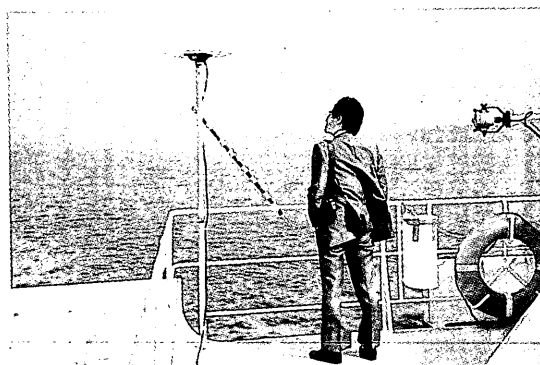


写真-3 移動局のGPSアンテナ

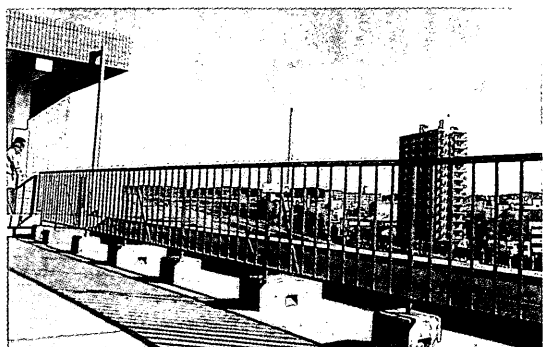


写真-2 基地局側の電話発信部分

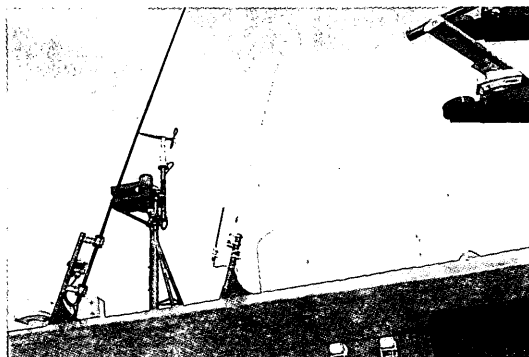


写真-4 移動局側の電話受信部分

3. 実験概要

3.1 実験に関する基本的な事項

実験日 : 平成7年9月28日
 実験船 : 飛翔 (1590総トン, 全長70m)
 航海航路 : 横須賀港新港埠頭から大島沖までの往復航路
 気象 : 晴天, 微風
 測定項目 : 2台のGPS受信機の位置(緯度, 経度, 楕円体高), 受信状態, 測位状態に関する毎秒データ
 画面表示 : 航跡姿勢(2種類のスケール), 位置, 左舷の受信機の高さ, 受信衛星数, 測位状態(RTK/OTF状態あるいは単独測位状態)の毎秒表示

実験日に新港埠頭に係留している「飛翔」の状況を写真-5に示す。

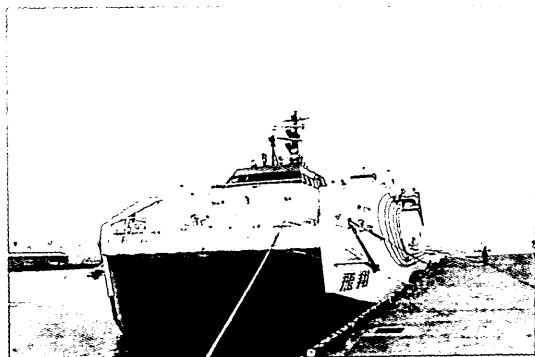


写真-5 係岸中の「飛翔」

3.2 接岸岸壁, 中ノ瀬航路位置情報の入力

TSLが離着棧する岸壁は事前に決定されており, その岸壁の位置座標を事前に入力しておく必要がある。このため, 実験に先立ち横須賀港新港埠頭の主要なポイント座標をこのRTK/OTF GPSにより測位し入力した。なお, 新港埠頭の工事基準点の位置情報との整合により精度の確認を行った。

また, 中ノ瀬航路の位置については, 公表されている位置情報をもとに形状を入力した。

3.3 評価手法

このシステムの性能評価は, 毎秒のデータ取得が可能であるかどうかという点と精度が数cmであるかどうかという点の2点によりなされる。第一点目については,

現場においてモニターで確認するとともに, 取得されたデータの欠測を解析することで確認される。第二点目については, それぞれ単独で測位を行う2台の受信機間の距離を取得データから解析することで確認される。すなわち, この距離が要求される精度内で変動しているかどうかで判断することが可能である。

4. 実験結果及び評価

実験結果について, 単独測位状況となっている外洋, 東京湾湾口部, 岸壁前面での状況及びデータ欠測, タイムラグについて以下に整理する。

4.1 外洋航行中での実験結果

基地局のデータが伝送されない外洋での結果の一部について, モニター画面を図-2に, また実験後に解析した同じ時間帯の2台の移動局間距離を図-3に示す。なお, 図-2においては左側の画面に拡大図(2受信機間を底辺とする2等辺三角形表示), 右上の画面に現在までの航跡図, 右下の画面に左舷受信局の高度図を表示している。特に, 左側の図において, 右舷側の受信機を黒丸, 左側の受信機を白丸とする情報を出力後の図面に追加することで, 位置関係が明らかになるようにした。また, 図-2の左側の図に表示されている部分に対応した時間帯を図-3の中に矢印で示す。

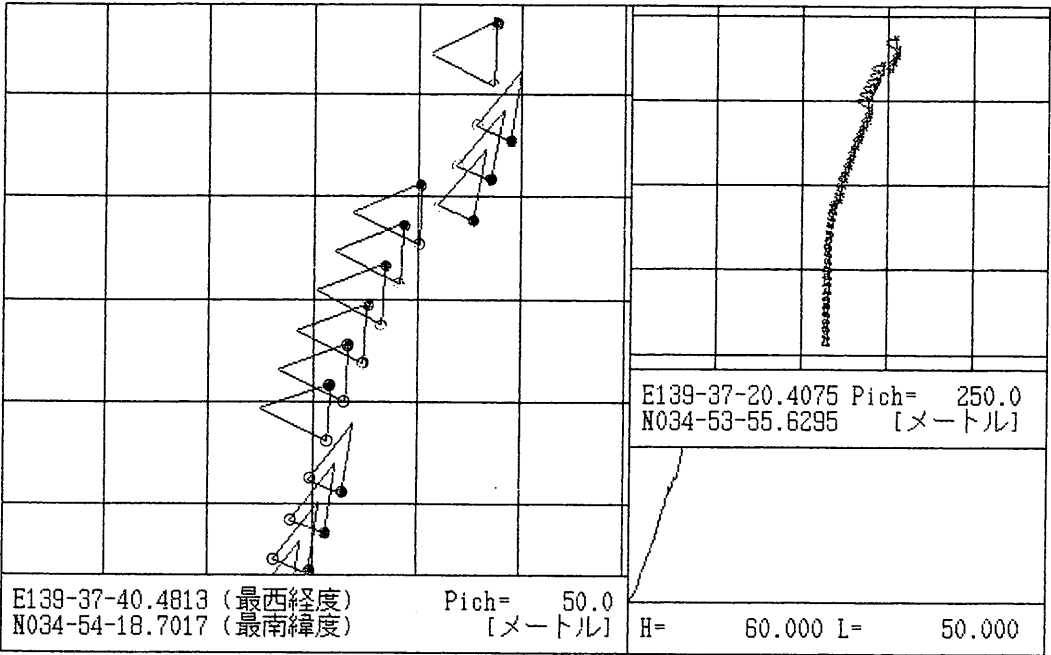
この状態は2台の受信機とも単独測位状態になっているため, 図-3で明らかのように, アンテナ間の距離が大きく変動している。また, 図-2の左側の図のように左右の相対的な位置関係もずれていること判る。ここで, 図-2の右上の表示で, ステータス1は単独測位状態を意味し, Sv数7は受信衛星数が7個であることを意味する。

4.2 東京湾湾口部での実験結果

横須賀港新港に約15kmまで近づいた東京湾湾口部から基地局に電話をかけ, 基地局からのデータをリアルタイムに入力することでRTK測位状態にした。ここで, 約1分で初期化は終了し, その後, 着棧するまでRTK状態の測位を実施した。

ここでは, 中ノ瀬航路入り口部での結果について, モニター画面を図-4に, また実験後に解析した同じ時間帯の2台の移動局間距離(左軸)および左舷の上下変動量(右軸)を図-5に示す。なお, 図-4の表示は図-2と同じであるが, 右上の画面に中ノ瀬航路の形状を表示している。また, 図-4の左側の図に表示されている部分に対応した時間帯を図-5の中に矢印で示す。

E139-37-48.2162 N034-54-26.9618 H 63.84 T 95-09-28 04:05:43 ステータス 1 Sv数 7



G:Graphics M:Marking RL:Reset(Left) RR:Reset(Right)
 U:Up D:Down H:Hold E:End

図-2 外洋航行中(単独測位状態)の出力画像

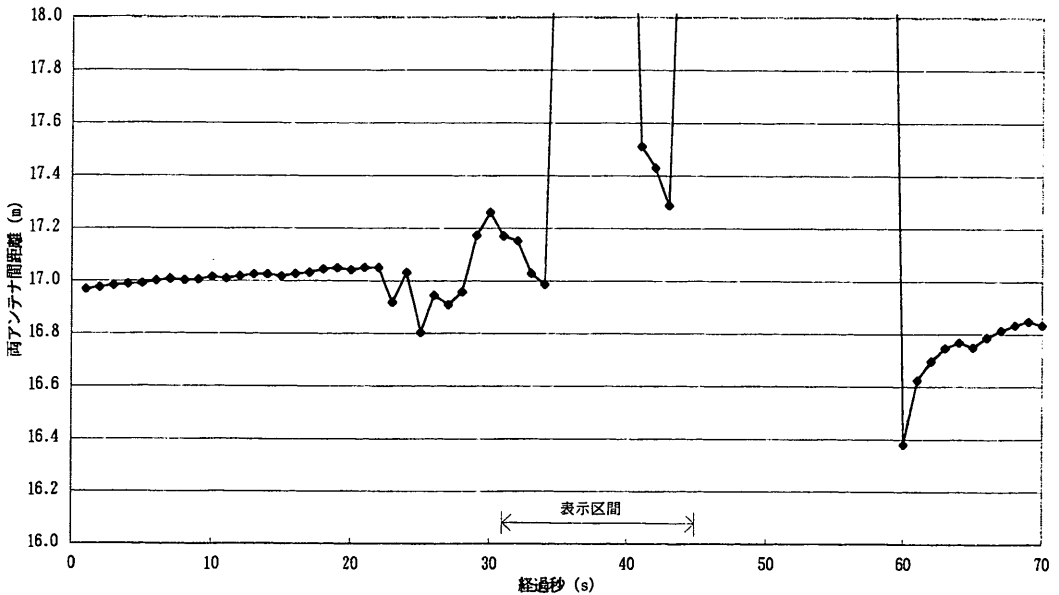
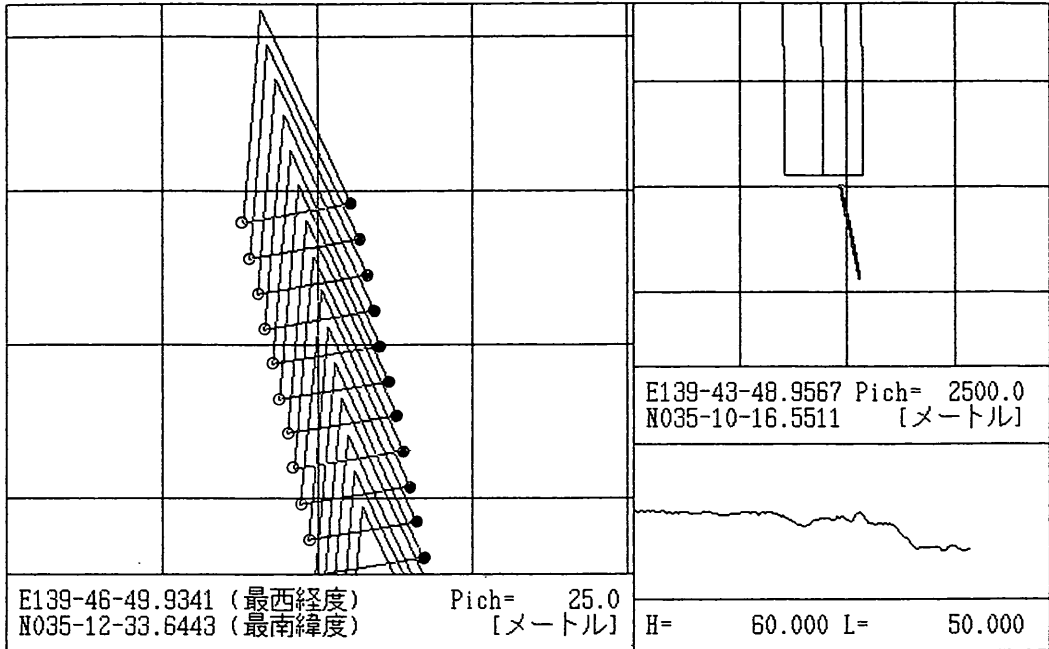


図-3 外洋航行中(単独測位状態)の移動局(GPSアンテナ)間距離

E139-46-51.4712 N035-12-36.6279 H 53.30 T 95-09-28 04:36:41 ステータス 3 Sv数 7



G:Graphics M:Marking RL:Reset(Left) RR:Reset(Right)
 U:Up D:Down H:Hold E:End

図-4 東京湾口部 (RTK測位状態) の出力画像

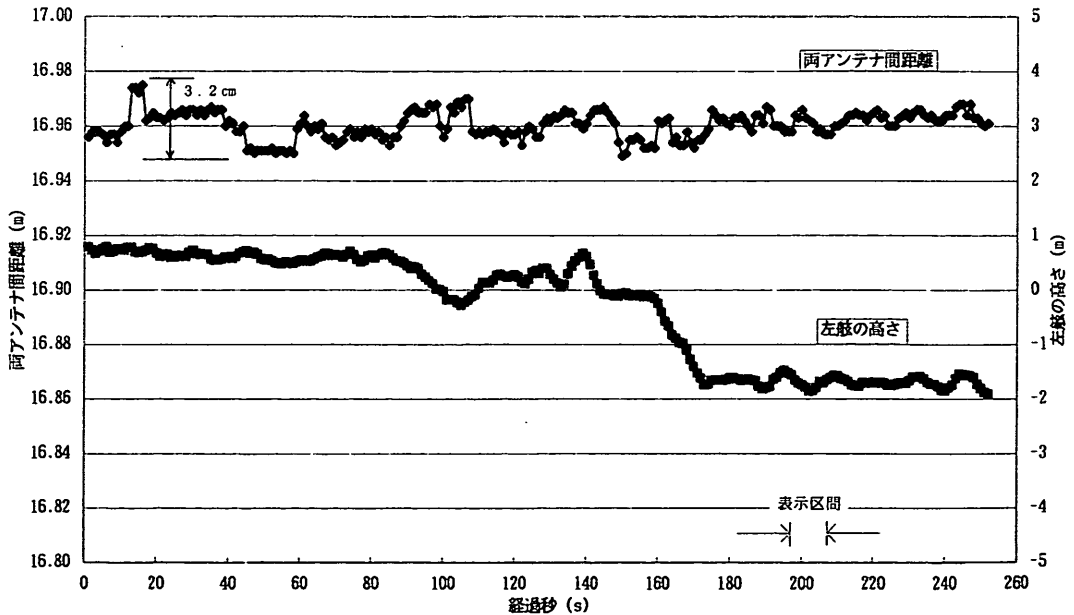


図-5 東京湾口部 (RTK測位状態) の移動局 (GPSアンテナ) 間距離

この状態は2台の受信機ともRTK状態になっており、図-5で明らかのように、アンテナ間の距離の変動量が3cm程度と非常に安定していることが分かる。また、図-4の左側の図より、図-2にみられたような左右の相対的な位置関係のずれも全く生じていないことが分かる。さらに、この航海において飛翔は中ノ瀬航路入り口部でオン・クッションからオフ・クッション（浮上状態から着水状態）への切り替えを行ったが、その状況が図-5において明確に示されている。飛翔のオン・クッションとオフ・クッションの喫水差は3m程度といわれており、概ねその結果となっている。ここで、図-4の右上の表示で、ステータス3はRTK測定状態を意味し、SV数7は受信衛星数が7個であることを意味する。

4.3 岸壁前面での実験結果

東京湾湾口部から着桟までは、2台の受信機ともRTK測定状態が継続した。移動局間距離および左舷の上下変動量の状況は、図-5で示す状況とほぼ同様であった。ここでは、最終的な着桟システムを想定し、測定された2台の受信機の計測結果に基づき、着桟状態の船体移動の図化を行った。その結果を図-6に示す。ここでは、10秒間隔で船型表示を行った。ここに示す埠頭の形状は、3.2で示したとおり事前に入力した位置座標をもとに表示されており、補正は行っていない。また、実験当日の出港状況を同様に表示した結果を図-7に示す。図-6、7から、飛翔の船体移動の状況が非常に滑らかに再現されているのが明らかになる。今回用いた航跡姿勢表示器（パソコン）の処理能力が必ずしも十分ではなかったため、実海域の実験においてここまでの表示は出来なかったが、機器の能力が改善されればここまでの表示も可能である。

4.4 係岸中の実験結果

(1) 移動局間距離

係岸中の2台の移動局間距離を図-8に示す。ここでは、変動量は2cm程度となっており、先ほどの航行中の移動局間距離を示した図-5と比較して、より安定した結果を示していることが分かる。このことから、図-5で示した移動中の変動量は、RTK-OTF GPSの精度に起因するものばかりではなく、写真-3に示した様に、移動局の船体への取り付けを簡易的に行ったことに起因する部分もあることが想定される。したがって、移動局が船体に十分固定できれば、より高精度の結果が得られると考えられる。

(2) 上下変動

係岸中の左舷側の移動局の上下変動を図-9に、右舷側の移動局の高低変動を図-10に示す。細かな変動をしながら大きな上昇傾向を示している。この大きな上昇傾向は、潮位変動を表していると考えられる。実験当日（9/28）のこの時間帯は上げ潮で、横須賀港の検潮記録によれば10分間で約4cm潮位が上昇しており、その状況が明確に測定されている。この潮位変動の影響を除くため、左舷、右舷の両方の差を図-11に示す。当初の設置において高低差を厳密に調整しなかったため、約5cmの相対差を最初から有するものの、変動量としては3cm程度になっている。この中には、波による船体変動（ローリング）の影響と精度誤差の両方が含まれていると考えられる。

(3) 平面変動

左舷の移動局について、東西および南北方向の変動量を図-12、13に示す。同様に、右舷の移動局についても、東西および南北方向の変動量を図-14、15に示す。右舷の東西位置が、図の中の900秒過ぎに3cmほど大きく変動している。この原因については不明であったが、これを除けば概ね3cm程度という安定した結果となっている。ここでの変動の中には船体変動と精度誤差の両方が含まれていると考えられる。

4.5 データ欠測の状況

東京湾湾口部でRTK測位状態になってから、データ転送エラーが5分に1回の割合で発生した。この原因は、簡易伝送方法である電話回線を利用した事によるものであり、この課題は専用の安定した通信回線を利用すれば解決すると判断される。

4.6 タイムラグの状況

実験において、基地局のGPS受信機からは毎秒約125バイトのデータが19200bpsで転送され、このデータは電話回線経由で移動局のGPS受信機に1.2秒遅れて届き、その後、測位演算を実施する。なお、電話回線の伝送速度は、船舶電話がアナログであるため2400bpsである。この測位結果は、0.8秒遅れてGPS受信機から出力され、航跡姿勢表示器においてさらに0.5秒遅れるため、最終的に2.5秒後の結果表示となった。これは、今回のシステムを汎用的な計測用の機器により構築したことに起因しており、この目的に特化した機器で構築すれば、このタイムラグの大半は解消されると考えられる。

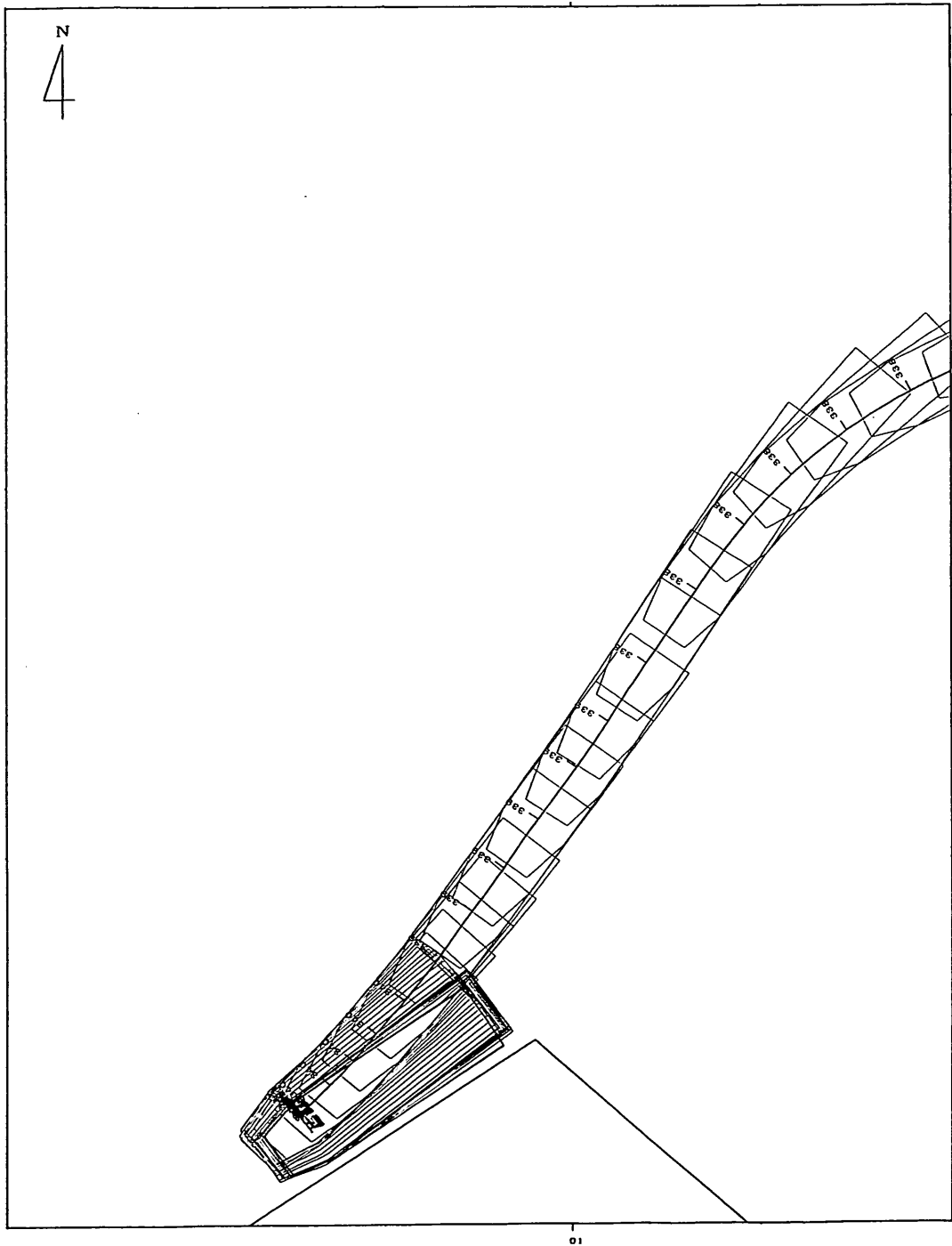


図-6 測位結果に基づく着岸時の船体移動状況

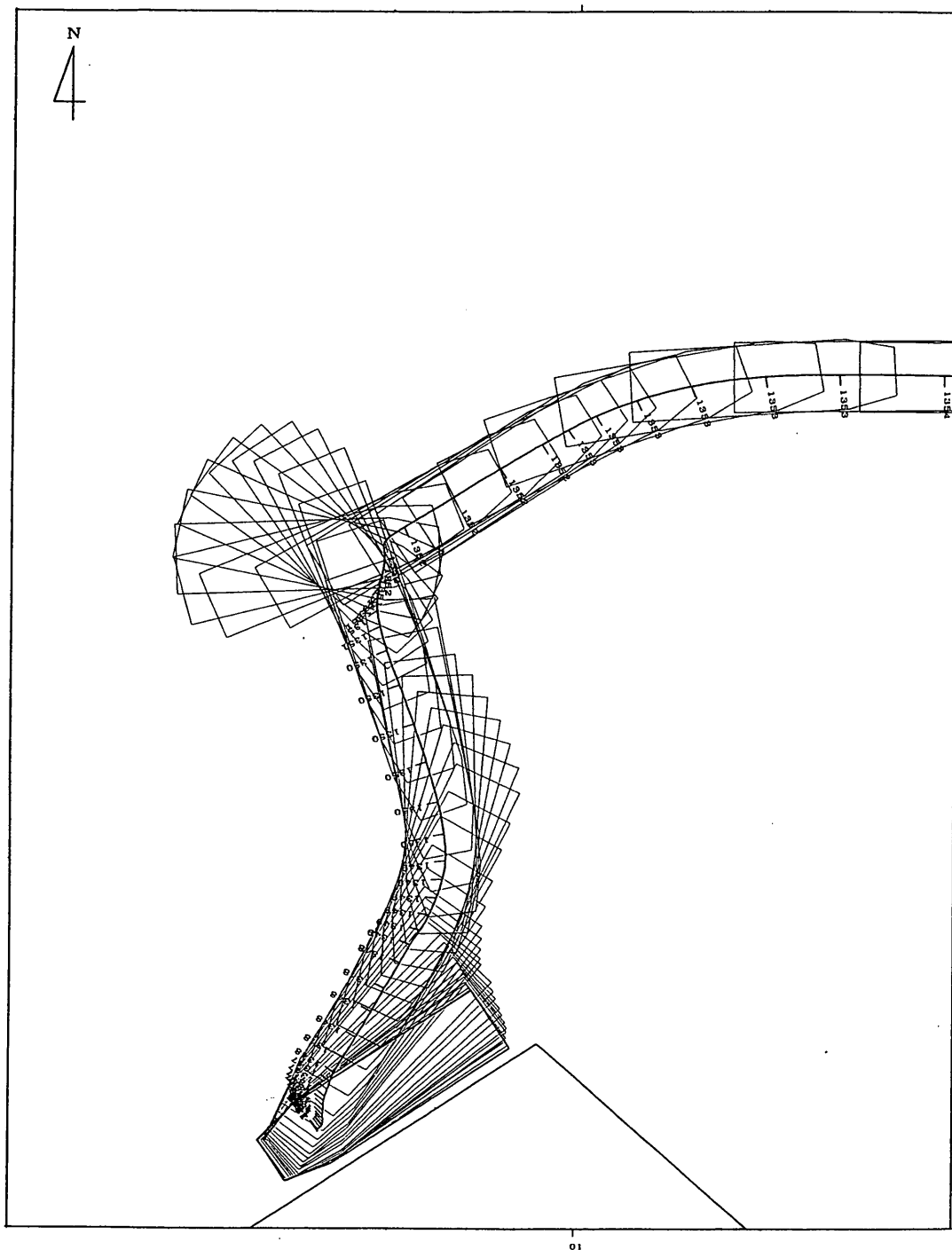


図-7 測位結果に基づく離岸時の船体移動状況

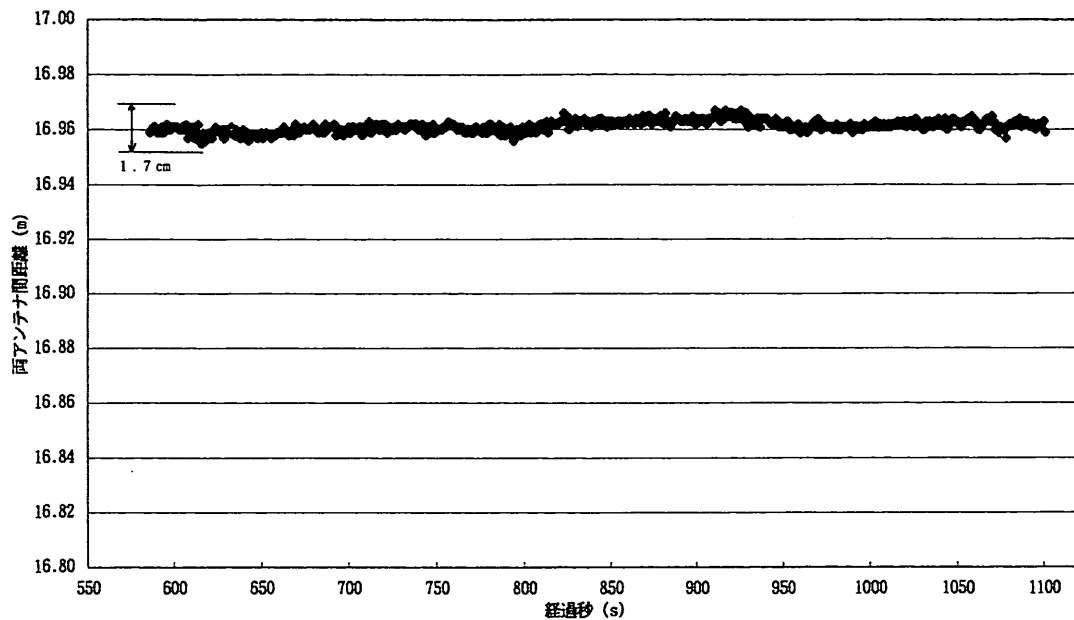


図-8 係岸中 (RTK測位状態) の移動局 (GPSアンテナ) 間距離

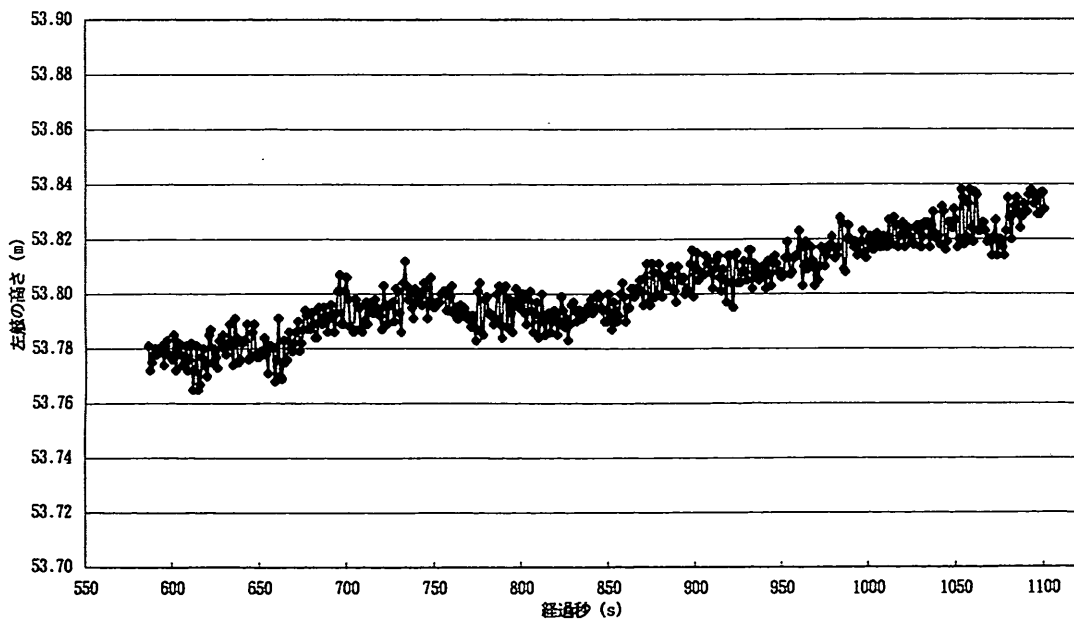


図-9 係岸中 (RTK測位状態) の左舷の移動局 (GPSアンテナ) の上下変動

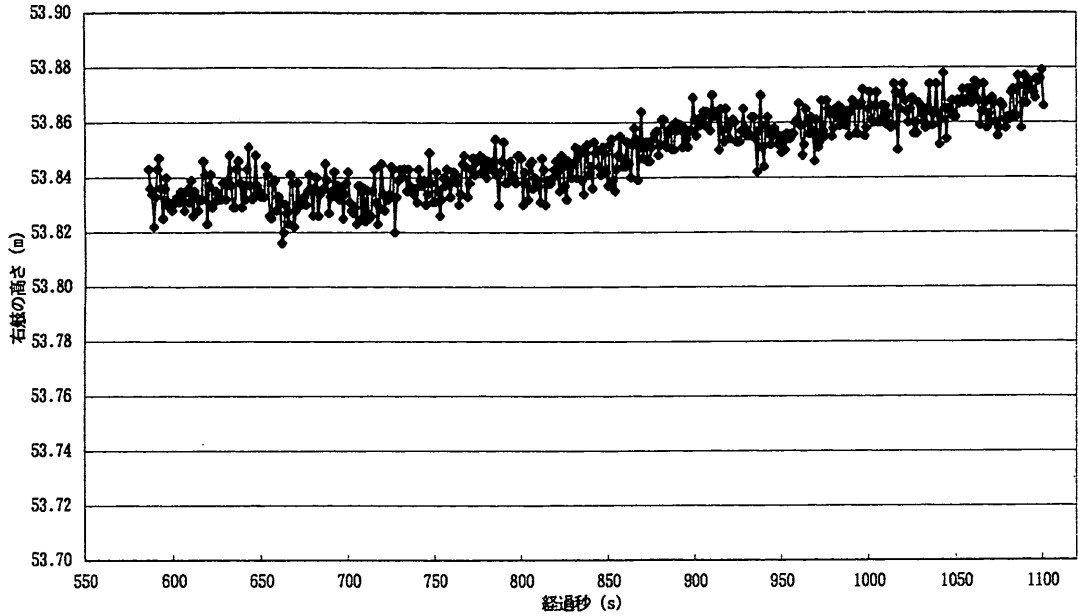


図-10 係岸中 (RTK測位状態) の右舷の移動局 (GPSアンテナ) の上下変動

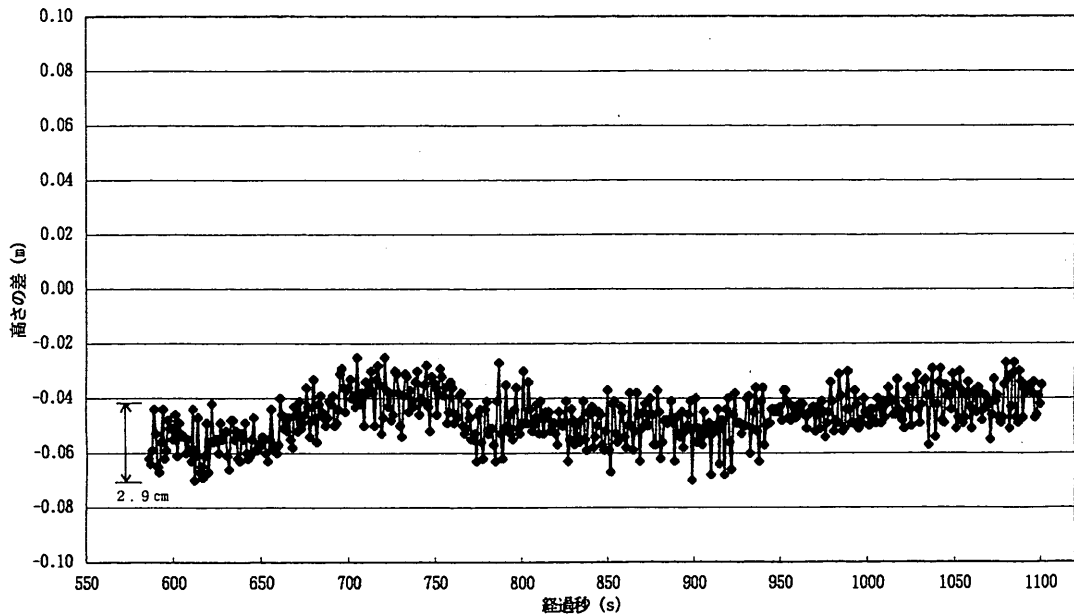


図-11 係岸中 (RTK測位状態) の両移動局 (GPSアンテナ) の高低差変動

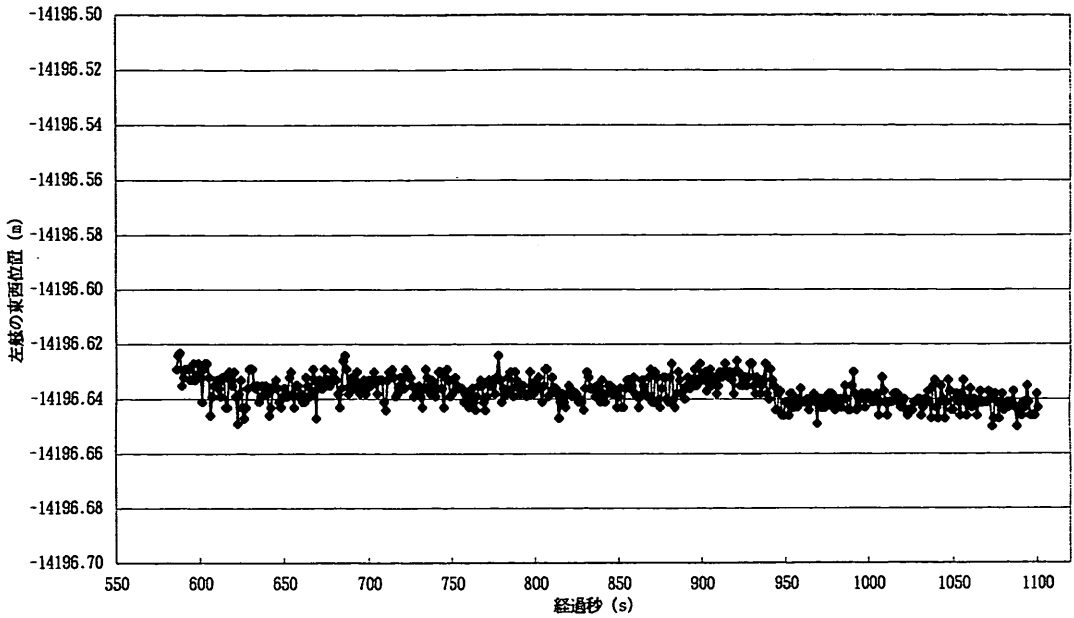


図-12 係岸中 (RTK測位状態) の左舷の移動局 (GPSアンテナ) の東西変動

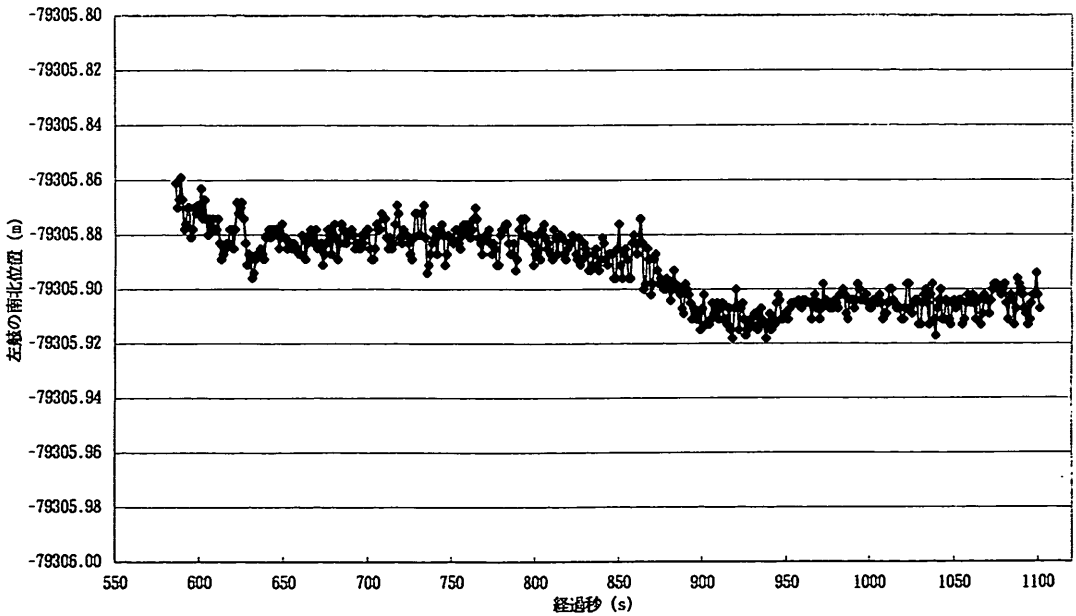


図-13 係岸中 (RTK測位状態) の左舷の移動局 (GPSアンテナ) の南北変動

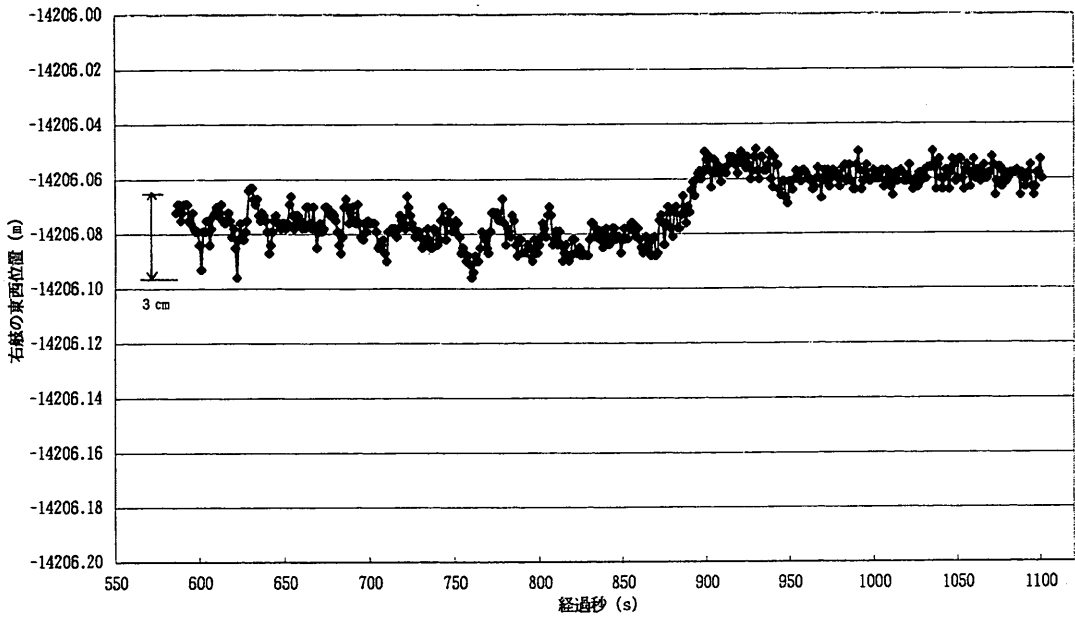


図-14 係岸中 (RTK測位状態) の右舷の移動局 (GPSアンテナ) の東西変動

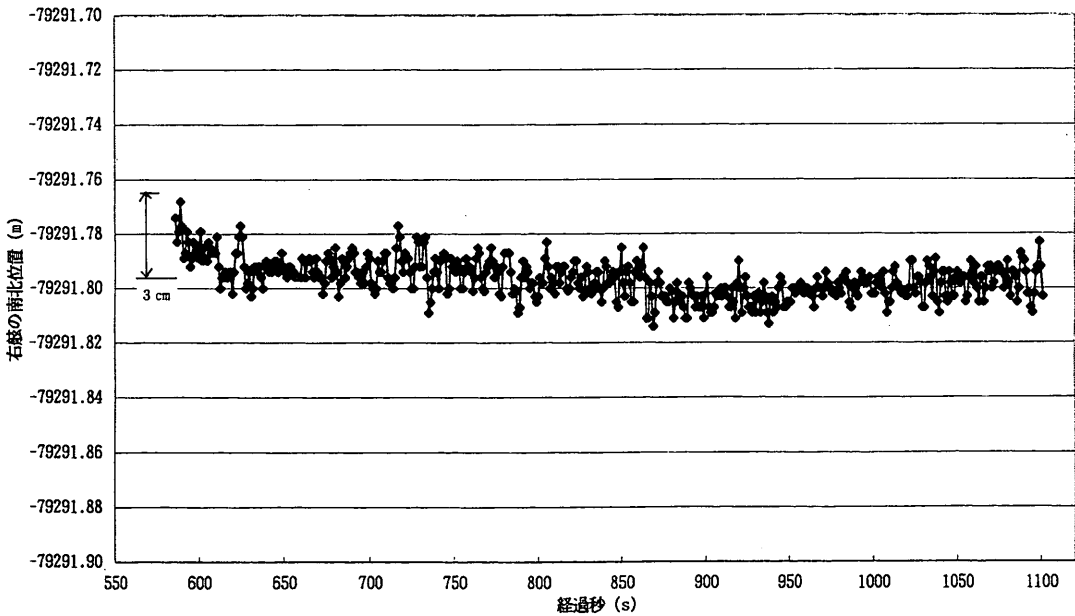


図-15 係岸中 (RTK測位状態) の右舷の移動局 (GPSアンテナ) の南北変動

4.7 着岸システムとしての評価

実験の結果、RTK/OTF GPSによるX、Y、Z方向の精度は、着岸システムとして十分に適用できるレベルに達していると考えられる。なお、データ欠測、タイムラグについては先に述べた様に、専用回線、専用機器により構築することで処理可能と考えられる。

5. あとがき

本研究では、TSLに代表される大型高速貨物船に対応したRTK/OTF GPSによる着岸システムを構築し、TSL-Aタイプの実験船である「飛翔」に搭載することで実海域実験を実施した。その結果、精度的には、着岸システムとして十分な精度が得られることが確認された。

しかしながら、実際の着岸においては、このシステムによる画像を操船責任者が視ることが可能かどうかという点に課題が生じる。特に、システムの有効性が期待される荒天時や視界不良時であればあるほど、操船責任者は自分の視覚情報を重要視するのが現状である。したがって、実際におけるシステム構築においては、支援システム的な役割を持たせる方が適当と判断される。

さらに、実用化における課題としてRTK/OTF GPSアンテナ、受信器等の機材価格が高いことが挙げられる。また、別の課題として、基地局の整備も挙げられる。

しかしながら、将来的には機材の低価格化及び全国的な基地局の整備が進むことは十分想定され、本システムの実用化の可能性は十分高いと考えられる。

また、このシステムの新たな適用として次のような方向が考えられることから、継続的な研究が必要であると考えられる。

- ①超大型船の着岸システムへの適用
- ②自動着岸システムへの適用
- ③狭水路航行支援システムへの適用

(1996年6月24日受付)

謝 辞

本報告は、平成3年度から7年度までの5カ年に実施された運輸技術研究開発調査「近年における交通環境の変化に対応した総合的な安全対策の確立に関する研究—高速海上交通システムの確立に関する研究」に関してシステム研究室と古野電気株式会社とが平成7年度に実施した共同研究の成果をとりまとめたものである。

この運輸技術研究開発調査において、運輸省運輸政策局が事務局となり研究会が設置された。ここにおいて、

小山健夫東大教授を始めとする総合研究会の委員の方々、堀口孝男東京都立大学名誉教授を始めとする港湾施設分科会の委員の方々からは、本研究の実施に際して貴重なご意見を多く頂いた。特に、萩原秀樹東京商船大学助教授からは、委員会以外の場においても多大なご指導を頂いた。また、シミュレータ実験の実施、実海域実験の分析においては、TSL技術組合、三井造船株式会社、三菱重工株式会社の関係者の皆様に大変ご協力を頂いた。

最後ではありますが、ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

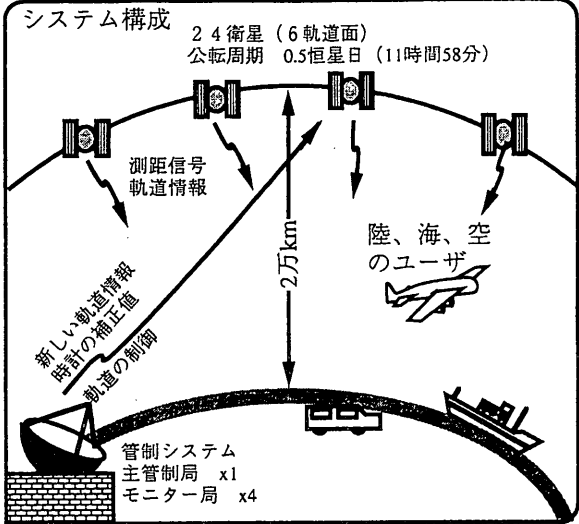
- (1)木津照一・花輪公雄：搬送波位相測定に基づく差動GPS（干渉測位）とその海洋研究における利用について、日本航海学会誌「航海」、第126号、pp21-28、平成7年12月

Global Positioning Systemの概要

米国が開発／運用する汎地球測位システム

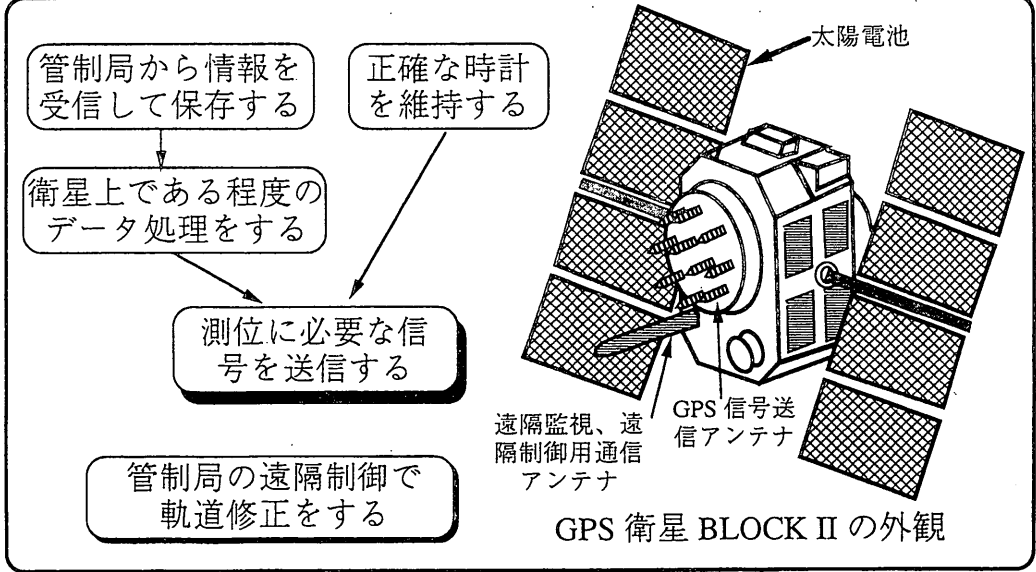
- 歴史**
- 1973年米国防総省が開発に着手
(海軍のTIMATION Program と空軍の621B Project を統合した)
 - 1978年から1986年にかけて実験用衛星BLOCK Iを11個打ち上げた
 - 1993年12月IOC(Initial Operational Capability)が宣言された
 - 1995年3月31日現在25個の衛星が稼働している

- システムの特徴**
- サービスエリアは地球全体
 - 24時間連続して利用可能
 - 精度が良い3次元の位置と速度が得られる
 - 正確な時刻が得られる



GPS衛星の機能

測位に必要な測距信号と軌道情報を送信する



GPS衛星の軌道と配置

軌道高度約2万キロメートルに24個配置

衛星の数

21衛星 + 3 予備衛星 (利用可能)

軌道高度

20,183 km

軌道面は6面

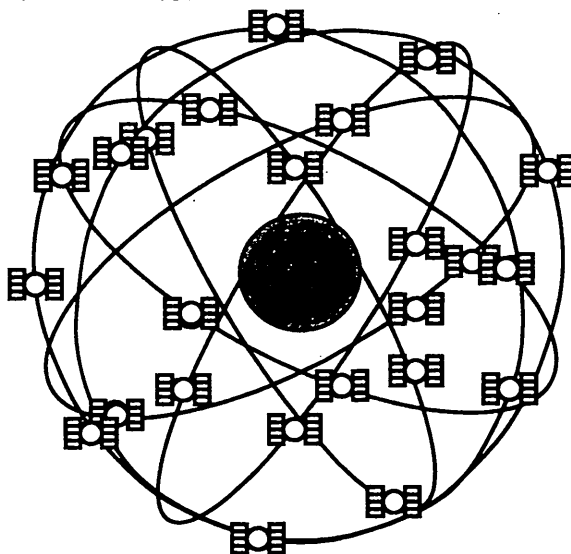
各面に4衛星を配置

軌道傾斜角55度

公転周期

0.5恒星日

地球の自転周期と1:2で同期しているため衛星は地上と固定関係にあり決った地点の上空を通過するが、太陽時と恒星時の差により通過時刻が毎日約4分づつ早まる



GPS管制局の機能

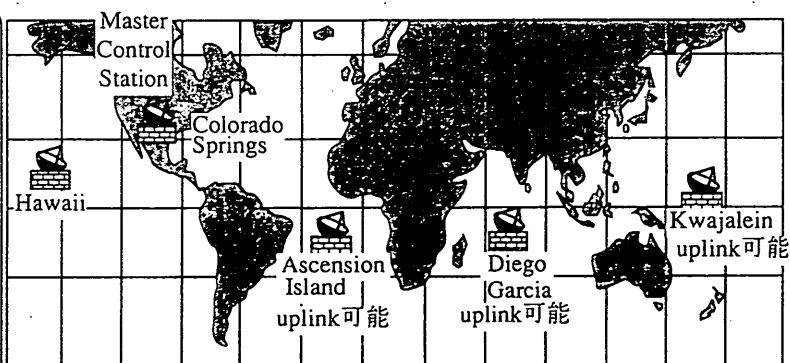
GPSの精度を維持する上で必要. 1 主管制局と4 モニタ局で構成

モニター機能

○2周波受信機で全てのGPS衛星信号を追尾する

○データはMaster Control Stationへ集められ、衛星の軌道、衛星の時計の補正值等を計算する

○Uplink局からこれらの計算結果(放送データ)を衛星へ伝送する

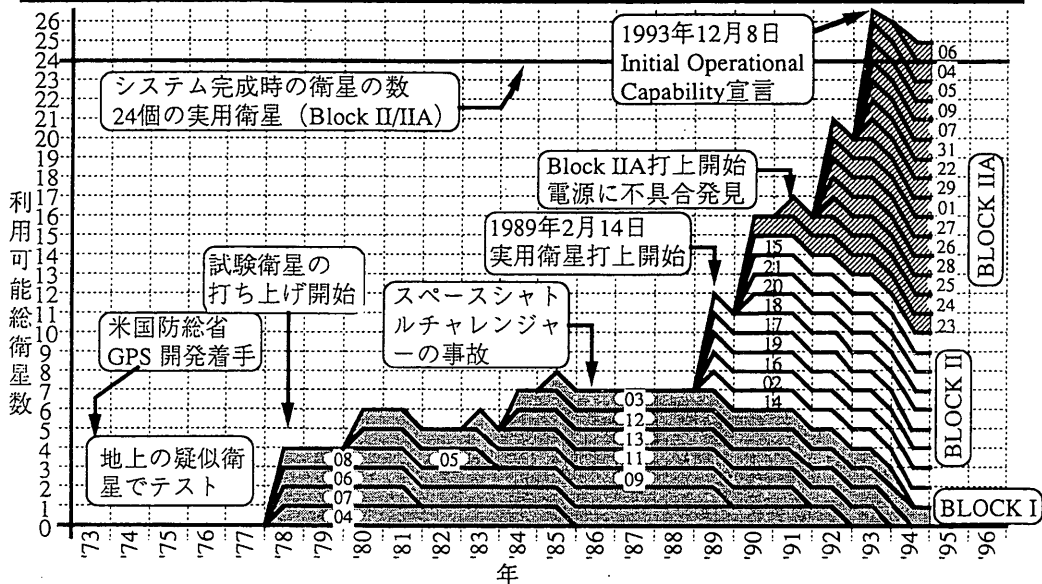


マスターステーションの任務

- モニター局の観測データを処理し軌道、衛星時計補正值を決定する
- 軌道から規定以上ズレた衛星の軌道修正
- 使用不能になった衛星の新衛星との交換

GPS打ち上げ状況 1994.6.1現在

25個の衛星が利用可能 (内ブロックIは1個のみ)



GPSの運用コスト

24個の衛星の内21個の衛星が時間率98%以上使用出来るよう維持

Joint DOD/DOT Task Force on GPSの報告書から

1. 最低限のGPSサービスを維持するコスト年間		4億ドル
2. 衛星の打ち上げ費用	年4個打ち上げ	3～4億ドル
	年3個打ち上げ	2.3～3億ドル
衛星の購入費	単価	3,000～4,000万ドル
ロケットの価格	単価	3,000～4,000万ドル
打ち上げ費	1回	1,500～2,000万ドル
3. その他の経費		3,000万ドル
制御セグメントへの人員配置 世界全域での保守 (ソフトとハード) 将来見込まれる主管制局の改良の為の準備 衛星のデータインターフェイスの変更		

人工衛星による測位の原理

衛星の位置=既知、衛星と受信点間のベクトル=観測可能

測位の基本式

$$\text{受信機の位置} = \text{衛星の位置} - \text{衛星と受信機の位置の関係}$$

└─ 求める解
└─ 軌道情報 (既知)
└─ 観測値

精度を決めるもの

1. 観測値の精度
2. 軌道情報の精度

(単純化の為に) 2次元測位の場合を考える

灯台の位置と灯台までの距離が判れば船の位置を決定出来る

方程式

$$R_{AS}^2 = (X_A - X_S)^2 + (Y_A - Y_S)^2$$

$$R_{BS}^2 = (X_B - X_S)^2 + (Y_B - Y_S)^2$$

精度を決めるもの

- 灯台の座標の精度
- 観測値の精度

伝搬経路に起因する誤差
 観測機器、観測者に起因する誤差

地心直交座標系(ECEF: Earth Center Earth Fix)

地球の形状を考慮しない=重力の影響を受けない数学的な座標系

準拠楕円体の中心に原点を持つ3次元直交座標系

- 衛星と受信機との幾何学的な距離の計算に便利
- 異なる測地系間の座標変換はECEFを経由して変換する

楕円体で地球を近似し, (ϕ, λ, H) で表す

最深海底と最高山頂との垂直距離は約19kmある

地球上の位置を曖昧さなく正しく表現する座標 (ϕ, λ, h)

準拠楕円体 地球の平均海面に最も一致するように選んだ回転楕円体

準拠楕円体とジオイドの差をジオイド高さ (N) という。GPSでは楕円体高 (h) が測定されるのでジオイド高さが判らなると標高に換算できない。

測地系の種類

世界に約180種類の測地系がある (地域、時代による)

	赤道の半径 a	偏平率 f	変換パラメータ (Δ =ローカル-WGS-84)		
			ΔX	ΔY	ΔZ
WGS - 84	6,378,137 m	1/298.257223563			
WGS - 72	6,378,135 m	1/298.26	0.00m	0.00m	-4.50m
日本測地系	6,377,397.155 m	1/299.1528128	146.43m	-507.89m	-681.46m

WGS-84 (World Geodetic System)

- 地球の形を最も良く表現している (ジオイドとの差は最大で100m程度で一致している)
- 地球の重心と楕円体の中心を一致させている→GPSの座標系に使用している

日本測地系 (TOKYO DATUM)

- 楕円体の中心と地球の重心が一致していない
- ジオイド高の傾斜が大きい
- 日本の地図を使う場合はWGS-84を日本測地系に変換する必要あり

SA, AS, IOC, FOC

GPSに特有な幾つかの用語の解説

SA : Selective Availability (選択利用性) (Standard Positioning Serviceに適用)

- 軍事上の理由で一般ユーザの測位精度を故意に劣化させる
- 水平精度100 m 2drms (95%), 高さ精度300m (99.99 %)を保証
- 衛星時計の精度と軌道情報の精度を劣化される

AS : Anti Spoof

- Pコードに対する妨害を防ぐ為と、Pコードの利用を禁止する為に
- Yコードと呼ばれる秘密の非常に長いコードに変更する

IOC: Initial Operational Capability

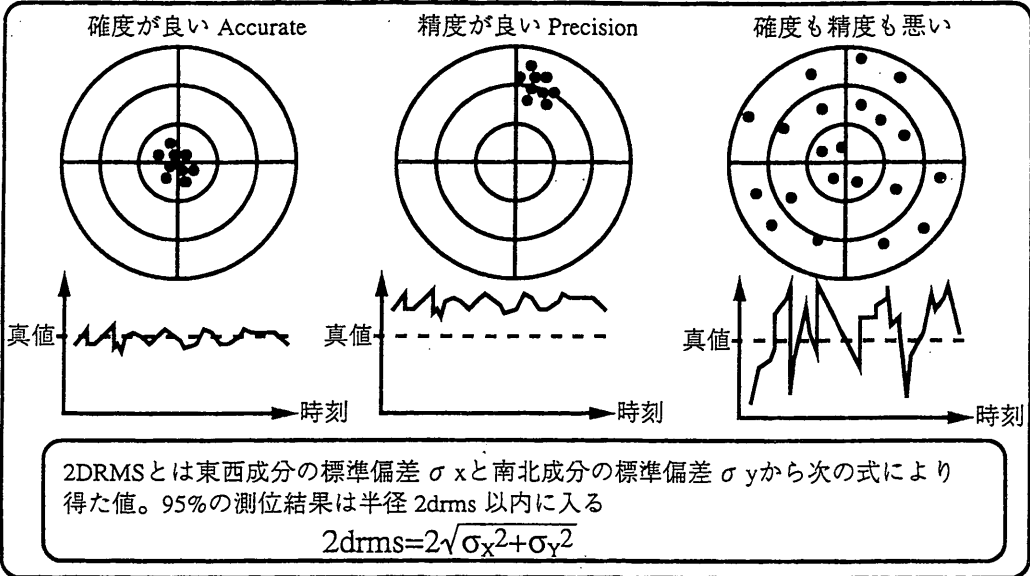
- 1993年12月8日に国防総省から運輸省への文書で宣言された
- 24個の衛星(BLOCK I/II/IIA)が利用可能が条件
- 以後、国防総省は少なくとも48時間前に計画的な劣化 (SPSの精度が規定以下) を沿岸警備隊のGPS情報センター(GPSIC)と FAAのNotice to Airman (NOTAM)に通知する義務がある (平時のみ) →民間の安定利用が保証された状態になった

FOC: Full Operational Capability

- BLOCK II/IIA衛星が予定通りの軌道に24個配備された、更に
- 軍用に必要な機能テストが終了した時点で、国防総省長官宣言する

確度、精度、2drms (2 Distance Root Mean Squared)

GPSでは確度を95%誤差円である2DRMSを使って現す



GPS単独測位のエラーバジェット

Selective Availability (SA 故意の劣化) が最も影響している

単独測位の場合の疑似距離の誤差の見積り

誤差源	誤差 (rms)	備考	
軌道情報の誤差	2.7 m [1]	GPS System Specification, SS-GPS-300C, USAF	
衛星の誤差	SAによる軌道情報の誤差	30 m [2] ・位置の精度劣化が目的 ・疑似距離は数時間周期で変動する	
	衛星時計の誤差	距離誤差 3 m [1] 速度誤差 0.0055 m/s [2] 加速度誤差 0.4 mm/s ² [2]	
	SAによる衛星時計の誤差	距離誤差 0 m [2] 速度誤差 0.14 m/s [2] 加速度誤差 3.7 mm/s ² [2]	
	電離層伝搬遅延誤差	8 m [1]	
伝搬誤差	対流圏伝搬遅延誤差	1.8 m [1]	・モデルを使用して補正後の値。
受信機の誤差	マルチパスによる誤差	3 m [1]	・アンテナ周囲の環境により大きく異なる、これは中程度のもの。
	受信機雑音誤差	3 m [1]	・スムージング処理後の値。
User Equivalent Range Error	31.6 m	各誤差の自乗和の平方根	
水平位置の誤差 (2DRMS)	94.8 m	2 x HDOP(=1.5) x UERE	

真の位置 放送された位置 故意の誤差 (SA) は実際は軌道情報の誤差と衛星時計の誤差の形で与えられる

軌道情報の誤差 衛星時計の誤差

電離層伝搬遅延誤差

対流圏伝搬遅延誤差

マルチパスによる誤差 直接波 反射波

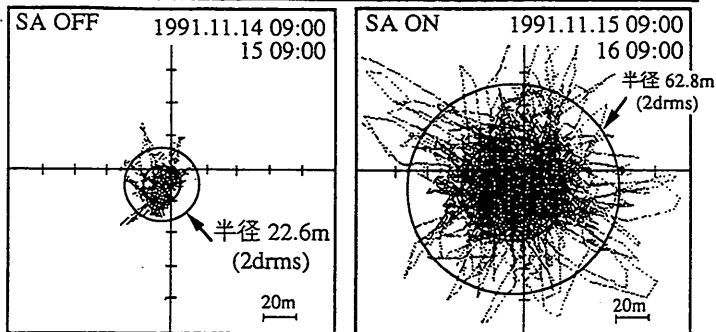
受信機時計誤差 受信機雑音 受信機

SA実施前後の固定点測位精度 1991年11月14日から16日にかけての観測データ

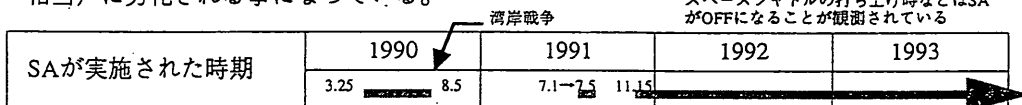
右の図はSA実施前後の各24時間の測位位置をプロットしたもの

SA実施前の位置の誤差の標準偏差は 11.3m
2drms誤差は 22.6m

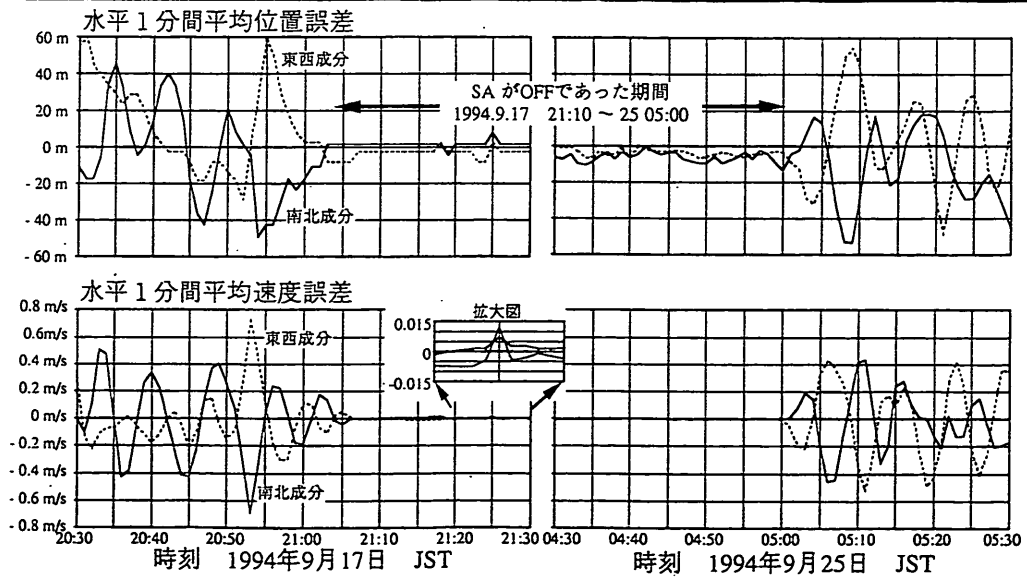
SA実施後の位置の誤差の標準偏差は 31.4m
2drms誤差は 62.8m
に悪化した



- (1) SAとはSELECTIVE AVAILABILITY (選択有用性) と呼ばれ米政府の政策により実施されている故意の精度劣化である。
- (2) SAがONになった時の位置の精度は100m 2drms (標準偏差の2倍、95%誤差円の半径に相当) に劣化される事になっている。



SA実施前後の固定点で観測した誤差の変化 数分周期で変動する誤差が観測された

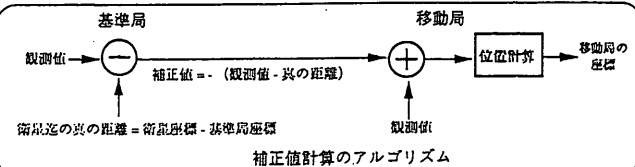


ディファレンシャルGPSの原理

基準局と移動局の間の共通誤差を相殺し精度を向上する

—DGPSの原理—

1. 数100km離れた2点から同じ衛星を観測した場合、衛星からの2つの点に到来する電波はほぼ同じ伝搬経路なので、伝搬経路に起因する誤差は2つの点でほぼ同じと見なすことができる。
2. 既知の点に基準局を設置し観測データと真の値との差から観測データの誤差を求めることが出来る。これを補正值として放送する。
3. 基準局の周囲の移動局は、各自の観測値にこの補正值で補正することにより基準局と共通の誤差成分を相殺することが出来るので精度が向上出来る。



補正值計算のアルゴリズム

縮尺をほぼ合わせた画：1 cm → 2,000 km

GPS衛星 (縮尺は無視)
高度 20,000 km (縮尺合わせてある)

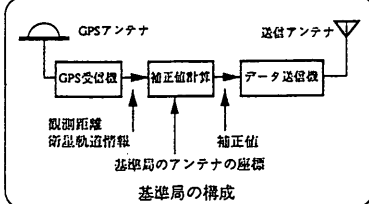
この縮尺は0.1mmなので
200 kmに相当する

電離層 F2
最高高度 1,000 km

大気の層は 10 km
この縮尺では地表から0.05 mm

地球半径 6,380 km

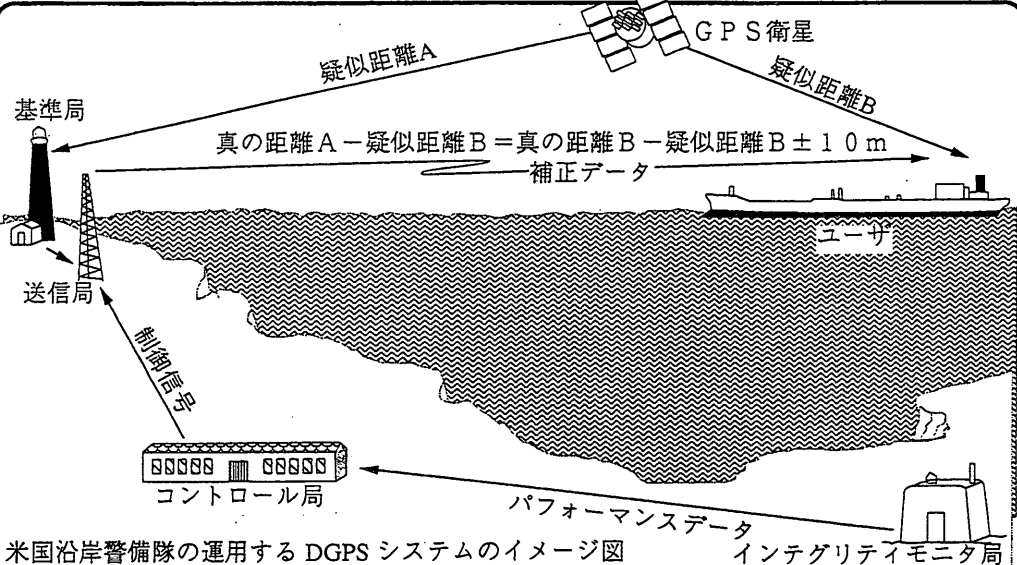
DGPS基準局から100 km離れた移動局はこの縮尺では0.05 mm離れた位置になるので描けない



基準局の構成

航海用 DGPS のシステム構成

日本沿岸に海上保安庁が展開予定



$\text{真の距離 A} - \text{疑似距離 B} = \text{真の距離 B} - \text{疑似距離 B} \pm 10 \text{ m}$
 補正データ

米国沿岸警備隊の運用する DGPS システムのイメージ図

DGPSで改善出来る誤差と改善出来ない誤差 インテグリティ（完全性）機能が付加出来る

改善出来る誤差

- 電離層遅延
基準局からの距離が比較的近い場合はほぼ完全に除去出来る。基準局からの距離が遠くなるに従い精度は劣化する。
- 対流圏遅延
基準局からの距離が比較的近い場合はほぼ完全に除去出来る。基準局からの距離が遠くなるに従い精度は劣化する。
- 軌道情報の誤差
ほぼ完全に除去出来る。
- 衛星の時計のエラー
ほぼ完全に除去出来る。
- Selective Availability（故意の劣化）
補正値の更新周期が短ければ完全に除去出来る。

改善出来ない誤差

- GPS受信機の誤差
 - ・受信機の熱雑音
 - ・無線妨害
 - ・ダイナミックス
 - ・マルチパス
- 基準局の誤差
 - ・受信機の熱雑音
 - ・無線妨害
 - ・マルチパス

DGPSのもう一つの重要な機能

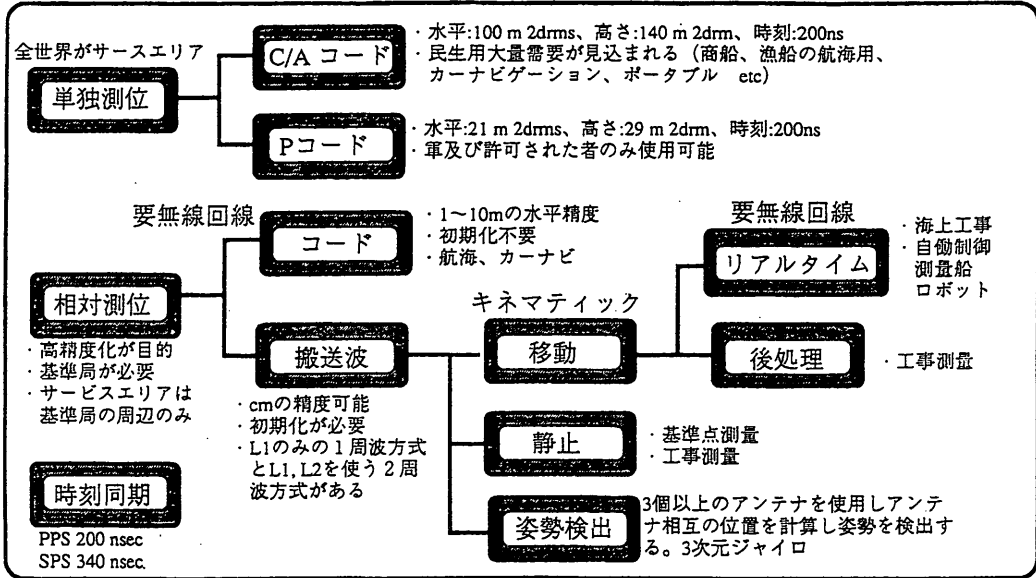
- #### システムの信頼性の向上
- GPS信号の異常の検出 (INTEGRITY)
 - 精度の評価

DGPS のエラーバジェット 精度は基準局からの距離と補正データの更新周期に依存する

誤差源	単独測定	DGPS 誤差 (疑似距離の誤差)					備考	
	疑似距離誤差 (rms)	1 km毎の誤差 (rms)	1 km	10 km	100 km	1,000 km		
衛星の誤差	軌道情報の誤差	2.7 m [1]	0.05 cm/km	0.0005	0.005	0.05	0.5	衛星の軌道誤差 10 m とした場合
	SAによる軌道情報の誤差	30 m [2]	0.5 cm/km	0.005	0.05	0.5	5.0	衛星の軌道誤差 100 m とした場合
	衛星時計の誤差 <small>距離誤差 速度誤差 加速度誤差</small>	<small>3 m [1] 0.0055 m/s [2] 0.4 mm/s² [2]</small>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	SAによる衛星時計の誤差 <small>距離誤差 速度誤差 加速度誤差</small>	<small>0 m [2] 0.14 m/s [2] 3.7 mm/s² [2]</small>	0.0 1.22 × 10 ⁻³ T ^{2.12}	0.0 0.7	0.0 0.7	0.0 0.7	0.0 0.7	補正値の更新周期=1秒 補正値の更新周期=10秒
伝搬誤差	電離層伝搬遅延誤差	8 m [1]	0.001 m/km 0.01	0.001 0.01	0.01 0.1	0.1 1.0	10.0	上段は昼良値 下段は夜悪値
	対流圏伝搬遅延誤差	1.8 m [1]	0.0 1.8	0.0 1.8	0.0 1.8	0.0 1.8	1.8	上段は昼良値 下段は夜悪値
受信機の誤差	マルチパスによる誤差	3 m [1]	0.0 3.0	0.0 3.0	0.0 3.0	0.0 3.0	3.0	上段は昼良値 下段は夜悪値
	受信機雑音誤差	3 m [1]	0.2 3.0	0.2 3.0	0.2 3.0	0.2 3.0	3.0	上段は昼良値 下段は夜悪値
User Equivalent Range Error		31.6 m		0.20~4.66	0.21~4.66	0.55~4.79	5.13~12.1	昼良値-夜悪値
水平位置の誤差 (2DRMS)		94.8 m		0.60~14.0	0.60~14.0	1.65~14.4	15.4~36.4	昼良値-夜悪値

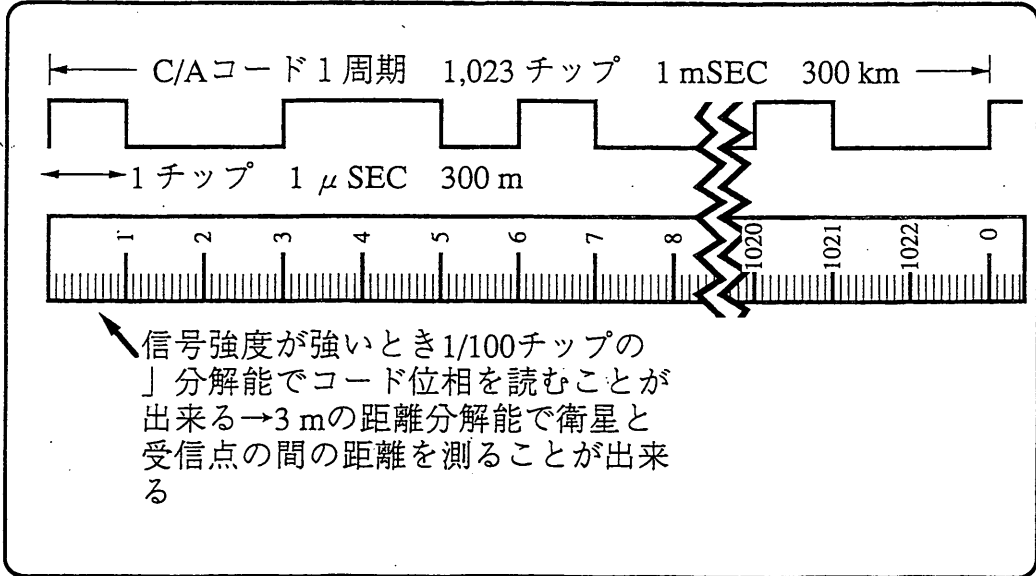
GPSの応用展開

GPSはシステム設計が良いので多彩な応用が展開されている



C/Aコードによる測距

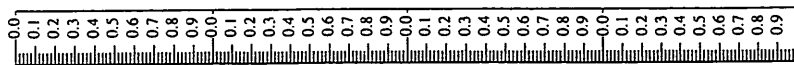
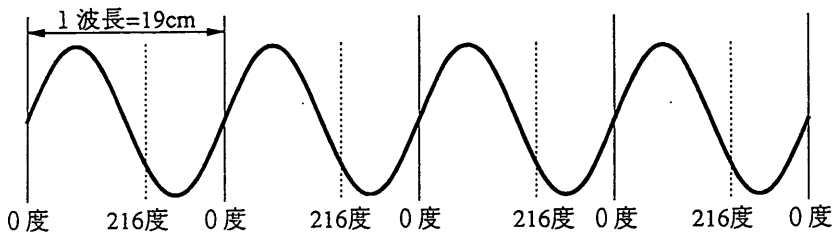
全長300 kmの長い物差だが、3mの分解能なので精度に限界あり



キャリア位相による測距

CARRIER = 搬送波、全長 19cm、分解能 2mm

波長= 1 サイクルの伝搬距離 = $\frac{\text{光速}}{\text{周波数}} = \frac{30 \text{ 万km/秒}}{1,575.42 \text{ MHz}} = 19 \text{ cm}$ 例えば216度はどのサイクルにもある

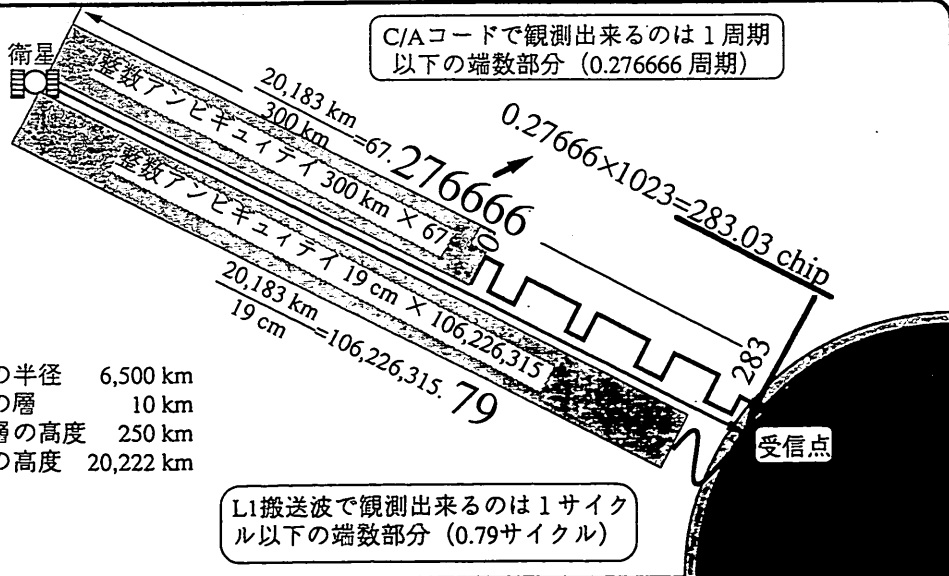


キャリアは0から0.99を繰り返す物差

- ・キャリアは正弦波、同じ波形が繰り返される
- ・何番目のサイクルかはキャリアの測定だけでは判らない
- ・しかし1サイクル内なら1/100から1/50サイクルの分解能で測定可能

コードと搬送波の物差の違い

整数アンビギュイテイ (あいまいさ) の違い



二重位相差から高精度な基線ベクトルを得る 衛星時計誤差、受信機時計誤差、伝搬誤差をキャンセル

1. 基準局をA、基準衛星を"1"とした時の二重位相差

$$\nabla_{B-A}^{2-1} = \lambda N_{B-A}^{2-1} + (\Phi_B^2 - \Phi_B^1) - (\Phi_A^2 - \Phi_A^1)$$

$$\nabla_{B-A}^{3-1} = \lambda N_{B-A}^{3-1} + (\Phi_B^3 - \Phi_B^1) - (\Phi_A^3 - \Phi_A^1)$$

$$\nabla_{B-A}^{4-1} = \lambda N_{B-A}^{4-1} + (\Phi_B^4 - \Phi_B^1) - (\Phi_A^4 - \Phi_A^1)$$

2. 未知数は受信点Bの受信点Aの相対位置

ΔX 、 ΔY 、 ΔZ の3つである。

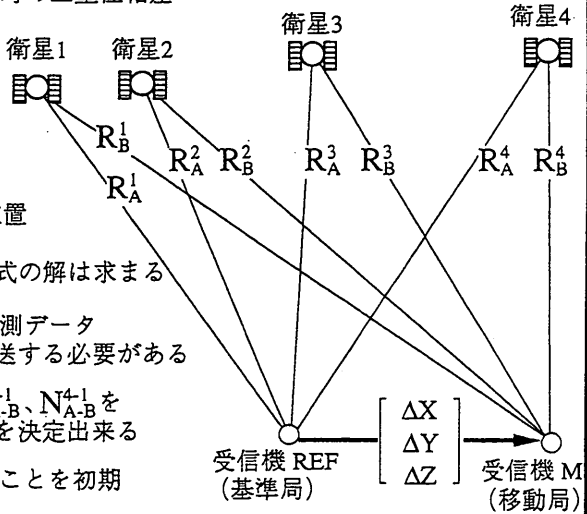
故に3個の二重位相差があれば方程式の解は求まる

3. 移動局位置を求めるには基準局の観測データ

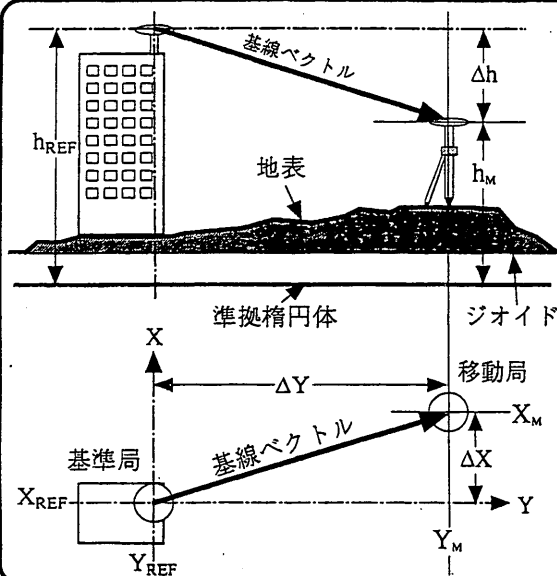
Φ_A^1 、 Φ_A^2 、 Φ_A^3 、 Φ_A^4 を無線で伝送する必要がある

4. 後は整数アンビギュイティ N_{A-B}^{2-1} 、 N_{A-B}^{3-1} 、 N_{A-B}^{4-1} を決定出来れば一義的に移動局の位置を決定出来る

5. 後は整数アンビギュイティ決定することを初期化という。



RTK-GPSでは基線ベクトルを毎秒1回計算 基準局1点固定の放射測量



基準局の座標
(X_{REF} , Y_{REF} , h_{REF})

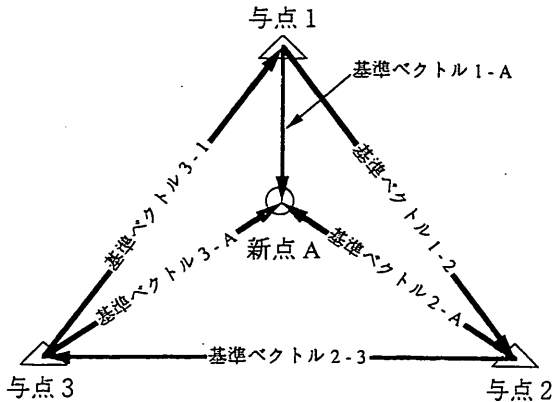
基線ベクトル
(ΔX , ΔY , Δh)

位相局の座標
 $X_M = X_{REF} + \Delta X$
 $Y_M = Y_{REF} + \Delta Y$
 $h_M = h_{REF} + \Delta h$

- 単独測位、DGPS測位は絶対座標が求まる
- 二重位相差による測位は、基準局に対する相対座標が求まる。基準局が5 cm ずれていたら、移動局も同じ方向に5 cm ずれる。

GPS 静止測量のメリット

網平均による精度の改善と誤差の推定が可能な点がRTKと違う



静止測量は冗長度を高め精度／信頼性を上げる。
上図の例では、誤差の大きな三角点を見つけることができる

- 新点（例えば基準局）の座標を可能な限り精度よく求めようとする場合は静止測量による。
- 一つの新点を囲む与点（三角点）を選び網を構成する
- 4台のGPS受信機を使って測量すると左図の6本の基線ベクトルが得られる
- 観測値に誤差がなく、三角点の座標に誤差がなければ、6本の基線ベクトルは完全に閉合する。
- 全ての観測には多かれ少なかれ誤差があるので、観測値と与点の座標に矛盾が生ずる。
- 網平均処理とは、この矛盾を最小二乗法により、複数の与点と最も適合する新点の座標を得る手法である。

初期化の種類

(整数値バイアスの確定= Integer Ambiguity Resolution)

1. 静的干渉測位
 - ・ 移動局が静止していることを条件に、長時間観測したデータを処理して整数バイアスを決定する
2. 既知の点に移動局アンテナを設置して初期化する
 - ・ 予め精密に測量したポイントにアンテナを設置して初期化する方法。短時間に初期化出来る。
3. On-The-Fly 初期化
 - ・ 移動局がサービスエリア内の任意の場所を移動中に初期化する。

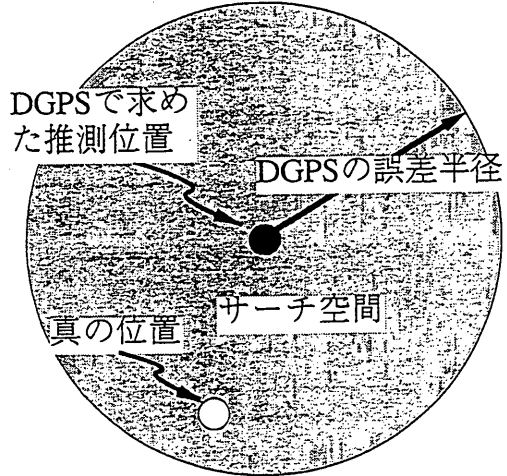
On-The-Fly Calibration OTF 初期化

DGPSで求めた位置を中心にサーチする

C/Aコードによる単独測位の場合でも測位を開始する為には初期推測位置が必要である。しかしその精度は数百kmでよいので一般には前回スイッチを切る直前の位置を記憶しておきそれを元に今回の測位を開始する。

搬送波を利用する測位の場合それよりはるかに高い精度の初期推測位置が必要である。

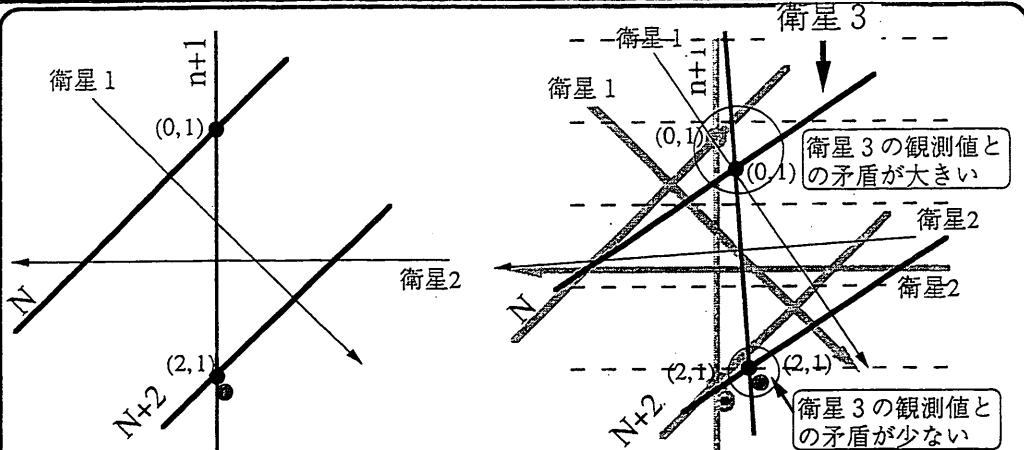
OTF初期化に利用出来る最も精度のよい初期推測位置はDGPSで求めた位置である。



サーチ空間は真の位置がその中に含まれるように設定する

正しい整数バイアスを決定するテスト

冗長な衛星を使って偽の候補を捨て、真の値を決定

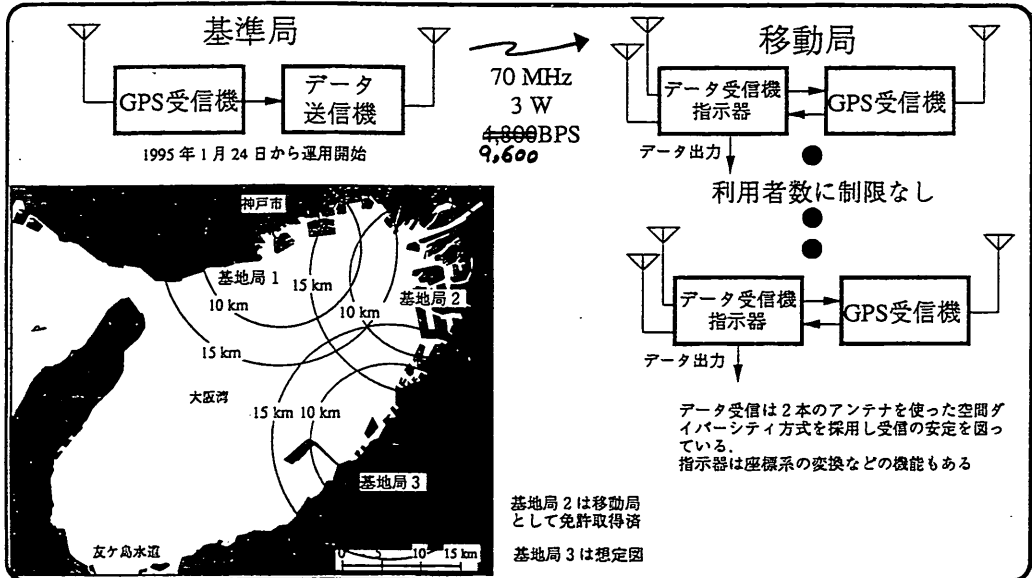


候補を決めた瞬間の候補(0,1)と候補(2,1)と真の位置の関係。これだけの情報ではどちらが真か判断出来ない。

一定時間経過後の状態。衛星の位置の変化、ドップラ積算値の変化で位置は移動する。衛星3をテスト用に使用し、正しい整数バイアスを求めることが出来る。冗長な衛星の数が多いほど判断に間違いが少なくなる。

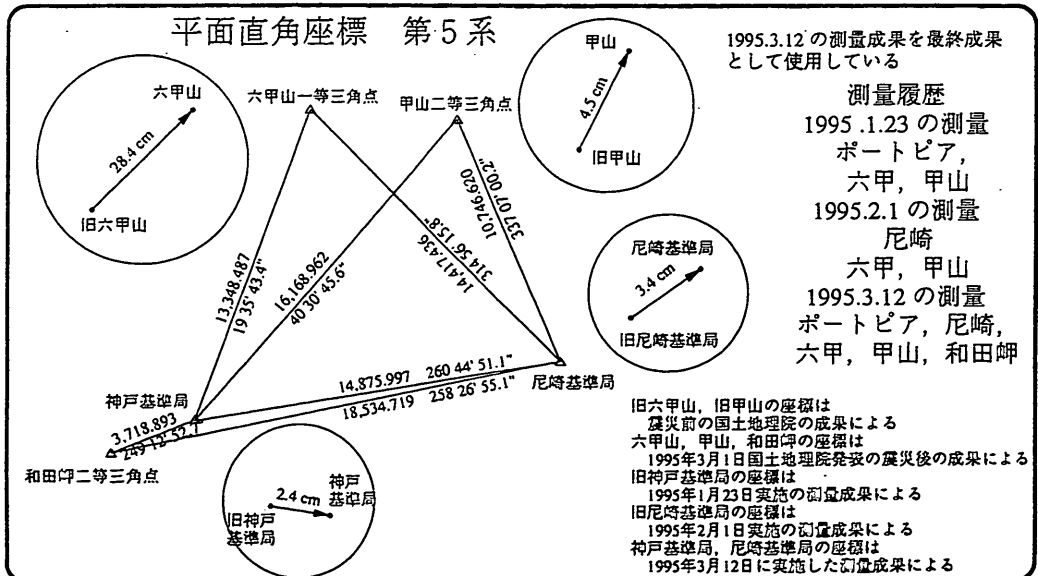
神戸キネマティック GPS システム構成

ポートピアホテル屋上に基準局設置



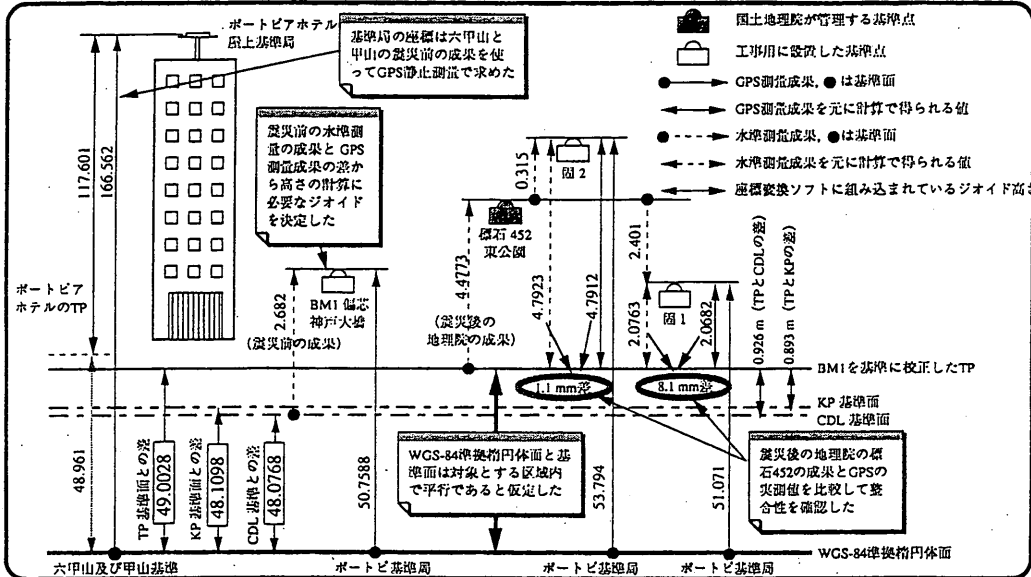
基準局水平座標の決定

六甲山，甲山，和田岬三角点を与点として測量



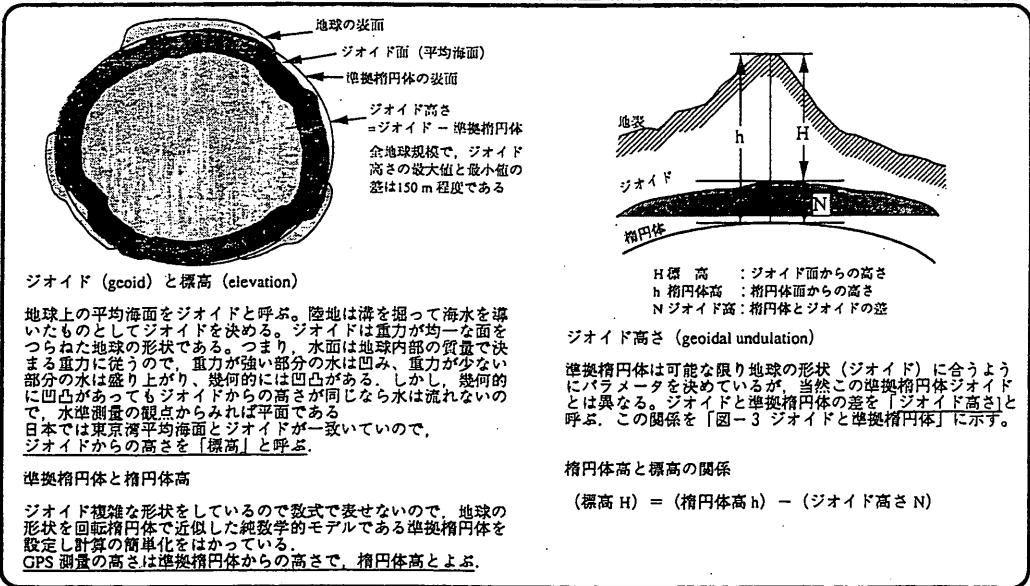
垂直座標（標高）の校正

神戸大橋 BM1 で校正，地理院水準点 352（東公園）で確認



ジオイドと準換楕円体

GPS 測量の高さは，水準測量の高さと定義が異なる



ジオイド高さ実測の必要性

GPS / 水準法 (ジオイド高さ = 楕円体高 - 標高)

GPS 測量の高さ (=楕円体高) が高くても、ジオイドからの高さ (標高) が低ければ水は楕円体高の低いから高い方 (ジオイド高さの低い方) に流れるので、楕円体高は実用的な高さとして使えない。

そこで楕円体高をジオイド高さを使って標高に変換する必要がある。GPS を使ってセンチメートル精度で標高を決定するには、センチメートル精度のジオイド高さのデータが必要だが、現在入手可能なジオイド高さの精度は 1 m 程度である。

将来、精密なジオイド高さのデータが国土地理院から提供される可能性はあるが、現状では対象とする地域のジオイドは実測により求めるしかない。

ジオイド高さは、水準測量とGPS測量を同時に実施することにより計算できる

KGPS の測位精度の仕様と実測値

精度は基準局からの距離に比例して劣化する

水平位置精度仕様 [rms]

$$1 \text{ cm} + D \times 1 \text{ ppm}$$

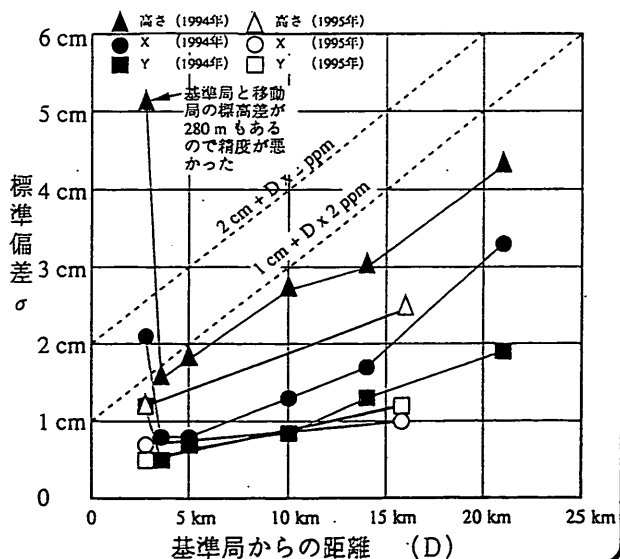
高さ精度仕様 [rms]

$$2 \text{ cm} + D \times 1 \text{ ppm}$$

- D: 基準局からの距離
- 高さがの精度の方が悪いのは、衛星が天空にあり、地下に衛星がないから。またジオイドの傾斜による精度の劣化は含まない
- 1994年より1995年の方が精度がよいのはGPS受信機のソフトウェアの改善による

測位精度実験方法:

移動局受信機を、基準局から所定の距離離れた場所に設置し、OTFが完了しキネマティック測位が5分間継続したらアンテナの電源を遮断/投入して強制的にサイクルスリップを発生させOTFモードに強制的に戻す。2.4時間これを繰り返す、毎回の測位結果を記録紙標準偏差を計算する。



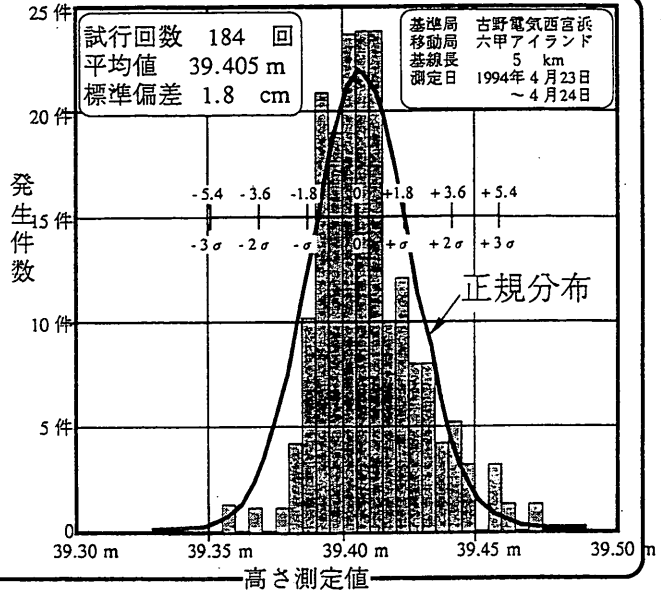
高さの測定値のバラツキの実例

同じ場所に移動局のアンテナを固定して184回測定いた結果

- 同じ場所を測っても同じ値にならないでバラツキがある
- バラツキの度合を標準偏差で表すことができる
- 標準偏差はシグマ (σ) とかRMSとも呼ばれる。標準偏差が小さいほどバラツキは少ない
- 右の図は高さの実測値の分布に標準偏差の物差を併記した

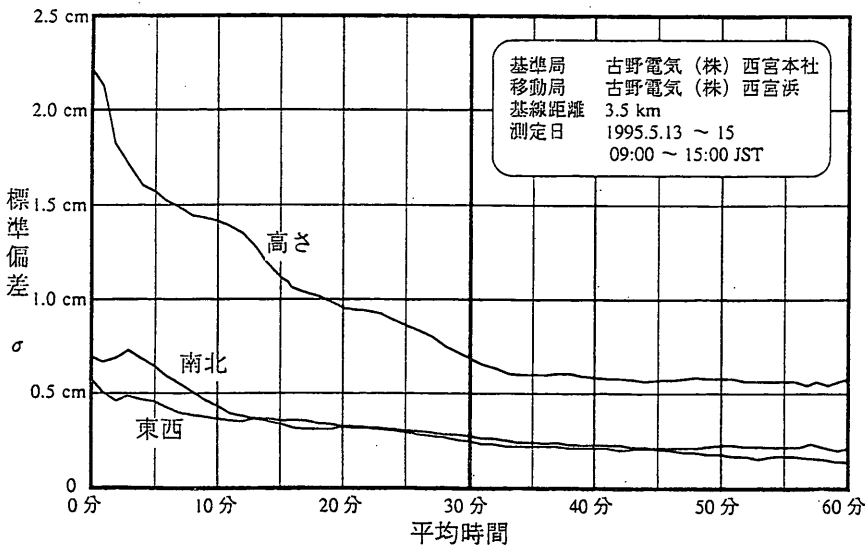
正規分布

- ± 1 σ ⇒ 68.3 %
- ± 2 σ ⇒ 95.5 %
- ± 3 σ ⇒ 99.7 %



平均処理による精度の改善

1時間平均処理すると高さの精度は1 cm rms に改善できる



- 平均処理は精度改善に有用な手段である
- 30分までは時間に比例して標準偏差が減少している
- 1時間以上平均してもあまり改善されない

キネマティック測量の特徴

現場で結果が判る，高精度が必要な場合は平均処理を併用

長所

- その場でリアルタイムに三次元の測量ができる
専門的な知識は必要ない
- 移動中の位置がわかる
深淺測量に最適
- 基準局を設置すれば，ユーザの数制限がない
同一工区内で共通の基準点を使用した工事ができる

注意すべき点

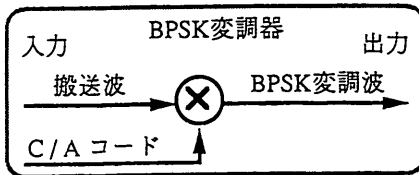
- 5個以上の衛星がないと初期化ができないのでキネマティック測量ができない
通常は5個以上の衛星が視野内にある（指示器の衛星予報でチェックできる）
- 橋のしたなど上空の視界のない場所では衛星の信号が受信できないので使えない
- 静止測量+網平均処理の精度は達成できない
平均処理による精度改善をはかる。最高の精度が必要な場合は静止測量を実施
- 原理的に高さの精度のほうが水平精度よりも悪い

準備すべき事項

- GPS/水準法の高さの校正点をつくる必要がある
水準測量による標高と，GPS測量による楕円体高が明らかな点を工区内に設ける

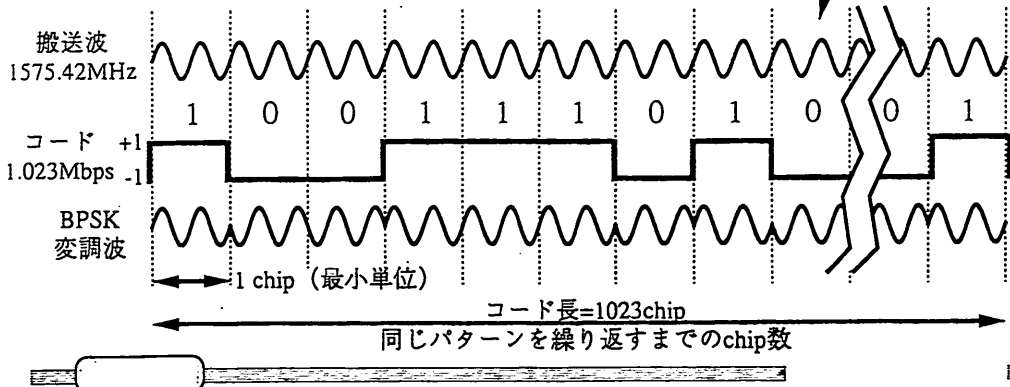
GPS信号はBPSK変調（スペクトル拡散信号）

Bi-Phase Shift Keying

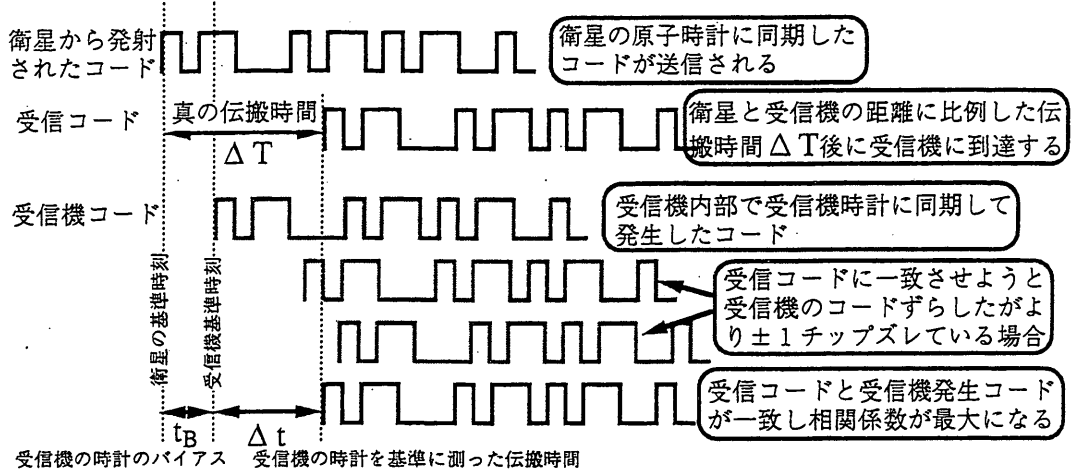


コードの符号が+1の時搬送波の位相は変わらないが、コードの符号が-1の時搬送波の位相が180度（反転）変化する

この図では2サイクルだがL1では実際には1chip内に1,540サイクルの搬送波が存在する



C/Aコードによる測距



疑似距離 $r = C \times \Delta t$ (真の距離Rは1衛星の観測だけでは求まらない)

ケプラーの軌道の6要素

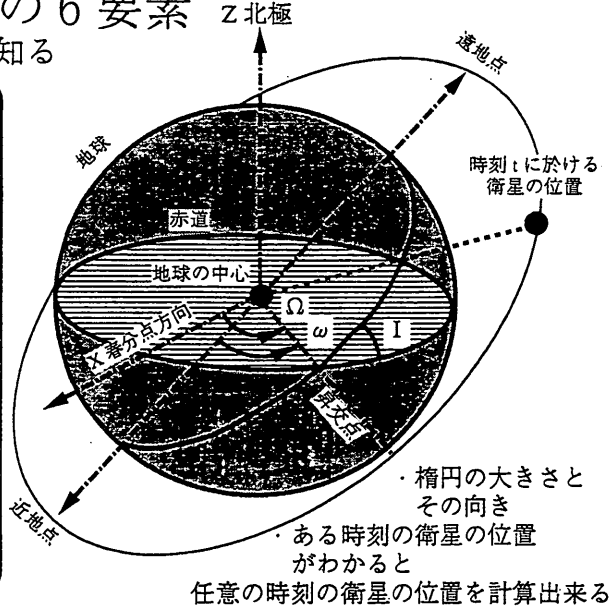
衛星の位置を知る

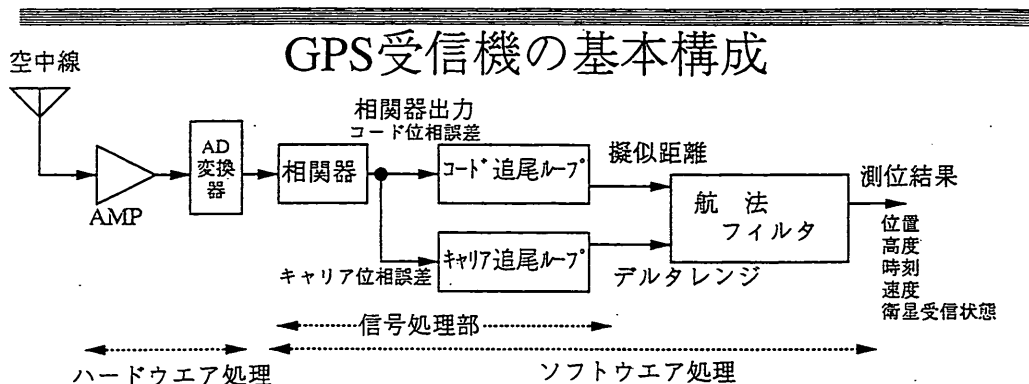
衛星の軌道面を決める

- (1) 昇交点経度 Ω
Longitude of ascending node
- (2) 軌道傾斜角 I
Inclination

軌道面上での衛星の楕円運動を現す

- (3) 軌道長半径 A
Semi-major Axis
- (4) 軌道離心率 ϵ
Eccentricity
- (5) 近地点引数 ω
Argument of Perigee
- (6) 平均近点角 M_0
Mean Anomaly
基準時刻(元期という)に於ける衛星の位置





GPS受信機の最近の動向

- 最新のコンピュータ技術、信号処理デジタルASIC、マイクロ波回路の集積化等によりGPSシステム開発当初は軍用の最高級GPS受信機と考えられていた5CHから8CH受信機がレジャー用のカーナビ用ディスプレイに組込まれている。
- GPSエンジンと称するGPS受信プリント基板をGPS専門メーカーが製造しセットメーカーにOME納入する傾向が定着しつつある。
- 上の受信機が名刺(55x90mm)以下で実現している

港湾技術研究所報告 第35巻 第3号

1996. 9

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所

横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 (有)つばさ印刷技研

Copyright © 運輸省港湾技術研究所 1996

本報告書の転載・複写を希望される場合は、港湾技術研究所企画課へご連絡をお願いします。