プロペラー体型省エネデバイスの研究

川島 英幹*、久米 健一*、坂本 信晶*

Study of Weather Adapted Duct (WAD)

by

Hideki KAWASHIMA, Kenichi KUME and Nobuaki SAKAMOTO

Abstract

National Maritime Research Institute (NMRI) has developed Weather Adapted Duct (WAD)¹⁾ which is a stern duct type energy-saving device. WAD consists of a propeller with special pitch distributions and a front duct placed very close to the propeller. Small size is key feature of WAD. The diameter of WAD at outlet is less than half diameter of the propeller. WAD is so small that harmful cavitation hardly occurs. WAD improves self-propulsion factors of ship, and reduces required power from 3% to 7%.

NMRI has also developed the design method of WAD. To investigate relation of duct circumferential elements and self-propulsion factors, self-propulsion tests were carried out using a tanker model with 1/3 partial duct. The results indicate upper region of WAD improves 1-t, and right region improves 1-W and $\eta_{\rm R}$. In order to analyze the scale effect in hydrodynamic characteristics and self-propulsion factors, viscous CFD simulations are carried out using bulk carrier with/without WAD using in-house CFD solver "SURF⁷)" with overset grid assembler "UPGRID⁶)" in model and full scales.

Cavitation tests were performed in order to clarify the influence of WAD on the pressure fluctuation induced by the propeller cavitation. The results show that WAD has little effects on the cavitation and reduces the level of pressure fluctuation in the case of high-loading conditions of propeller instead.

At the moment, 21 ships are planned to build with WAD.

* EEDI-PT
 原稿受付 平成 26 年 8 月 15 日
 審 査 日 平成 26 年 10 月 15 日

目 次

1. まえがき・・・・・20
2. Weather Adapted Duct (WAD) ······20
3. WAD の省エネ効果・・・・・21
3.1 船型と WAD の省エネ効果・・・・・・21
3.2 平水中における WAD の省エネ効果・・・21
3.3 実海域における WAD の省エネ効果・・・23
4. WAD 設計法・・・・・・24
4.1 WAD の簡易設計法・・・・・・・・・24
4.2 WAD 用プロペラの設計法・・・・・25
4.3 WAD の周方向部分の自航要素への影響・25
4.4 CFD を用いた WAD の詳細検討・・・・・27
5. キャビテーション性能の確認・・・・・30
5.1 WAD がキャビテーションに与える影響・31
5.2 WAD が船尾変動圧力に与える影響・・32
6. 波浪中において WAD にかかる流体力・・・・・33
7. まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・33
参考文献 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·

1. まえがき

EEDI 規制の適用や、重油価格の高騰などの要 因により、船舶の省エネ化への要求は年々高まっ てきている。そこで海上技術安全研究所では、重 点研究「実海域省エネデバイスの研究」の一部と して「プロペラー体型省エネデバイスの研究」を 平成23年度から平成25年度にかけて実施し、船 尾ダクト型省エネデバイス WAD (Weather Adapted Duct)を開発した¹⁾。WAD は一般的な船 尾ダクトと同じくプロペラ前方に配置されるが、 出口直径がプロペラ直径の 50%以下と従来の船 尾ダクトに比べて小型である。WAD は小型化す ることにより、有害なキャビテーションが発生し やすいプロペラ翼端付近への影響を小さくし、プ ロペラに近接した配置とすることで干渉効果を 大きくしていることが特徴である。さらにプロペ ラのピッチ分布についても WAD との干渉を考慮 し、通常のプロペラに対して翼根でピッチを立て、 翼端でピッチを寝かしたものとしている。またダ クトをプロペラに近づけることで、ダクトにおけ るプロペラの吸い込み効果が高まり、特に波浪中 などのプロペラ荷重度が高い状態で省エネ効果 が高まるため、装置名に「Weather」を冠してい る。

本報告では WAD の特徴と省エネ効果、設計、 キャビテーション性能、波浪中航行時に WAD に 加わる流体力についての研究成果について報告 する。

2. Weather Adapted Duct (WAD)

WAD は翼断面形状を持つリング状の物体をプ ロペラの前方に取り付ける船尾ダクト型省エネデ バイスの一種であり、ダクトの出口直径をプロペ ラ直径の 50%以下とし、ダクト後端とプロペラ前 縁の間隔がプロペラ直径の 10%以下であること を特徴とする。模型船に設置した WAD の写真を 図-1に示す。



図-1 模型船 (82型BC) に設置した Weather Adapted Duct (WAD)

WAD はプロペラ前方に設置されており、WAD 自体が船尾の流れを阻害しプロペラへの流入速度 を低下させるため、伴流率(1-W)が改善する。し かし、プロペラ直前に物体をおけば一般的には抵 抗となり、推力減少率(1-t)が悪化する。一方、船 尾部分では、プロペラに向かって、流れが絞り込 まれて行くため、プロペラ軸に対して角度を持っ た流れとなっている。そこでプロペラ直前に置く 物体を WAD のように翼断面形状を持つものとし て、船尾の流れに対して適切な迎角を持たせれば、 翼形状が揚力を発生し、その進行方向成分が推力 となる。この推力により、推力減少率の悪化を防 ぐことができ、条件によっては、改善する場合も ある。またプロペラ作動時には WAD 周りの流れ が加速されるため、揚力に伴う推力がさらに大き くなる傾向がある。加えて WAD が船尾に設置さ れることで、船尾部の圧力回復が進むことや、整 流効果により推力減少率が改善すること等の効果 が考えられる。WADの作動原理を図-2に、設計 コンセプトを図-3に示す。



WAD の特徴をまとめると以下のようになる。

- プロペラとダクトを近接配置(プロペラ直 径の10%以下)していることで高い干渉効 果が得られる。特に波浪中などのプロペラ 荷重度が高い状態で省エネ効果が大きくな る。
- 近接配置による高い干渉効果の副作用としてダクトやプロペラにおける有害なキャビテーションの発生が懸念されるが、ダクトを小直径化することでキャビテーションが問題となり易いプロペラ翼端部への影響を排除する。
- ダクトの直下流となるプロペラ翼根部でピッチを増加させる一方、ダクトより外側の 翼端部ではピッチを減少させることにより、 プロペラ翼端部でのキャビテーションを抑 制する。
- 直径を小さくすることで軽量化が可能になり、船体構造への負担が小さい。

3. WAD の省エネ効果

3.1 船型と WAD の省エネ効果

WAD の省エネ効果は船型により異なる。複数 の船型に対して WAD を装備した状態で水槽試験 を実施した結果によれば、その省エネ効果は 3~7%程度で、図-4、図-5 に示すように WAD 非装備時の伴流率と推力減少率により大まかな予 想ができる²⁾。この結果から WAD は、伴流率お よび推力減少率が小さい船型で省エネ効果が大き く、肥大船型に適していることが判る。



図-4 伴流率と WAD 省エネ効果の関係



図-5 推力減少率と WAD 省エネ効果の関係

3.2 平水中における WAD の省エネ効果

本章では海技研が船型を開発した8万2千トン型パナマックスバルクキャリア(82BC 船型)における平水中でのWADの省エネ効果について報告する。WADの形状を表すパラメータの定義を図-6に、82BC船型とプロペラ、WADの要目を表-1に示す。



表-1 供試模型船、模型プロペラ、模型 WADの 要目

NMRI 82Pana_Max BulkCarrier			
Scale	1 /29.1		
Principal Dimension		MODEL	ACTUAL
Length Between Perpendiculars	[m]	7.63	222
Length on Designed Load Water Line	[m]	7.73	225
Bredth	[m]	1.11	32.26
Depth	[m]	0.653	19
Draft (Design)	[m]	0.419	12.2

PROPELLER		MODEL	ACTUAL	ACTUAL/MODEI
Diameter	[m]	0.220	6.400	29.1
Pitch Ratio		0.650	0.678	1.043
Boss Ratio		0.160	0.160	1
Expanded Area Ratio		0.550	0.495	0.9
Chord Length at 0.7R	[m]	0.0696		
Number of Blades		4	4	_
Turning Direction		Right Hand	Right Hand	_
Shaft C.L. Height	[m]	0.1203	3.500	29.1
Position from A.P.	[m]	0.1203	3.500	29.1
Position from C.L.	[m]	0.0	0.0	_

WAD					
Wing Section	NMRI				
Diameter of Duct Outlet	Ddo/Dp	0.45			
Length of Duct	Ld/Dp	0.375			
Duct Open Angle	a(degree)	11			

水槽試験は三鷹第二船舶試験水槽(400m水槽) で実施し、WAD 無しの抵抗試験、WAD 有りの抵 抗試験、WAD 無しの自航試験、WAD 有りの自航 試験を実施した。試験状態は計画満載状態である。

全抵抗係数の比較を図-7 に示す。抵抗試験結 果を比較すると、本船型の場合は、WAD の有無 による船体抵抗の違いが見られ、WAD 有りの場 合の全抵抗係数が小さくなっている。

自航試験結果から WAD 有無による自航要素の 変化を比較した。自航解析をする際の抵抗値に、 WAD 無しの抵抗試験結果を使う場合と、WAD 有 りの抵抗試験結果を使う場合の二通りの解析を行 った。解析法の違いにより推力減少率 1-t は異な る結果となった。これは、推力減少率を計算する 際の曳航状態の抵抗値が、WAD 有りの結果から 推定すると小さくなるため、見かけ上推力減少率 が小さくなるからである。WAD の有無による自 航要素の比較を図-8に示す。WAD 無しの抵抗を 基準とした解析の場合、推力減少率は、WAD の 有無によりほとんど変化しないが、伴流率 1-W と、 船後プロペラ効率比 ηR が WAD の効果により改 善していることが判る。



図-7 WAD の有無による全抵抗係数の変化 (計画満載状態)



(計画満載状態)

馬力推定は、WAD 有りの抵抗試験と WAD 有り の自航試験を用いる場合と、WAD 無しの抵抗試 験と WAD 有りの自航試験を用いる場合の2種の 方法で実施した。本来的には WAD 有りの抵抗試 験結果と WAD 有りの自航試験結果を用いて馬力 推定をすることが望ましいと考えられるが、多種 類の WAD の系統試験等、時間的な理由により、 WAD 有りの抵抗試験を実施できない場合には、 WAD 無しの抵抗試験結果と WAD 有りの自航試 験結果を使った解析を行う必要がある。そのため 2種の解析手法を実施することとした。WAD 無し の抵抗試験結果を用いる解析法では、WAD 付の プロペラを一体の推進器と考え、WAD付のP.O.C. (Propeller open characteristics)を用いることも 考えられるが、WAD 自体の流体力学的特性が流 入角に対して敏感で有るため、流入角をもたない オープンウォーター試験の結果から得られる WAD 付の P.O.C.が、船後における作動状態と相 当異なるものと考えられることから、通常のプロ ペラ単独での P.O.C.を用いることとした。

実船の EHP は、抵抗試験結果から 3 次元外挿 法で算出した。自航試験結果の解析において、 WAD が無い場合の伴流修正係数は、矢崎チャー トから求められる値に 0.95 を乗じたものを用い た。WAD 有りの実船の伴流率 1-Ws は、WAD に よる伴流利得の変化が尺度影響を受けず、実船に おいても模型船と同等と考え、以下の式に従って 求めた。

$$1 - W_{S} = \varepsilon_{0} \times (1 - W_{T0}) - \Delta w \tag{3.1}$$

 $\varepsilon = (1 - W_S) / (1 - W_T) \tag{3.2}$

$$\Delta W = (1 - W_{T0}) - (1 - W_T) \tag{3.3}$$

W_{T0}:WAD 無し状態の伴流係数

 $W_{\tau}: WAD 有り状態の伴流係数$

∆w: WAD による伴流係数への影響

ε₀:WAD 無し状態での伴流修正係数

2種の解析手法による馬力推定結果を図-9 に、 設計速力における WAD の有無による実船性能の 変化を表-2 に示す。WAD 有りの抵抗試験結果を 用いて解析した場合は 6%、WAD 無の抵抗試験結 果を用いて解析した場合は 5%の馬力節減効果が あると推定された。



表ー2 設計速力における WAD の有無による実船

性能の変化

Condition			Designed Full	1
Vs(knot)			14.2	
Rudde	r		Mariner	
E	Resistance	without WAD	with WAD	without WAD
Energy Saving Device	Self-Propulsion	without WAD	with WAD	with WAD
Fr			0.156	
EHP(k)	W)	5,419	5,299	5,419
η _R		0.985	0.999	0.999
1-t		0.824	0.814	0.825
1-W _T		0.542	0.497	0.497
(1-W _S) / (1-W _T)		1.117	1.129	1.129
1-Ws		0.605	0.561	0.561
ηн		1.362	1.45	1.471
ηοs		0.516	0.497	0.496
η		0.692	0.72	0.728
ητ			1/1.03	
BHP(k)	W)	7,911	7,434	7,514
N(RPM)		113.4	110.5	110.9
BHP with WAD / BH	1	0.94	0.95	

3.3 実海域における WAD の省エネ効果

実海域での WAD の省エネ効果を調査するため、 アフラマックスタンカーの模型船を用いて、波浪 により船速が低下した状態を模した自航試験を実 施した¹⁾。試験に用いた模型船と模型プロペラの 要目を表-3 に、プロペラ回転数一定で、船速を 変化させた自航試験の結果を図-10 に示す。船速 低下しプロペラ荷重度が高い状態では、通常の状 態に比べて、省エネ効果が高まることが判る。

Aira_Max Tanker						
Scale					1/4	7.1
Principal Dimension				MOI	DEL	ACTUAL
Length Between Perpendiculars					4.86	229
Bredth			[m]		0.89	42
Draft (Design)			[m]		0.259	12.19
PROPELLER		MODEL	ACTU	AL	ACTUA	AL/MODEL
Diameter	[m]	0.149	7.00	0		47.1

0.670

0.159

0.450

Right Hand Right Hand

0.670

0.159

0.450

表-3 供試模型船および模型プロペラの要目





0.9

V'm/Vm

1.1

1

0.8

4. WAD 設計法

4.1 WAD の簡易設計法

0.7

WAD の効率的な設計を可能にするため、WAD の簡易設計法を開発した。

最初に WAD の設計パラメータを仮に決めて仮 設計を行い、配置上問題無いか確認する。3 章で 省エネ効果を紹介した 82BC 型船型での配置の検 討例を図-11 に示す。



設計した WAD の配置が物理的に問題ないこと

を確認した後、過去の試験結果を参考に、WAD の長さ Ld、開き角α、出口口径 Ddo が適切であ るか検討する。過去の試験結果からは、長さを長 くし、開き角を大きくし、出口口径を小さくする と伴流率の改善効果が大きくなる傾向があること が判っている。また伴流率の改善と船後効率比の 改善には、正の相関があることも判っている。

一方、推力減少率は、伴流率と船後効率比が改 善すると改善率が悪化する傾向がある。そのため、 設計した WAD の推力減少率がどのような傾向を 持つか確認する必要がある。そこで WAD 無し状 態での CFD (本検討では海技研で開発した CFD コード NEPTUNE³⁾ を使用) による自航計算結果 の流場データを用いて、推力減少率について検討 する。計算は、二重模型流れを対象に、乱流モデ ルに Modified Spalart-Allmaras model を用い、 プロペラモデルは無限翼数プロペラ、レイノルズ 数は 9.074×10⁶、計算格子は構造格子で格子セル 数 93 万格子(片舷)(i, j, k)=(208, 56, 80)、最小 格子間隔 1.6×10-6 で行った。WAD による推力減 少率の変化は、WAD との干渉により、船尾の圧 力分布が変化することに起因する部分と、WAD 自体が発生する推力により起因する部分であるが、 簡易設計法では、後者のみについて検討する。図 -12 は、82BC の WAD 前縁でのプロペラ軸方向 に対する流入角 B の周方向分布である。横軸は 0°が上向き、90°が右舷側で、船尾側から見て、 時計回りに角度が進んでいく。図-13は WAD 前 縁での迎角の周方向分布、図-14 は流入速度分布 (船速との比)を示す。図-15は WAD の各周方 向断面における揚力係数と抗力係数、流入速度か ら(4.1)式により求められる WAD の推力係数の分 布である。82型 BC 船型用 WAD の場合、全周に おいて WAD 推力係数が正となるようにしたとこ ろ、WAD を設置した場合の推力減少率は僅かに 改善する結果を得た(表-2参照、WAD 無し状態 の抵抗試験の結果を使って解析した場合)。なお、 簡易設計法で用いる WAD 推力の周方向分布は、 WAD の無い状態での流れ場を用いている。WAD の付いた状態では、WAD の発生する循環による 流場の変化のため、流入角や流入速度は変化し、 この計算結果とのずれが生じる。一方、WAD の 推力係数と水槽実験での推力減少率の変化は、直 線的な関係にあるため、そのずれを考慮しながら 設計すれば良い。(WAD 有りの場合の WAD 推力 の周方向分布については4章で説明する。)

 $C_{WTR} = C_L \times V_{\inf low}^2 \sin(\beta) + C_D \times V_{\inf low}^2 \cos(\beta) (4.1)$

*C*_{*L*} : WAD 翼断面の揚力係数

Pitch Ratio

Boss Ratio

Expanded Area Ratio

Number of Blades

Turning Direction



*C*₀: WAD 翼断面の抗力係数

図-12 WAD 前縁でのプロペラ軸方向に対する流 入角の周方向分布

(82 型 BC・WAD 無し CFD 自航計算結果から推定)



図-13 WAD 前縁での迎角の周方向分布 (82 型 BC・WAD 無し CFD 自航計算結果から推定)



図-14 WAD 前縁での流入速度の周方向分布 (82 型 BC・WAD 無 CFD 自航計算結果から推定)



図-15 WAD 前縁での WAD 推力係数の周方向分布 (82 型 BC・WAD 無 CFD 自航計算結果から推定)

4.2 WAD 用プロペラの設計法

WAD と組み合わせて使用するプロペラは、 WAD により流れが加速されるプロペラ翼根部で ピッチを増加させる一方、流れが遅くなる翼端部 ではピッチを減少させることにより、ピッチ分布 の適正化を図っている。WAD 用のプロペラの設 計では、まず通常の手順に従いプロペラを設計し、 そのプロペラのピッチ分布を変更する。図-16 に 通常プロペラと WAD 用プロペラのピッチ比の分 布の比較を示す。



チ比分布の比較

4.3 WADの周方向部分の自航要素への影響

肥大船の場合、船尾のプロペラ付近の流れは非 常に複雑なものになっており、ダクト周方向にお いて流入速度や流入角は異なり、WAD が発生す る揚力、推力も一様ではない。そこで、WAD の 内 1/3 (中心角 120°)の部分を切り取った形の 1/3 部分 WAD 模型 (図-17 参照、上方の扇形に なっている部分が部分ダクトで両端をフィンによ り固定している。下方のリング状の部分を模型船 の船尾管部分にかぶせて設置する。)を用いて、周 方向位置 (WAD 設置角 γ)を変更して自航試験 を行い、WAD の周方向部分と自航要素の関係に ついて調査した⁴。



図-17 1/3 部分 WAD 模型

試験に使用した肥大船模型とプロペラ模型の要 目を表-4 に示す。参考のため、CFD コード SURF⁵⁾により自航計算を実施した。計算は、二重 模型流れを対象に、乱流モデルに Modified Spalart-Allmaras modelを用い、プロペラモデル は、無限翼数プロペラ、レイノルズ数は 8.035× 10⁶、計算格子は非構造六面体格子で格子セル数 151,7 万格子(両舷)、最小格子間隔 1.6×10⁻⁶で 行った。計算結果から、WAD 前縁位置における WAD への流入角(x軸:船長方向となす角度)を 求めたものを図-18 に示す。横軸の 0°が上方、 90°が右舷側であるが、上方では流入角が大きく、 側方では流入角が小さい、この計算結果から、ダ クトへの流入角が周方向に変化することが判る。

SHIP		
Length Between Perpendiculars	[m]	6.55
Length on Designed Load Water Line	[m]	6.66
Bredth	[m]	1.06
Draft (Designed Full)	[m]	0.38

表-4 供試模型船および模型プロペラの要目

PROPELLER		
Diameter	[m]	0.239
Pitch Ratio		0.679
Boss Ratio		0.179
Expanded Area Ratio		0.61
Number of Blades		5
Turning Direction		Right Hand
Blade Section Type		MAU



試験を行った 1/3 部分 WAD 模型の要目を表-5 に示す。

衣一J 洪武 WAD 侯空の安	要目
-----------------	----

	Duct Open Angle	Ddi/Dp	Ddo/Dp	Ld/Dp
α5	5	0.538	0.493	0.255
α8	8	0.538	0.466	0.255
α11	11	0.538	0.439	0.255
α14	14	0.538	0.411	0.255
Fin	_	_	_	_

試験に用いた 1/3 部分 WAD は、入り口側直径 Ddi をプロペラ直径 Dp の 53.8%として、長さ Ld を 25.5%Dpに固定、開き角を 5°から 14°まで、 3°間隔で変化させた。さらにダクトを船体に固 定するためのフィンも自航要素に影響を与えてい ると考え、ダクト部分を除去したフィン単体の試 験も実施した。試験は三鷹第二船舶試験水槽 (400m 水槽)で実施し、試験速力は、フルード 数 0.18 に対応する速力とした。WAD の水槽試験 では、プロペラ荷重度の変化による推力減少率へ の影響が出やすいため、プロペラ荷重度を変化さ せて試験を行い、ロードファクターが1となると ころ(いわゆる ship point)の自航要素を内挿に より求めることで、プロペラ荷重度の影響を排除 した。WAD およびフィンの設置角 y は、船尾側 からみて、直上を 0°とし、右回りに角度を進め た。よって12時位置が、0°、3時位置が 90°、 6時位置が 180°、9時位置が 270°となる(図 -19参照)。水槽試験における 1/3 部分 WAD 模 型の設置状況を図-20 に示す。



図-19 1/3 部分 WAD 模型設置角 γ (船尾より見る)



図-20 1/3 部分 WAD 模型設置状況

水槽試験の結果得られた自航要素を用いて馬力 推定を行い、各 1/3 部分 WAD およびフィン単体 の各設置角での馬力減少率を計算した。開き角を 変化させた 1/3 部分 WAD とフィンの設置角と馬 力低減率の関係を図-21 に示す。



図-21 1/3 部分 WAD 設置角と馬力低減率

開き角が 5°の時は、設置角 0°での馬力低減 率が最も大きく、設置角 180°、設置角 270°で は、ほとんど馬力低減効果が無くなっている。そ の他の開き角の 1/3 ダクトでは、設置角 90°の場 合が最も良好な馬力低減率を示しており、設置角 0°がそれに続くが、設置角 180°においても、1 ~2%程度の低減率が示されている。やはり設置角 270°においては、馬力低減率はほとんど無いと 言って良い。またフィンのみでも設置角 0°、90° 180°については、2%程度の馬力低減効果が現れ ているが、設置角 270°では、ほとんど馬力低減 効果が無い。何れの開き角においても、馬力低減 効果は、0°と 90°付近で顕著であることが判っ た。

つづいて、開き角 11°の 1/3 部分 WAD の設置 角と自航要素の関係を図-22 に、設置角と馬力低 減率の関係を図-23 に示す。



図-22 1/3 部分 WAD 設置角と自航要素の関係 (開き角 11°)

設置角と自航要素の関係を見ると 1-t は、設置 角-15°~0°付近で最大となり、設置角 75°~ 90°で最小となる。また 1-Wr は、設置角 75°~ 90°で最小となり、設置角 270°付近で最大とな る。 ηR は、設置角 75°~90°で最大となり、設 置角 270°~-15°で最小となっている。つまり自 航要素の良否という観点からすると、1-t と他の 二つの自航要素 $1 W_T \ge_{\eta} R$ は、逆相関となって いる。



図-23 1/3 部分 WAD 設置角と馬力低減率の関 係(開き角 11°)

馬力低減率が良好な設置角は 0°と 90°のふた こぶになっている。この試験の対象船は右回りプ ロペラであるが、この場合、設置角 0°の位置に ある時、1-tと 1-W_Tは大きくなり、 η R は小さく なる。部分ダクト模型が後方から見て 90°(右舷 側)の位置にある時、1-tと 1-W_Tは小さくなり、 η R は大きくなる。これらの現象が総合されて、 0°位置あるいは 90°位置の省エネ効果が高くな った。

4.4 章で述べるように、模型スケールと実船ス ケールでは船尾での流れが異なるため、WAD へ の流入角も異なるものとなるが、流入角の周方向 位置に対する変化の傾向は類似しているため、1-t の変化は、模型船と実船では定量的に異なる可能 性があるが、周方向位置との関係については、類 似の傾向を示すと考えられる。

4.4 CFD を用いた WAD の詳細検討

WAD を装備した船舶の船尾流場をより詳細に 検討し、さらに WAD 流力特性に対する尺度影響 を調査するため、CFD 計算を実施した⁶⁾。WAD のような船尾付加物周りの流場を正確に計算する ためには、船体の境界層方向だけでなく、船尾付 加物に発達する境界層に対して十分な解像度を持 つ格子を生成する必要がある。そのためには、船 体周りと船尾付加物周りとで個別に格子生成を行 い、それらの格子を重合させる手法(重合格子法) が適していることから、本研究でも同手法を採用 した。計算には、海技研で開発した重合格子の生 成用前処理プログラム UPGRID⁶⁾とおよび海技研 で開発を進めている重合格子対応 CFD プログラ ムソルバーSURFを用いた。計算対象はパナマッ クス型バルクキャリア船とし、原船型(original, CB=0.84)を元に船尾を肥えさせ肥大度を大きく した船型(full, CB=0.85)と船尾を痩せさせ肥大 度を小さくした船型(thin, CB=0.83)を作成した。 3船型それぞれの船型について模型スケール(レ イノルズ数 6.21×10⁶)と実船スケールレイノル ズ数 1.31×10⁹)の CFD 計算を実施し、WADの 有無による影響が模型スケールと実船スケールで どのように変化するかを調査した。計算対象船と プロペラの要目を表-6に、UPGRIDで作成した 重合格子を図-24に格子パラメータを表-7に示 す。計算格子は両スケール共通である。なお、計 算手法の詳細については文献 6)を参照されたい。

表 - 6	計算対象船およびプロペラ(実機)の要

	H		
Hu	111	Prope	ller
$L_{pp}[m]$	217	$D_p[m]$	7.1
B[m]	32.26	H/D _p	0.8
d[m]	12.2	аE	0.5
Св	0.84	Z	4



図-24 UPGRIDで生成したWAD付き船体のCFD 計算用重合格子

X	
Hull	(i,j,k)=(160,176,80)=2,252,800
Stern tube	(i,j,k)=(64,80,76)=389,120
Duct	(i,j,k)=(80,120,56)=537,600
Local refinement	(i,j,k)=(64,60,48)=184,320
Total	3,363,840 cells (both sides)
Smallest spacing	2×10^{-7}

表-7 要素毎の計算セル数

図 - 25 に WAD の有無による形状影響係数 1+k の変化を示す。全体的な傾向としては、船型の違 いと WAD の有無による変化の関係は、模型スケ ールと実船スケールで一致しているが、実船スケ ールの 1+k は、模型スケールより 8%程度大きく なっている。1+k の増加はほぼ、WAD 内側前縁 に作用する圧力抵抗の増加によるもので、実船ス ケールでは模型スケールの 1.4 倍程度になってい る。





図-25 WAD の有無による形状影響係数の変化 (模型スケールと実船スケールの比較)

図-26 に WAD の有無による推力減少率 1-t の 変化を示す。1-t の WAD の有無による変化は、模 型スケールと実船スケールで、逆の傾向を示す。



図-26 WAD の有無による推力減少率の変化 (模型スケールと実船スケールの比較)

図-27 に WAD 前縁位置での流入角の周方向分 布を示す。模型スケールと実船スケールでは、流 入角が大きく異なっていることが分かる。図-28 に WAD に働く流体力の周方向分布を示す。模型 スケールと実船スケールでは、WAD に働く流体 力が推力となる部分、抵抗となる部分が大きく異 なっていることが分かる。これは、模型スケール と実船スケールで流入角が変化していることに起 因しており、結果として 1・t が、模型スケールと 実船スケールで異なったと考えられる。本結果か ら、WAD の装備による 1・t の変化については、模 型スケールと実船スケールの違いを十分考慮する 必要があることを示している。





図 - 29 に WAD の有無による伴流率 1-W の変 化を示す。WAD の有無による 1-W の変化は、模 型スケールと実船スケールとで同様の傾向を示し、 WAD の装備により 1-W が改善していることが分 かる。図-30に、原船型の WAD 有無の状態での 自航状態における伴流場を、模型船スケールと実 船スケールで示す。模型スケール、実船スケール ともに WAD 無し状態に比べ WAD 有り状態では、 WAD 外側上部(10 時-2 時の領域)で軸方向の速 度欠損が生じており、これにより 1-W が改善して いると考えられる。





図-29 WAD の有無による伴流率の変化 (模型スケールと実船スケールの比較)



(模型スケールと実船スケールの比較)

図-31 に、WAD の有無による船後効率比 ηR の変化を示す。本計算結果では、WAD の装備に より η_R は変化しない若しくは若干悪化する傾向 を示している。しかし、これまでに行ってきた水 槽試験結果では、 η_R は WAD の装備により約 1%-2%程度改善することが分かっている。従って、 η_R の計算精度には未だ検討の余地があることが 分かった。



図-31 WAD の有無による船後効率比の変化 (模型スケールと実船スケールの比較)

重合格子法を用いた CFD による WAD 付船体周 りの流場解析を実施し、以下の結果を得た。

1) 1+k については、模型スケールと実船スケールでは、類似の傾向を示すが、その傾向は実船スケールの方が強くなっている。従って実船スケールでは、WAD の装備による平水中での抵抗増加影響が無視出来ない可能性がある。

2) 1・t については、模型スケールと実船スケール で、WAD に対する流入角の傾向が異なるため、 ダクトに働く流体力も、模型スケールと実船スケ ールとで同様に異なる。この影響が 1・t に現れて くることから、WAD の装備による 1・t の変化は、 模型スケールと実船スケールの違いを考慮する必 要がある。

3) 1-W については、自航状態における伴流場お よび 1-W に対する WAD の影響が、模型スケール と実船スケールで同様であることから、模型スケ ールで推定した WAD の効果が実船スケールにも 適用可能であると考えられる。

4) ηR については、今回実施した計算結果は従
 来の模型試験結果を再現することが出来ておらず、
 その推定精度には改善の余地がある。

5. キャビテーション性能の確認

WAD を装備した船舶のキャビテーション性能 を調査するため、海技研大型キャビテーション試 験水槽の「第2計測部」において、一般的な肥大 船型の全長 5.5mの模型船を用いて、船後キャビ テーション試験を行った⁸⁾。模型プロペラは想定 される実機プロペラの要目に近いものを設計・製 作したものを使用しており、直径は 0.1753m、 0.7R 位置での翼弦長は約 0.045m、翼数は 4、回 転方向は右である。キャビテーション試験は実際 の作動条件に近い船尾伴流を模擬した流れの中で 実施する必要があるが、キャビテーション水槽は 密閉型の回流水槽であるため、そのままではディ フューザ効果により船尾流れが拡散するため、適 切な位置にフローライナ⁹⁾を設置することにより、 流れの安定化と伴流分布の変形を実現した。再現 目標となる伴流分布は、曳航水槽で得られた公称 伴流分布を笹島・田中の方法¹⁰⁾により変形したも のを用いた。笹島・田中の方法により推定した伴 流分布を図-32に示す。キャビテーション水槽内 にフローライナを用いて再現された伴流分布を図 -33に示す。全体的に一致する伴流分布の再現は 困難であるが、キャビテーションが多く発生しや すいプロペラ上側位置における流速の周方向変化 率は適切であると判断し、この伴流分布において キャビテーション試験を実行することとした。



図-32 笹島・田中の方法により推定された実 船スケールでの伴流分布



図-33 キャビテーション水槽内においてフロー ライナにより再現された伴流分布

キャビテーション試験の試験条件は、別途実施 した曳航水槽での抵抗・自航試験結果から推定し た実船馬力およびプロペラ回転数に基づき決定し た。試験条件の一覧表を表-8に示す。なお、Kr はスラスト係数、onはキャビテーション数でそれ ぞれ(5.1)および(5.2)式で表す。onはプロペラ上 方 0.8R 位置の水深において計算し、航走に伴う 水面の変形の影響は無視した。

$$K_T = T / (\rho n^2 D_P^4)$$
 (5.1)

$$\sigma_n = (P_{\infty} - P_V) / (0.5\rho n^2 D_P^2)$$
(5.2)

ただし、T はスラスト[N]、 ρ は水の密度[kg/m³]、 n はプロペラ回転数[rps]、 D_P はプロペラ直径[m]、 P_{∞} は静圧[Pa]、 P_V は水の蒸気圧[Pa]である。 case-7,-8、および case-17,-18 はプロペラ高荷重 状態を想定し、それぞれ case-5 および case-14 の KT を 1.25 倍と 1.50 倍にした状態である。

Case Number	WAD	Engine Output	Draft	K_T	σ_n
1		MCR	Ballast	0.154	1.957
5	milo			0.150	
7	w/0	NOR	Full	0.187	2.978
8				0.224	
9		MCR	Ballast	0.162	1.984
14	with			0.156	
17	WILLI	NOR	Full	0.195	2.987
18				0.234	

表一8	キャ	ビテ・	ーショ	ン試験り	と態
-----	----	-----	-----	------	----

5.1 WAD がキャビテーションに与える影響

WAD がキャビテーションに及ぼす影響を調べるためにキャビテーションパターンを比較した。 平水中航行時に想定される中で比較的厳しい条件 である case-1 と-9 の比較を図-34 に示す。なお、 図中の翼位置[deg]は真上が 0[deg]で時計回りに 正の角度をとる。プロペラのレイノルズ数は Dp ベースで RnD=6.7×10⁵ である。平水中を想定し た状態では WAD の有無によるパターンの差はほ とんど無く、キャビテーション性能に問題ないこ とが確認できた。



さらにプロペラ高荷重状態(1.5倍のKr)を再 現した case-8 と-18 の比較を図-35 に示す。こ の場合は WAD 有り状態の方でキャビテーション 発生面積が減少している様子が分かる。目視によ る観察からは、キャビティの体積も減少している 様子が見られた。このときの写真を図-36 に示す。





(上 WAD 無 case-8、下 WAD 有 case-18)
 図-36 WAD 有無によるキャビテーションパタ
 ーンの比較写真(高荷重状態)

5.2 WAD が船尾変動圧力に与える影響

WAD が船尾変動圧力に与える影響を調査する ため、船尾変動圧力計測を行った。圧力計は図-37 に示すようにプロペラ上方の船体表面に十字 状に埋め込んだ。



これにより計測された case-9 の縦方向及び横 方向の変動圧力分布を図-38 と図-39 に示す。

スペクトル解析により得られた翼次数1次から3 次成分までを表示した。グラフの縦軸は実船レベ ルに換算された有次元値である。両図を合わせて 考えると変動圧力のピークはプロペラ直上から前 方へ約 0.25DP の船体中心線付近であり、他のケ ースでもこの傾向は変わらなかった。



図-38 船尾変動圧の分布 (WAD 有 case-9、船長方向、y/DP=0.125)



case-1 および case-9 の変動圧力の 1 次から 3 次 成分のピーク値を比較したものを図-40 に示す。 グラフの縦軸は実船レベルに換算された有次元値 である。WADを装備した場合は 1 次成分が微減、 高次成分は同等という結果が得られ、この傾向は case-5 と-14、case-7 と-17 の比較でも同様であっ た。ただし、最も荷重度が高い case-8 と-18 の比 較では、図-41 に示すように、1 次成分だけでな く 2 次成分も有意な差で減少する結果となった。 この結果は図-35 のキャビテーションパターン で見られた変化と相関があり、WAD がキャビテ ーションの抑制とそれに起因する船尾変動圧力の 低下に貢献していると考えられる。



図-40 WAD 有無による船尾変動圧力のピーク値の比較(平水中航行状態)



6. 波浪中において WAD にかかる流体力

実船への装備に当たっては WAD 取り付け部分 の強度も重要である。そこで波浪中においてダク トに発生する流体力を推定するため、模型船を用 いた波浪中試験を行った²⁾。試験は海の10モー ド試験に準ずる方法で実施した。WAD は船尾の 甲板上に設置した検力計より翼断面形状を持った 支持金具で吊り下げることにより、模型船上から WAD に働く力を計測した(図-42 参照)。

試験は実船で波高 3m 相当の正面規則波中で波 浪中での船速低下を意識した Fr=0.105 となる速 力で軽貨状態において行った。試験データを解析 したダクト流体力の周波数応答を表-9 と図-43 に示す。この結果から(6.1)式を用いて、ダクト流 体力を簡易的に計算する方法を提案した。試験を 行ったのは Cb が 0.8 台の肥大船であるが、無次 元化した要目が類似した船型であれば、本簡易計 算法式を用いて、ダクトの発生する流体力を推定 することが可能である。



図-42 WAD に働く外力の計測システム

表-9 WADにかかる流体力の周波数応答





図-43 WADにかかる流体力の周波数応答

$$Z = \rho g S R_z \zeta_a \tag{6.1}$$

Ζ :ダクトにかかる流体力(上下方回

- *ρ* :流体の密度
- S : ダクト水平面投影面積
- R_: ダクトにかかる流体力の無次元値
- ζ :波振幅

7. まとめ

実海域省エネデバイスの1種として、プロペラ 一体型省エネデバイス WAD の開発を行った。

WAD の省エネ効果は、適用する船型に依存す るが満載状態で3%か5%程度の馬力低減が期待で きる。また実海域での波浪中船速低下を模擬した 高荷重状態では、通常状態よりも馬力低減率が大 きくなる。

WAD を装備した船型の水槽試験結果を基に、 WAD 簡易設計法を開発した。蓄積された水槽試 験結果から WAD を装備する船型自体の性能と WAD の効果の関係が明らかになり、WAD 部分模 型を用いた水槽試験による WAD の周方向の各部 分が自航要素に与える影響が判ってきた。さらに 重合格子等の導入により、WAD 付き船型の CFD シミュレーションの精度も向上し定性的な評価が 行えるようになってきており、模型船と実船の尺 度影響についても評価が可能となってきた。 キャビテーション性能については、試験の結果 からは問題がないことが確認され、高荷重状態で は、むしろ性能が改善することが判った。

現在、WAD は実船搭載のフェーズを迎えており、3船型21隻への装備が決まっている。

謝 辞

本研究は、今治造船株式会社殿、株式会社名村造 船所殿、北日本造船株式会社殿の多大なるご協力を いただき実施しました。また流体設計系水槽試験研 究グループのメンバーには水槽試験において多大 なる協力をいただきました。関係各位に深く感謝申 し上げます。

参考文献

- 1)川島英幹他:実海域において効果的な省エネデバイスの開発に関する研究、海上技術安全研究所平成 24 年度研究発表会講演集、第 12 回 (2012)、pp.25-32
- 二島英幹他: WAD の実用化、海上技術安全研究所平成 26 年度研究発表会講演集、第 14 回
 (2014)、pp.222-223
- 3) Hirata, N. et al, An efficient algorithm for simulating free-surface turbulent flows around an advancing ship, JSNAME vol.185 (1999), pp.1-8
- 4)川島英幹他:ダクト型省エネデバイスの周方向 部分と自航要素の関係について、日本船舶海洋 工学会講演会論文集、第 18 号(2014)、 pp.417-420
- 5) Hino, T. : A 3D unstructured grid method for incompressible viscous flows, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 182 (1997), 9-15
- 6) Sakamoto N.et.al. : Viscous CFD Analysis of Stern Duct Installed on Panamax Bulk Carrier in Model and Full Scale, 13th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries (2014), pp.72-82
- 7) Kodama Y. et. al : Development of UPGRID, and overset grid system for computing flows past ship hulls with appendages (in Japanese), Proc. 26th CFD Symposium, Tokyo, Japan (2012)
- 8) 久米健一他:船尾ダクト "WAD"の流体力とプロペラ・キャビテーション等へ及ぼす影響につ

いて、日本船舶海洋工学会講演会論文集、第 18号(2014)、pp.257·260

 9)右近良孝他:船尾変動圧力の推定に関する研究、 船舶技術研究所報告、第28号第4号(1991)、 pp.19-52

10) 笹島秀雄他:肥大船の伴流分布、造船協会論 文集、第120号(1966)、pp.1-9

二軸船に適した境界層制御技術の開発 について

黒田麻利子*、藤沢 純一*、宇都正太郎**、久米 健一***、 佐々木紀幸****

On the Development of the Technology for Boundary Layer Control applied for a Twinskeg Ship

by

Mariko KURODA, Junichi FUJISAWA, Shotaro UTO, Kenichi KUME and Noriyuki SASAKI

Abstract

ZEUS project¹⁾ was launched for the reduction of CO_2 emission from a ship in National Maritime Research Institute, and various technologies for the purpose have been studied. The study in this paper was begun as part of the ZEUS project. The ZEUS project introduces a twinskeg ship to realize the increase of the load cargo by enlargement of a ship's breadth. A twinskeg ship enables the more increase of the cargo by positioning a rise of bottom of tunnel incline between skegs towards aft. However, there should be a risk for the increase of viscous pressure resistance due to the drastic change of the bottom flow.

In this paper, the technology for boundary layer suction of absorbing a small amount of flow from the bottom of tunnel and blowing in front of propellers is examined for the purpose, for example, the reduction of hull resistance, the improvement of propulsive efficiency. By tank tests, relation between the effect of the boundary layer suction and the related parameters such as a suction point, an amount of absorbing flow was investigated.

Along with the ZEUS project, the attempt to improve the performance of the simple boxy ship by the introduction of fluids control technologies has been made. The application of boundary layer suction to the attempt was examined.

^{*}流体設計系、**海洋開発系、*** EEDI-PT、**** (株) MTI (研究当時流体設計系) 原稿受付 平成 26 年 8 月 1 日 審 查 日 平成 26 年 9 月 1 日