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)

小田 哲也*¹, 廣安 博之*², 西田 恵哉*²

Characteristics of Liquid Jet Atomization across a High-Speed Airstream (3rd Report, Breakup Process of Liquid Jet and Internal Structure of Spray)

Tetsuya ODA, Hiroyuki HIROYASU and Keiya NISHIDA

To elucidate deformation and breakup processes of a liquid jet across an airstream, tomograms of the liquid jet were taken by means of the laser light sheet method. In this method, fluorescent dye, Eosine-Y, was contained in the injected water, and the liquid jet was illuminated by the Nd: YAG laser light sheet. There are two types of atomization mechanisms. In the first mechanism, a horizontal section of the liquid column is distorted into a bow shape, and there exists a cavity without drops behind the liquid column. Small drops are produced at both tips of the bow. The continuous length and the width of the liquid column were measured from the tomograms. In the second mechanism, in which velocities of both the airstream and the injecting liquid are low, the liquid column is distorted in a snakelike shape and drops are produced near the tip of the liquid column.

Key Words: Atomization, Fuel Injection, Jet Engine, Liquid Jet, Liquid Column, Cross Airstream, Spray, Flow Visualization, Tomography, Laser Light Sheet

1. 緒 言

液体燃料を気流に対して垂直に噴射して微粒化する方法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に取付けられるアフターバーナに見られる。これらのエンジンの燃焼特性は液体燃料の微粒化特性の影響を大きく受けるため、液体燃料の微粒化過程を解明することが望まれている。側方より気流を受ける気体噴流の分散の場合、気体噴流の周辺における乱流混合により行われるが、液体噴流の場合にはそれに加えて液体の変形、分裂も分散に影響するものと考えられ、気体噴流の場合のように十分解明されていない。例えば、従来行われてきた噴霧の散乱光写真^{(1)~(3)}は噴霧の外形の観察にとどまる。液柱の後端からの液滴の形成周期を測定する試みも見られるが⁽⁴⁾⁽⁵⁾、噴霧内部の液柱の形状や分裂過程の解明は不可能である。

第1報では噴霧形状や液体の局所質量流量、ザウタ平均粒径の測定を行い、第2報では液滴の軌跡や液滴径の減少過程、液体の局所質量流量を数値計算から求

めた。これらより液体の分散状態が明らかになったが、インゼクタ近傍での微粒化過程との関連は未解明である。そこで著者らは噴霧の内部の状態を観察するためレーザーシート法による噴霧断面の瞬間写真撮影を行った。この撮影によって得た噴霧の断面写真から、気流速度や液体の噴射速度が液柱の形状や分裂過程、噴霧の内部構造に及ぼす影響を調べたので報告する。

2. 実験装置および方法

2.1 風洞および噴射系 図1に実験装置の概略を示す。本実験では、測定部の入口において一様な気流が得られる吐出し風洞を使用した⁽⁶⁾。この吐出し風洞の測定部で得られる気流の最大の速度は150 m/s (マッハ数0.4)である。測定部は内部が120 mm×120 mmの正方形断面であるアクリル製の透明なダクトである。測定部の入口に固定したインゼクタは内径φ0.9 mmの円形パイプであり、アキュムレータで加圧した液体を気流に対して垂直に噴射した。

図2に主な記号と座標系を示す。原点をインゼクタ噴孔とし、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_l の方向を z とする。

2.2 光学系および噴射液体 図3にレーザーシート法の光学系概略を示す。波長532 nm、発行時間20

* 平成3年11月22日 日本航空宇宙学会西部支部講演会において講演、原稿受付 平成4年7月20日。

*¹ 正員、広島大学大学院 (〒724 広島市西条町鏡山1-4-1)。

*² 正員、広島大学工学部。

ns の Nd: YAG レーザー光を凸レンズとシリンドリカルレンズにより厚さ $200\ \mu\text{m}$ のレーザーシートにした。このレーザーシートを噴霧に照射し、レーザーシートに対し正面に固定したカメラで撮影した。噴射液体の水には蛍光色素のエオシン Y ($\text{C}_{20}\text{H}_6\text{Br}_4\text{Na}_2\text{O}$) を $1\ \text{g}/100\ \text{cm}^3$ の割合で溶解した。この蛍光色素を溶解しない場合には、多重散乱した光の影響が大きくレーザーシートの周囲の液滴も照明するため、噴霧を透過するにつれてシート光厚さが厚くなるが、蛍光色素を溶解することで散乱光の影響を適度に抑えることができた。また、この蛍光色素により、レーザーシートの位置における緑色の散乱光に加えて黄色の蛍光が発生し、噴霧の断面像を明りょうに観察できた。この蛍光色素混入による断面写真の撮影法の詳細は、別報で報告することとする。

図1 実験装置概略

図2 主な記号と座標系

図3 レーザーシート法の光学系概略

3. 実験結果および考察

3・1 噴霧の内部構造と分裂過程 図4に一例として、 $V_a=70\ \text{m/s}$ の気流に対して垂直に液体を $V_i=10\ \text{m/s}$ で噴射した場合の噴霧の微粒化状態を、レーザーシート法によって撮影した写真を示す。この写真は右下からレーザーシート光を照射しているため、左上の縁の近辺が暗く、見にくくなっている。そこで、この部分を説明する図を図5に示す。液体は写真左下のインゼクタから噴射され、気流は左から右へ流れている。噴霧の左上の境界を外縁、インゼクタから伸びる液体の連続部分を液柱と呼ぶこととする。高さ $z=2\ \text{mm}$ までは液柱は気流に対して垂直に伸びている。 $z=2\ \text{mm}$ 以上では液柱から多くの微細な液滴が形成されている。 $z=4\ \text{mm}$ 以上では外縁側に、山の先端のようになった $1\ \text{mm}$ 程度の波長の凹凸が形成されている。さらに $z=8\ \text{mm}$ 以上では液柱が見えなくなっている。そこで図5に示すように、液柱が見えなくなる高さを液柱の連続長さ z_c とすると、この場合 $z_c=8\ \text{mm}$ となる。

図6は図4の噴霧の x - y 断面の写真である。この写真は下からレーザーシート光を照射しているため、図6(a)では左上の部分が暗く、見にくくなっている。そこで、この部分を説明する図を図7に示す。 $z=2\ \text{mm}$ [図6(a)] では液柱の断面形状が弓状になっている。液柱の下流側では液滴の存在しない部分(空洞)が見られる。空洞周辺の微細な液滴は、弓状に変形した液柱の端部から発生しているように見え、この部分が液柱の側端と考えられる。そこで図7のように側端間の距離を液柱の幅 w とすると、 $z=2\ \text{mm}$ では $w=3.5\ \text{mm}$ となっている。このような液柱断面の変形の原因には次のようなことが考えられる。インゼクタ直上では液柱断面は円形であり、液柱周囲の圧力分布は高速気流中における円柱の周囲での圧力分布と同様であると考えられる。そのため、気流速度が最大となる液柱の側端において y 軸の正負方向の吸引力を受け、だ円形に変形する。さらに変形した液柱の側端部は気流のせん断力により x 軸正方向に引張力を受けるため、液柱の断面が弓形になる。

$z=6\ \text{mm}$ [図6(b)] では液柱の側端において形成される液滴が、 $z=2\ \text{mm}$ で形成される液滴よりも大きくなっている(A)。また $1\ \text{mm}$ 程度の液体の塊が分離しつつある(B)。 $z=6\ \text{mm}$ では $z=2\ \text{mm}$ に比べ液柱の幅と空洞が小さくなっている。外縁側の形状には凹凸が多くなっている。

$z=8\ \text{mm}$ [図6(c)] では液柱と空洞が消滅し液滴

のみとなっている。したがって $z=6\sim 8\text{ mm}$ に液柱の先端があると考えられる。これは x - z 断面の写真 (図4) の説明において述べた液柱の連続長さ z_c が 8 mm であることと一致している。この位置での液滴は気流方向に並んでいるものが多く (C), $z=6\text{ mm}$ 付近で見られたような比較的大きな液滴塊が気流方向に引っ張られて分裂したものと考えられる。

以上の結果から予想される液柱の変形と分裂過程の概略を図8に示す。液柱の幅 w は、最初はインゼクタからの高さ z の増加とともに大きくなる。液柱の断面形状は弓形であり、液柱の背後において空洞が形成される。微細な液滴の形成が始まると w の増加割合が小さくなる。さらに高さ z が増加すると液柱から液体塊が分離し、 w が減少する。

3.2 噴射速度が液柱に及ぼす影響 図9に液体の噴射速度 V_i が液柱の連続長さ z_c に及ぼす影響を示す。黒のシンボルは x - y 断面の写真より推定した z_c であり、いずれの条件においても x - z 断面の写真よ

り求めた z_c と良く一致している。図9中の各直線、すなわち気流速度が $V_a=35, 70, 140\text{ m/s}$ の直線は、それぞれ $z_c=0.0058 V_i, 0.0029 V_i, 0.0015 V_i$ の直線であり、直線の傾きが気流速度に反比例している。 $V_a=35\text{ m/s}, V_i=5\text{ m/s}$ の条件の噴霧以外は、どの気流速

図4 噴霧の x - z 断面の写真 ($V_a=70\text{ m/s}, V_i=10\text{ m/s}$)

図5 噴霧の x - z 断面写真 (図4) の説明図

(c) $z=8\text{ mm}$

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

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

図6 噴霧の x - y 断面の写真 ($V_a=70\text{ m/s}, V_i=10\text{ m/s}$)

度 V_a においても z_c が V_i に比例している。このことから液柱内の液体は z 方向については等速運動を行っており、気流中を進行する液柱に及ぼす噴射方向の空気抵抗は、高さ z が z_c に達するまで小さいと考えられる。

図10に液体の噴射速度 V_i が液柱の幅 w に及ぼす影響を示す。いずれの V_i においても w はインゼクタからの高さ z の増加とともにいったん増加し、その後減少する。すなわち w は最大値をとっている。この w が最大となる高さ z は $V_i=10$ m/s では約 $z=3.5$ mm, $V_i=20$ m/s では約 $z=8$ mm, $V_i=40$ m/s では約 $z=14$ mm であり、 V_i に比例している。

3・3 気流速度が液柱に及ぼす影響 図9では液柱の連続長さ z_c が液体の噴射速度 V_i に比例することを示した。したがって気流速度 V_a が同一の場合、 z_c/V_i は同じ値をとる。この z_c/V_i は液柱中を進む液体が完全に液柱から分離する時間、あるいは液柱の分裂時間と言える。この時間 z_c/V_i に及ぼす V_a の影響を図11に示す。黒のシンボルは x - y 断面の写真より推定した z_c から求めた時間 z_c/V_i であり、図9における黒のシンボルに対応している。 $V_a=35$ m/s, $V_i=5$ m/s の噴霧以外はいずれの V_a においても、 V_i によらず、ほぼ同一の z_c/V_i をとっている。すなわち、液柱の分

裂に要する時間は V_i の影響を受けないと言える。一方、 V_a の増加に伴い z_c/V_i が減少している。したがって、液柱の分裂が V_a の増加により促進されていると言える。図11中の曲線は $z_c/V_i=0.05/V_a$ の双曲線である。 V_a と V_i が小さい $V_a=35$ m/s で $V_i=5$ m/s の条件の噴霧以外は、 z_c と曲線が非常に良く一致しており、液柱の連続長さが V_a に反比例していることがわかる。

図12に気流速度 V_a が液柱の幅 w に及ぼす影響を示す。いずれの V_a の場合も w はあるノズルからの高さで最大値をとっており、 w の最大となる高さは V_a の増加とともに低くなっている。また、 w の最大値は V_a が大きくなるにつれて減少している。しかし、この V_a による w の最大値の変化は液体の噴射速度 V_i による変化ほど顕著でない。これは V_a が大きくなるにつれて液柱に働く y 軸の正負方向への吸引力が大きくなり、 w を増加させようとする。ところが、それと

図7 噴霧の x - y 断面写真 [図6(a)] の説明図

図8 高速気流中における液柱の変形と分裂過程の概略

図9 液体の噴射速度が液柱の連続長さに及ぼす影響

図10 液体の噴射速度が液柱の幅に及ぼす影響

同時に、気流によって液柱の側端からの液滴の形成が活発になり w を減少させようとする。これらの相反する作用のために V_a が w の最大値に及ぼす影響は、 V_l による影響に比べて小さくなったものと思われる。

3・4 気流および液体の噴射速度が低速な場合の液柱の分裂過程 図11で示したように、気流速度が $V_a=35$ m/s、液体の噴射速度が $V_l=5$ m/s のときの液柱の分裂時間 z_c/V_l は、 V_a 、 V_l がより大きな条件よりも長かった。この $V_a=35$ m/s、 $V_l=5$ m/s の噴霧の x - z 断面の写真を図13に示す。これからわかるように液柱の近傍では微細な液滴が形成されず、気流によりゆっくりと液柱が変形した後に後端付近より比較的大きな液滴が形成されている。図14は図13の噴霧の $z=6$ mm における x - y 断面の写真である。液柱は大きく蛇行した後分裂しており、断面形状は弓形ではなく、液柱背後の空洞も見られない。液柱の側面から

は液滴が形成されておらず、変形した液柱の後端付近から液滴が形成されている。このように、 V_a と V_l が比較的小さい場合には液柱がゆっくりと変形し、液柱の側端からの液滴の形成がないために液柱の連続長さ z_c や z_c/V_l が、図9や図11から推測される値よりも大きくなったと考えられる。

図15に気流速度 $V_a=0$ m/s の場合における液体の噴射速度 V_l が液柱の連続長さ z_c に及ぼす影響を示す。図15は V_l の増加に伴う z_c の増加、減少の傾向から順番に、層流域、遷移流域、乱流域、噴霧流域に分けることができる⁽⁷⁾。 $V_l=5$ m/s の液体噴流は乱流域に含まれこの液体噴流の形状は図16(a)のようになる。これに側方から気流が当たると、蛇行した液柱凸部がこの気流により吸引され、この蛇行が増大するものと考えられる。したがって、図16(b)のように y 軸側の正負交互にくねった形状になったと考えられる。

図11 気流速度が液柱の分裂時間に及ぼす影響

図13 噴霧の x - z 断面の写真 ($V_a=35$ m/s, $V_l=5$ m/s)

図12 気流速度が液柱の幅におよぼす影響

図14 噴霧の x - y 断面の写真 ($V_a=35$ m/s, $V_l=5$ m/s: $z=6$ mm)

図 15 無風状態における液柱の連続長さ

4. 結 論

側方より高速な気流を受ける液体噴流の変形と分裂過程を調べるため、Nd: YAG レーザのシート光を噴霧に照射し噴霧断面の瞬間写真撮影を行った。その結果、次のことが明らかとなった。

(1) 高速な気流中に噴射された液体噴流の場合と、低速な気流中に低速で噴射された液体噴流の場合では微粒化過程が異なる。

また、各微粒化過程について以下のことがわかった。

(2) 高速気流中に噴射された液体噴流は、噴射直後の液柱が気流の作用により弓形の断面形状に変形し、液柱の背後には液滴の存在しない空洞が形成される。液柱の幅はインゼクタからの高さが大きくなるにしたがい増加し、最大値をとったのちに減少する。インゼクタ付近では弓形に変形した液柱の側端部分より微細な液滴が形成される。さらに高くなると液柱の後端から比較的大きな液体の塊の形成が起り液柱が分裂する。そして最終的には空洞が消滅する。

(3) 高速気流中に噴射された液体噴流の場合、本

(a) 乱流領域における液柱の形状

(b) 低速な気流を受ける乱流領域の液柱の形状

図 16 低速な気流中における噴霧の変形

実験の範囲内では液柱の連続長さは液体の噴射速度に比例する。また液体の噴射速度が増加すると液柱の幅の最大値が大きくなり、この最大値をとる高さが高くなる。

(4) 液柱の連続長さは気流速度に反比例して短くなる。また、気流速度が増加すると液柱の幅の最大値が小さくなるが、液体の噴射速度による変化ほど顕著でない。また液柱の幅が最大となる位置は気流速度の増加とともに小さくなる。

(5) 液柱の分裂時間は気流速度に反比例して短くなるが、液体の噴射速度による影響はほとんどない。

(6) 比較的低速の気流中に低速で噴射された液体噴流の場合、上記の液柱の変形と分裂過程が異なり、液柱は噴霧の幅方向に交互に蛇行し、液柱の後端付近から液滴が形成される。

文 献

- (1) Reichenbach, R. E. and Horn, K. P., *AIAA J.*, 9-10 (1971), 469.
- (2) Schetz, J. A. and Padhye, A., *AIAA J.*, 15-10 (1977), 1385.
- (3) 佐藤, 第12回液体の微粒化に関する講演会講演論文集, (1986), 956.
- (4) Less, D. M. and Schetz, J. A., *AIAA J.*, 24-12 (1986), 1979.
- (5) 浅野・ほか4名, 機講論, No. 900-59, B (1990-9), 497.
- (6) 小田・ほか3名, 機論, 58-552, B (1992), 2595.
- (7) 廣安・宝諸, 内燃機関, (1986), 120, コロナ社.