液滴飛散を生ずる噴流におよぼすノズル長さの影響*

石戸 勉¹⁾, 長谷川 裕晃²⁾

Effect of Nozzle Length on Jet Occurring Explosive Droplets Splashing

Tsutomu ISHIDO and Hiroaki HASEGAWA

ABSTRACT

Water jet accompanied with explosive droplets splashing under the various conditions was observed by flow visualization method as a basic study on the droplets control to develop the novel atomization system. Water jet that spouted from nozzle attached to bottom of air pressurized water reservoir naturally draws air from free surface of water in the reservoir and becomes a gas-liquid mixture jet when the free surface of water in the reservoir makes low into some height from the bottom with time elapsed. The gas-liquid mixture jet has made periodic radial splash of water droplets. In this study, the nozzle length and ejection pressure were changed and the droplets splashing phenomenon was analyzed by using high speed visualization and pressure measurement. As a result, it was found that the frequency of aligned droplets was changed due to difference in the nozzle length.

Keywords: Water jet, Droplet, Nozzle, Free surface, Atomization

1. 緒 言

噴流や液滴は、各種産業分野での利用のみならず、我々の日常生活においてもよく見聞する現象である。その中でもノズルより大気中に噴出される水噴流は、噴孔ノズルからの噴射などをはじめ多数の例を挙げることかできる。また、医療現場における点滴や内燃機関の燃料噴射に見られる液体微粒化技術などは液滴利用の好例である。

液体の微粒化には様々な方法が考えられている¹⁾。気体エネルギーを利用した方法では、液体噴流内でキャビテーション気泡を積極的に発生させると、単一噴孔ノズルにおいても微粒化が促進されるとの知見が報告されている^{2)~4)}。ただし、これらの研究はディーゼルエンジンの燃料噴射に関するもので高圧かつ高速流のものを対象にしている。そこで液体噴流に空気を意図的に吸込ませ、単一噴孔ノズルから気液混合噴流を形成させることで比較的低下で液体の微粒化が促進できるのではと考え実験を行ってきた。その実験の途中で、貯水用容器内の自由表面を持つ水を加圧し、底部に取付けられた流路が急縮小するノズルから噴流として噴出させた。こ

のとき、容器底面から自由表面までの高さがある範囲になると、噴流から液滴が半径方向外側へ周期的に整列して急激に飛散する場合があることを見出した^{5),6)}。この液滴飛散を生ずる噴流の概念図を **Fig. 1** に示す。容器内自由表面が低下していくと自然に空気が気柱として吸込まれ、気液混合噴流として噴出する。この噴流は、半径方向へ周期的に整列した液滴飛散を伴う。先行研究^{5),6)}では、ノズルの縮小部に形成された気泡が噴出後に急激に膨張するため、液滴飛散が生じるとの結果を得ているが、ノズル形状、特にノズルの縮小部

Fig. 1 Conceptual sketch of water jet with explosive splashing droplets.

* 原稿受付 2020 年 5 月 28 日

1) 宇都宮大学 工学部 (〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2, E-mail: ishido@cc.utsunomiya-u.ac.jp)

2) 正会員 宇都宮大学 工学部

長さの影響についての知見は多くない。

ノズル形状の影響を調査した研究は、ディーゼルエンジンの燃料噴射に関連する研究⁷⁻⁹⁾がある。これらもノズルの構造を単純にするべく単一噴孔ノズルを用いた実験がなされている。しかし、ディーゼルエンジンの燃料噴射を想定しているため、本研究の実験条件と比較して噴射圧力において2桁程度、噴流速度において1桁程度大きなものとしており高圧かつ高速流となっている。一方、本研究で取扱う液滴飛散現象はこのような内燃機関の燃料噴射ほどの高圧下での現象ではなく、医療現場で用いられる点滴のような水面とノズルの高低差を利用した低圧下での重力と表面張力のバランスによる液滴形成過程の現象^{10),11)}でもない。したがって、この液滴飛散要因の知見の蓄積が進んで、液滴飛散の周期性や飛散速度を制御できれば、今までにない液滴の活用が実現することとなる。

本研究は、可能な限り単純な構造の液体微粒化システムの開発をはじめ、様々な分野で応用が期待される液滴制御の基礎的研究として、種々の条件下での液滴飛散現象を可視化撮影により観察した。主としてノズル形状、特にノズルの縮小部長さおよび噴流の噴射圧力を変化させたときのノズル部内部の流れとそこから噴出する液滴飛散噴流を議論した。

2. 実験方法

2.1 実験装置および方法

Fig. 2 に実験装置の概略図を示す。アクリル樹脂からなる

Fig. 2 Schematic of experimental facility.

Table 1 Shape of nozzle. (unit : mm)

	d	D	h	H	h/d	Shape
A	2	10	5	10	2.5	
B	2	10	5	15	2.5	
C	2	10	5	30	2.5	
D	2	10	2.5	25	1.25	
E	2	10	5	25	2.5	
F	2	10	7.5	25	3.75	
G	2	10	10	25	5	

内径 130mm, 内側高さ 280mm の円筒状の貯水槽に 100mL の水を供試液体として入れることにより水深約 8mm とする。これに貯水槽上方中央より空気圧を加えて貯水槽底部に取付けられた噴射ノズルから垂直下方向に大気中へと水噴流を発生させる。加圧にはコンプレッサーを使用し、圧力の調整は SMC 製精密レギュレーター IR2000-02BG を用いた。噴射圧力は貯水槽底部の圧力として共和電業製圧力センサー PG-2KU を用いて計測し、その出力電圧を共和電業製動ひずみ計 DPM-711B で増幅しコンテック製アナログ入出力ユニット AIO-163202FX-USB を介してパソコンに取込んだ。水位が貯水槽底面から 5mm 程度になると、Fig. 1 に示したように、貯水槽底部の水とその付近の空気が同時に噴射ノズル内に吸込まれ、気液混合噴流が形成されるようになる。この噴流の持続時間はわずかであるが、この間の噴流の挙動に着目した。可視化については菅原研究所製ストロボスコープ PS-240B を同期させた CASIO 製デジタルカメラ EX-F1 と Photron 製ハイスピードカメラ FASTCAM MC2 を用いて行い、ノズル部内部の流れとそこから噴出する液滴飛散噴流について観察した。

2.2 噴射ノズル

噴射ノズルの材質は内部の流れを観察しやすくするために透明のアクリル樹脂を使用した。ノズルの内側部分は円筒状であるが、ノズルの外側部分は四角柱状になっており、この外側の側面の平面部を通してノズル部内部の可視化撮影を行った。本研究では Table 1 に示す A, B, C, D, E, F および G の 7 種類のノズルを製作した。これらのノズルの形状の特徴は、ノズル流路内径が急縮小することである。内径 d と長さ h の部分を細管、内径 D と長さ H の部分を太管、内径が D から d に急縮小変化する部分を細管入口部と呼ぶことにする。ノズル長さは h と H の和となる。また、 h/d は細管部長さ h を細管部内径 d で除した値で無次元値である。

3. 実験結果および考察

3.1 実験条件と液滴飛散噴流の定義

貯水槽上方中央からの空気による印加圧力は 10～100kPa とした。各圧力のときの細管部流速と細管部内径 d を代表寸法とした Reynolds 数を、ノズル E で水のみ噴流として求めたものを Table 2 に示す。これは、初めに貯水量を多めに入れて噴流が空気吸込みをしない状態となるよう

Table 2 Jet velocity and Reynolds number of nozzle E.

Pressure (kPa)	10	20	30	40	50
Velocity (m/s)	3.84	5.42	6.52	7.41	8.33
Reynolds number	7450	10510	12630	14360	16150
	60	70	80	90	100
	9.21	9.78	10.40	11.12	11.73
	17860	18960	20150	21540	22720

に噴出させたもので、流速は容積法により計測した。他のノズルについては h/d が異なるために縮流や摩擦の損失が異なるので流速は若干の相違が生じる。しかし、本研究では細管部内径 d を 2mm で同一としているので、Reynolds 数のオーダーを変えるほどの影響はないと考え、水のみ噴流の流速測定はノズル E でのみ実施した。印加圧力が大きくなるとともに流速および Reynolds 数も大きくなることがわかる。なお、液滴飛散噴流の実験においては 2.1 節で前述のように初期貯水量は 100mL として一定とした。また実験時の水温は約 19℃ であった。

本研究における気液混合噴流に対して、周期的に整列した液滴飛散現象の定義は次のようにした。噴流に明瞭なくびれが生じており、かつ液滴が噴流の半径方向に細管部直径以上の距離で飛散していること。したがって、噴流表面が多少乱れている場合や、噴霧流の状態は、液滴飛散現象は生じてないと見なした。つまり、緒言で述べた Fig. 1 のような形状の液滴飛散現象が典型例となる。

液滴飛散現象の時系列変化の様子を Fig. 3 に示す。Fig. 3 は、ノズル D で印加圧力 50kPa、噴射開始の水噴流の状態から噴射終了の霧状の噴霧流の状態までの 3 種類の噴流状態の画像である。つまり、空気吸込みはあるが液滴飛散をしていない状態(Fig. 3 (1))、空気吸込み量が多くなり液滴飛散が生じている状態(Fig. 3 (2))、空気吸込み量が圧倒的に多くなり噴霧流の状態(Fig. 3 (3))の 3 種類である。ノズル A, B, C, D および E は概ねこのような時系列順になったが、ノズル F および G は液滴飛散現象の過程が生じなかった。これは 3.3 節で後述するように、液滴飛散現象の出現は h/d の値に依存しており、ノズル F および G の h/d が比較的大きい

Fig. 3 Jet state of nozzle D at ejection pressure 50kPa (exposure time 15μs).

ことから液滴飛散現象の過程が生じなくなった。

3.2 印加圧力と液滴飛散状況

周期的に整列した液滴飛散現象が生じたノズルの中でノズル B および D の噴射圧力計測結果を Fig. 4 に示す。噴射を開始した時刻を零として、水噴流の状態から霧状の噴霧流になる時刻までをグラフにしている。噴射圧力は噴流が噴出する終り頃の噴霧流の状態になると多少減少するが、噴射開始後の時刻から大部分の時刻において印加圧力と同値とみなせるのがわかる。グラフ上に示された黒太線区間の前端は 5 回の圧力計測結果の液滴飛散が現れ始めた時刻の平均を表しており、黒太線区間の後端は液滴飛散が現れなくなった時刻の平均を表している。そのため、黒太線区間の長さは液滴飛散現象が継続する時間帯の平均を表している。この液滴飛散現象の一例として、ノズル D の 50kPa の結果を前述の Fig. 3 を用いて説明する。Fig. 4(2)の 50kPa のグラフの

(1) Nozzle B

(2) Nozzle D

Fig. 4 Pressure-time diagram of nozzle B and D at ejection pressure 10kPa to 100kPa.

Fig. 5 Water jet with splashing droplets of nozzle B at ejection pressure 40kPa and 70kPa (exposure time 15 μ s).

黒太線部になる前の時刻 1.81s が Fig. 3(1)の噴流状態, 黒太線内の時刻 2.24s が Fig. 3(2)の噴流状態, 黒太線を過ぎた時刻 3.01s が Fig. 3(3)の噴流状態を表している.

Fig. 4 より, ノズル B および D のいずれにおいても噴射圧力が高くなるほど噴射開始後の早い時刻で液滴飛散現象が生じている. しかし, その早まり方は噴射圧力が高まると多少遅れてきている. これは噴射圧力が高いほど貯水槽内の水の自由表面の高さが速く減少するため, ノズル部での空気吸込みも早まるからである. ただし, あまりに噴射圧力が高過ぎると急速に空気吸込み量が多くなるので, ノズルから噴出後に噴霧流への移行が早まり液滴飛散現象が生じなくなる. このため, Fig. 4 (2) では 100kPa の計測データを省略した. 噴射圧力が低過ぎる場合でもノズル部での空気吸込み量が少なくなり, 液滴飛散現象が生じなくなる.

Fig. 5 に, ノズル B の場合の噴射圧力が 40kPa と 70kPa

Fig. 6 Water jet with splashing droplets of nozzle A, B, C and D at ejection pressure 50kPa (exposure time 15 μ s).

における周期的に整列した液滴飛散現象の可視化画像を示す. Fig. 5 に示した噴射圧力の範囲においては, 噴射圧力が大きくなると液滴飛散の半径方向への広がりが大きくなることがわかる. Fig. 5 の細管部内の流れには 2 種類の気泡が見られる (Fig. 5 の図中矢印). 細管入口付近の明瞭な楕円体状の気泡と, 細管出口付近にある先行する急激に膨張しかかって白く乱反射した気泡である. ここで急激に膨張するのは, 気泡内部の圧力は大気圧より大きいため細管出口付近から大気圧に曝され始めるからである. この楕円体状気泡の形態は, 3.3 節で後述するように細管部長さにより違いが生ずるが, 細管部長さが同じならば本研究の圧力範囲では形状は楕円体状を呈する. ただし, この楕円体状気泡内の圧力は, 噴射圧力が大きくなるとともに大きくなるので, 液滴飛散の半径方向への広がりも大きくなる.

3.3 ノズル細管部長さと液滴飛散状況

ノズル細管部の長さの違いによる液滴飛散の状態を考察するために, 細管部長さ h と細管部内径 d の比 h/d を考える. ここで, h/d についてはディーゼルエンジンの燃料噴射用ノズルに関する研究⁷⁾⁹⁾においても重要なパラメータとなっている.

Fig. 6 にノズル A, B, C および D における液滴飛散現象の可視化画像を示す. 細管部内の流れに注目すると, $h/d = 2.5$ のノズル A, B および C では, 細管入口付近にある楕円体状の気泡とその下流部の細管出口付近にある急激に膨張しかかって白く乱反射した気泡が見える (Fig. 6 (3) の図中矢印). 細管を出た気泡は膨張が進み, 下流に行くにしたがって半径方向外側に液滴を飛散させている. 一方 $h/d = 1.25$ で比較的細管部長さが短いノズル D では, 細管出口付近にある急激に膨張しかかって白く乱反射した気泡しか見えない (Fig. 6 (4) の図中矢印). これに起因して, ノズル A, B, C

Fig. 7 Dynamic behavior of splashing droplets of nozzle D at ejection pressure 50kPa (from left to right every 1/8000s and exposure time 1/160000s).

Fig. 8 Dynamic behavior of splashing droplets of nozzle E at ejection pressure 50kPa (from left to right every 1/8000s and exposure time 1/160000s).

とノズル D では整列した飛散液滴の間隔に違いがみられ、ノズル D の方が他と比べ噴流軸方向の飛散間隔が短いことが確認できる。これは、細管出口以降での液滴形成周波数に違いが生ずることを意味する。

なお、ノズル A, B, C は h/d の値が同一で太管部長さ H が異なる。この太管部長さは、容器内の水の自由表面から吸込まれる空気的气柱の形状に影響をおよぼすが、Fig. 6 に見られるようにその気柱の形状は細管入口部まで漏斗状をなす。この漏斗状の気柱形状に関して、本研究で使用したノズルにおいては大きな差異は見られなかった。これにより、本研究で使用したノズルの範囲では液滴飛散現象におよぼす太管部長さ H の影響はなかった。

3.4 液滴飛散を生ずる噴流の動的挙動

液滴飛散を生ずる噴流の動的な挙動を観察するためにハイスピードカメラを使用して液滴飛散現象を観察した。Fig. 7 と Fig. 8 はハイスピードカメラにより得られたノズル D とノズル E の液滴飛散が生じているときの時系列画像である。特にここでは、 h/d の値が液滴飛散を生ずる噴流の動的

Table 3 Splashing droplet velocity of axial direction of jet, splashing droplet velocity of radial direction of jet and periodic droplet frequency of axial direction of jet.

	Pressure (kPa)	Axial velocity (m/s)	Radial velocity (m/s)	Frequency (Hz)
Nozzle D	30	6.97	1.99	2910
	50	8.05	2.54	3740
Nozzle E	30	7.15	1.17	1680
	50	9.60	1.57	2510

(1) Nozzle D

(2) Nozzle E

Fig. 9 Air column and bubble shape in nozzle of Nozzle D and Nozzle E at ejection pressure 50kPa (exposure time 1/160000s).

挙動におよぼす影響を調べることとする。Fig. 7, Fig. 8 とともに噴射圧力は 50kPa であり、フレームレート 8000fps、シャッタースピード 1/160000s で撮影されたもので、左から右へ 1 コマずつ 1/8000s の時間経過となっている。噴流が下流方向に進むにつれて飛散液滴が半径方向に移動していくのがわかる。そこで Fig. 7, Fig. 8 のそれぞれ連続した時系列画像を利用して、飛散液滴に関する噴流軸方向の速度、噴流半径方向の速度および噴流軸方向の液滴形成周波数を計測した。同様な計測を噴射圧力 30kPa の場合においても行った。その結果を Table 3 に示す。ノズル E での測定結果は、先行研究⁶⁾で示されている本研究のノズル E に相当するノズルに対する半径方向速度および周波数の測定結果とほぼ同程度の値である。この Table 3 から軸方向および半径方向への飛散液滴の速度は噴射圧力が大きくなるとともに大きくなっているのがわかる。これは細管部で形成される楕円体状気泡内の圧力が噴射圧力の増大に伴って増大するために、細管を出たときの膨張速度が増大するためである。液滴形成周波数は $h/d = 1.25$ のノズル D の場合の方が、 $h/d = 2.5$ のノズル E の場合より高い値を示している。これは、前節の 3.3 節で考察した、 h/d により液滴形成周波数に違いが生ずることの裏付けとなるものである。

細管出口以降での液滴形成周波数に違いが生ずる要因を、Fig. 9 を用いてまとめる。Fig. 9 は、Fig. 7 と Fig. 8 の図中に矢印で示した細管部付近を拡大したものである。空気吸込みの様子としては、太管より細管入口部へと漏斗状をなし、その先端が細管内に入るとそのままの細さの気柱としてではなく楕円体状の気泡が形成されているのがわかる。これらの漏斗状部分と楕円体状気泡部分を分かりやすくなるよう赤い輪郭線として Fig. 9 に示してある。 $h/d = 1.25$ で比較的細管部長さが短いノズル D では、細管入口部の漏斗状気柱先端以降で形成される楕円体状気泡は、細管の長さが短いためにすぐに細管出口の大気圧に曝され膨張を開始する。一方 $h/d = 2.5$ のノズル E では、細管入口部の漏斗状気柱先端以降ですぐに形成される楕円体状気泡と、その下流部にあり細

管出口で膨張しかかっている気泡の2つが見てとれる。また、この2つの気泡の大きさはノズル D で形成されている気泡とほぼ同じである。したがって、ノズル E ではノズル D より気泡が形成される時間が若干長くなり、細管出口に到達する時間も多少遅れる。これに起因して液滴形成周波数がノズル D よりも小さくなる。このように、ノズル細管部長さの違いにより、ノズル細管部で形成される楕円体状気泡の形態が異なり、これにより液滴形成周波数が変化する。

4. 結 言

本研究では、液滴制御の基礎的研究として、周期的に整列した液滴飛散を生ずる水噴流の挙動について、ハイスピードカメラを使用した可視化撮影により実験観察した。特にノズル長さおよび噴射圧力を変化させたときのノズル内部の流れとそこから噴出する液滴飛散噴流を議論した。以下に得られた主な結果を示す。

- (1) 噴射圧力が高過ぎても低過ぎても周期的に整列した液滴飛散現象は生じない。その中で、噴射圧力が高いほど液滴飛散が生じる時期が早まる。
- (2) 液滴飛散速度は、噴射圧力が増加すると増加する。
- (3) 本研究で使用したノズルの範囲では、液滴飛散現象におよぼすノズル太管長さの影響はなかった。
- (4) ノズル細管部に楕円体状気泡が生じ、細管部出口を出た後、大気圧に曝され急激に膨張することにより半径方向外側に液滴を飛散させている。
- (5) ノズル細管部長さの違いにより、ノズル細管部で形成される楕円体状気泡の形態が異なり、これにより液滴形成周波数が変化する。

参 考 文 献

- 1) 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，森北出版（2003）pp.12-19.
- 2) R.D.Reitz and F.V.Bracco：Mechanism of atomization of a liquid jet, The Physics of Fluids, Vol.25, No.10 (1982) pp.1730-1742.
- 3) Akira SOU, Shigeo HOSOKAWA and Akio TOYAMA：Effect of cavitation in a nozzle on liquid jet atomization, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.50 (2007) pp.3575-3582.
- 4) 河村 清美, 増田 糧, 植田 玲子, 井戸田 芳典, 永岡 真, 増渕 匡彦, 小森 啓介：キャビテーション気泡混合噴射法による微粒化メカニズムと噴霧特性, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.78, No.793 (2012) pp.132-142.
- 5) 河上 浩布, 石戸 勉, 庵原 昭夫：空気吸い込みを伴う水噴流の動的挙動, 可視化情報, Vol.23, Suppl.No.2 (2003) pp.59-62.
- 6) Hironobu Kawakami, Tsutomu Ishido and Akio Ihara：Behavior of Water Jet Accompanied with Air Suction, Journal of Fluid Science and Technology, Vol.2, No.1 (2007) pp.45-55.
- 7) 玉木 伸茂, 西田 恵哉, 清水 正則, 廣安 博之：液体噴流の微粒化過程におよぼす噴孔内流れの影響(第2報 ノズルの幾何学形状および雰囲気圧力の影響), 微粒化, Vol.5-3, No.11 (1996) pp.98-106.
- 8) 玉木 伸茂, 清水 正則, 廣安 博之：ノズル噴孔内キャビテーションによる高粘度液体噴流の微粒化, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.71, No.702 (2005) pp.632-640.
- 9) Takao KARASAWA, Masaki TANAKA, Kazuhiro ABE, Seiichi SHIGA and Toshio KURABAYASHI：Effect of nozzle configuration on the atomization of a steady spray, Atomization and Sprays, vol.2, no.4 (1992) pp.411-426.
- 10) 石戸 勉, 浦波 健, 大山 博史, 庵原 昭夫：ボンド数が小さな領域における液滴形成過程の研究, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.69, No.681 (2003) pp.1148-1154.
- 11) 佐藤 光太郎, 廣瀬 智水, 古屋 興二：液滴形成過程の高速度撮影, 可視化情報, Vol.26, No.7 (2006) pp.62-68.