火花点火成層エンジンの開発現状と将来展望

柳原 弘道*, 佐味 弘之*
Hiromichi YANAGIHARA Hiroshi SAMI

Key Words: Internal Combustion Engine, Stratified-Charge Engine, Current Technology, Future Prospect

1. ま え が き

火花点火成層エンジンとは、燃焼室内混合気成層状態に変化する濃度分布を与え、可燃混合気層域に設けられた点火プラグで点火し、主として拡散によって形成される可燃層に沿って、混合気全体へ火炎伝ばさせようとする方式である。この方式では、総合空燃比が可燃域を越えて薄くても、局部的に可燃混合気層が形成されるので、ほぼ一様な濃度の混合気が供給される通常のガソリン機関の場合と異なり、部分負荷での吸気絞りは不要である。

この火花点火成層エンジンが実現できれば、使用頻度の高い軽、中負荷域において吸気絞りがないため、吸排気のポンプ損失が少なくなり、また総合空燃比が薄く、空気サイクルに近づくという両方の効果によりディーゼル機関に近い、すなわちガソリン機関に比べて少なくとも20%は高い熱効率が期待できる。さらにこのエンジンの点火後の燃焼は、主として拡散燃焼であるため、耐ノック性が高く、オクタン価に対して鈍感である。一方、点火プラグを使って着火させるため、セタン価の低い燃料まで使用できる。したがってガソリン機関と比べて圧縮比は高くとることができ、かつ多種燃料を使える利点がある。ただし、圧縮比を高くすれば図示効率は向上するが、摩擦力は増加するので両者のバランスにより決まる適正な圧縮比が存在する。

このような特徴と利点をもつ火花点火成層エンジンの研究は、過去60年の間に多くの開発努力がなされてきたが、負荷と速度の広い範囲で着火

可能な混合気を点火プラグ近くに形成することが難しいため、低負荷での燃焼が不安定になり、多量の未燃成分を排出することが問題であった。このことは排出ガスの規制が厳しくなるにつれて、大きな欠点となり実用化が遠のくように思われた。しかし現在直面する重要課題である燃料消費量の低減に対して、このエンジンの研究はふたたび加速してくるものと考えられる。さらに将来予想される燃料の質（セタン価、オクタン価、粘度、蒸留点など）の変化、あるいはアルコール燃料の導入といった多種燃料化に対しても、この研究は重要な意義をもってこよう。

2. 開発の現状

成層エンジンには燃焼室形態として単室式、副室式がある。単室式では形成される渦流が弱いいため、混合気の成層化は困難となり、したがって燃焼が不安定となりやすいが、燃焼室壁面からの熱損失が少ないという利点がある。一方、副室式では強い渦流が利用でき成層化は容易であるが、熱損失は大きくなるため、単室式に比べて燃料経済性は若干劣る。

一方、成層状態を特徴づける重要な指標として噴射時期がある。ディーゼル機関なみに遅く、すなわち上死点近傍で噴射する方式では混合気の均質度が弱くなるため、成層度が強くなる。また噴射時期が大幅に早い方式では混合気の均質度は高くなり、したがって成層度は弱い。

以上の観点から、各種の方式を単室式と副室式に分け、かつ噴射時期が早いものと遅いものとに分類したものが図1である。この分類により、およそ燃焼形態の特性が推定できよう。本稿ではそのなかの代表的な方式である Texaco-TCCS,

* 正員、トヨタ自動車工業会社東富士研究所 (〒410-11 裾野市御宿1200)。

MAN-FM, Ford-PROCO, VW-PCI および最近発表された TOYOTA-MVCS をとりあげる。

2.1 Texaco-TCCS (アメリカ) (Texaco Controlled Combustion System)⁽¹⁾ Texaco 社で研究されており、当初は多種燃料性の要求が強い軍用車を対象であった。その構成を図 2 に示す。噴射された燃料は点火プラグの方向に移動中に、空気と混合蒸発し可燃混合気となり点火される。燃料噴射中に火炎面が形成され、燃焼生成物は渦

図 1 火花点火成層エンジンの種類

図 2 Texaco-TCCS の燃焼室

流とともに火炎面から運び去られる。着火可能な点火時期範囲が狭く、着火の確率を高めるためくり返し放電点火が試みられている。

ディーゼル機関と比べて燃焼過程は似ているので、出力、燃費、騒音、スモークなどの特性も類似である。多種燃料性は優れているが(表 1)、軽負荷域での燃焼が不安定であり、未燃成分の排出も多くアイドリング時のにおいも強い。これらの不具合を解消するために吸気絞りも試みられているが、最大のねらいである燃料経済性の利点が犠牲となる。最近 United Parcel Service Inc., で郵便配達用として一部使用されている。

2.2 MAN-FM (西ドイツ) (Fremdgezündetes M-Verfahren)⁽²⁾ FM 方式も軍用として開発されてきた。ディーゼル機関の M 方式から発展したものであり、図 3 にその構成を示す。M 方式は球形の燃焼室壁面に軽油を噴射し、壁面上に形成された燃料膜を、火炎の放射熱と壁面からの熱により蒸発させ燃焼を制御するものであるが、FM 方式はこれに点火プラグをもうけ、その近傍に燃料蒸気が集まりやすくしてガソリンその他のセタン価の低い燃料でも使えるようにくふうしたものである。吸入渦流が壁面に沿って流れる燃料膜を薄くひきのばして、壁面にもうけたくぼみに集中させ点火プラグに導く。これにより噴射量の多少に無関係に、可燃混合気が点火プラグ近傍に形成される。

現在、吸気を絞らない運転をほぼ実現しており、高い多種燃料性およびディーゼル機関と同等

図 3 MAN-FM の燃焼室

表 1 各種火花点火成層エンジンの総合比較

	Ford-PROCO V 8-5752 cc	Texaco-TCCS L 4-2311 cc	MAN-FM L 6-7 035 cc	VW-PCI L 4-1 600 cc	TOYOTA-MVCS L 4-1 988 cc	ディーゼル機関 (注1)	ガソリン機関 (注1)
最高平均有効圧 kg/cm ²	8.2	7.7	8.2~10.5	7.6	6.5	8.0~8.5	9~11.4
副室容積比 %	—	—	—	20~25	78	—	—
圧縮比	11	10	14~15	8~8.3	9.0	20~21.5	7.6~9.5
噴射時期	45°BTDC	26°BTDC~	35~40°BTDC	70°BTDC	120°BTDC	20° BTDC~TDC	—
スワール比	3~5	不明	3.2~3.5	不明	約 20	約 20	—
空燃比	12~20 (アイドル 60)	16~60	14~60	14~20	17~60	16~60	12~16
吸気絞りの程度	中	小	小	中	小	小	大
成層化の程度	弱い	強い (液滴燃焼度大)	強い	弱い	強い	液滴燃焼	均質燃焼
軽負荷域の燃費	ガソリン機関に近い ガソリン機関より高い	ディーゼル機関に近い ディーゼル機関に近い	ディーゼル機関に近い ディーゼル機関より低い	ガソリン機関よりやや悪い ガソリン機関より高い	ディーゼル機関に近い ディーゼル機関に近い	—	—
騒音	●ガソリン ●ディーゼル油 混合ガソリン ●メタノール 混合ガソリン	●ガソリン ●ディーゼル油	●ガソリン ●ディーゼル油 ●メタノール	●ガソリンのみ	●ガソリン ●ディーゼル油 混合ガソリン	—	—
多種燃料性	—	—	—	—	—	●ディーゼル油のみ	●ガソリンのみ
1975 FTP エミッション g/mile	Base (3.56, 26.4, 1.00)	Base (2.33, 5.88, 1.43)	不明	リーニンリアクタ +EGR (0.4, 3.0, 1.0~1.3)	—	—	—
(HC, CO, NO _x)	酸化還元触媒	酸化触媒 + EGR (注2)	—	—	—	—	—
	(0.35, 1.80, 0.24)	(0.37, 0.24, 0.31)					

(注1) 2~2.5 l クラスの代表エンジン。(注2) 吸気絞りも加わっている。

の燃費率が得られている。問題点は軽負荷での蒸発が十分でないため、壁面上に残る燃料が未燃成分として排出されること、および冷間時のにおいが強いことである。最近アルコール使用の研究も進められている。図4にメタノール燃料を使った、FM エンジンの正味熱効率を、軽油使用の場合と比較して示す⁽³⁾。FM 方式は TCCS 方式と同様に、大きなシリンダ容積のエンジンを対象に研究が進められてきたが、単位シリンダ当たり 500 cc 以下の小形エンジンにも適用できるように努力がなされている。

2.3 Ford-PROCO (アメリカ) (Programmed Combustion Process)⁽⁴⁾ この方式の特徴は強力なスキッシュ作用をねらった狭口燃焼室形状を有し、点火の確率をあげるため点火プラグを二つ設けていることである(図5)。貫徹力の弱い広角噴霧を点火プラグの近くに噴射し、可燃混合気

図4 FM 機関の正味熱効率(メタノール、軽油使用)

図5 Ford-PROCO の燃焼室

の形成をねらっている。比較的早期に噴射されることから、混合気の均質度が高い(成層度が弱い)ものと推定される。このため、ある程度吸気を絞らざるを得ず、したがって燃料経済性も妥協的レベルにあり、多種燃料性も高くない。また異常燃焼(ノッキング)による圧縮比の制約も受けやすい。

2.4 VW-PCI (西ドイツ) (Pre-Chamber Injection)⁽⁵⁾ この方式は図6に示すように、通常のカソリン機関に容積比 20~25% の副室を設け、この副室に補助燃料噴射弁と点火プラグを設けた構成となっている。主燃料は吸気管から予混合ガスとして吸入されるので、副室内の濃混合気から主室内の希薄混合気へ火炎伝ばする。このように二段燃焼させること以外は、通常のカソリン機関と類似であり、吸気絞りも必要で、本来の火花点火成層エンジンの特徴は得られないと思われる。排気対策に効果があり、運転性や耐久性での難点も少ないが、燃料経済性や多種燃料性などにおいて利点は少ない。

2.5 TOYOTA-MVCS (日本) (Multi-Vortex-stratified Combustion System)⁽⁶⁾ この方式は図7に示すように、球体(上部)とだ円体(下部)を組み合わせた形状の副室を有し、その頂部

図6 VW-PCI の燃焼室

図7 TOYOTA-MVCS の燃焼室

に設けられた噴射弁から、下部のくぼみに設けられた点火プラグ周辺に、燃料が噴射されることが特徴である。副室の容積比は約80%である。

上部の球体部と下部のくぼみ部に、それぞれ異なった形態の渦流が形成されるように、副室と連絡孔の細部形状が決められている。くぼみ部の渦流は、強すぎて燃料が散逸しすぎないように、また弱すぎて蒸発不良をおこさないように、適度に弱い渦流に制御されている。これによって点火部に安定した混合気形成される。球体部の強い渦流はくぼみ部の燃料を巻き込み、燃焼室全体における混合気の成層化を助ける。もちろん点火プラグ部から離れるにしたがって、徐々に混合気濃度は薄くなる。図8は油膜法で調査した燃焼室壁に沿う、渦流の軌跡を示す（記号I, IIは渦流中心

図8 MVCS 機関の渦流（油膜法）
 n : 1000 rpm, モータリング運転
 油膜の成分:
 液体パラフィン 30 cc
 菜種油 5 cc
 酸化チタン 25 g

図9 外開式ポペット弁（渦巻室付き）の噴霧角特性

を示す)。なおこれらの渦流の効果のほかに、燃焼室壁面の熱による蒸発作用も、混合気形成に重要な役割を果たす。

噴霧の制御も混合気形成上重要である。軽、中負荷域では、点火プラグ近くの混合気濃度は適正となるが、負荷が増加して燃料量が増えると点火プラグ部の空燃比は過濃となり、点火不良を起こしやすい。特に、点火プラグに噴霧が直接当たると点火不良を起こす。これらを防止するために円すい状の噴霧が得られる、外開式ポペット弁を使うとともに、燃料量の増大につれてその噴霧角が広がるようなくふうがなされている。また、噴霧の貫徹力が強すぎると、燃焼室壁面に噴霧が強く当たり、燃料は液膜状態となって蒸発が不良となるので、比較的低压（約40 kg/cm²）のノズル開弁圧力としている。図9に噴射ポンプ回転数と負荷に対する噴霧角の変化を示す。軽負荷では噴霧角は約30度であり、負荷の増加につれて噴霧角は30度から約80度に広がる。

噴射時期は非常に早く、約120° BTDC になっている。これより早すぎると点火時において燃料が散逸しすぎ未燃成分がふえ、遅すぎると点火プラグ近傍に燃料が集中しすぎることになり、過濃による点火不良をおこす。

燃焼特性は二つの段階に分けることができる。第一段階では、くぼみ部の比較的濃厚な可燃混合気内で火炎核が形成される。第二段階では、発生した火炎が強い渦流により希薄混合気域へ搬送される。このような燃焼過程の典型的な例を図10に示す。膨張行程では少量の未燃成分を含んだ、既燃ガスがシリンダ室に噴出し、未燃成分が反応する。以上のようなプロセスにより、着火遅れが短く、かつ圧力上昇率の低い比較的なめらかな燃焼過程が得られている。図11に指圧線図の一例を示す。軽負荷における圧力上昇率は約1

図10 MVCS 機関の燃焼過程
 火花ギャップ
 120° BTDC 6° BTDC 15° ATDC
 n : 500 rpm, A/F: 56/1, 噴射時期: 120° BTDC
 点火時期: 20° BTDC, 1000 fps

bar/deg. であり、ガソリン機関の圧力上昇率に近い。

図示燃費率と排出ガス特性を図 12 に示す。図示燃費率はディーゼル機関とほぼ同等である。未燃成分が少ないことは、他の火花点火成層エンジンにない特徴である。NO_x はガソリン機関と比べて多く、EGR は必ずうとなる。正味平均有効圧力は 2 l クラスで約 6.5 kg/cm² と低い (図 13)。この原因はシリンダ容積が小さいと燃焼室内のすきま容積、すなわちむだ空間がふえるので、空気利用率が悪化することによる。シリンダ容積の大きいエンジンでは、ほぼ渦流室式ディーゼル機関なみの出力が得られる。

騒音はアイドリング時においてガソリン機関なみとなるが、全負荷時の騒音レベルは回転数があるにつれて、ディーゼル機関に近づく。多種燃

図 11 MVCS 機関の圧力波形

図 12 MVCS 機関の性能

料性については十分な検討はなされていないが、30% 軽油混合ガソリンが使用できる。

以上のごとく、渦流と噴霧の精妙な制御により、広い運転域で吸気絞りなしの運転を実現し、出力は不十分であるものの、燃料経済性の改善はもちろん、火花点火成層エンジンで問題となる排出ガス、特に多量の未燃成分排出を抑制するねらいが達成されている。

2.6 まとめ 以上の五つの方式の主な特性をディーゼル機関、ガソリン機関と対比して、まとめたものが表 1 である。吸気を絞る Ford-PROCO と VW-PCI では、軽負荷の安定性や騒音などは良いが、燃料経済性や多種燃料性などで劣る。吸気を絞らない Texaco-TCCS や MAN-FM などはその逆である。このことは図 13 の燃費率特性の比較で明確に示されている。吸気を絞らないものではディーゼル機関と、吸気を絞るものではガソリン機関と同じレベルにある。そして軽負荷での両グループの格差は判然としている。あらためて火花点火成層エンジン本来の思想である、吸気を絞らないことの重要性が認識される。しかし、特に燃料噴射量の少ない軽負荷域での成層化技術が困難であるため、やむを得ず軽負荷域で吸気絞りを加える妥協的方式も多いのが現状である。

吸気絞りを不要とする良好な成層化の実現のためには、単純な噴霧と気流の適合のみでなく、精妙な気流と噴霧の制御、さらには燃焼室壁面の蒸発などの制御も必要と思われる。成層化の方法には均質混合気の分布に濃淡を与える手法と、噴霧の分布に濃淡を与える手法に大別することができるが、前者は多種燃料性が不十分となりやすく、

図 13 各種火花点火成層エンジンの燃費比較

後者はスモーク、未燃成分が排出しやすいという問題がある。副室式では混合気形成上の自由度が大きい反面、副室通路部の絞り損失あるいは冷却損失が増加する。したがって単室式か副室式かは議論のわかれるところであるが、燃料経済性が重視されるにつれ、単室式への研究指向が強まりつつあると思われる。

3. 将来展望

イギリスの研究機関である Ricardo 社は、火花点火成層エンジンが、本格的に市場に導入される時期を、1990 年代と予想し（図 14）、その誘因は燃料性状の多様化にあるとしている。しかし筆者らは多種燃料性のほかにも、燃料経済性をはじめとする種々の点で、火花点火成層エンジン実現のインパクトとなりうる重要な利点があると考ええる。以下に、開発の指針とする意味もあり、多種燃料性以外のねらい、開発の方向および課題について考察しておく。

図 14 Ricardo 社による乗用車用エンジンの将来予測（図は日本を対象とするが欧米に対しても類似）

3.1 期待できる利点

(1) ガソリン機関より良好な燃費 図 13 から明らかなように、火花点火成層エンジン本来の“吸気を絞らない”思想を実現すれば、少なくともディーゼル機関と同レベルの燃費は望めよう。圧縮比が低いことは図示熱効率にとって不利な要因であるが、摩擦損失が低くなるので正味熱効率への影響は少ない。

(2) ディーゼル機関に劣らない出力 火花点火成層エンジンのような筒内噴射エンジンでは、燃焼室のすきまなどのむだ空間に存在する空気を、上死点近くの短い期間に、燃料と混合させることが技術的に困難であり、したがって空気利用率を、完全な予混合気が供給されるガソリン機関のレベルにすることは容易ではない。しかし表 1 と図 13 をみると、少なくともディーゼル機関と同レベルの比出力（単位シリンダ容積当たりの出力）は期待してよい。なお、下記の(e)を考慮すると、エンジンの重量あるいは大きさが同じならば、ディーゼル機関よりシリンダ容積が大きくなれるので、出力も有利となる。しかし、高出力を望むなら過給するとよい。火花点火成層エンジンでは過給しても、吸気を絞らないため軽負荷域の燃費悪化は少なく、また要求オクタン価が低いいためノッキングしにくいことが予想されるので有力な手段となろう。

(3) ディーゼル機関に比べて期待できる利点

(a) パティキュレート・エミッションが少ない

表 2 のに PROCO で未規制排出物の測定例を示す。特にパティキュレートが少ないことに注目すべきで、ピストンリング摩耗や潤滑油劣化も少なくなろう。ただし、液滴燃焼度が強くスモークが排出される TCCS や FM 方式ではパティキュレートは多いかもしれない。

(b) サルフェート・エミッションが少ない
ガソリンを使うので当然であろう。

(c) NO_x を低減しやすい ディーゼル燃焼では、その構成要素である液滴での成層機構、およ

表 2 Ford-PROCO の未規制排出物

1975 FTP

		Ford-PROCO (触媒付き)	CUTLASS ディーゼル機関 (触媒なし)	CUTLASS ガソリン機関 (触媒付き)
パティキュレート	mg/km	6	410	9
ベンゾピレン	$\mu\text{g}/\text{km}$	0.2	3.0	0.2
アルデヒド	mg/km	22	32	9

び着火後噴霧全体へ一時に燃え広がる機構は変えにくく、制御の自由度が少ない。これに対して火花点火成層エンジンでは、構成と適合によって層形成速度を制御しうる自由度が大きいので、燃焼率を抑制して NO_x を低減しやすいと考えられる。また、パティキュレートやサルフェートの排出が少ないので、EGR のエンジン耐久性へおよぼす影響が少ないという利点も期待される。

(d) 静粛にできる (c) で述べたことは静かに燃焼させる根拠でもある。また、3・2(5) 項に記すごとくディーゼル機関より低い圧縮比と、噴射圧力で構成できる可能性が大きい。これは特にアイドリング時の振動、騒音低減に効果的と予想される。

(e) 軽量にできる (c) で述べたことからまた、最高爆発圧力を低くでき、現用のガソリン機関に近い軽量設計が可能となる。またピストンの熱負荷が低いなどの利点も期待される。

以上述べてきたことから、このエンジンの完成像は、ガソリン機関の種々の長所を備え、ガソリンで運転できるディーゼル機関という姿であるように思える。ガソリンと軽油の需給バランスの問題もあり、ディーゼル機関が普及すればするほど、このエンジンの必要性が高まるものと予想される。

3・2 開発の向かうべき方向 開発現状を踏まえ上記のねらいを念頭におくとき、開発の向かうべき方向は次のようではないだろうか。

(1) 成層化の不十分さを吸気に絞りと与えて妥協する姿勢は極力さけるべきである。2・6 節で述べたように、このような妥協は燃料経済性や多種燃料性を犠牲にし、開発の意義を大半消失する。

(2) スモークあるいはパティキュレートが発生しやすく、また圧力上昇率が大きくなりやすい液滴燃焼の度合は少なくするべきである。

(3) 単純な噴霧と気流の適合のみでは、広い運転域での十分な成層化は困難と思われる。MAN-FM 方式や TOYOTA-MVCS におけるように、壁面蒸発を利用したり、噴霧や気流に多次元的な変化を持たせるなどの、くふうが必要であろう。できれば、これらの制御が熱損失の少ない単室式で実現されることが望ましい。

(4) 燃焼室壁面における燃料の蒸発制御に関しては、最近進歩が著しいセラミック技術などによる断熱構成の導入も有効な手段であろう。

(5) 振動、騒音の面からディーゼル機関よりは低圧縮比、低噴射圧力での構成が望ましい。層形成上、圧縮容積をある程度大きくとる必要があること、および強力な微粒化は不要と考えられることから、それらの実現の見込みはある。

(6) 現ガソリン機関よりは高圧縮比になると予想され、これに伴う要求電圧増大に対応しうる点火系の開発が必要となる。また、着火性向上のための高エネルギー点火の検討も必要であろう。

(7) NO_x 低減のため、EGR の採用は必要であろう。

3・3 課題

(1) 成層化実現のための中心的課題は、燃料、噴霧、蒸発および気流に要求される特性の明確化、ならびにそれらの生成法の開発と適合である。このためには、噴霧の観察技術および燃焼室内部の温度、空燃比、流れなどの分布や様相を、経時的に把握する技術の向上が望まれる。

(2) 実用化のための重要な課題は、制御機構も含めた噴射系や、点火系の簡素化と原価低減、ならびに噴射弁や点火プラグなどの耐久性保証であろう。前者に関しては精密制御の必要性もあり、今後の電子技術の進歩に負うところ大である。

(3) HC 低減の予備手段として、低温活性触媒の研究開発は進めておく必要があろう。

4. あとがき

火花点火成層エンジンの現状を分析するとき、このエンジンの基本的なねらいである、優れた多種燃料性や良好な燃料経済性のほかにも、種々の利点が期待できるようである。種々の難題はあるが、少なくともディーゼル機関と同レベルの出力と燃費を有し、しかもその欠点をできるだけ除いたエンジンという姿で、早期の実現を期待している。

(原稿受付 昭和56年7月7日)

文 献

- (1) Mitchell, E., ほか3名, SAE Paper, No. 720051 (1972).
- (2) Meurer, J.S. and Urlaub, A.C., SAE Paper, No. 690255 (1969).
- (3) Meurer, J.S., 成層機関国際会議前刷集, C250/76 (1976), IME.
- (4) Simko, A., ほか2名, SAE Paper, No. 720052 (1972).
- (5) Brandstetter, W.R., ほか3名, SAE Paper, No. 741173 (1974).
- (6) 柳原, 第18回 FISITA 講演論文, 80.446 (昭55).
- (7) McKee, D.E., ほか2名, SAE Paper, No. 780592 (SP 431), (1978).