

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25282103

研究課題名(和文) 国際海上輸送における安全性・経済性・海洋環境を統合した新しい最適運航システム

研究課題名(英文) New Optimum System of Ship Operation Integrating Safety, Efficiency and Marine Environment in International Marine Transport

研究代表者

笹 健児 (Sasa, Kenji)

神戸大学・海事科学研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10360330

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：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、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)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とすることができたので報告する。

研究成果の概要(英文)：The emission of carbon dioxide has been restricted by the EEDI (Energy Efficiency Design Index). Weather routing services have become more important to shipping companies. However, there are accuracy deficiencies in the numerical models employed by such services for purposes such as weather forecast and the ship speed loss phenomenon. Moreover, the development of weather routing models has been hampered by insufficient accumulation of continuous data on ship motions, and the navigation, engine, and weather parameters. The data used for this study was collected over one year from a 20,000DWT class bulk carrier on worldwide voyages. Some new relationships regarding ship motions, speed loss, and wave conditions were developed, which were verified by experimental data and numerical simulations of the frequency response of the ship motion and of the weather and ocean.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：ウェザールーティング 船体運動 荒天航海 オンボード計測 船速低下 燃料消費 波浪推定 数値予報

1. 研究開始当初の背景

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。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。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。

2. 研究の目的

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「輸送の三原則を統合した国際海上輸送システムの創出」(文部科学省特別研究推進、2008～2011年度、4カ年)に取り組んできた。また著者らが船舶運航者を対象とした調査にて、外航航路の場合には最低でも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。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、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)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とすることができたので報告する。

3. 研究の方法

3.1 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9.82m、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。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。

3.2 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。図-1は0.1, 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4日～6日にかけて1時間ごとに有義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、平均航向、平均風速の1時間ごとの平均値(1sごとの観測値)の変化を図-2に示す。

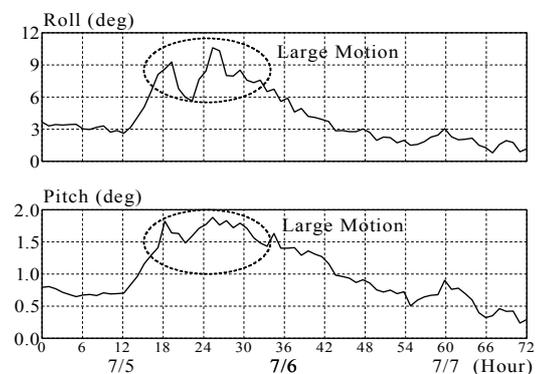


図-1 船体運動の有義振幅(2010年7月4日～6日)

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ノットを保持しており、このケースでは船速低下は見られなかった。

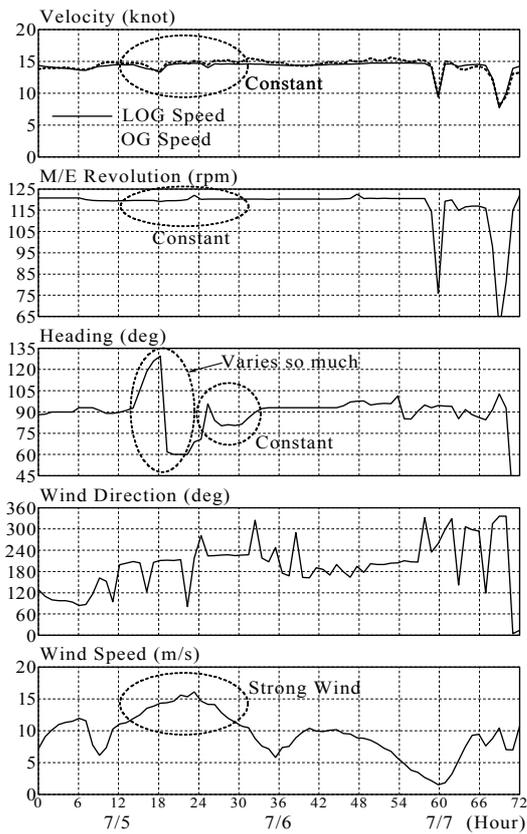


図-2 船速、船首方位、風向、風速の変化 (2010年7月4日～6日)

4. 研究成果

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。ここでは表-1に示した期間におけるデータを分析した。

4.1 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海里の海面領域(1920m×1920m)における海面反射の強度について、256×256点(7.5mの解像度)の画像データとして出力し、これを二次元フーリエ変換を用いた方向波数スペクトルに変換、データ出力するシステムとなっている。後述する船体運動の検証にあたり、方向角および周波数をパラメータとした方向スペクトルとしてのデータが必要となるため、レーダー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 と方向角 θ に変換し、次の関係式により方向スペクトル $D_W(f, \theta)$ に変換した。

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

ここで、 g は地球の重力加速度(=9.8m/s²)である。方向角 θ は 10° ごと、周波数 f は

0.01Hz ごとに 0.04~0.28Hz についてデータ出力した。図-3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。

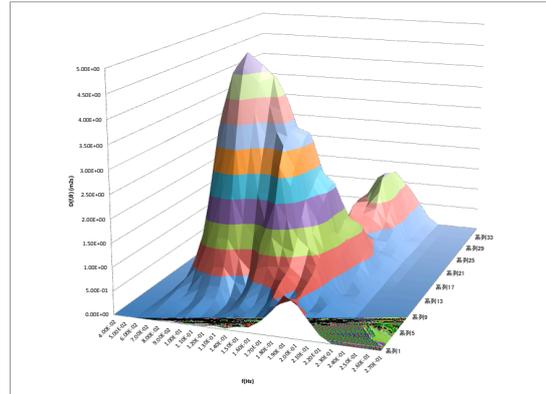


図-3 レーダー波浪計にて計測された船周りの方向スペクトル (2010年7月6日4:00)

図より方向角は 30° (斜め追波)、周波数は 0.14Hz (7.1s) 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 15m/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、0.1Hz 以下の低周波数帯、0.3Hz 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。

4.2 波浪モデルによる再現追算

ウェザー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数値的に検証した事例はほとんど見られず、関連する研究の多くは気象庁などの研究機関が計算した結果を使用している。しかし、気象関係の研究機関が計算した事例は大局的な気象海象の変化を知ることが目的としており、通常は 1° 程度の粗い解像度で計算される。微速で大洋上を移動する船舶の場合、このような解像度での気象情報では航海中に急変する風や波浪場に関する情報が再現されていないことが多く、本研究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比較により妥当な計算解像度の設定についても考察する。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) (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°、経度方向に 1.25° 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。図-4 に 7 月 6 日 4:00 における船舶位置 (54.533133° N, 147.92115° 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。

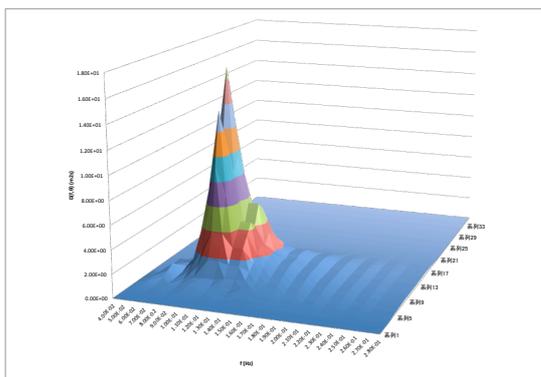


図-4 WW3 による波浪スペクトルの追算結果 (2010 年 7 月 6 日 4:00)

周波数特性については図-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° という非常に粗い設定であるため、船周りの風場の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、予め気象関係の機関が広域にて予報してい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、 θ は方向角を示す。図-5 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。通常予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。

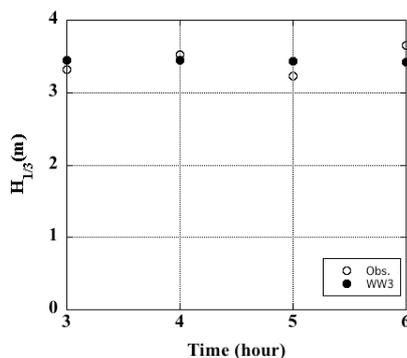


図-5 有義波高の実測値および追算値の比較 (2010 年 7 月 6 日 3:00 ~ 6:00)

4.3 荒天追い波時の船体運動の比較・検証

現在のウェザ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 の時間帯にて図-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。

4.4 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 $f=0.04\sim 0.28\text{Hz}$ まで $\Delta f=0.01\text{Hz}$ ごとに、波向 θ は 船尾 (0°) から船首 (180°) 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。理論の詳細は関連文献(柏木ら)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。図-6 に pitch の波向・周波数ごとの応答振幅の計算結果を示す。

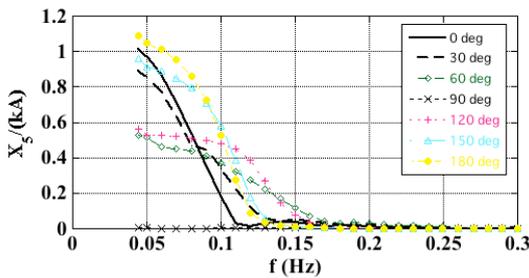


図-6 Pitch 運動の周波数応答関数の計算結果 ($F_r=0.18$, バラスト状態)

図より roll について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。

4.5 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。

$$DS_R(f, \theta) = |X_R(f, \theta)|^2 D_W(f, \theta) \quad (4)$$

$$DS_P(f, \theta) = |X_P(f, \theta)|^2 D_W(f, \theta) \quad (5)$$

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同様、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。

$$\begin{aligned} AR_{1/3} &= 4.0 \sqrt{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} DS_R(f, \theta) d\theta df} \\ &= 4.0 \sqrt{\int_0^\infty S_R(f) df} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} AP_{1/3} &= 4.0 \sqrt{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} DS_P(f, \theta) d\theta df} \\ &= 4.0 \sqrt{\int_0^\infty S_P(f) df} \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 $AR_{1/3}$ および $AP_{1/3}$ は roll および pitch の有義振幅を示し、 $S_R(f)$ 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 θ 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。図-7 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。

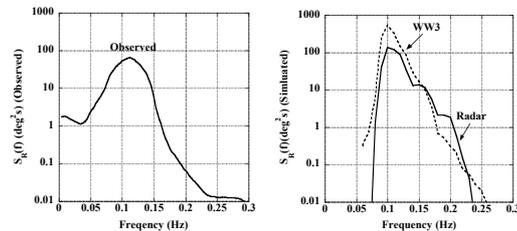


図-7 roll の実測値および波浪の実測値または追算値をもとに求めた方向スペクトルから得られた周波数スペクトルの比較 (2010 年 7 月 6 日 4:00)

roll および pitch とともに波浪の実測値をもとに推定した場合の方が運動の実測値に非常に近い。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。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 について実測値の方が 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、この点について今後も鋭意研究を継続し、明確にする予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 11 件)

(1) 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

(2) 笹 健児、塩谷 茂明、寺田 大介、若林 伸和、大澤 輝夫：データ分析から見た船舶運航における波浪予報の現状と課題について、土木学会論文集 B3 (海洋開発) 特集号、Vol. 69、No.2、I_61-66、2013

(3) Sasa, K., Terada, D., Shiotani, S., Wakabayashi, 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, pp.1-8, 2013

(4) Chen, C., Shiotani, S. and Sasa, K.: “Numerical Ship Navigation Based on Weather and Ocean Simulation”, Ocean Engineering Journal, Vol.69, pp.43-53, 2013

(5) 笹 健児、寺田 大介、塩谷 茂明、若林 伸和、池淵 卓郎：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—、日本船舶海洋工学会論文集、第 18 号、pp.167-175、2013

(6) Sasa, K., Chen, C., Shiotani, S., Ohsawa, T. and Terada, D.: “Numerical Analysis of Failed Forecasts of Waves under Low Pressures from Viewpoint of Ship Operation”, Proceedings of the 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2014, pp.1-8, 2014

(7) 笹 健児、陳 辰、塩谷 茂明、若林 伸和、寺田 大介：沿岸から離れた海域における波浪特性と船舶運航への活用に関する基礎的研究、土木学会論文集 B3 (海洋開発) 特集号、Vol.71、No.2、pp.I_185-I_190、2015

(8) Chen, C., Shiotani, S. and Sasa, K.: “Effect of Ocean Currents on Ship Navigation in the East China Sea”, Journal of Ocean Engineering, Vol.104, pp.283-293, 2015

(9) Sasa, K., Terada, D., Shiotani, S., Wakabayashi, N., Ikebuchi, T., Chen, C., Takayama, A. and Uchida, M.: “Evaluation of Ship Performance in International Maritime Transportation using an Onboard Observation System—In Case of a Bulk Carrier for International Voyages—”, Journal of Ocean Engineering, Vol.104, pp.294-309, 2015

(10) Chen, C., Shiotani, S. and Sasa, K.: “Study on a Numerical Navigation System in the East China Sea”, Journal of Applied Ocean Research, Vol.53, pp.257-266, 2015

(11) Sasa, K., Lu, L. and Chen, C.: “A Basic Study on Ship Speed Loss from the Viewpoint of Geographic Conditions and Ship Performance”, Proceedings of the 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2016, pp.1-8, 2016 (掲載決定)

〔学会発表〕(計 4 件)

(1) 笹 健児：ウェザールーティングの利用情報および太平洋沿岸を航行する大型フェリーの波浪予報から見た安全運航のあり方、日本船舶海洋工学会実海域性能研究会、2013 年 1 月 15 日 (海上技術安全研究所、東京都・三鷹市)

(2) 笹 健児、Odd M. Faltinsen、塩谷 茂明、内田 誠：実海域における船速低下の計算手法ごとの定量評価と検証、日本船舶海洋工学会第 1 回推進・運動性能研究会、2015 年 6 月 10 日 (大阪府立大学 I-site なんば、大阪府・大阪市)

(3) 笹 健児、Odd M. Faltinsen、Jasna Prpic-Orsic：実海域における船速低下の計算手法ごとの定量評価と検証その 2 (時間領域での解析)、日本船舶海洋工学会第 2 回推進・運動性能研究会、2015 年 10 月 22 日 (九州大学応用力学研究所、福岡県・春日市)

(4) 笹 健児：ばら積み貨物船による荒天航海に関する諸特性について—海域・季節ごとの比較—、日本船舶海洋工学会・第 72 回実海域推進性能研究会、2016 年 4 月 28 日 (東京海洋大学海洋工学部、東京都江東区)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

笹 健児 (神戸大学海事科学研究科・准教授)
研究者番号：10360330

(2) 研究分担者

塩谷 茂明 (神戸大学海事科学研究科・教授)
研究者番号：00105363

寺田 大介 (水産工学研究所漁船生産工学部・主任研究員)

研究者番号：80435453

内田 誠 (神戸大学海事科学研究科・教授)

研究者番号：90176694

庄司 るり (東京海洋大学海洋科学技術研究科・教授)

研究者番号：50272729

高山 敦好 (久留米工業大学工学部・准教授)

研究者番号：00624230