

# 色層を用いたエンジン内流動の可視化計測 (空気用モデルエンジン内流動計測の基礎実験)

田坂英紀<sup>1)</sup>・山村善彦<sup>2)</sup>・飯尾昭一郎<sup>3)</sup>

## Visualization Measurement of Flow in an Engine by Color Layer (Fundamental Experiment of Air Flow in a Model Engine)

Hidenori TASAKA, Yoshihiko YAMAMURA, Shoichiro IIO

### Abstract

It is important to grasp gas flow in a cylinder when investigating the relation with combustion. It is difficult to measure using the conventional measuring method and it needs much time, because the flow is complicated and unsteady flow. The measurement method that can be grasped easily is important. In this research, examination of a tracer particle and the manufacture method are performed. And evaluation and examination are performed about the accuracy of the analysis in the position of a tracer particle and the accuracy of the analysis in the speed. Moreover, distribution of the flow velocity of the whole region in a cylinder is measured using model engine. And color layer visualization aims at the validity to air flow being shown. As a result of performing examination and manufacture of the tracer for air flow, it was analyzable to the true value with comparatively good accuracy also in the stationary state or the state where it moved. Moreover, model engine was used and it has checked that the tendency of flow changed when piston form is different.

### Key Words:

Internal Combustion Engine , Flow Visualization , Color Layer , Air Flow Measurement , Tracer Particle

## 1. 緒論

### 1.1 まえがき

近年、我々の生活水準は劇的に高まり、日々膨大なエネルギー資源を消費し続けている。その代償として、地球温暖化、大気汚染、地下資源の枯渇などの様々な環境問題を抱えることとなった。

現在、自動車は我々の生活になくってはならない存在であるが、一方で環境問題と深く関係していることも事実である。近年、化石燃料の究極可採埋蔵量が判明し、残り50年の間に確実に底をつくことが分かった。

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

3) システム工学専攻大学院生

代替燃料として水素、アルコール、天然ガスなどを使用する自動車の開発が行われているが、性能や価格の面で、未だに検討しなければならない問題が多くある。また、モーターとエンジンを組み合わせたハイブリッドカーは低公害、低価格、低燃費を実現している。だが、依然、主要機関に内燃機関を用いていることには変わりなく、次世代交通システムに完全に移行するまでの間は、現在主流の内燃機関を用いることになる。そのため、内燃機関の燃焼効率を向上し、省エネルギー、環境保全を行わなくてはならない。

内燃機関の燃焼効率を向上する上で、燃焼と深い関係を持つシリンダ内のガス流動を把握することは重要である。だが、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シリンダ内全域の

流れを把握することは難しく、また、膨大な時間を要する。そのため、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法の確立が必要である。

## 1.2 研究目的

エンジンのシリンダ内ガス流動と燃焼の関係を把握するためには、従来用いられてきた、局所的な流速の計測方法だけでなく、シリンダ内全域の三次元瞬時流速分布を求める必要がある。

本研究では位置及び速度の解析精度向上のためのトレーサ粒子の検討と、それに基づいた製作を提案し、トレーサ粒子の位置解析精度、速度解析精度について評価・検討する。また、実機をモデル化したエンジンのシリンダ内全域の三次元瞬時流速分布を計測することで、空気流動に対する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

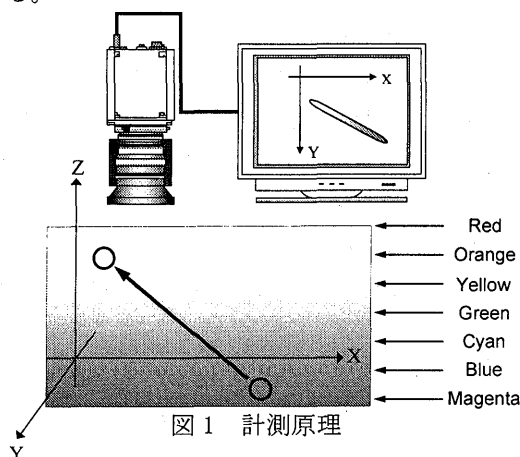
### 2.1 色層可視化計測

#### 2.1.1 三次元計測原理

本研究では照明光にカメラから深さ方向に応じて連続的に色が変化する光(以後、色層と呼ぶ)を用い、トレーサの反射光から輝度だけでなく色情報を得ることで1台のカメラで三次元計測を可能にした。計測原理を図1に示す。

#### 2.1.2 色の定量的表現方法

本研究では色を定量的に表現することのできる輝度(Luminance)と色相(Hue)を用いて深さ方向の位置を判別する。以下に輝度(Y)と色相(Hue)を求める式を示す。R,G,Bはそれぞれ、赤、緑、青の強度である。



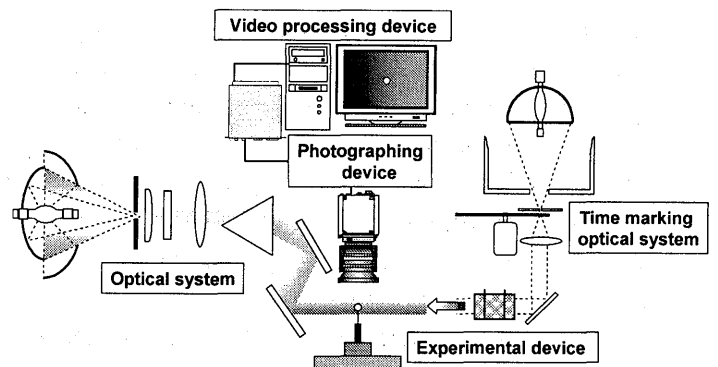
$$Y = 0.3R + 0.59G + 0.11B \dots (1)$$

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

### 2.2 計測システム

本研究の計測システムは大きく分けて以下の5つに分けることが出来る。計測システム原理を図2に示す。

- ・光源光学系・・・計測範囲に照射する色層を作る装置
- ・実験装置・・・実験に応じた撮影対象を構成する装置
- ・撮影装置・・・撮影対象を撮影する装置
- ・画像収録装置・・・撮影装置で得られた画像から被写体の座標と色情報を取得し、数値データとして処理する装置
- ・時間基準光学系・・・軌跡の移動時間と移動方向判別用のタイムマーカを照射する装置



## 3. トレーサの評価実験

今回、新たに製作した白色トレーサと検討方法について説明する。

### 3.1 白色トレーサについて

色層可視化の空気流動用トレーサには、以下の条件が求められる。

- ・色層の反射率が高く、かつ、正しい色情報を反射すること
- ・PTVに適した粒径であること
- ・空気によく追従すること
- ・球形に近く、かつ、個体差が少ないこと

今回製作したトレーサは、粒径約  $150 \mu\text{m}$  の中空粒子に、粒径約  $1 \sim 2 \mu\text{m}$  の白色微粉末を均一に付着させることで、反射光強度が高いトレーサを製作することが出来た。

### 3.2 静止粒子実験

静止したトレーサが、正しい色情報を反射するか評価する実験を行った。

#### 3.2.1 実験装置

静止粒子実験を行うためには、トレーサを任意の場所に正確に設置する必要がある。そのためトレーサの位置制御には三次元的に正確に移動させることが出来るトラバース装置を用いた。静止粒子実験装置を図3に示す。

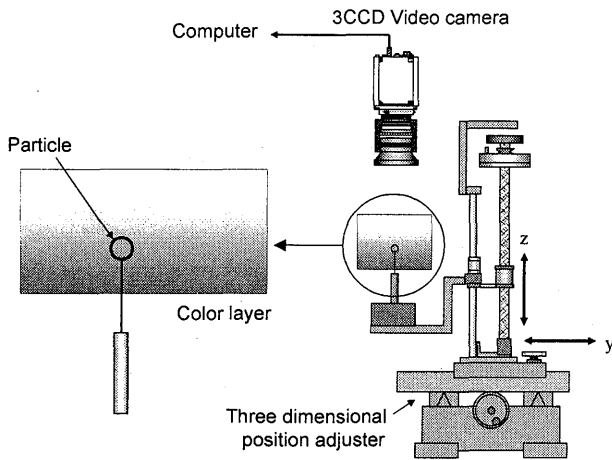


図3 静止粒子実験装置

#### 3.2.2 実験方法

本実験では、照射板と呼ぶ白い板を設置し、これを色層照射方向から撮影し、得られる Hue 値を真値とする。次に照射板を取り除き、トレーサを照射板と同じ平面上を高さ方向に移動させながらビデオカメラで上方から撮影する。Hue 値で 225° の場所を基準とし、高さ方向に、上下 20mm の範囲を 1mm 毎トラバースさせながら撮影を行う。照射板から得られた Hue 曲線とトレーサから得られた Hue 値を比較し、高さ位置で解析精度を確認する。

#### 3.2.3 実験結果・考察

実際の白色トレーサはコーティング状態に違いがあることが考えられる。そのため、実験にはランダムに選んだ3個の白色トレーサを使用した。静止粒子実験結果を図4に示す。グラフを見ると、Hue 値はいずれも、Hue で 350° から 150° までどの位置でも真値とほぼ一致している。実際に使用する解析範囲は 30mm という事実と、使用する色領域でも、真値との誤差が撮影システムによる変動の 5° 以内であったため、十分誤差範囲内に収まると考えた。

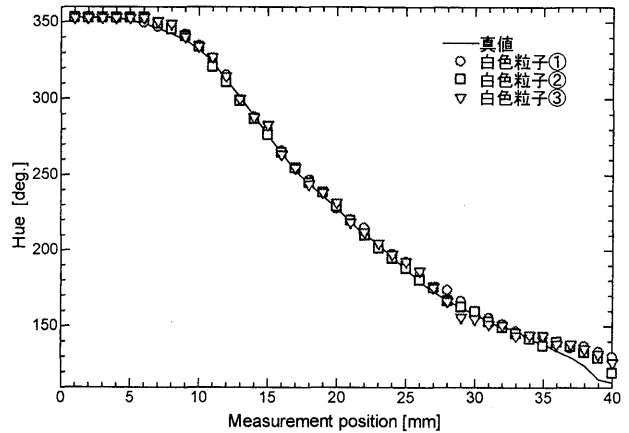


図4 静止粒子実験結果

以上の結果より、静止した白色トレーサは正しい色情報を反射し、位置解析精度も問題ないことが分かった。

### 3.3 定速回転する粒子による検討

一定速度で回転することが出来る円盤にトレーサを取り付け、白色トレーサを速度解析精度の面から評価した。

#### 3.3.1 実験装置

任意の回転数で安定して回すことのできる円盤にトレーサを取り付けた細線を設置する。また、回転円盤は全ての色領域を通過するように傾斜して設置する。側方から色層と時間基準及び移動方向判別用の白色光（以後、タイムマーカーと呼ぶ。）を照射し、トレーサ軌跡を回転円盤上方からビデオカメラで撮影する。移動粒子実験装置を図5に示す。

#### 3.3.2 実験方法

上方からビデオカメラで撮影した軌跡画像の始点と終点の Hue 値より高さ方向の移動距離を求める。時間にはタイムマーカーから算出したものを用いる。移動距離を時間で除することで、軸方向速度を算出した。回転円盤の回転数と設置角度、粒子の取り付け半径から軸方向速度算出し、それを真値とする。色から求めた速度と真値を比較することで、速度解析精度を評価する。

#### 3.3.3 実験結果・考察

移動粒子実験結果を図6に示す。

実験より色情報を用いた速度解析でカメラから見て奥行き方向の速度が 10m/s の場合に±10%以内の誤差で解析できた。

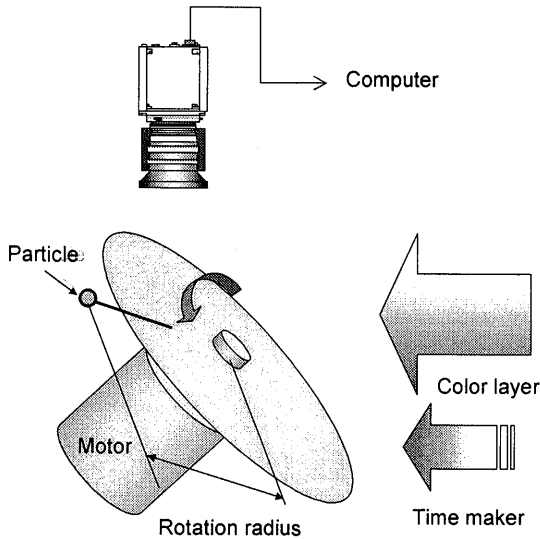


図5 移動粒子実験装置

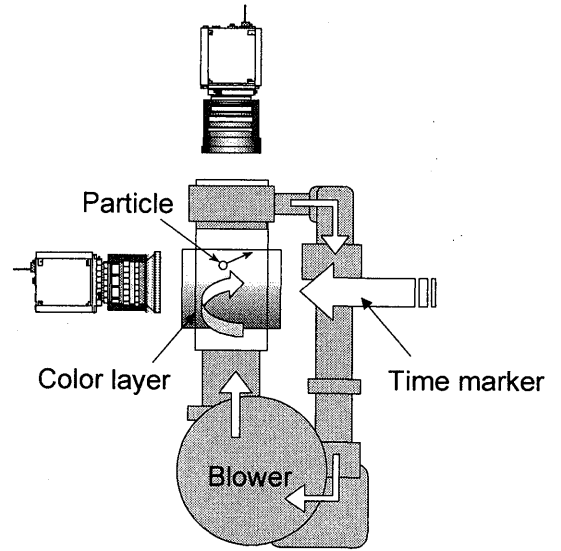


図7 旋回流モデル実験装置

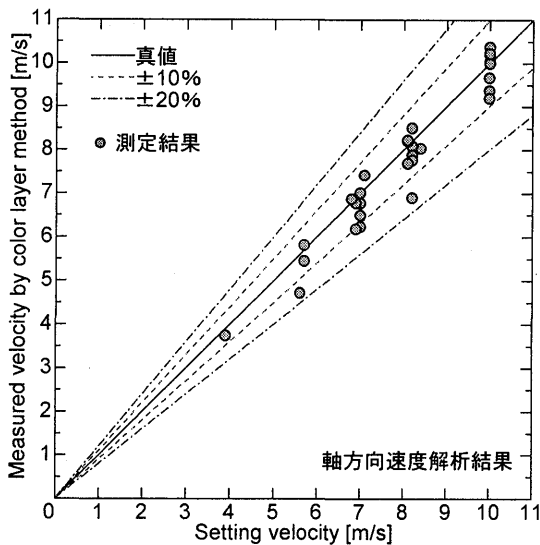


図6 移動粒子実験結果

3.4 旋回流モデルによる検討

エンジン内スワールを想定した旋回流モデルで速度解析精度を検討した。

3.4.1 実験装置

送風機を用い、観測領域で上向き循環流を作った。観測領域下部には整流フィンを取り付け旋回流が起こるようにした。観測領域にはガラス管を用い、側方に設置した光源からの色層と、タイマーが照射できるようにした。ガラス管上部には観測窓を設置した。観測領域の上方と側方にカメラを設置した。

旋回流モデル実験装置を図7に示す。

3.4.2 実験方法

観測領域上方のカメラを色情報の測定用とした。側方のカメラから、高さ方向の移動距離を測定、真値とし、色情報から求めた軸方向速度と比較することで速度解析精度を評価する。

3.4.3 実験結果・考察

旋回流モデル実験結果を図8に示す。

実験の結果、最大7m/sの流速に対し±20%で解析できた。移動粒子実験の結果より解析誤差が大きくなっているが、撮影したデータに青領域のデータが多く、その領域ではHueが微妙に変化した場合でも高さ位置の変化が大きいためと考えられる。そのため、実際のモデルエンジン実験で使用する際、この領域を使わないようにしなければならないことが分かった。

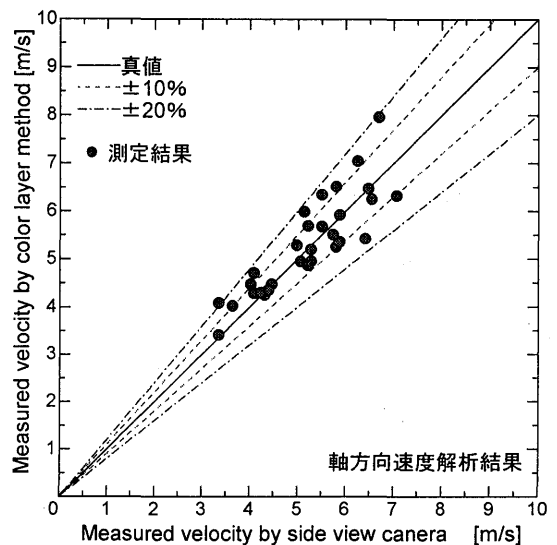


図8 旋回流モデル結果

#### 4. モデルエンジン実験

本実験では作動流体に圧縮性流体である空気を用いる実機をモデル化したモデルエンジンを製作し、色層可視化計測法によりシリンダ内流動を把握することで、実機への応用性を検討した。

##### 4.1 実験装置

モデルエンジン概略および諸元を図9に示す。

今回の実験ではフラットピストンの他に、ディーゼルエンジンにおける直接噴射方式の燃焼室に使用されるピストンキャビティの一つをモデル化したものを使用した。キャビティには様々な形状があるが、最も一般的に用いられている中スワール型キャビティを採用した。キャビティの概要図を図10に示す。

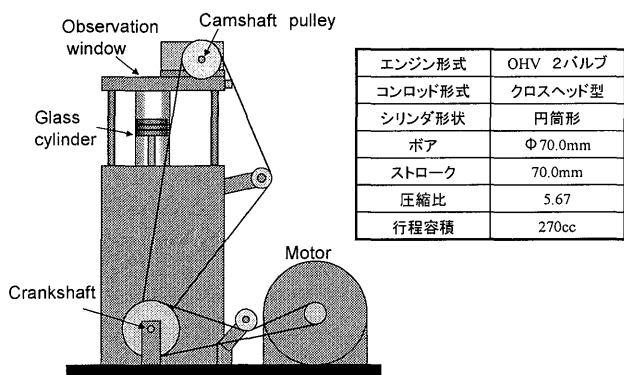


図9 モデルエンジン概略

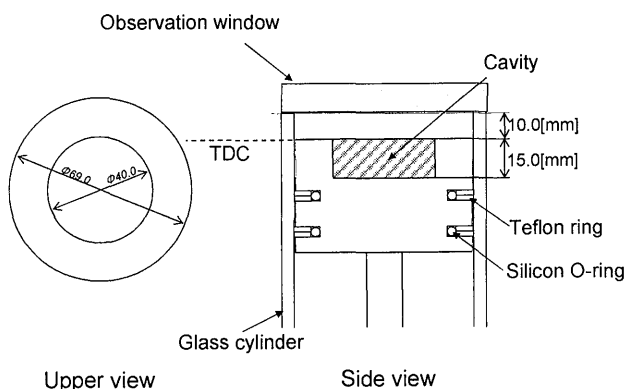


図10 キャビティピストン概要

##### 4.2 実験方法

本実験では、クランク回転数 200rpm において、フラットピストンを用いた圧縮・膨張行程のシリンダ内流動の計測を行った。また、キャビティピストンを用いて圧縮上死点時の流れの計測を行った。ここでは実

験結果の一部として圧縮上死点のフラットピストンとキャビティピストンの流れの比較を行い、ピストン形状が流れに及ぼす影響について検討した。

##### 4.3 実験結果・考察

図12, 13にTDCでのフラットピストンとキャビティピストンの流速分布を示す。図12, 13よりどちらも比較的安定した時計回りの旋回流を形成していることが分かった。図14, 15にTDCでのフラットピストンとキャビティピストンのシリンダ半径における周方向速度と軸方向速度のグラフを示す。図14で周方向速度についてみると、シリンダ中心から離れるほど周方向速度が大きくなっていることが分かる。その傾向はキャビティピストンの方が強く、シリンダ半径方向における周方向速度の勾配はフラットピストンの3倍程度になっていることが分かった。また、図15で軸方向速度についてみると、どちらもゼロを中心に分布しているが、キャビティピストンの方がフラットピストンよりばらつきが大きいことが分かった。

以上より、ピストン形状の違いにより流れの傾向が変化することを確認できた。

しかし、キャビティ本来の目的であるスキッシュ流を確認することはできなかった。原因として圧縮比が低すぎるものが考えられた。そのため、ピストン形状を変更し、圧縮比を5.67から現在のモデルエンジン構造上の限界である11.4に上げ確認実験を行った。その結果、シリンダ上方から見た画像で、圧縮比変更前は安定した円弧状の軌跡だったものが、シリンダ中心へ偏向したことを確認できた。

このことより、スキッシュ流を起こすためにはキャビティ形状だけではなく、圧縮比が重要な因子であることを確認できた。確認画像を図11に示す。

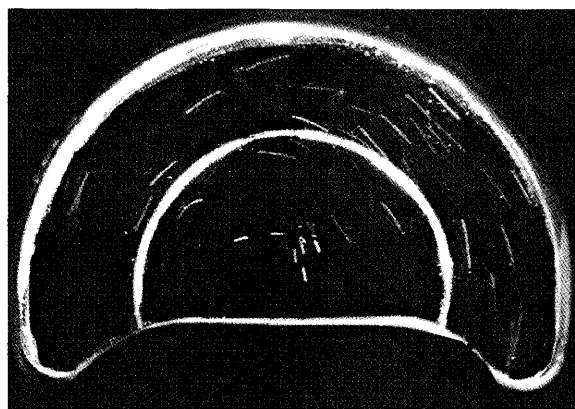


図11 確認画像

5. 結論

実機のガス流動計測を目的として空気流動に対する色層可視化計測法の有効性を検討した結果、以下の結論を得た。

1. 空気流動用トレーサの検討及び製作を行い、色情報による位置解析で最大誤差0.7mm, 最大10m/sで移動する粒子速度を真値に対して誤差±10%以内で解析することができた。
2. エンジン内スワールを想定した旋回流モデル実験で、定常的な流れにおいて、色情報により真値に対して誤差±20%以内の解析精度が得られた。
3. 実機同様の非定常流を想定したモデルエンジンで、フラットピストンを使用した際のシリンダ内三次元流速分布において、圧縮行程から膨張行程にかけての流れの変化を把握することができた。また、キャビティピストンについて実験を行い、ピストン形状の違いにより流れの傾向が変化することを確認できた。

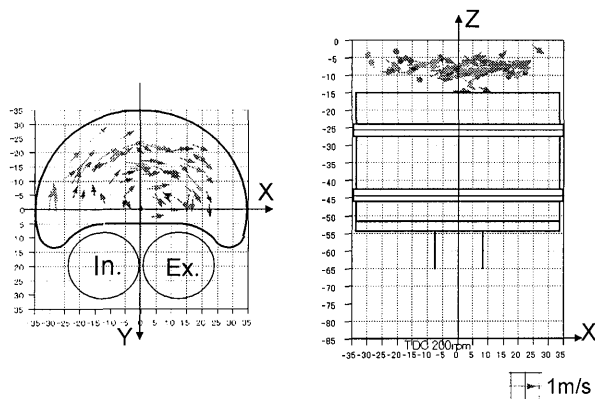


図12 TDCでのフラットピストンの流速分布

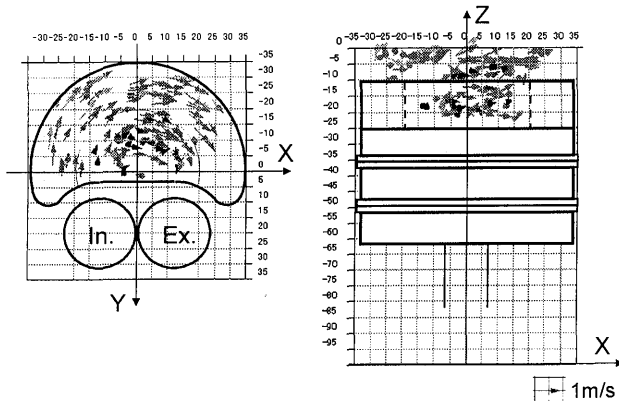


図13 TDCでのキャビティピストンの流速分布

参考文献

- 1) 田坂 英紀・佐藤忠教共著;内燃機関, P120~P121, 1995.10
- 2) レーザー計測ハンドブック編集委員会;レーザー計測ハンドブック, P161~P171, 1993.9
- 3) 可視化情報学会;PIV ハンドブック, P3~P10, 2002.7
- 4) 流れの可視化学会編;流れの可視化ハンドブック, P425~P427, 1986.10

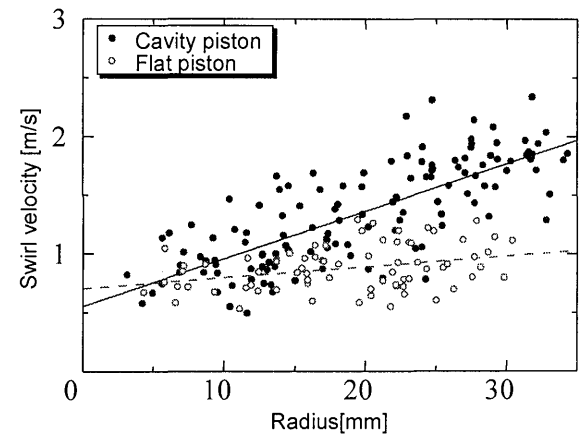


図14 TDCでのシリンダ半径と周方向速度

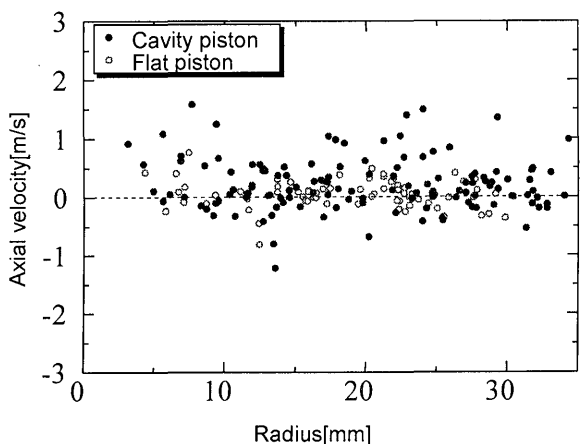


図15 TDCでのシリンダ半径と軸方向速度