

二輪車用小型エンジンにおける排気バルブ制御による NO_x 低減システムの開発

Development of NO_x Reduction System Based on Exhaust Valve Controls for Use in Small
Motorcycle Engine

中 溝 大 和*
Yamato NAKAMIZO
小 島 充*
Mitsuru KOJIMA

藤 原 一 夫*
Kazuo FUJIHARA
山 西 輝 英*
Teruhide YAMANISHI

要 旨

圧縮行程初期又は吸気行程後期から圧縮行程初期に、排気バルブをわずかに開閉させる内部 EGR システムを考案した。この開閉タイミングの場合、吸気行程はほぼ完了しているため、新しい混合ガスの充てん率低下はほとんどない。かつ、筒内圧は負圧であるため、NO_x低減のための十分な既燃ガスが勢いよく筒内へ流入する。その熱エネルギーと乱流エネルギーにより、筒内の混合ガスが活性化される。ゆえに、本システムはバルブタイミングを可変にする必要はなく、排気側カム軸と同軸に配置されたEGRカムをソレノイドで作動させるシステムとした。その結果、良好なドライバビリティを得つつ、排気エミッション規制(Euro 3)走行モードにおいて、NO_x が約 50%、CO が約 20%低減された。また、NO_xが大幅に低減できたために、Euro 3排気エミッション規制値をクリアするための触媒容積を、従来に対して約 70%小さくすることが可能となった。

ABSTRACT

An internal EGR system was devised that opens and closes an exhaust valve slightly at the beginning of the compression stroke, or between the end of the intake stroke and the beginning of the compression stroke. When this valve timing is used, the fresh air-fuel mixture charging rate shows practically no decrease because the action occurs when the intake stroke is more or less over. Sufficient burnt gas for NO_x reduction rapidly flows into the cylinder because the in-cylinder pressure is negative. The thermal energy and turbulence kinetic energy of the burnt gas activate the air-fuel mixture in the cylinder. Therefore, this system does not require variable valve timing, and it was designed to use a solenoid to operate an EGR cam that is located on the same shaft as the exhaust camshaft. As a result, the system achieved favorable drivability while reducing NO_x by approximately 50% and reducing CO by approximately 20% in the Euro 3 driving mode. Significant reduction of NO_x also enabled a reduction of approximately 70% in the catalyst volume needed to satisfy Euro 3 exhaust emissions standards.

1. まえがき

二輪車の排出ガス規制が年々厳しくなる中、現状の排気エミッション低減システムは触媒の浄化率の性能に依存している。特に、NO_x を大きく低減させるためには、触媒の浄化率を向上させる必要がある。そのために、空燃比のストイキ制御、触媒の容積増、マフラ内における触媒の配置、触媒の温度などを検討する必要がある。その結果、高コストのシステムになってしまうケースが多い。また、燃費低減のために空燃比をリーンにすると、触媒の NO_x 浄化率が大きく低下する。そのためにリーン化が図れない。ゆえに、触媒に頼らず、NO_x を低減する低コストの技術が必要である⁽¹⁾⁻⁽³⁾。

*二輪R&Dセンター

今回、圧縮行程初期又は吸気行程後期から圧縮行程初期に、排気バルブをわずかに開閉させる低コストな排気バルブの二度開け内部EGRシステムを考案した。本稿では、そのシステムによる NO_x 低減効果とその達成手法について述べる。

2. 開発のねらい

本システムの開発のねらいは、大幅な NO_x 低減により排気エミッション低減のために使っている触媒容積を大幅に小さくして、小型二輪車において環境性能と経済性を両立させることである。そのために、目標を下記内容とした。

- (1) 既燃ガスの流入による、熱および乱流エネルギーにより筒内の混合ガスが活性化されること。そして、大幅な NO_x が低減されること。
- (2) 良好なドライバビリティを得るため、EGRによる既燃ガスの流入により新気混合ガスの充てん率が大きく低下しないこと。
- (3) 軽量・コンパクトで廉価な内部 EGR システムレイアウトとすること。

3. システム概要

3.1. システム作動機構

Table 1 に本エンジンの主要諸元を示し、Fig. 1 に本システムの EGR カム作動機構の概略を示す。Fig. 1 に示されるように、シンプルな動弁構造とするため、EGRカムはカムシャフトと同軸上に配置され、軸方向にスライドする。EGR カムが作動しない場合(EGR OFF)と EGR カムが作動する場合(EGR ON)との切り換えは、リンクを介してソレノイドによりおこなわれる。本システムのレイアウトで配慮した主な内容を以下に記す。

- (1) リンク機構を設け、レバー比を与えることで、ソレノイドの小さいストローク量から適切な EGR カムのスライドストローク量を確保した。
 - (2) EGRカムと通常の排気バルブ用カムは、同一のロッカアームにより排気バルブを作動させる。
 - (3) 各部品の公差によるクリアランスの累積を吸収するため、リンク機構内にアジャストスクリューを設ける。
- 次に、EGRカムが作動した時の排気バルブのリフトカーブを Fig. 2 に示す。

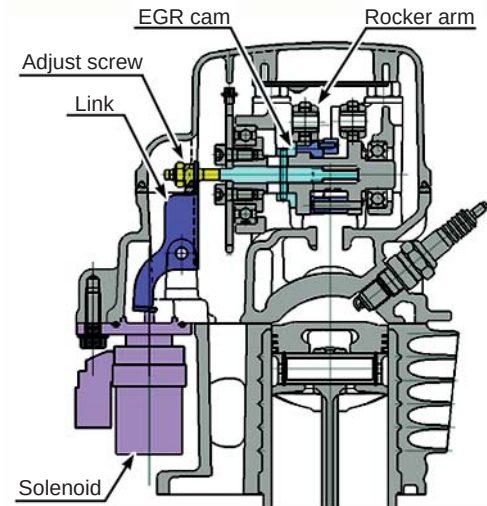


Fig. 1 EGR cam actuation mechanism

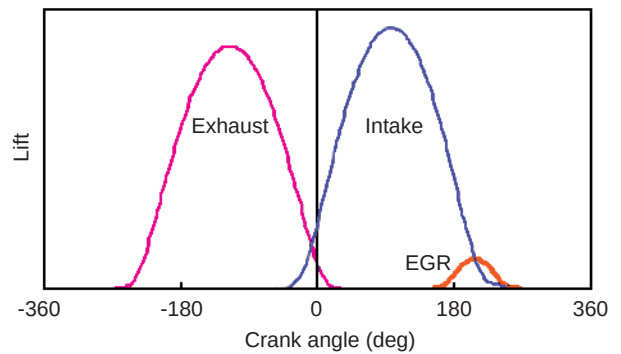


Fig. 2 Exhaust valve lift curves during actuation of EGR cam

3.2. 本システムによる燃焼改善確認

3.2.1. 実機における燃焼解析結果

本システムの EGR カムが作動しない場合(EGR OFF)及び EGR カムが作動した場合(EGR ON)の筒内圧力、排気管圧力、吸気管圧力を Fig. 3 に示す。

このグラフから、EGRカムが作動すると同時に排気管圧力が低下し、筒内圧力が上昇していることがわかる。すなわち、EGRカムが作動するタイミングにおいては筒内圧力が負圧であるため、EGRカムによって排気バルブが開くと同時に排気ポートから既燃ガスが筒内に流入し、筒内圧力が上昇することが明らかになった。

また、吸入管圧力の上昇はほとんどないため、既燃ガスが吸入管側にはほとんど流入していない。ゆえに、既燃ガスのエネルギーは筒内の混合ガスを活性化するために有効に使われていると考えられる。

次に EGR カムが作動しない場合(EGR OFF)と作動した場合(EGR ON)との P-V 線図を Fig. 4 に、熱発生率($dQ/d\theta$)を Fig. 5 に示す。これらのグラフから、EGR ON の場合はEGR OFFの場合より筒内圧力が大きく上昇し、 $dQ/d\theta$

Table 1 Engine specifications

Items		Specifications
Engine type		4-stroke Single-cylinder
Cooling type		Liquid cooled
Bore × stroke	(mm)	50.0 × 55.0
Displacement	(cm ³)	108
Compression ratio		11.0
Valve train		SOHC
Valve diameter (mm)	Inlet	φ25.5 × 1
	Exhaust	φ21.0 × 1
Max. power	(kW/r/min)	6.6/7 500
Max. torque	(Nm/r/min)	9.3/6 000

$d\theta$ も高くなることが明らかになった。また、Fig. 6 に EGR OFF, ON における筒内温度を示す。EGR ON の場合、圧縮行程中の温度は上昇しながらも、燃焼行程中の最高温度は低減できている。

以上のように、本システムの EGR カムの開けタイミングを圧縮行程初期又は吸入行程後期とし、閉じタイミングを圧縮行程であるが筒内圧が負圧状態のタイミングにすると、燃焼を改善させつつ筒内の最高温度を低減できることが明らかになった。

3.2.2. CFD による筒内流動と燃焼解析結果

(1) 計算条件

3.2.1. の実験結果に基づき、既燃ガスの流入と乱流エネルギーの効果を確認するため、筒内流動を含めた燃焼解析を CFD 解析により検証した。

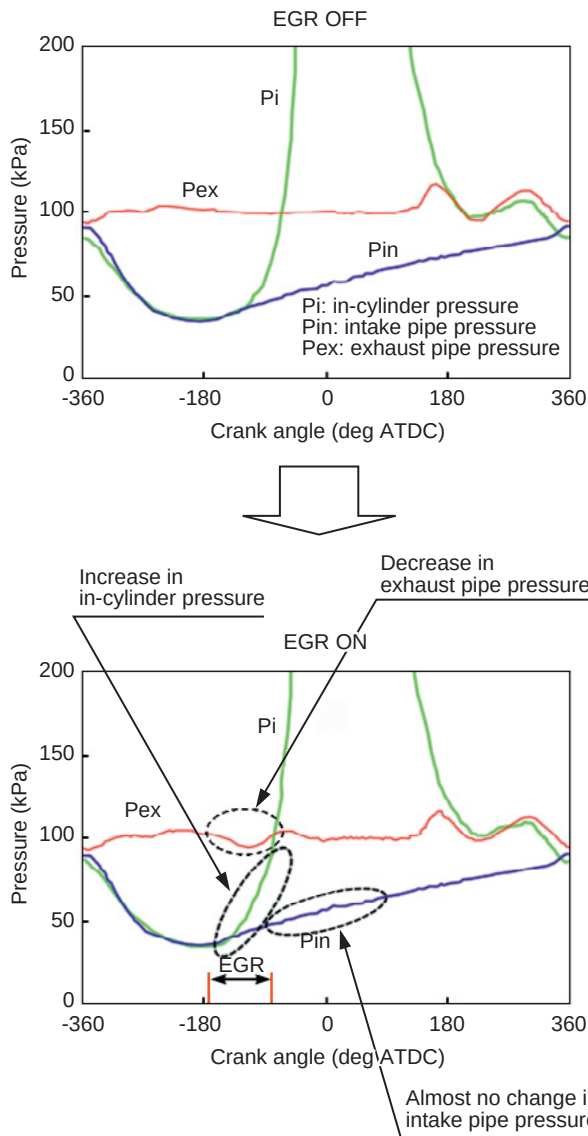


Fig. 3 Pressure applied to each part when EGR cam is in OFF and ON state

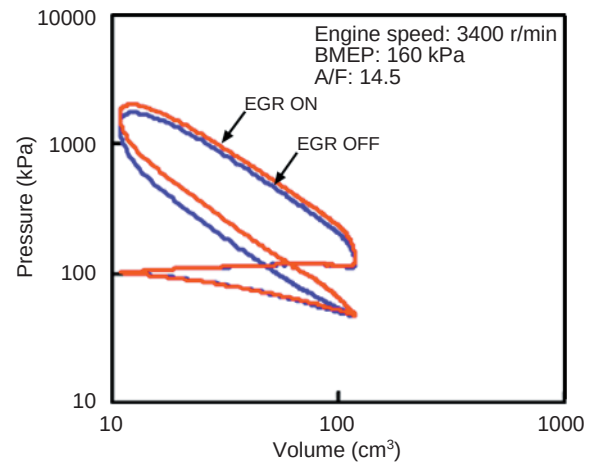


Fig. 4 P-V diagram when EGR cam is in OFF and ON state

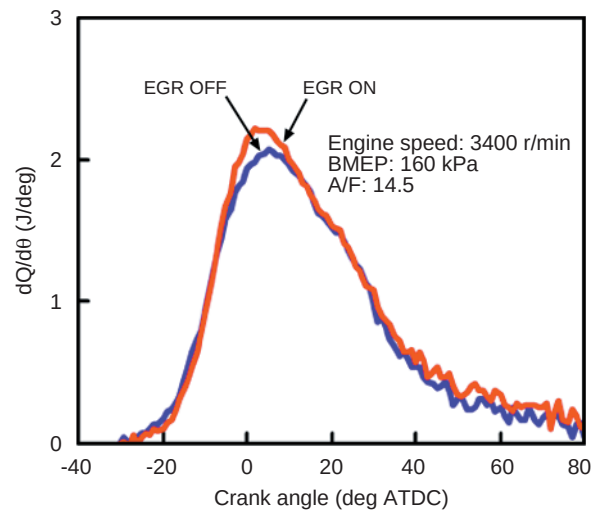


Fig. 5 $dQ/d\theta$ when EGR cam is in OFF and ON state

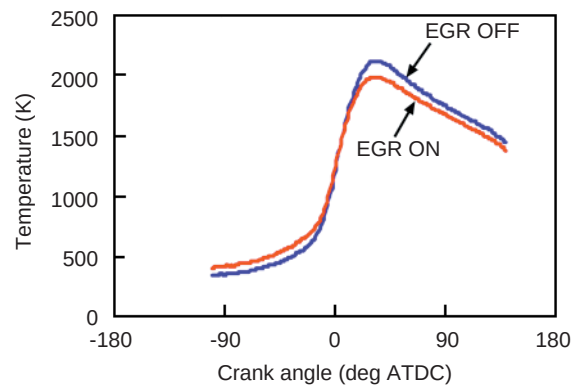


Fig. 6 In-cylinder temperature when EGR cam is in OFF and ON state

CFD 計算には市販の三次元熱流体解析コードである FIRE(AVL List 社)を用い、乱流モデルは標準 $k-\varepsilon$ を、燃焼モデルは ECFM(Extended Coherent Flame Model)を適用した。計算の初期条件と境界条件には、実機測定より得られた各部圧力及び各部温度測定値を与えた。なお、インジェクタから噴射された燃料は吸気弁が開くまでの間に吸気ポー

ト内ですべて気化しているものと仮定し、均質単相(当量比 = 1)の新気がシリンダに流入し、既燃ガスと混合して燃焼する過程を計算した。

(2) EGR 分布

排気管内の既燃ガスが筒内に流入する様子及び、EGR OFF, ON における EGR 分布を Fig. 7 に示す。EGR ON の場合、圧縮行程初期(−160 ~ −100 deg ATDC)のタイミングでEGRカムにより排気バルブが再び開き、排気管内の既燃ガスが筒内壁面に沿うように筒内に流入し、筒内の EGR 率が上昇していることがわかる。EGR 作動時の各部圧力測定値から推定できる既燃ガスの筒内流入現象が、より詳細に確認できた。

(3) 筒内乱流エネルギー

EGR OFF, ON におけるスパークプラグ近傍の乱流エネルギーを Fig. 8 に、筒内平均乱流エネルギーを Fig. 9 に示す。EGR ON の場合、筒内の乱流エネルギーが大きく上昇していることがわかる。EGR作動時に、排気管内と筒内

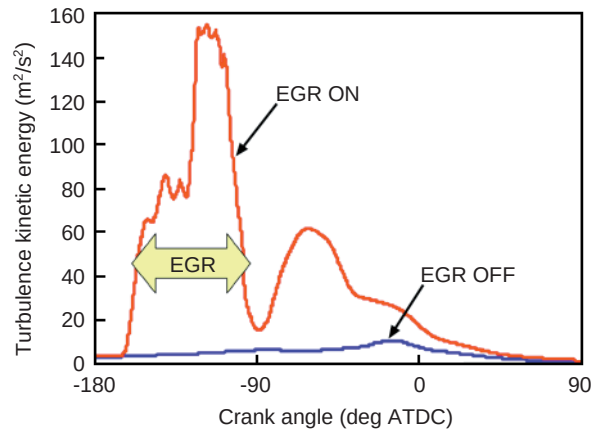


Fig. 8 CFD analysis of turbulence kinetic energy around spark plug

の圧力差で流入してくる既燃ガスが乱流エネルギーの増幅源となっている。本システムでの燃焼改善原因の一つと考えられる乱流エネルギーの変化が、より詳細に確認できた。

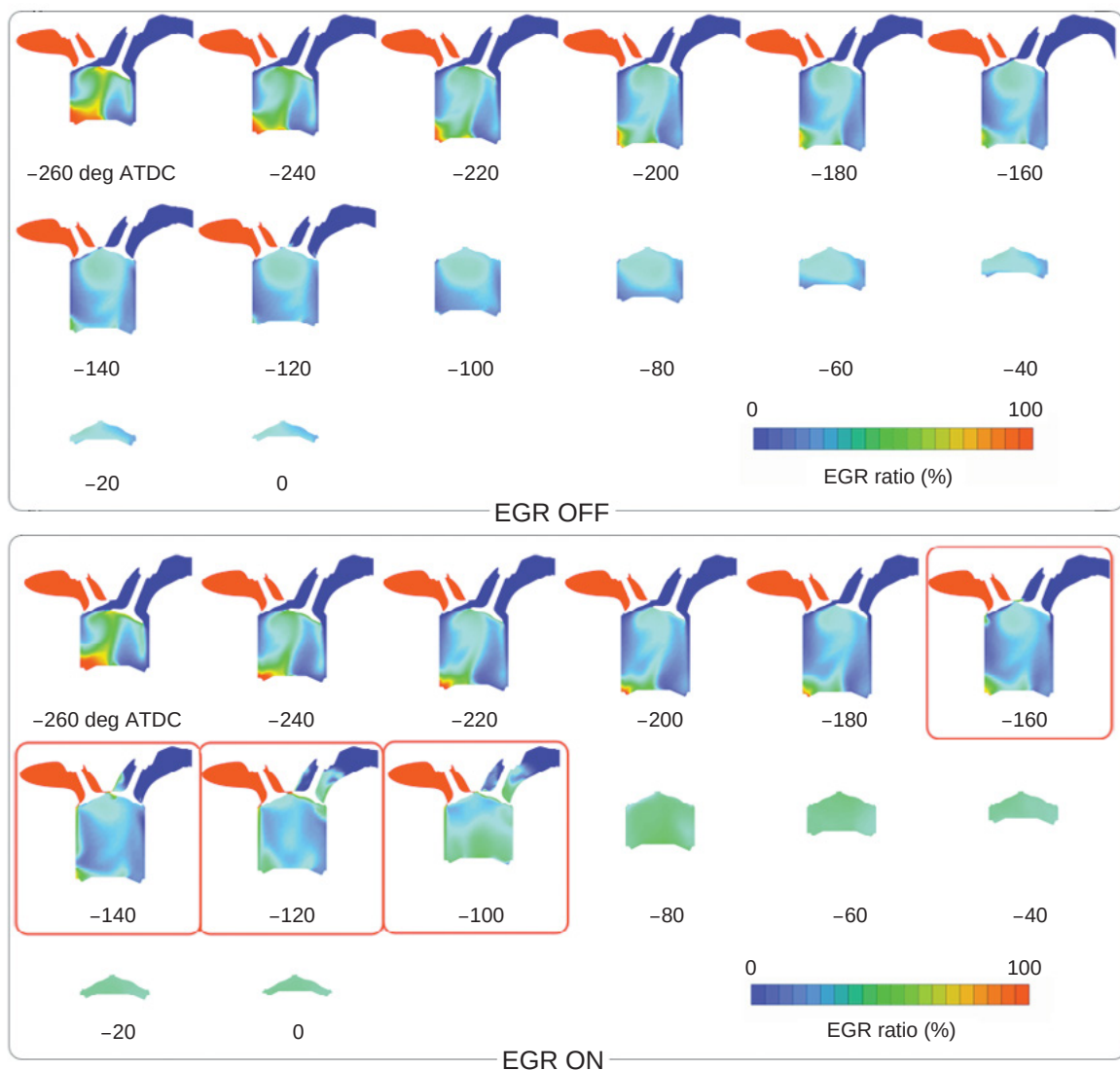


Fig. 7 CFD analysis of EGR

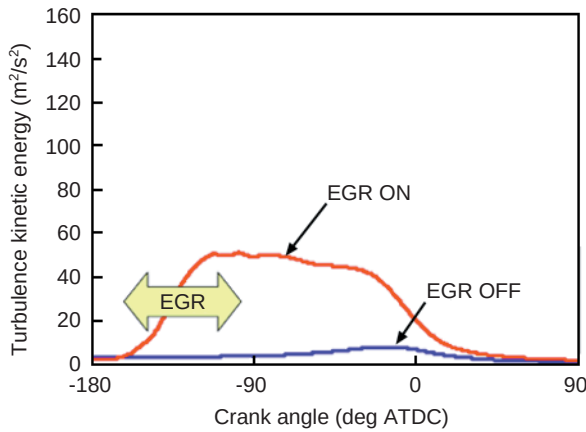


Fig. 9 CFD analysis of average turbulence kinetic energy in cylinder

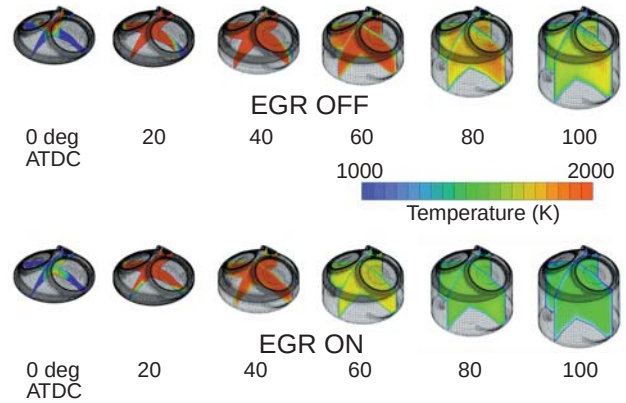


Fig. 11 CFD analysis of in-cylinder temperature

(4) 火炎伝播

EGR OFF, ON における火炎伝播の様子を Fig. 10 に示す。EGR ON の場合、着火遅れがあるものの、着火後の火炎伝播が早いことがわかる。EGR 流入による筒内の乱流エネルギーと内部 EGR による熱エネルギーの向上が原因であると考えられる。実験結果同様に、EGR 率の上昇にもかかわらず燃焼が改善していることがわかる。

(5) 筒内温度

EGR OFF, ON での燃焼行程中における筒内温度変化の様子を Fig. 11 に示す。

EGR ON の場合、燃焼行程中の筒内温度が低減していることがわかる。

以上のように、CFD 解析においても、本システムは燃焼を改善しつつ燃焼温度を低減できることが確認できた。

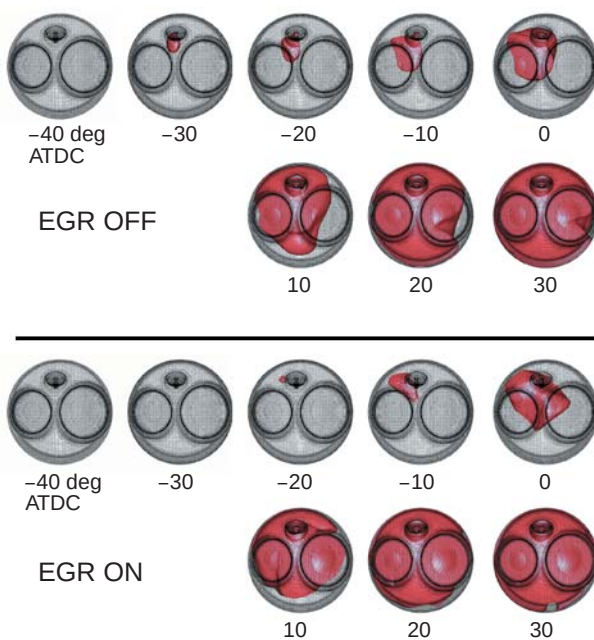


Fig. 10 CFD analysis of flame propagation

4. EGR カム作動特性の設定

4.1. 作動タイミング

EGR カムのリフトを一定とし、開角タイミングを変化させた各仕様(1, 2, 3)での排気バルブのリフトカーブを Fig. 12 に示す。そして、各仕様においてエンジン回転数・負荷を変化させ、NOx を測定した。それらの測定ポイント(a, b, c, d, e, f)を Fig. 13 に示し、各測定ポイントでの EGR による NOx 低減率の結果を Fig. 14 に示す。

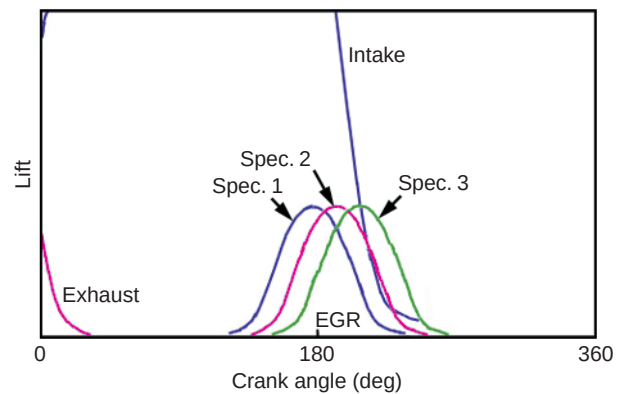


Fig. 12 Exhaust valve lift curves by difference in actuating timings of EGR cam

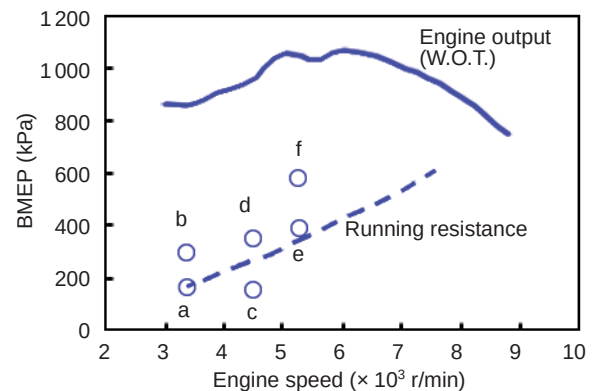


Fig. 13 EGR effect verification points

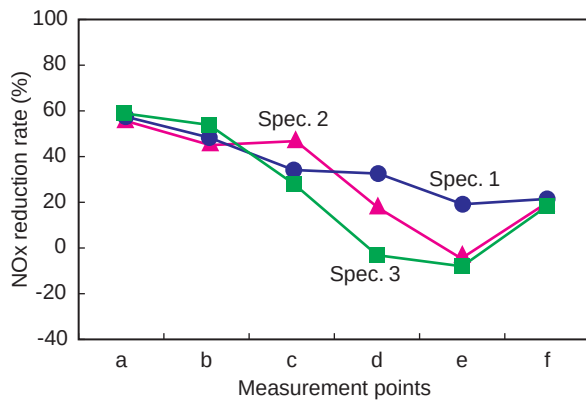


Fig. 14 NOx reduction rate by difference in actuating timings of EGR cam

各仕様共に、低回転・低負荷ほど NOx 低減率が高いのは、EGR カムが作動したときの筒内の負圧が大きいいため、既燃ガスの筒内への流入が多くなるからである。一方、高回転・高負荷になるほど NOx 低減率が少ないのは、EGR カムが作動したときの筒内の負圧が小さいため、既燃ガスの筒内への流入が少なくなるからである。

ただし、仕様 2、3 において、高回転・高負荷領域(測定ポイント f)で NOx が低減しているのは、EGR カムが閉じるタイミングで、筒内圧力が排気管圧力より高くなり、筒内の混合ガスが筒内から排気ポートに抜けてしまい、その結果、圧縮圧力の低下により燃焼が悪化したからである。そのときの筒内圧力、排気管圧力、吸入管圧力を Fig. 15 に、筒内圧力から求めた $dQ/d\theta$ を Fig. 16 に示す。これらのグラフからも、燃焼が悪化していることがわかる。

これらの結果より、燃焼を悪化させることなく、低負荷から高負荷まで NOx の低減効果を得るためには、EGR カムの開角タイミングは仕様 1 が良いことがわかる。

4.2. 作動リフト

EGR カムの開角タイミングを一定(4.1 項の仕様 1)とし、リフト高さを変化させた各仕様(A, B, C, D)での排気バルブのリフトカーブを Fig. 17 に示す。そして、各仕様においてエンジン回転数・負荷を変化させ、NOx を測定した。測定ポイントは、Fig. 13 に示したポイントであり、EGR による NOx 低減率の結果を Fig. 18 に示す。

低リフトの場合(仕様 A)は、EGR カムの開角面積が少ないため、筒内への既燃ガスの流入が少ない。ゆえに、NOx 低減率も少ない。一方、高リフトの場合(仕様 D)は、今回の測定ポイントすべてにおいて NOx 低減率が非常に多くなった。これは EGR カムの開角面積が大きくなり、筒内への既燃ガスの流入が多くなったためである。しかしながら、低回転・低負荷領域(測定ポイント a, c)では既燃ガスが非常に多く筒内に流入し過ぎたため、燃焼が悪化し、Fig. 19 に示すように HC が増加した。

以上のことより、今回の供試エンジンで NOx を低減させるための EGR カムの仕様として、EGR カムの開角タイミングは仕様 1、リフトは仕様 C が最も良いことが明らかになった。そして、EGR カムの作動は、エンジン回転数(Ne)とスロットル開度(θ_{th})により、ON/OFF 制御するものとした。

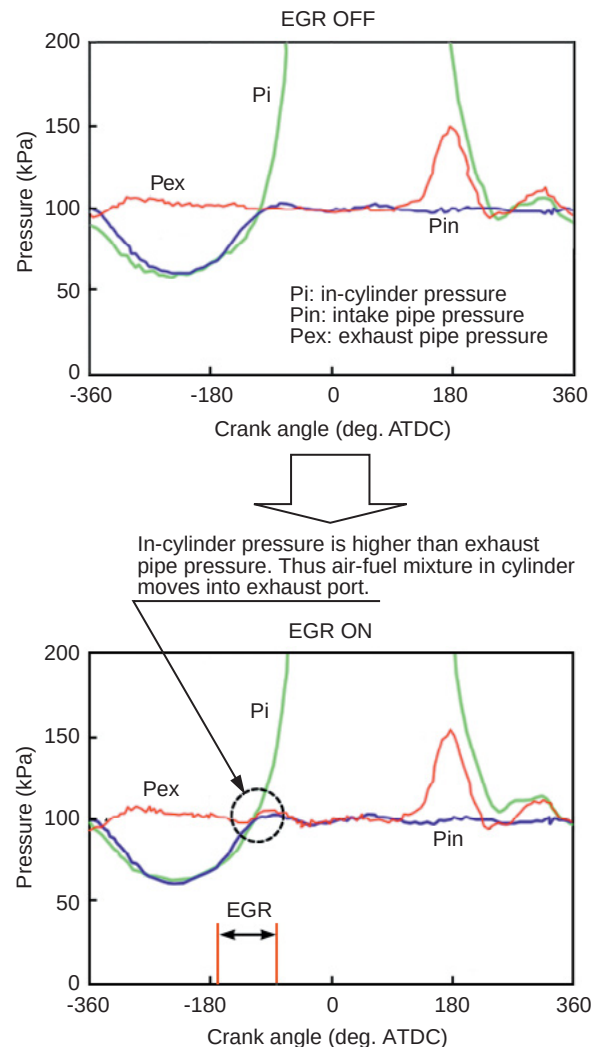


Fig. 15 Pressure applied to each part at measurement point "f" in specification 3

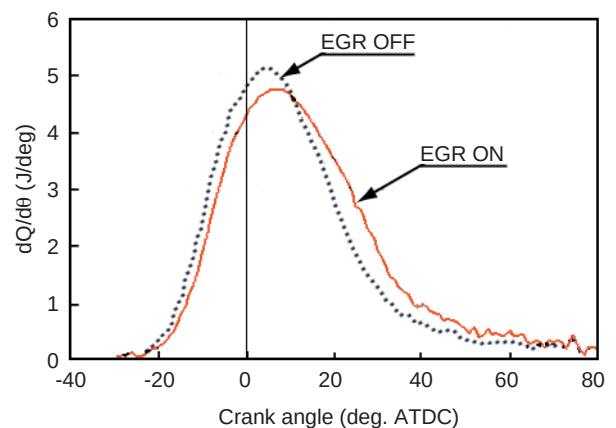


Fig. 16 $dQ/d\theta$ at measurement point "f" in specification 3

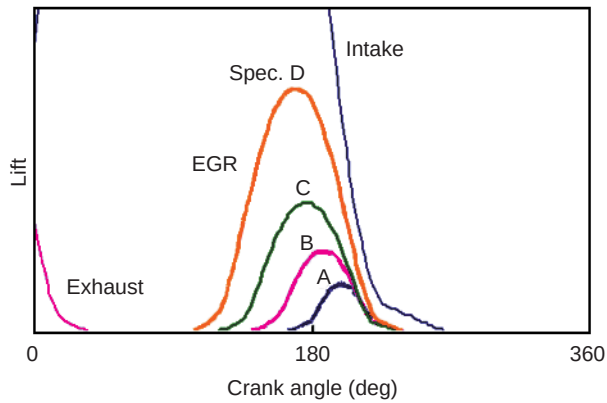


Fig. 17 Exhaust valve lift curves by difference in EGR cam lifts

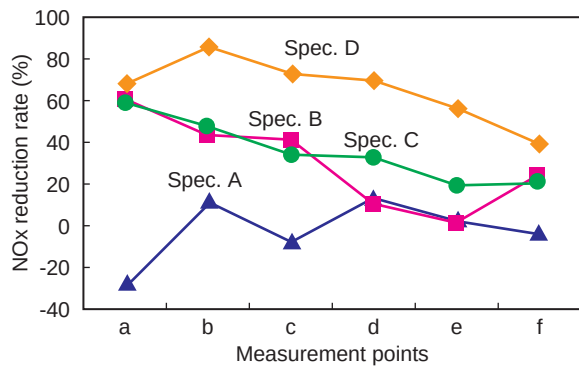


Fig. 18 NOx reduction rate by difference in EGR cam lifts

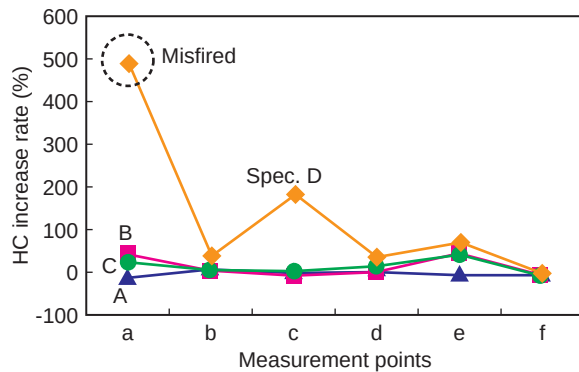


Fig. 19 HC increase rate by difference in EGR cam lifts

5. 排気エミッション性能

本システムを使って、完成車で排気エミッションを確認した。触媒なしでの排気エミッション規制(Euro 3)走行モードでの試験結果をFig. 20に示す。このグラフより、定常走行のみならず加減速走行においても NOx 及び CO が大きく低減していることがわかる。

触媒なしでの Euro 3 走行モードでのトータル排気エミッション値を Fig. 21 に示す。このグラフに示すように、本システムにより NOx は約 50%低減し、CO は約 20%低減す

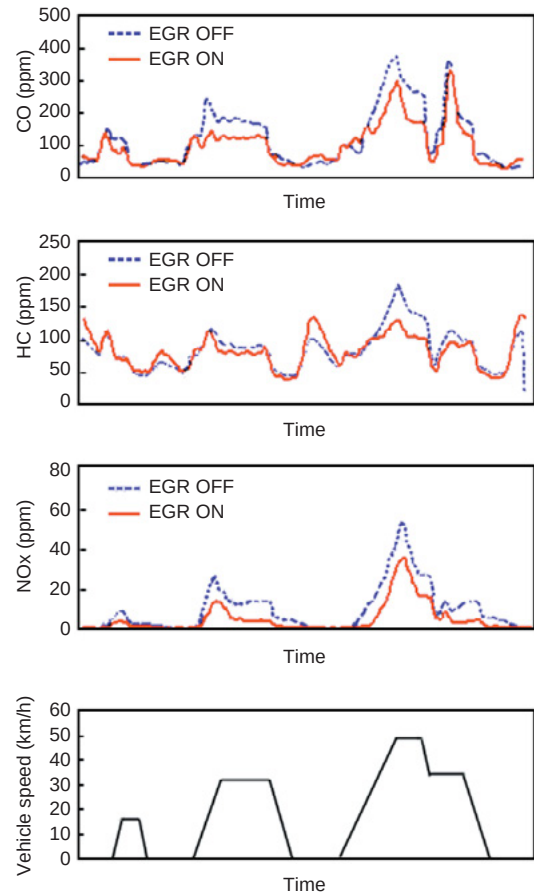


Fig. 20 Time history of exhaust emission in Euro 3 driving mode

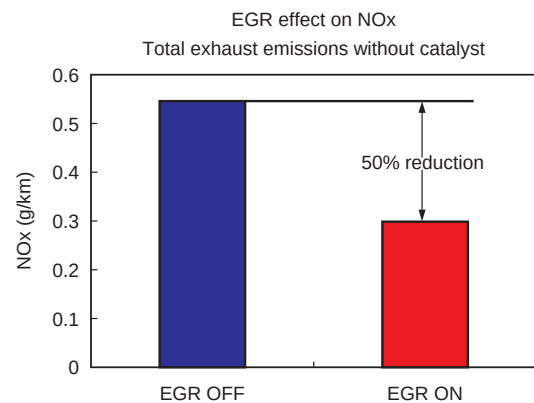
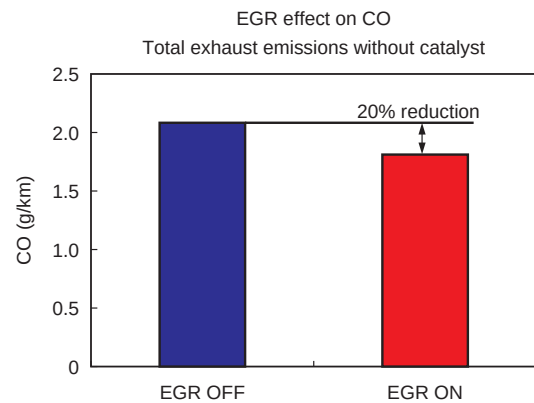


Fig. 21 Exhaust emission reduction effect by developed system in Euro 3 driving mode

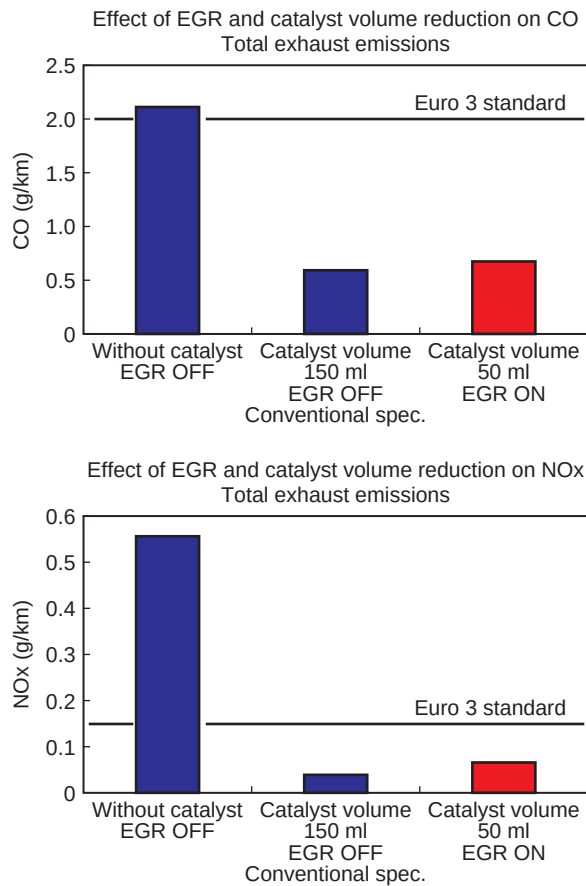


Fig. 22 Catalyst volume reduction effect by developed system in Euro 3 driving mode

ることが明らかになった。次に、触媒容積を小さくした場合の Euro 3 走行モードでの排気エミッションを測定した。その結果を、Fig. 22 に示す。このグラフからわかるように、Euro 3 排気エミッション規制値をクリアするための、触媒容積を従来に対して約70%小さくすることが可能となった。

6. まとめ

今回考案した内部 EGR システムにおいて、以下の知見と成果を得た。

- (1) EGRカムの作動タイミングは筒内圧が負圧状態で、できる限り遅いタイミングで開閉させることが望ましい。
- (2) Euro 3 走行モードでのトータル排気エミッション値において、NOx は約 50%低減、CO は約 20%低減することが明らかになった。
- (3) NOxの大幅な低減により、Euro 3排気エミッション規制値をクリアするための触媒容積を、約70%小さくすることが可能となった。

参考文献

- (1) Fuerhapter, A., Unger, E., Piock, W. F., Fraidl, G. K.: The new AVL CSI Engine-HCCI Operation on a Multi Cylinder Gasoline Engine, SAE Paper 2004-01-0551
- (2) 伊藤輝行: ガソリンエンジンにおける HCCI の可能性, ENGINE TECHNOLOGY Vol.7 No.2, p.26-32(2005)
- (3) 小池誠: 直接噴射式ガソリンエンジンの未燃排出物低減に関する研究, ENGINE TECHNOLOGY Vol.9 No.1, p.64-71(2007)

■ 著 者 ■



中 溝 大 和



藤 原 一 夫



小 島 充



山 西 輝 英