

定容燃焼容器による予混合乱流燃焼の実験的研究 (乱れ強さと火炎形状の評価)

友松 重樹¹⁾・田坂 英紀²⁾

Experimental Study for Premixed Turbulent Combustion using Constant Volume Combustion Bomb (Evaluation of Relation between turbulence intensity and flame structure)

Shigeki TOMOMATSU, Hidenori TASAKA

Abstract

The purpose of this study is the quantitative evaluation of relation between flame structure and turbulence of gas flow under turbulent premixed combustion. To measure simply, constant volume combustion bomb which is equipped turbulence control device is used. The authors measured the gas flow measured by Laser Doppler Velocimeter, and calculated turbulence intensity as characteristic value of gas flow. Flame structure was measured as cross sectional image by laser sheet method. To evaluate flame structure quantitatively, periphery / periphery of ideal circle, characteristic of unevenness and fractal dimension which is calculated by Box-counting method were used. These value express complexity of flame front shape. Box-counting method can evaluate flame shape which is chipped off part of the rim.

As results, the authors found that, in the range of 0.14–2.14m/s of turbulence intensity, unevenness of flame front increased with turbulence of gas flow and flame growth. Although, in spite of flame size, flame grew up with constant dimension every turbulence intensity.

Key Words: Turbulent combustion, Constant volume combustion bomb, Gas flow, Laser sheet method, Flame structure

1. まえがき

予混合乱流燃焼において、ガス流動と燃焼には非常に密接な関係があり、両者はお互いに影響を及ぼしあっていると考えられている。特に、乱れと燃焼の関係については様々な研究がなされてきたが、乱流予混合燃焼における燃焼促進機構は未だ解明されていないのが現状である。

本研究では、乱れ強さを制御することができる定容燃焼容器を用いて、レーザドップラ流速計による容器内ガス流動計測およびレーザシート法による火炎断面計測を行うこ

とにより、乱流予混合燃焼におけるガス流動乱れと火炎面形状の関係を定量的に考察することを目的とした。

2. 定容燃焼容器

本研究で使用した定容燃焼容器の概略図を図1に示す。燃焼室は、高さ120mm、幅244mm、奥行き120mm、容積約3300cm³の直方体に近い形をしており、上・下面および前後の対向する側面には、幅90mm、高さ90mmの可視化用観測窓が設けられている。下面の観測窓を交換することにより、燃焼実験時には点火プラグ等を取り付けることができる。また、燃焼室下部や側面には、プラグホール、予

1) 機械システム工学科助手
2) 機械システム工学科教授

混合気の吸・排気口などが設けられている。また、観測窓の無い対向する側面には、ガス流動発生装置が設置されており、外部のモータにより駆動した。

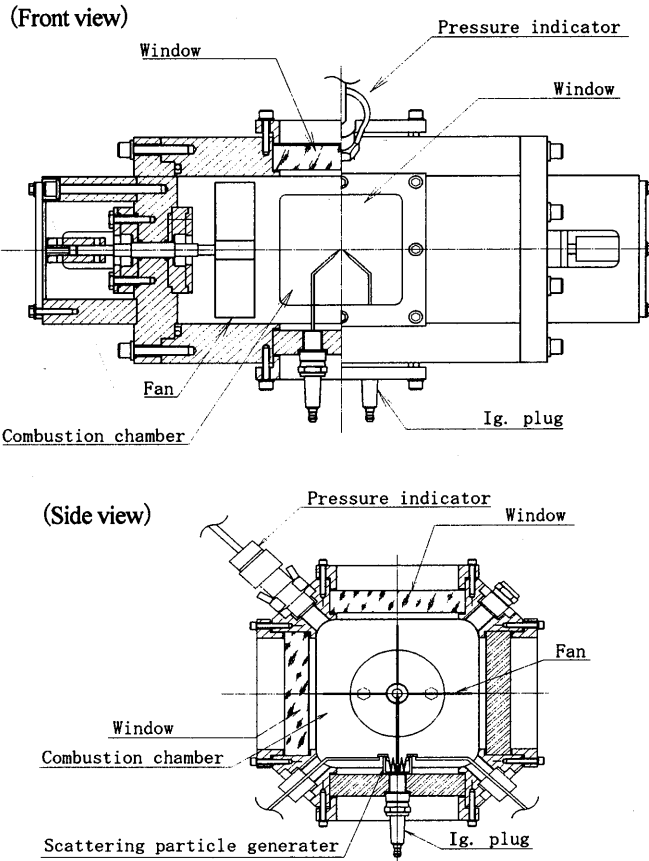


Fig.1 Constant volume combustion bomb

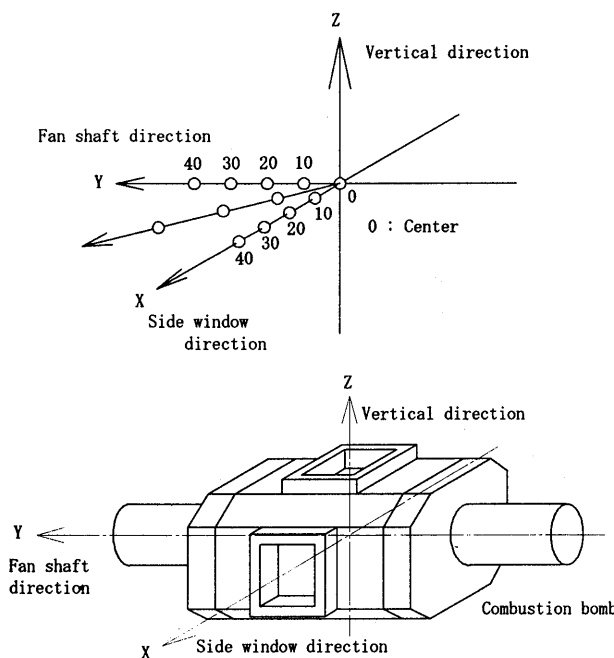


Fig.2 Measurement position

3. 容器内ガス流動計測

容器内のガス流動を把握するために、本研究では後方散乱レーザドップラ流速計を使用し、容器側方および上方からガス流動の3方向計測を行った。容器内におけるガス流動計測位置を図2に、計測結果の例としてモータ軸および側方観測窓方向の計測位置におけるZ方向乱れ強さを図3に示す。

計測の結果、可視化範囲内では、どの計測位置・方向についても主流速は乱れ強さに対して小さいものであり、それぞれの測定点における乱れ強さも3方向についてほぼ等しい状態になっていた。また、図3からもわかるように、乱れ強さについては、測定位置毎の差がほとんどみられず、分布はほぼ一様であった。

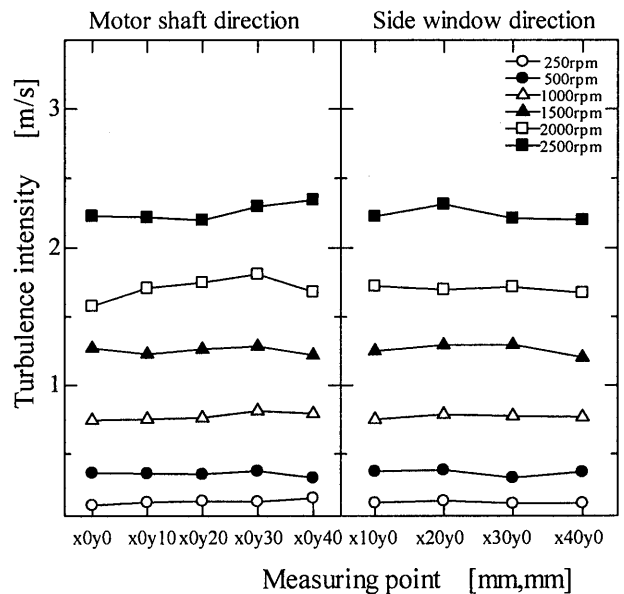


Fig.3 Turbulence intensity

4. 火炎断面計測

火炎断面計測は、Nd-YAG パルスレーザを用いたレーザシート法により、点火後の設定時刻における火炎断面撮影を行った。火炎断面計測システムの概略図を図4に示す。厚さ0.3 mmのシート状にしたレーザ光を容器側方より入射して容器内にレーザシートを形成し、点火後の設定時刻に、容器上方からモノクロ CCD カメラで撮影することにより、火炎断面画像の撮影を行った。レーザシート光源には、発光時間5~7 ns のNd-YAG パルスレーザを使用したため、現象が時間的に積算されることはない。

火炎断面計測には、当量比1のプロパン-空気予混合気を用い、実験条件は、乱れ強さを0m/s, 0.14m/s, 0.76m/s,

2.14m/sとし、点火後の設定時刻に撮影を行った。

レーザシート法による火炎断面画像の例として、乱れ強さ2.14 m/s、点火後6 msの火炎断面画像を図5に示す。この画像を2値化し、輪郭線を抽出した後、周囲長無次元数、火炎凹凸度、フラクタル次元等の算出を行った。

周囲長無次元数は、火炎の比較的小さな凹凸を表す特性値であり、火炎断面の輪郭線の長さを等価円(火炎断面と等しい火炎断面積を持つ真円)の周囲長で無次元化したものである。周囲長無次元数の時間経過を図6に示す。この図より、乱れ強さがある場合には時間経過とともに周囲長無次元数が大きくなっており、乱れ強さが大きいほど周囲長無次元数の増加率も大きくなっていることがわかる。

火炎凹凸度とは、火炎の比較的大きな凹凸を表す特性値であり、図心と輪郭構成点との距離と等価円半径とのRMS誤差である。火炎凹凸度の時間経過を図7に示す。この図から、火炎凹凸度も周囲長無次元数と同じように、乱れ強

さがある場合には時間経過とともに火炎凹凸度が大きくなっており、乱れ強さが大きいほど火炎凹凸度の増加率も大きくなっていることがわかる。

また、乱れ強さが無い(0m/s)場合には、周囲長無次元数はほぼ1のままであり、火炎凹凸度についても1.5mm以下であることから、火炎はほぼ真円形状を保ったまま成長していることがわかる。

次に、火炎の複雑さを評価するために、ボックスカウンティング法⁽¹⁾により輪郭線のフラクタル次元を算出した。ボックスカウンティング法は、碁盤の目のように、画像を等間隔 δ の格子状の領域に分割し、図形の一部が含まれるようなボックスの数 N_δ から次元を推定する方法である。格子間隔 δ を変化させていくと、 N_δ と δ には式(1)が成り立つ。

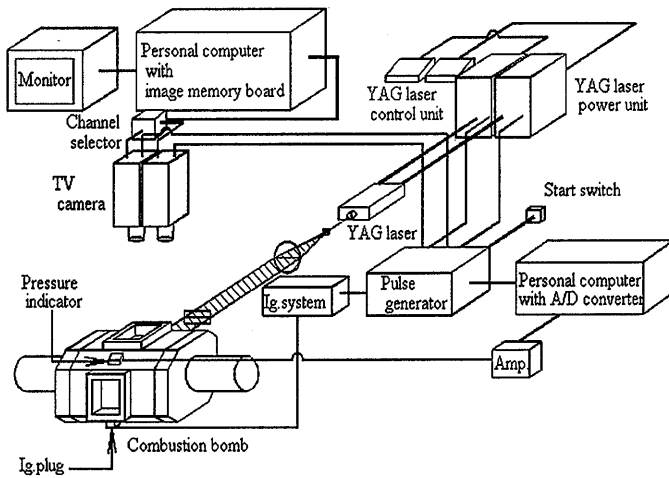


Fig.4 Flame cross section measurement system



Fig.5 Flame cross section image

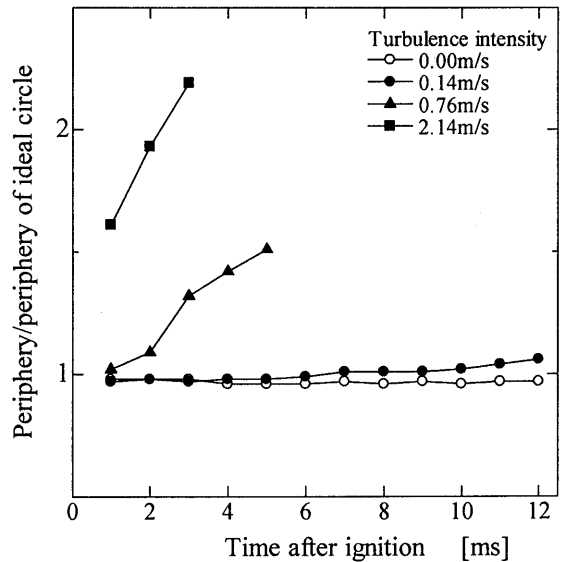


Fig.6 Periphery / periphery of ideal circle

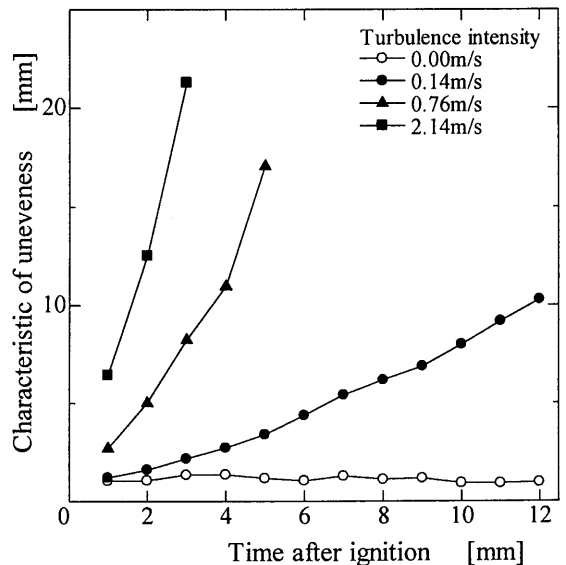


Fig.7 Characteristic of unevenness

$$N_{\delta} = C \cdot \delta^{-D} \tag{1}$$

また、フラクタル次元は、 $N_{\delta} - \delta$ を両対数プロットしたときの勾配Dであり、式(2)で表される。

$$D = -\frac{\log N_{\delta}}{\log \delta} \tag{2}$$

しかし、早い時刻に撮影した火炎は、画像全体に対して小さいものであり、 δ の値が大きい場合には誤差を生じてしまうため、 δ の値を広く変化させて $\log N_{\delta} - \log \delta$ プロット全体からフラクタル次元を推定する必要がある。また、従来⁽²⁾は8近傍処理により輪郭線の抽出を行っていたが、格子間隔を1画素とした場合に、実際の輪郭線が含まれるボックスの数と輪郭構成画素が一致するようにするため、4近傍処理にて輪郭線を抽出した。

図8に $\log N_{\delta} - \log \delta$ の関係の例として、乱れ強さ2.14m/s、点火後7msに撮影した画像から求めた $\log N_{\delta} - \log \delta$ を示す。このグラフからわかるように、 $\log N_{\delta} - \log \delta$ は2つの区間で $N_{\delta} = C \cdot \delta^{-D}$ を満たしており、この傾向は、乱れ強さを変えた場合でも全ての条件で見ることができた。このことから、火炎の輪郭線画像は、2つのフラクタル次元を持つと考えられる。しかし、今回撮影した画像は、512×512 Pixel、空間分解能0.22×0.22mmであったため、 δ が小さい区間のフラクタル次元はより高い解像度で撮影した場合には違う値をとる可能性があると考えている。

また、上記の方法で算出したフラクタル次元の時間経過を図9に示す。図中の各プロットは、同一時刻に撮影した10枚の輪郭画像から算出したフラクタル次元の平均値である。また、プロットの形は乱れ強さを、プロットの色は

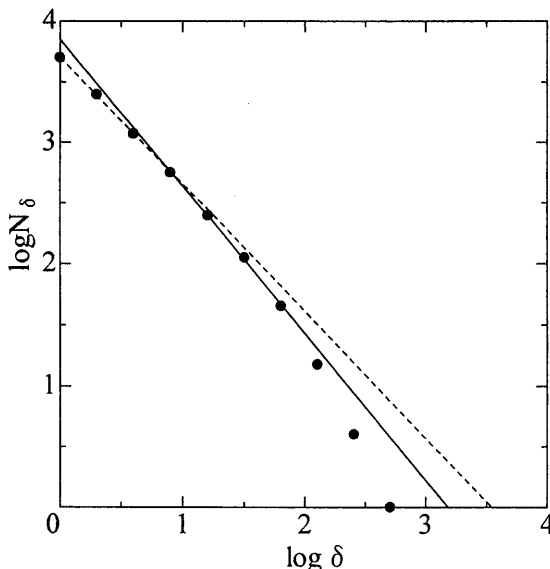


Fig.8 $\log N_{\delta} - \log \delta$

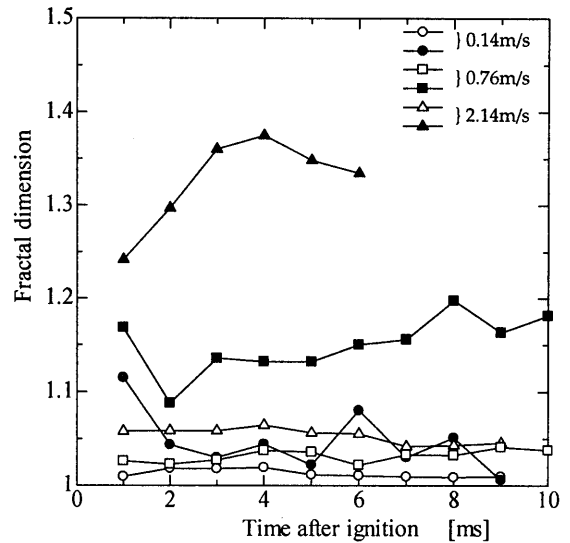


Fig.9 Fractal dimension

フラクタル次元を算出した区間を表しており、白色のプロットは $\delta = 0.22 \sim 1.76\text{mm}$ 、黒色のプロットは $\delta = 1.76 \sim 3.10\text{mm}$ である。

この図から、測度 δ が小さい範囲では乱れ強さ毎のフラクタル次元にほとんど差は無いが、 $\delta = 1.76 \sim 3.10\text{mm}$ では、火炎がある程度成長した3ms以降で、乱れ強さが大きい方がフラクタル次元は大きくなっており、乱れ強さ毎にほぼ一定の値となっていた。

以上の結果から、乱れ強さ0.14~2.14m/sの範囲では、乱れ強さが大きいと火炎面上の凹凸は増加し、火炎の成長とともに凹凸が増加しているが、火炎は大きさに関係なく乱れ強さ毎にほぼ一定のフラクタル次元を保ったまま成長していることがわかった。

5. 結論

定容燃焼容器を用いて、ガス流動計測および火炎断面計測を行い、予混合乱流燃焼における乱れ強さと火炎形状に関する検討を行った結果、以下の結論を得た。

1. 本研究で計測した乱れ強さ0.14~2.14m/sの範囲では、乱れ強さを大きくすると火炎面上の凹凸は増加し、火炎の成長とともに凹凸が増加しているが、火炎は大きさに関係なく乱れ強さ毎にほぼ一定のフラクタル次元を保ったまま成長していることがわかった。

参考文献

- 1) 高安秀樹, フラクタル, 朝倉書店, 1986
- 2) 友松重樹, 田坂英紀, レーザシート法による火炎断面計測(火炎面抽出方法の検討), 宮崎大学工学部紀要, 第30号, P279-284, 2001