

三次元PTVを用いた係留漁船の動揺の現地観測

FIELD OBSERVATION OF MOORED FISHING BOAT MOTIONS USING A 3D PTV ALGORITHM

佐藤典之¹・渡部靖憲²・秀島賢保³・近藤浩文⁴・佐伯 浩⁵

Noriyuki SATO, Yasunori WATANABE, Yoshiyasu HIDEISHIMA, Hirofumi KONDO
and Hiroshi SAEKI

¹正会員 工修 北日本港湾コンサルタント(株)技術部 (〒003-0029 札幌市白石区平和通2丁目北11-18)

²正会員 工博 北海道大学大学院工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

³学生会員 北海道大学大学院工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

⁴北海道大学大学院工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

⁵フェロー 工博 北海道大学大学院工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

The field measurement of moored ship motions is necessary to decrease troubles in cargo handling. But it was difficult to measure ship motions accurately by using accelerometer.

In this paper, a 3D PTV algorithm is applied to field observation of moored fishing boat motions. As a result, six-directional ship motions are measured accurately. This observation shows that heaving, rolling and pitching have only one energy peak which is the same period as energy peak of sea wave. Surging, swaying and yawing have two energy peaks, and the energy of peak in long period is higher than the energy of peak in short period. These two peaks are the same period as peaks of sea wave.

Key Words : Field observation, ship motions, 3D PTV, troubles in cargo handling

1. はじめに

近年、長周期波が原因で発生する荷役障害や係留索切断などの被害が全国各地の港湾で報告され、問題となっている。係留船舶の動揺による被害への対策を考える上では、船体動揺の原因を明らかにする必要があるが、そのためには船体動揺を精度良く測定することが不可欠である。しかし、従来から用いられている加速度計を用いた測定方法では、運動成分に変換するために2度の積分操作が必要となり、特に長周期成分についての変換精度に問題が残されている。これに対し、ビデオカメラ等を用いた画像解析による方法¹⁾、光波位置測定器と傾斜計を併用する方法²⁾、GPSを用いる方法³⁾など、6自由度の船体動揺成分を測定するための研究がなされてきているが、現地への適用例は極めて少ないのが実情である。

奥村ほか⁴⁾は、砕波帯や構造物近傍での三次元流速運動の計測方法として、動画処理法である三次元PTV法(粒子追跡法)を提案しており、室内実験において高精度で多粒子の流速計測が可能であることを実証している。この手法は、室内実験を対象として開発されたものであるが、計測方法を工夫すれば

屋外での計測にも応用が可能である。よって、船体動揺測定にこの手法を応用すれば、6自由度の運動成分を精度よく測定できる可能性がある。

そこで本研究では、漁港内に係留されている漁船の動揺観測に三次元PTV手法を応用し、漁船に設置した多点の観測点の運動を計測した。得られた計測結果をもとに船体重心位置での6自由度の運動を求め、対象漁船の動揺特性について考察を行った。

2. 三次元PTVを用いた動揺観測法

三次元PTV法においては、複数台のビデオカメラで撮影した動画を画像処理することによって測定点の三次元運動を測定する。三次元空間上の実座標 (x, y, z) は、2台のカメラの画像座標 $(x_1, z_1), (x_2, z_2)$ の関数として表される。この関数形としては、カメラレンズの屈折や視軸のずれによる問題を低減するために、(1)~(3)式に示す3次代数方程式を仮定した。3次代数方程式に現れる定数 $(a_0, a_1, \dots, c_{19})$ はキャリブレーション、すなわち動揺を測定する領域内において実座標が既知の点を20点以上撮影し、画像座標と実座標との関係から最小二乗法により決定する。

$$\begin{aligned}
x = & a_0 x_1 z_1 x_2 + a_1 x_1 |x_1| z_1 + a_2 x_1 |x_1| x_2 + a_3 z_1 |z_1| x_1 \\
& + a_4 z_1 |z_1| x_2 + a_5 x_2 |x_2| x_1 + a_6 x_2 |x_2| z_1 + a_7 x_1^3 + a_8 z_1^3 \\
& + a_9 x_2^3 + a_{10} x_1 z_1 + a_{11} x_1 x_2 + a_{12} z_1 x_2 + a_{13} x_1 |x_1| \\
& + a_{14} z_1 |z_1| + a_{15} x_2 |x_2| + a_{16} x_1 + a_{17} z_1 + a_{18} x_2 + a_{19} \\
& \dots \dots (1)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
y = & b_0 x_1 z_1 x_2 + b_1 x_1 |x_1| z_1 + b_2 x_1 |x_1| x_2 + b_3 z_1 |z_1| x_1 \\
& + b_4 z_1 |z_1| x_2 + b_5 x_2 |x_2| x_1 + b_6 x_2 |x_2| z_1 + b_7 x_1^3 + b_8 z_1^3 \\
& + b_9 x_2^3 + b_{10} x_1 z_1 + b_{11} x_1 x_2 + b_{12} z_1 x_2 + b_{13} x_1 |x_1| \\
& + b_{14} z_1 |z_1| + b_{15} x_2 |x_2| + b_{16} x_1 + b_{17} z_1 + b_{18} x_2 + b_{19} \\
& \dots \dots (2)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
z = & c_0 x_1 z_1 x_2 + c_1 x_1 |x_1| z_1 + c_2 x_1 |x_1| x_2 + c_3 z_1 |z_1| x_1 \\
& + c_4 z_1 |z_1| x_2 + c_5 x_2 |x_2| x_1 + c_6 x_2 |x_2| z_1 + c_7 x_1^3 + c_8 z_1^3 \\
& + c_9 x_2^3 + c_{10} x_1 z_1 + c_{11} x_1 x_2 + c_{12} z_1 x_2 + c_{13} x_1 |x_1| \\
& + c_{14} z_1 |z_1| + c_{15} x_2 |x_2| + c_{16} x_1 + c_{17} z_1 + c_{18} x_2 + c_{19} \\
& \dots \dots (3)
\end{aligned}$$

この手法を用いれば、原理的に2台のカメラの画像があれば実座標を決定することができるが、多点の同時観測を行う場合、図-1に示すように2台のカメラのみの情報では実座標が(a,b)と(a',b')のどちらの組み合わせになるのか判別できない場合がある。また、測定点の重なりにより実座標の抽出が困難となる場合もある。このような誤認識を解消するため、3台のカメラを用いて、2台ごとの画像座標の組み合わせで3つの実座標を計算し、3つの実座標の誤差が設定した基準値以内に収まる場合にのみ、その結果を採用することとした。

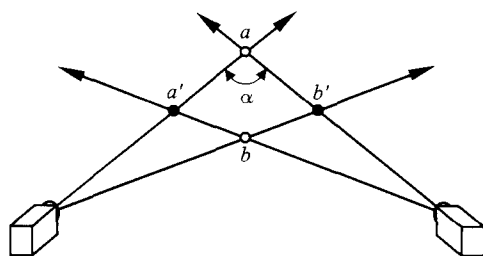


図-1 2台のカメラで検出される実座標

本手法による実座標の測定精度は、3台のカメラの配置と画角に左右される。カメラの配置では、図-1に示す測定点aに対する2台のカメラの挟角αに依存し、挟角が小さくなるほど測定精度が低下する。Kieft et al.⁵⁾によると、挟角が20°以上になれば実座標の測定誤差が一定値に収束することが示されている。また、カメラの画角については、画像座標がカメラの画素数単位の座標となるため、測定点全体を画面内にできるだけ大きく収めるように設定すれば分解能が向上して測定精度が向上する。

本手法による測定結果は、奥村ほか⁴⁾が実施した室内実験によって、

①二次元水路内で水粒子の軌道を観測した結果、

完全な断面二次元的な楕円運動をしていること
②楕円軌道の長軸と短軸の長さを微小振幅波理論による理論値と比較したところ、95%以上の精度で再現していること

という点から、十分な精度を確保していることが実証されている。したがって、現地観測においてこの精度を確保するためには、カメラの配置と画角設定およびキャリブレーションの精度向上が重要な要素となる。

以上の方法で測定した船体上の多点の動揺測定データから、任意の3点の組み合わせを使って(4)式により船体重心位置での6自由度の運動を求める。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここに、

$$\begin{aligned}
A_{11} &= \cos S_5 \cos S_6 \\
A_{12} &= \sin S_4 \sin S_5 \cos S_6 - \cos S_4 \sin S_6 \\
A_{13} &= \cos S_4 \sin S_5 \cos S_6 + \sin S_4 \sin S_6 \\
A_{21} &= \cos S_5 \sin S_6 \\
A_{22} &= \sin S_4 \sin S_5 \sin S_6 + \cos S_4 \cos S_6 \\
A_{23} &= \cos S_4 \sin S_5 \sin S_6 - \sin S_4 \cos S_6 \\
A_{31} &= -\sin S_5 \\
A_{32} &= \sin S_4 \cos S_5 \\
A_{33} &= \cos S_4 \cos S_6
\end{aligned}$$

であり、(X,Y,Z)は船体の重心位置を原点とした測定点の実座標、(x,y,z)は船体の重心位置を原点とした測定点の初期の実座標、S₁～S₆はそれぞれ、S₁:サージング、S₂:スウェイング、S₃:ヒービング、S₄:ローリング、S₅:ピッチング、S₆:ヨーイングである。

この方法によって、多点の測定データから3点の組み合わせを変えることで複数の重心位置での運動を計算することができる。それらの平均値を求めることで、測定精度の向上を図ることが可能となる。

3. 現地観測

(1) 観測の概要

現地観測は、図-2に示す北海道の噴火湾湾口部に位置する砂原漁港において実施した。砂原漁港においては、筆者ほか⁶⁾が昨年度実施したアンケート調査によって、長周期波によると思われる荷役障害が発生していることを確認している。

現地観測は、高波浪が来襲している時期をねらい、2003年9月30日16:00～17:00の約1時間に渡って実施した。動揺観測は図-3に示す○で囲んだ岸壁に係留されていた10t型の漁船で実施し、加速度計による測定結果と比較するために、船体重心位置に3成

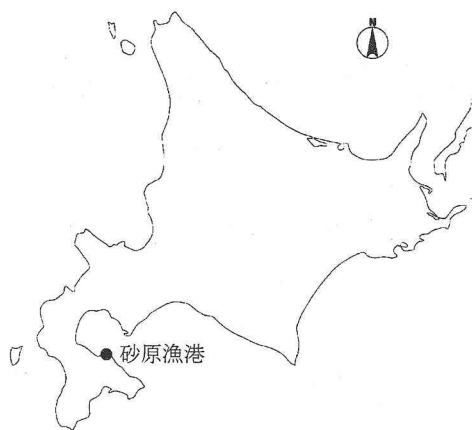


図-2 砂原漁港の位置

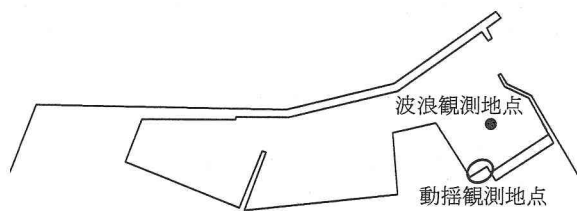


図-3 動揺と波浪の観測地点

分の加速度計を設置した。同時に、港内波浪との応答特性を調べるために、図-3に示す位置に水圧式波高計を設置し、波浪観測を行った。

(2) 観測方法

動揺観測に先立ち、図-4に示すように岸壁上に3台のビデオカメラを設置してキャリブレーションを実施した。キャリブレーションは、図-4に網掛けで示す動揺測定領域(幅3m、長さ16m、高さ2m)を1m間隔で格子状に分割し、全ての格子点を撮影することによって実施した。撮影した格子点は三次元座標が既知であるので、得られた画像座標との位置関係から(1)~(3)式の定数を最小二乗法により求めた。次

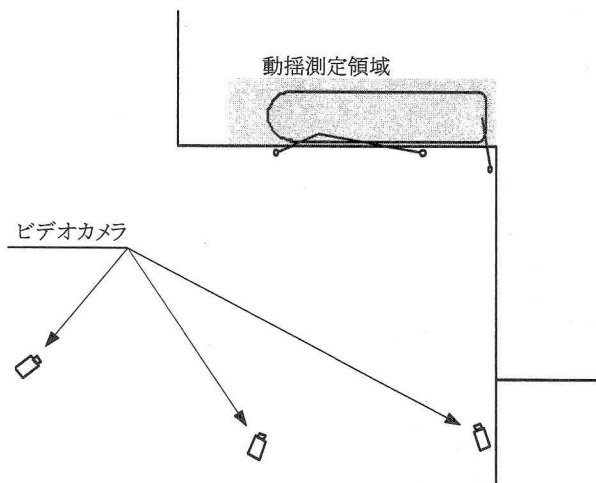


図-4 動揺測定領域とビデオカメラの設置位置

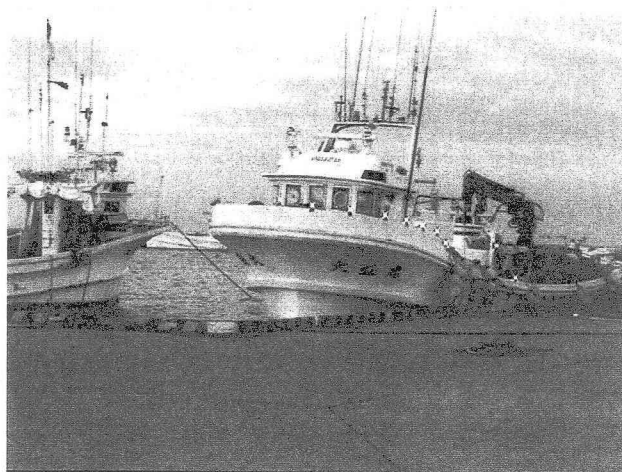


図-5 動画から抽出した静止画の一例

いで同地点に係留した10t型の漁船に、動揺測定点として13個の電球を取り付け、3台のビデオカメラにより撮影した。撮影した動画から0.5秒間隔で静止画を抽出し、(1)~(3)式を用いて各動揺観測点の3次元運動の軌跡を計算した。動画から抽出した静止画の一例を図-5に示す。

(3) 観測結果

図-6に13点の測定点のうち、●で示す点の10秒間の軌跡を示す。図-6より、係留索や防舷材に拘束さ

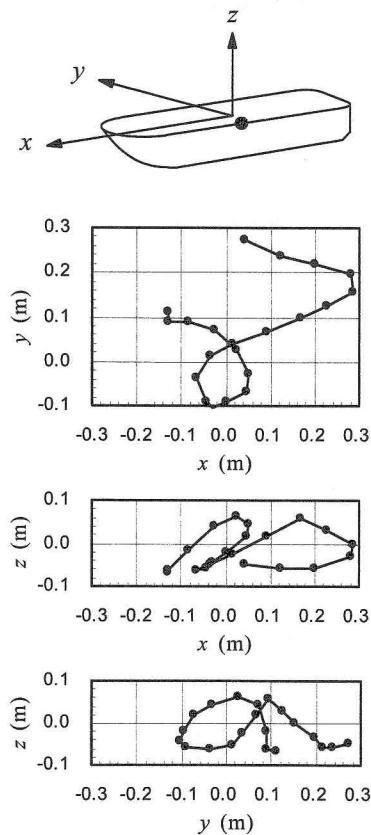


図-6 観測点の運動の軌跡

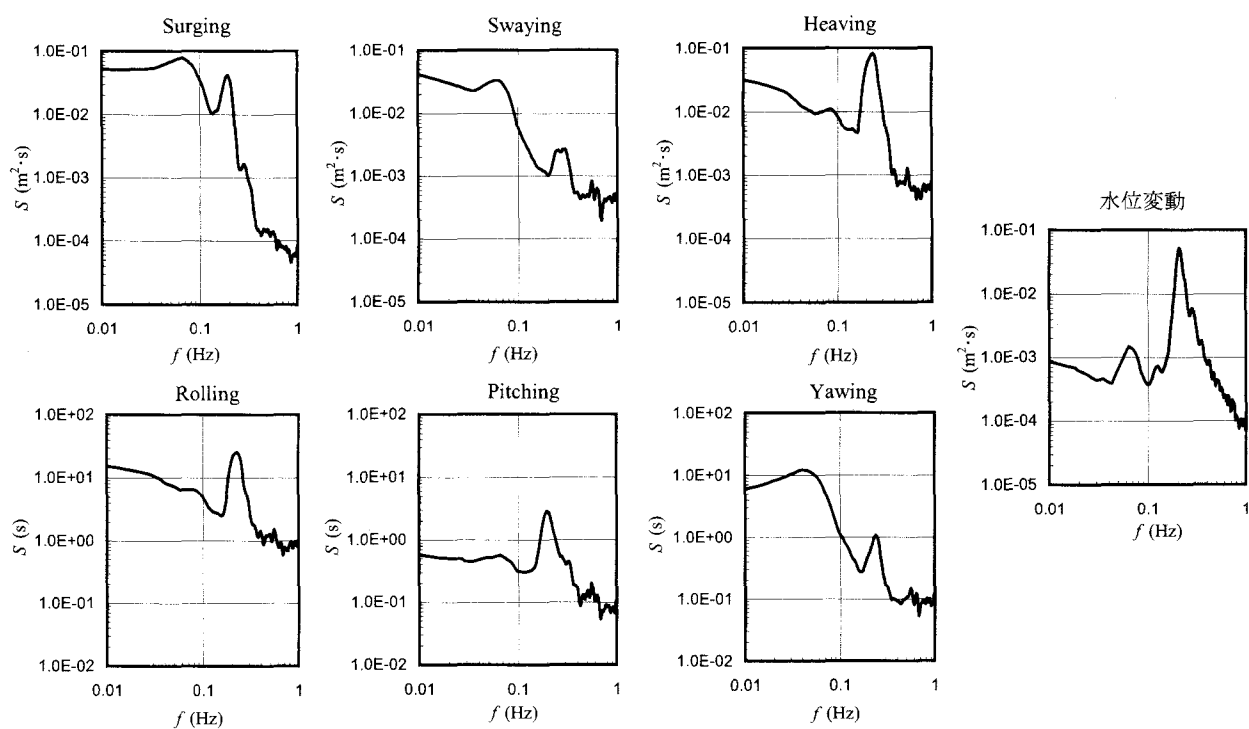
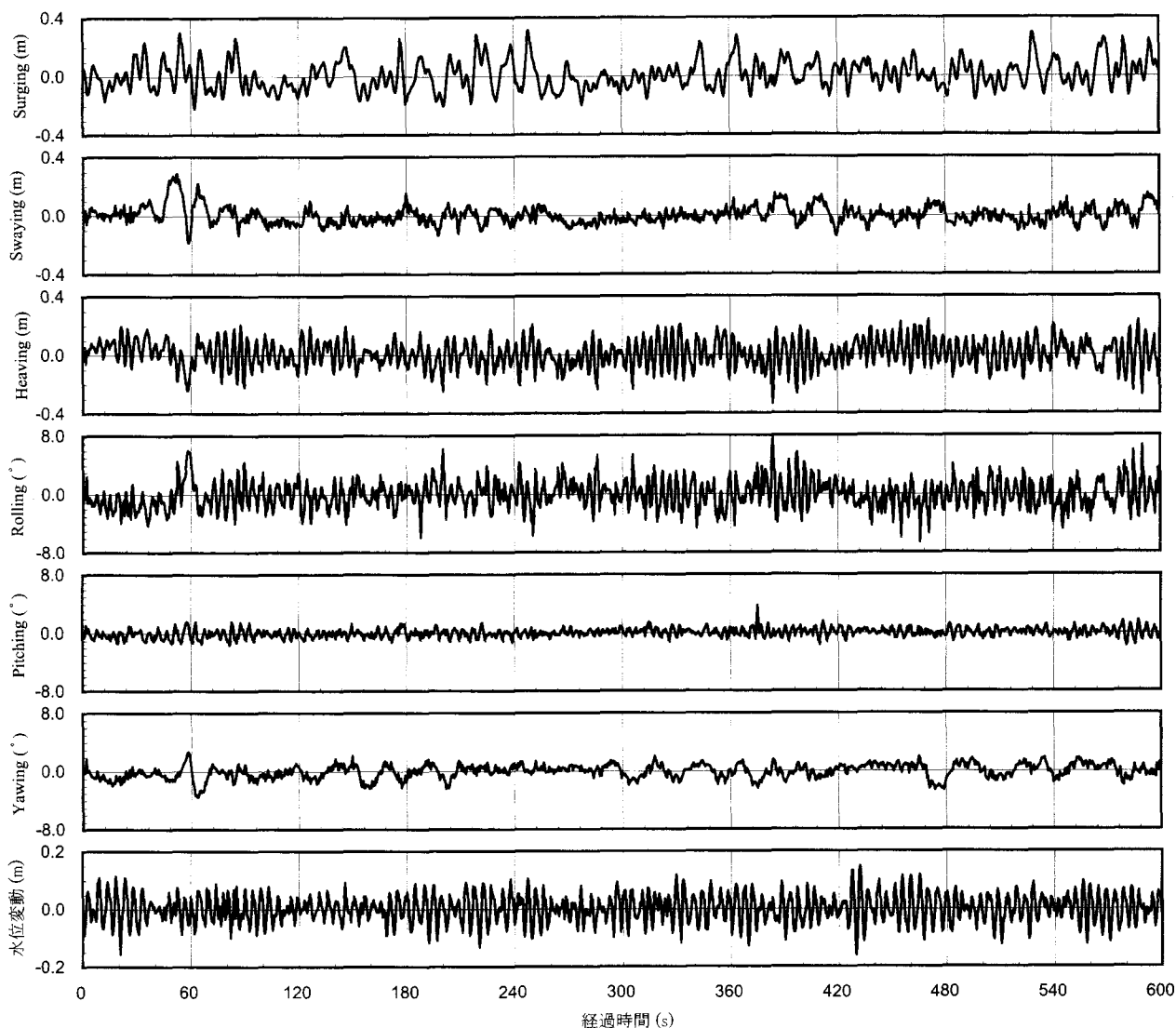


図-7 船体重心位置での動揺と港内波浪の時刻歴・スペクトル

れた状態で船体が運動している状況を確認することができる。

この点を含め6点については、観測時間内で95%以上のデータを取得することができたが、他の7点については、データの取得率が50%以下という結果となった。これは、カメラと観測点の位置関係から船体の陰に隠れて観測点が見えなくなる場合があったことと、観測点の間隔が狭かったために観測点同士が重なって個々の観測点の判別が不能になる場合があったことが主な原因である。よって、データの信頼度を考慮し、95%以上の取得率がある6点の測定データを用いて船体重心位置での6自由度の運動を計算した。図-7に船体重心位置での運動の時刻歴(最初の10分間)とスペクトル、および同時刻の港内波浪の時刻歴とスペクトルを示す。スペクトルをみると、観測した運動成分のうちヒービング・ローリング・ピッチングについては港内波浪のスペクトルとはほぼ相似したスペクトル形状となっており、波浪の短周期側にみられる5秒前後のピークに対応した動揺成分が顕著である。これに対し、サージング・スウェイング・ヨーイングについては港内波の長周期側にみられる15秒前後のピークに対応した動揺成分が見られ、そのエネルギーは5秒前後のピークよりも大きくなっている。これは、サージング・スウェイング・ヨーイングが水平平面内の運動で係留系のバネ特性の影響を受ける運動成分であることから、共振現象により長周期成分のエネルギーが卓越しているものと考えられる。

この動揺と波浪の応答特性は、大型船に対する既往の研究結果と同様の傾向を示しており、長周期波によると思われる荷役障害が発生しているとのアンケート調査結果を裏付ける結果が得られた。よって、漁港においても長周期波を考慮した動揺対策が必要であると考えられる。

(4) 加速度計による観測結果との比較

加速度計による観測はサージング・スウェイング・ヒービングの3方向について実施したが、スウェイングとヒービング方向の加速度が測定器の誤作動で正常に測定できなかったため、ここではサージング方向のみについて三次元PTVの結果との比較を行った。

加速度データを2回積分して求めたサージングの時刻歴を図-8に、スペクトルを図-9に示す。スペク

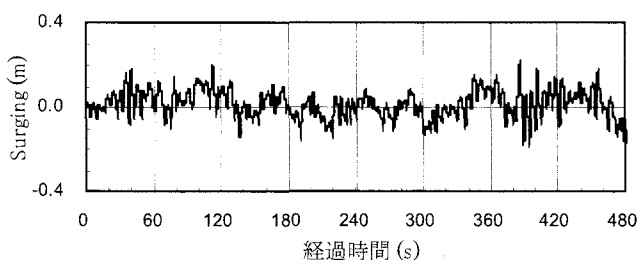


図-8 加速度計によるサージングの時刻歴

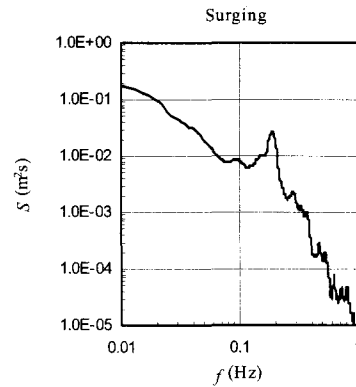


図-9 加速度計によるサージングのスペクトル

トルと比較すると、3次元PTVによる測定結果で現れている周期5秒前後の短周期側のピークは加速度計による測定結果にも現れているが、周期15秒前後の長周期側のピークは測定できておらず、これよりも長い周期の動揺成分のエネルギーが大きいことが分かる。この長周期の動揺成分は3次元PTVによる測定結果には見られないものであり、実際の動揺成分には含まれていないノイズのようなものと考えられる。この結果を見る限りでは、加速度計による動揺観測においては、特に長周期成分の測定精度に問題が残されていることが分かった。

4. 結論

本研究における主要な結論は次の通りである。

- 1) 3次元PTVの手法を現地に適用した結果、船体上の多点の動揺観測データから船体重心位置での6自由度の運動を求めることができた。
- 2) 漁船上に設置した13点の動揺測定点のうち、測定時間内で95%以上のデータを取得できたのは6点のみであった。これは、測定点が船体の陰に隠れて見えなくなる、測定点同士が重なる、といった現象により測定点が判別できなくなる場合があるためである。よって、本手法による動揺観測では、測定点の設置方法に注意を要することがわかった。
- 3) 観測した動揺6成分のうち、ヒービング・ローリング・ピッチングについては港内波浪の短周期側のピークに対応した動揺成分のみがみられる。これに対し、サージング・スウェイング・ヨーイングについては港内波浪の長周期側のピークにも対応した動揺成分が見られ、そのエネルギーは短周期側よりも大きくなっている。これは、サージング・スウェイング・ヨーイングが水平平面内の運動で係留系のバネ特性の影響を受ける運動成分であることから、共振現象によりエネルギーが卓越しているものと考えられる。

- 4) 砂原漁港においては長周期波によると思われる荷役障害が発生しているとのアンケート調査結果が得られていたが、観測された動揺と波浪の応答特性はこの事実を裏付ける結果であった。
- 5) 加速度計による測定では、長周期成分に実際の動揺成分には含まれないノイズのようなものが混入しており、三次元PTVによる測定で現れている長周期成分のピークは検出できなかった。

謝辞：本研究を実施するに当たって、砂原漁業協同組合の高山修専務理事、平井直和氏には、現地調査に際し多大なる協力を頂いた。ここに改めて謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 斎藤勝彦・久保雅義・笹沢茂夫：3Dトラッカーによる船体動揺の現地計測，海洋開発論文集，第12巻，pp.161-166，1996。
- 2) 朝崎勝之・松尾憲親・鵜飼亮行・森屋陽一・津金正典：港内係留船舶の長周期動揺に関する現地観測と動揺シミュレーションの入力条件の評価，海洋開発論文集，第15巻，pp.77-82，1999。
- 3) 斉藤 直・朝倉一雅・高橋陸悟・市川芳宏：三隅港における長周期波と大型石炭運搬船の動揺特性，海岸工学論文集，第46巻，pp.316-320，1999。
- 4) 奥村悠樹・渡辺靖憲・加藤雅也・佐伯 浩：砕波帯内の3次元流速の実験的評価－拡張3次元ステレオグラムPTVの開発と応用－，海岸工学論文集，第48巻，pp.96-100，2001。
- 5) Kieft, R. N., K. R. A. M. Schreel, G. A. J. van der Plas and C. C. M. Rindt : The application of a 3D PTV algorithm to a mixed convection flow, Experiments in Fluids, 2002。
- 6) 佐藤典之・佐伯 浩：北海道の漁港における係留船舶の動揺の実態について，海洋開発論文集，第19巻，pp.637-642，2003。
- 1) 斎藤勝彦・久保雅義・笹沢茂夫：3Dトラッカーによる