

「広幅浅吃水船に装備されたハイスキュープロペラのキャビティ・ボリュームにより誘起される船尾変動圧力」

右近 良孝* 黒部 雄三* 角川 明* 牧野 雅彦*

Pressure Fluctuations Induced by Cavity Volume on Highly Skewed Propellers for a R_o/R_o Ship

By

Yoshitaka UKON, Yuzo KUROBE, Akira KAKUGAWA
and Masahiko MAKINO

Abstract

In this report, the results of the extensive cavitation experiment on a R_o/R_o ship are described. It is well known that this type of ship often suffers from serious hull vibration induced by propeller cavitation. The effectiveness of highly skewed propellers on reduction of pressure fluctuation is examined through the measurements of pressure fluctuation.

In order to investigate the relationship between cavity volume and pressure fluctuation, cavity volume on highly skewed propellers is measured by the Laser Scattering Method developed in the Ship Research Institute.

The measurements of pressure fluctuation and cavity volume are performed not only in the axial wake field behind wire mesh screen, but also in a three dimensional wake field behind a complete model ship to clarify the influence of wake on propeller cavitation. Significant differences were observed on cavitation pattern and the amplitude distribution of pressure fluctuation in two kinds of wake fields. On the other hand, good agreements were obtained on maximum amplitude of pressure fluctuation, cavitation extent, and cavity volume for highly skewed propellers in the same situation.

From comparison between the experimental result and the one calculated by using the measured cavity volume as input data, good qualitative agreement between three propellers was obtained.

In addition, the effect of nuclei seeding by electrolysis and of roughness application to the leading edge of the propeller blade on unsteady cavitation is also examined.

目次

- | | |
|------------------|--|
| 1. 緒言 | 2.3 プロペラ単独試験 |
| 2. 供試模型および試験条件 | 2.4 伴流計測 |
| 2.1 試験の概要 | 2.5 試験条件 |
| 2.2 模型船および模型プロペラ | 3. ワイヤ・メッシュ伴流におけるキャビテーション試験, 平板での変動圧力計測およびキャビテ |

* 推進性能部

ィ・ボリュウム計測

3.1 試験の実施

3.2 キャビテーション観測

3.3 平板での変動圧力計測

3.4 キャビティ・ボリュウムの計測

4. 模型船伴流におけるキャビテーション試験，船尾変動圧力計測およびキャビティ・ボリュウム計測

4.1 試験の実施

4.2 キャビテーション観測

4.3 模型船での船尾変動圧力計測

4.4 キャビティ・ボリュウムの計測

5. 船尾変動圧力の理論計算と実験結果との比較

6. 考察

6.1 キャビテーションのパターン

6.2 船尾変動圧力

6.3 水素気泡の添加と粗さの影響

7. 結言

謝辞

参考文献

補追

船舶技術研究所大型キャビテーション試験水槽の計測および解析システムについて

1. 緒言

近年，海運界における経済性の追求は格段に厳しく，低回転大直径プロペラ船に見られる様な省エネルギー船の建造がなされているが，船体とプロペラとの間隔が小さくなりがちなため，船尾振動が大きな問題¹⁾となっている。また，新しい輸送方式の出現に伴って船型が多様化し，特に自動車運搬船 (Car Carrier) などの広幅浅吃水船型に見られる様な長大でかつ平坦な船尾張り出し部をもつ船では，プロペラ起振力による船尾振動はなお一層深刻な問題である。

本報告では，近年盛んに採用され始めてきた²⁾ハイスキュープロペラ (Highly Skewed Propeller) が広幅浅吃水船の船尾変動圧力に対してどのような軽減効果があるかを調べるため，キャビテーション試験と船尾変動圧力計測を行う。また，船用プロペラに発生するキャビテーションの発生範囲は，粘性を考慮することでかなりの精度で計算することができるが^{3),4)}，キャビティの形状およびボリュウムの理論推定に関しては，解決されるべき問題が多い。そこで本報告では著者らによって新たに開発された，レーザー光がキャビ

ティの表面で散乱されることを利用したレーザー光散乱法⁵⁾によりキャビティの厚さを実測し，ハイスキュープロペラに発生するキャビティの形状を調べる。

本報告では，ワイヤー・メッシュ後方の伴流中と模型船後方の伴流において，キャビテーション試験，船尾変動圧力計測，キャビティ・ボリュウムの計測を行い，その比較をし，伴流の相異の影響も調べている。これと同時にキャビテーション試験法の確立のため，水素気泡の添加および粗さを付けたことによる非定常キャビテーションへの影響を調べる。

また，キャビティボリュウムの計測値を入力データとして Huse の方法⁶⁾により船尾変動圧力を計算し，各ハイスキュー・プロペラでの計測結果と比較する。

本報告のうち，実験関係の一部は日本造船研究協会第183研究部会「船尾振動・騒音の軽減を目的としたプロペラおよび船尾形状の研究」との共同研究として昭和56年度に船舶技術研究所が担当したものである。

2. 供試模型および試験条件

2.1 試験の概要

本報告の対象船型は，日本造船研究協会第171研究部会において研究されたSR171広幅浅吃水船シリーズのC船型⁷⁾を母型として，実用船型 (car carrier) の実績を加味して得られた広幅浅吃水船 (R_0/R_0 船型)，いわゆるSR183船型⁸⁾である。本広幅浅吃水船の船尾変動圧力計測とキャビティ・ボリュウム計測に先立って，伴流計測とプロペラ単独性能試験が行われ

Table 1 Principal Particulars of Ship

| Ship Items | | Model | Full Scale |
|----------------|---------------|--------|------------|
| L_{pp} | (m) | 5.6241 | 150.000 |
| L_{WL} | (") | 5.8491 | 156.000 |
| B_{MLD} | (") | 1.2498 | 33.333 |
| d_{MLD} | (") | 0.3674 | 9.800 |
| Trim | (") | 0 | 0 |
| Displacement | (m^3) | 1.5573 | 29,545 |
| " | (t) | | 30,284 |
| Wetted Surface | (m^2) | 8.1183 | 5,774.9 |
| C_B | | | 0.604 |
| C_p | | | 0.623 |
| C_M | | | 0.970 |
| l_{cb} | (% L_{pp}) | | 1.809 |
| L/B | | | 4.500 |
| B/d | | | 3.401 |

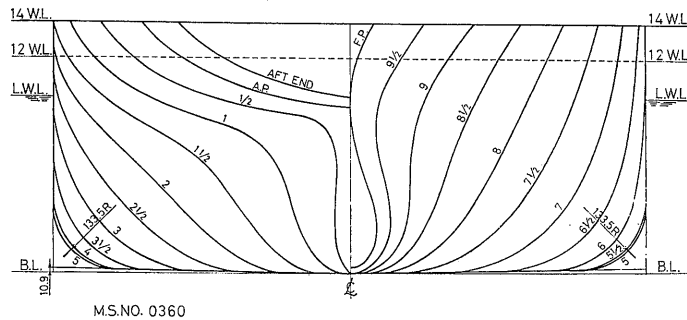


Fig. 1 Body Plan of R_0/R_0 Ship

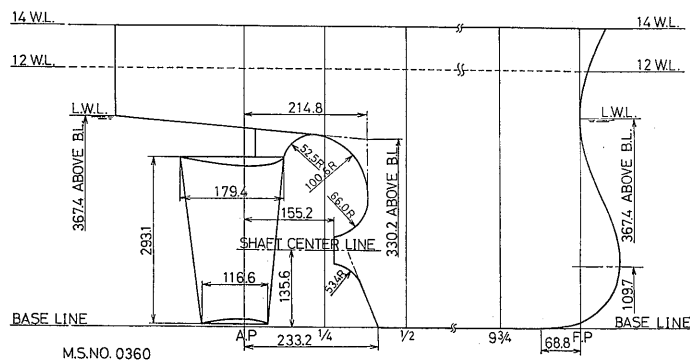


Fig. 2 Stem and Stern Shapes of R_0/R_0 Ship

た。キャビテーション試験は、曳航水槽における模型船の伴流分布をワイヤー・メッシュによりシミュレートした軸流方向不均一流中（以下、ワイヤー・メッシュ伴流という）と模型船後方の3次元不均一流中（以下、模型船伴流という）において行われた。

2.2 模型船および模型プロペラ

広幅浅吃水船の模型 (M. S. NO. 0360) は船長5.6241 mのパラフィン・ワックス製であり、その船体主要目を Table 1 に、正面線図および船首尾部形状を Fig. 1 および 2 にそれぞれ示す。実船は船長150 mを想定しており、 $B/d=3.40$ 、 $L/B=4.50$ である。模型船の深さは曳航水槽では14WLとし、キャビテーション水槽では12WLとした。ビルジ・キールは取り付けず、スタッドは植えていない。

模型プロペラは可変ピッチプロペラ型であり、その形状はAU-CP 4翼シリーズ試験に用いられた母型プロペラと同一の通常型プロペラと45°スキューおよび60°スキューのハイスキュープロペラである⁹⁾。以下、これらのプロペラをそれぞれMP-1、MP-2

Table 2 Particulars of Model Propellers

| Model Propeller | 1 | 2 | 3 |
|-----------------------|--------------------|------|------|
| M. P. No. (SRI) | 0211 | 0212 | 0214 |
| M. P. No. (SRC) | 2197 | 2198 | 2201 |
| Diameter (m) | 0.250 | | |
| Boss Ratio | 0.300 | | |
| Pitch (m) | Const. 0.1825 | | |
| Pith Ratio | Const. 0.730 | | |
| Exp. Area Ratio | 0.550 | | |
| Blade Thickness Ratio | 0.050 | | |
| Blade Section | MAU | | |
| Number of Blades | 4 | | |
| Rake Angle (deg.) | 0° | -4.0 | -6.0 |
| Skew Angle (deg.) | 11.0 | 45.0 | 60.0 |
| Type of Skew Line | Forward & Backward | | |

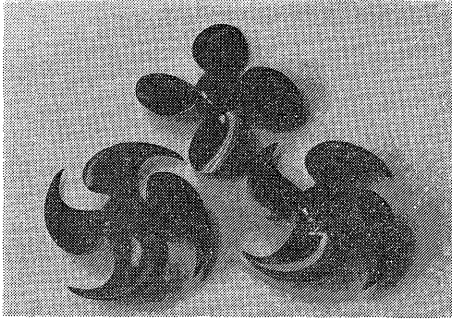


Fig. 3 Three Tested Model Propellers

そしてMP-3プロペラと呼ぶことにする。

上記のプロペラのピッチ比と展開面積比は次の様なプロペラ設計点で求められている⁹⁾。

船速 $V_s = 19.0 \text{ kn } (F_n = 0.250)$
 主機関×回転数 $21,400 \text{ PS} \times 127 \text{ RPM}$

これらのプロペラの主要目を Table 2 に、それらの形状を Fig. 3 の写真に示す。Fig. 3 において、上より時計回りの順でMP-1, MP-2, MP-3プロペラである。Table 2 に示されたこれらのプロペラのうち、MP-1およびMP-2プロペラはそれぞれ2個づつ製作されている。即ち、MP-1プロペラとして M. P. NO. 0211 と M. P. NO. 2197 の2個、およびMP-2プロペラとして M. P. NO. 0212 と M. P. NO. 2198 の2個が製作されている。M. P. NO. 0214 は M. P. NO. 2201 のことである。M. P. NO. 2197, 2198 および2201は日本造船技術センター（以下、造技センターという）での模型登録番号である。また、これらの模型プロペラは可変ピッチ機構を持っていない。

2.3 プロペラ単独性能試験

本試験で用いられたプロペラのうち、MP-1 (M. P. NO. 0211) とMP-2 (M. P. NO. 0212) プロペラの単独性能試験を船舶技術研究所（以下、船研という）の中水槽（長さ140m）において行った。使用した動力計は中型動力計（スラスト容量；±80kg）である。この結果をFig. 4に示す。併せて同図中に造技センターにおいて計測されたMP-3プロペラ (M. P. NO. 0214； M. P. NO. 2201) の単独性能曲線⁹⁾を示す。試験時のプロペラの没水率 I/D は1.0である。

Fig. 4 における3つのプロペラの単独性能曲線を比べるとMP-3プロペラの K_T および K_Q が大幅に小さくなっている。これはプロペラ翼の撓みによるものであり、回転数が小さくなるとMP-3の単独性能曲線はMP-1およびMP-2プロペラのそれに近

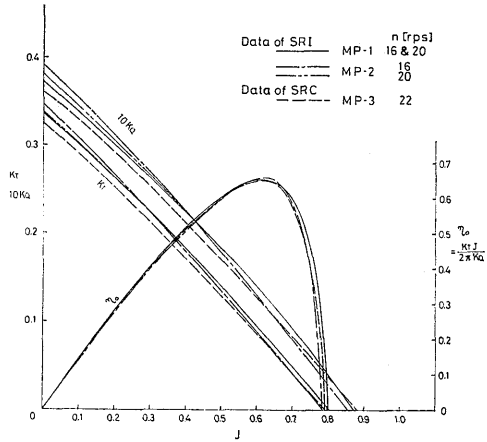


Fig. 4 Characteristics of MP-1, MP-2 and MP-3 Propeller in Open Water

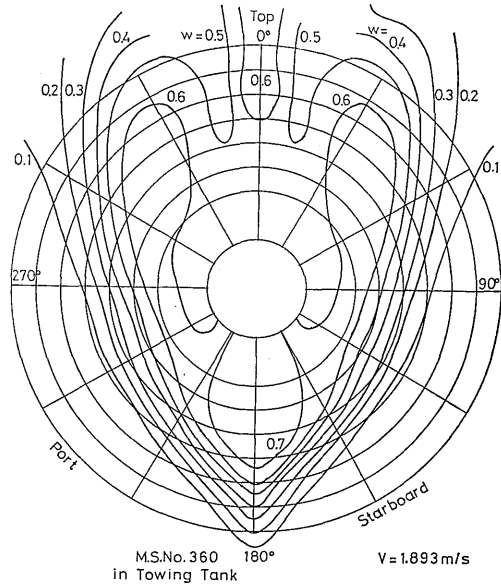


Fig. 5 Wake Distribution of R_0/R_0 Model Ship in Towing Tank

づく⁹⁾。プロペラ設計点 $J=0.478$ では3つのプロペラの効率に大きな差はない。

2.4 伴流計測

広幅浅吃水船 (M. S. NO. 0360) のプロペラ面における伴流計測を大水槽（長さ400m）において、満載状態 $F_n=0.250$ について行った。この伴流分布の計測結果を Fig. 5 に示す。本計測は球型5孔ピトー管により1点づつトラバースして行われた。造技センタ

一での計測結果⁸⁾と比べると, bottom 附近での若干の差異を除き, ほぼ同一の分布となっている。また, 本計測で得られた伴流分布は全く左右対称であった。

2.5 試験条件

キャビテーション試験のための試験条件は次の様に決定された。満載状態は前述のプロペラ設計点における通常プロペラのスラスト係数 K_T を求め, この K_T に一致させて試験を行うこととした。一方, バラスト状態の K_T はその排水量を満載排水量の65%, トリムを1% L_{pp} として, SR171C 船型の水槽試験の結果に基づき推定されたものであり, ⁸⁾ 伴流分布は満載状態でのそれと同じと仮定されている。

キャビテーション数は次式で与えられるシャフト・センターにおける静圧 P_0 とプロペラ回転数 n に基づくキャビテーション数 σ_n とした。

$$\sigma_n = \frac{P_0 - e}{1/2 \rho n^2 D^2}$$

但し, D はプロペラ直径, ρ は密度, e は蒸気圧である。

以上の様にして決められたワイヤー・メッシュ伴流と模型船伴流でのキャビテーション試験, 変動圧力計測およびキャビティ・ボリューム計測の試験条件をそれぞれ Table 3 および 4 に示す。Table 3 のワイヤー・メッシュ伴流において, 満載状態ではプロペラ回転数 25rps で $K_T=0.137$ となる様に測定部の流速が決定された。バラスト状態では同一流速で $K_T=0.129$ となる様にプロペラ回転数が決められた。一方, Table 4 の模型船伴流において, 満載およびバラスト状態ともプロペラ回転数は模型船および後述の整流体“Flow liner”の強度の点から 20rps と決定した。測定部の流速, 即ち船速は K_T 一致法により決定した。本試験での空気含有率 (gas content ratio) α/α_s

Table 3 Experimental Condition of Cavitation Test in Wake behind Wire Mesh

| Propeller | Cond. | K_T | σ_n | n (rps) | α/α_s | ϑ_w (°C) | Condition of Blade Surface |
|---------------------------|---------|-------|------------|--------------|-------------------|-----------------------|----------------------------|
| M. P. No. 1 (11° skew) | Full | 0.137 | 1.649 | 25.00 | 0.7 | 28 | Rough & Smooth |
| | Ballast | 0.129 | 1.443 | 23.66 | 0.7 | 28 | |
| M. P. No. 2 (45° skew) | Full | 0.137 | 1.649 | 25.00 | 0.7 | 28 | Smooth |
| | Ballast | 0.129 | 1.443 | 23.60 | 0.7 | 28 | |
| M. P. No. 3 (60° skew) | Full | 0.137 | 1.649 | 25.00 | 0.7 | 28 | Smooth |
| | Ballast | 0.129 | 1.443 | 23.60 | 0.7 | 28 | |

Table 4 Experimental Condition of Cavitation Test in Wake behind Model ship

| Propeller | Cond. | K_T | σ_n | n (rps) | α/α_s | ϑ_w (°C) |
|---------------------------|---------|-------|------------|--------------|-------------------|-----------------------|
| M. P. No. 1 (11° skew) | Full | 0.137 | 1.649 | 20.0 | 0.6 | 15 |
| | Ballast | 0.129 | 1.443 | '' | '' | '' |
| M. P. No. 2 (45° skew) | Full | 0.137 | 1.649 | '' | '' | '' |
| | Ballast | 0.129 | 1.443 | '' | '' | '' |
| M. P. No. 3 (60° skew) | Full | 0.137 | 1.649 | '' | '' | '' |
| | Ballast | 0.129 | 1.443 | '' | '' | '' |

はキャビテーション発生の間欠性 (intermittency) を出来るだけ避けるため, 両伴流中においてかなり大きい目 ($\alpha/\alpha_s=0.6\sim 0.7$) となっている。

3. ワイヤ・メッシュ後流におけるキャビテーション試験, 平板での変動圧力計測およびキャビティ・ボリューム計測

3.1 試験の概要

ワイヤー・メッシュ後流における不均一流中キャビテーション試験は船研の大型キャビテーション試験水槽第1測定部 (750mm ϕ) において行われた。上記試験で用いた伴流分布は, 曳航水槽における SR183 模型船の伴流分布を Fig. 6 に示す様にワイヤー・メッシュと金網を貼り付けたダミー・プレートによりシュミレートしたものであり, 12連単孔ピトー管により計測された。この計測結果を Fig. 7 に示す。曳航水槽での伴流分布 (Fig. 5 参照) と比較すると, パターンはかなり異なるところがあるが, トップ附近での伴流の特長はある程度とられていると言えよう。この伴流分布は Fig. 6 に示された変動圧力計測用平板が取り付けられていない時のものであり, 平板が取り付け

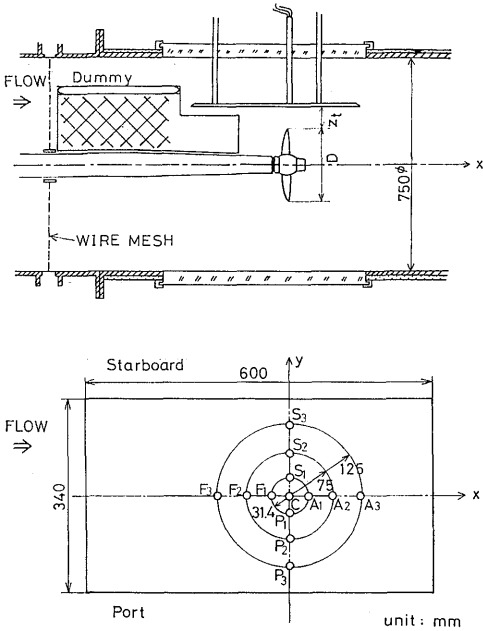


Fig. 6 Arrangement for Cavitation Test and Measurement of Pressure Fluctuations in No. 1 Working Section

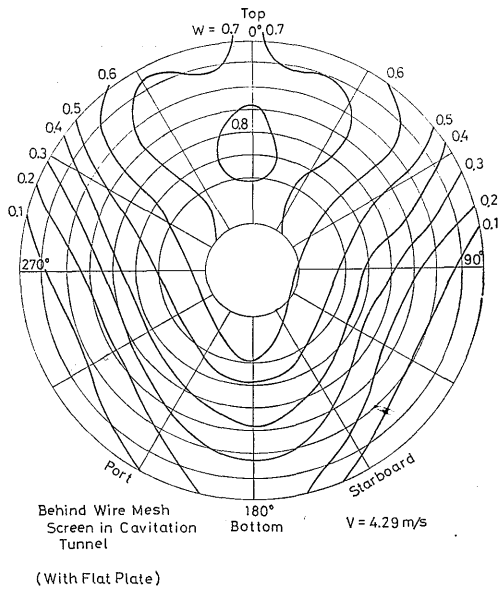


Fig. 8 Wake Distribution Simulated by Wire Mesh Screen and Dummy Plate with Flat Plate for Measurement of Pressure Fluctuations

られた時の伴流分布は Fig. 8 の様になる。両者を比較すると Top 附近において、平板がある時の方が伴流が大きくなっている。

ワイヤー・メッシュ後流における試験での供試模型プロペラは、通常型のMP-1プロペラ (M. P. NO. 2179)、45°スキューのMP-2プロペラ (M. P. NO. 2198) および 60°スキューのMP-3プロペラ (M. P. NO. 2201) である。

3.2 キャビテーション観測

3種類の模型プロペラの各試験状態におけるキャビテーション観測の結果をスケッチで Fig. 9A および B (以下、例えば、Fig. 9A および Bの両者について記述する時は Fig. 9 と略す) ~12に、写真で Fig. 13 ~16に示す。

今回の試験では空気含有率が大きいにも拘らず、キャビテーション発生 of intermittency が顕著であり、特にMP-1プロペラに関して発生範囲の不安定さがひどかったので、MP-1模型プロペラの前縁に約 0.5mm の幅で #220のカーボランダムを付けた場合についても試験を実施した。スケッチはキャビテーションの最大発生範囲を示す。Fig. 9 と10ならびに Fig. 13と14を比較して分かる様に、プロペラの前縁に粗さ

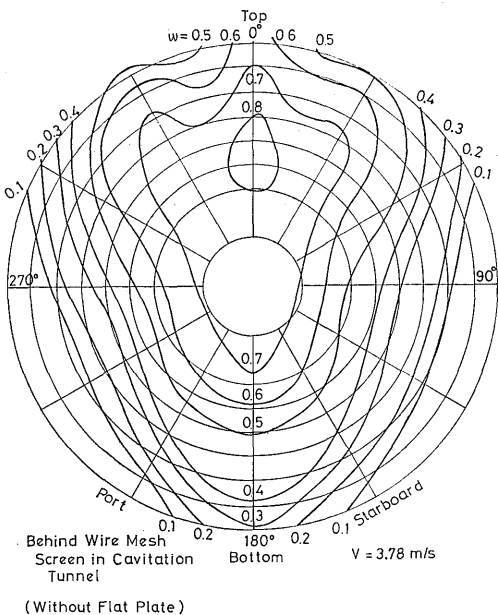


Fig. 7 Wake Distribution Simulated by Wire Mesh Screen and Dummy Plate without Flat Plate for Measurement of Pressure Fluctuations

MP-1 (Smooth)
Behind Wire Mesh
Full Load Cond. (MCR)

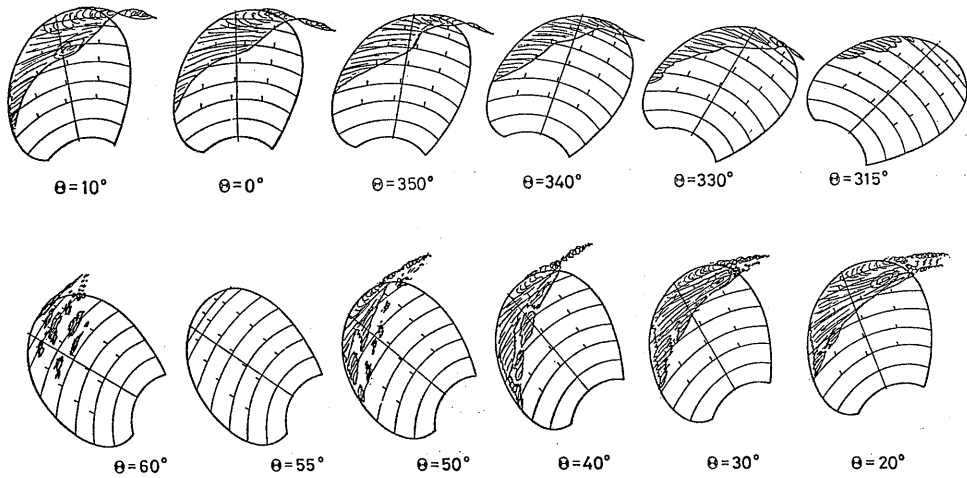


Fig. 9A Sketches of Cavitation Pattern on MP-1 Propeller without Roughness at Full Load Condition

MP-1 (Smooth)
Behind Wire Mesh
Ballast Load Cond (MCR)

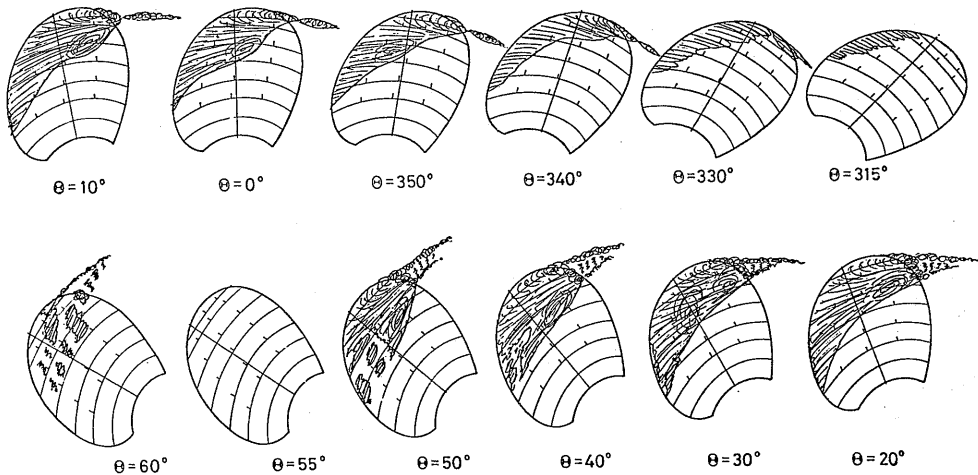


Fig. 9B Sketches of Cavitation Pattern on MP-1 Propeller without Roughness at Ballast Load Condition

を付けると、キャビテーション・パターンは定性的に変わらないが、キャビティ表面が条状となり、キャビテーションの発生範囲も若干広がり、安定化し、intermittency はなくなる。

MP-1 プロペラのキャビテーション・パターンは

満載状態およびバラスト状態とも翼角度 $\theta=40^\circ$ 以降において明瞭なクラウド・キャビテーションとその前方にちぎれた“パッチ状”のシート・キャビテーションが見られ、プロペラ翼の後縁側に向かって消滅しており、エロージョン発生危険性が充分に予想できる

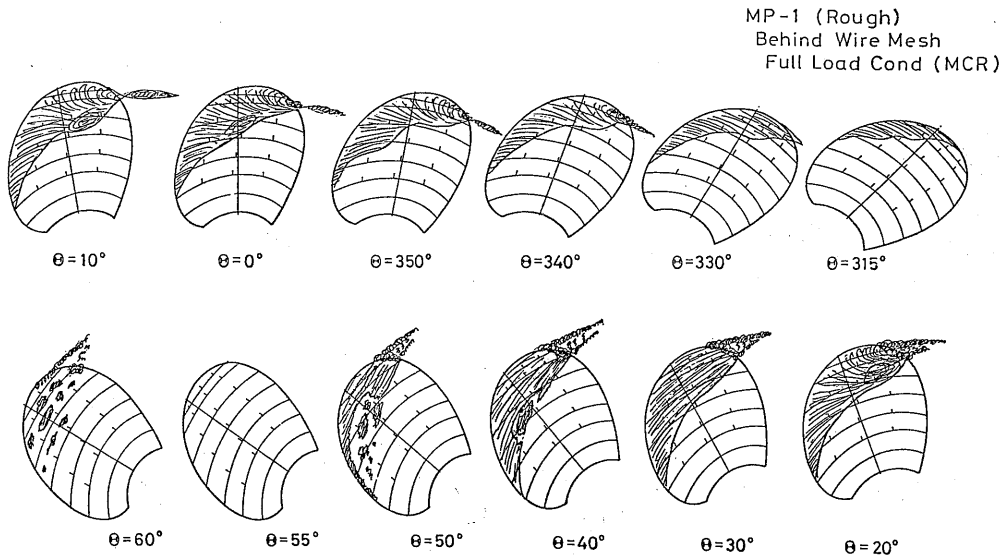


Fig. 10A Sketches of Cavitation Pattern on MP-1 Propeller with Roughness at Full Load Condition

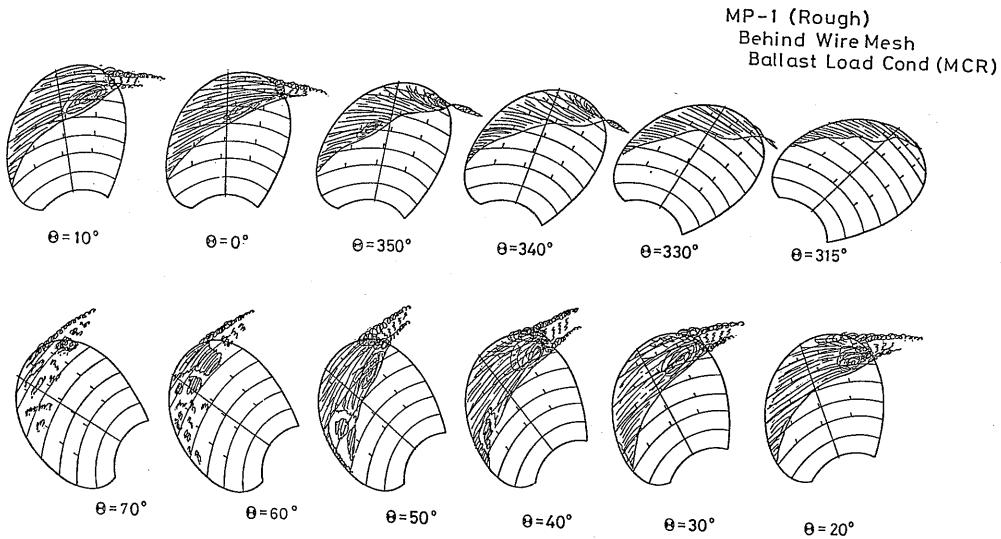


Fig. 10B Sketches of Cavitation Pattern on MP-1 Propeller with Roughness at Ballast Load Condition

ものであり¹⁰⁾、実際、実験中において模型プロペラ自身 (0.9R 附近の後縁) にもエロージョンが発生した。また、満載状態とバラスト状態でのキャビテーションの比較をすると、パターンは殆んど変わらないがバラスト状態での発生範囲が大きくなる。

MP-2 プロペラのキャビテーション・パターンは

(162)

Fig. 15 に示す様に、キャビティ表面の様相が通常型プロペラと異なり泡立って見え、チップ・ボルテックスが太く、また明瞭なクラウド・キャビテーションは見られなかった。Fig. 11 に示す様に満載とバラスト状態との違いは発生範囲だけであった。

MP-3 プロペラのキャビテーション・パターンは

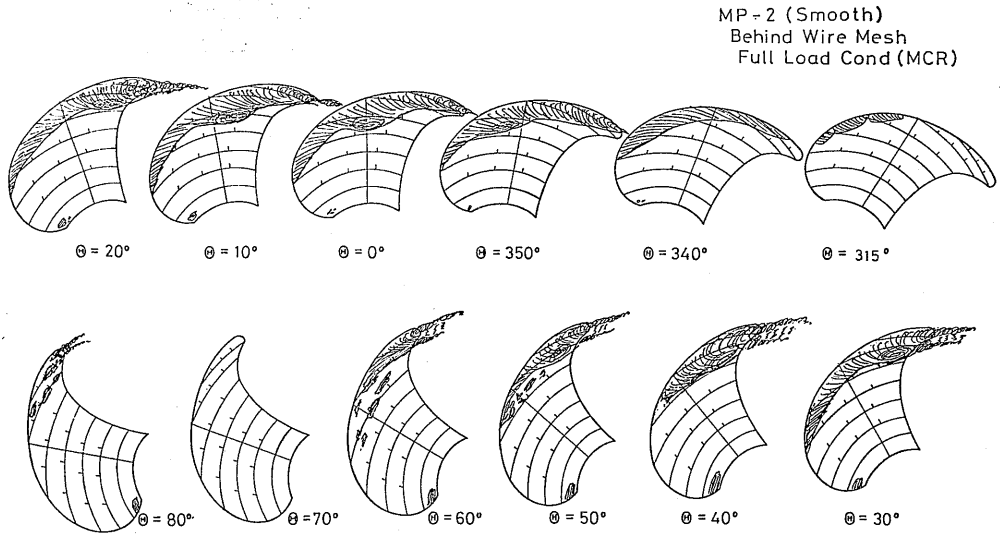


Fig. 11A Sketches of Cavitation Pattern on MP-2 Propeller without Roughness at Full Load Condition

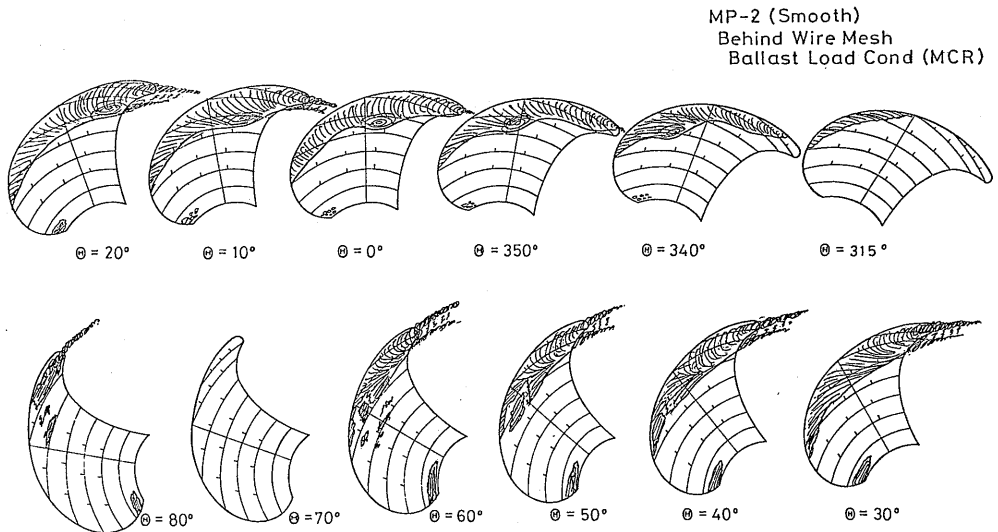


Fig. 11B Sketches of Cavitation Pattern on MP-2 Propeller without Roughness at Ballast Load Condition

Fig. 12 および16に示される様にMP-2プロペラとほとんど同じパターンであり、発生範囲はFig. 12に示される様にMP-1プロペラより少な目である。満載とバラスト状態との違いもMP-2プロペラと同様、発生範囲のみであった。

ハイスキュー・プロペラに発生するキャビテーション

ンは通常プロペラのキャビテーションと比較して、表面の様相が泡立って見えるばかりでなく、 $\theta=10\sim40^\circ$ の時、翼端前線のごく近傍においてキャビテーションが発生しない領域が存在した。ハイスキュー・プロペラのキャビテーションはチップ・ボルトテックスの影響を強く受けて roll-up し、キャビティの後端がプロペ

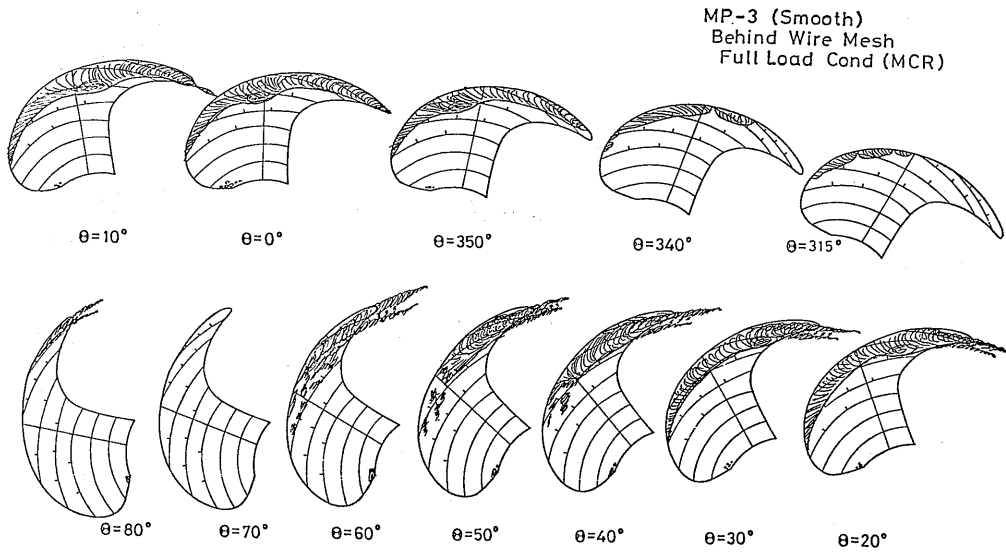


Fig. 12A Sketches of Cavitation Pattern on MP-3 Propeller without Roughness at Full Load Condition

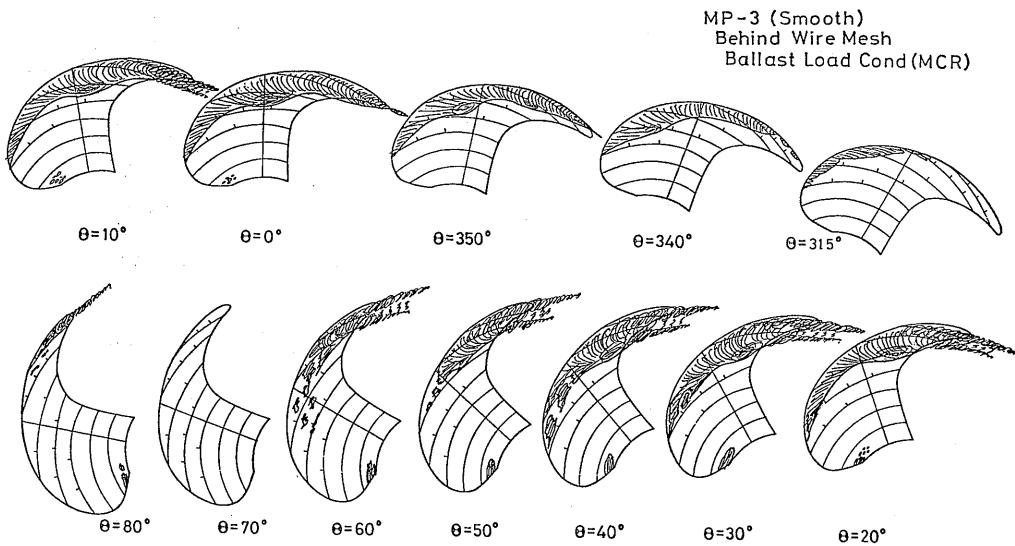


Fig. 12B Sketches of Cavitation Pattern on MP-3 Propeller without Roughness at Ballast Load Condition

ラ翼面から浮き上がる現象が見られた。

3.3 平板での変動圧力計測

プロペラおよびキャビテーションにより誘起される変動圧力の計測は、Fig. 6 に示される様にプロペラ上方に置かれた平板に取り付けられた圧力変換器により計測されることが多い^{11,12,13,14)}。本試験では11個の

コイン型圧力変換器 (ST社製, 容量 1 kg/cm^2 , 最大応答周波数 14 kHz) が使用され, その配置は Fig. 6 に示されている。チップ・クリアランス Tip clearance Z_t は $0.31D$ である。

変動圧力計測は, 満載およびバラスト状態に対し, それぞれキャビテーションが発生していない状態 (以