

可視化による空気流動計測の基礎研究

(空気流用トレーサの開発と基礎実験)

飯尾 昭一郎¹⁾・久保 周太²⁾・田坂 英紀³⁾

The Fundamental Research of the Air Flow Measurement by Flow Visualization

(Development and Fundamental Experiment of Tracer for Air Flow)

Shouichiro IIO, Shuta KUBO, Hidenori TASAKA

Abstract

As one of the solutions to the environment problem in an internal combustion engine, it is raising combustion efficiency to grasp gas flow in a cylinder in detail and control. However, it is not easy to solve gas flow in a cylinder correctly. Then, in order to examine the possibility of the application of color layer visualization method to the actual engine, tracer for air flow was examined. As a result, by forming an aluminum vacuum evaporation film at the surface of spherical tracer for air flow, it can be analyzed at comparatively quick flow velocity. The possibility of air flow measurement was shown at the actual engine by color layer visualization method.

Key Words:

Internal Combustion Engine, Flow in an Engine, Flow Visualization, Color Layer

1. 緒論

1.1 まえがき

21世紀を迎え、地球環境を考慮した技術なしではこれからの発展はあり得ない。最近では石油以外のエネルギー源として、天然ガス、電気、メタノール、水素などを利用するクリーンエネルギー車がCO₂抑制、排出ガスの観点から注目されている。しかしながら走行距離やコストなどといった面で劣っており、今後しばらくは石油を中心とした化石燃料を使用する内燃機

関が主流にならざるを得ない。この内燃機関を地球環境、資源の面から有利に進めていくためには、燃焼の効率を高める必要がある。そのためにはシリンダ内のガス流動を把握や制御しなければならず、またガス流動と深く関係する燃焼状態においても詳しく解明する必要がある。

シリンダ内のガス流動において、制御方法を知るためにはまず流れを空間的に把握する必要がある。しかしながらシリンダ内のガス流動は、非常に複雑な非定常流であるため、正確に解明するには困難を要する。

それゆえガス流動と燃焼を詳しく解明するためには、従来からあるガス流動計測法に加え、新たな計測方法が必要とされている。

1) 工学研究科システム工学専攻大学院生

2) 機械システム工学専攻大学院生

3) 機械システム工学専攻教授

1.2 研究の目的

シリンダ内ガス流動と燃焼の関係を詳細に把握するためにはHWA¹⁾やLDV²⁾といった1点の精度のよい計測だけでなく、1回の計測でシリンダ内全域の瞬時流速分布を得る必要がある。そのため本研究に用いる計測法は、可視画像上の2次元速度成分については従来のPTVで行われている計測法で求め、可視画像の奥行き方向成分に関しては、撮影装置から見て奥行き方向には白色の点光源とスペクトル分光光学系を組み合わせることにより色が虹色に変化している光源を作り、この光源を計測領域に水平照射し、粒子軌跡の色変化から奥行き方向の変位を求める。これにより一方向のみの撮影で3次元速度計測を可能とするものである。本研究では、実機での応用の可能性を検討するため、作動流体を空気とした場合のトレーサを検討し、より実機に近い比較的速い流速の計測の可能性を検討することを目的とする。

2. 計測原理

2.1 色層可視化計測

2.1.1 3次元計測の原理

点光源より照射される白色光をレンズによりシート状の光にし、分散プリズムを透過させることで様々な波長の成分は屈折率の違いにより、連続的に色が変化する虹色の層となる。以後、これを色層と記述する。この色層を水平に測定部に照射することで測定領域内のトレーサは深さ方向位置を示す色を反射しながら移動していく。これを測定部上方からカラー撮影することにより深さ方向位置を知ることができる。図1に本研究の計測原理を示す。

2.1.2 色の定量的表現方法

本研究では色情報を基に深さ方向の速度計測を行う。そのため、深さ方向の微妙な色の変化を定量的にかつ正確に表現することが必要である。一般的に、輝度 (Luminance)、彩度 (Saturation)、色相 (Hue) の3種類の因子の相互関係であらゆる色を分類して表現することができる。本研究では撮影装置としてカラービデオカメラを使用し、これから得られた画素ごとの

3つの色強度 (R, G, B) より輝度 : Y、色相 : Hue を求める。

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

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

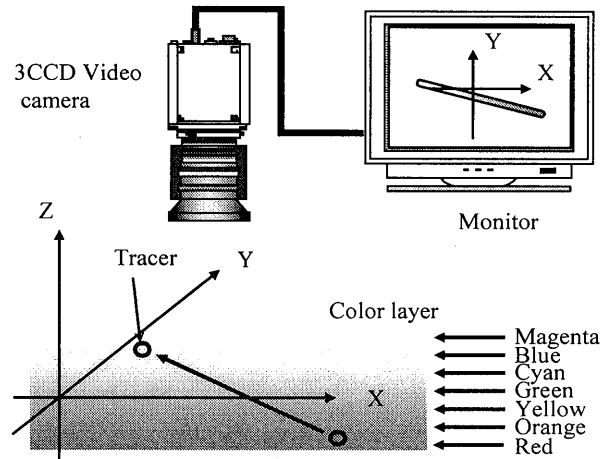


図1 計測原理

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4つである。

- ・光源光学系…被写体に照射する色層を作る
- ・実験装置…撮影対象を構成するシステム
- ・撮影装置…画像を撮影する
- ・画像処理装置…撮影装置で得られた画像から被写体座標と色情報を取得し、数値データとして処理する

3. 空気流動用トレーサの改良

3.1 トレーサ改良の検討

色層可視化計測法により空気流動を計測する際、トレーサの必要条件として次の点が挙げられる。

- ・色層の反射率がよいこと
- ・球形に近いこと
- ・PTVに適した粒径であること
- ・作動流体との密度比が小さく追従性がよいこと

従来の研究で空気流動用トレーサとして固体トレーサが最も有力であったが、半透明であるために光の干渉により正しくHue値を得られなかった。しかし追従性は良いため、半透明であることを改良すれば

空気流動用トレーサとして使用できるのではないかと考えた。そこでトレーサ表面に金属薄膜を形成し、効率よく色層を反射させることを考えた。金属薄膜形成方法としてスパッタリングと蒸着について検討した。

3.1.1 スパッタリング

スパッタリングとは、微量の Ar^+ ガスが存在する真空槽内に電極を設置し、陰極側に Ar^+ ガスが衝突する物質(ターゲット)を設置する。この衝突でターゲットの原子が飛び出し、陽極側に設置した基板に付着させる方法である。この方法で銅とアルミニウムの薄膜形成を行った。

(1) 銅のスパッタリング

固体トレーサの銅薄膜形成は可能であり、膜厚は $0.6\mu m$ であった。このトレーサのかさ密度を算出すると 170 kg/m^3 となり薄膜を形成しないトレーサの 12 kg/m^3 に対し14倍であり、空気流動に追従できない質量となった。反射光の輝度は1.5~3倍に向上したが、追従性の面で銅薄膜形成によるトレーサの改良は達成できなかった。

(2) アルミニウムのスパッタリング

銅のスパッタリングは有効でなかったため、密度の小さいアルミニウムのスパッタリングを行ったが、スパッタリング時の熱によるトレーサの破損が目立った。しかし、銅より密度が小さいことから追従性は良いと考えられた。

3.2 トレーサへの蒸着

アルミニウム蒸着は次の点が有効と考えられた。

- ・金属のため塗料などより耐久性が高い
- ・他の金属より密度が低いため追従性に及ぼす影響を抑えられる
- ・どの色でも反射率が銅より高く、薄膜による光の損失を抑えられる

一般的な蒸着装置では、固体トレーサのように微小で軽く、固定できないものに蒸着することはできないため、固体トレーサ専用の蒸着装置を製作した。蒸着装置で重要なことは、密閉性と蒸着槽内容積であるため、この点を考慮し製作した。蒸着装置の構造図を図

2に示す。この蒸着装置では一度でトレーサ全面に蒸着することはできないため、一度蒸着を行ったトレーサを裏返し未蒸着面をもう一度蒸着した。照明に蛍光灯を用いた、トレーサの顕微鏡画像を図3に示す。

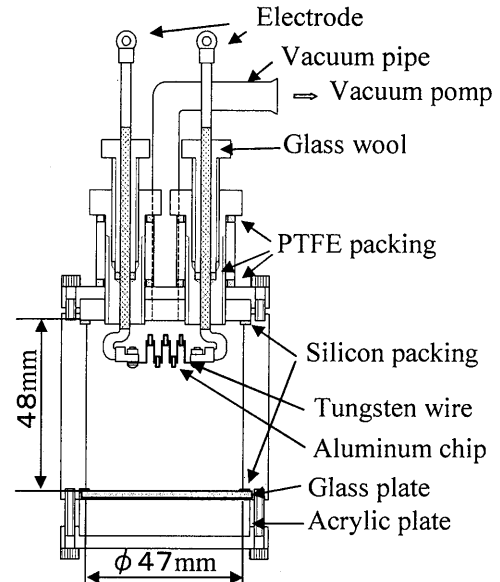
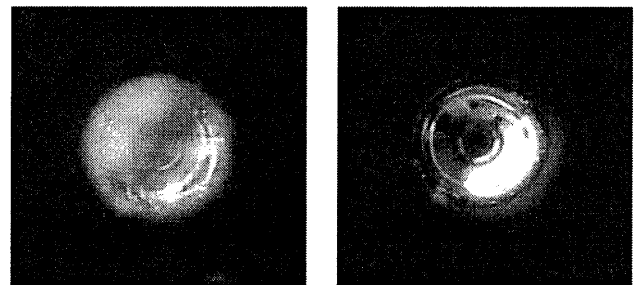


図2 蒸着装置



未蒸着トレーサ 蒸着トレーサ
照明: 蛍光灯

図3 トレーサの顕微鏡画像

アルミニウムを蒸着した固体トレーサ(以後、蒸着トレーサと記述する)の膜厚を測定すると、 $0.1\mu m$ であり、蒸着トレーサのかさ密度は 19 kg/m^3 となった。質量は $80.8 \times 10^{-12}\text{ kg}$ と固体トレーサ(以後、未蒸着トレーサと記述する)の質量 50.3×10^{-12} の60%増加となった。この結果を用い、エンジン内ガス流動に対する蒸着トレーサの追従性を検討した。ガス流動はLDVによる計測結果の一例を比較対象として銅スパッタリングトレーサについても計算した。計算結果

を図4に示す。この結果より、蒸着トレーサは色層可視化計測で使用できる追従性を有すると判断した。

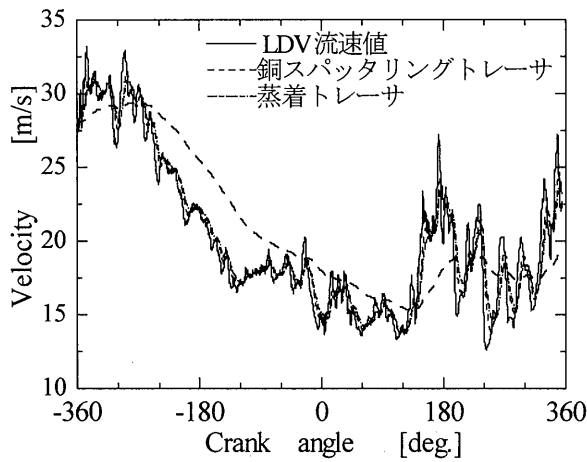


図4 追従性計算結果

4. 蒸着トレーサの評価実験

蒸着トレーサの追従性は、色層可視化計測の目的の許容範囲内であることがわかったため、実際に蒸着トレーサを色層内に入れ反射状態を評価する実験を行った。

4.1 静止粒子実験

本実験では、静止状態で蒸着トレーサの色層の反射率向上と、色層の反射光の正確さを確認することを目的とする。

4.1.1 実験装置

色層内で蒸着トレーサを静止させるため、細線先端に蒸着トレーサを取り付け、支柱を介してトラバース装置に固定する。トラバース装置で蒸着トレーサを色層内の任意の位置に静止させる。実験装置を図5に示す。

4.1.2 実験方法

本実験ではまず正確に色を反射する基準トレーサ（白色のエスレン粒子）で校正曲線を作成し、これと蒸着トレーサのHue曲線を比較することで蒸着トレーサの反射状態を評価する。撮影は基準トレーサでのHue値130°から1mmごとに20mm上まで20枚ずつ撮影する。解析結果を図6に示す。

解析結果より蒸着トレーサはほぼ正確にHueを示しているのが見てとれる。高さ位置1~3mmで最大

6°のずれを生じたが、撮影したトレーサの種類が異なっており、この色領域での反射特性が異なっているためだと考えられる。

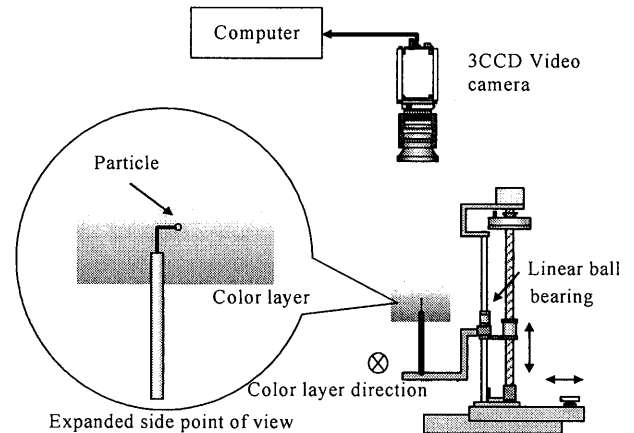


図5 静止粒子実験装置

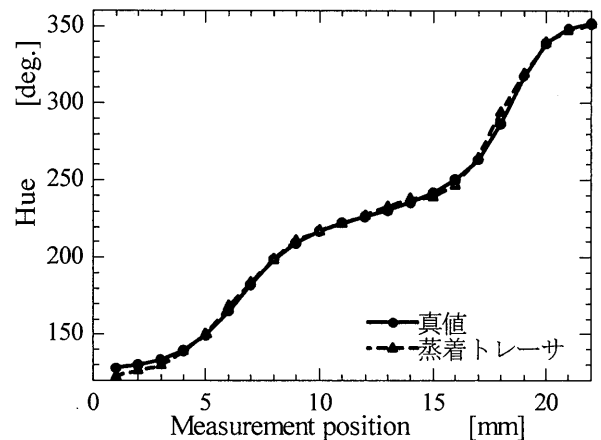


図6 静止粒子実験結果

4.2 移動粒子実験

色層内を移動する蒸着トレーサについてZ方向速度の解析精度を検討し、トレーサへのアルミニウム薄膜形成の有効性について確認することを本実験の目的とする。

4.2.1 実験装置

蒸着トレーサを任意の速度で移動させるため、モータに回転円盤を取り付け縁側にトレーサを設置する。円盤は全色領域をまたぐように42°傾けている。図7に実験装置を示す。

4.2.2 実験方法

本実験では静止粒子実験結果より、基準トレーサとの誤差をなくすため蒸着トレーサで校正曲線を作成

した。粒子の3次元速度を4, 8, 12, 15m/sに調整し各条件とも30枚ずつ撮影を行った。解析結果を図8-1、8-2、8-3、8-4に示す。

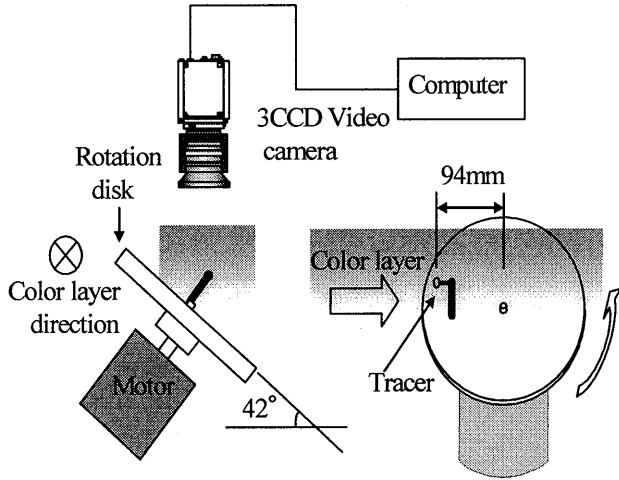


図7 移動粒子実験装置図

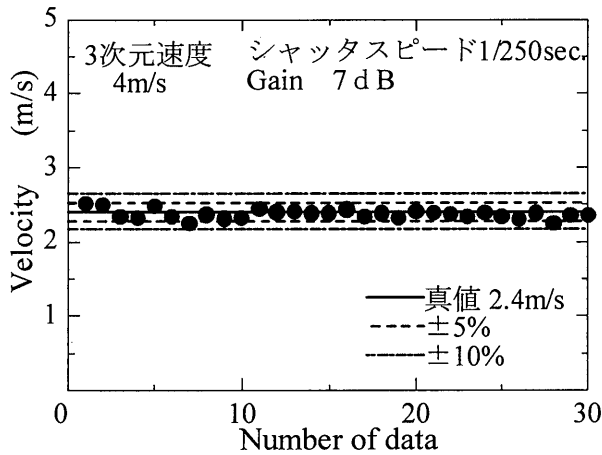


図8-1 設定速度4m/s解析結果

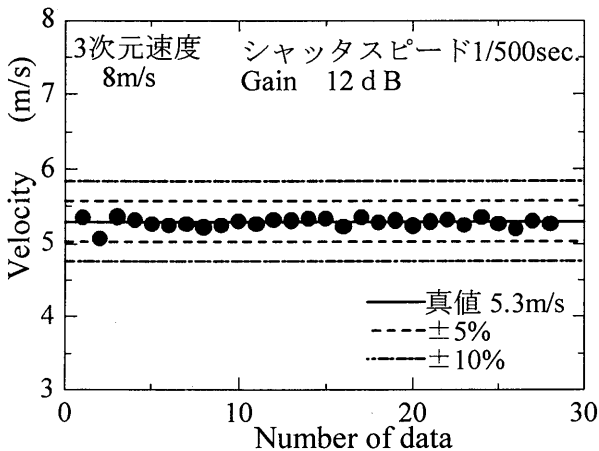


図8-2 設定速度8m/s解析結果

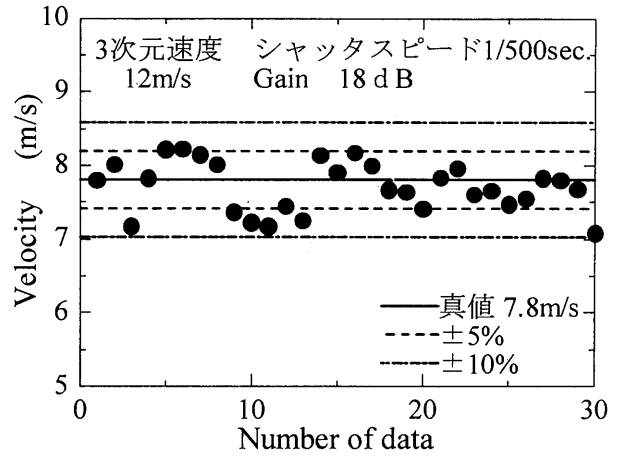


図8-3 設定速度12m/s解析結果

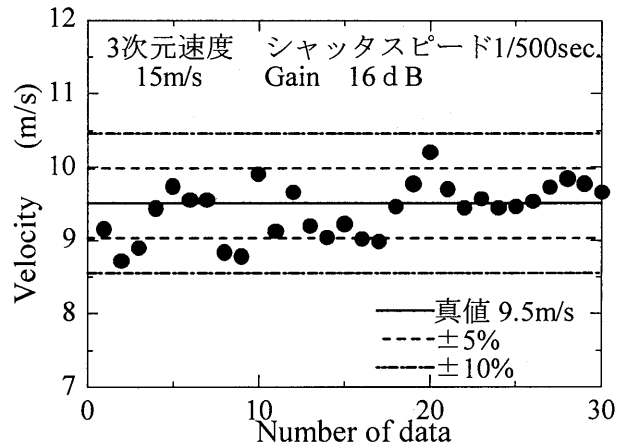


図8-4 設定速度15m/s解析結果

グラフよりどの設定速度でもほぼ誤差5%以内の精度で解析できている。誤差の原因は、端点の高さ位置付近は微妙なHue変化でも高さが大きく変化する色層の分布になっており、軌跡の一部がCCD素子の光を感じない無効領域をまたぐことで、色強度が損失するため微妙にHue値に差が生じたと考えられる。このHueの微妙な差が軸方向移動距離に大きく影響したと考えられる。蒸着トレーサでは15m/sでも解析が可能であり、未蒸着トレーサは4~5m/sまでしか撮影できなかったことから、蒸着トレーサは未蒸着トレーサに比べ2~3倍の輝度向上であることがわかる。

5. 結論

色情報を用いた空気流動の3次元可視化計測にお

いて、トレーサの改良により実機に近い比較的速い流速の計測の可能性について検討を行った結果、以下の結論を得た。

1. 固体トレーサの表面に蒸着によりアルミニウム薄膜を形成することで、色層の反射光の輝度を2～3倍に向上することができた。また、空気流動計測に蒸着トレーサを用いた場合、十分な追従性を有していることがわかった。
2. 静止粒子実験においてアルミニウム薄膜を形成した蒸着トレーサは、正確に色層を反射することがわかった。
3. 15m/sの比較的速い流速場でも、軸方向速度を10%以内の誤差で解析することができた。これにより色層可視化計測法において蒸着トレーサを用いた実機での空気流動計測の可能性を示すことができた。

参考文献

- 1) 日野太郎ほか3名、エンジニアのための計測技術、7章 p. 196、1981.9
- 2) レーザ計測ハンドブック編集委員会編、レーザ計測ハンドブック、B4 流れの計測、p. 161～169、1993.9