電気光学効果シャッタ高速写真による
シリンダ内流速分布の可視化計測*田 坂 英 紀^{*1}Flow Visualization Measurement of In-Cylinder Flow
by High Speed Photographs using an Electro-optical Shutter

Hidenori TASAKA

The flow visualization technique was used to measure the in-cylinder flow of an internal combustion engine. In this paper, metaldehyde was used as a tracer of the gas flow and the PLZT was adopted as the shutter on the basis of its merit of electrical controllability. First, the flow velocity obtained by this measuring system and that from LDV were compared and found to be in agreement; this demonstrated the validity of the measuring system. Two examples of the measured velocity were also shown. One is that cyclic variation of the in-cylinder flow and differences in the velocity on each radius at one moment existed. The other is that the rotational centers of the flow traces were calculated and found to distribute around the cylinder center at the compression stroke, gather near the cylinder center at the compression end, and distribute widely around the cylinder center at the expansion stroke.

Key Words: Internal Combustion Engine, Flow Measurement, Flow Visualization

1. ま え が き

エンジン内の燃焼と密接な関係にあるシリンダ内の流れは近年熱線流速計やレーザ流速計の利用により、高精度で詳細に計測できるようになってきた。しかし、シリンダ内の流れは空間的にも時間的にも大きく変化するものであり、サイクルごとの変動も大きいものと考えられている。したがって、詳細ではあるものの、レーザ流速計(LDV)や熱線流速計のような局所的な結果のみから、乱流燃焼と流れの関係を求めることは困難であると考えられる。

本研究では以上の観点から LDV に比べると精度的には劣るものの、空間的な情報を得られる可視化の方法を取り上げた。可視化手法としては高速度写真やテレビカメラを利用した研究もあるが、ここでは簡単なスチールカメラと電気光学効果シャッタの組合せにより、流速が流跡画像として得られるシステムを作り、その検討とシリンダ内流速分布の測定例を示す。

2. 計 測 方 法

2・1 計測方法の概要と特徴 ここで用いる方法は流跡と撮影時間から速度を求める通常の流れの可視化手法である。可視化を行う場合の撮影方法としては高速度写真を用いた連続写真による方法⁽¹⁾とスチールカメラ、テレビカメラを用いた単一画像による方法⁽²⁾⁽³⁾があり、単一画像による方法では照明光源を点滅させる方法⁽⁴⁾と受光側で光を ON-OFF する方法がある。ここでは計測範囲を広くとる意味で後者の方法を採用し、可視化画像を得るためのシャッタとして電気的な制御が容易である電気光学効果シャッタ(PLZT)を用いることとした。

PLZT の利点は電気的な制御であるため、必要とする時間(指定されたクランク角)において指定された時間の開閉が可能であること、およびその開閉時間を連続的に変えることである。エンジン内の流速は条件にもよるが 10 m/s のオーダーであり、これを流跡としてある程度の誤差範囲内で計測するためには 1/1 000 s オーダーのシャッタ時間が要求され、その開閉時間の精度はさらにその 1/10 以下である必要がある。またエンジンに対する同期性についてもほぼ同様な精度を要求される。このような開閉区間と同期性を要求されるシ

*1 平成元年 7 月 13 日 九州支部北九州地方講演会において講演、原稿受付 平成元年 10 月 2 日。

*2 正員、宮崎大学工学部(〒889-21 宮崎市学園木花台西 1-1)。

図 1 計測システムブロック図

シャッター機構としては通常の機械式シャッターでは不十分であり、電氣的に制御可能なシャッターが有効である。また、開閉区間を連続的に選択できることにより、流跡の寸法を最適に選ぶことができる。

なお、トレーサとしては気体の流れに対して応答性が良いとされているメタルデヒドを昇華させた後の再結晶を用いた^{(5)~(7)}。エンジンを含む実験装置全体は図 1 に示すような計測システムである。

2・2 PLZT の制御 撮影のタイミングはトレーサの投入を検出した後の下死点信号を基準にとり、これよりプリセットカウンタであらかじめ指定されたクランク角後の時期に電気光学シャッター (PLZT) を開閉し、フィルムにトレーサの流跡を写す。

PLZT は試作したシステムでは $100\ \mu\text{s}$ の開閉が可能であり、応答速度は比較的早いものの、透過率と遮光率の比は約 200 : 1 程度であり、これのみでは流跡の明暗比が好ましくない状態であった。ここでは補助的な機械式シャッターを併用することにより不必要な背景光の一部を遮断し、この ON-OFF 比を改善した。この機械式シャッターは高速で同期開閉させることが困難であるため、開区間を PLZT 開時期に対して十分に大きくとり、機械式シャッターの動作遅れや誤差があっても PLZT の開時期は十分に包括されているように設定している。これにより、PLZT の遮光時に漏えいしてくる光量を少なくすることができ、相対的な明暗比を向上させることができた。機械式シャッターを併用しない場合と併用した場合の比較写真例を図 2 に示す。

2・3 データ処理 写真として得られた画像は拡

図 2 機械式シャッターの併用効果写真例
(上：併用しない場合、下：併用した場合)

大投影したあと、トレーサの軌跡をデジタイザでトレースして長さを求めた。これと基準長さおよびシャッター時間とにより、流速に換算した。

3. 計測装置の検討と流速の計測例

3・1 実験装置および実験条件 全体のシステムは先の図 1 に示したとおりであり、使用したエンジンは図 3 に示すようなボア×ストロークが $84\ \text{mm} \times 90\ \text{mm}$ 、圧縮比 6.3 の可視化用エンジンでシリンダヘッ

ドの一部がガラス窓になっており、エンジン内の現象を直接観察することができる。

実験条件はトレーサの応答性と温度特性を考慮して、エンジンの回転数は 300 rpm の駆動運転とし、圧縮上死点前 90° から上死点后 90° までの区間を 45° おきに測定した。また吸気バルブにはシュラウドバルブを用い、旋回流を発生させている。

3・2 可視化流速の精度 可視化法による流速測定精度は主としてトレーサの応答性と流跡画像の精度に影響される。トレーサの応答性については従来の研究より中低速時のエンジン内の平均流速を求めることができるかとされているので⁽⁵⁾⁽⁶⁾、ここで論じる誤差としては無視できるものとする。

流跡画像を得る場合の精度は基本的にはシャッタスピードの制御時間と画像の分解能、流跡の数値化精度によるところが大きい。PLZT シャッタ時間は電気的な制御のため、再現性の誤差を含めて 1% 以下であり問題とはならない。また画像の分解能は 100 mm 視野で 0.3 mm 以上であり、ここで用いた撮影装置と条件では他の誤差に比べて十分に小さい。流跡の数値化が最も問題であり、始点終点の判別はトレーサの寸法や輝度の影響を受け、同一流跡であっても印画の条件によって平均的には約 10% 弱の誤差があった。以上を勘案すると、全体としての誤差は 10% 程度であると考えるのが妥当であろう。

なお、ここでは総合的な計測精度を確認する意味で、

図3 試験用エンジン測定部

エンジン内の流れについて、この可視化による測定結果とレーザ流速計によるそれとを比較した。ここでLDVによる計測はシリンダヘッド下面より 10 mm の一直径上をトラバースして求めたものである。一例を図4(a), (b)に示す。先に述べたようにサイクルごとの変動や三次元的な分布でありながら二次元的に処理しているために完全に一致することはないが全体的な傾向はよく一致しており、平均流を計測する場合にはこの計測方法が妥当であることがわかる。

また、流跡分解能の要因の一つに写真画像のコントラストがあるが、ここでは電気制御のシャッタを用いているため、流速に応じて流跡の長さを最適に設定できることも大きな利点である。

3・3 エンジン内の流速分布の計測例 この装置を用いてシリンダ内の流速測定を行った。同一クランク角における測定データを図5に示す。これは8サイクル分のデータであるが、サイクルごとに流速分布にかなりの変動があることがわかる。またあるサイクルのシリンダ内の同一半径位置においても、半径方向によって流速がかなり異なる場合が多く、その一例をシリンダの直交する2直径付近について整理すると図6

図4 レーザ流速計との比較

のようになる。レーザ流速計では当然局所的な情報でしかないが、可視化の方法ではその時点での画的な流速分布の情報が得られる。この測定条件ではシリンダ内の流れはその半径方向によって同一半径位置でも変化しているものの、平均的には軸対称流に近い剛体渦的な分布であることがわかる。

3・4 旋回流の中心 各流跡から得られる瞬間中心の方向からそれぞれの流跡の旋回中心を求め、その確率を示したものが図7である。これは流跡そのものの精度が十分ではないことおよび、旋回中心のずれがシリンダ中心から15 mm程度の範囲内にあることから、旋回中心をシリンダ中心のまわりに10 mm間隔でとった格子状の9点に分類してその存在確率を求めたものである。

この図7からわかるように、この条件では圧縮行程後半では旋回中心はシリンダ中心付近に広く分布しているが、上死点に近づくに従ってそれはほぼシリンダ中心に一致し、膨張行程では再び両者の一致する確率が急速に低くなることを示している。

4. ま と め

シリンダ内流速分布を測定する目的で電気光学効果シャッタを用いた可視化流速測定システムを作り、LDVとの相互比較を行った結果などからここで行

た条件での精度や利点などを示した。また計測の具体例などから、この計測装置が平均流や流跡の旋回中心の変化などのエンジン内の変動流を二次元的に計測する方法として有効であることを示した。

なお、流れの三次元性と方向性については今後検討する必要がある。

また本研究費の一部は文部省科研費〔一般研究(c)〕

図6 流速分布例(半径方向の分布)

図5 流速分布測定例(サイクルごとの変動)

図7 旋回中心の変化

62550162) によるものである。

文 献

- (1) 吉松・山田・平松・小西, 自動車技術会論文集, 36(1987), 20.
 - (2) 世古口・西脇, 機講論, No. 894-2(1989), 191.
 - (3) 吹田・川又, 内燃機関, 13-146(1974), 17.
 - (4) Hartmann, V. and Mallog, J., *P. I. Mech. E.*, C 42/88(1988), 235.
 - (5) 徐(判道)・徐(錫洪), 自動車技術会論文集, 2(1971), 22.
 - (6) 井元, 内燃機関, 13-146(1974), 11.
 - (7) 流れの可視化学会, 流れの可視化ハンドブック, (1986), 191, 朝倉書店.
-