船用推進システムの将来，特にその動向， 問題点および可能性について*

(昭和51年6月1日，日本船舶クラブ会議室にて開催された当学会特別研究
講演会で講演された資料を，船舶技術研究所機関性能部が抄訳したものである。)

Lars Th. Collin**

1. ま え が き

日本の船用機関に携わっておられる方々の権威あるこのような集りに講演することは，私にとって大変な名誉であり，この機会を与えて下さった方々に感謝の意を表したい。

これからの将来は，これまで予期していたのとは異なるものになることは，今日皆が認識している。予測というものは難しいが，これからの船用推進システムの問題点を展望し，それから将来における動向と可能性について結論を導きたい。

いろいろな船用原動機の将来における可能性について論ずる際，輸送経済性をもとにすることが肝要である。技術の分野で競合が激しく，しかも，比較の際の主要諸元がおおむね一定している場合には，与えられた船体に対し各種の原動機を組合わせた時の輸送経済性が選択の決定因子となろう。本文では経済的問題を論じた後に，ディーゼル機関の内的諸問題特に信頼性について述べ，さらに，2ストロークと4ストローク機関の得失について検討する。また，燃料の質低下を伴う将来の熱エネルギー変換でのエネルギー解放の問題についても触れる。

2. 輸送経済性

輸送経済性の分析を進めるに当たり，現状をは握することがまず必要である。機関にかかる直接あるいは間接的費用を考慮するだけでなく，在来の経済分析の手法により経済性に影響を及ぼすと考えられる因子についても検討を加える必要がある。基本的な費用はつぎの4種類に分類できる。

- (1) 資本費，(2) サービス費，(3) 運航費，(4) 荷役費

資本費は機関を含む船舶とコンテナ装置の利子と償却費，保険費，港湾費その他に関するものである。サービス費は乗組員の費用とサービスの費用，船体とコンテナの保守費それに機関のサービス費と予備品の費用である。運航費には主補機の燃料と潤滑油の費用を含む。積荷の

資本費には，積荷が船で輸送される間にかかる利子を含むので，輸送経済性の最適点は船速がより高い方へ移る。

資本費を論議する際，船舶の価格が安定していないことに，まず注目すべきであろう。特にここ数年は価格が極端に変動し，また下落しており，そのため船主が多数の船舶を所有している場合，それぞれの船にかかる資本費はその船が就航あるいは購入された時点によって違ってくる。将来を含め検討に必要な参考基準点として，最近2年間の変動が格別大きいことを考慮し，運航費特に油の値段が安定していた1972年を選んでいる。強調したいことは，機関の運転費その中でも燃料費は3～4年前は運航費総額の6～8%を占めるに過ぎなかったことである。周知のとおり現在情勢は変わり，船速にもよるが燃料費は総運転費の15～25%を占めるに至った。

現在，就航している船舶にかかる各種の費用は，船にとう載する各種原動機，すなわち，低速ディーゼル機関，中速ディーゼル機関，蒸気タービン機関，航空転用形ガスタービン機関および重構造形ガスタービン機関，の効率と価格によって定まる。経済寿命を10年とし利子を10%と仮定すれば，与えられた船体と機関の組合せによる船舶での輸送費を算出できる。図1は輸送費が最低となる船速を基準とした，相対的な輸送費と船速との関係を示す。縦軸は積荷1トン，輸送距離1海里当たりの輸送費を表わし，最低値で基準化している。主機関の

図1 輸送費と船速との関係

* 原稿受付 昭和51年10月8日

** 正会員 Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg, Sweden

出力は船速の3乗に比例するから、最適の船速はまた最適の出力を意味する。その結果、船を仮定し輸送距離を与えれば最適の船速が求まる。いま、それぞれの輸送距離に対して輸送費を計算し、その最適点を結ぶと図1に示すように輸送費最小の線がえられ、この線から最適船速および最適な機関の出力がえられる。同様の手順を22ノットのコンテナ船を例にして行くと、とう載主機関として考えられる5種類の機関について機関機装を含めた輸送費は図2のようになり、輸送費に差があることがわかる。同図によると、現在の確立された船用主機関である低速ディーゼルと蒸気タービンとの間には輸送費で3~5%の差がある。中速ディーゼルが費用は一番低く、ガスタービンが一番高い。いずれにしても、各機関は異なる最適輸送費を与えるだけでなく、それぞれの機関に応じた最適船速およびとう載機関出力があることを強調したい。

これらの計算の精度はもちろんデータの現実性によるが、感度評価のために入力データの中から多くのパラメータによる変化を求めておく必要がある。計算を実施した変量としては、(1)サービス費、保守費、潤滑油費、(2)比出力価格、(3)熱効率、(4)燃料価格、であり、それぞれの原動機についてパラメータを変化させたときの変動状況を図3に示す。その結論として、変量の変化幅に対して検討の余地はあるが、2種類のディーゼル機関は共に低い値をとり、最も優位な範囲に位置している。

同様な数学モデルで燃料価格が上昇した場合の状況を詳細に調査する。1972年の燃料価格を基準とし、その2倍、4倍(おおよそ現在の価格水準)、8倍の価格になった際の最適輸送費を示したのが図4である。たとえば

燃料価格を1972年の8倍とすると、与えられた船体での最適輸送費に対する船速のレベルは、石油危機前と比べると約30%低下しており、その結果、機関に必要とされる出力は基準点の約1/3となる。このことは、燃

図2 原動機別による輸送費

パラメータの変化

- b : サービス費、保守費、潤滑油費が基準値の0.5倍
- c : サービス費、保守費、潤滑油費が基準値の2倍
- d : 比出力価格 0.85ドル/PS → 0.95ドル/PS
- e : 熱効率 0.28 → 0.34
- f : 熱効率 0.32 → 0.29
- g : 燃料価格 21ドル/ト → 35ドル/ト
- h : 燃料価格 21ドル/ト → 14.4ドル/ト
- i : 比出力価格 0.85ドル/PS → 0.95ドル/PS
- k : { サービス費、保守費、潤滑油費が基準値の0.5倍
熱効率 0.28 → 0.34
燃料価格 21ドル/ト → 35ドル/ト
- l : { 熱効率 0.28 → 0.34
燃料価格 21ドル/ト → 35ドル/ト
サービス費、保守費、潤滑油費が基準値の4倍

(* 訳注: 原文では0.5倍となっているが、2倍の誤記と思われる。)
三菱重工・本岡氏のご指摘による。

図3 輸送費に及ぼすパラメータの感度評価

図4 輸送費に及ぼす燃料価格の影響

料価格が船舶の出力と速力の最適化に大きく影響することを示している。

もし、船用の目的で入手できる燃料が限定され、船用ディーゼル油しか入手できないと仮定すると、5種類の原動機は同種の燃料使用となり、そうすると蒸気タービンは不利となってガスタービンの値に近づき、2種類のディーゼル機関が非常に有利になる。

船舶の経済寿命と利子も輸送費に影響を与え、経済寿命が短くなると輸送費は増大するが、最適の船速はほとんど変化しない。一方、利子が高くなると輸送費は増大し、出力も少し大きい方へ移る。このように、輸送費の最適化はまた主機関の出力を新しく定めることを意味する。すなわちインフレが進行すると、より高い船速が、また経済が安定しているとより低い船速が要求される。もし、船に装備される原動機が出力を減らしたのか初期のような出力ならば、平均有効圧力は低くなる。積荷の価格が上昇すると、最適点の船速減少は小さくなる。

上述の考察から、与えられた船舶の最適船速は船舶の経済寿命、利子および積荷の価格上昇に対してはかなり平坦であると結論できよう。今後、情勢がどのように変わるか不明であるが、燃料価格が上昇する場合と燃料の質が変わる場合とでは影響に大きな違いがある。いずれに

しても、ディーゼル機関は直結形または中速機関のどちらでも、現在、考えられている他の形式の原動機に比べ、高い優位性を持っていることがわかる。このことは、ディーゼル機関をより完全にして良くするよう研究することが最良の道であることをわれわれに示唆している。また、低速機関に比べ中速機関が輸送費にして3%良いという事実も見のがすことはできない。

数学モデルによれば、輸送費の1%の利得は他の比較しうる相当特性、たとえば、アベイラビリティに変換することが可能である。船舶が動かの際の二次費用を考慮せずに純数学および経済の見地からは、利益が適正ならば1%の輸送費の利得は大よそ2~3日の動かと同等になる。この結論からすると、直結ディーゼルに対し3%の利得がある中速ディーゼルは、年間当たり8~2日の動かを生じても同等であることを意味する。

3. 信頼性

機関が経済分析上有利である、あるいは、他と十分競合できる能力を持つには信頼性が欠けてはならない。しかも、優位に立つには、年間350日あるいはそれ以上の日数を動かできるものでなければならない。信頼性は機器配置におけるシステムの複雑さと密接に関連しているので、図5に示すように構成によって信頼度が異なる。同図に見られるように、直結ディーゼル機関はもっとも単純な構成であり、継手を有する減速中速機関、ギアボックス付および可変ピッチプロペラ装備となると部品が余計に付属する。もちろん、2機1軸船では1基の機関が故障しても船は動けるが、ギアボックスが故障すると船は動けない。信頼度が高い形式は、2軸あるいは3軸であって各軸に継手あるいはギアボックスを備えた複数の機関を有する形である。このような形式は、非常に高いアベイラビリティを与えるが、装置はかなり複雑になる。

図5から船用推進システムの信頼性は、まとめるとつぎのようになる。まず、主機、伝達軸およびプロペラの系に要求される信頼度を0.95、いいかえると、港内等で操作する際の重大故障の数が100隻・年に対し5件の割合と設定する。伝達軸での信頼度を0.99、プロペラ、ギアボックス、継手の信頼度もそれぞれ0.99と仮定すると、原動機に要求される信頼度は機器の構成により0.989から0.562の間で変る。この後者の値は4機2軸配置に対する値である。もし、直結クロスヘッド形機関2機2軸なら、機関の必要な信頼度は0.792でよいことになる。

つぎに、原動機および各機器の信頼度をこれまでに報告されているデータに基いて与え、全体の系の信頼度を求めると0.956から0.999の値となる。その結果によると、4ストロークトラク形がクロスヘッド形よりいくらか高い値を示しているがそれほど差はない。1機1軸の直結クロスヘッド形配置は、中速の2機減速形式と同程度の0.973なる信頼度となる。1機の歯車減速方式は

 図5 推進システムの信頼度
(機関の必要信頼度)

信頼度が低い。最高の信頼度は2軸方式であって、トラシク形歯車方式あるいはクロスヘッド形直結方式のいずれも、信頼度は0.999となる。

信頼性の問題に対する技術と経済との最適化については今後さらに検討する必要がある。

4. 2ストロークと4ストローク機関の得失

これまでディーゼル機関の開発は大口径低速2ストローク機関と中速4ストローク機関に重点が置かれてきたが、この両機関の得失について考察することは興味あるところである。

その考察についてはまず非常に簡単な方法からはいることとする。内燃機関の $p-V$ 線図はなじみ深いものであるが、これを簡単に $p-\alpha$ (クランク角)線図に変換することができる。この $p-\alpha$ 線図をもとにして、圧縮始めの温度、圧力からガスの温度を求めることができ、 $T-\alpha$ 線図が作れる。次に、各瞬間における熱伝達率は、たと

えば、Eichelbergの式を使用して求められ、その積分平均値 h_m も求まる。上で求めた各瞬間における温度 T と熱伝達率 h の積であらわされる熱流束の時間変化も計算することができて、同様に1サイクルの積分平均値 $(hT)_m$ も得られる。作動サイクルの等価平均温度 T_m は熱流束の平均値 $(hT)_m$ と熱伝達率の平均値 h_m の比で表わされる。これらの典型的な線図を図6に示した。

以上の各値は2ストローク機関でも4ストローク機関でも同様の手法で求めることができるが、4ストローク機関の場合には掃気行程が大きいために2ストローク機関に比べて平均熱伝達率、平均温度ともに低くなる。従って、4ストローク機関に対してピストン面積当り2サイクルと同じ出力になる平均有効法が採れ、このことは2ストローク機関の平均有効圧力の2倍になるといえる。

次に2ストローク機関の熱の流れについて考える。図

図6 各値の時間変化

 図7 2-または4-ストローク機関の
壁の温度差の比較

7に示すように横軸に熱抵抗をとり、たて軸に温度をとると、各部の熱流束は一定となるため図のように直線となり、壁の両側の温度を求めることができる。いま、壁の厚さを2倍にすると、壁両側の温度の差 ΔT_{mat} は増すが、外部流体の熱抵抗が高温側、低温側とも前と同じであるとする、横軸は長くなるので傾斜はゆるくなり、従って、壁両側の温度差は壁の厚さには比例しないということがわかる。同様のことを4ストローク機関で行なえば、この機関は熱伝達率と等価温度が低い、2ストローク機関より温度こう配は低くなり壁両側の温度差が少なくなる。図7にその差を示した。

いま、寸法の等しい2ストロークと4ストローク機関を比較すると、後者は前者に比べて温度こう配は低く、板の内側の温度が低くなるので熱応力は20~25%、4ストローク機関が低くなる。

一方、ピストン表面積当りの比出力を一定にして比較すると、図8に示すように、4ストローク機関内壁の表

図8 2ストロークと4ストローク機関の熱応力の比較

面温度は2ストローク機関のそれに比べて50%以上も減少することがわかる。換言すれば、4ストローク機関は熱応力を低くし、潤滑面の温度を低くするという好結果をもたらす。従って、4ストローク機関では、燃料消費率を少なくする(熱効率を上げる)ために最高圧力を上げるとか、平均有効圧力を上昇させるとかいろいろの手段を講ずることができる。

5. 船舶用燃料と燃焼

これまで、2ストローク機関と4ストローク機関の得失について述べてきたが、次に将来の船舶用燃料の情勢を考慮しながら、燃料エネルギーの変換についてふれたい。

船舶関係で使用している燃料は、世界の総石油生産の約3~4%であり、石油消費の中で船舶関係はそう大きな比重を占めるものではない。

最近の傾向をみると、将来の原油の供給がますます少なくなるであろうことは明らかである。路上交通用の動力としては内燃機関が依然支配的であろうから、石油の軽質分はほとんどこれらの形式の動力に消費されるであろう。また、現在、暖房用あるいは動力用として軽質油が使われているが、同時に暖房用あるいは動力用エネルギーとしては徐々に原子力、地熱、太陽熱利用の方向に進むだろう。そのため、今後船舶用に使用される油は粘度が高くなり、品質が悪くなり、原油中に含まれる有害成分はますます高濃度になってくるであろう。以上のことから、燃料の噴射時に内燃機関に生ずる問題を指摘することができる。

再び $p-\alpha$ 線図にもどると、燃料噴射前までのシリンダ内ガス温度を計算することができる。ここでは、その計算の条件として、現在の標準機種の圧縮比、掃気温度それに掃気圧力等が使われている。

この燃料噴射直前の状態にあるシリンダ内ガスに燃料を一滴落とすと仮定しよう。いま、ある機関回転数を想定すると、角速度が与えられ、線図の横軸をクランク角度から時間に置き換えることができる。上死点前のある角度で落とされた油滴は、伝熱現象が主となって温度が上がるが、その時間に対する温度上昇曲線は計算により得ることができる。

図9 燃料油滴径とその温度上昇割合

図9は油滴の違いによりその温度上昇割合がどう変化するかを示したもので, 40μ 以下の小さな油滴はほとんど瞬間的に高温になるが, 大きい油滴では加熱に時間を要することがわかる。

図10では油滴径を一定とした場合の機関回転数の影響について示した。図より回転数の低い時の方が, 油滴の加熱は非常に速いということがわかる。低速機関の場合には, 加熱, 蒸発, 燃焼に要する時間が十分あるということは良く承知されているところである。

図10 機関回転数と燃料油滴温度上昇との関係

ところでいま, 油滴がたとえば単鎖式炭化水素の一部分のみで構成されると仮定し, そうすると徐々に油滴が軽い成分から重い成分に変わってくると考えられるが, 可燃混合物を形成するために加熱されなければならない温度範囲がだんだんと上昇してくることになる。油滴の炭素数が12~20の鎖をもった燃料では, 通常の油滴径では非常に早く温度が上昇するのに対し, 炭素数50~60のものでは必要な温度に上昇しないということがあ

る。これらのことから, 粗悪油を使用すると物理的な着火おくれが増し, 燃焼に要する時間が長くなることになる。もちろん, 着火おくれに対しては図11にみられるように圧縮比を高めることも効果的である。しかし, 圧縮比を高めると最高圧力ひいては最高温度が上昇し, 熱伝達率は上昇するが, 機関の熱負荷が高くなり, 燃焼室回りの壁を厚くしなければならず, 一方で NO_x が増大する一因ともなる。このための最も簡単な解決策は, より重

図11 炭素原子数, 圧縮比と燃料油滴温度上昇との関係

い油を使用する場合, 油滴径を制御して小さくすることである。しかし, このことは噴射装置の作動性, 高噴射圧力が要求され, 噴射装置の摩耗ひいては燃焼系統の信頼性と安定性に影響をおよぼすようになる。

ディーゼル機関において燃焼がおくると, 膨張行程での燃焼期間が長くなり, 排気弁等の過熱負荷, 五酸化バナジウムやナトリウム等有害物質による腐食の発生などの原因にもなるので注意しなければならない。

6. む す び

1972年の時点を基準とした経済性の考察からは, 主機としてはディーゼル機関が他の機関より優っており, たとえ将来, 船舶用機関の燃料が悪化しても, 大形2ストロークと中速4ストローク機関は優位な状態にあるといえる。

ディーゼル機関そのものは前に議論したように高い信頼性を有するものであるが, もしコストが故障期間も含めて考慮されている時には, ディーゼル機関の経済性は年間数日の動か日があることによってその有利さは失われてしまう。

信頼性の観点からすると, 2ストローク機関がもっとも高い信頼性を有し得る。そして, これに対抗するものとしては非常に複雑ではあるが, 多機多軸システムのみであろう。4ストローク機関は熱負荷の観点からみると大きな利点があり, ピストンリングの状態を良く保ち, 高温部分を低く保つ可能性を有している。

最後に燃料が悪化しても, 低速機関はその信頼性を維持することのできる可能性の最も高い機関である。将来の機関の信頼性に対しては燃料の質が重要な因子となる

であろう。同時に潤滑油の質も燃焼室を汚さず、腐食や各種アタックを防止するようなものが望まれるに違いない。ディーゼル機関に生ずるこれらの問題は蒸気ボイラやガスタービンの燃焼の場合でも同じである。

個人的な意見であるが、将来80年代には、各形式の船用機関の燃料は蒸留油に代わるか、あるいは、低質油に燃料添加物を加えたものが開発されることと思われる。

異なった形式の主機におけるエネルギー変換過程についてより深く研究することや、異なった原油から得られる各種炭化水素のエネルギー変換について研究することは今後重要課題になるであろう。

これまで述べてきたような状態にあって、われわれは将来の海上貿易を守るため、産学協同して将来の船用機関の発展のために寄与しなければならない。