

ステレオレーザ干渉画像法によるエアブラスト燃料噴霧中の粒子の 粒径及び3成分速度の同時計測とその燃焼場への適用

学生証番号 66219 氏名 山口 健太
 (指導教員 林 茂 教授)

Key Words : Interferometric Laser Imaging, Droplet Sizing, Three-Component Velocity, Spray Combustion

1. 序論

近年、燃費の向上を目指す航空用ガスタービンエンジンはサイクルの高温・高圧化の傾向にあるが、サイクルの高温・高圧化は環境汚染物質である窒素酸化物(NO_x)の排出量増加を伴う。よって、燃焼の安定性を維持し、 NO_x の排出量を削減することが大きな課題である。 NO_x の排出量や燃焼の安定性には燃焼器内の燃料噴霧が大きな影響を及ぼすため、燃料噴霧特性についての理解及び燃料噴霧の計測技術が重要である。そこで本研究では以下を目的に掲げる。

- () 非燃焼場において霧化空気差圧をパラメータとしエアブラスト燃料噴射弁による燃料噴霧の特性をステレオレーザ干渉画像法により明らかにする。
- () 同手法を燃焼場に適用し、燃焼場における噴霧計測技術を確立する。
- () 燃焼場において燃料噴霧の特性に霧化空気差圧及び気液流量比が与える影響を同手法により明らかにする。

2. 供試燃料噴射弁

図.1は本研究で非燃焼場の噴霧計測に用いたエアブラスト燃料噴射弁の断面図と外観写真である。燃料噴射弁は同軸に2つの旋回羽根(インナスワラ、アウトスワラ)を備えた空気流路を持ち、これらを通じた空気は旋回速度成分を与えられる。旋回羽根はそれぞれ独立に旋回方向および旋回角度(高さ1/2における角度で定義)を交換することができる。旋回方向はノズル下流側から見て反時計回りを正とする。このような流れ場においては噴霧軸付近が負圧になることにより再循環領域が形成される。燃料の灯油は上記空気流路の間の環状流路を通して液膜状で大気中へ流出し、空気のせん断力によって微粒化される。燃焼場の計測に用いた燃料噴射弁の基本的な構造及び特徴は非燃焼場において用いたものと同じである。燃料噴霧は非燃焼場では開放大気中へ、燃焼場では一辺100mmの正方形断面を持つ可視化燃焼器内へなされる。本研究では燃料噴射弁上流全圧 P_t と背圧(大気圧) p_a の差圧 Δp を p_t で無次元化した値を霧化空気差圧(以下 $\Delta p/P_t$)と定義し、これと気液流量比(air fuel ratio:AFR)及びスワラの旋回角をパラメータとして試験を行った。

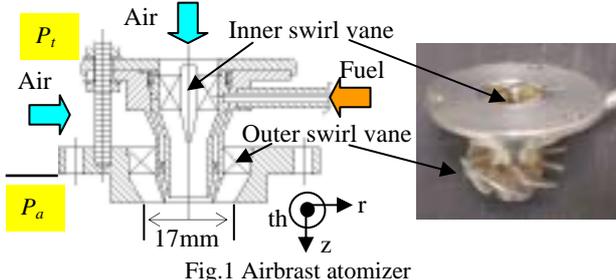


Fig.1 Airblast atomizer

3. レーザ干渉画像法(ILIDS)

3.1 計測原理及び計測装置

レーザ干渉画像法は液滴の粒径と速度の同時計測が可能な面計測法である。液滴によるレーザの散乱光のうち、本手法では液滴表面で反射する光と2度屈折して内部を通過して射出する光を利用する。これら2つの光を受光レンズの非焦点面で捉えるとその位相差により干渉縞が観察される(図.2)。干渉縞の本数と粒径の間には幾何光学より導かれる比例式が成り立つので、撮影した干渉縞画像から縞の本数を求めることにより粒径の算出が可能となる。また、速度の計測のため画像は微小時間間隔で2枚撮影しており、干渉縞の移動距離と撮影時間間隔から液滴の速度が計算される。本研究ではシート化したNd-YAGレーザ(波長532nm)を用い、受光CCDカメラは供試液体(灯油)による前述の二つの光が支配的になる睨み角 $\beta=70\text{deg}$ の位置に設置した。受光系には前田らにより考案された、円筒レンズを用いる光学的圧縮法^[1]を用いており、垂直画素方向のみが圧縮された干渉縞像を得ることができる。これにより干渉縞の重なりによるデータ取得率低下を防ぐことが可能である。

3.2 ステレオレーザ干渉画像法

液滴速度の計測にあたり、従来のレーザシート内の2成分速度(噴霧軸方向、半径方向)に加えシートに垂直な3成分目の周方向速度を得るため、ステレオ計測への拡張を行った。この3成分速度計測はステレオ視の原理を用いており、受光カメラ2台をレーザシートに関して対称となる位置に設置した。

3.3 ステレオレーザ干渉画像法の燃焼場への適用

本研究ではステレオレーザ干渉画像法を燃焼場の噴霧計測に適用した。燃焼場への適用にあたっては輝炎による信号の劣化が問題となるので、輝炎の発生しないような試験条件とした。また受光カメラ前面にはレーザ光波長以外の光を棄却する干渉フィルタを用いた。本手法を噴霧燃焼場に適用した例はこれまでほとんどなく、より実際に近い噴霧特性を理解するのに大きな一助となるものと考えている。

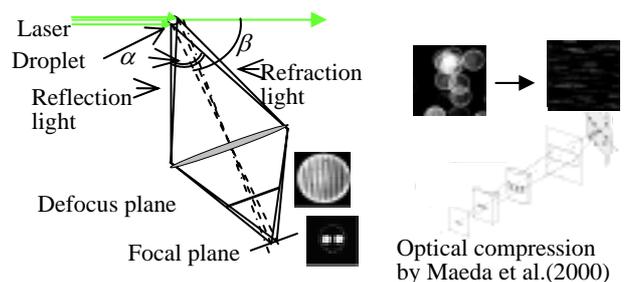


Fig.2 Basic configuration and optical compression technique of ILIDS

4. 結果及び考察

4.1 非燃焼場における噴霧計測

非燃焼場における噴霧計測はAFRを一定(9.5)とし、 $\Delta p/P_i=2, 4, 5\%$ の3条件で行った。スワラの回転角はインナースワラ-45deg, アウタースワラ+60degとした。図.3に $\Delta p/P_i=4\%$ における20, 30 μm クラスの液滴の液滴数の空間分布及びレーザシート内の2成分速度ベクトルを示す。以降の粒径クラスは $\pm 5\mu\text{m}$ の幅を持ち、例えば20 μm クラスには15~25 μm の液滴が含まれる。まず液滴数分布に注目すると、20 μm クラスの液滴は $z=10\text{mm}$ 付近までは噴霧外側へ広がるものの下流では内側へ偏向し噴霧内側にも存在しているのに対し、30 μm クラスの液滴は $z=20\text{mm}$ 付近まで噴霧外側へ広がり噴霧内側には少ない。またピーク位置も下流外側へ移動している。速度ベクトルは20 μm クラスの液滴には噴霧内側で再循環流れを反映し上流へ向かうものが見られるが30 μm クラスの液滴には見られない。これらのことは小さい液滴は大きい液滴に比べ気流への追従性に優れるためだと考えられる。図.4にレーザシートに垂直な周方向の速度分布を示す。2つのスワラによる気流は逆旋回であるため、液滴は上流の噴霧軸付近で負、外側で正の平均速度を持つと考えられたが、負の平均速度は計測されなかった。これは相対的に流量の多いアウタースワラによる旋回気流が支配的であるためと考えられる。またアウタースワラによる旋回は一旦減衰した後、下流で再び強くなっている。これは上流ではインナースワラとアウタースワラの旋回は拮抗しているが流量の少ないインナースワラの気流が先に減衰してしまうためだと考えられる。

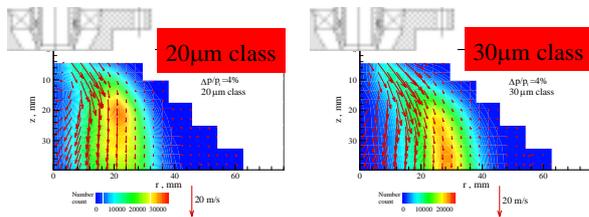


Fig.3 Spatial distribution of number count and mean velocity of droplet in different size class at $\Delta p/P_i=4\%$

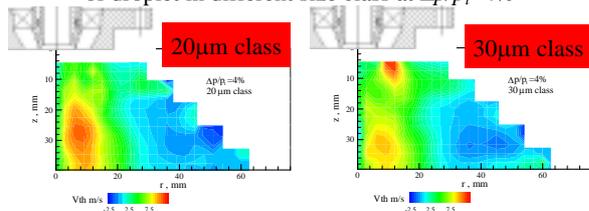


Fig.4 Spatial distribution of circumferential mean velocity of droplet in different size class at $\Delta p/P_i=4\%$

次に図.5に $z=13.5, r=6\text{mm}$ と $z=13.5, r=24\text{mm}$ の位置における20 μm クラス液滴の軸方向速度と周方向速度の相関を示す。図から $r=6\text{mm}$ の位置で再循環流れに追従し負の軸方向速度を持つ液滴でも負の周方向速度を持つ液滴は少ない。これより $z=13.5\text{mm}$ の位置で既にインナースワラによる旋回は減衰していると考えられる。

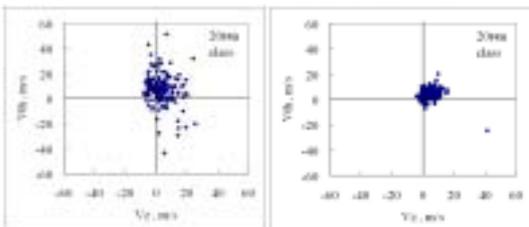


Fig.5 Size-classified correlation of different velocity component of droplets at $\Delta p/P_i=4\%$
(left : $z=13.5\text{mm}, r=6\text{mm}$, right : $z=13.5\text{mm}, r=24\text{mm}$)

4.2 燃焼場における噴霧計測

燃焼場における噴霧計測はアウタースワラを+48degと+60degとし、 $\Delta p/P_i=2, 3, 4\%$, AFRを15,18,20と変化させ行った。図.6にアウタースワラ+48deg, $\Delta p/P_i=4\%$, AFR20における火炎写真と液滴数の分布を示す。火炎はコーン状に形成されており、液滴数分布とよく似た形状になっている。また液滴数は $z=10\text{mm}, r=10\text{mm}$ 付近でピークを持つ。これはこの付近まではあまり燃焼反応が起きていないため微粒化の進行により液滴数が増加し、これより下流では蒸発・燃焼により液滴数が減少するためだと考えられる。

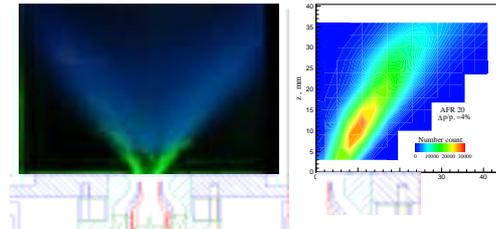


Fig.6 Photographs of flame with fuel droplets and total droplet number count at $\Delta p/P_i=4\%$, AFR20

次に図.7にAFRの変化による液滴数分布の変化を示す。図は $\Delta p/P_i=4\%$, $z=9\text{mm}$, 及び21mmの断面での20 μm クラスの液滴数の半径方向分布であり各断面での最大値で無次元化してある。図から、 $z=9\text{mm}$ の噴射弁近傍ではわずかに分布が変わるものの、AFRの違いによる液滴数分布への影響はほとんど認められないことが分かる。

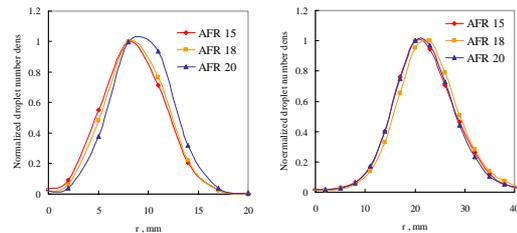


Fig.7 Radial distributions of droplets number count in 20 μm class for different AFR at $z=9\text{mm}$ and 21mm

5. 結言

非燃焼場において

- 燃料液滴の挙動はその粒径により大きく異なり、20 μm クラスは再循環流れに追従するが30 μm クラスは追従していない。
- インナースワラによる旋回の液滴の挙動への影響は噴射弁のごく近傍に限られ、下流及び噴霧外側ではアウタースワラによる旋回の影響が支配的である。

燃焼場において

- 今までなされていなかったステレオレーザ干渉画像法による燃焼場における噴霧計測を行い、計測が可能であることを実証した。
- AFRの変化による液滴数分布への影響はほとんど見られない。

謝辞：本研究は、宇宙航空研究開発機構において行ったものであり、終始御指導、御助言を頂きました林茂チームおよび松浦一哲主任研究員に感謝します。

参考文献

- [1]川口達也,小林俊弘,前田昌信,レーザ干渉画像法による噴霧液滴径・速度の面的同時計測法の開発,日本機械学会論文集(B編),Vol.68, No.666, 2002, pp141-148