B114 ステレオ PIV による燃焼器内スワール流れの 3 速度成分計測

吉田征二[○]、黒澤要治、山本武、五味光男、鈴木和雄（航空宇宙技術研究所）

3-Component Velocity Measurements of Air Flow in a Swirler Type Combustor Using Stereoscopic PIV

Seiji YOSHIDA, Yoji KUROSAWA, Takeshi YAMAMOTO,
Mitsuo GOMI and Kazuo SUZUKI

ABSTRACT

A combustor for gas turbine is required to reduce pollutant gas emission. In order to satisfy this requirement, it is needed that combustion process in the combustor is controlled accurately. So, it is important to get an information of interaction between turbulence and combustion. This report deals with aerodynamic phenomena in a swirl type combustor that has two swirlers. Stereoscopic PIV has been used to measure 3-component velocity field of swirling flow without combustion. It was shown that in the swirling flows the interaction of rotational direction is stronger than axial direction. So, two rotating flows are combined and become one rotating flow more quickly. But the distribution of axial direction flow speed is kept to farther downstream as it is.

Keywords: Stereo-PIV, Swirling flow, Combustor

1. 緒言

ガスタービンには、地球環境保全という観点から、NO_x や CO などの環境汚染物質の排出を低減することが強く望まれている。そのため、燃焼器においても高効率化、低公害化を行うことが要求されている。このような要求を満たすためには燃焼器内の燃焼過程をきめ細かく制御する必要があり、燃焼器内での乱流と燃焼の相互干渉を把握することが必要である。そのためには精度の高い計測、および精度の高い数値シミュレーションが要求される。また、燃焼器の最適化のためには数値シミュレーションは不可欠である。しかし、その計算コードを検証す

るための実験データが、十分であるとは言えない。

そこで、燃焼器内の流れの解明および数値計算コードを検証するためのデータの取得を目的とし、PIV 法を用いて計測を行った。しかし、従来の PIV 法では、測定面内の 2 速度成分しか計測できないため燃焼器内の流れの計測には不十分である。なぜなら、現在ガスタービン用として多く用いられている燃焼器は旋回流保炎器を用いており、この内部の流れは強い 3 次元性を持っているからである。そこで、測定断面上での 3 速度成分の分布を同時に測ることができるステレオ PIV を使用して計測を行った。今回は、計測手法の確立、および、非燃焼状態での燃焼器内流れの解明を目的とし、旋回流保炎器を用いた燃焼器の内部の流れを計測した。

2. 実験装置

2.1. 燃焼器

Fig.1 に燃焼器模型の試験部の概略図を示す。試験部は高さ 164mm、幅 78mm、長さ 275mm の箱型で、4 面が石英ガラスでできていて、光学的な計測が可能になっている。空気は空気加熱器により昇温された後、試験部上流に 2 つ設けられた軸流スワラから試験部に流入する。スワラは外径 50mm、内径 20mm、羽根は 12 枚

Fig.1 Test Section (unit:mm)

あり、羽根のミッドスパンでのねじれ角は 45 度である。スワラの旋回の向きは共に下流から見て左回りである。試験部出口は大気に開放されていて、試験部を通った空気はここから流出する。空気加熱器上流に渦流量計を設け、ここで計測した空気流量から平均流速を求めた。流入する空気の温度は 400K、スワラ出口での軸方向の平均流速は 30m/s とした。

今回は下側スワラの下流を測定したので、その出口中心を原点とし、Fig. 1 のように下流方向を x 軸、上方向を y 軸とし、右手系となるように z 軸を決めた。

2.2. PIV 装置

流速分布の計測に用いた PIV 装置の構成は次の通りである。PIV 装置の制御および取得した画像から速度ベクトルを算出するためのコンピュータとその上で動作するソフトウェア (TSI 社 INSIGHT-NT Ver.3.0)、粒子を照らすためのダブルパルス Nd:YAG レーザ (NEW WAVE RESEARCH 社 MiniLase II-20)、粒子像を撮影するクロスコリレーションカメラ (TSI 社 PIVCAM10-30 model 630046、有効ピクセル数 1000×1016)、そして、レーザとカメラを同期させるためのシンクロナイザー (TSI 社 LaserPulse model 610032) である。

シート光とカメラの配置を Fig. 2 のようにした。試験部の上方からシート光を照射し、側面の窓から粒子像を撮影した。シート光、レンズ、CCD カメラは Scheimpflug 条件を満たすように配置した^[1]。測定部でのシート光の厚さは約 2mm である。2つの粒子画像を別々のフレームに撮影し、相互相関により速度ベクトルを算出した。検査領域 (Interrogation spots) は 32×32 ピクセルとした。

トレーサ粒子はリキッドガス社の MSF-30M (平均粒径 2.7 μ m、見かけ比重 0.45) を用い、乾燥空気と混合した後、試験部の上流に注入した。

3. 測定原理

粒子画像から 3 速度成分を算出する方法を説明する。物理空間の位置 $\mathbf{x}$ から CCD 面上の位置 $\mathbf{X}^{(c)}$ へ投影する関数を $\mathbf{F}^{(c)}(\mathbf{x})$ とすると、時刻 t から Δt の間に位置 $\mathbf{x}$ のトレーサ粒子が $\mathbf{x} + \Delta \mathbf{x}$ へ移動した場合、CCD 面上での移動量

Fig. 2 Arrangement of PIV recording system

$\Delta \mathbf{X}^{(c)}$ は次式で表される。ここで、 c はカメラ 1, 2 を表す。

$$\Delta \mathbf{X}^{(c)} = \mathbf{F}^{(c)}(\mathbf{x} + \Delta \mathbf{x}) - \mathbf{F}^{(c)}(\mathbf{x}) \quad (1)$$

式(1)をテーラー展開して第 1 次の近似を行い、計測位置の測定体積での平均移動量を求めると、

$$\overline{\Delta \mathbf{X}_i^{(c)}} \cong F_{i,j}^{(c)}(\mathbf{x}_1) \overline{\Delta x_j} \quad i=1,2 \text{ and } j=1,2,3. \quad (2)$$

$\mathbf{x}_1$ は測定体積の中心位置、 $\overline{\Delta \mathbf{x}}$ は測定体積内のトレーサ粒子の平均移動量である。式(2)をすべての要素について書くと次式となる。

$$\begin{pmatrix} \overline{\Delta X_1^{(1)}} \\ \overline{\Delta X_2^{(1)}} \\ \overline{\Delta X_1^{(2)}} \\ \overline{\Delta X_2^{(2)}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1^{(1)}}{\partial x_1} & \frac{\partial F_1^{(1)}}{\partial x_2} & \frac{\partial F_1^{(1)}}{\partial x_3} \\ \frac{\partial F_2^{(1)}}{\partial x_1} & \frac{\partial F_2^{(1)}}{\partial x_2} & \frac{\partial F_2^{(1)}}{\partial x_3} \\ \frac{\partial F_1^{(2)}}{\partial x_1} & \frac{\partial F_1^{(2)}}{\partial x_2} & \frac{\partial F_1^{(2)}}{\partial x_3} \\ \frac{\partial F_2^{(2)}}{\partial x_1} & \frac{\partial F_2^{(2)}}{\partial x_2} & \frac{\partial F_2^{(2)}}{\partial x_3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \overline{\Delta x_1} \\ \overline{\Delta x_2} \\ \overline{\Delta x_3} \end{pmatrix} \quad (3a)$$

または

$$\overline{\Delta \mathbf{X}_A} = (\nabla \mathbf{F})_A \overline{\Delta \mathbf{x}} \quad (3b)$$

ここで $\mathbf{X}_A, \mathbf{F}_A$ は 2 台のカメラを合わせた位置ベクトルと投影関数を表す。投影関数 $\mathbf{F}_A$ が得られれば式(3)を解くことにより CCD 面上での移動量 $\Delta \mathbf{X}_A$ から物理空間上での移動量 $\Delta \mathbf{x}$ を求めることができる^[2]。

その $\mathbf{F}_A$ は次のようにして求める。まず、物理空間上で座標が既知である点を、実際に計測に用いる光学系と CCD カメラを用いて撮影し、物理空間上での座標 $\mathbf{x}_c$ と CCD カメラ上での座標 $\mathbf{X}_c$ の組を取得する。そして、次式に示す誤差 ε が最小となるように投影関数を求める。

$$\varepsilon = \frac{1}{N_c} \sum_{\{\mathbf{x}_c\}} \left\{ \mathbf{F}(\mathbf{x}_c) - \hat{\mathbf{F}}(\mathbf{x}_c) \right\}^2 \quad (4)$$

ここで、 N_c は $\mathbf{x}_c$ と $\mathbf{X}_c$ の組の数、 $\mathbf{F}(\mathbf{x}_c)$ は正しい投影関数 ($\mathbf{X}_c = \mathbf{F}(\mathbf{x}_c)$)、 $\hat{\mathbf{F}}(\mathbf{x})$ は求める投影関数である。本研究では $\hat{\mathbf{F}}(\mathbf{x})$ を x_1, x_2 (面内方向) について 4 次、 x_3 (面外方向) について 2 次の次式の多項式によって近似した。

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{F}}(\mathbf{x}) = & \mathbf{a}_0 + \mathbf{a}_1 x_1 + \mathbf{a}_2 x_2 + \mathbf{a}_3 x_3 \\ & + \mathbf{a}_4 x_1^2 + \mathbf{a}_5 x_1 x_2 + \mathbf{a}_6 x_2^2 + \mathbf{a}_7 x_1 x_3 + \mathbf{a}_8 x_2 x_3 + \mathbf{a}_9 x_3^2 \\ & + \mathbf{a}_{10} x_1^3 + \mathbf{a}_{11} x_1^2 x_2 + \mathbf{a}_{12} x_1 x_2^2 + \mathbf{a}_{13} x_2^3 + \mathbf{a}_{14} x_1^2 x_3 \\ & + \mathbf{a}_{15} x_1 x_2 x_3 + \mathbf{a}_{16} x_2^2 x_3 + \mathbf{a}_{17} x_1 x_3^2 + \mathbf{a}_{18} x_2 x_3^2 \\ & + \mathbf{a}_{19} x_1^4 + \mathbf{a}_{20} x_1^3 x_2 + \mathbf{a}_{21} x_1^2 x_2^2 + \mathbf{a}_{22} x_1 x_2^3 + \mathbf{a}_{23} x_2^4 \\ & + \mathbf{a}_{24} x_1^3 x_3 + \mathbf{a}_{25} x_1^2 x_2 x_3 + \mathbf{a}_{26} x_1 x_2^2 x_3 + \mathbf{a}_{27} x_2^3 x_3 \\ & + \mathbf{a}_{28} x_1^2 x_3^2 + \mathbf{a}_{29} x_1 x_2 x_3^2 + \mathbf{a}_{30} x_2^2 x_3^2 \end{aligned} \quad (5)$$

係数 $\mathbf{a}_i$ は最小自乗法により求める。

実際の校正は、平板上に座標が既知の点がグリッド状に配置された校正板を精密なトラバース装置にセットし、

これを測定空間上に配置し、CCD カメラで撮影することにより行う。測定領域は幅 67mm、高さ 52mm である。校正によって得られた $\hat{\mathbf{F}}(\mathbf{x})$ により、校正板上の点を CCD 面上に投影した座標と、実際に CCD で撮影して得た座標との差の RMS は、左のカメラについては X_1 (横) 方向、 X_2 (縦) 方向それぞれ 0.18pixel と 0.22pixel であった。CCD 面上から物理空間上に逆に投影した場合、この値は 0.018mm と 0.013mm に相当する。 x_1 方向 (左右)、 x_2 方向 (上下) の差の分布を Fig. 3, Fig. 4 に示す。これらの図から、差の分布は明確な傾向を持たず、式(5)の多項式は $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ の近似として有効であると考えられる。しかし、この差によって生じる 2 台の CCD 面上での位置のずれや、 $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ の微分値の誤差が測定結果に与える影響については、まだ詳細な検討を行っていない。

4. 測定結果および考察

測定は、 x 軸に垂直、 yz 平面に平行な測定面において、 $x=30\text{mm}\sim 160\text{mm}$ の間で、10mm 間隔に測定を行った。測定範囲内で流速が最大になるのはスワール出口であると考えられるが、スワール出口での流速が一様ではないことを考慮して、流速の最大値を 60m/s と見積もった。燃焼器の軸方向にこの速度を持っていた場合、つまり、測定面の面外方向にこの速度を持っていた場合でも粒子の移動距離がシート光の厚さの 1/4 以下となるように、2 つのレーザシートの発光間隔を $8\mu\text{s}$ とした。この時間でのトレーサ粒子の最大移動距離は 0.48mm である。測定面上を測定面に平行にこの距離を移動した場合、画像上での移動距離は約 6 ピクセルになる。これは、検査領域の幅の 1/4 よりも小さいので、面内方向もこの流速は計測可能である^[3]。

$x=40\text{mm}$ で測定した結果の一つを Fig. 5 に示す。この図は、下流から上流に向かって見た状態である。図中のベクトルは測定面に対して平行な速度成分 v 、 w を表し、等高線は測定面に垂直な軸方向の速度成分 u を表す。平均流速分布を求めるために Fig. 5 と同じ測定面で 80 回計測を行い、その平均を求めた。Fig. 6 にその結果を示す。表示の方法は Fig. 5 と同じである。測定回数が 80 回と少ないにも関わらず、良好な結果が得られていると考えられる。同様の方法により、各測定面において、80 回の計測を行い、それぞれの測定断面での平均ベクトル分布を求めた。それらの結果を合わせることで、Fig. 7 に示すように、燃焼器内での 3 次元的速度の平均ベクトル分布を得ることができた。

$x=100\text{mm}$ 、 160mm の測定面での平均速度分布を Fig. 8、Fig. 9 に示す。Fig. 6、Fig. 8、Fig. 9 と下流に行くに従って、二つの旋回流が合体して一つ大きな旋回流になっていく様子が分かる。 $x=40\text{mm}$ の位置では旋回流はほぼ独立した形状となっているが、 $x=100\text{mm}$ では測定面内の流速 (周方向流速) については測定領域の中で完結した旋回は見られず、測定領域の左上から下向きに

流れが入り、反時計回りに流れ、右上から上向きに流出するような流れになっている。つまり、上下の旋回流がほぼ合体していると考えられる。しかし、軸方向流速は、まだ完全には合体していない。つまり、周方向の流速は上下の旋回流の干渉が比較的強く、あまり下流まで下らないうちに合体した流れとなるが、軸方向の流速は干渉が比較的弱く、周方向の流れが合体した後も独立した旋回の影響を残すと考えられる。 $x=160\text{mm}$ では、上下の旋回流が合体し、周方向および軸方向流速共に、燃焼器内で大きな旋回となっていると考えられる。

また、Fig. 6、Fig. 8 から、スワールの下流に形成された旋回流が、やや右 ($-z$ 方向) にずれていることが分かる。これは、上下の旋回流が共に下流から見て左に旋回しているため、旋回流同士の相互干渉により、測定を行った下側の旋回流が右にずれたと考えられる。また、そのずれも、下流に行くに従い大きくなっている。同様に、上側の旋回流の中心も左方向にずれていると考えられる。

Fig. 6 の時間平均した流れ場と、Fig. 5 の瞬時の速度分布を比較すると、Fig. 5 では全体的に左旋回の流れであることが分かるが、小さな渦も存在し、また、軸方向流速 u が負となる逆流領域も大きく形が変形し、複数の領域に分かれ、乱れの大きな流れであることが分かる。

Fig. 3 Error between true x_1 in the object plane and the computed value (Left camera)

Fig. 4 Error between true x_2 in the object plane and the computed value (Left camera)

Fig. 7 の速度分布から、 $z=0\text{mm}$ のスワラ中心軸を含む面上での速度を Fig. 10 に示す。この図では、スワラ下流に形成される再循環領域内の流れが、全体的に下を向いている^[4]。これは、再循環領域の中心が Fig. 10 において紙面奥側 ($-z$) 方向にずれているためであることが、Fig. 6 から明確に分かる。

5. 結言

旋回流保炎器を用いた燃焼器内の非燃焼状態での流れをステレオ PIV を用いて計測し、次の結果を得た。

- ・旋回流同士の影響は、周方向流速の方が強く、軸方向流速はより下流まで独立した流速分布を保っている。
- ・今回用いた 2 連のスワラでは、旋回流同士の影響により旋回流の中心に偏りが見られた。

参考文献

- [1] Prasad A., Jensen K., Scheimpflug stereo camera for particle image velocimetry in liquid flows, *Applied Optics*, 34, 1995, 7092-7099.
- [2] Soloff S., Adrian R. and Lui Z., Distortion compensation for generalized stereoscopic particle image velocimetry, *Measurement Science and Technology*, 8, 1997, 1441-1454.
- [3] Adrian R. J., Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics, *Annu. Rev. Fluid Mech.* 23, pp.261-304, 1991.
- [4] 吉田征二, 黒澤要治, 山本武, 五味光男, 鈴木和雄, スワラ燃焼器内流れの PIV による計測, 日本機械学会 2000 年度年次大会講演論文集 Vol. IV, 2000.

Fig. 7 Time averaged velocity field in the test section

Fig. 10 Time averaged velocity field on the axial cut

Fig. 5 Instantaneous velocity field ($x=40\text{mm}$)

Fig. 6 Time averaged velocity field ($x=40\text{mm}$)

Fig. 8 Time averaged velocity field ($x=100\text{mm}$)

Fig. 9 Time averaged velocity field ($x=160\text{mm}$)