透明シリンダエンジンによる シリンダ内空気流動に関する研究^{*}

神 本 武 征^{*1} 八 木 田 幹^{*1} 森 吉 泰 生^{*2}
小 林 治 樹^{*1} 盛 田 英 夫^{*2}

AN EXPERIMENTAL STUDY OF IN-CYLINDER AIR FLOW WITH A TRANSPARENT CYLINDER ENGINE

TAKEYUKI KAMIMOTO, MIKI YAGITA, YASUO MORIYOSHI,
HARUKI KOBAYASHI, AND HIDEO MORITA

A transparent model engine was developed which can generate an axially symmetrical flow field in the cylinder and which allows an easy access for optical measurement of the in-cylinder air motion. Experimental data on flow characteristics such as mean velocity, turbulent velocity and turbulent scale in the entire space of the cylinder obtained with this engine are expected to be available for evaluating the reliability of mathematical models popular at present. This paper describes the design concept and details of the construction of the engine, and offers some experimental data measured by both a flow visualization technique and Laser-Doppler anemometry.

Key Words: Internal Combustion Engine, Transparent Cylinder Engine, In-cylinder Flow, Laser-Doppler Anemometry, Flow Visualization

1. ま え が き

レーザ・ドップラー流速計の実用化とラボラトリ・オートメーションの発達により、シリンダ内空気流動に関する大量データの処理が可能となり、平均流速と乱れの測定ができるようになった。一方コンピュータの大容量、高速化によってシリンダ内空気流動の多次元モデルによる数値解析も一般的になり、シリンダ内空気流動の研究は実験と理論の両側面からここ数年、格段の進歩を遂げつつある。

しかしながら、実験と数値解析は従来、別々の研究者によって行われてきたきらいがあり、実験では実験シリンダ内の一部領域が測定され、かたや数値解析では実験的裏付けのないままパラメトリックな計算が押し進められている傾向がある。数値解析法の問題点を明らかにし、かつそれらを解決するためには、シリンダ内全領域での流速測定値が必要と考えられる。

このような観点から、筆者らは透明なシリンダと透明なピストン頂面を有するエンジンを設計、製作した。従来、透明シリンダエンジンは燃焼のシュリーレン撮影が可能な四角断面を有するもの^(1,2)、燃焼観察用あるいはピストンリングの潤滑の挙動を観察する目的のもの⁽³⁾などが良く知られている。また空気流動の研究用としても、いくつかの駆動運転の透明シリンダエンジンが既に発表されている。インベリアルカレッジの軸対称2次元の透明シリンダエンジンが最初と思われるが⁽⁴⁾、シリンダがアクリル製のため、圧縮比が3.5、機関速度200rpmで運転されている。1984年にはスタンフォード大学⁽⁵⁾とNASAルイス研究所⁽⁶⁾の透明シリンダエンジンが相次いで発表され、1985年には豊橋技科大からレーザ・ドップラー流速計による測定結果が発表されている⁽⁷⁾。これら3つのエンジンは、いずれも通常の吸排気弁を有するため流れは3次元であり、数値解析法における基本的モデル、例えば乱流モデルや壁面境界条件等を検討するにはあまり適していない。

本報では1984年秋に完成した東工大の軸対称2次元透明シリンダエンジンの概要と、このエンジンを

^{*} 昭和62年4月1日 第64期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和61年4月28日。

^{*1} 正員、東京工業大学(〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)。

^{*2} 正員、東京工業大学大学院。

用いて行ったシリンダ内全領域のレーザ・ドップラー流速計による測定結果と流れの可視化実験の結果について報告する。

2. 透明シリンダエンジンの構造と特徴

今回、設計製作した透明シリンダエンジンの要求仕様は以下の通りである。

(1) 軸対称2次元流れを実現できる。(2) スワール比を変えられる。(3) シリンダの良好な視界を保つことができる。(4) シリンダ内全域の流れの可視化とレーザ・ドップラー流速計による計測が可能である。

上述の要求を満たすモデルエンジンの構造を図1に示す。動弁機構としてはベルト駆動の頭上カム式センターシングルバルブ①を採用した。スワラ②は、固定案内羽根でピッチおよび開度を変えることによりスワール比が変えられる。シリンダヘッドは流路が軸対称となるような形状に作られており、また、シリンダ内面の清掃などのためシリンダ部と無関係にヘッド部を容易に脱着できるようになっている。ピストントップ③、シリンダ④は石英とし、またアルミニウム製延長ピストン内部には反射鏡⑤を固定できるようになっている。製作した透明シリンダエンジンの仕様は表1に示す通りである。

設計にあたり、最も検討を必要とした点は、(1) 透明シリンダの材質と肉厚、(2) 無潤滑式ピストンリングの材質と形状、寸法の2点であった。

透明シリンダの材質として、(1) 熱的ならびに機械的強度、(2) 光学的性能、(3) ピストンリングによる摺動を伴った運転が可能であること、(4) 加工上の問題、(5) 経済性、などを考慮して石英ガラスとした。シリンダの厚さは、熱応力をシミュレーション計算して10mmと決定した。

無潤滑式ピストンリングの材質は四ふっ化エチレン系の、樹脂材料を用いた。合い口形状はステップカットとし、ピストンリング数は2本とした。

3. 計測方法

3.1 可視化測定法 シリンダ内流れの可視化実験では、メタアルデヒド粒子を用いたトレーサ法を採用した⁽⁸⁾。この方法は、メタアルデヒドを約120°Cで昇華させたときにできる針状結晶の凝集体をトレーサとして用いるもので、この粒子は、(1) 他のトレーサ粒子に比べて粒子径が1-2mmと大きく光を反射し易いため撮影に適する、(2) 綿毛状の粒子であるため粒子の見かけの密度が小さく流れへの追従性が良い、(3) ガラスを傷つける心配が少ない、など

の特徴をもつ。

発生させた粒子の流れへの追従性は井元らによって検討されており、それによれば53Hzまでの流速変動に追従する(後述するように平均流速にはほぼ追従すると考えられる)。

図2にシリンダ内への粒子供給系と光学系を示す。メタアルデヒドは、爆発の危険性があるので熱電対により温度をモニタしながらヒーターで加熱した。発生した蒸気を冷却、凝縮させて粒子を生成し、これを圧送してシリンダヘッド上部に取り付けたアクリル製カバー内に導いた。カバー内のトレーサ粒子は、吸排気弁

図1 透明シリンダエンジン断面図

表1 透明シリンダエンジン仕様

Displacement volume (cc)	402
Compression ratio	4.81
Bore × Stroke (mm)	80 × 80
Air-intake valve	Open 0° TDC Close 30° ABDC
Exhaust valve	Open 30° BBDC Close 0° TDC
Top-clearance (mm)	21
Con-rod length (mm)	200
Single valve dia. (mm)	33

を通してシリンダ内へ吸入される。粒子撮影用の光源には500W水銀灯を用い、図の右下に示すように厚さ約12mmのスリット光にして水平方向にシリンダ内を照明した。撮影は、ピストン頂部の石英ガラス窓を通してピストン下部より16mm高速度カメラ(NAC E10)により行った。撮影条件は、粒子がほぼ静止して写るよう900コマ/秒(クランク角度2°毎)、露光時間1/2700秒とした。ただし、この場合光量不足となるためフィルムはKODAK 7224(ASA400)を用い4倍増感現像を行った。スリット光の厚さは空間分解能の観点から薄いほど良いが、軸方向流速によって粒子が移動するため薄過ぎると粒子がすぐに視界から消えてしまい追跡が不可能となる。ここでは、軸方向流速の大きさ、撮影速度、粒子が3コマ以上写るなどの条件を考慮して12mmと決めた。以上のような条件のもとで図2の右下に示すような3断面で撮影を行った。

データ処理は以下のようにして行った。フィルムをモーションアナライザにより拡大投影し、圧縮下死点から上死点まで10°毎にそのコマと前後2°(1コマ)におけるトレーサ粒子の座標をグラフペンを用いてミニコンピュータ(ECLIPSE S-130)に入力した。これらの座標点を結ぶことにより軌跡を求め、軌跡の長さと撮影速度とから流速を求めて速度ベクトル図を作成した。データ処理はすべてミニコンピュータで行い、結果をX-Yプロッターより出力した。

3・2 レーザ・ドップラー流速計

3・2・1 光学系 レーザ・ドップラー流速計の光学系は図3に示すような2ビームモード前方散乱方式とし、周波数シフター(シフト周波数0.5MHz)を使用した。光源にはHe-Neレーザー(波長632.8nm, 出力25mW, ビーム径(1/e²)1.2mm)を用い、信号処理には周波数トラッカー(KANOMAX Model 1095)を使用した。ビームの交差半角は5.74°で、測定体積は長さ1.6mm, 幅0.2mm, 高さ0.2mmの約0.02mm³となる。測定点は図4に示す通りである。半径方向の測定点の位置決めは、シリンダヘッドを取り外しライナー上部に水平に設けたスケールに沿って散乱板を移動させ、シフト周波数をモニターすることで行った。半径方向の位置をR, シリンダヘッド下面からの位置をZで表す。シードには、アトマイザにより発生させたシリコンオイル微粒子(粒径約4μm)を使用した。シードの流れへの追従性を計算により見積ったところ応答周波数は3.4kHzとなり、サンプリングのナイキスト周波数(2.5kHz)より高い。実験は機関回転数300rpmで行い、流速の測定は周方向成分についてのみ

行った。トラッカーのサンプリングレートは、トップクリアランス部の測定で70kHz程度であった。

3・2・2 データ処理 トラッカーからの出力は、エンジンクランク軸に取り付けたエンコーダ(1

図2 流れの可視化方法と撮影位置

図3 レーザ・ドップラー流速計とデータ処理系

図4 測定位置

図5 速度ベクトル図
(300 rpm)

のデータは乱れの計算には使用せず平均流速を求めるためにのみ有効とした。

平均流速、乱れ速度を求めるに際し、シリンダ内流れに特有のサイクル変動を分離する必要がある⁹⁾。瞬時流速を v_0 、アンサンブル平均流速を $\langle v_0 \rangle$ 、乱れを v_0' 、サイクル変動を v_{0c} とすると $v_0 = \langle v_0 \rangle + v_{0c} + v_0'$ と表すことができる。乱れ速度 v_0' をあるカットオフ周波数以上の成分と考え、そのサイクルの移動平均を $\bar{v}_0$ とすると $\bar{v}_0 = \langle v_0 \rangle + v_{0c}$ と表され、乱れ v_0' を求めることができる。さらに、 v_0' のRMS値を乱れ速度 v_0' と定義する。一方、サイクル変動は $v_{0c} = \bar{v}_0 - \langle v_0 \rangle$ として求めることができる¹⁰⁾。

4. 結果と考察

4・1 可視化による結果と考察 図5にトレーサ粒子の動きから求めた速度ベクトル図を示す。図中、上から下に向かって $Z = 12, 48, 86$ mmと深さ方向の変化を示し、左から右に向かって圧縮下死点から上死点への時間変化を示してある。図は撮影条件により、比較的大きなトレーサ粒子からの結果を示している。このため流速の半径方向成分については追従性の問題が生じるが、周方向成分についてはレーザ・ドップラー流速計からの平均流速値ともサイクル変動の範囲内で一致していることから、正しい結果を示していると考えられる。図より、下死点では Z が大きいほど、つまりピストンに近いほど周方向流速が大きいことがわかる。また、スワールの中心は圧縮行程中シリンダ中心と一致せず、スワールの回転方向にゆっくりと移動しているが圧縮上死点では燃焼室中心にほぼ一致するようになる。

図6 アンサンブル平均流速の各行程における
パワースペクトルとその積分値

000パルス/回転、サンプリング間隔0.2 ms)からのパルスでA/D変換を行い、マイクロコンピュータ(HP 9836A)に転送した。データ処理にあたっては、5 ms(ナイキスト周波数は100 Hz)以上の間データのホールドがあった場合はそのサイクルのデータをすべて無効とし、更に1 ms(ナイキスト周波数は500 Hz)以上の間ホールドがあったサイクル

4・2 レーザ・ドップラー流速計による結果

4・2・1 平均流速と乱れ 図6に $R = 30$ mm, $Z = 12$ mmにおいて、0°を吸入上死点として180°毎に各区間のアンサンブル平均流速 $\langle v_0 \rangle$ (55サイクル分)のパワースペクトルをFFT法により求め、最大値で正規化した結果を示す。これによる

と、エネルギーの90%以上は100Hz以下の低周波数域にあることがわかる。

図7に同じ位置において、移動平均のカットオフ周波数を100Hzおよび50Hzとした場合のサイクル変動のRMS値 $V_{\phi c}$ および乱れ速度 v_{ϕ} の時間変化を示す。カットオフ周波数を変えるとサイクル変動および乱れの絶対値は異なるが、時間変化の定性的傾向はほとんど変わらない。すなわち、カットオフ周波数の決め方には任意性があるが、今回はアンサンブル平均流速の積分パワースペクトルが90%以上となる周波数すなわち100Hz(-3dB)をカットオフ周波数と決めた。カットオフ周波数100Hzは4.43msの移動平均区間幅に相当する。サイクル変動と乱れの時間変化の様子をみると、吸入行程では共に大きな値をもつが、圧縮膨張行程で共に単調に減衰し、排気行程に入ると再び増加する。

図8は同じ測定点で、あるサイクルにおける瞬時流速 V_{ϕ} 、移動平均流速 $\bar{V}_{\phi}$ 、サイクル変動 $V_{\phi c}$ 、乱れ速度 v_{ϕ} の時間変化を示したものである。これをみると、 V_{ϕ} は吸入行程でかなり変動しているが、圧縮膨張行程では次第に乱れが減衰する様子がわかる^(9, 11)。その後510°で弁が開くため、流速および乱れが再び大きくなる。図によると V_{ϕ} の高周波成分が $V_{\phi c}$ となっている。これは図6のパワースペクトルと図7の $\langle V_{\phi} \rangle$ を見るとわかるように、 $\langle V_{\phi} \rangle$ のパワーの大部分が約30Hz以下の低周波数域に含まれるため、 V_{ϕ} の30-100Hzの成分がサイクル変動とみなされたからである。

4・2・2 レーザ・ドップラー流速計による結果

図9にZ=12mmにおけるアンサンブル平均流速 $\langle V_{\phi} \rangle$ と乱れ速度 v_{ϕ} の半径方向の時間変化を示す。Rが負の位置における流速値は△で、Rが正の位置における流速値は○でプロットしてある。 $\langle V_{\phi} \rangle$ は吸入行程中(圧縮開始時のスワール比は約1.5)は、軸対称からややはずれた分布を示すが、圧縮行程中に次第に剛体渦へと近づいてゆき、軸対称な分布形へと変化する。膨張行程に入ると、分布はほぼ剛体渦をなす。510°に弁が開くため、540°では分布が軸対称からはずれる。また、R=38mmにおける $\langle V_{\phi} \rangle$ がR=35mmにおける値よりもわずかに小さくなっていることから、境界層厚さは2mm程度と考えられる。 v_{ϕ} については、全行程にわたって半径方向に殆ど一様であり、吸入行程中が最も大きく、圧縮から膨張行程中は単調に減少してゆく⁽¹²⁾。その後510°で弁が開き、540°で v_{ϕ} は再び大きくなる。

図10には、R=30mmにおける $\langle V_{\phi} \rangle$ と v_{ϕ} の軸方向分布の時間変化を示す。図中の破線は各クランク角度におけるピストンの位置を示す。 $\langle V_{\phi} \rangle$ は、吸入

行程中はシリンダヘッド下面付近よりもピストン頂面付近の方が高い流速値をもつ。しかし、圧縮膨張行程中は軸方向にほぼ一様な分布となる。510°で弁が開き、540°ではシリンダヘッド下面付近で $\langle V_{\phi} \rangle$ は大きくなる。 v_{ϕ} については、吸入行程中は $\langle V_{\phi} \rangle$ と同様、ピストン頂面付近で大きな値をもつが、吸入下死点ではピストン頂面付近の乱れは減衰して、軸方向の中程にピークをもった分布となる。続いて圧縮膨張行程では軸方向にほぼ一様な分布となり、単調に減少してゆき、540°では $\langle V_{\phi} \rangle$ と同様、乱れが再び大きくなる。

図7 アンサンブル平均流速 $\langle V_{\phi} \rangle$ およびカットオフ周波数を変えた場合のサイクル変動のRMS値 $V_{\phi c}$ と乱れのRMS値 v_{ϕ} の時間変化

図8 1サイクルにおける流速値 V_{ϕ} 、移動平均流速値 $\bar{V}_{\phi}$ 、サイクル変動 $V_{\phi c}$ 、および乱れ v_{ϕ}

最後に乱れの積分時間スケール Λ_t と積分空間スケール Λ_z の時間変化を図 11 に示す。定常性の統計的検定の結果⁽¹³⁾、乱れはクランク角度 45° の間、定常とみなされるので、 45° から 675° までの区間を 45° 毎にカットオフ周波数 50 Hz と 100 Hz との場合について Λ_t を求めた。すなわち、乱れ成分のパワースペクトルを FFT 法によって求め、そのアンサンブル平均 (20 サイクル分) から逆 FFT によって自己相関関数 $R(t)$ を求め、 $\exp(-t/\Lambda_t)$ でこれを近似して、 Λ_t を求めた。これを見ると、カットオフ周波数の相違にもかかわらず、 Λ_t の時間変化の傾向はほぼ同様で、圧縮膨張行程で徐々に増加する。その理由として図 8 からわかる様に、高周波の乱れが減少することが考えられる。カットオフ周波数の違いによる Λ_t の差が、吸入行程に比べて圧縮膨張行程中の方が大きい理由として、吸入行程では乱れの生成が活発で 100 Hz 以上の高周波の乱れが支配的であるのに対し、圧縮膨張行程では、高周波の乱れは消散してしまい、 50 Hz から 100 Hz の周波数帯の乱れ (サイクル変動に起因するものも含まれると考えられる) が

図 9 アンサンブル平均流速 $\langle V_b \rangle$ と乱れ速度 v' の半径方向分布 (300 rpm)

エネルギーの大半を占めることが考えられる。 495° から 540° の区間で Λ_t が急激に減少するのは、 510° に弁が開き高周波の乱れが生成されるためである。その後、排気行程では吸入行程ほど乱れが生成されないため、 Λ_t は増加すると思われる。 Λ_z は V_b がシリンダ内流れで支配的となる 270° から 450° までの 4 区間についてテイラーの仮説が成り立つものとして $\Lambda_z = \Lambda_t \times V_b$ (V_b : 区間時間平均流速) より求めた。これを見ると、従来の研究にもあるように^(9,10) 圧縮上死点で Λ_z は極小値をもつ。

図 10 アンサンブル平均流速 $\langle V_b \rangle$ と乱れ速度 v' の軸方向分布 (300 rpm)

図 11 積分時間スケール Λ_t と積分空間スケール Λ_z のカットオフ周波数による相違

5. ま と め

2次元軸対称透明シリンダエンジンを用い、フラットピストンの場合についてシリンダ内空気流動の測定を行った。まず可視化により、サイクル毎の流れを観察し以下の点を明らかにした。

(1) スワールの中心はシリンダ中心からずれており、スワールと同方向にスワール回転速度より低い速度で回転している。このスワール中心のずれ方は、毎サイクル変動している。

次いでレーザ・ドップラー流速計により、多数サイクルの周方向アンサンブル平均流速値および乱れ速度を測定し、以下の点を明らかにした。

(2) シリンダ壁面の境界層の厚みは2 mm程度であると考えられる。

(3) アンサンブル平均スワール流速および乱れ速度のシリンダ軸方向の分布は吸排気行程では一様ではないが、圧縮膨張行程ではほぼ一様である。

以上、本エンジンにより軸対称2次元流れが実現でき、またシリンダ内全域にわたる測定を行うことができた。これにより、本透明シリンダエンジン製作の目標が達成された。今後、本エンジンは数値解析法の評価に有用なデータを提供するものと期待される。透明シリンダエンジンの設計に協力された当時大学院生黄建銘氏ならびに可視化実験を担当された当時学部学生稲田浩氏に感謝致します。また、本エンジンの製作に当たり、ご援助賜った関係各社に厚く感謝致します。

文 献

- (1) Namazian, M., ほか5名, SAE Paper, No.800044(1980), 1.
- (2) 山田, ほか2名, トヨタ技報, 30-2 (昭55), 169.
- (3) 高尾, 新, 内燃機関, 12-8 (昭48), 55.
- (4) Arcoumanis, C., ほか2名, SAE Paper, No.820750(1982), 1.
- (5) Richman, R.M. & Reynolds, W.C., SAE Paper, No.840379(1984), 1.
- (6) Schock, H.J., AIAA-84-1316(1984), 1.
- (7) Morita, Y., ほか2名, Proceedings of International Symposium on Diagnostics and Modeling of Combustion in Reciprocating Engines, Tokyo(1985), 175.
- (8) 井本, 内燃機関, 12-144 (昭48), 11.
- (9) D.R.Lancaster, SAE Paper, No.760159(1976)
- (10) T.M.Liou and D.A.Santavicca, SAE Paper, No.830491(1983), 1.
- (11) 城戸, ほか5名, 機論 50-452, B (昭59), 1114.
- (12) 松岡, ほか4名, 機論 47-422, B (昭56), 2074.
- (13) J.S.Bendat, A.G.Piersol, ランダムデータの統計的処理, (昭52), 232, 培風館.

討 論

〔質問〕 城戸 裕之 (九州大学工学部)

興味深い実験装置の考案とその特長を生かしたご研究に敬意を表す。以下の点につきご教示いただきたい。

(1) 圧縮開始時のスワール比を約1.5, 機関回転速度を300 rpm と, 全体的にやや低めに設定されているが, どのような理由によるものか。

(2) 石英ガラス面に近い半径位置での計測では, ドップラー信号の劣化が予想される。特に乱れの計測において, 何か対策を講じておられたら, お示しいただきたい。

(3) 乱れの積分時間スケール, 積分空間スケールの解析において, カットオフ周波数50 Hz と100 Hz の場合について示されているが, シリンダ内空気流動の数値解析との関連で, どのような積分尺度を採用するのが妥当であるとお考えか。

〔回答〕 (1) 本研究は数値計算との比較検討を

行える信頼性の高い実験値を得ることを目的としており, まずLDVによる流速測定と流れの可視化が行いやすい条件を設定し実験を行った。今後, 高回転時や高スワール場における測定を行う予定である。

(2) 付図1に本実験でガラス壁面に最も近い測定位置における測定部の拡大図を示す。測定体積中心と壁面との距離は2 mmである。付図1にみるように,

付図 1

測定体積の端から壁面までの距離は 1.2 mm となる。さらに測定位置を壁に近づけてゆくとドップラー信号が急にシフト周波数になり流速の測定が不可能になる。測定位置が手前のガラス面に近づいた場合も同様である。

(3) 数値計算では K - ϵ 乱流モデルを用いており、 K と ϵ から求まる乱れスケールと図 11 に示すような積分長さスケールとの比較を行っている。しかし、 K - ϵ モデルではカットオフ周波数という考え方がないため、両者の比較を行う場合にご質問のような疑問が生じる。著者らもこの問題について考えているが未解決であり、今後、計算と実験で定義する乱れの意味を明らかにする必要があると考えている。

〔質問〕 新井 雅隆〔広島大学工学部〕

(1) 乱れと平均流を分離するカットオフ周波数とエンジン回転数の関係について、コメントがあったらお教え願いたい。

〔回答〕 機関速度を本実験の 2 倍 (600 rpm) にして測定を行った場合の結果と比較すると、周方向流速のアンサンブル平均値のクランク角に対する変化は圧縮・膨張行程中機関速度に対し類似の形となる。すなわちアンサンブル平均流速の周波数成分は機関速度にほぼ比例すると考えられる。したがって本報で定義するカットオフ周波数の値は倍増することになる。しかし機関速度をさらに増加させた場合に平均流速のクランク角に対する変化が機関速度に比例するかどうか、また本報で示す乱れの定義法をそのまま適用できるかどうかに関しては、今後の課題と考えている。