

## No.4

## パルス YAG レーザ PIV の高速流計測への応用

五味光男、黒澤要治、Jacky GUEZET、鈴木和雄（航空宇宙技術研究所）

## High Speed Flow Measurement Using Pulsed YAG Laser PIV

Mitsuo GOMI, Yoji KUROSAWA, Jacky GUEZET, and Kazuo SUZUKI (NAL)

## 概要

『高速から低速流域を含むフローフィールドの速度ベクトルマップを瞬時に計測できる』、流体計測におけるこの極めて魅力的な PIV (Particle Image Velocimetry) 計測法は、近年開発研究が急速に進み、とくに従来困難とされてきた高速流体計測の実用化へ大きく進展してきた。当所では、超音速航空機用エンジンの研究の一環として進めているラム燃焼器モデル内の高速・高乱流域計測に応用している。最近の PIV 装置の構成と原理、計測結果および実計測上直面している問題点等について述べる

## 1. はじめに

平面内の速度場を瞬時に測定できる PIV は過渡現象の計測、ブローダウン風洞計測等に適していると共に、CFD 検証技術として最も期待されている新しい光学的流体計測法である。レーザ光源を用い、微粒子の挙動に着目した光学的流体計測法として LDV (Laser Doppler Velocimetry) と比較される。特定の "1 点" での高精度計測ができる LDV とは共に一長一短があり、互いの長所が短所を補うという関係で使用することにより、より有効で精度の高い流体計測ができると考えられてきた。とは言え、LDV が計測法としてはほぼ確立した手法で、近年新たな展開が見られないのに比較し、PIV は新しい可能性を秘めた計測法として急速な進歩を見せている。そのため、PIV への関心、需要が高まり、さらにデータ処理のためのアルゴリズムやシステムの高機能化が進んでいる。高速流計測に関してはパルス Nd・YAG レーザ、イメージシフトテクニック等を利用して、ブローダウン風洞内

での高速モデル計測<sup>1,2)</sup>や  $M = 6.0$  の高レイノルズ数風洞における高速流 (960m/sec) 計測<sup>3)</sup> など意欲的な計測が試みられ、成果を実証した。しかし 1 枚のフィルム上に 2 枚の粒子画像を重ねて撮影し後からオフラインで解析するこれまでの手法は解析に時間がかかり、さらにイメージシフトテクニックのための光学的装置やその技術が必要で実用上問題があった。こうした問題の解決策として CCD ビデオカメラを用いるオンライン計測法<sup>4)</sup> が研究され、高速 CCD ビデオカメラを用いる方法<sup>5)</sup> やフレームストラドリングテクニックに基づいたクロスコリレーション CCD ビデオカメラによる方法<sup>6)</sup> が開発された。これを用いればイメージシフトテクニックも不要で、データの後処理が容易となり、パソコンによる高速処理やリアルタイム PIV<sup>7,8)</sup> も可能となる。とくに高速用のものが最近開発され、通常の使用方法で 500m/s 程度の計測が可能となってきた。さらに近年光源として PIV 用デュアルヘッド型 Nd・YAG パルス

レーザが、扱い易い小型のものから、燃焼や超高速計測用の大型・高出力のものまで市販され、汎用化してきた。

最近の PIV システムを、当所で超音速航空機エンジンの研究の一環として進めているラム燃焼器<sup>9, 10)</sup>モデル内の高速・高乱流域計測に応用して有用な結果<sup>11, 12)</sup>を得ている。

## 2. PIV の原理と構成

流体中の微粒子の挙動に着目して、特定の時間内に生じた粒子の移動量を知れば局所の速度が分かる。PIV は図 1 に示す基本構成要素と計測過程を経て速度ベクトルマップを決定する。即ちレーザライトをシート状にして照射し、流体内に混入した粒子からの散乱光を CCD ビデオカメラで撮影し、測定領域内の全ての粒子の分布画像を得る。この際粒子の移動量を予め予測した異なる時刻での一組 2 枚の画像が必要となる。この粒子画像を図 2 に示す処理フローに基づいて速度ベクトルを求める。まず 2 枚のそれぞれの画像を小さな検査領域 (Interrogation Area) に分割し、領域毎に二次元 FFT アルゴリズムで処理しさらに相互相関関数を求めて粒子の移動量を決定し、その領域での平均速度ベクトルを計算する。この処理を計測面全域に繰り返して全体のフローパターンを解析する。通常計測面内の解析ベクトル数は数千個になるが、計算に要する時間はわずかである。

### 2. 1 粒子分布画像の収集と処理 レーザ

異なる時刻における粒子分布画像データを得るには、パルス状光源とシート光学系が必要である。非常に速度が遅い場合 (水流計測等) には、アルゴンレーザ

のように手近にある光源を利用することもできるが、高速流には、発光時間の非常に短いパルスレーザが必要となる。YAG レーザや銅蒸気レーザなどが候補となるが、ピークパワーの非常に大きな理科学用の Nd・YAG レーザ (2 倍波: 532nm) が一般的である。図 3 に示すように同じ光量のビームを発振する 2 台のレーザ発振器から構成される。2 台のビーム発振間隔 ( $\Delta t$ ) は PIV 計測時のパラメータによって設定され、高速流計測の場合には  $\Delta t = \text{数 } \mu\text{s}$  が必要となる。発振されたビームは偏光素子を利用した光学装置で同一の光路上を直進しシート光学系へと導かれる。PIV 用に市販されているものには、10 ~ 50mJ/pulse の小型 YAG レーザ及び 200 ~ 400mJ/pulse の高出力 YAG レーザに分類できる。これらの主な仕様を図 4 に示す。近年急速に改良が進められ小型化、高機能化されつつある。

### カメラ

データ処理とも関連しているが、1 枚の画面に異なる時間の粒子分布画像を重ね撮りして、これらの処理を行うオートコリレーション用と、時間的に別々の画像を収集して処理するクロスコリレーション用とがあり、筆者らは後者を採用している。これは図 5 に示すフレームストラドリングという特殊な受光方法を採用したクロスコリレーション CCD デジタルビデオカメラである。すなわち 15Hz 又は 30Hz で動作しているビデオのフレームに対して、最初のレーザパルスは、フレームの最後部付近で発振させて 1 枚目の画像を記録し、次のフレームの先頭付近で 2 回目のレーザパルスを発振させて 2 枚目の画像を記録する。これを繰り返せば、必要な組の粒子画像データを収集できる。この 2 つの画像間隔時間  $\Delta t$  が、高速流計測のためには最も重要なファク

ターとなるが、最近のもので $1\mu\text{s}$ が可能である。この結果、通常のフレーム動作のカメラがあたかも $1\text{MHz}$ で動作したような速さで画像を得ることができる。CCDは $1\text{k}\times 1\text{k}$ ピクセルや $2\text{k}\times 2\text{k}$ ピクセルのものがある。

#### 検査領域

データ処理単位としての検査領域サイズは、CCDのピクセル数で設定され、通常は、 $64\times 64$  (または $32\times 32$ )ピクセルで行う(1ピクセルは $9\mu\text{m}$ 正方形)。CCD全体の面積は、 $1008\times 1018$ ピクセル( $9.1\text{mm}\times 9.1\text{mm}$ )である。実際計測する視野は、筆者らの実験では、 $40\text{mm}\times 40\text{mm}$ に設定しているので、測定上の空間分解能(検査領域サイズ)は、 $2.5\text{mm}\times 2.5\text{mm}$ となる。

#### 2. 2 結果表示

ベクトル表示の他、渦度分布、等速度線図などの表示機能を有している。もちろんベクトル表示と他の表示との重ね表示もできる。また速度ベクトルに対しては、過誤ベクトルの排除機能および排除後の補間修正表示機能もある。

#### 3. 実験装置

実験装置の系統図を図6に、ラム燃焼器保炎器モデルを図7に示す。ブローアからの空気は電気ヒーターで加熱され $50\text{mm}$ 矩形流路内に導かれる。流路壁はレーザーライトシートの入射および散乱光計測のため4面全て、石英ガラスで制作されている。流路内に設置した保炎器は二次元Vガッタタイプで、2種類(B、C)の実験を行っている。シンプル型Bに対し、Cは保炎器内での空気/燃料混合を促進するために、ガッタの壁面に空気流入孔があけてある。また燃料は、ガッタ

頂角の内側に設置したパイプに $1.5\text{mm}$ の孔をあけ噴出している。ガッタ前方空気速度は $V=40$ 及び $75\text{m/s}$ に設定し予熱ヒーターにより $600\text{K}$ に加熱してある。シーディング材は、粒径 $2.7\mu\text{m}$ のMSF-30M(リキッドガス)を拡散整流洞前方(図6内のB点)から乾燥圧力空気により混入させた。計測領域はガッタ後方 $40\times 40\text{mm}$ (図7)である。

PIV装置全体を図8に示す。システム全体のコントロールはパソコン上のソフトウェア(TSI-INSIGHT)で行う。レーザーはデュアルパルスYAG(NEWWAVE-Minilase、出力 $25\text{mJ/pulse}$ )で、クロスコリレーションカメラ(TSI-630045)との同期はシンクロナイザ(TSI-610032)上で行う。カメラからのデータはフレームグラバー(TSI-600066)を通じてパソコン内に取り込む。なお、計測面でのレーザーライトシートの厚さは、約 $0.5\text{mm}$ である。

#### 4. 計測結果

燃焼器特性を明らかにするためにガッタ近傍の流動を詳細に解析する必要があり、これまでの経験<sup>1,2)</sup>を参考に①非燃焼時 ②燃料噴出時 ③燃焼時の計測を進めている。1例としてガッタBの非燃焼時( $V=75\text{m/s}$ ,  $T=600\text{K}$ )の粒子分布画像(図9)および速度ベクトル図(図10)を示した。粒子画像には小さな渦によると思われる一部粒子分布が希薄な領域が存在する。ベクトルマップからは流れ場が大きなカルマン渦に支配されている様子がよく分かる。最高速度は自由流中で約 $150\text{m/s}$ で、ガッタによるブロックageを考慮すれば妥当な値である。図11に、同じ条件下でのガッタCの結果を示した。ガッタ入り口の条件は全く同じにもかかわらずガッタ壁面孔から流入する空気流によって大



きなカルマン渦は消滅して小さな渦が多数発生し、モデル B の場合と著しく異なったベクトルマップとなった。図 12 に、同じモデル C において、空気条件同一で燃料噴出時（非燃焼）の結果を示す。危険を回避するために模擬ガスとして He を燃料流量と同じ条件（当量比 = 0.2）になるように噴出した。この噴流ガスはガッタ直近後流では高速すぎて本装置では測定できず、10mm 以上後流で約 150m/s を記録している。ベクトルマップは燃料の噴出によって大きく変化し、ミキシングによるより複雑な流れ場になることが、図 11 と比較してよく分かる。燃焼時の例として図 13 にガッタ B の場合の水素燃焼時の結果を示した。この例は  $V=40\text{m/s}$  のケースで、粒子分布画像からは燃焼高温部と非燃焼部との粒子分布の濃淡が非常にはっきりしている。流れ場としては、非燃焼時と比較して火炎外側の境界付近が非常に安定していることを示した。燃焼流の場合は、粒子の赤熱発光、測定窓の焼け付きなど空気流の計測では無い新たな問題が発生するため、良好な粒子画像を得るための工夫が今後必要と思われる。

## 5. 今後の課題

燃焼器を対象とした高速流計測の結果いくつかの問題に直面しその対策を考慮している。

### ①最高速度計測の限界

現カメラシステムでは速度 160m/s が測定限界となっている。ビデオフレーム間隔  $\Delta t$  がもっと小さくできるカメラへの更新を検討している。

### ②測定窓の汚濁

粒子問題はいつの時代も光学計測の宿命的課題である。とくに高速流の場合は

粒子が帯電し、ガラス窓に一層付着しやすくなる。今後知見の収集と実験システム・環境に適した粒子の選択をさらに検討したい。

### ③燃焼流計測時の粒子画像の劣化

粒子が赤熱し光学的ノイズとなるため、カメラの前に狭帯域の光学フィルターが不可欠で、これによる減衰 (-25%) もあるが、粒子画像劣化の原因としてさらにミ一散乱光が赤熱粒子によって吸収され弱くなることも考えられる。そのため、粒子画像の改善のためにレーザー光源の高出力化を検討している。

## 6. まとめ

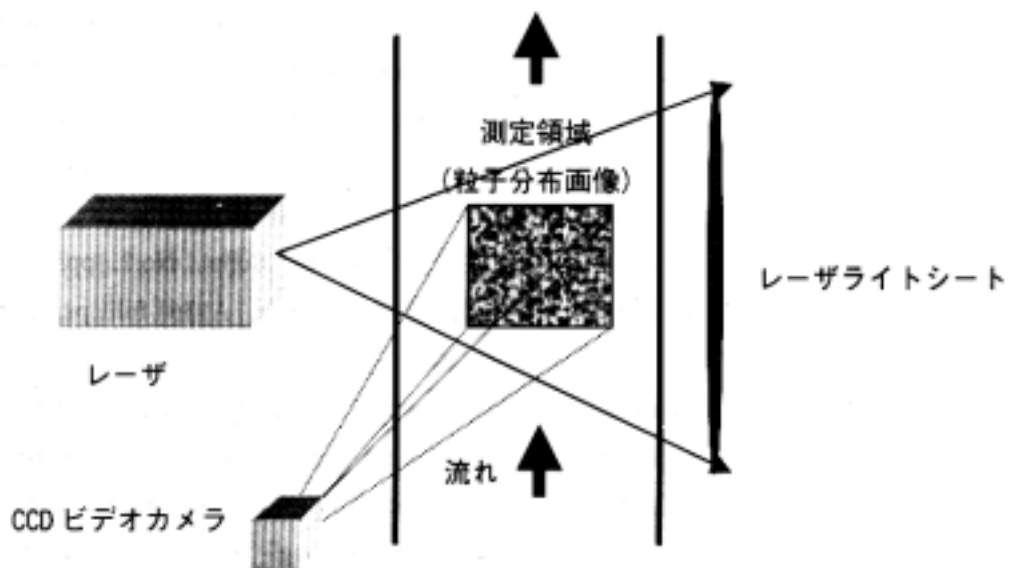
現在実施中の PIV による高速・高乱流域計測の一端を紹介しながら、PIV 計測法の特徴と有効性を示したが、筆者らも緒に就いたばかりで、経験蓄積の必要性を痛感している。この数年で PIV システムは汎用化に向けて画期的に変化した感がある。今後様々な流体計測に活用されていくものと思われる。さらに新しい 3 次元 PIV や粒子径同時計測システムなどの研究もすすめられており、CFD 検証技術としての有効性を考えれば流体計測での主役となる時代が到来しよう。

最後にこうした広範囲の流体計測分野に進出するであろうパルス YAG レーザの危険性も指摘しておきたい。アルゴンレーザー等のガスレーザーに比べ、ジャイアントパルス発振の YAG レーザははるかに“目”にとって危険であり、使用にあたっては正しい防具の着用、環境整備、レーザー保守等を考慮した新たな実験スタイルを検討する必要がある。

## 参考文献

1. J. Kompenhans and R.Höcker, "Application of

- Particle Image Velocimetry to High Speed Flows", von Karman Institute for Fluid Dynamics Lecture Series 1988-06: Particle Image Velocimetry, Brussels, Belgium, March 21-25,1988.
2. M.Raffel and J.Kompenhans, "PIV measurements of unsteady transonic flow fields above a NACA 0012 airfoil", SPIE Vol.2052 Laser Anemometry Advances and Applications(1993), pp.527-534.
  3. W.M. Humphreys and S.M.Bartram, "A Survey of Particle Image Velocimetry Applications in Langley Aerospace Facilities", 31st Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, January 11-14,1993, AIAA 93-0411.
  4. L.M.Lourenco and A.Krothapal, "Application of "On-Line" Particle Image Velocimetry to High Speed Flows", SPIE Vol.2052 Laser Anemometry Advances and Applications (1993), pp.683-689.
  5. M.Raffel, et al., "Velocity Measurement of Compressible Air Flow Utilizing a High-Speed Video Camera", Experiments in Fluids 18(1995), pp.204-206.
  6. W.T.Lai, "Recent Developments in PIV for Fluid Flow Research", Osaka Symposium 1995.
  7. W.T.Lai, "Particle Image Velocimetry: A New Approach in Experimental Fluid Research", Three-Dimensional Velocity and Vorticity Measuring and Image Analysis Techniques, Edited by Th.Dracos, Kluwer Academic Publishers, Ercoftac Series Vol.4, pp.61-92.
  8. D.R.McCluskey and E.Hayes, "Real-Time Signal Processing in Particle Image Velocimetry", Three-Dimensional Velocity and Vorticity Measuring and Image Analysis Techniques, Edited by Th.Dracos, Kluwer Academic Publishers, Ercoftac Series Vol.4, pp.93-112.
  9. K.Suzuki and K.Shimodaira, "The Combustion Performance of Methane-Fueled Ram Combustor", 11th ISABE, 1993, pp.811-821.
  10. K.Suzuki, et al., "High Combustion Efficiency and NOx Reduction by 2-Stage Combustion in Methane-Fueled Ram Combustor", International Gas Turbine Congress, Yokohama,1995, pp.359-366.
  11. J.Guezet, et al., "PIV Measurements of High Speed Air Flow in the Wake of a Flameholder", 可視化情報学会三重講演会 ('98 三重) 講演論文集 (Vol. 18, Suppl. No.2, pp31-32) 及び CD-ROM 版 (Vsj-mie, A136 (full paper p7)), 1998 年 9 月。
  12. J.Guezet, et al., "PIV Measurements of Ram Flameholder Wake-Flow with Combustion", International Conference on Optical Technology and Image Processing in Fluid, Thermal, and Combustion,7-9 Dec., Proceedings(pp242-243) & CD-ROM(Vsj-spie98, AB017(full paper p11)), 1998.
  13. J.Guezet, et al., "Determination of Water Flow Velocity around Ram Flameholder by PIV", 可視化情報学会沖縄講演会講演論文集 (Vol.17, Suppl. No.2, pp.51-54), 1997 年 10 月。



- ① 流体中に微粒子を混入 (シーディング)
- ② レーザライトシート照射
- ③ CCD ビデオカメラで微粒子による散乱光撮影 (フィールドの粒子分布画像 2 枚 1 組)
- ④ データ処理 (速度ベクトル計算、フィールドフローマップ表示)

図 1. PIV 原理図と計測フロー

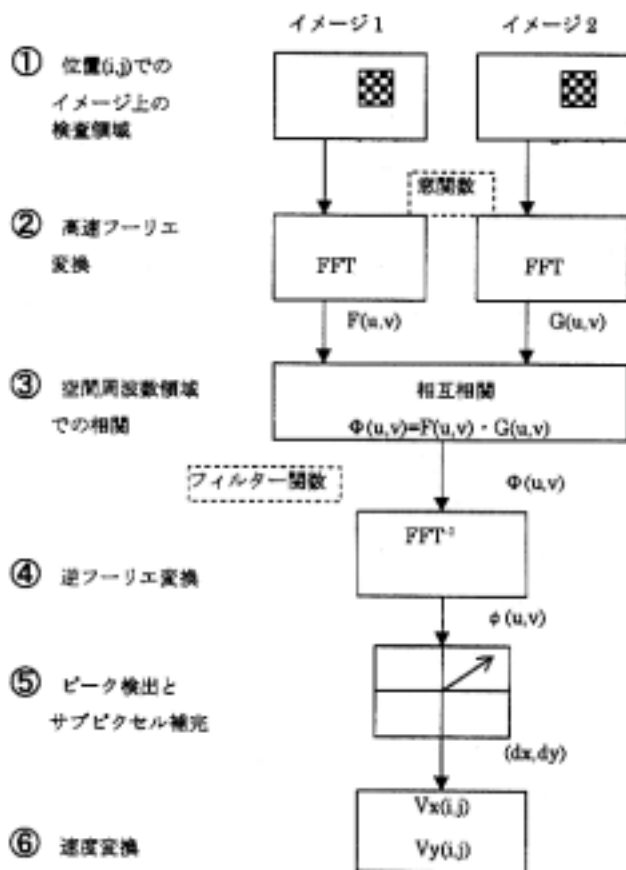


図 2. データ処理フロー例 (DANTEC社資料)

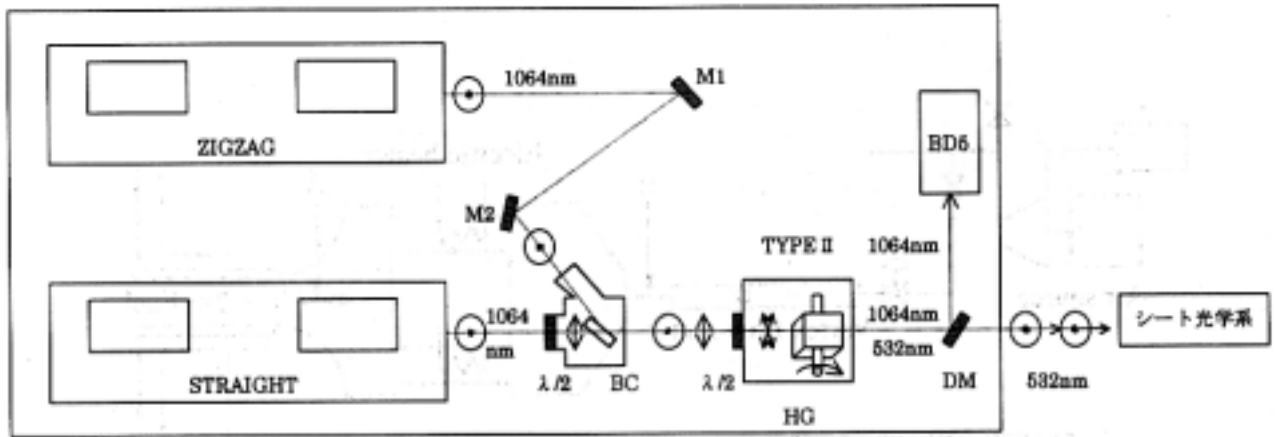


図3. PIV用パルスYAGレーザー構成例 (Spectra Physics社)

PIV用パルスYAGレーザー			
項目	タイプ	Mini-YAG	Hi-YAG
波長		532nm	
出力		~50mJ/パルス	~400mJ/パルス
繰り返し周波数		~30Hz	
パルス間隔		0.1 μs~100ms	
パルス巾		5~7ns	6~10ns
使用電力		100V	200V
ビーム径		2~3mm	6~8mm
レーザーヘッド寸法		150 <sup>W</sup> ×300 <sup>L</sup> ×70 <sup>H</sup>	500 <sup>W</sup> ×1200 <sup>L</sup> ×300 <sup>H</sup>

図4. 市販PIV用YAGレーザーの主な仕様例

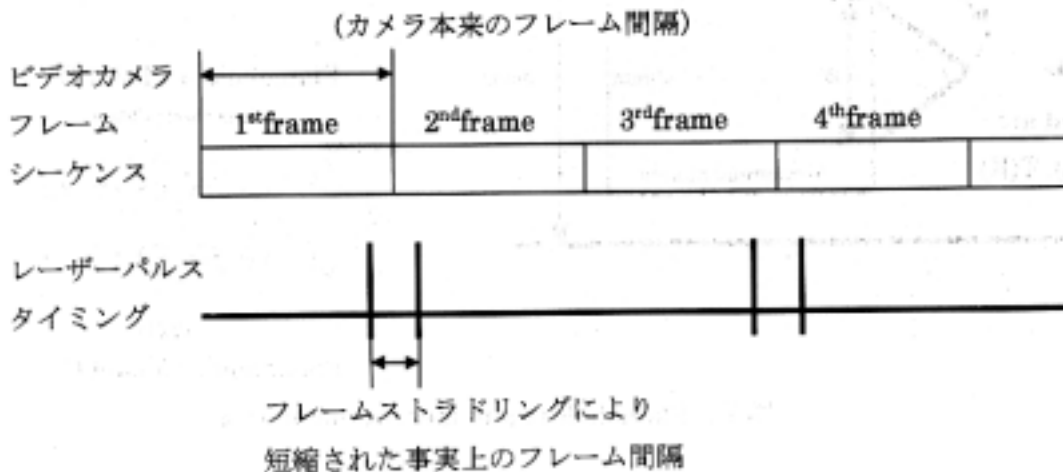


図5. クロスコリレーションビデオカメラのフレームストラドリング

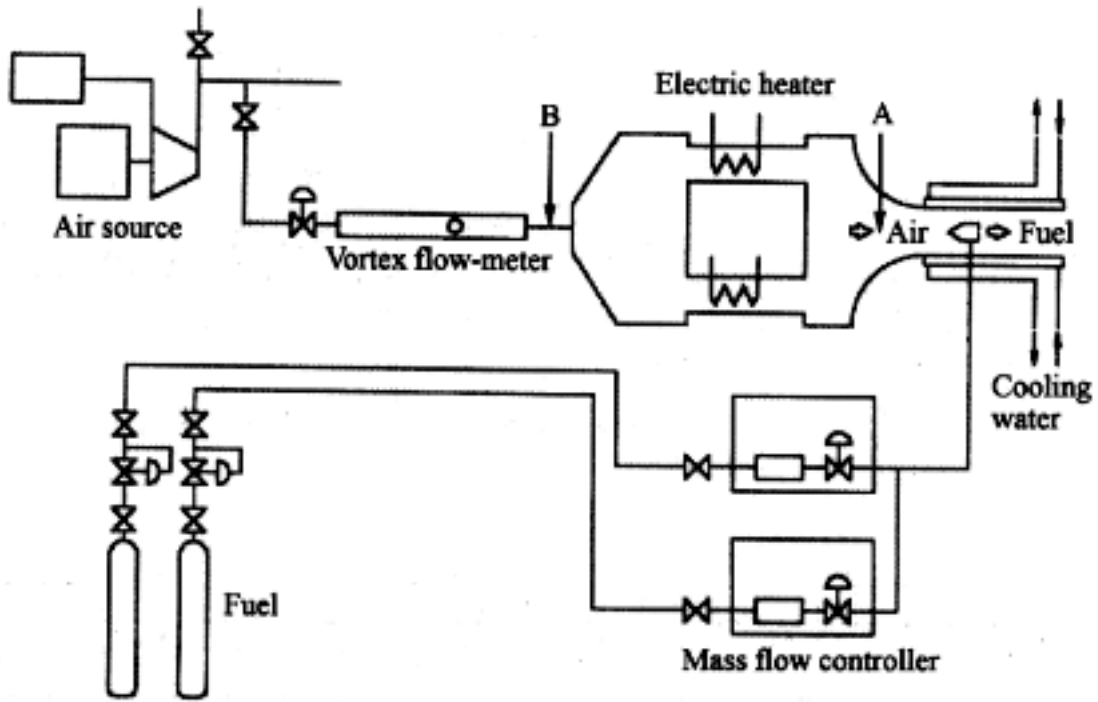


図 6. 実験装置

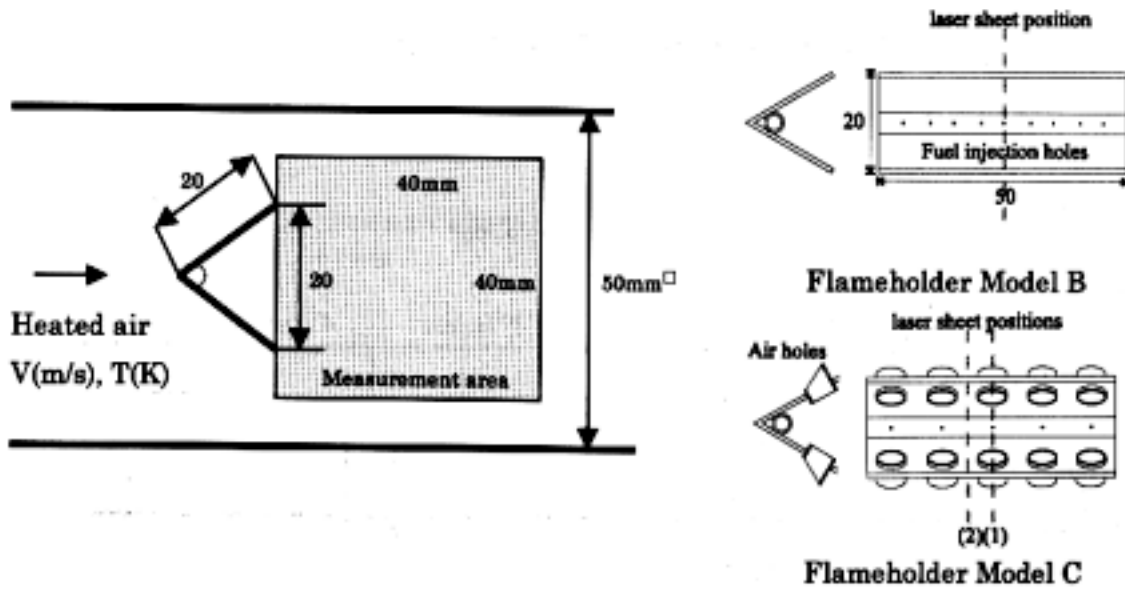


図 7. Flameholder and measurement area



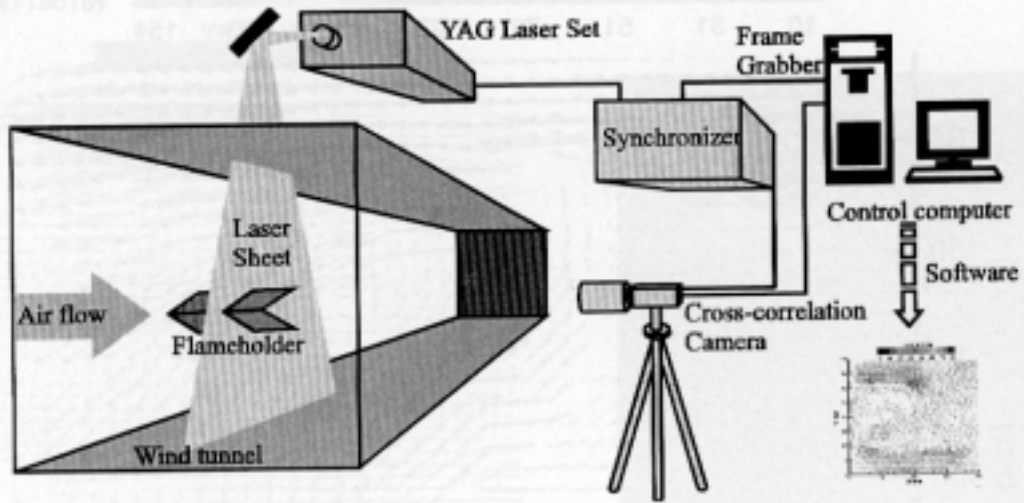


図8. Schematic of the PIV facility

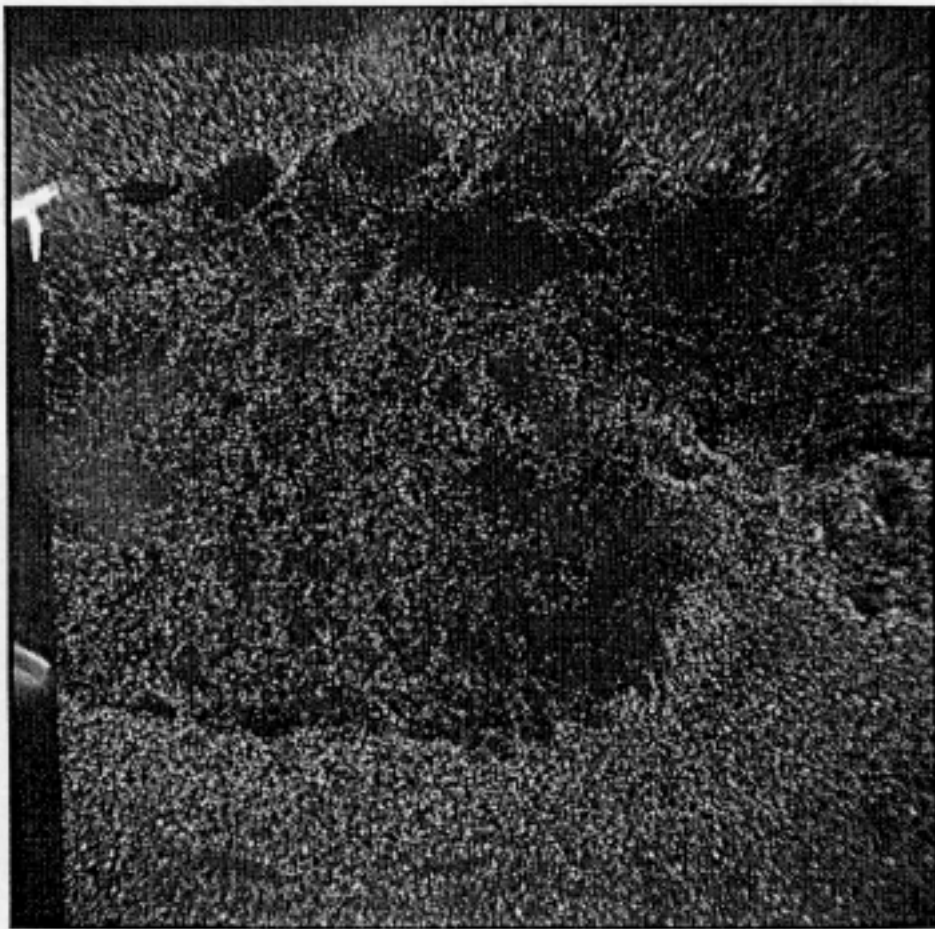


図9. Particle image in the wake of the flameholder model B ( $V=75\text{m/s}$ ,  $T=600\text{K}$ )

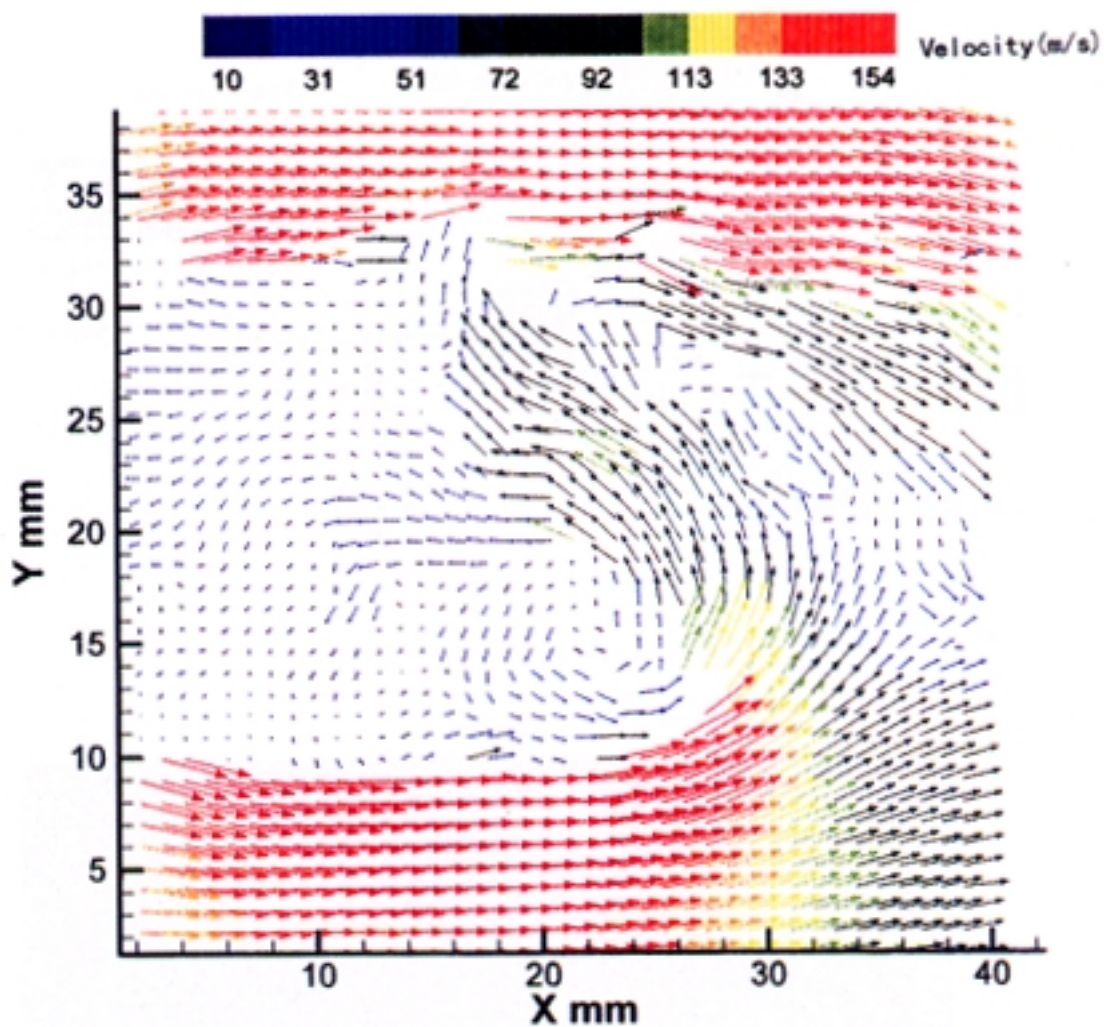


図 10. Velocity field in the wake of the flameholder model B (  $V=75\text{m/s}$  ,  $T=600\text{K}$  )

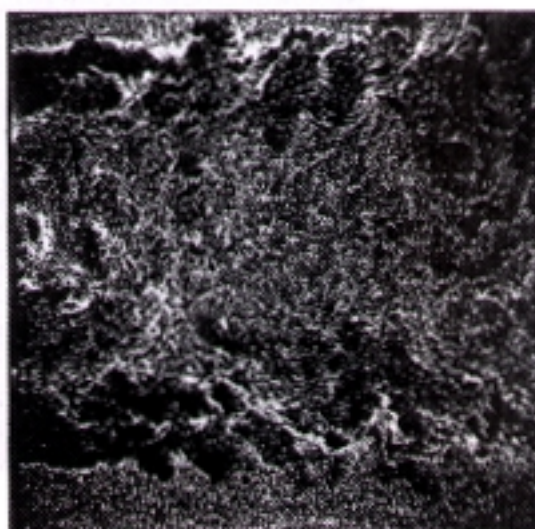
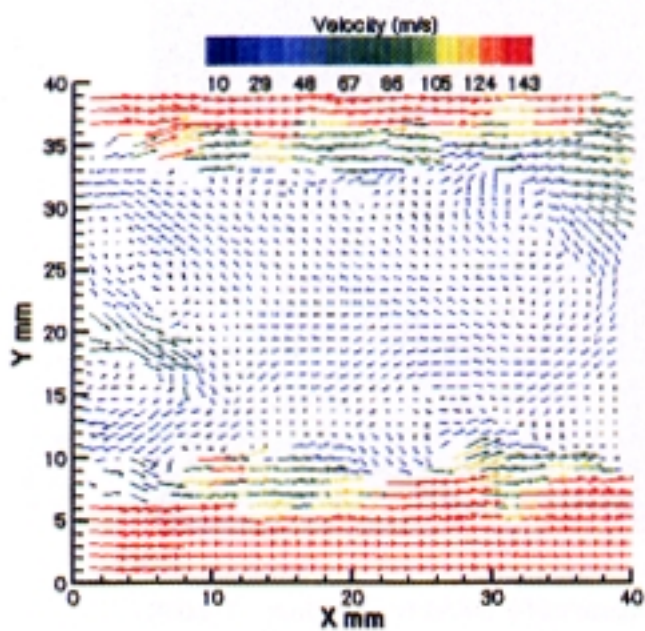


図 11. Velocity field and particle image in the wake of the flameholder model C  
(  $V=75\text{m/s}$  ,  $T=600\text{K}$  )



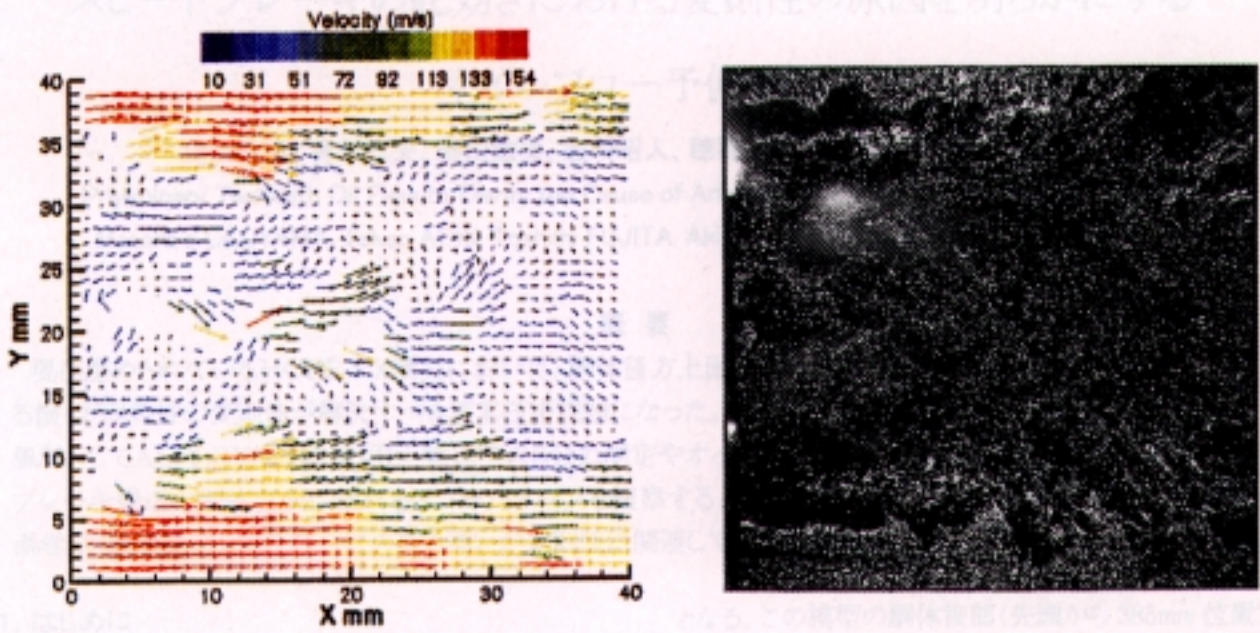


図 12. Velocity field and particle image in the wake of the flameholder model C with fuel injection (  $V=75\text{m/s}$  ,  $T=600\text{K}$  ,  $\phi=0.2$  )

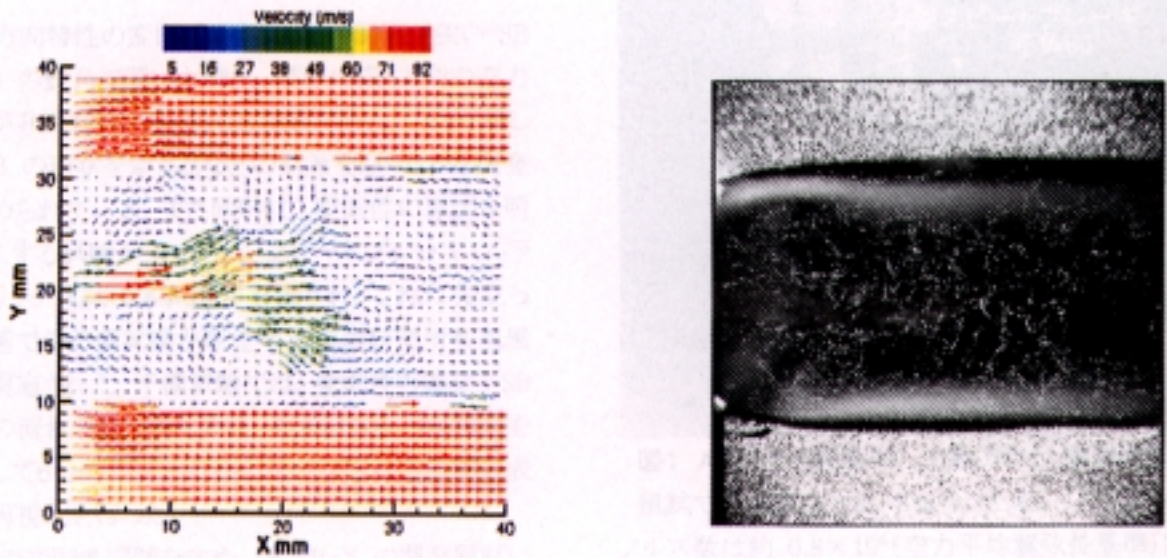


図 13. Velocity field and particle image in the wake of the flameholder model B with combustion (  $V=40\text{m/s}$  ,  $T=600\text{K}$  ,  $\phi=0.1$  , fuel=Hydrogen )

