

二軸大直径低回転プロペラ

(株)大内海洋コンサルタント 大内一之

1. はじめに

本年 11 月にニューヨーク市場の原油取引価格はバレル当たり 80 ドルを突破し史上最高値を記録した。昨今の石油の大幅な値上がりは、投機的な要素が含まれていることも否めないが、やはり底流として、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。しかし一方では、石油燃焼後の CO2 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、エネルギー源の石油離れも進行していくと思われる。

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により、より大幅な運航コストの削減と地球環境への貢献が同時に達成されることになる。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、少々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[1]。また、これにより将来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、船舶の燃料半減のために研究すべき省エネ技術分野を概観と、半減のための中核となる技術としての二軸大直径低回転プロペラを装備した省エネ船の開発提案を行うものである。

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大型船舶において、所要の速度で船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表 1 に示す。

表 1 船舶におけるエネルギー損失

燃料 (C 重油)	ディーゼル機関 (燃焼／回転力)	軸系 (伝達損失)	プロペラ推進 (回転力／有効推力)	シーマージン (風浪中抵抗増加)
変換効率	0.50	0.97	0.72	0.85
有効エネルギー	1.00	0.50	0.49	0.35
備考		BHP	DHP	EHP (平水中速力)
				(航海速力)

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回転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 η とすれば、 η は、プロペラ単独効率を η_p 、プロペラ効率比を η_r 、船殻効率を η_h とすると以下のように表される。

$$\eta = \eta_p \cdot \eta_r \cdot \eta_h \quad (1)$$

太宗船といわれる大型肥大船において、現状の推進効率 η のレベルは約 72% 程度となっており、その内訳は、 η_p が約 0.6、 η_r が約 1.05、 η_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克つために必要なエネルギー損失係数を考慮する必要がある、それをシーマージンと称する。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、上記に示した動力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する。

動力エネルギー損失を省き、有効推力を高めるためには、先ずエネルギー変換時の損失の大きい機器・システムについてその効率を高め、損失エネルギーの回収を考慮することが実りが大きいと思われる。ここでは、変換効率が 0.72 程度であり、まだ大幅改善の余地のあると考えられる船尾プロペラによる推進システムの効率向上策について提案することとしたい。

3. プロペラ効率の向上

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ルギー基本的命題として長年研究が続けられている。図 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[2]。ここで η_p は現状のプロペラ効率、 η_{pi} はプロペラ運動量理論に基づくプロペラ理想効率、 $CT = T / (0.5 \rho V^2 \pi D^2 / 4)$ はプロペラ荷重度を表す。ここで T : スラスト、 ρ : 流体密度、 V : 流入速度、 D : プロペラ直径とする。

図 1 において、プロペラの形状抵抗による損失②-③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、コストバルブ、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。

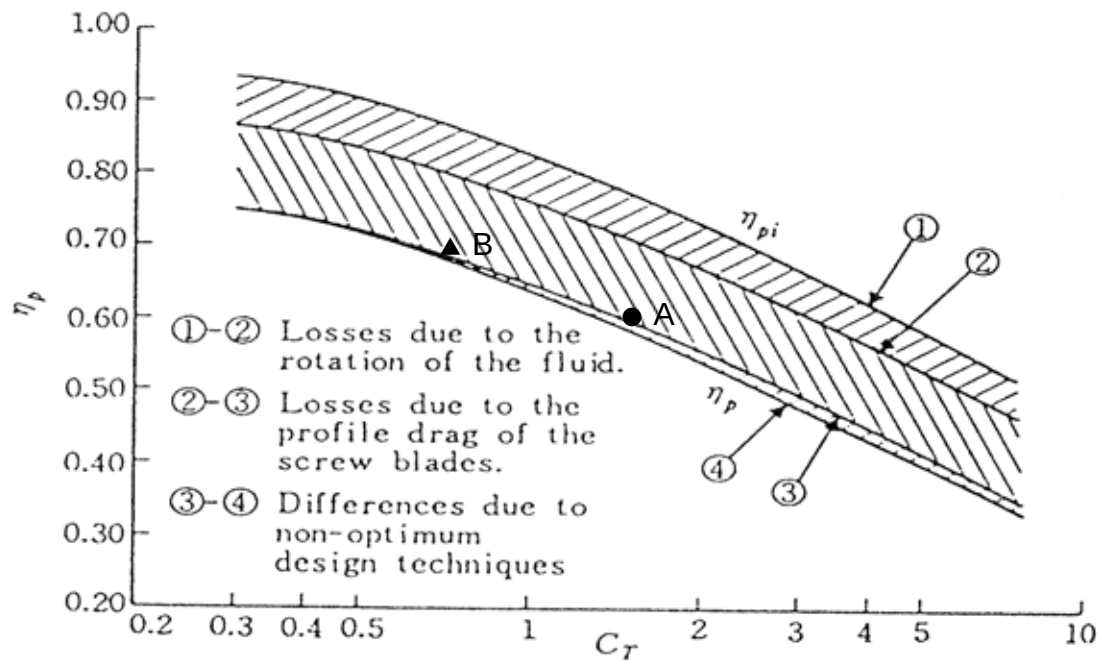


図1 スクリュープロペラにおけるエネルギー損失

さて、これまではプロペラの作動条件、つまりプロペラ荷重度が一定である状態でのプロペラ効率について議論をしてきたが、プロペラ効率を高めるためにはプロペラ荷重度 CT を減らすことが大きな効果をもたらす。1970 年代のオイルショック以来船舶の省エネ化が大幅に進展したが、その時に主役になった技術がプロペラの大直径低回転化であり、それに伴うプロペラ効率の向上であった。図2は某造船所における建造船のプロペラ効率とプロペラ荷重度をプロットしたものであり[3]、オイルショック後の 20 年間に、プロペラ荷重度の低減によりによりプロペラ効率が大幅に改善されてきたのが見てとれる。

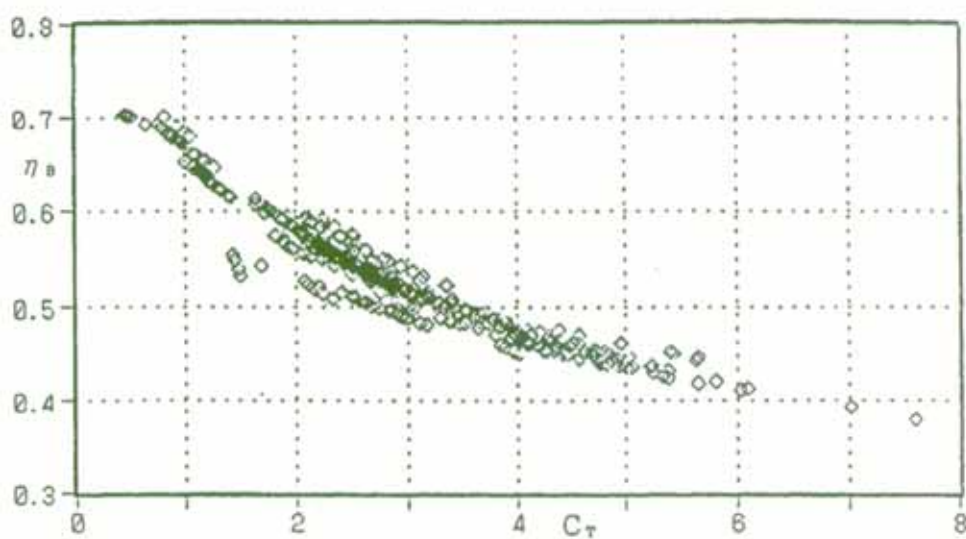


図2 1970-1990年建造船のプロペラ荷重度とプロペラ効率の実績

4. 二軸大直径低回転プロペラ

ここ 20 年にわたり、例えば VLCC に代表される大型肥大船の分野においては、省エネ附加物等による局部的で小幅の省エネ努力は行われているが、かつてのプロペラ大直径化や二重反転プロペラの開発のような 2 桁パーセントに届くような大幅のイノベーションは世界的にも皆無である。

ここでは、将来の省エネ船時代を見据え、従来船の太宗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したい。基本的な考え方としては、バラスト喫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て総合的推進性能の大幅な改善を目論むものである。Twin Skeg タイプの船尾形状例については図 3 に示す。

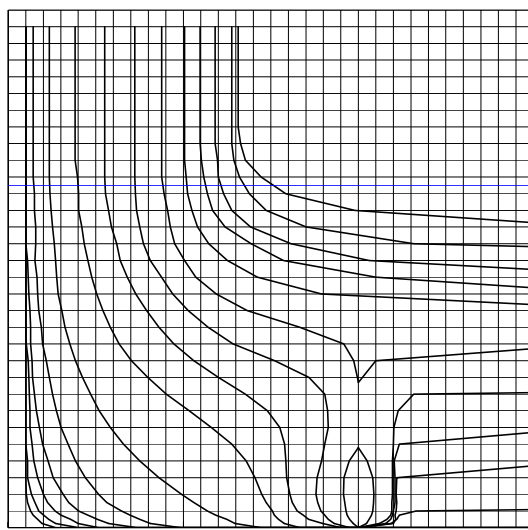


図 3 Twin Skeg 船尾形状例

図 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、作動状態を図 1 の B 点に持っていければ、荷重度は約 0.75、プロペラ効率は約 70% となり一軸船に比べて 17% 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 η_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。

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

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、 η_h の値は悪くなる傾向にあるが、船尾形状 Twin Skeg タイプにするなどの工夫をして、出来るだけ η_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。

5. 二軸船の主機と機関室配置

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。

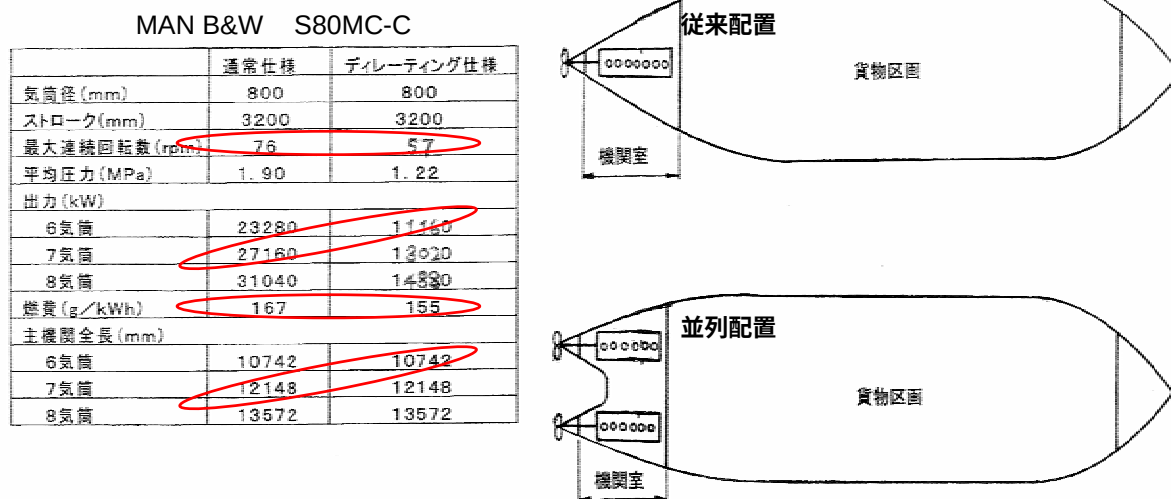


図4 ディレーティング主機並列配置による省エネと省スペース（VLCCの例）

6. 二軸大直径プロペラ推進船の省エネ性能

2機2軸の大直径低回転プロペラによるプロペラ効率の向上を核として、Twin Skeg タイプの船尾形状、ディレーティング主機の並列配置、を統合的に組み合わせた二軸省エネ船のコンセプトについて説明を行ってきたが、ここでは水槽実験の知見も参考にして定量的な省エネ効果についての見積について述べることにする。表2に抵抗推進性能に関連する各パラメーターについて、大型肥大船の代表としてVLCCを例として一軸船と二軸船の比較を行った結果を示す。

表2 二軸大直径プロペラ推進船の省エネ性能見積

PARTICULARS	Single	Twin	Ratio	Remarks
L (m)	320	320	1.00	
B (m)	60	60	1.00	
d (m)	20.5	20.5	1.00	
DW (t)	285,000	285,000	1.00	
Propeller Dia.(m) x Pitch Ratio x No.	9.8 x 0.75 x 1	9.8 x 1.00 x 2		
Propeller & M/E Revolution (rpm)	74	54	0.73	FPP on MCR
M/E Power (kw)	27,160	25,240		on MCR, Total
PERFORMANCE (d=20.5m)	Single	Twin	Ratio	Remarks
Speed (kt)	15.8	15.8		
Wet Surface (m2)	27844	29422	1.06	
1+K	1.33	1.27	0.95	
EHP (kw)	15,047	15,173	1.01	
ETA-T	0.98	0.98	1.00	
ETA-R	1.05	1.04	0.99	
ETA-H	1.18	1.12	0.95	1-t: 0.86
ETA-P	0.61	0.71	1.17	
BHP (kw)	20,340	18,616	0.92	Total
SFOC (g/kwh)	166	156	0.94	A-oil
FOC (t/d)	86	74	0.86	C-oil

Twin Skeg による浸水面積増による約 6%の抵抗増加は、形状影響係数 K の減少によりほぼキャンセルされ、Twin Skeg タイプの船尾の船体抵抗 (EHP) は一軸船と殆ど変わらないと思われる。一方、推進効率については、船尾形状設計の巧拙にもよるが、 η_h と η_r を合計して 6%程度の効率低下で抑えられれば、プロペラ効率で 17%の効率向上が得られるため、推進効率としては約 10%の効率向上が見込まれる。従って BHP ベースでの比較では満載状態で約 8%程度二軸船での馬力削減が見込まれる。これに加えて、ディレーティング主機の採用による燃費率向上効果の約 6%を加えると、約 14%の燃料消費量削減効果が得られる。更に、本プロペラは旋回流の回収を行っていないので、3 章で述べた例えば PBCF 等のプロペラ旋回流回収装置を夫々のプロペラに附加することにより、更に 4%程度の燃料削減効果が加算され、合計 18%程度の燃料消費量削減による省エネが期待される。

7. おわりに

ここまで議論してきた内容を以下にまとめることにより、燃料半減船実現のための有力な技術として、「二軸大直径低回転プロペラ推進船」の更なる研究を提案するものである。

- ① 一軸船と同径の低回転プロペラ 2 基を、適切に設計された Twin Skeg 船尾を持つ船体に装備することにより、有効馬力 (EHP) を殆ど増やさずに、推進効率 ($\eta = \eta_p \cdot \eta_r \cdot \eta_h$) を約 10%程度増加させ、燃料消費量 (BHP) を約 8%程度低減させる可能性を示した。
- ② 主機を機関室内に 2 台並列配置しディレーティングして使用し、燃料消費量を約 6%程度低減する可能性を示した。
- ③ 上記の 2 基のプロペラに適切な後流旋回流回収装置を附加することにより、更に 4%程度の燃料消費量を低減する可能性を示した。
- ④ 上記を統合して、約 18%程度の燃料消費量低減の可能性を示した。
- ⑤ 本研究を更に進めるために、大型模型船による精度の高い比較検討及び改良が必要である。
- ⑥ 上記技術は、全て既存の技術を用いて実現可能なものであり、実現に向けて二軸船への初期投資額と今後の燃料価格・環境問題認識を精査することにより、研究の加速を期待する。

参考文献

- [1] 大内一之：省エネ船の研究開発、日本海事新聞 2006 年 10 月 18 日付、日本海事新聞社、pp4
- [2] 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論文集 (1971)、日本造船学会、pp127-149
- [3] 百年史編纂委員会：日本造船技術百年史 (1997)、日本造船学会、pp215-226