

新型 LIFE 用 i-DSI 2プラグエンジンの開発

Development of i-DSI 2Plug Engine for 2004 Model Year Honda LIFE

和田 裕 介*

Yusuke WADA

成 田 研之助*

Kennosuke NARITA

大 津 啓 司*

Keiji OHTSU

篠 原 利 光*

Toshimitsu SHINOHARA

要 旨

新型ライフ用に開発した660cm³ 3気筒エンジンは、環境性能、軽量コンパクト性および静粛性を追求するためエンジン基本骨格を刷新した。

開発コンセプトは、実用運転域で優れたエンジンとすることであった。したがって、軽自動車で運転頻度の高い、高負荷・高回転に対応するため、ショートストローク骨格としフリクションを低減した。また、2点点火i-DSI急速燃焼により高圧縮比を可能とし、燃費、出力の改善をおこなった。

以上の改良により、実用域のトルクを7%向上させ、モード燃費ではトップクラスの値を達成した。さらに、燃焼改善によるアイドル時の燃費向上、エミッション、振動、騒音の低減を図り、高品位なエンジンとした。

ABSTRACT

A 660cm³ 3-cylinder engine has been developed for the new model of the Honda Life. The basic structure of the engine has been redesigned to achieve improved environmental performance, increased compactness and weight savings, and a higher level of quietness.

The development concept was to produce an engine that excelled under normal driving conditions. To respond to the high frequency of high engine loads and engine speeds in minicars, the i-DSI engine employs a short stroke to reduce friction. The use of i-DSI twin plug ensures rapid combustion, enabling fuel economy and output to be increased through the use of a high compression ratio.

The innovations outlined above have increased torque by 7% under normal driving conditions, and enabled the achievement of a class-topping fuel economy of 19.8 km/L in Japanese 10-15 mode. The increased idling fuel economy achieved by improved combustion and reduced emissions and NV make the new engine an extremely high-quality unit.

1. まえがき

環境保護、省資源に対しHondaは排出ガス、燃費、走り性能を向上させる軽量コンパクトなパワートレイン「i-シリーズ」を開発した。ストリーム用にリーンバーンのi-VTEC、フィット用に2点点火による急速燃焼のi-DSI (Dual & Sequential ignition)⁽¹⁾、またインスパイア用に気筒休止のi-VTECを採用し、燃焼制御に優れた新世代エンジンを世に送り出した。

軽自動車用エンジンの開発にあたり、軽自動車の使われ方から、軽自動車用エンジンのあるべき姿についてさらなる検討をおこない、シンプルな構造と高性能を目指し開発を進めた。本稿では、エンジンコンセプト、ならびに投入技術、達成性能について報告する。

*栃木研究所

2. 開発のねらい

新型エンジンを搭載する新型ライフは、“Pride and Dream”の志をもとに開発された。これに呼応して、エネルギー消費が少なく環境と人に優しい小さなクルマを具現化すべくエンジン仕様を検討した。特に、スモールカーのエンジンに求められる環境性能を、以下の4項目とし、これを目標に設定した。

- (1)環境性能すなわち、燃費向上と超一低排出ガス基準適合
- (2)実用域トルクの大幅向上
- (3)エンジンの軽量コンパクト化
- (4)エンジン振動、騒音の低減

3. エンジン概要と諸元

3.1. 概要

エンジン骨格の検討にあたり、軽自動車の走行負荷について整理をした。Fig. 1 は、10・15 モード走行時の運転頻度を排気量別に比較した結果である。660cm³は、相対的に高負荷、高回転の使用頻度が高くなっている。

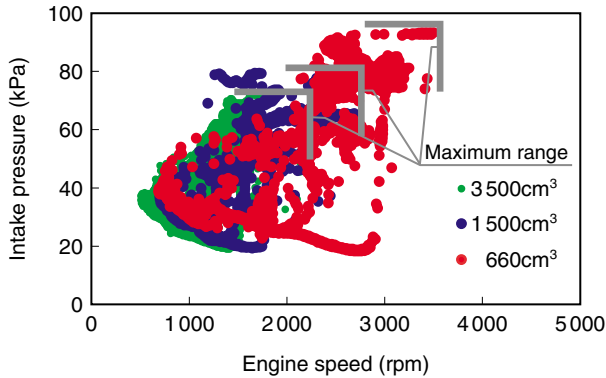


Fig. 1 Comparison of range of operating loads for engines of different displacement in 10-15 mode

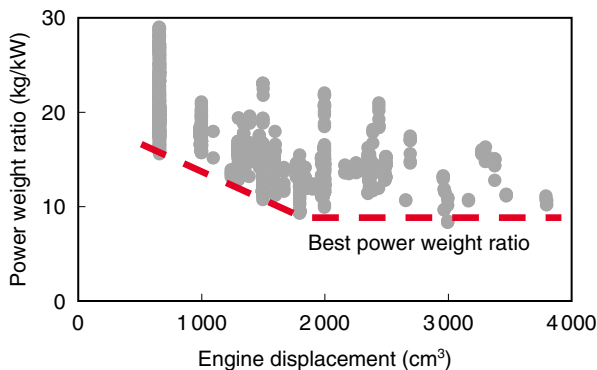


Fig. 2 Best power weight ratio for engines of different displacements

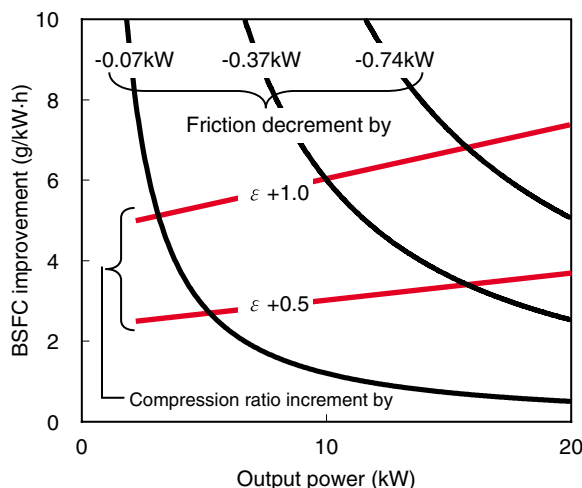


Fig. 3 Improvement of BSFC by friction decrease and compression ratio increase

Table 1 Engine specifications

Engine	Developed model	Previous model
Cylinder configuration	In-line 3-cylinder	In-line 3-cylinder
Bore × stroke (mm)	71 × 55.4	66 × 64
Displacement (cm ³)	658	656
Compression ratio	11.2	10.5
Valve train	SOHC 2 valves	SOHC 4 valves
Number of valves	2 per cylinder	4 per cylinder
Valve diam. Inlet (mm)	35	24.5
Exhaust (mm)	30	21
Fuel supply system	Programmed fuel injection	Programmed fuel injection
Ignition system	Dual point sequential ignition	Single point ignition
Max. power (kW/rpm)	38/6 700	38/7 200
Max. torque (N·m/rpm)	61/3 800	61/4 500

Fig. 2 は、無過給エンジンのパワーウエイトレシオと排気量の関係で、軽自動車の最小パワーウエイトレシオは、15kg/kW と 1800cm³ 以上の車両の 1.5 倍に相当する。これが軽自動車の高負荷、高回転使用頻度増加の理由である。

ここで環境性能、特にエンジン単体燃費の改善に焦点を絞ると、排気量レンジによらず急速燃焼化や安定燃焼化は共通の要望である。一方、軽自動車に特定すると、高負荷の実用頻度が高いため、大量EGRなどポンピングロス低減手法の有効性が薄いと言える。そこで、要求出力に対する、燃費改善手法の効果を確認した。

Fig. 3 は、従来型 660cm³ エンジンによる BSFC (Brake specific fuel consumption) 改善効果についての実験結果である。フリクション低減による BSFC 改善効果は、要求出力の増加に伴い効果が減少する。一方、高圧縮比化による BSFC 低減効果は、要求出力の増加に伴い効果向上が見られ有効な手法であることがわかった。

ゆえに、軽自動車用エンジンは、ノッキングを回避しつつ高圧縮比を設定し、かつ、高回転で大幅なフリクション低減ができる下記手法が有効であることが明確になった。

- (1) ショートストロークによる高回転フリクション低減
- (2) ビッグボアによる大径バルブ化とポンピングロス低減
- (3) 2バルブ、2点点火による高圧縮比

これより、ショートストローク骨格と i-DSI 採用をエンジン基本コンセプトに決定した。Table 1 に主要諸元表を、また、Fig. 4 にエンジン外観を示す。

エンジン燃焼室廻りの特徴をFig. 5に示した。まず、ビッグボア・ショートストローク骨格である。ボア・ストローク比 0.78, 最高出力発生回転数における平均ピストンスピードは 12.4m/sec という低速で、高回転におけるフリクション低減と、2バルブ仕様ながら大径バルブの採用により、ポンピングロス増加を抑制している。

また、既にフィットに採用した気筒当り 2 本のスパーク

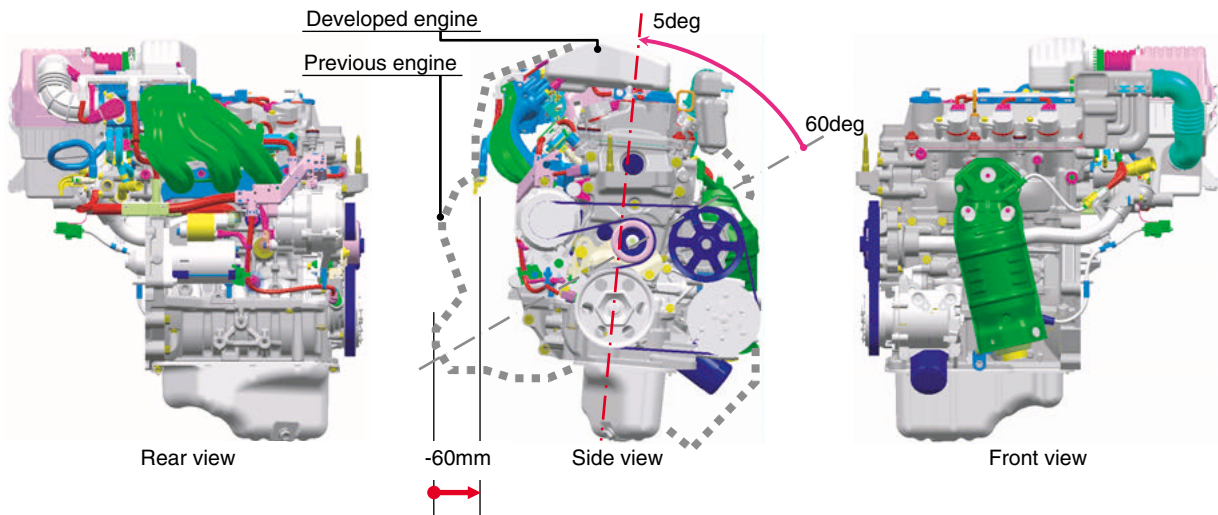


Fig. 4 View of new engine

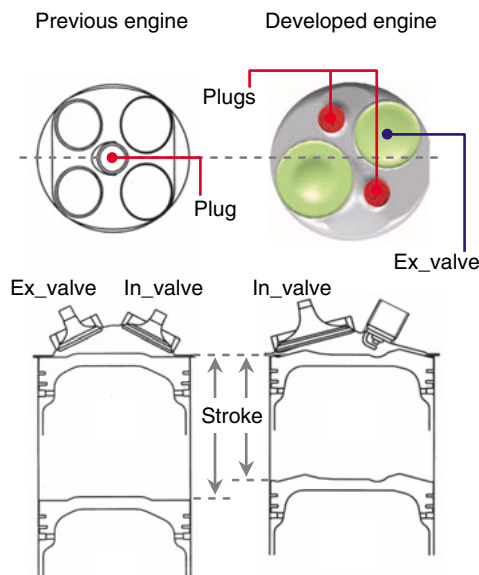


Fig. 5 Comparison of combustion chambers configuration of previous and new engines

プラグを対角に配置した i-DSI は、2 点点火の急速燃焼特性による高圧縮比化を主要な目的に採用した。

結果的に、圧縮比はレギュラガソリン仕様で最高レベルの 11.2 を設定した。また、出力は、従来型に対して最大トルク値と最高出力値は同等ながら、実用頻度の高い中高回転のトルクを向上させた。

3.2. 軽量コンパクト化

軽自動車にとって、車室の広さを確保するためのエンジンコンパクト化は重要である。レイアウトの工夫には、補機のシリンダブロック直付け、エキゾーストマニホルダー一体型シリンダヘッドとキャタライザの直付けレイアウトがあり、これらによりコンパクト化を図った。そして、エンジン搭載角を前傾 60° から前傾 5° に変更することで搭載前

後長を 60mm 短縮した。

また、レゾネータ集約型エアクリーナはトランスミッション上に配置することでパワートレイン全体のコンパクト化に寄与している。

くわえて、クランクシャフトやシリンダブロック廻りの形状やレイアウトの最適化、インテークマニホルド、シリンダヘッドカバー、オイルストレーナ、オイルレベルゲージの樹脂化によりエンジン重量の 9% 軽量化を達成した。

4. 達成性能

4.1. 燃費改善

軽負荷におけるエンジン単体燃費と燃焼安定性を Fig. 6 に示す。理論空燃比の BSFC 低減は 7% 低減、燃焼限界空燃比は 3A/F (Air fuel ratio) のリーン化が達成された。また、理論空燃比の燃焼期間は 13° 短縮できた。これは、燃焼急速化の効果であり、要素技術の詳細を以下に述べる。

4.1.1. i-DSI 適用効果

i-DSI をショートストローク骨格に適用するにあたり、Fig. 5 に代表される 4 バルブシリンダヘッド仕様に対する i-DSI シリンダヘッド仕様の燃費効果を検定した。

ここで用いた供試エンジンは、従来型エンジンの改良によるもので可能な限りショートストローク仕様に変更した。具体的には、ボア径 68mm、ストローク 60.4mm、圧縮比 11.5、バルブ挟み角 30° で、インレットおよびエキゾーストバルブは、それぞれ 4 バルブ仕様で径 25mm、径 21mm また、i-DSI 仕様で径 33mm、径 28mm を設定した。

これに対して、燃費効果の評価には、軽自動車の実用運転域を含む 3 モードを設定した。

- | | |
|-------------|----------------------|
| (1) 燃焼評価モード | 1500rpm, BMEP=358kPa |
| (2) 軽負荷モード | 2650rpm, BMEP=171kPa |
| (3) 高負荷モード | 4000rpm, BMEP=838kPa |

Fig. 7のとおりi-DSI仕様は、ISFC(Indicated specific fuel consumption)で2-6%低減、HC排出量は、20-50%低減した。これはインレットバルブ1弁によるポート流速の向上と、これによる筒内流動の強化、2点点火による急速燃焼の効果であり、この燃焼急速化の詳細をFig. 8に示した。

燃焼評価モードによると、全体として燃焼期間は8%短縮され、MBT(Minimum spark advance for best torque)点火時期の遅角化や最大筒内圧力発生角度の進角により燃焼急速化が把握できる。結果的に、最大筒内圧力の上昇による平均有効圧力の向上で燃費改善に至ったと考える。

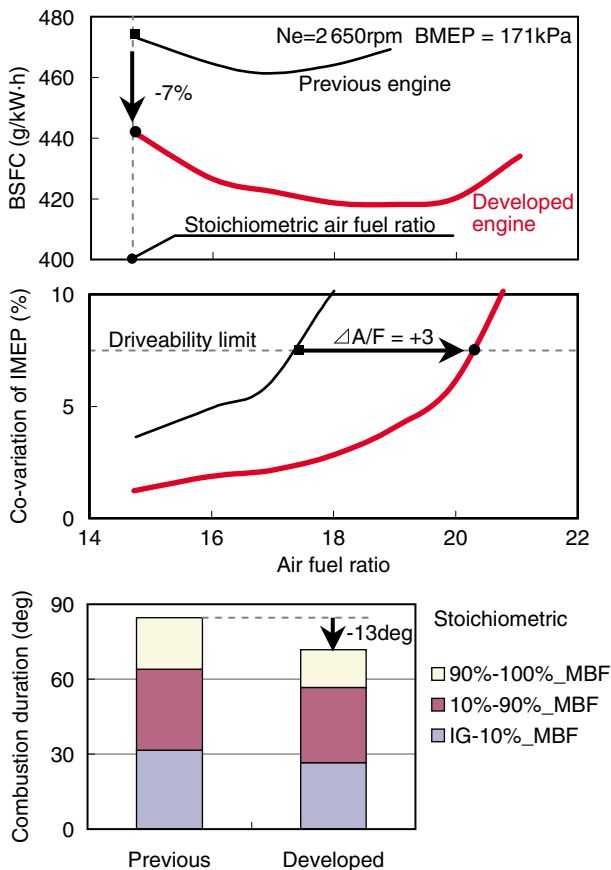


Fig. 6 BSFC and combustion characteristics

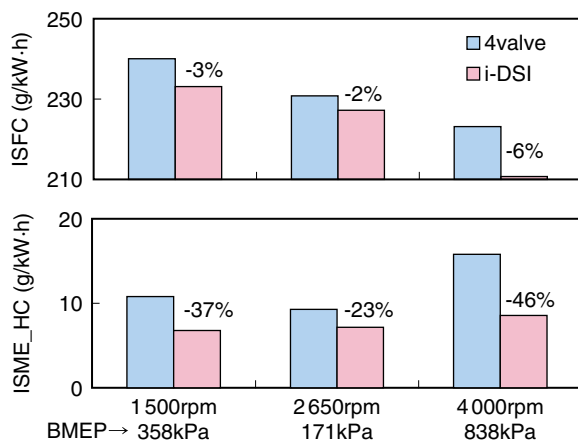


Fig. 7 Effect of i-DSI on ISFC and ISME_HC

以上の結果から、i-DSIの急速燃焼効果が明確になったので、さらに低フリクションを目指して量産仕様は、シリンダボア中心軸間距離80mm、ボア間距離を9mmとしたシリンダボア径71mmと、これに対するストローク長さ55.4mmから成る、ショートストローク仕様を決定した。

次に、インレットポートの改良による燃費改善を目的にスワール比、タンブル比の検討をおこなった。

- (1) aポート：タンブルポート(ベース仕様)
- (2) bポート：aポートに対してスワール比を4倍に強化
- (3) cポート：さらにタンブル比25%、スワール比12%向上

Fig. 9は、吸入行程におけるインレットバルブシート廻りの吸入空気流速分布シミュレーション結果である。ポー

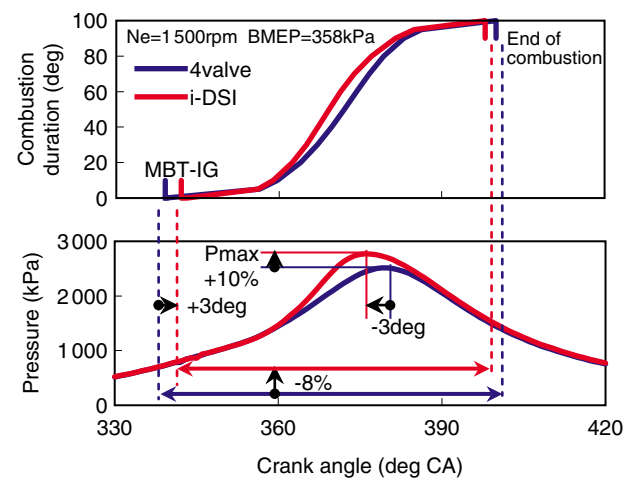
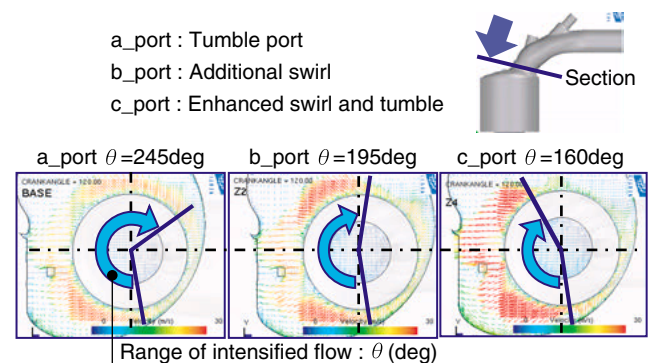
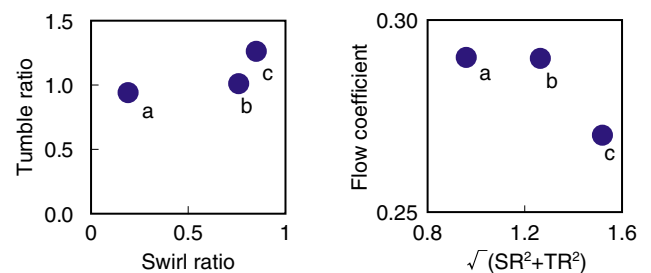


Fig. 8 Effect of i-DSI on combustion characteristics



(a) Velocity simulation : 1500rpm Intake manifold pressure=57kPa



(b) Steady flow test : Valve pressure 5kPa

Fig. 9 Inlet port flow characteristics

ト案 a, b, c の順で流れの指向性が強化されていることがわかる。流れの特性を、平均流量係数と渦強度⁽²⁾と比較すると、相対的に c ポートが渦強度の向上に対して、平均流量係数の低下があり出力低下が予測された。ここで用いた渦強度は、スワール比=SR とタンブル比=TR の合成値= $\sqrt{(SR^2+TR^2)}$ で定義している。

Fig. 10 に ISFC の実機測定結果を示した。a ポートに対する ISFC 低減割合は、b ポートで 0.5%, c ポートでは 1.0 % であり、渦強度の向上によって ISFC が改善される結果が得られた。最終的にポート仕様は、c ポートが最高出力値 2.5% 低下となったので、b ポートを量産適用した。

4.1.2. フリクション低減

軽自動車において実用頻度の高い中高回転のフリクション低減を目的に、ショートストローク骨格の採用とクランクジャーナル径の縮小をおこなった。

ショートストローク化によるピストンスピードの低減効果として、ピストン摺動面とシリンダスリーブ壁面間の油膜せん断抵抗低減やポンピングロス軽減が知られている。

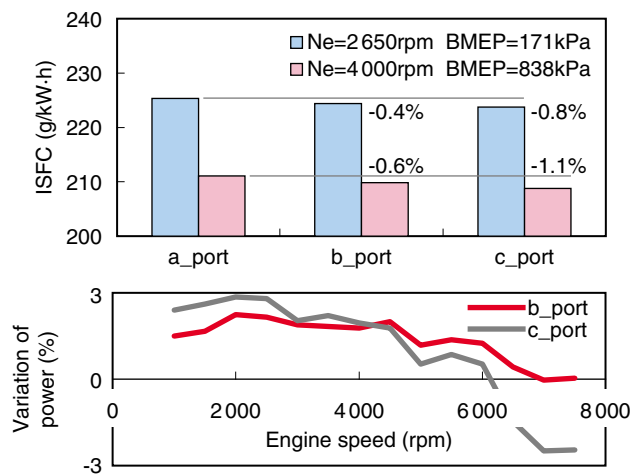


Fig. 10 Comparison of ISFC and power by inlet port

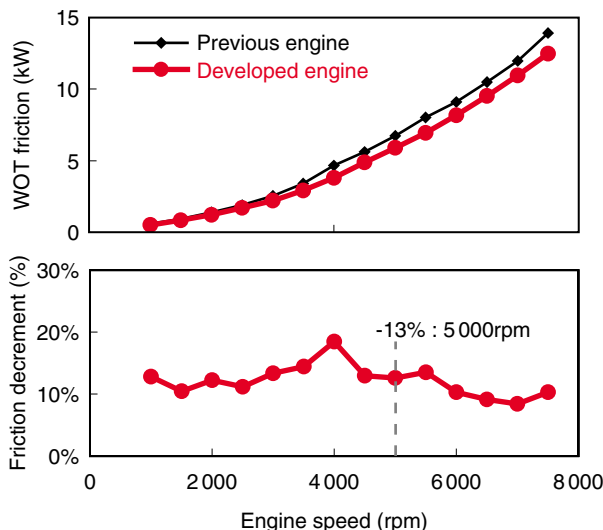


Fig. 11 Decrement of WOT friction

また、クランクシャフトは、ショートストローク仕様により、ジャーナル径とピン径からなるオーバラップが拡大できるのでクランクシャフトの剛性が高まりクランク打音について有利となる。新型エンジンは、クランクジャーナル部のフリクション低減、クランクシャフトの高剛性化、およびメタル焼付き性を検討した結果、クランクジャーナルを径 40mm から径 38mm へ縮小した。

その他のフリクション低減技術では、従来型エンジンに適用していたローラフォロア、0W-20 低粘度エンジンオイルは継続採用しつつ、新たにシビック・ハイブリット用エンジン⁽³⁾で採用したプラトーホニング、オフセットシリンダ構造、イオンプレーティングピストンリング、メインメタル、およびコンロッドメタルの条痕化、ピストンスカートへの二硫化モリブデンショットピーニングを採用した⁽⁴⁾。

フリクション低減効果を Fig. 11 に示した。これは、ポンピングロスを含む、スロットル全開時のモータリングフリクション比較結果である。エンジン回転のほぼ全域で 10 % 以上のフリクションを低減した。Fig. 12 に、フリクション低減内訳を示した。5000rpm におけるフリクションは従来型エンジンに対して 13% 低減された。この内訳は、ピストン廻り 55% 低減、クランクシャフト廻り 11% 低減、動弁系駆動 34% 低減であった。

4.1.3. アイドル安定性改善

アイドル回転数の低減は燃料消費量低減に重要である。新型エンジンは従来型に対してアイドル回転数を 50rpm 低減し 750rpm とした。これは i-DSI による急速燃焼、安定燃焼の効果である。

Fig. 13 に目標アイドル回転数毎の、回転数変動とその頻度を示した。測定条件は、エンジンオートマチックトランス

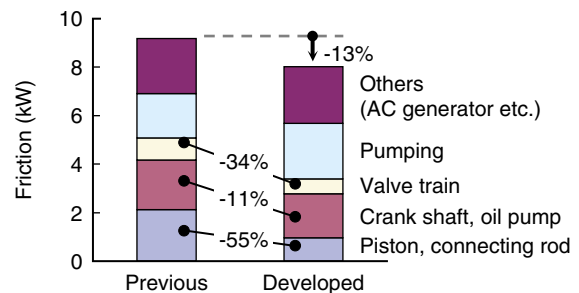


Fig. 12 Comparison of friction distribution

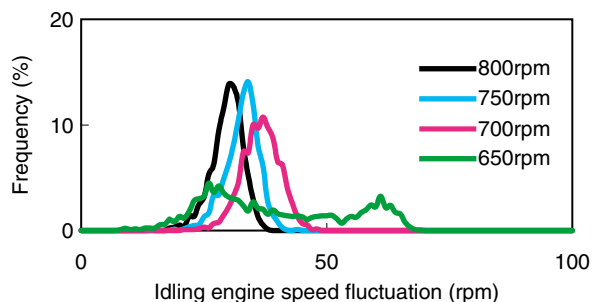


Fig. 13 Stability of idling engine speed

ミッション締結状態における台上試験で、シフト位置は D レンジ、完全暖機後の理論空燃比制御である。ここで、アイドル目標回転数を低速にすることで回転変動幅が増える傾向が示された。アイドル回転 650rpm では、回転数変動幅の広がりや頻度の散逸から、アイドル安定性が悪化していることがわかる。

これに対して、Fig. 14 は、目標アイドル回転数に対する最高筒内圧力(Pmax)の標準偏差である。650rpm において Pmax 標準偏差値の上昇があり、燃焼不安定領域に入ったことを示している。この結果は、前述した回転数頻度特性の傾向と良く一致しており、燃焼安定性がアイドル回転数安定性に大きく影響していることを表現している。

量産仕様は、電気負荷変化などトランジェントにおけるアイドル制御性も含め、設定回転数を 750rpm とした。

4.2. 出力

Fig. 15 にエンジン性能曲線を示す。出力特性は、吸入系仕様による共鳴同調回転数の調整をおこない、最大トルク値は従来型エンジンと同等ながら、4000rpm までの回転域で平均 7% トルクを向上した。また、同一最高出力値を

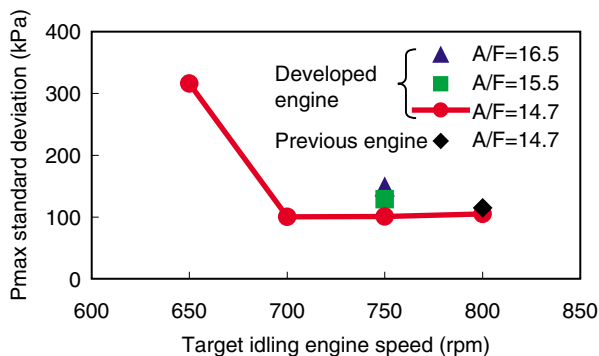


Fig. 14 Stability of idling Pmax

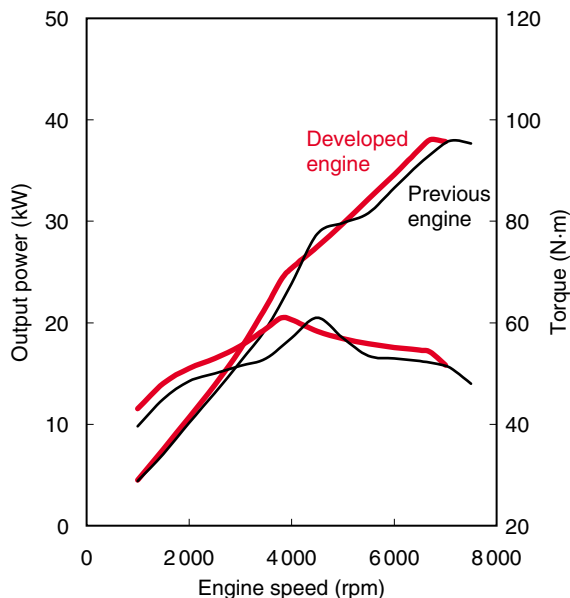


Fig. 15 Engine performance

500rpm 低回転で発生させ実用的な出力特性とした。

さらに、新型エンジンの出力特性の改良には、各種ノッキング抑制技術の適用が寄与している。i-DSI による燃焼急速化、スワールタンブルポート、新冷却水回路の適用が、具体的項目としてあげられる。

燃費改善検討と同様に、従来型エンジンの改造型ショートストローク仕様による i-DSI シリンダヘッド仕様の出力効果を確認した。Fig. 16 は、エンジン回転数に対する体積効率特性の比較である。i-DSI は 2 バルブ仕様のため 5000rpm 近傍までの回転域で体積効率の優位性がある。Fig. 17 に 3500rpm における MBT トルク特性と設定点火時期を表した。これによると i-DSI 仕様は、高 MBT トルクが遅角側の点火時期で発生し、かつ、ノッキング余裕度が同等であることから、設定トルクは 3% 向上した。

以上から、i-DSI は、体積効率向上とノッキング抑制効果により、低回転から高回転において、従来型 4 バルブエンジン同等以上の出力特性となった。

冷却水回路についても、ノッキング抑制を目標に改良をおこなった。Fig. 18 に冷却水回路の変更を示す。ラジエタからの循環冷却水をシリンダブロックに先行して流す従来型回路に対し、新型回路では、シリンダヘッドに先行して流す回路とした。これにより、比較的低温の循環冷却水を高い流

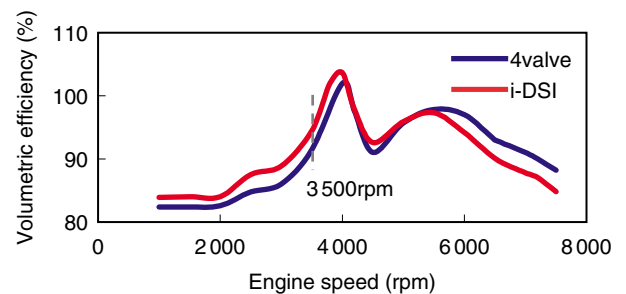


Fig. 16 i-DSI volumetric efficiency

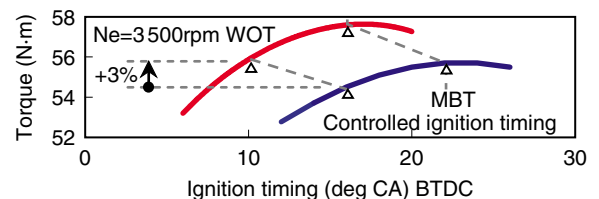


Fig. 17 Effect of i-DSI on torque

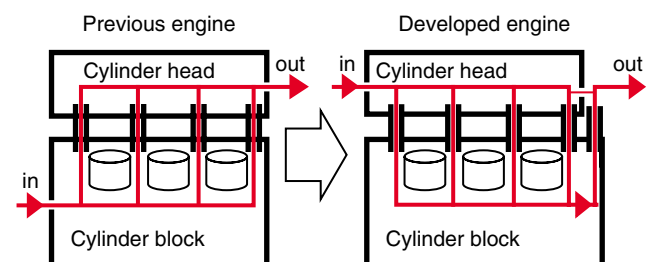


Fig. 18 Comparison of coolant circuit

速のまま燃焼室廻りに供給することで、エンジン回転数の全域で1-2°のノッキング改善ができ、高圧縮比による、燃費と出力の向上に寄与できた。

また、エキゾーストマニホールド一体型シリンダヘッドの採用に伴い、キャタライザフランジからシリンダヘッドへの熱流束についても、十分な冷却性能を保持できるようにシリンダヘッド内ウォータジャケット全体の冷却水流速分布を最適化した。具体的には、Fig. 19に示す冷却水流速シミュレーション、可視化、および実機ファイアリングの多点温度計測によって、冷却水のだよみや局所的な温度上昇を改良し形状を決定した。

4.3. 低エミッション技術

新型エンジンに適用した低エミッション技術は大きく以下に示す4項目である。

(1) 高精度空燃比制御

- 1-1 キャタライザ前のA/Fセンサとキャタライザ下流O₂センサによる高精度空燃比制御
- 1-2 シリンダヘッドポートにレイアウトされた多孔インジェクタによる燃料輸送遅れの軽減

(2) 排気系廻りの低ヒートマス構造

- 2-1 エキゾーストマニホールド一体シリンダヘッド
- 2-2 エンジン直下レイアウトのキャタライザ

(3) 燃焼安定化による冷間始動直後からの理論空燃比制御

(4) 触媒早期活性化のための大量点火時期遅角制御

ここで、(4)に該当する冷間始動直後の HC 排出ガス低減を目指した触媒早期活性化技術の適用結果を紹介する⁽⁵⁾。

触媒早期活性化には、点火時期の大量遅角による排気温度上昇が有効である。しかし、大量遅角の適用には、安定燃焼の確保が前提となる。

新型エンジンの低水温における、燃焼安定性のエンジン単体試験結果を Fig. 20, Fig. 21 に示した。水温 35°C の条件下で、BMEP(Brake mean effective pressure)が一定になるように点火時期遅角と吸気量を調整した。結果は、MBT点火時期から 25° の遅角でも燃焼変動率は 5%未満で安定燃

焼が確保されており、排気温度上昇は約200°Cに達することがわかった。

この制御の車両適用結果を以下に示す。Fig. 22は、点火遅角量に対する、エンジン冷間始動後 54sec における触媒温度と 11mode の HC 排出量を示している。点火時期遅角制御無しに対して、最大 15° 遅角にしても HC 排出量の低減傾向は維持されていた。結局、量産仕様は、燃費と触媒早

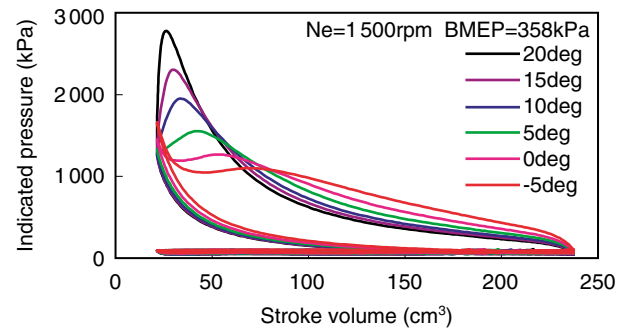


Fig. 20 Relationship between indicated pressure and ignition timing retard at constant BMEP

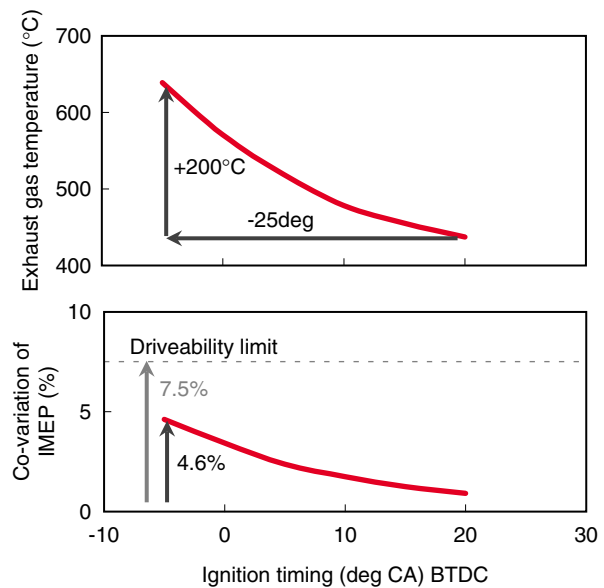


Fig. 21 Influence of ignition timing retard on exhaust temperature and combustion stability

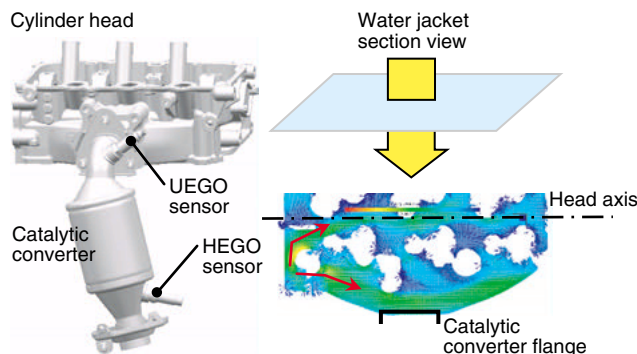


Fig. 19 Result of simulation of coolant flow to siamese exhaust port

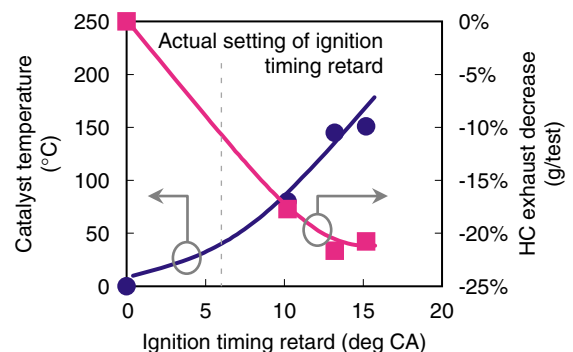


Fig. 22 Catalyst temperature rise and HC decrease

期活性化のバランスで点火遅角量 6° を設定した。また、Fig. 23に示すように排気系廻りの低ヒートマス構造の効果とあわせて 220°C の触媒温度上昇を達成し、超一低排出ガス基準に適合した。

4.4. エンジン振動，騒音改善技術

将来に渡りエンジン振動，騒音について，競争力のあるエンジン骨格を実現するため，第一に主運動系廻りの高剛性化と低振動化を進めた。まず，ショートストローク骨格

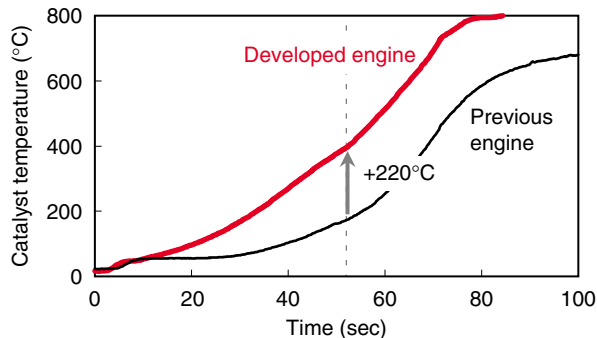


Fig. 23 Effect of siamese exhaust port and ignition timing retard on catalytic converter warm-up characteristics

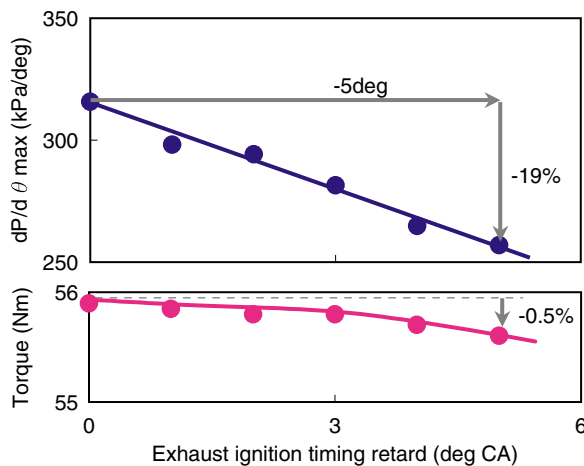


Fig. 24 $(dP/d\theta)_{\max}$ decrease and torque

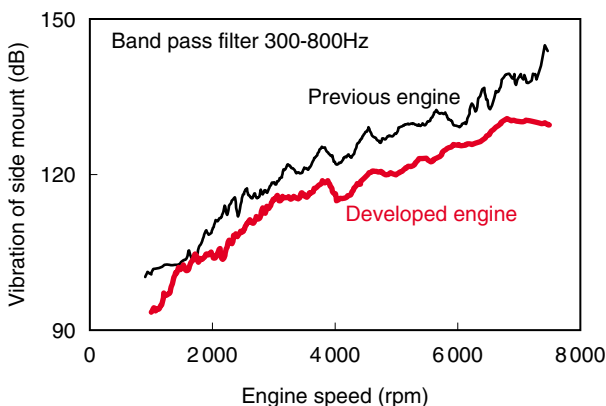


Fig. 25 Effect of i-DSI sequential ignition timing on improvement of engine noise

によってクランクシャフトの高剛性を確保しつつ，フルバランスウエイト化により振動を抑えた。クランクシャフト鍛造加工にツイスト行程を追加することで，フルバランスながら軽量化も達成した。CAE による 1 スロー剛性評価では，クランクシャフト曲げ剛性が従来型に対して，26% 向上した。

一方，シリンダブロック構造では，ロアブロック採用がエンジン骨格剛性向上に大きく寄与している。このロアブロックは，各ジャーナルとロアブロック外壁面を一体化し曲面形状とリップ配置を最適化することで，ジャーナル倒れ剛性を 38% 向上している。また，CAE の検討により，補強部品を必要とすることなく，エンジントランスミッション締結剛性を確保できた。

第二のエンジン振動，騒音改善技術は，i-DSI の位相差点火制御である。Fig. 24 は，5500rpm，WOT における気筒当たり 2 本のスパークプラグの同時点火と，エキゾースト側単独の遅角制御による $(dP/d\theta)_{\max}$ 低減効果を示している。量産仕様は，同時点火に対してエキゾースト側点火時期を 5° 遅角化することで，エンジントルクをほぼ同等のまま， $(dP/d\theta)_{\max}$ を 19% 低減，エンジン外郭騒音で 17% 低減した。

以上の高剛性エンジン骨格と i-DSI 技術により，Fig. 25 に示す中周波マウント点振動を 5-10dB 低減した。

5. まとめ

軽自動車用エンジンの開発にあたり以下の知見が得られ，これらを具現化することでトップクラスの環境性能と出力，燃費，静粛性などの高い商品性を達成することができた。

- (1) ショートストローク化によりピストンスピードを低減することで 10% のフリクション低減が可能である。また，燃焼面では，2 点点火を用いた急速燃焼により耐ノック性を向上させ，11.2 の高圧縮比化と合わせて BSFC を 7% 向上させることができ，モード燃費で 19.8km/L を達成することができる。
- (2) 全開出力では，上記急速燃焼，高圧縮比に加え，2 バルブ化による体積効率と冷却水回路変更による耐ノック性向上により，最大トルク回転数を 500rpm 下げながら 7% のトルク向上を図ることが可能である。
- (3) 環境性能では，直下キャタライザ，低ヒートマス排気系および点火時期遅角による触媒の早期活性をおこない，さらに，高精度空燃比制御により空燃比の安定化を図ることで超一低排出ガス基準に適合させることができる。
- (4) エンジン搭載角の前傾 60° から 5° への変更により前後長を 60mm 短縮し，シリンダヘッドカバーや吸入系部品を樹脂化することで 9% の軽量化が達成できる。
- (5) 振動騒音性能では，クランクシャフトの高剛性化と

CAE解析に基づくトランスミッションとの締結剛性の向上を図り、また、点火時期の遅角制御により(dP/dθ)max 低減をおこなうことでマウント振動を 5-10dB 低減することが可能である。

参考文献

- (1) 中山幸夫, 鈴木誠, 岩田洋一, 山野順司: 2002 年モデル「Fit」用 1.3L 2 プラグエンジンの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.13, No.2, p.43-52(2001)
- (2) 林有登, 櫻原一雄, 高林徹, 遠藤太郎: アコード／トルネオ用 1.8L リーンバーンエンジンの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.10, p.52(1998)
- (3) 松木正人, 若城輝男, 神山敏宏, 佐藤利行, 賀来嘉昭, 神田正浩: ハイブリッドカー「Civic Hybrid」用パワートレインの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.14, No.1, p.43(2002)
- (4) 萩原秀実: 内燃機関用ピストンスカート部への個体潤滑剤付与技術とその効果, Honda R&D Technical Review, Vol.14, No.1, p.85-92(2002)
- (5) 北川浩, 三部敏宏, 岡松和則, 安井裕司: 「ACCORD SULEV」用極超低エミッションシステム, Honda R&D Technical Review, Vol.12, No.2, p.37-44(2000)

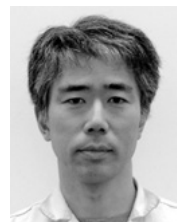
■ 著 者 ■



和田 裕 介



大 津 啓 司



成田研之助



篠 原 利 光