レーザ流速計による船用プロペラまわりの流場計測*

小山 鴻一**, 角川 明**, 岡本 三千朗***

Flow Field Measurement around a Marine Propeller
by Laser Doppler Velocimeter

by Koichi KOYAMA, Akira KAKUGAWA, and Michio OKAMOTO

Measurement of flow velocity distribution around a marine propeller was carried out by Laser Doppler Velocimeter in a cavitation tunnel. The LDV measurement system which can supply both velocity data and measuring position data relative to the blade position was developed, and the information about instantaneous velocity distribution around propeller blades was obtained. Authors succeeded in revealing the vortex system around propeller blades. The effect of strong vortex extending from blade tip was found in the measured velocity data. Accelerated and contracted flow behind blades was also appeared. Thrust and torque estimated from velocity distribution in slip stream were compared with direct measurement results. Comparison between experimental results and lifting surface theory shows that the existence of strong tip vortex shown by the experiment can not be followed by the theory. It is necessary to investigate the separated flow in the region near the blade tip, in order to improve the theoretical method.

Key Words: Flow Measurement, Unsteady Flow, Marine Propeller, Laser Doppler Velocimeter, Vortex

1. 緒 言

船用プロペラの流力性能を理論計算で定量的に推定することができるようになったのは、10数年前、電子計算機の普及により、プロペラ翼に対して揚力面理論を応用することが可能となってからのことである⁽¹⁾。揚力面理論計算は、スラスト、トルクのみならず翼面の圧力分布などの微視的な量に関する情報を提供してくれる。そこで、それを実験的に検証しようという努力がなされるようになり、プロペラ翼面の圧力計測⁽²⁾やプロペラまわりの流場計測が試みられるようになった⁽³⁾⁽⁴⁾。その結果、理論モデルが実現象を大方良くとらえている反面、両者の不一致点も指摘されるようになった。その一つはプロペラ翼の翼先端部に現れるものである⁽⁵⁾。プロペラ翼の先端に近い部分における流力現象をとらえることは、その性能把握に重要であるにもかかわらず、理論的にも実験的にも取扱いに困難な点が多く、この方面の研究は数少ない。著者らは、翼端部の特性が顕著に現れるような縦横比の小さな翼

のプロペラについてその流場の構造を調べている。

LDV (Laser Doppler Velocimeter) 計測技術の進歩は目覚ましく、最近、流体機械の内部流れ⁽⁶⁾やヘリコプタロータまわりの流れ⁽⁷⁾の計測に応用されている。船用プロペラまわりの流れの計測に LDV を応用した研究も多くなっているが、ほとんどのものが流速変動を平均した値として計測しているため、プロペラ翼端渦近くのように変動のきわめて大きい所の計測値としては情報量が不十分である。そこで、著者らは、周期的に変動する流速を精密に計測するために、LDV 回転同期計測システムを開発し、作動中のプロペラまわりの流場全体を瞬間的に計測したと同様な流速分布を得ることに成功した。以下は、そのような計測結果をまとめ流場の構造を明らかにしたものである。実験は船舶技術研究所のキャビテーション水槽(計測部直径 0.75 m) において行った。

2. LDV 回転同期計測システム

LDV 回転同期計測システムの概要を図 1 に示す。LDV は DISA55X 次元後方散乱光学系及び 55L90a カウンタプロセッサなどから構成される⁽⁸⁾。プロペラ主動力計から供給される回転信号を信号 f とする。回転同期計測装置の中で LDV 流速データの有無を判定

* 昭和 60 年 3 月 31 日 第 62 期通常総会講演会において講演。原稿受付 昭和 59 年 10 月 31 日。

** 正員、運輸省船舶技術研究所 (〒181 三鷹市新川 6-38-1)。

*** 運輸省船舶技術研究所。

し、流速データとプロペラ回転角に相当する信号 f の計測値を、ともにマイクロコンピュータに送る。それを継続して行うことにより、プロペラが一回転したときの、半径 r における円周上の流速分布が求められる。

LDV 計測の信頼度を増すには水中の散乱粒子数の制御が必要であるが、今回は水性ペイントの注入を行った。計測は1秒ごとの有効データ数が300~500個となり、有効データ数が測定点通過散乱粒子数の10~30%となるように散乱粒子数を制御して実施した。

3. 模型プロペラおよび実験状態

模型プロペラの主要目を表1に、形状を図2に示す。このプロペラは通常の船用プロペラと異なりキャンバがついていない。実験はこのプロペラが均一流中で作動する場合について行った。作動状態は、プロペラ回転数を $n=12\text{s}^{-1}$ とし、前進速度 V を変化させて前進常数 $J=V/nD$ (D : プロペラ直径) を変化させた。キャビテーション水槽の側壁影響により、水槽内のプロペラ前方の流速 V_v は、一般に無限流体中のプロペラ前進速度 V とは異なる。本文では V_v と V の関係は、理論式

$$\frac{V_v - V}{V} = \frac{2}{\pi} \left(\frac{R}{R_T} \right)^2 \frac{K_T}{J^2}$$

によった⁽⁵⁾。ここに R , R_T はそれぞれプロペラおよび水槽の半径であり、 K_T はスラスト係数(後出)である。座標はプロペラ軸方向の後方へ x 、プロペラ回転と反対方向を θ 、半径方向を r とし、 x , θ , r 方向の流速成分をそれぞれ V_x , V_T , V_R とした(図3)。

図1 計測システムの概要

4. 流速分布計測結果

プロペラ翼直後の x , r 方向の流速分布 V_x , V_R の計測例を図4, 5に示す。 $J=0.584$ の場合である。流速の無次元化には、 V_v を用いている。図4, 5の横軸は θ で、プロペラ翼回転角 $\theta=1^\circ$ ごとの計測値をプロットしている。プロペラが3翼であるので、流速分布は一回転中に3周期を繰返している。図4, 5から、強い翼端渦および弱い自由渦層による流速変動を見ることができる。図4(V_x)において $r=0.95R$ と $r=0.925R$ は流速ピークの向きが逆である。これは翼端渦の外側と内側を計測したためであり、翼端渦の中心はこの間にあると推定される。図4の $0.925R$ と $0.9R$ の図の流速ピークの左側に見られる小さな乱れは、翼後縁から放出された自由渦層によるものと考えられる。図5(V_R)においては、翼端渦の近くで流向が逆転する状態が明確に現れている。図6は V_T と V_R を合成したベクトル図であり、後方から流れを見た図である。プロペラ後流の速度場、特に翼端渦まわりの流れがよくとらえられている。

表1 模型プロペラ MP No.221 の主要目

Diameter (m)	0.300
Boss ratio	0.313
Pitch ratio	0.850 (const.)
Exp. area ratio	0.515
Blade thickness ratio	0.048 (at root)
Angle of rake	0°
Number of blade	3
Blade section	NACA 4 digit

図2 模型プロペラ MP No.221 の形状

図3 座標系

5. 平均流速分布

流速分布計測結果 V_x , V_T , V_R の円周方向平均値 $\bar{V}_x$, $\bar{V}_T$, $\bar{V}_R$ のうちの $\bar{V}_x$ の $J=0.364$ の例を図 7 に示す。前方から後方に移るにつれて流速が加速され、同時に縮流して行く様子を見ることができる。また、プロペラ後流の外側においては、プロペラ後方の流速は前方より遅くなっている。

6. ピッチ分布

流速計測値 $\bar{V}_x$, $\bar{V}_T$ を用いてらせん流のピッチ

図 4 軸方向流速 V_x の円周方向変化 ($J=0.584$, $X=0.11D$)

図 5 半径方向流速 V_R の円周方向変化 ($J=0.584$, $X=0.11D$)

$2\pi h$ を求め、その半径方向の分布を $J=0.364$ の場合につき図 8 に示した。図 8 には、チップボルテックス・キャビテーションにより計測したピッチの値および揚力面理論⁽⁵⁾で計算されたピッチの値 (LST) も示した。チップボルテックスのピッチが内側のらせん流のピッチより小さいことは、渦層の縁の巻き上がりを示しており、翼端はく離渦の形状を想像することができる。

7. 翼素の循環

前述の $\bar{V}_T$ を用いると、プロペラ翼の半径 r の翼素のまわりの循環は、単純な仮定のもとに $\Gamma = 2\pi r \bar{V}_T / l$ (l : 翼数) で与えられる⁽⁹⁾。それを図 9 に示した。図 9 中に $X/D=0.1, 0.2, 0.5$ とあるのは計算に用いた $\bar{V}_T$ の計測位置を表し、原理的には三者が一致するはずであるが、一致が不十分なのは解析法の限界と考えられる。図 9 に揚力面理論による計算値 (LST) も示したが、理論値と計測値の一致はオーダとしては良

図 6 合成速度ベクトル $\bar{V}_T + \bar{V}_R$ の分布 ($J=0.584$, $X=0.11D$)

図 7 軸方向流速 V_x の円周方向平均値の分布 ($J=0.364$)

図 8 らせん流のピッチの半径方向分布
($J=0.364$)

図 9 翼素の循環の半径方向分布

い。しかし、 J の小さい場合、理論計算では現れない強い循環が、翼端部に生じている。これが翼端はく離渦となって後流渦系を支配するものと考えられる。

8. スラスト、トルク計測値との対応

LDV 計測 $\bar{V}_x$, $\bar{V}_r$ に基づいて流体の運動量変化などを計算するとプロペラのスラスト係数 $K_T = T/\rho n^2$

表 2 スラストとトルクにおける比較

	$J=0.584$		$J=0.362$	
	K_T	K_Q	K_T	K_Q
Direct Measurement (POT)	0.088	0.0140	0.183	0.0240
Lifting Surface Theory (LTS)	0.088	0.0140	0.157	0.0202
Cal. from Velocity Data (LDV)	0.084	0.0138	0.187	0.0235

D^4 , トルク係数 $K_Q = Q/\rho n^2 D^5$ を求めることができる。それを、動力計による直接計測値 (POT) や揚力面理論による計算値 (LST) と比較して表 2 に示した。LDV 計測値の信頼性がほぼ満足なものであることはこの表からもわかる。

9. 結 言

周期的に流速変動をするプロペラまわりの流場を LDV で精度良く計測するシステムを開発し、均一流中で作動するプロペラまわりの流速分布を計測し、その流場の構造を調べた。その結果と揚力面理論の計算値を比較したところ、理論的手法を改良するには、翼端はく離渦の存在を適切に取扱う必要のあることが分かった。また、将来、このような計測が簡便にしかも高速にできるようになれば、プロペラ翼の性能成分を分析することによって、プロペラ設計における形状改良にも応用することが可能と考えられる。

文 献

- (1) 菅井, 日本造船学会論文集, 128(昭 45), 61.
- (2) 高橋・奥, 日本造船学会論文集, 141(昭 52), 17.
- (3) 武井・ほか 3 名, 船研研究発表会, 40(昭 57), 90.
- (4) 岡村, 石川島播磨技報, 23-3(昭 58), 259.
- (5) 小山・ほか 3 名, 日本造船学会論文集, 153(昭 58), 68.
- (6) 柏木・黒崎, 機誌, 87-785(昭 59), 341.
- (7) Biggers, J. C., ほか 3 名, *Proc. 33rd Annual Natl. Forum Am. Helicopter Society*, (1977), 77. 33-06.
- (8) 角川・ほか 5 名, 船研研究発表会, 38(昭 56), 37.
- (9) van Manen, J. D., *Int. Shipbuild. Prog.* 4-34(1957), 317.