

ガソリンエンジンシステムにおけるCold HC低減

久保修一，政所良行，瀧昌弘

Reduction in Cold Hydrocarbon Mass Emissions in Gasoline Engine System

Shuichi Kubo, Yoshiyuki Mandokoro, Masahiro Taki

要 旨

将来の大気環境改善に向けて，ガソリンエンジン車から排出される炭化水素(HC)の低減は，重要な課題の一つである。

本研究では，エンジン始動から暖機過程中に車両から排出されるCold HC低減を目的に，エンジン筒内及び触媒におけるHC酸化反応促進のためのエンジン燃焼制御法について検討した。

スワールの付与は，膨張行程での既燃ガスと未燃ガスとの混合を促進させ，未燃HCの酸化反応促進を可能とし，混合気の希薄化 ($\phi = 1.0 \rightarrow 0.9$) と組み合わせることにより，エンジン排出THC量

の大幅な低減を可能とした。

また，混合気の希薄化は，エンジン排出ガス中の酸素濃度増加を引き起こし，触媒におけるHC酸化反応の促進による低温活性向上にも寄与した。

スワールの付与と混合気の希薄化 ($\phi = 0.9$) とを組み合わせたエンジン燃焼制御を始動・暖機過程に適用することにより，Cold HC排出量は従来制御 (流動無& $\phi = 1.0$) に比べ約30%低減することを明らかにした。

Abstract

In order to minimize hydrocarbon mass emissions for a spark ignited engine-catalyst system during the cold start condition in which most of the hydrocarbon mass emissions occur, we focus on the acceleration of hydrocarbon oxidation reactions in a gas phase and a catalyst.

In the present study, effects of the in-cylinder gas flow motion and the equivalence ratio on the reduction of cold hydrocarbon mass emissions have been widely investigated using three spark ignited engine systems. It is suggested that a swirl of intake gas flow motion

and the lowering of equivalence ratio have a large effect on the improvement in in-cylinder oxidation reactivity by the mixing of unburned hydrocarbons with high temperature burned gas and also in catalytic reactivity by increasing the engine-out oxygen concentration. The cold hydrocarbon mass emissions under the developed engine control with a swirl and an equivalence ratio of 0.9 is about 30% lower than these under the conventional engine control with none of active gas flow motion and an equivalence ratio of 1.0.

キーワード

ガソリンエンジン，炭化水素エミッション，低温始動，スワール，酸化反応，触媒

1. はじめに

自動車から排出される炭化水素類（含酸素炭化水素を含む）は、光化学反応による大気汚染の主要原因物質の一つとして考えられている。このため、大気環境改善に向けて自動車の排気規制は世界的規模で厳しくなる方向に進んでいる（日本：2000年以降の規制，米国：LEV規制，欧州：STEP III & IV）。

現在のガソリンエンジンから排出される未燃炭化水素（以下，未燃HC）の低減は，主に触媒の働きにより達成されている。しかし，今後の厳しい排気規制に対応していくためには，エンジン始動から触媒が活性に達するまでの時間を短縮し，この間に排出される未燃HCをいかに低減させるかが重要な課題となっており，この課題解決に対して多方面からの研究が進められている^{1~4)}。

この重要課題に対して本研究では，エンジン始動直後から暖機過程に着目して未燃HCの排出特性を把握⁵⁾し，筒内及び排気浄化システムにおける未燃HCの酸化反応を促進させるためのエンジン燃焼制御法の確立を進めている⁶⁾。

本研究報告では，エンジン筒内及び触媒における未燃HCの反応促進に及ぼす筒内ガス流動と当量比の影響を明確にし，この検討結果から得られた最適エンジン制御法を市販列型エンジンシステムに適用し，始動・暖機過程でのCold HC低減能力を評価した点について述べる。

2. 装置及び方法

本実験は，2種類の基礎検討用エンジンシステム（筒内HC反応解析及び触媒反応解析用システム）と始動・暖機過程エミッション総合評価用エンジンシステムを用いて行った。

2.1 排気質制御検討用単筒エンジン

筒内ガス流動（タンブル，スワール及び流動無）及び当量比が筒内における未燃HCの酸化反応に及ぼす影響を解析するための単筒エンジン・排気サンプリングシステムをFig. 1に示す。

ガス流動の付与は，シリンダーヘッドとインタークマニホールド間に設置したバタフライバルブにより行った。ガス流動の形態は，バタフライバ

ルブ形状の変更⁷⁾により変化させた。

本実験では，ガス流動の影響のみを抽出するために，燃料は完全予混合状態で供給し燃料液滴の影響を取り除いた。燃料は，排気中における燃料成分と反応生成物との分離を容易にするためにガソリンを模擬した3成分混合燃料（10vol% n-heptane, 65vol% isooctane, 25vol% toluene）を使用した。

エンジン排出ガスは，排気弁直後（排気バルブ下流8mm）の位置と，排気ポート出口（排気バルブ下流84mm）の位置から真空ラインに接続されたガスサンプリングプローブ（オリフィス径：100 μ m）を介してサンプリングし，Pyrex製捕集瓶に希釈保存した。サンプリングしたガスは，ガスクロマトグラフ装置（HP 6890）を用いて個別HCの定量分析を行った。

2.2 触媒反応解析用列型エンジンシステム

触媒の昇温過程におけるHCの反応性と当量比との関係解析のための列型エンジンシステム⁸⁾をFig. 2に示す。このシステムは，エンジン定常運

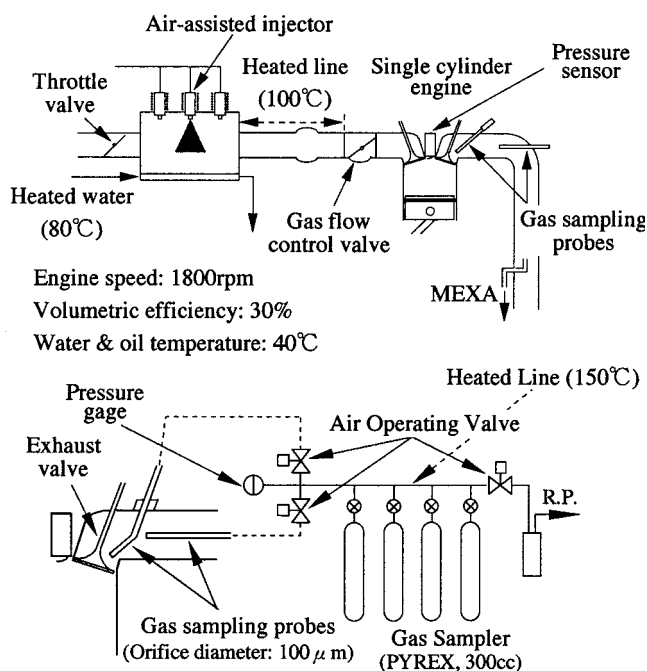


Fig. 1 Single cylinder engine system and exhaust gas sampling system for evaluation of in-cylinder gas flow.

転下で触媒の昇温特性を追跡できるように、市販4気筒エンジン(1.6リットル)からの排気が2系統(触媒装着ライン&非装着ライン)に切り替え可能となっている。触媒におけるHC反応解析は、時分割個別HC解析システム⁸⁾(豊田中央研究所製)を用いて行った。

触媒は、初期エージングを施したPt-Rh系三元触媒(容量:1.7リットル)を使用した。

燃料は、国内レギュラーガソリン相当品を使用した。

2.3 始動・暖機過程エミッション総合評価用エンジンシステム

エンジン始動から暖機過程におけるCold HC排出量の比較評価を実施するためのエンジンシステムの概要を以下に示す。

このエンジン-排気浄化システム⁹⁾は、4気筒2.2リットルガソリンエンジンにClose-coupled排気浄化システムを接続(排気ポート出口下流20cm)したものである。触媒は、初期エージングを施したPt-Rh系三元触媒(容量:1.3リットル)と同一性状・容量の耐久後触媒を使用した。燃料は、2.2における実験と同様に国内レギュラーガソリン相当品を使用した。

始動・暖機過程における触媒前後の個別HC濃度の時間プロフィール測定は、前述の時分割個別

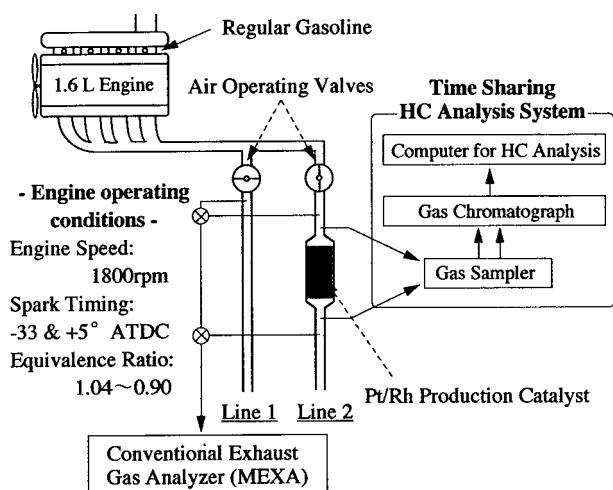


Fig. 2 Schematic of experimental configuration for evaluation of catalytic reactivity.

HC解析システムを用いた。

低温始動実験の再現性は、自動車排出ガス分析装置(堀場製作所製MEXA-8120D)から得られる各種排ガス濃度変化及び空燃比変化のばらつきが±2%以内に収まることを確認することにより行った。

上記3種類のエンジン実験におけるTHC, CO, CO₂, NO_x及び空燃比測定は自動車排出ガス分析装置(堀場製作所製MEXA-8120 & 8120D)を使用した。

3. 結果及び考察

3.1 エンジンにおけるHC反応促進

ここでは、エンジン排出THC低減に対するエンジン燃焼制御法としてガス流動と当量比に着目した検討結果を示す。

単筒エンジン(Fig. 1)を用いた3種類のガス流動(スワール, タンブル及び流動無)条件におけるエンジン排出ガス温度とエンジン排出THC濃度(MEXA測定値)との関係を2つの当量比($\phi = 1.0$ 及び0.9)についてFig. 3に示す。エンジン排出ガス温度の制御は、点火時期をMinimum spark advance for best torque(以下, MBT)から図示平

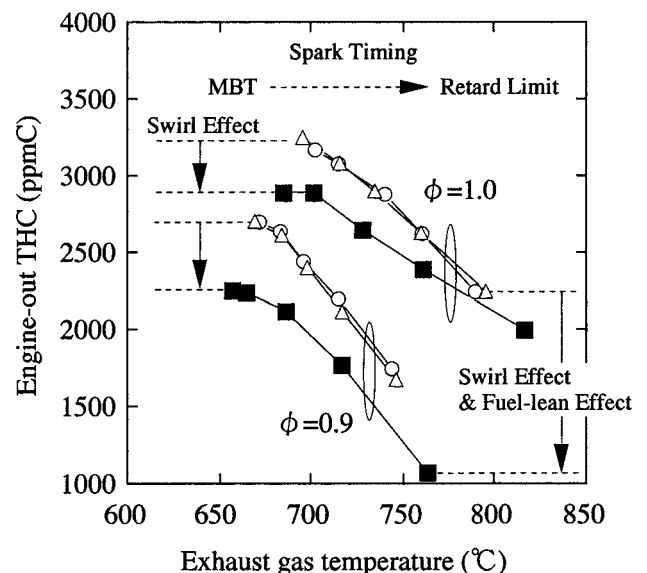


Fig. 3 Effect of intake flow motion on engine-out THC.

(○: None △: Tumble ■: Swirl)

均有効圧変動が5%となる点火遅角限界まで変化させることにより行った。

全体的な傾向としては、点火遅角によるエンジン排出ガス温度の上昇と共にエンジン排出THC濃度の低下が起こる。さらに、スワールを付与することにより、他のガス流動条件に比べ同じ排気温度であってもエンジン排出THC濃度の低下が見られる。この傾向は、Tomitaらの実験結果³⁾においても示されている。また、このスワール付与によるTHC濃度低減効果は、当量比(ϕ)が0.9の時の方が1.0に比べ顕著に現れている。

エンジン排出HC濃度レベルは、エンジン筒内及び排気ポート部での反応を経て決まる。このため、上記のスワール付与によるHC低減効果の原因解明のために、筒内及び排気ポート部におけるHC反応を分離した解析を行った。

筒内及び排気ポート部におけるHC反応解析は、Fig. 1に示した排気バルブ直後及び排気ポート出口でHC反応を凍結させてサンプリングしたガスのHC定量分析結果を基にして行った。

筒内HC反応解析は、各種ガス流動条件下で、点火時期及び当量比を変化させた時の排気バルブ直後のTHC(以下、Cylinder-out THC)濃度の測定により実施した。点火時期はMBTと点火遅角限界で実施し、当量比は1.0と0.9で実施した。

Fig. 4に指圧波形より算出した排気バルブ作動開始クランク角における筒内平均ガス温度とCylinder-out THC濃度との関係を示す。

点火時期がMBTでは、個々の当量比において3種類のガス流動条件における筒内既燃ガス温度はほぼ同じであるが、Cylinder-out THC濃度はスワールを付与することにより大幅な低下を示している。点火遅角限界では、スワールの付与によるCylinder-out THC濃度の低減効果はMBTでの結果と同様に現れているが、MBT条件と異なりスワールを付与すると他のガス流動条件に比べ筒内既燃ガス温度の上昇も引き起こす。

MBTにおけるスワールの付与によるCylinder-out THC濃度の低下は、燃焼終了後の膨張行程にまで残ったスワール流により、燃焼に寄与しなかった未燃HCと高温の既燃ガスとの混合が進み、HCの酸化反応を大幅に促進させたことによると

考えられる。点火遅角限界では、スワール流による筒内ガスの混合時間(燃焼終了から排気バルブ作動開始までの時間)がMBTに比べ短くなるため、混合によるHC低減効果は若干低下する傾向にあると考えられる。しかし、今回検討したスワールの乱れ強度が他のガス流動に比べ強い⁷⁾ため点火遅角限界の点火時期が遅くでき、これに伴う筒内既燃ガス温度の上昇による炭化水素酸化反応の促進効果が加わる。このため、点火遅角限界でのスワール付与によるHC低減効果はMBTの結果と同様に維持されることが考えられる。

タンブルの場合、タンブル流は圧縮行程から燃焼期間中に崩壊してしまうため混合促進によるHC低減効果は得られないと考えられる。しかし、点火遅角限界における筒内既燃ガス温度上昇によるHC低減効果のみはタンブル流の乱れ強度増加¹⁰⁾により引き起こすことが可能であると考えられる。

混合気の希薄化($\phi = 1.0 \rightarrow 0.9$)は、筒内既燃ガス温度を全体的に低下させるが、筒内に酸素が過

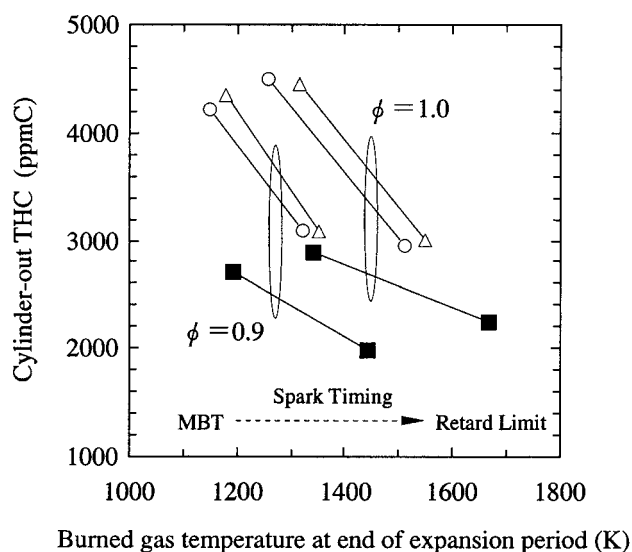


Fig. 4 Effect of intake flow motion on cylinder-out THC. (Cylinder-out THC were measured by using gas sampling probe placed right after exhaust valve.)
(○: None △: Tumble ■: Swirl)

剰に存在するため、低温域でのHCの酸化反応速度は上昇する。特にスワールによる混合促進過程では酸素とHCとの衝突確率が増加するためにHCの酸化反応は更に促進する。

排気ポート部におけるHC反応解析は、筒内で生成した反応中間生成物の存在によりHCの反応解析が複雑となるため、ここでは未燃燃料成分に着目した解析を行った。**Fig. 5**に排気バルブ直後のエンジン排出ガス温度と排気ポート部での未燃燃料成分の減少率との関係を示す。

未燃燃料成分濃度の減少率は、エンジン排出ガス温度の上昇と共に増加する。また、この減少率の温度依存性は、混合気の希薄化により低温側にシフトしている。これらのことより、混合気の希薄条件 ($\phi = 0.9$) における排気ポート部でのHCの酸化反応は、 $\phi = 1.0$ に比べ同等又はそれ以上の反応速度を示す。

排気ポート部におけるHCの酸化反応は、上記のことよりエンジン排出ガス温度と酸素濃度のみに強く影響される。

以上のことより、Fig. 3のスワール付与によるエンジン排出THC低減は、筒内におけるガスの混

合促進と遅角限界点火時期の遅延化に伴うガス温度の上昇により引き起こされたものであると考えられる。また、混合気の希薄化 ($\phi = 0.9$) は、HCの酸化反応速度の上昇に有効に寄与すると考えられる。

これらのことより、エンジン排出THC低減の手法として、スワールの付与と混合気の希薄化が有効であると考えられる。

3.2 触媒の低温活性向上

ここでは、触媒の早期活性化に対するエンジン燃焼制御法として当量比と点火時期の影響について検討した結果を示す。

触媒反応解析用列型エンジンシステム (Fig. 2) を用い、点火時期の異なる条件 (-33°ATDC & $+5^{\circ}\text{ATDC}$) での触媒の昇温過程における当量比とTHC浄化特性との関係を測定した。この結果から算出したHC 50%浄化到達時の平均触媒温度 T_{50} (触媒入りガス温度と出ガス温度の平均値) と当量比変化 ($\phi = 1.00 \sim 0.90$) による触媒入りガス酸素濃度との関係を**Fig. 6**に示す。

触媒入りガス酸素濃度が上昇すると T_{50} の低下

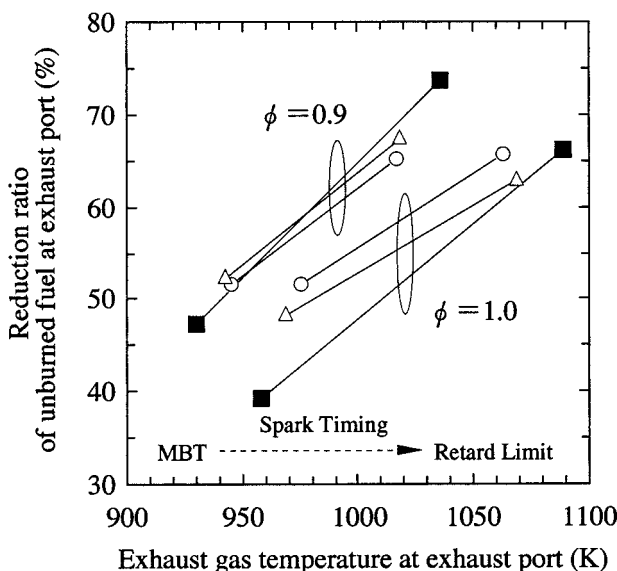


Fig. 5 Relationship between exhaust gas temperature and reduction ratio of unburned fuel.
(○: None △: Tumble ■: Swirl)

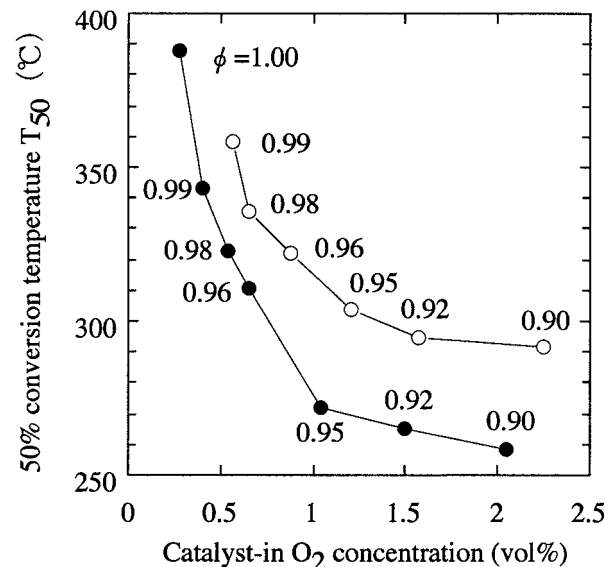


Fig. 6 Relationship between catalyst-in O_2 concentration and 50% conversion temperature (T_{50}).
(○: -33°ATDC ●: $+5^{\circ}\text{ATDC}$)

を引き起こすが、酸素濃度が1vol%以上 ($\phi \leq 0.95$) では T_{50} の低下傾向は飽和する。また、 T_{50} の低下は、点火時期を遅角させた条件 (+5°ATDC) において顕著である。

上記 T_{50} の変化特性は、以下のように考えられる。当量比の低下による酸素濃度の増加は、触媒の活性点におけるHCの活性化を促進させるが、HCの酸化反応促進に必要な酸素が活性点を覆い尽くすと、それ以上の酸素は触媒反応に寄与しなくなり、 T_{50} 低下傾向の飽和を示すと考えられる。また、点火時期の遅角は、エンジン排気中に占める反応性の高い低級オレフィン割合の増加を引き起こし⁶⁾、触媒における低温時のHC浄化効率向上に寄与し、 T_{50} をさらに低下させたと考えられる。

次に、当量比の変化が個別炭化水素の浄化特性に及ぼす影響を検討する。

Fig. 7 に $\phi = 0.99$ と0.90における平均触媒温度と10種類の個別炭化水素の浄化率との関係を示す。ここでは、点火時期-33°ATDCの結果のみを示す。(+5°ATDCの結果も同様な傾向)

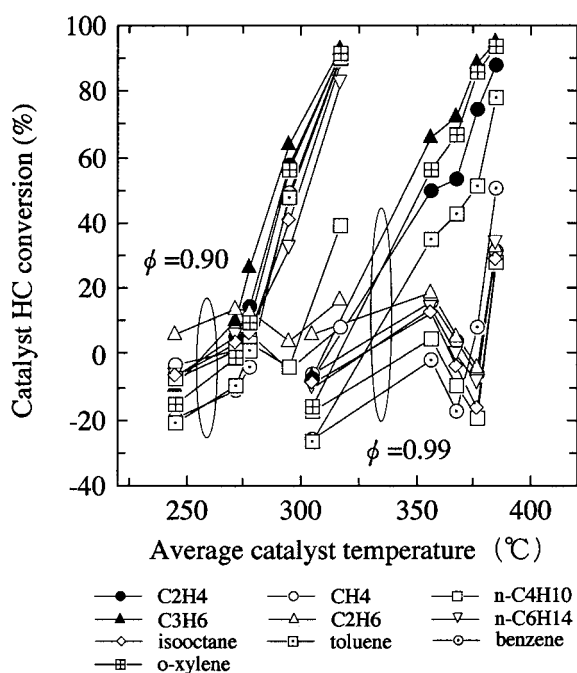


Fig. 7 Speciated hydrocarbon conversion profiles as a function of average catalyst temperature.

$\phi = 0.90$ でのHC浄化開始温度は、 $\phi = 0.99$ に比べ約50°C低下する。個々の炭化水素に着目すると、低級オレフィン及び側鎖を持った芳香族炭化水素の浄化率曲線は急激な立ち上がりを示す。また、 $\phi = 0.99$ では浄化率の非常に低い飽和炭化水素のうち炭素数の多いn-ヘキサンとイソオクタン及び芳香族炭化水素のベンゼンの浄化率も当量比の低下により大幅に向上している。

これらのことより、酸素過剰雰囲気 ($\phi = 0.90$) 下では一般的に反応性の低い炭化水素 (飽和炭化水素及びベンゼン) の浄化特性が大幅に改善され、低級オレフィンのような反応性の高い炭化水素についても低温域における浄化率の向上が図られている。これに対して、低級飽和炭化水素の浄化特性は当量比低下による酸素過剰雰囲気でも顕著な改善が見られない。しかし、当量比の低下によりエンジンから排出される低級飽和炭化水素量が大幅に減少する⁹⁾。したがって、低級飽和炭化水素の浄化率がTHC浄化率に及ぼす影響は非常に低くなると考えられる。

触媒の低温活性向上のためには触媒におけるHC反応の促進が必要であるが、このためのエンジン燃焼制御としては、混合気の希薄化による酸素濃度増加と点火時期の遅角制御による低級オレフィン割合の増加が有効である。酸素濃度増加による触媒におけるHC反応性向上の可能性は、Drakeらの実験結果⁴⁾でも示されている。

当量比制御に関しては、触媒におけるHC反応促進効果の飽和特性を考慮すると0.95～0.90に設定することが最適であると考えられる。

3.3 エンジン燃焼制御によるCold HC低減

3.1及び3.2において暖機過程における筒内及び触媒での未燃HCの反応促進に有効と考えられるエンジン制御条件を明確にした。ここでは、このエンジン制御条件(スワール付与& $\phi = 0.9$ 、以下、本制御)を列型エンジン・排気浄化システムに適用しCold HC低減能力を評価した。

実際のエンジン始動から暖機過程を模擬した低温始動実験⁸⁾は、**Table 1**に示したエンジン運転条件で実施し、本制御と比較のために従来制御(ガス流動無& $\phi = 1.0$)による検討も行った。

エンジン始動から約60秒間に排出される未燃

HC量の相対値（従来制御におけるエンジン排出THC量を1）をエンジン出口及び触媒（新品触媒及び耐久後触媒）出口において比較した結果をFig. 8に示す。

本制御を行うことにより、実際の低温始動を模擬した条件下でも筒内における未燃HCの酸化反応促進及び触媒の低温域におけるHC酸化反応の促進を引き起こし、エンジンー排気浄化システム

Table 1 Engine operating conditions for cold start experiment.

	Conventional control	Developed control
Gas flow motion	None	Swirl
Target equivalence ratio	1.0	0.9
Engine speed (rpm)	1400	1400
Injection timing (° ATDC)	+ 420 (End of fuel inj.)	+ 420 (End of fuel inj.)
Spark timing (° ATDC)	-16 (Retard limit)	-6 (Retard limit)
Intake pressure (kPa)	33.3	38.0
Water & oil temp.(°C)	20 (at engine start)	20 (at engine start)

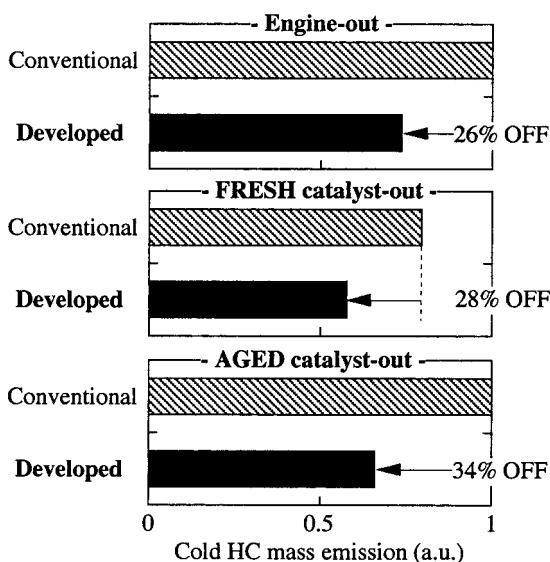


Fig. 8 Effect of engine control on cold hydrocarbon mass emissions.

全体を通したCold HC量は、従来制御に比べ約30%の低減を可能とした。

また、本制御は耐久後触媒に対しても触媒の低温域における活性向上能力の維持を可能とし、従来制御による新品触媒装着エンジンシステム以上のCold HC量の低減能力を示した。

4. まとめ

Cold HC低減のためのエンジン燃焼制御法を検討し、以下の結論を得た。

(1) エンジン排出THC低減のためのHC反応促進には、既燃ガスと未燃ガスとの混合促進、ガス温度の上昇及び混合気の希薄化が重要である。

(2) 混合促進には、膨張行程後半までガス流動が残るスワール流の付与が有効である。

(3) ガス温度の上昇には、点火時期の遅延化を可能とするガス流動による乱れ強度の増加が有効である。

(4) エンジン排出THC低減のためのガス流動としてスワールが最適である。

(5) 触媒の低温活性向上には、混合気の希薄化による触媒入りガス酸素濃度の増加が有効である。

(6) 触媒の低温活性向上のための最適當量比は、触媒におけるHC反応促進効果の飽和特性を考慮すると0.95～0.90の間である。

(7) スワールの付与と混合気の希薄化 ($\phi = 0.9$) の組み合わせは、エンジン及び触媒でのHC反応促進に非常に有効なエンジン燃焼制御法である。

以上の結論を基に、上記の制御を市販列型エンジンの始動・暖機過程に適用することにより、Cold HC排出量は従来制御（流動無+ $\phi = 1.0$ ）に比べ約30%低減することを明らかにした。

参考文献

- 1) 服部, ほか3名: 第13回内燃機関シンポジウム講演論文集, (1996), 109
- 2) Eade, D. et al.: SAE Tech. Pap. Ser. No.952417 (1995)
- 3) Tomita, M. et al.: SAE Tech. Pap. Ser. No.961952 (1996)
- 4) Drake, M. C. et al.: SAE Tech. Pap. Ser. No.962075 (1996)
- 5) Kubo, S. et al.: SAE Tech. Pap. Ser. No.932706 (1993)
- 6) 久保, ほか4名: 第13回内燃機関シンポジウム講演論文集, (1996), 151

- 7) 政所, ほか5名 : 第14回内燃機関シンポジウム講演論文集, (1997), 319
- 8) Ito, H. et al. : JSE Review, **18**-2(1997), 146
- 9) 久保, ほか4名 : 第14回内燃機関シンポジウム講演論文集, (1997), 325
- 10) Floch, A., et al. : SAE Tech. Pap. Ser. No.952457 (1995)

著者紹介



久保修一 Shuichi Kubo

生年：1963年。
 所属：反応制御研究室。
 分野：化学反応論によるエンジン燃焼およびエミッション解析。
 学会等：日本機械学会，自動車技術会，日本分光学会会員。



政所良行 Yoshiyuki Mandokoro

生年：1963年。
 所属：反応制御研究室。
 分野：内燃機関の燃焼およびエミッションに関する実験・解析。
 学会等：日本機械学会会員。



瀧昌弘 Masahiro Taki

生年：1952年。
 所属：動力システム研究室。
 分野：内燃機関の燃焼および排気。
 学会等：自動車技術会会員。
 1977年日本機械学会畠山賞受賞。
 1985年 SAE Arch T.Colwell Merit Award
 1986年自動車技術会論文賞受賞。
 1987年IR100選入賞。
 1993年愛知県知事感謝状。