

世界初の VLCC 向け二重反転プロペラ

Contra-Rotating Propeller for VLCC

長崎造船所 泉 泰 智*¹ 中 村 直 人*²
大 村 隆*³
技 術 本 部 佐 木 邦 夫*⁴

当社は1993年3月に世界で初めて二重反転プロペラ装置（CRP システム）を搭載した超大型タンカーを引渡した。二重反転プロペラ装置は究極の省エネルギー装置として開発が進められたが、そのような経済面にとどまらず、大幅な省エネルギー効果に比例して排ガス量そのものを減少させることができ、現在最も深刻な問題となっている地球環境の保護（CO₂, NO_x, SO_xの排出規制）にも大きく寄与できる装置である。本船は海上運転において約15%の省エネルギー効果が確認されており、現在順調に商業運航を続けている。

Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. (MHI) has delivered very large crude oil carrier installed with Contra-Rotating Propeller (CRP) System in March 1993. The energy saving effect up to 15% was demonstrated at her sea trial. The contra-rotating propeller has been developed aiming an ultimate energy saving device and one of the effective measures for exhaust gas emission control as well.

1. 緒 言

当社は、1988年8月に二重反転プロペラ（以下CRPと呼ぶ）装置を自動車運搬船“とよふじ5”に搭載し、世界に先駆けCRPの商船適用に成功した。その後当社は、より大きな省エネルギー効果が得られる大型船に適用するための研究を進め、1993年3月念願であった超大型タンカー“コスモ デルフィナス”にCRPを採用し、所期どおりの成果を得ることができた（図1参照）。

CRPは、互いに反転する二つのプロペラを前後に隣接して配置したもので、その省エネルギー効果は次の2点から得られる。

- (1) 前方プロペラで発生する流れには直接推力に寄与しない回転流の成分が含まれるが、反転する後方プロペラで逆方向の回転を与えることにより、最終的に回転流をなくし推進効率を向上させる。
- (2) 一般にプロペラ効率は、そのプロペラが分担する推力が小さいほど高くなる。CRPでは1基のプロペラが分担する推力が一軸船の半分になるため、それぞれのプロペラ効率が向上する。CRPの大型化に伴う技術課題としては以下の点がある。

- (1) 高荷重に耐える反転軸受の開発
- (2) 高偏心、高速に追従する反転シールの開発
- (3) コンパクトな反転装置の開発
- (4) 高い省エネルギー効果を得るCRP設計手法の開発

今回世界で初めてVLCCに搭載したCRPは“とよふじ5”の実績と経験に加え、CRPシステムの大型化に必要な多くの技術検証と総力を結集した品質検証体制により実現したものである。

2. VLCC用CRP

当社が開発したCRPシステムの概要を図2に示す。キーレスタイプの後方プロペラは、反転歯車及び弾性継手の中心を貫通した内軸に結合され、ディーゼル主機関の推力軸に直結している。一方、前方プロペラは外軸のフランジで結合され、この外軸は反転歯車の出力軸に接続される。

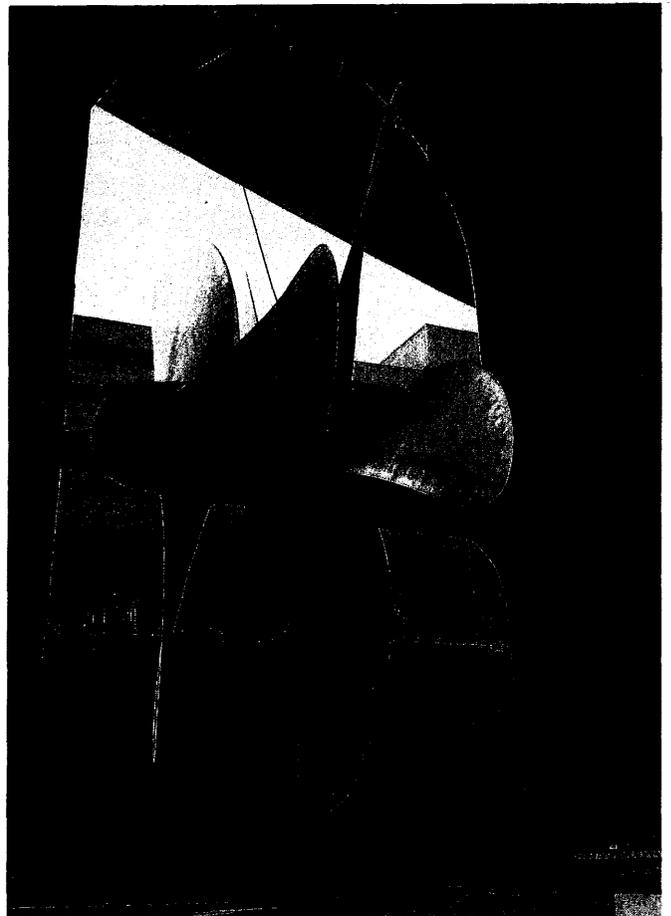


図1 “コスモ デルフィナス”のCRP 前方プロペラは5翼で後方プロペラは3翼。
CRP fitted on “Cosmo Delphinus”

2.1 プロペラ設計

本船用のCRPは、“とよふじ5”のCRP設計の際に開発した異速CRP設計手法を用いた。今回は、前方プロペラ低回転化によるCRPの省エネルギー効果の向上や反転歯車のコンパクト化、

*1 香焼工作部主査

*3 造船設計部機装設計課

*2 造船設計部船舶計画課主務

*4 長崎研究所トライボロジー研究室主査

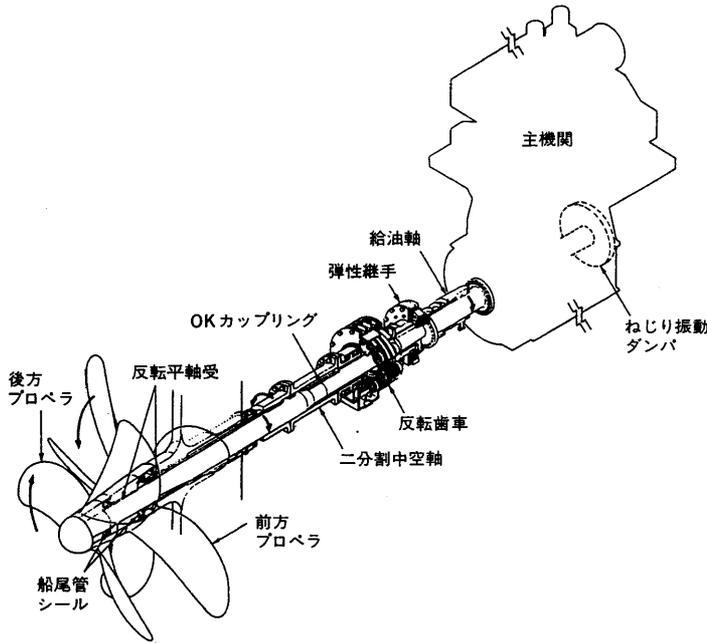


図2 VLCC用二重反転軸系図 単段のスター型遊星歯車を用いて“異速反転プロペラ方式”としている。CRP system for VLCC

さらに油圧源喪失時の動圧効果による内軸軸受性能の向上を狙い前方プロペラの回転数と後方プロペラの回転数比を3/5とし(“とよふじ5”は3/4)、前後プロペラの翼数をそれぞれ5翼と3翼に決めた。すなわち、前後プロペラの起振周波数を一致させ船体防振対策が容易になるよう選定した。プロペラ設計に際しては“とよふじ5”での実船計測結果及び事前の水槽試験結果を用いて設計を行うと同時に、最新のプロペラ理論であるパネル法を用いて性能予測を行った。

2.2 船尾管軸受

外軸内において内軸を支える内軸軸受は、内軸とは逆方向に軸受自体が回転するために一軸船に使用中の従来の滑り軸受では流体潤滑が不能となる。“とよふじ5”ではこの課題を解決するために当社独自で開発した静圧軸受(図3参照)を採用し5年以上にわたる運航で十分な信頼性を有することを確認している。今回のVLCCでは軸受支持能力増大のため前方プロペラボス内の主軸受に加え、外軸後端部付近に補助軸受を装備した。一方、外軸軸受は、内・外軸を支えるために軸受荷重が従来のVLCCより大きくなるため、4個の静圧ポケットを有する静圧軸受を採用した。低速回転時においても十分な油膜が保持されるため、従来軸受のような低速限界がないことが本静圧軸受の大きな特徴の一つである。

2.3 船尾管シール

CRPの内軸シールは互いに回転する外軸と内軸の間に装着されるため、従来のシールに比べシールの相対周速が高いだけでなく、より大きな軸の相対変化に耐えることが要求される。“とよふじ5”では従来のリップシールに改良を加えたシールシステムを採用したが、VLCCでは相対的な半径方向の振動やシール圧、周速が更に大きくなるため、メーカと共同で新形状リップシールを開発した(表1参照)。このシールは腕部をV形としさらに腕部の長さを長くするなどの形状変更により従来より軸挙動に対して2倍以上の追従性能を有するものとしている。

2.4 反転歯車

当社は“とよふじ5”以来単段スター型遊星歯車を採用してい

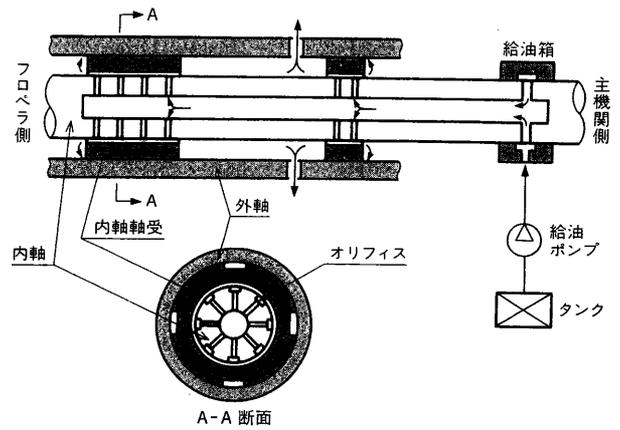


図3 静圧型反転軸受 高压の潤滑油を強制的に供給するため常に十分な油膜は保持される。Hydrostatical contra-rotating plain bearing

表1 船尾管シール比較 Comparison of stern tube seal

	従来形状品	新形状品
耐圧性	バックアップリングで対応	腕部をV型形状とし圧力緩和を図り、バックアップリングを併用することで対応
追従性	ゴム単体品とし対応	ゴム単体品とし、さらにリップ腕部長さを長くし、V型形状との相乗効果により対応
押さえ部形状	—	台形状に変更し、組込み性を向上させた
形状		

る。CRP用反転歯車は減速比が小さいこと、入力軸内面に内軸軸受を有していること、さらに外軸の剛性が高くかつ短いために、特に出力軸について船体変形の配慮が必要となることなどが、従来船に使用されている減速歯車と異なる点である。VLCC用反転歯車については基本設計段階から当社とメーカ間で平行して技術検証を実施し、信頼性の高い反転歯車とした。

2.5 弾性継手及びねじり振動ダンパ

ディーゼル主機関のトルク変動から反転歯車の歯面を保護する目的で弾性継手を装備している。CRPの弾性継手は、伝達トルクが大きいことや内軸が貫通することが構造上の特徴である。VLCC用弾性継手は伝達トルクの面で世界最大クラスであるが、国内・外の種々の継手のうち信頼性が高くコンパクトである金属板ばね構造のものを選択した。

軸系のねじり振動対策は、通常フライホイールの質量増加、チューニングホイールの取付等により共振回転数の変更等が行われているが、本VLCCでは内軸径を最少に抑え軸系全体をコンパクトにするため、金属板ばね構造のねじり振動ダンパを装備することとした。

3. 実船搭載

3.1 品質検証

世界初のVLCC用CRPを搭載した“コスモデルフィナス”

表2 コスモ デルフィナス建造工程
Cosmo Delphinus building schedule

'92/3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	
起工				主機横込 反転歯車搭載		進水 内外軸一体挿入	前方プロペラ取付 後方プロペラ取付	舵建付		主機係留運転 確認運転	第一回海上運転(バラスト喫水) 第二回海上運転(CRP計測)	第三回海上運転(満載喫水)	竣工

の建造に当たっては全社の見識者や関係者を一同に集めた品質検証体制を組み、“とよふじ 5”の実績と経験に加え大型化に伴う種々の技術課題を基本設計段階から建造～試運転～就航に至る各段階において徹底的に検証した。特に建造・試運転段階においては綿密な計測により大型 CRP の信頼性を検証した。

3.2 建造

本船の建造主要工程を表2に示す。シリーズ船に比べて若干長く、特に進水後竣工までが通常船と比べ約1.5か月長い。これは初品に対する品質管理を厳しくしたことと最終の運転調整に十分な時間を設けたためである。厳しい品質管理の一例として、機器及び配管装置に対しては現場取付後に全数陸揚げし内面洗浄を行う等の特別の防錆(せい)管理を行った。

さらには CRP 装置は二重の推進システムが一軸上に組込まれるため、建造工程の検討と精度管理が極めて重要なポイントとなる。

当社では“とよふじ 5”において CRP を搭載した実績があり、この建造の経験が大いに活用された。

例えば、内軸と外軸をあらかじめ陸上にて一体に組込んだ後に船尾管に挿入する工法を採用するための専用ジグを開発し、高精度の組立て作業を極めてスムーズに行うことができた。

プロペラ取付けは内軸プロペラ軸を船内側に引き込んだ後、前方プロペラを外軸プロペラ軸に取付け(フランジマウント方式)、その後内軸プロペラ軸を後方に引出し、後方プロペラを取付けた。舵建付は上述の2枚のプロペラ取付後に実施した。

CRP 軸系装置据付工事のうえで最も注意深く実施したのはアライメント調整である。特に、内軸系は外軸内側に設けられた

軸受によりアライメントが決まるため、外軸のアライメント調整のように船体に支持された軸受によって、微妙なアライメント調整をすることができない。このため、外軸アライメント変化に対する内軸アライメント変化量の予測計算を実施したうえ、船上計測結果と対比させながらアライメント調整を実施した。また、船体の喫水変化に対応する主機関のクランク軸デフレクション変化や軸系アライメント変化に対しては、同型船の実測結果を上述の予測計算に折込んで、本船での実測確認を実施しており、いずれも規定値を満足した。

以上、本船建造に当たっての CRP 関連の主要工事の一部を紹介したが、一連の作業は当初計画どおりの工程で極めてスムーズに実施された。

また、本船の建造を通じて大型 CRP 工事に関する十分なデータを把握したことにより、今後の CRP 装置の建造工法を完全に確立することができた。

3.3 性能計測結果

CRP の性能・軸系装置の信頼性検証のために各種試験を実施したことが確認された。

- (1) 推進性能は通常型と比べ模型試験での推定と同様の約15%の馬力減少が確認された(図4参照)
- (2) 操縦性能については図5に本船の旋回試験結果を従来船との

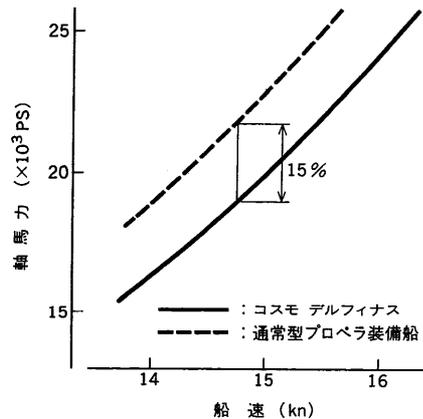


図4 “コスモ デルフィナス”の速力試験結果
海上運転で約15%の省エネルギー効果が確認された。
Energy saving effect of “Cosmo Delphinus”

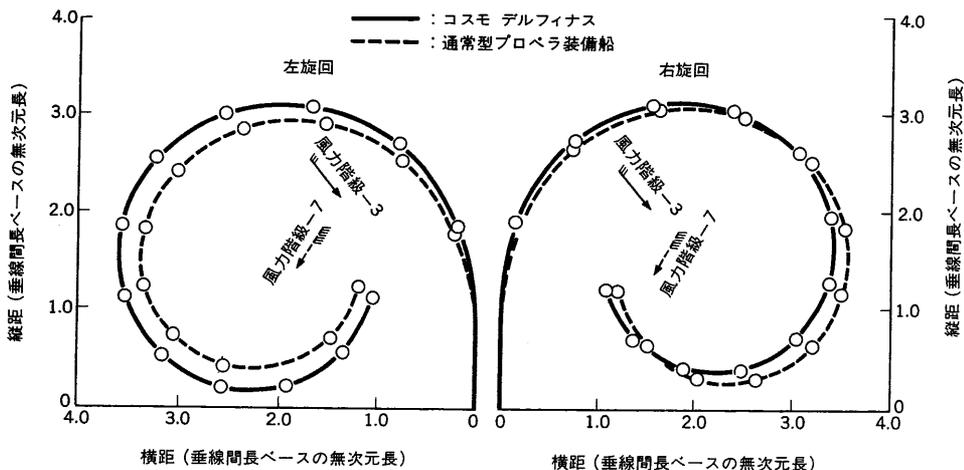


図5 旋回試験結果
Result of turning circle test

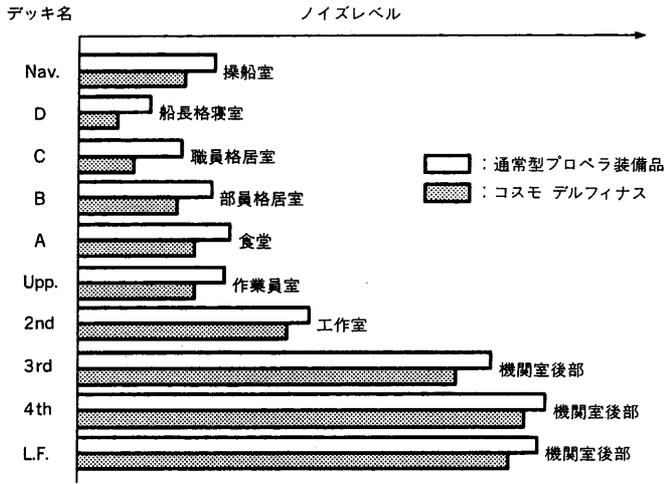


図6 騒音測定結果 CRP船が低騒音であることが顕著に現れている。 Sound pressure level at normal sea going

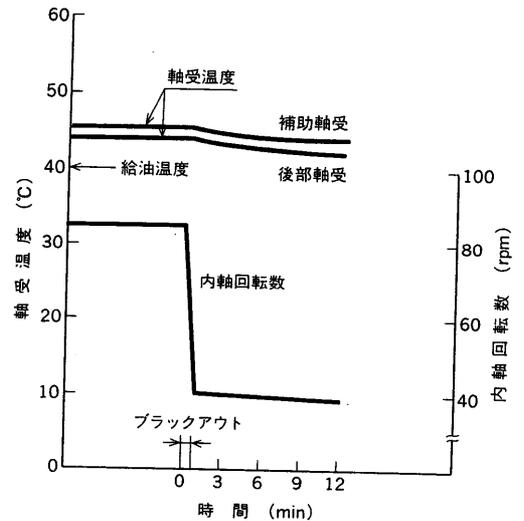


図7 ブラックアウト時の軸受性能 油圧源喪失時においても軸受温度上昇が見られない。 Stable bearing temperature under black out condition

比較で示すが、本船の軌跡の方が従来船より左右対称に近づいている。これはCRPにより回転流が減少したためと考えられる。逆スパイラル試験、変形Z試験、緊急後進試験の結果もすべて良好であり、操縦性能は従来船と比べ同等以上であることが確認された。

- (3) プロペラのキャビテーション発生状況を観察した結果、前方プロペラ、後方プロペラ共に翼端からの渦キャビテーションのみであり、通常型プロペラと比べキャビテーション発生量は少なかった。これに伴い、プロペラ上方で計測した変動圧力も低いレベルであった。
- (4) 船体振動及び騒音の低いことがCRPの特徴の一つであるが本船においてもそれが顕著に現れている。図6に本船のノイズレベルを従来船と比較して示すが、本船の方がいずれの場所においても減少している。
- (5) 反転軸受性能は回転する内軸軸受部に非接触変位センサを設け油膜厚さの計測を実施し、油膜形成の難しい低速回転時を含め300ミクロン以上の油膜厚さが確保されていることを確認できた。本軸受は静圧軸受であるのでブラックアウトなどの油圧源喪失時の性能が課題となるが、異速反転による動圧流体潤滑作用により油圧源が瞬時に喪失しても軸受上全く問題ないことが確認できた(図7参照)。
- (6) 反転歯車の各軸受温度は計画値どおりであり、また遊星歯車の荷重分担や歯当たりもうまく機能していることが確認された。
- (7) 船尾管シールは温度センサをリップに埋込み温度の変化を計測し、VLCC用CRP船尾管シールとして十分な性能を発揮できることが確認された。
- (8) 軸系ねじり振動の計測結果は計算値と良く合致し、本船は計画どおり常用回転全域で運転できることや、反転歯車のチャタリングが発生しないことが確認できた。
- (9) 従来の一軸船は、軸系のトラブルにより停船せざるを得ないがCRPでは内軸系のみで航行することが可能である。すなわち、外軸系(反転歯車、外軸軸受、前方プロペラ)のトラブル時に、前方プロペラ(外軸)を船体に固縛し、後方プロペラ

(内軸)のみで航走できるが、海上運転結果は次のとおりでその実用性が証明された。

- キャビテーションや翼応力の面から主機回転数が制限されるが、67rpm(約9.5ノット)で航行でき操船上の不具合もなかった。
- 船内作業、軸系部品、振動等に何ら問題はなかった。

4. 結 言

今回のコスモ デルフィナスの建造を通じ大型の二重反転プロペラの実用化を達成することができたが、このCRPは単に省エネルギーのみならず排ガス量そのものを減少させることができ、騒音・振動も低減できるまさに時代の要請にこたえる優れた装置であると言える。

当社は、本VLCC用CRPの建造を通じて得られた多くのノウハウを生かし、いかなる船種にもCRPを装備することが可能となった。

最後に本船の建造に当たり新和海運(株)、トヨフジ海運(株)に多大な御協力をいただいた。またCRP開発に関して(財)シップ・アンド・オーシャン財団からモータボート競争公益資金による補助金を受けて実施しており、ここに記して厚く感謝申し上げます。

参 考 文 献

- (1) Nakamura S., World's first contra-rotating propeller system successfully fitted to a merchant ship, The Motor ship 11th conference (March 1989)
- (2) Takekuma K., The development of a contra-rotating propeller for large ship, IM ar E (March 1990)
- (3) Nakamura S., Unconventional Propulsion System, ISME Vol.2 (1990)
- (4) Nakamura S., Contra-Rotating Propeller, Special edition Motor Ship (1993)