

# 乱れ容器による予混合気燃焼の実験的研究 (乱れと火炎形状に関する基礎実験)

田坂英紀<sup>1)</sup>・福井 大介<sup>2)</sup>・友松重樹<sup>3)</sup>

## Experimental Study for Premixed Gas Combustion in a Constant Volume Bomb with Turbulence (Fundamental Experiment of Turbulence and Flame Structure)

Hidenori TASAKA, Daisuke FUKUI, Shigeki TOMOMATU

### Abstract

In this study, it aimed at solving the relation between gas flow and flame structure for the purpose of the improvement in thermal efficiency of an internal combustion engine. However, It is difficult to analyze the inside of the chamber of an internal combustion engine, since it is complicated and capacity change takes place. Then, those relations were quantitatively analyzed by measuring turbulence intensity on three directions by LDV and measuring a flame section by the laser sheet method using a constant volume bomb. As a result, it turns out that turbulence forms unevenness with the small flame surface and promotes combustion, and that the promotion is proportional to turbulence intensity. In addition to the above, the authors attempt to take expanding images with the former of a flame section.

### Key Words:

*Internal Combustion Engine, Constant Volume Bomb with Turbulence, Turbulence Intensity, Flame Structure*

## 1. 緒論

我々の生活に必要な不可欠なものとなった自動車は、そのほとんどが内燃機関によって動力を得ている。内燃機関は枯渇が心配される化石燃料を動力源とし、また酸性雨や温暖化、大気汚染などの原因となっているNO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CO<sub>x</sub>などを含んだガスを排出する。しかし、それに代わる電気自動車や燃料電池車などが一般に普及するには、生産コスト、走行距離、出力やインフラの整備などを考えると、まだかなりの時間を要すると思われる。そこで、内燃機関が地球に及ぼしている悪影響を低減させるために、内燃機関を改善する必要がある。その方法の一つとして、熱効率の向上が挙げられる。

シリンダ内に取り入れた燃料を効率良く燃焼することで熱効率の向上を促し、自動車の低公害化、低燃費化、高出力化を図ることができる。そのためには燃焼とガス流動との関係を解析し解明する必要がある。

今日まで、火花点火機関における燃焼を解析するために、それを簡略化した定容容器を用いて、燃焼と乱れの関係に関する多くの実験的研究が行われてきた。それらの研究方法として、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法が用いられてきている。従来は、これらの方法により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。近年、レーザ装置の普及により、レーザ光源をシート状にしてレイリー、ミー、ラマンなどの散乱法を用いた瞬間的な二次元分布の計測による研究も行われてきた。従来からの直接観察、シャドウグラフ法、シュレーレン法などの可視化法は火炎の巨視的な観察には有効で

1) 機械システム工学科教授

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助手

あるが、局所的な火炎挙動を解析することは困難であった。

これらの散乱法を用いた二次元可視化計測はバーナ火炎に多く適用されたが、近年パルス発光のNd-YAG レーザ等を用いて瞬間的な乱流火炎断面画像を撮影することにより火炎の微視的な形状の変化を観察した研究も報告されている。しかし、乱流火炎の微視的構造は、未だ解明されるに至っていない。

ガス流動と燃焼の関係解明するためには、内燃機関内にガス流動を発生させ、それを変化させる必要がある。しかし、内燃機関の内部構造は複雑な上、時間と共に容積が変化するため、機関内の燃焼を解析することは極めて困難である。そこで、燃焼室構造を簡略化し、かつ容積変化のない定容容器を用いて現象を単純化することで、燃焼特性の定量的な解析を容易にすることができると思われる。

本研究では特に、ガス流動の乱れ成分に着目し、乱れを変化させることのできる定容容器を用いて、レーザドップラ流速計によって流速計測を行う。また燃焼火炎はレーザシート法を用いて火炎断面計測することで、乱れと火炎形状の関係を調査することを目的とする。

## 2. 実験装置及び実験方法

### 2.1 定容容器

図1に本研究で使用した定容容器概略図を示す。定容容器は、内容積約3300cm<sup>3</sup>のほぼ直方体の燃焼室を有する容器である。容器内に乱れを発生させるため、同期装置により、2つのファンを逆回転で同期回転させ

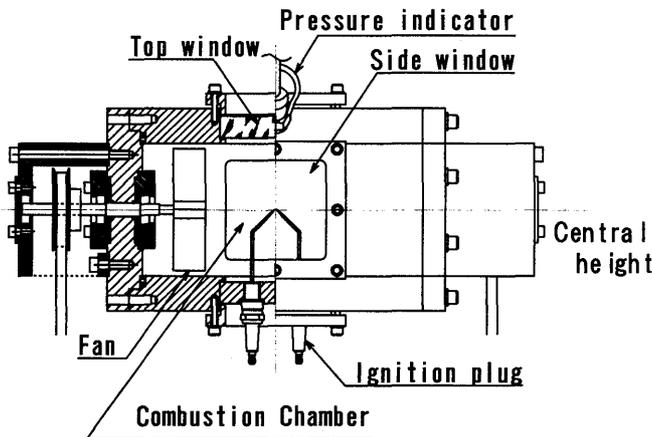


図1 定容燃焼容器概略図

せた。面積の等しい容器側面4面には、観測窓を取り付けられるようになっており、底面にはプラグ取り付け用アダプタと散乱粒子供給装置を設置している。

### 2.2 ガス流動計測システム

乱れの強さが火炎に及ぼす影響を解明するために、まず定容容器内のガス流動の計測を行った。図2にガス流動計測システム概略図を示す。ガス流動発生用ファンにはファン直径114mm、羽根高さ30mmの4枚羽根ファンを用いた。本研究では周波数シフトシステムを有する後方散乱LDVを用いてその計測を行った。流速データは、サンプリング周波数20kHzとし、一回の取り込みで16384pts(0.8192sec)を記録し、30データを有効データ数とした。ガス流動計測は後方散乱LDVを用いて、容器内の2方向計測を行った。

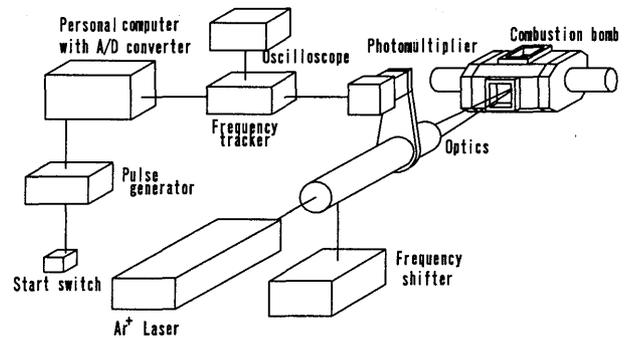


図2 ガス流動計測システム概略図

### 2.3 火炎断面計測システム

図3に、火炎断面計測システム概略図を示す。本研究では、レーザシート法による火炎断面撮影を行った。火炎断面の撮影は、パルス発光のNd-YAG レーザ2台と、モノクロ CCD フレームシャッターカメラ2台を用いて2連続撮影を行った。画像収録はイメージ

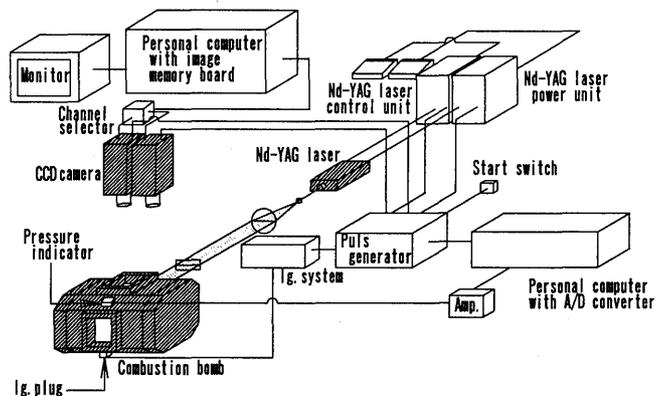


図3 火炎断面計測システム概略図

モリーボード (画素数: 512×512, 濃淡分解能: モノクロ 256 階調) を備えたコンピュータを用いて行った。

### 3. 流速計測

#### 3.1 ガス流動計測条件

ファン回転数は 250, 500, 1000, 1500, 2000, 2500rpm とした。

計測方向は, レーザ入射方向を X 方向, モータ軸方向を Y 方向, XY 平面に垂直方向を Z 方向とした。計測は, XY 平面上で行い, 計測位置は X 軸と Y 軸が交差する点を原点として, X 軸上のレーザ入射方向に 10mm おきに 40mm まで, Y 軸上のレーザ入射方向から見て左側に 10mm おきに 40mm までとした。

#### 3.2 流速計測結果

本実験では, Y, Z の 2 方向しか計測が行なえなかった。そこで, 3 方向から計測した昨年度の流速データとの比較を行なうことで, 本年度の X 方向の流速傾向を推察することとした。本実験における乱れ強さの算出にあたり, FFT を用いたバンドパスフィルタにより 10Hz 以下の周波数をカットし, またノイズと考えられる周波数以上もカットすることで算出を行なった。例として図 4 に昨年度容器内 3 方向乱れ強さ, 図 5 に本年度容器内平均乱れ強さを示す。

グラフより, 基本的なガス流動の傾向としては同じであることがわかり, X 方向の乱れ強さにおいても, 同じような傾向が得られると考えられる。また, 図 6 に示すように計測方向の違いによって乱れ強さの差はほぼ無いと考えられる。また, 乱れ強さの範囲を従来の 2 倍に広げて計測することができた。

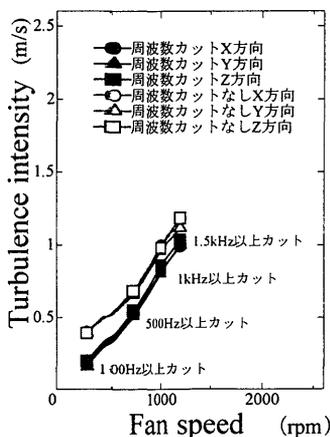


図 4 昨年度乱れ強さ

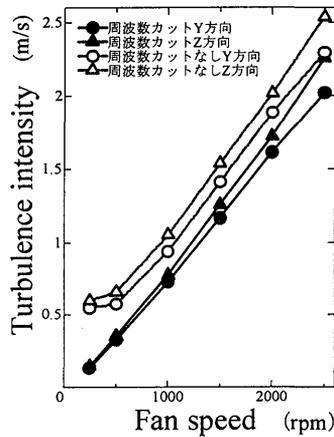


図 5 本年度乱れ強さ

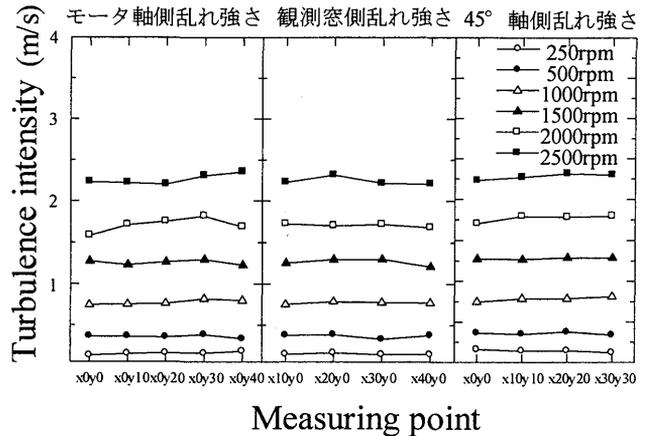


図 6 Z 軸方向容器内計測位置別乱れ強さ

### 4. 燃焼実験

#### 4.1 燃焼実験条件

まず, 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圧縮空気を当量比 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。予備実験で撮影した画像において, 特徴的な火炎面形状が見られたファン回転数 0, 250, 1000, 2500rpm について火炎断面計測を行った。各ファン回転数別の平均乱れ強さは, 250rpm で 0.14m/s, 1000rpm で 0.76m/s, 2500rpm で 2.14m/s である。火炎断面計測は, 同一火炎を異なる時刻で 2 連続撮影を行った。撮影空間分解能は, レーザシート全体が撮影範囲に写る状態で 0.22×0.22mm (以下, 1 倍) であり, 撮影時間間隔を 1msec とした。また, 局所火炎を観察するために行なった拡大撮影では, 空間分解能を 0.11×0.11mm (以下, 2 倍) 及び 0.06×0.06mm (以下, 4 倍) とした。拡大 2 連続撮影の時間間隔は 0.1msec とした。また, 燃焼圧力の計測も同時に行なった。

#### 4.2 画像処理

カメラのメモリに取込まれた画像は, 画像処理ボードを備えたパーソナルコンピュータにより, ハードディスクへと取込まれる。火炎画像は火炎面を抽出するために, 二値化及び輪郭線の抽出を行った。本研究に使用した定容容器のレーザシート入射窓が 90×90mm と大きく, 火炎画像を撮影する際に用いるレーザシートの中央部と端部に若干の輝度むらが生じてしまうため, 輝度値を加算した後画像の局所での

火炎の判別により二値化を行った。

### 4.3 火炎断面計測結果及び考察

#### (1) 燃焼圧力経過

燃焼圧力の時間経過を図7に示す。図より、乱れ強さが大きくなるにつれて、燃焼圧力のピークまでの時間が早くなっていることがわかる。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推測できる。また圧力のピーク値も乱れ強さに伴って上昇していることがわかる。

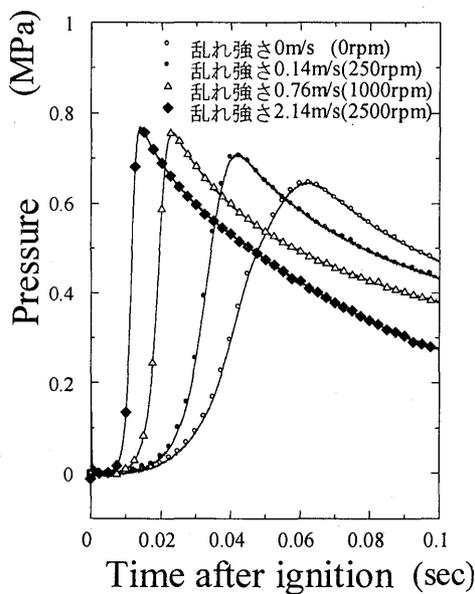


図7 燃焼圧力の時間経過

#### (2) 1倍火炎断面計測

1倍火炎画像からは、火炎断面積、周囲長無次元数、火炎凹凸度及び火炎伝播速度の算出を行った。レーザシートからはみ出した火炎画像についてはこれらの算出が行なえず、また、その画像の主たる火炎からのみ算出を行っているため、島状の火炎は算出値に反映されていない。図の破線部分は、島状火炎が現れた時間帯もしくは同じ撮影時刻にレーザシートからはみ出している画像が確認できた時間帯を示している。この時間帯に撮影された火炎画像については、撮影範囲からはみ出していない火炎画像を選んで算出している。以上のことを踏まえて以下に考察を示す。

#### < I > 乱れと燃焼の関係

燃焼圧力の結果より、乱れ強さの増加とともに燃焼

時間が短縮されることから、乱れは燃焼に強く影響していると思われる。燃焼性を測る指標として火炎断面積の時間経過が挙げられる。

#### (i) 火炎断面積の時間経過

火炎断面積の時間経過を図8に示す。縦軸は火炎断面積、横軸は点火後の時間経過となっている。この図より、どの条件においても、時間経過とともに面積が増加しており、その増加率も上昇していることがわかる。乱れ強さ0.76m/sの火炎については、時間の経過に伴い、急な面積増加が見られる。これは、0.14m/sに比べ、乱れ強さが増加したことにより、燃焼がより促進され、急な断面積の増加に繋がったと考えられる。乱れ強さ2.14m/sの火炎では、燃焼初期から他の乱れ強さでの火炎に比べ断面積に差が見られる。これは、乱れ強さの増加に伴い、燃焼初期段階から燃焼が促進されたためであると考えられる。乱れ強さの増加に伴い、火炎断面積が増大したと考えられる。

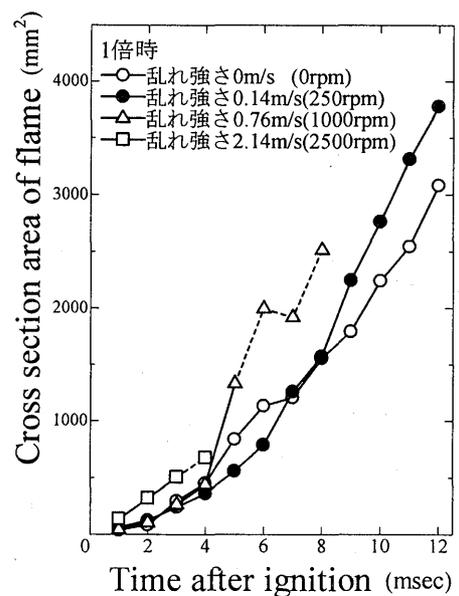


図8 火炎断面積の時間経過

#### (ii) 火炎伝播速度と等価円半径の関係

火炎伝播速度と等価円半径の関係を図9に示す。この図より、乱れ強さが大きくなるほど、等価円半径に対する伝播速度の増加率が大きくなっていることがわかる。燃焼初期ではどの乱れ強さにおいても、伝播速度が1~2m/s付近であることから、乱れの影響により、火炎伝播速度は火炎の成長過程において加速されていると思われる。

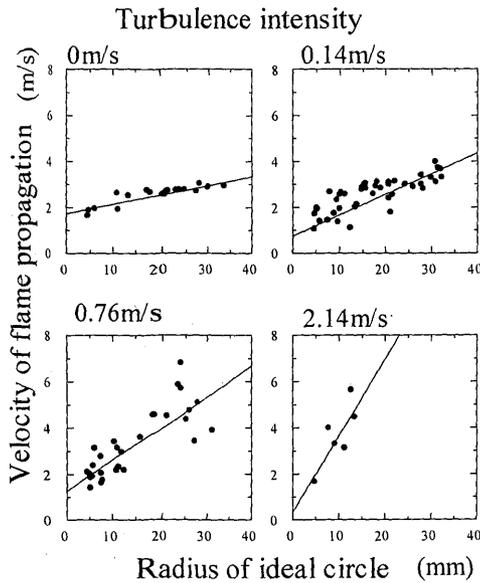


図9 火炎伝播速度と等価円半径の関係

<II> 乱れと火炎面形状の関係

乱れが火炎面にどのような影響を及ぼすかを調べるために、火炎面形状を評価する方法として、火炎凹凸度及び火炎周囲長無次元数を算出した。

(i) 火炎凹凸度の時間経過

火炎凹凸度は、火炎全体の大きな歪みの評価に有効である。火炎凹凸度の時間経過を図10に示す。縦軸は火炎凹凸度、横軸は点火後の時間経過を表している。

図より、乱れ強さ 0m/s では時間が経過しても火炎凹凸度が 0mm 付近でほぼ変化が見られず、等価円とほぼ等しい真円形状で成長していることがわかる。乱れ強さ 0.14m/s では、時間経過とともに凹凸度は上昇傾向にあり、火炎全体の歪みが増していることがわかる。乱れ強さ 0.76m/s では、時間経過に伴う凹凸度の

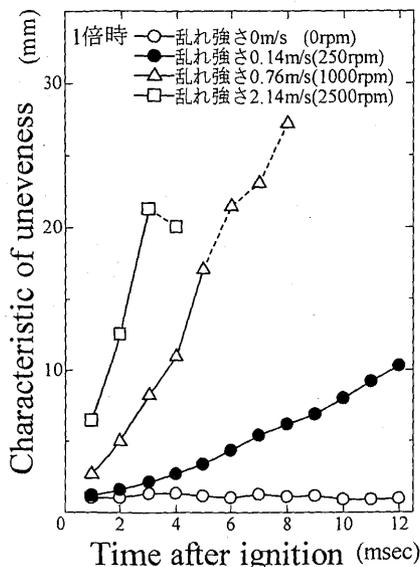


図10 火炎凹凸度

上昇が急になっており、火炎面が大きく変形しながら成長していることがわかる。乱れ強さ 2.14m/s では、燃焼初期から火炎全体が変形しており、他の乱れ強さでの火炎に比べ、凹凸度の上昇傾向がより急になっている。

(ii) 火炎面周囲長無次元数の時間経過

火炎面周囲長無次元数は、火炎の大きさによらず比較的小さな表面の凹凸を表すことができる。火炎面周囲長無次元数の時間経過を図11に示す。縦軸は火炎面周囲長無次元数、横軸は点火後の時間経過を表している。

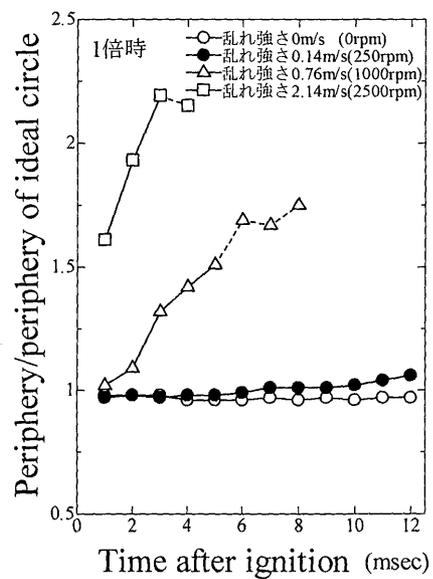


図11 火炎周囲長無次元

この図より、乱れ強さ 0m/s では、周囲長無次元数が 1 付近であり変動が見られず、火炎面に小さな凹凸が形成されていない等価円に近い真円形状であると考えられる。乱れ強さ 0.14m/s の火炎については時間経過に比例して、緩やかではあるが上昇傾向にあることがわかる。また乱れ強さ 0.76m/s においては、乱れ強さ 0m/s, 0.14m/s と比べて燃焼初期から無次元数の増加に差が見られ、2msec あたりから増加の度合いが上昇していることがわかる。これは、乱れ強さの増加に伴い燃焼が促進され、火炎面に小さな凹凸が増え、周囲長が増加し、無次元数も増加する傾向にあると考えられる。乱れ強さ 2.14m/s については、他の乱れ強さに比べ燃焼の初期より大きな差がある。これは乱れ強さの増大による影響で、燃焼初期段階から火炎表面により多くの凹凸が形成されていると推測できる。以上のことより、乱れ強さの増加に伴い、火炎はより複

雑に成長していると考えられる。

### (iii) 乱れと火炎形状

今回撮影された火炎画像から得られた傾向として、火炎が時間とともに伝播していく過程において、乱れ強さの増加が増加するにつれ、火炎全体が大きく歪んでいき、火炎表面の小さな凹凸も増している傾向がみられた。また、小さな乱れ強さでの火炎は、火炎面の小さな凹凸より、大きな歪みの方が顕著に現れていると思われる。

以上の結果より、乱れは火炎面の形状変化に大きな影響を及ぼしていると思われる。また、火炎形状が複雑に変形することにより、燃焼を促進させることがわかった。

### (3) 火炎拡大撮影

本研究の燃焼実験では、微小時間での火炎表面の動きを見るため、火炎断面の0.1msec間隔2連続拡大撮影を行った。拡大撮影によって得た火炎画像の例を図12, 13に示す。これらの火炎画像を定量的に考察することは困難であったため、拡大することにより確認できる火炎形状の特徴を調べた。

2倍拡大画像では、1倍火炎画像では確認することが困難な火炎表面の凹凸形状を確認することができた。また、既燃部に挟まれた線状の未燃部も多くの画像から確認することができた。この線状の未燃部は約0.3~0.5mmほどの幅であり、0.1msec間に既燃部となると考えられるが、そうならない火炎も確認できた。



図12 2倍拡大画像

4倍拡大画像においては、火炎表面に渦を巻いた細長い突起形状の火炎が見られた。また、乱れ強さ0.76m/sの火炎表面からもや状に写っている部分が確

認される。これは、乱れ強さの上昇につれ火炎帯が厚くなることや、空間分解能の向上により、火炎帯内で起こっている散乱粒子の濃度差変化を捉えているのではないかと考えられる。



図13 4倍拡大画像

## 5. 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のできる定容容器を用いて、LDVによるガス流動計測及びレーザシート法による火炎断面の撮影を行った結果、以下の結論を得た。

- (1) 燃焼実験を行なうことのできる乱れ容器内で乱れを発生させ、昨年度の2倍の乱れ強さまで変更することができた。
- (2) 乱れ強さの増加に伴い、火炎面の大きな歪み及び小さな凹凸が増加することで、燃焼が促進されることがわかった。
- (3) 従来の2倍及び4倍に拡大して撮影したことで、従来の実験では確認できなかった局所的な火炎形状を観察することができた。

### 参考文献

- (1) 浜本ら他2名, 日本機械学会論文集, 火炎写真の解析による密閉容器内乱流予混合気火炎の研究, 54巻, 504号, P2214
- (2) 植田ら他2名, 日本機械学会論文集, シリコンオイル液滴を用いたミィ散乱法の燃焼場への適用, 57巻, 541号, P3255
- (3) 吉山ら他2名, 第39回燃焼シンポジウム(2001), P183, 火花点火機関における乱流予混合気のしわ構造