

GPSを利用した係留小型船の動揺観測について

OBSERVATION OF AGITATION OF A MOORING FISHING BOAT USING GPS

久保純一¹・渥美洋一²・西村裕毅³

Jun'ichi KUBO, Youichi ATSUMI and Hiroki NISHIMURA

¹非会員 (独)土木研究所寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号)

²正会員 (独)土木研究所寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号)

³非会員 北海道開発局浦河港湾事務所 (〒057-0013 浦河郡浦河町築地1丁目4番23号)

In harbors and fishing ports, a mooring ship might agitate though the surface of the seawater is calm. The agitation of a mooring ship causes damage of hull, cutting of mooring rope, cargo handling difficulty, and these become problems. In order to grasp agitation, observation of agitation is performed. If the case where the limit of agitation must be defined politically when minute agitation is a problem is assumed, it is necessary to establish the highly precise observation technique.

As one of the methods, there is observation of agitation using GPS. This method analyzes three dimensional of agitation of a mooring ship by measuring the coordinates of three points on the hull by GPS. We executed the GPS observation and the video observation at the same time, and compared the results and evaluated the observation method. As a result, the utility of the GPS observation was confirmed.

Key Words : Fishing boat, agitation of a mooring ship, GPS observation

1. はじめに

外郭施設の整備が進み計算上の静穏度が高まっているにもかかわらず、係留小型船の動揺被害(係留・荷役障害、船体や係留施設の衝突による損傷)が生じている港湾・漁港があり、これらの港では早急な対策が要望されている。

船体動揺の対策を検討する上では、数値シミュレーションによる動揺解析が有効で、港湾における貨物船等の動揺被害のメカニズムについては解明が進んでおり動揺計算の例も豊富だが、漁船のような小型船では共振周期等が違い、既往の解析手法のパラメータ等がそのまま小型船に適用できるか不明確な部分がある。

このような被害の対策を検討するためには、船体動揺現象を明らかにするとともに、船体動揺に関するシミュレーションを精度よく行う技術を開発する必要がある。

このため動揺現象を正確に把握する観測手法を検討し、解析手法の検討に反映できる現地観測データを取得することとした。本報では観測手法の検討と現地観測結果について述べるものである。

2. 現地観測の手法の検討

船体動揺の原因究明や対策検討には、現地で起

こっている現象を正確に把握する必要がある。船体動揺に関する現地観測項目としては、波浪、風、船体自体の動揺等があるが、波浪と風の観測手法は既に確立していることから、船体動揺量を高精度で計測する手法を検討した。

(1) 船体動揺観測手法の種類

船体動揺の観測手法には、以下のものがある。

(a) ビデオ撮影

- ・船体にマーカーを設定し、それを撮影したビデオ画像から動揺変位を読み取る。
- ・使用実績は多い。
- ・夜間、荒天や障害物通過等の視程障害が生じた場合、欠測となる。
- ・遠近誤差が生じる(2方向以上の同時撮影で補正は可能)。
- ・ソフトウェア又は人力により動画から1コマずつ動揺量を読み取るため、処理に手間がかかる。
- ・一般的には並進成分のみ計測する。回転成分の計算は難しい。ただし、最近の画像処理ソフトウェアには、2方向から撮影した動画をリアルタイムで解析し動揺6成分を求めるなど能力が向上しているものもある。

(b) 3次元加速度計

- ・船体の3次元加速度を計測し、加速度を時間で2回積分して変位量を求める。
- ・装置がコンパクトで、船体への設置が容易。

- ・夜間や荒天等の視程障害時も観測できる。

(c) GPS

- ・船体上の点の空間座標を GPS で計測し、船体の重心等の変位量を計算で求める。重心の 3 次元の動きを計測するには、船上の 3 点の観測が必要。
- ・RTK-GPS 等の干渉測位方式を用いれば、高精度な観測が可能。
- ・夜間や荒天等の視程障害時も観測できる。
- ・複数の衛星電波(位置・時刻等の情報を含む)から観測位置を計算するため、衛星電波を遮る物体が近くにあると、観測不能。

このほか、GPS と加速度計を組み合わせる方法などもあるが、事前に 3 次元加速度計による観測手法を検討した際、当時用いた加速度計では小振幅かつ長周期(概ね 50cm 以下で 20sec 以上)の動揺で誤差が大きくなることが確認されたことから、3 次元加速度計を用いる方法は検討の対象から外した。

小型船の微小な動揺が問題となる場合や政策的に動揺量の上限目標値を定めるような場合を想定すると、より正確に実態を把握する必要があることから、本稿では高精度な観測が期待できる GPS によることとした。

(2) GPSの観測手法

GPS 測位の種類・特徴は図-1 のとおりである。

船体動揺観測に用いる測位方式は、高い測位精度が必要なことや観測対象が動体であることから、Kinematic 測位となる。Kinematic 測位の中では測量などに用いられる RTK-GPS が一般的だが、ここで

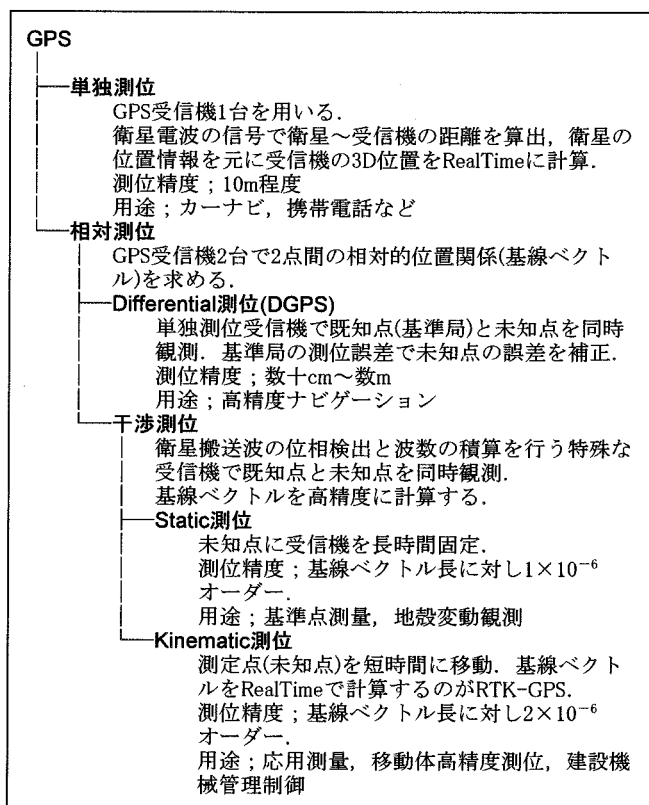


図-1 GPSの分類

はより高精度(基線ベクトル長(既知点と未知点との距離)に対し 2.0×10^{-7} オーダー)で、動体への追従性に優れる RTD(Real Time Dynamics)を用いることとした。RTK-GPS と RTD は観測に使用する器械は同じだが、観測データの処理方法(基線解析アルゴリズム)が異なる。両者の主な違いは以下のとおりである。

(a) RTK-GPS

- ・初期化(衛星電波から観測箇所の位置を求める。20～30 秒必要)して位置を求めた後、エポック(GPS の単位時間)毎に差分で位置を計算する。一時的に衛星電波が途絶えると、電波復帰後に再び初期化が必要となる。初期化中は欠測となる。
- ・ノイズ軽減のため、観測値にフィルタをかける(過去の軌跡から現位置を予測し、観測値を補正)。このフィルタがあだとなり、急停止・急発進や急な方向転換を正確に捕捉できない場合がある。

(b) RTD

- ・エポック毎に観測箇所の位置を求めるので RTK-GPS のような初期化は必要ない。このため一時的に衛星電波が途絶えても、RTK-GPS のような初期化による欠測は生じない。
- ・RTK-GPS のようなフィルタをかけないので、急停止・急発進や急な方向転換も正確に捕捉できる。

(3) GPSによる動揺観測・解析の流れ

a) 現地観測

他の Kinematic 測位と同様に、RTD で測位するには未知点(観測局)と既知点(基準局)の両方に GPS アンテナを設置し同時観測を行う。後述のとおり、船体の重心の 3 次元の動揺量は、船上の観測局 3 点の位置から計算で求める(ただし各観測局の基準局は共用可)ので、船体動揺の観測には GPS 受信機を 4 台(観測局 3+基準局 1)使用することとなる。

船体上の観測局設置箇所には、衛星電波の受信状態を良好に保つよう、なるべく周囲に衛星電波を遮蔽(欠測となる)・反射(マルチパスで誤差が発生)するものが少ない場所を選ぶ必要がある。また、計測後の計算上の誤差を考えると、観測局相互の距離を大きくとることが望ましい。更に長時間観測の場合、外海の状態の変化による急な出漁に器械の取外しが間に合わないことがあるため、船主から操業の邪魔にならない場所への設置を求められる場合もある。

b) 観測データの解析

現地観測後、GPS 受信機の内蔵メモリに蓄積された観測データを PC に取り込み、解析ソフトで処理すると、各観測局の時系列の 3 次元座標値(基準局を原点とし、南北、東西、上下の 3 軸)が得られる。この解析には既知点に設置した基準局が必要だが、観測地点の近傍に既知点がない場合、まず

近隣の電子基準点(国土地理院がインターネットでデータを公開)を既知点として基準局の位置を解析し、解析により確定した基準局を用いて各観測局の位置を解析する、という2段階の解析を行うことができる。

c) ノイズの除去

GPS による観測値は衛星電波の状態によりある程度ノイズを含むため、このノイズを除去する必要がある。今回は以下のように処理した。

まず、船体に固定した3つの観測局相互の距離は不変であるため、観測局間距離の平均値を設定して、データ測得間隔毎の各観測局間距離と比較し、両者の差が許容誤差(GPS 受信機の精度などから設定)の範囲を超えるデータを、異常値と見なし削除した。また、実際の船体の鉛直方向の動きは激しくないと考え、過去の値と比べ大きな上下動があった場合、そのデータを異常値と見なし削除した。

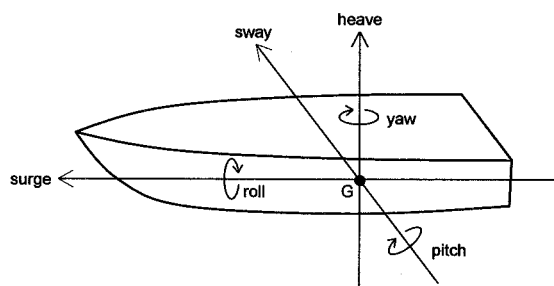


図-2 船体動揺6成分

d) 動揺量の計算

船体動揺 6 成分(並進 3 成分: Surge, Sway, Heave, 回転 3 成分: Roll, Pitch, Yaw 図-2 参照)は観測局のデータ測得間隔毎の座標データから計算で求める。

まず、データの扱いやすさを考慮し、各観測局の座標を、基準局を原点とした南北-東西-上下の座標系から、船体の重心を原点とした Surge 方向-Sway 方向-Heave 方向の座標系へ変換する。

動揺量のうち並進 3 成分は、船体の重心の移動量から求める。船体内に設定した重心と3つの観測局との距離は不変であることから、次式が成り立つため、この式を解けば船体の重心の座標が求まる。なお、この

連立方程式は非線形であるため、反復逐次計算(ニュートン法)で解を求めることとなる。

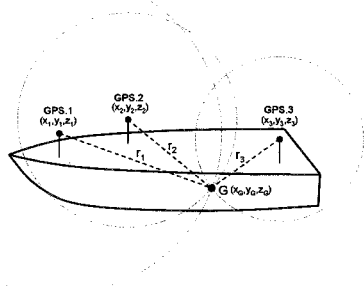


図-3 重心座標の算出方法

$$\begin{cases} (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2 = r_1^2 \\ (x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2 = r_2^2 \\ (x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 + (z-z_3)^2 = r_3^2 \end{cases}$$

ここに x, y, z ; 重心の座標

x_i, y_i, z_i ; i 番目の観測局の座標

r_i ; i 番目の観測局と重心との距離

回転 3 成分(Roll, Pitch, Yaw)は、重心と各観測局の位置関係から計算できる。

3. 現地観測

(1) 古平漁港(平成18年11月)

a) 現地観測

来襲波の長周期成分によると思われる船体動揺が問題となっている古平漁港(北海道古宇郡古平町)において、以下のとおり長時間連続観測を試みた。

観測日時: 平成 18 年 11 月 22 日 14:00 ~ 平成 18 年 11 月 24 日 13:00

観測場所: 古平漁港港内

対象船舶: 地元漁船(総トン数 9.8 トン)

対象船は、観測開始時は時化による船体動揺被害が予想されたため、船尾を岸壁、船首を沖に向け(縦づけ)、動揺で船体が岸壁に衝突しないよう係留索を長くにとって岸壁から離していたが、海象が回復したため 24 日未明に沖合へ出漁し、帰港後は通常どおり舷側を岸壁に向け係留(横づけ)した。

基準局及び観測局は、GPS 受信機、アンテナ及び長時間観測用外付けバッテリーで構成される。基準局は、陸揚げ等の作業の支障とならないように岸壁から離れた場所に設置した。観測局は、観測中の出漁が予想されたため、操業の支障とならないよう全て船橋楼の上に置くこととし、アンテナは固定用金具で、受信機本体と外付けバッテリーはロープで、固定した。基準局と観測局の測位は 0.1 秒間隔(10Hz)で行った。

動揺観測は、GPS 受信機の内蔵メモリと外付けバッテリーの容量等から約 47 時間で終了した。

b) 観測データの解析～動揺量の計算

・観測データの解析

観測後の解析で、基準局のデータにノイズ・欠測が非常に多く観測局の精度に悪影響を及ぼすことがわかり、代替として現場から約 4km 離れた電子基準点“積丹”の 1 秒間隔データを利用した。このため、観測データの測得間隔は電子基準点にあわせ 1 秒となった。このノイズ等の原因は、基準局設置位置が上屋に近すぎ、上屋による遮蔽やマルチパス等で衛星電波を正常に受信できない時間が多かったものと思われる。ただ、電子基準点を使ってもノイズ・欠測が多く残ったため、これ以降はノイズ等が少なく連続してデータを測得できた部分を選んで処理を行った。

・ノイズの除去

各観測局間距離の許容誤差を GPS の精度、上下動の許容値を 50cm 以下とし、前述の方法で異常値を削除した。この結果、観測時間 3 時間の測得率は縦づけ時 98.31%、横づけ時 84.50% となり、特に横づけ時は欠測がある程度連続するため、欠測部分の補間もやや難しい状態となった。

測得率低下の原因としては、対象漁船を係留していた岸壁の防風雪施設が考えられる。防風雪施設は積雪寒冷地の漁港における就労環境の改善等のため風・雪を防ぐ壁や屋根を有する上屋に類似した施設で、岸壁法線から 1m 陸側に設置されている。観測機器設置・撤去時には GPS 受信機が観測に必要な数の衛星電波を捉えていることを確認したが、縦づけ(≒岸壁から離れている)時の測得率が横づけ(≒岸壁に近い)時の測得率より高いことから、衛星の位置によっては防風雪施設の影響を受ける場合があると思われる。

・動揺量の計算

船体動揺 6 成分(並進 3 成分: Surge, Sway, Heave, 回転 3 成分: Roll, Pitch, Yaw)は観測局の 1 秒間隔の座標データから計算で求めた。

c) 観測結果

例として、横づけ時の動揺の時系列グラフを図-4 に示す。ところどころに欠測が見られるが、周期 10 秒前後の細かな振幅と周期 120~150 秒で振幅 1m 程度の Surge が読み取れる。

(2) 三石漁港(平成19年10月)

a) 現地観測

三石漁港(北海道日高郡新ひだか町)において、係留中の漁船を対象に観測データを取得した。三石漁港は船体動揺の問題を抱えており、新港地区では、低気圧・台風時の動揺で陸揚げ作業・休憩に支障がでている。旧港地区では、準備作業に支障がでているが、係留できない程ではない(写真-1 参照)。

観測の概要を表-1 に示す。

新港地区の外来漁船は横づけしていたが、旧港地区の地元漁船は縦づけし動揺で船体が岸壁に衝突しないよう係留索を長くにとって船体を岸壁から離していた。

新港及び旧港の船上の観測局 3 点で、0.1 秒間隔(10Hz)で測位した。基準局は、港内の適当な場所に既知点がないことから、新港地区の岸壁敷の任意の点に設置した。

なお、気象・海象観測データは北海道開発局浦河



写真-1 三石漁港

表-1 観測概要

観測日時	平成 19 年 10 月 20 日	
	10:16~12:41	13:40~15:23
観測場所	新港-4.5m 岸壁	旧港-3.5m 岸壁
対象船舶	外来漁船 19GT 全長24.8m, 幅5.4m	地元漁船 19GT 全長20.0m, 幅4.5m
気象	曇り~雨	
風象	3.1~5.1m/s SE~SSE	1.4~3.7m/s NW~WNW
海象	(港外) 0.7~0.9m	
	$H_{1/3}$ 0.06~0.08m	0.07~0.09m

港湾事務所によるものである。また同事務所では GPS による動揺観測と同時刻にビデオ撮影による動揺観測も行っており、比較のためこのデータを使用した。

b) 観測データの解析~動揺量の計算

・観測データの解析

既知でない場所に基準局を設置したことから、まず近隣の電子基準点“三石”の 30 秒間隔データを用いて基準局の位置を解析し、解析により確定した基準局を用いて各観測局の 0.1 秒間隔の位置を解析する、という 2 段階の解析を行った。

・ノイズの除去

古平漁港と同様に、各観測局間距離の許容誤差を GPS の精度、上下動の許容値を 50cm 以下とし、前述の方法で異常値を削除したが、細かいデータのバラツキは残るため、更に 10Hz(0.1 秒間隔)のデータを平均して 1Hz(1 秒間隔)にまとめた。

この結果、観測時間約 1 時間の測得率は新港地区で 99.99%、旧港地区で 98.97% となり、古平漁港での観測よりも良好であった。これは三石漁港の観測場所には防風雪施設など衛星電波を遮断・反射す

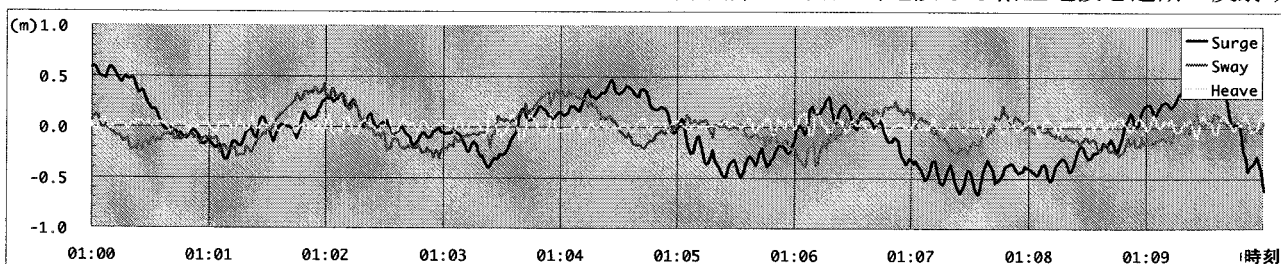


図-4 観測結果(2006/11/24 01:00~01:10)

るものがないためと考えられる。

最後に、ここまでの処理で欠けた時刻のデータを補間した。今回は欠測が少ないことから、前後の値から比例配分で欠測部分の値を求めた。

・動揺量の計算

船体動揺 6 成分(並進 3 成分: Surge, Sway, Heave, 回転 3 成分: Roll, Pitch, Yaw)は観測局の 1 秒間隔の座標データから計算で求めた。

c) 観測結果

①動揺の時系列グラフ

GPS による観測結果の例を図-5～図-6 に示す。

新港地区の外来船では、Surge に周期約 10 秒と概ね 2 分前後、振幅 0.5m 程度の動揺が読み取れる。旧港地区の地元船では、Surge に周期 2 分前後の動揺が見られ、動揺の振幅は係留索を長くとしているため大きかった。

②ビデオとの比較

GPS とビデオ観測との結果の比較を図-7 に示す。

Surge については、両者は概ね一致している。Sway は、ビデオが船首を撮影した画像から動揺量を読み取っており、GPS の動揺計算位置を船首にすると、概ね一致した。ビデオの動揺量は遠近誤差(ビデオカメラから遠いと動揺量が小さく、近いと動揺量が大きく映る)を補正していないものであることを考慮すると、妥当な結果と考えられる。

③動揺スペクトル

新港地区について港外と岸壁前面の水位のスペクトルを図-8 に、船体動揺のスペクトルを図-9 に、

それぞれ示す。また、動揺スペクトルと水位変動(岸壁前面)のスペクトルの応答関数を図-10～図-12 に示す。

水位のスペクトルを見ると、新港地区では概ね周期 15 秒以下(0.06Hz 以上)の成分が港内で減衰しているが、それ以上の周期では減衰の度合いが低い。

動揺について見ると、Surge は時系列グラフからも読み取れるとおり周期約 10 秒(0.1Hz)と 100 秒(0.01Hz)付近のピークがあった。周期 10 秒は港内水位の 0.1Hz 付近のピークに符合するものの、港内水位には 100 秒付近の目立った変動が見られないが、応答関数を見るとやはり 0.01Hz 付近にピークがあることから、100 秒付近の動揺は係留系の Surge の固有周期によるものと考えられる。Sway は、Surge よりやや周期が短い 25～50 秒(0.02～0.04Hz)付近にピークがある。これは港内水位のピークとも符合するが、Sway の復元力が係留索と防舷材であるのに対し、Surge の復元力はばね定数が小さい係留索のみであるため周期が長くなったことによるのも一因と考えられる。Heave は、応答関数からわかるとおり 0.15Hz 以下(6 秒以上)の部分で概ね港内の水面変動に一致している。

図示していないが、旧港地区では、Surge には新港地区と動揺に周期約 10 秒(0.1Hz)と 100 秒(0.01Hz)付近のピークが見られ、Sway には周期 100 秒以下では Surge と大きな差は見られなかった。これは、旧港地区では漁船を岸壁から離しているの

で防舷材が働かず、どちらの方向に対しても復元力

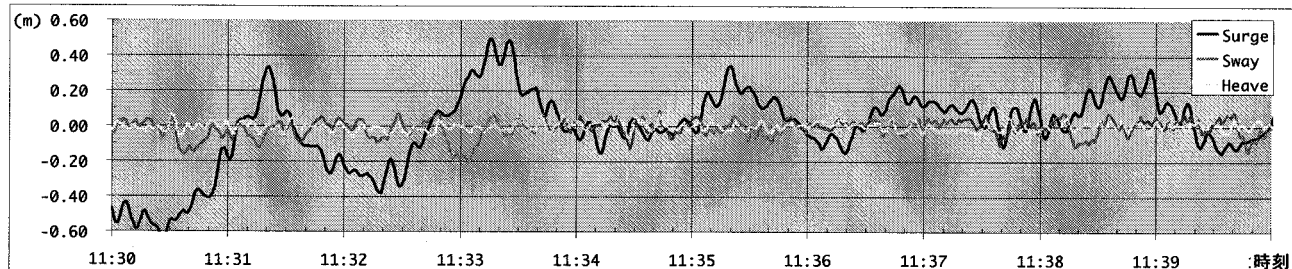


図-5 新港地区観測結果(2007/10/20 11:30～11:40)

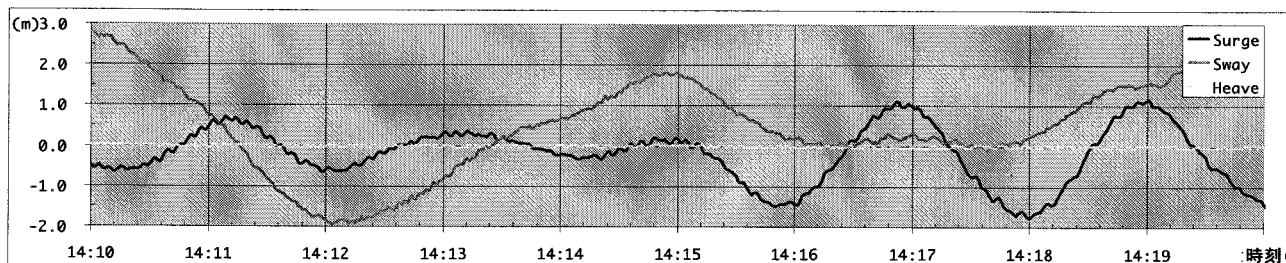


図-6 旧港地区観測結果(2007/10/20 14:00～14:10)

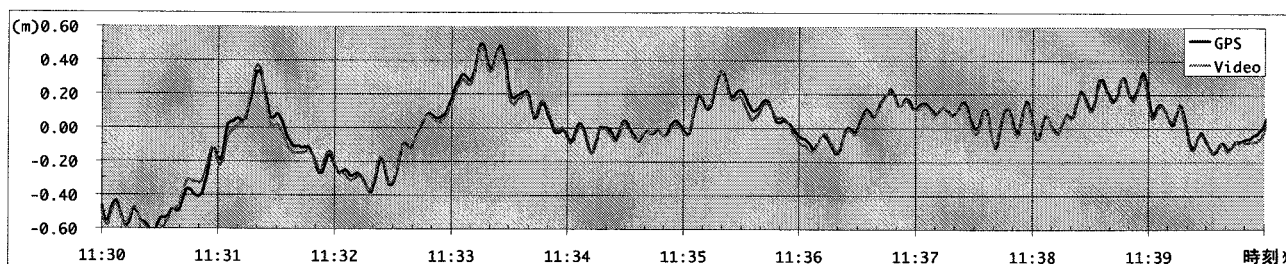


図-7 観測値の比較(新港 Surge)

は係留索のみとなったことによると考えられる。

4. 結論

本研究における主要な結論は次のとおりである。

(1) 現地観測

古平・三石の両漁港で GPS により船体動揺 6 成分 (Surge, Sway, Heave, Roll, Pitch, Yaw) が得られた。古平では夜間・沖合操業を含む約 2 日間の連続観測も可能であった。ただし、GPS 設置箇所周辺の状況 (衛星電波を遮蔽・反射するものの有無) 及び観測値に含まれるノイズ等の扱いに注意が必要である。

(2) 観測値の比較

三石での観測結果について、GPS とビデオの値を比較したところ、両者は概ね一致しており、ビデオの値が遠近誤差 (動揺が、カメラから遠いと小さく、近いと大きく映る) を含むことを考慮すると、GPS はビデオ撮影と同等の観測精度を期待できることが確認できた。

(3) 船体動揺に影響を及ぼす要因

三石漁港新港地区における船体動揺と前面及び港外の水位変動の観測結果から、長周期の周期帯にエネルギーが広く分布する港内水位により船体動揺が起こり、特に surge の固有周期と思われる動揺が顕著に表れたと考えられた。

参考文献

- 1) 長谷一矢, 久保純一, 窪内篤: GPS を用いた係留小型船舶の動揺観測—ビデオ観測と GPS 観測の比較とその評価—, 寒地土木研究所月報 No.639, pp.10-21, 2006

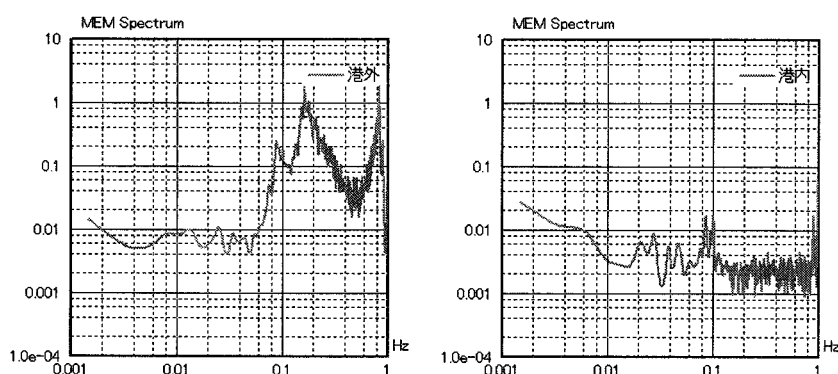


図-8 水位変動スペクトル

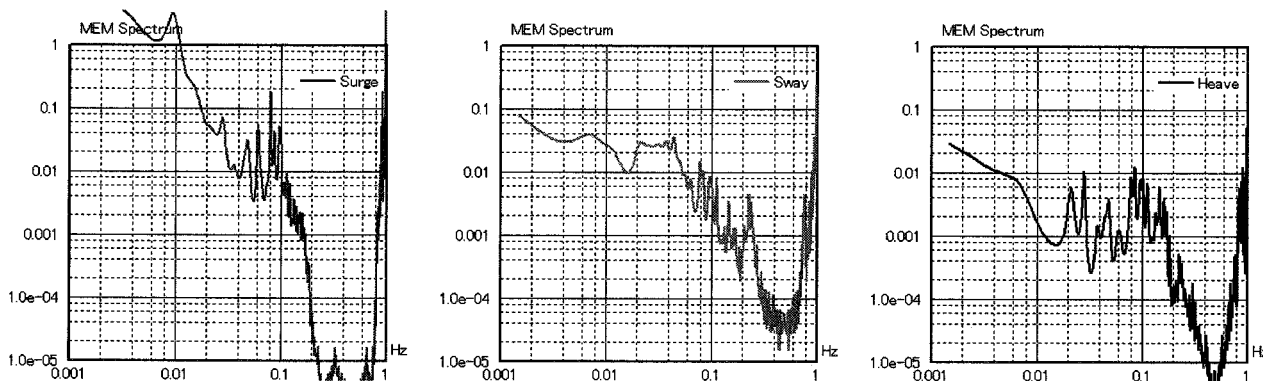


図-9 船体動揺スペクトル (並進3成分)

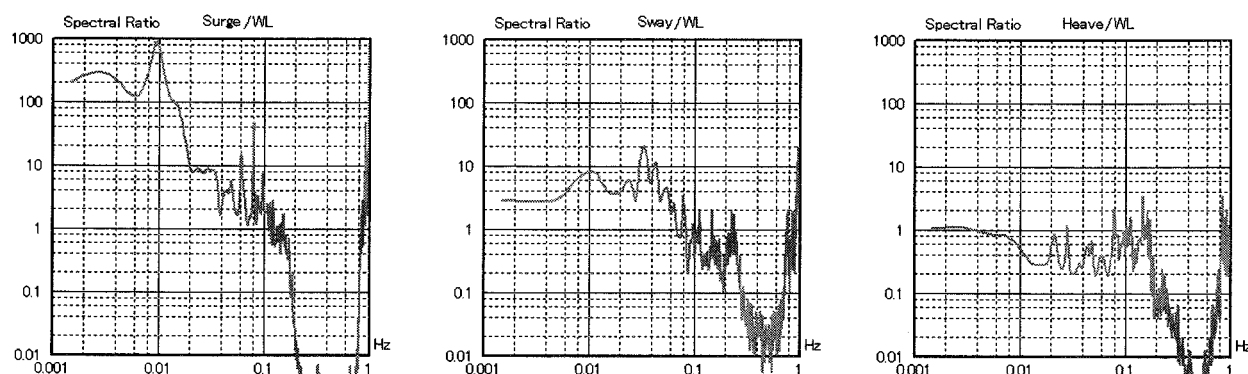


図-10 応答関数 (並進3成分/港内水位)