

PS-2 組合せライン CCD 法を用いたキャビティ体積計測技術の開発

流体設計系 * 白石 耕一郎, 澤田 祐希, 星野 邦弘

1. はじめに

本研究では船尾変動圧力の推定精度向上を目的とし、キャビテーション試験におけるキャビティ体積計測システムの開発を行う。まず、水中において高速かつ高精度で形状計測が可能な組合せライン CCD 法を用いた三次元形状計測装置の開発を行い、模型プロペラの翼面形状計測を実施することで、計測装置の精度検証を行う。その後、模型プロペラを用いたキャビテーション試験において、キャビティ体積と変動圧力の同時計測を実施する。そして、キャビティ体積計測結果から変動圧力を推定し、その値と変動圧力を圧力センサで実計測した結果と比較することで、開発した計測システムによるキャビティ体積の計測結果の妥当性を検証する。

ここで、 X_L, X_R, Y_C は撮影画像上におけるレーザーのピーク位置、 $(X_L - X_R)$ は左右のカメラの視差、 d は A 点と B 点の距離、 f はカメラの焦点距離である。次章で本装置の計測精度検証試験の結果について述べる。

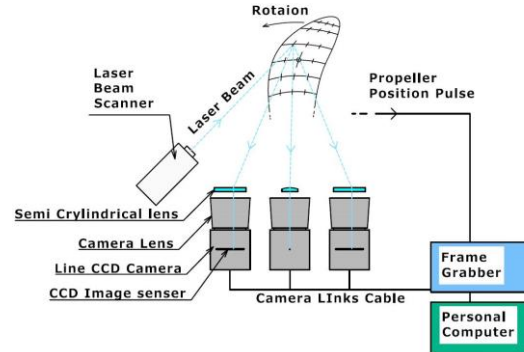


図-1 三次元形状計測装置の構成

2. 組合せライン CCD 法

本研究で用いる組合せライン CCD 法は、計測対象物にレーザーを照射して発生する散乱光を 3 台のライン CCD カメラで撮影し、それぞれの撮影画像のピーク位置から計測点の三次元位置を算出する方法である¹⁾。ライン CCD カメラは受像素子が横一列に並んでおり、一般的なエリアセンサに比べ、高解像度でありながら、スキャンレートも非常に高いという特徴がある。本研究で開発した三次元形状計測装置の構成と外観写真を図-1 と図-2 に示す。図-2 の中央にあるライン CCD カメラとその周りの光学系が開発した計測装置である。

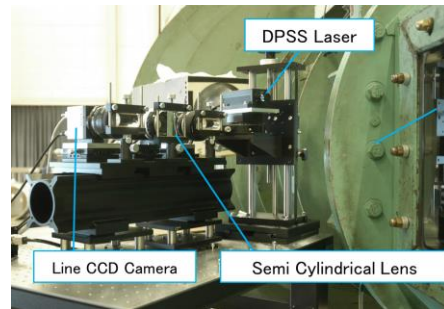


図-2 開発した三次元形状計測装置

本装置の具体的な計測方法は以下の通りである。まず、計測する位置にレーザーを照射し、計測対象の表面で散乱されたレーザー光はセミシリンドリカルレンズを通過することで、ライン CCD 素子上へと集光される。そして、ある計測対象から散乱されたレーザー光を 3 台のライン CCD カメラで撮像する。それぞれのカメラで撮影した画像の輝度分布からピーク座標を算出し、三角測量の原理よりレーザースポット光位置の三次元座標を求める。図-3 は組合せライン CCD 法における奥行き方向の計測原理を示している。 $P(X_0, Y_0, Z_0)$ は計測点、A および B は左右のライン CCD カメラの設置位置である。三角測量の原理より、レーザースポット光の三次元座標は以下の式より算出できる。

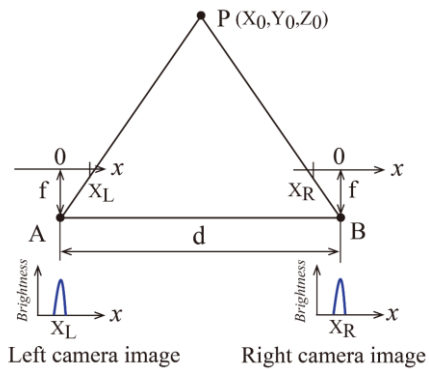


図-3 三角測量を用いた組合せライン CCD 法の計測原理

$$\begin{aligned}
 X_0 &= d \cdot X_L / (X_L - X_R) = X_L \cdot Z_0 / f & (1) \\
 Y_0 &= d \cdot Y_C / (X_L - X_R) = Y_C \cdot Z_0 / f & (2) \\
 Z_0 &= d \cdot f / (X_L - X_R) & (3)
 \end{aligned}$$

3. 検証試験

製作した計測装置の精度検証を行うため、模型プロペラの三次元形状計測試験と模型プロペラに発生するキャビテーションのキャビティ体積計測試験を実施した。使用したプロペラは、青雲丸 I 世 Conventional Propeller (以後、CP) の模型プロペラである²⁾。

3.1 三次元形状計測

三次元形状計測時の写真を図-4に示す。本計測では、プロペラトップをプロペラ角度 0deg とし、反時計回りを正とした。カメラキャリブレーションはプロペラ角度 +10deg と -10deg の 2つの角度で行い、プロペラ翼の形状計測はプロペラ角度 0deg の位置で行った。プロペラの回転数は 15rps である。

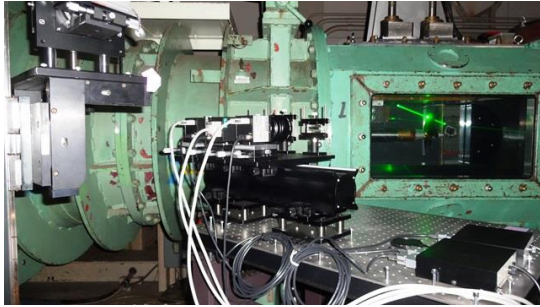


図-4 三次元形状計測装置及び計測風景

本試験で得られた形状計測結果を図-4に示す。プロペラ翼面形状はワイヤフレームで表示している。黒点は計測点を表しており、それぞれの計測点を三角形補間することで計測した翼面形状を求めている。コーナーの数値は計測結果とプロペラ翼面との誤差を示している。計測誤差は全体で 1.0mm 以下に収まっており、十分な計測精度が得られている。

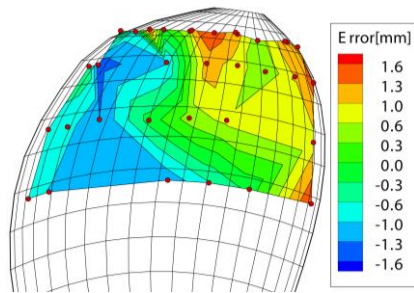


図-4 模型プロペラの翼面形状計測結果

3.2 キャビティ体積計測

キャビティ体積計測試験は前節と同様に模型プロペラを用いてキャビテーション試験を実施した。試験条件は、スラスト係数 $K_t=0.207$ 、キャビテーション数 $\sigma_n=3.06$ 、プロペラ回転数 $n_p=30$ [rps] とした。図-5は模型プロペラに発生したキャビテーションを高速度カメラで撮影した画像（左図）とキャビティ形状を計測した結果（右図）を示している。図-5より本装置によって 0.9R 付近のキャビティ体積が増大している箇所を計測できていることが確認できる。

次にキャビティ形状の計測結果からキャビティ体積を算出し、その値に単一気泡近似を用いて変動圧力の推定を行った。単一気泡近似はキャビテーションを単一気泡として近似することによって、プロペラ上方の

平板に生じる変動圧力を推定する手法である³⁾。図-6は計測したキャビティ体積から変動圧力を推定した結果と圧力センサで実計測した結果を示している。図-6の横軸は船幅方向の圧力センサ位置、縦軸は変動圧力の方振幅 ΔP_5 の一次成分の無次元値 $K_{p5} = \Delta P_5 / \rho n^2 D^2$ を示している。図-6から推定結果と実計測した結果は良く一致していることが確認できる。

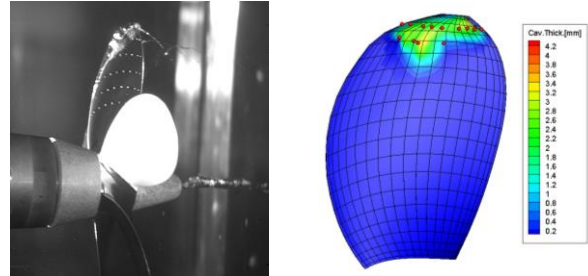


図-5 キャビティ形状計測結果の比較(プロペラ翼角度 0度)
左図:高速度カメラの画像, 右図:キャビティ形状計測結果

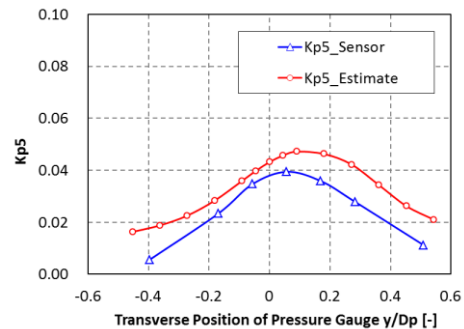


図-6 キャビティ体積計測結果を用いた変動圧力の推定結果と実計測結果の比較

4. まとめ

本研究では、キャビティ体積を計測するために組合せライン CCD 法を用いた三次元形状計測装置を開発した。本装置の精度検証を行うため、青雲丸 I 世 CP の模型プロペラの三次元形状計測とキャビティ体積計測を行った結果、開発した装置は三次元形状とキャビティ体積を十分な精度で計測できることが確認できた。今後は、光学系の改良を行うことで計測精度を向上させ、本装置の実用化を図る。

参考文献

- 1) 星野ら：水中 3 次元形状計測システムの開発，独立行政法人海上技術安全研究所研究発表会論文集，Vol. 6，2006，pp.109-114.
- 2) 工藤ら：模型プロペラ翼面上に発生するキャビティ形状の計測，日本造船学会論文集，Vol.166，1989，pp.93-103.
- 3) Hoshino et al. : Pressure Fluctuation Induced by a Spherical Bubble Moving with Varying Radius，西部造船会会報，第 58 号，1979，pp. 221-234.