

平成 30 年 9 月 4 日現在

機関番号：82627

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18296

研究課題名(和文) RANSによる実船の操縦運動中船尾流場の解明

研究課題名(英文) Study on full scale maneuverability using RANS

研究代表者

荒木 元輝 (Araki, Motoki)

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・主任研究員

研究者番号：00711350

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)：近年の船舶に対する温室効果ガス排出規制によって、船舶に搭載される主機は小さくする、または低速運航を行う場合が増えてきている。それによって船舶の操縦性は低下する傾向にあり、実船スケールの操縦性能を精確に推定することは非常に重要である。一方、従来では船舶の操縦性能は小さな模型実験から実船の操縦性能を推定しており、十分な精度とは言い難い。そこで本研究においては粘性数値流体力学(CFD)において船型開発等に多く使われているレイノルズ平均ナビエ・ストークス方程式(RANS)を用いて、あるタンカー船型に対し模型スケールと実船スケールで操縦シミュレーションを実施し、船舶操縦性における尺度影響を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Nowadays due to the regulation of vessel's greenhouse gas emission, new built vessels need to install downsizing engines and existing vessel required to operate in low-speed which degrades the vessel's maneuverability. Therefore predicting full scale ship maneuverability becomes more strict than ever. However conventional maneuverability predictions are based on experiments using small model ship which could include some error between model scale and full scale maneuverability. Therefore, in this research, computational fluid dynamics (CFD) using Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) equation are applied to predict full scale maneuverability. The subject ship is tanker type vessel and full scale and model scale maneuvering simulations are conducted to clarify the scale effects on maneuverability.

研究分野：船舶運動力学、数値流体力学

キーワード：尺度影響 船舶操縦性 船尾流場

1. 研究開始当初の背景

近年、船舶が排出する温室効果ガスの削減のために従来に比べ小さい出力の主機を搭載する船舶や低速運航する船舶が増加している。しかしながら、これらは船舶の操縦性能を低下させる可能性があり、操縦性基準を満足するためにも設計の段階で実船の操縦性能を正確に推定することが重要である。

一方、従来の操縦性推定法は縮尺模型を用いた拘束模型試験、自由航走試験が主であり、実船の操縦性能を推定するための模型スケールから実船スケールへのスケールアップに関してはスケールアップした伴流係数から舵力を修正したもの¹⁾や経験則に基づく修正係数を用いて操縦に係る諸係数のスケールアップを試みるもの²⁾が一般的である。また補助推力を用いた自由航走試験によって実船の操縦性能を推定する試み³⁾も行われている。

数値流体力学 (CFD) と計算機技術の発展により、船型開発の現場において CFD のレイノルズ平均ナビエ・ストークス方程式 (RANS) を用いたシミュレーションは船の推進性能を推定する一般的なツールとして既に使用されており、操縦性能を推定するツールとしても利用されつつある。一方、それらのシミュレーションのほとんどは模型スケールで実施されており、模型試験を実施する前の事前検討として行われていることが多い。しかし近年において壁関数の改良や高いレイノルズ数にも対応するために壁近傍に非常に高い格子密度を有する計算格子を用いることで、実船スケールにおける推進性能や操縦性能を RANS シミュレーションで推定しようとする試み⁴⁾が近年行われているが、それらは自由航走試験のマクロな違いや操縦性微係数の違いについて言及しただけのものが大半である。

そこで本研究では RANS を用いて模型スケールと実船スケールで操縦運動シミュレーションを実施し、操縦性微係数の比較だけでなく流場解析による操縦性の尺度影響について検討することとした。

- 1) 造船技術センター、実船の操縦性能試験、SRC News、No. 26、1994.
- 2) 安川宏紀 他、船舶操縦性予測モデルの標準化に関する研究委員会報告書、第 4 章
- 3) 上野道雄 他、自由航走試験における舵効き修正について、日本船舶海洋工学会学講演会論文集、第 16 号、2013、pp.325-326.
- 4) Sadat-Hosseini H. et al., Vortical structures and instability analysis for Athena in turning maneuver with full-scale validation, Proceedings of 30th Symposium on Naval Hydrodynamics, 2014, 23pp.

2. 研究の目的

船体・プロペラ・舵間の相互干渉に関して従来は揚力体理論 (パネル法や SQCM 法等)

が用いられ、一定の成果を上げているものの⁵⁾、これらの手法では粘性影響のある船後伴流中でかつ斜航・旋回運動中における船尾流場の状態を実験を用いることなく単独で推定することは難しい。また模型実験ではプロペラ・舵がついた状態で多くの断面において粒子イメージ流速計測法 (PIV) を用いて計測する必要があり、非常に高価で煩雑である。さらにあくまで模型スケールに限定され、模型と実船の尺度影響に関して解析することは不可能である。一方で近年、模型スケールだけでなく実船スケールのレイノルズ平均モデル (RANS) を用いた CFD 計算が実用的になり、複雑な流れを数値計算を基に解明できる技術水準に達してきた⁶⁾。また流速だけでなく物体表面圧力等も得られるため PIV の計測結果に比べ流場解析における情報量が豊富である。

そこで本研究では、操縦運動と粘性影響を同時に考慮できる RANS ソルバーを用いた模型・実船スケールにおける CFD シミュレーションを行い、それらの船尾流場を詳細に解析し、数学モデルの未解明な問題を解決する。特に複雑になりやすい船尾周りの流場計算に必要な計算格子生成において、効率的かつ自由度の高い重合格子法⁷⁾により、格子生成の問題を解決する。また同時に舵まわりはホーンやプロペラシャフト等があり複雑な形状であり、計算格子を生成する際に舵まわりの形状は簡略化されることが多く、その簡略化による影響も検討する。

CFD を用いた尺度影響に関する研究は近年行われ始めているものの、主にマクロな運動の差や船体に掛かる流体力の比較に留まっているものが多く⁸⁾、重要な舵力に関する研究や船尾流場の詳細な検討はされていない。また舵・船尾付近の流れは前述した粘性影響だけでなくプロペラ荷重度によっても大きく変化することが知られている。そこで舵力に関する尺度やプロペラ荷重度による影響を検討する。また操縦運動中の流体力についても流場解析を用いた尺度影響評価を試みる。

- 5) 日本造船研究協会第 221 研究部会、操縦運動時の船体周囲流場に関する研究報告書、1996、社団法人日本造船研究協会.
- 6) ITTC Manoeuvring Committee, Final report and recommendations for 26th ITTC, 2011, Proc. Of 26th ITTC, Vol. 1.
- 7) Wilson et al., RANS Simulation of a Container Ship Using a Single-Phase Level Set Method with Overset Grids, 2005, Proceedings of CFD Workshop Tokyo 2005, pp. 546-551.
- 8) Jin et al., URANS study of scale effects on hydrodynamic manoeuvring coefficients of KVLCC2, Ocean Engineering, Vol.118, 2016, pp.93-106.

3. 研究の方法

対象とする船型は操縦性が問題となりやすい肥大船であり、過去の研究やワークショップによって模型試験データが豊富にあるKVLCC2⁹⁾とした。KVLCC2の外観は図1、主要目は表1である。KVLCC2はベンチマーク用に開発された船型のため実船は存在しないが模型と実船のレイノルズ数の差は約1000倍となっている。



図1 KVLCC2 外観

表1 KVLCC2 主要目

	実船	模型
垂線間長 [m]: L_{pp}	320.0	2.9091
全幅 [m]: B	58.0	0.5273
喫水 [m]: d	20.8	0.1891
方形係数: C_B	0.8098	
舵コード長: c_R / L_{pp}	0.0266	
舵スパン長: h_R / L_{pp}	0.0493	
舵面積: A_R / L_{pp}^2	1.33×10^{-3}	
舵アスペクト比: Λ_R	1.8877	
プロペラ直径: D_p / L_{pp}	0.0308	

CFD シミュレーションにおいては実用的な時間で計算できる RANS を用いたシミュレーションを行う。RANS ソルバーとしては海上技術安全研究所で開発された NAGISA¹⁰⁾を用いる。NAGISA の支配方程式は3次元非圧縮 RANS であり、空間離散化としては構造格子のセル中心の有限体積法を用いる。圧力と速度のカップリングは擬似圧縮性を仮定することで行われる。対称ガウス・ザイデル法と多重格子法を用いて計算の収束を加速している。また今回、乱流モデルに関しては EASM (Explicit Algebraic Stress Model) を用いた。

複雑な船尾形状を模擬するために重合格子法を用いることとした。今回は海上技術安全研究所で開発された重合格子システム UP_GRID¹¹⁾を用いてプロペラシャフト、ホーン、舵の格子ブロックを生成し船尾形状を模擬した。UP_GRID は格子点の座標情報をスプライン関数と TFI (Trans-finite interpolation) を用いて3次元的な連続関数に写像し、格子ブロック間の空間的位置関係の逆問題を解くことで donor-receptor 関係を決定している。

自由表面影響としては対象船のフルード数が0.142と比較的低いため、計算量を削減するためにも二重模型流れとした。

プロペラ影響として NAGISA は動的重合格子も適用可能であるため実プロペラを用いることも可能であるが、実プロペラを用いる場合は時間刻みの非常に小さい非定常計算が必要で、操縦運動においては簡易プロペラ

理論に基づく体積力プロペラモデルを用いた結果からの推定精度の改善は比較的小さい¹²⁾ため今回は体積力プロペラモデル¹³⁾を用いることとした。

計算格子に関しては図2、表2に示すようにラダーホーン有り無しとの2種類の重合格子を作成し、従来では計算格子を作成する時に省略されがちであったラダーホーンの効果を検証する。

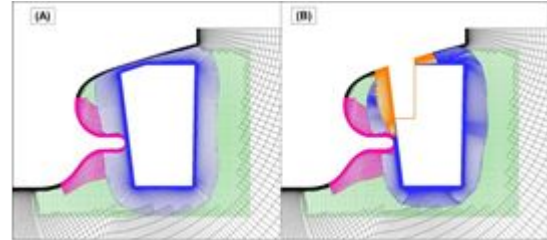


図2 船尾付近の重合格子 (Y対称面)
(A: ホーンなし、B: ホーンあり)

表2 重合格子概要

格子		$i_m \times j_m \times k_m$ (格子点数)
ホーン	ホーン有	181 x 145 x 65 (171万)
	ホーン無	105 x 121 x 81 (103万)
舵	ホーン有	201 x 137 x 89 (245万)
	ホーン無	105 x 121 x 81 (103万)
船尾シャフト		81 x 129 x 65 (68万)
中間格子		105 x 121 x 105 (133万)
船体		145 x 185 x 105 (281万)

実船スケールの計算に関しては壁関数¹⁴⁾を用いることで模型スケールと同じ計算格子で計算することとした。壁面に近接する最小格子間隔は模型スケールにおいては壁面からの無次元距離 y^+ は1未満にコントロールされており、実船スケールにおいても図3に示すように、 $y^+=10-30$ 辺りの範囲で壁関数の適用範囲である。

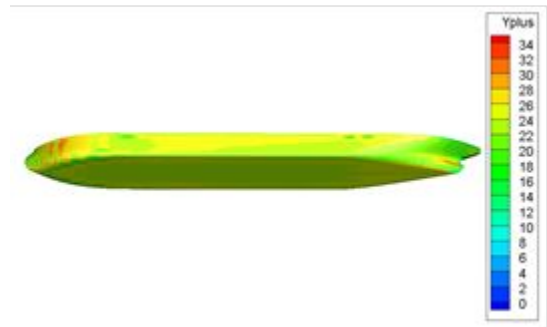


図3 曳航時(実船スケール)における船体表面の y^+ 分布

操縦運動シミュレーションとしては複雑な自由航走試験ではなく、各運動要素として検討することが可能な拘束試験を対象とした。ここでは過去の拘束模型試験¹⁵⁾と比較可能な舵角試験、斜航試験を実施した。

9) Van, S.H. et al.: Experimental Study

on the Flow Characteristics around VLCC with Different Stern Shape, Proceedings of 3rd Hydrodynamics, 1998, pp. 265-272.

10) 大橋訓英 他、重合格子対応構造格子 NS ソルバーの開発、第 28 回数値流体力学シンポジウム講演会論文集、2014、F06-2、

11) 児玉良明 他、付加物付き船体まわりの流れ計算のための重合格子システム UP_GRID の開発、第 26 回数値流体力学シンポジウム講演会論文集、2012、D08-1。

12) Sadat-Hosseini H. and Wu P. C., CFD simulation of KVLCC2 maneuvering with different propeller modeling, Proceedings of SIMMAN2014.

13) Ohashi, K. et al.: A comparative study of body force models representing effects of contra-rotating propellers, Proceedings of 105th Meeting of the West-Japan Society of Naval Architects, 2003, pp. 55-64.

14) Ohashi, K., Hino, T., 2012, Numerical study on the applicability of wall function models for the flows around an appendage attached to a body, AIAA 50th Aerospace Science Meeting Papers, AIAA 2012-0445.

15) Ueno, M., Yoshimura, Y., Tukada, Y., Miyazaki, H., 2009; Circular Motion Tests and Uncertainty Analysis for Ship Manoeuvrability, Journal of Marine Science and Technology, Vol. 14, Issue 4, pp. 469-484.

4. 研究成果

まずはラダーホーン有の模型スケールで実施した舵角試験から得られた X_d , Y_d , N_d , F_N (舵直圧力) の結果を SIMMAN2008¹⁶⁾ で実施されたとの他の RANS ソルバーと比較し、妥当な結果であることを確認した (図 4)。

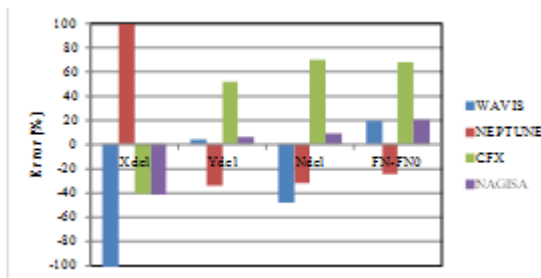


図 4 模型スケールにおける舵角試験の SIMMAN2008¹⁶⁾ との比較

次にラダーホーンの有無による模型スケールでの影響を検討した。図 5 のようにラダーホーンの有無によって MMG モデルの船体・舵干渉係数である t_R , a_H , x_H に対し大きな影響があることが分かった。舵角試験 (舵角 10 度) における船尾圧力の分布 (図 6) からラダーホーンの存在により船尾圧力が変化しており、この効果によって船体・舵干渉係数

が変化しているものと考えられる。一方で舵直圧力に関してはラダーホーンの影響は船体・舵干渉係数に比較すると小さくなかった。

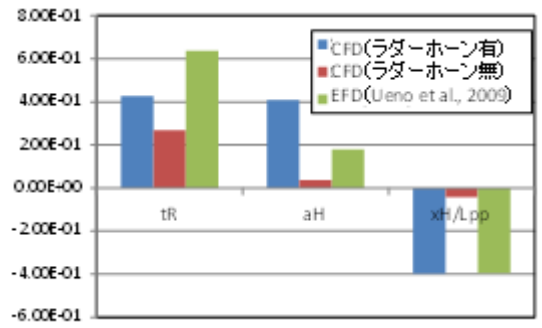


図 5 ラダーホーンの有無による船体・舵干渉係数の比較

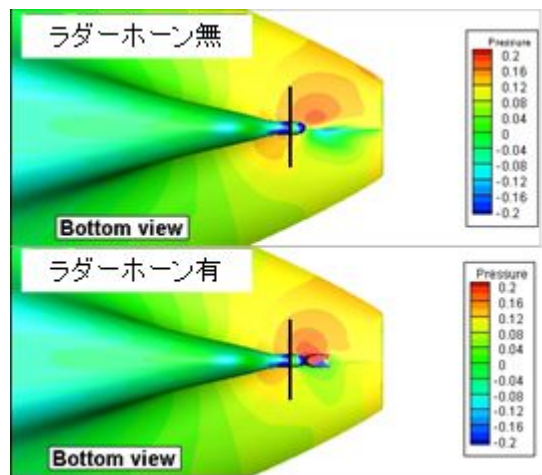


図 6 ラダーホーンの有無による船尾圧力分布の比較

次に舵角試験時における模型スケールと実船スケールの比較を行った。模型スケールにおいてはプロペラ荷重としては模型自航点 (M.P.) と ITTC 計算式¹⁰⁾ から推定した実船自航点 (S.P.) でシミュレーションを実施した。この結果、図 7 のように MMG モデルのプロペラ流入速度と舵流入速度の比 ε とプロペラ増速率 k_x に関して模型試験の実船自航点のものは模型自航点のものに比べ実船スケールのものに近いが、舵直圧力 F_N に関しては模型スケールの実船自航点の F_N は実船スケールの F_N に比べかなり小さくなり、模型自航点の F_N は実船スケールのものに比べ若干大きいものの比較的近い結果となった。この結果は上野ら³⁾ が実験的に確認した傾向と同じである。

これらの理由としてはプロペラ後流中とプロペラ後流から外れた部分の船後伴流の影響と考えられる。実船スケールと模型スケール (実船自航点、模型自航点) の自航時 (舵角 0 度) における A.P. 断面の伴流を図 8 に示す。図 8 においては模型スケールのプロペラ後流のあたらない舵上部の船後伴流は実船スケールのものより明らかに遅くなっている。一方、舵にあたるプロペラ後流に関して

は模型スケールの実船自航点では実船スケールに比べ若干遅く、模型自航点では明らかに速くなっている。これらのプロペラ後流中とプロペラ後流から外れた部分の船後伴流のバランスによって、この KVLCC2 においては模型スケールの舵直圧力は実船自航点では実船スケールよりかなり小さくなり、模型自航点では若干大きくなったものと考えられる。

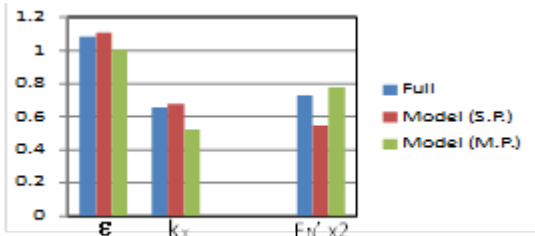


図7 舵角試験時における実船・模型スケールにおける ϵ 、 k_x 、 F_N の比較

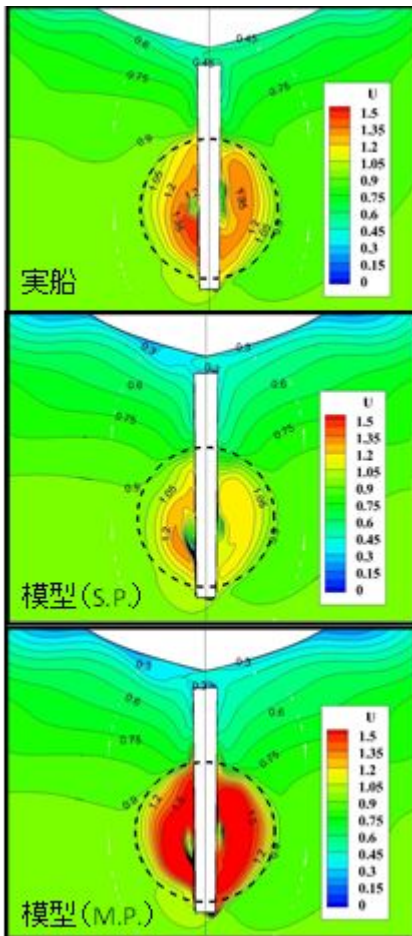


図8 自航時における A.P. 断面における実船スケールと模型スケールの伴流分布の比較

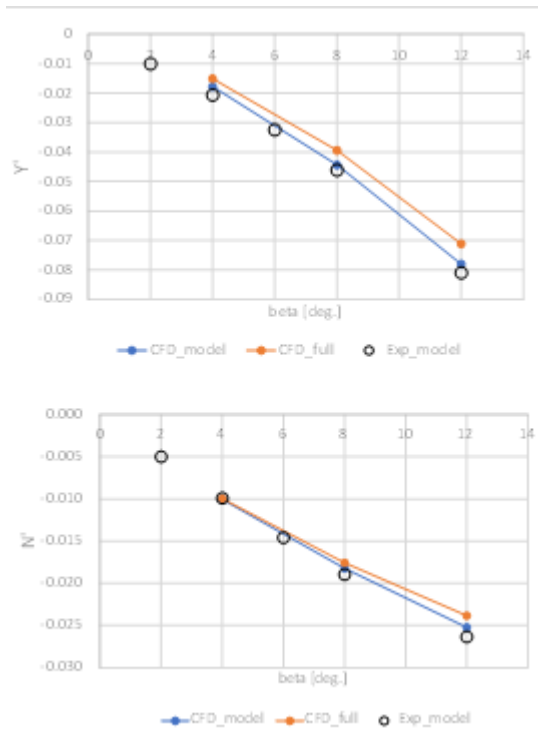


図9 斜航時における模型・実船スケールシミュレーションと模型試験の Sway 方向、Yaw 方向流体力の比較

図9に斜航時における模型試験結果¹⁵⁾と模型及び実船スケールシミュレーションでえられた船体に掛かる Sway 方向流体力と Yaw 方向流体力モーメントの比較を示す。模型スケールシミュレーションは模型試験と非常に良い一致を示しており、妥当な結果といえる。実船スケールでは模型スケールのものにくらべ Sway 方向流体力と Yaw 方向流体力モーメントともに若干小さいものになっており、その原因を流場解析から検討する。

斜航時(斜航角 12 度)における船体表面(正圧面、負圧面)の圧力分布を図10に示す。正圧面は模型スケールと実船スケールで大きな違いは見られないが、負圧面に関しては実船スケールの船尾付近の負圧が模型スケールのものにくらべて強くなっていることが分かる。これによって実船スケールの Yaw 方向モーメントは模型スケールのものにくらべて小さくなっていると考えられる。一方、実船スケールでは負圧面での負圧が模型スケールに比べ大きいことから揚力(Sway 方向流体力)は大きくなるはずであるが図9より実際には揚力が小さくなっている。

次に斜航時(斜航角 12 度)の渦を可視化するために Q 値 = 500 の等値面を図11に示す。図11より船体から剥離する剥離点を実船スケールにおいては模型スケールのものより船尾側に位置していることがわかる。この場合剥離が遅れることから実船スケールの方が模型スケールに比べ大きな揚力(Sway 方向の流体力)を発生させるはずであるが、実際には図9に示す通り、模型スケールの方

が大きな揚力を発生させる結果となっており、今後この原因を究明する必要があると考える。

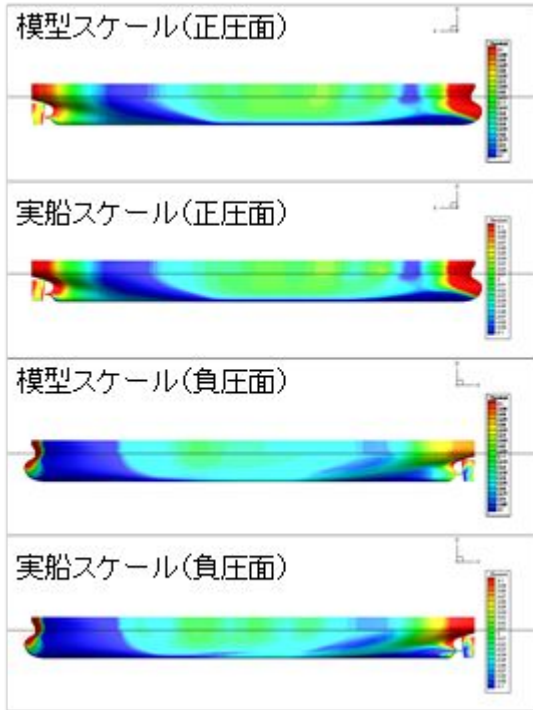


図10 模型・実船スケールの斜航時における船体表面の圧力分布の比較

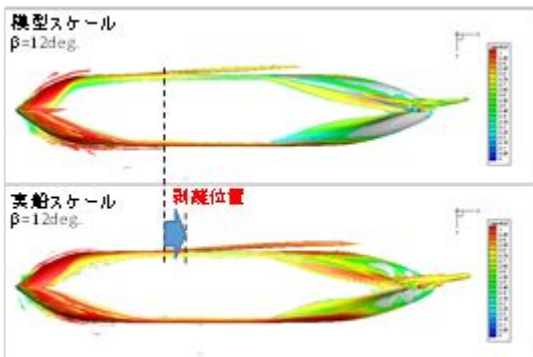


図11 模型・実船スケールの斜航時における船体周りの渦の比較

16) Stern F. et al., Experience from SIMMAN 2008-The First Workshop on Verification and Validation of Ship Maneuvering Simulation Methods, Journal of Ship Research, Vol.55, 2011, pp.135-147.

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 0 件)

〔学会発表〕(計 2 件)

Araki M., Ohashi K., Sakamoto N., Effect

of Rudder Horn and Propeller Hub Vortex for CFD Manoeuvring Simulations, Proceedings of MARSIM2015, 2015, No.3.4.1.

Araki M., Scale Effects on Ship Maneuverability using RANS, Proceedings of OMAE2018, 2018, OMAE2018-77191.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

荒木 元輝 (Araki Motoki)

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、主任研究員

研究者番号：00711350

(2)研究分担者

()

研究者番号：

(3)連携研究者

()

研究者番号：

(4)研究協力者

大橋 訓英 (Ohashi Kunihide)

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、上席研究員