A202 時系列噴流拡散火炎画像の輝度変動の可視化

槌野文博[○] (鹿児島大学院), 飯野直子, 鳥居修一, 矢野利明 (鹿児島大学)

Visualization of Timewise Luminosity Fluctuation of Jet Diffusion Flames

Fumihiro Tsuchino, Naoko Iino, Shuichi Torii, Toshiaki Yano

ABSTRACT

Free jet diffusion flame photographs were taken by high-speed video camera. Propane was used as fuel. Flame images are digitized into 24-bit full color images by using commercial software. The digital color image is decomposed into 8-bit images of the Red, Green and Blue components and moreover each component is converted into decimal ASCII data by means of our program. In this study, the Red component luminosity fluctuation is investigated for five different fuel exit velocities. The ASCII data of 3000 frames are stored into Microsoft Excel and the time-averaged value and fluctuation intensity of luminosity are calculated by our program based on the Visual Basic Applications Edition (VBA) in Excel. These results are recomposed into 8-bit BMP images and visualized as the density slicing pseudo color images.

Keywords: Image processing, Propane flame, Intensity of luminosity fluctuation

1. 結論

近年のパーソナルコンピュータの性能向上は非常にめざましく、処理可能なデータ量は格段に増加し、その処理能力は飛躍的に向上した。さらに、最近ではパーソナルコンピュータや周辺機器の価格の低下によって画像処理や演算が手軽に行えるようになり、アプリケーションソフトも充実してきたため、解析結果の可視化も簡単になった。また、MicrosoftのVisual BASICを用いて、比較的容易に画像を処理するオリジナルプログラムが作成できるプログラミング環境も整っている。

こうしたコンピュータ環境の発達を背景に、我々はこれまでに数百から数千コマの時系列プロパン噴流拡散火炎画像を画像処理、演算することで、火炎の長さや周囲長さなどといった火炎形状の時間挙動解析¹⁾や輝度や形状の時間変動による乱れの特性を検討する試み^{2,3)}などを行ってきた。乱流拡散火炎は高負荷燃焼が可能で、伝播性がないため逆火の心配がなく安全に取り扱うことができる。このため多くの工業用燃焼装置で広く利用されているが、燃焼、特に乱流拡散燃焼は現象が複雑なため完全な現象把握はできておらず、レーザを用いた乱れ渦の可視化⁴⁾や、最新の計測技術を駆使した温度や速度、濃度変動などの測定による火炎構造の解明⁵⁾、これらの変動成分を統計処理した結果から乱流火炎の乱れ特性を把握しようとする研究⁶⁾などが行われている。

本研究では火炎の輝度情報に注目した。火炎画像の輝度値は燃焼状態や反応プロセスなどの燃焼現象の一般情報を総括的に含んでいる。火炎色そのものを扱った研究には、ごみ焼却プラント用自動燃焼制御装置に対してカラー画像のRedとBlueの成分比から火炎温度を推定する方法を組み込んだ例⁷⁾や、CIE(国際照明委員会)のXYZ表色系色度座標で火炎

色を定量化して、プロパン-空気予混合火炎の火炎色と空気比、ラジカル発光との関係性を評価したもの⁸⁾などがある。ここでは、著者らが開発したプログラムを用いて高速度ビデオカメラにより撮影されたプロパン噴流拡散火炎をRed, Green, Blueに色分解し、それをテキストデータに変換した。これらのデータを表計算ソフトのプログラム環境を利用して、3000コマ分のRed輝度値から輝度の時間平均と乱れ強さを算出し、Windows標準のBMP画像として可視化した。ここでは、これらの方法論および、噴流のレイノルズ数を5段階に変化させた乱流拡散火炎の燃焼挙動との対応について述べる。

2. 実験装置および画像処理

実験装置をFig.1に示す。燃料のプロパンを静止空気中に噴出して拡散火炎を形成した。流量はニードルバルブで調節し、オリフィス・マノメータで測定した。噴流レイノルズ数 Re は500, 1000, 1500, 2000, 2500の5段階に変化させた。使用したステンレススチールチューブのストレートノズルは、内径が2.40mm、肉厚が0.18mmである。火炎は一秒間に500コマ撮影可能なカラー高速度ビデオカメラ(ナック, HSV-500)を用いて直接撮影され、S-VHSテープに録画された。

Fig.2は画像処理の手順を示す流れ線図である。録画されたカラー火炎画像は、市販の画像処理装置(三谷商事, WinROOF)で24ビットのデジタル画像(640×480Pixels, ただし、撮影領域は640×200Pixels)に変換される。これらの静止画は我々が開発したプログラム(Image Data Base Management: IDM)によって各々8ビットのRed, Green, Blueの成分画像に分解される。これらの各成分画像は、市販の動画編集ソフト(Adobe Premiere)により動画編集された。

Fig.1 A schematic of experimental apparatus

Fig.2 Image processing system

これにより、画質の劣化を招くことなく、パソコンのみでくり返し火炎の時系列挙動の観察が可能となった。色分解後の8ビットデータは、IDMによって10進のテキスト化処理され、表計算ソフトExcelのシート上での行と列が、画像のX、Y座標に対応する形式でデータベースに保存される。

3. 輝度変動の解析方法

静止画と動画を検討した結果、 Re によって火炎基部の浮き上がり高さや火炎終端の吹き飛び位置、火炎周囲長さや幅が異なることがわかった。各 Re について3000コマ(6000ms)の 640×200 Pixels 全画素を計算することは、パソコンの性能上困難であったので、今回は Table1 に示す領域を計算対象とした。Fig.3 に示すように、ノズル先端は画像の下端に位置する。ノズル半径方向を x 、中心軸方向を y として、ノズル中心を原点(0, 0)で表わす。単位はPixelである。なお、1Pixelは1.66mmに対応する。

Red 輝度値の時間変動の解析手順を Fig.4 に示す。表計算ソフトMicrosoft ExcelのVBA(Visual Basic Applications Edition)環境を利用して、Table1 に示す領域内の各画素の輝度平均 $\bar{C}$ を式(1)、変動の強さ σ を式(2)で算出した。式(3)で輝度の変動の相対強さ σ_s を求める。変動の強さを輝度平均で割って規格化し、0~255の256階調を持つ8ビット画像へ変換するために100をかけた。次に、Excelのシート上

の全画素についての計算結果を10進のテキストデータから8ビットの濃淡画像へ変換し、Windows標準のBMPファイルとして保存する。これをENVI(Better Solutions Consulting Limited Liability Company)でシュードカラー表示し、可視化した。

Table1	Analysis areas	(Pixels)
Re	x	y
500	-30~30	10~350
1000	-30~30	10~350
1500	-30~30	10~350
2000	-40~40	10~350
2500	-50~50	10~350

Fig.3 Flame shape and the coordinate frame ($Re=500$)

Fig.4 Analysis of flame luminosity fluctuation

$$\bar{C} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m C_i \dots \dots \dots (1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \{C_i - \bar{C}\}^2}{m}} \dots \dots \dots (2)$$

$$\sigma_s = \frac{\sigma}{\bar{C}} \times 100 \dots \dots \dots (3)$$

4. 結果と考察

4.1 直接写真および Red 成分画像について

本研究では直接撮影のカラー火炎画像を解析に使用した。燃料にプロパンを使用したため、火炎色は黄赤色を呈している。これはすすからの連続スペクトルが主に表れていると考えられる。輝度値は3次元火炎の全光路の積分値であるため、火炎表面の情報を提供するものではない。しかし、撮影された二次元画像の火炎周囲ではその影響はほとんどない。また、火炎やすすが存在する領域は高輝度で、未燃領域や周囲空気を取り込み渦領域では低輝度を示すことから、これらの輝度値の変分は総括的な物理的、化学的な燃焼の性質を示していると考えられる。

噴流レイノルズ数 $Re = 500, 1000, 1500, 2000, 2500$ の代表的な Red 成分画像を Fig.5 に示す。ノズルの位置は画像下部の黒色直線で示す。Red 成分は、Green や Blue 成分に比べて輝度値が高く、背景ノイズとの差が大きいため、閾値処理を施さなくても火炎形状が比較的是っきりしている。特に $Re=2500$ は燃焼状態が不安定で火炎の輝度が低いため、Red 以外の画像では背景との識別が難しい。そこで今回は Red 輝度値を用いて輝度の変動強さについて検討した。

4.2 各 Re での燃焼挙動

Fig.5 および動画の観察から、各 Re での噴流拡散火炎の特徴を簡単にまとめる。Fig.5(a)の $Re=500$ は遷移炎である。火炎の先端がゆらぎはじめているが、火炎中流までは層流炎で一定形状を保っている。 $Re=1000$ 以上の Fig.(b)~(e)は乱流炎である。ノズル径が小さいため、すでに浮き上がり火炎に移行しているが、Fig.5(b), (c)に示す $Re=1000, 1500$ での燃焼状態は安定しており、火炎全体の輝度が高い。 $Re=2000$ (Fig.5(d))になると燃焼状態は不安定になりはじめる。周囲空気を取り込み渦によって火炎の上流での火炎幅は広がり、下流部が分離してさらに下流へと流されて行く吹き飛びの周期が明瞭になる。Fig.5(e)の $Re=2500$ では吹き消え間近の流速のため、燃焼状態はさらに不安定で火炎全体の輝度がかなり低下している。常に高輝度を保つ領域はなくなり、

Fig.5 Red component flame images

中流付近で形成された塊状の火炎が下流へ流されつつ、周期的に次の火炎塊が中流付近で発生するという挙動をくり返している。

4.3 輝度平均および輝度の乱れ強さ

各 Re の Red 成分画像の輝度値について、3000 コマ (6000ms)の輝度平均 $\bar{C}$ (式(1))を計算した結果を Fig.6(a)に示す。Fig.3 に示すように、画像下端がノズル出口の位置である。直接写真の平均輝度を求めているので、光路長がもっとも長いノズル中心軸上に輝度平均の最高値が表れている。この結果は火炎の存在確率を表わしているものと考えられる。ノズル先端から火炎終端までを火炎長さとして定義すると、一般に言われているように、完全に乱流火炎に移行した後は燃料流量を増しても火炎の長さはほとんど変化しないことが輝度平均画像からも示された。また、各 Re 毎の平均的な浮き上がり高さや基部幅も明らかとなった。静止画や動画で観察されていた通り、 Re の増加に伴って浮き上がり高さが大きくなり、火炎基部幅が広がっていることが確かめられた。

Fig.6(b)は変動の強さを輝度の平均値で割ることで規格化した、輝度の変動強さ σ_c の疑似カラー表示画像である。輝度の変動強さについて Re による違いは小さい。各火炎の右側が輝度変動の大きな値を示しているが、これは噴流が完全な軸対称を保持できなかったためと考えられる。Fig.6(b)を Fig.6(a)および Fig.5 と照らし合わせて考察すると、火炎が常に存在する領域では変動が小さく、周囲空気を取り込み渦や、火炎下流部のゆらぎや吹き飛びが起こる領域では乱れている状態が表れていると言える。これは井田ら⁹⁾が定義する火炎構造の領域Ⅱ(燃料流と火炎が共存)、Ⅲ(火炎領域と周囲空気流が複雑に混合)にあたるだろう。また、火炎長さと同様に、火炎が半径方向に広がり得る幅も Re の増加に関わらずほぼ一定である。ここで我々は、Fig.6(a)と(b)から火炎の領域を以下のように定義する。常に高輝度が保たれているため輝度の変動がほとんどなく、Fig.6(b)で黒く表示される領域を領域 A、領域 A の外側に位置し、平均輝度値 31 以上の領域を領域 B、領域 B のさらに外側で、もはや平均輝度値は背景値と同程度のレベルであるが、時々火炎が存在し、輝度の変動強さが 51 以上の領域を領域 C とする。 $Re=500 \sim 1500$ について、領域 A は Fig.6(b)で各ノズル中心軸を中心として、 $Re=500$ では幅(xw)=14、高さ(yh)=212、 $Re=1000$ のときはxw=20、yh=265、 $Re=2500$ はxw=22、yh=298である。領域 A の幅は輝度平均値が 170 以上、高さは 140 以上の部分にあたる。領域 A には常に火炎が存在し、燃焼状態は安定していると考えられる。一方、 $Re=2000$ になると火炎全体の輝度の低下とともに、火炎の浮き上がり高さの変動が大きくなっていると考えられる。領域 A は減少し、ノズル中心軸上にも領域 B が表われている。さらに、 $Re=2500$ になると、動画の観察から予測された通り、常に火炎が保持される領域 A はなくなり、燃焼がかなり不安定になっていることが示された。このように、直接撮影の火炎画像から求めた輝度の変動強さは火炎の燃焼状態を理解するために利用することが可能である。これは実用の燃焼器における燃焼状

態のモニタリングに適用できる。

る指標となり得ることが示唆された。

5. 結論

プロパン噴流拡散火炎を、噴流レイノルズ数を5段階に変化させて、高速度ビデオカメラで撮影した。各 Re の火炎について 3000 コマの画像処理、演算および動画編集を行い、火炎の輝度平均と輝度の変動強さを求めた。その結果を BMP 画像に変換して、疑似カラー処理した画像を作成した。輝度変動を火炎の総括的な乱れ状態を表わす一種のパラメータとみなし、疑似カラー画像と火炎の挙動とを対比して考察した結果、以下の知見が得られた。

1. 輝度平均画像を用いて、ある Re の火炎についての平均的な火炎長さや火炎基部幅などの火炎形状や、浮き上がり高さといった値を得ることができる。
2. 輝度の変動強さは Re の変化にはあまり影響を受けないが、火炎外周の周囲空気の取り込み渦や火炎下流部のゆらぎや吹き飛びといった、火炎の乱れを良く表わす。
3. ノズル出口近傍の輝度の乱れ強さは、燃焼状態を判断す

参考文献

- 1) S. Torii and T. Yano, J. Flow Visualization & Image Processing, 15(1998), 81.
- 2) 槌野・他3名, 第36回燃焼シンポジウム講演論文集(1998), 76.
- 3) S. Torii・他2名, Proc. 5th ASME-JISME Thermal Eng. Conf. (1999), AJTE99-6329.
- 4) N.Iino・他3名, Proc. The 2nd Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (1999), PF069.
- 5) 塩路・他3名, 機論(B), 57, 544(1992), 4016.
- 6) 井田・大竹, 機論(B), 56, 531(1990), 3514.
- 7) 井田・大竹, 機論(B), 61, 582(1995), 744.
- 8) 黒崎・他6名, 川崎重工技報, 90(1985), 20.
- 9) 伊藤・他3名, 機論(B), 56, 531(1990), 3508.