

VTEC-E リーンバーンエンジンの開発

Development of VTEC-E Lean-Burn Engine

西澤 一 俊* 堀 江 薫* 三 浦 啓 二**
Kazutoshi Nishizawa Kaoru Horie Keiji Miura

荻 原 秀 実** 田 中 力** 山 田 範 之**
Hidemi Ogihara Chikara Tanaka Noriyuki Yamada

要 旨

エンジンの燃料消費率の低減は、自動車メーカーにおける重要な課題であり、希薄燃焼についてはその有効な解決策として各研究機関、自動車メーカーから数多くの研究が報告されている。

この論文では、4バルブ希薄燃焼エンジンの開発に関してエンジンの燃焼改善のみではなく車載時のエンジンマネジメントシステムの開発と車両のモードテスト結果についても説明する。主な内容は独自のバルブタイミングおよびリフトの可変機構を応用した可変スワールシステムの採用によるエンジンの燃料消費率、最大出力の改善、および車両の空燃比制御システムの開発とモード燃費の改善、エミッション規制への適合に関するものである。

ABSTRACT

Reduction of fuel consumption is an increasingly important target of automobile manufacturers today. As one of the effective approaches to improve the fuel economy, a four-valve lean burn engine was developed.

This paper describes the development of a four-valve lean-burn engine which involves improvement of the combustion, development of an engine management system, and vehicle test results.

Among the major themes discussed are : (1) the improvement of brake-specific fuel consumption under partial load conditions and achievement of high output power by adopting a variable-swirl system with a specially designed variable valve timing and lift mechanism; (2) the development of an air-fuel ratio control system; and (3) the improvement of fuel economy as a vehicle and an approach to satisfy the NOx emission standard.

1. ま え が き

近年、世界的な地球環境問題への関心の高まりにつれて、地球温暖化に係わるCO₂排出量低減の重要性が叫ばれ、化石燃料の消費量抑制が求められている。自動車メーカーにおいては、燃料消費の改善のために、多方面からの技術的アプローチがなされているが、なかでも希薄燃焼が燃費改善の有効な手段であることは、以前より検討されており、数多くの研究が報告されている。

しかしながら、希薄燃焼エンジンの実用化に向けては、(1)排気が酸化雰囲気にあるため、三元触媒を有効に利用できず、NO_xの低減が困難であること、(2)希薄混合気下で安定した燃焼を得るためにスワール等を採用すると、その手法によっては、吸入抵抗の増加により高出力化が

困難となること等の課題を解説する必要がある。

上記(1)の課題に対しては、燃焼改善による大幅な希薄燃焼限界の拡大によるNO_x排出量低減と、高精度の空燃比制御が可能なエンジン制御システムを開発したこと、(2)の課題に対しては、1989年に市場に投入したバルブリフト及びタイミングの可変機構(以下VTEC)を応用した、独自の可変スワールシステムを開発したことにより課題を解決し、4バルブ希薄燃焼エンジンを開発した。

本稿では、今回新に開発した1.5ℓ、4気筒希薄燃焼エンジン(VTEC-Eエンジン)について、燃焼改善内容を中心に紹介すると共に、エンジン制御システムの開発と車両のモード試験結果についても言及している。

* 和光研究所

** 栃木研究所

2. エンジン諸元と性能

Table. 1 に VTEC-E エンジンの主要諸元を示す。

この 1.5ℓ、4 気筒エンジンは、シリンダヘッド、シリンダブロック共にアルミ合金製であり、専用化すること徹底した軽量化を図っている。

また、フリクションを低減するため、ローラーフォロワ付ロッカーアーム、低張力ピストンリング等を採用し、希薄燃焼と共に燃費の低減を図った。

今回、新開発された VTEC-E 希薄燃焼エンジンは、Fig. 1 に示す様に、従来の 4 バルブエンジン並みの出力を維持しつつ、燃料消費率 (BSFC) の大幅な低減を達成している。特に、2 バルブの低燃費 (HF) エンジンに対しては、燃料消費率の低減と同時に高出力化も達成している。

3. 吸気バルブ休止機構 (VTEC-E)

3.1. 開発の狙い

希薄混合気下において、安定した急速燃焼を実現する手法としてスワールを採用した。しかし、2 バルブ (吸気 1 バルブ) のスワール給気エンジンでは、Fig. 2 に示す様に、低回転域においては 4 バルブエンジンと同等以

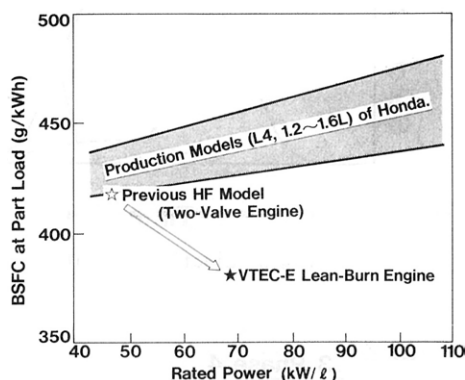


Fig. 1 Trade-off between rated power and BSFC at part load

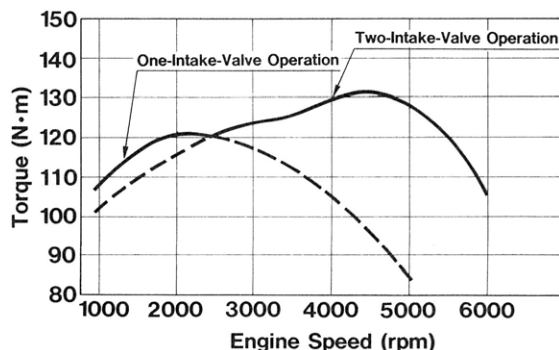


Fig. 2 Comparison of full load performance between two-intake-valve operation and one-intake-valve operation

Table. 1 VTEC-E engine specification

Cylinder Configuration		In-line 4 Cylinder
Bore×Stroke (mm)		75×84.5
Displacement (cc)		1493
Compression Ratio		9.3
Valve Mechanism		SOHC VTEC-E
Number of Valves		4
Valve Diameter	In.	φ 27.5
	Exh.	φ 23.5
Fuel System		PGM-FI
Ignition System		PGM-IG

上のトルクを得ることもできるが、高回転域においては体積効率の低下により出力を低下させる。従って、低燃費と高出力を両立させるためには、低回転域と高回転域での吸気バルブ数の切り換え機構が必要となる。

このため、従来の VTEC 機構を応用した独自の吸気バルブ休止機構 (以下 VTEC-E) を開発し、スワールの可変化を図った。この VTEC-E 機構の、開発時の狙いを以下に示す。

- (1) バルブ休止により、充分なスワールを生成できること。
- (2) スワールの可変機構による、吸気ポート及びバルブ周りの流量係数の低下が無いこと。
- (3) 構造がシンプルであること。

3.2. VTEC-E の概要

3.2.1. 構造と基本作動

Fig. 3 に VTEC-E の切り換え構造を示す。

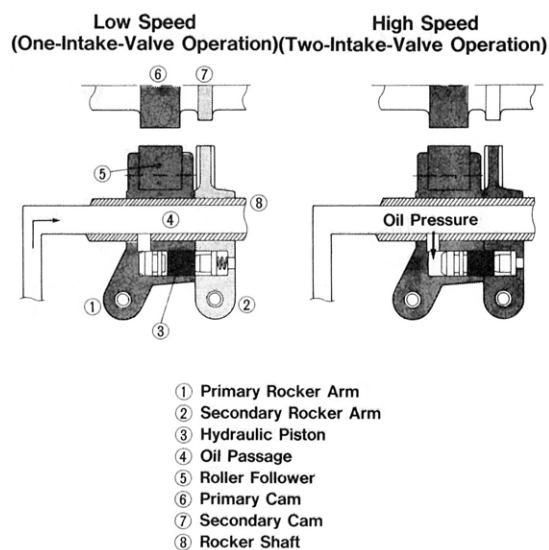


Fig. 3 Actuation of VTEC-E mechanism

VTEC-E の構造は、駆動用のプライマリカムと休止用のセカンダリカムの二つのカムプロフィールを持つ 1 本のカムシャフトと油圧ピストンを内蔵し、ローラーフォロワを有するプライマリロッカーアーム、およびセカンダリロッカーアームとで構成されている。

低回転時は、各々のロッカーアームが独立して相対するカムプロフィールに合わせて作動し、プライマリ側のバルブはリフトするが、セカンダリ側のバルブはほぼ休止状態となる。一方、高回転時には、ECU (エレクトロニック・コントロール・ユニット) からの信号により油圧回路が開き、油圧ピストンに油圧が加わって、二つのロッカーアームが連結されプライマリ、セカンダリの両方のバルブがプライマリカムのリフトで作動する。

このように、VTEC-E エンジンでは、低回転時には、VTEC 機構による吸気バルブ休止によりスワールを生成させ、高回転時は、吸気 2 バルブを作動させ高い体積効率を得る構造と成っている。

インジェクタはサイヤミーズポートの中央に位置し、休止ポートへも燃料が噴射されることから、Fig. 4 に示

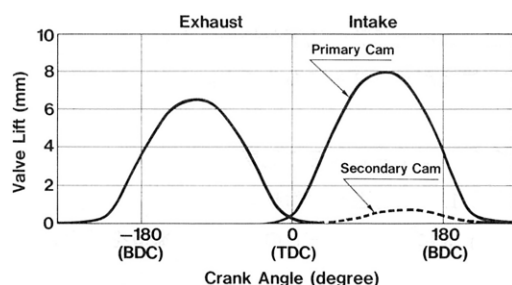


Fig. 4 Valve lift and timing

す様にセカンダリバルブは完全に休止せず 0.65mm のリフトとし、セカンダリポートでの燃料滞留を防止した。

セカンダリバルブのリフトがスワール比に与える影響は 0.65mm のリフトであればほとんどない。

3.2.2. トリガ機構

VTEC-E エンジンでは、吸気 1 バルブ休止状態と吸気 2 バルブ作動状態で高回転域において出力差が大きい。ため、低い温度条件においても吸気バルブ数の切り換えを行う必要がある。しかし、VTEC-E 機構は油圧により吸気バルブ数を制御しており、エンジン油温の低い状態では油圧ピストンの移動時間が遅れることと、油圧の低い回転で切り換えを行っていることにより、Fig. 5 に示す様なハジカレの発生する割合が増加する。このため、ハジカレを起こさずに確実に切り換え動作を行わせるトリガ機構を採用した。

ハジカレとは、油圧ピストンの先端が隣接するセカン

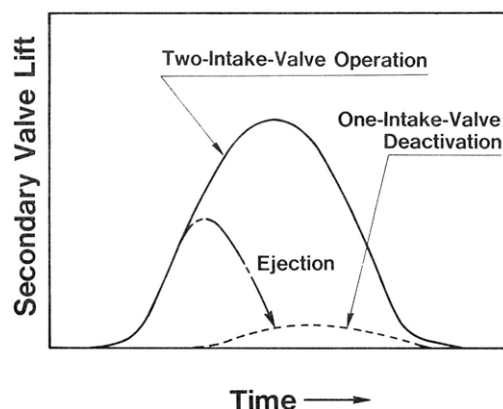


Fig. 5 Ejection pattern

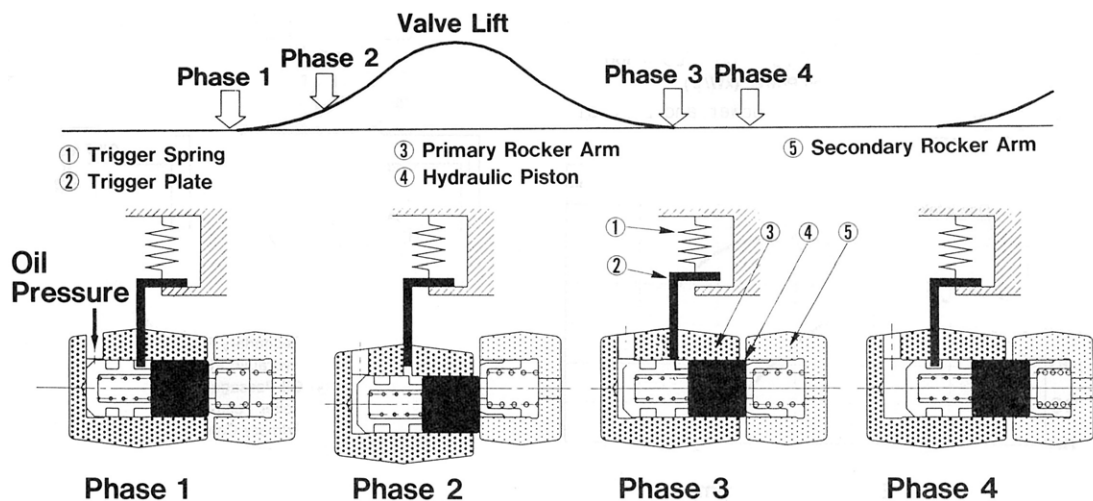


Fig. 6 Actuation of trigger mechanism

ダリロッカーアームに掛かった状態で、バルブリフト開始により油圧ピストンに軸方向の負荷が作用し、セカンダリロッカーアームから油圧ピストンが弾き出される現象である。但し、次のサイクルで確実にバルブリフトは切り換わる。

トリガ機構は、トリガプレートとトリガースプリングから成る非常にシンプルな構造で、セカンダリロッカーアームとプライマリロッカーアームがカムベース円上に位置する期間に、油圧ピストンの移動が完了するように作動開始時期を制御するものである。吸気1バルブ休止状態から吸気2バルブ作動状態に切り換わる時のトリガ機構の作動状態を Fig. 6 に示す。ECU からの信号により、油圧ピストンに油圧が掛かっていてもトリガプレートにより油圧ピストンは移動できない。次に、プライマリロッカーアームがリフトし、タイミングプレートは外れるが、プライマリロッカーアームとセカンダリロッカーアームのリフト差により、油圧ピストンは移動できず待

機状態となる。次に、バルブリフトが終わり、カムベース円上にロッカーアームが戻った時、油圧ピストンは移動することができ切り換え動作を開始する。また低い油温状態で、油圧ピストンの移動時間がカムベース円時間より長くなった場合はトリガ機構付きの場合でもハジカレが発生する。従って、油圧ピストンのストローク時間を測定し、ベース円内で切り換えを完了する限界油温を設定し (Fig. 7)、限界油温以下での切り換えを禁止した。エンジン油温とハジカレ発生率の関係を Fig. 8 に示す。トリガ機構の採用により、 -10°C のエンジン油温までハジカレの発生が無い確実な切り換えが保証できた。

4. 希薄燃焼の改善

4.1. スワールの最適化と燃焼室形状

広い希薄燃焼限界を得るために、ヘリカルポート等によって高いスワール比を設定すると、吸気ポートの流量係数が低下し出力を低下させる。従って、希薄燃焼限界

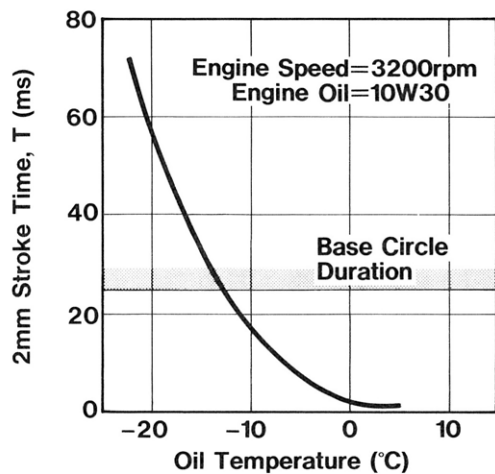
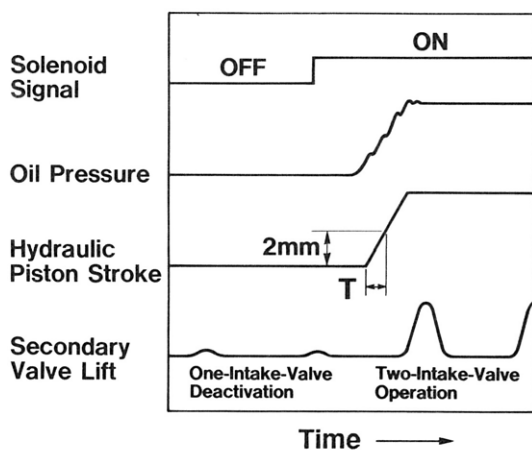


Fig. 7 Response Time For Cam shifting

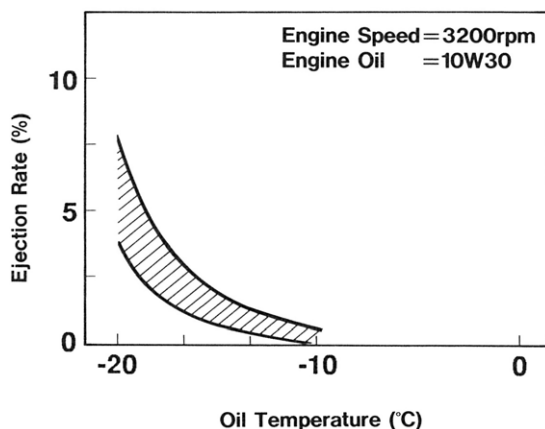


Fig. 8 Ejection rate

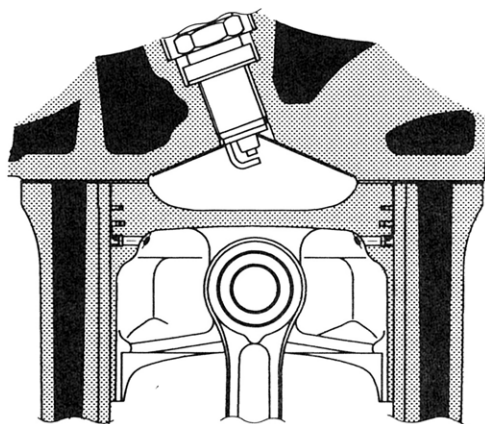


Fig. 9 Cross-section of combustion chamber

拡大は高スワール比化のみに頼らず、燃焼室形状を含めた燃焼の改善も合わせて行い、比較的低いスワール比で十分な希薄燃焼限界を得ることが重要である。

このエンジンに採用した燃焼室形状を Fig. 9 に示す。バルブ径を従来の4バルブエンジンに対して1.5mm小さくすることでコンパクトな燃焼室を形成して、火炎伝播距離の短縮を図り、スキッシュによる強い乱れとで急速燃焼を実現した。この燃焼室を採用したことにより、従来のペントーフ型燃焼室に比べ、同一スワール比における希薄燃焼限界を Fig. 10 に示す様に改善した。

また、スワール比が部分負荷時の燃料消費率、ポンピングロス、および吸気2バルブ作動時の吸気ポート流量係数、全負荷時の出力におよぼす影響を確認し、スワール比の最適化を行った。吸気2バルブ作動時のスワール比は0であり、ストレートポートを用いた吸気1バルブ休止では2.8までのスワール比が得られ、2.8以上のスワール比を得るためにはヘリカルポートを用いた吸気1バルブ休止が必要となる。スワール比の増加と共に希薄燃焼限界は改善されるが、燃料消費率はスワール比が2.5以上でポンピングロスの増加によりサチュレートする傾向にある (Fig. 11)。またヘリカルポートを用

いると、吸気2バルブ作動時の吸気ポートの流量係数が低下し最高出力が約8%低下する (Fig. 12)。

これらのテスト結果を踏まえ、このエンジンの狙いとした燃料消費率低減と出力の両立を考慮し、スワール比をストレートポートで実現できる2.5に設定した。

この結果、このエンジンの最高出力は、従来の4バルブエンジン並みの69kWを達成した。

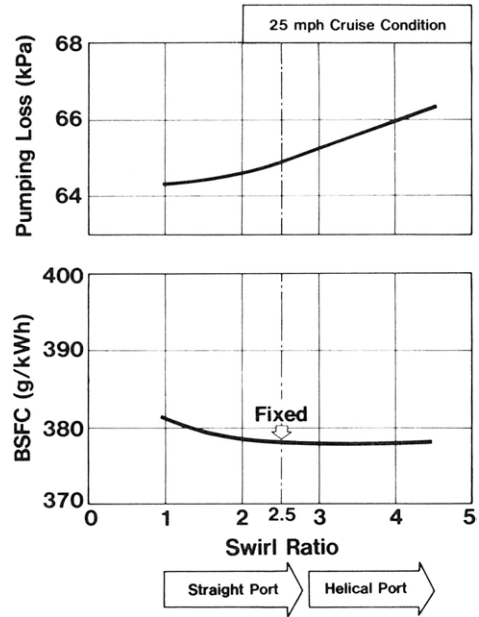


Fig. 11 Influence of swirl ratio on BSFC at part load

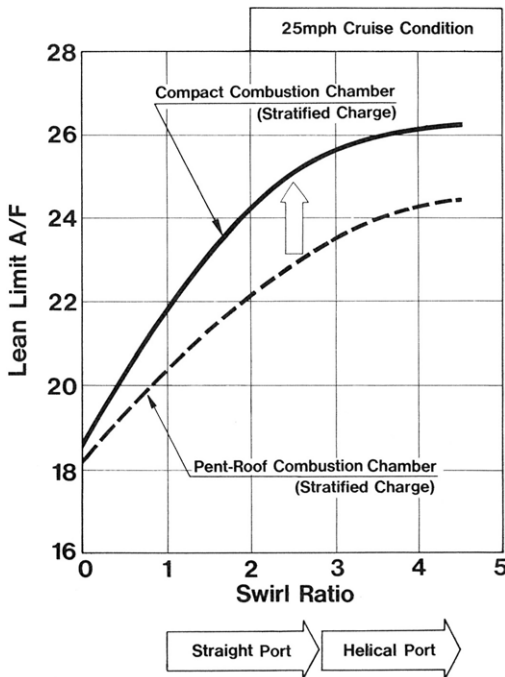


Fig. 10 Effect of compact combustion chamber on lean limit at part load

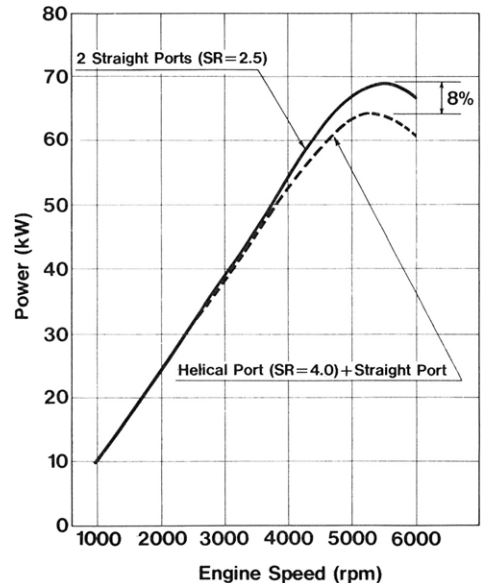


Fig. 12 Influence of intake port specification on full load performance

4.2. 混合気分布 (燃料噴射時期)

ポート噴射式スワール給気エンジンにおいて、吸入行程のある時期に燃料を噴射すると、いわゆる軸方向層状給気が形成され、筒内の上方にリッチ、下方にリーンな混合気が存在することが報告されている⁽¹⁾。筒内の上方、つまり点火プラグ近傍の混合気をオーバーオール空燃比よりリッチ化することにより、着火の安定性が向上し希薄燃焼限界が改善される。この現象を同一空燃比における燃料噴射時期の影響として示したのが Fig. 13 で

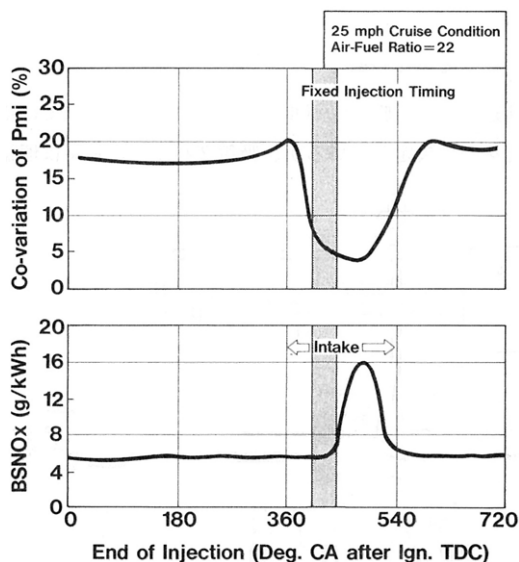


Fig. 13 Influence of injection timing on co-variation of pmi and NO_x emission

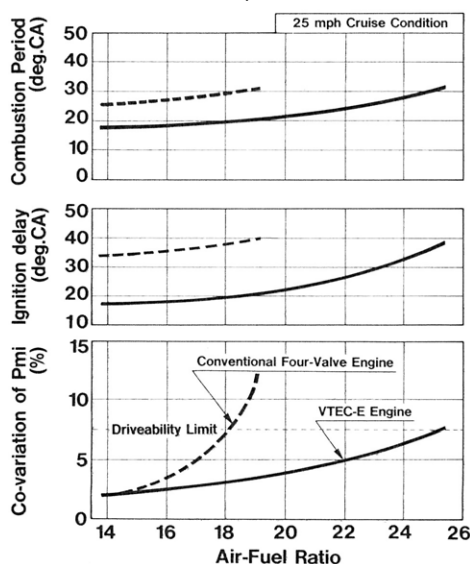


Fig. 14 Comparison of combustion characteristics between VTEC-E engine and conventional four-valve engine

ある。吸入行程中に燃焼安定性を大幅に向上する燃料噴射時期が存在する。

しかしながら、Fig. 13 に示すように最も燃焼安定性の良い燃料噴射時期で噴射を行うと希薄燃焼限界は改善するものの、NO_xの排出量が増加する。この原因として、筒内の一部にリッチな混合気が存在し燃焼するために、NO_xが増加することが考えられる。

ところが、リーンバーンエンジンは三元触媒によるNO_xの浄化が難しく、エンジン自体からの排出量を低減する必要がある。従って、燃料噴射時期の設定は、希薄燃焼限界がわずかに悪化するものの、NO_xが増加しない Fig. 13 に示す領域とした。

4.3. 燃焼特性と燃料消費率

スワールを用いた軸方向層状給気は、点火プラグ近傍の空燃比をリッチ化し着火性を向上するのみでなく、スワールによる乱れ増加と、スキッシュエリアを有するコンパクト燃焼室の採用で急速燃焼が図れる。従来の4バルブエンジンに対する燃焼改善を Fig. 14 に示すが、スワールおよび軸方向層状給気によって、点火から質量燃焼割合が10%に達するまでの期間(以下:着火遅れ期間)が大幅に短縮され、同時に質量燃焼割合が10%から

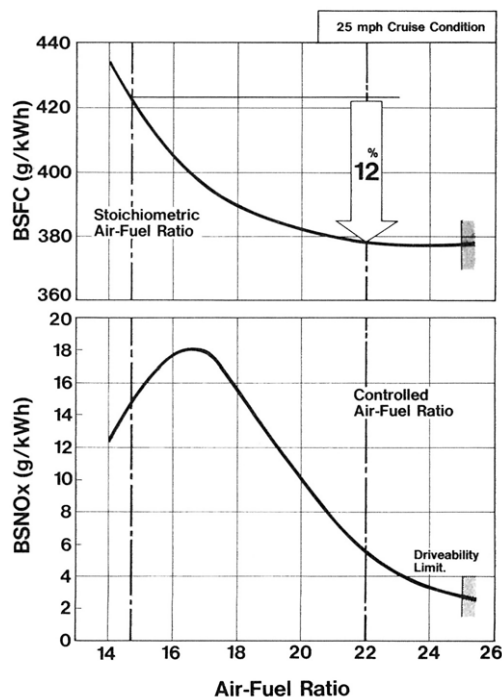


Fig. 15 Influence of air-fuel ratio on BSFC, BSNO_x

90%までの期間(以下:燃焼期間)を短縮している。また、コンパクト燃焼室によって、燃焼期間が更に短縮されている。その結果、希薄燃焼限界空燃比は18から25へと大幅に改善された。

希薄燃焼エンジンにおいては、可能な限りその運転空燃比を希薄化することによって NO_x 排出量自体を低減させる必要があるが、現行の NO_x エミッション規制を満足させ、且つ燃焼変動も十分に低いレベルに保つために、このエンジンの運転空燃比を22に設定した。この設定により、Fig. 15に示す様に理論空燃比に対して燃料消費率を12%低減できた。

一方、これらの燃焼改善技術は希薄燃焼に対してのみでなくEGRに対しても有効であり、理論空燃比におけるEGRによって5%の燃料消費率低減を得ることができた(Fig. 16)。従って、 NO_x 低減を図りながら低燃費を実現するために、理論空燃比下でEGRを導入している領域もある。

5. エンジン制御システム

エンジンでの燃料消費率低減効果と安定燃焼を車載状態においても実現させ、なお且つ NO_x 規制値も同時に満足させるためにFig. 17に概要を示すエンジン制御システムを開発した。

このシステムの特徴は、従来システムに対しエンジンの運転状態によって吸気バルブ数を切り換えるスワール制御システムとリニア空燃比センサ(以下LAFセンサ)により広範囲の空燃比を検出し、フィードバック制御する空燃比制御システム、およびEGR制御シ

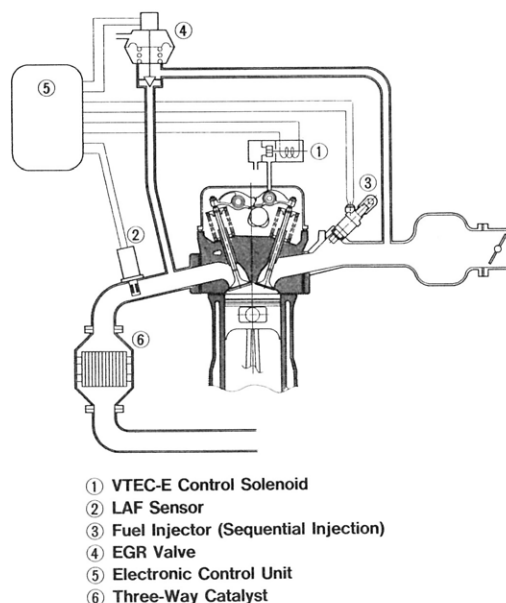
ステムを有している点にある。

5.1. スワール制御

スワールを制御するVTEC-E機構において、スワール比の設定は2.5または0の切り換えである。その切り換え領域は、全負荷域においては吸気1バルブ休止時と吸気2バルブ作動時のトルクが等しくなる2500rpmに、また部分負荷域においては3200rpmに、ドライブがショックを感じない範囲でヒステリシスを持たせて設定した。(Fig. 18)

5.2. 空燃比制御

前述の様に、吸気1バルブ休止時の部分負荷域では空燃比を22に設定しているが、吸気2バルブ作動時は理論



Engine Speed=3200rpm
Engine Oil =10W30

Fig. 17 Engine management system

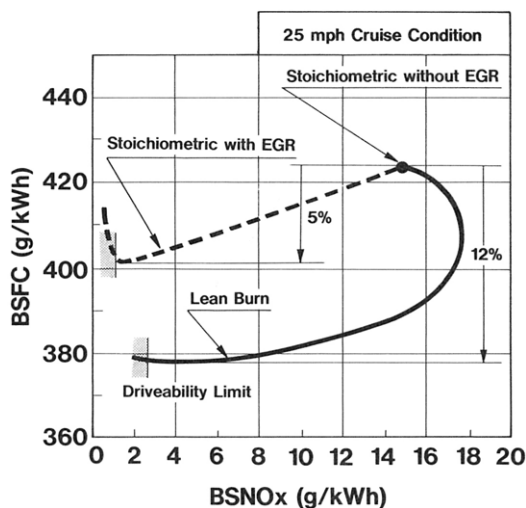


Fig. 16 Improvement of BSFC with lean burn and EGR

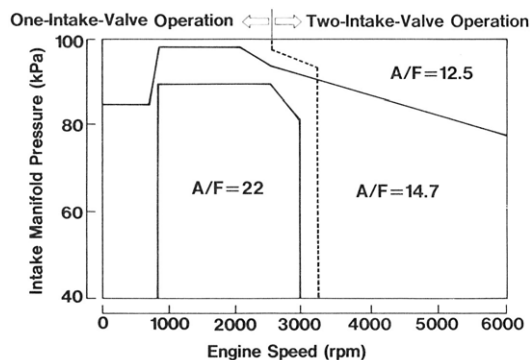


Fig. 18 VTEC-E AND AIR-FUEL RATIO CONTROL MAP

空燃比に設定してEGRを導入している。全負荷域における空燃比は最大出力が得られる12.5とした (Fig. 18)。

しかし、過渡運転において希薄空燃比から理論空燃比に移行する際、空燃比を徐々に変えると途中の空燃比で NO_x 排出量は増加する。逆に、希薄空燃比領域から理論空燃比領域への切り換えを瞬時に行うと大きな空燃比差があるために、ドライバはショックを感じる。従って、燃費、 NO_x 、運転性のそれぞれを満足させるためには、高精度でかつ高応答な空燃比制御技術の開発が希薄燃焼エンジン実用化の鍵となる。そのための最大の課題は、広範囲の空燃比を高精度、高応答で検出できるLAFセンサの開発である。

Fig. 19に、採用しているLAFセンサを示す。測定原理は、 ZrO_2 固体電解質が O_2 を選択的に透過する性質を応用したもので、酸素基準室との比較により、拡散室内の空燃比が常に理論空燃比となる様に制御する電流 I_p により排気ガスの空燃比を知ることができる。リーン状態では、 ZrO_2 固体電解質に正の電流 I_p を流すことにより拡散室内の O_2 を外側電極へ移動させ、またリッチ状態においては逆に負の電流 I_p を流すことにより外側電極から O_2 を

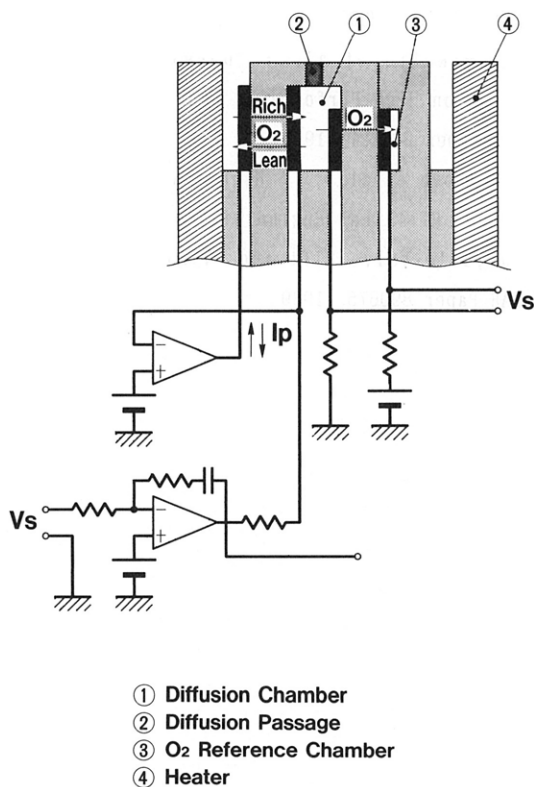


Fig. 19 Principle of detecting air-fuel ratio

拡散室内へ取り入れるが、この時の O_2 は外側電極において、 CO および CO_2 を還元して得ている。このLAFセンサの出力特性をFig. 20に示すが、空燃比10から30までの広い範囲で直線性が得られている。

また応答性は、プロテクタ等の形状を改良することで実用上問題なく、むしろこのエンジンの空燃比の制御性は吸気ポート等への燃料付着によって生じる燃料輸送遅れに支配されている。

さらに耐久性、信頼性については、エミッション、燃費および運転性の保証の観点で重要であり、各種耐久テストを通じて改良を重ね非常に高いレベルを得ることができた。

5.3. 車両燃費

以上の様な希薄燃焼技術およびエンジン制御システムを採用した車両によりモード試験によるエミッションと燃費の評価を行った。

その結果、希薄燃焼の採用により、 NO_x エミッションは目標としたEPA現行規制値(1.0グラム/マイル)を満足しつつ、Fig. 21に示すようにLA-4モードにおいて約8%、ハイウェイモードにおいて約12%の車両燃費の改善を達成した。この燃費結果は全域理論空燃比に設定した同一車両との比較によって得られた。

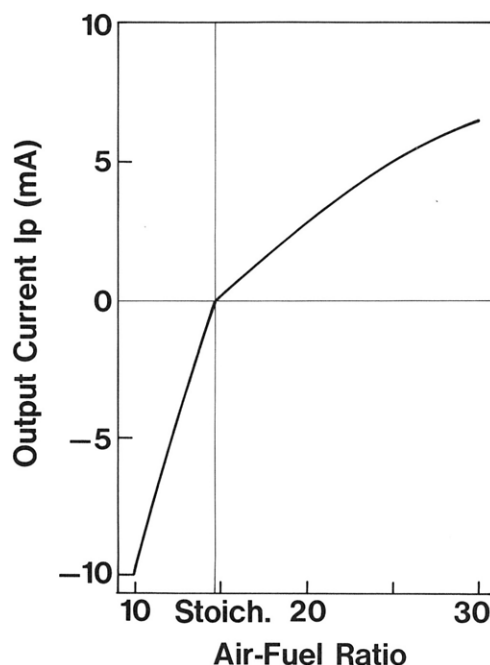


Fig. 20 Characteristics of linear air-fuel ratio sensor

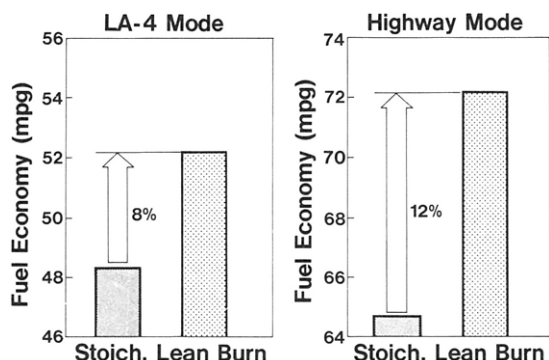


Fig. 21 Effect of lean burn on vehicle fuel economy (Inertia Weight = 2375lb)

LA-4 モードでの燃費改善結果がエンジンの燃料消費率低減 (12%) に比べ若干低い値となったが、これはモード中の設定空燃比が全域希薄空燃比ではなく、低水温時、アイドル時および加速時等において理論空燃比としているためである。

しかしながら、カリフォルニア州の NO_x 規制値 (0.4グラム/マイル) に対しては、全域理論空燃比での EGR の採用と三元触媒の利用によって、その規制値を満足しつつ燃費改善を図っている。

この様に、厳しい NO_x 規制をクリアしつつ、希薄燃焼による燃費効果を維持していくためには、更なる燃焼の改善による NO_x 排出量の低減及び、 NO_x 還元用触媒の研究開発が今後の課題である。

6. まとめ

独自の吸気バルブ休止機構 (VTEC-E) を用いた可変スワールシステムと、軸方向層状給気、およびコンパクト燃焼室を採用した希薄燃焼エンジンを開発し、以下の結果を得た。

- (1) 希薄燃焼限界を大幅に拡大した (空燃比 25) 結果、空燃比 22 での常用運転が可能となり、エンジンの燃料消費率を 12% 低減した。
- (2) 流量係数の高いストレートポートの採用が可能となり、吸気 2 バルブ作動時の体積効率を従来の 4 バルブエンジンと同等とすることで 69kW の出力を達成した。
- (3) 高応答リニア空燃比センサを用いた空燃比制御システム開発により、過度運転時の空燃比を高精度に制御することで、LA-4 モードにおいて NO_x の EPA 現行規制値を満足しつつ約 8% の車両燃費改善を希薄燃焼によって達成した。

参考文献

- (1) A. A. Quader : "The Axially-Stratified-Charge Engine", SAE Paper 820131, 1982
- (2) G. C. Davis et al. : "Modeling the Effect of Swirl on Turbulence Intensity and Burn Rate in S. I. Engines and Comparison with Experiment", SAE Paper 860325, 1986
- (3) S. Matsushita et al. : "Effects of Port with Swirl Control Valve on the Combustion and Performance of S. I. Engines", SAE Paper 850046, 1985
- (4) S. Matsushita et al. : "Development of Toyota Lean Combustion System", SAE Paper 850044, 1985
- (5) B. Khalighi : "Intake-Generated Swirl and Tumble Motions in a 4-Valve Engine with Various Intake Configurations-Flow Visualization and Particle Tracking Velocimetry", SAE Paper 900059, 1990
- (6) S. Furuno et al. : "The Effects of Inclination Angle of Swirl Axis on Turbulence Characteristics in a 4-Valve Lean-Burn Engine with SCV", COMODIA 90:437-442
- (7) L. Mikulic et al. : "Development of Low Emission High Performance Four Valve Engines", SAE Paper 900227, 1990
- (8) K. Inoue et al. : "A High Power, Wide Torque Range, Efficient Engine with a Newly Developed Variable-Valve-Lift and -Timing Mechanism", SAE Paper 890675, 1989

■著 者■



西澤 一 俊



堀 江 薫



三 浦 啓 二



荻 原 秀 実



田 中 力



山 田 範 之