自発光画像法ならびに平面レーザー誘起蛍光法による

燃焼流の計測*

立 花 繁** Zimmer Laurent**

1. はじめに

地球温暖化 (CO_2) や大気汚染 (NO_x , SO_x , PM) のように、環境問題に燃焼プロセスが介在する例は、多数存在する。排ガス規制は年々厳しくなる一方であり、航空機エンジンや発電用ガスタービンエンジンにおいても、規制に対応するクリーンなエンジンの研究開発が進められている。そのような研究開発の過程において、近年では、光学的計測によって燃焼流の現象を解析する場面が増えてきている。例えば、低 NO_x ガスタービンエンジンの開発を目指して、希薄予混合燃焼器の研究が盛んに行われる中、この燃焼方式で問題となる振動燃焼の現象解明や振動抑制のために、火炎自発光計測や PLIF 計測が積極的に利用されている¹⁾³⁾。ロケットエンジン燃焼器においても、古くから振動燃焼が問題となっており、シャドウグラフ、OH* 自発光画像計測、OH-PLIF 計測などによる現象解析が行われるようになってきた⁴⁾⁵⁾。このように燃焼の安定化を目指して、火炎の動的挙動を解明するために、可視化計測が用いられる例が多数ある。また、基礎的な研究においても、多くの場面で、燃焼場の光学的計測が積極的に活用されている。例えば、乱流火炎において、乱れ渦と火炎とが、どのように相互干渉を起こしているのかについて、PIV 法や PLIF 法によって、詳細な計測と解析が行われている⁶⁾⁷⁾。このような研究は、火炎伝播速度（燃料消費速度）に対する乱流の効果明らかにすることにつながり、航空機エンジン燃焼器のような限られた空間内で完全燃焼が要求される場面に大きく役立つ可能性がある。

本解説では、メタン-空気予混合火炎を計測対象とし、光学的計測の主だったものとして、OH* 自発光画像計測と OH-PLIF 計測について紹介する。発光原理と計測システムについて説明した上で、両者の比較を視野に入れながら、計測結果の考察を行う。

2. 計測対象と実験条件

弱旋回バーナー (Low-Swirl Burner, 以下, LSB) によって形成される予混合浮き上がり火炎を計測の対象とした。LSB の構造を図 1 に示す。バーナーは、円管ノズル、スワロー、乱れ発生部という 3 つの構成要素からなっている。ノズル内径は 53mm、ノズル長は 90mm である。乱れはパンチングプレートによって発生させている。スワローでは、図 1(b) の断面図に示されるように、4 つの孔（直径 2mm）から、2 次空気を円管ノズル内面の接線方向に噴出させることによって旋回成分を与えている。燃料にはメタンを用いており、

(a) バーナー全体

(b) スワローの断面図

図 1 弱旋回バーナーの構造

*原稿受付 平成 18 年 2 月 21 日。

**宇宙航空研究開発機構 総合技術研究本部 航空エンジン技術開発センター (東京都調布市深大寺東町 7-44-1)。

スタティックミキサー（長さ 520mm）により、メイン空気と十分に混合された上で、バーナーへと流入する。

スワールにおける 2 次空気による噴流（旋回ジェット）の役割は、メイン混合気ジェットの周縁に旋回成分を与え、その遠心力によってノズル下流に拡大流（減衰流）を形成させることにある。一方、予混合火炎の重要な特性として火炎の伝播が挙げられる。火炎は、未燃混合気の減衰流とそれに対向する火炎伝播との間で、互いの速度が釣り合う位置に浮き上がって保持される。これが、LSB 浮き上がり火炎の保炎機構である。バーナー中心軸上では、平均流の旋回成分はゼロで、平均的火炎面は流入速度と直交する。従って、その領域では、良い近似で平面乱流予混合火炎が再現されていると言える。

LSB 火炎の特性を表す重要なパラメータとして、次式で与えられるスワール数 (S) がある⁸⁾。

$$S = \frac{\pi R^2 Q_j^2 \cos \alpha}{n \pi R_j^2 (Q_m + Q_j)^2} \quad (1)$$

ここで、 n は旋回ジェットの数、 α は旋回ジェットの傾き角、 R と R_j はそれぞれ円管ノズルと旋回ジェット孔の半径、 Q_m と Q_j はそれぞれメイン予混合気と旋回ジェットの流量をあらわしている。本研究で用いたバーナーでは、 $n=4$ 、 $\alpha=20^\circ$ 、 $R=26.5$ mm、 $R_j=1$ mm である。また、メイン混合気流量と当量比を、それぞれ、 $Q_m=662$ [NLM]、 $\phi=0.70$ で一定として、スワール数 (Q_j で決められる) をパラメータとした実験を行った。

3. OH* 火炎自発光計測

3. 1 OH* 自発光の原理と計測法 火炎自発光は、燃焼反応の過程で、電子的に励起されたラジカルが、エネルギー準位の低い状態へと遷移する際に放出される光子によるものである。メタン-空気の燃焼において、OH*（励起状態の OH）の生成に関与する主な反応は、次式と考えられている⁹⁾。

一方、水素-空気の燃焼においては、次の 2 つが主な反応と考えられている¹⁰⁾。

励起状態の OH ラジカルが基底状態に遷移する際に、2 つの過程が考えられる：

式(4a)が火炎自発光に相当するもので、式(4b)は分子衝突によるエネルギー失活をあらわしている。後者の衝突頻度が明確でないことが、自発光による定量的な計測を困難にしている一つの理由である。自発光計測のメリットは、火炎が自ら発する光の計測であるため、レーザーを必要とせず、受光装置さえあれば計測でき

るという簡便性にある。逆に、後述するレーザー計測と異なり、火炎領域全体が光源であると言え、カメラが捉える画像は、通常、奥行き方向に光を積分した情報となっている点に注意を要する。

ここで示す画像計測は、ICCD カメラ (PI-MAX: 1K from Princeton Instruments, Dynamic range 16 bits, 1024*1024 pixels), UV-Nikkor 105mm/f4.5 レンズ、及び、光学フィルターを用いて行った。OH* 自発光のバンドスペクトルの中心波長は 306-320nm の範囲にあることが知られている。そこで、Schott 社 UG-5 バンドパスフィルターと WG-305 ハイパスフィルターとを組み合わせ、この波長に対応する光学フィルターとして適用した。ICCD カメラのゲインと露光時間は、CCD 素子が飽和を起こさないように、実験条件によって適切な値を選んで用いた。例えば、当量比 0.70 の条件でゲインをある値に設定し、露光時間が 130msec であったとき、当量比 0.80 の条件では、同じゲインで露光時間は 60msec とした。また、ここで示す結果は全て 20 枚の画像の積算をとったものである。計測領域は 83*83mm²、解像度はビニングにより 512*512pixel² に設定した。4 つの画素をまとめ 1 ピクセルとするビニングにより、解像度は半減するが、ピクセルノイズの低減とサンプリングレートの向上を図ることができる。

3. 2 OH* 自発光強度分布とその解析 計測画像の一例を図 2 に示す。左図の x 軸は水平方向位置、 y 軸は流れ方向位置を示している。 $(x, y)=(0, 0)$ がノズル出口の中心位置である。図中に自発光強度の等高線分布をグレイスケール (0→1) で表している。図からわかるように火炎はノズルから浮き上がって保持されている。右図は、 x 軸の [-15mm: +15mm] 区間で平均された自発光強度の y 軸方向への分布を表している。この 1 次元分布から、傾きが正であり、かつ、輝度最大値の 50% を示す位置を、OH* 浮き上がり高さ (H_{OH^*}) とし定義する。

図 2 OH* 火炎自発光強度分布 (左図) と火炎浮き上がり高さ (H_{OH^*}) の定義 (右図)

3. 1節で述べたように、図2は受光面に対して奥行き方向に積分した情報をあらわしている。平均してみた火炎について軸対称（今の場合、 y 軸が対称軸）な分布を仮定すると、アーベル逆変換を適用することによって、奥行き方向に積分された情報を中心断面の2次元分布に還元することができる。アーベル逆変換は次式であらわされる。

$$f(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^{R_0} \frac{g'(x) dx}{\sqrt{x^2 - r^2}} \quad (5)$$

ここで、 $g(x)$ は元の分布、 $f(r)$ が変換後の分布をあらわしている。 x 及び r は、中心軸からの距離、 R_0 は x 方向への計測領域の最大値に対応している。また、 $g' = dg/dx$ である。

図2に対して、アーベル逆変換を施した結果を図3に示す。中心軸の左・右のどちらの領域を変換するかによって、アーベル逆変換分布は2種類計算することができる。左右で分布が僅かに異なるのは、元の分布が完全な軸対象となっていないことからきている。図3（右図）は、 x 軸の $[-15\text{mm}; 0\text{mm}]$ 区間で平均された自発光強度の y 軸方向への分布を表している。この1次元分布から、傾きが正であり、かつ、輝度最大値の50%を示す位置を、アーベル逆変換分布による火炎浮き上がり高さ（ H_{Abel} ）として定義する。

4. 平面レーザー誘起蛍光（PLIF）計測

4. 1 OH-PLIFの原理と計測法

平面レーザー誘起蛍光（Planar Laser Induced Fluorescence, 以下、PLIF）計測法では、特定波長のレーザーシートを火炎に照射することで、対象とする分子の電子的状態を励起し、励起状態から基底状態に遷移する際に発するフォトンを検出する手法である。分子の電子的励起状態の落差を利用する点では、自発光計測と共通

図3 アーベル逆変換分布（左図）と火炎浮き上がり高さ（ H_{Abel} ）の定義（右図）

しているが、計測したい領域のみを平面レーザーで能動的に励起する点が大きく異なる。PLIF法では、瞬時火炎構造の詳細を捉えることができ、乱流火炎のような複雑な火炎構造の解析に強力なツールとなっている。

ここでは、OH-PLIF計測について紹介する。本研究では、励起波長として、 $A^2\Sigma^+ - X^2\Pi$ 電子エネルギー遷移の(1,0)バンド吸収線を用いており、306-320nmの波長域のエミッションが得られる。計測システムの概要を図4に示した。レーザー光源は、Dyeレーザー（Spectron Laser System, model SL4000G, 色素：ローダンミン590）とNd:YAGレーザー（Spectron Laser System, model SL825G 400mJ）とで構成されている。Dyeレーザー光の波長は波長メータ（CLUSTER, Lambdameter LM-007）で常時モニターし、グレーディングと連動した波長制御ソフト（Dyescan）を用いて567.272nmに設定する。その後、KDP結晶を通して、2倍高調波（283.636nm）へと変換される。KDP通過後のパルスエネルギーは約10mJ/pulseである。受光光学系は、自発光計測に用いたのと同じである。自発光計測と異なるのは、ICCDカメラの計測タイミングをレーザーパルスと同期させていること、ゲートモードによって露光時間を10nsecに設定していることの2点である。計測領域は80*80mm²、解像度はビニングオプションによって、512*512pixel²に設定した。各実験条件について、1000枚のOH-PLIF画像を取得した。

4. 2 OH-PLIF強度分布とその解析

OH-PLIF計測によって取得した画像の例を図5（左）に示した。平均した自発光画像と異なり、火炎面（断面）の凹凸の詳細が捉えられていることがわかる。この生データの画像解析を行い、燃焼進行度変数の分布を求める。以下で解析プロセスについて説明する。まず、自発光との比較を考え、解析する領域を x 軸の $[-15\text{mm}; +15\text{mm}]$ に定める。この解析領域内で、輝度に

図4 OH-PLIF計測システム

対してある閾値を設けて画像を2値化する.すなわち, 閾値より下を未燃ガス (0), 閾値以上を既燃ガス (1) とする. 追加プロセスとして, LSB 流れの特性から, 火炎面より下流側 (画像において上側) を全て既燃ガスとしている. また, 2値化プロセスの前にノイズ除去の目的で $5 \times 5 \text{ pixel}^2$ のメディアンフィルターを施している. 2値化された画像を図 5 (右) に示した. 黒が未燃領域, 白が既燃領域に対応している.

2値化画像 1000 枚の平均を取ることで, 平均燃焼進行度変数 ($\langle c \rangle$) の分布が計算される. スワール数が 1.32 の場合の $\langle c \rangle$ の等高線分布を図 6 (左) に示した. $\langle c \rangle$ は既燃ガスの存在確率をあらわしており, $\langle c \rangle = 0$ は常に未燃ガス, $\langle c \rangle = 1$ は常に既燃ガスであることを示している. この実験条件では, ほぼ1次元的な分布をしている. 自発光画像の解析と同様に x 軸方向 $[-15\text{mm}:15\text{mm}]$ の範囲について積分し, y 軸に対する1次元分布を計算すると図 6 (右) のようになる. ここで, $\langle c \rangle$ の値によって, 2種類の高さ H_{c001} と H_{c050} を定義する. 前者が $\langle c \rangle = 0.01$, 後者が $\langle c \rangle = 0.50$ に対応する高さを示している.

図 5 OH-PLIF 画像 (左図) と 2 値化画像 (右図. 黒が未燃, 白が既燃領域.)

図 6 平均燃焼進行度変数の 2 次元分布 (左図) と火炎浮き上がり高さに対する 2 種類の定義 (H_{c001} と H_{c050})

5. 解析結果の考察

前節までに示してきた OH^* 自発光強度分布と OH-PLIF 強度分布の解析結果について考察する.

5. 1 火炎浮き上がり高さの比較 スワール数をパラメータとして変化させて行った実験の結果を図 7 に示す. 図中の 4 種類のシンボルは, 定義の異なる 4 つの浮き上がり高さ (H_{OH^*} , H_{Abel} , H_{c001} , H_{c050}) に対応している. 全てに共通な点として, スワール数の増加に伴い, 火炎浮き上がり高さが小さくなる傾向にあることがわかる. これは, スワール数増加によって, 軸方向速度の減衰率が大きくなり, 保炎位置 (流入速度と火炎伝播速度のバランス位置) が上流側にシフトするためである. 4 者の違いに着目すると, 全てのスワール数において, H_{c050} が最も大きく, H_{c001} が最も小さい値を示し, H_{OH^*} と H_{Abel} がその間に位置していることがわかる. H_{OH^*} と H_{Abel} の値はスワール数が小さいところでは, ほぼ同一であるのに対して, スワール数の増加に伴って, 差が大きくなっている. これは, 火炎の (全体的な) 形状の変化によるものと考えられるが, 浮き上がり高さは, x 方向に積分して求めたものであるため, 図 7 からその根拠を言うことはできない.

そこで, 火炎形状を議論するために, 平均火炎面の水平方向からの傾きを, 式 (6) で与えられる角度 β によって表現する. β は, 時計回りを正, 反時計回りを負として, $x=0$ と $x=-15\text{mm}$ の位置における浮き上がり高さの差から計算する. 計算には, OH^* 自発光, OH^* 自発光のアーベル逆変換, OH-PLIF による $\langle c \rangle = 0.50$ の 3 種類の定義を用いた.

$$\beta = \arctan \left(\frac{H_{x=0\text{mm}} - H_{x=-15\text{mm}}}{15} \right) \quad (6)$$

図 7 4 種類の定義による浮き上がり高さの比較

スワール数をパラメータとした実験結果において、 β の値をまとめたのが図 8 である。縦軸が角度 β 、横軸が浮き上がり高さ (H_{c050}) を示しており、図中の実線は PLIF (H_{c050}) から計算された β (○シンボル) の 3 次多項式によるフィットを表している。この図から 2 つ重要な傾向がわかる。1 つ目は、 β が浮き上がり高さに対して右上がりの傾向にあることである。これは、火炎浮き上がり高さの増加に伴って、火炎形状が、U 字→フラット→W 字と変化していくことに対応している (図 9 参照)。火炎形状は、吹き消えのような火炎安定性と密接な関係があるため、その変化を捉えることは重要な意味をもつ。2 つ目の傾向として、Abel 逆変換による β (H_{Abel}) の方が、変換前の自発光分布による β (H_{OH^*}) よりも PLIF 結果 (直線) に近い値を示していることがあげられる。この点が、単なる自発光強度分布に対するアーベル逆変換分布の有用性を示している。

5. 2 OH-PLIF による火炎面曲率の解析 前節までは、専ら平均的な火炎の特性について、自発光と PLIF との比較という観点から議論してきたが、本節では、PLIF の瞬時画像を利用した解析の例を示す。乱流予混合火炎面構造の特性として、火炎面の局所的な曲率の解析を行う。局所的な曲率の解析には様々な手法

図 8 火炎浮き上がり高さ (H_{c050}) に対する火炎傾き角度 (β)

図 9 OH-PLIF による火炎面 2 値画像。当量比=0.80。左からスワール数=1.81, 1.32, 1.05。

があるが、ここでは、Gashi et al.¹⁰⁾による手法：

$$h(\sigma) = \frac{\ddot{x}\ddot{y} - \dot{x}\dot{y}}{(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)^{3/2}} \quad (7)$$

を採用した。ここで、 h は曲率、 σ は火炎面に沿った座標、 x, y は火炎面位置、ドット ($\cdot$) は、 $\partial/\partial\sigma$ をあらわしている。

曲率についての解析例を図 10 に示す。1000 枚の瞬時画像それぞれについて、このような解析を行い、統計処理を行うことで火炎面曲率の確率密度分布関数 (PDF) を計算することができる。 x 軸について $[-3.2\text{mm}; +3.2\text{mm}]$ のコア領域のみを対象として計算した PDF を図 11 に示す。図には、 $S=1.14, 1.32, 1.51$ の 3 種類のスワール数条件について、結果が示されている。負の曲率 (未燃側に凸) の存在確率が正の曲率 (既燃側に凸) に比べて大きいという傾向が共通して見られる。また、スワール数の増加に伴って、わずかながら、分布の幅が広がっている様子が確認される。これらは、Gashi et al.¹¹⁾の結果と同一の傾向となっている。分布幅が広がるのは、スワールの増加に伴って、火炎が上流側にシフトすることによって、乱流強度が大きくなることがその原因と考えられる。

図 10 火炎面位置の決定と火炎面曲率の解析結果

図 11 火炎面曲率の確率密度分布関数

6. まとめ

本稿では、弱旋回バーナーによる予混合浮き上がり火炎を対象として、OH*自発光画像法とOH-PLIF法の原理と計測システムについて説明した上で、計測結果とその解析例を示した。自発光計測は計測手法が簡便であり、グローバルな火炎情報（例えば、火炎浮き上がり高さ）の把握に有用であることを示した。次に、火炎の平均的断面形状を知るためには、火炎形状に軸対称性を仮定できるならば、アーベル逆変換の適用によって、生データよりも精度の高い情報が得られることを明らかにした。さらに、詳細な瞬時の火炎構造の解析には、PLIF法が有用であることを局所曲率分布の解析を例にとって示した。

ここで紹介されなかった火炎自発光計測の応用例としては、自発光スペクトルのピーク比を利用した当量比計測への応用（例えば、文献2),12)）が挙げられる。繰り返し述べてきたように、計測法の簡便性という観点から注目されている方法であるが、検査体積の影響や背景光の影響などを受けやすい点に困難点がある。特定された燃焼器の特定された作動条件における利用は期待できるが、一般性を持った定量的な計測は難しいのが現状である。そのため、近年では、簡便性を維持しつつ、一般性を有する当量比計測法として、レーザー誘起プラズマ分光分析（LIPS）法が着目されている（例えば、文献13),14)）。

また、PLIF法のその他応用例についても、ここで簡単に紹介する。2ライン励起法による温度計測への適用については文献15)によって、化学種濃度の定量計測については文献16)によって詳細な報告がなされている。燃焼流で重要となる化学種のPLIFとしては、文献17)によるNOx-PLIF、文献18)によるCH₂O-PLIF、文献19)によるCH-PLIFなどが挙げられる。しかしながら、そのS/N比の高さや応用範囲の広さ（例えば、水素火炎ではCHやCH₂Oは存在しない）から、OH-PLIFは燃焼場のPLIF計測において、最も広く利用されていると言える。

参考文献

- 1) T. Lieuwen and V. Yang, (Edited) *Progress in Astronautics and Aeronautics*, 210, AIAA, Inc., pp.481-529 (2006)
- 2) L. Zimmer and S. Tachibana, *Proc. 5th Symp. on Smart Control of Turbulence*, 85-94 (2004)
- 3) L. Zimmer, S. Tachibana, M. Tanahashi, M. Shimura and T. Miyauchi, *Proc. 6th Symp. on Smart Control of Turbulence*, 163-172 (2005)
- 4) 田村洋, *ながれ* 24: 307-314 (2005) .
- 5) G. Singla, P. Scoufflaire, C. Rolon, S. Candel, *Combust. Flame* 144: 151-169 (2006)

- 6) I. G. Shepherd and R. K. Cheng, *Combust. Flame* 127: 2066-2075 (2001)
- 7) C. Kortschik, T. Plessing and N. Peters, *Combust. Flame* 136: 43-50 (2004)
- 8) M. R. Johnson, R. K. Cheng *Proc. of The 19th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems*, Hakone, Japan (2003).
- 9) G. P. Smith, J. Luque, C. Park, J.B. Jeffries, D. R. Crosley, *Combust. Flame* 131: 59-69 (2002).
- 10) G. Singla, P. Scoufflaire, C. Rolon, S. Candel, *Proc. Combust. Inst.* 30 (2005) 2921-2928.
- 11) S. Gashi, J. Hult, K. W. Jenkins, N. Chakraborty, S. Cant, C. F. Kaminski, *Proc. Combust. Inst.* 30: 809-817 (2005).
- 12) P. G. Aleiferis, Y. Hardalupas, A. M. K. P. Taylor, K. Ishii and Y. Urata, *Combust. Flame* 136:72-90 (2004)
- 13) F. Ferioli, S. G. Buckley, *Combust. Flame* 144: 435-447 (2006)
- 14) Zimmer Laurent, 立花繁, “レーザー誘起分光分析法による予混合管内のガスの成分と温度の局所計測”, 第43回燃焼シンポジウム (2005)
- 15) R. Giezendanner-Thoben, U. Meier, W. Meier, J. Heinze, M. Aigner, *Appl. Optics* 44:6565-6577 (2005).
- 16) C. Schulz, V. Sick, *Prog. Energy Combust. Sci.*, 31 75-121 (2005).
- 17) D. D. Thomsen, F. F. Kuligowski and N. M. Laurendeau, *Combust. Flame* 119:307-318 (1999)
- 18) B.O. Ayoola, R. Balachandran, J.H. Frank, E. Mastorakos and C.F. Kaminski, *Combust. Flame*, 144: 1-16 (2006)
- 19) J. M. Donbar, J. F. Driscoll, C. D. Carter, *Combust. Flame* 122: 1-19 (2000)

著者紹介

Zimmer Laurent

1973年生. 宇宙航空研究開発機構 総合技術研究本部 航空エンジン技術開発センター プロジェクト研究員. University of Brussels (Belgium) と University of Nancy (France)の Mechanical Engineering において Ph.D. 専門分野: 燃焼計測, レーザー着火, 乱流燃焼.

立花 繁

1972年生. 宇宙航空研究開発機構 総合技術研究本部 航空エンジン技術開発センター 研究員. 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了. 専門分野: 燃焼計測, 燃焼制御, 乱流理論.