

令和元年6月18日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06920

研究課題名(和文) 船尾伴流分布とプロペラ形状の最適化を考慮した高性能プロペラ設計法に関する研究

研究課題名(英文) Design method for high performance propeller based on optimization of ship stern wake distribution and propeller blade shape

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) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではプロペラ形状と船尾伴流分布を最適化することで、高性能なプロペラ設計が可能なプロペラ設計手法の構築を行った。本問題は伴流分布最適化とプロペラ形状最適化の混合最適化問題となる。伴流分布最適化では、船型blending手法を用いることで関数最適化問題として取り扱い、効率的に最適化が可能な船型最適化システムを開発した。プロペラ形状の多目的最適化問題を解くために、適応型差分進化(JADE)を用いた新たなプロペラ形状最適化アルゴリズムを開発した。開発したシステムを用いて設計した模型プロペラを用いて水槽試験を行い、プロペラ単独効率の向上とキャビテーションの低減を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、船尾伴流分布とプロペラ形状を最適化することで、従来よりも高性能なプロペラを設計可能なプロペラ設計システムを開発した。本手法を用いることで、船舶から排出される温室効果ガス(GHG)を大幅に削減することも可能になるため、本研究の社会的意義は大きい。

研究成果の概要(英文)：In this research, we have developed a new propeller design method which can optimize propeller shapes and ship stern wake distributions. Both of wake distribution optimization and propeller shape optimization problem are transformed as a mixture optimization problem. In wake distribution optimization problem, we have used Blending method for stern hull shape to handle as a function optimization problem. In order to solve the propeller shape multi-objective optimization problem, a new propeller shape optimization algorithm using adaptive differential evolution (JADE) was developed. Propeller open water tests and cavitation tests were conducted using a model propeller designed using the developed system. Through experiments, we confirmed the improvement in propeller efficiency and reduction in cavitation.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：船用プロペラ 多目的最適化 進化計算 キャビテーション

1. 研究開始当初の背景

船用プロペラの翼形状最適化に関する研究はこれまでに数多く行われており、一様流中でのプロペラ性能の最適化は実用レベルに達している。一方、プロペラは船尾伴流という不均一流中で作動するため、プロペラ1回転中におけるプロペラ効率とキャビテーション性能を考慮する必要がある。そのため、伴流分布もプロペラ性能を決める重要な設計変数のひとつと考えられる。伴流分布とプロペラ形状の最適化が可能になれば、設計の自由度が増えるため、さらに性能の優れたプロペラ設計が可能となる。しかしながら、伴流分布とプロペラ形状の最適化問題は高次元問題となるため、解くことが非常に困難である。伴流分布は水槽試験もしくはCFDによって推定するのが一般的であるが、どちらも時間がかかるため、最適化計算を行うのは非常に困難である。プロペラ形状は、幾何学的に表現する方法は確立されているが、その表現に高次元関数を使用する必要があるため、プロペラ形状の最適化問題も高次元問題となり、その最適化計算には膨大な時間が必要である。このような理由より、伴流分布とプロペラ形状の最適化は非常に困難であるため、伴流分布及びプロペラ形状の同時最適化を用いたプロペラ設計法は研究開始時期には申請者が調べた限り、皆無であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、従来のプロペラ形状最適化問題について、船尾伴流分布を設計変数として加えることで、更なる高性能なプロペラ設計が可能となるプロペラ設計手法を構築することである。本最適化問題は、プロペラ形状最適化問題(数値最適化問題)と伴流分布最適化問題(組み合わせ最適化問題)が組み合わさった大規模な混合最適化問題となる。本研究では、伴流分布を設計する方法として、船型データベースを構築し、そのデータベースに対してデータ解析手法と船型ブレンドングを用いることで任意の伴流分布を生成する方法を用いる。また、本最適化問題を解くために、大規模最適化問題に有効な適応型差分進化手法であるJADEを用いた新たな最適化アルゴリズムを開発する。そして、この最適化アルゴリズムを用いたプロペラ形状最適化システムを開発し、プロペラ形状の最適化を行う。最終的に最適化プロペラの模型プロペラを用いた水槽試験を行い、開発したシステムの有効性を確認する。

3. 研究の方法

本研究では、上記の研究目的を達成するために、以下の項目について研究を実施した。

(1) 船型ブレンドング手法を用いた船型データベース及び伴流設計システム

船型ブレンドング手法による系統的船型生成システムを用いて、数千船型に及び船型と流場のRANS解によるデータベースの構築を行った。このデータベースには縦渦の強弱や伴流ピーク値等船型設計上想定される様々な船尾伴流が含まれている。この船型ブレンドング手法にユークリッド距離をベースとした伴流類似度の解析を組み合わせることで、任意の伴流分布を有する船型を生成することができる伴流設計システムを構築した。具体的には、任意の目的伴流分布に対するデータベース内の伴流類似度ランキングを作成し、上位3船型の配合率(ブレンドングファクタ)を伴流類似度に応じて変えることで、船型データベースを用いて任意の伴流分布を有する船型が生成される。図1に伴流設計システムの概要、図2に船型データベースにおける伴流分布データの例を示す。

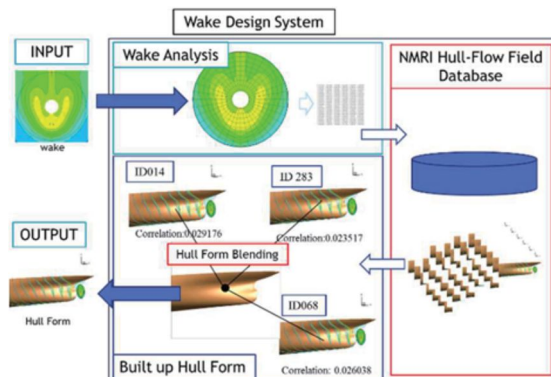


図1 伴流設計システムの概要

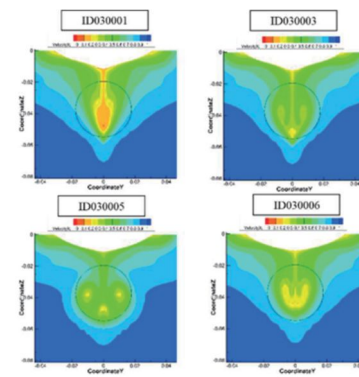


図2 船型データベースにおける伴流分布データの例

(2) プロペラ形状最適化システムの構築

本研究では、プロペラ形状最適化として、プロペラ単独効率の最大化、キャビテーション面積の最小化、目標スラスト誤差の最小化の3つ評価関数として取り扱った。目標スラスト誤差

は、設計船速で航行するために必要なスラストと最適化したプロペラのスラストの差を意味しており、この差が小さければ設計条件を満たすプロペラが設計されていることを意味している。また、プロペラ形状として半径方向のピッチ分布と最大キャンバー高さ分布を最適化の対象とした。これらの分布をそれぞれ多項式関数で表現し、この関数の各係数を設計変数として最適化を行った。

3つの評価関数は、パネル法的一种である SQCM を用いて算出した。プロペラ単独効率は、一様流中の定常 SQCM を用いて評価した。キャビテーションの面積は、プロペラ伴流中において非定常 SQCM を用いてプロペラ表面の圧力分布を算出し、その圧力分布に対して揚力等価法を用いてキャビテーション面積を算出した。目標スラスト誤差は、設計条件のスラストと定常 SQCM で算出されたスラストの差から算出した。

### (3) プロペラ形状最適化問題に適した最適化アルゴリズム

キャビテーション面積の評価は、非定常計算となるため一様流中の性能計算に比べ数倍の計算時間が必要であるため、最適化計算に要する計算時間も長くなる。本研究では、この問題を解決するために、最適化アルゴリズムについて研究調査を行い、現時点で最も有効なアルゴリズムの選定を行った。その結果、差分進化の一手法である適応型差分進化 JADE (Adaptive Differential Evolution) が様々なベンチマーク問題において有効であることが分かった。JADE の有効性を確認するために、JADE を実装した最適化プログラムを開発し、当初実装を予定していた CMA-ES (共分散行列適応進化戦略) と比較計算を行い、JADE は CMA-ES に比べ、約 5 倍以上の性能を有することを確認した。

そして、プロペラ単独効率、キャビテーション面積、目標スラスト誤差を考慮したプロペラ形状の多目的最適化を行うために、JADE と非優越ソートを用いた NSGA-2 を組み合わせた最適化アルゴリズムを開発した。そして、開発したプログラムを用いて内航船用プロペラ (以後、母型プロペラ) の多目的最適化計算を実施し、最適化手法の有効性を確認した。

### (4) プロペラ形状最適化システム検証のための水槽試験

開発したシステムの有効性を検証するために、本システムによって最適化した改良型プロペラの模型プロペラを製作し、POT 試験とキャビテーション試験を実施した。POT 試験においては、プロペラ単独効率の向上を確認する。また、キャビテーション試験では、キャビテーション面積と変動圧力の減少を確認する。

## 4. 研究成果

本研究では、上記内容の研究を実施し、得られた研究成果を以下に示す。

### (1) 伴流設計システムの有効性を確認

伴流設計システムの有効性を検証するため、原船型とシステム出力船型の模型船を用いて海技研の 400m 水槽において、伴流計測及び推進性能確認試験を実施した。その結果、原型船で 1.9% であったダクトの馬力削減効果は、システム出力船型では 4.2% となり、設計意図通りダクトの省エネ効果の向上が達成された。さらに、システム出力船型は、ダクト非搭載の裸殻状態で、原船型より 0.4% 同一船速での必要馬力が大きい。ダクトの省エネ効果の改善により、システム出力船型の伴流分布のために設計したダクトで 2.2% の馬力削減を確認し、設計目的としていた船型と付加物を組み合わせたトータルでの馬力削減を達成した。これらの試設計結果から伴流設計システムの実設計での有効性を確認した。

### (2) プロペラ形状最適化手法の構築

プロペラ単独効率、キャビテーション性能、そして目標スラスト誤差を考慮したプロペラ翼形状の多目的最適化を行うために、開発したプロペラ翼形状最適化プログラムを開発した。具体的には、適応型差分進化アルゴリズムである JADE と非優越ソートを用いた NSGA-2 を組み合わせて、プロペラ翼形状最適化に適した多目的最適化アルゴリズムを開発した。そして、開発したプログラムを用いて内航船用プロペラ (以後、母型プロペラ) の多目的最適化計算を実施し、数値計算において効率 1.5% 向上、最大キャビテーション面積を 10% 減少させたプロペラの設計に成功した。図 3 に多目的最適化によって得られたパレート解の分布を示す。この図より、プロペラ単独効率、キャビテーション面積、目標スラスト誤差について、パレート解が得られていることが確認できる。図 4 に得られたパレート解から選択したプロペラ形状のプロペラ単独特性とキャビテーション面積を示す。

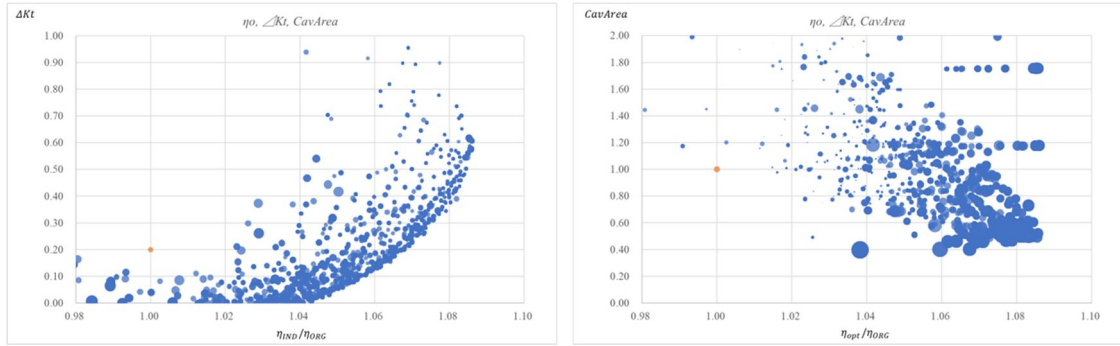


図3 プロペラ形状最適化システムにおける多目的最適化の結果  
 (左図：効率-スラスト差の比較、右図：効率-キャビテーション面積の比較)

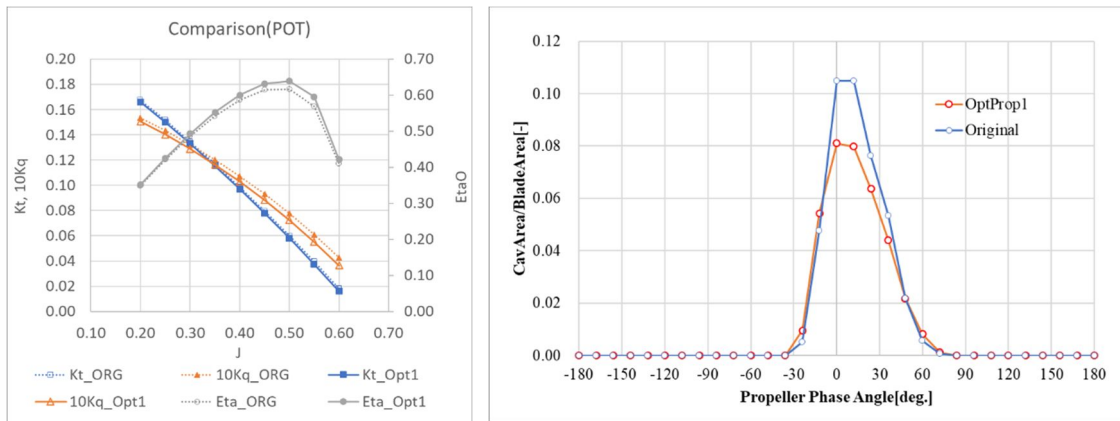


図4 数値計算における母型プロペラと最適化プロペラのプロペラ性能の比較結果  
 (左図：プロペラ単独特性の比較、右図：キャビテーション面積の比較結果)

### (3) 水槽試験による検証

数値計算によって最適化したプロペラの模型プロペラを製作し、POT 試験とキャビテーション試験を実施した。そして、最適化したプロペラと母型プロペラについて、プロペラ単独効率とキャビテーション性能として変動圧力の比較を行った。図5にプロペラ単独性能の比較結果を示す。この図より、プロペラ単独効率が約1.0%以上向上していることが確認できる。また、図6にはキャビテーション試験において計測した変動圧力の結果を示す。この図より、変動圧力が約20.0%以上低減することが分かる。図7及び図8はキャビテーション観察結果を示している。これらの図より、キャビテーションの発生面積が減少していることも確認できる。以上の結果より、最適化システムによって、母型プロペラ比べ性能を向上させたプロペラを設計できることを示した。

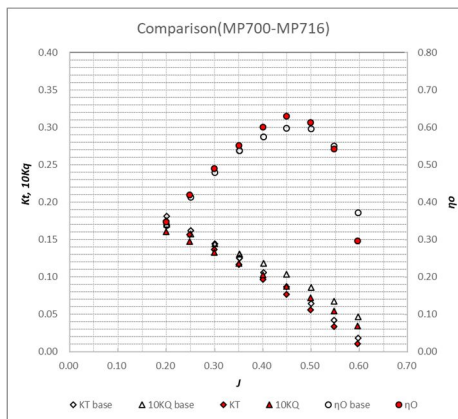


図5 水槽試験におけるプロペラ単独特性の比較結果

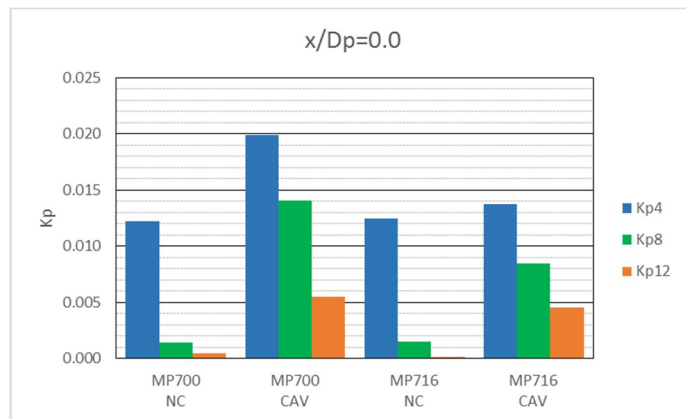


図6 変動圧力の比較結果  
 (設計時 MCR:  $N_p=42.0$ ,  $\sigma_n=1.370$ )



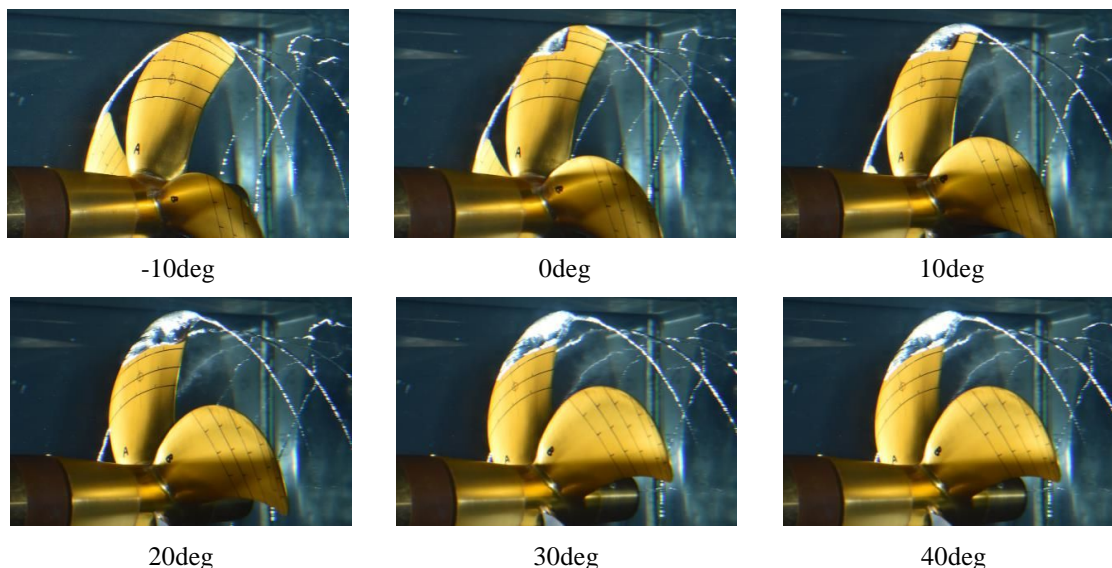


図7 母型プロペラのキャビテーション観察結果

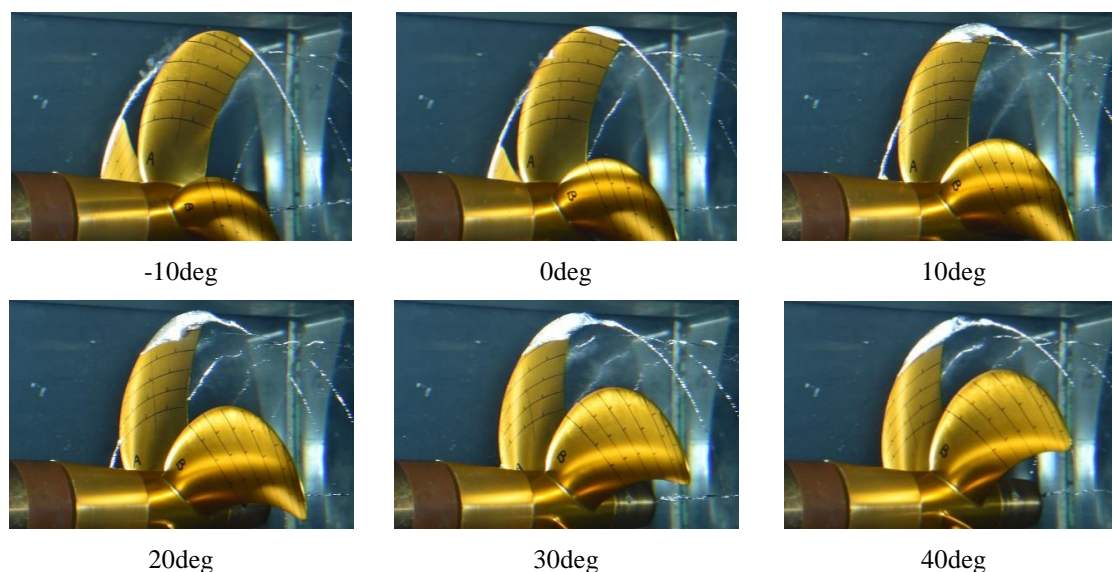


図8 改良型プロペラのキャビテーション観察結果

## 5 . 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計 4 件)

- (1) K. Shiraishi, Y. Sawada, D. Arakawa and K. Kimura: “A Study on Deformation Measurements and Hydrodynamic Investigation of the Flexible Composite Marine Propeller”, The Proceedings of 6<sup>th</sup> Symposium on Marine Propulsors (smp'19), 査読有, Vol.II, 2019, pp.431 ~ 436.
- (2) D. Arakawa, K. Shiraishi and J. Ando: “Construction and Analysis of Response Surface between Blade Shape and Propeller Characteristics using Multivariate Chebyshev Approximation”, The Proceedings of 6<sup>th</sup> Symposium on Marine Propulsors (smp'19), 査読有, Vol.II, 2019, pp.107-116.
- (3) Y. Ichinose, Y. Tahara:” A wake field design system utilizing a database analysis to enhance the performance of energy saving devices and propeller”, Journal of Marine Science and Technology, 査読有, 2018, in press, DOI: <https://doi.org/10.1007/s00773-018-0611-x>.
- (4) D. Arakawa, K. Shiraishi and J. Ando: “Application of Response Surface Method to Propeller Blade Hydrodynamic Optimization”, The Proceedings of OPTIS, 査読無, Vol.13, 2018, pp.209-pp.210, DOI: <https://doi.org/10.1299/jsmeoptis.2018.13.209>.

### 〔学会発表〕(計 3 件)

- (1) K. Shiraishi, Y. Sawada, D. Arakawa and K. Kimura: “A Study on Deformation Measurements and Hydrodynamic Investigation of the Flexible Composite Marine Propeller”, 6<sup>th</sup> Symposium on Marine

- Propulsors (smp'19), May 2019, Rome, Italy.
- (2) D. Arakawa, K. Shiraishi and J. Ando: "Construction and Analysis of Response Surface between Blade Shape and Propeller Characteristics using Multivariate Chebyshev Approximation", The Proceedings of 6<sup>th</sup> Symposium on Marine Propulsors (smp'19), 6<sup>th</sup> Symposium on Marine Propulsors (smp'19), May 2019, Rome, Italy.
  - (3) 新川大治朗, 白石耕一郎, 安東潤: "応答曲面法のプロペラ翼形状流体力学的最適化への適用", 第13回最適化シンポジウム, 日本機械学会, 2018年10月, 京都.

〔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〕

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名: 澤田 祐希

ローマ字氏名: SAWADA Yuki

所属研究機関名: 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

部局名: その他部局等

職名: 研究員

研究者番号(8桁): 60711356

研究分担者氏名: 一ノ瀬 康雄

ローマ字氏名: ICHINOSE Yasuo

所属研究機関名: 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

部局名: その他部局等

職名: 研究員

研究者番号(8桁): 00550021

研究分担者氏名: 新川 大治朗

ローマ字氏名: ARAKAWA Daijiro

所属研究機関名: 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

部局名: その他部局等

職名: 研究員

研究者番号(8桁): 40785549

### (2)研究協力者

研究協力者氏名: 安東 潤

ローマ字氏名: ANDO Jun

※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、研究者個人に帰属されます。