

可視化計測法を用いたエンジン内ガス流動の計測 (ピストン形状によるガス流動変化)

田坂英紀¹⁾・中島正隆²⁾

Measurement of In-Cylinder Flow by Visualization of Tracers In Color Layer (Change of Gas Flow by Difference of Piston Form)

Hidenori TASAKA, Masataka NAKASHIMA

Abstract

In diesel engines, gas flow is a very important term which promotes to mix air and fuel. However, in the past measurement procedure it is difficult to install the observation window and so on. Moreover, it was difficult to measure the three-dimensional flow in the cylinder. Therefore, it is necessary to understand gas flow in the cylinder in detail. In our previous research, we proposed the flow visualization method using color layer which can be indicated the velocity to the depth direction by the color of the image, and then three-dimensional flow measurement could be achieved. In this research, the model engine to imitate a real engine is used to examine the gas flow in the cylinder. Gas flow in the cylinder was measured how it was changed by two kinds of piston forms in this model engine by using visualization of tracers in color layer. As a result, it was understood that the state of the gas flow in the cylinder changes by the difference of the piston form. Thus, effectiveness of this measurement method measuring the gas flow in a cylinder was able to be shown.

Key Words:

Internal Combustion Engine, Flow Visualization, Color Layer, In-Cylinder Flow, Three-dimensional Flow Measurement

1. 緒論

1. 1 まえがき

ディーゼルエンジンはガソリンエンジンに比べ、熱効率がが高く燃料消費量が少ない上、地球温暖化の原因であるCO₂や人体に悪影響を及ぼすCO、HCの排出量が少ない点で優れている。しかし一方で、排出ガス中のNO_x濃度が高く、すすなどの浮遊粒子状物質 (PM) を含み、これが環境汚染の原因となっている。

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

ガソリンエンジンの大部分は、予め空気と燃料を混合し燃焼室内に取り入れ火花着火にて燃焼を行う予混合燃焼に対し、ディーゼルエンジンは燃焼室内に空気と燃料を独立して取り入れ、自己着火にて燃焼を行う拡散燃焼である。

ディーゼルエンジンのような噴霧燃焼の場合、燃焼中も燃料の噴射が続く拡散燃焼期が存在し、このとき燃料と空気の濃度に斑が生じる。このように燃料蒸気が酸素不足の状態では高温に保たれるとき、熱分解による脱水素反応や重合などが起こり、遊離炭素の集まりや炭素/水素比のきわめて大きい炭化水素を主成分とする『すす』が生成される。ディーゼル車の様な高速圧縮着火機関では燃焼に許しえ

る時間が少ないため排出ガス中のすすの存在は避けられない。こうして発生したすすは、排ガス浄化触媒の適用を困難にし、ガソリン車のような触媒での排ガス浄化が行えず、NO_x濃度も高くなってしまふ。(1)

すすの発生メカニズムを考えると、すすの排出量を低減するには拡散燃焼期とその後に続くあと燃え期における燃焼室内のガス流動が大きな役割を担っている。その為、この時期における燃焼室内の流れを知ることが重要である。しかし、シリンダ内は複雑な非定常流であるため、従来の局所的な計測方法では詳細に計測することは難しい。また、計測に膨大な時間を要するため、シリンダ内全域の三次元ガス流動を瞬時に、かつ簡便に把握できる新たな計測方法が必要である。

そこで本研究では可視化による流動計測方法のPTVを基本とし、そこに色層と呼ぶ色が連続的に変化する虹色の層を照射して、その色情報から被写体の奥行き方向を同時に計測する三次元計測システムである色層可視化計測の研究を行ってきた。

1. 2 研究目的

これまでの研究によりシリンダ内の三次元瞬時流速分布を計測する方法として色層可視化計測法を提案し、ほぼ確立するに至った。そこで本研究では、この計測方法を実機を模したモデルエンジンに適用し、ディーゼルエンジンにおいてすすの発生低減に重要なシリンダ内ガス流動が、ピストン形状の違いによりどのように変化するかを明らかにすることで、色層可視化計測法の有効性を示すことを目的とする。

2. 計測原理

2. 1 色層可視化計測法

2. 1. 1 三次元計測原理

本研究では3次元速度分布の計測を可能にするため、カメラに対して奥行き方向に連続的に色の変化する色層と呼ぶ照明光を計測領域に照射し、計測領域内を移動するトレーサの反射光から可視化計測法で得られる2次元平面移動量と色情報から奥行き方向の移動量を得ることで3次元計測を可能にしている。計測原理を図1に示す。

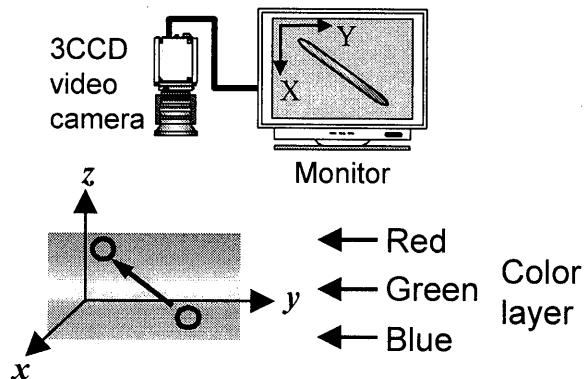


図1 計測原理図

2. 1. 2 色の定量的表現

色情報を定量的に扱うために撮影装置から得られた画素ごとのR、G、B強度から求める輝度 (Luminance) Y と色相 (Hue) の二つを使用する。この二つは一般的に次式で表される。

$$Y = 0.30R + 0.59G + 0.11B \dots (1)$$

$$Hue = \tan^{-1} \frac{R - Y}{B - Y} \dots (2)$$

3. 計測システム

本研究の計測システムは大きく分けて5つの装置から成り立っている。図2に計測システム概略図を示す。

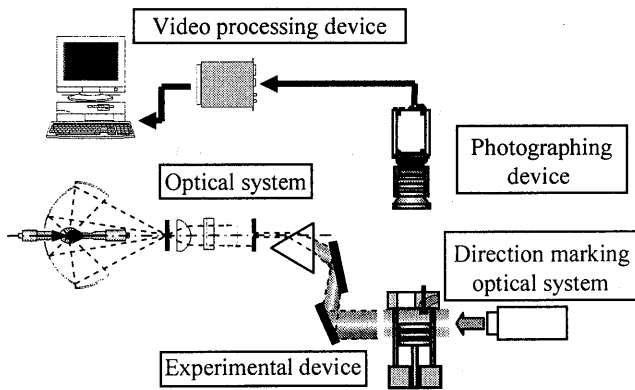


図2 計測システム概略図

3. トレーサに関する検討

3.1 白色トレーサ

色層可視化計測法に用いるトレーサとして、次の条件を満たす必要がある。

1. 色層の反射率がよく、正しい色情報を示すこと
2. 空気流動によく追従すること
3. PTVに適した粒径であること
4. 球形に近いこと

高い計測精度を得るためにもこれらの条件を満たす必要がある。

本研究では、粒径約 $150\mu\text{m}$ で半透明の固体樹脂製中空粒子を酸化チタンで製作した白色塗料で白色化し、色層可視化計測用トレーサとして開発した。

3.2 移動粒子実験

まず正確に色情報を反射し、良好な解析精度が得られるかを移動粒子実験で検討した。実験装置概略図を図3に示す。本実験では、色層内を移動するトレーサ軌跡を撮影し、撮影画像の色情報より求めた速度と、装置条件から理論的に求めた速度を比較し、速度解析精度について評価した。

その結果、実験値は真値に対し誤差 10%以内に収まり、良好な解析精度が得られていると判断した。

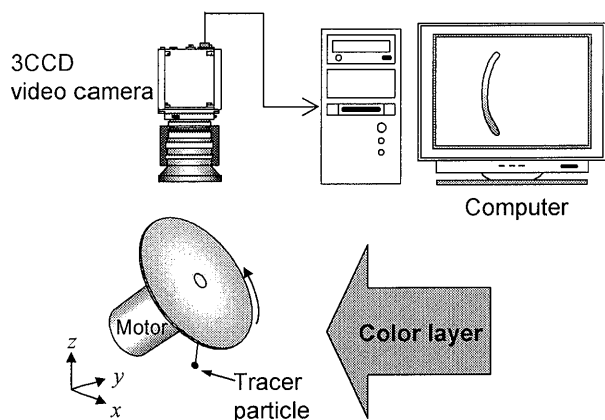


図3 移動粒子実験装置概略図

次に LDV で計測した実際のエンジン内の流速変動に対するトレーサの追従性を理論的に計算し、検討した。結果を図4に示す。

図4よりトレーサは良く追従していることが確認でき、今回製作した白色化トレーサは、色層可視化計測法で使用可能であると判断した。

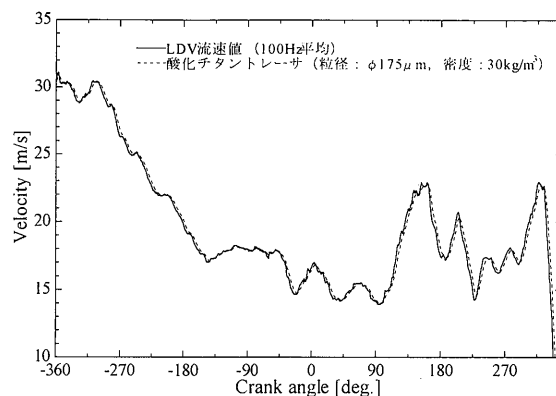


図4 追従性の計算結果

4. モデルエンジン実験

モデルエンジンの駆動は出力 0.75kW 、速度可変式の3相ACモータを使用し、クランクシャフトに直結したプーリで減速し駆動している。シリンダには内径 70.0mm 、外径 80.0mm のガラス製シリンダを使用しておりストロークは 70.0mm である。機関形式はクロスヘッド型機構である。この色層可視化計測法は、シリンダ側方からは色層を注入し、空気流動計測用トレーサとして微小粒子を使用するため、シリンダ内を潤滑することができない。そのためピストンリングにテフロンを使用し、無潤滑でかつ気密性を高く保たれた運転を可能とした。テフロンは摩擦係数が小さく、耐熱性・耐摩耗性に優れているが、弾力性に欠けるため、合口を入れたリング状のテフロンの内側にシリコン製のOリングを入れることで弾力性を持たせ、テフロンをシリンダに密着させる構造とした。合口部分からの圧縮漏れを防ぐため、合口を 180° ずらして組み合わせ合計4本のテフロンリングを使用して漏れを防ぐ構造になっている。

本実験で使用したモデルエンジンの概略図を図5に、諸元を表1に示す。

表1 モデルエンジン諸元

エンジン形式	OHC 2バルブ
コンロッド形式	クロスヘッド型
シリンダ形状	円筒形
ボア	$\phi 70.0\text{mm}$
ストローク	70.0mm
圧縮比	12.4
行程容積	270cc

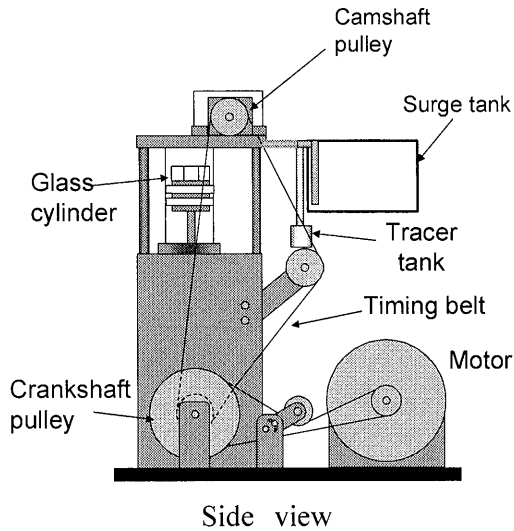


図5 モデルエンジン概略図

5. キャビティ形状検討

昨年度のキャビティピストンを用いた実験において、明確なスキッシュ流を確認出来なかったため、キャビティ形状の検討を行った。その結果、スキッシュ流を強める因子として、スキッシュエリア面積が関係していることがわかった。この結果を踏まえた新たなキャビティピストンを製作し、スキッシュ流を確認する為、バルブ開閉なしで実験を行った。バルブ開閉なしでのスキッシュ流確認画像を図6に示す。

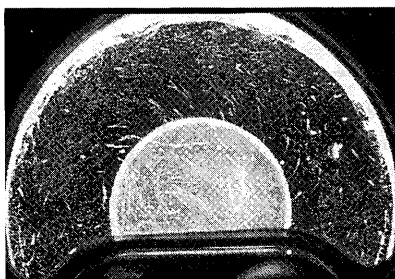


図6 スキッシュ流確認画像

その結果、スキッシュ流は発生しているものの、スワール流に比べ、非常に小さいことがわかり、現在の実験条件において明確なスキッシュ流を確認できないことが分かった。

また、今回の実験では、ピストン形状の違いによるガス流動の変化を見るため、フラットピストン及びキャビティピストンを用いて実験を行った。本実験に用いたピストン形状を図7に示す。

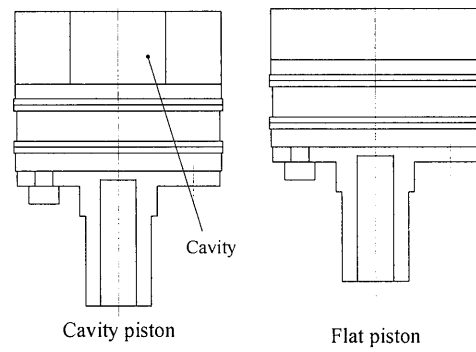
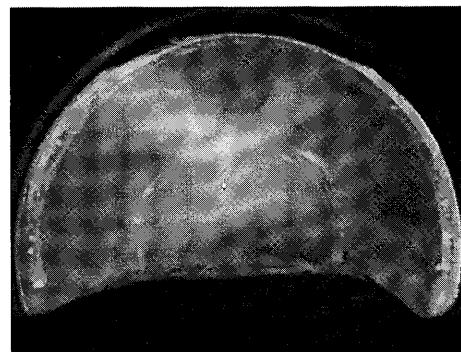


図7ピストン形状図

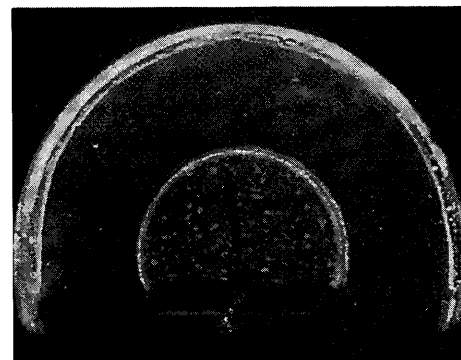
6. もや（水滴）対策

予備実験において、圧縮上死点後の急激な圧力低下に伴い、作動流体の空気が飽和蒸気圧に達し、もや（水滴）が発生し、撮影に支障をきたすことが確認された。そこで、作動流体に乾燥空気を用いる対策を行い、上死点後の撮影が行えるようにした。

図8にもや（水滴）対策確認画像を示す。



対策前



対策後

図8 もや（水滴）対策確認画像

7. 撮影実験

上記の対策がとれた為、ガス流動計測を行った。実験条件を表2に示す。

表2 実験条件

使用ピストン	フラットピストン キャビティピストン
撮影時期	BTDC60°, BTDC20°, TDC, ATDC20°, ATDC60°
シャッタースピード	1/500 [sec], 1/250 [sec], 1/125 [sec] (軌跡速度に応じて変更)
回転数	500 [rpm]
方向判別	YAG マーキング
使用トレーサ	酸化チタントレーサ

8. 実験結果・考察

実験結果の一部を以下の図9～14に示す。図は、ピストン形状でガス流動の変化が大きく見られたTDC, ATDC20° の計測結果で、それぞれZ軸上に設定した領域内における流速分布(周方向速度・軸方向速度)である。また表3、表4に、各クランク角度における軸方向速度と角速度の平均値を示す。ここで用いた角速度は、スワールの回転中心をシリンダ中心軸とし、このスワールを剛体渦として算出している。

表3 各クランク角度の平均軸方向速度

C.A.	フラットピストン [m/s]	キャビティピストン [m/s]	
		キャビティ内	キャビティ外
BTDC60°	-0.91	-0.46	-0.48
BTDC20°	-0.26	-0.11	—
TDC	0.07	-0.25	—
ATDC20°	0.37	-0.11	0.22
ATDC60°	(0.69)	(0.30)	(0.50)

表4 各クランク角度の平均角速度

C.A.	フラットピストン [rad/s]	キャビティピストン [rad/s]	
		キャビティ内	キャビティ外
BTDC60°	117	113	105
BTDC20°	129	153	—
TDC	101	189	—
ATDC20°	107	157	89
ATDC60°	(121)	(151)	(89)

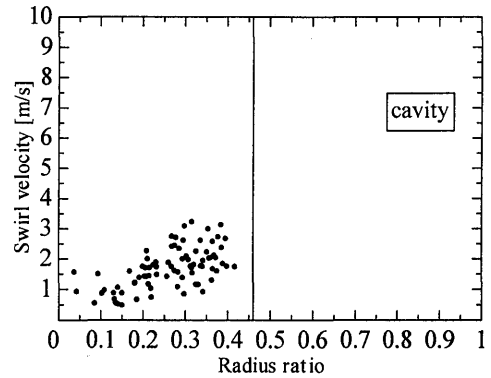


図9 TDC, Z=7.60~13.6 の領域における周方向速度

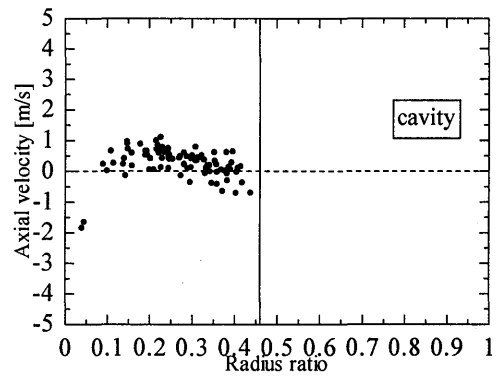


図10 TDC, Z=7.60~13.6 の領域における軸方向速度

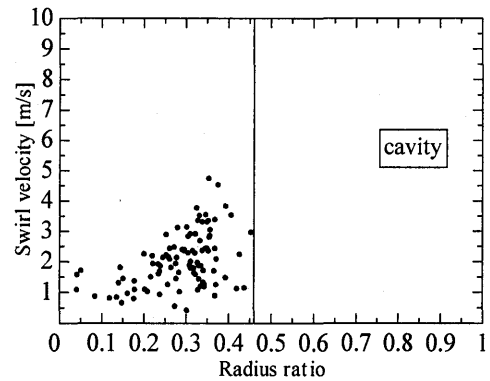


図11 ATDC20°, Z=10.53~16.53 の領域における周方向速度

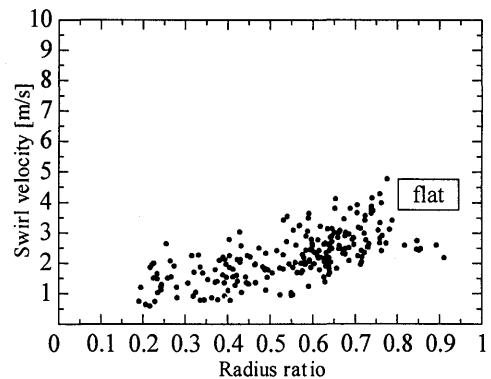


図12 TDC, Z=0.00~4.37 の領域における周方向速度

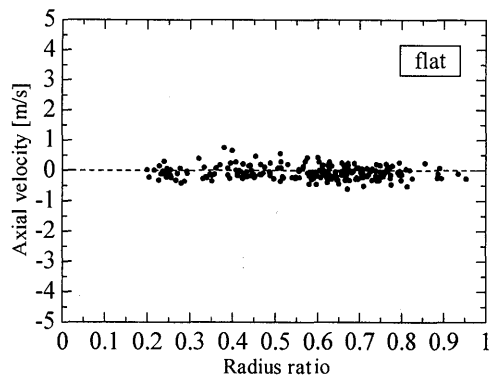


図1.3 TDC, $Z=0.00\sim 4.37$ の領域における軸方向速度

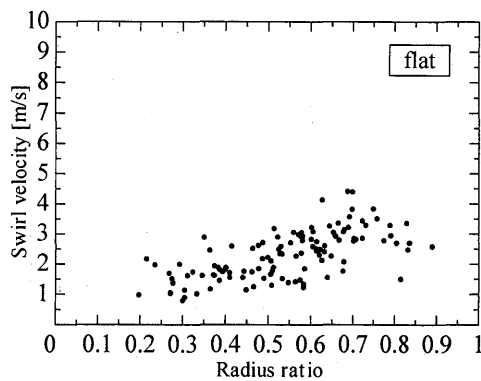


図1.4 $ATDC20^\circ$, $Z=4.00\sim 7.68$ における周方向速度

以上の各撮影時期において、ピストン形状の違いによるガス流動の変化を確認できた。 $ATDC60^\circ$ は、実験装置に変更があった為、他との比較を行っていない。

まずフラットピストンの軸方向速度は、ピストンの動きに追従する傾向が見られるが、キャビティピストンではピストン移動の影響だけでなく、キャビティに流入・流出する影響が確認でき、フラットピストンと異なる傾向にあることが分かった。

角速度では、フラットピストン・キャビティピストンの両方で剛体渦的な流れが確認できた。またフラットピストンの場合、 $BTDC60^\circ\sim BTDC20^\circ$ で増加し、それ以降は減衰する傾向が見られた。表3を見ると、この間に軸方向速度が減衰しているのが分かる。これより、軸方向の速度成分が周方向に偏向した為、角速度の成分が増加したと考えられる。一方キャビティピストンでは、 $BTDC60^\circ\sim TDC$ でフラットピストンよりも大きく増加し、 TDC 以降は減衰すると考えられる。

9. 結論

本研究で色層を用いた3次元可視化計測法をモデルエンジンに適用し、二種のピストン形状でシリンダ内流れを計測した結果、以下の結論を得た。

- (1) モデルエンジン内で使用する被写体として、耐久性が有り、追従性の良い白色化トレーサを開発することができた。
- (2) 圧縮上死点後の撮影実験において問題となった、もや(水滴)発生への対策として乾燥空気を用い、圧縮上死点後の撮影実験が行えるようになった。
- (3) 実機を模したモデルエンジンにおいて、フラットピストンとキャビティピストンの $BTDC60^\circ\sim ATDC60^\circ$ までの流れの変化を把握し、比較を行った結果、ピストンにキャビティを設けることで、シリンダ内流れは軸方向への流れが促進されることを確認し、色層可視化計測法の有効性を示した。

参考文献

- (1) 日本機械学会, 燃焼に伴う環境汚染物質の生成機構と抑制法, 第2部, P172
- (2) 田坂英紀・佐藤忠教, 内燃機関, 森北出版株式会社, P120~122, 1999.3
- (3) 可視化情報学会編, PIVハンドブック, 森北出版株式会社, P3~7, P286~287, 2002.7
- (4) 工藤 和幸・山村 善彦, 宮崎大学工学部機械システム工学科, 平成13年度卒業論文
色層を用いたエンジン内流動の可視化流動計測
(空気用モデルエンジン内流動計測の基礎実験)
- (5) 内燃機関編集委員会編, 内燃機関の燃焼, 山海堂 P140, P270, 1972.2
- (6) 田辺征一, 内燃機関, スワールの生成と減衰, 山海堂, P57~66, 1984.6
- (7) 池上詢, 内燃機関, エンジンのガス流動研究の現状, 山海堂, P2~8, 1984.6