高速気流中における気泡混入液体噴流の分散特性^{*1}

Characteristics of Spatial Distribution of a Bubbling Liquid

Jet across a High-Speed Airstream

小 田 哲 也^{*2}・廣 安 博 之^{*3}

Tetsuya ODA and Hiroyuki HIROYASU

Key Words: Fuels, Engines, Bubbling Liquid Jet, Cross Airstream, Spatial Distribution of Liquid

Abstract

A bubbling liquid jet was ejected normal to a high-speed airstream to control a spatial distribution of the ejected liquid under an airstream velocity of 70 m/s and a constant injection pressure. And spray shapes were obtained by scattered-light photographs with a long exposure time and the liquid mass flow rate per unit area were measured by the mass sampling technique. The height of the maximum liquid mass flow rate per unit area in the spray hardly changed, when the ratio of the mass flow rate of the ejected liquid to standard mass flow rate decreases from 100% (without gas) to 39% increasing the gas/liquid rate. However, with decreasing the ratio, maximum mass flow rate per unit area decreased and the width of vertical and horizontal distribution of the liquid mass flow rate per unit area increased.

1. 緒 言

超音速輸送機用のエンジンにはラムジェットエンジンやターボジェットエンジンなどの後ろに取り付けられるアフターバーナの燃焼技術が不可欠である。これらの燃焼器では燃料液体をインジェクタから短い距離で微粒化することが要求される。そのため、燃焼器入口で燃料液体だけを50~150 m/s (マッハ数0.15~0.45) 程度的高速な気流に対して単純な円形噴孔から垂直に噴射し、インジェクタの下流に固定した保炎器の周囲に燃料を分散させて燃焼させることが一般的である。

噴孔から液体を噴射すると、噴霧液体に空間的分布があり、保炎器付近の燃料の局所質量流量が燃焼状態に影響する。著者らは高速な気流中に液体のみを噴射した場合の液体の微粒化および分散過程について研究

を行ってきた^{1~3)}。その結果、気流速度が大きくなると液体の局所質量流量の最大値は大きくなり、最大値をとる高さ(液体の噴射方向位置、第2図の z 座標)は減少し液体燃料の分布範囲も狭くなった。また液体の噴射速度を大きくすると液体の局所質量流量の最大値は変化しないのかかわらず、最大値をとる高さは増加し液体の分布範囲が広がった。このように気流中に単に液体だけを噴射しただけでは液体の分布する範囲に応じて局所質量流量の最大値も変化するため燃料液体の分布状態を制御できない。つまり、ラムジェットエンジンやアフターバーナ内のインジェクタ噴孔から噴射した燃料液体の噴射量が変化すると、下流の所定の高さに固定した保炎器の付近に燃料が到達しなくなる。近年、これを解消するために噴射直前の液体に気泡を混入して気流中に噴射することで、所定の高さに燃料液体を到達させるという方法が考え出された。

Arai⁴⁾は、気泡(ヘリウムガス)を混入した液体(水)の噴射圧力を一定に保つことで、両者の混合比を変えても噴霧形状は不変であることを写真撮影により確認した。しかし、適量の液体を所定の領域に分布させることができることを確認するには、液体の局所質量流量を測定して液体の分布状況を明らかにする必要がある。一方、インジェクタよりも上流で液体と気体を混合すると混合割合や流路断面積などによって脈動することがある。そこでAraiらは界面活性剤を用いて気泡を微細にし脈動を起りにくくしている。ところが実用性を考えると、あらかじめ噴射液体に界面活性剤を混合することは望ましくない。

本研究では界面活性剤を用いず、単に噴射前の液体(水)に空気を混入して高速気流中に噴射する方法をとった。そこで、まず独自に開発したインジェクタの噴射特性について述べる。その上で、このインジェクタから気流中に噴射した噴霧の写真撮影や液体の局所質

^{*1} 平成5年11月1日、日本航空宇宙学会西部支部講演会にて講演。平成8年2月23日原稿受理

^{*2} 現、鳥取大学工学部

^{*3} 広島大学工学部

量流量の測定により、所定の高さに任意量の液体を到達させるという制御の可能性を確認し、噴霧の分散特性を明らかにした。

2. 実験装置および方法

2.1 吐出風洞の概略 第1図に吐出風洞の概略を示す¹⁾。ターボブロア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ブロアの吸入口におけるバルブにより調節した。測定部は内寸法が $\square 120 \times 120$ mmの正方形断面である透明なアクリル製ダクトである。この測定部入口の一樣気流中に気泡を混入した液体を気流に対して垂直に噴射した。この噴射方向は鉛直上方でもある。なお、噴射液体には水を、噴射液体に混入する気体に空気を使用した。

座標系および液体の局所質量流量の測定装置概略を第2図に示す。原点をインジェクタ噴孔とし、気流速度 V_a の方向を x 、噴霧の幅の方向を y 、液体の噴射速度 V_i の方向を z とした。

第1図 吐出風洞の概略

第2図 座標系および液体の局所質量流量の測定装置概略

この第2図は液体の局所質量流量の測定装置も示している。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て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。

2.2 噴射系および噴射特性の概略

2.2.1 噴射系とインジェクタの概略 本実験で使用する気泡混入型インジェクタを第3図に示す。このインジェクタは右と左からそれぞれ液体と空気が流入する。インジェクタの先端には内径0.9 mm、助走距離22 mmのステンレスパイプが付いており、このパイプの直前において液体と空気を混合し、パイプの先端、すなわちインジェクタ噴孔から液体と空気を同時に噴射する。噴射圧力はインジェクタ直前のブルドン管で、液体と空気の噴射流量は、上流における浮子式流量計で測定した。

ここでは気流速度 V_a を70 m/sとして実験を行った。また基準の液体噴射量 $Q_{i,0}$ を 1.12×10^{-5} m³/s と

第3図 気泡混入型インジェクタの概略

第4図 気泡を混入した噴射液体の流動様式の測定装置概略

した。液体の噴射量を小さくする場合には、噴射圧力 P_{inj} を 0.3 MPa に保ったまま混入する空気量を増加させて気流中に噴射することとした。

2.2.2 気泡混入液体の噴射特性 液体と空気を混合してパイプ内を流す場合、気液混相流の流動様式は液体と空気の流量や物性、パイプの寸法や形状、流動方向と体積力の方向の関係、混合方法や混合した位置からの距離により異なる⁵⁾。そこで噴射液体と空気の混合量が、インジェクタ噴孔から噴射した直後における気泡混入液体の流動様式におよぼす影響を第4図の装置で調べた。ただし、液体と空気の噴射方向を風洞での噴射方向と同じ鉛直上方とした。この装置は単に2本の針状プローブと定電圧電源、抵抗器を直列に接続したものであり、抵抗器間の電位差の時間変化をオシロスコープで測定した。噴孔の直上における液柱(液体の連続部分)の流動特性を調べるにはインジェクタ噴孔から2本の針状プローブまでの高さが低いほどよい。しかし抵抗器間の電位差がステンレス製のインジェクタ噴孔から影響を受けにくくするため、プローブを高さ $h=2$ mm に固定した。プローブ先端間の距離は液柱断面全体の気泡の分布状態を知るために広いほどよい。ところが空気を混合しない場合でも液柱表面が乱れ、プローブ先端が液柱外に出ることで電位

差信号に波形が現れることがある。そこで針状プローブの間隔を $\delta=0.6$ mm とした。

噴射液体に混入した空気量が抵抗器間の電位差 V_R の時間変動におよぼす影響を調べると、第5図のようになった。また第1表に、第5図や後述の第7図、第10図、第11図、および第12図中の条件 i に対する噴射条件、すなわち液体の噴射量 $Q_{l,i}$ 、空気の噴射量 $Q_{a,i}$ 、基準条件 ($i=0$, $Q_{l,0}=1.12 \times 10^{-5}$ m³/s, $Q_{a,i}=0$ m³/s) に対する液体の噴射流量割合 $Q_{l,i}/Q_{l,0}$ 、および噴射液体に対する空気の混入質量割合 $W_{a,i}/W_{l,i}$ を示す。基準条件、つまり空気を混合しない場合プローブ間には常に液体で満たされ、電極間は導通状態にあるため電位差 V_R に時間変動はみられない。液体の噴射量 $Q_{l,i}/Q_{l,0}$ が 83% および 66% の場合、つまり空気混合量を小さくすると電位差 V_R が小さくなり波形が不規則になる。ここで、電位差 V_R の波形の山の部分は両プローブ間に液体が多く存在し、谷の部分は気泡が多く存在することを示している。液体の噴射量 $Q_{l,i}/Q_{l,0}$ が 39% まで小さくなると、電位差 V_R の山と谷が周期的に現れている。しかも谷の部分では電位差 V_R が一定値に近く、山の部分に比べて1周期当たりの時間割合が長い。この電位差 V_R の谷の部分は、管断面積をほぼ満たす大気泡、すなわち気体スラグがプローブ間を通過している時間である。以上のことから空気の混合量が小さい場合の流動様式は液体中に小さな気泡が均一に分散している気泡流であるが、空気の混合量が大きくなると液体の断面積をほぼ満たすような大きい気泡を含むスラグ流(あるいはフロス流)に変わっているといえる。

空気量が多くなって流動様式が気泡流からスラグ流に変わるとき、小さな気泡が合体して直径が液柱あるいは噴孔の直径に近くなるとともに、液体が気体スラグの上下に押し除けられるため、液柱断面に対する液

第5図 液体の噴射量が抵抗器間電位差の時間変動におよぼす影響

第1表 第5図、第7図、第10図、第11図、および第12図の各条件に対する噴射条件

i	$Q_{l,i}/Q_{l,0}$ (%)	$W_{a,i}/W_{l,i}$ (%)	$Q_{l,i}$ (m ³ /s)	$Q_{a,i}$ (Nm ³ /s)
0	100	0	1.120×10^{-5}	0×10^{-5}
1	83	0.046	0.924×10^{-5}	0.41×10^{-5}
2	66	0.138	0.742×10^{-5}	1.02×10^{-5}
3	54	0.407	0.605×10^{-5}	2.46×10^{-5}
4	48	0.659	0.532×10^{-5}	3.51×10^{-5}
5	39	1.193	0.441×10^{-5}	5.27×10^{-5}

第6図 液体の噴射量が抵抗器間電圧におよぼす影響

体と空気の面積割合が時間的に大きく変動するようになると考えられる⁹⁾。すると電位差 V_R の山と谷の差が大きくなると思われる。よって電位差 V_R の最小値は流動様式を特徴づける気泡の直径と対応しているといえる。そこで第5図で示したような電位差 V_R の時間変動を第6図のように再整理した。第6図の横軸は基準条件に対する液体の噴射量割合 $Q_{l,i}/Q_{l,0}$ である。一方、縦軸は電位差の時間変化の最小値 V_R を基準条件の電位差 V_{Rmax} で割った値 V_R/V_{Rmax} である。基準条件である液体の噴射量割合 $Q_{l,i}/Q_{l,0}$ が100%の場合、液柱は気泡を含まず電位差 V_R/V_{Rmax} が100%である。この条件から液体の噴射量を小さくすると電位差 V_R/V_{Rmax} は次第に小さくなる。次いで液体の噴射量 $Q_{l,i}/Q_{l,0}$ が50%程度のとき、電位差 V_R/V_{Rmax} が急に小さくなり、再び緩やかに減少する。このことは液体の噴射流量が50%程度において液柱の流動様式が変化することを示しており、液体の噴射量 $Q_{l,i}/Q_{l,0}$ が50%程度以上のときは液柱は気泡流、液体の噴射量 $Q_{l,i}/Q_{l,0}$ が50%程度以下のときはスラグ流であるといえることができる。

3. 実験結果および考察

3.1 液体のみを噴射した場合の液体の分散特性
 第7図はインジェクタ噴孔の近傍における噴霧の瞬間写真である。この図では左からの気流に対し、液体と空気が左下のインジェクタ噴孔から上方に噴射されている。基準条件 $i=0$ の場合、噴孔直上の透明な液柱が高さ z とともに細くなっている。これは液柱の側端が気流により幅 y 方向に引っ張られ、 x 方向の厚さが減少したためである³⁾。このような液柱の変形は

気泡を混入しない場合に一般的にみられる。

本項では、噴射液体に気泡を混入したときと比較するため、まず噴射直前の液体に気泡を混入しない場合の噴霧について示す。第8図は液体の噴射量 $Q_{l,i}$ が噴霧外形におよぼす影響であり、第2表は第8図や後述の第9図中の条件 j に対する液体の噴射量 $Q_{l,i}$ 、基準条件 ($j=0$, $P_{inj}=0.3$ MPa, $Q_{l,0}=1.12 \times 10^{-5}$ m³/s, $Q_{a,0}=0$ m³/s) に対する液体の噴射量割合 $Q_{l,i}/Q_{l,0}$ 、噴射圧力 P_{inj} と液体の噴射速度 V_{inj} である。第8図の実線は後方からの連続露光による散乱光写真によって得た噴霧形状であり、噴霧上方の実線を噴霧の外縁と呼ぶこととする。第8図では噴射量の減少に伴い噴霧の外縁の高さ z が小さくなっている。これは液体の噴射量 $Q_{l,i}$ が減少すると噴射圧力 P_{inj} と噴射速度 V_{inj} が減少するためである。条件 $j=0$, 2 の噴霧についてインジェクタ噴孔から $x=100$ mm の位置における液体の局所質量流量 m_l を測定すると、第9図(a)

第8図 液体の噴射量が噴霧形状におよぼす影響 (液体のみ噴射した場合)

第7図 インジェクタ近傍における噴霧の瞬間写真

のようになった。液体の噴射量 $Q_{i,j}$ を小さくすると液体の局所質量流量 m_i が最大となる高さ z が低くなっている。ところが液体の局所質量流量 m_i の最大値には液体の噴射流量 $Q_{i,j}$ の減少による差がみられない。さらに液体の局所質量流量 m_i が最大となる高さ

第2表 第8図、第9図の各条件に対する噴射条件

j	$Q_{i,j}/Q_{i,0}$ (%)	$Q_{i,j}$ (m^3/s)	P_{inj} (MPa)	V_{inj} (m/s)
0	100	1.120×10^{-5}	0.30	17.6
1	83	0.924×10^{-5}	0.20	14.5
2	66	0.735×10^{-5}	0.13	11.6
3	55	0.616×10^{-5}	0.10	9.7

(a) 垂直方向の分布

(b) 水平方向の分布

第9図 液体の噴射量が液体の局所質量流量におよぼす影響 (液体のみ噴射した場合)

z における液体の局所質量流量 m_i の y 方向分布を第9図(b)に示す。液体の噴射量が小さくなると液体の局所質量流量 m_i の y 方向の分布が狭くなっている。よって通常のようにインジェクタから液体だけを噴射する方法では、液体の局所質量流量 m_i が最大となる高さ z を変化させず液体の局所質量流量 m_i の大きさだけを制御することは不可能であることがわかる。なお、この結果は気流速度が異なる場合にもみられた。

3.2 噴射液体に空気を混入した場合の液体の分散特性 第7図の条件 $i=1, 2$ および5の噴霧では、条件 $i=0$ の噴霧より液体の噴射量を小さくした代わりに、空気をあらかじめ噴射液体に混入して噴射圧力 P_{inj} を一定に保っている。これらの液柱は気泡を含んでいるためインジェクタ近傍で白濁している。また、空気を混合しない条件 $i=0$ の場合、液柱の太さが高さ z とともに細くなっているのに対し、空気を含む場合には細くなっていない。これはインジェクタ噴孔から噴射した液柱内の気泡が膨張したためといえる。条件 $i=5$ の場合、インジェクタ噴孔の直上で液柱が太くなっているだけでなく、高さが約3 mm 以上になると液柱から形成された液滴が直ちに気流に流されている。さらに、約12 mm 以上では液滴が見えておらず、噴霧の到達する高さ z が小さい。なお条件 $i=5$ の場合、第5図で説明したようにインジェクタ噴孔での気泡混入液体の流動様式がスラグ流になっている。

上記の結果から液滴の分散には外部からの気流による作用に加えて、液体噴流内の気泡も影響すると考えられる。そこで連続露光による噴霧の散乱光写真撮影を行ったところ第10図のようになった。気泡を混合した液体を噴射した条件 $i=1 \sim 4$ の噴霧では外縁の高さ z に差が見られないが、気泡を混合しない液体を噴射した条件 $i=0$ と比べると外縁の高さ z が大きくなっている。条件 $i=5$ の噴霧では外縁の高さ z が条件 $i=1 \sim 4$ よりもさらに大きくなっており、第7図の

第10図 液体の噴射量が噴霧形状におよぼす影響 (気泡混入液体を噴射した場合)

瞬間写真と異なった結果になっている。この理由については後述することとする。なお、第10図の傾向は他の気流速度の場合にもみられた。

つぎに第10図の各噴霧の中から、噴射液体に気泡を含まない $i=0$ の噴霧、気泡を比較的少量だけ含む $i=2$ の噴霧、および気泡を多量に含む $i=5$ の噴霧を選択しインジェクタ噴孔から $x=100\text{ mm}$ の位置における液体の局所質量流量 m_i を測定すると第11図(a)のようになった。この図では液体の噴射量 $Q_{l,i}/Q_{l,0}$ の減少により液体の局所質量流量 m_i の最大となる高さ z が変化しておらず、液体の局所質量流量 m_i の最大値が減少している。これは液体の噴射量 $Q_{l,i}/Q_{l,0}$ を小さくすると同時に噴射圧力 P_{inj} を一定に保つ

よう噴射液体に気泡を混入したため、時間および噴孔断面で平均した噴射液体の運動量が、気泡を含まない基準条件の場合と等しくなったためといえる。

さらに液体の局所質量流量 m_i が最大となる高さ z における液体の局所質量流量 m_i の y 方向分布を第11図(b)に示す。気泡混入量が少ない条件 $i=2$ では、液体の局所質量流量 m_i の分布形状が気泡を含まない条件 $i=0$ と同様にみえる。しかし、気泡混入量が多い条件 $i=5$ の場合、条件 $i=0, 2$ とは分布形状が異なり均一に近い。このことは第11図(a)の場合にもいえる。そこで第11図(a), (b)の各曲線をそれぞれの最大値で割って無次元化すると、第12図(a), (b)となった。第12図(a)の条件 $i=2$ の場

(a) 垂直方向の分布

(a) 垂直方向の分布

(b) 水平方向の分布

(b) 水平方向の分布

第11図 液体の噴射量が液体の局所質量流量におよぼす影響（気泡混入液体を噴射した場合）

第12図 液体の噴射量が液体の無次元局所質量流量におよぼす影響（気泡混入液体を噴射した場合）

合、液体の局所質量流量 m_l が最大となる高さ z 以下で条件 $i=0$ の分布と良く一致しているが、液体の局所質量流量 m_l が最大となる高さ以上では条件 $i=0$ より大きい。しかし第12図(b)では条件 $i=2$ と条件 $i=0$ に分布形状の差がない。ここで第13図(i)に、第7図の写真の $i=1, 2$ から想像できる液柱の分裂挙動を示す。条件 $i=1, 2$ のように気泡流を高速気流中に噴射する場合、気泡の量が少ないため液柱の微粒化

第13図 気泡混入液体の流動様式が液体噴流の分裂および分散挙動におよぼす影響の概略

第14図 スラグ流をインジェクタから噴射した場合の瞬間写真

や液体の分散におよぼす気泡の膨張の影響は顕著でなく、液体のみを噴射したときの微粒化、分散過程に近い。ただし噴霧上部では、液体だけ噴射した場合よりも噴射した液体が多く存在している。

第12図(a)の条件 $i=5$ の場合、液体の局所質量流量 m_l が最大となる高さ z 以下においても液体の局所質量流量 m_l が大きくなっている。この条件では噴射する気泡の混入量が大きく、インジェクタ噴孔内部で管断面積をほぼ満たす大きさの気泡が周期的に現れるスラグ流（あるいはフロス流）⁵⁾ となっていることを2.2.2項で述べた。この流動様式をとる場合、大きな気泡である気体スラグが噴孔から噴射される瞬間と、気泡間の液体塊、つまり液体スラグが噴射される瞬間では微粒化挙動が異なっており、液体の分布状況に影響しているものと想像できる。そこで条件 $i=5$ の瞬間写真を多数撮影したところ、第14図(a), (b)に示す2種類の分裂挙動を撮影できた。また、この写真から考えられる液柱の分裂挙動は第13図(ii)となった。第14図(a)のように気体スラグが噴射される瞬間には、液柱は内部の気体スラグが膨張することで破裂し、この破裂によって形成された微細な液滴が直ちに気流に流れ噴射液体は低い位置に分散する。それに対し、第14図(b)のように液体スラグが噴射される時には、この液体スラグの上流、つまりインジェクタのパイプ内に存在し膨張しつつある気体スラグの圧力を受けて液体スラグが押し出され噴射速度が大きくなったものと思われる。このようにして液柱の流動様式がスラグ流の場合、液体が広い範囲、すなわち高い位置にも低い位置にも分散するようになったといえる。一方、第12図(b)では条件 $i=5$ の分布の幅が他の条件のものよりも大きくなっている。これは大きい気泡が噴孔から噴射された後に膨張して液柱が分裂したためと思われる。

4. 結 言

高速な気流中に液体を単にインジェクタ噴孔から噴射する場合、噴射量を小さくすると液体の局所質量流量の最大となる高さが小さくなるため、所定の高さに適量の液体を分散させることができない。そこで独自に開発した気泡混入型インジェクタを用い、噴射直前の液体(水)に気泡(空気)をあらかじめ混入して噴霧の分散制御を行った。その結果、つぎの結論を得た。

(1) 液体の噴射量を減少させ、噴射圧力が一定となるように空気を混入してゆくと、液体の局所質量流量が最大となる高さは空気の混合割合に依存しなかった。それに対し、液体の局所質量流量の最大値は減少した。すなわち、液体が最も多く分布する高さを変え

ることなく、液体の局所質量流量の最大値だけを制御できた。

(2) 気泡混入量が増加すると噴射液体の分布範囲が広がった。

また、噴射液体の分布形状は噴射直後における気泡混入液体の流動様式に依存した。すなわち、

(3) 気泡流という流動様式にある気泡混入液体を高速気流中に噴射する場合、噴霧形状は変化しなかった。しかし、水のみを噴射した場合に比べると噴霧上部の液体の局所質量流量分布が広がった。一方、幅方向の分布については差がみられなかった。

(4) スラグ流という流動様式にある気泡混入液体を噴射すると、噴霧上部および下部で液体が広く分散した。また、幅方向にも液体が広く分散した。

参 考 文 献

- 1) 小田哲也, 廣安博之, 新井雅隆, 西田恵哉: 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), 日本機械学会論文集 B, 58 (1992), pp. 2595-2601.
- 2) 小田哲也, 廣安博之, 新井雅隆, 西田恵哉: 高速気流中における液体噴流の微粒化特性 (第2報, 噴射液体の局所質量流量, 液滴径の変化と軌跡の計算), 日本機械学会論文集 B, 58 (1992), pp. 2602-2606.
- 3) 小田哲也, 廣安博之, 西田恵哉: 高速気流中における液体噴流の微粒化特性 (第3報, 液体噴流の分裂過程と噴霧の内部構造), 日本機械学会論文集 B, 59 (1993), pp. 1408-1413.
- 4) Arai, T. and Schetz, J. A.: Penetration and Mixing of Bubbling Liquid Jets from Multiple Injectors Normal to a Supersonic Air Stream, 4th International Aerospace Planes Conference, Orlando, FL, December 1992.
- 5) 日本機械学会: 気液二相流技術ハンドブック, コロナ社, 東京, 1982, pp. 1-21.