

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04872

研究課題名（和文）界面捕獲法と気泡力学モデルを改良したプロペラキャビテーションCFD計算手法の開発

研究課題名（英文）Development of viscous CFD technique for cavitating propeller using improved interface capturing scheme and cavitation modeling

研究代表者

坂本 信晶（Sakamoto, Nobuaki）

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：80550003

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、従来非構造格子ベースの商用ソルバーに依存しがちであった船用プロペラ周りに発生するキャビテーションの推定を、構造重合格子ベースのin-houseソルバーを用い、比較的少ない格子数で精度良く計算可能とするための粘性CFD計算コードを開発した。具体的には、界面捕獲手法として多次元THINC法を採用し、キャビテーションモデルには気泡力学に基づく標準的なモデル(Zwart-Geber-Belamri, Schnerr-Sauer)を導入した。その結果、2次元naca0015翼および省エネ付加物有無の状態の船尾伴流中で作動するプロペラ周りの、非定常なキャビテーション発生状態が推定可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、従来非構造格子ベースの商用ソルバーに依存しがちであった、船用プロペラ周りに発生するキャビテーションの推定を、構造重合格子ベースの自作ソルバーを用い、比較的少ない格子数で精度良く計算可能とするための粘性CFD計算コードを開発した。ソルバーのキャビテーション計算に対する精度については、より定量的な検証が必要とはなるものの、比較的低い計算負荷で、船用プロペラに発生するキャビテーション計算を可能とする基礎技術の開発が完了したと考えられる。

研究成果の概要（英文）：On evaluating cavitation extent around marine propellers using viscous CFD, computations tend to depend on commercial CFD solver with unstructured grid which sometimes yields high computational expense since very fine grid is to be prepared to prevent numerical diffusion of cavitation interface. In the present study, structured overset FVM solver becomes the base of development. On the solver, algebraic-type VoF advection scheme "THINC" is implemented, in the meantime, two fundamental cavitation models (Zwart-Geber-Belamri, Schnerr-Sauer) based on simplified Rayleigh-Plesset equation are introduced. Resultant code are able to solve unsteady cavitation phenomena around 2D naca0015 and a 3D marine propeller operating in a ship wake without/with energy saving device.

研究分野：船舶流体力学

キーワード：船用プロペラ キャビテーション THINC法 構造重合格子 有限体積法

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

船用プロペラに発生するキャビテーションは、キャビテーション気泡が成長、伸縮、崩壊するため、船尾変動圧、水中騒音およびプロペラ表面に発生する壊食現象の一因になる。それ故、船用プロペラの設計および性能評価には、キャビテーション現象の把握が必須である。そのためには、キャビテーション試験水槽を用いた水槽試験と並行して、数値計算によるキャビテーションシミュレーションが多用され、船用プロペラの設計・性能評価にとって重要な要素技術となっている。流体の粘性を考慮した数値流体力学的手法(Computational Fluid Dynamics: CFD)では、キャビテーション気泡の形状を事前に仮定する必要は無く、またその挙動に乱流や非凝縮性気体の影響を考慮することも可能である。粘性 CFD 計算は計算時間では非粘性手法に劣るが、キャビテーション現象の再現性では、非粘性手法に勝っている。粘性 CFD によるプロペラキャビテーション解析では、キャビテーション界面の正確な捕獲、および相変化を正しく捉えることの出来るキャビテーションモデルが重要である。しかし 2000 年代中盤以降、殆どのプロペラキャビテーション計算が汎用商用コードで為されているため、この問題に適した界面捕獲法・キャビテーションモデルに対する技術開発が出来ていない。

2. 研究の目的

本研究では、

- 界面圧縮型ではない低数値拡散スキームを用い、かつ構造重合格子を用いて必要最小限の局所空間細分化を行うことで、汎用ソルバーよりも少ない計算負荷で、精度の高いプロペラキャビテーション界面の解像を可能とする。
- キャビテーションモデルに気泡力学的なメソスケール影響を取り入れ、気泡の生成・消滅のモデル化を改良することで、汎用ソルバーよりも精度の高いプロペラキャビテーション現象の再現に繋げる。

の 2 点に焦点を当てた、粘性 CFD 手法による船用プロペラ周りキャビテーション計算手法の開発を目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、粘性 CFD 解析における界面捕獲法とキャビテーションモデルの高精度化が、船用プロペラキャビテーションおよび関連する物理現象の再現性に与える影響を明らかにする。本研究は 3 年計画で実施し、開発のベースには、申請者が所属する海上技術安全研究所(以下、海技研)で開発を進めている船舶用 CFD ソルバー”NAGISA”を用いる。本研究では流体に対して非圧縮性を仮定する。また、気液混相状態の流体は、その物性(密度および粘性)を volume fraction によって決め、気相と液相間の速度差を考慮しない一流体として取り扱う。

【1 年目】: Ii et al. (2012), Xie et al. (2014)を参考とし、構造重合格子ベースの多次元 THINC 法のスキーム開発と検証、マクロスケール均質媒体キャビテーションモデル(Zwart et al. (2004), Sauer and Schnerr (2000))の実装、およびキャビテーションモデルの mass transfer term に、メソスケール要素(Srinivasan et al. (2009), 伊賀他 (2019))を導入するための調査と、NAGISA に実装するための定式化を行う。同時に、NAGISA の二相化を行う。

【2 年目】: 年度前半までに、NAGISA の二相化と検証を完了させる。その後、1 年目に開発した多次元 THINC 法スキーム・マクロスケールキャビテーションモデルを、NAGISA に実装する。キャビテーション解法については、2 次元翼問題を通じた基礎的な検証を行い、界面捕獲法の高度化がキャビテーション現象の再現性に与える影響を明らかにする。

【3 年目】: 年度前半までに、NAGISA に実装した多次元 THINC 法の並列化と、キャビテーションモデルへのメソスケール要素 導入を完了する。完成した計算手法を、2 次元翼だけでなく 3 次元船用プロペラキャビテーション問題に適用し、キャビテーションパターン、船尾変動圧、キャビテーション発生量について、水槽試験結果を用いた定量的な検証を行うことで、界面捕獲法に加え、キャビテーションモデルの高度化が、船用プロペラキャビテーション現象の再現性に与える影響を明らかにする。

4. 研究成果

4.1 構造重合格子ベースの多次元 THINC 法の開発と検証

本研究のベースとなる CFD ソルバー”NAGISA”は構造格子有限体積法を採用しているため、キャビテーション界面の捕獲に用いる多次元 THINC 法も、そのように定式化し実装する必要

がある。本研究では、文献を参考としながら以下に示す方法を開発した。

- あるセル内(セル形状は六面体で、hanging node は存在しない)の volume fraction の空間分布は tanh 関数で近似。
- セル内の界面形状(所謂、界面の方程式)は、平面(1次多項式)もしくは曲面(2次多項式)で近似。
- セル内の volume fraction 再構築の際に用いる volume fraction の1階微分・2階微分は、Xie et al. (2014)の方法に倣うが、それらの値の物理空間から計算空間への変換には、独自に定義した tri-linear 関数から算出した計量テンソルを使用。
- 界面の方程式を決定するパラメータ“ d_i ”の算出には、Xie et al. (2014)の方法に加え、Ii et al. (2014)¹⁰の方法を六面体に拡張した独自の手法を開発。
- 時間積分は陽解法とし、積分スキームには3次 TVD Runge-Kutta(RK)もしくは4次 RK とする。

以下に、開発した手法を3次元の移流問題に適用し検証した例を示す。図1に、球形の初期プロファイルを持つ vof 値が shear を持つ周期的な速度場で半周期経過した後の vof 値プロファイル、およびその後時間反転(つまり流速の符号がそれまでと反対になる)して更に半周期移流したプロファイルを示す。この計算においては、半周期経過した後のプロファイルが連続しているか・時間反転後(つまり一周期後)のプロファイルが初期プロファイルに戻るか、がポイントとなる。図1に示した結果は、THINC法の先行研究結果に比べ遜色のない結果となっている。

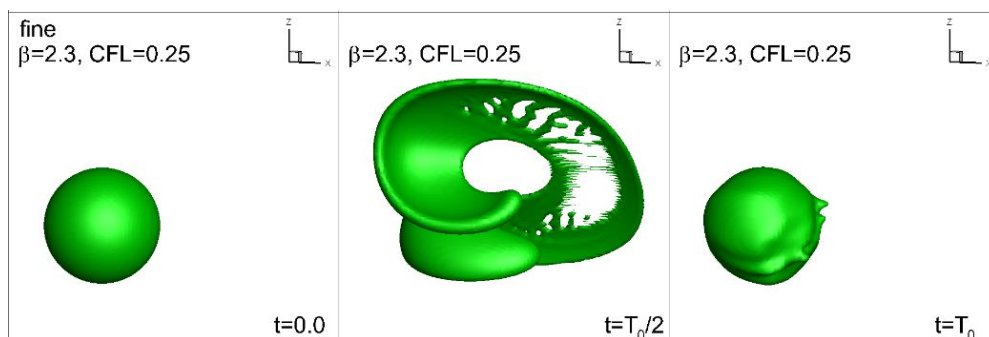


図1 3次元時間反転速度場問題 (fine grid) : 初期(左), 半周期後(中央), 1周期後(右)

本研究でプロペラ周りの流れを解く際、プロペラは回転し、その回転運動は動的重合格子により考慮する。そのため、プロペラ翼面上から発生したキャビテーション気泡は、回転運動を伴う異なる格子間を移流することになる。従って、多次元 THINC 法の移動する重合格子上における挙動を把握しておく必要がある。これは、図2に示すような数値実験により実施した。計算格子は、外側格子(黒色)および内側格子(青色)で生成し、互いの格子間補間情報は物理時間進行毎に、海技研で開発している重合情報計算コード“up_grid”を用いて更新した。初期状態として内側格子内部に2次元切り欠き円盤を配置し、移流計算開始後、内側格子のみが円盤と同一方向(Case #1, #3)もしくは反対方向(Case #2, #4)に移動、あるいは内側格子の回転移動と外側格子の周期的な移動の組み合わせ(Case #5, #6)といったパターンを試した。

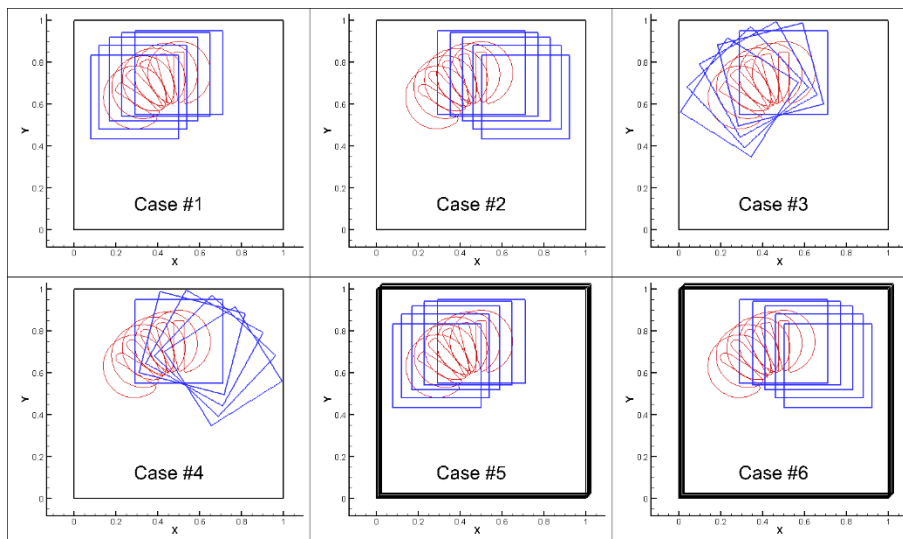


図2 動的重合格子状態における多次元 THINC 法テストケース

図 3 に、移流中および移流後の切り欠き円盤プロファイル比較結果を示す。何れのケースにおいても、移流後の円盤プロファイル(図 3 中黒線、 $t=T_p$ が 1 回転後)は、初期プロファイル(図 3 中赤線)とよく一致しており、異なる格子間を移流後の volume fraction の総量も初期値から約 2%の差に収まっている。詳しくは、Sakamoto et al. (2020)を参照されたい。ここまでで、動的重合格子に対する多次元 THINC 法の精度が確認できた。

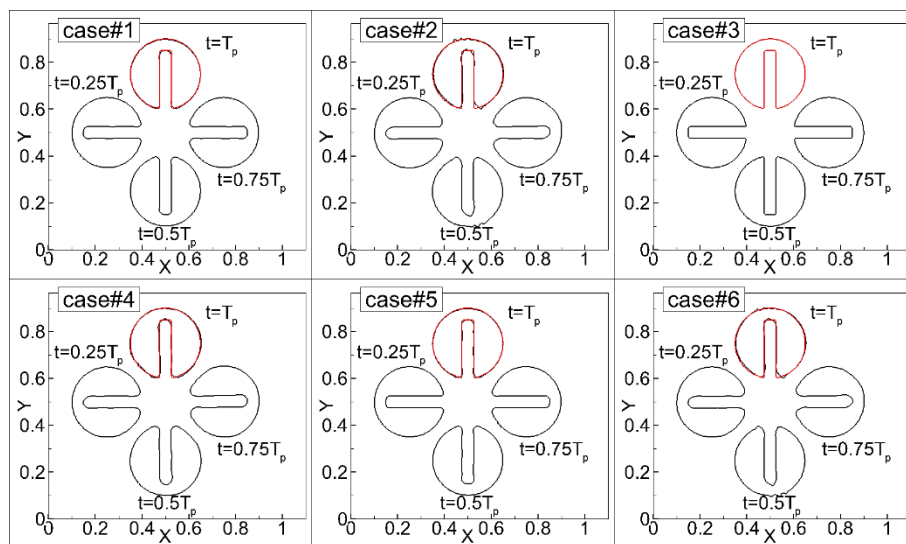


図 3 動的重合格子状態における多次元 THINC 法テスト結果

4.2 2次元翼・3次元船用プロペラ周りのキャビテーション計算

開発した計算手法を用いて、2次元 NACA0015 翼周りに発生するキャビテーションの計算を実施した。計算条件は、翼弦長 $L_c=150\text{mm}$ に基づくレイノルズ数 $Rn=1.2e+06$ 、迎角 8° 、キャビテーション数 $\sigma_n = 1.4$ とした。計算格子は OO トポロジーを持つ構造格子で生成し、外側格子は mid-chord から $10L_c$ の距離を持つ円形とした。壁面近傍における最小格子間隔は、 $1.5e-03$ とし、総セル数は 8,160 セルとした。伊賀他(2019)⁸⁾に従い、層流状態でも流場の巨視的な変動は再現可能と考え、乱流モデルは用いていない。キャビテーション計算には Schnerr-Sauer モデルを用い、モデルパラメータおよび物性値は、 $C_c = 0.2, C_v = 0.1, R_B = 80\mu\text{m}, N_B = 5.0e + 14 \frac{1}{\text{m}^3}, \rho_l = 998 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \rho_v = 0.024 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \mu_l = 1.0e - 3 \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}}, \mu_v = 1.0e - 5 \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}}$ とした。物理時間刻み幅は $\Delta t = 4.0e - 4$ とし、CFL 数が 1.0 を超えないよう留意した。計算結果の一例を、図 4 に示す。この図から、翼上面に発生する sheet cavitation および cloud cavitation が、本研究で開発した CFD 計算法により実験結果と比べよく再現出来ていることが分かる。

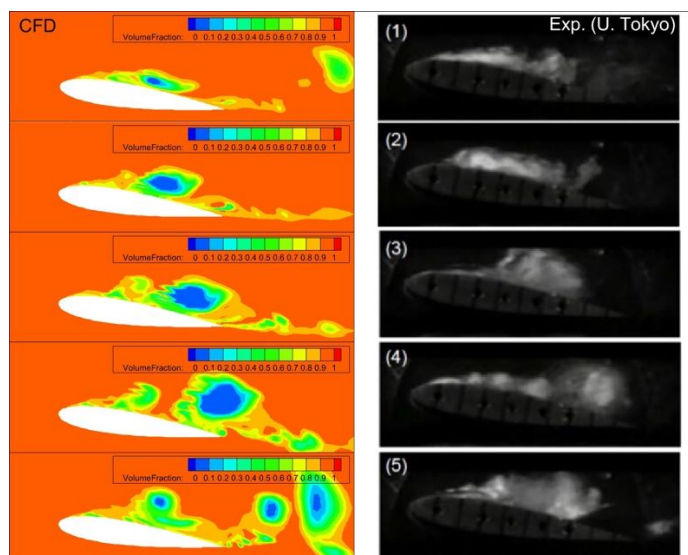


図 4 2次元 naca0015 翼周りに発生するキャビテーションの時間変化：CFD(左) vs 実験(右)

次に、3次元船用プロペラ周りに発生するキャビテーションの推定計算を実施した。計算対象とするプロペラは、海技研で開発したベンチマーク船型 Japan Bulk Carrier (JBC)が装備してい

る形状とした。図 5 に、ダクトなし/ありの状態で作動する JBC プロペラに発生するキャビテーションの瞬時値を示す。ダクトの有無は 9 時から 3 時、つまりプロペラ円の下半分の領域に軸方向流速の差を生じさせている。図 5 中の翼面上にある緑色に示した当値面が、キャビテーションの発生範囲であるが、その発生状態はダクトの有無で差はない。つまり、JBC 船型に装備しているダクトは、プロペラキャビテーションパターンに影響を与えることなく、省エネを達成していることが分かる。

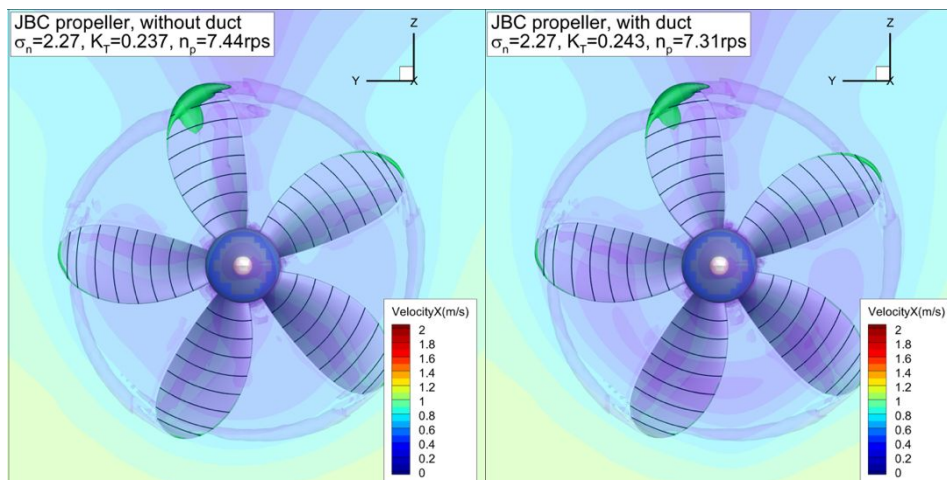


図 5 JBC プロペラに発生するキャビテーション推定：ダクトなし(左) vs ダクトあり(右)

プロペラキャビテーションは、図 5 に示す前進正転状態のプロペラだけではなく、例えば離着機時の状態である 4 象限状態(前進・後進と正転・逆転の組み合わせ)で作動するプロペラにも発生し、ともすれば前進正転状態の時よりも大規模なキャビテーションが生じる。本研究で開発した計算手法が、そのような状態のキャビテーションも再現できるか確認するため、第 3 象限状態(前進逆転、つまり astern が発令された直後)におけるキャビテーション発生範囲を推定する計算を実施した。図 6 に、その結果を示す。図 6 には、 $\sigma_n = 4.5$ の状態でのキャビテーションパターンの瞬時値を赤色の等値面で示している。黄色の等値面は、翼端渦を表している。図 6 から分かるよう、第 3 象限状態では face 面にもキャビテーションが発生している事が分かる。

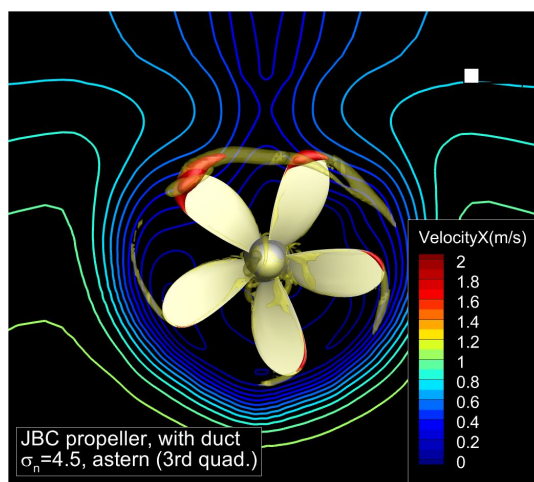


図 6 第 3 象限状態で JBC プロペラ(ダクトありの状態)に発生するキャビテーション推定

5 . 結言

本研究では、これまで非構造格子ベースの商用ソルバーに頼ることの多かった船用プロペラ周りのキャビテーション計算を、構造格子ベースの in-house code にて実施可能とすべく、界面捕獲法およびキャビテーションモデルを改良した計算法の開発を行った。その結果、船用プロペラ周りに発生するキャビテーションの範囲を、構造重合格子を用いた海技研で開発している in-house solver “NAGISA” にて推定が可能となった。但し本研究では、気泡力学に基づくキャビテーションモデルそのものは実装を完了したが、当初目的としていたメソスケール影響の考慮までは実装できておらず、4.2 に示したプロペラキャビテーション発生範囲および発生量の定量的な検証と共に、今後の研究課題としたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Nobuaki Sakamoto, Kunihide Ohashi	4. 巻 -
2. 論文標題 Fundamental Validation of Cavitation and Interface Capturing Models implemented on NAGISA	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本混相流学会 混相流シンポジウム2021 講演論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nobuaki Sakamoto, Hiroshi Kobayashi, Kunihide Ohashi	4. 巻 1
2. 論文標題 Application of "THINC" interface capturing scheme to the structured overset CFD solver	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本混相流学会 混相流シンポジウム2020 講演論文集	6. 最初と最後の頁 1-2
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Korkmaz Kadir Burak, Werner Sofia, Sakamoto Nobuaki, Queutey Patrick, Deng Ganbo, Yuling Gao, Guoxiang Dong, Maki Kevin, Ye Haixuan, Akinturk Ayhan, Sayeed Tanvir, Hino Takanori, Zhao Feng, Tezdogan Tahsin, Demirel Yigit Kemal, Bensow Rickard	4. 巻 220
2. 論文標題 CFD based form factor determination method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Ocean Engineering	6. 最初と最後の頁 108451 ~ 108451
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.oceaneng.2020.108451	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Nobuaki Sakamoto
2. 発表標題 Fundamental Validation of Cavitation and Interface Capturing Models implemented on NAGISA
3. 学会等名 混相流シンポジウム2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nobuaki Sakamoto
2. 発表標題 Application of "THINC" interface capturing scheme to the structured overset CFD solver
3. 学会等名 混相流シンポジウム2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Nobuaki Sakamoto, Hiroshi Kobayashi and Kunihide Ohashi
2. 発表標題 Estimation of Flows around a Full-Scale Ship by Structured Overset RaNS Code "NAGISA"
3. 学会等名 11th International Workshop on Ship and Marine Hydrodynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nobuaki Sakamoto, Hiroshi Kobayashi and Kunihide Ohashi
2. 発表標題 Overset RaNS Computation of Flow around Bulk Carrier with ESD in Full Scale and its Validation
3. 学会等名 令和元年 日本船舶海洋工学会 秋季講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究協力者	日野 孝則 (Hino Takanori)	海上技術安全研究所	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	大橋 訓英 (Ohashi Kunihide)	海上技術安全研究所	

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