



技術論文

単気筒エンジンでの成層吸気とEGRシステムを用いた燃費とNOxへの影響

Effect of stratified charge and an EGR system on fuel economy and NOx emissions of a single-cylinder motorcycle engine

高須 康嗣 加藤 隆輔 木下 久寿

Abstract

In recent years, the environment surrounding motorcycles is increasingly severe, due to factors such as exhaust emission standards that become more stringent year by year and the need to reduce CO₂ emissions and improve fuel economy out of concern for global warming. In this report, we discuss the results of tests we conducted to determine the effects of a stratified combustion system with low-pressure direct fuel injection into the cylinder for improving thermal efficiency and combustion stability coupled with a compact EGR (exhaust gas recirculation) system for limiting NO_x emissions when applied to a 400cc single-cylinder motorcycle engine.

In our evaluation, we examined combustion characteristics of the EGR gas in homogeneous combustion by inlet port fuel injection (PI) and in stratified combustion by low pressure direct fuel injection (low pressure DI). We also evaluated the effect by actual motorcycle evaluation test with regard to EGR gas temperature and the return current position and by CFD (computational fluid dynamics) analysis with regard to behavior of the fresh air and EGR gas in the inlet port and cylinder.

As a result, we made clear that stratified combustion by low pressure DI, temperature reduction of EGR and a return current position were effective in reducing fuel consumption and NO_x emissions - with an improvement of over 24% in fuel economy when running over the test drive cycle for the exhaust emission standards. Thus we verified that this system is effective for improving fuel economy for a small-class single-cylinder motorcycle.

1 要旨

近年、二輪車を取巻く環境は排ガス規制強化をはじめ年々厳しくなり、さらに地球温暖化の観点から、CO₂排出量の低減、燃費の向上が求められている。本報告では、400cc単気筒モーターサイクルエンジンにおいて、熱効率改善と燃焼安定性を狙った低圧筒内噴射成層燃焼システムと、NO_x抑制のためのコンパクトなEGR(排気ガス環流)システムの適用による効果検証について論ずる。

評価では、吸気ポート燃料噴射(PI)と低圧筒内直接燃料噴射(低圧DI)による成層燃焼でのEGRガスによる燃焼特性を確認した。またEGRガスの温度とその還流位置について実機評価を、新気とEGRガスの吸気ポートと筒内での挙動についてCFD(数値計算)解析を実施し、影響を評価した。

その結果、低圧DIによる成層燃焼、EGRの温度と還流位置による燃費とNO_x抑制への効果が明らかになり、排出ガス測定走行パターンにて24%以上の燃費改善がみられた。単気筒の小型モーターサイ

クルエンジンにおいて、本手法による燃費改善が効果的であることが確認された。

2 はじめに

一般的に排出ガス低減および燃費向上技術として理論混合比よりも燃料を薄くして燃焼させる希薄燃焼が知られている。^{[1][2]} しかし、希薄燃焼では排ガス中の酸素濃度が高いために、理論混合比の状況下で浄化性能を発揮する三元触媒でのNOxの浄化は困難であり、そのため、希薄燃焼における燃費向上にはNOx低減技術が非常に重要である。

NOxを低減させる技術としてよく知られているのが排気の一部を吸気に戻すEGRシステムである。^{[3][4]} これはEGRにより燃焼が緩慢となり、燃焼温度が低下するために、NOx排出量が低減されることによるものである。また、吸気管圧力上昇によるポンピングロス低減も燃費改善効果として期待されている。しかし、EGR率が高くなるに従い、燃焼が不安定になりやすいというデメリットも持っている。^[5] 一般的にモーターサイクルでは、高比出力、応答性、小型軽量が求められるため、希薄燃焼やEGRの適用は進んでいないのが現状である。

そこで本研究では、単気筒400ccモーターサイクル用エンジンにて、希薄燃焼による燃費向上を狙った比較的安価な低圧の直噴システムと、NOx抑制のためのEGRの適用を試みた。

EGR温度が燃焼特性やNOx排出量に与える影響と、二輪車への搭載性からコンパクト化を考慮したEGRの吸気管内への還流位置の影響を、エンジン単体およびCFDにて調査した。車両評価では燃費改善効果を確認し、二輪車用単気筒エンジンでの成層燃焼とEGRシステムによる燃費向上を検証した。

3 エンジン諸元と実験方法

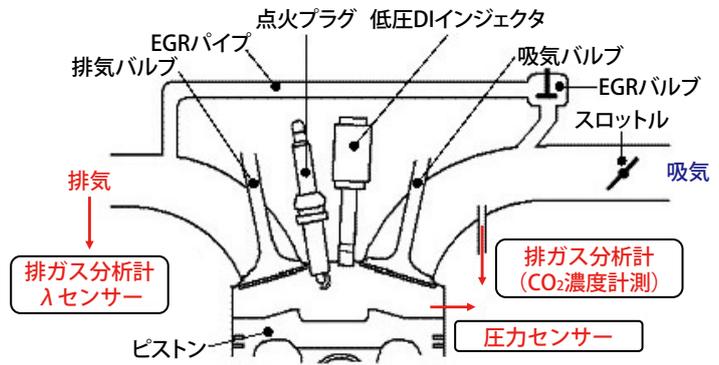
本研究にて供試したエンジン諸元を表1に、概略図を図1に示す。エンジンは4ストローク単気筒モーターサイクル用エンジンである。

筒内直噴システムは、成層混合気を作り出すために空気アシスト式低圧直噴インジェクタ(噴霧粒径：SMD 10 μ m程度、空気圧：650kPa、燃料圧：800kPa)を燃焼室中心部に取り付け、ピストン頂部には成層混合気を形成するために“ピストンボウル”を配置した。加圧空気とともに噴射、微粒化された燃料は、直接ピストンボウルにて混合気を形成する。点火プラグは噴射弁の近傍に装着されている。

EGRシステムは、二輪車への適用から小型・コンパクト性を考慮し、配管長が短くなるように排気ガスを排気管ではなく排気ポートより取り出し、吸気ポートのスロットルバルブの下流に供給される構成とした。EGRガスの流量はステップモーター型EGRバルブによって制御され、EGR率は吸気、排気中のCO₂濃度より算出した。またピエゾ式燃焼圧センサーを用いて燃焼圧計測や排気ガス濃度計測を実施した。

表1 エンジン諸元

エンジンタイプ	4ストローク単気筒
カムレイアウト	DOHC
バルブ	吸気2弁、排気2弁
排気量	cm ³ 395
ボア×ストローク	mm 83.0×73.0
圧縮比	11.5:1
冷却方式	水冷
燃料供給方式	低圧直接筒内噴射
インジェクタ位置	燃焼室中央
燃料圧力	Mpa 0.8
燃料	国内レギュラーガソリン

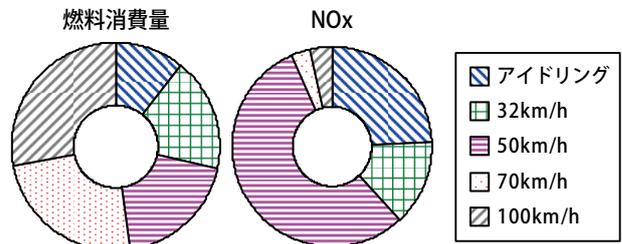


4 エンジンテスト運転ポイント

本研究ではEURO III排出ガス規制のテストパターン走行時、^{[6][7]} 成層燃焼領域の上限である50km/h相当でのNOx排出量の寄与率が最も高いことから、50km/h走行時のエンジン運転ポイントにて評価を行った。(図2) その時のエンジン運転条件を表2に示す。

表2 50km/h走行時のエンジン運転ポイント

エンジン回転数	rpm	3950
トルク	Nm	4.6
BMEP	MPa	0.146



5 成層燃焼とEGRシステム

まず初めに、PIによる均一希薄燃焼と、低圧DIによる成層燃焼による燃費低減効果を比較するとともに、成層燃焼においてEGRを用いた場合の効果を調査した。

図3にPIによる均一燃焼と低圧DIによる成層燃焼におけるEGR有無の比較を示す。低圧DIでの本テストにおけるEGR率は15～28%である。PIによる均一希薄燃焼では、混合気を薄くすると燃焼が不安定になるために、ほとんど燃費の改善は見られない。また希薄限界も空燃比で約18である。低圧DIによって希薄限界は空燃比約35まで伸び、燃費率を大幅に下げることが確認できた。混合気を成層化することにより、希薄混合気でも安定した運転が可能である。

しかし、EGRを導入しない低圧DIの場合、空燃費が23以上では燃費率はPIより改善されるが、NOx排出量はPIに比べて増加傾向となる。ここで、EGRを導入した場合、NOxと燃料消費量は同時に減少している。スロットルバルブはPIの場合より開かれており、燃料消費量の低減はポンピングロスの低下に

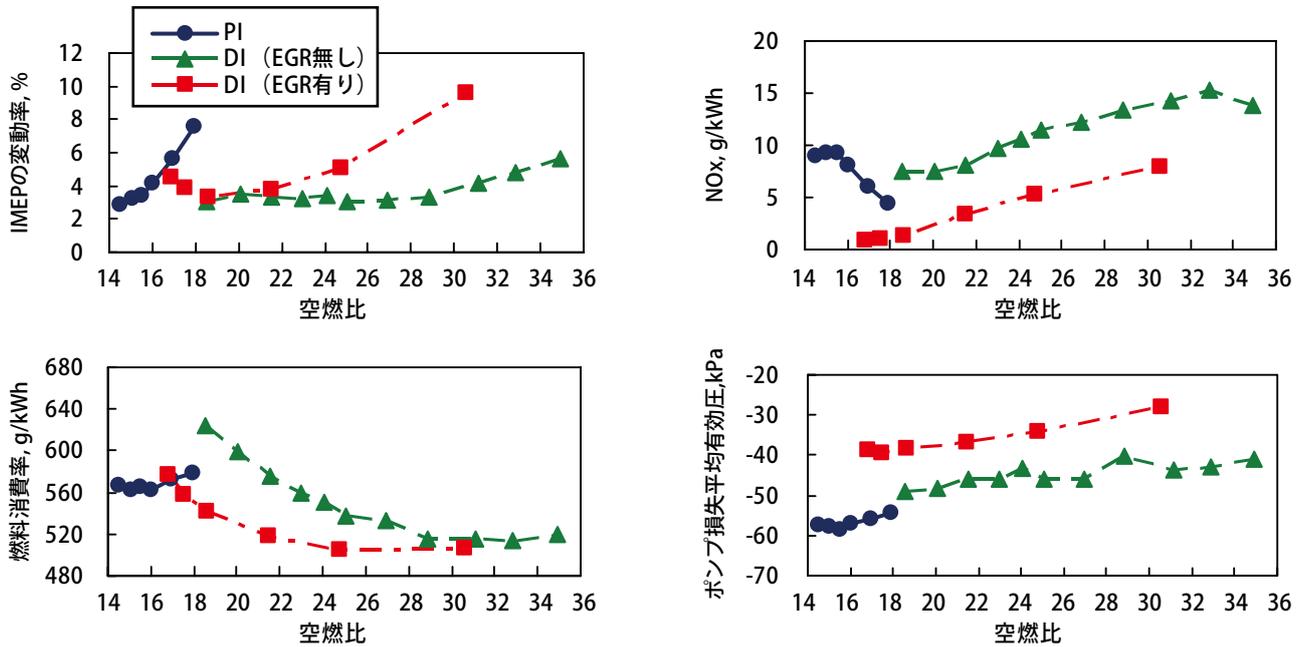


図3 成層燃焼とEGRの影響 (3950rpm, BMEP: 0.146MPa)

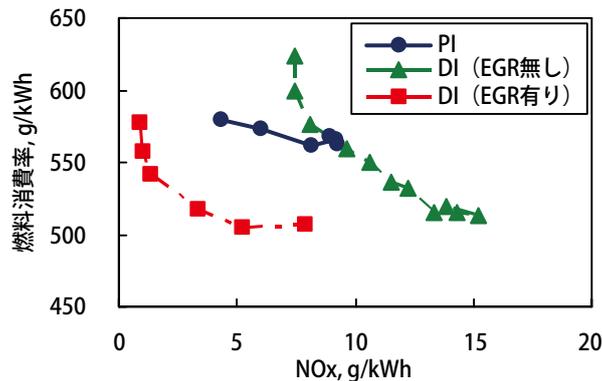


図4 NOx排出量と燃料消費率との関係 (3950rpm, BMEP: 0.146MPa)

よる効果も含まれる。

図4に燃費率とNOx排出量の関係を示す。成層燃焼を行うことで均一燃焼よりも燃費率を低減できるが、NOx排出量は逆に増加する。EGR導入にて燃費率とNOx排出量の両者の同時低減が可能となることが確認できる。

以上より、本構成にて燃焼安定性を悪化させることなく、燃費率低減とNOx排出量の抑制が可能となった。さらに、EGRによるこれらの優位性を確認するためにEGR温度と還流位置に着目して試験を行った。

6 EGR温度の影響

吸気EGR温度の変更

NOxの生成には温度が大きく影響しており、排出量低減には筒内温度を低下させる方法が有効である。そのためEGRガスの温度低下を試み、NOx排出量への影響を調査した。

表3 EGR温度調整方法

No.	EGR温度調整方法	EGRガス温度 °C
1	断熱カバー	290
2	通常パイプ	259
3	通常パイプ+空冷	243
4	水冷	206

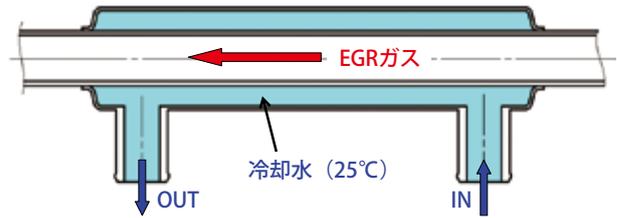


図5 水冷式EGRクーラー概略図

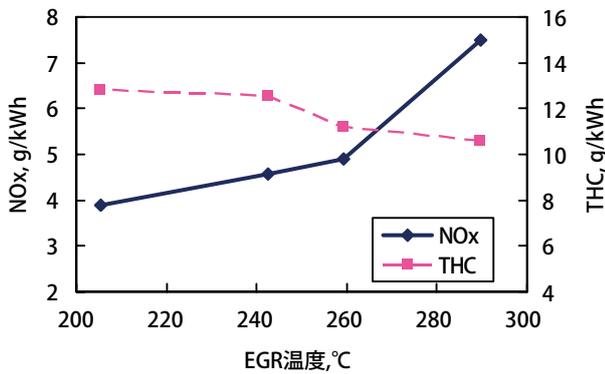


図6 EGRガス温度と排ガスとの関係
(3950rpm, Fuel: 8.3mg/st, Air: 5.57g/s)

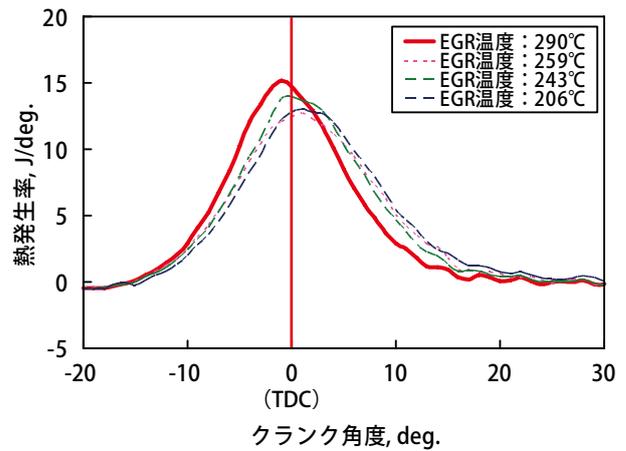


図7 熱発生率の比較
(3950rpm, Fuel: 8.3mg/st, Air: 5.57g/s)

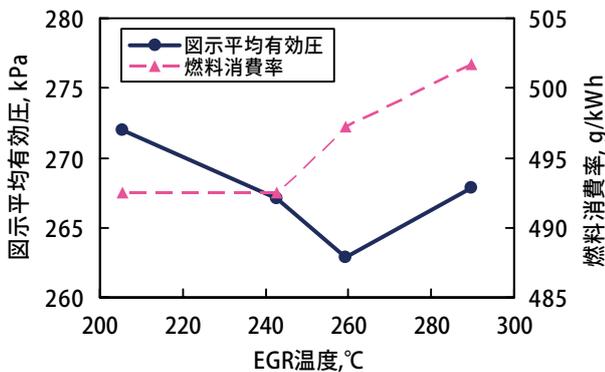


図8 図示平均有効圧と燃料消費率への影響
(3950rpm, Fuel: 8.3mg/st, Air: 5.57g/s)

EGRガスの温度調整は表3に示す方法にて、空冷または水冷による4通りにて制御し評価を実施した。図5に水冷式のEGRクーラーの模式図を示す。EGRガス温度の影響を明確にするため、燃料流量、吸入新気量(質量流量)、点火タイミング、噴射タイミングを固定として評価を実施した。

図6にEGRガス温度とNOx、およびTHCの関係を示す。図よりNOxはEGRガス温度の低下とともに減少している。EGRガスの温度が85°C低下すると、NOxは43%減少している。一方、EGRガスの温度低下により、THCの排出量は増加している。

図7にEGRガス温度の熱発生率への影響を示す。EGRガスの温度が低下したとき、熱発生率のピーク値の低下と燃焼が遅れる傾向にあることが分かる。

図8にはEGRガス温度とIMEP（図示平均有効圧）、燃費率の関係を示す。EGRの温度低下により燃焼は遅れる傾向にも関わらず、IMEPは増加し燃費率は低下している。EGR温度が高い状態では熱発生率が最大となるタイミングはTDC（上死点）の近傍であり、混合気形成の観点から要求される点火時期が過早であった。しかし、EGR温度の低下によって熱発生率のタイミングが最適となりIMEPが増加した。

7 EGRガスの還流位置の影響

CFDによるEGRガスの分布

特にモーターサイクル用単気筒エンジンでは、吸気ポート内で大きな吸気脈動が発生するため吸気ガスの流れが一定ではない。また、コンパクトな構成とするためのスロットル弁下流へのEGR導入は、シリンダーに供給されたEGRガスの不均一性を生じさせることも考えられた。そこで、CFDにて吸気行程中の新気とEGRガスの挙動を解析した。

図9は吸気ポートとシリンダー内における既燃ガスの挙動を示す。また吸気行程時に吸気バルブを通過する吸入ガス量（新気とEGRガスの合計）とEGR量、およびそれから算出したEGR率を図10に示す。

クランク角360°（オーバーラップ上死点）から570°までの解析結果を示す。多くの既燃ガスがEGRポート近傍の吸気ポート内に滞留しているが、吸気バルブ付近では新気比率が高い。クランク角360°でEGRポート近傍に分布していた既燃ガスは、クランク角420°より吸気ポートへ多く流入する。しかし450°では吸気脈動の影響により、その流れは一旦弱くなっている。そのため450°から480°のクランク角度においては、吸気バルブを通過する新気率が増加する結果となっている。おそらくそれは吸気ポートへの排気ポート側からの圧力脈動に起因するものと考えられる。

次に燃焼直前の未燃ガスと既燃ガスのガス分布について解析を行った結果を示す。図11では点火時の燃焼室内ボア断面の既燃ガス分布と点火プラグ下、吸排気方向での既燃ガス率を示す。シリンダー内では、点火時期における既燃ガスと未燃ガスの分布は完全均一ではない結果となった。既燃ガスは排気ポート付近に偏る傾向が見られる。

前述のように、吸気ポートの脈動による吸入ガスのEGR率が一定ではないことと、さらに燃焼室内にて既燃ガスと吸入ガスとの混合が不十分であることに影響を受けていると考えられる。これらより既燃ガスの不均一性、層状化の可能性が示唆された。

8 EGRガスの環流位置

図14に示す2種類のEGR戻し位置について評価した。排気ポートからEGR通路をへて、排気ガスは吸気ポートの上流側（Upstream）に環流する場合と、さらに、コンパクト化のためEGR通路長を短くできるシリンダーに近い下流側（Downstream）に環流する場合の2仕様を比較した。

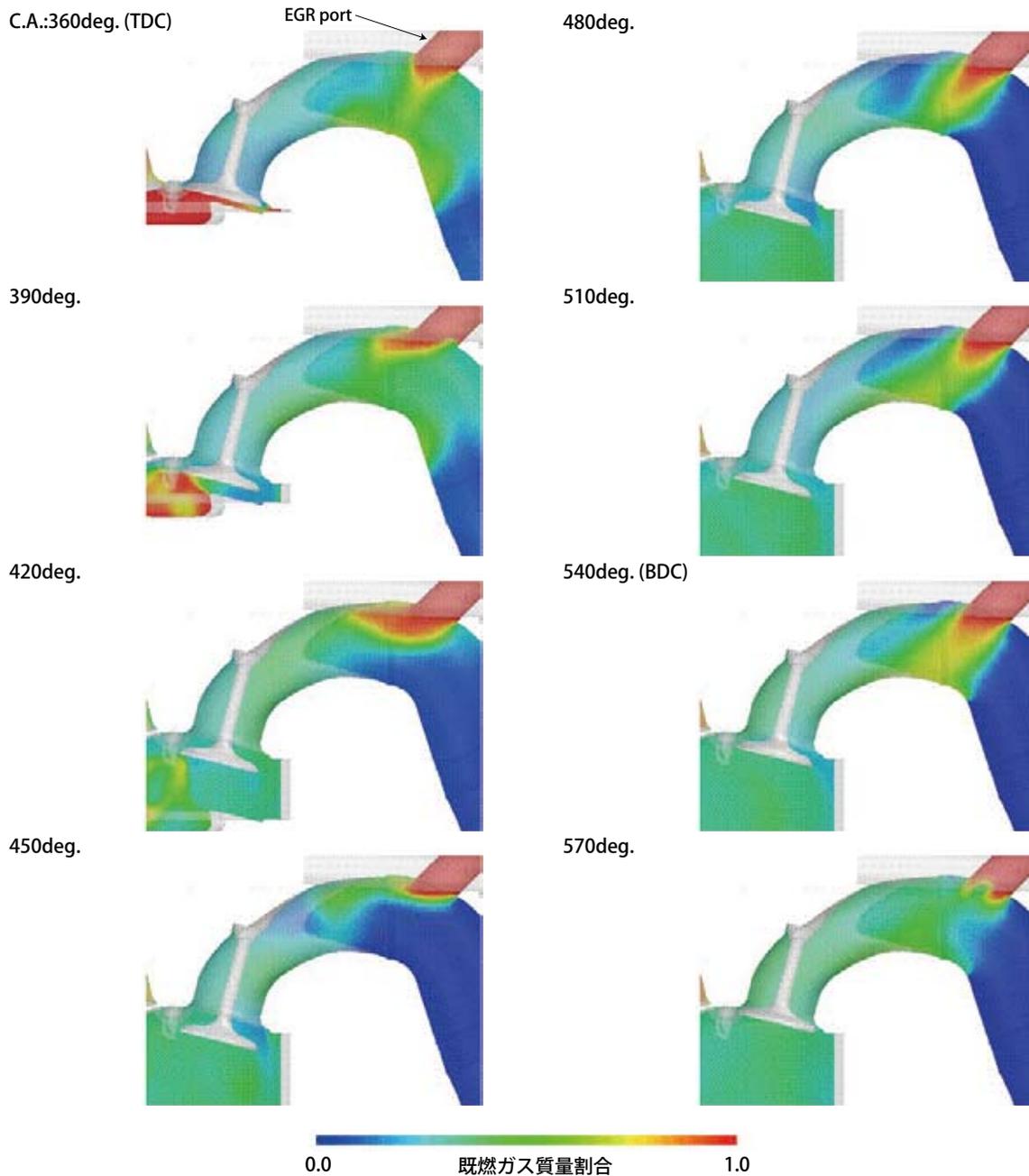


図9 吸気ポート内の既燃ガスの挙動(3950rpm, BMEP: 0.146MPa)

1.Upstream

“上流側”の場合、EGRガスは、吸気ポートの上流側から吸気ポートに入り新気と混合する。その混合に関してはある程度の不均一性が示唆された。

2.Downstream .

“下流側”の場合、その還流位置からシリンダーまでの距離が短く、EGRガスは、より吸気バルブの近くにて新気と混合されるため、“上流側”に比べ、混合の不均一性が高まることが予測される。以下にその評価結果を示す。

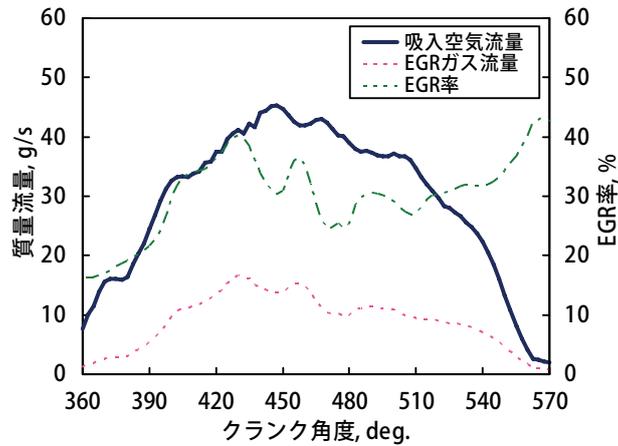


図10 吸気バルブを通過する空気流量とEGRガス流量

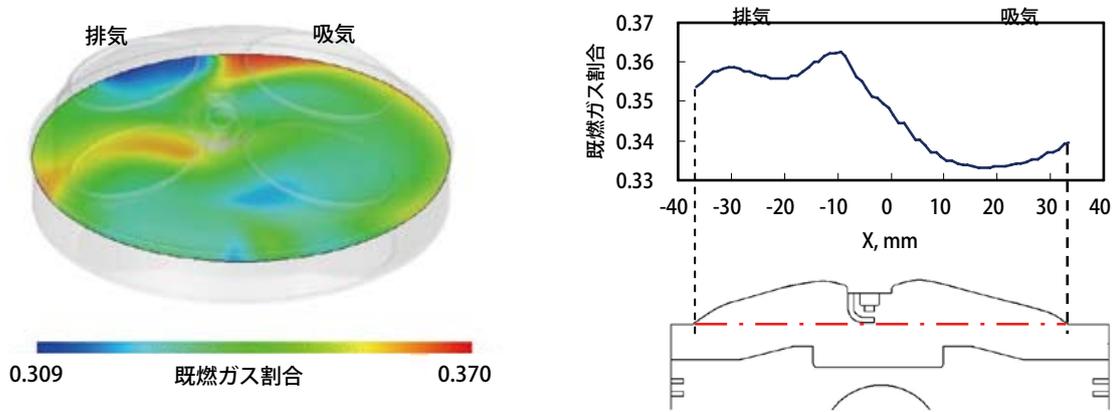


図11 点火時期での既燃ガス割合

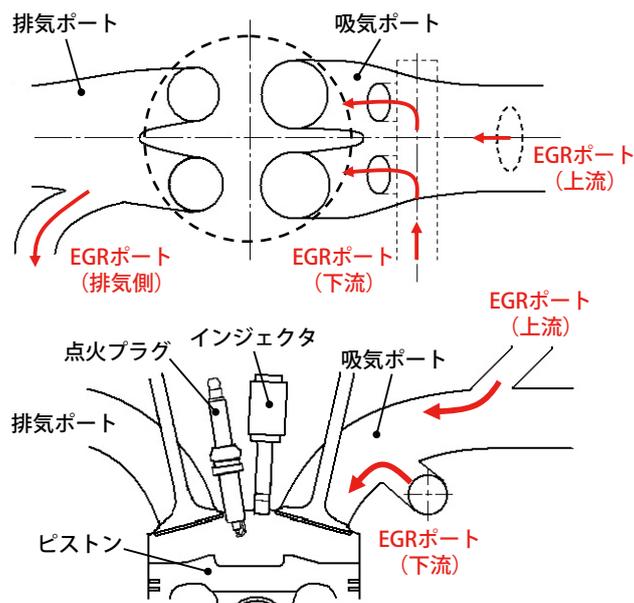


図12 EGRガスの還流位置

9 EGR環流ポジションの影響のテスト結果

図13にEGRの還流位置による燃費とNOxの関係を示す。EGRバルブポジションは、全開の位置に固定した。この図より、NOxと燃費の関係は下流側に環流することにより全域で改善されたことが分かる。特にNOx排出量1g/kWhの時、下流側にEGRを供給したときの燃費率は約3%上流側を下回っていた。

図14にNOxとTHCの量の関係を示す。ここでも全域で両者の関係は、下流側にて改善される結果となっており、NOx排出量1g/kWhの時のTHCは、上流側の値に比べ下流側では約20%低減された。

図15に、CFDによる吸気バルブを通過する瞬時のEGR率を示す。下流側へEGRの還流位置を変更することによって、高温EGRガスが吸気行程初期にシリンダー内に多く吸気されている。これはおそらく燃料蒸発を促進しTHCの削減に効果があると考ええる。

さらに、図16に点火プラグ下、吸排気方向での計算による既燃ガス率を示す。“下流側”での既燃ガス分布は、明らかに“上流側”より不均一で排気側に偏在している様子が伺える。

図17にそれぞれの点火時期における燃焼室内の既燃ガス分布を示す。“下流側”での平均EGR率は36%であり、それは“上流側”の28%よりも高い。燃焼安定性への悪化も懸念されたが、燃焼室内での既燃ガスの偏在が高EGR率においても燃焼安定性を維持し、その結果、燃費率とNOxさらにはTHCの削減に効果的であったと考えられる。

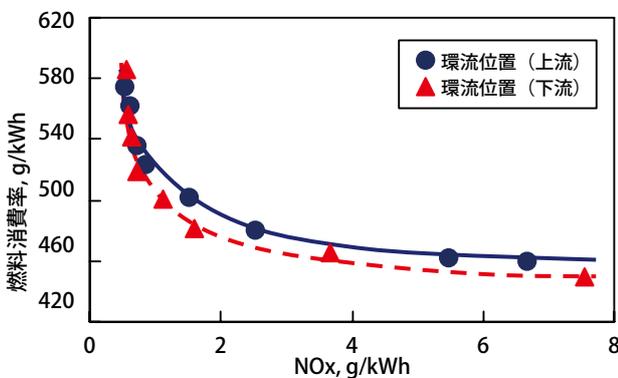


図13 燃料消費率とNOx排出量の関係
(3950rpm, BMEP: 0.146MPa)

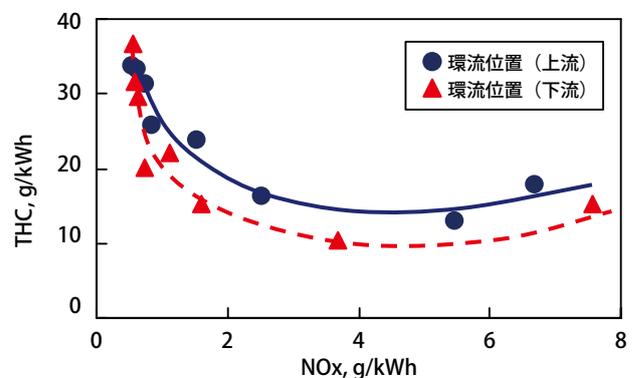


図14 THC排出量とNOx排出量の関係
(3950rpm, BMEP: 0.146MPa)

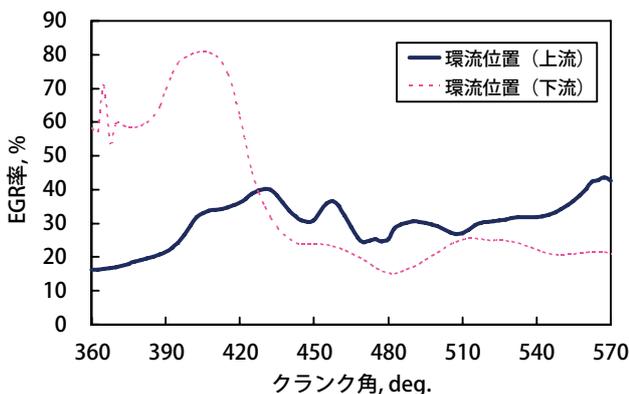


図15 CFD解析による吸気バルブを通過するEGR率

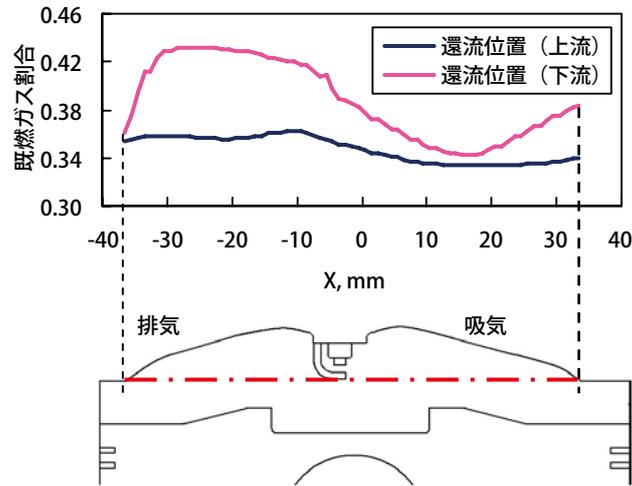
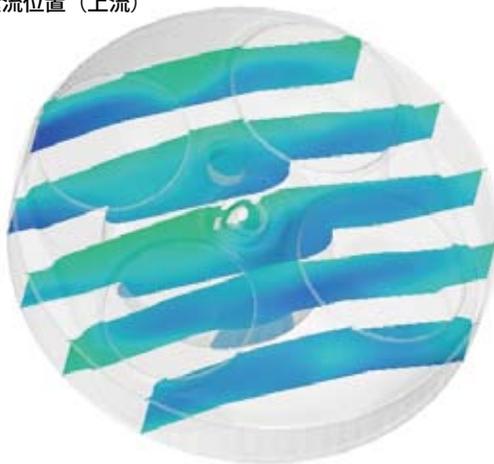


図16 点火時期における既燃ガス割合

環流位置 (上流)



環流位置 (下流)

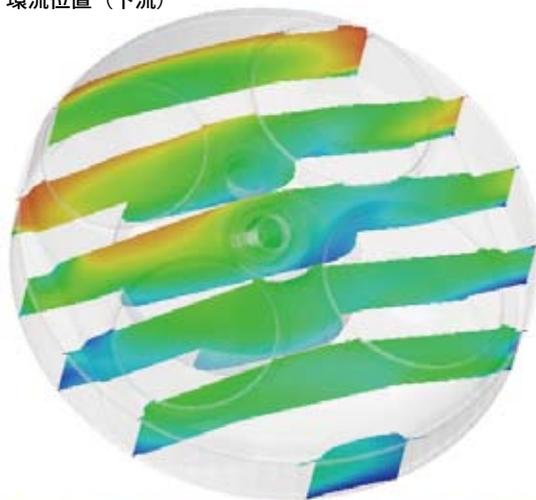


図17 点火時期における既燃ガスの比較

10 車両での燃費改善効果

燃費改善効果の確認のため、**図18**に示す車両での燃費計測を実施した。EGR還流位置は“上流側”で成層燃焼の領域は車両速度にて約50km/h以下にて設定された。**図19**にEURO III排ガス規制における測定パターンと50km/h定地走行での燃費計測結果を示す。今回のシステムの適用により排出ガスを悪化させることなく本車両にてモード走行時約24%、50km/h定常走行時でも18%の燃費向上が確認された。これらの結果は低速領域での成層燃焼による削減効果が高いことによる。



図18 テスト車両

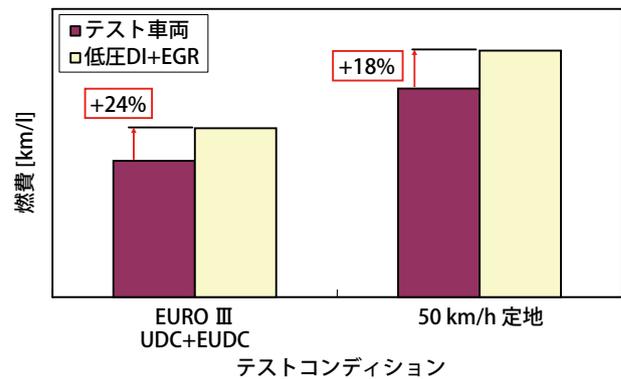


図19 燃費の比較

11 まとめ

本研究にてモーターサイクル用小型単気筒エンジンにおける燃料消費とNOx抑制を目的とし成層燃焼とEGRシステムを適用することにより次の結果を得た。

低圧DIによる成層燃焼とEGRシステムの併用により、燃焼安定性を損なうことなく、燃料消費量とNOxの同時抑制を可能とした。

EGRにてNOx低減がなされるが、その冷却によって低減効果は増大し、本評価での50km/h定常走行時にEGRガス温を85℃低減させると、NOxは43%減少する。しかしながらTHCは30%程増加する。

吸気ポートとシリンダー内でのEGRガスと新気の挙動をCFDにて解析を実施した結果、吸気ガス中のEGR率が変動し、シリンダー内の残留ガスとの混合の不均一性もあり、点火時期において既燃ガスと新気が不均一であることが確認された。

吸気ポートの“下流側”にEGRガスを還流することによって“上流側”よりEGR率の増加と均一性の悪化が解析より確認できた。実機結果からも、NOx排出量が1g/kWh時においては、下流側にEGRを導入したほうが燃料消費量は約3%上流側にEGRを導入する場合に比べ低減された。

車両評価ではモード走行時に約24%の燃費改善効果が確認された。小型単気筒エンジンにて低圧DIによる成層燃焼とEGRの組み合わせにより、コンパクトなシステムでの燃費改善の可能性が検証された。今後の課題としては、過渡におけるEGR量の推算やスロットルレスポンスへの影響の調査が考えられる。

参考文献

- [1] Schwarz, Ch., Schünemann, E., Durst, B., Fischer, J. and Witt, A.: Potentials of the Spray-Guided BMW SI Combustion System, SAE Paper No. 2006-01-1265, 2006.
- [2] Baecker, H., Kaufmann, A. and Tichy, M.: Experimental and Simulative Investigation on Stratification Potential of Spray-Guided GDI Combustion Systems, SAE Paper No. 2007-01-1407, 2007.
- [3] Sarikoc, F., Kettner, M., Velji, A., Spicher, U., Krause, A. and Elsaesser, A.: Potential of Reducing the NOx emissions in a Spray Guided DI Gasoline Engine by Stratified Exhaust Gas Recirculation (EGR), SAE Paper No. 2006-01-1261, 2006.
- [4] Tabata, M., Yamamoto, T. and Fukube, T.: Improving NOx and Fuel Economy for Mixture Injected SI Engine with EGR, SAE Paper No. 950684, 1995.
- [5] Solomon, A. S. and Szekely, G. A. Jr.: Combustion Characteristics of a Reverse-Tumble Wall-Controlled Direct-Injection Stratified-Charge Engine, SAE Paper No. 2003-01-0543, 2003.
- [6] Bosteels, D., May, J., Etheridge, P., Souza, I. D. and Lance, D.: An Investigation into the Challenges of Achieving Future Legislative Limits over Euro 3 and WMTC Drive Cycles for Current State-of-the-Art Motorcycle Technologies, SAE Paper No. 2005-01-2156, 2005.
- [7] Akamatsu, S., Kono, T., Miyata, H. and Uraki, M.: Research into New Emission Control Techniques for Motorcycles to achieve the EURO-3 Regulation, SAE Paper No. 2004-32-0032, 2004.
- [8] Takasu, K, Kinoshita, H. and Kato, R.: Effects on Fuel Economy and NOx Emission Using Stratified Charge and EGR System for a Single Cylinder Motorcycle Engine 2008-32-0018 / 20084718

■著者



高須 康嗣
Kouji Takasu

AM事業部
AM第1技術部



加藤 隆輔
Ryuusuke Katou

技術本部
研究開発統括部
パワートレイン研究部



木下 久寿
Hisatoshi Kinoshita

技術本部
研究開発統括部
パワートレイン研究部