

旋回流を伴う燃焼容器の設計製作と評価

友松重樹¹⁾・根井幹仁・山本寛²⁾・田坂英紀³⁾

Design, Manufacture and its Evaluation of Constant Volume Combustion Bomb with Swirling Flow

Shigeki TOMOMATSU, Mikihito NEI, Hiroshi YAMAMOTO, Hidenori TASAKA

Abstract

Improvement of thermal efficiency is one of efficient measures to achieve low fuel consumption in internal combustion engines. It is necessary to elucidate the relation between gas flow and combustion about improvement of thermal efficiency. One of the purposes of this research is to produce constant volume combustion bomb which is possible to adjust mean velocity and turbulence intensity. Another purpose is to design and to produce the constant volume combustion bomb where the flow field is not affected by container shape. Then, flow field was measured in the constant volume combustion bomb by LDV and flame images were taken by laser sheet method. After measurement, constant volume combustion bomb was evaluated. As results, this research was able to manufacture the constant volume combustion bomb which was possible to adjust mean velocity and turbulence intensity on wide range. Moreover, the measurement of the laser sheet method which was became possible on the wide range to measure of laser sheet method.

Key words:

Constant volume combustion bomb, Flow field, LDV, Internal combustion engine

1. まえがき

内燃機関の低燃費化を実現するためには、熱効率向上が一つの有効な手段である。そのためにはガス流動と燃焼の関係を解明する必要がある。しかし、実際の内燃機関における燃焼室内のガス流動は複雑であり、極めて解析が困難である。そこで燃焼室形状を単純化して、容積変化のない燃焼容器を用いることが必要になる。また、ガス流動と燃焼の関係を解明するには、平均流速と乱れ強さを広い範囲で変更可能な装置が必要である。しかし、定容燃焼容器内におけるガス流動の変更を行うことは容易ではなく、

これまでの研究で行われたファン形状の変更や流路での格子設置だけでは、平均流速と乱れ強さの条件を広い範囲で変更する事が困難であった。そこで、平均流速と乱れ強さの条件の組み合わせが多く作り出せる定容燃焼容器を製作し、ガス流動計測及び火炎断面計測により、製作した定容燃焼容器の有効性を評価することを研究目的とする。

2. 実験装置

2-1 容器の要求仕様と設計

本研究では、平均流速と乱れ強さの容器形状による影響を少なくするため、新たに容器を製作し、火炎成長における火炎構造の解析を行うことを目的とした。新たな旋回流容器製作における要求仕様とその対応を以下に示す。

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

〈要求仕様〉

- (1) 従来の容器では、円筒形状の一部に観測窓があることで容器断面が小判型になっており、容器周辺部で旋回流を乱していたと考えられた。そのため、容器形状による旋回流への影響をなくするため容器断面が円形状である円筒型にした。
- (2) 従来の容器では、レーザシートがレーザ入射窓の幅に制限され、容器内において幅 60mm のレーザシートしか形成できなかった。できる限りレーザシートの幅を広くして、火炎断面撮影範囲を拡大するために容器側壁部に透過性のあるガラス管を使用した。
- (3) 容器側壁部にガラス管を使用するためには、燃焼時に発生する熱や圧力変化に耐えられるようなガラスでなければならない。そのため、ガラスの耐熱性や機械的強度について詳細に検討し、温度変化に強く硬度の高いホウケイ酸ガラス製のガラス管を使用した。
- (4) 平均流速と乱れ強さを変更するためにはファン回転数を大きく変更することが有効である。そこで、これまで使用してきたモータより高回転なモータを新たに購入しようと考えた。しかし、要求を満たすモータを見つけることができなかった。そのため、増速装置を新たに製作し、増速機構を二段式にすることで四倍増速を行い要求とする回転数を得ることができた。
- (5) 今回、増速装置を使用し四倍増速を行うことで駆動するモータには大きなトルクがかかることが考えられた。そのため、高出力・高トルクのモータを購入することで四倍増速が行えるようにした。
- (6) 増速にあたり騒音、振動が発生する可能性が考えられた。そのため、駆動部には、振動、騒音が少なく滑らかに回転が伝えることができる歯付きプーリとベルトを使用した。歯付きプーリとベルトは低い初張力で滑りのない確実な伝達をすることができ、高トルクを伝えることができるという特徴を持つ。

2-2 円筒旋回流容器

図 1 に本研究で設計製作を行った定容燃焼容器の詳細を示す。この容器の燃焼室は、内径 127mm×高さ 223mm、容積が約 2800cm³の円柱構造になってい

る。容器断面を円形状としたため、容器形状による流れ場の影響を受けにくくしている。また、容器上面には、可視化範囲が φ120mm である観測窓を設け、火炎断面撮影時には光学的に歪みの少ない石英ガラスを使用した。また点火プラグ固定用ボルトには、材質にガラス繊維を使い、絶縁性を高くしたプラスチック製ボルトを使用することで、点火の際プラグ用ボルトの周辺で起こる放電を防いでいる。

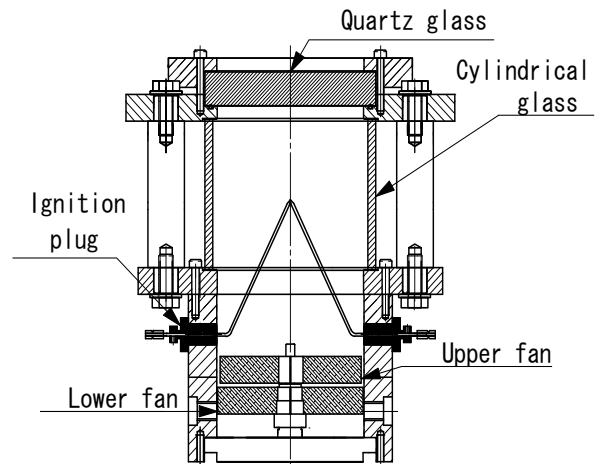


図 1 定容燃焼容器

2-3 ガス流動発生装置

増速装置の概略図を図 2 に示す。増速装置は 24 歯と 48 歯の歯数の組み合わせのプーリとベルトを 2 組使用することで、回転比 2 の二段で四倍増速とした。ガス流動を発生させるために容器下部に二段式の四枚羽根のファンを二つ取り付け、ファンごとに別々のモータで制御できるようにした。

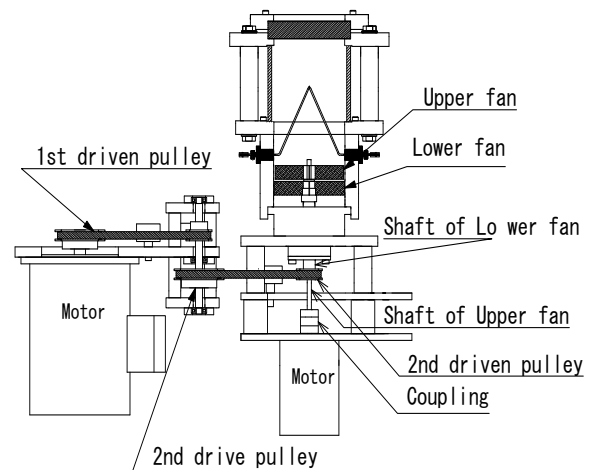


図 2 ガス流動発生装置

3. ガス流動計測

3-1 ガス流動計測システム

本研究では、前方散乱 LDV を用い流速測定を行った。図 3 に LDV システムの概略図を示す。

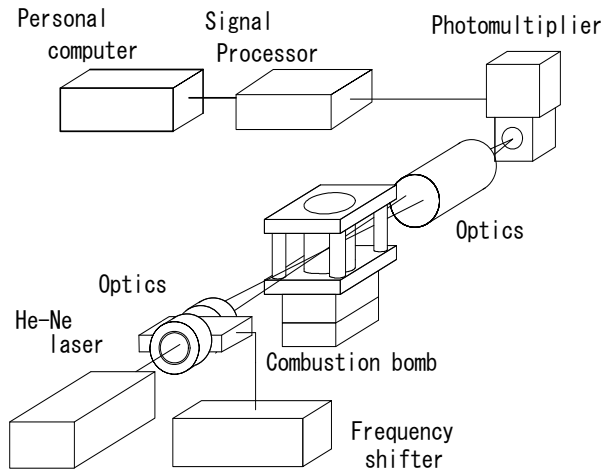


図 3 LDV システム概略図

光源から発せられたレーザ光はビームスプリッタを通過し 50mm の二つの平行光となる。その平行光は周波数シフタによりレーザの持つ周波数を 70MHz と 80MHz にし、周波数差を 10MHz とするようにした。レーザ光は凸レンズにより収束し、測定体積を形成する。その後、測定体積より得られる散乱光は受光レンズにより平行光となり集光レンズによりフォトマルチプライヤの受光面に収束される。フォトマルチプライヤより出力されるバースト信号はプリアンプにより増幅を行った。得られた信号は、ドップラー周波数が一定周期に要する時間をデジタル的に計測し周波数を求めるカウンタタイプの信号処理機 (IFA550) により、信号処理を行い、パーソナルコンピュータにより取り込んだ。

3-2 ガス流動実験条件

測定位置は容器中心を 0mm とし、受光側方向を正方向とした場合に 0~60mm の 10mm 間隔で測定を行った。また、容器内の流れが軸対称になっているかの確認を行うため、容器中心より -20mm, -40mm の位置で上段ファン 4000rpm 下段ファン 0rpm の条件により流速測定を行った。容器中心より 0mm, 10mm の位置では流速は 0m/s であることが考えられ

流速の方向が変化することが考えられた。そのため、流速 0m/s でも計測が行え、流れの方向が判断できる周波数シフタを使用した。また、散乱粒子には信号が得られやすい固体散乱粒子 (TiO_2) を使用することで、広い流速域での測定を可能にした。図 4 にガス流動測定位置を示す。また、測定時の実験条件を表 1 に示す。

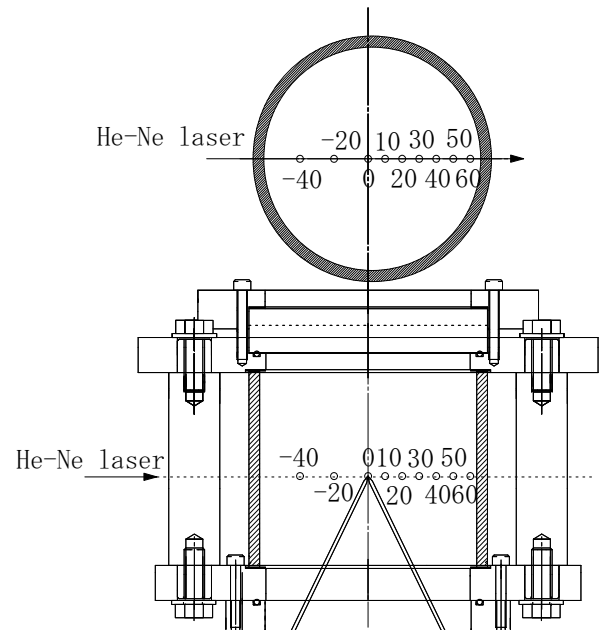


図 4 ガス流動測定位置

表 1 ガス流動計測条件

上段ファン	下段ファン	測定位置 mm (容器中心を 0mm)
2000 rpm	0 rpm	0,10,20,30,40,50,60
4000 rpm	0 rpm	-40,-20,0,10,20,20,30,40,40,50,60
0 rpm	4000 rpm	0,10,20,30,40,50,60
4000 rpm	4000 rpm	0,10,20,30,40,50,60
8000 rpm	0 rpm	0,10,20,30,40,50,60
0 rpm	8000 rpm	0,10,20,30,40,50,60
8000 rpm	8000 rpm	0,10,20,30,40,50,60

(0mm, 10mm, 20mm, 40mm 周波数シフタあり)

3-3 ガス流動計測結果及び考察

容器内ガス流動計測結果として、図 4 に周方向速度分布、図 5 に周方向の乱れ強さ分布を示す。

図 4, 5 において縦軸はそれぞれ平均流速と乱れ強さ、横軸は測定位置である。これらの図 4 より、容

器中心である0mmにおいて平均流速がほぼ0m/sであること、上段ファン4000rpm、下段ファン0rpmの20mmと-20mm, 40mmと-40mmで計測した平均流速と乱れは、ほぼ同様の結果が得られた。

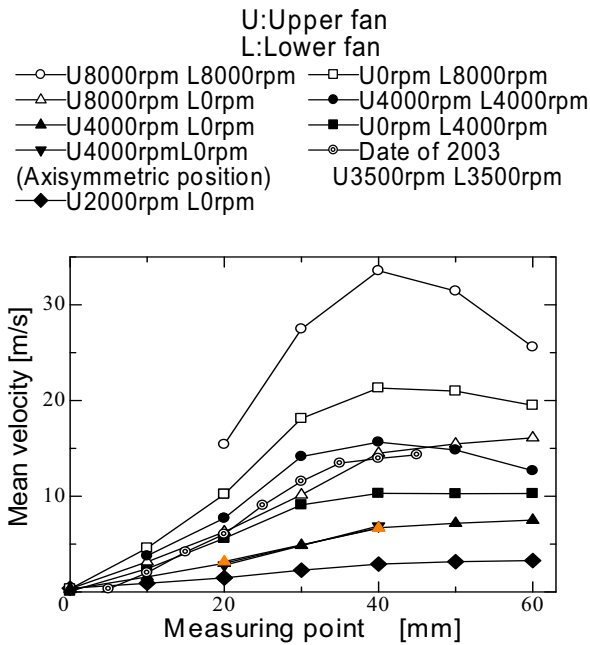


図4 周方向平均流速分布

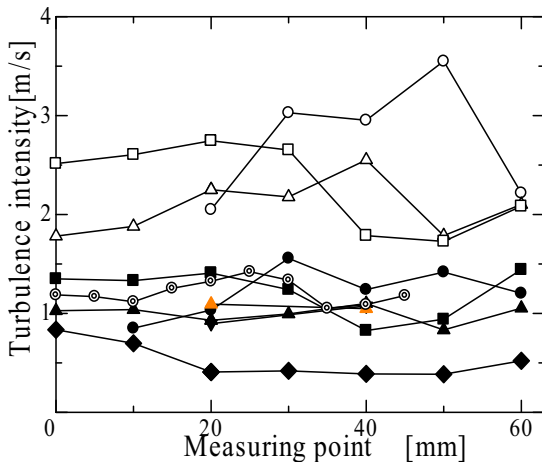


図5 周方向乱れ強さ分布

上段固定で下段のみ回転させた状態では、平均流速は30mm付近まで増加する。しかし、40mm以降は60mmまで一定であった。乱れ強さは、30~40mmの間で減少し、壁面付近である50mm, 60mmの位置で増加していた。これより、測定位置30mmと50mmを比較した場合、乱れ強さのみを変化させた流れ場を作り出すことができた。

流速が同じであったことから、流れの中心が容器

の中心にあり、計測軸上で対称になっていることがわかった。これにより、容器形状を円筒にしたことで容器形状による流れの影響をなくし、流れが軸対称になっていることが確認できた。

上下段ファンを回転させた状態では、容器中心より40mm付近で平均流速のピークがあり40mm以降壁面に近づくにつれて減少する傾向が見られた。また、乱れ強さについては、壁面に近づくにつれ増加と減少を繰り返す傾向が見られた。ファンを上下段同時に回転させることで他の条件と比べ、平均流速・乱れ強さ共に大きな流れ場を作り出すことが分かった。

下段固定で上段のみ回転させた状態では、平均流速は容器中心0mmより壁面60mmまで増加し、中心から40mmまで測定位置に対し比例関係であった。乱れ強さはほぼ一定の値を示すことが分かった。

上段固定で下段のみ回転させた状態では、平均流速は40mm付近まで増加するが40mm以降は60mmまで一定であった。乱れ強さは、20mm~40mmの間で減少し、壁面付近である50mm, 60mmの位置で増加していた。

以上の結果から、二段ファンの増速装置の設計製作を行ったことで、図4および5の左側に示した従来のガス流動発生装置による結果と比べても、平均流速と乱れ強さを広い範囲で作らせていることを確認できた。

4. 火炎断面計測概要

4-1 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により行った。図6に火炎断面撮影システム概略図を示す。火炎断面はNd:YAGレーザとモノクロCCDフレームシャッターカメラを用いて火炎全体の撮影(等倍撮影)及び火炎の局所撮影(四倍撮影)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)を組み込んだコンピュータを使用して行った。また、燃焼状態を確認するために燃焼圧力を計測した。

4-2 火炎断面計測条件

表2に燃焼実験の設定条件を示す。火炎断面計測では、当量比 $\phi=1$ のプロパン-空気の予混合気を、初期圧が0.1MPaになるように水銀マンメータを使

用して定容燃焼容器に充填した。レーザーシートの散乱粒子にはオイルスモークを使用した。そのオイルスモークは燃焼容器底部に設置したオイルスモーク発生装置で予混合気充填後に容器内で発生させた。

ファン回転数の設定は、ガス流動がない状態での燃焼を見るために上段 0rpm・下段 0rpm、ファン低回転の傾向を見るために上段 2000rpm・下段 0rpm、ファン中回転の傾向を見るために上段 4000rpm・下段 4000rpm での回転数の組み合わせ、ファン高回転での傾向を見るために上段 8000rpm・下段 8000rpm での回転数での組み合わせとした。また上段 4000rpm・下段 4000rpm、上段 8000rpm・下段 8000rpm では上下段ファン共に同一方向に回転させた。

CCDカメラでの撮影は前述のように等倍及び4倍で行った。撮影時刻は、また、ファン回転数が上段 0rpm・下段 8000rpm の条件においては、設定条件の中で最も火炎が複雑になることが予想された。そのため、撮影時刻を増やし火炎の広がりを観察できるようにした。ただし、本研究では一回の燃焼につき一時刻の撮影しかできないため、同一火炎を連続的に撮影したものではない。実験条件を表2に示す。

表2 燃焼実験の設定条件

4-3 火炎断面計測結果及び考察表

図7にファン回転数上段 0rpm・下段 8000rpm の条件における点火後の等倍火炎画像を示す。本研究において、従来のものは形成されたレーザーシートの半分が容器形状により損なわれていた。そこで、光学系のレンズ幅に制限されるものの、容器側壁を円筒ガラスに変更したことにより、形成したレーザーシート幅をすべて活用できるため火炎断面撮影範囲の拡大を可能にした。

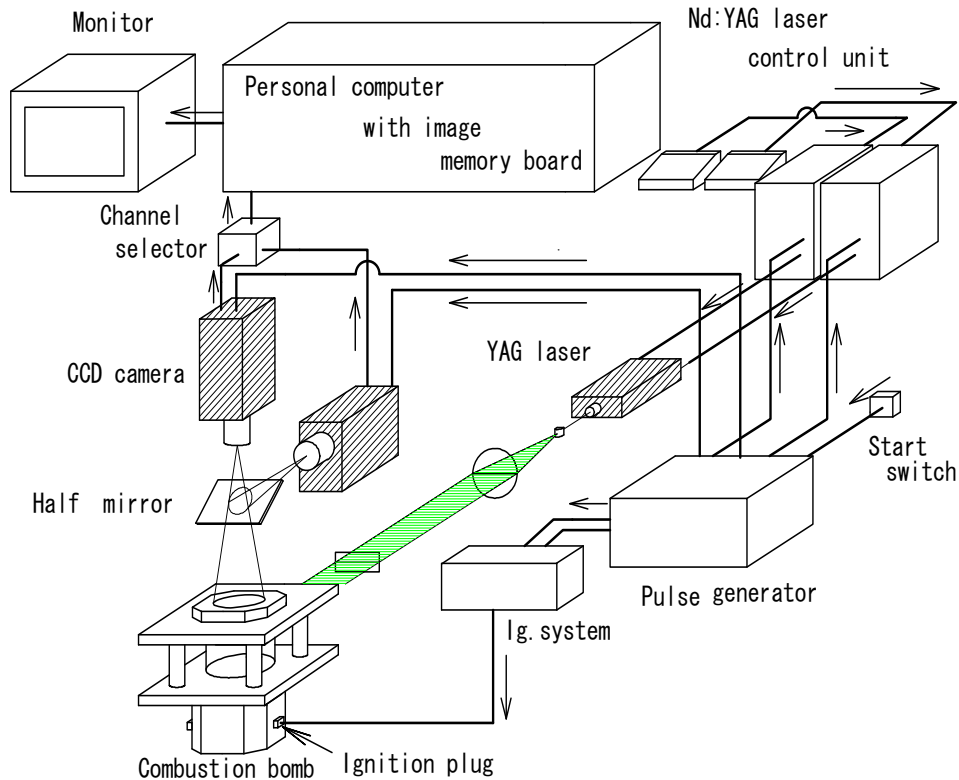


図6 火炎断面撮影システム概略図

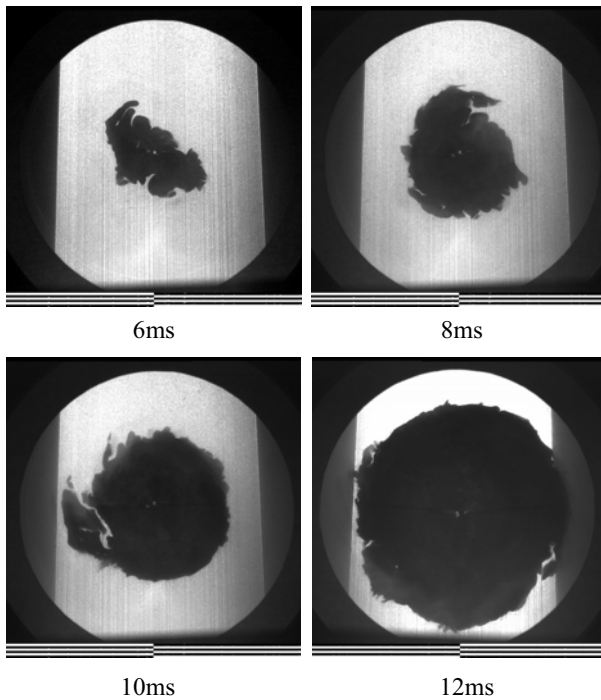


図7 点火後の等倍画像

このことから火炎表面に大きな凹凸をもつ火炎の評価も行えるようになったため、火炎の時間経過による評価がより明確に行えるようになった。

これにより火炎の点火時刻から容器壁面付近までの火炎の成長を評価可能になった。また火炎画像から火炎は既燃部が回転しながら成長していると推測できる。これは火炎が流れ場の影響を受けていると判断できるため、比較的大きな乱れをもつ流れ場でも、火炎形状全体の評価が行えた。

以上により、各ファン回転数条件の火炎画像から、ファン回転数の違い、流れの違いがあっても火炎の中心は容器中心付近にあり、時刻による火炎形状の変化から、全てのファン回転数条件において、ガス流動発生装置による流れの中心は容器中心付近にあるものと推測される。この事からも、今回製作した容器が容器形状に影響を受けない軸対称な流れ場を作りだす事ができたといえる。

5. 結論

平均流速と乱れ強さが火炎形状に及ぼす影響について調査を行うため、容器形状による流れ場への影響を少なくした容器を新たに製作し、容器内のガス流動計測と火炎断面撮影を行い、以下の結論を得た。

- (1) 容器断面形状を小判形から円筒形に変えることで、容器形状の影響を受けない軸対称な流れ場を作りだすことができた。
- (2) 設計製作を行った増速装置を使用することにより二段式ファンの回転数を広い範囲で変更可能となった。これにより、平均流速と乱れ強さを広い範囲で作り出すことができた。
- (3) 壁面をガラス製にした容器を製作したことで火炎断面の可能撮影範囲を広げることができた。

参考文献

- (1) 脇坂ほか2名、内燃機関の燃焼室内における乱流特性、日本機化学会論文集 B 編, 第48巻, 第430号 (1982), pp.1198-1205.
- (2) 加塩 剛, 旋回流を伴う容器内予混合気燃焼の実験的研究, 宮崎大学工学部卒業論文(2003)
- (3) 吉山ほか3名, 火炎点火機関における乱流予混合火炎のしわ構造, 第39回燃焼シンポジウム (2001), A233, pp.183-184.
- (4) 吉田ほか3名, 密閉燃焼室内乱流予混合火炎のフラクタル解析, 日本機化学会論文集 B 編, 第66巻, 第647号 (2000), pp.251-256.