九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

プレスワールフィンによる旋回流中のプロペラ翼形状最適化に関する研究

新川, 大治朗
海上技術安全研究所（研究当時：九州大学大学院工学府）

吉武, 朗
九州大学大学院工学研究院

金丸, 崇
九州大学大学院工学研究院

安東, 潤
九州大学大学院工学研究院

https://hdl.handle.net/2324/7174408

出版情報：Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers. 25, pp.9-19, 2017-06. The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers
バージョン：
権利関係：© 2017 The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers

KYUSHU UNIVERSITY

プレスワールフィンによる旋回流中のプロペラ翼形状最適化に関する研究

正会員　新　川　大治朗*　　正会員　吉　武　　朗**
正会員　金　丸　　崇**　　正会員　安　東　　潤**

Study on Propeller Blade Optimization in Pre-Swirl Inflow

by　Daijiro Arakawa, *Member*　Akira Yoshitake, *Member*
Takashi Kanemaru, *Member*　Jun Ando, *Member*

Summary

Various energy-saving technologies have been developed because improved fuel consumption contributes. Pre-swirl fins, which consist of multiple fins installed in front of a propeller, swirl inflow to the propeller in the opposite direction of the propeller rotation to recover the waste energy of a propelled ship. The propeller mast be designed in consideration of pre-swirl inflow, because velocity distributions flowing into the propeller are changed by pre-swirl fin. This paper describes a propeller optimization method in consideration of pre-swirl inflow using real-coded genetic algorithm. A propeller was designed by utilizing the present method. Propeller tests in which influence of pre-swirl inflow of the original and improved propellers were carried out.

1. 緒　　言

近年，船舶の省エネルギー（以下，省エネと称す）化への要求がかつてないほど高まっている．現在，船舶の推進性能向上のためにさまざまな技術開発が進められている．本研究においては，船尾部のプロペラ前方にプロペラと逆向きの旋回流を発生させる複数のフィンを放射状に取り付けるプレスワールフィンと呼ばれる省エネ装置に着目する．

プレスワールフィンを装備することにより，主にプロペラ回転数の低下による伝達馬力の減少，すなわち推進性能が向上することは古くから知られており，リアクションフィン[1]，フレンドフィン[2]などが実用化されている．プロペラに流入する流れはプレスワールフィンによって大きく変化するため，プレスワールフィンの影響を考慮してプロペラを設計する必要がある．しかしながら，プロペラ前方の旋回流が推進性能に及ぼす影響のメカニズムの解明は十分ではなく，また旋回流を十分に考慮したプロペラ設計法は見受けられない．

本研究の目的は，プレスワールフィンによる旋回流が推進性能に及ぼす影響を基礎的な実験により明らかにするとともに，旋回流中のプロペラ設計の一手法として，プレスワールフィンの装備による自航時の抵抗増加と適切なプロペラ回転数を考慮したプロペラ翼形状の最適化手法を開発することである．なお，最適化問題の解法として実数値遺伝的アルゴリズムを用いる．

*　海上技術安全研究所
（研究当時：九州大学大学院工学府）
**　九州大学大学院工学研究院

原稿受理　平成29年２月20日

2. 旋回流中プロペラ翼形状最適化問題の特徴

旋回流中プロペラ翼形状最適化の手法を示す前に，本最適化問題の特徴であるプロペラの目標推力と目標回転数について述べる．

2.1　プロペラの目標推力

これまで著者らが行ってきたプロペラ翼形状最適化[3]はプロペラ軸方向の伴流分布を平均した一様中で目標とするプロペラ推力および回転数を与え，効率を最大とする問題を取り扱ってきた．ここで与えられる目標推力は，プロペラの作動による船体抵抗増加，すなわち推力減少率を考慮して決定されている．

旋回流中プロペラ翼形状最適化問題における目標推力の設定は，プロペラ作動時の船体抵抗増加に加え，プレスワールフィンの抵抗増加を考慮して行う必要がある．文献[2]によると，曳航状態におけるフィンの有無で船体抵抗にはほとんど差はないとされている．プロペラ作動時の船体抵抗増加については，プレスワールフィンが装備されていない状態の推力減少率を t とし，プレスワールフィンが装備されプロペラの作動により圧力が減少するプレスワールフィンを含めた

船尾部の表面積が増加することによる推力減少率の増加率 Δt を与えて目標推力を決定し，最適化問題を解くことで考慮する．

まず，選定した原型プロペラについて，設計点における一様流速 V，プロペラ回転数 n を与え，九州大学で開発したパネル法 SQCM [4]に基づく定常プロペラ性能計算法を用いて性能計算を行う．ただし，ここでの一様流は，プロペラ前方に船体が存在するとしたときの伴流分布を平均化した流れであると考える．一様流中のプロペラ性能計算により得られた推力を基準推力 $T^{\mathrm{w/o\,Fin}}$ とし，上記 t および Δt を与え，次式を用いて推力減少率の増加量を考慮した目標推力 T^{Target} を決定する．

$$T^{\mathrm{Target}} = \frac{1-t}{1-(t+\Delta t)} T^{\mathrm{w/o\,Fin}} \tag{1}$$

2. 2　プロペラの目標回転数

プレスワールフィンによる旋回流中では，旋回流が無い状態よりも低いプロペラ回転数で同等の推力が発生し，伝達馬力が低下する．しかしながら舶用エンジンは，主機の出力と燃料消費率特性をもとに設定した目標負荷において駆動させることで省エネルギー化を図っている．したがって，プレスワールフィンを装備した場合に回転数が過度に低下することは好ましくない．

本研究においては，プレスワールフィンが装備されていない場合と同じ回転数を与え，プロペラ翼形状の最適化を行う．

3.　旋回流中プロペラ翼形状最適化の手法

本章では，2 章で示した最適化問題の特徴を考慮した旋回流中のプロペラ翼形状の最適化手法において，最適化問題の解法として使用する実数値遺伝的アルゴリズム，最適化問題における目的関数，制約条件および設計変数について述べる．

一般的に流体力学的な問題では目的関数に大きな不連続は無いと想定され，勾配法を基礎とした最適化手法が有効であると考えられる．しかし今回設定した目的関数は目標とする推力に近い条件で小さくなる 3.2 節の(3)式のように設定しているため，大きな不連続はないが目標推力となる領域で折れ曲がった微分不可能関数であると想定される．そのため最適化手法として実数値遺伝的アルゴリズムを用いる．

3. 1　実数値遺伝的アルゴリズム

遺伝的アルゴリズム（Genetic Algorithm; GA，以下 GA と略記する）は生物の進化を模擬した確率的な最適化手法である．GA においては，ある世代（generation）を形成している個体（individual）の集合，すなわち個体群（population）の中で，環境すなわち最適化問題における目的関数への適応度（fitness）の高い個体が高い確率で生き残るように選択（selection）が行われる．さらに，交叉（crossover）や突然変異（mutation）によって，次の世代の個体群が形成される．これら一連の操作の繰り返し，すなわち世代交代が進むにつれ，より適応度が高い個体（最適解に近い個体）が増加し，最適解が得られる．以上が GA の基本的な概念である．

GA においては一般的に，個体は 1 個の設計変数あたり適当な個数（ビット数）の 0 または 1 という整数値の列で表される．そして，この 0 または 1 の列（ビットストリング）は 10 進数への変換を経て実数である設計変数に写像される．各個体の染色体（chromosome）は設計変数の数だけビットストリングを並べることにより表現される．なお，ビットストリングにより表される空間を遺伝子型（genotype）空間，実数により表される空間を表現型（phenotype）空間といい，表現型から遺伝子型へ写像することをコード化（coding），逆に遺伝子型から表現型へ逆写像することをデコード化（decoding）という．また，ビットストリングによるコード化が行われたものはビットストリング GA と呼ばれる．

ビットストリング GA はさまざまな問題へ適用されているが，設計変数が連続な値をとる最適化問題の場合，染色体の表現としてビットストリングではなく，実数を直接用いた方がビットストリング GA よりも確実に最適解を得ることができるとの報告がある [5]．そこで本論文においては，熟練による勘と経験が必要な困難な作業として知られるレンズ設計問題に適用され，有用性が確認された UNDX という交叉方法を用いた実数値 GA を用いることにする．

本最適化手法では，交叉法として単峰性正規分布交叉（UNDX：Unimodal Normal Distribution CROSSover）を用いた．UNDX [6) 7)] は小野によって提案され，レンズの光学的性能最適化問題において，その有用性が確認されている．

UNDX では，Fig. 1 に示すように，2 個の親個体を表す実数ベクトル $\vec{P}_1$，$\vec{P}_2$ および 3 番目の親個体の実数ベクトル $\vec{P}_3$ の位置関係によって決まる正規乱数を用いて，2 個の子個体の実数ベクトル $\vec{C}_1$，$\vec{C}_2$ を生成する．ここで各個体は n_D 個の設計変数を成分とする n_D 次元の実数ベクトルによって表される．なお Fig. 1 は例として設計変数が 2 個の場合を示している．

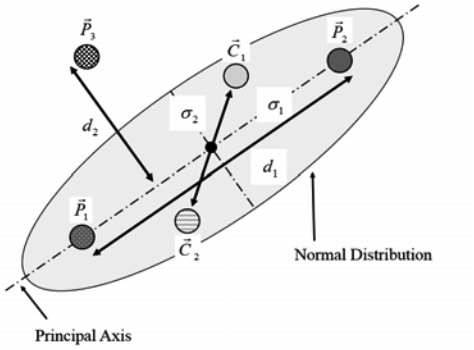

Fig. 1　Concept of UNDX (Tow-dimensional case).

3.1.1 交叉法

子個体は基本的に，2 個の親個体 $\vec{P}_1$， $\vec{P}_2$ を結ぶ線分の周辺に正規分布に従って生成される．3 番目の親個体 $\vec{P}_3$ は正規分布の標準偏差を決めるために補助的に用いられる．正規分布の標準偏差は，その主軸成分すなわち 2 個の親個体 $\vec{P}_1, \vec{P}_2$ を結ぶ方向の成分 σ_1 は両親間の距離 d_1 に比例させ，それ以外の軸の成分 σ_2 は，3 番目の親個体 $\vec{P}_3$ と両親を結ぶ直線との距離 d_2 に比例させる．これにより，両親が表現型空間において離れて存在している場合には，子個体は広い範囲に生成され，両親が近くに存在している場合には，両親に近い狭い範囲に生成される．ここで，主軸以外の標準偏差を $\sqrt{n_D}$ で除すことにより，設計変数の数が増加しても主軸から大きく外れることなく子個体が生成されるよう配慮されている．このとき，生成される子個体のベクトルは(2)式で表される．

$$\begin{aligned} \vec{C}_1 &= (\vec{P}_1 + \vec{P}_2)/2 + z_1\ \vec{e}_1 + \sum_{k=1}^{n_D} z_k\ \vec{e}_k \\ \vec{C}_2 &= (\vec{P}_1 + \vec{P}_2)/2 - z_1\ \vec{e}_1 - \sum_{k=1}^{n_D} z_k\ \vec{e}_k \end{aligned} \tag{2}$$

ただし，

$$\begin{aligned} & z_1 \sim N\left(0, \sigma_1^2\right) \\ & z_k \sim N\left(0, \sigma_2^2\right)\ (k = 2, \cdots\cdot, n_D\ ) \\ & \vec{e}_1 = (\vec{P}_1 - \vec{P}_2)/\left|\vec{P}_1 - \vec{P}_2\right| \\ & \vec{e}_i \perp \vec{e}_j\ \ (i, j = 1, 2, \cdots\cdot, n_D\ )\ (i \neq j) \\ & \sigma_1 = \alpha\, d_1 \\ & \sigma_2 = \beta\, d_2 / \sqrt{n_D} \end{aligned}$$

ここで，

$\vec{C}_1, \vec{C}_2$ ：子個体のベクトル
$\vec{P}_1, \vec{P}_2, \vec{P}_3$ ：親個体のベクトル
d_1 ： $\vec{P}_1$ および $\vec{P}_2$ の距離
d_2 ： $\vec{P}_3$ と線分 $\overrightarrow{P_1P_2}$ との距離
n_D ：設計変数の個数
$z_1 \sim N\left(0, \sigma_1^2\right)$ ：(2)式右辺第 2 項に用いる正規乱数
$z_k \sim N\left(0, \sigma_2^2\right)$ ：(2)式右辺第 3 項に用いる正規乱数
$\vec{e}_1, \vec{e}_i$ ：単位ベクトル
σ_1, σ_2 ：標準偏差
α, β ：標準偏差を決定するパラメータ
（$\alpha = 0.5, \beta = 0.35$ ）

である．

3.1.2 世代交代モデル

本研究では，佐藤ら [8] により提案された MGG（Minimal Generation Gap）モデルを世代交代モデルとして用いる．MGG モデルは，複製選択の際にランダムに親個体を選択すること，生存選択の際にルーレット選択により最適解ではない 1 個体を選択することから，集団の多様性保持に優れているといわれる．また，生存選択においてある程度良好な個体が次世代へ残されるようになっており，集団の分布が徐々に最適解がある方向へ移動するよう促しており，効率的に最適解が求められるという性質がある．

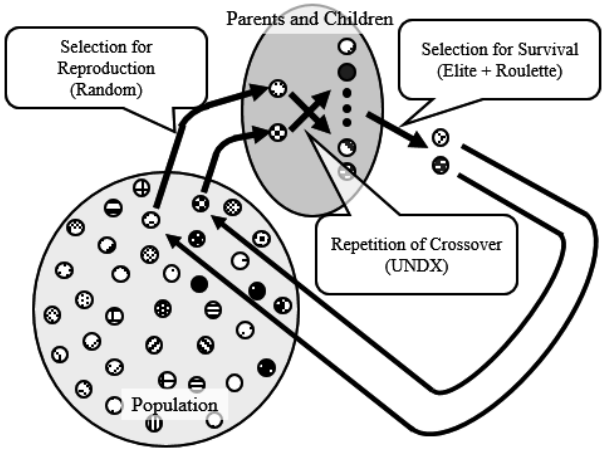

Fig. 2　MGG model.

実際に行われる翼形状最適化の手順は次の 4 ステップで表される．

［ステップ 1］　初期集団の生成

設計変数をランダムに生成することにより，翼の半径方向のピッチ分布，最大キャンバー分布を生成し，プロペラの幾何形状データを作成する．このとき，プロペラ翼の半径方向のコード長，スキュー，レーキおよび最大翼厚分布は原型のものを使用する．

本手法では SQCM による定常プロペラ性能計算法によりプロペラ性能を推定および制約条件の確認を行う．また，制約条件を満足していれば，この個体は初期集団に加えられる．制約条件を満たす個体（改良プロペラ）の数が N_P 個になるまで上記の手順を繰り返す．

［ステップ 2］　複製選択

交叉（子の生成）のため，一対の親（両親）を集団からランダムに選ぶ．

［ステップ 3］　交叉

ステップ 2 で選ばれた両親から，UNDX により 2 個の子個体を生成する．それらについて，SQCM による定常プロペラ性能計算法により，プロペラ性能および制約条件の確認を行う．制約条件を満足している場合，そのプロペラは次のステップでの評価対象として選定される．制約条件を満たす

子個体の数が $2\times N_C$ 個になるまで上記の手順を繰り返す．

［ステップ 4］　生存選択

ステップ2で選ばれた両親およびステップ3で生成された $2\times N_C$ 個の子個体の中から 2 個の個体を選ぶ．目的関数が最大である個体と，それを除く $2\times N_C+1$ 個の個体の中からルーレット選択により選ばれたものである．これら 2 個の個体を，ステップ 2 で選ばれた両親と置き換える．ステップ 2 から 4 を繰り返し，目的関数が収束するまで計算を行う．

3. 2　目的関数および制約条件

本最適化問題における目的関数 F は，所定の推力を発生させるトルクを最小化するために，トルクを直接目的関数にするのではなく，目標とする推力 T^{Target} との差に応じたペナルティ関数 P をトルク Q で除した値とする．目的関数 F およびペナルティ関数 P を以下のように表し，目的関数 F の最大化問題を解く．

$$F=\frac{P}{Q} \tag{3}$$

ただし，

$$P=\exp(-\left|T-T^{\mathrm{Target}}\right|/T^{\mathrm{Target}})$$

本手法では，最適化の過程で生成されるプロペラの目的関数は SQCM による定常プロペラ性能計算法により評価する．これとは別に，不均一な問題に適した非定常プロペラ性能計算法も開発したが，計算時間が長大となるため，本研究の最適化手法には使用しない．最適化におけるプロペラ性能評価は，次章に示すフィン後方で計測した流場を周方向に単純平均した値を流入速度として与える定常プロペラ性能計算法により行う．

また，本最適化ではフェイスキャビテーションを抑制するため，翼端を除くすべてのフェイス面の翼前縁から 1 番目と 2 番目のパネルにおいて負圧にならないものとした．

3. 3　設計変数

本最適化手法においては，半径方向のピッチ分布，最大キャンバー分布を設計変数とする．それ以外の幾何形状データ，すなわちコード長，スキュー，レーキおよび最大翼厚分布などは別途設定する必要があり，設計変数以外の幾何形状データは原型のものを使用する．

翼形状最適化にあたっては，基本となる翼型が必要である．ここでは，プロペラの基本翼型として，コード方向の翼厚分布が NACA66，キャンバー分布が NACA a=0.8 の翼断面形状をすべての半径方向位置で用いる．

翼形状最適化の設計変数は半径方向のピッチ分布，最大キャンバー分布とする．それぞれ半径方向の 3 点により定義される．このとき，実数値 GA における個体を表す実数ベクトル $\vec{X}$ は，これら 6 個の設計変数を成分とし $\vec{X}(P_1,P_2,P_3,C_{\max 1},C_{\max 2},C_{\max 3})$ と表される．

これらの設計変数は，初期集団生成の際はランダムに，その後は実数値 GA の交叉法 UNDX により生成される．

4.　フィン後方の流場計測

本章では，旋回流を発生さるフィンの主要目とフィン後方のプロペラ面における流場計測の方法および計測結果について述べる．

4. 1　旋回流を発生させるフィン

旋回流発生装置のフィンの主要目を Table 1 に，写真を Fig. 4 に示す．旋回流発生装置とは，フィンによってプロペラ回転方向と逆向きの旋回流を発生させる装置であり，円筒にアスペクト比の大きな 8 枚のフィンを周方向に 45 度間隔で放射状に取り付けたものである．フィンの直径は本研究に用いる模型プロペラの直径 250mm より大きい 290mm であり，フィンと軸方向の取り付け角度は 15 度である．

Table 1　Principal particulars of fin.

Diameter (mm)	290
Number of blades	8
Hub ratio	0.138
Blade section	NACA0014
Chord length of blade (mm)	32

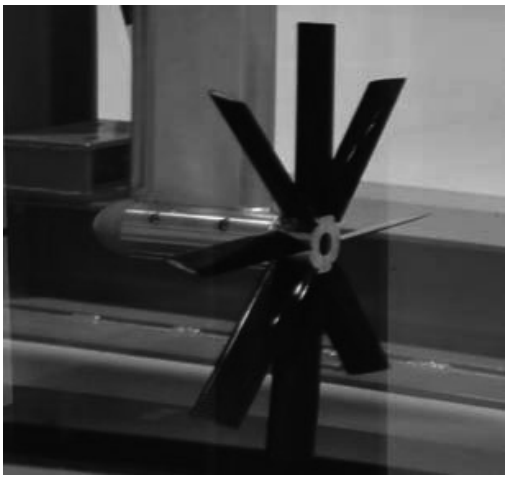

Fig. 4　Fin.

4. 2　高速回流水槽

流場計測は九州大学の高速回流水槽で行った．高速回流水槽の上面図と断面図を Fig.3 に示す．水路は垂直回流型で，観測部は，長さ 6,000mm，水路幅 2,000mm，水深 1,000mm である．流速は 0.1～3.3m/sec 間で設定可能である．

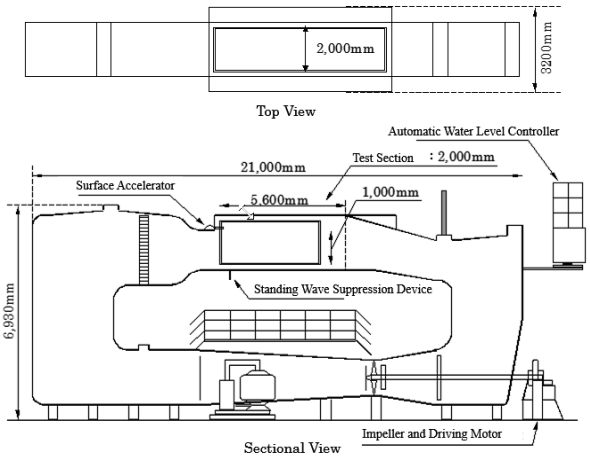

Fig. 3　High-speed circulating water channel.

4. 3　流場計測

球型 5 孔ピトー管を用いて一様流速をv=1.0m/s と設定したときのフィン後縁より 50mm 後方の断面の流場計測を行った．フィン中心軸の没水深度はプロペラ直径の 1.5 倍である 375mm とし，フィンの中心軸を原点として半径方向に 10mm 間隔（20mm～150mm の間），円周方向に 7.5 度間隔に計測点を設けた．これらの計測点は，旋回流中のプロペラ性能試験におけるプロペラ代表面に位置する．本研究に用いるスキューおよびレーキを有さないため，プロペラ代表面はコード長の中心に位置する．

流場計測の結果を Fig. 5 および Fig. 6 に示す．主流方向速度分布V_Xは図中右側の表に対応した等高線で Fig. 5 に示す．面内方向速度成分はベクトル図で Fig. 6 に示している．

フィン後方の流速のそれぞれの方向の計測値を周方向に単純平均し，それらの半径方向の分布を Fig. 7，Fig. 8 および Fig. 9 に示す．フィンによって軸方向の流速がわずかに減少し，周方向においては，プロペラの回転方向と逆向きの旋回流が発生している．

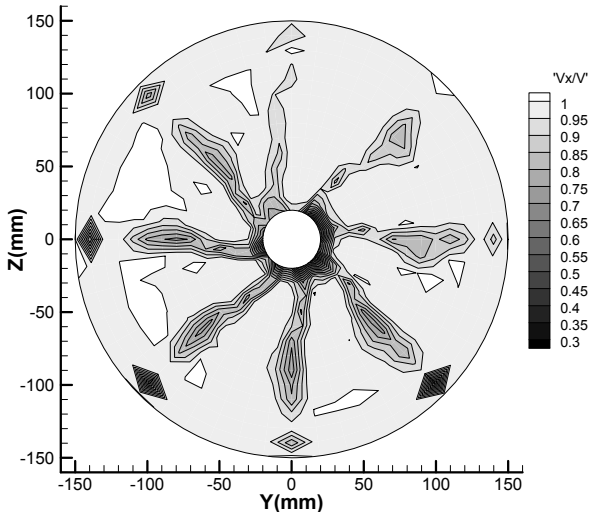

Fig. 5　$\overline{V}_X$　distribution.

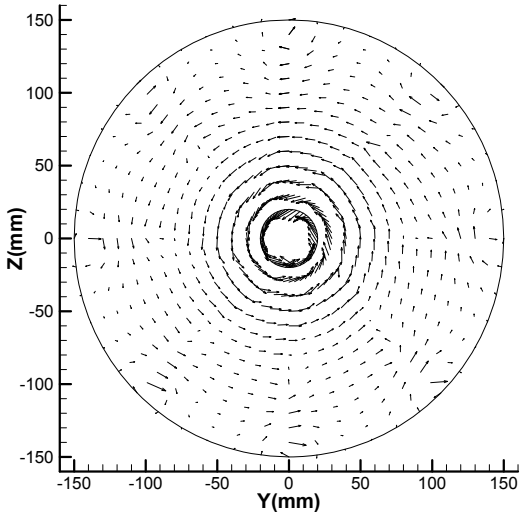

Fig. 6　Plane direction velocity distribution.

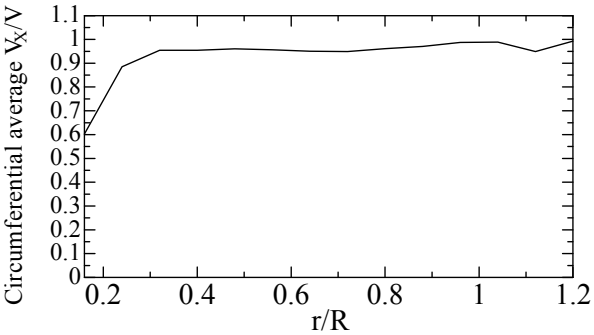

Fig. 7　Circumferential average velocity distribution of V_X.

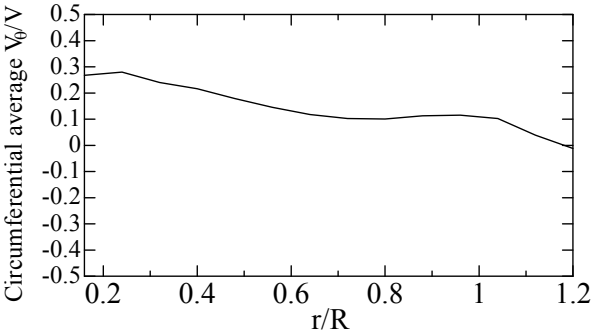

Fig. 8　Circumferential average velocity distribution of V_θ.

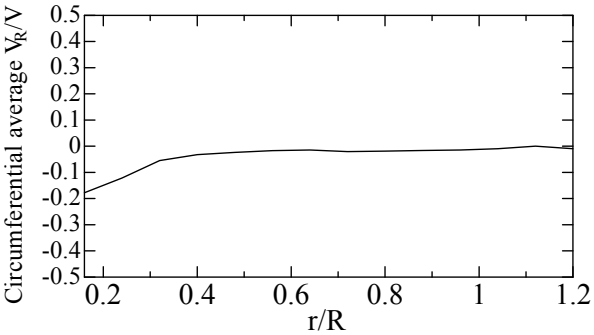

Fig. 9　Circumferential average velocity distribution of V_R.

Table 2 に軸方向流速 V_X，周方向流速 V_θ および半径方向速度 V_R の断面平均値をフィン前方の一様流速 V で無次元化した値を示す．周方向は反時計回りを正，半径方向は外向きを正とする．

Table 2 Average velocity.

$\overline{V}_X/V$	$\overline{V}_\theta/V$	$\overline{V}_R/V$
0.964	0.133	-0.023

5. 旋回流中プロペラ翼形状最適化計算の結果

本章では，最適化計算における原型プロペラ，最適化計算におけるプロペラの目標推力および回転数，得られた改良プロペラの形状および旋回流中のプロペラ性能の計算結果について述べる．

5. 1 原型プロペラ

本研究においては，翼の輪郭を数式で表したスキューおよびレーキを有さない単純形状プロペラを原型プロペラとして選定した．その模型プロペラの主要目を Table 3 に，写真を Fig 10 に示す．

Table 3 Principal particulars of propeller model.

Diameter (mm)	250
Number of blades	4
Pitch ratio at 0.7R	0.68
Expanded area ratio	0.5
Hub ratio	0.18
Skew angle (deg.)	0
Rake angle (deg.)	0
Blade section	NACA

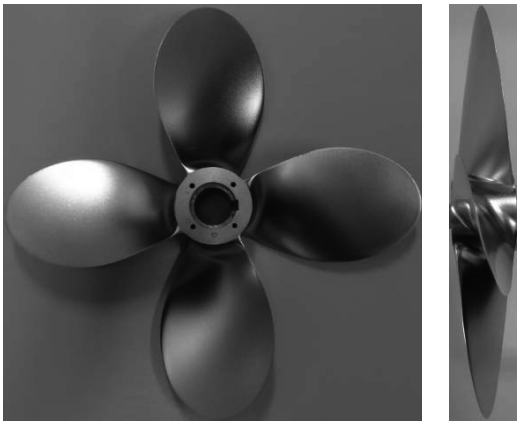

Fig. 10 model Propeller.

5. 2 最適化計算における目標推力と回転数

Fig.11 に単純形状プロペラの計算におけるパネル分割を示す．分割数は，翼表面のフェイス面およびバック面それぞれの翼弦方向を 15 分割，半径方向を 10 分割とした．

一様流速 V =1.0m/s，プロペラ回転数 n =10rps の場合，すなわち前進係数 J =0.4 におけるプロペラ性能計算により得られた推力，トルク，伝達馬力 DHP およびプロペラ効率 η_O を Table 4 に示す．この条件の推力の値を基準推力 $T^{\text{w/o Fin}}$ とする．また，この条件における伝達馬力を，これ以降 $DHP^{\bigcirc}$ とする．

旋回流が発生させるフィンが装備されていない状態の推力減少率を 0.2 と仮定し，フィンを装備することにより推力減少率が 15%増加と仮定すると，目標推力は Table 5 に示す値となる． 単純形状プロペラを原型プロペラとして，3 章で示した最適化手法を用いて，旋回流中のプロペラ翼形状最適化を行った．プロペラ回転数が 10rps の条件において目標推力 T^{Target} となるように最適化計算を行う．設計変数の範囲を Table 6 に示し，設計変数がこの範囲内に収まるように計算を行う．

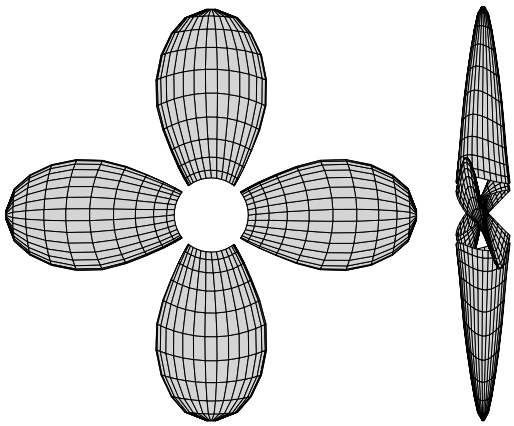

Fig. 11 Panel arrangements.

Table 4 Thrust, torque and DHP of original propeller by calculation (V =1.0m/s, 10rps, J=0.4).

$T^{\text{w/o Fin}}$ (N)	Torque(N・m)	DHP (W)	η_O
66.141	1.954	122.795	0.539

Table 5 Thrust deduction fraction and T^{Target} in calculation.

$t+\Delta t$	T^{Target} (N)	$T^{\text{Target}}/T^{\text{w/o Fin}}$
0.23	68.718	1.039

Table 6 Ranges of design variables.

Pitch ratio at root	0.5～1.2
Pitch ratio at 0.5R	0.5～1.0
Pitch ratio at tip	0.5～1.0
Max. camber ratio at root	-0.02～0.09
Max. camber ratio at 0.5R	0.00～0.06
Max. camber ratio at tip	0.00～0.04

5. 3　改良プロペラの形状

Fig. 12 および Fig. 13 に改良プロペラのピッチおよび最大キャンバー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分布は翼根では原型プロペラより大きく，0.5R から 0.9R までは逆に原型プロペラよりも小さく，翼端部では原型プロペラよりやや大きくなっている. 最大キャンバーは原型プロペラに比べ全体的に小さい. 原型プロペラの最大キャンバーは翼根から翼端に向かって減少しているのに対し，改良プロペラの最大キャンバーは，0.8R 以上の翼端部では原型よりやや大きくなっている.

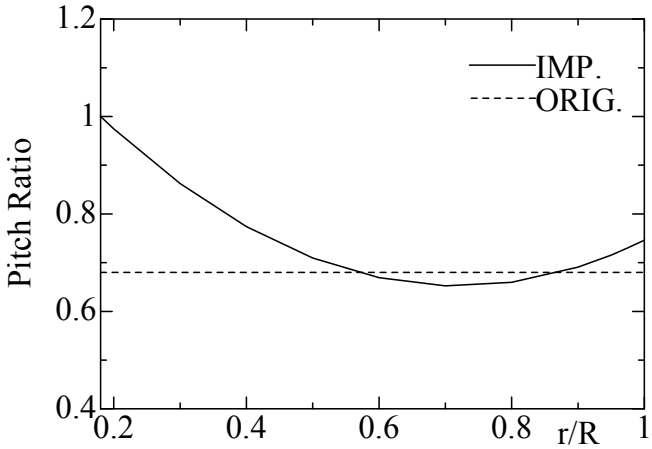

Fig. 12　Pitch distributions.

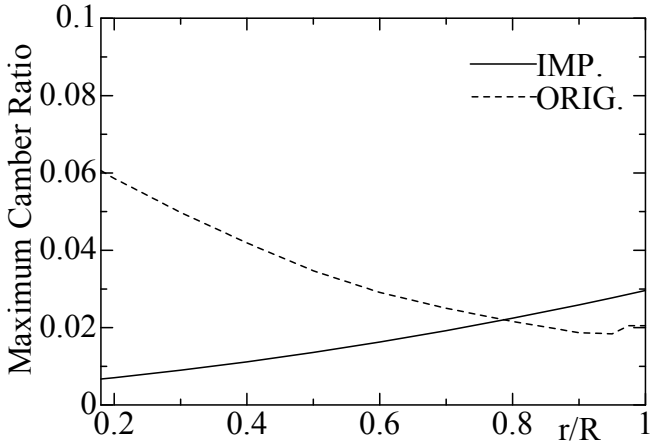

Fig. 13　Maximum camber distributions.

5. 4　旋回流中のプロペラ性能の計算結果

原型プロペラと改良プロペラの単独性能計算の結果を Fig. 14 に示す． K_T および K_Q はそれぞれ推力係数およびトルク係数である．改良プロペラは推力とトルクが減少している．

フィン後方の旋回流中を自航状態と考え, 推力一致法により求めた自航要素の計算値を Table 7 に示す. ここで，Q°，V_A，w_e，η_R，η_H および η_D は，プロペラ単独状態でのトルク，プロペラの前進速度，有効伴流率，プロペラ効率比，船殻効率および準推進係数である. 左および中央列はそれぞれ原型プロペラの推力を基準推力 $T^{\mathrm{w/o\,Fin}}$ および目標推力 T^{Target} に設定した場合，右列は改良プロペラの推力を目標推力 T^{Target} に設定した場合の自航要素を示している.

フィン前方の一様流が 1.0m/s であるのに対し，フィン後方の軸方向の断面平均流速は 0.964 m/s であり，これを伴流率に換算すると 0.036 である．それに対し，計算された有効伴流率 w_e は 0.16～0.17 程度となっている．この差は計算により得られた有効伴流率にはフィンによる軸方向の伴流率だけでなく, 周方向成分, すなわち旋回流の影響が含まれているためであると考えられる.

いずれの条件においても伝達馬力は V =1.0m/s の一様流中, プロペラ回転数 n =10rps の条件の伝達馬力 DHP° よりも減少している．また，改良プロペラについては，プロペラ回転数 n =10rps の状態で目標推力 T^{Target} となり，伝達馬力は減少している. 計算においてはプレスワールフィンが装備されていない状態のプロペラ回転数で伝達馬力が減少する改良プロペラが得られている.

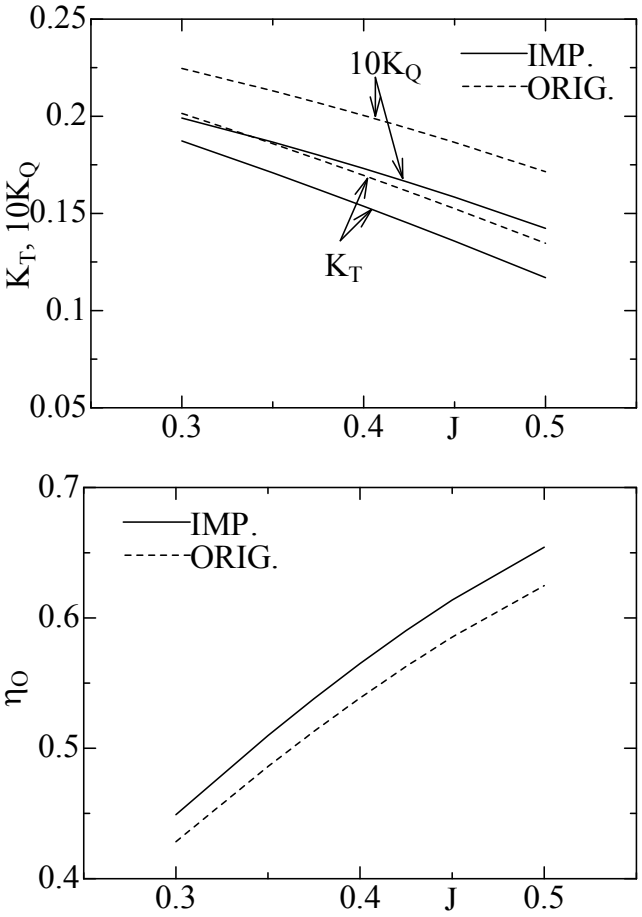

Fig. 14　Calculated result of propeller characteristics.

Table 7 Calculated result of self-propulsion factors.

	ORIG.	ORIG.	IMP.
T^{Target} (N)	66.141	68.718	68.718
n (rps)	9.53	9.67	10.00
Q (N・m)	1.930	1.998	1.894
K_T	0.186	0.188	0.176
J	0.348	0.343	0.335
$10K_Q$	0.214	0.215	0.191
$Q^{\bigcirc}$ (N・m)	1.893	1.961	1.861
V_A (m/s)	0.829	0.829	0.837
w_e	0.171	0.171	0.163
η_O	0.484	0.478	0.492
η_R	0.981	0.981	0.982
DHP (W)	122.795	121.384	118.989
DHP / $DHP^{\bigcirc}$	0.941	0.989	0.969
η_H	0.965	0.929	0.920
η_D	0.458	0.436	0.445

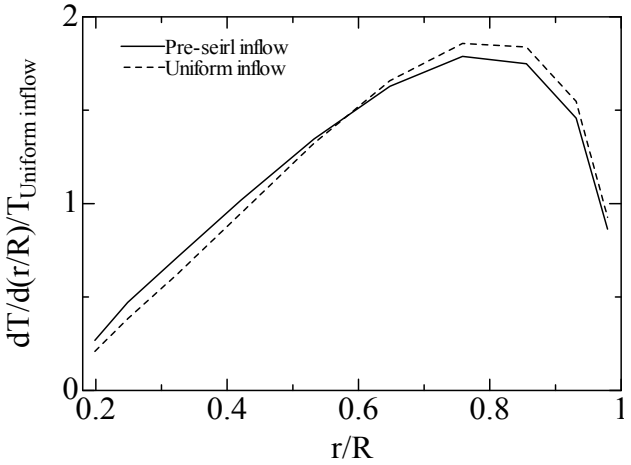

Fig. 15 Thrust distributions in radial directions.

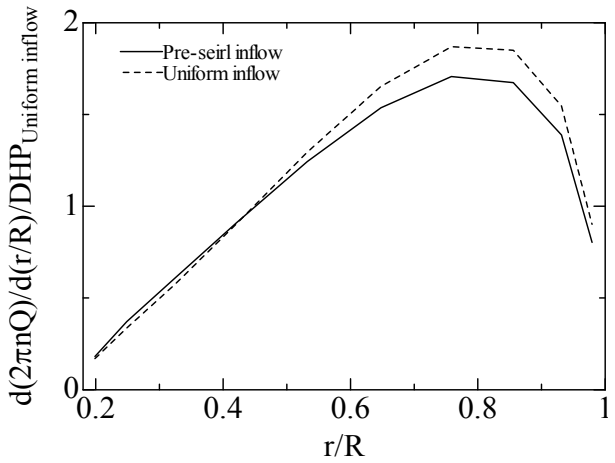

Fig. 16 Torque distributions in radial directions.

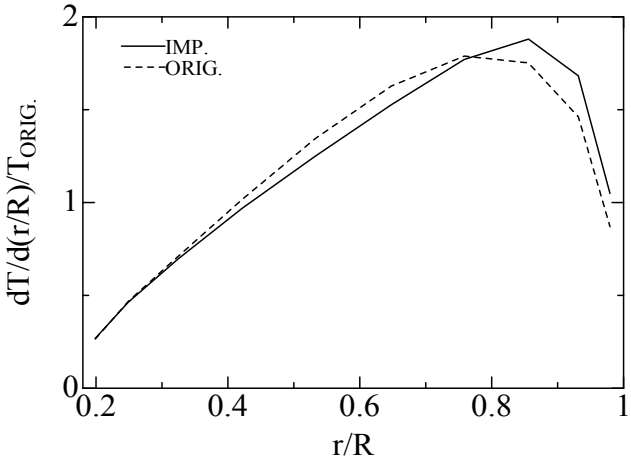

Fig. 17 Thrust distributions in radial directions.

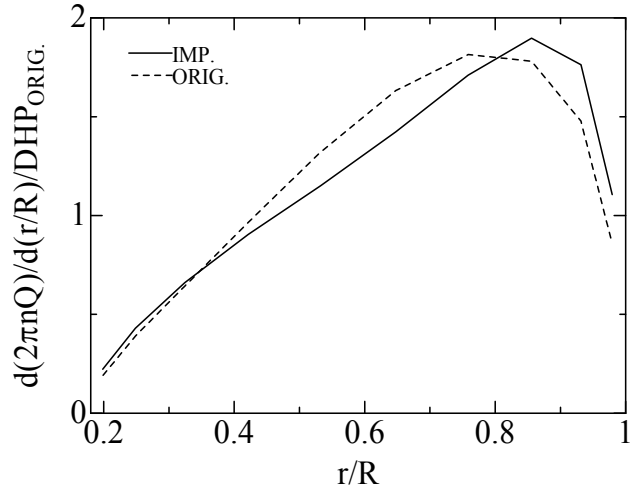

Fig. 18 Torque distributions in radial directions.

原型プロペラにおいて，V =1.0m/s の一様流中，プロペラ回転数 n=10rps の条件と旋回流中で基準推力 $T^{\mathrm{w/o\ Fin}}$ となる条件の推力分布を Fig.15，伝達馬力の分布を $2\pi nQ$ として Fig.16 に示す．旋回流中は一様流中に比べ，翼根から 0.6R 付近では推力が増加，0.6R 付近から翼端では減少している．$2\pi nQ$ は翼根から 0.4R 付近では増加し，0.4R から翼端では大幅に減少している．

周方向単純平均流場中において原型, 改良それぞれのプロペラが目標推力となるプロペラ回転数における半径方向の推力分布を Fig.17，伝達馬力の分布を $2\pi nQ$ として Fig.18 に示す．改良プロペラは原型プロペラに比べ，翼根から 0.75R 付近では推力が減少，0.75R 付近から翼端では増加している．$2\pi nQ$ は翼根から 0.8R 付近では減少し，0.8R から翼端では増加している．

6. 旋回流中プロペラ性能試験

本章では, まず 2 章に示した放射状に配置された複数のフ

ィンによる旋回流が推進性能にどのような影響を与えるかを確認する「旋回流中プロペラ性能試験」と称する試験の手順について述べる．そして，3 章に示した原型および改良プロペラの旋回流中における性能の実験結果について述べ, 考察を行う．

6. 1　旋回流中のプロペラ性能試験の手順

まず, 原型プロペラおよび改良プロペラの単独性能試験を, プロペラ回転数 n を 10rps に設定し，前進係数 J =0.3~0.5 の範囲で一様流速を変化させて実施する．

次に，Fig. 19 に示すように，プロペラ代表面より 50mm 前方にフィン後縁が位置するように旋回流発生装置を配置し，一様流速を V =1.0m/s に設定し，後述する目標推力を含む範囲で原型および改良プロペラの回転数を変化させ, 推力, トルクを計測する．

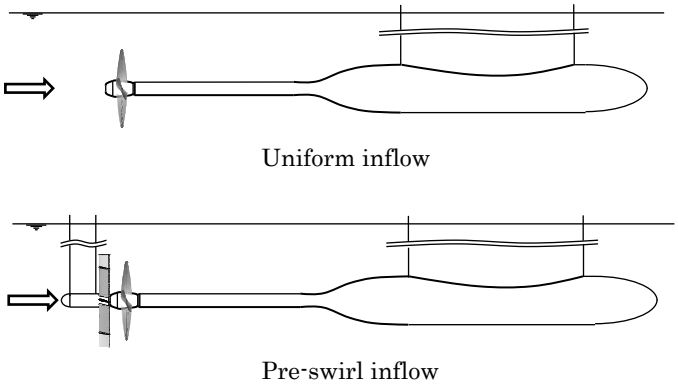

Fig. 19　Experimental conditions.

6. 2　プロペラ単独性能試験結果

Fig. 20 に原型および改良プロペラの単独性能を示す．図中の推力係数 K_T，トルク係数 K_Q およびプロペラ効率 η_O のセンターシンボル（●印および○印）は計測点を表している．推力係数 K_T，トルク係数 K_Q を示す実線および破線は計測点を最小 2 乗法により 3 次式で近似したものである. プロペラ効率を示す実線および破線は 3 次式近似した推力係数, トルク係数より計算した値を示す. 後述する旋回流中の自航要素は, これらの図の実線および破線で示した近似曲線を用いて解析する．

原型プロペラの単独性能試験において, 設計条件である一様流速 V =1.0m/s, プロペラ回転数 n =10rps, 前進係数 J =0.4 における推力，トルク，伝達馬力およびプロペラ効率の値を Table 8 に示す．このときの推力を基準推力 $T^{\mathrm{w/o\,Fin}}$，伝達馬力を $DHP^{\bigcirc}$ とする. 3 章と同様にフィンが装備されていない状態での推力減少率を 0.2 と仮定し，フィンが装備された状態での推力減少率の増加率を 15%と仮定すると，目標推力 T^{Target} は Table 9 に示す値となる．

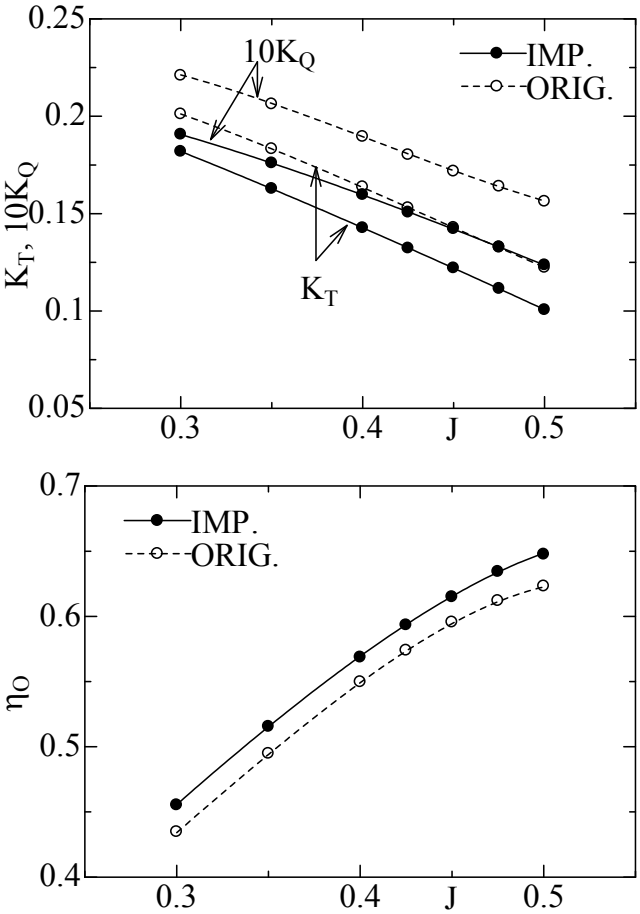

Fig. 20　Experimental result of propeller characteristics.

Table 8　Thrust, torque and DHP of original propeller in experiment. (V =1.0m/s, 10rps, J=0.4).

$T^{\mathrm{w/o\,Fin}}$ (N)	Torque(N・m)	DHP (W)	η_O
63.758	1.847	116.04	0.549

Table 9　Thrust deduction fraction and T^{Target} in calculation..

$t+\Delta t$	T^{Target} (N)	$T^{\mathrm{Target}}/T^{\mathrm{w/o\,Fin}}$
0.23	66.245	1.039

6. 3　旋回流中のプロペラ性能試験結果

原型プロペラについては基準推力 $T^{\mathrm{w/o\,Fin}}$ を目標推力に設定した状態および目標推力 T^{Target} の 2 状態において，改良プロペラにおいては目標推力 T^{Target} の 1 状態において旋回流中プロペラ性能試験を行った．その結果を Fig. 21 に示す．図中のセンターシンボル（●印および○印）は計測点を示しており, 目標推力となるプロペラ回転数は計測点を最小 2 乗法による 1 次式で近似して求めた. 伝達馬力も計測点を 1 次式で近似し, その 1 次式を用いて目標推力となるプロペラ回転数における伝達馬力を求めた．

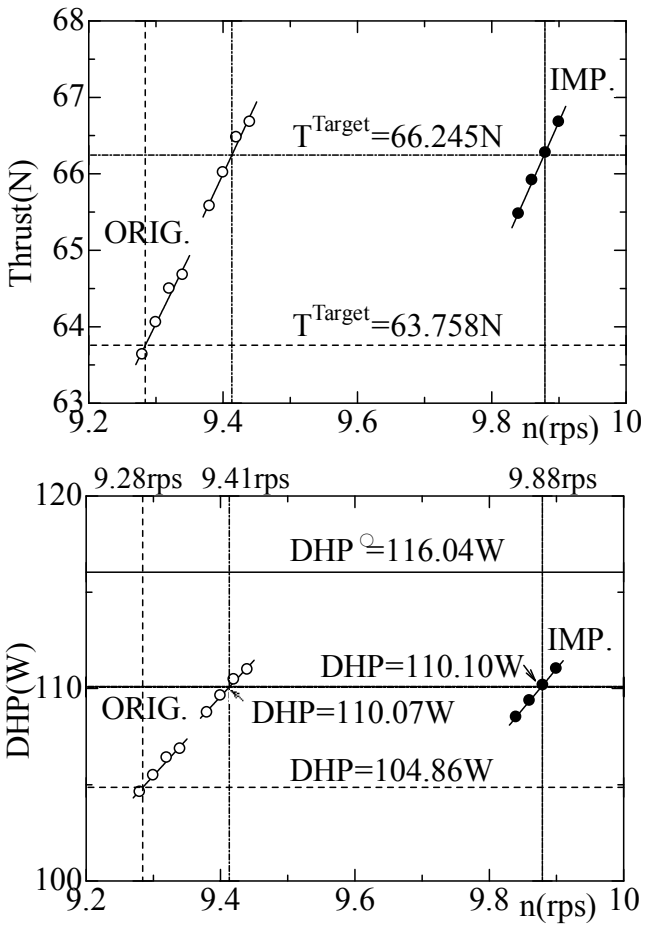

Fig. 21 Experimental result of thrust and DHP.

自航時のフィンの抵抗増加を考慮していない目標推力 $T^{w/o\,Fin}$ における旋回流中の原型プロペラの伝達馬力は，一様流中に比べ約 9.6%低下し，旋回流により伝達馬力が減少することが確認された．それと同時に，プロペラ回転数は約 7.2%低下した．

自航時のフィンの抵抗増加を考慮した目標推力 T^{Target} の場合，原型プロペラおよび改良プロペラともに伝達馬力の減少率は約 5.1%である．プロペラ回転数は，原型プロペラは約 5.9%減少した．改良プロペラについては回転数が減少しないように翼形状の最適化を行ったが，回転数は約 1.2%減少した．しかしながら，原型プロペラと比較して回転数の減少を小幅にとどめることができた．

自航時のフィンの抵抗増加を考慮した本最適化において，旋回流中における原型と改良プロペラの伝達馬力の減少率は実験においては同等であったが，改良プロペラの方がプロペラ回転数の減少が小幅であるため，本最適化手法は有効であると考えられる．ただし，本来は回転数の減少は許しておらず，回転数が減少した原因については後に考察を行う．

Table 10 に原型および改良プロペラの単独性能試験の試験結果を用いて推力一致法により解析した自航要素を示す．

前述したように，フィン後方の軸方向の平均流速を伴流率に換算すると 0.036 である．これに対し，いずれのプロペラおよび目標推力においても有効伴流率は 0.2 を超えている．これはフィンによる軸方向の伴流率だけでは説明ができない．有効伴流率には周方向成分，すなわち旋回流が大きく影響していると考えられ，このことは Table 7 に示した計算結果と同様な傾向である．

Table 10 Experimental result of self-propulsion factors.

	ORIG.	ORIG.	IMP.
T^{Target} (N)	63.758	66.245	66.245
n (rps)	9.28	9.41	9.88
Q (N・m)	1.797	1.861	1.774
K_T	0.190	0.192	0.174
J	0.331	0.325	0.319
$10K_Q$	0.211	0.213	0.185
$Q^{\bigcirc}$ (N・m)	1.771	1.834	1.753
V_A (m/s)	0.768	0.766	0.788
w_e	0.232	0.234	0.212
η_O	0.474	0.468	0.480
η_R	0.985	0.985	0.988
DHP (W)	104.86	110.07	110.10
DHP / $DHP^{\bigcirc}$	0.9036	0.9485	0.9488
η_H	1.042	1.005	0.977
η_D	0.486	0.463	0.463

Fig. 22 に一様流速 V =1.0m/s，プロペラ回転数 n =10rps の条件の伝達馬力 $DHP^{\bigcirc}$ を基準とし，原型プロペラが旋回流中で目標推力 $T^{w/o\,Fin}$ となる条件とフィンにより減速した軸方向速度を断面平均値 0.964m/s に設定した一様流中で目標推力 $T^{w/o\,Fin}$ となる条件の伝達馬力の計測値，SQCM による定常プロペラ性能計算法による計算値を示している．一様流速 0.964m/s に比べ，旋回流中の計測値と計算値の差が大きい．

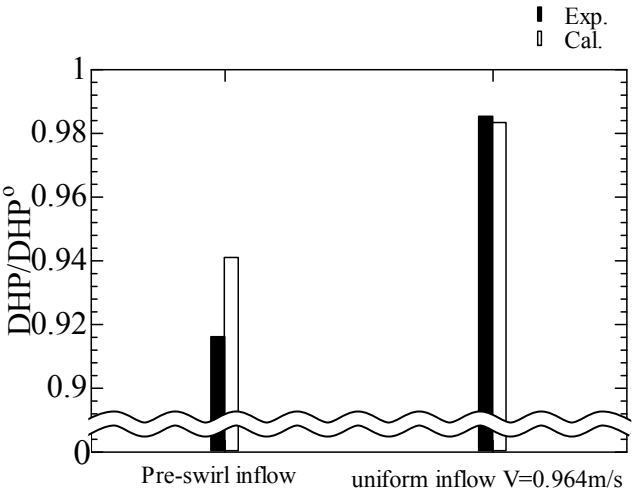

Fig. 22 Comparison of DHP(ORIG.).

この差は，実験ではプロペラ前方にフィンが存在し，プロペラにより誘導される流れによってフィン後方の流れは変化していると考えられるのに対し，最適化計算では一様流中で計測したフィン後方の流場データを与えただけあることが原因として挙げられる．実験ではプロペラによる誘導速度によってフィン後方の旋回流は，一様流中で計測した旋回流よりも大きくなり，一様流中で計測した流場を流入データとして与えた計算結果よりも低回転で目標推力を満たし伝達馬力が減少したと考えられる．

7. 結論

本論文ではプレスワールフィンによる旋回流が推進性能に及ぼす影響を基礎的な実験により確認した．また実数値遺伝的アルゴリズムを用いてプレスワールフィンの装備による自航時の抵抗増加と適切なプロペラ回転数を考慮したプロペラ翼形状の最適化を行なった．本論文の結論を以下にまとめる．

i) プロペラ前方にプロペラ回転方向とは逆向きの旋回流を発生させるフィンを配置した旋回流中プロペラ性能試験を実施し，プロペラの回転方向と逆向きの旋回流が所定の推力を発生させるための伝達馬力を減少させることを確認した．
ii) 同一のプロペラにおいてプレスワールフィンをよる伝達馬力の減少は主にプロペラ回転数であった．
iii) フィンによる自航時の抵抗増加と適切なプロペラ回転数を考慮した旋回流中のプロペラ翼形状最適化手法を開発した．
iv) 開発した手法を用いて改良プロペラを作成し，改良プロペラについて旋回流プロペラ性能試験を実施し，自航時のフィンの抵抗増加を考慮してもプロペラ回転数が大幅に低下することなく一様流中の原型プロペラと比べ伝達馬力が減少することを確認した．

今後は以下のような課題に取り組む予定である．

I) 旋回流を発生させるフィンとプロペラの干渉を考慮した最適化手法の開発
II) 非定常最適化を用いたプロペラ翼形状最適化
III) 自航時のフィンによる抵抗増加量の推定および実験による確認
IV) フィンを含めた最適化

謝　辞

本研究は JSPS 科研費 JP25420871 の助成を受けたものです．

参考文献

1) Takekuma, K., Tsuda, S., Kawamura, A., and Kawaguchi, N.: Development of Reaction Fin as a Device for Improvement of Propulsive Performance of High Block Cofficient Ship, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.150, pp.74-84, 1981.
2) 浅海友弘，池田勉，玉島正裕，藤原英嗣: 省エネルギー装置“フレンドフィン”の有用性について，日本船舶海洋工学会講演論文集，第 3 号, pp.261-264, 2006.
3) 安東潤，片岡史朗，龍知宏: 実数値遺伝的アルゴリズムを用いたプロペラ性能の改善，日本船舶海洋工学会講演論文集，第 11 号, pp.9-12, 2010.
4) 安東潤，毎田進，中武一明: 簡便なパネル法による定常プロペラ性能解析，日本船舶学会論文集，第 178 号, pp.61-96, 1995.
5) 小野巧，山村雅幸，喜多一: 実数値 GA とその応用，人工知能学会誌, Vol. 15, No.2, pp.259-266, 2000.
6) 小野巧，佐藤浩，小林重信: 単峰性正規分布交叉 UNDX を用いた実数値 GA による関数最適化，人工知能学会誌, Vol.14, No.6, pp.1146-1156, 1999.
7) Ono, I., Kobayashi, S. and Yoshida, K.: Optimal Lens Design by Real-Coded Genetic Algorithms Using UNDX, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, No.186, pp.483-497, 2000.
8) 佐藤浩，小野巧，小林重信: 遺伝的アルゴリズムにおける世代交代モデルの提案と評価，人工知能学会会誌, Vol.12, No.5, pp.734-744, 1997.