

## 2C01 FLEETによる噴流の速度3成分計測

○小池俊輔，杉岡洋介（宇宙航空研究開発機構），本間友幸(IHIエアロスペースエンジニアリング)

### Velocimetry of Jet using Stereo-FLEET

Shunsuke Koike, Yosuke Sugioka (JAXA), and Tomoyuki Honma (ISE)

Key Words : FLEET, Velocimetry, Jet, Supersonic flow

#### Abstract

A stereo-FLEET (Femtosecond Laser Electronic Excitation Tagging) system was developed and applied for the velocimetry of a jet. The system consists of a femtosecond laser and two camera system with image intensifiers. The total pressure of the jet was 300 kPa. The jet was injected from an orifice with a diameter of 5 mm. A cross filament was produced in the jet. The cross-filament images were acquired at 0.4  $\mu$ s, 2.4  $\mu$ s, and 4.4  $\mu$ s from the onset of the filament emission. The three-dimensional position of the cross point was calculated based on the triangulation method from the stereo pair of images. The velocities of the cross points were calculated from the positions and the interval of the acquisition times. The result quantitatively shows the velocity distribution of the jet.

#### 1. はじめに

FLEET (Femtosecond Laser Electronic Excitation Tagging)は，フェムト秒オーダーのパルス幅であるレーザ光を窒素分子に照射し，窒素分子を発光させ，発光する窒素分子を追跡することで流速を計測する手法である[1, 2]．近年は，状態量計測への応用も試みられており，窒素分子の発光の減衰時間を計測することで，密度を計測することも可能である[3]．

空気流れの実験では，空気中の窒素分子そのものを対象とすることから，新たな分子や粒子の流れ場への添加が不要，粒子トレーサで問題となる慣性力の影響による追従誤差が無い，計測対象の機器の汚染や腐食の問題が無い等の利点がある．そのため，航空宇宙分野の特に大型風洞における高速流れの研究においては，詳細な流速場を取得できる手法として期待できる．

FLEETは，発光する帯（フィラメント）を追跡する1次元の流速計測法として始まった．そのため，FLEETにおいては，計測できる速度成分の数をどのように増やすかは現状も課題の一つである．この課題における要点は，撮影したFLEET画像中の特徴点を明確にし，画像解析におけるいわゆる窓問題を避けることである．先行研究においては，フィラメントを点として見える向きから撮影することで2次元場を計測する方法[4]や焦点距離の短いレンズでレーザ光を集光させ，発光領域を点と見なせるようにする方法[5]，それに多点化を組み合わせた方法[6]，2本のフィラメントにより交点を形成し，交点を特徴点として追跡する方法[1]などが報告されている．

著者らは，これらの中から，大型の試験設備での利用を想定し，長焦点の光学系でも使用できる2本のフィラメントの交点を利用する手法に着目した．そして，これまでに，十字のフィラメントの交点を追跡することで，FLEETにより，旋回噴流等の速度2成分計測を行った [7, 8]．

本研究においては，これまでの成果を発展させ，速度3成分の計測を試みた．2台の撮像系を用いてステレオ撮影を行い，十字のフィラメントの交点の3次元座標を取得した．また，複数の時刻で取得した3次元座標から，各点の速度3成分を取得した．本稿では，この計測手法の概要と測定結果を紹介する．

#### 2. 試験系

図1に試験装置の概略図を示す．計測対象は空気噴流であり，直径5 mmの先細ノズルの孔から噴射した．噴射流量は制御機構（HFC-303, KOFLOC社製）で常時調整し，噴射総圧は300 kPaとした．図1に示すように，噴射孔中心を原点として，流れ方向をx，水平方向をy，鉛直方向をzとする．また，それら各方向の速度成分をu, v, wとする．本噴射器は旋回噴射も可能な構造ではあるが，本試験では旋回用部品は設置せず，図1のx方向に直線的に噴射した．

FLEET計測系は，フェムト秒レーザ（Astrella, Coherent社製）と2台の撮像系から成る．フェムト秒レーザ光は2系統に分け，水平方向と鉛直方向の2方向から噴流中のyz断面内に入射させた．このyz断面は，噴射孔からx方向に20 mm離れている．両光線がフィラメント位置で交わるように光学系を調整

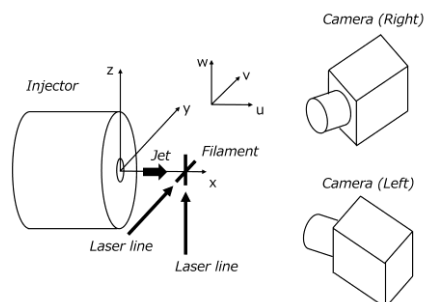


図1 試験系の概要図

した．また，このフィラメントの交点位置を移動させることで，計81点の交点の画像を取得した．なお，水平方向のレーザ光線の位置については，ほぼ等間隔となるように設定したが，鉛直方向のレーザ光線の位置については，トラバース機構の都合により不等間隔となった．

撮像系は，ショートパスフィルタ（波長閾値750 nm），光学レンズ（焦点距離180mm，F値2.8），イメージインテンシファイア（C10880-13F，浜松ホトニクス社製），CMOSカメラ（VLXT55MI，Baumer社製，2464 pix×2048 pix）から成り，カメラレンズは撮像面に対して，シャインブルーフ条件を満たすように傾けた．噴流の下流位置かつ噴流を挟み込むように，撮像系は左右に1系統ずつ配置した．フィラメントを形成するyz断面を撮影断面として，円形マーカ付きのカメラ校正用ボードを，このyz平面に設置した．校正ボードをx方向に±4 mmの範囲において，等間隔で動かし，カメラ校正用画像を計5断面撮影した．校正用画像中の計125点（25点×5断面）のマーカ位置に基づき，射影カメラ行列を算出した．なお，射影カメラ行列の算出においては，画像の歪曲収差の影響は補正していない．既知のマーカ座標に基づく3次元復元時の平均ずれ量は0.01 mmであった．

FLEET画像の撮影タイミングは，レーザ入射後に発光を撮像系がとらえた時刻を基準として，その時刻から0.4  $\mu$ s，2.4  $\mu$ s，4.4  $\mu$ sの3時刻とした．イメージインテンシファイアのゲートを開けるタイミングにより，これらの撮影タイミングは調整し，ゲート幅は700 nsとした．CMOSカメラは0.5 s間露光しており，この間，イメージインテンシファイアのゲートは，1 kHzのレーザ発振タイミングに合わせて開閉を繰り返す．1枚の画像中に計500回分のフィラメント発光が積算される．

### 3. 結果

図2に，噴流中心軸近傍の十字のフィラメントの撮影画像を示す．上段が0.4  $\mu$ s，中段が2.4  $\mu$ s，下段が4.4  $\mu$ sの画像である．また，左側の図が噴流を下流

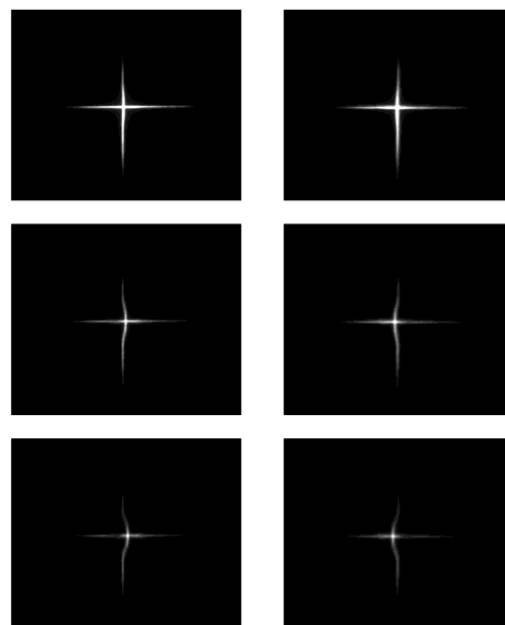


図2 十字のフィラメント画像

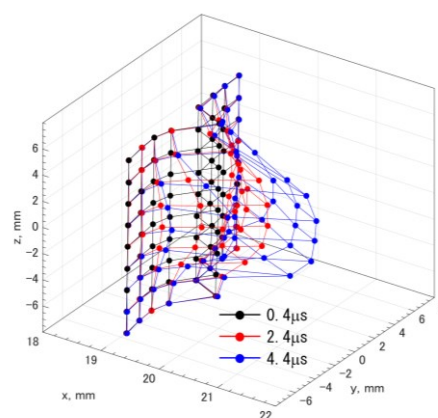


図3 フィラメントの交点の3次元位置

から見たときに左側に設置したカメラの画像であり，右側の図は，右側に設置したカメラの画像である．本試験では，このような画像を計81点のフィラメント位置において取得した．

図2より，発光開始時刻から時間がたつにつれて，輝度が低下するものの，十字の交点は特定できることが分かる．また，時間経過とともに，十字のフィラメントの形状が変化している様子も観察できる．特に下段の画像においては，左右のカメラで十字のフィラメントの曲がる方向が左右方向に逆になることも分かる．

図3にフィラメント交点の各時刻における3次元座標を示す．これは，レーザ入射時に同一断面内にいたフィラメントの交点が，その後，どのように移動したかを3次元的に示している．図3より，噴流中心軸上の点ほどx方向に大きく移動し，x方向に凸

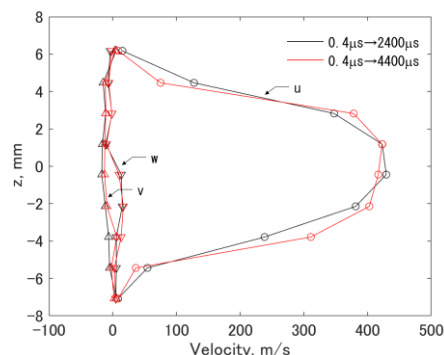


図4 速度3成分( $y = 0$  mm)

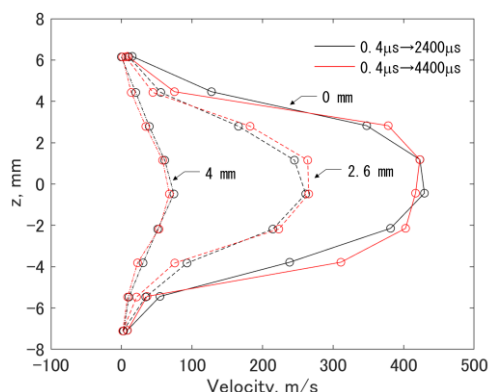


図5 速度成分u ( $y = 0, 4, 2.6$  mm)

の形状となっていることが分かる。

なお、図3の3次元座標は、以下のように求めた。まず、1時刻目の $0.4 \mu\text{s}$ に撮影したフィラメント画像から、発光輝度に基づきフィラメントの交点位置を特定する。その後、2時刻目と3時刻目の $2.4 \mu\text{s}$ と $4.4 \mu\text{s}$ に撮影した画像から、交点位置を特定する。ただし、この2時刻の交点位置の特定においては、1時刻目の画像の交点位置近傍の $128 \text{ pix} \times 128 \text{ pix}$ の領域を基準として、相互相関係数を算出することで特定する。この処理を2台のカメラの画像に対して行う。この処理により、対で求まる画像中のフィラメントの交点座標と、事前のカメラ校正に基づく射影カメラ行列を利用して、3次元座標を復元した。

図4に $y$ が $0$  mmにおける $z$ 軸に対する速度3成分の分布図を示す。時間間隔が $2 \mu\text{s}$ の場合と $4 \mu\text{s}$ の場合の2種類の速度分布を示す。いずれの速度分布においても、速度成分 $u$ が支配的である。 $z$ が $0$  mmの位置で最大となり、最大値は約 $400 \text{ m/s}$ である。 $yz$ 断面内の速度成分 $v, w$ は、 $u$ に対しては微小である。これらは、3次元復元時の誤差( $0.01 \text{ mm}$ )を考慮すると、有意量と言えない範囲と考える。

図5に $y$ が $0 \text{ mm}, 2.6 \text{ mm}, 4 \text{ mm}$ の位置における $z$ 軸に対する速度成分 $u$ の分布図を示す。 $y$ 方向についても、中心位置から離れるほど、速度が低下する様子を確

認できる。 $y$ が $2.6 \text{ mm}$ の位置では、最大値は約 $250 \text{ m/s}$ と低下し、 $y$ が $4 \text{ mm}$ の位置では、最大値は約 $50 \text{ m/s}$ まで低下している。

#### 4. まとめ

フェムト秒レーザ及び2台のカメラからなるステレオ撮像系を用い、噴流の速度分布計測を行った。噴流中に十字のフィラメントを形成し、2台のカメラで3時刻のFLEET画像対を取得した。ステレオ撮像系の校正係数を事前に校正ボードを撮影することで求め、三角測量法に基づき十字のフィラメントの交点の3次元座標を求めた。その3次元座標から得られる移動量と撮影時刻の間隔より速度3成分を算出した。本試験により、最大流速が測定位置において約 $400 \text{ m/s}$ の噴流の3次元速度分布を、光源と撮像系のみで定量的に得られることを示した。

#### 謝辞

本研究は、JSPS科研費 JP22H1406及びJP23K22677の助成を受けたものである。

#### 参考文献

- [1] Michael et al., "Femtosecond laser electronic excitation tagging for quantitative velocity imaging in air," *Applied Optics*, Vol. 50, No. 26, 2011.
- [2] Danehy et al., "FLEET velocimetry for aerodynamics," *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 54, 2022.
- [3] Yamaguchi et al., "Density measurement of supersonic airflow using decay characteristics of FLEET emission," *Experiments in Fluids*, 64, 2023.
- [4] Burns and Danehy, "Unseeded velocity measurement around a transonic airfoil using femtosecond laser tagging," *AIAA Journal*, Vol. 55, No. 12, 2017.
- [5] Danehy et al., "Three-component velocity and acceleration measurement using FLEET," AIAA paper, 2014-2228, 2014.
- [6] Richardson et al., "Tomographic FLEET with a wedge array for multi-point three-component velocimetry," *Optics Letters*, Vol. 49, Issue 4, pp. 846-849, 2024.
- [7] 小池ら, 「十字のフィラメンテーション発光によるFLEET速度計測」, 第55回流力/第41回ANSS, 1E05, 2023.
- [8] 小池ら, 「十字のフィラメンテーション発光による旋回噴流のFLEET計測」, 第52回可視化情報学会講演論文集, 30, 2024.