

直噴ガソリンエンジンの燃焼切り換え制御に関する研究

Research on Combustion Switching Control for Direct Injection Gasoline Engine

小 川 賢*
Ken OGAWA
甲 田 豊*
Yutaka KOHDA

小 森 谷 勲*
Isao KOMORIYA
武 内 雅 大*
Masahiro TAKEUCHI

田 上 裕*
Hiroshi TAGAMI
藤 木 有 司*
Yuji FUJIKI

要 旨

ABSTRACT

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JECTION方式を特徴とする直噴ガソリンエンジンを開発し、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させた。直噴ガソリンエンジンは、EGR に対する燃焼限界と空燃比に対する燃焼限界が異なる DISC と均質燃焼で運転される。従って、二つの燃焼では、同一出力で空気量と EGR 還流率が異なり、燃焼切り換え時、直噴ガソリンエンジンの課題であるトルク段差を引き起こす。このトルク段差防止のため、燃焼切り換え時の失火防止と要求トルクに応じた燃料量制限の二つの観点で研究を進め、吸入行程と圧縮行程に燃料を噴射し、燃焼限界を向上させることで失火防止を実現し、要求トルクに応じた燃料量制限は、燃焼切り換え直前の要求トルクと燃料量および現在の要求トルクより、現在の燃料量制限値を算出することで実現した。この二つの制御を導入し、トルク段差がなく排気ガスエミッションに優れた直噴ガソリンエンジンの燃焼切り換えを達成した。

Honda has developed its first-ever i-VTEC I direct injection gasoline engine employing a center injection system in which a high-pressure fuel injector is located at the center of the combustion chamber. Direct injection enables stratified charge combustion to be employed, and the new center injection engine demonstrates significantly improved fuel economy and emissions performance in the range of vehicle operation in which this type of combustion is used. The authors studied methods of switching between direct-injection stratified charge (DISC) and pre-mixed combustion in order to utilize DISC. The two forms of combustion employed in the new direct-injection engine differ in terms of combustion limits in relation to recirculated exhaust gas and air-fuel ratio. This causes the torque difference which is a specific issue in direct injection gasoline engines. The authors resolved this issue through the application of two technologies. Fuel injection during the intake stroke and the compression stroke has improved the combustion limit. When combustion is stable, the appropriate quantity of fuel to be supplied is determined from the required torque.

1. まえがき

近年、地球温暖化問題への関心が高まり、自動車業界では、低燃費・低排気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さまざまな形式の直噴エンジンが研究、開発されてきている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。直噴ガソリンエンジンは、

- (1) DISC 燃焼でポンピングロス、熱損失が少なく熱効率が
高い。
- (2) 均質燃焼では吸気温度が下がり、耐ノック性が優れ、充

填効率が高い。

等の利点がある反面、混合気制御が難しく全運転領域での成層燃焼は困難である課題も挙げられる。

このため、直噴ガソリンエンジンでは、運転領域に応じて成層燃焼と均質燃焼を使い分けている⁽⁴⁾。成層燃焼と均質燃焼では、同一トルクで燃費が最良となる点火時期等のエンジン制御パラメータが異なる。そのため燃焼状態を切り換える際、トルク変動を防止する手法が必要である。

本研究では、直噴ガソリンエンジンの燃焼状態切り換え時、運転者がトルク変動を感じないことを目標にし、失火抑制手法と燃料量算出方法の検討をおこなった。

* 栃木研究所

Table 1 Engine specifications

Engine code	K20B	
Cylinder configuration	In-line 4-cylinder	
Bore × Stroke (mm)	86 × 86	
Displacement (cm ³)	1 998	
Compression ratio	10:1	
Valve train	DOHC VTEC	
Number of valves	4 per cylinder	
Valve diameter (mm)	In.	34
	Ex.	28
Fuel supply system	Programmed fuel injection	
Fuel supply pressure (MPa)	8 - 10.5	
Fuel	Regular (91RON)	
Max. power (kW/rpm)	115 / 6300	
Max. torque (N·m/rpm)	188 / 4600	

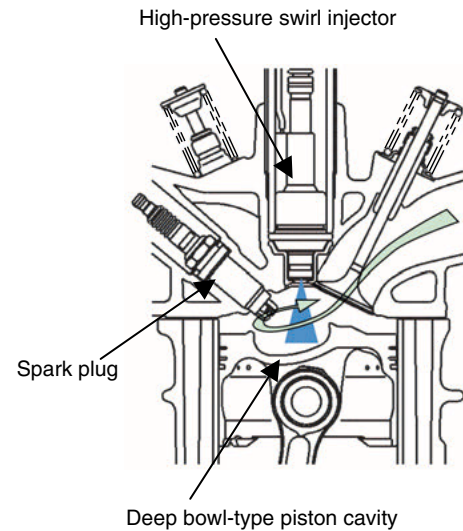


Fig. 1 Combustion chamber configuration

2. 主要諸元とシステム構成

2.1. エンジンの概要と主要諸元

Table 1 に供試エンジンの主要諸元を示す。Fig. 1 は燃焼室構成を示している。超希薄成層燃焼は、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及び、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により実現している⁽⁵⁾。

2.2. システム構成と制御手法概略

Fig. 2 に供試エンジンの制御システム構成を示す。本供試システムの特徴を以下に示す。

- (1) 成層燃焼運転時など大量に EGR を導入しても精度良く空気量を算出するためにエアフローメータを用い、検出した空気量にもとづき燃料量を算出する。
- (2) 要求される空気量が異なる成層燃焼と均質燃焼を両立させ、短時間で目標に収束させる電子制御スロットルバルブの採用。
- (3) 直噴ガソリンエンジンでは、ドライバビリティ、排気エミッション、燃費に及ぼす EGR 還流率の寄与が大きい⁽⁶⁾。要求される EGR 還流率への収束を速くするため、広く使用されているステップモータ式 EGR バルブに対し 5 倍の応答性を持つリニアソレノイド式 EGR

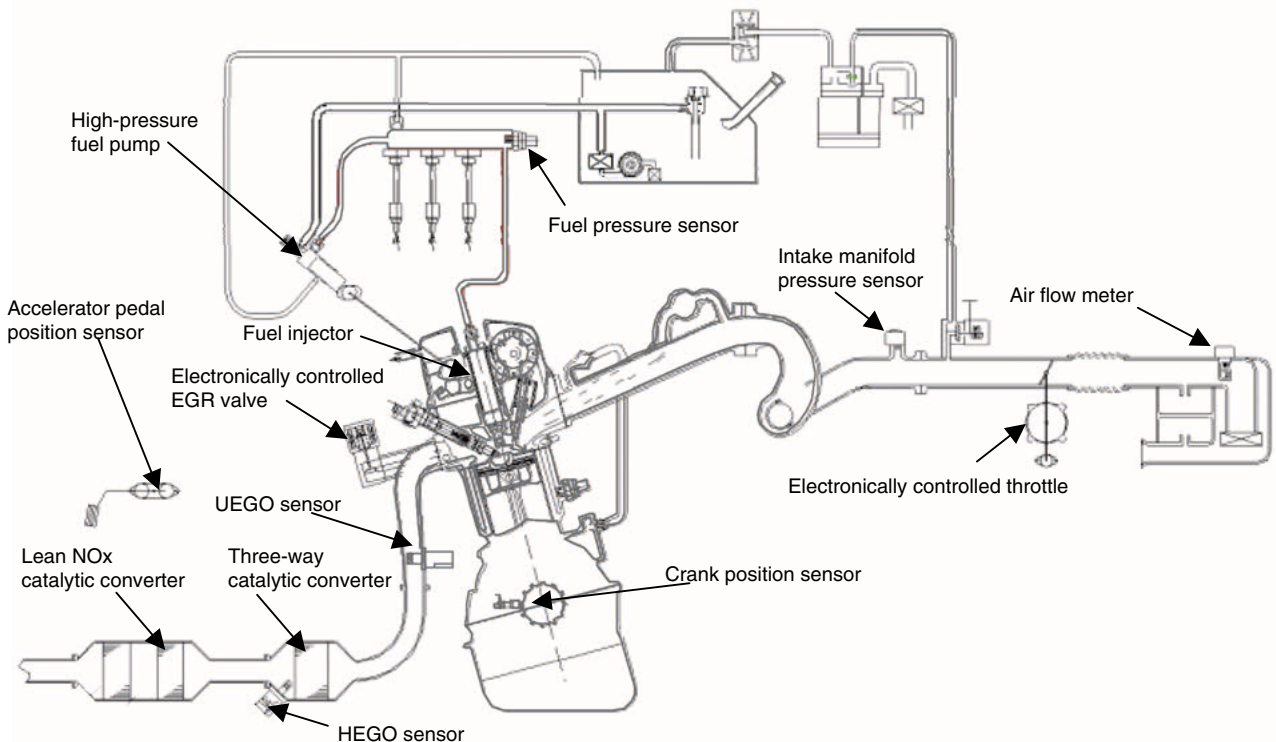


Fig. 2 System configuration

バルブを採用している (Fig. 3)。Fig. 4 にリニアソレノイド式 EGR バルブの応答性をステップモータ式 EGR バルブと比較して示す。

- (4) 排気システムは、上流よりドライバビリティ、燃費及び排気エミッションを最適に維持するために均質燃焼運転時はもとより成層燃焼運転時も空燃比フィードバックを実施するための UEGO センサ (Universal Exhaust Gas Oxygen Sensor)、理論空燃比での浄化及び希薄空燃比運転時の HC 浄化をおこなう三元触媒、理論空燃比領域での浄化性能向上に用いる HEGO センサ (Heated Gas Oxygen Sensor)、希薄空燃比領域での NOx 浄化をおこなう NOx 吸着反応型触媒により構成されている。
- (5) 燃料圧力制御は、エキゾーストカムにより駆動される単プランジャ式高圧ポンプからの燃料吐出量をスปีル弁により調量し制御している。スปีル弁制御量はエンジン回転数とインジェクタ吐出流量より基本スปีル弁作動マップにて算出される基本制御量を基準に、フューエルデリバリパイプに設置された燃圧センサ出力によりフィードバック制御されている⁽⁷⁾。
- (6) 成層燃焼では、要求されるエンジンパラメータが異なるため、ポート噴射で広く使われる空気量や吸気管圧

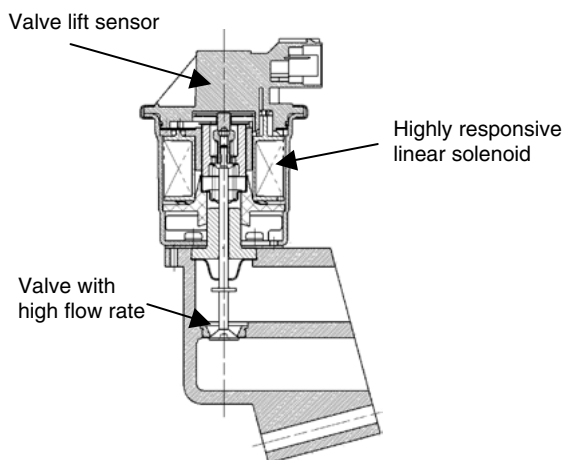


Fig. 3 Newly developed EGR valve

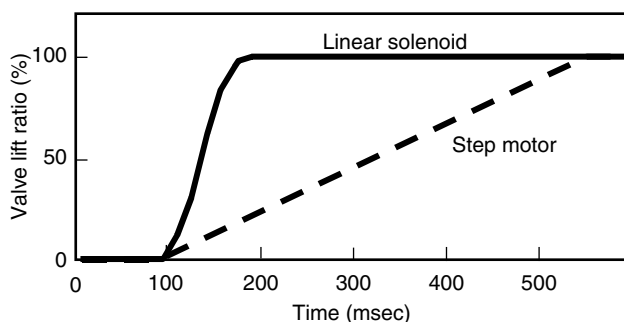


Fig. 4 Comparison of response times of linear solenoid EGR valve and step motor EGR valve

力ではエンジンの負荷を決めることができない。そのため、アクセルペダルセンサを用い、ドライバの要求トルクを算出し、この要求トルクとエンジン回転数を用い、燃焼方式や EGR リフト量等の制御パラメータを決定している。

3. 燃焼切り換え制御

3.1. 燃焼切り換えの必要性

Fig. 5 は、本供試エンジンの負荷に対する正味燃料消費率 (BSFC) 特性を DISC と理論空燃比での均質燃焼とを比較して示したものである。DISC 低負荷領域では大きな燃費向上効果が得られるが、負荷の上昇に伴いその効果は低下しある負荷以上では、理論空燃比での均質燃焼に対する燃費向上効果がなくなる。これは、負荷が大きくなるにつれポンプ損失の改善効果が減少することによるものである。従って、燃費を最適にするために負荷で燃焼形態を DISC と均質燃焼の間で切り換える必要がある。

3.2. 燃焼切り換え制御の目標と課題

従来技術として、吸入行程と圧縮行程との二回に分けて燃料噴射することにより弱い成層混合気を形成して過濃空燃比領域をなくし、しかも希薄混合気での安定燃焼を可能にし、均質燃焼での希薄燃焼が可能な負荷迄継続させる方法が知られている⁽⁶⁾。この方法では、燃焼が安定する効果は得られるが、所定の負荷まで希薄空燃比での運転を継続する可能性があり、排気エミッションの増大を招く恐れがある。本研究は燃焼切り換え時に運転パラメータを変更し、排気エミッション増加とトルク変動の発生がないことを目標とした。

Fig. 6 に燃焼切り換え時における制御要素の挙動を示す。成層燃焼はスロットル開度、EGR リフトともに大きな値が

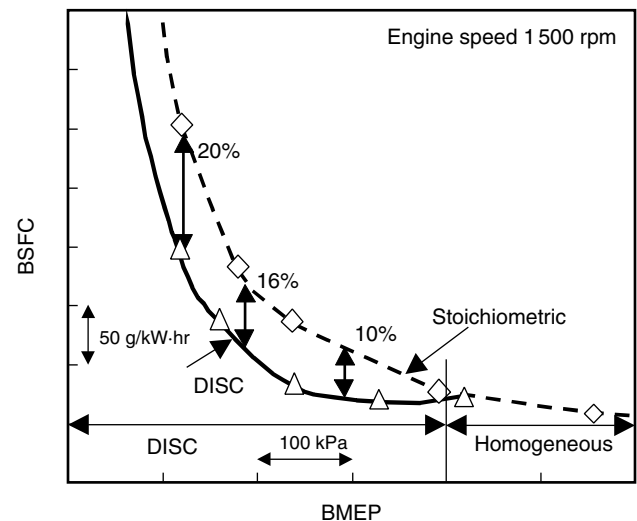


Fig. 5 Comparison of BSFC

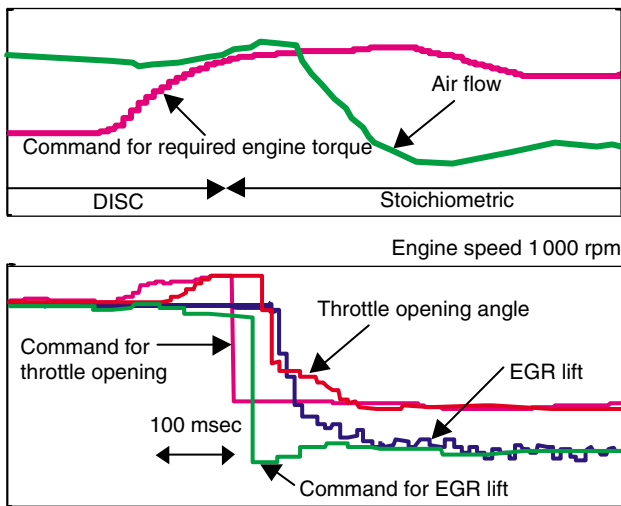


Fig. 6 Characteristics of engine control parameters during combustion switching

要求され、均質燃焼では要求が小さいことがわかる。また、燃焼切り換え指令と共に指令値は変化するが、実スロットル開度、実EGRリフトともに無駄時間があり、一次遅れ特性を持って指令値に追従する。燃焼切り換え制御の課題は、スロットル開度、EGRリフトが指令値に追従する間、EGR還流率、空気流量共に多く、均質燃焼でのEGR過剰による失火を防止することと、空気量が大きく燃料量が過大となり急激なトルク発生を防止することの二項目であることがわかった。

3.3. 失火防止手法

燃焼切り換え直後は、スロットルバルブ、EGRバルブともに成層燃焼の指令値であり、成層燃焼と同一トルクを均質燃焼で得ようとした場合、空燃比を大きくする必要がある。しかし、均質燃焼では希薄空燃比で大量のEGRが導入されると失火が発生する。

そこで大量にEGRが導入されてもプラグ廻りの空燃比

を可燃領域にし確実に着火させるために燃料を吸入行程と圧縮行程の二回に分けて噴射する方式を採用する。Fig. 7に示すように燃料噴射制御は、低負荷領域でDISC燃焼をおこなうため圧縮行程の後期に燃料噴射をおこなう圧縮行程噴射(以降図中Late injection)と高負荷領域で均一混合気燃焼をおこなうため吸入行程前期に燃料噴射をおこなう吸入行程噴射(Early injection)及び燃焼切り換え時、失火を防止するため吸入行程と圧縮行程のそれぞれに燃料を噴射する二回噴射(Double injection)で構成されている。

Fig. 8に同一回転、負荷、空燃比におけるEGR還流率に対する燃焼特性を吸入行程と圧縮行程の二回噴射と吸入行程での噴射を比較して示す。吸入行程と圧縮行程との二回に分けて燃料を噴射することで、均質燃焼では、失火に至るEGR還流率でも燃焼変動率が小さく安定した燃焼が得られ、広い領域で燃焼が安定することが確認できた。これは圧縮行程での噴射によりプラグ廻りの空燃比が可燃範囲になったことを示唆している。二回噴射の実施期間は、EGRバルブの応答時間が経過してかつ、空気量より算出される理論空燃比の燃料量と実際に噴射される燃料量より当量比を算出し所定値より大きくなるまでとした。これにより確実な失火防止が実現できた。

3.4. 燃料量算出手法

本制御システムは、エアフローメータで検出した空気量に基づいて燃料量を決定する方式を採用している。そのため燃焼切り換え時、例えば成層燃焼から均質燃焼に切り替わるとき、成層燃焼では空気量が大きくスロットル開度が指令開度に収束するまで要求トルクに対して燃料量が大きくなり、急激なトルク増加が生じる。そこで、この現象を防止するために燃焼切り換え時、空気量に基づいて算出した燃料量を燃焼切り換え直前の要求トルクと燃料量と現在の要求トルクより、現在の燃料量制限値を算出することで制限を加える方式を採用している。

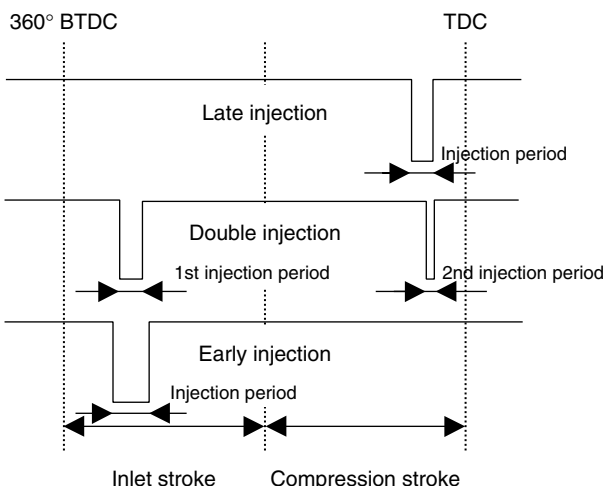


Fig. 7 Injection timing control

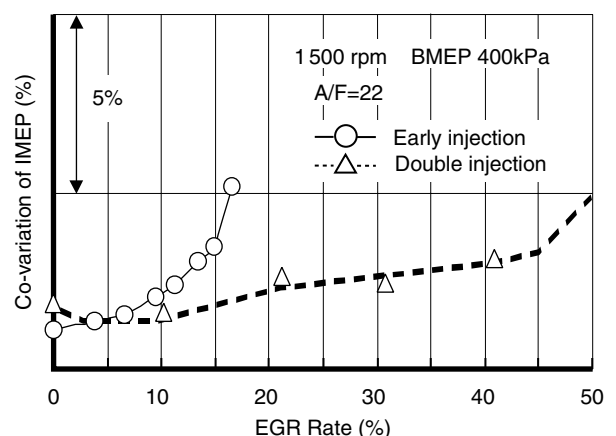


Fig. 8 Comparison of EGR characteristic for early injection and double injection

本制御を実施するためには、トルクと燃料量の関係を把握する必要がある。測定の結果、Fig. 9に示すように正味平均有効圧力と燃料噴射時間は、一次式で記述可能であることがわかった。従って、以下の式で燃料量制限値を算出し、燃料量制限値と空気量に基づいて算出した燃料量が等しくなった時点から燃料量制限を停止する方法で燃料の急変を防止した。燃料量制限値は、以下の式より算出した。

$$T_{lim} = \{ T_{in} + (\Delta T_{req} / \Delta P_m) \times (P_m - P_{min}) \} \times (1 \pm K_{cmb})$$

- T_{lim} : 燃料量制限値
 $\Delta T_{req} / \Delta P_m$: BMEP に対する燃料噴射時間の変化量
 T_{in} : 切り換えが発生した時点の要求燃料噴射時間
 P_m : 現在のドライバー要求トルク
 P_{min} : 切り換えが発生した時点のドライバー要求トルク
 K_{cmb} : 燃焼効率の補正項

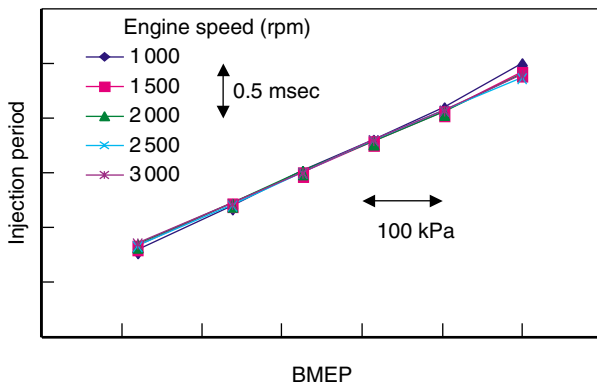


Fig. 9 Relationship of BMEP and injection period

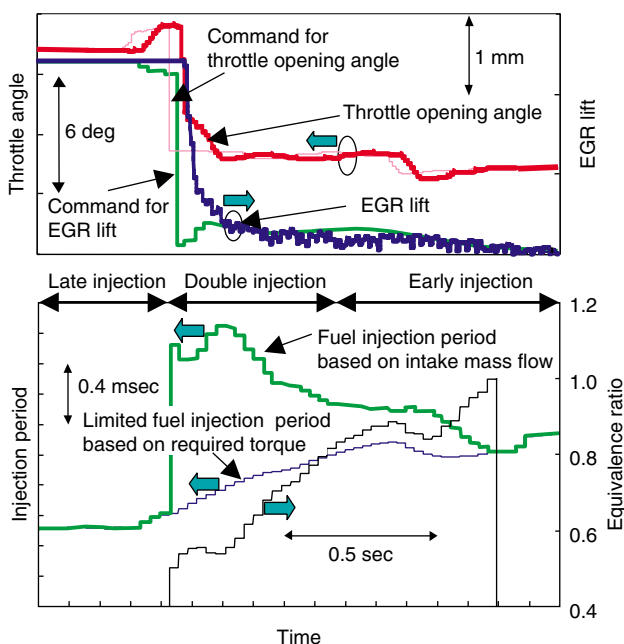


Fig. 10 Schematic diagram of transient condition

4. 実機結果

Fig. 10に燃焼切り換え制御をおこなった際のエンジン制御パラメータの挙動を示す。

二回噴射は、EGR リフトが指令値に収束した後、所定の当量比に達したとき終了することが確認できた。

燃料量制限により、燃料量の急激な立ち上がりが防止でき、かつ燃料量が滑らかに変化し、空気量に基づく値に接続できることが確認できた。

Fig. 11 は、燃焼切り換え制御の効果を発生トルクの挙動変化で示したものである。燃焼切り換え制御を採用

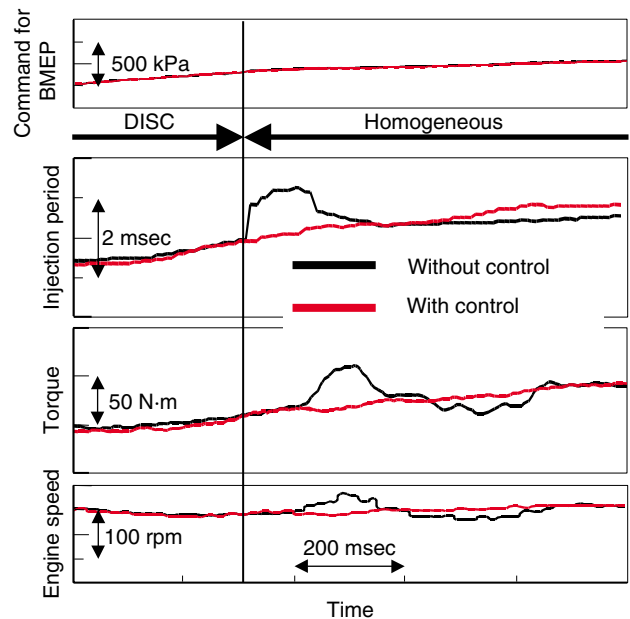


Fig. 11 Effect of combustion switching control on transient torque behavior

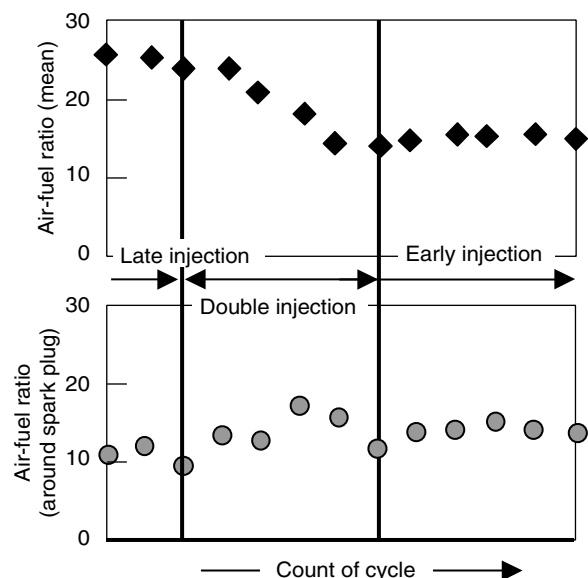


Fig. 12 Characteristics of air-fuel ratio around spark plug

することにより、燃焼方式の変化より発生する急激なトルク変化がなくまた回転変動もなく、要求トルクに滑らかに追従しショックの無い切り換えが実現できていることがわかる。

燃焼切り換え前後の赤外吸収法を用いたプラグ近傍の空燃比と平均空燃比をサイクル毎に測定した結果をFig. 12に示す。燃焼切り換え時、プラグ廻りの空燃比が着火できる値に制御され、吸入行程と圧縮行程への二回噴射による失火防止効果が確認できた。また、成層燃焼運転時は平均空燃比が希薄であるときもプラグ近傍空燃比は着火できる値に制御され、均一燃焼時は平均空燃比とプラグ近傍空燃比が同じ値になることがわかった。

5. まとめ

直噴ガソリンエンジンの燃焼切り換え制御の検討をおこない以下の知見を得た。

- (1) 燃焼切り換え時、吸入行程と圧縮行程の二回に分けて噴射することで、EGR 還流率が大きい領域の失火が防止できた。
- (2) 燃焼切り換え直前の要求トルクと燃料流量と現在の要求トルクに基づき、現在の燃料量制限値を算出、制御することで、切り換え時の燃料量の急激な変化を防止できた。
- (3) 二回噴射制御及び燃料量制限制御から構成する制御で、段差がなく排気ガスエミッションに優れた直噴ガソリンエンジン燃焼切り換えを達成した。

参考文献

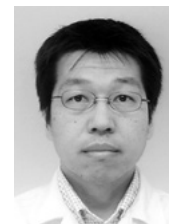
- (1) 久米ほか：筒内噴射ガソリンエンジンのための燃焼制御，自動車技術会学術講演会前刷集，No.961，9631948
- (2) Kuma,T., Iwamoto,Y., Iida,K., Murakami,M., Akishino,K., and Ando,H.: Combustion Control Technologies for Direct Injection SI Engine, SAE Paper 960600
- (3) 野田徹，入矢祐一，内藤健，光本久司，飯山明裕：直噴ガソリン機関における燃料と空気の混合と出力性能，自動車技術会学術講演会前刷集，No.976，9740307 (1997)
- (4) Harada,J., Tomita,T., Mizuno,H., Mashiki,Z., and Ito,Y.: Development of Direct Injection Gasoline Engine, SAE Paper 970540
- (5) 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 Technical Review Vol.16, No.1, pp39-46
- (6) 益城ほか：D-4 エンジンの開発，TOYOTA Technical Review Vol.47, No.2, p33-37(1997)

- (7) 後藤博之，広瀬研二，齋藤正美，松本誠司，飯高智，高芝和弘：直噴ガソリンエンジン用高圧燃料システムの開発，Honda Technical Review Vol.16, No.1, pp47-54

■ 著 者 ■



小川 賢



小森 谷 勲



田 上 裕



甲 田 豊



武 内 雅 大



藤 木 有 司