衝突噴流型ジェットエンジン燃料噴射弁の
噴霧粒径および噴霧分散特性*田村 貴洋^{*1}, 荒木 幹也^{*2}, 山田 秀志^{*3}
志賀 聖一^{*2}, 林 茂^{*3}, 小保方 富夫^{*4}Droplet Size and Spray Dispersion Characteristics of
an Impingement-Jet Type Jet Engine Fuel InjectorTakahiro TAMURA, Mikiya ARAKI^{*5}, Hideshi YAMADA,
Seichi SHIGA, Shigeru HAYASHI and Tomio OBOKATA^{*5} Department of Mechanical Engineering, Gunma University,
1-5-1 Tenjin, Kiryu-shi, Gunma, 376-8515 Japan

Droplet size and spray dispersion characteristics of an impingement-jet type jet engine fuel injector are investigated experimentally. The fuel injector is consisted of a pintle, intermediate ring, and outer ring, forming co-axial air flow channels with co-swirlers. Compressed air at room temperature is supplied with a blower, and is injected into the atmosphere through the co-axial channels. Distilled water is supplied with a liquid pump, and is injected from hole nozzles mounted in the pintle. The number of nozzles is 8 and 16. The liquid jets impinge onto impingement walls mounted on the intermediate ring, forming a free liquid film. From the tip of the liquid film, fine droplets are formed. The droplet size is measured using an LDSA, and the spray cross section is visualized using time-average Mie scattering method. It is shown that the droplet size is almost the same as the atomization of a simple wall-impingement jet, which is much smaller than that for a conventional air-blast fuel injector, and it is observed that a relatively uniform spray is formed using the fuel injector.

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

1. 結 言

航空機から排出される NO_x が、オゾン層破壊の 1 つの原因となっていることが知られている。高空における NO_x 排出量の約 60 % が航空機によると言われており、航空機用エンジンに対する低 NO_x 化のニーズは非常に高まっている。低 NO_x 化を実現する方法として、予蒸発予混合 (LPP: Lean pre-vaporized premixed) による希薄燃焼がある。その実現のため、燃料噴霧の微粒化特性改善は重要な課題である。

現在、ジェットエンジン用燃料噴射弁には、エアブラスト式 (プレフィルミング式) が広く用いられて

いる。壁面上に形成された薄い液膜を、大量かつ高速の空気流によって微粒化する方法である^①。噴霧分散性が高く、高負荷条件でもすす生成が少ないという特長をもっている。しかしこの方式の場合、原理上、微粒化程度が空気流速に依存する。空気流速の小さい低負荷条件では噴霧粒径が増大し、局所的な高温燃焼域の形成により NO_x 排出量が増大する。また噴霧粒径は、ザウター平均粒径 (SMD: Sauter mean diameter) で約 50 μm が限界であり、さらなる微粒化促進が必要である。

著者らは、壁面衝突をとまう圧力微粒化^②を適用することで、ジェットエンジン用燃料噴射弁の微粒化特性改善を試みてきた^{③④}。液柱状の液体噴流を小さな壁面に衝突させると、空間中に自由液膜が放出される。この液膜は非常に薄く、その端部から微細な噴霧が形成される^⑤。ジェットエンジン用燃料噴射弁に壁面衝突微粒化を適用することで、(i) エアブ

* 原稿受付 2008 年 4 月 15 日。

^{*1} 群馬大学大学院工学研究科 (☎ 376-8515 桐生市天神町 1-5-1)。^{*2} 正員、群馬大学大学院工学研究科。^{*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} 正員、フェロー、群馬大学大学院工学研究科。

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

ラスト式における、空気流速が小さい条件での微粒化程度悪化の問題を解決し、(ii) エアブラスト式では達成困難な、最小 $SMD=20\ \mu\text{m}$ 程度の噴霧を形成することを目標としている。著者らはこれまで、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ついて、以下の知見を得てきた。

空気流速と液体噴射圧力を様々に変化させて液滴径を計測した結果、2種類の微粒化モードが存在することが示された^③。空気流速の低下とともに液滴径が増大する「気流微粒化モード」と、空気流速が低下しても良好な微粒化程度を維持できる「圧力微粒化モード」である^③。「気流微粒化モード」では、液滴径は、従来のエアブラスト式燃料噴射弁とほぼ同等であることが示された^③。一方「圧力微粒化モード」では、空気流速の小さい領域で、従来のエアブラスト式燃料噴射弁と比較して顕著に微細な噴霧を得られることが示された^③。

衝突壁面形状を様々に変化させて液滴径を計測した結果、衝突壁面が大きい場合には「気流微粒化モード」と「圧力微粒化モード」の両者が現れるが、衝突壁面が小さい場合には「圧力微粒化モード」のみが現れることが示された^④。衝突壁面形状を最適化することで、空気流速によらず、すなわちエンジン運転条件によらず壁面衝突微粒化の利点を引き出すことが可能となった^④。

著者らはこれまで、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ついて、燃料噴射弁の一部セクターのみを対象に、実験的検討を行ってきた。供試液体供給能力に制限があったため、液体噴射ノズル数を3孔のみに制限し、基礎的検討を行ってきた^③。④。実際のLPP燃焼器への適用を考えた場合、微粒化程度だけでなく、予蒸発管・燃焼器における噴霧分散性、および幅広い運転範囲への適応性も考慮しなければならない。衝突噴流型ジェットエンジン燃料噴射弁の場合、離散的に配置されたノズルから液体供給を行うため、噴霧分散性の悪化が懸念される。また噴射弁全周から液体を供給した場合、これまでの一部セクターの実験とは異なる現象が現れる可能性が懸念される。本報では、実機への適用を想定し、液体噴射ノズルを噴射弁全周に配置した。噴霧粒径、噴霧分散性について、実機の運転条件に準じた幅広い条件下で実験的に検討を行った。

2 実験装置および方法

2・1 実験装置概略 図1に、実験装置概略を示す。微粒化用空気は、遠心式送風機より供給され、

Fig. 1 Schematic of experimental setup.

噴射弁直前に設置された全圧室を通り、大気中に噴射される。空気流速は、全圧室に取り付けられた水マノメーターの圧力差より算出した。空気全圧を100～500 mmAqの範囲で変化させた。この時の空気流速は、41～92 m/sである。この空気流速は、実機で想定される範囲を網羅するように設定してある。ただしこの空気流速は、空気全圧より求めたポテンシャル速度である。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。

供試液体には蒸留水を用いた。実機で想定される燃料油との性状の違いは生成される液滴の粒径に影響を及ぼす。以前の研究結果より、粘性が低い場合には粒径が減少することがわかっている。また、表面張力が低い場合には粒径が減少することがわかっている。燃料油を使用した場合には、蒸留水よりも粘性が低く、表面張力も低いので粒径は減少すると考えられる。燃料油を使用した場合、SMDが本実験結果の値よりも大きくなることはなく良好な微粒化程度を得ると考えられる。

供試液体は連続無脈動定量ポンプにより加圧され、噴射弁から空気流中に噴射される。液体噴射圧力の測定には、ひずみ計式圧力計を用いた。液体噴射圧力を、0.5～7.5 MPaの範囲で変化させた。Lefebvre^⑤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た^{③④}。

図2(a)、(b)にそれぞれ、壁面衝突噴流^⑥および衝突噴流型燃料噴射弁^{③④}の概略を示す。液柱状の液体噴流を小さな壁面に衝突させると、空間中に

Fig. 2 Schematic of fuel injector.

自由液膜が放出される。液膜は振動しながら流下し、その端部から分裂して微細な液滴を生成する^②。非常に薄い液膜を生成できるため、壁面衝突を伴わない自由噴流と比較し、顕著に微細な噴霧の生成が可能である^②。この壁面衝突噴流を適用することで、ジェットエンジン用燃料噴射弁の微粒化特性改善を目論む。

本研究で用いた燃料噴射弁は、実機で用いられる燃料噴射弁とほぼ同サイズである。燃料噴射弁は、外リング、中間リング、ピントルからなる2重円管である。エアブラスト用空気は、2重円管から供給される。それぞれの流路にスワラが設置されており、同一方向のスワールを生成する。供試液体は、噴射弁中心のピントル内部を通り、その先端に放射状に設けられたホールノズルより噴射される。ノズル直径 $D = 0.2 \text{ mm}$ である。ノズルから噴射された供試液体は、

液柱の状態を保ったまま中間リング上の衝突壁面に衝突し微粒化する。噴霧は、空気流によって大気中へと噴射される。

著者らはこれまで、衝突壁面形状を様々に変化させ、微粒化特性に及ぼす影響について検討を行ってきた^④。その結果、本研究では最も性能の良かった円柱型衝突壁面^④を使用した。中間リング壁面から突出した円柱端面に液体噴流が衝突することで、空間中に自由液膜が放出される。円柱端面は平面であり、ピントルと平行である。壁面積が小さいため、液体噴流が壁面に付着・停滞することがなく、自由液膜がすみやかに空気流中へと放出される。液膜速度の減衰が小さく、薄い液膜を維持できるという特長を有する^④。供試液体の衝突位置は、中間リング下流端から 2.5 mm 上流である。液体噴流は、空気流による横風を受け、偏向する。この偏向の度合いが最も大きい条件の場合、液体噴流は空気流の下流方向に約 1 mm 程度偏向することが確認されている^③。全ての条件で液体噴流が衝突壁面に衝突するように、円柱直径 $d = 2 \text{ mm}$ 、円柱高さ $h = 2 \text{ mm}$ とした。

著者らはこれまで、ノズルを 20° ピッチで3孔配置した燃料噴射弁を用いてきた^{③④}。供試液体の供給能力に限界があり、ピントル全周からの噴射が困難であったためである。本燃料噴射弁では、離散的に配置されたノズルから供試液体が供給される。ノズルとノズルの間では、形成された液膜同士が衝突し干渉する。ノズルを3孔設置することで、形成される噴霧の中心付近では、液膜同士の干渉の影響を検討できるよう配慮してきた^{③④}。しかしながら噴霧の空間分散性を検討するためには、やはりノズルをピントル全周に配置する必要がある。本研究では、連続無脈動定量ポンプを導入することで液体供給能力を大幅に増大し、ピントル全周からの液体噴射を行った。ノズル数8孔 (45° ピッチ) とノズル数16孔 (22.5° ピッチ) の2条件について行い、ノズル数 (ピッチ) が噴霧粒径ならびに噴霧分散性に及ぼす影響を含めて検討を行った。また比較のため、従来のノズル数3孔 (20° ピッチ)^{③④}の条件についても検討を行った。

2・2 計測法 噴霧粒径計測に、前方微小角散乱法を用いたレーザ光散乱法粒径測定装置 (東日コンピュータアプリケーションズ, LDSA-1300A) を用いた。噴射弁は、噴射軸方向が水平となるように設置される。プローブレザ光の直径は、約 10 mm である。プローブレザ光の中心が、噴射弁出口下流 600 mm 、噴射弁中心より鉛直上方 15 mm の位置を通るように

Fig. 3 SMD variation with air velocity and liquid injection pressure.

設置した。プローブレーザー光が、噴霧濃度の最も大きな領域を通過するように配慮されている^(3,4)。

噴霧分散性を検討するため、噴霧断面を連続ミー散乱法により撮影した。光源には、連続発振 Nd:YAG レーザを用いた。レーザー波長は 532 nm、出力は 30 mW である。レーザーヘッドからのレーザービームは、シリンダカルレンズ系でシート光にされる。レーザーシート光は、燃料噴射弁の中心軸と直角に入射される。撮影位置は、燃料噴射弁出口下流 50 mm である。ミー散乱像の取得には、噴射弁斜め下流方向に設置された CCD カメラを用いた。CCD カメラの露光時間は 1/60 s である。現象に対して露光時間が長いため、時間平均像が取得される。取得された画像のゆがみは、コンピュータを用いて補正される。

3. 結果 および 考察

3・1 空気流速と SMD の関係 図 3 に、空気流速および液体噴射圧力が SMD に及ぼす影響を示す。図 3 (a) ~ (c) はそれぞれ、ノズル数 3 孔⁽⁴⁾、ノズル数 8 孔、ノズル数 16 孔の結果を示す。縦軸は液滴の SMD、横軸は空気流速を示す。プロットの違いは、液体噴射圧力の違いを示す。

図 3 (a) のノズル数 3 孔の場合、全ての液体噴射圧力において、空気流速によらず SMD はほぼ一定となることが分かる。また液体噴射圧力の増大とともに、SMD は減少する。このような傾向を、「圧力微粒化モード」^(2,4)と呼ぶ。最大 SMD は約 60 μm であり、従来のエアブラスト式燃料噴射弁で達成できる最小粒径と、おおむね同じである。最小 SMD は約 26 μm 程度であり、従来のエアブラスト式燃料噴射弁と比較し、顕著に微粒化が促進される。空気流で微粒化を行うエアブラスト式燃料噴射弁の場合、空気流速の低下とともに SMD は増大する^(1,4)。壁面衝突をともなう圧力微粒化を適用することで、空気流速によらず良好な微粒化程度を維持できる、すなわち空気流速が小さくなる低負荷条件においても、良好な微粒化程度を維持できることが分かる^(2,4)。

図 3 (b) のノズル数 8 孔の場合、全ての液体噴射圧力において、空気流速によらず SMD はほぼ一定となることが分かる。ノズル数 3 孔の場合と同様に、「圧力微粒化モード」^(2,4)が見れる。ただし SMD の絶対値は、ノズル数 3 孔の場合と比較し、全ての液体噴射圧力において減少する。最小 SMD は約 17 μm であり、ノズル数 3 孔の場合よりも約 10 μm 減少する。

図 3 (c) のノズル数 16 孔の場合、全ての液体噴射圧力において、空気流速によらず SMD はほぼ一定となることが分かる。ノズル数 3 孔、ノズル数 8 孔の場

Fig. 4 SMD variation with liquid jet velocity.

合同様に、「圧力微粒化モード」⁽²⁻⁴⁾が現れる。ただし SMD の絶対値は、ノズル数 3 孔の場合とほぼ同じ値である。最小 SMD は、約 $30 \mu\text{m}$ である。

ピントル全周にノズルを設けた場合、「圧力微粒化モード」が現れること自体は変わらないものの、ノズル数によって SMD が変化する。ノズル数 16 孔の場合と比較し、ノズル数 8 孔の場合には、最小 SMD は減少する。本研究において、ノズル数 8 孔（ピッチ 45° ）でピッチが最大である。このとき、液膜同士の干渉が最小であると推察される。ノズル数 8 孔において、液膜同士の干渉が最小となるため、 SMD の絶対値が減少すると推察される。また、ノズル数 16 孔のピッチ 22.5° は、ノズル数 3 孔のピッチ 20° に近い値であり、液膜同士の干渉が同程度であることが推察される。このため、ノズル数 16 孔における SMD の

絶対値が、ノズル数 3 孔の場合とほぼ同じ値となると推察される。

3・2 液体噴流速度と SMD の関係

図 4 に、液体噴流速度 V_{lj} と SMD の関係を示す。図 4 (a), (b) はそれぞれ、ノズル数 8 孔、ノズル数 16 孔の結果を示す。縦軸は液滴の SMD 、横軸は液体噴流速度 V_{lj} を示す。液体噴流速度 V_{lj} は、液体噴射圧力から求めたポテンシャル速度である。横軸には、液体流量 G_{lj} をあわせて示す。各液体噴射圧力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。図 4 には、空気流の無い単純な壁面衝突噴流（図 2 (a)）の結果⁽²⁾をあわせて示す。壁面衝突噴流で用いたノズル径は、同じく $D = 0.2 \text{ mm}$ である。壁面衝突噴流実験の詳細については、参考文献 (2) を参照されたい。

図 4 (a), (b) の単純な壁面衝突噴流⁽²⁾の場合、液体噴流速度 V_{lj} の増大とともに SMD は直線的に減少する。壁面衝突噴流に関するこれまでの研究から、(i) 液体噴流速度 V_{lj} が SMD を支配する重要なパラメータであること、(ii) 壁面衝突を用いない自由噴流の微粒化と比較し SMD は顕著に減少することが示されている⁽²⁾。

図 4 (a) のノズル数 8 孔の場合、液体噴流速度 V_{lj} の増大とともに SMD は直線的に減少し、その後一定となる。また、液体噴流速度 V_{lj} の増大とともに、 SMD のばらつきは大きくなる。液体噴流速度が 100 m/s より小さい領域では、 SMD の絶対値は壁面衝突噴流の結果とおおむね同じとなる。液体噴流速度が 100 m/s より大きい領域では、 SMD の絶対値は壁面衝突噴流の結果よりわずかに大きくなる。

図 4 (b) のノズル数 16 孔の場合、液体噴流速度 V_{lj} の増大とともに SMD は直線的に減少して最小値をとり、その後増大する。また、液体噴流速度 V_{lj} の増大とともに、 SMD のばらつきは大きくなる。液体噴流速度が 50 m/s より小さい領域では、 SMD の絶対値は壁面衝突噴流の結果とおおむね同じとなる。液体噴流速度が 50 m/s より大きい領域では、 SMD の絶対値は壁面衝突噴流の結果より顕著に大きくなる。

液体噴流速度 V_{lj} がある値より小さい場合、本燃料噴射弁は、単純な壁面衝突微粒化⁽²⁾と同様の微粒化機構を有すると推察される。液柱状の液体噴流が小さな壁面に衝突することで、自由液膜が形成される。形成された薄い液膜の端部から液滴が分裂し、噴霧が形成される⁽²⁾。形成された噴霧は、空気流によって噴射弁から噴出する。微粒化過程における空気流の貢献

Fig. 5 Time-average Mie scattering images at 50 mm downstream from fuel injector for 8 nozzles.

はどちらかというと小さく、主に噴霧を分散する役割を担うと考えられる。

液体噴流速度がある値より大きい場合、本研究で用いた燃料噴射弁は、単純な壁面衝突微粒化^②とは異なる微粒化過程を有すると推察される。液体流量の増大(液体噴射圧力の増大)とともに、生成される液滴の運動量が増大する。このため、液滴が空気流に追従せず、直線的に飛行し、中間リング・外リングの内壁面に付着・停滞する。その一部は、空気流によって噴射弁から排出され、粗大な粒子となる様子が観察される。本燃料噴射弁では、狭い空間内に密集した状態で壁面衝突噴流が形成される。処理できる液体流量には限界があると考えられる。

図 4 (a), (b) から、本燃料噴射弁の場合、液体流量が約 30 g/s より大きくなると(図 4・破線円内)、単純な壁面衝突噴流^②と比較して *SMD* が大きくなることが分かる。ノズル数が異なっても、このしきい値はあまり変化しないようである。また、空気流速が大きくても小さくても、このしきい値はあまり変化しないようである。噴霧粒径の観点から考えると、供給可能な液体流量には上限が存在する。

3・3 噴霧分散性 図 5 に、連続ミー散乱法による噴霧断面像を示す。図 5 (a) ~ (e) は、液体噴射圧力を徐々に増大した結果を示す。ノズル数は 8 孔である。空気流速は 92 m/s である。予蒸発管の設置

Fig. 6 Schematic of spray flow field for several liquid injection pressures.

を前提に、撮影位置は噴射弁下流 50 mm とした。なお、噴霧の上下端が若干暗いのは、レーザーシートの強度分布が一様でないためである。

図 5 (a), (b) より、液体噴射圧力が小さい場合、噴霧中心に液滴は到達せず中空噴霧となることが分かる。図 5 (c) ~ (e) より、液体噴射圧力が大きい場合、噴霧中心まで液滴が到達し中実噴霧へと変化していくことが分かる。本燃料噴射弁では、同軸コスワラを用いて空気流に旋回を加えている。内部スワラのスワール数は約 0.8、外部スワラのスワール数は約 0.9 である^①。このような旋回流の中心には、再循環領域が形成される^①。液体噴射圧力が小さい場合、空気流中心に形成される再循環領域に液滴が侵入しないため、中空噴霧が形成され则认为られる。液体噴射圧力が大きい場合、液滴数が増大し再循環領域に侵入する粒子が増え、中実噴霧へと近づいていくと推察される。

図 5 (a) ~ (e) より、液体噴射圧力を増大していても噴霧外径はほとんど変化しないことが分かる。空気流の流れ模様は、液体噴射を行ってもそれほど大

きくは変化しないと予想される。液滴は、空気流外縁まで分散し、流下すると考えられる。本燃料噴射弁では、形成される噴霧の面積は、液体流量の増大とともに噴霧の内側へのみ拡大していく。

本燃料噴射弁では、離散的に配置されたノズルから液体が供給されるため、噴射弁円周方向に大きな噴霧濃度分布が形成される懸念があった。また、壁面衝突噴流による自由液膜が、空気流と平行な方向に形成されるため、噴射弁半径方向に大きな濃度分布が形成される懸念もあった。図5を見る限り、噴射弁円周方向、半径方向の噴霧濃度のばらつきは比較的小さいと考えられる。なおここには示していないが、ノズル数 16 孔の場合も定性的に上記と同様の結果が得られている。

3・4 噴霧の平均 ALR (Air Liquid Ratio) LPP
 燃焼を前提とする場合、噴霧内の燃料濃度は局所燃焼温度を支配する重要なパラメータである。実際のジェットエンジンは、極めて広い作動範囲での運転が要求される。空気流量および供給燃料流量の変化に応じて、噴霧内の燃料濃度がどのように変化するかを把握することは、エンジン設計の観点から重要である。本節では、定性的ではあるものの、図5の噴霧断面像から噴霧内の平均 ALR 推定を試みる。

簡単のため、噴霧内の燃料濃度を一様と仮定する。また、噴霧内の空気流速を一様と仮定する。これらは、実際の噴霧から考えるとかなり粗い仮定ではあるものの、噴霧濃度に関する定性的な情報を得るにはある程度役に立つと考えている。

Fig. 7 Relationship between Overall ALR and

図6に、簡略化した噴霧流れ場を示す。燃料噴射弁から供給される空気および供試液体の流量より求められる ALR を、Overall ALR と定義する。

$$\text{Overall ALR} = \frac{G_{\text{air}}}{G_{\text{liq}}} \quad (1)$$

ここで、 G_{air} は噴射弁から供給される空気質量流量、 G_{liq} は噴射弁から供給される液体質量流量である。

一方、形成された噴霧内の平均的な ALR を、*Spray ALR* と定義する。

$$\text{Spray ALR} = \frac{\rho_{\text{air}} V_{\text{air}} A_{\text{spray}}}{G_{\text{liq}}} \quad (2)$$

ここで、 ρ_{air} は空気密度、 V_{air} は噴射弁下流 50 mm における平均空気流速、 A_{spray} は噴射弁下流 50 mm における噴霧面積である。平均空気流速 V_{air} は、噴射弁出口での初期空気流速と、噴射弁下流 50 mm での空気流外縁直径から、運動量保存則を用いて算出した。噴霧面積 A_{spray} は液体噴射圧力の増大とともに拡大する (図 5、図 6) ため、利用される空気量は増大する。液体流量の増大と、噴霧面積の増大が同じ割合で起これば、*Spray ALR* は一定となる。

図7に、*Spray ALR* と *Overall ALR* の関係を示す。縦軸は *Spray ALR*、横軸は *Overall ALR* を示す。プロットの違いは、ノズル数、空気流速の違いを示す。各条件において、液体噴射圧力を 5 段階に変化させているが、ここではそれらを全てプロットしている。本研究では、*Overall ALR* を 13 ~ 26 の範囲で変化させた。この値は実際のジェットエンジン燃料噴射弁と比較し、かなり小さな値である。本研究では、高圧雰囲気下ではなく大気圧下で実験を行った。実際のジェットエンジンでは、空気密度は約 8 倍大きくなる (海面高度でサイクル圧力比 17 の場合)。実機条件に当てはめる場合、*Overall ALR* は 1 桁大きな値となる。

図7より、全てのプロットは、破線 (*Overall ALR* = *Spray ALR* の線) よりも上側に位置することが分かる。噴射された空気流が周囲空気をエントレインし、希薄になるためである。ノズル数、空気流速、液体噴射圧力によらず、ほぼ全てのプロットが 1 つの直線上に集まることが分かる。ただし破線内で囲まれたプロットは、この直線から下に外れる。これらは液体噴射圧力 0.5 MPa の条件であり、*Overall ALR* に対して、噴霧内の平均燃料濃度が他の条件と比較して大きくなることを示している。

液体流量が小さい領域では、燃料液滴が十分に分散せず、噴霧内の燃料濃度は意図した値よりも大きくなる。この条件を除けば、燃料噴霧内の平均濃度

(*Spray ALR*) は、噴射弁から供給された燃料濃度 (*Overall ALR*) とおおむね直線関係にあり、供給燃料量の調整で噴霧内の燃料濃度制御が可能であると予想される。

4. 結 言

衝突噴流型ジェットエンジン燃料噴射弁の噴霧粒径および噴霧分散特性に関して、実験的検討を行った。実機への適用を想定し、ノズル数を変化させて噴霧粒径計測および噴霧断面像撮影を行い、微粒化過程および噴霧内燃料濃度について検討を行った。この結果、以下の知見を得た。

- (1) ノズル数 8 孔の場合、*SMD* は空気流速に依存せず、液体噴流速度の増大とともに直線的に減少しやがて一定となる。最小 *SMD* は $17\mu\text{m}$ 程度である。
- (2) ノズル数 16 孔の場合、*SMD* は空気流速に依存せず、液体噴流速度の増大とともに直線的に減少して最小値をとり、その後増大する。最小 *SMD* は $30\mu\text{m}$ 程度である。
- (3) 液体流量がある値を超えると、燃料噴射弁のピントル、中間リング、外リング壁面に、供試液体が液膜として付着・停滞する様子が顕著になる。この結果、液体噴流速度の増大とともに、*SMD* は増大する。
- (4) 液体噴射圧力が小さい場合、中空噴霧が形成される。液体噴射圧力の増大とともに噴霧中心に液滴が侵入し、中空噴霧に近づいていく。液体噴射圧力を変化させても、噴霧外径はほとんど変化しない。

- (5) 噴霧内の平均燃料濃度は、燃料噴射弁から供給される空気および供試液体の質量流量の変化に応じて、おおむね直線的に変化する。

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。本研究の実施にあたり、群馬大学学部生 茂木 宣昭 君、中村 壽雄 技 術専門職員の援助を頂いた。ここに記して謝意を表する。

文 献

- (1) Lefebvre, A.H., *Atomization and Sprays*, Hemisphere Publishing, (1989), 244-252.
- (2) Araki, M. et al., Atomization of a High Speed Liquid Jet by Wall Impingement, *Transactions of JSME*, 71-703, B (2005), 978-985.
- (3) Yamada, H. et al., Effect of Pressure Atomization with Wall Impingement on the Atomization Characteristics in a Jet Engine Burner, *Transactions of JSME*, 70-700, B (2004), 3257-3263.
- (4) Araki, M. et al., Wall Geometry Effects on Atomization Characteristics of an Impingement-Jet Type Jet Engine Fuel Injector, *Transactions of JSME*, 71-710, B (2005), 2568-2574.
- (5) Gupta, A.K., Lilley, D.G., Syred, N., *Swirl Flows*, Energy and Engineering Science Series, Abacus Press, (1984), 10-12.