

定容燃焼容器による予混合気の燃焼に関する研究 (乱れ発生容器における流れ場の計測と火炎伝ば)

友松重樹¹⁾・上田 諭²⁾・田坂英紀³⁾

Research of Premixed Combustion in a Constant Volume Combustion Bomb

(Measurement of Gas Flow and Flame Propagation in Turbulent Combustion Bomb)

Shigeki TOMOMATU, Satoshi UEDA, Hidenori TASAKA

Abstract

In recent years, it is necessary and indispensable that the internal combustion engine should be improves thermal efficiency from the view point of environmental problems for decreasing exhaust gas. However, the analysis of combustion is very difficult in an actual engine, because construction of the combustion chamber is complex and volume changes by strokes. Then, we use a constant volume combustion bomb that can be controlled turbulence flow. It is effective to analysis of turbulent combustion. We measured velocity by LDV that doesn't influence on flow. And we calculated the characteristic value of flow. Moreover, we took pictures of flame section with laser sheet method and analyzed the image. With those results, the purpose is to throw light on the effect of flame by turbulence intensity and frequency in combustion bomb.

Key Words:

Internal Combustion Engine, Turbulent Combustion, Turbulence intensity and frequency

1. まえがき

近年、内燃機関は環境問題等の観点から有害排出ガス低減のため、熱効率を向上させることが必要不可欠になっている。しかし、その問題を解明する上で内燃機関の内部構造は複雑であり、時間とともに容積が変化するため、解析は非常に困難である。そこで内部構造を簡略化し、乱れを制御することのできる定容燃焼容器を使用することによって、乱流場における燃焼を解析することは乱流燃焼を解明するために有効である。

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

本研究ではガス流動に影響を与えないLDVで燃焼容器内の流速を計測し、乱れの特性値を算出する。また、レーザシート法を用いて火炎断面の撮影をし、画像解析を行う。それらの結果より燃焼容器内の乱れ強さ、乱れの周波数が火炎に及ぼす影響を解明することを目的とする。

2. 実験装置及び計測原理

2-1 定容燃焼容器

図1に本研究で使用した燃焼容器を示す。この燃焼容器は燃焼室内幅約260mm、高さ、奥行き約120mm、容積約3300cm³である。燃焼室壁の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。流速測定時には、側方観測窓と上方観測窓に厚さ 2.5mm のソーダ石灰ガラスを用い、燃焼実験時には光学的に歪の少ない厚さ 20mm のガラス (BK7) を使用した。図 1 に示すように容器四隅には、歪みゲージ式圧力インジケータや散乱粒子供給装置用電極等を設置できるようになっている。散乱粒子供給装置は、流速測定時の散乱粒子や火炎断面計測に用いる散乱粒子を発生させる装置である。散乱粒子にはオイルスモークを使用し、容器にオイルを満たし、その中に浸したニクロム線に電流を流すことによって発生させた。

側方観測窓に対して垂直方向にある側面にはガス流動発生用ファンが設置され、外部から交流モータによって駆動する。ファンは容易に交換できるようになっており、本研究では $\phi 114\text{mm} \times 30\text{mm}$ の遠心ファンと $\phi 115\text{mm}$ 、容器側壁に対して傾斜角 10° の傾斜円盤を使用した。側方観測窓取り付け面の対面には予混合気吸入口、燃焼ガス排気口兼水銀マンオメータ取り付け口がある。

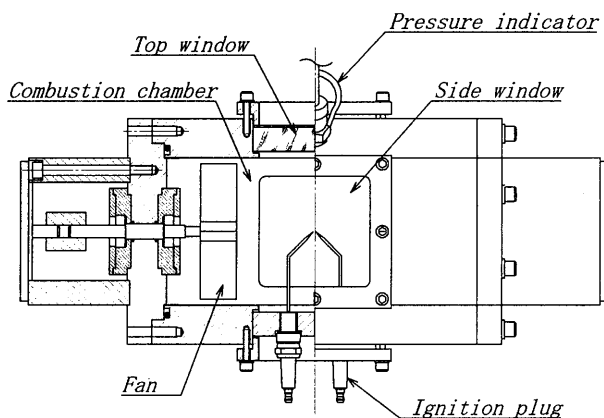


図 1 定容燃焼容器概略

2-2 LDV 装置

本研究で使用した LDV は、差動形法 (Dual Beam Mode) である。散乱光の受光方式は、観測窓が 1 つで済み、測定範囲の自由度がより広がる後方散乱方式を用いた。

2-3 火炎断面計測原理

本研究の火炎構造の解析は、火炎の一断面を撮影することのできるレーザーシート法で行った。レーザーシート法とは、シート状にしたレーザーを検査部に照射し、その散乱光の画像から可視化を行う方法である。

これは、燃料または予混合気に散乱粒子をシードし、

反応帯通過前後の濃度分布による散乱光の強弱を記録する方法であり、散乱光強度が強いため比較的簡単な装置で撮影ができる。散乱光強度は粒子の濃度に比例し、火炎面の前後での散乱粒子濃度の急激な変化を利用し、火炎断面を計測することができる。その瞬間の火炎断面を撮影しコンピュータに取り込み、画像処理をすることにより火炎面の観察を行う。

火炎断面の計測精度には、空間分解能と時間分解能とがある。空間分解能は使用する散乱粒子の径やその供給濃度に左右されるが、散乱粒子の直径は $2 \sim 5 \mu\text{m}$ でありレーザーシートは一樣な厚さとなるため大きな影響はなく、主に燃焼容器からテレビカメラまでの距離に依存し、距離が離れると、火炎が小さく写り、1画素あたりに与えられる情報が大きくなる。その結果空間分解能は低下する。本研究では約 0.068mm^2 の計測が可能である。時間分解能は Nd-YAG レーザの発光時間が $5 \sim 7\text{nsec}$ と短いためそれのみに依存し、テレビカメラのシャッタースピードには影響を受けない。しかし、シャッターを開けすぎると火炎の自発光の影響により、火炎断面以外の輝度値が相対的に高くなり、コントラストが悪くなる場合がある。

3. ガス流動測定結果および考察

3-1 容器内 3 方向乱れ強さ

本年度は 6.25Hz 未満の周波数成分は左右のファン回転数差によって偶発的に発生するものと考えられたため除去し、それ以上の周波数成分のガス流動について解析を行った。

図 2, 3 にモータ軸側と側方観測窓側の各測定位置、回転数における X 方向成分の乱れ強さ分布を示す。

グラフより各条件の X 方向成分の乱れ強さは測定位置によらず、ほぼ等しいことがわかる。これは他の方向成分の乱れ強さについても見る事ができた。遠心ファンでの乱れ強さは、ファン回転数の増加に伴って、ほぼ一定の増加率を示した。また、傾斜円盤 6000rpm の乱れ強さは遠心ファン 1200rpm とほぼ同じ値を示す結果となった

3-2 乱れの周波数解析結果

3-2-1 遠心ファン周波数解析結果

図 4 に遠心ファンの各設定回転数 (1000, 1200rpm) における燃焼容器内の代表点 (X, Y) = (0, 0), (0, 20),

(20, 0) での X 軸方向流れの乱れ成分の周波数解析結果を示す。本研究では 6.25Hz 未満の周波数成分は除去するため、FFT を用いて周波数解析を行い、その後、High pass filter (HPF) によって 6.25Hz 以下の周波数帯を除去した。図に示すデータは、乱れの周波数が他の回転数と比較しやすいように全パワーを 1 として正規化したものの 20 データ分をアンサンブル平均したものである。グラフの縦軸は乱れの相対パワースペクトル密度、横軸は周波数である。遠心ファンでは、すべての設定回転数、測定位置において、乱れの特定周波数のピークは現れなかった。また、すべての条件で、

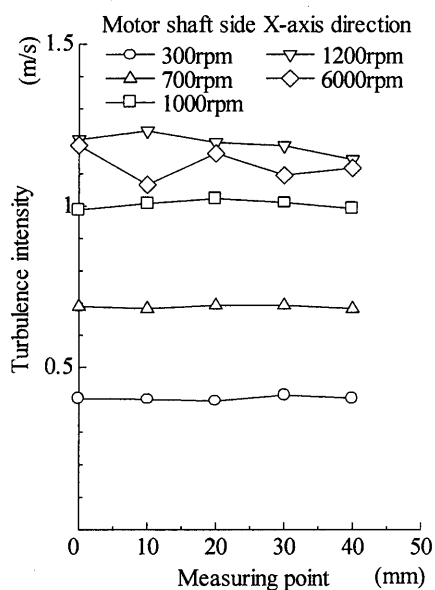


図 2 X 軸方向モータ軸側乱れ強さ

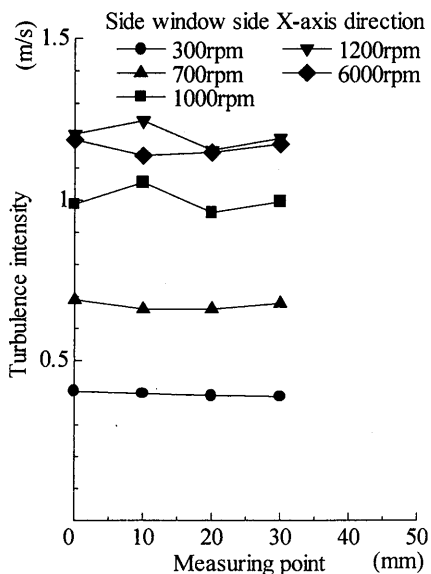


図 3 X 軸方向観測窓側乱れ強さ

100Hz 以下の周波数成分の占める割合が多くなっているが、その割合も遠心ファンの回転数の上昇に伴って多くなっている。

3-2-2 傾斜円盤周波数解析結果

図 5 に各測定位置での傾斜円盤 6000rpm の全方向乱れの周波数解析結果を示す。傾斜円盤 6000rpm も遠心ファンと同じく 6.25Hz 未満を除去した後に解析を行った。

傾斜円盤 6000rpm の周波数解析結果を見ると、約 100Hz に周波数ピークが現れる結果となった。しかし Y 軸上の Y 方向では周波数ピークが現れない結果となった。これは傾斜円盤の回転運動では、Y 軸上の Y 方向に周期的な乱れが発生しなかったためと思われる。

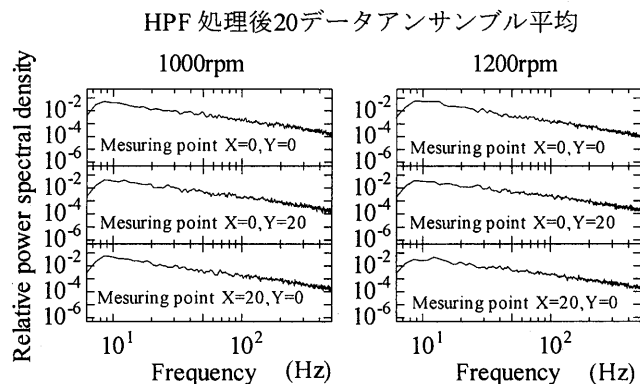


図 4 遠心ファン 1000, 1200rpm X 方向周波数解析結果

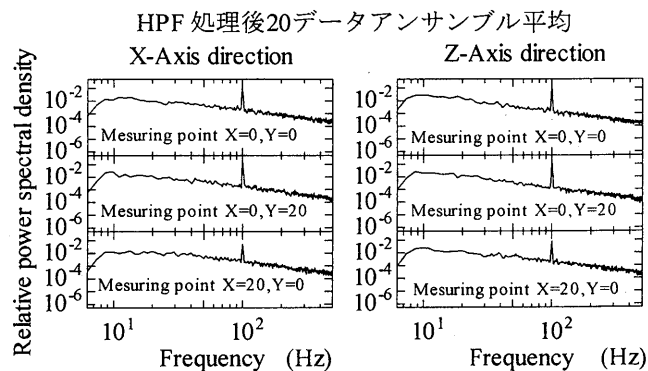


図 5 傾斜円盤 6000rpm X, Z 方向周波数解析結果

4. 火炎断面の解析

4-1 画像処理法

コンピュータのハードディスクに取り込まれた火炎断面画像は、コンピュータのソフトウェアによって火炎断面画像を処理¹⁾し、火炎の特性値を算出した。まず、画像輝度のヒストグラムを元にソフトウェアのツールを用いて2値化を行った。2値化した画像は火炎断面の特性値を得るプログラムにかけるため、白黒を反転した。その2値化画像をさらに処理することによって、輪郭線のみにした。

以上のようにして得られた、2値化画像と輪郭線を画像処理プログラムにかけ、火炎断面の特性値(図心位置、火炎断面積、周囲長、図心から輪郭構成点までの距離、火炎凹凸度、平均半径)を得た。

4-2 火炎断面計測結果および考察

図6, 7に点火後の各時刻における火炎断面積, 火炎周囲長を示す。火炎断面積のグラフを見るとデータが途中で終わっているものがあるが、これは火炎が可視化範囲からはみ出し、火炎形状特性値の算出が不可能となったためである。遠心ファンを用いた条件では、ファン回転数が高いほど同時刻における火炎断面積が大きくなった。これは燃焼容器内ガス流動の乱れが燃焼を促進したためだと思われる。傾斜円盤6000rpmの火炎断面積は、乱れ強さが遠心ファン1200rpmとほぼ同じであったが、各時刻の断面積は遠心ファン1200rpmよりも小さな値を示した。周囲長においても、遠心ファンの回転数が上昇するにつれ増加する結果となった。火炎断面積のグラフを見ると遠心ファン1000rpmの7msと1200rpmの6msでは1000rpmの方が大きくなっているが、周囲長はほぼ同じ値を示しているため、遠心ファン1000rpmと1200rpmを比較すると、遠心ファン1200rpmの火炎形状の方が複雑になっていると推測できる。

4-3 乱れ強さと火炎の関係

4-3-1 乱れ強さと火炎凹凸度の関係

図8に遠心ファン0, 300, 700, 1000rpmにおける、乱れ強さと火炎凹凸度の関係を示す。グラフより、同時刻での火炎凹凸度を見ると、ファン回転数が上昇し、乱れ強さが大きくなると、火炎凹凸度も大きくなることがわかった。しかし、この結果では燃焼容器内の乱

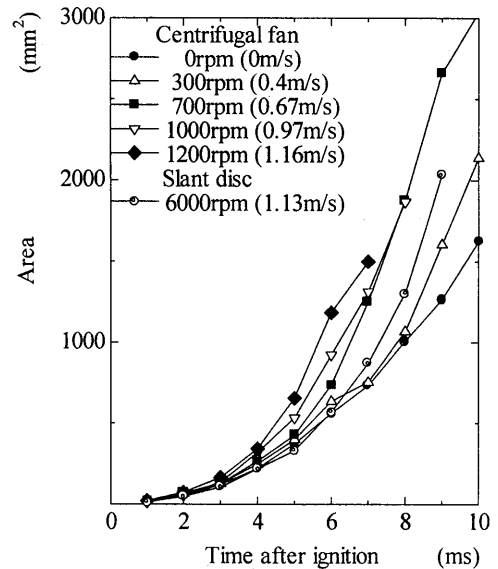


図6 火炎断面積

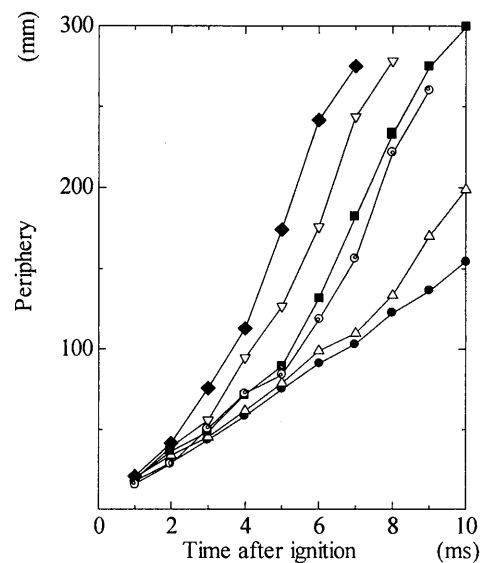


図7 火炎周囲長

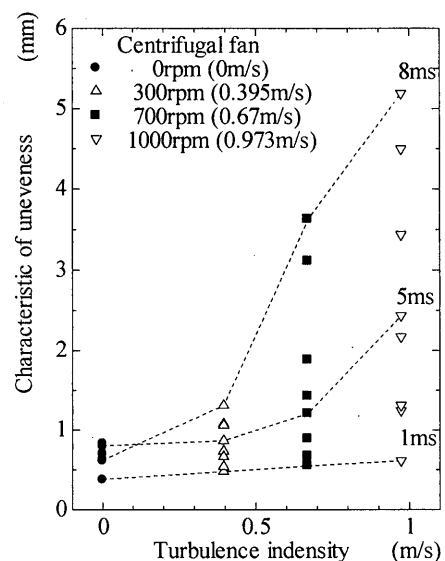


図8 乱れ強さと火炎凹凸度の関係

れ強さと火炎の形状との関係しか明らかにされないため、次に乱れ強さと火炎伝播速度との関係を調査する。

4-3-2 乱れ強さと火炎伝播速度の関係

燃焼容器内のガス流動と火炎成長との関係を見るため、図9に遠心ファン0, 300, 700, 1000rpmでの乱れ強さと火炎伝播速度との関係のグラフを示す。火炎伝播速度とは、2連続撮影によって得た2枚の火炎断面画像における等価円半径の差と撮影時間間隔から算出した値であり、算出した火炎伝播速度は、2連続撮影の中間時刻における速度とした。グラフより、どのファン回転数においても、時間が経過するごとに、火炎伝播速度は上昇していることがわかる。1.5msでは各回転数における火炎伝播速度に差は見られないが、3.5ms以降では乱れ強さの増加につれ、火炎伝播速度も増加していることがわかる。以上の結果より、燃焼初期段階では、火炎が小さいために乱れ強さの影響が現れにくい、火炎が成長するにつれ、火炎は乱れの影響を大きく受け、火炎伝播速度が増加していくことがわかる。

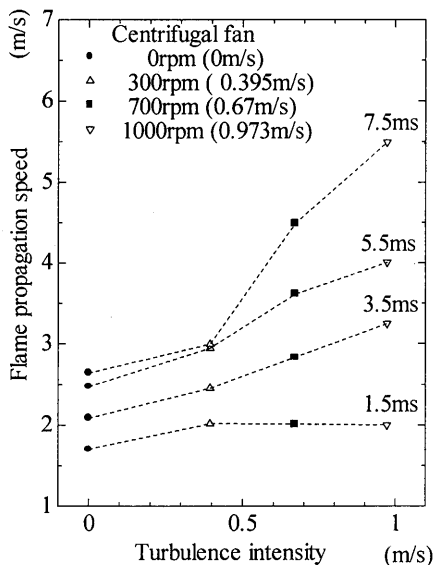


図9 乱れ強さと火炎伝播速度の関係

4-4 乱れの周波数と火炎の関係

これまでは乱れ強さで火炎の特徴を考察してきたが、遠心ファン1200rpmと傾斜円盤6000rpmでは、乱れ強さがほぼ等しいにもかかわらず、火炎断面積、周囲長、凹凸度などを比較すると、傾斜円盤6000rpmと遠心ファン1200rpmでは異なる結果を示していた。こ

れは傾斜円盤と遠心ファンのガス流動発生メカニズムが異なるためだと思われるが、火炎燃焼に及ぼす明確な結果は得られていない。そのため、ここでは乱れ強さがほぼ等しい傾斜円盤6000rpm、遠心ファン1200rpmについて、火炎凹凸度、火炎周囲長、周囲長無次元数、火炎断面積の比較を行った。

図10~13に遠心ファン1200rpmと傾斜円盤6000rpmの火炎凹凸度、火炎周囲長、周囲長無次元数、断面積の時間経過を示す。各グラフの横軸は点火後からの時間を示しており、縦軸はそれぞれ火炎凹凸度、火炎周囲長、無次元数、火炎断面積を示している。

火炎凹凸度、周囲長のグラフをみると、どちらのグラフにおいても遠心ファン1200rpmの方が傾斜円盤6000rpmよりも大きく、その増加率についても同様のことがいえる。火炎凹凸度は先に述べたように、火炎の大きな歪みを表す値であり、凹凸度の値が小さな傾斜円盤6000rpmでは火炎に大きな凹凸が少ないことがわかる。次に細かい凹凸を評価する際の火炎の大きさを排除するために、火炎周囲長を面積の等しい真円の周囲長で除した無次元数を算出した。グラフより傾斜円盤6000rpmの無次元数は時間が経過しても、その値は緩やかに増加しているが、その値は遠心ファン1200rpmと比較すると小さいことがわかる。しかし、遠心ファン1200rpmでは傾斜円盤6000rpmよりも値が大きく、時間が経過するにつれ、無次元数がさらに大きくなっている。このことより、6msまでの燃焼初期段階の傾斜円盤6000rpmでは小さな凹凸があまり形成されていないが、遠心ファン1200rpmでは小さな凹凸が形成され、時間の経過とともに増加していることがわかる。火炎断面積の比較においても、傾斜円盤6000rpmは遠心ファン1200rpmよりもすべての時刻において面積が小さいことがわかった。

遠心ファン1200rpmと傾斜円盤6000rpmは乱れ強さが等しいにもかかわらず、火炎形状には差があり、1200rpmの火炎の方が形状は複雑で、成長も早くなっていた。流速測定の結果から、遠心ファン1200rpmと傾斜円盤6000rpmには乱れの周波数に差があることがわかっており、傾斜円盤6000rpmでは約100Hzに周波数のピークが見られ、乱れの全パワーに対する100Hz以下の割合が非常に高くなっていた。火炎形状から判断すると、遠心ファン1200rpmの火炎の方が細かい凹凸が多いので、傾斜円盤6000rpmよりも高い周波数の影響を受けていると考えられ、傾斜円盤6000rpmでは

100Hz以下の乱れが支配的であるために、小さな凹凸があまり形成されていないと思われる。このことより、100Hz以下の乱れ成分は火炎面に比較的大きな凹凸を形成し、小さな凹凸は100Hz以上の周波数域の乱れによって形成されており、両方の影響により、燃焼が促進されているが、火炎の小さな凹凸は火炎表面積を増加させるので、その影響は100Hz以上の方が大きいと考えられる。

5. 結論

ガス流動と火炎の形状の関係を調査するため、LDVを用いて容器内のガス流動計測を行い、またレーザーシート法を用いた火炎断面形状の撮影を行って、解析した。その結果、次の結論を得た。

- (1) 容器内ガス流動の乱れが大きいと火炎の形状が複雑になり、未燃ガスと火炎が接触する面積が増加し、火炎伝播速度も増加していることから、燃焼が促進されていることがわかった。
- (2) 容器内ガス流動の乱れの周波数解析を行った結果、100Hz以上の周波数域の乱れは小さな凹凸を形成し、火炎表面積を増加させ、未燃ガスと接する面積が増加するため燃焼を促進していることがわかった。
- (3) 傾斜円盤を用いることにより燃焼容器内に主流速がなく、乱れの特定周波数にピークを持ったガス流動を作ることができた。

参考文献

- (1) 八木ら他7名
C言語で学ぶ実践画像処理, オーム社, 1992

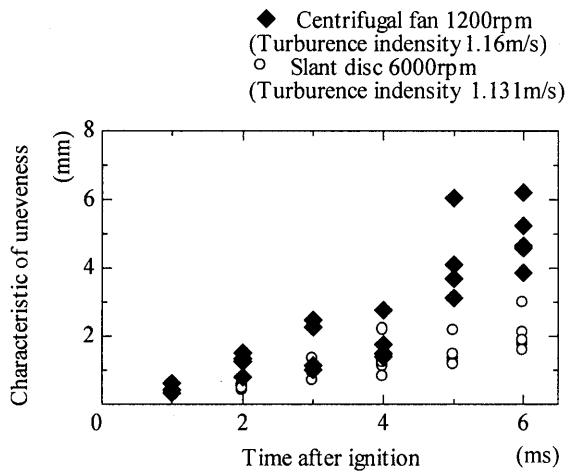


図10 火炎凹凸度

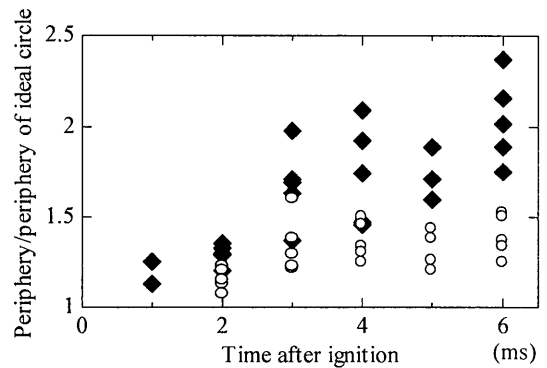


図12 周囲長無次元数

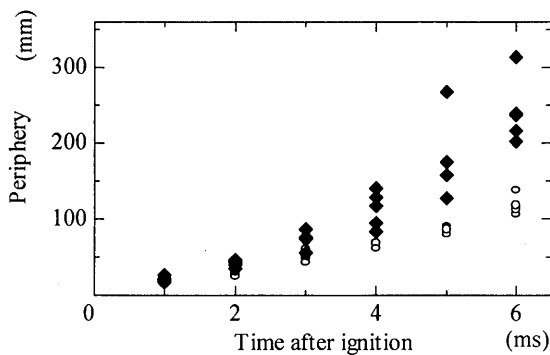


図11 火炎周囲長

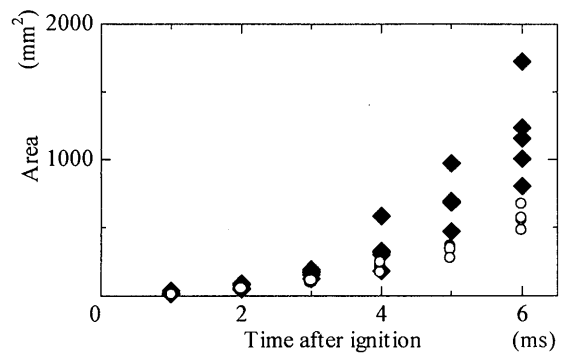


図13 火炎断面面積