A304

噴霧燃焼器内部における三次元流れ場の PIV 計測と誤差評価

木内 雅也[○](新潟大院), 藤澤 延行(新潟大)

PIV measurement and uncertainty analysis of three-dimensional velocity field in a spray combustion chamber

Masaya KIUCHI and Nobuyuki FUJISAWA

ABSTRACT

This paper reports the measurement of three-dimensional velocity field in a spray combustion chamber with and without combustion using a combined use of planar PIV technique and with a rotary shutter mechanism. An uncertainty analysis has been carried out using artificial images, which include the influence of luminous noise generated by the spray combustion. The present results indicate that the flow pattern inside the combustion chamber is modified to strengthen the vertical flow motion relative to the horizontal one under the influence of combustion.

Keywords Three-dimensional flow, PIV, Combustion, Uncertainty analysis,

1. 結 論

噴霧燃焼器内部の熱流動状況の把握は、燃焼室熱負荷、排ガス、騒音などに関わりを持つことから工学的に重要な課題である。このため、その内部流動に関する研究がしばしば研究課題として取り上げられてきたが、このような燃焼を伴う流れ場では輝炎の発生による影響が PIV による速度場計測上ノイズとして働くため、燃焼時における流れ場の定量計測例⁽¹⁾は少ない。この課題に対し、Tomimatsu ら⁽²⁾は、ロータリーシャッタを用いた PIV 計測法を提案し、それを用いた噴霧燃焼装置中央断面における速度計測結果を示した。

本研究では、この計測法を発展させることで噴霧燃焼器内部の燃焼を伴う三次元流れ場を明らかにすることを目的とする。また、このような輝炎の影響を考慮した擬似画像を作成することで、速度計測における計測精度を評価する。

2. 実験装置および方法

2.1 燃焼器モデル

Fig.1 に本研究で用いた燃焼器モデル(105mm×105mm×161mm)を示す。燃焼器モデルは実機の灯油用給湯器を1/5 スケールに縮小化したものである。ただし、実験装置の周囲3面は、透明な耐熱ガラスを用いて可視化可能である。燃料には灯油を用い、それを圧縮噴霧式ガンタイプバーナで微粒化し、燃焼器内部に供給する。バーナ出口にはスワラーが設置されている。なお、バーナスロート内径は 51mm、バッフルプレートは外径 40mm、内径 20mm である。実験は、空気供給量は 4.3g/s、燃料供給量

0.056g/s で行った。

2.2 計測システム

Fig.2 に実験装置を示す。光源にはダブルパルス Nd:YAG レーザ(波長 532nm、出力 50mJ/pulse)、可視化画像の取得には高解像度カメラ(8bit, 1008×1018 pixel)を用いた。トレーサは平均粒径 2 μ m、密度 0.2g/cm³の気流に対して追従性の良好な多孔質シリカ粒子を用いた。なお、CCD カメラの構造上、燃焼時の計測において第二フレームが開放状態となり、輝炎の影響がノイズとして強く現れる。このため、カメラ前面にロータリーシャッタ、そしてバンドパスフィルタ(中心波長 532nm、半値幅 3nm)を設置した。ロータリーシャッタは、撮影軸上を回

Fig.1 Combustion chamber model.

Fig.2 Experimental set up.

転する円板に開けた穴をシャッター機能として利用する装置である。この装置は、ロータリーディスク上の穴が撮影域と重なった瞬間をフォトセンサで感知して、カメラを同期作動することでシャッターとしての機能を与えることができる。このとき、CCD カメラの第一フレームはカメラ内蔵の電子シャッターによって $200\mu s$ 、第二フレームはロータリーシャッターによって $2ms$ 程度の露光時間となる。このシャッタースピードは Tomimatsu ら⁽²⁾の報告により最良の条件であることが確認されている。

2.3 PIV 解析

噴霧燃焼の PIV 計測では、ロータリーシャッターを用いた実験画像でも、輝炎の影響を完全に除去できない。このため、通常の PIV 解析に用いられる輝度差累積法に代えて、直接相互相関法を用いた。この方法では、多少の輝炎の影響の存在下でも PIV 解析が可能である。なお、本解析ではサブピクセル解析を導入することで、計測精度を向上させた。本実験では、平均粒子径 2pixel 、相関領域の大きさ $31 \times 31\text{pixel}$ 、二画像の時間間隔 $180\mu s$ の条件で行ったが、このとき、粒子の平均移動量は 2pixel である。このようにして得られた瞬時速度場 150 組を平均することで、平均速度場を求めた。

2.4 流れ場の 3 次元再構成

燃焼器内部の流れ構造を明らかにするには、容器内の全流れ場を計測する必要がある。本実験では、2 次元 PIV 計測を XY 断面並びに ZY 断面に対して適用し、かつ両計測を奥行き方向 17 断面に対して行うことで、3 次元平均速度分布を測定した。すなわち、XY 断面の計測から速度の u, v 成分、ZY 断面の計測から w, u 成分が求められるが、両断面の交点位置では速度 3 成分 u, v, w が得られることになる。同様に、ステレオ PIV 法を奥行き断面に対して適用することで、3 次元平均速度分布を求めることも可能であるが、この場合には、ステレオ角度を十分に確保できないこと、容器周辺での計測が困難なことなどの課題が残る。

Fig.3 Measurement method.

Fig.4 Sample image.

3. 擬似画像を用いた計測精度の評価

PIV 計測を噴霧燃焼場に適用した場合、輝炎、燃焼流中の未燃液滴、燃焼容器面に付着した未燃液滴など、通常の流体計測では問題とされないノイズが存在する。本研究では、これらのノイズを実験画像から求め、擬似画像に反映させることで、誤差評価を行った。

本実験から得られた実験画像と作成した擬似画像の一例を Fig.4 に示す。ただし、実験画像は、バンドパスフィルタとロータリーシャッターを用いた結果である。実験画像から明らかに、パーナ出口付近には、すす構造が形成されていることが分かる。なお、擬似画像の作成にあたって、正解速度場には連続の式を満たす三次元渦流れ場を与えた⁽³⁾。このような擬似画像に PIV 解析を施し、その結果を正解速度場と比較することで、誤差評価を行った。その際の誤差評価式は、下に示した式を用いた。

$$\frac{\sum_k \sum_j \sum_i \sqrt{(U_{ijk} - U_{ijk}^*)^2 + (V_{ijk} - V_{ijk}^*)^2 + (W_{ijk} - W_{ijk}^*)^2}}{\sum_k \sum_j \sum_i \sqrt{U_{ijk}^{*2} + V_{ijk}^{*2} + W_{ijk}^{*2}}}$$

Fig.5 Velocity distribution.(combustion,XY)

Fig.7 Velocity distribution.(combustion,ZY).

Fig.6 Velocity distribution.(non-combustion,XY)

Fig.8 Velocity distribution.(non-combustion,ZY)

Fig9. Streamline in chamber.

Left: combustion right: non-combustion

4. 実験結果および考察

4.1 2次元流れ場

Figs. 5, 6 は、それぞれ、燃焼時ならびに非燃焼時における燃焼容器の種々の XY 断面 ($z=0, 24, 42\text{mm}$) の速度計測結果である。ただし、図では速度ベクトル表示に加え、速度の大きさをグレースケールにて表示した。

燃焼時の結果 (Fig. 5) によると、バーナ位置 ($z=0\text{mm}$) における流れ場は、入口から対向面に向かって直線状に進む主流があり、対向面によどみ点が確認できる。また、壁面に向かった流れは上下に分かれ、容器壁面に沿って進み、上下部共に渦の形成が見られる。一方、測定断面が側壁方向に向かうと、中央断面と同様の流れパターンが維持されるが、主流幅が小さくなる。このような燃焼時の流れパターンは、非燃焼時にも同様に観測される。しかしながら、非燃焼時の結果は、燃焼流幅や速度に減少効果が見られ、定量的には相違することが明らかである。

Figs. 7, 8 は、同様に、燃焼時と非燃焼時における ZY 断面の計測結果である。ただし、バーナからの距離 $x=11, 53, 95\text{mm}$ の 3 断面について示した。

燃焼時の結果 (Fig. 7) によると、バーナ付近 ($x=11\text{mm}$) では、中央付近に円形の燃焼流の痕跡が確認され、その両側壁近くでは容器壁面に沿って上部に向かう流れパターンが存在する。 $x=53\text{mm}$ の断面では、比較的流れが小さく、混沌とした流れ状態であることが分かる。ただし、出口付近の流れは明瞭に観測された。対向面付近 ($x=95\text{mm}$) の断面では、よどみ点を中心に放射状に広がる流れが確認できた。特に、下部へ広がる流れと両側壁付近を伝い上部へ向かう流れに大きな速度が観測された。

非燃焼時の流れ場 (Fig. 8) においても、定性的には同様な流れパターンが観測されたが、定量的には燃焼流の縮小、速度場の全体的減少が明らかである。他方、対向面付近の上向きの流れは下向きと比べ小さく、燃焼器内部のパターンが燃焼流幅の影響を受けることを示唆する。

4.2 3次元再構成流れ場

Fig. 9 は、燃焼時ならびに非燃焼時における燃焼器内部の流線を 3 次元表示した結果である。ただし、図中の太線は、流れパターンの概略を示す。いずれの結果においても、定性的な流れパターンは一致することがわかる。すなわち、対向面まで達した主流が放射状に広がり、その後、下部へ向かう流れが底面と主流の間で循環する。また、その一部は入口側壁面にそって出口方向へ向かう。上部へ向かう流れは側面を沿いながら、そのまま出口へと向かう。一方、相違点としては、燃焼時において上方向の流れは流線が密であり、非燃焼時のそれと比較して定量的な違いが認められる。

	combustion	non combustion
without noise	2.4%	2.4%
back ground noise	2.4%	2.4%
experimental noise	5.3%	3.0%

Table.1 Error table of artificial images.

4.3 計測精度

Table.1 に擬似画像を PIV 解析した計測誤差を示す。ノイズを加味していない PIV アルゴリズムのみの誤差は 2.4% であることがわかった。これを基準としてノイズを重畳させた。二時刻間の画像には、カメラ素子のノイズがあるため、実験による画像から輝度差を計算してこれを背景ノイズとした。このときの結果は、2.4% で精度に影響を及ぼさないことがわかった。次に実験のノイズとして、三次元流れ場計測で計測した画像を一時刻目、二時刻目とそれぞれ平均化することによりノイズを算出した。また、燃焼時には、すす構造体による影響がある。燃焼時にはこのノイズを加味した。誤差は燃焼時が 5.3% であり、非燃焼は 3% であった。

これらの結果より、本研究で用いた燃焼を伴う流れ場計測法は、非燃焼時の計測と比較して若干の精度低下が確認できた。

5. 結言

本研究では、燃焼器内部の燃焼を伴う流れ場の三次元計測を行った。結果から燃焼、非燃焼時の流れパターンは類似しているが流れの定量的な違いがあることがわかった。特に、燃焼時において入口対向面に沿って出口に向かう流れが大きいという相違点の確認された。また、実験ノイズが計測法に与える影響について、擬似画像を用いて考察した。結果より、燃焼時でのノイズを重畳した誤差は 5.3% であり、非燃焼時に比べ精度が低下することがわかった。

参考文献

1) Palero, V. and Ikeda, Y., Journal of Visualization, 5(2002), 285-292.
2) Tomimatsu, S. et al., Journal of Visualization, 6-3, (2003), 273-282
3) Fujisawa, N. and Hashizume, Y, Meas. Sci. Technol. 12, (2001), pp.1235-1242