平面レーザ散乱法による円筒噴流の
連続二次元濃度分布測定*長谷川 達也^{*1}, 山口 馨起^{*1}
天野 哲也^{*2}, 鏡 味 督 博^{*3}Sequential Two-Dimensional Concentration
Measurement of a Cylindrical Jet
by Planar Laser Scattering MethodTatsuya HASEGAWA, Shigeki YAMAGUCHI,
Tetsuya AMANO and Tokuhiko KAGAMI

Water vapor concentration of a cylindrical jet was visualized sequentially by the planar laser light scattering method and a high-speed two-dimensional detection system. The scattered light signal was amplified by about 20 % by adding fluorescent dye in the water vapor, and the vapor concentration was almost conserved in the visualized region of $z/d=5-10$. Two-dimensional distribution of the average concentration showed a trapezoid profile near the nozzle and a Gaussian profile in the downstream region. The distribution of fluctuation in intensity showed two peaks in the mixing region. The temporal behavior of the concentration distributions indicated that large three-dimensional eddies existed in the jet, and that entrainment of the ambient gas occurred due to the eddies.

Key Words: Flow Visualization, Digital Image Processing, Laser, Jet, Mass Transfer, Turbulent Mixing, Light Scattering

1. 結 言

平面レーザ光を用いた濃度分布測定法は、(1)プローブを用いる一般的な測定法とは異なり、非接触であるために流れを乱さない、(2)実際にプローブを設置すると不都合が生じるような場所(内燃機関の燃焼室内など)でも測定が可能である、(3)多点同時測定が可能である、(4)時間および空間分解能が高い、などの特徴を持つ。また最近コンピュータ処理能力の向上により、可視化像から得られる多くの情報は、画像処理されるだけでなく、時間平均や相関といった統計量の定量的測定にも用いることができるようになってきた。

平面レーザ光を用いた乱流中の二次元濃度分布測定に関するこれまでの研究⁽¹⁾⁽²⁾は、時間平均または非定常な流れ場のある瞬間のみをとらえたもので、連続した非定常な現象を扱ってはいない。しかしながら、非定常な濃度分布の挙動を可視化することは、特に渦構造などの本質を解明するうえで重要であると思われる。

る。そこで本研究では、非定常流の中の濃度分布を比較的高速で連続して撮影する可視化システムを開発し、これを実際に円筒自由噴流に適用してその有効性を確認した。

本研究では、微小粒子からの散乱光および蛍光を利用して濃度分布の可視化を行っている。はじめに散乱光と蛍光を利用した場合のそれぞれの特徴を調べたうえで、性質のよく知られている円筒自由噴流について濃度分布測定を行い、平均濃度分布、変動濃度分布、濃度の保存性などについて検討した。

2. 記 号

$C(i, j)$: 相対濃度値

C_{total} : 軸対称を仮定した場合の z 断面における平均濃度値の総和

$\overline{C_{\text{total}}}$: C_{total} の平均値

$\bar{C}(i, j)$: 時間平均濃度分布

$\tilde{C}(i, j)$: 変動濃度分布

$C^*(i, j)$: k 番めの画像における濃度分布

$\bar{C}_{\text{max}}$: 時間平均濃度分布の z 断面における最大値

d : ノズル内径

I : レーザ光平面の強度分布

i : ノズル半径方向座標値

* 原稿受付 平成2年6月28日。

^{*1} 正員、名古屋工業大学 (〒466 名古屋市昭和区御器所町)。

^{*2} 学生員、名古屋工業大学大学院。

^{*3} 准員、旭硝子(株) (〒230 横浜市鶴見区末広町1-1)。

j : 噴流主流方向座標値
 k_1, k_2, k^* : 比例定数
 N : 画像データ数
 n : 噴霧の粒子数
 r : ノズル半径方向座標
 $r_{1/2\max}$: 半値幅
 Re : レイノルズ数
 n_c : フルオレセインナトリウム水溶液の濃度
 S : 散乱光および蛍光の信号値
 S_B : S の背景ノイズ信号値
 S'_B : S_c の背景ノイズ信号値
 S_c : 検定用信号値
 u : 流速
 $u_{\max}$: 流速の最大値
 z : 噴流主流方向座標
 η : 分光感度を含めた感度特性
 λ_1 : 蛍光の波長
 λ_2 : 散乱光の波長

3. 実験装置および方法

3.1 実験装置 図1に本研究で使用した実験装置の系統図を示す。噴流気体には窒素を用いた。窒素はマイクロフィルタを通して $0.7\mu\text{m}$ 以上の不純物を除去した後、混合容器内で超音波加湿器(SANYO CFK

-Q 200)により発生する霧と混合させ、真ちゅう製のノズル(内径 6mm)から噴流として流出させる。ノズル出口での半径方向の散乱光強度分布をレーザビームによって非定常線測定したところ、信号値は時間的にも空間的にも一定値となっていた。なお、発生する霧の粒径は理論上およそ $2.3\mu\text{m}$ となる⁽³⁾。

アルゴンイオンレーザ(NEC GLG 3300)より発生したレーザ光は音響光学変調器(NEC OD-8810)を通してパルス光とする。音響光学変調器は電圧を加えると超音波によって回折格子を構成しレーザ光が回折されるため、音響光学変調器に加える電圧の周期を調節することによりレーザ光をパルスのに光学系に送ることができる。音響光学変調器で回折されたレーザ光の中から強度の最も大きい一次光を使用するため、ピンホールで零次光も含めた他の回折光を遮断した。ピンホールを通過したレーザ光はビームコンプレッサにより $1/3$ の径に縮小された後、円筒レンズ(直径 4mm)によって縦方向に広げられ、平凸円筒レンズ(焦点距離 50mm)によりレーザ光平面を形成させる。レーザ光平面の厚さはおよそ 0.5mm となる。レーザ光の光軸の調整はフォトダイオードで検出することによって行った。

接写レンズ(Micro NIKKOR f2.8)と、信号を増感するためのイメージンテンシファイア(浜松ホトニ

図1 実験装置系統図

クス C 3100) を取付けた固体撮像素子カメラ (RETI CON MC 0128) をレーザ光平面に対して垂直な軸上に置いて撮影を行った。霧滴に蛍光色素を混入し、蛍光のみを検出する場合には、レンズ直前に長波長透過フィルタ (半減波長値 520 nm) を取付けた。固体撮像素子カメラは最大 128×128 画素で撮影でき、こま撮り速度は撮影に用いる画素数により $4 \sim 1\,000$ frames/s の範囲で可変である。ただし、イメージインテンシファイアの残光特性 (最大 2 ms) によりシステムとしてのこま撮り速度は最大 500 frames/s である。また、音響光学変調器を固体撮像素子カメラに同期させて作動させる際に、コントローラにより露光時間を $5 \sim 660 \mu\text{s}$ の範囲で設定することが可能である。一度に記録できる画像数は画素の大きさによって変化するが、 128×128 画素では 64 こまでである。画像は固体撮像素子カメラコントローラ (東京エレクトロン RS 9100) のメモリに一時的に保存され、光の強度により数値化され、ハードディスクに記録される。記録されたデータをパーソナルコンピュータで画像処理したうえで静止画面として作画し、その画像は必要に応じてカラービデオコピープロセッサで出力することができる。またデジタルスキャンコンバータを介して、ビデオカセットレコーダでこま撮りして動画処理することもできる。

3.2 平面レーザ光分布の検定 断面濃度の測定においては、測定結果を解析したり画像処理する場合に、光源からの光の強度が様でないことに注意しなければならない。光源としてレーザ光を使用した場合には、レーザ光自体がガウス分布形の強度を持っているため、レーザ光平面の中心付近で強度が大きくなる。そこで、あらかじめレーザ光平面の強度分布を測定しておき、測定結果を補正することが必要である。

測定を行う位置にパイレックス製の検定用セル (幅 $50 \text{ mm} \times$ 高さ $75 \text{ mm} \times$ 厚さ 15 mm) を置き、レーザ光の減衰の影響をなくすために、視野領域内で光の進行方向に信号値が変化しないよう濃度を調節したフルオレセインナトリウムの希薄水溶液を入れ、レーザ光平面がセルの中央を通過するようにする。レーザ平面内にあるフルオレセインナトリウムの希薄水溶液は黄緑色の蛍光を発する。セル内の希薄水溶液の濃度 n_c は均一に分布していると考えられるので、セル内の蛍光強度分布はレーザ光平面の強度分布であるとみなせる。したがって、セル内の蛍光強度分布のみを長波長透過フィルタを用いて露光時間 250 ms で測定し、補正用データとして用いた。

また、噴霧を通過することによってレーザ光が減衰することも考えられるが、ノズル出口での散乱光強度

を測定したところ光の減衰は認められなかった。

固体撮像素子カメラにおける視野領域のノズル半径方向座標を i 、主流方向座標を j とすると、点 (i, j) における信号値 $S(i, j)$ と検定で得られた補正用データの信号値 $S_c(i, j)$ を用いて、受光システムの感度特性も含めて補正された相対濃度値が得られる。

$$C(i, j) = \frac{S(i, j)}{S_c(i, j)} = \frac{k_1 \eta(i, j, \lambda_1 + \lambda_2) I(i, j) n(i, j)}{k_2 \eta(i, j, \lambda_1) I(i, j) n_c} = k^* n(i, j) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\eta(i, j, \lambda_1 + \lambda_2) / n(i, j, \lambda_1)$ は一定値とみなしている。なお、レーザ光のない場合にも発生する背景ノイズはあらかじめ $S(i, j)$ および $S_c(i, j)$ から差引いておく。また当然のことながら、散乱光の強度は濃度 (粒子数) と比例することを前提としている。

3.3 平均濃度分布と変動濃度分布 時間平均濃度分布 $\bar{C}$ 、変動濃度分布 $\bar{C}$ 、変動濃度分布 $\bar{C}$ は以下に示す式で求められる。

$$\bar{C}(i, j) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N C^k(i, j) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\bar{C}(i, j) = \left[\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \{C^k(i, j) - \bar{C}(i, j)\}^2 \right]^{1/2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで $C^k(i, j)$ は k 番めの画面における濃度分布である。 N は画面データ数である。

3.4 実験条件 レーザ光は波長 488 nm、発振器からの出力 1.2 W とした。レーザ光強度は光軸の調整に用いたフォトダイオードの出力をデジタルボルTMメータで測定した結果、実験の前後において全く変化がなかった。

視野はノズルの中心軸を通る断面で、ノズル出口から中心軸上 30 mm 下流の位置を基準に幅 $24 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ の領域とし、これを 80 画素 $\times$ 100 画素で撮影した。したがって、本実験の空間分解能は、0.3 mm である。また、蛍光を撮影する場合には、濃度 1.8 % のフルオレセインナトリウム溶液を使用して霧を発生させた。

座標系は視野領域内でノズルの半径方向を r 方向、噴流主流方向を z 方向とした。

4. 実験結果および考察

4.1 散乱光と蛍光の信号値の比較 検出する光が散乱光のみの場合、散乱光と蛍光を合せた場合、蛍光のみの場合について同じ実験条件において信号強度を比較したのが図 2 である。図 2 は、噴流中心断面の平均相対濃度の最大値 (信号の最大値) の流れ方向への変化を示しており、ノズル出口平均流速は 9.8 m/s ($Re = 3\,800$) である。平均濃度は露光時間 50 ms、こま

撮り速度 20 frames/s で連続撮影した 128 画面を用いて求めた。横軸はノズル出口からの距離 z をノズルの内径 d で無次元化した値 z/d をとり、縦軸は散乱光のみを検出した場合の $z/d=5$ の位置での値で正規化した。図 2 から、散乱光と蛍光を合せて測定したものは散乱光のみの場合と比較して信号値が 2 割程度大きくなること、また蛍光のみの場合には散乱光のみの場合に比べて 2 割程度強度が小さくなることからわかる。したがって、以降の実験では散乱光と蛍光の両方を用いて測定を行った。

4.2 濃度の保存性の検討 信号値の比較に用いた散乱光と蛍光を合せて撮影した場合のデータについて、噴流の広がり軸対称であると仮定し、 z 断面の濃度分布を台形公式により近似的に数値積分して濃度の保存性を調べた結果が図 3 である。縦軸は各 z 断面での積分値 C_{total} をその平均値 $\overline{C_{total}}$ で正規化してある。図 3 から、1 割程度のばらつきはあるものの、濃度はほぼ保存されていることがわかる。したがって、本実験の測定範囲ではトレーサ粒子の蒸発の影響はないと考えられる。

4.3 瞬間濃度分布 音響光学変調器によって露光時間を 200 μ s に設定し、こま撮り速度 500 frames/s で瞬間濃度分布を連続撮影した結果を図 4 に示す。それぞれの画像の時間間隔は 2 ms で、平滑化を行った後、平均濃度分布の最大値を 1 として、16 階調で濃淡処理を施してある。濃度分布の挙動を見ると単純な二次元的渦構造からは考えられない複雑な周囲気体の巻き込みや濃度の変化が生じており、大規模な三次元的渦構造が噴流を支配していることがわかる。また下流に行くにつれ、小さい渦に遷移して濃度がうすくなる様子もわかる。

瞬間濃度分布から式 (2), (3) により時間平均濃度分布 $\bar{C}$ 、変動分布 $\tilde{C}$ を求めたのが図 5(a), (b) である。図 5 中には $\bar{C}$, $\tilde{C}$ の分布を三次元的に表したものと、濃淡表示したもの両方が示されている。図 5(a) より、上流側では台形の分布が見られ、下流に行くにつれて拡散してガウス形分布となっていく様子がわかる。また、図 5(b) では $z/d=5 \sim 7.5$ の噴流境界にピークが見られ、下流に行くにつれてピークが減衰し全体に広がっていく様子がわかる。 $z/d=5 \sim 7.5$ においては、濃度の高い気体と周囲気体が交互に通過する大規模な渦構造が存在するため、このような変動値のピークがあらわれると考えられる。また、この実験結果は

と、濃淡表示したもの両方が示されている。図 5(a) より、上流側では台形の分布が見られ、下流に行くにつれて拡散してガウス形分布となっていく様子がわかる。また、図 5(b) では $z/d=5 \sim 7.5$ の噴流境界にピークが見られ、下流に行くにつれてピークが減衰し全体に広がっていく様子がわかる。 $z/d=5 \sim 7.5$ においては、濃度の高い気体と周囲気体が交互に通過する大規模な渦構造が存在するため、このような変動値のピークがあらわれると考えられる。また、この実験結果は

図 2 散乱光と蛍光の信号強度の比較

図 3 濃度の保存性

図 4 瞬間濃度分布の非定常挙動 ($Re=1900$, $5d \sim 10d$)

図 5 三次元表示と濃淡表示

図 6 平均濃度分布の相似性

Long らの砂糖粒子を用いた場合の実験結果⁽²⁾とほぼ一致している。図 6 は発達した噴流に遷移したと思われる $z/d=9, 10$ における平均濃度分布の相似性について調べたものである。横軸は半値幅 $r_{1/2 \max}$ 、縦軸は各 z 断面での中心軸上の最大濃度 $\bar{c}_{\max}$ で正規化してある。 $z/d=9, 10$ の平均濃度分布は、ほぼ一つの曲線上にのっており、相似性を示している。また Tollmien⁽⁴⁾ の速度分布にほぼ対応している。これはレーザ誘起蛍光法での実験結果⁽¹⁾と同様である。

5. 結 言

レーザ散乱法による連続二次元濃度分布測定システムを用いて、円筒噴流の非定常二次濃度分布の可視化を行い、次のような結果を得た。

- (1) 蛍光物質を混入することにより、散乱光の場合に比べて信号強度が 2 割程度向上する。
- (2) 本研究の測定範囲においては、霧の蒸発による濃度消失はなく、濃度の保存がほぼ成立する。
- (3) 濃度分布の時間挙動は、大規模な三次元的渦構造が噴流を支配しており、複雑な周囲気体の巻き込みや濃度の変化を生じさせていること、下流に行くにつれて小さい渦に遷移していくことを示した。
- (4) 平均濃度の台形分布からガウス形分布への遷移、混合領域における変動濃度の分布はよく知られた噴流の特徴を示した。

文 献

- (1) 長谷川・ほか 3 名, 機論, 55-519, B(1989), 3566.
- (2) Long, M. B., ほか 2 名, AIAA, J., 19-9(1981), 1151.
- (3) 東京総合技術センター編, 最新強力超音波技術, (1987), 255-273.
- (4) Schlichting, H., *Boundary-Layer Theory*, (1979), 749, McGraw-Hill.