

令和 5 年 6 月 4 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04941

研究課題名（和文）新形式省エネ舵の性能向上に関する研究

研究課題名（英文）Study of new type energy saving rudder for high performance

研究代表者

金丸 崇（Kanemaru, Takashi）

九州大学・工学研究院・准教授

研究者番号：90612127

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、プロペラが後流場を作り出す旋回流によるエネルギー損失を効率良く回収し、推進性能を向上させるための舵として、フィン付舵を取り上げ、理論的基礎検討から水槽模型実験、PIV、CFDによるシミュレーションに取り組んだ。フィン付舵自体は、実用化されているが、研究代表者は流体力学、特に翼理論に基づく省エネメカニズムの詳細を調べ、フィン形状を楕円にすることにより、一般的に用いられている形状のフィンよりも、大きなフィン推力が得られ、舵抗力が低減することを示した。また、プロペラの推力の変化まで考慮した、プロペラ-舵系の推進効率についても優れることを、理論計算、CFD、および水槽模型実験により示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

プロペラ-舵の干渉を利用した様々な省エネデバイスが実用化されている。一方、これらに関する研究は、船体を含めた自航要素の評価で行われるものが殆どである。実用の設計上、自航要素の評価は重要であり、当然着目すべきである。しかし、複雑な現象の流体力学的な干渉を詳細に知るには、より基本的な検討が望ましい。本研究ではプロペラと舵のみの干渉に着目し、フィン付舵の効果について詳細を調べ、フィンと舵本体の推力にはある程度トレードオフの関係があること、フィンは壁（舵面）に付加されているにもかかわらず鏡像効果を有しない等、これまでに着目されなかった流体力学的見地からの考察を示しており、学術的意義が大きいと考える。

研究成果の概要（英文）：In this study, we take rudders with fin which efficiently recovers the energy loss due to the circumferential flow generated by the propeller and improves the propulsive performance. The theoretical fundamental study, model test using the circulating water channel, and development of a newly-type rudder fin are conducted. Typical rudder fins are practical and widely used as energy saving devices. In this study, the effect of the rudder fin is investigated in detail based on fluid dynamics and wing theory. As a result, it is found that elliptic fins obtain the larger thrust which reduces the rudder drag. Also, it is shown that the propeller-rudder propulsive efficiency considering the change of propeller thrust is improved by theoretical calculation, CFD, and the model test.

研究分野：船舶海洋流体工学

キーワード：プロペラ-舵干渉 省エネ舵 フィン付舵 プロペラ後流 舵推力 舵抗力

様式 C - 19 , F - 19 - 1 , Z - 19 (共通)

1 . 研究開始当初の背景

船舶の省エネデバイスの中に、プロペラ後流中でプロペラが作る出す旋回流によるエネルギー損失を推力に変えて回収するタイプがある。舵も實際上、このタイプの一つであり、さらに舵の形状を工夫する、あるいは付加物を設けることにより、性能向上を狙う舵を省エネ舵と呼び、研究代表者もプロペラ-舵の干渉を考慮した新形式省エネ舵の考案、改良に取り組んでいる。

省エネデバイスは、船体をも考慮した自航要素で評価することが実用設計上必要である。しかし、船体、プロペラ、および舵の干渉は複雑であり、省エネデバイスの推進性能への寄与のメカニズムを説明することは容易ではない。

プロペラ後流中でエネルギー損失を回収するデバイスである省エネ舵の場合、その基礎的なメカニズムを確認する方法として、船体を入れずに、プロペラと舵の干渉のみに着目することが考えられるが、このような基礎的な研究例があまり見られない。

2 . 研究の目的

本研究では、研究代表者らが開発した、パネル法によるプロペラ-舵干渉の理論計算ツールを駆使し、独創的な新形式省エネ舵を開発することを目的とする。特に、プロペラ-舵干渉による流体力学的省エネ効果を追究する。なお、船体は考慮しない。舵抗力のみならず、プロペラ推力・トルクの変化についても着目し、プロペラ-舵系効率として、その性能を評価する。

また、研究代表者の所属する研究室が所有する高速回流水槽を用いたプロペラ-舵干渉実験、PIV による干渉流場計測、CFD による数値シミュレーションも実施し、力のみならず流場についても詳細に調べ、良好な結果を得た省エネ舵については、そのメカニズムの確認、解明まで行う。

3 . 研究の方法

(1) パネル法 SQCM (Source and QCM) によるプロペラ-舵干渉計算ツールの改良

研究代表者らが開発した、パネル法によるプロペラ-舵干渉の理論計算ツールは、九州大学で開発された簡便なパネル法である SQCM (Source and QCM) をプロペラと舵に適用し、同時に解く計算法である。ポテンシャル計算ではあるが、定性的な傾向を表現できる。しかし、計算値は高荷重状態で過大な推力 (過小の抗力) を与えてしまうという問題があった。本研究では次に述べる計測値を用いて、高精度な計算を実現するための改良に取り組む。

(2) プロペラ-舵干渉時のプロペラ推力・トルク、舵抗力計測

基準舵 (付加物無し)、および考案した舵について、研究代表者が所属する研究室所有の高速回流水槽 (図 1) を用いて逆 POT 方式によるプロペラ-舵干渉実験 (図 2) を行い、プロペラ推力・トルク、舵抗力を計測する。

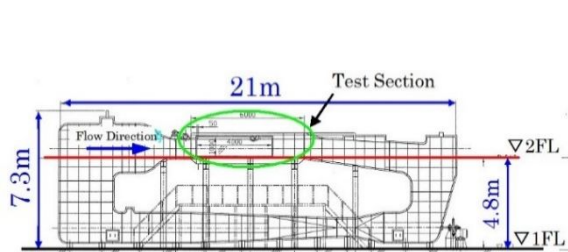


図 1 高速回流水槽

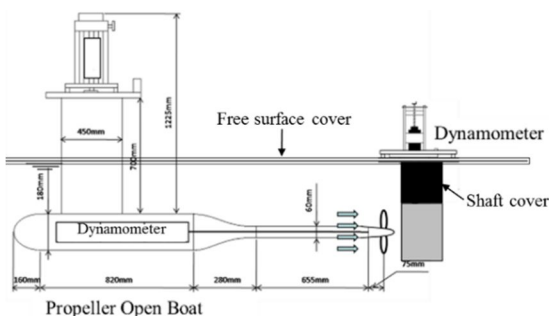


図 2 計測洞内

舵の検力計に作用する力の中に、舵軸の抵抗が含まれないように、舵軸をカバーで覆う。また、自由表面影響を取り除くため、水面に制波板を設置する等、高精度な計測に努める。なお、プロペラの検力計は舵のそれより容量が 1 桁以上大きいため、プロペラ推力・トルクの僅かな計測誤差でもプロペラ-舵系効率に大きく影響する。安定且つ高精度な計測値を得るため、比較、考察の対象とする一連の系統試験は、全て同日中に 1 日で行う。

(3) PIV (Particle Image Velocimetry) によるプロペラ-舵干渉時の流場計測

プロペラ単独の後流場に比べ、プロペラ-舵系の後流場は旋回流成分が小さいことが知られているが、これは、プロペラが作り出す旋回流によるエネルギー損失を舵が回収した結果として現れるものである。省エネ効果を有する舵は、この旋回流成分がより小さいことが予想される。これを実際の現象で確認するため、研究代表者が所属する研究室所有のステレオ PIV (Particle Image Velocimetry) システムを用いた流場計測を行う。プロペラ単独の場合、2 台のカメラを計測洞の両側に配置して行えるが、プロペラ-舵干渉流場の場合、舵の存在により 2 台のカメラで同じ位置を撮影することができない。この問題を解決するため、本実験では同一方向からの撮影を試みる (図 3.4)。なお、焦点の問題から同時に計測する領域が限られるため、高さ方向の計測幅を設定し、カメラ固定でプロペラオープンボートの深度を変更させて計測する。短冊状に得た計測面の計測結果をつなぎ併せることで後流場全面の計測値を得る。

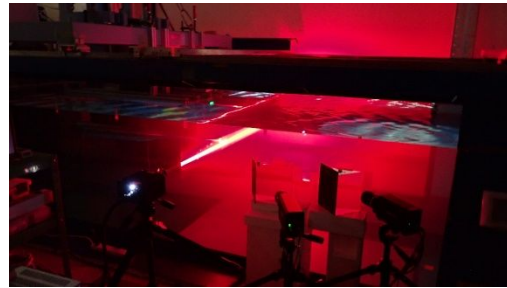
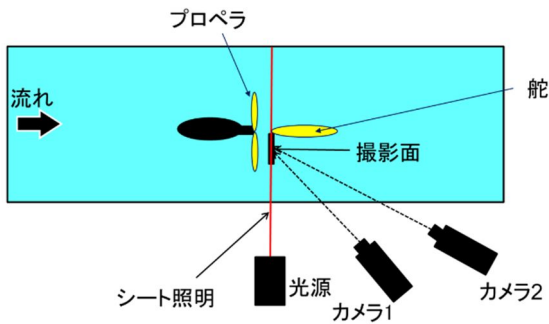


図3 計測機器配置図

図4 計測の様子

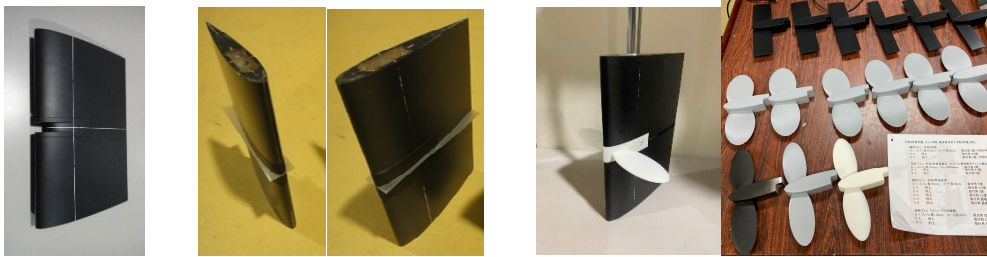
(4) CFDによるプロペラ-舵干渉数値シミュレーション

前述のパネル法によるプロペラ-舵干渉の理論計算は、後流渦面がモデル化に依るため、舵による後流渦の攪乱等、実際の複雑な流れを表現することが難しい。そこで本研究ではCFDによるプロペラ-舵干渉数値シミュレーションにも取り組む。計算にはMSCソフトウェア製の非構造格子系汎用熱流体解析ソフト SCRYU/Tetra を用いる。計算は非定常で行い、乱流モデルとして SST-k- ω モデルを採用する。

4. 研究成果

(1) 新形式省エネ舵の考案

本研究は3年(R02~R04年度)に渡って実施したが、試行錯誤を繰り返し様々な省エネ舵を取り扱った(図5)。本報告では最終的な成果である楕円フィン付舵について述べるが、初めに、この舵に至るまでの経緯を示す。



(a)切り欠き付高推力舵 (b)翼中央板付舵 (c)楕円フィン付舵(右:フィン部)
図5 考案した新形式省エネ舵

切り欠き付高推力舵(図5(a), 開始前~R02年度)

プロペラ中心線の延長線上にあたる舵前縁部に切り欠きを設け、舵によるハブ渦の攪乱を遅らせることにより、旋回流によるエネルギー損失を効率よく回収し、より大きな舵推力を得る舵である。舵抗力を減少させる(舵推力を増加させる)効果は認められたが、一方で、舵の排除効果によるプロペラ推力の増加量が通常舵より小さくなることが分かった。本研究では、排除効果を小さくする省エネ舵は、非効率で、効果が小さいと判断した。

翼中央板付舵(図5(b), R02年度)

図6に示すようにプロペラ後流場の舵断面への流入速度ベクトルは旋回流成分を有するため、迎角を有する状態と等価となる。従って、流入速度ベクトルに垂直な方向に揚力が発生し、揚力のプロペラ軸方向成分が舵推力として作用する。一方、この揚力の向きはプロペラ中心線の延長線を境に舵上下で逆となり、且つ、循環分布の連続性から翼中央部では揚力が発生しないと推察される。そこで、研究代表者は翼端版と同様の効果を有する平板を翼中央部に配置し、翼中央部で図7中の破線で示す鏡像効果を与え、大きな推力を発生させる舵として、翼中央板付舵を考案した。しかし、模型実験により、鏡像効果を得るには大きな翼中央板が必要となる一方で、翼中央板の摩擦抗力も大きくなり、省エネ舵としての効果が得られなかった。

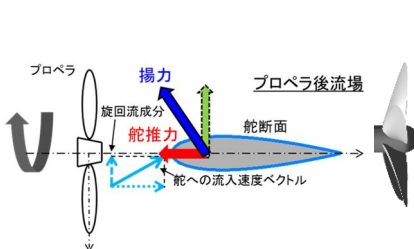


図6 舵推力図

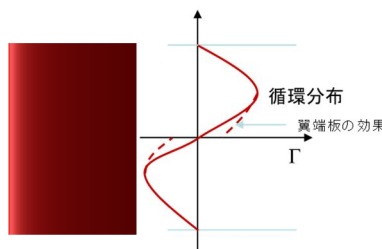


図7 プロペラ後流中舵の循環分布

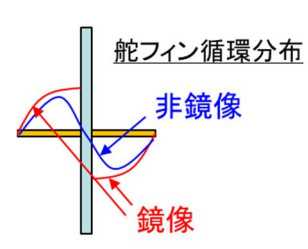


図8 フィンの循環分布

楕円フィン付舵 (図 5(c), R03, R04 年度)

既に実用化され、広く用いられている省エネ舵の一つにフィン付舵がある。これは、フィンに舵本体と同様の流体力学的メカニズム (図 6) が作用することにより、より舵推力を得るものであり、旋回流によるエネルギー損失をより効率的に回収するものである。

フィンは舵本体に対して小さいため、フィンには舵面を壁とする鏡像効果が作用し、翼根で大きな推力が得られていると、推察される。しかし、理論計算や CFD によるフィンの翼幅方向推力分布から、舵本体と同様に、鏡像効果は得られていないことが分かった。従って、翼根は舵面に付着しているものの、翼理論上、翼端と同じである (図 8)。そこで、研究代表者は、揚抗比に優れる楕円翼を採用することで、大きな推力、および優れたプロペラ-舵系効率を得られると考えた。本報告では、この楕円フィンについての成果を述べる。

(2) プロペラ-舵干渉時のプロペラ推力・トルク、舵抗力の計測値と計算値を用いた考察
フィン付舵

図 9 に矩形フィン付模型舵 (取付角左から 0 度, 5 度, 10 度) を示す。舵フィンは 3D プリントを用いて舵の嵌め込み部と一体 (図 5(c)右) で製作している。図 10 に同様に楕円フィン付舵を示す。両者は最大コード長と翼面積が同じである。

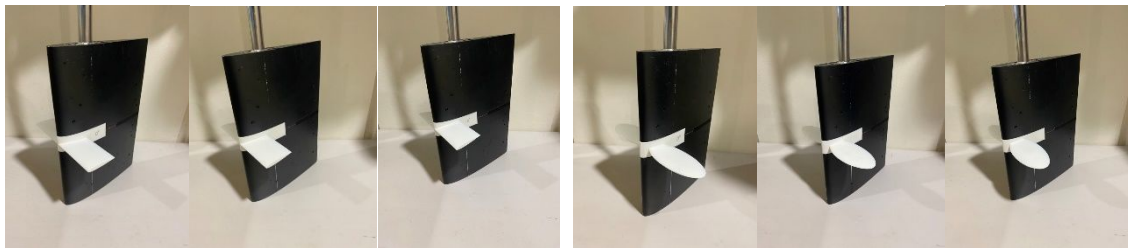


図 9 矩形フィン付舵 (取付角 0, 5, 10 度) 図 10 楕円フィン付舵 (取付角 0, 5, 10 度)

図 11, および 12 に矩形フィン付舵, および楕円フィン付舵の舵抗力係数 K_{FX} を示す。

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

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。高荷重状態ではフィンにより舵抗力が減少し、低荷重度ではフィン無しの方が良いという理に適った傾向が得られており、取付角による差異についても計算と実験で傾向が一致している。また、図 11 と図 12 を比較すると、楕円フィン付舵の方が、舵抗力が小さいことが分かる。

プロペラ-舵系の効率 η_{PR} を以下のように定義する。

$$\eta_{PR} = \frac{J}{2\pi} \frac{K_T - K_{FX}}{K_Q}$$

ここで、前進係数 J , 推力係数 K_T , トルク係数 K_Q である。図 13, および 14 に η_{PR} の設計点付近を拡大して示す。同じ J (図中マーク) について、フィン無しからの J のズレや取付角による大小関係が実験と計算でよく一致している。図 14 に示す楕円フィンの方が、明らかに効率が優れており、最高効率は実験、計算とも取付角 0 度で得られ、計算ではフィン無しに比べ 0.8%, 実験では 1.3% の向上が得られている。

(3) PIV によるプロペラ-舵干渉時の流場計測

図 15 に舵後方の横断面について、PIV による軸方向速度分布、面内流れの速度ベクトルを、プロペラ単独、フィン無し舵と比較して示す。舵があることにより、プロペラのエネルギー損失を回収した結果として旋回流成分 (ここでは面内流れの速度ベクトルの大きさ) が幾分小さくなっているが、フィンを有することにより、より小さくなっていることが分かる。このように、理論計算、および力の計測値を裏付ける結果が得られた。しかし、局所的に不合理な流れが見られる等、精度が不十分であり、定量的にも信頼できる計測システムの構築が今後の課題である。

(4) CFD によるプロペラ-舵干渉数値シミュレーション

図 16 に CFD によるフィン部の圧力分布を示す。青が負圧を示す。最もフィン推力が発生する取付角 0 度が最も背面の負圧が大きく、大きな揚力、すなわち大きな推力を得ていることが分かる。図 17 に CFD から得られた楕円フィン付舵の舵抗力を実験値と比較して示す。フィン無し舵との差異、および各取付角による差異について、大小関係が実験と計算で一致しており、定性的には CFD で高精度な推定が可能である。しかし、計算値は実験値に比べ、全体的に舵抗力が大きく、定量的には大きな差異がある。この原因の一つはメッシュサイズと思われる。プロペラ-舵干渉問題の場合、プロペラ単独計算と異なり、プロペラ後流場のかなりの広範囲でメッシュを細かくする必要がある。特にハブ渦まわりではさらに細分割が必要となるため、今後の課題として、大規模な計算に取り組みたい。

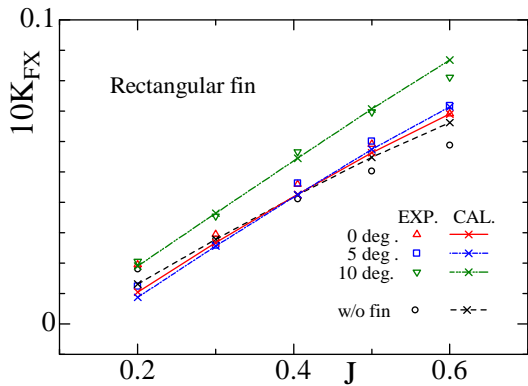


図 11 舵抗力 (矩形フィン付舵)

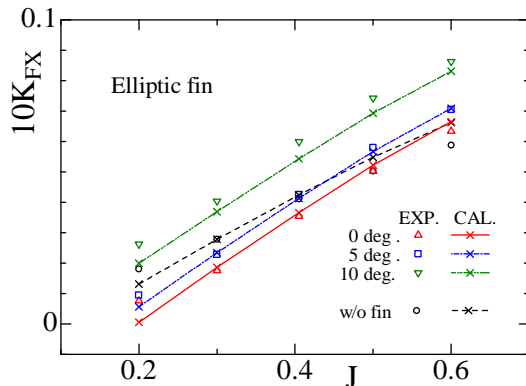


図 12 舵抗力 (楕円フィン付舵)

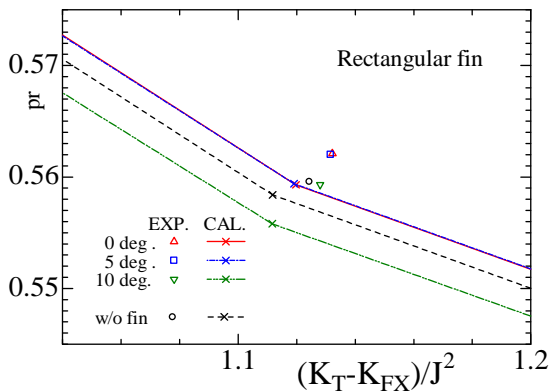


図 13 プロペラ-舵系効率 (矩形フィン付舵)

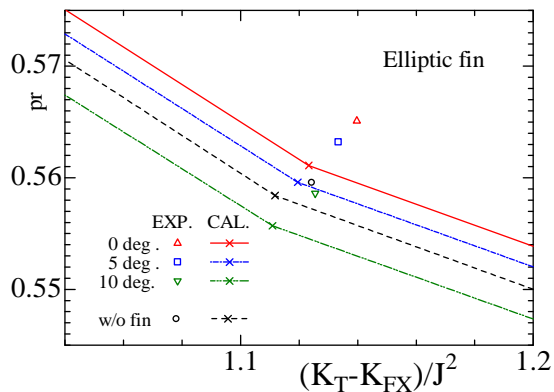


図 14 プロペラ-舵系効率 (楕円フィン付舵)

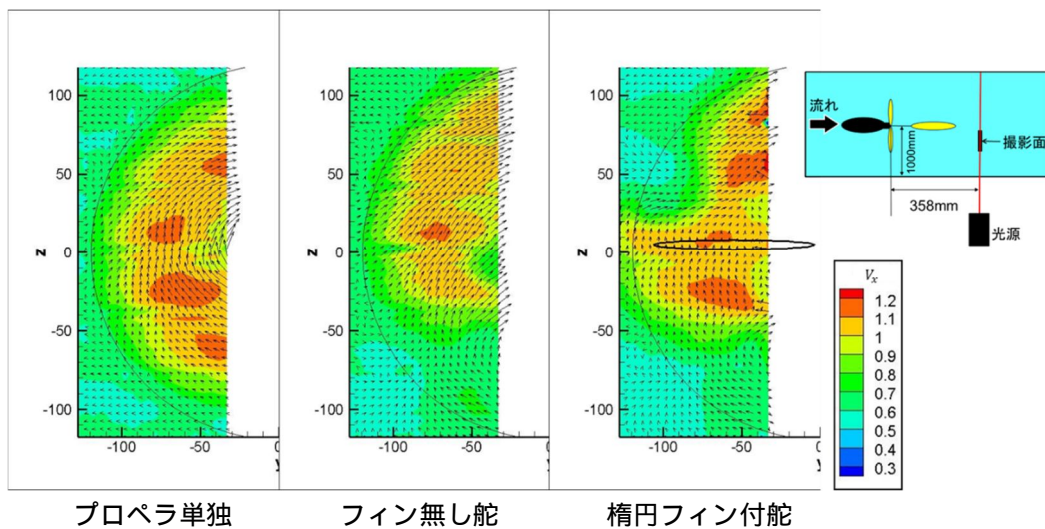


図 15 PIV によるプロペラ後流場の流速分布 (舵後流場)

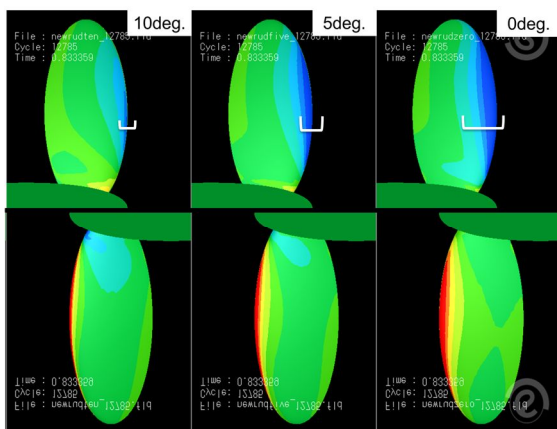


図 16 CFD によるフィン部表面圧力分布

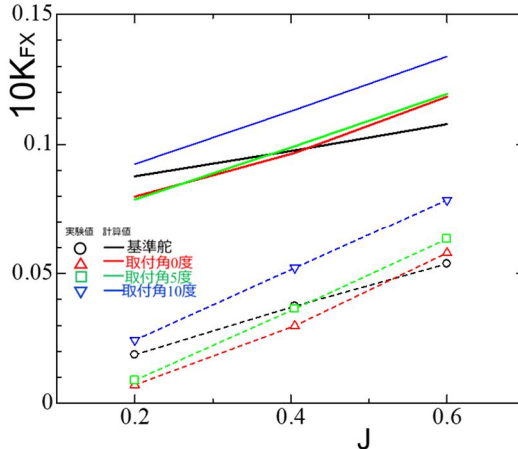


図 17 CFD による舵抗力 (楕円フィン付舵)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 金丸崇, 吉武朗, 安東潤	4. 巻 第34号
2. 論文標題 フィン付舵の舵抗力低減効果に関する一考察	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本船舶海洋工学会講演会論文集	6. 最初と最後の頁 309-314
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takashi Kanemaru, Akira Yoshitake, Jun Ando	4. 巻 1
2. 論文標題 A Fundamental Study on Rudder Drag Reduction by Rudder Fin	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 7th International Symposium on Marine Propulsors	6. 最初と最後の頁 334-340
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 金丸崇, 吉武朗, 安東潤	4. 巻 第35号
2. 論文標題 フィン付舵の舵抗力低減効果に関する一考察 - 続報: プロペラ-舵系推進効率 -	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本船舶海洋工学会講演会論文集	6. 最初と最後の頁 673-676
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 金丸崇
2. 発表標題 フィン付舵の舵抗力低減効果に関する一考察
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会令和4年度春季講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takashi Kanemaru
2. 発表標題 A Fundamental Study on Rudder Drag Reduction by Rudder Fin
3. 学会等名 7th International Symposium on Marine Propulsors (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金丸崇
2. 発表標題 フィン付舵の舵抗力低減効果に関する一考察 - 続報：プロペラ-舵系推進効率 -
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会令和4年度秋季講演会
4. 発表年 2022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