

i-VTEC 吸気弁遅閉じ機構による燃費改善技術

Achievement of Enhanced Fuel Economy via i-VTEC Intake Valve Closure Delay Mechanism

瀬 古 一 行*
Kazuyuki SEKO

林 有 登*
Aruto HAYASHI

中 嶋 摩沙洋*
Masahiro NAKAJIMA

要 旨

燃費改善の新たな手法として、従来の VTEC 機構に加え吸気弁遅閉じ機構を採用した新型 i-VTEC エンジンを開発した。本エンジンの特徴は、吸気弁閉じ時期を遅らせた遅閉じカムと出力カムをエンジンの負荷に応じて切換えることで低燃費と高出力の両立を図ったことにある。吸気弁遅閉じ機構では、低負荷時には遅閉じカムを用いポンピングロスを低減させるとともに、高負荷時には出力カムに切換えることで高出力を発生させる。遅閉じカムのバルブタイミング設定に際しては、実車走行条件を考慮するとともに筒内流れシミュレーションを用いた。この結果、遅閉じカムは出力カムに対してエンジン単体燃費を 6% 低減し、新型エンジンを搭載した車両では 10・15 モード燃費 17.0 km/L (平成 22 年燃費基準 + 5%) を達成した。

ABSTRACT

The conventional VTEC system has been modified with a mechanism enabling delayed closure of the intake valves as a new method of increasing fuel economy. The major characteristic of the new engine is the achievement of a balance between low fuel consumption and high power by means of switching between a delayed closure cam with delayed intake valve closure timing and a high output cam, depending on engine load. The intake valve closure delay mechanism employs the delayed closure cam when the engine is under low load in order to reduce pumping loss. The high output cam is employed when the engine is under high load, in order to produce high power. A variety of driving conditions were considered and in-cylinder flow simulations were used in setting the valve timing of the delayed closure cam. The delayed closure cam achieves a 6% reduction in engine fuel consumption compared to the high output cam. The application of the new VTEC mechanism has enabled the achievement of 17.0 km/L fuel economy in the Japanese 10-15 mode, representing a 5% increase on the level as stipulated by domestic 2010 fuel economy standards.

1. まえがき

環境問題に対する関心が高まる中、自動車用エンジンの低燃費化、低エミッション化といった環境性能向上は開発における重要な課題となっている。CO₂ 排出量低減すなわち燃費改善手法としては理論熱効率向上、ポンピングロス低減、フリクションの低減等が考えられる。Honda は環境性能向上のため、リーンバーンエンジン、筒内直噴エンジン⁽¹⁾や VTEC にカムシャフト位相連続可変機構を組み合わせた 4 気筒 i-VTEC エンジン⁽²⁾を始め、気筒休止による可変シリンダシステムを搭載した V6 i-VTEC⁽³⁾エンジンの開発をおこなってきた。

熱効率向上にむけた別のアプローチとしては、吸気弁遅閉じによって圧縮比に対して膨張比を大きくする手法が知

られており、アトキンソンサイクル、あるいはミラーサイクルと呼ばれて技術的考察がなされ⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾、一部のエンジンでは実用化^{(7), (8)}されている。

このように吸気弁遅閉じは燃費改善の有効な手段であるが、効率向上のために吸気弁閉時期を遅くするほど、高負荷、高回転域での充填効率低下による出力低下が課題となり、過給機やハイブリッド機構との組み合わせが必要であった。

今回、吸気弁閉時期の設定を通常と遅閉じに切換える i-VTEC 機構を考案し、低燃費と高出力、および低排出ガスを両立する R18A 型 1.8L 4 気筒 i-VTEC ガソリンエンジン⁽⁹⁾を開発した。本研究では、吸気弁遅閉じ時期がポンピングロスおよび燃焼安定性に及ぼす影響と燃費改善効果を検討した。

*栃木研究所

2. 吸気弁遅閉じについて

2.1. 熱効率への影響

従来型エンジン(オットサイクル)と吸気弁遅閉じエンジンでの P-V 線図を模式的に Fig. 1 に示す。

従来型エンジンは圧縮比と膨張比がほぼ同一であったが、吸気弁の閉時期を遅くした場合は、圧縮行程における混合気の実圧縮比(=実効圧縮比)と膨張行程における膨張比が異なる高膨張サイクルとなり、同一圧縮比のオットサイクルに対して熱効率が向上する。

Fig. 1 に示されるオットサイクルと高膨張サイクルの理論熱効率は、以下になる。

オットサイクルの場合

$$\eta_o = 1 - \frac{1}{\epsilon_o^{\kappa-1}} \quad (1)$$

ただし、圧縮比 $\epsilon_o = V_{o1}/V_{o2} = V_{o4}/V_{o3}$
比熱比 κ

高膨張サイクルの場合

$$\eta_e = 1 - \frac{\beta \epsilon_e'^{1-\kappa} \epsilon_e^{\kappa} + \kappa (\epsilon_e' - \epsilon_e) - \epsilon_e'}{\epsilon_e^{\kappa(\beta-1)}} \quad (2)$$

ただし、実効圧縮比 $\epsilon_e = V_{e1}/V_{e2}$
膨張比 $\epsilon_e' = V_{e4}/V_{e3}$
爆発度 $\beta = P_{e3}/P_{e2}$

式(1)、(2)から膨張比を 10.5 として実効圧縮比を変化させたときの高膨張サイクルと、圧縮比を変化させたときのオットサイクルの熱効率を求め Fig. 2 に示す。なお、爆発度は実機テスト結果より 4.5 とした。これより、理論熱効率の変化は膨張比が支配的であり、同一圧縮比ならば膨張比の高いエンジンが燃費に有利といえる。また、高膨張サイクルでは実効圧縮比の低下により圧縮時の筒内温度が低下し、熱損失低減およびノッキング回避の効果も期待できる。

2.2. ポンピングロスへの影響

一般的にガソリンエンジンでは低負荷時の少量空気を調整する手段としてスロットルバルブにより絞り運転をおこ

なっている。この状態では負圧下で空気を吸入するためポンピングロスが発生する。Fig. 3に従来型エンジンと吸気弁遅閉じ時期を遅閉じとしたエンジンにおけるポンピングロスの違いを模式的に示す。(b)のように遅閉じカムを用いて吸気弁閉時期を遅らせた場合は、吸入行程で筒内に入った空気の一部を圧縮行程前半でインテークマニホールドに吹き返すことによって実際の圧縮開始点がAからA'へと変化し、スロットルバルブの絞りが少ない状態で空気量を調整するためポンピングロスが低減する。

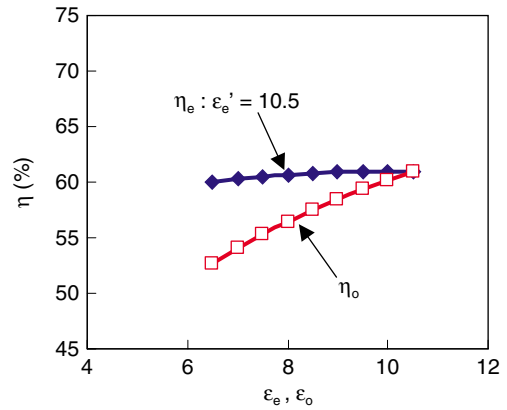


Fig. 2 Influence of ϵ_e and ϵ_o on cycle efficiency

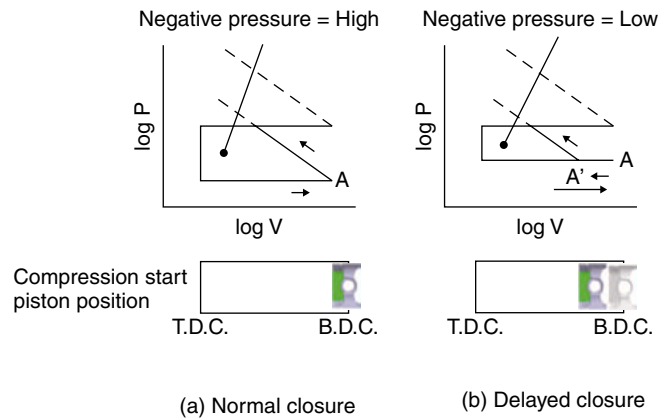


Fig. 3 Influence of intake valve closure timing on pumping loss

3. テスト装置

Table 1 に供試エンジン(R18A 型 i-VTEC エンジン)の主要諸元を示す。

供試エンジンは二つある吸気弁のうち、片方を出力カムと遅閉じカムの切換えをおこなう構造となっている。遅閉じカムの閉時期変更は種々に設定したカムに組み替えておこなった。なお、吸気弁開閉時期はバルブリフト 1mm 点で定義する。Fig. 4に出力カムと遅閉じカムにおいて設定した吸気弁閉じ時期(以下、I.V.C.)とカムプロフィールを示す。

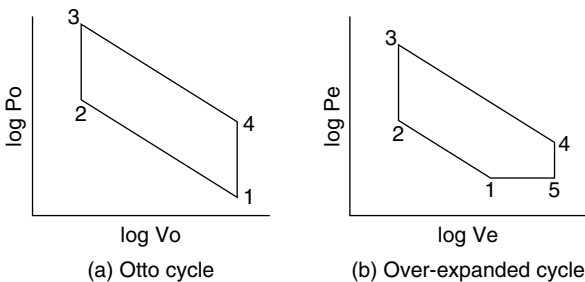


Fig. 1 Comparison of P-V diagram between Otto cycle and Over-expanded cycle

Table 1 Engine specifications

Type	R18A
Cylinder configuration	In-line 4-cylinder
Bore × Stroke (mm)	81 × 87.3
Displacement (cm ³)	1799
Compression ratio	10.5:1
Valve train	SOHC i-VTEC Inlet delayed closure
Number of valves	4 per cylinder
Valve diameter (mm) In./Ex.	32/26
Cylinder offset (mm)	12
Intake manifold	Variable intake system
Gasoline	Regular (RON91)
Max. power (kW/rpm)	103/6300
Max. torque (Nm/rpm)	174/4300

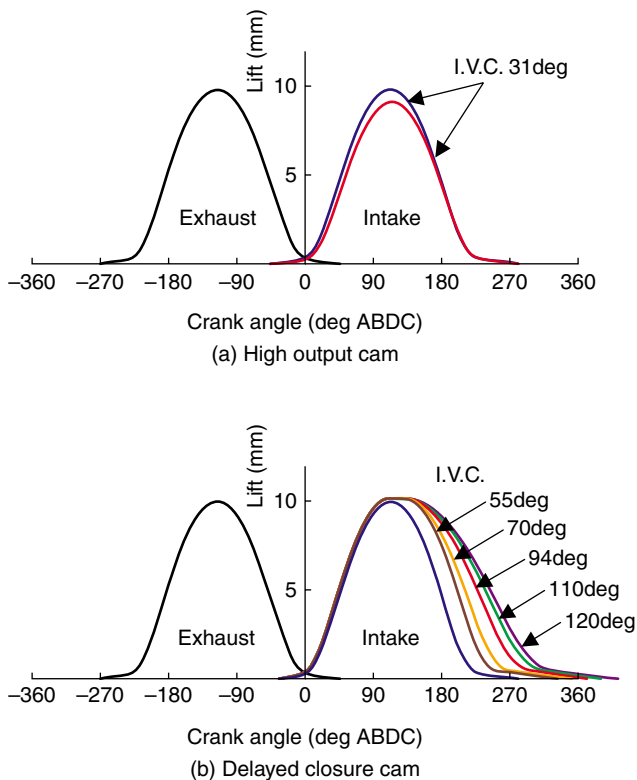


Fig. 4 Applied I.V.C and cam profiles

指圧波形は指圧センサ (Kistler 6052B) とチャージアンプ (Kistler 5011B) をもちい、クランク角 1.0 deg 毎にサンプリングした。

4. 結果および考察

4.1. 遅閉じカムがポンピングロスに及ぼす影響

Fig. 5 に同一出力における出力カムと遅閉じカムの指圧線図を示す。I.V.C. は出力カム 31 deg (ABDC, 以下同じ)、遅閉じカム 94 deg である。遅閉じカムでは圧縮行程前半で

一度吸入した空気がインテークマニホールドへ吹き返され、圧縮開始タイミングが遅れていることがわかる。また、吸入行程での平均負圧が大気側に近づきポンピングロスが低減していることがわかる。

Fig. 6 に W.O.T. における出力カムの体積効率 (以下、 η_v) と遅閉じカムの η_v の比を吹き返し割合と定義して示す。遅閉じカム作動時は、出力カムに対して 25 - 35% の空気が吹き返され、見かけの排気量が小さくなっていることがわかる。i-VTEC 機構により要求トルクに応じてカムを切替えることで、高負荷域の出力と低負荷域の燃料消費率低減を両立させている。

4.2. 遅閉じカムが熱効率に及ぼす影響

Fig. 7 に、I.V.C. を 31, 94, 120 deg と変化した場合の図示燃料消費率 ISFC に及ぼす影響を示す。図示平均有効圧力 IMEP には、ポンピングロス分を考慮したグロス値⁽¹⁰⁾をもちいた。

供試エンジンは圧縮比が 10.5 一定のため、I.V.C. に対する ISFC に大きな変化は見られなかったものの、遅閉じカムでは ISFC が約 0.5% 低くなった。これは実効圧縮比が変

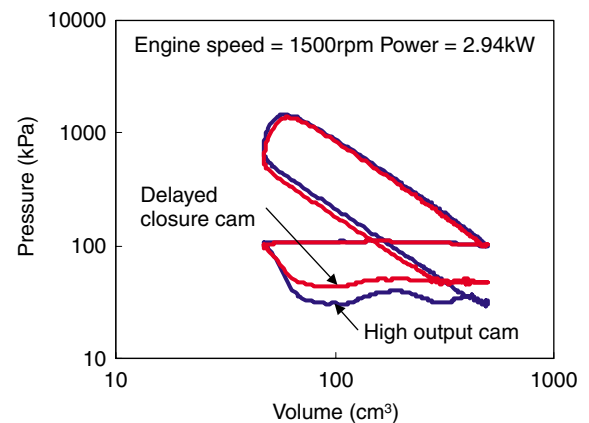


Fig. 5 Effect of delayed closure inlet valve timing for reduction of pumping loss

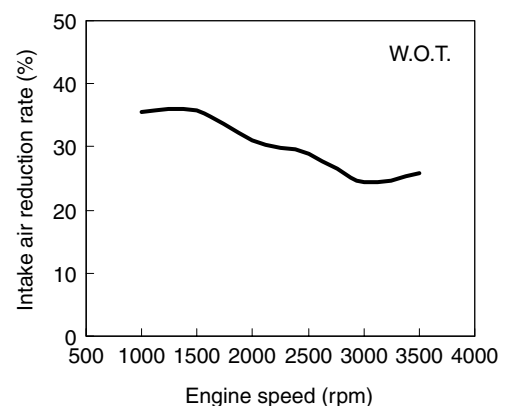


Fig. 6 Intake air reduction rate at inlet valve delayed closure

化して筒内温度が低下しシリンダ壁面への熱損失が減少したためと考えられる。また、IMEPを増加させるとI.V.C.31 deg ではノッキングによる点火時期リタードの影響を受けISFCが増加する領域があるのに対し、I.V.C.94 deg ではW.O.T.においてもノッキングは発生せずISFC増加は見られなかった。しかし、I.V.C.の遅角化とともにW.O.T.でのIMEPは低下した。

4.3. 遅閉じカムによる燃費向上効果

Fig. 8 に、I.V.C. に対するポンピングロス、正味燃料消費率 BSFC の改善効果、指圧解析結果を示す。I.V.C. を遅

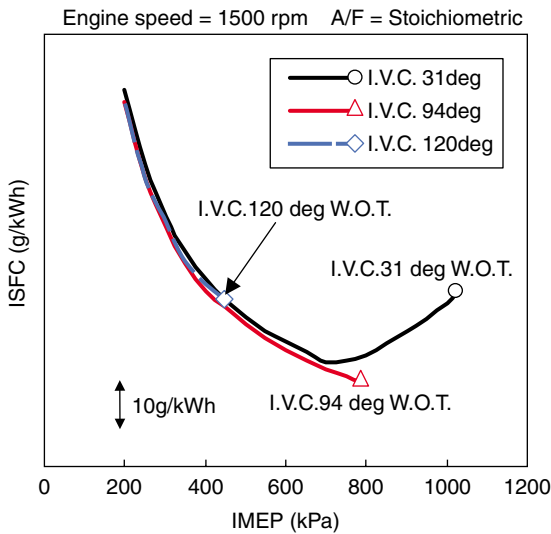


Fig. 7 Influence of I.V.C. on ISFC

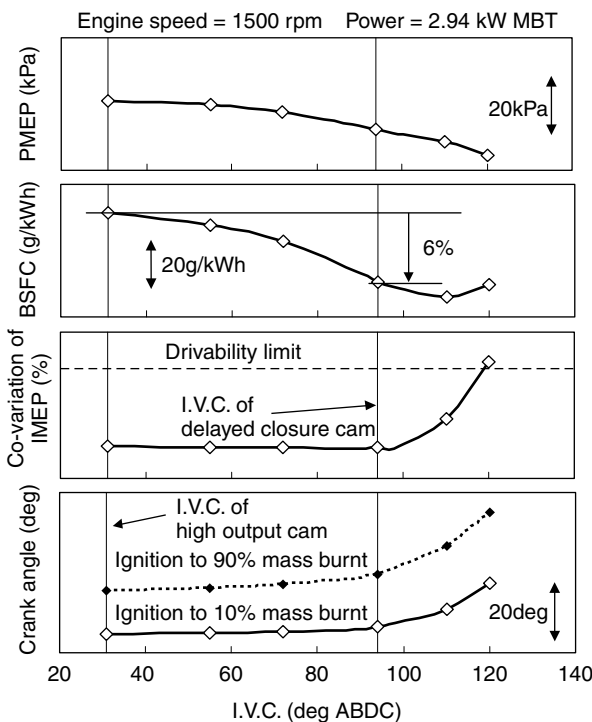


Fig. 8 Influence of I.V.C. on PMEP, BSFC, characteristics of combustion

角するにつれてポンピングロスは低減し BSFC も向上するが、110 degより遅角するとポンピングロスは低下しているにもかかわらず BSFC の向上は見られなかった。これはI.V.C.の過大な遅角によって筒内流動が減衰することと筒内温度が低下することにより、着火後の初期燃焼が緩慢になりポンピングロス低減分が相殺されたためと考えられる⁽¹¹⁾。

Fig. 9 に圧縮行程後半の筒内乱れエネルギーと燃料分布シミュレーション結果を示す。出力カム(I.V.C.31 deg)とI.V.C. 94deg 遅閉じカムのプラグ近傍における乱れエネルギーを比較すると、I.V.C. 94degでは乱れエネルギーの強い領域がやや狭くなった。これに対してI.V.C.110 degではプラグ近傍の乱れエネルギー減少が顕著になりプラグ近傍燃料分布のリッチ領域も減少した。これが Fig. 8 においてI.V.C.110 deg で初期燃焼および主燃焼期間、燃焼安定性を示す IMEP 変動率が急激に立ち上がる要因になっているものと考えられる。この結果からI.V.C.を過大に遅角すると、着火時の筒内乱れエネルギー低下とともに燃料分布がリーン化し燃焼が変化するものと考えられる。

Fig. 10 に車両における代表的なクルーズ車速に相当する負荷条件で I.V.C. を変化させた場合の出力カム(I.V.C.31 deg)に対する BSFC の改善効果を示す。車速 40 km/h では I.V.C.98 deg 付近で BSFC 改善効果が極大となったが、車速 80 km/h 以上ではI.V.C.120 deg まで遅角しても BSFC

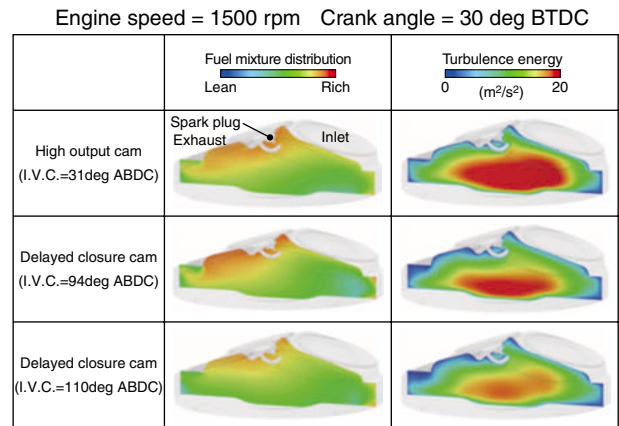


Fig. 9 Comparison of turbulence energy and fuel mixture distribution

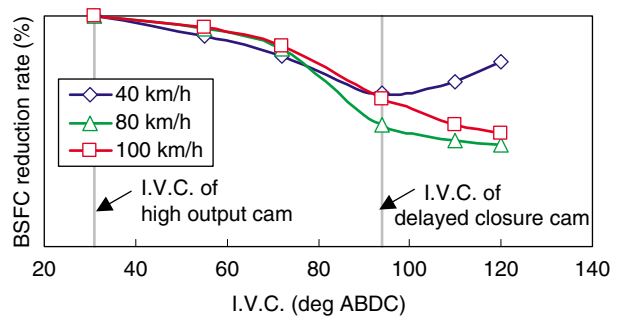


Fig. 10 BSFC reduction rate at cruise condition

のボトムは得られなかった。これは、高車速(高エンジン回転, 高負荷)よりも低車速(低エンジン回転, 低負荷)のほうが遅角側 I.V.C. での筒内流動と筒内温度の低下が大きいためと考えられる。したがって負荷条件が変化すると, BSFC が最善となる I.V.C. も変化する。遅閉じカムの I.V.C. は, 燃費改善効果と燃焼安定性を考慮し下死点後 94 deg に選定した。これにより出力カムに対して同等の燃焼を確保しつつ BSFC を 6%改善することができた。

Fig. 11 に EGR 率に対する指圧解析結果, NOx 排出量, BSFC を示す。出力カムの方が EGR 時の燃費低減量はやや多いが, EGR を導入した場合でも遅閉じカムの優位性は変わらなかった。

EGR 率に対する燃焼特性を比較した場合, 遅閉じカムでは出力カムと比べて燃焼安定性限界 EGR 率は減少するものの, 遅閉じ化により筒内温度が低下するため BSFC 最小ポイントでの NOx 排出量は出力カムと同等となった。

4.4. 遅閉じカム切換領域と燃費改善効果

Fig. 12 に遅閉じカムの出力カムに対する BSFC 低減率マップを示す。遅閉じカムの燃費改善効果はポンピングロス低減効果の大きい低回転, 低負荷で顕著であるが, 遅閉じカムに切換えをおこなう全領域で燃費改善効果が得られた。

以上のような遅閉じカムの燃費改善効果に加え, 低フリクション技術による燃費改善技術を採用することにより, 本エンジン搭載車両は 10・15 モード燃費 17.0 km/L を達成した。

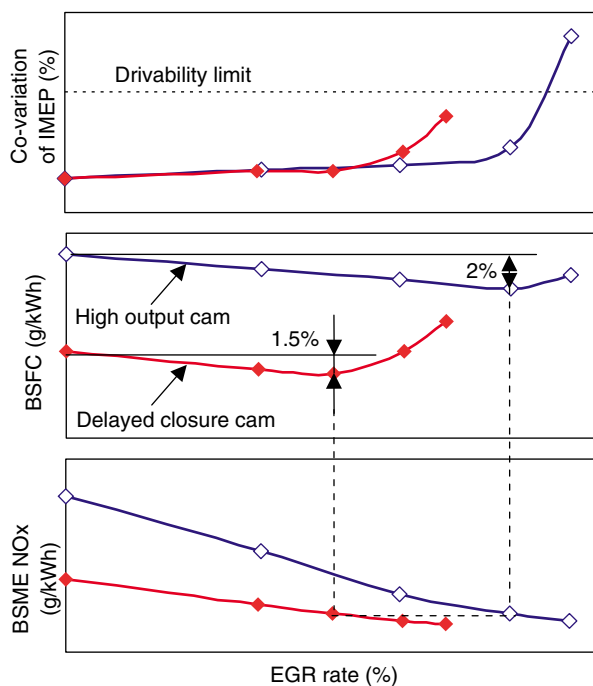


Fig. 11 Comparison of EGR characteristics between conventional valve timing and delayed valve timing

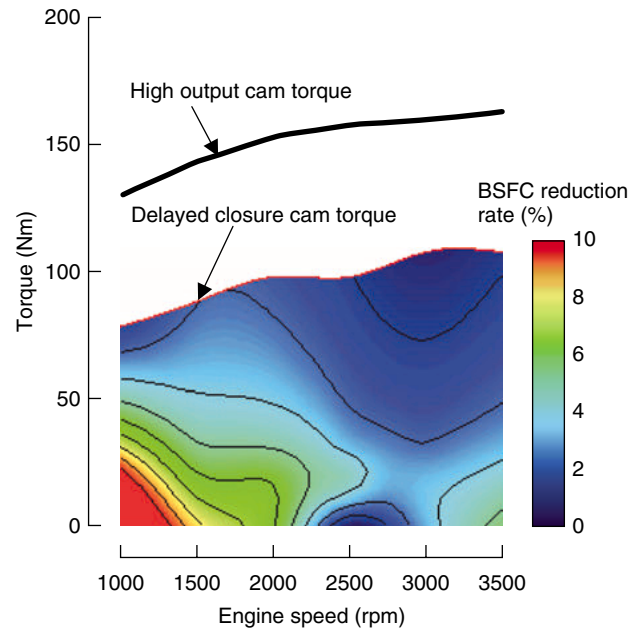


Fig. 12 BSFC reduction rate map (W/O EGR)

5. まとめ

出力カムと吸気弁遅閉じカムを切換える i-VTEC 機構を開発し, 吸気弁遅閉じ時期と燃費改善効果について検討をおこなったところ, 以下の結果を得た。

- (1) 遅閉じカム作動時は高膨張サイクルを実現することができ, I.V.C.94degにおいて出力カム(I.V.C.31deg)に対し BSFC は6%改善した。
- (2) 圧縮比を保ったまま出力カムと吸気弁遅閉じカムを切換えた場合, 燃費向上効果はポンピングロス低減が支配的である。
- (3) 遅閉じカムでは出力カムと比べて燃焼安定性限界EGR率は減少するものの, 遅閉じ化により筒内温度が低下するため BSFC 最小ポイントでの NOx 排出量は出力カムと同等となった。

参考文献

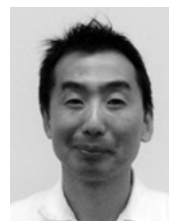
- (1) 甲田豊, 菅波友二, 小林裕幸, 小川賢: 高性能・低エミッション 2.0L 直噴ガソリンエンジンの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.16, No.1, p.39-46
- (2) 新里智則, 林有登: 新型 2.0L リーンバーンエンジンの開発, HONDA R&D Technical Review, Vol.12, No.2, p.45-54
- (3) 野口勝三, 藤原幹夫, 瀬川誠, 澤村和同, 鈴木茂: V6 i-VTEC可変シリンダシステムエンジンの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.16, No.1, p.85-92
- (4) Heywood, J.B.: Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill Book, p.183-186(1979)

- (5) 山名康介, 湯澤義晴, 志賀聖一, 西田憲二, 荒木幹也, 中村壽雄, 小保方富夫: 吸気弁遅閉じ超過膨張サイクルガソリン機関の性能に及ぼす吸気乱れ増大と希薄燃焼適用の効果, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.95-04, p.1-5(2004)
- (6) 松岡信: 内燃機関の熱効率に関する二, 三の考察, 内燃機関, 第 23 巻, 第 4 号, p.9-26(1984)
- (7) 畑村耕一, 後藤剛, 調枝昌博, 清水弘志, 阿部宏司: ミラーサイクル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.931, p.201-204(1993)
- (8) 高岡俊文, 広瀬雄彦, 上田建仁, 熊野靖, 多田博, 金井弘: トヨタハイブリッドシステム用高膨張比ガソリンエンジン, TOYOTA Technical Review, Vol.47, No.2, p.56-63(1997)
- (9) 瀬古一行, 多賀渉, 鳥居健史, 中村聡, 秋間和洋, 関谷明堂: 新型 CIVIC 用 1.8L i-VTEC エンジンの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.18, No.1, p.8-15
- (10) Heywood, J.B.: Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill Book, p.715(1979)
- (11) 南雲慎一, 原誠之助: 吸気弁閉時期制御による燃料消費率の改善, 自動車技術会論文集, Vol.26, No.4, p.17-23(1995)

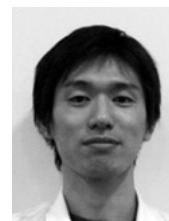
■著 者■



瀬古 一行



林 有登



中嶋 摩沙洋