

GPS を利用した潮位観測システムに関する 基礎的要素技術の開発

浜田賢二¹・山中光雄²・中井 修³・山下武広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 次長

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

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

潮位観測は、港湾の工事や測量に不可欠な調査項目であるが、検潮所の設置には制約があり、流れが複雑に変化する海域や沖合いのデータ取得には必ずしも十分には対応できないのが現状である。

そこでGPSを応用して面的な海域の潮位観測を行う総合潮位観測システムの開発を最終目標として、これに必要な基礎的要素技術であるGPS潮位観測技術と海上潮位観測に適用される船舶の動揺補正技術の開発を行った。

これらに対する実海域実験等を行った結果、GPSシステムの広域かつ正確な潮位観測への適用性、および船体動揺補正システムの有効性が確認された。

Key Words: GPS, tide observation, correction of ship's oscillation, field tests

1. まえがき

瀬戸内海と日本海を結ぶ関門海峡は、古来より海上交通の要衝であり、明治の末期より関門航路の増深や拡幅等の整備工事が運輸省第四港湾建設局(以下四建と記す)によって進められている地域である。

しかしながら関門海峡は狭隘で蛇行しており、加えて瀬戸内海と日本海の潮位差のため、同海峡内の潮位と潮流は複雑に変動しており、急潮流、航路の埋没、渦流等が船舶の航行のみならず港湾工事の遂行にも大きな問題となっている。これらの問題点に対処し、安全で効率的な船舶の航行や港湾工事の施工のためには、潮位、潮流、水深等を精度よく求めることが不可欠である。このためにこれまで長期間に渡って現地観測が行われ、多くのデータの集積が図られてきている。

四建でも、各地に設置した検潮所による潮位観測や、測量船による深淺測量等を継続して実施し、工事や水深の基準となる基本水準面(Cardinal Datum Level, CDL)の設定や工事中の潮位算定、水深の管理等に活用してきている。

しかしながら潮位観測に関しては、上記のように関門海峡の流れは複雑であり、限られた固定検潮所のデータから海域各所の潮位を精度良く推定することは困難であるばかりでなく、航路中央部などの検潮所が設置できな

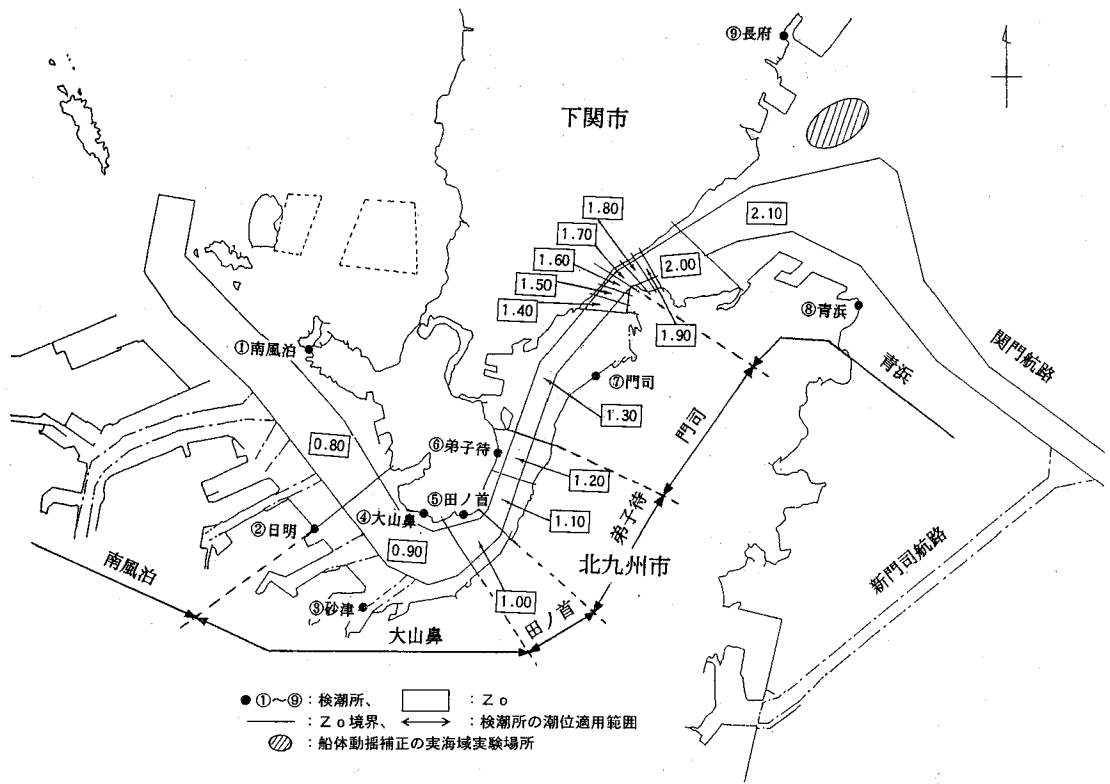
い場所では計測方法も確立していないのが現状である。

このような状況に対処するため、検潮所以外の固定点のみならず海上の任意点を含む面的な潮位観測を行うことが求められており、筆者らはGPSを利用した新しい潮位観測システムの開発を行っている。本研究では、面的なGPS総合潮位観測システムの開発を最終目標とし、これに必要な基礎的要素技術として、GPSによる潮位観測技術および海上潮位観測に適用される船舶の動揺補正技術の開発を行った。これらのうちGPSによる潮位観測技術には、筆者らが開発したGPS海上測位システム¹⁾を応用した。

本報告は、GPSの潮位観測への適用性の検討、高精度な海上潮位観測に必要な船体動揺補正技術の開発、およびこれらを結合したGPS潮位観測総合システムの確立に必要な今後の技術的課題について述べるものである。

2. 関門海域の潮位観測の実態と問題点

現行の潮位観測は、痕跡調査、量水標、検潮機などによって海面の高さの変化を計測するものである。観測結果の分析によって港湾海域の基本水準面や潮位差等が求められ、また異常気象による高潮、深淺測量や浚渫工事の際の時々刻々の水位の計算等にも活用されるため、潮位観測は港湾施設の計画、設計、施工に不可欠な観測項



図一 関門海域のZ₀（基本水準面CDLから平均水面までの距離）の分布と検潮所の配置

目である。

前述のように関門海峡は、瀬戸内海と響灘を結ぶ細長く屈曲した水道であり、通水断面積は小さく、またその長さは約20kmに及ぶ。瀬戸内海側の東口と日本海側の西口の潮位差によって海峡内には速くて複雑な潮流が生じ、したがって潮位や平均水面は場所によって大きく異なる。このため略最低低潮面を表す基本水準面から平均水面までの距離Z₀は、関門海峡内において細かく区分され、80cmから210cmまで10cm間隔で14段階に変化している³⁾。この状況を図一に示す。

このような海面変動を長期間に渡って観測するとともに、深淺測量や浚渫工事の際の潮位補正を行うため、四建は関門地区全海域に10ヶ所の検潮所を設置している。これらの配置場所も図一に併記している（ただし、苅田検潮所は図の範囲外となるため表示されていない）。また同図には、海峡海域で港湾工事を行う場合の潮位補正に通常適用される検潮所の担務範囲も示されている。

現状では各検潮所は、潮位観測データをリアルタイムで無線送信しており、作業船等は工事海域に対応する検潮所の無線潮位データを選定して、リアルタイム潮位補正を行っている。

上記各検潮所における潮位観測結果を図二に示す。

図より、平均水面は、西から東に向かって基本水準面上0.77m（南風泊）から2.13m（苅田）まで変化しており、また朔望平均満潮面と朔望平均干潮面との差は、東部の青浜で3.82mと大きいが、西へ向かうにしたがって急激に小さくなり、西部の南風泊では1.49mとなっている。

このように変化の激しい海峡内の潮位変動の観測は、限られた少数の検潮所では必ずしも十分とはいえない。また同一Z₀区域内でも流れの遠心力によって下関側と北九州側の潮位が異なる場合があることや、検潮所が設置できない航路中央部の潮位データはほとんど得られていないことなど、現状の観測システムでは対処できない項目もある。

したがって、より広範な海域の詳細な潮位データが得られれば、深淺測量や浚渫等の港湾工事がより合理的かつ経済的となる。またそのデータは、海峡内流れの数値シミュレーションや水理模型実験の基礎データとして使用され、航路埋没量の予測や船舶航行時の渦対策等に活用されることが期待できる。

以上のことから関門海域では、合理的かつ経済的な新しい潮位観測システムの開発が望まれている。

第四港湾建設局検潮所潮位

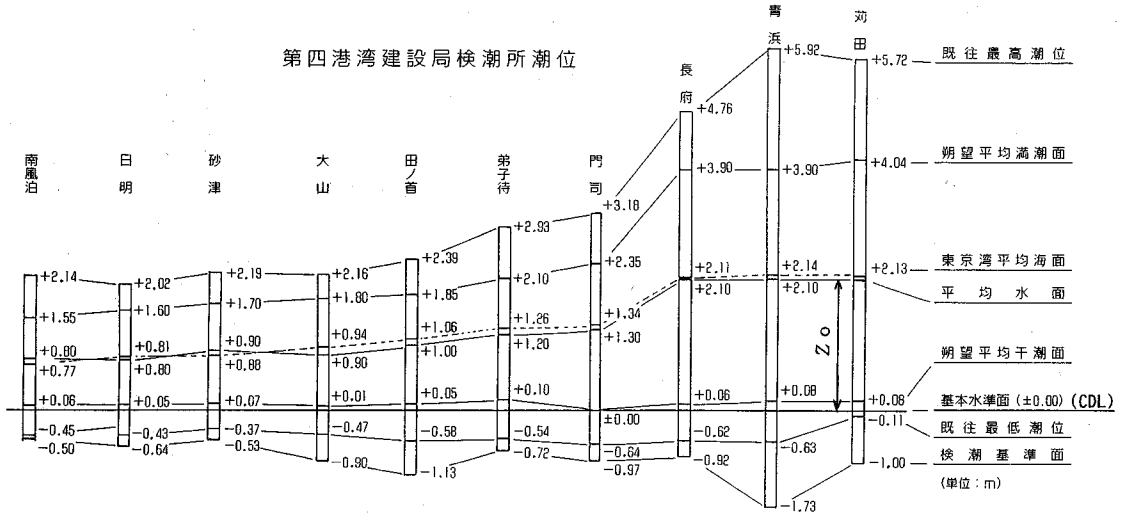


図-2 関門海域の検潮所における潮位観測結果

3. 本研究の目的と調査内容

本研究は、上記港湾工事の効率化、海峡内の海流シミュレーションや水理模型実験の高精度化を目的として、以下の考え方に基づいてGPSによる総合潮位観測システムを開発することを目指している。ここで総合潮位観測システムとは、海岸の固定地点ばかりでなく、沖合海面の潮位変動も調査可能な計測システムを意味する。

まず、面的な海域に適用可能な総合潮位観測システムに必要な要素技術として、①潮位そのものを正確に観測する方法、および②沖合潮位観測のために使用する船舶等の動揺補正手法、を開発する。そして次に、③これらを結合して全体をシステム化する。

本研究においては特に①および②に焦点を絞り、①についてはGPSを応用した潮位観測装置、②についてはジャイロおよび加速度計等による船体動揺補正装置を開発した。③については、①と②をハード的に結合し、この総合システムを管理し、またデータ処理を行うソフトを開発する必要がある。これらのうちハード面の技術的問題点はないが、ソフト部分については、海上潮位の定義、GPSと従来計測法の座標系の差異、動揺補正の手順等の基本的処理条件がまだ明確でないため、今後これらの概念が確定されることが③の全体システム開発の前提となる。したがって本報告では、上記③に関しては、GPS潮位観測総合システムの確立に向けて今後考慮すべき技術的課題について整理しておくものとする。

4. GPS海上測位システムによる潮位観測

GPS海上潮位観測システムの主要な基礎的要素技術

である潮位計測技術には、前述のように筆者らがこれまでに開発したGPS海上測位システムを応用することを考えた。そして海面変動に追従するフロートとの結合などいくつかの工夫を行い、その潮位観測への適用性を実海域実験によって調べた。

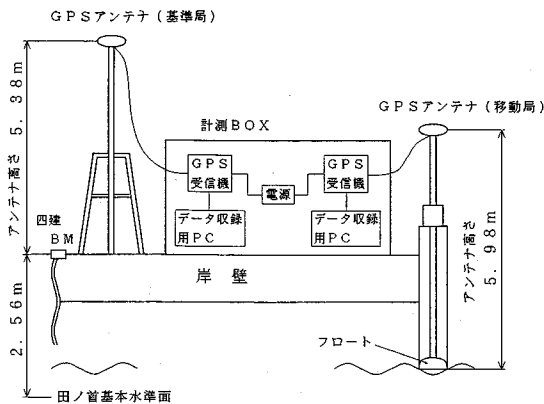
実験は、検潮所がない海岸での観測を想定し、GPS機器を岸壁に固定した定点観測と、沖合の海上観測を想定し、船舶に機器を搭載して航行しながら計測する海上移動観測の2種類を実施した。

(1) GPSによる潮位観測システム

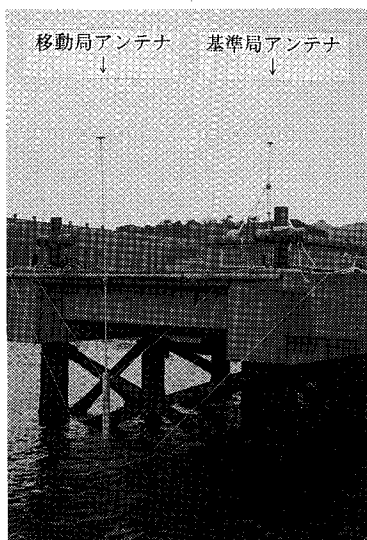
今回の潮位観測実験に用いたGPS測量システムは、筆者らが港湾工事や海底面の深淺測量に使用する作業船のリアルタイム海上測位のために独自に開発したものである²⁾。このシステムでは、GPS測位技術の中で最も精度が高い干渉測位法を適用しており、さらに移動しながら計測を行うことも可能なキネマティック方式としている。

干渉測位法は相対測位の種類であり、基準点（以下基準局と記す）に対する測位点（以下移動局と記す）の3次元相対座標、すなわち基線ベクトルを求めるものである。

この測位方式は高精度測位が可能であるが、測位開始の前に、整数値バイアス³⁾の決定、いわゆる初期化を行う必要がある。筆者らのシステムでは、この初期化方法としてオンザフライ（On The Fly、以下OTFと記す）方式⁴⁾を適用している。この方法は、5個以上の衛星を必要とし、また他と比べると初期化完了までに時間がかかるが、移動局が動いていても初期化が可能であるという特長を持っており、作業船等による海上での測位に適して



図一三 GPS 固定点潮位観測システムの構成



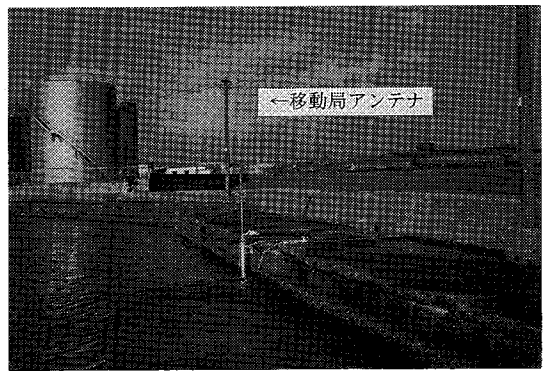
写真一 田の首検潮所の GPS 基準局と移動局

いる。

さらに本 GPS 海上測位システムは、広範な海域においてリアルタイム測位を行うため、基準点から測位点への相対測位の補正情報送信に 70 MHz 帯、出力 3 ワットの FM 無線通信技術を独自に採用している^{1),2)}。そして基線長約 6 km 以下の範囲において、測位精度(標準偏差) 3 cm 以下の実測値が得られている²⁾。

また本 GPS 海上測位システムは、基準局、移動局の両局ともデータ収録用パソコン (PC) を有しており、GPS 受信電波、信号処理結果等を記録することができる。これによりリアルタイム処理ばかりでなく、観測生データを収集し、事後に種々の解析を行うことも可能である。

今回の実験では、生データを一定時間収集し、その後オフラインでキネマティック演算等の種々の分析を行う事後処理方式で潮位変化を算定した。



写真一 二 砂津検潮所の GPS 移動局



写真一 三 日明検潮所の GPS 移動局

潮位観測の実験場所は、流れが大きく変化し、相対距離が大きく、かつ海峡の両岸に位置していることなどを考慮して、田ノ首、砂津および日明の 3 検潮所を選定した (図一 1 参照)。

基準局は田ノ首に設置した。田ノ首における基準局および移動局の機器の構成と配置、検潮所のベンチマーク (四建 BM) との位置関係等を図一 3 に示す。

基準局では、衛星からの GPS 電波は固定アンテナから GPS 受信機に導かれ、所定の処理の後にデータ収録用 PC に記録される。

一方、田ノ首の GPS 移動局アンテナは、潮位変動に追従して上下動するフロートに固定され、これらの上下変位によって潮位の連続観測を行う。GPS 電波は基準局と同様に GPS 受信機を通してデータ収録 PC に記録される。

砂津移動局の機器の構成および配置は田ノ首と同一である。日明移動局では、田ノ首および砂津のフロートの代わりに係留船舶を使用していることだけが異なり、他は田ノ首および砂津と同じである。

これらの移動局アンテナを取り付けたフロート等は、波浪の影響が少ないこと、局所的な影響が生じないこと、

船上移動局

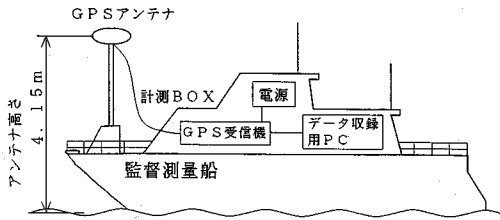


図-4 GPS 船上潮位観測システムの構成



写真-4 海上潮位観測船外観

漂流物などによる破損の恐れがないこと、などを考慮して検潮所直近の場所に設置した。3 検潮所における基準局および移動局アンテナの設置状況を写真-1～3 にそれぞれ示す。

また海域の任意の場所の潮位を観測するため、四建所属の監督測量船(全長 16.5 m, 35.9 総トン, 以下測量船と記す)に GPS 移動局を搭載して、船上潮位観測システムを構成した。この機器配置を図-4 に、外観を写真-4 にそれぞれ示す。

(2) 固定点潮位観測

一般的な検潮所は、観測室内に井戸を設け、その下部から導水管を海中に伸ばした構造となっており、海面に連動した井戸内の水位を検潮機によって計測する。このように特定の専用設備による正確な検潮データと、フロートと結合した GPS 測位システムを定点に固定して得られた潮位データを比較することにより、GPS の精度および有効性を調査した。

ここで注意しておくべきことは、これまでの潮位観測の基準面と GPS 観測のそれが異なることである。すなわち潮位観測の基準面はいわゆる基本水準面 (CDL) であり、これは平均水面から主要四分潮の半潮差の和だけ下がった高さであり、この位置は略最低低潮面であることから、海図における水深表示のゼロ点でもある⁴⁾。ただし主要四分潮とは主太陰半日周期、主太陽半日周期、日月合成日周期および主太陰日周期であり、潮位記録の調和分解によって得られる⁴⁾。

これに対して GPS 観測では、地球中心を原点として地球に固定された座標系 WGS-84 系 (World Geodetic System 1984) によって観測点の座標が求められる⁵⁾。この測量値を各地で測量の基準としている準拠楕円体 (例えば日本の場合はベッセル楕円体) 上の座標に変換することによってこれまでの測量結果と対応付けられ、水平方向に対しては一義的に決定される。しかしながら、鉛直方向に関しては、潮位の基準高さは上述のように平均海面から求められる CDL であり、これは準拠楕円体面とは直接関係しない。すなわち GPS 測量から求められる鉛直座標は準拠楕円体面からの高さであり、一方潮位は CDL からの高さを表す。したがって平均海面にほぼ一致するジオイドと WGS-84 系楕円体面の位置関係が求められない限り、GPS 観測高さと潮位を一義的に対応付けることはできない。

現状では、このジオイド高はまだ m オーダーのグローバルなモデルがいくつか提案されているにすぎず、GPS による cm レベルの高精度な調査が種々試られている状況であり^{6),7)}、精密なジオイドマップの作成が測量分野における今後の課題となっている。したがってここでは、検潮所データと GPS 潮位データの観測値から両者の相対的位置関係を求め、これを基に両潮位データの対応関係を評価するものとする。なお、写真-1～3 に示すフロートおよび係留船舶による GPS 潮位観測値は、振幅数 cm、周期 2～3 秒程度の小刻みな周期的変動を示すため、ここではある時点の GPS による潮位は、その前の 1 分間の値の平均値とした。

上記の対応関係を求める前に、3 検潮所において計測された実験日の潮位変動記録を図-5 に示す。図では、各検潮所の CDL を便宜上一致させて縦軸の 0 m としている。図より、3 検潮所の潮位は、変動パターン、相対潮位差とも細かくみれば同一ではなくて地域差があり、流れが複雑であることが理解されよう。なお、3 検潮所の検潮機は、運輸省港湾局の全国潮位観測網において標準機とされているフース型であり、検潮井戸内水位をフロートによって検出する構造となっている。なお、この検潮所観測データも小刻みな微小振動が含まれることが多く、この場合は潮位決定の前に平滑化処理が行われる。

本論に戻り、3 検潮所の検潮機データと GPS による

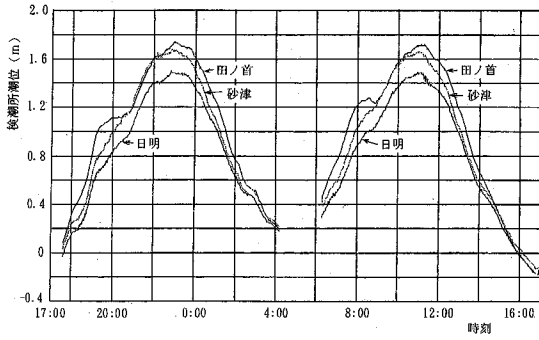


図-5 田ノ首, 砂津, 日明の検潮所潮位変化

表-1 検潮所データとGPS固定点データの差

田の首検潮所		日明検潮所		砂津検潮所	
差の平均 (m)	差の標準偏差 (cm)	差の平均 (m)	差の標準偏差 (cm)	差の平均 (m)	差の標準偏差 (cm)
31.87	1.3	34.56	1.5	30.99	1.4

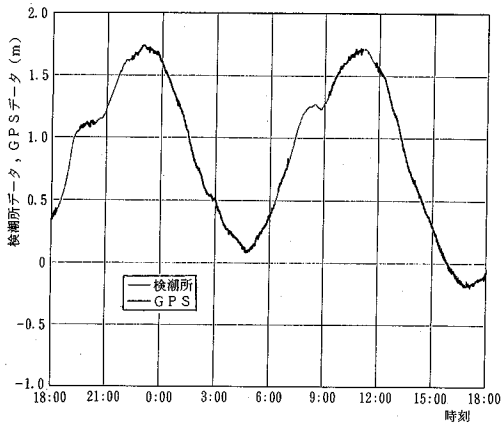


図-6 (1) 検潮所とGPSの潮位の比較 (田ノ首)(同一座標軸)

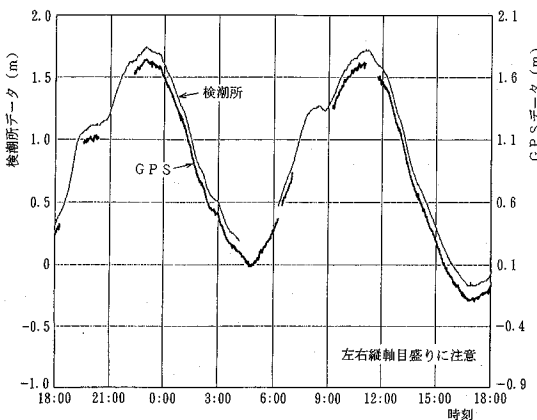


図-6 (2) 検潮所とGPSの潮位の比較 (田ノ首)

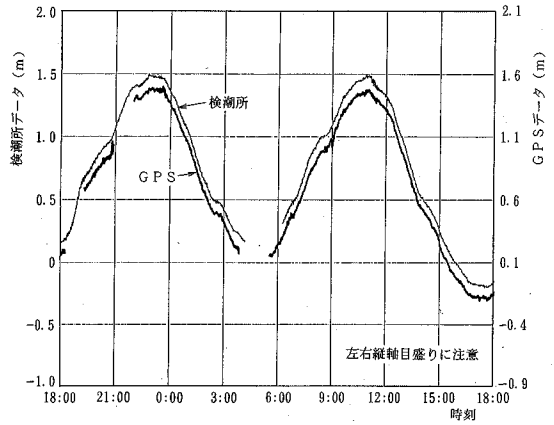


図-7 検潮所とGPSの潮位の比較 (日明)

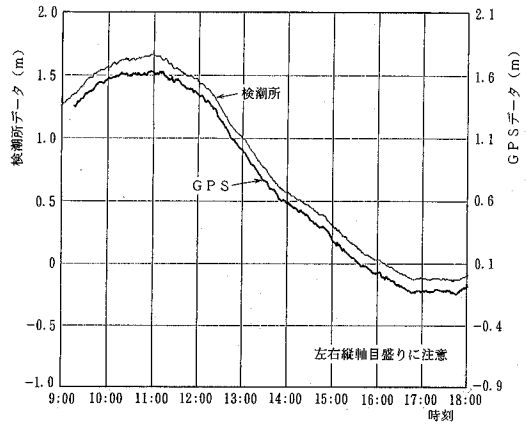
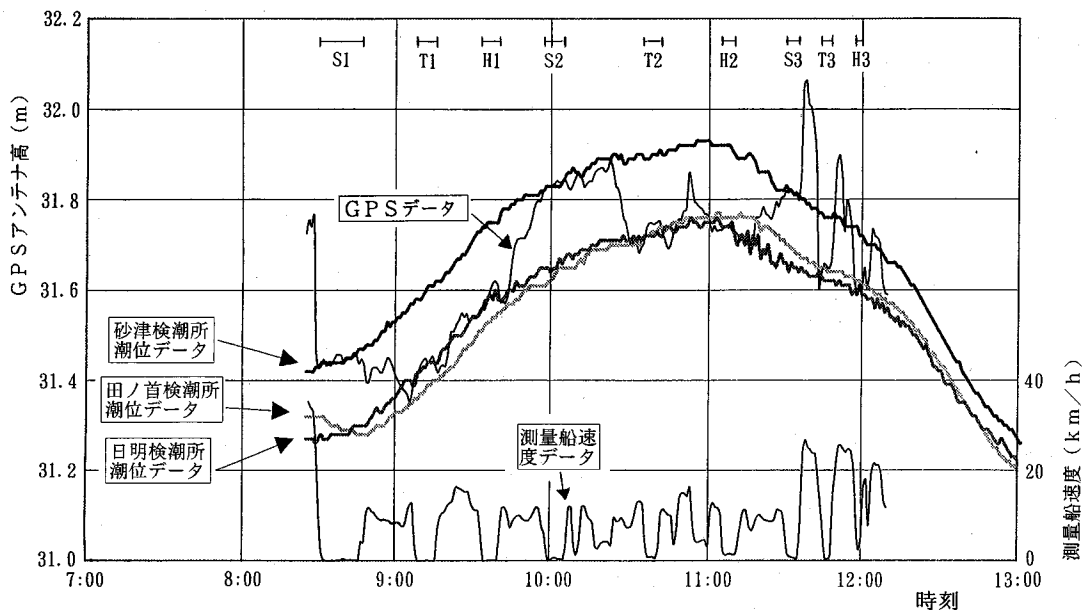


図-8 検潮所とGPSの潮位の比較 (砂津)

潮位データの差の平均値と差の標準偏差を求め、これらを表-1に示す。検潮所潮位はCDLをゼロとしているため、この差の平均値は、鉛直方向を向いた検潮所潮位とGPS高さの2つの座標系の原点の平行移動量を表すことになる。したがって、GPS高さデータからこの値を減じれば、検潮機データと同一の基準で比較ができることになる。この処理を行った両潮位データの時間的変化の例を田ノ首について図-6(1)に示す。

図より、両潮位データは極めてよく一致しており、実用上は同一とみなして差し支えないと考えられる。他の2検潮所の場合も同様の一致性が見られるため、両潮位データの重なりを防いで見やすくするために両潮位を表す縦軸目盛を10cmずらして、3検潮所のデータを図-6(2)、図-7および図-8にそれぞれ示す。なお図中のデータ欠落部は、検潮機については用紙送りの不良、GPSについては低仰角の衛星が多かったために捕捉衛星数が3以下となってキネマティック測位ができなくなったことなどによるものである。



図一 9 3 検潮所潮位と測量船 GPS による海上潮位の総合比較

表一 2 検潮所データと測量船停船時 GPS データの差

田ノ首検潮所		日明検潮所		砂津検潮所	
差の平均 (m)	差の標準偏差 (cm)	差の平均 (m)	差の標準偏差 (cm)	差の平均 (m)	差の標準偏差 (cm)
30.08	2.4	30.28	1.4	30.27	1.0

図一 6 (2), 図一 7, および図一 8 より, 3 検潮所すべてについて両検潮データは絶対値および変動パターンともほとんど一致している。この一致性が高いことは, 表一 1 に示す差の標準偏差が 1.3~1.5 cm と小さいことにも現れている。

したがって, 本 GPS システムによって既存の検潮所と同程度の精度で実用レベルの潮位観測が十分可能であると判断される。ただし, 観測にあたっては波浪の影響が少ないなど比較的正しい潮位が得られる場所であること, 周囲の建築物や大型構造物による GPS 電波の遮蔽や反射波の影響 (マルチパス) が無いことなどについて十分配慮することが必要である。

(3) 測量船による海上潮位観測

図一 4 に示した GPS 観測機器搭載の測量船によって海上の潮位観測実験を行い, 本 GPS 海上測位システムの海上潮位観測への適用の可能性を調査した。実験では, 測量船が 3 検潮所間を直線ルートで三角形に巡回して海上航行および検潮所停止を繰り返す, この間の GPS 測位データを集めた。なお, 検潮所間の距離は, 日明・砂津間 2.2 km, 砂津・田ノ首間 3.3 km, 田ノ首・日明

間 3.5 km である。

前述のように, これまで陸域から離れた海上の潮位を正確に計測できる機器が実用化されていないため, ここでは検潮所潮位データとの相対的な整合性を調べることによって GPS システムの潮位観測性能を評価するものとする。

まず第一に, 海上観測システムの静的な計測性能を確認するため, 測量船を検潮所に停止させた時の GPS 高さデータと検潮所潮位データの相関関係とその精度を, 4.(2)と同様に両者の差の統計処理によって求めた。その結果について差の平均と差の標準偏差を求め表一 2 に示す。表中の標準偏差は, 表一 1 の固定点観測の場合とほぼ同程度であり, 測量船停止時は, GPS による高さのデータと検潮所潮位データは表一 2 中の両観測値の差の平均値によって関係づけることができるものと考えられる。

上記の考え方に基づいて, 表一 2 の差の平均値を用いて求めた 3 検潮所の潮位および測量船航行時の高さを WGS-84 楕円体高に統一して表示すると図一 9 が得られる。図中の S 1~S 3, T 1~T 3, H 1~H 3 はそれぞれ砂津, 田ノ首および日明における停船時間帯を表す。また同図の下段には測量船の速度も併記している。

図一 9 より, GPS 潮位データは各検潮所位置で検潮所データとおおむね一致し, 検潮所間を航行中は出発地の潮位からほぼ連続的に増減して到着地の潮位に達していることがわかる。したがって GPS アンテナ高は, 検潮所間の海面の高さ, すなわち海上潮位を表しているものと

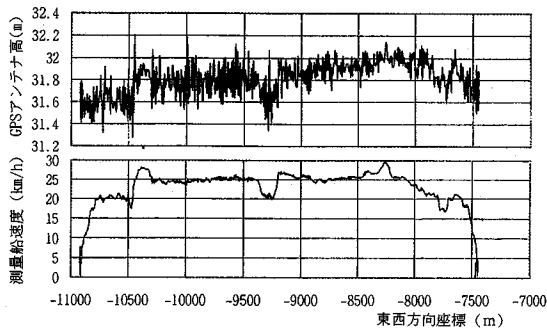


図-10 海上潮位観測時のGPSアンテナ高さ変動例

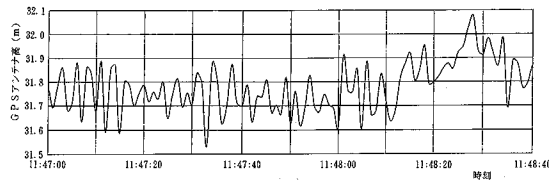


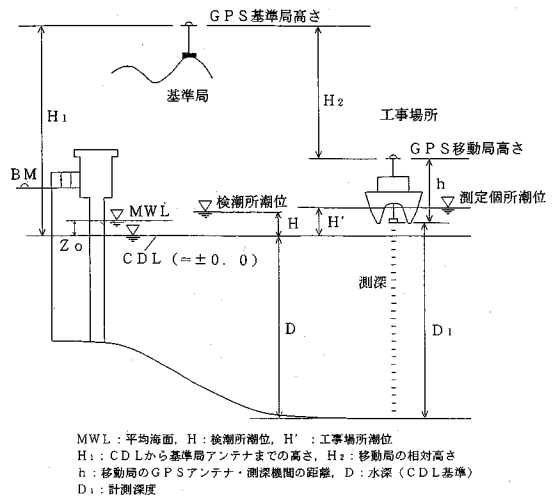
図-11 GPSアンテナ高さの時間的変動例

考えられる。ただし図-9におけるGPSデータは、前記固定点観測の場合と同様に、1分間の平均値を代表値としているが、海上航行時には波浪や潮流等が直接船体に影響するため、観測値の変動幅は固定点観測の場合よりも一般には大きくなる。本調査時は風、波浪ともほとんどなく穏やかな海、気象条件であったが、GPSアンテナ高は振幅数cm〜20cm、周期2〜5秒程度の周期的変動が観測されている。この変動状況を田ノ首から日明への航行を例として図-10に(横軸は新平面直角座標系のII系⁸⁾における東西方向座標)、またこの間の一部を時間的に拡大した例を図-11に示す。

また、図-9において時刻11:30〜12:15頃のGPSデータが大きく数回変動しているが、これはGPSアンテナが写真-4に示すように船首側に設置されているため、船速の増加による船首部の浮き上がり現象の影響が顕著に現れたものである。図-10はこの現象の一例(11:46〜11:58)でもあり、船速の増減とアンテナ高の増減の対応が理解されよう。

これらの結果より、本GPS海上測位システムと船舶等を用いて、調査海域の潮位を観測することは十分可能であると考えられる。ただし、より精度の高い計測のためには、前述の船体動揺の影響を補正する必要があるものと考えられる。また各検潮所の観測結果を準拠樁円体からの絶対高さとして同一基準で比較することも可能と考えられる。

上記のようにGPSによって海上での潮位観測が可能になれば、関門海峡の浚渫工事や深淺測量の効率や精度が改善される。例えば図-12を参照して、2. で述べた



MWL:平均海面、H:検潮所潮位、H':工事場所潮位
H₁:CDLから基準局アンテナまでの高さ、H₂:移動局の相対高さ
h:移動局のGPSアンテナ・測深機間の距離、D:水深(CDL基準)
D₁:計測深度

図-12 GPSによる潮位補正応用例

ように関門海峡の浚渫工事や深淺測量では、検潮所からの無線送信によって現地の潮位補正を行っているが、流れの複雑性のために検潮所潮位(図-12中のH)と工事場所潮位(同H')が異なることがしばしばある。この現象は図-5の潮位実測値からも容易に推定できよう。このときHとH'が等しくなければ潮位補正は不正確となり、浚渫深度や測深値に誤差を生じる。

この対策としてGPSによって船体高さを計測し、測深値と組み合わせて潮位補正を行うことが考えられる。このためには、あらかじめ検潮所BMなどによってCDLから基準局アンテナまでの高さH₁を測定しておく必要があるが、以後は現地移動局の相対アンテナ高H₂と測深値D₁の計測によって次式より水深Dが求められ、検潮所の観測データは不要となる。

$$D = D_1 - \{H_1 - (H_2 + h)\} \quad (1)$$

ただしhは移動局アンテナと測深機間の距離であり、既定値である。

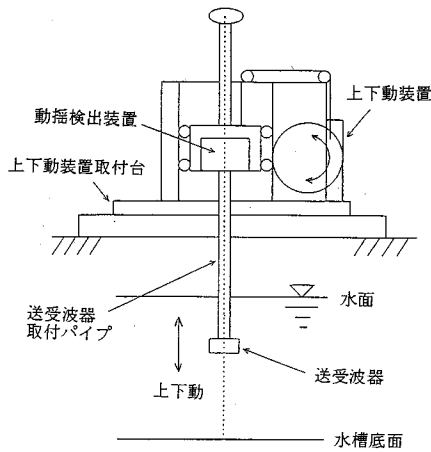
このようなGPSを用いた補正方法が採用されれば、前述の各検潮所に設置している潮位データ無線送信システムは不要となり、測量の効率化が図れるとともにその精度も改善されるものと考えられる。

5. 海上観測における船体動揺補正技術

4. で示したように、GPSを利用して海域の面的な潮位観測が可能であることが明らかとなった。一方実際の潮位観測においては、計測精度向上のため、測量船の速度の増加による船首部の浮き上がりや、風浪による船体の動揺に対しても正確な計測が行えることが望ましい。このためには、船体に固定したGPSアンテナの動揺補正が要素技術として必要である。本研究では潮位観測等

表一三 船体動揺検出器の性能

項目	計測範囲	検出精度	応答性
ローリング	±4.5°	静的：±0.5° 動的：±1.0°	500°/秒
ピッチング	±3.0°		
ヒービング 加速度	±5 m ±1 G	加速度感度 5 v/G	500Hz



図一三 ヒービング補正実験装置

種々の海上観測に適用できる船体動揺補正装置の開発を行った。

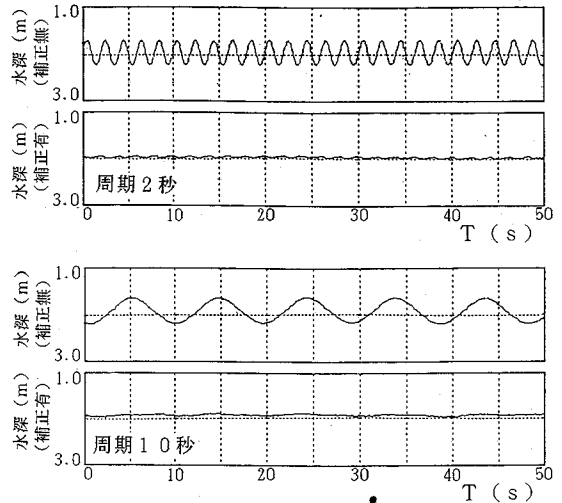
本動揺補正システムは、2軸支持フレーム構造の鉛直ジャイロによって船体のローリング(横揺れ)およびピッチング(縦揺れ)を、また加速度計による船体の上下動加速度の二重積分からヒービング(上下揺れ)を測定し、これらを総合して動揺の検出と補正を行うものである。この原理自体は新しいものではないが、本装置は信号処理のデジタル化による高精度化や、船体旋回時に発生する水平加速度の影響を除去する機能など独自の性能を有している。本装置に使用する動揺検出器の性能を表一三に示す。

これらのうち鉛直ジャイロの性能は実用上の要求を満足するが、加速度計によるヒービング測定は、周期が長くなると積分定数の誤差やノイズの影響によって精度が悪くなるため、所要精度によっては適用範囲が限定されることになる。

上記後者のヒービングの検出および補正性能を把握するため、深淺測量をモデルケースとして模型実験を行った。実験装置を図一三に示す。図中、上下動パイプの下端に取り付けられた超音波式測深機は、水槽上に設置した上下動装置によって水中を振幅25cm、周期約2~40秒の範囲で加振される。計測した水槽底面の水深について

表一四 ヒービングに対する振幅補正結果

周期 (秒)	振幅補正率 F (%)	周期 (秒)	振幅補正率 F (%)	周期 (秒)	振幅補正率 F (%)
2	93	6	93	10	94
4	94	8	94		



図一四 ヒービングによる計測水深の変化例

て検出加速度の2重積分によって動揺補正を行い、その効果を評価する。評価は位相ずれおよび振幅補正率によって行う。ここで振幅補正率Fは、補正なしの場合の水深変動の振幅A₀、補正した場合のそれをA₁として次式で定義する。

$$F = 1 - A_1 / A_0 \quad (2)$$

ここで実用上の許容限界として、位相ずれは10度以下、振幅補正率90%以上として実験結果を整理すると動揺周期は約10秒以下が適用範囲として得られた。この振幅補正率Fの周期約2~10秒の場合の実験結果を表一四に、また水深補正結果の例を周期約2および10秒の場合について図一四に示す(各周期とも上段が補正なしの計測水深であり、下段が動揺補正を行った場合の水深である)。表より振幅補正率は93~94%と高く、また図より水深補正も良好に行われていることがわかる。

上記模型実験における動揺補正性能の実船への適用効果を確認するため、四建所有の測量船(双胴型、全長15.6m、67.2総トン)を用いて実海域の深淺測量実験を行った。実験場所は海底の起伏が比較的少ない長府沖の海域を選定した(図一三参照)。実験場所の詳細な水深分布が既知でないため、ここでは取得した測深データについて動揺補正を行わない場合と行った場合の海底形状の比較により、動揺補正の効果を判定した。なお実験中の海、

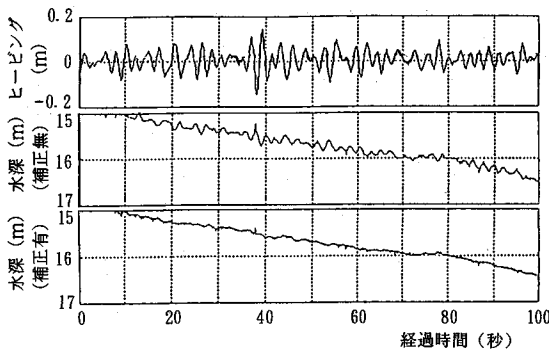


図-15 動揺補正実験結果の例 (船速約10ノット)

気象条件は、風、波浪ともほとんどなく良好であった。

実験結果の一例として、船速約10ノットで観測した場合のヒーピング量、動揺補正の有無による計測水深の差違を図-15に示す。図より振幅数cm~15cm、周期2~4秒程度のヒーピングが計測されており、動揺補正なしの場合にはこのヒーピングの影響が測定水深にほぼそのまま現れているが、動揺補正ありの場合にはヒーピングの影響がほとんど解消されていることがわかる。

上記模型実験および実海域実験より、船体の動揺周期が短い場合には、本方式によって船舶を用いた海上観測の際の動揺補正が実用上可能であると考えられる。

したがって、本動揺補正装置とGPS測位システムを組み合わせて、より精度が高い海域の面的な潮位観測が技術的に可能と考えられる。

しかしながら、これまでの潮位観測は検潮所による観測が基準であり、風浪による海面変動を対象としていない。このため海底近傍から検潮井戸深部に海水を導くなど、風浪による短周期の水面変動の影響を受けにくい構造が採用されている。一方、船舶等による潮位観測は風浪や潮流の影響が避けられない。したがって、これらを考慮した海上潮位の定義、適正な計測のための航行速度や観測回数、取得データの平均化方法(処理時間、移動平均中心等)などの概念を整理し、これらと整合した動揺補正として全体を体系化することが今後のGPS潮位観測総合システムの確立のために必要であろう。このためには、本研究で開発した要素技術を活用して、今後海面変動のデータやこの時の船体動揺のデータを収集、分析し、上記総合システム開発の基礎資料とすることが有効である。

なお、ヒーピングの主要因である波浪は、波高が1~2m以下の場合にはほとんど10秒以下である。したがって、現実的には長周期のヒーピング頻度は少ないと考えられるが、これに対する精度の高い補正方法の確立については今後の課題である。

6. まとめ

海岸線の定点および沖合を含む面的な海域に適用できるGPS総合潮位観測システムの開発を最終目標として、これに必要な基礎的要素技術としてGPS潮位観測装置および船体動揺補正装置を開発した。実海域実験等によって得られた結論および今後の最終システム開発のための課題は以下の通りである。

(1) GPS海上測位システムによって、検潮所における潮位観測と同等の精度で固定点潮位観測を行うことが可能である。ただしGPSアンテナを結合するフロートや船舶等が潮位を忠実に再現し、またGPS電波の遮蔽物がない場所を選定する必要がある。

(2) GPSシステムを搭載した船舶によって海域の任意の場所における潮位観測が可能である。筆者らが開発したGPSシステムは、70MHz帯、出力3wattの無線テレメータを用いており、これにより浅瀬や深淺測量の際のリアルタイム潮位補正を行うことができるものと考えられる。

(3) 上記(2)の海上潮位観測においては、より精度を上げるために船体の動揺補正が重要である。本研究で開発した動揺補正装置は、模型実験や実海域実験の結果、波浪等による短周期の船体動揺に対して有効であると考えられる。

(4) 海上潮位観測は風浪や潮流の影響を受けるなど、検潮所における観測と現象や観測方法が異なる。したがって今後海上潮位の定義、計測方法、取得データの平均化方法、動揺補正などの概念の確立および体系化を図る必要がある。また座標系が異なることによる現行潮位観測とGPS観測の基準レベルの相対関係の明確化、ジオイドの影響評価なども今後の課題として挙げられる。

7. あとがき

面的な海域の潮位観測に適用できる基礎的要素技術としてGPS潮位観測技術と船体動揺補正技術を開発し、その有効性を実海域実験等により検証した。

今後これらを用いて関門海域の潮位、船体動揺等のデータを収集して海上潮位変動の傾向を調査し、関連要素技術を合理的に結合した総合潮位観測システムの確立を図る予定である。

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量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, 外柙保勝, 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) 海上保安庁水路部：海上保安庁水路図誌，日本水路協会，1994.
- 4) 白石直文，沼田淳，須田熙，稲村肇：港湾工学，鹿島出版会，1986.9.
- 5) 土屋淳，今給黎哲朗：GPS 測量と基線解析の手引き，日本測量協会，1992.
- 6) 辻弘道，杉田要，根本恵造，益子栄，後藤清，岩田昭雄：GPS／水準法によるローカルなジオイド比高の決定，国土地理院時報，1991，No.73.
- 7) 国土地理院測地部：座標変換プログラム TKY2WGS，国土地理院技術資料，B・1-No.23，1994.
- 8) 村井俊治：土木学会編，新体系土木工学，51 土木測量，技報堂出版，1980.
- (1995.10.23 受付)

DEVELOPMENT OF FUNDAMENTAL METHODS FOR TIDE LEVEL OBSERVATIONS BY USING GPS

Kenji HAMADA, Mitsuo YAMANAKA, Osamu NAKAI,
Takehiro YAMASHITA, Norikazu SHIMIZU and Koji NAKAGAWA

Although tide level observations are important for surveying tide behavior and marine construction, it is still difficult to obtain these observations in the area where tide flows rapidly and changes occur suddenly. Authors propose an application of the GPS (Global Positioning System) to tide level observations and an equipment for detecting ship oscillation.

The results of field experiments show the method proposed here is applicable for tide level observations. Furthermore, the laboratory and field tests show the equipment developed in this research is effective to detect and compensate the short period oscillation of ships in the case of offshore observation.