定容燃焼容器を用いた予混合燃焼のガス流動と 火炎形状に関する実験的研究*

友 松 重 樹** 田 坂 英 紀***

Relationship between Gas Flow and Flame Shape for Premixture Combustion
using Constant Volume Combustion Chamber

By Shigeki Tomomatsu and Hidenori Tasaka

Premixture combustion mainly occurs in gasoline engines but it had also occurred in diesel engines at the previous combustion. Gasoline engines have been used as marine engines especially for pleasure boats. The mechanism of premixture combustion helps to reduce air pollution and fuel consumption. It also helps to know the mechanism of previous combustion which generates noise and heat loss in diesel engines. This work has studied the effect of flow characteristics to the flame structure during premixture combustion. A constant volume combustion chamber was designed to research the relationships between combustibility and flow characteristics by changing the gas velocity to study its effect on flame shape. Gas velocity was measured by LDV system, combustion pressure was measured by pressure indicator and flame shape was studied by a television camera. The results showed that the main cause of the complexity of flame shape is the turbulence intensity of gas flow.

1. 緒 論

予混合燃焼は主として火花点火機関における燃焼形態であるが、ディーゼルエンジンの初期燃焼においても観察される。小型レジャーボートに使用されるエンジンは4サイクルガソリンエンジンが主流であり、EUにおける排気ガスや燃費の規制、アメリカで予定されている規制に対しても対応が必要となっている。また、燃焼形態は異なるものの、ディーゼルエンジンの初期燃焼における予混合燃焼は、騒音の原因となる急激な圧力上昇を引き起こし、またシリンダー壁面への熱損失を増加させる問題があることが知られている。このような問題を解決するために、エンジン内における予混合気燃焼に関して様々な研究⁽¹⁻³⁾が行われてきたが、平均流速、乱れ強さなどのガス流動特性値と燃焼の活発さである燃焼性の関係⁽⁴⁻⁷⁾を十分に解明するには至っていない。したがって、現象としての観点から予混合燃焼における火炎構造をより詳細に解明する必要がある。

本研究では、現象の複雑な因子を排除して燃焼現象

を単純化し、各種の計測を容易にするために、通常のエンジンのような容積変化がない定容燃焼容器の設計・製作を行った。その装置を利用して、ガス流動計測および火炎断面計測を行うことにより、特に平均流速や乱れ強さなどのガス流動の特性値が予混合燃焼の火炎形状におよぼす影響を実験的に明らかにすることを目的とした。

2. 燃焼容器の設計と製作

本研究では、ガス流動と燃焼性の関係を調査するために、以下に示すような条件を備えた定容燃焼容器を設計し、製作した。

2.1 定容燃焼容器の必要条件 (1)ガス流動が可変であること。その可変範囲はエンジン内のガス流動状況を参考⁽⁸⁾に、周方向の平均流速を0~30m/s、乱れ強さ0~3m/s程度とする。(2)ガス流動の速度計測はレーザードップラ流速計(LDV)で可能であること。(3)火炎断面の可視化計測が可能であること。(4)燃焼圧力計測などの各種計測を行うことができること、などである。

2.2 設計製作した定容燃焼容器

(1)燃焼容器の諸元 要求仕様に基づいて設計・製作した定容燃焼容器の概略を図1に示す。燃焼室は直

*原稿受付 平成17年11月24日。

**正会員 宮崎大学(宮崎市学園木花台西1-1)。

***宮崎大学

図1 定容燃焼容器

径 120mm, 高さ 120mm の円筒に近い形状をしており, 上面および対向する側面には, 可視化用観測窓が設けられている. また, 燃焼室側面に圧力インジケータや点火用電極も設置できる. 燃焼室下部のガス流動発生室には, ガス流動発生用ファン, 予混合気の吸排気口および散乱粒子供給装置が設けられている.

(2) ガス流動発生装置 ガス流動発生装置は, 二つのガス流動発生用ファンとその駆動システムから構成されており, ファンの形状を図2に, 駆動システム装置の概略を図3に示す. ファンは, 2枚の羽根が直交した形状とした. ファン駆動装置は, 内外二重の回転軸とプーリー等で構成されており, 2台のモーターによってファンを駆動する. 2つのファンを同一方向または逆方向に回転させることによって, 容器内のガス流動を変化させることができる. なお, 設計した容器の評価については実験結果の後に述べる.

図2 ガス流動発生用ファン形状

図3 ファン駆動装置

3. 実験装置および実験方法

設計・製作した燃焼容器を用いて, ガス流動を変化させ, 各種条件での火炎の発達状況を計測する.

3.1 ガス流動の計測装置 容器内のガス流動は, 光源に出力が 50mW の He-Ne レーザーを用いた前方および後方散乱 LDV を用いて計測した. 散乱粒子は, グリースを加熱することにより発生させた直径約 5 μm のオイルスモークである. この散乱粒子は, 容器内のガス流動に対して, 十分な追従性を有していることを計算によって確認してある. LDV により得られるバースト信号は, トラッカータイプの信号処理機によって処理し, A/D コンバーター内蔵のパーソナルコンピュータによって流速に相当する出力を収録した.

3.2 火炎断面計測装置 火炎の断面計測は, レーザーシート法によって行った. 火炎断面計測システムの概略図を図4に示す. 光源には, 発光時間が 5 ~ 7ns である YAG レーザーを用い, 図5に示す光学系を通過させることにより, 厚さ 0.3mm, 幅 100mm のシート状にした. 予混合気および散乱粒子を充填した容器に, このシート光を側面の観測窓から容器内に照射する. 未燃部は燃焼初期ではわずかに圧力の影響を受けるものの散乱粒子濃度はほとんど変化することはないが, 既燃部では燃焼による急激な膨張により散乱粒子濃度が極端に低くなる. この状態でレーザー光を照射すると, 既燃部と未燃部の散乱光強度には大きな差が

図4 火炎断面計測システム

図5 レーザシート光学系

生じる。この散乱光強度の差を上方の観測窓から TV カメラを用いて撮影する。したがって、撮影した火炎画像では、既燃部は暗く、未燃部は明るく写る。また、火炎断面画像の収録は、解像度 512×512 pixel の画像収録ボードで行い、画像の空間分解能は 0.2mm である。

4. ガス流動実験結果および考察

ガス流動の変更は表 1 に示す二つのファンの回転速度と方向の組み合わせによって行い、燃焼の開始点である点火プラグを含む水平面において、中心から半径位置 45mm までの点について計測した。ガス流動の計測には LDV を使用した。

4. 1 平均流速 図 6 に各条件における容器内の平均流速分布を示す。平均流速とは各条件における各測定位置の流速の時間平均値である。この図より、容器内にはどの条件でもファンで発生させた旋回流が形成されていることがわかる。容器中心から半径位置 35mm の範囲においてこの旋回流は剛体渦であるが、35mm より外側の範囲では壁面との摩擦により平均流速は減衰している。また、容器内の形状が対称形であ

表 1 ガス流動計測実験条件

No.	Fan speed [rpm]	
	Upper fan	Lower fan
a	3500	3500
b	3500	3000
c	3000	2000
d	3000	1000
e	0	3500
f	0	3000
g	0	1000

図6 容器内平均流速分布

るにもかかわらず、渦の中心が僅かではあるがオフセットしている。この程度の偏りは実験には大きな影響はないと考えられる。

4. 2 乱れ強さ 図7に容器内ガス流動の乱れ強さ分布を示す。この図より、乱れ強さは容器内の全領域で $0 \sim 1.3 \text{ m/s}$ の範囲で変化させることができた。当初、空間的に一様な乱れ場を想定して設計を行ったが、計測を行ったところ均一な乱れ場にはなっておらず、このことは改善すべき点の一つである。しかし、実験毎の乱れ強さには再現性があり、後述の燃焼における火炎の形状評価の場合にはその位置における乱れ強さを用いて整理することで評価は可能であると考え、この状態で燃焼実験を行うことにした。

図7 容器内乱れ強さ分布

図8 燃焼圧力経過

4. 3 燃焼圧力 図8に燃焼実験時における各条件での燃焼圧力経過を示す。燃焼圧力は、点火から少し遅れて火炎核の成長にとともに、急激に上昇する。平均流速、乱れ強さがともに小さい条件では、点火から最高燃焼圧力に達するまでの期間が約 40 ms であるのに対し、平均流速が高く乱れ強さが大きい条件においては約 20 ms と大幅に短縮されている。この図からも、ガス流動は、その平均流速や乱れ強さによって、火炎伝播を促進していることがわかる。

4. 4 燃焼容器の評価 今回設計・製作した定容燃焼容器は、当初のガス流動場としての平均流速、乱れ強さおよびその分布の目標値を達成することはできなかったが、燃焼実験から推定して、この研究目的の第1段階としては予混合気燃焼の燃焼実験が可能である装置である。また、LDVを用いたガス流動計測もほぼ可視域全体で可能であり、後述するようにレーザーシート法による火炎画像の断面計測も計画どおり行える装置とすることができた。まだ改善すべき部分は多数あるが、ほぼ当初の目的を達成できる装置として製作できたものと考えている。

5. 火炎の計測実験

5. 1 火炎断面計測 火炎計測は、前述の火炎断面計測システムにより行った。図9に火炎伝播を撮影する際の計測機器の動作時期を示す。容器内に理論混合比のプロパン-空気予混合気を、初期条件が大気温、圧力 0.1 MPa で充填した後に、ファンを所定の回転数に設定し、スタートスイッチを押して燃焼室中心で点火した。点火から撮影までの時期および YAG レーザーの発光時期は、電子回路により制御しており、それぞれ $100 \mu\text{s}$ 間隔で独立に設定できる。撮影可能時期は、点火後 2 ms から 20 ms である。またこの手法では、1回の燃焼において撮影できる画像が1枚のみであるため、火炎伝播を連続的に議論することはできない。

図9 計測機器の動作時期

5. 2 実験条件 本実験の重要な因子は、ガス流動の平均流速、乱れ強さおよび点火から撮影までの時間である。燃焼実験では火炎は点火位置を中心としてほぼ同心円状に伝播する。火炎形状の評価位置は、(1)空間的な流れの状態が安定し、再現性があること、(2)火炎形状を評価する場合に十分な解析データが得られる火炎画像データが得られること、を条件として設定した。この条件から、(1)の安定性、再現性および流れの等方性、(2)火炎の十分な発達および再現性を考慮して、平均的な火炎先端の半径位置で中心からほぼ30mm付近になる条件を評価位置とした。火炎の計測高さは燃焼開始位置と同じ水平面で、ガス流動を発生させるファン装置を除いた燃焼室の中央である。この条件を満たす時刻は点火後、14~18msの時間となる。

以上の必要条件から、燃焼実験条件を表2に示すように定めた。グループAは、乱れ強さが同じで平均流速が異なる条件、グループBは平均流速がほぼ等しく乱れ強さが異なる条件、グループCは平均流速と乱れ強さが共に小さい条件である。表中の番号は、後述する実験結果で示す実験条件の番号と同じである。

表2 燃焼実験条件

No.	Mean velocity [m/s]	Turbulence intensity [m/s]	Time after Ig. [ms]
Group A			
①	14.0	1.1	17.5
②	12.4	1.0	17.0
③	8.2	1.0	14.5
Group B			
④	7.4	0.9	17.5
⑤	7.3	1.3	14.5
⑥	7.4	0.9	16.0
Group C			
⑦	2.1	0.4	17.0

6. フラクタル次元による火炎形状の評価

6. 1 火炎画像および画像処理 火炎断面計測システムで撮影された画像は、輝度階調が256階調のモノクロ画像である。火炎断面画像の例を図10に示す。前述したように、燃焼反応が起こっている火炎面の前後で散乱粒子濃度が大きく変化するために、ここで火炎画像に急激な輝度の変化が起こる。このため、例示した画像のように未燃部は白く、既燃部は黒く撮影され、その境界部分が火炎面となる。火炎形状の複雑さを評価するためには、この火炎面をできるだけ正確に抽出する必要がある。

この境界部分である火炎面を抽出するために、画像の輝度の二値化処理を行い、既燃部と未燃部を区別するが、実際の処理においてはノイズや輝度のムラが処理結果に悪影響をおよぼした。このため、統計的手法として、図11のような輝度のヒストグラムを求め、明るい部分と暗い部分の極小値を閾値とし、二値化を行うことでこの影響を排除することができた。この方法により、輪郭線を抽出した例を図12に示す。

6. 2 フラクタル次元算出方法 フラクタル次元は、形状の複雑さを評価する方法の一つである。本研究では、ボックスカウンティング法によりフラクタル次元の算出を試みた。輪郭線のデジタル画像にボックスカウンティング法を適用する場合、この実験の計測システムでは元の画像が512×512画素の画像であるため、画像の一边が全体の1/2, 1/4, …となる正方形(ボックス)に分割していき、火炎面が含まれるボックスの数をカウントする。ボックス一边の画素数を r 、その時に火炎面が含まれるボックスの数を $N(r)$ 、

図10 火炎断面画像

図11 輝度ヒストグラムの例

図 1 2 火炎の輪郭線

フラクタル次元を D とすると、これらの関係は次式で表される。ここで、 k は定数である。

$$N(r) = k \cdot r^{-D} \quad (1)$$

フラクタル次元 D は、 $N(r) \sim r$ を両対数プロットした時の傾きであるため、次式によって計算される。

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

6. 3 フラクタル次元算出結果

(1) フラクタル次元とガス流動の一般的な傾向
フラクタル次元の算出結果として、平均流速と火炎面のフラクタル次元の関係を図 1 3 に示す。平均流速が 2~14m/s の範囲において、平均流速の増加にともない火炎面のフラクタル次元も大きくなる傾向が見られた。しかし、平均流速 7m/s 付近の乱れ強さが異なる条件で

図 1 3 平均流速とフラクタル次元の関係

は、大きなバラツキが見られる。火炎面の複雑さは平均流速の大きさのみに影響を受けるものではないと考えられる。次に、火炎面のフラクタル次元と乱れ強さの関係を図 1 4 に示す。図より、乱れ強さごとに多少のバラツキが見られるものの、乱れ強さの増加とともに火炎面のフラクタル次元が乱れ強さにほぼ比例的に増加する傾向が見られた。

(2) フラクタル次元とガス流動の具体的な関係

図 1 3, 1 4 にはここで行ったすべて条件を記入した。当初の実験条件に示した乱れ強さがほぼ等しく、平均流速の異なるグループ A について図 1 5 に示す。実験点数は少ないが、これらを実線でつないでみると、フラクタル次元を D 、平均流速を U として、

$$D = 0.01U + 0.95 \quad (3)$$

の近似式が得られる。同様に、平均流速が等しく乱れ強さの異なるグループ B についてのみ示すと図 1 6 のようになり、これらを直線近似すると、乱れ強さを u' として、

$$D = 0.12u' + 0.93 \quad (4)$$

という近似直線が得られる。これらは、データ数が少ないために確定的な実験式ではないが、火炎の複雑さに対する影響度は、この 2 式の U 、 u' の係数からわかるように、乱れ強さの影響が非常に大きいことがわかる。

以上の結果から、ガス流動の乱れ強さは、火炎形状の複雑さに影響を与える大きな因子であり、燃焼圧力の結果も総合して考えると、乱れ強さが燃焼を促進していると考えられる。

図 1 4 乱れ強さとフラクタル次元の関係

図15 乱れ強さが同じ場合の平均流速とフラクタル次元の関係

図16 平均流速が同じ場合の乱れ強さとフラクタル次元の関係

7. 結 論

予混合燃焼における燃焼性とガス流動特性との関係を調査するために、ガス流動の条件が可変で火炎伝播の計測が可能な定容燃焼容器を設計・製作し、火炎形状とガス流動特性値についての考察を行った結果、以下のことがわかった。

(1) ガス流動の平均流速および乱れ強さをある程度広い範囲で変更でき、火炎の可視化計測が可能な定容燃焼容器を設計・製作することができた。

(2) ガス流動の条件として、平均流速が 0~14m/s、乱れ強さが 0~1.4m/s の範囲で燃焼火炎の複雑さを評価したところ、定性的には両者とも火炎形状の複雑さと強い相関があることがわかった。

(3) 詳細にこの関係を調査すると、火炎の複雑さへの依存性は、平均流速によるものより、乱れ強さへの依存性が非常に高いことがわかった。

しかし、火炎構造とガス流動特性値との関係については、さらに多くの条件で検討を行う必要がある。

謝 辞

本研究を行うにあたり、宮崎大学工学部熱機関研究室の学生諸君、特に当時博士前期課程の学生であった竹本史久君の協力を得た。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 吉山ほか 3 名, 機論, (B)64-626 (1998-10), 3479-3484
- 2) 鈴木ほか 1 名, 機論, 69-677(B) (2003-1), 236-244
- 3) 吉山ほか 3 名, 機論, 69-682(B) (2003-6), 1509-1514
- 4) 中原ほか 4 名, 燃焼シンポ, 42 回論集, (2004-12), 343-345
- 5) 北川ほか 1 名, 燃焼シンポ, 42 回論集, (2004-12), 23-24
- 6) 濱本ほか 4 名, 機論, 64-623(B) (1998-7), 2325-2331
- 7) 吉山ほか 3 名, 機論, 66-647(B) (2000-7), 1865-1870
- 8) 田坂ほか 3 名, 機論, 70-692(B), (2004-4), 1086-1091

著者紹介

友松 重樹 (1)

- ・ 1973 年生.
- ・ 宮崎大学工学部機械システム工学科.
- ・ 修士 (工学) (宮崎大学).
- ・ 内燃機関, 燃焼工学.

田坂 英紀 (2)

- ・ 1942 年生.
- ・ 宮崎大学工学部機械システム工学科
- ・ 工学博士 (東京工業大学)
- ・ 内燃機関, 燃焼, 伝熱, 計測