

GPSを利用した海上測位システムの開発

重松文治 齋藤勉

要旨

GPS(Global Positioning System=汎地球測位システム)が次世代の測定の主流になるであろうという予想から、測量関係者のGPSへの関心は極めて高い。すでに、GPS方式を利用した測量システムがいくつか開発され、この方式が本格的な実用段階に入ってきている。

GPS方式は、衛星からの電波が受信できる限り測量ができるため、移動局との位置関係、見通しなどの制約がなく、固定局の設置点の選定が容易なことである。その上、精度も向上し、操作上、高度な熟練を必要としない等多くの特徴がある。

当初、衛星の数が少なく測量時間等の制約があったが、現在、ほぼ24時間の使用が可能となって、精度も大幅に改善されてきている。

このような状況下、当社においても早くからGPSの将来性に着目し、その応用化に取組み、今回東北電力(株)原町火力発電所新設工事において各種GPS応用技術を開発した。

まず、高精度ディファレンシャル方式を深淺測量システムに導入し、続いてリアルタイム・キネマティック方式をケーソン据付の際の位置出し管理や、ケーソン基礎マウンドの捨石均し管理に導入し、データの管理まで自動化した施工管理システムを開発・実用化した。

1. まえがき

GPSは、米国によって開発された人工衛星を用いる新しい測位システムで、その名前のおり、人工衛星の電波を受信することによって世界中のどこにいても自分自身の位置を知ることができる。本来は、飛行機や船舶が航行するための航法支援用として開発が進められてきたが、特別な受信装置を複数用いることによって数cmの精度で地上の点の間の相対的な位置関係を測定することができる。このため、近年精密測量分野での応用が急速に進められている。

すでに測量分野では、海上測量の一部においてディファレンシャル方式が、陸上工事の基準点測量や土地造成に係る各種測量等においてスタティック方式やキネマティック方式が用いられるようになり、その技術は、近年、急速に進歩を遂げてきている。しかしながら、従来のディファレンシャル方式の場合、精度が数m程度と悪く、スタティック方式やキネマティック方式の場合、リアルタイム性がない上、GPS衛星からの電波が遮断されてサイクルスリップが発生した場合、初期化を固定した既知点で行わなければならない等の制約条件があり、これが海上作業へのGPSの本格的な導入を困難にしている主な要因であった。しかし、GPSの将来性に着目し、東北電力(株)原町火力発電所新設工事(以下原町火力)のような太平洋に面した、厳しい波浪条件下の海上土木工事における測定の効率化、高精度化を目的として、GPS方式の応用について次のような調査、実験をおこなってきた。

①GPSと従来測位方式との比較

②GPS方式の精度確認実験と工事適用検討

③GPS方式を利用した海上作業への導入検討とシステム化

本報は、以上の調査・実験の結果を報告するとともに、原町火力におけるGPSを用いた施工管理システムの実用化実績をまとめたものである。

2. GPSの概要

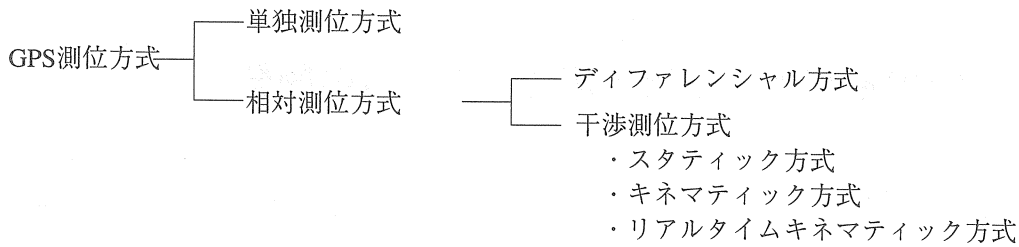
2.1 GPS測位方式の種類と原理

GPS衛星は地表から約2万kmに6個の円軌道で4個づつ配置され地球の周りを回っている。地球上のいかなる場所でも頭上に数個の衛星が存在し、受信機では衛星からの信号を受信して高い精度で緯度・経度・高度、そして時刻が得られ、同時に衛星から受信機までの距離を測定する。(衛星と受信機の距離は、衛星が信号を送信してからそれが受信機に到達するまでの時間に電波の速度を掛けて得られる。)

GPSは軍事目的で開発されたものであるが、標準測位と呼ばれる数十mの精度で測位できる機能は、民間にも開放されており、GPSを複数台用いる相対測位方式とすることにより測量にも使用可能な精度まで向上する。GPSによる測位方法には図-1に示すような種類がある。

2.1.1 単独測位方式

移動局1台のみで、地球上の利用者の位置を観測する。



図一 G P S方式の種類

この方法は、自動車・航空機・船舶等のNavigation Systemに利用される。移動体の位置を測定し、精度は数十m程度である。

2.1.2 相対測位方式

相対測位とは複数の受信機を用い、地点間の距離ベクトルを測定する方法で、精度が非常に高い。ディファレンシャル方式とキネマティック方式とがある。

(1) ディファレンシャル方式

G P S受信機を固定局、移動局と2台使用してあらかじめ既知の位置に設置した固定局で測位し、真とした位置との誤差を求め、この誤差等の情報をテレメータにて移動局へ伝送する。

この方式によると、原理的には、固定局と移動局の両局のG P S受信機への衛星信号の伝播遅延や、受信機固有の固定誤差が同じであるならば、固定の誤差は除去される。但し、ランダム誤差は除去できない。

リアルタイムで測定可能なため移動体に応用され、従来は精度は2~3m程度であったが、今回当社が採用した高精度ディファレンシャル方式は精度0.2mと高精度であり海上の深淺測量等への利用が可能となった。

しかし、測定局と基準局の距離が40Km以上大きくなると両局への伝播遅延時間に差異が生じるため誤差が増える。

(2) 干渉測位方式

座標既知の受信点から他のG P S受信点にいたる3次元ベクトル（基線ベクトル）を求める方式であるが、干渉測位では測位のモノサシとして衛星の送信電波そのものの波長を使う。送信電波の波長は約20cmであり、距離精度は、この目盛(波長)間隔の10%と推定され、したがって衛星と受信点間の距離測定精度は数cmということになる、図一2に干渉測位の原理図を示す。

干渉測位方式には以下の各方式がある。

①スタティック方式

この方法は、G P S測位の中では一番高精度であるため精密測量等に応用される。精度は基線ベクトルの0.5mm±1ppmであるが、測量中は、10分~30分静止しなければならない。

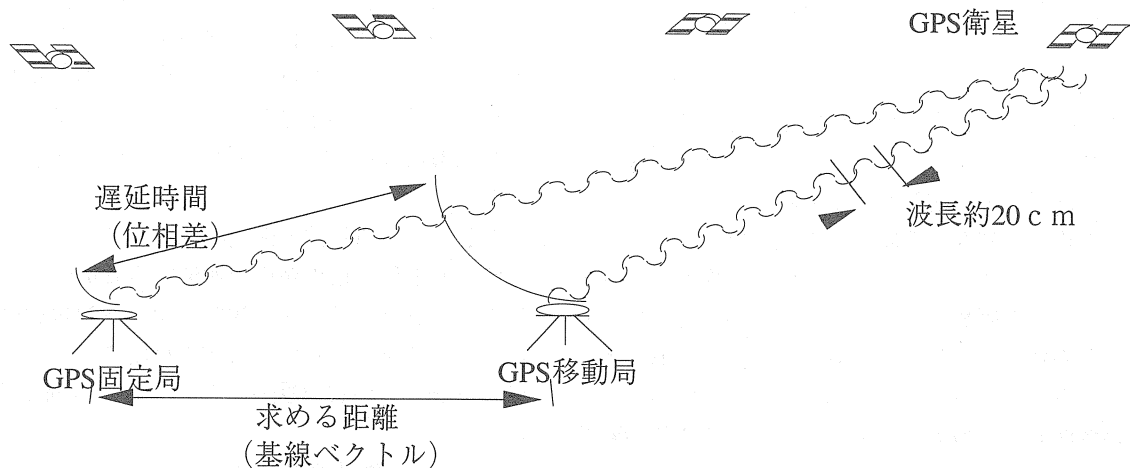
②キネマティック方式

測量点が移動しながらも測量が可能であり、精度も数cmと高精度なため、一般の土木測量用に用いられている。測量結果は後処理である。

③リアルタイムキネマティック方式

上記キネマティック方式を改良し、リアルタイムに測量結果がわかる。したがって、海上の測量等にも使用できるようになった。

本方式は測量開始時に静止点での長時間の初期化が必要であったが、このたび動揺している船舶等においても数分間で初期化が可能なりリアルタイムキネマティック・



図一2 干渉測位の原理図

表-1 GPS測位方式の特徴比較表

項目	単独測位方式	ディファレンシャル方式	スタティック方式	キネマティック方式	リアルタイムキネマティック方式
使用する受信機の台数	1台	2台以上	2台以上	2台以上	2台以上
リアルタイム性	有り	有り	後処理	後処理	有り
精度	数十m	2~3m 高精度タイプで 0.2~0.5m	5mm±1ppm	基線ベクトルの決定精度0.02m	基線ベクトルの決定精度0.02m
受信機の価格	安価	やや高価	高価	高価	非常に高価
用途	車(ナビゲーション) 船(航海用)	深淺測量用 建設機械測位用	精密測量用	陸上土木測量用	海上精密測量用

注) リアルタイムキネマティック方式の初期化を容易にしたリアルタイムキネマティック・オンザフライ方式が開発された。

オンザフライ方式が開発され海上測量用としての技術的な問題点はほとんどすべて解決された。

2.2 GPS測位方式の特徴比較

GPSを用いて位置を決める場合、今まで述べたように、精度は測位の方法、受信機の種類、リアルタイム性の要求によって大きく変わりテレメータが必要な場合もある。

代表的な特徴比較表を表-1に示すが、測量関係では、今後、高精度で操作が簡単なリアルタイムキネマティック・オンザフライ方式が主流となるであろう。

3. 従来方式の問題点とGPS導入の経緯

従来、海上測量の位置出しには、電波または、光波測位儀が使用されていた。しかし、以下の課題があり、測量の高精度化と効率化が求められていた。

3.1 従来方式の問題点

(1) 電波測位儀を使用する場合

- ・無線局開設の許可や無線操作に資格者が必要である。
- ・海面反射などによる電波障害で測量できない海域がある。
- ・三辺測量のため、2つの従局点と主局測量点との幾何学的配置関係に精度が影響される。
- ・従局の設置、キャリブレーションなどの保守が容易でない。

(2) 光波測距儀を使用する場合、

- ・光波のため、測距限界が4km程度である。
- ・雪が降ったり霧がかかるといった気象条件で測量ができなくなることがある。
- ・測位儀が測量船上の反射鏡を自動追尾しているため、一度障害物が視界を遮ると測量の続行が困難になる。

これらの問題点が、GPS方式とすることにより、改善されるため、GPS方式は理想的な測位装置といえる。表-2にGPS方式と従来方式の比較表を示す。

表-2 GPS方式と従来方式の比較表

種類	項目	精度と計測範囲		障害物の影響	使用台数	その他
		精度	計測範囲			
GPS	キネマティック方式	±0.02 ~ 0.05m	15km	影響小	制限なし	初期化が必要 テレメータ必要
	ディファレンシャル方式	±0.2 ~ 3m	40km	同上	同上	テレメータ必要
	電波測位儀	±0.5 ~ 1.0m	80km	影響あり	制限有り	無線の免許や申請が必要である
	光波測位儀 (自動追尾)	±0.05m	4km	障害物と雨、霧等の影響大	制限有り	目標を見失った場合、再調整が必要である

表-3 GPSの導入経緯

方式等	内容	検証結果	実施年	備考
単独方式	精度検証	精度30m	1990	米国、'87より衛星打上げ
ディファレンシャル方式	単独用を2台組み合わせた精度検証	精度10m	1991	稼働衛星12個
	測量用ディファレンシャル方式の精度検証	精度3m	1992	稼働衛星18個 海洋測量には使用不可
	高精度ディファレンシャル方式 現場実験と導入	精度0.2m	1993/3	稼働衛星21個 海洋測量可能
キネマティック方式	キネマティック方式の精度検証	精度0.02m 障害物に弱い	1991	後処理である
	リアルタイムキネマティック方式の精度検証と導入	精度0.02m	1993/6	稼働衛星24個 静止初期化が必要
	リアルタイムキネマティック・オンザ・フロッピー方式の精度検証と導入	精度0.02m	1993/11	移動初期化可能

3.2 GPS測位法の導入経緯

GPS衛星は1987年から試験衛星が打ち上げられているが、当社におけるGPS測位法の導入経緯については、表-3のように、1990年より本格的に取組み、調査と実験を繰り返してきた。最初は高価で精度も悪く時間の制約等があったが、1993年には飛躍的にGPSの性

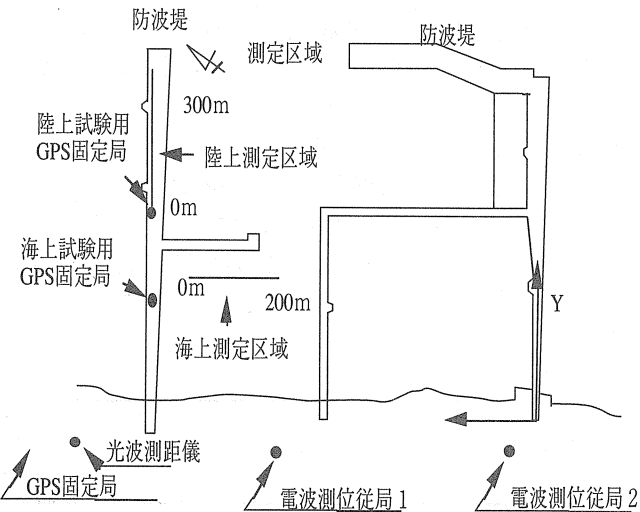


図-3 実験場所 (原町火力工事現場)
能が向上し、価格を除きほとんどすべての問題点がクリアされた。

4. GPS測位法の実証実験

原町火力の港湾工事において、従来の電波測位儀や光波測位儀に代わりGPSを測量等に適用することが可能か、陸上実験にて精度(絶対精度、安定性)の検証をおこない、海上実験では、精度(絶対精度、安定性)、気象・海象条件の影響、反射・障害物の影響と運用・操作性等に関して調査した。

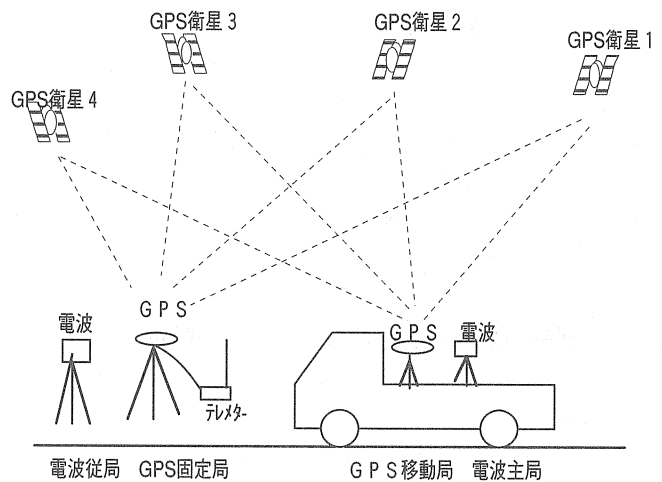


図-4 ディファレンシャル方式の陸上実験方法

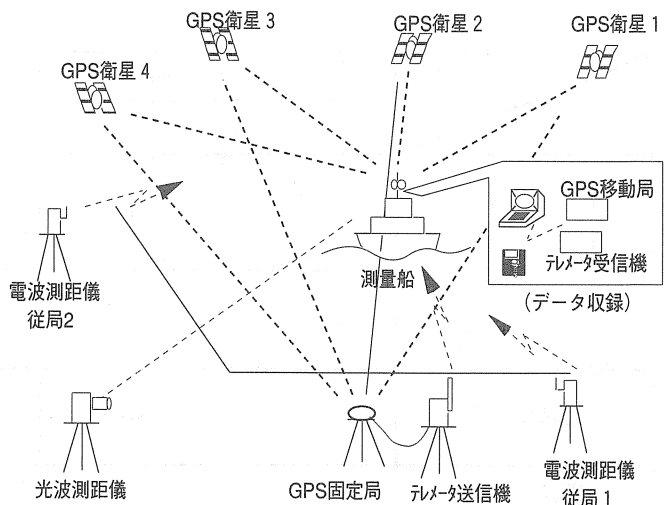


図-5 ディファレンシャル方式の海上実験方法

4.1 ディファレンシャル方式の実験方法

陸上の数カ所の既知点にマーキングをおこない、GPSの移動局と電波測位儀を車に搭載して、数カ所の既知点間を移動して、計測をおこなった。

図-3に実験場所を、図-4にディファレンシャル方式の陸上実験方法を示す。

海上実験は、測量船に、GPSのアンテナ、電波測位儀主局のアンテナおよび光波測位儀のミラーを同軸上に取り付け、基準となる光波測位儀および、比較する電波測位儀の位置出し信号を同時に収録した。

図-5にディファレンシャル方式の海上実験方法を示す。

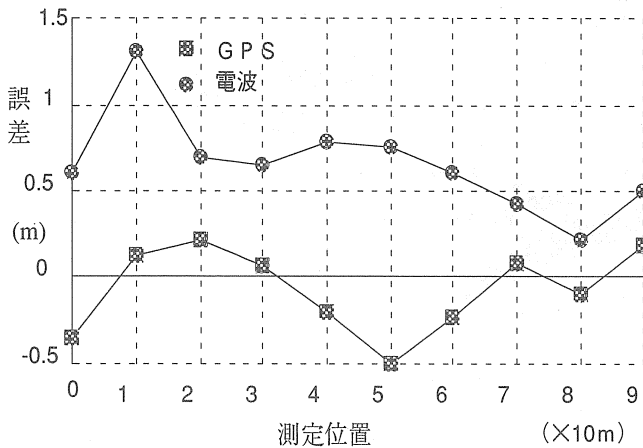


図-6 ディファレンシャル方式の陸上実験結果

4.1.1 ディファレンシャル方式の実験結果

(1) 陸上実験結果

スタート点から、10m間隔で電波測位儀とディファレンシャル方式の陸上実験の精度比較を行った結果を図-6に示す。

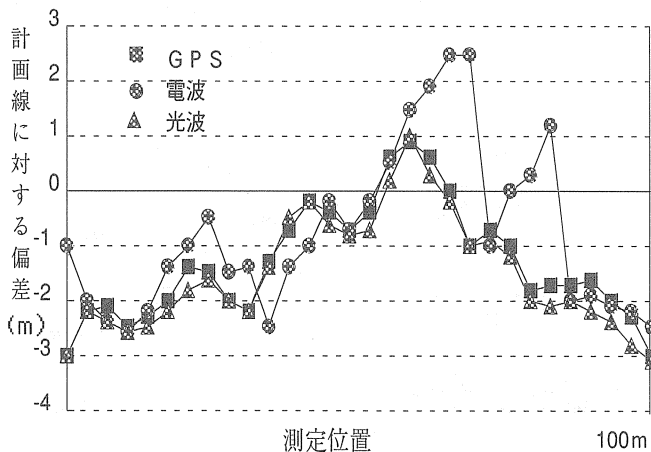


図-7 ディファレンシャル方式の海上実験結果

①GPS方式の静止点測位精度

平均誤差E=0.5m、標準偏差σ=0.3mであった。

②電波方式の測位精度

平均誤差E=0.7m、標準偏差σ=0.5mであった。

(2) 海上実験結果

測量船での航跡を図-7に示す。光波測位データを正としたときの、GPSのデータはよく一致しているが、電波測位儀は所々大きなズレが発生している。

①GPS方式の測位精度

平均誤差E=0.25m 標準偏差σ=0.22mであった。

②電波方式の測位精度

平均誤差E=0.65m 標準偏差σ=0.96mであった。

4.1.2 ディファレンシャル方式の評価

GPSの陸上実験の固定点計測時は精度0.2~0.3m程度であったが、海上で測量船による移動計測を行った場合0.2m程度にまで向上し、海上測量においては、GPSの精度が上回っていることが確認できた。

ディファレンシャル方式は、静止しているより移動している方が精度が良い。

また、リアルタイム性や操作性に関しても問題がなかった。電波測位儀では、海面反射によるエラーが発生したり、また、従局の位置関係により精度が大きく変動した上、途中で障害物等があると、測定不能となる等の問題点があった。

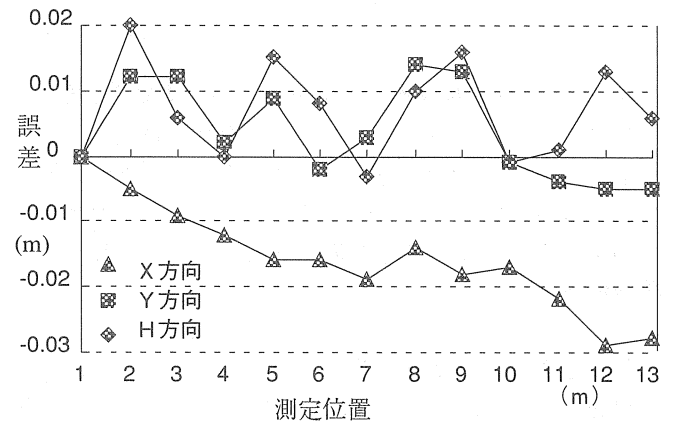


図-8 リアルタイムキネマティック方式の実験結果

4.2 リアルタイムキネマティック方式の実験

海上測量にリアルタイム・キネマティック方式を導入することを目的とし、同方式の精度確認試験を行なった。なお、リアルタイム・キネマティックGPS方式は高さ方向の精度も数cmで計測可能であり、海上での精度確認実験を行う場合、基準となる測量機が他にないため陸上にレールを引いた台車上にGPSを載せ試験を行うことで判断した。

4.2.1 リアルタイムキネマティック方式の実験結果

図-8にリアルタイムキネマティック方式の実験結果を示す。X、Y、H方向とも誤差2~3cm以内と極めて良好な結果が得られた。

Y方向 平均誤差E=0.01m 最大誤差=0.015m

X方向 平均誤差E=0.015m 最大誤差=0.03m

H方向 平均誤差E=0.01m 最大誤差=0.02m

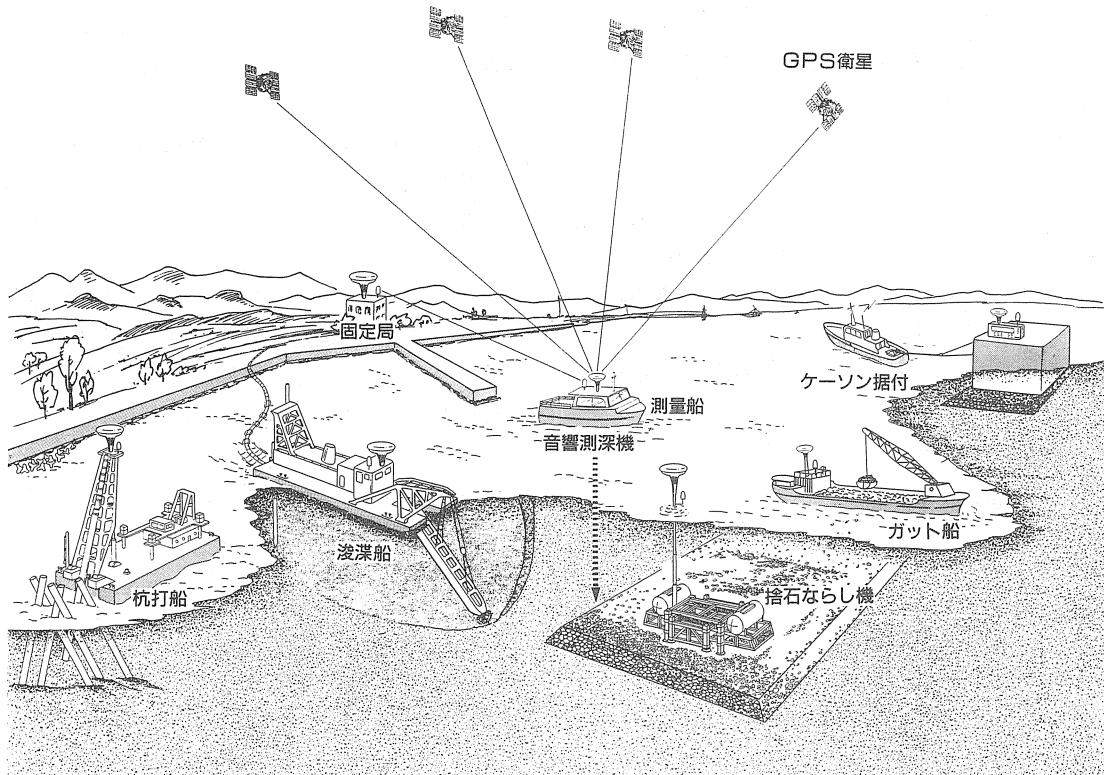


図-9 GPSを利用した海上測位システムの概念図

4.2.2 リアルタイムキネマティック方式の評価

リアルタイムキネマティック方式の水平精度は、海上測量への適用に十分な数値精度といえ、高さ方向に関してもほぼ同程度の精度が得られるため、従来必要とされた潮位補正や、ヒービング補正（波による上下動）の問題等が解決された。

設分野の測量に利用できることを検証し、海上測量分野への応用について開発を進めた、図-9にGPSを利用した海上測位システムの概念図を示し、その代表例として自動深浅測量システム、ケーソン据付管理システムおよび捨て石均し管理システムの概要を示す。

5. 当社における導入例

初期の調査と陸上実験、海上実験を通じてGPSが建

5.1 GPSを利用した自動深浅測量システム

本システムは、当社で、すでに開発実用化されている自動深浅測量システムの測量船の位置出しにGPSを用

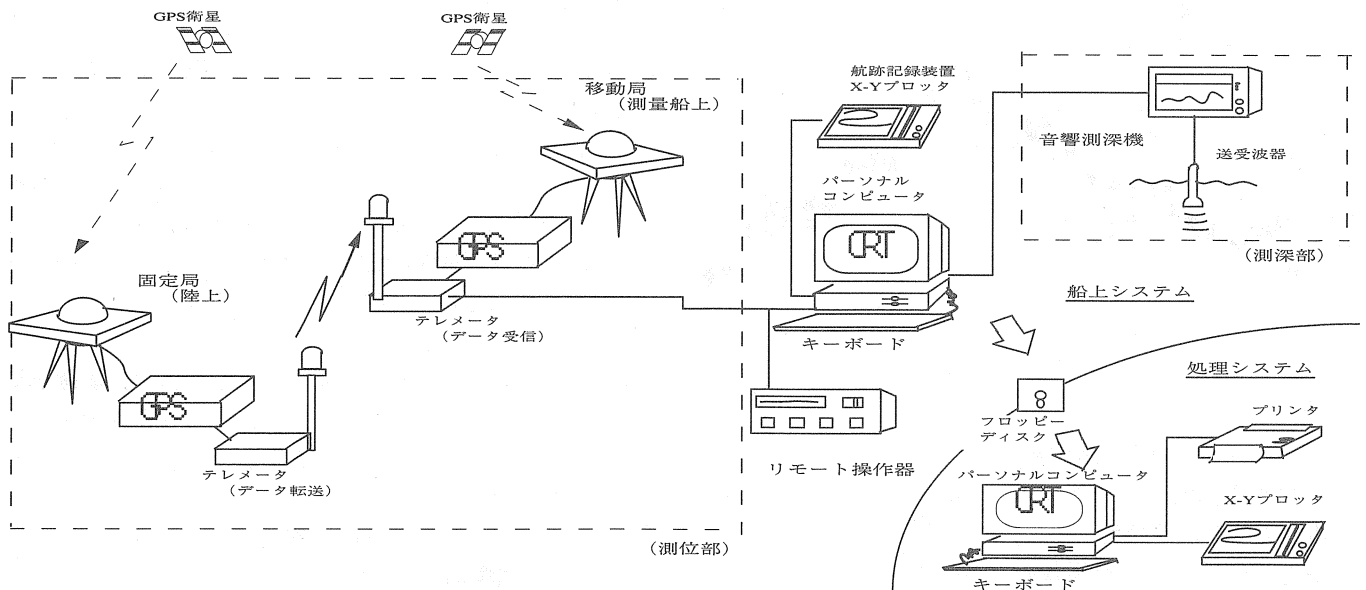


図-10 ディファレンシャル方式による自動深浅測量システム図

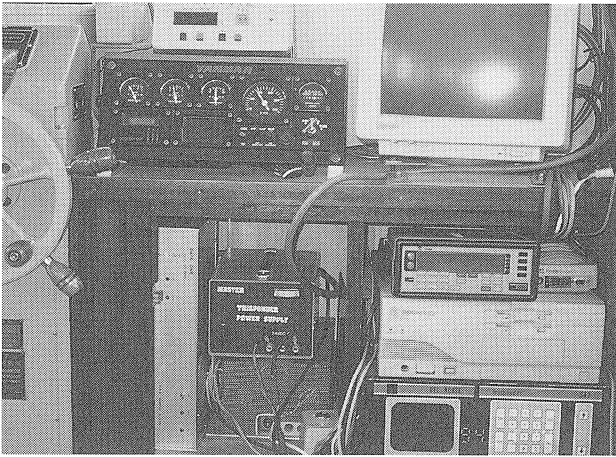


写真-1 測量船内部

い、水深の計測に音響測深機を用いて、測量船の現在の位置や測量の状態をCRTやモニターに表示しながら、位置と深度のデータをパソコンへ収録して、後処理により、水深図、断面図、土量計算等を自動で行うシステムである。

従来測量を行う場合は障害となる他の作業船等の移動をおこなったりしていたが、GPSを使用することにより、この移動作業が不要となっただけでなく、測位データが安定しているため測量の能率向上を図ることができた。図-10にディファレンシャル方式による自動深淺測量システムを示し、写真-1に測量船の内部を示す。

5.2 GPS利用のケーソン据付管理システム

ケーソンは、港の外郭施設を形成する上で重要な構造物である。この製作は、当工事区域内の陸上に設けられた造函施設で製作され、海上へ浮かべて据付現場まで回航される。

従来の港湾等の防波堤建設工事におけるケーソン据付は、光波測位儀やトランシット等の誘導により行われている。しかし、所定の位置へ据付するためには、光波測位

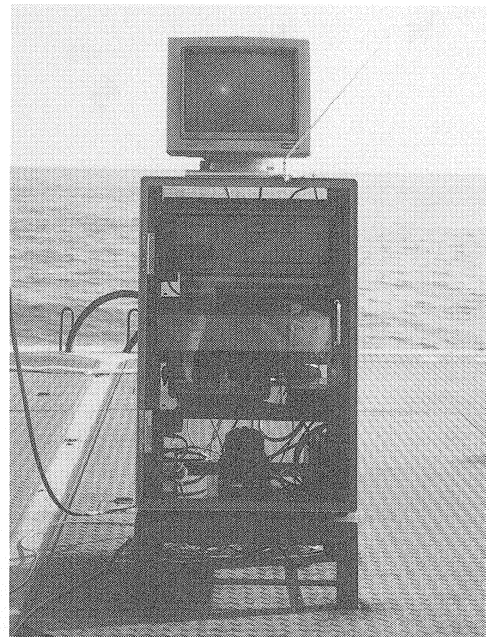
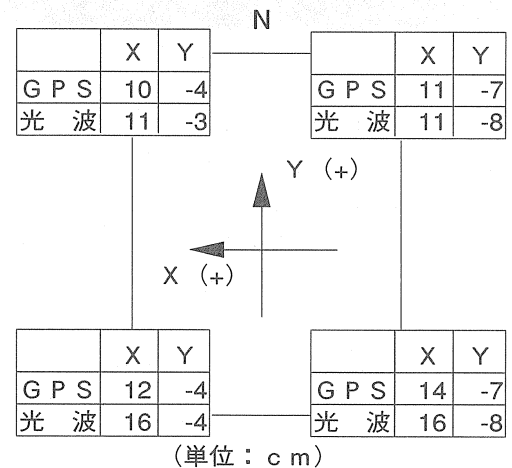


写真-2 ケーソン据付管理装置



GPS、光波の値は据付目標値からのずれである。

図-12 ケーソン据付時の天端の測定精度

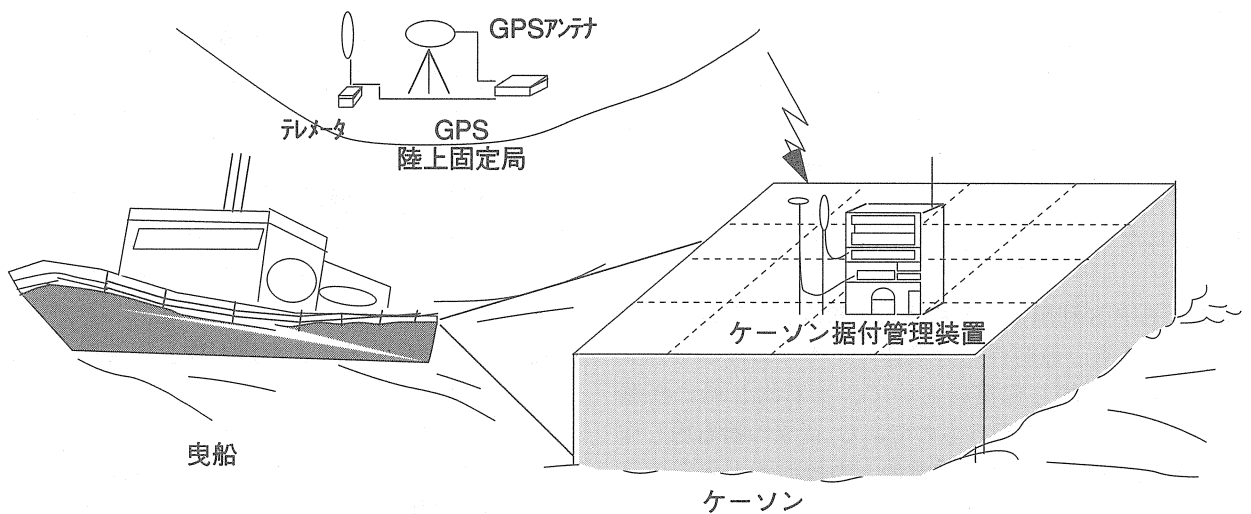
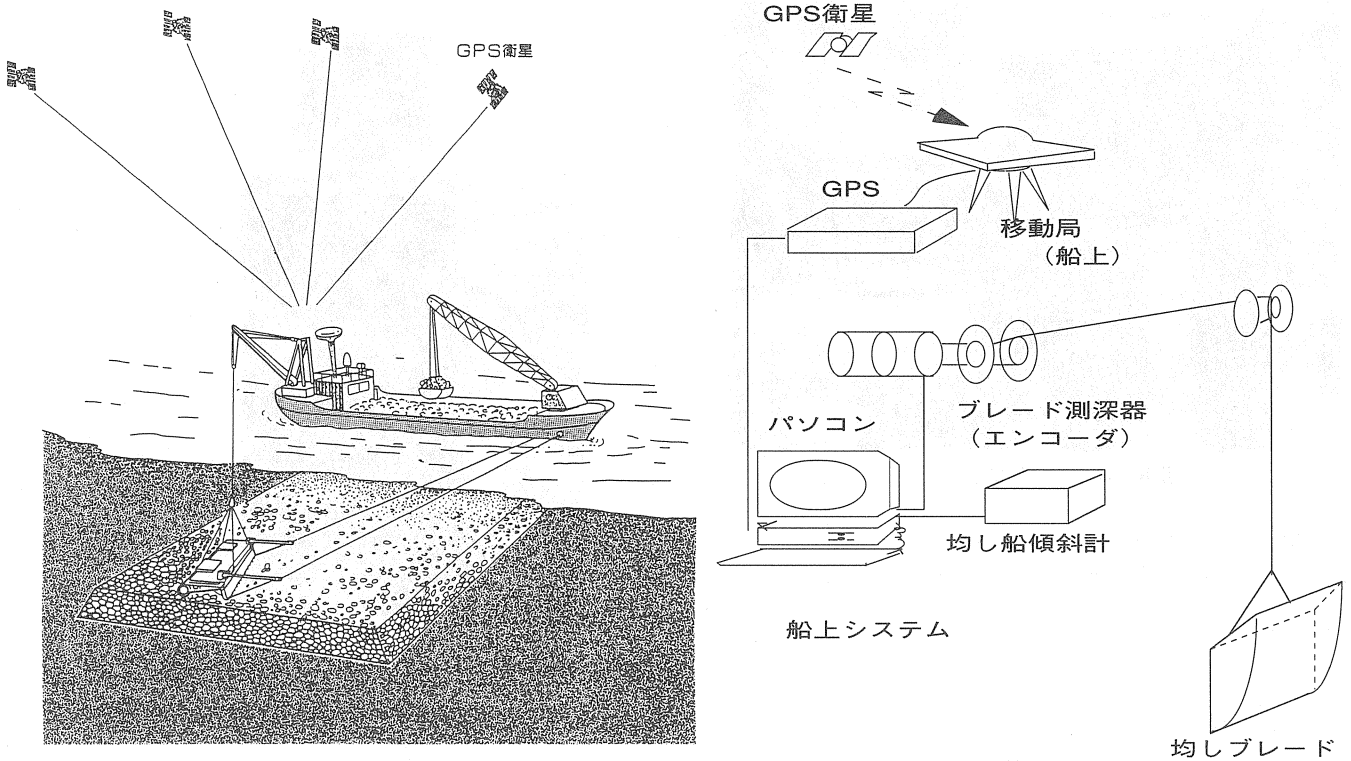


図-11 キネマティック方式によるケーソン据付管理システム概念図



図一 13 GPSによる捨石均し作業船測位概念図と計測システム

儀やトランシット等の誘導では、途中に見通しができないような障害物があると、誘導が不能となったり、距離が遠くなると、据付精度においても問題があった。

したがって、どのような場所においても、容易に精度よく設置するための技術開発が強く要望されていた。

本装置は、リアルタイムキネマティック方式の受信機をケーソン上に設置して、ケーソン位置を求め、同じくケーソン上に設置したジャイロによりケーソンの向きを高精度で計測し、パソコンにて演算処理するシステムである。

曳船や起重機船上にて、据付中のケーソンの位置と向きをリアルタイムでCRT上にグラフィックと数値で表示することにより、容易にかつ高精度に据付することを目的としている。

図一 11 にキネマティック方式によるケーソン据付管理システム概念図を、図一 12 にケーソン据付時に光波との比較を行った結果を示す。(この時の据付位置は固定局より1.5kmの位置である。)

写真一 2 にケーソン据付管理装置を示す。

5.3 GPS利用による捨石均し管理システム

本システムも、原町火力港湾建設工事におけるケーソンマウント捨石均し作業において、捨石均し船に搭載し、作業支援、管理を行うものである。従来の捨石均し作業における作業船測位は、作業船上の操舵者が海上の目標(旗または対岸の目標物など)を定め、ジャイロ等をたよりに誘導を行っていた。また、今回のシステムの導

入以前においては、電波測位儀により測位を行い、測位データをパソコンに取り込むことにより均し船の航跡をCRTに表示させ、均し域を確認しながら、作業効率を上げるものであった。また均しブレードの深度については、潮位を利用し補正を行うものであった。

今回導入したシステムは、リアルタイムキネマティック・オンザフライ方式を採用することにより、測位精度の向上(特に高さ方向の高精度化)が図れ、均し船の測位に加え、ブレード深度についてもGPS高さデータとブレード深度データ(ブレード吊下げワイヤー長計測による相対深度の計測)からブレード絶対深度(すなわち、捨石均しの出来型)をリアルタイムで管理しながらの均し作業を可能なものとした。これにより、従来操舵者の感に頼っていた部分を明確化でき作業効率を上げることができた。主な特徴としては、

- ①GPSを利用し、高精度作業船測位を可能にしている。
- ②GPS測位、作業船動揺、均しブレード深度をリアルタイムで計測し、高精度で捨石均しブレード面を測位し、コンピュータによる測位表示、データ収録を可能としている。

図一 13 にGPSによる捨石均し作業船測位概念図と計測システムを示す。

6. まとめ

今回開発したGPSを利用した各種海上測位システムは、従来の問題点をほとんどクリアし、高精度で安定していることから、今後の各種海上工事の主流になるであ

ろうと予想される。また大型海洋工事においては、固定局の共有化などを行えば移動局の使用台数に制限がないため、運用面でのメリットが大きい。

そのためには固定局からのデータに関して標準フォーマットを早急に決める必要があり、現在関係機関やメーカーとその作業を行っている。

謝 辞

本装置の開発にあたり、東北電力(株)原町火力建設所の土木建築課の方々や原町火力作業所の方々には、貴重な助言を頂き、また導入に関していろいろな面からご配慮いただきました。御支援、御協力を頂いた関係各位に紙面を借りて謝意を表します。

