

PS-6 船用プロペラの翼端渦の PIV 計測とその解析方法

流体設計系 *新川 大治朗, 澤田 祐希, 白石 耕一郎, 川並 康剛

1. はじめに

船用プロペラの翼端渦から発生するキャビテーションは船舶から水中に放射される高周波数帯の騒音の主な要因の一つである。そのため、翼端渦の周りの流速や圧力を推定することが重要である。そこで、本研究は、プロペラ翼端渦の計算モデルを作成するため、水槽試験によりその渦核の大きさと渦強さを確認すること目的とした。海上技術安全研究所（以下、当所）の大型キャビテーション水槽で模型プロペラの翼端渦まわりの流場について PIV¹⁾を用いた翼端渦まわりの流場の計測方法と計測流場データから渦特性（渦核の大きさと渦強さ）を解析するための同定方法について紹介する。

度はおよそ 0.23mm である。画像の撮影時間間隔 Δt は、粒子の最大移動距離がおおよそ 10 pixel になるように調整した。計測条件を表-1 に示す。

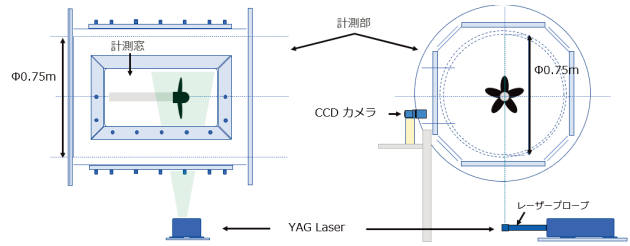


図-1 PIV システムの配置

2. 翼端渦の PIV 計測

2.1 試験水槽

本実験は、当所の大型キャビテーション試験水槽で実施した。なお、カメラ・光学系と測定領域の位置関係がプロペラの翼端付近の流場計測に適していることから、直径 0.75m の計測胴（第1計測胴）を用いた。

2.2 供試模型

供試模型プロペラは、初代青雲丸 HSP の直径 0.25m の模型プロペラを使用した。

2.3 PIV システム

2D-PIV のための機器配置のスケッチを図-1 に示す。レーザーは、計測胴下部の測定窓からプロペラの軸心を照射した。PIV システムは、ダブルパルス Nd-Yag レーザー（LOTIS TII 社製 LS-2145PIV-300）、CCD カメラ（JAI AM200-GE、アクティブピクセル 1600(h)×1200(v)）、システムコントローラで構成した。測定領域は、およそ 22.6 (幅)×16.9 (高さ) mm であり、PIV 画像の撮影タイミングはプロペラ翼の通過と同期させ、所定の角度位置とした。測定領域を図-2 に示す。本研究では、トレーサーとして架橋ポリメチルメタクリレート（直径 12 μ m、密度 1.2g/m³）からなる球状粒子を用いた。計測誤差は画像密度（検査領域サイズとレーザーシートの深さにおけるトレーサー粒子の数として定義）が 5 より大きくなると非常にゆっくりと減衰し、その後ほぼ一定になるとされている²⁾。そこで、撮影画像を確認しながら、検査領域内におおよそ 6 個の粒子が入るように、キャビテーション水槽に注入するトレーサーの量を調整した。測定した画像から速度ベクトルを抽出する処理は、フローテックリサーチ社製 FtrPIV3 を用いて直接相互相関法を使用した。検査領域は 33×33 pixel で 50%オーバーラップさせた。計算格子の解像

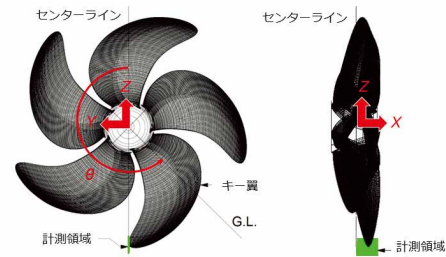


図-2 PIV 計測領域 ($\theta=226$ [deg.])

表-1 計測条件

n_p [rps]	K_T [-]	U_0 [m/s]	θ [deg.]	$Re_D \times 10^{-6}$ [-]	$Re_{0.7} \times 10^{-6}$ [-]	Δt [μ s]
20	0.25	2.66	226	1.403	1.043	9
15	0.25	2.00	226	1.053	0.783	12
10	0.25	1.35	226	0.702	0.522	19

2.4 計測結果

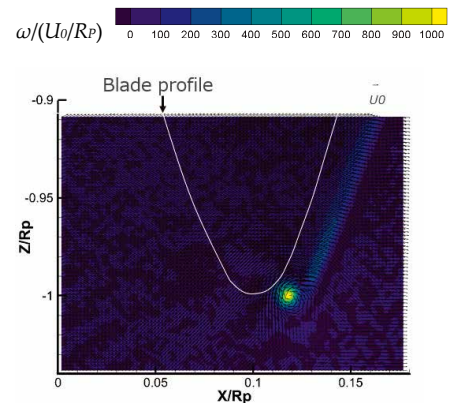


図-3 速度およびコンターの位相平均 ($n_p=20$ [rps], $K_T=0.25$ [-], $\theta=226$ [deg.])

計測結果から得られた翼端渦周りの流速分布，渦度の分布を図-3 に示す．結果は 3000 ペアの画像を解析した位相平均の結果である．速度分布をベクトル，渦度をコンターで示している．それぞれの値は，流入速度およびプロペラ半径で無次元化している．白い線は翼端がセンターライン上にあるときの翼の輪郭線を示す．

3. 翼端渦の同定

3.1 同定モデル

計測した翼端渦を，Rankine 渦モデルと Burgers 渦モデル²⁾を用いた同定を行った．Burgers 渦モデルは Navier-Stokes 方程式の定常解で，円柱渦を表す渦モデルであり，翼端渦近傍の流れの粘性の影響を考慮できる．Burgers 渦モデルの周方向速度は式 (3.1) で表せる．渦度は式 (3.2) で表せる．

$$u_\theta = \frac{\Gamma}{2\pi r} \left\{ 1 - e^{-\frac{\alpha r^2}{2\nu}} \right\} = \frac{\Gamma}{2\pi r} \left\{ 1 - e^{-\frac{r^2}{r_0^2}} \right\} \quad \text{式 (3.1)}$$

$$\omega = \frac{\alpha \Gamma}{2\pi \nu} \cdot e^{-\frac{\alpha r^2}{2\nu}} = \frac{\Gamma}{2\pi \cdot r_0^2} \cdot e^{-\frac{r^2}{r_0^2}} \quad \text{式 (3.2)}$$

ただし， Γ は循環の強さ， r_0 は渦核の半径， α は渦核の大きさに関する定数であり，以下のように定義する．

$$\alpha = \frac{2\nu}{r_0^2} \quad \text{式 (3.3)}$$

Burgers 渦モデルを用いた同定には，PIV データを補間した渦度のデータを用いた．渦中心の PIV による計測流場データを Kriging 補間した渦度のデータを用いた．渦度はガウス分布である．渦核の半径は，Burgers 渦モデルの渦度と PIV による計測流場データの補間した値の渦度との二乗誤差が小さくなるように決定した．

3.2 同定結果

図-4，図-5 は， $n_p=20\text{rps}$ ， $K_f=0.25$ の翼端渦の PIV の計測データ，Rankine 渦モデルと Burgers 渦モデルの同定結果の周方向速度分布と渦度分布を示す．

同定したそれぞれのモデルについて，PIV による計測流場との一致度を示す指標として平方二乗誤差 (RMSE: Root Mean

表-2 Rankine, Burgers 渦モデルの RMSE

$n_p[\text{rps}]$	Rankine 渦モデル		Burgers 渦モデル	
	u_θ/U_0	$\omega/(U_\theta/R_p)$	u_θ/U_0	$\omega/(U_\theta/R_p)$
20	0.509	255.4	0.391	63.6
15	0.509	243.6	0.303	53.2
10	0.915	266.2	0.192	63.6

- PIV measurement data
- PIV measurement data (interpolation)
- Rankine vortex model
- Burgers vortex model

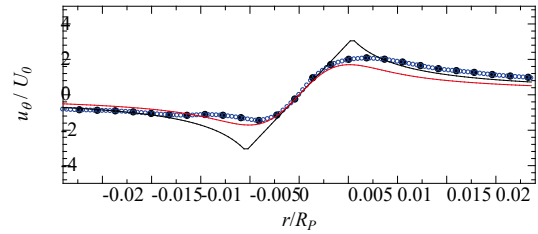


図-4 周方向速度分布 ($n_p=20\text{rps}$ ， $K_f=0.25$)

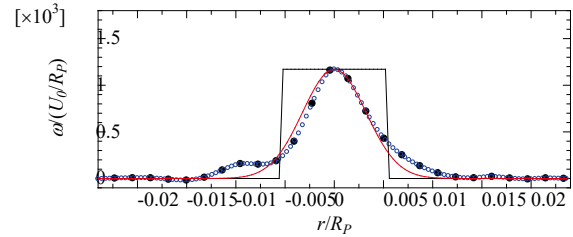


図-5 渦度分布 ($n_p=20\text{rps}$ ， $K_f=0.25$)

Squared Error) を用いて比較を行った．渦中心から 3 mm の範囲について，Rankine 渦モデルと Burgers 渦モデルの同定結果と PIV データとの RMSE を表-2 に示す．Burgers 渦モデルの周方向速度および渦度の同定結果の RMSE はそれぞれ Rankine 渦モデルの同定結果の 21~77%，22~25%である．

4. まとめ

本研究では，当所の大型キャビテーション試験水槽の模型プロペラの翼先端近くの流場計測を 2D-PIV を用いて実施した．プロペラ性能計算法の翼端渦モデルの作成を目的とし，翼端渦の渦特性（渦核の大きさと渦強さ）を抽出するための渦モデルへの同定方法について検討を行った．計測した翼端渦の流場データについて Rankine 渦モデル，Burgers 渦モデルを用いて同定を行った．その結果，粘性の影響を考慮している Burgers 渦モデルを用いた同定結果の方が PIV による計測結果と一致しており，渦特性（渦核の大きさと渦強さ）の解析に適していることを示した．

参考文献

- 1) ITTC-Recommended Procedures and Guidelines : Guideline on Best practices for the Applications of PIV/SPIV in Towing Tanks and Cavitation Tunnels, 26.
- 2) Westerweel, J. : Theoretical analysis of the measurement precision in particle image velocimetry, Experiments in Fluids, 29, (2000), S003-S012.
- 3) Burgers, J. M. : A mathematical model illustrating the theory of turbulence, Advances in Applied Mechanics, Volume 1, (1948), pp. 171-199