2次元ノズル内キャビテーションと液体噴流の微粒化* (第1報, 超高速度カメラによる可視化)

宋 明良^{*1}, 富山明男^{*1}, 細川茂雄^{*1}
濁川慎司^{*2}, 松本洋一郎^{*3}

Cavitation in a Two-Dimensional Nozzle and Liquid Jet Atomization (1st Report, Ultra-High Speed Visualization)

Akira SOU^{*4}, Akio TOMIYAMA, Shigeo HOSOKAWA,
Shinji NIGORIKAWA and Yoichiro MATSUMOTO

^{*4} Department of Mechanical Engineering, Kobe University,
1-1 Rokkodai, Nada-ku, Kobe-shi, Hyogo, 657-8501 Japan

Cavitation and internal flow in the nozzle of a liquid injector are known to affect the atomization of a discharged liquid jet. In the present study cavitation in a two-dimensional (2D) nozzle and the injected water jet were visualized using an ultra high-speed camera. As a result, the following conclusions were obtained: (1) The behavior of cavitation in the 2D nozzle and liquid jet agreed qualitatively with the previous observations of cylindrical nozzles. (2) When the cavitation number σ was 1.18, the inception of small cavitation bubbles was observed near the nozzle inlet apart from the side wall. (3) The number of cavitation bubble clouds increased with decreasing of σ ($0.75 \leq \sigma < 1.18$), and the streamwise length of the cavitation region increased toward the middle of the nozzle (developing cavitation). The bubble clouds were clearly observed to recirculate in the separated boundary layer. In the case a wavy jet was observed with no significant effects of cavitation on liquid jet atomization. (4) With a slight decrease of σ from 0.75, the cavitation region suddenly extended to the nozzle exit (super cavitation). The shape of the cavitation region near the inlet became smooth, which imply the formation of a long cavitation bubble near the inlet. At the downstream half of the nozzle, clouds of cavitation appeared and collapsed intermittently within the nozzle. In the case atomization was promoted to form spray with ligaments and droplets.

Key Words: Atomization, Injector, Nozzle, Cavitation, Internal Flow, Liquid Jet

1. 結 論

ディーゼルエンジン用燃料インジェクタの噴孔ノズル内ではキャビテーションが生じ、その様相が噴射される液体噴流の微粒化と密接に関係することが知られ、数多くのノズル内可視化実験が行われている⁽¹⁻⁶⁾。その結果、キャビテーションがノズル入口から出口付近まで発達すると、液体噴流の微粒化が促進することが示された。しかし、ノズル内キャビテーションの詳細な挙動、ノズル内流動や乱れおよびその微粒化促進機構は未だ明らかでない。キャビテーションによる微粒化促進機構を解明できれば、様々な工業分野で利用できる効率的な微粒化ノズルの設計に寄与する可能性がある。また、ノズル内キャビテーションの詳細な挙動や

液相速度分布に関する実験データが得られれば、近年試みられているノズル内キャビテーションの非定常数値解析⁽⁷⁻¹⁰⁾の検証にも役立つ。ところで、ノズル内キャビテーション流れの計測を困難にしている原因として、円筒形ノズル内の3次元的なキャビテーションの界面における光の屈折が画像可視化と光学的流速計測を阻むことと、小口径ノズル内キャビテーション挙動の時定数が非常に短いことが挙げられる。光の屈折の問題を回避するために、二次元(2D)ノズルを用いた実験が行なわれている⁽¹¹⁻¹³⁾。Iida ら⁽¹¹⁾の撮影は露光時間が長く、キャビテーションの存在はわかるが、気液界面形状はわからない。大黒ら⁽¹²⁾は数種類の2Dノズル内キャビテーションの透過光撮影を行っているが、同一ノズル内におけるキャビテーションの初生から発達までを系統的に観察していない。Henry と Collicott⁽¹³⁾は透過光撮影およびレーザーシートを用いたキャビテーションのノズル断面撮影を行っている。しかし、同一ノズル内におけるキャビテーションの初生から発達までを対象に、短露光時間・高周波数・高空間分解能

* 原稿受付 2005年3月18日。

^{*1} 正員, 神戸大学工学部機械工学科(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)。

^{*2} 神戸大学大学院自然科学研究科。

^{*3} 正員, 東京大学大学院工学系研究科(〒113-8654 東京都文京区本郷7-3-1)。

E-mail: sou@mech.kobe-u.ac.jp

でその非定常挙動を、微粒化と関連付けて捕らえた研究は見受けられない。また、ノズル内キャビテーションによる微粒化促進機構を解明するためには、ノズル内キャビテーション流れの速度分布計測が有効と考えられる。しかし、Gnirss ら⁽¹⁴⁾がキャビテーションを伴わない2Dノズルの出口流速を計測している以外に、ノズル内流速分布の計測例は少ない。

本研究では、ノズル内キャビテーションの詳細な挙動と、ノズル内キャビテーション乱流に関する知見を得るために、2Dノズル内キャビテーションの初生から発達までを対象に、第1報では超高速カメラを用いた可視化を試みた。その際、2Dノズルの厚さをノズル幅より薄くし、ノズル内2次元液相速度分布のLDV計測を行なった。後者の結果は、第2報で報告する。

2. 実験装置および実験条件

2.1 実験装置 実験装置の概要を図1に示す。水道水をプランジャーポンプで圧送し、内径90mm、高さ800mmの気液分離タンクを経て、2Dノズルから噴射させた。ここで、気液分離タンクはプランジャーポンプで生じる微小気泡を除去するために用いた。2Dノズルの模式図を図2に示す。灰色で示した形状のステンレス製の薄い板を前後からアクリル板で挟んだ構成とした。ノズルの幅 W_N は4mm、ノズル長さ L_N は16mm、厚さ t_N は1mm、ノズル上流の幅は32mmとした。なお、これはディーゼルエンジン用燃料インジェクタのノズルの約20倍のスケールに相当する。ノズル入口はシャープエッジとした。ノズルの長さ L_N と幅 W_N の比 L_N/W_N は、円筒形ノズル内でキャビテーションが生じる条件⁽⁹⁾を参考にして4とした。ノズル厚さをノズル幅より小さくすることにより、LDVによってノズル内液相速度の主流方向成分だけでなく、幅方向成分も計測可能となる。なお、ノズル前後面にアクリル壁が存在するため、ノズル内キャビテーション流れは擬2次元であることを断っておく。

ノズル内キャビテーションと噴流は、超高速カメラ(ナックイメージテクノロジー社製IMACON 200)を用いて透過光撮影した。得られたデジタル画像の画素数は1200×980ピクセル(空間解像度は2.8~18 $\mu\text{m}/\text{pixel}$)である。高速で移動するキャビテーション気泡の界面をシャープに捕らえるために、露光時間 t_{ex} は5nsとした。気液界面が20m/sで移動した場合の画像のぶれは0.1 μm となる。照明には超高速カメラと同期させたキセノン・フラッシュ・ランプを用いた。また、キャビテーションおよび噴流の詳細挙動について調べるために、マクロレンズを用いた拡大撮影(空

間解像度は2.8 $\mu\text{m}/\text{pixel}$)も行なった。なお、噴射圧 P_{inj} はノズル入口から100mm上流の位置でブルドン管圧力計を用いて計測し、水の流量は気液分離タンク下流において面積式流量計を用いて計測した。

2.2 実験条件 主な実験条件を表1に示す。本実験では、次式で定義されるキャビテーション数 σ とレイノルズ数 Re をパラメータとし、キャビテーションの初生前からHydraulic Flipが生じるまでの幅広い条件を対象とした。

$$\sigma = \frac{P_a - P_v}{0.5\rho_L V_N^2} \quad (1)$$

$$Re = \frac{V_N W_N}{\nu_L} \quad (2)$$

ここで、 P_a は雰囲気気圧(=0.1013 MPa)、 ρ_L は水の密度、 V_N はノズル断面平均流速、 ν_L は水の動粘度を表す。水温 T_w は19°C(飽和水蒸気圧 P_v は約2.2 kPa)、溶存酸素濃度は8.98 mg/Lであった。

Fig.1 Experimental setup

(a) front view (b) side view

Fig.2 2D nozzle

Table 1 Typical conditions of experiment

Mean liquid velocity in the nozzle, V_N [m/s]	Reynolds number, Re	Cavitation number, σ
11.25	45000	1.57
12.5	50000	1.27
13.0	52000	1.18
14.5	58000	0.94
16.0	64000	0.78
17.0	68000	0.69
17.5	70000	0.65
19.0	76000	0.55

3. 実験結果と考察

3.1 高キャビテーション数の場合 $\sigma \geq 0.75$ における実験結果と考察を以下に示す。

3.1.1 流れ場の概要 ノズル全体の可視化画像の一例を図3に示す。画像の空間解像度は $18 \mu\text{m}/\text{pixel}$ である。ステンレス製の側壁とキャビテーション気泡が黒く見える。図3に示すように高キャビテーション数の条件では、キャビテーションはノズル入口付近の側壁沿いに、壁からやや離れて現れる。壁から離れた位置でのキャビテーションの初生は従来の知見^(12,13)と一致する。なお、キャビテーション数 σ が減少するほど、キャビテーション気泡の存在領域はノズル入口から側壁に沿って下流方向へ伸びる。

噴流出口から下流方向へ13mmまでの区間における噴流の可視化画像の一例を図4に示す。キャビテーションの初生前を含む $\sigma \geq 0.75$ の全ての条件で、噴流界面に小さな波を伴う波状流となり、ノズル出口直下での噴流の分裂や微粒化は見られなかった。ノズル出口から下流方向へ4.0mmから6.5mmまでの区間における噴流右側面の拡大撮影画像の一例を図5に示す。噴流界面に形成されているさざ波の波高は0.5mm未満であり、界面からの液滴発生は見られない。

以上の結果、 $\sigma \geq 0.75$ の条件では、キャビテーションはノズルの上流半分にしか現れず、キャビテーションによる噴流の微粒化促進効果は小さいことがわかった。本研究では、このような発達途上のノズル内キャビテーションを Developing Cavitation と呼ぶこととする。

3.1.2 キャビテーションの詳細挙動 ノズル右入口付近の拡大撮影画像の一例を図6に示す。空間解像度は $2.5 \mu\text{m}/\text{pixel}$ である。ノズルエッジが斜めにカットされたように見えるのは、ノズルエッジ稜線とカメラの光軸が一致していないためである。図6(b)より、

本実験では $\sigma=1.18$ においてキャビテーションが初生し、その位置は剥離境界層の外縁付近と考えられる。初生位置付近での速度分布については第2報で報告する。さらに、図3および図6(c)-(f)に示すように、キャビテーション数 σ が低下すると、キャビテーション領域は下流方向へ伸び、剥離境界層内全域に広がり、かつ気泡の数密度を増すことがわかった。

Fig.3 Images of cavitation in a 2D nozzle ($18 \mu\text{m}/\text{pixel}$, $t_{\text{EX}}=5 \text{ ns}$)

Fig.4 Images of liquid jet below the nozzle exit ($18 \mu\text{m}/\text{pixel}$, $t_{\text{EX}}=5 \text{ ns}$)

Fig.5 Zoom in images of liquid jet interface ($2.5 \mu\text{m}/\text{pixel}$, $t_{\text{EX}}=5 \text{ ns}$)

キャビテーションが初生した条件 ($\sigma=1.18$) でのキャビテーションの時間変化を図7に示す。4個程度のキャビテーション・クラウドが剥離境界層内の流れに乗って移動・成長・変形・崩壊 (図7(b)の矢印1など) していることが分かる。また、図7(c)中に矢印2で示すように、時刻 $t=12\mu\text{s}$ ではノズル入口から下流方向

へ約 $350\mu\text{m}$ 、壁から約 $200\mu\text{m}$ 離れた位置に、新たなキャビテーションが初生しており、初生が側壁面上で生じるのではないことが確認された。各キャビテーション・クラウドが単一気泡なのか、複数の気泡で構成されているのかは明確には判別できないが、その大きさは約 $20\sim 150\mu\text{m}$ に見える。

$\sigma=0.78$ におけるキャビテーションの時間変化を図8に示す。画像は10 μ s 間隔で撮影しているが、紙面の都合上40 μ s 間隔で示す。時刻 $t=0\mu$ s ではノズル入口から約0.9mm 下流の位置に、また $t=120\mu$ s では約2.0mm 下流の位置に、キャビテーション領域の切れ目が見られ、キャビテーションの数密度が高いこの条件でも、キャビテーションが小気泡の集合体であることがわかった。キャビテーション領域の主流側外縁にキャビテーション・クラウドの凹凸が見える(図8中の矢印1,2)。この凹凸形状の時間変化から、主流側外縁付近ではキャビテーション・クラウドが下流へ移動していることがわかった。一方、側壁沿いに見えるキャビテーション・クラウド(図8中の矢印3,4)はゆっくりと上方へ移動している。従来、キャビテーション領域を剥離境界層と見なした議論が見られる^(1,3,4)が、キャビテーション領域と剥離境界層の対応については明確にされていない。本結果より、キャビテーション領域は剥離境界層と対応しており、キャビテーション・クラウドの数密度が高い条件では、図8(e)に模式的に示すように、キャビテーション・クラウドが剥離境界層の循環流れに乗って移動していることが明らかになった。

3.2 低キャビテーション数の場合 $0.55 < \sigma < 0.75$ における実験結果と考察を示す。

3.2.1 流れ場の概要 ノズル内全体画像の一例を図9に示す。 $0.55 < \sigma < 0.75$ では、図に示すようにキャビテーション領域が側壁に沿ってノズル入口から出口付近まで発達する。キャビテーション領域の外縁は、ノズルの上流部分ではスムーズな形状で、下流部分では複雑な凹凸が生じていることがわかった。

この条件での液体噴流の画像の一例を図10に、ノズル出口から下流方向へ4.0~6.5mm の位置における噴流右側面付近の拡大撮影画像の一例を図11に示す。図4および5の波状流とは明らかに異なり、噴流が出口から13mm の範囲でも末広がりになっている。また、噴流の左右界面には複数の液糸(リガメント)が伸び、多数の液滴も見え、微粒化されていることがわかる。

以上より、キャビテーションが発達してノズル出口付近に達することが、液体噴流の初期変形・分裂・微粒化と密接な関係にあることが確認された。キャビテーション領域がノズル出口付近に達すると微粒化が促進される現象は、円筒形ノズル内での従来の結果^(1,2,5)と定性的に一致しており、今回得られたキャビテーションおよび液体噴流挙動は、本2D ノズル特有のものではないと考えられる。

本研究では、このように発達したノズル内キャビテーションを Super Cavitation と呼ぶ。

Fig.9 Images of cavitation in a 2D nozzle (18 μ m/pixel, $t_{EX} = 5$ ns)

Fig.10 Images of liquid jet near the nozzle exit (18 μ m/pixel, $t_{EX} = 5$ ns)

Fig.11 Zoom in images of liquid jet interface (2.5 μ m/pixel, $t_{EX} = 5$ ns)

Fig.12 Supercavitation in the 2D nozzle ($\sigma = 0.69$, $Re = 68000$, $18 \mu\text{m}/\text{pixel}$, $t_{\text{EX}} = 5 \text{ ns}$) Fig.14 Collapse of cavitation clouds above the nozzle exit ($\sigma = 0.65$, $Re = 70000$, $2.5 \mu\text{m}/\text{pixel}$, $t_{\text{EX}} = 5 \text{ ns}$) Fig.13 Zoom in images of cavitation near the inlet ($2.5 \mu\text{m}/\text{pixel}$, $t_{\text{EX}} = 5 \text{ ns}$)

図12に $\sigma=0.69$ における発達したノズル内キャビテーションの時間変化を示す。画像は $30 \mu\text{s}$ 間隔で撮影した。図中に白矢印で示すように、ノズル中流から下流において、側壁沿いのキャビテーション領域から断続的に突出している複雑な形状のキャビテーション・クラウドが、成長・変形しつつ下流へ移動し、最終的にはノズル出口の約1~2mm上流の位置で崩壊することがわかった。清水らは、円筒形ノズル内でキャビテーションがノズル入口から出口付近へ達し、出口付近で上下に振動する時に微粒化が最も促進すると報告して

いおり⁽¹⁾、本研究におけるキャビテーション・クラウドの断続的な崩壊と対応する。したがって、ノズル下流部に断続的に現れるキャビテーション・クラウドのノズル出口付近での崩壊は、噴流の微粒化促進と密接な関係にあるといえる。すなわち、円筒形ノズルにおいても同様のキャビテーション挙動が微粒化に強く関わっていることが示唆される。

3.2.2 キャビテーションの詳細挙動 Super Cavitationに関して詳細に調べるために、ノズル入口および出口付近での拡大撮影を行った。図13はノズル入口付近でのキャビテーション画像の一例である。空間解像度は $2.5 \mu\text{m}/\text{pixel}$ である。図6に示したDeveloping Cavitationの場合と比べると、キャビテーションが側壁に接して、エッジから伸びている点、およびキャビテーション領域の主流側外縁がスムーズである点が明確に異なる。なお、このスムーズな外縁は時間的に形状が変化せず、連続した気相の界面であると考えられる。

$\sigma=0.65$ におけるノズル出口からその2.5mm上流までの区間における拡大撮影画像を図14に示す。空間解像度は $2.5 \mu\text{m}/\text{pixel}$ である。この図に示すように、本実験条件内では、キャビテーションはノズル出口の約1~2mm上流までで全て断続的に崩壊し、ノズル出口からのキャビテーション流出は見られなかった。

Fig.15 Cavitation in a 2D nozzle and liquid jets

Fig.16 Cavitation length L_{cav}^*

3.3 キャビテーションの発達と噴流の微粒化

キャビテーション数 σ の低下に対するノズル内キャビテーションと液体噴流の遷移状況を図15にまとめる。これらの画像は閃光時間12 μ sの背景光により撮影した。キャビテーションが生じない条件から、初生を経て、キャビテーション領域がノズル上流半分に残まる Developing Cavitation の条件までは、噴流は界面にさざ波を伴う波状流を呈し、ノズル出口直下での噴流の分裂や微粒化は生じない。 σ が0.75より低下すると、キャビテーション領域が急激に成長し、Super Cavitation に遷移する。Super Cavitation の条件では、キャビテーションはノズルエッジに付着し、ノズル出口

直上で崩壊する。このとき、噴流は末広がりになり、ノズル出口直下でも噴流の左右界面にリガメントが多数現れ、液滴が飛散する噴霧流になり、微粒化が促進される。

以上の結果より、ノズル内キャビテーションが液体噴流の初期変形・分裂・微粒化促進の重要な一因であることが確認できた。

なお、 $\sigma \leq 0.55$ ではノズルの左右いずれか一方の壁面で、流れが剥離したままノズルから噴出する Hydraulic Flip^(3,4,5)を呈し、噴流の分裂と微粒化は抑制される。以上のキャビテーション発達過程とノズル出口直下における噴流の初期変形・分裂・微粒化特性およびそれらの関係は、従来の研究において円筒形ノズルで観測されている結果^(4,5)と定性的に一致しており、これらの点に関して本ノズルは円筒形ノズルと同様の現象を再現している可能性が示唆される。ただし、円筒形ノズルで生じる Hydraulic Flip はノズル側壁全周において付着しないのに対して、2Dノズルを用いた本実験では、図15に示すように数秒毎に左右が入れ替わる Hydraulic Flip となった。

キャビテーション領域の流れ方向長さ L_{cav} をノズル全長 L_N で無次元化した L_{cav}^* のキャビテーション数 σ 依存性を図16に示す。 $\sigma \leq 1.18$ で $L_{cav}^* > 0$ (初生)となり、さらに σ が0.75から僅かに減少すると、ノズル内キャビテーションは Developing Cavitation から Super Cavitation に急変し、 $\sigma \leq 0.55$ で Hydraulic Flip になることがわかる。

4. 結 論

ノズル内キャビテーションの詳細挙動と液体噴流の初期変形や微粒化との関係に関する知見を得るために、本研究では 2 次元(2D)ノズルを対象としたノズル内キャビテーションとノズル出口直下における液体噴流の超高速カメラによる可視化を行なった。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 本研究で用いた 2D ノズル内キャビテーションとノズル出口直下における液体噴流の初期変形・分裂・微粒化特性は、従来の円筒形ノズルの結果と定性的に一致した。
- (2) キャビテーション数 σ が 1.18 程度に減少すると、ノズル入口よりわずかに下流の剥離境界層外縁上で、キャビテーションは初生する。
- (3) $0.75 \leq \sigma < 1.18$ では、キャビテーション領域は剥離境界層内に広がり、多数のキャビテーション・クラウドが剥離境界層の循環流れに乗って移動する。キャビテーションがノズル上流に留まる限り、噴流は波状流を呈し、ノズル出口直下では分裂や微粒化しない。
- (4) $0.55 < \sigma < 0.75$ では、キャビテーション領域外縁はスムーズになり、キャビテーションがノズル出口付近で断続的に崩壊する。このとき、ノズル出口直下でも噴流は末広がりになり、左右界面にリガメントおよび液滴が多数現れ、微粒化が促進される。
- (5) $\sigma \leq 0.55$ では、左右の側壁のうち交互に一方において流れが剥離したままノズルから噴出する Hydraulic Flip になり、噴流の分裂と微粒化は抑制される。

謝 辞

東京大学大学院松本研究室博士後期課程の池田貞一郎君には実験の実施に際して協力を頂いた。また、本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金「若手研究(B)」(課題番号 16760129)の助成により行われた。ここに謝意を表します。

文 献

- (1) 清水正則, 新井雅隆, 廣安博之, "高速液体噴流の分裂過程", 機論 B 編, 54-504 (1988) pp.2236-2244.
- (2) 清水正則, 新井雅隆, 廣安博之, "液体噴流の微粒化過程とノズル内の流れ", 機論 B 編, 56-528 (1990) pp.2519-2525.
- (3) H. Chaves, M. Knapp, A. Kubitzek, F. Obermeier and T. Schneider, "Experimental Study of Cavitation in the Nozzle Hole of Diesel Injectors Using Transparent Nozzles", SAE Paper, 950290, (1995) pp. 645-657.
- (4) C. Soteriou, R. Andrews and M. Smith, "Direct Injection Diesel Sprays and the Effect of Cavitation and Hydraulic Flip on Atomization", SAE Paper, (1995) No. 950080.
- (5) 玉木伸茂, 西田恵哉, 清水正則, 廣安博之, "ノズル噴孔内のキャビテーションが液体噴流の微粒化に及ぼす影響", 機論 B 編, 63-614 (1997) pp.3447-3454.
- (6) L. C. Ganippa, G. Bark, S. Andersson and J. Chomiak, "Comparison of Cavitation Phenomena in Transparent Scale-up Single-Hole Diesel Nozzles", Proc. CAV2001, (2001) A9.005.
- (7) D. P. Schmidt, C. J. Rutland, M. L. Corradini, P. Roosen and O. Genge, "Cavitation in Two-Dimensional Asymmetric Nozzles", SAE Paper, (1999) No. 1999-01-0518.
- (8) R. A. Bunnell, S. D. Heister, C. Yen and S. H. Collicott, "Cavitating Injector Flows: Validation of Numerical Models and Simulations of Pressure Atomizers", Atomization and Sprays, 9-5, (1999) pp.445-465.
- (9) W. Yuan and G. H. Schnerr, "Optimization of Two-Phase Flow in Injection Nozzles (Interaction of Cavitation and External Jet Formation)", Proc. ASME FEDSM '02, (2002) CD-ROM FEDSM2002-31016.
- (10) A. Sou and A. Tomiyama, "Numerical Simulation of Liquid Jet Deformation Based on Hybrid Combination of Interface Tracking and Bubble Tracking Methods", Multiphase Sci. and Tech., 17-1-2, (2005) pp.23-41.
- (11) H. Iida, E. Matsumura, K. Tanaka, J. Senda, H. Fujimoto and R. R. Maly, "Effect of Internal Flow in a Simulated Diesel Injection Nozzle on Spray Atomization", Proc. ICLASS 2000, (2000) CD-ROM.
- (12) 大黒正敏; 古舘仁; 野田英彦, "ノズル内キャビテーションが液体分裂機構に及ぼす影響(第 2 報, 2D ノズル内の液流の挙動)", 機論 B 編, 69-685, (2003) pp.2024-2029.
- (13) M. E. Henry and S. H. Collicott, "Visualization of Internal Flow in a Cavitating Slot Orifice", Atomization and Sprays, 10, (2000) pp.545-563.
- (14) M. Gnirss, K. Heukelbach, and C. Tropea, "Influence of Nozzle Flow on the Atomization of Liquid Sheets and Round Jets", Proc. DFG-Priority Program Atomization and Spray Processes, (2004) Paper No. 1.2.