

定容燃焼容器による予混合乱流燃焼の実験的研究 (火炎の微視的構造とフラクタル次元)

友松 重樹¹⁾・田坂 英紀²⁾

Experimental Study for Premixed Turbulent Combustion using Constant Volume Combustion Bomb (Relation between microscopic flame structure and fractal dimension)

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 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, Flame structure, Fractal dimension

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火炎の微視的構造とフラクタル次元の関係を調査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。

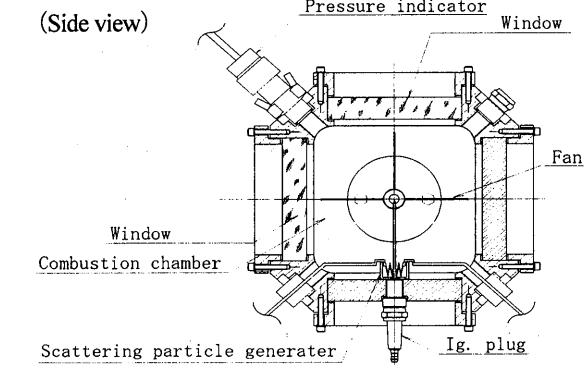
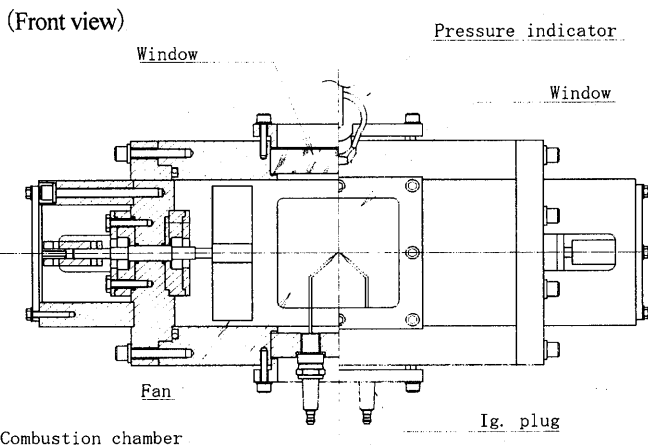


Fig.1 Constant volume combustion bomb

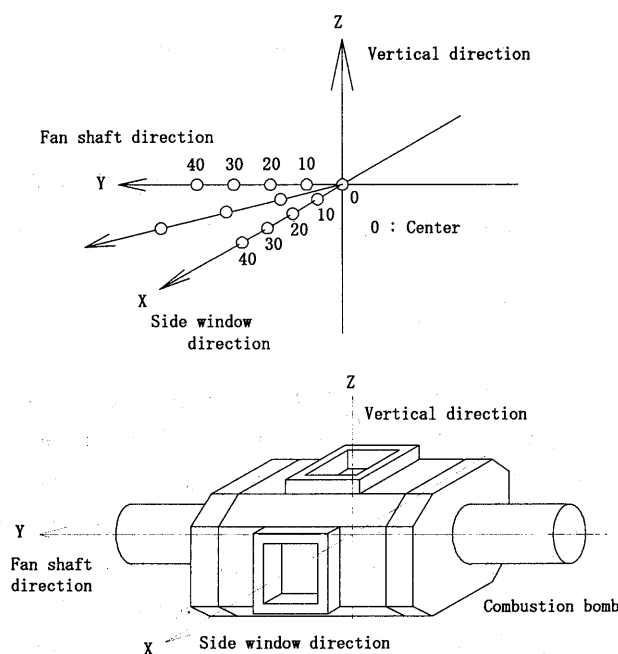


Fig.2 Measurement position

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。

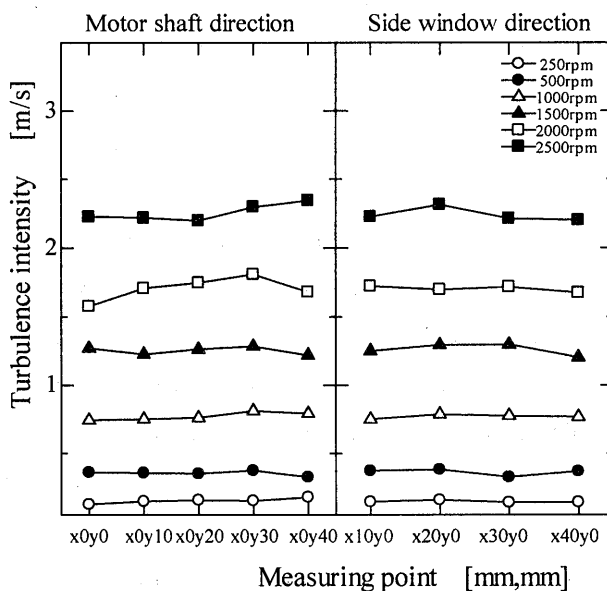


Fig.3 Turbulence intensity

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0.3mm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5~7ns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、火炎形状特性値の算出を行った。

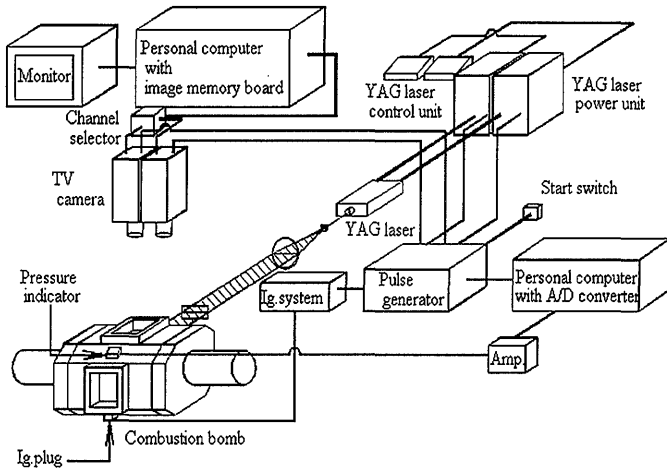


Fig.4 Flame cross section measurement system

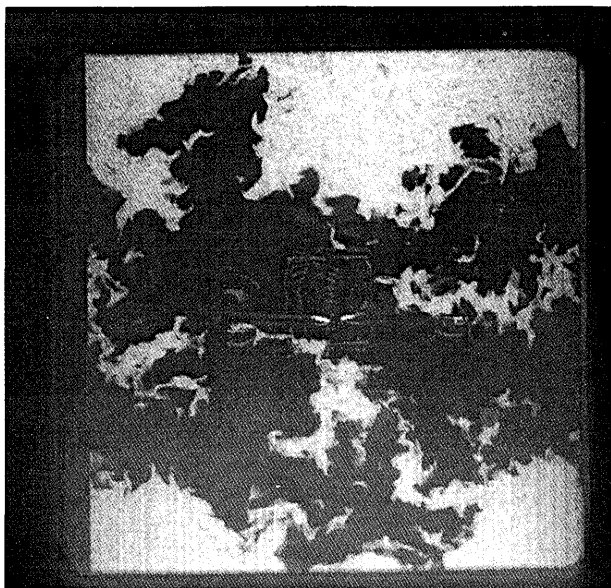


Fig.5 Flame cross section image

本研究では、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。

$$N_\delta = C \cdot \delta^{-D} \quad (1)$$

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。

$$D = -\frac{\log N_\delta}{\log \delta} \quad (2)$$

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。

既報³⁾ において、図 6 のように、 $\log N_\delta - \log \delta$ 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、 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られたため、乱れ強さ 0.76m/s と 2.14m/s の条件について、火炎を標準の約 4 倍に拡大して撮影を行った。

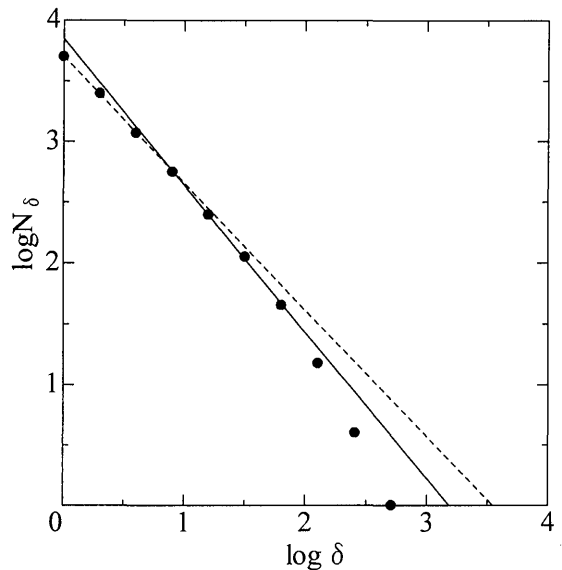


Fig.6 $\log N_\delta - \log \delta$

既報での撮影条件は 512×512 Pixel, 空間分解能 0.22×0.22 mm, 今回の空間分解能は 0.048×0.048 mm である。

それぞれの解像度で撮影した画像から求めたフラクタル次元の時間経過を図 7, 8 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、プロットの色はフラクタル次元を算出した区間を表しており、図 7 において白色のプロットは $\delta = 0.22 \sim 1.76$ mm, 黒色のプロットは $\delta = 1.76 \sim 3.10$ mm, 図 8 においては $\delta = 0.048 \sim 1.54$ mm である。

これらの図から、測度 δ が小さい範囲 ($\delta = 0.22 \sim 1.76\text{mm}$) では乱れ強さ毎のフラクタル次元にほとんど差は無く、どの時刻においても 1.1 以下となっていることがわかった。

$\delta = 1.76 \sim 3.10\text{mm}$ 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 $0.14 \sim 2.14\text{m/s}$ の範囲では、乱れ強さが大きくなると火炎面上の凹凸が増加し、火炎の成長とともにその凹凸は増加しているが、 $\delta = 1.76 \sim 3.10\text{mm}$ では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ち、 $\delta = 0.048 \sim 1.76\text{mm}$ において火炎断面輪郭線のフラクタル次元は $1.0 \sim 1.1$ の範囲でほとんど変化しないことがわかった。

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断面輪郭線のフラクタル次元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 $0.14 \sim 2.14\text{m/s}$ 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、 δ が 1.76 以上では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ち、 $\delta = 0.048 \sim 1.76$ において火炎断面輪郭線のフラクタル次元は $1.0 \sim 1.1$ の範囲であることがわかった。

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
- 3) 友松重樹, 田坂英紀, 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), 宮崎大学工学部紀要, 第31号, P267-270, 2003

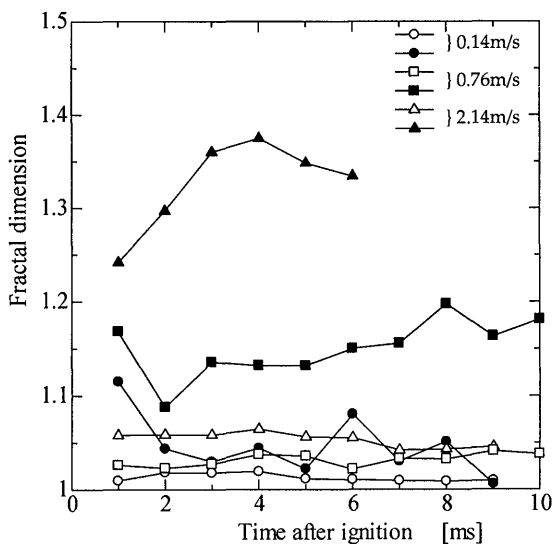


Fig.7 Fractal dimension

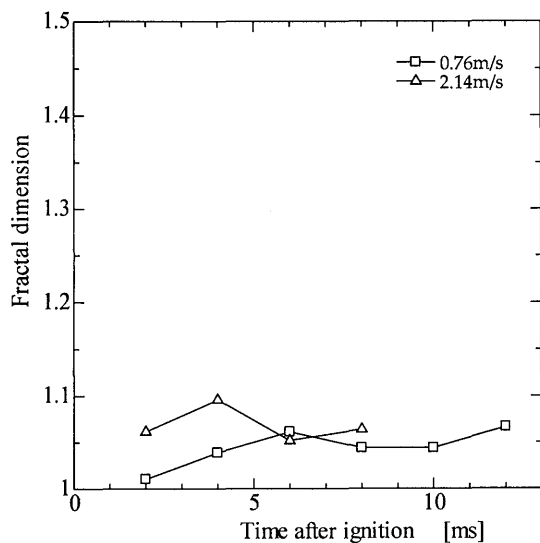


Fig.8 Fractal dimension