

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成24年5月24日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2011

課題番号：23656552

研究課題名（和文） 船尾伴流を考慮した高性能プロペラ設計法の開発

研究課題名（英文） Development of design method for high performance propeller considering ship stern wake

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

研究成果の概要（和文）：

船尾伴流中でのプロペラ性能を最適化する方法を開発した。本手法における船尾伴流中でのプロペラ性能の評価には非定常プロペラ性能計算法を用いている。最適化問題の解法には実数値遺伝的アルゴリズムを用いている。プロペラ性能に関する目的関数が異なる3種類の最適化計算を行い、いずれの場合も原型プロペラの性能を上回る改良プロペラを得ることができた。今回の計算では、一様流中のプロペラ効率と船尾伴流中のプロペラ性能の間に正の相関関係が見られた。

研究成果の概要（英文）：

A method to optimize propeller performance in ship stern wake has been developed. In the present method, unsteady calculation method of propeller characteristics is used for evaluation of propeller performance in ship stern wake. Real-coded genetic algorithm is used for optimization procedure. Three different objective functions about propeller performance were used for optimization. Improved propellers that have superior performance comparing to original propeller were obtained in each case. In the present calculation, positive correlation between propeller efficiency in uniform flow and propeller performance in ship stern wake was found.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	1,600,000	480,000	2,080,000

研究分野：船舶流体力学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：プロペラ, 性能, 最適化問題, 船尾伴流

1. 研究開始当初の背景

(1) 船舶から排出される CO₂ 等の温室効果ガス削減対策として国際海事機関(IMO)においては新造船の燃料消費性能をインデックス化するエネルギー効率設計指標(EEDI)の検討が行われ、これが義務化されることになった。これにより造船会社においては、より燃費性能(推進性能)が優れた船舶の設計が要求されることになる。CO₂ 排出量は船舶が航行する際の所要馬力と密接な関係があり、馬力低減のためには低抵抗の船型開発、船用プロペラの効率向上、エンジンの効率向上等が挙げられる。CO₂ 排出量の削減は、単独の技術

で達成されるものではなく、複数の技術による効果の累積によって達成されるものであり、数%の効果の技術であっても決して疎かにされるべきものではない。

(2) プロペラは船尾伴流という不均一流中で作動する。船尾伴流の不均一性はプロペラ性能のみならずキャビテーション性能に対しても大きな影響を及ぼす。プロペラ軸方向の流入速度が遅くなる領域では翼素への流入速度の迎角が大きくなり、キャビテーションの発生量が増大する。キャビテーションの発生量の非定常性は船尾変動圧力やエラー

ジョン等の有害な現象の原因となるため、プロペラ設計の際には非定常キャビテーションに関する制約という観点から船尾伴流の不均一性が考慮される。しかしながら、プロペラ効率についてはプロペラへの流入速度を平均化した一様流中で向上が図られるのが一般的であり、プロペラが実際に作動している不均一流中でのプロペラ性能を向上させようとする試みは見受けられない。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、これまであまり考慮されていなかった船尾伴流という不均一流中のプロペラ性能を最適化問題として取り扱おうとするものである。なお、不均一流中でのプロペラ性能には、一様流中のプロペラ効率 η_0 、有効伴流係数 $1-w_e$ およびプロペラ効率比 η_R が関連している。

(2) このような最適化問題はこれまで解かれたことがないため、解の存在は保証されていない。しかしながら、このようなリスクを恐れず当該問題の解法の開発に着手し、確実に最適解が求められるような方法の開発に成功すれば、船の推進性能向上のための斬新な方法論の基礎となる。従って、まずは数値計算のレベルに限って研究を行うこととする。

3. 研究の方法

(1) 九州大学で独自に開発した非定常プロペラ性能計算法はパネル法に基づくものである。本計算は、他機関で開発された同種の方法に比べ計算時間が短い。しかし、本計算法の計算時間が他と比べて短いとはいえ、最適化問題に組み込むためにはさらに高速化を計る必要がある。高速化の手段として次のようなことを試みる。一様流中のプロペラ性能を求める際には、それぞれの翼まわりの流れは同じなので、対象性を考慮して1翼についてのみ問題を解けばよい。しかし、不均一流中においてはそれぞれの翼まわりの流れは全て異なるので、全翼を解かなければならない。現状の計算法では全翼のパネル分割は同じ個数で行っているが、ここでは1翼のみパネル分割をこれまでと同様な個数で行い、他の翼のパネル分割数は減らすように計算プログラムの修正を行う。これにより計算時間が短縮できるはずである。推力・トルク等の精度を保ちつつ、どこまでパネル数を減らせるかを検討する。

(2) ここでは既に開発済みのプロペラ設計支援ツールの概要を説明した後、船尾伴流中のプロペラ設計に関する最適化問題の解法について述べる。

① プロペラ設計支援ツールにおいては、実数値遺伝的アルゴリズムを用いてプロペラ効率の最適化計算を行っている。以下、プロペラ設計支援ツールを幾つかのステップに分け、各ステップの説明を行う。なお、計算の流れは、MGG と呼ばれる実数値遺伝的アルゴリズムの世代交代モデルに基づいている。

ステップ[I] 初期集団の生成

プロペラは複数の半径位置において、ピッチ、スキュー、レーキ、翼型のコード長、翼型のオフセットデータを与えることにより、その幾何形状を表現することができる。これらの分布を適当な数式で表すこととし、数式に含まれる係数（設計変数）を変化させてやれば、さまざまな幾何形状を表すことができる。計算開始時に設計変数をランダムに変化させ、キャビテーションに関する制約条件を満足するプロペラを N_P 個生成しておく。これら個体の集合を初期集団という。

ステップ[II] 複製選択

集団からランダムに交叉のための2個の親個体（両親）を選択する。

ステップ[III] 交叉

ステップ[II]で選択された両親に対してUNDX と呼ばれる交叉法を適用すると2個のプロペラ（子個体）が生成される。ここで得られたプロペラがキャビテーションに関する制約条件を満たしているかどうか確認する。制約条件を満たすプロペラが N_C 個得られるまでUNDXを繰り返し適用する。

ステップ[IV] 子個体の評価

ステップ[II]で選択およびステップ[III]で生成されたプロペラの目的関数を計算する。

ステップ[V] 生存選択

ステップ[IV]で性能を計算したプロペラのうち、目的関数の値が最も大きなもの1個およびそれを除いた残りの中からルーレット選択によってさらに1個選択する。そして、これら2個の個体とステップ[II]で選択した2個の親個体を入れ替える。

ある停止条件が満たされるまでステップ[II]からステップ[V]までの操作を繰り返す。

② 本手法においては、スキュー、レーキ、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。ただし、改良型プロペラにおいては、原型プロペラの翼型は使用せず、キャンバー分布がNACA

a=0.8、翼厚分布が NACA 66 の翼型をすべての半径方向位置で採用する。なお、キャンバー分布については、最大位置をコード方向に適宜移動させることとし、コード方向の最大キャンバー位置を設計変数として取り扱う。これに加え、今回の改良においては、半径方向のピッチ分布および最大キャンバー分布を設計変数とする。設計変数である半径方向のピッチ、最大キャンバーおよび各半径位置でのコード方向の最大キャンバー位置を 2 次関数で表すことにし、具体的には、翼根部、50%半径位置および翼端部におけるそれぞれの値を設計変数とする。したがって、設計変数の個数は 9 個である。

③ 最適化問題の目的関数が異なる以下の 3 つの方法を試みる。なお、それぞれの方法において、Holden の方法による船尾変動圧の計算法による変動圧力の 1 次成分の振幅をキャビテーションに関する制約条件として便宜的に使用する。

[Method-A]

一様流中のプロペラ効率 η_0 のみを最大化する。なお、一様流中の推力係数 K_T が目標とする推力 K_T^{Target} に近づくようなペナルティ関数 α を導入する。最適化問題の目的関数 F および推力係数に関するペナルティ関数 α は次式で表される。

$$F = \eta_0 \times \alpha, \quad \alpha = e^{(-|K_T - K_T^{\text{Target}}| / K_T^{\text{Target}})}$$

[Method-B]

プロペラの回転数を固定して、伴流中の推力係数が原型プロペラと等しくなるような伴流分布上流の流速 V を求める。このときのトルク係数 K_Q を最小化する。推力係数に関する制約を Method-A と同じように取り扱うこととし、最適化問題の目的関数 F を以下のように設定する。

$$F = \alpha / K_Q, \quad \alpha = e^{(-|K_T - K_T^{\text{Target}}| / K_T^{\text{Target}})}$$

[Method-C]

Method-A と Method-B を組み合わせた方法で、最適化問題の目的関数 F を以下のように設定する。

$$F = \alpha \times \eta_0 / K_Q, \quad \alpha = e^{(-|K_T - K_T^{\text{Target}}| / K_T^{\text{Target}})}$$

(3) 船尾伴流中での原型プロペラおよび改良プロペラの性能評価方法を以下に示す。

[原型プロペラの性能評価方法]

(I) 原型プロペラに対し、プロペラの回転数 n と一様な流入速度 V_0 を与え、定常状態

の推力 T_0 、トルク Q_0 およびプロペラ効率 η_0 を求める。

(II) プロペラ上流の yz 断面 (プロペラ軸を x 軸としたとき、 x 軸に直交する平面) において伴流率 $w(y, z)$ および伴流分布上流の流速 V を与えるとプロペラ面への x 軸方向流入速度分布 $u(y, z)$ は次式で表される。

$$u(y, z) = V(1 - w(y, z))$$

伴流中で定常状態と等しい推力 T_0 を発生するような伴流分布上流の流速 V を求める。この際、プロペラの回転数は n とする。このときのトルクを Q とする。

(III) 次式より、原型プロペラの有効伴流係数 $1 - w_e$ 、プロペラ効率比 η_R および推進効率を表す指標 e_D^* を求める。

$$1 - w_e = V_0 / V, \quad \eta_R = Q_0 / Q, \\ e_D^* = \eta_0 \times \eta_R / (1 - w_e)$$

[改良プロペラの性能評価方法]

(IV) 改良プロペラに対し、原型プロペラと同じ伴流分布上流の流速 V を与え、伴流中で原型プロペラと同じ推力 T_0 を発生するようなプロペラ回転数 n_I を求める。このときのトルクを Q_I とする。

(V) (IV) で求めた伴流中のプロペラ回転数 n と原型プロペラの推力 T_0 より推力係数 K_{T0} を求める。推力一致法の考え方に従い、一様流中で推力係数 $K_T = K_{T0}$ となる前進係数 J を求め、プロペラ回転数を n_I として平均流入速度 V_A を求める。また、このときのトルクおよびプロペラ効率をそれぞれ Q_{0I} および η_{0I} とする。

(VI) 次式より、改良プロペラの有効伴流係数 $(1 - w_e)_I$ 、プロペラ効率比 η_{RI} および推進効率を表す指標 e_{DI}^* を求める。

$$(1 - w_e)_I = V_A / V, \quad \eta_{RI} = Q_{0I} / Q_I, \\ e_{DI}^* = \eta_{0I} \times \eta_{RI} / (1 - w_e)_I$$

(4) 本研究では原型プロペラとして青雲丸 I 世に装備された通常型プロペラを採用する。表 1 および図 1 に本プロペラの主要目およびプロペラ性能計算における標準パネル分割を示す。また、図 2 に本プロペラが作動する船尾伴流分布として伴流率 $w(y, z)$ の等高線を示す。

表1 青雲丸 I 世通常型プロペラの主要目

直径 [m]	0.2500
ピッチ比	0.9500
展開面積比	0.6500
翼厚比	0.0480
ボス比	0.1972
翼数	5
スキュー角 [deg.]	10.5
レーキ角 [deg.]	6.0
翼断面	MAU

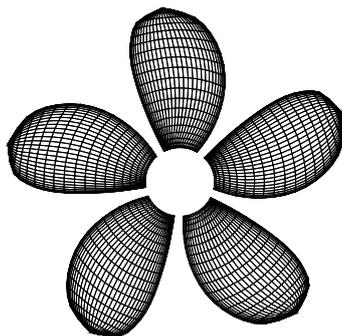


図1 パネル分割図

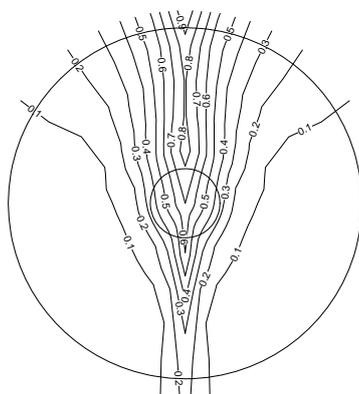


図2 船尾伴流分布

4. 研究成果

(1) まず、非定常プロペラ性能計算法の高速化について述べる。本研究で使用する非定常プロペラ性能計算法は他機関で開発された同種の方法に比べ計算時間が短い。しかし、最適化問題に組み込むためにはさらなる高速化が必要である。本計算法は全ての翼のコード方向を片面 30 パネル、半径方向を 20 パネルに分割するのが標準であるが、まずはそれぞれの方向のパネル数を片面 20 パネルおよび 14 パネルまで減らした。この段階で伴流中プロペラ性能の計算値がわずかしこ

化しないことを確認した後、1 翼を除く他の翼のパネル数を減らせるようにプログラムを修正し、1 翼は前段階のパネル数のままで他の翼のパネル数をコード方向片面 5 パネル、半径方向 5 パネルに減らした。ここまで減らしても、伴流中プロペラ性能の計算値の変化は許容範囲内であった。計算時間は標準パネル数の約 3.5% まで短縮することができた。

(2) 次に、船尾伴流中のプロペラ性能最適化問題の解として得られた改良プロペラについて述べる。

① 図3および図4に原型および改良プロペラのピッチおよび最大キャンバー分布を示す。ピッチはプロペラ直径で無次元化し、最大キャンバーは各半径位置におけるコード長で無次元化したキャンバー比の形で示している。原型プロペラの最大キャンバーはピッチ面からの高さとしている。原型プロペラのピッチ分布は半径方向に一定であるが、改良プロペラのピッチ分布は、おおまかにいえば、いずれも翼端に向けて減少する形状となっている。ただし、それぞれの方法で形状は異なる。一方、改良プロペラのキャンバー比の分布は3種とも似通っており、翼根で原型よりも小さく、70%半径位置より翼端側では原型よりもやや大きくなっている。

② 図5に改良プロペラの各半径位置におけるコード方向の最大キャンバー位置を示す。いずれの改良プロペラも、翼端に近づくにつれ最大キャンバー位置が翼後縁側に移動している。ただし、Method-Cのみ半径方向の中央付近に向けて最大キャンバー位置が一旦翼前縁側に移動している。

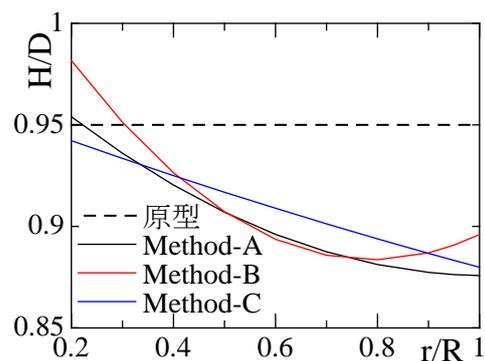


図3 ピッチ分布

表2 伴流中でのプロペラ性能

	Method-A	Method-B	Method-C
n_I/n	0.99160	0.99106	0.99380
$(1-w_e)_I / (1-w_e)$	0.9974	0.9979	0.9975
η_{OI} / η_O	1.0245	1.0257	1.0211
η_{RI} / η_R	0.9991	0.9993	0.9991
e_{DI}^* / e_D^*	1.026	1.027	1.023

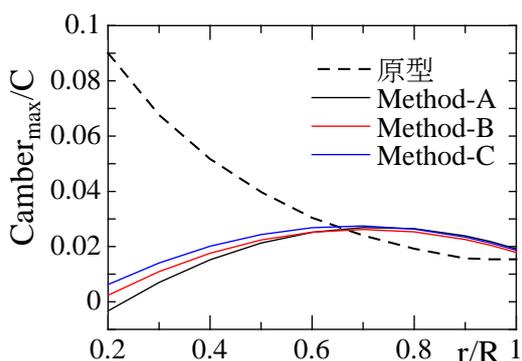


図4 最大キャンバー分布

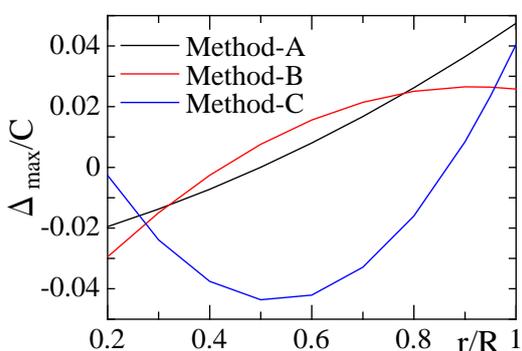


図5 改良プロペラの最大キャンバー位置

③ 表2に3種の改良プロペラの伴流中での回転数、有効伴流係数、プロペラ効率、プロペラ効率比および推進効率を表す指標を原型プロペラの値に対する比の形で示す。いずれの方法によっても推進効率を表す指標は原型に比べ2%以上向上している。推進効率を表す指標の内訳を見てみると、いずれの方法によっても有効伴流係数およびプロペラ効率が原型プロペラに比べ向上し（有効伴流係数は値が小さい方が推進効率を表す指標の向上につながる）、プロペラ効率比は原型プロペラとほぼ同等となっていることがわかる。

④ 以上のように、本研究においては船尾伴流中のプロペラ設計に関する最適化問題の解法を開発した。本研究で用いた伴流分布の場合、一様流中のプロペラ効率最大化と伴流中のトルク最小化の間には正の相関関係が見られ、一様流中のプロペラ効率を最大とすることを目標とすれば、伴流中での性能も改善されたが、今後、他のプロペラおよび伴流分布での検討を引き続き行う必要がある。

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)

[学会発表] (計1件)

① 金丸 崇、安東 潤、非定常運動を伴うプロペラ性能解析、日本船舶海洋工学会西部支部講演会、2011年11月、下関市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安東 潤 (ANDO JUN)

九州大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：60211710