

# エンジン燃焼実験における流れと燃焼性の実験的調査

1) 木村 正寿 · 2) 友松 重樹 · 3) 長瀬 慶紀 · 4) 田坂 英紀

## Experimental Study of Combustibility according to Flow Characteristics in an Internal Combustion Engine

Masatoshi KIMURA, Shigeki TOMOMATSU, Yoshinori NAGASE, Hidenori TASAKA

### Abstract

In an internal combustion engine, it is usually considered that combustion and flow are affected each other. In our previous works, it seemed to be in good correlation between combustion and flow characteristics. But after precise examinations, the correlations were not enough. The cause of this disaffection would be the change of actual fuel air ratio during the combustion experiments in the engine. So the examination of this discrepancy was made by the injection duration of the fuel injection system. The discrepancy was decreased by this check of the injection duration when engine was running. The relationships between combustibility and flow characteristics was inclined to be come near in some extent, but more improvement should be required.

### Key Words:

Internal combustion engine, Combustibility, Flow characteristc

### 1. まえがき

ガソリンエンジンにおいて高効率化のためには希薄燃焼が有効であることから、これまで成層燃焼方式などを用いて、シリンダ内に積極的にガス流動を起こすことで希薄燃焼を達成してきた。一般的にはガス流動と燃焼には密接な関係があることが知られており、今後一層の高効率化を図るためには燃焼に及ぼすガス流動の影響を明確にする必要がある。そしてこれらの相互関係について解明しガス流動を適切に制御できれば、環境負荷の少ないエンジンが開発できる。

本研究では実際に使用されている機関に近い状態で、かつ実用的に利用頻度の高い運転条件である軽負荷・希薄域におけるガス流動と燃焼の関係に注目した。

このような目的から、ガス流動可変機構を備えてエンジンで実験的な研究を進めてきたが、ガス流動と燃焼の関係で他の傾向と異なる条件もあり、明確な関係を見つけ出すことができなかった。その原因の一つとして混合気供給システムが確立し

ておらず、燃焼圧力計測時に混合比が変動している因子が考えられた。本研究では予混合気の混合比を確認し、均一にした上でガス流動と燃焼状態の関係について考察することを目的とする。

### 2. 実験装置

#### 2.1 供試エンジン

本実験で使用した供試機関は、市販されている空冷単気筒 4バルブ SOHC エンジンを実験用に改良したものである。供試機関断面図を図 1 に、供試機関主要緒元について表 1 に示す。

なお、実験条件を安定させるために、潤滑油の供給量と温度を制御している。

#### 2.2 ガス流動可変機構

本研究ではシリンダ内のガス流動に変化を与えるため、吸気バルブのバルブガイド部に加工を施してガス流動可変部品を取り付けている。この部品は開口角 45 度の扇形の開口部を持つプレートと、設置調整用のプレート台座から構成されている。バルブガイド部に取り付けるプレートの設置角は 15° 毎に 24 通りの角度で取り付けることが可能であり、取り付け角を変更することでシリンダ内のガス流動に変化を与えている。図 2 にガス流動可変機構部分を示す。

1)工学部技術センター 技官  
2)機械システム工学科 助手  
3)機械システム工学科 助教授  
4)機械システム工学科 教授

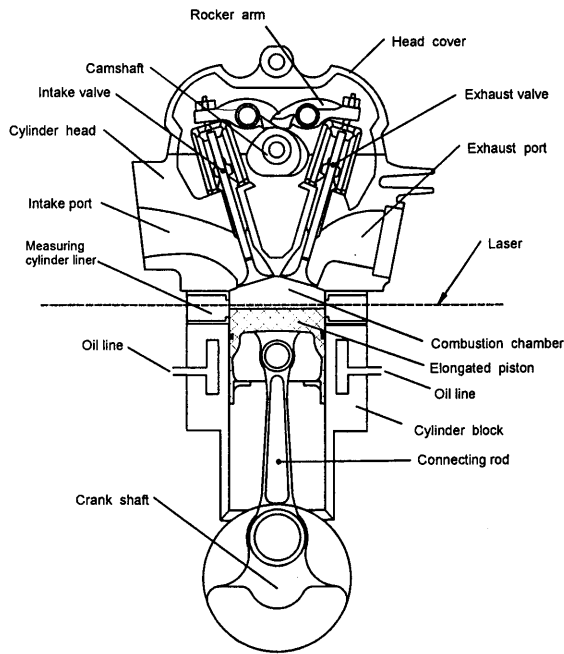


図1 試験用エンジン断面

表1 供試エンジン主要緒元

|       |                |
|-------|----------------|
| 種類    | 4サイクル・ガソリン     |
| 燃焼室形状 | ペントルーフ         |
| 弁機構   | SOHC           |
| 内径×行程 | 79.0 × 71.2 mm |
| 排気量   | 348 cc         |
| 圧縮比   | 6.38           |

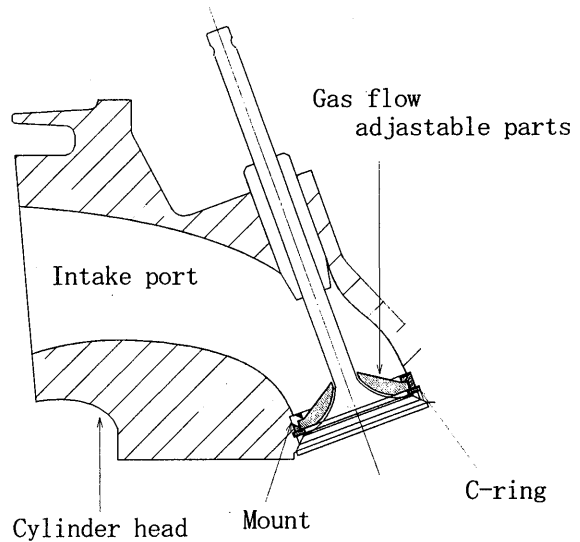


図2 流速可変機構

2.3 その他のエンジン関連実験装置

空気流量は層流流量計で計測する。また燃料噴射後の気化を促進するために、強制的に燃料を加熱する装置を吸気系に用意する。

2.4 燃焼圧力計測

燃焼圧力は非定常で高温となる燃焼ガスの圧力を計測するために、水冷式歪計式指圧計を用いる。

2.5 ガス流動計測装置

ガス流動はレーザドップラ流速計によって計測する。信号処理器はトラックタイプである。また散乱粒子は中空樹脂製である。

2.6 データ収録

データ収録部は A/D 変換器及びパソコンで構成され、A/D 変換器の分解能は12ビットである。

3. 実験方法

3.1 流速測定実験方法

ガス流動は供試機関を駆動運転して燃焼室内の流速を前方散乱 LDV により計測した。実験条件を表2に、計測位置を図3に示す。

流速可変条件として吸気ポートに取り付けた可変機構を表に示すように取り付け角 0° から 330° までの6条件とした。

流速データは良質な流速データを1計測地点につき 100 サイクル分取得して解析に利用した。

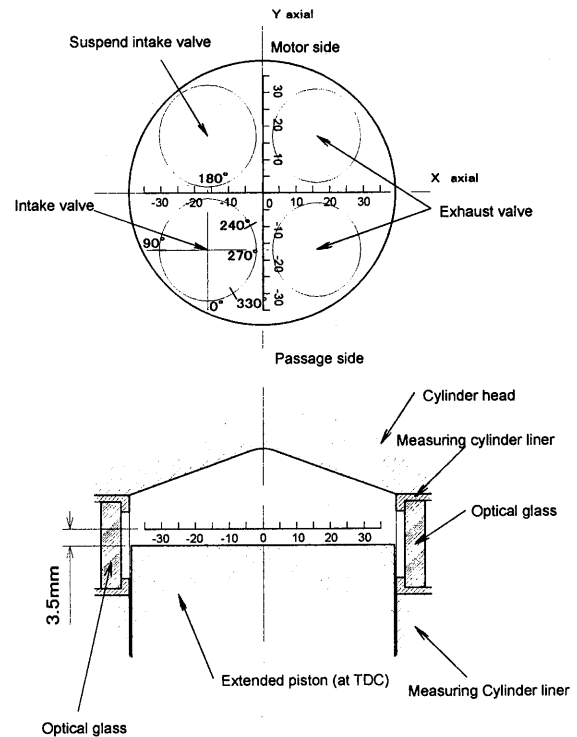


図3 流速計測位置

3.2 燃焼実験方法

燃焼実験はガス流動計測条件と同じ流れ可変機構の設定条件で行い、エンジン回転数は1000rpm、空燃比は理論混合比付近の15および希薄域の17.5である。また充填効率は低負荷を想定して25%とした。

燃焼実験条件を表3にまとめておく。

表3 燃焼実験の実験条件

|       |  |
|-------|--|
| 機関回転数 | 1000rpm  |
| 空燃比   | 15, 17.5   |
| 充填効率  | 25%  |
| 点火時期  | MBT  |
| ポート形状 | ①設定角0° (A)<br>②設定角60° (C)<br>③設定角75° (W)<br>④設定角180° (G)<br>⑤設定角270° (J)<br>⑥設定角330° (L) |

4. 評価方法と実験結果

4.1 流速の評価方法

シリンダ内ガス流動は、1測定点あたり100サイクルの母集団をアンサンプル平均したものを平均流速とした。この平均流速を用いて、シリンダー内の空気が剛体渦であると仮定して同じエネルギーとなるシリンダー内空気の回転数とエンジンの回転数の比をスワール比として平均流速のインデックスとした。

また、平均流速と各時刻の1サイクル毎の流速と差のRMSを乱れ強さとして算出した。

平均流速の計測結果を表4に示す。

4.2 燃焼の評価方法

着火運転による圧力計測によって収録した5000サイクルの実験データより、図示仕事、仕事の変動率、燃焼性を算出した。

(1) 図示仕事

供試機関の着火運転時に燃焼圧力を計測し、その指圧線図から求められる量を図示仕事とした。

(2) 仕事の変動率

図示仕事の標準偏差から図示仕事の5000サイクル平均で割った値を仕事の変動率とした。

$$\text{仕事の変動率} = \frac{\text{図示仕事の標準偏差}}{\text{図示仕事の平均値}}$$

(3) 燃焼性

燃焼性の評価基準として熱発生率を算出し、点火時期から熱発生率最大値までの時間 $\Delta\theta$ で、熱発生率最大値 $(dQ/d\theta)_{\max}$ を割ったものを燃焼性とした。

$$\text{燃焼性} = \frac{(dQ/d\theta)_{\max}}{\Delta\theta}$$

5. 混合比の設定に関する検討

本研究ではガス流動と燃焼についての関係を明確にすることを目的とし、ガス流動可変機構を用いてガス流動を変化させ、燃焼圧力を計測する。しかし昨年度までの結果からプレート設置角で特異な点が見られ、両者の関係を明確にすることができなかった。その原因の一つとして混合気供給システムが確立しておらず、燃焼圧力計測時に混合比が変動しているのではないかと考えられた。よって本年度は混合気の状態を確認した上でガス流動と燃焼状態の関係について考察することを一つの目的とした。

5.1 混合気形成についての検討

(1) 燃料噴射量の確認の必要性

昨年度まで燃焼圧力計測時の燃料噴射量の設定は圧力計測前に噴射量の検定を行い、規定の噴射量に調整後、着火運転をして燃焼圧力を計測した。しかし圧力計測後に噴射量検定を行うと、噴射量が増えていることが多数回あった。このことより時間的に噴射量が増えることが明らかであり、これがガス流動と燃焼状態の関係が明確に表せない原因の一つではないかと考えられた。そのため燃焼圧力計測時には規定の噴射量であることを確認する必要がある、噴射量が増えた場合には随時調整する必要がある。

表4 平均流速計測結果

|             |        |         |         |          |          |          |
|-------------|--------|---------|---------|----------|----------|----------|
| プレート設置角     | 0° (A) | 60° (C) | 75° (W) | 180° (G) | 270° (J) | 330° (L) |
| 周方向流速 (m/s) | 3.20   | 0.92    | 0.81    | 0.73     | 2.60     | 4.63     |
| 軸方向流速 (m/s) | 0.97   | 0.47    | 0.49    | 0.57     | 0.97     | 0.94     |

(2) ガソリン温度の確認

本研究では燃料噴射装置としてインジェクタを使用している。インジェクタは電磁的に開閉を制御しているが、燃料の噴射量には燃料の温度も影響を及ぼすことが考えられる。そのため燃料温度と噴射量の関係について調査を行った。調査結果について図4に示す。その結果、噴射量を制御するためにはガソリン温度を一定に保つ必要がある事がわかった。そのためインジェクタ直前に温度管理装置を製作した。これは吸入直前のガソリンを常に水冷し、ガソリン温度を一定に保つものである。またインジェクタのフィルタ部分に熱電対を挿入し、ガソリン温度を確認できるように改良を施した。

(3) インジェクタ開閉の確認

上記のようにインジェクタは電磁的に制御されており、電磁コイルに電流が流れるとコイルにプランジャーが引き寄せられてニードルバルブを開き燃料を噴射するシステムである。よってインジェクタに通電する電圧波形の確認を行った。インジェクタに通電される電圧波形について図5に示す。その結果、燃料噴射が開始されると電圧波形に二ヶ所のくぼみまたは突起が生じていることが分かった。また意識的に通電時間を変化させると、この2箇所のくぼみ間の時間が変化していることを確認できた。よってこの変化の大きく現れる時間（これを以後「噴射電圧期間」という）と燃料噴射量とは関係があることが考えられたため、噴射量との関係について調査を行った。噴射電圧期間と燃料噴射量の関係について図6に示す。その結果、この期間が燃料噴射量と関係があることが確認できた。

以上の結果より燃焼圧力計測時にインジェクタにかかる電圧波形を同時計測し、圧力計測時に規定の燃料を噴射していることを確認するようにした。またこの噴射電圧期間を実際の噴射期間と定義した。

5.2 混合比検出装置の製作と検討

混合比を検出するために、熱伝導率型検出器の製作を行った。これは空気とガソリンの熱伝導率には差があることを利用しようとしたものである。

理論的には可能であるものの、実際に計測を行って見たところ、空燃比 0.5 の差を検出することは不可能であり、今年度の計画では行わないこととした。

6. 実験結果に対する考察

6.1 スワールと燃焼の関係について

周方向流速と燃焼性に関する実験結果を図7に

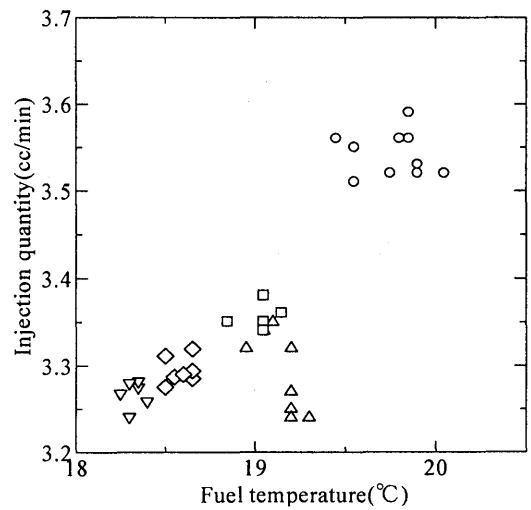


図4 燃料温度と燃料噴射量

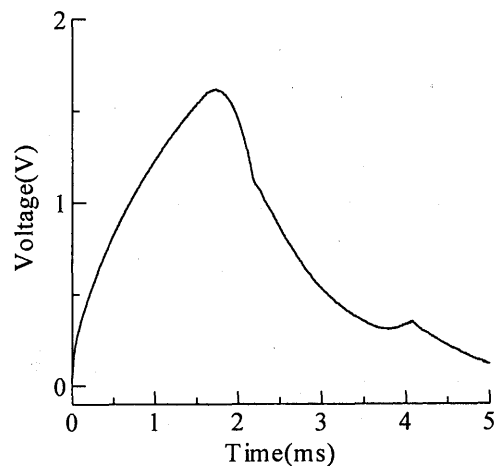


図5 噴射電圧波形

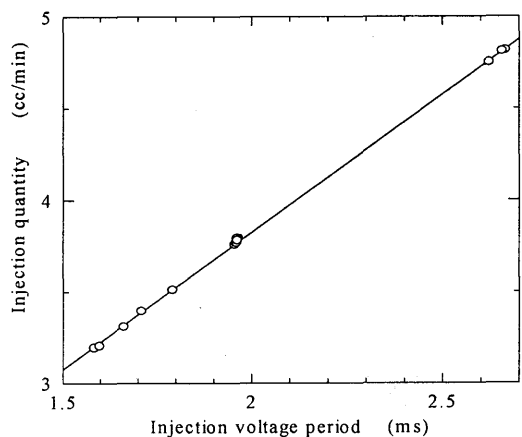


図6 噴射電圧期間と燃料噴射量

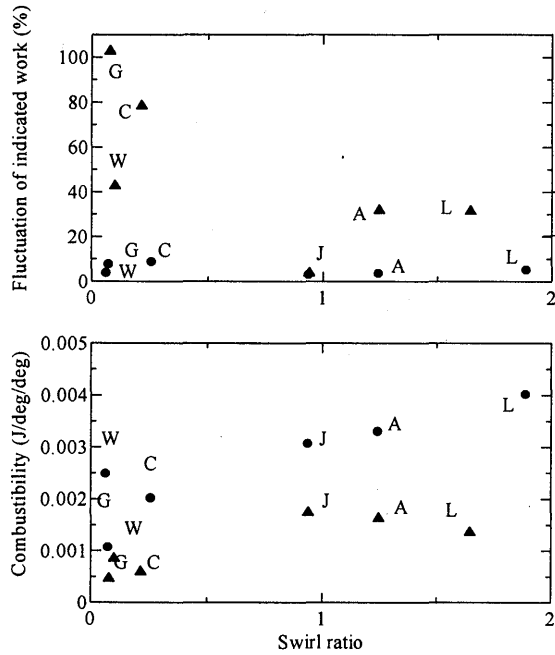


図7 スワール比と燃焼特性

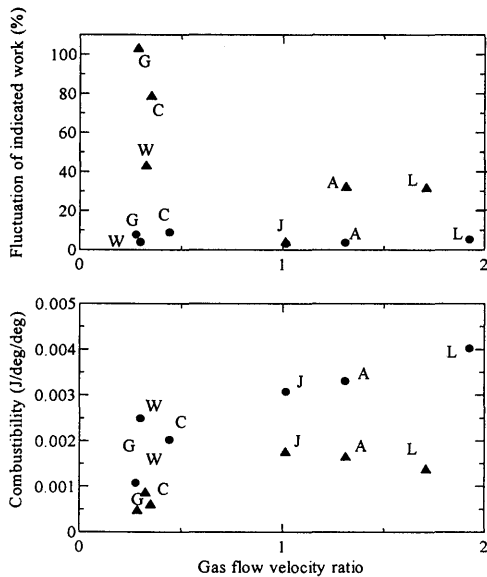


図8 ガス流速比と燃焼特性

示す。流速測定により求めた周方向流速と燃焼の関係について考察を行った。周方向の平均流速は大きく2つに分けられ、①スワールが大きいグループ(J,A,L)、②スワールが小さいグループ(C,G,W)に分けられる。①と②のグループを比較した場合、①のグループが燃焼状態は仕事量が大きく、仕事の変動率が小さいことなどから、燃焼

性はいいと判断される。すなわち、全体的な傾向としてスワールの大きい方が燃焼状態が良くなっているといえる。よってスワールが大きくなることによって燃焼自体が促進されることと、スワールを大きくすることによってガス流動のサイクル変動が小さくなり、サイクルごとの燃焼の安定性が向上することなどの理由により燃焼状態が良くなるものと考えられる。

しかし、今回の結果から問題点として(i)②グループ内で比較をした場合、スワール比が大きくなると燃焼状態が良くなるという関係がいえないこと、(ii)①グループも同様にスワールと燃焼の関係がいえないことが挙げられる。そこでまず(i)の原因について検討を行った。②グループ内のガス流動について平均流速とサイクル変動を比較すると、サイクル変動の割合が大きくサイクルごとで流速場の分布が変わっていることが考えられる。このことがスワールと燃焼の関係が整然と評価できなかった原因ではないかと考えられる。

また(ii)の問題点に関してはスワール比を大きくしすぎると生成した火炎が吹き消されてしまい、燃焼に悪影響を及ぼしているのではないかと考えられる。今回スワール比1以上程度でこのような現象がおきていることには多少疑問があるが、軽負荷・希薄運転を行っており生成した火炎のエネルギーが小さいためこのような現象が起きているのではないかと考えられる。

### 6.2 ガス流動比と燃焼の関係

ガス流動比と燃焼の関係について図8に示す。その結果、ガス流動比と燃焼の関係は図7と変わらない結果となった。これは使用した供試機関では軸方向流速に比べ周方向流速が強いためこのような結果になったと考えられる。

### 6.3 乱れ強さと燃焼の関係

乱れ強さと燃焼の関係について調査を行った。エンジン内の燃焼にはさまざまな因子が関係してくるため、今回特に違いの見られたスワール比についてはそれぞれのグループごとに比較を行った。スワールが小さいグループに関しては乱れ強さが大きくなるほど燃焼状態が良くなる傾向にあることが分かった。しかしスワールが発達しているグループでは乱れ強さが大きくなると燃焼状態が悪くなっていることが分かった。今回の結果についてJ,A,Lのポートにおける乱れ強さの空間分布や時間分布、周波数の変更などの検討を行ったが、乱れ強さのシリンダ内空間分布や時間分布に関しては特徴的な点は見られなかった。今回の原因については乱れ強さの変化幅が少ないため、スワールの影響で乱れ強さの影響が埋もれてしまったこ

とが考えられる。

## 7. 結論

エンジン燃焼実験を行う上で問題の一つとして考えられた混合比の変動について研究を行い、得られた圧力計測結果と流速測定結果から燃焼室内のガス流動と燃焼との関係を調査し、以下の結論を得た。

1. 燃焼圧力計測時に使用するインジェクタの開期間を常時計測することでガソリン噴射量を確認することができ、混合比の変動を抑制することができた。

2. 軽負荷・希薄域で実験を行うことができ、ガス流動と燃焼の関係について不明確な点はあるもののスワールや乱れ強さと燃焼には関係があること、スワールはガス流動のサイクル変動を抑制していることを確認できた。

## 謝 辞

なお、本研究を進めるにあたり、実験に際して当時大学院学生 泉 立哉 君、学部学生 中野 伸哉 君に多くのご協力をいただいた。記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 浜本 嘉輔, 富田 英二, 章 忠, 栗城 洋, 片岡 義弘, エンジンシリンダ内乱流の計測, 日本機械学会論文集(B編),58巻 550号,(1992-6),p.1969-1974
- 2) 小保方 富夫, 柄沢 隆夫, 倉林 俊雄, 四サイクル火花点火機関における燃焼室内ガス流速のLDA測定, 日本機械学会論文集(B編),54巻 505号,(昭 63-9),p.2689-2686
- 3) 野平 英隆, 許斐 敏明, 石山 忍, 指圧線図解析による燃焼変動の研究, 日本機械学会論文集(B編),vol.33,No.1,(1979),p.11-17
- 4) 浜本 嘉輔, 富田 英二, 田中 豊, 片山 哲也, 火花点火機関の燃焼に及ぼすスワールの影響, 日本機械学会論文集(B編),52巻 480号,(1986-8),pp.3059-3067
- 5) 池上 詢, 塩路 昌宏, 朱 啓 明, 佐藤 謙一郎, 高柳 文成, 火花点火ガス機関の希薄燃焼, 日本機械学会論文集(B編),59巻 562号,(1993-6),p.2094-2099
- 6) 田坂 英紀, 佐藤 忠教, 内燃機関, 森北出版(1995)
- 7) 八田 桂三, 浅沼 強, 松木 正勝, 内燃機関計測ハンドブック, 朝倉書店(1981)