

船舶における省エネ技術について



技術解説

日 夏 宗 彦*

On Energy Saving Technology in Naval Architecture

Key Words : Energy Saving Devices, Ship Propulsion

1. はじめに

近年とみに話題になっている地球温暖化問題は、船舶の分野でも例外ではなく、最近ではCO₂排出に関する規制も施行された。

本誌は工学異分野の方々を読者の対象とした学際的な雑誌であると思われるので、船舶の省エネ技術の動向について紹介することとし、この分野の各方面での認識が深まれば幸いである。

2. EEDI 規制について [1]

船舶からのCO₂排出量を規制するため、IMO（国連海事機関）では、EEDI（Ship Energy Efficiency Design Index エネルギー効率設計指標）と呼ばれる指標を新たに示し、2013年1月1日以降に建造契約される特定船種の外航船に対して、この値が規制値より下回ることを要求した。EEDIは、船舶が1トンの荷物を1マイル（1,852m）運ぶ際に排出するCO₂の重量（グラム数）で定義され、概念として次式で表される。

$$EEDI \left(\frac{g}{ton \cdot mile} \right) = \frac{CO_2 \text{ 換算係数} \cdot \text{燃料消費率} \left(\frac{g}{kWh} \right) \cdot \text{主機出力} (kW)}{\text{輸送貨物重量} (ton) \cdot \text{船速} (mile/h)} \quad (1)$$

* Munehiko HINATSU

1956年1月生

大阪大学大学院工学研究科造船学専攻
前期課程修了（1980年）

現在、大阪大学大学院工学研究科 今治
造船共同研究講座 特任教授 工学博士
船舶の抵抗、推進

TEL : 06-6879-8148

FAX : 06-6879-7594

E-mail : hinatsu@naoe.eng.osaka-u.ac.jp



この指標に対して、各船種毎に1999年から10年間の実績値によるEEDI値の平均値（基準値）がまず規定され、2015年、2020年、2025年と5年ごとにphaseが決められ、この5年ごとの間に建造される船は、EEDI値がその建造されるphaseに応じて、基準値の10%、20%、30%（船種によっては数値は異なるものもある）の削減がされるように要求されている。従って現在から10年後に建造される外航船舶は、30%のEEDI削減が求められるわけで、造船業界では、CO₂削減につながる技術であれば何でも取り込もうといった空気に包まれている。

EEDIの定義式を見ると、これを小さくするには分母を大きくする方法、分子を小さくする方法がある。分子を小さくするには、まず、主機出力を小さくする方法が考えられる。しかしながら、必要以上に小さくすると、荒天時の操縦性能に支障が出る恐れがあるため、最低出力にはある種の歯止めがかけられる。主機出力を減らすほかに、船体抵抗を減らすことも重要となる。この研究は、船型学の研究の核をなすとも言え、長年にわたり取り組まれ続けている課題である。CO₂換算係数の小さい燃料の利用については、たとえばLNGを燃料として用いる方法がある。一方、分母を大きくすることは、載貨重量トンを増やすか（船を大型化する）、船速を増やすかであるが、船速と船体抵抗は強い相関があるため、船速だけを一方的に大きくして改善を図ることはできない。また船を大型化するとしても、航路や寄港地の制約等から、これも一方的に大きく取することは容易でない。

ここでは、特に船の推進性能向上によって、CO₂削減を図る方法について紹介する。

3. 船舶の推進性能について

通常、船舶は船尾に取り付けられたプロペラで推

進している。船が走るとき、船は水の粘性のため、船近傍の周りの水を引きずっていく。船から見ると、船近くの水は船にへばりついた状態で流れる。このため船近傍の船速が遅くなった部分は、運動量が損失している。プロペラを船尾につけ、この流れが遅くなったところで作動させると、プロペラの“蹴り出し”作用により損失した運動量の回復が期待される。これが、プロペラを船尾に装備する理由である。

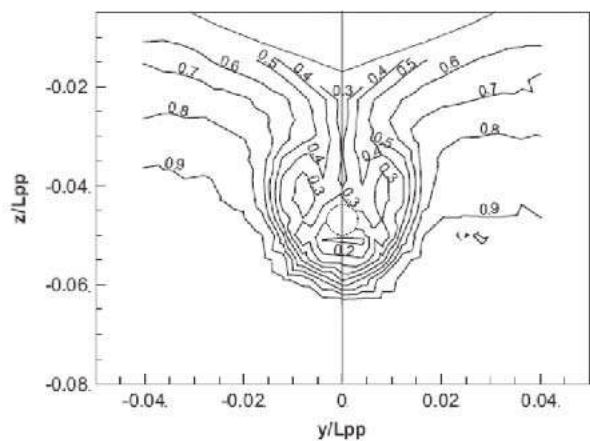
船の推進効率、以下のように定義される。今、船速 V_s で航走する船を考える。船尾で作動するプロペラは回転数 n (rps) で推力 T 、トルク Q で作動しているとする。この船が V_s で曳航された時の抵抗を R とすると、 RV_s は、船体がまわりの流体に与えるエネルギーと考えられ、これを馬力で表現した時、有効馬力と呼ばれる。船の推進効率は、プロペラを回転させるのに要する仕事 $2\pi nQ$ (入力に相当) と有効馬力 (出力に相当) の比で定義される。これをさらに以下のように分解する。

$$\frac{RV_s}{2\pi nQ} = \frac{R}{T} \frac{TV_a}{2\pi nQ_0} \frac{V_s}{V_a} \frac{Q_0}{Q} \quad (2)$$

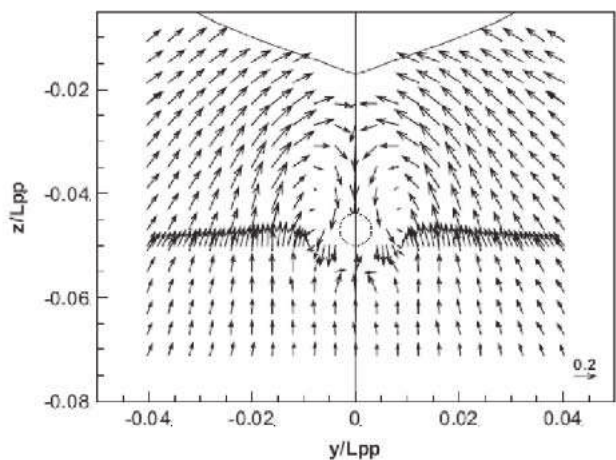
ここで V_a は一様流速で、回転数 n で作動した時に推力 T が生じる流速に相当し、プロペラの単独性能曲線から同定される。 Q_0 はこの状態で同じくプロペラ単独性能曲線から同定されるトルクで、一般には船の後ろで作動している時のトルク Q とは異なる。このように船の推進効率は抵抗と推力の比、プロペラ単独効率、船尾での伴流の割合、船後でのトルク比の積で表される。ところで、 V_a は船尾での粘性流に支配される。粘性影響の尺度であるレイノルズ数 ($=V_s L/\nu$ 、 L は船長、 ν は動粘性係数) は模型船では 10^6 程度、実船では 10^9 程度であるため、模型船の方が実船より粘性の影響を強く受ける。このため、粘性作用で、船体が周囲の流体を引きずる効果は模型船の方が実船より大きく、結果として模型船の方が実船に比べて船尾の流れが遅い領域が広がる。これから、模型試験におけるプロペラの作動条件と実船におけるプロペラの作動条件は異なる。このようなことから模型試験で得られた結果 (係数) をそのまま単純に実船に適用することはできず、縮尺影響を考慮した解析が必要となる。ここに船の推進性能推定の難しさがある。

4. 船尾周りの流れ

図1に、タンカー船型のプロペラ作動面での流速分布を示す [2]。図は、船を後方から見た絵で、 $z=0$ が水面 (図の上方側) で、 $y=0$ が船の左右対称面となる。図1(a) は主流方向の速度分布で、プロペラが置かれるあたりで、流速が遅くなっていることがわかる。換言すると、船体に沿って発達した境界層 (速度の遅い層) は、できる限りプロペラに入るように船型が考えられている。これは流速ロス分をできる限りプロペラの蹴り出し効果でエネルギー回収を図るためである。図1(b) は、同一面での面内速度分布で、一対の渦が存在していることがわかる。これは船長方向に軸を持つ渦で、船尾縦渦と呼ばれている。回転流は、このままではロスとなる。



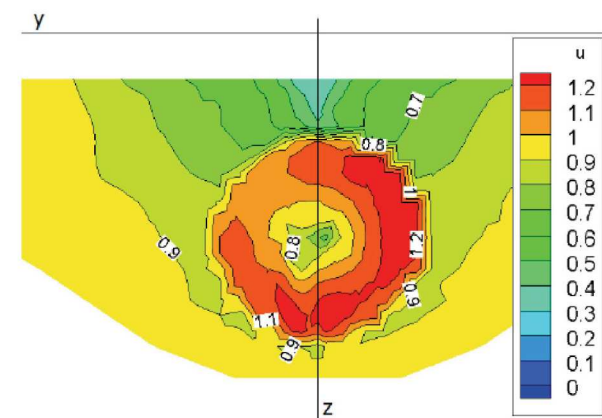
(a) プロペラ面での主流方向成分



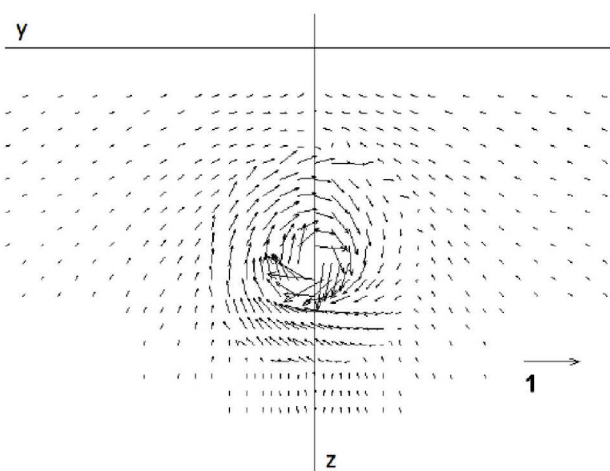
(b) プロペラ面での面内流速分布

図1 タンカー船型のプロペラ面での流速分布例

図2に、作動するプロペラ後方の流速分布を示す。これはSPIV (Stereo Particle Image Velocimetry) と呼ばれる手法で計測した結果で、プロペラにより大きな回転流が生成されていることがわかる。この回転流は、船の推進には寄与しないので、エネルギーの損失となる。



(a) 主流方向成分



(b) 面内流速分布

図2 作動するプロペラ直後の流れの例
上が船長方向の流速分布、下は面内速度成分 [3]

以上のように、船の後ろの流れは速度損失のほか、回転流も伴う複雑な流れであり、これらを如何に有効に推進効率向上につなげていくか、生成させた回転流を如何に回収していくかという観点から、省エネ技術開発はとりくまれてきた。

5. 船舶の省エネ技術例

省エネ効果を向上させるためには、船体の抵抗を

減らす、推進効率の向上を図る二つの方法がある。船体抵抗を減らすには、たとえば、造波抵抗軽減のため、船体前半部の船型改良するものや、船橋等の上部構造物の角を落として、風圧抵抗を低減させるなどの方法があげられる。推進効率の向上には、たとえばプロペラへの流入速度分布改善のための船体後半部の船型改良等の方法があげられる。これらは長年の研究の歴史がある。ところが、1973年に起こったオイルショック後は、さらなる省エネ効果の上積みが求められるようになり、今まで捨てられていた流れのエネルギー回収に積極的に目が向けられるようになった。

タンカーのような肥大船では、前述したようにプロペラに流入する流れ場に大きな縦渦が伴っている。この回転成分を推力に変換し、かつプロペラには整流された流れが流入するようにとの意図で、プロペラ前方にいくつかのタイプの省エネ装置が装備されるようになった。図3に、筆者が実験で使用したダクトの例を示す。ダクトは、プロペラ円を大きく覆うものから、写真の例のように小型のもの、半円状のものなど、すでにいろいろなタイプのダクトが提案されていて、すでに出尽くした感すらある。

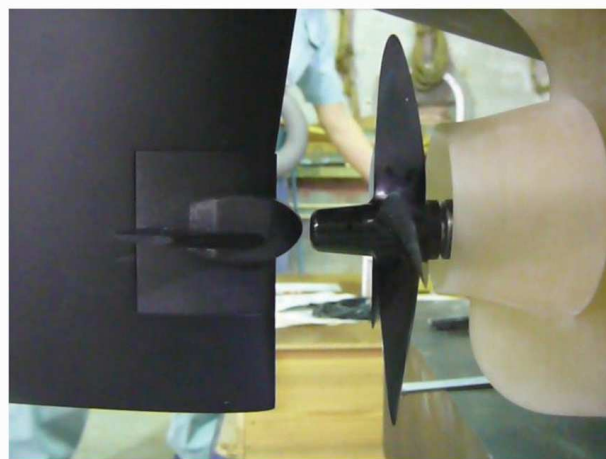


図3 プロペラ前方に設置されたダクトの例

プロペラが作動すると、プロペラの吸引効果ともあいまって、ダクトには推力が発生し、かつ円周方向の回転流が整流されるように設計される。別のタイプの省エネ装置として、図4にフィンの一例を示す。

これも回転流をうまく利用して、フィンには推力が働き、かつプロペラには整流された流れが流入す

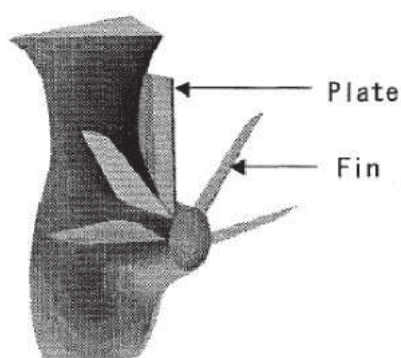


図4 pre-swirl型の船尾フィン [4]

るように設計される。このようにダクトや（プロペラ前方）フィン、船尾の回転流を回収して推力に変換するとともに、流れを整流させてプロペラの効率向上を図るのが基本概念で、pre-swirl型の省エネ装置に分類される。

次に、プロペラ後流の大きな回転流を回収することで、推進効率を上げる例を示す。古くは、プロペラ回転流により、舵上方では舵に対して左舷から右舷へ、舵下方では逆に右舷から左舷に向かう流れが存在するため、舵上下半分をねじり、舵上下面で常に正の迎角が生じるようにして、舵に推力を発生させることを狙ったリアクション舵がある。近年ではさらに積極的にプロペラ回転流を回収する目的で、舵に小さな翼を設置する例が多く考案されている。小さな翼に対してはプロペラ回転流に対して迎角を持

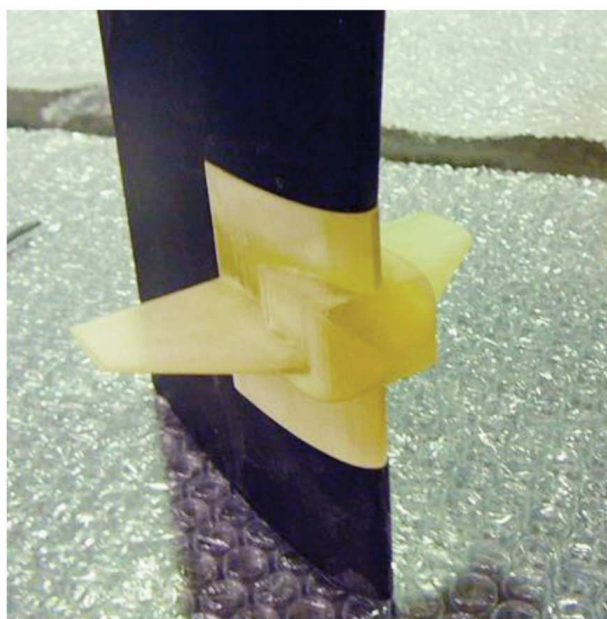


図5 舵フィンの例

たせるようにして推力を発生させる。図5にやはり筆者が実験に用いた舵フィンの一例を示す。

このほかに、上記とは異なり、船体の摩擦抵抗を直接低減させることで省エネを目指した、空気潤滑法 [5] がある。これは船底から気泡を噴出させ、船底の摩擦抵抗低減を狙ったもので、最近わが国で、積極的に研究が進められている方法である。空気潤滑法は、船底に空気を噴出させるための装備等、従来の省エネ装置に比べて、現状ではコスト面で高く、コストと省エネ効果の関係のさらなる改善が必要と思われ、今後の研究に期待される。

6. 省エネ装置開発の困難さ

EEDI規制により、省エネ効果のさらなる積み増しが要求されている。このため近年では、複数の省エネ装置の組み合わせが試行されるようになっていく。しかしながら、たとえばそれぞれ単独で3%の省エネ効果を有したものの同士を単純に組み合わせても、足し算で6%というわけには行かないのが実情である。省エネ装置の開発の難しさは、やはり船尾の粘性流場に設置されることから、模型試験の結果がそのまま実船の性能を示さないところにあると思われる。模型試験で得られた省エネ効果が、実船の薄い境界層の中に、省エネ装置が置かれたときに、どの程度の効果が維持されるのかを推定することは容易でない。また流場の違いを考慮した合理的な試験方法も確立されていないのが現状で、省エネ装置の設計は各造船所のノウハウによるところが大きい。

7. 水槽試験技術の発展

従来、省エネ装置の良し悪しを模型試験で判定する場合は、省エネ装置を装備した模型船の抵抗試験や自航試験を行い、推進効率がどの程度改善されたかを見ていた。一方で、省エネ装置は複雑な流れの中に置かれているので、基本的にはプロペラが作動した状態で、装置自体がどのような流れに置かれているのか知る必要がある。しかし、船体周りの流れをもつばら5孔ピトー管で計測するときは、省エネ装置の直前や直後にピトー管を設置できないことから省エネ装置まわりの詳細な流場は、よく知られていなかった。一方で、船舶工学分野でも、SPIVによる計測技術が急速に普及したことから、今まで未知であった省エネ装置近傍の詳細な流れの様子

が明らかになりつつある。SPIVは非接触計測法であるので、物体近傍の流れを乱すことなく計測できるので、今後の省エネ装置の開発には必要不可欠な計測手段になると思われる。図6にSPIVで計測したプロペラが作動する状態での舵直後の計測例を示す[3]。舵とプロペラ後流渦の干渉により、流場が非対称に変形している様子が、詳細に捉えられている。

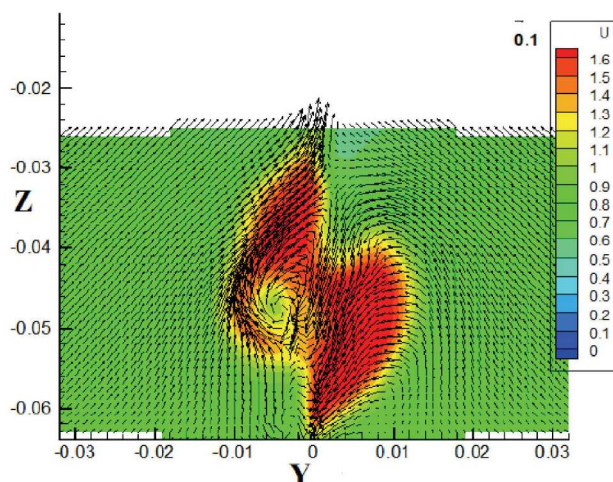


図6 舵直後の流場計測の例 [3]

また、変わったところでは、省エネ付加物の模型を3Dプリンターで作る試みもされている。図3のダクト部分や図5の舵フィンが3Dプリンターで製作している。これを用いると系統的に変化させた省エネ装置の試験が効率的に実施でき、今後とも利用度が高まるものと思われる。

8. CFDによる性能推定

近年、CFD (Computational Fluid Dynamics) の急速な発展に伴い、省エネ装置の性能推定や設計にも利用されるようになってきた。当初は主船体のみを考えた船体周り流れの計算が主であった。その後、プロペラを体積力で表現する方法等による自航状態の計算が可能となり、CFDによる推進性能推定の利用が広がっていった。さらに最近では、オーバーセットを許す格子系での計算方法の開発や、非構造格子系による計算法の利用などにより、船尾に装備された省エネデバイス周りの複雑な形状周りの流れの計算も可能となった。最近では、多くの機関で複雑な省エネデバイス周りの流れのシミュレーションが盛んに行われ、省エネデバイスの設計にも利用さ

れつつある (たとえば [6])。

CFDを用いる大きな利点の一つは、実船レイノルズ数におけるシミュレーションを行うことで、実船に装備された省エネデバイスの性能が推定しうることになったことである。ただし、実船のような高レイノルズ数下の計算では、そもそも実船周りの詳細な流場計測例がほとんどないことから、計算精度の検証は必ずしも十分行われていないのが現状である。従って、現状ではたとえばレイノルズ数を模型レベルから実船レベルまで順次変えた計算を行い、計算結果とレイノルズ数の関係を苦慮して、数値解の精度を見極めるなど、ある種のノウハウを活用しつつCFDを利用していくものと思われる。

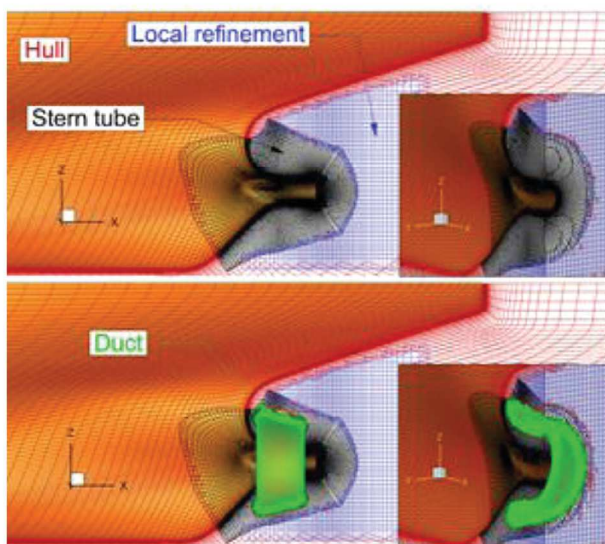


図7 省エネ付加物を装備した船体周りの格子分割例 [6]

9. おわりに

船舶の省エネ技術開発は、長く、かつ非常に蓄積の多い研究課題であり、筆者の力量では到底まとめきれない。このため本解説も稚拙なものとなってしまった。読者にお詫びしたい。それでも、本記事に接して、造船工学にあらためて関心を持っていただける読者が生まれれば、筆者にとっておいしい喜びである。今回、筆者に解説記事執筆の機会を与えてくださった本誌の編集担当の先生方に御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 「特集 EEDI (その1)」日本船舶海洋工学会誌 第53号、平成26年3月

- [2] Kume et al., Measurements of Hydrodynamic Forces, Surface Pressure and Wake for Obliquely Towed KVLCC2M Model and Uncertainty Analysis, CFD Workshop Tokyo 2005, pp.646-653,(2005)
- [3] Yan Naing Win, Computation of the Propeller-Hull and Propeller-Hull-Rudder Interaction Using Simple Body-Force Distribution Model, 大阪大学学位論文 (2014)
- [4] 浅海友弘他、「省エネルギー装置“フレンドフィン”の有効性について」日本船舶海洋工学会講演会論文集第3号 pp.261-264,(2006)
- [5] 日夏宗彦、「空気潤滑法を用いた船舶の省エネルギー技術動向」、混相流 第27巻1号 pp.4-10(2013)
- [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 Application in Maritime Industries (2014) pp.72-82

