

ステレオファイバ스코ープ画像を用いた3次元流速分布計測法の開発

80121954 近藤央樹 指導教員 前田昌信

1. 緒論

近年、圧力容器内のような外界と環境を異にする閉空間の流動場を把握することはプラントなどの効率や安全性の向上などから非常に要望されている。しかし参照窓の必要性や光学系などの設置の困難さから PIV による測定は従来では不可能であった。Tani et al (2001) はファイバ스코ープを CCD カメラに取り付け、軌跡追跡法のアルゴリズムを実装することで PIV の適応範囲を閉空間内にまで拡大することに成功した。それにより閉空間内の流れ場の把握が可能となった。しかし、より正確に複雑な流れ場を把握するためには流速の3方向成分の測定が必要である。

本研究ではファイバ PIV に1対のファイバ스코ープを使用することでステレオ PIV に展開し、閉空間内において3方向成分の速度測定可能なシステムを構築した。またファイバ PIV においても問題であったファイバ스코ープによる移動量算出への影響を解析し、PTV-SS 法の3次元計測への展開を試みた。

2. 計測機器

Fig. 1 に本計測システムの概要を示す。2つの CCD カメラはどちらもファイバ스코ープの終端に装着され、ファイバ스코ープを転送された粒子群画像が記録される。2つのカメラから得られた流速を合成することによって、流動場の2次元3方向速度成分を算出することが出来る。本研究では CCD カメラ（日立国際電気, Hitachi-KP-F2A）は近赤外域に感度のピークを有する解像度 640×480 pixels, フレームレート 30 Hz, 8bit のものを採用した。光源には半導体レーザー（JENOPTIK 社, JOLD-20-CPXF-1L）を使用した。その中心発光波長は 807nm, 最大出力は連続光で 20W である。また使用したファイバ스코ープ（オリンパス光学工業社製, IC36A-15）は、繊維総本数 36,000 本（マスク内繊維数 31,300 本, コア中心間距離 $14 \mu\text{m}$ ）である。

半導体レーザーからの出力はシングルコアファイバ（直径 $400 \mu\text{m}$ ）を通り送光用レンズからレーザーシートとして出射される。そのためレーザーシート光学系の小型化が実現され、受

光系と同様に操作性に優れる。また半導体レーザーはレーザー照射時間やレーザー間隔を外部信号によって任意の値に取ることが可能である。本研究では半導体レーザーをコントロールする外部信号の作成をパルスジェネレーティングボード（Fird, IO-PCI）によって行った。このボードの RAM-TABLE にデータを書き込むことによって任意のタイミングパルスを作成することができる。

粒子の位置算出方法を示す。Fig. 2 はシート光によって照射された領域を上方から見たものである。2つのカメラ、レーザーシートを固定した状態で2枚のキャリブレーションシートを撮影し、カメラ座標と実座標の変換行列を算出する。それによってそれぞれのカメラ座標に対応する実座標の直線の式を求め、同じ粒子に対し右カメラと左カメラの直線の交点を粒子の位置として算出する。これによって粒子の始点と終点を求め、移動量から速度の算出が可能になる。

ファイバ스코ープによる画像は、各コアに入射する像が均一化されるので、伝送された画像は一本のファイバコア径が最小の空間分解能となる。さらに、クラッドにより像の欠落が生じ、得られた粒子画像は CCD カメラの画素に比べて粗いので著しい解像度の劣化が生ずる。画像の劣化は計測の精度に影響を及ぼすため、ステレオ PIV において、その誤差を検討する必要がある。

3. PTV-SS 法でのファイバ스코ープによる誤差の低減

ファイバ스코ープを通すことで画像が劣化し粒子の情報量が極めて減少する。それにより粒子の画像間での誤対応、サブピクセル移動量算出誤差という2つの問題が生じる。本研究ではパルスジェネレーティングボードと半導体レーザーの組み合わせによりレーザーの照射時間と間隔を任意に設定し粒子軌跡像を撮影、粒子群ではなく個々の粒子の移動量を見積もる PTV-SS 法⁽¹⁾、またサブピクセル移動量算出に自己相関値マップフィッティング法を開発・実装した。

Fig. 3 に通常の方法⁽²⁾と PTV-SS 法のレーザーの照射タイミングを示す。PTV-SS 法は粒子の軌跡の長さ・傾きを調べることで粒子の次なる移動点を予測し、予測点周辺を探索すること

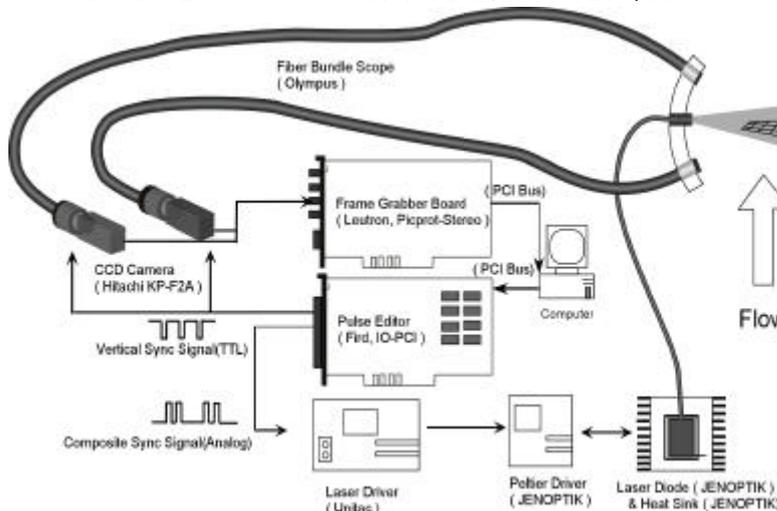


図1. システムの概要

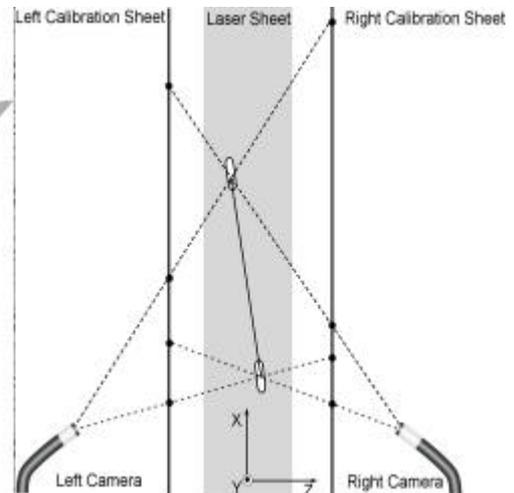


図2. ステレオ PIV の粒子位置算出方法

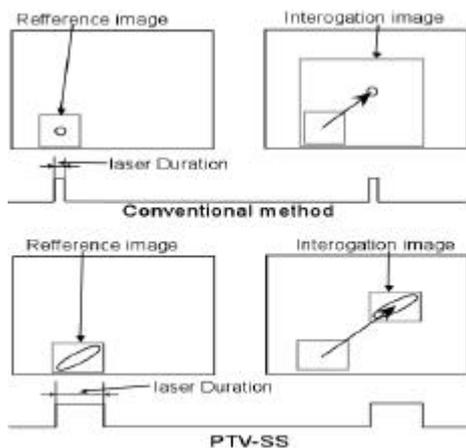


図3. レーザの照射タイミング

で粒子の誤対応を減少させるアルゴリズムである．移動点への距離は以下の式によって表される．

$$L = \frac{(LongAxis - ShortAxis)}{LaserDuration \cdot LaserInterval} (1)$$

 L は移動点までの距離, $LongAxis$ は粒子の直径, $ShortAxis$ は粒子の短径 $LaserDuration$ はレーザーの照射時間 $LaserInterval$ はレーザーの照射間隔である．

サブピクセル移動量を算出するのに従来はガウス分布関数を相互相関マップにフィッティングさせる方法を使うのが一般的であった⁽²⁾．それは粒子画像の相互相関マップがガウス分布を取るためである．しかし本研究においては粒子画像がファイバによって劣化するため相互相関マップがガウス分布を取らず, また粒子の軌跡の長さが一定ではないので一意にフィッティング関数は決まらない．そのため本研究ではフィッティング関数を粒子の自己相関値マップを取る方法を開発した．図4に相互相関マップ(a)とガウス分布マップ(b), 自己相関マップ(c)を示す．図4(a)にフィッティングさせるのに図4(b)のガウス分布マップよりも図4(c)の自己相関マップのほうがより適切なことがわかる．

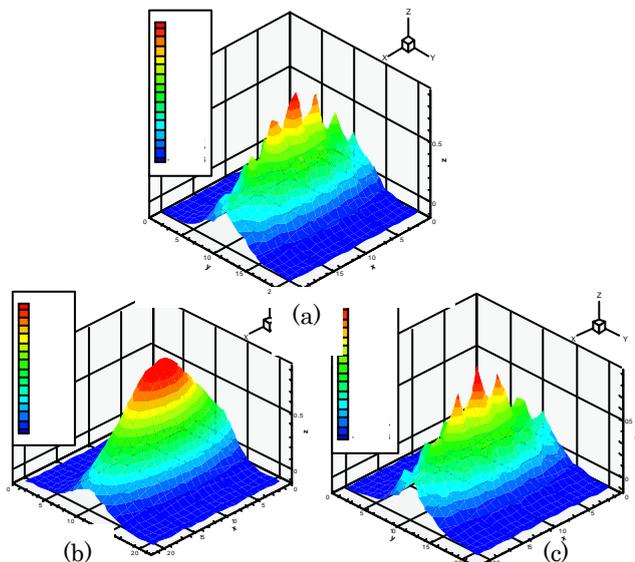


図4. 相関値マップ

4. シミュレーションによる検証

シミュレーション画像を作成し以上のアルゴリズムの性能を検証した．図5(a)はPTV-SS法を使用した場合と使用しない場合の測定結果である．使用した場合は実際の移動量と計測によって算出された移動量の差はないが, 使用しない場

合は粒子の誤対応によって実際の移動量と算出された移動量に差があることがわかる．また図5(b)はサブピクセル移動量算出方法にガウス分布フィッティングと自己相関フィッティングを用いた場合である．自己相関フィッティングの方が極めてBiasErrorが減少していることがわかる．

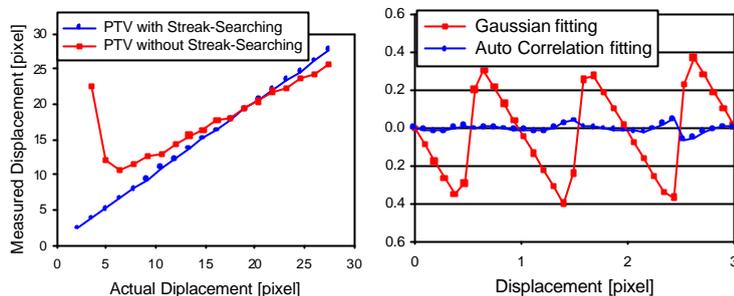


図5. シミュレーション結果 (a) (b)

5. 実流動場計測

本計測システムの実流動場への適用性を確認するために, 軸対称噴流の速度計測実験を行なった．実流動場を計測するため受光系, 送光系が一体となったプローブを作成した． Re 数は約5300である．測定範囲を図6(a)に示す．ノズル直上5D (D =ノズル直径)のポテンシャルコアが消失する付近を測定した．レーザーの照射間隔は4ms, 照射時間は3msである．図6(b)はLDVとステレオフィバ PIVとの比較である．図6(c)は速度のベクトル図である．

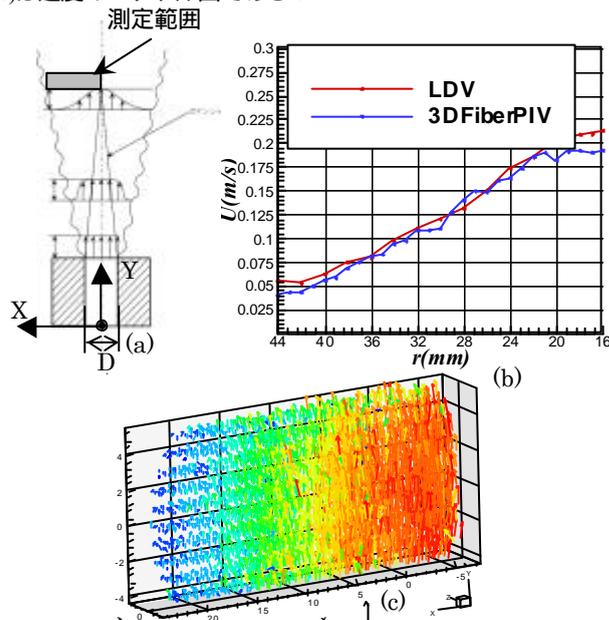


図6. 噴流の測定結果

6. 結言

ステレオフィバスコープ PIV システムを開発した．1対のファイバスコープとカメラを使用することで3次元流速の測定が可能になった．ファイバスコープによって起こる画像の劣化の影響をPTV-SS法と自己相関マップフィッティング法により減少させることに成功した．

実際の流動場へのこのシステムの適用性を確認するために軸対称噴流の計測を行い, LDVと比較して平均流速において誤差は10%以内に収まった．これにより閉空間内の3次元流速分布がステレオフィバスコープ PIVによって計測可能なことが確認された．

参考文献

- (1)Tani et al., Development of fiberscope PIV system by controlling diode laser illumination, Exp In Fluids, 2002.
- (2)Raffel et al., 1998 Particle image velocimetry a practical guid.,