九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

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 ： プロペラ位置とピッチ分布による自航要素への影響

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/2324/7177173

出版情報：Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers. 32, pp.1-8, 2020-12. The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers
バージョン：
権利関係：© 2021 The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers

KYUSHU UNIVERSITY

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

－プロペラ位置とピッチ分布による自航要素への影響－

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　一ノ瀬　康　雄**　　正会員　安　東　　潤***

A Study about Interaction of Propellers with Multiple Energy Saving Devices
-The Effect to Self-Propulsion Factors due to Propeller Position and Pitch Distribution -

by　Yoshihisa Okada, *Member*　Kenta Katayama, *Member*
Yosuke Kobayashi,　Takamichi Hiroi, *Member*
Yasuo Ichinose, *Member*　Jun Ando, *Member*

Summary

In recent years, ship owners and shipyards need more energy-saving vessels by the regulation of SOx and EEDI (Energy Efficiency Design Index). Therefore, main shipyards are already equipped with ESDs (Energy Saving Devices) in front and behind the propeller, such as a stern duct and a rudder bulb. However, there are almost no research examples of the interaction of propellers with ESDs, and there is a possibility of improvement of propulsion performance by consideration of the interaction.

The self-propulsion test results with the stern duct and rudder bulb showed almost the same effect as adding the energy-saving effect of each ESD, and the highest energy-saving effect compared with bare hull was 15.0%. Also, due to the propeller position and pitch distribution, BHP (Brake Horse Power) difference of a maximum of 4.9% occurred. 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 of propeller with ESDs also changed.

In this paper, the authors described model test results to investigate the interaction of propellers with ESDs for achievement of highest efficiency of propulsion devices.

1. 緒　　言

2020 年 1 月に導入された SOx 排出規制の対応策として，船主や運航会社は①低硫黄燃料油の使用，②排ガス処理装置の搭載，③LNG 燃料船への切り替えのいずれかの選択を迫られている．特に“低硫黄燃料油の使用”を選択する場合，燃料費の負担が増加するため，船主や運航会社は燃費の改善に躍起になっている．

また，2013 年に発効されたエネルギー効率設計指標 EEDI（Energy Efficiency Design Index）は 2020 年に EEDI・Phase-2，2025 年に EEDI・Phase-3 まで引き上げられることが決まっており，さらなる船舶の推進性能向上が課題となっている．

造船・海運業界全体の省エネルギー志向に後押しされるように，最近の船舶においてはプロペラの前後に船尾ダクトや舵バルブの搭載が増えつつある．例えば，ジャパンマリンユナイテッド㈱では，プロペラの前方に船尾ダクト（Super Stream Duct, Semi-Circular Duct），プロペラの後方にフィン付き舵バルブ（Swept-back Up-thrusting Rudder Fin with BULB）を装着することで推進性能の改善を図っている [1]．

またプロペラに関しても，船体の伴流に対してプロペラ効率を最大化する形状設計が行われている（例えば [2]）．一方，プロペラと船体の干渉を示す自航要素はプロペラ形状により変化することが知られている [3]が，複数の省エネ付加物が搭載された場合のプロペラ形状による自航要素の変化については明らかになっていない．これを解明することができれば，プロペラと省エネ付加物の一体設計が可能となり，推進器全体の高性能化を実現できる．

本研究では，省エネ付加物を搭載した船の自航要素がプロペラ形状によってどの様に変化するかを検証するために，プロペラ位置とピッチ分布を変化させた自航試験を実施した．

*　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 2 年 9 月 3 日

また自航要素の変化要因を調査するために，プロペラや省エネ付加物周りの流場を計測した．

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．模型プロペラは MAU 断面にて 2 種類の異なるピッチ分布とし，設計点における効率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，また先端では小さくなる逓減ピッチ分布，MPNo. 2 は一定ピッチ分布である．Fig. 3 に各プロペラのピッチ比分布を示す．プロペラの回転方向は船尾から見て時計回りである．

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	
Propeller (MPNo. 1 and 2)		
	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	
Expanded area ratio	0.5500	
Boss ratio	0.1600	

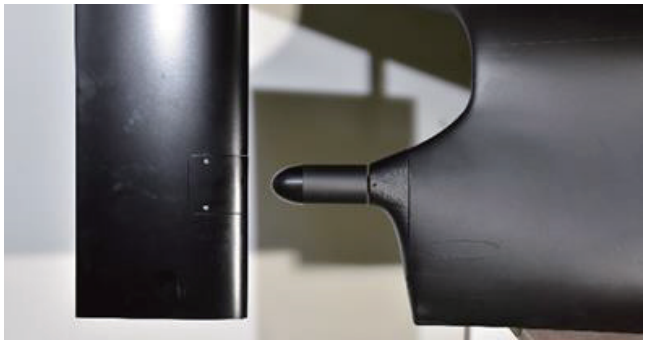

Fig. 1　82BC Stern Shape.

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）[4]と舵バルブ（Ultimate Rudder Bulb）[5]を本船用に設計した．Neighbor Duct は船尾側面を沿う流れを利用し推力を発生することを目的とした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．模型船に省エネ付加物を装着した状態を Fig. 4 に示す．

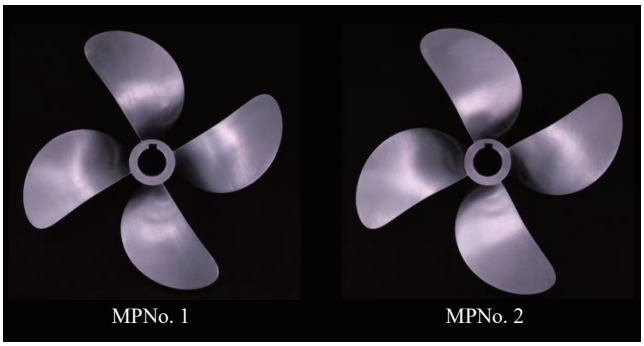

Fig. 2　Propeller model of MPNo. 1 and 2.

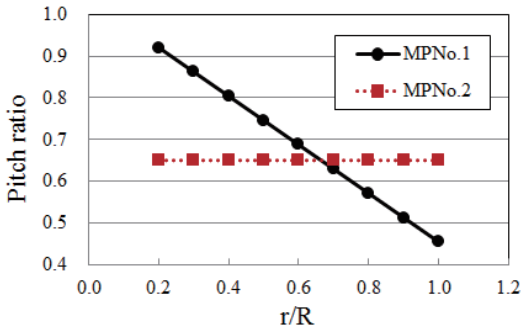

Fig. 3　Pitch distribution of MPNo. 1 and 2.

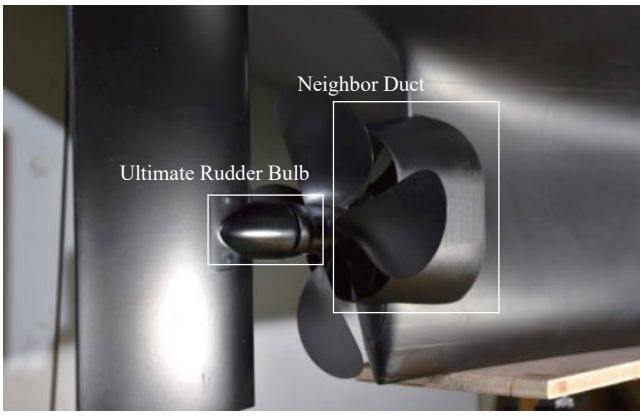

Fig. 4　Energy saving devices for model test.

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)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.

Table 2　Model test items.

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

*Item of PIV measurement

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 μm, 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であり, フレームストラドリング法により粒子画像の撮影を行った. 一航走中に約 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. またプロペラの映り込みがない場合, 計測はプロペラの回転と同期させずプロペラ 1 回転中の平均速度場を評価, 映り込みがある場合は同期した計測を行い, プロペラ位相角 0 度での平均流場を評価した.

計測位置は Fig. 6 に示すように船尾ダクトの前縁付近から舵方向に向けて S1 から S6 の計 6 断面を対象とした. S1 と S2 は船尾ダクト前縁からダクト翼弦長のそれぞれ 5%前方と 20%後方, S3 は船尾ダクト後縁からダクト翼弦長の 5%後方, S4 は舵バルブの最大径位置, S5 は舵前縁部から舵翼弦長の 5%後方, S6 は A.P.とした.

本研究で用いた没水型ステレオ PIV 装置は, PIV 装置の造波等による流場への影響を避けるために, PIV 装置を右舷側に設置して, 計測面となるレーザーシート照射口を上流側とするのが標準的な使用方法である. 一方, S1 や S3 等を計測する場合, レーザーシートとカメラの間にダクトやプロペラが存在し計測可能な範囲が小さくなるため, PIV 装置を反転させ左舷側からの計測も行った. これにより,レーザーシートとカメラの間に物体が存在しなくなるため, S1 や S3 を計測する場合にも十分な計測領域を確保することが可能となった. また PIV 装置を左舷側に設置した場合でも流場への影響はほとんどないことを, 両舷から計測した伴流の比較で確認している.

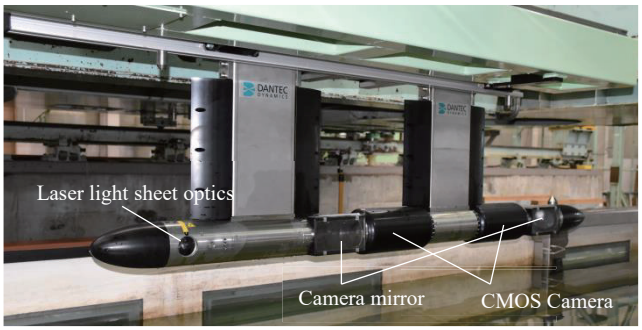

Fig. 5　Submersible PIV probe.

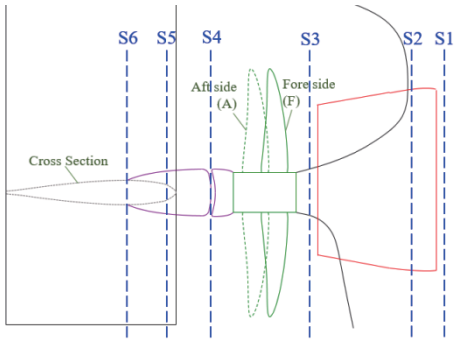

Fig. 6　Measurement section by PIV.

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

抵抗試験の解析法は 3 次元外挿法とし, 平板の摩擦抵抗係数は Schoenherr の式により算出した. 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 $1\text{-}w_S$ の算出においては, 矢崎チャート[6] 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 Fn=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.

$$\mathrm{BHP} = \frac{\mathrm{EHP}}{\eta_D\,\eta_T} \tag{1}$$

$$\eta_D = \eta_H\,\eta_{OS}\,\eta_R \tag{2}$$

$$\eta_H = \frac{1-t}{1-w_S} \tag{3}$$

$$1 - w_S = 0.95\,\varepsilon\,(1 - w_T) \qquad (4)$$

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
$1\text{-}w_T$	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 および 2 の Kempf のレイノルズ数 $R_{nk}=4.2\times10^5$ 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 ηo に顕著な差は見られなかった．

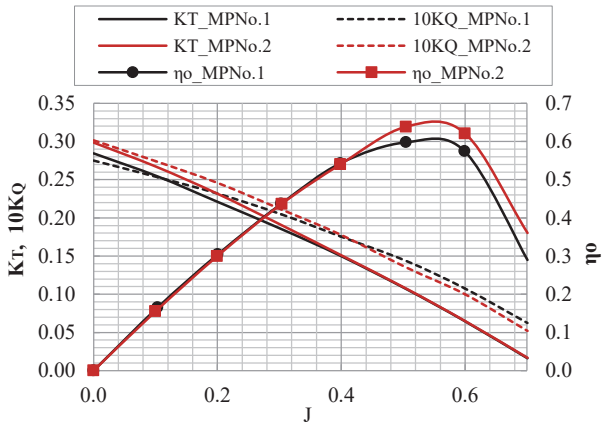

Fig. 7　Propeller open water test results.

3. 3 自航要素と省エネ効果の解析結果

Table 3 に模型および実船スケールにおける船尾ダクト装着時の自航要素と BHP 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）にて最大となる 6.1%の改善率が得られた．両プロペラともにプロペラ位置が後方の場合に改善率が高くなる傾向となり，ピッチ分布よりもプロペラ位置が与える影響の方が大きい結果となった．有効伴流係数 $1\text{-}w_T$ は，MPNo. 2（一定ピッチ）の改善率が高い傾向が伺える．プロペラ位置の比較では，前方で改善率が高くなっている．

プロペラ位置を後方とすると，推力減少係数 1-t は向上し，有効伴流係数 $1\text{-}w_T$ は悪化するという傾向は裸殻状態でも報告されている [7]．要因としては，プロペラ作動による船尾の圧力低下による 1-t の影響が小さくなる，また伴流が速度回復して 1-wt が悪化するというものであるが，本計測のような船尾ダクトが装着された状態においても同様の傾向を確認した．船後プロペラ効率比 η_R は MPNo. 2 の改善率が高くなるものの，前後位置での傾向は不明確である．

船尾ダクトのみ装着した場合の自航試験結果より，各自航要素はプロペラ位置やピッチ分布により干渉影響に差が生じることが分かった．

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

MPNo.	No.1	No.2	No.1	No.2
Propeller position	Fore (F)		Aft (A)	
E.S.D.	Duct			
Δ 1-t (%)	2.2	2.5	6.1	4.5
Δ $1\text{-}w_T$ (%)	3.6	6.5	2.8	5.0
Δ 1-ws (%)	2.5	4.6	2.0	3.5
$\Delta\eta_H$ (%)	4.9	7.4	8.2	8.3
$\Delta\eta_R$ (%)	-0.1	2.6	0.9	2.4
Δηos (%)	-0.6	1.1	0.4	2.0
BHP (kW)	7724	7228	7344	7113
Δ BHP (%)	4.0	10.2	8.8	11.6

次に，Table 4 に模型および実船スケールにおける船尾ダクトと舵バルブ装着時の自航要素と BHP の改善率を示す．

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

MPNo.	No.1	No.2	No.1	No.2
Propeller position	Fore (F)		Aft (A)	
E.S.D.	Duct + Bulb			
Δ1-t (%)	5.8	4.0	6.7	5.6
Δ $1\text{-}w_T$ (%)	6.2	8.3	5.1	6.7
Δ 1-ws (%)	4.4	5.9	3.6	4.8
$\Delta\eta_H$ (%)	10.6	10.5	10.7	10.8
$\Delta\eta_R$ (%)	2.5	3.9	1.4	4.4
Δηos (%)	-0.7	0.8	-0.2	1.7
BHP (kW)	7145	6955	7182	6844
Δ BHP (%)	11.2	13.6	10.8	15.0

推力減少係数 1-t は MPNo. 1（翼根部ピッチ大）の方が向上している．また，両プロペラにおいてプロペラ位置が後方の場合に高い改善率が得られた．有効伴流係数 $1\text{-}w_T$ は，MPNo. 2（一定ピッチ）にて 8.3%と大きな改善効果が得られた．プロペラ位置の比較より，前方で改善率が高くなっている．船後プロペラ効率比 η_R は前後位置での傾向は不明確ではあるが，MPNo. 2 の改善率の向上が顕著に表れた．

船尾ダクトと船尾バルブ装着時の各自航要素については，プロペラ位置やピッチ分布によってΔ1-t は最大 2.7 ポイント，$\Delta 1\text{-}w_T$ は最大 3.2 ポイント，$\Delta\eta_R$ は最大 3.0 ポイント変化し，無視できない差が生じることが分かった．また BHP

に関しては, MPNo. 1(F)の裸殻状態と比べ，船尾ダクトと舵バルブを装着すると 10%を超える有効な省エネ効果が得られ，MPNo. 2(A)では 15.0%となった.

本研究における試験結果より, 船尾ダクトのみ装着した場合と，船尾ダクトと舵バルブを装着した場合を比較し，省エネ効果にこそ差があるものの, 干渉影響の変化は概ね同様の傾向であることが分かった. また船尾ダクトと舵バルブを組み合わせることで各自航要素の改善効果が向上し, 高い省エネ効果が得られる結果となった.

4. PIV 計測による自航要素の変化要因の調査

まず初めに PIV 計測の精度検証を行う目的で模型船の伴流分布を計測し, 過去に同じ模型船を用いた 5 孔ピトー管による計測結果との比較を行った. 船体はダミーボスを装着した抵抗試験状態とし，省エネ付加物と舵は装着していない.

5 孔ピトー管と PIV による伴流の計測結果を Fig. 8 に示す. 図中の黒線の円はプロペラの 1.0R を表している．PIV による伴流の計測結果は 5 孔ピトー管と比較し, 軸方向と円周方向ともに良く一致していることが分かる.

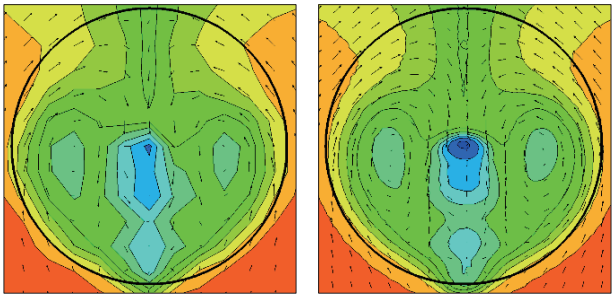

Fig. 8　Measurement results of wake distribution.

自航試験の結果より, プロペラ位置やピッチ分布により推力減少係数 1-t，有効伴流係数 1-w_T および船後プロペラ効率比 η_R が変化することが明らかになった．そこで PIV によって計測された流場から自航要素の変化要因を調査した. なお, 本章では船尾ダクトと舵バルブの両方を装着した状態の PIV 計測結果を用いている.

船尾ダクト直前 S1（ダクト前縁からダクト翼弦長の 5%前方）における PIV 計測結果を Fig. 9 に示す．右舷からの計測ではダクトの存在によりダクト前縁前方の計測はできなかったため，左舷側の流場で評価を行う.図中の細線はプロペラの 1.0R と 0.7R の円（以降, 全ての PIV 計測結果に記載），中線はダクトの前縁形状, 太線は計測位置における船尾断面を示す．流速分布は船速を 1.0 とした比率で表している.

プロペラ間の比較では，0.7R より内側となる船尾ダクトの左舷上部付近において，MPNo. 2（一定ピッチ）に比べて MPNo. 1（翼根部ピッチ大）の方が流速の速い領域が広がっている．これは MPNo. 1 の方が翼根から中央付近のピッチが大きいため, 吸い込みが強くなることで発生した加速領域と思われる．一方でプロペラ位置の比較では，プロペラが後方の場合に全体的に低速となっている. 船尾ダクトとプロペラが離れたことで吸い込みが弱くなったものと考えられ, 船尾ダクト左舷上部の加速領域も狭くなっている.

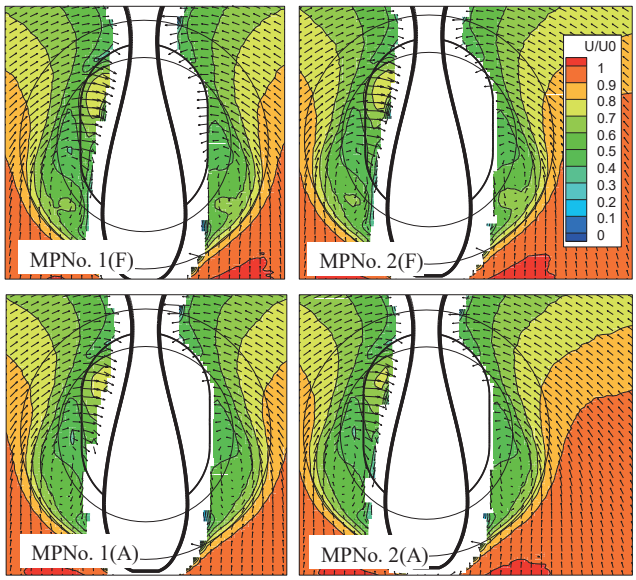

Fig. 9　PIV measurement results at S1.

次に，プロペラ直後 S4（舵バルブの最大径位置）の PIV 計測結果を Fig. 10 に示す．左舷からの計測ではプロペラの存在によりプロペラ後方の計測はできなかったため，右舷側の流場で評価を行う．MPNo. 1 に比べて，翼先端側のピッチが大きい MPNo. 2 では 0.7R よりも外側で加速されており, ピッチ分布の差と一致している. プロペラ位置が後方の場合は翼と計測位置が近くなるため, 縮流の影響により全体的に低速になっているものと思われる.

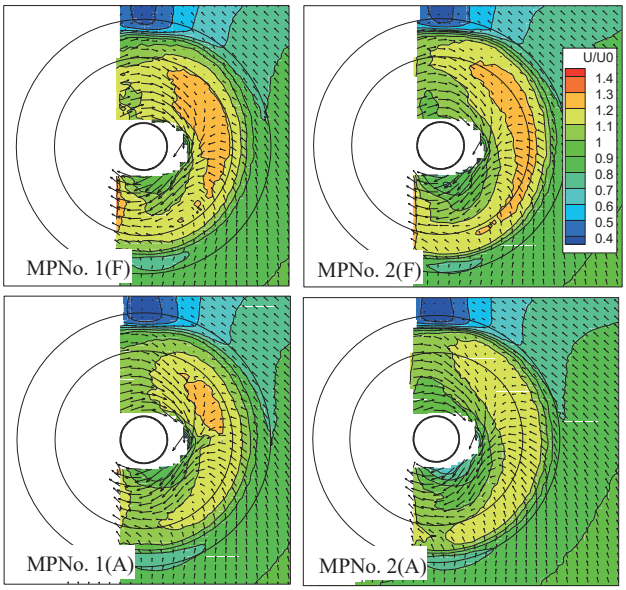

Fig. 10　PIV measurement results at S4.

ダクト前縁 S1 およびプロペラ直後 S4 の流場がプロペラ形状によって変化していることから，プロペラ形状によりダクト推力や舵抵抗が増減して推力減少係数 1-t が変化している可能性が考えられる．そこで, S1 のダクトの前縁形状に対する法線方向速度（ダクト中心への向きを正とする）と主流方向速度のなす角を α（度），S4 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 β（度）として，ダクトへの流入角 α と舵への流入角 β を調査した．

S1 の PIV 計測結果より求めた α を Fig. 11 に示す．MPNo. 2（一定ピッチ）に比べて，MPNo. 1（翼根部ピッチ大）の方が左舷側のダクト前縁にて流入角 α が増加していることから, MPNo. 1 では船尾ダクトへの迎角も大きくなりダクト推力が増加していると推察される. プロペラ前後位置での比較では，後方の方が流入角 α は減少している．

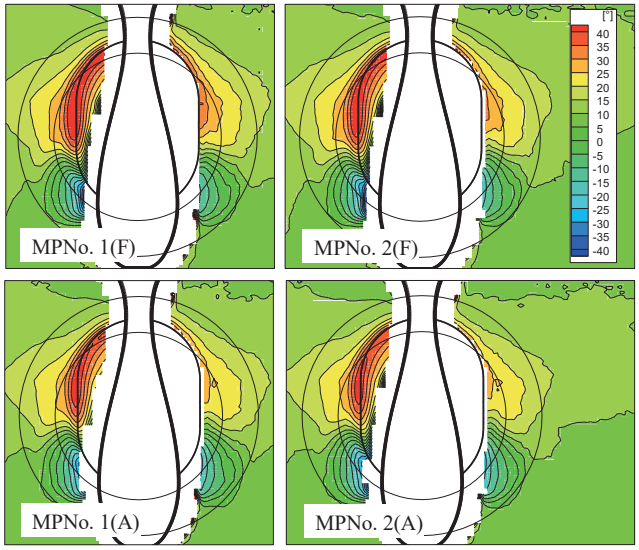

Fig. 11　Distribution of α(deg.) at S1.

次に Fig. 12 のように，ダクト前縁の外周長さ P_D 上にて PIV 計測できた左舷側の任意の点 $p/(P_D/2)$におけるダクトへの流入角 α の比較を Fig. 13 に示す．

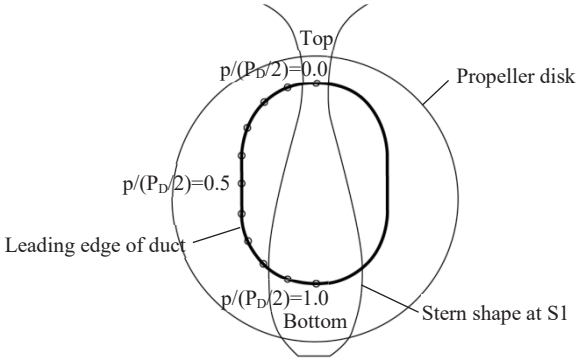

Fig. 12　Definition of arbitrary points on half peripheral length(P_D/2) of duct for port side.

Fig. 13 より，全範囲にて MPNo.1（根元ピッチ大）のダクトへの流入角 α が最も大きくなり, 特にダクト上部付近でその傾向が強い．ダクト側面部から下部の範囲では，MPNo. 1 と 2 の両プロペラにおいて, プロペラ位置が後方よりも前方にて α が大きくなる傾向が顕著である．

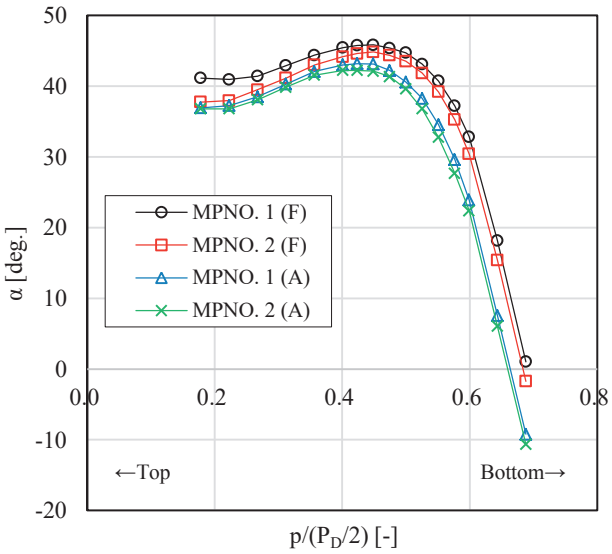

Fig. 13　Comparison of α(deg.) at leading edge of duct for port side.

さらにピッチ分布の影響を調べるために, 同じプロペラ位置における MPNo. 2（一定ピッチ）に対する MPNo. 1（根元ピッチ大）の α の差を Fig. 14 に示す．プロペラ前方位置において後方よりも α の差が大きく, プロペラとダクトの干渉影響が強くなっていることがわかる．つまり，推力減少係数 1-t の改善に関わるダクト推力の増加を考えると，プロペラを前方に配置し, MPNo. 1 のような翼根部のピッチが大きな方が有利となる．

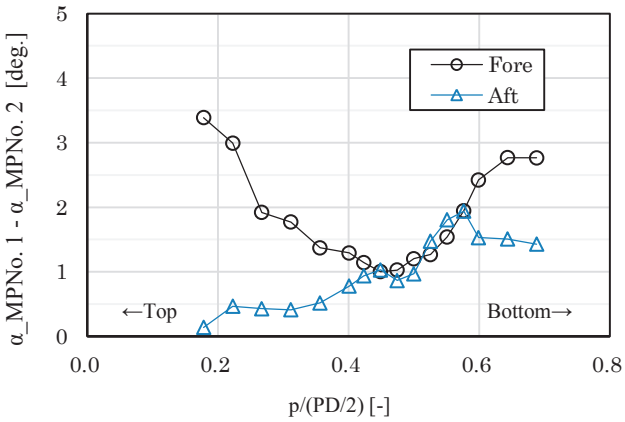

Fig. 14　Difference in α(deg.) between MPNo. 1 and 2.

さらに，S4 の PIV 計測結果より求めた β（度）を Fig.15 に示す．ここでは舵抵抗の増減への影響を調べるため，舵前

縁の直前に該当するプロペラ軸中心の垂直方向（赤線）の流入角 β の絶対値に着目した．

プロペラ位置が同じ場合，MPNo.2（一定ピッチ）よりも MPNo.1（翼根部ピッチ大）の方が舵への流入角 β が大きくなっており，舵の抵抗成分に含まれる前縁推力の成分が増加し，舵抵抗が減少していることが考えられる．プロペラ位置の比較では，両プロペラにおいて後方の方が流入角 β は大きく，舵の抵抗減少が期待できる．即ち，推力減少係数 1-t の改善に影響する舵抵抗の増減について，プロペラ位置を後方に配置し，MPNo.1 のような翼根部のピッチが大きい方が有利といえる．

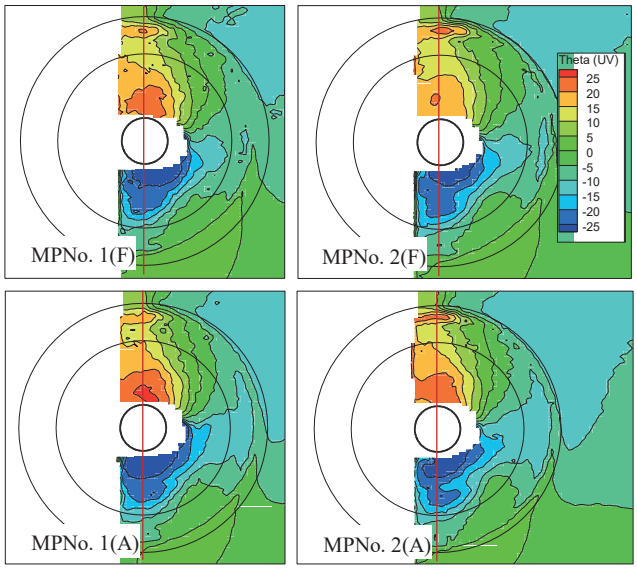

Fig. 15　Distribution of β(deg.) at S4.

以上のようにピッチ分布の違いについてはダクトへの流入角 α や舵への流入角 β が大きくなる MPNo.1（翼根部ピッチ大）にて推力減少係数 1-t の改善率が高い自航試験結果が得られており，本研究における流場計測結果と一致している．

一方でプロペラ位置については，船尾ダクトの推力増加に対しては前方の方が効果的であり，舵抵抗の低減には後方の方が効果的と推察される．本研究における試験結果では，Table 4 のようにプロペラ位置を後方とした MPNo.1（翼根部ピッチ大）にて推力減少係数 1-t の改善率が最も高くなっている．自航試験の 1-t の増減については，プロペラ作動による船尾の圧力低下の影響も含まれているため，船尾ダクトの推力増加よりも舵抵抗の減少効果の方が 1-t の改善への影響度が高いとは断言できない．

今後，プロペラ位置の違いにおける船尾の圧力変化の影響やプロペラ形状の差による船尾ダクトの推力や舵抵抗の増減について，模型試験や数値計算を用いた検証が必要である．

最後にプロペラ直前 S3（船尾ダクト後縁からダクト翼弦長の 5%後方）の PIV 計測結果を Fig. 16 に示す．プロペラの映り込みがあったため，プロペラ位相角 0 度での平均流場を評価した．図中の中線はダクトの後縁形状を表している．プロペラ位置の比較では，前方位置にて全体的に流速が速い．これはプロペラと計測位置が近いため，吸い込みが強くなっているものと思われる．

プロペラ間の比較では 0.7R より内側において MPNo. 2 に比べて翼根のピッチが大きい MPNo. 1 の方が高速となっている．一方 0.7R より外側においては，MPNo. 1 に比べて 0.7R より外側でピッチが大きい MPNo. 2 の方が高速となっている．プロペラ直前の断面においてもピッチ分布の影響が確認されたが，有効伴流係数 1-w_T との関係は明らかではない．

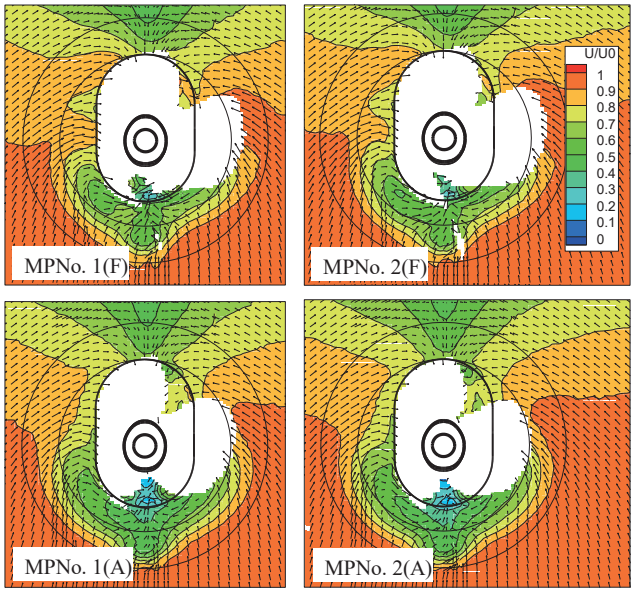

Fig. 16　PIV measurement results at S3.

5. 結　言

船尾ダクトおよび船尾ダクトと舵バルブが搭載された船体に対して，MPNo. 1（翼根部ピッチ大）と MPNo. 2（一定ピッチ）の 2 種類の模型プロペラを用いてプロペラ位置を変更した自航試験と PIV 計測を実施し，プロペラ形状が省エネデバイス付き船体の自航要素に与える影響を検証した．本研究では以下の知見が得られた．

1）推力減少係数 1-t は，プロペラ間の比較では翼根部ピッチ大の MPNo. 1 の方が高い値を示した．船尾ダクトと舵バルブを装着した場合のダクト前縁の流場計測結果から，MPNo. 2 と比べて翼根部のピッチが大きい MPNo. 1 の方がダクト前縁付近での流入角 α が大きくなっており，ダクト推力が増加したものと推察される．さらに，プロペラ直後の流場計測結果から MPNo.2 よりも MPNo.1 の方が舵前縁付近での流入角 β が大きく，舵抵抗の減少が考えられる．以上のことから MPNo.1 にて，1-t が向上したものと考えられる．

2） プロペラ前後位置の比較では,1-t は後方の方が高い値となった．プロペラ位置については，船尾ダクトの推力増加には前方, 舵抵抗の減少には後方が好ましいことが分かったが，1-t の増減には船尾の負圧領域の影響も含まれており, 今後の模型試験や数値計算での検証が必要である．

3） 有効伴流係数 $1\text{-}w_T$ は，一定ピッチ分布の MPNo. 2 の方が改善していた．またプロペラ前後位置の比較では，プロペラ位置が前方にて改善傾向が伺えた．

4） これらの自航要素の変化は, 船尾ダクト単独時とダクトおよび舵バルブ搭載時に概ね確認された．

5） 本研究における模型試験の結果から実船スケールにおける制動馬力を評価した場合, MPNo. 1(F)の裸殻状態と比べてプロペラ前後に複数の省エネ付加物を装着した状態の MPNo. 2(A)にて 15.0%の馬力削減効果が得られた．また，同状態においてプロペラ位置やピッチ分布を変更した場合，最大 4.9%の馬力差が確認できたため, 干渉影響を考慮した推進装置の設計でさらなる省エネ化が期待できる．

今後, 数値計算を用いてプロペラ位置および形状と自航要素の関係について検証をするとともに, 船尾ダクトと舵バルブを装着した状態の高性能化について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) Web site : Japan Marine United Corporation, https://www.jmuc.co.jp/rd/development/hydrodynamics/energy-saving/, (accessed on 28th February 2020).
2) Saito, Y., Hino, T., and Masuda S.: Propeller Shape Optimization in Wake Field Using CFD Analysis, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol. 26, pp.35-50, 2017 (in Japanese).
齋藤裕樹，日野孝則，増田聖始 ：CFD を用いた伴流中プロペラ形状最適化（第一報），日本船舶海洋工学会論文集，第 26 号, pp.35-50, 2017.
3) Hamasaki, J., Sakajiri, Y., Ito, M., Yamasaki, S., Tamashima, M., and Ogura, M.: Effects of Propeller Diameters, Skew Angles and Propeller Longitudinal Positions on Self-Propulsion Factors of a Full Ship, Transactions of the West-Japan Society of Naval Architects, Vol. 72, pp.141-150, 1986 (in Japanese).
浜崎準一, 坂後幸広, 伊藤政光, 山崎正三郎, 玉島正裕, 小倉理一 : プロペラ直径，スキューおよび前後位置が肥大船の自航要素におよぼす影響，西部造船学会々報，第 72 号, pp.141-150, 1986.
4) Katayama, K., *et.al.*: Propulsion Performance Optimization of “Neighbour Duct” by CFD’, Proceedings of MARINE 2017, pp.529-537, 2017.
5) Okada, Y., *et.al.* : The development of “Ultimate Rudder” for EEDI, Proceedings of MARINE 2015, pp.605-612, 2015.
6) Yazaki, A.: A Chart for Estimating Wake Fraction of Actual Ships from Tank Test Results by using Model Ships, Bulletin of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 40, pp.270-272. 1969 (in Japanese).
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.
7) G. P. Gómez, *et. al.* : Detailed design of ship propellers, F.E.I.N., pp.262-263, 1998.