

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02370

研究課題名(和文) 船の衝突回避に必要な性能の解明と事故防止のための基準に関する研究

研究課題名(英文) Research on ship performance to avoid collision and criteria to prevent marine accidents

研究代表者

上野 道雄 (UENO, Michio)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：60358405

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：まず、海難事故調査報告書等の分析から船の停止距離と初期船速等の関係を示す規格化された基礎データを取りまとめた。次に、停止性能を系統的に把握しうる数値計算手法のためにプロペラ逆転時の数学モデルを構築し、プロペラ回転数の変化の停止性能への影響を調べた。さらに、模型実験によっても実際の物理現象を把握するとともに前述の数値シミュレーション法の検証をおこなった。模型実験では研究担当者らの実験手法によって模型船で実船の船体運動を模擬できる手法を用いた。これらの結果からプロペラ逆転回転数の変化と停止性能の関係にとりまとめて船の停止性能基準に関する新しい指針を取りまとめた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

船の衝突を防止するための人間-機械系の観点からの研究や船の停止・旋回性能に関する研究には実績がある。しかし、国際海事機関の基準の問題点が指摘されることはあっても、衝突事故削減の観点からの検討がされたことはなかった。

衝突事故が依然として船舶事故の大半を占める中、近年、国際的な温室効果ガス削減規制によって機関出力の小さい船が増加してプロペラ逆転停止性能が低い船の増加につながるものが危惧されている。このような状況において本研究の成果は、これまでの人為的過失防止の対策等とは異なる、船が備えるべき停止性能は安全上どれだけ確保すべきかという観点からの手がかりを与えるものである。

研究成果の概要(英文)：Basic data representing rectified relation between initial ship speed and resultant stopping distance by propeller reversing were analyzed. A mathematical model for simulating ships' stopping motion during propeller reversing is constructed and stopping characteristics depending on propeller rate change in propeller reversing process were studied. Ship model tests were carried out in which a novel technique was applied for realizing actual ship's stopping motion using a free-running ship model. These results were summarized as a guideline for considering standards of stopping performance for preventing marine accidents such as collisions and groundings.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：海難事故 衝突回避 事故防止 安全基準

## 1. 研究開始当初の背景

船の衝突・乗揚事故(以下「衝突事故」と記す)を減らすためには海上衝突予防法など操船上の規則が定められており、船の乗員はこれら法令に則り操船することが義務づけられている。また、研究開発の点でも、衝突防止予防装置等の機器開発や AIS 等を利用した操船支援など、乗員の人為的過失を防ごうとする観点からの取り組みの実績は数多くある。一方、船の乗員の多くは衝突の危険が差し迫った場面でもプロペラ逆転を発令せずに操舵によって衝突を回避しようとする傾向があるのはプロペラ逆転中は舵がほとんど効かず船は制御不能に陥るからと考えられる。

このような状況に対し、国際海事機関(IMO)は操縦性基準を定めている。30年以上前から議論が始まり、2002年に正式に採択されたこの基準は、船の性能面から海難事故を防ぐための基準という意味で画期的なものである。この基準の中では、旋回性能や進路安定性に関する基準に加えて、衝突事故に関連の深いプロペラ逆転時の停止性能とプロペラ正転時の初期旋回性能も定められている。停止性能は航海船速からプロペラ逆転を発令した後に船体停止に至るまでに進んだ距離で定義される。基準値は船の長さ(L)の15倍(15L)であるが、大型船の場合は主管庁の判断によって20Lにまで緩和することができる。初期旋回性能は航海船速航行時に10度舵を取った後10度回頭するまでに進んだ距離で定義される。基準値は2.5Lである。

これらの基準は、衝突事故を減らすための具体的な検討によって定められたものではなく、主に就航船の性能実績に基づいて定められたもので、緊急時に前述のような行動をとることの多い乗員にとってはこれらの性能基準は必ずしも衝突回避に実効性のあるものと評価されていない可能性がある。停止性能基準があってもこれらの有効性が実証されていなければ基準としての信頼を得ることができないと考えられる。

船の衝突を防止するための人間-機械系の観点からの研究、たとえば、他船との最接近距離等に基づく衝突予防援助装置の研究開発などによる操船支援の研究などが数多くある。また、船の停止・旋回性能に関する研究にも実績がある。プロペラ正転時の旋回性能はもちろん、プロペラ逆転時に関しても流体力学的な研究や停止運動の数学モデルに関する研究などがあり、船の初速と機関出力、排水量などとプロペラ逆転時の停止距離を関連付けた研究もある。しかし、これら船の性能の観点からの過去の研究では、航海船速からのプロペラ逆転という極めてまれな状況設定等、IMO基準の問題点が指摘されることはあっても、衝突事故削減の観点からの検討がされたことはなかった。

衝突事故が依然として船舶事故の大半を占めている中、近年、国際的な温室効果ガス削減規制によって機関出力の小さい船が増加することが予想されている。このことは、近い将来建造される船のプロペラ逆転時の出力も小さくなる可能性があることを意味することから、プロペラ逆転停止性能が低下して衝突回避性能の劣る船の増加に直接つながることが危惧されている。

これまでの多くの研究は衝突事故を見張り不十分に代表される人為的過失の観点から分析して事故防止の対策等を論じてきた。しかし、さらに効果的に海難事故を減らすための停止性能基準はどのように考えたらよいのかについて世界的な議論を開始するには、船が備えるべき性能とりわけ船の停止性能は安全上どれだけ確保すべきか、という観点から衝突事故防止の問題に取り組む必要があると考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究では、衝突事故データの分析に基づき、衝突事故回避のために船が備えるべき停止性能を明らかにするとともに、衝突事故減少に対して実効性のある性能基準を提案することを目的とした。衝突回避に必要な停止性能はどのように考えるべきか。停止・旋回性能が乗員に正しく理解・評価されて衝突回避手段として有効に活用され、そして実際の衝突事故減少へとつなぐためにはどのような基準であるべきなのかを明らかにする必要があると考えられるからである。

本研究では、従来の操船支援・人為的過失防止の観点だけでなく、本来備えるべき船の性能の観点から衝突防止に必要な条件を明らかにし、船の停止および初期旋回性能と衝突事故減少の関係に基づき船が満たすべきこれらの性能基準を新たに提案することを目的とする。

現状では乗員が停止操船をとることは多くないが、旋回による進路変更に加え停止行動の効果が本研究によって再認識されることで今後の緊急時の操船法の考え方に新たな視点を与え、船の衝突回避性能や停止性能に対する新しい視点からの研究を促進することにもつなげる。

## 3. 研究の方法

本研究では、これまでの海難事故調査報告書や海難審判採決録、事故解析記録等の事故報告書から衝突事故データを収集し、小型船舶や台船・押船など特殊な船・状況の事故を除いてデータの質の統一性をまず整えた。IMO操縦性基準が対象とするのは長さ100m以上の船であるが、初段階では厳密な制限を設けずに後の分析状況を考慮して対象船を必要に応じて絞り込むこととし、国際基準提案の基礎となるデータとして信頼性のあるデータを収集した。

収集した衝突事故データから船の主要寸法等の諸元のほか、事故の海域・航路等と見合い関係、衝突の危険を認識した時刻と船速・位置、衝突時の時刻と船速・位置、衝突回避のためにとった行動などを抽出した。衝突の危険を認識した時点には、比較的余裕を持って避航できる状況から

衝突が目前に迫った状況まで可変的に考えられたが、研究担当者らのこれまでの海難事故解析等の業務における経験と知見を生かして事故報告書を読み解き、分析を進める中で対象とする時点と判断することとした。そして、衝突の危険を認識した位置から衝突位置までの距離を推定し、この2点間の距離を各事故・各船に対する衝突回避に必要な距離とみなした。このとき、実際の航跡を考慮した距離を直線距離と近似することによって実際の回避行動や主機出力を考慮した船体運動のモデル化に基づく判断基準の考察につなげることにした。

個々の衝突事故および船によって危険を認識した時点の船速は異なるので、この距離を基準となる船速における距離に規格化して比較する必要があるため、数値計算のための船の停止運動のモデル化をおこなった。特に、プロペラ逆転による停止運動のモデル化において、衝突事故報告等の資料から数値計算に必要な情報が得られるように運動モデルの簡略化をおこなった。停止および初期旋回性能には主機出力の変化と舵力の干渉が大きく影響をおよぼすと考えられるため、主機出力と回転数変化が船の回避性能に与える影響を考慮することとした。

上記の規格化と運動モデルは自由航走模型実験と計算との比較によって有効性を検証することとした。模型実験には研究担当者らが開発した舵効き船速修正およびプロペラ前進率・船速修正を用いた。この手法は模型船に搭載したファンによる補助推力とプロペラ回転数を同時に制御することでプロペラ正転・逆転時を問わず近似的に実船相似の操縦運動を実現するものである。実船と模型船のプロペラ回転数を運動の相似性を考慮して関係づけることにより、主機出力と回転数の変化が衝突回避性能におよぼす影響を検証できる手法である。模型実験と数値計算の比較により、より信頼性の高い運動モデルの構築を目指した。



図1 コンテナ船模型

#### 4. 研究成果

一般に大型船ほどプロペラ逆転による停止距離が長くなり、衝突事故が起きた場合の被害が大きくなると考えられる。本研究ではこのような大きな衝突事故被害が発生することを想定して大型船を対象として検討をおこなうこととした。大型船の中でも肥大船ほど停止性能が低く停止距離が長くなる。一方、コンテナ船のような痩せ形船でも近年特に大型化が進み事故例が目立つようになってきているため本研究では大型コンテナ船を対象とすることとした。

対象船は全長 355m の巨大コンテナ船で線図が公開されている船型である。図1に模型船の写真を示す。近年よく見られるようになったやや上向きの球状船首をもち、船尾は広いトランサム、舵は写真にはないがマリナー型である。

対象船の基本的な性能を把握するためにまずプロペラ単独試験を実施した。プロペラ単独試験は海上技術安全研究所の中水槽で実施した。プロペラ単独試験時のレイノルズ数はプロペラ直径を用いた値で  $3.6 \times 10^5$  である。 $K_T$  が推力係数、 $K_Q$  がトルク係数、横軸の  $J$  はプロペラ前進率を表す。いずれも過去の他機関でのデータと比較して妥当な結果であることを確認した。

次に同じく対象船の基本性能把握のために抵抗試験と自航試験を実施し、プロペラ逆転停止性能把握のための自由航走模型実験を実施するための推力減衰係数  $1-t$  と模型船の伴流係数  $1-w_m$  を求めた。船速は実船相当で 6kn と 17kn である。

対象船の基本性能の把握に次いで、プロペラ逆転停止性能を調べるための自由航走模型実験を実施するために自由航走模型船を準備した。通常自由航走模型実験、特にプロペラ逆転性能を調べる実験の場合にはあくまで模型船の性能を調べる試験として実施するが、本研究では直接実船の停止性能を調べる実験として実施するため、研究担当者らが開発した実験法を採用す

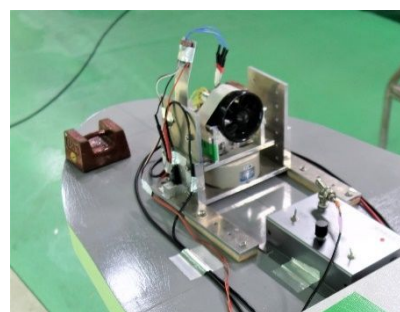


図2 船首側補助推力装置

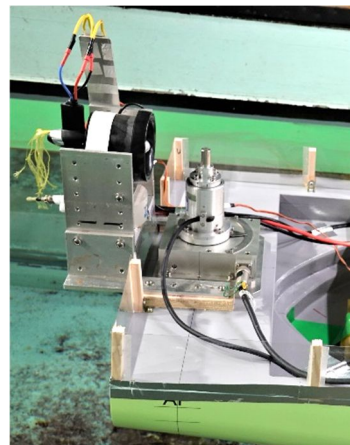


図3 船尾側補助推力装置

表1 実船船速と実船プロペラ回転数

No.	$u_{0s}$ (kn)	$n_{0s}$ (rps)
1	6.0	-15.3
2	17.0	-15.3

表2 模型プロペラ回転数と補助推力係数

Control method	$V_{0m}$	$f_{TA}$
NCeJ <sub>0</sub>	$e_i n_{0s}$	0
JSC	$e_i n_{0s}$	Eq.(19)
SFCeJ <sub>H0</sub>	$n_{0s}$	1

ることとした。この実験では模型船を使って実船の性能を調べるために補助推力装置が必要となる。停止性能を調べるために船首と船尾にダクトファン型の補助推力装置を設置した。

補助推力装置はプロペラ正転の際は前進方向、逆転の際は後進方向の力を補助または補正する役割を持つ装置である。ダクトファンを検力計の上に設置してダクトファンの発生する力をフィードバックすることで補助推力を制御する。図2と図3に船首と船尾のダクトファンと検力計の状況を写真で示す。

実船の性能を自由航走模型船で調べるための模型船の制御法をプロペラ前進率・船速修正(JSC)によって模型船のプロペラ回転数と補助推力を制御して自由航走模型実験を実施した。まずは自由航走模型船の直進試験によって船速とプロペラ回転数の関係を把握した後、プロペラ逆転性能試験の試験状態を検討した。対象船の設計船速は25knであるが、実験施設である試験水槽の水面広さの制約のため模型船のプロペラ逆転前の直進時の船速は実船相当で17knと6knとし、実船のプロペラ逆転回転数は前進時設計船速対応の回転数の80%である-15.3rpmとすることとした。これらの状態に対応する値を表1に示す。なお、プロペラ逆転を発令後、設定の逆転回転数に至るまでは一定の変化率でプロペラ回転数を減少させた。

基本的な模型船の制御は先に述べたJSCであるが、比較対照として別の2つの制御状態でも実験を実施した。一つは補助推力は使わず模型船と実船とで $J_0$ を一致させる方法で、これをNCe $J_0$ と記す。もう一つは補助推力で摩擦修正に相当する力を発生するとともに $J_{H0}$ を模型船と実船とで一致させる方法で、これをSFce $J_{H0}$ と記す。JSCを含むこれら3種類の制御における模型船プロペラ回転数と補助推力係数 $f_{TA}$ を表2に比較して示す。これまで一般に、自由航走模型実験でプロペラ逆転停止試験を実施する場合にこのようなプロペラ回転数やプロペラ推力について実船との相似を検討されたことはJSCの手法以外にない。

まず、図4から図9までに初期船速6knの実験結果を示す。初期船速6knの状態に対応するプロペラ正転回転数はNCe $J_0$ 状態では5.88rpm、JSC状態とSFce $J_{H0}$ 状態では4.42rpmである。プロペラ逆転の指令回転数はNCe $J_0$ 状態とJSC状態では-13.59rpm、SFce $J_{H0}$ 状態では-15.30rpmである。図4はプロペラ回転数の変化を表す。逆転発令後一定の変化で指令逆転回転数に変化している。図5は減少していく船速の初期船速との比を表す。停止までの時間はNCe $J_0$ が19.2s、SFce $J_{H0}$ が16.2s、JSCが17.0sである。図6はプロペラ推力の変化を表す。図4が示す比較的単調減少傾向を示すプロペラ回転数に対して図6のプロペラ推力の減少傾向はそれほど単調ではない。これはプロペラ逆転時の複雑なプロペラ周りの流場の変化によるものと考えられ、プロペラ逆転による前後と左右の力および回頭モーメントが複雑な変化をすることに対応していると考えられる。図7は補助推力の変化を示す。SFce $J_{H0}$ 状態ではあくまで摩擦修正に対応する力を発生するので船が前進している場合は基本的には正の値となるのに対し、JSC状態

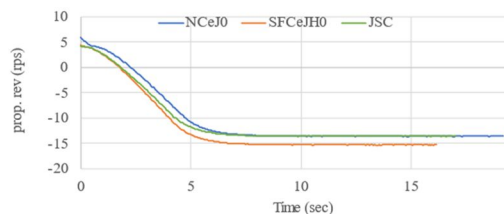


図4 プロペラ回転数( $V_0=6kn$ )

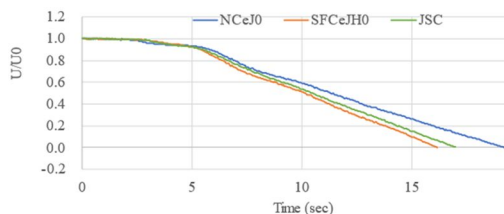


図5 船速比( $V_0=6kn$ )

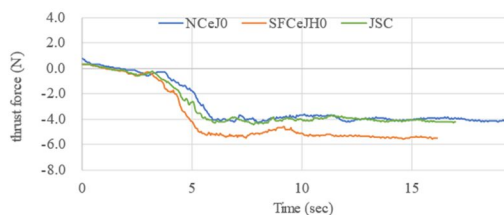


図6 プロペラ推力( $V_0=6kn$ )

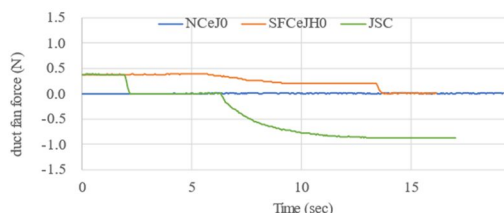


図7 補助推力( $V_0=6kn$ )

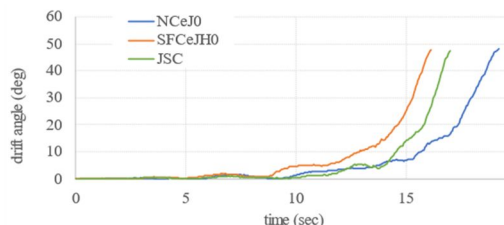


図8 斜航角( $V_0=6kn$ )

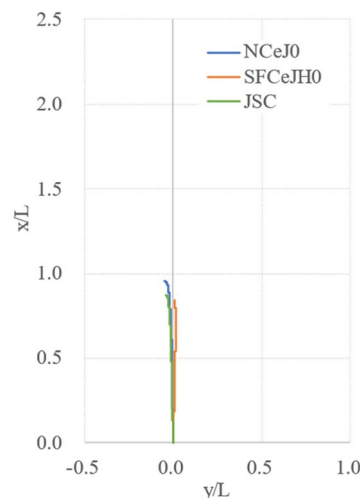


図9 航跡( $V_0=6kn$ )

の場合は正から負に変化するのが特徴的である。補助推力が0付近で不連続な傾向が見られるのはダクトファンの分解能の影響である。ただし、この不連続な変化は力の値としては大きくはなく船の運動に大きな影響を与えないと考えられる。図8は停止運動中の斜航角の変化を表す。3つの制御状態いずれにおいても斜航角は正に増大している。Jあるいは $J_H$ に基づく制御であるため、これら変数の関数としてとらえられるプロペラ逆転時の前後・左右の力と回頭モーメントの傾向が定性的には同じであることを示していると考えられる。図9は航跡を表す。初期船速が6knと低速であるため1船長程度の距離で停止していることがわかる。

次に図10から図15に初期船速17knの実験結果を示す。図10はプロペラ回転数の変化を表したもので、初期船速に対応するプロペラ回転数が高いため逆転指令回転数に至るまでの時間は初期船速6knの時よりも長い時間がかかっているが、減少率の設定は同じである。図11は船速比を表す。6knの状態よりもややなめらかな船速減少の傾向が表れている。途中のJSC状態の変化率が大きくなっていることもデータに表れている。図12はプロペラ推力の変化を表す。初期船速が大きいため力もプロペラが発生する力が大きく6knの状態以上にプロペラ周りの流場が複雑で計測データにも雑音が目立つ結果となっている。図11の船速変化が6kn状態よりなめらかな傾向を示したのはこのプロペラ推力の変化が6knの状態に比べて、高周波数の変動が大きいとはいえ、比較的なめらかであったからと考えられる。図13は補助推力の変化を表す。初期船速が大きいため補助推力も全体に6knの状態に比べて大きく、力が0付近の不連続も船の運動に影響しないことが推測される計測データとなっている。6knの状態と同じくNCE<sub>J0</sub>状態では補助推力は一貫して0であり、JSC状態では正から負に値が変化している。図14は斜航角を表す。初期船速6knの場合より斜航角の発達程度はなめらかであるが最終的な停止時の斜航角は6knの場合とほぼ同じ50度程度となっている。図15は航跡を表す。初期船速6knの状態に比べて停止距離が約5倍になっている。停止時の左右の偏差に制御に依存して差が見られるのは6knの場合よりも大きいように見えるが、停止運動は初期船速だけではなく初期の微小な回頭角速度や斜航角にも最終的に大きな影響を受けることがあるので今後の分析には注意する必要がある。

以上、今回の一連の実船相似の船体運動を実現した自由航走模型実験における2つの初期船速の実験結果の例を示した。初期船速によって模型船の制御の違いが異なる形で表れることがわかった。本研究における自由航走模型実験では過去のプロペラ逆転状態とは異なるプロペラ回転数の変化で計測をおこなっており、今後はこれらのデータを数値シミュレーションも活用しながら詳細に分析したうえでより合理的な停止性能基準の提案につなげた上で論文等で成果を公表していく。

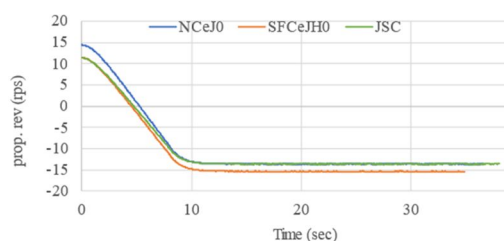


図10 プロペラ回転数 ( $V_0=17kn$ )

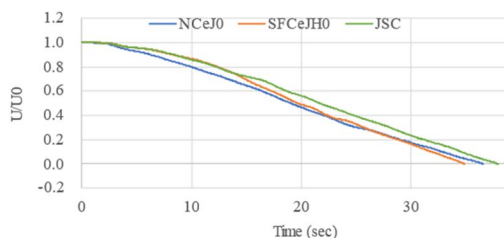


図11 船速比 ( $V_0=17kn$ )

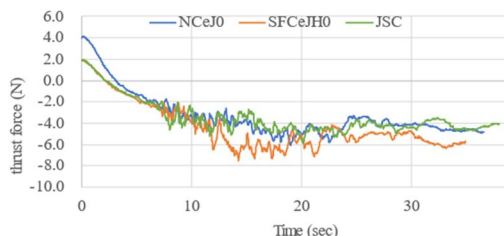


図12 プロペラ推力 ( $V_0=17kn$ )

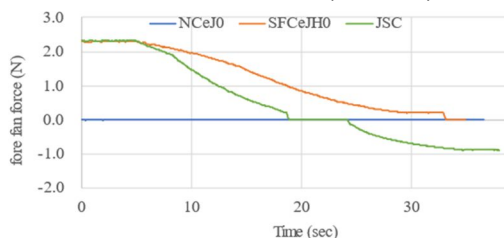


図13 補助推力 ( $V_0=17kn$ )

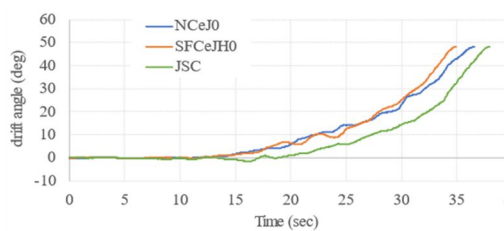


図14 斜航角 ( $V_0=17kn$ )

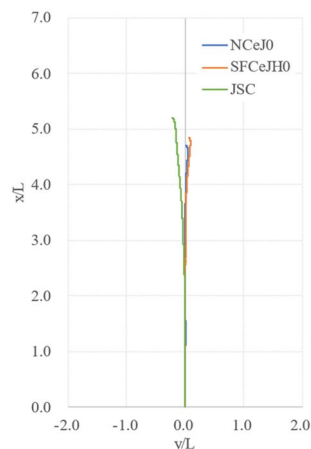


図15 航跡 ( $V_0=17kn$ )

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 TSUKADA Yoshiaki, SUZUKI Ryosuke, UENO Michio
2. 発表標題 Development of an auxiliary thruster for free-running model ship tests
3. 学会等名 Seminar at The Institute of Marine Engineering of the National Research Council of Italy (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 SUZUKI Ryosuke, TSUKADA Yoshiaki, UENO Michio
2. 発表標題 Free-running model test using rudder effectiveness and speed response correction, and wind loads simulator
3. 学会等名 Proceedings of the 6th International Conference on Advanced Model Measurement Technology for the Maritime Industry (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 北川泰士, 塚田吉昭, 上野道雄, 鈴木良介
2. 発表標題 主機特性及び操縦性能の相似則を考慮した自由航走模型試験法
3. 学会等名 KFR(第345回)・大阪府立大学大学院工学研究科海洋システム工学分野共催セミナー
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮崎英樹, 塚田吉昭
2. 発表標題 船舶の新たな制動手法の一考察
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 28
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 寺田大介, 上野道雄
2. 発表標題 耐航・操縦性能に関する水槽試験技術
3. 学会等名 推進・運動性能研究会シンポジウム, 日本船舶海洋工学会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>運動性能研究グループ  <a href="https://www.nmri.go.jp/study/research_organization/fluid_performance/group2_2.html">https://www.nmri.go.jp/study/research_organization/fluid_performance/group2_2.html</a>  運動性能研究グループ  <a href="https://www.nmri.go.jp/oldpages/institutes/fluid_performance_evaluation/movement_performance/index.html">https://www.nmri.go.jp/oldpages/institutes/fluid_performance_evaluation/movement_performance/index.html</a>  模型船の(見掛けの)抵抗を自由に操る - 補助推力装置の開発,  <a href="https://www.nmri.go.jp/institutes/fluid_performance_evaluation/movement_performance/dfat/index.html">https://www.nmri.go.jp/institutes/fluid_performance_evaluation/movement_performance/dfat/index.html</a>  模型船の運動を実船と相似にする - 舵効き船速修正 - ,  <a href="https://www.nmri.go.jp/institutes/fluid_performance_evaluation/movement_performance/rsc/index.html">https://www.nmri.go.jp/institutes/fluid_performance_evaluation/movement_performance/rsc/index.html</a>  補助推力装置と舵効き船速修正を使った自由航走模型試験,  <a href="https://www.nmri.go.jp/oldpages/institutes/fluid_performance_evaluation/movement_performance/DFATandRSC/index.html">https://www.nmri.go.jp/oldpages/institutes/fluid_performance_evaluation/movement_performance/DFATandRSC/index.html</a></p>
---

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	宮崎 英樹 (MIYAZAKI Hideki)  (10415797)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員  (82627)	
研究分担者	田口 晴邦 (TAGUCHI Harukuni)  (70344455)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員  (82627)	
研究分担者	塚田 吉昭 (TSUKADA Yoshiaki)  (90425752)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員  (82627)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------