

旋回噴霧における液滴径及び速度三成分の同時計測

Simultaneous Measurement of Size and 3D Velocity of Droplets in a spray issuing from Swirl nozzle

川橋 正昭^{1*}、座間 淑夫²、永久保 輝昭³、富永 慎一³

Masaaki Kawahashi¹, Yoshio Zama², Teruaki Nagakubo³, Shinichi Tominaga³

¹ 埼玉大学 工学部機械工学科

Department of Mechanical Engineering, Saitama University

² 埼玉大学 理工学研究科

Graduate School of Science and Engineering, Saitama University

³ 日本ノズル精機株式会社

Nippon Nozzle Seiki Co., LTD

Abstract

A combined technique of simultaneous measurements of size and 3D velocity components of droplets in a spray has been proposed. This technique is based on the optical technique of glare points observation and stereoscopic PIV (SPIV). The size of droplet is obtained by the interval of the glare points generated by the direct reflection and the 1st refraction from the droplet illuminated by Nd:YAG laser (532nm). The 3D velocity components of droplets are measured by using SPIV based on the images of distribution of the glare points. The optical arrangement for this simultaneous measurement has been devised and the feasibility and capability of the technique was confirmed by applying to size and velocity field measurements of a spray issuing from a swirl fuel nozzle being used in a gas turbine.

Key Words: Spray, Droplet size, Stereoscopic PIV method, Three-components of velocity, Optical technique, Glare points

1. 緒論

噴霧場を形成する際、噴霧液滴のサイズや挙動を把握することは重要である。特に内燃機関の燃焼器内

に形成される燃料噴霧においては、その噴霧構造が燃焼状態に大きく影響し、省エネルギー、排出ガス環境問題などに関連して、噴霧場の定量的評価が重要である。これまで噴霧場解析については多くの研究がなされており、様々な計測技術が提案されている。しかし、燃料噴霧場は通常液滴数密度が高いことや、旋回成分や周囲空気によるエンタレイメントのため

* 〒338-8570 さいたま市桜区下大久保 2 5 5

電話：048-858-3425 FAX：048-858-3448

E-mail: mkawa@mech.saitama-u.ac.jp

微粒化された液滴は複雑かつ三次元的な挙動を示すことなどから、噴霧場の計測は容易でない。最近、前田ら[1][2][3]は、液滴数密度の高い軸対称噴霧に対してレーザ干渉画像法[4]を用いた液滴径と液滴速度の二次元同時計測手法を提案し、実際の噴霧場計測に適用して良い結果を得ている。液滴径及び液滴の三次元計測手法としては、加藤ら[5][6]によるステレオ画像法を用いた粒子径・速度の同時計測法が提案されている。この手法では、粒子輪郭を補間により検出するため粒径、および粒子速度の起点の決定に仮定が含まれ、それらの精度が空間解像度に依存することなどの問題点が含まれている。そこで本研究では、実用的な三次元噴霧場実験解析法の開発を目的として、平行レーザ光で照明された噴霧液滴の散乱光特性を利用して得られる画像の解析から液滴径を求め、さらにステレオスコピック PIV (SPIV) を適用して速度三成分を同時に計測する手法を提案する。

透明な球形粒子が平行光で照明されたときの粒子散乱光の直接反射光および粒子内部を通過した1次屈折光をレンズ系で集光すると、像面で分離した輝点对(Glare Points)像が得られる。この輝点对の間隔には粒子径の情報が含まれている[7]。本研究では、輝点对の間隔から粒子径を求める関係式を導出し、得られた画像の輝点对間隔を求めて粒子径を計測し、同時にステレオビュー輝点对分布画像に SPIV 法適用して速度三成分を同時に計測する複合計測手法を提案する。

この手法の精度検証のために粒径が既知であるシリカ粒子を用いてその精度が評価され、ガスタービン用の渦巻き噴射弁によって形成される旋回噴霧を対象に計測を行い、本計測手法の実用性の検討を行った。その結果、本手法が三次元噴霧場の解析に有効であることが確認された。

2. 計測原理

透明で球形と仮定される噴霧液滴が平行光で照明されたときの粒子散乱光の直接反射光と1次屈折光に対して、結像系により像面に輝点对を得る幾何光学系が図1に示されている。

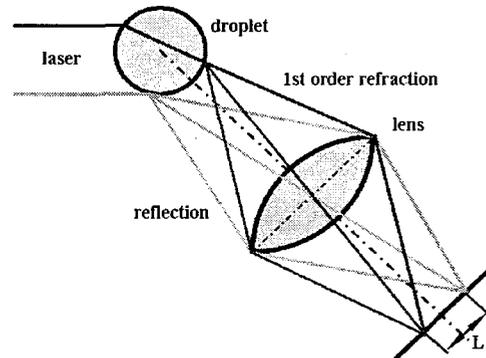


Fig.1 Optical pass of reflection and refraction ray

このような光学系において、受光角 θ としたとき像面で観察される輝点对の間隔 L から噴霧液滴径を求める関係式が、式(1)に示されている。

$$d = 2 \frac{L}{m} \left[\sin \left[\tan^{-1} \left(\frac{\sin \left(\frac{\theta}{2} \right)}{\cos \left(\frac{\theta}{2} \right) - \frac{1}{n}} \right) \right] + \cos \left(\frac{\theta}{2} \right) \right] \quad (1)$$

ここで、 d : 粒径、 m : 撮影倍率、 θ : 受光角、 n : 屈折率、 L : 輝点对間隔である。この関係は、一般的に幾何光学的近似が粒径パラメータ $a \gg 10$ から20であれば成り立つ[8]。したがって、光源として波長532nmのレーザを用いると、測定が可能な粒径の下限は、約 $2\mu\text{m}$ から $3\mu\text{m}$ となる。

輝点对における各輝点の輝度は、受光角によって異なる。計測では、同一輝度で輝点对が得られるように光学系が調整される。実験は、水噴霧を対象とすることから、幾何光学的近似を考慮した解析[9][10]から求められる反射光と屈折光の光強度の分布は図2のようになる。図よ

り、約70度付近で反射光および一次屈折光の両者の光強度が等しくなり、輝度の揃った輝点对が得られることから、実験光学系では、受光角が70度に設定される。

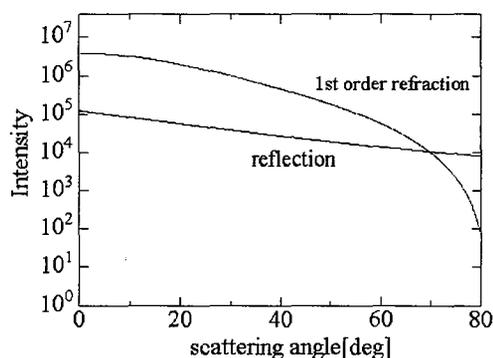


Fig.2 Intensity distribution of reflection and 1st order refraction ($\lambda=532\text{nm}$, $n=1.33$, $d=60\mu\text{m}$)

3. 粒径計測の精度評価

実体顕微鏡により粒径が $64\mu\text{m}$ と確認されているシリカ粒子（相対屈折率：2.25）に対して本計測手法を適用し、粒径計測の精度評価を行った。図3に実験装置の概略図を示した。

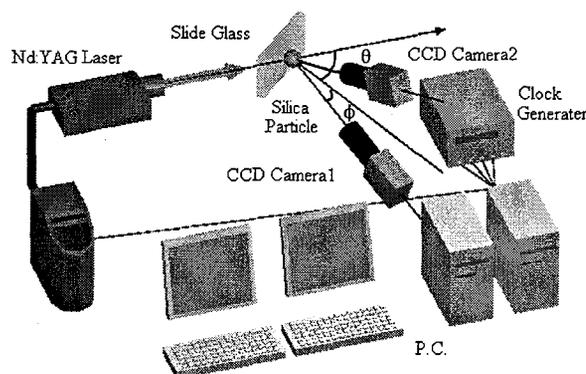


Fig.3 optical arrangement on verification of size measurement

分子間力によりスライドガラスに付着させたシリカ粒子に、光源となる Nd:YAG レーザをガラス面側から照射し、ステレオ角 ϕ をつけた二台のカメラをレーザに対してカメラ受光角 θ 方向に傾け Glare Points 像

を撮影する。本実験では、明瞭な Glare Points 像を取得するために、相対屈折率が 2.25 のシリカ粒子の場合、0 次反射光と 1 次屈折光の光強度が等しくなるような光散乱角度として、 $\theta=90^\circ$ で実験を行う。また、ステレオ角 ϕ は 20° に設定した。

本実験光学系で得られる Glare Points 像の内、カメラ 1 で観察された像を図 4 (a) に示す。得られた像の輝点間隔 L から式(1)により粒径を評価できるため、その間隔の決定方法として、自己相関法を適用した。図 4(b) に、自己相関値の分布が示されている。自己相関値の内、値の 0 次ピークと 1 次ピークの距離が輝点の距離に一致するため、それらの位置をサブピクセル精度で検出する。

これらの処理から得られた粒径は $65.5\mu\text{m}$ となり、本計測手法の精度は実粒径に対して約 2% と評価された。

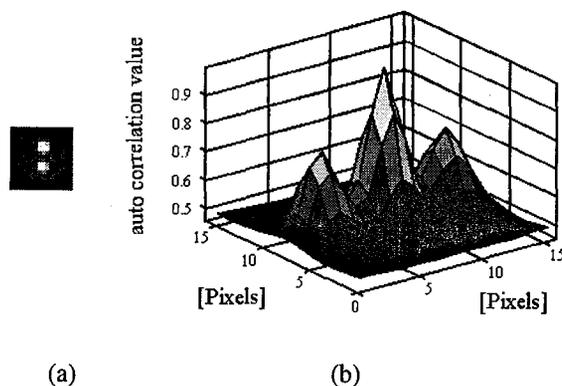


Fig.4 Doublet image of glare points (a) and distribution of auto-correlation value (b)

4. 実噴霧場への適用

図 5 に実験装置の概略図を示した。光源にはダブルパルス発振の Nd:YAG レーザ(波長: 532nm 、出力: 50mJ 、閃光時間: 5ns)をレーザヘッドに取り付けられたシート光光学系を用いて厚さ約 1mm にし、測定領域を光切断する。本計測では光学的手法および

ステレオ PIV 法を適用した複合計測法であるため 2 台の CCD カメラ(画素数 : 1008(H)×1016(V)Pixles) をシート光面に対して噴霧液滴からの反射光と屈折光の光強度が等しくなる $\theta=70$ 度、およびステレオ角 $\phi=20$ 度を設け配置する。

光源とカメラの同期には Clock Generator(DG535)用

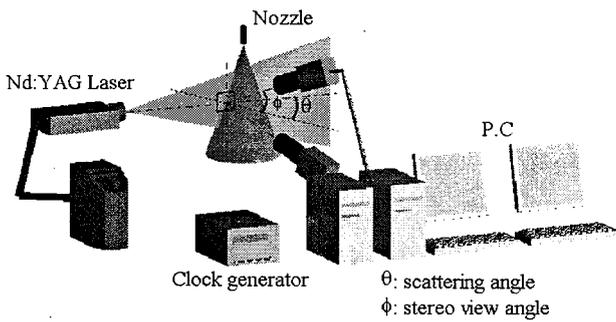


Fig.5 Experimental set-up

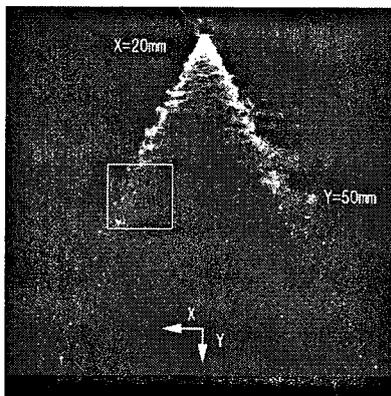


Fig.6 Test section

いた。噴霧は供試液体を水とし、噴孔圧力 1.0MPa で大気中に噴霧される。撮影された画像はデジタル画像として PC に保存される。二台のカメラで撮影された可視化画像から輝点对画像に自己相関法を用いて二点の距離 L を決定し、式 (1) から液滴径を求める。また、Doh[11]らによって提案されたカメラモデル式を適用したステレオ PIV 法により速度の三次元再構築を行う。本実験では噴孔から $x=20\text{mm}, y=50\text{mm}$ を

中心とする $20\text{mm} \times 20\text{mm}$ の領域を計測した(図 6)。

5. 結果および考察

図 7 に噴霧の可視化画像およびその一部を拡大した画像を示す。本研究で提案された光学系の配置によって液滴からの反射光と屈折光の輝点对像が撮影されることが確認できる。また、その像に式(1)を適用して、粒径計測が可能であることが確認される。

図 8 はステレオ PIV の結果で、ベクトルは $x-y$ 面

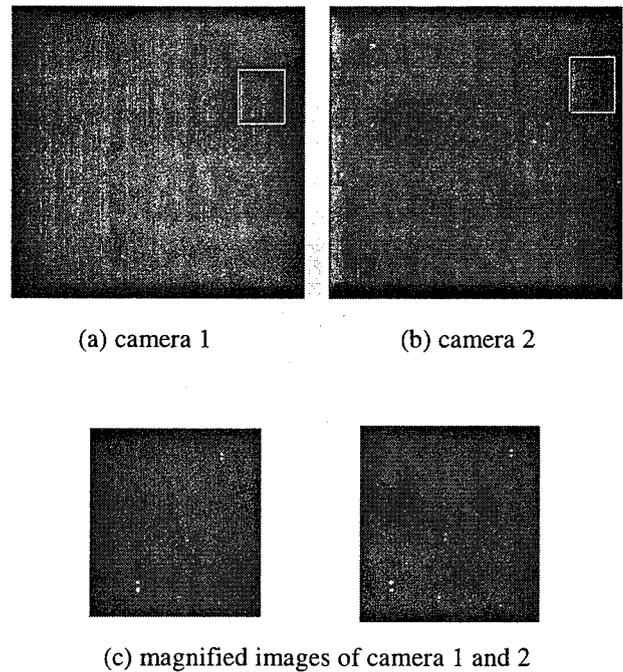


Fig.7 Images included glare points in test section by stereoscopic configuration and magnified images

内方向成分を、グレイレベルマップは奥行き方向の速度成分の大きさを表している。対象とする噴霧は右ねじ旋回であることから噴霧内部ではその方向の速度が確認できる。しかしながら、噴霧外の領域では逆の旋回成分が確認できる。これらの結果より、三次元性を有する噴霧構造が確認された。図 9 には、速度解析がなされた画像に含まれる液滴径の頻度分布が示されている。計測された領域では、 $80 \mu\text{m}$ を

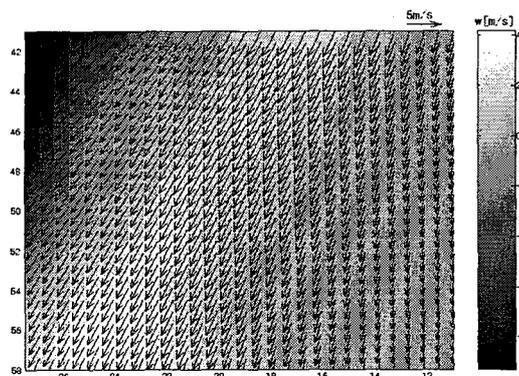


Fig.8 Three-components of velocity map in spray flow

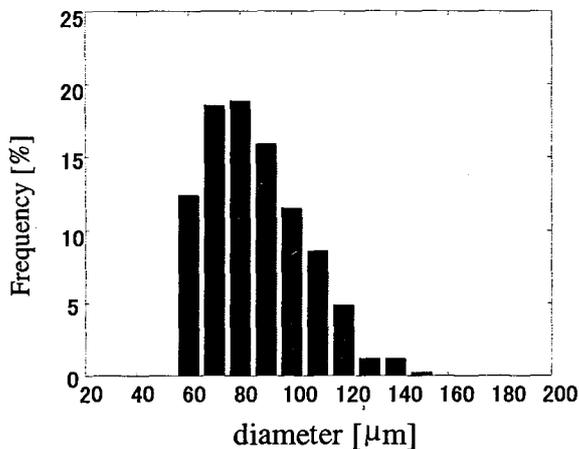


Fig. 9 Frequency of classified droplet size in test section

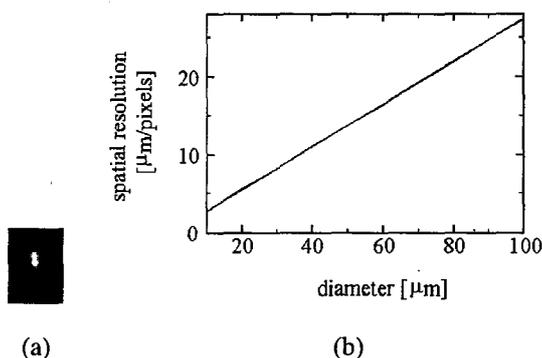


Fig.10 Image of overlapped glare points (a), and relation between spatial resolution and diameter of droplet (b).

中心径とする液滴径の分布が形成されていることが確認された。本計測手法では、撮像系の空間分解能

が不足している場合、図 10 (a) のような輝点が重なった像が撮影される。粒径計測では 0 次反射光と 1 次屈折光の像面で分離した輝点对像の間隔から粒径が得られるため、計測のダイナミックレンジは撮像系の空間分解能に依存する。図 10 (b) は輝点が分離して撮影されるために必要な粒径に対する空間分解能との関係を示している。本計測では空間分解能が約 20 [$\mu\text{m}/\text{Pixels}$]であるため、図 10 (b) より、得られた粒径の下限値は 60 μm となる。

6. 結言

本計測手法により粒径 64 μm のシリカ粒子の粒径が計測され、その実粒径との誤差が約 2%と評価された。また、実噴霧流に適用し、提案された計測法の有効性が検証された。その結果、撮影された画像から液滴径及び速度三成分の計測が可能であることが確認されるとともに、本計測手法の噴霧流への有効性が確認された。

参考文献

- [1] M. Maeda, T. Kawaguchi, and K. Hishida: "Novel interferometric measurement of size and velocity distributions of spherical particles in fluid flows", *Meas. Sci.Tech.* 11, L13-L18 (2000).
- [2] 川口達也, 小林俊弘, 前田昌信, "レーザー干渉画像法による噴霧液滴径・速度の面的同時計測法の開発", *機論*, 68-666, B, pp.3620-3627 (2002)
- [3] M. Maeda, Y. Akasaka, T. Kawaguchi, "Improvements of the interferometric technique for simultaneous measurement of droplet size and velocity vector field and its application to a transient spray", *Exp. in Fluids*, 33, pp.125-134, (2002)
- [4] A. R. Glover, S. M. Skippon, and R. D. Boyle, "Interferometric laser imaging for droplet sizing: a method for

droplet-size measurement in sparse spray systems” Appl. Opt .
34., pp.8409-8421, (1995)

[5] 加藤裕之, 西野耕一, 進士晃, 鳥居薫, “ステレオ画像
法による粒子径・速度の同時計測”, 機論, 62-602, B,
pp.3620-3626, (1996)

[6] K. Nishino, H. Kato, and K. Torii, “Stereo imaging
for simultaneous measurements of size and velocity of
particles in dispersed two-phase flow”, Meas. Sci.
Tech, 11, pp.633-645, (2000)

[7] H.C. Van de Hulst, and R. T. Wang, “Glare pints”
Appl. Opt, 30, pp.4755-4763, (1991)

[8] H.C. Van de Hulst, “Light scattering by small particles”,
Dover, New York(1950)

[9] W. J. Glantschnig, and S. Chen, “Light scattering from
water droplets in the geometrical optics approximation”, Appl.
Opt, 20, pp.2499-2509, (1981)

[10] A. Ungut, G. Grehan, and G. Gouesbet, “Comparison
between geometrical optics and Lorenz-Mie theory”, Appl.
Opt, 20, pp.2911-2918, (1981)

[11] H. D. Doh, D. H. Kim, K. R. Cho, Y. B. Cho, T. Saga,
and T. Kobayashi, “3D-PTV using genetic algorithm”, 4th Int.
Symp. on PIV, pp.17-19, (2001)