

高速度ビデオカメラによる乱流拡散火炎の解明

近藤 成史・矢野 利明・鳥居 修一
(受理 平成6年5月31日)

An Experimental Study on Turbulent Diffusion Flames by High Speed Video Camera

Seiji KONDOU, Toshiaki YANO, and Shuichi TORII

This experimental study was conducted to observe and record the dynamic behavior of methane jet diffusion flames from a vertical circular nozzle. An image processing method combined with a high speed video camera was employed to analyze the turbulent structure of the flame. Emphasis was placed on the streamwise variations of R, G and B values, which correspond to the color level of the flame. Each value of R, G and B was increased along the flame axis. In particular, it was observed the R value affected by turbulence, as a substantial variation of R value was observable with an increase in the Reynolds number. On the contrary, the effects of Reynolds number and flame location on the B value were insignificant. Based on the color variations of the flame, it was, thus, possible to detect the turbulent flame structure.

1. 緒 論

乱流拡散火炎は層流火炎に比べて単位時間、単位体積当たりの燃焼量が大きい。また、それは予混合火炎に多くみられる逆火といった現象もなく、燃焼制御が容易で、火炎が安定しているという特徴を持つ。したがって、この火炎は実用の燃焼器などに幅広く用いられている。しかしながら、乱流火炎は層流火炎に比べてその構造が非常に複雑であるので、多くの研究が行われているにも拘らず、その詳細な特性は十分明らかにされていない。特に、乱れが強い場合、乱れの長さスケールが反応帯厚みに比べて小さくなることが予想される。このときの火炎内部構造は乱流火炎の解明に重要であるものの、この領域の知見は十分とは言い難い。さらに、乱流場における燃焼現象は極めて複雑な複合現象（燃料と酸化剤の物質移動現象、多成分の化学反応、発生した熱の移動現象）であり、それが高温域で急激に生じるので、これに応えられる測定技術が必要であるが、この開発の遅れが乱流火炎の解明の難しさを一層助長している。

最近では、CCDカメラや高速度ビデオカメラなどが開発され、これらの映像機器による火炎画像によって火炎構造を明らかにしようという試みがなされている¹⁾。本研究は、メタンの乱流拡散火炎を高速度ビデオカメラを用いて2つのレイノルズ数領域で撮影し、RGB値を統計処理して、火炎の内部構造の解明を行う。

2. 実験装置および解析方法

Fig. 1は実験装置の概略を示す。オリフィス・マノメータで調整された燃料はノズルから静止空気中へ噴出され、乱流拡散火炎が作られる。その火炎像は高

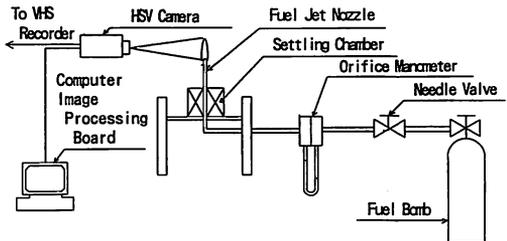


Fig. 1 Experimental apparatus.

速度ビデオカメラ（ナック製 HSV-500）によって撮影され、その画像はパーソナルコンピュータに内蔵されたイメージプロセッシングボードに取り込まれる。これを画像処理して得られたRGB値は、火炎中心軸上の $x/d=20\sim 230$ の間で測定され、それぞれの値の時間的变化と rms 値の変化が求められる。ただし、 x はノズル出口からの距離で、 d はノズル径である。

本実験では、メタンが燃料として使用され、ノズルは内径2.40mm、肉厚0.18mmのものを用いた。撮影条件として高速度ビデオカメラのシャッタースピードを1/5000に設定し、撮影コマ数は1秒間に500コマとした。実験は噴流レイノルズ数が $Re=1500$ と 2500 の場合について行った。

3. 実験結果と考察

3.1 時間の変化に対するRGB値の変化

火炎の色は、R値（赤色）、G値（緑色）、B値（青色）に分けられる。以下では、それぞれの色を検討することによって火炎の内部構造を探る。

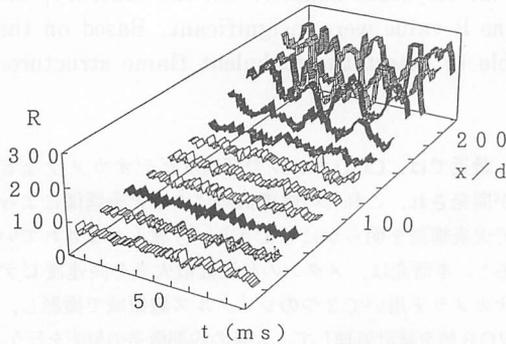


Fig. 2 Time variation of instantaneous R component along the flame axis.

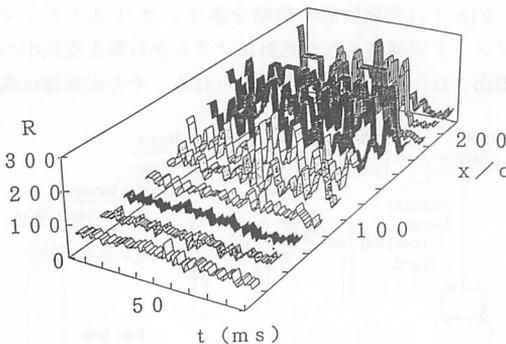


Fig. 3 Time variation of instantaneous R component along the flame axis.

$Re=1500$ と 2500 の火炎について、ノズル軸上の x/d における R 値を時間 t に対しプロットしたものをそれぞれ Fig. 2, Fig. 3 に示す。 $Re=1500$ と $Re=2500$ の火炎の先端位置はそれぞれ $x/d=230$, $x/d=190$ に対応する。 $Re=1500$ の場合、 x/d の値が増すにつれて、すなわちノズル出口から離れるにつれて R 値の変化は大きくなり、周期的な変動が $x/d=150$ と 170 で見られる。R 値の時間変化は $Re=1500$ に比べて $Re=2500$ の場合に顕著になっている。特に、R 値は $x/d=100$ 以上で激しく変化し、変動の周期が短くなっていることが観察される。このことから、火炎の乱れがレイノルズ数の増加によって影響されていることが窺える。

Figs. 4, 5 は、Figs. 2, 3 と同じやり方で G 値について纏めたものであり、 $Re=1500$ と 2500 の結果をそれぞれ示している。R 値と同様に、G 値も x/d の増加とともに大きくなり、かなり下流域では R 値ほどではないものの変動が現れている。また、両レイノルズ数において周期的な変動が $x/d=170$ で見られる。 $Re=1500$

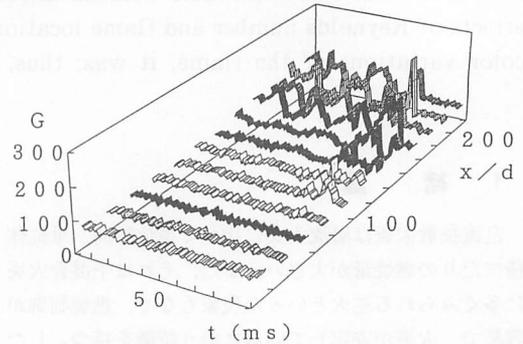


Fig. 4 Time variation of instantaneous G component along the flame axis.

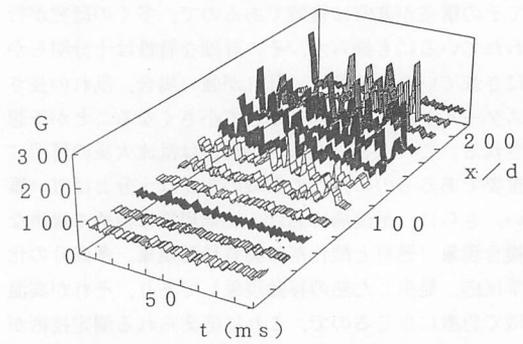


Fig. 5 Time variation of instantaneous G component along the flame axis.

の場合、G値は $x/d=170$ 以上で大きく変化し、一方この傾向は $Re=2500$ では $x/d=120$ で現れている。この挙動は高レイノルズ数で顕著になることが分かる。さらに下流域では、高レイノルズ数の場合のG値に大きな変化は見られないが、これはレイノルズ数の増加に伴って火炎が短くなったことによると考えられる。

先と同様の方法で得られたB値の結果を $Re=1500$ と 2500 についてそれぞれ Fig. 6, Fig. 7 に示す。両レイノルズ数のB値は下流域においてもかなり低いことが分かる。このことは、B値が乱れの変化を受けにくいためであるか、光学的な問題であるかに関しては現段階では判断し兼ねる。

以上の結果から、時間変化に対する色の各成分の変動は x/d が大きくなるにつれて助長されている。ただし、この傾向はB値では小さい。また、単位時間当たりの各成分の変動はレイノルズ数の増加にともなって大きくなっていくことが分かる。このRGB値の変化は、レイノルズ数の増加によって乱れが促進されたためであると考えられる。

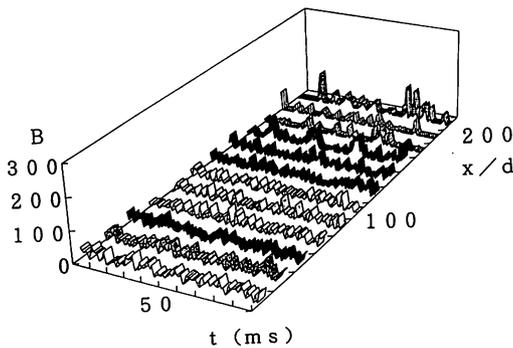


Fig. 6 Time variation of instantaneous B component along the flame axis.

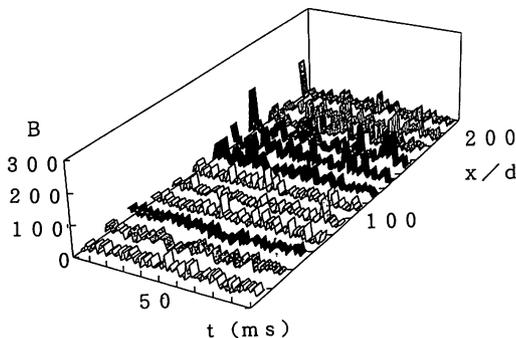


Fig. 7 Time variation of instantaneous B component along the flame axis.

3. 2 rms値の変化

前章では、火炎のRGB値の時間変動が下流方向へどのように変化しているかを観察した。しかしながら、その各々について定量的な変動量を把握することはできない。そこで以下では、RGB値のrms値について検討する。

Fig. 8は、R値のrms値の軸方向変化を2つのレイノルズ数について比較したものである。 $Re=1500$ の場合、rms値は x/d の値が130までほとんど一定値を示し、さらに下流域では単調に増加している。 $Re=2500$ の場合も同様に、rms値は軸方向に増加し、 $x/d=190$ で最大値を示し、その後減少していることが観察される。ただし、 $Re=2500$ の場合の火炎先端位

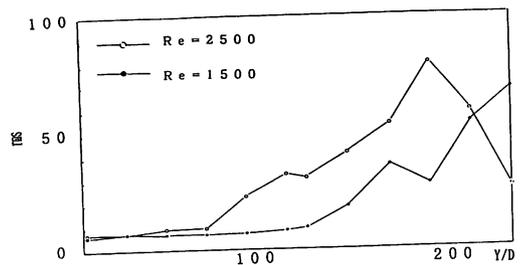


Fig. 8 Variation of rms value along the flame axis.

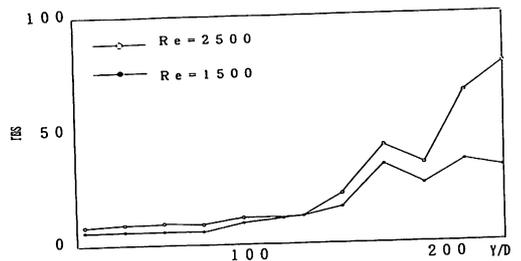


Fig. 9 Variation of rms value along the flame axis.

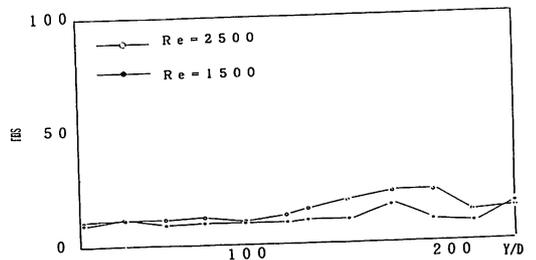


Fig. 10 Variation of rms value along the flame axis.

置は、先に触れたように $x/d=190$ であり、これ以上では火炎は存在しない。したがって、R 値の変動成分は高レイノルズ数の場合においても下流に向けて単調に増加すると思われる。この R 値の増加傾向は高レイノルズ数の場合には早い段階から見られる。一般に、乱流強度は乱流領域でもレイノルズ数が増すにつれて増加する。したがって、断定はしかねるが、この変化が2つのレイノルズ数での R 値の違いとして現れたのではないかと考えられる。

Fig. 9 は、先と同じように G 値の rms 値の軸方向変化を示している。G 値は火炎軸に沿って増加し、レイノルズ数による違いはほとんど現れていない。また、G 値は全領域において R 値に比べて低い値を示している。

Fig. 10 は先と同じ方法で B 値の結果を纏めたものである。B 値の rms 値は小さく、全領域にわたってほとんど変化しない。したがって、B 値は他の値に比べてレイノルズ数の変化による乱れの影響を受けにくいことが分かる。

4. 結 論

乱流拡散火炎を高速度ビデオカメラで撮影し、画像処理によって求めた RGB 値を統計的に処理して、火炎の内部構造を検討した結果、有用な知見が得られたので以下に纏める。

1. RGB 値は火炎軸に沿って大きくなる傾向が見られる。特に、R 値の変動はレイノルズ数の増加にともなって著しく、他の値に比べて乱れに大きく影響される。一方、B 値のそれは、レイノルズ数の違いや火炎位置に対してほとんど変化せず、乱れの影響も受けにくい。
2. 高速度ビデオカメラを用いて RGB 値を測定することによって火炎構造の解析は可能であることが分かった。

参考文献

- 1) 大竹・他 3 名, 機論, 57-535, B (1991), 357.
- 2) 黒崎・他 6 名, 川崎重工技報, 90 (1985), 20-31.
- 3) 井田・他 1 名, 機論, 56-531, B (1990), 3514.