

フィン付舵の舵抗力低減効果に関する一考察

金丸, 崇
九州大学大学院工学研究院

吉武 朗
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/2324/7183302>

出版情報 : Conference Proceedings The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers.
34, pp.309-314, 2022-05-26. 日本船舶海洋工学会
バージョン :
権利関係 : ©日本船舶海洋工学会



フィン付舵の舵抗力低減効果に関する一考察

正会員 金丸 崇* 正会員 吉武 朗*
正会員 安東 潤*

A Study on Rudder Drag Reduction by Rudder Fin
by Takashi Kanemaru, *Member* Akira Yoshitake, *Member*
Jun Ando, *Member*

Key Words: Propeller-rudder interaction, Rudder fin, Rudder drag in slipstream

1. 緒 言

プロペラ後流中に置かれた舵は、プロペラが作り出す回転流によるエネルギー損失を回収し、推進性能にも寄与していることが知られている。この効果をさらに高めるため、プロペラ後流中の垂直翼としての舵に加え、水平翼としてフィン^{1),2)}を付加するフィン付舵が広く用いられている。

フィン付舵については、船体を含め、高度なシミュレーション技術等を用いた総合的な実用レベルでの調査研究が近年も盛んに行われている³⁾。一方、一般に知られている舵フィンの基本的な原理について詳細に示された例はあまり見受けられない。本論文では、プロペラ後流中で、特に舵と舵フィンが及ぼし合う影響に着目し、理論計算と模型実験から、フィン付舵の舵抗力低減効果について考察を行う。

2. プロペラ後流中の舵

プロペラ後流中における舵に作用する力について述べる。プロペラ後流場は軸方向の加速流と回転方向の旋回流を有する。プロペラ後流中の舵に作用する力 F_X を次の三つに大別する。

$$F_X = F_D + F_p + F_T \quad (1)$$

ここで、

F_D : 粘性抗力, F_p : 圧力抗力, F_T : 舵推力 (<0)

F_D は摩擦抵抗を主成分とする流体の粘性によって生じる抗力であり、一様流中でも作用する。プロペラ後流中にはプロペラ軸方向（主流方向）に加速域があり、圧力勾配を有する。プロペラ直後は高圧であり、無限後方では無限前方と同じ圧力に漸近する。舵は通常、圧力勾配が大きなプロペラ直後に置かれるため、前縁側（高圧）と後縁側（低圧）で圧力場に差を有し、抵抗が作用する（Fig. 1）。これを圧力抵抗 F_p とする。

一方、プロペラ後流中の舵には推力が作用する。Fig. 2 に示すように、プロペラ後流中の舵への流入速度ベクトルは、旋回流成分を有しているため、迎角を持った状態で配置されることが等価となる。これにより、流入速度ベクトルに垂直な方向に揚力が発生する。この揚力のプロペラ軸方向成分は前方を向くため、これが舵推力 F_T となる。

る。

舵推力 F_T はプロペラ後流中で、プロペラ推力に寄与しない旋回流成分を推力に変えるという、エネルギー損失の回収効果として得られるものである。

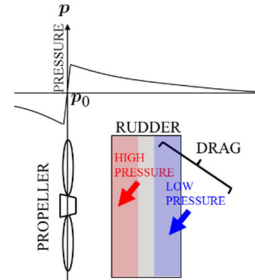


Fig. 1 Drag by pressure gradient.

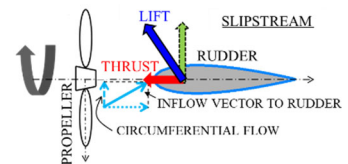


Fig. 2 Rudder thrust.

舵フィンも垂直翼（舵）が水平翼に置き変わったものであり、同様のメカニズムで舵推力 F_T を得る。しかし、舵フィンは舵を壁とした鏡像翼に近い点で、単一翼である舵と状態が異なる。

3. 模型実験

3.1 基準舵およびプロペラ

本論文では舵フィンの効果の基本的なメカニズムについて着目するため、矩形舵に単純な形状のフィンを付加して舵抗力を計測する。基準舵として、文献^{4),5),6)}と同様に森山ら⁷⁾によるプロペラ-舵干渉に関する研究で用いられた舵を採用する（Table 1（ORIGINAL））。

Table 1 Principal particulars of rudder.

NAME OF RUDDER	ORIGINAL (MR-27 ⁷⁾)
CHORD LENGTH (m)	0.200
SPAN LENGTH (m)	0.300
ASPECT RATIO	1.50
TYPE OF SECTION	NACA0015

模型プロペラも森山ら⁷⁾による研究で用いられた MP-B を用いる（Table 2, Fig. 3）。

Table 2 Principal particulars of propeller.

NAME OF PROPELLER	MP-B ⁷⁾
DIAMETER (m)	0.2389
NUMBER OF BLADE	5
PITCH RATIO AT 0.7R	0.679
EXPANDED AREA RATIO	0.610
HUB RATIO	0.179
RAKE ANGLE (DEG.)	9.17
BLADE SECTION	AU

* 九州大学大学院工学研究院

原稿受付 令和4年3月4日

公開日 令和4年5月19日

春季講演会において講演 令和4年5月26, 27日

©日本船舶海洋工学会



Fig. 3 Model propeller MP-B.

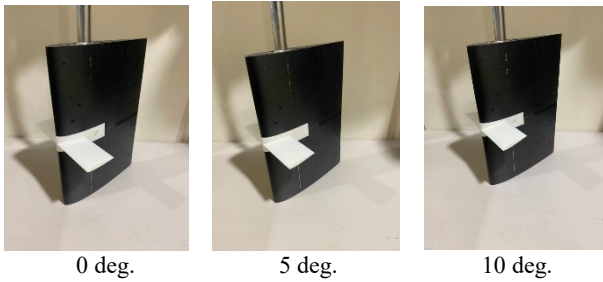
3.2 矩形フィン付舵

始めに、矩形フィン付舵を取り上げる。3.1節の基準舵に Table 3 に示す矩形フィンを取り付ける。Fig. 4 にフィンの取付角 0 度の舵形状を示す。本論文では、フィンの取付位置はラダーホーン部を想定し、舵角を与えたときのプロペラとの干渉は考慮しない。Fig. 5 に模型舵（取付角 0 度、5 度、10 度）を示す。舵フィンは 3D プリンタを用いて舵の嵌め込み部と一体で製作した。

Table 3 Principal particulars of rectangular fin.	
CHORD LENGTH (m)	0.050
SPAN LENGTH (m)	0.086
TYPE OF SECTION	NACA0012



Fig. 4 Rudder with rectangular fin.



0 deg. 5 deg. 10 deg.

Fig. 5 Model rudder with rectangular fin.

3.3 楕円フィン付舵

次に、本論文では楕円フィンを取り上げる。その着想に至った理由については後述する。Table 4 にフィンの主要目を、Fig. 6 に取付角 0 度の舵形状を示す。

Table 4 Principal particulars of elliptic fin.	
CHORD LENGTH (m)	0.050
SPAN LENGTH (m)	0.110
TYPE OF SECTION (Tip side)	NACA0012
TYPE OF SECTION AND MAXIMUM THICKNESS (m) (Root side)	NACA00XX 0.006



Fig. 6 Rudder with elliptic fin.

フィンは NACA0012 を基本形状としたが、ルート部で翼厚が薄くなり過ぎるため、最大コード長断面より内側では翼厚比ではなく、翼厚を一定とした。なお、フィンの翼面積は 3.2 節の矩形フィンに等しい。Fig. 7 に模型舵（取付角 0 度、5 度、10 度）を示す。



0 deg. 5 deg. 10 deg.

Fig. 7 Model rudder with elliptic fin.

3.4 プロペラ後流中の舵抗力計測

九州大学高速回流水槽にて逆 POT 形式によるプロペラ-舵干渉実験を行い、舵抗力等を計測した。Fig. 8 に高速回流水槽の概略図を、Fig. 9 に計測システムの概略図を示す。なお、プロペラ-舵前縁間距離 ℓ (Fig. 10) は 60mm とした。

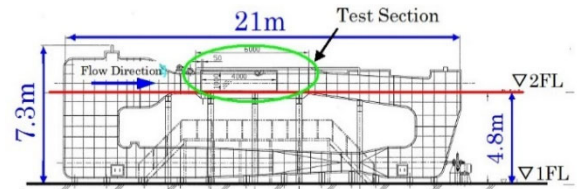


Fig. 8 High speed circulating water channel.

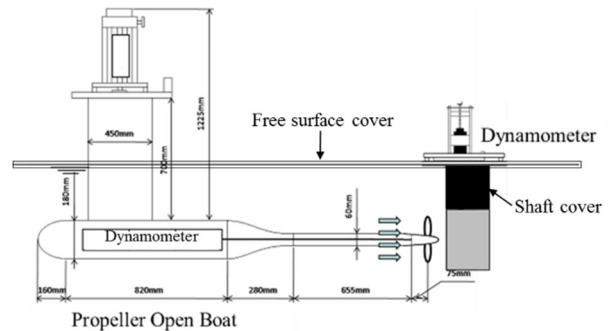


Fig. 9 Test section in operating condition.

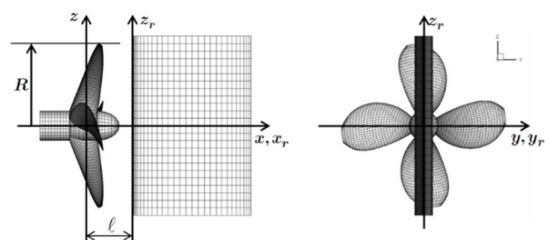


Fig. 10 Coordinate systems of propeller and rudder.

4. 計算法

プロペラと舵の干渉流体力の計算法として、文献 4),5),6)と同様に、非定常 SQCM を用いる。本論文では、この計算法を拡張し、舵フィンを取り付けたプロペラ-フィン付舵の計算法を開発した。Fig. 11, および 12 に矩形フィン付舵、および楕円フィン付舵のパネル分割図を示す。舵表面パネルとフィン表面パネルの干渉を避けるための工夫を施している。なお、フィンの揚力面 (QCM) については、左右のフィンの翼根渦を舵中央で結合させる一体翼モデルと舵表面に単独翼としてのフィンをついたのみのモデルがあるが、計算値と実験値との比較 (次章) から、一体翼モデルの方が現象を的確に表現できることが分かったため、これを採用する。

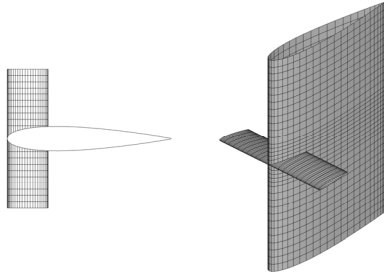


Fig. 11 Panel arrangement of rudder with rectangular fin (5 deg).

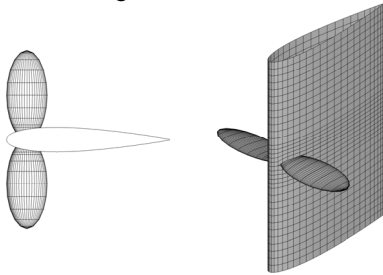


Fig. 12 Panel arrangement of rudder with elliptic fin (5 deg).

5. 考 察

舵抗力係数 K_{FX} を次式のように定義する。

$$K_{FX} = \frac{F_X}{\rho n^2 D^4} \quad (2)$$

ここで、 F_X は舵抗力、 ρ , n , および D は流体密度、プロペラ回転数、およびプロペラ直径である。

始めに、フィンが無い通常舵について、推力係数 K_T 、トルク係数 K_Q 、舵抗力係数 K_{FX} を Fig. 13 に示す。いずれも設計点 ($J = 0.405$, J はプロペラ前進係数) 付近では計算により実験を表現できている。ただし、高荷重状態では計算が不安定となるため $J = 0.2$ は計算対象から除外する。

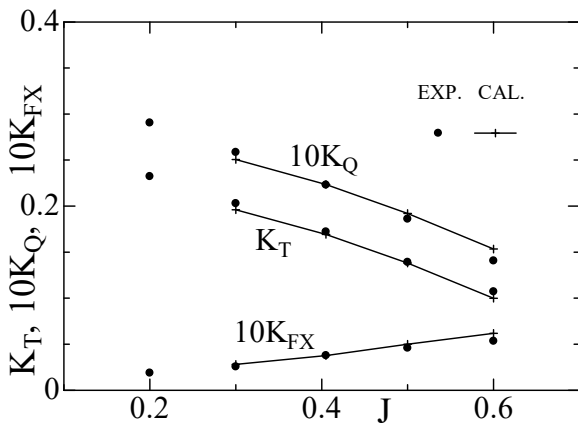


Fig. 13 Propeller performance with ORIGINAL rudder.

Fig. 14 に実験, および計算によって得られた矩形フィン付舵の舵抗力係数 K_{FX} を示す。実験値を見ると、高荷重状態ではフィンにより舵抗力が減少しているが、荷重量が下がるとフィン無し舵の方が、舵抗力が小さい。舵フィンの効果が荷重量に依存することは一般に知られている¹⁾。計算値は、実験値の傾向をおおそ表現できている。取付角 10 度で舵抗力が大きくなるのは、フィンへの流入迎角が小さくなり、舵推力を生み出す揚力が発生しなくなるためであるが、実験では取付角 0 度のフィンも高荷重状態で舵抗力が大きくなっている。これは、逆に流入迎角が大きすぎることで、実験では失速を起こしているためと推察される。

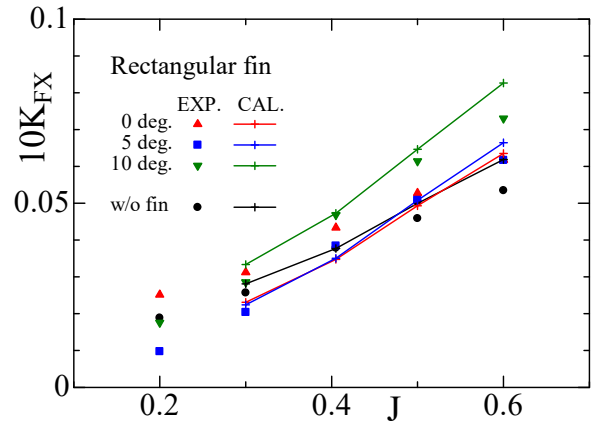


Fig. 14 Drag of rudder with rectangular fin in slipstream.

Fig. 15 に計算によって得られた矩形フィン付舵の舵抗力係数を舵本体の成分 K_{FXR} とフィンの成分 K_{FXF} に分けて示す。実線が舵本体、破線がフィンを示す。取付角 0 度はフィンにより大きな推力が得られているが、舵本体の抗力も大きくなっている。全体的にフィンの推力 (負の抗力) が大きいほど舵本体の抗力が大きくなると言える。Fig. 14 で見られる舵抗力にあまり差異がなくても、舵本体とフィンを別々に見ると、取付角による変化が大きいことが分かる。

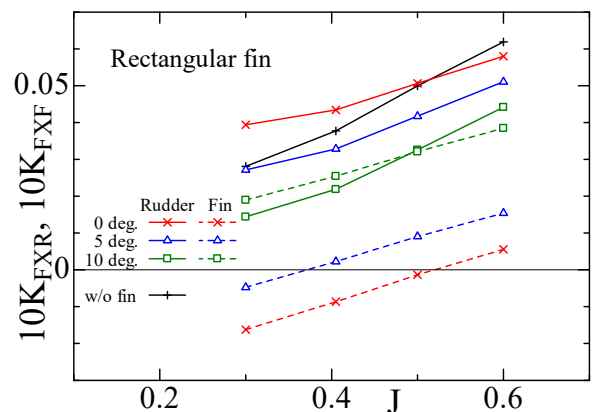


Fig. 15 Drag of rudder and rectangular fin in slipstream.

Fig. 16, および 17 に $J = 0.405$ における舵抗力分布、およびフィンの抗力分布を示す。これらは、コード方向同列のパネル上の圧力積分値からパネルの幅で除して求めた。フィンの取付角を変えると主にフィン近傍の舵断面内部で抗力の変化が大きくなることが分かる。フィンが推力発生装置として効くことは、旋回流を弱め、損失エネルギー

ギーのうち、舵による回収分を減らしているとも解釈できる。このように、舵とフィンによる損失エネルギーの回収には、ある程度、トレードオフの関係があると言える。とは言え、当然ながら、フィン推力を稼ぐことを目標とした方が、全体の舵抗力を小さくできる。

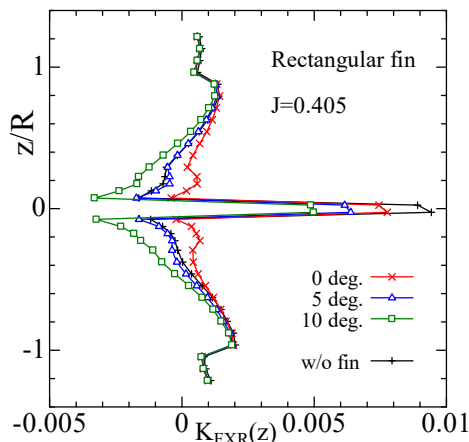


Fig. 16 Drag distribution of rudder with rectangular fin.

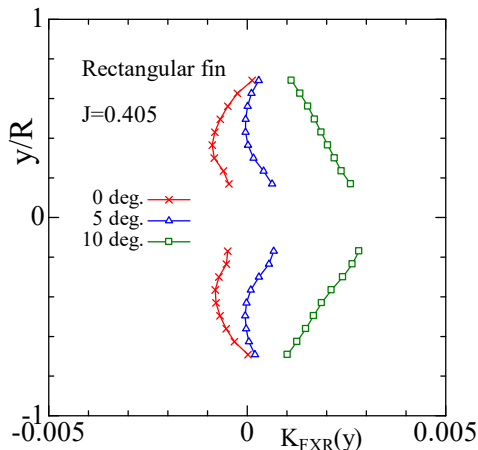


Fig. 17 Drag distribution of rectangular fin.

ところで、Fig.17 のフィンの抗力分布中の取付角 0 度を見ると、フィンは舵を壁とする鏡像効果が得られているであろうにも関わらず、翼根で推力が落ちる。これは、翼根も翼端に似た 3 次元特性を有しているとも捉えられる。そこで、本論文では、誘導抗力の低減に優れることが知られている楕円フィンを試みた。これが Fig. 6, 7, 12 に示す楕円フィン付舵である。

Fig. 18 に実験、および計算によって得られた楕円フィン付舵の舵抗力係数 K_{FX} を示す。矩形フィン (Fig. 14) では取付角 0 度の高荷重状態において失速によると考えられる抗力の増大が見られたが、楕円フィンでは見られず、実験値が安定しており、計算値との一致も良好である。取付角 0 度を見ると、高荷重状態において大幅な舵抗力低減が得られており、実験、および計算共に、設計点 ($J = 0.405$) でもフィン無しに比べ舵抗力低減が得られている。

Fig. 19 に Fig. 15 と同様に、楕円フィン付舵について抗力を舵本体とフィンに分けて示す。 $J = 0.3$ の取付角 0 度について、矩形フィン (Fig. 15) と比較すると、楕円にすることにより、フィン部で約 2 倍の推力 (負の抗力) が得られている。一方、舵本体の抗力についてはさほど差異はない。すなわち、楕円フィンは、フィンにより大きな推

力を得るのみならず、推力と引き換えに生じる舵本体の抗力増大も抑える効果があると言える。

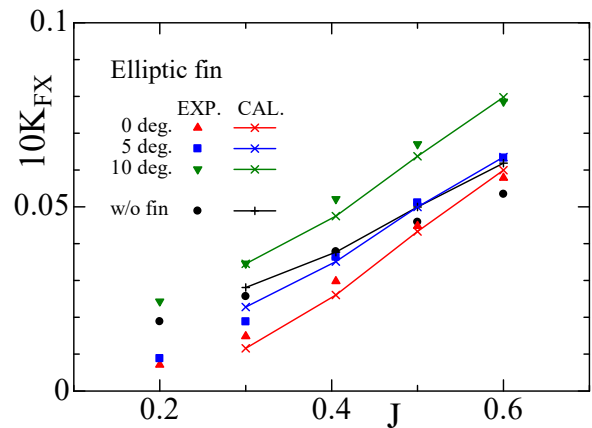


Fig. 18 Drag of rudder with elliptic fin in slipstream.

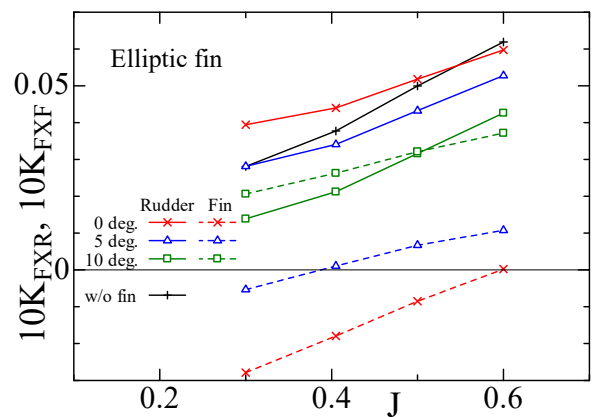


Fig. 19 Drag of rudder and elliptic fin in slipstream.

Fig. 20, および 21 に $J = 0.405$ における舵抗力分布、およびフィンの抗力分布を示す。舵本体の抗力分布については、矩形フィン付舵の場合 (Fig.16) とさほど差異がないが、フィンの抗力分布について、推力が得られる取付角 0 度を見ると、矩形フィン付舵の場合 (Fig.17) と異なり、フィン翼根部でも推力が得られていることが分かる。矩形フィンと楕円フィン、それぞれの最適取付角どうしを比較することが望ましいが、大まかな比較として、Fig. 22, および 23 に両者を重ねて示す。楕円フィンは矩形フィンに比べ、翼端、および翼根でも推力を得ていることが分かる。

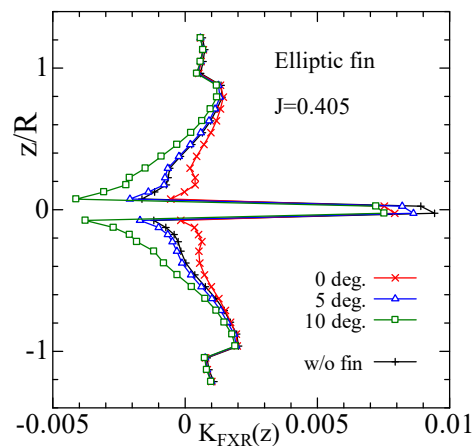


Fig. 20 Drag distribution of rudder with elliptic fin.

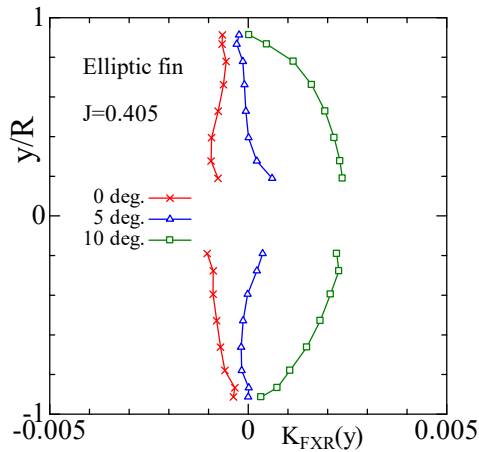


Fig. 21 Drag distribution of elliptic fin.

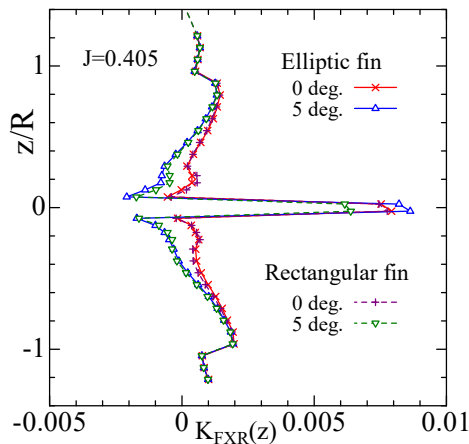


Fig. 22 Comparison of rudder drag distribution with fin.

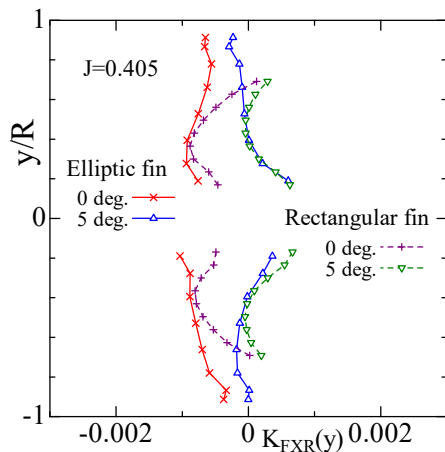


Fig. 23 Comparison of fin drag distribution.

Fig. 24 に $J = 0.405$, 取付角 0 度における矩形フィン、および楕円フィンのフィン表面圧力分布を比較する。両者でスパン長が異なるがフィン形状の面積は等しい。楕円フィンの方が負圧の面積が広く、翼根、および翼端でも前縁の局所負圧が見られる。

一般に、舵フィンは台形翼が採用されるため、翼端については楕円翼に近い効果が得られるかもしれないが、翼根でも翼弦長を絞った方が有利となる可能性がある。しかし、実際の設計ではフィンの構造強度との兼ね合いを考慮する必要があるであろう。

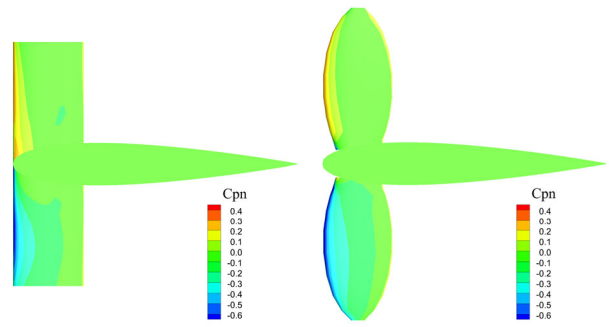


Fig. 24 Pressure distribution on fin surface ($J = 0.405$, 0 deg).

5. 結 言

本論文では、矩形舵に矩形フィン、および楕円フィンを取り付けた単純形状のフィン付舵を取り上げ、それぞれのプロペラ後流中の舵低減効果について、模型実験と理論計算の両面から考察を行い、次の結果を得た。

- 本論文中で開発した非定常 SQCM によるプロペラ-フィン付舵の干渉計算は、実験値を定性的にも定量的にも表現できる。
- フィンの取付角を変えることにより、フィンの推力を増加させると、舵本体の抗力は増加する。なお、舵抗力全体で見たときの抗力の変化が小さくても、舵本体、およびフィン部の抗力は大きく変化している。
- 矩形フィンの推力分布を見ると、翼根部では推力が小さく、鏡像効果のメカニズムとは現象が異なる。
- 翼根部のコード長が小さくなる楕円フィンを考案し、実験と計算により、特に高荷重状態での大きな舵抗力低減効果を示した。また、計算により矩形フィンよりも大きな推力が発生することを示した。

今後、CFD による数値シミュレーションを用いた実証、および実用を考慮した舵フィンの考案等に取り組みたい。

謝 辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP20K04941 の助成を受けて行った。ここに謝意を示す。

参 考 文 献

- 森正彦, 山崎禎昭, 藤野良亮, 太田垣由夫: IHI A. T. Fin-第1報 原理および開発の要点-, 石川島播磨技報, Vol. 23, No. 3, pp.266-273, 1983.
- 岡本幸彦, 笠原良和, 福田正篤, 白木東: 船舶用省エネルギー装置 NKK-SURF の開発, NKK 技報, No. 132, pp.78-84, 1990.
- 金丸崇, 日夏宗彦: 省エネ技術 (第 10 章), GHG 排出量ゼロに向けた船舶流体力学の現状と展望, 日本船舶海洋工学会 推進・運動性能研究会シンポジウム, 2020.
- 金丸崇, 吉武朗, 安東潤: 後退角付舵の省エネ効果に関する研究, 日本船舶海洋工学会講演論文集, 第 22 号, pp.281-286, 2016.
- 金丸崇, 吉武朗, 安東潤: 前縁に切り欠き部を有する高推力舵の省エネ効果に関する研究, 日本船舶海洋工学会講演論文集, 第 24 号, pp.483-488, 2017.
- 金丸崇, 吉武朗, 安東潤: 後退角及び切り欠き部を有する高推力舵の省エネ効果に関する研究, 日本船舶海洋工学会講演論文集, 第 26 号, pp.557-488, 2018.

- 7) F. Moriyama : On the Effect of a Rudder on Propulsive Performance, 日本造船学会論文集, 第 150 号, pp.63-73, 1981.