連携記事

温室効果ガス（GHG）排出を削減するエコシップの実用技術

Practical Eco-Ship Technology to Reduce the GHG Emission

廣田和義
Kazuyoshi Hirota
ジャパン マリンユナイテッド（株）
商船事業本部 基本計画部
流力性能グループ

1 はじめに

地球環境保護が国際的な重要課題となり、1997年には温室効果ガス（GHG）の排出量削減を規定する京都議定書が採択された。京都議定書はその対象を先進国のみに限定しており、船主、荷主、船籍国、船員、出入港地など、複数の国が関与する国際海運はその対象外であり、国連の海事専門機関である国際海事機関（IMO）においてGHG排出削減を追及することとされている。国際海運におけるGHG排出削減はIMOの海洋環境保護委員会（MEPC）で議論され、2011年7月に開催されたMEPC62において、国際海運におけるCO_2排出規制を導入するため、海洋汚染防止条約（MARPOL）の一部改正案が採択された[1)]。

この規則はCO_2の排出総量を規制するものではなく、1トンの貨物を1マイル運ぶ際に排出されるCO_2を算出したエネルギー効率設計指標（EEDI：Energy Efficiency Design Index）を定められた基準以下に規制するものである。この規則は、2013年1月1日以降に建造契約される外航船舶に対して発効される。同時に、運航中の船舶には船舶エネルギー効率管理計画書（SEEMP：Ship Energy Efficiency Management Plan）の所持が義務化され、その中で実運航においてもエネルギー効率を改善していくことが求められている。

エネルギー効率を高めるということは、多くの貨物を少ない燃料消費量で速く目的地まで運ぶということであり、この規制は、船社にとっては運航経済性を高めるということ、造船所にとっては新技術を導入して差別化を図ることに繋がる。この背景がドライブフォースとなり、多くの船社や造船所が環境対応エコシップのコンセプトを提案しており、一部は実建造されている。それらのほとんどは、エネルギー効率を高めることが主目的であるため、図1に示すような

(1) エンジン効率の改善
(2) 船体推進効率の改善
(3) 実運航における効率改善
(4) 自然エネルギーの転換利用

といった技術が織り込まれている。本稿では、これらの中から実用化されている船の環境対応技術の例について紹介する。

2 エンジン効率の改善（排熱回収）

一般的な商船は、プロペラを駆動させて推進力を得る推進用ディーゼルエンジンと、プラント機器や照明などで消費される電力を供給する発電用ディーゼルエンジンが運転されている。船の推進用ディーゼルエンジンは自動車のガソリンエンジンに比べ、格段に燃費効率が優れているが、さらに省燃費を達成するため、推進用ディーゼルエンジンが排出する熱エネルギーを利用して電力を生み出すハイブリッドターボチャージャー（図2）が開発された[2)]。

ハイブリッドターボチャージャーとは、船舶用大型エンジンに搭載されるターボチャージャーの構造の一部に小型の高速発電機を内蔵させたものである。その大きな特徴は、エンジンからの排気を駆動源としエンジンに空気を送るターボチャージャー本来の仕事（給気）に加えて、ターボチャージャーのローター軸に直結された発電機による発電を行っていることである。この二つの仕事を一つのターボチャージャーで行っているため“ハイブリッドターボチャー

図1 エコシップのコンセプト

ジャー”と呼ばれている。

近年ではターボチャージャーの高効率化が図られ、エンジンへの給気仕事に対して、ターボチャージャーの駆動源となるエンジンの排気エネルギーが余剰となる場合がある。エンジン排気はターボチャージャーを通過後、他に利用することがなければ、捨てられるエネルギーであることから、この余剰エネルギーを発電に利用できるハイブリッドターボチャージャーは、有益な排熱回収技術の一つである。

常用航海中では、ハイブリッドターボチャージャーの発電能力のみで船内の必要な消費電力を全て供給することができるため、発電用エンジンを運転する必要がなくなり、燃費削減に寄与する。このハイブリッドターボチャージャーを用いた船内電力システムを世界で初めて搭載した船が2011年に完工し、計画通り、発電機を作動させずに運航できることが実証された。その燃費削減効果は全消費量の約3%相当であった。

3 推進効率の改善

船の推進エネルギー効率を高めるには、

(1) 船型の改良

(2) 推進器（プロペラ）の効率向上

(3) 省エネルギーデバイスの採用

等が考えられる。船型の改良については、古くから理論的研究や多くの水槽試験が実施されており、それらの知見を使えばかなり高効率な船型を提案することができる。近年では高速なコンピューターと数値流体力学（CFD）の発展によって、船型自動最適化計算が実用化されてきているが、実設計においては機器配置や貨物艙容積の確保のためにどうしても制約点が多く存在するため、ある程度の推進効率減が生じてしまう。たとえば大型タンカーの場合は推進効率が0.75程度であるので、推進用エンジンが発生させるエネルギーの75%だけが推進エネルギーとして利用され、25%が捨てられていることとなる。この捨てられるエネルギーをできるだけ回収して推進エネルギーに転換するため、プロペラ性能の向上策や省エネルギーデバイスが実用化されている。

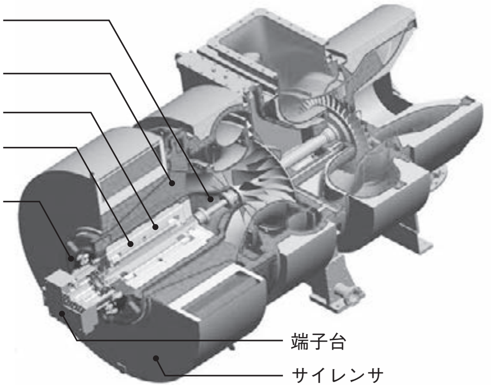

図2　ハイブリッドターボチャージャーの断面図[2)]

3.1　二重反転プロペラ

プロペラは回転することによって回転流を生み出し、その前後方向成分が推進力として使われるため、前後方向成分以外は有効活用されていないこととなる。この回転流を回収するプロペラとして、二重反転プロペラ（CRP：Contra-Rotating Propeller）が開発された[3)]。

二重反転プロペラは図3のように2枚のプロペラを同一軸上の前後に配置し、互いに逆方向に回転させることによって、前のプロペラが発生した回転流を後ろのプロペラが回収して整流し、前後方向の推進力に変えることによってプロペラ効率を高めるものである。二重反転プロペラによって10%以上もの効率向上が期待される。

3.2　省エネルギーデバイス

タンカーやばら積み貨物船といった肥大船は、船尾部分で大きな渦を発生することで推進エネルギーを浪費してしまう。この渦を回収し、プロペラ周辺の流場を改善して推進効率を上げるものとして多くの省エネルギーデバイスが実用化されている[4)]。これらの多くはプロペラ前方の船体に取り付けるものとプロペラ後方の舵に取り付けるものがほとんどである。

プロペラの前方に取り付けるタイプのデバイスは、船尾ビルジ部から発生する三次元剥離渦（ビルジ渦）を回収することを主目的としている。ビルジ渦の大きさは粘性抵抗の大きさにつながるが、プロペラ近傍では伴流利得（プロペラ周囲の相対流速が遅くなることによって、プロペラは船の速度でなく、遅くなった流れに打ち勝てばよくなるため、推進効率が上がる利得）を増加させる。このタイプのデバイスはビルジ渦を回収して流れを直線的に整流する一方で、伴流利得は増加させる効果がある。

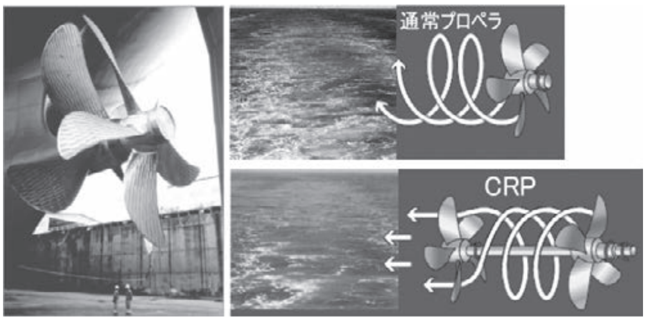

図3　二重反転プロペラ（CRP）

プロペラの後方に取り付けるタイプのデバイスは、舵まわりに設置されるものが多く、プロペラの回転流による損失を回収することを主目的としている。

図4はプロペラ前方に取り付けるタイプとプロペラ後方の舵に取り付けるタイプを組み合わせた実例である。

プロペラ直前のダクト状の省エネデバイスは、SSD（Super Stream Duct）というもので、ダクトは翼断面を有しており、ビルジ渦を回収することによって揚力を発生させ、その前後方向成分を推力として利用する。また、ダクト内部の流れは加速されてプロペラ面に導入されるが、ダクト外部の流れは逆に減速され、伴流利得を増加させる。ダクトタイプは特にビルジ渦の大きい肥大船で効果が大きく、SSDの採用による燃費削減効果は3～8%である。

プロペラ後方の舵に付いている省エネデバイスは、バルブとフィンを組み合わせたSURF-BULB（Swept-back Up-thrusting Rudder Fin with BULB）というもので、プロペラが回転したときに中心部から発生する渦（ハブボルテックス）をバルブによって弱め、プロペラ回転流を舵の両側に水平に設置したフィンで回収することによって発生する揚力の前後方向成分を推力として利用するものである。SURF-BULBの採用による燃費削減効果は3～5%である。

図4の実例ではプロペラの前後に二種類の省エネデバイスを取り付けており、組み合わせた場合の燃費削減効果は5～10%に達する。

4 実航海における効率改善

実運航されている船は波や風といった外乱の中を航行するため、荒れた海象では外乱によって生じる抵抗増加は無視できない。したがって主機や船体の効率を改善するだけでなく、風や波に対抗できる性能を考慮することもエネルギー効率向上に大きく寄与する。

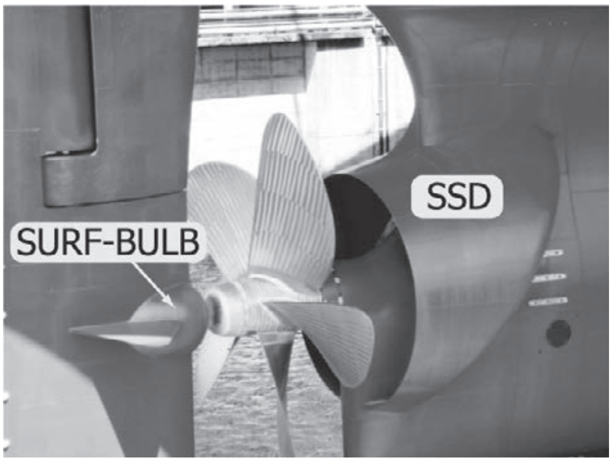

図4　プロペラ前後に取り付けられた省エネデバイス

4.1　居住区の風圧力低減

タンカーやばら積み貨物船は船体後方に背の高い居住区を有しており、貨物を積んだ満載状態では、風圧力が働く正面投影面積のうち居住区部分が占める割合は半分以上にもなる。最近では図5のように居住区の前縁角を矩形に切り取った隅切り型居住区が実用化された例がある。土木・建築分野では橋脚や高層ビルの風による自励振動を低減するために四隅を矩形に切欠く処理が施されており、これによって抗力も小さくなることが知られている。この隅切りをばら積み貨物船の居住区前縁に適用し、風洞試験を行った結果、正面風圧抵抗の低減効果は、図6のとおり、居住区を含めた満載状態の船体全体模型で12%であった[5)]。

図5　居住区の隅切り

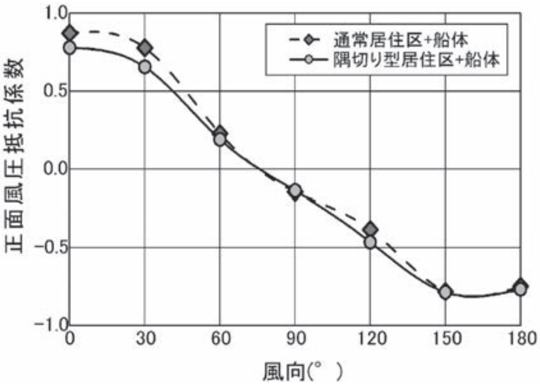

図6　風洞試験結果[5)]

4.2　船体の風圧力低減

自動車運搬船のように風圧受圧面積の大きい船は、正面風圧抵抗のみならず斜めから風を受けたときの横流れが大きく、針路を保持するための当て舵量が大きくなることによる抵抗増加が生じる。また、強風下での横流れは操船そのものが困難になり、安全運航上の問題にもつながる。そこで前節の隅切りの考え方を図7のように自動車運搬船の上甲板側面部に適用し、上甲板前端部は斜めにカットした船型が開発された。この改良型自動車運搬船の風洞試験では、従来型の自動車運搬船に対して、風圧抵抗の前後方向成分、横方向成分、船を回頭回答させようとするモーメント成分ともに約20%の低減が確認された。この効果により、例えば風速15m/sの中では最大6%の馬力低減効果があると試算されている。本船は就航後、良好な就航実績を示し、従来の自動車運搬船に対して横流れが少なく、船速低下も小さいという船長の評価も得ている[5)]。

4.3　波による抵抗増加を低減させる船型

波による抵抗増加の主な要因は、船が波で揺れることによる抵抗増加成分と船首にあたる波を反射することによる抵抗増加成分の2つである。波による抵抗増加を低減するため、この波浪中抵抗増加の二成分をそれぞれ低減させる検討が行われているが、大型のタンカーやばら積み貨物船のような肥大船では、実航海において遭遇する波の波長は船体の長さに対してかなり短いものがほとんどであるため、船はあまり揺れないため、波浪中抵抗増加成分のほとんどは入射する波を肥大した船首で前方に反射することによって生じる反力によるものであり、肥大船ではこの抵抗増加成分の減少を目指した検討がなされてきた。

4.3.1　Ax-Bow

反射波に基づく波浪中抵抗増加成分を低減するには、船首部分に入射した波をできるだけ前方に反射しないようにすればよい。そのアイデアに基づいて実用化されているものにAx-Bowがある。Ax-Bowは満載状態の水線面上の船首先端部分を図8のようにカットし、斧（ax）のように先端の垂直部分の水線面形状をできるだけ尖らせるようにした船首形状である。Ax-Bowは模型による波浪中抵抗増加試験が実施されており、正面～斜め向かい波での規則波中抵抗増加は20%～30%減少することが確認された。

Ax-Bowの実用化第一船（図9）は2001年竣工のばら積み貨物船で、従来型船首を持つ同型姉妹船の二隻の実船計測による実海域での効果も確認された。正面向かい波近傍の実船計測データから風、当て舵の影響を除去し、波浪成分のみによる船速低下量を比較した結果を図10に示す。図中の●はAx-Bow、○は従来型船首の実船試験結果を示し、実船と破線はそれぞれの近似平均線である。波高が小さい領域ではデータ混在しており、差が明確ではないが、波高が大きくなるにしたがってAx-Bowの船速低下量が通常船首より小さい傾向が明確になっている。この船速低下量は模型で実施した波浪中抵抗増加試験結果から推定した実海域における船速低下量の予測結果とほぼ同等の値となっていることが確認された[6)]。

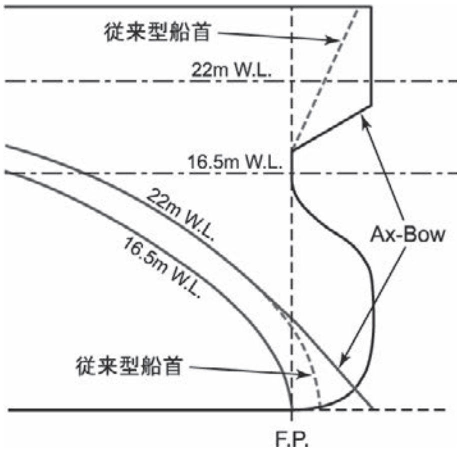

図8　Ax-Bow模式図
W.L.（Water Line）船底からの高さ
F.P.（Fore Perpendicular）船首垂線

図7　風圧力軽減型自動車運搬船

図9　Ax-Bow採用第一船

4.3.2 LEADGE-Bow

Ax-Bowは、平水中性能を変えないことを前提とし、満載喫水線以下の船型は変えていない。従って、バラスト状態での航行においては波浪中抵抗増加は従来型船舶と変わらない。一方、タンカーやばら積み貨物船は貨物を取りに行く航海は貨物艙が空になっているバラスト状態なので、全航海の半分はバラスト航海となり、水面は満載状態よりもかなり低い位置にある。従ってバラスト状態も含めて効果を得るため、船首部分全体の水線面形状を尖らせたほうが良いという考えに基づいて開発された船首形状がLAEDGE-Bowである。この形状は図11に示すように船首端部の水線面全体が尖っていることから、Leading Edgeを短縮して名づけられた。船首部分全体を尖らせると、水面以下の船首バルブがなくなってしまい、平水中の造波抵抗に悪影響を及ぼすと懸念される。しかしタンカーやばら積み貨物船のような低速肥大船の場合、全抵抗に占める造波抵抗の割合が小さく、船首バルブの効果は船の見かけ上の長さが長くなって船首部の肥大度が小さくなる効果であるため、船首部分を全体に尖らせても平水中抵抗に悪影響はない。LEADGE-Bowについても波浪中抵抗増加試験が行われ、満載状態、バラスト状態ともに波浪中抵抗増加の低減効果があることが確認された[7]。

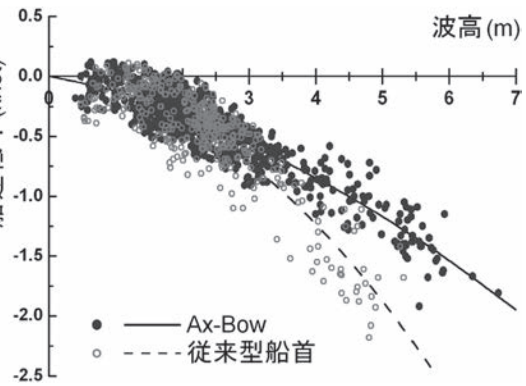

図10　実船試験結果（船速低下）[6]

図11　LEADGE-Bow採用船

5 おわりに

地球温暖化防止の観点から，国際海運において船から排出されるCO_2を削減する規則が発効し、推進性能の優劣を平水中性能で論じられていた時代から、種々の外乱が作用する実海域の航海において燃費削減が規則として要求される時代となった。

冒頭で説明したEEDIは、この規則が発効する2013年1月1日以降は船の建造契約日と完工日によって段階的に改善していかなければならない。2025年1月以降になると、現時点の平均的な値からEEDIを30%も下げなければならないことが予定されており、本稿で紹介したすべての技術を導入しても厳しいレベルであろう。

一方で、そういった新技術導入が不可欠である規則の発効は、長引く円高や建造コスト高という点で海外の造船新興国に劣後となっていた日本の造船・舶用機器メーカーにとってチャンスとなりうるのではないであろうか。そのために、新しい技術を早急に実用化できるよう、造船・舶用機器業界と海運業界は情報交換と議論を密にして、GHG排出削減という同じターゲットに向かって協調を強化することがますます重要であると考える。

参考文献

1）国土交通省報道発表資料，国際海運における世界初のCO_2排出規制の導入について，平成23年7月19日.
2）小野嘉久，白石啓一，山下幸生：排ガスで発電する大型舶用ハイブリッド過給機の実用化，三菱重工技報，49（2012）1, 35.
3）坂本芳太郎，藤野良亮，勝亦康司，成田豊伸：二重反転プロペラ装備 258,000 DWT型油槽船「沖ノ嶋丸」，石川島播磨技報，34（1994）5, 372.
4）佐々木紀之：近年の省エネ推進装置，日本造船学会誌「テクノマリン」，（2005）885, 322.
5）松本光一郎，田中良和，廣田和義，宇佐美俊，高岸憲璽：船舶の正面および側面に働く風圧力低減の試み，関西造船協会論文集，（2003）240, 115.
6）廣田和義，松本光一郎，高岸憲璽，折原秀夫，吉田尚史：実海域実船計測によるAx-Bow効果の評価，関西造船協会論文集，（2004）241, 33.
7）山﨑啓市，松本光一郎，高岸憲璽：低速肥大船の船首形状について，関西造船協会論文集，（2003）240, 101.

（2012年11月29日受付）