

最近のプロペラ鳴音の特徴とその防止法の研究

川 添 強* ・中 島 徹**
錦 戸 慎 吾*** ・Lee Kim Leong****Some Characteristics of Recent Propeller Singing
and Its Preventive Measures

by

Tsuyoshi KAWAZOE*, Touru NAKASHIMA** Shingo NISHIKIDO***
and Lee Kim LEONG****

So far a cause of propeller singing could be explained by the resonance between Karman vortex street from the trailing edge of $0.55R \sim 0.6R$ and the natural frequency of the blade. The revision of the trailing edge mentioned above by grinding could almost arrest the singing.

However there are many cases where recent propeller singing cannot be extinguished by the usual measure. In this study, the characteristics of recent singing and its preventive measures are considered using FFT analysis of noise occurred in some large ships. In consequence, we developed a new anti-singing design which leads to good results on some applied ships.

Key Word : Marine Propeller, Singing, Karman Vortex, Natural Frequency, Blade design

1. まえがき

プロペラがある回転数で作動しているとき、“ワーン、ワーン”または“キーン、キーン”という金属音を発することがある。この現象はプロペラ鳴音 (Propeller, singing)¹⁾と呼ばれている。この音は船尾から聞こえてくるため、たびたびプロペラ軸と軸受の金属接触によるものと懸念される。鳴音現象はプロペラ翼にキャビテーションが発生している場合、キャビテーション音によってかき消され易い。従って、喫水が深くキャビテーションが発生しにくい条件下で、船尾から聞こえてくる周期的な金属音は、プロペラ鳴音と考えてよい。

一般に、プロペラ鳴音は、プロペラ性能にほとんど影響を与えず、むしろキャビテーションが発生していないことを示すもので、“Noise”ではなく“Singing”

と呼ばれるのもこうした背景によるものである。このため、護衛艦・漁船・客船などの特殊な船舶のプロペラを除いては、特に取り除く必要はないと言われる。しかし、船室にまで響く鳴音は、居住性を低下させる一因となるため除去する必要がある。

鳴音の発生原因は、翼の後縁から剥離し流れ出た水流にカルマン渦列 (Karman vortex street) ができ、このカルマン渦列の周波数と翼の固有振動数とが一致するためとされる。従って、いつも一定のプロペラ回転数で鳴音が発生する。従来の鳴音は、プロペラの $0.55R \sim 0.6R$ (注: $1.0R$ が翼の先端を示す) の翼後縁から生じるカルマン渦の発生周期と、翼の固有振動周期の同調による共振現象と見なされ、この対策として、この部分の翼後縁の補正加工により鳴音をほぼ打ち消すことができた。ところが、最近の鳴音は必ずしも

平成8年10月28日受理

*機械システム工学科 (Department of Mechanical Systems Engineering)

** (株) 大島造船所 (Oshima Shipbuilding CO., LTD)

***三菱重工業 (株) (Mitsubishi Heavy Industries, LTD)

****大学院修士課程機械システム学専攻 (Graduate Student, Department of Mechanical Systems Engineering)

上記の翼後縁位置での発生ではなく、従来の後縁補正加工では消音できない例が多くなってきている。

本研究では実際の大型船舶で発生した数例のプロペラ鳴音をFFTで解析し、最近の鳴音の特徴とその防止法について検討した。また、防止法の一つである耐鳴音設計法を実船に適用し、鳴音を打ち消す研究成果を得たので報告する。

2. 鳴音の一般的な特徴

図1に示すようにプロペラ鳴音は翼後縁から出るカルマン渦の発生周波数と羽根の固有振動数の一致による共振現象である。その一般的な特徴は、次のようになる。

- (1) プロペラ回転数に対応した異音で、金属音に近い音であるため軸受接触音と混同し易い。
- (2) プロペラ回転数に対応したうなり音が発生する場合が多い。翼間の仕上げ形状にばらつきがあると、うなりが発生すると言われる。²⁾
- (3) 舵機室等での音が最も大きくで、ひどい時はデッキ上でも聞こえる。
- (4) Ballast Load では発生しにくく、Full Loadで発生し易い。Ballast Loadでは翼後進面側にキャビテーションが発生し、このため翼後縁からのカルマン渦の発生が抑制される。また、鳴音がキャビテーション音にかき消される。
- (5) 舵を取ると異音が消滅する場合がある。

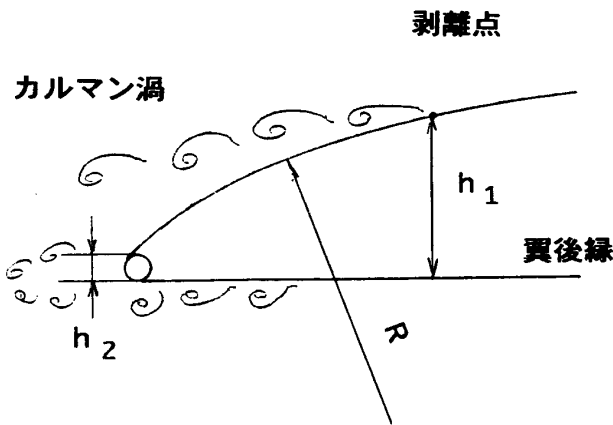


図1 プロペラ翼後縁のカルマン渦

従って、軸受接触音との混同を避けるには、上記の(4)および(5)に注目する必要がある。カルマン渦の周波数 f の推定式は(1)式で示されるが、これをプロペラに適用すると、渦の剥離点が翼断面上の2点と考えられるため翼厚 h_1 部から剥離する渦の周波数 f_1 (2)式と後縁端 h_2 から剥離する渦の周波数 f_2 (3)式に分けられる。

$$f = S_n \frac{U}{h} \quad (1)$$

$$f_1 = S_n \frac{\sqrt{V_a^2 + 2\pi nr^2}}{h_1} \quad (2)$$

$$f_2 = S_n \frac{\sqrt{V_a^2 + 2\pi nr^2}}{h_2} \quad (3)$$

ここで、

S_n : Strouhal 数

h : 流体中の物体の厚さ

U : 流入速度

V_a : プロペラ前進速度

n : プロペラ回転数

r : 翼の任意半径

h_1, h_2 : 翼の後縁部の厚さ (図1)

一方、カルマン渦と共振する側の翼の固有振動数の推定については、Bakerの横振動一次 f_b の概算式(4)式があるが、ハンマリング法による実測値との間にまだ開きがある。最近ではFEMによる翼の固有振動数の解析が進歩してきたが、プロペラが水中にあるため空気中に比べ f_b が10~20%低下するなど推定精度に問題が残る。³⁾

$$f_b = \frac{kh_0}{r^2} \sqrt{\frac{EI}{A}} \quad (4)$$

ここで、

k : 曲げ一次振動数の係数

h_0 : 翼の先端厚さ

E : ヤング率

I : 断面2次モーメント

A : 翼断面積

3. 従来の鳴音防止法

プロペラ鳴音の原因、即ちカルマン渦と翼の共振現象は、従来、翼の0.55Rないし0.6Rにおいて生じる例が多いとされる。この問題解決の先駆的役割を果たした鬼頭⁴⁾は、(2)式および(3)式を流用して後縁の厚さを次式のように限定した。

$$h_1 \geq 0.002\pi \frac{N_1 D}{f_1} \quad (5)$$

$$h_2 \leq 0.002\pi \frac{N_2 D}{f_2} \quad (6)$$

ここで、

h_1 : 図1の0.55R~0.6Rにおける翼後縁厚さ (cm)

h_2 : 図1の0.55R~0.6Rにおける翼後縁端厚さ (cm)

N_1 : プロペラの最大回転数 (rpm)

N_2 : プロペラの最微速回転数 (rpm)

D : プロペラ直径 (cm)

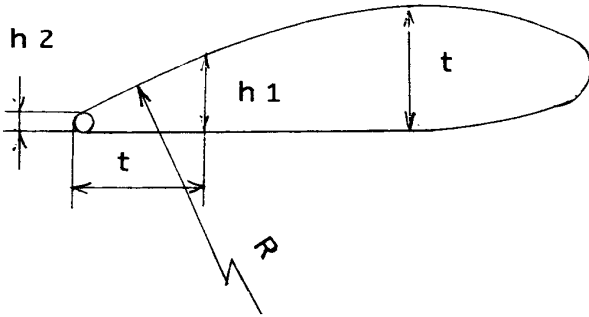


図2 鬼頭による鳴音防止法

f_1 : 翼の最小固有振動数 (Hz)

f_2 : 騒音と感知しない最大周波数 (Hz)

また、図2中のRは、翼厚が h_1 と h_2 との間を、それより前縁側の背面の形状とスムーズに接するよう選ばれる。しかし、実際は h_1 の厚さを大きくできないことが多く、 h_2 だけを採用しながら翼後縁の圧力面と背面の形状をできるだけ非対称にするといった工夫が折り込まれている。この鬼頭の方法は、これまでかなりの成果をあげている。実際のプロペラ後縁部の設計においては、発生させたくないカルマン渦の周波数範囲、すなわち、 f_1 から f_2 の範囲を人間の可聴域外とすることで、鳴音発生の実害をなくすよう配慮している。なお、可聴域としては、300から1000Hzの範囲を考慮している。

図3には後縁部形状とカルマン渦強さの関係を示すが、鳴音防止のために very weak の形状を採用している。その他の鳴音防止法として、翼後縁の後進面側にハの字形の溝を加工したり、 $\phi 10 \times 10H$ 程度の円柱を千鳥状に溶接して、カルマン渦の規則的な発生を乱す工夫が実施され効果をあげている。

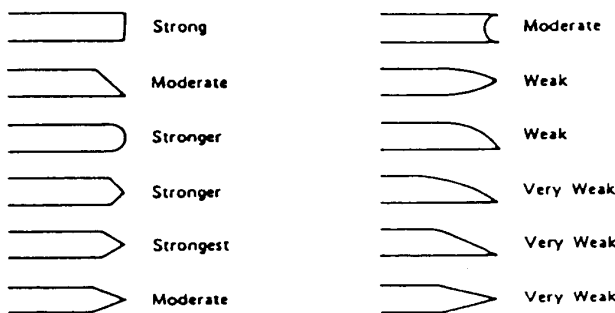


図3 翼後縁部形状とカルマン渦強さの関係

4. 最近の鳴音の特徴とその防止法

最近のプロペラにおける鳴音の特徴としては、次のような点が挙げられる。

(1) スキュードプロペラ⁵⁾などに用いられてる新しい翼断面(例; NACA 翼型)の採用により、プロ

ペラのキャビテーション性能が著しく改善され、これまでの翼先端部におけるキャビテーションが深い喫水では特に発生しなくなった。このため、翼先端部においてもカルマン渦の規則的な発生を乱す要因がなくなった。

(2) 高効率化を目指した最近の低回転大直径プロペラにおいては、(1)式および(2)式中の“N・D”の値は従来とほとんど変わらないが、後縁端厚さ h_2 が直径に比例して増加する傾向にあるため、後縁端から発生するカルマン渦の周波数 f_2 が下がってくる傾向にある。(図4)

(3) プロペラの低回転大直径化により、展開面積比が減少することで翼断面が比較的厚くなり、このため後縁厚さ h_1 のポイントにおいてカルマン渦の発生点を固定できず、後縁端までのいずれかの厚さの点に対応するカルマン渦が発生することになる。このため、下側の可聴域に対するカルマン渦周波数 f_1 が上昇する傾向にある。(図4)

図5には、最近発生した鳴音の例を示すが、これから次のこと分かる。

(1) 最近の鳴音は、鬼頭の言う“0.55Rないし0.6Rにおける h_1 または h_2 に対応する周波数”だけとは言いがたい。 f_2 で0.4R付近からのカルマン渦との共振も考えられる。

(2) 渦の剥離点が h_1 から h_2 の間にも存在する。

従って、その鳴音防止法としては図6に示すように次のことが考えられる。

- (1) ナックルポイントにおける剥離角度(翼背面と傾斜面の角度)を従来よりも大きくとって、 E_1 点で確実に流れを剥離させる。
- (2) 後縁端の丸みを小さくする。

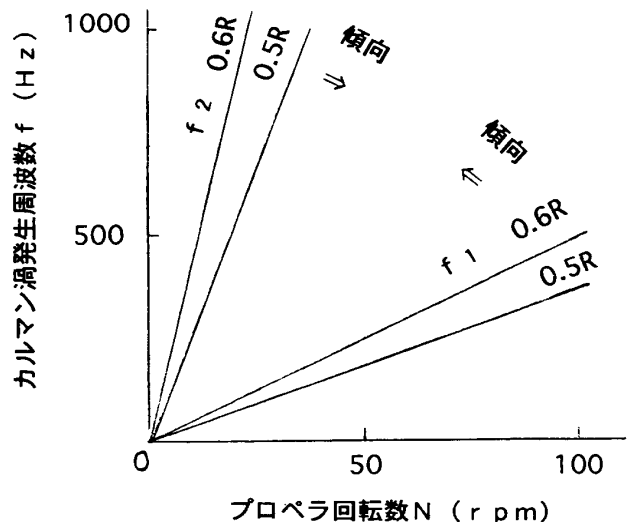


図4 最近のカルマン渦発生周波数の傾向

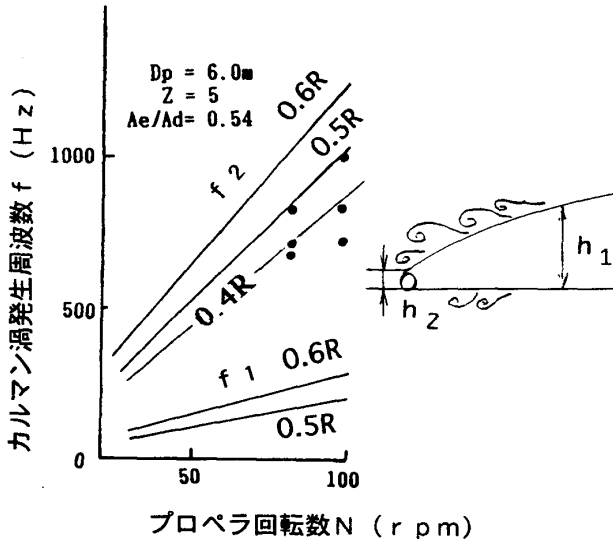


図5 最近発生したプロペラ鳴音の例

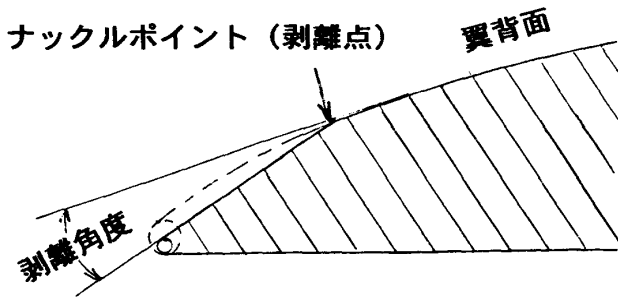


図6 ナックルポイントでの流れの剥離固定法

(3) ナックルポイントから後縁端までは、直線的にスムーズに仕上げる。

5. 鳴音防止法の実船適用例

最近、73000ton Bulk Carrier の同型船 3 隻に鳴音が発生した。プロペラ等の主要目を表 1 に示す。この鳴音は、喫水が浅い海上試運転時には検出されなかったが、Full Load での航行時にエンジンルームで金属音のノイズとなって現われた。図 7 には、FFT 解析による鳴音の周波数とプロペラ回転数の関係を示す。この図より鳴音防止対策前には(1)鳴音が主機の NOR 回転数に近い73~78rpm で発生していること、(2)高周波数域は0.3R~0.35R の翼後縁端から剥離するカルマン渦の発生周波数に一致、(3)低周波数域は0.7R~0.95R の後縁 R 起点のカルマン渦の発生周波数に一致することが認められる。

この防止法として下記の対策を実施した。

- (1) 現状10°程度のナックルポイントの剥離角度を大きくする。
- (2) 後縁端の丸みに相当する h_2 を1.5から1.0mm へ

小さくする。

(3) ナックルポイントから後縁端まで翼縁ゲージで精査しながらスムーズなストレート仕上げとする。

上記(1),(2),(3)を後縁側0.4R~0.95R まで適用した結果、図 7 の対策後に示すように共振点がずれて鳴音は完全に消滅した。

表1 プロペラ等主要目

プロペラ直径	7200mm
プロペラ翼数	5 翼
プロペラ没水深度 (Full Load)	9.72m
プロペラ没水深度 (Ballast Load)	4.25m
主機 MCR 回転数	81rpm

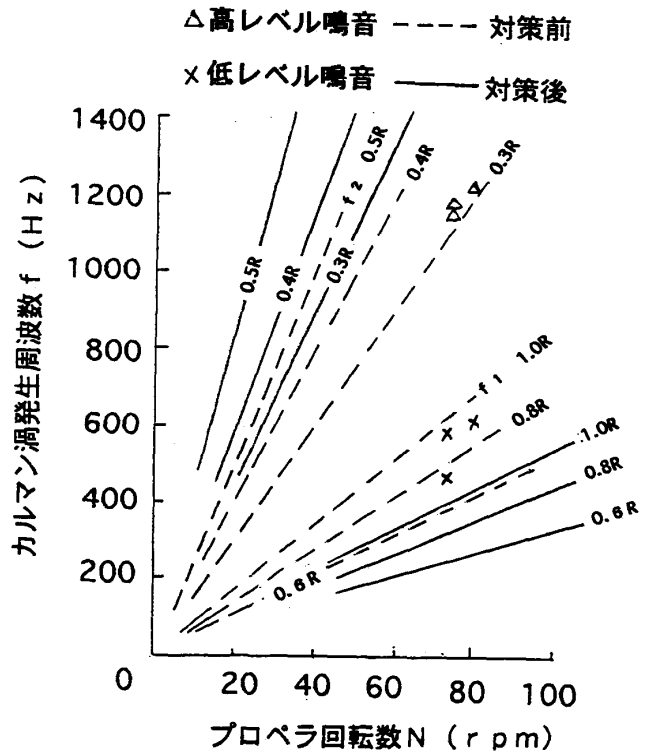


図7 73kton バルクキャリアの鳴音周波数

6. まとめ

筆者等は鳴音に対する経験から「その防止法はむずかしい。」とする実感をもっている。実際に1~2回の翼後縁加工で鳴音が消えず3回目の対策により消音した例もある。本報告では、最近のプロペラ鳴音とその防止法について述べてきたが、防止法のポイントは翼後縁端 (h_2) を極力小さくして、 h_1 から h_2 まで鋭く直線的に加工し、流れを h_1 部で確実に剥離させて、発生するカルマン渦を低周波数域に抑え込むことである。最近の新たなプロペラ鳴音の問題は、推進効率の

向上を目指した翼型の改善や低回転大直径化に起因するところが大きい。従って、鳴音を2次的な問題として捉えず、水中における翼の固有振動数の推定精度向上も含めて問題解決に取り組むことが重要であると考ええる。

参 考 文 献

- 1) H.E.Sanders, SNAME Vol.2 (1957), 140
- 2) 鬼頭, 日本造船学会誌, Vol.582 (1977), 1
- 3) 川添, 錦戸, 長崎大学工学部研究報告, 27-48 (1997), 37
- 4) 鬼頭, 日本船用機関学会誌, 9-8 (1974), 1
- 5) T.Sasajima, T.Kawazoe, Technical Review of MHI, 25-3 (1988), 1