

乱流燃焼実験のための乱れ燃焼容器改善と燃焼実験

友松重樹¹⁾ ・ 池田和章²⁾ ・ 長瀬慶紀³⁾ ・ 田坂英紀⁴⁾

Improvement of Combustion Bomb and Combustion Experiment for Turbulent Combustion Experiment

Shigeki TOMOMATSU, Kazuaki IKEDA, Yoshinori NAGASE, Hidenori TASAKA

Abstract

As premixed combustion, there would be a close correlation between turbulence of gas flow and combustibility. So the precise correlation is needed. The purposes of this study are improvement of gas flow generator and quantitative evaluation of relation between gas flow and flame. A constant volume combustion chamber which is equipped fans to generate turbulence of desired conditions was improved and used. Turbulence intensity was measured by LDV. Flame image was taken by the CCD camera with memory. Complexity of flame shape was mainly evaluated by fractal dimension. As results, improving of gas flow generator, gas flow in the chamber was found that the mean velocity was small and turbulence intensity was the same distribution in the space, and these were reproducibility. Flame complexity was mainly depend on turbulence intensity. At the range of turbulence intensity of from 0 to 4.5 m/s, tendency of fractal dimension of flame shapes is increased according to turbulence intensity. But fractal dimensions were not changed by growth of flame.

Key Words :

Gas flow generator, Turbulence intensity, Fractal dimension, Flame cross section

1. 緒言

現在、内燃機関は非常に重要な動力源となっている。しかし、これと同時に、石油依存による化石燃料の枯渇や、排出ガスなどにより環境問題を引き起こしている。そのため、環境に与える影響を軽減するために内燃機関

を改善していく必要がある。その方法として、内燃機関の熱効率の向上が挙げられる。内燃機関の熱効率を向上させるためには、ガス流動と燃焼の関係を解明することが重要である。

浜本ら¹⁾は、旋回乱流を起こすことができる定容燃焼容器を用いて、レーザシート法により火炎断面計測を行った。また、火炎の複雑さをサークル法によりフラクタル次元で評価した。それにより、フラクタル次元は点火後、火炎伝播とともに増加し、一定値に近づくことを提示した。また、浜本ら²⁾は、単気筒火花点火機関における乱流火炎の形状をレーザトモグラフィにより計測した。これにより、火炎のフラクタル特性を用いることによって火炎伝播限界条件にある乱流火炎の火炎断面構造について

1) 機械システム工学科助教

2) 機械システム工学専攻大学院生

3) 機械システム工学科教授

4) 機械システム工学科名誉教授

調査した。その結果、乱れの影響が大きくなることによって、火炎のしわ状が進むサイクルと、火炎が逆に失火へ至ると推定されるサイクルが存在することがわかった。しかし、燃焼の促進に効果的とされる乱れ成分のみに着目し、ガス流動の乱れ成分が燃焼の詳細な関係にどのように影響し、燃焼の促進に効果があるのかを示した報告は多くない。

本研究では、ガス流動の乱れ成分と燃焼の関係に着目する。そこで、燃焼室構造を簡略化し、容積変化のない定容燃焼容器を用いることにより燃焼現象を単純化することで、燃焼特性の定量的な解析を行う。また、その容器内で平均流速が小さく、空間内で乱れ強さを一様にするのができ、平均流速と乱れ強さに再現性のあるガス流動発生装置を製作する。これを用いて乱れを変化させ、流速測定を行い、火炎断面計測し、形状を評価することで、乱れ強さが火炎断面形状の複雑化におよぼす影響を調査することを目的とした。

2. 実験装置

2.1 定容燃焼容器

本研究に用いる燃焼容器は、ガス流動の乱れ成分に着目し、平均流速が小さく、乱れ成分のみを変化できるように設計した。図1に定容燃焼容器の概略を示す。

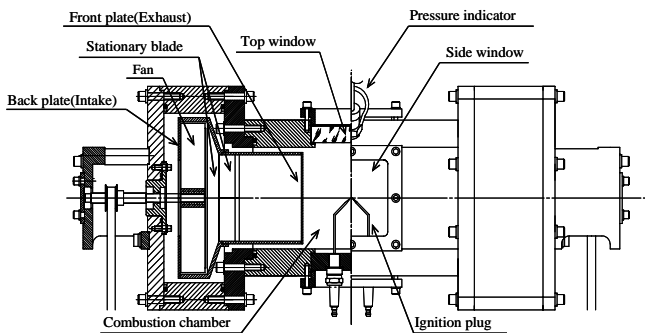


図1 定容燃焼容器概略図

この定容燃焼容器は、燃焼室幅、高さ及び奥行き約120mmとなっている。4つの面積の等しい側面の中央には90mm×90mmの観測窓が取り付けられるようになっている。ガス流動測定の際には容器側面に観測窓を設置し、火炎断面計測の際には容器側面および上面に観測窓を設置する。また、火炎断面の際には容器底面に設置されている点火プラグを用いて、火花点火により燃焼を開始させる。容器の左右にはガス流動発生装置が設置され、フ

ァンの回転数の差による主流速の発生を抑えるため、ファン回転同期装置を用いて、左右のファンの回転数を互いに逆回転で同期させた。

2.2 ガス流動発生装置

本研究で使用したガス流動発生装置の概略図を図2に示す。ガス流動発生装置として、従来の研究³⁾では自作したFRP製のガス流動発生装置を使用していたため、左右での工作精度・取付け精度が異なり、ガス流動発生装置を組みなおす度に流れ場が変化してしまう傾向が見られた。そこで、左右での工作精度に違いが生じないように、ケーシングを削り出しにより製作し、取付け精度により流れ場の変化がないように、位置決めピンを用いて組めるようにした。さらに、従来の最大乱れ強さより、乱れ強さを大きくするために、ファンをφ150mmから本研究ではφ180mmに拡大し、流量を増やすことにした。

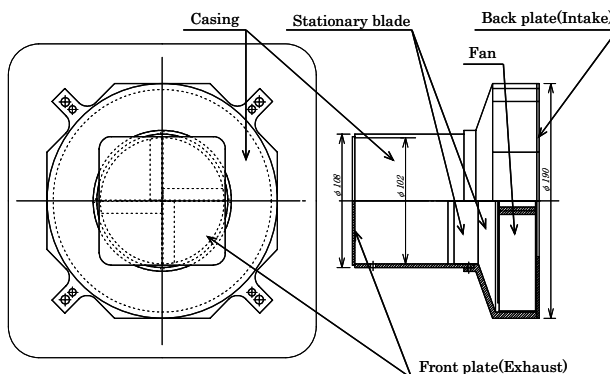


図2 ガス流動発生装置概略図

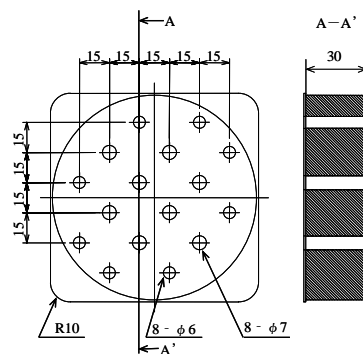


図3 多孔板概略図

ァンはφ180mm、高さ30mmの遠心ファンを使用している。また、ファン後方に吸気プレートを設置し、ファン前方には図3に示す多孔板を設置している。ファン後方から吸気された空気は、ファン前方に設置されている多孔板から噴流として出る仕組みになっている。多孔板は噴流がすれ違って出るように設置してあり、すれ違

った噴流により、せん断力を利用して乱れを発生させる。

3. ガス流動測定

3.1 ガス流動測定システム

乱れ強さが火炎におよぼす影響を解明するため、定容燃焼容器内のガス流動を明らかにする必要がある。そのため、本研究では、LDVを用いてガス流動測定を行った。図4にガス流動測定システム概略図を示す。

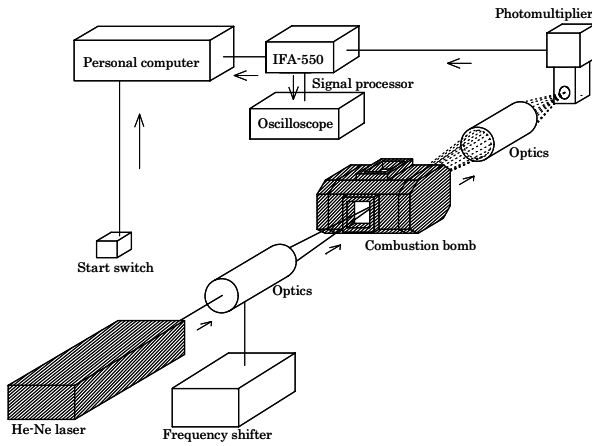


図4 ガス流動測定システム

LDVシステムには、デュアルビームモード前方散乱方式を用い、光源には出力50mW、波長632.8nmのHe-Neレーザを使用し、流れの方向を判別するために周波数シフトシステムを用い、2本のビームを光学的にそれぞれ70、80MHzずつシフトさせた。これにより、干渉縞が移動するため流れの方向を判断でき、流速が0m/sの場合でも10MHzのバースト信号を得ることができる。散乱光の検出には、フォトマルチプライヤ（光電子増倍管）を用い、信号処理にはカウンタタイプの信号処理機であるIFA-550を用いて、得られたデータを直接パーソナルコンピュータに取り込んだ。

流速データは、サンプリング周波数20kHzとし、一回の測定で0.8192sにあたる16384データを記録した。1条件につき有効データを30データとした。測定方向は、ファン回転軸方向をX方向、レーザ入射方向をY方向、XY平面に垂直方向をZ方向とした。また、ファンの設定回転数は、0、350、1000、2500、4500、6000rpmとした。

3.2 流速測定結果・考察

各測定位置における各軸方向の乱れの分布を図5に示す。図の横軸に測定位置、縦軸に乱れ強さを示している。

それぞれの方向で回転数が同一の場合、乱れ強さは比較的均一な乱れ強さになっている。

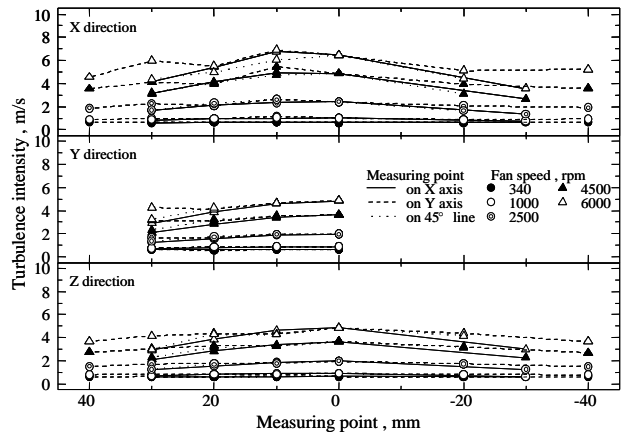


図5 各方向乱れ強さの分布

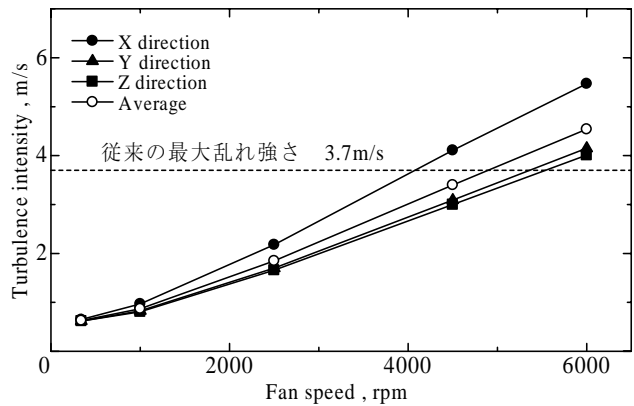


図6 回転数と乱れ強さの関係

また、各方向の乱れ強さの関係を図6に示す。横軸に回転数、縦軸に乱れ強さを示している。また、平均乱れ強さは、X方向、Y方向、Z方向の各平均乱れ強さを更に平均したものである。各方向とも回転数の増加に伴い乱れ強さが大きくなっている。X方向に関して、他の二方向と比較して乱れ強さが大きくなっている。これは、ガス流動発生装置がX方向に噴流を出していることが影響していると考えている。しかし、各回転数における平均乱れ強さと各方向での差は小さいため、これらの乱れ強さをを用いることで乱れと火炎形状の関係を評価することが出来ると考えられる。

さらに、従来の研究における最大平均乱れ強さが3.7m/sであったのに対して、本研究では最大平均乱れ強さ4.5m/sまで大きくすることができた。これは、ファン径を拡大したことで、流量が増えたためであると考えている。

4. 火炎断面計測

4.1 火炎断面計測システム

本研究では、ガス流動の乱れが火炎の形状に与える影響を調査するためにレーザシート法による火炎断面の撮影を行った。火炎断面計測システムを図7に示す。火炎断面の計測は、パルス発振のNd:YAGレーザおよびモノクロCCDフレームシャッターカメラ二台を用いて撮影を行った。画像収録はイメージメモリーボード（画素数：512×512、濃淡分解能：モノクロ256階調）を備えたパーソナルコンピュータを用いて行った。Nd:YAGレーザは、三枚のレンズを通過させることにより、容器内でレーザがシート状になる。また、燃焼時には容器内に散乱粒子をシードしており、未燃部と既燃部で散乱粒子の濃度が差が生じ、散乱光に強弱ができる。これにより、容器内の火炎断面形状を撮影している。

火炎断面計測の際には、プロパン-空気予混合気を0.100MPaになるように充填した。次に、散乱粒子供給装置を用いて燃焼室内にオイルスモークを発生させ、容器中心に対向設置してある点火電極（電極間隔2mm）で火花点火させる。その後、パルス発生装置からの信号の発信により、指定時間にレーザ発光とカメラシャッターを同期させ、二枚の画像をCCDカメラで撮影した。火炎断面計測では、乱れ強さを0, 0.6, 0.9, 1.9, 3.4, 4.5 m/sとして計測を行った。また、燃焼状態を確認するために歪みゲージ式圧力計を用い圧力測定も同時に行った。

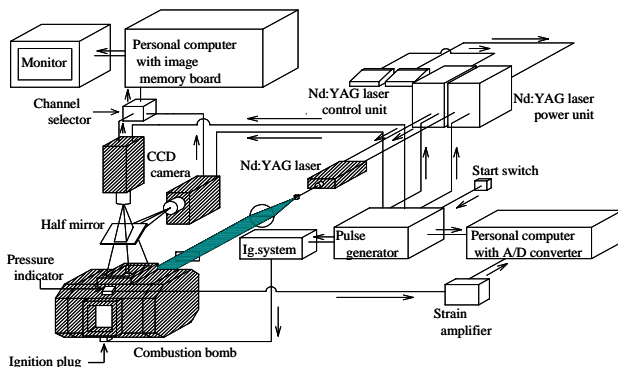


図7 火炎断面計測システム

4.2 火炎断面画像処理方法

図8に火炎断面計測で撮影された画像を示す。撮影された火炎断面画像から火炎形状に対する評価を行う場合、火炎の輪郭を抽出する必要がある。そのため、火炎断面画像に対し二値化処理を行った。

本研究では乱れが火炎形状におよぼす影響を調査することが目的であるため、実際に反応が起こっている火炎断面の輪郭は正確に抽出しなければならない。しかし、

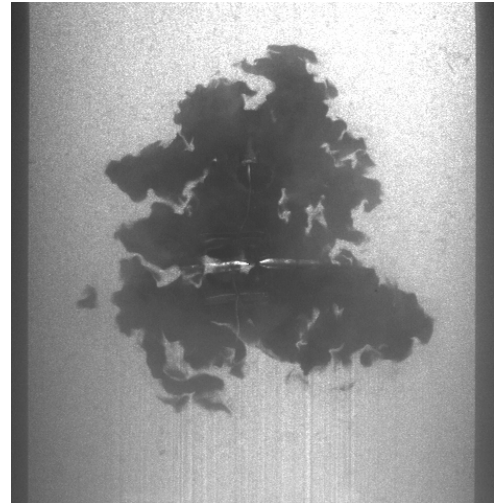


図8 火炎断面画像

火炎断面は複雑な形状をしている上、撮影時に供給する散乱粒子の濃度が毎回異なるため、撮影した画像のコントラストは全て異なっていた。そのため、二値化処理だけでは火炎断面の輪郭をはっきりと認識することは困難であり、輪郭抽出プログラムによる自動化は行えなかった。そこで、二値化を行う前に、既燃部と未燃部の境界を鮮明にする必要があった。その作業として、撮影した画像を画像処理プログラムにより鮮明化することで、火炎断面輪郭をはっきりさせ、二値化の際に作業者の主観が入りにくくして、二値化を行った。

図9に火炎断面計測時に計測した燃焼圧力の結果を示す。横軸に点火後の時間経過、縦軸に燃焼圧力を示している。ここで、燃焼圧力は容器内での燃焼による熱発生と容器壁面などを通じて熱が逃げる熱損失が釣り合った時に燃焼圧力が最大となる。この燃焼圧力最大値は容器形状に依存するが、本研究では燃焼の状態を表す指標として燃焼圧力最大値および点火から燃焼圧力最大値までの時間を用いて考察を行った。図より、乱れ強さが大きくなると、燃焼圧力最大値は上昇している。このことから、乱れ強さが大きくなると燃焼は促進されていると考えられる。ここで、各乱れ強さにおいて燃焼圧力最大値までの時間を比較すると、乱れ強さが大きくなるにつれて、最大値までの時間が短くなってきていることが分かる。乱れ強さ0.9m/sあたりから最大値までの時間は次第に短くなっていき、乱れ強さ3.4m/sと4.5m/sでは燃焼圧力最大値までの時間の差は1ms以内となっている。これらのことより、乱れ強さが大きくなると、燃焼は促進さ

4.4 燃焼圧力計測結果・考察

図9に火炎断面計測時に計測した燃焼圧力の結果を示す。横軸に点火後の時間経過、縦軸に燃焼圧力を示している。ここで、燃焼圧力は容器内での燃焼による熱発生と容器壁面などを通じて熱が逃げる熱損失が釣り合った時に燃焼圧力が最大となる。この燃焼圧力最大値は容器形状に依存するが、本研究では燃焼の状態を表す指標として燃焼圧力最大値および点火から燃焼圧力最大値までの時間を用いて考察を行った。図より、乱れ強さが大きくなると、燃焼圧力最大値は上昇している。このことから、乱れ強さが大きくなると燃焼は促進されていると考えられる。ここで、各乱れ強さにおいて燃焼圧力最大値までの時間を比較すると、乱れ強さが大きくなるにつれて、最大値までの時間が短くなってきていることが分かる。乱れ強さ0.9m/sあたりから最大値までの時間は次第に短くなっていき、乱れ強さ3.4m/sと4.5m/sでは燃焼圧力最大値までの時間の差は1ms以内となっている。これらのことより、乱れ強さが大きくなると、燃焼は促進さ

れてはいるが、燃焼圧力最大値までの時間の差の変化を見ると、促進作用にも限界があると考えられる。そのため、ある乱れ強さで燃焼圧力最大値までの時間は最短となり、さらに乱れ強さを大きくしていくと、最大値までの時間は長くなると考えられる。

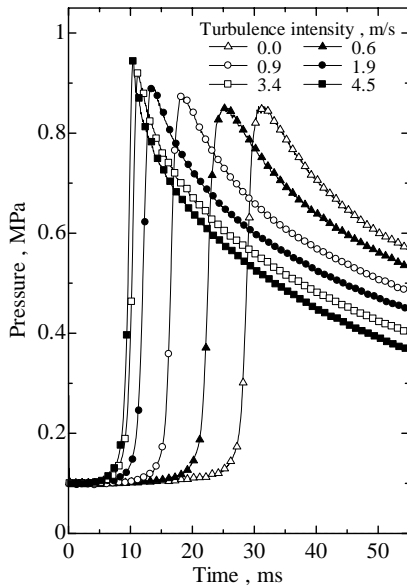


図9 燃焼圧力計測結果

4.5 火炎断面計測結果・考察

4.5.1 既燃部面積

本研究では、燃焼の促進について調査するために空間内の乱流火炎について既燃部面積による評価を行うことにした。そのため、二時刻、同一火炎上で撮影した。

画像処理した二値化画像より、既燃部の画素数を算出し、1画素の面積である 0.04mm^2 をかけて面積を算出した。

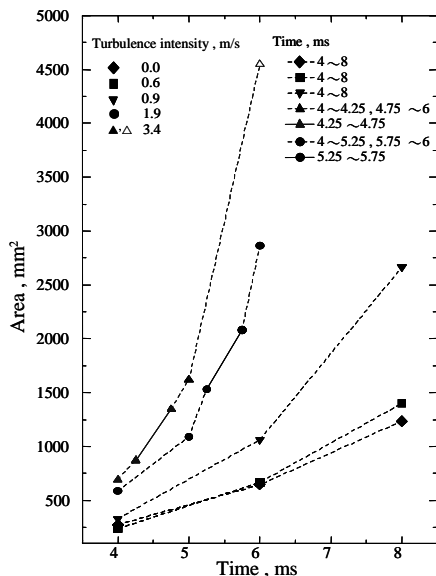


図10 既燃部面積計測結果

図10に既燃部面積計測結果を示す。横軸に点火後の時間経過、縦軸に既燃部面積を示している。また、実線は同一火炎から算出したデータであり、破線は異なる火炎のデータを示している。乱れ強さ 3.4m/s , 6ms での既燃部面積は計測領域からはみ出しているため、正確なデータではないが、火炎の広がりを観察する上で、参考データとして記載する。実際には更に既燃部面積が増加していると考えられる。ここで、乱れ強さが大きくなるに従って、既燃部面積が大きくなっている。このことより、乱れ強さが大きいと燃焼が促進されると考えられる。

4.5.2 フラクタル次元算出

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を用いたフラクタル次元の算出を行った。ボックスカウンティング法とは、画像を一边の長さが $1, 1/2, 1/4 \dots$ となる正方形に細分化していき、対象図形が含まれている正方形の数を数えていくことである。また、この細分化された正方形の領域をセルと呼ぶ。セルの一边の長さを r 、対象図形の一部が含まれるセル数を $N(r)$ 、フラクタル次元を D とすると、 $N(r)$ と r には次の関係式が成り立つ。

$$N(r) = C \cdot r^{-D} \dots (1) \quad (C : \text{定数})$$

式(1)にある D が対象となる物体のフラクタル次元となる。つまり、式(1)の両対数プロットの最小二乗直線の勾配がフラクタル次元 D となる。従って、 D は次式で表すことができる。

$$D = -\frac{\log N(r)}{\log r} \dots (2)$$

また、式(2)で求めた傾きの直線上で近似できる r の範囲が、火炎形状が自己相似性を有する範囲であり、その範囲の最小値を下限値、最大値を上限値という。

4.5.2 フラクタル次元

フラクタル次元と時間の関係を図11に示す。横軸に点火後の時間経過、縦軸にフラクタル次元を示している。実線は同一火炎から算出したデータであり、破線は異なる火炎のデータを示している。図より、乱れ強さが増加するとフラクタル次元も増加していることがわかる。さらに時間が経過してもフラクタル次元は変化しないことがわかる。このことより、時間経過と共に火炎が成長して既燃部面積が増加してもフラクタル次元は変化しないと考えられる。

図12に点火後4msにおける乱れ強さとフラクタル次元

の関係を示す。横軸に乱れ強さ、縦軸にフラクタル次元を示している。乱れ強さが大きくなるとフラクタル次元が大きくなる傾向にあることがわかる。そのため、乱れ強さを大きくすることにより、火炎形状が複雑になると考えられる。

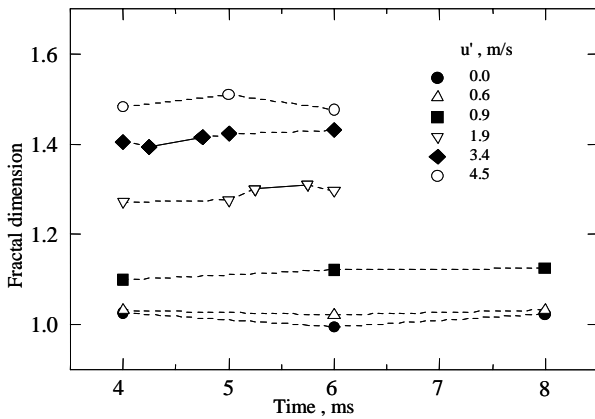


図11 時間とフラクタル次元の関係

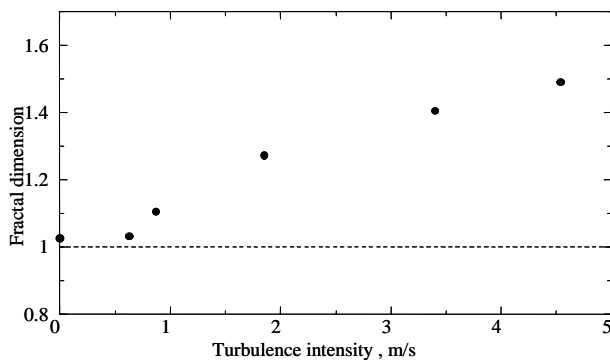


図12 点火後4msの乱れ強さとフラクタル次元の関係

以上の結果より燃焼は乱れ強さを大きくすることで、火炎形状が複雑になり既燃部面積が増え、燃焼を促進させることが出来ることがわかった。さらに同一乱れ強さにおいては時間経過に伴い火炎が成長し、既燃部面積が増加してもフラクタル次元は変化しないことがわかった。

5. 結論

乱れ強さと火炎形状の関係を解明するために、乱れ強さを空間的に一様にできるガス流動発生装置の設計製作を行った。LDVによる乱れ強さの測定、レーザシート法による火炎断面計測を行い、乱れ強さが火炎形状に与える影響について調査した。その結果より得た結論を以下に記す。

- (1) 従来の研究よりファン径を大きくしたことで流量を増やすことができ、乱れ強さを拡大することができた。また、ガス流動発生装置を製作し、多孔板を多数試作した結果、乱れ強さを空間的に一様にすることができた。
- (2) 火炎断面計測を行い、フラクタル次元の算出を行った結果より、時間の経過と共に火炎が成長して既燃部面積が増加してもフラクタル次元は変化しないことがわかった。
- (3) 乱れ強さを大きくし、火炎形状を複雑にすることで燃焼を促進させることができることがわかった。

参考文献

- 1) 浜本ら他4名, 機論(B)64-623, pp.2325-2331, 1998
- 2) 浜本ら他3名, 機論(B)69-682, pp.1509-1514, 2003
- 3) 室園 裕輔 宮崎大学大学院機械システム専攻
平成17年度 修士論文