

プロペラピッチ分布と複数の省エネ付加物の干渉影響に関する研究：ピッチ分布と船尾ダクトが舵周りの流場に与える影響について

岡田, 善久
ナカシマプロペラ株式会社

片山, 健太
ナカシマプロペラ株式会社

小林, 洋祐
ナカシマプロペラ株式会社

拾井, 隆道
国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所

他

<https://hdl.handle.net/2324/7177172>

出版情報 : Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers. 37, pp.9-17, 2023-06. The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers

バージョン :

権利関係 : © 2023 The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers



プロペラピッチ分布と複数の省エネ付加物の 干渉影響に関する研究

ーピッチ分布と船尾ダクトが舵周りの流場に与える影響についてー

正会員 岡 田 善 久*	正会員 片 山 健 太*
小林 洋 祐*	正会員 拾 井 隆 道**
正会員 若 生 大 輔**	正会員 一ノ瀬 康 雄**
正会員 安 東 潤***	

Interaction of Propeller Pitch Distribution and Multiple Energy Saving Devices
- The Effect of Propeller Pitch Distribution and Stern Duct on the Flow Field around the Rudder -

by	Yoshihisa Okada, <i>Member</i>	Kenta Katayama, <i>Member</i>
	Yosuke Kobayashi,	Takamichi Hiroi, <i>Member</i>
	Daisuke Wako, <i>Member</i>	Yasuo Ichinose, <i>Member</i>
	Jun Ando, <i>Member</i>	

Summary

Recent years, merchant ships are equipped not only with high performance propeller, but also with multiple ESDs (Energy Saving Devices) to recover energy losses, so propulsion performance has been greatly improved. There is a possibility that propulsion performance can be improved by integrating propeller and multiple ESDs.

In our previous study, the self-propulsion test results with the multiple ESDs like stern duct and rudder bulb showed the highest energy-saving effect, namely 15.0% compared with bare hull. In addition, the maximum difference of BHP (Brake Horse Power) caused by differences in propeller position and pitch distribution was 4.9%. The PIV (Particle Image Velocimetry) measurement results confirmed that the flow field in front and behind the propeller changed depending on the propeller position and pitch distribution, and the interaction among the propeller and the ESDs also changed.

After the previous study, additional self-propulsion tests including rudder resistance measurements were conducted using propellers having three different pitch distributions and the multiple ESDs. Furthermore, the flow field changes in front of the rudder due to the presence of stern duct and the difference of propeller pitch distributions were analyzed by PIV measurement results. In this paper, the authors focus on the thrust deduction factor and describe the energy-saving effect due to changes in rudder resistance.

1. 緒 言

2018 年 4 月に IMO が採択した温室効果ガス (GHG) 削減戦略¹⁾では 2008 年を基準年として、2050 年までに国際海運からの GHG 総排出量を 50%以上削減し、21 世紀中のなるべく早期に GHG 排出ゼロを目指している¹⁾。このように船用業界において劇的な技術変化が求められるなか、直近では主

機の燃料に使用されている重油の代替燃料として LNG やアンモニア、水素の研究が実施されている²⁾。一方、船舶の推進性能に関する省エネルギー化も加速しており、最近では、プロペラ前後に船尾ダクトや舵バルブ等の複数の省エネ付加物を併用する傾向が強くなった。実際に搭載されている省エネ付加物の一例として、川崎重工業³⁾では船尾ダクトの SDS-F (Semi-Duct System with contra Fins) では約 3~7 [%]、舵バルブの RBS-F (Rudder Bulb System with Fins) は約 2~7 [%]の馬力削減効果が得られると提示している³⁾。

省エネ付加物の研究開発は、国内外で数多く実施されているものの⁴⁻⁵⁾、複数の省エネ付加物とプロペラの干渉影響に関する研究事例は多くない。Okamoto ら⁶⁾、Kimura ら⁷⁾はプロペラ前後に省エネ付加物を搭載した場合の馬力削減効果は、それぞれの単独状態の馬力削減効果より大きくなることを示した。一方、複数の省エネ付加物を搭載した場合の馬力

* ナカシマプロペラ株式会社

** 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所
海上技術安全研究所

*** 九州大学大学院工学研究院

原稿受理 令和 4 年 11 月 25 日

削減効果は、それぞれの単独状態のその足し合わせとはならず、何らかの干渉が生じていることが予想される。Hori⁸⁾は、プロペラ前方デバイスにより、舵やプロペラ後方デバイス周囲の圧力分布が変化し、プロペラ後方デバイスの抵抗値が変化することを報告した。著者ら⁹⁾はプロペラ後方デバイスおよび舵表面の圧力分布を評価し、デバイスの形状によっては圧力分布の干渉影響を小さくできることを示した。Ichinose ら¹⁰⁾は、プロペラ前方デバイスであるダクトと後方デバイスである舵バルブフィンの干渉について調査し、ダクト下方の形状により舵フィンに流入する流れが変化することにより舵フィンの性能が変化すること、上部のみの半円型ダクトとすることにより干渉影響が小さくなることを報告した。これらにより、プロペラ前方デバイスが後方に作り出す流場によりプロペラ後方デバイスの性能が変化することが干渉の要因の一つであることが分かってきた。ここで、プロペラ自体も前後のデバイスの周りの流場に影響を及ぼしているため、プロペラ形状や位置を変えて誘導速度分布を変化させることにより複数省エネデバイスの干渉影響を小さくし、馬力削減効果を最大化できると考えられる。前報¹¹⁾において、著者らは船尾ダクトと舵バルブの複数の省エネ付加物が搭載された模型船を用いた自航試験を実施し、プロペラ前後位置やピッチ分布の違いにより、複数の省エネ付加物の効果に最大 4.9 [%]の馬力差が生じることを示し、プロペラ形状を変化させることにより干渉影響を変化させ推進効率を最適化できる可能性を示した。しかしながら、プロペラピッチ分布が 2 種類であるため、プロペラによる詳細な干渉の傾向が掴めていない。さらに舵抵抗などを計測していないため、干渉影響の要因を特定できなかった。

本研究では、干渉影響による個々のデバイスの性能変化を評価することを目的に、船尾ダクトおよび舵バルブを対象にピッチ分布を 3 種類変化させたプロペラを対象に研究を実施した。また、自航試験と同時に舵抵抗を計測することにより、船尾ダクトおよび船体と舵バルブの性能変化の分離を行った。またプロペラと舵間の流場計測を行うことにより、船尾ダクトおよびプロペラによる舵前方の流場の変化について調査した。

2. 水槽試験の内容

2.1 供試模型の概要

試験模型は 82,000 DWT (82BC と称する) の Panamax Bulk Carrier を用いた。供試船と舵、供試プロペラの主要目を Table 1, 82BC の船尾形状を Fig. 1, 模型プロペラの外観を Fig. 2 に示す。プロペラの回転方向は船尾から見て時計回りである。舵の翼厚比は、舵の中心高さにおけるものである。模型プロペラは MAU 断面にて 3 種類の異なるピッチ分布であり、設計点におけるプロペラトルクがほぼ同等となるように設計した。MPNo.1 は翼根部のピッチが大きく、翼先端で

は小さくなる通減ピッチ分布、MPNo. 2 は一定ピッチ分布、MPNo.3 は翼先端のピッチが大きく、翼根部では小さくなる通増ピッチ分布である。Fig. 3 に各ピッチ比分布を示す。

Table 1 Principal particulars of hull and propeller.

Hull		
	Model scale	Full scale
Lpp [m]	7.6311	222.00
Breadth [m]	1.1089	32.26
Draft [m]	0.4194	12.20
Block coefficient	0.8671	
Rudder		
Area [m²]	0.0460	38.93
Chord length [mm]	148.7	4325
Aspect ratio	2.081	
Thickness chord ratio	0.2266	
Propellers		
	Model scale	Full scale
Number of blades	4	
Diameter [mm]	220.0	6400.0
Pitch ratio of 0.7R	0.6294 for MPNo.1 0.6500 for MPNo.2 0.6422 for MPNo.3	
Expanded area ratio	0.5500	
Boss ratio	0.1600	

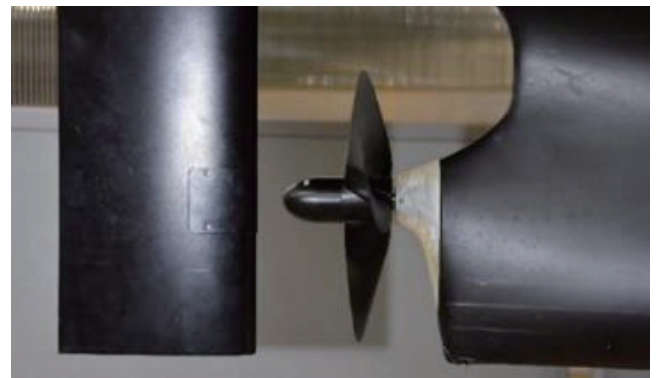


Fig. 1 82BC Stern Shape.

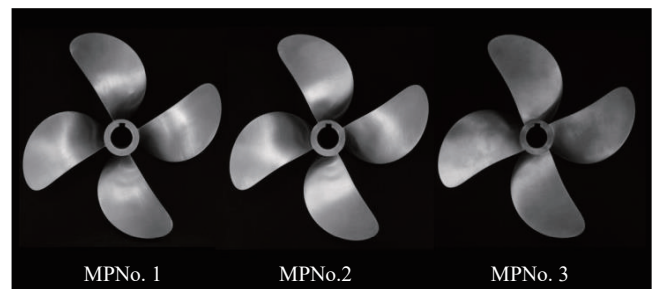


Fig. 2 Profile of model propellers.

本研究の模型試験に採用した省エネ付加物は、ナカシマプロペラが開発した船尾ダクト (Neighbor Duct)¹²⁾と舵バルブ (Ultimate Rudder Bulb)¹³⁾である。Neighbor Duct は船尾側面を沿う流れを利用し推力を発生させるために直線部を有する縦長の船尾ダクト、Ultimate Rudder Bulb は伴流利得の効果を向上させる目的でプロペラキャップに膨らみを持たせた流線型の舵バルブである。試験に用いた模型船に搭載された省エネ付加物を Fig. 4 に示す。

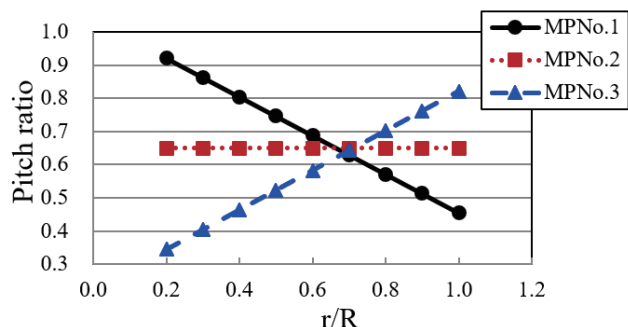


Fig. 3 Pitch distribution of model propellers.



Fig. 4 Energy saving devices for model test.

2.2 模型試験の項目

模型試験は海上技術安全研究所の設備を用い、プロペラ単独性能試験と PIV (Particle Image Velocimetry, 粒子画像流速計測法) による流場計測を全長 150m の中水槽、抵抗・自航試験を全長 400m の長水槽にて実施した。

本研究においては、省エネ付加物の装着状態やプロペラ位置とピッチ分布の差による干渉影響を調査するため、Table 2 のような抵抗・自航試験を行った。模型プロペラは翼位置がプロペラ直径の 7.5 [%] 分前後に変更できるボス構造となっており、自航試験と PIV 計測では翼位置を前後させてその影響を調査した。表中のプロペラ位置は船首側を Fore (以下, (F) とする)、船尾側を Aft (以下, (A) とする) として表した。前報¹¹⁾においてプロペラ位置を後方とした場合の方が省エネ効果が大きいことが示されたため、本研究においてもプロペラ位置を後方を中心に計測を行った。

流場計測は、Fig. 5 に示す没水型ステレオ PIV 装置 (Dantec

Dynamics 製) によって実施した。本装置ではダブルパルス Nd:YAG レーザー (Quantel laser, Evergreen EHP15-340, Wavelength 532 [nm], Max. repetition rate 15 [Hz], Max. energy 340 [mJ]) とレーザーシート光学系、2 台の CMOS カメラ (Dantec Dynamics, FlowSense EO 4M32, 2072 [pix]×2072 [pix], 12 [bit]) が組み込まれており、主流方向に垂直な断面の 2 次元 3 成分の流場を計測することが可能である。トレーサ粒子には銀コート粒子 (粒子径 8~20 [μ m], 比重 1.7) を用いた。本装置の可視化光源はダブルパルスレーザーであり、フレームストラッキング法により粒子画像の撮影を行った。一航走中に 500 ペアの画像を取得し、統計処理することにより平均速度場を算出した。計測位置は Fig. 6 に示すように舵前縁部から舵翼弦長の 5% 前方とした。

Table 2 Model test items.

MPNo.	Propeller position	Energy saving device	Kind of test
—	—	Without	Resistance test
MPNo. 1	Fore (F)	Without	Self-propulsion test
		Duct + Bulb	
	Aft (A)	Without	
		Bulb	
MPNo. 2	Aft (A)	Duct	
		Duct + Bulb	
		Without	
		Bulb	
MPNo. 3	Aft (A)	Duct	
		Duct + Bulb	
		Without	
		Bulb	

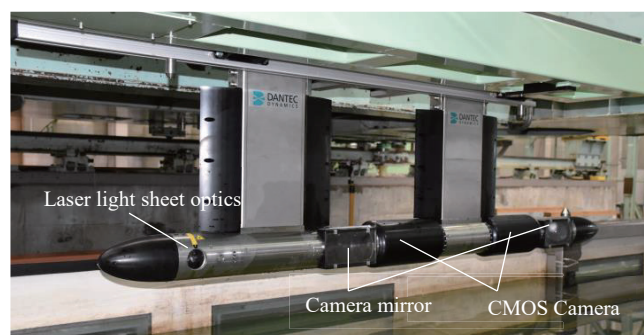


Fig. 5 Submersible PIV probe.

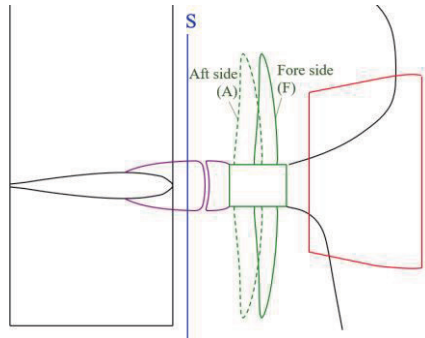


Fig. 6 Measurement section by PIV.

3. プロペラ形状による自航要素と省エネ効果の変化

3.1 自航要素と省エネ効果の算出方法

平板の摩擦抵抗係数は Schoenherr の式により算出し、実船馬力推定には 3 次元外挿法を採用した。プロペラに作用する推力とトルクの計測は、実船の自航点におけるプロペラ荷重度とした。また抵抗係数は、裸殻状態のそれを用いた。実船有効伴流係数 $1-w_s$ の算出においては、模型試験と実船の過去の経験による相関関係を考慮し、矢崎チャート¹⁴⁾から得られる尺度影響係数 ε の値の 95 [%]を用いた。伝達効率 η_T は $1/1.03$ として、計画速力 14.2 [knots]となるフルード数 $F_n = 0.156$ における自航要素および、(1) 式で定義される制動馬力 BHP (Brake Horse Power) を評価する。

なお改善率は、MPNo. 1 (F)の裸殻状態に対する比率（推進効率が向上する場合を正とする）とした。

$$BHP = \frac{EHP}{\eta_D \eta_T} \quad (1)$$

$$\eta_D = \eta_H \eta_{OS} \eta_R \quad (2)$$

$$\eta_H = \frac{1-t}{1-w_s} \quad (3)$$

$$1-w_s = 0.95 \varepsilon (1-w_T) \quad (4)$$

ただし、

BHP 制動馬力 [kW]

EHP 有効馬力 [kW]

η_D 推進効率

η_H 船殻効率

η_{OS} 実船プロペラ効率

η_R 船後プロペラ効率比

$1-t$ 推力減少係数

$1-w_T$ 模型有効伴流係数

3.2 プロペラ単独性能試験の結果

模型プロペラ MPNo. 1, 2 および 3 の Kempf のレイノルズ数 $Rnk = 4.2 \times 10^5$ におけるプロペラ単独性能試験結果を Fig. 7

に示す。

設計点付近 ($J = 0.378$) におけるプロペラ単独効率 η_o の差は MPNo.2, 1, 3 の順で小さくなっている。

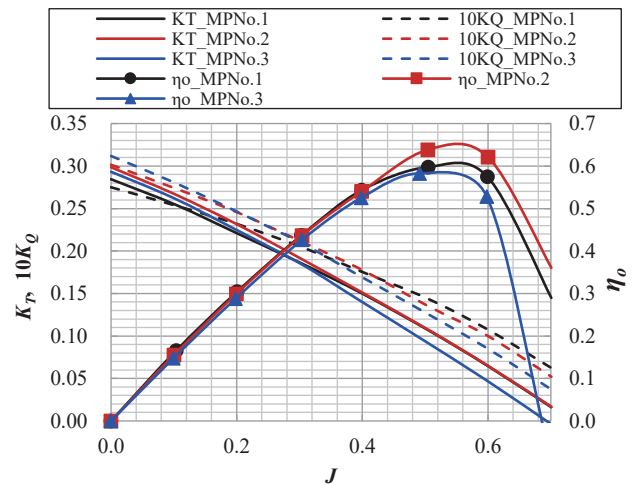


Fig. 7 Propeller open water test results.

3.3 自航要素と省エネ効果の解析結果

Table 3 に舵バルブ搭載時の自航要素と BHP について、MPNo. 1 (F)の裸殻状態からの改善率を示す。推力減少係数 $1-t$ は MPNo. 1 (翼根部ピッチ大) にて 4.8 [%]の改善率となり、翼先端のピッチが大きくなるにつれ悪化した。有効伴流係数 $1-w_T$ の改善率は、 $1-t$ の改善率と逆の傾向となり、MPNo. 3 (翼先端ピッチ大) にて最大となる 6.8 [%]の改善効果であった。船後効率プロペラ効率比 η_R は MPNo. 3 (翼先端ピッチ大) にて 4.1 [%]の改善率であった。

Table 3 Improvement ratio of self-propulsion factors and BHP with bulb.

MPNo.	No.1	No.2	No.3
Propeller position	Aft (A)		
E.S.D.	Bulb		
$\Delta 1-t$ [%]	4.8	3.3	2.2
$\Delta 1-w_T$ [%]	1.6	3.9	6.8
$\Delta 1-w_s$ [%]	1.1	2.8	4.8
$\Delta \eta_H$ [%]	6.0	6.3	7.4
$\Delta \eta_R$ [%]	2.0	3.0	4.1
$\Delta \eta_{OS}$ [%]	0.5	2.1	-3.3
BHP [kW]	7543	7327	7585
ΔBHP [%]	8.0	10.6	7.5

次に、Table 4 に船尾ダクト搭載時の自航要素と BHP の改善率を示す。改善率が最大となるプロペラは、推力減少係数 $1-t$ については MPNo. 1 (翼根部ピッチ大) にて 5.1 [%]、有効伴流係数 $1-w_T$ については MPNo. 3 (翼先端ピッチ大) に

て 8.8 [%], 船後プロペラ効率比 η_R については MPNo. 3 にて 5.1 [%]であり, 各自航要素の変化は, 舵バルブ搭載時と同じ傾向となっている。

Table 4 Improvement ratio of self-propulsion factors and BHP with duct.

MPNo.	No.1	No.2	No.3
Propeller position	Aft (A)		
E.S.D.	Duct		
$\Delta 1-t$ [%]	5.1	3.8	2.8
$\Delta 1-w_T$ [%]	3.1	5.4	8.8
$\Delta 1-w_s$ [%]	2.2	3.8	6.2
$\Delta \eta_H$ [%]	7.5	7.9	9.6
$\Delta \eta_R$ [%]	1.4	2.8	5.1
$\Delta \eta_{os}$ [%]	0.1	1.8	-3.8
BHP [kW]	7511	7262	7396
Δ BHP [%]	8.4	11.4	9.8

最後に, Table 5 に船尾ダクトと舵バルブを併用した場合の自航要素と BHP の改善率を示す。改善率が最も高いプロペラは, 推力減少係数 $1-t$ については MPNo. 1 (翼根部ピッチ大) にて 5.5 [%], 有効伴流係数 $1-w_T$ については MPNo. 3 (翼先端ピッチ大) にて 10.1 [%], 船後プロペラ効率比 η_R については MPNo. 3 にて 6.9 [%]となった。この傾向は舵バルブや船尾ダクトの搭載時と同様である。

Table 5 Improvement ratio of self-propulsion factors and BHP with duct and bulb.

MPNo.	No.1	No.2	No.3
Propeller position	Aft (A)		
E.S.D.	Duct + Bulb		
$\Delta 1-t$ [%]	5.5	4.5	3.9
$\Delta 1-w_T$ [%]	5.1	7.1	10.1
$\Delta 1-w_s$ [%]	3.6	5.0	7.1
$\Delta \eta_H$ [%]	9.5	10.0	11.9
$\Delta \eta_R$ [%]	2.7	5.2	6.9
$\Delta \eta_{os}$ [%]	-0.4	1.4	-3.9
BHP [kW]	7320	6987	7136
Δ BHP [%]	10.7	14.8	13.0

実船の馬力計算に用いられる自航要素について, 異なるピッチ分布による改善の増減は全て同じ傾向となり, 推力減少係数 $1-t$ は翼根部のピッチ大にて改善, 実船有効伴流係数 $1-w_s$ は翼先端ピッチ大にて改善, 船後プロペラ効率比 η_R も翼先端ピッチ大で改善, 実船プロペラ効率 η_{os} は一定ピッチで最も改善される結果となった。

実船スケールにおける馬力削減効果は, 全ての省エネ付加物において MPNo. 2 (一定ピッチ) にて最も改善効果が高くなった。舵バルブ単体の搭載時以外は裸殻状態も含め, MPNo. 2, MPNo. 3 (翼先端ピッチ大), MPNo. 1 (翼根部ピッチ大) の順に省エネ効果が改善された。本研究の試験では船尾ダクトと舵バルブ併用時に MPNo. 2 にて 14.8 [%]という大きな BHP 改善効果が得られた。

3.4 複数の省エネ付加物による自航要素の干渉量の比較

複数の省エネ付加物を搭載した場合の自航要素における干渉影響について検証する。各プロペラの裸殻の自航要素から各省エネ付加物搭載時の自航要素の差分を算出したもの (①,②,③), 舵バルブと船尾ダクトの単体搭載時の差分の和 (①+②), 干渉量として, ①+②と舵バルブと船尾ダクトを併用した場合③の差 (①+②-③) を Fig. 8～10 に示す。また縦軸は改善の効果を表すが, 干渉量のみ値が小さい場合に改善効果が高いことを表す。Fig. 8 の推力減少係数 $1-t$ の干渉量は, MPNo. 1 (翼根部ピッチ大), MPNo. 2 (一定ピッチ), MPNo.3 (翼先端ピッチ大) の順に大きいことが分かる。舵バルブや船尾ダクト単体での改善効果は, 翼根部のピッチが大きい方が高くなっている。

次に Fig. 9 の実船有効伴流係数 $1-w_s$ の干渉量は, MPNo. 3 が最も小さい。各省エネ付加物搭載時の改善効果は, 翼根部のピッチが大きい方が高くなる傾向となった。

Fig. 10 に示す船後プロペラ効率比 η_R の干渉量についても, MPNo. 3 が最も小さくなった。各自航要素において先端部のピッチが大きくなると干渉量が小さくなる傾向となる。

各自航要素の舵バルブと船尾ダクトの併用時の干渉量を比較すると, 実船有効伴流係数 $1-w_s$, 推力減少係数 $1-t$, 船後プロペラ効率比 η_R の順に小さいことが分かった。

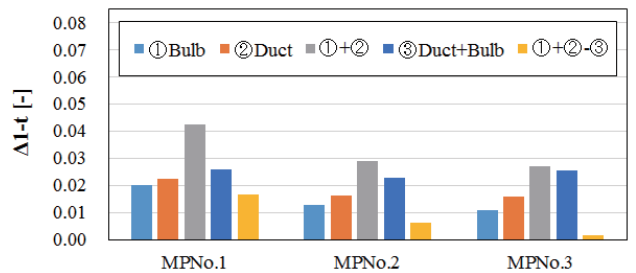


Fig. 8 Comparison of $\Delta 1-t$ interaction effect.

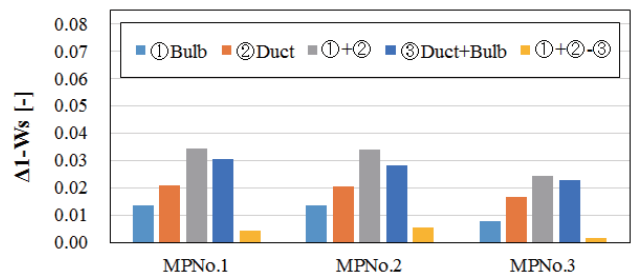
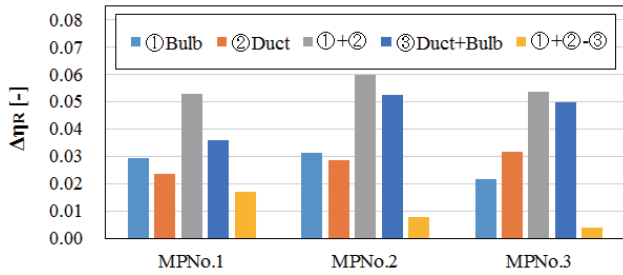


Fig. 9 Comparison of $\Delta 1-w_s$ interaction effect.

Fig. 10 Comparison of $\Delta\eta_R$ interaction effect.

3.5 舵抵抗と推力減少係数の関係

次に推力減少係数の増減に及ぼす舵抵抗の影響を調査するため、各プロペラについて省エネ付加物の搭載状態毎に (5) 式で定義される舵抵抗係数 C_{Fr} を Fig. 11 に比較する。

$$C_{Fr} = \frac{F_{rx}}{\frac{1}{2}\rho_m V_w^2 S_m} \quad (5)$$

ここで、 F_{rx} は舵抵抗、 ρ_m は模型試験時の水の密度、 V_w は模型試験時の対水船速、 S_m は模型船の表面積である。なお抵抗試験時、舵抵抗は全抵抗の約 0.8 [%]を占めた。

Fig. 11 より、先端部のピッチが大きくなると舵抵抗が大きくなることが分かる。またいずれのプロペラにおいても舵抵抗係数は舵バルブ、船尾ダクトと舵バルブの併用、船尾ダクト、裸殻の順に小さく、舵バルブに船尾ダクトを付加することにより抵抗が増加することが分かった。

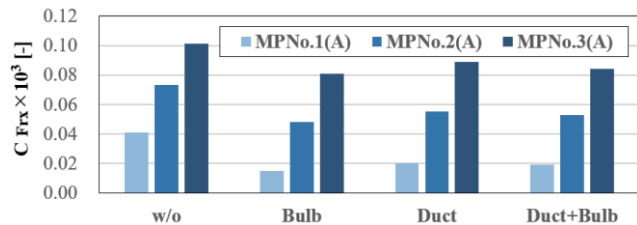


Fig. 11 Resistance coefficient of rudder (Aft).

各省エネ付加物の搭載時に舵抵抗 F_{rx} の増減による省エネ効果を調べるために、舵抵抗に対する推力減少率 t_{Fr} を (6) 式で定義する。

$$t_{Fr} = \frac{F_{rx} - F_{rx0}}{T} \quad (6)$$

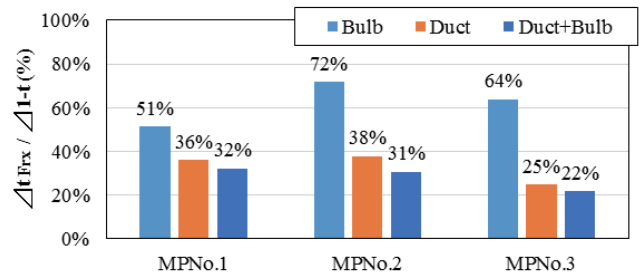
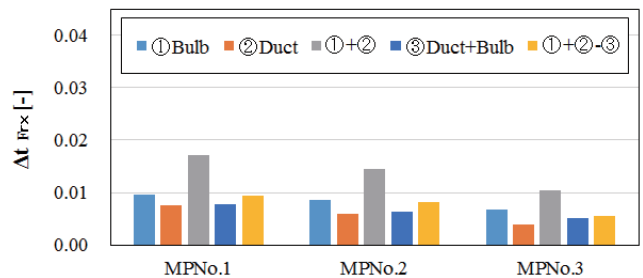
ただし、

t_{Fr}	舵抵抗 F_{rx} に対する推力減少率
F_{rx0}	抵抗状態の舵抵抗 [N]
T	プロペラ推力 [N]

各プロペラの裸殻状態の t_{Fr} から各省エネ付加物の搭載時の t_{Fr} を差し引いた変化量 Δt_{Fr} と推力減少係数の変化量 $\Delta 1-t$ との比を舵抵抗減少の推力減少係数改善への寄与率と定義

し、これを Fig. 12 に示す。舵抵抗の減少効果は舵バルブ単体にて約 50~70 [%]と特に大きな寄与率であり、船尾ダクトが搭載された状態においても 22~38 [%]を占めていることが確認できた。

次に、舵抵抗 F_{rx} に対する推力減少率の干渉効果を Fig. 13 に示す。縦軸は改善の効果を表すが、干渉量のみ値が小さい場合に、改善効果が高いことを表す。省エネ付加物が搭載された場合には、翼根部のピッチが大きい方が、舵抵抗の減少に起因した推力減少係数の改善効果が高くなることが分かる。また、翼先端のピッチが大きくなるほど干渉量は小さくなる傾向となる。

Fig. 12 Comparison of ratio of Δt_{Fr} and $\Delta 1-t$.Fig. 13 Comparison of Δt_{Fr} interaction effect by rudder resistance.

4. PIV による推力減少係数の変化要因の調査

前章では模型試験において舵抵抗を計測することにより、舵の抵抗が推力減少係数の変化に影響を与えていることを明らかにした。本章では、プロペラのピッチ分布とダクトの有無が舵周りの流場に与える影響について、裸殻と船尾ダクトを装着した場合の舵前縁近傍の PIV 計測結果を比較することで調査した。

舵直前（舵前縁から舵翼弦長の 5% 前方）における主流方向速度分布 U/U_0 を Fig. 14 に示す。なお U/U_0 は流速 U について、船速 U_0 を 1.0 とした比率で表している。図中の細線はプロペラの 1.0R と 0.7R の円 (Fig. 15 も同様)、赤線はプロペラ円の垂直方向の中心線を表している。

裸殻状態での比較では MPNo. 1（翼根部ピッチ大）では 0.7R より内側の領域でプロペラ後流が加速され、MPNo. 3（翼先端ピッチ大）では 0.7R より外側で加速されており、ピッチ分布の差がプロペラ後流に現れている。船尾ダクト有無については、MPNo. 3 では大きな差が見られないが、MPNo.

1 では U/U_0 が 1.3 を越える領域が存在しなくなっている。原因として、船尾ダクトが装着されることで $0.7R$ より内側の加速が鈍化されたものと考えられる。つまり、先端ピッチが大きい場合は船尾ダクト有無による後流の流場変化が小さく、干渉も小さくなることが分かる。

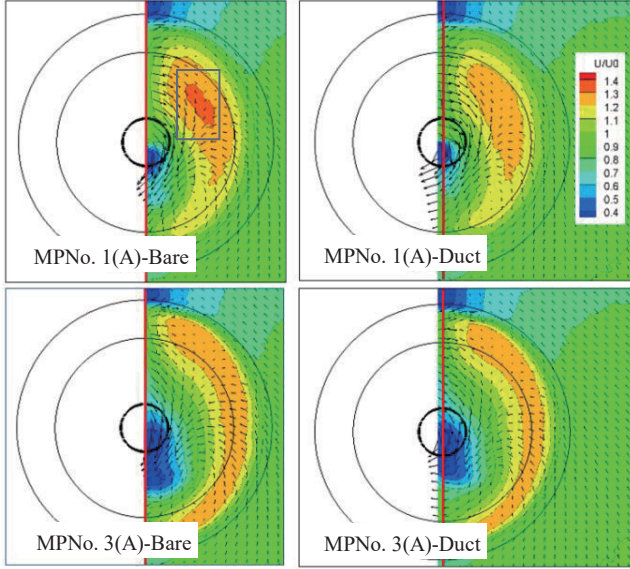


Fig. 14 Streamwise velocity distribution.

次に、舵が推力減少係数に及ぼす影響を調べるために S_5 の主流方向速度と水平方向速度（右舷方向を正とする）のなす角を舵への流入角 β として Fig 15 に示す。舵前縁直前となる中心線付近の流入角 β を比較すると、特に軸心上部付近にて角度差があることが分かった。裸殻の比較では、MPNo. 3（翼先端ピッチ大）において流入角 β が 30° を越える領域が広がっている。船尾ダクト搭載時におけるプロペラ間の比較でも同様の傾向がある。裸殻と比べ船尾ダクト搭載時では、大きな流入角 β の領域は狭くなる。

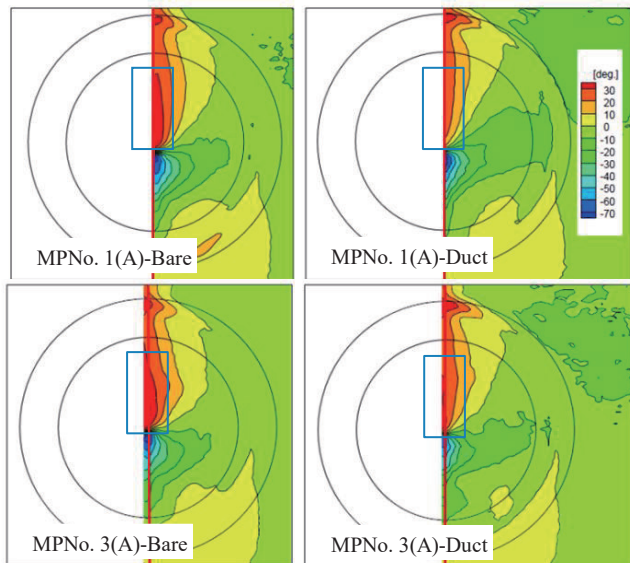


Fig. 15 Distribution of β [deg.].

MPNo. 1 および 3 の裸殻状態とダクト搭載時における各半径位置の舵への流入角 β の比較を Fig. 16, 17, 18, 19 に示す。縦軸の $r/R = 1.0$ は軸心より上方向、 $r/R = -1.0$ は軸心より下方向である。また、舵抵抗係数 C_{Fr} を Table 6 に示す。

Fig. 16 と 17 のプロペラ間の比較では裸殻とダクト搭載時の両状態にて、特に半径位置 $r/R=0.0\sim0.7$ 付近において翼根部のピッチが大きい MPNo. 1 の方が舵への流入角 β が大きくなっている。Table 6 の舵抵抗係数 C_{Fr} から同じように MPNo. 1 の方が小さく、傾向は一致している。

一方、Fig. 18 と 19 の省エネ付加物の有無による比較では、舵抵抗係数 C_{Fr} は船尾ダクト搭載時において小さくなる。舵への流入角 β は $r/R=0.0\sim0.5$ までは船尾ダクトの方が大きくなり C_{Fr} の傾向と一致するものの、 $r/R=-0.6\sim0.0$ 付近では裸殻の β が大きく、 C_{Fr} の傾向とは異なる。今後、流入角だけでなく、流速分布も考慮した解析が課題である。

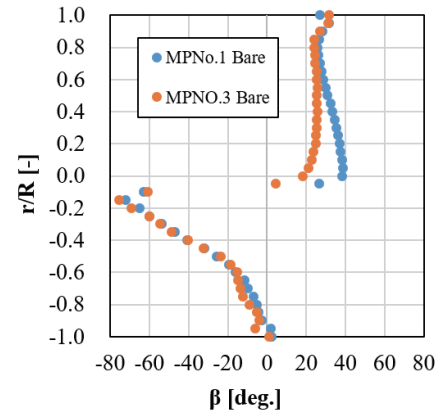


Fig. 16 β of MPNo.1 and 3 w/o ESD profiles.

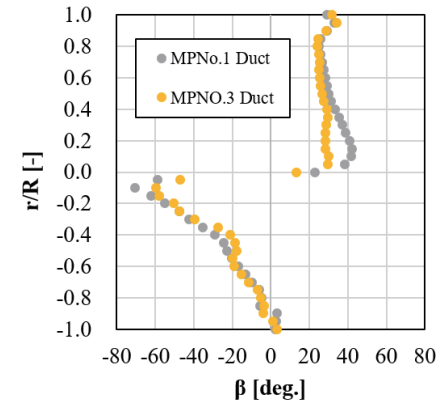
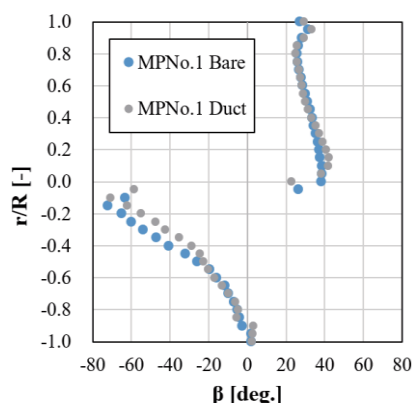
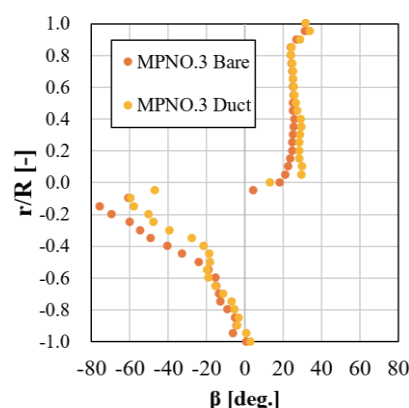


Fig. 17 β of MPNo.1 and 3 with duct profiles.

Fig. 18 β of MPNo.1 w/o and with duct profiles.Fig. 19 β of MPNo.3 w/o and with duct profiles.Table 6 Comparison of C_{Frx} for MPNo.1 and 3.

MPNo.	No.1 (A)		No.3 (A)	
	W/o	Duct	W/o	Duct
$C_{Frx} \times 10^3$	0.041	0.020	0.101	0.089

5. 結 言

本研究では、船尾ダクトや舵バルブを搭載した船舶に対して装備されるプロペラのピッチ分布を 3 種類変化させた模型試験を実施し、特にプロペラのピッチ分布とダクトの有無が舵周りの流場並びに舵抵抗に与える影響について、PIV 計測並びに舵抵抗の直接計測結果から実験的に調査し、以下の知見が得られた。

- 1) ピッチ分布による自航要素への影響は、搭載される省エネ付加物の種類に関わらず傾向は同じであり、推力減少係数 $1-t$ は翼根部のピッチが大きい方が改善、実船有効伴流係数 $1-w_s$ は翼先端のピッチが大きい方が改善、船後プロペラ効率比 η_R も翼先端のピッチが大きい方が改善、実船プロペラ効率 η_{os} は一定ピッチ分布で最も改善された。制動馬力 BHP も一定ピッチで最も改善した。
- 2) 舵バルブと船尾ダクトを併用した場合、一定ピッチ

のプロペラ MPNo. 2 の後方位置の馬力削減効果は裸殻状態の MPNo.1 の前方位置と比較して 14.8% の大きな改善効果が確認された。

- 3) 複数の省エネ付加物を搭載した場合の干渉影響を検証し、いずれの自航要素に対しても翼先端のピッチが大きい方が干渉量は小さかった。また各自航要素の干渉量を比較すると、複数の省エネ付加物による干渉は、実船有効伴流係数 $1-w_s$ 、推力減少係数 $1-t$ 、船後プロペラ効率比 η_R の順に大きくなることが分かった。PIV 計測により、翼先端のピッチが大きいプロペラでは船尾ダクト搭載による後流の流場変化が小さいことが確認された。つまり、翼先端のピッチが大きいプロペラは、プロペラ後方の省エネ装置に与える影響も少なく、自航要素の干渉も小さくなることが明らかになった。
- 4) 船尾ダクトの有無に関わらずプロペラ間の比較では、翼根部のピッチが大きくなると舵への流入角 β が増加する。一方、同一プロペラにて裸殻と船尾ダクト搭載時を比べると、右舷と左舷で流入角 β の増減は異なる。全ての状態について舵への流入角だけでは舵抵抗の増減の説明は難しく、今後、流速も考慮した解析が課題である。
- 5) 各省エネ付加物による推力減少係数 $1-t$ の改善に対する舵抵抗減少の寄与率は、舵バルブに顕著で約 50～70% に達するが、船尾ダクト搭載時も 22～38% の割合を占めていた。これについては、船尾ダクト装着時には舵前縁での主流速が低くなることが舵抵抗低減効果の低下の一因と考えられる。

本研究の模型試験結果より、プロペラのピッチ分布と複数の省エネ付加物との干渉について検証することができた。今後は数値計算を用いた解析や最高効率化を目的としたプロペラ設計の研究を進めていく予定である。

謝 辞

本研究を行うにあたって国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所の川北千春博士より貴重なご指導や助言を頂きました。心よりお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Resolution MEPC.304(72) : Initial IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships, International

- Maritime Organization, 2018.
- 2) Shipping Zero Emission Project : Roadmap to Zero Emission from International Shipping, Revision 2, 2020.
国際海運 GHG ゼロエミッションプロジェクト : 国際海運ゼロエミッションプロジェクト, 第2校, 2020.
 - 3) Kawasaki Heavy Industries, Ltd. Website : https://global.kawasaki.com/en/mobility/marine/technology/energy_saving.html (accessed on 13th September 2022)
川崎重工業株式会社ウェブサイト : https://www.khi.co.jp/mobility/marine/technology/energy_saving.html, (参照 2022-9-13).
 - 4) Araki, M., Ohashi, K. and Hirata, N. : A Study of Shape Optimization and the Scale Effects on Energy Saving Device, Conference Proceedings Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Volume 20, pp.411-414, 2015.
荒木元輝, 大橋訓英, 平田信行 : 省エネ付加物に関する形状最適化とその尺度影響に関する一考察, 日本船舶海洋工学会論文集, 第20号, pp.411-414, 2015.
 - 5) Inukai, Y., Itabashi, M., Sudo, Y., Takeda, T. and Ochi, F. : Energy Saving Device for Ship—IHIMU Semicircular Duct—I, IHI Engineering Review, Volume 40, No. 2, pp.59-63.
 - 6) Okamoto, Y. and Masuda, S. : Interaction Between Two Energy-Saving Devices, Journal of the Kansai Society of Naval Architects, Volume 232, pp.25-30, 1999.
岡本幸彦, 増田聖始 : 省エネルギー付加物の相互干渉, 関西造船協会誌, 232 巻, pp.25-30, 1999.
 - 7) Kimura, K., Ando, S., Ono, S. and Tanaka, Y. : A Method to Predict Full Scale Performance of the Propeller Boss Cap Fins (PBCF), Proceedings of Sixth International Symposium on Marine Propulsors smp'19, 2019.
 - 8) Hori, M. : Research on design methods for energy-saving device for ships using numerical computation techniques, Doctoral thesis, Osaka university. 2017.
堀正寿 : 数値計算技術を利用した船舶省エネルギー装置の設計手法に関する研究, 博士論文, 大阪大学, 2017.
 - 9) Okada, Y., Katayama, K., Okazaki, A., Okazaki, M., Fukuda, K., Kobayashi, Y. and Kajino, T. : The Battle Royal of Energy Saving Devices for a Ship, Proceedings of Fifth International Symposium on Marine Propulsors smp'17, 2017.
 - 10) Ichinose, Y., Fukasawa, R. and Ohba, H. : Development of the Semicircular-Duct-Type Energy Saving Device with Upper-side Parallel Part, Conference Proceedings Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Volume 23, pp.403-406, 2016.
一ノ瀬康雄, 深澤良平, 大場弘樹 : 上部に平行部を持つ半円状ダクト型省エネ付加物の開発, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第23号, pp.403-406, 2016.
 - 11) Okada, Y., Katayama, K., Kobayashi, Y., Hiroi, T., Ichinose, Y. and Ando, J. : A Study about Interaction of Propellers with Multiple Energy Saving Devices -The Effect to Self-Propulsion Factors due to Propeller Position and Pitch Distribution -, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Volume 32, pp.1-8, 2020.
岡田善久, 片山健太, 小林洋祐, 拾井隆道, 一ノ瀬康雄, 安東潤 : 複数の省エネ付加物とプロペラの干渉影響に関する研究, 日本船舶海洋工学会論文集, 第32号, pp.1-8, 2020.
 - 12) Katayama, K., Okada, Y., Ichinose, Y., and Fukasawa, R. : Propulsion Performance Optimization of “Neighbour Duct” by CFD’, Proceedings of MARINE 2017, pp.529-537, 2017.
 - 13) Okada, Y., Kawasaki, M., Katayama, K., Okazaki, A., Fukuda, K., and Okazaki, M. : The development of “Ultimate Rudder” for EEDI, Proceedings of MARINE 2015, pp.605-612, 2015.
 - 14) Yasaki, A. : About a Chart to Estimate Wake Fraction of Actual Ship from Model Test using Model Shi, Bulletin of the Society of Naval Architects of Japan, Volume 40, pp.270-272, 1969.
矢崎敦生 : 模型船による水槽試験から実船の伴流係数を推定するための図表について, 日本造船学会誌, 第40号, pp.270-272, 1969.