

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K18294

研究課題名(和文) プロペラ後流中における省エネ舵の流体力学的性能に関する研究

研究課題名(英文) Study on Energy Saving Effect of High Thrust Rudder in Propeller Slipstream

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)：船用プロペラの後流中に置かれる舵は、プロペラが作り出す旋回流から推力を得ることが知られており、プロペラ-舵の流体力学的干渉を積極的に利用した省エネ舵がこれまでもいくつか開発、実用化されている。本研究は、プロペラ中心線の延長線上に位置する舵の前縁部に切り欠きを与えることで、大きな舵推力を得るといふ、これまでにないタイプの新形式省エネ舵(以下、高推力舵)を提案し、理論的、及び実験的にその効果を検証したものである。本研究によって高推力舵の省エネ効果、及び高効率のメカニズムが示され、今後の実用化に向けた基礎資料が得られた。

研究成果の概要(英文)：The rudder behind the propeller generates the thrust owing to the circumferential flow in the propeller slipstream. Some researchers developed the low drag rudders using the propeller-rudder interaction. This study presents the newly developed rudder 'High Thrust Rudder' which has U-shaped notch at the leading edge on the extended line of the propeller shaft center line in order to obtain the low drag more effectively comparing with the conventional rudder. Experiment and calculation are conducted in this study and the energy saving effect by the developed rudder was confirmed.

研究分野：船舶海洋流体力学(推進性能)

キーワード：プロペラ舵干渉 低抵抗舵 プロペラ後流 舵抵抗計測 SQCM

1. 研究開始当初の背景

船用プロペラ（以下、プロペラ）後流中に置かれる舵は、操縦性能のみならず、推進性能にも大きく影響し、プロペラが作り出す旋回流成分から推力（以下、舵推力）を得ることが知られている（図1）。より大きな舵推力を得て舵抵抗をできるだけ減じようとした省エネ舵やフィン付舵等がこれまでに開発、実用化されているが、省エネのニーズが高まる今日において、更なる性能向上が求められている。

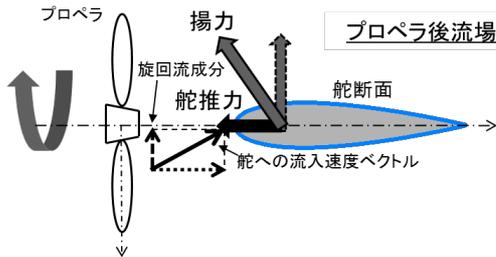


図1 プロペラ後流中の舵（舵断面）

研究代表者らは、プロペラ-舵の流体力学的干渉に関する理論的研究に取り組んできた結果、実際の現象における舵抵抗が理論計算による値ほど小さくならない原因として、舵自身の存在によるハブ渦の攪乱が大きいことを見出すと共に、ハブ渦が攪乱されるのを遅らせる（ハブ渦強さをできるだけ後流まで保たせる）ような舵を開発することで、大きな舵推力が得られると考えた。

このようにして得られた知見から、研究代表者らはこれまでにないタイプの新形式省エネ舵である高推力舵を考案した。高推力舵は図2に示すように、舵前縁でハブ渦が流入する位置にコの字型の切り欠きを与え、上下に分断させることでハブ渦の流路を確保する形状となっている。これによって、舵前縁側の広範囲に渡って旋回流成分が有効に作用し、大きな舵推力が得られると考えるものである。

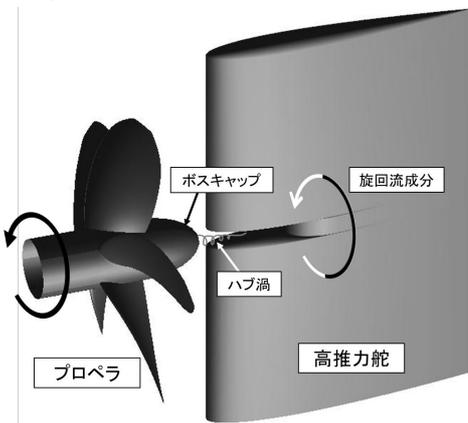


図2 高推力舵

2. 研究の目的

本研究は、高推力舵の性能を理論的、及び実験的に検証し、その効果を確認することを目標とする。具体的には次の2つの目的に大

別する。

(1) プロペラ-高推力舵干渉の理論的シミュレーションツールの開発

研究代表者らは九州大学で開発されたパネル法 SQCM を用いたプロペラ-舵の干渉シミュレーションツールを開発した。本研究ではこのツールをベースとし、切り欠き部の効果が表現できる計算モデルの開発を目的とする。

(2) 高推力舵模型の設計、製作

(1)で開発したシミュレーションツールを用いて、基礎的検証に効果的な3種類の高推力舵を設計し、水槽模型実験用の模型を製作する。なお、本研究で用いる実験用プロペラも1個製作する。

(3) 水槽模型実験

九州大学高速回流水槽を用いて、模型実験により高推力舵の性能を確認する。実験はプロペラ単独性能試験、舵単独性能試験、及びプロペラ-舵干渉時の性能確認試験を実施する。

3. 研究の方法

(1) 計算法の開発

本研究ではプロペラと舵の干渉流体力の計算法として、九州大学で開発された簡便なパネル法である SQCM を用いる。SQCM を用いた非常プロペラ性能計算法については文献 [1] に、3次元非常直進翼の計算については文献 [2] に詳しく述べられている。さらに、プロペラと舵の干渉流体力の計算で重要となるハブ渦を表現するためのハブ渦モデル、及び後流渦の変形を考慮する。図3に示すように、ハブ渦モデルはハブ内部もプロペラ翼の一部と見なし、揚力面をプロペラ中心線まで拡張させることにより、翼根側の翼端渦をハブ渦として放出させるものである。

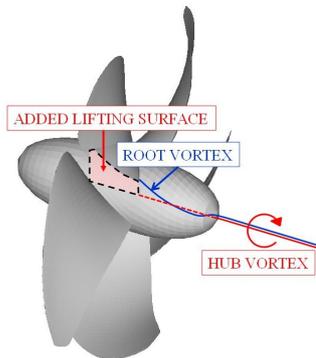


図3 ハブ渦モデルの概要

図4に示すように、プロペラ座標系  $o-xyz$  に対し、軸方向に距離  $l$  だけ平行移動させて舵座標系  $o-x_r y_r z_r$  を取り、 $z_r$  軸が舵前縁を通るものとする。なお、本研究では  $l/D = 0.25$  ( $D$  はプロペラ直径) をプロペラと舵の基準の位置関係とする。

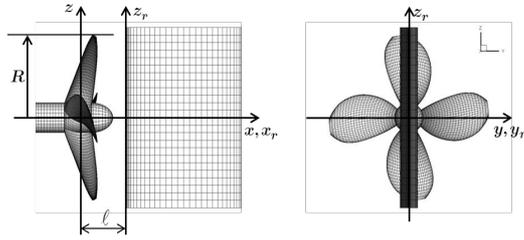


図4 座標系

プロペラ後流中における舵周りの流場計算は、プロペラ後流渦面を構成する渦糸（渦線分）と舵表面の計算点との位置関係で生じる特異性により、容易ではない。後流渦面の計算も同様である。しかし、これらの問題は渦線分による誘導速度計算式であるビオサバールの法則にランキン渦モデル（(1)式、図5）を組み込むことで特異性を回避できる。渦核半径 $r_0$ は適切な値を仮定し、渦核内部は固体の回転と見なす。

$$\vec{v}_\gamma = \frac{1}{4\pi} \frac{\vec{r}_1 \times \vec{r}_{12}}{|\vec{r}_1 \times \vec{r}_{12}|^2} \left\{ \frac{\vec{r}_2}{|\vec{r}_2|} - \frac{\vec{r}_1}{|\vec{r}_1|} \right\} \cdot \vec{r}_{12} \quad (1)$$

Where  $\frac{|\vec{r}_1 \times \vec{r}_{12}|}{|\vec{r}_{12}|} = d$ , if  $d \leq r_0$ , then  $d = r_0$

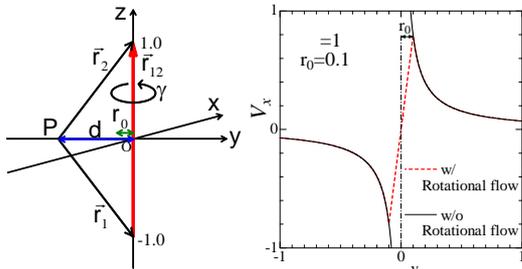


図5 渦線分による誘導速度

また、ハブ渦にもランキン渦モデルを適用する。ハブ渦の渦核半径 $r_0$ はプロペラの作動状態やボスキャップ形状に依存すると考えられるが、舵抵抗は $r_0$ の大きさによって変化する。 $r_0$ を理論的に算出することは難しいため基準状態と定めるケースについて、計算による舵抵抗値が実験値とおおよそ合うように以下のように与えた。

$$r_0 = th(x_r) \quad (\text{in rudder})$$

$$r_0 = 0.07R \quad (\text{out of rudder}) \quad (2)$$

ここで、 $th(x_r)$ と $R$ は、舵断面の翼厚分布とプロペラ半径である。実際の現象では、ハブ渦は舵によって攪乱されるか、あるいは舵片側表面を流れることにより $x_r$ 軸周りの旋回流成分が小さくなるものと推察されるが、計算での表現が難しいため、旋回流成分が低下する現象を渦核半径が拡大されることによる現象として簡易的に置き換えた。

図6に示すように、タイムステップ $t$ 、半径方向節点番号 $\mu$ 、周方向節点番号 $w$ における後流渦節点の位置ベクトル $\vec{W}_{t\mu w}$ は、(3)式に示すように前のタイムステップにおける

位置ベクトル $\vec{W}_{t-1\mu w-1}$ からの速度ベクトルによる移動量で決まる。

$$\vec{W}_{t\mu w} = \vec{W}_{t-1\mu w-1} + \vec{V}_1 \Delta t + \alpha \vec{V}_{St\mu w} \Delta t \quad (3)$$

ここで、

$\vec{V}_1$  : 一様流速度ベクトル

$\Delta t$  : 時間刻み幅

$\vec{V}_{St\mu w}$  : 特異点分布による誘導速度ベクトル

ただし、舵の攪乱による後流渦面の変形を3次元で行うことは難しいため、精度と計算の安定の両方を考慮し、 $\vec{V}_{St\mu w} (\vec{V}_{Sx}, \vec{V}_{Sy}, \vec{V}_{Sz})$ のうち、 $x \geq l$ のみ完全3次元変形、 $x < l$ では $\vec{V}_{Sy}$ 、 $\vec{V}_{Sz}$ 共に0とし、軸方向の変形のみ考慮した。

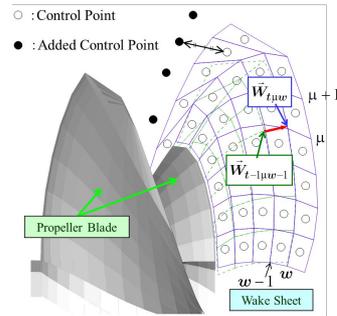


図6 後流渦変形モデル

プロペラ、舵の特異点分布が求まると、舵表面の圧力 $p_R$ は非定常 Bernoulli の式より次式で求められる。

$$p_R - p_0 = -\frac{1}{2} \rho (\vec{V}_r^2 - \vec{V}_{W_0}^2) - \rho \frac{\partial \phi_R}{\partial t} \quad (4)$$

ここで、

$p_0$  : 無限遠方の圧力

$\rho$  : 流体密度

$\vec{V}_r$  : 舵表面速度ベクトル

$\vec{V}_{W_0}$  : プロペラ後流場速度ベクトル

$\phi_R$  : 舵表面の攪乱速度ポテンシャル

圧力係数 $C_{pn}$ はプロペラ回転数 $n$ 、プロペラ直径 $D$ を用いて次式で定義する。

$$C_{pn} = \frac{p_R - p_0}{\rho n^2 D^2} \quad (5)$$

舵抵抗 $F_x$ はポテンシャル成分 $F_{xp}$ と粘性成分 $F_D$ の和、

$$F_x = F_{xp} + F_D \quad (6)$$

で表され、 $F_{xp}$ は(5)式による舵表面 $S_r$ の圧力積分で得られる。

$$F_{xp} = -\iint_{S_r} (p_R - p_0) n_x dS \quad (7)$$

ここで、

$n_x$  : 舵表面法線方向単位ベクトル $x$ 方向成分

$F_D$ の計算にはNACA翼断面抵抗係数 $C_D(z)$ の式を用い、スパン長 $z_s$ で積分して求める。

$$F_{xv} = \frac{1}{2} \rho \int_{z_s} C_D(z) \vec{V}_{in\ x}^2(z) c(z) dz \quad (8)$$

ただし、

$$C_D = 0.012 th / c + 2(1 + 2 th / c) C_f \text{ (Hughes)}$$

$$C_f \text{ (Hughes)} = 0.066 / (\log_{10} R_n - 2.03)^2$$

$$R_n = \frac{c(z) \bar{V}_{in x}}{\nu}$$

ここで、

$\bar{V}_{in x}$  : 流入速度の x 軸方向成分舵断面平均値

$c(z)$  : 舵断面コード長

$th / c$  : 翼厚比

プロペラ前進係数  $J$ 、推力係数  $K_T$ 、トルク係数  $K_Q$ 、プロペラ効率  $\eta_P$ 、舵抵抗係数  $K_{FX}$  は以下のように定義する。

$$J = \frac{V_A}{nD}, \quad K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}, \quad K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5},$$

$$\eta_P = \frac{J K_T}{2\pi K_Q}, \quad K_{FX} = \frac{F_X}{\rho n^2 D^4} \quad (9)$$

ここで、 $V_A$ 、 $T$  および  $Q$  はプロペラ前進速度、推力およびトルクである。また、プロペラ-舵の干渉を考慮した推進性能を評価する指標として、以下のようにプロペラ-舵系の効率  $\eta_{PR}$  を定義する。

$$\eta_{PR} = \frac{J (K_T - K_{FX})}{2\pi K_Q} \quad (10)$$

## (2)高推力舵の設計、及び製作

基準となる通常舵として、森山らによるプロペラ-舵干渉に関する研究で用いられた舵を採用し(表1 (ORIGINAL)), これにコの字型の切り欠きを与えることで高推力舵を製作した。切り欠き部の深さ、幅が舵抵抗に及ぼす影響を調べるため、図7に示すとおり、3種類製作した。切り欠きの幅が小さく、深さがコード長 10%の舵を HTR10S、30%の舵を HTR30S、また、HTR30S の切り欠き幅を大きくした舵を HTR30L とする。図8に計4種類の舵模型の写真を示す。

表1 高推力舵主要目

NAME OF RUDDER	ORIGINAL (MR-2)
CHORD LENGTH (m)	0.200
SPAN LENGTH (m)	0.300
ASPECT RATIO	1.50
TYPE OF SECTION	NACA0015

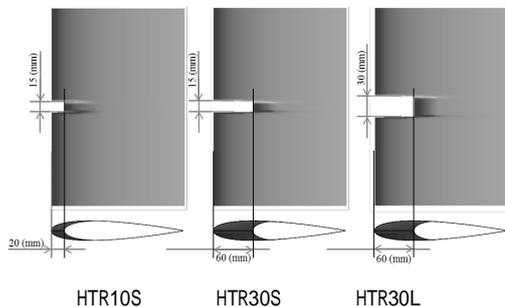


図7 高推力舵

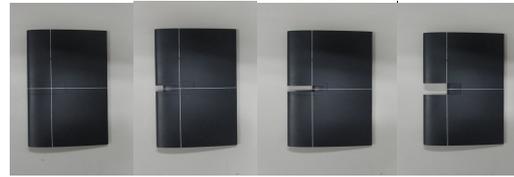


図8 高推力舵模型

模型プロペラも舵同様、森山らによるプロペラ-舵干渉に関する研究で用いられたMP-Bを採用した(表2、図9)

表2 プロペラ主要目

NAME OF PROPELLER	MP-B
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



図9 模型プロペラ

## (3)水槽模型実験

高推力舵の性能を調べるため、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、プロペラ推力、トルク、及び舵抵抗を計測した。ORIGINAL についてはプロペラ-舵間距離の影響についても調べた。図10に高速回流水槽の概略図、図11に計測システムの概略図、図12に計測胴内の写真を示す。舵軸に作用する抵抗を取り除くため、舵断面形状と同一の断面形状を持つシャフトカバーで舵軸を覆い、舵に作用する力のみが計測できるようにした。また、過去の計測ではプロペラオープンボートの造波により、舵抵抗が正確に計測できないという問題があったが、本計測では、図12に示すようにアクリル板で製作した制波板を設置し造波を抑えることにより、自由表面影響を取り除いた。

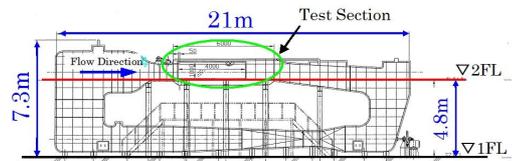


図10 高速回流水槽

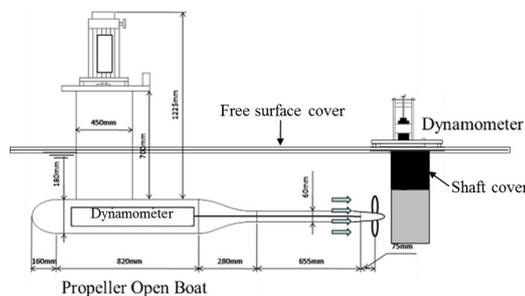


図11 計測システム

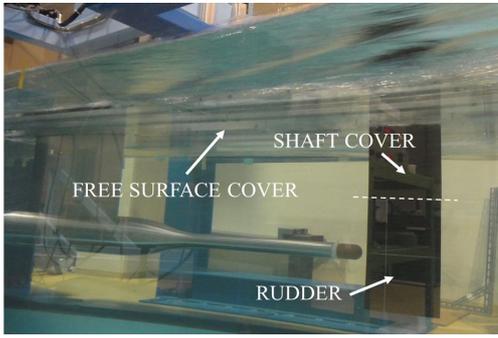


図 1 2 計測洞内

4. 研究成果

図 1 3 に舵が有る場合と無い場合（プロペラ単独）の推力係数  $K_T$  ・トルク係数  $K_Q$  を比較する。舵の排除効果による  $K_T$  ・  $K_Q$  の増加量が実験と計算で良く一致している。

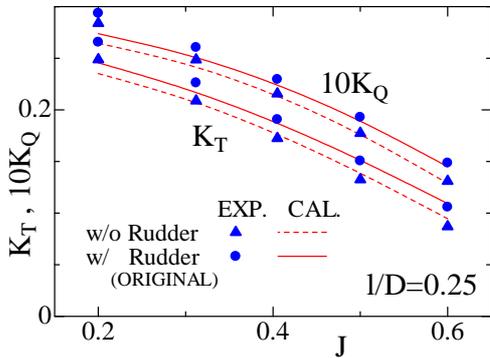


図 1 3 プロペラ推力・トルク舵有無の比較

図 1 4、及び 1 5 に計算による後流渦面形状と圧力分布を示す。本研究で取り扱う荷重度の範囲では後流渦面が安定して収束すること、及び特異な圧力が生じないことを確認した。

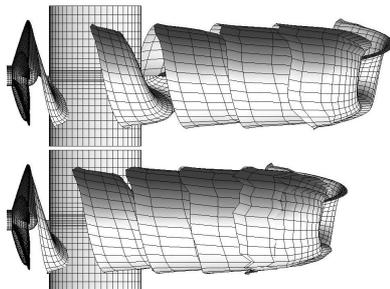


図 1 4 後流渦面形状(上:  $J=0.405$ , 下:  $J=0.2$ )

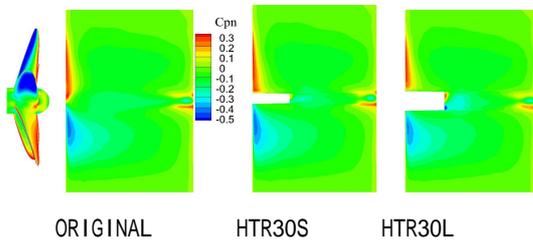


図 1 5 舵表面圧力分布

図 1 6 に高推力舵を配置したときの推力係数  $K_T$  ・トルク係数  $K_Q$ 、及び舵抵抗係数  $K_{FX}$  を示す。高推力舵の種類によるプロペラ

性能の変化はほとんど見られない。これは、切り欠き部による排除影響の変化がほとんど無いことを意味する。舵抵抗は、計算値が舵推力を過大評価（結果として、舵抵抗を過小評価）する傾向があるが、設計点 ( $J=0.405$ ) 付近に着目すると、舵抵抗の大きさの順序が実験と計算で一致している。ただし、実験では高推力舵の種類による差異が小さく、この点も計算と異なる。今後、計算による推定精度の向上が課題となる。

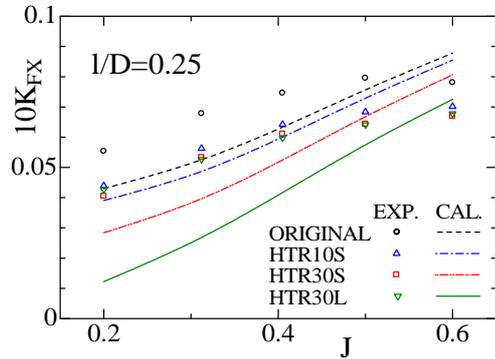
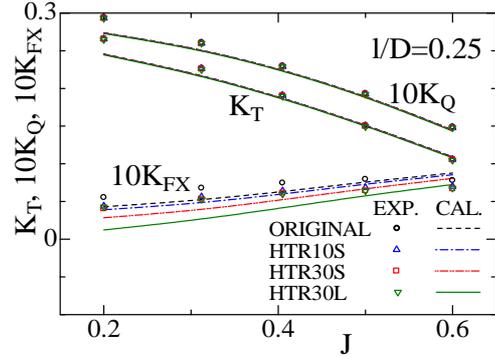


図 1 6 プロペラ性能・舵抵抗(下: 舵抵抗拡大)

図 1 7 にスパン方向舵抵抗分布を示す。ハブ渦中心部の断面が舵抵抗のピークとなっているのはランキン渦モデルを適用しているためであるが、この部分を除くと舵がハブ渦近傍で推力を発生させていることが分かる。ところが、切り欠きの角部の断面に着目すると、抵抗が作用している。これは、図 1 8 に示すように、角部が翼端効果を有し、舵推力が減少するためである。一方、角部で生じる局所的翼端渦は、ハブ渦による誘起速度を助長し、切り欠き部断面の迎角を大きくする作用がある。このため、この部分では大きな推力が得られる。結果として、この推力が角部で失われる推力より大きくなり、これが高推力舵の抵抗が ORIGINAL より小さくなるメカニズムであると考えられる。

図 1 9 に舵を推進器の一部とみなしたプロペラ-舵系の性能  $K_T - K_{FX}$ 、 $K_Q$ 、及び  $\eta_{PR}$  を示す。 $\eta_{PR}$  は実験値、計算値共に、全ての高推力舵について、ORIGINAL に比べて向上していることが分かる。この結果により、推進性能に着目した高推力舵の効果は確認できたと言える。しかし、最も効率が良くなる舵が実験と計算で異なる。実験では HTR30S

が、計算では HTR30L が最も優れ、それぞれ、ORIGINAL に比べ 1.1%、1.2% 向上している。 $\eta_{PR}$  の ORIGINAL に対する変化を正しく捉えるには、舵抵抗の減少量とプロペラ排除効果の両者について高精度が求められる。今後は推定精度の向上に努めると共に、実用舵への適用に取り組みたい。

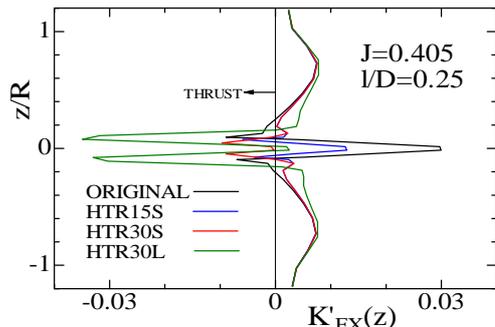


図 17 スパン方向舵抵抗分布

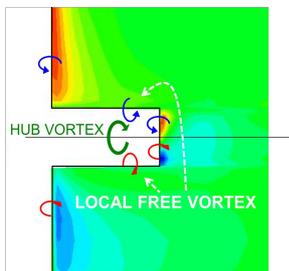


図 18 切り欠き部の局所的翼端渦

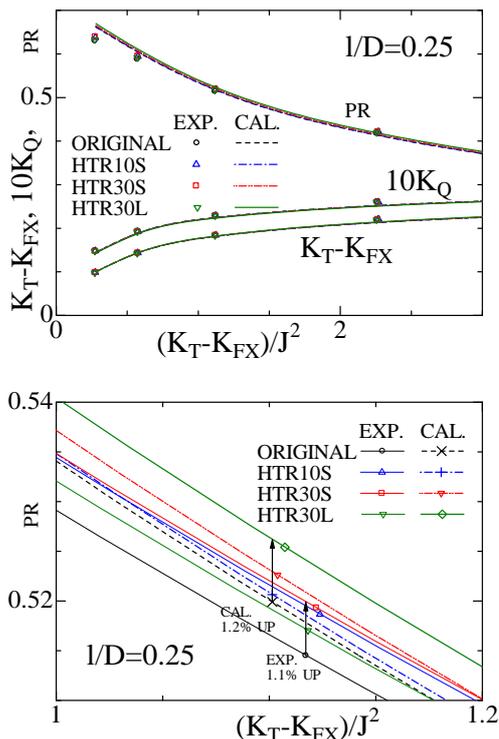


図 19 プロペラ-舵系の効率(下:設計点拡大)

< 引用文献 >

毎田進、安東潤、中武一明、簡便なパネル法による非定常プロペラ性能解析、日本造船学会論文集、第 182 号、1997、71-80

金丸崇、安東潤、後流渦の変形を考慮した非定常プロペラ性能解析、日本船舶海洋工学会論文集、第 6 号、2007、267-279  
 毎田進、安東潤、中武一明、簡便なパネル法による非定常 3 次元翼問題の解法、西部造船会々報、第 94 号、1997、1-11  
 金丸崇、龍知宏、吉武朗、安東潤、中武一明、パネル法を用いたプロペラ性能解析法におけるハブ渦モデルについて、日本船舶海洋工学会講演論文集、第 14 号、2012、263-266  
 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講演論文集、第 13 号、2011、29-30  
 森山文雄、山崎隆介、プロペラの舵に及ぼす影響について、西部造船会々報、第 61 号、1981、25-39

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)

[雑誌論文](計 3 件)

金丸 崇、吉武 朗、安東 潤、Development of New Type of Low Drag Rudder in Propeller Slipstream、Proceedings of 5th International Symposium on Marine Propulsor、査読有、2017

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会論文集、査読有、2017、483-488

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会論文集、査読有、2016、281-286

[学会発表](計 3 件)

金丸 崇、Development of New Type of Low Drag Rudder in Propeller Slipstream、Proceedings of 5th International Symposium on Marine Propulsor、2017 年 6 月 12 日、エスポー(フィンランド共和国)

金丸 崇、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春季講演会、2017 年 5 月 24 日、東京大学生産技術研究所

金丸 崇、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会春季講演会、2016 年 5 月 27 日、福岡県中小企業振興センター

6. 研究組織

(1) 研究代表者

金丸 崇 (KANEMARU, Takashi)  
 九州大学大学院・工学研究院・准教授  
 研究者番号: 90612127