

PIV を用いた拘束噴流の研究

野崎 勉・福原 稔・田畑 隆英・
津田 実・園田 裕和
(受理 平成 8 年 5 月 31 日)

A Study on Bounded Jet Flow by Particle Image Velocimetry

Tsutomu NOZAKI, Minoru FUKUHARA, Takahide TABATA,
Minoru TSUDA and Hirokazu SONODA

The Particle Image Velocimetry (PIV) is an excellent method from the point of view of being able to measure velocity at various points simultaneously. In this paper, PIV is applied to a bounded jet flow which is the result of interactions between free turbulence as a jet flow in the region far from the bounding plates and wall turbulence as a boundary layer flow in the region near the bounding plates. A domain of a correlation matrix, a time interval between two instants, and an image area are discussed to obtain a more correct velocity field of the bounded jet. As a result, the most probable of these parameters are obtained. By using these values, the velocity obtained by PIV agrees with that obtained by CTA (Constant Temperature Anemometer) and LDA (Laser Doppler Anemometer) qualitatively.

1. まえがき

矩形ノズルから二平行平板間に流出する噴流は拘束噴流と呼ばれ、流れは拘束平板の影響を受けて三次元的構造¹⁾となる。すなわち、自由乱流と壁面乱流との相互作用によって二次流れが生じ、下流に進むにしたがって、その発生する領域、発達する領域、そして減衰する領域が存在すること²⁾およびエクセス現象^{3)~6)}が明らかにされているが、その詳細については未だ不明な点が多い。

PIV (Particle Image Velocimetry, 粒子画像流速計)の一手法である濃度パターン相関法は、異なる時間でのトレーサ粒子の分布パターン対応付けの評価に相互相関係数を用いる画像処理流速計であり、数多くの研究機関で実用化研究^{7)~9)}が行われている。しかし著者らの知る限り、これらは閉空間の流れ場を計測の対象としており、さらに、水流での計測がほとんどであり、拘束噴流のような開空間の空気噴流に対しての適用例

は少ない。以上の点を考慮し、本研究では市販の濃度パターン相関法による画像解析システムを用いて拘束噴流の流れを計測することに加え、熱線流速計 (CTA) およびレーザードップラ流速計 (LDA) による中野⁶⁾の結果と比較することにより、定常解析における拘束噴流への濃度パターン相関法による画像処理流速計の適用性について検討した。調査する PIV のパラメータは、相関マトリックスの大きさ、2 時刻間の時間間隔および画像範囲の大きさを対象とし、その最適条件設定を目的とする。

2. 主な記号

b_0 : ノズル出口の半幅 m
 Cr : 相互相関係数
 F : 尖度
 f : 相関マトリックス内の各画素の輝度
 g : 捜査マトリックス内の各画素の輝度
 H : 平板から噴流中央面までの距離 m

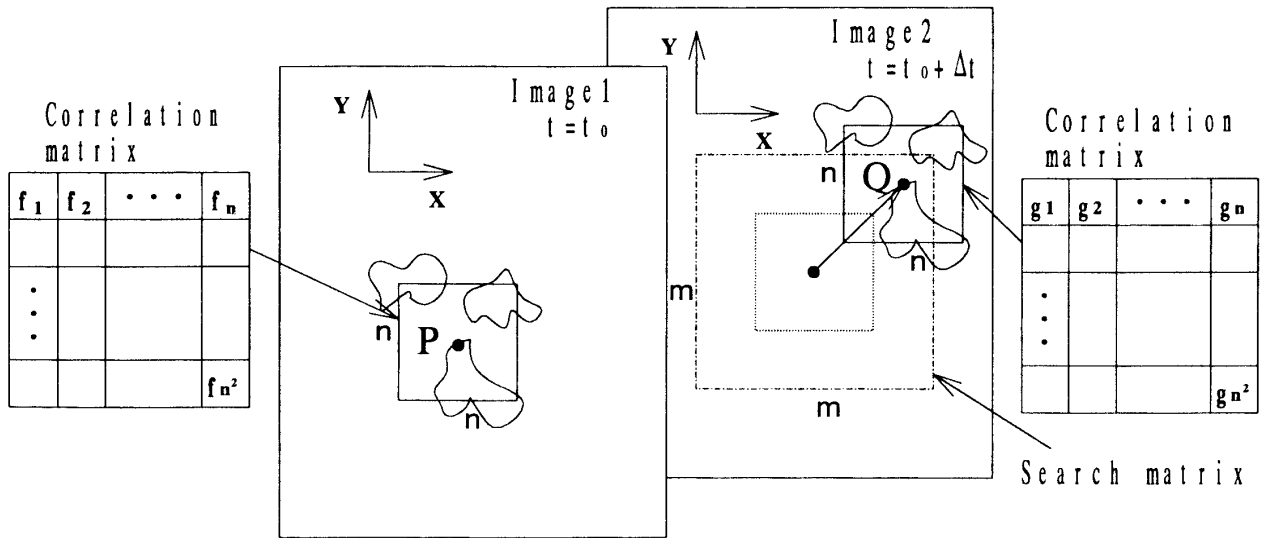


図1 濃度パターン相関法の原理

- m : 捜査マトリックスの大きさ (画素数)
- n : 相関マトリックスの大きさ (画素数)
- Re : レイノルズ数
- t : 時刻 sec
- U_0 : ノズル出口における一様速度 m/s
- U : X 軸方向の速度 m/s
- u' : X 軸方向の測度変動成分の rms 値 m/s
- X : 主流方向の座標 m
- Y : X 軸に直角な拡散方向の座標 m
- Z : X 軸, Y 軸に直角なスパン方向の座標 m
- ν : 動粘性係数 m^2/s

3. 実験装置および方法

図1に濃度パターン相関法の原理を示す。時刻 $t=t_0$ における画像1と $t=t_0+\Delta t$ における画像2の2枚の局所的な濃度パターンを有する画像を考える。画像1上にその移動距離を表すベクトルの始点となる点Pをとり、これを中心とする $n \times n$ の相関マトリックスを構成し、その輝度レベル f_{n^2} を各ピクセルごとに256階調で表す。次に、画像2上に同じ大きさ $n \times n$ の相関マトリックスを設定し、同様に輝度レベル g_{n^2} を添字が相関マトリックスに対応するように表す。二つの相関マトリックスの輝度分布 f, g についての相互相関係数 Cr は、

$$Cr = \frac{\sum fg - \frac{1}{n^2} \sum f \sum g}{\sqrt{\sum f^2 - \frac{1}{n^2} (\sum f)^2} \sqrt{\sum g^2 - \frac{1}{n^2} (\sum g)^2}} \quad (1)$$

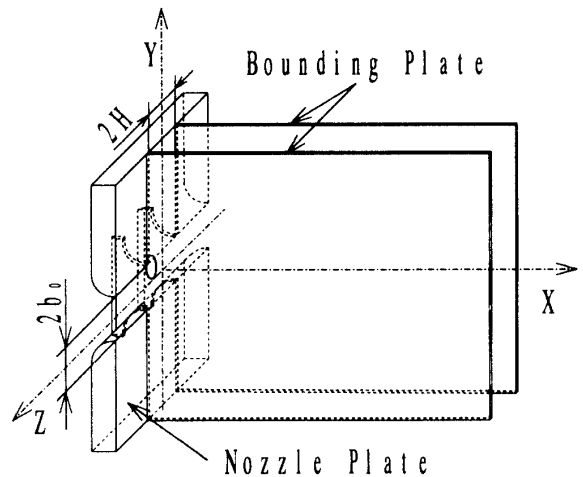


図2 実験装置測定部概略図

により求められる。パターンの類似性を評価するために点Pを中心とする $m \times m$ の捜査マトリックス内で相関マトリックスの中心を移動させ、各ピクセルごとの相互相関係数を計算する。相互相関係数の値が最も高かったピクセルをベクトルの終点とし、局所的濃度分布パターンの移動距離を求め速度を測定する。

図2に実験装置測定部の概略図を示す。作動流体である空気は、遠心送風機より風洞装置に導かれて整流され、形状が二方絞りのノズルからテストセクションに流出する。ノズル幅 $2b_0$ は 100 mm、拘束平板間の距離 $2H$ は 200 mm であり、ノズルアスペクト比 H/b_0 は 2 である。ノズル出口における流速は、流量バル

ブおよび遠心送風機の駆動用モータの回転数をインバータで制御することにより調整する。ノズル出口の一樣速度 U_0 を代表速度に、ノズル幅 $2b_0$ を代表長さにとると、レイノルズ数 Re は 5000 である。

図 3 に処理系システムの概要を示す。流れの可視化は、 $X-Y$ 断面（噴流中央面）、 $X-Z$ 断面および $Y-Z$ 断面（噴流直裁断面）において、煙トレーサ法およびレーザーライトシートを用いて行った。光源には、Ar 型レーザー発信器（日本電気 GLG3200）から発信されたレーザー光を光ファイバーに通し、シリンドリカルレンズにより厚さ 5 mm のスリット上にしたレーザーライトシートを用いた。トレーサ粒子には線香の煙を用い、送風機の吸込み口から注入した。

撮影にはハイスピードビデオカメラ（NAC HSV-500）を使用し、250 フィールド/sec でトレーサ画像をハイエイトビデオカセットレコーダ（SONY EVO-9650）に録画する。この記録された可視化画像はタイムベースコレクタ（I-DEN ITV-7）で時間軸を補正した後、フレームメモリーボード（ケイオー電子工業 IFM-512）に輝度情報として取り込み、各種画像処理を行って速度ベクトルを得る。フレームメモリーボードは 1 画面 512×480 ピクセルの画素数であり、256 階調の輝度分解能を有する。計算機には NEC PC-9821An を、画像処理には市販の濃度パターン相関法による画像解析システム Current PIV Ver.1.0 を用いた。画像処理におけるサンプリング回数は 1000 回とし、過誤ベクトルの削除を行わず、測定された全

てのデータから、
平均流速

$$U = \frac{\sum U_i}{i} \quad (2)$$

速度変動の rms 値

$$u' = \sqrt{\frac{\sum (U_i - U)^2}{i}} \quad (3)$$

および尖度

$$F = \frac{\sum (U_i - U)^4}{(u')^4} \quad (4)$$

を求めた。

4. 実験結果および考察

4.1 $X-Y$ 断面（噴流中央面）

4.1.1 可視化画像

図 4 は拘束噴流の $X-Y$ 断面（噴流中央面）における流れの可視化画像である。噴流は画像の左側に位置するノズルから流出し、周囲の流体とのせん断による渦を形成しながら下流へと流れていく。渦の輪郭では主流に巻き込まれた流体によって濃淡のある画像が得られるが、噴流主流部ではポテンシャルコア内でトレーサ粒子が均一に存在するためそれは得られない。すなわち、渦が巻くという情報よりも渦が下流へ移動するという情報が支配的であるため、現段階では $X-Y$ 断面に PIV を適用することは不可能である。

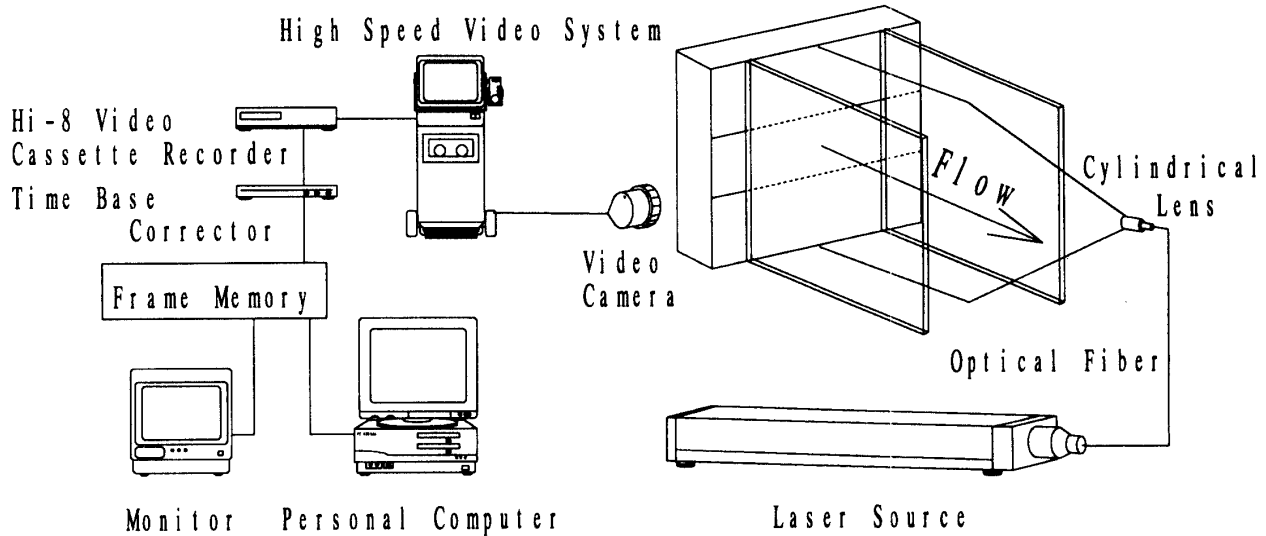


図 3 処理系システムの概要

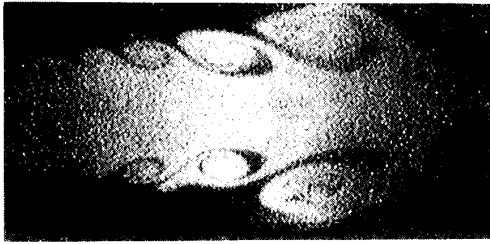


図4 X-Y断面の可視化画像

図5 X-Z断面 ($Y/b_0=1.0$) の可視化画像

4.2 X-Z断面

4.2.1 可視化画像

図5は、X-Z断面 ($Y/b_0=1.0$) の可視化画像であり、流れ方向は図4と同様に右向きである。流れは下流へ進むにしたがって壁近傍で渦が発達し、自由せん断層の領域を広げ、濃淡のあるトレーサ画像が得られる。この断面では拘束噴流特有のエクセス現象がみられる $X/b_0=6$ を中心とした可視化画像で PIV による流速測定を試み、撮影画像範囲の大きさ、相関マトリックスの大きさおよび2画像間の時間間隔の影響について調査する。

4.2.2 画像範囲の大きさの影響

X-Z断面 ($Y/b_0=1.0$) においてエクセス現象がみられる $X/b_0=6$ を中心とする $X/b_0=4\sim 8$, $5\sim 7$, $5.5\sim 6.5$ の3種類の画像範囲で画像処理を行い、測定精度について考察する。1画素の大きさはそれぞれ 0.46 mm/pixel , 0.28 mm/pixel , 0.17 mm/pixel である。

図6, 7, 8は画像処理によって求めた $X/b_0=6$, $Y/b_0=1.0$ の位置における平均速度 U 、速度変動の rms 値 u' 、および尖度 F であり、I型熱線流速計で測定した結果も併せて示す。PIVの各種パラメータは、速度分布の形状が熱線流速計による測定結果⁶⁾に近くようにそれぞれの画像範囲で最適化を行っている。

速度分布で拘束平板側の傾向を最もよく捉えられたのは、画像範囲 ($X/b_0=5\sim 7$) である。速度変動の

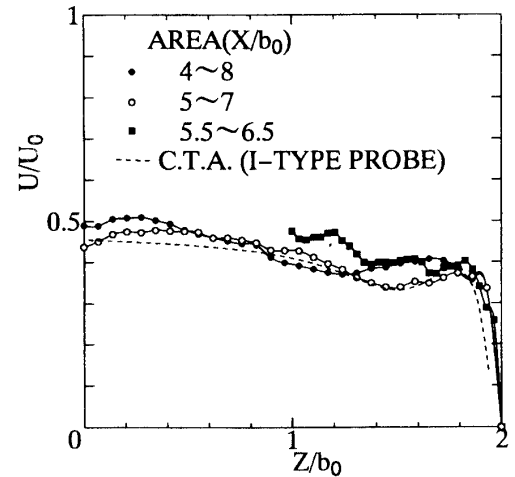


図6 速度分布 (画像範囲の影響)

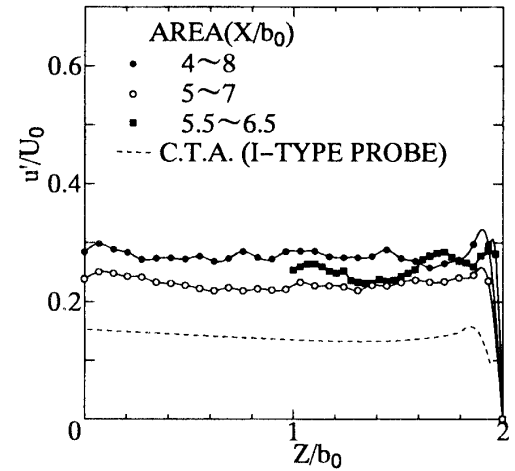


図7 速度変動の rms 値 (画像範囲の影響)

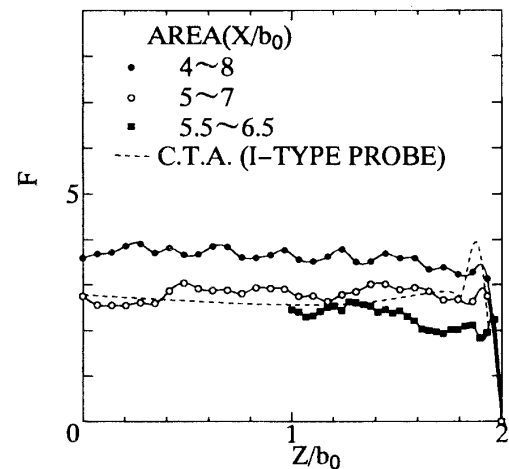


図8 尖度 (画像範囲の影響)

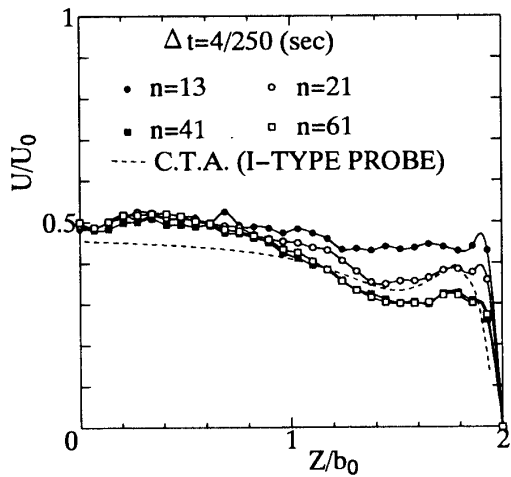


図9 速度分布 (相関マトリックスの影響)

rms 値は、一般に相関マトリックスによる影響が大きく、画像範囲による影響は明言できない。尖度は画像範囲が狭くなるにしたがって小さくなる傾向があり、過誤ベクトルが多くなることを示している。

したがって、広い撮影範囲の画像では大まかにしか現象を捉えることができず、画像範囲が狭いと複雑な流れを捉えることが可能となる反面、過誤ベクトルが多発する傾向がある。今後、画質改善および過誤ベクトルの除去により、特に狭い撮影範囲の可視化画像において計測精度が向上すると考えられる。

4. 2. 3 相関マトリックスの大きさの影響

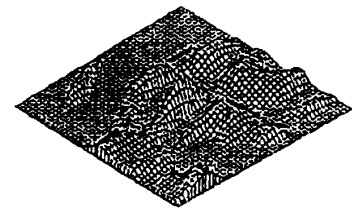
図9に相関マトリックスの大きさ n を変化させた場合の速度 U を示す。 n の大きさによる平均流速の相違が噴流中央側で見られないのに対し、拘束平板間でその影響が明確に見られる。これを図10, 11に示す



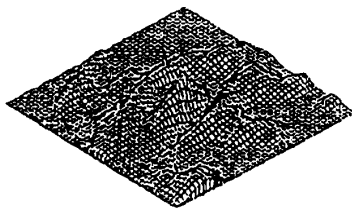
(a) $n=13$



(b) $n=21$

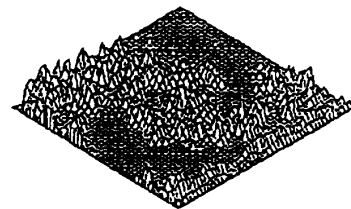


(c) $n=41$

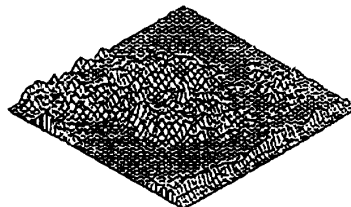


(d) $n=61$

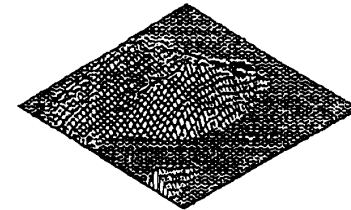
図10 自己相関係数分布 ($Z/b_0=1.00$)



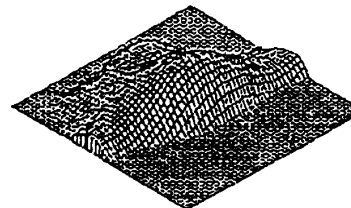
(a) $n=13$



(b) $n=21$



(c) $n=41$



(d) $n=61$

図11 自己相関係数分布 ($Z/b_0=1.76$)

噴流中心側と拘束平板側における自己相関係数の二次元分布で説明する。噴流中心側 ($Z/b_0=1.00$) では、中心の山の形状は変化しないが、 n が小さくなるとその周囲に多数の相関係数のピークが現れる。この山がいくつも現れるのは n の値が小さくなることにより空間情報が減少し、類似の濃度パターンが増大することを示しており、本来のピーク付近の相関係数にも影響を及ぼしている。拘束平板側 ($Z/b_0=1.76$) では、中心のピークの形状が n の値によって大きく異なり、 n が 21 以下で明確なピークが認められるようになる。これは相関マトリックスが大きすぎる場合、拘束平板近傍の複雑な流れの状態をうまく捉えることができなためと考えられる。以上の理由から計測する流れ場の状態により相関マトリックスの大きさを選定する必要がある。

4. 2. 4 時間間隔の影響

図12に2画像の時間間隔 Δt を変化させた場合の速度分布を示す。本研究において Δt による大きな相違は見られなかった。一般に時間間隔が大きすぎると濃度パターンが変化して相関係数が低下し誤対応の原因となり、短すぎると速度ベクトルの分解能が低くなる。

4. 3 Y-Z 断面 (噴流直裁断面)

4. 3. 1 可視化画像

図13に $X/b_0=10$ における噴流直裁断面の可視化画像を示す。濃度パターンに特徴ある領域が噴流中心部まで及び、拘束平板側で噴流幅が広がっていることが分かる。処理する画像の大きさは、図6に示す X-Z 断面の計測で熱線流速計の結果と定性的に一致する画像範囲 ($X/b_0=5\sim 7$, 0.28 mm/pixel) とする。噴流直裁断面は主流に垂直であるためトレーサの対応付けが困難になるが、本研究ではハイスピードカメラにより2画像間の時間間隔が非常に短く、レーザーライトシートの幅内に同一のトレーサが含まれる可能性が高いことからこの断面での計測を試みることにした。画像処理によって得られた二次流れのベクトル図は過去の実験結果⁶⁾と定性的に比較される。PIV パラメータは時間間隔 $\Delta t=2/250 \text{ sec}$ 、相関マトリックスの大きさは X-Z 断面で壁側の傾向を捉えられた $n=21$ を用いて、 $X/b_0=10$ の断面で計測を行う。

4. 3. 2 二次流れの計測

図14に $X/b_0=10$ における速度ベクトル図を示す。 $Y/b_0=0.8$ 以下では噴流の中心部であるため、可視化画像の濃淡パターンに特徴がなく誤対応が多い。 $Y/b_0=1.1$ 以上では拘束平板近傍の広い領域で拡散方向に

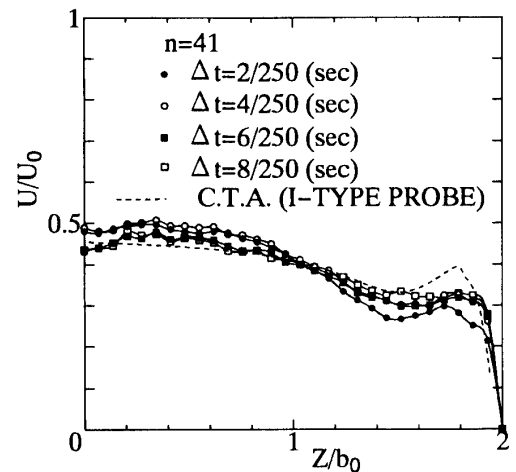


図12 速度分布 (2画像の時間間隔の影響)

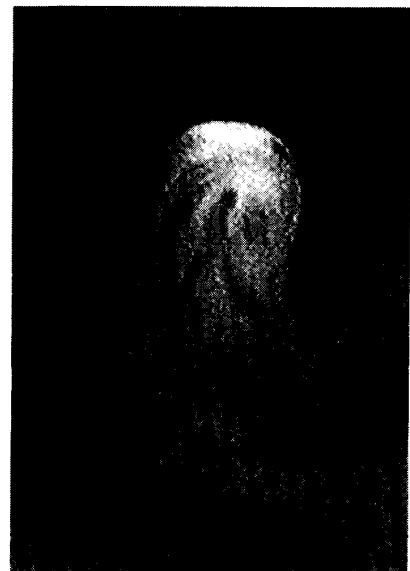


図13 Y-Z 断面 ($X/b_0=10$) の可視化画像

大きい成分をもつベクトルが見られる。この拘束平板付近での拡散方向への流れと噴流中央部でのエントレイメント流れの相互作用によって発生する渦を中野⁶⁾は捉えており、本研究ではその渦の一部を確認することができた。外部シーディングを行わなかったことによりエントレイメント部分にトレーサが存在しなかったため、噴流外部および噴流境界に存在する二次流れは明確には捉えることができなかった。

以上のことから、噴流直裁断面 ($X/b_0=10$) において画像処理により拘束噴流特有の二次流れの一部を定性的に捉えられる可能性があることが分かった。

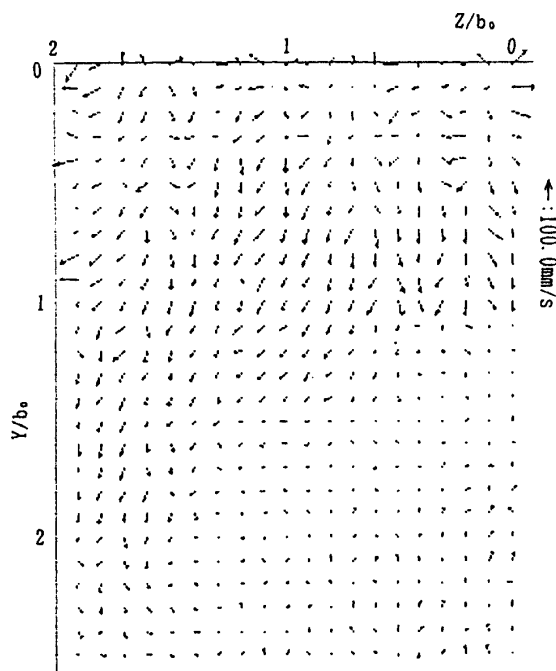


図14 Y-Z断面 ($X/b_0=10$) のベクトル図

5. むすび

ノズルアスペクト比2の拘束噴流の煙トレーサ法による可視化画像に、PIV（濃度パターン相関法）による画像処理流速計を適用することを試みた。 $X-Y$ 断面（噴流中央面）は濃淡のある画像を得ることができず計測不可能であったため、 $X-Z$ 断面 ($Y/b_0=1.0$) および $Y-Z$ 断面 ($X/b_0=10$ の噴流直裁断面) で計測を行い、熱線流速計ならびにレーザードップラ流速計による測定結果と比較して、以下の結論を得た。

- (1) $X-Z$ 断面の計測から、画像処理流速計を用いて流れを捉えるには、まず可視化画像範囲の大きさが重要である。さらに、PIVのパラメータである相関マトリックスの大きさの選定も併せて必要であり、特に拘束平板付近のような複雑な流れ場ではその影響を強く受ける。これらの値を最適化することにより熱線流速計による実験結果と定性的に一致する結果を得ることができた。
- (2) 主流に対して垂直である $Y-Z$ 断面（噴流直裁断面）の計測で得られた速度ベクトル図から、拘束噴流特有の二次流れの一部を確認することができた。

以上のことから PIV による計測で拘束噴流の流れを捉えることは可能であるといえる。しかし、最終的に画像処理流速計の特徴である非定常解析を行うには、本煙トレーサ法による流れの可視化画像は極めて微弱であり、濃度パターンの誤対応による過誤ベクトルの発生が多い。今後、トレーサならびにその注入法の検討、AOM (Acousto Optic Modulator) および CCD ビデオカメラの導入、さらに可視化光源の出力増大化とより明るいレンズの採用等により、可視化画像の画質改善を行った上で過誤ベクトルの削除を行い、計測精度を向上させる必要がある。

終わりに臨み、本実験に協力いただいた当時本学院生1年大重慎一郎氏ならびに本学部4年福井宏氏に深く感謝する。

文 献

- 1) Foss, J.F. and Jones, J.B., "Secondary Flow Effects in a Bounded Rectangular Jet", Trans. ASME, Ser. D, 90-2, (1968), 241.
- 2) Holdeman, J.D. and Foss, J.F., "The Initiation Development and Decay of the Secondary Flow in a Bounded Jet", Trans. ASME, J. Fluids Eng., 93-3 (1975), 342.
- 3) 野崎 勉・中島正弘・八田圭爾, 「初期乱れ強さを考慮した拘束噴流に関する研究 (ノズルアスペクト比が3の場合の実験)」, 機論, 50-452, B (1984), 959.
- 4) 中島正弘・野崎 勉・八田圭爾, 「初期乱れ強さを考慮した拘束噴流に関する研究 (第4報, アスペクト比2の場合の乱れ特性)」, 機論, 54-503, B (1988), 1922.
- 5) Nozaki, T., et al., FLOW VISUALIZATION IV, (1986), 495, Hemisphere.
- 6) 中野広文, 鹿児島大学修士論文, (1989).
- 7) 小林敏雄・他3名, 「二次元流れ場の実時間デジタル画像計測システムの開発」, 機論, 55-509, B (1989), 107.
- 8) 小関常雄・他3名, 「取鍋精錬炉の脱炭現象と模型実験における乱流計測」, 機講論Ⅲ, No.95-1, (1995), 249.
- 9) 岡本孝司, 「粒子パターン変形を考慮した粒子画像流速測定」, 機講論Ⅲ, No.95-1, (1995), 233.