

潜水調査船支援母船 :可変ピッチプロペラの低雑音設計とその運転方法

野澤和男 元川崎重工、元大阪大学

§ 1はじめに:

背景:

近年、深海海底資源の開発や海洋スペースの有効利用に関する興味増大、また最近頻発する海底地震や津波の発生メカニズムの解明のために海洋調査活動が活発となりその海域も広範囲かつ大深度となってきた。1990年に6,500m潜水調査船搭載の支援母船「よこすか」(Fig1)が川崎重工業で建造され現在も活躍している。この支援母船は2軸の可変ピッチプロペラ(CPP)を装備している。本船には各種高度な音響機器が搭載され深海域における母船と潜水船間の水中通話、位置決め、探査や海底地形のマップ作製が重要な任務であるが、この際発生する水中雑音、なかでもプロペラ水中雑音をいかに低減させるかが最重要課題であった。(Fig2)

筆者らは「よこすか」の船体・プロペラ設計に携わり、低雑音プロペラ設計とその運転方法(CPP翼角×回転数最適化)を研究し実船計測でその効果を確認した。これらは数編の論文①、②、③等に発表した。今回、一連の研究を回顧整理し本分野の研究の道標として分かりやすく解説した。

プロペラ雑音低減化問題とその周辺:

深海調査オペレーションでは支援母船の海底地形調査や潜水船との通信に音波が使用される。受波信号を妨害する水中雑音、ここではプロペラ水中雑音を許容レベル以下に低減させることが不可欠な課題であった。この低減化問題の背景や重要性を具体的に理解するためにマルチナロービーム音響測深装置を使用するオペレーションを例にして、母船側送波出力から海底反射を経て受信器再受信までの信号の流れをマルチナロービーム用のソナー方程式を使って説明する。(Fig3)

支援母船船底の送信機から送波した信号SLが海中を伝搬し海底で反射し船側で検出できるための限界値DT (Detection Threshold、検出閾値)は次式で表現される。

$$DT=SL - 2TL - (NL - DI) - DL - RL \dots\dots\dots(1)$$

- SL:Source Level(送波出力), TL:Transmission Loss (伝搬損失), NL:Noise Level(雑音レベル),
- DI: Receiving Directivity Index(受波指向性利得)、
- DL:Loss of Acoustic Window(音響窓透過損失),
- RL:Reflection Loss of Sea Bottom(海底反射損失)



Fig. 1 6,500m潜水調査船支援母船「よこすか」



Fig. 2 6500m潜水調査船、無人探査機と支援母船間の深海調査オペレーション

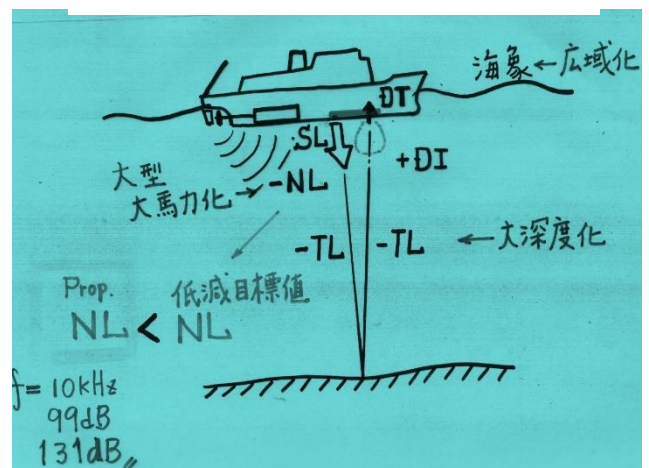


Fig. 3 マルチナロービーム使用時のソナー方程式の諸因子

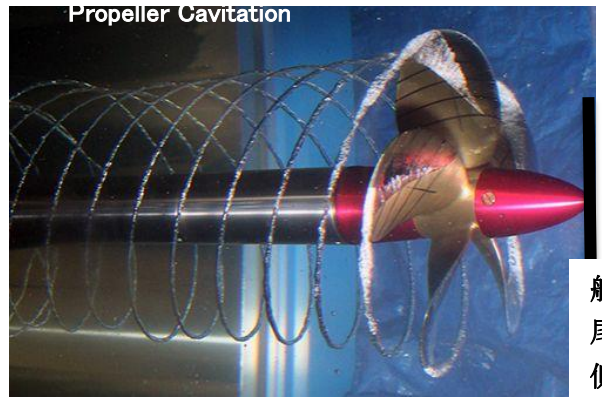
上記の6項目の中で、深海での交信に極めて大きなマイナス要因となるのは音波の伝搬距離減衰である。Rを水深とすると球面拡散による往復の距離減衰量は

$$-2TL = -2 \times 20 \log R \dots\dots\dots (2)..$$

である。潜水調査船の水深は6,500mなので音波が海底で反射し船に戻ると減衰量は-153dBと著しく大となる。二次的なDI,DL,RLを省いて簡単化すると、(1)は、

$$DT(\text{検出閾値}) \doteq SL - 153 - NL$$

になる。DTを有意な量とするために送波出力SLは大きなものが望まれるが実用上の限度がある。雑音レベルNLを可能な限り低く抑えることが重要となる所以である。



船尾側

Fig. 4 プロペラ螺旋渦とキャビテーション例

船体周辺の雑音NL:

- ① 機関雑音(主機、補機等による個体伝搬音や透過音)
 - ② プロペラ雑音(プロペラ翼面の圧力変動およびキャビテーションによる雑音)(Fig4)
 - ③ 流体雑音(船体や付加物の乱流境界層や渦による雑音)
 - ④ 海象雑音(風波や海中生物の動きに基づく雑音)(Fig5)
- ③は船体設計で常に考慮されており④は自然現象であるので対処すべき課題は、①機関雑音と②プロペラ雑音の低減となる。機関雑音の低減は別途行われ、その概要は論文^③に述べられている。

プロペラ雑音は翼面のキャビテーション(Cavitation)が発生すると急激に増加する。プロペラが回転すると翼背面(back: 船尾側)が負圧に、翼正面(face: 舵側)が正圧となり流れは翼先端で振じれて螺旋渦を形成して流出する。翼先端(tip)近傍ほど周速が大きく圧力低下が大である。圧力が海水の飽和蒸気圧より下がると海水は蒸発して空洞化した螺旋渦(Fig4)となる。これがTip Vortex Cavitationである。プロペラ荷重度(回転数)を上げると推力の増大(船速の増加)と共にキャビテーションが増大しプロペラ雑音が増加する。

低雑音が不可欠な支援母船のオペレーション: Fig6

- ① マルチナロービーム音響測深時(高船速・高馬力)
- ② 低速支援時: 6.5K潜水支援時、無人探査機曳航時(低速・低馬力)および(低速・高馬力)

このように高速域から低速域までの広いプロペラ作動範囲でプロペラ雑音を低減させねばならない。

このために、可変ピッチプロペラCPPの特性を利用して、

各オペレーションの船速を保持する①推力を出しつつ、②翼先端部に発生するCavitation(Back CavitationやFace cavitation)を制御してプロペラ雑音を低減させる方法を考えた。

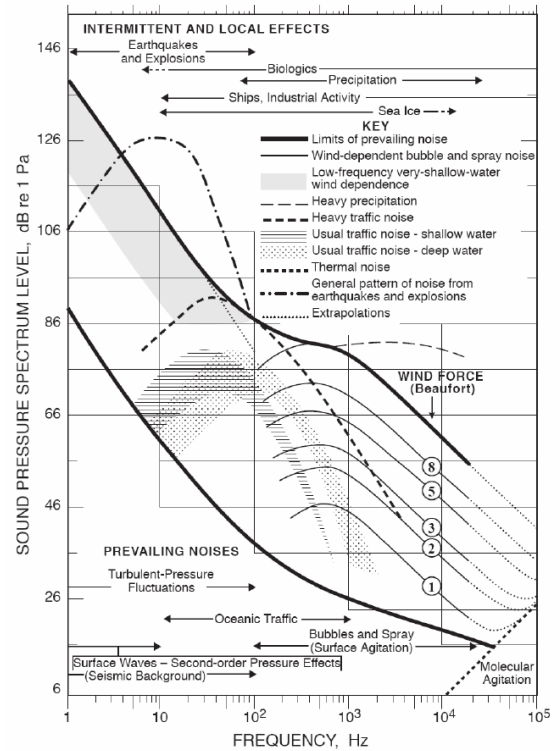


Fig. 5 海洋中の周囲雑音レベルの構成 (by Wenz)

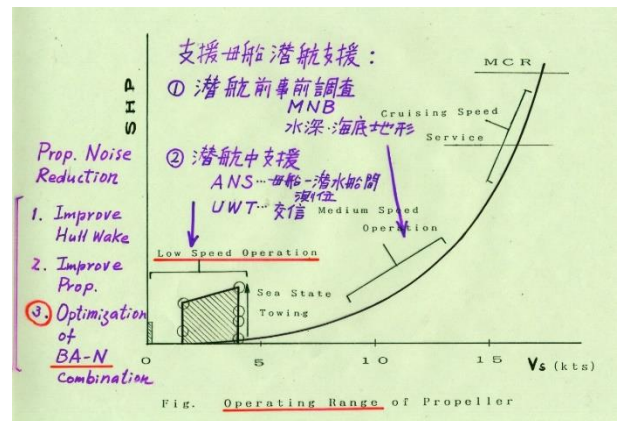


Fig. 6 支援母船“よこすか”の潜航支援時プロペラ作動範囲

可変ピッチプロペラの特徴を生かした運転方法:

(可変ピッチプロペラ:Fig7 と推力の出し方)

CPPはフランジ付きの翼がボスに差し込まれプロペラ軸により回転数 N で回転する。中空のプロペラ軸中の油はボス内部の油圧ピストンによりリンク機構を経て翼フランジを回し翼角 ψ (BA:Blade Angle)を所定のピッチ角に変更できる。各オペレーションに必要な推力 $T_1, T_2, T_3 \dots$ を与える($N \times BA$)の組み合わせはそれぞれ推力一定の双曲線状カーブ(Fig.8)上の点から自由を選択できる。この性質を利用すれば、推力一定の条件下で翼先端に発生するキャビテーションが最小になる($N \times BA$)の組合せを見いだすことができる。

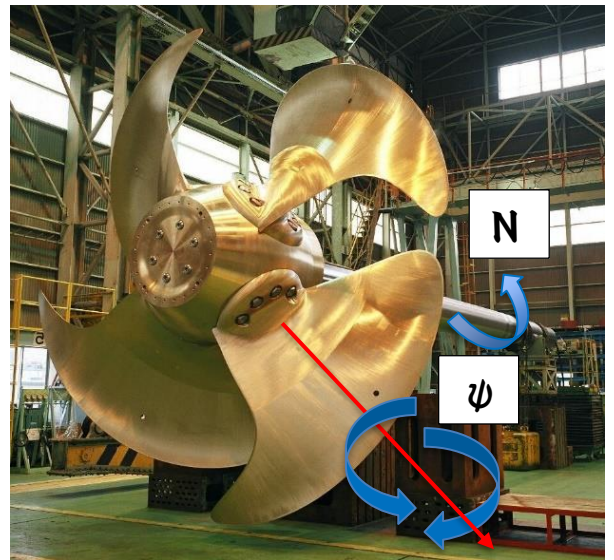


Fig.7 可変ピッチプロペラCPP

(キャビテーション発生が最小となる $N \times BA$ の組合せ)

プロペラ揚力面理論により各半径 r のプロペラ翼素への流入線図と流入角度 α^* が計算できる。(Fig9) キャビテーションは翼先端付近で生じることに着目し対応翼型への流入角度 α を与えて最小圧力値を計算しキャビテーションバケット図(Fig10)を作ればBack側とFace側に発生する悪質なキャビテーションを最小限に抑える($N \times BA$)の組合せを評価することができる。手順の概要を書く。推力 T_1 一定の($N \times BA$)カーブ上の点を選び、計算半径の翼型への平均流入迎角 α^* を計算する。つぎにその相当2次元翼型について流入角度 α を数点($\pm \Delta \alpha$)変えて最小圧力値 $-C_p$ を求め、($-C_p, \alpha$)を置点してキャビテーションバケット図(Fig10)を作る。 $\Delta \alpha_{BACK}$ と $\Delta \alpha_{FACE}$ がBack Cavitation、Face Cavitationのそれぞれの発生限界を評価するインデクスとなる。 $(N \times BA)$ を変えて計算すれば推力 T_1 一定下の最適($N \times BA$)組合せ点●が見いだせる。それを各 $T_1, T_2, T_3 \dots$ で計算し置点すれば低ノイズを与える実用的な($N \times BA$)制御ライン(折れ線状等)が設定できる。(文献①参照)

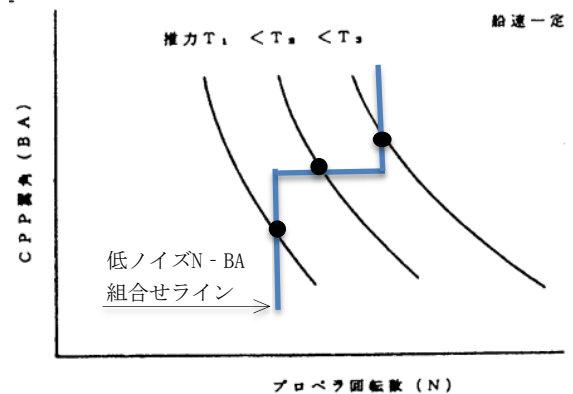


Fig.8 推力一定のCPP($N \times BA \psi$)曲線

低雑音プロペラ設計の設計: 上記の計算に先立ち、翼数、直径、翼断面形状、翼厚分布、ピッチ分布、ボス比を持つ最終候補プロペラを設計して置く。プロペラ自身とその運転方法の両者が適合してCPPシステムとしての低雑音化が達成される。

CPP模型キャビテーション試験および実船水中雑音計測を経て本法の妥当性を検証した。

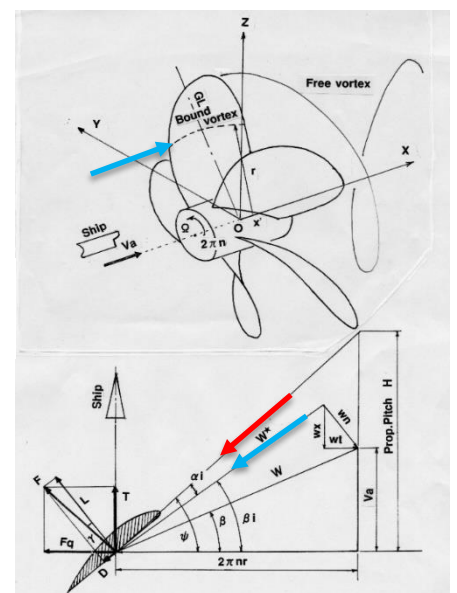


Fig.9 プロペラ理論による翼素流入線図と α_i

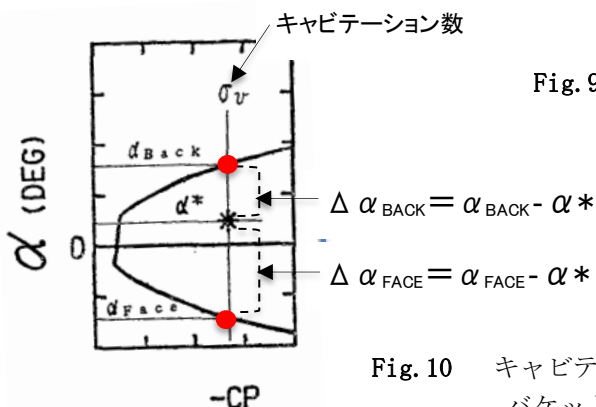


Fig.10 キャビテーションバケット図

低雑音プロペラ設計と翼角×回転数の運転方法:

－研究方法の時系列概要－

1) 2,000M潜水調査船支援母船“なつしま”^{*}のCPP: 実船試験と模型試験: Type Ship研究

- ① 模型CPPキャビテーション試験による雑音計測と実機換算
- ② 実船試験: CPP雑音計測と模型キャビテーション試験との相関
- ③ 雑音計測結果から(翼角×回転数ダイアグラム作成)、CPP低雑音(N×BA)組合せ方法構築

^{*}川崎重工業建造

2) 支援母船「よこすか」CPPの設計:

- ① プロペラ流入流場の均一化 ←→ 船尾形状
- ② プロペラ設計: 5翼、40%skew, Tip Unload ピッチ分布
- ③ CPP: (翼角×回転数)組合せ ← shock free entryを狙う

3) 「よこすか」CPP模型キャビテーション試験と考察:

- ① 模型CPPキャビテーション試験による雑音計測
- ② 実機換算と雑音分布考察
- ③ キャビテーションバケット図による低雑音CPP操作方法の考察

4) 支援母船「よこすか」実船試験CPP雑音計測:

- ① 実船雑音計測、(翼角×回転数ダイアグラム)を作成
- ② 模型/実機: 雑音分布の比較考察、
最適な(翼角×回転数ダイアグラム)の決定と採用
- ③ 評価: 低雑音目標達成確認

§ 2: 技術資料

低雑音を考慮したCPPの運転方法 (日本船用機関学会誌 第27巻 第9号(1992-9))

野澤和男、高須順三

(次頁)

(参考)

- ① 水中雑音の研究第1報: 野澤和男、高須順三、中西俊之、佐野 正(日本造船協会論文集)
https://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo_10787417_po_ART0005172935.pdf?contentNo=1&alternativeNo=
- ② 水中雑音の研究第2報: 野澤和男、高須順三、中西俊之、佐野 正(日本造船協会論文集)
https://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo_10787722_po_ART0005169396.pdf?contentNo=1&alternativeNo=
- ③ 6500m潜水調査船支援母船「よこすか」の雑音低減化対策及びその成果について(JAMSTECR24)
[digidepo_8791945_po_24_2.pdf \(ndl.go.jp\)](https://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo_8791945_po_24_2.pdf)
- ④ 一般資料: サイドスキャンソーナーの基礎 佐野俱佳 (J. Adv. Mar. Tech. Soci. Vol. 10, No. 2, 2004)
https://www.jstage.jst.go.jp/article/amstec/10/2/10_59/_pdf/-char/en
- ⑤ 水中雑音の原理: R. J. ユーリック著 土屋・西村監修 (共立出版)



低雑音を考慮した CPP の運転方法*

野 沢 和 男** ・ 高 須 順 三**

Operation Method of CPP for Lower Proller Noise

By Kazuo Nozawa, Junzo Takasu

With the recent increasing interest in scientific and engineering researches into ocean and deep sea, large and high powered oceanographic ships with controllable pitch propellers (CPPs) has become necessary.

In such ships, because of necessity for detection of the deep sea bottom and telephoning and communication between the support ship and the deep sea submergence vehicle using acoustic instruments, it has become a very important technical object to reduce the underwater noise around the hull, especially the propeller cavitation noise, below the required level.

In this paper, firstly, general relations among propeller geometry, cavitation and noise are explained, considering characteristics of CPP, and the following three fundamental methods which are found effective for reduction of the propeller noise are described :

- 1) Equalization of wake distribution at a propeller plane
- 2) Optimum selection of particulars and shape of CPPs
- 3) Optimum combination of CPP blade angle and revolution number

Secondly, theoretical and experimental studies of the low noise CPP on the support ship "Yokosuka" for a 6500m deep submergence research vehicle in application of the above methods are briefly described.

The full scale propeller noise was measured at her sea trial and compared with the predicted one. It was found that the noise level of this propeller was very low and the above described methods were very effective for the noise reduction.

1. 緒 言

近年、世界の海洋を対象とした物理学、生物学、水産学、海底地質などの基礎研究や深海底資源開発、海洋スペースの利用などの工学的研究の観点から海洋、とりわけ、深海に関する興味が増大してきた。これに伴い、調査活動を行う海域が広範囲になり、大深度となってきたために潜水調査船支援母船や海洋調査船も大型化、大馬力化している¹⁾。最近の例としては、6,500m潜水調査船支援母船「よこすか」²⁾、海洋研究船「白鳳丸(代船)」³⁾がある。これらの船舶は2軸推進で可変ピッチプロペラ(CPP)を装備しており、調査や支援時における操作性、機動性を向上させている。

この種の船舶では音響機器を利用した深海域における水中通信、位置決め、探査などが重要な任務となっており、水中雑音、なかでも、プロペラ雑音の低減化が重要な課題となる。この事情をマルチナロービーム用のソナー方程式を適用して具体的に説明してみる^{1),4)}。

送波した信号が海底で反射し、船側で検出できるための限界値DT(Directive Threshold, 検出閾値)は次式で表現される。

$$DT = SL - 2TL - (NL - DI) - DL - RL \quad \dots(1)$$

ここでSL: Source Level (送波出力), TL: Transmission Loss (伝搬損失), NL: Noise Level (雑音レベル), DI: Receiving Directivity Index (受波指向性利得), DL: Loss of Acoustic Window (音響窓透過損失), RL: Reflection Loss of Sea Bottom (海底反射損失)である。

*原稿受付 平成4年6月15日

**川崎重工業(株) (神戸市中央区東川崎町3-1-1)

大深度になる程、送波信号レベルSLに対して、音波の伝搬距離に基づく球面拡散や吸収によりTLが増大するため、限界値DTを保持するためには、受波器近傍の雑音レベルNLを出来るだけ低減する必要がある。船体周辺の雑音としては、①機関雑音（主機、補機による固体伝搬音や透過音）②プロペラ雑音（プロペラ翼面の圧力変動、流場およびキャビテーションに基づく雑音）③流体雑音（船体や付加物の乱流境界層や渦に基づく雑音）④海象雑音（風波や海中生物の動きに基づく雑音）などが含まれる。船体の主要雑音は機関雑音とプロペラ雑音であるが、上述の理由により、大深度になると海象雑音と同程度にまで抑えた低い雑音レベルが要求されるため、船舶の大馬力化に伴う雑音の増大傾向に対して極めて厳しい低雑音化が必要となる。

プロペラ雑音は翼面のキャビテーション発生に依存するからこれを抑えるように設計することが第一であるが、この種の船舶では観測時の風波による船体抵抗増加や無人探査機の曳航による抵抗増加によりプロペラの作動点が広範囲に変化するため、この特殊事情を十分に考慮した低雑音プロペラ設計やその運転方法が重要となる。

以下、本論文ではプロペラキャビテーションとプロペラ雑音の一般的傾向および潜水調査船支援母船「よこすか」(1990年川崎重工建造)の低雑音CPPの設計とその運転方法等について記述する。

2. プロペラキャビテーションとプロペラ雑音

2.1 プロペラ水中雑音低減化因子と相関図²⁾

図1にプロペラ雑音低減化因子と相関図を示す。プロペラ雑音はプロペラ翼面上の圧力分布およびこれに起因するキャビテーションによるものであるから、これを低減化する主要因子としては次の3点が考えられる。

- (i) プロペラ流入流場、即ち、伴流分布の均一化
- (ii) プロペラ要目、形状の最適化
- (iii) 可変ピッチの運転条件、即ち、翼角、回転数の最適組合せ

(i)についてはプロペラの作動環境の最適化である。一軸船であれば船尾形状、二軸船であればさらに、ボッシングやシャフト・ブラケットの形状、配置を伴流が可能な限り均一になるようにする。

(ii)については、キャビテーションが発生しにくくなるようなプロペラ自体の最適化である。

(iii)はCPPの特性を生かして船速やプロペラ荷重程度ごとにプロペラ翼角・回転数を調節し、キャビテーションが発生しにくい状態を保つ。

以上の3点の考慮により、プロペラ一回転中の翼面圧力分布を低く、平坦な形状とし、キャビテーションの初生、成長を遅らせることにより、キャビテーション崩壊に基づく高周波雑音を低減することができる。

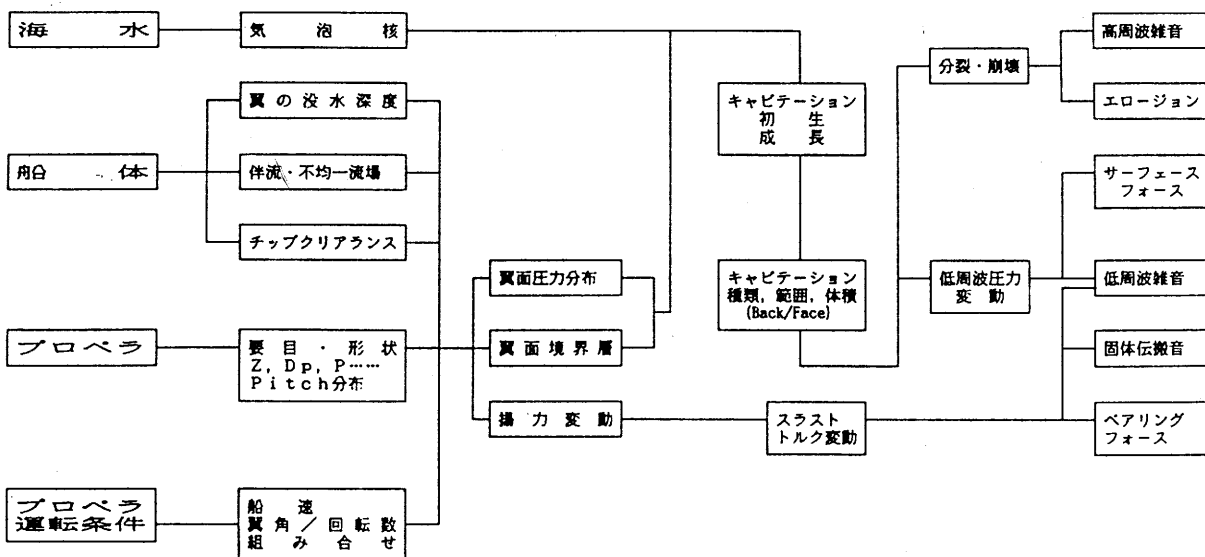


図1 プロペラによる振動雑音の相関図

2.2 キャビテーションの発生とプロペラ雑音
 プロペラキャビテーションの発生によりプロペラ雑音が増加していく様子を図2に示す⁵⁾。これは船長90m、排水量3000tの海洋調査船の模型をオランダNSMB(現MARIN)のVacuum Tankで自航させてプロペラキャビテーション観測と水中雑音計測を行ったものであり、船速を変化させた時のキャビテーション発生状況とプロペラ雑音レベルの増加状況が示されている。

船速12ktsではキャビテーションは発生していない。雑音レベルは低く、増加の傾向は横ばいである。しかし、14kts付近で、Tip Vortex Cavitationが発生しはじめると雑音レベルは急増する。その後、Back Cavitationの発達に伴い、14ktsから20ktsまでの間に約30dB増加している。20kts以上になりキャビテーションが十分に発達すると、雑音レベルは飽和して増加の傾向はかなり緩やかになる。プロペラ雑音レベルはキャビテーションの初生およびその後のキャビテーション発生量の大きさに強く依存することがわかる。

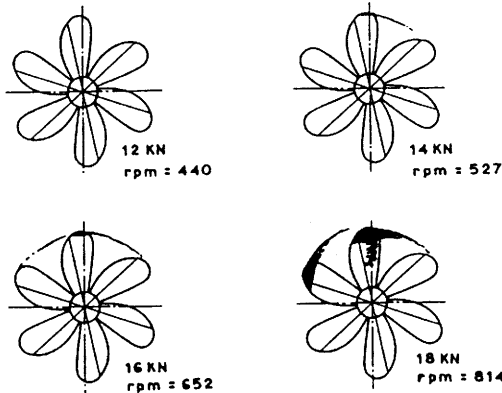
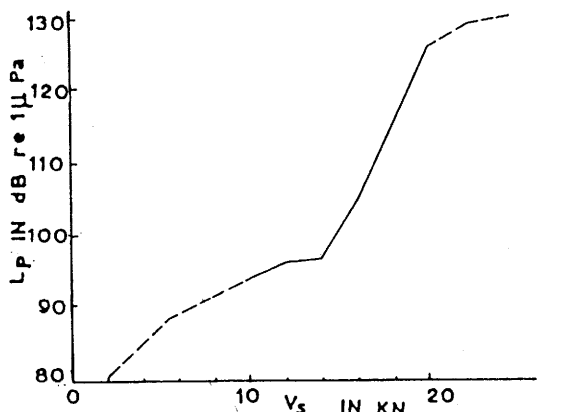


図2 プロペラキャビテーションとプロペラ雑音

Brown⁶⁾はキャビテーションの発生による雑音レベルの増加量を $\Delta L_s = 10 \log (A_c/A_d)$ (ここで A_c : キャビテーション発生面積, A_d : 翼面積) で与えている。キャビテーション面積が10倍になると約10dB増加することを示すが、16ktsから18ktsの変化を見るとほぼ同程度の傾向で増加していることがうかがえる。

2.3 CPPの翼角・回転数の組合せと発生するキャビテーションの傾向
 船が一定船速を保持するためには船体抵抗に見合う推力Tを保持する必要がある。CPPではその推力を得る翼角と回転数の組合せは無数に取ることができ、図3-aに示すような双曲線状の曲線となる。また船体が平水中を単独で航走しているか、無人探査機を曳航しているか、波浪中で抵抗増加をうけているかなどにより発生すべき推力が変化するとこれに対応して翼角と回転数の組合せ曲線も異なったものとなる。図3-aでは例として3種 ($T_1 < T_2 < T_3$) の推力に対応

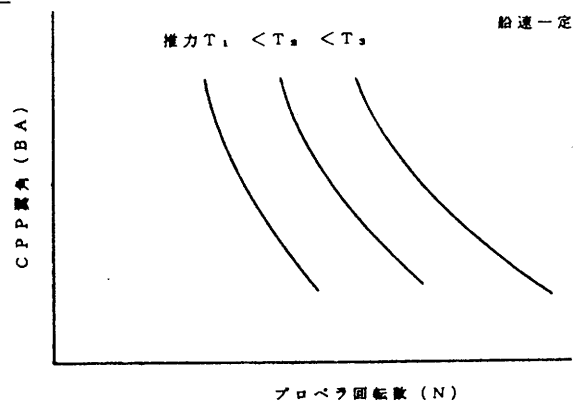


図3-a 一定船速を保持するCPP翼角の回転数の組合せ

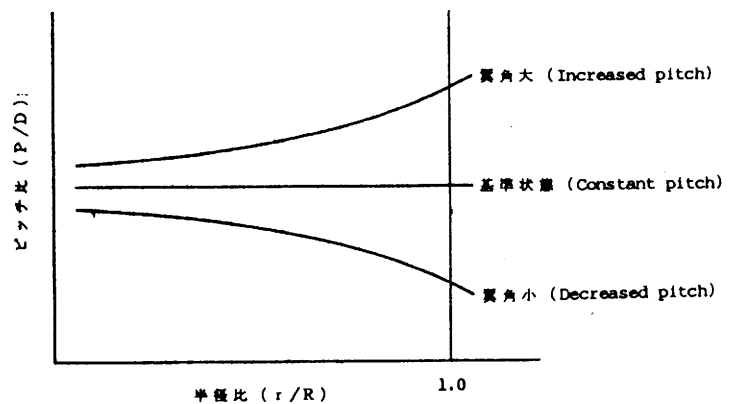


図3-b プロペラピッチ分布の一例

した3本の組合せ曲線を示した。

さて、キャビテーションの発生に係る重要なパラメーターの一つとして、プロペラ半径方向のピッチ分布がある。CPPで翼角を変えるとピッチ分布がどのようになるか、簡単のため基準状態で一定ピッチに設計した場合を考えてみると、図3-bのように翼角を大とすると逡増ピッチ (Increased pitch)、翼角を小とすると逡減ピッチ (Decreased pitch) となる。このピッチ分布の変化は翼先端ほど著しく、また先端付近ほど周速が大きいので、キャビテーション発生に及ぼす影響は大きい。

図3-aの一本の組合せ曲線に沿って翼角と回転数を変えた場合を想定してみる。翼角を大とすると先端でのピッチ比が大となり、そこでの翼素への流入迎角が正となって Back Cavitation が発生しやすくなり、逆に翼角を小とすると流入迎角が負となって Face Cavitation が発生しやすくなる。このことから、Back Cavitation も Face Cavitation も発生しない (あるいは、発生量の最も少ない) 最適な翼角と回転数の組合せが、中間的な位置に存在するものと理解できる。

更に、図3-aのように、組合せ曲線を複数考慮する場合には、最適な組合せ点が多条件で変化するものと考えられる。

2.4 キャビテーションの種類とプロペラ雑音

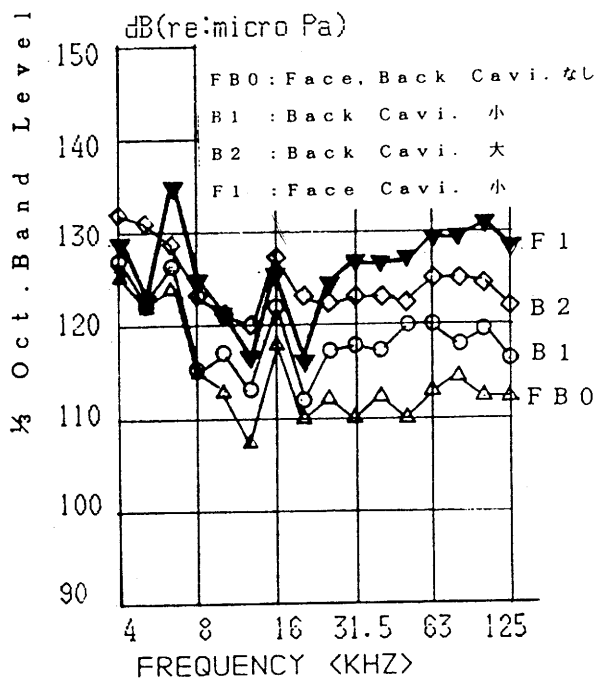


図4 Cavitationの種類とプロペラ雑音

音 前項で、CPPでは翼角を大としたとき、Back Cavitation、翼角を小としたとき Face Cavitation が発生しやすい傾向にあると述べたが、キャビテーションの種類によりプロペラ雑音はどのように変化するのであろうか？図4は、2,000m潜水調査船支援母船「なつしま」用CPPの模型プロペラをキャビテーション水槽において船速4kts相当を保持する翼角と回転数の組合せで作動させて雑音計測を行った例である。

「FB0」はプロペラ翼角と回転数を調整してプロペラ先端でキャビテーションが発生しないようにした場合で、雑音レベルは低く高周波数に向かって減少し、110dB程度で横這いとなっている。「B1」、「B2」は順次翼角を大 (回転数を小) として Back Cavitation が発生するような組合せとしたもので周波数全域にわたり、雑音レベルが少しずつ増加する。一方、「F1」は翼角を小 (回転数を大) として Face Cavitation をわずかに発生させたもので雑音レベルは130dB程度まで急激に増加する。特に、高周波雑音の増加が著しい。図5は「なつしま」の実船でのプロペラ雑音計測の例⁷⁾である。各船速を保つように翼角・回転数の組合せを変えて計測した

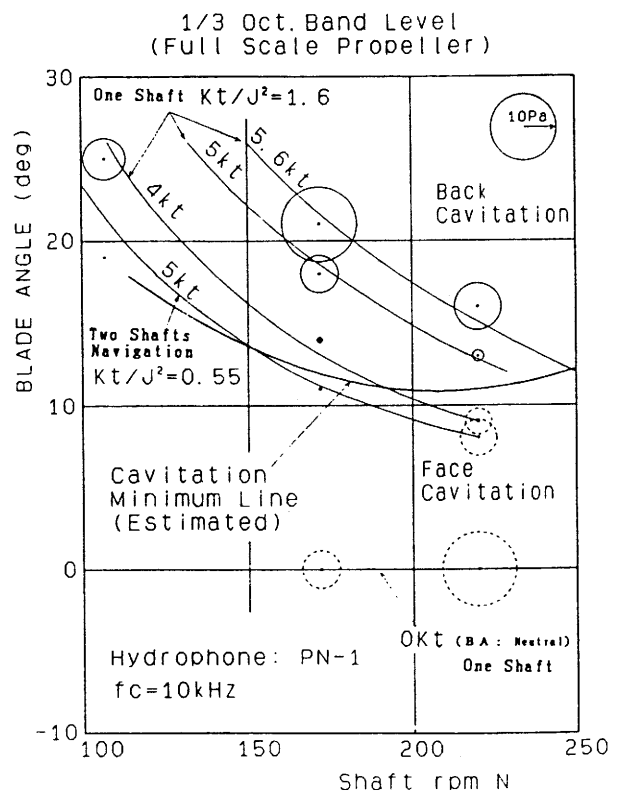


図5 実船プロペラ雑音とプロペラ翼角・回転数の組合せ (「なつしま」プロペラ)

プロペラ近傍の雑音レベル (1/3 Oct Band $f_c = 10\text{KHz}$) から平均音圧 P ($P = 10^{(8\text{SPL} - 120)/20} P_a$) に換算して示している。なお、図には揚力面理論により計算されたプロペラ先端近傍の流入条件がほぼ Shock Free 状態となり Cavitation が最小と考えられる組合せ曲線が記入されている。この線より上側が Back Cavitation, 下側が Face Cavitation の発生領域となる。同図から、

(1) 同一船速であっても、CPPの翼角と回転数の組合せによりプロペラ雑音が最小となる組合せがあり、これから離れるに従い雑音レベルが増大している。特に、Face Cavitation の発生では雑音レベルが急増している。

(2) 船速が変わると、プロペラ荷重度が変わるため雑音が小さくなる組合せが変化している。

等が確認できる。また、図中の理論的に求めた Cavitation 最小ラインがほぼ雑音最小ラインに対応していることがわかる。

キャビテーションの種類と雑音レベルの大きさとの間の一般的傾向は次のようである。

Tip Vortex やシート状の Back Cavitation の発生による雑音レベルは余り高くなく、発生領域の増大に伴い、雑音レベルが徐々に増加する。Face Cavitation が発生すると急激に雑音レベルが高くなる。さらに、Bubble Cavitation や Cloud Cavitation が発生すると雑音レベルより高いものになる。

以上から、Bubble Cavitation や Cloud Cavitation は勿論のこと、雑音レベルの高い Face Cavitation の発生は極力避けることがまず重要である。更に Cavitation が発生しやすいプロペラ先端近傍で Back 側の Sheet Cavitation が最少となるようにプロペラを設計し、運転することが望ましい。

3. 「よこすか」の CPP の低雑音化²⁾

3.1 「よこすか」の概要と低雑音目標

以下では、前述したプロペラ雑音低減化を図るために検討すべき項目の具体的な実施例として、6,500m潜水調査船支援母船「よこすか」のCPPについて簡単に紹介する。「よこすか」の外形を図6に

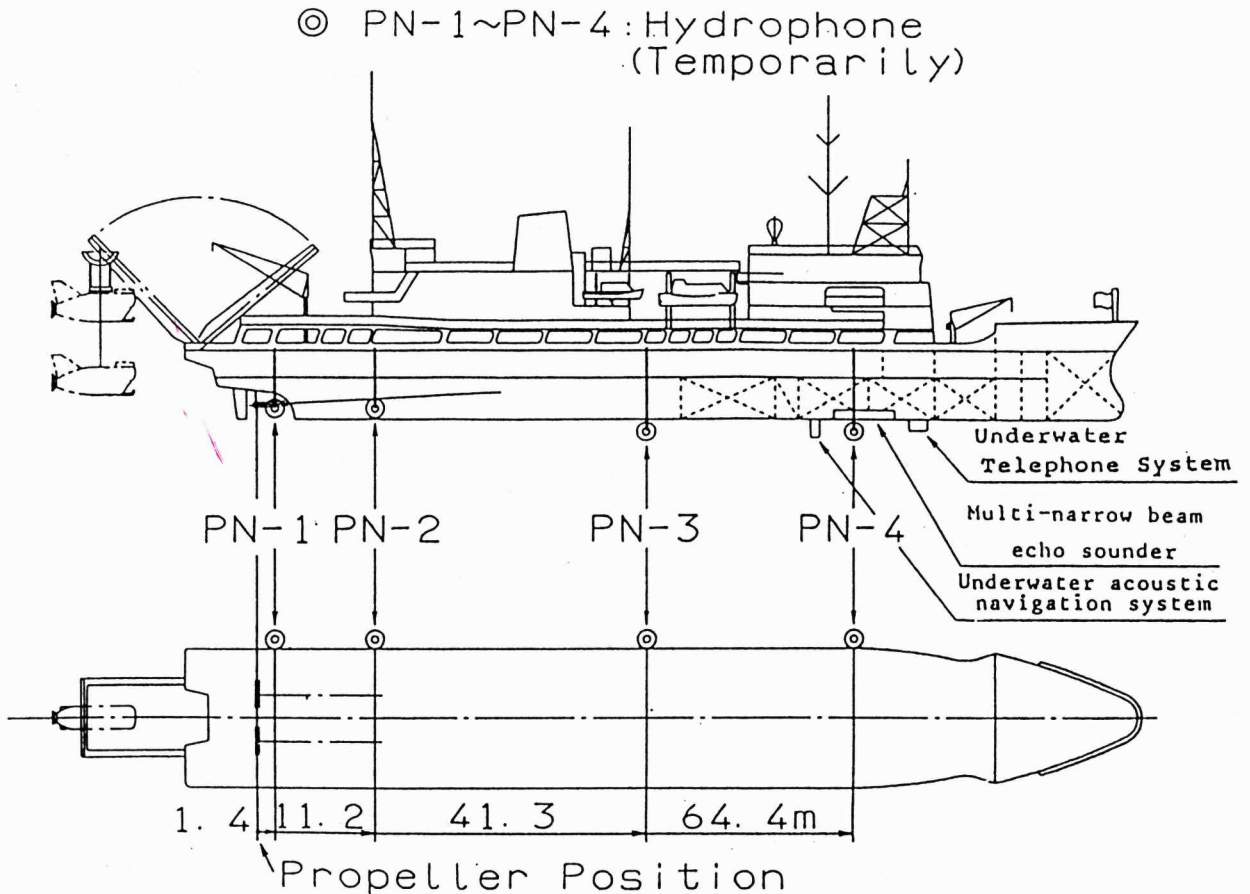


図6 「よこすか」の船型とプロペラ雑音計測位置

示す。本船は船長 95m, 排水量約 4,100t, 機関馬力 3,000PS×2 軸, 航海速度 16kts である。図中に試運転時のプロペラ雑音計測用に使用した 4 本の仮設無指向性ハイドロフォン (PN-1~PN-4) 及び本船付の各種音響機器の位置が示されている。

本船のミッションの 1 つは潜水調査船の潜航前事前調査であり, マルチナロービーム (Multi Narrow Beam Echo Sounder) を使用して潜航海域選定のための水深や海底地形の広範囲な計測を行う。計測の効率化から 10~12kts の高速航行で行われる。他の 1 つは 6500m 潜水調査船 (6.5K) の潜航中支援であり, 音響航法装置 (Acoustic Navigation System), 水中通話機 (Under water Telephone) を使用して, 潜水調査船の位置測定や相互の交信を行う。また, 現在, 搭載の準備が進められている 10,000m 無人探査機 (10K) を曳航し, 海底, 地形の詳細探査を行う。これらのオペレーションは 4 kts 前後の微速で行われる。低速支援時のミッションとその時の海象条件を考慮して, プロペラ作動領域を L 4-1~L 4-4 と 4 種類設定し, CPP の低雑音化をはかった。ここで, L 4-1~L 4-4 は図 8 に示すようにそれぞれ 6.5K 支援 (SS 0), 10K 支援 (SS 0), 6.5K 支援 (SS 4), 10K 支援 (SS 4) 時の翼角・回転数の組合せ曲線で, この順に船体抵抗大, 即ちプロペラ荷重が大となっている。なお, SS は Sea State の略である。

それぞれの主要音響機器の使用周波数帯と要求される検出閾値 DT はソーナー方程式より与えられ, これから雑音低減目標レベルが設定された。例えば $f = 10\text{kHz}$ では $-35\text{dB} // \mu\text{bar}/\sqrt{\text{Hz}}$ ($99\text{dB} // \mu\text{Pa}$, 1/3 Oct Band) 程度であり, これを上述の全ての Operation で満たすことが要求された。

3.2 CPP の要目, ピッチ分布と翼角・回転数の運転方法 第 2 章で示したプロペラの雑音低減化因子について, 理論的実験的検討を行いプロペラの最適化を行った。この結果, 「よこすか」のプロペラ翼数は 5 翼とし, 直径は 3 m と比較的大きくした。プロペラピッチ分布は Tip Unload 型とし 40% のスキューをつけた。Tip Unload 型ピッチ分布の選定にあたっては次のような模型実験を行った。即ち, MCR 付近のピッチ分布を Tip Unload (D), 一定 (C), 増加 (I) と 3 種類変化させた CPP を初期設計し, キャビテーション水槽において雑音計測を行った。図 7 は 4 kts 一定として自由航走時 (L

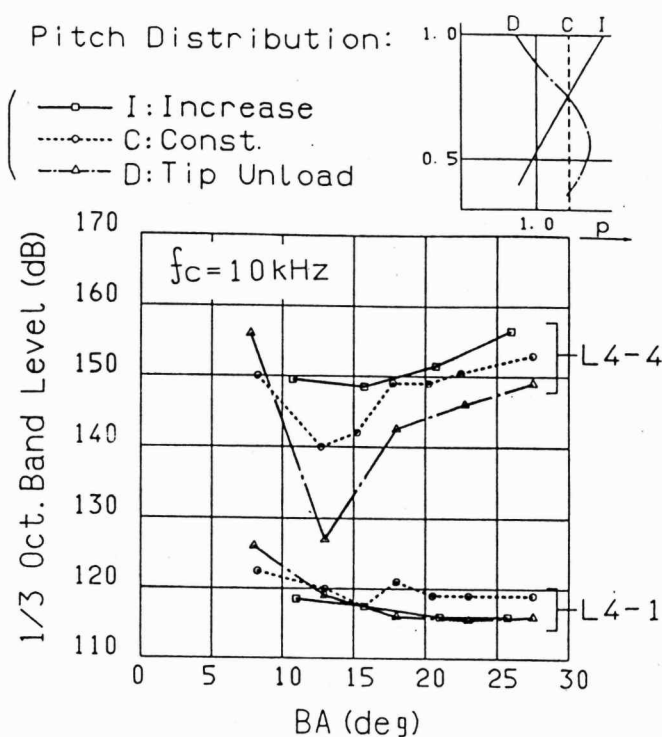


図 7 CPP のピッチ分布がプロペラ雑音に及ぼす影響

4-1) と馬力増加時 (L 4-4) について, 翼角と回転数の組合せを変えた時のプロペラ雑音の 1/3 Oct Band 分析値 (中心周波数 : 10kHz) であり, Levkovskii の方法に修正を加えて実船雑音レベルに換算してある。

これによると,

- (1) 荷重度の高い L 4-4 では Tip Unload 型のプロペラ D の雑音レベルが全体的に低く, かつ BA = 13° 付近で雑音が極小となる。Increase Pitch のプロペラ I に比べて約 20dB 低くなっており, この翼角付近で翼先端付記が Shock Free Entry となっていることを示す。翼角が減少 (回転数が増加) すると Face Cavitation の発生により雑音レベルは急激に増加する。
- (2) プロペラ荷重度の低い L 4-1 ではいずれのプロペラも雑音レベルは 120dB 前後と低くなるがプロペラ I, D は翼角の大きい (回転数が小さい) 所で 116dB 程度やや小さくなる。

以上の実験から, 「よこすか」の CPP のピッチ分布はプロペラ D に近い Tip Unload 型とすることにした。

「なつしま」の実船 CPP の雑音設計や「よこすか」の初期 CPP 模型の雑音計測結果により, 各プロ

ペラ荷重状態において翼角・回転数の組合せを最適に選択することにより低雑音化がはかれることが分かった。これを厳密に達成するためにはプロペラ回転数が任意に選択できる電動モーターの装備が必要となるが、この必要性も含めて基本設計段階で種々の推進システム搭載時の雑音レベルの予測を行った。その結果、推進システムとしては「なつしま」と同様の2段変速機付中速ディーゼル機関とし、プロペラ回転数は主機回転数モード2種類（高速用、低速用）及び減速ギア比2種類（高速用、低速用）の組合せで低雑音化が可能であることがわかった。低速ギアモードとして、91rpm~113rpm、高速ギアモードとして、148rpm~185rpmを使用することにした。

3.3 低速オペレーション時のプロペラ雑音

〈模型プロペラによる水中雑音の予測〉

キャビテーション水槽で「よこすか」CPPの相似模型プロペラ（直径220mm）を使用したプロペラ雑音計測を行った。

図8に低速オペレーション（4kts）時のプロペラ

水中雑音の雑音分布を示す。これは115dBから160dBの間の雑音レベル（1/3 Oct. Band $f_c=10\text{kHz}$ ）について、2.5dB刻みで等雑音線を作画したものである。この結果によると、本船のプロペラ雑音については、

- (1) プロペラ回転数を低く翼角を大きくした組合せの領域では、雑音レベルが約120dBと低く、低速ギアモードでの運転が低雑音上有利である。
- (2) プロペラ回転数が大きな領域、即ち、高速ギアモード付近から高回転側では等雑音分布線が密になり雑音レベルは140~150dBと急増する。
- (3) 本船のCPPは低速ギアモードで運転することにより、雑音レベルは低くなり、低減目標に対して約10dBの余裕をもって達成できることがわかった。

〈実船プロペラ水中雑音〉

本船の試運転時に、1.6ktsと4ktsの両軸使用自由航走と4ktsの片軸航走の状態においてプロペラ翼角と回転数を変化させた雑音計測を行い、プロペラ雑音の音源レベルを求めた。キャビテーション試験

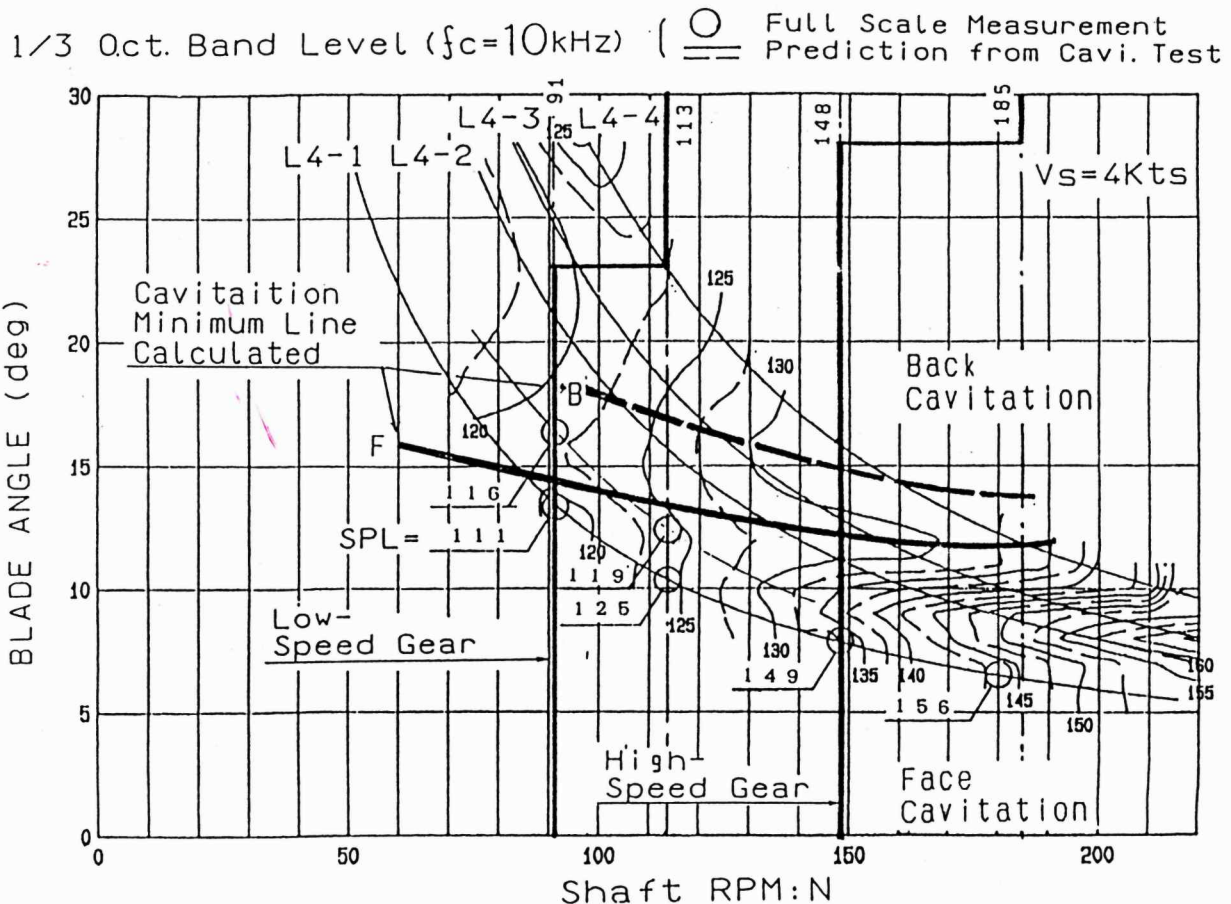


図8 低速度支援時のプロペラ雑音（「よこすか」実船計測および模型試験）

による予測値と比較しながら考察すると次のようである。

- (1) プロペラ荷重度の低い L 4-1 についてみると、低速ギヤモードの $N=91\sim 113$ において実測雑音の方が $5\sim 10\text{dB}$ 低い値を与え、予想以上の低雑音化が得られた。
- (2) 高速ギヤモードの $148\sim 185\text{rpm}$ では逆に、実船プロペラ雑音の方が $5\sim 10\text{dB}$ 高い値となっている。なお、 1.6kts の場合の雑音も同傾向でプロペラ回転数の増加とともに雑音レベルは増加するが、低速ギヤモード付近では 4kts の雑音レベルに比べて約 10dB 増加している。
実機プロペラの方が模型プロペラに比べて雑音レベルの増減の勾配が急であるが、傾向は良く一致していることがわかった。

〈プロペラ揚力面理論による低雑音領域の推定〉
プロペラ揚力面理論により種々の翼角・回転数の組合せでの翼面上の圧力分布を計算し、Cavitation 数との関連からそれぞれ Back Cavitation と Face Cavitation の発生限界線を予測し“B”と“F”として記入した。この線の間は翼の流入状態が Shock Free Entry 状態となるため、Cavitation が発生せず、したがって、雑音レベルが最小となる領域である。この領域の上、下、特に下側の Face Cavitation 領域では雑音レベルが急増している。以上の傾向

は実験値と良く一致しており、CPPの要目・形状および CPP の運転方法の設定の妥当性が確認できた。また、キャビテーション試験やプロペラ理論が低雑音プロペラ設計に有効であることがわかった。

3.4 プロペラ中立翼角時（船体停止時）のプロペラ雑音 CPP の利点の1つは、中立翼角に戻すことによりプロペラ作動のまま船体を停止させ、種々のオペレーションが可能となることである。低速支援時においてもこれに近いオペレーションが必要となる場合がある。中立翼角に変節するとプロペラ先端付近のピッチ角が負となるため、プロペラ回転数の増加とともに激しい Face Cavitation が発生する。

模型プロペラによるキャビテーション試験および実船試験において、中立翼角の状態プロペラ回転数を $91\text{rpm}\sim 185\text{rpm}$ の間で4種類変化させた時の雑音計測を行い、実船プロペラ雑音との比較を行った。 $1/3\text{ Oct. Band } f_c=10\text{kHz}$ での雑音レベルを図9に示す。これによると

- (1) 模型実験による予測値と実船試験値は定性的、定量的によく一致している。
- (2) 低速ギヤモードの 91rpm から高速ギヤモードの 141rpm までは雑音レベルがほぼ直線的に増加する。
- (3) $N=141\text{rpm}$ から 185rpm では雑音レベルはほぼ

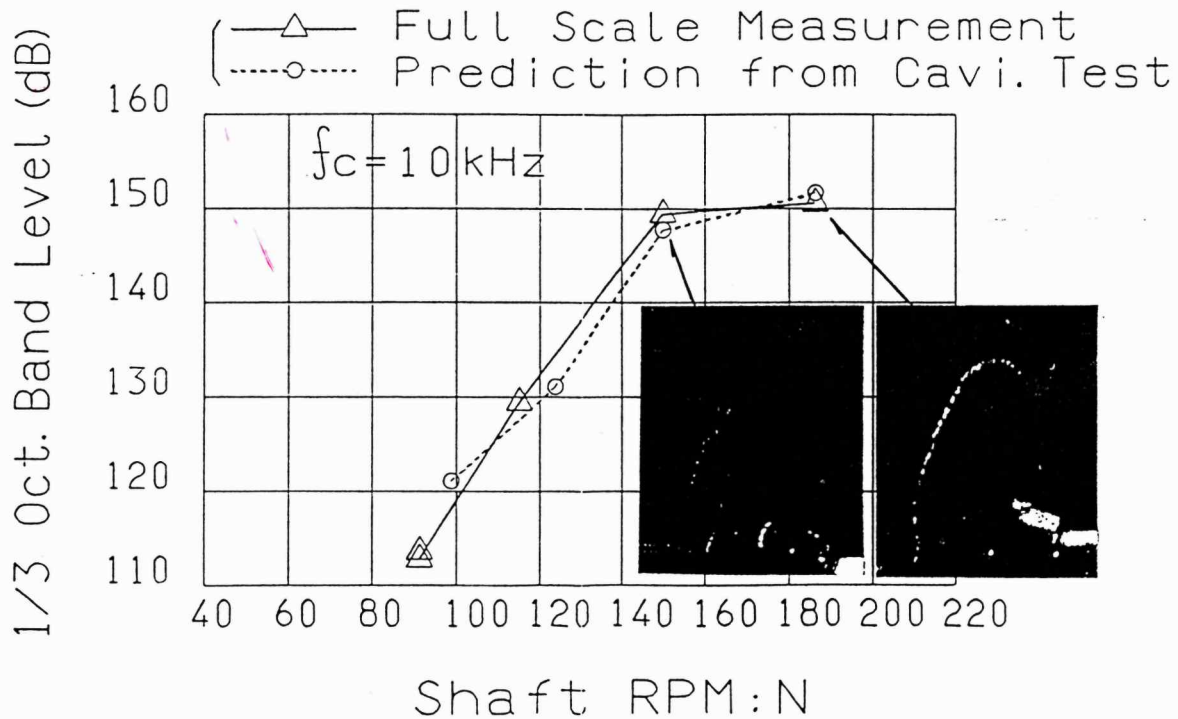


図9 中立翼角時のプロペラ（「よこすか」実船計測および模型試験）

横ばいとなる。

以上の傾向は図 2 に示した雑音レベルの変化によく似ている。

図中に、 $N=149\text{rpm}$ と 185rpm でのキャビテーション試験で観測した Face Cavitation 発生状況の写真を示す。 $N=91\text{rpm}$ と 113rpm では Face Cavitation 発生は認められなかった。これと雑音レベルの増加の傾向を関連させると

- (4) Face Cavitation の発生、発達と雑音レベルの増加の傾向の間には“ずれ”があり、Cavitation が発生しない状態であっても、ミクロな Cavitation の初生にもとづく雑音が増加している。
- (5) $N=149\text{rpm}$ から 185rpm では Face Cavitation が発達しているにも拘らず、雑音レベルは横ばいとなっている。Face Cavitation が発達して定常化したため雑音レベルが飽和したものと考えられる。Face Cavitation の初生を遅らせることが低雑音上重要である。

- (6) 以上の考察から低雑音オペレーション時に中立翼角による操船が必要な場合には、プロペラ回転数を可能な限り低くして運転すべきである。

3.5 CPP の運転方法とプロペラ雑音 最後に、全船速域でのプロペラ運転条件（翼角・回転数組合せ）とプロペラ雑音音源レベルの関係を図 10 に示す。低速域の無指向性雑音は図 8 に示したように直接計測されているが、中高速域では計測器具にかかる流体力が大きくなるため計測されていない。そこで、低速域で同時に計測されている MNB による計測雑音と無指向性雑音の差を中高速域で計測した MNB の雑音レベルに加算することにより、中高速域での無指向性雑音を推定した。

このようにして求めた全船速域での雑音レベルから $1/3\text{ Oct. Band, } f_c=12.5\text{KHz}$ の値について平均音圧 P を求めて図示した。

これによると、

- (1) 低速ギヤモードでのプロペラ雑音は高速ギヤ

1/3 Oct. Band Level ($f_c=12\text{kHz}$)
Propeller Noise (Source Level)

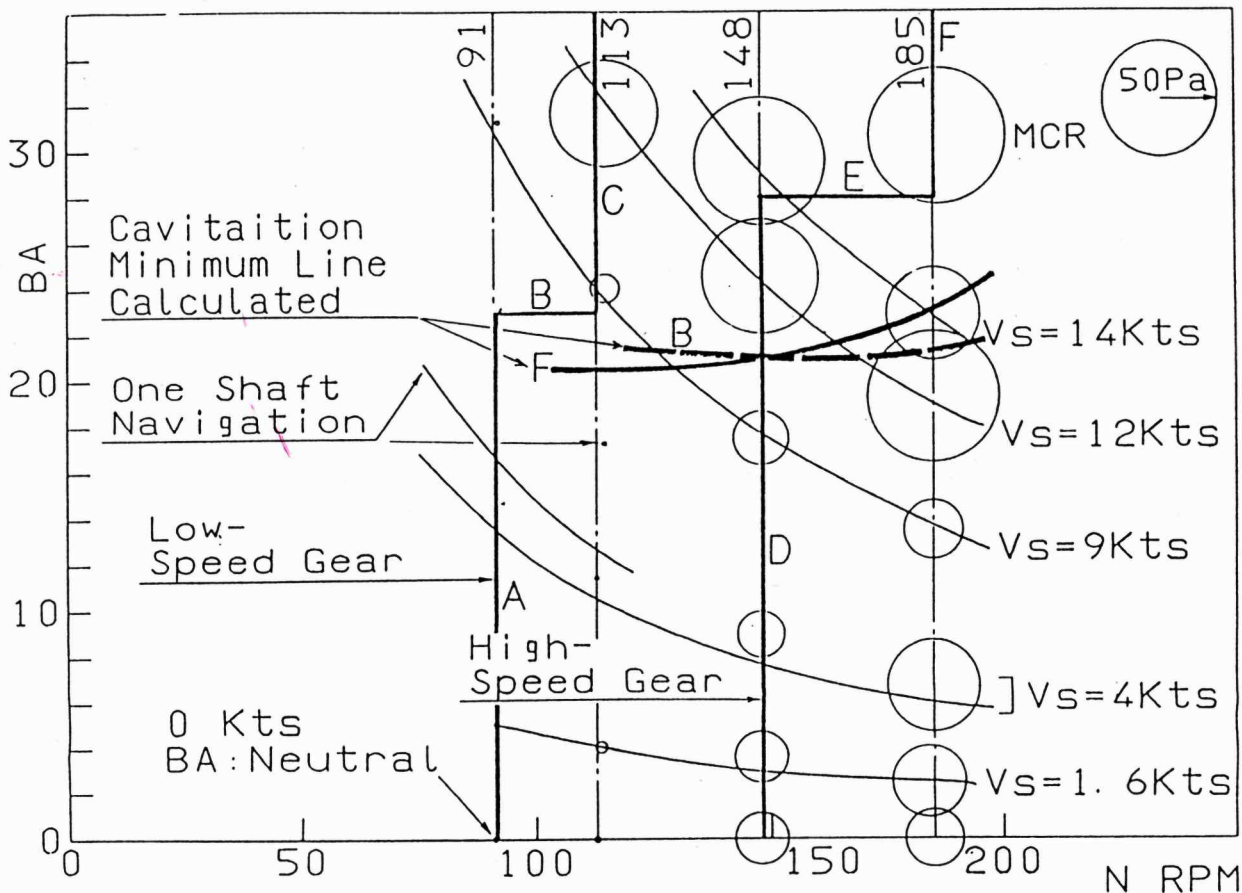


図 10 「よこすか」のプロペラ雑音 (実船計測)

モードの雑音に比べて、図示できないほど低く、低速オペレーションから中速でのマルチナロービーム航走に至るまで、A→B→Cの翼角・回転数の組合せでCPPを運転することが雑音の低減化上で最適である。

- (2) 高速ギヤモードにおいても、概ねD→E→FとCPPを運転することが低雑音上有利であり、低速ギヤモードの組合せで馬力が上限に達した場合にはこの線上で運転するのが望ましい。

図中には中高速で計算した Back Cavitation と Face Cavitation の発生限界線をそれぞれ、“B”、“F”として記入した。これによると、

- (3) マルチナロービーム航走での船速 9 kts~14 kts では、この限界線の Back 側でCPPを運転することになり、雑音レベルの高い Face Cavitation の発生を抑えていることがわかる。

以上のことから、本 CPP およびその運転条件は、低速および中高速域全体を通じて、低雑音上最適な設計となっていることが実船計測によって実証された。

4. 結 言

最近、理学・工学の分野で興味が増大している海洋調査に不可欠な潜水調査船支援母船等に関し、水中探査や交信に重要な影響を与える可変ピッチプロペラの低雑音化とその運転方法について述べた。

プロペラ雑音は主にプロペラ翼角に発生するキャビテーション気泡の崩壊に基づくため、キャビテーションの発生を可能な限り抑えるような設計及び運転が重要となる。このためには、プロペラ流入流場の均一化とプロペラの最適化とともに、CPPの特性

を生かした翼角・回転数の最適組合せが有効であることを見出した。この方法について、理論的実験的研究を行うことにより、6,500m潜水調査船支援母船「よこすか」のCPPの低雑音化を達成した。

深海研究は最近新しい話題となってきた地球環境問題における海洋研究とともに、今後ますます重要視され、これに伴ってより大型の海洋調査船が必要とされてくるであろう。CPPの水中雑音の低減化の観点からその理解に本論文が役立てば幸甚である。

文 献

- 1) 門馬大和：深海研究の今後の展望と必要な技術開発，関西造船協会創立80周年記念シンポジウム（平成4年5月）
- 2) 野沢和男ほか：プロペラ水中雑音の研究（第2報：6,500m潜水調査船支援母船「よこすか」のプロペラへの適用），日本造船学会論文集第168号（平成2年12月）
- 3) 小林和男：研究船白鳳丸（代船）の特徴，第9回海洋工学シンポジウム，日本造船学会（平成元年7月）
- 4) R. J. ユーリック著，土屋明訳西村実監修：水中音響の原理，共立出版（54年11月）
- 5) Stuurman, A.M.: Fundamental Aspects of the Effect of Propeller Cavitation on the Radiated Noise, Symposium on High Powered Propulsion of Large Ships (Part 2), Wageningen, The Netherlands (1974, Dec)
- 6) Brown, N.A.: Prediction of Propeller Noise Spectra, International Symposium on Shipboard Acoustics (1976)
- 7) 野沢和男ほか：プロペラ水中雑音の研究，日本造船学会論文集164号（昭和63年12月）