

可変バルブリフト機構を用いたエンジン 冷機始動時の HC 排出量低減

Reduction of HC Emission from an Engine in Cold-start Condition
Achieved through Variable Valve Lift System

中 山 幸 夫* 丸 谷 武 志* 及 川 利 広*
Yukio Nakayama Takeshi Maruya Toshihiro Oikawa
川真田 正 史** 藤 原 幹 夫*
Masashi Kawamata Mikio Fujiwara

要 旨

米国大都市部の光化学スモッグ (オキシダント) 問題未解決から、車両より排出される HC (Unburnt hydrocarbons; 以下 HC) 排出量の規制が強化され、自動車メーカーとしてこの HC 排出量低減は重要な課題となっている。HC 排出量は、エンジン冷機時に寄与度が高く燃焼の安定化と車両の運転性能確保のための過濃混合気燃焼が、主要因として上げられる。

本論文ではこのエンジン冷機時の燃焼に着目し、当社のバルブリフトおよびタイミングの可変機構 (VTEC Variable Valve Timing and Lift Electronic Control System) ^{(1) (2)} を用い吸気バルブの低リフト化とバルブオーバーラップ量の減少および燃焼室形状の改良により燃焼の安定化を検討した。この結果、車両の運転性能を損なうことなくエンジン冷機始動後の空燃比設定を従来より薄くでき ($A/F=15.5$) HC 排出量の低減を可能とした。

ABSTRACT

In the cities of the US, the worsening ozone problem has prompted reinforcement of regulations against emissions of hydrocarbons (HC) from automobiles. To cope with this situation, a reduction of HC is a vital challenge for the automotive industry. It is when the engine is cold-started that its emission level is highest - a result of using a rich air-fuel mixture to achieve stable combustion and secure good drivability.

Thus, using an engine with Variable Valve Timing and Lift Electronic Control System (VTEC), a method was proposed for improving and stabilizing combustion during the start of the engine in cold conditions.

The system has a reshaped combustion chamber designed to stabilize combustion with leaner mixtures ($A/F=15.5$) than that of the existing engines. Coupled with its revised valve mechanism - lowered intake valve lift and reduced valve overlap, it can achieve considerably reduced HC emission and still retain the drivability.

1. ま え が き

近年、地球規模における世界的環境破壊問題およびエネルギー問題がクローズアップされる中、自動車関連では米国大都市部の光化学スモッグ (オキシダント) 問題未解決 (1970 年マスキ法の効果が不十分) という大気汚染の実態から、CARB (California Air Resources Board: カリフォルニア州大気資源局) が新しい大気浄化法=カリフォルニア LEV (Low Emission Vehicle) 規制を提案、1990 年 11 月にはこの改正法が決定された。

Table 1 に決定された HC 排出量規制の一部を示す。

このような規制強化により自動車メーカーにとって HC 排出量の低減は重要な課題となっており、触媒の改良、燃料の改良など数多くの研究が進められている。^{(3)~(6)}

排出 HC は、その大部分が触媒によって浄化される。このため、HC 排出量規制に対する最大の課題は、触媒が活性化する前のエンジン冷機時に排出される HC 量低減である。エンジン冷機始動時は、燃料の気化状態が悪く、過濃混合気での燃焼および点火時期の進角によって燃焼の安定化と車両運転性能の確保を図っているが、こ

* 栃木研究所

** HONDA R&D NORTH AMERICA, INC. OHIO CENTER

Table 1 California LEV Regulation

Component	50k miles STD (g/mile)					
	'92	'93	'94 (TLEV)	'97 (LEV)	'98 (ULEV)	ZEV
NMOG	(0.39)	(0.25)	0.125	0.075	0.04	0
CO	3.40	←	←	←	1.70	0
NOx	0.40	←	←	0.20	←	0
HCHO	—	—	0.015	←	0.008	0

NMOG : Non Methane Organic Gas

() : NMHC (Non Methane Hydrocarbon)

HCHO : Formaldehyde

TLEV : Transient Low Emission Vehicle

LEV : Low Emission Vehicle

ULEV : Ultra Low Emission Vehicle

ZEV : Zero Emission Vehicle

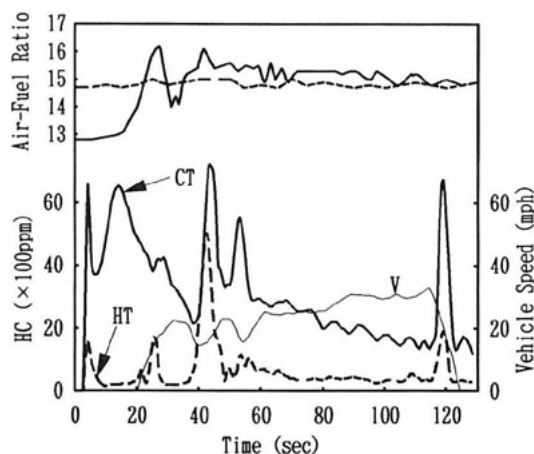


Fig. 1 Characteristics of Air-fuel Ratio and HC Emission During 125 sec after Starting in the LA-4 Mode

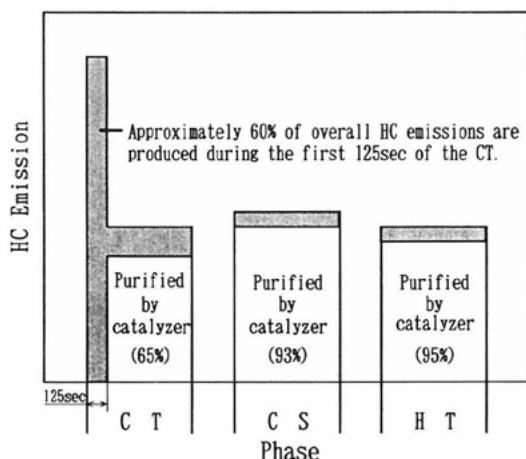


Fig. 2 HC Emission Characteristics at each Phase in the LA-4 Mode

れらはHCの排出量を増加させる大きな要因となっている。そこで、VTEC機構を用い吸気バルブの低リフト化およびバルブオーバーラップ量の減少により燃焼の安定化を図り、空燃化の希薄化によって低温時の車両運転性能を満足しつつ、HC排出量低減の可能性を検討した。本稿では、エンジン冷機始動時の燃焼改善内容と車両の運転性能およびモード試験結果について述べる。

2. HC低減の狙い

2.1. 現状分析

量産車によるLA-4モード中におけるCold Transient Phase(以下CT)およびHot Transient Phase(以下HT)のエンジン始動から125秒間のHC排出特性および空燃比特性をFig. 1に示す。CTはHTに対し多量のHCが排出されていることがわかる。この要因を以下に示す。

- (1) エンジン冷機始動時は、燃料の気化状態が悪く吸気ポートおよび燃焼室壁面への燃料付着によりプラグ近傍の空燃比が希薄となり、着火と燃焼が安定しない。このため、燃料の増量により着火と燃焼の安定化を図っているが、過濃空燃比のためHC排出量が多い。
- (2) シリンダ、ピストンおよびシリンダヘッドの壁面にごく近い混合気は低温で流動がほとんどないので、火炎がその中に入りにくく、そのため消炎し易い。この未燃混合気層が、排気行程のピストン上昇でかき上げられ、多量のHCを排出する。
- (3) エンジン冷機始動時には、通常触媒の温度も低く触媒が効率良くHCを浄化できる温度に到達していないため、HCは非常に多く排出される。

Fig. 2にLA-4モード各Phase毎のHC排出特性を示す。Cold Stabilized Phase(以下CS)およびHTのエンジン暖機状態であれば触媒の温度が上がり、HCは93~95%浄化される。

CTのエンジン始動から125秒間で、LA-4モード全HC排出量の約60%が排出されている。

2.2. HC低減の考え方

現状分析より、定常運転時のHC排出量低減よりもむしろエンジン冷機始動から、触媒がHCを効率良く浄化できるまでの125秒間に排出されるHC量低減が非常に有効であることがわかる。以下にHC低減の狙いを示す。

- (1) エンジン冷機始動後の空燃比の希薄化
→燃料の気化・霧化促進および乱れの増大による燃焼改善
- (2) エンジン暖機時間の短縮
→ヒートマスの低減
- (3) 触媒の早期活性化
→排気温度の上昇
- (4) 定常運転時の HC 量低減
→燃焼室表面積の低減、緩慢燃焼

これらの項目の中で、エンジン冷機始動後の空燃比希薄化は、HC 量低減に対し非常に効果的である。しかし、従来のエンジンでは着火性が悪くなり燃焼の変動が増大するため、本エンジンでは VTEC 機構を用い、吸気バルブリフトの低リフト化による燃焼改善の可能性について検討した。

3. エンジン諸元

Table 2 にテストエンジンの主要諸元を示す。

従来の 2.2ℓ、SOHC、4 気筒エンジンをベースにし、シリンダヘッドには VTEC 機構を採用した。さらに、HC 排出量低減の観点から従来のエンジンより燃焼室をコンパクトに、またヒートマス低減のため極力シリンダヘッドの軽量化を図った。このほか、DOHC 化によってバルブスプリング荷重を約 20% 低く設定し、バルブ駆動ロス低減による燃料消費低減も図られている。

HC の濃度測定は FID (水素炎イオン化検出器) を用い、排気温度はクロメル-アルメルシース型熱電対を用いて排気マニホールド内で測定した。

4. VTEC 機構

4.1. VTEC の狙い

エンジン冷機始動後に空燃比を希薄化しても安定した着火と燃焼を得るためには、燃料の気化・霧化促進および燃焼温度上昇と燃焼期間の短縮が必要と考え、以下の内容について改良をおこなった。

- (1) 吸気バルブリフト量を下げる。
- (2) バルブオーバーラップ量を少なくする。

しかし、これらの手法は、高回転域における体積効率の低下により出力を低下させる。したがって、低温低回転域の燃焼改善による HC 排出量低減と高出力を両立さ

Table 2 Engine Specifications

Cylinder Configuration		In-Line 4 Cylinder	
Bore×Stroke	(mm)	85×95	
Displacement	(cm ³)	2156	
Compression Ratio		9.2	
Valve Mechanism		DOHC VTEC	
Number of Valves		4	
Valve Diameter	Intake Exhaust	φ32 φ29	
		Low Speed	High Speed
Intake Valve Open	(deg BTDC)	17	40
Intake Valve Close	(deg ABDC)	72	80
Exhaust Valve Open	(deg BBDC)	67	80
Exhaust Valve Close	(deg ATDC)	13	40
Intake Valve Lift	(mm)	3.0	10.0
Exhaust Valve Lift	(mm)	6.0	9.5
Valve Overlap	(deg·mm)	1.6	22.0
Fuel System		Programmed Fuel Injection System	
Ignition System		Programmed Ignition System	

せるためには、低回転域と高回転域でのバルブタイミング・バルブリフト量の切り換え機構が必要となる。

このため、従来の VTEC 機構を用い、Fig. 3 に示す

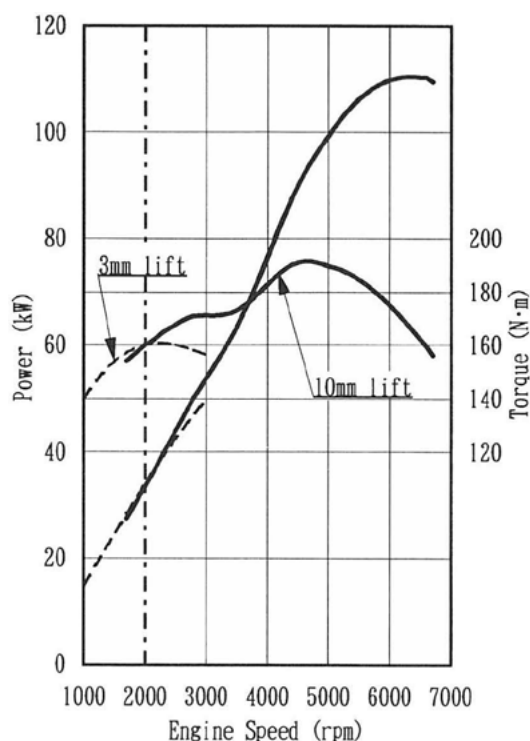


Fig. 3 Comparison of Full Load Performances at Valve Lifts of Both 3 and 10mm.

Table 3 Structure and Characteristics of VTEC System

	Low Engine Speed (Cold-Start Condition)	High Engine Speed
Switching of Rocker Arm		
Valve Lift and Timing		
Achievements	● Improvement in combustion and driveability by lowering valve lift. ● Reduction of HC emission by using leaner mixture and higher exhaust gas temperature in catalyzer. ● Improved fuel economy by reducing valve train friction.	● Ensuring in higher output power by keeping higher valve lift.

ように、2000rpmで、バルブタイミングとバルブリフト量を切り換え、ワイドレンジの出力特性を維持している。

4.2. 構造と基本作動

Table 3にVTECの切り換え構造およびバルブリフトカーブを示す。VTECの構造は、吸気・排気ともに低回転時駆動用のプライマリカム(①)、セカンダリカム(②)と高回転時駆動用のミドルカム(③)の三つのカムプロフィールを持つ一本のカムシャフトと油圧ピストン(⑦、⑧)を内蔵したプライマリロッカーアーム(④)・ミドルロッカーアーム(⑥)およびセカンダリロッカー

アーム(⑤)とで構成されている。

低回転時は、プライマリロッカーアームとセカンダリロッカーアームが独立して、相対するカムプロフィールに合わせて作動し、吸気バルブは低リフトの3mmで、排気バルブは6mmリフトで運転される。高回転時には、ECU(Electronic Control Unit)からの信号により油圧回路が開き、油圧ピストンに油圧が加わってプライマリ・セカンダリ・ミドルの三つのロッカーアームが連結され、吸気バルブは高い体積効率を得るための10mmリフトで、排気バルブは充分な排気をおこなうための9.5mmリフトで運転し高出力化を図っている。

5. HC 排出量の低減

5.1. ファストアイドルコンディション

5.1.1. 従来エンジンにおける HC 排出量

(1) 希薄燃焼

エンジン冷機始動後のアイドル状態では、着火と燃焼の安定化を図るため、理論空燃比よりも濃い設定をおこなっているのが普通である。従来エンジンにおける HC 排出量 (ISHC: Indicated-Specific HC)、排気温度および図示平均有効圧力 IMEP (Indicated Mean Effective Pressure) の変動率 (Variation in IMEP) と空燃比との関係を Fig. 4 に示す。従来の設定空燃比 13 のような過濃空燃比では、酸素不足により多量の HC が排出される。図に示すように空燃比を薄くすると HC 排出量は減少し、排気温度は上昇するが、燃焼変動の著しい

悪化があり車両の運転性能を損なう。したがって、空燃比の希薄化による HC 排出量低減には、燃焼の改善が必要である。

(2) 点火時期リタード

排出 HC の多くは、圧縮および燃焼の圧力によってピストントップランドに押し込められた高濃度の HC が燃焼されずに排出されることが知られている。

点火時期を遅角させると Fig. 5 に示すように HC 排出量は減少し、排気温度は上昇する。これは、点火時期を遅角させると燃焼期間が長くなり燃焼終了クランク角度が遅くなるため、ピストントップランドに押し込められた未燃 HC が筒内に流出し燃焼するためである。しかし、点火時期の遅角もまた燃焼変動の著しい悪化を伴うため、適切な設定の必要がある。

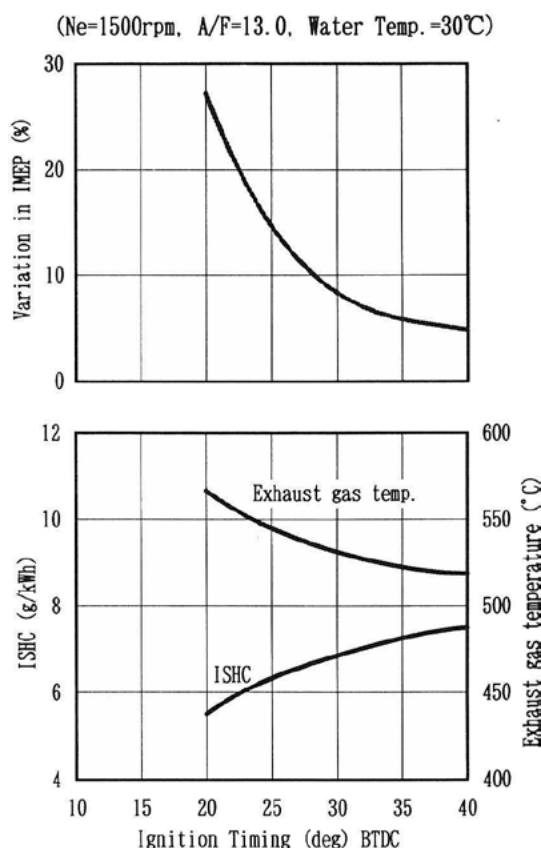


Fig. 4 Influence of Air-fuel Ratio on Variation in IMEP, ISHC and Exhaust Gas Temperature under Fast-idle Condition

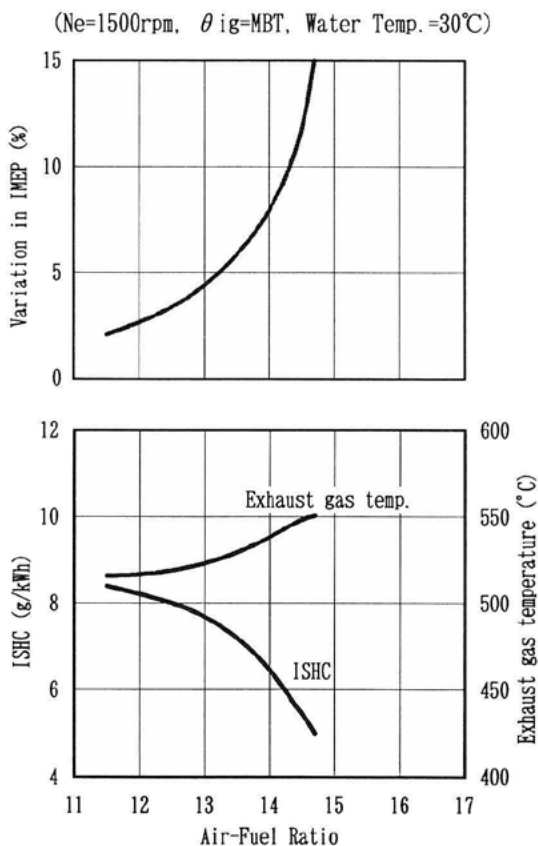


Fig. 5 Influence of Ignition Timing on Variation in IMEP, ISHC and Exhaust Gas Temperature under Fast-idle Condition

5.1.2. 燃焼の改善とHC排出量の低減

燃料の気化状態が悪いエンジン冷機始動時に空燃比を希薄化しても安定した着火と燃焼を得るために、吸気バルブリフト量を従来エンジンの8.8mmから3mmへ低リフト化し吸気流入速度を最大点で約40%増加させ、燃料の気化・霧化の促進および乱れの増大を図った。またバルブオーバーラップ量は従来エンジンの1/4に設定し、吹き抜けの低減および筒内残留ガスの低減による燃焼温度上昇を図った。従来のエンジンに対する燃焼改善をFig. 6に示すが、吸気バルブリフトの低リフト化は、吸入仕事が若干増加するものの、点火から質量燃焼割合が10%に達するまでの期間（以下：着火遅れ期間）が大幅に短縮され、同時に質量燃焼割合が10%から90%までの

期間（以下：燃焼期間）も短縮されている。この結果、燃焼限界空燃比は14から17へと改善された。（Fig. 6(e)）

エンジン冷機始動後の空燃比設定については、HC排出量低減からは17が好ましいが、排気温度とのバランスおよび燃焼変動を充分低い状態に保つことを考慮する必要がある。このため、Fig. 7に示すように排気温度の上昇およびHC排出量を考慮し、IMEP変動率5%を維持しつつ点火時期を35deg①から28deg②へ遅角し、設定空燃比を15.5とした（Fig. 7(c)）。これら空燃比の設定および点火時期の適正化によりFig. 7(b)に示すように従来エンジンに対してHC排出量を約45%低減することができた。

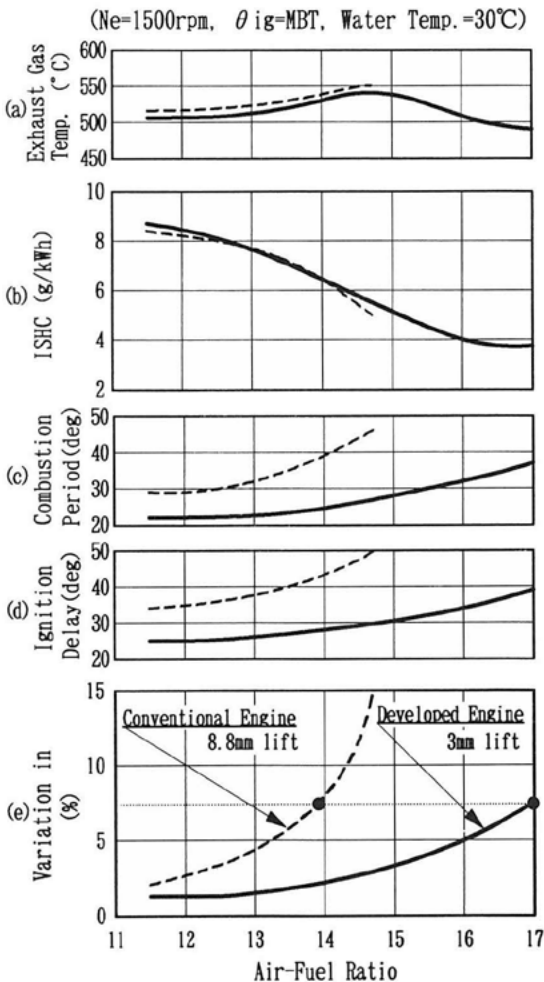


Fig. 6 Comparison of Combustion Characteristics between Developed Engine and Conventional Engine under Fast-idle Condition

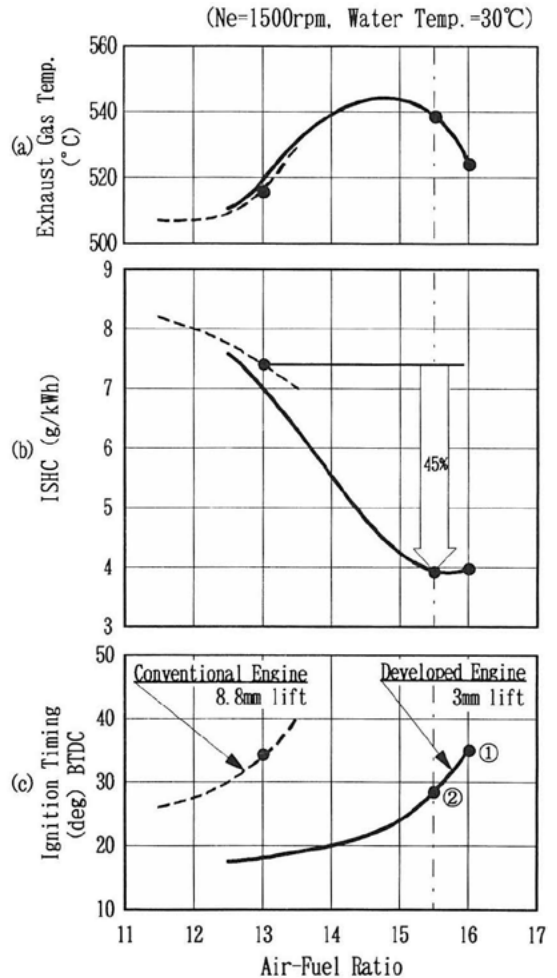


Fig. 7 Comparison of Ignition Timing (Variation in IMEP = 5%) · ISHC between Developed Engine and Conventional Engine under Fast-idle Condition

5.1.3. 車両の運転性能

従来の4バルブエンジン搭載車両およびエンジン冷機時の燃焼改善を可能としたVTEC機構を採用した車両について運転性能の評価をおこなった。

外気温と冷却水温は5℃、揮発性の悪い重質ガソリン使用の条件で、エンジン始動から発進～パートスロットル加速における車両の運転性能をFig. 8に示す。従来の4バルブエンジン搭載車両で設定空燃比12では、Fig. 8(a)に示すように充分な運転性能が得られる。し

かし、空燃比を13に薄くすることにより、Fig. 8(b)に示すように始動後とスナップ後の回転低下および発進・パートスロットル加速時にヘジテーションの発生がある。さらに空燃比14ではFig. 8(c)に示すように始動不良・エンジンストールにまで至る。これに対し、吸気バルブリフトを3mmとしたVTECエンジン搭載車両では、Fig. 8(d)に示すように空燃比14においても運転性能を満足し、従来の4バルブエンジンに対し空燃比で2.0の性能向上が得られた。

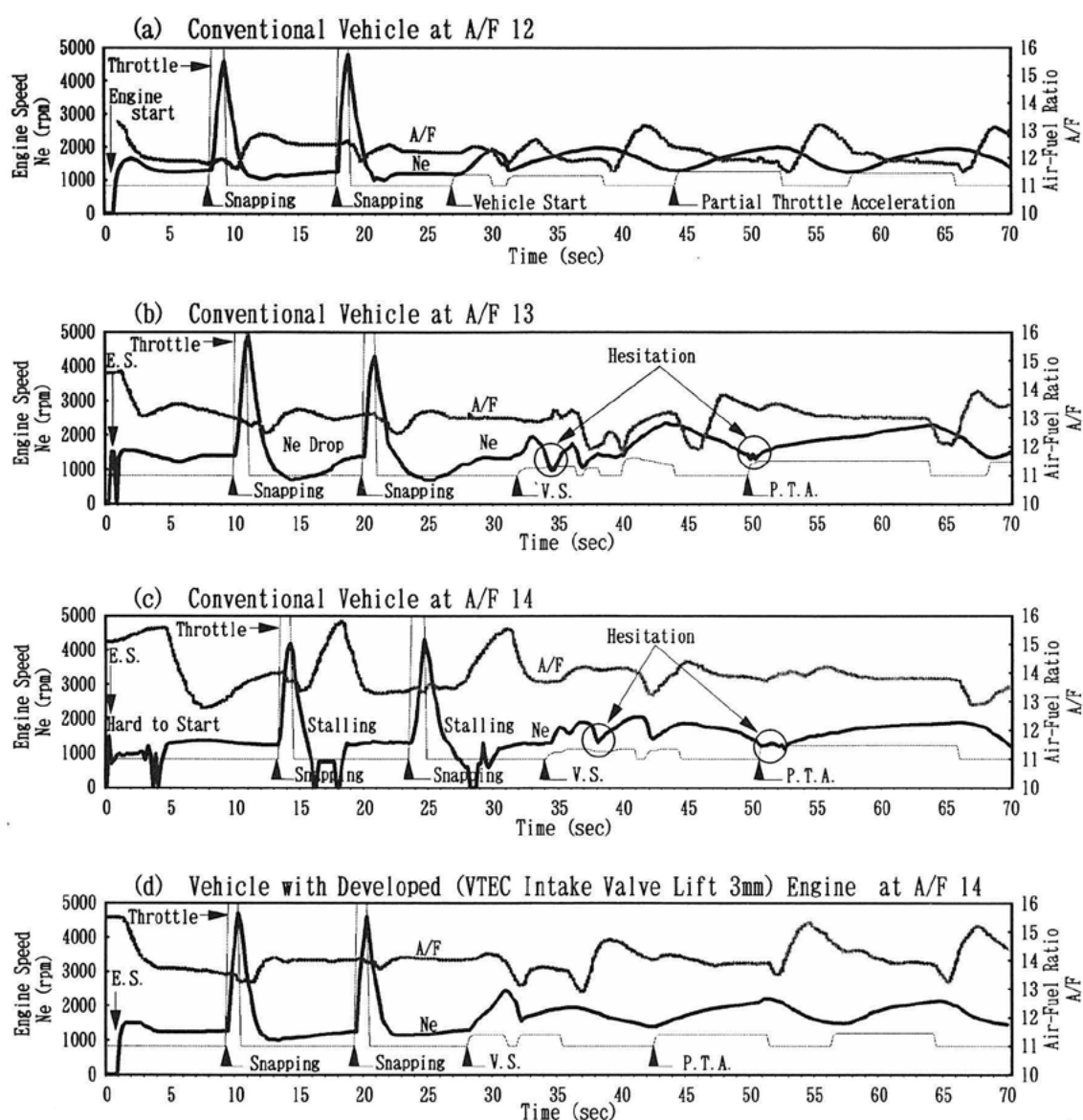


Fig. 8 Driveability Characteristics

5.2. 30mph クルーズコンディション

5.2.1. 燃焼室形状の改良

このエンジンに採用した燃焼室形状を Fig. 9 に示す。燃焼室の改良については、一般的にスキッシュを設けコンパクトな燃焼室を形成し、強い乱れと火炎伝播距離の短縮によって急速燃焼させることが知られているが、スキッシュクリアランスの設定によっては、そのスキッシュ部がクエンチング層を形成し HC 排出量増大にもつながる。このため、急速燃焼を狙うのではなく HC 排出量低減の観点から、シリンダヘッド側の燃焼室表面積を約 5% 減少させ、クエンチング面積を少なくすることを狙った。この結果、Fig. 10 に示すように燃焼室のみの改良により約 7% の HC 排出量 (BSHC: Braked Specific HC) 低減が可能であった。

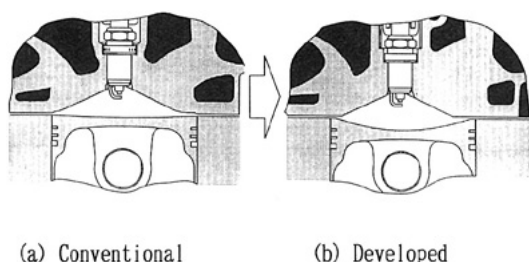


Fig. 9 Cross-section of Combustion Chamber

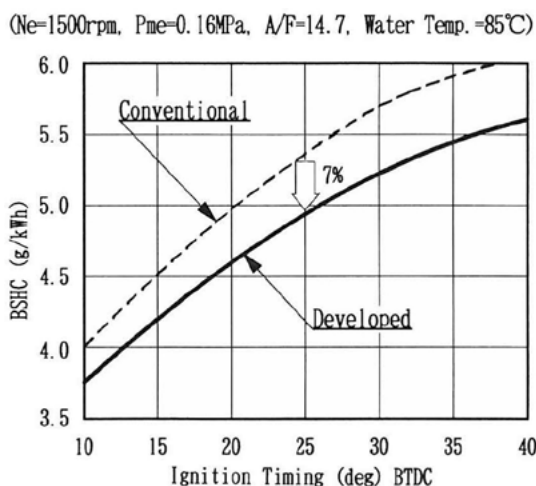


Fig. 10 Effect of Developed Combustion Chamber on BSHC under 30mph Cruising Condition

5.2.2. EGR 導入

エンジン冷機始動時は、燃焼改善による空燃比の希薄化で HC 排出量の低減が可能となった。しかし、Fig. 11 に示すようにエンジン暖機後は、この燃焼改善による燃焼期間の短縮によって燃焼終了クランク角度が早くなるため HC 排出量の増加がある。この対応として、Fig. 12 に示すように低リフト時は EGR を従来設定の 5% に対して 10% 導入し、燃焼を緩慢にすることにより HC 排出量は約 5% 低減した。一方、バルブ駆動ロスの低減、燃焼改善および EGR によるポンピングロスの低減によって従来のエンジンに対して燃料消費は約 5% の低減が得られている。

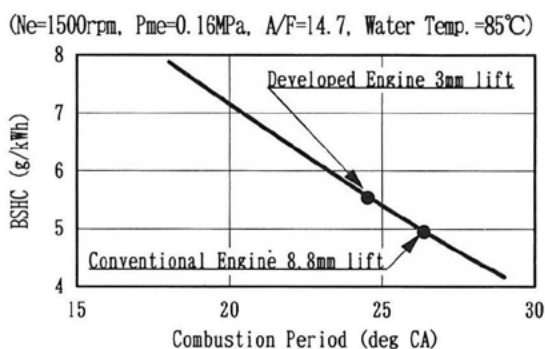


Fig. 11 Influence of Combustion Period on BSHC under 30mph Cruising Condition

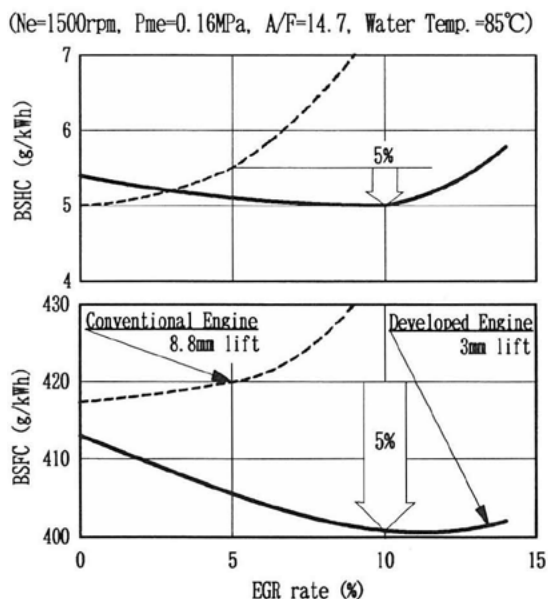


Fig. 12 Comparison of BSHC, BSFC between Developed Engine and Conventional Engine under 30mph Cruising Condition

5.3. LA-4 モード HC 排出量

以上のようにエンジン冷機始動時の燃焼改善を可能とした本 VTEC 機構を採用した車両 (Inertia Weight = 3250 lbs.) により、LA-4 モードにおける HC 排出量の評価をおこなった。

エンジン冷機始動後の空燃比希薄化および点火時期の適正化により、Fig. 13 に示すようにエンジンから排出される HC 量低減とともに排気温度上昇による触媒の早期活性化 (約 10 秒) が得られた。また吸気バルブリフトの低リフト化で吸気流入速度増大による燃料の気化と霧化促進は過渡時の空燃比ばらつき抑制にも寄与し、HC 排出量の低減が得られている。さらに、エンジン暖機後における低リフト時の EGR 適正量導入および燃焼室形状の改良を含め、Fig. 14 に示すように、LA-4 モード全体で約 30% の HC 排出量低減を図ることができた。

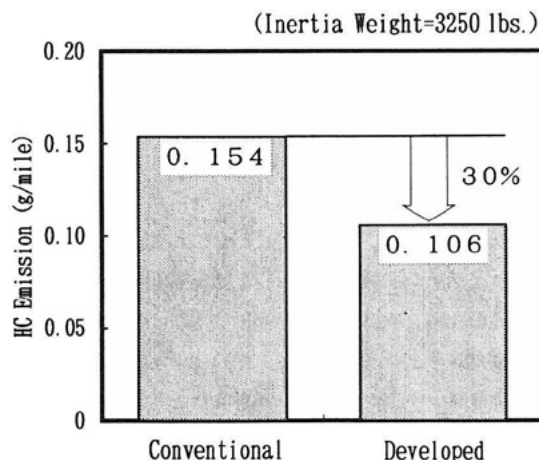


Fig. 14 Comparison of HC Emission in the LA-4 Mode between a Vehicle with Developed Engine and a Conventional Vehicle.

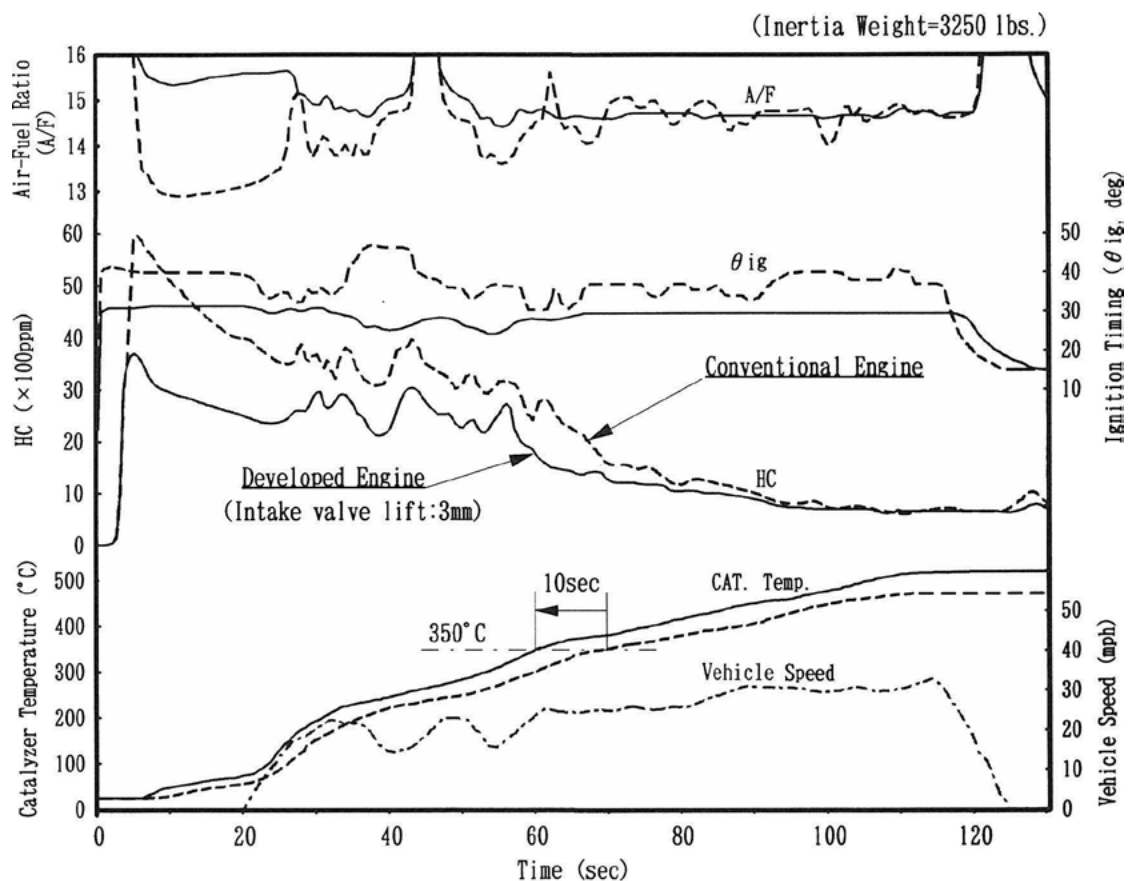


Fig. 13 HC Emission Characteristics during the First 125sec of CT in the LA-4 Mode

6. まとめ

参考文献

VTEC 機構を用い、運転条件に応じたバルブタイミング・バルブリフト量の切り換えおよび燃焼室形状の改良によって以下の結果を得た。

- (1) 吸気バルブの低リフト化 (3mm) および、バルブオーバーラップ量の減少によって着火と燃焼の大幅な安定化が図れ、低温始動時の車両運転性能を損なうことなく、空燃比の希薄化 ($A/F=13 \rightarrow 15.5$) が可能となった。これによりファストアイドルコンディション時エンジンからの排出 HC 量を約 45% 低減できた。
- (2) エンジン暖機後の低回転域では、低リフト時の EGR 適正量導入により HC 排出量の低減とともにエンジンの燃料消費を約 5% 低減できた。
- (3) LA-4 モードにおいては、エンジンから排出される HC 量の低減とともに排気温度上昇による触媒の早期活性化も図れ、LA-4 モード全体で約 30% の HC 排出量低減が得られた。

謝 辞

本論文をまとめるにあたり、有益な御助言を頂いた浅沼強 東京大学名誉教授に深く感謝の意を表します。

- (1) Inoue. K et al.: "A High Power, Wide Torque Range, Efficient Engine with a Newly Developed Variable-Valve-Lift and Timing Mechanism"
SAE 890675. 1989
- (2) Horie. K et al.: "The Development of a High Fuel Economy and High Performance Four-Valve Lean Burn Engine",
SAE 920455. 1992
- (3) L. S. Socha et al.: "Electrically Heated Extruded Metal Converters for Low Emission Vehicles",
SAE 920093. 1992
- (4) T. Ma et al.: "Exhaust Gas Ignition (EGI)-A New Concept for Rapid Light-off of Automotive Exhaust Catalyst",
SAE 920400. 1992
- (5) T. J. Clossey et al.: "The EC-X Test Program Reformulated Gasoline for Lower Vehicle Emission"
SAE 920798. 1992
- (6) P. J. Jessup et al.: "An Overview of Unocal's Low Emission Gasoline Research Program",
SAE 920801. 1992

■ 著 者 ■



中山 幸夫



丸谷 武志



及川 利広



川真田 正史



藤原 幹夫