123

船尾後流分布の画像計測

奥野武俊[○] (大阪府立大学), 成瀬裕希(IHI), 西尾 茂 (神戸商船大学)Image Measurement of Ship Wake Flow
Taketoshi OKUNO, Yuki NARUSE and Shigeru NISHIO

ABSTRACT

This paper deals with a method of PIV for the wake flow behind a ship model. In order to measure the time-averaged velocity, the statistical method is employed. It is shown that the possibility of measuring the three-dimensional velocity field by one camera and using the only one illumination sheet. In the experiment, a new tracer has been developed to use a large model, 2m long ship model in a large circulating water channel, of which the observation section has 6m long, 1.5m wide and 1.0m deep. The diameter and specific gravity of the tracer can be adjusted easily. Fairly large tracer, around 3mm diameter, is made to demonstrate its usefulness here. The measured result shows that the measurement method and the new tracer are effective for the experiments.

Keywords: New Tracer, Image Measurement, Ship Wake, Circulating Water Channel

1. 緒言

流場に混入されたトレーサ粒子による可視化画像を用いた流速測定法, いわゆる PIV は, 瞬時の流速分布を非接触で多点同時計測が可能となる方法として注目を集め, 流場の 2 次元計測に関しては相関法や時空間微分法など一部製品化されているアルゴリズムがあるものの, 流場の 3 次元計測に関しては未だ研究途上にあると言える¹⁾.

工学的な立場からは流れの時間平均速度を知る事が重要であることが多いので, ここでは船尾の後流分布計測を例として, 画像データを統計的に解析する手法に限定すれば 3 次元流場の時間平均流速を 1 台のカメラで撮影された可視化画像から求めることができることを示した。

また, 船舶模型を用いた実験では, 長さ 2.0m 以上の模型を使うのが一般的であり, 大型模型まわりで PIV を使うためには, それに適したトレーサの開発が必要である。ここでは, 粒子径や比重を任意に変更できる新しいトレーサ粒子を開発して, 大型回流水槽における画像計測実験を可能とした。

2. 計測原理

本計測システムの計測原理は, 流場内において局所的に粒子分布密度が一定であるとみなせる場合には, その点における粒子通過頻度は流速に比例するとの考えを一般化したもので, 結果的に粒子密度に左右されずに, 流速の時間平均値を

求めるものである²⁾。

トレーサ粒子によって可視化された画像の輝度値を f , 流速を観測系に固定した直交座標で (u, v, w) と表し, 画像の輝度値は流体とともに輸送される物理量と考えれば, 輝度変化は次式で表される。

$$\frac{\partial f}{\partial t} + u \frac{\partial f}{\partial x} + v \frac{\partial f}{\partial y} + w \frac{\partial f}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

この点における流線座標 (ξ, η, ζ) とすれば, 流線方向 ξ の速度成分 u_ξ は, 次で表わせる。

$$\frac{\partial f}{\partial t} + u_\xi \frac{\partial f}{\partial \xi} = 0 \quad (2)$$

ただし, ここでは流場内の照明強度は均一かつ一定と仮定し (1), (2) 式の右辺はゼロとしている。ここで, 定常流を仮定すれば, 流速の時間平均値 (その絶対値) は可視化画像を統計的に処理することによって得られる。すなわち,

$$|u_\xi| = \frac{E \left[\left| \frac{\partial f}{\partial t} \right| \right]}{E \left[\left| \frac{\partial f}{\partial \xi} \right| \right]} \quad (3)$$

ここで, $E[]$ は集合平均を表しているが, エルゴード性が仮定できる場合は時間平均と考えて良い。

(3) 式右辺の分子は粒子の通過頻度, 分母は粒子の空間分布密度になっており, 時間平均流速の絶対値は, その点にお

ける粒子の通過頻度と粒子の空間分布密度の比により求まる。つまり、流速の時間平均の絶対値は、流場の粒子密度に左右されずに求められることになる。このことは、たとえ流場が3次元であっても、なんらかの方法でこれらの量が求められるなら簡単に時間平均流速が求められることを意味している。

ただし、一般に流線方向は未知であるため、ここでは局所的な粒子分布密度の等方性を仮定し、流線方向の輝度の微分値は、可視化の際に使うシート光上の微分で置き換えられるものとする。

さて、計測点における時間平均流速を $(\bar{u}, \bar{v}, \bar{w})$ とすれば、 N 個の計測データから求められる支配方程式の残差和 R は、

$$R = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f_i}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial f_i}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial f_i}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial f_i}{\partial z} \right)^2 \quad (5)$$

となる。ここで、(5) 式の残差和 R を最小にする $(\bar{u}, \bar{v}, \bar{w})$ は (6) 式の条件を満足することになる。すなわち

$$\frac{\partial R}{\partial \bar{u}} = \frac{\partial R}{\partial \bar{v}} = \frac{\partial R}{\partial \bar{w}} = 0 \quad (6)$$

したがって、これから (7) 式に示すような連立方程式が得られる。

$$[A] \begin{pmatrix} \bar{u} \\ \bar{v} \\ \bar{w} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f_i}{\partial x} \frac{\partial f_i}{\partial t} \right) \\ -\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f_i}{\partial y} \frac{\partial f_i}{\partial t} \right) \\ -\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f_i}{\partial z} \frac{\partial f_i}{\partial t} \right) \end{pmatrix} \quad (7)$$

ここで、 $[A]$ は (8) 式で表わされる行列であり、

$$[A] = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f_i}{\partial x} \right)^2 & \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f_i}{\partial x} \frac{\partial f_i}{\partial y} \right) & \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f_i}{\partial x} \frac{\partial f_i}{\partial z} \right) \\ \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f_i}{\partial y} \frac{\partial f_i}{\partial x} \right) & \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f_i}{\partial y} \right)^2 & \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f_i}{\partial y} \frac{\partial f_i}{\partial z} \right) \\ \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f_i}{\partial z} \frac{\partial f_i}{\partial x} \right) & \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f_i}{\partial z} \frac{\partial f_i}{\partial y} \right) & \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f_i}{\partial z} \right)^2 \end{pmatrix} \quad (8)$$

であるが、流場に局所的等方性を仮定し、粒子が円形となっている可視化画像を考え、輝度値は時間に対してランダムな値となることを考えると、 $[A]$ の対角成分以外の

項は零になるので、速度は簡単な演算で求められる。ただ、1枚のシート光を用いる場合は、主流方向の輝度値の微分値を求める事は不可能なので、ここではまず (3) 式から速度ベクトルの絶対値を求め、(8) 式を使って面内速度分布を求めると、その差は主流方向の速度成分となるので、これによって船尾の後流分布が求めた。

3. 実験システム

船尾後流分布の計測をするために、本研究で開発したシステムの概要を Fig.1 に示す。本計測システムでは一様流に対して垂直にシート光面を作り、流体中にトレーサ粒子を混入してシート光を通過する際の散乱光を、鏡を介して観測部側面より CCD カメラで撮影した。また、データ処理を簡単にし、実用的な計測を実現するため、CCD カメラで撮影される画像は計算機に直接取り込まれるとすぐに統計値の計算を行い、その場で計測結果を画面に出力できるようにした。これにより、画像データは一度に最低2枚のみ保存すれば良く、計測時間は短縮される。

まず、本計測システムの有意性を確かめるために、小型模型を小型回流水槽で実験を行った。この場合のシート光の厚みは2mm、一様流速は0.5m/sに設定し、トレーサ粒子の直径は0.25mmのものを使用した。船体模型は、全長400mmのSeries60 (Cb=0.6) を用いた。

原理的に2枚の画像取り込み間隔内に、ある粒子がシート光上を1画素以上移動すれば、粒子の通過頻度を正確に求めることができないので、見かけ上この時間間隔

Fig.1 Experimental Setup

を短くする工夫を行った。すなわち、レーザービームライン上に回転円盤を利用したメカニカルシャッターを設け、2枚の画像取り込み間隔を任意に変化できるようにし、画像取り込み間隔を1/1000秒とした。この簡易なシステムを用いてアルゴンレーザーによる連続光によって、パルスレーザーやAOMを用いたのと同じ効果を得た。

後述する大型回流水槽における実験もほぼ同じシステムであり、水槽および模型に対応して相対的に大きなものとしている。ただし、CCD カメラはアクリル製の透明ボートに搭載して、鏡を介さずに船尾後方から直接撮影する方法を使った。

4. 計測結果

画像計測に先立って、従来からこの種の計測によく用いられているピトー官による計測を行った。Fig.2 はその結果である。本実験で用いたピトー官の直径は3mmの

Fig.2 Measured by Pitot Tube

JIS型で、プロペラ面内の 21×8 点で行い、合計168点のデータを得た。この実験に要した計測時間は約11時間であった。

Fig.3は画像計測によって得られた後流分布の結果である。この計測で用いた画像データは5万組で、計測時間は約3時間であった。この結果をFig.2と比較すれば、船体中央付近で流速が最も遅くなる様子など、瘦型船に見られる縦長の後流分布はかなりよく捕らえられていることがわかる。もちろん、分布の詳細には異なるところもあり、特に流速の大きなところでの計測精度については十分でない印象を与えている。しかしながら、もともと計測精度よりも短時間計測を目指して開発した本計測システムの妥当性は確認できたと思われる。

Fig.4 Cross Flow Distribution

Fig.3 Measured by Images

また、プロペラ面内の2次流れはFig.4に示す通りで、これも瘦型船の典型的な速度分布となっている。

5. 大型回流水槽における船尾後流分布

次に、前述した小型回流水槽における実験を基に、本研究の最終目標である大型回流水槽における船尾後流の計測結果について述べる。

ここで用いた大型回流水槽は、その観測部の長さ6m、幅1.5m、深さ1.0mで、ここに長さ2mの船体模型をおいて実験する。一様流速は、 $u_{\infty}=0.75\text{m/s}$ であるが、これはこの種の実験における標準値と考えてよく、 $Fn=0.17$ 、 $Rn=1.32 \times 10^6$ である。供試模型は典型的な肥大船型のSR196A模型($C_b=0.802$)である。

5.1 新しいトレーサの開発

大型回流水槽において、前節までに述べた画像計測法を用いるためには、それに適したトレーサが必要である。ここでは、他の実験にも用いることを一つの目標に、以下の要件を考えた。

- 1) 粒子径は任意に変更できること
- 2) できるだけ簡単に製作できること
- 3) 大きな粒子径のトレーサもできること
- 4) 比重は調節可能で、ほぼ1.0であること
- 5) 蛍光性を持たすことができること
- 6) 水槽の水と一緒に排水可能であること
(人体や環境に影響の無い物質)

これらの要件を満たす可能性のある物質について調査した結果、アルギン酸ナトリウムと塩化カルシウムを用いた、いわゆる「人工イクラ」の製作手法³⁾を応用するのがよいことが分かり、以下のような手法で新しいトレーサ粒子を製作した。

製作手法は、マイクロカプセルの製法の一つとして知られているもので、アルギン酸ナトリウム溶液を塩化カルシウム溶液に滴下するものである。滴下用の細管の直径を変えることで任意の粒子径を得ることができ、アルギン酸ナトリウム溶液に適当なオイルを加える事で粒子の比重を調整することが可能である。また、蛍光染料を混合すれば、十分な輝度を有する粒子を作ることでもでき、ここでは有機顔料(シンロイヒ)を使った。

1リットルの1.5%のアルギン酸ナトリウム溶液に対して、135mlのオイルと7グラムの顔料を加え、10%塩化カルシウム溶液に、水頭圧約1.0m程度の圧力をかけた直径約1mmの細管から滴下した。これによって、ほぼ比重1.0、直径3mmの粒子を作ることができた。細管の直径を変更し、細管にかかる圧力を変更することで、滴下速度や粒子径を任意に変更できることを確認した。

直径の大きな粒子トレーサは、流れに対する追従性が悪くなることが心配されるが、ここでは、これまでに開発した計測プログラムをそのまま使うために、従来の実験装置をほぼ比例的に大きくして、粒子径をほぼ3mmと決めた。ただ、粒子径の大きなトレーサで比重を1.0することはかなり難しいと思われるので、ここでは強いて大きなものによる実験を試みるという動機もあった。

なお、このトレーサ粒子は、「人工イクラ」として市販されているものとほぼ同じものであり、無害で水槽の水と一緒に雨水路に排水しても問題無い事を確認した。

5.2 実験結果

この実験における供試模型船は、船尾渦が比較的大きく、特徴的な渦状の面内速度分布を示す肥大船 SR196A 模型である。大型回流水槽の観測窓から船体までの距離はほぼ 1m と、かなりあるため、レーザ光の減衰が大きく、粒子像の輝度が低くなる。そのためにシート光を通過する粒子の認識率が小さくなるため、計測画像数をかなり取る必要があることがわかった。Fig.5 は、流速ベクトルの絶対値を濃淡分布で表し、面内速度をベクトルとして表示したものである。この結果を得るための計測時間は 9 時間、解析画像の合計枚数は 15 万枚である。

Fig.5 Measured Result in Large CWC

図を見てわかるように、面内速度ベクトルは典型的な渦状分布となっているが、速度ベクトルの絶対値に対する等高線を描いた Fig.6 から分かるように、小型回流水槽における計測例に比較して滑らかな分布形状は得られておらず、プロペラ位置付近では若干高い値となるなど、不自然さもある。これらは小型回流水槽での実験に比べて、粒子の通過頻度が十分でないことが大きな原因と思われる。

Fig.6 Absolute Value of Velocity

Fig.7 は、2 節で述べた手法で船の進行方向の速度成分を求めて、等高線として示したもので、これがいわゆる船尾伴流分布になる。この図は、船尾後流域における流場の特徴を十分に捉えており、本計測システムは大型回流水槽における実験に対しても、十分有効であることを示している。

Fig.7 Wake Distribution

6. 結言

本研究では、従来から開発してきた船尾後流分布を計測するための、画像データの統計的解析手法を拡張すれば、1 枚のシート光面による計測データから 3 次元流場の速度成分の時間平均値を求めることが可能であることを示し、計測のための実験システムを開発した。

小型回流水槽を使って船尾後流を画像計測し、ピトー管による実験結果と比較して、本システムの有効性を確認した。

次に、同様の実験を大型模型と大型回流水槽を使って行うために適当なトレーサ粒子の開発を行い。粒子直径や比重を任意に変更できる、新しいトレーサ粒子を開発した。ここでは、比較的粒子径の大きなもので、比重をほぼ 1.0 のものを作成し、レーザに対する蛍光性も十分持たせることができた。その結果、ほぼ満足すべき結果が得られた。今後、粒子径の選び方や、蛍光顔料の工夫などによって計測精度も上げることができると期待される。

参考文献

- 1) 平工 良三, 鈴木 敏夫: 高速ビデオカメラを用いた連続画像データ処理による三次元流速測定法の開発, 可視化情報学会誌 Vol.19 Suppl.No 2
- 2) 西尾 茂, 奥野武俊, 平田奈美: 統計解析手法を用いた流場の画像計測システムの開発 (第 3 報) - 3 次元速度場計測への応用 -, 関西造船協会誌, 第 228 号, pp.59-65, 1997
- 3) 近藤 保, 小石 真純: マイクロカプセル: 三共出版, 1997