

新型 2.4 L 直噴エンジンの開発

Development of New 2.4 L Direct-Injection Gasoline Engine

本 橋 康 弘*

Yasuhiro MOTOHASHI

石 木 和 也*

Kazuya ISHIKI

久保田 賢 司*

Kenji KUBOTA

岩 本 崇*

Takashi IWAMOTO

赤 石 伸 行*

Nobuyuki AKAISHI

木 下 将 一*

Masakazu KINOSHITA

要 旨

Honda の次世代エンジンシリーズとして、低 CO₂ 排出性能と高出力を両立した新型 2.4 L i-VTEC 4 気筒直噴ガソリンエンジンを開発した。本エンジンは、吸気バルブ間に高圧マルチホールインジェクタを備えた直噴システムを採用し、均質混合気の形成と燃焼改善をねらった吸気ポート、燃焼室形状、インジェクタ噴霧、燃料噴射制御の最適化をおこなった。骨格刷新によるフリクション低減技術の適用と合わせ、4% の最高出力、12% の最大トルクの向上、5% 以上のエンジン単体燃費改善を達成した。本エンジンを搭載した 2013 年モデル Accord は、高効率 CVT トランスミッションの採用、車体改良と合わせ、11% の EPA ラベル燃費向上、California Air Resources Board 排出ガス規制における LEV II SULEV レベルの低排出ガスを達成した。また、振動騒音性能に必要な部位への剛性を確保しつつ、軽量化を図った新骨格を適用し、従来型エンジン同等以上の振動騒音性能と軽量化の両立を実現した。

ABSTRACT

A new 2.4L i-VTEC 4-cylinder direct injection gasoline engine reconciling low CO₂ emissions performance with high power has been developed as part of a next-generation Honda engine series. The new engine employs a direct injection system provided with a high-pressure multi-hole injector positioned between the inlet valves. The inlet head port, combustion chamber shape, injector spray, and fuel injection control were optimized in order to realize homogeneous air-fuel mixture formation and enhanced combustion. Together with the reduction of friction through the modification of the engine framework, these innovations made it possible to realize a 4% increase in maximum power, a 12% increase in maximum torque, and a 5% or more increase in unit fuel efficiency. The use of this engine in the 2013 model year Accord, together with the employment of a high-efficiency CVT and modification of the vehicle body, has made it possible to realize an 11% increase in the EPA fuel economy label value and an emissions level corresponding to the LEV II SULEV level in the California Air Resources Board regulations. In addition, the use of a new engine framework that was reduced in weight while realizing stiffness in the areas necessary for noise and vibration performance made it possible to balance weight savings with the realization of an equivalent or higher level of noise and vibration performance than the previous engine.

1. ま え が き

環境保護への関心が高まる中、エンジン開発においても、低燃費、低排出ガス化に代表される環境性能技術に重要課題として焦点が当てられている。しかしながら車本来の走る楽しさも同様に重要項目と捉え、環境性能と走り両立すべく革新技術の開発を進めている。今回、新たな 4 気筒 2.4 L クラスエンジンとして、従来の i-VTEC 機構⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾に加え、筒内直接噴射方式(以下直噴)を採用し、燃費改善、低排出ガスおよび高出力化を実現する K24 型 2.4 L 4 気筒 i-VTEC 直噴エンジンを開発した。以下にこの新型エンジンに適用した新技術と達成性能について報告する。

*四輪 R&D センター

2. 開発のねらい

低炭素社会へのさらなる貢献と、走る楽しさの両立を目指す次世代革新技術 EARTH DREAMS TECHNOLOGY に沿ったコンセプトのもと、本エンジンは低燃費、低排出ガスに代表される環境性能と走る楽しさを実現する出力性能の両立を目指し、開発目標を以下のように定めた。

- (1) 常用域で走る楽しさを実現する圧倒的な低中速トルク
- (2) トップクラスの低燃費
- (3) LEV II SULEV レベル規制を満たす低排出ガス
- (4) 静粛性向上と軽量化の両立

Table 1 Engine specifications

Item	Developed	Previous
Engine code	K24W	K24Z
Cylinder configuration	In-line 4-cylinder	In-line 4-cylinder
Bore × Stroke (mm)	87 × 99.1	87 × 99
Displacement (cm ³)	2356	2354
Compression ratio	11.1	10.5
Valve train	DOHC i-VTEC 16-valve	DOHC i-VTEC 16-valve
Valve diameter (mm) IN/EX	36/30	36/31
Cylinder offset (mm)	8	0
Fuel injection	Direct injection	Port injection
Fuel	Regular	Regular
Max. power (kW/rpm)	138/6400	132/6500
Max. torque (Nm/rpm)	245/3900	218/4300

3. エンジン概要と適用技術

Fig. 1 にエンジン外観図を、Table 1 に従来型 2.4 L エンジンと比較した主要諸元を示す。開発目標を達成するためのエンジンの核となる技術として、従来のポート噴射方式に対し、充填効率および熱効率の改善による出力性能と環境性能の両立をねらい、筒内直接噴射方式を採用した。

骨格構造の刷新をおこない、軽量化、コンパクト化を進めつつ、従来型エンジン同等以上の振動騒音性能を達成した。主運動系はクランクピン給油機構の高効率化、フリクション低減技術を採用した。シリンダヘッドは低排出ガスとコンパクト化を実現した排気マニホールド一体型構造を踏襲した。Fig. 2 に示す動弁系機構の見直しにより、従来の i-VTEC 機構を踏襲しつつバルブ挟み角を縮小し、燃焼室のコンパクト化を図ることで、燃焼室表面積比の改善による燃焼効率改善を実現した。吸気ポートは均質な混合気形成に必要な高流動化を達成すべく、ポート形状、燃焼室形状の変更をおこなった。また、カム動弁系駆動機構として、排気カム端部に直噴用高圧ポンプ駆動カムを配置するとともに新チェーンテンショナ機構を採用し、チェーン信頼性の確保と低フリクション化を実現した。



Fig. 1 K24W i-VTEC direct-injection engine

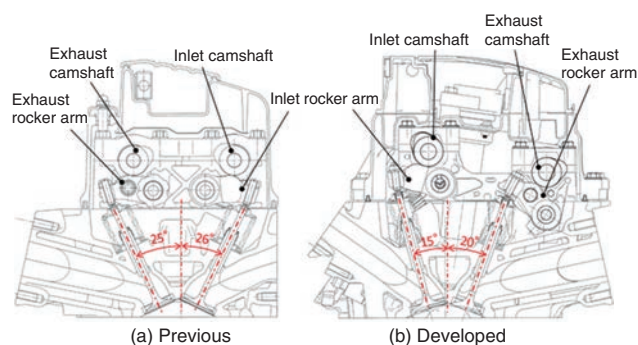


Fig. 2 Configuration of valvetrain and combustion chamber

4. 直噴システム

4.1. 直噴システム概要

Fig. 3 に直噴燃料供給システムの概要図を示す。この高圧燃料噴射システムは、高圧多段燃料噴射による性能向上に加え本エンジンを筆頭にシリーズ開発される V6 3.5 L との構成部品の共通化を考慮し開発を進めた。従来型エンジンのポート噴射システムに対して車両搭載性を損なうことなく、コンパクトなパッケージングを実現した。

インジェクタは二つの吸気バルブ間に 6 噴孔のマルチホールインジェクタを配置し、強化されたタンブル流動に合わせ、噴霧形状を適正化することで、均質な混合気形成によるサイクル変動の少ない安定した燃焼を実現した。

燃料を最大 20 MPa まで昇圧させるプランジャ式高圧ポンプは排気側カムシャフトの端部にローラタペットを介して配置される。4 山のカムプロファイルの最適設定と高精度な制御をおこなうことで、自由度の高い燃圧コントロールとインジェクタの優れた燃料噴霧性能を実現している。さらに燃料配管内のオリフィスを最適化することで、過渡運転時の燃圧変化への追従を可能とし、高精度空燃比 (以下 A/F) 制御を実現した。

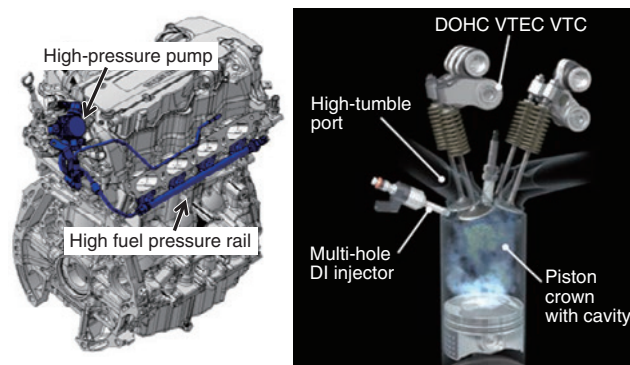


Fig. 3 High fuel pressure direct-injection system

4.2. 直噴燃焼技術

本エンジンのねらいである環境性能と出力を両立するため、直噴化による充填効率向上、ノッキング改善および低排出ガス性能に主眼を置いた均質混合気形成によるストイキ燃焼をコンセプトとして定めた。均質混合気形成の具体的な手法として、高流動吸気ポート、マルチホールインジェクタ、高圧燃料システムを核とし、燃焼改善、すす排出低減をねらった分割噴射、燃料噴射制御の改良による均質混合気形成にて性能向上、燃焼安定性の確保を実現した。

4.2.1. 高流動吸気ポート

直噴における均質混合気形成のためには、筒内流動強化が必要となるが、相対的に流量係数が低下し、自然吸気エンジンにおける高出力化に必要な高流量との両立が課題となる。この相反する要求に対し、VTEC 機構を最大限に活かし各回転領域における異なる要求を満足すべく、カムリフト領域ごとのタンブルと流量係数のバランスの最適化を図った。具体的には、VTEC 低速カムリフト領域においては、吸気流エネルギーの小さい低回転領域における高流動化を実現する高タンブルの特性をねらい、VTEC 高速カムリフト領域においては高出力化に必要な高流量が得られる特性の両立をねらった。これらを実現するために、吸気ポート形状の改良に加え、シュラウド付き燃焼室を採用した。Fig. 4 にシュラウド付き燃焼室形状、Fig. 5 にシュラウドによるバルブ廻りの流れの変化を示す。

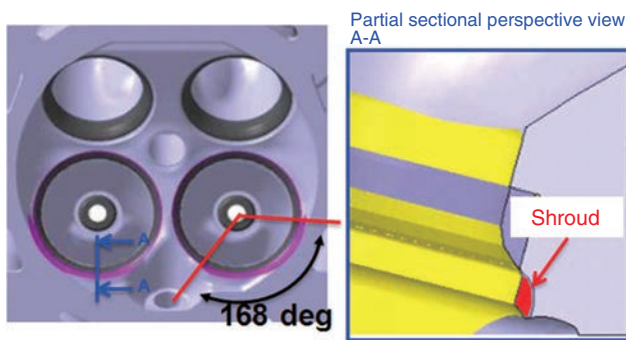


Fig. 4 Combustion chamber shape with shroud

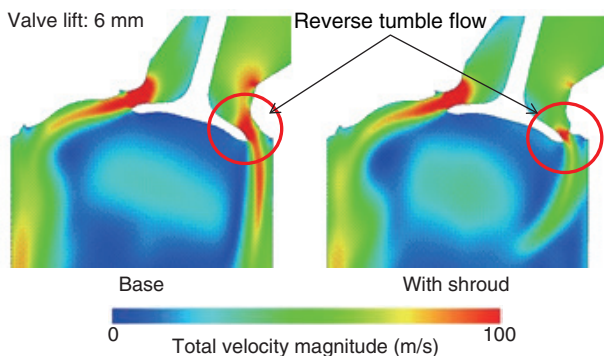


Fig. 5 Influence of shroud on air flow around inlet valve

燃焼室の吸気バルブ外周部にシュラウドを形成する構造とし、吸気側スリーブ寄りの流れをシュラウドによって抑制する。これにより、点火プラグ側の流れが主流となり、Fig. 6 に示すように主に低中リフト時のタンブルを強化することができ、VTEC 低速カム領域の高流動化を実現した。また、Fig. 7 に示すように、シュラウドは高リフト域においては影響が小さく、流量係数の低下を招かないため、VTEC 高速カム領域における高流量係数化が可能となる。また、高リフト域のタンブル強化を、流量係数低下を極力抑えた吸気ポート形状へ変更することで実現し、VTEC と協調した全域高流動化と高出力化に必要な高流量係数の両立を達成した。吸気ポート形状、シュラウド壁の追加によるタンブルレシオおよび流量係数への影響を Fig. 8 に示す。吸気ポートの形状変更によるタンブル強化手法においては、通常は流量係数の低下を伴うトレードオフの関係となるが、シュラウドの採用によりタンブルレシオと流量係数のトレードオフの相関ラインに対して、両者を改善することが可能となった。

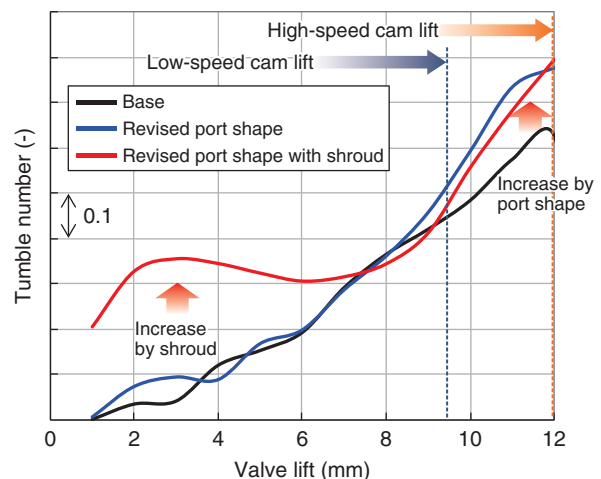


Fig. 6 Tumble flow intensity characteristics

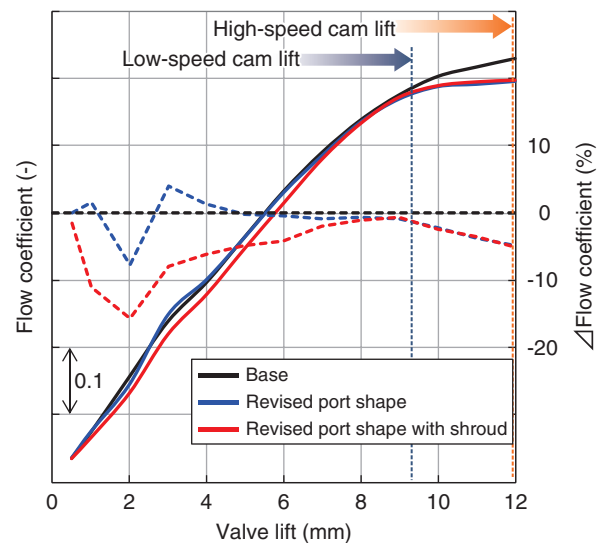


Fig. 7 Flow coefficient characteristics

4.2.2. 直噴インジェクタ噴霧特性

直噴インジェクタについては6噴孔のマルチホールタイプを採用し、噴霧特性の最適化をおこなった。インジェクタ噴孔位置は、均質混合気形成および流動アシスト効果による筒内流動への影響、筒内の燃料付着への寄与度が大きく、吸気ポート改良により達成した強筒内流動に適応した噴霧特性を検討する必要がある。噴霧特性を選定する上で、出力、燃費などの基本性能に加え、直噴の課題である低温時の燃焼安定性、すす排出量、オイルダイリューションを考慮し、CFDおよび、実機テストを用いて最適化をおこなった。Fig. 9に今回検討をおこなった噴霧パターンを示す。それぞれ、高拡散 (Pattern A)、噴霧の流動アシスト効果による高流動 (Pattern B)、スリーブ付着低減 (Pattern C)を目的とした噴霧パターンを検討した。

Fig. 10に (a) タンブル比、(b) 混合気の均質性、(c) スリーブおよびピストンへの燃料付着量に関するインジェクタ3仕様によるCFD結果を示す。またTable 2に代表的なテスト結果の概要を示す。CFD結果と同様に実機においても燃焼改善などの変化が見られた。Pattern Aに対して、Pattern Bでは、タンブル比向上による全開出力向上、燃焼安定性改善効果が見られた。Pattern Cについては、タンブル比向上が見られたものの、噴霧が内向きに集中していることによると考えられる均質性低下により出力、燃焼改善効果は得られなかった。またピストン付着増大によるすす排出量の増加が見られた。ダイリューションについて

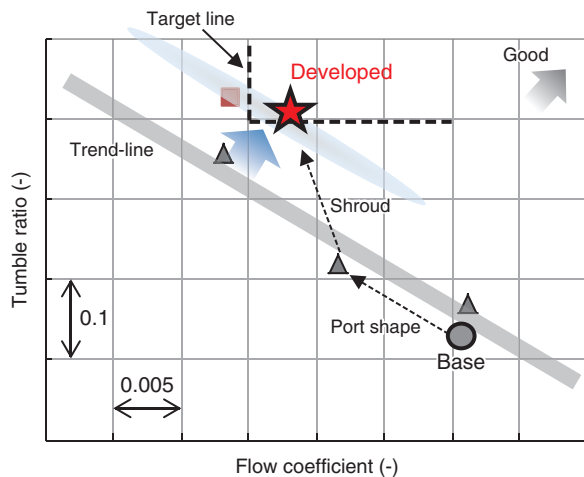


Fig. 8 Relationship of flow coefficient and tumble ratio

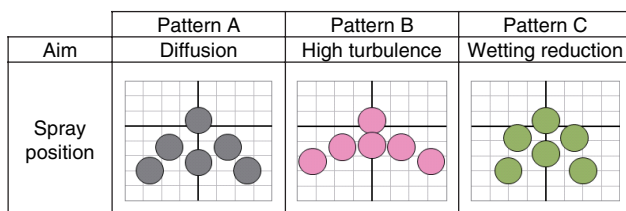


Fig. 9 Injector spray position

Table 2 Test results for difference in injector spray position

	Pattern A	Pattern B	Pattern C
WOT power	Base	+ 1% Increase	Equivalent
BSFC	Base	Equivalent	Equivalent
Combustion stability	Base	+ Better	Equivalent
Exhaust soot	Base	Equivalent	- Increase
Oil dilution	Base	+ 3% Reduction	+ 2% Reduction

は、Pattern B、Pattern Cともに改善しているが、CFD結果においては、Pattern Bはスリーブ付着が増加しており、相関性が見られない。スリーブ付着について、付着位置の切り分けをおこなった。Fig. 11に吸気行程の下死点における吸気側および排気側スリーブへの燃料付着量と実機データ

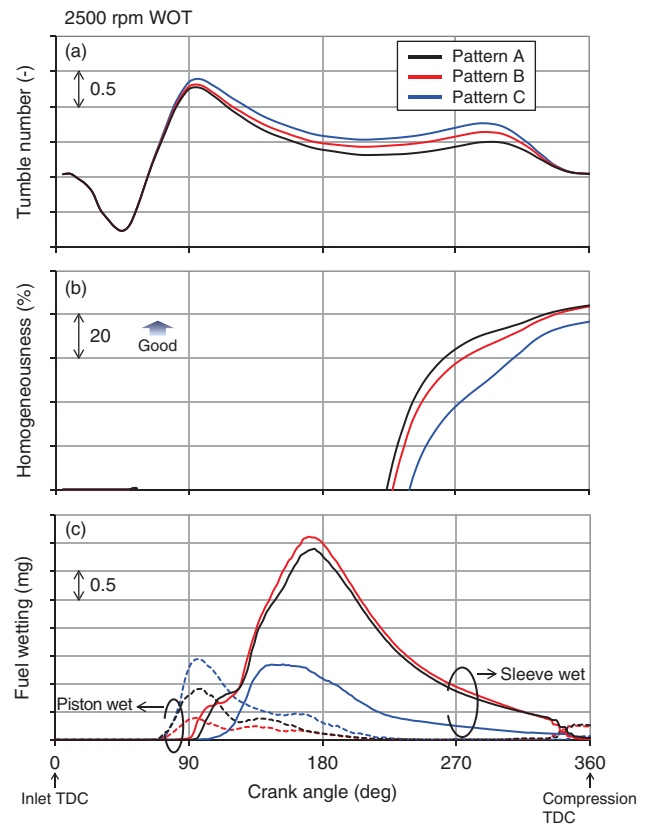


Fig. 10 CFD results for difference in injector spray position

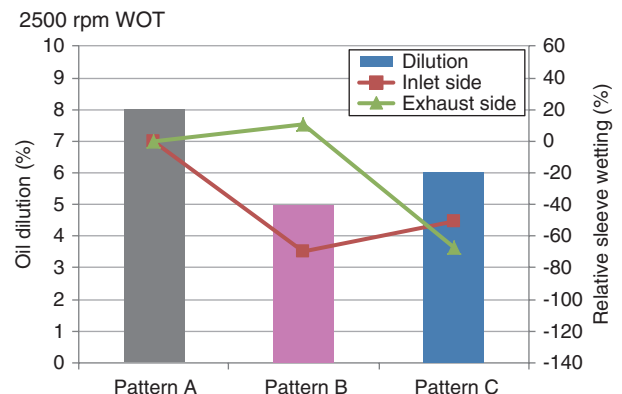


Fig. 11 Fuel wetting and oil dilution

イリュージョン結果を示す。吸気側スリーブ付着量と実機ダイリユーション結果に相関性が見られる。これは、吸気側スリーブの方が温度が低く付着後の蒸発性が低く、ダイリユーションに寄与しやすいためと考えられる。以上の結果より本エンジンの最適噴霧として Pattern B の噴孔配置を選択した。

4.2.3. 直噴燃料噴射時期、噴射圧力制御

直噴のメリットである噴射時期の自在化、多段噴射による出力、燃費効果を最大限に発揮するためには、高燃圧化による噴射期間の短縮、燃圧制御範囲拡大による最大および最少要求噴射量の確保などが挙げられる。それらに対応するために高燃圧かつ幅広い燃圧制御範囲を有するシステムを採用した。本エンジンは 3.5 MPa から最大 20 MPa までの燃圧制御幅を有しており、エンジン回転数やエンジン負荷など運転条件に応じて、噴射時期、噴射回数を協調した最適制御をおこなう。燃圧、噴射時期制御の最適化による高燃圧分割噴射の効果を CFD にて検討した。Fig. 12 に筒内の (a) 乱流エネルギー、(b) プラグ近傍の A/F、(c) 筒内均質度の変化を示す。分割噴射とすることで、圧縮行程初期の 2 回目の噴射による筒内流動強化および、プラグ近傍 A/F の安定化、均質度改善の効果が見られた。

分割噴射の効果を最大限に生かすべく、燃料噴射圧力、

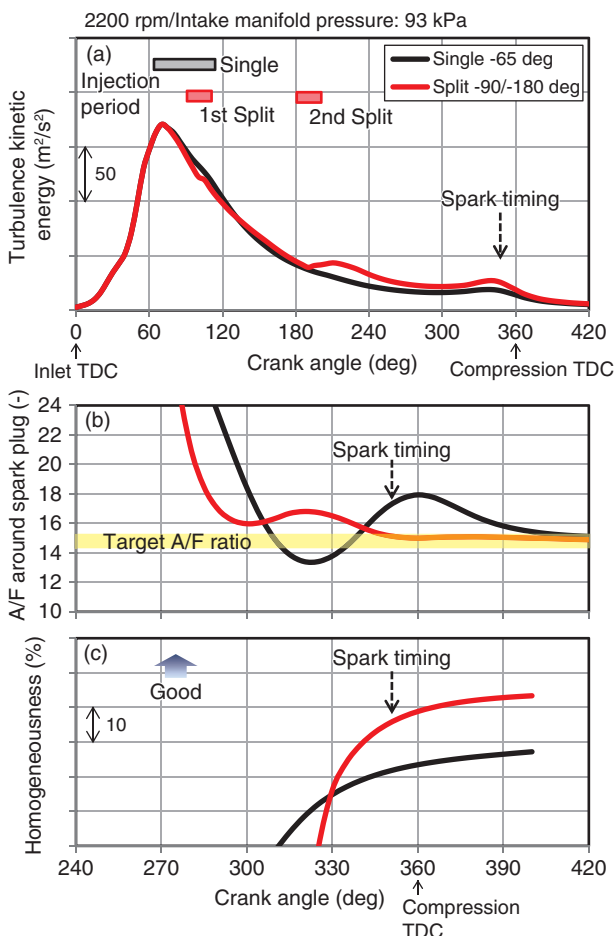


Fig. 12 CFD results for differences in injection control

一回目および二回目噴射時期、分割比率の最適化をおこなった。Fig. 13 に最適化された分割噴射の実機確認結果を示す。単発噴射においては、噴射時期を進角することで、燃焼安定性の改善傾向が見られるが、ピストン付着の増大によるすす排出量の増加との両立が課題となり、高精度な噴射時期設定が要求される。高燃圧分割噴射においては、すす排出に対するタフネスが向上し、すす排出と燃焼安定性の両立が可能となり、噴射時期設定の自由度も向上する。また、燃焼速度向上と合わせ、1% 以上の燃料消費率 (BSFC) の改善効果が得られた。

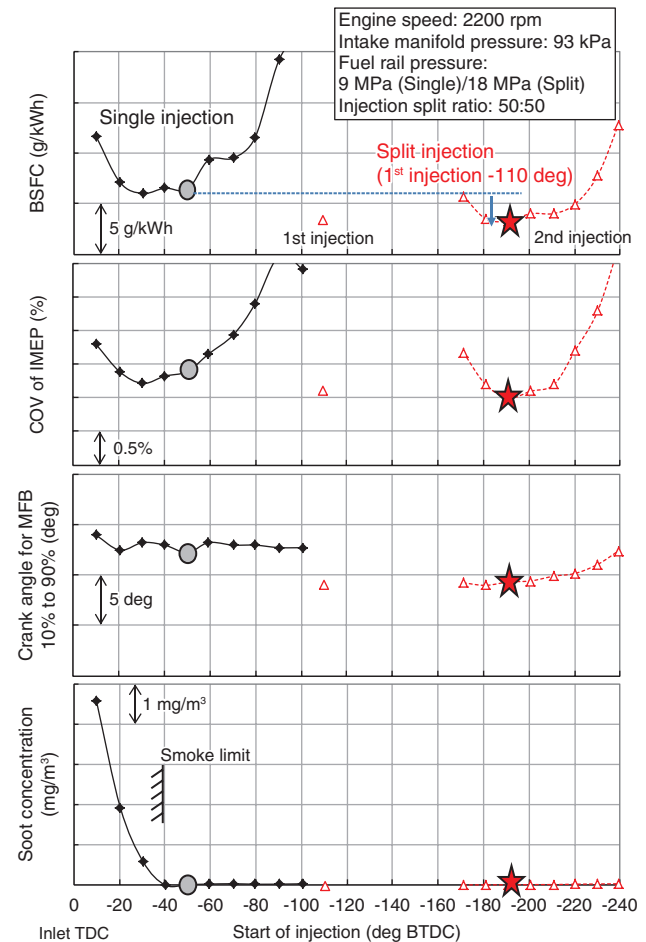


Fig. 13 Effect of fuel pressure and injection timing control

5. 出力向上技術

常用域における走りの向上を目的とし低中速トルクを向上させる出力特性をねらい、以下の出力向上技術を採用した。直噴システムは、高筒内流動と高流量係数を両立する吸気ポートに加え、インジェクタ噴霧、噴射制御を最適化することで充填効率向上、ノッキング改善による出力向上を実現した。直噴化による出力改善効果を Fig. 14 に示す。

Fig. 15 に従来型エンジンとの出力特性の比較を示す。従来型エンジンに対し、前述した直噴の採用に加え、以下の

出力向上技術を採用することにより、10%以上の低速トルク向上、12%の最大トルク向上、4%の最高出力向上を達成した。

- (1) 低中速領域のトルクを向上させるレゾネータ内蔵インタークマニホールド
- (2) 吸気ポート、排気マニホールド一体型ヘッド、バルブタイミングの最適化による吸排気効率の改善
- (3) 高流動ポート、燃焼室のコンパクト化、冷却システム改良によるノッキング改善
- (4) フリクション低減技術

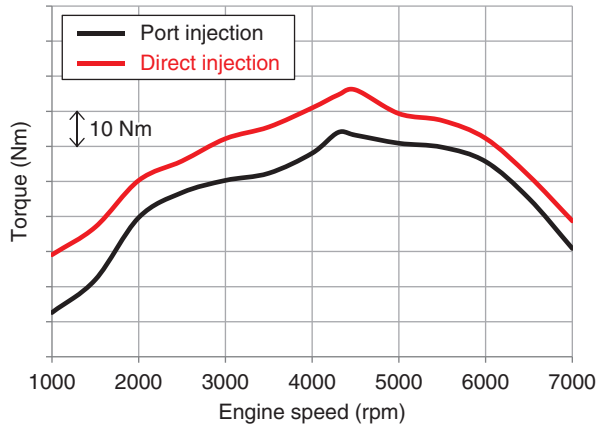


Fig. 14 Effect of direct injection

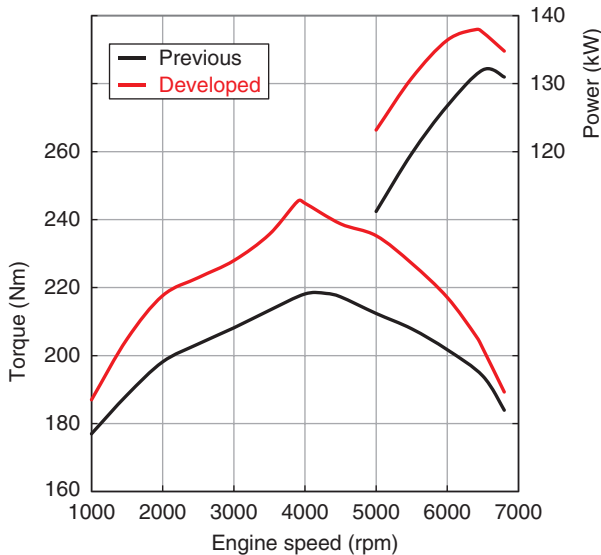


Fig. 15 Engine performance

6. 燃費低減技術

6.1. フリクション低減技術

基本骨格の刷新によるフリクション低減技術として、Fig. 16に示すとおり、ダブルアームチェーンテンショナ、カムジャーナル表面粗さの低減、シリンダオフセット、低緊縛オイルシール、バランスウェイト形状の改良、#2、#4

ジャーナル集約給油構造、低粘度オイルの適用をおこなった。これらのフリクション低減技術の採用により、従来型エンジンに対し、6%のフリクション低減を達成した。

6.2. 単体燃費

Fig. 17にエンジン回転数1500 rpmにおけるBSFC特性を示す。エンジン単体燃費は、前述したフリクション低減技術の適用と直噴化による燃焼効率の向上に加え、高負荷領域においては、直噴分割噴射制御の最適化により、従来エンジン比5%以上の燃費向上が得られた。

6.3. 実車燃費

新型CVTの採用に伴い、走行中のエンジン回転数を低回転化および、自在に設定することが可能となった。直噴化によるトルク特性の向上とBSFC特性、トランスミッション伝達効率を考慮したパワートレイン制御の最適化をおこなった。Fig. 18に示すようにLA4モードにおいて、従来型ATに対して、エンジン回転数を低回転化することができ、燃費改善効果を得ることができた。以上のパワートレイン刷新による燃費改善に加え、車体の空力改善、軽

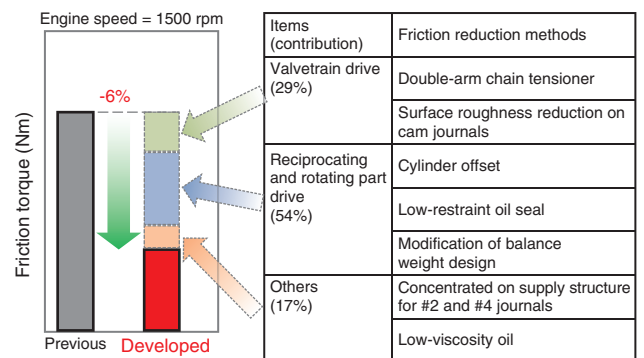


Fig. 16 Friction reduction technologies

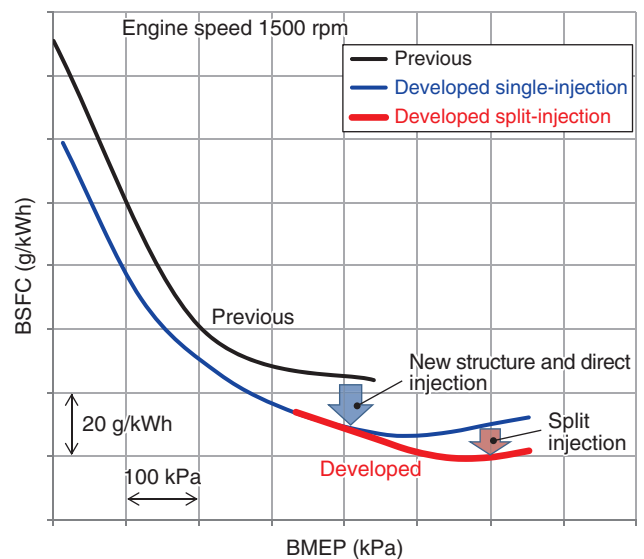


Fig. 17 BSFC characteristic

量化, 転がり抵抗低減などを実施し, 従来車に対し EPA ラベル燃費において 11% の燃費向上となり, クラストップレベルの燃費 30 mpg を達成した。

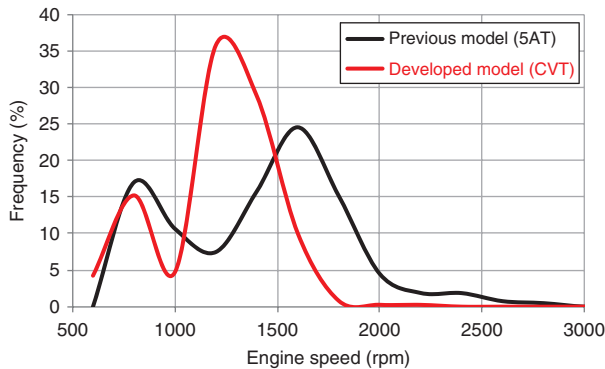


Fig. 18 Engine speed frequency in LA4 mode

7. 低排出ガス技術

7.1. 低排出ガス技術概要

世界有数の厳しい排出ガス規制である US-LEVII 法規の SULEV カテゴリに適合すべく, Feed ガスエミッションの低減, 排ガス後処理の効率改善をねらい, 以下の技術を適用した。

- 直噴燃焼最適化, 燃焼室改良による低 Feed ガスエミッション化
- 排ガス流れ改善による触媒浄化効率の改善
- 低コスト, 高性能を両立する新触媒

7.2. 排ガス流れ改善

触媒の浄化性能を最大限に活用しつつ, 劣化抑制をはかるために, 排ガス流を均一に触媒に導入させる必要がある。そのためには, フロントコーン形状が重要となる。従来エンジンの後方排気から前方排気へと変更することにより, フロントコーンの設計自由度が向上し, Fig. 19 に示すとおり従来エンジンに対してさらなる排ガス流の直下触媒への均一導入が可能となった。さらに, Universal Exhaust Gas Oxygen センサについても最適位置への搭載が可能となり, より高精度な A/F コントロールが可能となった。

7.3. 低貴金属触媒

触媒に関しては, 地球環境資源の保護の観点から貴金属使用量の低減を検討し, 特に産出量が極めて少ないロジウム (Rh) の低減に焦点を当てた。今回, 新規開発をおこなった触媒では, 排出ガスの還元浄化性能に優れる Rh の一部を, 酸素の吸放出速度を高めたパラジウム (Pd) に代替することで, 触媒全体の貴金属使用量, 特に Rh の低減を実現した。Fig. 20 に触媒貴金属使用量およびエミッション性能の比較を示す。この新規触媒は, 従来触媒に対して貴

金属使用量を -22%, Rh を -50% 低減したにもかかわらず, 従来触媒以上の性能を有しており, 従来触媒に対して貴金属使用量および Rh を低減させながら, US-LEVII 法規の SULEV カテゴリに適合することが可能となった。

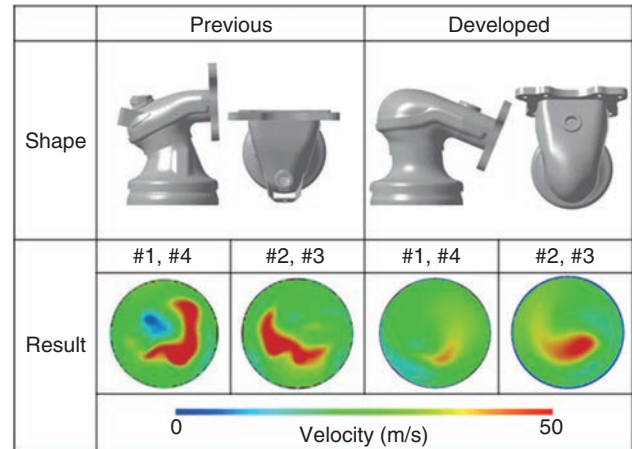


Fig. 19 Front gas feed distribution

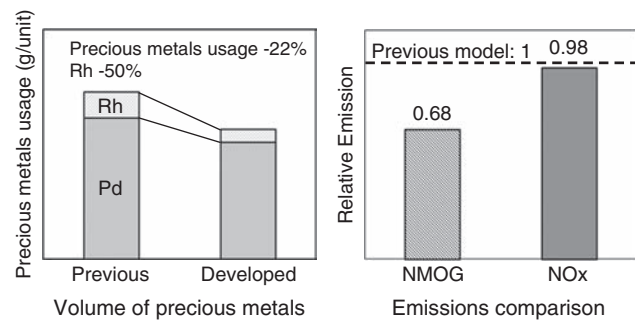


Fig. 20 Comparisons of volume of precious metals and emissions

8. 振動騒音低減技術

本エンジンでは, 加速時室内音等の解析に用いられている主成分回帰法を用いた伝達経路解析手法 (PCR-TPA)^{(5),(6)} をエンジンに適用し, 振動騒音と軽量化の両立を図った。燃焼加振力によるエンジン振動の伝達経路を大別すると, 下記の三つに分けられる。

- (1) 燃焼室から直接シリンダヘッドを伝達する経路
- (2) ピストンを介し, シリンダブロックへ伝達する経路
- (3) クランクシャフトを介し, 各クランク軸受と外壁面を一体化したロアブロックを伝達する経路

シリンダヘッド振動, シリンダブロック振動, クランク軸受振動およびエンジンマウント取付け部のエンジン振動を同時計測し, PCR-TPA を実施した。Fig. 21 に伝達寄与割合の解析結果を示す。PCR-TPA の結果, エンジンマウント取付け部への振動伝達寄与として, クランク軸受廻りからの寄与割合が大きく, 他の部位の寄与は小さいことがわかった。

この結果から、本エンジンでは軸受廻りの剛性を確保するため、従来型エンジンと同じ各クランク軸受と外壁面をラダーフレームにて一体化したロアブロックの構造を採用し剛性を確保した。また、Fig. 22に示すように、振動伝達寄与の少ないシリンダブロックの軽量化をおこなうことでシリンダブロック重量を10%低減した。Fig. 23に従来型エンジンに対する最高出力とシリンダブロック軽量化の位置づけを示す。前述した高剛性と軽量化の両立により、エンジン骨格の重量を6%低減しつつ、Fig. 24に示すとおり従来型エンジン同等以上のエンジン振動騒音性能を達成した。

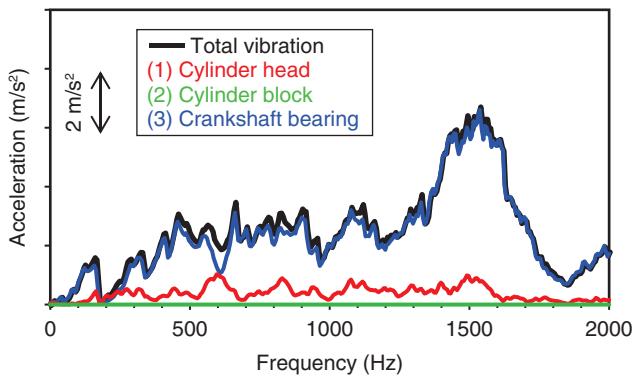


Fig. 21 Effect on PCR-TPA vibration transfer

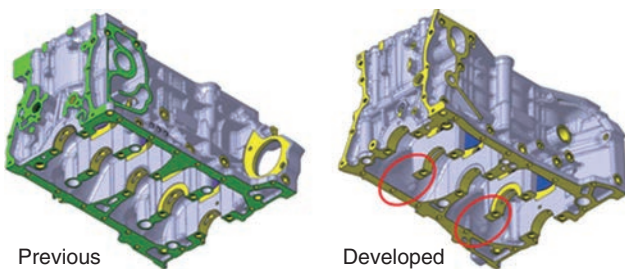


Fig. 22 Cylinder block weight reduction

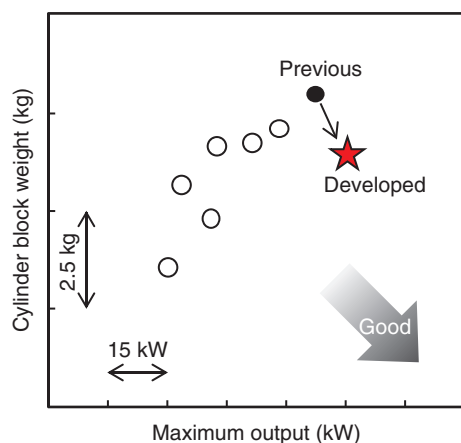


Fig. 23 Cylinder block weight and maximum output

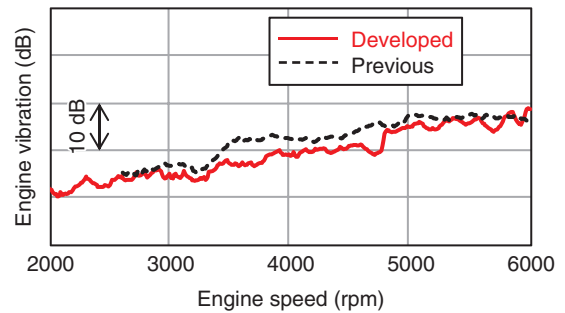


Fig. 24 Vibration level at end of engine mount bracket under full load

9. まとめ

新型4気筒2.4 L直噴エンジンにおいて、直噴燃焼技術として、CFDを用いた仕様検討をおこない、吸気ポート、燃焼室形状、インジェクタ噴霧、噴射制御の最適化による燃焼改善を実現した。また、直噴燃焼技術に加え、新骨格の採用によるフリクション低減技術、低排出ガス技術により以下の結果を得た。

- (1) 従来型エンジンに対し、低速トルク10%向上、最大トルク12%向上、最高出力4%向上と単体燃費5%以上の改善を両立した。
- (2) エンジン単体燃費の改善に加え、CVT採用に合わせたダウンスピード、エンジン作動線の最適化により、クラストップレベルのEPAラベル燃費30 mpgを達成した。
- (3) 新骨格エンジンにおける低Feedガスエミッション化、排気システムの最適化により、US-LEV II SULEVレベルの低排出ガス性能を達成した。
- (4) 骨格刷新に伴い、振動伝達寄与の解析による効率的な高剛性化および軽量化をおこない、従来型エンジンに対し、振動騒音性能同等以上を確保しながら、コンパクト化および6%の軽量化を実現した。

参考文献

- (1) 新里智則, 林有登: 新型2.0 L リーンバーンエンジンの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.12, No.2, p.45-54
- (2) 瀬古一行, 多賀渉, 鳥居建史, 中村聡, 秋間和洋, 関谷明堂: 新型CIVIC用1.8 L i-VTECエンジンの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.18, No.1, p.8-15
- (3) 甲田豊, 菅波友二, 小林裕幸, 小川賢, 関谷明堂: 高性能・低エミッション2.0 L直噴ガソリンエンジンの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.16, No.1, p.39-46
- (4) 川口良太, 山本一哉, 萱場貴, 小島貞夫, 新開孝裕, 浅

芽広一郎:新型 ACCORD 用 2.4 L i-VTEC エンジンの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.20, No.1, p.25-32

(5) 坂本淳, 尾崎睦:新型 ACCORD の加速時室内音の改良—主成分回帰法を用いた伝達経路解析手法の適用—, Honda R&D Technical Review, Vol.19, No.2, p.66-69

(6) 能村幸介, 吉田準史:主成分回帰法を用いた車内音の伝達経路解析手法, Honda R&D Technical Review, Vol.8, No.1, p.136-141

■ 著 者 ■



本橋 康弘



久保田 賢司



赤石 伸行



石木 和也



岩本 崇



木下 将一