

乱流拡散火炎の乱れ構造の解明

則武 雅人・矢野 利明・鳥居 修一

(受理 平成7年5月31日)

Analysis of the Structure in Turbulent Jet Diffusion Flames

Masato NORITAKE, Toshiaki YANO and Shuichi TORII

The present work was performed to elucidate the mechanism of turbulent jet diffusion flames from a circular nozzle by using a high speed video camera. The visible images present an instantaneous display of the turbulent flames. This paper gives information on the turbulence of jet diffusion flames, analyzed from the flame shape which was recorded every 2 milliseconds.

An image processing method was employed to visualize the flames shape. In order to obtain the external length and area of flame, a binary image was made from the gray scaled images.

A quasi-periodic fluctuation appears in the external length of the flame, and in the area of flame, based upon examination of 300 sequential frames of binary images, in the case of Reynolds number 500. Resulting from an increase in the Reynolds number, the periodic fluctuation gradually disappears, and a high frequency component appears. Its amplitude becomes high. There is a similarity between the external length and area of the flame.

Analyzing the binary image of a flame can reveal the physical characteristics of turbulent diffusion flame behavior.

1. 緒 論

乱流拡散火炎は層流拡散火炎よりも燃焼負荷を大きくすることができ、しかも乱流予混合火炎よりも扱い易い。乱流拡散火炎は、各種の工業用燃焼装置などに広く利用され、工業的にも馴染み深い火炎である。乱流拡散火炎をより安全に使いこなすためには、その構造や吹き消えの仕組みを解明し、燃焼制御や火炎の安定性などを向上させる必要がある。しかし、乱流拡散火炎の燃焼の速さは、乱流が故に著しく増大し、その燃焼過程も極めて複雑なものとなっている。そのため、乱流拡散火炎の本質的な解明は非常に難しく、多くの研究がなされているにもかかわらず、その構造は未だ不明な点が多い。

最近の著しい技術革新の中に撮影機器や画像処理装置の発達がある。それらの機器は気象分野や医療技術

分野など様々な方面で活用されており、燃焼工学の分野においても火炎の構造を解明するためにそれらの機器を用いた研究⁽¹⁾が行われてきている。画像処理を用いる利点としては、非接触で燃焼現象を計測するため、その現象を妨げずに解析することができる。また燃焼現象を映像として録画することにより、任意の時間の瞬間的な現象を捉えることができる。これらの利点は火炎の構造を解析する上で非常に有効的な方法である。

本研究では、燃料噴流のレイノルズ数を変化させて、プロパンの乱流拡散火炎の現象を高速ビデオカメラで撮影した。得られた火炎画像を濃淡輝度により画像処理し、2値化された火炎画像の時間変化などから乱流拡散火炎の乱れ構造の解明を試みた。

2. 実験装置

Fig. 1に実験装置の概略を示す。燃料にはプロパンを使用し、ニードルバルブで流量を調整し、オリフィス、マノメータで流量を測定しノズルから噴出される。周囲空気は整流格子により十分に整流されており、静止空气中へ垂直上方噴出の噴流拡散火炎を作る。噴出ノズルから約1 m離れた位置に高速度ビデオカメラ

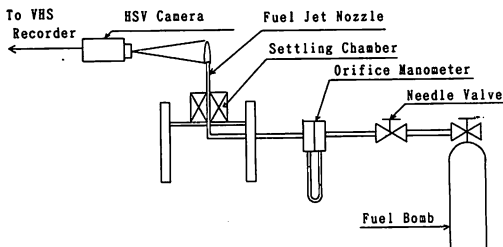


Fig. 1 Experimental equipment

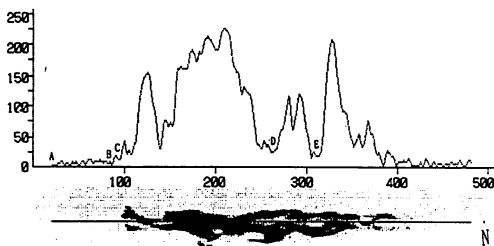


Fig. 2 Luminance value on the centerline of nozzle and light and shade flame image

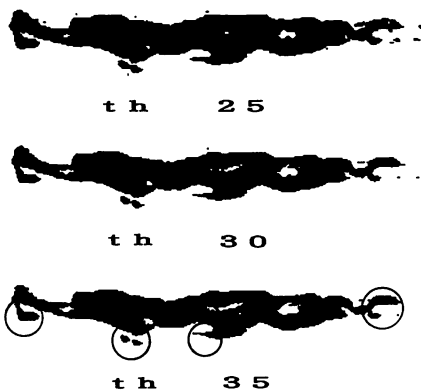


Fig. 3 Binary images versus threshold

(NAC社製 HSV-500)を設置した。また、整流格子は直径4 mm、長さ220 mmのストロー(約4000本)を用いた。

3. 2値化火炎画像のしきい値の設定

本研究において、火炎形状を決定するための火炎画像の2値化処理のためのしきい値 th の設定は重要なポイントとなる。本研究では、P-タイル法、モード法いずれも適応でなかった。そこで本研究では以下に示す方法でしきい値の設定を行った。

Fig. 2は画像処理装置によって映し出された火炎映像とその火炎のノズル中心軸上の輝度値を示したものである。画像処理装置の画面の大きさは火炎の流れ方向に対して512の画素を有している。ノズルの半径方向に対しては480である。図のx軸は流れ方向の画素数を示す。ノズル出口は $x=491$ の位置にあり、図中Nで示す。火炎は $x=491$ から0に向かって噴出している。

ノズル中心軸上の輝度値を見ると、AからBまでは輝度値は10程度となっており、背景の輝度だと思われる。しかし、下の火炎画像を見るとCあたりが火炎の先端だと思われ、その輝度値は20前後となっている。DやEの付近を見ると、火炎画像からはかなり背景に近いように見えるが、輝度値を見ると25から30の輝度

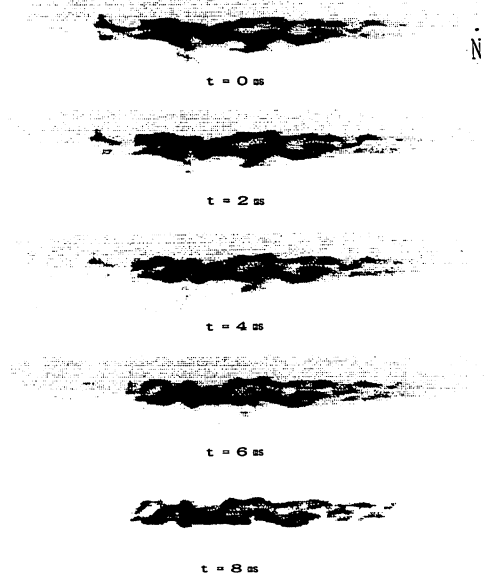


Fig. 4 Sequential flame images

となっている。背景と火炎の境界では火炎輝度の影響を受け、背景の輝度値が30前後まで高くなる。

Fig. 3 はしきい値 $th=25, 30, 35$ の2値化火炎画像を示したものである。この図から $th=25$ では火炎の周囲に背景の輝度が点々と残っている。火炎画像と $th=30$ および 35 の2値化画像を比較すると、しきい値 35 では図中○で示すように削られている部分がある。以上のことから、本研究ではしきい値 th を30と設定した。

4. 実験結果および考察

4.1 連続火炎画像

Fig. 4 はレイノルズ数 $Re=1500$ の火炎画像の2ms毎の映像を示した。この図の1コマを見ると火炎表面の乱れの模様がはっきり見える。また時間変化を見ることにより、上流から下流への乱れの模様の移り変わりがよく観察できる。特に、図中の左側部分にみられる火炎先端の形状が変化していく様子がよくわかる。

4.2 連続2値化火炎画像

Fig. 5 はFig. 4 をしきい値30で2値化処理した火炎画像である。2値化画像では $t=0\sim6\text{ms}$ の火炎先端部分の分裂と衰退が先の連続火炎画像より一層明確

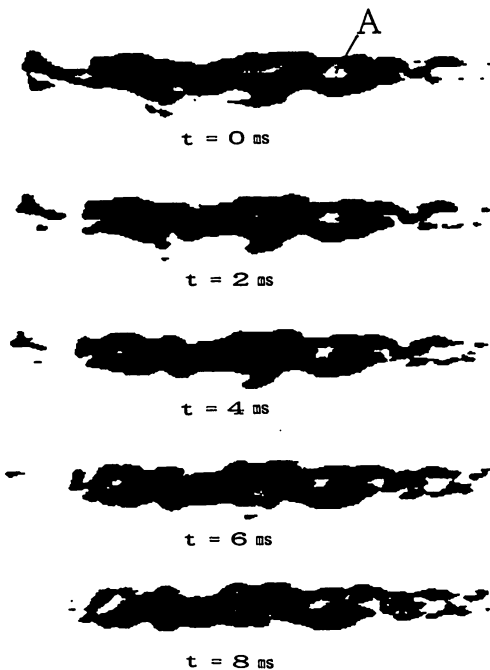


Fig. 5 Sequential binary images of flame

に示されている。またこの火炎先端の形状の変化は2ms毎に輝度値が30以上の領域が減少していることを表している。また、 $t=0\text{ms}$ のA点で示すように火炎中に存在する火炎輝度が30以下の空孔が下流側に大きさを変えながら移動している。Fig. 5 ではFig. 4 より火炎表面の微細な乱れの模様は見られないが、火炎形状を、すなわち火炎面積や周囲長さを計測するには2値化火炎画像が適切であることを示している。また、時間変化に対する火炎形状の変化も明確にしている。

4.3 ノズル中心軸上の輝度値の時間変化

Fig. 6 は $Re=1500$ の火炎のノズル中心軸上の輝度値の時間変化であり、輝度変化のパターンには相似性が見られ、輝度値のピークが上流から下流に向かって

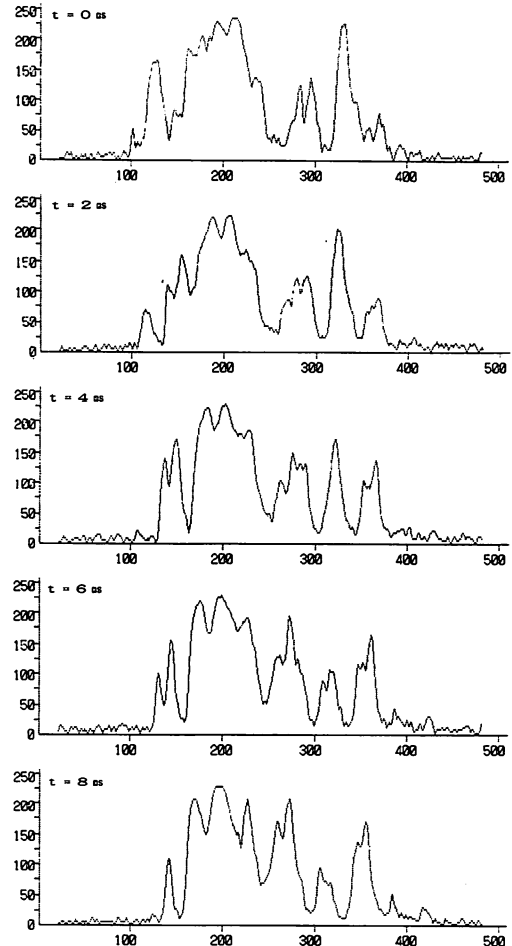


Fig. 6 Time variation of luminance value on the centerline of nozzle

全体的に変化していくのがわかる。 $x=491$ のノズル出口から430付近では不輝炎となっているため、白黒の濃淡画像の輝度から火炎と背景の輝度を区別することは難しい。420付近から380付近では、中心軸の輝度値は少し背景より高くなっている。380付近から250付近では輝度は上昇しながら下流へ流れている。このあたりは最も変動する部分の一つである。また、250付近から180付近では、高い輝度を保持したままで上流から下流へ移動している。180付近から火炎先端では、輝度は急激に下降する傾向にある。これらの結果から輝度の変化は乱流拡散火炎の乱れの影響を表していると思われる。よって輝度の変化と火炎画像などを比較することにより乱流拡散火炎の乱れ構造を解明する手がかりになると思われる。

4. 4 しきい値を変化させた2値化火炎画像

Fig. 7はしきい値を変化させた2値化火炎画像で

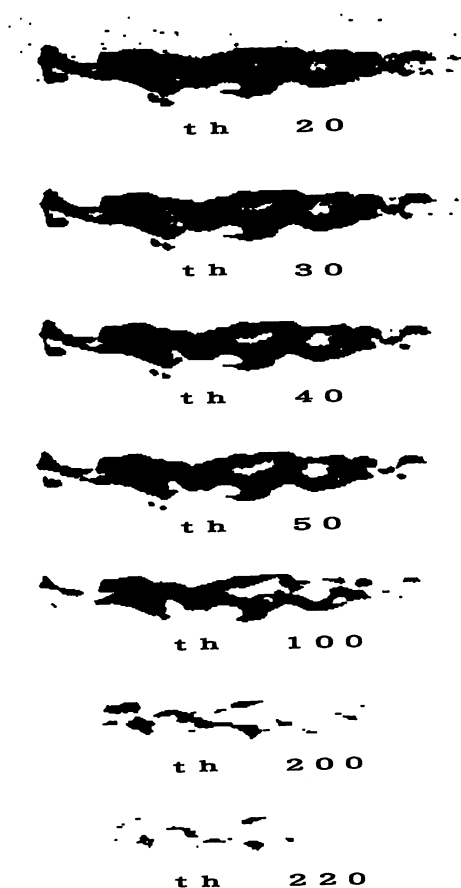


Fig. 7 Binary images versus threshold

ある。採用した火炎はFig. 4の $t=0\text{ms}$ の火炎である。その火炎を7種類のしきい値で2値化した。しきい値を上げていくにつれて2値化火炎は小さくなっていく。このことから火炎の輝度は段階的になっていると言える。また、 $th=220$ の2値化火炎からこの火炎には高い輝度が点在していることがわかる。このようなことからしきい値を変化させることにより、火炎中の輝度値分布の割合を知ることができる。

4. 5 しきい値と火炎面積の関係

Fig. 8は撮影された任意の火炎について $Re=500, 1000, 1500$ の火炎のしきい値 th を変化させた時の火炎面積 A の変化である。

なお、 $Re=500, 1000, 1500$ いずれにおいても火炎面積と火炎周囲長さは時間とともに変動し、採用する火炎によってそれらの値は大きく変わってくる。

図から $th=5\sim 30$ あたりまでは火炎面積の減少する傾きが大きい、 $th=30$ あたりから150あたりまでは1次関数的に減少する。 $th=150$ あたりからはレイノルズ数が上がるにつれて減少する傾きが大きくなる。この結果からレイノルズ数が大きいほど150以上の輝度を持つ火炎面積の変化が大きく、火炎中に存在する高輝度の変動、すなわち、燃焼の変動が激しいことを示している。

4. 6 しきい値の変化による周囲長さ

Fig. 9は火炎周囲長さ L をとったものである。 $th=150$ あたりまでは減少する傾きは $Re=500, 1000$ において変わらないが、 $Re=1500$ においては、ばらつきがある。いずれのレイノルズ数においても、 $th=150$ あたりから減少する傾きが大きくなる。

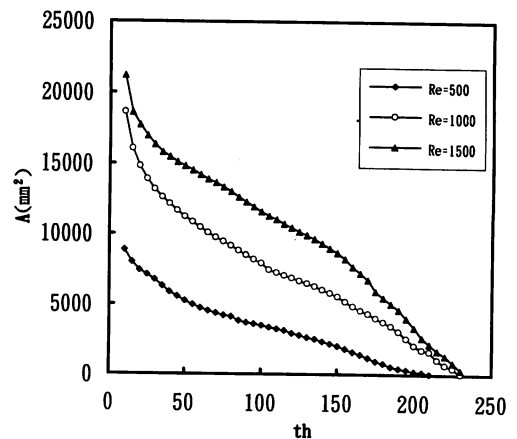


Fig. 8 Threshold versus area

$Re=500$ で $th=50$ と130, $Re=1000$ では $th=70$ と180付近, $Re=1500$ では $th=150$ 近くの2カ所で, 周囲長さが増加する。これはしきい値を変化させることによって, Fig. 8に示すように, 火炎が切断され渦や縞の模様が形成され, それが周囲長さの増加となって表れているためである。レイノルズ数が大きくなるにつれ, その周囲長さの変化が生じる輝度は高くなる。

Fig. 8, Fig. 9からレイノルズ数500, 1000, 1500において火炎面積はレイノルズ数に関係するが, 火炎周囲長さはあまり影響されない。またどちらの図においても $th=150$ あたりにおいて大きな変化がある。

4. 7 火炎面積の時間変化

Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12は $Re=500, 1000, 1500$ の火炎について, しきい値30で2値化した火炎面積 A の2ms毎の時間変化を示したものである。 $Re=500$ では周期的な変動が顕著に表れている。その理由として $Re=500$ の拡散火炎においては, 火炎面がしわ状となり, 層流火炎の性質が残っているためと思われる。また, 変動の振幅は 2500mm^2 程度で 7000mm^2 あたりを中心として振動している。しかし, $Re=1000, 1500$ においては周期的な変動はほとんど見られない。 Re が大きくなるにつれて2ms毎の変動幅は大きくなり, 全体的な変動も著しくなる。また平均的な火炎面積も大きくなっている。

4. 8 火炎周囲長さの時間変化

Fig. 13, Fig. 14, Fig. 15は $Re=500, 1000, 1500$ の火炎について, 火炎周囲長さ L の時間変化を示したものである。 $Re=500$ では周期的な変動がかなり顕著に表れている。しかし, $Re=1000, 1500$ と大きくな

るにつれて, その特性は失われる傾向にある。これは火炎面積の場合と同様に $Re=500$ の拡散火炎において, 層流火炎の性質が残っているためである。また,

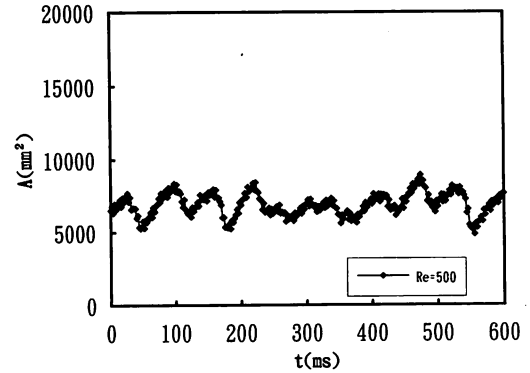


Fig. 10 Time plots of instantaneous area, $Re=500$

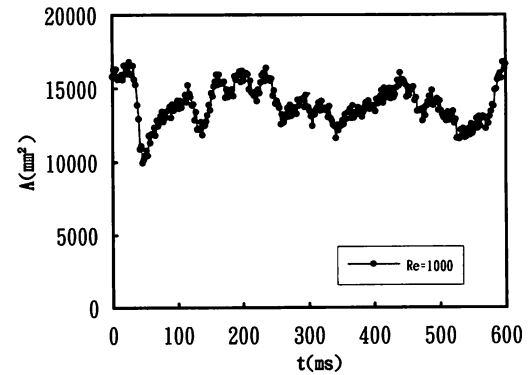


Fig. 11 Time plots of instantaneous area, $Re=1000$

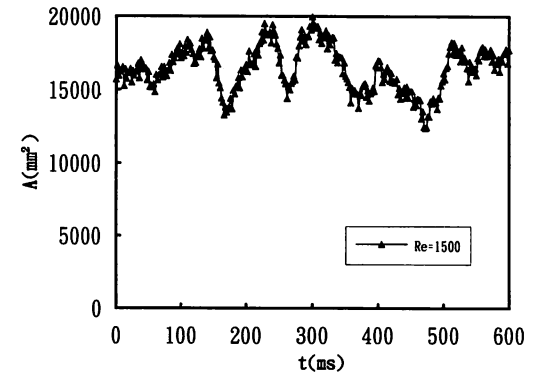


Fig. 12 Time plots of instantaneous area, $Re=1500$

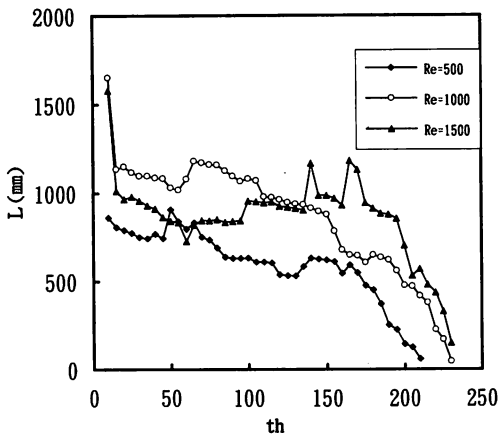


Fig. 9 Threshold versus external length

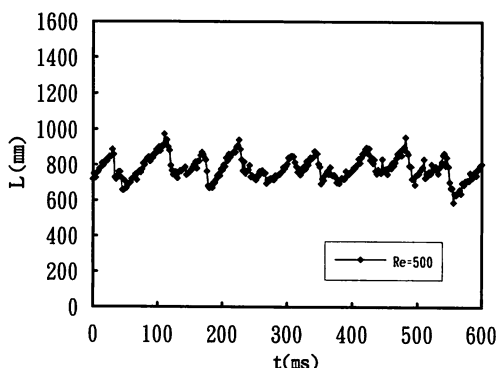


Fig. 13 Time plots of instantaneous external length, $Re=500$

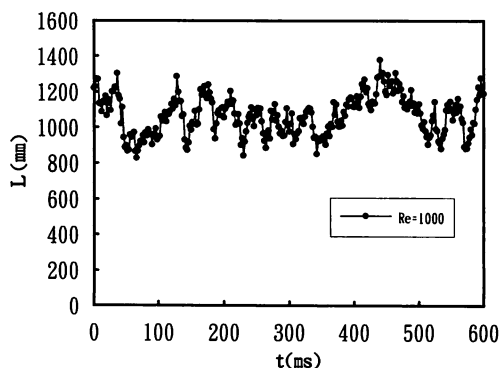


Fig. 14 Time plots of instantaneous external length, $Re=1000$

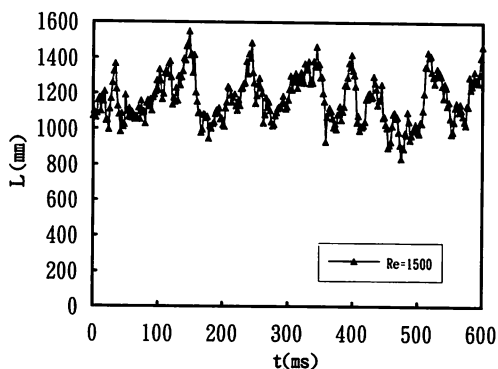


Fig. 15 Time plots of instantaneous external length, $Re=1500$

$Re=500$ における周囲長さの変動の振幅はほぼ400mmであり、 $L=800$ mmを中心に振動している。 $Re=500$, 1000, 1500と大きくなるにつれて2ms毎の変動幅が大きくなる。また、周囲長さの振幅の変動も著しくなる。また、周期が短くなり、平均の周囲長さも長くなっている。このようなことから輝度で2値化した火炎を解析することによって、火炎形状が持つ特性をとらえることができる。

$Re=500$ においては火炎周囲長さ、火炎面積どちらにおいても低周波の周期性が表れている。 $Re=1000$, 1500になると火炎周囲長さでは周期性が残っていると思われるが、火炎面積ではその特徴を見出すことはできない。いずれのレイノルズ数においても火炎周囲長さと火炎面積の時間変化における変動は相似性があり、その相似性はレイノルズ数が大きくなるにつれて崩れてくる。また、2ms毎の変動は火炎周囲長さより火炎面積の方が大きくなる。

5. 結 論

本研究では乱流拡散火炎を高速度ビデオカメラで撮影し、その火炎の瞬間的画像を画像処理により濃淡輝度の時間変化および輝度による2値化火炎画像の変化などから乱流拡散火炎の乱れの解析を行った。その結果次のようなことが明らかとなった。

1. ノズル中心軸上の輝度値のピークは時間の経過とともに上流から下流へ移動する。
2. 2値化火炎の火炎周囲長さとは火炎面積の時間変化における変動は相似性がある。
3. レイノルズ数が増加するにつれて2値化火炎の周囲長さと面積の平均値は大きくなる。
4. レイノルズ数の増加に伴い周囲長さの変動の振幅は大きくなり、低周波の周期性は崩れ、高周波成分が現れてくる。
5. 輝度で2値化した火炎画像を解析することにより、乱流拡散火炎挙動の特徴を捉えることが可能である。

参考文献

- 1) 大竹ほか3名, 高速TV画像とレイリー散乱による乱流拡散火炎の研究, 機論(B) 57, (1991) 535.