

# LEDを光源とする簡易型PIVの開発

増淵 寿\*1, 橋本 康隆\*2

## Development of simplified PIV system using LED light source

Hisashi MASUBUCHI, Yasutaka HASHIMOTO

This paper proposes an inexpensive simplified particle image velocimetry (PIV) system which uses LED as a light source instead of Laser. For this double-exposed PIV system, a new two-colored LED light sheet (LLS) generator was constructed. With this LLS generator, PIV was applied to measure velocity of two Couette flow around/inside the rotating cylinder. That experimental results show this PIV system has sufficient accuracy to analyze low-speed (up to a few cm/s) simple flow.

**KEYWORDS :** Particle Image Velocimetry, Flow visualization, LED, Flow Measurements

### 1. 緒言

#### 1-1 PIVについて

PIVとは、Particle Imaging Velocimetryの略で、流れの可視化画像をもとに流体の速度分布を求める方法の総称である<sup>1)</sup>。PIVは、速度の多点同時計測が可能で、プローブ等の挿入が必要ないために流れを乱さないという利点があり、レーザーの高出力化と画像処理技術の進展を追い風に急速に発達した計測手法である。

しかし、市販のPIVには、高出力のダブルパルスレーザーと、このパルス出力と同期できるビデオカメラが使われており、これらは非常に高価(一般的な計測システムで数千万円)である。そこで、本研究では高輝度LEDを光源に使用し、汎用のデジタルスチルカメラと組み合わせた、安価で学生実験などにも利用しやすい簡易型PIVシステムの開発を試みる。

#### 1-2 簡易型PIVの概要

本研究が対象とする狭義のPIVの一般的な(単一露光型の)計測手順の概略は、次の通りである<sup>2)</sup>。①トレーサ粒子が加えられた流れの中に、レーザーを光源とするシート光を時間差 $\Delta t_1$ で2回照射し、2枚の可視化画像を取得する。②コンピュータを用いて1枚目の画像を微小領域に分割し、次に $\Delta t_1$ 後の2枚目の画像内でパターンの似た粒子分布を探索し、この点における速度ベクトルを得

る。この際のカメラと照明のタイミングをFig.1(a)に示す。通常のビデオカメラはフレーム間隔が固定されているため、パルス間隔 $\Delta t_1$ を変更するには、レーザー光の照射タイミングをカメラのフレーム切替と同期させる必要がある(フレームストロドリング法と呼ぶ)。

これに対し、本研究で開発を試みるPIVでは、1枚の画像に2時刻の粒子を記録する多重露光型を採用する(図1(b)参照)。このとき、2回照射するLEDの色を変えれば(これをカラーPIVと呼ぶ)、2時刻の粒子を区別できるため、撮像装置にスチルカメラが利用可能となる。得られた1枚の可視化写真を色情報に基づいて2枚に分解すれば、こ

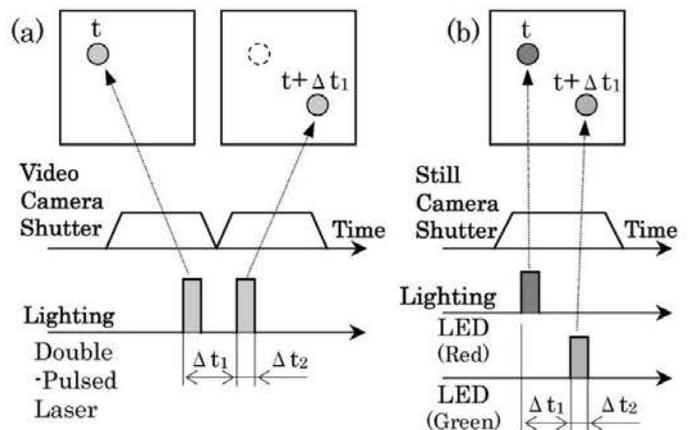


Fig.1 Two methods to obtain particle image for PIV.  
(a) Single exposed PIV. (b) Double-exposed PIV.

\*1 機械工学科 (Dept. of Mechanical Engineering), E-mail:masubuti@oyama-ct.ac.jp

\*2 2009年度機械工学科卒業 現 東京農工大工学部機械システム工学科3年生

れ以降の速度ベクトルを求める処理は、通常の PIV と同様に行うことができる。

## 2. おもな記号

- $\Delta t_1$  : シート光のパルス間隔      s
- $\Delta t_2$  : シート光のパルス幅      s
- $D_o$  : 円筒容器の内径 (半径  $R_o$ )      mm
- $D_i$  : 回転円柱の外径 (半径  $R_i$ )      mm
- $N$  : 容器あるいは円柱の回転速度      rpm
- $\omega$  :      "      回転角速度      rad/s

## 3. シート光発生装置

### 3.1 光学系

LED が発生する光は、レーザと比べて光束 (放射束) が劣るだけでなく、指向性の低い拡散光である。このため、光シートを形成するには、ビームを広げるレーザとは反対の役割をする光学系が必要となる。そこで、図 2 に示すシート光発生装置を自作した。LED の拡散光を 3 枚の凸レンズで集光し、ロッドレンズで  $y$  方向の厚みが一定となるシート光に変換するものである。実際には、ロッドレンズだけでは十分に薄いシート光にはならなかったため、シリンドリカルレンズを追加して設置した。また、ダイクロイックミラーを採用することによって、2 個の LED が同一の光学系を利用できるようになり、装置が簡素化されている。

LED の発光のタイミングは、図 3 に示す 2ch 出力のファンクションジェネレータで制御し、パルス幅  $\Delta t_1$  とパルス間隔  $\Delta t_2$  とを自由に設定できる。一般に LED は応答性が高く、フォト IC を用いた確認実験<sup>3)</sup>でも応答の遅れは  $\mu s$  のオーダーであった。今回の PIV システムでは、 $\Delta t_{1,2}$  とも ms のオーダーであるから、この応答遅れは無視してよい。

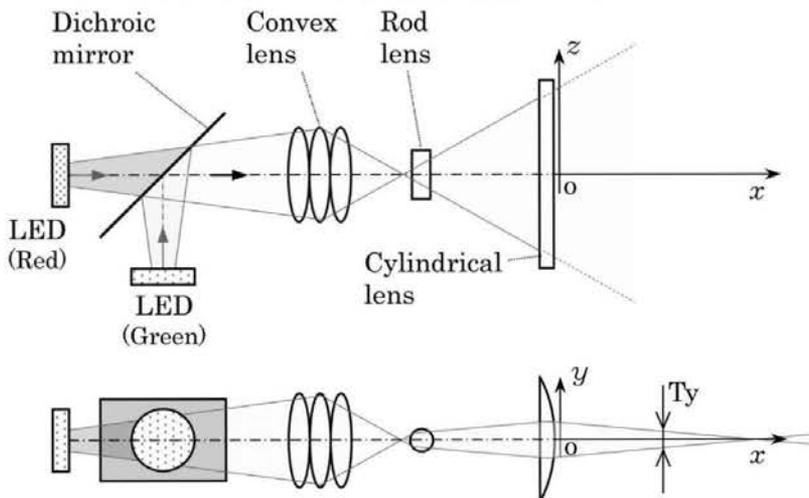


Fig.2 Schematic of light sheet generator.

最後に、本実験に使用する高輝度 LED(Luxeon® III Star)の主な仕様<sup>4)</sup>を表 1 に示す。

Table.1 Specification of LED

Color	Dominant Wavelength	Spectral Half-width	Luminous Flux	Viewing Angle
Green	530 nm	35nm	80 lm	10° *
Red	627 nm	20nm	140 lm	

\* with collimator lens

### 3.2 シート光の計測

はじめに、発生させたシート光の厚さを測定し、可視化領域を定める。図 2 のシリンドリカルレンズの前方の  $x$  軸上にフォト IC (TPS855(F)) を設置し、これを  $y$  方向に上下させてシート光の厚み方向の照度分布を測定した。計測された照度が、同一の  $x$  断面での最大照度の 1/2 となる厚さ (半値幅) をシート光の厚さと定め、その変化を図 4 に示す。シート光はシリンドリカルレンズから 100mm 前方で最小厚み (約 2.0mm) となり、厚み方向の広がり角は約 2° であった。ここで、可視化領域のシート光厚さを 3.0mm 以下と仮定すれば、その長さは図 4 より 59.7mm となる。さらにシート光の幅を目視によって測定したところ、最小厚みの位置でおおよそ 75mm であった。これにより、可視化領域は最大で約 60mm×75mm と判断する。

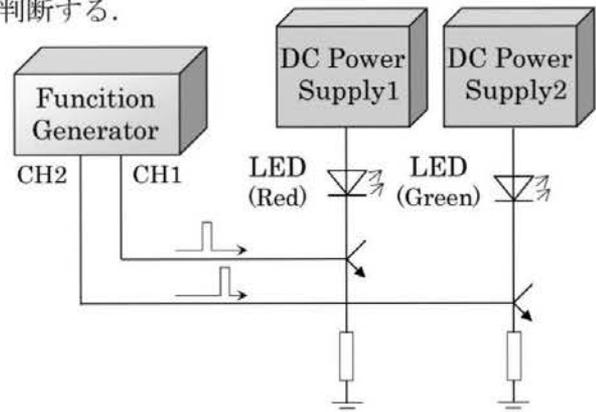


Fig.3 Experimental apparatus for generating pulsed LED light.

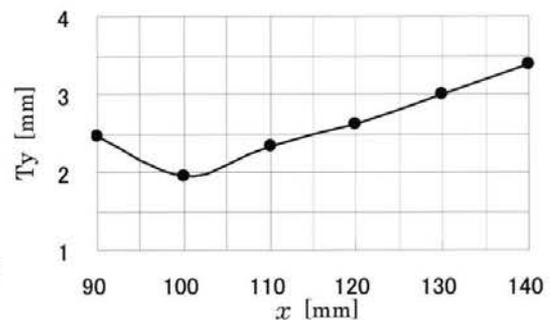


Fig.4 Thickness of light sheet in the  $xy$ -plane. ( $z=0$ )

### 4. PIV システムの検証

#### 4.1 可視化用円筒型水槽

開発した PIV システムの精度を検証するため、速度分布の解析解を有する容器内流れの速度計測を行う。実験は、図 5 に示す円筒型水槽内の 2 種の流れに対して実施した。

- ① 静止した円筒型水槽 (Do=95mm) 内へ円柱 (Di=20mm) を同軸上に挿入し、N=14.6rpm で等速回転させる。
- ② 円柱を除去し、円筒型水槽 (Do=90mm) を N=12.5rpm で等速回転させる。

このとき、二次元の定常旋廻流れ ( $u_r=0$ ) を仮定すれば、極座標で表した Navier-Stokes の運動方程式は式(1)のように簡略化され、これを解けば、①および②のクエット流の速度成分  $v_\theta$  の解析解が  $r$  の関数として、それぞれ(2),(3)式のように得られる。

$$\frac{d}{dr} \left\{ \frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r v_\theta) \right\} = 0 \dots\dots\dots(1)$$

$$v_\theta = \frac{Ri^2}{Ro^2 - Ri^2} \omega \left\{ -r + \frac{Ro^2}{r} \right\} \dots\dots\dots(2)$$

$$v_\theta = r\omega \dots\dots\dots(3)$$

作動流体は食塩で密度調整を行った水で、予め直径 75~150  $\mu m$  のトレーサ粒子 (DIAION) を混濁しておく。この水槽内へ、図 2 の装置で発生さ

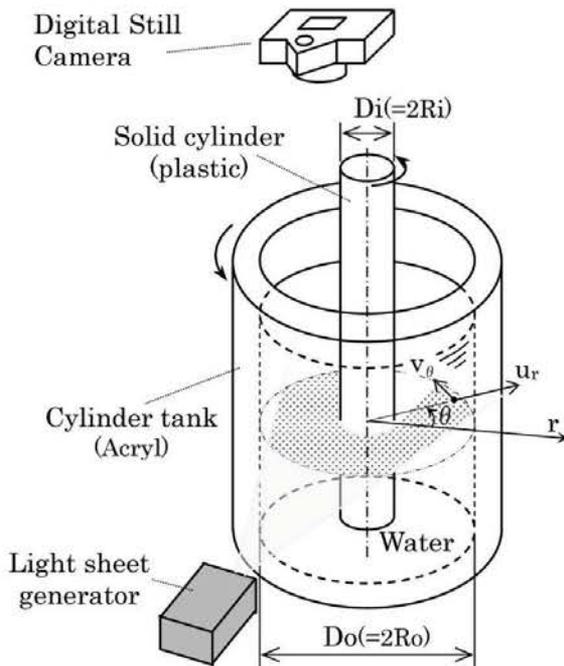


Fig.5 Experimental apparatus to measure the flow between two concentric rotating cylinders.

せたパルス状のシート光を水平に照射し、上方からデジタル一眼レフカメラ(Nikon D100)で撮影を行う。撮影は暗室内で行い、カメラのシャッターは開放にする。

#### 4.2 2重円筒内クエット流れのPIV計測

撮影した可視化写真の一例 (約 100 万画素) を図 6(a)に示す。次に画像処理ソフト (Adobe, photoshop CS) で、この写真からそれぞれ赤・緑成分の濃度値 (輝度値) だけを抽出して 2 枚のグレースケール画像を作成する。画像中央付近 40×40pixel の原画像が(b), 抽出後の 2 枚の画像が(c),(d)である。抽出後の画像を比較すると、やや不明瞭ながら、類似した粒子パターンが左から右へと数 pixel 動いている様子が分かる。次に、2 枚の画像から PIV ソフト (Photron, FLOgraph-PIV) を使って得られた速度分布が図 7 で、1 枚の可視化画像から、1514 点の有効な速度データが得られた。定性的には、理論どおりに円柱付近が最も速く、半径が大きくなるにつれて次第に速度が低下する旋廻流れになっている。ただし、円柱近傍では、方向や大きさが不自然な誤ベクトルが発生している。誤ベクトルの発生原因としては、シート光が円柱表面で反射するために粒子画像が不鮮明になることや、PIV の検査領域が正方形であるた

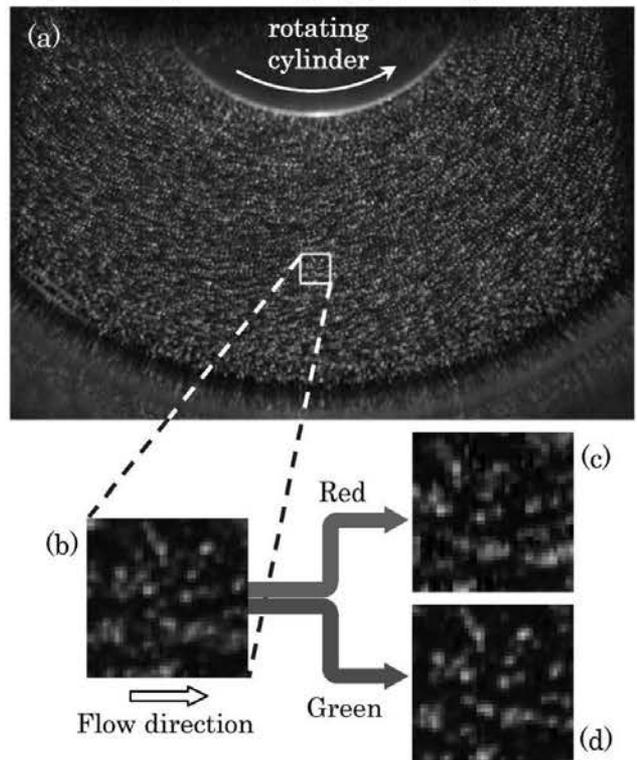


Fig.6 Photograph of flow visualization.  
 (a) Original image.  
 (b) Scale up image.(40×40pixel).  
 (c) Extract red luminance level from fig.6(b).  
 (d) Extract green luminance level from fig.6(b).  
 ((a),(b)color image, (c),(d) gray scale image).

めに円形の境界の取扱いが困難であることが挙げられる。

次に、速度の解析解（式(2)）との比較を行ったものを図 8 に示す。縦軸は、計測点における流速  $V = \sqrt{u_r^2 + v_\theta^2}$  を、回転円柱の周速度で除した無次元流速を表わす。円柱付近の  $r$  が小さい範囲では、前述した理由により流速のばらつきが多い。また、PIV で得られた速度は解析解に比べて小さく、異なる傾向を示している。この原因として、2重円筒内流れの不安定性が考えられる。すなわち、この流れには式(2)の解析解が存在するが、実際には不安定性のためにテイラー渦流れが発生し、様々な流れパターンを引き起こすことが知られている<sup>5)</sup>。本実験で計測した流れにおいても、シート光を水平に照射したときの流跡線が同心円ではなく、鉛直に照射したときには2次流れの発生を確認している。このため、容器内の流れは、式(2)とは異なる速度分布となっている可能性が高く、計測データと解析解との不一致が必ずしも PIV の誤差であ

るとは限らない。このため、本例では開発した PIV システムの定量的な評価は差し控える。

### 4.3 回転円筒内クエット流れの PIV 計測

前節の流れ場自体の問題に対処するため、次に円柱を取り去り、円筒側を回転させたクエット流れに対し PIV 計測を行う。この流れは理論的にも安定であり、式(3)どおりの流れが発生するものと期待される。図 9 に PIV によって得られた速度分布を示す。有効な速度ベクトルの数は 1935 点で、シート光の幅に制約があるため両端の速度ベクトルは得られていない。円筒に近い外縁部の流速が大きく、中央付近は遅い旋廻流れになっている。ただし、円筒容器の近傍では図 7 の場合と同様の理由により、またシート光の端に近い側では粒子画像の輝度不足のために、明らかな誤ベクトルも発生している。

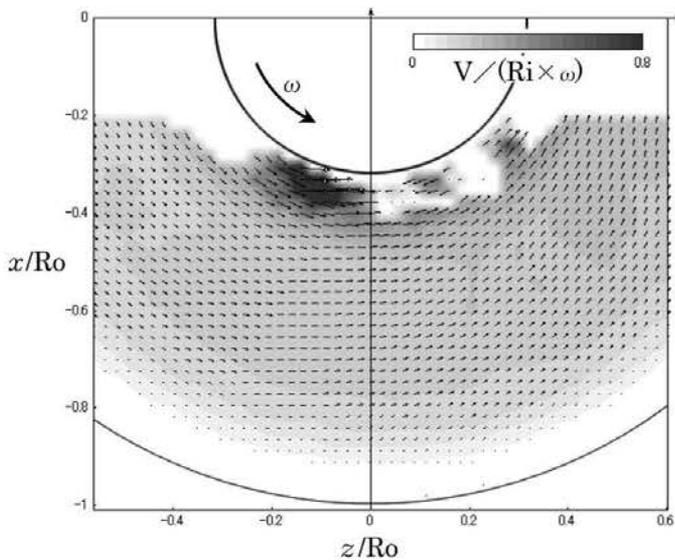


Fig.7 Distribution of velocity vectors. ( $\Delta t_1=100\text{ms}$ ,  $\Delta t_2=10\text{ms}$ )

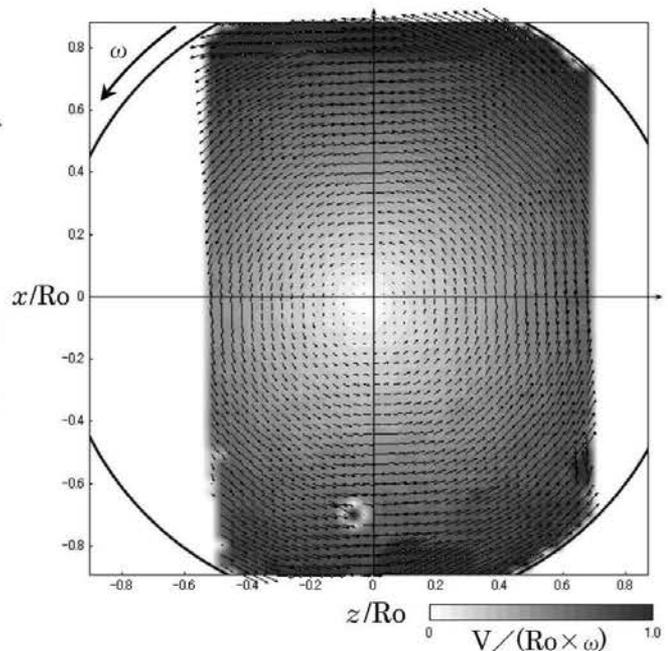


Fig.9 Distribution of velocity vectors. ( $\Delta t_1=50\text{ms}$ ,  $\Delta t_2=17\text{ms}$ )

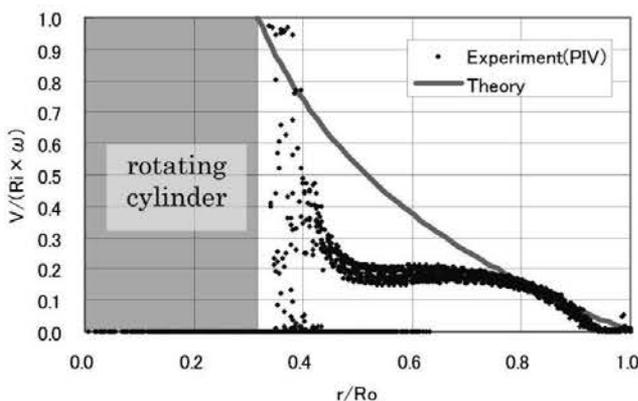


Fig.8 Comparison of velocity distribution for the flow between two concentric rotating cylinders.

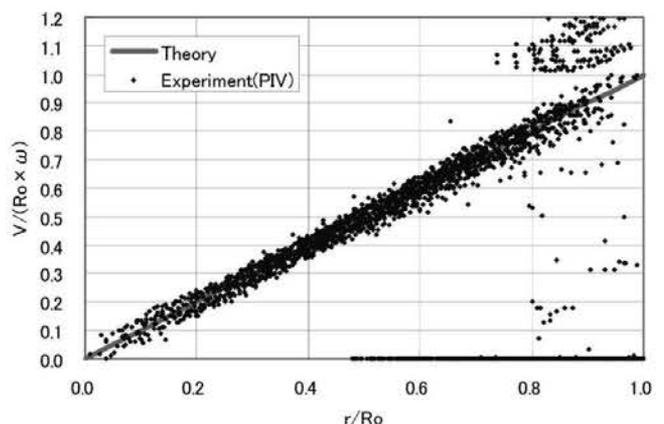


Fig.10 Comparison of velocity distribution for the flow in the rotating cylinder.

測定した速度値と、解析解とを比較したものを図 10 に示す。  $r/R_0 \geq 0.8$  では容器に近いために流速にばらつきがみられるが、これ以外では概ね解析解(3)に近い流速が得られている。この結果より、本 PIV システムは、このような単純流れの測定では定量的にも有効に機能するものと判断する。

#### 4.4 PIV システムの注意点

次に、本システムを使用して速度計測を行う際の注意点について論じる。開発した計測システムの最大の問題は、光源となる高輝度 LED の光束が、市販の PIV で使用する高出力レーザに比べ極めて小さいため、シート光が暗いことである。一般的に、スチルカメラはビデオカメラに比べて感度を高く設定できるが、輝度値の高い可視化画像を得るために、次の 2 点の工夫を要した。①パルス幅を  $\Delta t_2 \geq 10\text{ms}$  と大きくする。②粒子直径の大きい  $d \geq 75 \mu\text{m}$  のトレーサ粒子を使用する。

①のパルス幅の制約のため、測定可能な流速の上限には制約が発生する。つまり、速い流れでは、トレーサ粒子の軌跡が線状になり、加えて（パルス間隔  $\Delta t_1$  も大きくせざるをえないから）粒子の移動量も大きくなるため、2 時刻の画像間のマッチングが不正確になり、計測精度の低下が懸念される。ただし、本研究で測定対象とした 4.3 の回転容器内の流れは、流体要素がせん断・伸縮変形を受けない単純回転流れであるために、流速を比較的大きくしても、測定誤差はそれほど大きくならなかった。この場合でも、最大流速は数 cm/s 程度と推定される。

②については、Mie 散乱の散乱光の強度が粒子径の約 2 乗に比例する<sup>2)</sup> ため、さらに大きな  $d \geq 250 \mu\text{m}$  の粒子を使った実験も行ってみた。しかし、数密度を同一にすると、粒子の投入量が多くなるため、可視化範囲内の光源から遠い側は、手前の粒子の陰になってしまい、可視化画像の半分は輝度が低下してしまった。また、粒子の浮上・沈降速度は粒子径とともに増大する<sup>2)</sup> ため、大きい粒子を使用する場合には、流体の密度のより正確な調整が必要となり、これには大変な労力を要する。このように、高輝度画像の取得を目的として、あまりに径の大きな粒子を選択するのは適切ではないことが分かった。

## 5. 結言

LED を光源とするシート光発生装置を自作し、これを中心にして、安価な簡易型 PIV システム(多重露光型カラー PIV) の開発を目指した。その結

果、デジタルカメラとファンクションジェネレータおよび PC ソフトウェアを除けば、数万円で PIV システムを作成できた。次にこれを使用して、容器内流れに対して PIV 測定を行い、システムの検証を行った。得られた主な結果を次に示す。

(1) 自作した光源装置で発生させた LED のシート光の厚みは 2.0~3.0mm で、最大可視化領域は約  $60 \times 75\text{mm}$  である。

(2) 開発した PIV システムは、局所的な変動が少なく、かつ流速数 cm/s 以下の低速流れであれば、定量的にも妥当な速度計測が可能であった。

今後は、このシステムを使って、多くの計測を実施し、その計測精度の検証を行いたい。また、計測システムの課題としては、以下の 2 点が挙げられる。

- ・シート光発生装置の改良 … 複数の LED (LED アレイ) を用いて幅広いシート光を発生させる。可視化領域(幅)の拡張と、照度増加が目的である。
- ・カメラ校正の追加 … 本研究では、物体座標と像座標(可視化画像内の座標)の関係は、画像内で一様と近似した。実際には、カメラのレンズ収差と気液界面における屈折の影響により、両者の関係は位置の関数となる。計測精度向上のためには、カメラ校正を行って、これらの影響を排除する必要がある。

#### 参考文献

- 1) 小林敏雄, 岡本孝司, 佐賀徹雄, 機論 B, vol.65, No.629 (1999), pp8-14.
- 2) 可視化情報学会, PIV ハンドブック, 森北出版, (2002).
- 3) 澤村亮祐, 増淵寿, 日本機械学会 関東学生会第 48 回 学生員卒研発表前刷集, vol.2, (2008), pp421-422.
- 4) LUXEON, Technical Datasheet DS45, Power light source Luxeon III Emitter.
- 5) 例えば, 古川裕之, 渡辺崇, 中村育雄, 機論 B, vol.68, No.674 (2002), pp2671-2678.

[受理年月日 2010 年 9 月 27 日]

