

高性能・低エミッション 2.0L 直噴ガソリンエンジンの開発

Development of High-performance and Low-emission Direct Injection Gasoline Engine

甲 田 豊*

Yutaka KOHDA

小 林 裕 幸*

Hiroyuki KOBAYASHI

菅 波 友 二*

Tomoji SUGANAMI

小 川 賢*

Ken OGAWA

要 旨

Honda は燃焼室の中心に高圧インジェクターを配置したセンターインジェクション方式を特徴とする初の 2.0L 直噴ガソリンエンジンを開発した。本エンジンは直噴エンジンの特徴である直噴層状吸気(以下 DISC : Direct Injection Stratified Charge)領域での燃費, エミッション性能を大幅に向上した。また, ピストン形状, 高圧インジェクタ噴霧特性, ならびに VTEC による筒内流動の最適化により, DISC 領域超希薄混合気状態での安定燃焼を可能とした。出力は VTEC 機構および VTC によるカムシャフト位相連続可変機構の採用により低燃費エンジンとしてはトップクラスの出力を達成した。本エンジン搭載の 2004 年モデルストリームは CVT との組み合わせにより 10・15 モード燃費 15.0km/l の低燃費を達成した。低エミッション化では, 大量 EGR および高性能リーク NOx 触媒の採用により超希薄成層燃焼エンジンとしては国内初となる平成 12 年度排ガス規制値の 75% 低減排ガスレベル(「超一低排出ガス」認定)適合を実現した。

ABSTRACT

Honda has developed the first-ever 2.0L i-VTEC I direct injection gasoline engine employing a center injection system in which a high-pressure fuel injector is located in the center of the combustion chamber. This engine significantly improved fuel economy and emissions performance. Optimization of in-chamber fuel flow through redesign of piston shape and the spray characteristics of the high-pressure fuel injector and the application of VTEC has enabled the achievement of stable combustion of a stratified ultra-lean air-fuel mixture. Due to VTEC mechanism and the continuous variation of camshaft phase enabled by VTC, the engine has achieved top-class power for a high fuel economy engine. The new engine is fitted in the 2004 model Stream, and in combination with the CVT employed in the vehicle has enabled the Stream to achieve a low fuel consumption figure of 15.0 km/l in Japanese 10-15 mode. A large amount of EGR and a high-performance lean NOx catalyst to reduce emissions has further enabled the Stream to become the first vehicle with an engine employing ultra-lean stratified charge combustion to achieve an emissions level of only 25% of the level stipulated by the Japanese 2000 emissions regulations and obtain Ultra Low Emission Vehicle (ULEV) certification.

1. まえがき

自動車業界では近年の地球環境問題の高まりに対し, 低燃費・低エミッション化を主眼としたパワープラントの開発を進めている。特に筒内直噴ガソリンエンジンは火花点火内燃機関の燃費改善技術として様々な形式の直噴エンジンが研究, 開発されてきている^{(1), (2)}。Honda においても, 新世代パワープラント「i-シリーズ」^{(3), (4)}を商品化してきたが, 今回 2000 年モデルストリーム用に開発された 2.0L i-VTEC リーンバーンエンジン⁽³⁾をベースとし, 初の 2.0L

*栃木研究所

i-VTEC I 直噴ガソリンエンジンを開発した。独自のセンター噴射コンセプトを採用し, 直噴ガソリンエンジンでは困難と考えられていた, 超希薄成層燃焼による燃費改善と排ガスエミッション低減の両立を達成した 2.0L i-VTEC I 直噴ガソリンエンジンの超希薄燃焼技術について報告する。

2. 開発のねらい

本エンジンを搭載する新型ストリームの開発コンセプトは, 「環境とスポーツ性の高次元バランス」である。直噴エン

ジンの大幅な低燃費効果を中心に、CVTの採用による更なる低燃費化を狙った。実車動力性能についても直噴エンジンの出力改善とCVTによるレシオの最適化により、環境性と高次元での両立を狙った。開発の具体的目標は下記の通りである。

- (1) 低燃費(10・15 モード燃費：15.0km/l)
- (2) 低エミッション(平成 12 年度排ガス規制値の 75% 低減排ガスレベル「超一低排出ガス」)
- (3) スポーティーな走りを実現するための高出力性能

3. エンジンの概要と主要諸元

Fig. 1 にエンジンの概要図を、Table 1 に新開発 K20B エンジンと従来モデル K20A エンジンとの主要諸元比較を示す。筒内への直接燃料噴射による吸入空気充填効率向上とノッキング抑制効果は一般的に知られている^{(5), (6)}。本エンジンの最大の特徴はこれら直噴の特徴を活かし、超希薄成層燃焼による大幅な燃費の改善と低エミッション、また出力向上を両立させるためのセンターインジェクション方式を採用したことである。Fig. 2(a), (b) に示すように高圧インジェクタを燃焼室のセンタにレイアウトし、点火プラグをエキゾーストバルブ間に配置した。限られたスペースにレイアウトをおこなうため、インレットバルブ径とエキゾーストバルブ径は従来エンジンに対してそれぞれ1mm, 2mm 小径化しているが、インレット、エキゾーストポートの形状、およびバルブリフトプロファイルの最適化により、吸排気効率は従来エンジン同等以上を確保した。

また動弁系には、超希薄成層燃焼と高出力両立のために VTEC 機構とカムシャフト連続位相可変機構(以下 VTC)を採用している。K20Bエンジンは従来エンジンに対して高圧縮比化および吸排気系レイアウトの見直しを合わせておこない、従来エンジン K20A 対し中・高速域でのトルク向上させ燃費性能と走りのバランスを高次元で両立させた。Fig. 3 に全開出力特性を示す。



Fig. 1 K20B direct injection gasoline engine

Table 1 Engine specifications

Engine Code	K20B	K20A
Cylinder configuration	In-line 4-cylinder	In-line 4-cylinder
Bore × stroke (mm)	86 × 86	86 × 86
Displacement (cm ³)	1 998	1 998
Compression ratio	10:1	9.8:1
Valve train	DOHC VTEC	DOHC VTEC
Number of valves	4 per cylinder	4 per cylinder
Valve diameter (mm)	In.	34
	Ex.	28
Valve diameter (mm)	In.	35
	Ex.	30
Fuel supply system	Programmed fuel injection	Programmed fuel injection
Fuel injection pressure (MPa)	8 - 10.5	0.34
Ignition system	Programmed ignition	Programmed ignition
Max.power (kW/rpm)	115 / 6300	113 / 6500
Max.torque (N·m/rpm)	188 / 4600	186 / 4000

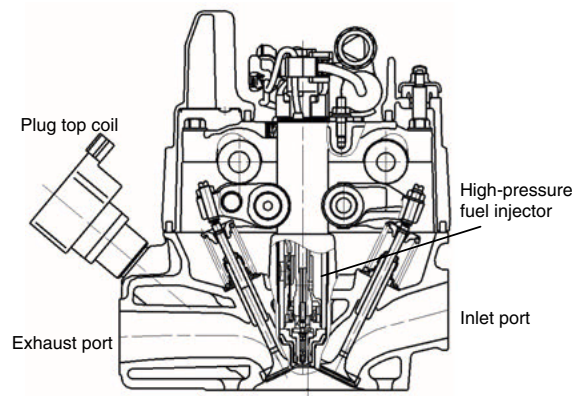


Fig.2(a) Section view of cylinder head

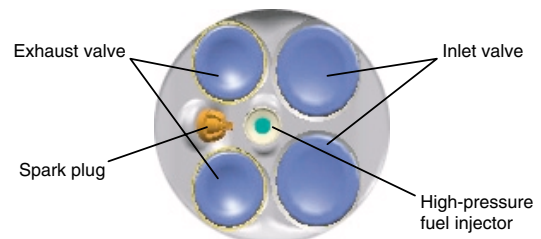


Fig.2(b) Configuration of cylinder head

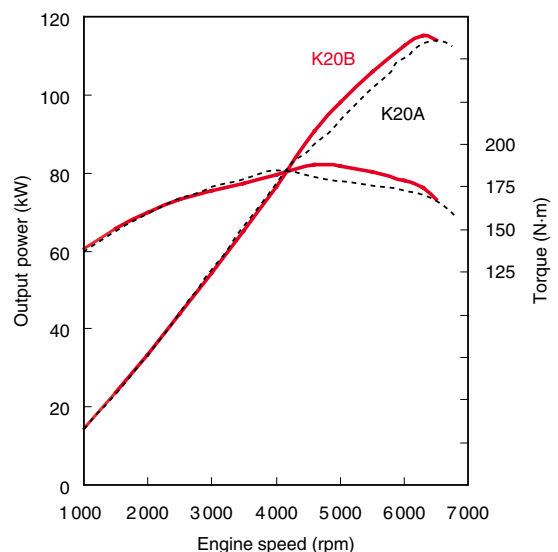


Fig. 3 Engine performance

Fig. 4 に高圧インジェクタとエキゾーストカムで駆動される単プランジャー式の高圧ポンプを、Fig. 5に高圧直噴インジェクタの噴霧特性を示す。燃料圧力は運転条件に応じて 8-10.5MPa の高燃圧に制御される。高圧の燃料はインジェクタ内部のスワールガイド溝により微粒化され、筒内に噴射される。噴霧粒径は SMD12 μm 以下の微粒化レベルを達成した。混合気の保持性を高めるために、噴霧特性は狭角で高ペネトレーションの設定としている。

4. 燃焼コンセプト

超希薄成層燃焼を実現するためには可燃混合気の形成と保持ならびに、いかに着火後の急速燃焼を実現するかが課題となる。混合気の形成、保持のためには筒内の吸気流動は極力押えた方が有利である。一方熱効率向上には着火後混合気の急速燃焼をおこなうために、筒内の流動や乱流強度は強い方が望ましい。これら相反する要求を満足するため、高ペネトレーションインジェクタのセンターレイアウトと深皿キャビティピストンによる噴霧流動を利用した混合気形成と保持、1バルブ休止 VTEC 機構によるスワールを利用した急速燃焼をコンセプトとした(Fig. 6)。

また高出力運転時には、吸気2バルブ運転に切替え体積効率を高め、吸気行程に燃料供給をおこない理論空燃比で均質燃焼をおこない、高出力・ハイレスポンスの出力性能を実現する。本方式では従来のサイドインジェクション方式に対し、燃焼室シリンダー壁面への燃料付着がなく未燃HCの低減が可能である。Fig. 7にK20Bエンジンの各燃焼モード毎の領域を示す。燃料噴射タイミングの自由度が大きく、広い成層燃焼領域を実現できていることがわかる。

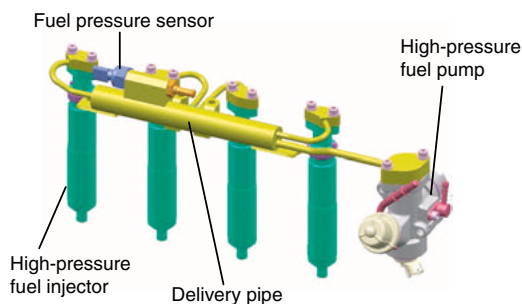


Fig. 4 High pressure fuel system

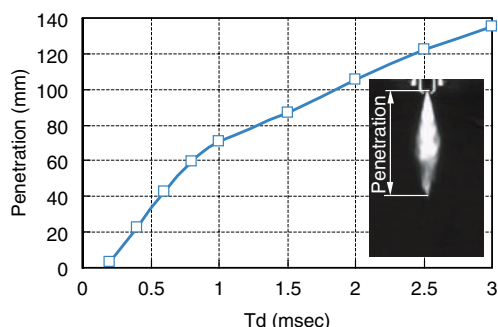


Fig. 5 High-pressure injector spray characteristics

4.1. ピストンキャビティ形状

Fig. 8(a), (b)にピストンの外観形状を示す。深皿キャビティは、点火プラグ方向にキャビティ底面の傾斜角を持たせ、点火プラグ側を深く設定している。またキャビティ底面の最深部をスワール上流側へ偏向して設定している。これによりインジェクタから噴射された高速の噴霧でキャビ

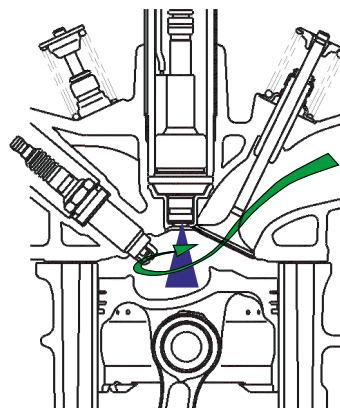


Fig. 6 Combustion chamber configuration

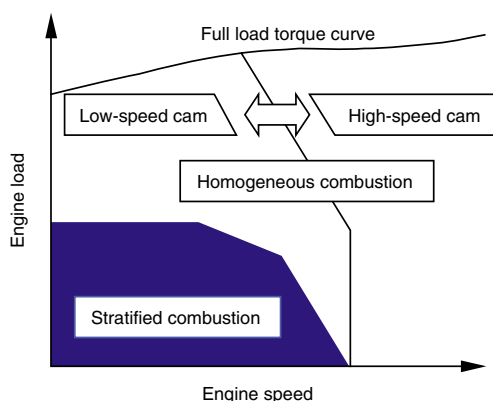


Fig. 7 Map of combustion mode

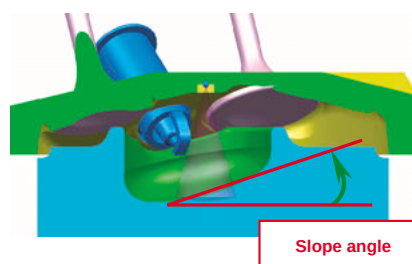


Fig.8 (a) Section view of piston

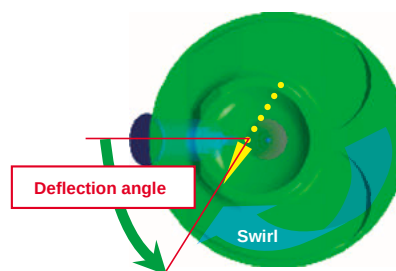


Fig.8 (b) Top view of piston

ティ内に混合気の渦を生成、保持し、気化した混合気をスワールの流れにより点火プラグ廻りに到達させる形状としている。キャビティの容積、傾斜角度、偏向角度は実機テスト、可視化、ならびに混合気分布シミュレーションにより最適化している。

4.1.1. キャビティ仕様設定

Fig. 9にキャビティボリューム比(総燃焼室容積に対するキャビティ容積の比)を変化させたときの成層燃焼時の図示燃料消費率 ISFC 特性を示す。キャビティボリューム比が小さいほど軽負荷の ISFC が改善され、成層化を高めることが可能であるが、逆に高負荷域ではキャビティ内の空燃比が過濃状態となり ISFC が悪化する傾向となる。本エンジンでは成層燃焼の負荷方向バランスの最適化を図り、キャビティボリューム比を 26%に設定した。

またキャビティ底面傾斜角度によるISFCへの影響をFig. 10に、キャビティ底面傾斜偏向角度による ISFC への影響を Fig. 11 にそれぞれ示す。

キャビティ底面傾斜角度が小さいと、点火プラグ方向への混合気の指向性が弱まり、噴射量の少ない軽負荷ではISFCが悪化する傾向を示す。キャビティ偏向角度は筒内スワール強度に応じて最適値が変化するものと考えられる。K20B エンジンでは傾斜角度 15deg, 偏向角度 45deg に設定している。

4.1.2. 混合気分布

Fig. 12 に成層燃焼時の混合気分布と空気流動のシミュレーション結果を示す。圧縮行程中に筒内に噴射された噴霧は、ピストンキャビティ底面の傾斜に沿ってスワールの上流方向に偏向した最深部に導かれる。高燃圧で噴射された噴霧のペネトレーションにより、ピストンキャビティ内の壁面から中心方向に縦渦が発生する。この高ペネトレー

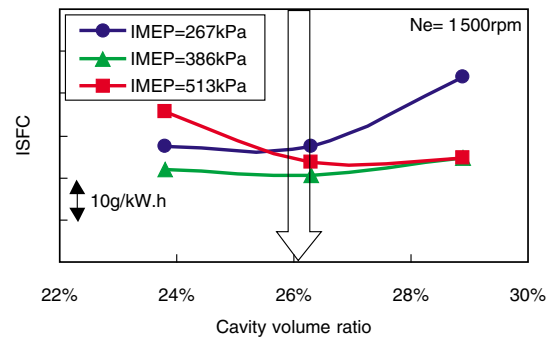


Fig. 9 Influence of cavity volume ratio on ISFC

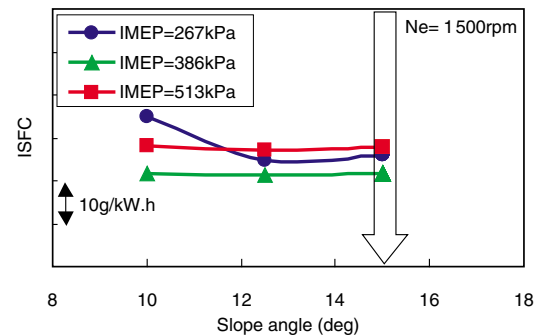


Fig. 10 Influence of slope angle on ISFC

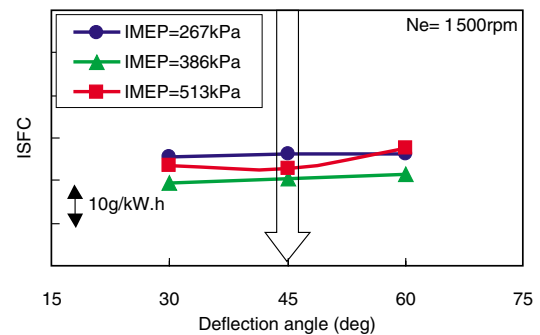


Fig. 11 Influence of deflection angle on ISFC

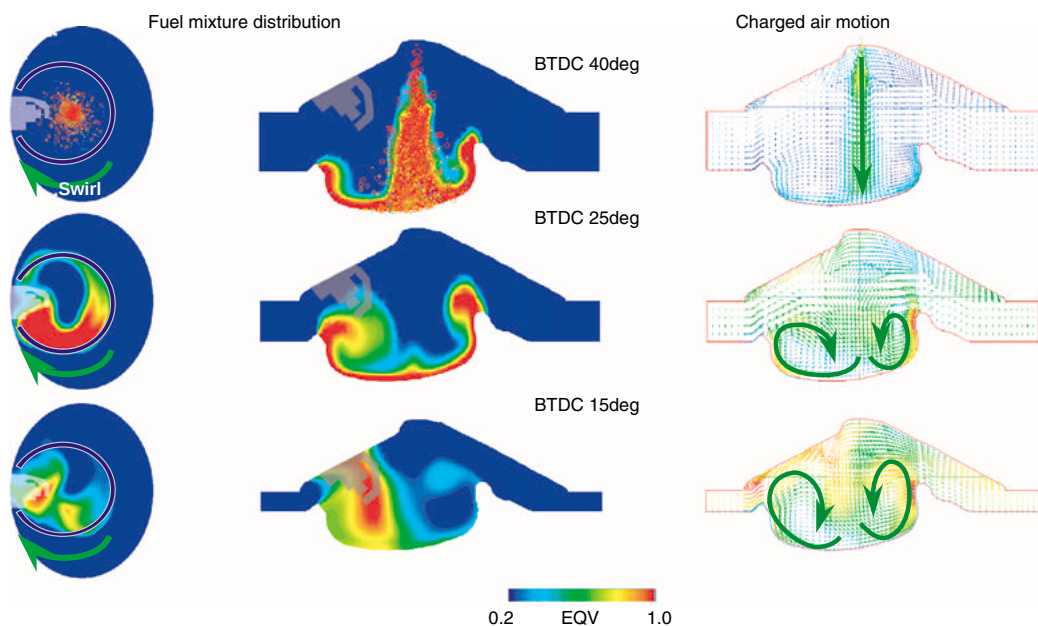


Fig. 12 Simulation of fuel mixing process and air motion in stratified charge combustion

ション噴霧が発生する縦渦により、混合気の分散を防ぎ保持性を高め、コンパクトな混合気の塊を形成している。

またピストンキャビティに衝突後、気化が促進した混合気は、筒内スワールの流れにより点火プラグ方向に導かれる。点火時期 BTDC 15deg において点火プラグ近傍には安定した可燃混合気が存在しており、その結果超希薄成層燃焼においても確実に安定した燃焼が可能であることがわかる。

4.2. 燃焼特性

Fig. 13 にエンジン回転数 1500rpm, DISC 運転時の噴射タイミングに対する ISFC, HC・NOx 排出量および指圧解析結果のデータを示す。

保持性の高いピストンキャビティ形状とセンターインジェクション方式の採用により噴射タイミング BTDC 20deg から 50deg にかけて幅広く安定した燃焼を実現している。この負荷における最適噴射タイミングは、燃費・エミッション・燃焼安定性より BTDC 40deg となる。噴射タイミングを BTDC 60deg 付近までアドバンスすると混合気が拡散し成層化が弱まり燃焼変動が悪化する。一方、噴射タイミング BTDC 20deg のリタードした付近では、燃費が悪化する傾向となる。HC排出量が増加していることから、後燃え燃焼が増えて燃焼期間が遅延し ISFC が悪化したものと考えられる。このように DISC 領域では、ISFC がボトムとなる噴射タイミングが存在する。噴射時期の設定は、エンジン回転数と負荷で ISFC およびエミッションのバランスの良い最適値に設定している。

Fig. 14 にエンジン回転数 1500rpm, 超希薄成層燃焼時の EGR 還流率に対する正味燃料消費率 BSFC, NOx 排出

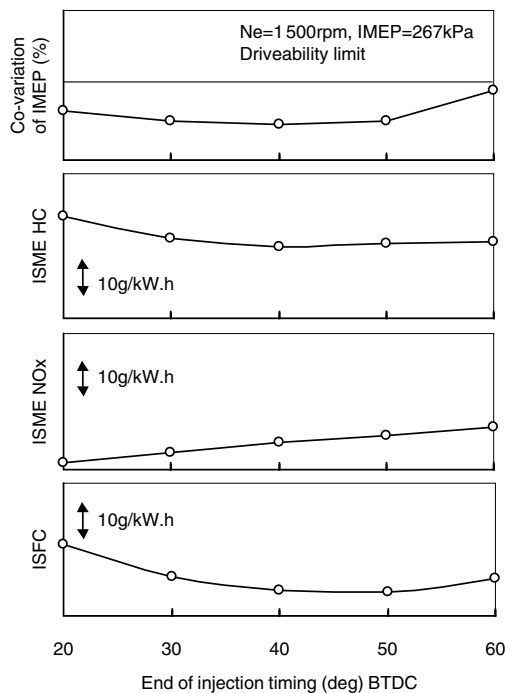


Fig. 13 Influence of injection timing on combustion characteristics

量, 空燃比, 指圧データを示す。BSFC最小ポイントである EGR 還流率 40%においても安定した燃焼を実現している。またエミッションにおいても、大量 EGR によりフィード NOx の約 80%低減を可能とした。

Ne=1500rpm BMEP=118kPa の DISC 燃焼とストイキ燃焼の指圧解析結果を示す(Fig. 15)。DISC燃焼時は、理論空燃比での均質燃焼に比べ、ピストンキャビティ内に混合気を成層化しているために、着火遅れが短い。また着火後の初期燃焼の立上がりも早く急速燃焼していることがわかる。微粒化した高ペネトレーション噴霧と保持性に優れたピストンキャビティを用いた混合気形成およびスワールの筒内流動によりこの急速燃焼を実現している。

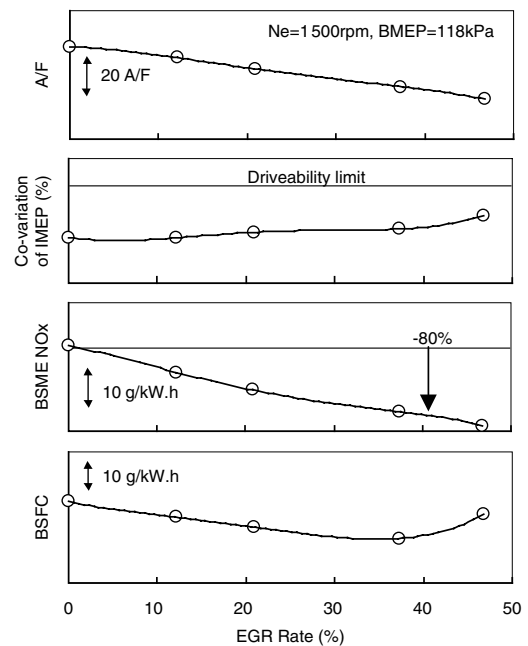


Fig. 14 BSFC, NOx combustion characteristics

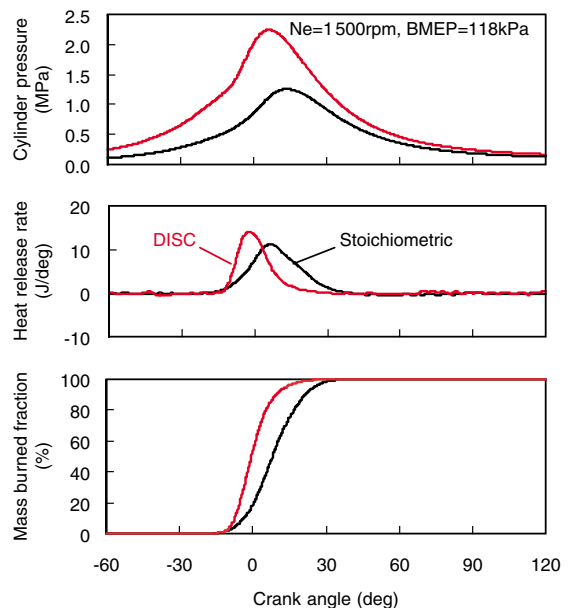


Fig. 15 Comparison of combustion characteristics

5. エンジン単体燃費と車両燃費

5.1. エンジン単体燃費

Fig. 16 にエンジン総排気量と BSFC の関係を示す。直噴エンジンは、今まで述べてきた超希薄成層燃焼による熱損失の低減、比熱比の増加およびポンピングロス低減で、従来の理論空燃比燃焼エンジンに対し 20% の BSFC 低減を達成した。

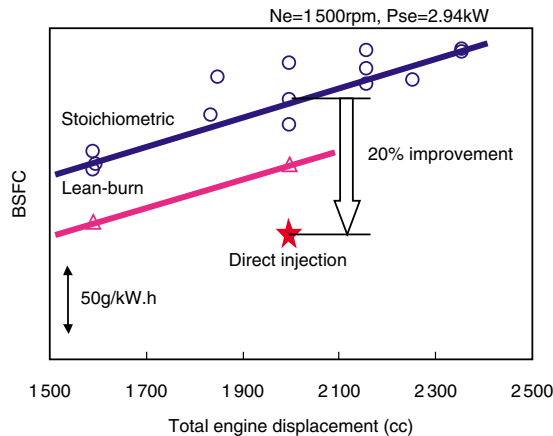


Fig. 16 Improvement of BSFC

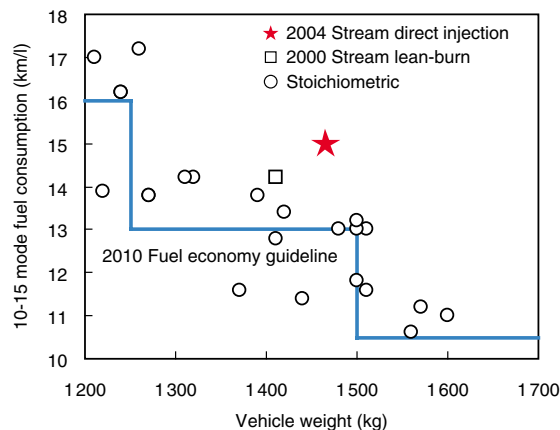


Fig. 17 Relationship between vehicle weight and 10-15 mode fuel economy in production gasoline vehicles

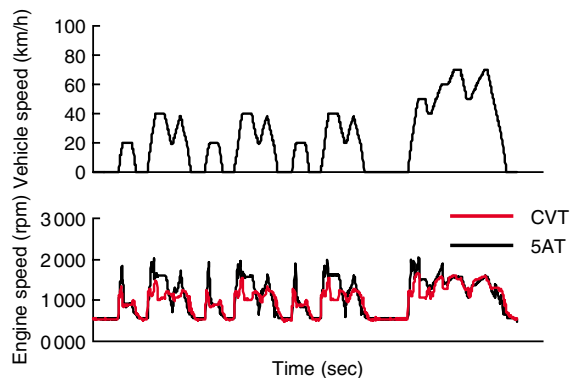


Fig. 18 Comparison of 10-15 mode engine speed between CVT and 5AT

5.2. 車両燃費

Fig. 17 に車両重量と国内 10・15 モード燃費の関係を示す。また Fig. 18 に 10・15 モード中のエンジン回転数を CVT と 5AT 搭載車両の比較で示す。エンジンと CVT の協調制御によりエンジン運転領域を低回転に保ち、BSFC の低い領域で運転するように設定している。CVT 搭載車両は、5AT に対しモード中のクルーズおよび加速域で低いエンジン回転域で運転できていることがわかる。

直噴エンジン搭載車両は、超希薄成層燃焼による低燃費化および CVT との協調制御による低燃費技術により、ストイキエンジン搭載車両に対して、10・15 モードでの約 15 % 燃費低減を図り 15.0km/l の低燃費を達成した。この値は 2010 年燃費基準を大幅に上回り、本車両の燃費性能が優れていることを示す。

6. 低エミッション技術

従来にない超希薄成層燃焼を用いた直噴エンジンで、平成 12 年度排ガス規制値の 75% 低減排ガスレベル「超一低排出ガス」を達成することを目標にし、本エミッションシステムを検討するにあたり、リーン域でのフィードガス低減、NOx 浄化率向上を重点項目として各仕様の検討をおこなった。

6.1. エキゾーストシステム

本エンジンのエキゾーストシステムを Fig. 19 に示す。出力性能との両立を可能にするため後方排気で 4-1 排気系を採用した。理論空燃比領域、コールド始動時の浄化性能、およびリーン運転時の HC 浄化を三元触媒(以下 TWC)上流に UEGO センサ(Universal Exhaust Gas Oxygen Sensor),

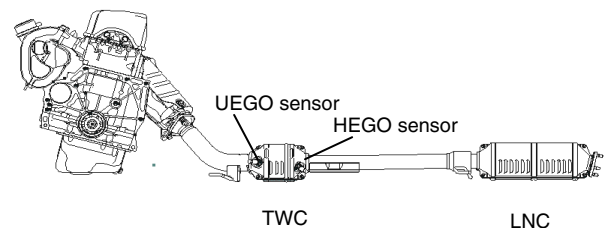


Fig. 19 Configuration of exhaust system

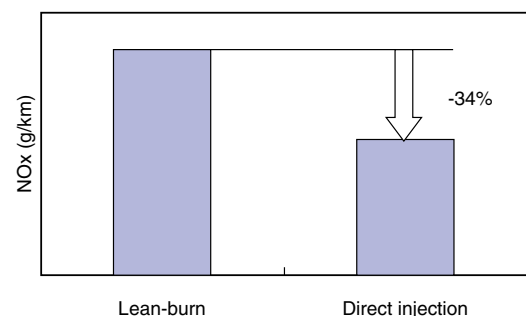


Fig. 20 Comparison of feed NOx emission in 10-15 mode between lean-burn engine and direct injection engine

下流に HEGO センサ(Heated Exhaust Gas Oxygen Sensor)を配置し、高精度空燃比制御をおこなうことで確保した。またリーン領域での NOx 浄化のため NOx 吸着反応型三元触媒を床下に配置した。

6.2. エミッション達成値

Fig. 20 にリーン域でのフィード NOx レベルを従来の予混合成層燃焼と超希薄成層燃焼を対比して示す。本エンジンは超希薄成層燃焼での大量 EGR 導入が可能であり、モード中のフィードガスを 34%低減した。

Fig. 21 に NOx 排出ガス濃度違いでのリーン NOx 触媒の浄化率特性を示す。フィードガスの NOx 濃度が低いほどリーン NOx 触媒の浄化率は高くなる。また直噴エンジンの超希薄成層燃焼での大量 EGR によりフィードガスの NOx 濃度が低減できること、リーン NOx 触媒自体の改良により 2000 年モデルのリーンバーンに採用したリーン NOx 触媒に対し低容量に抑えることが可能となった(Table 2)。

また、超希薄成層燃焼から理論空燃比への切替え時の制御の最適化を図り、国内 10・15 モード燃費 15.0km/l の低燃費と平成 12 年度排ガス規制値の 75%低減排ガスレベル「超一低排出ガス」という低エミッションレベルを両立することが出来た。

7. まとめ

以下の技術的な特徴を有する i-VTEC I 直噴ガソリンエンジンを開発した。

- (1) センターインジェクション方式を採用し、独自の深皿キャピティ付きピストンと VTEC によるスワールで混合気形成をおこない、超希薄成層燃焼を可能とした。
- (2) 10・15 モードの燃費でクラストップの 15.0km/l の低燃費を達成した。
- (3) 成層燃焼と均質燃焼を切替える方式のエンジンで、大量 EGR を用いた成層燃焼制御システムおよび高性能

Table 2 Catalytic converter specifications

	2004 Model direct injection	2000 Model lean-burn
TWC	1.0L 600cell	0.7L 400cell
LNC	1.4L 400cell Improved	2.4L 400cell Adsorption type

リーン NOx 触媒の採用により、平成 12 年度排ガス規制値の 75%低減排ガスレベル(「超一低排出ガス」認定)を実現した。

参考文献

- (1) 芦沢剛, 斎藤勝夫, 田村善春, 酒井太朗: 直列 4 気筒直噴ガソリンエンジンの開発, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.71-98, JSAE9838237
- (2) 野呂田一彦, 原田淳, 安部静生, 吉岡幸生, 青山克彦: 新型 L4 直噴ガソリンエンジンの開発, 自動車技術会学術講演会前刷集, No78-00, JSAE20005525
- (3) 新里智則, 林有登: 新型 2.0L リーンバーンエンジンの開発, HONDA R&D Technical Review, Vol.12 No2, p45-54(2000)
- (4) 中山幸夫, 鈴木誠, 岩田洋一, 山野順司: 2002 モデル「Fit」用 1.3L 2 プラグエンジンの開発, HONDA R&D Technical Review, Vol.13 No2, p43-52(2001)
- (5) Kuma, T., Iwamoto, Y., Iida, K., Murakami, M., Akishino, K. and Ando, H.: Combustion Control Technologies for Direct Injection SI Engine, SAE Paper 960600
- (6) 岡本憲一, 市川徳市, 斎藤健一郎, 尾山宏次, 平谷康治, 漆原友則: 筒内直噴ガソリンエンジンにおけるオクタン価と耐ノッキング性能に関する検討, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.73-02, JSAE20025175

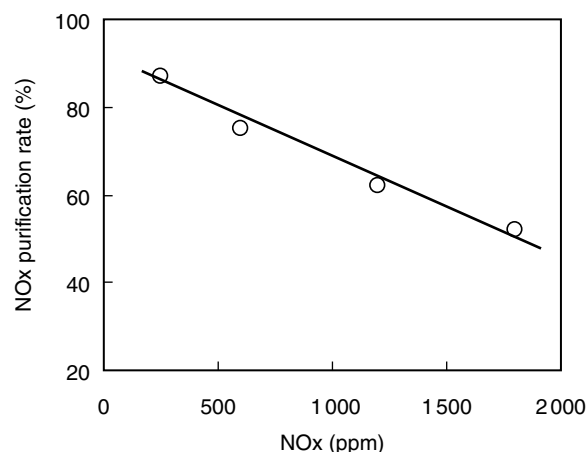


Fig. 21 NOx purification characteristics

■ 著 者 ■



甲 田 豊



菅 波 友 二



小 林 裕 幸



小 川 賢