

# 船尾フィンによるビルジ渦抑制と推進性能に与える影響の研究

## Study of Bilge Vortices Suppression and Propulsive Performance by Stern Fin

航空宇宙工学コース

航空エンジン超音速流研究室 1245044 廣田 知大

### 1. 諸言

近年の海運・造船業界では、2020年1月より船舶燃料に対する国際的な環境規制<sup>(1)</sup>が導入されるなど環境問題の観点から船舶の運用における省エネルギー化が求められており、燃費性能向上に向けた開発が進められている。燃費性能向上の手段として、燃料の燃焼効率向上や推進性能の向上等が挙げられる。

船体形状の設計において推進性能の向上は重要項目である。一般的に推進性能は船体抵抗と推進効率の2つによって評価する<sup>(2)</sup>。船体抵抗は空気と水による流体抵抗に分けられるが、水から受ける抵抗の割合が極めて大きい。抵抗成分は主に摩擦抵抗、圧力抵抗、造波抵抗の3成分からなる<sup>(3)</sup>。3成分の内、船体形状で大きく変動する圧力抵抗に着目する。圧力抵抗は船体の表面付近から流体が剥離することで表面の圧力が低下し船体前面との間で生じる圧力差を圧力抵抗として扱う。この圧力抵抗に関して、船体固有の形状が原因で発生するビルジ渦と呼ばれる縦渦の影響で本抵抗の増加が懸念されている。ビルジ渦とは、肥大船が有する船尾湾曲部（ビルジ部）を流体が通過した後に対発生する図1のような主流方向に軸を持つ縦渦のことである。大規模なビルジ渦はプロペラ面に流入することで推進効率にも大きな影響をもたらすとされている一方で、推進効率自体は船体後方に設置されているプロペラの作用による流体の全圧増加と抵抗で決まる。ビルジ渦はプロペラ面へも流入するため、推進性能への影響を正しく評価する必要がある。船舶の燃費性能向上を考える上でこれらの課題を解決するため、ビルジ渦の回収、抑制の研究開発が進められている。回収には、渦に起因する回転流のエネルギーを推力に変換するダクト等<sup>(4)</sup>がある。ビルジ渦の抑制には、渦の発達過程におけるフィンの設置により渦の弱化を狙う方法が有効であるが現在開発されている船尾フィンはビルジ渦抑制に対しての明確な位置や形状が定まっていない。

本研究では、推進性能に強く影響を与える船体まわりの複雑な流体の流れをCFDにより予測することで、船尾まわりで発生するビルジ渦の抑制及び船尾流れの整流を狙いとした船尾フィンの付加を提案する。そして取り付けられたフィンがビルジ渦の抑制に効果的かどうかの評価、及びビルジ渦の規模や位置を変化させた結果推進性能に与える影響の評価を行う。

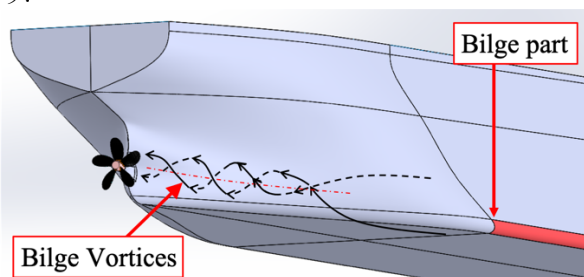


Fig. 1 Distribution of bilge vortices at the stern.

### 2. 計算方法

#### 2. 1 数値計算手法

本研究では三次元非圧縮性乱流を扱い、数値計算ソフトにはオープンソースソフトであるOpenFOAMを用いる。支配方程式は連続の式、レイノルズ平均ナビエ・ストークス方程式を用い、乱流モデルは $k-\omega$  SSTを用いる。速度・圧力解法としてSIMPLE法<sup>(5)</sup>を採用し定常計算で行った。空間の離散化は有限体積法を用い、方程式の対流項には二次精度TVD、拡散項には二次精度中心差分法を用いた。計算格子の生成には流体解析用メッシュジェネレーターであるPointwiseを使用した。

#### 2. 2 船殻効率

推進効率に関して、船体とプロペラの干渉を考慮した要素である船殻効率が有り、プロペラ無しの場合で抵抗 $R_{t0w}$ が働いている状態で船体を速度 $V$ で進ませるための仕事率と、プロペラ有りの船体を速度 $V$ で進ませるためプロペラの推力 $T$ がする仕事率の比を表したものである<sup>(6)</sup>。船殻効率 $\eta_H$ は推力減少率 $t$ と伴流係数 $w$ を用いて以下の式で表される。

$$\eta_H = \frac{1-t}{1-w} \quad (1)$$

ここで、 $1-t$ はプロペラの作用による船体抵抗の増加分とプロペラから発生する推力との比で推力減少係数と表され、以下の式となる。

$$1-t = \frac{T + R_{t0w} - R_t}{T} \quad (2)$$

ここで $R_{t0w}$ はプロペラ無し時の船体抵抗である。

$1-w$ は前方にある船の影響でプロペラ前方の流速 $v_a$ が主流 $U$ に対してどれだけ割合低下したかを示し、以下の式となる。

$$1-w = \frac{v_a}{U} \quad (3)$$

#### 2. 3 プロペラ回転の再現手法

プロペラは回転運動により推力を発生させるため、推進性能を評価する上で推力の推定にはプロペラの回転運動のモデル化が必要である。本研究ではOpenFOAMのMulti Reference Frame model(MRF法)を用いて回転運動のモデル化を行った。MRFを適用するにあたって、指定する回転領域内を通常の絶対座標系と異なり相対座標系として考えた。相対座標系内ではナビエ・ストークス方程式の時間平均解にコリオリ力を付与し、プロペラの回転を仮想的に行った。

### 3. 船尾フィン付加によるビルジ渦及び船殻効率への影響

#### 3. 1 フィンの設置位置及び形状、寸法の選定

事前に行ったプロペラ回転を考慮した数値計算の結果より、船尾付近にて図2に示すような分布のビルジ渦が発生することが分かった。また、ビルジ渦を細分化するように主流方向に分割した断面を図3に示す。これらの結果から、渦が

分布している経路をビルジ渦の発達経路と同定し、経路中での発達段階を渦が成長する以前に干渉できる位置、渦が形成されつつある発達途中に干渉できる位置、渦が成長した頃に干渉する位置の三段階に分けることでフィンの取り付け位置の選定を行った。選定したフィン付加位置を表 1 に示す。フィンの形状は、単純にフィンが渦に与える影響を評価するため台形状を選定した。寸法は、V.P.4 ではビルジ渦が船体表面からやや離れてしまっているため、フィンの高さ及びそれに伴う抵抗を考慮し、V.P.1~V.P.3 において船体表面からビルジ渦までの距離が最も長い V.P.3 で渦管の中心に干渉できるようなフィンの高さを選定した。

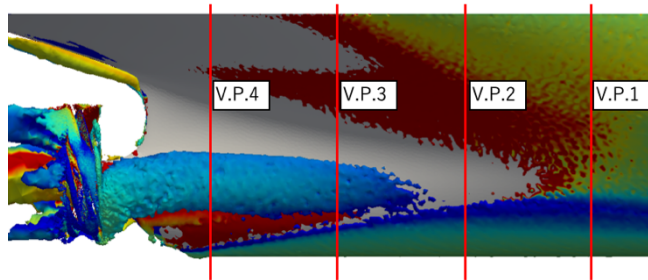


Fig. 2 Vortex structure around the stern.

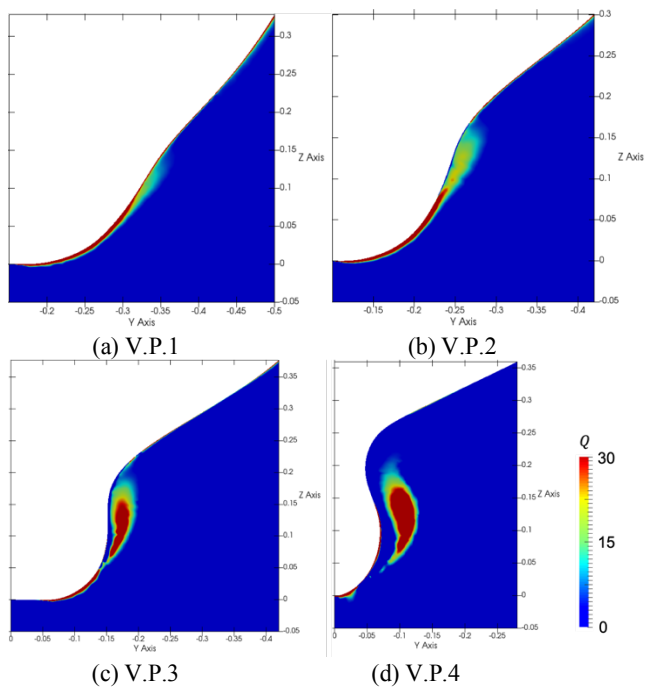


Fig. 3 Distribution of Q values.

Table 1 Specifications of fin mounting position.

	X[mm]	Z[mm]
P.1	-1300	82.5
P.2	-1500	100
P.3	-1700	117.5

### 3. 2 計算対象

本研究で用いた計算モデルを図 4 に示す。モデルは船舶分野での数値流体解析におけるベンチマークとして用いられている JBC(Japan Bulk Carrier)<sup>(7)</sup> という肥大船のモデルを使用した。JBC は船舶分野での CFD ワークショップである CFD Workshop Tokyo 2015 にて、テストケースモデルとして扱われた船型である。本計算では喫水線以下を解析領域とする為、単相流として計算し、水面の自由表面影響は考慮しないもの

とする。船体モデルの諸元を表 2 に示す。用いたプロペラモデルを図 5 に示し、諸元を表 3 に示す。また、付加するフィンのモデルを図 6 に示し、寸法は図示の通りとする。フィン取り付け図の外観を図 7 に示す。

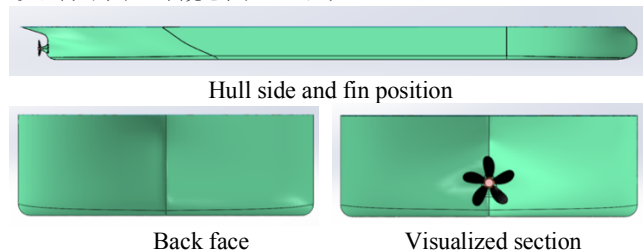


Fig. 4 JBC model.

Table 2 JBC particulars.

Lpp[m]	7.0
Beam[m]	1.125
Draft[m]	0.387

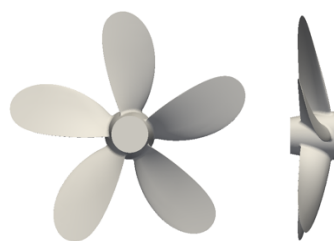


Fig. 5 Propeller model.

Table 3 Propeller particulars.

Propeller diameter[m]	0.203
Rotation speed n[rps]	7.8
Number of blade	5
Rotation direction	Right

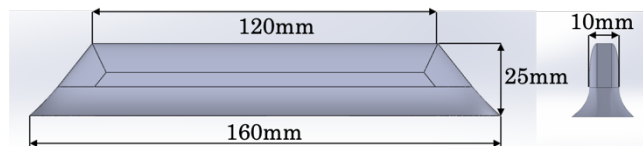


Fig. 6 Fin model.

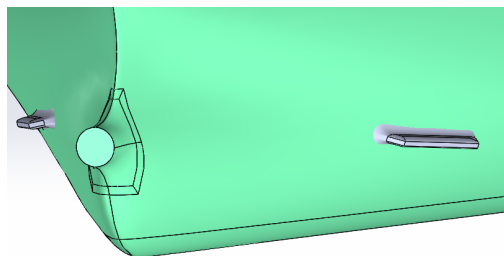


Fig. 7 Fin mounting diagram.

### 3. 3 計算領域及び境界条件

計算領域は図 8 に示す船長方向×船幅方向×深さ方向に 25m×20m×10.42m とする。また領域の境界条件は表 4 に示すように、流入、流出境界を一樣流とし、船体及びプロペラ、フィンは境界は滑り無し境界、それ以外は滑り境界とした。本研究の計算条件を表 5 に示す。流入条件には、模型船を用いた水槽試験と同じ状況を想定し曳航速度を 1.179[m/s]と想定し、曳航速度に相当するよう x 軸方向に U=-1.179[m/s]を与えた。

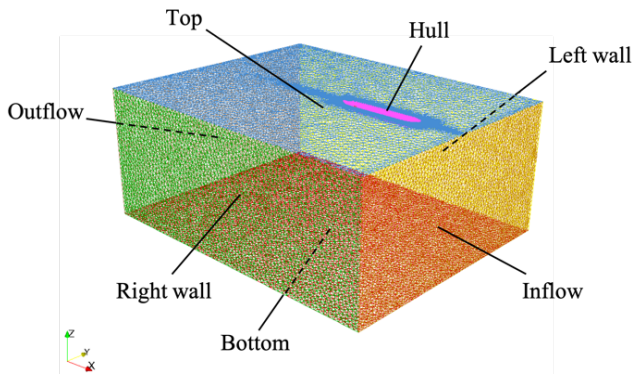


Fig. 8 Calculation area.

Table 4 Boundary conditions.

Boundary surface	Boundary condition
Inflow	Uniform flow
Outflow	Uniform flow
Side wall	Slip wall
Bottom	Slip wall
Top	Slip wall
Hull	No slip wall
Propeller	No slip wall
Fin	No slip wall

Table 5 Calculation condition.

Inflow velocity	-1.179[m/s]
Turbulence model	$k-\omega$ SST
Turbulent intensity	$2.6 \times 10^{-6}[\%]$
Turbulent energy $k$	$4.698 \times 10^{-8}$
Specific dissipation rate $\omega$	4.698

### 3. 4 ビルジ渦の規模への影響

まず、各付加位置での  $Q$  値による渦構造の分布を図 9 に示す。フィン無し時はまとまった渦が発生しているのに対し P.1 フィンでは、フィンにより乱れた流れが上下で 2 本の渦となり、後方に流れる段階で再び合流し 1 本の渦となっていることが確認できる。P.2 フィンでは、P.1 フィンと同様にフィンによる上下の渦の発生が確認できるが、後方に流れる段階で上の渦が弱まりながら下の渦に合流していることが確認できる。P.3 フィンでは、ビルジ渦が大規模な渦に発達しかけている段階に設置しているため、フィンが既に発生している渦を上下の渦に分裂する形で作用していることがわかる。後方に流れる段階で上の渦は小規模化し、渦構造は確認できなくなった。下の渦は弱まることなくプロペラ面へ流入していることが確認できる。

次に各ケース毎の V.P.4 及びプロペラ位置直前断面の  $Q$  値の分布を図 10、図 11 に示す。P.3 フィン付加後、渦が図 10 のように上下に分裂していることが確認できる。図 11 から、P.1 フィンでは他ケースと比較して渦が図中央の軸付近からやや遠ざかるように分布していることが確認できる。一方で、P.3 フィンは他ケースと比較して中央の軸付近に集まるように分布していることが確認できる。また、P.3 フィン付加時では上の渦の弱化による全体的なビルジ渦の小規模がなされていると推測される。

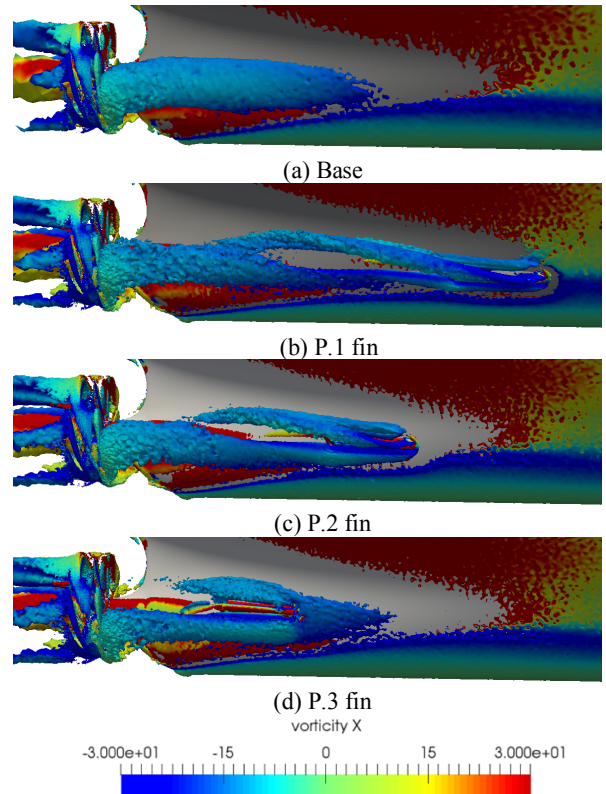


Fig. 9 Distribution of  $Q$  values seen from the side of the hull.

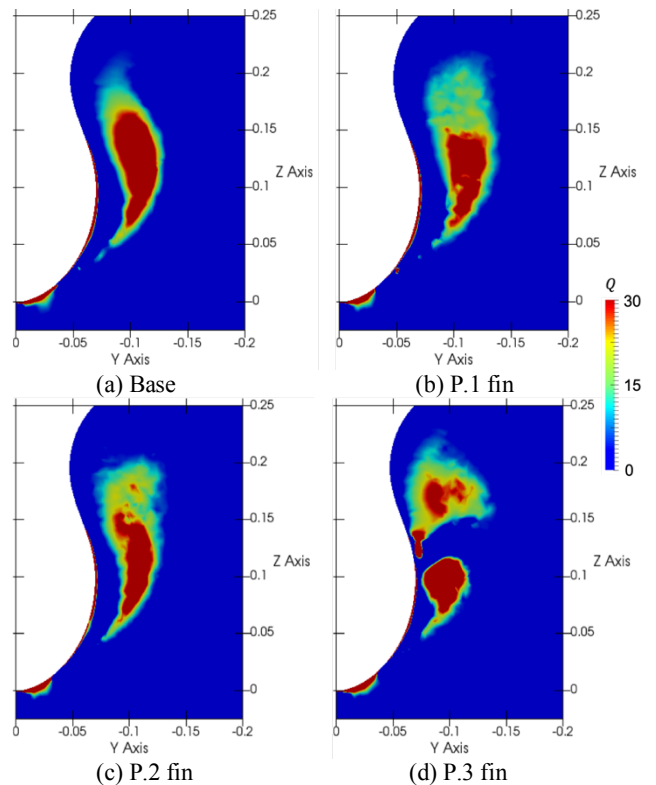


Fig. 10 Distribution of  $Q$ -values in V.P.4 cross section.

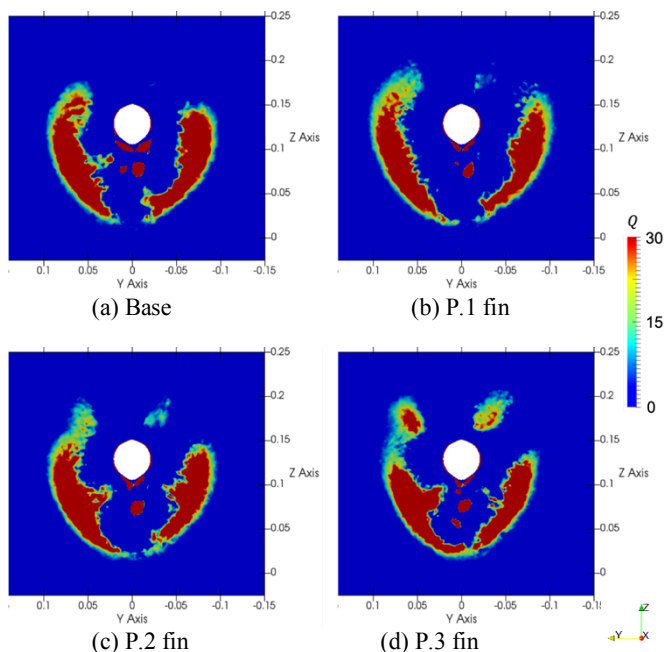


Fig. 11 Distribution of Q-values in the cross section just before the propeller.

### 3. 5 フィン付加による推力の変化

フィンを取り付けけた場合のプロペラから生じる推力をフィン無しの場合と比較する。各位置にフィンを設置した場合の推力の変化を図 12 に示す。Base と比較して、P.1 フィンは約 1.56% 増加、P.2 フィンでは約 0.2% 増加、P.3 フィンは約 0.64% 減少した。取り付け位置が船体の後方になるにつれ、Base に対する推力の変化分は増加から減少に推移していることが確認できる。

推力の算出に用いたプロペラ前後における主流方向位置の各断面から取得した全圧を図 13 に示す。推力はプロペラ前後での全圧差に強く依存しており、各ケースでの推力に差が生じた要因を調査するため、図中のケース間での全圧の差が比較的大きい  $X=-2060\text{mm}$  に着目する。図 14 に回転領域の断面積を用いて可視化した流速分布を示す。 $X=-2060\text{mm}$  での全圧の差が大きかった P.1 フィンと P.3 フィンに注目する。P.1 フィンでは低速領域の範囲がやや広がっており、円の縁下側に存在している高速領域の分布が押し出されるようにして減少していることが確認できる。P.3 フィンでは図中央付近に低速領域が集中して分布しており、この分布は流速の主流方向成分が主流方向と直角な速度成分に変化した渦の存在によるものと考えられる。したがって、フィン無し、P.3 フィン取り付け時のようなプロペラ流入直前において渦が軸付近に存在する一方で、前節で述べたように P.1 フィン取り付け時のように軸からやや離れた箇所に渦が分布することで低速領域が拡大し、 $X=-2060\text{mm}$  における全圧の低下及び推力の増加に繋がったのではないかと推測される。

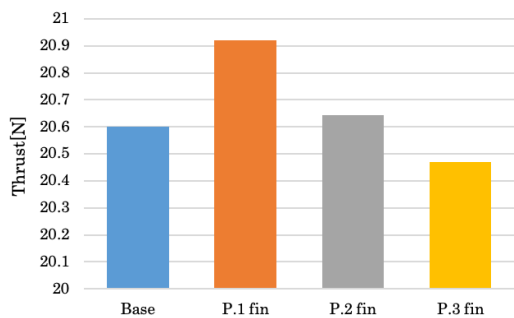


Fig. 12 Thrust in each case.

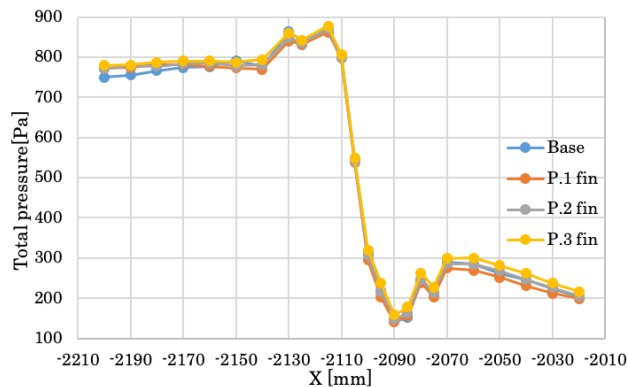


Fig. 13 Total pressure before and after the propeller.

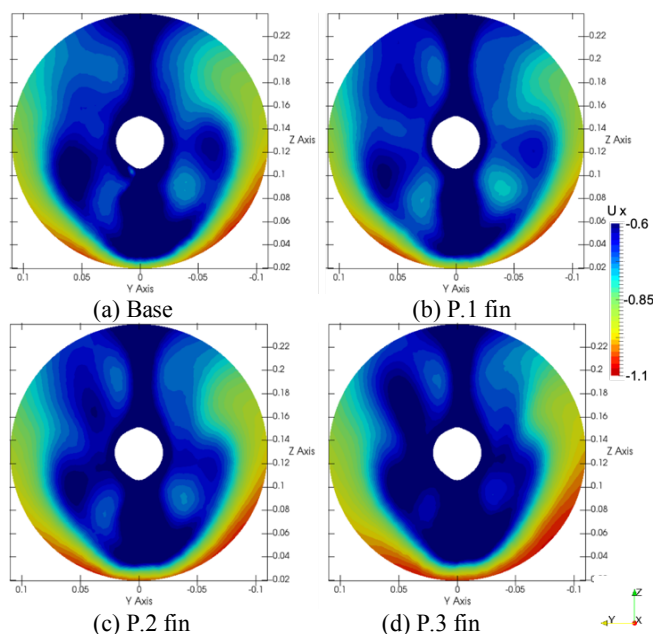


Fig. 14 Mainstream flow velocity distribution at  $X = -2060\text{mm}$ .

### 3. 6 船体抵抗及び船殻効率への影響

フィンを P.1~P.3 に取り付けけた場合の、船体とフィンにかかる全抵抗及び前節で求めた推力を元に算出した推力減少係数、有効伴流係数、船殻効率の結果を表 6 に示す。P.1 にフィンを取り付けすることで推力の増加は見られたが、抵抗の増加により推力減少係数が減少し、有効伴流係数も減少したが Base と比較すると船殻効率は 3.0% 減少した。P.2 へのフィン取り付けは推力、抵抗ともに Base に対して変化は小さく船殻効率も同様に変化は小さい。P.3 へのフィン取り付けでは、推力はやや減少し抵抗も増加したことにより、船殻効率も Base に対して減少した。

Table 6 Evaluation factor results.

	Base	P.1	P.2	P.3
$R[\text{N}]$	44.91	45.67	45.03	45.33
$T[\text{N}]$	20.60	20.92	20.64	20.47
$1-t$	0.740	0.707	0.734	0.717
$1-w$	0.609	0.599	0.607	0.613
$\eta_H$	1.215	1.180	1.209	1.170

### 3. 7 推力向上のための改善案

プロペラ流入直前における流れ場を改善することにより推力を向上させる方法を検討した。まず、プロペラにとって高い推力が発生する流れ場は、回転するプロペラの翼に対して相対速度が大きくなるような流れがぶつかることである。翼断面では流入成分とプロペラの回転による相対速度成分の2つから迎角が決定し推力が生じている。図15に本計算のフィン取り付け無し時の  $X=-2060\text{mm}$  位置断面における  $Z$  方向速度成分を示す。ビルジ渦の影響により図に示すような向きの流れが生じており、赤矢印で示すプロペラの回転方向と同じ成分の存在により相対速度が小さくなっている部分があると推測される。図中の速度分布から内向きの下降流成分の方が上昇流成分より速く、周速を考慮しても内側の方が相対速度の減少割合が大きいと推測した。そのため内側の下降流成分の減少割合を最優先に考え、相対速度の低下を引き起こす流れを抑制する対策として新たな船尾フィンを取り付ける方法を考えた。

考案した船尾フィン及びP.2フィンを取り付けた外観を図16に示す。本フィンは単独での使用ではなく、図に示すようにP.2フィンを同時に付加した場合を想定した。P.2フィンではP.1, P.3よりわずかに下降流を抑制する作用があったため、下降流を事前に弱化させた上で追加フィンにより下降流の大幅な抑制が可能だと考えた。考案したフィンを  $X=-1930\text{mm}$  の位置に付加することで、前方から来る下降流の流れをフィン上面で妨げることにより下降流は減少し、妨げられた流れは左舷側へ流れ込み左側の下降流を増加させるのではないかと考えた。またプロペラ流入面に近づくにつれ下降流の領域が広がっていくことを考慮し、本フィンは後方にいくほど面積を大きくすることで下降流の発達に対応している。

追加フィンを用いることで下降流の抑制などプロペラ流入前の流れ場の変化による推力等の向上の可能性はあると考えた。

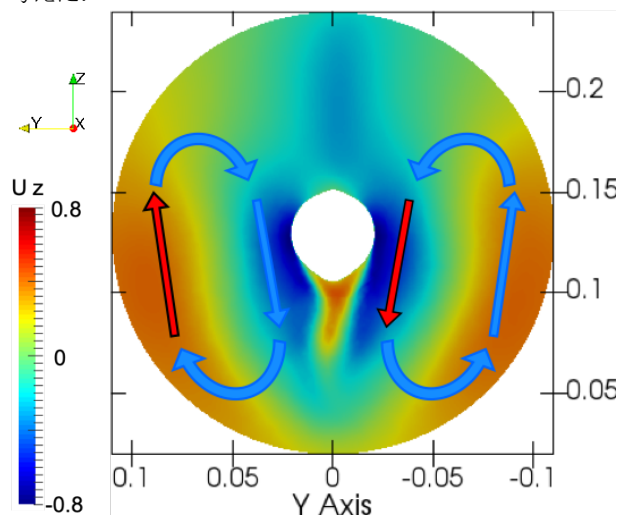


Fig. 15 Velocity distribution of the cross section at  $X=-2060\text{mm}$  without fin.

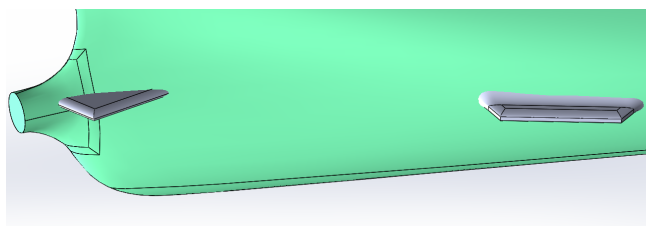


Fig. 16 Installation diagram of the invented fin and P.2 fin.

### 4. 結言

本研究では、プロペラ回転無し状態である曳航時とプロペラ有り状態である自航時の流体計算から基準となる船体抵抗や推力の取得及びビルジ渦の渦構造を確認した後に、ビルジ渦の抑制に有効なフィンを考案しビルジ渦と推進性能の関係について調査することを目的として数値計算を行った。その結果、船体に取り付けたフィンにより推力を増加させることができた。一方で、全抵抗も増えることとなり抵抗増加の割合から結果的に船殻効率は減少する結果となった。推力増加の要因としては、プロペラ流入直前におけるプロペラ回転直径の範囲内で低速領域が広範囲に広がるようにしてより均一な分布になったことによるものと考えられる。各ケースでの比較から、ビルジ渦がプロペラ面内より内側に存在する場合、低速領域がプロペラ面の中心付近に集中することでプロペラに流入する主流成分の割合も高くなり推力が減少することがわかった。抵抗の増加によって船全体での効率は減少したためフィンの形状は流線型かつ、より拡散的で弱化したビルジ渦をプロペラ面に導くことができる位置へのフィンの設置が望ましいと考えられる。またプロペラが推力を生み出す上で、プロペラ流入前における相対速度を減少させるように流れを抑制することが重要な要素であると言える。

以上のことを踏まえ、推力等の向上を狙いとしてビルジ渦による下降流の抑制を図る新たな船尾フィンを考案した。このフィンにより船尾の流れ場を変化させることで推進性能の向上を実現できると考える。

### 参考文献

- (1) 国土交通省, “SOx 規制への対応について”, [https://www.mlit.go.jp/maritime/maritime\\_fr7\\_000019.html](https://www.mlit.go.jp/maritime/maritime_fr7_000019.html)
- (2) 西垣亮 他, “CFD を用いた船型改良技術について—造波抵抗低減と推進効率の向上—”, 三菱重工技報, Vol.44 No.3, 48-51, 2007.
- (3) 明和海運株式会社, <http://www.meiwakaiun.com/meiwaplus/tips/tips-vol48/>
- (4) ジャパン マリンユナイテッド株式会社, <https://www.jmuc.co.jp/rd/development/hydrodynamics/energy-saving/>
- (5) 春日悠, “非圧縮流体の圧力-速度連成手法”, <http://penguinitis.g1.xrea.com/study/note/pressure-velocity.pdf>
- (6) 齋藤瑛, “波浪中航行時の馬力推定に関する基礎的研究”, 東京海洋大学大学院, 修士学位論文, 2014
- (7) JAPAN Bulk Carrier, Tokyo 2015 A Workshop on CFD in CFD Hydrodynamics, [https://t2015.nmri.go.jp/jbc\\_gc.html](https://t2015.nmri.go.jp/jbc_gc.html)