



## 二次元気流噴射弁における噴霧流束分布の計測と予測

### Experimental and Theoretical Analyses on Spray Flux Distribution of Planar Air-Blast Atomizer

吉田 博愛,  
(Hiroaki YOSHIDA)  
九州大学  
(Kyushu Univ.)

井上 智博\*,  
(Chihiro INOUE)  
九州大学  
(Kyushu Univ.)

高和 潤弥,  
(Junya KOUWA)  
IHI  
(IHI Corp.)

伊藤 光紀  
(Mitsunori ITOH)  
IHI  
(IHI Corp.)

Air-blast atomizers are utilized for jet engines to atomize a bulk of liquid using accompanying high-speed gas streams. Although optimizing spray mass flux distribution providing local air-fuel ratio is strongly demanded, there are limited studies reporting quantitative spray mass flux distribution, because of the measurement difficulty. In the present paper, quantitative spray mass flux distributions at a planar air-blast atomizer is obtained using a mechanical patternator newly developed for high-speed air-blast atomizer with changing injection velocities and liquid species as water and kerosene. It is found that droplets linearly disperse from the exit of atomizer downstream. A prediction model of spray mass flux distribution is constructed by using a new global length scale of spray based on the liquid/gas momentum ratio. The model reproduces the experimental results of spray flux distribution with no dependencies on injection velocities in the range of gas velocity as 45 ~ 100 m/s and liquid properties.

Keywords: Jet engine, Air-Blast Atomizer, Patternator, Spray flux, Liquid Sheet

### 1. はじめに

近年、航空機には安全性や信頼性はもちろん、環境適合性の向上が強く求められており、NO<sub>x</sub> やすすなどの更なる排出量削減が課題となっている<sup>(1)</sup>。ジェットエンジンの燃料噴射弁として、離陸から巡航・着陸にわたる幅広い条件で、良好な噴霧を実現するために、高速の気流によって低速の液体を微粒化する、気流噴射弁が広く採用される<sup>(2)(3)</sup>。燃焼室内で起こる噴霧燃焼を最適化するには、空間的な空燃比や燃焼温度を最適化する必要がある<sup>(4)</sup>。着火領域には十分な燃料濃度を要し、保炎領域では環境適合性の観点から低い燃料濃度が求められる<sup>(5)</sup>。したがって、燃焼室内で要求される燃料濃度は空間的に異なり、燃焼室内に適切な燃料噴霧流束を供給することが重要である。

これまでに、気流噴射弁における噴霧粒径の計測が行われてきた<sup>(6)(8)</sup>。噴霧流束の計測手法は、光学計測とパタネータ計測に大別される。このうち Phase Doppler Anemometry (PDA)等の光学計測は、検査面積が小さく、噴霧流束に大きく影響する粗大液滴の計測が難しいものの、非接触計測という利点を有する<sup>(9)</sup>。この利点を生かして、吉田らは、多様な周囲圧力環境下でせん断強度が噴霧流束に与える影響を調査した<sup>(10)</sup>。松浦らは Laser Diffraction Spray Analyzer (LDSA)を用いて、気流噴射弁形状と噴霧流束の関係性について報告している<sup>(11)</sup>。Bhayaraju は、PDA によりプレフィルムの影響を調査した<sup>(12)</sup>。Chong らは PDA を用いて内部スワールを持つ気流噴射弁における噴霧の構造的な特徴を報告し<sup>(13)</sup>、中村らは Phase Doppler Interferometer (PDI)を適用して、気液運動量比と噴霧角の関係性を調査した<sup>(14)</sup>。他方、パタネータ計測は、計測可能な液滴サイズに制約がない点や計測面積が広い点が有利であるものの、接触型計測であるため、噴霧構造に与える影響を無視できないのが難点である<sup>(15)(17)</sup>。しかし、同一の噴霧に対して、PDA による噴霧流束分布の計測結果は、パタネータの計測結果

を過小評価することが報告されている<sup>(17)</sup>。従って、過去の研究で、気流噴射弁における定量的な噴霧流束分布を報告した事例が十分に蓄積されているとは言い難い。望ましい噴霧を実現可能な気流噴射弁を設計するためには、噴霧流束分布を予測することが必要であり、その予測精度を検証するために、定量的な計測結果が不可欠である。

こうした背景を受けて、著者らは、高速気流を有する気流噴射弁における定量的な噴霧流束分布計測に適用可能な、新しいパタネータを開発した<sup>(17)</sup>。本研究では、同計測装置を用いて、広範な気液噴射速度と二種類の液物性の条件で噴霧流束分布を計測した上で、様々な噴射条件における噴霧流束分布を整理する理論モデルを提案することを目的とする。

### 2. 実験装置および条件

#### 2.1 実験装置

気流駆動用のプロワと液噴射用の貯水タンクの下流に、図 1 に示す実験装置を設置した。気流噴射弁として、ノンプレフィルミング型の二次元噴射弁を採用した。実験装置は、上流から噴射弁、パタネータ、チューブおよびメスシリンダーで構成される。 $x, y, z$  軸は、それぞれ噴霧奥行き方向、噴霧幅方向、流れ場下流方向とした。噴射弁から膜状に噴射された低速液体が、液膜を挟む高速気体によって微粒化され、液滴が  $y$  方向に広がりながら、 $z$  方向に飛散する。パタネータで区分された液滴は、チューブを通じてメスシリンダーに蓄積される。各メスシリンダー中の液質量を計測し、噴霧捕集時間で除すことで、 $y$  方向一次元の局所噴霧流束  $\dot{q}$  [kg/s/m] の分布を取得する。

#### 2.2 噴射弁形状

本研究で用いた標準気流噴射弁の概要を図 2 に、諸元を表 1 に示す。噴射弁の中央部に、最大厚み  $T_w = 8.9$  mm、コード長  $L_w = 89$  mm を有する翼型が設置されている。翼後端の中央に設けたスリット状の噴射孔から、低速の液体を噴射する。液体の噴射面積は  $2H_l \times W_l = 0.30$  mm  $\times$  38 mm である。液出口を挟むように設置した二次元ノズルから、高速の

原稿受付：2020年1月27日

\* 責任著者：正会員、九州大学

(〒819-0395 福岡市西区元岡 744)

E-mail: inoue.chihiro@aero.kyushu-u.ac.jp

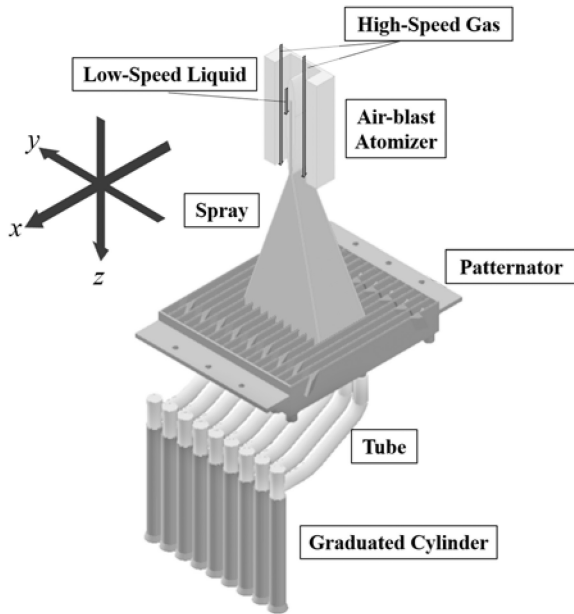


Fig.1 Schematic of experimental apparatus.

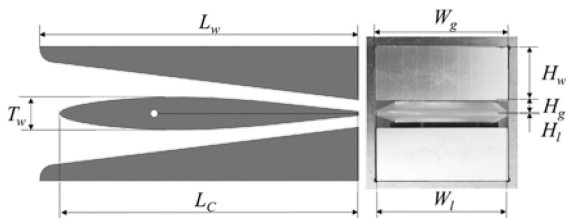


Fig.2 Atomizer configurations. (Left: cross sectional view, Right: bottom view.)

Table 1 Atomizer geometry.

$H_g$	Gas exit height [mm]	3.3
$H_l$	Liquid exit height [mm]	0.15
$H_w$	Wedge height [mm]	16
$L_c$	Chord length [mm]	89
$L_w$	Wedge thickness [mm]	92
$T_w$	Wing thickness [mm]	8.9
$W_g$	Gas exit width [mm]	40
$W_l$	Liquid exit width [mm]	38

気体を噴射する。気体出口形状は  $H_g \times W_g = 3.3 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$  である。境界層の発達を押さえるために、気体流路は縮流形状とした。

### 2.3 パタネータ

開発したパタネータ形状を、図 3 に示す。全ての液滴を捕集しつつ噴霧構造へ影響を最小限にするため、パタネータには、液滴捕集用と高速気流貫通用の 2 種類のスロットを一個おきに設けた。液滴捕集用スロットが 9 個、液滴を捕集しない気流貫通用スロットが 8 個ある。各スロットの計測面積は  $x \times y = 190 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  である。x-y 平面の全領域を計測するために、同一噴射条件で 2 回実験を実施する。1 回目は噴射弁中心とパタネータ中心を揃えて噴霧流束分布を取得後、2 回目はパタネータを y 方向に 1 スロット幅 (10mm) 移動させて計測する。既に、同パタネータを用いることで、気流噴射速度 100 m/s の条件においても、噴射した液体をほぼ 100% 捕集可能であることを確認しており、同パタネータが噴霧流束に与える影響は小さいと評価できる<sup>(17)</sup>。

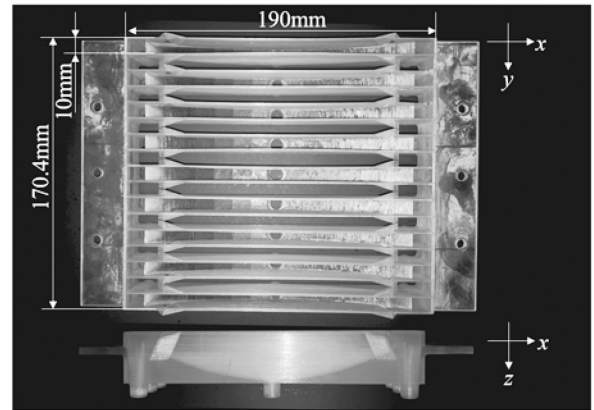


Fig.3 Patternator for high-speed planar air-blast atomizer.

Table 2 Experimental conditions.

$v_l$	Liquid velocity [m/s]	0.15 ~ 2.9
$v_g$	Gas velocity [m/s]	45 ~ 100
$z$	Distances from atomizer [mm]	60 ~ 200
$t$	Mesurement time [s]	30,60

Table 3 Properties of liquids and gas.

		Air	Water	Kerosene
$\rho$	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	1.2	1000	800
$\gamma$	Surface tension [mN/m]		73	28

### 2.4 実験条件

実験条件の一覧を表 2 に、使用した気体の物性値を表 3 に示す。作動流体として、気体に空気、液体に水または灯油を用いた。液体種が水の場合、液噴射速度は  $v_l = 0.15 \sim 2.9 \text{ m/s}$ 、気体速度は  $v_g = 63 \sim 100 \text{ m/s}$  である。灯油の場合、 $v_l = 0.85 \sim 1.7 \text{ m/s}$ 、 $v_g = 45 \text{ m/s}$  とした。なお、 $v_l$  と  $v_g$  は、流路途中に設置した流量計で計測した体積流量を、出口面積で除した、断面平均流速である。過去の実験データ<sup>(18)</sup>を参考に、以下の実験結果は、液噴射量に対して、パタネータを通して捕集した総液量の割合が 85% 以上の結果を示す。

## 3. 結果と考察

### 3.1 噴霧構造の相似性

図 4 に、液体に水を使用したときの、y-z 面内における噴霧の瞬時可視化結果を示す。液膜の両側面を流れる高速気体によって液膜がはためき、微粒化された液滴が、y 方向に飛散する。z 方向下流ほど、噴霧が y 方向に広がる。そこで、パタネータ設置位置を  $z = 60 \text{ mm} \sim 200 \text{ mm}$  と変化させて、噴霧流束分布を計測した結果を、図 5 に示す。 $\dot{q}$  の分布は、いずれの z 方向位置でも、 $y = 0$  で最大になる。また、噴射弁からの距離の増加に伴い、液滴が y 方向に分散する結果、 $y = 0$  における最大局所噴霧流束  $\dot{q}_m$  が減少する。

続いて図 5 に示した  $\dot{q}$  を、式(1)に従って、噴射弁からの距離 z を用いて無次元化した。

$$\bar{q} = \frac{\dot{q}z}{\dot{m}_l} \quad (1)$$

ここで  $\dot{m}_l$  [kg/s] は、噴射した液体の総流量であり、 $\bar{q}$  は無次元局所噴霧流束を表す。図 6 に示す、 $\bar{q}$  と無次元距離  $y/z$  の関係は、z に依存しないことを確認できる。これは、液滴が噴射弁近傍から直線的に飛散することを意味する。噴霧の瞬

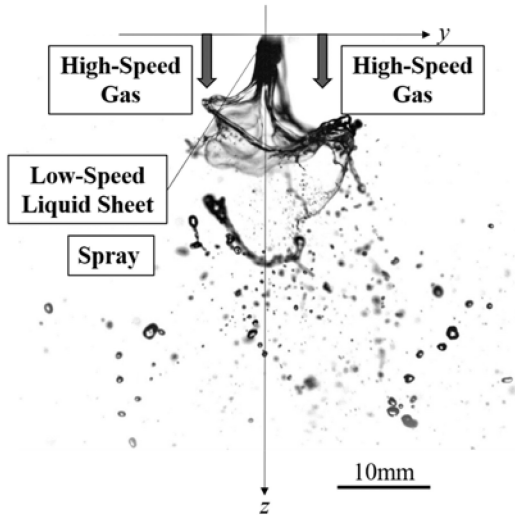


Fig.4 Flapping liquid sheet.

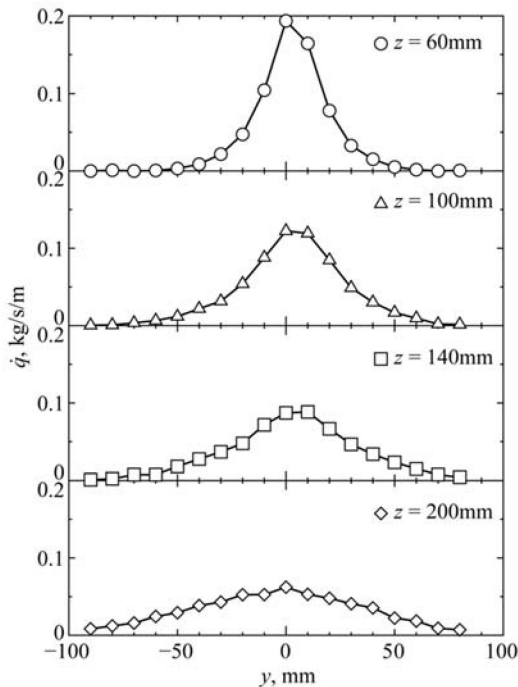


Fig. 5 Spray flux distributions at different distances from the atomizer. ( $v_g = 63 \text{ m/s}$ ,  $v_l = 0.58 \text{ m/s}$ )

時可視化結果を時間積分して得られる液滴の軌跡を、図7に示す。黒い線が液滴の軌跡、白い線が瞬時の液形状を表す。液滴の軌跡が直線的であることから、分裂後の液滴は直線的に飛散することを確認できる。従って、パタネータ設置位置は、 $\bar{q}$ の分布に影響しないことが示された。

### 3.2 無次元噴霧スケール $\Lambda$

はじめに、気流噴射弁における噴霧構造を代表する無次元スケールを導出する。続いて、噴霧流束分布の理論的な予測式を定式化する。

過去の研究から、jet in cross flowにおける貫入高さや、二液衝突型微粒化の噴霧幅といった、二流体現象のマクロな構造を代表する無次元スケールが、二流体の運動量比の平方根で与えられることが明らかになっている<sup>(19)-(22)</sup>。現象のアナロジーを利用して、気流噴射弁における無次元噴霧スケール $\Lambda$ を、気液の運動量比として、式(2)で定義する。

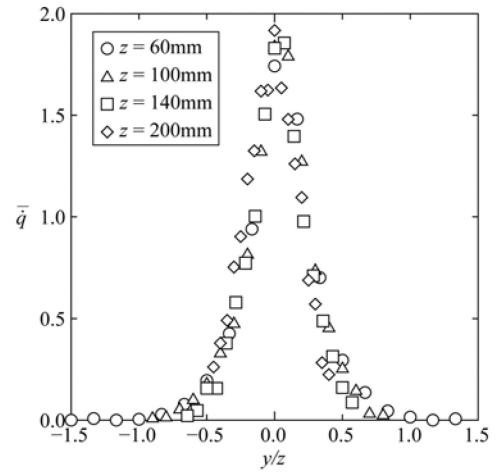


Fig.6 Distribution of  $\bar{q}$  at different distances from the atomizer.

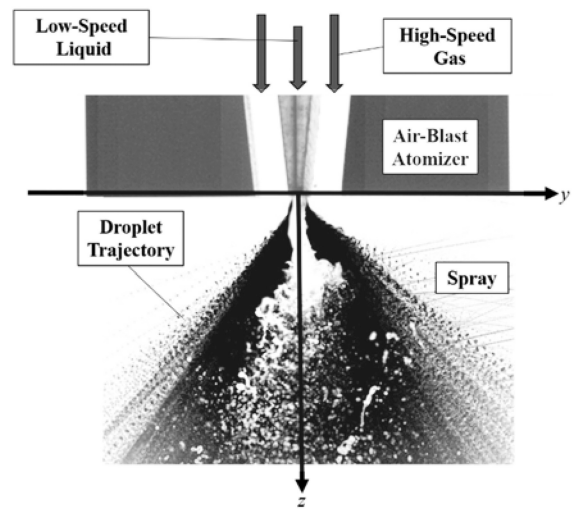


Fig.7 Time-integrated drop trajectories with instantaneous sheet.

Table 4 Experimental conditions at the same  $\Lambda$ .

	$\Lambda$	Liquid	$v_l$ , m/s	Gas	$v_g$ , m/s
Case1	0.08	Water	1.5	Air	83
		Kerosene	0.85	Air	45
Case2	0.09	Water	1.8	Air	75
		Kerosene	1.2	Air	45
Case3	0.10	Water	2.9	Air	90
		Kerosene	1.5	Air	45

$$\Lambda^2 = \frac{\dot{m}_l v_d}{\dot{m}_g v_g} \approx \frac{\rho_l v_l H_l W_l v_d}{\rho_g v_g H_g W_g v_g} \quad (2)$$

ここで、気流の質量流量 $\dot{m}_g$ [kg/s]、分裂時の液滴速度 $v_d$ [m/s]である。気流によって液膜から引き延ばされたりガメントは、ウェーバー数 $We = \frac{\rho_l v_d^2 H_l}{\gamma} \approx 1$ の条件で分裂することから、 $v_d$ を式(3)で与える。

$$v_d \approx \sqrt{\frac{\gamma}{\rho_l H_l}} \quad (3)$$

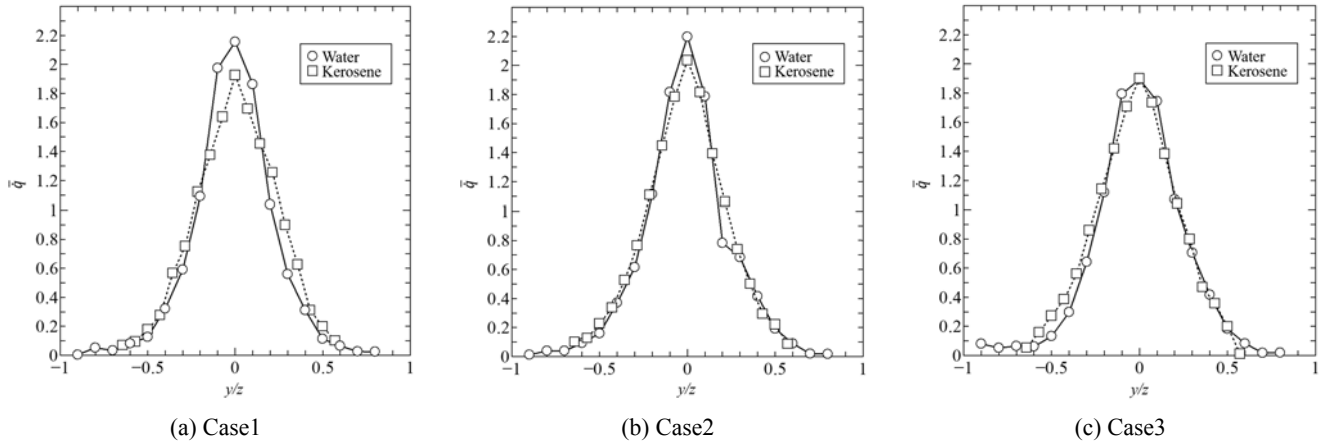


Fig.8 Similarity rule of normalized spray scale( $\Lambda$ ) for the high-speed air-blast atomizer.

式(3)を式(2)に代入し、整理すると、次式を得る。 $\Lambda$ は、作動流体と噴射弁形状、噴射速度によって一意に決まる。

$$\Lambda^2 \approx \frac{\sqrt{\rho_l H_l \gamma v_l}}{\rho_g H_g v_g^2} \quad (4)$$

表4に、Case1-3に示す3ケースの $\Lambda$ について、それぞれ作動流体と噴射速度が異なる条件を示す。Case1-3において、実験で得られた $\bar{q}$ と、噴射条件から決まる $\Lambda$ の関係を、図8に示す。いずれの場合も、作動流体と気液噴射流速が異なるものの、 $\Lambda$ が等しければ、 $\bar{q}$ の分布が一致することを確認できる。

次に、実験結果の $\bar{q}$ をもとに、 $y$ 方向重心位置の絶対値を計算し、噴射弁からの距離 $z$ で無次元化した値を $Y$ として、次式で定義する。

$$Y = \frac{\sum(|y/z| \cdot \bar{q})}{\sum \bar{q}} \quad (5)$$

図9に示す噴射条件 $\Lambda$ に対する実験結果 $Y$ の関係をみると、両者の間に、次の比例関係があることが明らかになった( $a=2.5$ )。

$$Y \approx a\Lambda \quad (6)$$

以上より、 $\Lambda$ は気流噴射弁の噴霧構造を特徴づける無次元パラメータであることが分かった。

### 3.3 噴霧流束分布予測モデル

いま、 $\bar{q}$ が $y/z=0$ 周りの正規分布であると仮定すると、標準偏差 $\sigma$ を用いて、 $\bar{q}$ は式(7)で与えられる。

$$\bar{q} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^2} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \left(\frac{y}{z}\right)^2\right) \quad (7)$$

式(7)の絶対値一次モーメントが $Y$ に比例することと、式(6)を利用することで、 $\sigma$ は $\Lambda$ の関数になる( $b=2.8$ )。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\pi}{2}} Y \approx b\Lambda \quad (8)$$

式(8)を式(7)に代入して整理すると、次式を得る。

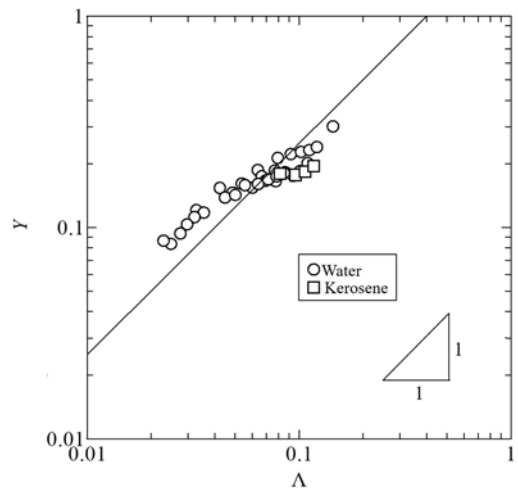


Fig. 9 Relativity of  $Y$  and  $\Lambda$ .

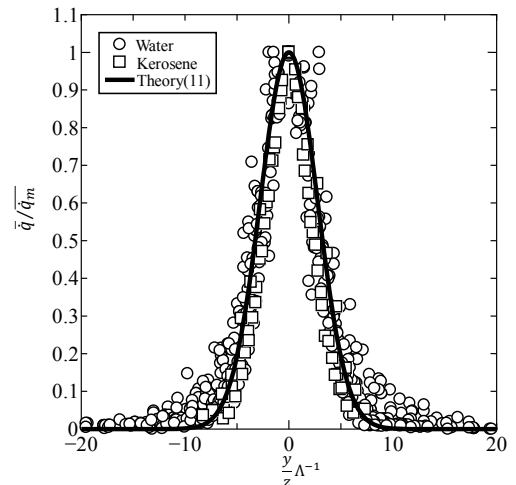


Fig.10 Normalized spray flux distributions.

$$\bar{q} = \frac{1}{\sqrt{2\pi b^2 \Lambda^2}} \exp\left(-\frac{1}{\pi b^2} \left(\frac{y}{z} \Lambda^{-1}\right)^2\right) \quad (9)$$

式(9)は、 $y/z=0$ で最大値 $\bar{q}_m$ をとる。

$$\bar{q}_m = \frac{1}{\sqrt{2\pi b^2 \Lambda^2}} \quad (10)$$

$\bar{q}_m$ を用いて式(9)を規格化すると、最終的に式(11)を得る。

$$\frac{\bar{q}}{\bar{q}_m} = \exp\left(-\frac{1}{\pi b^2} \left(\frac{y}{z} \Lambda^{-1}\right)^2\right) \quad (11)$$

表2の全噴射条件に対して得られた、全48ケースの実験結果と式(11)を比較して、図10に示す。本研究の範囲内では、液体種と気液流速に依存することなく、式(11)が成立することが判明した。

#### 4. おわりに

最大気流速度 100 m/s の気流噴射弁の噴霧流束分布を定量的に計測可能なパターナータを用いて、液体種と気液噴射速度を様々に変化させた計測を実施し、噴霧流束分布を予測することを試みた。得られた結果を以下に示す。

1. 分裂した液滴は噴射弁近傍から直線的に飛散するため、噴霧流束分布は、噴射弁からの距離を用いて無次元化できる。
2. 気流噴射弁の噴霧構造を代表する長さスケールが、気液の運動量比で与えられることが分かった。
3. 同長さスケールを利用して、気流噴射弁の噴霧流束分布を正規分布で定式化し、本実験条件における液体種と気液流速の範囲で妥当性を検証した。

提案した予測式の更なる検証、特に噴射弁形状の影響や、適用可能範囲の明確化については、今後の課題として残されている。

#### 文 献

- (1) 田坂英紀：燃焼工学，森北出版株式会社(2011)，6-7.
- (2) Lefebvre, A. H.: *Airblast Atomization*, *Progress in Energy and Combustion Science*, 6.3(1980), 233–261.
- (3) Rizkalla, A. A., Lefebvre, A. H.: *The Influence of Air and Liquid Properties on Airblast Atomization*, *J. Fluid Engineering*, 97(1975), 316–320.
- (4) 野田進，名田譲：噴霧燃焼，混相流，24(2010)，259–266.
- (5) 京徳信夫，鈴木達也，中馬弘勝，劉京爽，徳岡直静：着火性に及ぼす噴霧特性の影響(第2報：蒸気燃料濃度の影響)，*微粒化*，5-4(1996)，170–177.
- (6) Zheng, Q. P., Jasuja, A. K., Lefebvre, A. H.: *Structure of Airblast Sprays under High Ambient Pressure Conditions*, *J. Engineering for Gas Turbines and Power*, 199.3(1997), 512–518.
- (7) Panchasara, H., Agrawal, A.: *Effect of Enclosed Flame on Spray Characteristics and Emission from Preheated Bio-oil using an Air-blast Atomizer*, *Energy Procedia*, 110(2017), 216–222.
- (8) Lorenzetto, G. E., Lefebvre, A. H.: *Measurements of Drop Size on a Plain-jet Airblast Atomizer*, *J. AIAA*, 15(1977), 1006–1010.
- (9) Tropea, C.: *Optical Particle Characterization in Flows*, *Annual Review*, 43(2011), 399–426.
- (10) Yoshida, K., Ide, K., Takahashi, S., Matsuura, K., Iino, J., Kurosawa, Y., Hayashi, S., and Ohta, Y.: *Airblast Spray Characteristics of Planar Liquid Films in Longitudinal Gas-Phase Shear Layer at Various Ambient Pressure Conditions*, *Proc. 12<sup>th</sup> ICLASS*, 2012
- (11) 松浦一哲，丸永拓哉，鈴木俊介，須田充，井戸教雄，黒沢要治，牧田光正，林茂：液膜式気流噴射弁の設計パラメータ・作動条件が噴霧特性に与える影響 -第一

報 複数の噴射弁形態の比較による考察-，宇宙航空研究開発機構研究開発資料，JAXA，2007

- (12) Bhayaraju, U. C.: *Analysis of Liquid Sheet Breakup and Characterization of Plane Prefilming and Nonprefilming Airblast Atomizers*, Ph.D. Thesis, 2007
- (13) Chong, C. T., Hochgreb, S.: *Effect of Atomizing Air Flow on Spray Atomization of an Internal-Mix Twin-Fluid Atomizer*, *J. Atomization and Sprays*, 25(2015)
- (14) Nakamra, S., McDonell, V., Samuelsen, S.: *The Effect of Liquid-Fuel Preparation on Gas Turbine Emissions*, *J. Engineering for Gas Turbines and Power*, 130(2008)
- (15) Mevey, J. B., Russell, S., and Kennedy, J. B.: *High-Resolution Patternator for the Characterization of Fuel Sprays*, *J. Propulsion and Power*, 3(1987), 202–209.
- (16) Dullenkopf, K., Willmann, M., Wittig, S., Schöne, F., Stieglmeier, M., Tropea, C., and Mundo, C.: *Comparative Mass Flux Measurements in Sprays using a Patternator and the Phase-Doppler Technique*, *Particle & Particle Systems Characterization*, 15(1998), 81–89
- (17) Yoshida, H., Inoue, C., Kouwa, J., Itoh, M.: *Spray Flux Distribution of High-Speed Planar Air-blast Atomizer*, *IGTC2019*.
- (18) Schelling, J., and Reh, L.: *Influence of Atomizer Design and Coaxial Gas Velocity on Gas Entrainment into Sprays*, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 38 (1999), 383-393.
- (19) Inoue, C., Fujii, G., and Daimon, Y.: *Mixing Length Scale of Bi-Propellant Thrusters for Characteristic Velocity Formulation*, *Int. J. Eng. Mat. Chem. Prop.*, 16(2017), 281–294.
- (20) Inoue, C., Takeuchi, Y., Nozaki, K., Himeno, H., Watanabe, T., Fujii, G., and Daimon, Y.: *Unified Length Scale of Spray Structure by Unlike Impinging Jets*, *Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci.*, 62(4)(2019), 213–218.
- (21) Broadwell, J. E. and Breidenthal, R. E.: *Structure and Mixing of a Transverse Jet in Incompressible Flow*, *J. Fluid Mech.*, 148 (1984), 405–412.
- (22) Smith, S. H. and Mungal, M. G.: *Mixing, Structure and Scaling of the Jet in Crossflow*, *J. Fluid Mech.*, 357 (1998), 83–122.