



二流体噴射弁の内部流動と噴流の挙動

Behaviors of Internal Flow and Liquid Jet of Twin-Fluid Atomizer

邢 文静 (Wenjing XING) 橋口 和明 (Kazuaki HASHIGUCHI) 佐藤 一教 (Kazunori SATO) 西田 恵哉* (Keiya NISHIDA) 尾形 陽一 (Yoichi OGATA)
 広島大学 (Univ. of Hiroshima) 三菱重工業 (Mitsubishi Heavy Industries, Ltd) 三菱パワー (Mitsubishi Power, Ltd) 広島大学 (Univ. of Hiroshima) 広島大学 (Univ. of Hiroshima)

Objectives of the present study are to clarify the various behaviors occurred in a liquid-gas mixing twin-fluid atomizer. High-speed flow visualization experiments were conducted for the transparent atomizer model made of acrylic resin. Many transient and peculiar phenomena were obtained for internal flow and spraying jets after injection.

Results show that the internal flows of atomizer are classified into 4 groups: liquid film region, co-existence region of liquid column and film, liquid column region and turbulent liquid column region. Furthermore, the external flows of atomizer are mainly divided into 3 patterns: liquid balloon region, co-existence region of liquid column and disintegrated droplets and liquid film breakup region. In addition, liquid balloon width and frequency are measured. Atomization properties of jet-spread angles and droplet sizes were measured for different liquid breakup patterns.

Keywords: Twin-Fluid Atomizer, Two-Phase Flow, Atomizer Internal Flow, Breakup Process, Spray Formation

1. 緒言

ガスタービンエンジンは陸上の火力発電所、航空機の動力源として広く使われている。液体燃料を用いる油焚きガスタービン燃焼器の微粒化法には主として、液膜流に微粒化用の空気を衝突させるタイプ⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾や、液体燃料を複数の噴出孔から液柱状に噴射して横風といわれる燃焼用空気流(Crossflow)に衝突させて微粒化するタイプ⁽⁵⁾⁻⁽⁸⁾がある(図 1(a))。本研究では、後者の噴出孔から液体を噴出するタイプを基本的対象とし、ひとつの噴出孔における現象を取り上げる。

ガスタービンの燃焼器において、液体燃料の微粒化や燃焼器内への分散が不十分であると、エミッション(煤, CO, NO_x)増加, 燃焼振動などの不安定現象の発生, 機器の損傷などを誘発する。結果的に、効率をはじめとして機器の性能低下に結びつく。

以上の課題に対する解決策として、ガスタービンに限らずボイラなど他の燃焼においても気液衝突による二流体噴射弁は有効であり、幅広く研究されている⁽⁹⁾⁻⁽¹⁵⁾。例えば、佐藤ら^{(9),(10)}はCWM(石炭・水スラリ)燃焼用の内部混合式アトマイザの特性を調べている。橋口ら⁽¹⁴⁾はボイラ用の新しい内部混合式アトマイザを開発した。小田ら⁽¹⁵⁾はガスタービンを対象に噴射前の液体に空気を混合させ、噴流の分散特性を調べた。しかし、このような研究にもかかわらず、二流体噴射弁内部における気液衝突二相流の現象が複雑であり、不明点が多い。さらに、二流体噴射弁のように高速で気液が干渉する現象を従来の知見のみで説明するのは難しい。

二流体噴射弁には前述の内部混合式や外部混合式等多くのタイプがあるが、本研究で対象とするのは図 1(b)のように円筒形をした液体噴出孔の側面から垂直に微粒化用空気を供給するタイプの噴射弁である^{(16),(17)}。このような構造の狙いは、微粒化

の改善が期待できると同時に構造的にシンプルでかつ信頼性を維持できるであろうという点にある。

本研究の目的は、透明なアクリル製の二流体噴射弁を設計し、LED 光源を用いて、高速度ビデオカメラにより噴射弁内部流動と液体噴流の挙動の詳細観察を行い、二流体噴射弁の様々な特性を把握することにある。

なお本研究では、横風(Crossflow)を当てる内容は含んでいない、液体単相噴流(図 1(a))と二流体噴射弁からの噴流(図 1(b))が横風を受けた際の比較については別途報告の予定である。

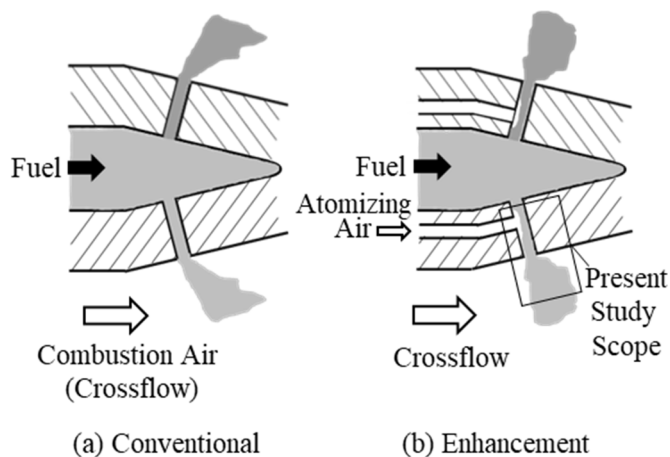


Fig.1 Image of gas turbine engine atomizer

2. 実験装置および方法

図 2 に使用した二流体噴射弁モデルの断面図を示す。供試液体は中心気液合流孔の軸上より、一方微粒化用空気は気液合流孔開始部から 3mm 下流の側部より直角に合流される。気液合流孔の孔径は 4mm とした。実機ガスタービンの噴出孔径は、このサイズの 1/3~1/2 程度であるが、本研究ではできるだけ内部流動をつぶさに観察したいこと、また現状液柱単相で噴射する構

原稿受付: 2020 年 5 月 7 日

* 責任著者: 正会員, 広島大学

(〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1)

E-mail: nishida@hiroshima-u.ac.jp

造を二流体噴射弁に改良するに際し、孔径を大きくできるであろうというもくろみもあり、両者を勘案し拡大モデルを用いた。微粒化用空気と液体の供給孔の断面積の和と気液合流孔の断面積の和が等しくなるように設計した。噴射弁の材質はアクリルであり、気液合流孔の内面は研磨剤により仕上げている。なお、噴射弁出口に長さ 3mm の段差があるが、これは後継する実験で風洞に設置するために設計したものである。

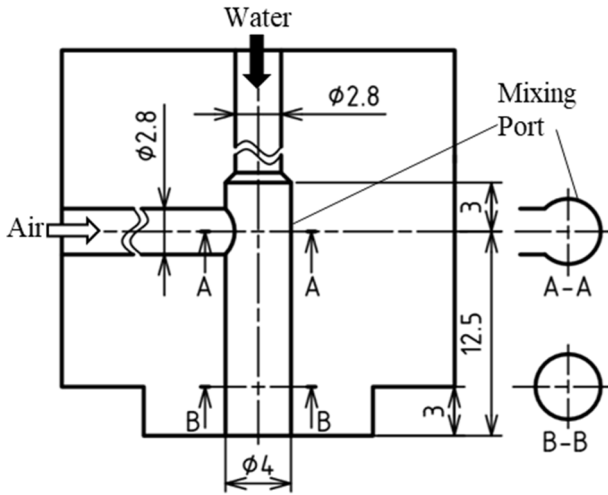


Fig.2 Details of twin-fluid atomizer

図 3 に実験装置の係統および撮影光学系の概略を示す。供試液体は水道水である。微粒化用空気はコンプレッサ (Makita 製 AC700) から供給される。

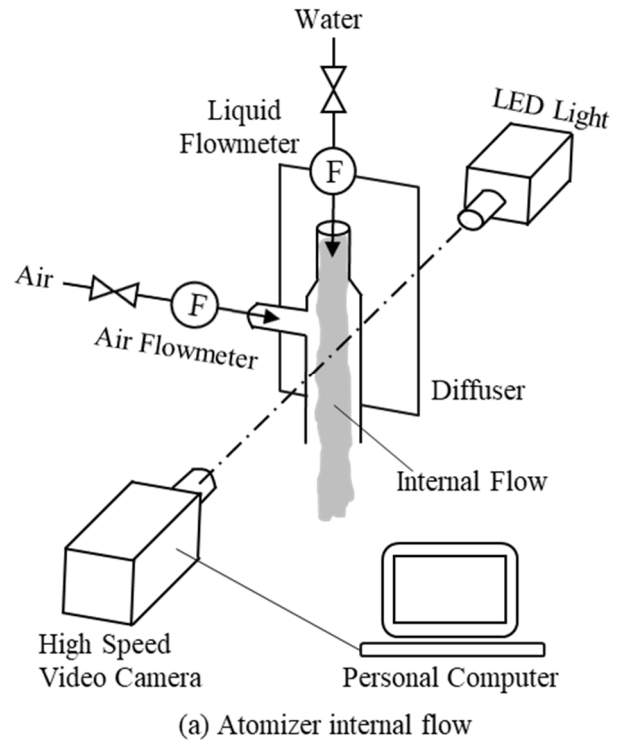
図 3(a)は二流体噴射弁の内部流動の撮影方法である。二流体噴射弁の背後から LED 光源 (Altec 製, LLBGR) で連続的に照射し、ディフューザーで光を拡散させている。二流体噴射弁の手前側から高速度ビデオカメラ (Photron 製, APX RS), レンズ (Nikon 製, 60mm, f/2.8) で撮影した。LED 光源の出力は 65W, 高速度ビデオカメラの撮影速度は 20000fps, 露光時間は 20 μ s である。画像の解像度は 512x256 pixels に設定した。

図 3(b)に、二流体噴射弁から噴出する液体噴流の撮影方法を示す。撮影速度および解像度は 20000fps および 512x256 pixels であり、内部流動撮影方法 (図 3(a)) と同じである。一方、LED 光源出力と露光時間はともに変化させ、それぞれ 17W および 6.54 μ s とした。なお、中空液球の膨らみ幅と噴流の広がり角度を求める際は、5000fps で撮影し、画像の解像度はそれぞれ 512x512pixels および 1024x512pixels とした。液滴径を求める時も、5000fps で撮影したが、同じ液滴の重複計測を避けるために、ある液滴群から全く別の液滴群へと完全に入れ替わった画像から液滴径を計測し、ザウター平均粒径を求めた。画像の解像度は 1024x512pixels とした。なお、中空液球の膨らみ幅と噴流の広がり角度の定義は、3.3 節で述べる。

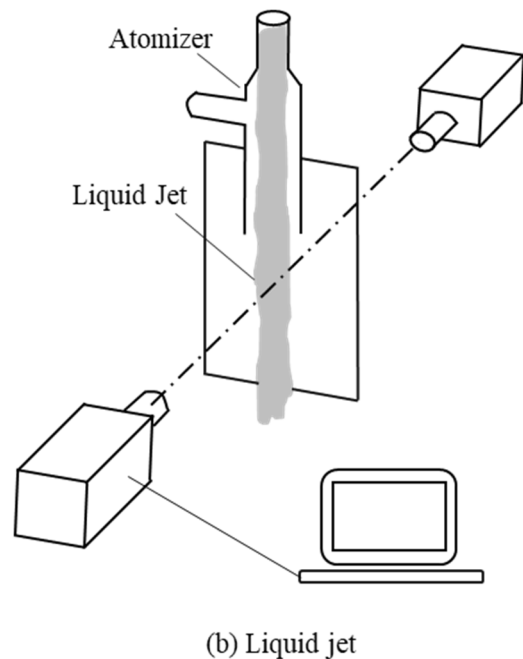
表 1 に実験条件をまとめて示す。液体および微粒化用空気はともに室温である。実機の定格負荷運用時の液体流量は、本表に示す範囲の上限に近い。本研究では、二流体化を試みるための基礎的知見を幅広く得る目的で流量条件を少量側に広げ、実験に供した。実機燃焼器は高温高压であるが、本研究はまず第 1 ステップとして水を用い、常温、大気圧下で実験を行った。

Table 1 Experimental conditions

Item	Value
Injection Liquid	Water
Liquid Mass Flow Rate	5.0 ~ 23.3(g/s)
Atomizing Gas	Air
Air Mass Flow Rate	0.04 ~ 0.20(g/s)



(a) Atomizer internal flow



(b) Liquid jet

Fig.3 Experimental apparatus and optical arrangements

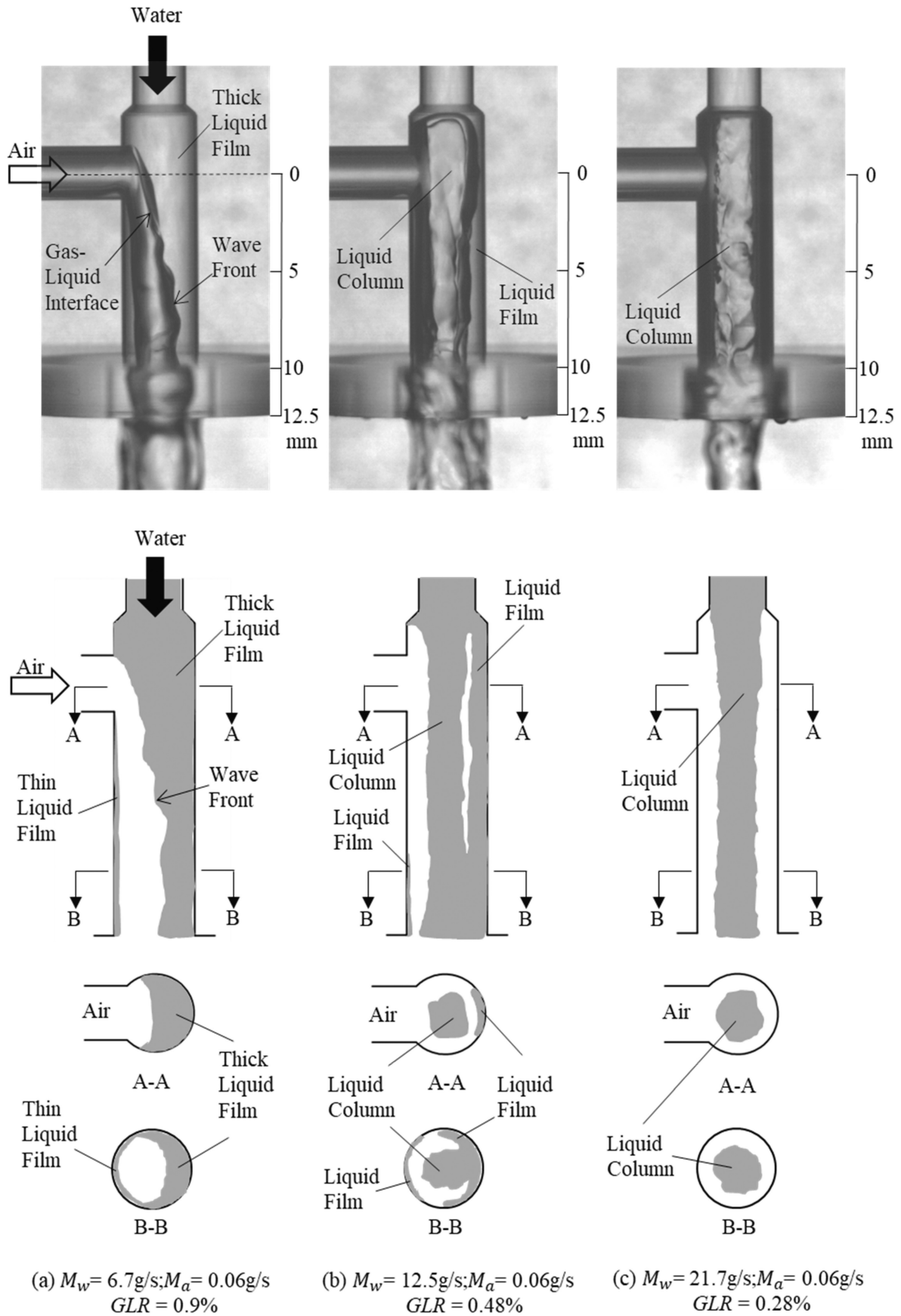


Fig.4 Photographs of atomizer internal flow (upper) and illustrations of liquid flow pattern in cross-sections (lower) at the air flow rate of $M_a = 0.06\text{g/s}$

Each photograph condition corresponds to the plots (a)(b) and (c) in Fig.6

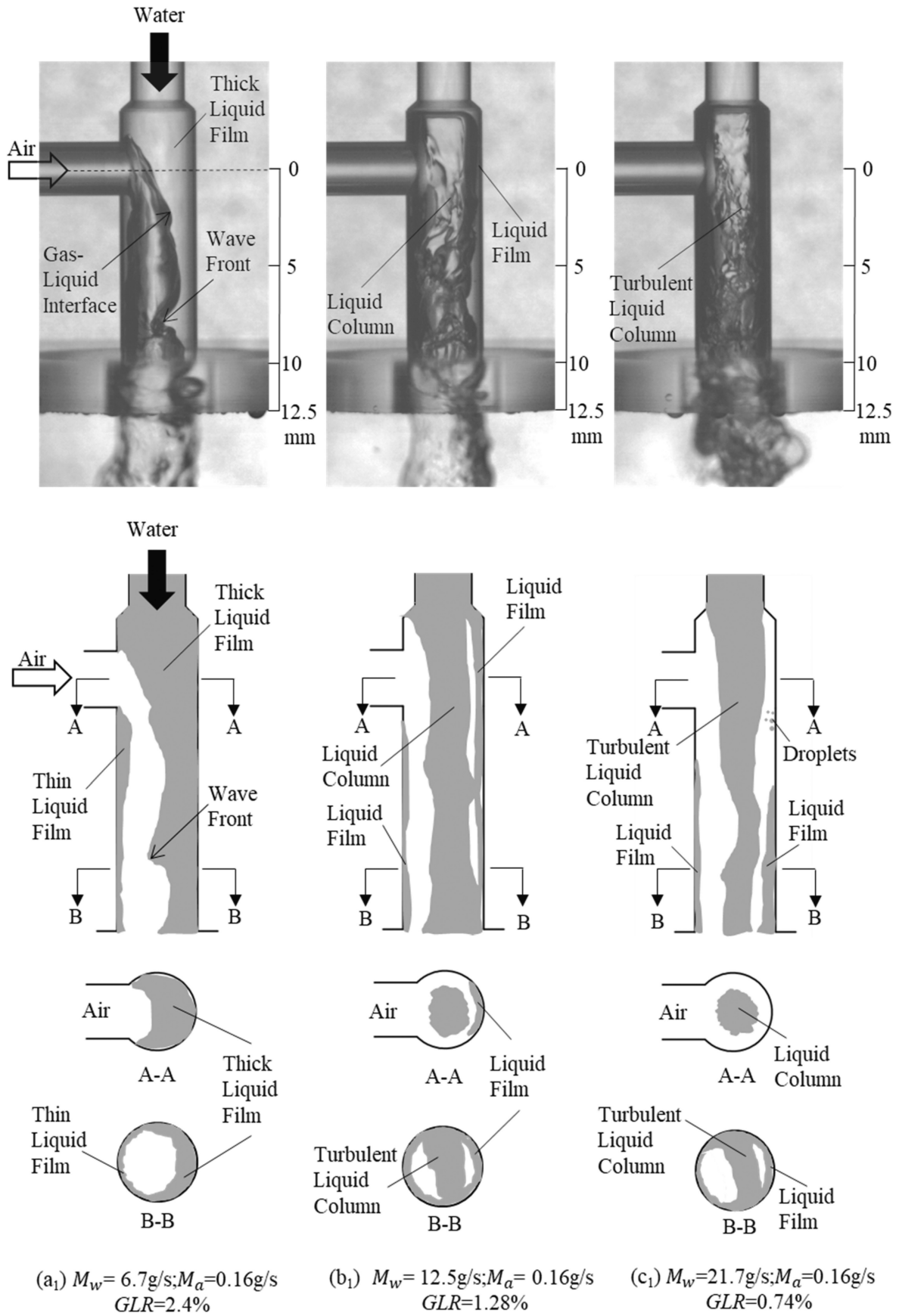


Fig.5 Photographs of atomizer internal flow (upper) and illustrations of liquid flow pattern in cross-sections (lower) at the air flow rate of $M_a = 0.16\text{g/s}$
Each photograph condition corresponds to the plots (a₁) (b₁) and (c₁) in Fig.6

3. 結果および考察

3.1 噴射弁内部流動の分類

図4および図5に、微粒化用空気流量 M_a と液体流量 M_w を変化させた場合における代表的な現象の瞬間写真と、それらの縦断面および水平断面(A-A)(B-B)の現象をスケッチとして示す。スケッチで灰色とした部分は液体を示し、他の白い部分は微粒化用空気である。図4(a)~(c)は微粒化用空気 $M_a=0.06\text{g/s}$ 、図5(a₁)~(c₁)は $M_a=0.16\text{g/s}$ に固定している。上方から液体を供給し、左側から微粒化用空気を供給している。気液合流孔内で暗く見える部分は空気または気液界面であり、比較的明るい部分は液体である。 GLR (Gas to Liquid Ratio)は気液の質量流量比であり、以下のように定義される：

$$GLR = \frac{M_a}{M_w} \times 100\% \quad (1)$$

図4(a)~(c)は GLR が小さい場合の現象である。図4(a)では、液体が供給孔から気液合流孔へ流下するに従い、合流孔の壁面に押し付けられるように液膜となる様子が観察される。微粒化用空気供給孔と反対右側の壁面上には厚い液膜が、一方左側の壁面には薄い液膜が生じる。液膜の厚さが偏っているものの、いわゆる環状液膜流⁽¹⁸⁾に近い。さらに、気液界面では波頭が生じる。

図4(b)の現象では右側の壁面に液膜が生じるが、図4(a)の液膜に比べると薄い。さらに、噴射弁の中心軸上には液柱が存在する。つまり図4(b)では、液膜と液柱が共存している。このように液膜と液柱が共存するメカニズムは現時点でははっきりわかっていない。中心の液柱が主現象であり、液体の供給部(微粒化用空気との合流点よりも上流)における拡大部に沿う濡れなどの作用で、一部が壁面上の液膜になっているのも一因ではないかと考えている。上流側では液柱と液膜が離れているが、下流では中心の液柱が気流の作用で振動し液膜と接触するように見える。さらに、左側の壁面と衝突することがあり、壁面上に薄い液膜が生じる。瞬間写真では判然としないところもあるので、図4(b)の縦断面と水平断面B-Bのスケッチを示す。断面B-Bでは、上流A-Aよりも液体の断面が広がったように便宜上描いているが、これは中心の液柱が変動することを示している。図4(c)になると液体の運動量がかなり勝るようになって液柱が噴射弁の中心を貫通していることがわかる。

図5(a₁)~(c₁)は微粒化用空気流量を増加させて 0.16g/s と固定し、 GLR を大きくした条件の現象である。図5(a₁)は図4(a)と同様に液膜が生じるが、 GLR が大きいため、液膜表面の乱れは激しい。波頭も図4(a)に比べて高く振幅の大きな乱れが界面で生じていることがわかる。また下流では、噴射弁の内周全域に液膜が存在する状態となる。図5(b₁)は図4(b)と同様に液膜と液柱が生じるが、図4(b)に比べると GLR が大きいため、気液衝突した直

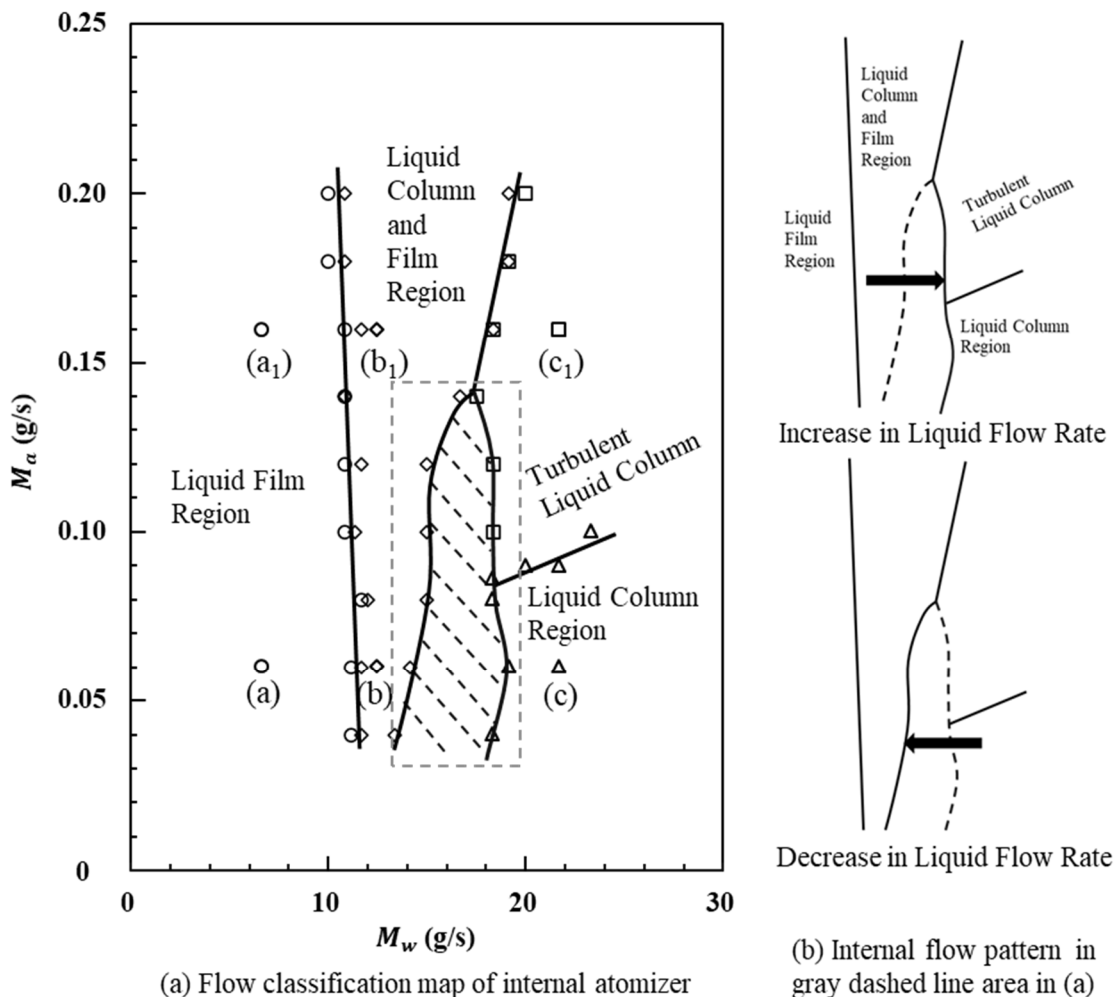


Fig.6 Classification of atomizer internal flow

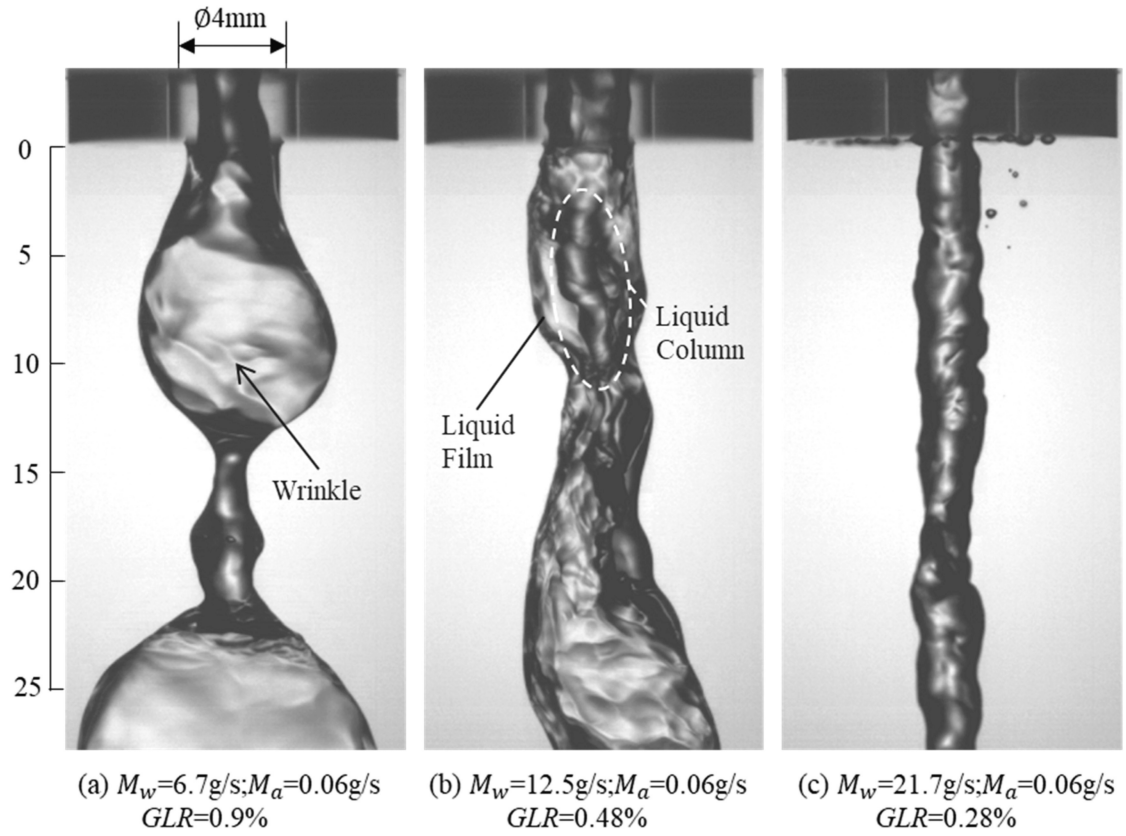


Fig.7 Photographs of external flow at the air flow rate of $M_a = 0.06\text{g/s}$
Each photograph condition corresponds to the plots (a) (b) and (c) in Fig.9

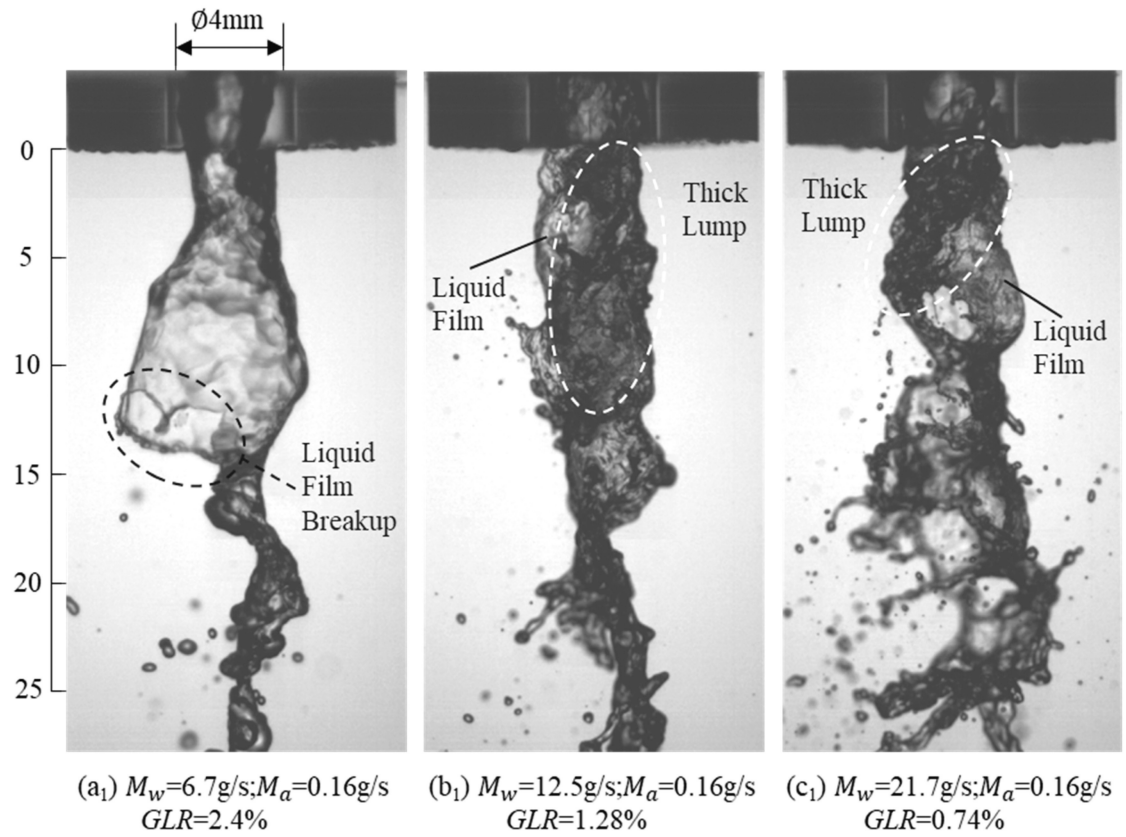


Fig.8 Photographs of external flow at the air flow rate of $M_a = 0.16\text{g/s}$
Each photograph condition corresponds to the plots (a₁) (b₁) and (c₁) in Fig.9

後に液柱が乱れ、噴射弁内壁面に衝突して、左側の壁面上に薄い液膜が生じる。これらの液膜を図 5(b₁)のスケッチに示す。

図 5(c₁)は図 4(c)に比べると GLR が大きいので、液柱が激しく乱れて噴射弁の内壁面に衝突し、その一部は液膜となる。また気液が直接衝突する位置より下流で液滴が分裂し、気流の勢いで右壁面に付着する。この様子は内部流動の動画により認められ、図 5(c₁)にスケッチとして描いた。

上記の例に加え、微粒化用空気流量 M_a と液体流量 M_w をともに幅広く変化させて現象観察を行い、4 種類の典型的な現象に分類できるという結論に至った。

図 6 は M_a と M_w の関係で表現したマップ上に現象パターンの領域を示したものである。このマップ中の(a)~(c)および(a₁)~(c₁)の符号を付けた各プロットは、図 4 および図 5 の各現象の条件に相当する (図 6(a)において○は(a)(a₁), ◇は(b)(b₁), □は(c₁) および△は(c)に相当)。液体流量の増加あるいは減少の操作に応じて、液柱と液膜共存域の境界がずれる特異な領域が存在する。この領域を斜め破線のハッチングで示した。さらに、図の右側に小さくした分類図を示した。矢印「→」「←」は、それぞれ液体流量の増加あるいは減少時の現象の境界を表している。

以上のように二流体噴射弁内での現象は大きく 4 つに分類できる：

(1) 液膜域 (Liquid Film Region)・・・液体が微粒化用空気的作用で押され、右側の壁面に厚い液膜、左側の壁面に薄い液膜が生じ、いわゆる環状液膜流に近い (図 4(a), 図 5(a₁)) 。

(2) 液柱と液膜共存域 (Liquid Column and Film Region)・・・噴射弁内壁面に沿って流れる液膜と中心の液柱が同時に存在する (図 4(b), 図 5(b₁)) 。

(3) 液柱域 (Liquid Column Region)・・・液柱が二流体噴射弁の中心を貫通する。液柱の表面には乱れがあるが、激しさは乏しい (図 5(c)) 。

(4) 激しく乱れる液柱域 (Turbulent Liquid Column Region)・・・上記(3)に比べると液柱全体が大きく変形して乱れ、壁面と衝突し、その一部が液膜となる (図 5(c₁)) 。

3.2 噴射弁から噴出した噴流挙動の分類

図 4 と図 5 の噴射弁内部流動に対応する噴射弁から噴出した液体噴流の挙動をそれぞれ図 7 および図 8 に示す。

図 7(a)の内部流動では液膜が壁面に沿って流れ、液膜に周期性のある波頭が生じる。それらが噴出する際に、液体が空気を含み中空液球状の液膜になり、細い液柱と交互に現れる。液体が流下するにしたがって細い液柱部から分裂する。また、中空液球状の液膜が破裂する。ここでは噴射弁出口から下流 25mm までの範囲で、中空液球状の液膜が生じて破裂しない、または破裂した際に生じる液滴が存在しない現象を中空液球(Liquid Balloon)とした。この中空液球には大小の「しわ(Wrinkle)」が生じている。これらの「しわ」は、二流体噴射弁内部における気液界面の空気力学的乱れに加え、弁からの噴出後に外部大気との接触により生じた乱れが相乗していると推察される。この液体流量におい

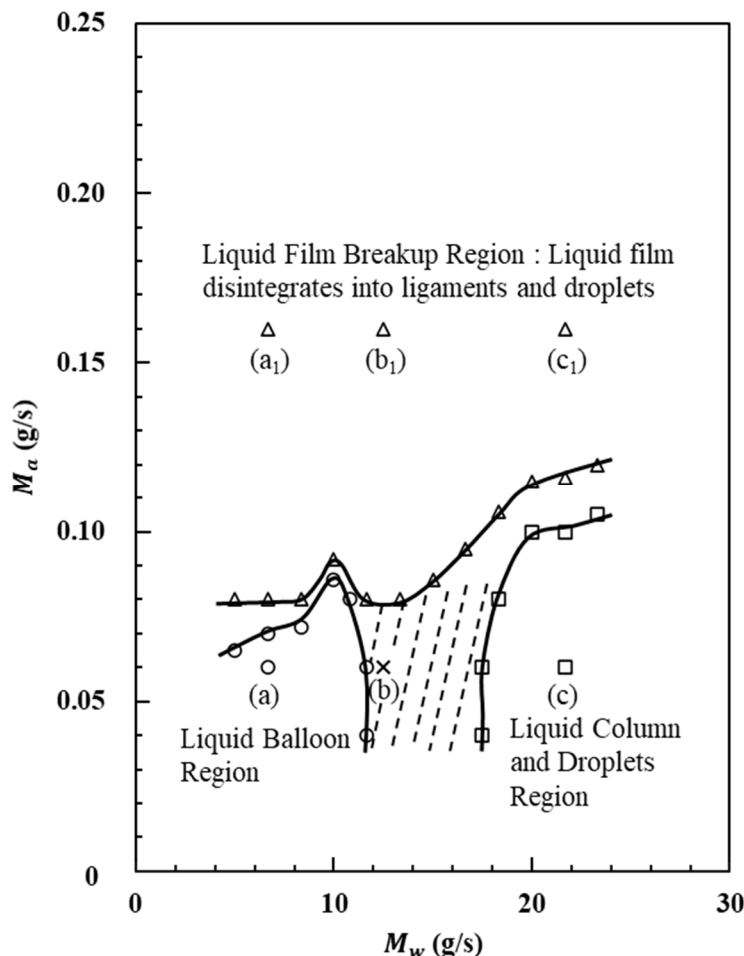


Fig.9 Classification of atomizer external flow

て微粒化用空気流量を増加させると図 8 (a₁)のように環状の液膜が膨らんで破裂し、液糸と液滴が生じる。噴射弁内部流動で左側の壁面に沿って流れる液膜が薄いことから、噴出後液膜の左側の方が分裂しやすい傾向が見てとれる。

図 7(b)に示すように、噴射弁内部流動で液柱と液膜が共存する場合、噴出する際には液柱の周りに液膜が生じる。噴出孔出口から生じる「袋」状の膨らみを液膜、また中心部は上流から下流へと太く長い「塊」状に見えることからこれを液柱と判断した。写真中に液膜と液柱それぞれに線を引いて示した。微粒化用空気流量を増加させると図 8 (b₁)のように液膜が分裂し、液糸と液滴が生じる。

図 8(c₁)は、図 5(c₁)の内部流動が噴出した条件に相当する。図 5(c₁)の B-B 断面に一部の瞬間例を示したように、液柱は激しく振動し、壁面に衝突し多くは液膜化する。そのため図 8(c₁)のように、環状液膜流が乱れて噴出する様子が見える。図 8(b₁)(c₁)の噴射弁出口近くを見ると、単なる環状液膜ではなく、濃い塊状(Thick Lump)のようなものも見え(破線で囲み示す)、これらが液柱の一部の残りではないかとも思えるが、はっきりとは断定しにくい。

図 7(c)の内部流動で液柱が二流体噴射弁内を貫通し、そのまま液柱を噴出する。さらに、液柱から液滴が分裂する。微粒化用空気流量を増加させると内部流動の液柱が激しく乱れ、図 8(c₁)のように左右激しく乱れる液膜を吹き出し、液膜が分裂して液糸と液滴が生じる。

上記の例に加え、微粒化用空気流量 M_a と液体流量 M_w をともに幅広く変化させて現象観察を行い、3 種類の典型的な現象に分類できるという結論に至った。

図 9 は M_a と M_w の関係で表現したマップ上に現象パターンの領域を示したものである。このマップ中の(a)~(c)および(a₁)~(c₁)を添書きした各プロットは、図 7 と図 8 の各現象の条件に相当している(図 9 において○は(a), □は(c)および△は(a₁) (b₁) (c₁)に相当)。液体流量の増加あるいは減少の操作に応じて、中空液球と液柱の間に遷移領域が存在する。この遷移領域は、液体流量の増加あるいは減少操作によって、横軸上において中空液球域と液柱域の境界がずれる。液体流量を減少して中空液球域の横軸上の境界を求め、一方液体流量を増やして液柱域の境界を求めた。これらの領域を斜め破線のハッチングで示した。また、中空液球域、遷移領域および液柱域において、微粒化用空気流量を増やすと液膜分裂現象が支配的となる領域が現れる。

以上のように二流体噴射弁の外部流動の現象は大きく 3 つに分類できる：

- (1) 中空液球域 (Liquid Balloon Region)・・・液体が空気を含んで中空液球状の液膜になる (図 7(a))。
- (2) 液柱と液滴域 (Liquid Column and Droplets Region)・・・液柱と液柱から液滴が分裂する (図 7(c))。
- (3) 液膜分裂域 (Liquid Film Breakup Region)・・・液膜が分裂して液糸と液滴が発生する (図 8(a₁), (b₁) (c₁))。

3.3 噴流の特性

3.3.1 中空液球の発生

図 9 の(a)中空液球域で生じる中空液球の膨らみの大きさと発生周波数に着目し、画像上でその膨らみの幅 y を測定した。図 10 に定義を示す。中空液球の膨らみ幅は、噴射弁出口から下方 20mm の位置(噴孔径 4mm の 5 倍)で計測し、膨らみの左右端か

ら噴孔中心軸までの長さを求め、 $y = y_L + y_R$ として求めた。また、所定の時間内で、膨らみの幅がピークに達する回数を発生周波数 f_b とした。

図 11 に中空液球の膨らみの幅の時間変化を示す。図 11(a)は液体流量 $M_w = 10\text{g/s}$ を一定とし、微粒化用空気流量 $M_a = 0.04\text{g/s}$ および $M_a = 0.08\text{g/s}$ の場合を比較したものである。 $M_a = 0.08\text{g/s}$ の

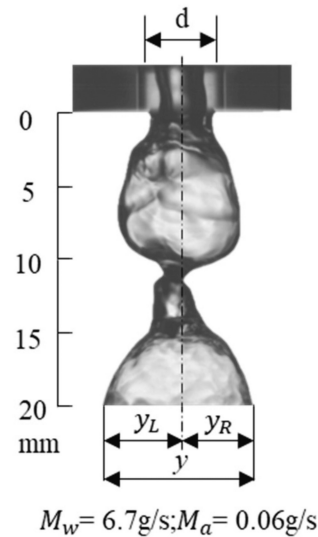
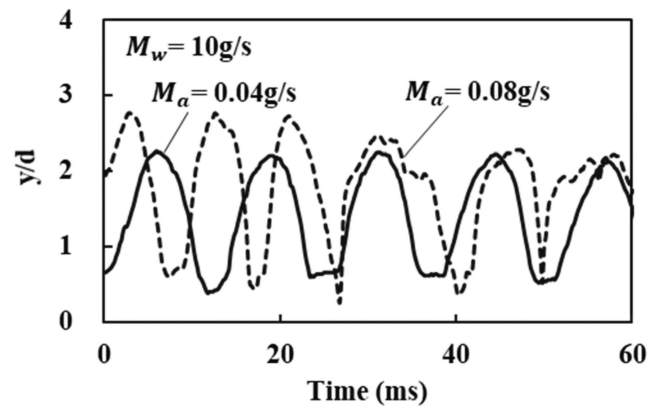
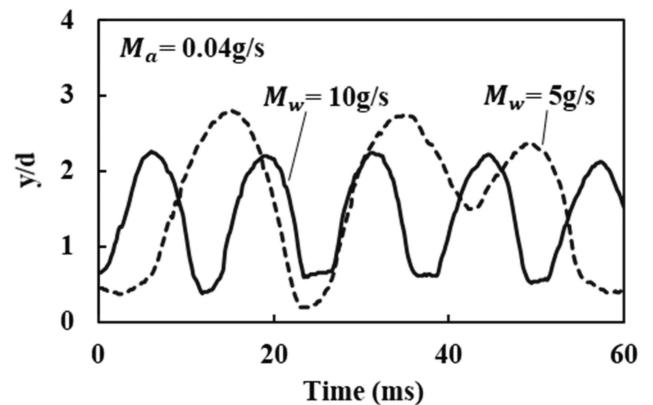


Fig.10 Definition of liquid balloon width



(a) Comparison of air flow rates



(b) Comparison of water flow rates

Fig.11 Time-changes of balloon width under different flow conditions

条件は中空液球域であるが、図9の領域で見ると液膜分裂域との境界に近い。両微粒化用空気流量の条件ともに無次元化した y/d が周期的に変化することがわかる。微粒化用空気流量 M_a が多い方が膨らみの幅 y/d の上限と下限間の差が大きい。一方、微粒化用空気流量 M_a が少ない 0.04g/s の場合正弦波に近いものの、 M_a が増加すると収縮時の波形が下向きにスパイク状に尖る。図11(b)は微粒化用空気流量 $M_a = 0.04\text{g/s}$ を一定とし、液体流量 $M_w = 5\text{g/s}$ と $M_w = 10\text{g/s}$ とした場合を比較している。実線の液体流量 10g/s の曲線は図11(a)の実線と同一であり、比較のベースとした。液体流量が少ない場合では y/d の波形が崩れ、膨張収縮が不規則になる。

図12は、液体流量をパラメータとし、微粒化用空気流量に対する中空液球の発生周波数 f_b の変化をまとめたものである。微粒化用空気流量の増加とともに f_b は増大する。この特性は液体流量が異なっても同様であり、また液体流量が多いほど f_b が高い傾向があることがわかる。

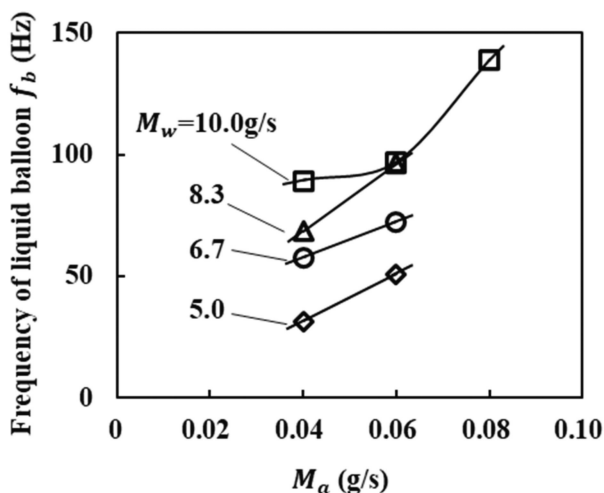


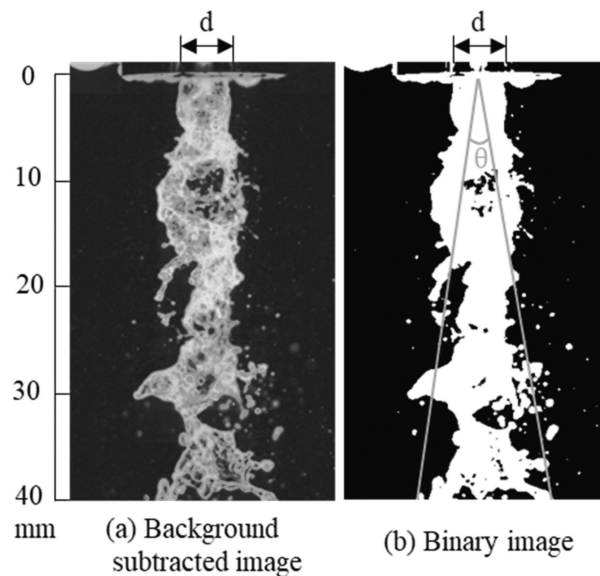
Fig.12 Relation between frequency of liquid balloon and air flow rate

3.3.2 噴流の広がり角度

二流体噴射弁から噴出する噴流の広がり角度を求めた。液体噴流の原画像と背景画像の差分処理を行い二値化する。できる限り小さな液滴も捉えるために、二値化のしきい値を輝度値30とした。図13に背景差分した画像(a)および二値化画像(b)の一例を示す。噴流の広がり角度は、噴射弁出口から下方40mm(噴孔径4mmの10倍)の位置において、二値化画像から噴流の左右境界点(液滴も含める)を求め、噴射弁出口の中心と結ぶ両振り角度を広がり角度 θ とした。

図14は微粒化用空気流量 M_a に対する噴流の平均広がり角度 $\bar{\theta}$ の変化を示したものである。噴流の平均広がり角度 $\bar{\theta}$ は200枚の瞬間画像から求めた平均値である。液体流量 M_w が一定の場合、 M_a の増加とともに $\bar{\theta}$ は増大する。一方、微粒化用空気流量 M_a が一定の場合、 M_w の増加とともに $\bar{\theta}$ は増大するわけではなく、液体流量 $M_w = 12.5\text{g/s}$ の時、 $\bar{\theta}$ は最も小さい。 $M_w = 12.5\text{g/s}$ の条件は、液柱と液膜が共存したまま噴出するため、噴流は広がらないと考えられる。図15に、微粒化用空気流量 $M_a = 0.16\text{g/s}$ 一定の下で、液体流量をそれぞれ(a) $M_w = 6.7\text{g/s}$ 、(b) $M_w = 12.5\text{g/s}$ および(c) $M_w = 21.7\text{g/s}$ とした場合の瞬間画像例を示す。これら3

例は、図8(a1)(b1)(c1)に示した例と、噴射条件は同じであるが、別の瞬間像として参考までに示した。図15(a)の画像からわかるように液体流量 $M_w = 6.7\text{g/s}$ の場合、噴射弁出口では環状の液膜が膨らんで破裂する。一方、図15(b)のように液体流量 $M_w = 12.5\text{g/s}$ になると、液膜と液柱が共存し噴流の膨らみは乏しい。図15(c)は、液体流量をさらに増加させて $M_w = 21.7\text{g/s}$ とした場合であり、噴流の広がりが直線状に単調に増大する。



$M_w = 21.7\text{g/s}; M_a = 0.16\text{g/s}$

Fig.13 Definition of spread jet angle

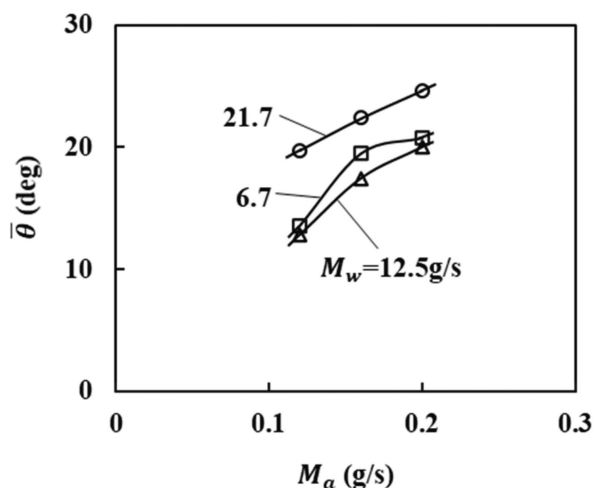


Fig.14 Changes of spread jet angles as a function of air flow rate

3.3.3 平均液滴径

図16に、液滴の瞬間写真例を示す。瞬間写真は噴射弁出口から下方120~168mmおよび横方向に96mmの範囲における液滴群であり、 $94\ \mu\text{m}/\text{pixel}$ である。この平面領域における各液滴の面積を求め、また面積から球相当径を算出してザウター平均粒径を導いた。ひとつの条件の測定液滴数は、200~400個である。液滴径の算出にはImage Jを用いた。

図17に微粒化用空気流量 M_a に対するザウター平均粒径 D_{32}

の変化を示す。微粒化用空気流量の増加とともに D_{32} は減少する傾向がある。ただし、噴射弁内の二相流の形態や噴出後の噴流の挙動が異なるため、液体流量 M_w に応じて D_{32} の減少特性は異なる。 $M_w = 21.7\text{g/s}$ の場合、微粒化用空気流量 M_a が少ないと液柱が噴射弁内をすり抜けるような状態となり、液柱が分裂した液滴径はかなり粗い。 M_a が増加すると噴射弁内の乱れが激しくなり、 D_{32} は急速に減少する。 $M_w = 12.5\text{g/s}$ の場合は、噴射弁内で一部が液膜となるため M_a が減少しても粗大にはならない。 $M_w = 6.7\text{g/s}$ の条件では、 M_a が少ないと膨らんだ環状の液膜が勢いよく破裂することがないまま流下するので液滴径を求めることができず、一部破線で類推している。

4. 結言

微粒化用空気と液体を直角に衝突させる二流体噴射弁の内部流動と噴出後の外部流動を明らかにするために、可視化による現象観察を中心として、噴流分裂形態の各特性を求めた。得られた結論は以下のようにまとめられる。

- (1) 内部流動は、4 つのタイプの典型的現象の領域に分類できる。微粒化用空気と液体の両流量の組み合わせによって、それらは、液膜、液柱と液膜共存、液柱および激しく乱れる液柱の4領域である。このうち液柱と液膜共存域において、液体流量の増加あるいは減少の操作に応じて、領域の境界がずれる。
- (2) 外部流動すなわち噴出後の噴流は、3 種類の代表的現象に分類できる。中空液球、液柱と液滴および液膜分裂の各領域である。
- (3) 噴射弁内部流動が液膜の場合、噴出後に中空液球が生じたり、液膜が分裂する挙動が見られる。内部流動が液柱と液膜共存域のとき、微粒化用空気流量の増加とともに液膜分裂型へ変化する。内部流動が液柱と激しく乱れる液柱になるケースでは、液柱と液滴および液膜分裂が現れる。
- (4) 噴出後に、中空液球は膨張と収縮を繰り返す。その周波数は微粒化用空気流量とともに増加する。
- (5) 噴流の広がり角度は、微粒化用空気流量が多いほど増大する。一方、同一の微粒化用空気流量下で液体流量が多いほど広がりが大きいわけではなく、液膜と液柱が共存する条件では、広がりは乏しい。
- (6) 液滴径は、膨らんだ環状液膜の破裂の勢いが乏しい場合や噴射弁内で液柱がすり抜けるような場合に粗くなる。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、計測装置の一部を貸与して頂いた(株)ヒロテック、および実験と解析に協力いただいた当時、広島大学の学生 王超氏と柏原百合菜さんに感謝します。

文 献

- (1) Rizk, N.K., Lefebvre, A.H.: The Influence of Liquid Film Thickness on Airblast Atomization, Journal of engineering for power, 102-3(1980), 706-710.
- (2) 山田秀志, 松本裕, 林茂, 志賀聖一, 荒木幹也, 堀越順,

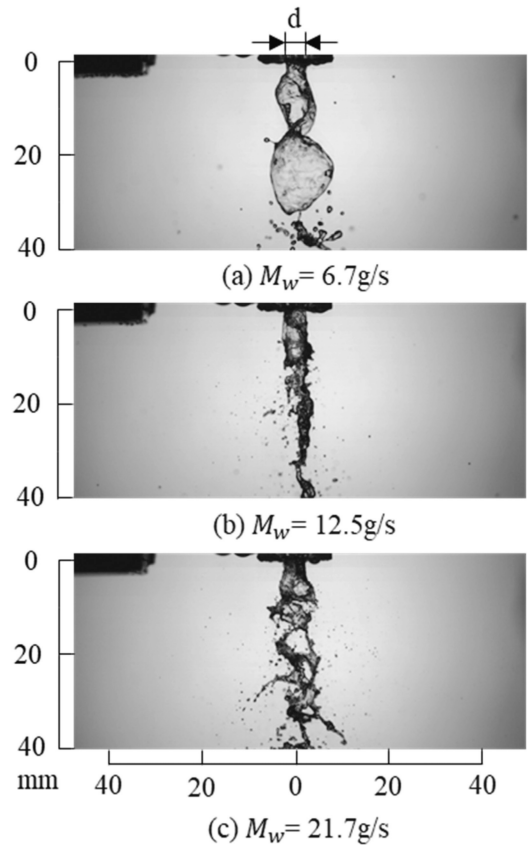


Fig.15 Images of liquid jet at air flow rate of $M_a = 0.16\text{g/s}$

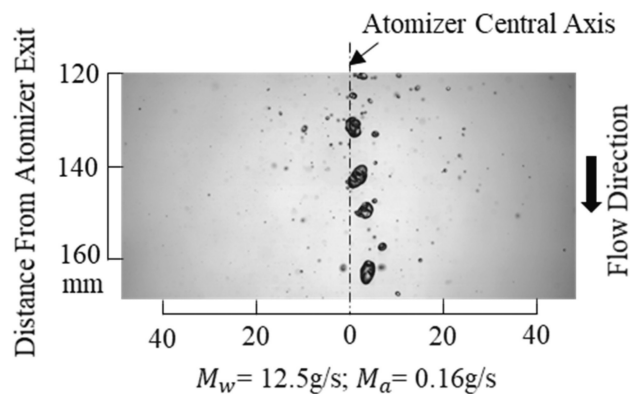


Fig.16 Droplets image and domain for measuring droplet sizes

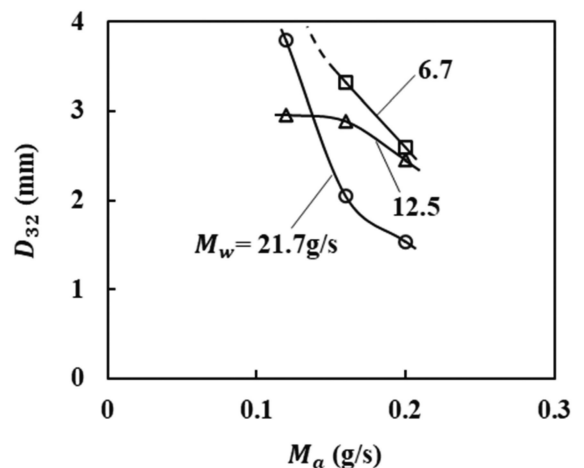


Fig.17 Variation of Sauter mean diameter with air/liquid flow rates

- 中村壽雄, 小保方富夫: ジェットエンジンバーナ用噴射弁に対する壁面衝突圧力微粒化の効果, 日本機械学会論文集, 70-700(2004), 3257-3263.
- (3) 越智雅規, 浜島真二郎, 稲村隆夫, 麓耕二: プレフィルミングエアブラストアトマイザーにおける液膜分裂モデル, 日本液体微粒化学会, 第 23 回微粒化シンポジウム講演論文集(2014), 123-128.
- (4) 大島逸平, 川畑諒太, 宋明良, 松浦一哲: 平面液膜式気流微粒化過程の可視化実験, 日本液体微粒化学会, 第 24 回微粒化シンポジウム講演論文集(2015), 17-23.
- (5) Wu, PK., Kirkendall, KA., Fuller, RP., Nejad, AS.: Breakup Processes of Liquid Jets in Subsonic Crossflows, *Journal of Propulsion and Power*, 13-1(1997), 64-73.
- (6) Wu, PK., Kirkendall, KA., Fuller, RP., Nejad, AS.: Spray Structures of Liquid Jets Atomized in Subsonic Crossflows, *Journal of Propulsion and Power*, 14-2(1998), 173-182.
- (7) Ng, C.-L., Sankarakrishnan, R., Sallam, K.A.: Bag Breakup of Nonturbulent Liquid Jets in Crossflow, *International Journal of Multiphase Flow*, 34-3(2008), 241-259.
- (8) Leask, SB., McDonell, VG., Samuelsen, S.: Emulsion Jet in Crossflow Atomization Characteristics and Dynamics, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 141-4(2019).
- (9) 佐藤一教, 沖浦邦夫, 馬場彰, 正路一紀, 秋山巖: 高濃度石炭・水スラリの微粒化に関する研究 第 1 報 微粒化特性, 日本機械学会論文集, 53-493(1987), 2890-2895.
- (10) 佐藤一教, 沖浦邦夫, 馬場彰, 正路一紀, 秋山巖: 高濃度石炭・水スラリの微粒化に関する研究 第 2 報 微粒化機構, 日本機械学会論文集, 53-494(1987), 2995-3002.
- (11) Song, S.H., Lee, S.Y.: Study of Atomization Mechanism of Gas/Liquid Mixtures Flowing Through Y-jet Atomizers, *Atomization and Sprays*, 6-2 (1996), 193-209.
- (12) Barreras, F., Lozano, A., Barroso, J., Lincheta, E.: Experimental Characterization of Industrial Twin-Fluid Atomizers, *Atomization and Sprays*, 16-2(2006), 127-145.
- (13) Milkvik, M., Stahle, P., Schuchmann, H.P., Gaukel, V., Jedelsky, J., Jicha, M.: Twin-Fluid Atomization of Viscous Liquids: The Effects of Atomizer Construction on Breakup Process, Spray Stability and Droplet size, *Internal Journal of Multiphase Flow*, 77 (2015), 19-31 .
- (14) Hashiguchi, K., Yamane, F., Fuji, H., Sato, K., Nishida, K.: Development of Internal Mixing Twin Fluid Atomizer with Multiple Exit Ports for Heavy Oil-Fired Boilers, *Atomization and Sprays*, 29-2(2019), 161-176.
- (15) 小田哲也, 廣安博之: 高速気流中における気泡混入液体噴流の分散特性, 日本航空宇宙学会誌, 45-518(1997), 154-161.
- (16) 川頭大毅, 邢文静, 橋口和明, 佐藤一教, 西田恵哉: 二流体噴射弁の内部流動と噴霧の挙動 第 1 報 透明噴射弁による高速度ビデオカメラ観察, 日本液体微粒化学会, 第 27 回微粒化シンポジウム講演論文集(2018), B-121.
- (17) 邢文静, 橋口和明, 佐藤一教, 西田恵哉, 尾形陽一: 二流体噴射弁の内部流動と噴流の挙動 第 2 報 流動様式の詳細観察, 日本液体微粒化学会, 第 28 回微粒化シンポジウム講演論文集(2019), JA-112.
- (18) 日本機械学会編: 気液二相流技術ハンドブック, コロナ社, (1982), 1-21.