

レーザー光を利用したプロペラ翼面上の キャビティ厚み分布の計測

右近 良孝* 黒部 雄三*

Measurement of Cavity Thickness Distribution on Marine Propellers by Laser Scattering Technique

By

Yoshitaka UKON and Yuzo KUROBE

Abstract

For the purpose of prediction of hull pressure fluctuations induced by unsteady cavitation on marine propellers, it is very important to estimate cavity volume on the propeller blade. In this report, a new method has been developed for measuring the cavity thickness distribution on model propellers operating in non-uniform flow by utilizing the laser scattering technique. Cavity thickness can be obtained from the measurement of the distance between the laser scattering point on the propeller blade surface and that on cavity surface. In the present measurement, the cavity thickness was also measured by pin method which has been used by Japanese investigators, in order to compare with the measured values by the laser scattering technique.

From the results of the measurement, it is concluded that the present technique gives significant measured values of cavity thickness. It can be said that the laser scattering technique has several excellent merits that the analysis of measured data is simple, precise, inexpensive and so on.

It seems that the angular position of the maximum cavity volume corresponds with that of the maximum pressure fluctuation.

1. 緒 言

船用プロペラに発生する非定常キャビテーションによって誘起される船尾振動は、深刻な問題の一つである。このため船尾振動の予測および減少を目的として、数多くの研究者により、キャビテーションの発生範囲¹⁾やキャビティボリュームの推定^{2),3)}、更に船尾変動圧力の理論計算⁴⁾が試みられている。これらのうち、キャビテーションの発生範囲に関しては、模型および実船に対してもかなり良い一致が得られている

が⁵⁾、他方キャビティボリュームに関しては、船用プロペラ上のキャビティボリュームの計測の難かしさもあり、理論計算と実験との比較は殆んど行われていない。とりわけ、船尾変動圧力の計算において、正確なキャビティボリュームの入力データが不可欠である⁶⁾ことからキャビティボリュームの計測の重要性は極めて大きい。

現在までのところ、不均一流中を作動する船用プロペラに発生したキャビティボリューム、即ちキャビティ厚み分布の計測はステレオ写真^{7),8)}とプロペラ上にピンを立てる方法^{8),9)}により行われている。前者の方法は専用の極めて高精度なカメラを用い、かつ高価な図

* 推進性能部

原稿受付：昭和56年9月16日

化機による骨の折れる解析を必要とするため、一部の機関においてしか行われていない。後者の方法は日本において用いられている方法で、簡便であるがピンの存在によるキャビテーションへの影響 (Stagnation effect およびピンの相互干渉) が避けられない場合があり、精度の良い計測を行うには限界がある。以上のことから上記の方法によらないレーザー光を用いる新しいキャビティ厚み分布の計測法 (以下、レーザー散乱法という) の開発を行い、同時にレーザー光による計測値とピンによる計測値との比較も行う。

2. 計測方法

本計測法は、先ず第一に光が異なる媒質を通過する時に、その点において反射、散乱されることを利用したものであり、レーザー光は容易に強い光が得られ、散乱点が明瞭に認識できるために用いられた。次に、回転するプロペラに発生するキャビティの形状を計測するためには、キャビテーション観測と同様にある一定のプロペラ角度位置において、見掛け上プロペラ、キャビティ、そしてレーザー光の散乱点を静止させる必要がある。このため、レーザー光をある一定のプロペラ角度位置においてのみ、プロペラおよびキャビティに対して発射する様に音響光学変調器が用いられている。以上の方法により、もしプロペラ上のキャビティが同じプロペラ角度位置において変動していなければ、プロペラおよびキャビティ上の任意の点においてレーザー光の散乱点を固定することができる。キャビ

ティの厚みは、プロペラ上の固定点とキャビティ表面上に固定された点の位置を知ることにより計測される。

キャビティ厚み分布計測は、船舶技術研究所の大型キャビテーション試験水槽第1計測部において行われた。主な使用計測機器は、レーザー流速計用のトラバース装置¹⁰⁾、He-Ne ガスレーザー光源 (15mW)、および音響光学変調器であり、本計測システムを Fig. 1 に示す。音響光学変調器はストロボスコープと同様にプロペラの回転パルス信号 (10 μ sec) をトリガーとして、レーザー光を超音波により回折させる装置であり、その回折光のうち一次回折光 (消光比1/1000) のみを取り出し、プロペラの回転およびストロボ発光に同期させた。これは音響光学変調器を用いないと回転する他のプロペラ翼やキャビティによりレーザー光が散乱され、目的のプロペラ翼上のキャビティによる散乱光を認識することができないためである。レーザー光の一次回折光の直径は約1.5mmである。また He-Ne ガスレーザーは赤色であるので、青色または黒色等にアルブライト加工 (アルマイト加工の一種) されたプロペラでは非キャビテーション時にはプロペラ翼面上に当たったレーザー光を確認することができないので、白色ペイント (つや消し) を塗ることによって明瞭に確認することができる。

以上の計測システムによりレーザー光を任意のプロペラ翼面上、またはキャビティ表面上に固定することができ、ストロボ発光時においても明瞭にその位置を

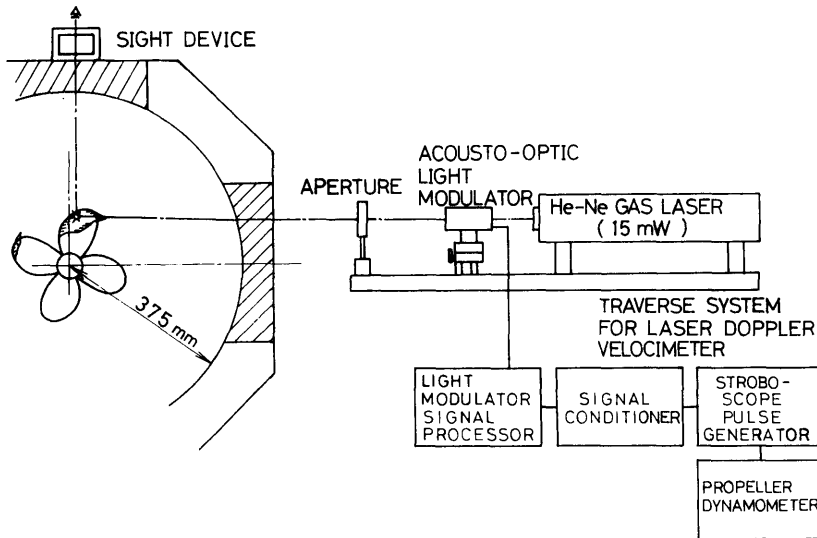


Fig. 1 Schematic Drawing of the Arrangement of the Measurement System

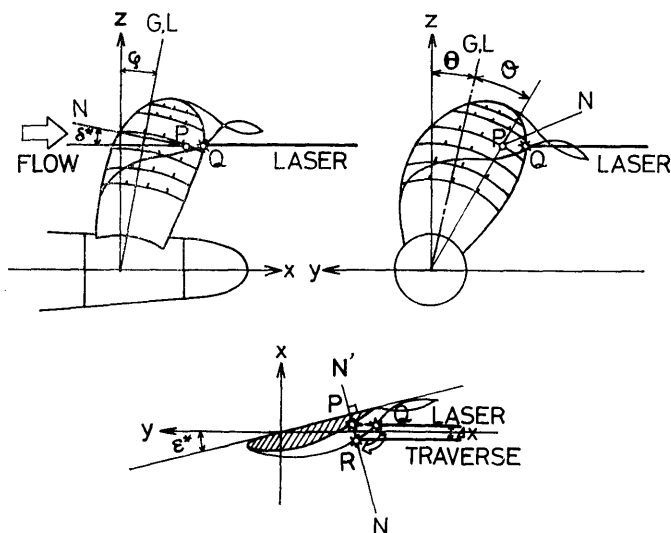


Fig. 2 Coordinate System of Propeller

確認することができる。

Fig. 2のプロペラ座標系に基づくと、計測点におけるプロペラピッチ面に対する法線は次の式で表わされる。

$$x - r \tan \varphi = \frac{y - r \sin(\theta + \theta)}{\tan \varepsilon \cdot \cos(\theta - \theta) - \tan \varphi \cdot \sin(\theta - \theta)} \\ = \frac{z - r \cos(\theta + \theta)}{-\tan \varepsilon \cdot \sin(\theta - \theta) - \tan \varphi \cdot \cos(\theta - \theta)} \quad \dots(1)$$

ここで、 ε はプロペラの幾何学的ピッチ角、 φ はレーキ角である。また、 r は半径位置、 θ はジェネレーターライン (G.L.) の角度位置 (Fig. 2 で反時計回りを正とする)、 θ は投影面での計測点の G.L. からの角度位置である。

次に、法線の $x-y$ 面、 $y-z$ 面への投影を考えるとそれぞれ x 軸に対して見掛上次の様な角度をなす。

$$\tan \varepsilon^* = \tan \varepsilon \cdot \cos(\theta - \theta) - \tan \varphi \cdot \sin(\theta - \theta) \quad \dots(2)$$

$$\tan \delta^* = \tan \varepsilon \cdot \sin(\theta - \theta) + \tan \varphi \cdot \cos(\theta - \theta) \quad \dots(3)$$

計測は以下に述べる手順により行なわれる。非キャビテーション状態において Fig. 2 に示す様にレーザー光を与えられた角度位置における計測点 P に当てる。この時のトラバース装置の位置を読み取る。この後キャビテーションを発生させると、Fig. 2 に示される様にレーザー光はキャビティの存在により計測点の法線上からずれたキャビティ表面上の Q 点において散乱される。トラバース装置により、レーザー光の散乱点 Q を計測点の法線 $N-N'$ とキャビティ表面とが交

わる点 R に一致するまで法線 $N-N'$ の yz 平面への投影線に沿って移動させる。即ち、トラバース装置を x および (3) 式で与えられる角度 δ^* で z 方向に移動させ、(2) 式で与えられる鉛直平面内のキャビティ表面とレーザー光との交点を読み取り器により求める。この時のトラバース装置上の移動量を読み取り、次の計算式により、キャビティの厚みを求めることができる。

レーザー光の x 方向の移動量を Δx とするとキャビティの法線方向の厚み τ は、

$$\tau = \Delta x \cdot \sqrt{1 + \tan^2 \varepsilon(r) + \tan^2 \varphi} \quad \dots(4)$$

により与えられる。上式からも分かる様に、本方式によるキャビティ厚みの計測値の解析が極めて容易であり、かつ厳密な式であるので、散乱点と計測点よりたてた法線との一致を判定する時、即ち計測時以外に誤差を生じることはないと言える。

3. キャビティ厚み分布の計測および結果

キャビティ厚み分布の計測は、翼面圧力計測¹¹⁾に用いられた模型プロペラ M. P. No. 0123 について行われた。このプロペラの要目を Table 1 に示す。このプロペラの翼断面形状は SRI・a 型であり、大型超高速コンテナ船のキャビテーション・エロージョン防止のために開発された¹²⁾ものである。

Fig. 3 にワイヤメッシュ・スクリーンによりシュミレートされた 27 万トン・タンカーの伴流分布を示す。この伴流分布に対し、上記プロペラは適切な組み合わせ

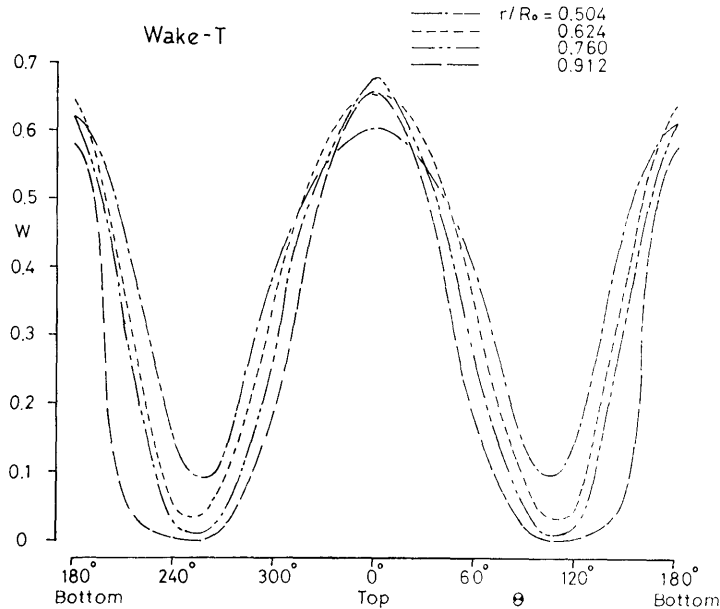


Fig. 3 Circumferential Wake Distribution

Table 1 Particulars of Model Propeller

MODEL PROPELLER NO.	0123
DIAMETER (m)	0.250
BOSS RATIO	0.180
PITCH RATIO	1.264(0.7r)
EXPANDED AREA RATIO	0.800
BLADE THICKNESS RATIO	0.050
ANGLE OF RAKE	7.5°
NUMBER OF BLADES	6
BLADE SECTION	SRI · a

Table 2 Experimental Condition

Experimental Condition	1	2	3
n (rps)	15.0		
K_T	0.357		
σ_n	4.81	4.08	3.34
α/α_s	0.6		
θ_w (°C)	27		

ではないが、かなり安定したキャビテーションが発生することから、用いられた。実験条件を Table 2 に示す。この Table において、 α/α_s は空気含有率であり、荷重度はかなり高いといえる。

本レーザー法は原理的にはスーパー・キャビティおよび任意のプロペラ翼面上の点でキャビティ厚みを計測することができるが、本論文では主としてプロペラ翼面上の $r/R=0.95, 0.9, 0.8, 0.7$ の 1/8, 1/4, 1/2, 3/4, 4/4 chord において計測がなされた。

本実験では、レーザーの方法による計測値と従来行われていたピンによる方法の計測値との比較のため、プロペラ翼面上にピンを植えキャビティボリュームを計測した。ピンの高さは 6 mm、断面形状は長さ 1 mm、幅 0.5 mm の偏平円形である。ピンはそれらによる相互干渉を防ぐため 4 翼に各 1 本ずつ植えた。この方法による計測の精度はスーパー・キャビテーション状態において ± 0.5 mm 程度と考えられる。

Figs. 4~6 にキャビテーションの発生範囲を、Fig. 7 に実験条件 3 における角度位置 20 度毎のキャビテーションパターンの写真を示す。いずれの状態においてもキャビテーションの intermittency は強かったので、プロペラのバック面に白色ペイントを塗り、見掛上 intermittency を少なくして計測を行った。写真に示されている様に各条件とも発生し始めた頃を除

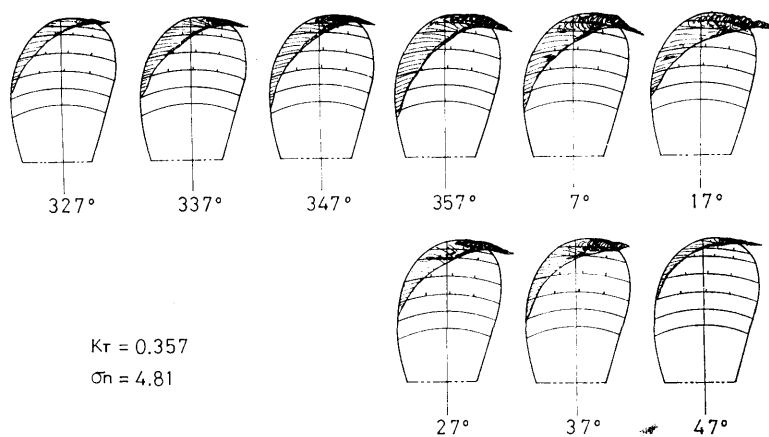


Fig. 4 Sketches of Cavitation Patterns (Condition 1)

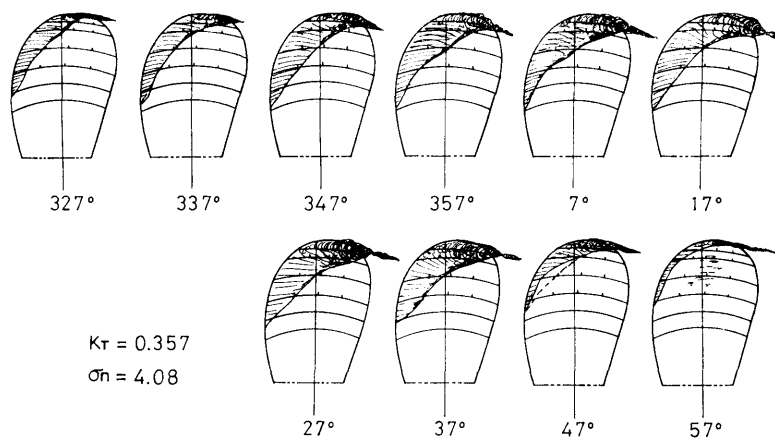


Fig. 5 Sketches of Cavitation Patterns (Condition 2)

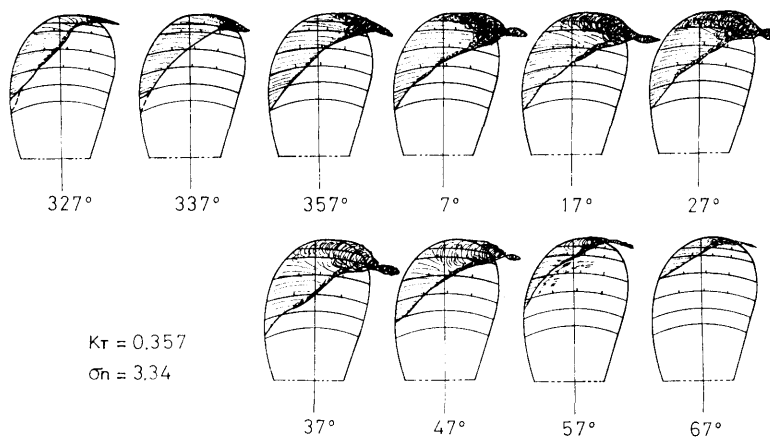


Fig. 6 Sketches of Cavitation Patterns (Condition 3)

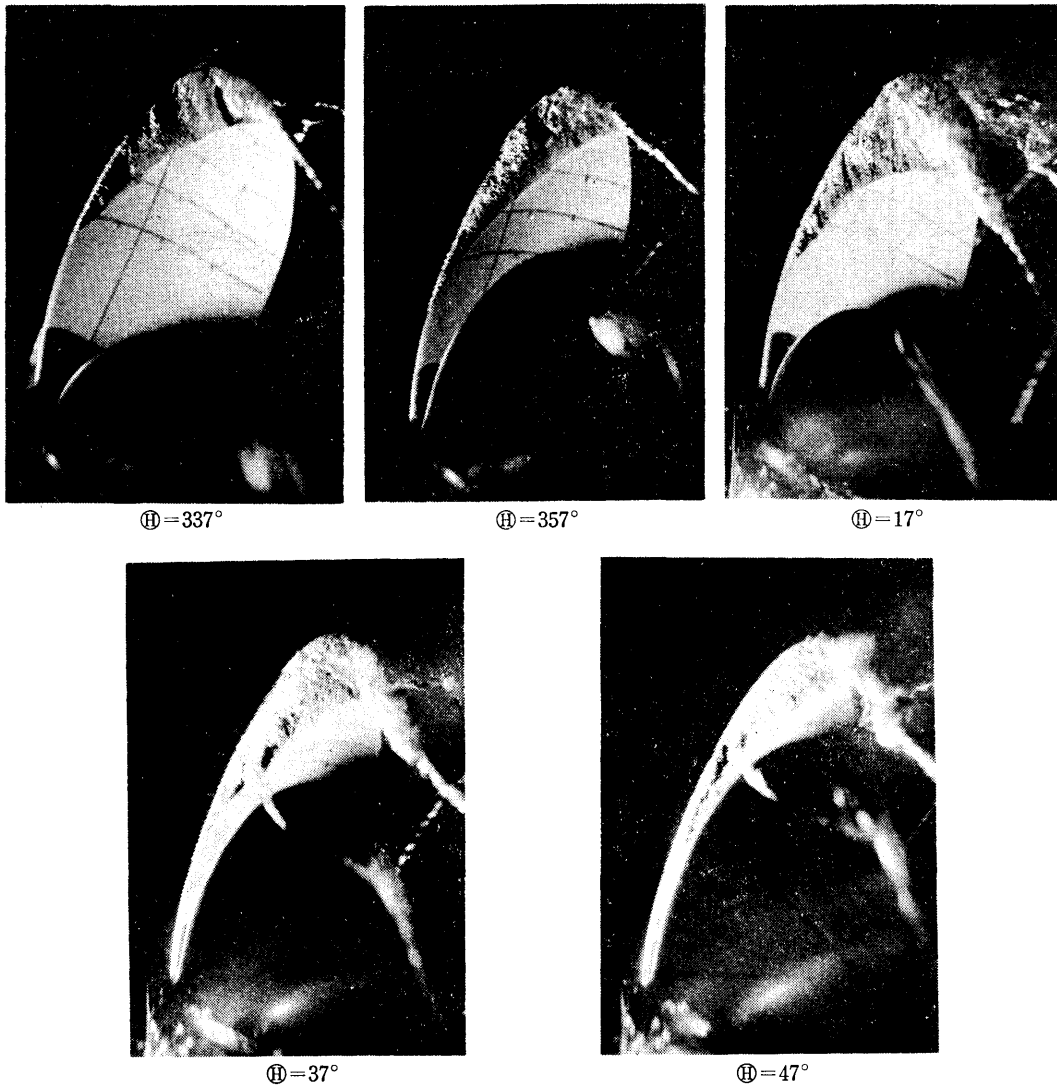


Fig. 7 Cavitation Appearance on Model Propeller (Condition 3)

き、非常に厚い不透明なシートキャビテーションが発生しているが、激しいクラウドキャビテーションの発生は見られなかった。

Figs. 8~11は実験条件1~3の角度位置 $\theta=337^\circ$, 357° および 17° におけるキャビティ厚み分布を示す。図中の曲線で示された本計測によるキャビティのプロファイルは、主に空洞理論において得られる閉塞型に近い形状であった。しかし、 $\theta=17^\circ$ および 37° では Figs. 10と11に示される様に、翼端近傍 (0.95 および $0.9R$)ではキャビティの形状は、“2つコブ形”となっており、空洞理論により与えられるような簡単な形

状でないことが分かる。これはチップボルテックス・キャビテーションの発達によりシート・キャビテーションが大きな影響を受けたためと考えられる。このような傾向は実験条件1および2の $\theta=17^\circ$ および 37° においても見られ、ステレオ写真により得られたキャビティ形状⁷⁾と定性的に一致している。Figs. 8~11において示されたピンによるキャビティ厚みの計測値はレーザー光による計測法による計測値と比較して、翼端近傍において一致が良い。このことから、ピンによる方法が有意な計測値を与えるスーパー・キャビテーション状態において、本計測法の信頼性が示されていると

by Laser	by Pin	K_t	δn
—	○	0.357	4.81
- - -	△	0.357	4.08
- · - ·	□	0.357	3.34

by Laser	by Pin	K_t	δn
—	○	0.357	4.81
- - -	△	0.357	4.08
- · - ·	□	0.357	3.34

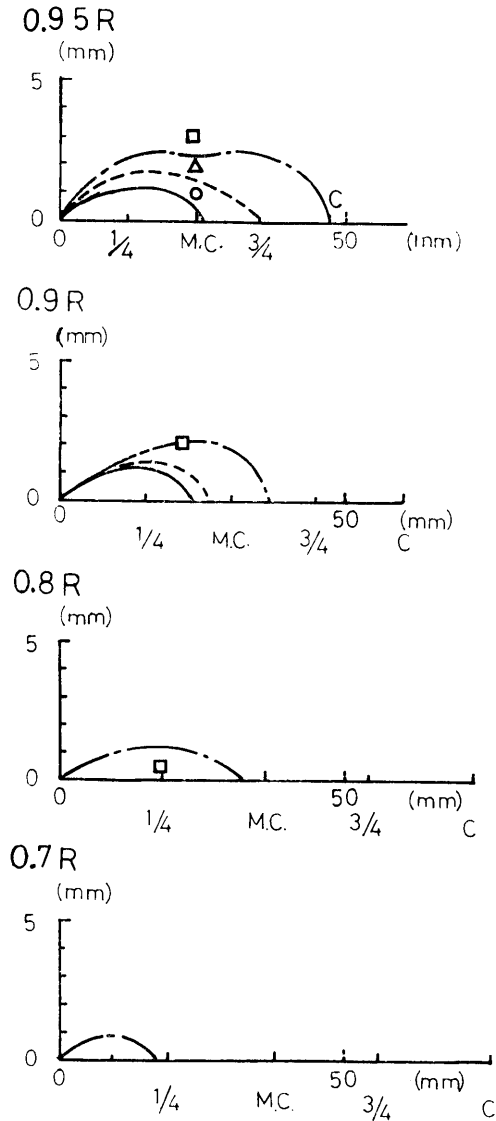
 $\Theta = 337^\circ$


Fig. 8 Chordwise Cavity Thickness Distribution ($\Theta=337^\circ$)

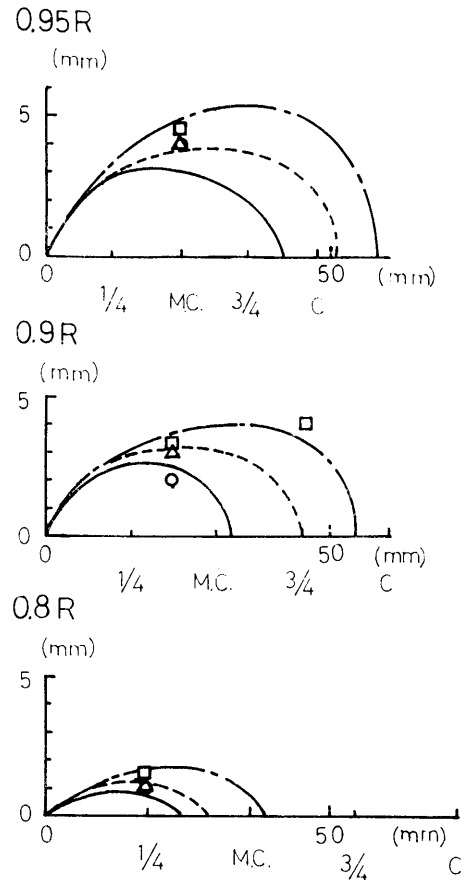
 $\Theta = 357^\circ$


Fig. 9 Chordwise Cavity Thickness Distribution ($\Theta=357^\circ$)

も言える。

Figs. 12~14 に各実験条件における本計測法による計測値を基に、フェアリングにより得られたキャビティ厚み分布の等高線 (contour curve) を示す。これらの図において、0.7R より翼根側の部分では外挿となっている。一方、翼端近傍のスーパー・キャビテーション状態となった領域では、特に角度位置 θ が 37°

by Laser	by Pin	Kt	δn
—	○	0.357	4.81
- - -	△	0.357	4.08
- - -	□	0.357	3.34

by Laser	by Pin	Kt	δn
—	○	0.357	4.81
- - -	△	0.357	4.08
- - -	□	0.357	3.34

$\Theta = 17^\circ$

$\Theta = 37^\circ$

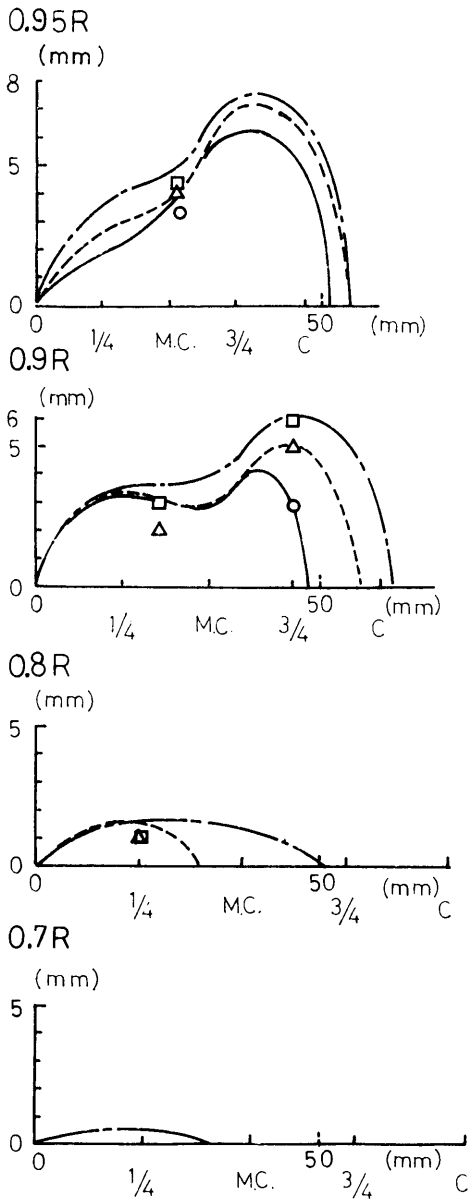


Fig. 10 Chordwise Cavity Thickness Distribution ($\Theta=17^\circ$)

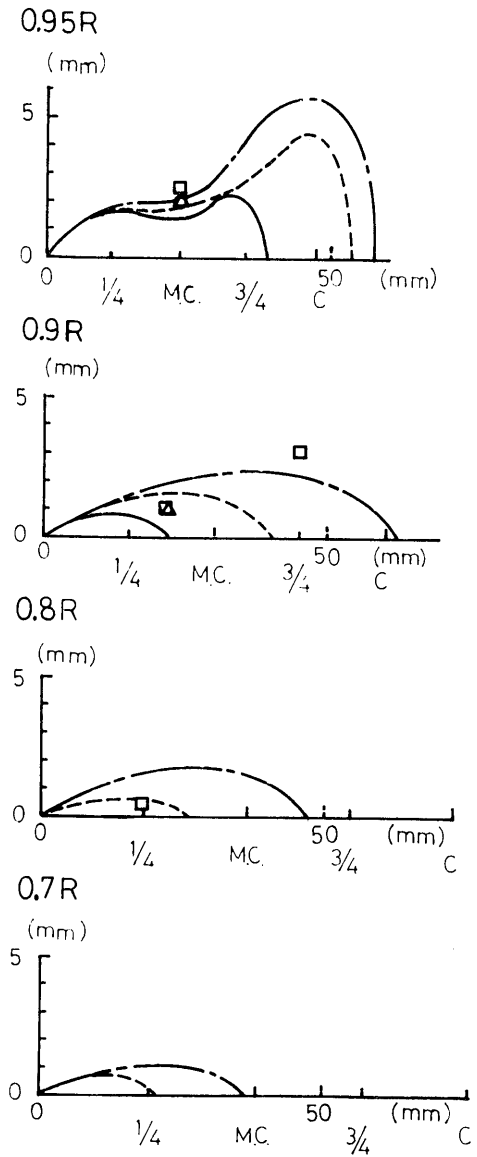


Fig. 11 Chordwise Cavity Thickness Distribution ($\Theta=37^\circ$)

M.P. NO. 123
 $Kt = 0.357$
 $\delta n = 4.81$

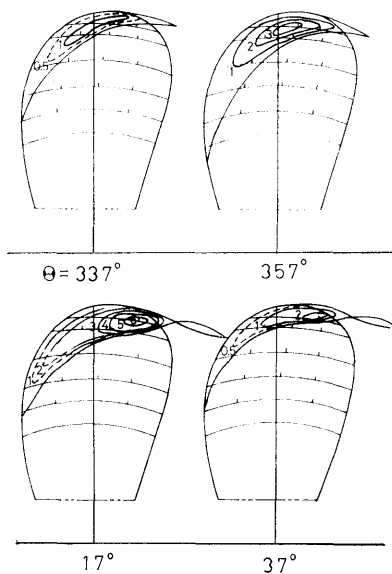


Fig. 12 Contour of Cavity Thickness
(Condition 1)

M.P. NO. 123
 $Kt = 0.357$
 $\delta n = 3.34$

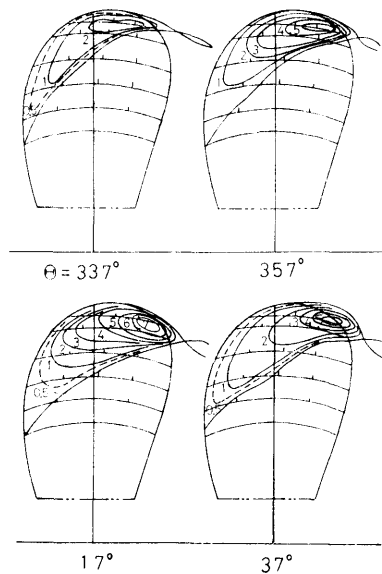


Fig. 14 Contour of Cavity Thickness
(Condition 3)

M.P. NO. 123
 $Kt = 0.357$
 $\delta n = 4.08$

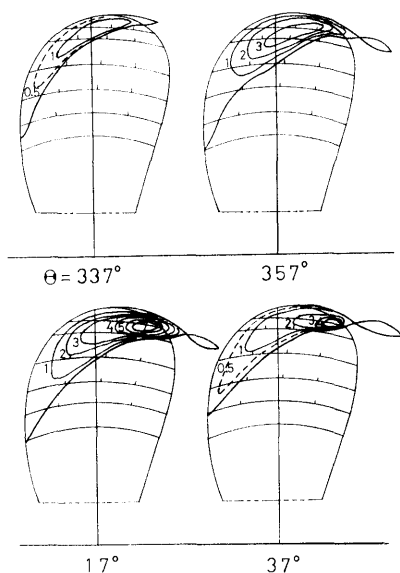


Fig. 13 Contour of Cavity Thickness
(Condition 2)

附近では、キャビティがプロペラ翼面から浮き上がっており、これら図のキャビティ後端の領域において正確な意味でのキャビティ厚み分布とはなっていない。これらの図においてキャビティの最大厚み位置が角度位置の変化とともに、翼端かつ後縁に向かって変化する様子を見ることができる。

本計測法による計測精度は、レーザー光の散乱が良い時には $\pm 0.1\text{mm}$ 程度であるが、キャビテーションの intermittency が多い時などには $\pm 0.5\text{mm}$ になる場合がある。総合的に見てキャビティの最大厚みの $\pm 5\%$ 程度の計測精度があるものと考えられる。

Fig. 15 はレーザー光を用いた計測法により得られた各半径位置の厚み分布を翼弦方向と半径方向に積分して得られたキャビティ・ボリュームの円周方向の変化の様子を示したものである。実験条件3においてキャビティ・ボリュームが最大となるのは約 13° であり、約 5.7cm^3 になる。これらの値はステレオ写真による計測結果⁷⁾ともオーダーにおいて良い一致を示す。しかしながら、本供試模型プロペラは6翼であったので、 $\theta=37^\circ$ より右舷側では次のプロペラ翼によってレーザー光がさえぎられたため、計測が行われて

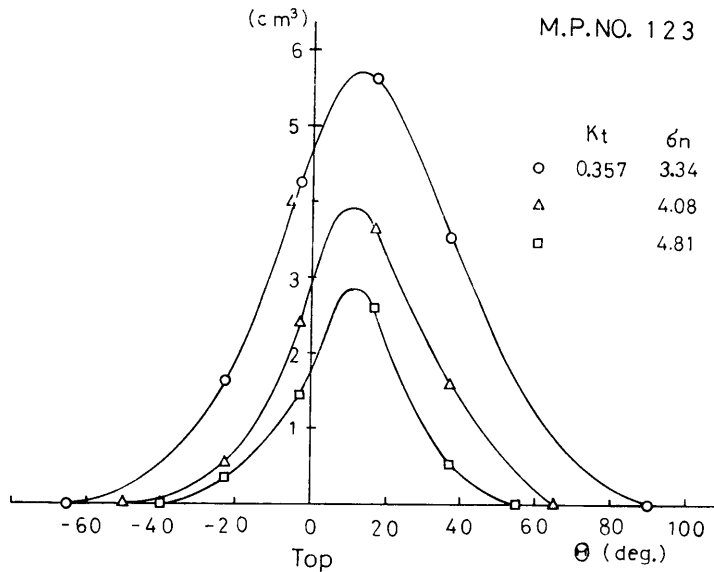


Fig. 15 Circumferential Variation of Cavity Volume

M.P. NO. 123

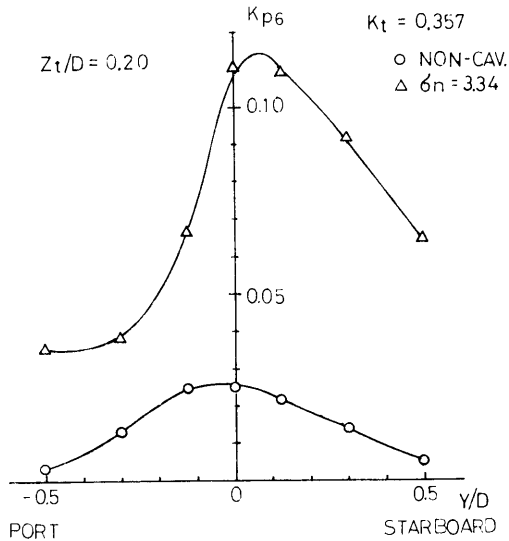


Fig. 16 Measured Pressure Amplitude of the Blade Rate Harmonic on Flat Plate (Condition 3)

いない。また、 $\theta=337^\circ$ より左舷側では、レーザー散乱光を計測部上部において検出することが容易でなかったため計測されていない。それ故、発生開始時と消滅時におけるキャビティ・ボリュームのカーブの精度は余り良くないと考える。

大型キャビテーション水槽第1計測部では、ワイヤメッシュによりシュミレートされた不均一流中において作動するプロペラの発生する圧力変動は平板上で計測される¹³⁾。Fig. 16は平板に取り付けられた圧力変換器(容量 1 kg/cm^2)により計測された圧力変動をFFT¹⁴⁾により解析し、その振幅の一次成分のtransverse方向(y方向)の分布を示したものである。実験条件3では圧力変動の最大値の位置は、角度位置に換算して約 7° になり、充分ではないが、良い対応を示しているといえるであろう。

4. レーザー散乱法についての考察

レーザー散乱法は他の方法と比較すると次の様な特長をもつ。

長所としては、前述の様に解析が厳密でかつ容易であることが挙げられる。特に、ステレオ写真による解析は高度な技術と多くの解析時間を必要とするが、計測精度は30~100%程度⁷⁾であり、一方レーザー散乱法はこの点において秀れている。また計測に要する費用も少なく済む。一方、短所としては、まずintermittencyが強い時には散乱光が法線と一致したかどうかの判定がかなり難しくなり、計測時間がかなり長くなる。

キャビティの表面が適当に荒れていないと計測者のところに散乱光が来ないために、計測が不可能になる

場合がある。特にキャビティ表面が鏡面の様に透明なキャビテーション数一流中において場合（例えば、均かが小さい時など）には、キャビティ表面で散乱されずにレーザー光が透過してしまう場合がある。しかし、このような場合や intermittency の強い場合にはプロペラ前縁に粗さ¹⁵⁾やプロペラ翼表面にペイントなどを塗ることにより、キャビティ表面を人工的に荒らし、レーザー光のキャビティ表面での散乱を多くすることにより、計測を可能にすることができる。

計測の手順として、非キャビテーション状態とキャビテーション状態とを繰り返して設定するので、状態の設定に要する時間が計測時間の2～3倍にも達する。

本方法では、キャビティがプロペラ翼面上から浮き上がった場合にはプロペラ翼上面からのキャビティ上表面の位置を計測していることになり、キャビティの厚み分布を計測していることにはならない。しかしながら、原理的には計測系をキャビテーション水槽の反対側に設置することなどにより、キャビティの下表面の位置を計測することは可能である。

ピンによる方法は解析および計測時間において、ピンを植えた点では短かいが、多点計測が行いづらい。計測範囲はスーパー・キャビテーションに近い状態に限定され、精度向上が期待できないこと、更にプロペラ翼面の後縁近傍やスーパー・キャビテーションの部分での計測は行うことができない。

レーザー光のキャビティによる散乱を利用したキャビティの厚み分布の計測法としては、本報告に述べられた原理に基づくトラバース装置を用いる方法の他に、プロペラの前方よりレーザー光を発射し、プロペラとキャビティ表面で散乱点が異なることを利用して、キャビティ厚みを計測する方法が考えられる。この方法は、本報告の方法と異なり、複雑なデータ解析計算を必要とするが、特にキャビテーションが消滅する角度位置（右舷側）で威力を発揮するので、今後発展させていく必要があると言える。

5. 結 言

本論文では、不均一流中を作用する模型プロペラに発生する非定常キャビティの厚み分布を計測するため、レーザー光を利用した新しい計測法を開発した。

本計測法により計測されたキャビティ厚み分布は公表されたステレオ写真による方法およびピンによる方法による計測結果と比較すると定量的にも定性的にも

良い一致を示し、極めて信頼性のある計測法であるといえることが分かった。

キャビティ・ボリュームに対するチップ・ボルトテックス・キャビテーションの影響は大きく、空洞理論などで与えられるような単純な厚み分布にならない。キャビティ・ボリュームを計算する際に、チップ・ボルトテックス・キャビテーションを含む3次元影響を考慮することが重要であろう。

本計測法により得られたキャビティ・ボリュームが最大となる点と、変動圧力の振幅が最大となる点とが必ずしも一致しなかったが、良い対応を示しているといえることができる。

今後、更に精妙なキャビティ・ボリューム計測を行うことにより船尾変動圧力の推定法の確立に寄与することができるものと考えられる。

謝 辞

本研究の遂行に際して、予備実験、装置の使用および購入、そして本計測法に関する討論において協力していただいた推進性能部の方々に対し感謝いたします。特に、児玉良明技官との計測法に関する率直な議論は有益であった。また、変動圧力計測の解析は角川明技官の製作した解析プログラム(YHP 9845T)により行われた。ここに記して感謝の意を表します。

本計測およびパルス信号処理電気回路製作において熱心に協力していただいた牧野雅彦技官、電気通信大学生兼八薫君に大いに感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 右近良孝; 「プロペラキャビテーションの発生範囲の推定法」, 船研報告, Vol. 10, No. 6, 1979
- 2) Grey, L.M.; "Investigation into Modeling and Measurement of Propeller Cavitation Source Strength at Blade Rate on Merchant Vessels", Propellers '81 Symposium, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Virginia, 1981
- 3) Isshiki, H. and Murakami, M.; "On a Theoretical Treatment of Unsteady Cavitation (1st Report)", Trans. of the West-Japan Society of Naval Architects, No. 62, 1981
- 4) Yuasa, H. et al; "Practical Applications of the Discrete Vortexes Element Method for Calculation of Propeller Induced Excitation Forces", The 13th Symposium on Naval Hydrodynamics, Tokyo, 1980
- 5) Ukon, Y.; "Partial Cavitation on Two-and

- Three-Dimensional Hydrofoils, and Marine Propellers”, The 10th IAHR Symposium, Tokyo, 1980
- 6) Zimmermann, B.; “Berechnung des durch die Kavitationsgebiete auf den Propellerflügeln an einer Platte induzierten instationären Druckes”, Report 362, Institute für Schiffbau der Universität Hamburg, 1977
 - 7) Søntvedt, T and Frivold, H.; “Low Frequency Variation of the Surface Shape of Tip Region Cavitation on Marine Propeller Blades and Corresponding Disturbances on Nearby Solid Boundaries”, The 11th Symposium on Naval Hydrodynamics, London, 1976
 - 8) Hoshino, T.; “Estimation of Unsteady Cavitation on Propeller Blades as a Base for Predicting Propeller-Induced Pressure Fluctuations”, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 148, 1980
 - 9) 山崎正三郎他; 「Highly Skewed Propeller の研究 (第1報推進性能とキャビテーション性能に関する模型実験)」, 日本造船学会, 第149号, 1981
 - 10) 角川明他; 「レーザー・ドップラー流速計によるプロペラ近傍流場計測例」, 第38回船舶技術研究所秋季研究発表会講演集, 1981 (発表予定)
 - 11) Takei, Y, Koyama, K., and Kurobe, Y.; “Measurement of Pressures on a Blade of a Propeller Model”, Papers of Ship Research Institute, No. 55, 1979
 - 12) 門井弘行他; 「SRI・a プロペラの諸特性および設計図表」, 船研報告, 第15巻, 第2号, 1978
 - 13) 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回船舶技術研究所秋季研究発表会講演集, 1979
 - 14) 大崎順彦; 「地震動のスペクトル解析入門」, 鹿島出版会, 1976
 - 15) Kuiper, G.; “Some Experiments with Distinguished Types of Cavitation on Ship Propellers”, International Symposium on Cavitation Inception, ASME, New York, 1979