

キャビテーション騒音の研究

荒 井 能*

An Investigation of Cavitation Noise

By
Chikara ARAI

Abstract

This paper deals with an investigation of a method which estimates the generation condition of cavitation by the measurement of cavitation noise.

Cavitation noise consists of a pulse train with 1 μ sec rise time and 10 μ sec duration, and has almost ultrasonic characteristics. By utilizing this character, the frequency of wave height was measured, and the chart of accumulative wave height frequency was obtained.

On this chart, the noise pattern due to the cloud cavitation on a propeller working in non-uniform flow was evidently discriminated from other cavitation noise patterns.

目 次

1. 緒 言	1	5. キャビテーション騒音波形の観測	6
2. キャビテーション騒音の発生機構	2	6. 周波数スペクトルの計測	7
3. 計測に使用した機器	2	7. 波高頻度分布の計測	9
3.1 ハイドロフォン	2	7.1 半対数波高頻度分布図による解析	9
3.2 前置増幅器	3	7.2 歪度と尖度による解析	10
3.3 波形記録装置	3	7.3 対数正規分布図による解析	11
3.4 周波数スペクトル分析装置	3	7.4 考 察	15
3.5 (音圧)波高頻度分析装置	4	8. 計測に関する問題点	15
4. 実験状態	4	8.1 ハイドロフォン	15
4.1 ハイドロフォンの実装	4	8.2 前置増幅器	15
4.2 状態の設定	5	8.3 波形記録装置	15
4.3 状態の種類	5	8.4 波高頻度分析装置	15
4.3.1 初生キャビテーション状態	5	8.5 演算装置	15
4.3.2 チップボルテックスキャビテーション状態	5	9. 結 論	15
4.3.3 シートキャビテーション状態	6	謝 辞	16
4.3.4 クラウドキャビテーション状態, 他	6	文 献	16
		付 録	16

1. 緒 言

キャビテーションが発生しているときに, 同時に騒

音も発生していることは周知の事実¹⁾であるが, この騒音を計測してキャビテーションの発生機構の解明や, キャビテーションパターンの発生状況の推定などに, 役立たせようとする研究の歴史はあまり長くはない。筆者は, 船用プロペラ等において発生するキャビ

* 推進性能部

原稿受付: 昭和56年5月8日

テーションの騒音を計測し、キャビテーションの発生状況を推定することを試みた。その目的は、実船においてかなり手数を伴う作業であるキャビテーション観測に代って、より容易な騒音計測によって、プロペラの浸食に関係の深いクラウドキャビテーションを検知することである。今回、定性的ではあるが、一応の成果が得られたので報告する。

2. キャビテーション騒音の発生機構

キャビテーション騒音は、水中の微細な気泡核が、プロペラ近傍の水の蒸気圧以下の低圧部に流入し、沸とう現象により気化してキャビティバブルに成長し、その後水の蒸気圧以上の高圧部に流入して圧力が上昇し、キャビティが急速に崩壊するときに発生する。すなわち、この気泡の急速な成長崩壊に基づく過渡的な変形が、周囲に圧力変動を生じ、結果として騒音を発生するもの¹⁾と考えられている。そして、このキャビティの変形によって生ずる圧力変動は、インパルス状

であることが知られている¹⁾。一方水中に存在するキャビティの核の位置や大きさはランダム（不規則）であるから、たとえ定常的な流れの中に生じるキャビテーションであっても、その騒音の発生状態は、音圧および発生間隔がランダムなパルス列であると考えられる。また、たとえ同一の大きさを持った核であっても、キャビテーションの発生状況が異なれば、発生する騒音も異なると考えられる。プロペラ翼が、キャビテーションにより浸食される場合は、強い衝撃的な圧力がプロペラ翼面上に働くことが予想され、したがって発生する騒音も高い音圧を示すことが期待される。この騒音の周波数スペクトルあるいは音圧（波高）頻度を計測すれば、キャビテーションの発生状況を知る手がかりになるのではないかと考えた。

3. 計測に使用した機器

計測に使用した機器の各論を以下に、一覧表を表-1に示す。

表-1 使用機器一覧

名 称	型 式	製 造 会 社 名
ハ イ ド ロ フ ォ ン	10 L 10 N	日本電波工業
前 置 増 幅 器	ST-65 (改造)	沖 電 気 工 業
周波数スペクトル分析装置	TR-4120	タケダ理研工業
電 流 プ ロ ー プ	CP-501, 520	岩 崎 通 信 機
X Y レ コ ー ダ	WX-431	渡 辺 測 器
波 型 記 録 装 置	MS-5103 B	岩 崎 通 信 機
プラグインユニット	SP-30H-B	〃
波 高 頻 度 分 析 装 置	EDS-34208 A	東 京 芝 浦 電 気
プラグインユニットK型	UE-730-009	〃

3.1 ハイドロフォン

ハイドロフォン（水中マイクロフォン）は、騒音を電気信号に変える変換器で、文献²⁾に示されたハイドロフォンに類似した製品（超音波探傷用硫酸リチウム振動子、共振周波数 10 MHz）を使用した。

本ハイドロフォンの校正は、音場相互校正法³⁾により行った。この校正法とは、可逆変換器の送波感度と受波感度は同一で可逆性があるという理論によって、3個の送受波器を用いた実験結果から、送波感度と受波感度の積を求め、両者を分離する方式である。した

がって、少くとも3個のうち1個は可逆変換器であり、あとの2個は1個ずつの送波器および受波器であれば良い。使用したハイドロフォンは、圧電効果を利用した変換器であるから、送波器および受波器の両方に使用できる可逆変換器である。ハイドロフォンを3個使い、そのうち2個をそれぞれ送波専用および受波専用とし、1個を受波用および送波用として以下に述べる方法で校正を行った。

校正に使用した水槽は、高さ 100 mm、幅 100 mm、長さ 10~320 mm のアクリル樹脂製で、水槽の端面

の反射防止には油粘土を使用した。計測には後述の周波数スペクトル分析装置を用い、付属の分析周波数発振器の出力をそのまま送波用のハイドロフォンに加え、相対するハイドロフォンを受波器とし、その出力を前置増幅器を介して周波数スペクトル分析装置に加えた。そして、周波数スペクトル分析装置に付属するオシロスコープに現われた伝送特性を、XYレコーダ(表-1 参照)で記録した。また、送波用ハイドロフォンに流入する電流を電流プローブで(表-1 参照)検出し、同様な方法で記録した。また、音場が十分球面音場⁹⁾とみなせるように、ハイドロフォン相互間の距離を、5~0.7 MHz では 320 mm, 0.7~0.1 MHz では 60 mm, 0.1~0.04 MHz で 10 mm とした。上記の校正結果を図-1 に示す。なお、図-1 の校正曲線は周波数帯によって4本の曲線に分かれ、Case I は上記のハイドロフォンの相互の距離が 320 mm の場合、Case II は 60 mm の場合、Case III は 10 mm の場合である。なお、この距離は、計測した最高周波数において十分球面音場とみなせるように定めた。しかし Case III の場合は、ハイドロフォン相互間の距離が検出器の直径に比べても短いので、念のため特に低周波帯域について防衛庁技術本部第5研究所で検定を行った。

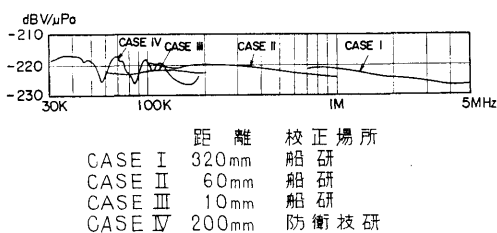


図-1 ハイドロフォン校正結果

ここでは、防衛庁技術本部第5研究所所有の水中音響標準装置Ⅲ型⁹⁾を用い、予め校正された送波器と供試のハイドロフォンの距離を 200 mm とし、受波感度のみの校正を行った。この結果を図-1 の Case VI に示す。両者の結果は、詳細には必ずしも良い一致を示してはいないが、大略の感度としては類似の値が得られたと考えて良いであろう。また多少の凸凹はあるにせよ、少なくとも要求される帯域(後述)では、大体において平坦である一ほほ忠実に圧力波形を電圧波形に変換している一と考えて良いであろう。

3.2 前置増幅器

前置増幅器は、ハイドロフォンの出力を高インピー

ダンス (30 MΩ) で受けて増幅する、接合型の N 型電界効果トランジスタと、低インピーダンス (600 Ω) で次段に送るトランジスタ増幅器を組み合わせたものである。なお、前置増幅器の初段の時定数を小さくして機械的雑音の混入を防止した。

3.3 波形記録装置

キャピテーション騒音波形の記録用として、記録式の静電オシロスコープを使用した。本装置の垂直軸には、前記の前置増幅器の出力を加え、水平軸の走査速度を所定の値にセットして単掃引状態とし、撮像管を記録状態とした。そして、任意の時間にリセットボタンを押して単掃引を行わせ、もし有意な記録が取れなかった場合は、画面を消去して再びリセットボタンを押して記録するようにし、有意な記録のみ写真撮影により保存した。

3.4 周波数スペクトル分析装置

キャピテーション騒音の周波数スペクトル分布を分析する手段には、1/3 オクターブバンドフィルタによる方法とヘテロダイン式フィルタによる方法がある。1/3 オクターブバンドフィルタによる方法は、フィルタの帯域幅がフィルタの中心周波数に比例しているので、騒音スペクトルの強度もフィルタの中心周波数に無関係に得られる。しかし、フィルタの中心周波数が離散的であり、また、あまり高い周波数 (200 KHz 以上) のフィルタは作られていない。これに対しヘテロダイン式フィルタによる方法は、周波数に無関係に帯域幅が一定で、計測周波数帯域は 0~数十 KHz から数百 GHz に及ぶものが市販されている。このフィルタは、主として線スペクトルあるいはそれに近似したスペクトルを計測するには便利であるが、騒音のスペクトルの計測にはあまり適していない。しかし、本計測では、特に高い周波数の計測が重要であると考えたために、キャピテーション騒音のスペクトル分布の分析装置としてヘテロダインフィルタ方式のものを採用した。本装置は、周波数スペクトル分布分析部と分析周波数発振部とからなっており、両者は電気的に十分に分離されている。また周波数スペクトル分布を表示するオシロスコープと、表示をXYレコーダに記録するための出力端子を備えており、X軸に周波数に比例した出力が、Y軸にスペクトル強度の対数 (dBm) に比例した出力が得られるようになっている。

この装置を用いた場合は、フィルタの帯域幅の問題により、厳密には1/3 オクターブバンドフィルタを用いた計測結果との比較はできないが、少なくとも傾向

を知ることは可能である。なお、この装置の使用に関しては、入力を前記波形記録装置の垂直出力端子より取り、周波数の掃引をごくゆっくり行うことで、狭帯域による応答の低下を補った。すなわち、キャビテーション騒音の周波数スペクトル強度を計測する際には、周波数掃引幅 0~2MHz、フィルタの帯域幅 1 KHz、掃引時間を 50 秒として行った。

3.5 (音圧) 波高頻度分析装置

キャビテーション騒音はインパルス状であるから、このインパルスの波高頻度を計測するために波高頻度分析装置を使用した。本装置は、もともと放射線のエネルギースペクトルを計測するために開発された装置である。本装置を放射線のエネルギースペクトルの計測に使用する場合、放射線の出力パルスの立上り時間は $2\mu\text{s}$ 以下であって、キャビテーション騒音の立ち上り時間 $1\mu\text{sec}$ (写真-2 および 4 参照、後述) と同程度であるため、本装置を採用した。本装置は、計測範囲 (2 V) を等間隔に 200 のチャンネルに別け、それぞれのチャンネルにカウンタを置き、入力されたパルスの波高の最大値を取って、それに相当するチャンネルのカウンタに 1 を加える動作を繰り返すようになっている。このカウンタの計数結果は、後から各チャンネルごとに記録用のプリンタに印字することが可能である。

計測時間中に計数し得る最大の数は 10 進法 6 桁で、付属のオシロスコープでこのカウンタの内容をアナログに変換して表示することも可能である。はっきりとした頻度分布が得られ、またオーバーフローをなるべく起こさないよう、計測時間は 50 秒とした。しかし、ときにオーバーフローを生じた場合もあり、最大計数値はもう 1 桁大きい方が良かった。付属のオシロスコープは、オーバーフローを生じたチャンネルが少なく、かつオーバーフローの回数も少ない時には、オーバーフロー検出装置として利用することができた。

プリンタに記録したデータは、更に紙テープに穿孔し電子計算機で後述の統計計算等を行った。

前記の前置増幅器については、ゲインおよび周波数特性の校正を行い、波形記録装置および周波数スペクトル分析装置は、周波数特性および振幅特性の校正を行ったが、それぞれ規格内の値を示した。波高頻度分析装置の時間特性には十分な精度があったが、低域のウィンドウの精度 (チャンネルの下限および上限の電圧値の精度) は十分ではなかったと考えられ、この問題については後述する。また、周波数スペクトル分析装置の周波数軸のゼロ点も比較的ドリフトが目立ったので、計測ごとにゼロ点を補正してから計測するようにした。図-2 に計測のブロック線図を示す。

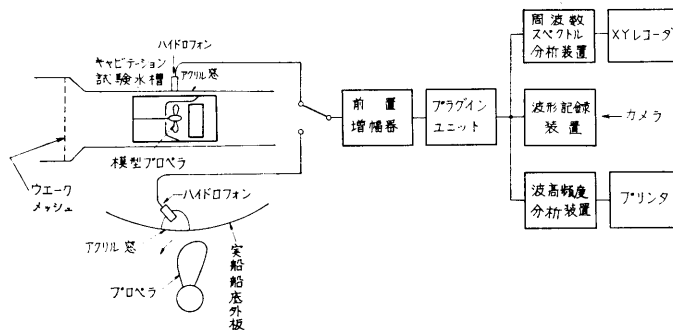


図-2 計測ブロック線図

4. 実験の状態

キャビテーション騒音の計測を行った場所および実験の種類等を示す一覧表を表-2 に示す。また、ハイドロフォンの実装方法および各種実験の状態等について以下に示す。

4.1 ハイドロフォンの実装

小型および大型キャビテーション水槽でのハイドロフォンの実装方法を図-2 の上部に示す。すなわち、

キャビテーション水槽上部観測用窓(アクリル樹脂製)の上にスピンドル油を滴らし、その上にハイドロフォンの受圧面がアクリル窓と密着するように設置した。

実船では、図-2 の下部に示すように、プロペラ直上の船底外板にアクリル製の窓を設け、その上に“かぶと”状の容器を置き、中に水を満たし、ハイドロフォンを“かぶと”状の容器に固定して、受圧面を水中に浸すようにした。

2次元振動翼の場合も、観測用窓はアクリル製であ

表-2 実験の種類および実施場所

試験対象	流 場	試験の種類	実 施 場 所
模型プロペラ	不均一流	W, S, H	船研小型キャビテーション水槽 ⁴⁾
〃	均一流	S, H	船研大型キャビテーション水槽 ⁵⁾
実船プロペラ	不均一流	W, H	A丸及びE丸実船試験
2次元振動翼	不均一流 ^{b)}	H	東京大学工学部船舶工学科特殊空洞水槽
発電用水車模型	不均一流	H	三菱重工業株式会社神戸研究所水力研究室

略号 W: 波形観測, S: スペクトル分布計測, H: 波高頻度分布計測

ったので、簡単な治具を作ってハイドロフォンを保持させ、アクリル面と受圧面の間にスピンドル油を滴らした。

発電用水車模型では、そのケースがアクリル製であったので、キャビテーションの最も発生し易い部位に向けてハイドロフォンの受圧面をケースに固定し、アクリルとの間にやはりスピンドル油を滴らした。

ハイドロフォンの取付けには極めて簡便な方法を用いたが、その理由は、アクリル、スピンドル油および水中での音の伝播速度が極めて近似しており、三者間の透過による反射の影響は極めて軽微であると判断し得たからである。また、スピンドル油を上述のように使用した理由は、ハイドロフォンの受圧面とアクリルとの間に空気の層ができることを防ぐためと、スピンドル油は、水よりも絶縁その他の理由で優れているためである。

しかし、キャビテーションの発生位置とハイドロフォンの距離は必ずしも一定にすることはできなかった。また、ハイドロフォンの出力値そのもので比較することはできなかった。

4.2 状態の設定

模型プロペラの不均一流中の実験では、下記の実船プロペラの回転速度より推力係数 K_T を推定し、実船に近似させた伴流分布の中で、推力係数とキャビテーション数を一致させて行った。模型プロペラの均一流中の実験では、視覚的に不均一流中での状態に近似した状態で行った。しかし、後述のように、均一流中でのクラウド状態（下記）は存在しないので、そのかわりバブル状態（下記）で実験を行った。

実船のプロペラでは、キャビテーションが発生する状況を下記の4つの状態に分類し、それぞれを実船のプロペラの回転速度の変更により実現し、観測により確認した。

2次元振動翼と発電用水車模型については、キャビテーションが視覚的に出現する直前の状態と、激しく起っている状態と、これらの中間の点2点計4点を選定して行った。

4.3 状態の種類

実験状態の種類は、いずれの場合も4種の実験状態について行った。以下に模型プロペラの場合を例にとり、キャビテーションをストロボスコープで観察して名付けた状態名およびその詳細について記す。なお、状態の制御を自由に行える点と後述のバブル状態を除いては、実船のプロペラも下記と近似した状態を示した。

4.3.1 初生キャビテーション状態

視覚的にキャビテーションの初生が認められるキャビテーション数を δ_i とし、模型プロペラの周囲の状態を δ_i の2倍程度に設定する。この状態で計測器を調整して雑音（キャビテーション騒音以外の原因で生じる立上りの速い電気的擾乱）を十分に抑圧すれば、キャビテーション騒音と考えられる立上りの早いインパルスは認められない。しかし、圧力等の実験状態設定パラメータの変更により、周囲の状態を $1.5\delta_i$ 程度に設定したあたりから、キャビテーションによる騒音と考えられる立上りの速いインパルスが観測され始める。そして視覚的にキャビテーションの初生が認められる状態では、このインパルスは、かなりの強度に達している。したがって、視覚的にはまだキャビテーションの初生は認められないが、キャビテーション騒音は確実に認められる状態を、初生キャビテーション状態（以下“キャビテーション”は省略する、他の状態についても同様）と呼ぶ。

4.3.2 チップボルテックスキャビテーション状態

模型プロペラのキャビテーション数を、 δ_i より更に小さくすると、チップボルテックスキャビテーション

ンが発生して次第に安定し、翼の後方に、らせん状の渦を作る。この状態をチップ状態と呼ぶ。

4.3.3 シートキャビテーション状態

模型プロペラのキャビテーション数を、チップ状態より更に小さくすると、キャビティは次第に翼の先端から翼根部に向けて拡がり始め、翼の背面は膜状のキャビティで覆われるようになる。この状態をシート状態と呼ぶ。

4.3.4 クラウドキャビテーション状態, 他

模型プロペラのキャビテーション数を十分小さくすると、プロペラが不均一流中で作動している場合は、翼上のキャビティが消滅する付近に雲または霞状のキャビティが見える。この状態をクラウド状態と呼ぶ。また、模型プロペラが均一流中で作動している場合は、回転角によってキャビティが消滅するような事がなく、従ってクラウド状態もない。しかし、キャビテーション数が十分に小さい場合は、翼根部に球状のキャビティが現われる（バブルキャビテーション）のでこの状態をバブル状態と呼ぶ。

2次元振動翼および発電用水車模型の実験では、チップボルテックスキャビテーションを発生する状態はない。しかし、双方共シートキャビテーションおよびクラウドキャビテーション（発電用水車模型の場合には浸食を生ずるキャビテーション）状態は存在する。このため、初生状態とシート状態の中間の状態を、チップ状態のかわりに準シート状態と呼称する。

5. キャビテーション騒音波形の観測

前記の波形記録装置を用いて、キャビテーション騒音波形の映像を写真撮影することによって観測を実施

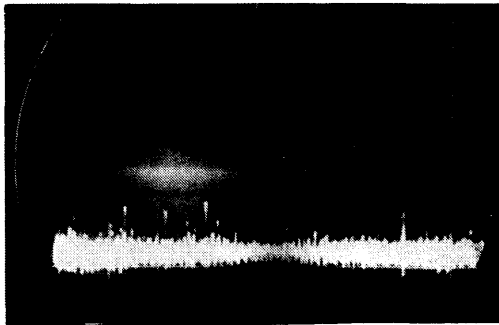


写真-1 キャビテーション騒音波形（模型，不均一流中）
縦軸感度 10 mV/div.
掃引速度 1 ms/div.

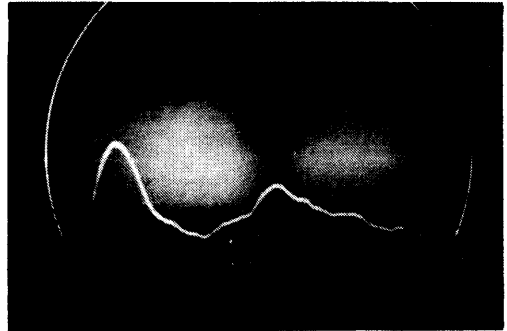


写真-2 キャビテーション騒音波形（模型，不均一流中）
縦軸感度 10 mV/div.
掃引速度 1 μ s/div.

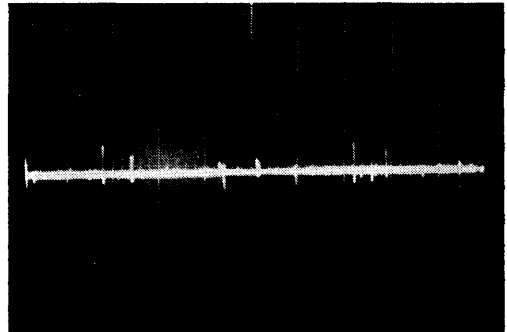


写真-3 キャビテーション騒音波形（実船，不均一流中）
縦軸感度 1 V/div.
掃引速度 1 ms/div.

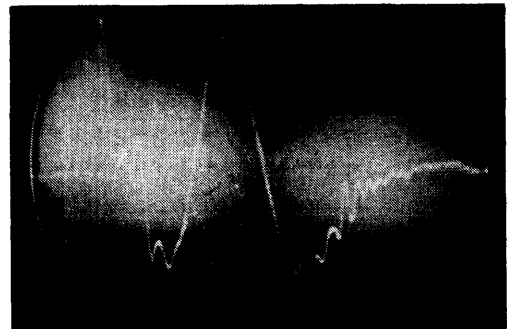


写真-4 キャビテーション騒音波形（実船，不均一流中）
縦軸感度 1 V/div.
掃引速度 1 μ s/div.

した。本装置は、ランダムに発生する信号を手動で撮像管に記録する方式であり、記録時間を 10 msec および 10 μ sec としたので、10 msec のものは別として 10 μ sec のものは、必ずしもすべての実験状態で波形の捕捉に成功したわけではない。しかし、船用プロペラの模型試験と、実船試験におけるキャピテーション騒音の波形について、2, 3 の良好な結果が得られたので、この例について以下に考察を進める。

模型プロペラにおける不均一流中のキャピテーション試験から計測した、キャピテーション騒音の波形を写真-1 および 2 に示す。2 枚の写真は、それぞれ時間軸 (X 軸) の掃引速度が 1 msec/div と 1 μ sec/div のものである。両者は特に顕著な波形変動を示したものであって、同一波形を掃引速度を変えて示したわけではない。また、実船 (不均一流中) におけるキャピテーション騒音の波形を写真-3 および 4 に示す。

それぞれの時間軸は、1 msec/div, 1 μ sec/div である。

これらの写真について説明すると、1 個のキャピティバブルの成長および崩壊によって生ずる圧力変動の期間は数 μ sec で、その圧力変動の立ち上がりは 1 μ sec 程度のインパルス状である。また、キャピテーション騒音の発生時期、波高もともにランダムである。

実船プロペラと模型プロペラの変動時間には特に差異はないが、振幅には数十倍ないし百数十倍の差異がみられる (実船プロペラと模型プロペラの直径比は、1:34.483 である)。なお、写真-1 の基線が太い理由は、キャピテーション騒音の波高値が小さかったので、増幅器のゲインを上げたために、前置増幅器の熱雑音等の振幅も増加したためと考えられる。

上記の事項により、つぎの考察を導くことができる。

a) 1 μ sec で立上がるパルスを捕捉するためには、検出器および増幅器の周波数帯域の上限は 5 MHz 程度が必要である。また現象が発生してから終結するまでの時間は大略 7~10 μ sec と考えられるので、周波数帯域の下限は 20~15 KHz が必要である。(文献⁶⁾および付録参照)

なお、周波数帯域の下限を定めた理由は、機械的な振動が入力に混入することを防止するためである。機械的振動は、文献⁷⁾に示すように、大部分が 10 KHz 以下に集中している。

b) この波形がキャピテーションの騒音波形である理論的な根拠はない。しかし、7. で述べるようにプロペ

ラ付近の音場には、キャピテーション騒音以外には、少なくとも 2 μ sec 以下の急峻な立上がりを示す雑音は存在していない。また、この波型は、文献⁷⁾および本報告に提示したキャピテーション騒音のスペクトル強度に近似したスペクトルを有しているため、少なくともキャピテーションに起因するものである。本報告では、この波形をキャピテーション騒音の波型として取り扱うこととする。

c) 写真-1 および 3 によると、キャピテーション騒音の波形は必ずしも一様ではなく、さまざまな波高のものを含んでいる。これは、キャピティの大きさがランダムであることの他に、キャピテーションの発生状況が異なるためと考えられる。すなわち、キャピテーションの発生状況 (例えばクラウドキャピテーションや、シートキャピテーションなど) が異なれば、プロペラの浸食状況も異なるのであるから、キャピテーション騒音の波高も異なるであろう。

d) 模型と実船のキャピテーション騒音の波高の比は大略 1:100 程度であるが、必要周波数帯域幅が変わらないので、単に増幅器のゲインの切り替えのみによって模型と実船の両方に同一の試験機材が使用でき、大変好都合であった。この騒音の特性は、何らかの相似則を示しているようであるが、相似則を十分検討するためにはもっと高精度のデータを多数集める必要がある。

6. 周波数スペクトルの計測

周波数スペクトル分析装置の入手時期が比較的遅かったため、実船、2次元振動翼および発電用水車模型のキャピテーション騒音の計測時に周波数スペクトルの計測は実施できなかった。

本研究を開始した当初には、不均一流中で作動するプロペラのキャピテーション騒音の周波数スペクトルの計測を実施した⁷⁾が、その結果では、キャピテーション数が小さくなるに従ってキャピテーション騒音の周波数スペクトル強度は増加した。このため、周波数スペクトルの計測のみによって、キャピテーションの状況を推定することができるのではないかと考えた。しかし、不均一流中のプロペラのキャピテーション騒音の周波数スペクトルの計測を行ってみると、スペクトル強度は、チップ状態で最大となり、これよりキャピテーション数を大きくしても小さくしても減少することが判明した。

また、同一のプロペラを同一の作動条件、同一のキ

キャビテーション数で、均一流中と不均一流中のキャビテーション騒音の周波数スペクトルの計測を行ってみたが、キャビテーションの発生状況は全く異なっており、不均一流中の方が均一流中より大きなキャビテーション数でキャビテーションを発生した。

上記の事項により、均一流中と不均一流中で作動するプロペラのキャビテーション騒音を、同列において比較することは困難である。このため、視覚面からキャビテーション状態を前述の4状態に分類して、それぞれの状態の周波数スペクトル強度について 図-3 および 図-4 に示し、これらの図について述べる。

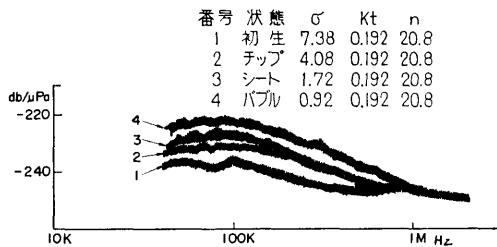


図-3 均一流中の模型プロペラのキャビテーション騒音のスペクトル分布

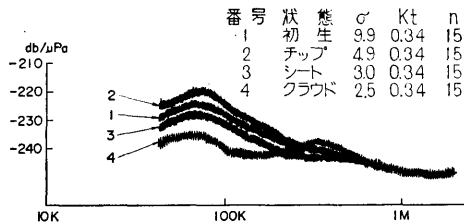


図-4 不均一流中のプロペラのキャビテーション騒音の周波数スペクトル分布

初生状態となるキャビテーション数は、不均一流中の場合の方が均一流中の場合より大きく、この傾向は他の状態でも同様である。双方の周波数スペクトルの分布状況は、均一流中の場合の方が強度がやや大きい事を除いては、殆んど変わらない。

初生状態からチップ状態に移った場合の周波数スペクトル強度は、均一流中の場合および不均一流中の場合の双方とも増大する。

チップ状態からシート状態へ移った場合の周波数スペクトル強度は、均一流中の場合には更に増大するが、不均一流中の場合には減少する。

シート状態からバブル状態あるいはクラウド状態に

移った場合の周波数スペクトル強度は、均一流中では更に増大するが、不均一流中の場合には更に減少し、超高周波成分は僅かに増大する。

上記の事項よりつぎの考察が導かれる。

a) 不均一流中では、プロペラの翼の回転角によって翼に対する実効的なキャビテーション数が異なっている。一方キャビテーション数は、プロペラ全周の平均的な値であるから、回転角度位置によっては、キャビテーションの発生する範囲が変化する。これに引きかえ、均一流中ではすべての回転角度位置についての翼に対する実効的なキャビテーション数は変らない。このため、不均一流中のプロペラは、均一流中のプロペラより大きいキャビテーション数でキャビテーションを発生する。また、視覚面からキャビテーション状態を分類した場合に、不均一流中の方が均一流中に比べてキャビテーション騒音の周波数スペクトル強度が弱い理由は、不均一流中では特定の領域しかキャビテーションは存在しないが、均一流ではキャビテーションは全周に存在するからである。

b) キャビテーションの初生は、恐らく微視的な段階から始まるであろうが、この段階で既に検知可能な騒音が発生していると考えられる。実船と模型のキャビテーション初生に関する報告⁸⁾によると、騒音計測により検知した初生キャビテーション数は、視覚的に検知した初生キャビテーション数と一致はしていないが、実船と模型プロペラに関する考察では類似の傾向を示した。キャビテーション初生に、騒音による検知が有効なことは早くから知られているが、視覚によるキャビテーションの検知との間に有意な相関が設定されれば、騒音の計測は、キャビテーション初生判別の有力な手段となるであろう。

c) 不均一流中の周波数スペクトル強度について、チップ状態よりシート状態の方が減少しているが、その理由としては、シートキャビテーションを生じている流場付近には、大きな気泡核が存在するので、騒音が伝播する間に、この気泡核によって減衰を受けたものと考えられる。しかし、この理由のみによるものかどうかは不明である。

d) 不均一流中に生ずるクラウドキャビテーションは、キャビテーションによる浸食と密接な関係があるとされているが、このクラウド状態の周波数スペクトル分布には、際立った特徴を発見することはできなかった。この理由は、本計測で採用したような、定常的に存在する騒音の波形の成分を積分して抽出する方式

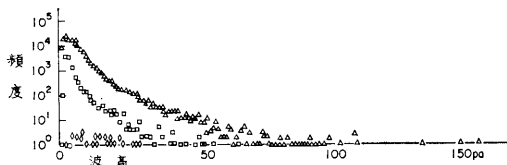
では、過渡的に発生するクラウドキャビテーションのみの周波数スペクトルを得ようとするは無理であったのかもしれない。

7. 波高頻度分布の計測

模型および実船のプロペラ，2次元振動翼ならびに発電用水車模型のすべての実験においてキャビテーション騒音の波高頻度分布の計測を行った。この計測について特筆すべきことは，計測系の電氣的な擾乱（雑音）を十分に抑圧すれば，キャビテーションの非発生時には波高分析装置の入力は全く無く，キャビテーション発生時には必ず入力を得られたことである。しかし，計測系の電氣的擾乱に対する遮蔽が不十分な場合は，例えばストロボスコープや種々の計測装置の制御用サイリスタ装置から発生する雑音（これらは大略一定値を示すことが多い）によって，記録が乱された。このため，記録を行うまえにキャビテーションが全く生じない運転状態（たとえば実船試験においてはターニング）において，入力がゼロになるように接地点その他を調整した。また，キャビテーション騒音の計測を行う時にはストロボスコープのスイッチを切り，ストロボスコープの点火用パルスがキャビテーション騒音に混入することを防止した。

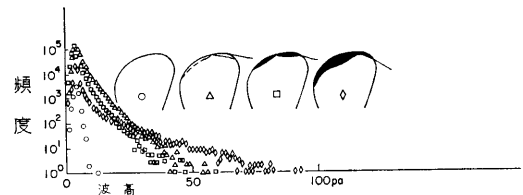
7.1 半対数波高頻度分布図による解析

計測結果を半対数方眼紙にプロットした波高頻度分布図と，一部のスケッチを 図-5~11 に示す。頻度の範囲が非常に広がったので，頻度を示すスケールとして縦軸に頻度の対数をとる，横軸に波高の圧力をとった。またこれらの図に共通して，不均一流中のキャビテーション初生状態を○印，チップ状態を△印，シート状態を□印，クラウド状態を◇印，均一流中のチップ状態を▲印およびバブル状態を◆印でそれぞれ表わした。図-5 および 6 は A 丸の模型試験，図-7 は A



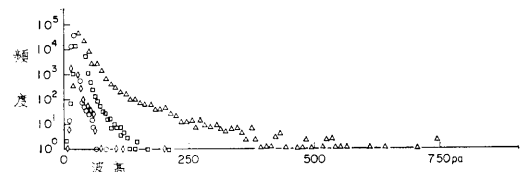
状態	記号	6n	K1
初生	○	6.4	0.104
チップ	△	4.5	0.143
シート	□	3.5	0.132
クラウド	◇	2.1	0.150

図-5 A丸模型プロペラ ($V_a=3.75$ m/s)



状態	記号	6n	K1
初生	○	6.4	0.104
チップ	△	4.5	0.143
シート	□	3.5	0.132
クラウド	◇	2.1	0.150

図-6 A丸模型プロペラ $V_a=4.7$ m/s



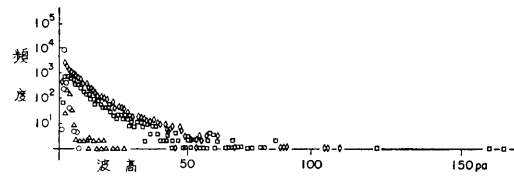
状態	記号	6n	K1
初生	○	13.4	0.057
チップ	△	4.5	0.143
シート	□	3.5	0.132
クラウド	◇	2.1	0.150

図-7 A丸実船試験



状態	記号	6n	K1
初生	○	1.9	-
チップ	△	2.9	0.19
シート	□	2.4	0.176
クラウド	◇	3.0	0.296

図-8 E丸実船試験



状態	記号
初生	○
シート	△
シート	□
クラウド	◇

図-9 2次元振動翼

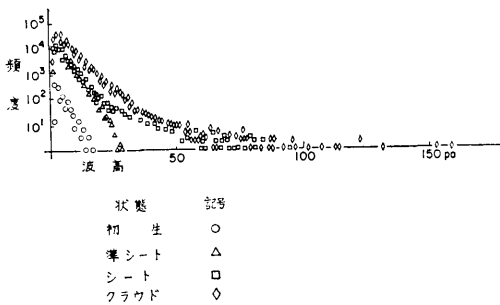


図-10 発電用水車模型

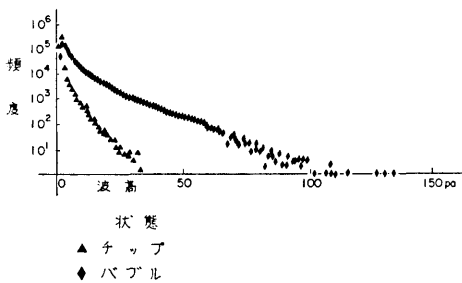


図-11 均一流中の模型プロペラ

丸の実船試験，図-8 はE丸の実船試験，図-9 は2次元振動翼，図-10 は発電用水車模型，図-11 は均一流中の模型プロペラのものを示す。図-5 と図-6 は同一のプロペラで，プロペラの前進速度がそれぞれ 3.75 m/sec と 4.7 m/sec と異った場合の図である。前進速度を変えた理由は，前進速度が遅いと同一のキャピテーション数を得るために静圧を下げる必要があり，このために図-5 のクラウド状態（◇印）では気泡によりプロペラが見えなくなる程であった。この気泡は，キャピテーション騒音も減衰させるので，図-5 のクラウド状態（◇印）で計測したパルス数は極めて僅少であり，分布の形状を明示するには至らなかった。このため，改めて前進速度を変更して計測しなおしたものが図-6 である。図-5～11 を通じて言えることは，クラウド状態（◇印）で数は少ないが波高の大きい成分が存在する図が多いことであり，この成分を定量的に取扱う試みを以下に述べる。なお，図-5～11 については後述する。

7.2 歪度と尖度による解析

本報告では，統計学的な概念である歪度 (Skewness) と尖度 (Kurtosis) を導入して“数は少ないが波高の大きい成分”を定量的に表わすことを試みた。

歪度および尖度は，正規分布からの隔りを表わす数であり，キャピテーション騒音がある基準的な状態では正規分布で近似できると仮定すれば，歪度および尖度で，“数は少ないが波高の大きい成分”を表わすことができるのではないかと考えたためである。

歪度および尖度は次式で表わされる。

$$\beta_1 = \frac{1}{s^3} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3 \cdot f_i}{n^3} \dots\dots\dots \text{歪度}$$

$$\beta_2 = \frac{1}{s^4} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4 \cdot f_i}{n^4} \dots\dots\dots \text{尖度}$$

ここに，s は母集団の標準偏差， x_i は i 番目の標本の値， \bar{x} はその母集団の平均値， f_i は i 番目の標本の頻度，n は標本の個数の総和である。母集団が正規分布をなすときは，歪度は 0，尖度は 3 である。

歪度は正規分布の対象度（右側が大きい時に正の値）を示し，尖度は，中央値からの偏りの度合を示す。いま完全な正規分布をなす母集団を想定し，正規確率紙⁹⁾上の縦軸に累積頻度率（全体を 100% とする），横軸に標本の値を取ってプロットすると，直線状に分布し，直線の傾斜は標準偏差に比例する。

この分布のある値（ここでは 99%）から正規確率紙

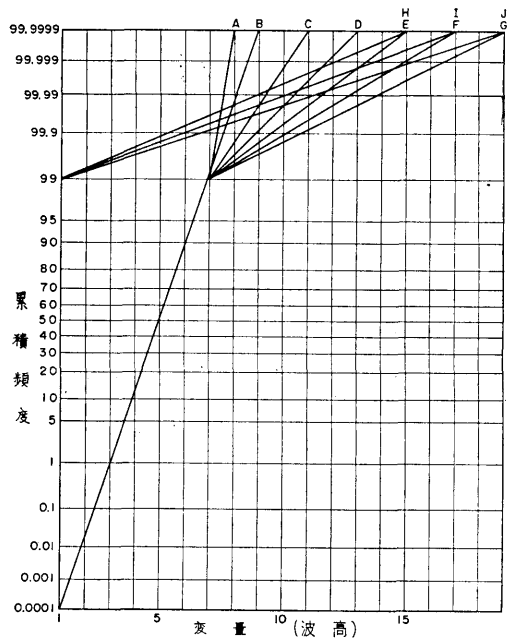


図-12 仮想分布 I (H, I および J は折点を移動して表示)

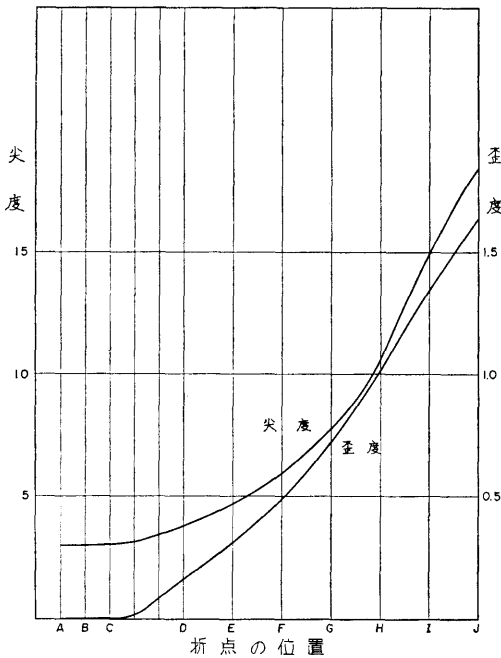


図-13 仮想分布Ⅰの歪度および尖度

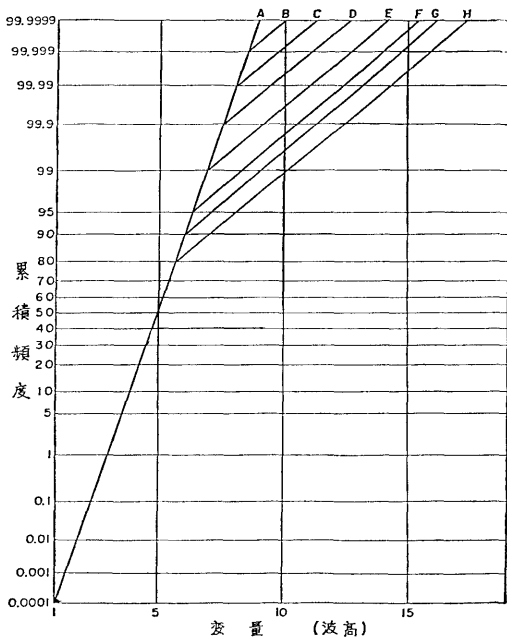


図-14 仮想分布Ⅱ

上で分布の勾配が直線状に変化したとして図-12を作成し、この図の歪度および尖度を計算して図-13に示した。また一定の勾配で折点（2つの直線状の分布が

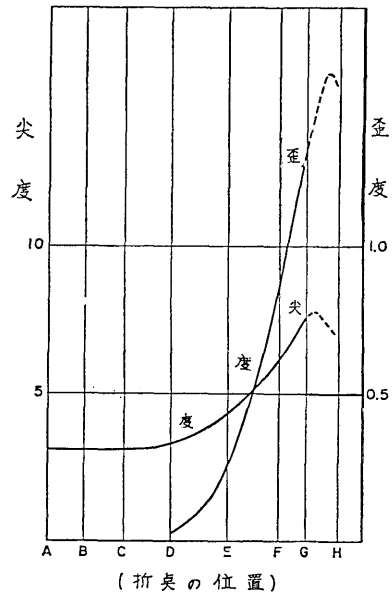


図-15 仮想分布Ⅱの歪度および尖度

分かれるところ、以下同じ)が変化した場合を想定して図-14を作り、この図の歪度および尖度を計算して図-15に示した。これらの図について考察すると、図-13についての歪度および尖度は、勾配が増加する程増加する。また図-15については、歪度および尖度は、折点の値が85%を越えなければ、すなわち、“数は少ないが波高の大きい成分”が全体の15%を越えなければ、歪度および尖度で“数は少ないが波高の大きい成分”を表わすことができると考えられる。しかし、この議論は、あくまで仮想的な分布を想定した場合に成り立つものであって、歪度および尖度に関するこの現象は、母集団の低レベルの分布が減少した場合でも同様に成り立つ(後述の図-22のチップ状態(▲印)参照)。しかし、筆者の計測システムでは、1チャンネルや2チャンネルに記録するかしないかを決定するレベルの値がドリフトを起していた形跡がある。このドリフトは、キャピテーション騒音を歪度および尖度で捕えようとする場合には明らかに問題になる。したがって、本稿では、歪度および尖度を参考程度に使用することとし、各図にそれらの値を掲げておく。また、歪度および尖度は、雑音の影響も非常に受け易いので、キャピテーション騒音の解析には、次項の対数正規分布図によることとした。

7.3 対数正規分布による解析

変量の大きい成分が含まれる現象は、正規分布より

対数正規分布の方がよく適合する。そこで、対数正規確率紙を用いて、キャビテーション騒音の音圧（波高）発生頻度を整理すると、正規確率紙の場合より、より直線で近似できることが判明した。音圧（波高）は、騒音の強さを対数（デシベル）で表わした単位であるから、これが対数正規分布になることは、騒音の強さのエネルギー値が正規分布になることを意味し、キャビテーションのエネルギーが正規分布状（ランダム）に発生することを意味する。

以上の考察により、図-5～11 に示した各実験のキャビテーション騒音の波高頻度分布を対数正規確率紙上に整理し、図-16～22 に示した。これらの結果から、いずれの実験状態においても累積頻度の 20～80 % の範囲のものはほぼ直線で近似でき、騒音波高の発生頻度は中心域の大部分においてよく対数正規分布に適合するといえる。

この分布から外れて上部または下部に折点を持つ分布については尖度と歪度を用いて同様に検討できるため、以下それぞれについて説明を加える。

a) 図-5 および 6 に示す A 丸の模型プロペラにおけるキャビテーション試験、図-7 の A 丸の実船試験は、

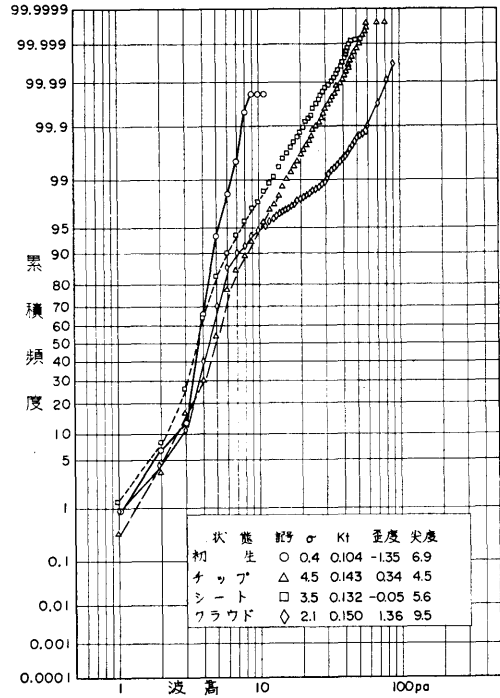


図-17 A丸模型プロペラ ($V_a=4.7$ m/s)

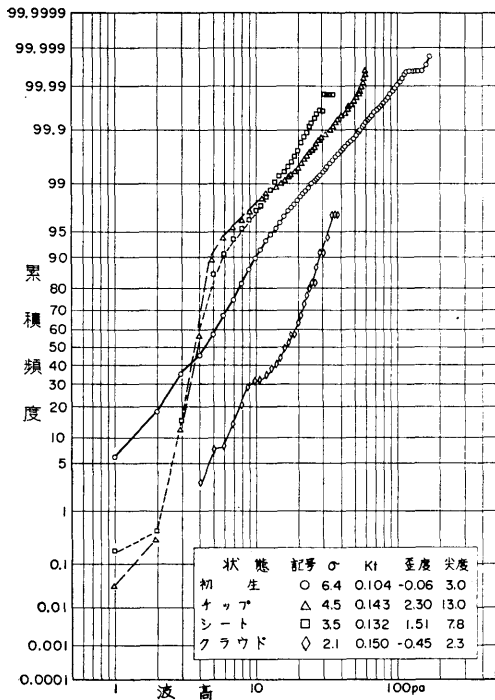


図-16 A丸模型プロペラ ($V_a=3.75$ m/s)

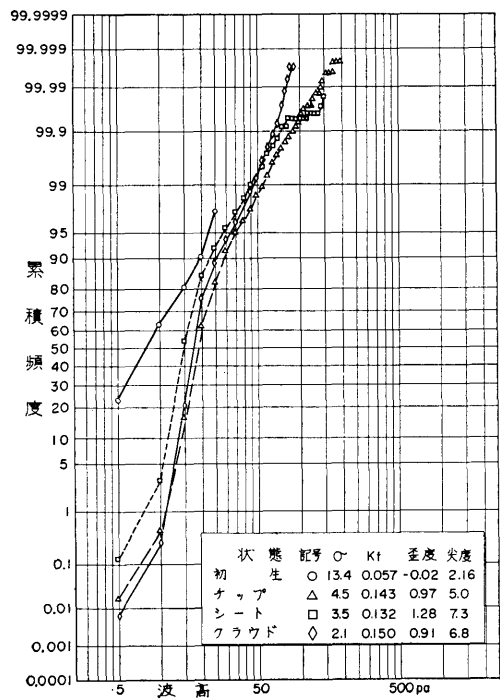


図-18 A丸実船試験

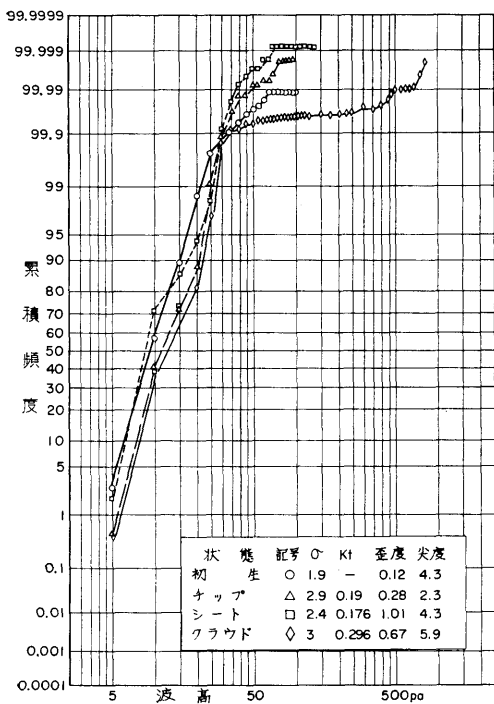


図-19 E丸実船試験

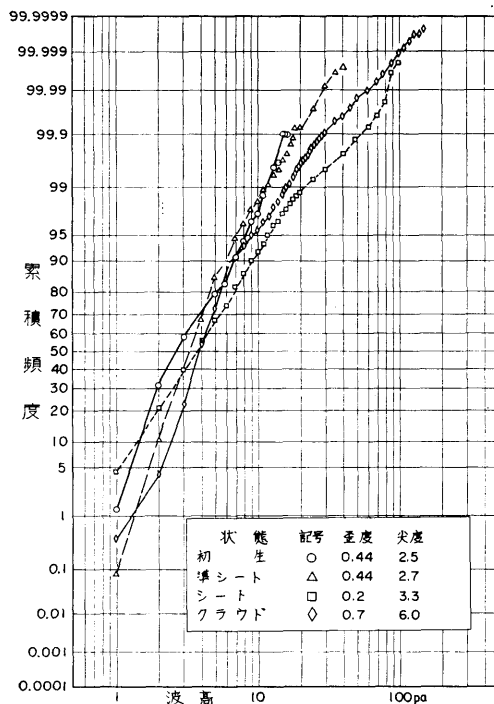


図-21 発電用水車模型

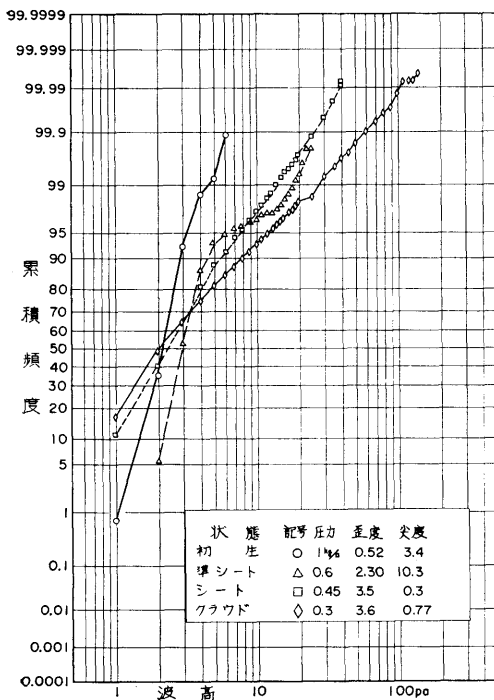


図-20 2次元振動翼

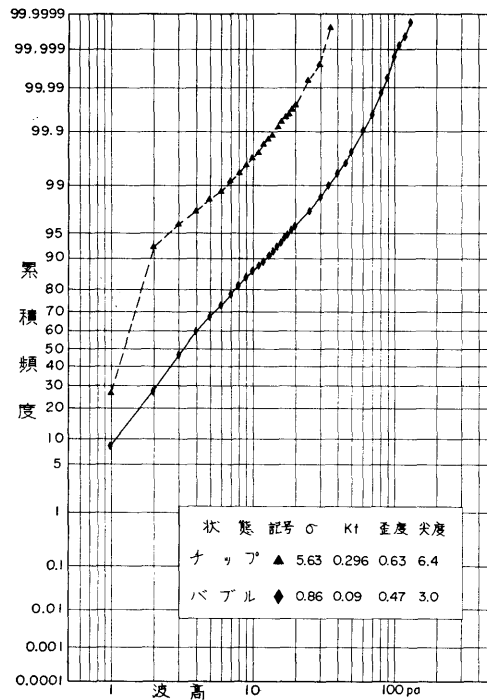


図-22 均一流中模型プロペラ

それぞれ 図-16~18 に対応する。これらの図の初生状態 (○印) は、図-17 では下位の 2 点が、図-18 では上位の 1 点がそれぞれ直線から外れている。これらの影響で 図-17 の尖度は大きくなり、図-18 の尖度は小さくなったと考えられ、この点を除けば直線状に分布する一対数正規分布をなす一と考えられる。チップ状態 (△印) およびシート状態 (□印) についてこれらの図を見ると、いずれも略同様な変化をしており、特に 図-16 のチップ状態 (△印) では折点が 90% 付近にあるために尖度が大きくなったと考えることができる。図-18 のクラウド状態 (◇印) は、折点がやや下方にある以外はチップ状態 (△印) やシート状態 (□印) と変わらないように見える。しかし、図-18 のクラウド状態 (◇印) を計測した場合は、キャビテーション数が小さく、喫水も深くとれなかったので、プロペラ付近の流場に多くの気泡核が存在した。この気泡核の存在はキャビテーション騒音の計測に有害な影響を与え、もし騒音が伝達する径路に気泡核が存在すると、騒音は極端に減衰される。しかし、騒音の伝達する径路に気泡核が存在しない確率を期待すると、計測時間が長ければ、それに比例して騒音の到達する回数も増加する。したがって、図-16 (図-5) や図-18 (図-7) のクラウド状態 (◇印) では計測時間を延長すべきであった。

図-17 のクラウド状態 (◇印) は、“数は少ないが波高の大きい成分”を上部の“たるみ”として明瞭に示しており、これは、クラウドキャビテーション発生時の特徴である衝撃圧を示すものと考えられる。この“たるみ”は 図-16 および 図-18 のクラウド状態 (◇印) においても見ることができる。特に 図-16 では、図-5 においては単に意味を持たない点の羅列であったものが明瞭な“たるみ”を示している所に意義はあるが、捕え得た騒音の数があまりにも少ないので、これ以上のことを判断することはできない。

b) 図-8 および 図-19 の E 丸の実船試験の結果について考察すると、初生状態 (○印) では、99.7% までの点は直線状に分布している。また尖度が大きい理由は、波高の大きい成分 (雑音と思われる) が存在しているためである。また、チップ状態 (△印) やシート状態 (□印) は、初生状態 (○印) と似ているが、尖度が小さい理由は、波高の大きい成分が少ないことと、80~99.9% の分布が初生状態 (○印) と比べて勾配が大きい (標準偏差が小さいため) と考えられる。クラウド状態 (◇印) では、明瞭に“たるみ”のある分

布を示しており、観測によっても、クラウドキャビテーションが認められた¹⁰⁾。また、チップ状態 (△印) およびシート状態 (□印) でもクラウドキャビテーションが認められた¹⁰⁾が、図-19 もこのことを裏書きしているようである。

c) 図-9 および 図-20 の 2 次元振動翼の結果では、初生状態 (○印) は大体直線と考えられるが、準シート状態 (△印) の 95% 以上はかなり“たるみ”を生じており、“数は少ないが波高の大きい成分”の存在を示す。一方、シート状態 (□印) とクラウド状態 (◇印) では勾配は多少減少して標準偏差が増加したことを示すが、大体直線状の分布を示す。このことから、クラウドキャビテーションは、シート状態のように安定した状態からつぎの安定した状態 (たとえば、スーパーキャビテーション状態) へ遷移する過渡的な段階に発生するのではないかと推論される。本報告の中で定義したシート状態とクラウド状態は、振動翼においてはスーパーキャビテーションあるいは安定したキャビテーションの状態であり、本報告の分類上の準シート状態がクラウドキャビテーションを発生する状態ではないであろうか。

船用プロペラと振動翼は、クラウドキャビテーションによる浸食を受けることでは同様であるが、振動翼にはチップボルテックスキャビテーションが無いなどの異なった点も数多くあるので、上記のことを早急に断定することはできない。今後実験を続けて行ってみる必要がある。

d) 図-10 および 図-21 の発電用水車模型の結果においては、初生状態 (○印) およびチップ状態 (△印) では大体直線状に分布している。ただし、尖度が小さい理由は、前述の低レベルの不安定性に起因するものと考えられる。シート状態 (□印) では 99%、クラウド状態 (◇印) では 90% 付近を折点とする“たるみ”が生じており、ともに“数は少ないが波高の大きい成分”の存在を示す。これは、クラウドキャビテーションまたはこれに相当するものがシート状態から現われ始め、クラウド状態で更に発生頻度が増加したものと推察される。

e) 図-11 および 図-22 は、均一流中の模型プロペラの場合を示すもので、チップ状態 (▲印) の左端の一点を除き、一般に滑らかな分布をしており、不均一流中のような“たるみ”は見られない。チップ状態 (▲印) の最下位の 1 点は、前述のレベルの変動に起因するものであろう。

7.4 考 察

上記の事項からつぎの考察を導くことができる。

- 1) キャピテーション騒音の音圧は、対数正規分布図に発生するため、この累積波高頻度分布図を作成することによって、不均一流中のキャピテーション騒音に、“数は少ないが波高の大きい成分”の存在することが明らかになった。また、その分布傾向に特有性を見出すことができ、これをもってクラウドキャピテーションの発生を間接的にはあるが検出することができた。これらの一部は観測でも確認されている。
- 2) キャピテーション騒音の波高頻度は、状態を初生状態(○印)からチップ状態(△印)に変化すれば増加するが、チップ状態(△印)からシート状態(□印)に変更すれば、波高頻度は減少することが多い。しかし、シート状態(□印)では、波高の大きい成分が発生し始めているので、波高の大きい成分の発生を指標とすることができるであろうし、シート状態(□印)からクラウド状態への移行は、波高の大きい成分の増加が指標となるであろう。なおこの場合、気泡核の成長によりキャピテーション騒音がかなり減衰を受けた場合でも、波高の大きい成分の増加を把握し得る場合があるので、可能であれば、計測時間を十分とることが必要であろう。
- 3) 図-19のクラウド状態(◇印)の波高の大きい成分の存在を示す折点は99.9%付近にあるが、図-18のクラウド状態(◇印)のは90%付近にある。また、図-19に示したE丸の就航後に発生したプロペラのキャピテーションによる浸食の程度は、図-18に示したA丸の就航後に発生したプロペラのキャピテーションによる浸食の程度よりはるかに軽微であった¹¹⁾。もし、プロペラの浸食に関連するキャピテーション騒音が前述の波高の大きい成分であるとすれば、波高の大きい成分の少ない方がキャピテーションの浸食が少なくと考えても良いであろう。

8. 計測に関する問題点

8.1 ハイドロフォン

ハイドロフォンは、この目的のために製作されたものでなかったため、電気的な遮蔽が不十分で、特に校正時あるいはサイリスタを使用した機器の周辺で使用した場合に、雑音を防止するために少なからぬ時間を要した。ハイドロフォンの帯域幅は、この程度の定性的な計測への使用には十分であった。

8.2 前置増幅器

前置増幅器は、線形な特性のものを使用したがる、キャピテーション騒音のダイナミックレンジ(最強信号と最弱信号の比)が大きかったので、最適の信号対雑音比が得られたとは言えない。この解決策として、最近開発された応答速度の早い素子を用いた対数増幅器で信号対雑音比を圧縮すれば、対数正規分布図を作る場合も対数確率紙のかわりに正規確率紙が使用できる。しかし、この方法では低レベルの熱雑音の処理法が問題になるであろう。

8.3 波形記録装置

波形記録装置は、筆者が使用した機器よりも、デジタル式アナログ記録装置の0.1 $\mu\text{sec/sample}$ 程度のものである。ただし、この場合の前置増幅器は、線形なものが必要である。

8.4 波高頻度分析装置

波高頻度分析装置は、ウィンドウのドリフトが少ないものを使用することは当然であるが、そのほかの性能は、前置増幅器にどのようなものを選ぶかによって左右される。もし、前置増幅器に対数増幅器を使用する場合は、現在のままのチャネル数(200 ch)で十分であろう。最高カウント数は、現在のものより更に1桁(10^7 まで)あることが望ましい。

8.5 演算装置

現在では、計測データより対数正規分布図を作成して、始めてキャピテーションの発生状況が推察できるが、この処理は比較的単純なので、マイクロコンピュータによりXYプロッタあるいはCRTディスプレイに直ちに出力させることも可能であろう。

9. 結 論

船用プロペラ等のキャピテーション騒音の計測から、キャピテーションの発生状況を推定するため、キャピテーション騒音が、一般的な雑音の影響を受けにくい超音波のインパルス成分を含むことを利用して、その波高頻度を計測した。その結果、対数確率紙に対数正規分布図を作成することにより、不均一流中で作動するプロペラ等に特有な現象であるクラウドキャピテーションを判別できた。しかし、この研究での計測結果の適用例は乏しく、まだ未解決の多くの問題を抱えている。したがって、今後さらに適用例を増やしてデータを集積し、本報告で有効性を示した判別法を発展させて、より正確で容易な判別法の確立をはかる必要があるであろう。

謝 辞

本研究に関し御協力頂いた方々（代表）を列記し、
 深甚な感謝の意を表わしたいと思います。

1. ハイドロフォン関係

東京工業大学精密工学研究所奥島基良教授
 東北大学工学部奥山大太郎教授（当時）
 防衛庁技術本部第5研究所漆原清第一部長（当時）
 沖電気工業株式会社研究所
 国際電気株式会社福田尚実超音波製造部長（当時）

2. 試験関係

東京大学工学部船舶工学科田宮真教授（当時）
 川崎重工業株式会社岡本洋推進性能班長（当時）
 三井造船株式会社昭島研究所安部光弘推進性能研究
 室長
 三菱重工株式会社神戸研究所安藤錠治水力研究室長
 （当時）

参 考 文 献

- 1) H. M. Fitzpatrick and M. Steinburg, "Hydrodynamic Source of Sound", 1st. Sym. Naval Hydrodynamics, Sep. 1957
- 2) 河西千広, 奥山大太郎他, "圧電振動子の過渡応答特性を利用した active dumping", 日本音響学会研究発表会講演論文集, Vol. 1, 1969年
- 3) 奥島基良, "変換器の感度特性", 超音波技術便覧, 昭和43年5月改訂2版
- 4) 志波久光, "船舶試験所空洞試験水槽に就て", 船舶試験所報告第5号, 昭和17年2月
- 5) "大型キャビテーション試験水槽の建設について", 船舶技術研究所報告第14巻1号, 昭和52年1月
- 6) イ・ポフ, "機械工学における空気力学実験法", 朝倉書店, 昭和44年2月
- 7) 高橋 肇, 荒井 能, "キャビテーション騒音の研究", 第24回運輸技術研究所研究発表会講演概要, 1962年11月
- 8) 伊藤達郎, 門井弘行, "船用プロペラのキャビテーション(その2)", 第2回船用プロペラに関するシンポジウム, 1971年3月
- 9) 岡松正泰, "推計学ノート", 第5版, オーム文

- 庫, 昭和31年
- 10) 横尾幸一他, "3軸コンテナ船の推進性能の研究", 日本造船学会論文集133巻, 昭和48年6月
 - 11) H. Takahashi et al, "Comparison of cavitation phenomena between the actual and model ship propellers, and erosion survey on the actual propeller", Proceeding of 14th. ITTC, Vol. 2, Sept. 1975
 - 12) 早田保実, "パルス電子工学", 第2版, 日刊工業新聞社, 昭和35年4月

付録 現象の立上り時間および継続時間と、それを計測する計測器の周波数帯域について

一般に、高周波数の変動を含む現象を計測するための計測器は、減衰度がいかなる場合にも、計器の固有振動数が測定周波数の10倍以上あれば、振幅決定の誤差は1%を越えない⁶⁾。本報告の場合は、立上がり時間が1 μ secのパルスであるから、立上がりと同下がりと同様であるとしても測定周波数は500 KHzであり、計器の固有振動数(10 MHz)および帯域(5 MHz)は充分上記の条件を満足している。

一方低周波数の帯域について、現象の継続時間と等しい周期の矩形波を考え、この矩形波が現象の継続時間と等しい時定数を持った不完全微分回路を通過すると、傾き(sag)は振幅の37%に達する。そしてこの傾きを1%以内に押えるには50倍の時定数を持たせることが必要である¹²⁾。しかし、現象の継続時間と等しい周期の正弦波が、現象の継続時間に等しい時定数の不完全微分回路を通過したときの振幅減少率は1.3%に過ぎない。したがって、実際の一般の波形の場合の計測誤差は上記の矩形波の場合の37%よりは小さく、正弦波の場合の1.3%よりは大きい値をとるものと考えられる。本報告の場合は低域に存在する雑音を減衰させるために、不完全微分回路の時定数を約10 μ secとしたが、この数値はやや小さ過ぎたと考えられる。