

高压水噴流の可視化観察

嶽間沢秀孝, 児島忠倫

Visualization of high pressure water jets

Hidetaka GAKUMASAWA and Tadatomo KOJIMA

Synopsis

In this research, in order to carry out atomization mechanisms of high speed liquid jets from several nozzles was created. The high-speed spray visualization system by the digital high speed camera system (framing rate of 10^4 f.p.s.) was produced. The continuous image taken picture of high speed liquid jets was analyzed. The liquid column breakup process and liquid sheet tearing process as observed, and some findings were obtained.

Key Words : High Speed Liquid Jet, High Speed Camera, Atomization, Spray Characteristic

1. はじめに

液体の微粒化技術は、ディーゼル噴霧燃焼⁽¹⁾、金属の冷却、微粒子生成、塗装などの工業分野で広く用いられている。微粒化の良否が製品の良否を決定づけるため、微粒化機器の性能の観点から微粒化についてさまざまな研究がされている。特に円管ノズルから噴射される軸対象液体噴流⁽²⁾や二次元自由液膜噴流⁽³⁾の微粒化過程の観察は従来から行われている。これらの研究により、各微粒化過程において多様な微粒化機構が存在し、その違いにより生成される液滴の粒径が異なることが明らかにされている。

一方、短発光大出力レーザーや高速度デジタルカメラ・ビデオの開発が進み、可視化・計測技術が大きく進歩している。燃料噴射や薬剤散布の分野では、所定の粒径の液滴を必要な所に必要な時間分散させることが望まれており、液滴の速度と空間分布に関する研究が数多くなされている。高速度可視化解析により、液柱・分裂液滴の速度と分布が噴射圧力や噴孔形状により大きく異なることが報告されている。

本研究では、デジタルハイスピードカメラによ

る高速水噴流可視化システムを製作し、高压洗浄機から高压水を噴射させ、噴射圧力や噴孔形状を変化させた高速水噴流を高速連続撮影し、噴霧内に存在する連続液柱の分裂状態および液膜噴流の微粒化過程を観察した。

2. 実験装置および方法

実験装置の概略を図1に示す。噴射ポンプには、リョービ社製電気高压洗浄機 AJP-80 と Asada Corporation 製高压洗浄機 440 を使用した。

リョービ社製の高压洗浄機(AJP-80)は噴射圧 8.0MPa (最大)、吐出量 6.0 l/min で噴孔は直径 1mm の円形からスロット状の形に変形可能である。Asada Corporation 製の高压洗浄機(EP-44H)は噴射圧力を 0~4.0MPa まで任意の噴射圧力を調整可能なものであり、ノズルは直径約 0.6mm の円形である。噴射は常温の大気中に行い、噴射液体には水道水を用いた。

撮影には、デジタルハイスピードカメラ(Nac 社製 MEMRECAM fx-K3: 最大 10,000 コマ/秒)を用いた。表1にデジタルハイスピードカメラの使用を示す。光源として噴霧の後方に出力 300W のキ

表1 デジタルハイスピードカメラ仕様

センサ素子	Color CMOS
素子画素数	1280×1024pixel
data/pixel	10bit/pixel
フレームレート	100, 250, 500, 1000fps (1280×1024pixelまたは640×512pixel) 2000fps 3000~10000fps
電子シャッター	1/1000~1/200000sec
記録時間	約2.4秒 (1000fps、解像度1280×1024pixel撮影時)
トリガモード	START, CENTER, END, CUSTOM
レンズマウント	Cマウント ニコンDマウント (マウント変換アダプター使用時)
デジタル出力	FibreChannel (1Gbps) 100BASE-TX (100Mbps) CF Type I / Type II Slot
モニタ出力	専用DigitalVGA (専用LCDビューファインダー用)
制御ソフト	FX link
耐G性能	衝撃:100G サイン半波:10msec 振動:MIL-STD-810D METHOD-514.3
電源	DC20~32V (ACアダプタ付属)
外形寸法	137(W)×130(H)×330(D)mm (突起部除く)
重量	約5kg (レンズ、オプション除く)

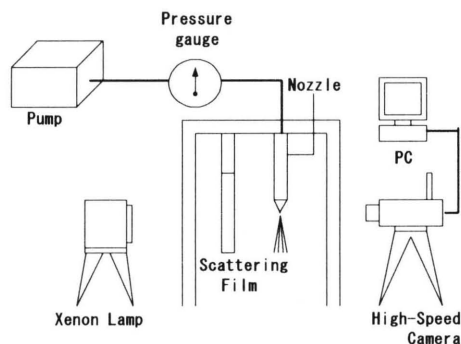


図1 実験装置

セノンランプを設置し、厚さ $50\mu\text{m}$ のトレーシングフィルムで光を拡散して噴射される水噴流の影を撮影した。噴射終了後、撮影された多数のフレームの中から指定したフレームをパーソナルコンピュータに取り込み、画像を調整して可視化した。

3. 結果と考察

3. 1 噴射圧力による噴流の分裂形態変化

図2にAsada製高圧洗浄機を使用した場合の水噴流の一例を示す。この洗浄機はエアコンの熱交換器などの洗浄用で、ノズルから噴出する水噴流は扇状の液膜を形成して大きく広がりながら微粒化する。なお、シャッター速度は $1/200000\text{s}$ とした。

図2(a)の噴射圧力 $\Delta P=1.0\text{MPa}$ の噴流の写真を示す。上下の写真は同じ噴流を撮影したもので両者の時間差は 10^{-4}s である。また、写真下部にスケールを配した。ノズルから噴出直後に扇状の液膜を形成している。液膜の外縁は大きく波打ち下流に行くにつれて液膜厚さが薄くなるにつれて、破断し液糸となりさらに液滴へと微粒化している。

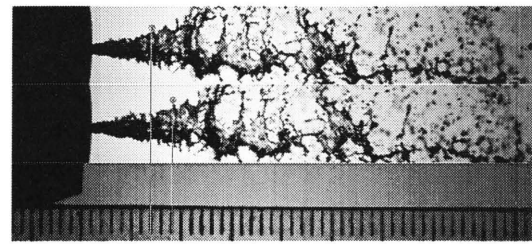
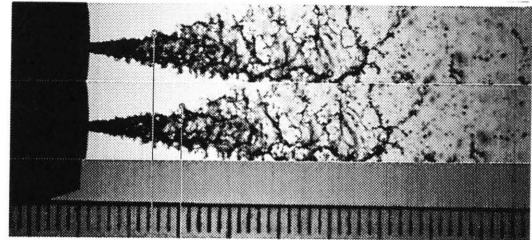
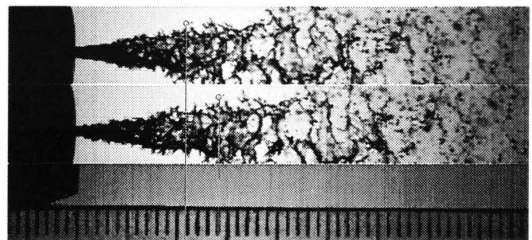
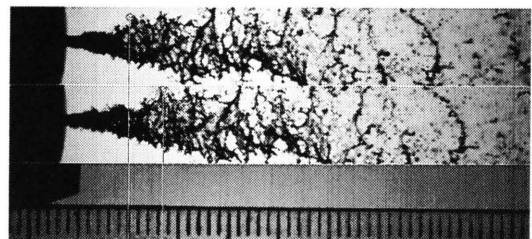
(a) $P = 1.0\text{MPa}$ (b) $P = 2.0\text{MPa}$ (c) $P = 3.0\text{MPa}$ (d) $P = 4.0\text{MPa}$

図2 水噴流の可視化写真

上の写真に見える液糸は下の写真では、下流に進行しながら細くなっている。

図2(b)の噴射圧力 $\Delta P=2.0\text{MPa}$ の噴流は、(a)の場合より液膜の厚さが薄く、より上流位置で液膜に穴が開いている部分がある。穴の周囲は液膜厚さより若干厚いリムで縁取られ、下流に行くにつれて大きくなり、液膜から脱落した部分が液糸となっている。

図2(c)の噴射圧力 $\Delta P=3.0\text{MPa}$ の噴流は、さらに上流から不安定になり、液膜が破れた部分から液糸に移行している。いずれの液糸も 10^{-4}s 後には急激に細くなり周囲に液滴を生成している。

図2(d)の噴射圧力 $\Delta P=4.0\text{MPa}$ の噴流は、ノズル噴出直後から扇形状が揺らぎ激しく微粒化している。ノズルから 40mm 程度下流に見える液糸は

10^{-4} s 後には何箇所かで破断し、大きな液塊となる様子がわかる。よって下流部分では、粒径の小さい液滴と黒く見える大きめの液塊が混在している。

図3にリョービ社製の高圧洗浄機を使用した噴流の写真を示す。噴孔形状は円形とし、噴射圧は $\Delta P=8.0\text{MPa}$ とした。ノズルから流出した直後の液柱は円形形状を維持せず、いびつな形状をしている。これはノズル壁面との摩擦や、ノズル内に生じたキャビテーションの影響が考えられるが詳細は不明である。液柱表面から上流方向に向けて液糸が発生し、その先端から液滴が形成されている。これは周囲空気との相対速度が大きいため、液柱表面が摩擦力で引き剥がされるためと考えられる。

3. 2 噴射圧力と噴流圧力

図4に図2および図3の写真から噴流の移動速度を求めた結果を示す。 $\Delta P=0.5\sim 4\text{MPa}$ まではAsada製高圧洗浄機を使用した結果で、 $\Delta P=8\text{MPa}$ はリョービ社製の高圧洗浄機を使用したもので、二つの結果を同じグラフ上に示すことにはあまり意味がない。

ノズル流量係数の流量係数 c は次の式で定義される。

$$Q = cA\sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (1)$$

Q は流量、 A は噴孔断面積、 ρ は液体の密度である。Asada製高圧洗浄機の結果から算出した流量係数は $0.39\sim 0.41$ となる。値に差異があるのは、噴孔直後で写真が黒くなるため噴出速度を算出することが困難なため、速度算出位置が下流にずれたためと考えられる。よって今回算出した流量係数は実際より低く見積もられているが、連続画像から簡単に流量係数を類推することができる。なお、リョービ社製の高圧洗浄機では $c=0.55$ となった。

3. 3 噴孔形状による噴流形態変化

図5にリョービ社製の高圧洗浄機の噴孔を円形からスロット型に変化させたときの水噴流の写真を示す。 $\Delta P=8.0\text{MPa}$ でシャッター速度は $1/200000\text{s}$ である。

(a)の円形噴孔の場合は、噴流は噴孔から噴出した直後から表面が歪んでいるようすがわかる。これはノズル内が平滑でないためと思われる。下流に行くにつれて、空気との相対速度差で生じる激しい摩擦力により歪みは大きくなり、やがて液柱は断裂していく。なお、写真上の大きな液滴は、液

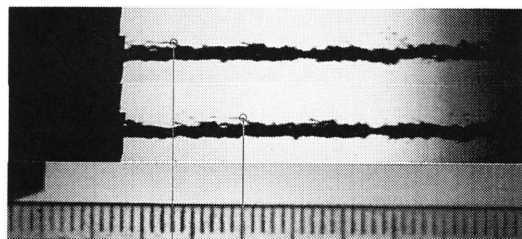


図3 水噴流の可視化写真, $\Delta P=8.0\text{MPa}$

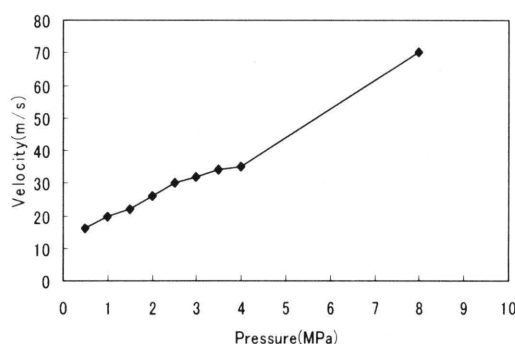


図4 噴流速度

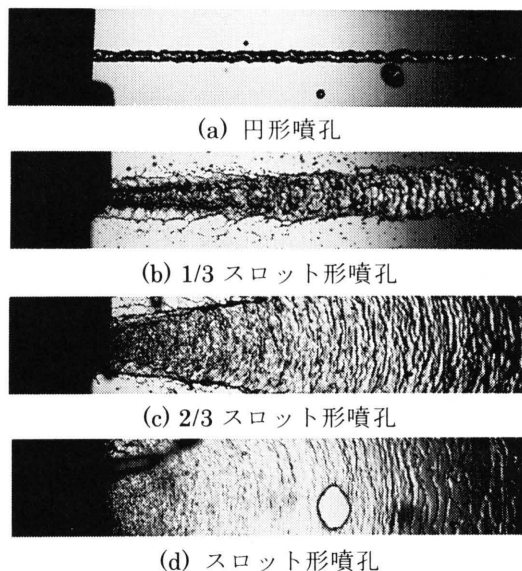


図5 噴孔形状による噴流形状

柱から直接生じたものではなく、下流において噴流の受ける容器から跳ね返ったものである。

(b)の噴孔を1/3スロット形にした場合は、噴流は噴孔壁にはさまれて、液膜状に噴出する。液膜の端の部分では空気によって減速された液体が液糸を形成し、細かい液滴を生成している。また、液膜

表面は噴孔出口直後では噴孔壁との摩擦により不規則に乱れているが、下流に行くにつれて周期的な凹凸を生じるようになる。

(c)の噴孔を2/3スロット形にした場合は、液膜表面の乱れが周期的な凹凸に移行するようすが確認できる。また、液膜端は黒く可視化されることから液体がある程度厚みを持っていると思われる。

(d)は噴孔を限界まで押しつぶした状態にした場合である。噴流は薄い液膜となって噴出する。写真では液膜厚さが限界に生じたところで、穴が生じている。穴の周囲には厚いリブが形成されている。なお、液膜の表面は周期的な凹凸が生じることで安定し厚さ方向には液滴がほとんど発生せず、液膜端で微粒化が進行している。

4. まとめ

高速洗浄機から噴出する水噴流をデジタルハイスピードカメラで撮影し、得られた連続画像から

いくつかの知見を得た。

- (1) 液膜状噴流は周端が厚くなり液糸を発生させながら微粒化する。
- (2) 液膜状噴流の表面には周期的な凹凸が生じ安定する。
- (3) 液体噴流の連続画像から簡単に流量係数を類推することができる。

参考文献

- (1) 廣安博之、エンジンテクノロジー、ディーゼル噴霧特性、Vol.4, (2002), 40-46
- (2) Hoyt, J. W. and Taylor, J. J., J. Fluid Mech., 83(1977), 119-127.
- (3) 新井隆景・橋本弘之, 機論 51-470, B(1986), 3336-3343.