ダブレット流 (吹出しと吸込みからなる同軸噴流) の拡散制御に関する研究* (PIV を用いた非定常流れ場の計測)

園田 裕和** , 野崎 勉*** , 福原 稔***,
米盛 敬****, 津田 実*****

Study on Diffusion Control of Doublet Flow Consisting of Injection and Suction Flow (Measurements of Unsteady Flow Field by using PIV)

Hirokazu SONODA, Tsutomu NOZAKI, Minoru FUKUHARA,
Kei YONEMORI and Minoru TSUDA

ABSTRACT

A doublet flow is the circular free jet added the annular suction flow mounted on the same axis by using a double coaxial pipe. This flow was proposed for the purpose of diffusion control of a circular free jet. The doublet flow was examined experimentally with respect to time mean and unsteady characteristics over the full flow field by using PIV. It was found from the time mean analysis that as the suction velocity increases, the area average value of the fluctuating velocity increases. From the unsteady analysis, it was found that the vortex structures, which have the vorticity that is nearly equal to that of a jet, exist when the suction velocity is high. The vortex structure behaves intermittently, and exists randomly to the radial directions. Thus, the cause of the increase of the fluctuating velocity as described above is clarified by showing the behaviors of these vortex structures.

Key words: Flow control, Particle Image Velocimetry, Unsteady analysis, Vortex structure

1. まえがき

噴流の拡散・混合を制御することは、工学的見地からその必要性が高い^{1)~4)}。著者らは、同軸二重円管を用いて円形自由噴流の外側に環状吸込流を設け、せん断層内の渦構造をこの吸込流により操作し、噴流の拡散・混合を制御することを提案した⁵⁾。この流れは噴流(吹出し流)と吸込流が極めて接近して存在することから、古典流体力学から引用してダブレット⁶⁾流と名付けた。このような流れ場をこれまでに熱線流速計(CTA)を用いて計測し、以下のような有用な結果を得た。すなわち、吹出し流速を一定とし、吸込流を増加させることにより、変動速度が拡散方向に増大する、つまり噴流の拡散効果が得られた。また、噴流中心軸に対称な2点にお

ける変動速度の相互相関係数を計測し、非対称な渦放出現象を見出すことができ、上述した変動速度の増大の要因を明らかにした。しかしながら、このような流動現象はCTAを用いた点計測により得られた結果であり、流れ場全領域についてダブレット流の非定常な拡散現象の解明を行うには瞬時の多点同時計測が必要である。

近年、トレーサ粒子により可視化された流れ場から、画像処理技術を用いて速度場の情報を得る方法、つまりPIV (Particle Image Velocimetry)^{7)~12)}が注目されている。この方法は従来の流速計では困難な多点同時計測が可能であることから、流れ場全領域の非定常計測に対して極めて有効な手法である。また流れ場の時間平均特性についての計測においても、CTAおよびレーザドップラー流速計(LDA)に代表されるトラバース計測に比べて、大幅な時間短縮が可能となる。このような利点から、PIVは多くの研究機関において流れ場の計測装置として用いられている。しかし、従来のPIVシステムでは比較的低速低乱流でなければ計測が困難であることが

* 原稿受付 1997年3月18日

** 正会員 鹿児島大学大学院

*** 正会員 鹿児島大学工学部

**** 鹿児島大学大学院

***** NEC九州

ら、そのほとんどが水流を測定の対象としており、比較的高速高乱流となる空気流に対しての適用例は少ない。

本報では、PIV のうち濃度パターン相関法を用い、空気を作動流体としたダブルット流の管出口端近傍の二次元流れ場の全領域について速度を計測し、吸込流を変化させることにより、半径方向への拡散の促進現象および渦構造の放出現象についてそれぞれ時間平均特性および非定常特性の解析を行った。

記号

r, z : 円筒座標

r_i : 吹出し管内半径 mm

S' : 変動速度の合成成分 ($= \sqrt{u_z'^2 + u_r'^2}$) m/s

t : 時間 sec

$\bar{U}_i$: 吹出し流の流路断面積平均値 m/s

$\bar{U}_s$: 吸込流の流路断面積平均値 m/s

$\bar{U}_z$: 平均流速の主流方向成分 m/s

u : 変動速度 m/s

ζ : 渦度 1/s

添字

$=$: 任意の領域における面積平均値

$\sim$: 時間平均値

2. 実験装置および方法

2.1 可視化装置および方法

Fig. 1 に可視化装置および画像処理装置の概略を示す。水平に設置された同軸二重円管の内管を吹出し口、外管を環状吸込口とした。吹出し管内半径は 23.5 mm、肉厚は 1.5 mm、吸込管内半径は 50 mm とし、作動流体として空気を用いた。ここで吹出し流には助走距離を十分に取り、管出口端において十分に発達した乱流の速度分布を有する噴流を用いた。座標は円筒座標系を用い、管出口端の中心を原点とし、噴流中心軸の方向（主流方向）に z 軸、半径方向（拡散方向）に r 軸をとる。実験装置の詳細については前報⁵⁾を参照いただきたい。

つぎに可視化画像を得る方法について示す。トレーサ粒子にはタルクパウダ（平均粒子径: 10 μm ）を使用し

た。可視化を行う前にトレーサ粒子が測定領域全体に存在するように、予め流れ場に影響を及ぼさない程度の閉空間内にトレーサ粒子を浮遊させる。その状態において、吹出し流中にトレーサ粒子を混入し、測定領域にトレーサ粒子の濃度パターンを形成した。空間的な統計データ量に違いが生じることはやむを得ないが、PIV 解析を行う際、測定領域全体にわたって、十分なトレーサ粒子数が存在することを確認している。可視化の手法にはレーザーライトシート (LLS) を使用し、その光源にはダブルパルス Nd:YAG レーザ（出力: 15 mJ/pulse, ビーム径: 2.5 mm, パルス幅: 5~7 nsec, 繰り返し周波数: 30 Hz）を用い、シリンドリカルレンズにより厚さ約 10 mm（実際、トレーサ粒子の濃度パターンが可視化される面は厚さ 10 mm のうちの中心付近の光強度が高く、薄い領域である）のシート状にして測定断面 (r - z 断面）に間欠照射した。

第 1 章で述べたとおり、PIV を用いた計測の殆どが作動流体として水を用いた低速低乱流の流れを計測対象としたものである。これは一般的に画像入力装置として NTSC 方式の CCD カメラを用いるため、そのフレームレート (1/30 秒) に依存した時間分解能しか得られず、トレーサ粒子の分布パターンの移動速度および変形速度が速い場合、分布パターンの 2 時刻間における対応付けが困難または不可能となるためである。そこで今回、作動流体として空気を用いた高速高乱流の流れを計測するために以下のような手法を用いた。すなわち、LLS の照射タイミングを CCD カメラから出力される映像信号に同期させ、フレーム画像を構成する 2 つのフィールド画像の境界付近、つまり第 1 フィールドの後半部分と第 2 フィールドの前半部分にそれぞれ LLS を照射した。その際、CCD カメラの光の蓄積はフィールド蓄積法とし、同一フレーム上に 2 時刻の濃度分布パターンを画像化した。上述の手法によりフレームレートに依存しない短い時間間隔の 2 時刻の画像が得られる。また光源としてパルスレーザを用いた場合、連続光レーザを AOM (音響光学セル) によりパルス化する場合と比べて高い出力

Fig.1 Schematics of visualization system and image processing system

が得られ、しかもパルス幅が5~7 nsec と短いことから、鮮明でしかもトレーサ粒子が流跡線とならず殆ど静止した状態の画像を得ることができた。本装置ではLLSの照射間隔を任意の時刻に設定でき、測定の対象とする流れ場の速度および画像の空間分解能を考慮し、本実験では0.7 msec と設定した。このLLSの照射は各フレームごとに連続的に行われる。このようにして得られたCCDカメラの出力画像はCRV（光ディスク）に転送、記録された。

2.2 画像処理装置および方法

上述の手順で得られた画像をフレームメモリーボードにより512×480ピクセルで256階調の画像としてA/D変換し、さらに第1フィールドと第2フィールドを分離することにより、解析に使用する2時刻の入力画像（前半の画像をF1、後半の画像をF2と呼ぶ）を作成した。画像の空間分解能は約0.25 mm/ピクセルである。このようにして得られた2時刻の画像に対し濃度相関係数の計算を行い速度ベクトルを算出した。解析手順について以下に示す。まず、F1に対し速度ベクトルの始点となる点Pをとり、これを中心とする $n \times n$ ピクセルの相関マトリックスを定義する。次にF2にF1の点Pと同じ位置を中心とする $m \times m$ ピクセルの捜査マトリックスを設定し、相関マトリックスをその中心Pが捜査マトリックス内に存在するように平行に逐次移動させ、各ピクセルごとに濃度相関係数 Cr を、

$$Cr = \frac{\sum_{i=1}^{n^2} f_i g_i - (1/n^2) \sum_{i=1}^{n^2} f_i \sum_{i=1}^{n^2} g_i}{\left\{ \sum_{i=1}^{n^2} f_i^2 - (1/n^2) \left(\sum_{i=1}^{n^2} f_i \right)^2 \right\}^{1/2} \left\{ \sum_{i=1}^{n^2} g_i^2 - (1/n^2) \left(\sum_{i=1}^{n^2} g_i \right)^2 \right\}^{1/2}} \quad (1)$$

により計算する。ここで、 f および g はF1およびF2にそれぞれ定義したマトリックス内における各ピクセルでの画像濃度を示す。得られた濃度相関係数分布からピーク位置を検出し、その点を点Pを始点とする速度ベクトルの終点とした。ここで、速度計測の精度の向上を図るため、ピーク位置周囲の濃度相関係数分布に対し統計的処理¹³⁾を施し、1ピクセル以下の移動量を算出した。今回測定領域全体において濃度相関係数 Cr がある値（ここでは便宜上0.55とした）以下のベクトルおよび平均流速から $\pm 3\sigma$ （ここで σ は標準偏差）以上離れた値を示すベクトルを過誤ベクトルと判定した。本報において相関マトリックスのサイズは、噴流中心軸上、せん断層付近および噴流外部の流れ場の代表的な数カ所を抽出しPIV解析を行った結果、 $n \geq 41$ ピクセルにおいて速度ベクトルの平均値が一定となり、また高い濃度相関係数 Cr の値が得られたため $n=41$ ピクセルと設定した。また捜査マトリックスのサイズは $m=51$ ピクセルと設定した。また、時間平均特性については1,000フレーム

の平均量として算出した。本実験での一連のPIVによる解析には、市販の画像処理流速計測システムCurrent PIV Ver.1.15 [日本カノマックス(株)]を用いた。

2.3 実験条件

流速は、吹出し流速 $\bar{U}_i$ を2.0 m/sに一定とし、吸込流速 $\bar{U}_s$ との流速比 $\bar{U}_s/\bar{U}_i$ を0, 0.37, 0.55, 0.65, 0.74, 0.79, 0.86, 0.92, 0.96および1.0の10通りに変化させた。ここで、 $\bar{U}_s$ および $\bar{U}_i$ は流路の断面積平均値を示す。測定領域は管出口端近傍に限定しているので、 $z/r_i \leq 5.0$ の主流方向の範囲とした。ここで、 r_i は吹出し管内半径である。ただし、 $0 < z/r_i < 0.5$ の範囲では、LLSが吹出し管および吸込管の影響により反射し、解析上過誤ベクトルが多く発生するため、この領域の結果は表示しない。

3. 実験結果および考察

3.1 PIVの測定精度

まず、PIVを用いて得られた噴流中心軸上における平均流速および変動速度の分布について、CTAを用いて得られた結果との比較検討を行い、PIVの測定精度について考察する。Fig. 2に示すように、流速比 $\bar{U}_s/\bar{U}_i$ は0および0.92の場合を例にとる。図中の横軸は z/r_i を、縦軸は平均流速の主流方向成分 $\bar{U}_z$ および変動速度の主流方向と拡散方向の合成成分 $S' (= \sqrt{\bar{u}_z^2 + \bar{u}_r^2})$ をそれぞれ $\bar{U}_i$ で無次元化した値を示す。 $\bar{U}_s/\bar{U}_i=0$ すなわち自由噴流の場合について比較する。 $\bar{U}_z$ の両者はほぼ一致しており、 S' はPIVによる値のほうがCTAによる値に比べ若干高い。流速比が大きい $\bar{U}_s/\bar{U}_i=0.92$ の場合には、 $\bar{U}_z$ および S' のいずれも両者に多少差異が生じている。このように流速比が大きくなると、前報⁵⁾で示したように円周方向への三次元性が強くなり、今回用いた二次元PIV計測では解析上誤差が生じやすくなる。また、瞬時に逆流を伴う流れ場が存在することから、

Fig.2 Comparison between the results of PIV and those of CTA ($r/r_i = 0$)

CTA 計測においても誤差が生じやすくなるため, 誤差の評価は容易でない. このような状況において, 本実験では水流に比べて計測が困難な空気流を測定対象とする中, 本論文の議論の範囲内では PIV の測定精度は十分であると考ええる.

3.2 時間平均特性

上述した測定精度を持つ PIV を用いて得られた時間平均特性の解析結果を示す. まず, 吹出し流と吸込流の関係性を明らかにするため, 平均流速の主流方向成分 $\bar{U}_z$ について調べた. $\bar{U}_i$ で無次元化した $\bar{U}_z$ の等高線図を, 例として $\bar{U}_s/\bar{U}_i = 0, 0.65$ および 0.92 についてそれぞれ Fig. 3 (a)~(c) に示す. ここで, 2.3 節で述べたように, 主流方向の測定領域は $0.5 \leq z/r_i \leq 5.0$ とした. また, 拡散方向の測定領域は流れの軸対称性を考慮し, 鉛直下方向のみ $0 \leq r/r_i \leq 3.0$ とした. $\bar{U}_s/\bar{U}_i = 0$ すなわち自由噴流の場合, セン断層の $r/r_i = 1.0$ 付近に速度勾配の大きい領域が存在し, 下流へ行くにつれその勾配は若干緩やかになる. $\bar{U}_s/\bar{U}_i = 0.65$ の場合には吸込管端のごく近傍に吸込流の存在が確認でき, 自由噴流の場合と比べて吹出し流の速度勾配は緩やかとなる. さらに流速比が大きい $\bar{U}_s/\bar{U}_i = 0.92$ の場合には, 吸込流がさらに増加する様子が観察でき, その影響を受けた吹出し流は下流まで到達できず, 速度勾配の大きい領域は管端近傍に存在することがわかる.

つぎに拡散の程度を明らかにするため, 変動速度の主流方向と拡散方向の合成成分 $S' (= \sqrt{u_z'^2 + u_r'^2})$ について

調べた. $\bar{U}_i$ で無次元化した S' の等高線図を Fig. 4 に示す. Fig. 4 (a)~(c) は Fig. 3 と同じ流速比の条件である. $\bar{U}_s/\bar{U}_i = 0$ の場合, 平均流速の等高線図 $\bar{U}_z$ において見られた速度勾配の大きい領域すなわち $r/r_i = 1.0$ 付近に, 変動速度の高い領域が存在する. $\bar{U}_s/\bar{U}_i = 0.65$ の場合においても, 速度勾配の大きい領域に変動速度の大きい領域が存在する. さらに流速比の大きい $\bar{U}_s/\bar{U}_i = 0.92$ の場合にも, 速度勾配の大きい領域すなわち管端近傍に, 変動速度の高い領域が存在する. よって, いずれの流速比においても速度勾配の大きい領域と変動速度の高い領域はほぼ対応している.

これらの変動速度の値を流速比の影響について定量的に評価するため, 任意の領域における変動速度 S' の面積平均値として,

$$\bar{S'} = \frac{\int S' dA}{\int dA} \quad (2)$$

が定義される. ここで, A は任意の領域の面積を示している. 本実験では $S'/\bar{U}_i \geq 0.1$ となる領域において解析を行うことにした. 各流速比の計算結果を Fig. 5 に示す. 図中の横軸は流速比 $\bar{U}_s/\bar{U}_i$ を, 縦軸は変動速度の面積平均値 $\bar{S'}$ を $\bar{U}_i$ で無次元化した値を示す. $\bar{U}_s/\bar{U}_i < 0.65$ の範囲では, 吸込流が増加するにつれ変動速度の面積平均値は緩やかに増加するが, $\bar{U}_s/\bar{U}_i \geq 0.65$ ではその値は急激に増大し, $\bar{U}_s/\bar{U}_i = 0.86$ において最大値をとる.

Fig.3 Contour maps of time mean axial velocity

Fig.4 Contour maps of fluctuating velocity

Fig.5 Area average values of fluctuating velocity

その値は $\overline{U}_s/\overline{U}_i = 0$ の場合に比べ約 1.7 倍も高くなる。さらに $\overline{U}_s/\overline{U}_i \geq 0.96$ では、吸込流が強すぎるため $\overline{S}/\overline{U}_i$ は極めて低い値を示す。このように吸込流が増加

するにつれ変動速度が増大し、拡散が促進されていることがわかる。

3.3 非定常特性

前報⁵⁾において熱線流速計を用いて渦構造の非定常性を示したが、これは点情報から得られた結果である。また、可視化画像で得られた空間的な渦構造の挙動から定量的な情報を得ることはできない。これらの問題を解決する手法が PIV 計測であり、以下にその非定常特性の解析結果を示す。まず、各流速比における可視化画像とその画像に基づく瞬時の渦度分布の解析結果をそれぞれ Fig.6 および Fig.7 に示す。図中(a)~(c)はそれぞれ $\overline{U}_s/\overline{U}_i = 0, 0.65$ および 0.92 の条件である。図中の渦度 ζ は $\overline{U}_i/r_i$ で無次元化してある。噴流中心軸に対する非対称性を調べるため、拡散方向の測定領域は鉛直上下方向に $0 \leq r/r_i \leq 2.5$ とした。Fig.6 に示す可視化画像から、流速比が大きくなると吹出し流が連続的に放出されず、しかも対称性を失う様子が観察できる。Fig.7 からわかるように、 $\overline{U}_s/\overline{U}_i = 0$ の場合、 $r/r_i = 1.0$ 付近において渦度の高い領域が下流まで連続して存在し、噴流中心軸に対する対称性も保たれている。 $\overline{U}_s/\overline{U}_i = 0.65$ の

Fig.6 Flow visualization photographs

Fig.7 Contour maps of instantaneous vorticity

Fig.8 Time sequence of instantaneous vorticity ($\bar{U}_s/\bar{U}_i = 0.92$)

場合, $z/r_i = 2.0$ 付近から下流まで自由噴流とは異なり若干連続性および対称性が失われてくる. $\bar{U}_s/\bar{U}_i = 0.92$ の場合, その現象はさらに顕著となるが, $\bar{U}_s/\bar{U}_i = 0$ と同程度の高い渦度を有する領域が存在することがわかる.

$\bar{U}_s/\bar{U}_i = 0.92$ の場合の非定常解析において観察された渦構造の挙動を調べるため, 時間的に変化した瞬時の渦度分布を Fig. 8 に示す. ここで, Fig. 8(a)~(c)は Fig. 7(c)を起点とした渦構造の挙動を 1/30 秒間隔で示している. Fig. 7(c)に示した $t = t_0$ sec において管出口端で既に非対称となった渦構造 (図中 A および B) が観察できる. 次の時間ステップの $t_1 = t_0 + 1/30$ sec および $t_2 = t_0 + 2/30$ sec では, 高い渦度を保持しながら拡散方向に放出される渦構造の様子が観察できる. さらに $t_3 = t_0 + 3/30$ sec では, 管出口端付近に次に放出される非対称な渦構造 (図中 C および D) が観察される.

さらに, 主流方向を $z/r_i = 2.0$ の位置に固定し, 時間的かつ空間的 (拡散方向) な渦の挙動を調べた. ここでは, 計測時間 3 秒 (フレーム数 90 個分) における結果を Fig. 9 に示す. ここで, Fig. 9(a)~(c)は Fig. 7 と同じ流速比の条件で, 図中の横軸は時間 t [sec] を, 縦軸は r/r_i を示す. また渦度 ξ は Fig. 7 および Fig. 8 と同様, $\bar{U}_i/r_i$ で無次元化してある. この分布は, Fig. 8 でわかるように CCD カメラのフレームレート (1/30 秒) の制約上, 時間的に連続的な現象を捉えることはできない. このように高速の流れ場において時間刻みが離散的ではあるが, 以下のような考察を行うことができる. $\bar{U}_s/\bar{U}_i = 0$ の場合, 常に $r/r_i = 1.0$ 付近に渦度の高い領域が存在し, 噴流中心軸に対する対称性も保たれ, 定常的な流れ場であることがわかる. $\bar{U}_s/\bar{U}_i = 0.65$ の場合, その分布は自由噴流と比較して若干間欠的となり, 噴流中心軸に対する対称性が失われてくる. 変動速度の高い $\bar{U}_s/\bar{U}_i = 0.92$ の場合, $\bar{U}_s/\bar{U}_i = 0.65$ の場合よりもさら

に間欠的でしかも拡散方向にランダムに存在することから, 非定常性の強い渦放出現象を示す. このように吸込流の増加に伴い非定常性を強める高い渦度を有した渦構造の挙動が観察できた. 以上より, 変動速度の増大の要因を非定常解析から明らかにすることができた.

4. 結論

円形自由噴流の周囲に環状の吸込流を加えたダブルット流 (作動流体: 空気) の拡散現象に着目し, PIV を用いて多点同時計測を行った. ダブルット流の管出口端近傍の二次元速度場の全領域において時間平均特性および非定常特性に及ぼす流速比の影響を調べた結果, 以下の結論を得た.

- (1) いずれの流速比においても, 平均流速の速度勾配の大きい領域と変動速度の高い領域はほぼ対応している.
- (2) それぞれの流速比における変動速度の面積平均値は $\bar{U}_s/\bar{U}_i \geq 0.65$ において急激に増加し, $\bar{U}_s/\bar{U}_i = 0.86$ において最大値をとり, $\bar{U}_s/\bar{U}_i \geq 0.96$ では吸込流が強すぎるため極めて低い値を示す. したがって, 拡散制御の観点から, 今回の条件において $\bar{U}_s/\bar{U}_i = 0.86$ の場合に最も拡散が促進されることがわかる.
- (3) 非定常特性の解析結果から, $\bar{U}_s/\bar{U}_i = 0$ の場合に存在する瞬時の渦度の高い値が, $\bar{U}_s/\bar{U}_i = 0.92$ の場合においても保持されていることがわかる.
- (4) $\bar{U}_s/\bar{U}_i = 0.92$ の場合の渦構造の時間的な変化を調べると, 管出口端のごく近傍においてすでに噴流中心軸に対し非対称となり, 時間の経過とともに拡散方向に放出される様子が観察できる.
- (5) 主流方向を $z/r_i = 2.0$ の位置に固定し, 時間的かつ空間的 (拡散方向) な渦の挙動を調べると, 変動速度の高い $\bar{U}_s/\bar{U}_i = 0.92$ の場合, その分布は間欠的となりしかも拡散方向にランダムに存在することから, 非定常性

Fig. 9 Time sequence of instantaneous vorticity distributions at $z/r_i = 2.0$

の強い渦放出現象を示すことができる。

よって、上述した非定常解析において観察される渦構造の挙動から、変動速度の増大の要因を明らかにすることができた。このように、PIV を用いた速度場の全領域について時間平均解析および非定常解析を行い、ダブレット流の非定常な拡散現象の解明に対し有用な知見を

得ることができ、PIV 計測が極めて有効であることを確認することができた。今後、吹出し管と吸込管の管径比、レイノルズ数および吹出し流の初期条件（出口速度分布および初期変動速度）等の影響について PIV 解析を行う予定である。

終わりに臨み、PIV を用いた計測を行うにあたり新日本製鐵(株)津田宜久氏より貴重なご助言を、また日本カノマックス(株)より YAG レーザの貸与を賜った。記して謝意を表す。また、本実験に協力をいただいた本学部 4 年生の上田和成および野口寛樹の両氏に謝意を表す。

参考文献

- 1) Crow, S. C. and Champagne, F. H.: Orderly structure in jet turbulence, *Jour. of Fluid Mechanics*, 48 (1971), 547-591.
- 2) Hussain, F. and Husain, H. S.: Elliptic jets. Part 1. Characteristics of unexcited and excited jets, *Jour. of Fluid Mechanics*, 208 (1989), 257-320.
- 3) 豊田国昭, 白浜芳朗, 小谷幸慈: 渦構造の操作による非円形噴流の制御に関する研究, *日本機械学会論文集 (B 編)*, 58-545 (1992), 7-13.
- 4) 栗間諒二, 宮本政英, 笠木伸英, 平田賢: 軸対称噴流の渦輪挙動に対する周期的じょう乱の効果, *日本機械学会論文集 (B 編)*, 60-574 (1994), 2007-2013.
- 5) 野崎勉, 園田裕和, 李輝, 福原稔, 南田純也: ダブレット流（吹出しと吸込みからなる同軸噴流）の拡散制御に関する研究, *日本機械学会論文集 (B 編)*, 62-598 (1996), 2208-2214.
- 6) 例えば, Milne-Thomson, L.M.: *Theoretical Hydrodynamics*, Macmillan & Co LTD (1962), 149-150.
- 7) Adamczyk, A. A. and Rimai, L.: Reconstruction of a 3-dimensional flow field from orthogonal views of seed track video images, *Experiments in Fluids*, 6 (1988), 380-386.
- 8) Hesselink, L.: Digital image processing in flow visualization, *Annual Reviews of Fluid Mechanics*, 20 (1988), 421-485.
- 9) 小林敏雄, 佐賀徹雄, 瀬川茂樹, 神田宏: 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, *日本機械学会論文集 (B 編)*, 55-509 (1989), 107-115.
- 10) Willert, C. E. and Gharib, M.: Digital particle image velocimetry, *Experiments in Fluids*, 10 (1991), 181-193.
- 11) Adrian, R. J.: Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics, *Annual Reviews of Fluid Mechanics*, 23 (1991), 261-304.
- 12) 佐田豊, 佐藤一穂, 笠木伸英, 高村則之: 3 次元画像処理流速計による乱流気流計測, *日本機械学会論文集 (B 編)*, 60-571 (1994), 865-871.
- 13) 津田宜久, 小関常雄, 小林敏雄, 佐賀徹雄: 濃度相関法による速度計測システムの開発, 第 7 回流れの計測大阪シンポジウム, 11-15 (1993), 83-87.