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*

大黒正敏^{*1}, 古舘 仁^{*2}

Effect of the Cavitation in a Nozzle on the Liquid Breakup

Masatoshi DAIKOKU^{*3} and Hitoshi FURUDATE^{*3} Department of Mechanical Systems on Information Technology, Hachinohe Institute of Technology,
88-1 Myo Ohbiraki, Hachinohe-shi, Aomori, 031-8501 Japan

The objective of this study is to promote disintegration of liquid jet by cavitation inside the nozzle. Using cylindrical nozzle, the effects of the nozzle dimensions on the liquid breakup are investigated. When the length-diameter ratio L/D of the nozzle is low, cavitation bubbles are formed inside the nozzle and the breakup of the issuing jet is promoted.

Key Words: Atomization, Cavitation, Liquid Breakup, Cylindrical Nozzle

1. 緒言

液体の微粒化が関連する分野は燃焼器などの燃料噴射、噴霧乾燥、噴霧冷却、調湿、洗浄、表面処理、農薬散布などきわめて広く、使用目的に適合した噴霧特性が要求されており、微粒化された噴霧液滴群の平均粒径、粒度分布等を制御することや液体微粒化の促進が不可欠な条件となっている。圧力噴射弁では、100 MPa 以上の高圧噴射により微粒化促進が可能であるが、噴射弁の耐久性の問題が発生することに加え、生成される噴霧の平均粒径は $15\mu\text{m}$ 程度にとどまってしまう。したがって、噴射圧力が低くとも粒径の増大を抑制できるのであれば、省エネルギーの立場からも有用であると考えられ、そのためノズル内のキャビテーション発生による液流のかく乱を利用して、微粒化を促進させる試みがなされている。清水ら¹⁾は、噴孔長さ/噴孔径比 $L/D=1\sim50$ の円筒ノズルを用いて、内部のキャビテーションと噴出した液体の分裂模様を調べた結果、噴射圧力 2.0 MPa までは縮流、キャビテーションが発生、その縮流はノズル壁面に再付着することを確認するとともに、その付着位置は噴射圧力の増加にともない、噴孔出口側に移動して、これにともなって微粒化は促進すると報告している。さらにノズル内における縮流の再付着点が噴孔出口に近づくと、噴出後の液体が微粒化するまでの長さ(分裂長さ)が短くなり、噴霧角が増大することを明らかにしている。また、噴射

圧力が 2.0 MPa 以上では、ノズル急縮小部から液体がはく離し、縮流状態を保ったままノズルより流出するために、まったく微粒化されないことも示している。

玉木ら²⁾は、液流の乱れを促進するためにノズル入口部にメッシュを設けた噴射弁や、ノズル内部に円環状の溝を付けた噴射弁を用いて、 $L/D=1\sim20$ の範囲で、ノズル内部のキャビテーション模様と噴出した液体の分裂模様を調べている。メッシュを設けた場合には、 L/D が増加すると分裂長さは長くなり、噴霧角が小さくなって微粒化特性が低下し、ノズル部に円環状の溝がある場合では、その溝を境にした上流部長さと下流部長さが短いほど噴流の微粒化が促進され、分裂長さが短くなると報告している。

本研究では、ノズル内におけるキャビテーション発生・崩壊が液体の分裂に及ぼす影響を調べるために、研究の初期段階として円筒ノズルを用いて、寸法や形状が内部流れと噴出した液体の分裂模様と及ぼす影響を観察、検討することとする。

2. 実験方法

図 1 に透明アクリル製の供試円筒ノズルの概略図を示す。図 1(a)は、ノズル内で縮流が起きやすいように急縮小部をもつ形状(以後、S-Type と称する)である。表 1 は S-Type のノズル寸法諸元である。噴孔長さ/噴孔径 $L/D=3, 12, 20$ と定め、噴孔径 D を 0.5, 1.5, 3 mm として、それに対応する噴孔長さ L を決定し、計 9 種類を製作したが、本報では主に噴孔径 D が 1.5, 3 mm での結果について述べる。図 1(b)は、噴孔入口部に丸み($R=3.5\text{ mm}$)をつけたノズル(以後、R-Type と称する)、図 1(c)は噴孔径が連続的に減少する

* 原稿受付 2001 年 7 月 25 日。

^{*1} 正員, 八戸工業大学機械情報技術学科(〒031-8501 八戸市大字妙大開 88-1)。^{*2} 准員, 八戸工業大学大学院。

E-mail: daikoku@hi-tech.ac.jp

ようにテーパ部を持つノズル（以後、T-Type と称する）である。

図 2 に実験装置系統図を示す。供試液体は水道水であり、フィルターを通した後、プランジャポンプで加圧し、ノズルから定常噴霧される。水道水の溶存酸素量は、溶存酸素メーター（HORIBA 製 OM14）で測定し、その値は水道出口で $5.2 \sim 6.6 \text{ g/m}^3$ 、ノズル流出後で $6.1 \sim 8.5 \text{ g/m}^3$ の範囲である。ノズル内部の液体の乱れ模様、噴出した液体の分裂模様はマイクロフラッシュ（菅原研究所製 PS240）を光源とする透過光にて 35 mm スチールカメラで撮影した。分裂模様はノズル端下方 200 mm が写真中央になるように撮影した。なお、光源の閃光時間は $12 \mu\text{s}$ であり、比較的大きなスケールの液流の乱れは判別可能となっている。本研究では研究の初期段階として、キャビテーション発生の観察など基本的な現象の把握に重点をおくことにし、噴射圧力は低圧として、その範囲は絶対圧で $0.2 \sim 1.0 \text{ MPa}$ とした。噴射圧力は円筒ノズルの液体供給部（ノズル上端）の上方約 50 mm で測定した。なお、ポンプに起因する圧力変動の周波数は噴射圧によらず $40 \sim 50 \text{ Hz}$ 、振幅はノズル入口で $\pm 1 \text{ kPa}$ 以内であり、噴射圧に対して最大 1 % 程である。また、流量と噴孔径から算出した平均流速は $0.85 \sim 27.5 \text{ m/s}$ の範囲、その変動は 5 % 以内である。なお、円筒ノズルのレイノルズ数 Re は平均流速 U 、噴孔径 D を用いて次式で定義した。

Fig.1 Test cylindrical nozzles

Fig.2 Schematic of experimental apparatus

Table1 Dimension of S-Type nozzles

$D \text{ (mm)}$	$L \text{ (mm)}$	L/D
3	9	3
1.5	4.5	
0.5	1.5	
3	36	12
1.5	18	
0.5	6	
3	60	20
1.5	30	
0.5	10	

$$Re = \frac{UD}{\nu} \dots \dots \dots (1)$$

キャビテーションの発生の目安となるパラメータとしてキャビテーション係数が用いられるが、その定義は、

$$\kappa = \frac{p_{\infty} - p_v}{\frac{1}{2} \rho_l U_{\infty}^2} \dots \dots \dots (2)$$

である。ここで、 p_v 、 ρ_l は、それぞれ液体の蒸気圧と密度、 p_{∞} 、 U_{∞} は、それぞれ無限遠における静圧と流速である。キャビテーションによる微粒化促進に関する研究では、キャビテーション係数の定義が未だ定まっておらず、研究者によって異なっている^{3),4)}ことや、また噴射圧力にはノズル直前の圧力が用いられていることから、本研究では、ノズル直前の圧力を噴射圧力 p として、噴孔内平均流速 U を用いて、

$$\kappa = \frac{p}{\frac{1}{2} \rho_l U^2} \dots \dots \dots (3)$$

と表現することにした。なお、(3)式で求めたキャビテーション係数の範囲は $278 \sim 2.6$ である。

3. 実験結果と考察

3. 1 円筒ノズルの内部流れと液体の分裂模様

図 3 に S-Type ノズルの内部流れ（上段）と噴出した液体の分裂模様（下段）を $L/D=20$ の場合について示す。 $L/D=20$ の場合、噴射圧力が $0.2 \sim 0.5 \text{ MPa}$ （図

3(a)~(d))では、ノズル内急縮小部にキャビテーションは発生していないことがわかる。下段の写真はノズル端下方 200 mm 周囲の液流の挙動を示しているが、噴出した液体はほとんど微粒化していない。噴射圧力が 0.6 MPa 以上 ($Re=5.23 \times 10^4 \sim 8.26 \times 10^4$) (図 3(e)~(g)) になると、ノズルの急縮小部からわずかにキャビテーションが発生していることが確認されるが、この気泡は発生直後に消失している。また、噴出した液体表面は乱れてはいるものの、噴射圧力が 0.8 MPa 以上の場合ほどには分裂が促進していないことがわかる。これは、キャビテーション気泡崩壊によって乱れが発生したとしても、 L/D の値が大きい、すなわち噴孔長さ L の値が大きいため液体が噴孔内を流れ行く過程で乱れが減衰するためと考えられる。また、この圧力の再上昇にともなう気泡の消滅点 (キャビテーションの再付着点) は、噴射圧力が増加するにしたがって下流に移動していくことが図 3(h)および(i)からも確認されるが、これは清水らの実験結果¹⁾とも一致している。このような場合には、キャビテーション気泡の崩壊による液流の乱れによるためか、噴出した液体表面は大きく乱れており、液滴が周囲に飛散する様子が確認される。

図 4 に S-Type ノズルの内部流れ (上段) と噴出した液体の分裂模様 (下段) を $L/D=12$ の場合について示す。例えば、噴射圧力が 0.9 MPa において、 $L/D=20$ の場合 (図 3(h))、発生したキャビテーションが噴孔内で消滅するのに対して、 $L/D=12$ (図 4(h))では、消滅しないまま噴出する現象が見られる。これは L/D の値が大きい場合には、加圧された液体が大気に解放されるまでの距離が長いこと、キャビテーション気泡が消滅する圧力にまで再び上昇しやすいのに対して、 L/D が減少すると、下流 (大気) の影響を受けて圧力の再上昇が妨げられ、気泡が消滅しなくなる傾向が見られるためと考えられる。また、噴出した液流も大きく乱れており、特に気泡が消滅しないままノズルから噴出する場合 (図 4(e)~(i)) には微粒化が促進していることがわかる。本研究では、同じ噴孔径 ($D=3$ mm)、噴射圧力の場合、 $L/D=20$, 12 双方のノズル内流速はほとんど同じであるにもかかわらず、 $L/D=20$ に比べ $L/D=12$ の場合に低噴射圧力でキャビテーションの発生が見られる。その原因のひとつとして、 $L/D=12$ では L の値が小さいために、縮流部から大気圧下に液流が開放されるノズル出口までの圧力勾配が大きいことが挙げられ、その影響により、上流 (縮流部) で気泡が発生しやすくなると考えられる。

図 5 に S-Type ノズルの内部流れ (上段) と噴出し

た液体の分裂模様 (下段) を $L/D=3$ の場合について示す。この場合、0.4 MPa (図 5(c))と低い噴射圧力でもノズル全体にキャビテーションが発生して、液流が乱れ、噴出した液体の分裂が促進していることがわかる。この現象は、それ以上の圧力の場合でも同様であり、このように小さな L/D の場合は、気泡の消滅は起こり得ず、気泡発生にともなう液流のかく乱により、微粒化が促進していることがわかる。

3. 2 ノズル形状の影響 ノズルの寸法形状が分裂におよぼす影響を考察するために、R-Type および T-Type ノズルについて、液体の分裂模様 (平滑流、波状流、噴霧流) について噴出速度と形状で分類したものを図 6(a)に示す。また、分裂模様の遷移を調べるために、S-Type ノズルについて、噴出した液体の分裂模様を噴出速度と L/D で分類したものを図 6(b), (c)に示す。ここで、平滑流は軸対称的な波動の成長により変形、液滴に分裂する状態、波状流は軸対称的でなく、表面に微視的な乱れ、変形が発生し、それが周囲気体の作用により拡大し、表面の凹凸だけでなく、液柱が複雑に曲がる状態、噴霧流は流速の増大にともない周囲気体の作用が大きくなり、ひも状、ツノ状、袋状等の変形が生じ、その分裂により液滴を発生する状態が一部、あるいは全体に存在するものと定めた^{5),6)}。平滑流から波状流、波状流から噴霧流への遷移は、複数回の写真撮影と目視による観察から判断したため、流速にある程度の幅があり、このような帯状の曲線で示している。単孔ノズルからの液体噴流の分裂模様や分裂長さは、ウェーバー数 (慣性力と表面張力 σ の比) と使用気体と周囲液体の密度比 (ρ_a / ρ_l) の n ($=0.55$) 乗との積で定義される無次元数、ジェット数 Je ;

$$Je = \frac{\rho_l U^2 D}{\sigma} \left(\frac{\rho_a}{\rho_l} \right)^{0.55} \dots \dots (4)$$

を用いてしばしば整理される。まず、この節ではノズル形状がノズル内の乱れと液体の分裂に及ぼす影響を調べるために、R-Type, T-Type ノズルについて考察する。なお、S-Type ($L/D=3$, $L=9$ mm) の L が、R-Type および T-Type ノズルの直管部の長さに近いことから、これらを比較することにする。R-Type ノズル, T-Type ノズル (図 6(a)) とともに波状流から噴霧流に遷移する流速が、同程度の噴孔長さを持つ S-Type ($L/D=3$) に比べ、大きい値になっている。これは、T-Type ではノズル内の流路断面積の変化が緩やかで、それにとり

Fig.3 Internal flow and breakup phenomena ($L/D=20$, $D=3$ mm)

Fig.4 Internal flow and breakup phenomena ($L/D=12$, $D=3$ mm)

Fig.5 Internal flow and breakup phenomena ($L/D=3$, $D=3 \text{ mm}$)

Fig.6 Transition of breakup phenomena

う流れの方向、速度変化が緩やかなためにキャビテーションが発生せず、それによる乱れの促進がなされないと考えられる。S-Type に比べその発生が抑制されているものの、R-Type では、0.6 MPa になると噴孔直管部入口からキャビテーションが発生し、液体の分裂が促進されることが確認された。

3. 3 分裂模様の遷移 ここでは、S-Type ノズルの L/D が分裂模様の遷移にどのように影響を与えるかを調べた結果を示す。S-Type ノズル (図 6(b),(c)) において、 L/D の値が小さくなるにつれ、波状流から噴霧流に遷移する流速が、小さくなることわかる。これは、図 5 に示したように、急縮小部の存在による縮流、キャビテーション気泡発生の影響による微粒化の促進が行われることに対応している。それに対して、

噴孔長さが相対的に長くなることにより、縮流、キャビテーションによる乱れが発生しても、その乱れが流路内で安定化することにより、この波状流から噴霧流への遷移流速の値は大きくなるのである。

一方、ノズルから噴出後の液体が平滑流から波状流へと遷移する流速は、波状流から噴霧流への遷移ほどは L/D に依存していないことがわかる。これは、平均流速の値が小さい領域であり、キャビテーションの発生がなく、その影響を受けないためと考えられる。単孔ノズルからの液体噴流に関して、ジェット数 $Je=10 \sim 15$ で平滑流から波状流に、 $Je=400 \sim 500$ で波状流から噴霧流に遷移する⁷⁾とされている。本研究で用いた円筒ノズルにおいて、平滑流から波状流に遷移する流速は、 $Je=15$ とすれば、計算上 $D=3$ mm の場合で 3.8 m/s、 $D=1.5$ mm の場合で 5.3 m/s となり、 $L/D=20$ では、単孔ノズルに類似しているためか、特に $D=1.5$ mm の場合、実験結果とよく一致している。また、波状流から噴霧流に遷移する流速に関しても、 $Je=400$ とすれば、計算上 $D=3$ mm で 19.5 m/s、 $D=1.5$ mm で 27.5 m/s となり、これは $L/D=20$ の実験結果とよく一致していることがわかる。

レイノルズ数が同程度 ($Re=3.12 \times 10^4 \sim 3.74 \times 10^4$ の範囲) の場合 (図 3(c), 図 4(c), 図 5(c)), $L/D=20, 12$ では噴孔内にキャビテーションは発生しておらず、噴孔内の乱れは見られないのに対し、 $L/D=3$ では噴孔内の液流が激しく乱れており、その乱れは噴孔出口まで連続している。また、本報には観察結果を示していないが、噴孔径が 1/2 スケールの $D=1.5$ mm の円筒ノズルにおいても、同程度のレイノルズ数でキャビテーションの再付着や、噴射圧力の上昇による再付着点の移動など、 $D=3$ mm の場合と同じ傾向であることが確認された。

また、本研究におけるノズル内部流れの観察結果 ($L/D=3, D=1.5$ mm) に見られる流れは、急縮小部からの縮流・循環流の発生や壁面近傍からキャビテーション気泡が発生、崩壊する挙動に関する宋ら⁸⁾による 2 次元ノズル ($L/D=4, D=2$ mm) 内流れの数値計算結果によく一致していることが確認された。したがって、このようなノズル内液流の乱れは、彼らの解析結果が示すように、微粒化の促進に重要な役割を果たしていると考えられる。 L/D の減少により、より小さい流速で微粒化が促進されることは応用上、有意義であると考えられるが、それが主にキャビテーション発生による液流の流れ場の乱れによるものか、あるいは主に気泡の崩壊・消滅による衝撃的な液流のかく乱によるものかを今後明らかにする必要がある。

4. 総 括

本研究は高速噴流の微粒化促進を目的に、円筒ノズルを用いて噴射圧力、ノズルの寸法 (L/D)、ノズル形状それぞれが、噴出した液体へ及ぼす影響を調べた。その結果を以下に示す。

- (1) 噴射圧力が増加すると、噴孔内にキャビテーションが発生し、微粒化が促進されることを確認した。
- (2) L/D が大きい場合、噴孔で発生した乱れがノズル内を流れ行く過程で減衰するため、噴出した液体の微粒化は促進されない。
- (3) L/D が小さい場合、それが下流の流れの影響を受けにくいので、低噴射圧においてもキャビテーションが発生し、そのため噴出した液体の分裂が促進される。
- (4) L/D が小さい場合、キャビテーションの発生・崩壊の影響を受けるために、波状流から噴霧流に遷移する流速は小さくなる。
- (5) R-Type, T-Type ノズルは、同程度の噴孔長さ ($L/D=3$) の S-Type ノズルに比べ、噴孔内の流れの方向、速度変化が緩やかで、そのためキャビテーション

の発生が抑えられ、微粒化が促進されない。

文 献

- 1) 清水・新井・廣安, 機論 B, 56-528, 2519-2525, (1990).
- 2) 玉木・西田・清水・廣安, 機論 B, 63-613, 3144-3149, (1997).
- 3) 水口・西田・吉崎・廣安, 第7回微粒化シンポジウム講演論文集, 203-208, (1998).
- 4) 千田・松村・藤本, 第7回微粒化シンポジウム講演論文集, 197-202, (1998).
- 5) 倉林, 液体の微粒化技術, 27-55, (1995), アイピーシー.
- 6) 日本液体微粒化学会編, アトマイゼーション・テクノロジー, 14, (2001), 森北出版.
- 7) Tanasawa, Y. and Toyoda, S., *Technology Reports of Tohoku Univ.*, 19-2, 135-156, (1955).
- 8) 宋・中島・正木, 第9回微粒化シンポジウム講演論文集, 251-256, (2000).