



# 実海域における荒天航海時の貨物船の運動性能について:ーオンボードデータによる運動および波浪特性の分析・推定ー

笹, 健児

寺田, 大介

塩谷, 茂明

若林, 伸和

池淵, 卓郎

---

## (Citation)

日本船舶海洋工学会論文集, 18:167-175

## (Issue Date)

2013-12-01

## (Resource Type)

journal article

## (Version)

Version of Record

## (Rights)

©2013 公益社団法人 日本船舶海洋工学会. 本文データは学協会の許諾に基づきJ-stageから複製したものである

## (URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90002901>



# 実海域における荒天航海時の貨物船の運動性能について

－オンボードデータによる運動および波浪特性の分析・推定－

正会員 笹 健 児\*                      正会員 寺 田 大 介\*\*  
 正会員 塩 谷 茂 明\*\*\*              正会員 若 林 伸 和\*  
 正会員 池 淵 卓 郎\*\*\*\*

Ship Motions of Cargo Ship in Stormy Condition at Actual Sea  
 – Analysis and Estimation of Ship Motions and Wave Properties due to Onboard Data –

by Kenji Sasa, *Member*                      Daisuke Terada, *Member*  
 Shigeaki Shiotani, *Member*              Nobukazu Wakabayashi, *Member*  
 Takuro Ikebuchi, *Member*

## Summary

It is inevitable to maintain the safety and efficiency in the maritime transportation. Especially, the steep rise of crude oil price requires shipping companies to minimize fuel consumption more than ever. Weather routing services are focused on shipping companies with international transportation. However, there are still many problems on accuracies of current models, such as sea forecasts or slow down due to ship motions. It is the reason why those continuous databases, for examples, ship motions, navigation or engine parameters, or sea conditions, are not enough accumulated to develop weather routing models. In this study, those databases have been observed for a couple of years in a 20,000DWT class bulk carrier in worldwide voyages. Some new relations can be known about ship motions, slow down, or wave conditions. The verification of ship motions and waves is carried out here with observed databases and numerical simulations of frequency response of ship motions and that of weather and oceanography. Finally, some points are discussed to construct the new methodology of total evaluation of international maritime transportation in the future.

## 1. 研究の背景・目的

グローバル化を支える地球規模の物流活動は海上輸送なしには成り立たず、船舶の運動性能は耐航性、操縦性、推進性等の分野にて多くの研究成果が蓄積されてきた<sup>1)2)3)</sup>。また GPS, AIS 等をはじめとした航海計器の諸技術も著しく発展し、海上輸送の安全性および経済性の改善に大きく寄与してきたことは疑いのないところである。一方、昨今の世界不況や中東情勢の不安定さによる原油価格の高騰、ドルやユーロの暴落による急激な円高は海運経営に大きな打撃を与え、これまでにない規模で運航コストの削減が求められている。また世界的な気候変動や温暖化等の影響もあり、台風や低気圧の大型化、複雑化に対する最適運航を考える場合、これまでのような経験

則を主体とした方法では対応しきれなくなっている。これらの背景と気象海象の予報技術の発展に伴い、船舶の最適航路を求めるウェザールーティングや実海域でのデータ計測に関する研究が鋭意進められている<sup>4) 5)</sup>。しかし、数値モデルによる気象海象の予報は船舶運航の評価で必要となる解像度を有しておらず、船体運動との関係でこれらの精度が検証された研究事例はほとんど存在しない。著者らは海上輸送の評価は安全性だけでなく、経済性および海洋環境を同時に満足したものでなければならないという観点より「輸送の三原則」のプロジェクト研究に数年間取り組んできた<sup>6)</sup>。また著者が船舶運航者を対象とした調査<sup>7)</sup>にて、外航航路の場合は最低でも 10 日先の予報精度が必要であること、有義波高という評価指標だけでなく、それぞれの船舶が持つ性能や応答特性を含めた最適運航の指標が十分でないことを改めて明らかとした。船舶運航における現場の要望を満たしたウェザールーティングの概念は Fig. 1 に示すようなイメージが考えられる。

図に示すとおり、現状のシステムに対する主な改善ポイントは図の左上に示す気象海象の予報能力、右上に示す荒天航海における船舶の性能および応答の正確な評価である。これと同時に将来的には図の下部に示す最短時間および最少燃料消費、

\* 神戸大学大学院海事科学研究科  
 \*\* 水産総合研究センター水産工学研究所  
 \*\*\* 神戸大学大学院自然科学系先端融合研究課  
 \*\*\*\* 今治造船株式会社

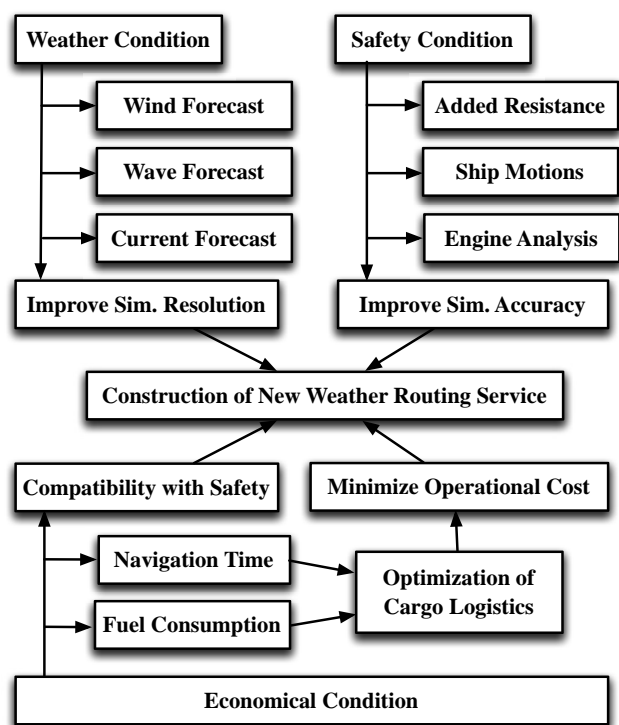


Fig. 1 New concept of desirable weather routing system

貨物物流の最適化など経済的側面とも組み合わせたシステム全体の高度化が最終的に必要とされるが、現状のウェザールーティングではこれらを高度化するための基礎データも蓄積が少なく、また荒天航海の安全性を評価する理論体系も耐航性分野の研究成果を十分に反映させたものであるとは言い難い。上記背景より、本研究では安全性評価の側面にまず検討対象を絞り、国際航海に従事するバラ積み貨物船を対象に船体運動、航海・機関パラメーター、気象海象について長期間のオンボード計測についてシステムを開発の上で現在に至るまで継続中である。一方、データ分析および理論的な検討については、荒天航海時の波浪特性、船体運動および関連項目との関係を様々な角度から整理し、EUT(Enhanced Unified Theory)<sup>8)</sup>による応答振幅の数値計算の結果をもとに実海域での荒天追波時における横揺れおよび縦揺れスペクトルの推定精度をある程度明らかにすることができたので報告する。

## 2. 実海域でのオンボード計測

### 2.1 対象船舶および実施期間

ここでは国際航海に従事するバラ積み貨物船をオンボード計測の対象とした。主要目は垂線間長 160.4m、幅 27.2m、満載喫水 9.5m、航海速力 14 ノットであり、喫水、排水量および重心位置は貨物の種類および積載状態によって大きく変動する。Fig. 2 に実験対象としたバラ積み貨物船の外観を示す。

当該船舶は定期的な航路を持たない不定期船であり、2010 年 6 月に竣工後、これまで日本国内に一度も寄港せず、太平



Fig. 2 View of 20,000DWT bulk carrier in this study

洋、大西洋、北半球、南半球と地球全体をその時々々の貨物需要に従って航海を続けている。船橋まわりに各種の各計測センサーを設置し、また航海情報および機関情報は VDR およびエンジンデータロガーからそれぞれの計測値を PC にデータ転送するオンボード計測システムを新たに構築している。2010 年の 6 月に空船状態で処女航海を日本から北米へ行った時点より計測を開始し、現在も計測を実施中である。データ回収は開始 1 年後の 2011 年 6 月に実施し、2012 年 12 月には計測中に船体運動の衝撃にて損傷したと思われる PC の交換も併せて行っている。

### 2.2 オンボード計測の主要項目

ここでは航海中の主要な計測項目、計測機器および計測状況を Table 1 に示す。表に示すとおり、観測の全期間にわたってデータが得られているのは船体運動のみであり、航海および機関データは最初の 1 年間、船体周りの波浪スペクトルは最初の 2 ヶ月のデータが存在する。これは外洋を長期間にわたって航海する船舶のため、データロガーとして設置した PC のハードディスクが衝撃によって破損したことによる。この点については上述したとおり、ハードディスクより衝撃に強いとされる SSD ドライブの PC に交換したことで対応したところである。本研究では全データが揃っている 2010 年 7 月を中心に分析結果を紹介し、2011 年以降のデータも今後報告する予定としている。

### 2.3 船体運動および航海・機関データの特性

ここでは荒天に遭遇した 2010 年 7 月上旬および 2011 年 5 月末～6 月初めにかけての 2 例についてデータ整理した結果を示す。Fig. 3 および Fig. 4 は 0.1s ごとに計測された roll および pitch の時系列をもとに、2010 年 7 月 5 日～7 日、2010 年 9 月 26 日～30 日にかけて 1 時間ごとに有意振幅を求めた値についての変動を示す。これらと同時期において船速、船首方位、機関回転数、平均風向、平均風速の 1 時間ごとの平均値 (1s ごとの観測値) の変化を Fig. 5 および Fig. 6 に示す。

Table 1 Main observed parameters onboard observation

| Parameters                     | Observed units      | Observed periods |
|--------------------------------|---------------------|------------------|
| Ship motions                   | Inertial unit       | All Periods      |
| Positions, speeds and headings | VDR                 | 2010.6-2011.7    |
| Wind speeds and directions     | VDR                 | 2010.6-2011.7    |
| Engine revolutions and thrusts | Engine data logger  | 2010.6-2011.7    |
| Wave spectrums                 | Radar wave analyzer | 2010.6-2010.7    |

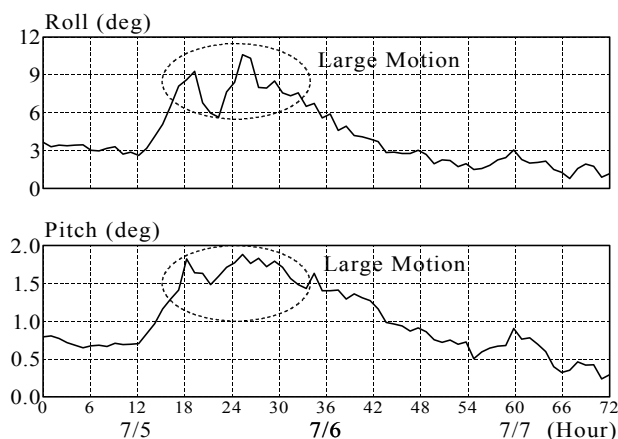


Fig. 3 Variation of significant amplitudes of roll and pitch in July 4-6, 2010

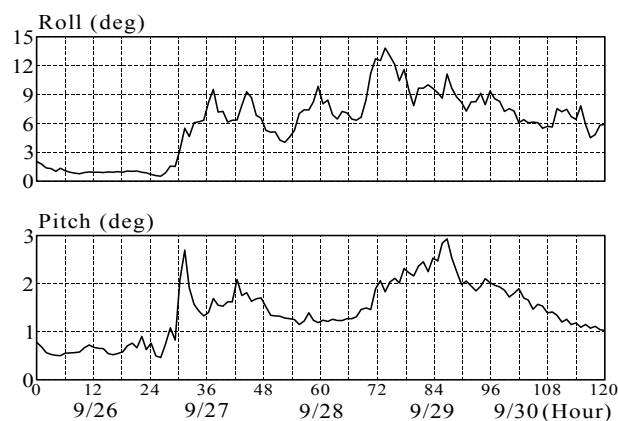


Fig. 4 Variation of significant amplitudes of roll and pitch in September 26-30, 2010

2010年7月のケースは空船状態にて日本から北米に向かう航海のアラスカ沖で観測されたものであり、後述するが有義波高3~4mの荒天に遭遇したときの状況である。船首方位が大きく変動しているが、これは相対波向が横波状態となるのを避けるために取った操舵と考えられる。平均風速は最大で15m/s発生し、低気圧の影響を受けているものと推察される。rollおよびpitchはそれぞれ11°および2°発生しており、特にrollの影響が顕著であった。船速については通常の14ノットを保

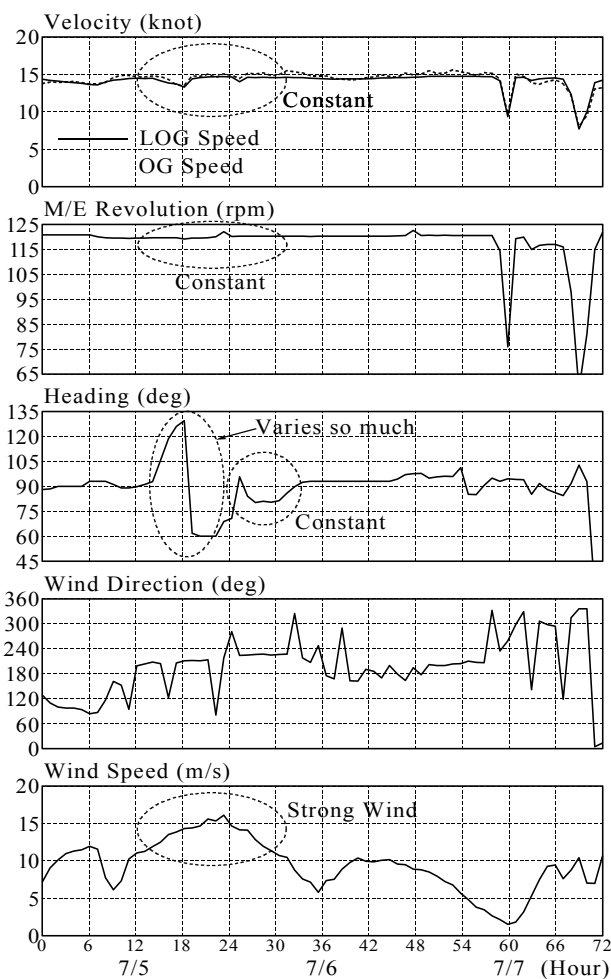


Fig. 5 Variation of mean values of ship speed, heading, M/E revolution, wind direction, and wind speed in July 4-6, 2010

持しており、このケースでは船速低下は見られなかった。一方、2010年9月末のケースについては、貨物を積載した状態でアジアから北米に向かって太平洋上を東航する中で観測されたものであり、Table 1に示すとおり、このケースの波浪データは計測できていないが、平均風速は最大で20m/s発生していることから、前者より厳しい海象条件の中を航行していたと思われる。rollは先のケースと同じ程度の13°発生しているが、ここではpitchが最大で5.5°と非常に大きく卓越しているこ

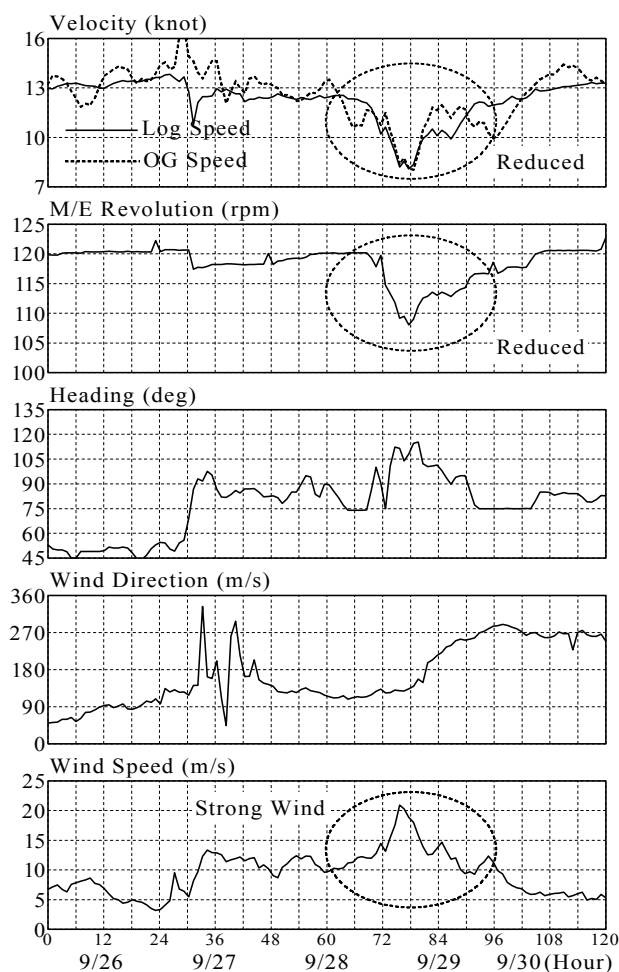


Fig. 6 Variation of mean values of ship speed, heading, M/E revolution, wind direction, and wind speed in September 26-30, 2010

とが特徴的であった。これに伴い、船速および機関回転数も大きく低下しており、10ノットを切る状態での航海が2日程度連続的に発生していることが分かる。このときの操船状況の詳細は不明であるが、向波状態でpitchが卓越しスラミング等の発生にて機関回転数を低下させる操船を行った可能性が高い。

## 2.4 船速と他のパラメータの相関関係

前節で示したデータにおいても船体運動の卓越時に顕著な船速低下が見られる場合とそうでない場合が存在するが、ここでは2010年6月～2011年6月における1年間のデータを対象に船速と他のパラメータの相関関係を整理した結果を紹介する。Fig. 7に船速、roll、pitch、平均風速および機関回転数との相関関係を示す。ただしrollと船速に関する相関図については、停泊中および沖待ちの状況でのデータを除去するため、船速が6ノット以上のケースを抽出し相関係数を計算した結果を示している。

内藤らによれば<sup>9)</sup>、荒天時の船速低下について、操船手段として減速の機関操作を行った場合（意図的減速）と波浪中の

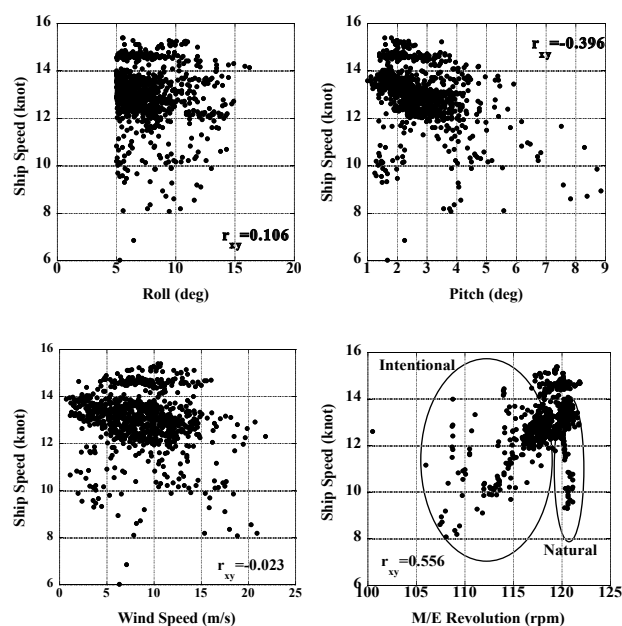


Fig. 7 Relations among ship speed, roll, pitch, wind speed and engine revolution

抵抗増加が顕著に作用した場合（自然減速）に大別できるとされている。ただし、明確な船速低下が見られない場合においても抵抗増加は発生している可能性があるため、厳密な意味で両者のどちらにパターン分けするのは容易ではない。このため、本研究では船速と機関回転数が同時に低下した場合を意図的減速と考え、船速の低下にもかかわらず機関回転数に低下が見られない場合を自然減速と定義することにした。図より多くのケースは意図的減速のパターンに当てはまり、荒天遭遇時にはあらかじめ減速操作で操船対応していることが分かる。一方、機関回転数が常用出力時の120rpm近くにあるにもかかわらず、船速が10ノット程度に低下しているケースが自然減速と考えられるが、全体における割合は意図的減速に比較して少ないことが分かる。どのような背景で上記のような減速パターンの割合となっているのかについて、当時の航海記録、航海データ、船体運動データ、さらには機関出力に関するデータとの多面的な分析が必要であることを示唆しており、今後の研究で詳細に分析する予定である。相関係数は機関回転数やpitchとの相関が想像されたとおり大きく、理論どおりrollとの相関は非常に小さいことがデータより確認できた。今後は機関関係の他のパラメータとの相関関係も詳細に分析中であり、この点もさらに明確にしたいと考えている。

## 3. 荒天時における船周りの波浪特性

前述したとおり、計測開始後の2ヶ月間にわたって船周りの波浪が方向スペクトルの形で得られている。ここではTable 1に示した期間におけるデータを分析した。

### 3.1 波浪の方向スペクトル特性

船橋に設置されたレーダーにより船の前方約1海里的海面反射の強度から方向波数スペクトルの形で求められる。後述する船体運動の検証にあたり、周波数をパラメータとした方向スペクトルが必要のため、レーダ波浪計から得られた波数スペクトル  $E_W(k_x, k_y)$  は、 $x$  および  $y$  方向の波数である  $k_x$  および  $k_y$  を周波数  $f$  と方向  $\theta$  に変換し、次の関係式を用いて方向スペクトル  $D_W(f, \theta)$  に変換した。

$$D_W(f, \theta) = \frac{16 \cdot 2\pi^4 \cdot f^3}{g^2} E_W(k_x, k_y) \quad (1)$$

ただし、 $g$  は地球の重力加速度 ( $= 9.8\text{m/s}^2$ ) である。ここで方向角は  $10^\circ$  ごと、周波数は  $0.01\text{Hz}$  ごとに  $0.04 \sim 0.28\text{Hz}$  についてデータ出力した。Fig. 8 に2010年7月6日4:00における船周りの波浪についての方向スペクトルを示す。

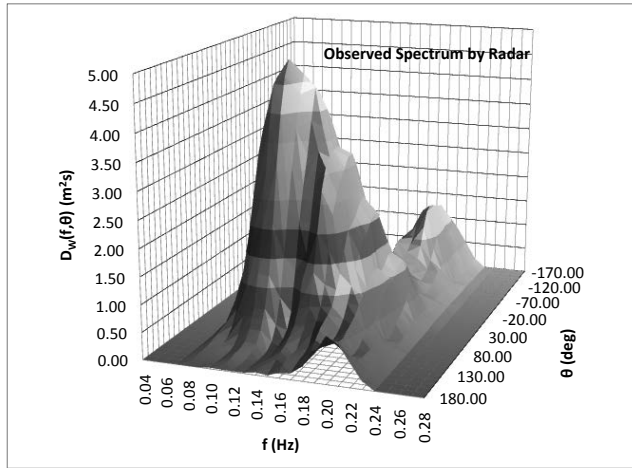


Fig. 8 Observed directional spectrum around ship at 4:00 in July 6, 2010

本論文では波向について、船尾から船首方向に向かって反時計回りに測る角度で示している。図より方向角は  $30^\circ$  (斜め追波)、周波数は  $0.14\text{Hz}$  ( $7.1\text{s}$ ) 付近にピークが見られる。方向角および周波数の分散形状はうねりではなく風波のそれに近い。これは船周りの平均風速が  $15\text{m/s}$  前後であったことから妥当な結果と考えられる。しかし後述するが、 $0.1\text{Hz}$  以下の低周波数帯、 $0.3\text{Hz}$  以上の高周波数帯での再現性については限界があり、この点については次節で示す数値計算の結果とも比較の上で考察する。

### 3.2 波浪モデルによる再現追算

ウェザルーティングにおいては船舶への影響を予測するにあたり、気象海象の予報精度が最も重要となる。しかしスペクトル形状まで含めた再現性を検証した事例はほとんどなく、ここではレーダー式波浪計にて観測された方向スペクトルの再現を試みた。計算機能力が発達した現在、様々な気象および海象モデルが構築・使用されているが、対象船舶が太平洋を横断する航路であったことを踏まえ地球全体など広域を計算領

域として設定可能な WW3(Wave Watch III)<sup>10)11)</sup> を使用した。これは米国の NOAA によって開発および発展してきた実績のあるモデルである。計算領域は地球全体で設定し、計算格子の間隔は緯度方向に  $1^\circ$ 、経度方向に  $1.25^\circ$  で設定した。計算点における気象データについては、米国中央環境センター(NCEP)が公開している再解析値を設定した。Fig. 9 に7月6日4:00における船舶位置 ( $54.533133^\circ \text{N}$ ,  $147.92115^\circ \text{W}$ ) における波浪の方向スペクトルについての追算結果を示す。

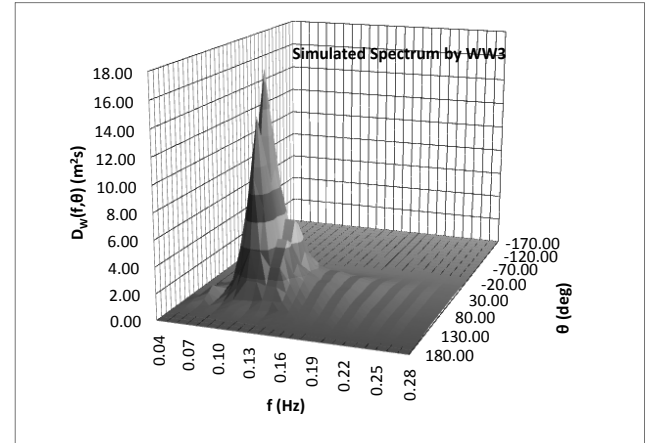


Fig. 9 Simulated directional spectrum around ship at 4:00 in July 6, 2010

周波数特性については Fig. 8 よりも若干ピークが低周波数側に存在し、レーダー式波浪計による観測結果の低周波数側の再現性が低いとされる点に矛盾していない一つの結果と思われる。図より追算によるスペクトルは計測値よりも方向角、周波数ともにピークを中心に尖った形状となっている。これは計算の解像度である格子間隔が  $1^\circ$  という粗い設定であるため、船周りの風場が正確に再現できていない可能性が考えられる。これは通常のウェザルーティングにて広域にて予報される数値計算が船周りの波浪状況を正確に再現できていないおそれを示唆する結果である。一方、両者が波浪の統計的な性質においてレーリー分布に従うと仮定すれば、有義波高および平均周期の値は以下にて求められ、ここでは実測値と追算値の定量的な比較を実施した。波浪の方向スペクトルと有義波高および平均周期の関係は次式で表される。

$$H_{1/3} = 4.0\sqrt{m_0} \quad (2)$$

$$T_{02} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (3)$$

ここで、 $m_0$  および  $m_2$  はスペクトルの0次および2次モーメントであり、それぞれ次式で示される。

$$m_0 = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} D_W(f, \theta) d\theta df \quad (4)$$

$$m_2 = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} f^2 D_W(f, \theta) d\theta df \quad (5)$$

$D_W(f, \theta)$  は波浪の方向スペクトル,  $f$  は周波数,  $\theta$  は方向角を示す. Fig. 10 に 7 月 6 日 3:00~6:00 にかけての有義波高および平均周期の実測値および追算値の比較をそれぞれ示す. 図より両者のスペクトル形状はかなり異なっているものの, 有

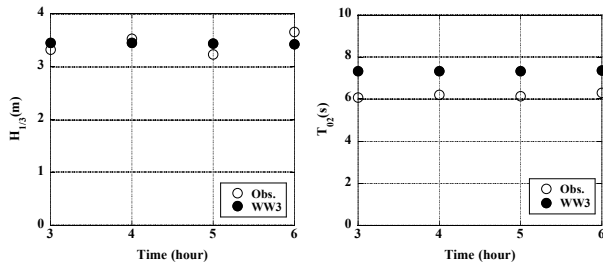


Fig. 10 Variation of significant wave heights and mean wave periods in 3:00-6:00 July 6, 2010

義波高に換算すると大きな違いが見られないことが分かる. 一方, 平均周期は観測値が追算値よりも 1s 程度小さくなっている. 通常の前報は有義波高にて議論されることが多いが, 周波数および方向分散を含めたスペクトル特性の違いが船体運動にどの程度違いが発生するのかを検証する.

#### 4. 荒天追い波時の船体運動の比較・検証

現在のウェザールーティングでは荒天時の波浪に関する再現性をスペクトル形状まで議論していないが, 船体運動は波高だけでなく, 波向や周期, これらから決まる出会い周期が非常に重要な要素となる. ここでは船周りの波浪の実測値および追算値をそれぞれ外力とした場合の船体応答をスペクトルの形で求め, その差を比較・検証する. 再現対象とした 2010 年 7 月 6 日の 3:00~6:00 の前日である 7 月 5 日の 12:00~24:00 の時間帯にて Fig. 5 に示すとおり, 船首方位を大きく変化させている. これは荒天航海の操船として意図的に針路を何回も変更したものと考え, この期間の船体運動は操舵影響が強く反映されていると思われる. また平均風速も最大で 15m/s 程度まで達しており, 特に Surge や Sway など水平方向への船体運動へ影響していると思われる. このため, 操舵影響が微小と見なせる, 針路がほぼ一定となった区間を分析対象とし, かつ Pitch および Roll などの波浪によって支配される運動を対象としたため, 海流および風による影響も微小と見なせると考えた. よって本研究では波浪中の船体応答により実測値と計算値の比較を近似的に検証した.

##### 4.1 船体運動における応答振幅の計算

ここでは 2010 年 7 月 6 日の 3:00~6:00 にアラスカ沖を航行中の船体運動を対象に検証を行う. 当該航海は竣工後に日本から北米に向けた空船航海を行っていたため, 当時の喫水および重心条件は平均喫水 4.66m の 1.82m の船首トリム, 重心高さは 6.91m であった. この条件にて周波数  $f=0.04\sim0.28\text{Hz}$  まで  $\Delta f=0.01\text{Hz}$  ごとに, 波向  $\theta$  は船尾 ( $0^\circ$ ) から船首 ( $180^\circ$ )

まで  $\Delta\theta=10^\circ$  ごとに計算を行った. 応答振幅の計算にあたり, 船体周りのラディエーション力, ディフラクション力, 波浪強制力については EUT により行った. EUT は船体内部を二次元問題, 船体外部を三次元問題でそれぞれモデル化し, 両者のマッチングを満たす未知ポテンシャルを決定する手法である. 理論の詳細は参考文献<sup>8) 12)</sup>に譲るが, 当該手法は高速船の場合に精度が低下すること, 応答振幅は実験値よりも若干大きくなるということが述べられている. しかし, ここでは船速は 14 ノット, フルード数に換算して 0.18 であり高速船の領域には当たらないと思われるため, この計算手法を用いることとした. Fig. 11 および Fig. 12 に roll および pitch の波向・周波数ごとの応答振幅の計算結果を示す. 図より roll について

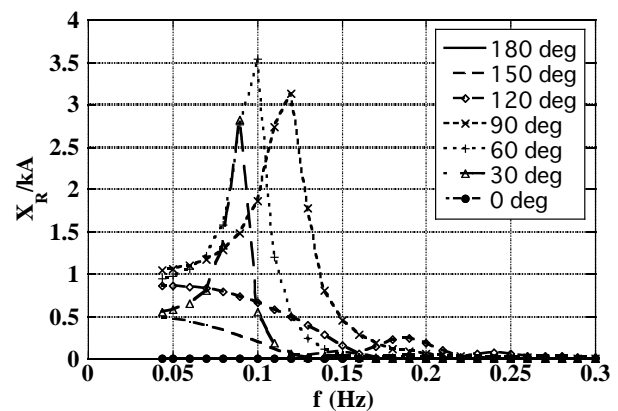


Fig. 11 Response function of roll motion at  $F_n=0.18$ (Ballast condition)

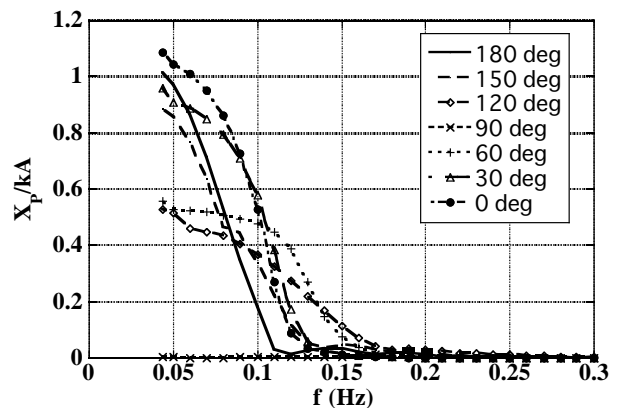


Fig. 12 Response function of pitch motion at  $F_n=0.18$ (Ballast condition)

は斜め追波の時に応答が最も大きく, ここで再現しようとしているケースは roll が卓越するであろうことを示唆している,

##### 4.2 船体運動の方向スペクトル, 有義値での比較

前述した船体運動の応答関数を用い, 荒天航海時の roll および pitch の方向スペクトル, 有義振幅等を推定することが可

能となる．roll および pitch の応答振幅をそれぞれ  $X_R(f, \theta)$  および  $X_P(f, \theta)$  とすれば，これらの方向スペクトルは次式にて求められる．

$$DS_R(f, \theta) = |X_R(f, \theta)|^2 D_W(f, \theta) \quad (6)$$

$$DS_P(f, \theta) = |X_P(f, \theta)|^2 D_W(f, \theta) \quad (7)$$

ここで  $DS_R(f, \theta)$  および  $DS_P(f, \theta)$  は roll および pitch の方向スペクトルを示す．有義波高および平均周期を求める式と全く同様に，これら方向スペクトルから roll および pitch の有義振幅および平均周期も計算される．また roll および pitch の実測値との比較については，実測値は方向スペクトルとして計測されていないため，時系列データを FFT 解析することで周波数スペクトルを求め，これを次式にて有義振幅および平均周期を算出した．

$$\begin{aligned} AR_{1/3} &= 4.0 \sqrt{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} DS_R(f, \theta) d\theta df} \\ &= 4.0 \sqrt{\int_0^\infty S_R(f) df} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} AP_{1/3} &= 4.0 \sqrt{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} DS_P(f, \theta) d\theta df} \\ &= 4.0 \sqrt{\int_0^\infty S_P(f) df} \end{aligned} \quad (9)$$

$$TR_{02} = \sqrt{\frac{r_0}{r_2}} \quad (10)$$

$$TP_{02} = \sqrt{\frac{p_0}{p_2}} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} r_0 &= \int_0^\infty \int_0^{2\pi} DS_R(f, \theta) d\theta df \\ &= \int_0^\infty S_R(f) df \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} r_2 &= \int_0^\infty \int_0^{2\pi} f^2 DS_R(f, \theta) d\theta df \\ &= \int_0^\infty f^2 S_R(f) df \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} p_0 &= \int_0^\infty \int_0^{2\pi} DS_P(f, \theta) d\theta df \\ &= \int_0^\infty S_P(f) df \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} p_2 &= \int_0^\infty \int_0^{2\pi} f^2 DS_P(f, \theta) d\theta df \\ &= \int_0^\infty f^2 S_P(f) df \end{aligned} \quad (15)$$

ここで， $AR_{1/3}$  および  $AP_{1/3}$  は roll および pitch の有義振幅， $TR_{02}$  および  $TP_{02}$  はそれらの平均周期を示し， $S_R(f)$  および

$S_P(f)$  は実測値から求めた roll および pitch の周波数スペクトルを示す．前述したとおり，roll および pitch の実測値は方向スペクトルとして求められていないため，スペクトルの方向分散性を検証することができない．このため，計算で求められる roll および pitch の方向スペクトル  $DS_R(f, \theta)$  および  $DS_P(f, \theta)$  を方向角  $\theta$  について積分すればそれぞれの周波数スペクトルが求められるため，この形で船体運動の再現性を比較することとした．Fig. 13 および Fig. 14 に 2010 年 7 月 6 日 4:00 における roll および pitch の実測値から求められた周波数スペクトルと船体応答振幅と波浪の実測値または追算値をもとに求めた方向スペクトルを方向角に積分して得られた周波数スペクトルの比較を示す．

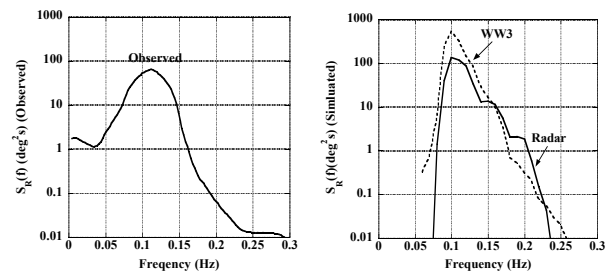


Fig. 13 Comparison of spectrums of roll motion between observed and simulated at 4:00 in July 6, 2010

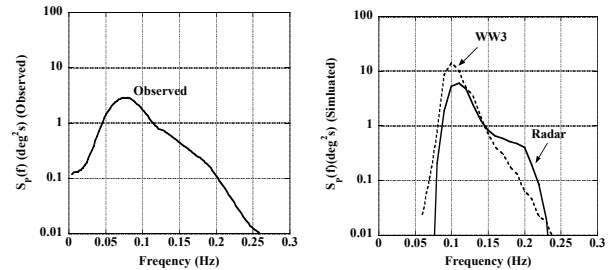


Fig. 14 Comparison of spectrums of pitch motion between observed and simulated at 4:00 in July 6, 2010

図より roll および pitch とともにスペクトルのピークエネルギーは波浪の実測値をもとに推定した方が近く，追算値をもとにした推定値は実測値を過大評価している．周波数特性については，roll は実測値および推定値ともに大きな違いは見られないが，pitch については実測値のピーク周波数は 10s 以上のところにあるが，推定値は両方とも 10s 以下の領域にあり，この点が再現できていないことが分かる．これらのスペクトルをもとに 2010 年 7 月 6 日 3:00～6:00 における roll および pitch の有義振幅および平均周期の計算結果（実測値および推定値）の比較を Fig. 15 および Fig. 16 に示す．

図より roll および pitch とともに有義振幅は波浪の実測値をも



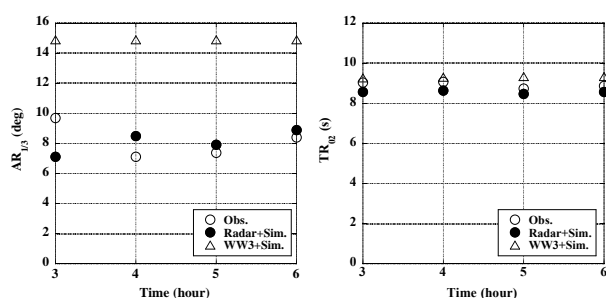


Fig. 15 Comparison of significant amplitude and mean period of roll motion from 3:00 to 6:00 in July 6, 2010

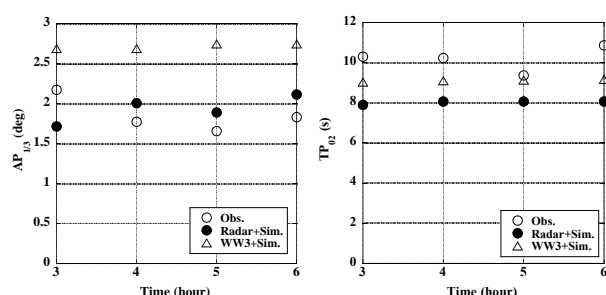


Fig. 16 Comparison of significant amplitude and mean period of pitch motion from 3:00 to 6:00 in July 6, 2010

とに推定した場合の方が運動の実測値に非常に近いことが明らかとなった。一方、波浪の追算値をもとに推定した場合は実測値の 1.5~2 倍程度大きく、明らかに過大評価していることが分かる。平均周期については roll の場合は三者とも大きな違いは見られないが、pitch については実測値は 10s 前後であるのに対し、計算値は 6~8s となっている。この点について、roll の場合は固有周期にてほぼ決まることから実測値と計算値にほとんど差が見られなかったものと考えられるが、pitch の場合は斜め追波の状況であったことから、出会い周期は長くなる傾向にあるが、レーダー式波浪計または波浪追算にて得られた方向スペクトルの低周波数側の精度が十分でないことが計算精度に影響しているであろうことが明らかとなった。特に pitch については波向の影響を非常に強く受けるため、この点について鋭意研究を進める必要がある。

## 5. 結論

- (1) 荒天に遭遇した 2010 年 7 月および 2010 年 9 月のケースとも船体が横波状態など危険な状況とならないよう現場で経験的に操舵を繰り返していると思われる形跡が確認できた。しかし、roll および pitch の有義振幅が顕著に低減した傾向は確認できず、経験的な対応の限界を裏付ける。
- (2) 船速低下の傾向を調べるため、いくつかのパラメータと相

関分析を実施した。pitch と船速の相関係数は約 0.4、roll は 0.1 程度であった。全体的な傾向として、船速低下に関連する運動モードはほぼ pitch によって説明できると考えられる。

- (3) 船速と機関回転数との相関係数は 0.556 であり、荒天に遭遇したことにより機関回転数をあらかじめ低下させる操船を選択した意図的な減速パターンが多くを占めていることが分かった。一方、機関回転数は通常の 120 程度でありながら船速が 10 ノットであった自然減速のパターンも何割か見られたが、全体に占める割合は意図的な減速に比較して少ない。
- (4) 2010 年 7 月 6 日のアラスカ沖で遭遇した荒天時の波浪について、レーダー式波浪計で観測した方向スペクトルの実測値と WW3 による追算値を比較した。有義波高として比較すると両者はほぼ同じであったが、前者はエネルギーピークが後者よりも低く、方向角および周波数ともに分散が大きいことが明らかとなった。
- (5) これらと EUT にて求められた船体応答値をもとに roll および pitch の方向スペクトルを推定し、roll および pitch とも WW3 をもとに推定した場合、実測値の 1.5~2 倍の有義振幅となるが、レーダー式波浪計の計測値をもとに推定した値は実測値にもかなり近い。これより、有義波高が同じであっても船体運動の再現値は大きく異なることが明らかとなり、方向スペクトルの精度が重要となる。また周波数が 0.1~0.25Hz くらいの範囲で卓越する実海域の船体運動については、本研究で提案した手法で実用上十分な精度で再現できることが明らかとなった。

## 6. 今後の課題

- (1) 波浪追算に関し、全球の波浪モデルである WW3 を用いたが、通常の前報で用いられる計算の解像度では風や波浪の局所性が十分に再現できていないことが示された。本研究の船舶の場合、気象が変化しない目安として 30 分間の航行距離を考えると 7 海里 (約 13km) くらいの解像度を持たせた計算も検討する必要性を窺わせる。ただし、現状の計算機性能ではこれは容易でなく、パソコン等による計算機環境の整備などがこれから必要となる。
- (2) 船体運動の周波数特性に関する再現度について、roll は実測値をほぼ正確に推定できているが、pitch については平均周期で比較すると推定値は実測値よりも 1~2s 短くなっており、スペクトルのピークもややずれている。ここで対象としたのは斜め追波の状況であり、出会い周期は長くなる傾向にある。レーダー式波浪計および数値計算で得られた方向スペクトルとともに 0.1Hz 未満の周波数帯にてエネルギーレベルが非常に小さいことがその原因として考えられる。船体周りの波浪に関する低周波数帯および高周波数帯のエネルギーレベルを適切に計測・予報できる研究の必要性が明らかとなった。

## 謝 辞

本研究の実施にあたり、オンボード計測に全面的にご協力いただいた正栄汽船株式会社および計測対象としたバラ積み貨物船の乗組員一同に深く感謝の意を表する。またデータ整理等に助力を得た神戸大学大学院海事科学研究科の学生諸君に感謝する。本研究は文部科学省・特別研究推進「輸送の三原則を統合した国際海上輸送システム創出の研究」（代表者：塩谷茂明教授，平成 20～23 年度）の一環として実施されたことを付記する。

## 参 考 文 献

- 1) 柏木正，岩下英嗣：船体運動・耐航性能編，成山堂書店，320p.，2012.
- 2) 安川宏紀，芳村康男：船体運動・操縦運動編，成山堂書店，170p.，2012.
- 3) 鈴木和夫，佐々木紀幸，川村隆文：船体抵抗と推進，成山堂書店，224p.，2011.
- 4) 庄司るり，足達宏之，大津皓平：ウェザールーティングシステムの構築に関する研究—I—アブログによる推進性能の推定—I，日本航海学会論文集，第 121 号，pp.19-26，2009.
- 5) メザウィブラヒム，庄司るり，田丸人意：ウェザー・ルーティングに使用する気象・海象情報の精度向上についての一考察，日本航海学会論文集，第 122 号，pp.209-217，2010.
- 6) 笹健児，寺田大介，塩谷茂明，若林伸和：荒天航海時の船体運動と海上輸送の安全・効率性の関係について，日本航海学会論文集，第 127 号，pp.79-87，2012.
- 7) Sasa, K., Terada, D., Shiotani, S., Wakabayahi, N., and Ohsawa, T.: Current Situation and Difficulty of Wave Forecast from Viewpoint of Ship Management, Proceedings of the 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2013, 2013.
- 8) 柏木正：前進しながら動揺する船の流体力学に関する新しい細長船理論の展開，日本造船学会論文集，第 178 号，pp.169-177，1995.
- 9) 内藤林，中村彰一：波浪中における船速低下及び推進性能について，関西造船協会誌，第 166 号，pp.25-34，1977.
- 10) Tolman, H.L.: Limiters in Third-Generation Wind Wave Models, Global Atmosphere and Ocean System, Vol.8, 2002.
- 11) 嶋田陽一，高橋桂子，塩谷茂明：国際海上輸送のための気象・波浪大規模予測システムの構築，日本航海学会論文集，第 127 号，pp.197-203，2012.
- 12) Kashiwagi, M., and Wang, X.: A New Slender-Ship Theory Valid for All Oscillatory Frequencies and Forward Speeds, Proceedings of the 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2013, 2013.