

実海域省エネデバイスの開発に関する研究

川島 英幹*, 一ノ瀬 康雄*, 笠原 良和*, 久米 健一*
金子 杏実*, 深澤 良平*, 田原 裕介**

Research on the Development of Energy Saving Device in Actual Sea

by

Hideki KAWASHIMA, Yasuo ICHINOSE, Yoshikazu KASAHARA, Kenichi KUME,
Azumi KANEKO, Ryohei FUKASAWA and Yusuke TAHARA

Abstract

Research on the development of energy saving device in actual sea was conducted in five years from 2011 to 2015. Goals of the research were developing highly efficient energy-saving device for vessels, developing stern flow control technology with energy saving devices which is equipped at aft hull part, and constructing the hull form design system for ships satisfying the Energy Efficiency Design Index (EEDI) regulation. In the process, we developed the energy saving device Weather Adapting Duct (WAD), and it is equipped on 110 actual ships at the end of 2016. With the advancement of flow field analysis technology using Computational Fluid Dynamics(CFD), it became possible to investigate the stern flow field with energy saving devices in detail. We developed the method to optimize the design parameters of the energy saving device on the flow field condition and control the stern flow fields combining multiple energy saving devices. Furthermore, by combining CFD and hull form design system, we designed the new hull form which satisfies the EEDI Phase III regulation.

*研究当時 EEDIPT, ** 流体性能評価系

原稿受付 平成29年6月15日

審査日 平成29年7月20日

目 次

1. まえがき	74
2. EEDI 規制に対応した船型開発システムの構築に関する研究	74
2.1 EEDI 規制対応実海域省エネ船型開発システムの構築	74
2.2 CFD を活用した高次の EEDI 規制に対応する船型開発	75
2.2.1 船型開発での CFD の高度利用技術の活用	75
2.2.2 高次の EEDI 規制に対応する船型開発	77
3. 最適省エネデバイスの検討および船尾流場制御への適用	79
3.1 実海域省エネデバイス WAD	79
3.2 最適省エネデバイスの検討および船尾流場制御	80
3.2.1 船型の特徴と WAD の省エネ効果の関係	80
3.2.2 WAD と他の省エネデバイスの干渉	82
3.2.3 船尾流場制御による最適省エネデバイスの検討	82
4. まとめ	85
参考文献	86

1. まえがき

国際海事機関(IMO)の EEDI(Energy Efficiency Design Index)規制では、EEDI 値を 2020 年のフェーズⅡで基準値の 20%減、2025 年のフェーズⅢで 30%減とすることが義務づけられており、新造船に対して非常に高い省エネ性能を要求している。一方、船舶は実海域で運航されるため、平水中で航行するのみならず船体運動を伴う風波中を航走している。そこで、重点研究 15 実海域省エネデバイスの研究では、平水中だけでなく実海域において平水中と同様高い省エネ効果を発揮する省エネデバイスの開発を「プロペラと一体化した最適省エネデバイスシステムの研究」(本研究については海上技術安全研究所報告 14 巻 2 号¹⁾において報告している。)として実施した。そして将来の厳しい EEDI 規制に対応するため、実海域において高い省エネ性能を持つ船舶の船型設計を可能とするため、「EEDI 規制に対応した船型開発システムの構築に関する研究」と「最適省エネデバイスの検討および船尾流場制御への適用」を実施した。本報告ではこの 2 項目について報告する。

2. EEDI 規制に対応した船型開発システムの構築に関する研究

2.1 EEDI 規制対応実海域省エネ船型開発システムの構築

IMO の EEDI 規制では、EEDI 値を 2020 年のフェーズⅡで基準値の 20%減、2025 年のフェーズⅢで 30%減とすることが義務づけられており新造船に対して非常に高い省エネ性能を要求している。そこで、将来の厳しい EEDI 規制に対応でき、実海域においても高い省エネ性能を持つ船型を開発するためのプラットフォームとして、EEDI 規制対応実海域省エネ船型開発システムを構築した。

EEDI 規制対応実海域省エネ船型開発システムは、要目最適化プログラム HOPE Light, 線図 CAD システム, RANS-CFD, Potential-CFD, 実運航性能シミュレータ VESTA, MMG モデルに基づく操縦性検討プログラム, QCM (準連続渦分布法) によるプロペラ性能推定プログラム等のプログラムを連携させ、有機的に統合運用できるようにすることで、要目の決定, CP カーブの決定, フレームライン形状の決定, 線図の生成, プロペラの設計, 舵の設計, 馬力推定, 耐航性, 操縦性等の一連の船型開発の流れを効果的に行える一気通貫のシステムとして構築している。図 2.1 に EEDI 規制対応実海域省エネ船型開発システムの概要を示す。EEDI 規制対応実海域省エネ船型開発システムは、あらゆる面から船型を検討できる利点があるが、高い省エネ性能の追求のためには、CFD

結果を高度利用することが最重要である。そこで CFD の高度利用機能を付け加えることで、より高度な設計が可能となっている。その具体例を 2.2.1 以降に示す。

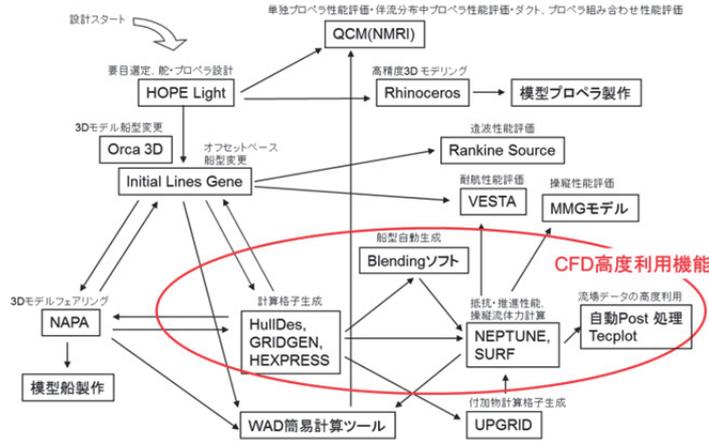


図 2.1 EEDI 規制対応実海域省エネ船型開発システムの概要

2.2 CFD を活用した高次の EEDI 規制に対応する船型開発

IMO の EEDI 規制では、2020 年に基準値の 20%減、2025 年に 30%減と、高い省エネ性能を要求しており、旧来技術の延長線上では、簡単に規制値をクリアすることは困難である。そのため、このような高い EEDI 規制値に対応した船型を将来開発するため、母型となる優れた性能を有する海技研独自の船型を先行して開発しておく必要がある。そのため、高次の EEDI 規制に対応できる将来の母型となる船型の開発を行った。船型開発は、EEDI 規制対応実海域省エネ船型開発システムを用いて、CFD による船型最適化と CFD 流場データの高度活用を行い、省エネデバイスの最適化により、最終的に EEDI フェーズⅢに対応できる船型の開発²³⁾を実施した。

2.2.1 船型開発での CFD の高度利用技術の活用

EEDI フェーズⅢに対応できる省エネ性能が高い船型の開発を行うため、CFD を活用して船型開発の指針を得る⁴⁾こととした。

船型を自動的に生成する手法として、複数の船型を組み合わせる中間船型を生成する船型 Blending 手法⁵⁾がある。本稿では、抵抗性能と推進性能が総合的に優れた船尾形状の設計指針を得るため、船型 Blending 手法を用いて船尾形状を変化させた船型を系統的に生成し CFD により自航性能を検討した例について報告する。検討は 33,000 DWT ケミカルタンカーを対象に行った。図 2.2 に示すように船首形状は変化させず、船尾形状のみ変化させた。母船型は、船首形状が同じで、船尾形状が U 型船尾と V 型船尾の船型を用意した。母船型のフレームラインを図 2.3 に示す。図中の青色が U 型船尾で緑色が V 型船尾である。

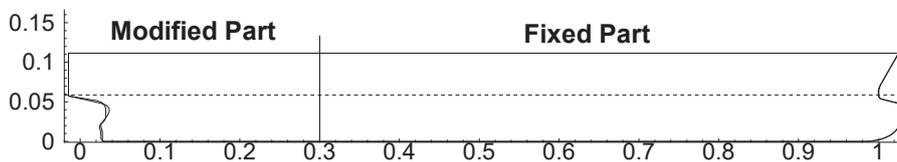


図 2.2 船型の変形範囲

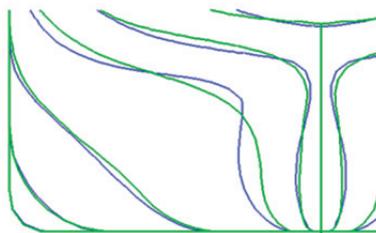


図 2.3 船型 Blending に用いた母船型の船尾フレームライン

図 2.4 に船尾形状の違いによる船体表面圧力分布及び限界流線の違いを示す。船尾ビルジの近くに発生した圧力ポケット（低圧領域）により、流線が集まり、船尾の逆圧力勾配において流線が集中しているところが剥離線である。剥離線と軸方向渦度分布より（図 2.5）剥離線に沿って剥離渦が成長する様子が分る。船尾フレームラインの形状が V 型船尾から U 型船尾に変わるに依り、圧力ポケット上方付近の圧力分布の等高線が主流方向に近い角度から主流に垂直な向きに立ち上がり、剥離線も主流と垂直の方向へ変化し、U 型船尾の軸方向渦度が、V 字船尾よりも強くなる様子も分る。一方、V 型船尾では、渦の発生が弱いため、プロペラ面では伴流分布が明らかなフック形状とならない。これらの結果は、船尾の伴流分布形状が、圧力ポケットのピーク値ではなく、圧力分布の等高線の間隔および船体表面上の負圧領域の拡がりによって特徴付けられることを示している。

図 2.6 に圧力の船長方向成分の分布を示す。圧力分布が負となる領域は、圧力抵抗が発生している部分である。V 型船尾の圧力分布と比較して、U 型船尾の圧力分布が負となる領域は上部で拡大しており、船尾形状の凹み部分が上方に拡大することに対応する。これらの分布の変化は、圧力抵抗の増加をもたらす。船尾形状の違いによる圧力抵抗の違いは、形状抵抗の変化として表れるが、形状影響係数を見ると U 型船尾と V 型船尾の $1+k$ の差異は、2.9%であった。

このように船尾船型形状の変化が流場に影響を与えるため、船尾が U 型形状から V 型形状に変化するのに伴い、形状抵抗は減少し、有効伴流係数は増加する。図 2.7 に船尾が U 型形状から V 型形状に変化するのに伴う形状抵抗と有効伴流係数の変化の様子を示す。

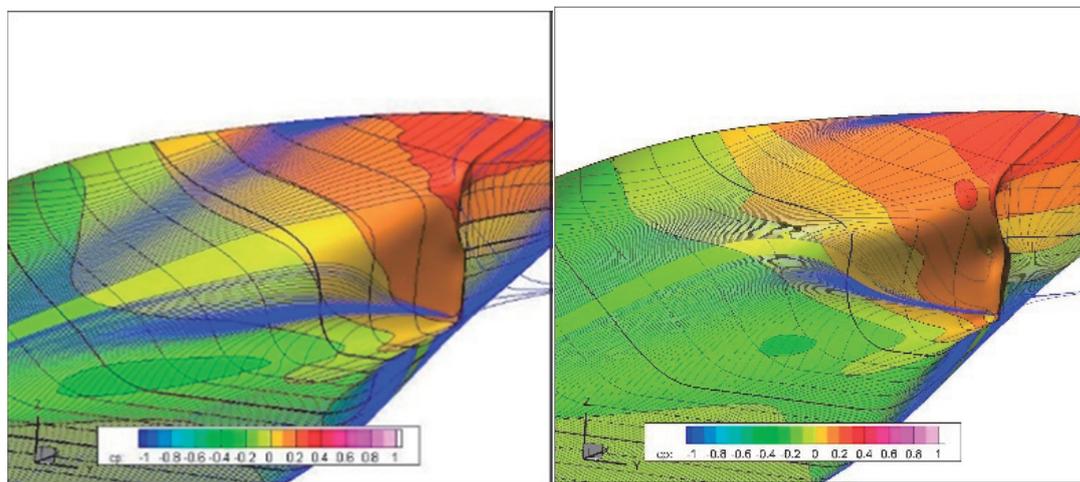


図 2.4 船尾形状の違いによる圧力分布及び限界流線の違い（左：V 型船尾、右：U 型船尾）

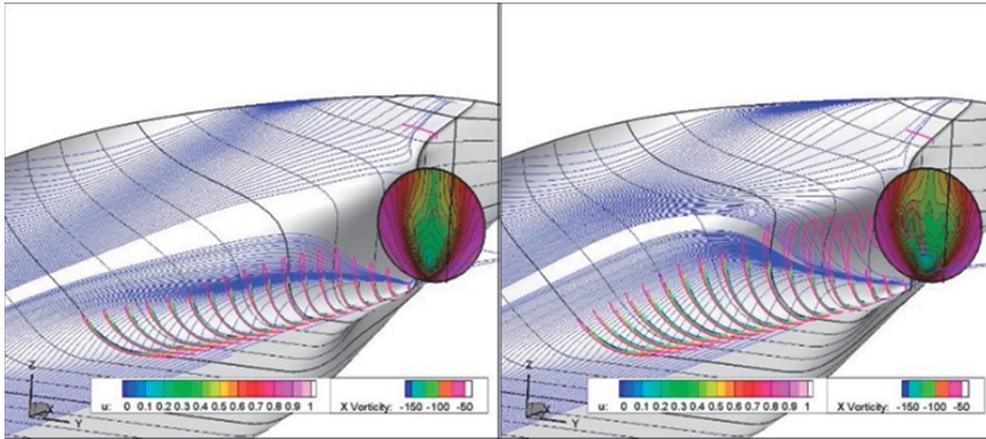


図 2.5 船尾形状の違いによる渦度及び限界流線の違い (左: V型船尾, 右: U型船尾)

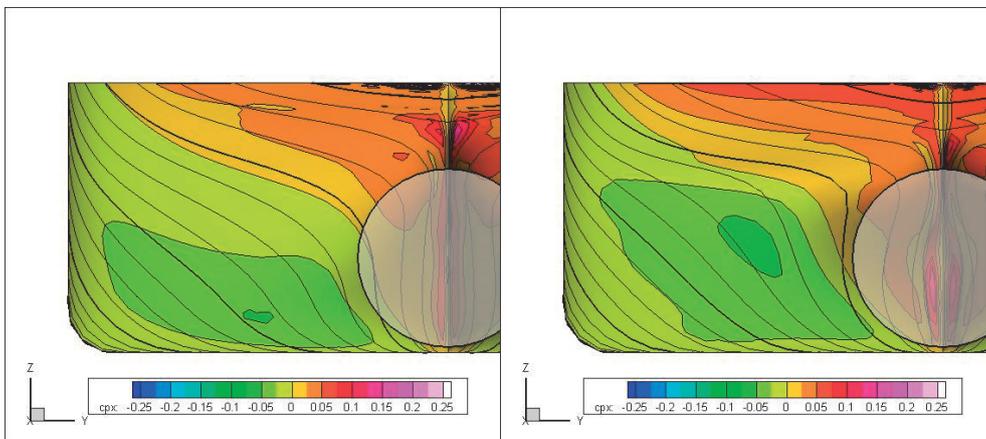


図 2.6 圧力の船長方向成分の分布 (左: V型船尾, 右: U型船尾)

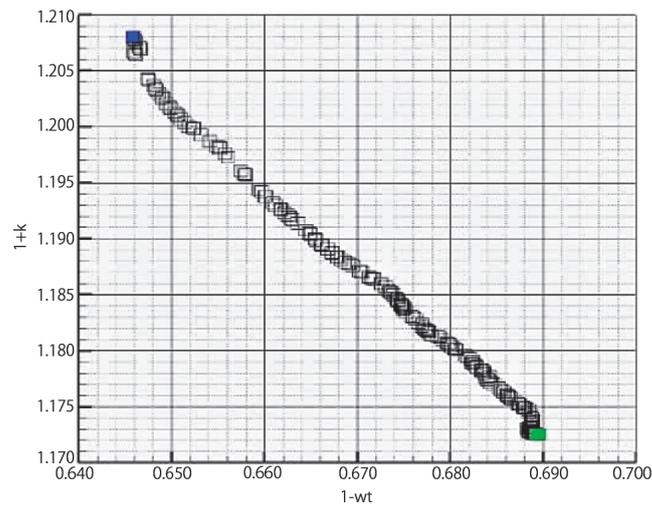


図 2.7 船尾がU型形状からV型形状に変化するのに伴う形状抵抗と有効伴流係数の変化

2.2.2 高次のEEDI規制に対応する船型開発

EEDI 規制対応実海域省エネ船型開発システムの有効性を確認するため、ケミカルタンカーを対象に高次のEEDI 規制に対応する船型を開発した。船型開発には 2.2.1 に記述の CFD による船型最適化システムを活用し、

CFD 流場データの高度活用，省エネデバイスの最適化により，平成 26 年度に EEDI フェーズⅡ規制に対応できる第一次船型を開発し，平成 27 年度には EEDI フェーズⅢ規制に対応できる第二次船型を開発し，その性能を水槽試験で確認した．開発したケミカルタンカーの主要目を表 2.1 に，船型の概観図を図 2.8 に，第一次船型と第二次船型の船首造波の違いを図 2.9 に，EEDI 値を図 2.10 に示す．

表 2.1 船型開発の対象としたケミカルタンカーの主要目

DWT	33,000
Lpp	170.5 m
B	27.7 m
D	14.0 m
d_scantling	11.0 m
Cb	0.81

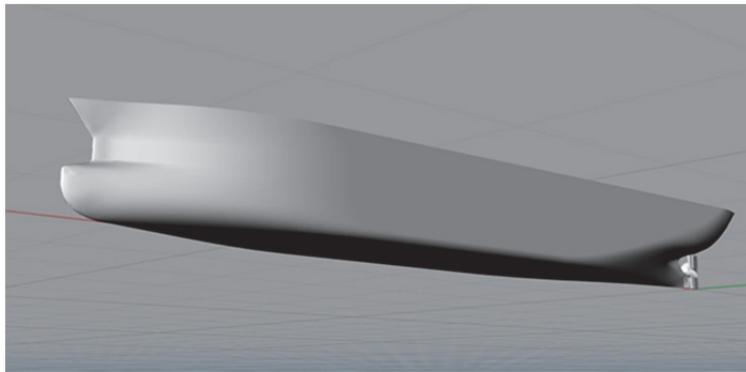


図 2.8 自主開発した EEDI フェーズⅢ対応ケミカルタンカーの船型

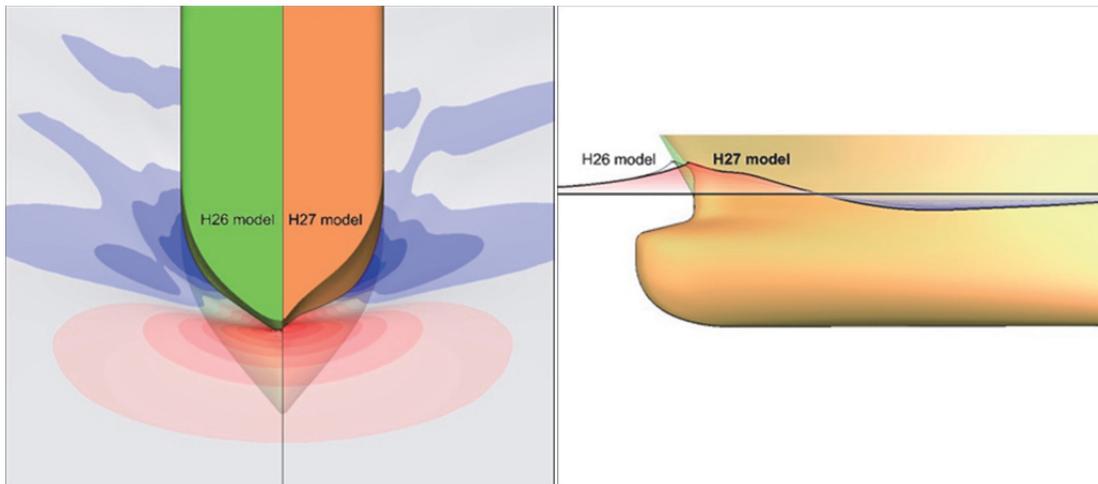


図 2.9 平成 26 年度開発の 33CTH26 モデル（EEDI フェーズⅡ対応）と平成 27 年度開発の 33CTH27 モデル（EEDI フェーズⅢ対応）の船首造波の比較

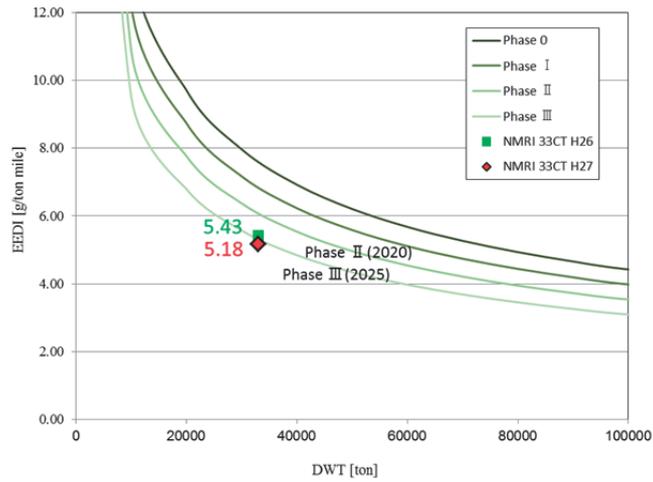


図 2.10 実海域省エネ船型開発システムを用いて開発したケミカルタンカーの EEDI 値

3. 最適省エネデバイスの検討および船尾流場制御への適用

3.1 実海域省エネデバイス WAD

本重点研究では、船尾ダクト型省エネデバイスの1種である実海域省エネデバイス WAD(Weather Adapted Duct)¹⁾の開発も行った。WADは以下のような特徴を持っている。

- ・プロペラの前方向に取り付けるダクト型省エネデバイスである。
- ・プロペラ-ダクト間の干渉効果を高めるため両者を近接配置する。
- ・波浪中船速低下時等のプロペラ高荷重状態で省エネ効果が増大する。
- ・有害なキャビテーションの懸念を解消させるため小直径化する。
- ・ダクトとプロペラを一体設計することにより性能を最適化。
- ・省エネ効果は、水槽試験で概ね約4~6% (実績値) である。

WADは、CFDによる流場解析や水槽試験、キャビテーション水槽における船後試験を経て実用化されており、現在では、複数の造船所に採用され、多くの実船に搭載されている。実船搭載され WAD の写真を図 3.1 に、平成26年度から28年度までの実船搭載実績を図 3.2 に示す。



図 3.1 実船に搭載された WAD

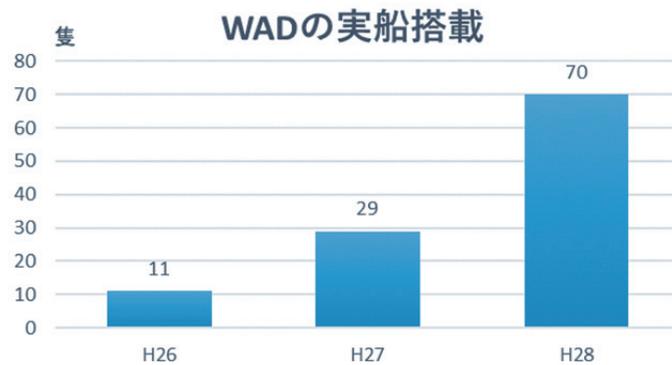


図 3.2 WAD の実船搭載実績

3.2 最適省エネデバイスの検討および船尾流場制御

3.2.1 船型の特徴と WAD の省エネ効果の関係

このように多数の実船に搭載されている WAD であるが、複数の船種・船型を対象にした水槽試験の結果から、省エネ効果と船型の特徴に相関があり、図 3.3 に示すように、省エネ付加物を搭載しない裸殻状態の有効伴流係数 $1-W_T$ が低い船型では高い省エネ効果が得られるが、 $1-W_T$ が高い船型では省エネ効果が出にくいこと¹⁾が判った。

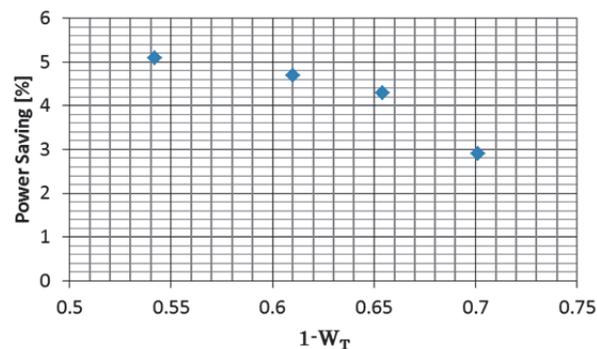
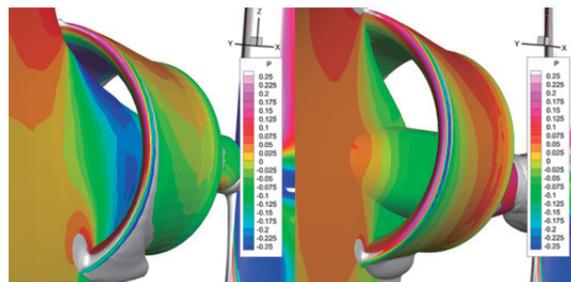
図 3.3 裸殻での有効伴流係数 $1-W_T$ と WAD 省エネ効果の関係

図 3.4 は水槽試験での裸殻における伴流係数が 0.10 異なる 8 万トンクラスのバルクキャリアの WAD 周りの圧力分布と $U=0$ で抽出した剥離域を示したものである。左側の船型は、U 型の船尾フレームラインを持つ船型で、船尾縦渦が強く、有効伴流係数が小さい。一方、右側に示す船型は、V 型の船尾フレームラインを持つ船型であり有効伴流係数が大きい。水槽試験結果から推定される馬力の低減率は、前記の通り有効伴流係数の小さい U 型船型で高い。WAD の開き角は、U 型船尾で開き角 11 度、V 型船尾で 10 度に設計しており、同一翼型を使用している。WAD 後縁の直径は、U 型・V 型ともにプロペラ直径の 45% である。



U型船尾 V型船尾

図3.4 WAD まわりの圧力分布及びU=0で抽出した剥離領域

WAD もその1種であるダクト型省エネデバイスの船尾流場と推進性能にもたらす効果には、以下の4つが考えられる。

- 効果1 ダクト及びその周辺で起こる剥離等に起因する伴流係数の改善
- 効果2 効果1に起因した伴流の変化によるプロペラ効率比の改善
- 効果3 ダクトの発生する推力による推力減少係数の改善
- 効果4 ダクト周辺の船体圧力の変化に起因する推力減少係数の改善

ダクトの性能が十分に発揮されていないケースでは、特に推力減少係数が改善しない、あるいは悪化するケースが多い。これらのケースの流体力から考察すると、効果3が小さい、または逆効果となっている。

そのため、ダクト設計では、効果3に設計の重きを置き、少なくともダクトが抵抗とならない設計方針をとっている。ただし、縦渦の極端に強いU型船尾では、極端に効果1と2の改善が大きく、この限りでないことも確認しているが、設計法として一般化しないと考える。

ダクトの効果1及び3について、ダクトの周方向の翼素に着目し、周方向の翼素への流入角を分析¹⁶⁾し、周方向の翼への流入角から、ダクトの生み出す推力と、軸方向による速度欠損からくる伴流係数の改善効果について検討した。ここでは、ダクトとの干渉による船尾の圧力分布の変化ではなく、ダクトの設計上は有用なダクトの周方向の翼素の流力特性に着目する。図3.5にダクト前縁でのプロペラ軸方向に対する流入角 β の周方向分布を示す。横軸は0度が上向き、90度が右舷側で船尾から見て時計回りに角度が増加する。U型船尾における流入角の様な変化に対して、V型船型の角度の分布は60度付近まで急峻に変化し、80度付近から小さい流向角を保持しながら、ゆっくりと角度が回復することが分かる。また180度付近の流れは図3.4でも観察できるとおり、剥離しており前記効果1,2に寄与している。

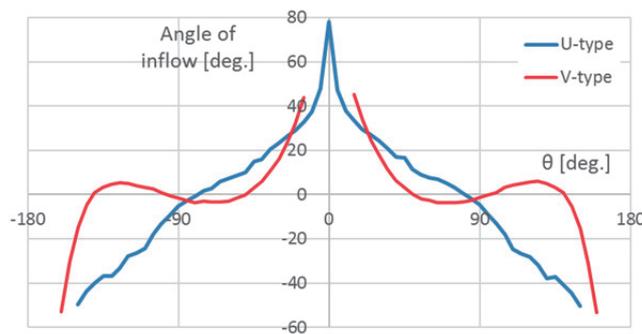


図3.5 自航状態におけるダクト前縁部での流入角 (β) の周方向分布

次に、この流入角分布から翼素の発生するプロペラ軸方向の推力を(3.1)式で算定した。 V_{in} は翼素への流入速度、 C_L 、 C_D は翼素の揚力係数と抗力係数であり、揚力係数 C_L の計算には山口のプログラム⁷⁾を用いた。翼に対する迎角は-30度以下に制限し、迎角0度以上は剥離域として計算から除外した。算出したプロペラ軸方向推力の周方向の分布を図3.6に示す。

$$C_{WTR} = C_L \times V_{in}^2 \sin(\beta) + C_D \times V_{in}^2 \cos(\beta) \quad (3.1)$$

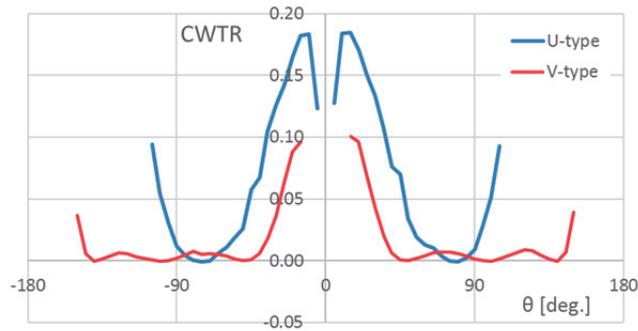


図 3.6 C_{WTR} の周方向分布

U型船尾に搭載されているダクトは90度付近まで強い推力を出しているのに対して、V型船尾に搭載されているダクトは45度から135度付近にかけてほとんど推力を出していないことが分かる。これは、流入角がゼロ付近を推移しているためである。

すなわち、U型船型に搭載されるダクトに対して、V型船型に搭載されるダクトの省エネ効果が小さい理由の1つは、縦渦の弱いV型船尾のつくる伴流の周方向の流向角が、角度の強い上部0度から60度付近まで急峻に変化し、80度付近から小さい流向角を保持し続けるためである。よって、V型船尾においてダクト型の省エネ付加物がより効果を発揮するには、上部0度付近の大きな流向角を効率的に利用することと、流向角が小さい場所を少なくする必要がある。

ここでは、船尾縦渦の強弱に影響の大きいU型及びV型の船尾フレームラインに基づき考察したが、船尾伴流の違いとして一般化することも考えられる。

3.2.2 WAD と他の省エネデバイスの干渉

WADのようなプロペラ前方の付加物と舵フィン等のプロペラ後方に設置されるポストスワール型省エネ付加物は、しばしば大きな干渉現象が生じ、同時に搭載したときの性能が期待ほど得られないことがある。ダクト下部の剥離は図3.7に示す通り、舵に搭載されるフィンに流入する流れを乱す。過去の実験結果によれば、舵フィンの効果は、特に左舷側のフィンの推力に依存することが分かっている。これは、船底からの上昇流とプロペラ回転流が干渉し、より流向角が大きく、流速の速い流れが左舷側のフィンに流入することにより、強い推力を発生させるためと考えられる。ダクトと舵フィンの干渉は、ダクト下方の流れが剥離することにより、舵フィンに流入する流れを乱すことにより起こっていると考えられる。

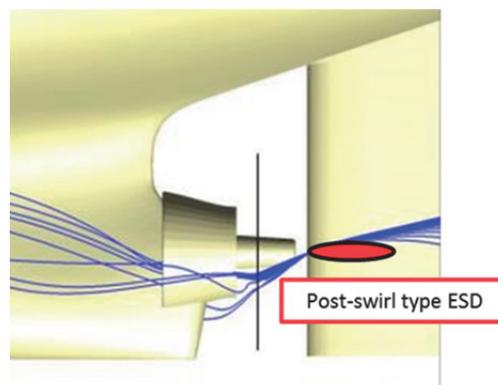


図 3.7 WAD と舵フィンの干渉

3.2.3 船尾流場制御による最適省エネデバイスの検討

V型船尾で省エネ効果が発揮しにくい、ポストスワール型省エネデバイスとの干渉があるというWADの2つの課題を解決するため、船尾流場制御を行うプロペラ前方の付加物として変形ダクト型省エネデバイスの開発を

行った。変形ダクト型省エネデバイスは以下の特徴を持ち、USTD (UPPER SIDE TAPERED DUCT)⁸⁾と名付けた。図3.8にUSTDの概要図を示す。

USTDは以下のような特徴を持っている。

特徴1 ダクトと舵フィンとの干渉を低減するため、剥離を起こす円形型ダクト下部を除去し、上部半円形状とする。

特徴2 ダクト上部0度付近の大きな流向角を効率的に利用するための、ダクト上部に平行部を設ける。

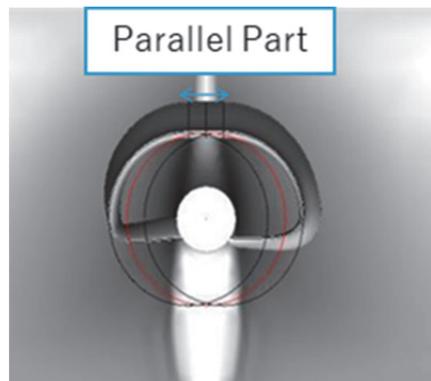


図3.8 WADを改良した新省エネデバイス USTD (UPPER SIDE TAPERED DUCT)

図3.9にWAD及びUSTDとプロペラ後方に設置されるポストスワール型省エネデバイスの一種である舵フィンとの干渉の違いを示す。WADの下部は流れが剥離しており、舵フィンへの流入迎角が変わることが分かる。一方、剥離を起こすダクト下部を除去したUSTDでは、ダクトと舵フィンへの流入迎角に対する影響が小さいと考えられる。

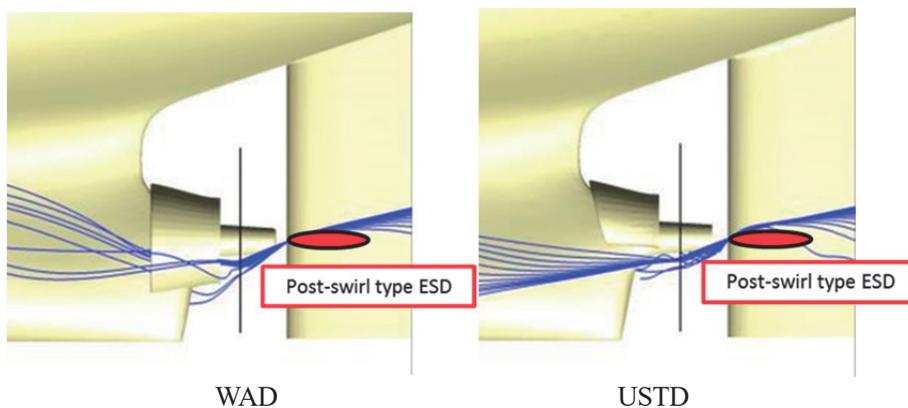


図3.9 WADとUSTDの舵フィンとの干渉の違い

続いて、USTDに設けた平行部の効果を示す。図3.10は、V型船型に平行部があるUSTDと平行部のないUSTDについて、800万～900万セルの非構造格子で海技研開発のCFDソルバーSURFによる省エネ効果の比較を示す。平行部のあるUSTDでは、平行部のない場合に対して0.4%推力減少係数の改善が見られ、馬力低減率は0.5%改善する。図3.11に平行部がある場合とない場合での、USTD周りの圧力分布を示す。ダクト上部0度付近にある平行部でUSTDが推力を出していることが確認できる。

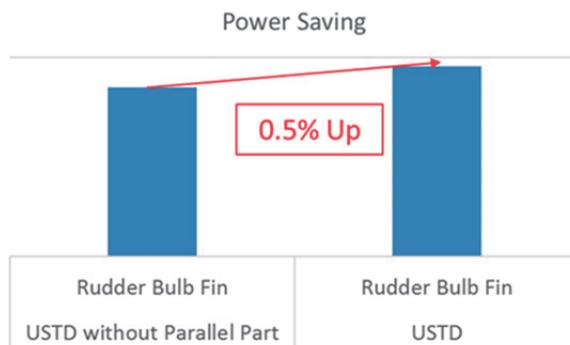


図 3.10 USTD の平行部の有無による省エネ効果の違い

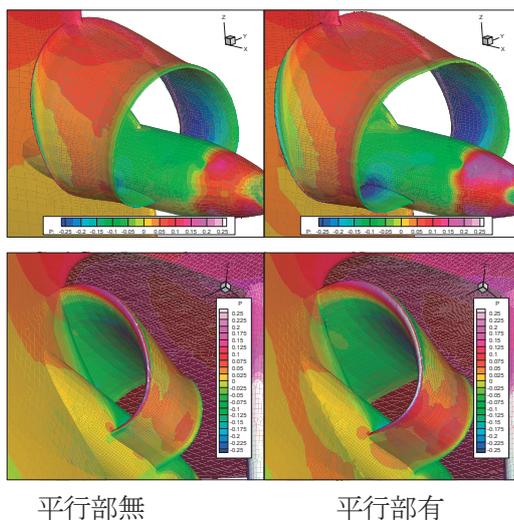


図 3.11 USTD の平行部の有無による圧力分布の違い

続いて、水槽試験により USTD の性能を確認した。そして、水槽試験の結果から USTD と WAD の馬力低減効果を算定した。図 3.12 に 3 万トンクラスのケミカルタンカーにおける結果、図 3.13 に 8 万トンクラスのバルクキャリアにおける結果を示す。USTD は WAD と比較し、馬力低減効果が 0.6%~1.4%高いことが判る。

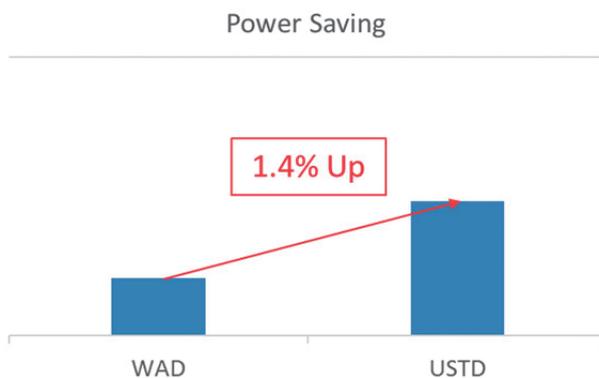


図 3.12 WAD と USTD の省エネ効果の違い
(3 万トンクラスケミカルタンカー)

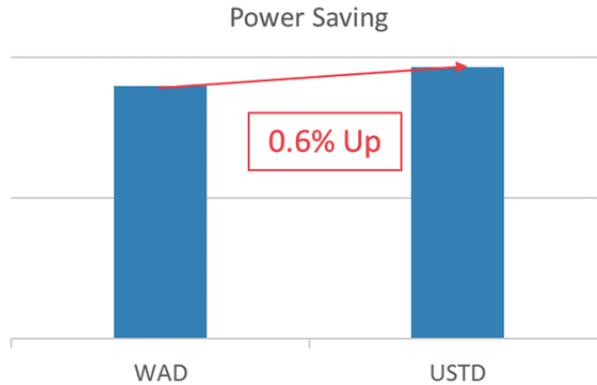


図 3.13 WAD と USTD の省エネ効果の違い
(8万トンクラスバルクキャリア)

さらに8万トンクラスバルクキャリアにUSTDとWADを付加し、舵フィンと組み合わせた場合について水槽試験を行い、馬力低減効果を比較した。その結果を図3.14に示す。USTDが、舵フィンとの干渉がある場合にも、馬力低減効果に対して優位性を持っていることが分かる。

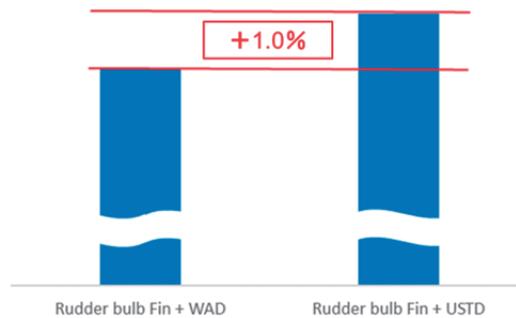


図 3.14 WAD と USTD の省エネ効果の違い
(8万トンクラスバルクキャリア)

4. まとめ

本重点研究では、平成23年度から平成27年度までの5年間にかけて、実海域で運航される船舶で効果の高い省エネデバイスの開発、船尾付加物による船尾流場制御技術の開発、高次のEEDI規制に対応した実海域省エネ船型開発システムの構築とシステムを用いた高次EEDI規制に対応できる自主船型の開発を行ってきた。その過程で実海域省エネデバイスWADを開発し、H28年度末時点で110隻の実船に搭載されている。またCFDによる流場解析技術の高度化に伴い、船尾付加物を設置した状態での船尾流場を詳細に検討出来るようになり、船型の特徴に適した船尾付加物を用いることで、船尾流場を制御し、複数の省エネデバイスを組み合わせながら、大きな省エネ効果を生み出す方法を確立した。またCFDと船型の自動生成技術を組み合わせる手法を開発し、船型改良手法を高度化することで、これらの手法を応用して、EEDIフェーズⅢ規制に対応できる船型を開発した。

参考文献

- 1) 川島英幹他：プロペラと一体化した最適省エネデバイスシステムの研究，海上技術安全研究所報告，第14巻第2号（2014），pp.89-104.
- 2) Kasahara：Hull Form Design Utilizing CFD for Improvement of EEDI，International Workshop on Ship Technologies Related to Energy Efficiency Design Index (EEDI) (2015).
- 3) 一ノ瀬康雄他：EEDI 高次規制に対応した省エネ船舶開発手法の研究，平成28年度（第16回）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 研究発表会講演集，第16回（2016），pp. 62-71.
- 4) Ichinose et.al：A Detailed Numerical Study on Influence of After-Body Frame-Lines on Near-Wall and Near-Wake Flow Fields，日本船舶海洋工学会講演会論文集，第21号（2015），pp.558-563.
- 5) Tahara et.al：Single- and multi-objective design optimization of a fast multihull ship: numerical and experimental results, Journal of Marine Science and Technology, Vol.16 No. 4(2011), pp.412-433.
- 6) Inukai et.al：Energy-Saving Principle of the IHIMU Semicircular Duct and Its Application to the Flow Field Around Full Scale Ships, IHI Engineering Review, Vol. 44 No.1 (2011), pp.17-22.
- 7) 山口一：定常流中の2次元翼及び翼列の流体力学的特性を境界層影響を考慮して予測するためのコンピュータプログラム，<http://www.l.k.u-tokyo.ac.jp/yama/prog/prblg/index.html>
- 8) 一ノ瀬康雄他：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（2016），pp.403-406.