

予混合乱流燃焼の実験的研究

(乱れ燃焼容器を用いた流れの計測と火炎形状)

友松重樹¹⁾・市原 浩一郎²⁾・宮地 純一²⁾・田坂英紀³⁾**Fundamental Experiment for Premixed Turbulent Combustion
(Flow Measurement and flame structure
in a Combustion Bomb with Turbulence)**

Shigeki TOMOMATU, Koichiro ICHIHARA, Junichi MIYACHI, Hidenori TASAKA

Abstract

In this research, it has aimed at elucidating the relation between gas flow and flame structure to improve thermal efficiency in internal combustion engine. However, it is extremely difficult to elucidate a combustion phenomenon because structure of internal combustion engine is complicated and changes its capacity. Therefore, we use a constant volume bomb without capacity change. To analyze the relation between characteristic value of turbulence and flame structure, turbulence intensity is measured by LDV and scale of turbulence is measured by hot wire anemometer and flame cross section is measured by the laser sheet method. As a result, when turbulence intensity increases, flame structure becomes complicated. And flame structure doesn't seem to change even if turbulence intensity becomes very strong.

Key Words:

Internal Combustion Engine, Constant Volume Bomb, Turbulence Intensity, Scale of turbulence, Flame Structure

1. 結論

火花点火機関における燃焼の解析を行うにあたり、乱れと燃焼についての実験的研究¹⁻³⁾が数多く行われてきた。解析する手法としては、直接観察、シャドウグラフ法、シュレーリン法などの可視化計測が用いられている。これらの方法は、乱流火炎構造を定量的に示す手段として用いられてきた。また、近年ではレーザ装置の普及により、レーザ光をシート状にして火炎の二次元分布の計測も行われてきた。しかし、さまざまな実験的研究が行われてきたが、ガス

流動と燃焼の詳細な関係の解明には至っていない。

ガス流動と燃焼の関係を解明する上で、内燃機関の構造は複雑であり容積変化が起こるため、燃焼現象を解明することは極めて困難である。そこで、燃焼室構造を簡素化した定容容器を用いることにより、燃焼現象を単純化でき、燃焼の特性を定量的に計測、解析が行えると考えられる。

本研究では、ガス流動の特に乱れ成分に注目し、レーザドップラ流速計 (LDV) にて定容容器内ガス流動を測定し、2本の熱線による相関により乱れのスケールの算出を行い、レーザシート法を用い火炎断面を撮影する。これらの計測結果より、乱れ強さ、乱れのスケールと火炎形状との関係を明らかにすることを目的としている。

1) 機械システム工学科助手

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

2. 実験装置及び実験方法

2.1 定容容器

本研究で用いた定容容器を図1に示す。この定容容器は容積約 3300cm³ の燃焼室を有しており、容器内に乱れを発生させるために、2つのファンを対向位置に設置し、逆回転で回転数を一致させた。また、燃焼室内壁面4面の中央には 90mm×90mmの窓があり、観測用窓、燃焼用プラグ付き鉄蓋等が取り付け可能である。

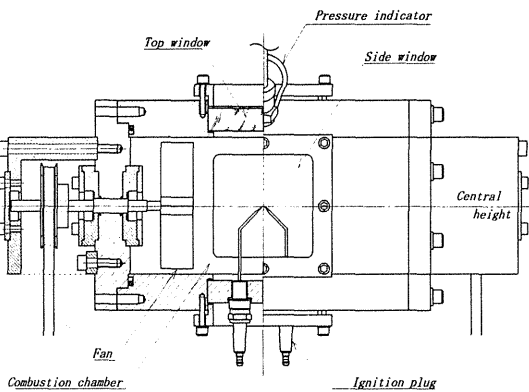


Fig.1 Constant volume combustion bomb

2.2 ガス流動測定システム

図2にガス流動測定システム概略図を示す。ガス流動測定には、周波数シフトシステムを有する前方散乱レーザドップラ流速計を用いて測定を行った。光源には 50mW の He-Ne レーザを使用し、散乱光の検出には光電子増倍管を使用した。光電子増倍管から得られた電気信号は信号処理器にて処理した後、A/D 変換を行い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を 20kHz (50μs 間隔) とし、一回の取り込みで1データ 16384pts (0.8192s)

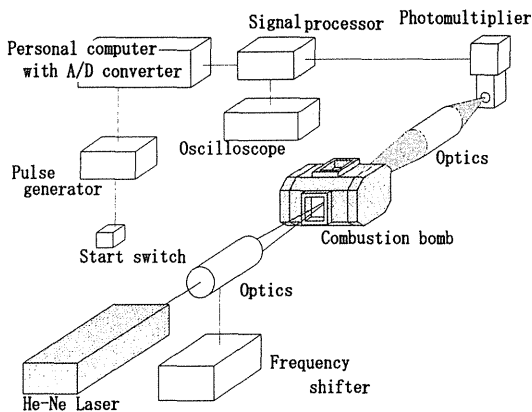


Fig.2 Flow velocity measurement system

を記録し、有効データ数を 50 データとした。

本研究では、図3に示すように、直行の4枚羽根ファンと、4枚羽根ファンと異なった流れ場を形成できるショベルファンの2種類のファンを使用した。

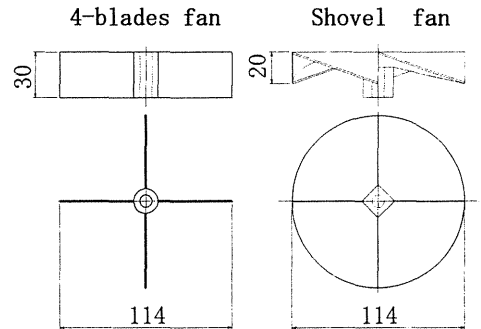


Fig.3 Flow velocity generator

2.3 スケール計測システム

本研究では、2本の1型定電圧型熱線流速計を使用し、流れ場の2点の流速変動から空間相関係数 $R(r)$ を算出し、乱れのスケールを求めた。ここで、熱線間隔を r とした。図4にスケール計測システム概略図を示す。熱線流速計は、ホイーストブリッジ回路の原理を用い、熱線を抵抗の一部としている。ガス流動が発生することで、熱線が冷却され、熱線の抵抗値が変化し、回路内に電位差が生じる。この電位差を計測し換算を行うことで、流速を検出している。熱線から得られた流速データから相関係数を算出し、 $R(r)-r$ 曲線からマクロスケール、マイクロスケールの算出を行った。

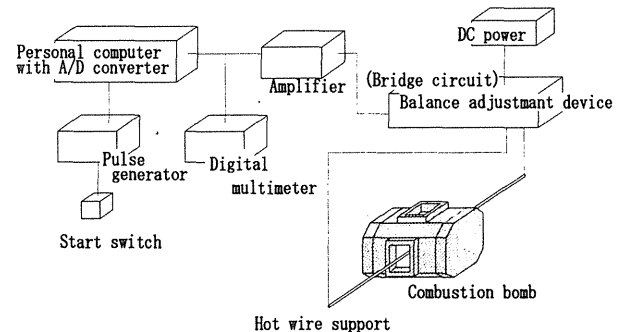


Fig.4 scale of turbulence measurement system

2.4 火炎断面計測システム

本研究における火炎断面計測は、レーザシート法を用いた。図5に火炎断面計測システム概略図を示す。火炎断面の撮影は、Nd:YAG レーザとモノクロ CCD カメラを使用し、等倍と4倍の同時刻撮影を行った。画像の収録は、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) を搭載したコンピュータを使用した。また, 燃焼状態を確認するため, 歪みゲージ式圧力計を使用し, 燃焼圧力を計測した。また, 2 台のカメラを使用し正確な火炎断面形状を撮影するために, プレート型ビームスプリッタを使用することで, 撮影角度をなくした撮影を行った。

本研究の空間分解能は, 火炎面全体を撮影する等倍撮影で 0.20mm×0.20mm であり, 火炎の一部を拡大して撮影する 4 倍撮影で 0.05mm×0.05mm である。

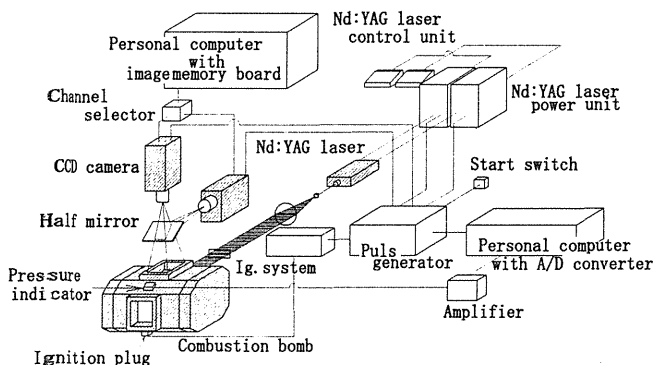


Fig.5 Flame section measurement system

3. 流速測定

3.1 ガス流動測定条件

図 6 に容器内ガス流動測定位置を示す。測定方向は, ファン軸方向を X 方向, レーザ入射方向を Y 方向, 重力方向を Z 方向とし, 容器中心を原点とした。Y 方向に関しては, 装置の関係上, 測定が困難であったため, 容器の対称性を利用し, XZ 平面の Z 方向の流速測定を行い, XY 平面の Y 方向の流速を推定した。回転数条件は, 4 枚羽根ファンでは, 350, 1500,

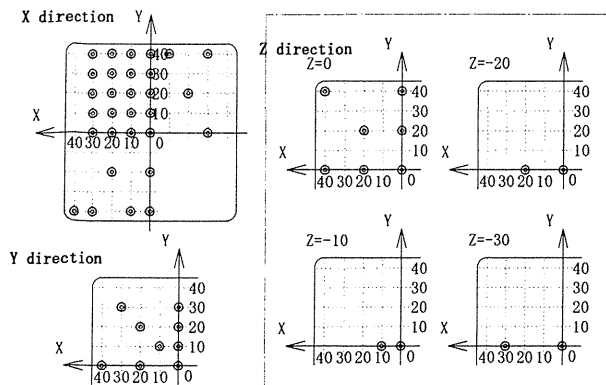


Fig.6 Gas flow measurement position

2500, 3500rpm, ショベルファンでは, 500, 2500rpm にて測定を行った。

3.2 流速測定結果

・乱れ強さ算出

図 7 に 4 枚羽根ファンの X 方向の乱れ強さを示す。回転数が上がることで, 乱れ強さがほぼ一定の割合で増加していることが分かる。また, 乱れ強さが測定位置によらず近い値を示しており, これはショベルファンも同様な結果となった。これより方向別の乱れ強さは, 容器内で均一である。しかし, 4 枚羽根ファン, ショベルファン共に同一計測点において X 方向の乱れ強さが小さい結果となった。ただし, ファン回転数 2500rpm までの回転数では, 平均乱れ強さとの差が最大で 10% 程度であるため, 3 方向で乱れ強さがほぼ一定であると言える。また, 4 枚羽根ファン 350rpm とショベルファン 500rpm, 4 枚羽根ファン 1500rpm とショベルファン 2500rpm の乱れ強さがほぼ等しい結果になった。これより, 形状の異なる乱れ発生装置を使用し, 同程度の乱れ強さを発生させることができた。

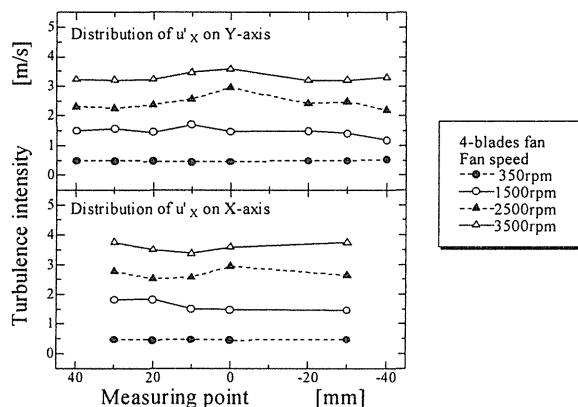


Fig.7 X direction turbulence intensity

4. 乱れのスケール計測

4.1 スケール計測条件

計測は, XY 平面 Y 軸上を計測する為, 熱線を垂直に設置し $x=0\text{mm}$, Y 軸方向に 10mm おきに 30mm までと $x=10\text{mm}$, $y=20\text{mm}$ の計測を行った。容器中心と $x=10\text{mm}$, $y=20\text{mm}$ においては, 熱線 1 系統, 熱線 2 系統のそれぞれを動かし, それ以外は熱線 2 系統のみを動かし計測を行った。また, 熱線垂直方向から 90 度傾けた水平方向でのスケールを確認す

るために、熱線を水平に設置し $x=0\text{mm}$, $y=20\text{mm}$ にてスケールの計測を行った。回転数条件は4枚羽根ファンでは、350, 1500, 2500, 3500rpm, ショベルファンでは、500, 2500rpm で計測を行った。

4.2 スケール計測結果

4枚羽根ファンの熱線垂直方向と熱線水平方向での各種スケールの結果より熱線の方向を90度傾けても、スケールの値に大きな変化がないことを確認した。また、ショベルファンに関しても同様の結果が得られた。

(1) マクロスケール

図8に、4枚羽根ファンおよびショベルファンのマクロスケールの結果を示す。4枚羽根ファン、ショベルファン共に回転数が上がり乱れ強さが大きくなるとマクロスケールが大きくなる傾向があった。また、計測位置が容器中心から側壁へ移動するとマクロスケールが大きくなっている。これは、壁面付近の流れが不安定であることが影響しているのではないかとと思われる。

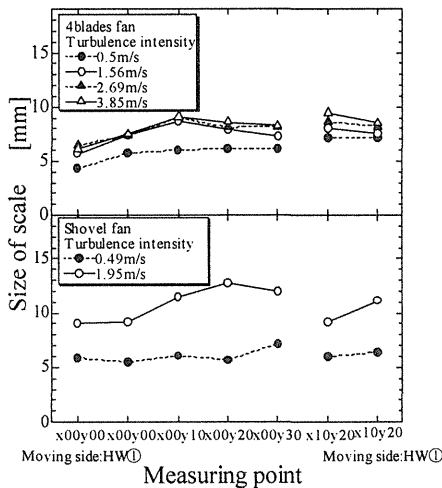


Fig.8 Result of Macro scale

(2) マイクロスケール

図9に、4枚羽根ファンおよびショベルファンのマイクロスケールの結果を示す。マクロスケールと同様に、乱れ強さが大きくなると、マイクロスケールも大きくなる傾向が見られた。また、4枚羽根ファンの乱れ強さ0.5m/sを除く、Y軸上の計測点においてスケールが均一でないのが分かる。しかし、中心から少し離れた $x=10\text{mm}$, $y=20\text{mm}$ の場所においてはほぼ同程度のスケールが得られている。これらの

事から、Y軸上は左右から来る流れがぶつかり合う場所であり不安定な流れになっているのではないかと推測する。ショベルファンでは、計測場所に関係なくほぼ同程度のスケールが均一に分布していることが分かる。

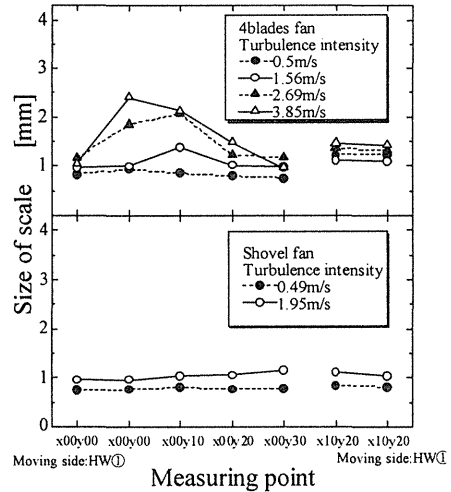


Fig.9 Result of Micro scale

5. 燃焼実験

5.1 燃焼実験条件

燃焼実験に使用する予混合気は、予混合気生成タンク内にプロパンと空気を当量比1となるように分圧法を用いて生成し、ファンにより十分に攪拌した。予混合気は、真空引きした定容容器内に初期圧0.1MPaで充填した。火炎断面計測は、等倍画像と4倍画像の同時刻撮影で行った。撮影時刻はすべての条件にて点火後4ms, 6ms, 8ms, とし回転数条件は4枚羽根ファンでは、350, 1500, 2500, 3500rpm, ショベルファンでは、500, 2500rpm で計測を行った。また、燃焼圧力の計測も同時に行なった。

5.2 燃焼圧力

図11に4枚羽根ファン、ショベルファンの燃焼圧力波形を示す。乱れ強さが増加することにより、圧力ピーク値までの時間は早くなり、圧力ピーク値が上がっていることが分かる。これは、燃焼時間が短縮されていることを示しており、乱れ強さが大きくなるにつれて、燃焼が促進されているとがわかる。これより、乱れ強さ3.85m/s(4枚羽根ファン3500rpm)までは燃焼を促進しているといえる。しかし、今回の圧力波形から乱れ強さが大きくなればな

るほど燃焼を促進するのではなく燃焼を促進する限界値があることが推測できる。

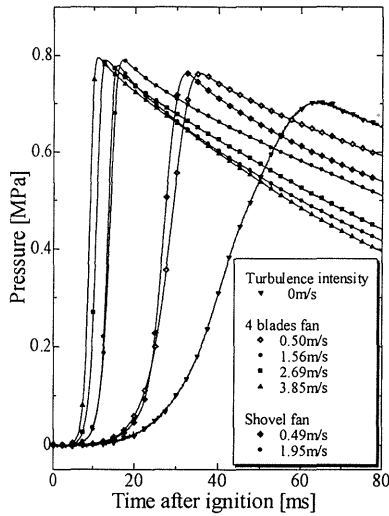


Fig.11 Result of combustion pressure

5.2 火炎断面画像

火炎断面計測により得られた画像の例として、4枚羽根ファンの乱れ強さ 0.50m/s 及び 2.67m/s, 点火後 6ms における火炎断面画像を図 12 に示す。火炎画像から分かるように、乱れ強さが大きくなると火炎形状が複雑になり、燃焼が促進されていることがわかる。

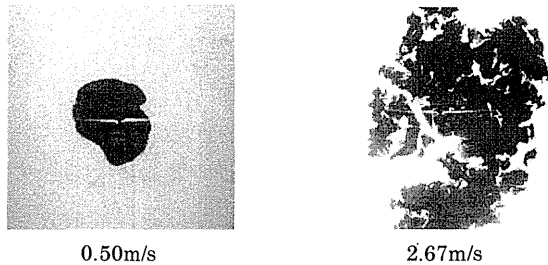


Fig.12 Flame cross section image

5.3 フラクタル次元算出結果

図 13, 14 に 4 枚羽根ファン, ショベルファンのフラクタル次元算出結果を示す。グラフより、等倍撮影と 4 倍撮影のフラクタル次元がほぼ一致していることが分かる。また、同一条件の燃焼毎で、フラクタル次元に偏差が存在していた。これは、同一条件においても燃焼に多少のばらつきや場所による偏りがあるのではないかと考える。

各回転数における点火後の時間経過を見てみると、時間経過によってフラクタル次元に多少の変化はあ

るものの、どの回転数においてもほぼ一定のフラクタル次元を示していることが分かる。よって、時間経過によって火炎の複雑さは変化していないと言える。乱れ強さが 0.5m/s 程度で揃っている 4 枚羽根ファンとショベルファンのフラクタル次元算出結果を比べると、ほぼ一致していることが分かる。また、この乱れ強さにおいては、マクロスケール、マイクロスケールとも一致している。よって、火炎表面の凹凸の形成には、乱れの特徴値が影響していると言える。乱れ強さが 4 枚羽根ファンで 1.56m/s, ショベルファンで 1.95m/s と比較的同程度の乱れ強さにおいて、フラクタル次元、周波数分布を比べても、ほぼ一致していた。スケール計測結果を見てみると、マイクロスケールには変化が無いが、ショベルファンのマクロスケールが約 3mm~5mm 大きいことが分かる。つまり、乱れ強さ 2m/s 程度の流れにおいて、マクロスケールに 3mm~5mm 程度の差が生じて、フラクタル次元への影響は少ないと言える。

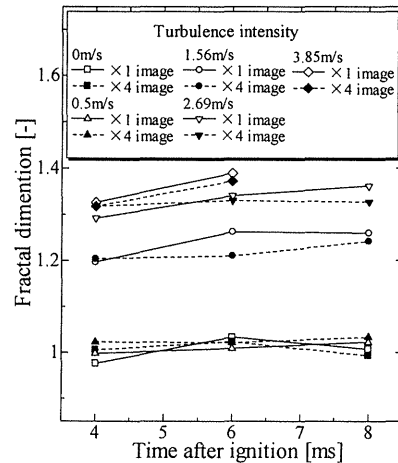


Fig.13 Fractal dimension of 4 blades fan

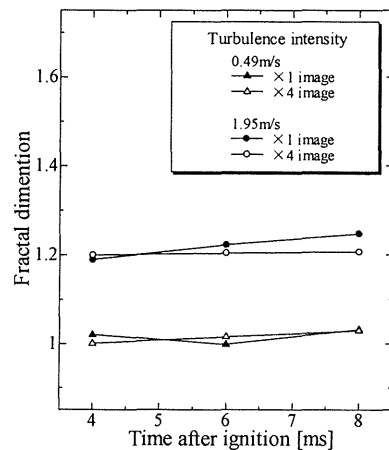


Fig.14 Fractal dimension of Shovel fan

5.4 乱流場における燃焼の評価

(1) 4枚羽根ファン乱れ強さ 0.0m/s と 0.50m/s

乱れ強さ 0.0m/s の流れ場で火炎断面形状は、ほぼ球状に広がっている。一方、乱れ強さ 0.50m/s の流れ場においては、火炎断面形状は大きく緩やかな凹凸を持った火炎ができています。しかし、フラクタル次元はともに1程度でありはっきりとした差は見られなかった。燃焼圧力を比較すると、乱れ強さ 0.50m/s のほうが圧力ピークまでの時間が短くなっており、燃焼が促進されている。これは、ショベルファンでも同様の傾向であったことから、乱れ強さが少しでも存在することで、フラクタル次元に影響が無い程度の凹凸が形成され、燃焼が促進されていると推測できる。

(2) 4枚羽根ファン乱れ強さ 0.50m/s と 1.56m/s

火炎断面形状を見ると、乱れ強さが 0.50m/s と 1.56m/s では、乱れ強さが大きくなったことによって火炎面が複雑になっていた。フラクタル次元は、乱れ強さが 0.50m/s のとき 1.0 であったが、1.56m/s では 1.2 と高くなった。燃焼圧力は、乱れ強さが大きくなることで圧力ピーク値までの時間が短くなり燃焼が促進されていた。スケールについて比較を行うと、乱れ強さが増加することで、マクロスケールは大きくなった。マクロスケールは大きくなっているが、ショベルファンとの比較で、2m/s 程度の乱れ強さでは、マクロスケールに 5mm 程度の変化が生じても火炎面に影響を及ぼさないことが分かっている。このことからマイクロスケールの影響ではなく、乱れ強さが大きくなることで、より火炎面の複雑さが増し燃焼が促進されたと推測できる。

(3) 4枚羽根ファン乱れ強さ 1.56m/s と 2.67m/s

火炎断面形状を見ると乱れ強さ 2.67m/s の方が、細かな凹凸が増え、より複雑になっていることが分かる。乱れ強さ 1.56m/s と比べ乱れ強さ 2.67m/s がより複雑になったのは、マイクロスケールの成長と、乱れ強さの増加が影響し、フラクタル次元が増加したと思われる。

(4) 4枚羽根ファン乱れ強さ 2.67m/s と 3.85m/s

スケールは、大きな違いはなかった。乱れ強さ 2.67m/s と 3.85m/s では、フラクタル次元が 0.03 程度

しか違いがないことから火炎形状に多少の歪みはあるが複雑さには違いがないことが分かる。4枚羽根ファンを使用した場合、乱れ強さを増加させることは、火炎の変形には効果があるが、これ以上乱れ強さを大きくしても火炎表面の凹凸の複雑さは変化しないと考える。これは、燃焼圧力結果からも同様のことが言える。

以上のことから、乱れ強さを大きくすることで火炎面の複雑さを表すフラクタル次元が大きくなることが分かった。また、乱れのスケールの種類や条件によっては、火炎面の形状は変化するのではないかと思われるが明確には分からなかった。また、乱れ強さを大きくしても、火炎面はある一定以上に複雑にならず、凹凸形状の複雑化による燃焼の促進には限界があると推測される。

6. 結論

乱れと火炎形状の関係を調査するために、乱れを発生させることが可能な定容容器を用いて、LDV による容器内ガス流動の測定、熱線による乱れのスケール計測及びレーザシート法による火炎断面計測を行い、乱れ強さ、乱れのスケールと火炎形状の解析を行った結果以下の結論を得た。

- (1) 乱れ強さが 2m/s 程度の時、マクロスケールが火炎凹凸に及ぼす影響は少ない。
- (2) 乱れ強さと火炎断面形状のフラクタル次元の関係から、乱れ強さを非常に大きくしても、火炎表面はある一定以上に複雑にはならないという傾向を見いだすことが出来た。

参考文献

- 1) 山本ら他 3名, 日本機械学会論文集, 旋回噴流燃焼器を用いた強乱流予混合火炎の研究, 66 巻, 666 号, P603
- 2) 浜本ら他 3名, 日本機械学会論文集, 密閉容器内均一混合気の燃焼に及ぼす旋回乱流の影響, 53 巻, 488 号, P1395
- 3) 浜本ら他 4名, 日本機械学会論文集, 密閉燃焼室内乱流予混合火炎のフラクタル解析, 64 巻, 623 号, P2325