

# 干渉画像法による非定常噴霧流の粒子径・速度の空間分布計測

学籍番号 80120934 赤坂幸広 指導教員 前田昌信

## 1. 緒論

液体の微粒化・噴霧形成技術は、内燃機関など工業上様々な場面で用いられている。内燃機関における液体燃料の微粒化過程は非定常現象であるため非常に複雑である。インジェクタの特性を評価する際、噴霧を構成する液滴の位置・粒径・速度の空間分布を把握することは、噴霧構造の解析、装置の性能評価に寄与する。噴霧液滴の計測器として一般に用いられている Phase Doppler Anemometry(PDA)は、粒径・速度を同時に計測可能であり、その粒径の測定精度も高い。しかし点計測法であるため、個々の液滴の空間的(面的)な相互関係や間欠噴霧などの非定常的な流動場の計測は困難である。汎用の面的計測法の粒子画像流速計(Particle Image Velocimeter, PIV)は、トレーサ粒子が均一であるような流動場において速度ベクトルを算出できるが、粒径に分布を持つような流動場ではその判定が困難である。本質的に粒径分布がある噴霧流では、個々の液滴速度に対する知見が必要であり、瞬時の空間的な位置・粒径・速度分布計測法の構築が望まれた。干渉画像法(Interferometric Laser Imaging for Droplet Sizing, ILIDS)は、瞬時の空間的(面的)な粒径情報を高精度に計測可能である。本研究では、干渉画像法に速度計測機能を加え、粒径速度の同時計測システムを構築・評価し、非定常噴霧流に本計測法を適用させ、その噴霧特性を明らかにすることを目的としている。

## 2. 干渉画像法による粒径・速度の測定原理

透明な球形液滴にレーザー光を照射すると、液滴像の内部に明暗の干渉縞が生成される。幾何学的な関係より、この干渉縞数  $N$  は液滴径  $d$  に比例する。

$$d = \frac{2\lambda N}{\alpha} \frac{1}{\cos \frac{\theta}{2} + \frac{m \sin \frac{\theta}{2}}{\sqrt{m^2 + 1 - 2m \cos \frac{\theta}{2}}}} \quad (1)$$

ここで、 $\lambda$  はレーザー波長、 $N$  は干渉縞数、 $\alpha$  はレンズの集光角、 $\theta$  は受光にらみ角、 $m$  は液滴と周囲媒体の相対屈折率である。式(1)右辺において、 $N$  以外のパラメータは、測定条件や撮影系の設定によって決まる。従って、干渉縞数  $N$  を計数することで絶対的な液滴径  $d$  を算出することが可能である。

本研究では、速度算出に Particle Tracking Velocimetry の原理を用いている。光源にダブルパルスレーザーを用いて微小時間間隔  $\Delta t$  で液滴に照射し CCD カメラに連続的に記録した後、2 時刻のペアなる画像対に相互相関演算を施し、撮影画像内の干渉縞像の移動量を算出する。その後移動量を  $\Delta t$  で除することで速度を算出する。本手法の速度計測の特徴として挙げられるのは、移動量算出の際、輝度分布の相関係数の大小比較のみならず、高精度に算出された粒径、二枚目の粒子位置も対応付けの判断材料としていることである。この方法によって個々の液滴の対応が付き、よい相関が得られ、安定した速度算出を行うことが可能になった。

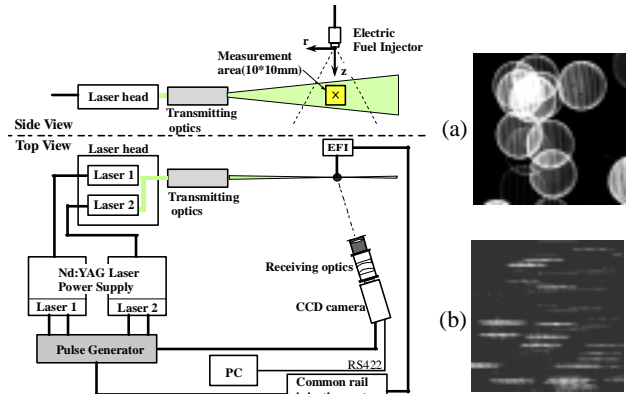


Fig.1 Schematic of the experimental set-up.



Fig.2 Fringe images.

## 3. 測定装置

Fig.1 に干渉画像法による計測システムの概略図を示す。噴霧座標系は図中に示すように、インジェクタの噴口を原点とし下流方向に  $z$ 、半径方向に  $r$  とした。本計測システムは光学系装置(ダブルパルスレーザー発振装置, 送光光学系, 受光光学系), 画像取得装置(高解像度 CCD カメラ, 画像蓄積・処理用 PC)で構成され、システム全体を単一の多チャンネル同期信号発生器で制御している。光源に Nd:YAG レーザ(NEW WAVE 社, solo 120, 120mJ/pulse, 波長 532nm)を用いた。レーザー光はシート状にして噴霧場に照射し、測定領域のシート厚さは約 0.5mm とした。液滴からの反射光と屈折光はその強度が等しくなる  $\theta=73\text{deg.}, \alpha=10\text{deg.}$  に設置された集光レンズと円筒面レンズ( $f=100\text{mm}, -100\text{mm}$ )を通して集光され、CCD カメラ(10bit 1018×1008pixels)に撮影される。干渉縞像同士の重なりによる粒子弁別の困難(Fig.2(a))を改善するため、円筒面レンズを用いることで干渉縞計数に不必要な干渉縞に平行な成分を圧縮し(Fig.2(b)), 空間分解能を向上させている。非定常噴霧は、高圧燃料供給ポンプ, 高圧燃料管(コモンレール), 電気制御式噴射弁から構成されるコモンレール式噴射系と直噴エンジン用ホロコーンインジェクタ(Bosch 社, 噴霧角 70deg., 噴射率 12.5cc/sec)により生成される。噴射(開弁)期間  $t=2.0\text{ms}$ , 噴射周波数 10Hz, 噴射圧力 1.0MPa, 雰囲気圧力 0.1MPa に設定した。

## 4. 実験結果・考察

干渉画像法による速度計測の評価を行うため、定常噴霧場 ( $z=40, 100\text{mm}$ ) において LDV と比較した結果、噴霧中心軸上の高数密度場においても約 9% 以内の誤差で両計測法による結果が一致した(Fig.3)。

また、ILIDS と同様に面的計測法である PIV と速度算出の比較を行った。PIV の速度算出は、2 時刻間の粒子配置パターンが不変という前提があるため、極局的に流動が変化

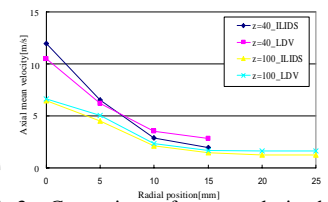


Fig.3 Comparison of mean velocity by ILIDS and LDV.

する複雑流の計測には難があるとされる。そこで、両計測法の比較に際しては、一様に液滴が分布する流れ場と、渦の存

在する複雑な流れ場, 2種類の領域で比較を行った. 測定領域は,  $z=15, r=0$ と $z=25, r=10$ を中心とする $10\text{mm}\times 10\text{mm}$ の領域, 測定時刻は噴射開始後 $3.0, 4.0, 5.0\text{ms}$ とした. Fig.4に両計測器により各領域において得られた平均速度の時間的変化を示す.

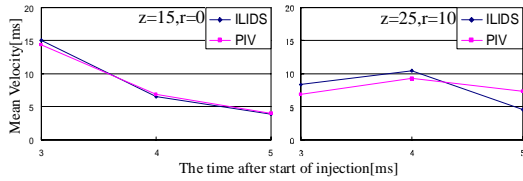


Fig.4 Comparison of mean velocity by ILIDS and PIV.

$z=15, r=0$ においては3時刻わたって良好な一致(約4%)が確認される. 一方,  $z=25, r=10$ は, 両計測法の間で, 平均速度に約20%程度の差異が生じた. 流動構造を把握するため, ILIDSによる速度ベクトルマップ, 液滴数分布を時刻 $t=5$ に関して粒径別に(1) $0<d<20\mu\text{m}$ (2)

$20<d<30\mu\text{m}$ (3)  $30<d<50\mu\text{m}$  に分け, Fig.5に示す. ILIDSによる速度ベクトルは, 測定面( $1018\times 1008\text{pixels}$ )を25の矩形領域に区切り, その中に存在するすべての液滴速度を平均することで, PIV的に表示した. 結果より,  $20\mu\text{m}$ 以下の小径液滴は $r=10\_15$ において渦に追従しており,  $30\mu\text{m}$ 以上の液滴が存在する領域との境界においては誘引され小径にもかかわらず高速で流動している. 大径液滴( $30\mu\text{m}<d<50\mu\text{m}$ )は渦に誘引されず, 噴射時の慣性を維持して鉛直下向きに高速で流動していることが確認される. Fig.6は,  $z=25, r=10, t=5$ の測定領域を

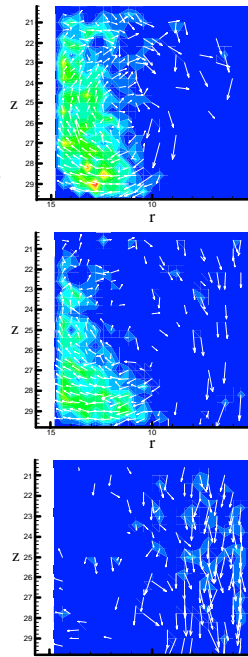


Fig.5 Velocity vector map and number distribution.

(a) $r=5\_10$ , (b) $r=10\_15$ について分け 径と $r, z$ 方向の速度の相関,  $r$ 方向速度と $z$ 方向速度の相関を示している. これらより粒径による流動の相違を確認することができる. ストークス数は(a)領域で $St=1.1$ , (b)領域で $St=0.4$ であったため, 流れ場の特性と一致することが確認された. Fig.7は噴射開始後 $t=2.5, 3.0\text{ms}$ の空間的な数密度, 平均粒径, 速度ベクトル分布を示している. 干渉画像法による計測は, 噴霧液滴の位置・粒径・速度・数密度の空間分布を時間的に計測可能であることが最大の特徴といえる.

### 5. 結言

本研究では干渉画像法に速度計測機能を加え, 実流動場で計測システム全体を評価した. また, 非定常噴霧流動場を各時刻に凍結した詳細な画像を時系列に配列することによって, 時空間的な噴霧特性を考察し, 以下の知見を得た.

- (1) ILIDSで算出した平均速度はLDVで最大約9%, PIVでは一様な流れ場において約4%で測定結果が良好に一致し, 本計測法の有効性を示された.
- (2) PIVの理想的な流動場では, ILIDSと一致し, PIVでは原理的に難のあると言われる複雑流では値が一致しなかったことから, 本手法による速度計測の有効性と共に, 複雑流における本手法の優位性が示された.

(3) 非定常噴霧流の時空間的な位置, 粒径, 速度, 数密度の空間分布を得ることに初めて成功した. 今後, 非定常噴霧の解析に寄与するものと思われる.

### 参考文献

[1] A.R.Glober 他2名, *Appl. Opt.*, 34, 36, 8409, 1995.  
[2] Maeda M *et al.*, *Meas. Sci. Technol.*, 11, L13, 2000.

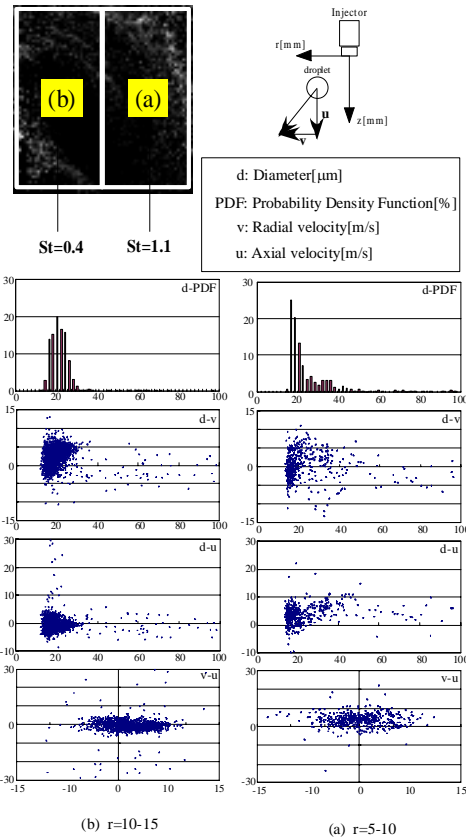


Fig.6 Correlation of droplet diameter and velocity.

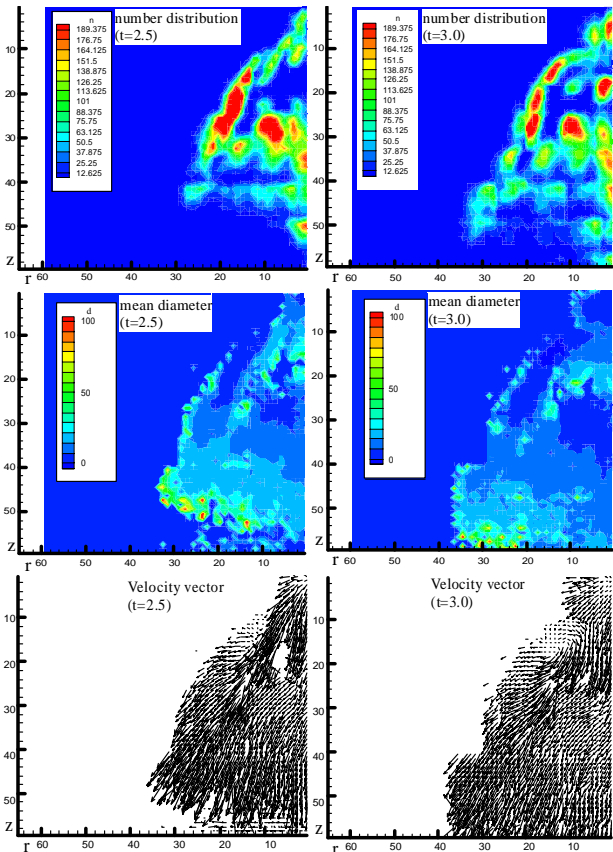


Fig.7 Spatial distribution of droplet number, size and velocity vector.