



| | |
|------------------|---|
| Title | 火炎内の渦構造の特徴とその可視化法 |
| Author(s) | 近久, 武美; Chikahisa, Takemi; 菊田, 和重 他 |
| Citation | 北海道大學工學部研究報告, 158, 27-32 |
| Issue Date | 1992-01-31 |
| Doc URL | https://hdl.handle.net/2115/42305 |
| Type | departmental bulletin paper |
| File Information | 158_27-32.pdf |



火炎内の渦構造の特徴とその可視化法

近久武美 菊田和重 梅田 啓
金野 満 村山 正

(平成3年10月31日受理)

Visualization of Eddy Structure and its Characteristics in a Turbulent Jet Diffusion Flame

Takemi CHIKAHISA, Kazusige KIKUTA, Hiromu UMEDA,
Mitsuru KONNO and Tadashi MURAYAMA
(Received October 31, 1991)

Abstract

This paper explains the visualization method of eddy structure in a turbulent jet flame by using a pulse laser and an image intensifier. For understanding turbulent diffusion combustion, it is very important to know the characteristics of the mixing process and eddy structure. As it is rather difficult to visualize the eddy structure due to the luminous flame, the structure is usually estimated from local fluctuations in temperature or in velocity.

The study compares pictures of the eddy structure and measured eddy scales by conventional methods. The paper also shows the diffusion characteristics and instantaneous flame shape, which is quite different from the regular shape.

1. ま え が き

乱流拡散燃焼の詳細を明らかにする上で、乱流混合および渦構造の性質を知ることがきわめて重要である。しかし、輝炎の影響により火炎内の渦構造を可視化することは容易ではなく、これまでは局所的な温度変動や速度変動、あるいはシュリーレン写真などからその構造を類推するにとどまっていた。これに対し、強力なレーザーシート光と高速シャッターリングが可能なイメージインテンシファイアを用いることによって、火炎中の渦構造の可視化が可能となった¹⁻³⁾

本論では火炎中の渦構造の可視化法について述べるとともに、画像から得られた情報の一例を紹介する。

2. 渦構造の可視化法

図1は可視化のための光学装置を示したものである。本実験では出力135 mJ(7 nsec)のNd:YAG レーザの第2高調波(532 nm)を光源とし、シリンダリカルレンズでシート光を形成した。

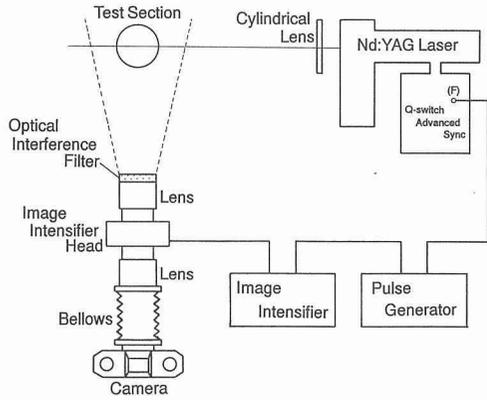


図1 レーザシート法撮影装置

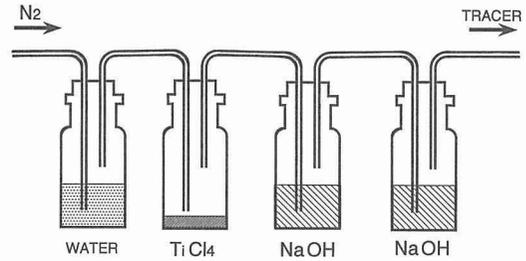


図2 トレーサ発生装置

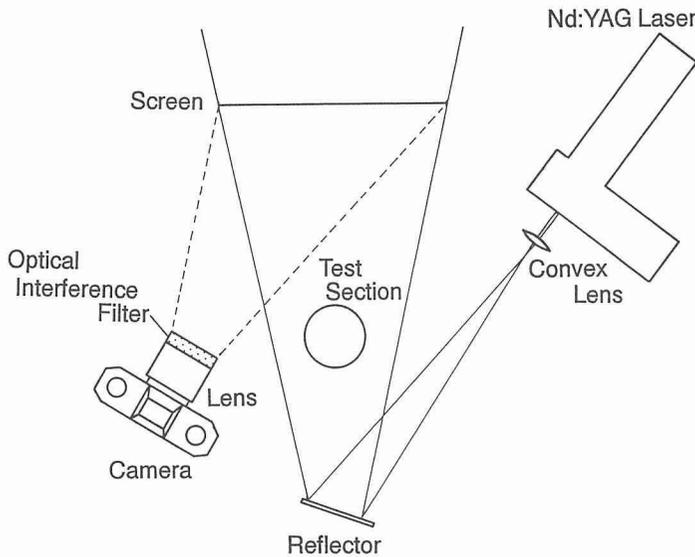


図3 広視野シャドウグラフ撮影装置

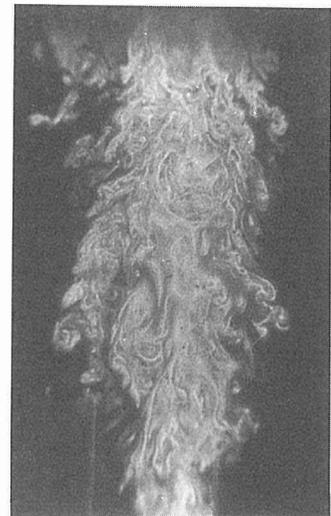


図4 画像例 (LPG火炎)

これを火炎に当て、火炎中に混入したトレーサ粒子の散乱光をスチールカメラにより撮影した。この際、輝炎の影響を除去するために、イメージンテンシファイアをカメラ前方に取り付けた。イメージンテンシファイアではレーザの発光時間に近いゲーティングが可能であり、本実験では1 μ sec 程度のゲーティングで輝炎の影響を十分に除去することができた。なお、アセチレン火炎では輝炎が強いために、さらにレーザ光の波長に相当するバンドパスフィルタを用いた。撮影はカメラのシャッタを開放とし、レーザを単発発光させた。

トレーサには図2に示す装置で発生させた酸化チタン粒子を用いた。四塩化チタンはわずかな水蒸気と反応して、微細な酸化チタン粒子を発生する。しかしこの際、同時に塩酸が発生するので、このまま用いると周辺の機器類を著しく腐食させてしまうことに注意しなければならない。本実験では図に示すように、水酸化ナトリウムの水溶液中でバブリングすることにより、塩酸を除去した。この場合、水酸化ナトリウム水溶液にトレーサ粒子も多くトラップされてしまうが、それでもなお十分な量のトレーサを発生することができた。トレーサはノズル出口部において周

囲から噴流中に混入させた。

一方、図3に示す方法で火炎全体のシャドウグラフの撮影も行った。通常、シャドウグラフの撮影には平行光を用いるが、その場合には視野が凹面鏡のサイズに規定されることになる。そこで、強力なレーザー光を利用し、一点から発する光を火炎に当てスクリーン上に写る映像をカメラで撮影することによって、広い視野のシャドウグラフ撮影を可能にすることができた。

3. 可視化画像から得られる情報の一例

3.1 火炎内の渦構造の特徴

図4はLPG火炎内の渦構造の可視化写真の一例である。図にみられるように、火炎内には大小様々な渦が明確に存在しており、その大きさは下流に行くほど増大していることがわかる。また、その形状は図5に示すシュリーレン写真像と大幅に異なっており、一断面の瞬間的な渦は随分大きく、かつ噴流の境界もかなり波うっていることがわかる。

一方、図6は火炎全体のシャドウグラフであるが、レーザーの単発発光による写真であるにもかかわらず、図5のシュリーレン写真と同様に乱れ模様は微細であり、また噴流境界も直線的であって、図4と大きく異なっている。このことから、噴流火炎内には比較的大きな渦がランダムに存在しているが、厚さ方向に積分された映像では大きな渦の情報が消えてしまうことがわかる。

3.2 渦スケールとの対応

レーザーシート法によって可視化された火炎内の渦がどういったスケールの渦に対応しているかを知ることは興味深い。そこで火炎内に線径25ミクロンの白金-ロジウム熱電対を挿入し、その変動信号とレーザーによる可視化画像との対比を試みた。図7はその際の写真の一例であり、図中のほぼ中央にある2つの小さな光った点が熱電対のプローブである。一方、図8はそれに対応した熱電対の変動信号ならびにその自己相関関数であり、レーザーの発光は変動波形図の中央で行われている。

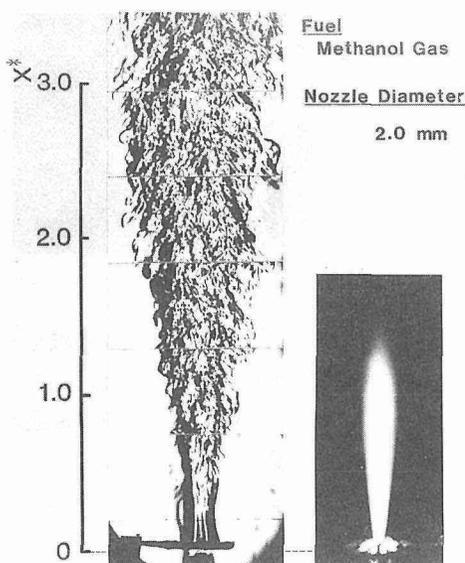


図5 メタノール火炎のシュリーレン写真
(シャッター速度 1/1000 秒)

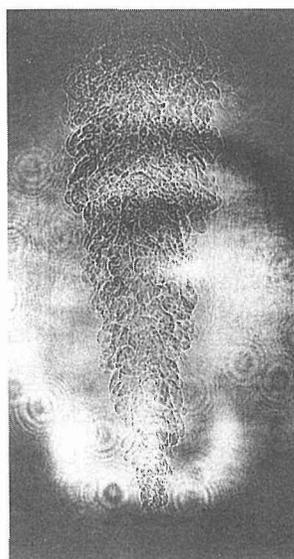


図6 LPG火炎のシャドウグラフ
(発光時間: 7 nsec)



図7 LPG火炎内の構造
($Re=18600$)

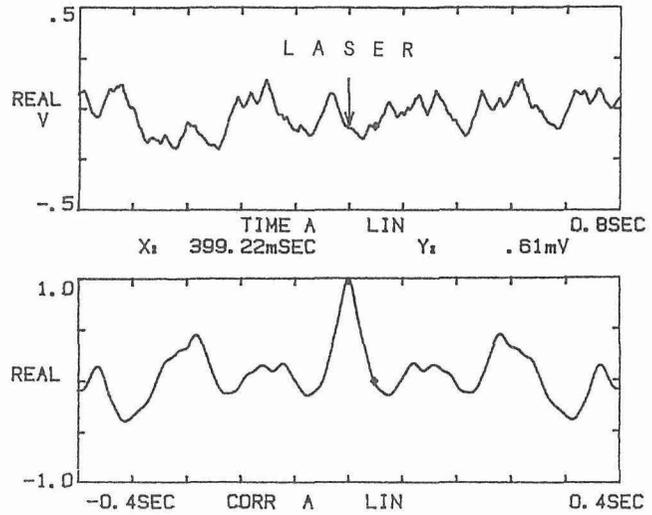


図8 熱電対の出力波形と自己相関関数
(図7に対応)



図9 拡大渦写真 (LPG)

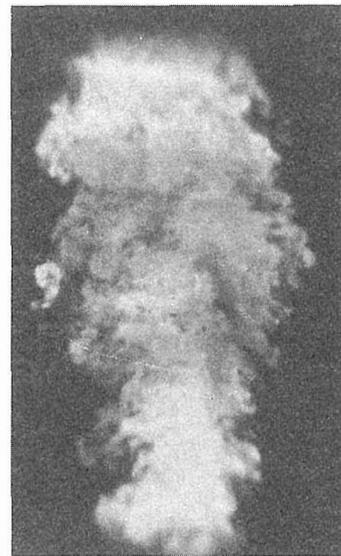


図10 窒素ガス噴流の渦写真 ($Re=10300$)

この変動の自己相関関数が最初にゼロとなる時間間隔を近似的な積分時間スケールと置くと、積分時間スケールは 38 msec、自己相関関数の第 1 ピークの周期は 98 msec であった。

一方、このプローブ位置における流速を、熱線流速計により計測した窒素ガス噴流の流速から密度変化を考慮しながら推定したところ、図 7 におけるプローブ位置の平均流速は約 0.5 m/sec であった。これらから、プローブ位置における渦の積分スケールは約 20 mm、渦の間隔は約 50 mm と推定された。

これに対して、図 7 において見られる明確な渦は約 20 mm 程度の大きさであり、またその間隔も概ね 50 mm 程度となっており、上述のスケールとよく対応していることがわかる。したがって

本方法によって可視化される明確な渦は概ね積分スケールと対応していると言うことができる。

一方、図9はカメラを近付けてこのような渦を拡大撮影したものであるが、20 mm程度の渦の中にさらに小さな渦が階層的に存在していることが観察される。その最小渦は約3 mm程度となっており、これはテイラーのマイクロスケールに相当している可能性が推察された。ただしこの点については、今後詳細な検討が必要である。

3.3 混合拡散，すす生成，および燃焼領域の観察

火炎の無い噴流と噴流火炎とでは、ともに類似したシュリーレン像が得られるが³⁾ それらのレーザーシート画像はかなり異なっていることが観察された。図10は窒素ガス噴流のレーザーシート画像であるが、図7における噴流火炎のものに比べて、トレーサの拡散が強く、渦構造が明確ではない。したがって、火炎の存在は小さなスケールの混合を制御していると推察される。これは良く言われるように、高温化にともなう小さな渦スケールの層流化現象によるものと考えられる⁴⁾。ただし、これが噴流中への空気導入に強く影響を及ぼすか否かはこのことのみから判断することは難しく、今後詳細な検討を行うことが必要である。なお、図10における噴流の積分スケールを熱線流速計を用いて測定したところ約25 mmと推察され、これは噴流境界にみられる凹凸の塊とはほぼ同じスケールであることが確認された。

一方、図11はアセチレンに窒素を混合した燃料を用い、火炎中のすすをトレーサとして可視化した写真である。図7と比べて渦分布が同程度であることに加え、トレーサとしてのすす粒子の拡散が進んでおらず、さらに次に示す瞬間火炎写真の形状から判断して、すすは図7に見られたそれぞれの渦の境界で生成されていることが推察された。ただし、図11に示されているすすの大部分は生成中のものではなく流れに沿って運ばれたものであるため、その両側に燃料と空気がどこでも同様に存在していると考えべきではないことに注意するべきである。図12と図13は火炎形状の外観をスチールカメラで直接撮影したものと（シャッタ速度60分の1秒）、イメージインテンシファイアを通して100 μsec で撮影したものをそれぞれ示している。ただし、両者の大き

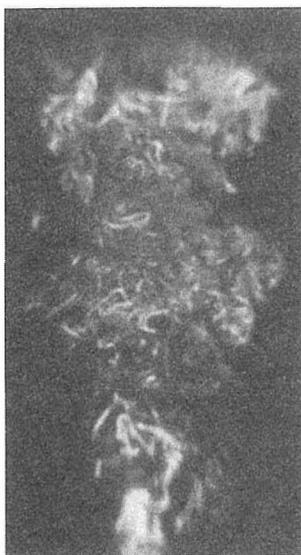


図11 すすの可視化写真
(アセチレン+N₂)

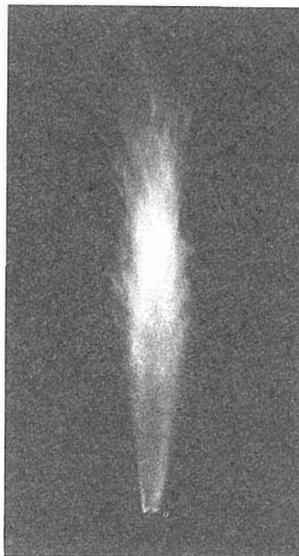


図12 輝炎 (1/60 秒)
(LPG火炎)



図13 輝炎 (100 μsec)
(LPG火炎)

さは異なったカメラで撮影したために、対応していない。この二つの図を比較すると、図13の輝炎は通常目視で観察される様子と大きく異なっており、瞬間的には輝炎は空間のごく一部にしか存在していないことがわかる。このことから、噴流火炎では連続した火炎帯が空間に定常的に広がっているのではなく、反応可能な状態に達した部分からばらばらと高速で燃焼していることが推察される。なお、図13にはすすが生成されていると思われる輝度の高いしわ状の部分もあわせて観察されている。

4. ま と め

以上、本論ではレーザーシート法による火炎内の渦構造の可視化法と、画像から得られる情報の一例を紹介した。得られた画像の解釈については、まだ推論によるところが多く、異論も多いと思われるが、この点については今後さらに検討を加えたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 池上：「すす生成および火炎不均一性」，文部省科研費重点領域研究成果報告書，(1990)，p 175
- 2) 神本：「噴霧の分裂機構と燃焼」，同上，p 71
- 3) 近久，金野，菊田，村山：「燃料性状に対する噴流拡散火炎構造の相似性に関する研究」，第28回燃焼シンポ，(1990)，p 158
- 4) 小沼：「拡散燃焼場に対する乱流および燃焼モデル」，文部省科研費重点領域研究成果報告書，(1990)，p 31