ダイナミック PIV の展開と展望*

岡本 孝司**, 杉井 康彦**, 石川 正明***

Future of Dynamic PIV — innovative fluid dynamics —

Koji OKAMOTO, Yasuhiko SUGI and Masaaki ISHIKAWA

1. はじめに

PIV (Particle Image Velocimetry) は、流体の 2 次元速度分布を計測する手法として広く用いられている¹⁾。PIV は、2 次元空間内の速度分布を計測するシステムであるため、十分大きな空間周波数をもつデータを取得することが重要であり、一般的には最低 100 万画素程度の高解像度カメラが用いられる。従来、このような高解像度カメラでは、カメラのフレームレートが高々 30 fps 程度に限られており、PIV の計測においても、時間方向の過渡変動情報を得ることが困難であった。数 Hz 程度の非常にゆっくりとした過渡変動については、時系列変化を取得することが行われていたが、一般的には時間方向の変動は平均化することが行われていた。具体的には、アンサンブル平均による平均速度分布や、乱流統計量の算出といった手法がとられていた。

21 世紀になり、高速度カメラは大きなブレイクスルーを迎えた。従来の高速度カメラは CCD 素子を用いるものが主流であり、読み出し速度の制限から、高速化するためには解像度を犠牲にする必要があった。このことから、非常に小さな画像解像度に限定されていたが、高速度カメラを用いた PIV なども行われてきていた。しかし、PIV の利点である空間解像度が悪くなってしまうため、非常に限られた用途にしか用いられてこなかった。近年の CMOS 技術の進展により、100 万画素の高解像度を持ちながら、毎秒 3000 枚記録することのできる高速度カメラが市販され、さまざまな分野で利用されるようになった。高解像度で、かつ、高速度というカメラの出現は、流体計測にも大きなブレイクスルーをもたらした。

PIV においても、旧来の毎秒 30 枚の高解像度カメラを毎秒 2000 枚乃至 3000 枚の高速度カメラに置き換える事が行われた。解像度を犠牲にすることなく、単純に速度だけが 100 倍と 2 桁高速化した事になる。なお、PIV 画像を取得するためには、カメラだけではなく、レーザー側も高繰り返しのパルスレーザーを照明に用いる必要があ

る。このため、溶接などの用途に用いられていた高出力の kHz オーダのパルスレーザーを 2 台用いて照明することが行われた。なお、現在では 10 kHz で発振できる、高速度 PIV 用のダブルパルスレーザーが市販されている。

旧来の 30 Hz 高解像度カメラ + 15 Hz ダブルパルスレーザーを、3000 Hz 高解像度カメラ + 1500 Hz ダブルパルスレーザーに置き換えるだけで、2 桁時間方向に高密度な情報を取得できる、高速度 PIV が出来上がる。カメラとレーザー以外の部分は旧来のシステムをそのまま流用できるため、さまざまに応用が進んでいる。高速度 PIV では、1 kHz 乃至 20 kHz といった高時間分解能で速度分布が計測できる。2 次元画像情報に 1 次元時間方向の軸が加わり、3 次元情報を容易に取得することができることになる。ダイナミック PIV で取得したデータは、空間方向だけでなく、時系列方向にも十分な情報を持っているため、熱線流速計 1 万個を空間に設置した事と同等な速度情報が得られることになる。

このダイナミック PIV システムは、流体計測、ひいては流体工学分野にブレイクスルーをもたらす。大量の高時間空間分解能をもつ画像情報や、時間空間変動情報がえられるという特長を利用して、様々な流れに適用されはじめている。ここでは、ダイナミック PIV の将来を考える一助とするため、主に著者らの関与している事例について紹介していきたい。

2. 高速流の過渡計測

現状、著者らが保有しているダイナミック PIV システムは、1024×1024 画素で 3 kHz、512×512 画素で 10 kHz、256×256 画素で 20 kHz の時間解像度を持っている。一般に PIV ではフレームストラドリングによって微小時間間隔の画像を取得する。10 kHz でカメラを動かすと、その半分の 5 kHz 毎に速度情報が得られることになる。画像計測であるため、スケールによって計測できる範囲が変わってくるが、比較的高速な流れ場でも十分計測が可能である。ここでは、10 mm のチャネル内を平均流速 10 m/s で流れる窒素ガスの境界層流動計測例を紹介する²⁾。断面が 10×10 mm で、長さ 1 m の矩形流路に、障害物として先端を 45 度にカットした 2

* 原稿受付 2004 年 11 月 5 日

** 正会員 東京大学大学院 工学系研究科

*** 正会員 琉球大学 工学部 機械システム工学科

mm 幅の板を流路の中心に設置する。トレーサとして、微粒化したオリブオイルを用いる。高速度カメラは、画像は 512×256 画素、 10 kHz で撮影を実施した。レーザーは 5 kHz とし、ダブルパルスを $20 \mu\text{s}$ のフレームストラドリングで照明を行った。このことから、連続する 2 枚の画像間隔はそれぞれ $20 \mu\text{s}$ と $180 \mu\text{s}$ となる。速度ベクトルは $20 \mu\text{sec}$ の画像間隔側のデータを用いて算出する。前述のように、速度ベクトルは 5 kHz ($200 \mu\text{sec}$ 毎) で算出される。

流れは 2 mm 幅の障害物に当たり、上下のそれぞれ 4 mm 幅のチャンネルに分離して流れる。障害物の先端は 45 度に切りかいてあるが、その鋭角側の領域を可視化する。先端から境界層が発達している様子が可視化される。この流れ場を、上記のダイナミック PIV システムで計測し、得られた速度ベクトルから求めた渦度分布を Fig. 1 に示す。境界層の近傍で速度ベクトルは強い変動が見受けられ、また正負の渦度を持つ渦度分布が障害物のエッジ近傍から下流に続いて分布した結果が得られた。また、 $200 \mu\text{s}$ 間隔での移動した領域を白丸で囲って示しており、その移動は画像の半分程度も移動しているにもかかわらず、良好に渦が遷移していく様子がとらえられている。障害物のエッジから放出される渦の周期は、数 kHz と高速なため、従来の遅いフレーム速度のカメラでは不可能で、ダイナミック PIV システムのみが変動の取得が可能である。なお、本計測では渦の発達の状況をより詳細に取得するには、 5 kHz では遅すぎることもわかる。 20 kfps 乃至 32 kfps のさらに高速度な撮影を実施し、渦の発達様相のラグランジュ的な評価を推進していく予定である。

Fig. 1 Vorticity map for lower side²⁾.

3. 混相流計測

ダイナミック PIV は、混相流計測にも有効である。気泡と液相速度場との相互作用を知るために、シャドワイメージで気泡を捉え、PIV で液体の速度分布を計測することが従来から行われてきている³⁾。従来は気泡の上昇速度を抑えるために、粘性の高い液体を用いたり、気泡とほぼ等速でシステム全体を上昇させ、ラグランジュ的に気泡を追跡する手法などが用いられてきた。ダイナミック PIV システムを用いれば、何も変えずに 100 倍高速化が図られるため、複雑な仕組みを準備しなくても、気泡の変動や速度変動を捕らえることが可能となる。さらに、レイノルズ数が大きくなり、気泡の変形が大きくなる条件における気泡と流体との相互作用、気泡の変形挙動と速度との相関などを評価する場合にも高速度撮影は有効である。

ここでは、高速度高解像度カメラ (1024×1024 画素、 2000 fps) を 1 台使い、気泡流を計測した例を示す⁴⁾。気泡の輪郭を捉えるためのバックライト照明には、 808 nm の赤外線パルスレーザー (Oxford HSI-1000) を用いる。一方、流速分布計測のためには、高速度ダブルパルスレーザー (New-wave Pegasus) を使う。高速度カメラと 2 種類のパルスレーザーのタイミングチャートを Fig. 2 に示す。赤外線パルスレーザーの発光をまたぐように PIV 用レーザーを発光させ、気泡位置が 2 枚の粒子画像の中心差分となるように設定する。それぞれの画像には、粒子画像と粒子とは若干時間の異なる気泡の画像が記録される。粒子の移動を解析することで、ちょうど気泡が映っている時間と同じ時刻の速度が解析できることになる。時間を制御し、気泡像と粒子像の時間をずらすことで、気泡と粒子の重なりを防ぐことも可能になる。1 枚の画像から輝度情報などを用いて、気泡画像と粒子画像を分離する。気泡の移動は PTV によって追跡し、液相速度分布は PIV によって解析する。Fig. 3 に得られた気泡と液相の速度分布の例を示す。気泡の挙動を 1 kHz で取得すると共に、気泡周りの速度分布を詳細に取得することができている。気泡流などの混相流においては、気泡位置などの条件を全く同一にした実験を行うことは不可能である。このため、ある条件における過渡変動を高詳細な時間分解能で取得することは大きなメリットがある。混相流計測にもダイナミック PIV は非常に有効であろう。

Fig. 2 Timing chart for bubble images⁴⁾.

Fig. 3 Simultaneous measurement of bubble flow⁴⁾.

4. 高速度マイクロ PIV⁵⁾

マイクロ流動においては、スケールが小さくなることにより、画像中での移動量が相対的に大きくなることから、フレームストラドリングによるマイクロ PIV が発達してきた。一方、高速度カメラを使うと容易に画像間の時間差を 1 ms 以下にできることから、高速度撮影が有効である。さらに、マイクロ流動において非線形な力の釣り合いにより、非定常流動が発生することが知られている。このような界面近傍に発生する非定常流動を捉えるためには、高速度撮影が必須となる。ここでは、水-油の向流界面における非定常流を紹介する⁵⁾。光源には Nd:YAG CW レーザー (532 nm, 50 mW) を用いる。試料中の蛍光粒子の励起光のみを顕微鏡にセットしたカメラで記録する。蛍光は極めて微弱なため、イメージインテンシファイアを搭載した 512×512 画素, 10 bit, 2000 fps の高感度高速度カメラで記録する。連続照明を

用い、時間差はカメラのフレーム間の時間差で決定される。パルスレーザーを用いることでフレームストラドリングも可能であるが、レーザー強度の問題と、今回の流れ場では、0.5 ms の時間間隔で追跡が可能であったため、連続照明を用いた。使用したマイクロチャンネルは 2 つの入り口と 2 つの出口を持つ X 字型の構造になっており、幅 100 μm , 深さ 25 μm である。マイクロシリッジとシリッジポンプにより、圧力駆動で作動流体を一定流量で流した。作動流体には、水と酢酸ブチルを用いた。

Fig. 4 上側に観察領域の拡大図を示す。2 つのチャンネルの接触している距離は 500 μm で、上側のチャンネルに酢酸ブチルが左から右へ、下側のチャンネルに水が右から左へそれぞれ流れ、チャンネル中央で 2 流体が接触している。なお蛍光粒子は水側のみに混入した。Fig. 4 に蛍光粒子画像から得られた時間平均速度分布を示す。水側の領域の中心である $y=75\mu\text{m}$ 付近では速度は最大値をとり、約 2.0 mm/s となっている。壁近傍である $y=60\mu\text{m}$ 付近では速度はゼロとなるが、一方、油-水界面である $y=90\mu\text{m}$ 付近では速度がゼロとなる領域とそうでない領域があり流れ方向に対して均一な分布になっていない。なお、トレーサ粒子は酢酸ブチル側には混入していないため、水側領域しか速度計測ができない。

Fig. 4 の四角で囲った領域 (12 $\mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$) における速度場の時間変動の例を Fig. 5 に示す。流れ場は 1 ms で交差する流れから巻き込む様な流れに少しずつ変化している。これは水-油界面において急激な速度の変化が生

Fig. 4 Microchannel and average velocity distributions⁵⁾.

Fig. 5 Velocity distribution at the oil/water interface⁵⁾.

じているためであると考えられる。このようなマイクロスケールでの流動の変動を高時間、高空間解像度で捉えることができることが、ダイナミック PIV の利点である。マイクロスケールにおいては、界面近傍において、非線形な流れ場が形成され、かつ、本例のように過渡変動が誘起される場合もある。このようなマイクロスケールの流れ場の解明には、過渡変動を計測することは重要であり、高速度マイクロ PIV の更なる発展が期待される。

5. 生体計測

血流は心拍による拍動や筋肉による振動などがあり、高解像度高速度カメラによる時空間高解像度計測が有効である。血流計測にダイナミック PIV を適用した例を

Fig. 6 measurement of micro circulation⁶⁾. Fig. 7 Phase averaged velocity distribution⁶⁾.

示す。

血液は、赤血球と血漿が主成分であるが、体積分率で45%という高濃度の赤血球のため、非ニュートン性を示すことが知られている。杉井ら⁶⁾は、ラットの腸間膜における約 $30\text{ }\mu\text{m}$ の細動脈を顕微鏡によって可視化し、高解像度高速度カメラ (1000 fps, 512×512 画素) にて記録した。画像の一例を Fig. 6(a) に示し、これらの画像を解析することによって得られる赤血球の速度分布を時間平均した速度分布を Fig. 6(b) に示す。ここでは平均速度であるが、高速度ビデオカメラを用いているため、 $30\text{ }\mu\text{m}$ 内部の速度分布を時系列で取得することができている。細動脈においては拍動による周期的な流れが観測されており、その速度変動を位相平均することによって、脈動の各位相における速度分布を算出することができる。

Fig. 7 に、水平部分の速度情報を位相平均し得られた水平方向速度分布を示す。ここにあるように、細動脈においても速度が速くなったり遅くなったりすることを繰り返していることが良くわかる。速度分布の形状自体は、位相によってはあまり変化していない。なお、生体が相手の場合、アンサンブル平均をとったり、血圧パルスを用いて位相平均をとったりする事は非常に困難である。顕微鏡と高速ビデオカメラを用いることで、容易に変動する血流を計測することが可能となる。生体流を計測する場合に強いアドバンテージとなると考えられる。

6. 4次元計測

従来から、カメラを複数台用いることで、3次元空間中に漂う粒子の3次元位置情報を求め、この粒子の3次元位置を追跡することで3次元3成分速度分布計測が行われてきていた。これらは3D-PTVと呼ばれ、1980年代には西野ら⁷⁾によって乱流計測手法として確立されている。これらの計測には、通常のカメラが用いられているため、時間方向の分解能は、最大で30 Hzであり、乱流統計量を求めるためにはアンサンブル平均が行われている。

この3D-PTV用のカメラとして、高解像度高速度カメラを用いる研究も進められている。Dohら⁸⁾は、カメラを3台用いる3D-PTVを従来から開発してきたが、高解像度高速度カメラ (1024×1024 画素, 2 kfps) を3台用いて、2 kHzで3次元空間の速度分布を計測するこ

Fig. 8 Instantaneous vector of 4 D-PTV⁸⁾.

とに成功している。照明は、高輝度の高繰返しパルスレーザー (Nd:YAG 532 nm, 20 mJ/pulse, 2 kHz) を用い、フレームストロリングは用いずに、0.5 ms の連続する画像間の情報を用いて粒子速度を解析している。100 万画素カメラを 3 台用いているため、追跡可能な粒子数は 10,000 個程度であるが、衝突噴流の過渡変動を詳細に捉えている。3 台のカメラを用いる必要があるが、流れの全情報を取得できる優れた手法であり、発展が期待される。

一方、粒子の 3 次元位置情報をホログラムによる干渉縞として 1 台の高速度カメラに記録し、これを追跡することで 3 次元速度分布かつ時系列変動を計測している⁹⁾。ホログラフィック PIV (HPIV) はフィルムベースのものが主であったが、近年はデジタルカメラを用いるデジタルホログラムが盛んになってきている。フィルムを用いる場合には、フィルムを現像した後、CW レーザーを用いて 3 次元空間中に粒子像を再生する必要があった。一方、デジタルホログラムでは、ホログラムの干渉縞をカメラで直接受光し、その干渉縞情報をコンピュータの上で計算によって再構築する。粒子像の再生をバーチャルなコンピュータ上の 3 次元空間で行うことができるため、精度が向上するとともに、計測が簡単に行えるというメリットがある。但し、従来のデジタルホログラムでは、カメラの解像度が高々 100 万画素程度しかなく、計測できる粒子の個数が非常に少ないというデメリットがあった。フィルムは、画素に直せば 10 億画素程度となり、到底フィルムには及ばない。しかし、高速度高解像度カメラを用いたデジタルホログラムは、1 秒間に 2000 枚撮影可能なため、1 秒間の画素数はフィルムベースに匹敵してくる。また、高速度カメラを用いる HPIV では、照明用光源として、安価な CW レーザーを AOM によりダブルパルス化して用いる事が可能であり、高価なパルスレーザーが不要である。つまり、カメラとコンピュータがあれば比較的容易に 4 次元計測が可能となる

Fig. 9 Hologram image⁹⁾.

Fig. 10 Instantaneous 3 D vector by HPIV⁹⁾.

という特徴を持っている。今後、高解像度高速度カメラを用いた HPIV が、乱流構造解析などに威力を発揮するものと期待している。

7. 密度場計測

PIV だけではなく、高解像度高速度ビデオカメラを、温度や密度などのスカラー場計測に用いることも可能である。圧力や密度といった情報の過渡変動量分布を高解像度かつ高速度で取得することのできる有効な手法と考えている。

Ko ら¹⁰⁾は、100 万画素、2 kfps の高速度高解像度カメラを 3 台用い、スペックル法によって、3 次元密度分布を計測している。スペックル法は、光路上の屈折率分布 (密度分布) により、レーザー光が屈折し、スペックルパターンが変移する事を利用する。スペックルパターンの時系列変化を高速度カメラで記録し、その変移量を、PIV 画像解析で用いられる相互相関法を適用して算出する。この変移量は、屈折率勾配の光路長積分となっているので、逆問題を解くことによって 3 次元の屈折率分布 (密度分布) を算出することが可能となる。この逆問題解析は、一般的なトモグラフィ手法の一つであり、Ko らは Fig. 11 に示すような 3 方向からの画像を用いて計測を行っている。マッハツェンダー干渉計やマイケルソ

ン干渉計などに比べて、光学系が簡便となること、また、サブピクセルの変移量も PIV 画像解析技術を用いることで詳細に解析が可能であることなどから、3次元密度分布計測には有効な手法である。

Ko らが用いた高速度ビデオカメラは、Photron 社製の FASTCAM Max を用い、 256×256 画素、15 kHz で撮影を行った。レーザーは、連続発振の 400 mW、Nd:YAG レーザーを用い、ビームスプリッターで3方向に分割し、 -90 度、 60 度、 0 度の3方向からの投影画像を得る。対象とする過渡流れ場は、三角形ノズルから噴出する窒素ガスジェットである。この窒素ガスジェットは電磁弁によって制御され、時刻0で電磁弁を開けた後の、ジェット噴流の変動を時系列で可視化する。Fig. 12 に得られた四次元密度分布情報から、ノズルより2mmと10mmの断面密度分布を示す。また、2mmにおける密度変動を(a), (c), (d)に示す。まず、ショックが通過

Fig. 11 Schematic of Optical Layout¹⁰⁾.

Fig. 12 Reconstructed 4 D density distributions¹⁰⁾.

し、その後、短時間に噴流が発達していく様子をとらえることに成功している。

8. まとめ

ダイナミック PIV は、流体計測分野に大きな革新をもたらしている。従来、CCD カメラで撮影されていたものを単純に高解像度高速ビデオカメラに置き換え、かつ、照明を高速度パルスレーザーで行うことで、今までわからなかった過渡変動を定量化することができている。単純であるが大きな前進であり、様々なアプリケーションへの適用が進められると期待している。十分な精度で、3次元(2次元空間+1次元時間)の情報を容易に取得できる特徴を生かし、今まで知られていなかったような現象を、高時間分解能、かつ高空間分解能で定量化できるようになってきた。なお、研究の最先端では、単純にカメラを置き換える時代はすでに終わり、ダイナミック PIV で得られる情報を最大限利用するために、その特徴を考慮した新しいダイナミック PIV アルゴリズムの開発も模索されている。ダイナミック PIV 技術は、流動計測におけるブレークスルーであり、今後の大きな発展が期待される。

参考文献

- 1) 可視化情報学会編, PIV ハンドブック, 森北出版 (2002).
- 2) 石川, 岡本, 班目, 狭い流路内の障害物周りの流れの高速度 PIV 計測, 可視化情報 Vol. 24, Suppl. 1, (2004), 345.
- 3) 藤原, 前川, 飯塚, 菱田, 前田, 気泡を含む流れ場の乱流構造 (PIV による気泡近傍の流動場の計測), 機論 B, Vol. 64, No. 622, (1998) 1697.
- 4) 石川, 岡本, 班目, 高速度撮影システムによる気泡流ジェットの流れの可視化, 可視化情報 Vol. 24, Suppl. 1, (2004), 123.
- 5) 篠原, 杉井, 岡本, 青田, 火原, 北森, 高速度マイクロ PIV 法を用いたマイクロ流体デバイス内の非定常流計測, 可視化情報 Vol. 24, Suppl. 1, (2004), 39.
- 6) 杉井, 西尾, 岡本, 中野, 南山, 新見, 高精度画像計測法を用いた微小血管内の速度分布計測(第2報ラット腸間膜細動脈のアンサブル流速平均解析), 機論 B, Vol. 70, No. 691 (2003).
- 7) K. Nishino, N. Kasagi, M. Hirata, Three-dimensional particle tracking velocimetry based on automated digital image processing, Trans. ASME, J. Fluid Eng. Vol. 111 (1989) 384.
- 8) D-H. Doh, T-G. Hwang, Y-B. Cho, K. Okamoto, "4 D-PTV", Proc. ISFV 11, (2004) Paper 4. 10. 2.
- 9) K. Okamoto, K. Ikeda, S. Murata, S. Stake, "Dynamic Holographic PIV for full-field measurement," Proc. Int. Workshop on Holographic Metrology in Fluid Mech., (2003), 189.
- 10) H. S. Ko, K. Ikeda, M. Ishikawa, K. Okamoto, Y-J. Kim, "Experimental Analysis of High-speed and Initial Helium Jet Flow Using Three-dimensional Digital Speckle Tomography," Proc. ISFV 11, (2004) Paper 3. 4. 2.

(a) $t=0\mu\text{s}$

(b) $t=200\mu\text{s}$

口絵1 10 mm のチャンネル内を平均流速 10 m/s で流れる窒素ガスの境界層流動の渦度分布 (5 kHz (200 msec 毎))。

(口絵1 東京大学 大学院 工学系研究科 岡本 孝司)
(本文 2 頁参照)