模型プロペラ翼面上に発生する キャビティ形状の計測

正員 工 藤 達 郎* 正員 右 近 良 孝*
正員 黒 部 雄 三* 正員 谷 林 英 毅**

Measurement of Shape of Cavity on a Model Propeller Blade

by Tatsuro Kudo, *Member* Yoshitaka Ukon, *Member*
Yuzo Kurobe, *Member* Hidetake Tanibayashi, *Member*

Summary

In order to improve theoretical prediction of propeller induced pressure fluctuations, it is indispensable to investigate the behaviour of unsteady cavity on the propeller blades, since the pressure fluctuations are roughly in proportion to the second time derivative of the cavity volume. To this end, several methods of measuring cavity shape have been proposed such as using stereo photography, pin gauge and laser beam scattering.

This paper describes a highly advanced method of measuring the three-dimensional cavity shape using a laser beam coupled with a CCD (Charge Coupled Device) camera and image processor to make measurement faster and more detailed. Model experiments on two propellers—a conventional and a highly skewed propeller—of a training ship SEIUN-MARU have endorsed the usefulness of the present measurement technique both in its speed and accuracy.

Further, some features of cavity behaviour of highly skewed propellers have been found in terms of cavity thickness distribution and its variation over the blades and the blade angle positions.

記号表

a_i, b_i, c_i : カメラ・パラメータ
 D_p : プロペラ直径
 K_T : スラスト係数 = (スラスト) / $\rho n^2 D_p^4$
 n : プロペラ回転数
 s : $\sec \alpha \tan \beta$
 t : $\tan \alpha$
 u_i, v_i, w_i : レーザ・パラメータ
 X, Y, Z : 空間座標
 α : 水平方向レーザ振り角
 β : 垂直方向レーザ振り角
 ξ, η : 画面座標
 θ : プロペラ翼角度位置
 σ_n : キャビテーション数
$$= (\text{軸心静圧} - \text{蒸気圧}) / \frac{1}{2} \rho n^2 D_p^2$$

 ρ : 流体密度

1. 緒 言

近年、船舶の低振動化の要求はますます強くなってきており、船舶の振動についての国際標準 (ISO 6954) の最高品質レベルを保証することが設計者の重要なテーマとなってきた。船体振動の起振力としてはエンジンとプロペラが主なものであり、後者に関してはプロペラに発生する非定常キャビテーションが大きな役割を果たす¹⁾。このプロペラ起振力を高い精度で推定するためにはとりわけキャビティ・ボリュームの 2 次の時間変化分を精度良く計算することが不可欠であるが、現在の理論予測法の精度は充分ではないことが知られている^{2,3)}。そこで、キャビティ形状を計測する方法として、現在まで次のようないくつかの方法が提案されている。

- ① ステレオ写真法^{4,5)}
- ② ピン・ゲージ法^{6,7)}
- ③ レーザ光散乱法^{7,8,9,10)}

第 1 の方法は航空写真で実用化されている方法であるが、装置が高価であり、解析が難しいことが挙げられ、キャビティ形状計測への実用化は確立しているとは言い難い。第 2 の方法は簡便である反面、高い精度が期待できな

* 運輸省船舶技術研究所

** 三菱重工業(株)長崎研究所

いばかりでなく、ピン自身によりキャビティ形状が変化する⁸⁾ので、船用プロペラへの適用は問題がある。第3の方法は運輸省船舶技術研究所（以下、船研という）で開発された我が国独自の方法で、非接触計測法であり、計測精度が高く、模型プロペラに関してかなりの量のデータが得られ⁹⁾、実船プロペラに関して計測の可能性が示されている⁹⁾。しかしながら、この方法では計測に時間がかかり、キャビティ・ボリュームの2次の時間変化分を精度良く求めるために必要な多量なデータを得ることが難しい欠点があった。

そこで著者らは既存のレーザ光散乱法と近年目ざましい進歩を示している CCD (Charge Coupled Device) カメラと画像処理技術を組み合わせることにより模型プロペラに発生する非定常キャビティ形状を高速、高精度で計測する方法（以下、LASER-CCD 法という）を開発した。本論文ではその計測法と計測データの解析法について述べる。また、運輸省航海訓練所の練習船「青雲丸」の模型プロペラ⁹⁾に発生するキャビティについて本方法により計測を行い、既存のレーザ光散乱法による計測結果と比較し満足すべき結果が得られたので、それについても述べる。

2. 計測原理

本論文で述べる船用プロペラキャビティ形状計測システムは、キャビテーション水槽内に取り付けられた模型船又はワイヤー・メッシュ後方で作動する模型プロペラ上に発生するキャビティの3次元の形状を効率的に計測することを目的に開発された。その原理を、Fig. 1 に示す。キャビティ表面にレーザ光を照射し、その散乱光を CCD カメラで捉えることにより、空間内に2本の直線（レーザ光及びカメラから像への視線）が決定される。この2本の直線の交点として散乱点、即ちキャビティ表面の一点が算定できる。

原理としてはステレオ写真法に似ているが、ステレオ写真法の2本の視線のうち1本をレーザ光に置き換えることにより、その直線をトラバースさせることによる自動計測を可能としている。

Fig. 1 Principle of Measurement

以下に、座標の算出法を述べる。

2.1 座標系

(1) 空間座標 (X, Y, Z)

プロペラに固定した直交座標系である。Fig. 2 に示すように、プロペラ・シャフト中心軸に沿って後向きに X 軸、それとプロペラのジェネレータ・ラインの交点を原点とする。 Y 軸と Z 軸は、座標系が右手系直交座標系をなし、1 番翼のジェネレータ・ラインが XZ 平面内に有るようになる。

(2) 画面座標 (ξ, η)

CCD カメラによる画像の画面上での座標で、画面の左上を原点に横方向に ξ 軸、縦方向に η 軸をとる。

(3) レーザ座標 (α, β)

レーザ光のトラバース量を表す座標で、水平方向の振り角を α 、縦方向の振り角を β で表す。

2.2 座標変換

(1) 空間座標→画面座標

空間内の直線が画面上でも直線となり、線形性が保たれるとすれば、空間座標から画面座標への変換は 11 個のパラメータ $a_1 \sim a_4, b_1 \sim b_4, c_1 \sim c_3$ （以下、カメラ・パラメータ）を用いて、

$$(c_1 X + c_2 Y + c_3 Z + 1) \begin{bmatrix} \xi \\ \eta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 X + a_2 Y + a_3 Z + a_4 \\ b_1 X + b_2 Y + b_3 Z + b_4 \end{bmatrix} \quad (1)$$

と表わされる。

(2) 空間座標→レーザ座標

一点から放射状にトラバースされるレーザ光が屈折することなく、振り角 α, β の一方を固定し、もう一方を変化させた時の走査面が平面になるとすれば、空間座標からレーザ座標への変換は 11 個のパラメータ $u_1 \sim u_3, v_1 \sim v_4, w_1 \sim w_4$ （以下、レーザ・パラメータ）を用いて

$$(u_1 X + u_2 Y + u_3 Z + 1) \begin{bmatrix} t \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 X + v_2 Y + v_3 Z + v_4 \\ w_1 X + w_2 Y + w_3 Z + w_4 \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここに、

$$\begin{cases} t = \tan \alpha \\ s = \sec \alpha \cdot \tan \beta \end{cases} \quad (3)$$

と表わされる。

2.3 パラメータの同定

空間座標が既知である点を用いて座標変換の各パラメータの同定を行うことにより、計測に用いる画面座標系及びレーザ座標系を決定する。

(1) カメラ・パラメータの同定

プロペラ翼面上の座標既知点 N 個（座標 (X_i, Y_i, Z_i) ; $i=1, 2, 3, \dots, N$; $N \geq 6$) の画面上での座標 (ξ_i, η_i) を調べ、(1) 式に代入してカメラ・パラメータについて整理すると、

Fig. 2 Propeller Coordinates System

$$\begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & -\xi_1 X_1 & -\xi_1 Y_1 & -\xi_1 Z_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ X_2 & Y_2 & Z_2 & 1 & -\xi_2 X_2 & -\xi_2 Y_2 & -\xi_2 Z_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_N & Y_N & Z_N & 1 & -\xi_N X_N & -\xi_N Y_N & -\xi_N Z_N & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\eta_1 X_1 & -\eta_1 Y_1 & -\eta_1 Z_1 & X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\eta_2 X_2 & -\eta_2 Y_2 & -\eta_2 Z_2 & X_2 & Y_2 & Z_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\eta_N X_N & -\eta_N Y_N & -\eta_N Z_N & X_N & Y_N & Z_N & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \vdots \\ \xi_N \\ \eta_1 \\ \eta_2 \\ \vdots \\ \eta_N \end{bmatrix} \quad (4)$$

となる。これを最小二乗法により解いて各パラメータを求める。

(2) レーザ・パラメータの同定

カメラ・パラメータの同定と同様に N 個 ($N \geq 6$) の座標既知点にレーザ・ビームを当て、その時のレーザ振り角 α_i , β_i ($i=1, 2, \dots, N$) を用いてレーザ・パラメータは次の方程式より求められる。

$$\begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & -t_1 X_1 & -t_1 Y_1 & -t_1 Z_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ X_2 & Y_2 & Z_2 & 1 & -t_2 X_2 & -t_2 Y_2 & -t_2 Z_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_N & Y_N & Z_N & 1 & -t_N X_N & -t_N Y_N & -t_N Z_N & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -s_1 X_1 & -s_1 Y_1 & -s_1 Z_1 & X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -s_2 X_2 & -s_2 Y_2 & -s_2 Z_2 & X_2 & Y_2 & Z_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -s_N X_N & -s_N Y_N & -s_N Z_N & X_N & Y_N & Z_N & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ w_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \vdots \\ t_N \\ s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_N \end{bmatrix} \quad (5)$$

ここに、 t_i, s_i は (3) 式に α_i, β_i を代入したものである。

2.4 空間座標の算出

(1) 式及び (2) 式を X, Y, Z について整理してまとめると、

$$\begin{bmatrix} c_1 \xi - a_1 & c_2 \xi - a_2 & c_3 \xi - a_3 \\ c_1 \eta - b_1 & c_2 \eta - b_2 & c_3 \eta - b_3 \\ u_1 t - v_1 & u_2 t - v_2 & u_3 t - v_3 \\ u_1 s - w_1 & u_2 s - w_2 & u_3 s - w_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\xi + a_4 \\ -\eta + b_4 \\ -t + v_4 \\ -s + w_4 \end{bmatrix} \quad (6)$$

となる。レーザの振り角の設定値から t, s が定まり、その時のレーザ光の翼面又はキャビティ表面での輝点を CCD カメラで取り込み、画像処理装置でその画面上での重心位置 ξ, η を算出すれば、(6) 式を最小二乗法で解くことにより輝点の空間座標 X, Y, Z を求めることができる。

3. 計測装置

計測システム全体は、Fig. 3 に示すように、以下に述べる装置及びそれらの制御・データ処理を行うソフトウェアから構成される。

① レーザ発振器

プロペラ翼面上に照射するレーザ光源として、アルゴン・イオン・レーザ (Spectra Physics 社製、最大出力 5 W, 緑色) を用いた。今回の計測では、主に出力 400~800 mW で使用した。

② 音響光学変調器

⑧の同期回路より送られるプロペラ位相信号に同期して、レーザ光を回折させる装置である。この装置を通過するレーザ光のうち、信号に同期して得られる一次回折光は、幅 100 μsec のパルス状レーザ光となる。

③ レーザ集光部

音響光学変調器よりの一次光のみをピンホールで選択した後、集光レンズにより④の光ファイバ入口に集光する。集光レンズは上下、前後、左右に移動可能で、更に、光軸に対するあおり角も調整可能である。これらを調整することにより、光ファイバに最も効率良くレーザ光を入射させることができる。

④ 光ファイバ

内径 50 μm , 長さ 10 m の光ファイバで、終端より 1 m は

Fig. 3 Propeller Cavity Shape Measuring System

水中での使用になるため、終端より1 m手前の所でキャビテーション水槽の窓に水密となるように取り付けのための加工が施されている。

⑤ レーザ光トラバース装置

光ファイバを通じて入ってきたレーザ光を2枚の鏡を用いて上下・左右に放射状にトラバースし、プロペラ翼面上の任意の点に当てるための装置である。2枚の鏡はそれぞれ独立な2つのステッピング・モータで向きを変えことができ、制御は⑥のミラー・コントローラを通じて⑩のマイコンで行う。

本装置は模型船内船尾部に設置し、水中で使用されるため、全構造は ± 1 気圧の水圧に耐えられる防水耐圧容器に収められ、レーザ光は容器前面の円形窓を通して照射される。窓は光の屈折影響をなくすためにレーザ・トラバース中心を中心とする同心球面状の亚克力製とした。

ステッピング・モータの分解能は 0.36 deg/step であり、レーザ光の振り角は横方向に 0.0218 deg 、縦方向に 0.072 deg 単位で制御される。走査範囲は、上下、左右共に $\pm 20 \text{ deg}$ 以内である。照射されるレーザ・ビーム径は、トラバース装置から250 mm離れた所で約1 mmである。

⑥ ミラー・コントローラ

レーザ光トラバース装置内の鏡を制御する信号を送る。GP-IBによりマイコンで制御する。また、レーザ光トラバース装置内にセンサを持つ漏水検知器も備えている。

⑦ CCD カメラ

2台の小型モノクロ CCD カメラ (NEC; TI-23A) に105 mm レンズ (Nikon) を付けて用いる。画素数は 512×492 で、水中距離で約1.4 m離れたプロペラ翼面の約50 mm四方を一画面に入れることができ、この時、一画素が約0.1 mmに相当する。2台のカメラはそれぞれ独立にレーザと組み合わせて、または、2台同時にステレオ・カメラとして用いることができる。

⑧ 同期回路

プロペラとカメラの同期をとるための回路である。プロペラの回転信号パルスと、CCD カメラの同期信号のタイミングが合った時を選び出し、②の音響光学変調器及び⑨の画像処理装置に信号を送り、データ取込みのトリガとする。

⑨ 画像処理装置

イメージ・プロセッサ (NEC; PD-200) を使用した。画像分解能は 512×480 ドットで、1点のデータは明るさで256階調に分けて扱われる。適当な数居値により二値化されたプロペラまたはキャビティ表面で散乱されたレーザ光の像の重心位置を算出して⑩の計測制御装置に送る。

⑩ 計測制御装置

マイコン (NEC; PC 9801 VX) を用いて計測の制御及びデータの処理を行う。この計測システムのために開発されたプログラムにより、レーザ光のトラバース(⑥のミラー・コントローラを通じて⑤のレーザ光トラバース装置の中の2枚の鏡を制御する)、⑨で処理された画像重心データの取込み、それをもとにレーザ光散乱点の空間位置の算出、プリンタ、ディスク等へのデータの書き出しを行う。

⑪ データ解析装置

ワーク・ステーション (HP 9000-330 CH) を用いて、⑩で処理されたデータを基にキャビティ表面形状、キャビティ体積等の解析を行う。

4. 計測手順

上述の計測システムを用いて、船研の大型キャビテーション水槽の第二計測部で模型船後方で作動するプロペラ翼面上のキャビティ形状計測を行った。

使用した模型船は M. S. No. 500, 模型プロペラは M. P. No. 218 及び M. P. No. 220 である。これらは運輸省航海訓練所の練習船「青雲丸」の1/16.293の模型であり、M. P. No. 218 は通常型プロペラ (CP), M. P. No. 220 はハイリー・スキュード・プロペラ (HSP) である。これらの主要目を Table 1 及び 2 に示す。5翼あるプロペラのうち、2つの翼は白色に、他の2つの翼は黒色にラッカーで塗装した。

レーザ光トラバース装置を模型船内に設置して使用するので、Fig. 4 に示すように船尾の一部を亚克力窓で置き換えた。この状態での伴流分布を Fig. 5 に示す。船尾形状が変わったことによる影響は殆ど無かったが、 0° 近傍で伴流のピークが約0.05大きくなった。その影響により発生したと考えられる間欠的な PHVC (Propeller-Hull Vortex Cavitation) が観察された。また、CCD カメラは計測部の左舷側外部より斜めにプロペラを見る位置で使ったため、計測部には三角プリズム状の亚克力窓を付けて使用し、カメラの光軸が窓の面にほぼ垂直となるようにした。

計測は、実船プロペラ回転数163 rpm 相当の状態 (CP は $K_T=0.207$, $\sigma_n=3.06$, HSP は $K_T=0.201$, $\sigma_n=2.99$: 以下、キャビ状態と言う) と、キャビテーションの発生していな

Table 1 Principal Particulars of a Model Ship

M.S.No.	500
Length bet.P.P. [m]	6.444
Breadth [m]	0.984
Depth [m]	0.491
Draft [m]	0.356

Table 2 Principal Particulars of Model Propellers

M.S.No.	218	220
Type	CP	HSP
Diameter [m]	0.22095	0.2200
Pitch Ratio at 0.7 R	0.950	0.944
Expanded Area Ratio	0.650	0.700
Boss Ratio	0.1972	
Number of Blade	5	
Skew Angle [deg]	10.5	45.0
Rake Angle [deg]	6.0	-3.03
Blade Section	MAU	Modified SRI-B
Direction of Rotation	Right	Right

い状態（以下、ノンキャビ状態と言う）で行った。ノンキャビ状態は、静圧、流速は変えずに、プロペラ回転数を下げるにより設定した。今回は、キャビ状態は $n=20$ rps、ノンキャビ状態は $n=14$ rps で計測を行った。これは、静圧を変えるとプリズム窓が水槽内外の圧力差により出入りし、CCD カメラから見たプロペラの位置がずれるためである。パラメータの同定もこのノンキャビ状態において行った。

キャビ状態の計測では、キャビティを透過したレーザ光が翼面で光ることを防止するために、黒く塗った翼を使用した。同定及びノンキャビ状態の計測では、レーザ光が翼面で良く乱反射するように白く塗り、更に同定用のマーキングをした翼を使用した。翼による形状の差は 0.05 mm 以下であり、今回の計測システムで目標とした計測精度 0.5 mm に比べて充分に小さい。

計測の手順としては、まずノンキャビ状態で白翼を用いてカメラ・パラメータ、レーザ・パラメータの同定を行う。この際、翼角度位置をいくつかだけ使って同定を行うと奥行きに関しての精度が非常に悪くなるので、計測したい翼角度以外に、 5 deg ないし 10 deg ずらした翼角度位置でのデータも使用して同定を行う。次にそのまま白翼で翼面形状の計測を行う。これは、計測範囲と刻み幅を指定することによって自動的にレーザ光をトラバースし、計測ができる。次にキャビ状態にして、キャビティに覆われていないマー

Fig. 4 Acrylic Window at Stern of the Ship

Fig. 5 Axial Wake Velocity Distribution in Cavitation Tunnel

キング点を計測する。これにより、ノンキャビ状態とキャビ状態のスラストの差でプロペラ全体が前後方向に移動しても、その量を検出することができる。今回の計測では $0\sim 0.4\text{ mm}$ 程度の移動があった。最後に黒翼を同じ翼角度位置にしてキャビ状態とし、自動計測でキャビティ表面の形状を計測する。このとき、同一の計測点（レーザ振り角）に対して、複数回（ $10\sim 20$ 回）の計測を行う。

複数枚（今回は3枚）の亚克力板で構成されている船尾亚克力窓による屈折の影響を避けるために、亚克力板1枚を通して計測できる範囲毎に分けて以上の計測を行う。計測の速さは、1回のデータ取り込みにつき約1秒である。1計測点につき10回データ取り込みを行い、200点計測を行うものとする、約30分で1枚の亚克力板に対してキャビ状態での計測を終了する。ノンキャビ状態における同定作業及び翼面計測を含めると、1つの翼角度位置で計測に要する時間は、約2時間である。

5. 解析方法

計測により得られるデータは、レーザ光反射点の空間座標 (X, Y, Z) である。これをもとに、以下の手順によりキャビティまたはプロペラ翼面の形状の解析を行った。

まず、屈折の影響を避けるためデータは Fig. 4 のようなアクリル窓の各板毎に分けて計測されるので、同一状態のデータを一つのデータにまとめる。

得られたデータは、レーザ光反射点の空間座標であり、必ずしもキャビティ表面で光ったものだけではない。キャビティ状態の計測では黒く塗装した翼を用いてはいるが、翼面での反射率はゼロではなく、Fig. 6 のようにキャビティ内部を透過した光の像が捕らえられることがある。そのような像は、図に示すようにキャビティ表面での屈折の関係で翼面より中に入り込んだ像として捕らえられることになる。よって、キャビティ表面で反射した光の像と、キャビティを透過して翼面で反射した像は、それぞれの算出された空間座標値から、翼面を境としてふり分けることができる。

また、音響光学変調器で分離しきれずに混入してくる零次光は一次光に比べけた違いに微弱な光ではあるが、偶然零次光による鏡面反射の方向に CCD カメラがあると、その光像は一次光の乱反射による光像と同レベルの明るさの像としてカメラに捉えられる。しかし、今回のような配置（船内からレーザを照射し、左舷側に設置したカメラで像を撮る）では、零次光による像はやはりプロペラ翼面より後方の像としてその空間座標が算出されるため、同様にふり分けることができた。

こうしてふり分けられたデータを、レーザ振り角 (α, β) が同一のものについて空間座標を平均する。そうして得られた点を Fig. 7 のような三角形メッシュに分割し、補間したものをキャビティまたはプロペラ表面形状とする。補間法としては、得られたデータの性質を考慮して線形補間を用いた。

キャビティの厚さを求めるにあたっては、求めたいキャビティ表面上の点を通りプロペラ・シャフトを中心軸とする円筒面を考え、それを展開した面内でプロペラのピッチ

Fig. 6 Reflection of Laser Beam on Cavity and Propeller Blade Surface

Fig. 7 Triangle Mesh for Data Analysis

Fig. 8 Cavity Thickness Contour

線に垂線を降ろし、プロペラ翼断面との交点までの距離をもってその点のキャビティ厚さとした。円筒面内で考えているため、プロペラ翼面に降ろした垂線より僅かに（翼のレーキ角の余弦の逆比を以て）長くなる。これは、プロペラ翼断面の厚さに通常使われている定義と同じ定義によるものである。

データ解析結果は Fig. 8 のような等厚線図、Fig. 9~12 のような断面図等として表される。また、計測範囲がキャビティ全体を覆っていれば、キャビティ体積も精度良く算出される。これらの解析は、三角メッシュの作成に約 10 分かかかる以外は、全てリアルタイムで対話型に処理できる。

6. 計測結果

6.1 通常型プロペラ

Fig. 9 に M. P. No. 218 の翼角度位置 $\theta=0 \text{ deg}$ における翼面形状計測結果を示す。細い実線は翼断面、太い実線が計測結果を示す。プロペラ・オフセットと比較して誤差は 0.3 mm 以下であり、目標とした計測精度 0.5 mm を充分満足するものである。ただし、キャビティ状態の計測では同定時と違う翼を使用するため、プロペラ製作精度と翼角度位置設定精度による誤差が更に加わることになる。前者は 0.05 mm 以下であり問題にならない。後者は、翼角度位置の設定精度を 0.1 deg 、プロペラ直径 250 mm とすると、翼端で誤差は最大 0.2 mm となる。よって全て合わせると、キャビティ形状の最大計測誤差は約 0.5 mm と評価できる。

キャビティ状態でのキャビティ形状計測結果を Fig. 10(a) ~ (e) ($\theta=350 \text{ deg} \sim 30 \text{ deg}$) に示す。一点鎖線は目視によるキャビテーション発生範囲、丸印がレーザ光散乱法によ

Fig. 9 Measured Blade Sections of CP

Fig. 10 (a)

Fig. 10 (b)

Fig. 10 (c)

Fig. 10 (d)

Fig. 10 (e)

Fig. 10 Measured Cavity Sections on CP ($K_T=0.207$, $\sigma_n=3.06$)

Angular Position = 30.0 deg
MP220 163RPM NON.CAV

Fig. 11 Measured Blade Sections of HSP

Angular Position = 0.0 deg
MP220 163RPM

Fig. 12 (a)

Angular Position = 20.0 deg
MP220 163RPM

Fig. 12 (b)

Angular Position = 30.0 deg
MP220 163RPM

Fig. 12 (c)

Angular Position = 40.0 deg
MP220 163RPM

Fig. 12 (d)

Angular Position = 50.0 deg
MP220 163RPM

Fig. 12 (e)

Fig. 12 Measured Cavity Sections on HSP ($K_T=0.201$, $\sigma_n=2.99$)

る計測結果、太い実線が今回の計測結果を示す。前縁近傍の透明なシート・キャビテーションが発生している領域では、レーザ光が散乱しないためにデータが欠落している領域が生じている。また、船尾アクリル窓の板の継目に当たって計測できない領域($\theta=0^\circ$ と 20° の $3/4$ 翼弦長より後縁側)があった。

キャビティ後縁形状の計測結果は、 $0.8R$ では空洞理論と言う閉塞的な形状となり、 $0.9R$ と $0.95R$ では翼面とほぼ平行な開放的な形状になっている。 $0.8R$ ではキャビティの存在範囲が目視観測によるそれよりはみ出している。この理由については後の考察で述べる。

6.2 ハイリー・スキュード・プロペラ

M. P. No. 220 の $\theta=30^\circ$ での翼面形状計測結果をFig. 11に示す。前縁側で、 $0.8R$ では翼内部に食い込んだ、 $0.95R$ では翼から浮き上がった結果となっているが、誤差の最大値は約 0.5 mm である。

Fig. 12(a)~(e) ($\theta=0^\circ$ deg~ 50° deg)にキャビティ形状の計測結果を示す。CPと同様に、キャビティ前縁部はレーザ光の散乱率が低かった。また、 $\theta=50^\circ$ degの後縁部はアクリル板の継目にあたり計測が不可能であった。

HSPのキャビティ後縁形状の計測結果はCPと異なり計測された全ての場所で開放的な形状であり、翼後縁に向かってその厚さが増加しつつ突然切れて終わっているような形をしている。目視によるキャビテーション発生範囲(一点鎖線)との対応は良い。

7. 考 察

7.1 目視観測によるキャビテーション発生範囲との比較

不均一流中で作動するプロペラ翼面上に発生するキャビティは、同じ翼角度位置で観察していても、その形状、特にキャビティ後縁の形状が激しく変化することがある。今、単純化して、Fig. 13の実線ABとACの間をキャビティ後縁が変動しているとする。目視観測によるキャビテーション発生範囲は、BとCの中点D付近、或は、残像の影響により多少大きい方に引きずられてD点より少しC点寄りとなりがちである。

今回の計測システムに用いた解析法では、キャビティが存在する時だけを厚さ方向に平均することになるので、平均化した形状は折れ線AECのようになると考えられる。

従って、本システムの解析によるキャビテーション発生範囲は、キャビティ形状の変動の激しい領域では目視によるそれよりも大きめに評価することになり、同時に、キャビティ体積も過大評価する恐れがある。実際に、CPの $0.8R$ のキャビティ後縁にその影響がみられる。この領域では、目視でもキャビテーション発生範囲の変動が大きかった。HSPでもキャビテーションの変動は存在したが、CPに比べてその変動は小さく、計測と目視によるキャビテーシ

Fig. 13 Model for Fluctuating Cavity End Shape

ン発生範囲は良く一致している。

任意の点でのキャビテーションの発生確率を正確に求めることができればキャビティ体積もより良い精度で求められるが、今回の計測では、キャビティが存在していても必ずしも光像が得られるとは限らないため、キャビテーションの発生確率を求めることができなかった。

キャビティ表面で安定した一様なレーザ光散乱を得られればキャビテーションの発生確率を求めることができ、問題は解決する。実船のスケールで発生するキャビティは通常表面が白濁しており、この条件を満たしていると考えられるが、模型プロペラに発生するキャビテーション、特にシート・キャビテーションは表面が滑らかで、乱反射しない。キャビテーションの発生の間欠性を少なくする手段として用いられる翼前縁粗さを付けると少し改善されるが、まだレーザ光の得られない領域が残った。これは今後解決すべき課題と考えられる。

7.2 レーザ光散乱法による計測結果との比較

Fig. 10 (CP) と Fig. 12 (HSP) にレーザ光散乱法による同じ模型での過去の計測結果⁸⁾を丸印で示す。

レーザ光散乱法ではレーザ光をキャビティ表面に接するように照射するため、データ解析に近似がなく、原理的には 0.2 mm 程度の高い精度が期待できる。反面、レーザ光散乱点の決定を目視で行うことによる精度の低下が考えられ、総合的には今回の計測精度と同等と考えられる。

両者の計測値は計測精度の範囲内で非常に良く一致し、両システムによる計測の信頼度が高いことを示している。

7.3 CP と HSP のキャビティの比較

CP と HSP のそれぞれに発生するキャビティの発生量と翼角度に対するその変化を比較した。発生量を示す値として最大厚さ及び平均厚さの変化を Fig. 14 に、面積の変化を Fig. 15 に、体積の変化を Fig. 16 に示す。Fig. 16 にはレーザ光散乱法による結果⁸⁾も点線で示す。

前述のようにキャビティ前縁部に計測できない領域が存在するので、その部分については目視観察によるキャビテーション発生範囲の外縁(厚さが零となる点)と計測されたキャビティ形状データの外縁とを線形補間して、それをキャビティの表面とした。キャビティの平均厚さはCPとHSPでほとんど差は無いが、最大厚さはHSPの方が約30%大きい。面積及び体積は、いずれもCPの方が量が多く、又、翼角度位置に対する変化、すなわち、時間的な変化も

大きい。体積のピーク位置(CPの $\theta=10^\circ$, HSPの $\theta=30^\circ$)における2次の時間変化分は、5点中央差分により求めると、CPで $-2.01 \text{ m}^3/\text{sec}^2$, HSPで $-0.33 \text{ m}^3/\text{sec}^2$ であり、HSPの方がCPの約1/6となっている。ピークの位置が今回の計測の方が約10度小さいが、この理由としては、伴流分布の違いと解析方法の違いが考えられる。

7.1に述べた理由によりCPに関してキャビティ体積を過大に計算し、そのために2次の時間変化分を過大に評価していることが考えられる。しかし、目視によるキャビテーション発生範囲からはみ出す部分はキャビティも薄く、その部分を除いて体積を計算してもHSPとは明らかな差があった。また、HSPではキャビティの後縁が翼面から離

Fig. 14 Comparison of Cavity Thickness Variation between CP and HSP

Fig. 15 Comparison of Cavity Area Variation between CP and HSP

Fig. 16 Comparison of Cavity Volume Variation between CP and HSP

れて浮き上がっている領域があったが、その領域のキャビティの裏側の形状は今回は計測できず、翼面とキャビティに挟まれた部分もキャビティ体積に算入されている。その分、HSPの実際のキャビティ体積は本計測値より小さいと考えられる。

よって今回の結果は、HSPのキャビティ体積の2次の時間変化分がCPのそれよりも小さいために変動圧力が軽減されることを確認するものである。

8. 結 言

本論文ではCCDカメラを利用した画像処理技術と、船研で既開発されているレーザ光散乱法とを組み合わせ、模型船用プロペラに発生する非定常キャビティの3次元形状を計測する新しい方法、LASER-CCD法を開発し、模型船後方で作動する模型プロペラのキャビティ形状の計測を行い、以下のような結論を得た。

- (1) 本計測法では $\pm 0.5 \text{ mm}$ 以内の精度でキャビティの厚さを計測することができる。既存のレーザ光散乱法の計測値と比較した結果、上記の精度以内で良好な一致を得た。
- (2) 本計測法では自動計測により多量なデータを短時間で得ることができるので、各種の既存法より格段に実用的な計測法である。
- (3) ハイリー・スキュード・プロペラに発生するキャビティの厚さは通常型プロペラのそれより必ずしも小さくないが、体積及びその2次の時間変化分はハイリー・スキュード・プロペラの方が小さいことを詳細な計測により確認した。

本計測法は、キャビティ表面におけるレーザ光の散乱の具合の影響を強く受ける。しかし、レーザ光とカメラの配置、レーザ光の波長、キャビテーション安定化の手法等に改良の余地が残っており、この問題を解決できれば、キャビティ形状・体積をより精度良く求めることができる。これにより、キャビテーションを伴うプロペラにより誘起される変動圧力の推定、あるいは、キャビティ・ボリウム理論的推定法に対する検証データとして大きく寄与することが期待できる。

本論文での計測は、三次元キャビティ形状計測システムを用いて行われた。本システムは主にキャビティ厚さ計測システムと三次元キャビティ形状解析システムから構成される。前者のシステムは(財)日本造船振興財団、石川島播磨重工業(株)及び三菱重工業(株)の共同研究である「無振動高品質船舶の開発」研究の一環として実施した船研と三菱重工業(株)との共同研究「プロペラ変動圧力に及ぼすキャビテーションの影響」において開発された。この共同研究には三菱重工業(株)の他、石川島播磨重工業(株)、川崎重工業(株)、住友重機械工業(株)、NKK、日立造船(株)、三井造船(株)が協力者として参加した。

謝 辞

本計測システムの開発の機会をくださった運輸省海上技術安全局技術課の佐々木博通課長を始めとする関係者の方々に感謝するとともに、研究補助をしていただいた(財)日本造船振興財団に謝意を表します。また、本計測システムの開発に当たりご協力いただいた佐藤隆一(石川島播磨重工業(株))、斎藤泰夫(川崎重工業(株))、竹川正夫(住友重機械工業(株))、岡本幸彦(NKK)、田中寿夫(日立造船(株))、石井規夫((株)三井造船昭島研究所)、星野徹二(三菱重工業(株))の諸氏に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 谷林英毅：プロペラ起振力、船舶の振動・騒音とその対策に関するシンポジウム、日本造船学会、1970、pp. 26-58
- 2) 右近良孝：第4章プロペラ・キャビテーションの予測、第3回船用プロペラに関するシンポジウム、1987、p. 162
- 3) Sasajima, T. & Ukon, Y.: ITTC Comparative Tests on Pressure Fluctuations, Proc. of Int. Workshop on Cavitation, Wuxi, 1989, pp. 59-67
- 4) Zimmermann, B.: Berechnung des durch die Kavitationsgebiete auf den Propellerflügeln an einer Platte induzierten instationären Druckes, Bericht Nr. 362, Institut für Schiffbau der Universität Hamburg, 1977
- 5) 山口一他：ステレオ写真法によるプロペラ・キャビティ厚さの測定、第4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、1986、pp. 115-122
- 6) Hoshino, T.: Estimation of Unsteady Cavitation on Propeller Blades as a Base for Predicting Propeller Induced Pressure Fluctuations, Journal of S. N. A. J., Vol. 148, 1980, pp. 33-44
- 7) 右近良孝、黒部雄三：レーザ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、船研報告、第19巻、第1号、1982、pp. 1-12
- 8) 黒部雄三他：青雲丸の実船対応キャビテーション試験、船研報告、第20巻、第6号、1983、pp. 15-49
- 9) Kodama, Y. et al.: The measurement of Cavity Thickness on a Full Scale Ship by Using Laser and TV Camera, Papers of Ship Research Institute, No. 73, 1983
- 10) 星野徹二、田中保爾：プロペラ翼面上の非定常キャビティ断面形状の計測、第11回流れの可視化シンポジウム、1983、pp. 167-172