

令和 3 年 6 月 5 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04584

研究課題名（和文）気泡力学に基づく船尾変動圧力推定法の開発とプロペラの総合的最適化システムの構築

研究課題名（英文）Development of a method to estimate fluctuating pressure on ship stern based on bubble dynamics and construction of a comprehensive optimization system for propeller design

研究代表者

安東 潤 (ANDO, JUN)

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号：60211710

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）：キャビティ面積およびプロペラ効率を目的関数とする多目的最適化問題を解く手法を開発し、その妥当性を模型試験によって確認した。一般貨物船用のプロペラを原型とした改良プロペラの模型試験の結果、設計点付近でプロペラ効率が約2%向上し、キャビテーションによる変動圧力が減少していることが確認された。

変動圧力と強い相関のあるキャビティ体積を短時間で推定する計算法を開発した。この方法は、定常な一様流中の2次元翼に発生するキャビテーションの形状を気泡力学に基づいて推定する方法をプロペラ翼に適用するもので、青雲丸 世のプロペラの伴流中でのキャビティ体積を計算したところ、実験結果との良好な一致が確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

船舶の推進性能の分野においては二酸化炭素排出量削減のため、船舶の省エネ化実現の要となる高性能プロペラの設計の重要性が一段と増している。プロペラの最適設計は、船尾伴流中でプロペラ翼面上に発生するキャビテーションによって誘起される船尾変動圧力に配慮して行われる。

本研究においては、プロペラ効率および変動圧力と相関のあるキャビティ面積を目的関数とするプロペラ翼形状の多目的最適化計算法ならびに変動圧力と強い相関のあるキャビティ体積を短時間で推定する計算法を開発した。本研究結果により、より高性能なプロペラの設計が可能となり、船舶からの二酸化炭素排出量削減が期待される。

研究成果の概要（英文）：A method for solving a multi-objective optimization problem with cavity area and propeller efficiency as objective functions was developed, and its validity was confirmed by model tests. Model tests of an improved propeller, which was originally designed for a general cargo ship, showed that the propeller efficiency was improved by about 2% around the design point and that the fluctuating pressure due to cavitation was reduced.

A calculation method was developed to estimate the cavity volume, which is strongly correlated with the fluctuating pressure, in a short time. This method, which is based on bubble dynamics to estimate the shape of cavitation on a two-dimensional blade in steady uniform flow, was applied to propeller blades. The calculated cavity volume on Seiun-Maru-I propellers in wake agreed well with experimental results.

研究分野：船舶流体力学

キーワード：船用工学 プロペラ キャビテーション

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 船舶の推進性能の分野においては CO<sub>2</sub> 排出量削減のため、船舶の省エネ化実現の要となる高性能プロペラの設計、すなわち最適設計の重要性が一段と増している。プロペラの最適設計は、船尾伴流中でプロペラ翼面上に発生するキャビテーションにより誘起される船尾変動圧力（以下、単に「変動圧力」と称す）に配慮して、プロペラ効率が最大となるようにプロペラの各半径位置の翼断面形状やピッチ分布等のプロペラ翼形状を最適化する流体力学的な最適化問題と定義できる。

(2) 最近では、プロペラ効率は原型並みで構わないが変動圧力を減少させたい、もしくは変動圧力は原型並み、または多少の増加は許容してでも、できるだけプロペラ効率を向上させたいという新たな要求、すなわち、プロペラ翼形状の流体力学的最適化問題において解決すべき新たな課題が生じてきている。

2. 研究の目的

(1) 変動圧力と間接的な相関のあるキャビテーションの発生範囲（キャビティ面積）と九州大学で開発したパネル法に基づく定常プロペラ性能計算法により求めたプロペラ効率を目的関数とするプロペラ翼形状の多目的最適化問題を解く手法を開発する。そして、本手法で得られた改良プロペラ模型の単独性能試験およびキャビテーション試験を実施し、本手法の有効性を確認する。

(2) 変動圧力と相関が強いキャビティ体積を短時間で推定することを目的とし、気泡力学の分野で有名な単一球形気泡の成長・崩壊を表す Rayleigh-Plesset の方程式を解く気泡追跡法をプロペラに適用して船尾伴流中で作動するプロペラの翼に発生するキャビテーションの体積の変化を求める計算法を開発する。

3. 研究の方法

(1) プロペラ翼形状の多目的最適化

① キャビテーションの発生範囲は揚力等価法により求める。設計変数は半径方向のピッチ、最大キャンバーおよび幾何レーキ分布とし、スキュー、コード長および最大翼厚の半径方向分布は原型プロペラのものを変更せずそのまま使用する。翼数も原型と同じである。また、各半径位置でのコード方向の翼厚分布も原型プロペラと同じとする。

② 海上技術安全研究所において設計された 749 総トン型一般貨物船を対象として設計されたプロペラ（MP700 と称する）を原型プロペラとする。模型プロペラの主要目および写真を、それぞれ表 1 および図 1 に示す。

③ 揚力等価法によるキャビティ面積の計算は、図 2 に示すようなワイヤ・メッシュ・スクリーンで模擬した伴流分布を与え、推力係数  $K_T = 0.124$ 、キャビテーション数  $\sigma_n = 1.37$  として実施する。

(2) 気泡力学に基づいたプロペラ翼面上のキャビティ体積の計算

① 九州大学で開発したパネル法に基づく非定常プロペラ性能計算法により、船尾伴流中の各翼角度でのプロペラ翼面上の圧力分布を出力し、気泡追跡法の入力データとする。各翼角度においてプロペラ翼前縁に流入した気泡核がプロペラの回転による各半径位置の周方向速度によって翼表面を移動すると仮定し、上述の圧力分布を与えて Rayleigh-Plesset の方程式を解く。得られた気泡半径の包絡線をキャビティ形状とし、これを翼表面で積分することによりキャビティ体積が得られる。

② 計算対象は、船舶技術研究所（現海上技術安全研究所）においてキャビティ体積の計測がなされた青雲丸 I 世通常型（CP:Conventional Propeller）およびハイスキュープロペラ（HSP:Highly Skewed Propeller）とする<引用文献①>。

表 1 MP700 の主要目

Diameter(mm)	240
Number of blades	4
Pitch at 0.7R	0.6059
Expanded area ratio	0.4791
Hub ratio	0.1750
Skew angle(deg.)	25.0
Rake angle(deg.)	4.13
Blade section	NACA



図 1 MP700

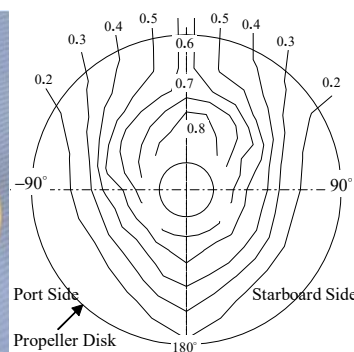


図 2 伴流分布

#### 4. 研究成果

##### (1) プロペラ翼形状の多目的最適化

① 本多目的最適化により得られた 153 個の Pareto 解、すなわち改良プロペラを図 3 に示す。横軸は各改良プロペラの効率を原型プロペラの効率により無次元化した値、縦軸は各改良プロペラのキャビティ面積を原型プロペラのキャビティ面積により無次元化した値を示している。ここに示すキャビティ面積は、翼角度-90 度から 90 度までの合計である。これらの Pareto 解の中から効率が約 2% 向上し、キャビティ面積が約 30% 減少したものを改良プロペラ (MP715) として採用した。

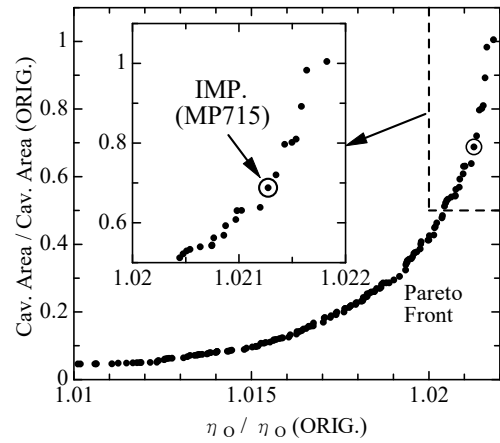


図 3 Pareto 解

② 図 4 に改良プロペラの半径方向のピッチ、最大キャンバーおよび幾何レーキ分布を原型プロペラと比較して示す。改良プロペラのピッチおよび最大キャンバー分布は原型プロペラに比べ翼端部で大きくなり、翼端部で小さくなっている。幾何レーキは原型に比べ改良プロペラの方が小さくなっている。

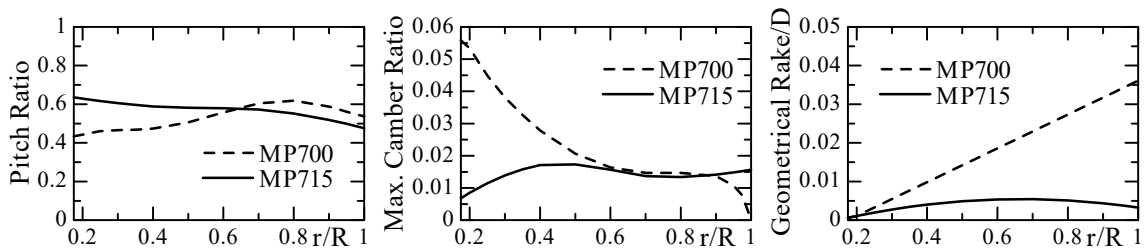


図 4 ピッチ、最大キャンバーおよび幾何レーキ分布

③ 原型および模型プロペラの単独性能試験結果として、図 5 に推力係数  $K_T$  およびトルク係数  $K_Q$  を示す。設計点付近の改良プロペラの推力およびトルクは原型プロペラに比べ、それぞれ約 5% および 8% 低くなっている。図 6 にプロペラ効率を示す。プロペラ効率は改良プロペラの方が高くなっている。なお、プロペラ単独性能試験は、海上技術安全研究所の三鷹第三船舶試験水槽において実施された。

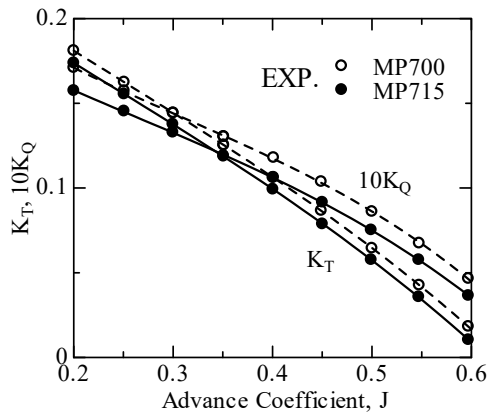


図 5 推力およびトルク係数

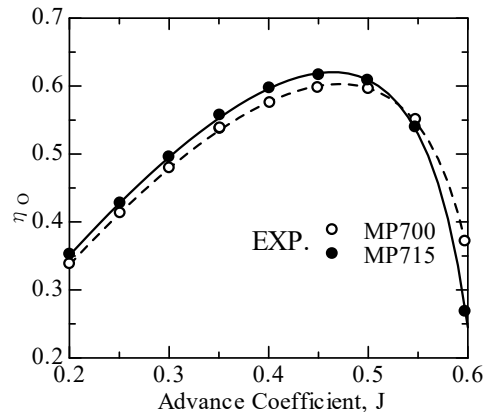


図 6 プロペラ効率 (前進係数ベース)

④ 図 7 にプロペラ荷重度  $\sqrt{K_T} / J$  ベースでのプロペラ効率の比較を示す。設計時のプロペラ作動点  $\sqrt{K_T} / J = 1.09$  において、改良プロペラの効率は原型プロペラに比べ 2.1% 高くなっている。

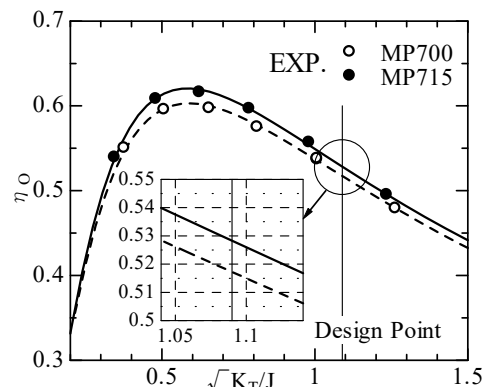


図 7 プロペラ効率 (荷重度ベース)

⑤ キャビテーション発生時の変動圧力の計測は、原型および改良プロペラの単独状態での推力に差があることから、キャビテーション水槽内の圧力および流速は同一とし、プロペラ回転数を調節して両プロペラの推力を一致させて実施している。したがって、両プロペラの推力係数  $K_T$  およびキャビテーション数  $\sigma_n$  は異なり、原型プロペラが  $K_T = 0.124$  および  $\sigma_n = 1.37$ 、改良プロペラが  $K_T = 0.120$  および  $\sigma_n = 1.32$  である。図 8 にプロペラ直上付近の変動

圧力振幅の実験値を示す。改良プロペラの変動圧力振幅の1次、2次および3次成分は原型プロペラに比べ、それぞれ32%、39%および16%減少している。なお、キャビテーション試験は、海上技術安全研究所の大型キャビテーション水槽において実施された。

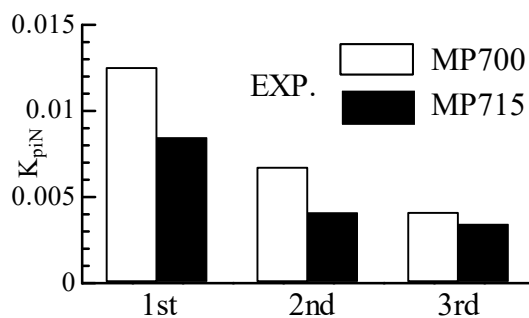


図8 変動圧力振幅

⑥ 図9にキャビテーション観察結果を示す。改良プロペラの方がシート・キャビテーションの発生範囲が小さくなっていることが確認された。

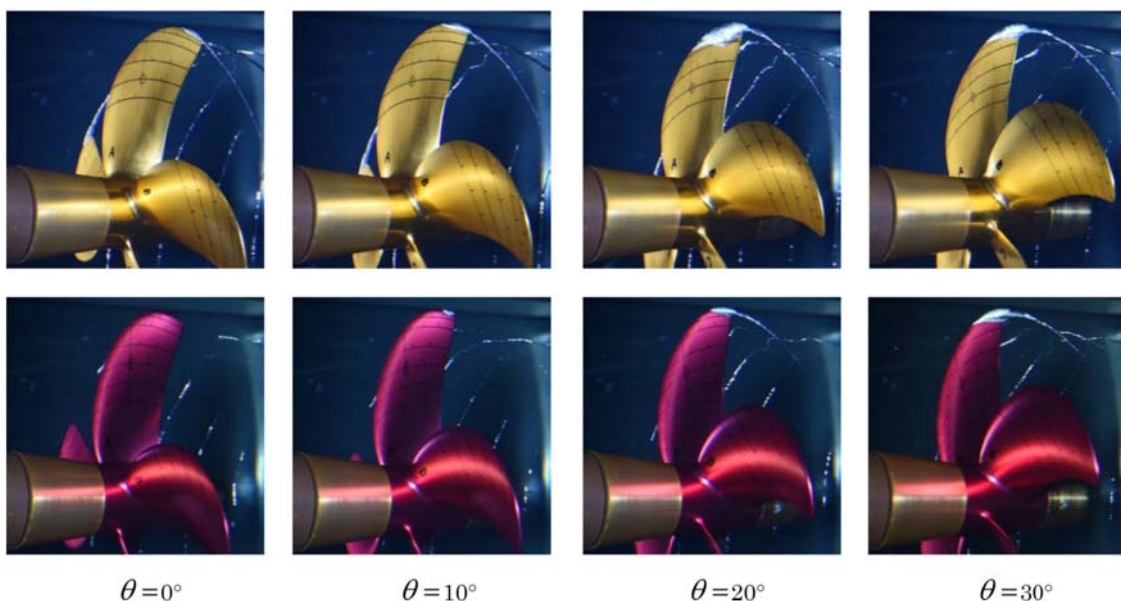


図9 キャビテーション観察結果（上：MP700，下：MP715）

(2) 気泡力学に基づいたプロペラ翼面上のキャビティ体積の計算

① 青雲丸I世CPおよびHSPの翼表面に発生するキャビテーションの形状を本計算法により求め、その形状を<引用文献①>に示されている実験結果および<引用文献②>に示されているパネル法による実験結果と比較する。計算条件は、CPにおいては $K_T=0.207$ および $\sigma_n=3.06$ 、HSPにおいては $K_T=0.201$ および $\sigma_n=2.99$ となっている。図10および図11に、それぞれのプロペラのキャビティ形状を示す。本計算法の結果は、実験結果およびパネル法による計算結果に比べ、全体的にキャビティ厚さが厚め、キャビティ長さが短めになっているが、翼角度の変化に伴うキャビティ形状の定性的な変化の様子は捉えることができている。

② 図12に青雲丸I世CPおよびHSPのキャビティ体積の比較を示す。CPにおいては定量的にも定性的にも実験結果と良く一致している。HSPにおいては実験結果よりキャビティ体積を大きく推定しているが、定性的な傾向は実験結果に近くなっている。

<引用文献>

① 工藤達郎、右近良孝、黒部雄三、谷林英毅、模型プロペラ翼面上に発生するキャビティ形状の計測、日本造船学会論文集、第166号、1989、93-103

② 金丸崇、安東潤、簡便なパネル法による非定常プロペラキャビテーションの計算、日本船舶海洋工学会論文集、第9号、2009、45-53

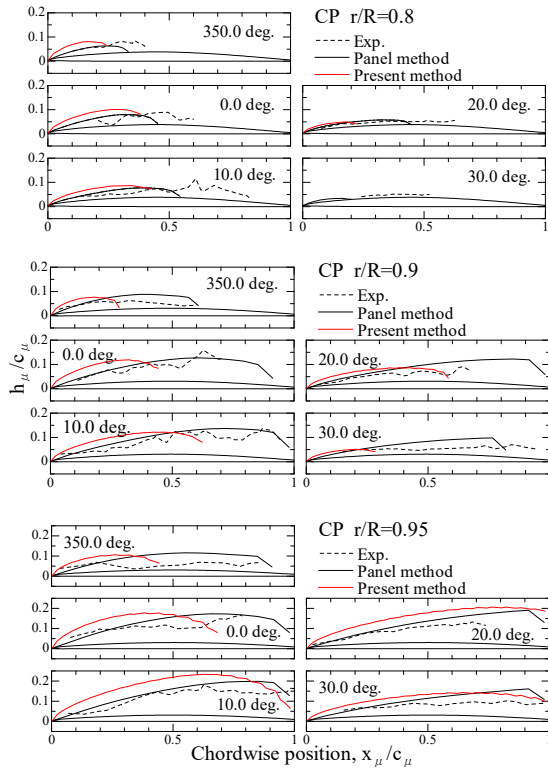


図 10 キャビティ形状 (青雲丸 I 世 CP)

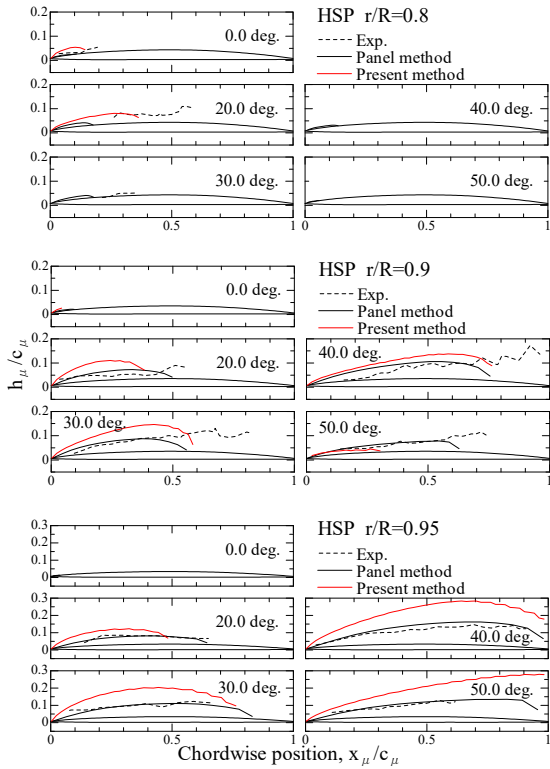


図 11 キャビティ形状 (青雲丸 I 世 HSP)

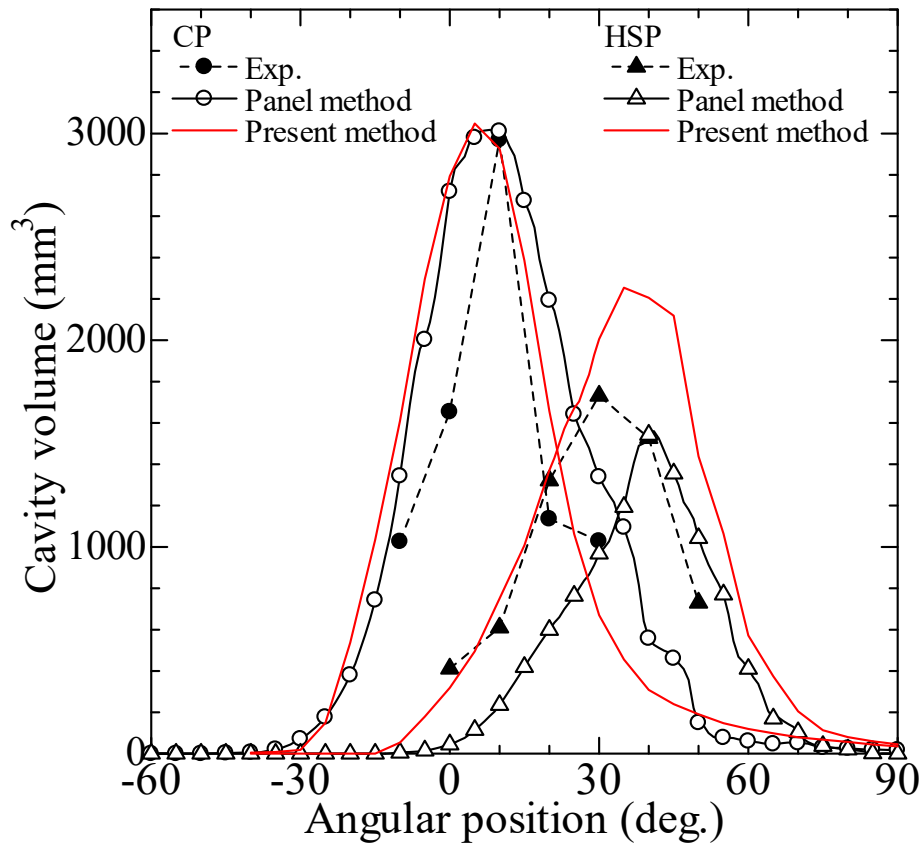


図 12 キャビティ体積 (青雲丸 I 世 CP, HSP)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 安東潤, 新川大治朗, 澤田祐希, 白石耕一郎, 金丸崇
2. 発表標題 船用プロペラの性能改善の一手法 実数値遺伝的アルゴリズムを用いたプロペラ翼形状の多目的最適化
3. 学会等名 第82回ターボ機械協会 岡山講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安東潤, 新川大治朗, 澤田祐希, 白石耕一郎, 金丸崇
2. 発表標題 実数値遺伝的アルゴリズムを用いたプロペラ翼形状の多目的最適化（第二報）
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会令和元年秋季講演会
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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------