技術資料

プロペラ回転数低下の問題に関する 主機メーカーの意見調査*

日本舶用機関学会
軸系研究委員会

Research of The Main Engine Manufacturers' Recommendation
on Propeller Design

By Propeller and Shafting Committee of MESJ

It has been well known among propeller designers that propellers must be designed so as to prevent any possibility of overloading the main engine even the required engine power increases owing to the increased frictional losses on ship's hull and propeller itself during service.

On the other hand, propeller designers recently wonder if an allowable load of the engine is very limited and an allowable overload duration becomes more and more short.

Taking consideration of the above, Propeller and Shafting Committee has made inquiries about their design criteria to the major diesel and steam turbine main propulsion machinery manufacturers in Japan relative to the following items;

- 1) Main engine allowable operating range of manufacturer's standard.
- 2) Main engine performance drop by aging.
- 3) Recommended allowance for propeller design against aging.
- 4) Relations between propeller rpm drop in service and main engine allowable operating range.
- 5) Possibility of improving the main engine allowable operating range.

1. ま え が き

経年的な船体抵抗の増加に主機トルクが応じきれないために起こる問題の解決にプロペラ設計者が関与する機会は多い。プロペラ設計時にあらかじめ適当量の回転数余裕を見込むのが通例とされ、また、就航後の経年変化に応じてプロペラの径や翼の後縁を改造することもしばしば行なわれる。

このような対処の方法は今や一般常識として業界に定着しつつあるが、一方、プロペラ設計者の立場からすると主機自体の出力称呼がいわゆるリミットデザインに走りすぎて船体抵抗の増加に応じるための余裕度が少なくなり、初期の回転数余裕が次第に大きくなって行く傾向にあるのではないかと懸念される。

今回、当学会の軸系研究委員会では、このような疑問が動機となってプロペラ回転数低下の問題に関する主機メーカーのアンケート調査を企画した。この調査の目的は、プロペラ設計者が主機メーカーの意見と実状をは握するとともに、主機メーカーにも船体の経年変化に関する認識を一層深めてもらうことにあり、幸いにしてアンケートを

依頼した主機メーカー30社（蒸気タービン5社、二サイクルディーゼル9社、四サイクルディーゼル16社）の中から21社24機種（蒸気タービン4社、二サイクルディーゼル8社、四サイクルディーゼル9社）の回答を得ることができた（回答回収率約70%）。

アンケート回答結果は当委員会では慎重審議の上、調査研究資料¹⁾としてとりまとめたが、ここにその内容を要約して報告する。

2. 主機メーカーが標準とする 運転許容範囲線図

主機メーカーが標準とする運転許容範囲を図示してもらうとともに、回転数、出力、トルクなど諸制限の設定根拠を図示してもらった。

一般に運転許容範囲としては次の①②③の各パターンがある。

- ① は連続運転範囲
- ② は限定時間付運転範囲
- ③ は海上試運転時使用可能範囲

このパターンを色別けしながら各メーカーの回答結果を分類整理すると次のようである。

* 原稿受付 昭和53年5月8日

2.1 蒸気タービン 運転許容範囲線図としては、図1に示すT-1、T-2がある。

運転許容範囲は広くすべて④範囲となっており、⑤⑥範囲はない。

過回転上限……103~105% MCO

RPM

過出力上限……103~108% MCO

出力

過トルク上限……103~104% MCO

トルク

回転の制限根拠は動翼、車板などの回転部分強度であり、出力、トルクの制限根拠は減速装置の歯車強度となっている。

2.2 ニサイクルディーゼル 各種各様のタイプがあるが、図2~5に示すようにタイプIからタイプNまでの4種類に大別出来る。

各タイプとも過回転の許容範囲として④範囲が設けられているのが蒸気タービンと異なる特徴の一つである。

④範囲上限は100~104% MCO rpm

⑤範囲上限は106~108% MCO rpm

諸制限は主として次のような根拠にて設定されている。

回転数……運動部分の強度、しゅう動部の性能。

トルク(高回転部)…… P_{max} 、 P_e に対する各部材の強度、熱負荷能力。

トルク(低回転部)……構成部材の熱負荷能力、不適性燃焼(掃気量不足)。

出力…… P_{max} 、 P_e に対する各部材の強度、熱負荷能力。

2.3 中速四サイクルディーゼル 運転許容範囲線図のタイプは、図6のD-7~D-13に示すように各種各様である。

だいたい二サイクルの分類のどれかに似ているが、二サイクルに比べると、低回転域でのトルク余裕の大きい機種がかなりあるのが目につく。

2.4 高速四サイクルディーゼル 回答は1機種(1100 PS×1400 rpm、水中翼船など高速艇用)のみであったが、図7に示すように、回転数、トルク、出力とも二サイクル、中速四サイクルに比べて許容範囲の広いのが特徴である。アンケート回答に「スピードギャランティがきびしく、シーマージンを取る余裕がなく、プロペラ設計はNSOいっぱいで行なうのが常識となっている。トルクリッチに対して耐久性のある機関でない」と使用出来ない。定格を下げることは重量当り出力が低下して競争に勝てない」とあった。この種の主機の計画条件の厳しさをうかがい知ることが出来る。

3. 主機自体の経年的な性能低下

各社の主機運転許容範囲線図の標準は長年の実績をもとに、主機自体の経年的な性能低下なども考慮に入れて決められたものと考えられる。アンケートでは主機自体の経年的な性能低下(出力、許容トルクなどの低下)について「どの程度と考えているか」「その主たる原因はなにであるか」を質問したところ、回答の状況は表1の通りであった。

蒸気タービンメーカは性能低下をあまり心配していないのに対し、ディーゼルではメンテナンスが良ければ性能低下なしとの条件付回答が大半を占めている。

なお、経年的な性能低下の原因としては、次のような項目があげられている。

蒸気タービン……動翼、静翼の腐食による表面粗さの増加、グランド部摩耗による蒸気洩れの増加。

ディーゼル……各強度部材のガタ、ライナの摩耗、過給機、空気冷却器その他クーラー類の汚れ、FO弁、FOポンプなどの整備不十分、吸排気系統の汚れ、消耗品の摩耗(ピストンリング、吸排気弁など)。

表 1

単位：社数

	蒸気タービン	二サイクルディーゼル	中速四サイクルディーゼル	高速四サイクルディーゼル
不明	1	3	4	—
性能低下はない	2	—	—	—
メンテナンスが良ければ性能低下はない	—	5	3	1

4. 主機メーカの推せんするプロペラ回転数余裕

蒸気タービンでは推せん値のないメーカもあるが、ディーゼルはすべての会社が推せん値を持っている。

蒸気タービン……2~2.5%

二サイクルディーゼル……3~5.6%

中速四サイクルディーゼル……3~6.7%

高速四サイクルディーゼル……3%

運転許容範囲線図と推せんする回転数余裕との関連をみると、運転許容範囲がトルクリッチ側に狭い機種ほど回転数余裕を大きく取る傾向になっている。この回転数余裕の考え方は「本船計画時のプロペラ効率の確保、就航後のトルクリッチ化の程度、海上公試時および就航時にしし得る出力の三つを考慮して従来の実績により決める」ということである。

また、推せん値はあくまでユーザーの便利のため出しているものであり、押しつけるものではない、というのがメーカの態度で「回転数余裕は基本的には船主と造船所の間で決められるべきものである」という意見を記しているメーカが4社あった。

図1 蒸気タービンの運転許容範囲線図

①範囲：出力上限は90% MCO、低回転域でのトルクリッチ側の制限線はMCOを通る $P \propto R^3$ ラインよりもトルクリッチ側まで広がっている。MCOと90% MCO出力間に②範囲がある。

図2 二サイクルディーゼルの運転許容範囲線図(タイプI)

①範囲：出力上限はMCO、トルクリッチ側の制限線はMCOを通る $P \propto R^3$ ライン。
①範囲よりトルクリッチ側に②範囲がある。

図3 二サイクルディーゼルの運転許容範囲線図(タイプII)

①範囲：出力上限はMCO、トルクリッチ側の制限線はMCOを通る $P \propto R^3$ ラインよりもトルクリッチ側まで広がっている。

①範囲よりトルクリッチ側に②範囲がある。

図4 二サイクルディーゼルの運転許容範囲線図(タイプIII)

①範囲：出力上限はMCOより上(約103%)まで広がっている。トルクリッチ側の制限線はMCOを通る $P \propto R^3$ ラインよりもトルクリッチ側まで広がっている。
②範囲はない。

図5 二サイクルディーゼルの運転許容範囲線図(タイプIV)

図6 中速四サイクルディーゼルの運転許容範囲線図

図7 高速四サイクルディーゼルの運転許容範囲線図

5. 運転許容範囲線図の経年変化への対応

アンケートは運転許容範囲線図と経年的なプロペラ回転数低下の関係について質問を廻り下げることにした。

仮に経年的な回転数低下が年1%である船の主機が図8のような運転許容範囲であったとすればどうなるかを考える。船用特性は経年とともに左に移動してゆくので、仮に常用出力を90% MCOとすれば、就航後の理論的運転点は図中矢印の線をたどり、約5年後には④範囲(連続運転範囲)をはずれることになり、プロペラを改造するなどの方策を講じないかぎり船は安心して走れないという極めて憂慮すべき事態となる。

回転数低下の傾向は船によって差があり、一概に論ずることは難しいが、図9は各種資料^{2),3)}から回転数低下率の示されているものを抜粋整理し、あえて「回転数低下(トルク増加)の典型的カーブ」として作成したものである。これによれば、回転数低下の状況は就航5年後にて約6%、10年後にて約10.5%である。

アンケートにおいては、回転数低下をこの典型的カーブと仮定した場合、メーカーの推薦通りの回転数余裕で設計された船が5年後、10年後に遭遇するであろう運転点を各社の運転許容範囲線図に記入してもらった。

その結果は意外に多種多様で、5年後にプロペラ改造が必要になるものもある反面、長年に亘り問題なく④範囲内で続航可能なものもある。図10はプロペラ改造などを必要とせずに④範囲内で続航可能な期間を各機種について比較したものである。

蒸気タービンの場合、10年後においても④範囲内で運転出来るが、ディーゼルの場合5年後には回答機種の約25%が④範囲で運転出来なくなり、10年後には二サイクルで約90% (⑥範囲内50%, ④⑥範囲外40%),

四サイクルで約55% (⑥範囲内45%, ④⑥範囲外10%)の機種が④範囲内での運転が出来なくなるという結果になっている。ディーゼルでも四サイクルは10年後においても約45%の機種が④範囲内の運転をキープ出来るのが注目される。

図8

(注) 1. 本図はプロペラ回転数低下に関する各種資料から回転数低下率の示されているものを抜粋整理(ディーゼル船8隻, タービン船2隻)して得た次のような結果にもとずいて作成したものである。

- 1) 船の種類、主機の種類による傾向差は明りょうでない。
- 2) DOCK TO DOCKの回転数低下率は2~5%であり、船令の増加とともに増加の傾向にある。
- 3) 年間の経年変化は0.5~2%である。船令5年程度まではほぼ同じであり、さらに船令が増すと減少の傾向にある。
2. 回転数低下率は船体汚損およびプロペラ特性の経年変化にもとづくものである。

但し、主機出力の推定法により主機の経年変化の影響も多少含まれている。特にディーゼル船の場合、過給機の回転数から主機出力を推定している(8隻中7隻)、過給機回転数の経年変化の影響が含まれている。

図9 回転数低下(トルク増加)の典型的カーブ

前提条件について、たとえば、回転数低下の仮定が実際よりか酷すぎるとか、様々の異論もあろう。しかしこの図の示唆するものを冷静に認識することも必要であらう。すなわち、船という耐用年数が比較的長い製品を計画するに当たっては、船体抵抗の経年変化の見極めとともに、プロペラ設計時の回転数余裕の選定が極めて重要であるし、また主機の評価を単に称呼出力（カタログ出力）のみで判断するのは早計で、その出力範囲が将来の変化にどこまで対応出来るかというバックグラウンドを的確には握ることを怠ってはならないと考えられる。

6. 主機運転許容範囲の制限条件改善の可能性

アンケートにおいては「連続運転範囲をトルクリッチの方向（図8で左側に向って）へ拡大すること、あるいは、オーバースピードの方向（図8で右側に向って）へ拡大することは、どのような対策を講ずればどの程度まで可能か、又、このほかに主機自体でプロペラ回転数低下に対処する方法があるか、そして、それによりどの程度の改善が期待出来るか」について質問したが、設問の主旨は主機メーカー側でもっと“ねばり”のある主機を検討してほしいというプロペラ設計者側からの希望であった。

90% MCO 出力をキープして (A) 範囲内で運転可能

90% MCO 出力をキープ出来るが (B) 範囲内の運転となる

× (A) (B) 範囲外の運転となる

85% MCO

(A) 範囲内の運転であるが 85% MCO 出力まで出力をダウンすることになる

回転数余裕：経年変化への対応算定のベースとした値
(メーカーの推せん値が範囲で示されている場合は上限値を使用した)

図10 運転許容範囲線図の経年変化への対応

アンケート回答内容を最大公約数的に要約すると次のようである。

6.1 蒸気タービン 現在の許容範囲で十分ニーズを満足していると考えられ、特に必要な場合のみ現存の機種から必要な余裕を見込んで主機を選定する(RATINGを下げて使用する)ことになろう。

6.2 ニサイクルおよび中速四サイクルディーゼル

(a) トルクリッチ側に許容範囲を広げる対策としては、効率の高い過給機の開発、2段過給の採用、過給機のマッチング点の変更、燃焼室構成部品の熱負荷能力アップなどが考えられる。しかし一般に、トルクリッチ側へ許容範囲を広げることと、燃焼室耐久性の向上とは相入れない要求であり、今後とも改善の成果はトルクリッチ側への拡大の方向よりはむしろメンテナンス間隔拡大の方向に向けられるべきである。

(b) オーバースピードの方向に許容範囲を広げることは、動弁系、運動部分の慣性力対策、しゅう動部の潤滑対策、軸受部材の強度アップ、振動対策など根本的な設計変更が必要になる。

(c) 現存機種に手を加えて機関運転許容範囲を広げることには無理があるようで、当面は現存の機種の中から必要な余裕を見込んで主機を選定する(RATINGを下げて使用する)ことになろう。

6.3 高速四サイクルディーゼル 前にもふれたように、「水中翼船など高速艇用主機ではトルクリッチ

に対して耐久性のある機関でないで使用出来ない」という回答はこの種の主機におけるニーズの厳しさを表わしている。トルクリッチ方向への拡大対策も排気弁ソジウム冷却、ヒートパイプの装着、ピストン冷却など具体的な回答があり、改善の可能性があるようである。

7. あとがき

今回のアンケートにおいては問題の核心を浮きぼりにするために、設問はなるべく具体的かつ定量的なものとしたので競合するメーカーの立場としては回答しにくい項目もあったであろう。しかし、主機メーカー各位のご協力のおかげでアンケートをとりまとめることが出来、プロペラ回転数低下の問題に対する主機メーカーの考え方が明確になり、又、運転許容範囲線図の経年変化への対応など注目に値する内容も少なからず得られたように思う。

終りにアンケートにご協力いただいた主機メーカー各位に深甚の謝意を表する。

文 献

- 1) MESJ-S(軸系)調査研究 R-17 主機トルク回転数の余裕のあり方
- 2) MESJ-S(軸系)調査研究 R-2 プロペラ回転低下に関する調査
- 3) 日本船用工業会 船用主機出力定義に関する調査報告書

(担当会社 日本鋼管㈱)