

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 7 No. 4 2017

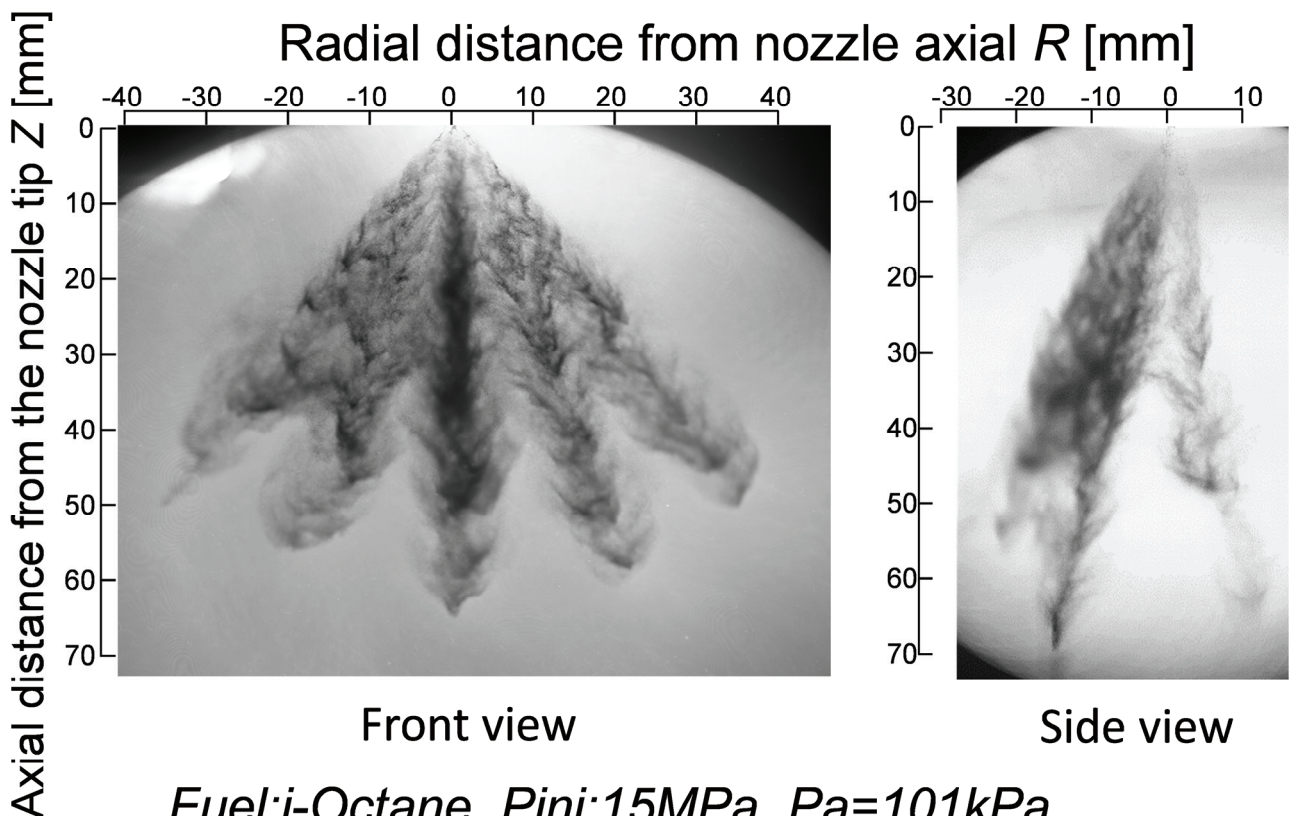
JSAE エンジンレビュー

特集：エンジンの燃料噴射（ガソリンエンジン）

- ・「エンジンの燃料噴射（ガソリンエンジン）」特集号について
- ・ガソリン燃料噴霧と燃焼
- ・ガソリンエンジン用燃料噴射装置の現状と将来

連載：

- ・ガソリン筒内噴射の開発史（連載第 4 回）混沌とした時代を抜けて電子制御式筒内噴射の実用化



Fuel: i-Octane, P_{inj} : 15MPa, P_a : 101kPa
 Q_{inj} : 8mg, T_{inj} : 1.1ms, T_d : 1.0ms



公益社団法人 **自動車技術会**

コラム: ● 技術者に聞いてもらいたい本田宗一郎氏のことば: The words of Mr. Soichiro Honda for engineers 野口 勝三(本田技術研究所) Katsumi NOGUCHI (HONDA R&D Co.,Ltd.)	1
特集: エンジンの燃料噴射(ガソリンエンジン) ・「エンジンの燃料噴射(ガソリンエンジン)」特集号について A special number on fuel injection in engines (SI engine) 小酒 英範 (東京工業大学) Hidenori KOSAKA (Tokyo Institute of Technology) ・ガソリン燃料噴霧と燃焼 Spray feature and combustion in S.I Engines 松村 恵理子 (同志社大学) Eriko MATSUMURA (Doshisha University)	2 3
<p>この記事には、PDF 上で Flash Player を用いて再生される動画が埋め込まれております。 現在動作が確認されている環境は以下です。</p> <ul style="list-style-type: none">・Windows (7,8,10), macOS(Sierra)・Adobe Reader Ver. 10.1.5 以前のもの・Adobe Reader Ver. 10.1.5 以降+Flash Player NPAPI 版(プラグイン版) <p>上記環境であっても、お使いの機器及びブラウザ環境によっては、再生されない場合があります。 動画再生に関するご質問は受けかねますのでご了承ください。</p>	
・ガソリンエンジン用燃料噴射装置の現状と将来 Current status and the future of the fuel injection equipment for the gasoline engine 山下 幸宏 (株式会社デンソー) Yukihiro YAMASHITA (DENSO CORPORATION)	7
<連載企画>	
・ガソリン筒内噴射の開発史(連載第 4 回) 混沌とした時代を抜けて電子制御式筒内噴射の実用化 The Technical History of Gasoline Direct Injection After the Chaos Age, The Emergence and Commercial Viability Practical Realization of Electronic Direct Fuel Injection -The 4th serial article- 調 尚孝 (株式会社 SOKEN) Naotaka SHIRABE (SOKEN,INC.)	11

■ JSAE エンジンレビュー編集委員会

委員長: 飯田 訓正 (慶應義塾大学)
副委員長: 村中 重夫 (元日産自動車)
幹事: 飯島 晃良 (日本大学)
委員: 遠藤 浩之 (三菱重工業エンジン&ターボチャージャ)
大西 浩二 (日立オートモティブシステムズ)
金子 タカシ (JXTG エネルギー)
菊池 勉 (日産自動車)
小池 誠 (豊田中央研究所)
小酒 英範 (東京工業大学)
清水 健一 (元産業技術総合研究所)
下田 正敏 (日野自動車)
西川 雅浩 (堀場製作所)
野口 勝三 (本田技術研究所)
平井 洋 (日本自動車研究所)
山口 恭平 (自動車技術総合機構)
山崎 敏司 (編集)

発行所: 公益社団法人 自動車技術会
発行日: 2017年6月10日
発行人: 石山 拓二 (京都大学)
〒102-0076 東京都千代田区五番町 10-2
電話: 03-3262-8211

ENGINE REVIEW
SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN
Vol. 7 No. 4 2017

●コラム

技術者に聞いてもらいたい本田宗一郎氏のことば

The words of Mr. Soichiro Honda for engineers



野口 勝三

Katsumi NOGUCHI

(株)本田技術研究所

HONDA R&D Co.,Ltd.

このコラムを読んでいる方で、本田宗一郎と言う名を耳にしたことが無い方は、居ないだろう。世界中で多くの方に知られている、名ではないだろうか？本田さんは、1906年静岡県で生まれ、1946年本田技術研究所を設立、原動機付自転車バタバタを創った。1964年ドイツGPでF1初参戦し、翌年メキシコGPで優勝。1971年CVCCエンジン概要を発表し、翌年にマスキー法を世界で初めてクリアした。世界各国から評価され、多数の受章し1989年日本人初のアメリカ自動車殿堂入りを果たした。優れた技術者であり経営者として、現在に多くの功績を残している。本コラムでは、その中から技術者に役立つと思われる、ことばをいくつか紹介する。

■理論とアイデアと時間の尊重

理論に基づく各人のアイデア、即ち創意工夫を尊重するところに進歩発展がある。人間の価値は物事を理論的に考え、合理的に処理する知恵と能力に比例する。ただし、どのように優れた工夫や発明でも、必要な時に提供せられなければ何の価値もない。息を引き取ってから到着したのでは、如何なる名医も藪医者に劣る。アイデアと時間は絶対的なもので、切り離すことはできないものだ。そして創意発明は、苦勞し考え抜いた末の、せっぱつまった苦しまぎれの知恵であると述べている。本田さんは寝る時、筆記用具を枕元に置いて、夜中に思いついたアイデアを起きて書きとめていた。

■気づくことが先決条件

技術があれば何でも解決できるわけではない。技術以前に気づくということが必要になる。技術者は沢山いるが、なかなか解決できない事がある。気付かないからだ。正しい知恵を出すには？見学と観学ということばを挙げている。目で見ただけの見学ではだめ、見学でなく観察する見方、つまり観学でなければならない。本当の見方というものは、観察することによってのみ、正しい知恵が出てくる。今も、現場・現物・現実の三現主義が継承されている。現場に行き、現物をよく観て、現実を知れば、アイデアや解決策のヒントが見つかるのである。

■やってみもせんで

技術というのは不思議なもので、すんなりと理論どおりのものができる場合と、ちょっとしたプロセスの違いで予期せぬ結果が出る場合とがある。長年やっていると、「何か、あるな」予感がひらめいて、さらにそれを実証したくなるものだ。「ああやってもだめなら、こうやってみる」ということになる。それがまた、新しい貴重な体験となって蓄積されてゆくのである。「それは、ムリでしょう」とか、「おそらくダメでしょう」といった言葉は、「やってみもせんで、何をいっとるか」という一喝で消し飛んでしまう。一見無理なものが、ああやってもだめならこうやってみるという粘りの前に可能性を持ち始めてくるのである。また成功とは99%の失敗に支えられた1%である。(失敗を恐れるな)とも言っている。失敗はしてもよい。だが、二度と同じ原因で失敗しないように、反省をしなければならない。それが貴重な経験となり知恵となり成功に達するのだ。

今の時代も変わらない、物事の本質を言い得ていることばが、数多く残されている。本田さんは気さくで、人柄から湧き出る雰囲気、周囲の人を魅了した。その魅力は、なぜか？本田さんは、考え方や有るべき姿などの、素晴らしい理念が最初に有って、独自の技術でそれを実行し、結果を出して実証した。それゆえ信頼され、言っていることばに説得力が出る。いつも大きな夢を持ち困難に挑戦し、周りの人に夢を与えることばをかける。そして逆境に陥った時にでも、明るく笑い飛ばすことを忘れない。だから、周囲の人を惹きつけたのでは、無いだろうか。この様な技術者に成りたいものである。

<参考文献>

TOP TALKS 本田技研工業

「エンジンの燃料噴射(ガソリンエンジン)」特集号について

A special number on fuel injection in engines (SI engine)

小酒英範

Hidenori KOSAKA

東京工業大学

Tokyo Institute of Technology

エンジンにおける燃料噴射は、燃焼排気性能の改善、排気後処理装置の性能向上、燃料多様化への対応などの技術課題に関連して、その重要性が増している。燃料噴射装置は単なる燃料供給装置ではなく、電子制御式燃料噴射装置の高い制御性を生かした燃焼室内の燃料分布のきめ細かい制御による燃焼改善に加えて、エンジンと排気後処理装置の協調駆動なども担っており、エンジンシステム全体の性能を支配するキーデバイスとなっている。

前号ではディーゼルエンジンにおける燃料噴射について、燃料噴射と燃焼の関係、現在広く用いられているコモンレール式燃料噴射装置のコンセプトと開発経緯、最新のコモンレール式燃料噴射装置の現状と将来技術の展望について、それぞれ専門家による解説記事を掲載した。今号では、ガソリンエンジンにおける燃料噴射を取り上げる。

ガソリンエンジンにおける燃料噴射は、ポート噴射と筒内噴射の2つに大別されるが、それぞれにおいて要求される機能が異なる。まず、これらの求められる燃料噴射と燃料噴霧の特性を、燃焼コンセプトと関連付けて、同志社大学の松村恵理子氏に解説いただいた。次に、ガソリンエンジンにおける燃料噴射装置の現状と将来展望について、株式会社デンソーの山下幸宏氏に解説いただいた。また、前号に引き続き、株式会社SOKENの調尚孝氏には連載記事「ガソリン筒内噴射の開発史」をご執筆頂いた。これらの記事を通して、ガソリンエンジンにおける燃料噴射技術の歴史と将来展望を俯瞰する一助となれば幸いです。

ガソリン燃料噴霧と燃焼

Spray feature and combustion in S.I Engines

松村 恵理子

Eriko MATSUMURA

同志社大学

Doshisha University

この記事には、PDF 上で Flash Player を用いて再生される動画が埋め込まれております。現在動作が確認されている環境は以下です。
 ・Windows (7,8,10), macOS(Sierra)
 ・Adobe Reader Ver. 10.1.5 以前のもの
 ・Adobe Reader Ver. 10.1.5 以降+Flash Player NPAPI 版(プラグイン版)
 上記環境であっても、お使いの機器及びブラウザ環境によっては、再生されない場合があります。動画再生に関するご質問は受けかねますのでご了承ください。

1 はじめに

自動車用ガソリンエンジンの燃料供給系は、その時代のニーズや環境の変化に対応して、多くの研究開発により技術革新がなされてきた。日本においては非常に厳しい排ガス規制値が段階的に引き下げられている。このような背景から排出ガス低減に対して電子式燃料噴射システムによる空燃比制御を含めた噴射系改良が積極的に行われ、ポート噴射式(MPI; Multi Point Injection, 以後、MPI と記す)ガソリンエンジンが電子制御燃料噴射システムの主流であった。この燃料噴射装置、電子制御技術に加えて触媒システムの進歩とともに、排出ガス規制に対応した技術が確立され、それに伴い、再びエンジン出力向上と燃費向上に対応した技術開発が盛んに行われるようになった。その一つとして 1996 年には、日本の自動車会社から世界に先駆けて筒内噴射式(DISI; Direct Injection Spark Ignition, 以後、DISI と記す)ガソリンエンジンが実用化され^{(1),(2)}、直噴の特長である燃料の気化潜熱による吸入空気冷却により体積効率が 5~6% 向上し、高出力化と高圧縮比化による低燃費化を実現している。このように自動車用ガソリンエンジンの燃料供給系は、その時代のニーズや環境変化に対応して、MPI から DISI へと変わりつつある。本稿では、MPI および DISI に用いられる燃料噴霧の特性について解説するとともに、筒内噴射式のディーゼル噴霧との違いについても解説する。

2 ガソリンエンジンにおける燃料噴霧の特性

2.1. MPI に求められる噴霧特性

図 1 に MPI の一般的なシステム構成⁽³⁾を示す。また図 2 に吸気ポート内における噴霧レイアウト⁽⁴⁾の一例を示す。噴射圧力は約 300kPa である。MPI 用燃料噴射弁は、吸気バルブ上流の各吸気ポートに搭載されており吸気ポート内に燃料が供給される。そのため始動時における燃料噴射量の増量・暖機過程での吸気ポート壁面への燃料付着が空燃比制御性に悪影響し、三元触媒が活性温度に到達するまでに発生する未燃炭化水素(HC)の排出が課題となる。また低温、低負荷時にはポート内に付着する燃料液膜量が多くなるため過渡運転時における性能も課題となる。ポート壁面への燃料付着の低減手段として、燃料噴射弁から噴射する燃料の微粒化が有効である。図 3 に MPI 用燃料噴射弁の変遷を示す⁽⁴⁾。燃料の微粒化手段として、噴孔部から噴射された燃料に空気を衝突させるエアアシスト噴射弁^{(5),(6)}、噴射弁の本体に加熱部を設けて加熱した燃料を噴射する加熱燃料噴射弁^{(7),(8)}が量産化されており、現在では噴孔数を増やして噴孔径を小さくする多噴孔型噴射弁が主流となっている。12 孔噴射弁の噴霧形状を図 4 に示す。2 方向に噴射される噴霧形状である。噴孔数が多くなるほど噴霧分散性が高く良好な微粒化が得られる一方、噴霧間干渉による微粒化の悪化、噴霧角の広角化によるポート側壁への燃料付着の増加が懸念となり噴孔数の増加には限界がある。このように MPI においては、ポート壁面への燃料付着を低減可能な微粒化特性が重要となる。

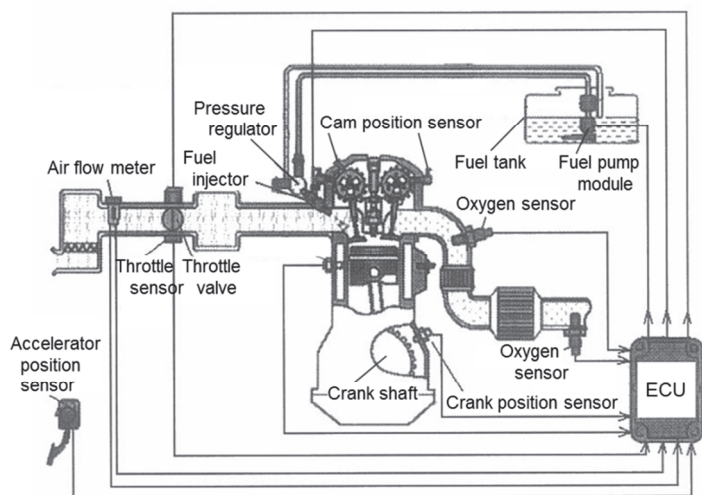


Fig 1 Schematic diagram of multi point injection system (MPI)⁽¹⁾

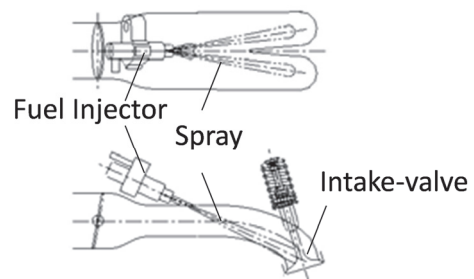


Fig 2 Spray image inside the intake port

Year	1986 ~	1989 ~	1996 ~	1997 ~	1999 ~	2002 ~
Nozzle type	Pintle 1-Jet	1 hole 2-Jet	4 holes 2-Jet	4 holes 2-Jet Air assist	12 holes 2-Jet Straight nozzle	12 holes 2-Jet Taper nozzle
Atomization SMD(μm)	250μm					50μm

Fig 3 History of atomization technology⁽⁴⁾

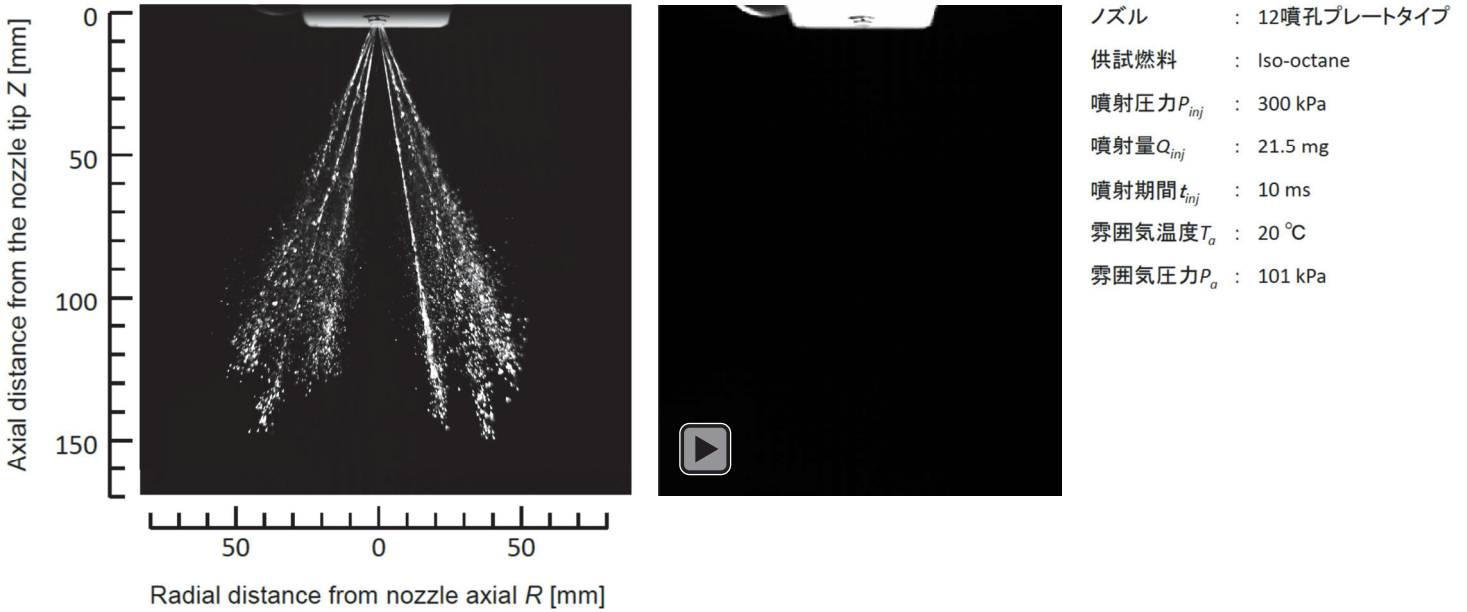


Fig 4 Spray Shape 【動画: 図をクリックすると動画が再生されます】

2.2. DISI に求められる噴霧特性

(1) DISI の燃焼形態

低燃費、低排出ガス、機関性能向上が両立する基盤技術として注目されている DISI は、燃焼室内に直接燃料を噴射する混合気形成方法により「成層燃焼」と「均質燃焼」の 2 種類の燃焼形態に分けられる。具体的に「成層燃焼」は圧縮行程後半に燃料を噴射し筒内全体としては空気の多い超希薄状態でありながら、点火プラグ付近に点火可能な濃い混合気を集め、安定した超希薄燃焼を実現し低燃費が可能である。また吸気を絞って空気量を減らす必要がなくなるためポンピング損失や冷却損失が減り、空気サイクルに近づくため熱効率が向上する。「均質燃焼」は吸気行程に燃料を噴射し燃料の酸化潜熱による吸入空気冷却により多くの空気を吸入することが可能である。これにより体積効率が増加し、さらに点火時期における作動ガス温度が下がリノックが発生しにくくなるため高圧縮比化が可能となり高出力・高トルク化が実現できる⁽⁹⁾。1996 年に日本の自動車会社より世界に先駆け実用化された直噴ガソリンエンジンにおいてはこれら 2 つの燃焼形態のうち、部分負荷運転領域においては「成層燃焼」、高負荷および高速運転領域においては「均質燃焼」というように燃焼形態を切り替えることでガソリンエンジンとしての比出力の高さを確保しながら部分負荷の燃費を大幅に改善できる優位な点がある。しかし、超希薄燃焼としての「成層燃焼」においては、従来のガソリン機関で用いられてきた三元触媒は利用できず、NOx 排出量が増加するため、2003 年には「成層燃焼」をほとんど含まない「均質燃焼」の筒内直噴ガソリンエンジンが実用化された⁽¹⁰⁾。これは「成層燃焼」の燃費改善には至らないが三元触媒を利用でき、高出力でありながら前述のようにポート噴射ガソリンエンジンに比べてノックが改善されるため燃費も改善することができる。過給および小排気量化により大幅な燃費改善が期待できる。さらに冷間始動時では精密な空燃比制御と成層混合気化により燃料噴射量を少なくする事ができるため触媒暖気前の HC 低減が可能である。このように直噴ガソリンエンジンは「成層燃焼」と「均質燃焼」という異質な混合気形成・燃焼形態を同一の構成で運転状況により切り替え、ガソリンエンジンとしての機関性能を低下させることなく燃費向上いわゆる CO₂ 排出量を大幅に削減しエミッション低減を両立することができる。

(2) 成層燃焼に対する噴射系への要求

次世代の内燃機関として非常に有望視されている筒内直噴ガソリンエンジンであるが歴史をさかのぼると 50 年以上も前から研究がなされていた⁽¹¹⁾⁻⁽¹⁷⁾にもかかわらず、広範囲な運転条件下において「成層混合気」の形成が特に困難であり実用化が難しい手法であった。「成層燃焼」の成立には圧縮行程中に燃料を噴射し点火までの短い時間内で混合気形成を実現させる必要があり、高い燃料噴射圧力、噴射率ダイナミックレンジの拡大、優れた微粒化特性が噴射系に要求される。2000 年に量産化されたエンジン⁽¹⁸⁾ではスリットノズルを使用し、噴射圧力は 12MPa と MPI の約 300kPa と比較して非常に高い設定である。図 5 は成層混合気形成法を大まかに三つに分類しており、それぞれにおいて燃料噴射弁の搭載位置、ピストン形状、気流の種類が異なる。混合気形成を大別すれば、燃料の蒸発と空気の混合であるが、成層燃焼の場合はこれに加えて点火プラグ近傍への混合気の配置が最も重要である。

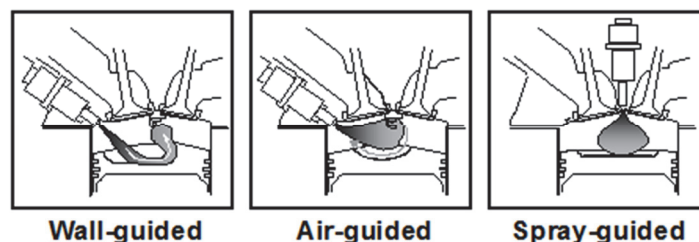


Fig 5 Comparison of DISI Stratified charge combustion principal concept

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 7 No. 4 2017

“Spray-guided”方式は、ガス流動やピストン形状に頼らず噴霧自身の作り出す流れと空気の巻き込みによって混合気クラウドを形成し、その一端に点火する方法⁽¹⁹⁾である。噴射終了から点火までの期間が短いめすばやく噴霧を蒸発させ混合気を点火プラグ周りに配置し継続させることが必要であり非常に難しい混合気形成方法であるといえる。回転や負荷に対する筒内流動の違いやサイクル間の気流変動に影響を受けない安定した混合気形成が必要であり、そのロバスト性の確保が難しく、燃焼変動の燃料噴霧への依存度が高くなる。

“Air-guided”方式は、吸気ポートで作り出す空気流動を利用して混合気を形成するため複雑なピストン形状を要しないが、負荷や回転に応じた速さで混合気クラウドを点火プラグに導く必要があるため気流の精密制御が重要になる。

“Wall-guided”方式は、ピストン頂面に形成したキャビティが噴射した燃料を点火プラグ近傍まで導き、混合気クラウドを形成する方法である。吸気ポートで作り出すスワールやタンブル気流を併用し混合気形成を行う場合もある。噴射時期を変えることで、噴霧がピストンに衝突してから点火プラグに到達するまでの距離と時間を最適化することができ、安定した混合気形成が可能である。しかし、エンジン回転数が高くなるほど筒内の空気流動は強くなり安定した成層混合気を形成するためにはより強い貫徹力が求められ、高負荷運転領域においてはより優れた微粒化特性が必要である。また、冷間時においては噴霧がピストンに衝突することによる HC、スモーク排出を抑制するために噴射時期が限定される。

「成層燃焼」を成立させるため、噴霧に要求される特性をまとめると以下の通りである。

- (1) 強い貫徹力：噴霧自身が混合気を形成しつつ噴射弁から点火栓へ到達する必要性。
- (2) 高分散：過濃混合気の抑制と混合気内の均質化。空気とのせん断面積を多くとり、エントレインメントの促進が必要。
- (3) 高微粒化：圧縮行程中に燃料を噴射し点火までの短い時間内で混合気形成を促進。

圧縮行程に噴射するという意味では、ディーゼル噴霧も同じであるが、噴射時期における筒内圧力はガソリン噴霧よりもはるかに高く、噴射圧力も約 200MPa と DISI の約 10 倍の設定である。また拡散燃焼であるディーゼルエンジンでは混合気形成過程が燃料の空間分布、着火、燃焼、排気全てを制御している点で燃料の噴霧特性、噴射量の精密な制御が必要となる。

(3) 均質燃焼に対する噴射系への要求

「均質燃焼」は吸気行程に燃料を噴射するため、均質な混合気形成のためには「成層燃焼」と同様に優れた微粒化特性が必要である。筒内に噴射された燃料が限られた期間で混合気を形成する DISI では噴霧の微粒化が優れていることが MPI に比べて非常に重要であり蒸発の速さから考えれば微粒化特性の指標となるザウタ平均粒径 SMD(Sauter Mean Diameter)は $20\mu\text{m}$ 程度は必要と考えられている^{(20),(21)}。MPI 用噴霧の SMD が図 3 に示すように $50\mu\text{m}$ であることを考えると非常に高い微粒化特性が必要である。微粒化には噴射圧力の影響が大きく MPI に比べて高い噴射圧力の設定となっている。また、特に高負荷において、全噴射量を吸気 TDC から BDC までの期間に噴射しなければならず、MPI に比べて 3 倍以上の噴射率が必要である一方、アイドルのような少量燃料の噴射が必要な運転条件にも対応可能な噴射率のダイナミックレンジ拡大が必要である。ディーゼルエンジンのように噴射圧力を大幅に変えることのない DISI では噴射圧力 4MPa から約 20MPa の範囲で必要なダイナミックレンジと微粒化特性を確保している。近年、量産化されたエンジンではマルチホールノズルが主に使用され、噴射圧力は最大で 20MPa の設定である。インジェクタがシリンダーヘッドの側面に搭載されている(サイド噴射方式)6 孔ホールノズルの噴霧形状を 図 6 に示す。吸気行程中に筒内に燃料噴射する均質燃焼においては、スワール流やタンブル流といった筒内の旋回流動を利用して均質な混合気を形成する。噴霧のレイアウトは側面視に比べて正面視における燃料分散幅がより広い噴霧レイアウトになっている。これは、成層燃焼のように点火プラグ周辺への安定した混合気配置の必要性はないものの、吸気行程中の噴射であるため PM および PM 粒子数やオイル希釈の発生起因となる筒内壁面における燃料液膜形成(筒内ウェット)を低減するため、インテイクバルブのリフトタイミングやリフト量、ピストンの位置、シリンダーライナーまでの距離を考慮して最適な噴射時期の選択と適切な貫徹力を有する噴霧形状および噴霧レイアウトにする必要があるためである。参考に、9 孔ホールノズルのディーゼル噴霧(底面からの撮影)を図 7 に示す。火花点火による火炎伝播であるガソリン燃焼に対して拡散燃焼のディーゼルエンジンでは筒内のスワール流で噴霧を旋回させ筒内の空気を多く取り込みことが必要であるためシリンダーヘッドの中央に搭載されたインジェクタから噴射される噴霧(図 7 では 9 つの噴霧)が等間隔に均等に配置されており、先に説明した DISI 用の噴霧レイアウトとは全く異なる(図 8, 9)。

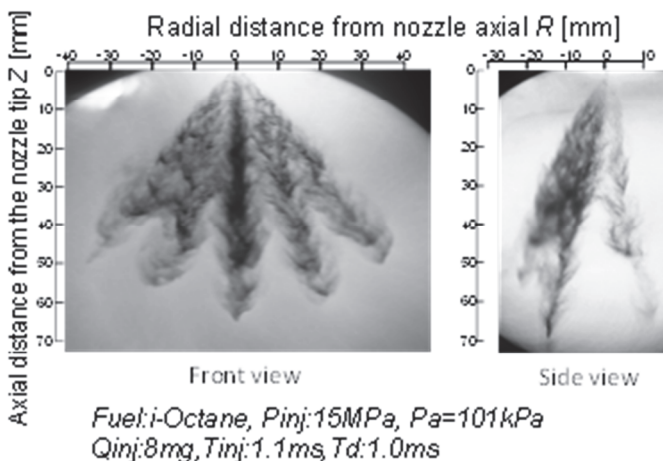


Fig 6 Spray Shape (DISI)

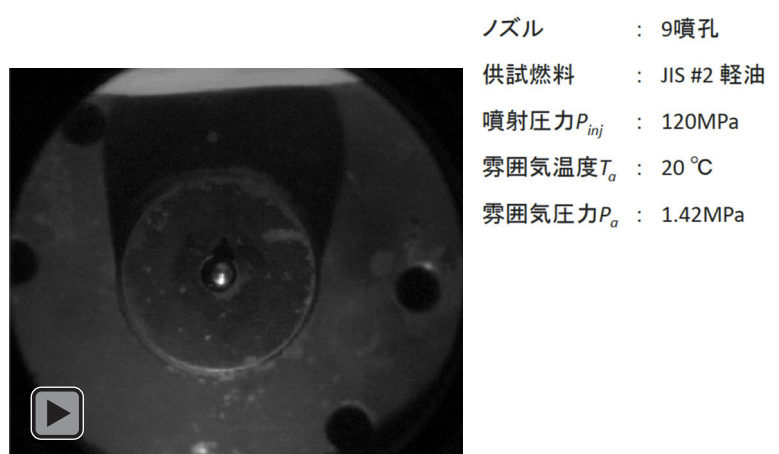
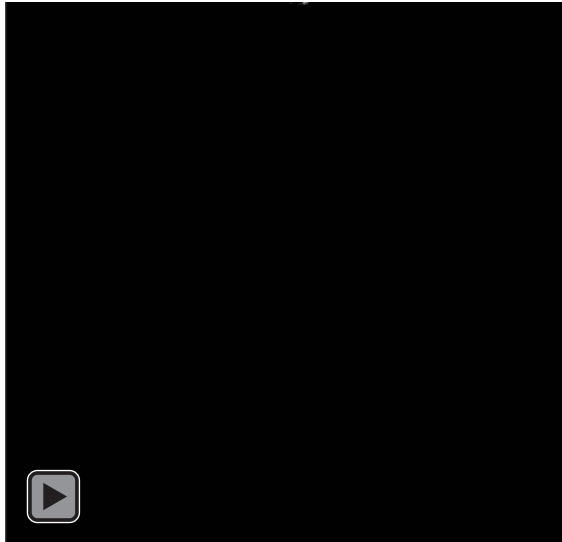
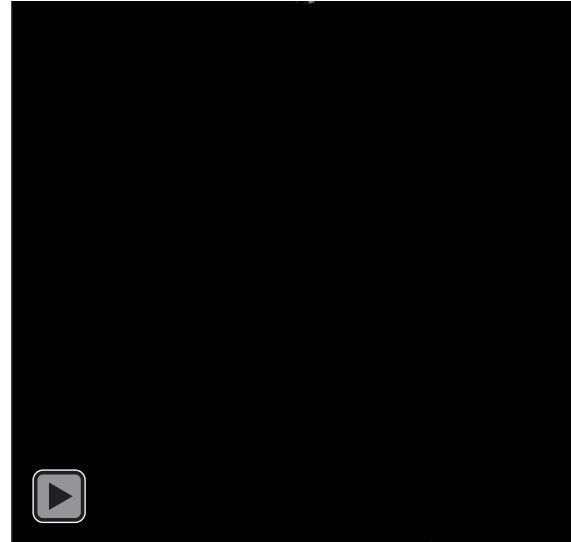


Fig 7 Spray Shape (Diesel) 【動画: 図をクリックすると動画が再生されます】

Fig 8 Spray Shape (DISI) 噴射圧力 $P_{inj}=4\text{MPa}$

【動画:図をクリックすると動画が再生されます】

Fig 9 Spray Shape (DISI) 噴射圧力 $P_{inj}=15\text{MPa}$

【動画:図をクリックすると動画が再生されます】

3 おわりに

ガソリン噴霧において、MPI および DISI どちらも優れた微粒化特性が必要であるが、DISI については燃焼形態に応じた適切な貫徹力と分散性が必要である。また近年の筒内ウェットを起因とする PM 粒子数やオイル希釈に対応するためには更なる微粒化技術が求められている。その 1 つに高燃圧化も検討されているようであり、ディーゼル噴霧との垣根が低くなっているように感じられる。さらに、今後の熱効率向上に向けたスーパーリーンバーンのように超希薄燃焼の実現のためには、火炎伝播を促進させる筒内の乱れと混合気形成過程の詳細を調査する必要があると考えている。

【参考文献】

- (1) 岩本裕彦, “筒内ガソリン噴射エンジンの開発”, 三菱自動車テクニカルレビュー, No.9, pp.21-31, (1997)
- (2) 水野宏幸, 他 4 名, “D-4 エンジンの制御システム開発”, トヨタテクニカルレビュー, Vol.47, No.1, pp.30-35, (1997)
- (3) 自動車技術会, “自動車技術ハンドブック”.[4]設計(パワートレイン)編, p81, (2005)
- (4) 松尾哲治, 他 2 名, “ガソリンエンジン用インジェクタの微粒化開発”, デンソーテクニカルレビュー, Vol.11, No.1, pp.67-73, (2006)
- (5) Sugimoto, T., Takeda, K., Yoshizaki, H., “Toyota Air-Mix Type Two-Hole Injector for 4-Valve Engines”, SAE Paper, 912351, (1991)
- (6) H. Sean Hilbert, et al., “The Effects of Small Fuel Droplets on Cold Engine Emissions Using Ford’s Air Forced Injection System”, SAE Paper, 952479, 1995)
- (7) Frank Zimmermann, et al., “An Internally Heated Tip Injector to Reduce HC Emissions During Cold-Start”, SAE Paper, 1999-01-0792, (1999)
- (8) Boyke Richter, et al., “Influence of Atomization Quality on Mixture Formation, Combustion and Emissions in a MPI-Engine Under Cold-Start Conditions, Part I”, SAE Paper, 2002-01-2807, (2002)
- (9) 小池誠, “直噴ガソリンエンジンにおける混合気形成と燃焼”, 豊田中央研究所 R&D レビュー, Vol.33, No.4, pp.3-14, (1998)
- (10) Sadakane, S., Sugiyama, M., Kishi, H., Abe, S., Harada, J., Sonoda, Y., “Development of a New V-6 High Performance Stoichiometric Gasoline Direct Injection Engine”, SAE Paper 2005-01-1152, (2005)
- (11) Davis, C.W., Barber, E.M., Mitchell, E., “Fuel injection and positive ignition – A basis for improved efficiency and economy”, SAE Trans, Vol.69, pp.120-131, (1961)
- (12) Witzky, J.E., Clark, J. M., “Study of the swirl stratified combustion principle”, SAE 660092, (1966)
- (13) Bishop, I.N., Simko, A., “Ford stratified-charge engine has fuel-injection system and other features that provide high thermal efficiency using gasoline”, SAE 680041, (1968)
- (14) Simko, A., Choma, M.A., Repko, L.L., “Exhaust emission control by the Ford programmed combustion process – PROCO”, SAE 720052, (1972)
- (15) Miyake, M., “Developing a new stratified-charge combustion system with fuel injection for reducing exhaust emissions in small farm and industrial engines”, SAE 720196, (1972)
- (16) Alperstein, M., Schafer, G.H., Villforth, F.J., “Texaco’s stratified charge engine – multifuel, efficient, clean, and practical”, SAE 740563, (1974)
- (17) Schapertons, H., Emmenthal, K.-D., Grbe, H.-J., Oppermann, W., “VW’ gasoline direct injection (GDI) research engine”, SAE 910054, (1991)
- (18) Takeda, K., Sugimoto, T., Tsuchiya, T., Ogawa, M., Ueda, S., Yoneshige, K., “Slit Nozzle Injector for A New Concept of Direct Injection SI Gasoline Engine”, SAE Paper 2000-01-1902, (2000)
- (19) Karl, G., Kemmler, R., Bargende, M., Abthoff, J., “Analysis of a direct-injected gasoline engine”, SAE Paper 970624, (1997)
- (20) Dodge, L. G., “Fuel Preparation Requirements for Direct-Injected Spark-Ignition Engines”, SAE Paper No.962015 (1996)
- (21) Tomoda, T., “Development of Direct Injection Gasoline Engine – Study of Stratified Mixture Formation”, SAE Paper No. 970539(1997)

ガソリンエンジン用燃料噴射装置の現状と将来

Current status and the future of the fuel injection equipment for the gasoline engine

山下 幸宏

Yukihiro YAMASHITA

株式会社デンソー

DENSO CORPORATION

1 はじめに

2000年代から強化された燃費・CO₂規制に対応するため、ガソリンエンジン用燃料噴射装置は変化してきた。長年、吸気ポートに燃料を噴射するポート噴射式が主流であったが、先進国では急速にエンジンシリンダ内に直接燃料を供給する筒内噴射式が増加してきている。燃料噴射装置に求められる性能要求も上がってきており、今後も燃料噴射装置の進化は進むと考えている。本項ではガソリンエンジン用燃料噴射装置の現状と将来を展望する。

2 ガソリンエンジン用燃料噴射装置のこれまでと現状

2.1. ポート噴射式燃料噴射装置

1970年代初めに電子式エンジン制御装置と共にポート噴射式燃料噴射装置が登場し、現在まで主流となっている。(図1) ポート噴射式燃料噴射装置は燃料タンクに設置された燃料ポンプにより、燃料を圧送し、吸気ポートに設置されたインジェクタに燃料を供給している。インジェクタはエンジン制御ユニットからの指令により、燃料を調量し、エンジンに燃料を供給している。燃料ポンプは燃料タンク内に配置されるインタンク式が主流である。燃料の圧力はプレッシャレギュレータにより、一定の圧力に保持されている。(図2)

導入当初から80年代半ばまで、インジェクタの噴射ノズルはピントル式であり、燃料噴射方向も1方向の1ジェットであった。80年代後半から2000年代前半の排出ガス規制強化に対応するため、エンジン冷機時に排出される未燃ガスを低減させる必要があった。80年代半ばには吸気通路への燃料付着を低減させるため、インジェクタの噴射ノズルは単孔式となり、燃料噴射方向も2弁式吸気弁のそれぞれに向かう2ジェットが導入された。更に厳しい北米LEV(Low Emission Vehicle)規制に対応するためには、更なる燃料の蒸発促進が必要であり、燃料の微粒化を促進させるため、噴射ノズルは多孔式が主流となっていった。

現在のポート噴射式インジェクタの駆動体はソレノイド、噴射ノズルは多孔式が一般的である。多孔式は導入当初は4孔であったがその後、18孔までのバリエーションが存在しており、噴射ノズルの孔数を増加させることにより、燃料の微粒化度を高めている。燃料の蒸発を促進し、吸気通路への燃料の付着を低減し、均質混合気を生成することにより、始動から触媒が暖機されるまでのエンジンの排出ガス中の有害成分を抑制している。^{1),2)}

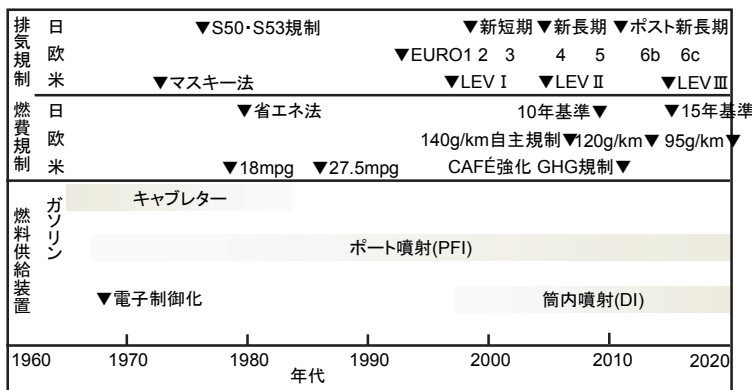


Fig 1 排気、燃費規制と燃料噴射系製品の変遷

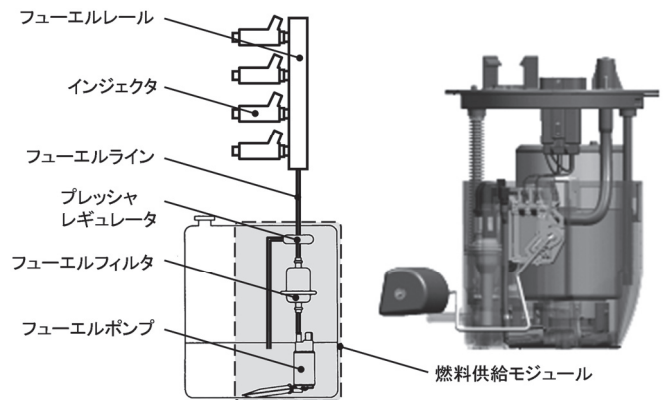


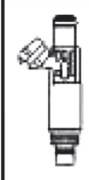


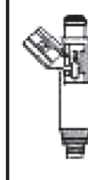



Fig 2 ポート噴射システムとモジュール製品

また、最近では1気筒に2本のインジェクタを備えるポート噴射式燃料噴射装置も登場している。2本のインジェクタを吸気弁に近い位置に設置し、吸気通路への燃料付着を減らし、吸気弁が開弁しているタイミングで燃料を噴射することで、筒内に直接入る燃料を増加させ、筒内で気化する燃料を増やしている。ノッキングを抑制しつつ、圧縮比を上げる筒内噴射エンジンと同様な効果を狙っている。1気筒に2本のインジェクタの採用は軽自動車や小型エンジンを搭載する小型車に採用が増えている。(表1)

燃料ポンプは燃料フィルタ、レベルゲージ等と一体化され、燃料ポンプモジュール化されてきている。ポンプはウェスコ式ポンプが一般的には使用されるが大排気量エンジンでE85以上のエタノール燃料対応エンジン等で高流量が必要な場合、ギア式ポンプが使われることもある。燃料圧力は当初、0.2MPa程度であったが、燃料圧力を燃料の微粒化を促進する力に変換できるように0.3MPaから0.5MPaとなってきた。また、従来はインジェクタに燃料を一定量圧送し、使用されなかった燃料は燃料タンクに戻していたが、最近は燃費向上を図り、消費電力を抑制するためにインジェクタで使用する燃料量に応じて、燃料圧力や燃料量を制御できるブラシレスモータと燃圧センサを組み合わせて採用することが増加している。

Table 1 ポート噴射インジェクタの変遷

	A-type	B-type	C-type			UC	a-UC
	('86~)	('89~)	('96~)	('97~)	('99~)	('02~)	('10~)
外観							
重量	102	79	42			34	27g
ノズル形式 噴霧形態	ピントル 1-jet	単孔 2-Jet	4孔 2-Jet	4孔 2-Jet	4孔 (エアアシスト) 2-Jet	12孔 (ストレート) 2-Jet	18孔 (ターハ) 1-Jet
噴霧粒径 SMD[μm]	250					50	30

2.2. 筒内噴射式燃料噴射装置

筒内噴射式燃料噴射装置は筒内噴射インジェクタ、高圧ポンプ(図3)、低圧の燃料ポンプモジュール等で構成され、低圧の燃料ポンプで圧送された燃料はカムで駆動される高圧ポンプにより、高圧化され、筒内噴射インジェクタに供給される。



Fig 3 高圧ポンプ

1990年代半ばに筒内に直接、燃料を供給する筒内噴射式燃料装置を採用した筒内噴射エンジンが量産化された。(図1)当時の筒内噴射エンジンはリーン燃焼を採用していた。導入当初、燃料圧力は6MPa程度であり、筒内噴射インジェクタの噴射ノズルはスワール式が採用されていた。³⁾その後、排出ガス規制強化もあり、リーン燃焼の筒内噴射エンジンは大きく広がらなかった。

2000年代前半に登場した過給ダウンサイジングエンジンでは理論空燃比の均質混合気で燃焼させるストイキ燃焼を採用し、同時に小排気量化・少気筒化することにより、燃費性能を向上させた。小排気量のままでは出力が低下するため、過給器により、出力を回復させ、燃費と性能の両立を図った。通常、過給エンジンはノッキングが発生するため、圧縮比を自然吸気エンジンより小さくする必要があった。しかし、筒内噴射エンジンの採用により、自然吸気エンジンに近い圧縮比とすることができた。これは筒内で燃料が気化することにより、混合気を冷却し、ノッキングを抑制することができるため

ある。この効果を利用するため、過給ダウンサイジングエンジンへの筒内噴射エンジン採用が広がった。

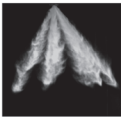
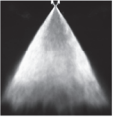
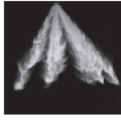

また、厳しい排出ガス規制を満足させるため、冷間始動後、点火時期を大きく遅角することにより、排出ガス温度を高め、触媒を早く暖機させる必要があった。しかし、遅角点火中の燃焼は不安定となるため、点火プラグ近傍のみ、混合気を濃くする成層混合気を形成させる必要があった。成層混合気形成には圧縮行程でも燃料供給可能な筒内噴射式が有利であり、燃費規制、排出ガス規制両面からの要求により、筒内噴射エンジンが増加してきている。

現在の筒内噴射用燃料噴射装置は筒内噴射インジェクタの搭載位置により、サイド噴射とセンター噴射に大別される。サイド噴射では筒内噴射インジェクタは吸気ポート下方に吸気通路と並行に搭載される。サイド噴射はセンター噴射に比較すると搭載自由度は高い。しかし、噴射燃料の噴霧長が長いと反対側のシリンダ壁に燃料が付着するため、オイル希釈の促進が懸念される。センター噴射はシリンダ頭頂の中央、吸気弁と排気弁の間に設置されるが点火プラグが配置されるシリンダ頭頂に設置するため、搭載位置の制約が大きい。しかし、インジェクタと点火プラグの位置が近いため、成層混合気形成に有利と考えられる。

筒内噴射インジェクタの駆動体はソレノイドとピエゾの2つの方式に大別され、ソレノイドが主流である。噴射弁は内開弁と外開弁があるが主流は内開弁であり、外開弁はピエゾとの組み合わせしか存在しなかった。しかし、近年、ソレノイド駆動と外開弁の組み合わせのインジェクタが発表されている。⁴⁾

噴射ノズルの形状は内開弁では多孔式、ファンスプレー式に大別される。多孔式は噴孔の位置と数を制御することにより、噴霧配置の自由度を確保している。噴孔形状もストレート噴孔、小径の噴孔の外側に大径の噴孔を設ける段付き噴孔等の種類が存在する。ファンスプレー方式は噴孔をスリット状に形成する方式で燃料噴霧は扇状となる。扇状の噴霧は均一となり、燃料の濃淡は少ない。外開弁はインジェクタの外側に向かって、噴射弁が開くため、噴霧形状は円錐状となる。(表2)

Table 2 直噴インジェクタの種類

筒内噴射インジェクタ						
搭載位置	サイド噴射			センター噴射		
駆動方式	ソレノイド			ソレノイド		ピエゾ
噴射弁	内開弁			内開弁		外開弁
噴射ノズル	多孔式		ファン スプレー	多孔式		
噴孔	ストレート	段付き	スリット	ストレート	段付き	
噴霧形状						

3 筒内噴射式燃料噴射装置

近い将来では厳しくなるPM排出規制に対応するため、混合気濃度分布の偏り解消、付着残留燃料の低減を推進する必要がある。筒内噴射インジェクタには燃料をシリンダ壁面、ピストンに燃料を付着させること無く、限られた時間内で気化させることを求められる。このため、燃料の微粒化が重要となってくる。燃料圧力を上げることにより、燃料のエネルギーを液体燃料分裂に使用し、微粒化を促進することができる。このため、35MPaまで高まった燃料圧力は更に上昇する可能性がある。(図4、図5)

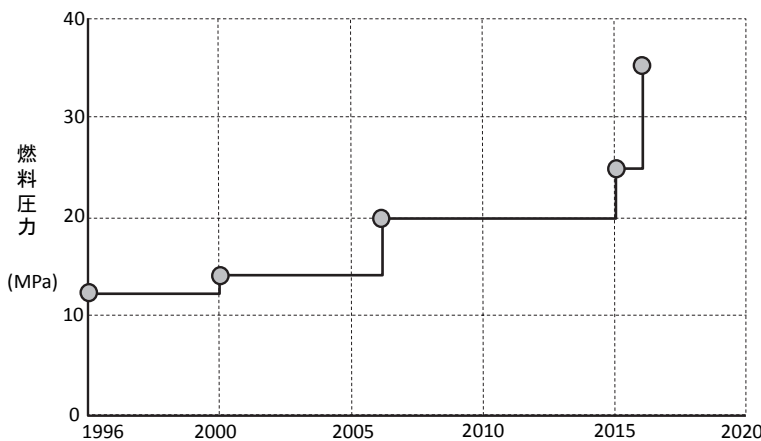


Fig 4 高圧化の変遷

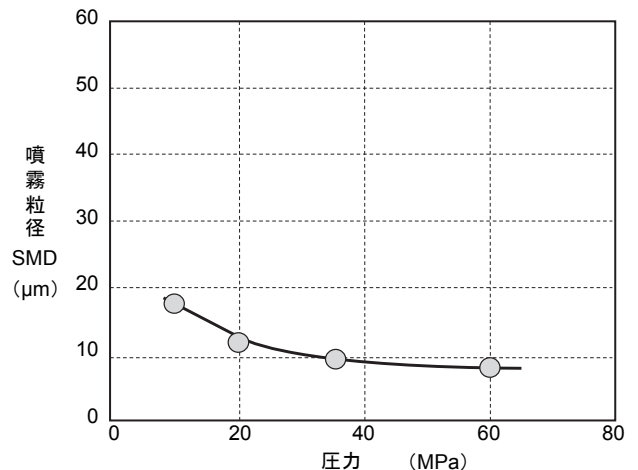


Fig 5 燃料圧力と噴霧粒径

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 7 No. 4 2017

必要な燃料を何回かに分割し、噴射する多段噴射の採用も増加していくと考えられる。燃料と燃料の間に空気の層を作り、燃料の気化促進と燃料付着を抑制することが可能であり、また、燃料噴射を分割することにより、混合気の均一度向上が図ることができる。

最小噴射量もますます、必要な特性となってきた。多段噴射の採用により、1回の駆動あたりの燃料噴射量は少なくなってきた。噴射弁の開閉を検出して、学習することにより、噴射量精度を上げる制御の採用が増えると予測している。

更に厳しくなるCO₂・燃費規制に内燃機関中心で対応するためにはガソリンエンジンをより進化させる必要がある。具体的には可変圧縮比やリーン燃焼、自着火燃焼の市場への導入が予測される。例えば成層リーン燃焼コンセプトを実現するためには点火時に微小燃料を噴射し、すぐに気化させ、点火プラグ近傍に均一混合気を形成することが求められる。筒内噴射インジェクタには更なる微粒化、最小噴射量精度の向上、噴霧配置の精密化が求められる。可変圧縮比では、圧縮比により、最適な燃料噴霧形状が異なる可能性があり、条件により、燃料噴霧を変化させることができる可変噴霧が必要になってくる可能性がある。

ガソリンエンジンの進化を抑制し、電動化を推進する対応も考えられる。電動化を活用する場合でもハイブリッド車までの電動化であれば基本的にエンジンが作動するため、ベースエンジンの燃費性能が車両燃費に直結する。このため、ベースエンジンは筒内噴射エンジン化されていくと予想される。

終わりに

排出ガス規制や燃費・CO₂規制強化に対応するため、ガソリンエンジンは大きな進化をしてきた。燃料噴射装置はガソリンエンジンの変化の支えとなり、実現する鍵となる製品であった。今後、更なる規制強化に対し、リーン燃焼等の燃焼進化の要求は続く。また、ハイブリッド車やプラグインハイブリッド車等の電動化車両にも内燃機関は残り、電動化車両に最適な燃焼が求められると思われる。これから先のガソリンエンジンの変化に対しても、燃料噴射装置の進化は続いていくと考えている。

【参考文献】

- 1) 松尾哲治他:ガソリンエンジン用インジェクタの微粒化開発, デンソーテクニカルレビュー, Vol.11 No.1, p.67-73 (2006)
- 2) 宮木正彦他:燃料噴射系製品の現状と将来展望, Engine Technology Review Vol.1 NO.3 2009, p.14-21 (2009)
- 3) 上田信司他:ガソリン直噴システム用新インジェクタの開発, デンソーテクニカルレビュー Vol.5 No.1, p.75-80 (2000)
- 4) Delphi ホームページ <http://www.delphi.com/manufacturers/auto/powertrain/gas/injsys/delphi-multec-20-gdi-fuel-injector>

ガソリン筒内噴射の開発史

(連載第 4 回) 混沌とした時代を抜けて電子制御式筒内噴射の実用化

The Technical History of Gasoline Direct Injection

After the Chaos Age, The Emergence and Commercial Viability Practical Realization of Electronic Direct Fuel Injection -The 4th serial article-

調 尚孝

株式会社 SOKEN

Naotaka SHIRABE

SOKEN,INC.

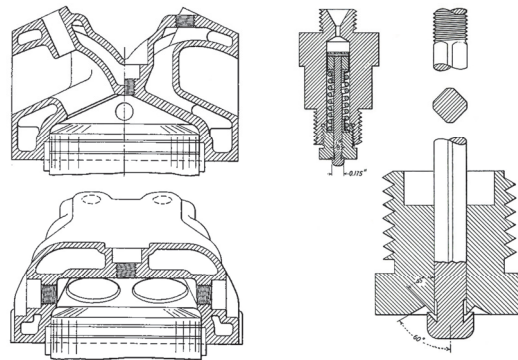
11. 直噴層状給気(DISC)に対する数多くの挑戦(1940年代~1970年代)

11.1 前史

燃焼室の点火栓周辺に点火可能範囲の過濃混合気を形成し、他の領域には希薄混合気を形成する方法を層状給気と言い、特にそれを筒内噴射で行う場合を直噴層状給気(Direct Injection Stratified Charge: DISC)と呼ぶ。最初に層状給気を着想したのは Nicholas August Otto であった(1870年)。鈴木孝氏の書籍⁷⁷⁾にそのことが記述されているので以下に紹介する。「---エンジンの効率向上に腐心していたオットーはある日、工場の煙突から出る煙が空気と混ざることなくずっと高く昇っていくのをつづくと眺めていた。なぜだろうと考えているうち、にわかにな彼を襲ったインスピレーションは、もしこの煙がガスならば、煙突の出た所(つまり過濃領域)で点火してやれば、燃焼はだんだん薄くなっていく他の部分(つまり希薄領域)にゆるやかに伝播し、静粛な効率の良い燃焼が得られるに違いない。---」その後、Otto は 1877 年に燃焼室に直接燃料を噴射する特許を出願している(ドイツ特許 No.532)。

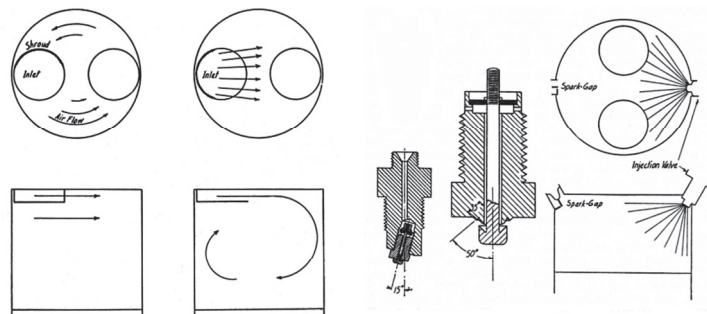
そして、1935 年頃初めて直噴層状給気を定置用で実用化したのはスウェーデンの Hesselman で、これについては既に 3.2 節で述べた。そもそもこのエンジンは当時貴重であったガソリン以外を燃料として使用することを主目的としておりガソリンの生産が活発となり潤沢に入手できるようになってからはこのエンジンは急速に衰退し、1950 年以降には消滅した。

大阪市立大学の坂上茂樹教授の詳細なご研究⁷⁸⁾によると、この頃、Hesselman と時を同じくして直噴層状給気を吸気管噴射と比較して研究していたのは、内燃機関研究の泰斗である米国 MIT の Taylor 兄弟ら(兄の C.F.Taylor は内燃機関の古典的名著”Internal Combustion Engine in Theory and Practice”の著者)であった(Fig.53, Fig.54)。



C.,F., Taylor, E.,S., Taylor and G.,L., Williams, Fuel Injection with Spark Ignition in an Otto-Cycle Engine. S.A.E. Transactions. Vol.26, 1931. Fig.2 and 5

Fig. 53 Combustion Chamber and Direct Injection Nozzle for NACA Test Engine by C.E. Taylor et al. (1931)



E.,S., Taylor and G.,L., Williams, Further Investigation of Fuel Injection in an Engine Having Spark Ignition. S.A.E. Transactions. Vol.28, 1932. Fig.3, 4 and 6.

Fig. 54 Combustion Chamber and Direct Injection Nozzle in CFR Test Engine by E.S. Taylor et al. (1932)

当初 N.A.C.A. の汎用試験機関(127×177.8mm)を用いて MIT 航空発動機研究室で行なわれ、噴射ポンプは Bosch 製、ノズルはポート噴射用が Bosch のピントル・ノズル、筒内噴射用には貫徹力よりも噴霧の微粒化を追及した開弁圧 210.6kg/cm² の衝突型自動弁が開発され燃焼室頂部に取付けられた。噴射は吸気行程噴射で点火時期は 28° BTDC に固定とした。坂上先生の研究⁷⁸⁾を引用すると、Taylor らはガソリン筒内噴射方式の優位性を強調し、飛行機や船舶のように速度と負荷との関係が単一の曲線を以って近似されるような用途においては空気量制御と燃料噴射量制御とを単純な機械仕掛けで連動せしめ、最適な混合比制御を行なうことは容易であると述べている。自動車や鉄道車両における制御はより困難であるが、機械的ないし人的介入を通じた制御は可能であるとも論じている。そして彼らはディーゼル機関用噴射装置が完成の域に達している現在、ガソリン噴射の実用化に対する機械的問題は解決されており、ただポンプ・エレメントの正しい潤滑とノズルの可動部分の隙間をやや大きめに設定することだけに留意すべきである、と結んでいる。彼らは給気層状化による希薄燃焼の実現と圧縮行程噴射の実現を次の課題と見定めていた。1932 年にはこの課題を手がけ CFR エンジン(すなわち Cooperative-Fuel-Research Committee 機関; 内径 82.6×ストローク 114.3mm)20 を用いた筒内噴射実験を行なった。圧縮行程噴射が取上げられたのは 2 サイクル機関における筒内噴射実現のためには掃気の吹抜け損失を防ぐため、圧縮行程噴射しかないからである。CFR 機関にはシュラウドつき吸気弁が装備(既出の Hesselman エンジンに類似)され、弁上流部で旋回させることにより、そこからスワール(旋回渦流)とタンブル(縦渦流)、ないしそれらの中間形態を随意に導出させられるという工夫が仕込まれていた。また、噴射ノズルの位置が燃焼室頂部から外れるため、噴霧角の最適化を図るため新たなダイヤフラムスプリング式の小さな自動弁が開発された。ガソリン噴射実験は概ねスロットル全開、1,000rpm.で行なわれた。CFR 機関の圧縮比は 3~15 の範囲で可変となっているが、この一連の試験には概ね 5.0 が用いられた。しかし開発されたノズルでは空気の流動に負けて点火プラグ付近に可燃混合気が集まらず、安定した性能が得られなかった。そこで通常型に近いポペット弁を用いる貫徹力重視のノズルに置換したところ、気化器装備時に対して 5~7% 大きな出力と 6~11% 少ない最小燃料消費率が得られた。燃焼室内での空気流動と燃料液滴の貫徹力は必須の条件であった。

この当時既に、層状給気を実現するため吸気としてスワール流とタンブル流が試されたこと、燃料噴霧の貫徹力を重要視していたことに驚かされる。しかるに Taylor らの実用的ガソリン噴射に対する見解は楽観的過ぎており、それからしばらくの間ガソリン筒内噴射は機械式(ジャーク式)である以上、次の 4 つの課題

- ・燃料噴霧の貫徹力の最適化(ノズル開弁圧で規定される)
- ・ポンプ部分とノズル部分の潤滑性、隙間を設け過ぎるとその部分のガソリンリーク
- ・燃料噴射量調量精度(特に少量噴射量域)及び気筒間不均量
- ・噴射時期の精緻な制御性

の解決に苦しみ続け、のちの電子制御(コモンレール式)の登場を待たなければならなかった。

11.2 P.H.Schweitzer 博士による体系化と層状給気機関への期待

1962 年、2 サイクル内燃機関と燃料噴霧理論の権威であるペンシルバニア州立大学名誉教授(当時)の P.H.Schweitzer 博士が日本内燃機関連合会と日本機械学会に招聘来日され東京・大阪で講演された⁷⁹⁾。その講演の中で、博士は内燃機関を分類し(Fig.55)、オットー機関(当時気化器が主流)はスロットル負荷調節の予混合火花点火(1234)で、ディーゼル機関は燃料量負荷調節の不均一混合圧縮自着火(ABCD)が基本であると述べると同時に、それぞれの機関の長所を併せ持つハイブリッド機関(今日で言う電動モーターと内燃機関を組み合わせたハイブリッドではない)の登場を期待している。すなわち 4 つの数字とアルファベットを組み合わせた種々のハイブリッド機関についてその可能性を期待を込めて論じている。例えば、12CD は予混合圧縮自着火機関(HCCI)であり、本章で解説している層状給気機関は AB3D が基本となる。後述する層状給気機関の研究例である TEXCO 燃焼方式や Ford PROCO 燃焼方式は(AB3D)、MAN の M 燃焼方式(A2CD)となる。

本来、層状給気はスロットル弁を開いた空気過剰の状態で燃焼を成立させるため、軽負荷では吸気管内負圧がより正圧側になるので吸気行程でのポンプ損失を低減でき、燃料消費率を低減できるという大きな長所がある。この実現のために多くの研究者が層状給気に挑戦した。またもっと初期(特に第 2 次世界大戦以前)には、この層状給気方式が燃料を選ばなくても良いという特性を有することから多種燃料対応エンジン実現という目的も考えられた。すなわち戦地での燃料事情に有利に対応できるということから軍事目的の研究も行われた。

オットー機関	ディーゼル機関
1. 外部混合	A. 内部混合
2. 均一混合気	B. 不均一混合気
3. 固定点 点火	C. 圧縮着火
4. 空気+燃料調節	D. 燃料調節
(スロットル付き)	(スロットルなし)

Fig. 55 Functional Comparison between Otto engine and Diesel engine by Prof.Dr. P.H.Schweitzer (1962)

11.3 研究された直噴層状給気エンジン

数多くの層状給気エンジンが研究され (Fig.56), 紹介しきれないほど数多くの総説や論文が提出されている (例えば 80),81),82),83),84)。ここでは, 単室燃焼 (主室燃焼ともいう, 副室燃焼ではない) かつ筒内噴射 (気化器ではない) に限定して代表的な (著名な) 3 例を以下紹介する⁸²⁾。図は上記総説・論文や Basshuysen の書籍⁸⁵⁾ から引用した。

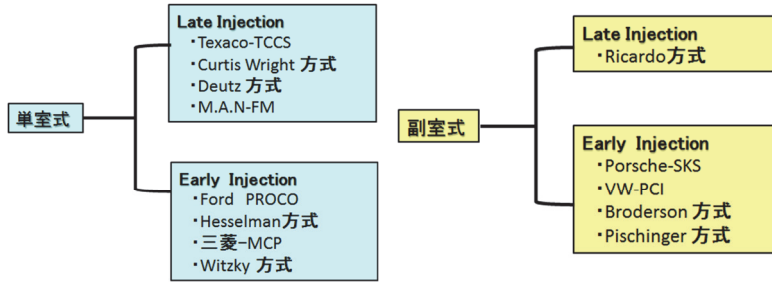


Fig. 56 Classification of Stratified Charged Engines by Sami and Yanagihara (1979)

(1) Texaco-TCCS (Texaco Controlled Combustion System)

Texaco とは米国石油巨大メジャーである。燃料製造会社が燃焼の研究を実施しており, 当初は多種燃料対応を目的に軍用を対象に研究されていた。第 2 次世界大戦を挟んでかなり長期間 (1940 年代後半から 1970 年代前半まで) 取り組まれた研究である。その構成を Fig.57 に示す。噴霧の根元に近い領域には噴射量の多少に関わらず可燃層が形成されやすいという考えから, そこに点火プラグを配置し点火する。そしてシラウド付き吸気弁で形成された吸入渦流による燃焼ガスと新気の交換作用が点火プラグ近傍を常に可燃とし, 噴射しながら同時に多重放電点火することが特徴である。燃焼過程 (拡散燃焼的) がディーゼルと似ており, 出力, 燃費, 騒音, スモークなどの特性もディーゼルと類似している。多種燃料対応は非常に優れている。一方で特に軽負荷域の燃焼が不安定で, 炭化水素の排出も多く, 上述の層状可燃混合気形成の着想は不十分であったと思われる。筒内噴射は Bosch 製ディーゼル列型噴射ポンプのガソリン用改造と思われる。

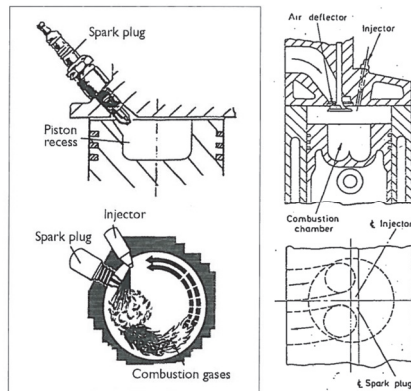


Fig. 57 Texaco Controlled Combustion System (1949-1974)

(2) MAN-FM (Fremdgezündetes M-Verfahren 英 Separative Ignited M-Process)

MAN 社は Rudolf Diesel によるディーゼルエンジンを初めて実用化した伝統あるドイツの会社で Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg (アウグスブルク・ニュルンベルク機械工場) の頭文字に由来する。ディーゼルの M 燃焼方式 (MAN の M) から発展したもので Fig.58 にその構成を示す。ピストン頂部の球形燃焼室壁に小さな凹部が設けられており, ここに燃料が集まるように沿面に燃料が噴射される。この時, 吸気スワールが壁面に沿って流れる燃料膜を薄く引き伸ばしながら, 噴射量に無関係に可燃混合気をこの凹部に形成するのが特徴であり, そこに設置された点火プラグで着火する。壁面の燃料は蒸発しつつスワール流に乗って燃焼室内に広がり形成された可燃混合気層を中心に燃焼が進行する。その進行はディーゼル燃焼よりゆるやかで, 爆発圧力が低く静かである。吸気絞りのない運転を実現しており, 高い多種燃料対応性とディーゼルと同等の燃費が得られた。反面, ガソリンエンジンより出力がかなり劣る。エンジンの小型化, 壁面温度制御, ピストンや点火プラグの耐久性にも課題があった。筒内噴射は Texaco と同じく Bosch 製ディーゼル列型噴射ポンプの改造と思われる。

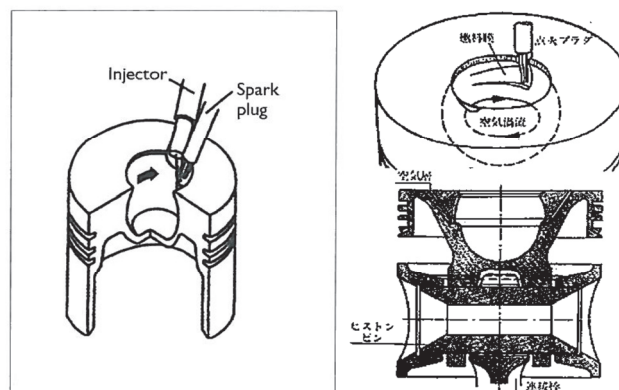


Fig. 58 Combustion Chamber of MAN-FM (Fremdgezündetes M-Verfahren) (1965)

(3) Ford-PROCO (Programmed Combustion) Process

Ford 社では Simko らが当初カップ状のピストン燃焼室、一つの噴射弁、一つの点火プラグと吸入渦流で構成される FCP (Ford Combustion Process)方式を研究していた⁸⁶⁾が、可燃混合気層形成の点でやはり課題が大きく、Simko らはさらに PROCO への発想に移行した (Fig.59)。すなわち、強力なスキッシュ作用を狙った燃焼室形状と点火プラグが二つあることが特徴である。中央に配置した噴射弁からの噴霧特性とスキッシュ作用による燃焼室内の縦渦流を工夫して成層化(層状化)を図っているが、分散性の良い広角噴霧が用いられること、および Texaco や MAN-FM と異なり比較的早期に噴射されることから混合気の成層度は劣り、吸気は絞らざるを得なかったものと推定される。当初の層状給気実現の狙いに対し技術的課題の大きかったゆえか、均質混合気の方に妥協された感がある。それゆえ、ノック限界も圧縮比で規制され、多種燃料対応性も低く、燃費も通常のガソリンエンジンからさほど改善されていない。筒内噴射は、Ford 自前の燃料噴射装置を開発しており、ノズルはカーボンデポジット対策を意図したと思われる外開式の自動弁であった⁸⁷⁾。(Fig.60)ディーゼルのノズル(内開弁)と違って、Mercedes-Benz 300SL の場合も外開弁が採用されたが、その理由は、ガソリンは粘性が軽油より低いので内開弁だと噴射ポンプで調量圧送した燃料がノズルニードルとボデーのクリアランス間でリークし調量精度を悪化させるからである。外開弁にはこのようリークメカニズムはない。

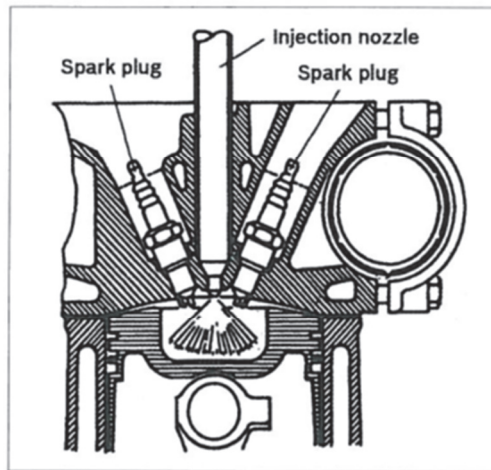


Fig. 59 Ford-PROCO (Programmed Combustion) Process (1972)

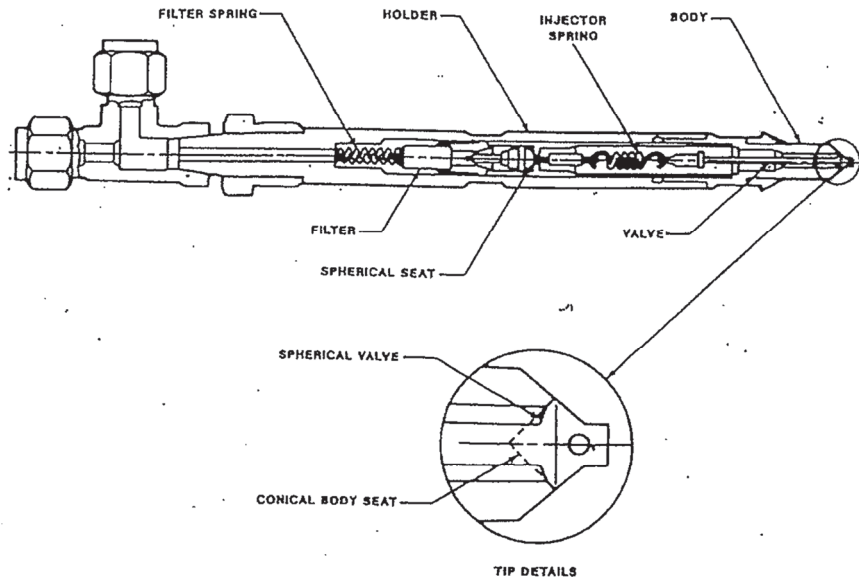


Fig. 60 Ford PROCO experimental Fuel Injector (1978)

以上、これら3例以外にも多くの DISC エンジンが研究されたが、何一つとして実用化されたものは出現しなかった。燃費、騒音、出力、スモークという全ての観点で、当時のガソリンエンジンやディーゼルエンジンを凌ぐものがなかったと言える。この要因は、ある目的とした運転範囲において時間的・空間的な成層混合気の形成が非常に難しかったことに尽きると思われる。噴射装置側から見れば当時は全て機械式の筒内噴射であり、11.1 節の最後の部分に記述した技術課題を機械製造精度では克服することが出来なかった。加えて、米国では排気規制の動きがあり、自動車用に DISC を使うとなるとこれも大きな障壁となった。1980 年代以降 DISC の研究は下火になっていった。

しかしながら、層状給気の本質的な燃費の良さは如何とも捨て難く、ちょうど 1970 年は Otto が層状給気を着想してから 100 年後に当たり、いつしかエンジン研究者・開発者の間では、直噴層状給気(DISC)は「ガソリンエンジン 100 年の夢」として憧れるテーマになっていった。この間第3回連載でも紹介したように電子制御式ポート噴射が自動車用として進化し続け大量生産の時代を謳歌した。その技術が筒内噴射にも採用され DISC に再挑戦するのは 1990 年代まで待たなければならなかった。

12. 筒内噴射 2 サイクルエンジンの開発熱(1980 年代後半 ~ 1990 年代半ば)

12.1 前史

2 サイクルエンジンは、1881 年 D.Clerk によって発明され、この歴史は Otto の 4 サイクルエンジンと同じくらい古い。しかるに現在、2 サイクルエンジンは自動車用としては使われておらず、2 輪用やマリン用船外機では近年まで使われてきたが排気規制強化のため姿を消している。現在使用されている分野は、芝刈り機等の汎用エンジンに限られている。もともと、掃気と圧縮が同時に行われる 2 サイクルでは、掃気の上流から燃料を供給したのでは、そのまま排気へ燃料が吹き抜け、燃費悪化を招いたり未燃の炭化水素を排出するという根本的な問題を抱えていた。そのため掃気終了後に燃料を直接筒内に供給すればこの課題解決がなされるので、昔から 2 サイクルには筒内噴射が必要と考え方があった。既に 6.2 節で解説したように、BOSCH は 1912 年には船外機用の 2 サイクル直噴の開発に着手し、1951 年には Gutbrod と Goliath という 2 サイクルエンジンの乗用車で機械式ではあったが筒内噴射装置の実用化を果たしている。その後も、2 サイクル筒内直噴エンジンは油井・大西の YOCP 機関(1969 年)⁸⁸⁾などでしばしば研究されたり、2 サイクル用の機械式筒内噴射装置も 1960 年代後半にデンソーで開発されてきた(6.2.3 節で解説)が実用化はされなかった。

12.2 Orbital 社の空気噴射コンセプト(1982 年 SAE 発表)

1982 年オーストラリアの Orbital 社は、SAE で噴射の新しい概念を発表した⁸⁹⁾。この論文の題目 "Pneumatic Fuel Metering - A New Approach to Advanced Fuel Control" から分かるように、空気を使った噴射であった。Fig.61 にその概念図を示す。空気用のノズルと空気と燃料を噴射するノズル(自動弁)の二つを有し、噴射のイベントは大きく

- ①燃料を噴射弁内に設けた燃料室に貯める段階
- ②調量した燃料を空気ノズルを開くことによって貯めた燃料を吹き飛ばしながら自動弁から燃料・空気もろとも噴射する段階
- ③機関負荷に応じて容積が変わる燃料量を燃料室に供給する段階

の三つに分けられる。原始的な弁膜のような物が記載されており、空気用のノズルをどう作動させるかも不明瞭で、蓋然性に欠け、Fig.61 は概念図以上のものではなかった。Orbital は空気をともに噴射することで燃料の微粒化を訴求したが、新規な部分はたった一つ、「燃料の調量と噴射を時間的に分けた」ということである。これまで解説してきた燃料だけを噴射する機構では燃料の調量と噴射は全て同時に行われる。Mercedes-Benz300SL では機械式(Jerk 式)のポンプで計量された燃料を圧送して外開式の自動弁から全量を噴射する。Electrojector(コモンレール式)では燃料の噴射期間がすなわち調量された量でもある。空気を使う噴射は Air Injection といい、燃料だけの噴射は無気噴射: Solid Injection(まれに対比的に Airless Injection ともいう)。燃料だけの噴射は高速域になると噴射期間が制限され、その制限期間の中で大容量の燃料噴射が要求されるという課題があった。これが空気の噴射では、噴射期間以外の時間は燃料調量に充てることできるという長所がある。

空気を使った 2 サイクル筒内直噴としては、1955 年独の NSU 社(のちにロータリーのバンケルエンジンを開発した会社として有名、現在は AUDI の関連会社となっている)の Froede 博士による 2 輪 2 サイクルエンジン用に研究した空気噴射のノズル(Fig.62)⁹⁰⁾があるが、これは当時としては先進のソレノイドを使ったものであったが、燃料(調量)と空気噴射が同時に行われる方式であった。

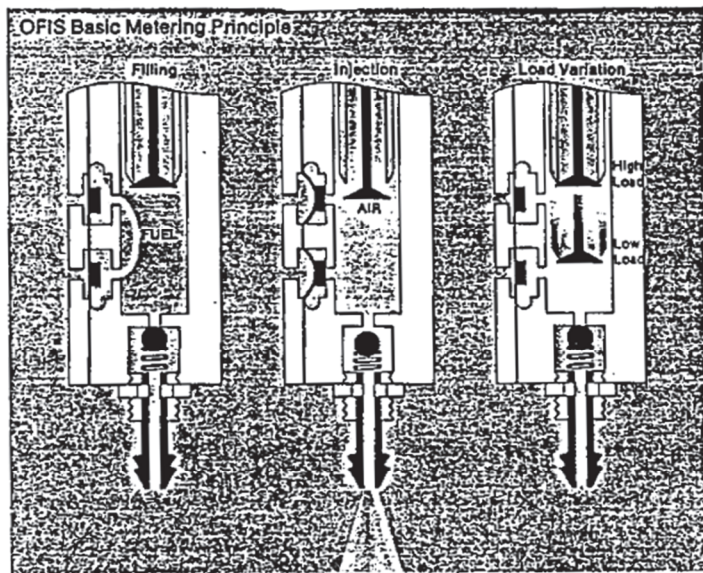


Fig. 61 OFIS (Orbital Fuel Injection System) Basic Metering Principle (1982)

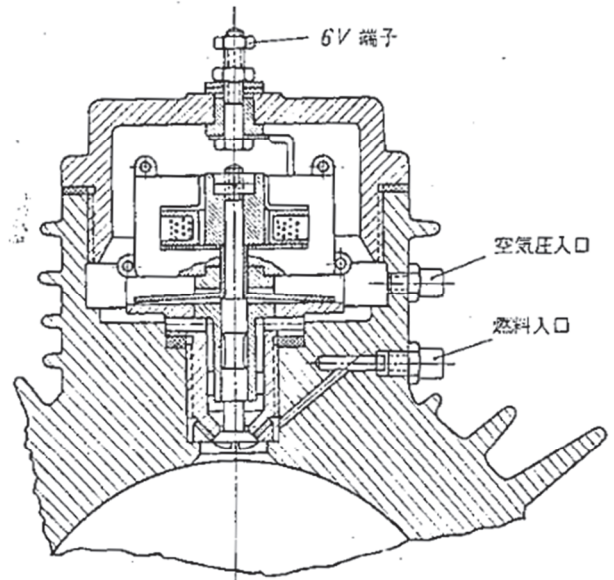


Fig. 62 NSU- Pneumatic Injection Nozzle (1955)

燃料と空気を時間を分けて供給・噴射するという考え方は、Orbital が初めてではない。ディーゼルエンジンの祖 Rudolf Diesel が、初めて考案した燃料供給方式がまさしく空気噴射方式であった。1893 年、Diesel は微粉炭(固体燃料)を圧縮空気で吹き飛ばしながらノズルから噴射させる圧縮自着火エンジン(定置用)を考案している(Fig.63)⁹¹⁾。ディーゼルはこれをさらに改良し 1900 年頃には扱いやすい液体燃料を使った空気噴射システムを完成させている(Fig.64⁹²⁾, Fig.65⁹³⁾)。Fig.65 で空気噴射弁の動作を説明する。空気はエアコンプレッサで 30-40 気圧に加圧され、送気孔 9 より噴射弁 7 へ常時供給されている。一方、燃料は燃料ポンプにより 60-70 気圧に加圧され、圧縮行程の始めに送油孔 4 より噴射弁 7 内へ供給され、圧縮行程の終わり付近でカムによって押棒 3 が突き上げられ、ロッカーアーム 2 が上昇してニードル 8 がリフトし、有孔板 5 を通過して燃料は微粒化され空気が燃料と共に噴孔 6 より噴射される。この空気噴射式のディーゼル定置機関のレプリカがヤンマー東京本社(東京八重洲)に Rudolf Diesel が考えた初期の MAN 社製エンジンを模倣して長らく展示してあったが、現在は滋賀県長浜市にあるヤンマーミュージアムに移設されているようである。

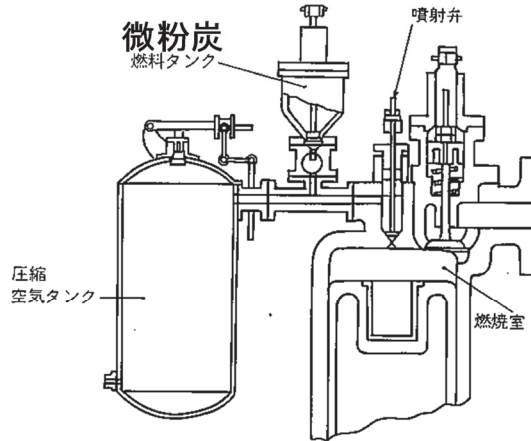


Fig. 63 Coal Dust Injection System invented by Rudolf Diesel (1893) US Patent No.542896 (1895)

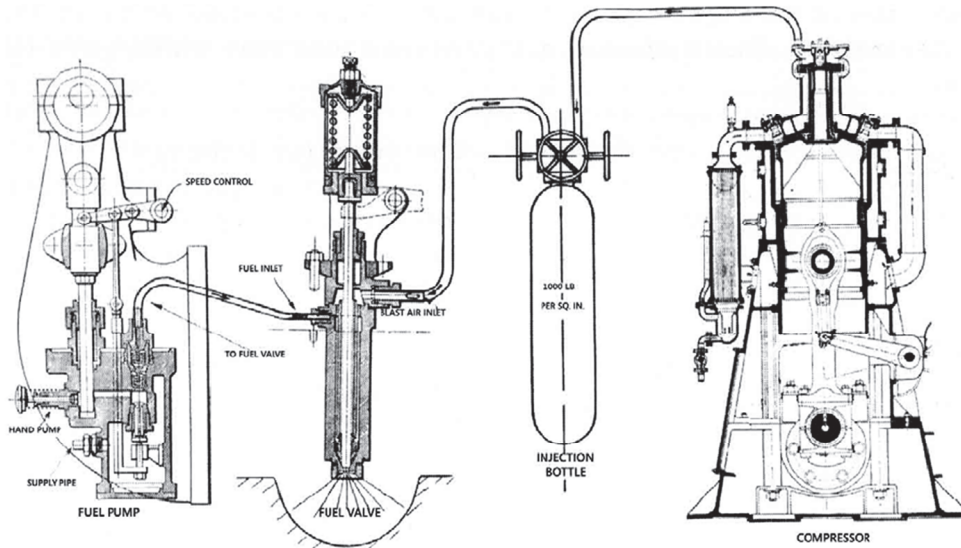


Fig. 64 Typical Air Injection System by Rudolf Diesel (circa 1900)

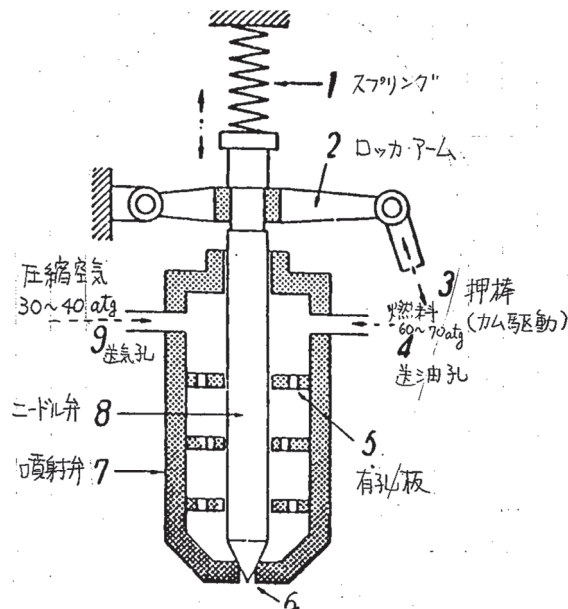


Fig. 65 Details of Air Injection Nozzle

1982年にSAEで発表したOrbitalのコンセプトはそもそもポート噴射用を意図していたようだが、その後もOrbitalはこの技術の積極的な広報活動を続け、1985年には電子制御の直噴システムODIS(Orbital Direct Injection System)搭載した2サイクルのOCP(Orbital Combustion Process)エンジンを発表し、世界中の自動車会社やマリン船外機メーカーに積極的に売り込みをかけた。このOCPエンジンを(Fig.66)⁹⁴⁾に示す。これは1.2Lの3気筒サイクルエンジンでクランクケース掃気(内部掃気)式のエンジンである。Orbitalのエンジン開発シリーズの特に大排気量には圧縮機を使った強制掃気(外部掃気)のものもあった。Orbitalはこのエンジンの従来エンジンに対する特徴(長所)として

- Lower Cost (-25%Reduction)
- ~1/2 Size of Conventional Engines
- ~1/2 Weight of Conventional Engines
- Potential for 30% Reduction in Fuel Consumption
- Greater Simplicity than Conventional Engines
- Smoother than Conventional Engines

を掲げた。乗用車用エンジンとしてすっきり姿を消した比出力の高い2サイクルエンジンがこの独自の直噴技術でいよいよ甦るかということで、世界中のエンジン技術者や噴射技術者の注目を浴びた。世界の有力な自動車会社やマリンエンジンメーカーはOrbitalと契約を結び共同開発する姿勢を見せた。ここに2サイクルエンジン開発ブームが到来した。特に核となるのは直噴技術でFig.66でエンジンヘッド直上に搭載されているPneumatic Direct Injectorに注目が集中した。当初はFig.66のように白抜きで記載されていたが、のちにOrbitalの特許で明らかになった。最も具現性の高いものをFig.67⁹⁵⁾に示す。燃料用インジェクタとしてボトムフィードタイプの量産ポート噴射弁を用い、燃料通路と圧縮空気の通路を共用した共通のレールから燃料・空気をそれぞれ供給し、燃料用インジェクタの下流には独自の外開式のソレノイド噴射弁を設置している。Fig.68⁹⁴⁾にエンジンのクランク角でのタイムイベントを示す(1350rpm, 17.1Nmの場合)。この噴射方式において重要なことは、BTDC90°からBTDC60°にかけて噴射のイベントがハッチングで示されているが、この期間以外は燃料供給(燃料弁の噴射)に当てることができる、すなわち高速高負荷域でも燃料供給(調量)に十分な時間が確保できるということである。

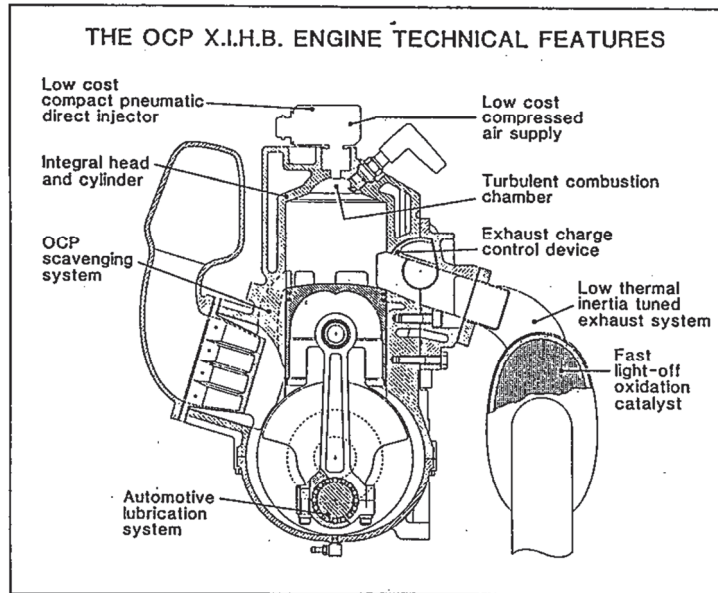


Fig. 66 Technical Features of the OCP(Orbital Combustion Process) Engine (1985)

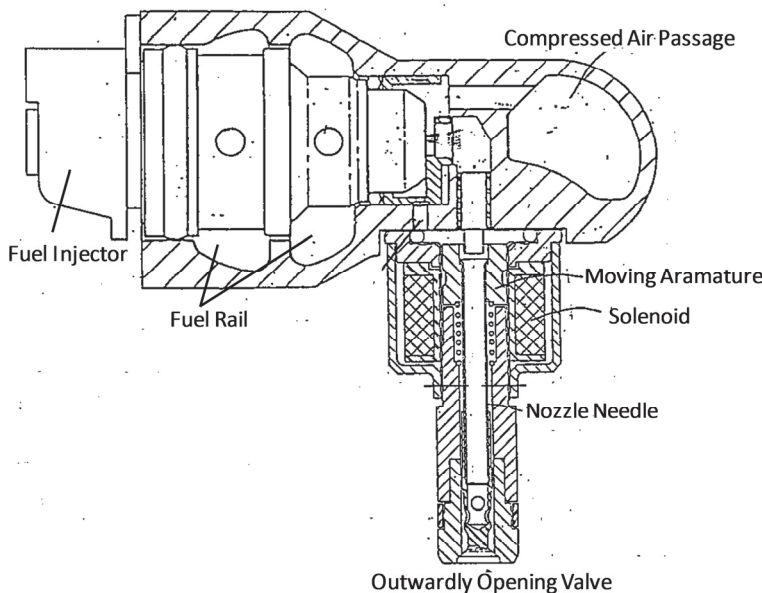


Fig. 67 Typical Orbital (ODIS) Pneumatic Direct Injector (1988)

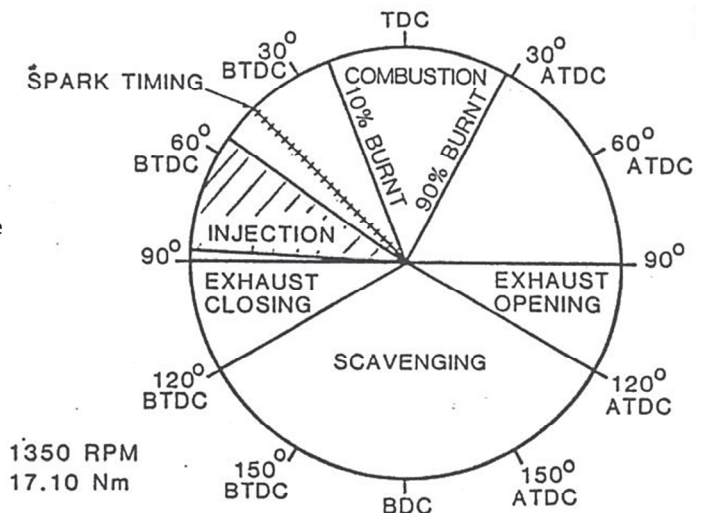


Fig. 68 Typical Timing Diagram of Orbital Combustion Process(OCP)

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 7 No. 4 2017

12.3 自動車会社やマリン用船外機メーカーによる2サイクル直噴エンジン開発

Orbital のコンセプト提案が世界中の自動車会社の乗用車用2サイクル直噴エンジン開発のブームに火を付けた。1980年代中盤以降、日米欧の主要な自動車会社が2サイクル直噴エンジン開発を開始した。Orbitalのライセンス供与を受けた会社もあり、ライセンス供与を受けずに独自の開発を志す会社も現れた。同じく噴射装置のサプライヤも Orbital のライセンス供与を受ける動きを示した会社もあれば、独自の高圧の無気噴射の開発を目指したサプライヤもあった。当時のエンジン開発の一例を公開された資料をもとに作成したもの Fig.69 に示す(Orbital エンジンも既出である)。図を見て分かるように、掃気方式に内部掃気方式(シュニール掃気)とスーパーチャージャを使った強制掃気(外部掃気)方式のものに分かれ、何より噴射装置は、空気を使うものと空気を使わない高圧の無気噴射方式のものに分かれるが全て筒内噴射であった。当時、エンジン開発に関するニュースや情報は2サイクルエンジンに関するものが多く、エンジン技術者や噴射技術者は高い関心を示していた。ところが1990年代になると、自動車用2サイクルエンジンの開発熱は徐々に冷め、下火になっていった。その後少なくとも自動車用2サイクル直噴エンジンで実用化されたものは皆無であった。この理由はよく分からないが、2サイクル特有の「掃気」というガス交換のサイクル安定性が全負荷領域で乗用車エンジンに要求されるレベルに達しなかったということかもしれない。加えて空気を使う噴射は微粒化は期待できるものの、掃気用とは別に容量の大きな空気圧縮機が必要で、その搭載性とコストの課題があったのかもしれない。ところが高圧の無気噴射方式は、歴史的には噴射の王道を歩んでおり、この開発は決して無駄ではなかったようで、4サイクルエンジン用として次章で解説する電子制御式の筒内噴射装置として1996年に実用化を果たすことになる。

なお、Orbitalの有気噴射は、米Brunswick社グループのMercuryMarineエンジンの2サイクルOptimaxシリーズでDFI(Direct Fuel Injection)として1998年頃から実用化されている⁹⁶⁾。

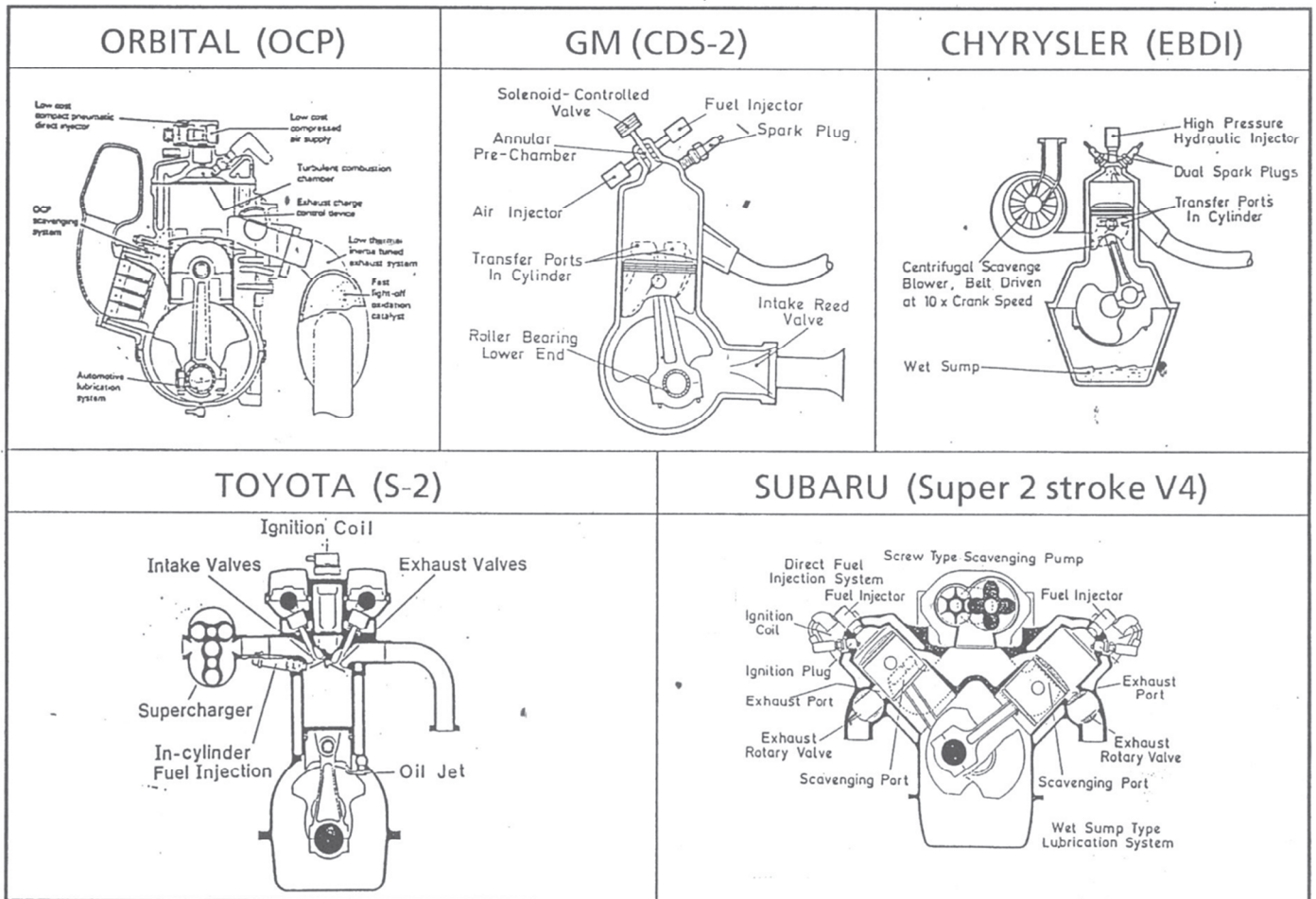


Fig. 69 Development of Two Stroke Cycle Engines (1980's)

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 7 No. 4 2017

また、独の FICHT 社は、2 サイクルエンジン用に 1988 年頃から無気噴射だが高圧ポンプを必要としない独自の噴射弁を開発し(Fig.70)⁹⁷⁾、1998 年には米 OutboardMarine 社(OMC)の 2 サイクル船外機エンジン用として実用化され、その後も何社かのジェットスキーエンジンや船外機エンジンで使われている。噴射装置の生産は Bombardier 社が行っている。これはソレノイド下流の自動弁室の油圧をソレノイド通電による可動プランジヤのストロークにより加圧上昇させ、開弁圧以上になったときに噴射開始させる構成である。

ヤマハ発動機は 1999 年、筒内噴射(HPDI)を搭載した 2 サイクル船外機エンジン Z200N を販売開始している⁹⁸⁾。HPDI は当時自動車で量産されていた噴射装置(後述)をベースに開発されたものである(Fig.71)。

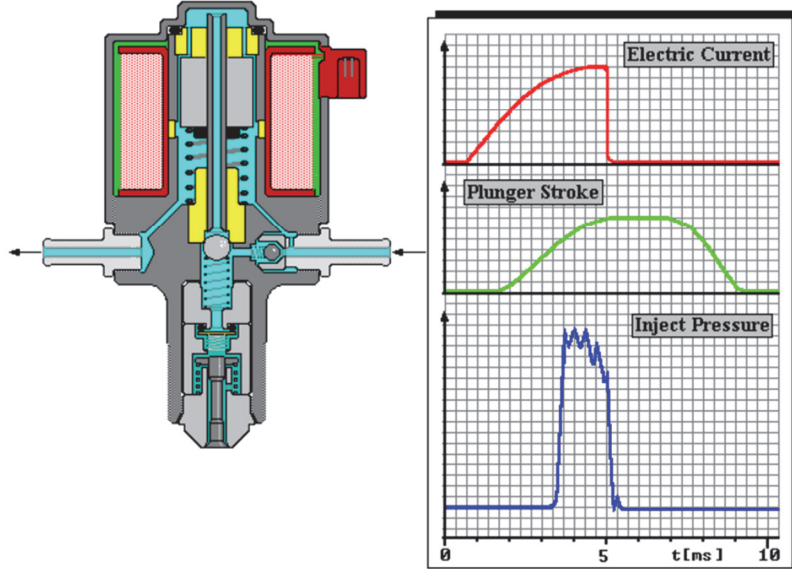
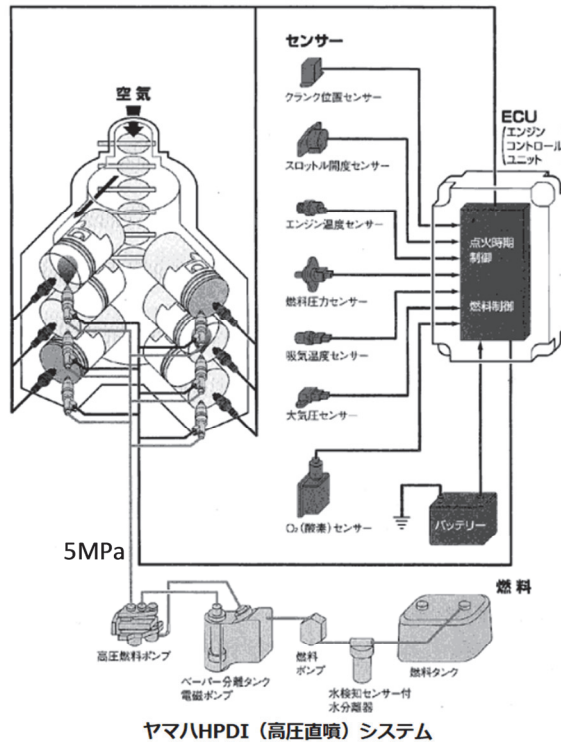


Fig. 70 FICHT Fuel Injector (1995)

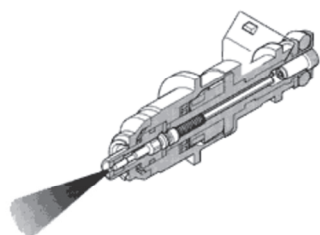


ヤマハ船外機「Z200N」

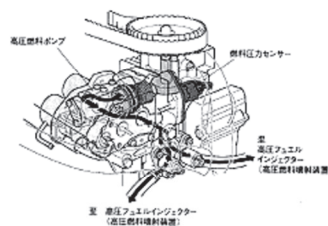
- ・2stroke 76° V6
- ・φ90mm × 68mm, 2596cm³
- ・147.1kW (200ps) @5000rpm



ヤマハHPDI (高圧直噴) システム



「Z200N」の高圧フェュエルインジェクター



「Z200N」の高圧燃料ポンプ

Fig. 71 YAMAHA Outboard Marine Engine Z200N and Direct Injection System (1999)

13. 電子制御式筒内噴射の実用化

1996年は筒内噴射の歴史において記念すべき年であり、この年、三菱自動車とトヨタ自動車から相次いで、世界初の電子制御筒内噴射エンジンを搭載した乗用車が発売された。

13.1 三菱自動車の開発した GDI エンジン⁹⁰⁾ (1996 年)

1996年、三菱自動車は量産自動車世界初の成層ガソリン直噴エンジン GDI エンジン (4G93) を実用化し、日本国内向けに同社の乗用車ギャランとレグナムに搭載することを発表、同年8月に販売開始した。このエンジンを Fig.72 に示す。GDI とは Gasoline Direct Injection を意味する。層状給気を実現するためのコンセプトとして次の三つの点が新しい特徴である。

- ・従来の水平吸入ポートによって生成されるタンブル流とは逆向きにの旋回方向を持つ逆タンブルを生成する直立吸気ポート
- ・燃料の分散を制御する電磁式の筒内スワール噴射弁
- ・燃料はスパークプラグと逆方向に噴射し、混合気の挙動を制御して適切な層状化を実現する球形の窪みを有するコンパクトピストンヘッドとベントルーフ燃焼室

これらの構成により、Fig.73 に示すように、軽負荷側は遅角噴射を行い空燃比 30-40 の層状給気を実現し高負荷側は早期噴射により空燃比 13-14 の均質混合気を実現している。このコンセプトにより日本の 10-15 モードで燃費改善率 25% を達成している。

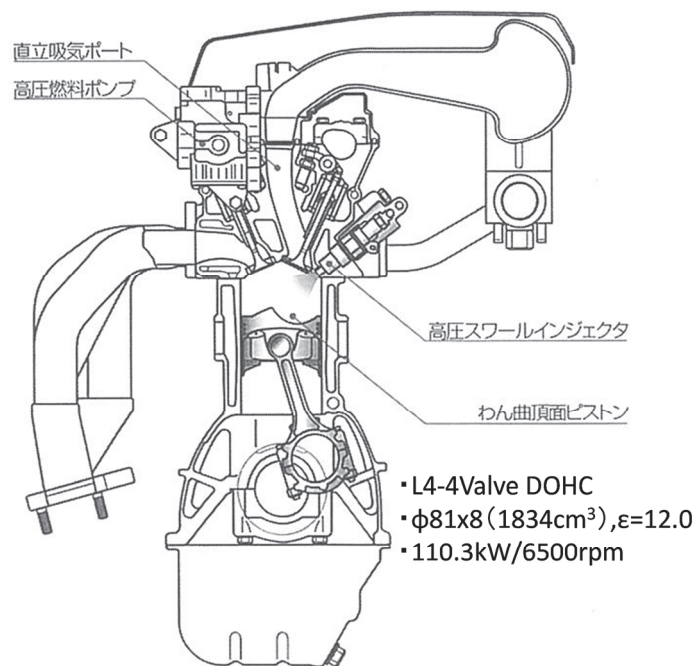


Fig. 72 Mitsubishi GDI Engine _4G93 (1996)

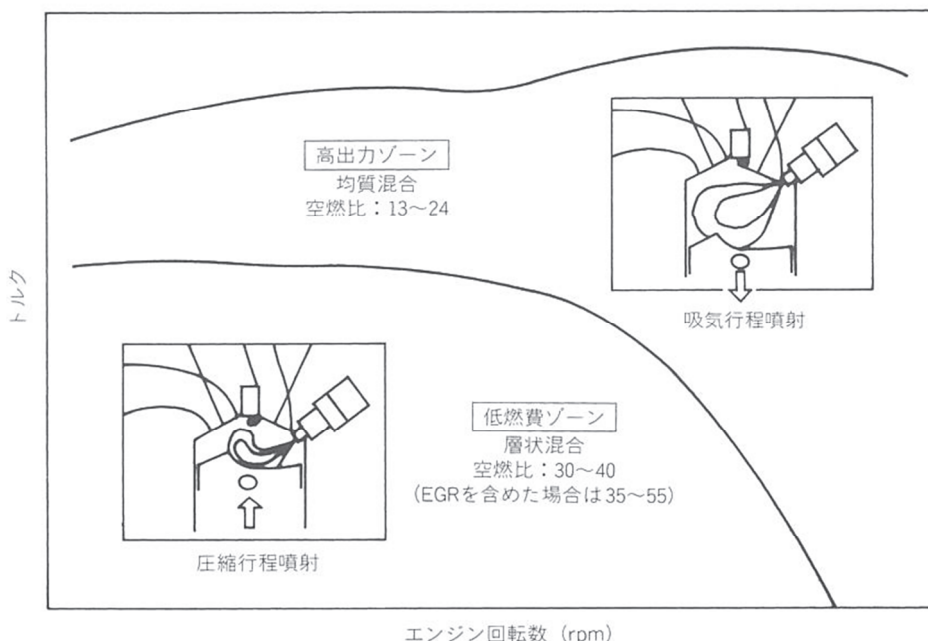


Fig. 73 Air-Fuel Ratio Control for Mitsubishi GDI Engine

筒内噴射を実現するために燃料噴射圧力は 5MPa に設定され、新たに高圧燃料ポンプと筒内噴射弁が開発されている。高圧燃料ポンプを Fig.74、筒内噴射弁を Fig.75 に示す。

燃料タンクからフィードポンプで送り出された燃料は、低圧レギュレータで調圧され、高圧燃料ポンプに送られる。このポンプの形式はエアコンのコンプレッサなどでよく使われる斜板式であり、エンジンカム軸で駆動される駆動軸に対して傾斜した斜板を回転させ、斜板の回転によって往復運動する 7 本のピストンにより燃料を加圧する。高圧ポンプから送られた燃料は高圧レギュレータによって調圧され筒内噴射弁へ供給される。

筒内噴射弁は吸気側に配置し、タンブル流に対して斜め方向から燃料を筒内に噴射する。噴射弁シート上流には噴霧をスワールさせるスワールチップが設置されている。スワールチップの外径(六角形の外接円)は約 6mm で中央に 0.8mm の孔が開けられ、下流側にスワール溝が 4 本設けられ、噴霧にスワール運動を与える。噴霧角は約 30° であり、燃料噴射量はリフト 65 μ m のニードルバルブの開弁時間によって制御される。

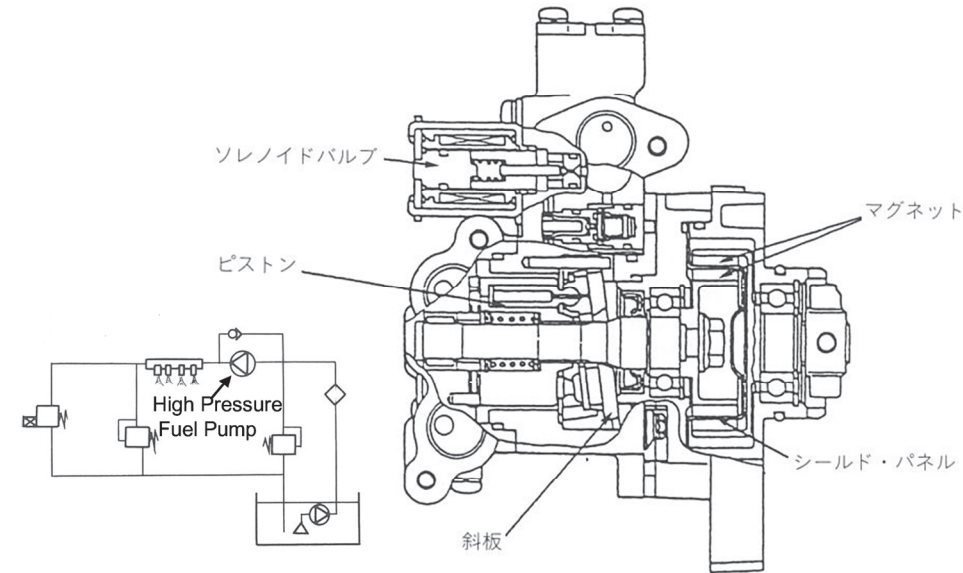


Fig. 74 High Pressure Fuel Pump for Mitsubishi GDI Engine

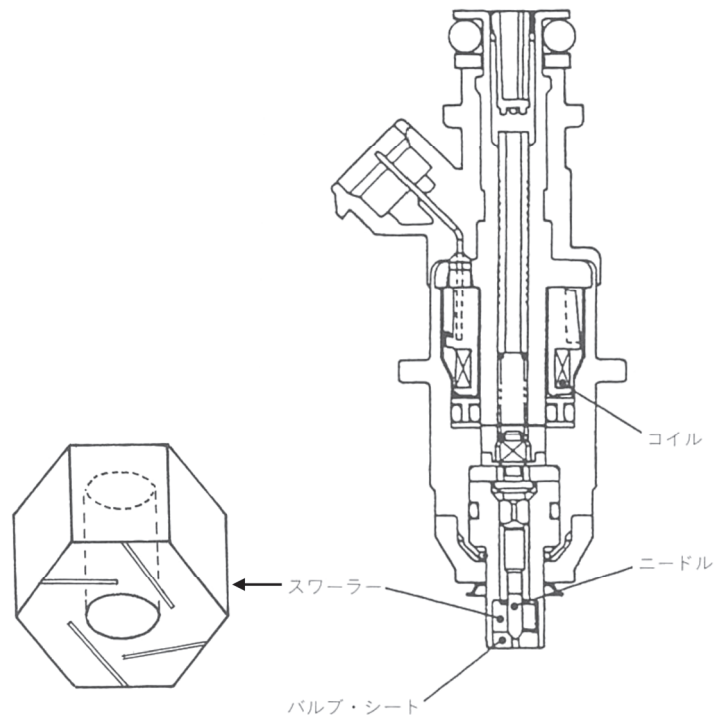


Fig. 75 High Pressure Fuel Injector for Mitsubishi GDI Engine

13.2 トヨタ自動車が開発した D-4 エンジン^{100,101)} (1996 年)

D-4 とは Direct Injection 4 Stroke Gasoline Engine を意味するが、同時に次の 4 つの D で始まるコンセプトが込められている。

- Direct Gasoline Injection
- Dynamic Mixture Formation
- Decisive Combustion Control
- Delightful Performance

トヨタ自動車は1996年、画期的な低燃費と高出力・高応答を実現する直噴エンジン(3S-FSE)を発表、同年12月にCORONA Premioに搭載して発売した。このエンジンをFig.76、システム図をFig.77に示す。層状給気を実現するために、吸気SCV(E-SCV)を持つ独立ヘリカルポート、燃焼室吸気側横方向からの筒内噴射、独自の形状を有する深皿頂面ピストンが特徴である。層状給気を狙うエンジン条件では、Fig.78に示すようにSCVを閉じ吸気にスワール流を形成させ、この流れに燃料が深皿燃焼室に押し込められように圧縮行程で燃料を噴射し成層化を図る。この時、空燃比は20-50(EGR含む)である(Fig.79)。

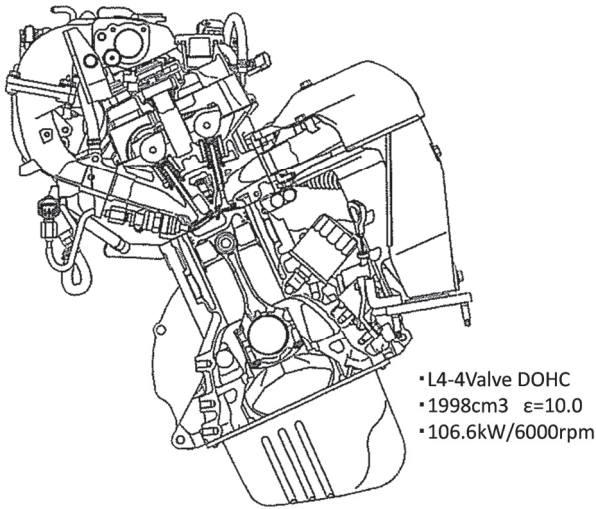


Fig. 76 TOYOTA D-4 Engine_3S-FSE (1996)

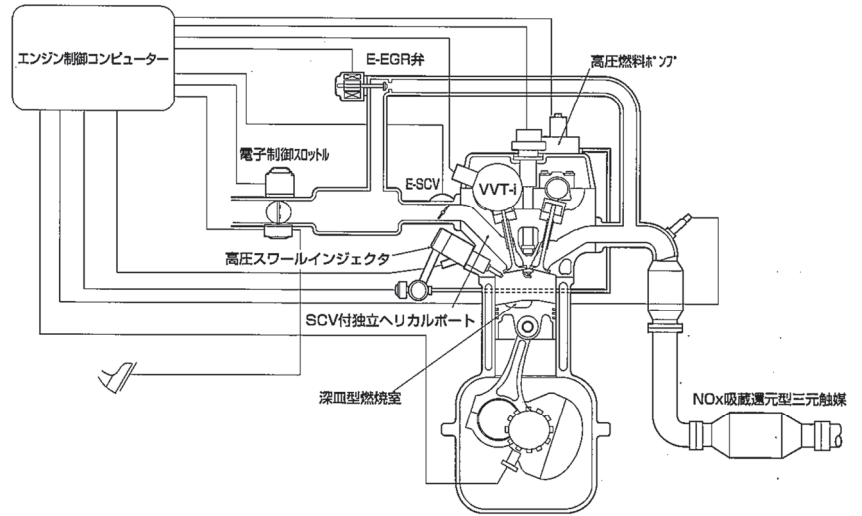
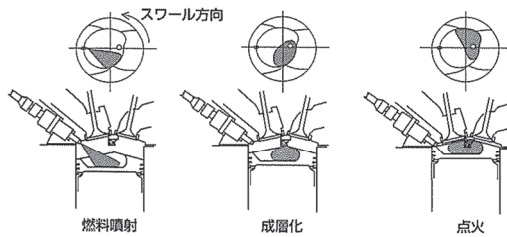


Fig. 77 TOYOTA D-4 System (1996)

■成層燃焼概要



■ピストン形状



■SCVの動作とスワール生成

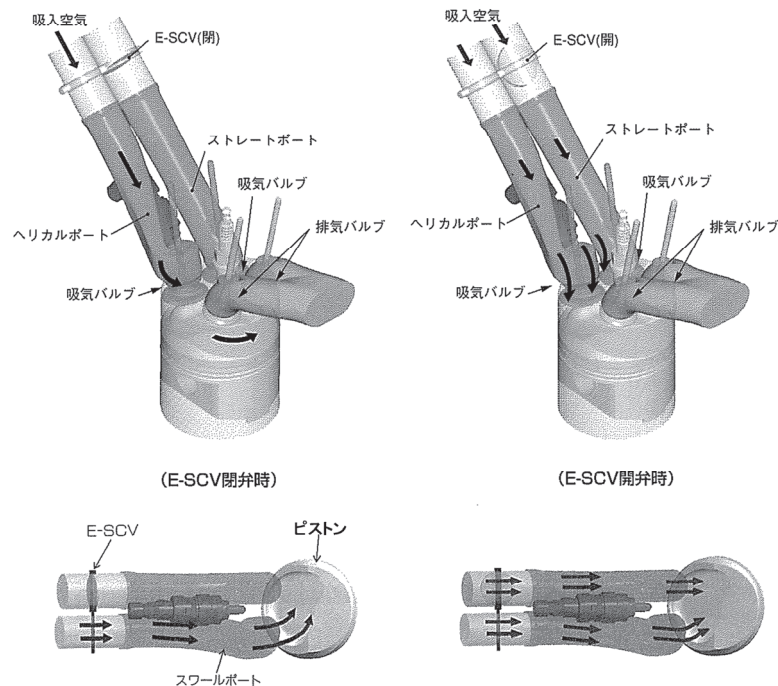


Fig. 78 SCV Control and Swirl Formation

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 7 No. 4 2017

Fig.79には空燃比 15-23 の弱成層領域、空燃比 15-23 の均質リーン領域、空燃比 12-15 の均質領域に分けて制御することが示されている。特に弱成層領域では、吸入行程と圧縮行程の2回に分けて燃料噴射する制御が採用されている。またリーン領域でのNOx浄化のため、トヨタ自動車が独自に開発したNOx吸蔵型還元触媒を採用している。このエンジン搭載車で、10-15モード燃費17.4km/L(従来エンジン搭載車は13.0km/L)と従来比約35%の低燃費を達成し、発進加速・追い越し加速ともに約10%の性能向上を実現している。Fig.80には、筒内噴射のための高圧ポンプと噴射弁の外観写真を示す。高圧ポンプはエンジン排気カム軸で直接駆動される単筒のピストンポンプでレール燃料圧力が12MPa(ポート噴射の40倍)に制御される。噴射弁はスワール弁であり、噴射弁軸から20°ほど傾いてスワール噴霧を形成する。なお、噴射弁のノズル部にはカーボンデポジットの耐性を向上させるための特殊な処理が施されている。

燃料噴射使用域

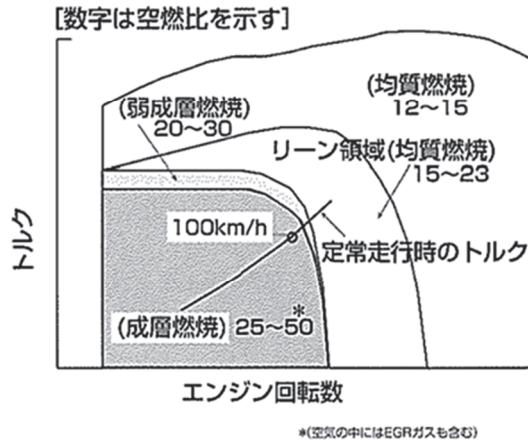


Fig. 79 Air-Fuel Ratio Control

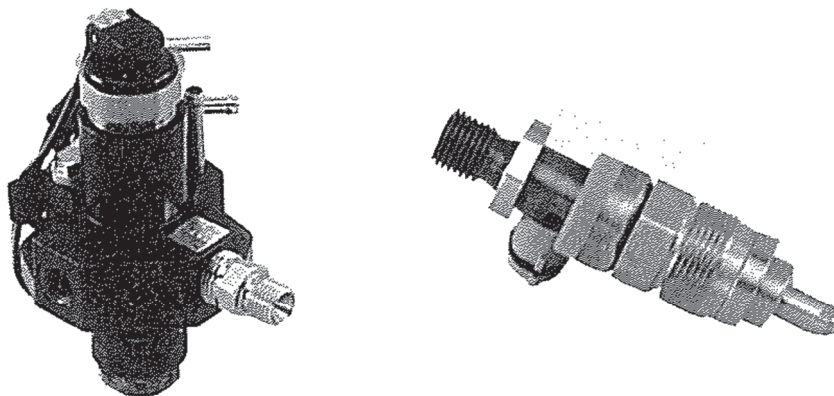


Fig. 80 High Pressure Supply Pump and Fuel Injector

13.3 成層燃焼を実現するための3つのコンセプト^{102),103)}

成層燃焼エンジンは、混合気を層状化する手法によって代表的な3つのコンセプトに大別される。すなわち、噴霧自身の貫徹力を利用して混合気を層状化する方式をスプレーガイド方式、ピストンに設けられたキャビティを利用して濃い混合気をプラグ近傍に集める方式をウォールガイド方式およびシリンダ内部流動を利用して層状化する方式をエアガイド方式に分類される。この3つの方式をFig.81に示す。実際のエンジンにおいては、これらの中間的なものもある。

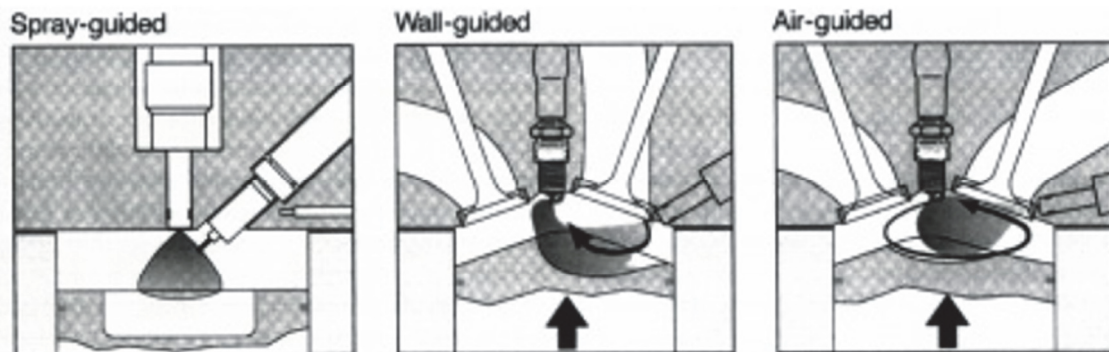


Fig. 81 Three Concepts for Direct Injection Stratified Charge

スプレーガイド方式では、噴射弁とスパークプラグは比較的近くに設置され、噴霧特性によって形成される層状混合気を用いて成層燃焼を達成する。従って噴霧特性によって運転範囲や実際の運転する混合気濃度が制限される。スパークプラグに直接液滴が衝突するため、安定燃焼に対する検討も必要である。

ウォールガイド方式では噴射弁とスパークプラグは、スプレーガイドに比べ離れて配置される。これはピストンキャビティ形状を用いて混合気をスパークプラグ近傍に輸送するためである。筒内空気流動は、混合気の輸送をアシストする役割を担う場合が多く、一般的なウォールガイド方式は後述するエアガイド方式との組み合わせと考えることができる。またこの方式は、噴射から点火までの時間が長く設定できるため、より広い範囲の空燃比で運転することが可能である。混合気の層状化においては、噴霧特性の影響がスプレーガイド方式に比べ小さく、比較的安定した方式である。1996年に三菱自動車とトヨタ自動車実用化した成層直噴エンジンは、このウォールガイド方式である。

エアガイド方式では、噴霧はピストン頂面に衝突することなく、蒸発した混合気が直接空気流動によってスパークプラグ近傍に運ばれる。この方式は、壁面への燃料付着が少なく、排出ガス性能の面で有利であるが、空気流動で混合気を制御するため、回転数などによって空気流動が変化した場合に安定して混合気を制御できるよう空気流動を制御する必要がある。

13.4 その後のガソリン筒内噴射の進化¹⁰⁴⁾

その後、電子制御式の筒内直噴が登場して20年が過ぎた。世界中の自動車メーカーが筒内直噴エンジン車を実用化するようになり、層状給気だけでなく均質燃焼で高圧縮比化と対ノック性向上による低燃費化、ポート噴射併用によるPM低減、過給によるダウンサイジング、の筒内直噴エンジンが出現した。概ね次のような進化を辿っていると思われる。

第1世代：自然吸気で成層燃焼)層状給気による燃費改善 三菱、トヨタ

第2世代：自然吸気で均質燃焼)始動直後の排ガス改善

第3世代(過給吸気で均質燃焼)ダウンサイジングコンセプト

第4世代(自然吸気?成層燃焼?均質燃焼(ストイキオメトリ?リーン?)予混合自着火?)

一方で噴射装置も高機能化を図り、小型化、高燃料圧力化、1行程中の多段噴射化(高応答化)、多孔化、高信頼性化が進められている。この動きは、ディーゼルコモンレールと同じである。大きな技術課題としては、排気中のPM粒子数低減と考えられる。

以上の動きは現在進行形であり、現役の技術者の方々が日夜開発に集中しておられることであり、関係する論文も出続けている状況なので、この内容について筆者の現段階の論評は控えたい。

(連載終わり)

(あとがき)

筆者は一時期ガソリン筒内噴射弁の開発を担当したことがあった。当時このガソリン筒内噴射技術には内燃機関の歴史に匹敵するくらいの先人技術者の長い歴史があることを知り、開発の参考にしようとして少しずつ資料を半ば趣味のように収集してきた。中には国立国会図書館やドイツ Stuttgartにある Mercedes-Benz Museum で入手できた資料もある。このたび思いがけなくこれらを引っ張り出して、歴史の技術解説を執筆する機会を得たことは望外の喜びである。

この歴史をまとめていて、全体に感じたことは「技術は必ず繋がっていて不連続性がない」ということである。Otto や Diesel の夢が無気や有気の筒内直噴に繋がり、航空機用気化器の課題解決が筒内直噴を生み自動車にもたらされ、社会の状況に対応して進化を遂げた。

自動車技術会からの要望で分野外の技術者に対しても分かり易い表現を心掛けたが、何よりもこの分野の研究開発を担当する方々にとって知らなかった歴史もあると思われるので大いに参考資料にしていれば幸いである。

本稿中、事実誤認や誤植があればご指摘ご叱責いただきたいと思います。最後の章は少しあっさりとしたが、この意図は13.4節の末尾に示した。現在の現役技術者の方々の中からぜひとも本稿の続編を執筆される方が登場することを願う次第である。

(謝辞)

本稿を執筆する機会を与えてくださった JSAE-Engine Review 編集委員会委員長の飯田訓正先生、本稿の編集をご担当されきめ細かく相談にのっていただいた飯島晃良先生、並びに編集委員会やご関係の自動車技術会の方々に深く感謝いたします。

【参考文献】

- 77) 鈴木孝, エンジンのロマン(初版), p37, プレジデント社, 1988年
- 78) 坂上茂, 三菱航空発動機技術史ガソリン噴射, 水メタノール噴射技術の進化と三菱重工業 2013年6月- 大阪市立大学学術機関リポジトリ http://dlisv03.media.osaka-cu.ac.jp/infolib/user_contents/kiyo/111C0000001-78.pdf
- 79) P.H.Schweitzer, 齊藤孟(訳); 内燃機関の現在と将来(3), 内燃機関, Vol.1, No.5 (1962) (原題) P.H.Schweitzer, The Present and Future of the Internal Combustion Engine, (Transcript of Lecture), Tokyo Oct.19th 1961, Osaka Oct.27th 1961
- 他に 調 尚孝, 内燃機関の現在と将来, JSAE-Engine Review, 1-2, Vol. 1 No. 2 (2011)
- 小林久徳, ガソリン噴射の窓から見えること, 自動車技術会中部支部, 第8回先輩講話, 2006年6月7日
- 80) 岡 剛, 層状給気機関の燃焼, 内燃機関の燃焼基礎講座第10章, 月刊内燃機関編集委員会編 173-179, 山海堂, 1962年2月,
- 81) R.A.Haslett, M.L.Monaghan, and J.J.McFadden, Stratified Charged Engines, SAE Technical Paper, 760755, 1976
- 82) 佐味弘之, 柳原弘道, 筒内噴射成層エンジンの開発の現状と将来への期待, 自動車技術, Vol.33, No.1, 49-83, 1979
- 83) Giovanetti, A., Ekchian, J., Heywood, J., and Fort, E., "Analysis of Hydrocarbon Emissions Mechanisms in a Direct Injection Spark-Ignition Engine," SAE Technical Paper 830587, 1983
- 84) 飯山明裕, 村中重夫, DISC エンジンの現状と展望, JSAE 9431030, 自動車技術会, 1994
- 85) Richard van Basshuysen, Gasoline Engine with Direct Injection, Chapter 2, VIEWEG-TEUBNER, 2009(64) JAN P. NORBYE, AUTOMOTIVE FUEL INJECTION SYSTEMS A TECHNICAL GUIDE, 21, Motorbooks International Publisher & Whole Sales, 1981
- 80)~85) 以外にも数多くの論文や総説が提出されている また 85) の文献欄には各燃焼方式の研究者の原論文が網羅されている
- 86) Bishop, I. and Simko, A., "A New Concept of Stratified Charge Combustion - The Ford Combustion Process (FCP)*," SAE Technical Paper 680041, 1968
- 87) Scussel, A., Simko, A., and Wade, W., "The Ford PROCOCO Engine Update," SAE Technical Paper 780699, 1978,
- 88) Yui, S. and Ohnishi, S., "A New Concept of Stratified Charge Two Stroke Engine Yui and Ohnishi Combustion Process (YOCP)," SAE Technical Paper 690468, 1969
- 89) Michael L. McKay, "Pneumatic Fuel Metering-A New Approach to Advanced Fuel Control", SAE Technical Paper 820351, 1982
- 90) W.Froede, Benzineinspritzung fuer Kleine Zylinder von Otto- Motoren, MTZ, Nr.8, 1955
- 91) 藤沢英也, 川合静男, ディーゼル噴射, 山海堂, p9, 1988
- 92) P.G.Burman, F.Deluka, Fuel Injection and Controls for internal combustion engines, American Bosch, p9, 1962
- 93) 棚沢泰ら, ディーゼル機関(第1)高速編 (1963年), 山海堂, p96, 1963
- 94) 当時の Orbital 社パンフレットより
- 95) PCT 特許 WO88/07628 (International Publication Date: '88.Oct.6) より
- 96) オプティマックス 2017 マーキュリーエンジン <http://www.kisaka.co.jp/mercury/optimax2015>
- 97) 独 Provenion 社のホームページに噴射弁の作動が動画で紹介されている <http://www.provenion.de/65-1-FFI.html>
- 98) <https://global.yamaha-motor.com/jp/news/1999/0913/outboard.html> 世界初の HPDI を搭載。クリーンで経済的な高性能2ストローク船外機 ヤマハ船外機「Z200N」新発売
- 99) 金子靖雄, ガソリン筒内直噴エンジン, 103-114, 山海堂, 2000
- 100) トヨタ自動車 PRESS INFORMATION, 直噴ガソリンエンジントヨタ D-4, 1996年
- 101) 高山干城, 杉山雅則, 吉岡幸生, 特集 未来への挑戦 TOYOTA D-4, TES MAGAZINE, Vol.48, No.2, 18-25, 1997, トヨタ技術会編
- 102) 村瀬栄二, 小型ガソリンエンジンの筒内現象解析による燃焼改善に関する研究, 早稲田大学博士論文, 第2章 p12, 2005年12月 早稲田大学リポジトリ <https://waseda.repo.nii.ac.jp/>
- 103) Preussner, C., Döring, C., Fehler, S., and Kampmann, S., "GDI: Interaction Between Mixture Preparation, Combustion System and Injector Performance," SAE Technical Paper 980498, 1998
- 104) ガソリン直噴エンジン ウキベディア , 英語サイトもあり