

令和 5 年 10 月 23 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04871

研究課題名(和文)多視点型キャビティ形状計測技術の構築とキャビテーションの理論計算法の高精度化

研究課題名(英文)Construction of multi-view cavity shape measurement and improvement of theoretical calculation of propeller cavitation

研究代表者

白石 耕一郎 (Shiraishi, Koichiro)

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：40586591

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：船用プロペラに生じるキャビテーションの理論計算の精度向上のためには、水槽試験におけるキャビティ形状計測結果を用いた計算モデルの検証が不可欠である。本研究では、複数台のラインセンサーを多角的に配置することで、界面が不安定な三次元形状を計測可能な多視点型ラインセンシング法を開発し、従来計測が困難だった翼端渦キャビテーションの形状計測を可能にした。理論計算の高度化では、キャビティ表面パネルによって構成されるキャビティ体積要素ごとに変動圧力を計算し、これらの総和から変動圧力を算出する計算法を開発した。本計算法によって、従来法よりも精度良く変動圧力を推定できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、多角的に高精度な三次元形状計測が可能な多視点型ラインセンシング法を新たに開発した。本計測法は複数台のラインセンサーを様々な角度で設置することで、多角的に三次元形状を計測でき、ロバスト性が非常に高い特徴がある。なお、本計測法は非接触の多角的三次元形状計測法として様々な形状計測に応用することが可能である。多視点型ラインセンシング法を用いることで、界面の変動の激しい翼端部クラウドキャビテーションの形状も捉えることが可能である。これによって形状の変化率等を用いて、翼端部クラウドキャビテーションを定量的に評価でき、新たな理論モデルの開発が可能となり、理論計算法の高精度化にもつながる。

研究成果の概要(英文)：To improve the accuracy of theoretical calculations of cavitation in marine propellers, it is essential to verify the theoretical model using cavity shape measurement results of cavitation experiment at cavitation tunnels. In this study, we have developed a multi-view line sensing method that can measure three-dimensional shapes with unstable interfaces by arranging multiple line sensors from multiple angles, enabling the shape measurement of tip vortex cavitation, which has been difficult to measure in the past. In the improvement of theoretical calculation, we have developed a calculation method that calculates the fluctuating pressure for each cavity volume element composed of cavity surface panels and calculates the total fluctuating pressure from the sum of these elements. We have shown that the developed calculation method can estimate the pressure fluctuation more accurately than the previous method.

研究分野：推進性能、キャビテーション、画像計測、画像解析、キャビテーション、機械学習

キーワード：多視点型ラインセンシング法 キャビテーション形状計測 翼端渦キャビテーション キャビテーションに起因する変動圧力 理論計算法 簡便なパネル法(SQCM)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

船用プロペラに生じるキャビテーションは、プロペラの性能低下や船体振動および騒音の原因となるため、できる限りキャビテーションの発生量を抑えたプロペラ設計が必要である。そのため、設計段階でキャビテーションを評価するために理論計算や数値計算が用いられている。しかしながら、キャビテーションは液体と気体の二相流及び相変化が組み合わさった複雑な現象であるため、理論モデルや数値計算法は完成されておらず、現在も盛んに研究が行われている。理論モデルや数値計算法の高度化のためには、その検証に使用するためのキャビティ形状の計測値が不可欠である。キャビテーションによって生じる振動及び騒音とキャビティ形状の間には強い相関があるため、その形状を高精度に計測することができれば、その計測値を用いて理論モデルを改良し、推定精度を向上させることが可能である。しかしながら、キャビティ形状の計測には、非接触計測及び高応答性が求められるため、これまでに実用化された計測方法はほとんど存在しない。

計算モデルの精度向上のためには、シートキャビテーションに加え、翼端渦キャビテーション及び翼端部クラウドキャビテーションの形状データが重要である(図1参照)。翼端渦キャビテーションの強さは、形状の太さと相関があることが分かっており、形状が計測できれば、計算モデルの検証データとして使用できる。また、翼端部クラウドキャビテーションは変動圧力の高次成分等に影響することが分かっているが、形状の変動が激しく界面が不安定であるため、その評価方法さえ確立されていない。翼端部クラウドキャビテーションの形状計測が実現できれば、三次元形状という数値データを新たに取得することができ、従来困難だった本キャビテーションの定量的な評価方法を構築できる可能性がある。しかしながら、これらのキャビテーションの形状計測が可能な三次元形状計測法は存在しないため、新たに構築する必要がある。

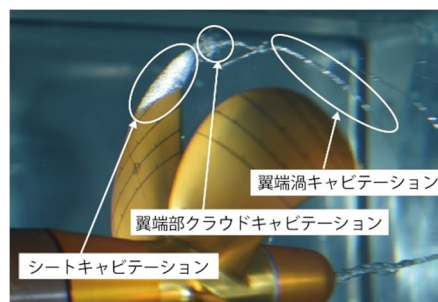


図1 模型プロペラに生じるキャビテーションの画像

## 2. 研究の目的

本研究では、翼端部クラウドキャビテーションと翼端渦キャビテーションの形状計測が可能な三次元形状計測法の構築と理論計算によるキャビテーション推定法の高精度化を目的として、3年間の研究期間において以下の2項目について研究を実施した。

### (1) 多視点型ラインセンシング法を用いたキャビティ形状計測システムの構築

翼端渦キャビテーションはプロペラに対して非常に細く複雑な形状であり、翼端部クラウドキャビテーションは変動が激しく、界面の捕捉が難しい。このような問題を解決して形状計測を行うためには、高応答かつ多角的視野で計測が可能な三次元形状計測法が必要である。そこで、本研究では、申請者が以前開発した組合せライン CCD 法を拡張させ、多角的に高精度な三次元形状計測が可能な多視点型ラインセンシング法を新たに構築する。この方法は、複数台のラインセンサーを様々なアングルで設置することで、多角的に三次元形状を計測することが可能である。従来のステレオ計測は、計測原理上、カメラの向いている一方向しか計測できないが、この方法は複数台のカメラ画像を組み合わせることで複数方向からの計測が可能である。このような特長を有する三次元形状計測法はこれまでに無く、非接触の多角的三次元形状計測法として様々な形状計測に応用することが可能である。そして、多視点型ラインセンシング法を用いた翼端渦キャビテーションと翼端部クラウドキャビテーションを計測可能なキャビティ形状計測システムを構築する。

### (2) キャビティ形状計測結果を用いた理論計算法の高精度化

プロペラ翼面上に発生するシートキャビテーションに関しては自由流線理論に基づく計算法を既に構築しており、十分な精度を有することを確認している。一方、翼端渦キャビテーションおよび翼端部クラウドキャビテーションに関しては、気泡追跡法に基づく計算法を試みているものの、最終目標である変動圧力高次成分の高精度化には至っていない。原因として、シートキャビテーション、翼端部クラウドキャビテーション、翼端渦キャビテーションの各キャビティ体積を各代表点に配置した、3つの球形気泡による変動圧力の重ね合わせとして算出するその取り扱いの簡易さが上げられる。また、計算で重要となるキャビテーションパターンの翼端部の局所的なキャビティ形状について、十分な検証が行われていない。申請者は、キャビティの種類に関係なく、計算で得られる最小単位のキャビティ体積が連続的に分布していることを考慮できる変動圧力計算法の構築に取り組んでおり、翼端部のキャビティ形状のデータを用いて計算法の妥当性を検証する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 多視点型ラインセンシング法を用いたキャビティ形状計測システムの構築

翼端部クラウドキャビテーションのような界面が不安定な三次元形状を計測するために多視点型ラインセンシング法を新たに開発する。この方法は、複数台のカメラ情報を組み合わせることで、多角的な三次元形状計測が可能である。そのため、気泡と気泡が重なる部分についても、別角度から計測ができるため、不安定な界面も計測できるという特長を有している。本研究では、複数台のラインセンサーを多角的に配置するための光学系を設計し、本計測法用に透視投影モデルを用いたカメラモデルを新たに開発した。多視点型ラインセンシング法は、シートキャビテーション及び翼端渦キャビテーションの形状計測も可能である。ただし、本計測法は点計測を繰り返して三次元形状の分布データを得る方法であるため、キャビテーションが広範囲に発生する場合、計測に時間がかかる可能性がある。本研究では、回転ステージを用いることで、レーザースキャニングが可能な自動計測システムを構築した。これによって、キャビテーションの三次元形状の分布計測を効率的に行うことができる。また、レーザースキャニングの照射角を細かくすることで、計測データの密度を上げることができる。形状の細かい翼端渦キャビテーションについても、発生範囲全体にレーザーが照射されるように角度を調整することで、その形状を計測することが可能である。図2に本研究で開発したキャビテーション形状計測システムの写真と3Dモデルを示す。

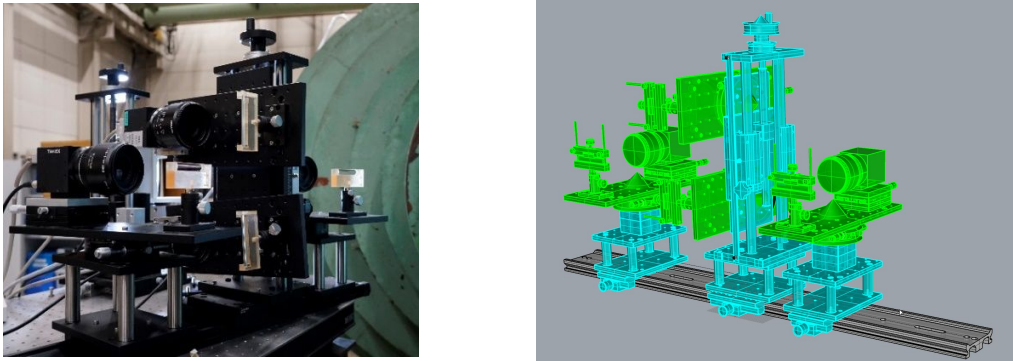


図2 開発したキャビティ形状計測システム（左：写真，右：3Dモデル）

#### (2) キャビティ形状計測結果を用いた理論計算法の高精度化

従来は、算出された全キャビティ体積を単一球状気泡として翼端位置に代表させ、変動圧力を計算していたが、キャビティ体積の大半を占めるシートキャビティは、翼面上に薄く広がり、収縮するとされるものであり、実際の現象と取り扱いが大きく異なる可能性がある。そこで、本研究では、キャビティ体積を1個にまとめて扱わず、キャビティ表面の各パネル下で得られるキャビティ体積ごとに変動圧力を求め、これらの総和として変動圧力を算出する。この方法はキャビティと変動圧力計測点の位置関係が厳密に扱われる等の利点がある。図3, 4にキャビテーションのモデル化の図を示す。具体的には、パネルごとのキャビティ体積  $V_{ij}$  (図3)とその位置を、全て各時刻について出力させる。図3の  $i, j$  はそれぞれ半径方向、周方向のパネル番号である。この  $V_{ij}$  は翼表面とキャビティ表面パネル間の四角柱状の要素からなり、台形則を用いて、断面積、および体積を算出する。なお、シートキャビテーションの他、翼端部スーパーキャビテーション、翼端渦キャビテーション (図4) についても同様に、要素ごとに体積を出力する。翼端部スーパーキャビテーションの場合、キャビティ厚さを測る底面は後流渦面となり、翼端渦キャビテーションについてはキャビティ円筒要素の体積を  $V_{ij}$  として扱う。そして、各キャビティ表面パネルにより得られたキャビティ体積  $V_{ij}$  ごとに変動圧力を求め、この総和から変動圧力を計算する。

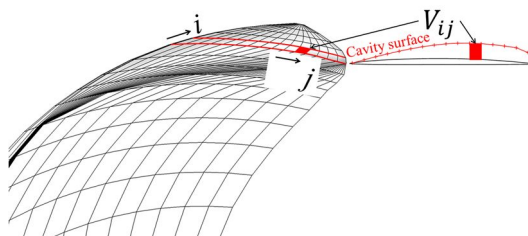


図3 キャビティ体積要素

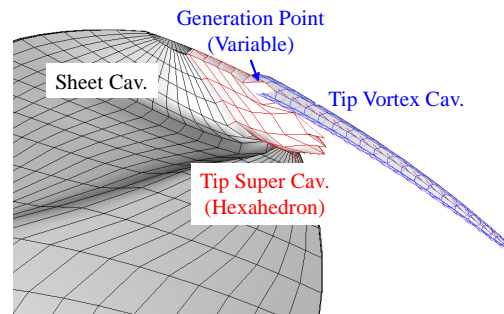


図4 キャビテーションモデルでのパネル配置

#### 4. 研究成果

##### (1) 多視点型ラインセンシング法を用いたキャビティ形状計測システムの構築の成果

本研究で開発したキャビティ形状計測システムの精度の確認を行うため、青雲丸 I 世 HSP の模型プロペラ (図 5 参照) の三次元形状計測を行った。本計測では、プロペラトップをプロペラ角度 0deg とし、反時計回りを正とした。プロペラの回転数は 15rps である。図 6 にキャビティ形状計測風景の写真を示す。



図 5 供試模型プロペラの写真

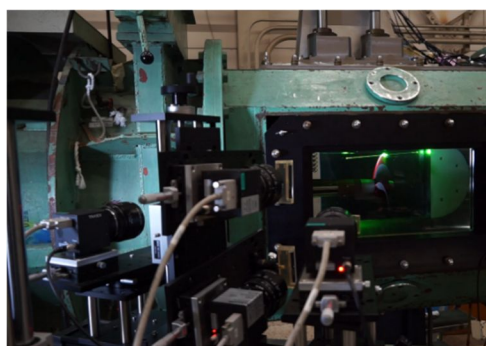


図 6 キャビティ形状計測の風景

本試験で得られた形状計測結果を図 7 に示す。図 7 においてプロペラ翼面形状はワイヤーフレームで表示している。赤点は計測点を表しており、それぞれの計測点を三角形補間することで計測した翼面形状を求めている。コンターの数値は計測結果とプロペラ翼面との誤差を示している。計測誤差の平均値は 0.22 mm となり、十分な計測精度が得られている。本計測結果より、装置の改良によって大幅に計測精度が向上していることを確認した。

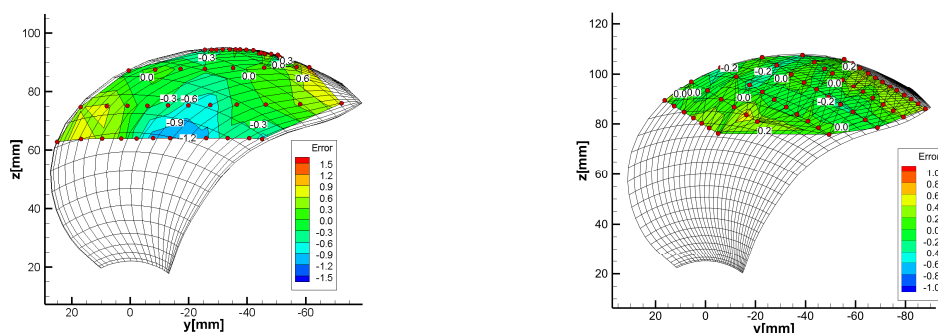


図 7 模型プロペラの翼形状計測結果 (左: 従来法, 右: 開発法)

青雲丸 I 世 HSP の模型プロペラに生じるキャビテーションの形状計測結果を図 8 と図 9 に示す。図 8, 9 は、模型プロペラに発生したキャビテーションをスチールカメラで撮影した画像 (左図) とキャビティ形状を計測した結果 (右図) を示している。図 8 と図 9 より各プロペラ位相角におけるキャビティ形状を広範囲において計測できていることが分かる。また、プロペラ位相角 40, 50 deg においては、翼端渦キャビテーションの形状を捉えられていることが確認できる。本結果より、従来手法では困難だった翼端渦キャビテーションの形状を計測できることが分かった。また、シートキャビテーションから翼端渦キャビテーションに遷移する箇所が生じる翼端部クラウドキャビテーションも捉えられていることが確認できる。これらの結果より、カメラの増強によるロバスト性向上と光学系の改良による輝度分布のピーク検出感度の向上によって、翼端部クラウドキャビテーションと翼端渦キャビテーションの形状を計測できることを確認した。

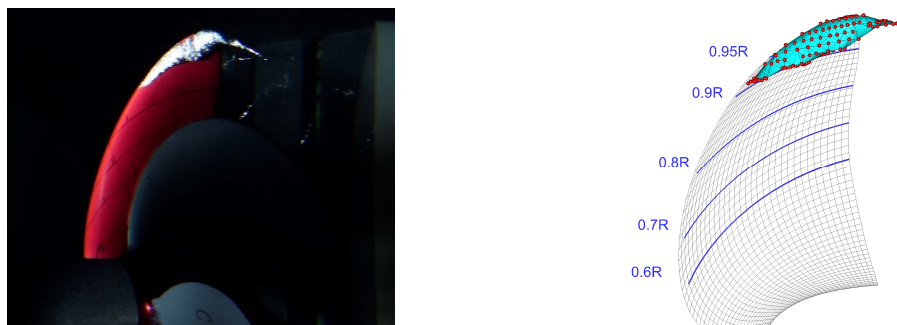


図 8 キャビティ形状計測結果 (プロペラ位相角 40deg)

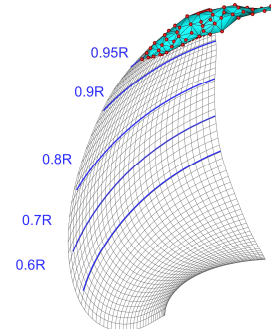
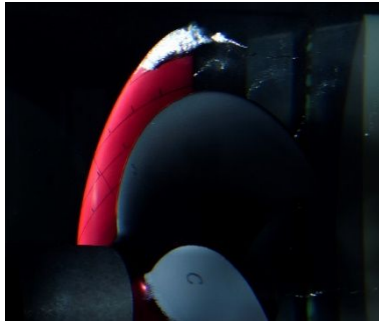


図9 キャビティ形状計測結果 (プロペラ位相角 50deg)

(2) キャビティ形状計測結果を用いた理論計算法の高精度化の成果

SQCM による非定常プロペラ計算法をベースとする、キャビテーションによって誘起される変動圧力計算法の更なる改良を行った。キャビティ表面パネルによって構成されるキャビティ体積要素ごとに変動圧力を計算し、これらの総和による変動圧力計算法を示した。本計算法によって、キャビテーションパターン、キャビティ面積、キャビティ体積について、計算の方が大きく評価する傾向があるものの、定性的に実験値を表現できることを示した。また、変動圧力の波形についても、従来法よりも実験による波形の特徴をよく捉え、変動圧力振幅の1~3次成分の分布についても実験値に近づくことを示した(図10参照)。

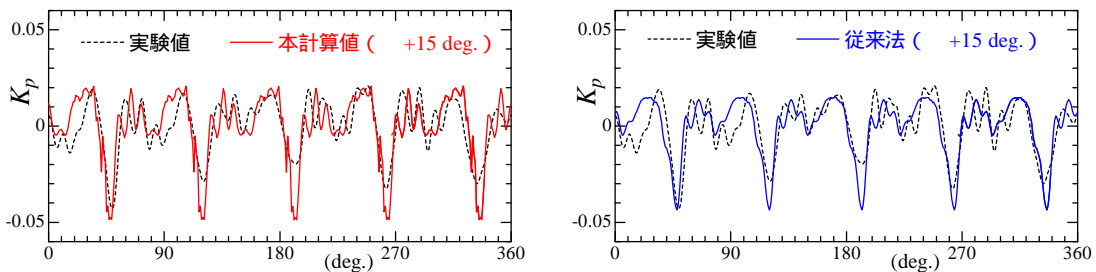


図10 変動圧力の推定結果の比較 (赤：開発手法，青：従来法)

図11にキャビテーションパターンを実験画像と比較して示す。プロペラ位相角 20deg. で両者が異なるのは、計算の方が実験よりも早い翼角度でキャビティが発生、発達するためであるが、全体的にはキャビティの発達、収縮の様子が計算で表現できている。

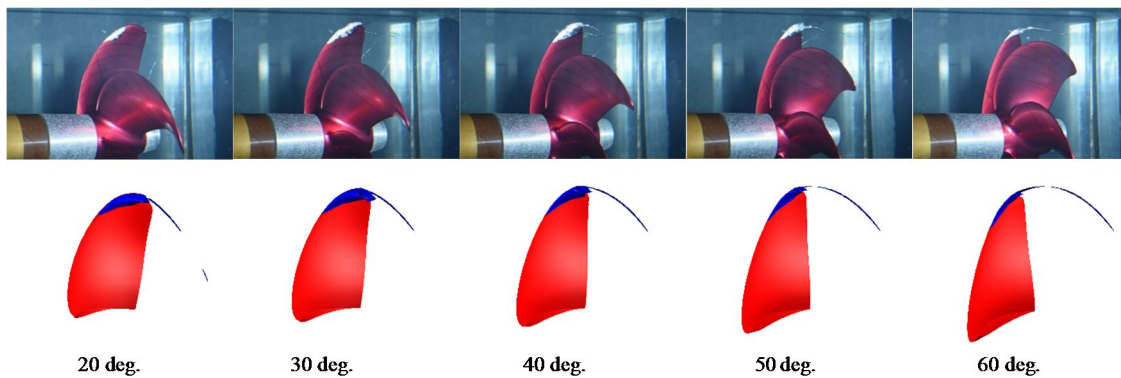


図11 キャビテーションパターンの推定結果の比較 (赤：開発手法，青：従来法)

(3) まとめ

本研究では翼端渦キャビテーション及び翼端部クラウドキャビテーションの形状計測が可能な多視点型ラインセンシング法を用いたキャビテーション形状計測システムを構築した。そして、青雲丸I世 HSP 模型プロペラを対象にキャビティ形状計測を行い、両キャビテーションを計測できることを確認した。また、理論計算の高度化では、キャビティ表面パネルによって構成されるキャビティ体積要素ごとに変動圧力を計算し、これらの総和から変動圧力を算出する計算法を開発した。本計算法によって、従来法よりも精度良く変動圧力を推定できることを示した。

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Shiraishi Koichiro, Sawada Yuki, Arakawa Daijiro	4. 巻 33
2. 論文標題 3D Shape Measurement Method for Cavitation on Marine Propellers Using Combination Line CCD Camera Method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers	6. 最初と最後の頁 219～230
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2534/jjasnaoe.33.219	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Koichiro Shiraishi, Yuki Sawada, Azumi Kaneko and Daijiro Arakawa	4. 巻 -
2. 論文標題 Development of Cavitation Shape Measurement Method Using Muti-View Line Sensing Method	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of 7th International Symposium on Marine Propulsors	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 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 -

1. 著者名 Koichiro Shiraishi, Yuki Sawada, Junichi Fujisawa	4. 巻 -
2. 論文標題 Accuracy Verification of Cavity Shape Measurement Using Combination Line CCD Camera Measurement Method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of 11th International Symposium on Cavitation	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 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 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 金丸崇、新川大治朗、白石 耕一郎、安東潤
2. 発表標題 プロベラキャビテーションによって誘起される船尾変動圧力の実用的計算法 - 続報：翼面上のキャビティ分布を考慮した変動圧力の計算
3. 学会等名 キャビテーションに関するシンポジウム(第20回)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Koichiro Shiraiishi, Yuki Sawada, Azumi Kaneko and Daijiro Arakawa
2. 発表標題 Development of Cavitation Shape Measurement Method Using Muti-View Line Sensing Method
3. 学会等名 7th International Symposium on Marine Propulsors (SMP21) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 白石耕一郎、新川大治朗、澤田祐希、金子杏実、金丸崇、安東潤
2. 発表標題 差分進化法を用いた船用プロペラ翼形状の多目的最適化法の開発
3. 学会等名 第86回ターボ機械協会 総会・講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Koichiro Shiraiishi
2. 発表標題 Accuracy Verification of Cavity Shape Measurement Using Combination Line CCD Camera Measurement Method
3. 学会等名 11th International Symposium on Cavitation (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 白石耕一郎、澤田祐希
2. 発表標題 組合せラインCCD法を用いた水中三次元形状計測法の船用プロペラ水槽試験への応用
3. 学会等名 第82回ターボ機械協会講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 白石耕一郎、澤田祐希
2. 発表標題 大型キャビテーション水槽における計測技術の高度化
3. 学会等名 第85回海上技術安全研究所研究発表会
4. 発表年 2022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 分担者	金丸 崇  (Kanemaru Takashi)  (90612127)	九州大学・工学研究院・准教授   (17102)	

	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	澤田 祐希  (Sawada Yuki)  (60711356)	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
---------	---------