LDV によるシリンダ内流れ軸方向分布の測定*

城戸 裕之^{*1}, 田島 博士^{*1}, 松本 昭彦^{*2}

LDV Measurements of Axial Distributions of In-Cylinder Gas Velocities

Hiroyuki KIDO, Hiroshi TAJIMA, and Akihiko MATSUMOTO

Velocity distributions of in-cylinder gas flow in a two cycle uni-flow type engine were measured under motoring conditions by a forward scattered LDV. Measurements were conducted in several planes along the cylinder axis so that the axial distribution and decaying process of swirl velocity in the whole combustion chamber could be investigated. The obtained results are as follows. (1) The initial profile of swirl velocity distribution like solid-body-rotation changes into a flat-top trapezoidal one during the course of the compression and the expansion stroke. (2) A complicated three dimensional flow structure exists in the early compression stroke. (3) The volume mean angular momentum of swirl velocity decays monotonously and maintains about 65 % of the initial value when TDC is reached. It shows a similar decaying process in a pancake shaped constant volume bomb after the midway in the compression stroke.

Key Words: Internal Combustion Engine, In-cylinder Gas Flow, Flow Measurement, Laser Doppler Velocimetry, Swirl Velocity, Angular Momentum, Decaying Process

1. ま え が き

レーザ光を用いた計測技術の進展や数値計算モデルの発展に伴い、内燃機関のシリンダ内ガス流動の詳細な研究が盛んに行われている^{(1)~(4)}。

シリンダ内流れの計測では、燃料噴霧の分散や火炎の伝ばに直接的に影響するという観点から、主として燃焼室上端近傍の筒内流に重点が置かれてきた。しかしながら、数値計算の妥当性やスワール発生機構の良否などを評価するには、燃焼室全体の流れを圧縮行程初期から計測する必要があると思われる。

本報では、シリンダ内流れの軸方向分布をレーザドップラー流速計(LDV)を用いて測定し、燃焼室内の角運動量の減衰過程について考察を行った。

2. 実験装置および実験方法

2.1 供試機関 実験に用いたのは、2サイクル単流掃気形機関で、掃気ポートの外周に設けた可変角度羽根で掃気の流入角を変えることにより、生成スワールを制御できるようになっている。機関の主要諸元

* 昭和62年10月25日 九州・中国四国支部熊本地方講演会において講演、原稿受付 昭和62年3月18日。

^{*1} 正員、九州大学工学部 (〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)。

^{*2} 住友重機械工業(株) (〒188 田無市谷戸町2-1-1)。

を表1に、概要を図1に示す。中ぐり形ピストンの上部にはパイレックス製のピストンヘッドを装着し、二つの排気バルブを燃焼室側壁上でシリンダ軸について対向する位置に設けることで、燃焼室上壁全体をパイレックス製としている。軸方向速度成分を測定する際のレーザビームと散乱光の通路としては、二つの対向する光学窓(パイレックス製、直径24mm)を燃焼室側壁上の排気バルブと直交する位置に設けている。燃焼室形状は偏平円筒状で、上死点間げきは21mmである。

2.2 レーザドップラー流速計 LDVにはデュアルビームモードの前方散乱方式を用いた。LDVの主な諸元を表2に、スワール速度の軸方向分布および半径方向速度成分の測定時の光学系の構成を図2に示す。ドップラー周波数の検出には、カウンタタイプの信号処理器(以下、カウンタと略記する)を用いた。

表1 供試機関主要諸元

Bore × Stroke	100 × 83	mm × mm
Compression ratio	4.09	
EVO/EVC	± 60°	BBDC
SPO/SPC	± 60°	BBDC

2.3 散乱粒子 散乱粒子として中位径が $2.31\ \mu\text{m}$ のタルク ($\text{SiO}_2\text{-MgO}$) を使用した。散乱粒子のシーディングは、二分した給気的一方を粒子混入部に導き、他方は直接、機関に供給することで行い、給気総量は一定のまま両者の比を調節することで適当なシーディング量が得られるようにした。

2.4 データ処理 カウンタ出力は、計数処理に対するバリデイト信号とクランク角信号とともに計算機に転送し、流速を算出する。1条件当たりのサイクル数はサンプリング周波数 $2\ \text{kHz}$ で通常約 30 サイクルであるが、信号状態や平均流速の絶対値に応じて、最大 60 サイクル程度まで増加させた。流速の算出は、バリデイト信号に基づいて選択したカウンタ出力より行うが、その際、シフトからのノイズやドロップアウトによる不良信号で、各サンプル点ごとのアンサンプル平均値にばらつきが生じていないことを確認した。この場合、十分なデータレートが得られない測定条件が存在したため、本実験ではアンサンプル平均による流速値のみを求めることとし、乱れの解析は行わなかった。

2.5 測定方法 実験は全測定を通じて駆動運転下で行った。駆動回転数は $600\ \text{rpm}$ 、掃気圧を $0.126\ \text{MPa}$ とし、掃気ポート外周の可変角度羽根は、掃気ポ

ート中心からシリンダ中心を結ぶ半径方向と掃気方向とのなす角の正弦が 0.8 となるように設定した。

測定位置はすべてシリンダ軸とクランク軸とに平行な平面内にあり、その表示にはシリンダ軸方向を z 、クランク軸方向を r とする座標系を用いた。本実験での測定位置を図 3 に示す。下死点でのピストン上面の位置を $z=0(\text{mm})$ と定義し、シリンダ中心を $r=0(\text{mm})$ 、シリンダ中心より機関前方を r の正方向、後方を負方向と定義し、半径位置はシリンダ半径 R で無次元化した値で示した。測定範囲は、スワール速度については、 $z=24\sim 93$ 、 $r=-0.8R\sim +0.8R$ ($z=93$ については、 $r=-0.9R\sim +0.9R$) とし、軸方向および半径方向速度成分については、それぞれ $z=93, 99$ の直径上の図 3 中に示す範囲とした。 $z=93$ は、上死点間げきのほぼ中央に相当し、他の z 座標は上死点前後 30°CA ほどのピストン位置を考慮して決定した。

表 2 LDV 主要諸元

Laser wave length	514.5	nm
Focal length of focusing lens	247, 500	mm
Angle of intersecting beams	10.97°, 5.59°	
Calibration factor	2.7, 5.3	m/s/MHz

図 1 供試機関概要

- ① Ar ion laser ② Beam splitter
③ Bragg cell ④ Focusing lens
⑤ Collecting lens ⑥ Photomultiplier
⑦ Frequency mixer ⑧ Frequency counter

図 2 光学系の構成

図 3 測定位置

3. 測定結果と考察

3・1 スワール速度 スワール速度の計測結果を図4～7に示す。図4は、 $z=93, 84, 63$ の測定面におけるスワール速度をクランク角と半径位置に対して表示したものである。クランク角と半径位置の座標はスワールの減衰過程が明確になるよう、その方向を選択した。半径位置一定での速度変化がスワールの減衰過程を表し、クランク角一定での速度変化が半径方向の速度分布を表す。図4中、流速が表示されていない部分は、測定体積の一部または全体がピストン上面より下

に位置するか、ピストン上面からの散乱光により良好な信号が得られなかった区間を示す。いずれの測定面においても、速度分布はシリンダ軸に対してほぼ軸対称であり、圧縮行程初期には剛体渦状の分布を示すが、シリンダ壁に近い部分ほど減衰が大きく、膨張行程中には台形状の分布を示すようになる。また、スワールの旋回中心はシリンダ軸に一致しておらず、シリンダ中心にはある程度の流速が認められ、その絶対値や方向は測定面により異なる。スワール速度の減衰は単調ではなく、圧縮行程の初期に流速の増加する時期が認められる。同様な現象は他の測定⁽³⁾⁽⁴⁾でも報告されて

図4 スワール速度の半径位置およびクランク角に対する変化

おり、軸方向に角運動量の分布が存在するためと考えられる。

図5は、 $z=93, 84, 63$ で r が負の範囲における速度分布を示したものである。前述したように、剛体渦状の速度分布が時間の経過につれて台形状の分布へと変化していくが、 r が $-0.2R$ 以内では減衰がほとんど認められない。また、 $z=93$ の測定面は他の測定面に比べて流速が低く、その差は圧縮初期に大きい。

図6は、 $z=93, 84, 63$ での $r=-0.3R, -0.5R, -0.7R$ におけるスワールの減衰過程を示したものである。いずれの測定面においても、圧縮行程中に流速の周期的な変動が認められ、変動は圧縮初期に大きく、圧縮が進むにつれて流速値と同様に減衰している。

図7は、 $r=-0.6R, -0.7R, -0.8R$ における圧縮行程初期のスワール速度の軸方向分布を示したものである。周期的変動で流速の増加や減少の生じる時期が各測定面ごとに異なっているため、スワールは軸方向に不均一で、その分布形も時間的に変化することがわかる。燃焼室上端に近い測定面の流速が圧縮行程初期には他の測定面の流速に比べて低い傾向を示すが、圧

縮が進むにつれて軸方向には一様な分布に近づくことがわかる。以上に述べたスワール速度の測定から、スワール速度の半径方向分布が剛体渦状のものから台形状のものへと変化すること、圧縮行程初期に周期的な流速変動が存在すること、スワール速度の軸方向分布が不均一なものであることなどがわかった。特に軸方向分布が不均一であることは、燃焼火室内の全角運動量やスワールの減衰過程を正しく把握するには、軸方向の速度分布の測定が必要であることを示している。

3・2 角運動量の減衰 図8は、各測定面ごとに算出した単位質量当たりの角運動量とそれらの体積平均値の減衰過程を示したものである。角運動量はシリンダ軸に対して対称な測定点の流速値の平均より算出し、シリンダ軸とシリンダ内壁上ではスワール速度は0、 $0.80R$ から $0.95R$ までは流速一定と仮定した。図8には角運動量の値に対応するスワール比も表示している。図8より、各測定面における角運動量は大きく変動するが、体積平均値ではほぼ単調に減衰していることがわかる。圧縮開始から上死点までで角運動量の体積平均値は約65%に減衰している。

図5 スワール速度の半径方向分布

図6 スワール速度の減衰過程

次に、角運動量の減衰過程を次式で検討した⁽⁵⁾。

$$(2\varepsilon/\nu^3)^{1/4}H = C_n(\overline{U}_\theta H/\nu)^m \quad (1)$$

$$\varepsilon \equiv -\frac{1}{2}d\overline{U}_\theta^2/dt \quad (2)$$

ここで ε : 単位質量当たりのスワールの運動エネルギーの減衰率 (m^2/s^3), ν : 動粘度 (m^2/s), H : 燃焼室高さ (m), C_n : 実験定数 (-), $\overline{U}_\theta$: 軸方向平均スワール速度 (m/s) であり, m は燃焼室高さに基づくレイノルズ数の指数である。偏平円筒状定容容器内のスワール速度の減衰過程では $m=0.7$ とする整理式が得られており, その場合, $C_n \approx 0.72$ となっている⁽⁶⁾。また, 平形燃焼室を有する単圧縮装置における圧縮行程中のスワール速度の減衰も, 同様に $m=0.7$ で整理されている⁽⁷⁾。その場合の C_n の値は偏平円筒状定容容器における値よりも少し大きく, そのためやや大きな減衰予測結果を与えている⁽⁸⁾。図 9 に, m を 0.7 および 1.0 として, それぞれに C_n を変化させた場合の計算結果を示す。圧縮行程初期には $m=1.0$, $C_n=0.034$ とする計算値が, 圧縮行程後半以降では $m=0.7$, $C_n=0.73$ とする計算値が実測値と良い一致を示している。圧縮行程から膨張行程までの減衰過程を m を 0.7 とする減衰曲線だけで予測することは困難であり, 特に圧縮行程初期の減衰過程には, m を 0.7 とした場合の減衰曲線との定性的相違が認められる。このことから, 本実験の供試機関における筒内流は, 圧縮が進むにつれて偏平円筒状定容容器内の旋回流と同様な流れへと変化していくことがわかる。圧縮行程初期の減衰が偏

平円筒状定容容器内のものと異なる理由として, この時期にはまだ掃気行程中に生じた軸方向および半径方向の流れが存在していて筒内流が単純な旋回流になっていないことや, 圧縮行程初期の旋回流速が定容容器で整理式を求めた場合よりも高いことなどが考えられる。

3.3 軸方向および半径方向速度成分 図 10 は,

図 8 角運動量の減衰

図 7 スワール速度の軸方向分布

図 9 減衰過程と予測計算との比較

図 10 軸方向速度成分の時間変化

$z=93$ の位置における軸方向速度成分のクランク角に対する変化を示したものである。軸方向速度成分はシリンダ軸に対してほぼ軸対称であったため、図 10 には $|r|=0.1R, 0.5R, 0.8R$ の計測値の平均を示した。いずれの半径位置においても上死点までには上昇成分がなくなり、上死点以後は全体にわずかな下降流となることがわかる。また、 $|r|=0.1R$ では一様に減衰していくが、 90°BTDC では $|r|=0.8R$ で急激な速度低下を、 $|r|=0.5R$ で速度の急増を示しており、この測定面でのスワール速度の周期的な変動に対応して、軸方向速度成分も大きく変動することがわかる。特に $|r|=0.8R$ では下降流となっており、 90°BTDC 付近ではシリンダ軸からシリンダ壁に向かう二次流れの存在が予想される。

図 11 は、 $z=99$, $r=0.2R, 0.5R, 0.7R$ での半径方向速度成分の計測結果を示したものである。半径方向速度成分もスワール速度と同様、周期的に変動しており、 $z=93$ の測定面でスワール速度の低下が観察された 90°BTDC 付近では明らかに外向きの流れとなっていて、前述のような二次流れの存在を示している。

4. 結 論

2 サイクル単流掃気形機関において、スワール速度の軸方向分布および燃焼室上端近傍での軸方向および半径方向速度成分を測定し、以下の結論を得た。

- (1) スワール速度の半径方向分布は剛体渦状のも

図 11 半径方向速度成分の時間変化

のから台形状のものへと変化していくが、圧縮行程初期には周期的な流速変動が存在する。

(2) スワール速度は軸方向に不均一な分布をしており、燃焼室内の全角運動量やスワール速度の減衰過程を把握するには軸方向分布の測定が必要である。

(3) 圧縮行程初期には、燃焼室中央からシリンダ内壁に向かう二次流れが存在している。

(4) スワール速度の平均値より求めた角運動量は、圧縮行程初期にはやや急な減衰を示すが、圧縮行程後半以降では偏平円筒状定容容器内の流れと同様の減衰過程を示す。

本研究は、文部省科学研究費補助金特定研究「燃焼現象」によるものであることを記し、関係各位に謝意を表する。

文 献

- (1) Uzkan, T., ほか 2 名, SAE Paper, 830266 (1983).
- (2) Liou, T.-M., ほか 3 名, SAE Paper, 840375 (1984).
- (3) 松岡・ほか 4 名, 機論, 47-422, B (昭 56), 2074.
- (4) 大久保・ほか 4 名, 機論, 52-480, B (昭 61), 3121.
- (5) Kido, H., ほか 2 名, Proc ASME-JSME Thermal Eng. Joint Conf., 4 (1983), 191.
- (6) 浜本・ほか 2 名, 機論, No. 855-1 (昭 60-3), 211.
- (7) 和栗・ほか 4 名, 機論, 46-406, B (昭 55), 1184.
- (8) Kido, H., ほか 3 名, SAE Paper, 800985 (1980).

討 論

〔質問〕 植木 弘 信〔長崎大学工学部〕

「スワール速度のクランク角に対する変化」はクランク角で 10° ごとに、また「軸方向速度成分の時間変化」は 30° ごとに示しておられるが、移動平均幅をそれぞれ 10° および 30° と設定されたのか。

〔回答〕 本研究では、信号状態が良好なサイクルだけを比較的少数採取し、そのアンサンブル平均から流速値を求めている。そのため、平均区間幅を一定に

した場合、測定条件によっては、平均区間内のデータ数が信頼性を欠くほど少なくなることがあるために、平均幅の最大値をクランク角で 10° とし、その範囲内で妥当なデータ数が得られる最小の平均幅を用いている。なお、軸方向速度成分の表示が 30° ごとになっているのは、全般に信号状態が良好でなかったため、ドップラー波形の直接撮影を 30° ごとに行って流速を求めたことによるものである。

53 巻 491 号, B 編 (昭 62-7) 正誤表

執筆者名	ページ	欄	行	誤	正
香川 澄 ほか	2180	左	6	P_1	P_2
	〃	〃	〃	P_2	P_1
	〃	〃	7	P_2/P_1	P_1/P_2

54 巻 497 号, B 編 (昭 63-1) 正誤表

執筆者名	ページ	欄	行	誤	正
池田隆治 ほか	10	右	23	5, 6 中の...	6, 7 中の...
増田 渉 ほか	50	図 11	左上 図中	$x/b=2$	$x/b_0=2$
	〃	右	7	2-41	41-2
	〃	右	9	2-73	73-2
里深信行 ほか	72	英文題名		Between	between
	77	右	20	σ	O
大島亮一郎	126	左	式(8)	$e^{-k^2 m}$	e^{-km^2}
	〃	右	式(11)	〃	〃
	127	左	式(15)	$e^{-16Kk^2 m}$	$e^{-16kK^2 m}$
	128	表 1	表中	$R_e \times 10$	$R_e \times 10^{-6}$
内藤悦郎 ほか	156	右	14	$p=2(p'+\rho'_0 g' y' \cdot \cos \phi + \rho'_0 g' x' \cdot \sin \phi)/(\rho'_0 u_0'^2)$	$p=2(P'+\rho'_0 g' y' \cdot \cos \phi + \rho'_0 g' x' \cdot \sin \phi)/(\rho'_0 u_0'^2)$
	157	右	14	滑度	渦度
佐藤運男 ほか	198	左	10	シリンダ内れ流入し,	シリンダ内へ流入し,
	〃	右	23	12.85・13.20	12.85~13.20
	202	左	12	試作機関との	試作機関と