

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04219

研究課題名(和文) 荒天下における実船の変動トルクと操船限界の推定に関する研究

研究課題名(英文) Study on estimation of fluctuating propeller torque and manoeuvring limit of full-scale ship in rough weather

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) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：外乱下の実船変動プロペラトルクの推定法を開発しました。自由航走模型船の運動を実船相似にする舵効き船速修正をプロペラ逆転状態に拡張しました。主機の連続運転の制限をモデル化するとともに、舵効き船速修正に主機モデルを組み込んで統合するアルゴリズムを構築しました。自由航走模型船に風の影響を付与できる風荷重模擬装置を開発してこれまで不可能だった波風併存時における自由航走模型実験を可能にしました。自由航走模型船を用いて波風併存時の実船の変動トルクを推定して実船と模型船の波浪中変動トルクの違いを明らかにするとともに、主機作動制限の操船運動への影響を明らかにしました。

研究成果の概要(英文)：The estimation method of full-scale ship propeller torque in external forces was developed. The rudder effectiveness and speed correction that ensures full-scale similar model ship motion was enhanced to apply to propeller reversing condition. The continuous operation limit of an engine was modeled and the algorithm that makes the rudder effectiveness and speed correction capable to incorporate any engine model was constructed. The wind loads simulator was developed for free-running model ship tests in wind and waves that had been impossible so far. Free-running model tests in wind and waves and the estimation method of fluctuating full-scale propeller torque developed in this research demonstrated how the ship motion depends on the engine limit and how full-scale propeller torque differ from model-scale propeller torque.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：実船性能推定 波浪中変動プロペラトルク 自由航走模型実験 主機作動制限 補助推力装置 舵効き船速修正 風荷重模擬装置

1. 研究開始当初の背景

2011年11月の国連海事機関(IMO)第62回海洋環境保護委員会(MEPC62)において採択された決議に基づき、船舶からの温室効果ガスの削減対策としてエネルギー効率設計指標(EEDI: Energy Efficiency Design Index)に関する規制が2013年1月に開始されました。一方、EEDI規制のために過小な主機出力を搭載した船が荒天下で操船不能になり海難事故を起こすことを防止するための暫定最低出力ガイドラインが2013年5月のMEPC65で採択され、その妥当性に関する学術的な面からの検討が国際的な急務となっています。主機出力の面で相反するこれら2つの規制は海域における船の推進性能と操縦性能が主機特性を通して船の経済性と安全性にいかに関わっているかを示すとともに荒天下の主機出力と操船限界に関する研究の必要性を示しています。

波浪中で変動するトルクに関する研究は過去に実績がありますが、そのほとんどは模型実験とこれに対する理論計算に基づくもので、しかも多くは正面向波中を対象とした研究です。実海域を表す多方向不規則波浪場における実船の変動トルクを論じた研究例はこれまでにほとんど見られません。波浪中の機関特性に関する研究も実績がありますが、主機出力と操船限界の関係を論じた先駆的な研究はごく少数です。波浪中の変動トルクを推定するにあたっての理論計算における問題点は波漂流力とプロペラ有効流入速度の推定です。波漂流力は船と波との相対関係すなわちどのような波に船が遭遇するかを正しく推定する際に必須の項目ですが、左右力と回頭モーメント成分の理論式は提案されているものの実用性が実験の困難さのため十分検証されていません。プロペラ有効流入速度の変動はトルク変動の直接の要因ですが、特に波の円運動に基づく成分が十分に解明されていません。一方、実験的な推定法の問題点は模型船のレイノルズ数が実船と大きく異なるために模型船の運動が一般に実船と相似にならないことと運動が相似になったとしてもやはりレイノルズ数の違いによってプロペラ周りの流れ(伴流)が実船と相似ではないために変動トルクが相似にはならないという避けがたい尺度影響が存在することです。

このような状況で、近年、研究代表者らは自由航走模型船の見掛けの抵抗を自由に操ることのできる補助推力装置を開発して従来は模型船を台車で曳航する実験でのみ可能だったいわゆる摩擦修正を自由航走模型試験でも容易に実現できるようにしました。摩擦修正とはレイノルズ数の違いによって実船と大きく異なる模型船の摩擦抵抗係数を見かけ上実船と同じにする手法です。研究代表者らはさらに補助推力装置を使って摩擦修正とは異なる舵効き船速修正を提案しました。舵効き船速修正とは補助推力とプロ

ペラ回転数を時々刻々制御して外乱下の模型船の操縦運動を実船相似にする手法です。さらに、研究代表者らは正面向波中などの特別な場合について自由航走模型船のトルクやスリップ比などの低周波数変動成分を実船相似にする手法を提案しました。これらの新しい技術は本研究で取り組む実船の高周波数成分を含む変動トルク推定のための基礎となるものです。

2. 研究の目的

本研究では、まず変動トルクにおける実船・模型船の尺度影響を明らかにします。トルクの変動をもたらす要因のうち実船尺度で推定すべき要因を特定し、模型尺度で実船相似の変動トルク・推力を実現することの可能性と実用性を明らかにします。この検討をもとに波浪中推進性能理論と自由航走模型実験を組み合わせた新しい実船の変動トルクの推定手法を構築します。

次に、上記手法によって推定した荒天下を航行する実船の変動トルクを入力とし、トルク制限とプロペラ露出の影響を考慮する主機モデルを構築します。実船の変動トルクが推定できれば主機モデルに入力することで実船のプロペラ回転数の高周波数成分の応答も推定できるので、自由航走模型実験を一連の閉回路制御で実施でき、結果として船体運動と主機応答の両方を同時に実船相似にすることができると考えられます。

さらに、上記の新しい主機モデルを組み込んだ波浪中の自由航走模型実験によって、主機モデルそのもの、そしてトルク制限等が荒天下における実船の船体運動および変動トルクにおよぼす影響、さらには荒天下の操船限界と機関出力の関係を明らかにします。

3. 研究の方法

(1) 実船の変動プロペラトルク推定手法の構築

トルクの高周波変動成分はプロペラに流入する水の速度の変動に起因し、これは主に波浪中の船体動揺(船体動揺成分)と波そのものによる水粒子の運動(波成分)から構成されます。したがって、波浪中の変動トルクを推定するにはプロペラ有効流入速度の船体動揺成分と波成分を推定する必要があります。一方、プロペラ有効流入速度は不規則波中の非定常状態でもトルク一致法によって推定できることが研究代表者らの過去の研究からわかっています。さらに、研究代表者らの提案している舵効き船速修正では補助推力装置と模型プロペラ回転数を制御して自由航走模型船の外乱下の船体運動を実船相似にすることが可能です。本研究では補助推力装置をプロペラ逆転領域まで拡張することによりプロペラトルク推定法の適用範囲の拡張を試みました。そして、これらの理論的考察と研究代表者らの研究成果をもとに、実船のプロペラ回転数が与えられたと

きの波浪中の変動トルクを、理論と実験の組み合わせによって推定する新しい手法の構築に取り組みました。ここでは、模型尺度で実船相似の変動トルクを直接実現するのではなく、模型実験で計測された模型プロペラトルクをもとに実船の変動トルクを時々刻々推定する方法をもとに新しい手法を考案することとしました。

(2) 主機の作動限界を考慮した主機モデルの構築

主機トルクの限界には、連続運転のための馬力制限や省エネを目的とした燃料投入量の制限などいくつかの種類があります。これらの多くは燃料の性状や気温・気圧などの気象条件を考慮したのですが、このほかにも過給機の応答を含めたモデル化などいくつか提案されています。プロペラ露出についてはプロペラ没水深度によるプロペラ単独特性の変化、空気吸い込みの影響など複雑な現象などが多く未解明な部分も多いと考えられます。これらの現象の中から本研究では主機の連続運転の制限を取り上げてその特徴を自由航走模型実験に取り入れるための簡潔な主機モデルの構築に取り組みました。

(3) 自由航走模型実験による荒天下の操船限界と機関出力の関係の解明

IMO の機関出力に関する暫定ガイドラインで対象とされるのは実海域で見られる多方向不規則波浪場です。研究代表者らは近年の研究で全周造波機を用いた水槽で多方向不規則波浪場を再現する技術を確立し、実際に起こった海難事故の再現に成功しました。この技術を活用して全周造波機を備えた実海域再現水槽で荒天下の自由航走模型実験を実施しました。この実験では本研究で構築した実船変動トルク推定法と主機モデルによって模型船を制御しました。このとき研究代表者らの提案した補助推力装置と舵効き船速修正も併用することで模型船の荒天下の船体運動を実船と相似にしました。この実験で変動トルク推定法と主機モデルの有効性を検証しました。この自由航走模型実験に先立ち、補助推力装置を応用した風荷重模擬装置の開発に取り組みました。この風荷重模擬装置はこれまで不可能だった波風並存時の自由航走模型実験を可能にするものです。

4. 研究成果

実船の外乱下変動プロペラトルクを自由航走模型を使って推定するためには模型船の外乱下の運動が実船相似である必要があります。模型船のプロペラと波との出会い状況が実船と相似になっている必要があるからです。外乱下の模型船の船体運動は本研究担当者らが開発した舵効き船速修正によって実現できます。本研究では舵効き船速修正を利用して次のように実船の外乱下変動プロペラトルク推定法を構築することとしました。舵効き船速修正では模型プロペラ回転数と補助推力を船速のフィードバックによ

り制御します。このとき計測される模型プロペラトルクからトルク一致法によってプロペラ有効流入速度を推定し、これを計測した船速データをもとに船速の成分と波の成分に分離します。船速に基づく成分は伴流が影響しますので尺度影響があります。一方、波の成分は尺度影響がないと仮定すると、伴流成分に尺度影響を考慮することによって実船のプロペラ有効流入速度が推定できます。推定した実船のプロペラ有効流入速度と舵効き船速修正の元になる実船プロペラ回転数から実船プロペラ前進率を計算すれば実船プロペラ単独性能に基づいて実船プロペラトルクが推定できます。

本研究ではさらに進んで上記実船プロペラトルク推定手法に任意の主機モデルを組み込む手順を構築しました。図1はそのアルゴリズムを示したもので、実船プロペラ回転数 n_s が与えられたときに舵効き船速修正 RSC によって補助推力係数 f_{TA} と模型プロペラ回転数 n_m を制御して船体運動を実船相似としながら模型プロペラトルク Q_m から実船プロペラトルク Q_s を推定しますが、ここに、主機モデル Engine を組み込むことによって n_s と Q_s がつながり、全体が閉ループを構成することになりました。

主機モデルに関しては平均有効圧力の制限と過負荷防止の制限を取り上げ、これらを自由航走模型実験に反映できるような主機のモデル化をおこないました。一般に、平均有効圧力の制限と過負荷防止の制限は図2上の図に示すように主機またはプロペラ回転数と主機出力制限として定義されますが、このまま波浪中を航行する模型船制御に適用することは実験技術的に困難です。そこで本研究では、図2上の図の特性を図2下の図に示すような船速とプロペラ回転数の関係に変換する手法を用いることとしました。これにより、自由航走模型船の時々刻々の船速の計測データをもとに主機の作動制限を考慮して模型プロペラの回転数を制御することができるようになると同時に、この主機モデルを研究代表者らが開発した舵効き船速修正に容易に組み込むことが可能となりました。このことは、外乱下で主機の作動制限を考慮した船体運動を実船相似にすることが可能となることを意味します。制御変数は補助推力を決める補助推力係数と模型プロペラ回転数です。具体的な制御変数の例を実船の指令プロペラ回転数一定の場合を例にとって図3に示します。青の線が主機作動制限を考慮しないこれまでの模型プロペラ回転数一定の制御です。船体運動は実船相似にはなりますが、主機作動制限は考慮されません。これに対し、100%MCR(最大連続出力)と80%MCR の制限を考慮した場合を黒と赤の線で示します。主機作動制限によって模型プロペラ回転数を減少させる一方で補助推力は増加させる必要があることがわかりました。

外乱下の自由航走模型実験に先立ち、図 4 に示すような風荷重模擬装置を開発しました。補助推力装置に用いたものと同じダクトファンを船首に 3 台と船尾に 3 台配置し、これらによって任意の見かけの風向風速に応じた風荷重を模型船に与えます。波浪中の船体運動が誘起する慣性力は加速度計の計測値によって補償します。この装置によってこれまで不可能だった波風併存時の自由航走模型実験が可能となりました。

開発した外乱下の実船プロペラ変動トルク推定法を自由航走模型実験に適用しました。図 5 に船首右斜め 60° に一方向不規則波と風を受ける状態での計測および推定結果の時系列を示します。船速は舵効き船速修正によって実船相似になっており、プロペラ有効流入速度の波成分は尺度影響がないと仮定しています。プロペラ有効流入速度と船速成分は実船の方が小さいですが変動トルクは実船の方が大きいことがわかります。

横軸に波風との出会い角をとって変動トルクの平均値と変動成分の有義値、そしてこれらの比を示したのが図 6 です。横軸 0° が正面向波風状態を表します。NC で表したのは舵効き船速修正を使わない通常の自由航走試験結果、SFC は補助推力を用いて摩擦修正をおこなった結果です。RSC が舵効き船速修正を表します。プロペラトルクの平均値はもちろん、変動成分にも尺度影響があることがわかります。特にこの例では、変動成分と平均値の比が模型船では斜め波風中が正面向かい波風中より小さいのに対し実船では逆の傾向を示しているのが特徴的です。

本研究で開発した主機の作動制限モデルを組み込んだ自由航走模型実験結果を図 7 に示します。多方向不規則波と風の中を定常航行させた結果で、横軸が波の主方向と風との出会い角を表します。青線が主機作動制限を考慮しない場合、緑線と赤線が 100%MCR と 80%MCR を想定した場合の結果です。主機作動制限が船速の減少と斜航角・舵角の増加の傾向となって現れており、主機の作動制限が乱下の操船限界におよぼす影響を明らかにする手法を確立しました。

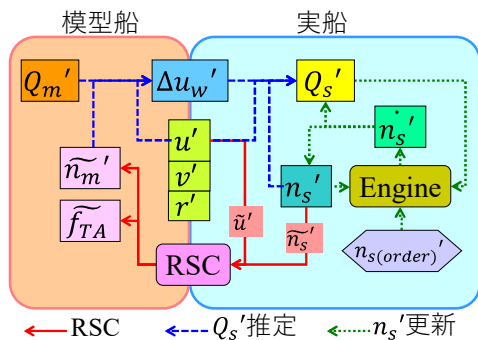


図 1 模型船の運動を実船相似にする舵効き船速修正(RSC)に実船トルク推定法および機関モデルを組み込むアルゴリズムの概略(Q_s' が

実船プロペラトルク, Engine が機関モデルを表す)

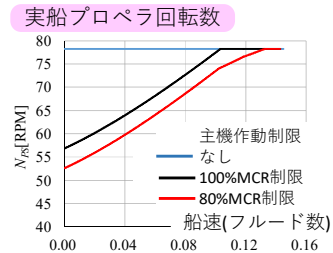
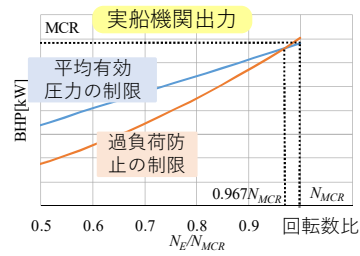


図 2 機関出力における 2 種類の制限(上)とこれを考慮した実船のプロペラ回転数の船速に対する変化(下)(制限なしの場合と 100%MCR 制限・80%MCR 制限の場合)

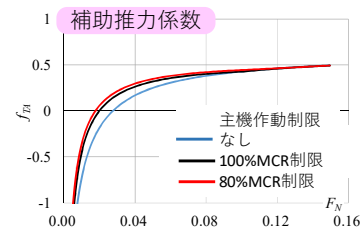
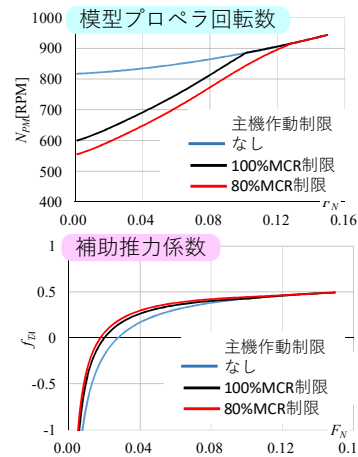


図 3 機関出力の制限を考慮した模型船制御手法におけるプロペラ回転数(上)と補助推力係数(下)の船速に対する変化の比較

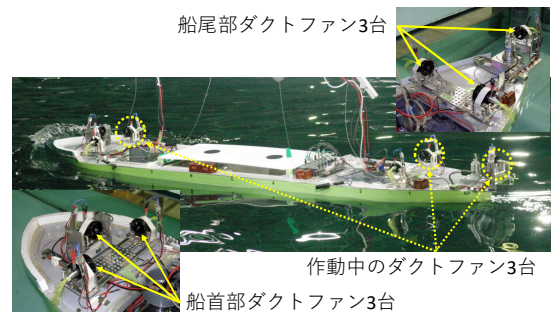


図 4 風荷重模擬装置を用いた波風併存時の自由航走模型実験、船首部と船尾部にそれぞれに 3 台のダクトファンを配置して風荷重を模擬する、船尾部の 1 台は補助推力装置を兼ねる、点線の○が作動中で右斜め後ろからの風を模擬している

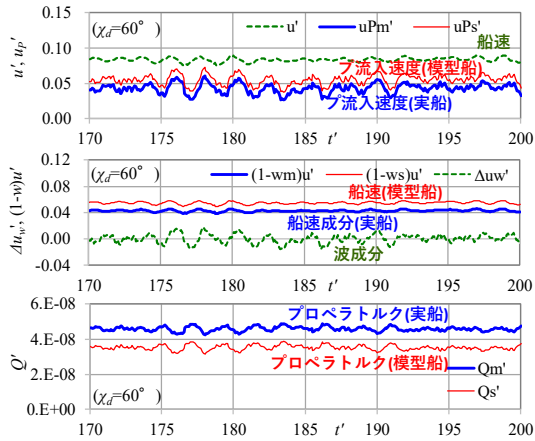


図5 一方向不規則波・風中の船速とプロペラ有効流入速度(上)、プロペラ有効流入速度中の船速成分と波成分(中)、プロペラトルク(下)の時系列, 実船の値は波浪中変動トルク推定法による模型実験結果からの推定値

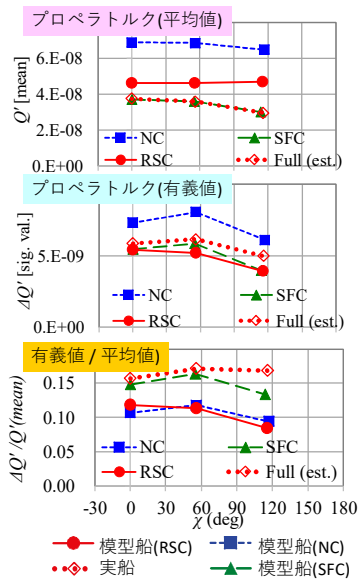


図6 変動トルク推定法による波風併存時のプロペラトルクの模型実験結果と対応する実船の推定値の比較, 変動成分の有義値と平均値の比は模型船(RSC)では斜波中より向かい波中が大きい, 実船では逆の傾向を示している

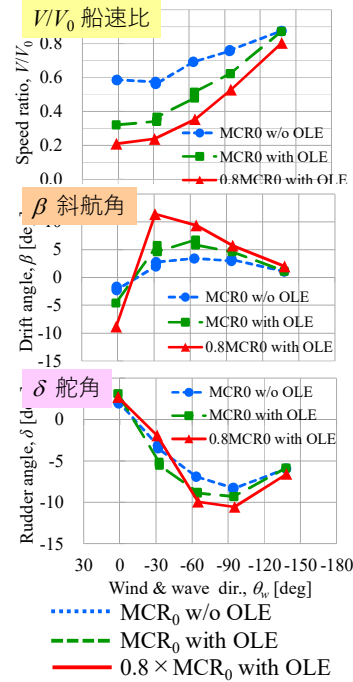


図7 機関出力の制限が波浪中の船速と斜航角、舵角の平均値におよぼす影響の比較, 波長船長比 0.4, 波高船長比 1/58 の規則波中, 横軸は波との出会い角, 0度が正面向波

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4件)

(1) UENO, Michio, TSUKADA, Yoshiaki, Estimation of full-scale propeller torque and thrust using free-running model ship in waves (DOI: 10.1016/j.oceaneng.2016.05.005), Ocean engineering, 査読有り, Vol.120, 2016, pp. 30-39.

(2) UENO, Michio, SUZUKI, Ryosuke, TSUKADA, Yoshiaki, Estimation of stopping ability of full-scale ship using free-running model (DOI:http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.12.001), Ocean engineering, 130, 査読有り, 2017, pp.260-273.

(3) UENO, Michio, SUZUKI, Ryosuke, TSUKADA, Yoshiaki, Rudder effectiveness and speed correction in practice at tank test (DOI: https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.09.003), Ocean engineering, 145, 査読有り, 2017, pp. 124-137.

(4) 塚田吉昭, 鈴木良介, 上野道雄, 風荷重模擬装置の開発と実海域環境下の自由航走模型試験, 査読あり, 海上技術安全研究所研究報告, 17巻3号, 2018, pp. 167-186.

[学会発表] (計11件)

(1) 上野道雄, 鈴木良介, 塚田吉昭, 舵効き船速修正と実船変動トルクの推定-補助推力装置の活用-, 査読なし, 海上技術安全

研究所研究発表会講演集, 第15回, 2015, pp. 26-35.

(2) 上野道雄, 塚田吉昭, 補助推力装置付き自走模型船を使った停止試験の方法, 日本船舶海洋工学会講演会論文集 (ISSN 2185-1840), 22号, 査読有り, 2016, pp. 167-168.

(3) UENO, Michio, TSUKADA, Yoshiaki, Stopping Test Method for Free-running Model Ship Equipped with Auxiliary Thruster, International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE), 査読有り, 2016.

(4) UENO, Michio, TSUKADA, Yoshiaki, SUZUKI, Ryosuke, Free-running model ship test for estimating full-scale performance at actual seas, Conference Proceedings, The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, 査読なし, 2016, pp. 19-21.

(5) 上野道雄, 鈴木良介, 塚田吉昭, 自走模型試験による斜め波風中実船変動トルクの推定, 査読なし, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, Vol. 26, 2018.

(6) 鈴木良介, 塚田吉昭, 上野道雄, 舵効き船速修正法の実験的検証, 査読なし, 海上技術安全研究所研究発表会講演集, 第16回, 2016, pp. 196-197.

(7) 鈴木良介, 塚田吉昭, 上野道雄, 自由航走模型試験における舵効きと船速の修正について(続報)-模型実験-, 査読なし, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, Vol. 23, 2016, pp. 445-446.

(8) 塚田吉昭, 鈴木良介, 上野道雄, 自由航走模型試験のための風荷重模擬装置の開発, 査読なし, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, Vol. 23, 2016, pp. 443-444.

(9) 鈴木良介, 塚田吉昭, 上野道雄, 主機作動制限を考慮した操縦性能模型試験に関する研究, 査読なし, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, Vol. 24, 2017, pp. 609-611.

(10) TSUKADA, Yoshiaki, SUZUKI, Ryosuke, UENO, Michio, Wind loads simulator for free-running model ship test, International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE), 査読有り, 2017.

(11) SUZUKI, Ryosuke, TSUKADA, Yoshiaki, UENO, Michio, Experimental estimation of manoeuvrability of full-scale ship in wind and waves using free-running model, International Conference on Advanced Model Measurement Technology for the Maritime Industry (INT-NAM), 査読有り, 2017, pp. 484-479.

[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

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-, https://www.nmri.go.jp/institutes/fluid_performance_evaluation/movement_performance/dfat/index.html

模型船の運動を実船と相似にする-舵効き船速修正-, https://www.nmri.go.jp/institutes/fluid_performance_evaluation/movement_performance/rsc/index.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

上野道雄 (UENO MICHIO)
(国立研究開発法人) 海上・港湾・港空技術研究所・その他部局等・研究員
研究者番号: 60358405

(2) 研究分担者

塚田吉昭 (TSUKADA YOSHIAKI)
(国立研究開発法人) 海上・港湾・港空技術研究所・その他部局等・研究員
研究者番号: 90425752

鈴木良介 (SUZUKI RYOSUKE)
(国立研究開発法人) 海上・港湾・港空技術研究所・その他部局等・研究員
研究者番号: 20711328

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし