


 $\theta=0^\circ$

Fig. 13 Photos of Cavitation Pattern on MP-1 Propeller without Roughness at Full Load Condition


 $\theta=0^\circ$

Fig. 14 Photos of Cavitation Pattern on MP-1 Propeller with Roughness at Full Load Condition


 $\theta=0^\circ$

Fig. 15 Photos of Cavitation Pattern on MP-2 Propeller without Roughness at Full Load Condition

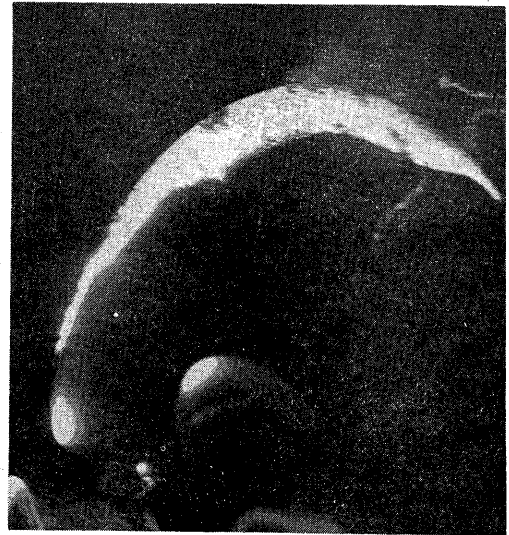

 $\theta=0^\circ$

Fig. 16 Photos of Cavitation Pattern on MP-3 Propeller without Roughness at Full Load Condition

下、非キャビテーション状態という)とキャビテーションが発生している状態(以下、キャビテーション状態という)について行った。計測された変動圧力波形は補追で述べられるデータ解析システムにより調和解析され、各 Blade Frequency の振幅および位相が調

べられた。

まず、非キャビテーション状態での変動圧力計測点 (Fig. 6 参照) における3種類のプロペラによる変動圧力波形をそれぞれ Fig. 17A, B およびCに示す。これらのうち点 S_1 (Fig. 6 参照) での圧力波形を

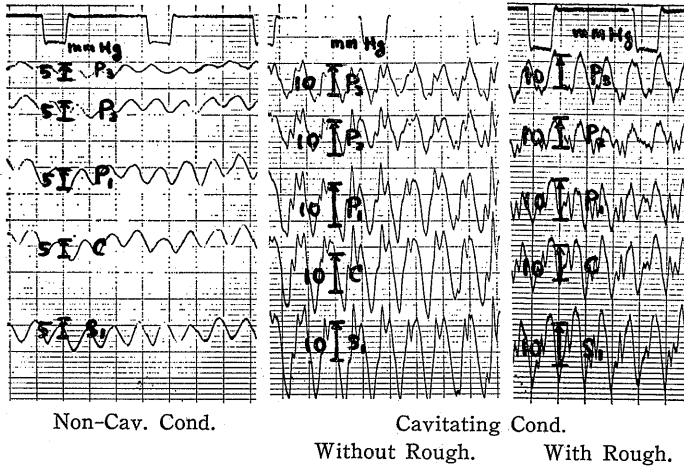


Fig. 17A Measured Fluctuating Pressure on Flat Plate Induced by MP-1 Propeller

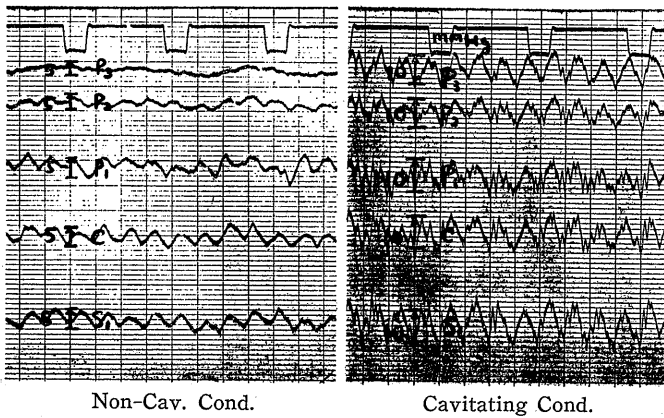


Fig. 17B Measured Fluctuating Pressure on Flat Plate Induced by MP-2 Propeller

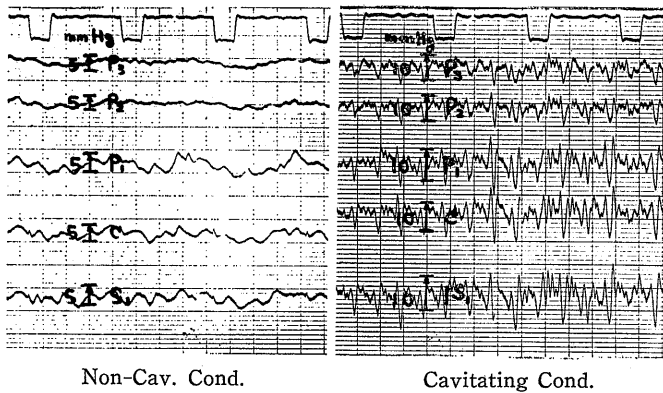


Fig. 17C Measured Fluctuating Pressure on Flat Plate Induced by MP-3 Propeller

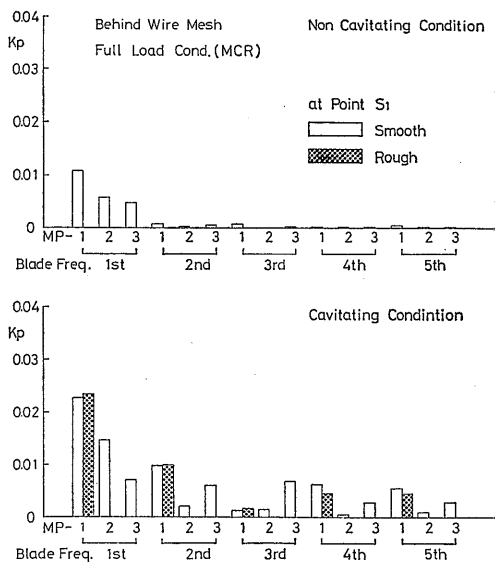


Fig. 18 Blade Frequency Components of Fluctuating Pressure Induced by MP-1 Propeller (at Point S_1)

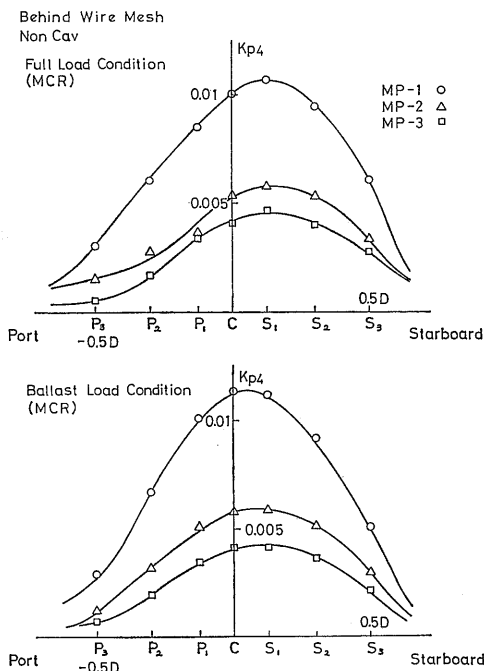


Fig. 19A Single Amplitude of Fluctuating Pressure on Flat Plate in Transverse Direction for Three Propellers in Non-Cavitating Condition (1st Blade Frequency Component)

A/D変換の後、FFTを用いてFourier解析して得られた各 Blade Frequency 成分の一例を Fig. 18 に示す。この結果非キャビテーション状態では各プロペラとも圧力振幅は Blade Frequency の一次成分以外は殆んどなく、スキューが大きくなるに従って圧力振幅は減少している。非キャビテーション状態における満載およびバラスト状態での変動圧力振幅の左右舷方向および上下流方向の分布を Fig. 19A および B に示す。ここで、 K_{p4} は圧力変動の単振幅の一次成分を $\rho n^2 D^2$ で無次元化したものである。両図からも分かる様に、キャビテーションが発生していなくともスキューが大きくなると、変動圧力振幅が約 1/2 ほど減少した。Fig. 20 に変動圧力の位相を示す。3種類のプロペラとも変動圧力の位相は、次式で与えられる幾何学的な位相 ϕ^* と良く一致している。 ϕ_0 をプロペラ翼が直上を向いた時の位相遅れとすると、

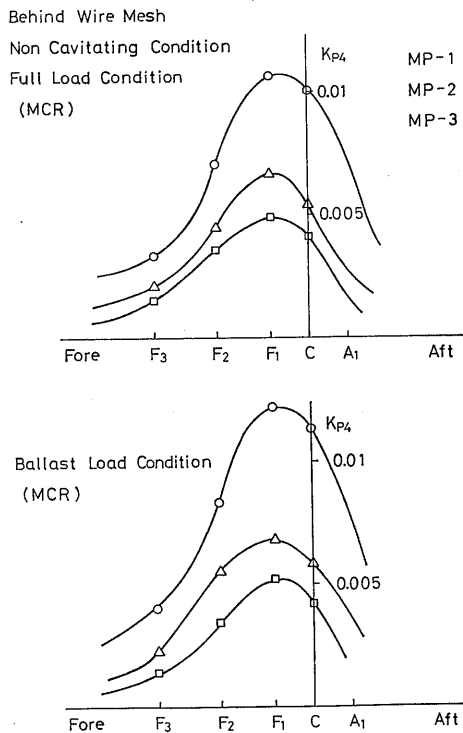


Fig. 19B Single Amplitude of Fluctuating Pressure on Flat Plate in Stream-wise Direction for Three Propellers in Non-Cavitating Condition (1st Blade Frequency Component)

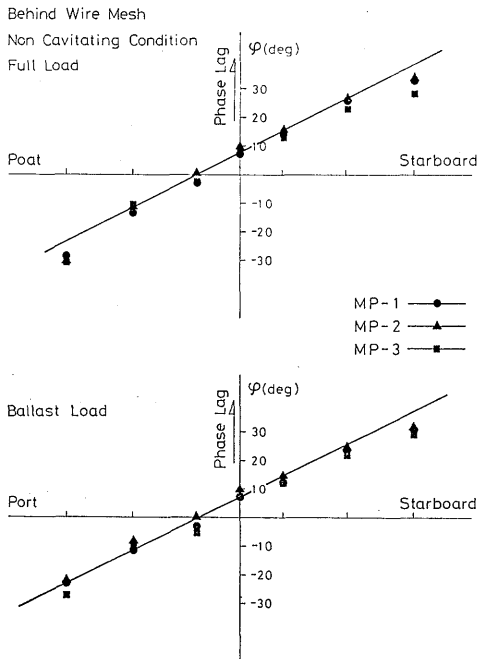


Fig. 20 Phase Angle of Fluctuating Pressure in Transverse Direction for Three Propellers (1st Blade Freq. Com-p.)

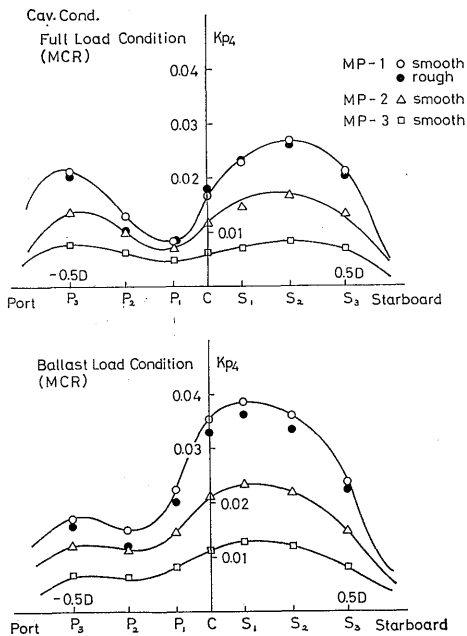


Fig. 21A Single Amplitude of Fluctuating Pressure in Transverse Direction for Three Propellers (1st Blade Freq. Comp.)

$$\phi^* = \tan^{-1} \left(\frac{Y/D}{1/2 + Z_i/D} \right) + \phi_0$$

キャビテーション状態での変動圧力計測点 (Fig. 6 参照) における3種類のプロペラの一回転中に誘起される変動圧力波形をそれぞれ, Fig. 17A, B および C に示す。これらのうち, 点 S₁ での圧力波形を Fourier 解析して得られた各 Blade Frequency 成分の一例を Fig. 18 に示す。変動圧力波形はキャビテーションが発生することにより, 高次成分が現われ, スキューが大きくなると一次成分は著しく小さくなるが, MP-3 プロペラでは高次成分がそれほど減少せず, むしろ MP-2 プロペラより増大する結果となった。

本試験において, 特に MP-1 についてキャビテーション発生 of intermittency が強かったので, 前縁に粗さを付けて変動圧力を計測した。この結果を Fig. 17A および 18 に示す。キャビテーションの発生は粗さ

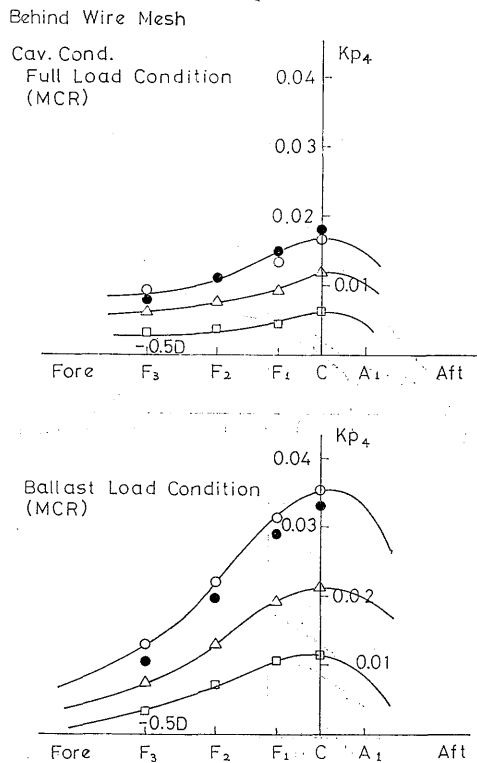


Fig. 21B Single Amplitude of Fluctuating Pressure on Flat Plate in Streamwise Direction for Three Propellers in Cavitating Condition (1st Blade Frequency Component)

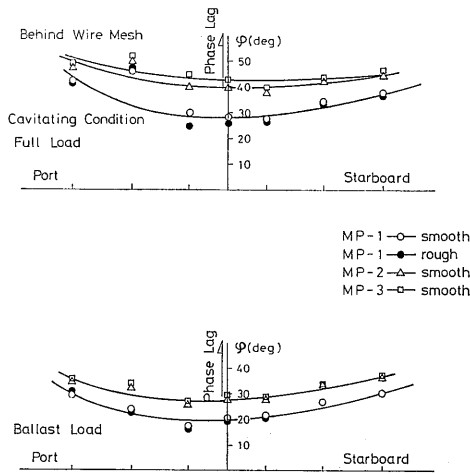


Fig. 22 Phase of Fluctuating Pressure on Flat Plate in Transverse Direction for Three Propellers in Cavitating Condition (1st Blade Frequency Component)

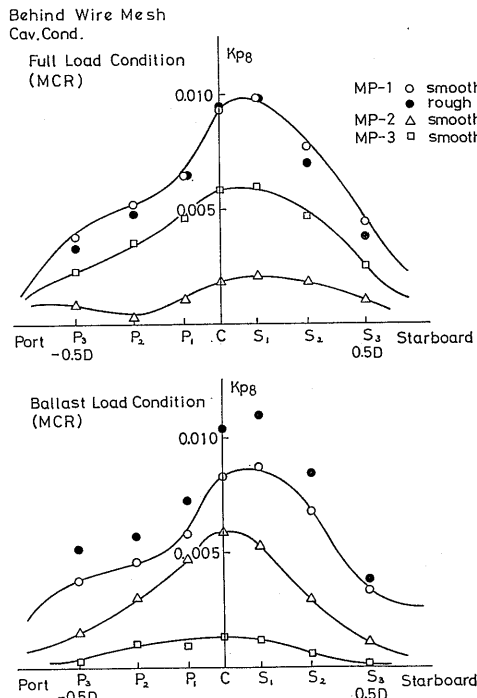


Fig. 23A Single Amplitude of Fluctuating Pressure on Flat Plate in Transverse Direction for Three Propellers in Cavitating Condition (2nd Blade Frequency Component)

をつけることによって安定化した。Fig. 17A において、粗さを付けると波形に高次成分が増した様に見えるが、Fig. 18 に示した調和解析の結果大きな差が見られなかった。また、Fig. 17A において粗さのある場合での振幅はない場合より小さくなっているが、変動圧力波形の記録された時と調和解析された時とが、必ずしも一致していないためである。

キャビテーションの intermittency が強いと、圧力振幅が少なくなると思われたが、本試験では粗さを付けても変動圧力振幅への影響が少なかった。これは空気含有率が高く、かつ10回転の平均波形を解析しているので、観測から危惧されたほど変動圧力に intermittency が強い影響を与えなかったのではないかと思われる。

Fig. 21A およびBにキャビテーション状態における満載およびバラスト状態での変動圧力振幅の一次成

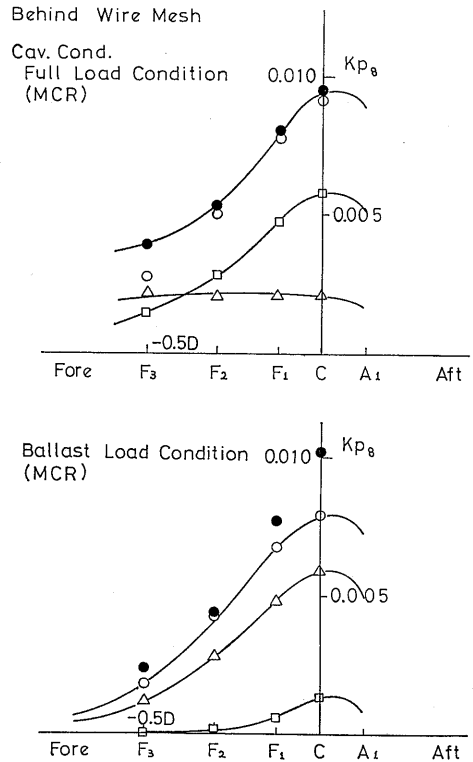


Fig. 23B Single Amplitude of Fluctuating Pressure on Flat Plate in Streamwise Direction for Three Propellers in Cavitating Condition (2nd Blade Frequency Component)

分 k_{p4} の左右舷方向および上下流方向の分布を示す。変動圧力の一次成分について、スキューの効果を見ると、MP-2プロペラ（45°スキュー）とMP-3プロペラ（60°スキュー）は通常型であるMP-1プロペラ（11°スキュー）と比べて、それぞれ約2/3と1/3になっており、スキューが大きいくほど変動圧力の減少に効果があると思われる。振幅が最大となる位置は満載およびバラスト状態ともかなり右舷側に寄っている。この様な傾向は平板を用いた変動圧力計測においてしばしば見られる¹²⁾。

一方、今回の計測において特異な現象が見られた。特に満載状態において、変動圧力の山が右舷側ばかりでなく左舷側にも存在したことである。この現象はキャビテーション・パターンから考えると、不合理な計測値の分布であるといえる。しかし、この理由として側壁影響、または平板の局所的な振動などが考えられるが、はっきり分からない。キャビテーション水槽の振動（主動力計、インペラーなどに起因する）により発生したものではないことは、非キャビテーションおよび定常キャビテーション状態においてこの様な現象が見られないこと¹⁴⁾から推察できる。特に、Fig. 21 Aの満載状態の計測結果は非常に極端な例であるが、平板での変動圧力計測において、左舷側の変動圧力の振幅が非キャビテーション状態および定常キャビテーション状態の様に必ずしも減少しないことがある¹⁴⁾¹⁵⁾。この様な現象はプロペラの回転数を変化させても計測された。

Fig. 22 に左右舷方向の変動圧力の一次成分の位相を示す。非キャビテーション状態と比較して、3つのプロペラとも左右舷方向での位相差がなくなっており、従来からよく知られている通りの計測結果となった¹⁶⁾。またMP-2とMP-3プロペラの位相は殆んど同じである。上下流方向の位相についても位相差は見られない。

Fig. 23A およびBに Blade Frequency の二次成分の変動圧力の単振幅 k_{p8} を示す。MP-3プロペラの場合を除き、左舷側に振幅の山が存在しない分布となった。満載状態とバラスト状態を比較すると、満載状態ではMP-2とMP-3とでは振幅の大きさが逆転しており、MP-2は上下流方向の振幅が他のプロペラの分布と異なっている。キャビテーションの発生状態によって変動圧力が微妙に影響を受けるのが分かる。しかし、これらの計測量はかなり小さい。

Fig. 24 に Blade Frequency の二次成分の変動圧

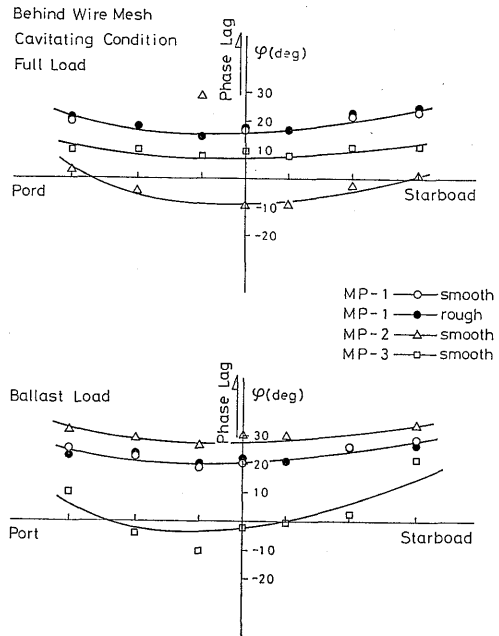


Fig. 24 Phase Angle of Fluctuating Pressure on Flat Plate in Transverse Direction for Three Propellers in Cavitating Condition (2nd Blade Frequency Component)

力の位相を示す。一次成分と同様、キャビテーションが発生すると左右舷方向の位相変化が殆んど見られなくなる。

ビジュグラフに記録された変動圧力波形 (Fig. 17A, BおよびC参照) の Peak-to-Peak の値を読み取り、その値の1/2を $\rho n^2 D^2$ により無次元化した値 \bar{k}_p を Fig. 25A およびBに示す。この結果から分かる様に、MP-3の Peak-to-Peak の単振幅はMP-2のそれとあまり変わらず、スキューの効果が頭打ちに近い状態となっていることが分かる。これは前述の様に変動圧力の Blade Frequency の2次以上の成分が逆転したためである。このことはスキュー角を大きくすればするほど変動圧力が減少するとは限らないことを示している。

Fig. 26 に負の最大変動圧力が発生する時の位相をプロットした。

3.4 キャビティ・ボリウム計測

船尾変動圧力の推定および軽減する上において、プロペラ翼面上のキャビティの形状およびボリウムが

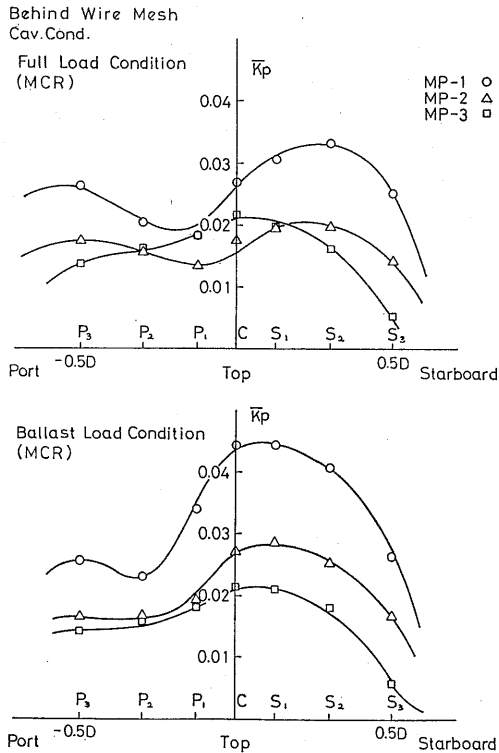


Fig. 25 Single Amplitude of Peak-to-Peak Fluctuating Pressure on Flat Plate in Transverse Direction for Three Propellers in Cavitating Condition

どの様になっているかを知ることは永年の懸案であった。このため、キャビティのボリューム計測が試みら

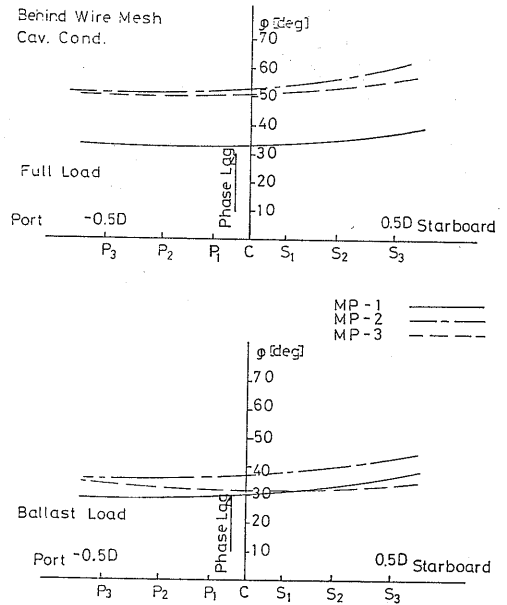


Fig. 26 Phase Angle of Negative Peak Pressure on Flat Plate in Transverse Direction for Three Propellers in Cavitating Condition

れ、従来はステレオ写真による方法^{17,18)}か、またはピンによる方法^{12,13)}により計測がなされてきた。しかしながら、両者とも計測精度などの点において満足できるものではなかった。

最近、船研においてレーザー光の散乱を利用してキャビティの厚みを計測する方法⁹⁾が開発された。この

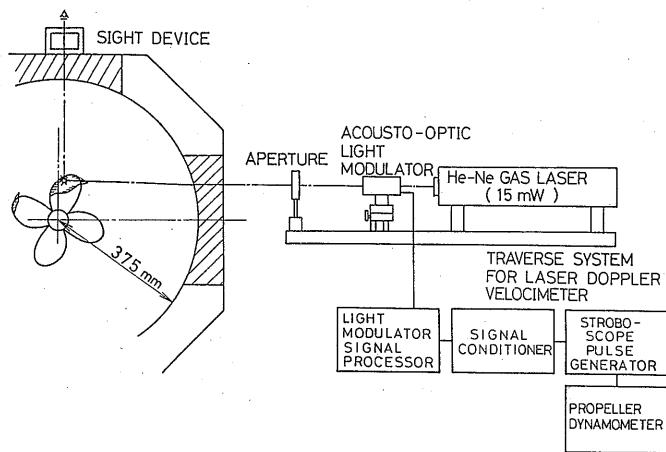


Fig. 27 Arrangement of the System for measuring Cavity Thickness by Laser Scattering Method

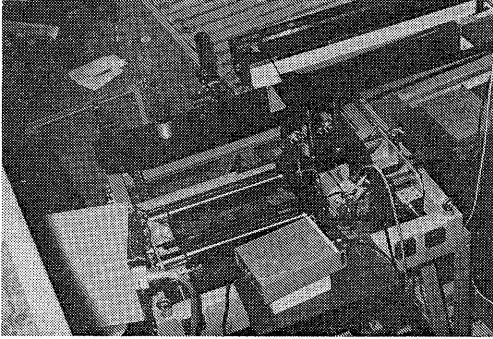


Fig. 28 Instruments Used in the Measurement of Cavity Thickness on Propeller Blades

方法により、MP-1、2および3プロペラに発生したキャビティの厚さの計測を行った。キャビティ・ボリュームの計測システムを Fig. 27 に、レーザー光源、音響光学変調器および光学系の配置を Fig. 28 に示す。また、レーザー光散乱点を計測するための治具 (sight device) を Fig. 29 に示す。

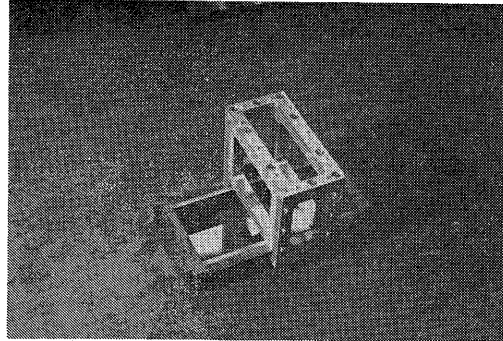


Fig. 29 Sight Device for Observing the Location of Laser Scattering Point

今回の計測ではレーザー光散乱法他に、ピンによる方法によりキャビティの厚さを計測した。しかし、ピンによる方法は、Fig. 30A および B に示すプロペラ翼端近傍のスーパー・キャビテーション状態になったキャビティの厚さの計測を除いて、Fig. 30B および C に示す様にピンが存在することによる stagnation

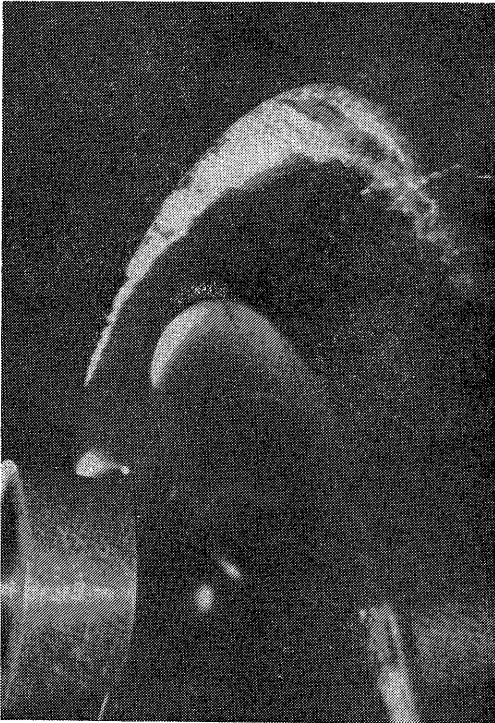


Fig. 30A An Example of Cavitation Pattern Little Influenced by the Existence of Pin ($\theta=20^\circ$)

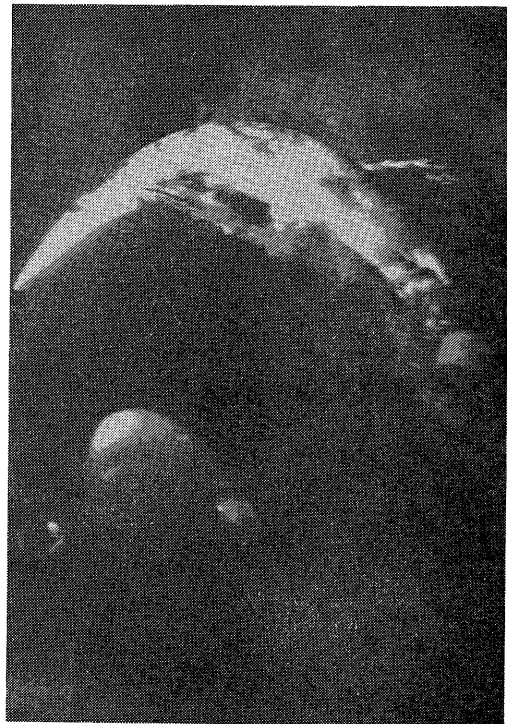


Fig. 30B An Example of Cavitation Pattern Unfavorably Influenced by the Existence of Pin except Tip Region ($\theta=0^\circ$)



Fig. 30C An Example of Cavitation Pattern Unfavorably Influenced by the Existence of Pin ($\theta=0^\circ$)

効果により、キャビティのパターンが変化するので、正確な計測をすることは難かしい。また、一つのプロペラ翼に取り付けられるピンの数が多いとピン相互の干渉が顕著になるので (Fig. 30C 参照)、計測の可能な点もかなり制限を受ける。

Fig. 31~33 に各プロペラの満載およびバラスト状態でのキャビティの厚さ分布を示す。レーザー光散乱法による計測値とともに、ピンによる計測値もプロットした。スーパー・キャビテーション状態では両者の一致は良いが、ピンによる計測値は前縁側では薄目の値を与える。本計測では、MP-1プロペラに発生するキャビテーションの表面での散乱が少なかったため、MP-1プロペラのみ前縁に粗さが付けられている。

3種類のプロペラにおいて計測されたキャビティの厚さの翼弦方向の形状は、楕円形のような単純な形状ばかりではなく、2つコブ形も多く、翼端近くではチップ・ボルトテックスの影響を強く受けた形状となっている⁵⁾。なお翼角度位置が大きい時には、チップ・ボル

テックス・キャビテーションの roll-up の影響を強く受け、スキューが大きくなるにつれてキャビティの後縁が浮き上がる現象が見られた。レーザー光散乱法は厳密に言えば、キャビティの上表面の位置を計測しているため、キャビティの後端付近では厚目となっている。

レーザー光散乱法により計測された厚み分布を積分して求めた各プロペラ翼角度位置におけるキャビティ・ボリュームを Fig. 34 に示す。スキューのキャビティおよびその変化に対する影響に注目すると、体積が最大となる位置の位相の遅れは通常型プロペラと比べ、ハイスキューになると大きくなり、ボリュームの変化もやや緩やかである。このことは、変動圧力計測値が、スキューが大きくなると小さくなる傾向を説明していると考えられる。また、満載とバラスト状態とを比較すると、バラスト状態でのキャビティ・ボリュームの方が大きく、変動圧力の増大と符号する。

一方、キャビティ・ボリュームの総量はスキューが大きくなるに従って小さくなるが、バラスト状態では通常型プロペラでのキャビティ・ボリュームはハイスキュー・プロペラのそれと比べて、必ずしも大きくはない。それ故、バラスト状態でのハイスキュープロペラでのキャビティ・ボリュームは前述の理由により幾分過大計測されているにしても、通常型プロペラでのキャビティ・ボリュームより大きいと思われる。

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・ボリュームの計測

4.1 試験の実施

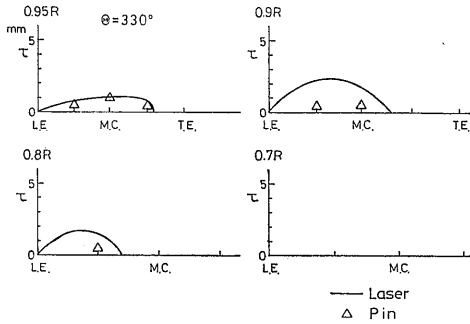
模型船を用いた船尾変動圧力およびキャビティ・ボリュームの計測が、船研の大型キャビテーション水槽第2測定部 (8m×2m×0.88m) において行われた。模型船は満載吃水線から7.5cm程深くして、Fig. 35に示す様に測定部上蓋に取り付けられる。

キャビテーション水槽での模型船の伴流は曳航水槽でのそれと若干異なることが知られている^{19,20)}。特に C_B が0.8程度の肥大船の場合は甚しく、非対称な伴流となった。このため、“vortex generator”などを取り付けたりなどしてその違いを少なくする様に工夫されたが²¹⁾、充分なものとは言えなかった。

キャビテーション水槽における模型船伴流を曳航水槽でのそれと一致させるべく、Fig. 36に示す様に整流体“Flow Liner”²²⁾を模型船後方の壁面に配置し

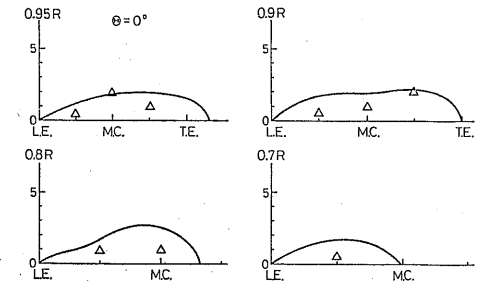
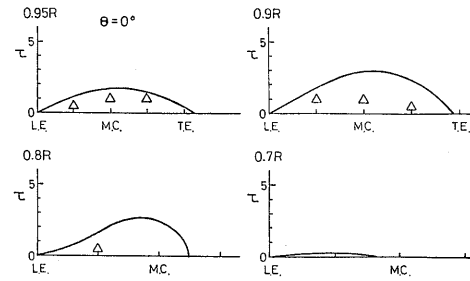
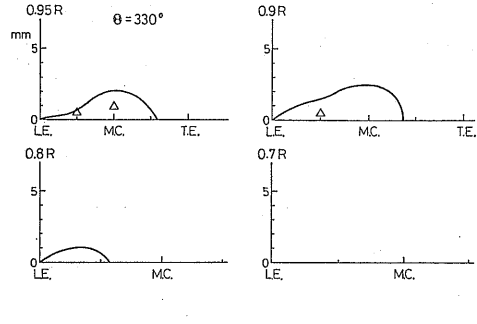
Behind Wire Mesh

MP-1 Full Load Condition



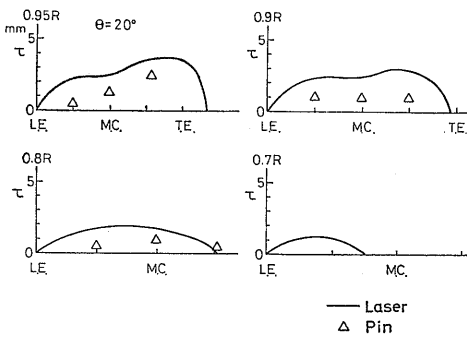
Behind Wire Mesh

MP-1 Ballast Load Condition



Behind Wire Mesh

MP-1 Full Load Condition



MP-1 Ballast Load Condition

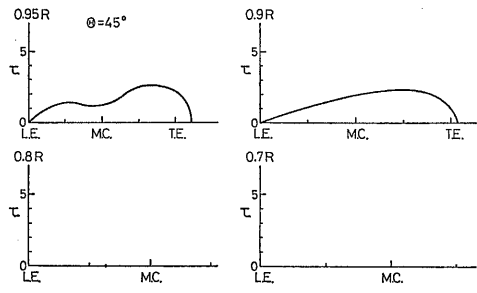
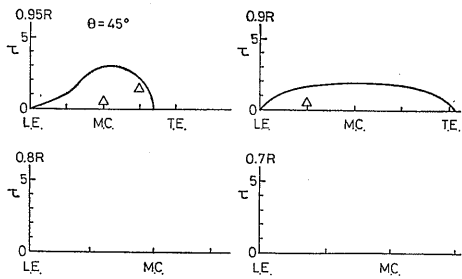
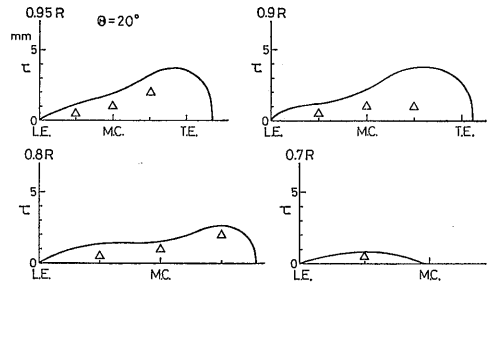


Fig. 31 Measured Cavity Thickness Distribution on MP-1 Propeller Working in Axial Wake Flow