

# 燃料半減船の可能性について

正員 大 内 一 之\*

Possibility of Half Fuel Consumption Vessel

by Kazuyuki Ouchi, Member

## Summary

Saving fuel oil of merchant vessels is a very important issue because we are facing the problem of not only increasing price of the fuel oil but also the penalty of CO<sub>2</sub> emission in near future. Drastic and systematic approach for the fuel saving is requested and needed in order to keeping the global leadership in the industries of shipping and shipbuilding. The present paper proposes and discusses a possibility of Half Fuel Consumption Vessel which adopts new technology concepts integrally such as the system of large diameter twin propeller propulsion, the system of air bubble lubrication, the system of recovering main engine waste heat, etc.

## 1. 緒 言

昨今の石油の大幅な値上がりは多少投機的な要素はあるものの、基本的底流として資源量の枯渇と大人口を抱える中国・インドを中心とする発展途上国のエネルギー需要の高まりが石油価格を押し上げており、今後も世界人口の増加と共に長期的に更に高騰していくことが予想される。更に、石油燃焼後のCO<sub>2</sub> 排出による地球温暖化問題が、将来の人類の生存を左右する大きな環境問題として今後ますますクローズアップされ、外航海運業にもCO<sub>2</sub> 排出に対するペナルティーが科せられる時代も遠からず到来するとが予想される。

船舶・航空機のような独立した移動手段におけるエネルギー源は、高密度でハンドリング性に優れた石油燃料が殆ど全てを占めており、石油の価格が相当高くなってもそれに代わる適当なエネルギー源を技術的にもコスト的にも見出すのは難しく、今のところ将来にわたって石油依存を続けざるを得ない分野であると思われる。従って、今後の船舶に求められる最大の要求は省エネ・省燃料消費である。他の産業分野に比べて海運造船分野では、燃料を削減することこそが運航コストの削減と地球環境への貢献を同時に達成できる最大の技術目標となろう。このような視点から、今後の船舶設計は従来の世間標準並の性能の船を低いコストで作るという意識から、多少コストはかかっても省エネ効果が抜群であり、初期コストを簡単に取り返して余りある技術開発への意識への転換が必要であり、燃料消費量を半減させるような抜本的且つ総合的な技術開発を目指すべきである。また、これにより将来の日本の海運造船産業が世界でのリーダーシップをとることが出来る。

本稿では、船舶における抜本的且つ大幅な燃料消費削減を行うために、その候補となる要素技術を提案・考察し、燃料消費量が従来型船舶の半分になる「燃料半減船」の実現のための研究分野と課題を論じることとする。

## 2. 船舶におけるエネルギー損失と省エネの可能性

ディーゼル機関とプロペラ推進器を船尾に配置した一般的な外航大型商船において、所要の速度で船体を前進させるために、投入した燃料から必要な速力を発生させる過程でのエネルギー損失について、現在の技術水準での概略の値を Table 1 に示す。

現在の殆どの船舶に採用されている船用大型 2 サイクルディーゼル機関は、ロングストローク化、過給機の改良等数々の開発を経て、燃料である C 重油の持つカロリー（エネルギー）の約 50%を回転力としてプロペラ軸に伝えており、熱機関としては最高の効率を発揮しているが、それでも残りの 50%の熱は排ガス及び冷却排水として、夫々空中及び海中に捨てられているのが現状である。

エンジンの出力(BHP)をプロペラへ伝える軸系の損失は、直結方式であれば摩擦、シール等で約 3%程度でありそれほど大きくはない。ただしエンジンとプロペラの間に減速機等を入れると更に 3%程度の損失、また、エンジンで発電機を回し電力を発生し電動モーターでプロペラ駆動する電化船となると現状技術では 15%以上もの伝達損失を覚悟しなければならない。

プロペラは回転力の推力への変換機であり、プロペラ出力(DHP)に対して所定の船速での船体抵抗に見合う推力エネルギーを得るための効率を推進効率 とすれば、はプロペラ単独効率を  $p$ 、プロペラ効率比を  $r$ 、船殻効率を  $h$  とすると以下のように表される。

\* (株)大内海洋コンサルタント

Table 1 Energy Losses of a Modern Merchant Vessel

燃料 (C 重油)	ディーゼル機関 (燃焼 / 回転力)	軸系 (伝達効率)	プロペラ推進系 (回転力 / 推進力)	シーマージン (実海域影響)	船体
変換効率	0.50	0.98	0.72	0.85	
エネルギー損失原因	排ガス・冷却水の排熱	軸受シール摩擦	粘性・旋回流損失	波浪中抵抗増加	粘性・造波抵抗
損失エネルギー	0.50	0.01	0.14	0.05	
伝達エネルギー	1.00	0.50	0.49	0.35	0.30
馬力		BHP	DHP	EHP	

$$= p \cdot r \cdot h \quad (1)$$

外航大型肥大船においては、現状の推進効率のレベルは約72%程度となっており、その内訳は  $p$  が約 0.6、 $r$  が約 1.05、 $h$  が約 1.15 程度が標準的な値であると云える。

船舶は実用上は風浪のある実海域にて使用されるので、最終的な船の性能・燃料消費量は実海域でのデータで評価すべきである。そのため、実海域での抵抗増加に打撃するために必要なエネルギー損失係数を考慮する必要があり、それをシーマージンと称し、平水中に比べての実海域での所要出力増加割合で表す。シーマージンは航路や季節により大幅に変化するが、現在は平均で約 15% 程度の値と評価されている。

船舶における省エネを総合的に考えた場合、載貨性を十分備えた上での抵抗の少ない船体を研究することと、Table 1 に示したエネルギー損失を最小化することが、車の両輪の如く重要であり、全体としてのバランスをとり総合的な観点からの省エネを追及していくことにより、大きな成果が得られるものと考えられる。

ここでは、エネルギー損失量が大きく改善・回収の余地が大きいと考えられる、船体抵抗の低減、プロペラ推進系の効率改善、主機からの排熱回収に関して、夫々、気泡による船体潤滑、二軸大直径プロペラ推進システム、主機排ガス及び冷却水の統合的排熱回収を提案するものである。これらの技術を統合し熟成させることにより燃料半減船の実現が視野に入ってくると思われる。

### 3. 二軸大直径プロペラ推進システム

回転力(トルク)を推力(スラスト)に変換するプロペラの効率を上げる努力は、船舶における省エネの基本的命題として長年研究が続けられている。Fig.1 に運動量理論に基づくプロペラの理想効率と現状のプロペラ設計技術の差を示す[1]。ここで  $p$  は現状のプロペラ効率、 $p_i$  はプロペラ運動量理論に基づくプロペラ理想効率、 $CT = T / (0.5 \rho V^2 D^2 / 4)$  はプロペラ荷重度を表す。ここで  $T$ : スラスト、 $\rho$ : 流体密度、 $V$ : 流入速度、 $D$ : プロペラ直径とする。

Fig.1 において、プロペラの形状抵抗による損失 - についてはなかなか改良が難しい面があるが、プロペラ後流の旋回流による損失 - についてはその回収について多くのアイデアが提案され、二重反転プロペラ(CRP)、プロペラボスキャップフィン(PBCF)、リアクションラダー、コスタバルブ、ラダー付フィン、等が実用化され約 10% の損失と目されるプロペラ後流旋回流の一部又はほぼ全部を回収してプロペラ効率向上による省エネの成果をあげている。

ここでは、従来型の肥大船の殆どを占める一軸船に対して、同じ直径のプロペラを 2 基装備した二軸船の開発を提案する。基本的な考え方としては、パラスト噴水を深くしないように、同直径のプロペラを 2 基並列に並べ二軸船とすることによりプロペラ荷重度を半分に減らし、プロペラ効率を大幅に向上させることを核として、Twin Skeg による船尾設計、低回転数・低燃費主機の並列配置設計等を組み合わせ、総合的推進性能の大幅な改善を目論むものである。

Fig.1 に示した A 点は、現状での代表的な VLCC のプロペラ作動状態を表しており、プロペラ直径は約 10m、回転数は 74rpm、プロペラ荷重度は約 1.5、プロペラ効率は約 60% である。この船を 2 軸として同じ 10m 直径のプロペラを 2 枚並べ回転数を 54rpm とすることにより、作動状態を

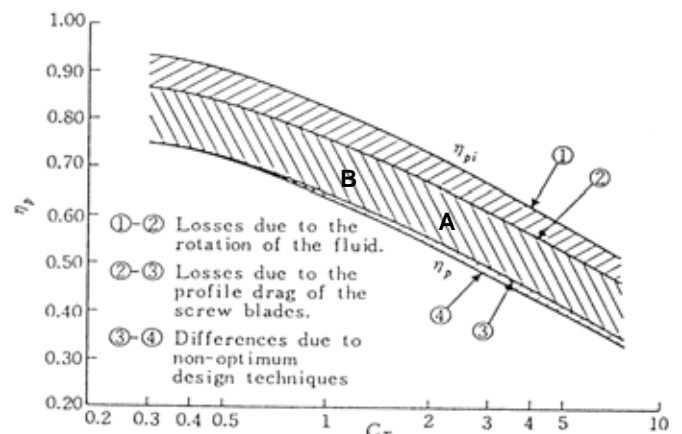


Fig.1 Energy Losses of Screw Propeller

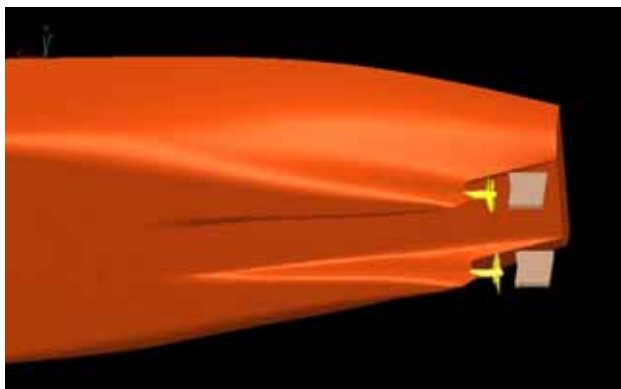


Fig.2 Twin Skeg Stern

図1のA点からB点に持っていければ、荷重量は約0.75、プロペラ効率率は約70%となり一軸船に比べて18%もプロペラ効率が増加することとなる。しかし、ここで問題となるのは2軸にした場合の(1)式に示した船殻効率  $h$  の変化である。スラスト減少係数を  $t$ 、伴流係数を  $w$  とすると、船殻効率は次式で表される。

$$h = (1 - t) / (1 - w) \quad (2)$$

一般的に二軸船は一軸船に比べて、プロペラに入る伴流の流速  $(1 - w)$  が大きくなり、 $h$  の値は悪くなる傾向にあるが、船尾形状をTwin Skeg タイプ (Fig 2 参照) にするなどの工夫をして、出来るだけ  $h$  が減少しないような船型を開発することがポイントとなる。ところが、このようなTwin Skeg タイプの船尾形状を採用すると浸水表面積は増加することになり、約5%程度の船体抵抗増加となる。しかし一方では、Twin Skeg タイプとすることにより船尾へ向けての船体の絞りが軽減されるため、ビルジ渦のような船尾縦渦が殆ど出なくなり、粘性抵抗が減ることによる形状影響係数  $K$  の値の減少が見込める。二軸船によるもう一つの省エネのための利点として、燃費効率の良いディレーティングした主機を使用できるということがある。ディレーティング主機は

エンジンの平均有効圧力 (mep) を標準使用状態よりも大幅に下げて使用する方法で、mep の下がる分エンジン出力も減少するが、KW・h 当たりの燃料消費量に関しては最大で約7%程度下げることが出来る。2機2軸システムを採用することにより、1軸では機関室の長さの問題でディレーティング主機が使えなかった船が、片舷ずつ半分の出力のエンジンで事足りるため、自由にディレーティングエンジンを選択して省エネが可能となり、また、機関室長さもむしろ短く出来る利点もが生じる。図4にVLCCを例にとって、標準仕様の主機(7筒)を搭載した一軸船に対して、二軸船において1気筒少ないディレーティング仕様の主機(6筒)を並列に2機配置した模式図を示す。このような主機の配置と選択で低回転と燃費向上を同時に実現することが可能となる。

上記を統合した2機2軸の大直径低回転プロペラ推進システムとして荷重量半減で18%、後流旋回流回収により4%として計22%のプロペラ単独効率向上が見込まれるが、逆に船殻効率は10%程度減少する。更に船体抵抗に関してはTwinSkeg 船型により、浸水表面積の増大で5%悪化するが、一方形状影響係数  $1 + K$  が5%良くなるので殆ど変わらない。ディレーティングエンジン並列配置による6%の燃費向上を合わせるとトータルで18%程度の省エネが可能と予想される[2]。

#### 4. 気泡潤滑システム

気泡を船体に這わすことにより、船体表面の摩擦抵抗係数を大幅に減らせることは古くから知られている。最近の研究[3]によれば船底平底部の左右舷に端板をつけ10mm程度の厚さで気泡を這わせることにより、その部分の摩擦抵抗が半減することがフルスケール(流速6m/s)の実験で確認されており、実船実験でも満載/バラスト平均で、船体抵抗低減による省エネ率で約7%、気泡注入動力を差し引いた正味の

MAN B&W S80MC-C

	通常仕様	ディレーティング仕様
気筒径(mm)	800	800
ストローク(mm)	3200	3200
最大連続回転数(rpm)	76	57
平均圧力(MPa)	1.96	1.22
出力(kW)		
6気筒	23280	11160
7気筒	27160	14020
8気筒	31040	16880
燃費(g/kWh)	167	155
主機間全長(mm)		
6気筒	10742	10742
7気筒	12148	12148
8気筒	13572	13572

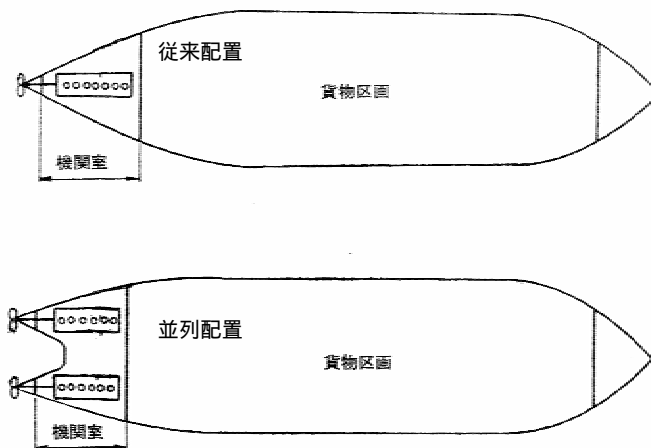


Fig.3 Energy and Space Savings on the Parallel Arrangement of Main Engine (VLCC)

省エネ率で約 5%という結果が得られている。

これから、平底面積の割合が全浸水面積の 50%程度の幅広肥大船に対しては、うまく平底に気泡を万遍なく這わすことが出来れば、半分の面積の摩擦抵抗が半分になるわけで、船体抵抗の 8~9 割を占める摩擦抵抗が 25%減少することとなり、非常に大きな省エネポテンシャルを持った技術である。

しかし上記実験船では満載/バラスト喫水が、夫々 7m/4m であり、気泡注入動力は推進出力の 2%程度で済んでいるが、喫水が深くなると気泡も水圧で圧縮されるため、所定の気泡体積を確保するには喫水圧に打ち克つ圧力に加えて、圧縮した体積を補完するための流量を確保する必要がある。そのため、気泡注入動力は喫水の約二乗に比例すると考えられ、10m を越す深喫水の船では、気泡注入動力が大きくなり、正味の省エネ効果を得るのは難しくなる。そのため、大型深喫水船にも適用するには、放出して後方に流れ去っていく莫大な量の気泡を回収して再利用する技術開発が鍵となる。

気泡潤滑技術の成否は、船底における安定的な気泡分布状態の実現と気泡の回収による気泡注入動力の極小化にかかっており、良い方法が開発できれば、幅広肥大船において 15~20%の省エネが期待できると考えられる。

## 5. 主機排熱統合回収システム

主機からの排熱は消費燃料の熱エネルギーの 50%に達する。これらの排熱エネルギーの約半分は排気ガスとして大気中に、残り半分は主機等の冷却水として海中に捨てられている。現在、主機排熱回収し動力生成を行うことで実用化しているシステムとしては、高馬力船における排ガスエコノマイザーと蒸気タービンによる発電であるが、省エネの量としては主機出力の約 3%程度の回収に止まっている。

熱回収の際に、効率に関連して問題になるのは排熱温度である。排ガスのような 300 以上の高温であれば回収効率も高いが、冷却排水のように 80 となれば海水温度との差は 60 程度しかなく効率は低い。しかし、これらの熱源を統合的に効率よく働かせ、全体としての回収効率を高める試みは、最近の省エネ要請から各機関で研究され始めており、最近の調査によれば、主機出力の 10%の排熱回収はほぼ実用化の段階であり、理論的には 15%~18%の回収は可能であることが指摘されている[4]。

ここでは、温度が低く非常に回収が難しいといわれる冷却水排熱の回収方法として、海洋温度差発電 (OTEC) に使われている高効率な熱回収技術を導入して統合的排熱回収システムを構築することを提案する。このサイクルはアンモニア水を作動流体としたウエハラサイクルといわれる温度差 20 でも動力生成・発電が可能な技術であり、主機冷却水の効率の良い熱回収に応用することが可能である。Fig.4 にウ

エハラサイクルのダイアグラムを示す。

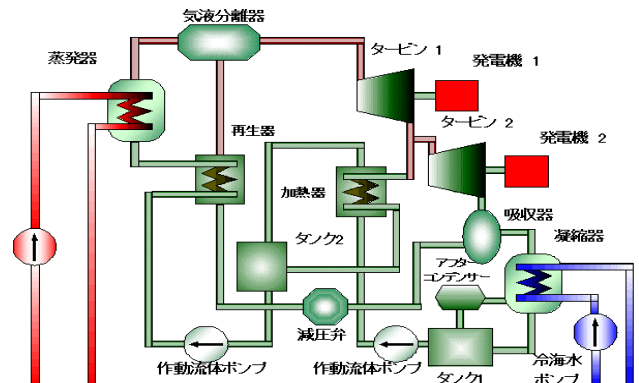


Fig.4 Diagram of Uehara Cycle

## 6. 結 論

燃料半減船の実現に向けて、大きな省エネ効果の得られる 3 つの新しい要素技術の提案とその実現の可能性について考察した。これらは互いに独立して省エネ効果を発揮するだけでなく、互いにシナジー効果も発揮する。例えば、Twin Skeg 船型と気泡潤滑システムを組み合わせた場合には、船尾がバトックフロー船型となり気泡は船尾流れと共に船体に沿って上昇するため、気泡潤滑船の難点であるプロペラが気泡を巻き込み効率が落ちたり振動が出るといった問題から解放される。また、排熱回収と気泡潤滑を組み合わせることにより、これまで航海中にデマンドが少なく装備されてこなかった排熱回収装置が、気泡放出のための有力なエネルギー源として活用できるメリットも出てくる。

これらの 3 つのシステムを装備した肥大船の総合的省エネ率の可能性を以下に示す。

$$0.82(2 \text{ 軸}) * 0.80(\text{空気潤滑}) * 0.85(\text{排熱}) = 0.56$$

更に、これに船首鋭角化によるシーマージンの改善、風圧抵抗の少ない居住区・上部構造の採用等を加味すれば、

$$0.56 * 0.97(\text{鋭角船首}) * 0.98(\text{風圧}) = 0.53$$

47%の燃料削減となり、燃料半減船は十分な可能性があると考えられ、世界に先駆け推進していくことが望まれる。

## 参考文献

- [1] Van Manen, D. J. : Non-Conventional Propulsion Devices、第 2 回船用プロペラに関するシンポジウム(1971)、日本造船学会、pp127 - 149
- [2] 大内一之：二軸大直径低回転プロペラ、超省エネ船シンポジウム (2007)、日本船舶海洋工学会、pp63-68
- [3] 児玉良明：空気潤滑による船体抵抗低減技術、超省エネ船シンポジウム(2007)、日本船舶海洋工学会、pp47-62
- [4] 春海一佳：排熱回収、超省エネ船シンポジウム(2007)、日本船舶海洋工学会、pp75-93