

## キャビテーション騒音の研究(第2報)

### —音紋図を用いたプロペラキャビテーション騒音データの解析法について—

荒井 能\*・高橋 肇\*\*

#### An Investigation of Cavitation Noise (2nd Report)

#### — Analysis of Cavitation Noise Data using Time History of Noise Spectra —

By

Chikara ARAI and Hajime TAKAHASHI

#### Abstract

This paper deals with data analysis of cavitation noise emitted from a marine propeller using Time History of Noise Spectra. Time History of Noise Spectra consists of the spectra of the blade frequency and its harmonic spectra of a propeller printed on a paper using fount developed by the authors. Describability of Time History of Noise Spectra was tested in using data of a model propeller working in a non-uniform flow in the cavitation tunnel and invaluable data recorded in the experiments on the actual and model ships. The authors conclude that Time History of Cavitation Noise Spectra patterns depend on the characteristics of the blade frequency noise of an individual propeller and that, at least, the method may be used to estimate cavitation conditions of a propeller after many actual and model ship experiments and capture the relationship between the blade frequency noise and its spectra.

#### 目 次

1. 緒 言	1
2. 前方式との比較	2
3. 使用機器及び手法	2
4. 使用プロペラ及び実験状態	2
5. 音 紋 図	2
6. 考 察	6
7. 結 論	14
8. 謝 辞	15
記号表	15
参考文献	15

APPENDIX スペクトル強度の表現方法について	16
A1. フォント作成プログラム	16
A2. フォント出力用機械語プログラム及び読み込みルーチン	16
A3. 出力用プログラム	17

#### 1. 緒 言

船用プロペラの翼面上に発生するキャビテーションによる弊害として、最初には軍艦における推力低下問題が挙げられた(英国駆逐艦 Daring 号, 1894年)。その後、翼面上のエロージョン問題が重要となってきたが、1968年頃からは船尾不均一流中で発生する非定常キャビテーションによる船尾振動問題<sup>1)</sup>に研究の対象が移ってきた。

\* 推進性能部

\*\* 東京商船大学

キャビテーション騒音に関しては、特に漁船の場合にはその影響の重要性が早くから指摘されている<sup>2)</sup>。

最近では、漁業調査をも含めて海洋調査・開発に携わる船舶などで水中音響機器を使用する例が多くなり、キャビテーション騒音に関連する研究が発表されるようになってきた<sup>3),4),5),6)</sup>。また、21世紀に向けてのレジャー客船<sup>7)</sup>とも関連して居住性の高い船舶開発の必要性が増大し、ひいてはキャビテーション騒音を抑制した船舶の開発が望まれている。

第1報<sup>8)</sup>では、極超音波領域のキャビテーション騒音を採取して、キャビテーション発生状況を検出する方法が報告された。本報告では可聴周波数領域のプロペラ翼周波数の騒音を対象とし、音紋図を作成してキャビテーションの状態を推定する方法を試みた。

## 2. 前方式との比較

前方式では、キャビテーションの崩壊現象だけに注目して、個々のキャビティが崩壊する際に生ずる騒音のみを純粋に検出することを目標としたため、極超音波領域を取り扱った。また、使用した計測機も発展途上の機器が多かったため、性能を維持することが困難であった。

不均一流中のプロペラのキャビテーション騒音は、キャビティの崩壊に起因する騒音と、キャビテーションの容積の変動に起因する翼周波数（プロペラの回転数とプロペラの翼数の積、Blade Frequency）の騒音に、大別することができる<sup>9)</sup>。しかし、前方式では前者のみに着目して追求したために、クラウド・キャビテーションのようなキャビティが一時的に大量に崩壊した時に発生する騒音の検出以外には、特に顕著な現象を把握することができなかった。

その後、可聴周波数領域のプロペラの翼周波数の騒音に着目した。翼周波数の騒音は、キャビテーションの発生状況によって、一次成分の他その高次成分が変化することは周知の事実<sup>10)</sup>である。これを最近急速に発達してきたパーソナル・コンピュータを利用して、声紋分析のように図形化することは可能である。

以上の理由から、音紋図を用いてキャビテーションの発生状況を推定する方法が考えられる。前回の方法は、キャビテーションの崩壊現象をマイクロに捕えて、キャビティが消滅する際に発生する圧力波形の立ち上がり振幅の波高頻度分布を求めた。これに対して今回の方法は、キャビテーション騒音をマクロに見て翼

周波数の高次成分の増減と関連すると仮定しようとするので、キャビテーション騒音の発生要因からも取り扱う周波数帯からも、手法として全く異なっている。

## 3. 使用機器及び手法

水中騒音の電気信号への変換と初段増幅は、B&K社製の8103型ハイドロフォン及び2635型チャージ式初段増幅器を使用した。A-D変換器はNCC社製のMark-1b型、計算機、周辺装置及び出力機器にはNEC社製PC-9801F2型及び付属装置を使用した。

音紋図は、M. P. No. 229に関してはハイドロフォンの出力を初段増幅器を通して直接解析し、又青雲丸のデータに関しては既にデータ記録器に記録されているものを再生して解析した。アナログ信号は、A-D変換器でデジタル化し、フロッピー・ディスクまたはハード・ディスクに記録し、この信号をFFT計算し、スペクトル線図を独自の符号に変換して、ライン・プリンターに出力した。使用したプログラムで用いた手法は、APPENDIXに示した。

## 4. 使用プロペラ及び実験状態

今回、音紋図は、M. P. No. 229<sup>11)</sup>と、SR-183研究会で行われた青雲丸の実船試験<sup>12)</sup>及び船研の経常研究として行われた青雲丸の模型試験に対して得られた。実船試験に関しては、当時採取された諸記録が使用された。模型試験のデータは同時期に計測された未公表データを使用した。M. P. No. 229を用いての実験は、キャビテーション水槽の第一計測部のウェーク・メッシュによる2次元の不均一流中で行われた。実船対応模型実験<sup>13)</sup>は、M. P. No. 218（普通型プロペラ）及び220（ハイ・スキュー型プロペラ）を用い、キャビテーション水槽の第二計測部で模型船（M. S. No. 336）の後流中で行われた。これらのプロペラの主要目をTable-1に、模型プロペラの実験状態をTable-2に示す。

## 5. 音 紋 図

音紋図（Figs. 1~24）の横軸は、周波数を翼周波数で無次元化した値で表現した。縦軸は、上から下に時間の推移を表現しており、プロペラの1回転の間のデータのサンプル数を256点とし、プロペラが2回転す

Table-1 Principal Dimensions of Propellers

M. P. No. or etc.	229	218	220	Ship-S CP	Ship-SHSP
Diameter ( m )	.2660	.22095	.2200	3.6	3.6
Pitch Ratio	.830	.950	.944	.950	
Boss Ratio	.140	.1972	.1972		
Exp. Area Ratio	.415	.650	.700	.650	.700
Max Blade Width Ratio	.2975	.2465			
Mean Blade Width Ratio	.2527	.2945	.2730		
Blade Thickness Ratio	.0450	.0442	.04961	.0442	
Angle of Rake (deg.)	5	6	-3.03	6	
Number of Blades	3	5	5	5	5
Blade Section	MAU	MAU	SRI-B	MAU	SRI-B
Skew Angle (deg.)	5.9	10.5	45	10.5	45

Abbreviation Ship-S : Seibun maru  
 CP : Conventional Propeller  
 HSP : Highly Skewed Propeller

る間のサンプル数計 512 点のスペクトル線図を 1 本の横軸の線に記号化して表現し、スペクトル線 62 本計 124 回転分のスペクトルを 1 枚の音紋図で表現した。音紋図の記号間のスペクトルの強度差は 2 dB で、全

体で 60 dB (1000 倍) のスペクトルの強度差を表すことができる。以下に採取した各音紋図についての説明を行う。なお、各音紋図の表題の末尾には、翼周波数の値を記入した。

音紋図では、翼周波数或いはその高次成分のスペクトルが全サンプル期間を通して大きいと、横軸の算用数字の下の太い目盛りの下方に、縦に鮮明な筋が表れる。その他の所に表れている筋は実験中に混入した雑音の影響と考えて一応除外して考えた方がよいであろう(例えば、交流電源雑音)。但し、翼周波数及びその高次成分を表すスペクトルと 1 目盛り離れて隣接して存在するスペクトル(側波帯のスペクトル)は、翼周波数またはその高次成分がプロペラの回転による変調を受けて出現したものと考えられる。

実船の音紋図では、翼周波数の高次成分を表す縦の筋はあまり明確ではなくや、前後に広がっている。

Fig. 19 と Fig. 22 の横軸に平行な濃いスペクトルは、この箇所をサンプリング中にスイッチの閉閉音が混入したため、これも考慮外とした方がよいであろう。

M. P. No. 229 の音紋図を Figs. 1~6 に示す。このプロペラでは、プロペラの周囲の圧力を変化してキャピテーションの発生状況を変化させながら計測を行った。ハイドロフォンは、プロペラの直上より上流に向

Table-2 Experimental Conditions of Model Propellers

No. of Model Propeller	Rev. Sec <sup>-1</sup>	K <sub>T</sub>	Ambient Pressure	$\sigma_n$	Wake Generation	Fig. No.	Photo No. or Remarks
229	14.99	0.145	813 mm Hg	12	Mesh	1	1,6
	15.00	0.145	510 mm Hg	8.22	Mesh	2	
	14.99	0.145	480 mm Hg	7.72	Mesh	3	2,7
	14.99	0.145	300 mm Hg	4.70	Mesh	4	3,8
	15.00	0.145	193 mm Hg	2.92	Mesh	5	4,9
	14.99	0.145	153 mm Hg	1.95	Mesh	6	5,10
218	16.80	0.200	252 mm Hg	3.66	Model Ship	7	c/o Actual Ship 149 r. p. m.
	17.15	0.207	228 mm Hg	3.06	Model Ship	8	c/o Actual Ship 163 r. p. m.
	17.95	0.219	227 mm Hg	2.78	Model Ship	9	c/o Actual Ship 171 r. p. m.
220	17.30	0.195	261 mm Hg	3.57	Model Ship	10	c/o Actual Ship 149 r. p. m.
	17.80	0.201	238 mm Hg	2.99	Model Ship	11	c/o Actual Ship 163 r. p. m.
	18.50	0.212	234 mm Hg	2.71	Model Ship	12	c/o Actual Ship 171 r. p. m.

かって右 45°の方向でプロペラの先端よりマイクロフォンの中心までの距離が 192 mm の位置に固定した。なお、計測を行った周波数帯は高々 20 Hz~1kHz であるから、マイクロフォンの周波数特性や指向特性の影響は軽微であると考えて考慮しなかった。

Fig. 1 はキャビテーションが全く発生していない場合の音紋図である。横軸の目盛り 1 の所に縦に通っている筋は、プロペラの翼周波数の基本波のスペクトルを表している。また、横軸の目盛りが 7~9 の近傍はその周囲に比較すると濃度が高いが、キャビテーション水槽の音響特性の実測によると、これはキャビテーション水槽の音響特性に起因するこの周波数帯の背景雑音の増幅によるものと考えられる。この、Fig. 1 の状態を Photo 1 及び 6 に示す。写真の前半番号は、キャビテーションが最も発達する状態の位置、後半番号(グラビア写真)はキャビテーションが消滅する位置の写真である。

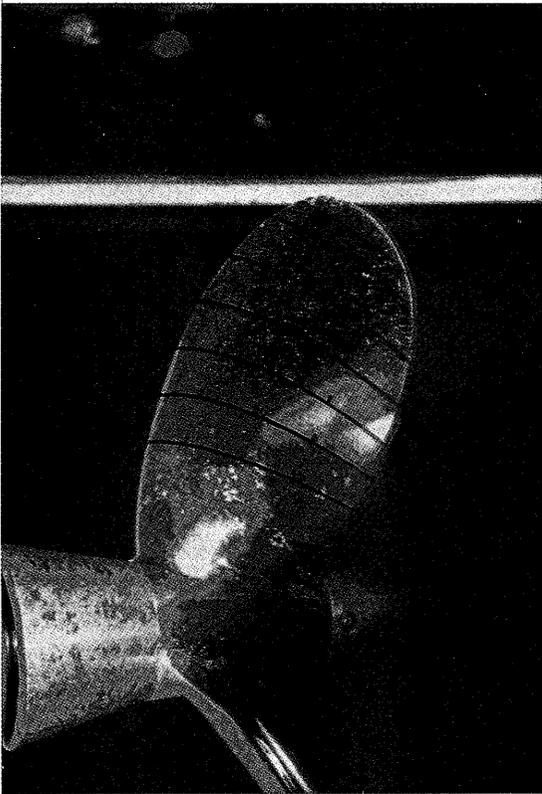


Photo 1 M. P. No. 229 in Non-cavitating Condition ( $\sigma_n = 12, \Theta = 0^\circ$ )

Fig. 2 は、チップ・ボルテックス・キャビテーションが発生しかかっている状態の音紋図、Fig. 3 は、チップ・ボルテックス・キャビテーションが完全に成生した状態の音紋図である。Fig. 3 は、Fig. 2 と比較して、翼周波数の第 2 次成分のスペクトルを表す筋が鮮明に表れてきているが、Fig. 2 と Fig. 3 の計測時のプロペラ周辺の圧力差は約 6% に過ぎない。この、Fig. 3 の状態を Photo 2 及び 7 に示す。

Fig. 4 はシート・キャビテーションが発生している状態の音紋図で、Fig. 3 と比較して基本波及び第 2 次

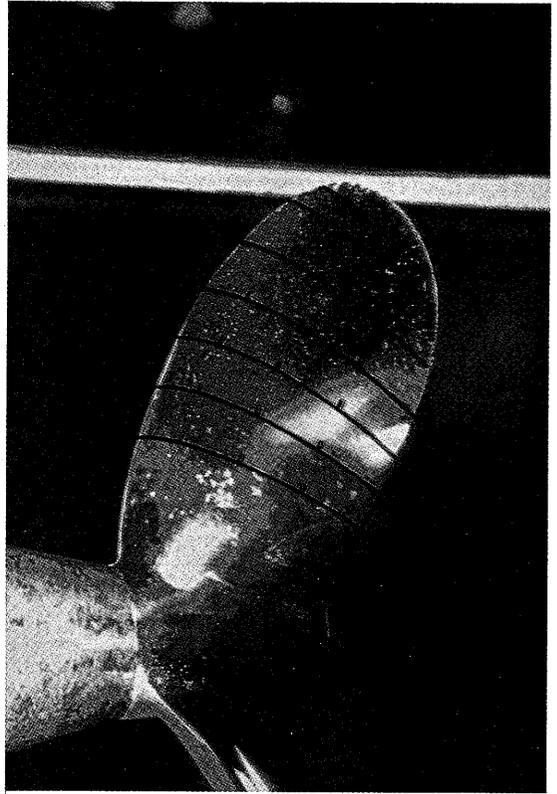


Photo 2 M. P. No. 229 in Tip-vortex Cavitation Condition ( $\sigma_n = 7.72, \Theta = 0^\circ$ )

成分のスペクトルが増強され、第 3 次成分及び第 8 次成分がやや目立つ程度にしか変化していないが、視覚的なキャビテーション状況は、大きく変化している。この、Fig. 4 の状態を Photo 3 及び 8 に示す。

Fig. 5 はクラウド・キャビテーションが発生し始めた状態の音紋図、Fig. 6 はクラウド・キャビテーショ

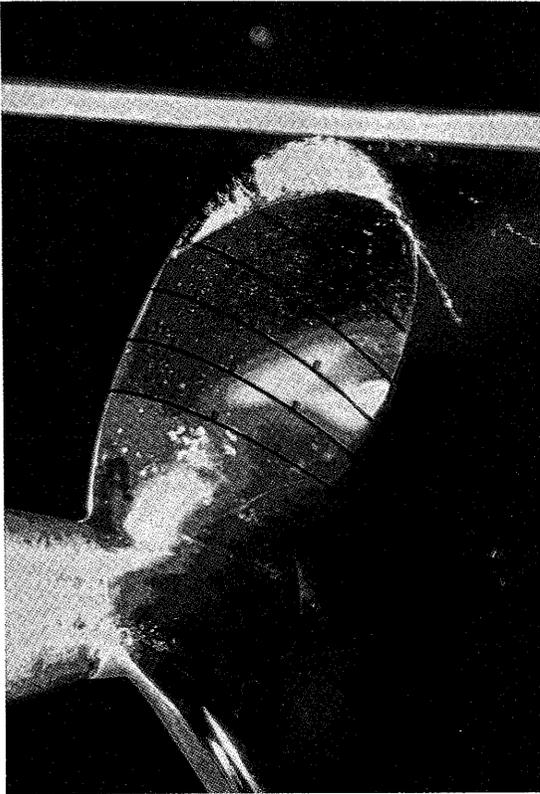


Photo 3 M. P. No. 229 in Sheet Cavitation Condition ( $\sigma_n = 4.7, \Theta = 0^\circ$ )

ンが激しく発生している状態の音紋図である。

両者共翼周波数基本波とその第2～5次成分及び第8～11次成分のスペクトルが鮮明に表れている。

なお、両図の基本波のスペクトルは図示されている記号(Fig.A参照)の値より大きい、これ以上の値を図示することは不可能なので図上で飽和していると見なして最も大きいスペクトルを表わす記号で代用した(音紋図の最大値と最小値の比を変更すれば全ての振幅を正確に表現することも可能であるが、その代わりFig. 2と3の変化の様子が減殺される)。

Fig. 6では、Fig. 5でや、不鮮明であった基本波の第6～7次成分が鮮明に表れ、同様にFig. 5でも存在はしているが不鮮明な、翼周波数の5次及び9次の下側波帯のスペクトル、9次、10次及び11次の上側波帯のスペクトルがや、鮮明になっているが、Fig. 5で鮮明な基本波の第12次成分以上はFig. 6では不鮮明になっている。Fig. 5の状態をPhoto 4及び9に、Fig.

6の状態をPhoto 5及び10に示す。

つぎに、SR-183研究部会で行われた実船試験と、経常研究で行われた模型試験との、音紋図上の比較につ

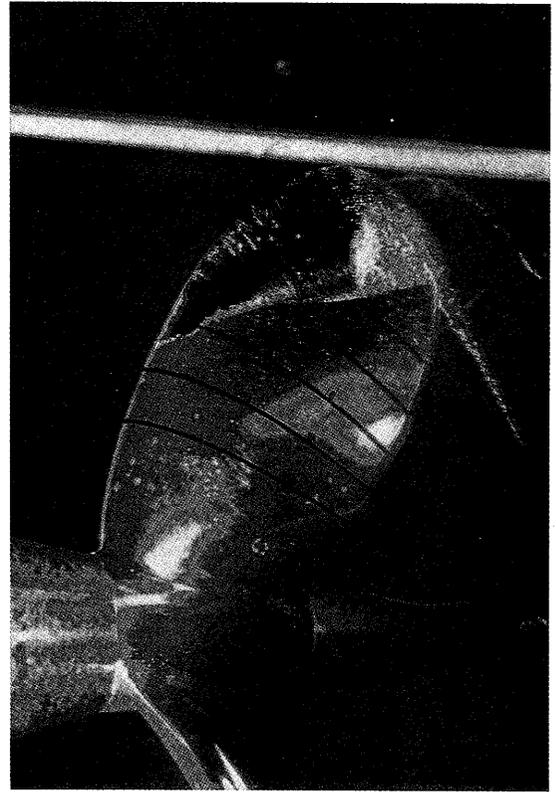


Photo 4 M. P. No. 229 in Cloud Cavitation Condition I ( $\sigma_n = 2.92, \Theta = 0^\circ$ )

いて述べる。

Figs. 7～9はキャビテーション水槽第2計測部で普通型のプロペラ(M. P. No. 218)を模型船(M. S. No. 366)の後流中で作動させた場合の音紋図、Figs. 10～12は同一水槽でハイ・スキュー型プロペラ(M. P. No. 220)を同一模型船の後流中で作動させた場合の音紋図である。また、Figs. 13～15は、SR-183研究部会で行われた実船試験で採取した普通型プロペラの音紋図、Figs. 16～18は同一実船にハイ・スキュー型プロペラを装着して採取した音紋図である。Figs. 7～12の実験状態は、それぞれが実船のプロペラの回転数が149 r. p. m., 163r. p. m.及び171 r. p. m.に対応している。実験状態の細目は、Table-2に示されている。ここでは

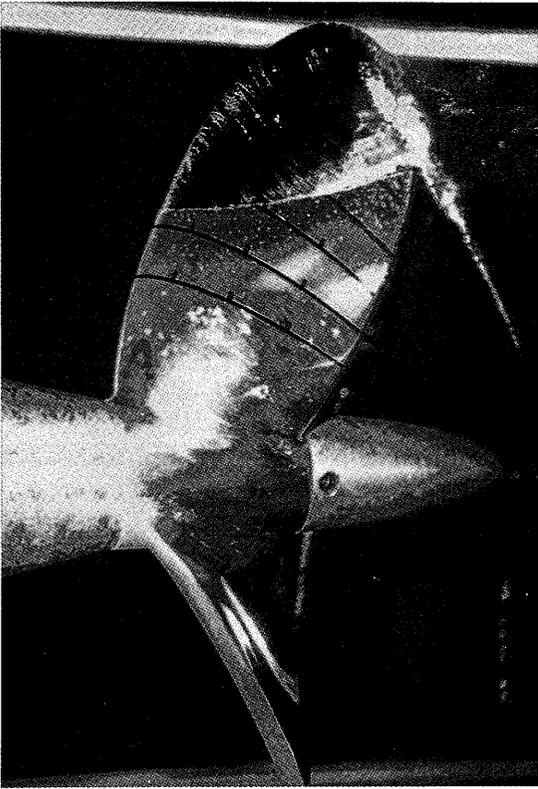


Photo 5 M. P. No. 229 in Cloud Cavitation Condition II ( $\sigma_n = 1.95, \Theta = 0^\circ$ )

主として音紋図の所見についてのみ述べる（キャビテーションの発生状況その他に関しては文献(12)および(13)を参照されたい）。Figs. 7~9 と Figs. 13~15 を比較すると、Figs. 7~9 では翼周波数の基本波のスペクトルから第 6~7 次成分までが比較的鮮明に表れているが、Figs. 13~15 では鮮明に判別できるのは翼周波数の基本波及びその第 5 次成分のスペクトルまでで、特に高次成分のスペクトルの幅が広がっており、計測中に回転の変動があったことを示している。しかし、仔細に Figs. 7~9 及び Figs. 13~15 を見ると、回転数の増加により両者共翼周波数の基本波のスペクトルは増加しており、Figs. 7~9 では第 8 次成分、Figs. 13~15 では第 7 次成分の部分的な増加が見られる。

Figs. 10~12 と Figs. 16~18 の比較では、Fig. 10 を除いて Figs. 11~12 は翼周波数の基本波及び高次成分のスペクトルが第 6 次或いは第 8 次成分まで比較的明瞭に判別でき、しかも回転数が高くなるに従って次第

に高次成分が増強しているのに対し、Figs. 16~18 で明瞭に識別できる翼周波数の高次成分は第 2 次或いは第 3 次程度に留まっている。しかし、Figs. 16~18 の計測中の回転変動及びプロペラ付近に騒音を遮蔽する効果がある気泡が流れていたこと（これは、騒音計測と同時に撮影した V. T. R. によって明らかである）等の理由を勘案して減殺すると、回転数が高くなるにつれて次第に翼周波数の基本及び高次成分のスペクトルが増強しつゝあることが辛うじて読み取れる。また、Figs. 7~9 と Figs. 10~12 及び Figs. 13~15 と Figs. 16~18 の普通型プロペラとハイ・スキュー型プロペラの比較では、模型実験及び実船試験の両者とも普通型プロペラのスペクトルの方がハイ・スキュー形プロペラのそれを上回っていることが図上から読み取れる。

Figs. 19 と 21 及び Figs. 20 と 22 は普通型及びハイ・スキュー型プロペラのキャビテーションが発生していない状態（70 r. p. m. 及び 88 r. p. m.）の音紋図とチップ・ボルテックス・キャビテーションが完全に発生したと考えられる場合（100 r. p. m. 及び 107 r. p. m.）の音紋図である。キャビテーションが発生していない状態では、プロペラの翼周波数のスペクトルを示す筋のみが顕著であるが、キャビテーションが発生した状態では模型プロペラ（MP. No. 229）の場合ほど明瞭ではないがそれでも検知できる程度に翼周波数の第 2 次（及び第 3 次）成分が発生している。なお、この状態の模型試験の結果の録音テープによる音紋図は、水素気泡発生装置を使用していたために、翼周波数の高次成分が多かったので、割愛した。

## 6. 考 察

Figs. 1~6 の計測を行ったときのプロペラの作動状態は、プロペラ周辺の圧力を変化させたのみで他の諸条件は変化していないので、Fig. 2 で不鮮明であった翼周波数の第 2 次成分が Fig. 3 で鮮明に表れているのは、明らかにチップ・ボルテックス・キャビテーションが発生した影響によるものと考えてよいであろう。

Fig. 3 と Fig. 4 の間には、視覚的なキャビテーションの変化に対応する音紋図の変化が見られない理由は、チップ・ボルテックス・キャビテーションがシート・キャビテーションと共存しているため、チップ・ボルテックス・キャビテーションの影響の方が強く

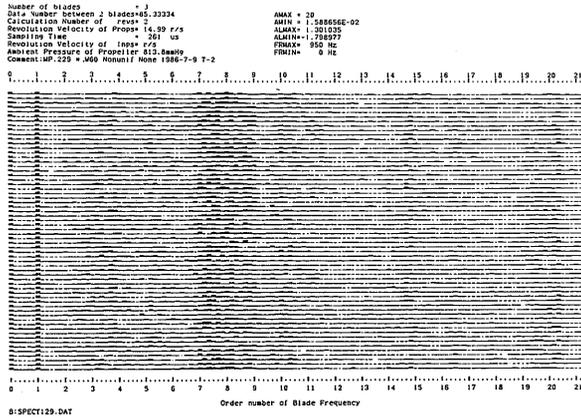


Fig. 1 Time History of Noise Spectra of M. P. No. 229 in the Non-cavitating Condition,  $\sigma_n=12$ , Blade Frequency ( B. F. ) = 45 Hz

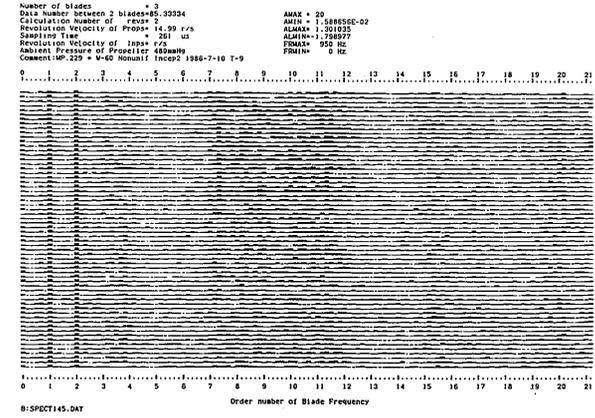


Fig. 3 Time History of Noise Spectra of M. P. No. 229 in the Tip vortex Cavitation Condition,  $\sigma_n=7.72$ , B.F. = 45 Hz

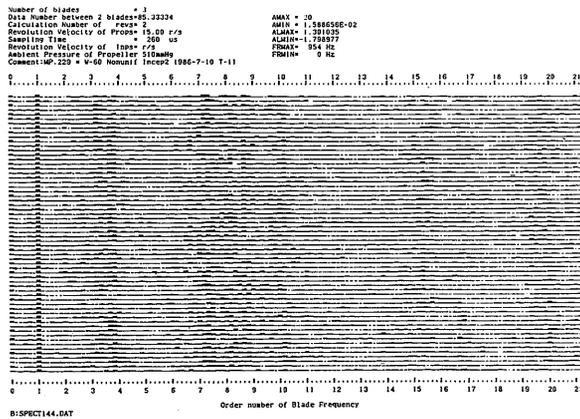


Fig. 2 Time History of Noise Spectra of M. P. No. 229 in the Pre-cavitating Condition,  $\sigma_n=8.22$ , B. F. = 45 Hz

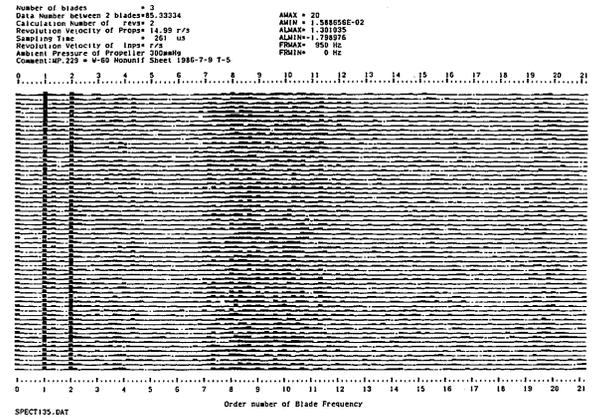


Fig. 4 Time History of Noise Spectra of M. P. No. 229 in the Sheet Cavitation Condition,  $\sigma_n=4.7$ , B. F. = 45 Hz

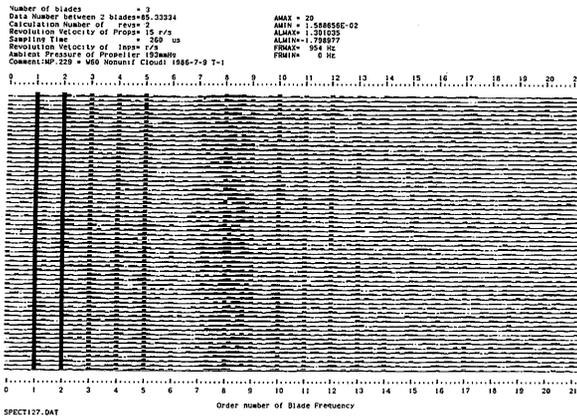


Fig. 5 Time History of Noise Spectra of M. P. No. 229 in the Cloud Cavitation Condition I,  $\sigma_n = 2.92$ , B. F. = 45 Hz

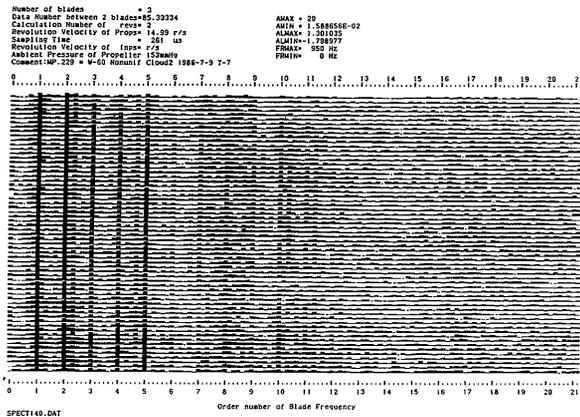


Fig. 6 Time History of Noise Spectra of M. P. No. 229 in the Cloud Cavitation Condition II,  $\sigma_n = 1.95$ , B. F. = 45 Hz

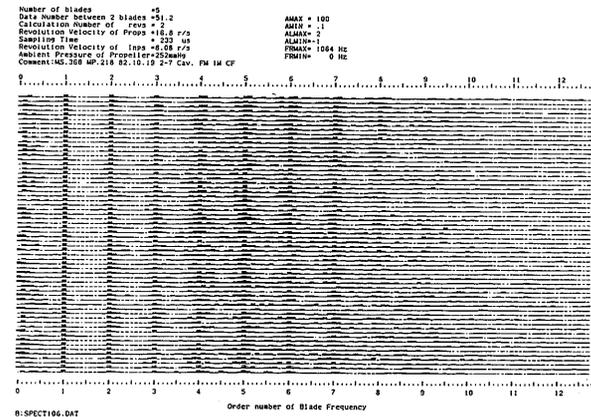


Fig. 7 Time History of Noise Spectra of M. P. No. 218 in the Condition Equivalent to 149 r. p. m. of Actual Ship-S, B. F. = 84 Hz

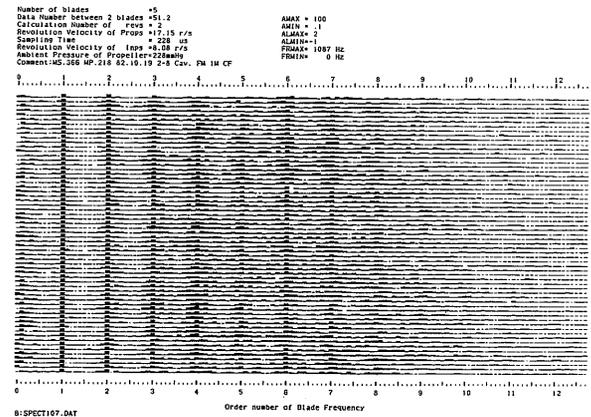


Fig. 8 Time History of Noise Spectra of M. P. No. 218 in the Condition Equivalent to 163 r. p. m. of Actual Ship-S, B. F. = 85.75 Hz

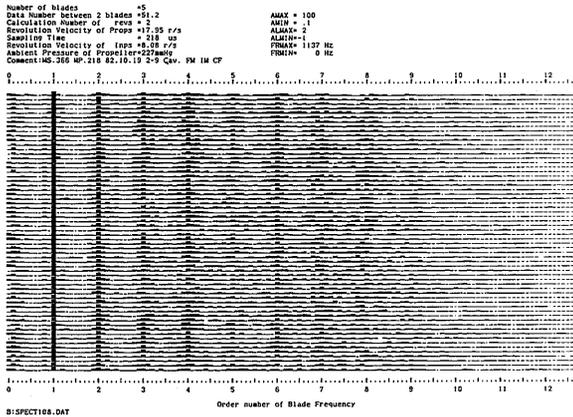


Fig. 9 Time History of Noise Spectra of M. P. No. 218 in the Condition Equivalent to 171 r. p. m. of Actual Ship-S, B. F. = 89. 75 Hz

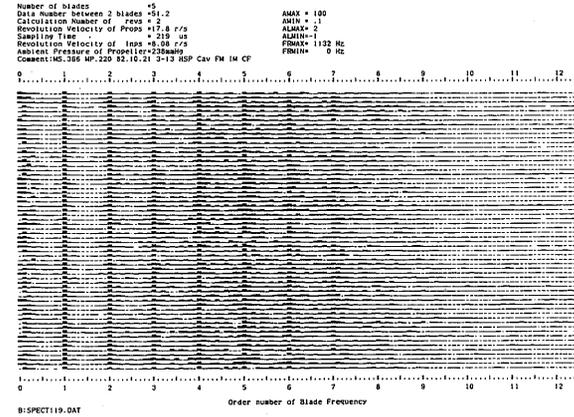


Fig. 11 Time History of Noise Spectra of M. P. No. 220 in the Condition Equivalent to 163 r. p. m. of Actual Ship-S, B. F. = 89 Hz

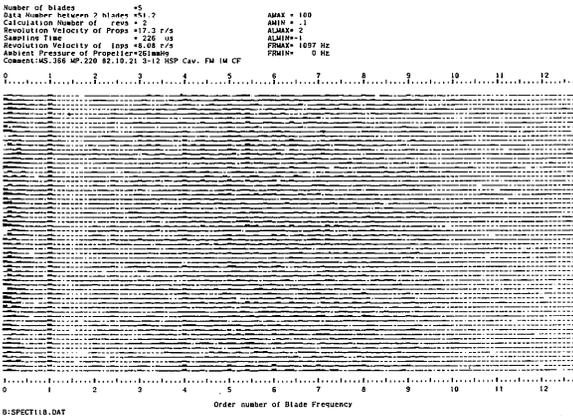


Fig. 10 Time History of Noise Spectra of M. P. No. 220 in the Condition Equivalent to 149 r. p. m. of Actual Ship-S, B. F. = 86. 5 Hz

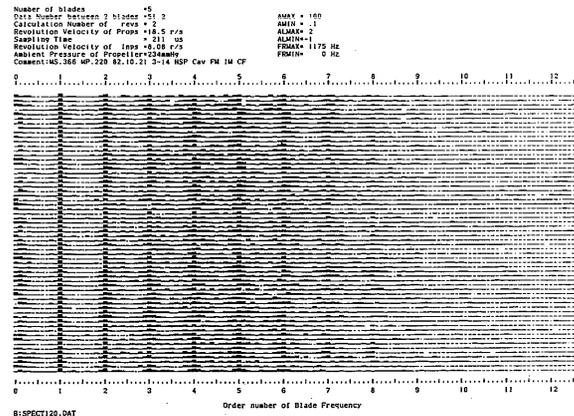


Fig. 12 Time History of Noise Spectra of M. P. No. 220 in the Condition Equivalent to 171 r. p. m. of Actual Ship-S, B. F. = 92. 5 Hz

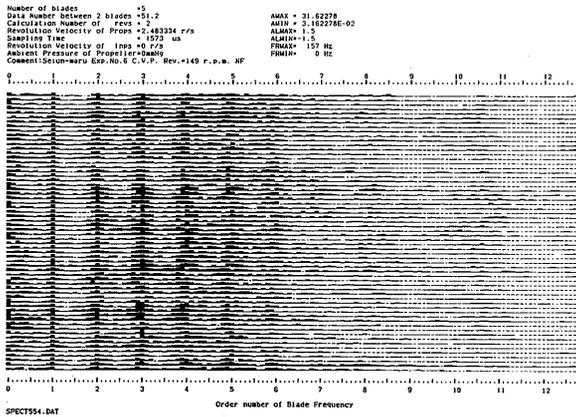


Fig. 13 Time History of Noise Spectra of the Conventional Propeller of Ship-S in the 149 r. p. m. Condition, B. F.  $\approx$  12. 4 Hz

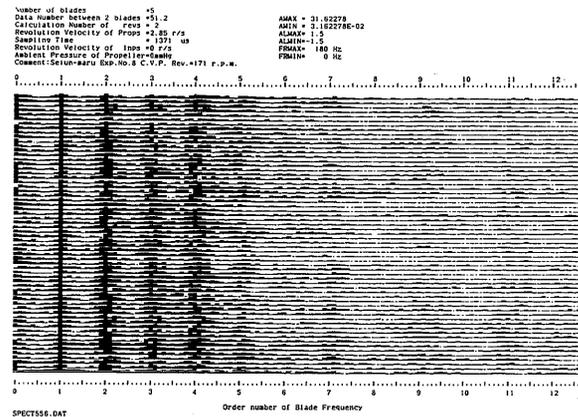


Fig. 15 Time History of Noise Spectra of the Conventional Propeller of Ship-S in the 171 r. p. m. Condition, B. F. = 14. 25 Hz

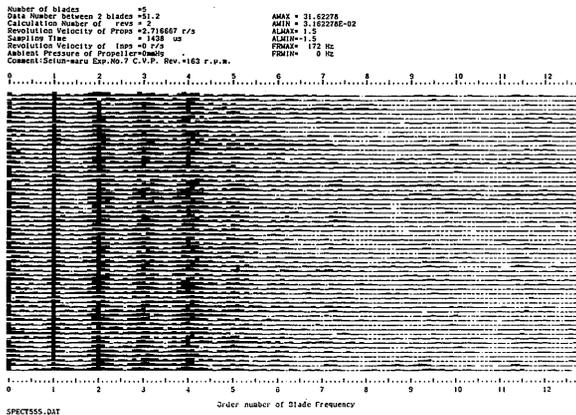


Fig. 14 Time History of Noise Spectra of the Conventional Propeller of Ship-S in the 163 r. p. m. Condition, B. F.  $\approx$  13. 6 Hz

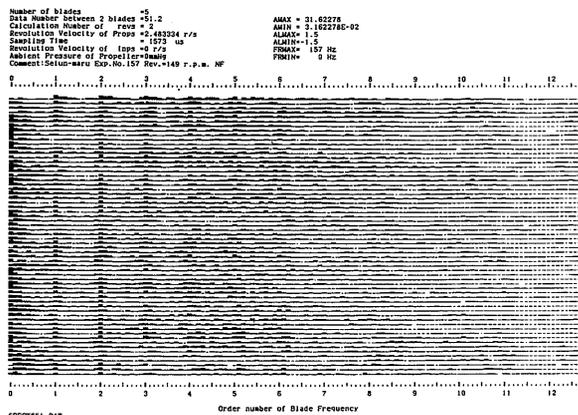


Fig. 16 Time History of Noise Spectra of the Highly-Skewed Propeller of Ship-S in the 149 r. p. m. Condition, B. F.  $\approx$  12. 4 Hz

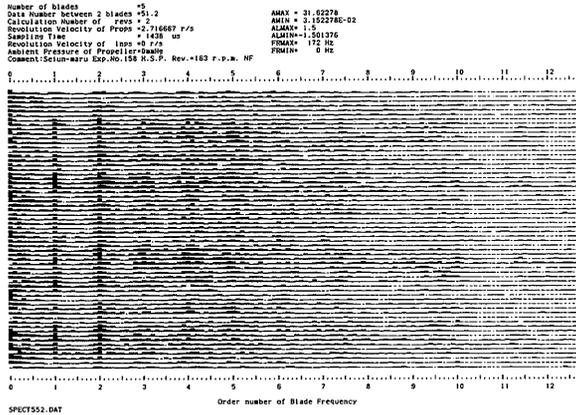


Fig. 17 Time History of Noise Spectra of the Highly-Skewed Propeller of Ship-S in the 163 r. p. m. Condition, B. F.  $\approx$  13.6 Hz

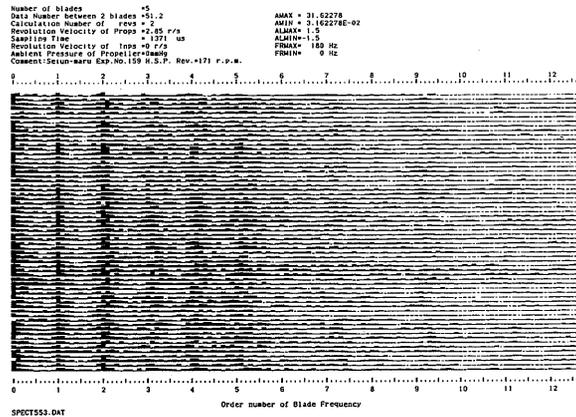


Fig. 18 Time History of Noise Spectra of the Highly-Skewed Propeller of Ship-S in the 171 r. p. m. Condition, B. F. = 14.25 Hz

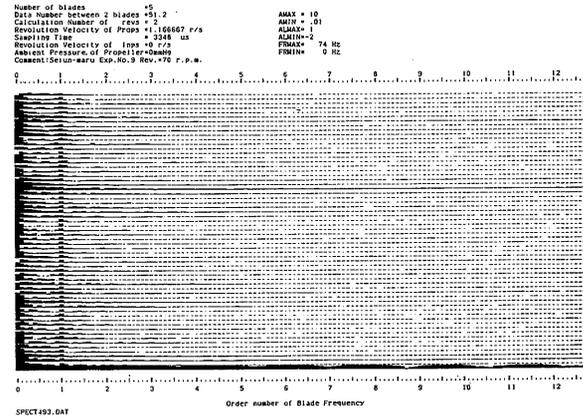


Fig. 19 Time History of Noise Spectra of the Conventional Propeller of Ship-S in the 70 r. p. m. Condition, B. F.  $\approx$  5.8 Hz

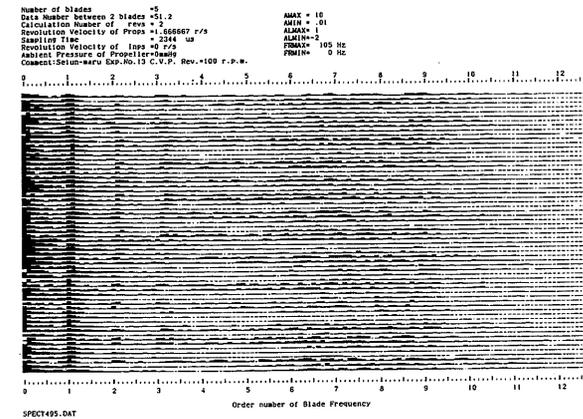


Fig. 20 Time History of Noise Spectra of the Conventional Propeller of Ship-S in the 100 r. p. m. Condition, B. F.  $\approx$  8.3 Hz

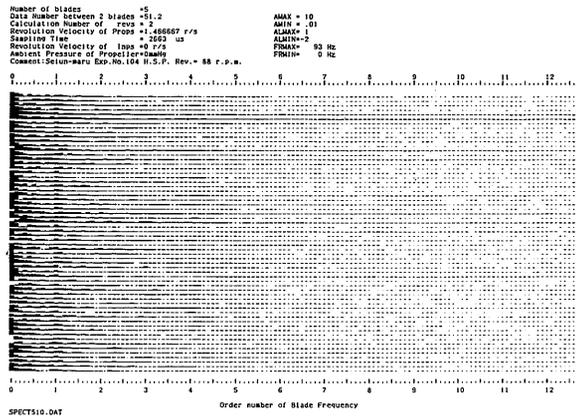


Fig. 21 Time History of Noise Spectra of the Highly-Skewed Propeller of Ship-S in the 88 r. p. m. Condition, B. F.  $\approx$  7.3 Hz

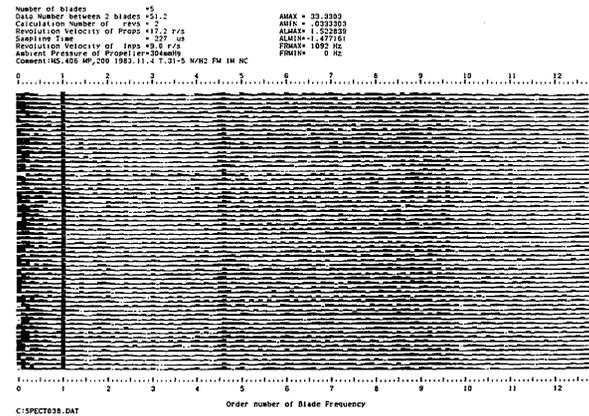


Fig. 23 Example of Time History of Noise Spectra obtained without Activating the Hydrogen Bubble Generator, B. F. = 86 Hz

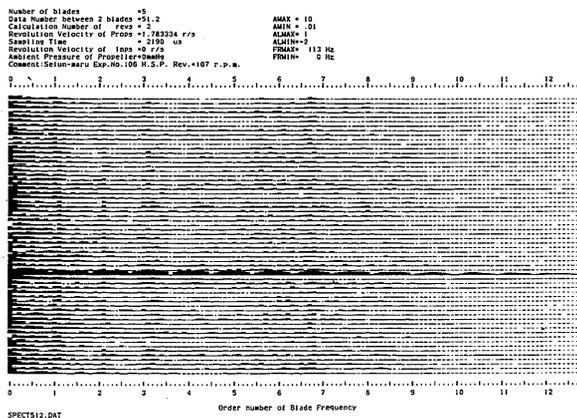


Fig. 22 Time History of Noise Spectra of the Highly-Skewed Propeller of Ship-S in the 107 r. p. m. Condition, B. F.  $\approx$  8.9 Hz

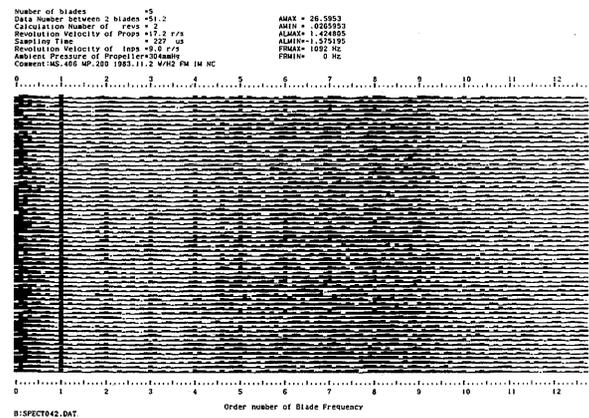


Fig. 24 Example of Time History of Noise Spectra obtained with Activating the Hydrogen Bubble Generator, B. F. = 86 Hz

表れたためか、シート・キャビテーションの高次成分特性がチップ・ボルテックス・キャビテーションのそれと近似しているためかを判断することは、少なくとも現時点では不可能と考える。

Fig. 5 及び Fig. 6 に関して、翼周波数の第 9 次以上の成分が急激に増加している理由は、明らかにクラウド・キャビテーションが発生してキャビテーションの形状が激しく変動した影響と考えてよいであろう。音紋図で表現し得る周波数範囲 (20 Hz ~ 1 kHz) では到底クラウド・キャビテーションが発生する周波数の騒音 (5 kHz 以上)<sup>9)</sup> を捉えることは不可能ではあるが、上記のクラウド・キャビテーション状態のように、副次的に翼周波数の高次成分が増加する現象により、限られた場合にはこれを捉えることが可能となるであろう。これは本例のプロペラが、シート・キャビテーション状態で翼周波数の 3 次以上の成分が極めて少なかったためであって、他のプロペラの例 (例えば Ship-S, CP) が示すように、シート・キャビテーション状態で翼周波数の高次成分が多いプロペラでは、翼周波数の高次成分の増加が必ずしもクラウド・キャビテーションと結び付かないことを銘記すべきであろう。しかし、翼周波数の第 4 次以上の高次成分の側波帯の存在は、クラウド・キャビテーションの存在の指標となるであろう。Fig. 6 で、翼周波数の第 12 次以上の成分のスペクトルが不鮮明となった理由は、クラウド・キャビテーション状態を実現するためにプロペラ近傍の圧力を減少したので、プロペラ近傍に気泡が発生し、このために、高周波数の音波が蔽断されたためと考えられるが、これだけの説明では不十分であろう。

また、実船の音紋図の高次のスペクトルが、模型プロペラの音紋図のように一本の筋とはならず幅を持って分布している理由は、実船の主機の回転数が模型実験に使用した電動機の回転数に比較して不安定であった故と考えられ、プロペラの回転とデータのサンプリングの間を同期させる必要があるものと考えられる。

Figs. 1~3 及び Figs. 19~20 と Figs. 21~22 のキャビテーション初生状態の音紋図で共通していることは、キャビテーションが発生していないプロペラの音紋図は総じて翼周波数の高次成分の含有率が低く、キャビテーションが発生すると翼周波数の高次成分 (特に第 2 次成分) が顕著になることであろう。プロペラのキャビテーションの初生については従来より様々な定義があるが、音紋図から判断する場合は、“全てのプ

ロペラ翼に、継続してチップ・ボルテックス・キャビテーションが発生した状態”のときに、翼周波数の第 2 次成分のスペクトルが顕著に表れるようである。Fig. 20 や Fig. 22 はこのような場合か或いはや、これよりもキャビテーションの発生状況が進行した状態の音紋図であると言えよう。

キャビテーションの発生による翼周波数の高次成分の発生要因は、キャビティの発生の非定常性によるもので<sup>13)</sup>、キャビテーションの発生を検出する有力な手段の一つであると考えられる。しかし、本音紋図で検出できるのは全ての翼にキャビテーションが発生して初めてキャビテーションの発生が確認できるのであって、前報<sup>9)</sup>の方法で定義された初生キャビテーション状態ではなく、前報の方法で定義されたチップ・ボルテックス・キャビテーション状態を検出していると考えた方がよいであろう。

前報で定義した、チップ・ボルテックス・キャビテーションからシート・キャビテーションに到るまでの間では、視覚的なキャビテーション発生状況の定石的な変化に対応する音紋図上の変化の法則性は発見できなかった。音紋図上では、これらは、個々のプロペラの翼周波数の波形に依存する。即ち、M. P. No.229 では、翼周波数の基本波及び第 2 次成分のみが増強しているが、M. P. No.218 及び 220 と、青雲丸の実船のプロペラでは、翼周波数の基本波及び第 2 次成分の外に、第 3 次成分以上も増強している。この、視覚的なキャビテーションの変化に対応する音紋図の変化が多様であることが、本方法の最大の弱点と考えられる。しかし、個々のプロペラの翼周波数の高次成分の含有特性を模型実験により把握することが可能であれば、この弱点の幾分かは減殺出来ると考えられる。

文献<sup>12)</sup>と<sup>13)</sup>には、クラウド・キャビテーションが存在した記述はないし、またその後の青雲丸の定期検査でも、プロペラにクラウド・キャビテーションによる浸食を受けた痕跡はないので、Fig. 10 を除く Figs. 7~12 の翼周波数の高次成分の存在は、Figs. 5~6 のようなクラウド・キャビテーションのためではなく、水素気泡発生装置の影響と考えた方がよいかも知れない。Figs. 7~9 及び Figs. 11~12 で、比較的翼周波数の高次成分が鮮明に表れている理由は、水素気泡発生装置を作動させてキャビテーションを視覚的に安定させたためと考えられる。一般に水素気泡発生装置を作動させた場合の音紋図への影響は、他のプロペラの実験 (Figs. 23~24) により確かめられており、雑音レ

ペルに相当する一般的な音紋図の濃度と共に翼周波数の第4次以上の高次成分が強調されることが判明している。

水素気泡発生装置は、水中の核を補って観測時に安定したキャビテーション状態とするためのものと考えられるが、翼周波数の高次成分が過剰に強調されるので、少なくとも音紋図上からは、音紋図を採取する場合に使用することは不相当と考えられる。なお、水素気泡発生装置を問題とした状況では、激しいクラウド・キャビテーションが発生する状態ではなかった( $\sigma=2.7$ 以上)ので、高周波数の騒音の遮蔽の有無についての考察は行わなかった。

上記のように、プロペラによって翼周波数の高次成分の含有率が異なることは、一篇の音紋図のみでのプロペラのキャビテーションの発生状況の推定を行うことの危険性の証左でもある。しかし、模型プロペラのキャビテーション観測と模型プロペラの音紋図の検討を事前に行えば、多少なりとも実船のプロペラのキャビテーション発生状況を推定することは可能であると考えられる。即ち、少なくとも上記のプロペラに関しては、翼周波数の第2次成分の顕著な出現は、全ての翼にチップ・ボルテックス・キャビテーションが発生した可能性が高いし、また、翼周波数の基本波のスペクトルが異常に高く、翼周波数の高次成分のスペクトル(第9次成分以上)も極端に大きく且つ4次以上の成分の側波帯が存在するときは、一応クラウド・キャビテーションの存在を疑って見てもよいであろう(実船において4次以上の成分の側波帯が観測される場合は、他にプロペラの切損事故或いはプロペラに異物が付着するなどの事故により、翼周波数がプロペラの回転数で変調されて、高次成分の側波帯が観測される場合が考えられる。但し、原因がクラウド・キャビテーションにある場合は、回転数の逓減により消失するので、区別が可能である)。このように、単に翼周波数の高次成分が多いことのみにより、これをクラウド・キャビテーションとは結び付けられない。また、Figs. 7~9とFigs. 10~12及びFigs. 13~15とFigs. 16~18では、翼周波数の基本波からその第7次成分までが、回転数の増加に応じて増強されていることが辛うじて読み取れる。

## 7. 結 論

模型と実船のプロペラの、キャビテーション騒音の

音紋図を比較して、その相関について調査した。

模型と実船のプロペラの、キャビテーション発生状況の音紋図による検出の相関では、少なくとも次の事項は立証されたと考える。

1. チップ・ボルテックス・キャビテーションの発生は、翼周波数の第二次成分を明瞭に増加させる。
2. プロペラの種別による音紋図上の特性は、模型プロペラのは実船のプロペラのものに類似した傾向を有する。
3. 上記は、従来行われてきた1/3オクターブ・フィルタによるキャビテーション騒音の解析や、船尾変動圧力の解析等に於いても検出可能な事項であるが、音紋図は、より直接的に表現し得ると考える。

上記の事項その他により、実船の音紋図のみより実船のキャビテーション状況を推定する場合の仮説を試みると、

1. 翼周波数のスペクトルが基本波に関するもののみで、高次成分のスペクトルが非常に小さい場合は、キャビテーションが存在しない可能性が高い。
2. 翼周波数の第二次以上の成分が存在する場合は、キャビテーションが発生している可能性が高いが、どの程度で発生しているかは特定できない。
3. 翼周波数の第4次以上のスペクトルに側波帯成分が存在するときは、激しくクラウド、キャビテーションが発生しているか、あるいはプロペラの切損事故等が考えられる。

なお、考察の項で述べたように、今回の実験には様々な不備な点があり、各々に種々の問題を提起しているので、模型プロペラによる実船プロペラの作動状況の推定は、現時点では一概に容易に可能であるとは言えない。また、今回の実験並に解析手法は、完全なものとは言い難い。

1. 計算機は、通常のパーソナル・コンピュータのみを使用したため、高度の計算技術を採用し得なかった。
2. 模型試験はキャビテーション水槽中で行ったものであるから、当然自由音場と等価な結果は得られていない。
3. 今回取り扱った青雲丸の騒音データには、プロペラのキャビテーション騒音以外の他の雑音も、

含まれているものと考えられる。

4. 従って、文献<sup>2)</sup>のように、厳密にプロペラのキャビテーションの騒音のみを抽出する必要がある。

そう云った意味からも、更に詳細に、データに対して検討を加える必要があると思われる。今後数多くの実船及び模型プロペラに対して、翼周波数及びその高次成分とキャビテーションの発生状況の関係を把握することにより、実船のプロペラの音紋図を採取すれば、或る程度のキャビテーションの発生状況を音紋図によって推定することは可能となるであろうと考える。

但し、音紋図はプロペラの発生する騒音を大掴みな方法で表現するものであるから、表現の限度は弁えておく必要があるであろう。

本方法の有効性を確認し、上記の問題点を解決することにより、実船に装備して常時プロペラのキャビテーション状況を或る程度監視する、“キャビテーション・インディケータ”も製作可能であると考えられる。

音紋図は、船とプロペラに固有なものと考えられるので、将来は、声紋のように、個体の判別に利用する道もあるかも知れない。

## 8. 謝 辞

SR-183 研究部会で実施された実船試験の貴重な録音テープを借用させて頂いた、東京大学工学部船舶工学科、及び騒音計測に携わられ収録に協力された関係者の方々に深甚な感謝の意を表す。船研で行われた青雲丸の模型船でのキャビテーション試験及び騒音計測は、推進性能部の右近技官及び黒部技官によって1982年に行われたものを使用させて頂いた。

また、実験及び写真撮影を遂行され或いは貴重な示唆を与えられた部内各位に感謝の意を表す。

### 記号表

$K_T$	スラスト係数 $= T / \frac{1}{2} \rho n^2 D^4$
$T$	スラスト (N)
$\rho$	水の密度 (Kg/m <sup>3</sup> )
$n$	プロペラの回転数 (1/sec)
$D$	プロペラの直径 (m)
$\sigma_n$	キャビテーション数 $= (P_0 - e) / \frac{1}{2} \rho n^2 D^2$
$P_0$	周囲の代表圧力 (Pa)

- e そのときの温度に対応するの水の蒸気圧 (Pa)

## 参 考 文 献

- 1) 高橋 肇, 上田 隆康, 野中 健美, : プロペラ起振力に関する研究 (第2報), 第12回船舶技術研究所発表会講演概要, (昭和43年11月) 或いは, Takahashi, H. and Ueda, T., An Experimental Investigation into the Effect of Cavitation on fluctuating Pressures around a Marine Propeller, Papers of Ship Research Institute, No. 33, (1970)
- 2) Trout, G. C., Procedures for research vessel design, Fishery Investigations, Series II, Vol. 27, No. 10, U. K. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, HER MAJESTY'S STATIONERY OFFICE, (1975)
- 3) 上入佐 光, 野尻 武生, 湯浅 肇: プロペラキャビテーションノイズの特性について, 三井造船技報, 第125号 (1985)
- 4) 木原 和之外: 海洋調査船におけるプロペラ放射雑音の低減, 海洋音響研究会論文集, (昭和61年)
- 5) 岡村 尚昭, 浅野 利夫: プロペラキャビテーション雑音の予測と実船計測, 昭和63年度秋期造船三学会
- 6) 野沢 和男外: プロペラ水中雑音の研究, 昭和63年度秋期造船三学会
- 7) 池田 良穂: 21世紀のクルーズ客船, 新しい造船学, 第14回夏期講座, 日本造船学会, (1988)
- 8) 荒井 能: キャビテーション騒音の研究, 船舶技術研究所報告, 第18巻, 第4号, (昭和56年7月) pp. 5~6
- 9) 田村 兼吉: プロペラのキャビテーション騒音に関する研究, 東京大学修士論文, (昭和58年3月) pp. 18~23
- 10) 黒部 雄三, 上田 隆康: キャビテーション水槽におけるプロペラ変動圧力の計測例, 第34回船舶技術研究所研究発表会, (昭和54年11月) p. 28
- 11) 門井 弘之, 岡本 三千朗, 吉田 三雄: SRI-B型プロペラの開発およびその諸特性, 船舶技術研究所報告, 第21巻第6号, (昭和59年11月) pp. 25~26
- 12) SR-183 研究部会: 船尾振動・騒音の軽減を目的としたプロペラ及び船尾形状の研究, (昭和58年3

月)pp.100~106, 124~138, 或いは高橋 肇:練習船青雲丸での実船試験, 第3回キャビテーションに関するシンポジウム, 日本学術会議, (昭和58年10月)

- 13) 黒部 雄三外:青雲丸の実船対応キャビテーション試験, 船舶技術研究所報告, 第20巻, 第6号, (昭和58年11月) pp. 395~429

#### APPENDIX スペクトル強度の表現法について

声紋でのスペクトル強度の表現方法は, 各点の濃淡で表現するが, パーソナル・コンピュータのプリンタ上で表現するためには工夫が必要である。このため, プリンターに特殊な形状のフォント (Fount, 字形) を記憶させて結果的には図の濃淡に近似できるようにした。このフォントは3種類考案したが, 最もふさわしいと考えられる第2案を採用した。なお, 利用に当たって他のものも場合によっては利用価値があると思われるので, 3種類のフォントを Fig. A に示す。このフォントは, 以下のプログラム (A1) によって作成され, 同様に以下のインテル社製 8086 用機械語を含むプログラム (A2~3) によって出力される。この機械語プログラムは, N88-BASIC 等でも書くことは可能であるが, 速度が極端に遅くなるので敢えてこのままで発表した。なお, コンピュータには NEC 社製 PC-9801F2 型 (512 Kバイト増設 RAM 付), プリンターには同社製の PC-PR201 型を使用することを前提とし, プログラム言語も同機付属の MS-DOS 用 N88-BASIC V1.0 の言語を使用した。他の計算機或いはプリンターでもこのまま, または一部の変更により使用可能になると考えられる。

##### A1. フォント作成プログラム

- A1-1. Fount-1, 分割数が17のもの (省略)  
A1-2. Fount-2, 分割数が31のもの。音紋図は, このフォントにより作成した。

```
1020 DEFINT I-N
1110 DIM IFOUNT ( 15, 30 )
1120 FOR I=0 TO 30
1130 FOR J=0 TO 15
1140 IFOUNT ( J, I ) =0
1150 NEXT J
1160 NEXT I
1170 L=&H4000
1180 M=7
```

(74)

```
1190 N=7
1200 FOR I=1 TO 15
1210 FOR J=M TO N
1220 IFOUNT ( J, I ) =L
1230 NEXT J
1240 X=CSNG ( I/2 )
1250 M=7-INT ( X )
1260 N=7+INT ( X+0.5 )
1270 NEXT I
1280 K=L
1290 FOR I=16 TO 30
1300 FOR J=0 TO 15
1310 IFOUNT ( J, I ) =L
1320 NEXT J
1340 IF I=30 THEN 1370
1350 K=K*2
1360 L=L+K
1370 NEXT I
1380 '利用者プログラム本体
```

A1-3. Fount-3, 分割数が241のもの。これは, 特殊な用途に使い道があるであろう。(省略)

上記の演算により IFOUNT ( J, I ) のなかにはフォントに相当する数字が形成される。これを使用してプリンタに出力するためにはさらに以下A-2及びA-3のプログラムを使用する必要がある。

A2. フォント出力用機械語プログラム及び読み込みルーチン (このルーチンは, 必ずプログラムの最初に行っておく必要がある)。

```
1000 CLEAR &H3
1010 DEF SEG = &H9FFD
1020 DEFINT I-N
1030 LPFOUNT=0
1040 FOR I=0 TO 39
1050 READ A$
1060 POKE LPFOUNT+I, VAL ( "&H"+A$ )
1070 NEXT I
1080 DATA 50 'PUSH AX,Save registers
1081 DATA 51 'PUSH CX
1082 DATA 56 'PUSH SI
1083 DATA 1E 'PUSH DS
1084 DATA 8B, 4F, 02' MOV CX,02 [BX] :Take
Base parameter
```

```

1085 DATA 8B, 37 'MOV SI, [BX] ;Take Offset
      parameter
1086 DATA 8E, D9 'MOV CX, DS;Set DS
1087 DATA B9, 20,00 'MOV CX, 20H;Set CX to
      fount counter
1088 DATA E4, 42 'IN AL, 42H;Read input port
      42H
1089 DATA 24, 04 'AND AL, 4;Search ready
1090 DATA 74, FA 'JE FA;If not , input again
1091 DATA 8A, 04 'MOV AL, [SI] ; Get fount
      data
1092 DATA E6, 40 'OUT 40H, AL;Output to LP
1093 DATA B0, 0E 'MOV AL, 0EH; Output 14 to
      port 46H
1094 DATA E6, 46 'OUT 46H, AL
1095 DATA B0, 0F 'MOV AL, 0FH; Output 15 to
      port 46H
1096 DATA E6, 46 'OUT 46H,AL
1097 DATA 46 'INC SI;Increment SI
1098 DATA E2, EB 'LOOP EB;Loop if counter
      NZ
1099 DATA 1F 'POP DS;Resave registers
1100 DATA 5E 'POP SI
1101 DATA 59 'POP CX
1102 DATA 58 'POP AX
1103 DATA CF 'RETI;Return to main prog.

```

なお、上記のプログラムのうち、1080 から 1103 までの” ’ ” 以降はプログラムを理解するために付けたものであるから、省略してもプログラムの動作に影響はない。

### A 3. 出力用プログラム

一行に出力するフォントの数を N とし、出力するパターンを表わす数（段階を表わす整数）が M 行分、IA ( J, I ) ( J は 1 から N までの数、I は 1 から M までの数) に格納されているものとする。

```

5000 LPRINT CHR$ ( 27 );"T12" 'Set crlf to 1/10"
5010 A$=STR$ ( N * 16 )
5020 FOR I=1 TO M
5030 LPRINT CHR$ ( 27 );"I";RIGHT$ ( "000"+
      RIGHT$ ( A$, LEN ( A$ ) - 1 ) , 4 );
5040 FOR J=1 TO N
5050 CALL LPFOUNT ( IFOUNT ( 0, IA ( J, I ) ) )
5060 NEXT J
5070 LPRINT
5080 NEXT I
5090 LPRINT CHR$ ( 27 );"A" 'Reset crlf to 1/6"

```

以上で一行に所定の N 個のフォントを使用した M 行の図を出力する。

FOUNT 1

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16

FOUNT 2

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19  
 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30

FOUNT 3

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19  
 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39  
 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59  
 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79  
 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99  
 100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111 112 113 114 115 116 117 118 119  
 120 121 122 123 124 125 126 127 128 129 130 131 132 133 134 135 136 137 138 139  
 140 141 142 143 144 145 146 147 148 149 150 151 152 153 154 155 156 157 158 159  
 160 161 162 163 164 165 166 167 168 169 170 171 172 173 174 175 176 177 178 179  
 180 181 182 183 184 185 186 187 188 189 190 191 192 193 194 195 196 197 198 199  
 200 201 202 203 204 205 206 207 208 209 210 211 212 213 214 215 216 217 218 219  
 220 221 222 223 224 225 226 227 228 229 230 231 232 233 234 235 236 237 238 239  
 240

Fig. A Developed Founts

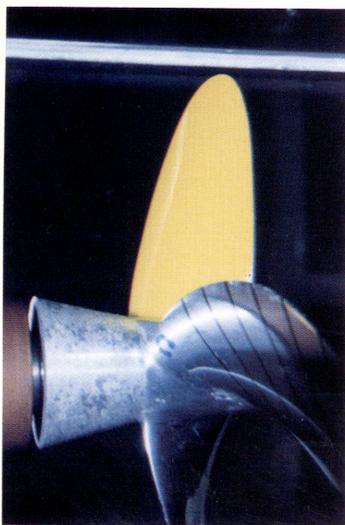


Photo 6 M. P. No. 229 in Non-cavitating Condition ( $\sigma_n = 12$ ,  $\Theta = 60^\circ$ )

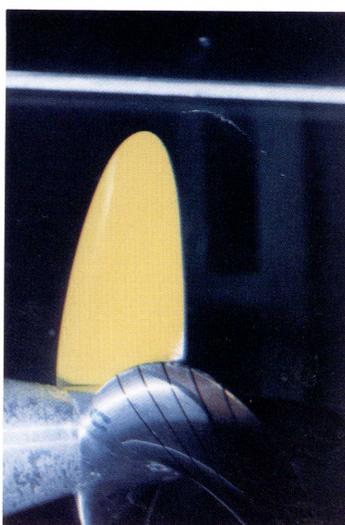


Photo 7 M. P. No. 229 in Tip-vortex Cavitation Condition ( $\sigma_n = 7.72$ ,  $\Theta = 60^\circ$ )

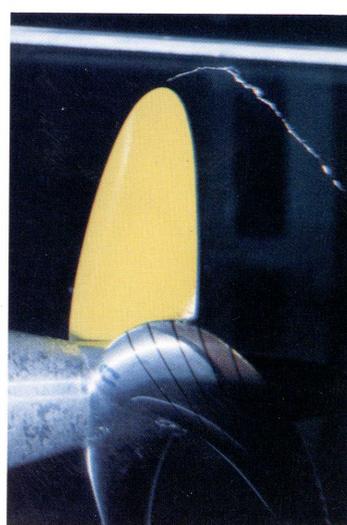


Photo 8 M. P. No. 229 in Sheet Cavitation Condition ( $\sigma_n = 4.7$ ,  $\Theta = 60^\circ$ )



Photo 9 M. P. No. 229 in Cloud Cavitation Condition I ( $\sigma_n = 2.92$ ,  $\Theta = 60^\circ$ )



Photo 10 M. P. No. 229 in Cloud Cavitation Condition II ( $\sigma_n = 1.95$ ,  $\Theta = 60^\circ$ )