

PIV の標準化, 実用化に関する研究

—第 2 報 標準実験による PIV の評価—

Research on the PIV Standardization and Generalization
2nd Report: Evaluation of a PIV System by Using Standard Experiment

小林 敏 雄*・佐 賀 徹 雄*・瀬 川 茂 樹*・胡 暉*・名 越 正 穂**

Toshio KOBAYASHI, Tetsuo SAGA, Shigeki SEGAWA, Hui HU and Masaho NAGOSHI

1. はじめに

前報では標準画像を用いた濃度相関法の性能評価について報告した。PIV は大別して可視化技術, 画像解析技術, エレクトロニクス技術そしてコンピュータ技術から構成される複雑なシステムであり, 標準画像による画像解析技術の評価だけでは PIV の評価として不十分である^{1), 2)}。システム全体としての評価を行うためには, 標準問題の設定とその流れの場での標準実験の実施が必要となる。現在, 5 台の標準実験装置が作成され, 国内の 17 の大学, 研究機関, 企業で標準実験が試みられている。標準実験では, さまざまな PIV 手法と PIV システムが適用され, その実測結果の収集と評価が行われつつある。本研究では, 標準問題として設定された「噴流による自由液面自励振動流れ場」に筆者らの構成した PIV システムを適用した。同時に, レーザドップラー流速計 (LDV) による計測を実施し, PIV の検証データとして用いた。PIV 標準実験装置による PIV の評価の一例として報告する。

2. 標準実験

2.1 標準問題と実験条件の設定

PIV の標準問題として設定された流れ場は, 図 1 に示すように, 自由液面を持つ矩形容器内に噴流を流出させ自由液面に自励スロッシングを発生させた流れ場である。自励スロッシングあるいは噴流からの放出うずなどによる周期的な変動流, 噴流によるせん断流あるいは旋回流, 対向流などが複合する複雑な流れ場である。標準実験では, 標準実験装置の仕様の共通化と実験条件の規定により, 計測すべき流れ場が設定される。標準実験では, 平均水位 ($H = 160 \text{ mm}$) と流入流量 ($201/\text{min.}$) が規定され, 可視化手法や画像解析手法およびシステム構成などは実施者が適宜

に選択し計測を行うものとしている。計測すべき量としては, 容器中央断面内の①平均速度分布, ②平均乱流強度分布および③流入口側の液位が最高, 最低時の瞬時速度分布が項目としてあげられている。これらの計測結果を LDV の計測結果と比較する。

2.2 標準実験装置と PIV システム

図 2 に標準実験装置と PIV システムの概要を示す。標準実験装置は図に示すような循環系で構成されている。矩形容器への流入流量は, ヘッドタンクで 20 リットル/分 に設定され, 流量一定に保たれる。流入口での速度分布は, 流入口の上流に設置された整流装置 (多孔板とハニカム格子で構成) により, ほぼ一様に設定される。流入口での平

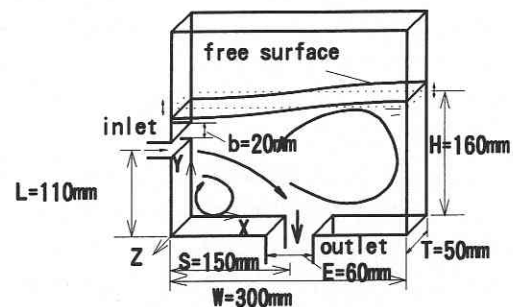


Fig. 1 The schematic of the test tank

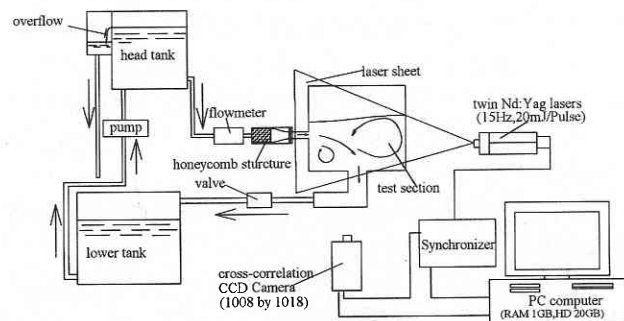


Fig. 2 The schematic of the experiment setup

*東京大学生産技術研究所 第 2 部

**日本カノマックス株式会社

研 究 速 報
 均速度は 0.333 m/s で、平均乱流強度は約 3% である。流入口高さ b にもとづくレイノルズ数 Re は 6,700 である。供試流体 (水) の温度は下部タンク部で $22^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ に制御される。

本計測に用いた PIV システムは、ツイン Nd:YAG パルスレーザー (出力 20 mJ/Pulse, 波長 532 nm, 発光時間 6 ns, 発光間隔 0.1 s - 200 ns, Q スイッチ周波数 15 Hz), 相関カメラ (1016 × 1008 pixel, 8 bit) とレーザーとカメラを同期させるシンクロナイザおよびワークステーション (CPU pentium 450 MHz, RAM 1 GB, HD 20 GB) とで構成されている。計測対象とする矩形容器内の流れは z 方向にほぼ 2 次元的事から、PIV 計測は容器奥行き方向の中心断面 ($x-y$ 断面, $z = 25$) で行うこととした。以下、この断面を計測断面とする。自由液面の水位は容器内の流入口上部に設置した点電極センサー (時定数 1.5 ms, 分解能 0.1 mm) で検出した。流れ場を微細なトレーサ粒子 (ナイロン粒子, 平均粒径 $35\mu\text{m}$, 比重 1.02) で可視化し、上記 PIV システムで速度計測を行った。画像解析手法は濃度相関法である。

本計測における画像分解能は 0.16 mm/pixel である。レーザーライトシートの厚みを約 1 mm に、発光時間間隔 Δt を 4 ms に、発光時間を Δt を 6 ns に設定して測定断面内の画像を入力した。このとき、画像中の粒子の平均移動距離は 6 画素である。設定した検査窓のサイズは 32×32 pixel で、本 PIV 計測の空間解像度は $5.12 \text{ mm} \times 5.12 \text{ mm}$ に相当する。検査窓に含まれるトレーサ粒子の数は約 30 個程度で、速度ベクトルの算出にはサブピクセル補間を用いた。計測された速度ベクトルに含まれる過誤ベクトルは統計処理により除去している³⁾。

2次元 LDV により、計測断面内の 10 mm ピッチの正方形格子点上の速度分布と乱流強度分布を計測した。LDV の空間解像度は $0.68 \text{ mm} \times 65\mu\text{m}\phi$, サンプルングレートは 1 KHz である。各測定点では 30 秒間 (30,000 個) の計測データをアンサンブル平均して平均速度分布と乱流強度分布を求めている。最高あるいは最低水位時の速度分布は、各測定点での 3 分間の LDV 計測データから、点電極の信号を用いた条件付きサンプリングで、約 290 周期分のスロッシングから、位相平均速度分布を求めた。LDV 計測に用いたトレーサ粒子は粒径 $1\mu\text{m}$ のポリスチレンラテックスである。

なお、矩形容器内の n 次モードスロッシングの固有振動数は次式のように表される⁴⁾。

$$f^n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{n\pi g}{W} \tanh\left(\frac{n\pi H}{W}\right)} \dots\dots\dots (1)$$

標準実験装置の幾何学形状と実験条件をあてはめると 1 次モードの振動数は 1.56 Hz となる。流入口直後 ($x = 110$, $y = 10$, $z = 25$) で LDV により速度計測を行い、データを FFT 処理して得られた自励スロッシングの振動数は 1.6 Hz で、ほぼ設計値に近い値となっている。

3. 計 測 結 果

3.1 時間平均速度分布

PIV 計測では、約 130 秒間の 1000 回の瞬時速度分布の計測結果から時間平均速度分布を算出した。本 PIV システムでは、7.5 Hz 間隔で瞬時速度分布が計測される。自励スロッシング 1 周期あたりに 5.7 回の、約 210 周期の計測である。図 3 に連続する 2 時刻分の瞬時の速度分布と渦度分布を重ね合わせて、図 4 に時間平均速度分布と時間平均乱流強度分布を示す。時間平均速度 U_{ij}, V_{ij} および平均乱流強度 T_{ij} は次式のように定義している。

$$U_{i,j} = \sum_{t=1}^N \frac{u_{i,j,t}}{N} \quad V_{i,j} = \sum_{t=1}^N \frac{v_{i,j,t}}{N} \dots\dots\dots (2)$$

$$T_{i,j} = \frac{\sqrt{\sum_{t=1}^N (u_{i,j,t}^2 + v_{i,j,t}^2)}}{N}$$

$$= \frac{\sqrt{\sum_{t=1}^N (u_{i,j,t} - U_{i,j})^2 + \sum_{t=1}^N (v_{i,j,t} - V_{i,j})^2}}{N} \dots\dots\dots (3)$$

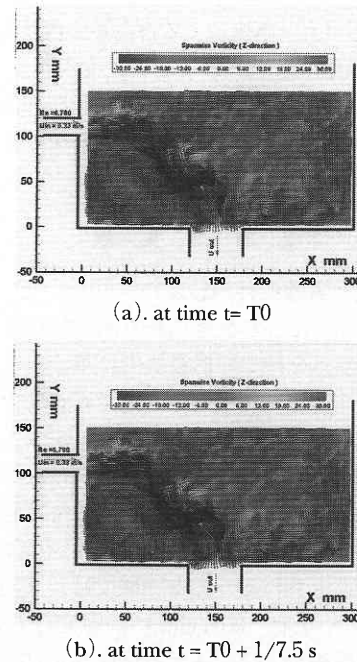
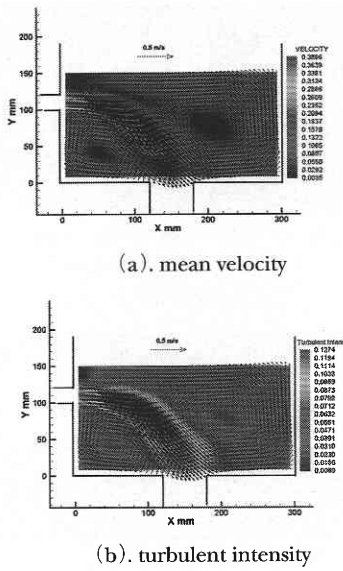


Fig. 3 The instantaneous velocity and spanwise vorticity distributions



(a). mean velocity

(b). turbulent intensity

Fig. 4. The time average flow field of the PIV result

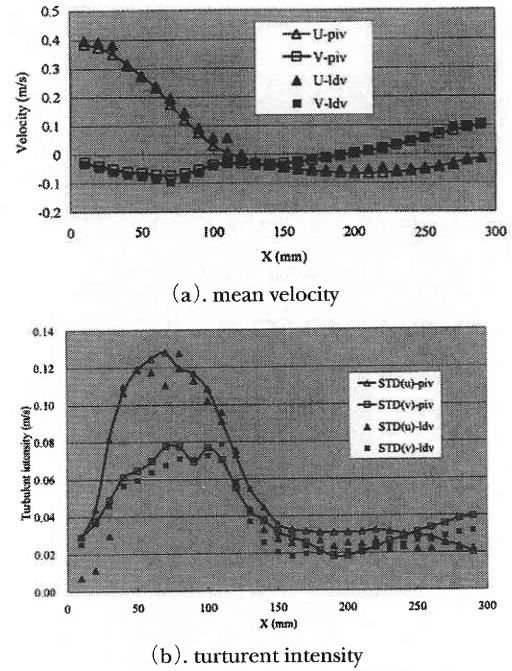
ここに、 u_{ij} と v_{ij} は X と Y 方向の瞬時速度、 $u'_{ij,t}$ と $v'_{ij,t}$ は瞬時の乱れ速度で、 $N = 1000$ である。

瞬時の速度分布からは、流入口付近の噴流の上面で比較的大きなスケールの渦が発生していること、および噴流の形状が周期的に変形していることなどがわかる。一方、図 4 (a) の時間平均速度分布には、噴流により容器の右側および左下部に、それぞれ反時計および時計回りの大きな循環流が形成されることが示されている。図 4 (b) には、噴流の上面側で渦の移動によるものと思われる、乱流強度の高い領域が形成されている。

PIV の計測結果を LDV のそれと比較した。図 5 に流入口のセンターライン上の平均速度分布および乱流強度分布を示す。本 PIV での平均速度分布は LDV のそれとは数%以内で一致していることがわかる。一方、乱流強度分布には局所的に LDV の計測結果との相違が現れている。これは、前報で示したように、PIV 計測では、検査窓内の平均的な粒子運動から速度を計測すること、およびある程度検査窓の大きさが必要なことなどから、計測領域の設定によっては LDV に比べ空間解像度が低下する。本 PIV 計測で設定した空間解像度は $5.12 \text{ mm} \times 5.12 \text{ mm}$ と比較的低いため、流れのせん断の大きい領域では LDV 計測結果と相違が現れている。同時に、平均データ数がやや不足するものと思われる。

3.2 位相平均速度分布

流れ場では自動スロッピングにより 1.6 Hz の周期振動が生じている。PIV は、流れ空間の瞬時多点の速度が計測でき流れの空間構造を迅速に解析できることが計測上の特

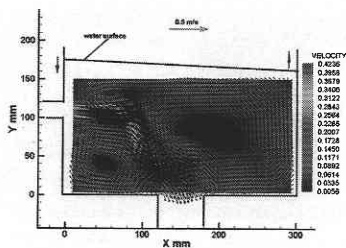


(a). mean velocity

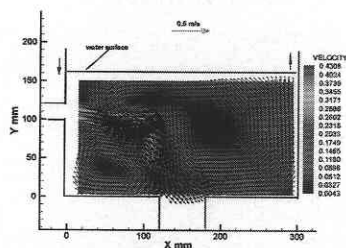
(b). turbulent intensity

Fig. 5 The comparison of the time average results by using PIV and LDV measurement (along the inlet central line ($Y = 110 \text{ mm}$, $Z = 25 \text{ mm}$))

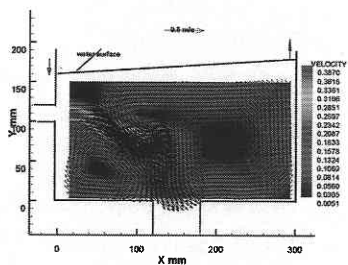
徴である。この PIV の特性を評価するために、標準実験では、液位が最高、最小時の瞬時速度分布の計測という課題が設定されている。本 PIV 計測では、点電極センサーで液位を感知し、これをトリガー信号としてシンクロナイザーでレーザーの発光と関連カメラの画像入力とを同期させて、特定した位相の画像の条件付きサンプリングを行った。図 6 にスロッピング周期中の 4 つの位相角度 ($\theta = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$) における位相平均速度分布を示す。図中、容器内の上方に液面の変化を模倣的に示してある。位相平均速度分布は、250 周期分の各位相の瞬時速度分布を用いて算出した。図には、容器内の右側および左側に定定的な 2 つの旋回流が存在していること、および噴流上面側で比較的大きなスケールの渦が発生し移動していることがわかる。この渦は位相角度が 0 から π へ増加すると、左側の液位が最大から最小へと減少していくと、噴流上面に沿って流出口側へ移送されていく。さらに位相角度が π から 2π へ増加すると、液位が最低から最大に増加していくと、渦は流出口右端へ衝突しながら一部は流出口へ吸い込まれ、一部は右側の旋回流に流入していく。同時に流入口側の噴流上面に新たに渦が発生し、つぎのサイクルが始まる。PIV の条件付きサンプリング計測により、このような周期的な渦の発生と位相角度による渦の移送状況、あるいは噴流形状の変化などが検出されている。PIV では流れ場の構



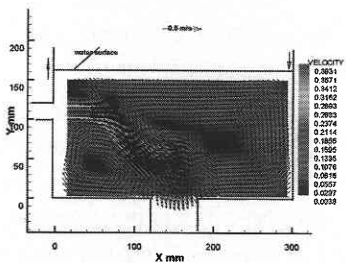
(a). situation 1 ($\theta = 0$)



(b). situation 2 ($\theta = \frac{\pi}{2}$)



(c). situation 3 ($\theta = \pi$)

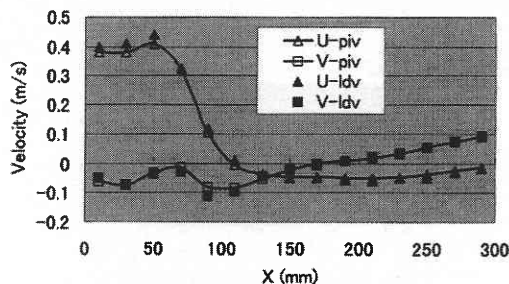


(d). situation 4 ($\theta = \frac{3\pi}{2}$)

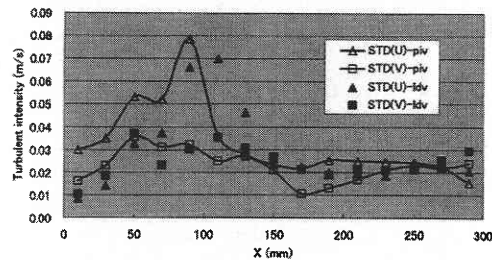
Fig. 6. The phase average of flow field of PIV result

造を定量的かつ効果的に解析できることがわかる。

図7に流入口のセンターライン上のPIVとLDVの位相平均速度分布および乱流強度分布を示す。位相平均速度は、比較的少ないデータ数にもかかわらずほぼ一致する。しかし、乱流強度分布は速度変動の大きいX = 50から100の間で両者に差異が生じている。データ数の不足が主な原因と考えられる。



(a). mean velocity



(b). turbulent intensity

Fig. 7 The comparison of the phase average result by using PIV and LDV measurement (situation 1, $\theta = 0$, along the inlet central line ($Y = 110$ mm, $Z = 25$ mm))

4. ま と め

標準実験装置を用いて、PIVを全体システムとして評価した。自由表面をもつ矩形容器内で噴流により発生する自励スロッシング流れ場を対象として、濃度相関法によるPIV計測を行った。LDV計測結果と比較、検討して以下の結果を得た。

- (1) PIVでは時間平均速度分布はLDVのそれとよく一致する。乱流強度分布は、PIVの空間解像度や測定データ数が不足すると、LDV計測とに差異が生じる。
- (2) 条件付きPIV計測により、流れの空間構造を定量的に効果的に解析することができる。

今後、PIVのデータ数や空間解像度を変化させた詳細な評価を行う予定である。

(1999年2月12日受理)

参 考 文 献

- 1) PIVの要点, 可視化情報学会講習会テキスト, VSJ-PIV-S 1, 1998. 6.
- 2) 小林, 岡本, 佐賀, Particle Image Velocimetryの動向, 日本機械学会論文集 (B), Vol. 65, No. 629, 1999, pp. 8-14.
- 3) N. Tuda, T. Saga, T. Kobayashi, System Development of Particle Tracking velocimetry for Turbulent Flow Measurement: Turbulence Measurement Around a Backward Facing Step, ASME FED-218, 1995, pp. 29-36.
- 4) 深谷, 斑目, 岡本, 噴流の矩形容器内自励スロッシングの発生機構, 日本機械学会論文集 (B), 62-599, 1996, pp. 2604-2611.