

衝突噴流型ジェットエンジン燃料噴射弁の
微粒化特性に及ぼす壁面形状の効果*荒木 幹也^{*1}, 堀越 順^{*2}, 山田 秀志^{*3}
志賀 聖一^{*1}, 林 茂^{*3}
中村 壽雄^{*4}, 小保方 富夫^{*1}Wall Geometry Effects on Atomization Characteristics
of an Impingement-Jet Type Jet Engine Fuel InjectorMikiya ARAKI^{*5}, Jun HORIKOSHI, Hideshi YAMADA,
Seiichi SHIGA, Shigeru HAYASHI,
Hisao NAKAMURA and Tomio OBOKATA^{*5} Department of Mechanical Engineering, Gunma University,
1-5-1 Tenjin-cho, Kiryu-shi, Gunma, 376 8515 Japan

Effects of a wall impingement jet on atomization characteristics of a jet engine fuel injector were investigated experimentally. Liquid is injected from 0.2 mm-diam nozzles and the liquid columns impinge onto a wall. The liquid forms thin films on the impingement wall and fine droplets can be produced. Several kinds of impingement wall geometries, such as slope, parallel and cylinder types, were examined and the droplet size and atomization mode were investigated. The droplet size was measured with an LDSA. For the slope type, two kinds of atomization mode, namely, "air blast atomization" and "pressure atomization" modes were observed. The pressure atomization mode is preferable, since it leads to the atomization improvement of a jet engine in low load operations. For parallel types, the atomization characteristics were similar to that for the slope type. For cylinder types, pressure atomization mode can be realized with a small liquid injection pressure. And the droplet size in the pressure atomization mode is smaller when compared with the parallel types.

Key Words: Jet Engine, Pressure Atomization, Wall Impingement, Liquid Film, Spray, SMD

1. 結 言

航空機用ジェットエンジンから排出される NO_x が、大きな問題となりつつある。高空に排出された NO_x はそのまま滞留し、オゾン層破壊の原因物質となる。高空に滞留する NO_x の 60% は航空機由来と言われており、ジェットエンジンに対する低 NO_x 化のニーズは極めて高い。ジェットエンジンの低 NO_x 化のためには、予蒸発予混合燃焼による希薄燃焼が有望である。これを燃焼器サイズの増大なしに実現するためには、燃料噴射弁の微粒化特性改善が緊要の課題となっている。

従来のジェットエンジン用燃料噴射弁では、エアースラスト方式（プレフィルミング方式）が広く用いら

れている⁽¹⁾。これは、壁面上に形成された液膜を、空気流によって微粒化する方式である。微粒化後の燃料の空間的分散性が高く、高負荷条件でもすす生成が少ないといった特長をもっている。しかしながら、原理的に空気流速の低下とともに微粒化特性が悪化するという問題がある。

著者らは、従来のエアースラスト方式の燃料噴射弁に、壁面衝突を伴う圧力微粒化の手法を組み合わせることを提案してきた⁽²⁾。噴射弁に設けた複数のノズルから、燃料を模擬した精製水を噴出する。液体噴流は液柱の状態を保ったまま壁面に衝突し、液膜が形成される。液膜はその運動量によって空気流中に放出され、液滴へと分裂する。このコンセプトによる微粒化促進効果を検証するため、実機サイズの燃料噴射弁を製作し、その微粒化特性について実験的に検討を行ってきた。

衝突噴流方式の燃料噴射弁を用いた場合、液体噴射圧力に応じて 2 種類の微粒化モードが現れることが明らかとなった⁽²⁾。液体噴射圧力の小さな条件では、

* 原稿受付 2005 年 1 月 17 日。

^{*1} 正員, 群馬大学工学部(☎ 376-8515 桐生市天神町 1-5-1)。^{*2} 学生員, 群馬大学大学院工学研究科(☎ 376-8515 桐生市天神町 1-5-1)。^{*3} 正員, 宇宙航空研究開発機構総合技術研究本部(☎ 182-8522 調布市深大寺東町 7-44-1)。^{*4} 群馬大学工学部(☎ 376-8515 桐生市天神町 1-5-1)。

E-mail: araki@me.gunma-u.ac.jp

従来のエアブラスト方式の燃料噴射弁と同様に、空気流速の増大とともに液滴のザウター平均粒径 (SMD) が減少することが示された (気流微粒化モード) ⁽²⁾。一方、液体噴射圧力の大きな条件では、液滴の SMD は空気流速には依存せず、燃料噴射圧力で整理できることが示された (圧力微粒化モード) ⁽²⁾。また、気流微粒化モードと比較した場合、圧力微粒化モードの効果が最も顕著な条件においては、液滴の SMD は $1/3 \sim 1/14$ となり、微粒化特性が大きく改善されることが示された。これらから、液体噴射圧力の大きい条件で現れる圧力微粒化モードにおいては、空気流の貢献が少なくても良好な微粒化が可能であることが示された ⁽²⁾。

しかしながら、実際のジェットエンジンを考えた場合、低負荷運転条件では、空気流量とともに燃料流量も減少する。衝突噴流方式を用いた場合、燃料流量を絞るために燃料噴射圧力を小さくする必要があり、微粒化モードは気流微粒化モードとなる。このため、衝突噴流方式の利点が失われることとなる。空気流量および燃料流量の両者が小さい条件において、良好な微粒化特性をもつ噴射弁の開発が必要となる。

著者らはこれまで、液体噴流を壁面に衝突させることで液膜を形成する、壁面衝突噴流の基礎微粒化特性に関して、実験的検討を行ってきた ⁽³⁾。この研究より、(i) 液体噴流をそのまま微粒化する場合 ⁽⁴⁾ と比較し、壁面衝突を用いる場合の方が小径液滴を得られること、(ii) 衝突壁面と液体噴流のなす角度が大きいほど、小径液滴を得られること、(iii) 衝突壁面の寸法が小さいほど、空間中に放出される際の液膜の速度が大きく、小径液滴を得られることが明らかになっている。これらを踏まえ、本報では、衝突噴流型燃料噴射弁の壁面形状の最適化を図る。特に、液体噴射圧力の小さい条件においても圧力微粒化モードを得られる壁面形状の選定が重要となる。液体噴流の衝突角度、および衝突壁面の寸法を変化させ、液滴の SMD 、微粒化モードに及ぼす影響について、実験的に検討する。

2. 実験装置および方法

2. 1. 燃料噴射弁

図 1 に、実験装置の概略を示す。実機サイズの燃料噴射弁を全圧室出口に設置した。エアブラスト用空気は、ブローアから供給され、バイパス弁により流量調整を行った後、全圧室に導かれる。空気は、全圧室から噴射弁に供給され大気中に噴出する。全圧室の空気全圧は、水マンオメータで計測される。空気全圧から、損失を無しとした時の空気流速を算出した。空気

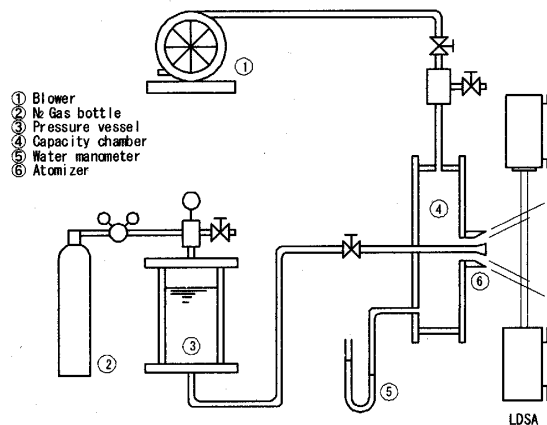
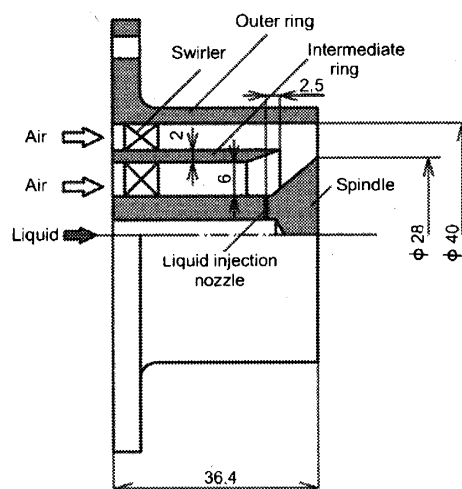
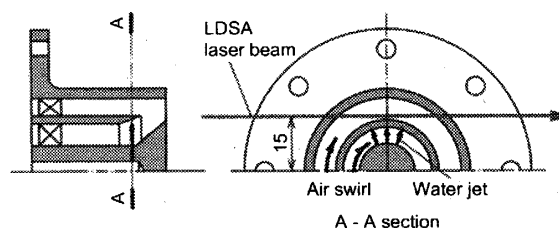


Fig. 1 Schematic of the experimental setup.



(a) Cross sectional view of the fuel injector



(b) Droplet size measurement position

Fig. 2 Schematics of the fuel injector.

全圧を $100 \sim 500 \text{ mmAq}$ の範囲で変化させた。この時、空気流速は $41 \sim 92 \text{ m/s}$ となる。ただし、この空気流速はあくまで空気全圧から求めたポテンシャル速度であり、空気流の影響の大きさを表す目安として用いた。実際の空気流速は、噴射弁に流入する際の縮流、境界層発達、スワローでの損失などの影響を受けると考えられる。供試液体には精製水を用いた。供試液体の加圧には、窒素ガスを用いた。液体噴射圧力を $0.5 \sim 7.5 \text{ MPa}$ の範囲で変化させた。加圧された供試液体は、配

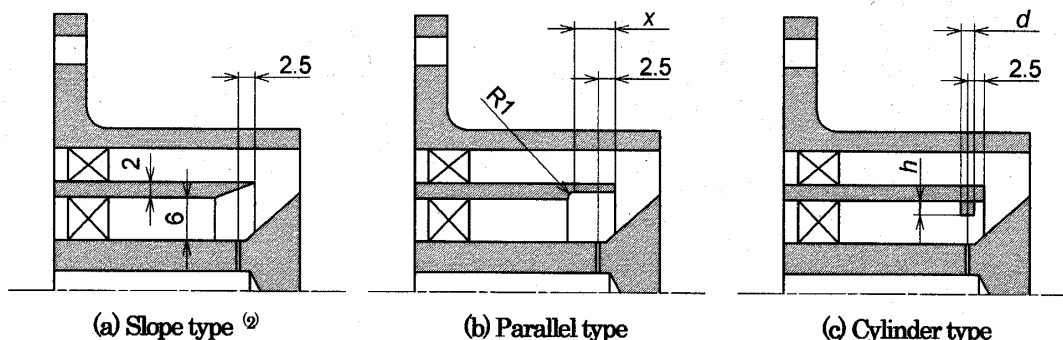


Fig. 3 Schematics of impingement wall geometries.

管を通して噴射弁に供給される。

Lefebvre⁽¹⁾は、エアブラスト式燃料噴射弁の微粒化特性に関して、実機で想定される広範な条件において実験を行い、Rizkalla and Lefebvreの式を導き出した。本研究では、この式の適用範囲を網羅するように、実験条件を設定している⁽²⁾。

図2(a)に、燃料噴射弁の概略を示す。燃料噴射弁は、外リング、中間リング、スピンドルからなる二重円管である。エアブラスト用空気は、二重円管から供給される。それぞれの流路にはスワローが設置されており、同一方向のスワローを生成する。

供試液体は、スピンドル内部を通して供給され、スピンドルに設けた直径 $\phi 0.2$ mmのホールノズルから噴出する。ノズルは、円周方向に 20° ピッチで3個設けてある。実用的には、全周にわたり18個のノズルを設ける必要があるが、液体の処理能力の制約から困難であった。また本研究のように、複数のノズルから離散的に液体を供給する方式では、ノズル間で干渉が起り、単ノズルの場合と結果が異なる可能性がある。そこで、 20° ピッチで3個のノズルを設け、実験を実施した。ノズルが3個あることで、形成される噴霧の中心付近では、ノズル間の干渉の影響を検証できるよう配慮した⁽²⁾。

ノズルから噴出した供試液体は、液柱の状態を保ったまま⁽²⁾中間リングに衝突する。このことは目視にて確認されている。また、著者らの行ってきた、壁面衝突噴流⁽³⁾および自由噴流⁽⁴⁾の微粒化に関する実験的研究においても確認されている。液体噴射ノズル出口から衝突壁面までの距離は、その形状によって異なるが最大で約7 mmである。液体噴流は、エアブラスト用空気による横風の影響を受け、偏向する。空気流による偏向の度合いが最も大きい条件の場合、液体噴流は衝突壁面に至るまでに、空気流の下流方向に約1 mm程度偏向する⁽²⁾ことが確認されている。

2. 2. 計測法

図2(b)に、液滴の粒径計測の実施位置を示す。液滴の粒径計測には、前方微小角散乱法(東日コンピュータアプリケーションズ社; LDSA 1300A)を用いた。計測位置は、噴射弁出口下流70 mm、噴射弁中心軸上方15 mm⁽²⁾である。この計測位置は、形成される噴霧のほぼ中心をとらえており、また、噴霧によるレーザ光の減光の度合いが最も大きくなる位置である。ここで得られた液滴径が噴霧の液滴径をおおよそ代表すると考えられる⁽²⁾。

2. 3. 衝突壁面形状

図3に、中間リングに設けた衝突壁面の形状の概略を示す。本研究では、液体噴流が衝突する部分の形状を様々に変化させた。それぞれ、「斜面型」、「平行型」、「円柱型」と呼ぶ。

図3(a)に示す斜面型は、前報⁽²⁾で用いた壁面形状である。液体噴射ノズルの中心軸は、中間リング下流端の2.5 mm上流に位置している。斜面型では、液体噴流衝突部に 20° のテーパを設けてある。衝突壁面に対する液体噴流の衝突角度は約 70° となる。ただ

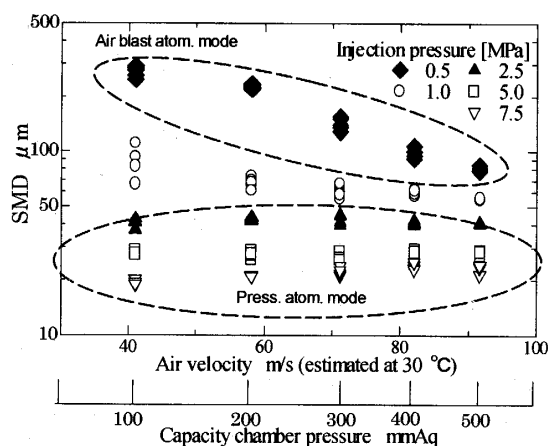
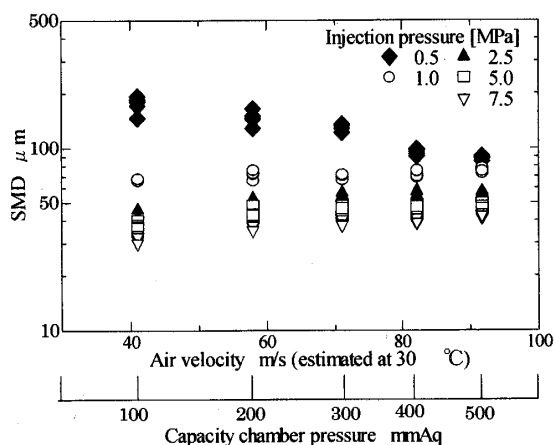


Fig. 4 SMD variation with the air velocity and liquid injection pressure, for the slope type.

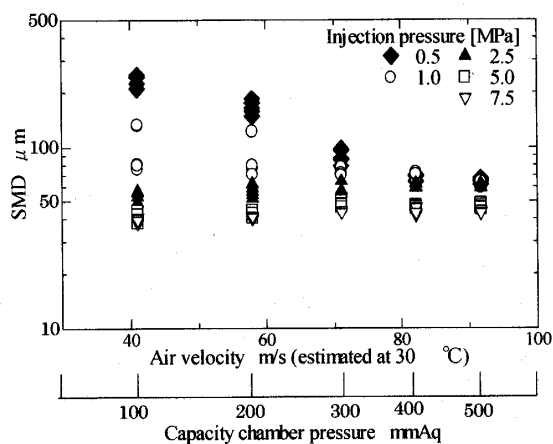
し、液体噴流は空気流によって偏向するので、衝突角度は実験条件に応じてわずかに変化する。

図 3 (b) に示す平行型は、衝突壁面の角度の影響を調査するために用いた。液体噴射ノズルの中心軸は、中間リング下流端の 2.5 mm 上流に位置している。液体噴流衝突部はスピンドルと平行である。液体噴流の衝突角度は約 90° となる。また、壁面上に形成される液膜が、噴射弁上流方向にさかのぼって広がることを防ぐため、R 1 mm の段差を設けてある。衝突壁面の平行部長さを x とし、 $2\text{ mm} < x < 6\text{ mm}$ の範囲で変化させた。

図 3 (c) に示す円柱型は、液体噴射ノズル出口から衝突壁面までの距離、および衝突壁面の大きさの影響を調査するために用いた。液体噴射ノズルの中心軸は、中間リング下流端の 2.5 mm 上流に位置している。



(a) $x = 2\text{ mm}$



(b) $x = 6\text{ mm}$

Fig. 5 SMD variation with the air velocity and liquid injection pressure, for parallel types.

液体噴射ノズル中心軸の延長線上に、円柱の突起を設けてある。円柱端面は平面であり、スピンドルと平行である。液体噴流は、この円柱端面に衝突する。液体噴流の衝突角度は約 90° となる。円柱直径 d を $2\text{ mm} < d < 4\text{ mm}$ の範囲で、円柱高さ h を $2\text{ mm} < h < 4\text{ mm}$ の範囲で変化させた。なお、液体噴流は空気流によって偏向する。液体噴流が円柱端面に衝突するよう、その位置を微調整している。また、全ての条件において液体噴流が円柱端面に衝突することを目視にて確認している。

3. 結果 および 考察

3. 1. 斜面型

図 4 に、斜面型を用いた場合の液滴の SMD を示す。横軸は空気流速、縦軸は SMD である。プロットの違いは、液体噴射圧力の違いを表す。

液体噴流は、衝突壁面に衝突して液膜となり、空間中に放出される。空間中に放出された液膜は液滴へと分裂していく⁽²⁾。このため、空間中に放出される際の液膜速度が重要な意味を持つ。液体噴射圧力が 0.5 MPa の場合、SMD は空気流速の増大とともに減少する。液体噴射圧力が小さい場合、そのままでは空間中に放出される液膜の速度は小さく、それ自身の運動量による微粒化は期待できない。液膜は、空気流の貢献によって微粒化されると考えられる。このため、従来のプレフィルミング方式と同様に、空気流速の増大とともに SMD が減少すると考えられる。これが気流微粒化モードである⁽²⁾。

一方、液体噴射圧力が 2.5 MPa 以上の場合、SMD は空気流速によらずほぼ一定の値をとる。また、液体噴射圧力の増大とともに、SMD は減少する。液体噴射圧力が大きい場合、液膜は空間中に高速で放出され、それ自身の運動量によって微粒化が行われると考えられる。これが圧力微粒化モードである⁽²⁾。

前報⁽²⁾では、位相ドップラー法を用い、液滴の粒径と速度との同時測定を実施した。一般に、気流微粒化モードでは、小さい液滴ほど気流に乗りやすいため、粒径と速度とは負の相関を示す。一方圧力微粒化モードでは、大きな液滴ほど噴射圧力のエネルギーを保持しているため、粒径と速度とは正の相関を示すことが知られている。前報で、個々の液滴について粒径と速度との相関を調べた結果、2つのモードは重畳して現れており、厳密に分離することは困難であることが明らかとなった⁽²⁾。ただ、より貢献の大きい(液滴数の多い)モードが、巨視的に見たときの結果として現れてくると考えられる。

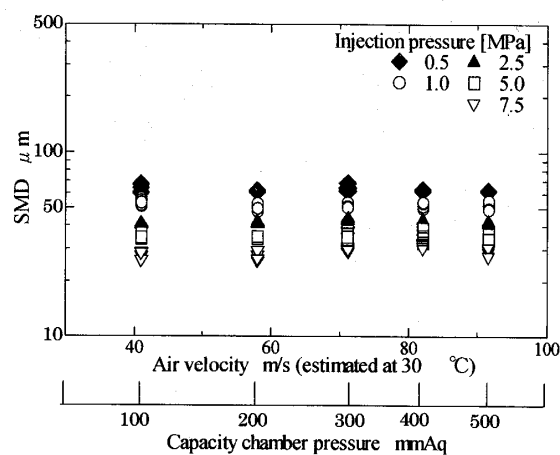
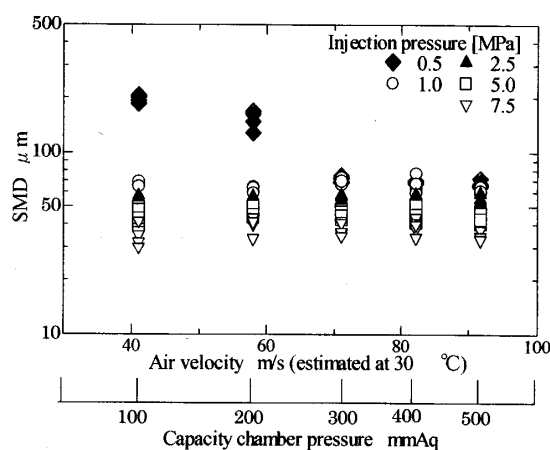
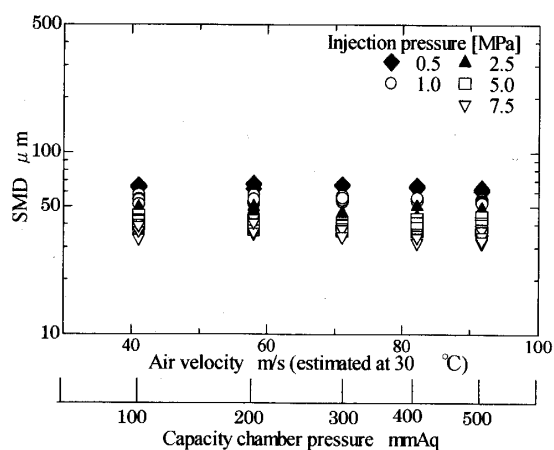
(a) $d=2\text{ mm}$, $h=2\text{ mm}$ (b) $d=4\text{ mm}$, $h=2\text{ mm}$ (c) $d=2\text{ mm}$, $h=4\text{ mm}$

Fig. 6 SMD variation with the air velocity and liquid injection pressure, for cylinder types.

3. 2. 平行型

図 5 に、平行型を用いた場合の液滴の SMD を示す。図 5 (a), (b) は、それぞれ平行部長さ $x=2\text{ mm}$, 6 mm の場合を示す。横軸は空気流速、縦軸は液滴の SMD である。プロットの違いは、液体噴射圧力の違いを表す。

図 5 (a), (b) いずれにおいても、液体噴射圧力が 0.5 MPa の場合、 SMD は空気流速の増大とともに減少する。斜面型と同様に、気流微粒化モードが現れる。一方、液体噴射圧力が 2.5 MPa 以上の場合、 SMD は空気流速によらずほぼ一定の値をとる。また、液体噴射圧力の増大とともに、 SMD は減少する。斜面型と同様に、圧力微粒化モードが現れる。

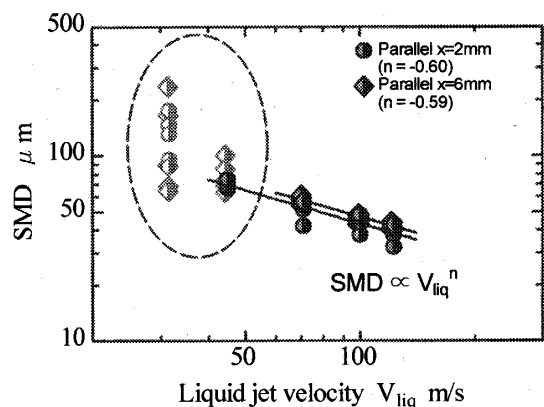
平行型を用いた場合の微粒化特性は、斜面型のそれとよく似ていることが分かる。液体噴流と衝突壁面のなす角度が微粒化特性に及ぼす影響は、比較的小さいと考えられる。ただし、斜面型と平行型の壁面角度の違いが 20° と比較的小さいことも、その原因と考えられる。

3. 3. 円柱型

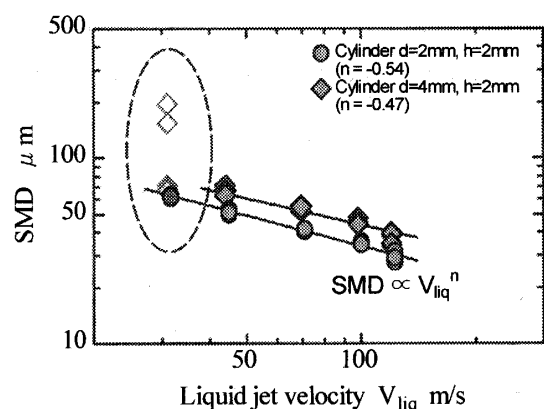
図 6 に、円柱型を用いた場合の液滴の SMD を示す。図 6 (a) は、円柱直径 $d=2\text{ mm}$, 円柱高さ $h=2\text{ mm}$ の場合の結果を示す。これを基準形状とする。図 6 (b) は、円柱高さ h を固定 ($h=2\text{ mm}$) し、円柱直径を $d=4\text{ mm}$ と大きくした場合の結果を示す。図 6 (c) は、円柱直径 d を固定 ($d=2\text{ mm}$) し、円柱高さを $h=4\text{ mm}$ と大きくした場合の結果を示す。横軸は空気流速、縦軸は液滴の SMD である。プロットの違いは、液体噴射圧力の違いを表す。

図 6 (a) に示す基準形状の条件では、全ての液体噴射圧力において、 SMD は空気流速によらずほぼ一定の値をとることが分かる。また、液体噴射圧力の増大とともに、 SMD は減少する。気流微粒化モードは現れず、全ての条件で圧力微粒化モードが現れることが分かる。図 6 (b) に示す円柱直径 d が大きい条件では、液体噴射圧力が 0.5 MPa の場合、気流微粒化モードが現れる。液体噴射圧力が 1.0 MPa 以上になると SMD は空気流速によらずほぼ一定の値をとり、圧力微粒化モードに遷移することが分かる。図 6 (c) に示す円柱高さ h が大きい条件では、図 6 (a) の基準形状の条件と同様に、全ての液体噴射圧力において、圧力微粒化モードが現れる。その微粒化特性は、基準形状とほとんど変わらないことが分かる。

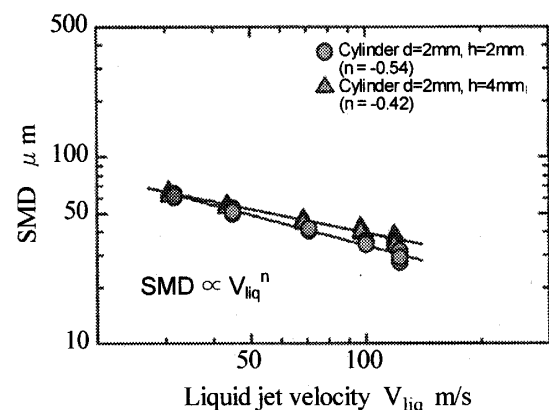
円柱型を用いた場合、特に円柱直径 d が小さい場合には、斜面型、平行型と比較し、より小さな液体噴射圧力で圧力微粒化モードを実現できる。このことは、



(a) Parallel types



(b) Cylinder types (change in diameter)



(c) Cylinder types (change in height)

Fig. 7 SMD variation with the liquid jet velocity V_{liq} .

燃料流量が小さくなる低負荷運転条件においても、良好な微粒化特性を維持できることを意味している。液体噴流は円柱端面に衝突して液膜となり、空間中に放出される。衝突壁面上において、供試液体は粘性抵抗を受け減速する。衝突壁面上での摩擦の影響が大きいと、空間中に放出される際の液膜の速度は減少し⁽³⁾、液膜自身の持つ運動量による微粒化は期待できず、空気流の貢献が必要となる。このため、円柱直径 d の増

大とともに、気流微粒化モードが現れるようになったと考えられる。

一方、円柱高さ h は、微粒化モードにほとんど影響を及ぼさないことが分かる。ただし、その距離の違いが 2mm と小さいことも、その原因と考えられる。

3. 4. 液体噴流速度と液滴径の関係

衝突壁面形状を変化させることで、現れる微粒化モードが大きく変化することが示された。特に円柱型を用いた場合、圧力微粒化モードが現れやすいため、空気流速の大小にかかわらず一定の微粒化特性を得られることが示された。圧力微粒化モードにおいては、液体噴射圧力の増大に伴い液滴の SMD が減少する。以下では、圧力微粒化モードに焦点を絞り、液体噴射圧力（あるいは液体噴流速度）と SMD との関係について検討する。

図 7 に、液体噴流速度 V_{liq} と液滴の SMD の関係を示す。図 7 (a) は平行型を用いた場合、図 7 (b) は円柱直径 d を変化させた場合、図 7 (c) は円柱高さ h を変化させた場合の結果を示す。横軸は、液体噴射圧力から算出したポテンシャル速度を示す。縦軸は、液滴の SMD を示す。それぞれの液体噴流速度 V_{liq} において、空気流速は 5 段階に変化しているが、ここではそれらを全てプロットしている。気流微粒化モードと圧力微粒化モードの両方が現れた条件については、プロットの色を薄くし、点線で囲んで表示している。

図 7 (a) ~ (c) より、気流微粒化モードが含まれる場合、液滴の SMD に大きなばらつきが見られることが分かる。一方、圧力微粒化モードの場合、SMD のばらつきは減少し、液体噴流速度 V_{liq} の増大とともに SMD が直線的に減少することが分かる。圧力微粒化モードの場合、平行型、円柱型の違いにかかわらず、SMD は液体噴流速度 V_{liq} で整理できる。この特性は、前報の斜面型でも同様に観察されたものである⁽²⁾。

図 7 (a) ~ (c) より、グラフの傾きを表す指数は、-0.4 ~ -0.6 程度となる。著者らの実施してきた壁面衝突噴流の微粒化に関する基礎研究⁽³⁾において、衝突角度が 90° の場合 SMD は液体噴流速度の約 0.5 乗に比例することが示されており、本研究での結果とおおむね一致する。このことから、圧力微粒化モードにおいては、空気流のない単純な壁面衝突噴流に近い現象が現れている可能性が大きいと考えられる。ただし、文献 (3) とはノズル直径が異なるため、SMD の絶対値の比較は難しいと考えられる。

図 7 (a) より, 平行型を用いた場合, 平行部長さ x の減少とともに, 圧力微粒化モードが現れやすくなることから分かる. 壁面に衝突した液体噴流は, 液膜となって空間中に放出される. この際, 衝突壁面上では粘性摩擦による減速が起こる⁽³⁾. 平行部長さ x の増大とともに, この減速の度合いは大きくなり, 空間中に放出される際の液膜の速度を低下させ, 圧力微粒化モードの実現を阻害すると考えられる.

図 7 (b) より, 円柱型を用いた場合, 円柱直径 d の増大とともに, SMD は増大することが分かる. これも, 壁面上での粘性摩擦の影響と考えられる. また, 液滴の SMD は, 平行型を用いた場合よりやや小さい. 円柱型を用いた場合, 衝突壁面が突起状になっているため, 衝突により形成された液膜が, 360° 全ての方向に向かって放出される⁽⁹⁾と考えられる. このため, 平行型と異なり, 噴射弁の円周方向, あるいは噴射弁の上流方向にも自由に液膜が形成され, 微粒化に有利となったと考えられる.

図 7 (c) より, 円柱型を用いた場合, 円柱高さ h が変化しても, SMD は同程度となることから分かる. ただし, 円柱高さ $h=4$ mm の場合, 液体噴射ノズル出口から衝突壁面までの距離は 2 mm まで接近する. 衝突壁面から放出された液膜あるいは液滴が, スピンドルのテーパ一部に衝突する可能性がある. テーパー部への液滴の衝突は, 液滴の合体などを引き起こす可能性があり, わずかながら液滴の粒径の増大を招いている可能性もあると考えられる.

以上の議論から, 圧力微粒化モードにおいては,

- (i) 液滴の粒径は液体噴流速度で整理できる点,
- (ii) 壁面寸法が小さく高速の液膜を空間中に速やかに放出できる方が, 生成される液滴の粒径が小さい点,
- (iii) 衝突壁面が突起状になり, 360° 全ての方向に向かって液膜を放出できる方が, 生成される液滴の粒径が小さい点が明らかとなった.

4. 結 言

衝突噴流型ジェットエンジン燃料噴射弁の微粒化特性に及ぼす壁面形状の効果について, 実験的に検討を行った. 壁面形状として, 平行型, 円柱型を用い, 従来の斜面型との比較を行った. この結果, 以下の知見

を得た.

- (1) 平行型の衝突壁面を用いた場合, 従来の斜面型と同様に, 気流微粒化モード, 圧力微粒化モードの 2 つのモードが現れる. ただし, 平行部長さが小さくなると気流微粒化モードは現れづらくなる.
- (2) 円柱型の衝突壁面を用いた場合, 従来の斜面型と同様に, 気流微粒化モード, 圧力微粒化モードの 2 つのモードが現れる. ただし, 円柱直径が小さくなると気流微粒化モードは現れなくなる.
- (3) 円柱型の衝突壁面を用いた場合, 圧力微粒化モードにおいては, 円柱直径が小さくなるに従い, 液滴の粒径が小さくなる.
- (4) 平行型, 円柱型のいずれの衝突壁面を用いた場合にも, 圧力微粒化モードにおいては, 液滴の粒径は液体噴流速度で整理できる.
- (5) 衝突壁面形状は, 液膜を減速させること無く, かつ液膜を 360° 全ての方向に向かって放出できるものが望ましい. つまり, 衝突壁面は小さく, 突起状であることが望ましい.

5. 謝 辞

本研究は, 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) と群馬大学との共同研究として実施された. 宇宙航空研究開発機構より, 実験・計測装置に関する支援を頂き, また有益な討論の機会を頂いた. また本研究の実施にあたり, 群馬大学大学院生 菊池健司君の援助を頂いた. ここに記して謝意を表する.

6. 参 考 文 献

- (1) A. H. Lefebvre, *Atomization and Sprays*, Hemisphere Publishing, (1989), 244-252.
- (2) 山田 他, 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, 機論, 70-700, B (2004), 3257-3263.
- (3) 荒木 他, 壁面衝突による高速液体噴流の微粒化, 機論, 71-703, B (2005), 978-985.
- (4) Karasawa, T. et al., Effect of Nozzle Configuration on the Atomization of a Steady Spray, *Atomization and Sprays*, 2 (1992), 411-426.