

慣性センサを利用した船舶の横揺れ特性の測定と解析

生産システム工学専攻 柴田 遥規, 指導教員 中井 一文

Measurement and Analysis of Rolling Characteristics of a Ship using the Inertial Sensor

Haruki SHIBATA, Kazufumi NAKAI

Advanced Course of Production System Engineering, National Institute of Technology, Toba College

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.

外的要因の他にも復原力の喪失原因には船内の積み荷の荷崩れによる荷重の移動が考えられる[1]. この荷崩れの発生原因には海面の波浪, 船体の状態による外力によって起こるロール角の大傾斜の影響が大きいといえる. 荷崩れが発生し, 傾斜の中心位置が変動してしまうと操船の際に考慮しなければいけないため, 傾きの急激な増加を予測し, 突発的な大傾斜を検知する必要がある.

また, 航海中の風も操船性能を評価する外力の1つであり[2], 海上にて風が吹く場合, 風上から風下の方角に向けて波エネルギーが伝搬する[3]. 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. また, 波が船体に当たる角度や, 波の大きさによって, 船体の傾斜は変わる[4]. つまり, 海上での風向・風速から波による船体への影響の予測を行うことができると考えられる. 波の角度や大きさは真値として非常に得づらいため, 風向・風速から船体の傾斜を知ることができれば, 転覆の予防策を検討することも可能となる.

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.

本稿では, 船舶の傾斜を検知できるシステムを構築するため, 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. 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に掲げており, 慣性センサによって得られた値を真値とし, 加速度センサとの値の比較を行う. 慣性センサは鳥羽商船高等専門学校所有の鳥羽丸に設

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.

また, 風向・風速データから傾斜角の発生確率を推定し, 船体への相対風向が船体の傾斜に影響するかどうか, 風速が大きければ船体が大傾斜する傾向があるかどうかを示す.

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.

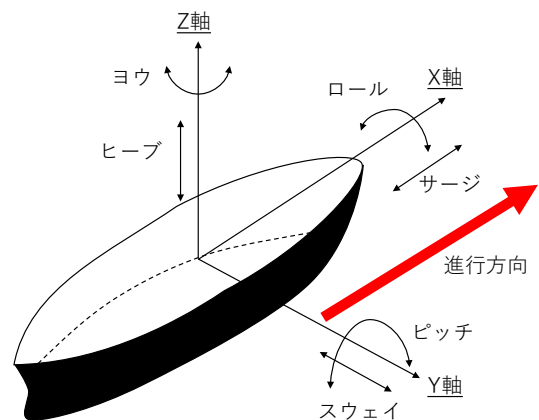


図1 波の中の船体運動

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[3]．

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 $20\sim40^\circ$ 程度で転覆が発生しやすく，船速が高速のときは $0\sim50^\circ$ に広がりさらに転覆が起こりやすくなるという模型船による実験結果がある[4]．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

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・風向を用いて大傾斜が発生するかどうかの推定を行う．本稿では，加速度データによる傾斜角度を，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，風向・風速データの組み合わせから加速度の大きさの発生確率を推定する．これにより，加速度が大きくなり船体の傾斜が大きくなる確率を確認する．ロール角の計測は慣性測定装置を船舶に導入すれば測定可能であるが，加速度データから得られる横揺れの特性を比較し同様のデータが検出可能であれば，導入コストが下がり，多くの船舶へ普及させる事ができると考えられる．

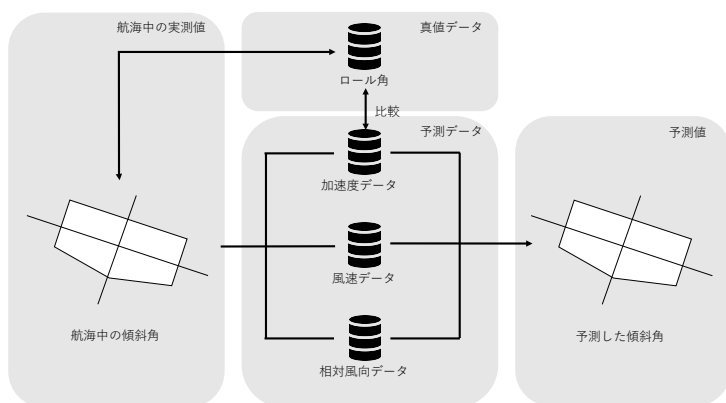


図 2 船体運動の要因と傾斜角の推定

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 ADXL 355)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．その際の状態を図3に示す．

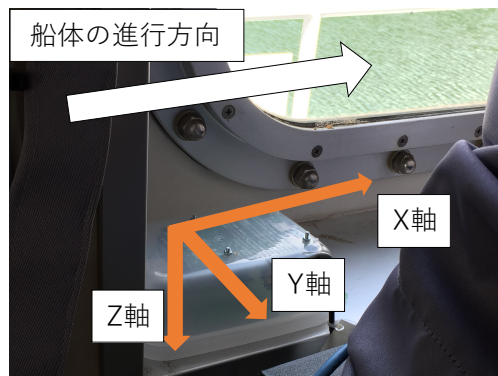


図 3 加速度センサの軸方向

表 1 加速度センサ(ADXL 355)の仕様

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)

3.3. 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する．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 5 慣性測定装置 (TMOS-2000)

表 2 慣性測定装置(TMOS-2000)の仕様

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		

3.4. 船体データの取得

船体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、船体の速度、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 6 船舶自動識別センサ (FA-150)

4. ロール角と加速度データの比較

加速度データから得られる横揺れの特性と慣性測定装置から得られるロール角の横揺れ特性は同様であると考えられる。データの比較にはそれぞれの横揺れ周期を算出し比較をする。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。

4.1. 復原力の導出

船体の横揺れ周期は(1)式に示す近似式により、船の復原力を求めることができる[6]。以下の式より横揺れ周期の値から復原力を求めることができるため、横揺れ周期の値を比較することで加速度データとロール角の比較ができるといえる。

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

B: 船幅[m]

GM: 復原力[m]

T: 横揺れ周期[s]

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. 横揺れ周期の導出

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 を行う。FFT の結果は 6.1 節にて述べる。

5. 大傾斜の発生確率の推定

5.1. 風向・風速を考慮したベイズ推定による加速度推定

波と風による外力は船舶の横揺れに対して大きな影響を与えると考えられる。そのため、風向風速データと加速度データとの相関関係を調べる。風向風速計のサンプリング周期 1 分に合わせ、加速度データは 1 分間の最大値を抽出した。

傾斜を間接的にあらわす加速度の大きさの発生確率はベイズ推定により事後確率の算出を行う。

海上での風速の状態を X、風向の状態を Y、船体の傾きをあらわす加速度の状態を Z としたとき、それぞれの状態の発生確率を P(X)、P(Y)、P(Z) とする。

加速度 Z が風速 X と風向 Y に依存して発生するとしたとき、

$$P(Z|X,Y) = \frac{P(X,Y|Z)P(Z)}{P(X)P(Y)} \quad (2)$$

となる．

本稿において発生確率は状態の観測値から算出するため， X ， Y ， Z は離散分布として扱い，離散値は $X = \{X_1, X_2, \dots, X_9\}$ ， $Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_{12}\}$ ， $Z = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_{16}\}$ として扱う．

5.2. 風向・風速と加速度のデータセット

風速データは取得した最大値，最小値から 2[m/s] ごとに区切り 9 段階に分類している．相対風向については正面を 0° として左側がマイナス，右側がプラスとなっている．振り分けは 30° ごとに区切っており，12 段階に分類している．また，相対風向の角度については図 7 に示す．

加速度データについては加速度センサの測定範囲である $\pm 2g$ を 16 段階に分類している．

表 3 各種データの評価表

風速 :[m/s]	事例 : X_i	相対風向 :[$^\circ$]	事例 : Y_j	加速度 :[g]	事例 : Z_k
0 ~ 2	1	-180 ~ -165	1	-2 ~ -1.75	1
2 ~ 4	2	-165 ~ -135	2	-1.75 ~ -1.5	2
4 ~ 6	3	-135 ~ -105	3	-1.5 ~ -1.25	3
6 ~ 8	4	-105 ~ -75	4	-1.25 ~ -1.0	4
8 ~ 10	5	-75 ~ -45	5	-1.0 ~ -0.75	5
10 ~ 12	6	-45 ~ -15	6	-0.75 ~ -0.5	6
12 ~ 14	7	-15 ~ 15	7	-0.5 ~ -0.25	7
14 ~ 16	8	15 ~ 45	8	-0.25 ~ 0	8
16 ~ 18	9	45 ~ 75	9	0 ~ 0.25	9
		75 ~ 105	10	0.25 ~ 0.5	10
		105 ~ 135	11	0.5 ~ 0.75	11
		135 ~ 165	12	0.75 ~ 1.0	12
		165 ~ 180	1	1.0 ~ 1.25	13
				1.25 ~ 1.5	14
				1.5 ~ 1.75	15
				1.75 ~ 2.0	16

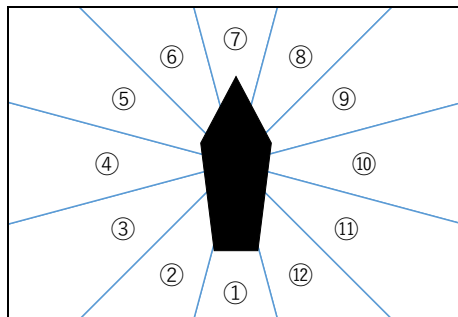


図 7 船舶の出会い角

6. 実証実験

6.1. 慣性センサの真値比較

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．2017 年 11 月 10~12 日の運航時に取得したロール角・加速度データに FFT

をかけたデータ結果を図 8，9 に示す．サンプリング周期が 0.1[s] のため，正規化周波数 0.5 が 5[Hz] に相当する．

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．鳥羽丸の固有横揺れ周期は 8[s] であるため，横揺れ周期に対応する周波数は 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．

また，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．

図 8，9 どちらにも正規化周波数 0.05 以下の低周波領域に高いピークが検出された．

図 8，図 9 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ロール角，加速度データ共に 0.0977[Hz] であった．この逆数を取り，横揺れ周期は 10.24[s] となった．

上記の結果より，ロール角と加速度データ共に同様のデータを得ることができた．これより，安価な加速度センサを用いても船舶の横揺れ特性を判断することができるといえる．

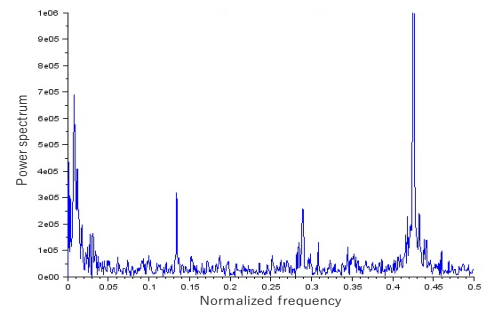


図 8 運航時の加速度データの周波数スペクトル



図 9 運航時のロール角データの周波数スペクトル

6.2. 風向・風速と加速度の取得結果

2017 年 11 月 10 日～12 日と 2018 年 6 月 5 日～8 月 6 日にかけてデータ取得を行った。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 $0.0977\sim0.117[\text{Hz}]$ の平均値と，固有でない横揺れ周波数に相当する $0.0977[\text{Hz}]$ 未満の平均値に分けてグラフにあらわした。また， $0.0488[\text{Hz}]$ 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 10 に示す。固有でない周波数におけるパワースペクトルが上昇することは船体の横揺れ周期が大きくなることを意味している。

それぞれ，赤線が 1 分間の平均風速，緑線が船速，青線が $0.0977\sim0.117[\text{Hz}]$ の平均スペクトルデータ，ピンク線が $0.0488[\text{Hz}]$ 未満の平均スペクトルデータである。なお，船速については運航中，停泊中の判断をするため比較している。

データを比較してみると，運航中に風速とともにパワースペクトルも上昇している。転覆が起こる危険があるのは特に運航中であることが分かる。

また，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，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。

4.3 節では横揺れ周期が大きくなることで復原力が喪失することを示した。しかし，上記の結果より突発的に起こる大傾斜については風速が上昇することにより傾斜が大きくなっているため，横揺れ周期からは船舶が転覆する傾向を判断することができないことが分かる。さらに，波の出会い角によっても船体の傾斜は変動するため船体に及ぼす外力の向きによって船体の傾斜が変動することがわかっている[4]。そのため，風向・風速データから加速度データが上昇する発生確率を算出する必要がある。

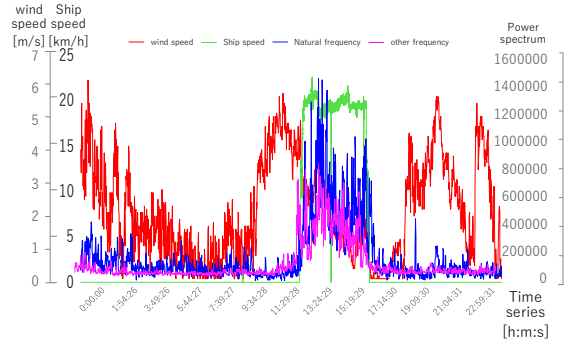


図 10 加速度の時系列データの例(11 月 10 日)

6.3. ベイズ推定による傾斜角の発生確率の算出

2017 年 11 月 10 日～12 日と 2018 年 6 月 5 日～8 月 6 日にかけて取得したデータから，運航中の約 18 時間分のデータを分析しベイズ推定を行い，加速度の発生確率を算出する。算出方法については，予め船舶から取得した風向・風速と加速度の取得データに基づいて事後確率を算出する。風速 $6[\text{m/s}]$ ，風向 $-45\sim-15^\circ$ の事後確率を図 11 に例示する。

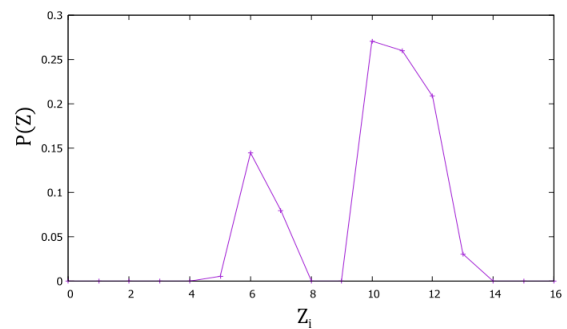


図 11 風速 $6[\text{m/s}]$ かつ風向 $-45\sim-15^\circ$ での加速度の発生確率

上記の場合，加速度の 6，7 と 10～12 付近にて発生確率が上昇している。この時，加速度 10～12 の大きさの傾斜と緩やかな傾斜が混じって発生していることが分かる。続いて，発生確率が最大となる加速度だけを抽出し，各風向・風速における加速度の傾向を比較する。

発生確率が最大となる加速度データを 3 次元グラフにしたものを図 12 に示す。また，Z が最大となるときの事後確率の分布を図 13 に，最小となるものを図 14 に示す。

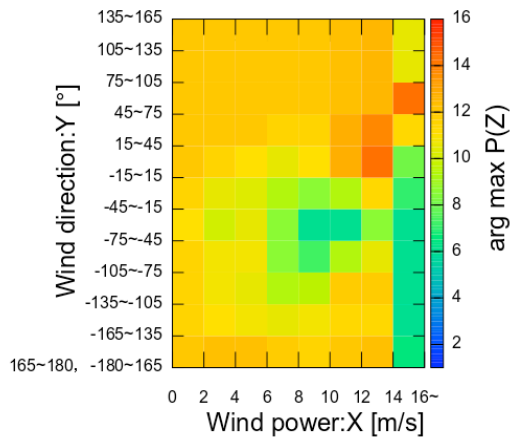


図 12 風向・風速を加味した加速度データの発生確率

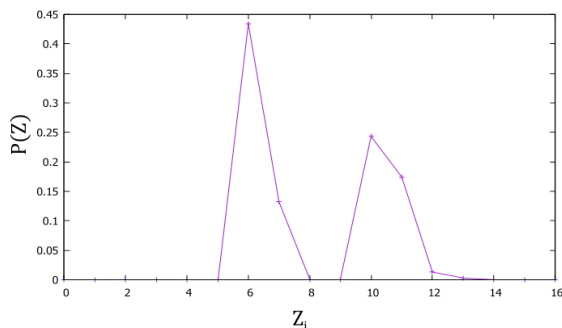


図 13 風速 10[m/s]かつ風向-75 ~ -45° での加速度の発生確率

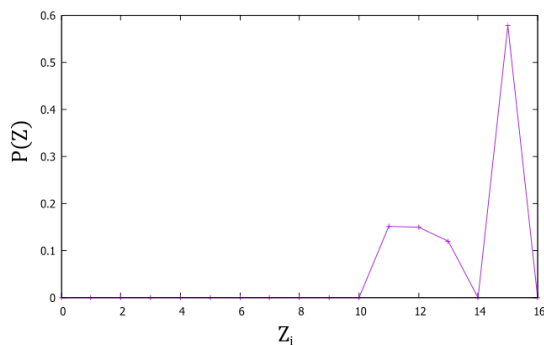


図 14 風速 14[m/s]かつ風向 15 ~ 45° での加速度の発生確率

上記の結果より加速度が上昇するのは風速 14[m/s], 風向-15~45° の時と最大風速のときに加速度が上昇すると予測される。本稿の実験では風速 16[m/s]以上のデータが少ないため発生確率は著しく低かった。

事後確率についてはどちらも加速度の 10~12 付近で一定の確率が発生しつつ、それぞれの地点で確率が急上昇していることがわかる。

本稿にて加速度が大きくなった風速 14[m/s]での相対風向を加味した加速度の発生確率のイラストを図 15 に示す。色の意味は図 12 に準ずる。

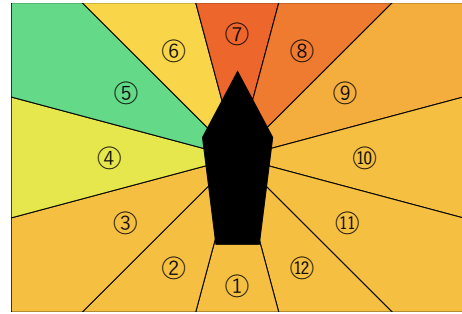


図 15 風速 14[m/s]での加速度データの発生確率

上記より、背面からの風については発生確率が最大となる加速度は同程度であった。しかし、正面と前方右方向にて、加速度の上昇が見られ、前方左側からの風については加速度の下降が見られた。これらの結果より、乗船者の位置や荷重の重心位置が右側に寄っていたことなどが推測できる。

従来の研究において高速である船舶では波の出会い角 0~50° において転覆しやすくなるとされている。本研究で使用した船舶では検証方法が異なるため範囲が狭まってしまったが、従来の研究と同様の傾向を調査することができた。

さらに実際の船舶を用いてデータ分析を行ったため、それぞれの船舶に適したデータセットを作成することができる。よって、今回の手法は従来の手法より有意であるといえる。

7. おわりに

6.1 節の実験結果より、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も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、風向と風速の値を加えて横揺れ特性の分析を行った結果、風速が上昇している際の風向-15~45° では傾斜角が大きくなる傾向があった。

風速・風向・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、向きから傾斜角が大きくなる発生確率の算出を行った。今後は加速度データのトレンドを加味して精度を上げ、リアルタイムに船

員へ危険通知をするシステム開発を行う。

文 献

- [1] 岩井聰：“船内荷重の移動についての一考察”，日本航海学会第 10 回講演会，(1953.11)
- [2] 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
- [3] 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)
- [4] 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
- [5] 井関俊夫：“非定常船体動揺データの時系列解析について 一多変量時系列データの瞬間クロススペクトル解析一”，日本航海学会，(2005)，第 114 号
- [6] 本田啓之輔：“基本運用術”，p.243，(1974.12)