

小型二輪車用エミッション低減システムの研究

Study of Emission Reduction System for Small Motorcycles

赤松 俊二* 石田 周一* 浜渦 朗*
Shunji AKAMATSU Shuichi ISHIDA Akira HAMAIZU

要 旨

世界各国で小型二輪車のエミッション規制が年々厳しくなっていることに対応して、空燃比を高い精度で制御するために、燃料噴射を用いた小型二輪車用エミッション低減システムを、排気量100cm³の4ストロークエンジンをベースに研究した。燃料噴射はスロットル開度とエンジン回転数と吸入負圧により使い分ける、2種類の噴射量マップにより制御している。この制御は単気筒エンジンの大きな吸入負圧変動の影響をなくすため、吸気バルブが開いているときのエンジン吸入負圧のピーク値を保持して、制御指標としている。また、排気ガス浄化のために、O₂フィードバック制御と三元触媒を使用した。さらに、燃費向上のために省電力の小型燃料ポンプを開発した。

さらに、キックスタータによる良好な始動性を得るための制御システムも開発した。これらの開発したシステムを採用することにより、欧州における二輪車エミッション規制“Directive 97/24/EC chapter 5”(EURO-1)によるTHC規制値の約1/30に減少し、ベースエンジンに対し燃費が約20%向上した。

ABSTRACT

Recently, the emission regulations for small motorcycles become severe in many countries every year. Therefore, to control air-fuel ratio by high accuracy, the emission decrease system for a small motorcycle, which used fuel injection, was researched based on four-stroke engine of displacement 100cm³. Fuel injection is controlled by two maps of injection amount used properly according to the openings of the throttle, the engine speeds, and intake pressure. In the control, the peak value of intake pressure during opening the inlet valve is maintained to lose the influence of big pressure changes of the single-cylinder engine, and it is used as the control index. Moreover, the O₂ feedback control and the three-way catalyst systems were used to purify exhaust emission, and a small fuel pump of power saving type was developed to improve fuel economy.

In addition, the control system to obtain an excellent startability by the kick-starter was also developed. By adopting these developed systems, hydrocarbon was decreased by about 1/30 of the regulation value provided in the motorcycle emission regulation “Directive 97/24/EC chapter 5” (EURO-1) in Europe, and the fuel economy has improved by approximately 20% compared to the base engine.

1. まえがき

近年、世界各国で小型二輪車のエミッション規制が年々厳しくなっている。例えば、100cm³クラス小型二輪車の主な市場であるタイでは、現在、エミッションの4次規制が発効しており、2003年からさらに厳しい5次規制が予定されている。主要地域の二輪車エミッション規制値をTable 1に示す。

従来、小型二輪車のエミッション低減の手法としては、キャブレタ、エアインジェクション、および、触媒を組み合わせたシステムが主に用いられてきた。

キャブレタで燃料を供給する場合、空燃比を高い精度で制御することに限界があり、近年、排ガス浄化性能の向上とドライバビリティの両立が困難になっている。

そこで、効果的な小型二輪車のエミッション低減を考え、排気量 100cm³ クラスの4ストロークエンジンにフューエルインジェクションを適用するための研究を行った。

本稿では、小型二輪車にフューエルインジェクションシステムと、排ガス後処理装置を適用した手法とその成果について述べる。

Table 1 Current emission limits for motorcycles

	CO (g/km)	THC (g/km)	NOx (g/km)
EURO-1 (4 stroke)	13	3	0.3
Japan (4 stroke)	13	2	0.3
Tailand Level 4	4.5	3 (combined)	

2. エミッション目標値

本研究では、THC の排出量削減を考え、THC 目標値を日本国内の乗用車2000年規制値と同じ値に設定した。この値は欧州における二輪車エミッション規制“Directive 97/24/EC chapter 5”(EURO-1)の THC 規制値の約 1/30 である。CO 及び NOx についても、上記規制値と同じ値に設定した。今回設定したエミッションの目標値を Table 2 に示す。

Table 2 Targets emission

	CO (g/km)	THC (g/km)	NOx (g/km)
Targets	0.67	0.08	0.08

3. 供試エンジンの概要

供試エンジンはホンダが全世界に数多く提供している100cm³クラスの4ストロークエンジンを使用した。その主要諸元を Table 3 に示す。

Table 3 Major specifications of test engine

Items	Specifications
Bore × Stroke (mm)	50.0 × 49.5
Displacement (cm ³)	97.2
Compression ratio	8.8
Valve system	OHC 2 Valve
Max. power (kW / r / min)	5.32/8 000
Max. torque (Nm / r / min)	7.23/6 000

4. フューエルインジェクション適用の課題

エミッション低減手法には、一般に下記のような方法が用いられている。

- (1) 燃料供給装置にはフューエルインジェクションを用い、空燃比を精密に制御する。
- (2) 排ガス中のO₂濃度を監視し、空燃比が理論空燃比になるようにフィードバック制御を行う。
- (3) 排気管内に三元触媒を設置し、酸化還元作用で排ガスを浄化する。
- (4) 排気ポートに二次空気を導入し、未燃焼ガスの浄化を促進させる。

小排気量・単気筒エンジンの小型二輪車にこれらの装置を適用するためには、微量な燃料の制御、軽量化、出力低下がないこと、さらに、低コストが要求される。

以下に解決すべき課題を示す。

- (1) エンジン吸入負圧の変動が大きい単気筒エンジンに適用できる燃料供給制御とする。
- (2) 出力を低下させない触媒の配置とする。

- (3) 燃費を悪化させる電気負荷を低減させるシステムとする。

- (4) キックスタータによる始動性を確保する。

5. エミッション低減システムの概要

採用したエミッション低減システムの構成図を Fig.1 に示す。フューエルインジェクションの ECU は 16bitCPU を用いた。ECUは燃料噴射量、噴射タイミング、点火時期の制御を行い、エンジンと触媒の間に取り付けられたO₂センサで排ガス中のO₂濃度を検出して、燃料噴射量を修正制御する。燃料供給は、燃料タンク内に省電力型の内接ギア式燃料ポンプを設置し、インジェクタに燃料を圧送する。燃料供給圧力は、燃費悪化につながる燃料ポンプの電気負荷を低減するために 250kPa に設定した。吸気系は、キャブレタ仕様と吸気管長を合わせエンジンのトルク特性を確保した上で吸気抵抗が低くなるように曲がり数を少なくし、インジェクタは、燃料噴霧がインレットバルブ裏の傘部中心をねらう位置に配置した。吸気系システムの配置を Fig.2 に示す。排ガス後処理系は、メタル担体の三元触媒をマフラ内に配置した。

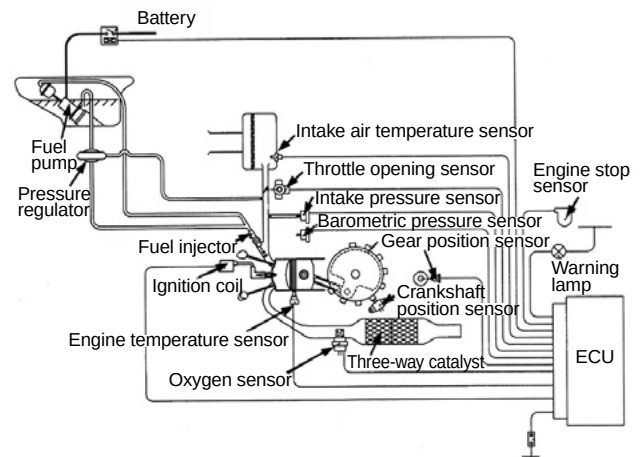


Fig.1 Emission reduction system

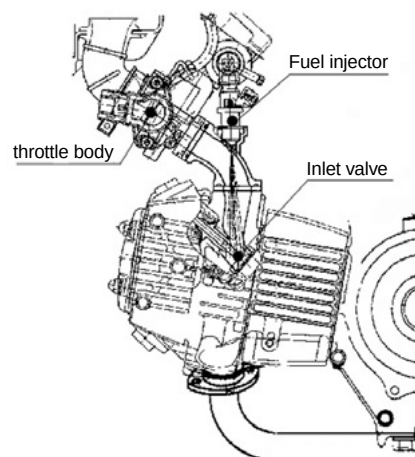


Fig.2 Air intake system

6. 燃料供給装置

6.1. フューエルインジェクション制御

フューエルインジェクションシステムは、2種類の噴射量マップを持ち、スロットル開度とエンジン回転数により使用するマップを切り替えて制御する方法とした。

(1)低負荷時には、スロットル開度の微少な変化をエンジン吸入負圧で検出し、エンジン吸入負圧とエンジン回転数により決定されるエンジン吸入負圧噴射量マップを使用する。

(2)高負荷時には、スロットル開度の変化を常時検出することができるスロットル開度とエンジン回転数により決定されるスロットル噴射量マップを使用する。

燃料噴射を制御するための指標としてエンジン吸入負圧を把握する必要があるが、単気筒エンジンの爆発間隔は 720° であり、燃料噴射量制御の元となる吸入負圧は変動が大きい。

Fig.3に示すように、エンジン吸入負圧値は爆発の間隔の間で値が変わる。そのため、エンジン吸入負圧センサ出力の読みとりのタイミングで値が変わり、燃料噴射量の制御には使えない。今回の開発システムでは、吸気バルブが開いているときのエンジン吸入負圧のピーク値を ECU 内で保持して燃料噴射量制御の指標とした。

また、従来のフューエルインジェクションでは、クランクシャフトの回転位置を決定するためクランクシャフトに 30° ごとにリラクタを設置している。そして、カムシャフトポジションセンサの信号との組み合わせで、クランクシャフトの回転位置と行程を判別していた。本システムでは、カムシャフトポジションセンサを廃止した。代わりにクランクシャフトに取り付けたリラクタの間隔を1か所のみ 120° にした部分を設け、その部分を検出することによってクランクシャフトの位置を決定する方式とした。行程は、吸入負圧が吸入行程と膨張行程により差があることを利用して判別した。

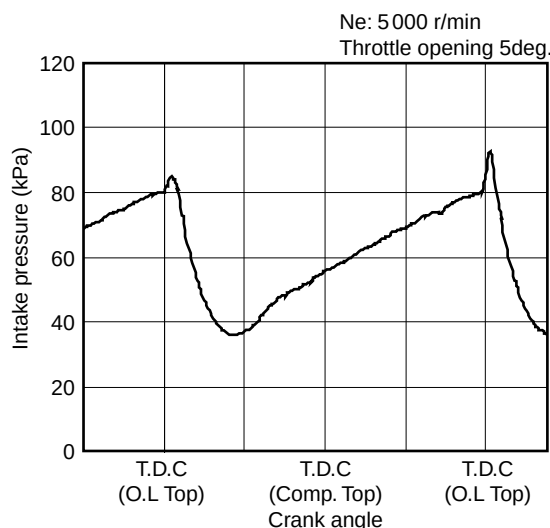


Fig.3 Change of engine intake pressure

6.2. フューエルインジェクタ

小排気量エンジンにフューエルインジェクションを適用するためには、微小燃料の計量に適した小流量のインジェクタを採用する必要がある。流量諸元を Table 4 に示す。

燃料粒径については、ピントルノズルタイプ、4孔プレートタイプ、エアアシストタイプの3種類のインジェクタを用いて、燃料粒径がエミッションに与える効果について検討した。

テストに使用したインジェクタのフォームとザウター平均粒径(S.M.D)を Fig.4 に示す。

Table 4 Fuel flow specifications of injectors

Items	Developed Injector	HONDA VFR800FI
Dynamic Injection quantity at 2 msec (mm ³ /stroke)	1.68	4.38
Static Injection quantity (cm ³ /min)	107.5	248.5

Pintle nozzle	4-hole plate	Air assist
		
SMD:125μm	SMD:95μm	SMD:40μm
Measurement conditions: Fuel pressure: 250kPa Assist air pressure: 26kPa S.M.D: Measured by LDSA		

Fig.4 Forms of injectors and Sauter's mean diameter

一般に、二輪車用エンジンは高回転型であるために吸気バルブが開いている時間が短い。そのため、噴射された燃料の一部は直接に燃焼室に入らずに暖まったインレットバルブ付近に滞留する。その滞留した燃料は熱で気化されて燃焼室に入る。そのため、暖機サイクルがある ECE40 モードのテストにおいては、インジェクタの違いによる微粒化のエミッション低減効果は認められなかった。そこで暖機サイクルがない LA-4 モードでエミッション比較テストをした。

その結果、ECE40 モードより LA-4 モードのほうがインジェクタ粒径の評価法に適していることが分かった。LA-4 モードでは、Fig.5に示すように燃料粒径をピントルノズルに対して、より微粒化することで CO と THC は減少したが、NOxは増加した。しかし、4孔プレートタイプとエアアシストとの比較では、エミッション値に大きな差はなかった。この結果から構造が簡単でコストが低い4孔プレート仕様を採用した。

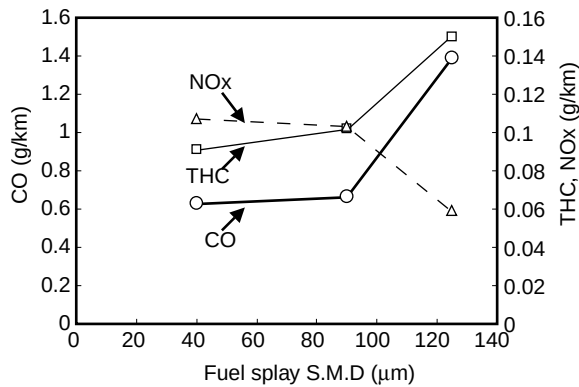


Fig.5 Emission results in LA-4 mode

6.3. O₂ フィードバックシステム

排気系に取り付けられた3元触媒の性能を効率よく利用するために、O₂センサを用いたフィードバックシステムを採用し、混合気の空燃比を理論空燃比に制御した。単気筒エンジンでは、燃料噴射のタイミングがクランク角度で720度に1回である。これにより、噴射制御の遅れと排気脈動の影響を受け、O₂センサの検出値が安定しないことが懸念された。O₂センサの出力と空燃比の関係はリニアではないので、人為的に燃料供給量を増減させて、空燃比をフィードバック制御しているが、従来の4気筒エンジン用に比べて、本システムでは、この周期を短くすることによって、有効にO₂フィードバック制御をすることができた。

7. 排気処理装置

7.1. 触媒の配置と早期活性化

三元触媒を早期に活性化させ浄化を促進させるため、触媒を排ガス温度の高い位置に配置する必要がある。しかし、その位置では排気抵抗が大きくなる。要求出力を確保するためには排気抵抗を小さくする必要がある。その相反する要求を満足できる触媒の配置を検討した。ECE40 エミッション測定モードにおける各部の排ガス温度を Fig.6 に示す。

ECE40 モードの場合は、測定サイクルの前に暖機サイクルが2サイクルあり、その間で触媒を完全に活性化させる必要がある。そのため、触媒の目標活性化温度はECE40 モードの1サイクル3山目で350°C以上になるように設定した。テ

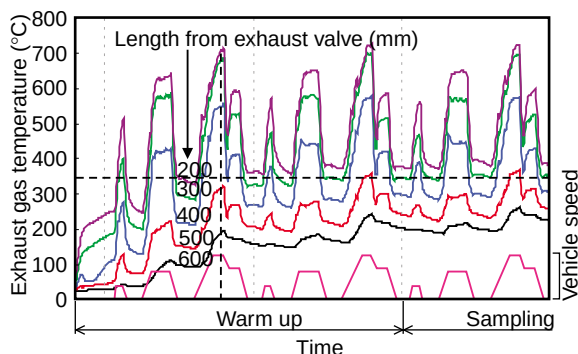


Fig.6 Exhaust gas temperature (ECE40 mode)

ストエンジンでは、排気バルブから480mm以内の位置に触媒を配置することで、その目標温度を達成した。触媒のセル数と容量については、排ガスボリュームと要求される浄化率でコンピュータシミュレーションを行い、セル数を300セル、容量を250cm³に決定した。触媒配置の方法は、Table 5 に示すように触媒の径違いで2つの案を検討した。

Table 5 Specification of Test catalyst

Items	Spec. A	Spec. B
Substrate material	20 Cr 5 Al	
Diameter (mm)	60	40
Length (mm)	90	90
Number of catalyst	1	2
Volume of catalyst (cm ³)	254	226
Substrate cell number (cpsi)	300	
Wall thickness (μm)	50	
Precious metal	Pt/Rh	

ECE40 モードでの THC エミッションおよび出力測定の結果を Fig.7, 8 に示す。

触媒の径は大きい方が、触媒前のチャンバ部で排気脈動が利用できることや排気抵抗が小さいなど出力を得るためには有利である。しかし、取り付け位置に自由度が少ないので触媒位置が排気システムにおいて後方となってしまう。そのため触媒温度が下がって浄化率が小径に比べ低下する。本システムでは、出力の低下が最小限にでき、かつ、触媒の活性化温度を維持することができる排気ポートから460mmの位置に触媒を取り付けたことにより、直径60mmの大径の触媒を採用した。

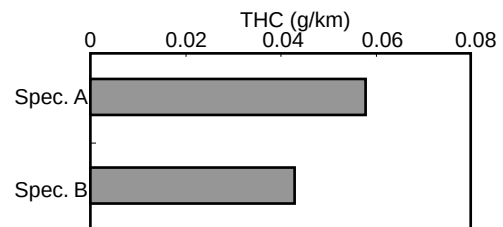


Fig.7 Result of THC emission by different catalyst

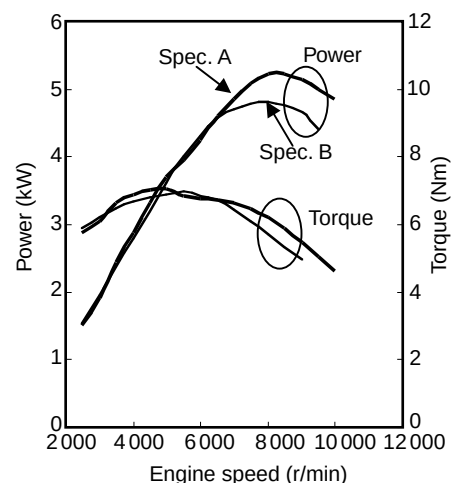


Fig.8 Engine performance of different catalyst

7.2. 二次空気導入システム

(エアインジェクションシステム)

排気ポートへの二次空気導入によるエミッション低減効果を検討した。エアインジェクションは、 O_2 フィードバックが作動していない冷機時とアイドリング時に作動させるように、ECUでソレノイドバルブにより制御した。触媒の早期活性の効果としては Fig.9 に示すように、ECE40 モード中の初期一山目の温度上昇に効果があり、触媒の活性時間を 19sec 短縮した。しかし、エミッション測定時の触媒温度には差がなかった。

なお、開発したエミッション低減システムには、エアインジェクション無しでエミッション目標値を達成したので、エアインジェクションは採用しなかった。

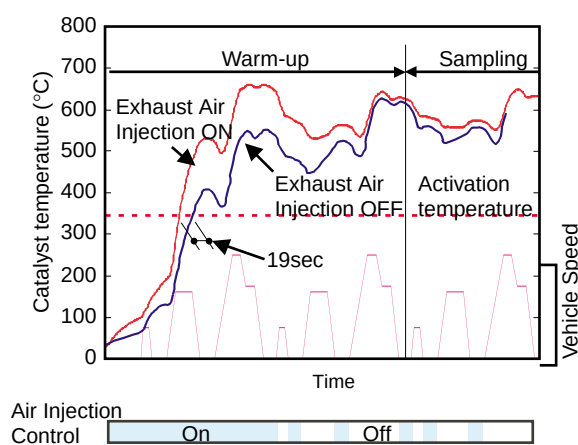


Fig.9 Catalyst temperature in ECE40 mode

8. 燃費向上手法

8.1. 点火時期の最適化

点火時期は、エミッション、燃費、ドライバビリティに対して影響が大きいので、スロットル開度とエンジン回転数による3次元マップを用いて、最適な点火時期とするように制御した。Fig.10 に点火時期の3次元マップを示す。ベースエンジン車に対して、パーシャル域における点火時期をスロットル開度に応じて最大 10° 進角させた。この進角の効果により、ECE40 モード燃費は5%向上した。

8.2. 燃料ポンプの低電流化

小型二輪車用の燃料ポンプは、その発電容量から省電力性能が求められる。このためにポンプ方式は、高効率な容積型を選定し、内接ギヤ方式を採用した。最初、乗用車用の内接ギヤポンプを使うことを検討したが、しゅう動面積が大きくしゅう動ロスが大きいため低電流化は難しかった。そこで駆動トルクを低減するために外径と板厚を縮小した内接ギヤを開発した。また、モータの回転子に細い銅線を多く

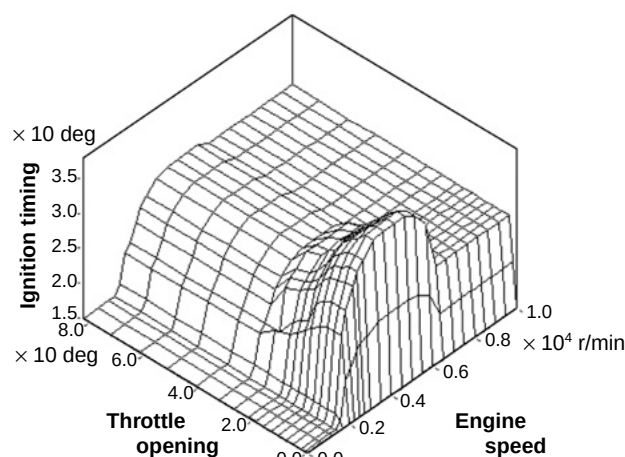


Fig.10 Ignition timing 3-D map

巻き、マグネットには磁束密度の高い高性能ものを採用した。これらにより、低電流化を達成し、省電力型の燃料ポンプができた。乗用車用ポンプと二輪車用に改良したポンプの特性を Fig.11 に示す。

本システムでは、Fig.12 に示すようにフューエルインジェクション化による空燃比の最適制御、減速時の燃料カットの採用などにより、ベース車に対しECE40モード燃費を20%向上させた。

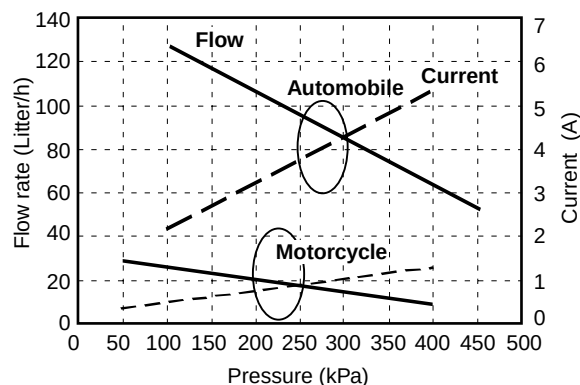


Fig.11 Features of developed pump for small motorcycles

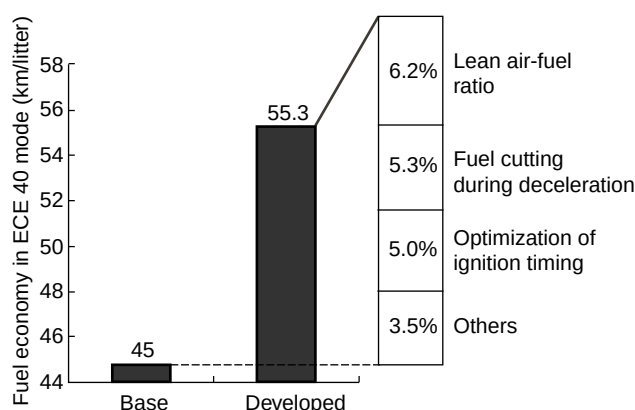


Fig.12 Fuel economy improvement

9. キック始動時の制御

小型二輪車では、キックスタータによるエンジンの始動性は重要である。キック始動の場合は1回のキックでクランクが5～6回転しかしない。また、フューエルインジェクションの制御には、クランクが回り始めてから燃料が噴射されるまでに、噴射時期の検出および演算時間として3回転程度を必要とする。

キック始動時の着火チャンスは無効な回転数を差し引いた1～2回しかなく、始動は失敗しやすくなる。これを改善するために、クランクが回り始めたことをクランクポジションセンサの信号で検出すると、信号のパルス数を監視してパルスを5回検出した時点で、燃料を噴射する始動時専用の制御を導入した。この制御方式により始動性はベース車と同等のクランク回転数で始動できるようになった。

10. 試験結果

フューエルインジェクションシステム、O₂フィードバックシステム、および点火時期制御システムを採用した排気量100cm³の単気筒4ストロークエンジンによるエミッション、燃料消費量および出力の試験結果を以下に示す。

- (1) ECE40モードエミッション目標値と試験結果を Table 6 に示す。
- (2) ECE40 モード燃費を Table 7 に示す。
燃費は、ベース二輪車の 45.0km/l から 55.3km/l まで約 20%向上した。
- (3) エンジン出力は、ベースエンジンの5.32kWから5.22kWに減少したが、Table 8に示すようにベース車と同等の最高速度と加速性能を確保できた。

Table 6 Test results of ECE40 mode emission

	CO (g/km)	THC (g/km)	NOx (g/km)
Result	0.44	0.058	0.023
Targets	0.67	0.08	0.08

Table 7 Test result of fuel economy by ECE40 mode

	Fuel economy (km/l)
Result	55.3
Base	45.0

Table 8 Test results of power performance

	Maximum speed (km/h)	0-200m Acceleration time (sec)
Result	87	13.95
Base	86	13.95

11. まとめ

小型二輪車のエミッション低減のために、100cm³単気筒4ストロークエンジンに適したフューエルインジェクションシステム、O₂フィードバックシステム、三元メタル触媒システム、点火時期制御システムを開発した。それらのシステムを採用することにより以下のことを実現した。

- (1) 三元触媒及びO₂フィードバックの採用により、エミッションを現行規制値(EURO-1)の1/30レベルを達成した。ECE40モードのエミッション値はCO: 0.44g/km, THC: 0.058g/km, NOx: 0.023g/km である。
- (2) 燃料消費は、フューエルインジェクション化による空燃比のリーン化、点火時期の最適化及び低電流燃料ポンプの採用でベース車に対し約 20%向上させた。
- (3) 三元触媒の取り付け位置とサイズを選定することにより、触媒の早期活性とエンジン出力の維持を両立させることができた。
- (4) カムシャフトポジションセンサを廃止しエンジン吸入負圧センサで代替することで、小型二輪車用の廉価なフューエルインジェクションシステムを開発した。

参考文献

- (1) Abe, M. et al, Exhaust emission reduction for the VFR800FI, International Motorcycle Conference (Ifz Conference), Germany, 1997

■ 著 者 ■



赤松 俊二



石田 周一



浜渦 朗