

特集 電動式連続バルブタイミング可変機構の開発*

Development of a Variable Valve Timing System Controlled by an Electric Motor

竹中昭彦 漆畑晴行 森野精二 服部正敬
 Akihiko TAKENAKA Haruyuki URUSHIHATA Seiji MORINO Masayoshi HATTORI
 井上高志 益城善一郎
 Takashi INOUE Zenichiro MASHIKI

A system with “Variable Valve Timing –intelligent by Electric motor (VVT-iE)” has been newly developed to realize requirements for lower fuel consumption and lower exhaust gas emission, as well as higher performance. The system has initially been adopted for the intake valve train of Toyota’s new 4.6 and 5.0 liter V8 SI engine. The VVT-iE is composed of a cam phasing mechanism connected to the intake camshaft and a brushless motor integrated with an intelligent driver unit. The developed motor-actuated system is completely free from operating limitations by conventional hydraulic VVT. This new system leads to advantages in reducing cold HC and also achieves further reductions in fuel consumption.

Key words: Variable Valve Timing, Fuel consumption, Emissions, Electric motor

1. はじめに

地球温暖化や大気汚染防止への取り組みの一環として、より一層のCO₂、および汚染物質の排出量の低減が自動車に求められている。一方で、本来の魅力である「走る」「曲がる」「止まる」の基本性能向上も車には同時に求められている。これらを実現するため、エンジンには燃費低減、排気ガスのクリーン化と性能の向上の高度な両立が必要である。このような要求に応えるために動弁系の果たす役割は大きく、従来から数々の改良が進められてきた。今回、油圧駆動による連続バルブタイミング可変機構に替わり、燃費・排ガスの低減、出力向上の両立を目的に電気モータ駆動による連続バルブタイミング可変機構（Variable Valve Timing –intelligent by Electric Motor 以下：VVT-iE）を開発しLS460, LS600h に搭載されたので紹介する。

2. 開発のねらい

現在、量産化されている可変動弁系機構をまとめると Table 1 のようになる。大きく分けてバルブリフトを可変するものと位相を可変するものがある。リフト可変はカムプロフィール切り替え型と連続可変型があり、実用化されて久しい¹⁾³⁾。一方、位相可変は、現在ほとんどが連続可変式の油圧駆動方式である。この油圧駆動方式を電気駆動方式とすることで、エンジンの運転条件の影響を受けずにカム位相を制御できることに着目し、燃費、低温エミッション改善、ハイブリッド車（以

Table 1 Assessment of variable valve control systems

Type		Description	Power	Fuel economy	Cold emissions	Commercial value for HV
			○	○	△	×
Cam phase	Cam phasing (Hydraulic) ⁽⁴⁾ (Brake type) ⁽⁵⁾		○	○	△	×
	Cam phasing (Electric)		○	◎	◎	◎
Valve lift	Cam profile ⁽¹⁾ switching I (Hydraulic)		◎	△	△	×
	Cam profile ⁽²⁾ switching II (Hydraulic)		○	◎	△	×
	Lost motion ⁽³⁾ (Electric)		◎	◎	△	×

下, HV) の商品性向上に貢献ができると考え、開発に着手した。即ち、燃費改善には吸気カムの閉弁位相を遅らせアトキンソンサイクル効果を利用する。低温エミッションの改善については始動直後から位相を進角させ燃料の霧化促進を図る。HVの商品性向上については、スムーズな始動・停止をねらったデコンプレッションと、極低温での始動性の両立を図るために、クランク中に進角させることをねらう。以上を実現するために、VVT-iEの開発目標を以下においた。

- (1) エンジン停止後も最遅角と最進角の中間で位相を保持でき、その位置で始動できること。
- (2) 極低温時あるいは低油圧時から作動できること。
- (3) 極低温時でもエンジンクランク中より作動できること。

* (社)自動車技術会の了解を得て、「2007年春季大会学術講演会前刷集」No. 82-07, 386-20075263 より、一部加筆して転載

3. VVT-iE のシステム構成

3.1 システム構成

今回開発した VVT-iE のシステム構成を Fig. 1 に示す。VVT-iE は、吸気カムシャフトに取り付けられた「位相変換部」とエンジンチェーンケースに搭載したブラシレス式「モータ」およびモータと一体化された「駆動回路（以下、EDU）」により構成される。EDU はエンジン ECU からの指令によりモータを駆動する。位相変換部の役割はモータ回転の入力をカム位相の進角、遅角に変換することである。

作動原理を Fig. 2 を用いて説明する。モータ回転速度をカムシャフト回転速度よりも速く回転させることでカム位相が進角される。目標位相到達後はモータ回転速度とカム回転速度を同一に戻すことで位相が保持される。モータ速度を減速するとカムが遅角される。このとき、進角（遅角）速度はモータ増速（減速）速度に比例する。

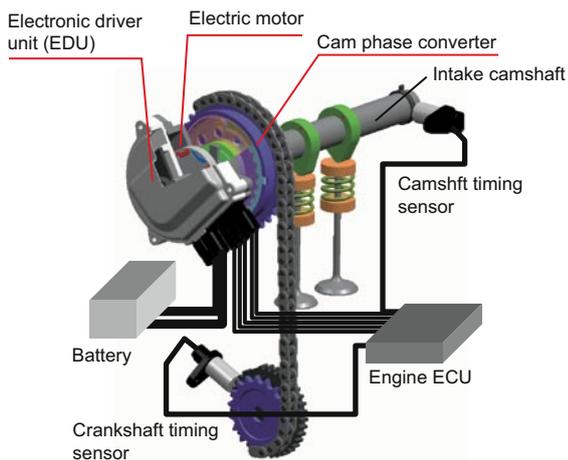


Fig. 1 VVT-iE system

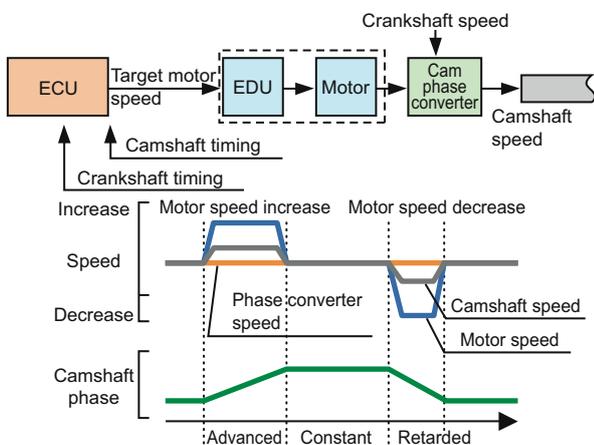


Fig. 2 VVT-iE control concept

3.2 位相変換部

前述の通り、位相変換部はモータ回転数に応じてカム位相を進角・遅角させる役割を持つ。変換部の構造を Fig. 3 に示す。変換部には

- (1) 最適な減速比を設定することで、できるだけ小型のモータを用いて位相を進角、遅角できること。
- (2) エンジン停止時にカムトルクに打ち勝って位相を保持できること。

が要求される。この要求を満たすために変換部を「減速機構部」と「リンク機構部」とで構成した。それぞれの特徴を以下に示す。

- (1) 減速機構部: コンパクトで同軸に配置可能なサイクロイド減速機を採用した。減速比は、モータの小型化とカム位相速度応答性の最適バランスから 100 倍程度とした。
- (2) リンク機構部: モータからはカムシャフトを回しやすく（正効率が低い）、カムシャフト側からは回されにくく（逆効率が低い）なるよう、リンク部分と渦巻き溝プレート（確動カム）を採用した。この部位のリード角を適正な範囲に選ぶことで作動中のモータ要求トルクを最小とし、エンジン停止中にカムトルクに打ち勝って位相を保持できるようにした。（Figs. 4&5）

3.3 モータと EDU 部

モータおよび EDU の役割は EDU からの指令値（カム位相目標値）に応じて変換部を駆動させることである。Fig. 6 に概観・概要を示す。モータの選定にあたっては正転、逆転で繰り返し運転されるため高い耐久性が求められること、および、高効率で高回転に適する必

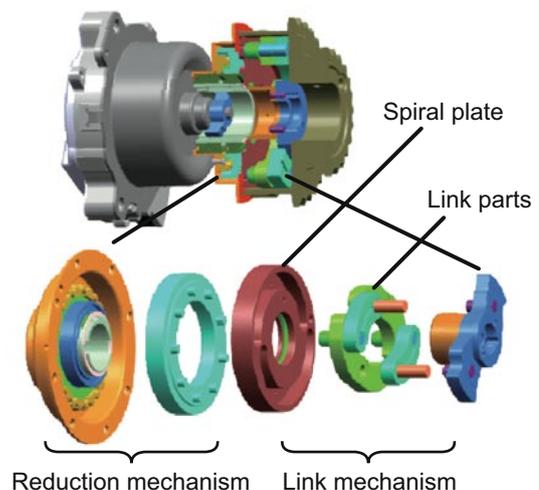


Fig. 3 Cam phase converter structure

要があることから IPM (Interior Permanent Magnetic) モータを採用した. EDU 回路部分に関してはモータと一体化し部品点数の削減を図った. EDU に組み込む機能としては, EDU からの回転速度指示をモータの駆動に変換する速度フィードバック (F/B) 機能と EDU およびモータの状態を検知するダイアグ機能とした. 今回採用した速度 F/B 制御は ECU からはモータ回転数指令のみを EDU に送り, ECU 指令値に対するモータ回転数の F/B 制御を EDU 内で行うものである. ECU からは進角・遅角速度を直接指示することができるため制御開発工数の低減が図れる.

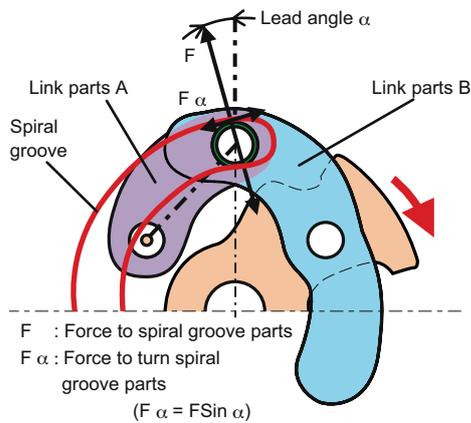


Fig. 4 Lead angle

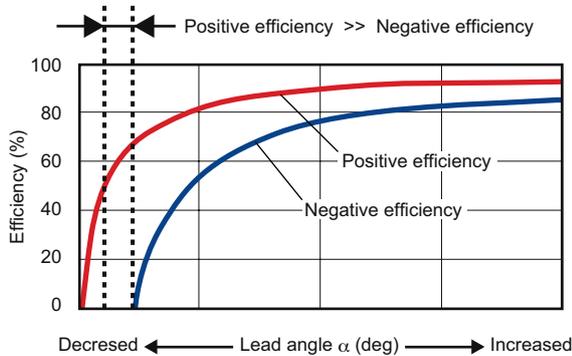


Fig. 5 Transmission efficiency

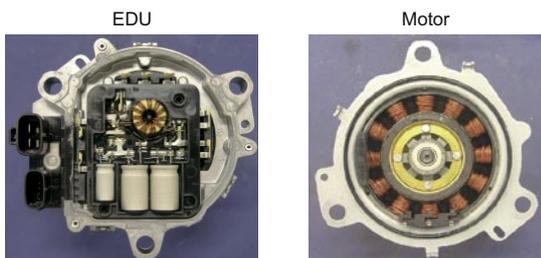


Fig. 6 EDU and motor

4. カム位相速度の比較

Figs. 7&8 に従来の油圧駆動式 VVT と今回開発した VVT-iE それぞれの ECU 指令値とカム位相速度の関係を示す. 従来の油圧駆動式の場合は, エンジン回転数や油温の影響を大きく受ける. 一方, VVT-iE の場合は ECU の指令値に対しカム位相速度がほぼ一定となることが分かる. これはエンジンの諸条件に対し制御のロバスト性が高いことを示している. 以上のように, VVT-iE の場合は外乱に左右されず常に一定速度の応答性を得ることが確認できる.

5. VVT-iE の効果

今回開発した VVT-iE は新開発の V8 エンジンシリーズ 4.6L, 5.0L に搭載された. ここでは VVT-iE を用いることによって得られた燃費, 排気ガス性能, HV の商品性, 出力の向上について以下に順次説明する.

5.1 燃費向上

可変機構を用いた燃費向上方法として吸気バルブ開弁位相を早めて内部 EGR を利用しポンピングロスを低減する方法⁴⁾と, 吸気バルブ閉弁位相を遅らせポンピングロス低減と合わせて膨張比を大きくしアトキンソン効果を利用する方法²⁾が従来より知られている. しか

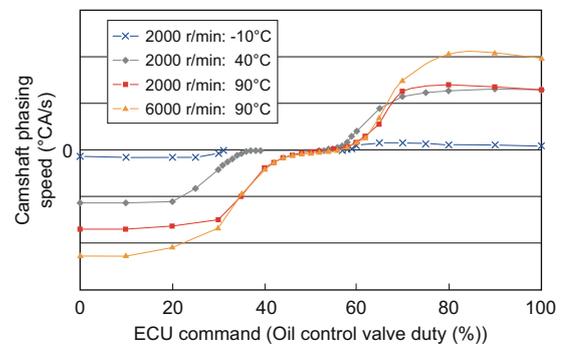


Fig. 7 Camshaft speed characteristic of hydraulic VVT

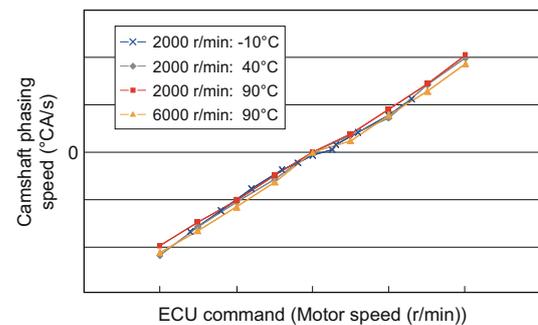


Fig. 8 Camshaft speed characteristic of VVT-iE

し、前者にはEGRガス増加によるノッキング発生と燃焼不安定によるトルク変動がともなう場合があり、燃費効果を引き出す上で限界がある。そこで今回のV8エンジンの燃費向上にあたっては始動位相に対し遅角側の作動領域を活用できるというVVT-iEの特徴を活かし後者が採用された (Fig. 9)。

5.2 排気ガス性能向上

Fig. 10 に低温時エンジン始動後のVVT-iEによるコールドHC排出量低減効果を示す。低温時、エンジン始動直後からVVT-iEを進角させることでバルブオーバーラップを増加し吸気ポートにEGRガスを吹き返らせ燃料の霧化を促進させることで燃料噴射量を低減してHCを約40%程度低減させることができた。

5.3 HVの快適性の追求

HVではエンジン効率の最も良い領域を多用するとともにエネルギー回収、低負荷走行時のエンジン停止などを行い、低燃費を実現している。走行中あるいは、

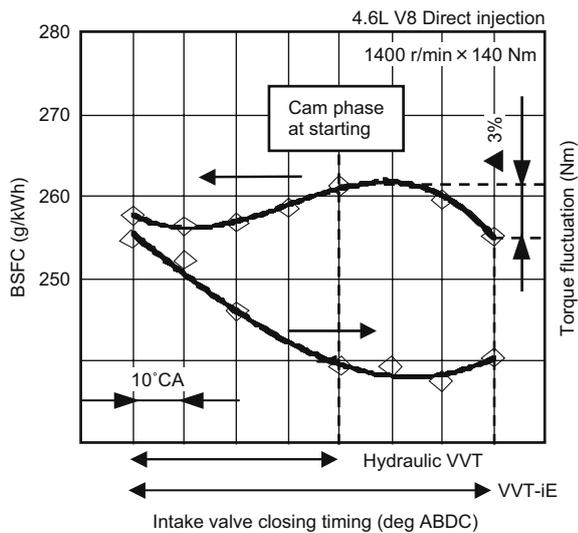


Fig. 9 Effect of VVT-iE (Fuel economy)

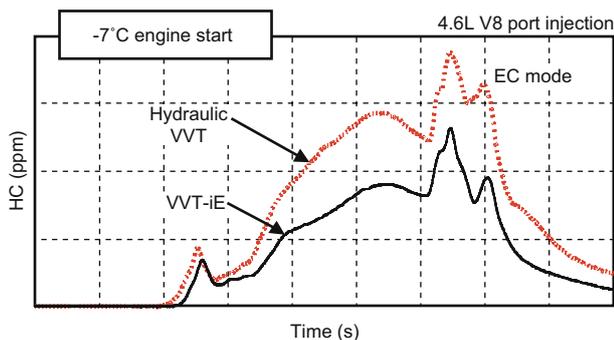


Fig. 10 Effect of VVT-iE (Cold HC)

アイドリング中に頻繁にエンジン停止と始動を繰り返すためスムーズなエンジンの始動と停止も重要な商品性の一つとなっている。始動・停止時の振動低減を達成するための手段の一つとして吸気カムシャフトの閉弁位相を遅らせる (デコンプレッション) 方法が広く用いられている。一方デコンプレッションの結果、低温で始動時間が延びる可能性があり、始動時間を短くするためには閉弁位相は早い方が良い (Fig. 11)。

そこでこれらを両立させるためVVT-iEを用いて低温でのエンジン始動時はクランキング中に位相を進角させることとした。その結果、温度によらず始動時間を最小にすることが可能となりHVの商品性の向上により一層貢献できた (Fig. 12)。

5.4 出力向上

Fig. 13 に吸気カムシャフトの閉弁位相に対する低温時の出力トルクを示す。低温時、油圧駆動方式では十分にVVTを作動させられないためカム位相を最遅角に固定するが多い。そのため暖機後に比べ、トルクが低下する可能性が有る。しかし、VVT-iEの場合は水温などの運転条件によらず、最適位相まで自由に進角することができるため、低温時から本来の出力を発揮する

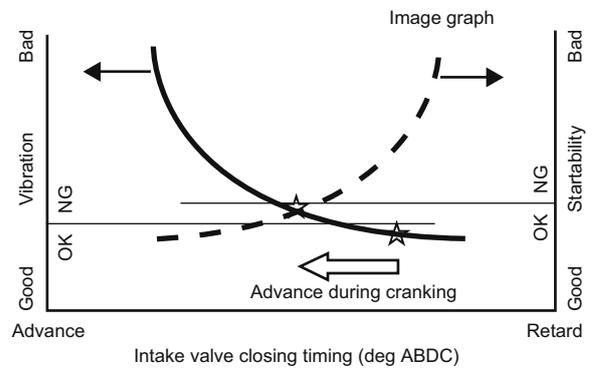


Fig. 11 Effect of VVT-iE (Vibration/startability for HV)

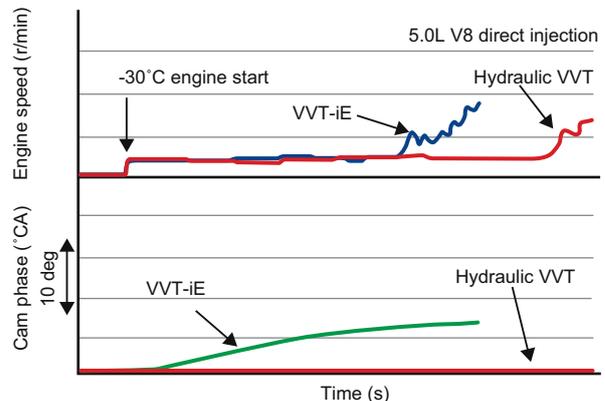


Fig. 12 Effect of VVT-iE (Startability)

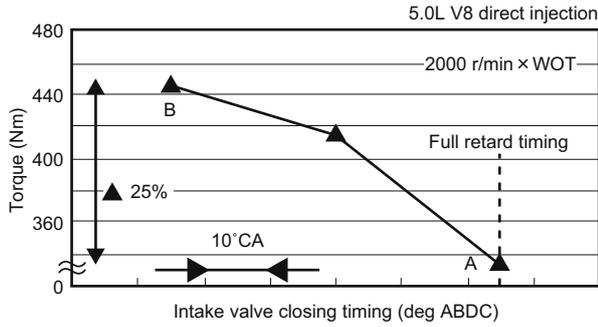


Fig. 13 Effect of VVT-iE (output performance)

ことができる。また最高出力点においても始動位相より遅角領域が使用できることで、バルブオーバーラップを大きくしすぎることなく、カムの作用角が拡大でき、慣性効果を使って吸気効率を上げ出力を向上させることができた。

6. まとめ

エンジンの運転条件によらず吸気カムシャフトタイミングを自由に可変させることをねらい、従来の油圧駆動方式から電気モータ駆動方式としたバルブタイミング連続可変機構を開発した。新開発のV8エンジンシリーズに搭載され、以下の効果が得られた。

- (1) アトキンソンサイクルの効果により燃費が改善できた。
- (2) エンジン始動直後から吸気カム位相を進角させることで低温時のHC排出量が低減できた。
- (3) クランキング中に作動させることでHVの静粛性と始動性を高い次元で両立できた。

<参考文献>

- 1) 川瀬弘幸他: 高性能エンジン用可変動弁機構 VVTLiの開発, TOYOTA Technical Review, Vol.50, No2, pp. 22-27 (2000).
- 2) 林達彦: エンジンの可変技術, 日経 Automotive Technology, 2006, Spring, pp. 130-135 (2006).
- 3) Klaus, B., et al., : Further Development of BMW's Fully-Variable Valve Control System Valvetronic, MTZ09/2005, pp. 650-658 (2005).
- 4) Y.Moriya, et al., : "A Newly Developed Intelligent Variable Valve Timing System-Continuously Controlled Cam Phasing as Applied to a New 3 Liter Inline 6 Engine", SAE Paper No. 960579 (1996).
- 5) 中川他: 新型V型6気筒直噴ガソリンエンジンの開発, 自動車技術会学術講演会, No. 77-01 (2001).
- 6) 山田哲他: フラッグシップ 新V8エンジンの開発, 自動車技術会学術講演会前刷集, No. 93-06, pp. 1-6 (2006).



<著 者>



竹中 昭彦
(たけなか あきひこ)
機能品技術 2 部
バルブタイミング可変機構の開発・
設計に従事



漆畑 晴行
(うるしはた はるゆき)
パワトレイン制御開発部
バルブタイミング可変システムの
制御開発に従事



森野 精二
(もりの せいじ)
電気制御機器部
EDUの開発・設計に従事

服部 正敬
(はっとり まさよし)
トヨタ自動車(株)
エンジンプロジェクト推進部
VVT-iEのハードシステム開発に従事

井上 高志
(いのうえ たかし)
トヨタ自動車(株)
エンジンプロジェクト推進部
バルブタイミング可変システムの開発に従事

益城 善一郎
(ましき ぜんいちろう)
トヨタ自動車(株)
エンジン制御システム開発部
エンジン制御システムの開発に従事