

高速気流中における液体噴流の微粒化特性*

(第1報, 噴霧形状, 液体の局所質量流量とザウタ平均粒径の測定)

小田 哲也^{*1}, 廣安 博之^{*2}
新井 雅隆^{*3}, 西田 恵哉^{*2}

Characteristics of Liquid Jet Atomization Across a High-Speed Airstream (1st Report, Experiment on Shape of Spray, Spatial Distribution of Injected Liquid and Sauter Mean Diameter)

Tetsuya ODA, Hiroyuki HIROYASU,
Masataka ARAI and Keiya NISHIDA

To elucidate the atomization process of a liquid jet across a high-speed airstream, the spray shape, the mass flow rate per unit area and the Sauter mean diameter were measured. Under an airstream velocity of 140 m/s or 70 m/s and injection velocity of 10 m/s, 20 m/s or 40 m/s, the Sauter mean diameter and the maximum liquid mass flow rate per unit area in the spray hardly changed with the liquid injection velocity. However, with increasing air velocity, the Sauter mean diameter decreased and the maximum liquid mass flow rate per unit area increased. Rearranged spatial distribution of the liquid mass flow rate per unit area in a horizontal direction agreed with the profile by the Gauss's function. An equation for width of spray was obtained from the photographic results.

Key Words: Atomization, Fuel Injection, Jet Engine, Liquid Jet, Cross Airstream, Spray, Drop Size, Drop Breakup

1. 結 言

ターボジェットエンジンなどに取付けられるアフターバーナやラムジェットエンジンでは, 基本的にはインゼクタより液体燃料を気流に対し側方から噴射する方法を用いる。燃料は気流により微粒化し, 空気と混合した後に燃焼する。したがって, 高速気流中における気体燃料の噴流の場合には燃焼状態が, ほぼ気流との混合状態のみにより決定されるのに対して, 液体燃料の噴流の場合には液柱や液滴の微粒化過程や蒸発過程が, 気流との混合状態とともに大きな影響因子となる。このように液体燃料の噴流の場合は気体燃料の噴流の場合に比べ, 混合気の形成過程が複雑であり, 高速気流中における気体噴流の研究に比べて大きく立ち遅れている。

初期の研究では Schetz ら⁽¹⁾ および Reichenbach ら⁽²⁾ が, 散乱光写表やシャドウグラフから噴霧のおよぼ高さや噴霧の幅を測定した。さらに, Thomas ら⁽³⁾ は液体の局所質量流量の測定などにより噴霧内部の構

造について考察した。佐藤ら⁽⁴⁾ はレーザビームのフランホーファ回折に基づいた装置によりインゼクタ形状が噴霧のザウタ平均粒径におよぼす影響などについて測定を行った。

これらの研究にもかかわらず, いまだに噴霧の内部構造についての知見は十分ではなく, 液滴径の変化や液体の分散状況についての詳細な解析や計算例は見られない。そこで本研究では噴霧内における液滴径や液体の局所質量流量の数値計算のための基礎資料を得ることを目的に, 噴霧形状, 噴霧内の液体の局所質量流量やザウタ平均粒径を測定した。

2. 実験装置および方法

2.1 風洞および噴射系 図1に実験装置概略を示す。ターボプロア1で吸入した空気は, ディフューザ3で減速され整流部4を経て, 絞り管5で加速された後に測定部6に導入される。測定部内の気流速度をターボプロアの吸入口におけるバルブにより調節した。一方, アクキュムレータ8内の液体をコンプレッサ7で加圧し, 流量調整用バルブ9およびブルドン管10を経て測定部内に固定したインゼクタから噴射した。測定部入口におけるインゼクタは内径0.9 mmのステンレスパイプであり, 液体を気流に対し垂直に噴射

* 平成2年8月24日 第17回液体の微粒化に関する講演会において講演。原稿受付 平成4年1月27日。

^{*1} 正員, 広島大学大学院 (〒724 東広島市鏡山1-4-1)。

^{*2} 正員, 広島大学工学部。

^{*3} 正員, 群馬大学工学部 (〒376 桐生市天神町1-5-1)。

した。なお噴射液体には水を用いた。

測定部は寸法が正方形 (120×120 mm) の透明なアクリル製のダクトである。図2に測定部における気流速度 V_a の測定結果を示す。図2(a), (b)はそれぞれ測定部入口の中央における V_a が 130, 40 m/s のときの速度分布である。図2(a), (b)ともインゼクタが置かれる測定部入口では 110×110 mm の範囲、測定部出口では 90×90 mm の範囲で一様な速度分布が得られている。なお本風洞で得られる最大の気流速度は 140 m/s, すなわち気流のマッハ数で約 0.4 であった。

2・2 座標系および測定装置 図3に座標系および液体の局所質量流量の測定装置を示す。座標の原点をインゼクタ噴孔とし、気流の方向を x 方向、噴霧幅の方向を y 方向、液体の噴射方向を z 方向とした。液体の捕集は内径 6 mm, 外径 8 mm のサンプリングプロープで行った。サンプリングプロープから流入した液体と空気は円筒形の捕集容器に側面から流入し、容器内を旋回する過程で分離される。そして液体を捕集し、空気のみを大気中に放出した。なお液体の捕集効率は約 80% であった。

図4に粒径測定装置を示す。噴霧の粒径測定装置はフランホーファ回折理論に基づいた装置である。直径

6 mm のレーザビームを噴霧に照射し、レーザビームの通過範囲の液滴によって回折した光の強度分布を測定することで噴霧のザウタ平均粒径を求めた。

3. 結果および考察

3・1 一般的な噴霧特性 図5に気流速度 V_a が 140 m/s, 液体の噴射速度 V_l が 20 m/s のときのインゼクタ近傍における噴霧の瞬間写真を示す。この写真は噴霧後方に黒幕を置き、斜め後方からのマイクロフラッシュの瞬間光で照明して撮影した散乱光写真である。液滴はインゼクタからの高さが $z=1\sim 2$ mm (矢印の位置) より高い位置において液柱から形成されている。約 $z=2$ mm 以上では液柱周囲の濃厚な液滴群の

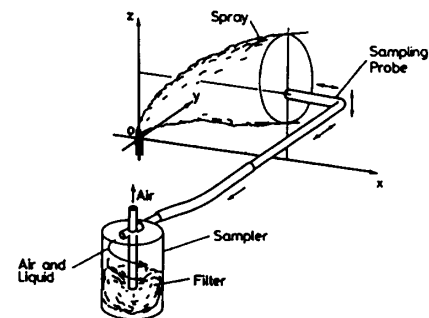


図3 座標系と液体の局所質量流量測定装置概略

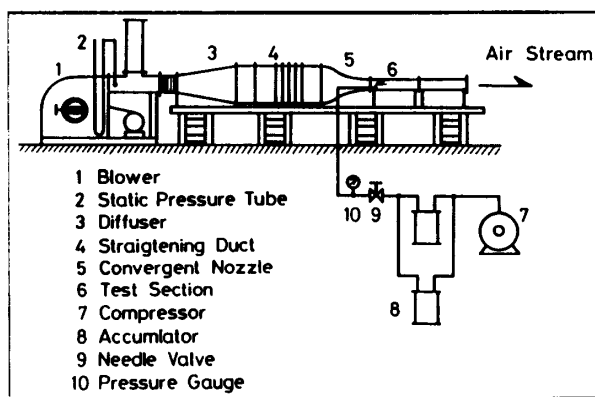


図1 実験装置概略

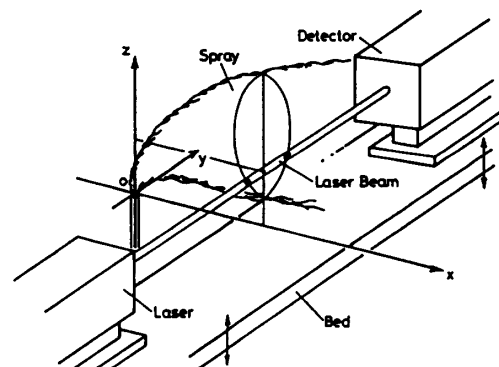


図4 粒径測定装置概略

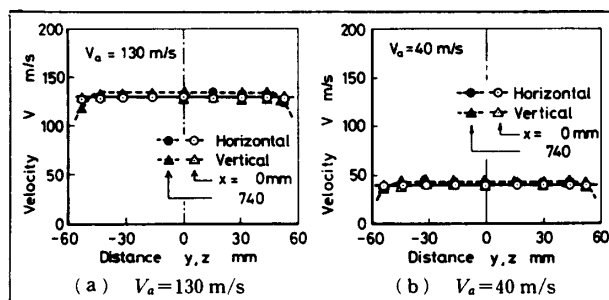


図2 測定部における気流速度

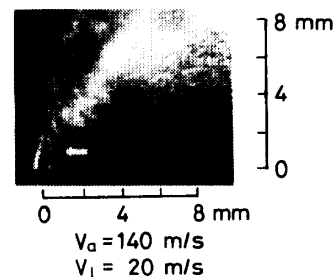


図5 インゼクタ近傍における噴霧の瞬間写真 ($V_a=140$ m/s, $V_l=20$ m/s)

ため噴霧中の液柱を見ることが不可能である。

図6に図5で示した $V_a=140$ m/s, $V_i=20$ m/s の噴霧中における液体の局所質量流量 m_i と、液滴のザウタ平均粒径 D_{32} を示す。 m_i の z 方向分布は $y=0$ mm におけるものである。噴霧の上方と下方の実線は噴霧後方からの連続露光による散乱光写真撮影で得た噴霧外形であり、それぞれ外縁、内縁と呼ぶこととする。一点鎖線は図6(a)における液体の局所質量流量が最大となる高さを結んだ曲線であり、噴霧の中心線と呼ぶこととする。噴霧の中心線はいずれの x 方向の位置においても噴霧の内縁よりも外縁に近くなっている。ザウタ平均粒径は噴霧の内縁から外縁に向かうにつれて大きくなっている。これは高い位置ほど液柱が気流方向に曲げられ、気流速度ベクトルと液柱の速度ベクトルとの相対速度の大きさが小さくなり、比較的大きな液滴が形成されること、また大きな液滴、すなわち運動量の大きな液滴ほど高い位置に到達することのためと考えられる。 $x=100$ mm と 200 mm では m_i と D_{32} の分布形状や大きさに顕著な差が見られない。それに対し $x=10$ mm では m_i の最大値が非常に大きく、噴霧の中心線の上方では D_{32} が急激に大きくなっており、分裂途中の大きな液滴が存在しているものと考えられる。なお、散乱光写真から測定した噴霧の内縁および外縁の外側に液体の局所質量流量とザウタ平均粒径の測定値がある。これは内縁や外縁の外側では液滴の数密度が非常に小さいため、これらの液滴が散

乱光写真には撮影されなかったと考えられる。

3・2 液体の噴射速度の影響 図7に気流速度 V_a を 140 m/s、液体の噴射速度 V_i を $10, 20, 40$ m/s とした場合のインゼクタ近傍における噴霧の瞬間写真を示す。 V_i が大きくなると噴霧の外縁の高さ z は大きくなっている。また、液滴の形成され始める高さは V_i の増加にともない高くなっている。 $V_i=10$ m/s の噴霧では外縁の凹凸が大きく高さが高くなるとともに、この凹凸の大きさと間隔が大きくなっている。液柱はこの凹凸の成長過程で分裂し、液滴となると思われる。

図8に V_i が噴霧形状におよぼす影響を示す。図8

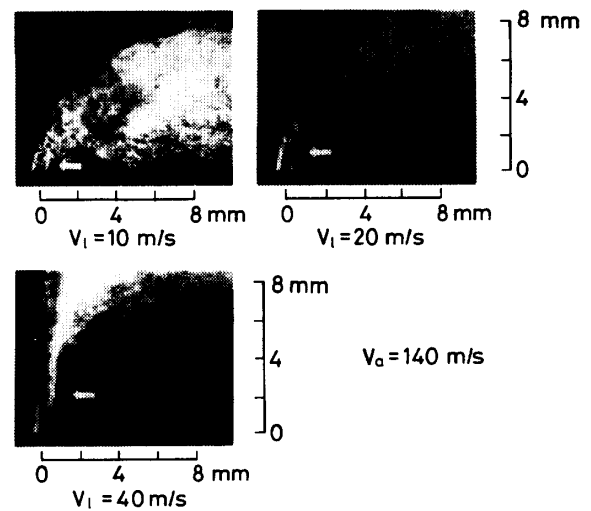
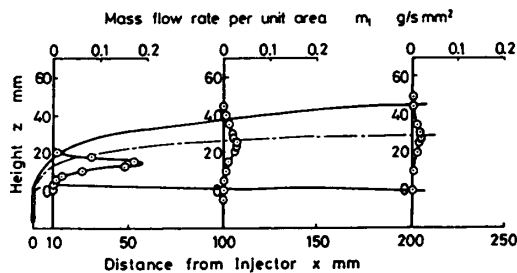
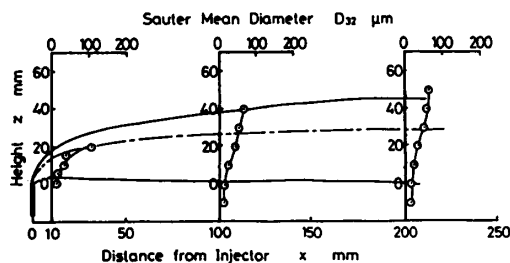


図7 インゼクタ近傍における噴霧の瞬間写真 (噴射速度の影響)

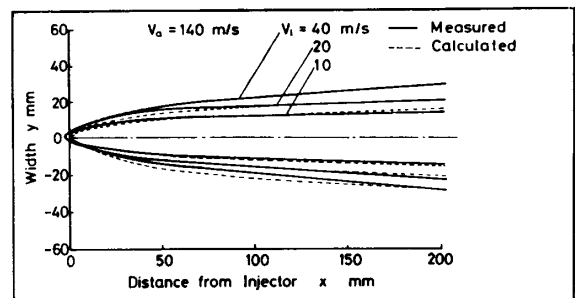


(a) 液体の局所質量流量

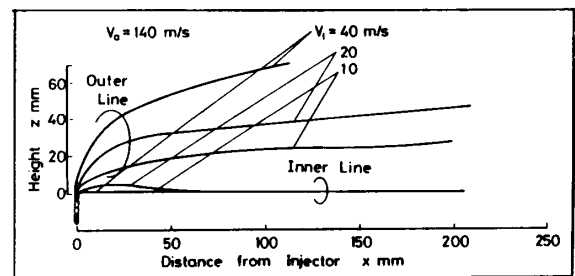


(b) ザウタ平均粒径

図6 ザウタ平均粒径と液体の局所質量流量 ($V_a=140$ m/s, $V_i=10$ m/s)



(a) 上方からの噴霧形状



(b) 側方からの噴霧形状

図8 液体の噴射速度が噴霧形状におよぼす影響

(a), (b)はそれぞれ噴霧の上方および側方から見た噴霧形状である。図8(b)より V_i が大きいほど噴霧の外縁が高くなり、また図8(a)より噴霧の y 方向の幅も大きくなっていることがわかる。なお、図8(a)の破線は後述する噴霧幅の実験式から求めた計算結果である。

図9に V_i が、 $x=100$ mmにおける液体の局所質量流量 m_i とザウタ平均粒径 D_{32} の高さ z 方向の分布におよぼす影響を示す。このインゼクタから $x=100$ mm という位置では液滴の分裂がほぼ完了していると考えられる。いずれの条件においてもザウタ平均粒径は高さが高くなると大きくなっている。 $V_i=10$ m/sの場合、 $z=0$ mmにおいてザウタ平均粒径が大きくなっているが、これは他の噴霧に比べ V_i が小さいためにインゼクタ近傍で直ちに液柱が分裂し、微小な液滴のみでなく大きな液滴も形成され则认为される。したがって、 $z=0$ mmにおけるザウタ平均粒径が $V_i=20$,

40 m/sの場合よりも比較的大きくなったと考えられる。 $z=0$ mm以下における微細な液滴はインゼクタの後流の影響を受けてインゼクタより低い位置に巻き込まれたものと考えられる。 m_i の最大となる高さは V_i が大きいほど高くなっている。しかし、 m_i の最大値は、 V_i 、すなわち噴射量が大きく異なるにもかかわらず顕著な差がない。したがって m_i の最大値は V_i により変わらないと言える。 D_{32} は、同じ高さ z では V_i が大きいほど小さくなっている。しかし噴霧内の m_i の最大位置での D_{32} は、図10に示すように、いずれの V_a においても V_i の増加とともに増加している。また、 $z=0$ mm以下における微細な液滴はインゼクタの後流の複雑な流れのために、インゼクタ出口よりも低い位置に巻き込まれたものと考えられる。

3・3 気流速度の影響 図11に液体の噴射速度 V_i が20 m/s、気流速度 V_a が140, 70 m/sのときの

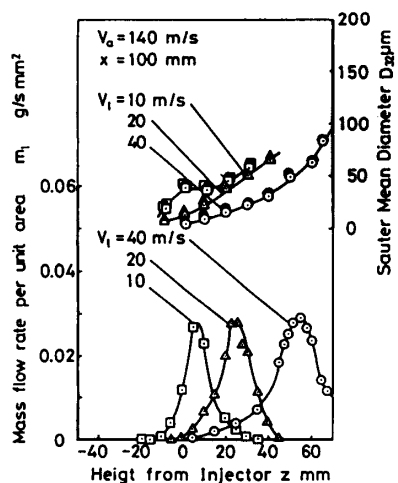


図9 液体の噴射速度がザウタ平均粒径と液体の局所質量流量におよぼす影響

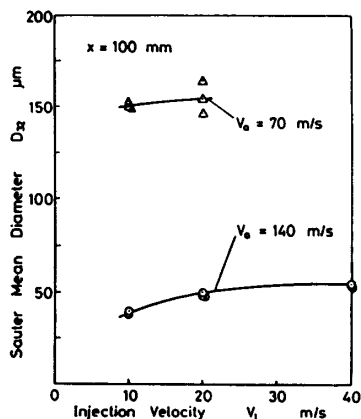


図10 液体の噴射速度がザウタ平均粒径におよぼす影響

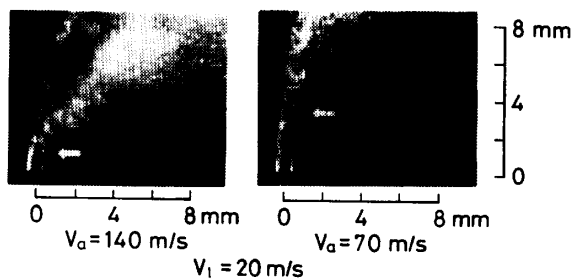
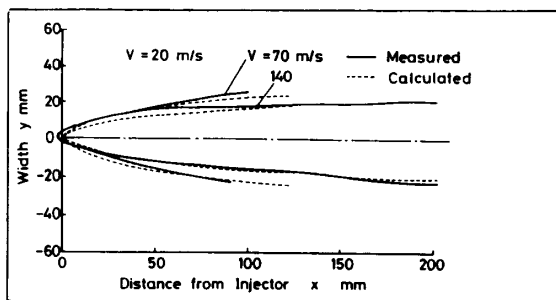
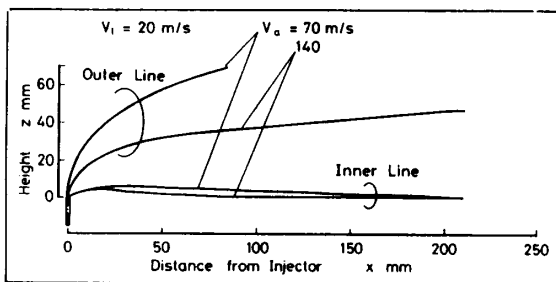


図11 インゼクタ近傍における噴霧の瞬間写真 (気流速度の影響)



(a) 上方からの噴霧形状



(b) 側方からの噴霧形状

図12 気流速度が噴霧形状におよぼす影響

インゼクタ近傍における噴霧の瞬間写真を示す。 V_a が小さくなると噴霧の外縁の高さが大きくなっており、液滴の密度がまばらになっている。液滴の形成され始める高さは V_a の減少とともに高くなっている。

図12に V_a が噴霧形状におよぼす影響を示す。図12(b)より V_a が小さくなると噴霧の外縁は高くなり、図12(a)より噴霧の幅が大きくなっている。なお、図12(a)の破線は後述する噴霧幅の実験式から求めた計算結果である。

図13に V_a が $x=100$ mmにおける液体の局所質量流量 m_l とザウタ平均粒径 D_{32} の高さ z 方向の分布におよぼす影響を示す。 m_l が最大となる高さは V_a が小さい噴霧が高くなっている。一方、 m_l の最大値は噴射流量が同じであるにもかかわらず、 V_a の大きい噴霧が大きくなっている。同じ高さにおける D_{32} は、 V_a が大きいほうが大きくなっている。しかし図14に示すよ

うに m_l の最大位置における D_{32} は V_a の増加により大きく減少しており、 V_l による影響に比べると顕著である。したがって噴霧のザウタ平均粒径や液体の局所質量流量の最大値は、液体の噴射速度よりも気流速度に大きく影響を受けると言える。

3・4 気流と噴射液体の運動量流速比 ($\rho_l V_l^2 / \rho_a V_a^2$) が同一の場合 図15に気流と噴射液体の運動量流速比が同一である $V_a=140$ m/s, $V_l=20$ m/s と、 $V_a=70$ m/s, $V_l=10$ m/s の場合のインゼクタ近傍における噴霧の瞬間写真を示す。これらを比べると噴霧形状がよく似ているが、 $V_a=70$ m/s, $V_l=10$ m/s の噴霧の液滴径が大きく、液滴の数密度がまばらになっている。この噴霧は約 $z=4$ mm 以上において液滴の数密度の大きい領域と小さい領域が交互に見えている。外縁の形状を見ると約 $z=4$ mm までは凹凸の大きさ

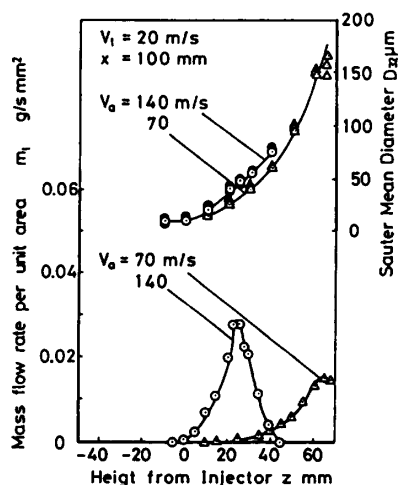


図13 気流速度がザウタ平均粒径と液体の局所質量流量におよぼす影響

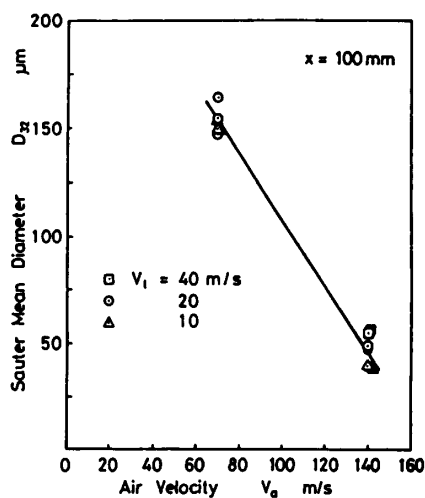


図14 気流速度がザウタ平均粒径におよぼす影響

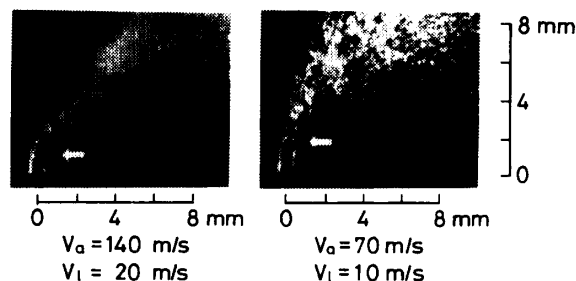
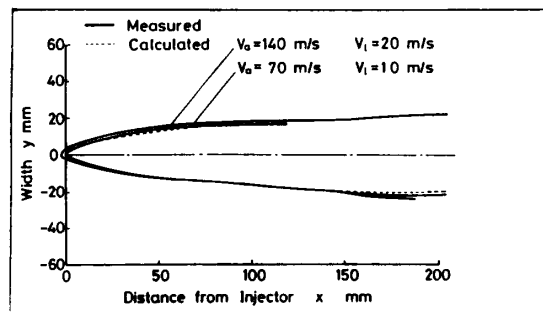
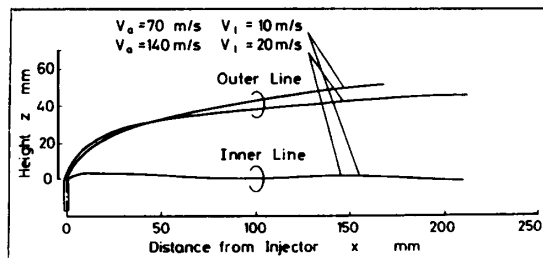


図15 インゼクタ近傍における噴霧形状 (気流と噴射液体の運動量流速比が同一の場合)



(a) 上方からの噴霧形状



(b) 側方からの噴霧形状

図16 気流と噴射液体の運動量流速比が同一の場合の噴霧形状

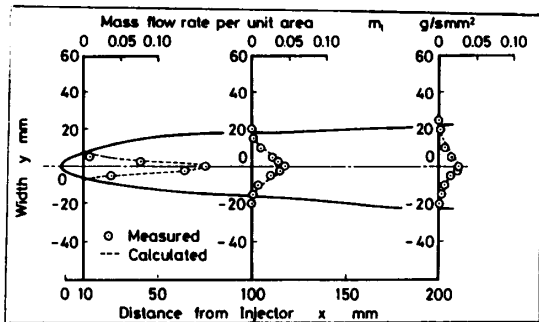


図 17 液体の局所質量流量の噴霧幅方向分布
($V_a=140$ m/s, $V_i=20$ m/s)

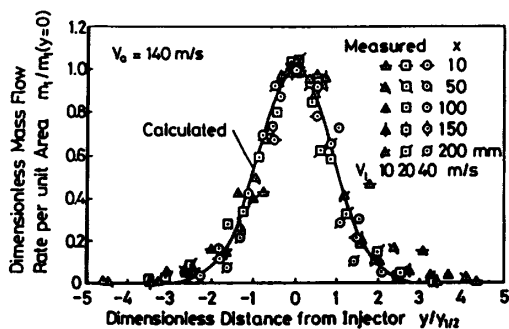


図 18 液体の局所質量流量の噴霧幅方向分布

と間隔は小さいが、約 $z=4$ mm 以上では液滴の数密度に応じて凹凸の大きさと間隔が大きくなっている。したがって $z=4$ mm 付近において大きな液柱の分裂が行われ、液滴が形成されていると考えられる。液体の噴射方向は気流に対して垂直であるが、液柱は気流にさらされて風下の方向に傾いている。したがって液柱先端の分裂により形成される液塊は噴射方向よりやや風下に向かい液柱から離脱していると思われる。

図 16 に両条件での噴霧形状を示す。噴射液体と気流の運動量流束の比が同一の場合、噴霧の外縁の高さは等しいとして実験式が求められているが⁽¹⁾、図 16(b)を見るとインゼクタからの距離が大きくなるにつれて、 $V_a=70$ m/s, $V_i=10$ m/s の噴霧の外縁が $V_a=140$ m/s, $V_i=20$ m/s に比べて高くなっている。それに対し噴霧の幅の差は顕著でない。なお、図 16(a)の破線は後述する噴霧幅の実験式から求めた計算結果である。

3.5 噴霧の幅 噴霧の幅は気流と噴射液体の運動量流束比が同じ場合には等しいが、噴射速度が大きい場合、また気流速度が小さい場合には大きくなることがわかった。このことを考慮して噴霧の幅の半分 y_w が次式で表されるとした⁽⁵⁾。

$$\frac{y_w}{d_{inj}} = A \left(\frac{\rho_i V_i^2}{\rho_a V_a^2} \right)^B \ln \left(1 + C \frac{x}{d_{inj}} \right) \quad (1)$$

ここで d_{inj} はインゼクタの内径であり、 A , B , C は定数である。図 8(a), 12(a), 16(a) などの噴霧形状の実験結果から A , B , C を最小二乗法で求めると次のようになった。

$$A=1.83 \quad (2)$$

$$B=0.17 \quad (3)$$

$$C=2.8 \quad (4)$$

この曲線は図 8(a), 12(a), 16(a) の破線であるが、いずれも写真から求めた噴霧形状によく一致している。

3.6 液体の局所質量流量 図 17 に $V_a=140$ m/s, $V_i=20$ m/s における液体の局所質量流量 m_i の噴霧幅 y 方向の分布を示す。これは m_i が最大となる高さ z において m_i を y 方向に測定した結果である。図 17 中の破線は後に示す曲線〔式(7)〕である。どの x 方向の位置においても m_i の分布形状は正規分布に近いように見える。他の高さ z でも m_i の分布が正規分布に近いとして、任意の位置における液体の局所質量流量分布 $m_i(x, y, z)$ が次式で表されるとした。

$$\frac{m_i(x, y, z)}{m_i(x, 0, z)} = \exp \left[-0.646 \left(\frac{y}{y_{1/2}} \right)^2 \right] \quad (5)$$

ただし $y_{1/2}$ は $m_i(x, y, z)$ が $m_i(x, 0, z)/2$ となる位置 y である。図 18 に測定から得た $m_i(x, y, z)/m_i(x, 0, z)$ と式(5)の計算結果(実線)を示すが、どの条件でもよく一致している。

$V_a=140$ m/s, $V_i=20$ m/s の $x=100$ mm における y_w は式(1)より 12 mm であり、 $y_{1/2}$ は測定結果より 6 mm であった。そこで $y_{1/2}$ を次のように仮定する。

$$y_{1/2} = 0.5 \cdot y_w \quad (6)$$

よって式(5)は次のようになる。

$$\frac{m_i(x, y, z)}{m_i(x, 0, z)} = \exp \left[-2.58 \left(\frac{y}{y_w} \right)^2 \right] \quad (7)$$

この式による曲線は図 17 の破線であるが、どのインゼクタからの距離でも測定値によく一致している。

4. 結 言

ターボジェットエンジンに取付けられるアフタバーナやラムジェットエンジンの燃焼器内に見られる側方より高速気流を受ける液体噴流の微粒化特性を解明するため、噴霧の形状、液体の局所質量流量、ザウタ平均粒径の測定を行った。さらに、これらの実験結果をもとに噴霧の幅と噴霧幅方向の液体の局所質量流量分布の実験式を求めた。その結果、次のことがわかった。

(1) 噴霧中の液体の局所質量流量はインゼクタからの高さの増加とともに一度増加して最大値をとり、その後減少する。一方、ザウタ平均粒径はインゼクタ

からの高さの増加とともに大きくなるだけであり、液体の局所質量流量が最大となる高さを超えても減少しない。

(2) 噴霧幅は、気流に対する噴射液体の運動量流束の比の増加とともに増加する。

(3) 液体の局所質量流量の最大値は気流速度が増加すると大きくなる。液体の噴射速度の影響は少ない。

(4) 液体の局所質量流量が最大となる位置のザウタ平均粒径は、気流速度の増加とともに小さくなる。液体の噴射速度が増加すると、液体の局所質量流量が最大となる位置でのザウタ平均粒径は大きくなるが、その変化は気流速度による変化に比べるとわずかである。

文 献

- (1) Schetz, J. A. and Padhye, A., *AIAA J.*, 15-10 (1977), 1385.
- (2) Reichenbach, R. E. and Horn, K. P., *AIAA J.*, 9-10 (1971), 469.
- (3) Thomas, R. H. and Schetz, J. A., *AIAA J.*, 23-12 (1985), 1892.
- (4) 佐藤・ほか2名, 第12回液体の微粒化に関する講演会講演論文集, (1986), 77.
- (5) 稲村・ほか5名, 第17回液体の微粒化に関する講演会講演論文集, (1990), 55.