

慣性センサを用いた船舶の横揺れ特性の検討

柴田遥規^{†1} 鈴木治^{†1} 中井一文^{†1} 江崎修央^{†1}

概要: 船舶事故には、転覆、沈没による事故が存在する。原因として過積載やバラスト水の調節ミスなどによる復原力の喪失が考えられている。復原力とは、航行中に波などの外力が作用して左右どちらかに傾斜した際に、船の重心位置、浮心位置の位置関係で傾斜している船体を元の姿勢に戻そうとする力のことである。そのため、復原力が小さい船では少しの外力でも転覆する可能性がある。船の復原力は一般的に船体重量と浮心位置を利用して算出する。他にも船体の横揺れ周期より求める方法がある。本研究では、横揺れ周期を用いて復原力の算出を行う。横揺れの原因として海面の波浪、船体の状態が大きく関与している。これらのデータからも横揺れの予兆を検出することができる。海上にて風が吹く場合、風上から風下の方向に向けて波エネルギーが伝搬する。そのため、風速、風向データから復原力の推定ができると考えられる。これまでは、船舶の浮心位置、重心位置から復原力の計測が行われてきたが、本研究では慣性センサを利用して船舶の横揺れ特性の測定と解析を行う。実験の結果、解析した横揺れ特性と風速データについての相関関係が確認できた。

キーワード: 横揺れ周期, FFT, 慣性センサ, 船体運動, ロール角

Investigation of Rolling Characteristics of a Ship using the Inertial Sensor

HARUKI SHIBATA^{†1} OSAMU SUZUKI^{†1} KAZUFUMI NAKAI^{†1} NOBUO EZAKI^{†1}

Abstract: There are ship accidents due to overturn and sink. It is believed to be caused by loss of restoring force due to overloading and misadjustment of ballast water. The restoring force is the force that attempts to return to the original posture when an external force such as waves are acting during navigation and tilts to the left or right. Generally, the restoring force is calculated using the hull weight and the floating position. Another method is achieved by calculating from the roll cycle of the hull. This research adopts the second method. The rolling is largely involved in the wave of the sea surface and the state of the hull. When wind blows at the sea, wave energy propagates from windward to leeward. Therefore, it is considered that the restoring force can be estimated from wind speed and wind direction. Conventionally, the restoring force has been measured from the floating position and the center of gravity position of the ship, in this research, the inertial sensor was used to measure and analyze the roll characteristics of a ship. As a result of the experiment, the correlation between the analyzed rolling characteristics and the wind speed was confirmed.

Keywords: Roll cycle, FFT, Inertial sensor, Hull movement, Roll angle

1. はじめに

船舶には転覆、沈没事故が存在する。その原因として、復原力の喪失が考えられている。復原力とは、航行中に波などの外力が作用して左右どちらかに傾斜した際に、船の重心位置、浮心位置の位置関係から船体を元の姿勢に戻そうとする力のことである。そのため、復原力が小さい船では少しの外力でも転覆する可能性がある。復原力の喪失と転覆の大きな要因として、海面の変動による外力が大きく関与している[1]。

海上にて風が吹く場合、風上から風下の方向に向けて波エネルギーが伝搬する[2]。さらに、風力が増すことで、波高と周期が大きい波が発生する。つまり、海上での風力、風向から波の予測を行うことができると考えられる。また、風そのものも操船性能を評価する外力の1つである[3]。そのため、風速が大きければ船体が傾斜する傾向がある。

これまでは、船舶の浮心位置、重心位置から復原力の計測が行われてきたが、本研究では慣性センサを利用して船

舶の横揺れ特性の測定と解析を行い、最終的には復原力の推定を行う。また、慣性センサとして安価な加速度センサを用いて転覆の予兆を判断することも研究目的のひとつである。

本稿では、鳥羽商船高等専門学校所有の鳥羽丸に慣性センサを設置してデータの比較を行う。また、転覆の予兆を判断するために船体を持つ固有の横揺れ周期、動揺固有周期を基準値として比較を行う。

2. 関連研究

2.1 波による船体運動

海上での船の運動には波の状態が関係している[4]。波の中の船体運動はローリング、ピッチング、ヨー、スウェイ、ヒープ、サージの6つの自由運動がある。それぞれの運動方向については図1に示す。また、船体の転覆に大きく関与しているロール角の解析を行うことで転覆の予兆を判断する方法がある。そのため、本稿では慣性センサを用いて

^{†1} 鳥羽商船高等専門学校
National Institute of Technology, Toba College

ロール角の運動特性に相当する値を取得するとともに横揺れ特性を調査する。

復原力とは、航行中に波、風などの外力によって船体が傾斜したとき、元の姿勢に戻ろうとする力である。

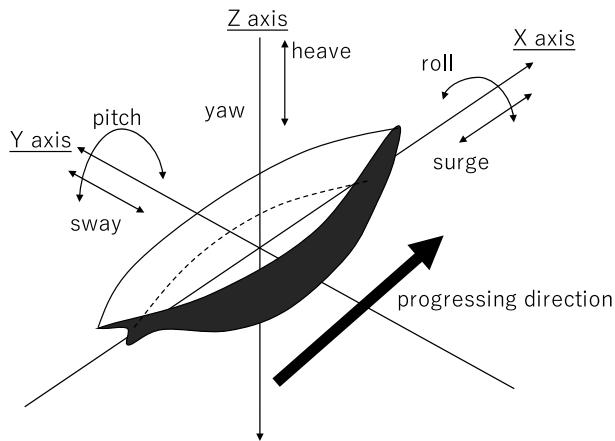


図 1 波の中の船体運動
Figure 1 Ship motion in waves.

2.2 波による横揺れ特性の変動

横揺れ特性に関わりの大きい要素として波による変動が挙げられる。波の変動は海上での風の影響が大きい。特に、風速・風向によって波の状態が大きく変化し、風上から風下に向けて波エネルギーは伝搬する[2]。

これらの原理を基に波の大きさと向きを推定するために本研究では風速・風向データと波のデータには相関があるものとして仮定し実験を行う。

波による転覆のしやすさについては出会い角 $20^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 程度で転覆が発生しやすく、船速が高速のとき転覆が起こりやすくなる。また、必ず波下側に向かって転覆する。

3. システム概要と構成

本研究では、各種のセンサから得られた船舶の横揺れ特性を評価することで転覆予兆を検出し、安全な航海ができることを目指す。図2に示すように、転覆の予兆検出に使用するデータとして加速度・風速・船速を用いて復原力の推定を行う。本稿では、加速度データによる横揺れ周期を、船体の傾斜と直接関係するロール角を真値として比較することで加速度データの有意性を確認する。

また、風速、船速データと加速度データ、ロール角を比較し、船体状況と船体に対する外力を加味したうえでの横揺れ周期の相関関係を確認する。風速・船速・ロール角は、それぞれセンサを船舶に導入すれば測定可能ではなるが、加速度データから得られる横揺れの特性的みで転覆予兆を検出可能であれば、導入コストが下がり、多くの船舶へ普及させることができると考えられる。

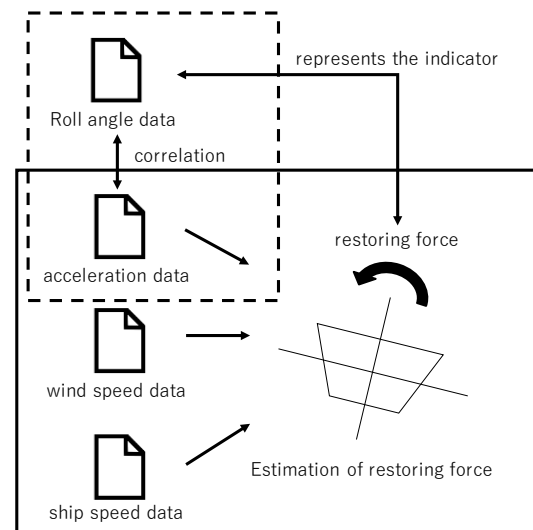


図 2 船体運動の要因と復原力の推定
Figure 2 Factors of ship motion and estimation of restoring force.

3.1 船体の傾斜、加速度データの測定

本研究では、鳥羽商船高等専門学校所有の鳥羽丸を計測対象とした。船体の中心位置に加速度センサ(Analog Devices 製 ADXL355)を設置してデータ計測を行った。加速度センサの仕様について表1に示す。

加速度センサを設置した際の軸方向については船体の進行方向を X 軸、船体の横方向を Y 軸、鉛直下方を Z 軸として設置した際の状態を図3に示す。

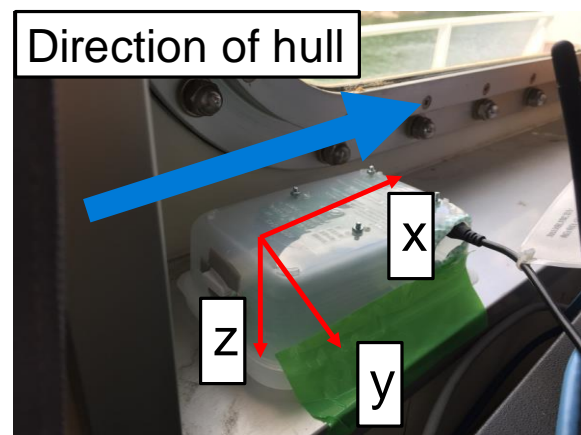


図 3 加速度センサの軸方向
Figure 3 The axial direction of the acceleration sensor.

表 1 加速度センサ(ADXL355)の仕様

Table 1 Specification of acceleration sensor (ADXL 355).

項目	仕様
測定範囲	$\pm 2g$
軸数	3 軸
出力方式	I2C
AD コンバータ分解能	20bit

3.2 風速データの取得

2.2節で述べたように、風速、風向によって波エネルギーは変化する。そのため、鳥羽丸に設置された風向風速計(日本エレクトリックインスツルメント製 N-162D)から日付、時刻、UNIX 時刻、瞬間風向、瞬間風速、1 分間の平均風向、1 分間の平均風速、最大風速、5 分間の最大風速、10 分間の平均風向、10 分間の平均風速、10 分間の最大風速を取得する。データは1分間に1回取得する。



図 4 風向風速計 (N-162D)

Figure 4 Wind direction anemometer (N-162D).

3.3 船速データの取得

船速データを比較するために船舶自動識別装置 (AIS) よりデータを抽出する。

鳥羽丸に設置された AIS 受信機(古野電気製 FA-150)より出力された NMEA 形式のデータを、時刻、船体の速力、位置情報(緯度、経度)を抽出した。AIS データは1秒間に1回取得する。



図 5 船舶自動識別センサ (FA-150)

Figure 5 Automatic Ship Identification Sensor (FA-150).

3.4 船体のロール・ピッチ角の取得

船舶に設置された慣性測定装置(東京計器株式会社, TMOS-2000)より出力されたロール・ピッチ角のデータを取得した。データは0.1秒に1回取得する。

慣性測定装置から得られたロール角は、本研究において横揺れ特性の真値として扱う。ピッチ角は取得しているが、本稿においては取り扱わない。



図 6 慣性測定装置 (TMOS-2000)

Figure 6 Inertial measurement device (TMOS-2000).

表 2 慣性測定装置(TMOS-2000)の仕様

Table 2 Specification of inertial measurement device (TMOS-2000).

項目	測定範囲	分解能	精度(静止)
加速度	±2g	±0.0025g	±0.03g
角速度側	±100°/s	±0.01°/s	±0.1°/s
ロール・ピッチ角	±30°	±0.0025°	±0.5°
周波数応答	DC ~15Hz		
出力	+5V		
入力	±15V, +5V		

4. 横揺れ周期の算出

4.1 復原力の算出

船の復原力は一般的に船体重量と浮心位置を利用して算出する。他にも、(1)式に示す近似式により、船体の横揺れ周期より求める方法がある[6]。

$$T = 0.8 \times \frac{B}{\sqrt{GM}} \quad (1)$$

B: 船幅[m]

GM: 復原力[m]

T: 横揺れ周期[s]

本研究では、(1)式を用いて横揺れ周期から復原力の算出を行う。(1)式で述べている横揺れ周期は、船が両側に傾き、元の姿勢に戻るまでの時間を一周期とする。

4.2 動揺固有周期の導出

動揺固有周期とは船舶が持つ決まった揺れの周期のことである。鳥羽丸の GM は 0.64[m]であり、船幅は約 8[m]であるため(1)式より鳥羽丸の横揺れ周期は 8[s]であると計算

される。

本稿ではこの周期を基準値として扱う。そのため、この基準値を上回っているとき、船体の傾斜が大きくなるため、転覆のおそれがあるものとする。

4.3 横揺れ周期の計算

加速度データに対して FFT(高速フーリエ変換)を施し、船体に含まれる挙動を検出し、横揺れ周期の推定を行う。

サンプリング周期は 0.1[s]とし、FFT の窓幅は 1024 とした。また、窓は 512 ずつシフトし全てのデータに対して FFT を行った。FFT の結果は横軸が周波数、縦軸がロール角・加速度のパワースペクトル強度である。FFT をかけたデータ例をロール角・加速度データ、運航時・停泊時に分けて図 7~10 に示す。

FFT の結果に対してパワースペクトル強度が大きい点を横揺れ周波数とし、横揺れ周波数に対して逆数をとった値を船体の横揺れ周期とする。船体の横揺れ周期に関する周波数は 0.125[Hz]であると考えられるため、正規化周波数 0.05 より高い周波数は横揺れ周波数の計算には用いない。

加速度センサの軸については船体の横軸をあらわしている Y 軸を使用する。

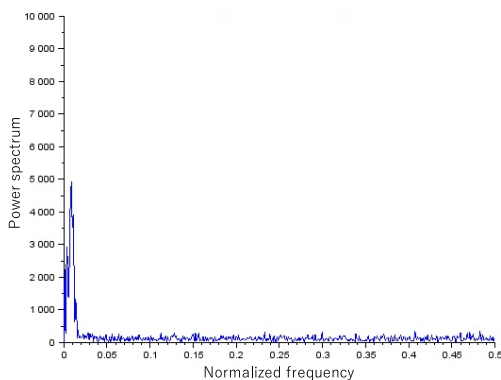


図 8 運航時のロール角データの周波数スペクトル
Figure 8 Frequency spectrum of roll angle data during operation.

また、運航時の 4.3[Hz]付近で高いピークが見られたが、鳥羽丸のエンジンは 240~270[rpm]であるため、エンジンによるパワースペクトルであると考えられる。

運航時と停泊時のデータを比較した結果、どちらの結果にも正規化周波数 0.05 以下の低周波領域に高いピークが検出された。

図 1, 図 2 に示した結果では、パワースペクトルが最大になっている点は運航時がロール角、加速度データ共に 0.0977[Hz]、停泊時が 0.117[Hz]であった。この逆数をとると、横揺れ周期は運航時が 10.24[s]、停泊時が 8.55[s]となった。

5. 実証実験

5.1 実験概要

本稿では、慣性センサから得られたロール角・加速度のスペクトルデータと風速・船速データの比較による相関関係の確認を行った。ロール角のデータを真値として加速度データとの比較を行った。

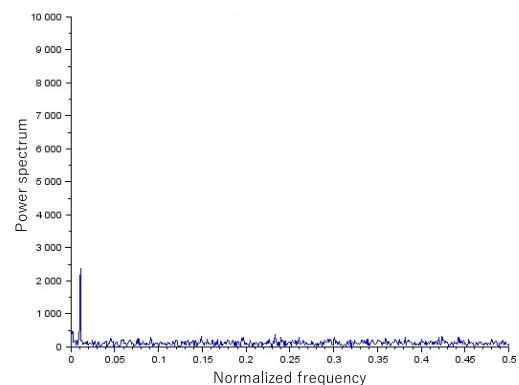


図 10 停泊時のロール角データの周波数スペクトル
Figure 10 . Frequency spectrum of roll angle data at anchorage.

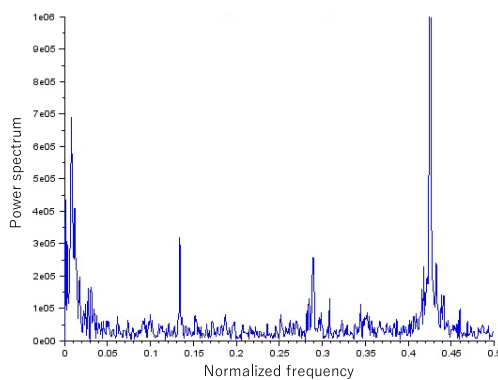


図 7 運航時の加速度データの周波数スペクトル
Figure 7 Frequency spectrum of acceleration data during operation.

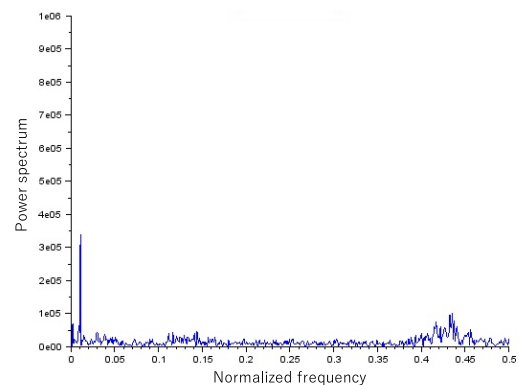


図 9 停泊時の加速度データの周波数スペクトル
Figure 9 Frequency spectrum of acceleration data at anchorage.

5.2 評価実験-船速，風速データとの比較

2017年11月10～12日に取得した風速，船舶の速力，ロール角，加速度データのFFTを施したパワースペクトル強度データの比較をした．スペクトルデータについては，船体の固有横揺れ周波数に相当する0.0977~0.117[Hz]の平均値と，固有でない横揺れ周波数に相当する0.0977[Hz]未満の平均値に分けてグラフにあらわした．

また，0.0488[Hz]未満の周波数は定常偏差としてカットした．パワースペクトルを時間変化として図11~16に示す．

まず，図11と図12に示した11月10日のデータを比較する．

それぞれ，赤線が1分間の平均風速，緑線が船速，青線が0.0977~0.117[Hz]の平均スペクトルデータ，ピンク線が0.0488[Hz]未満の平均スペクトルデータである．

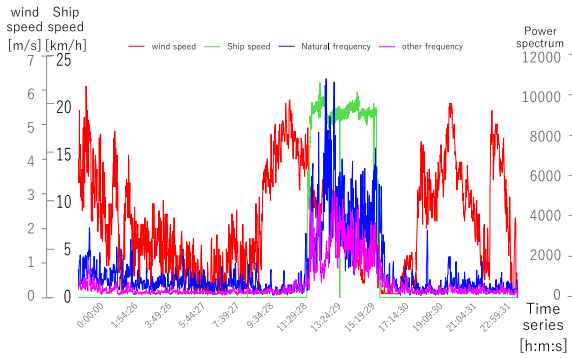


図13 11月10日のロール角の時系列データ
 Figure 13 Time series data of roll angle on November 10.

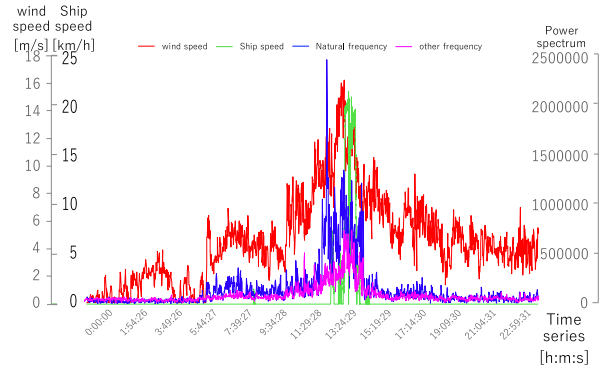


図16 11月11日の加速度の時系列データ
 Figure 16 Time series data of acceleration on 11th November.

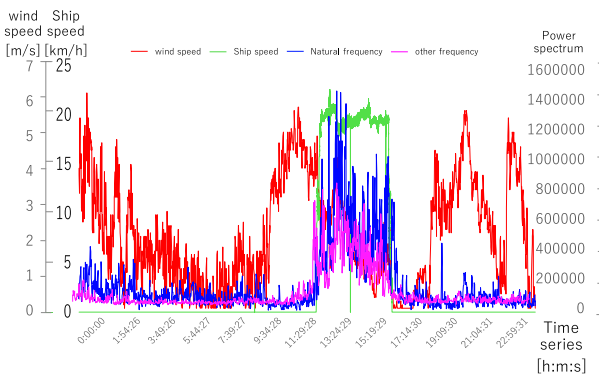


図12 11月10日の加速度の時系列データ
 Figure 12 Time series data of acceleration on November 10.

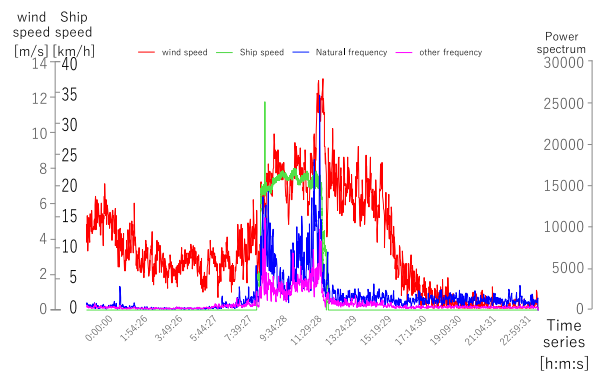


図15 11月12日のロール角の時系列データ
 Figure 15 Time series data of roll angle on 12th November.

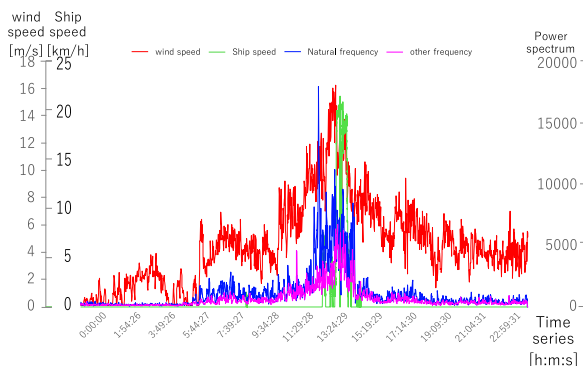


図11 11月11日のロール角の時系列データ
 Figure 11 Time series data of roll angle on 11th November.

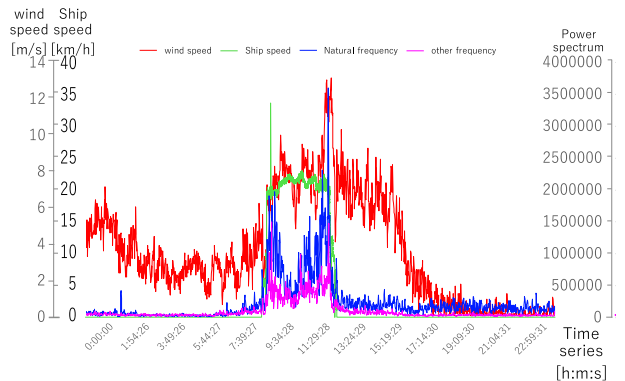


図14 11月12日の加速度の時系列データ
 Figure 14 Time series data of acceleration on 12th November.

まず、ロール角と加速度データの真値比較については、図 11 と図 12 の固有横揺れ周波数に相当するパワースペクトルの青線は同様の動きをしており、加速度データを用いることで船体の横揺れ特性を測定できることがわかった。特に停泊時から運航時にかけてパワースペクトルが急上昇している点（時刻 11:28 付近で船速が急上昇する点）については同じ傾向があらわれている。

運航時は図 11、図 12 の固有横揺れ周波数に相当するパワースペクトルの青線と固有でない横揺れ周波数に相当するピンク線のパワースペクトルが上昇しているが、特に図 11、図 12 の固有横揺れ周波数に相当するパワースペクトルの青線は船速が上昇中に風速が上昇した点(13:24 付近の点)で固有横揺れ周波数に相当するパワースペクトルの青線が最大になるように上昇している。

その時、図 11、図 12 の固有でない横揺れ周波数に相当するピンク線については下降している。これらの関係より横揺れの周期は変わらないが、船体の横揺れの振幅が大きくなっていることが分かる。

11 月 11、12 日のデータである、図 13、図 14、図 15、図 16 の固有横揺れ周波数に相当するパワースペクトルの青線と固有でない横揺れ周波数に相当するピンク線にも上記の関係が見られた。

6. おわりに

実験結果より、加速度センサから取得した船体の横軸成分を分析することで船体の横揺れをあらわすロール角を取得することができた。ロール角を出力できる慣性センサは非常に高価であり、簡単には導入できない。それに対して加速度センサは安価なものであるが本稿の通りロール角の取得ができ、IoT 機器として組み込み易いため、各種の船舶への導入が可能である。

また、船速と風速の値を加えて横揺れ特性の分析を行ったことで、船速と風速が共に上昇した際に最も横揺れが大きくなるという相関関係を確認できた。船速・風速・横揺れ特性の評価を行っている研究は少なく、船舶の運航は航海士の経験則によるところが大きい。そのため、各種の計測器が導入可能な昨今においても、毎年のように転覆事故は発生している。本研究による横揺れ特性の可視化により、経験則のような暗黙知を形式知に変えられる可能性がある。

本稿では、船体に対する風の大きさのみの比較を行った。そのため、船速と風速が上昇した際のパワースペクトルの上昇の仕方が測定日毎に多少の傾向の違いとしてあらわれた。波の伝搬方向は風向と相関関係があると考えられるため、今後は風向データを用いて船体に対する風の出会い角から横揺れ特性の比較を行っていく。

参考文献

- [1] 梅田直哉, 山越康行. 斜め追波中の復原力喪失による船の転覆確率の評価, 日本造船学会, 1991, 第 169 号
- [2] 川島利兵衛, 佐藤要, 武田誠一. 流れのある海面における波

- 浪推定. 日本航海学会第 96 回公演会. 1997.5
- [3] 藤原敏史, 上野道雄, 二村正. 船体に働く風圧力の推定. 日本造船学会, 1998, 第 183 号
 - [4] 川島利兵衛. 海洋波の中の船体運動計測の方法について. 日本航海学会, 1966, 第 36 号
 - [5] 菅信, 猿田俊彦, 田口晴邦, 安野三樹雄. 斜め追波中の船の転覆について, 日本造船学会論文, 1990, 第 167 号
 - [6] 本田啓之輔. 基本運用術. p.243. 1974.12