

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成30年 8月24日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K12474

研究課題名(和文) 荒天時における船舶機関の運転制御および波浪影響の連携評価による新運航システム

研究課題名(英文) New Operation System Evaluating Engine Control and Wave Motions in Rough Seas

研究代表者

笹 健児 (Sasa, Kenji)

神戸大学・海事科学研究科・准教授

研究者番号：10360330

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではばら積み貨物船を対象に実海域データを約6年間にわたって計測しており、荒天時の意識的減速に関する目安として示されている鉛直加速度、横揺角、海水打ち込みおよびスラミングの発生確率を計算した。一方、荒天航海時は船橋だけでなく、機関室においても主機の過負荷を防止する目的で、様々なパラメーターをモニタリングしていると言われる。このため主機関係の指標も多面的にデータ処理し、他のパラメーターとの変動関係性についても比較検証していき、ばら積み貨物船の荒天航海時に対する船速低下を支配する要因を考察した。

研究成果の概要(英文)：In this study, onboard measuring of ship performances has been implemented for six years to know the slow down patterns in rough seas. Here, following parameters are focused to analyze the voluntary speed loss, such as the vertical acceleration, roll angle, probabilities of deck wetness and slamming, etc. Furthermore, various parameters are also being monitored in the engine room. This point is researched on the nationwide questionnaire for shipping companies, and measured parameters related on main engine. New parameters to evaluate the voluntary speed loss are summarized.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：船舶性能 主機特性 荒天航海 船速低下 実海域 ウェザールーティング

## 1. 研究開始当初の背景

地球上の95%以上の貨物輸送は船舶による海上輸送にて担われており、天然資源、水、人口分布、食糧事情、経済事情など多様な背景をもとに現代社会の大動脈としての役割を果たしている。一方、台風の発生パターンなどの気象変化、燃料費の高騰、海洋上の排出ガス規制(EEDI)など輸送の定時性、環境負荷の減少、安全性といった制約条件が多く課されるようになった。船舶運航の現場では、気象予報をもとに安全性、燃料消費、CO<sub>2</sub>排出を最適化した航海ルートを経済的に探索する最適運航(ウェザールーティング)に関する研究が多く実施され、コンテナ船などでは既に実用化されている。これにより船舶運航の高度化が期待されるが、現在のモデルは波浪中の船舶性能(特に荒天中の船速低下)に関する評価について、現象の複雑さもあり数値計算にて実際の状況を再現しきれていない。荒天航海時には波浪中の抵抗増加により船速が低下する自然減速だけでなく、船舶の状況から危険性を判断し、減速操作を行う意図的減速が混在している。この点は過去の研究でも指摘されているが、実海域におけるデータが不足していたこともあり、検証できていない点が多い。意識的減速を論じるためには、船橋での操船だけでなく、機関室での主機運転も含めた調査・分析が必要と考えられる。船橋での荒天操船から見た意識的減速に関する研究例は多く存在するが、機関室での運転操作に関する研究例はほとんど存在せず、両者の観点からの考察が必要とされる荒天中の船速低下に関する正しい評価手法は未だ確立されていない。

## 2. 研究の目的

海上輸送は地球上の輸送の95%を担っており、最も重要な社会システムの一つとされる。陸上輸送や航空輸送に対し、一度に大量の貨物を配送できることが海上輸送の大きな利点である。一方、輸送速度は他の形態より遅く、特に気象条件の影響を強く受けるため、定時性の確保に苦慮していることを考慮しなければならない。荒天航海における安全性の確保と同時に、定時輸送や燃料消費の最適化など経済面との両立を図った船舶運航が気象情報や船舶性能の発展とともに要求されるようになってきた。この意味で安全性と経済的な観点から船舶の最適ルーティングに関する研究が進められている。ウェザールーティングにおけるルート計算にて荒天航海時における船速低下をいかに正確に評価できるかが大きなポイントとなる。船速低下は波浪中抵抗増加を主体とした外力影響による自然減速と安全面から操船者が意図的に船速低下させる意識的減速が混在することはこれまでに多く指摘されている。後者について、多くの意識的減速の基準やパラメ

ーターが様々な研究者により調査研究されている。しかしこれらは実海域での連続データに基づくというよりは、関係者への調査により導き出されたものと位置づけられる。荒天航海時にどのような運航状態であったのかを把握することは極めて重要であり、著者が保有するばら積み貨物船の実海域データにて過去に提案された指標の検証を行うことにした。上記背景より本研究ではこれを検証する実海域データとして約6年間にわたって計測しており、荒天時の意識的減速に関する目安として示されている鉛直加速度、横揺角、海水打ち込みおよびスラミングの発生確率を計算した。一方、荒天航海時は船橋だけでなく、機関室においても主機の過負荷を防止する目的で、様々なパラメーターをモニタリングしていると言われる。このため主機関係の指標も多面的にデータ処理し、他のパラメーターとの変動関係性についても比較検証していき、ばら積み貨物船の荒天航海時に対する船速低下を支配する要因を考察した。

## 3. 研究の方法

本課題では28,000DWT ばら積み貨物船を対象に2010年~2016年の期間でオンボード計測された実海域データの多面的な分析、過去の関連研究にて提案された閾値の実海域データによる検証、さらに実務者を対象に行ったアンケート調査にて荒天時の機関運転に関する状況の把握に努めた。

### (1) 関連研究にて提案された閾値の検証

1970年代から進められた意識的減速に関する研究が多く実施されており、これらを取りまとめた。多くは船橋での操船時に関連する指標が対象となっている。例えば、鉛直方向の加速度、水平方向の加速度、横揺れ角度といった船員の作業限界や乗客の乗り心地に関連するパラメーター、スラミング確率、海水打ち込みの確率など船体の構造強度に関わるパラメーターという観点から論じられてきた。これらについて船種、船型ごとに閾値がそれぞれの項目に関して設定されているが、アンケートやヒアリング調査を主体とした結果であり、実海域データによる閾値の検証を試みた。

### (2) 実務者を対象に実施したアンケート調査

船舶の機関士を対象に荒天航海時における機関室での操作対応、問題点等に関するアンケート調査を実施した。主な設問項目は①荒天航海となった場合、船速低下の度合について、②荒天航海時の主機操作について、主機の性能維持の観点よりモニタリングしている項目について、性能維持および安全性から見た許容値、③主機のモニタリング項目が許容値に近づいた場合、運転設定の変更判断タイミング、④荒天航海時に主機のモニタリング項目が許容値を超える場合、具体的な対応方法、⑤その他荒天時の主機運転に関して

重要な点、について調査、取りまとめ。  
 (3)実海域における船速低下シミュレーションモデルの構築と検証

28,000DWT ばら積み貨物船を対象に実施した実海域データにて、顕著な船速低下が発生した南半球での荒天航海を再現した。主機運転は自動制御とし、再現した結果を実測データと比較・検証した。

4. 研究成果

本研究では南半球海域を航行していた28,000 トン級のばら積み貨物船を実験対象とした。表-1 にばら積み船の主要目を示す。

表-1 ばら積み貨物船の主要目

Length、 between Perpendiculars	160.4 m
Breadth	27.2 m
Draft (Fully Loaded)	9.82 m
Navigation Speed	14.0 knots

主機出力やスラスト、主機回転数といった航海機関データについては船内の計器により観測されたデータをエンジンデータロガーから船陸間通信装置を介して記録され、船体運動及び各加速度等については船橋に設置した慣性計測ユニットにより観測した。航海機関データは1秒ごとに記録され1時間を1データ(1×60×60=3,600点)として、船体運動及び加速度等は0.1秒ごとに記録され1時間を1データ(10×60×60=36,000点)として保存される。波浪情報に関しては、気象機関 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) および ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecasts)が公開している気象の客観解析データ NCEP-FNL および ERA interim をもとに、グローバル波浪モデル Wave WATCH IIIにて数値計算した結果及び客観解析データを入力とし、大気モデル WRFにて風情報を再現した後に Wave WATCHIIIで波浪情報を求める三手法で計算した結果を用いた。表-2 に示すように3種類の計算波を用いて相対水位変動を求めるものとする。今回使用する実海域データは本船がアフリカ大陸南岸を西航しながらインド洋から大西洋に向かって航行中に船首方向から強風を伴った高波浪に遭遇している。図-1 に表-2 にて示した三手法にて2013年6月1日～4日における本船位置での有義波高の追算した結果を示す。図より、6月2日～3日にかけて波高が非常に高くなっており、最大で5～7mとなっている中で荒天航海している。これより、2013年6月1日～3日までの3日間を対象としている。

表-2 気象海象のシミュレーションにて使用した気象データベースと計算解像度

Method	Database	How to reproduce wind field
NCEP	NCEP-FNL	Linear interpolation from 1° to 0.1°
ERA	ERA interim	Linear interpolation from 0.7° to 0.1°
WRF	NCEP-FNL	Wind distributions are numerically simulated by the atmospheric model WRF (Input:1°、Output:0.1°)

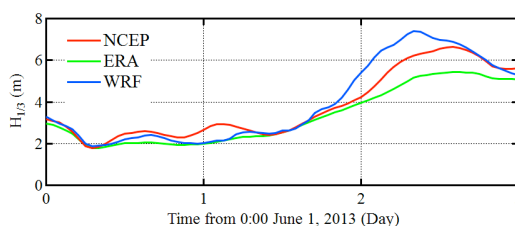


図-1 荒天航海時における船舶位置での有義波高の変化 (2013年6月1日～3日)

船舶が荒天に遭遇する場合、船体動揺が増加するとともに波高の2乗に比例する抵抗増加も顕著となる。船速は次式の関係式を満足した中で決定される。

$$\beta_v(x_p, y_p, z_r)(1-t)T(n, V) = R_{SW}(V) + R_{AW}(\chi, \omega, H, V) + R_{AWD}(\varphi, U, V) \quad (1)$$

ここで $\beta_v$ は ventilation による推力低下係数、 $t$ は機械的な損失による推力低下係数、 $T$ はスラスト、 $n$ は主機(=軸)回転数、 $V$ は船速、 $R_{SW}$ は静水中抵抗、 $R_{AW}$ は波浪中抵抗増加、 $\chi$ は相対波向、 $\omega$ は出会い波周波数、 $H$ は波高、 $R_{AWD}$ は風圧抵抗、 $\varphi$ は相対風向、 $U$ は風速をそれぞれ示す。波浪や風条件が厳しくなる場合、 $\beta_v$ の値が低下する一方、 $R_{AW}$ および $R_{AWD}$ の値が増加する。両者がバランスするためには $R_{SW}$ が低減する必要があり、 $V$ が一般的に低下( $n$ も低下)するように制御される。これが自然減速のメカニズムであるが、荒天時には船体動揺の非線形性が強くなりスラミングや海水打ち込みといった強非線形現象が発生するほか、鉛直および水平方向の加速度や roll が增大すると乗組員が作業困難となるであろう側面より、ある程度以上の荒天状況になると、自然減速となる前に船体の安全確保のため、意識的な減速操作を行うのが一般的とされている。こ

のときの判断指標について、欧州を中心に1970～1980年代に多くの研究が実施されている。この中でもノルウェーのNORDFORSKが実施した調査によると、FPおよび船橋での鉛直加速度、船橋での水平加速度、およびrollのrms値、さらにスラミングおよび海水打ち込みの発生確率について、表-3に示す限界値が示されている。航海中にこれらの値の内いずれかを超過する場合、意識的減速に至るという考え方である。

表-3 意識的減速に関する提案指標例

Vertical Acceleration at FP (rms)	0.2 g
Vertical Acceleration at bridge (rms)	0.15 g
Lateral Acceleration at bridge (rms)	0.12 g
Roll (rms)	6.0 °
Probability of Slamming	0.025
Probability of Deck Wetness	0.05

$$\dot{z}_G = \dot{z}_B(t) + l_x \ddot{X}_P(t) - l_y \ddot{X}_R(t) \quad (2)$$

$$\ddot{X}_P(t) = \frac{X_P(t) - 2X_P(t-1) + X_P(t-2)}{\Delta t^2} \quad (3)$$

ここで、 $\dot{z}_G$ ,  $\dot{z}_B$ は重心位置、船橋における鉛直加速度、 $\ddot{X}_P$ ,  $\ddot{X}_R$ はpitchおよびrollの角加速度、 $l_x$ ,  $l_y$ は重心からセンサー位置までの縦距離と横距離を示している。FPにおける鉛直加速度は次式で求められる。

$$\ddot{z}_{FP}(t) = \ddot{z}_G(t) - \dot{l}_x \ddot{X}_P(t) \quad (4)$$

ここで、 $\dot{l}_x$ は重心からFPまでの縦距離を示す。式(2)～(4)にて計算したデータから高周波成分を除去する必要がある、周波数が1.25Hzより小さい場合と25.0Hzよりも大きい場合をフィルタ処理したものをを用いた。これにより作成された加速度の時系列に対しゼロアップクロス法にてrms値を算出する。

機関データの処理はそれぞれ1分間ごとの平均値を取り、1時間あたり60点の変動値として処理する。船体運動および各位置における鉛直加速度、分析結果等の観測データを整理しそれぞれの関係性について考察する。図-2に2013年6月1日～3日間の船橋、重心、FPにおける鉛直加速度の変化を示す。図中の赤線は表-3に示した現在基準とされている値を表す。図-3に同時刻の水平加速度とrollの変動を示す。図-4に同時刻の船速と主機回転数を示す。図-2より船橋とFPが40時間を越える時間から顕著に大きくなり始め、特に船

橋では限界とされている0.15gを上回りつつある。一方、FPでは限界値とされている0.20を基本的に上回っており、限界値として正確さに欠けていることがわかる。船橋と同様に考慮すると、赤い点線のような限界値となるのではないかと推測される。図-3より、X方向加速度は限界値よりも小さな値となっているが図-2の変化と類似した傾向がある。Y方向、rollについては60時間以降に値が増大している。

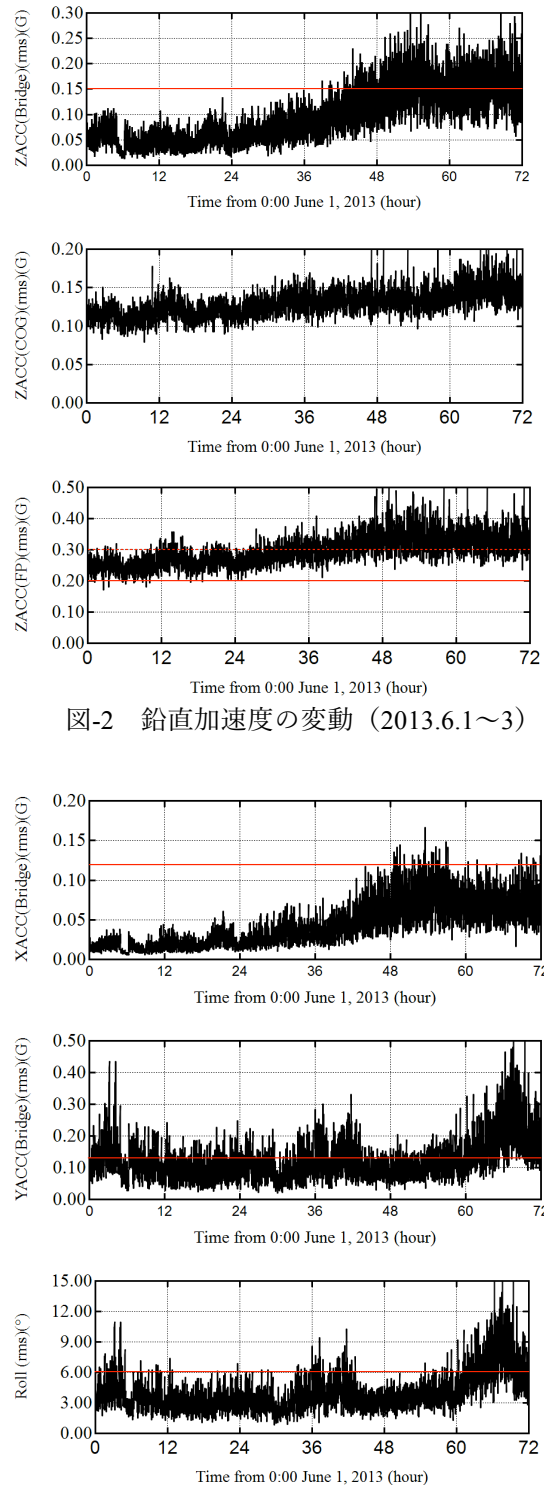


図-2 鉛直加速度の変動 (2013.6.1～3)

図-3 水平加速度の変化 (2013.6.1～3)



図-4より、船速の顕著な低下は40時間を過ぎた頃から生じており、主機回転数もほぼ同じタイミングで低下していることがわかる。船速については当時12ノットにて航行しているが、30時間くらいの時点から2ノット程度の減速が生じている。一方で主機回転数は低下していない。図-2と比較すると船橋での鉛直加速度がしきい値(0.15g)を超過したのが40時間付近であるため、船速および主機回転数が大きく低下し始めるタイミングに非常に近い。荒天航海時にもかかわらず海水打ち込み確率やスラミングの発生確率が非常に低く出た原因として二つ考えられる。一つは、この航海においてばら積み貨物船が満載状態でなかったことが挙げられる。満載でなかったため水面から船首部までの距離が大きくなり海水打ち込みやスラミングが発生しづらかったのではないかと推察される。もう一つは海水打ち込みの発生確率を相対水位変動が水面から貨物船の船首楼高さまでの距離 $f$ を上回る時と定義した点にある。ばら積み貨物船において船首部は船楼甲板と呼ばれる海水打ち込みを防ぐための部位があり、乾舷よりも少し高い位置となっている。つまり船首の一部では船楼甲板により海水打ち込みを防ぐことができているがその少し後部の乾舷部分では海水打ち込みが発生している可能性が考えられるため、海水打ち込みの定義を水面からデッキまでの高さを上回る時と定義すれば海水打ち込みの発生確率は大きくなるだろうと考えられる。

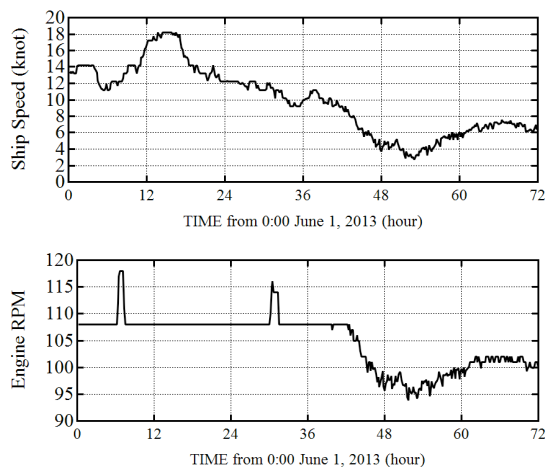


図-4 船速および回転数の変化 (2013.6.1~3)

一方、荒天航海時にはプロペラから軸を通じて抵抗が増大し、主機出力やスラストが低減する。船速を維持しようとするれば、燃料投入を増加させ主機出力の低下を防止する必要がある。ただし、この状況で燃料増加は燃焼不良による排気温度の上昇や過給機への圧縮空気の逆流(サージング)等が生じ、主機が過負荷となる危険性がある。このため、機関室では

関連する項目を常時モニタリングし、上記現象のおそれがある場合には燃料投入量を減少させ、主機回転数を意識的に下げる措置を取ると言われている。実海域データでは主機関係の項目も記載されているため、Fuel Pump Mark (燃料投入量に相当する指標)、主機出力、排気ガス温度、スラスト、過給機回転数についてそれぞれ1分間平均値の変化を整理した結果を図-5に示す。これらの図を見るとFuel Pump Mark、主機出力、スラストおよび過給機回転数に類似した変動傾向が見られる。それぞれ20時間に見られるピークは波浪等の要因により抵抗増加が大きくなり、主機回転数を一定に維持するため出力を増大させたと考えられる。この時点に見られる船速低下は自然減速と推察される。また、40時間程度で発生する船速および主機回転数の低下に対

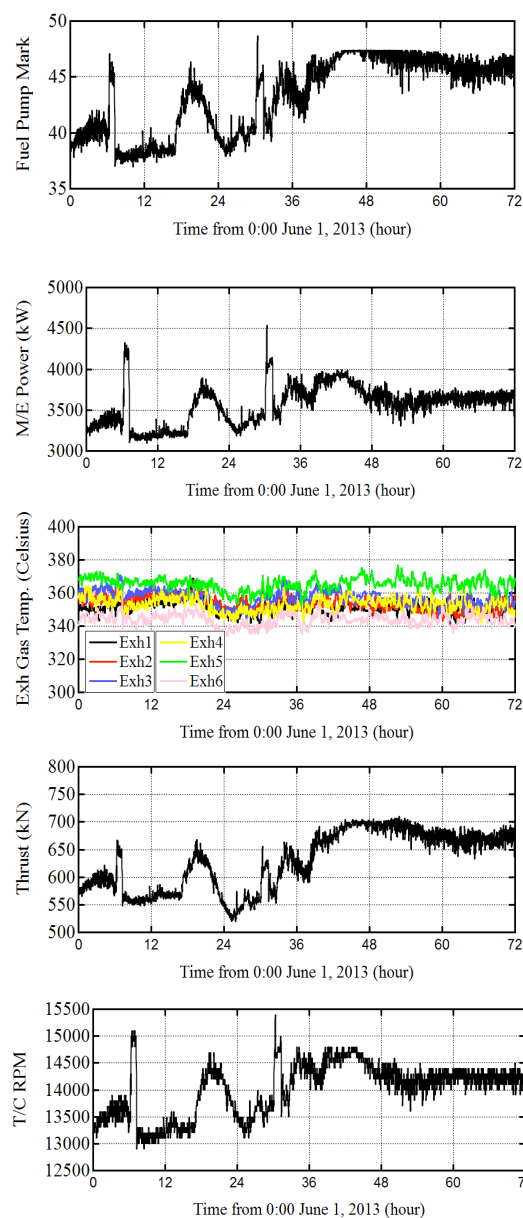


図-5 主機関連のパラメーター変化 (2013年6月1日~3日)

し、主機出力を微減させた後、一定となっているのは荒天により諸抵抗が増加している状態で出力を上げると排気ガス温度の上昇にて負荷が発生する危険性があるため、出力を減少させていると思われる。この状況にて波浪の増大とともに抵抗増加が著しくなり、式(1)の関係を満足するために、船速低下が発生していると見なせるため、意識的減速の典型的なパターンではないかと推測される。図より排気ガス温度は図中の緑線 5 番シリンダー(排気ガス(5))が最も高い温度を示しており、6 箇所の排気ガス温度の中で危険性の判断に適した指標と考えられ、今後の研究では主機に負荷が増大した時の主機サイクル内の熱変化の予測評価も重要な要素となる。船橋における加速度と機関室における燃料投入の変動を比較すると意識的減速を実行したタイミングはほぼ同じであった。ただし、どちらの指標をもとに減速判断をしたのかは特定するには至らなかった。今後、複数ケースの荒天航海のデータを分析し、船橋および機関室のパラメーター間の相関を見極める等により、詳細を明らかにしたい。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

- (1) Chen, C., Shiotani, S., and Sasa, K., “Study on Navigation System in the East China Sea”, J. Applied Ocean Research, Vol.53, pp.257-266, 2015
- (2) 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-”, J. Ocean Engineering, Vol.104, pp.294-309, 2015.
- (3) Chen, C., Shiotani, S., and Sasa, K., “Effect of Ocean Currents on Ship Navigation in the East China Sea”, J. Ocean Engineering, Vol.104, pp.283-293, 2015.
- (4) Sasa, K., Lu, L.F. 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
- (5) 笹健児、盧麗鋒、佐々木亘、寺田大介、加納敏幸、溝尻貴明：国際海上輸送におけるウェザールーティングの高度化に関する基礎的研究 I -南半球での荒天航海時における遭遇波浪の特性推定-、日本船舶海洋工学会論文集、第 25 号、pp.157-173、2017
- (6) Sasa, K., Faltinsen, O.M., Lu, L.F., Sasaki,

W., Prpić-Oršić, J., Kashiwagi, M., and Ikebuchi, T., “Development and Validation of Speed Loss for a Blunt-shaped Ship in Two Rough Sea Voyages in the Southern Hemisphere”, Journal of Ocean Engineering, Vol.142, pp.577-596, 2017

- (7) Lu, L.F., Sasa, K., Sasaki, W., Terada, D., Kano, T., and Mizojiri, T., “Rough Wave Simulation and Validation using Onboard Ship Motion Data in the Southern Hemisphere to Enhance Ship Weather Routing”, Journal of Ocean Engineering, Vol.144, pp.61-77, 2017

[学会発表] (計 2 件)

- (1) Sasa, K., Faltinsen, O., and Kashiwagi, M., “Comparison of Ship’s Speed in Some Numerical Simulation Methods”, Proceedings of the Third International Conference on Violent Flows 2016, pp.1-7, 2016
- (2) Sasa, K. and Faltinsen, O.M., “Evaluation of Speed Loss in Seaways Containing Seekeeping and Propulsion Theory”, 日本船舶海洋工学会講演会論文集、第 20 巻、pp.65-68、2015.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

#### 6. 研究組織

- (1) 研究代表者  
笹健児 (SASA, Kenji)  
神戸大学・大学院海事科学研究科・准教授  
研究者番号：10360330
- (2) 研究分担者  
柏木 正 (KASHIWAGI, Masashi)  
大阪大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：00161026  
内田 誠 (UCHIDA, Makoto)  
神戸大学・大学院海事科学研究科・教授  
研究者番号：90176694
- (3) 連携研究者  
( )  
研究者番号：
- (4) 研究協力者  
( )