

シリンダ壁筒内噴射による 2ストロークエンジンの排ガス・燃費低減

Emission Reduction by Cylinder Wall Injection in Two-stroke Engines

鈴木隆広 Takahiro Suzuki 本山雄 Yuh Motoyama

●研究開発センター 応用プロジェクト開発室 / 研究開発センター コア技術研究室

In two-stroke engines, short-circuiting of the fresh charge during the scavenging period increases exhaust hydrocarbon (HC) emissions and fuel consumption. We investigated the effect of in-cylinder fuel injection on exhaust emissions and fuel consumption using a Multi-Point Injector (MPI) based low pressure injection system. The test engine was a crankcase compression, two-stroke, water-cooled, single cylinder engine (displacement 430 cm³) with the fuel injector installed on the cylinder wall. The injector was modified only at its nozzle tip. Several types of jets were prepared to make comparisons, including one having two holes, on the top and bottom sides, causing the fuel to spray toward the top of the piston and the cylinder head. In our comparison of exhaust emissions and fuel consumption from a low load at a low speed to a maximum output and while varying the injection pressure from 600kPa to 2.0MPa, we found that injection pressure had less effect on emissions and fuel consumption.

In the case of an injection pressure of 600kPa, the rates of reduction of exhaust HC and fuel consumption were 35-75% and 15-35% respectively. A lack of dynamic range of injection was observed when the injection pressure was set under 600kPa.

We also studied the optimum position for the injector. In the axial direction the better result was obtained with a closer position of the injector to the cylinder head. In the radial direction, a scavenging side position led to the better result than an exhaust side position. The effect of the number of injection holes and the injection angle were comparatively small. But when the injected fuel went directly toward the exhaust port, exhaust emission quality deteriorated. To solve the problem of irregular combustion at low load we tried using an exhaust butterfly valve; a well-known device for correcting irregular combustion in two-stroke engines. We found that exhaust emissions and fuel consumption could be further reduced with the more stable combustion.

1 はじめに

2ストロークエンジンは同一排気量の4ストロークエンジンと比べると、小型・軽量・高出力という優れた特徴から、小排気量の2輪車やマリンエンジンなどの世界で使用されてきた。しかしながら、地球環境の観点から見ると、未燃燃料の吹き抜けや低負荷時の不整燃焼の問題などから、近年の排ガス規制に対応することがますます難しくなっている。そこで、2ストロークエンジンの優れた特徴を活かしながら排ガスや燃費を向上させるために、2ストロークエンジン筒内噴射技術が世界的に研究されており、1996年からは、高度な燃料噴射コントロールを用いたマリン用筒内噴射エンジンが、各社から発売されている。これらのいくつかは成層燃焼システムを採用し、他方では高圧燃料噴射による

均一燃焼を採用している。どちらの場合もインジェクタは高温・高圧の燃焼ガスに曝されるシリンダヘッドに取り付けられており、そのための対策がインジェクタやエンジンなどにされている。一方、インジェクタをシリンダ壁に取り付けるシステムも提案されている。インジェクタ位置の関係上噴射時期が制限されるため、成層燃焼の達成は困難であるが、インジェクタが燃焼中の高温・高圧なガスに直接曝されることが少ないため、噴孔閉塞が発生し難いとともに、広く普及している燃料圧力の低い自動車用吸気管噴射システムと共通して使用できる可能性があることから、信頼性を確保できると共にコストの面でメリットがあった。

以上から、筆者らはシリンダにインジェクタを取り付ける2ストロークシリンダ壁筒内噴射方式に着目し、MPI（マルチポイントインジェクタ）をベースとしたインジェクションシステムを開発して、詳細なエンジンテストを行った。本文では、インジェクタ位置、噴射圧、噴孔形状が排ガス、燃費に与える影響を調査した結果や、バタフライ排気バルブを用いた不整燃焼対策の結果について紹介する。

2 テストエンジンとインジェクタ諸元

テストには、排気量 430cm³ のクランク室圧縮2ストローク水冷単気筒エンジンを使用した。主要諸元を表1に示す。また、図1に噴射システムを示す。インジェクタは、シリンダ中心軸に対し直角方向に取り付け、シリンダ壁に開孔するインジェクションノズル取り付け孔の大きさが最小となるよう配慮した。

インジェクタは、市販 MPI をベースとし、任意の噴霧特性を得られるよう、ノズル先端部分に試作した噴射ノズルチップを圧入して使用した。噴射ノズルチップは、噴孔が2孔で一方の噴霧が燃焼室方向、他方がピストン頂面方向の両方に向かうタイプと、噴孔が単孔で噴霧がピストン頂面方向のみに向かうタイプを試作し、それぞれをタイプA、タイプBと名付けて、噴孔の径・角度・配置・噴孔の数を調整して噴霧特性（噴霧分散状態、噴霧角、噴霧パターン）を変化させた。図2にインジェクタの構造、図3にノズルチップとその諸元を示す。ベースとした MPI の作動性および耐圧性を調査した結果、噴射圧は 2MPa 程度が上限となるため、その範囲で噴射圧を調整した。

比較のため、スワールノズル式で噴霧角 35° の

表1 エンジン諸元

Type	Water-Cooled 2-Stroke Single Cylinder
Scavenge System	Crankcase Compression Loop Scavenging
Displacement	430cm ³
Bore × Stroke	86mm × 74mm
Connecting rod Length	130mm
Compression Ratio	6.5
Ext.Timing	97° A,BTDC
Scv.Timing	120° A,BTDC

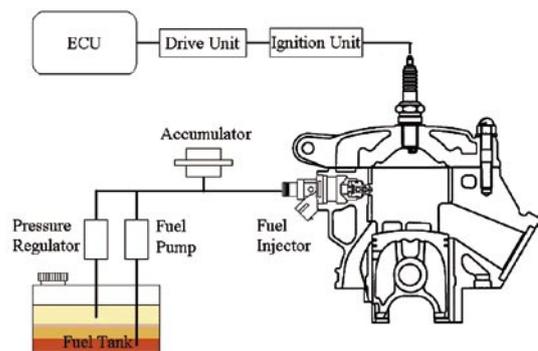


図1 噴射システム

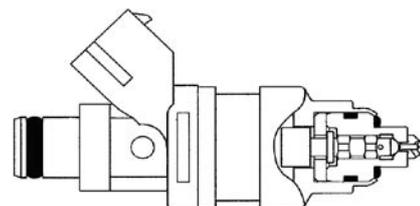


図2 インジェクタの構造

インジェクタをシリンダヘッドに取り付け、噴霧がシリンダヘッドからピストン頂面に向かう試作高圧燃料噴射システムも用意した。

エンジン実験は、ICOMIA（舟艇工業会国際評議会）-5MODE で定められる運転条件の中から選択した。表2に運転条件を示す。

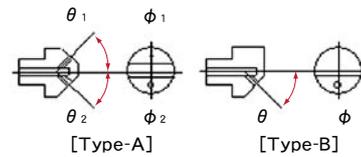
3 エンジンテスト

3.1 インジェクタ取り付け位置の影響

インジェクタのシリンダ取り付け位置を、図4に示すように同一高さで円周上A、B、C、Dにした場合、各位置によるHC（炭化水素）と燃費への影響を調査した。この時、シリンダに開口するインジェクタのノズルポート高さは60° A,BTDC（上死点前後）一定とし、ノズルはA-0を用いた。また、噴射圧は600kPaとし、噴射時期、A/F（空燃比）、点火時期などの運転パラメータはHCが最も低くなるように設定した。

実験の結果を図5に示す。インジェクタがAの位置、すなわち対向掃気側から排気側に向かって燃料を噴射する場合に、HC・燃費が最も低くなることが分かった。

次に、インジェクタを対向掃気ポート側に配置し、ノズルポート（インジェクタ先端のノズル部がシリンダに開口する孔）の高さの違いによる出力とHCの関係について調査した。図6に、ノズルポート高さを60°、74°、93° A,BTDCの位置としたとき、MODE 1運転条件で噴射時期を変化させて調査した結果を示す。



Type	A - 0	A - 1	A - 2	A - 3	A - 4
$\phi 1$ (mm)	0.35	0.50	0.35	0.21	0.16
$\phi 1$	45°	45°	45°	45°	45°
$\phi 2$ (mm)	0.83	0.61	0.71	0.76	0.78
$\phi 2$	55°	55°	55°	55°	55°

Type	B - 0	B - 1	B - 2	B - 3
ϕ (mm)	0.80	0.90	0.90	0.90
θ	45°	35°	45°	55°

図3 ノズルチップとその諸元

表2 ICOMIA-5MODE 運転条件による試作エンジン運転ポイント

MODE No.	Engine Speed (rpm)	Engine Torque (Nm)
1	5,500	41.1
2	4,400	29.4
3	3,300	19.1
4	2,200	10.4
5	800	-

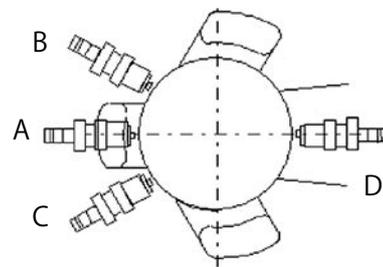


図4 インジェクタ取付け位置

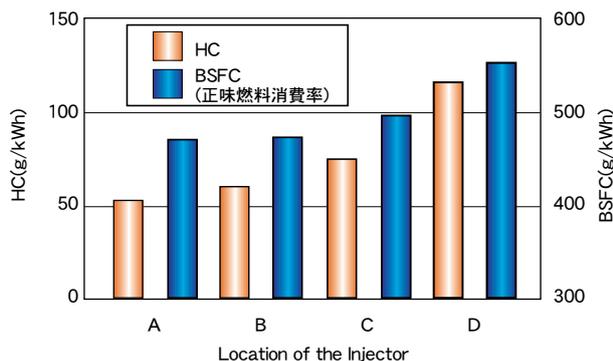


図5 インジェクタ取付け位置の影響

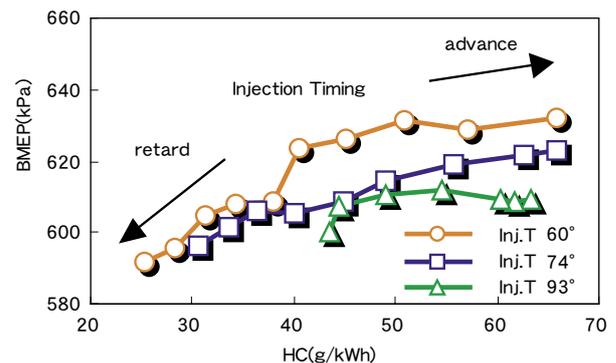


図6 ノズルポート高さの影響

ノズルポート高さが60°、74° A,BTDC では、噴射時期を進めると出力とHC がともに増大する。これは混合気均一性が向上する反面、吹き抜けも増大することを示している。また、ノズルポート高さが93° A,BTDC では、噴射時期を進角しても出力は向上しない。これは、混合気形成に重大な障害が生じることを表している。同一出力ではインジェクタのノズルポート高さが高い位置にある程、すなわちノズルポートの開口時期が早い方がHCは低い。そのため、吹き抜け減と混合気形成を両立させるには、ノズルポート開口時期が早い方が良いことがわかる。シリンダ壁噴射では、ピストンによりノズルポートが閉じられている間は噴射できないため、噴射時期の自由度と最大噴射量確保の観点からも、ノズルポート開口時期は早い方が良い。一方、燃焼ガスのインジェクタノズル内への逆流を防止する観点から、ノズルポートが開いている間は燃料圧力がシリンダー圧力より高い必要がある。最適なノズルポート開口時期は、この条件を満たす最も早い時期である。例えば、噴射圧を600kPaとした場合、テストに用いたインジェクタノズルの逆流防止圧力は1.5MPaである。テストエンジンでは最大トルク点で圧力が1.5MPaまで低下するのは概ね50° ATDC であるため、最適なノズルポート高さは約55° A,BTDC となる。

3.2 燃料噴射圧力の影響

噴射圧の違いにより噴霧粒径が変わるため、排ガス・燃費特性へ影響を与えるものと考えられる。そこで、MODE 1から4までの運転条件で、噴射圧による排ガス・燃費への影響を調べた。ノズルはA-0を用い、ノズルポートは対向掃気ポート側で60° A,BTDC の位置に設けた。

MODE 2からMODE 4では、HCが最も低くなるよう運転パラメータを設定した。一方、MODE 1では噴射時期によりHCと出力が同時に変化するため、出力が吸気管噴射の95%となるように運転パラメータを決めた。

図7に、各測定点における排ガス・燃費を示す。比較のため高圧噴射（7MPa）と吸気管噴射（255kPa）の結果も示した。ここでは、吸気管噴射における値を100%とし、各々の噴射圧における値を比率で表した。噴射圧が高いほどHCの低減効果が高いことが分かるが、本筒内噴射システムを用いた場合、600kPaの低圧でもHCは35%から75%、燃費は15%から35%低減した。ところで、2ストロークエンジンでは給気比が高いほど吹き抜けが増えるため、筒内噴射では高負荷ほどHC・燃費の低減効果が高くなる。しかし、グラフではMODE 1のHCがMODE 2より多くなっている。これは、MODE 1が出力重視の噴射タイミングとなっているためである。

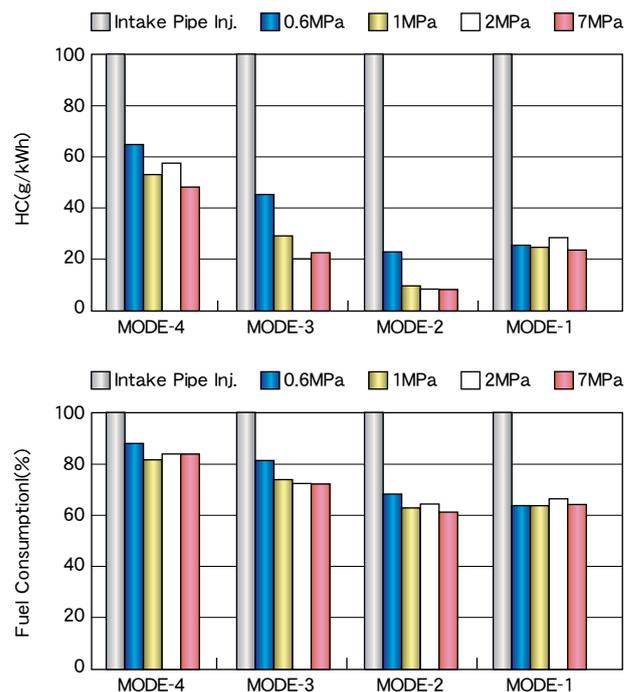


図7 噴射圧力の影響

3.3 噴孔ディメンジョンの影響

インジェクタ位置と同様に、噴孔ディメンジョンも吹き抜けや混合気形成に影響を与えられられる。**図 8** は、タイプ A ノズルの噴孔径を変えて試作し、燃焼室方向とピストン方向に噴射する燃料配分を変化させたときの HC 特性を示している。この時、噴孔径の面積の和が等しくなるようにした。MODE 1、4 とも、燃焼室方向に向かう噴霧の量を増やすと HC が増大する傾向を示した。燃焼室方向に向かう噴霧はシリンダヘッド内面に付着しやすいのがその原因と考えられる。

図 9 は、2 孔ノズル A と全噴霧がピストン頂面に向けて噴射される単孔ノズル B とを比較したものである。噴霧伏せ角 θ が 45° （ピストンが上死点位置にある時、噴霧がピストン中心位置付近を狙う角度）より大きいタイプ B-2、B-3 の方がタイプ A-0 より HC が少ない。また、伏せ角が 35° のタイプ B-1 の場合は、タイプ A-0 より HC が増大している。これは、噴霧がピストンと衝突せずにダイレクトに排気に吹き抜けるためである。

以上より、噴霧は全てピストン頂面の適切な位置に向かって吹くべきであることが分かった。ところで、噴霧を全てピストン頂面に吹くとした場合、より広い領域に燃料を分散させれば、より高い均一性が得られるものと期待できる。しかし、タイプ B で 2 孔、3 孔ノズルを試作して単孔ノズルと比較したところ、各モードポイントで排ガス・燃費特性にほとんど差がみられなかった。**図 10** にテストに用いた噴孔を示す。

3.4 排気バタフライバルブによる燃焼改善

筒内噴射でも均一燃焼の場合は、低負荷域で不整燃焼が発生する。不整燃焼域における排出 HC は、掃気期間中の吹き抜け燃料と失火により未燃のまま排出される燃料により構成される。失火による割合は負荷が低いほど大きくなる。このように、極めて低い負荷領域では、吹き抜けのみを低減させるだけでは十分な HC 低減効果を得ることが出来ない。そこで不整燃焼策として、モーターサイクルなどで

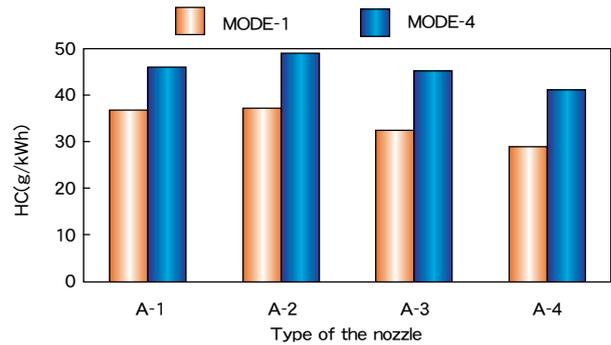


図 8 噴孔径配分影響

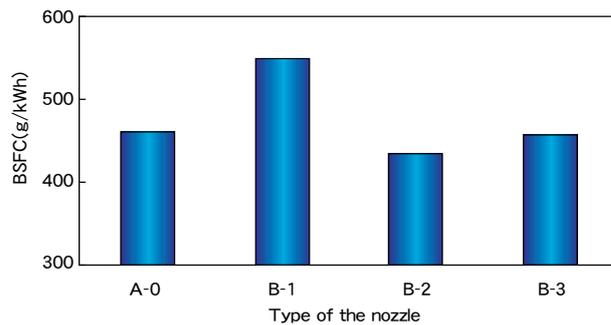
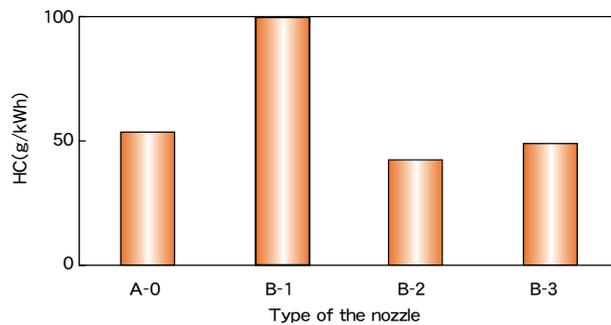
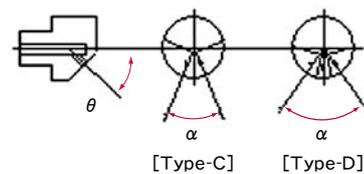


図 9 噴射角度影響



Type	C	D
ϕ (mm)	0.64	0.52
噴孔数	2	3
θ	50°	50°
α	45°	70°

図 10 噴霧エリア比較用 2 孔・3 孔ノズルとその諸元

過去に市販実績のあるバタフライ排気バルブを適用し、その燃焼改善効果を調べた。図11にバルブ配置、図12にMODE 4におけるHCならびに燃焼変動率を示す。排気バルブを用いるとHCを20%以上低減でき、燃焼変動は半減することがわかる。また、A/Fが安定する領域も大幅に広がっている。

このように、排気バタフライバルブによる不整燃焼低減策が、筒内噴射においても有効に作用することが確認できた。排気バルブを装着した場合の、噴射圧600kPaにおけるICOMIAモード排ガス(HC+NO_x(窒素酸化物))及び燃費は、吸気管噴射に対してそれぞれ約70%減と約30%減であった。

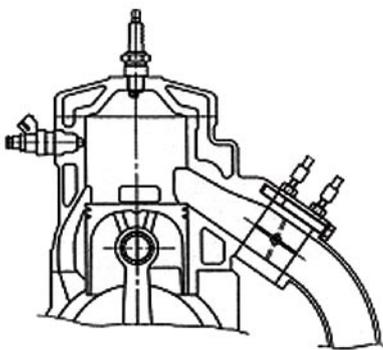


図11 排気バタフライバルブ

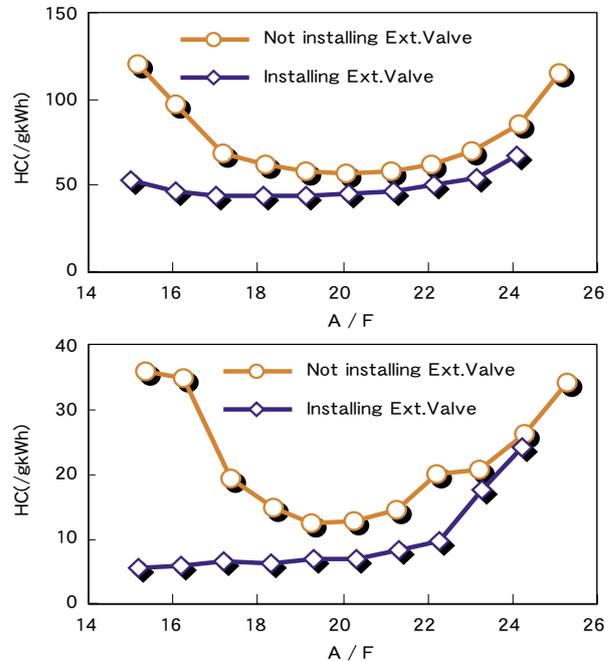


図12 排気バルブによる排ガス・燃費改善

4 おわりに

市販MPIベースのシリンダ壁筒内噴射システムを開発し、試作430cm³単気筒2ストロークエンジン(図13)を用いて排ガス・燃費低減効果を詳細に調査した。その結果、噴射方法を最適化することにより、600kPaという低圧な燃料噴射圧力でも、コンベンショナルな2ストロークエンジンと比較して、排ガス・燃費を大幅に低減できる事が分かった。また、本筒内噴射に排気バルブによる不整燃焼低減技術を併用することにより、低負荷領域でも排ガス・燃費低減が図れるとともに、燃焼安定性も向上することができた。

■著者



鈴木隆広



本山雄

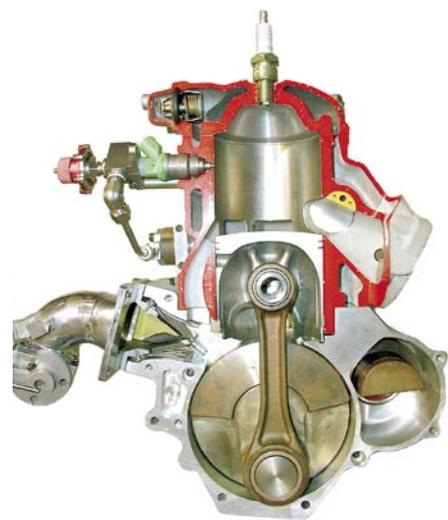


図13 2ストロークシリンダ壁筒内噴射エンジン