214 高圧乱流予混合火炎のレーザートモグラフィーによる 可視化とフラクタル解析

東北大院 田村 崇^{*} 神戸製鋼 中島鉄平
東北大流体研 小林秀昭 東北大流体研 新岡 嵩

Visualization and Fractal Analysis of High Pressure Turbulent Premixed Flame using Laser Tomography.

Takashi TAMURA^{*}, Teppei NAKASHIMA^{**},
Hideaki KOBAYASHI^{***} and Takashi NIIOKA^{***}

Visualization of flame front shape of high pressure turbulent premixed flame by using laser tomography was made for the purpose of exploring the influence of the turbulence intensity and ambient pressure on the turbulent flame structure. The high pressure combustion chamber was used, where the continuous combustion was possible. In order to quantify the complexity of the flame front shape, the fractal analysis was made. As a result, the fractal dimension increased with increasing the turbulence intensity and ambient pressure, and it was saturated to about 2.15.

1. 緒言

高圧乱流予混合燃焼は、乱れによる燃焼速度の増加と、雰囲気圧力の上昇に伴う質量流束の増加という二つの効果が相乗的にはたらき、単位時間、単位面積当たりに発生するエネルギーを増加させることができる。従って、高負荷燃焼器の多くは、この高圧乱流燃焼を利用したものとなっている。しかし、大気圧下での乱流予混合火炎の研究は数多く行われているが、実験の困難性や現象の複雑さなどから、高圧下における研究は、あまり行われておらず、雰囲気圧力がおよぼす乱流燃焼速度や火炎構造への影響に関する情報は非常に少ない。

本研究では雰囲気圧力を一定に保ったまま、長時間計測を可能にするため、圧力制御された高圧容器内にメタン-空気乱流予混合火炎を安定化させ、レーザートモグラフィーによる可視化を行った。また、雰囲気圧力および乱れ強さの変化がおよぼす火炎面形状の変化をフラクタル解析を用いて定量化することを試みた。

2. 実験装置および方法

2-1. 実験装置

^{*} Graduate Student, Tohoku University. ^{**} Kobe Steel Co. Ltd.

^{***} Institute of Fluid Science, Tohoku University.

実験装置の概要を図1に、ノズルバーナの
 詳細を図2に示す。内径149mm、高さ1100mm
 の高压容器内に、ノズル出口径が20mmの予
 混合ノズルバーナを設置した。ノズル出口
 から40mm上流に、開口比が約50%で、径が
 $\phi 1\text{mm}$ 、 $\phi 2\text{mm}$ 、 $\phi 3\text{mm}$ 、 $\phi 4\text{mm}$ の孔を均一に
 あけた多孔板を取り付け、それによって乱
 れを発生させた。乱流火炎の安定化と、遠
 隔操作による点火を容易にするために、ノ
 ズル出口と同心円状に取り付けた水素拡散
 火炎のパイロットバーナを用いた。また、
 #200のステンレスメッシュをノズル出口か
 ら0.5mm中心軸方向に突き出すように取り
 付け、火炎安定性を向上させた。高压容器
 内の圧力制御は、圧力センサーの値を用い
 て、排気バルブ開度をフィードバック制御
 することにより行った。

2-2. 実験方法

高压容器内を一定の圧力 $P(0.1, 0.25, 0.5,$
 $1.0\text{MPa})$ に保ち、当量比0.9のメタン-空気
 乱流予混合火炎を安定化させる。未燃混合
 気中に粒径約 $1\mu\text{m}$ の SiO_2 微粒子を混入し、厚
 さ約0.3mm、出力4Wのアルゴン・イオンレー
 ザのシート光を照射する。可視化された火
 炎断面像を干渉フィルター付きのCCDカメラ
 (シャッタースピード $1/10000\text{sec}$)または、
 イメージインテンシファイアを取り付けた
 高速度ビデオで撮影した。また、各種乱流
 特性値の計測は熱線風速計を用いた。

2-3. フラクタル解析

フラクタル特性値は、測度法によって求
 めた。測度法の概念図を図3に示す。CCDカ
 メラにより撮影された火炎断面の画像を二
 値化し境界線を取り出す。次に、その境界
 線を構成する各画素を中心として半径 ε の
 円で覆い、その全面積 A を 2ε で割って火炎
 断面の長さ $L(\varepsilon)$ とする。そして、 ε を変化

Fig.1 Schematic of experimental apparatus.

Fig.2 Schematic of turbulent nozzleburner.

Fig.3 Schematic of fractal analysis.

させたときの $L(\varepsilon)$ の値を測定する。これを両対数グラフに表し特性値を求めた。

§3. 実験結果および考察

図4に高速度ビデオにより撮影された火炎断面像を示す。なお、 U は平均流速、 u' は乱れ強さである。乱れ強さが減少しているにもかかわらず、圧力上昇に伴い、火炎面形状が複雑化しているのがわかる。

図4にフラクタル解析の一例を示す。図中の直線部分がフラクタル性を示す領域で、この勾配 D_2 から等方性乱流の仮定の下で、次式により、フラクタル次元 D_f が求められる。

$$D_f = 2 - D_2 \quad (1)$$

また、直線部分から外れ始める ε をフラクタル性の成立する限界とし、上限値を ε_o 、下限値を ε_i と定義する。

上限値 ε_o は、どの条件下においても、10～14mmとなりほぼ一定であった。しかし、下限値 ε_i については存在は確認されるが、必ずしも、その値を特定できない。これは ε を小さくすると画像処理の段階で生じる誤差と火炎面の凹凸のスケールがほぼ等しくなり、どちらかを判別するのが難しくなることに起因する。高圧下では火炎の凹凸は、さらに激しくなるので、今後この問題を解決するために火炎をできるだけ大きく撮影し、さらに拡大して画像処理をおこなう方法を検討する必要がある。

図5に、 u'/S_L (S_L は層流燃焼速度)とフラクタル次元 D_f との関係を示す。図5より u'/S_L が増加するとともに D_f も増加していることがわかる。 D_f が増加するということは、火炎面形状が複雑化することを意味しており、トモグラフィーに先立って行ったシュリーレン写真による火炎の観察結果と

Fig.4 Effects of ambient pressure on flame front shape. (laser tomography)

Fig.5 Relationship between the typical length and measurement scale.

Fig.6 Effects of u'/S_L on fractal dimension.

も一致する。また、他の研究と比較すると、フラクタル次元と乱れ強さとの関係は、同様の傾向を示しているが、本実験結果は、絶対値が小さくなっており、ブンゼンバーナの値(2.21~2.32)⁽¹⁾よりも、よどみ火炎の値(2.02~2.13)⁽²⁾に近くなっている。これは解析の方法の違いによるものと考えられる。

圧力変化にともなう D_f の変化は、同じ u'/S_L の値でも、特に u'/S_L が比較的小さい領域において圧力が増大するほど、 D_f の値が大きくなる。つまり火炎面の複雑さは、単純に u'/S_L や圧力に依存するのではなく、互いの相互干渉に依存してくると言える。

前報⁽³⁾では、乱流燃焼速度が雰囲気圧力に大きく依存することを明らかにしたが、ここでは、前報と同様の方法により、フラクタル次元の圧力依存性を示すことにする。図7に、 $(P/P_0)u'/S_L$ と D_f の関係を示す。ただし、 $P_0=0.1\text{MPa}$ である。このような整理の仕方をする、ほぼ一本の曲線で表すことができる。また、図7より $(P/P_0)u'/S_L$ の増加とともに、 D_f はある値に収束していく傾向を示している。乱流予混合火炎では、 S_T を乱流燃焼速度、 S_L を層流燃焼速度とすると次式が成立するといわれている。⁽¹⁾

$$S_T/S_L = (\varepsilon_i/\varepsilon_0)^{2-D_f} \quad (2)$$

図7に示される D_f が収束する傾向を考慮すると、高圧下で乱流燃焼速度がさらに増加するならば、 ε_i がさらに減少するはずである。この点からも ε_i の圧力依存性を詳細に調べる必要がある。

4. 結言

連続燃焼が可能な高压容器内に乱流予混合火炎を安定化させ、レーザートモグラフィによる火炎断面像の観察を行った結果、乱れ強さおよび雰囲気圧力の増加に伴い、火炎面形状が複雑化することがわかった。また、複雑化は、乱れ強さと雰囲気圧力の影響を同時に受けることが判明した。

5. 参考文献

- (1) 吉田 亮、燃焼研究、92 (1993)、pp. 21-39.
- (2) 矢作、植田、溝本、第31回燃焼シンポジウム講演論文集、(1993)、pp. 416-418.
- (3) 小林、中島、田村、新岡、日本機械学会東北支部石巻地方講演会講演論文集、(1994).

Fig.7 Effects of ambient pressure and turbulence intensity on fractal dimension.