

旋回噴射型の超微細噴霧散水器の開発

東海国立大学機構岐阜大学 工学部機械工学科

朝原 誠

1. はじめに

近年、微細水粒子の噴霧による高い洗浄効果が注目され、粒径の小さい散水器の開発が進められている。ディーゼルエンジン、航空機エンジン、ロケットエンジン等の液体燃料噴霧では、高圧噴射や旋回噴射による微粒化促進技術が開発され、性能の向上に寄与している。一方、家庭用散水器では水圧が制限されるため、高圧噴射による微粒化促進は期待できない。そこで、多くの散水器では、旋回噴射による微粒化促進が図られている。

散水器から噴出される水の粒度分布と微細液滴が呼吸によって体内に流入する際の洗浄効果に焦点を当てた研究の結果から、水の粒子が小さいほど洗浄効果が高くなることが示唆された¹⁾。また、散水器から放出される有害物質が呼吸と皮膚によって吸収される量を比較した結果から、有害物質は呼吸だけでなく皮膚からも吸収され、人体に影響を与えていることが明らかになった²⁾。散水器と同様の現象である噴霧現象に関する既往研究としてインジェクタによる噴霧の微粒化に関する研究が行われ、噴射圧を用いて微粒化高さや液膜角度（液膜角度）、平均粒径などの複数のパラメータを用いて微粒化の整理がされた結果、噴射圧により燃料の液膜の特徴が変化し、微粒化性能に違いが表れることが示唆された³⁾。また、高圧ディーゼル噴射スプレーの燃料微粒化特性についての研究の結果から、一次微粒化は主に Kelvin-Helmholtz 不安定性、二次微粒化は Reyleigh-Taylor 不安定性によって引き起こされていることが示唆された⁴⁾。

以上より、散水器において液滴径が洗浄効果に大きく関連しており、流体力学的不安定性と微粒化の関係から微粒化特性を把握することで散水器の性能を向上させることができるといえる。そこで、本研究では、散水器の液膜部分を高時空間分解能で撮影し、流体力学的不安定性との関連性を調べることで散水器の微粒化特性を把握することを目的とした。

2. 実験方法及び条件

微粒化特性取得実験ではバックライト撮影法を用いて液膜部分の可視化画像を取得し、そこで取得した画像から微粒化高さ、噴霧角度、界面上の波長を測定した。バックライト撮影法は高速度カメラにバックライトを入射し、バックライトの光路上に存在する現象を陰影として可視化する撮影法である。バックライト撮影法を用いて散水器の液膜の可視化画像を取得した実験装置と撮影領域を図 1 に示す。アルミフレームによって作成した骨組みに電動ステージ (LTS300/M, Thorlabs) を設置し、電動ステージに散水器ヘッドを平行に設置することで任意の横位置で撮影ができるように設計した。使用した 4K 高速度カメラ (FASTCAM NOVA R5-4K, Photoron) にレンズ (28-75mm F/2.8 Di III VXD G2, TAMRON) を設置し、撮影速度は 1,250 fps に設定し撮影を行った。また、バックライト光には短パルスレーザー (Cavitar Smart A006-UHSTH, Cavitar Ltd.) を使用した。任意の位置にある散水器に対し、高速度カメラと短パルス

レーザーの位置を調節し、背景光の明るさや画角が適切になるよう調節した。また、液膜は散水器の位置とカメラの位置に依存して撮影される大きさが変わるためスケールはヘッドを変えるごとに取得した。

圧力条件を示した表を表 1 に示す。噴射圧は日本で散水器が使用される際の一般的な水圧である 0.15MPa を基準にし、0.1 MPa, 0.15MPa, 0.2 MPa, 0.25MPa, 0.3 MPa と設定することで実験を行った。散水器は微粒化の撮影を容易にするために、一つの孔から水が噴射するように設計し、本研究で開発した散水器ヘッド A と既存品の散水器ヘッド B, 散水器ヘッド C を用いて実験を行った。また、散水器ヘッドに流れ込む水の流量は圧力ごとに変化させた。圧力ごとの流量条件を表 2 に示す。

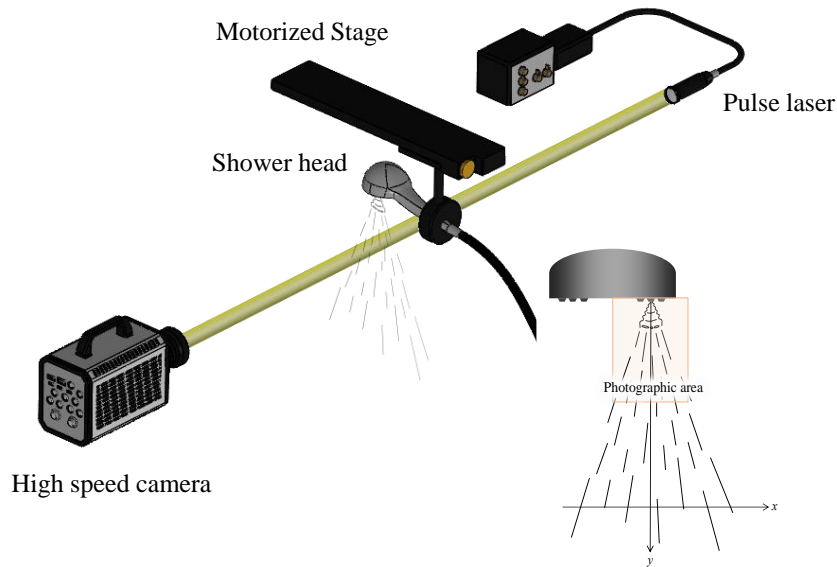


Fig.1. Schematic diagram of the experimental apparatus used to acquire liquid film visualization images using the backlight imaging method.

Table 1 Pressure conditions

| Notation | Pressure [MPa] |
|----------|---------------------------|
| A | 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3 |
| B | 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3 |
| C | 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3 |

Table 2 Pressure conditions vs. flow rate

| Pressure [MPa] | flow rate [cm ³ /s] |
|----------------|--------------------------------|
| 0.1 | 4.66 |
| 0.15 | 5.46 |
| 0.2 | 6.43 |
| 0.25 | 7.14 |
| 0.3 | 7.84 |

流速取得実験は微粒化特性取得実験と同様にバックライト撮影法を用いて液膜画像の取得を行った。微粒化特性取得実験では、液膜部分を高倍率で撮影することで流速を測定し、またフレーム間で粒子群の移動量を求めるために高フレームレートで撮影した。流速取得実験の実験装置の装置図と撮影領域は図 1 とほぼ同じである。実験装置は微粒化特性取得実験と同様の装置を設置し、高速度カメラを変更することにより高倍率かつ高 fps での撮影を可能とした。

流速取得実験では微粒化特性取得実験と同様に、アルミフレームで作成した骨組みに電動ステージ (LTS300/M, Thorlabs) を設置し、電動ステージに散水器を平行に設置することで任意

の横位置で撮影ができるように設計した。カメラはより高 fps での撮影が可能である高速度カメラ(MEMRECAM ACS-1, ナックイメージテクノロジー)を用い、撮影速度 75,000fps で撮影を行った。また、バックライト光には短パルスレーザー (Cavitar Smart A006-UHSTH, Cavitar Ltd) を使用した。任意の位置にある散水器に対し、高速度カメラと短パルスレーザーの位置を調節することで、背景光の明るさや画角が適切になるように調節した。

3. 結果及び考察

図 2 に各圧力条件における微粒化挙動のスナップショットを示す。噴射圧の上昇に伴い、コーン状の液膜が広がり、また、液膜が崩壊して微粒化するまでの距離（微粒化距離）が短くなる傾向が確認できる。

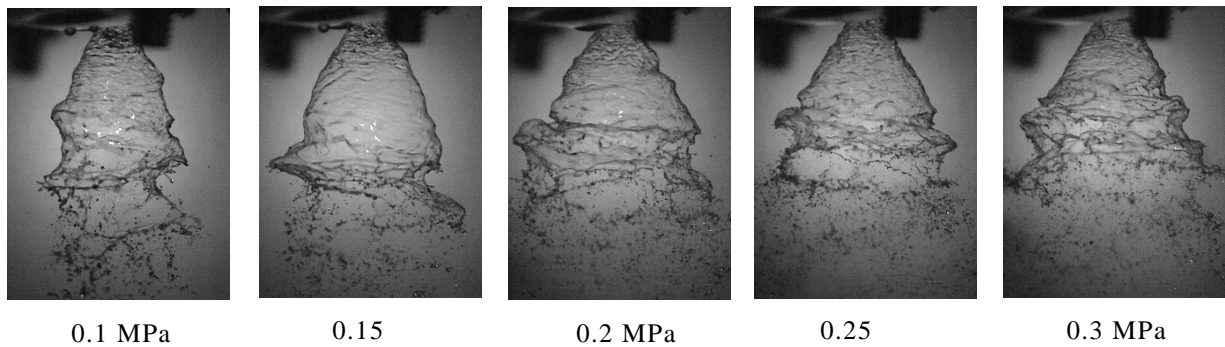


Fig.2 Liquid film image acquired in a liquid film imaging experiment.

図 3 に噴射圧 0.2 MPa での微粒化挙動を示す。液膜には噴射方向に対する横波が形成され、波の腹に沿って膜分裂することで液糸が形成される（一次微粒化）。さらに、液糸が長手方向に分断され、小さい粒子となる（二次微粒化）。このように、大きい液塊が主構造から分離される一次微粒化と、液塊が微粒化する二次微粒化は、ディーゼルエンジンの燃料噴射の微粒化過程でもみられる現象であるが、散水器でも同様の現象が確認された。

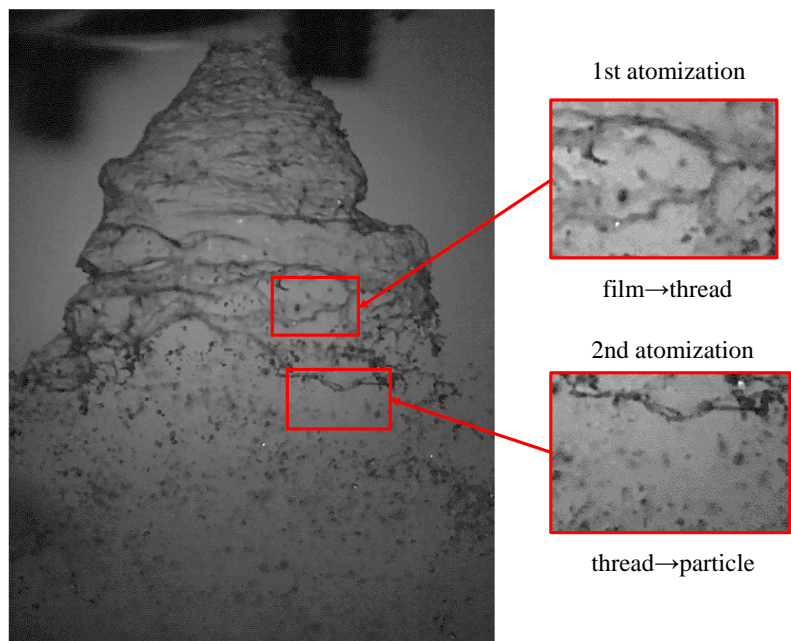


Fig.3 Atomization process obtained by flow acquisition experiment (0.2 MPa) .

続いて，前処理画像に時間平均化処理

$$I_{ave}(i,j) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N I(i,j,n) \quad (1)$$

と標準偏差処理

$$I_{SD}(i,j) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (I(i,j,n) - I_{ave}(i,j))^2} \quad (2)$$

を施し，微粒化における時間変動成分の超出を試みた．図4に前処理，時間平均化処理，標準偏差処理を施した輝度値の空間分布を示す．時間平均化処理画像から， $z=0$ における液膜面の時間平均位置は周囲よりも輝度値が小さいことがわかる．ここで，標準偏差処理画像における $z=0$ 液膜面に注目すると，輝度値の標準偏差が周囲よりも大きい．このように，バックライト撮影画像の時間平均化処理および標準偏差処理により，液膜面を特定することが可能である．液膜面の標準偏差が大きくなった要因として，図2でみられた液膜面に形成される波の存在が考えられる．この波は Kelvin-Helmholtz 不安定性によって生じると考えられている⁴⁾．

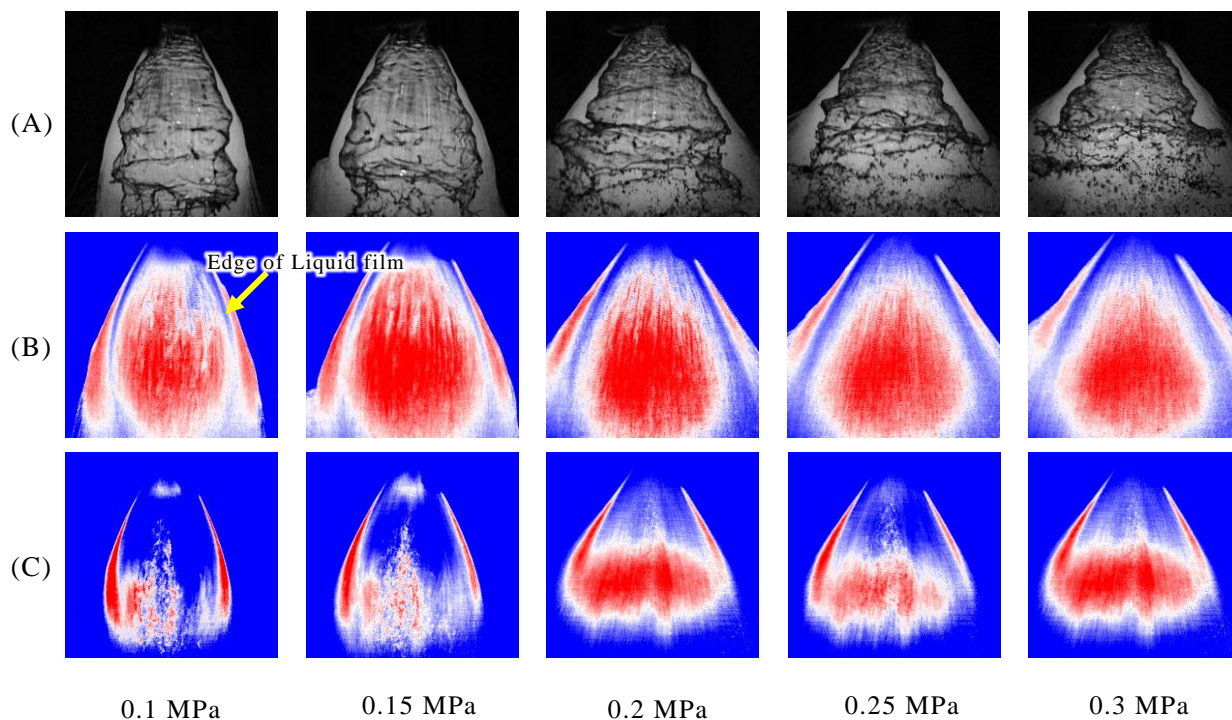


Fig.4 Processed image((A):Preprocessing, (B):Averaged processing, (C):Standard deviation processing).

図4より，標準偏差処理を施すことで液膜面の不安定領域が顕在化し，この不安定性が微粒化に影響を及ぼすことが示唆された．そこで，前処理画像に SVD

$$\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1 \quad \mathbf{x}_2 \quad \cdots \quad \mathbf{x}_K] = \begin{bmatrix} I_{1,1} & \cdots & I_{1,n} & \cdots & I_{1,K} \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ I_{l,1} & \cdots & I_{l,n} & \cdots & I_{l,K} \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{L,1} & \cdots & I_{L,n} & \cdots & I_{L,K} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$X = U\Sigma V^T = \sum_{k=1}^K u_k \sigma_k v_k^T \quad (4)$$

を施すことで、散水器の微粒化における特徴の抽出を試みた。図5にSVDを適用して取得した第1モードから第3モードと平均化画像を示す。第1モードは平均化画像と概ね一致する。第2、第3モードでは噴射方向(x方向)に逆位相の特徴量が確認される。この逆位相の特徴量は、図2,3でみられる波の波長であると考えられる。そこで、図2に代表されるオリジナル時系列画像から液膜の波長を測定し、SVDにより得られた縞模様の幅を比較した(図6)。その結果、オリジナル時系列画像より測定した波長とSVDにより得られる第2モード、第3モード縞模様の幅は概ね一致した。よって、第2モード、第3モードは液膜不安定領域に生じる波の成分が抽出されたモードであると考えられる。図7に、各圧力条件によるモードの累積寄与率を示す。低圧なほど、低次モードの寄与率が大きい。これは、高圧なほど、微粒化を構成する要素が複雑であることを示している。

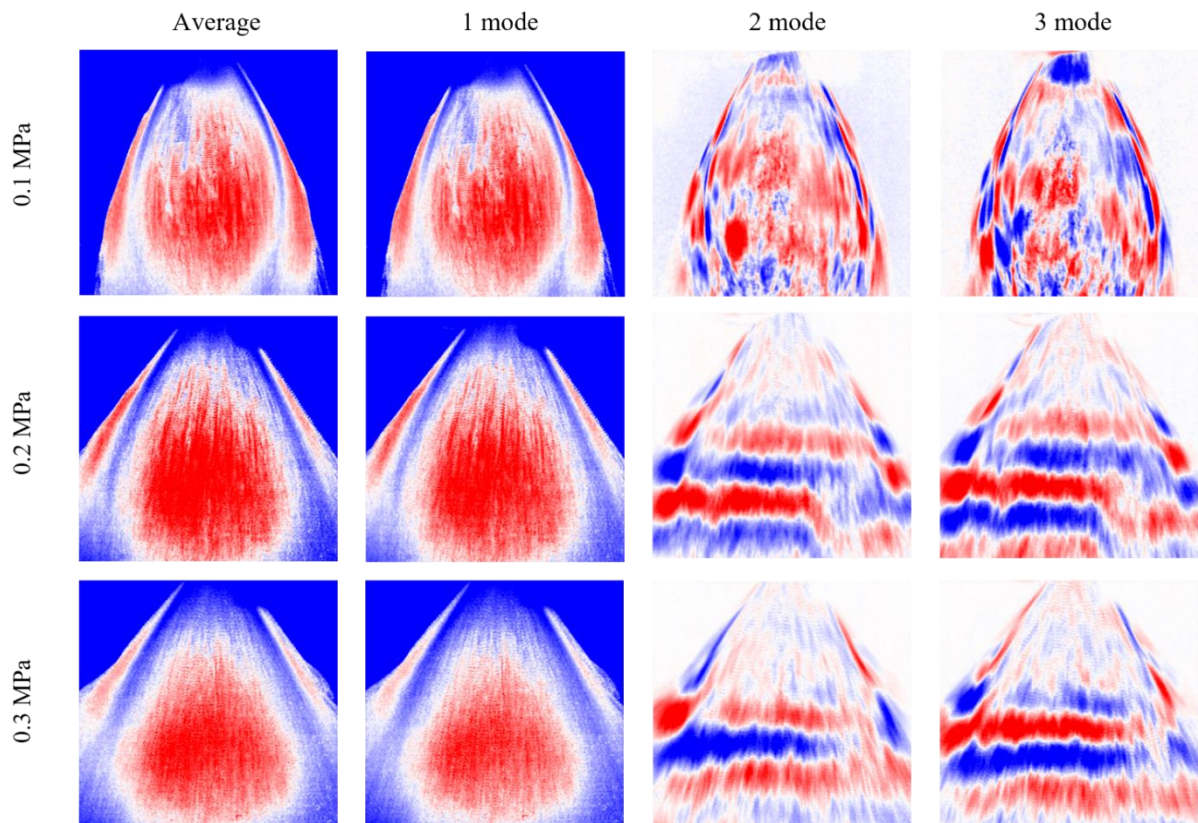


Fig.5 Images for each mode extracted by singular value decomposition (1~3 modes).

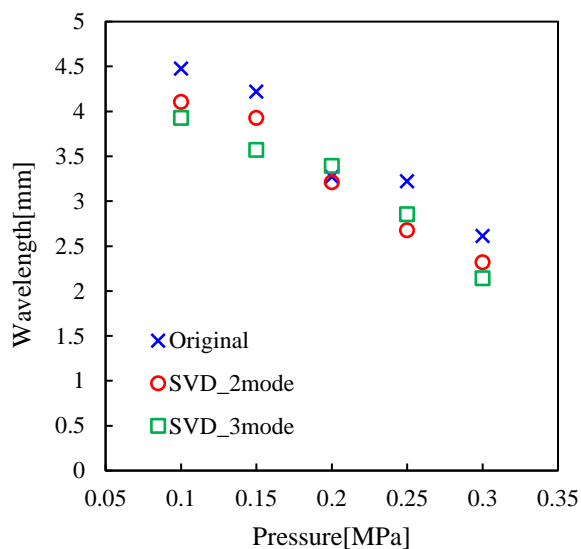


Fig.6 Comparison of wavelengths.

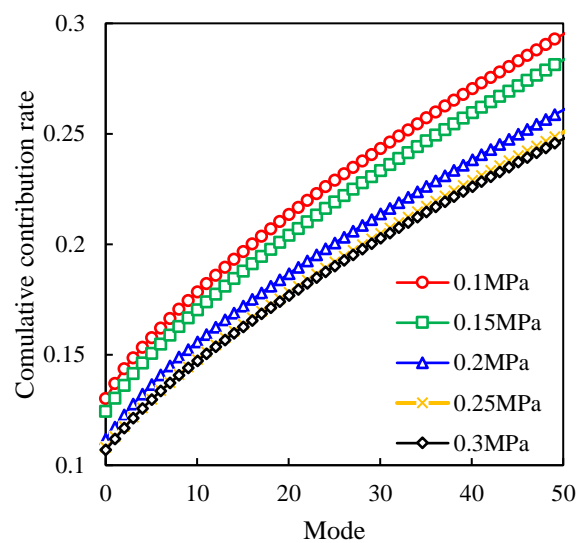


Fig.7 Cumulative contribution rate by pressure of SVD.

9. まとめ

高速度カメラを用いて散水器の水微粒化挙動をバックライト法で撮影し、その微粒化特性把握を目指した。取得した時系列画像に対し、複数の画像解析手法を施した結果、時間平均化処理および標準偏差処理から液膜面の位置や不安定領域を明示することができた。さらに、特異値分解（SVD）により、微粒化粒径に関係すると考えられている液膜の波長が得られた。以上の結果から、時間平均化処理、標準偏差処理、特異値分解により、新開発の散水器の微粒化性能を簡易的に調べることができ、洗浄効果の高い散水器の開発スピード向上が期待される。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、公益財団法人天野工業技術研究所から多大なご支援を頂いた。また、実験データの取得及びデータ解析は、東海国立大学機構岐阜大学大学院修士2年・岩崎航大、同大学学部4年・横山一輝が実施した。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 1) Yue Zhou, Janet M. Benson, Clinton Irvin, Hammand Irshad, Yung-Sung Cheng, Particle Size Distribution and Inhalation Dose of Shower Water Under Selected Operating Conditions, HHS Public Access, 2010.
- 2) Wan K. Jo, Clifford P. Weisel, Paul J. Liroy, Routes of Chloroform Exposure and Body Burden from Showering with Chlorinated Tap Water, Risk Analysis, 10, 4, pp.575-pp.580, 1990.
- 3) J. Dernet, C. Hespel, F. Foucher, S. Houille, C. Mounaim-Rousselle, Influence of physical fuel properties on the injection rate in a Diesel injector, Fuel, 96, pp.153-pp.160, 2012.
- 4) Chang Sik Lee, Sung Wook Park, An experimental and numerical study on fuel atomization characteristics of high-pressure diesel injection sprays, Fuel, 81, 18, pp.2417-pp.2423, 2002.