

概況

直噴ガソリンエンジンの開発経過

斎藤昭則

Development of the Direct Injection Gasoline Engine

Akinori Saito

要 旨

筒内噴射成層燃焼エンジンはガソリンエンジンの燃費改善に大きな効果があるとされてきたが、実用化がなされていなかった。これに対して1996年にトヨタ自動車と三菱自動車はそれぞれ「D-4」、「GDI」と称する筒内噴射成層燃焼エンジンを開発し市販車に搭載した。当社でもトヨタ自動車でのエンジン開発に対応して、燃料噴射系の開発や燃焼解析の面から支援を行った。一方で一層の性能改善を目指した新たな燃焼系を探索していた。この新たな燃焼系コンセプトは1998年に第二世代のD-4燃焼系として採用された。本特集はこの第二世代のD-4燃焼系に関する技術内容をまとめたものである。

本概況では個々の技術内容に先立ち、筒内噴射成層燃焼エンジンの特徴と過去の開発経過について述べる。

キーワード 直噴ガソリンエンジン，成層燃焼，高圧ガソリン噴射

Abstract

Though the DISC (Direct Injection Stratified Charge) engine has a good fuel consumption performance, it was not put into practical use. However, in 1996, Toyota Motor and Mitsubishi Motor began to manufacture it, and named it the “D-4 Engine” and “GDI Engine”, respectively. The development of fuel injection devices for the engine and an analysis of the combustion phenomena have been done in our laboratory with Toyota Motor. The new concept for the combustion system has been researched in our laboratory. The concept was applied to the 2nd generation D-4 Engine in 1998.

This magazine features the technology of the 2nd generation D-4 Engine. In this overview, the characteristics of the DISC Engine and progress of the development are described.

Keywords Direct injection gasoline engine, Stratified charge combustion, High pressure gasoline injection

1. はじめに

自動車の燃費向上が叫ばれている今日、自動車用原動機の大部分を占めるガソリンエンジンの燃料消費率向上に対する技術開発が重要課題になっている。現在、ガソリンエンジンの燃料消費率向上策として最も有効と考えられているのは、筒内噴射成層燃焼方式である。この方式のエンジンは1996年8月に三菱自動車が市販車に搭載したのを皮切りに、同年12月にはトヨタ自動車、1997年には日産自動車が市販車に搭載した。また、2001年にはフォルクスワーゲンが欧州市場の一部に投入した。

当社ではトヨタ自動車での最初の筒内噴射成層燃焼エンジン開発に対応して、燃料噴射系の開発や燃焼解析の面から支援を行うとともに、第二世代燃焼系の開発に取り組んできた。この結果、当社から提案したコンセプトに基づく第二世代の燃焼系が1998年に実用化された。本特集は第二世代燃焼系のコンセプト、および開発上の課題とその対応結果をまとめたものである。

それぞれの技術内容に先立ち、本稿では筒内噴射成層燃焼エンジンの特徴と、これまでの開発経過を述べる。

2. 筒内噴射成層燃焼エンジンの特徴

Fig. 1はガソリンエンジン車の場合における、投入燃料の全エネルギーに対するエンジンでのエネルギー消費割合を示す図である。この割合は運転モードで変わるが、大まかな言い方をすれば車両の動力として使われるエネルギーは20%にしかならない。動力にならない損失として10%が摩擦損失、さらに10%がポンピング損失、残りは熱損失と見積もられている。これらの損失を低減することによって、エンジンの燃料消費率を向上することができる。

筒内噴射成層燃焼エンジンでは、これらの損失の中でポンピング損失をなくすることができるとともに、圧縮行程時に空気のみを圧縮するので熱力学上の法則から効率が向上する。また、ノッキングにも強いとされており、圧縮比を高めることにより一層の効率向上が期待できる。

3. 成層燃焼エンジンの開発経過

筒内噴射成層燃焼エンジンを最初に公表したのはスウェーデンのヘッセルマンであるとされている。ヘッセルマンが1930年に公表したエンジンの概要をFig. 2¹⁾に示す。しかし、この時代には燃料噴射系も点火系も未熟だったため、予想されるような性能が得られず、その後進展はしなかった。

1960年代になり再び筒内噴射成層燃焼エンジンの研究・開発が活発化した。代表的なエンジンとしてTexaco社が発表した「TCCSエンジン」、Ford社が発表した「PROCOエンジン」、MAN社が発表した「FMエンジン」が挙げられる。各エンジンの燃焼系の概要をFig. 3に示す。いずれもかなり精力的に研究・開発が行われたが実用には至らなかった。実用

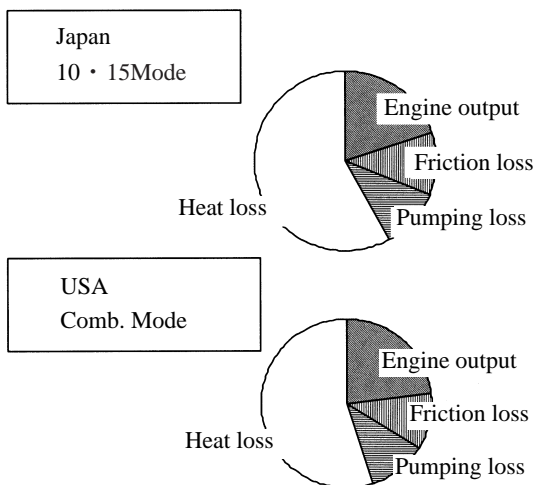


Fig. 1 Energy consumption rate of gasoline engine.

にならなかった要因はいくつか考えられるが、制御性の良い燃料噴射系がなかったことが大きいのではないかと推測される。

1970年代に入り、本田技研工業は「CVCC」と称する成層燃焼エンジンを発表し実用化した。このエンジンのねらいは燃料消費率の向上ではなく、当時の自動車業界で大問題になった排気対策のためであった。すなわち、エンジンから排出される有害成分であるNO_xを低減するために希薄混合気の燃焼を実現しようとしたものである。「CVCCエンジン」の概要をFig. 4に示す。Fig. 4に示されるようにこのエンジンは筒内噴射方式ではなく気化器で燃料を供給する方式であった。主室に希薄混合気を供給するとともに、副室に燃料濃度の濃い混合気を供給する。副室の濃混合気に点火して副室の連絡孔から火炎のジェットを吹き出し、主室内の希薄混合気を確実に燃焼させるというものである。そのため、気化器には二種

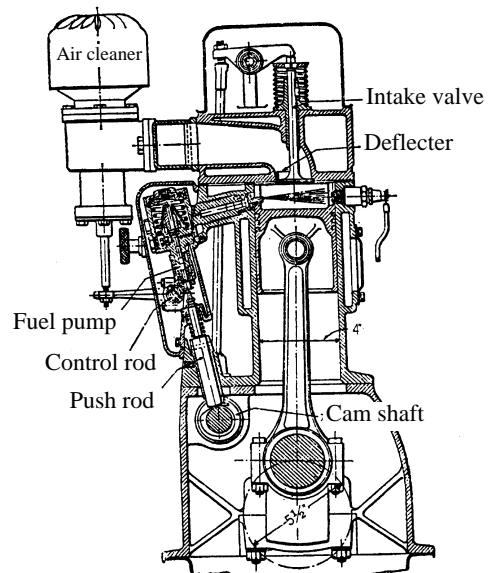


Fig. 2 Hesselman engine¹⁾.

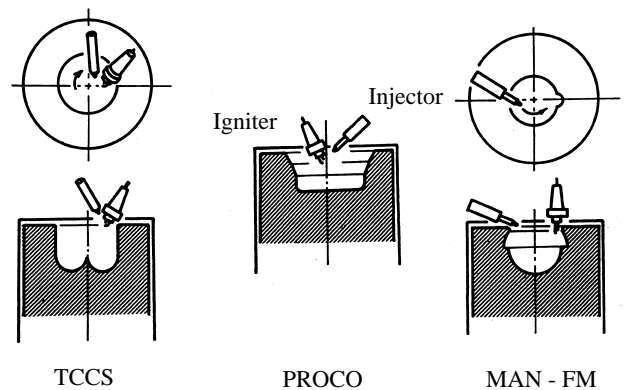


Fig. 3 Research DISC engines in 1960's.

類の混合気濃度を調整するための機構が設けられており、かなり複雑な構造であった。

当社でも1970年代に成層燃焼エンジンの研究が行われた。当時は棚沢泰名誉所長がチームを率いていたが、その時に教わった分類が成層燃焼エンジンの全体像を知る上で参考になるのでTable 1に示す。この分類によれば「CVCCエンジン」は「2323」ということになる。トヨタ自動車でも同様のエンジンが開発され、著者も開発の一時期支援部隊の一員として参加したが、気化器の調整は困難を極めた。

「CVCCエンジン」は当時大きな関心を集めたが、三元触媒を用いた排気浄化システムの浄化効率が極めて高かったため、排気浄化を目的にした「CVCCエンジン」は消えていった。そして、三元触媒を用いた排気浄化システムが排気対策の主流になった。ただし、三元触媒を有効に使うためには理論空燃比

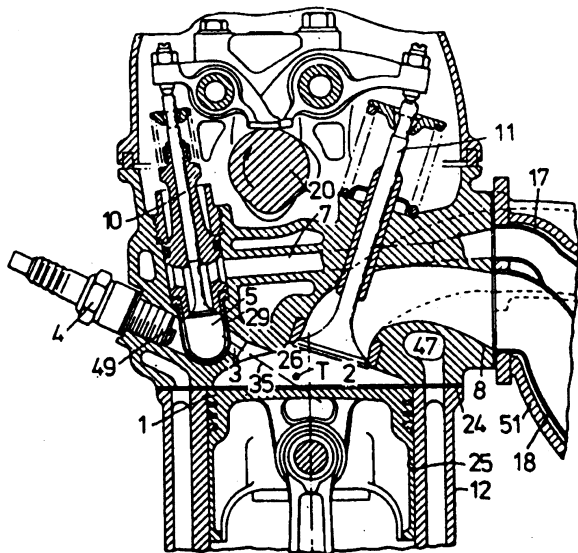


Fig. 4 CVCC engine.

Table 1 Classification of DISC engines.
(Einteilungsschema für Schichtladungsmotoren, 1975)

Combustion chamber	Intake valve	Mixture formation	Fuel supply	
1				Open chamber
2				Divided chamber
	1			At main-chamber
	2			At sub-chamber
	3			At main- and sub-chamber
		1		Inner cylinder
		2		Outer cylinder
		3		Inner and outer cylinder
			1	To main-chamber
			2	To sub-chamber
			3	To main- and sub-chamber
			4	To sub- and main-chamber

での燃焼を行う必要があり、燃料量の精密な制御が不可欠であった。これに対して、電磁駆動式燃料噴射弁と酸素センサを使った電子制御式燃料噴射装置が開発された。この燃料噴射装置は三元触媒システムとともに広く普及していった。これに伴い、気化器もなくなっていった。

1980年代になって排気対策への取組みが一段落し、次は燃費低減の要求が強まるものと予想された。そのため再び筒内噴射成層燃焼エンジンの見直しが図られ始めた。

4. PZT駆動式高圧ガソリン噴射装置

1987年から当社とトヨタ自動車では再び直噴ガソリンエンジンの研究を始めた。過去の開発経過を踏まえると、最も重要な要素技術は燃料噴射技術であろうということで一致し、まず高圧ガソリン噴射装置の開発に取り組んだ。噴射弁の駆動には電磁駆動方式も試みられたが、応答性に優れ駆動力の大きいPZT駆動式の噴射弁が選択された。何度かの改良を重ねた最終形状のPZT噴射弁の構造をFig. 5²⁾に示す。

一方、このような電気制御式燃料噴射装置を前提とした筒内噴射成層燃焼エンジンの混合気形成法の基本的な考え方をFig. 6²⁾に示す。行程容積分の空気がシリンダ内に吸入された後、軽負荷では少量の燃料を噴射して点火栓近傍に負荷に見合う小さな混合気塊を形成する。負荷が増すにつれ噴射する燃料量を多くして、やや大きな混合気塊とする。このような混合気塊を形成するためには、点火栓近傍にうまく燃料噴霧を運ぶとともに、噴射から点火までの時間を短くして混合気が広く拡散する前に点火する必要がある。すなわち、圧縮行程中に微粒化状態の良い燃料を噴射しなければならない。

一方、高負荷では燃焼室全体に混合気が行き渡るようにする。ただし、燃料量が多くなると燃料蒸発や混合気形成に要する時間が長くなるので噴射は吸気行程に行う方が良い。また、吸気行程中に燃料を噴射すれば、燃料が蒸発する際に吸入空気を冷却するため充填効率が上がり、エンジン出力の向上も期待できる。

この考え方に基づいて混合気形成を制御するためには、微粒化特性が良く噴射時期を任意に可変できる噴射系、すなわち電気制御式の高压燃料噴射装置が不可欠である。PZT噴射弁を用いた噴射系はこれらの要求を十分に満たすものであった。

このような考え方のもとに試作が行われた初期型の筒内噴射成層燃焼エンジンの構成をFig. 7に示す。

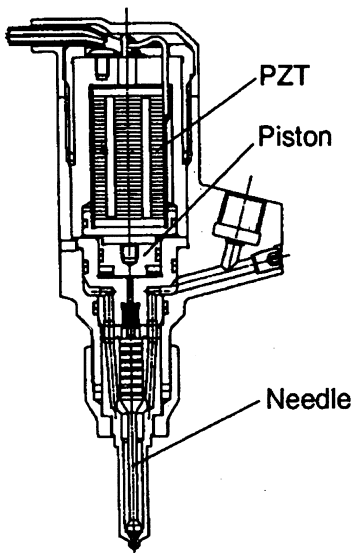


Fig. 5 Structure of PZT injector²⁾.

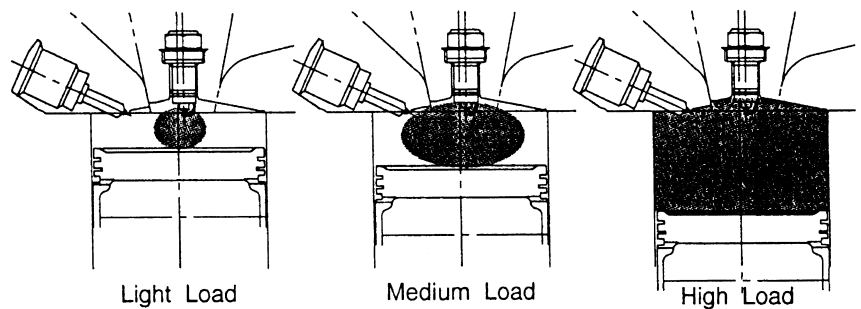


Fig. 6 Ideal mixture formation in the cylinder²⁾.

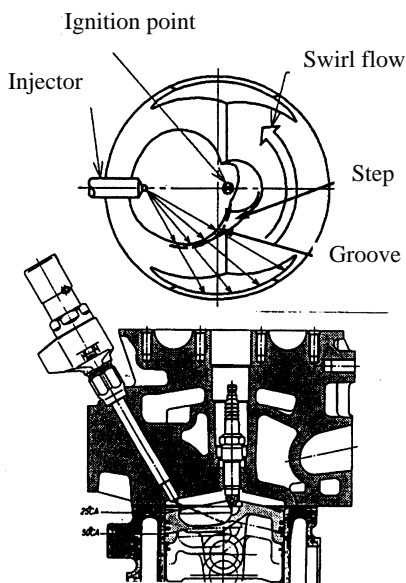


Fig. 7 The D-4 engine in the early stage.

5. 実用化された筒内噴射成層燃焼エンジン

初期型の筒内噴射成層燃焼エンジンは多口ホールノズルを装着したPZT駆動式燃料噴射弁を用いたものであった。ホールノズルから噴射される燃料噴霧は貫徹力が強く、ねらった位置に燃料噴霧を集中させるのには最適であり、特に軽負荷領域のように成層度を強くしたい場合には有効であった。一方、負荷が高くなり燃料の分散度をあげたい場合には必ずしも適しているとは言えない。実用のエンジンでは負荷条件が種々変化するため、より広い範囲で混合気形成を制御することが求められた。そのため、貫徹力がやや弱く適当な分散度をもった噴霧が要求され、スワールノズルの使用が検討された。また、量産化を考えた場合には、使用経験のないPZTを噴射弁のアクチュエータとして使うには時期がまだ早いとの判断がなされ、電磁駆動式の燃料噴射弁が使われることになった。

1996年に「トヨタD-4エンジン」と称されて市販車に搭載された筒内噴射成層燃焼エンジンの断面図

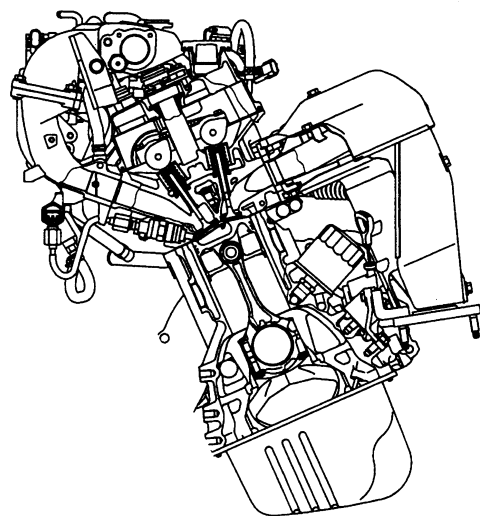


Fig. 8 The D-4 engine for mass production³⁾.

をFig. 8³⁾に示す。当社ではこのエンジンの燃焼系を模擬した可視化エンジンを用いてシュリーレン観察を行った。燃焼室内での混合気形成過程を調べた結果をFig. 9に示す。この図で白く見えるのが燃料(ガソリン)噴霧であり、赤い部分はその蒸気領域である。このような計測や解析の結果から、当初考えられた混合気形成の実現が確認された。

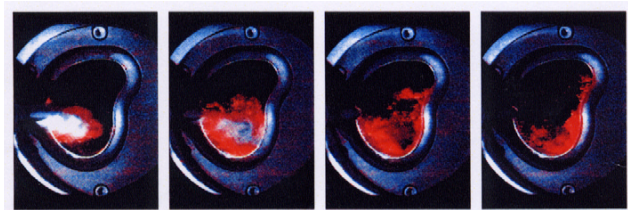
最初の「トヨタD-4エンジン」は排気量2リットルの4気筒エンジンとして開発されたが、その後排気量の大きいエンジンへの展開が図られることになった。これに伴い、燃焼系の見直しが行われることになった。当社ではD-4エンジンの燃焼解析を行う一方で、成層燃焼領域をさらに高負荷域まで伸ばしたいとの要望を受けて、主に燃料噴霧形態と混合気形成状態との関連について研究を行っていた。この中で、高負荷域ではスワールノズルの円錐噴霧よりも、やや貫徹力が強く分散度の高い扇状の噴霧(ファンスプレー)が良好な結果をもたらすことをつかんでいた。ファンスプレーは、過去の経験からノズルの先端に細い溝(スリット)を切ったスリットノズルで形成できることは分かっていた。そして、このファンスプレーの貫徹力を生かして噴霧を点火栓近傍に導くために、円弧状の壁面を持つ「貝型燃焼室」が適していることも確認した。これらの考えをまとめ、新たな燃焼系のコンセプトとして提案した。このコンセプトはトヨタ自動車においても優位性が確認され第二世代のD-4エンジンに適用されることになった。

新燃焼系コンセプトの詳細と実用化過程での課題およびその対応については、本特集のそれぞれの項目を参照いただきたい。

6. 今後の方向

筒内噴射成層燃焼エンジンは長い経過を経て実用化の一步を踏み出した。予想通りの良好な特性も確認されたが、課題も残っている。まだまだ改良の余地があると考えている。

石油はあと50年程度でなくなると言われている。



White zone : fuel spray
Red zone : fuel vapor

Fig. 9 Visualization of mixture formation.

また、地球の温暖化が進み南極や北極の氷が融けて海面が上昇するとも言われている。いずれも実際にどうなるかは分からないが、こうした将来の危惧に対して自動車の燃費向上は今後も大きな課題であることは確かである。

2章でエンジンの損失について述べたが、摺動部や回転部の摩擦損失は加工精度の向上や表面処理、さらに潤滑方法の見直しと潤滑剤の改良などで、着実に低減していくであろう。また、熱損失の低減としては圧縮比の向上を図るのが有効であるが、ノッキングの問題が横たわっている。燃料のオクタン価向上あるいは耐ノック剤の開発が望まれるが、燃焼方式の改善もまだ残っていると思われる。困難な取り組みにはなるが、地道に進めていかなければならない。

エンジン全体構造の見直しもあるかもしれない。過去には全く構造の異なるロータリ・エンジンも開発されたが、レシプロエンジンを凌駕するには至らなかった。ピストンのシールを考えると、現状のレシプロエンジン形式が最も良いということになるのだろう。ただし、レシプロエンジン形式を前提としても、現在のピストン系の機構にこだわることはない。フリーピストン形式も考えられる。フリーピストン形式としてピストンの動きで直接発電する方式も考えられている。

いずれにせよ、すでに飽和したかのように言われるエンジン技術ではあるが、まだまだ掘り起こせば未知の領域が出てくるように思われる。さらなる挑戦を行っていきたい。

参考文献

- 1) 富塚清：内燃機関の歴史, (1969), 305, 三栄書房
- 2) 澤田大作：日本機械学会講習会教材, No.97-88(1997), 57-64
- 3) トヨタ自動車広報資料(1996.8)
(2001年10月5日原稿受付)

著者紹介



斎藤昭則 Akinori Saito

生年：1948年。

所属：機械1部。

分野：燃料噴射，エンジン燃焼。

学会等：日本機械学会，自動車技術会，日本液体微粒化学会，計測制御学会会員。

1996 Award for research on Automotive Lubricants (SAE) 受賞。

1997年 自動車技術会技術開発賞受賞。

1998年 日本機械学会エンジンシステム部門技術功績賞受賞。

工学博士。