2 台の CCD カメラを用いた相互相関方式 PIV による
エンジンシリンダ内流れの計測*漆 原 友 則^{*1}, 高 木 靖 雄^{*1}In-Cylinder Velocity Measurement Using Two CCD Cameras
and Cross-Correlation PIV

Tomonori URUSHIHARA and Yasuo TAKAGI

A cross-correlation particle image velocimetry (PIV) system consisting of two CCD cameras was developed to measure in-cylinder air motion in automotive engines. By using CCD cameras instead of conventional cameras, it is possible to obtain the velocity vector field more quickly after photographing the particle images. Cross-correlation was adopted to compensate for the smaller pixel number of the CCD cameras, since this technique requires fewer pixels than auto-correlation to obtain one velocity vector. In-cylinder air motion in both horizontal and vertical planes was measured with the PIV system for a tumble intake system and a reverse tumble intake system. In both cases, tumbling motion was clearly observed in the vertical section. With the tumble intake system, twin swirling motions were observed in the horizontal section. Large cycle-to-cycle variations were observed in the velocity vector field in both cases.

Key Words: Gasoline Engine, Flow Measurements, Laser-aided Diagnostics, PIV, Tumble, Cyclic Variation of Mean Velocity

1. ま え が き

近年, エンジンの燃費改善への社会的要求がますます強まっている。エンジンの燃費改善のおもな方策の一つである希薄燃焼のためには, シリンダ内にスワールあるいはタンブルと呼ばれる混合気の渦運動を形成し, これから生じる乱れによって, 火炎伝播を促進する必要があることが知られている⁽¹⁾。

従来, エンジンのシリンダ内ガス流動を計測するためには LDV (Laser Doppler Velocimetry) が最も広く使用されてきた。しかし一度の計測では空間中の 1 点の速度しかわからず, 空間中の 1 断面の速度場を計測するには時間と労力を要する。そのため, ここ数年, エンジンのシリンダ内ガス流動の計測のために PIV (Particle Image Velocimetry)⁽²⁾ や PTV (Particle Tracking Velocimetry)⁽³⁾ といった二次元の計測法が使用されるようになった。しかしながら従来の多くの研究では映像の記録のために写真フィルムが使用されているため, 速度ベクトルを求めるためにいったん現像を行わなければならない計測の即時性の点では十分

とはいえない。本研究ではエンジンのシリンダ内空気流動を短時間で計測するために, 即時性を優先して写真フィルムの代わりに 2 台のフルフレームランダムシャッター CCD カメラを使用した PIV システムを構築した。この PIV システムをエンジンのモータリング時のシリンダ内流動計測に適用した結果を報告するとともに, 本方式が有している課題に関しても述べる。

2. PIV 方式の選択と装置の構成

2・1 エンジン計測用 PIV に要求される特性

エンジン燃焼室内の PIV 計測は以下の点で一般の PIV 計測にない難しさを有している。

(1) エンジンのピストンストロークに伴って流れが周期的に変化する非定常流である。このため測定タイミングをピストンの運動の位相に合せて, エンジン側からコントロールする必要がある。

(2) 測定視野の大きさの割に, 流速が大きい(典型的な数値としては 0.1 m の視野に 10 m/s の流速)。このため露光の間隔を小さくする必要がある。

これら以外の条件として, 速度場の計測結果を活用してエンジンの燃焼室形状や流動生成部品の開発を行うことを考えると, 計測結果がリアルタイムで得られることが望ましい。そのため,

* 原稿受付 1997 年 5 月 12 日。

*¹ 正員, 日産自動車(株)動力機構研究所 (〒237 8523 横須賀市夏島町 1)。

(3) 粒子画像の撮影には、写真フィルムではなく、ビデオカメラを用いることが望ましい。

2・2 PIV 方式の選択 PIV には自己相関法と相互相関法のどちらを使用するか、どのような種類のカメラを使用するかによって多数の手法が存在するが、前記の条件を満たすためにどの PIV 方式が最適かを以下に考察する。

表 1 は自己相関法と相互相関法の得失を示したものである。フィルムカメラの使用が一般的であった PIV の初期には、フィルム上に二重露光を行って得られた画像をもとに、自己相関法により速度の計算が行われていた。これに対し、わずかな時間差で撮影された二つの画像間の相関を計算する相互相関法は、ビデオカメラとの組合せで近年用いられるようになった。相互相関法は自己相関法に対して次のような利点をもつ。

(1) 相互相関法では相関関数の中心にピークが存在しないため、相関関数の信号ピークが中心ピークに重なって分離できなくなる恐れがない。このため 2 回の露光間の粒子の移動量を小さく設定することができ、結果的に一つのベクトルを求めるために必要な画素数が小さくなる。この特長は、画素数がフィルムに比べて少なくなるビデオカメラを使用する際に特に重要となる。また、ベクトルを求めるために必要な画素数が少ないということは計算時間の短縮化にもつながる。

(2) また同様に、相関関数の信号ピークが中心ピークの影響を受けないために、誤ベクトルが算出される頻度が低い。この特性に関しては文献⁽⁴⁾に詳しく述べられている。

(3) 相互相関法では速度の方向が明らかであるためイメージシフトを用いる必要がない。

次にカメラの種類による得失について述べる。各種のカメラと画素数の関係を表 2 に示す。フィルムカメラの画素数はビデオカメラの画素数と比較してかなり大きく、一度の撮影で多くのベクトルを得るために有利である。

一方、ビデオカメラの画素数は少ないため、一つのベクトルを計算するのに多くの画素を要する自己相関法では得られるベクトルの数が少なくなる。ビデオカメラと、一つのベクトルを計算するのに必要な画素数が少なくてすむ相互相関法とは相性がよいことがわかる。

表 1 および表 2 に示した特性から、相関計算法とカメラとの各組合せの特徴をまとめたものが表 3 である。この結果に基づき、本研究では空間分解能と即時

Table 1 Comparison between auto-correlation method and cross-correlation method

	False Vector Probability	Minimum Picture Element Number for 1 Vector	Necessity of Image Shift
Auto-Correlation Method	High	128*128 (Approx.)	Necessary
Cross-Correlation Method	Low	32*32 (Approx.)	Not Necessary

Table 2 Comparison among camera types

	Picture Elements Number	Instantaneousness
Full Frame CCD Camera	512 * 512 ^{*1}	Good
High Speed Video Camera	256 * 256	Good
35mm Film Camera	1500 * 1500 ^{*2}	Poor

* 1 Video camera type CCD camera
* 2 In case that film resolution is 0.02mm

Table 3 Comparison among PIV methods

	Auto-correlation method	Cross-correlation method
CCD camera	Number of picture elements is too small	For high speed phenomena, 2 cameras are necessary
Film camera	Image shift is necessary to determine flow direction	Two different color light sources are necessary

Fig. 1 2 CCD-Camera PIV system

性を両立する方法としてビデオカメラを使用した相互相関法の PIV を採用することとした。

エンジン側から撮影タイミングをコントロールしなければならないという問題に関しては、後述する 2 台のランダムシャッタ CCD カメラを使用することにより解決した。

2・3 2 台の CCD カメラを用いた PIV システムの構成 図 1 に今回使用した PIV システムの構成を

示す。相互相関の計算をするためには二つの映像を取得する必要があるが、本 PIV システムではハーフミラーを介して 2 つの CCD カメラで粒子画像を撮影した。

今回使用したカメラは高速電子シャッタを備えており、そのタイミングを外部トリガによってコントロールできる(ランダムシャッタ機能)。また、1 回の露出で全画素を露光することができるフルフレームカメラであることが大きな特長である。通常のインタレース方式 CCD カメラと比較して 2 倍の垂直分解能を得ることができ、ビデオカメラの欠点である画素の少なさを補うことができる。

次に光源について述べる。エンジン内の空気流動を PIV によって計測する際には、比較的小さな測定視野(例えば 0.1 m)の中で比較的大きな流速(例えば 10 m/s)が発生していることが問題となる。仮に、撮影された画像の 1/10 の寸法の部分画像から一つのベクトルを算出するものとし、粒子の移動量をこの部分画像のさらに 1/5 とすると、2 回の露光の間隔は 200 μ s となる。このような短時間の露光を行うためには、YAG レーザに代表されるパルスレーザが最適である。本研究では設備の都合により銅蒸気レーザを使用した。表 4 にシステムを構成する各要素の仕様を示す。

次にカメラ、レーザ、エンジンの同期について述べる。図 2 は、エンジンからのトリガパルスに応じて、

どのように銅蒸気レーザおよびカメラの露出をコントロールするかをタイミングチャートで示したものである。本研究で使用したカメラの最高シャッタ速度はカメラの 1 水平走査期間に相当する約 1/15 700 s である。また、カメラの露出タイミングは外部トリガのタイミングに応じて、カメラの水平同期信号の位相にまらめられたタイミングで開始される。そこで、2 台のカメラを 1 水平走査期間の時間差で露出し、かつ、銅蒸気レーザをカメラの水平同期信号周波数(約 15 700 Hz)で駆動する。このようにすれば二つのカメラの露光期間中にそれぞれ一度のレーザの発光が行われ、1/15 700 s の時間差の画像を記録することができる。

2.4 流速の計算方法 撮影された 2 枚の画像はまずコンピュータのフレームグラバ上に保存される。計算には MS-DOS 上で Microsoft C を使用したが、メモリー空間に制限があり画像データを一度に計算機内に読み込めないため、一つのベクトルを計算するごとにフレームグラバ上から部分的に画像データを計算機に読み込み、直接法で相互相関関数を計算した。相互相関関数のピーク付近を放物線近似することによってピーク位置を 1 ピクセルよりも細かな精度で求めた。

相互相関の計算をするための切出し画像の標準的な大きさは 32 * 32 画素、また、ベクトルの間隔は 16 画素(いわゆる 50% オーラップ)とした。このとき合計ベクトル数は 32 * 32 となる。この場合、全ベクトルの計算に要する時間は、CPU として Pentium 90 MHz を有するパーソナルコンピュータを用いておよそ 200 s であった。

なお、誤ベクトルの検出と訂正は行っていない。

3. 供 試 機 関

供試機関はペントルフ形燃焼室を有する 4 弁機関である。表 5 にこのエンジンの主要諸元を示す。実験においては通常の吸気系のほかに、図 3 に示すような吸気系を使用した。一つは、シリンダ内にタンブルと

Table 4 Specification of PIV components

	Manufacturer Product name	Specification
CCD Camera	Takenaka System Kiki Co., Ltd. TM-9700N	Full frame random shutter camera Picture element: 768X484 Maximum shutter speed: 1/16000s
Copper Vapor Laser	Oxford Lasers Ltd. CU15-A	15W Φ 10kHz
Frame Grabber	Mitani Shoji Co., Ltd. SPECTRUM2	Picture element: 512X512 RGB Input
Computer	NEC PC9821	Pentium 90MHz

Fig. 2 Timing chart of 2 CCD-camera PIV

Table 5 Specification of tested engine

Engine Type	4-Stroke, 4 valves/cylinder, S.I. Engine
BoreXStroke	83X86mm
Displacement	465 cm ³
Compression Ratio	9.5 : 1
Combustion Chamber	Pentroof

Fig. 3 Configurations of intake systems

Fig. 4 Flow field measurement area

呼ばれる垂直方向の旋回流を形成するための吸気ポート端面のスワールコントロールバルブである。またもう一つは、頭上弁式二サイクル機関や筒内直噴式四サイクルガソリン機関で 사용되는ことのある逆方向に旋回するタンブル流れを形成するためのシュラウド付き吸気弁である。

実験においては二つの方向からエンジンの燃焼室内の流動を計測した。図4はエンジン側方からシリンダ内の垂直断面を計測する際の観測視野を、図5はエンジン下方から燃焼室内の水平断面を計測する際の観測視野を示す。

4. 実験結果および本 PIV 方式の課題

4.1 実験結果 流動計測は機関速度 700 rpm, スロットル全開のモータリング状態にて行った。

図6はエンジン側方からの計測結果である。タンブルを生成するスワールコントロールバルブを使用した場合、 180° BTDC および 90° BTDC においてシリンダ内に強いタンブル流れが形成されていることがわか

Fig. 5 Flow field measurement area

る。その後 30° BTDC では視界の中に渦は見えないものの、TDC では再び燃焼室内にタンブルが現れている。

一方、逆タンブル方向のシュラウド弁を使用した場合、シリンダ内に明確な渦は形成されていないようであるが、TDC においては弱い逆タンブルが観察される。

図7は下方から計測した、燃焼室の水平断面の TDC における流動場である。タンブルを生成するスワールコントロールバルブを使用した場合、燃焼室内に双子渦が形成されていることがわかる。逆タンブル方向のシュラウド弁を使用した場合、燃焼室内の流れは弱く渦は見られない。

図8は TDC における流動のサイクル変動を示したものである。通常の吸気系の場合および逆タンブル方向のシュラウド弁を使用した場合ともに、流動のサイクル変動が大きく、サイクルごとに流れのパターンは大きく異なることがわかる。

4.2 本 PIV 方式の課題 以上示したように、2 台の CCD カメラを用いた本 PIV システムによってエンジンの燃焼室内の流動計測を行うことができた。しかしながら、なお次のような課題が残されている。

(1) 2 台のカメラを使用することによる画像のずれ 2 台のカメラの光軸をピクセル単位で合致させることはかなり困難な作業である。また、カメラレンズ等はわずかな外力でも位置が変わるため、いったん合せた光軸を維持することも難しい。この問題の解決方法として、ただ 1 台のランダムシャッターカメラを使用しトリガタイミングを工夫して、連続する 2 フレーム

Fig. 6 Flow field in vertical section

Fig. 7 Flow field in horizontal section

ムの最初のフレームの露出時間の後端と後側のフレームの露出時間の先端とに露光を行い、任意のタイミングで小時間差の2画像を得る方法がある。最近いくつかの計測器メーカーからこのシステムが販売されている。

(2) 多数サイクルの統計処理の問題 多数のエンジンサイクルで得られた結果の平均化等の統計処理は行っていないが、近年パーソナルコンピュータの計算能力が飛躍的に進歩しており、適切なソフトウェアを作成できれば計算時間の問題はないと考えられる。

(3) 画素数の少なさ 512 * 512 画素のカメラでは 32 * 32 程度のベクトルしか得られないが、最近手頃な価格になってきている 1000 * 1000 画素のデジタルカメラを使用すれば一度の撮影で得られるベクトルの数を大幅に改善できる。しかしながら、光軸

合せをより厳密に行う必要がでてくるので(1)の問題とセットで解決する必要がある。

5. ま と め

流れが周期的に変化する非定常流のエンジン燃焼室内流動計測用の PIV として、2 台のフルフレームランダムシャッタ CCD カメラを用いた PIV システムを構築した。このシステムを使用することによって、エンジン内のタンプルの形成過程、および、タンプル流動のサイクル変動をとらえることができた。

一方、本 PIV 方式は、2 台のカメラを使用することによる画像のずれの発生、CCD カメラの画素数に起因するベクトル数の少なさという二つの問題を有しており、今後解決すべき課題として残されている。

最後に、本研究にあたり実験を担当していただいた

Fig. 8 Cycle by cycle variation of flow field

雨森幸雄氏に感謝申し上げます。

文 献

- (1) 漆原友則・村山太一・ほか 2 名, スワール・タンブルによる乱流生成と燃焼特性, 機論, **60**-580, B(1994), 4280-4286.
- (2) Reuss D. and Adrian R. J., ほか 3 名, Instantaneous Planar Measurements of Velocity and Large-Scale Vorticity and Strain Rate in an Engine Using Particle-

Image Velocimetry, *SAE Paper*, No. 890616(1989).

- (3) 三林大介・桑原一成・安東弘光, レーザシート法による筒内流動の解析, 自動車技術会 1990 年秋期学術講演会前刷集, **1**(1990), 177-180.
- (4) Keane, R. D. and Adrian, R. J., ほか 1 名, Single Exposure Double Frame Particle Image Velocimeters, *Proc. 9th Int. Cong. Appl. Lasers Electro Opt.*, Boston, USA (1990).