

電磁機構を用いた自在バルブタイミングシステムの研究

Study on Variable Valve Timing System Using Electromagnetic Mechanism

杉 本 千 早*
Chihaya SUGIMOTO

梅 本 篤*
Atsushi UMEMOTO

清 水 康 夫*
Yasuo SHIMIZU

要 旨

近年燃費向上技術としてポンピングロス低減できるノンスロットル化が注目されている。本研究はノンスロットル化を実現した電磁式自在バルブタイミング機構(以下電磁バルブ)搭載エンジンの燃費、全開性能、音振動性能に関するものである。

実機搭載を考慮した低電圧駆動方法による高効率な機構と安定かつ低着座速度を実現した定電圧バルブ開閉制御を開発し、その結果、従来のカム機構動弁系に対し、10.15モード燃費シミュレーションで7%の向上、バルブタイミングの最適化と掃気効果により低中回転域で約20%のトルク向上を達成した。また小型内蔵油圧タペットと2回過励磁定電圧制御、樹脂エンジンカバーの組合せによりアイドル時従来の動弁系と同等の騒音性能を得ることができた。

ABSTRACT

The elimination of the throttle has recently attracted attention as a means of improving fuel economy through the reduction of pumping loss. The research described in this paper concerned fuel economy, noise and vibration performance and wide-open throttle performance in an engine equipped with an electromagnetic variable valve timing mechanism to enable the throttle to be eliminated.

A high-efficiency mechanism equipped with a low voltage drive method from considerations of practical use and constant voltage opening and closing control that has realized short and stable valve contact speed were developed. In comparison with a conventional cam-driven valvetrain, this new valve mechanism has achieved a simulation-based improvement of 7% in fuel economy in the 10.15 mode and a roughly 20% increase in torque at low to mid engine speeds through optimization of valve timing and scavenging effectiveness. In addition, the combination of compact type-integrated hydraulic tappet, dual over-excitation constant voltage control and resin engine cover, has enabled the engine to record the same noise level when idling as an engine with a conventional valvetrain.

1. まえがき

4サイクルエンジンの燃費向上技術として、ノンスロットル化によるポンピングロス低減の試みが多くおこなわれている。その手法として吸気弁開閉時期の変動による吸入空気量調整方式⁽¹⁾⁻⁽⁶⁾やカムと吸気弁の間に介在する油圧をバルブリフト中に開放し、吸気弁閉弁時期を変更する油圧駆動弁方式⁽⁷⁾や中間レバーと偏心カムシャフトを用い、中間レバーの基部とローラフォロア間の作動カーブの接触部を変えることでバルブリフト量を変化させ、量産化したメカニカル方式等が挙げられる。しかし環境適合性や機構の複雑さからの部品点数増大の問題があった。そこでシンプルでバルブタイミング自由度が高い電磁バルブの機構と制御、エンジン性能について研究をおこなった。

2. 電磁バルブの基本原理と動作モード

Fig. 1 に示すように電磁バルブ作動の基本は、スプリングと運動系の自由振動でありフリクションと構造減衰分を

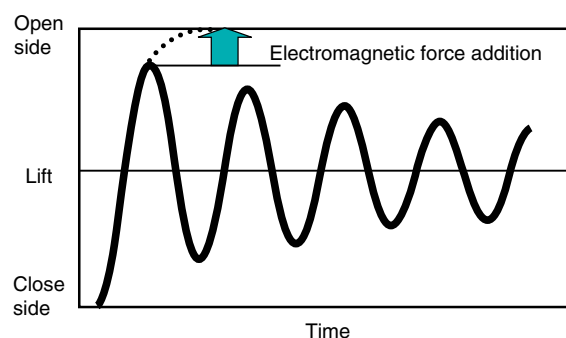


Fig. 1 Basic principle of electromagnetic valve

* 栃木研究所

電磁石で吸引し保持する原理である。従来のカムプロフィールと比較して Fig. 2 に示すように、バルブ挙動は電磁石への通電タイミングで制御し、回転数によらずリフト時間は一定である。そのためクランクアングルに対するプロフィールは、低中回転域では矩形波であり体積効率を向上させることができる。また、バルブタイミングは開閉共に完全自在化が可能で、吸排気脈動の利用やポンピングロス低減をねらいとしている。

動作モードを Fig. 3 に示す。バルブとアーマチュアは初期状態(図中央)では、上下のスプリング力のつりあいにより、バルブリフトの中間位置に静止している。運転指示が作動状態になると、上下コイルにある周期を持って交互に通電しアーマチュアを振動吸引させ全閉にする(図左)。その後は連続動作し(図右)、運転指示が停止状態になると全バルブは一斉に動作を終了し中立位置(図中央)に戻る。

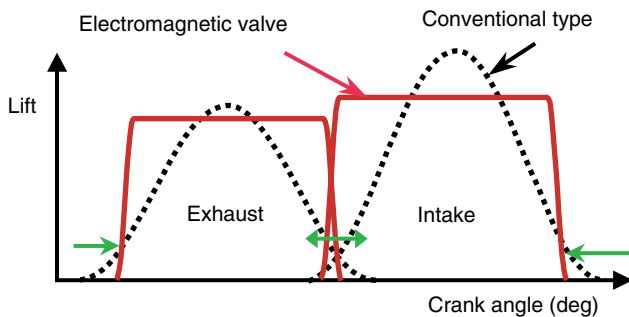


Fig. 2 Comparison of electromagnetic valve profile and conventional valvetrain profile

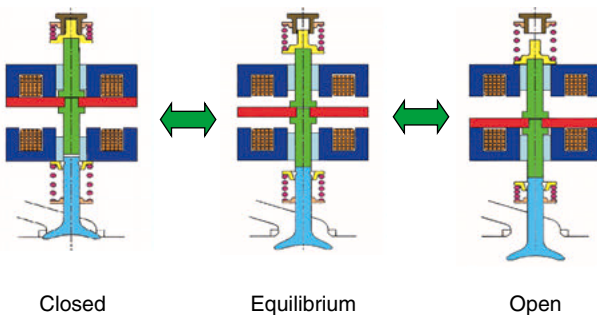


Fig. 3 Motion of electromagnetic valve

3. 構造とシステムの概要

研究に使用した電磁バルブの主要構造と諸元を Fig. 4 と Table 1 に、システムを Fig. 5 に示す。

構造は四角いアーマチュアディスクにシャフトが固定されその上下にスプリングを持ち、上部のシャフトの先端にはリフトセンサ、下部のシャフトとバルブの間にはバルブ緩衝機構用の小型油圧タペットを内蔵している。各部の摩耗や熱膨張を考慮し、全閉側では先にバルブが着座しその後アーマチュアが吸引される分離機構を持っている。これは従来のカム機構動弁系というタペットクリアランスに相

Table 1 Valvetrain specifications

Valve diameter (IN/EX) (mm)	30/24
Valve lift (IN/EX) (mm)	7/6
IN maximum spring force (N)	480
EX maximum spring force (N)	550

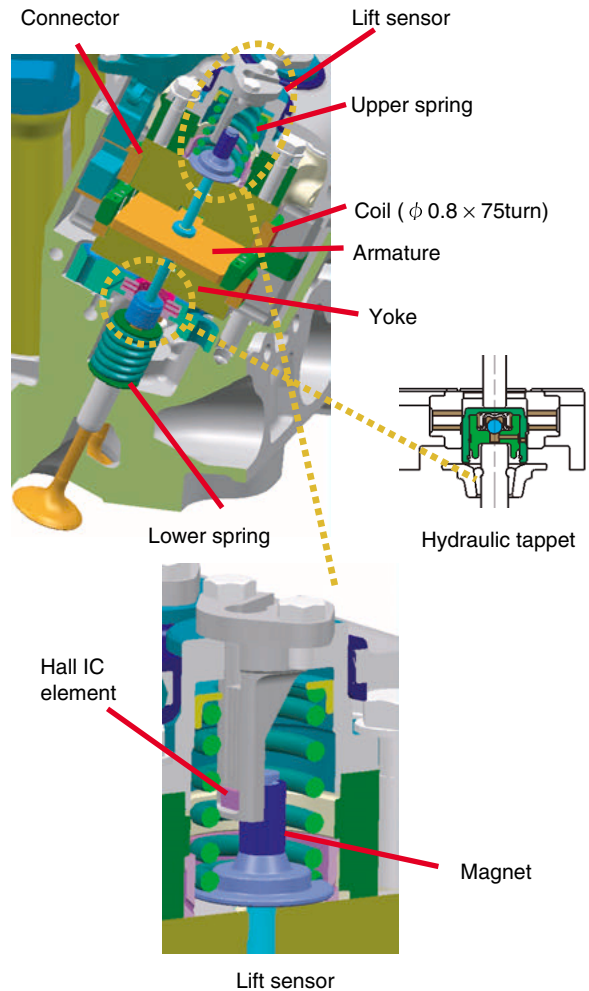


Fig. 4 Structure and hydraulic tappet and lift sensor

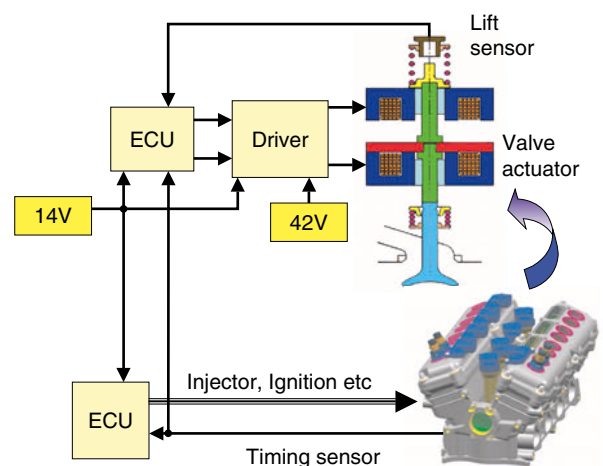


Fig. 5 Electromagnetic valve management system

当する。また筒内圧の影響を抑えるため、インテーク側よりエキゾースト側のスプリング荷重を上げている。ヨークは渦電流損失低減とコスト削減をねらいとした珪素鋼板の積層構造で、その中に樹脂ボビン付きコイルが巻かれている。電磁バルブのシステムはタイミングセンサのみを共有し、ECU、Driver は専用のものであり既存の ECU に追加している。また各バルブは実機搭載を考慮し 42V の低電圧で駆動され、リフトセンサの信号により個別に制御させている。

4. シミュレーションによる高効率化の検討

バルブタイミングの完全自在化により吸入空気量をコントロールし、ノンスロットル化を実現させ燃費向上をはかるにあたり、消費電力性能は燃費に大きく影響を及ぼす。一般的に消費電力を低減する手法として磁路面積増大による吸引力向上、漏れ磁束の低減、材料特性の向上、積層化による渦電流損失低減、コイル冷却等が挙げられる。

今回用いた珪素鋼の B(磁束密度)–H(磁界)特性を Fig. 6 に示す。高磁界領域では磁束密度が飽和しているのがわかる。これをもとに静磁場シミュレーションにて吸引力を、電気・機械連成シミュレーションにおいては電圧を印加し電流が流れ、磁束が発生しアーマチュアが吸引されるという実挙動メカニズムと吸引時の急激な磁束変化により発生する渦電流損失を解析し、いくつかのパターンを計算することで低消費電力な積層構造と駆動方法を見出した。

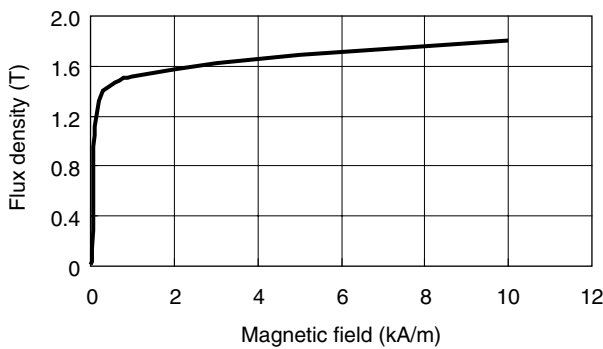


Fig. 6 Magnetic flux and magnetic field characteristics

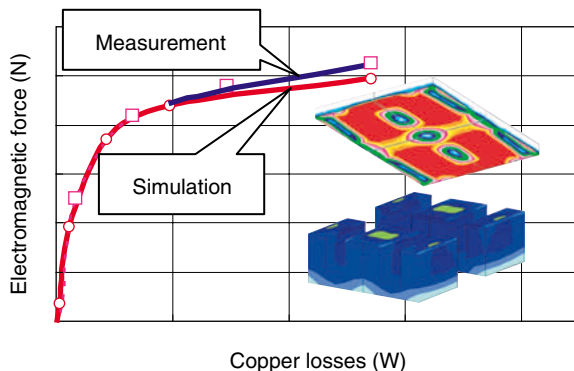


Fig. 7 Static magnetic field simulation

微小距離時の吸引力シミュレーションと実測の比較を Fig. 7 に示す。飽和領域で差はあるが良い精度を得ている。

電気・機械連成シミュレーションの変圧器モデルと結果を Fig. 8 に示す。式(1), (3), (4)は左側, 式(2)は右側回路を表し, 自己, 相互インダクタンスともに時間の関数となる。これはB-H特性が非線形であり透磁率が変化すること, アーマチュアの変位にともなって磁気抵抗が変化することによる。したがって電流 I_1 に伴う誘導起電力の発生に対し, L_1 と $\frac{dI_1}{dt}$ の積だけでなく I_1 と $\frac{dL_1}{dt}$ の積も寄与する。リフト中は電流が立ち上がっても吸引力は直ぐに立ち上がらず, 微小距離になると急激な特性を示す。また, 渦電流損失においては急激な磁束の変化時に発生し, アーマチュアが保持されている時は発生しないことがわかる。

$$V_1 = R_1 I_1 + L_1 \frac{dI_1}{dt} + \frac{dL_1}{dt} I_1 + M \frac{dI_2}{dt} + \frac{dM}{dt} I_2 \quad (1)$$

$$0 = R_2 I_2 + L_2 \frac{dI_2}{dt} + \frac{dL_2}{dt} I_2 + M \frac{dI_1}{dt} + \frac{dM}{dt} I_1 \quad (2)$$

$$L_1 = \frac{N_1^2 A}{\frac{1}{\mu} + \frac{2x}{\mu_0}} \quad (3)$$

$$\frac{dL_1}{dt} = -\frac{N_1^2 A}{\left\{ \frac{1}{\mu} - \frac{2x}{\mu_0} \right\}^2} \left\{ \frac{1}{\mu_0} \times \frac{d\mu}{dB} \times \frac{dB}{dt} + \frac{2}{\mu_0} \times \frac{dx}{dt} \right\} \quad (4)$$

上式の M は相互インダクタンス, μ は磁性体の透磁率, μ_0 は空気中の透磁率, l は有効磁路長さ, A は有効磁路断面積, N はコイル巻き数, x はアーマチュアリフトを表す。

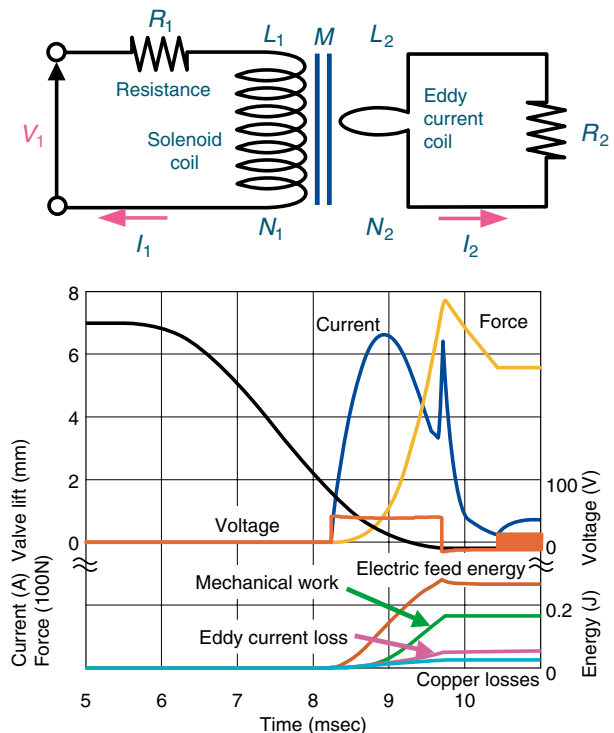


Fig. 8 Electric/mechanical compound simulation

5. 消費電力性能

このようなシミュレーション結果をもとに高効率な積層構造の電磁バルブを搭載した4気筒エンジンを作成し、実機エンジンにてコイル端子間の消費電力を測定した結果を Fig. 9 に示す。1500rpmIN・EX 片バルブ休止駆動で約150W 16バルブ駆動でスリッパタイプ動弁系と同等の約300Wの性能を達成した。

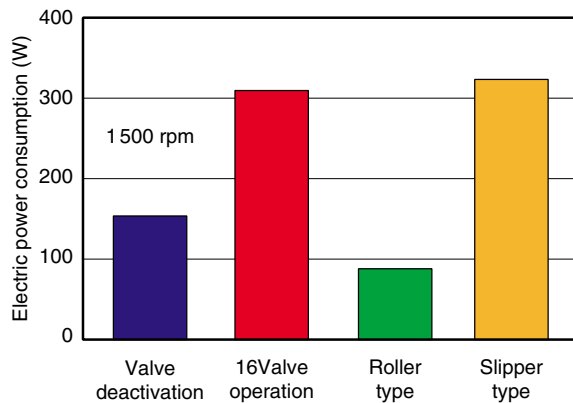


Fig. 9 Comparison of electric power consumption

6. 制御システム

制御の基本原則を Fig. 10 に示す。バルブリフト中は定電圧制御、保持時は定電流制御をおこなっている。一般的に知られている定電流制御はバルブリフト中フリクション等の外乱を受けると自由振動の到達距離が小さくなり、アクチュエータのインダクタンスの変化が鈍く電流が流れやすくなるが、電流一定のため電圧が縮小し吸引力を減少しようとする方向に働く。それに対し本制御は電圧一定のため、電流が成長し吸引力を増大する方向に働くことにより安定した挙動を得ることができる。定電圧制御の手法は各バルブの実変位をリフトセンサで検出し目標値と比較して通電

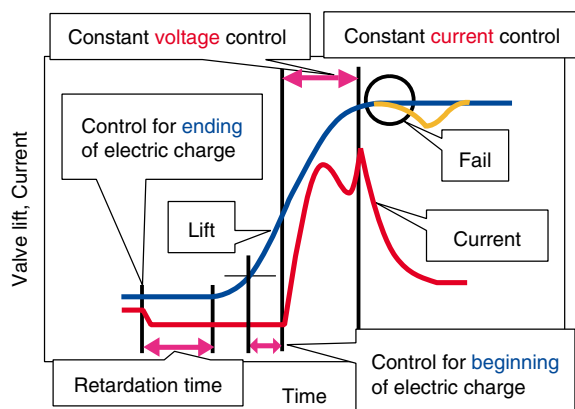


Fig. 10 Control principle

タイミングを制御する方法である。通電開始制御とは、バルブの安定動作と着座速度低減の両立をねらいとし通電開始タイミングで着座速度が決定させることからバルブの移動時間を計測して、目標値と比較し次サイクルの通電開始タイミングを求める方法である。

通電終了制御とは、通電終了タイミングでバルブタイミングが決定させることから残留磁束の影響による遅延時間のバラツキを補正し、通電終了から1 mm リフトまでの時間を計測して次サイクルの遅延時間を補正する方法である。さらに着座判定検知システムを持ちフェイルが発生しバルブが中立位置状態に至った時、エンジン性能への影響が大きいためフェイル発生タイミングにより閉弁側または開弁側へ吸引する。

7. 騒音振動性能

従来の動弁系機構は、バルブ着座時の衝撃音と耐久性を考慮し緩衝曲線が存在する。しかし電磁バルブは緩衝曲線がなく微小距離になるほど急激な吸引力特性になることからバルブ、アーマチュア着座時の衝撃音が課題である。

機械騒音に対する動弁系騒音寄与率は、アイドル時が最も高いため、簡易無響室においてヘッド単体アイドル時の上方近接音評価をおこなった結果を Fig. 11 に示す。電磁バルブは従来のカム機構動弁系に対し音圧レベルで(以下 SPL: Sound pressure level)約 19dB の悪化であった。

これに対し Fig. 12 と Fig. 13 に示すように定電圧過励磁制御を2回過励磁制御にすることにより着座近傍の急激な吸引力特性を抑制しアーマチュアの着座速度を0.45から0.1m/secまで低減させ、その結果ヨークへの衝撃加速度も1/4以下に低減した。さらに Fig. 14 と Fig. 15 に示す小型内蔵油圧タペットとの組合せにより15dBの低減効果と樹脂のエンジンカバーとアイドル回転数低下により従来のカム機構動弁系と同等の騒音性能を得ることができた。

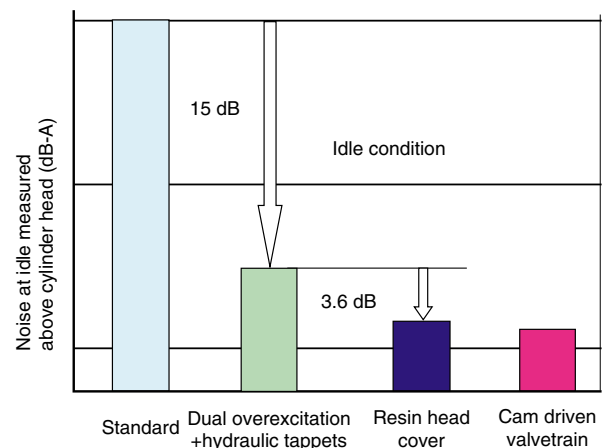


Fig. 11 Controlling methods, structural difference and effects

8. 実機性能

実機性能試験に用いたエンジン諸元を Table 2 に、実機燃費性能結果を Fig. 16 に示す。自在バルブタイミング化により nonslot 運転が可能となり、インテークバルブクローズタイミングの遅閉じ化により、従来のカム機構動弁系に対し消費電力込みで 10% の BSFC 向上効果を確認した。その時の PV 線図を Fig. 17 に示す。遅閉じ効果によりポンピングロスが低減していることがわかる。(軸出力 2.9kW at 1500rpm, 片バルブ休止運転)

さらに 10.15モード燃費シミュレーション解析をおこなった結果、7% の燃費向上効果が得られた。

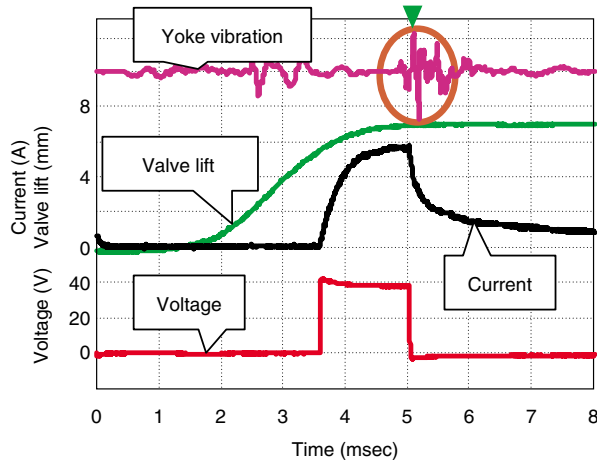


Fig. 12 Overexcitation control under constant voltage condition

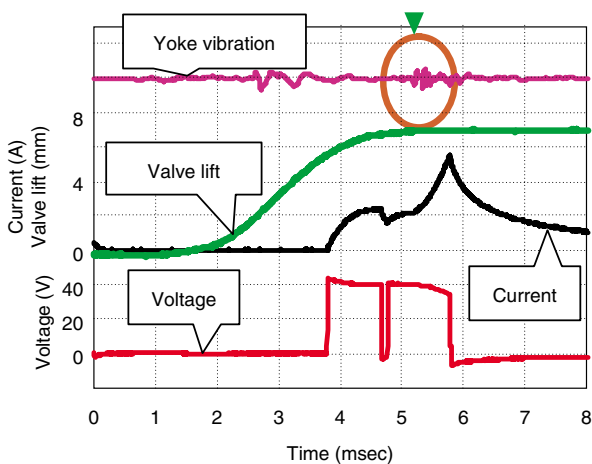


Fig. 13 Dual overexcitation control under constant voltage condition

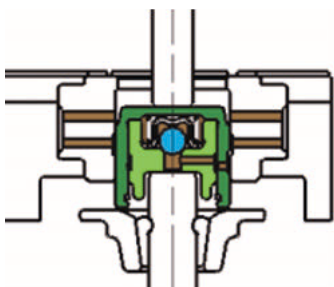


Fig. 14 Hydraulic tappet

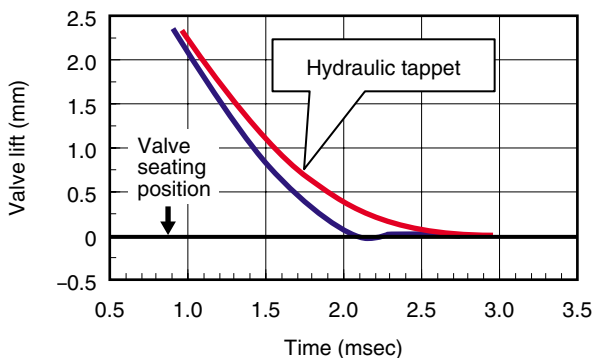


Fig. 15 Hydraulic tappet effect

Table 2 Test engine specifications

Bore × stroke (mm)	75 × 90
Displacement (cm ³)	1 590
Bore spacing (mm)	84
Valve lift (IN/EX) (mm)	7/6
Valve train type	Electromagnetic valve train

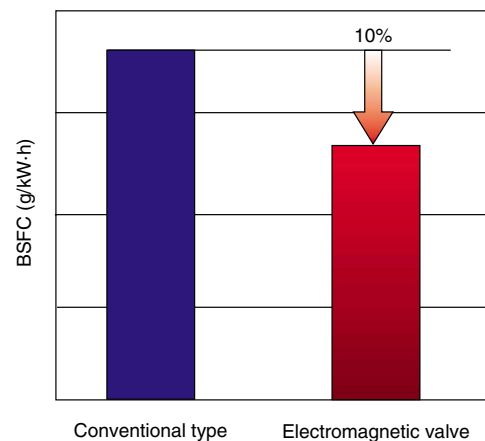


Fig. 16 Comparison of fuel consumption values

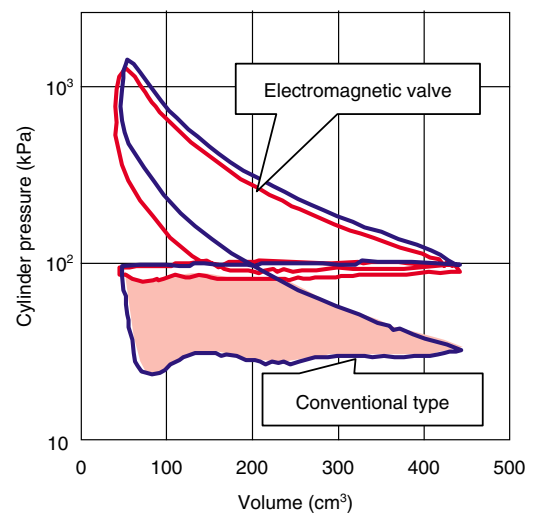


Fig. 17 Pumping loss reduction

実機全開性能結果を Fig. 18 に示す。インテークバルブのクローズタイミングを下死点にすることで実行行程容積を増加させ、さらに吸排脈動を利用した掃気による体積効率向上により低中回転域で約 20%のトルク向上を達成した。

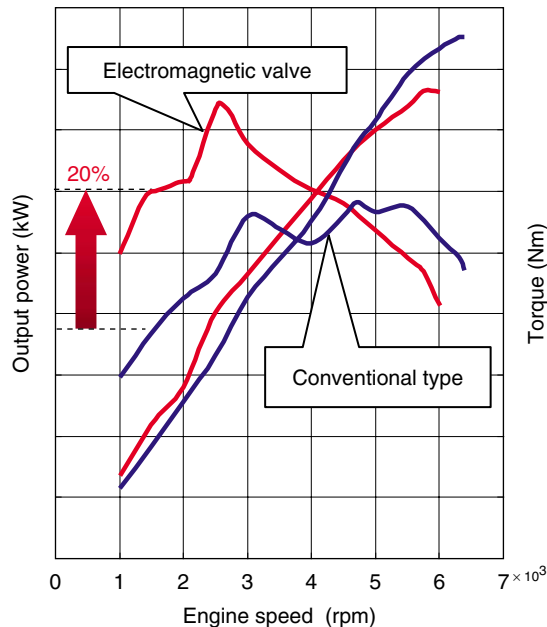


Fig. 18 Wide-open throttle performance

参考文献

- (1) Tuttle, J.: Controlling Engine Load by Means of Late Intake Valve Closing, SAE Paper 800794
- (2) Tuttle, J.: Controlling Engine Load by Means of Early Intake Valve Closing, SAE Paper 820408
- (3) Gray, C.: A Review of variable engine valve timing, SAE Paper 880386
- (4) Nuccio, P.: Variable Valve Timing as a Means to Control Engine Load, FISITA 82071
- (5) Lenz, H.: Initial test result of an electro-hydraulic variable-valve actuation system of a firing test, SAE Paper 890678
- (6) Suzuki, J.: Study of improving Fuel Economy by Early Intake Valve Closing Concept, Transaction of the SAE of JAPAN, No.24(1982)
- (7) Urata, Y.: A Study of Vehicle Equipped with Non-Throttling S.I. Engine with Early Intake Valve Closing Mechanism, SAE Paper 930820

9. まとめ

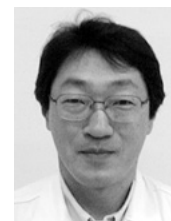
実用性のある低電圧(42V)駆動方式を用いて高効率な電磁バルブ機構を開発し、以下の結果が得られた。

- (1) 電磁バルブを用いてノンスロットル化することにより、従来の動弁系に対し BSFC で 10% (軸出力 2.9kW at 1500rpm) 10.15モード燃費シミュレーションで 7% の向上効果を確認した。
- (2) 最適なバルブタイミングと掃気効果を利用し、低中回転域で約 20%のトルク向上を得た。
- (3) 通電開始と終了制御の組合せにより安定したバルブ挙動と低着座速度を達成した。
- (4) 小型内蔵油圧タペットと2回過励磁定電圧制御、樹脂エンジンカバーの採用により、アイドル時カム機構動弁系と同等の騒音性能を達成した。
- (5) 静磁場と変圧器モデルの電気機械連成シミュレーションを組合せることにより、実動時の渦電流損失や銅損、機械仕事、投入エネルギーなどのメカニズムを解析した。

■ 著 者 ■



杉本 千早



梅本 篤



清水 康夫