

LIF - PIV によるウォーターファングレットの速度場計測

○小熊靖之（日大工・機械） 彭國義（日大工・機械）

1. 緒言

ファングレットノズルを用いて形成される水噴流（以下、FJ と略記）は、除染、洗浄、塗膜剥離、溶射皮膜の剥離、アスベストの除去などの分野で広く用いられている。FJ の材料加工特性（洗浄・材料除去特性など）は、噴射圧力、水噴流の分裂挙動、スタンドオフ距離、噴射角度などに依存する。FJ の流動特性を解明するために、PIV (Particle Image Velocimetry) を用いた速度場計測が行われている¹⁻²⁾。これらの報告では液塊・液滴をトレーサーとして使用している。気中で噴射された噴流は、ケルビン・ヘルムホルツの不安定性によって噴流界面が波打ちはじめ、液塊・液滴に分裂する。噴流内部の流動計測を対象とした PIV にて液塊・液滴をトレーサーとして用いる場合、これらは噴流の界面近傍の流動を捉えているため、噴流内部の流動計測に適さない。また、トレーサーの一種としてナイロン製の微粒子がある。このトレーサーの密度は水とほぼ同一値のため、水の流動計測には適している。本研究では、PIV (トレーサー：液塊・液滴) とレーザー誘起蛍光法を導入した PIV (トレーサー：蛍光ナイロン微粒子) による FJ の速度計測を実施し、トレーサーが FJ の速度計測に与える影響を調べる。

2. 実験装置および方法

Fig. 1 にレーザー誘起蛍光法を導入した PIV (LIF-PIV) による FJ の速度計測の実験装置を示す。LIF-PIV による高噴射圧力 (10MPa) の FJ の速度計測の予備実験として、圧力タンクと FJ 噴射ノズルで構成された FJ 噴射装置 (噴射圧力 : 0.85MPa) を製作した。圧力タンクに水と蛍光ナイロン微粒子を投入し、コンプレッサーから圧縮空気を充填する。噴射ノズル上流に設置したボールバルブを開放し噴射ノズルから FJ が噴射される。本実験の噴射圧力は 0.85MPa である。また、噴射ノズルの詳細は文献³⁾を参照されたい。

LIF (レーザー誘起蛍光法) はレーザー光で蛍光物質の原子・分子を励起し、蛍光物質と異なる波長の色を発光させる方法である。LIF-PIV システムによる FJ の速度計測は、Nd:YAG レーザーによるレーザー光 (波長 $\lambda = 532 \text{ nm}$, 緑色) をシリンダリカルレンズを用いてシート状にして噴流に照射させる。それによって蛍光ナイロン微粒子 (蛍光染料: ローダミン B) は橙色の散乱光 ($\lambda = 590 \sim 610 \text{ nm}$) を液塊・液滴は緑色の散乱光を放出する。高速度 CMOS カメラのカメラ

レンズにロングパスフィルター ($\lambda \geq 560 \text{ nm}$) を装着し、蛍光ナイロン微粒子の流動様相のみを撮影する。この蛍光ナイロン微粒子は、ナイロン微粒子 (平均粒径 : $50 \mu\text{m}$, 密度 : 1030 kg/m^3) をローダミン B で染色した。LIF-PIV の場合は、水 10l, 蛍光ナイロン微粒子 12g, PIV の場合は、水 10l のみを圧力タンクに投入した。

撮影条件は、LIF-PIV, PIV 共にカメラの解像度 $1,024 \text{ pixels} \times 1,024 \text{ pixels}$, その解像度に対する撮影領域のサイズ $114 \text{ mm} \times 114 \text{ mm}$, 撮影フレームレート $4,000 \text{ fps}$ とした。第一と第二瞬間画像の撮影時間間隔 Δt は、 $9.6 \mu\text{s}$ に設定する。第一・第二瞬間画像のセットは約 2,700 セット撮影する。また、噴流に照射するレーザーライトシートの厚さは約 2 mm である。FJ の速度を瞬間画像から算出するためにサブピクセル解析を導入した直接相互関係法を用いた。FJ の座標系はファングレットノズル出口面と噴流中心軸の交点を原点として、噴流中心軸方向に X 軸を、噴流が扇状に広がる方向 (ノズル長径方向) に Z 軸を、X-Z 面に対して垂直方向に Y 軸をとる。また、X, Y, Z 方向の速度成分をそれぞれ u, v, w と定義する。

3. 実験結果

3.1 瞬時可視化画像

Fig. 2 に LIF-PIV, PIV による FJ の瞬時可視化画像を示す。Fig. 2 の座標は、噴射ノズルの楕円形開口部を円形とみなした場合の等価直径 $d_e (= 1 \text{ mm})$ で無次元化している。(a) PIV の場合では、ノズル出口付近に透明状の液膜領域 ($X/d_e = 0 \sim 30$) が確認でき、その下流ではケルビン・ヘルムホルツの不安定性によって液膜が Y 方向に大きく波打ち、筋状構造が形成される。さらにこれらが崩壊し、液塊・液滴が形成されていると考えられる。(b) の LIF-PIV の場合では、(a) と比較して画像の明るさが暗いことが解る。これは、レンズに取り付けたロングパスフィル

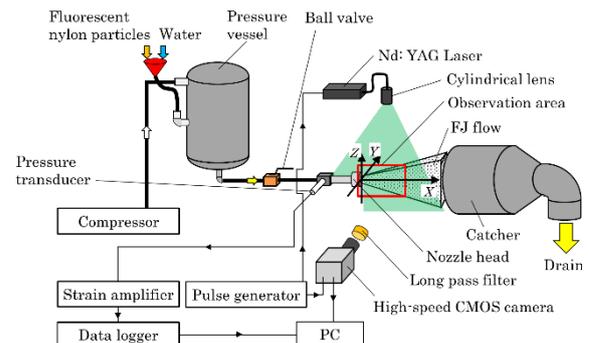


Fig. 1 Experimental setup.

ターの減光作用によるものと考えられる。また、噴射ノズル出口付近の液膜領域内 ($X/d_e = 0 \sim 20$) に蛍光ナイロン微粒子が確認でき、液膜領域の下流では、(a)と同様に筋状構造が形成している。本論文の可視化画像の大きさの都合上、確認出来ないが原画像を拡大し確認したところ、この筋状構造は蛍光ナイロン微粒子が連なった構造であると考えられる。(a),(b)共にこの筋状構造は、液塊・液滴、蛍光ナイロン微粒子に分裂し、レーザーライトシートの面外 (Y 方向) へ飛散したため、FJの下流域では液塊・液滴、蛍光ナイロン微粒子があまり確認できなかったと考えられる。

3.2 速度分布

Fig. 3は、Fig. 2(a),(b)それぞれの瞬時可視化画像のペアと画像相関解析によって得られた瞬時合成速度場を示し、図のカラーコンターは瞬時合成速度 $V (= \sqrt{u^2 + w^2})$ の大きさを示す。(a)のPIVによる瞬時速度場では、液塊・液滴の他に筋状構造の速度が計測されている。噴射ノズル出口付近の液膜領域にて速度ベクトルが確認出来ない。これは流動を捉える構造がないため速度ベクトルが算出されなかったと考えられる。(b)のLIF-PIVによるFJの瞬時合成速度場では、蛍光ナイロン微粒子の速度が計測されている。噴射ノズル出口付近の液膜領域内の蛍光ナイロン微粒子の存在によって液膜領域内の速度が計測可能となった。

Fig. 4は、Fig. 3の瞬時速度場1000セット分平均した時間平均合成速度場を示す。(a)はFJ,(b)はLIF-PIVの結果である。(a),(b)共に液膜領域より下流域 ($X/d_e \geq 30$) では速度が Z 方向に対してほぼ一定である。(b)のLIF-PIVの結果は、本研究のFJの計測範囲において、(a)の結果と比較して速度が大きいことが解る。また、ノズル出口付近の液膜領域 ($X/d_e = 5 \sim 30$) の速度は Z

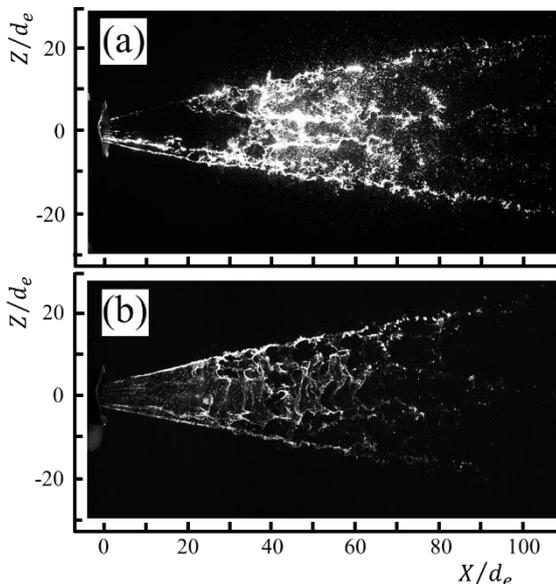


Fig. 2 Instantaneous visualization images. (a) PIV, (b) LIF-PIV.

方向に対して速度がほぼ一定である。

4. 結論

PIVとLIF-PIVによるFJの速度計測を実施し、トレーサー粒子がFJの速度計測に与える影響を調べた結果、以下の知見を得た。

- (1) LIF-PIVの使用によってFJの液膜領域の速度計測が可能となり、時間平均値では Z 方向に対してほぼ一定の値を示す。
- (2) LIF-PIVによるFJの速度はPIVと比較して大きいことが確認された。

参考文献

- 1) L. Ding, S. Shimizu and M. Kido, Proc. 7th Pacific Rim International Conference on Water Jetting Technology, (2003), 413-420.
- 2) Y. Oguma, G. Peng and S. Shimizu, Fluid-Structure-Sound Interactions and Control, (2018), 131-136.
- 3) S. Shimizu, H. Ito, S. Hori and G. Peng, Water Jetting, BHR Group, (2012), 395-403.

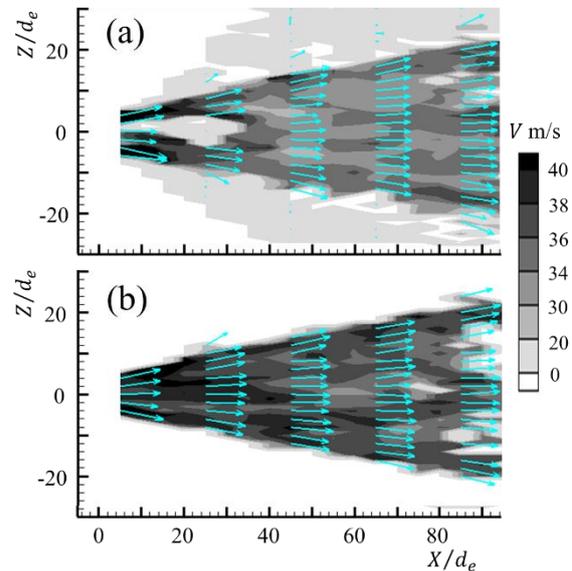


Fig. 3 Instantaneous velocity fields. (a) PIV, (b) LIF-PIV.

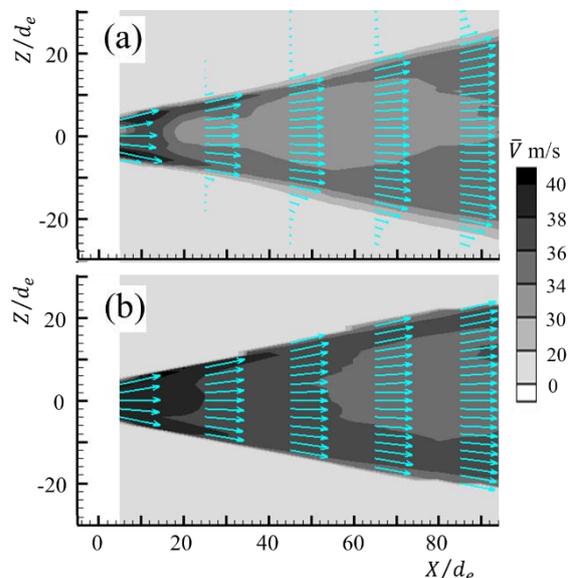


Fig. 4 Time - average velocity fields. (a) PIV, (b) LIF-PIV.