

feature article

# 環境対応のエンジン機器(可変動弁システム)

Variable Valve Actuation Systems for Automotive Engines to Respond to Environmental Issues

原 誠之助 Seinosuke Hara

菅 聖治 Seiji Suga

渡邊 悟 Satoru Watanabe

エンジンの可変動弁は、出力性能だけでなく、燃費や排気の改善に有効な技術として近年、普及が進んでおり、特に環境問題に対応する有望なCO<sub>2</sub>低減技術として、その重要性が高まっている。日立グループは、1980年代半ばにVTCを実用化し、2007年からはVELの大量生産を開始した。VTCはガソリンエンジンには標準的に適用されつつあり、VELはVTCと組み合わせることで燃費効果が大きく、採用が広まっている。日立グループは、燃費規制対応のキーテクノロジーとして、可変動弁のさらなる高機能化をめざしていく。

## 1. はじめに

自動車のエンジンは誕生以来目覚ましい進歩を遂げ、その回転やトルクの運転範囲は大幅に広がった。しかし、エンジンバルブの作動タイミングは固定のままで、エンジンの最適設計が困難となっていた。そこで、運転条件に応じてバルブタイミングを最適化する可変動弁が1980年代から使われるようになった。当初は、出力向上とアイドル燃費安定の両立など用途が限定的であったが、排気や燃費の規制強化に伴ってその有効性が高まり、これらの規制対応

に活用されるようになった。

この間、日立グループはカムの回転位相を変えるVTC (Valve Timing Control: 可変位相) を1980年代半ばに国内で他社に先駆け実用化した。さらに1990年代に入って可変リフトの開発を行い、初めにVVL (Variable Valve Lift: カム切り替え) を製品化し、2007年にはVEL (Variable Valve Event and Lift Control: 連続可変バルブリフト) が日産自動車株式会社のスカイラインクーペ (V6, 3.7 L) などに採用されて量産を開始した(図1参照)。

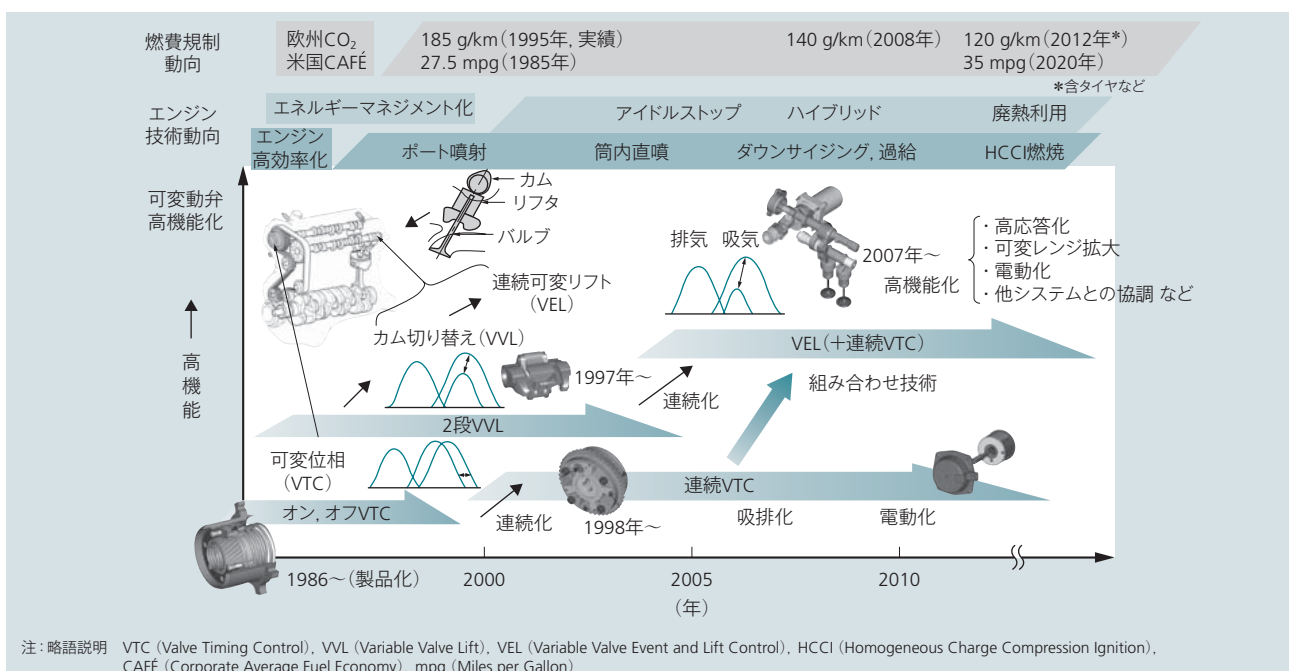


図1 可変動弁の高機能化

可変動弁は走りや環境を両立する技術として重要度が高まり、今後自動車のCO<sub>2</sub>削減のキーテクノロジーとしてさらなる高機能化が進む。

ここでは、自動車エンジンの環境対応に有効な可変動弁システムの性能効果と、代表的な可変動弁システムVTCおよびVELの概要について述べる。

## 2. 可変動弁の機能と性能効果

古くから動弁機構には出力を上げるための大リフト化、高速化が求められてきた。機構が複雑化する可変動弁では、これらがまず基本課題となる。そのうえで燃費や排気をよくするために可変機能による熱効率向上や燃焼改善が必要となる。エンジン性能向上因子と可変動弁機能の関係を図2に示す。

可変動弁は出力だけでなく燃費、排気に幅広く効果をもたらす。熱効率関係では吸気弁閉時期によるポンプ損失の低減をはじめ、小バルブリフトによる燃料微粒化やガス流動強化による燃焼改善などの効果が大きい。

可変動弁によるポンプ損失低減例を図3に示す。

部分負荷域で約8%の燃費効果が得られる。排気関係ではHC（炭化水素）、NOx（窒素酸化物）の有害成分の低減効果が大きい。現在では触媒技術が進歩して冷機始動時の触媒暖機前のHC排出が課題として残っているが、これに

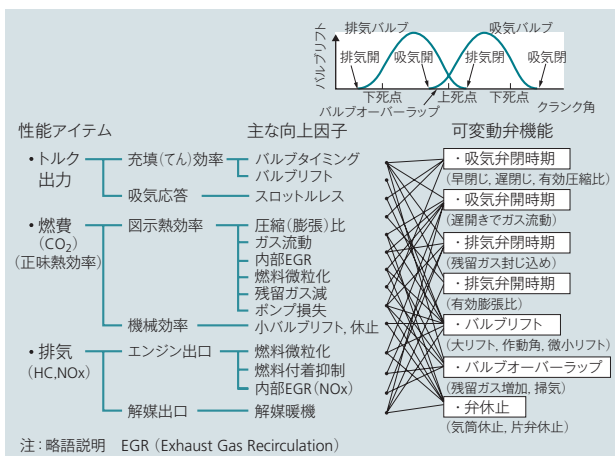


図2 エンジン性能向上因子と可変動弁機能の関係

可変動弁は出力だけでなく燃費や排気にも幅広い効果が得られる。

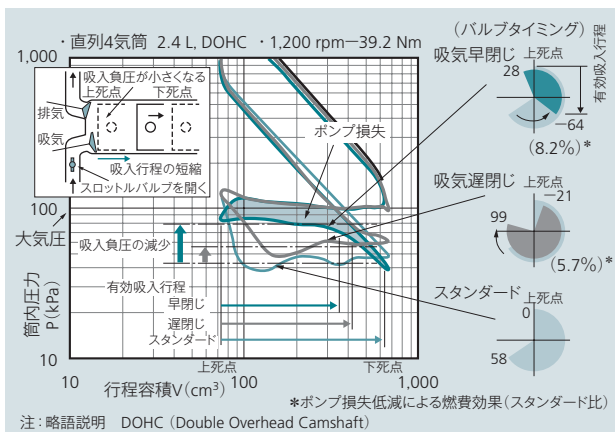


図3 気筒内の圧力変化とバルブタイミングによるポンプ損失の低減

吸入の遅閉じ、あるいは早閉じにより、有効な吸入行程が短縮して吸気が制限され、その分スロットルを開く。これによって吸入負圧が減り、ポンプ損失が低減する。

は小リフトなどによる燃料微粒化やオーバーラップ制御による燃料壁面付着の抑制などの効果が大きい。可変動弁の具体的な機構は図4のように分類される。

機能性が増すほど性能効果は高いが、コストや搭載性の課題が大きい<sup>1)</sup>。

## 3. 可変位相(VTC)システム

VTCは、図5に示すようにカム軸先端のスプロケット部のアクチュエータで位相変換できるので、簡便で搭載しやすい方式である。日立グループは、まずヘリカルギア構造の油圧オンオフ制御方式を実用化した。VTCはカム軸の交番トルクに起因するギア音が課題であったが、独自のバックラッシュ除去機構で解決した。その後1990年代終わりに、連続制御で高応答、高変換角のペーンタイプを実用化した。連続制御ではエンジン運転条件に応じたバルブタイミングの最適化のため、高精度な制御が求められた。具体的にはクランク角やカム角のセンサー信号に応じてソレノイドバルブを駆動し、VTC油圧室への油圧を調整している。この連続制御により、燃費や排気が大幅に改善され、現在ではガソリンエンジンに標準的に採用されるよう

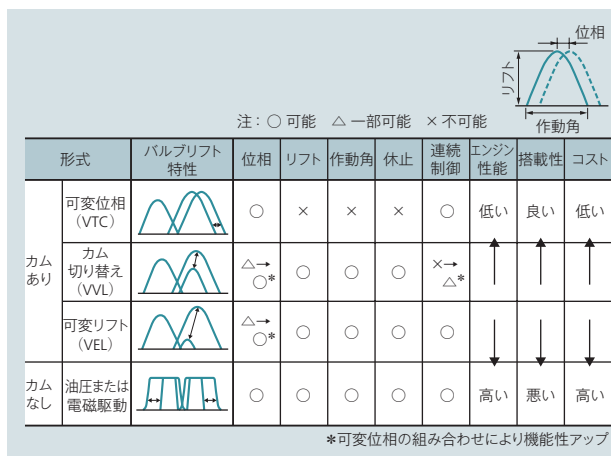


図4 可変動弁の形式と機能比較

高機能化によってエンジン性能は向上するが、コスト、搭載性の課題が大きい。

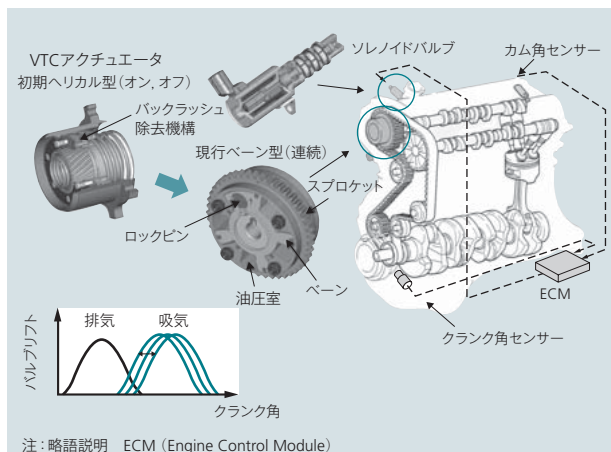


図5 VTCシステム

クランク角やカム角のセンサー信号に応じてVTCへの油圧を制御する。

になった。適用は吸気側が基本であるが、排気側適用も拡大してきており、特にガソリン直噴エンジンでは、ターボ過給と組み合わせるバルブオーバーラップにより掃気効率などを高め、ターボラグの改善を図っている。今後は始動時からバルブタイミングの最適化が可能な電動型などのニーズが高まっていくものと予測される。

#### 4. 連続可変バルブリフト(VEL)システム<sup>2),3)</sup>

リフトや開弁期間(作動角)が変わる可変リフトは、1960年代から研究が進められてきた。日立グループもまずVVLを製品化したが、これは2段切り替えのため燃費効果などを十分に得られず、VELの開発に取り組んだ。VEL開発にあたっては、1980年代前半にSOHC(Single Overhead Camshaft)エンジン用にまとめたプロトタイプ開発の経験を生かしている<sup>4)</sup>。

##### 4.1 基本構成と作動原理

VELのシステム構成を図6に示す。開発にあたっては、(1)既存エンジンの小変更で搭載可能、(2)ワイドレンジなリフト、作動角可変、(3)高回転化、(4)低駆動フリクション、および(5)高い制御応答性などを主なねらいとした。搭載性については従来エンジンのカム軸位置を変えずに、気筒間の空きスペースに可変機構を配置して実現した。

VELの作動原理を図7に示す。駆動カムの回転によっ

て往復運動を発生させ、それをリンクなどで揺動カムに伝える。さらにロッカアームの揺動支点を上下することによって揺動カムの揺動位置を変化させ、リフト、作動角を連続的に変える。VELは往復運動をリンクなどで強制的に揺動カムに伝えるため、揺動カムを引き戻すリターン springsが不要であり、機構の駆動フリクションを小さくできるのが特長である。またリンク機構による強制駆動のため、高速化が容易であり、この種の機構では最高の7,500エンジンrpm(Revolution per Minute)を達成している。さらにVELは0.7 mmから12.5 mmまでワイドレンジにリフトが制御でき、燃費、出力効果を高めている。特に微小リフトによってスロットルレス運転が可能となり、スロットルに起因するポンプ損失を大幅に低減することができた。また、バルブでスロットル作用を行うため吸気の応答がよく加速レスポンスが向上する。ここで微小リフトによる気筒間の吸気ばらつきが課題となっていたが、独自のリフト調整機構で解決した。

VELのアセンブリとその構成部品を図8に、VELのアクチュエータを図9にそれぞれ示す。これはブラシ付きDC(Direct Current)モータ、ボールねじ減速機構とコントロールシャフトの角度センサーから成る。VELは機構本体の低フリクション、ボールねじの高伝達効率などによ

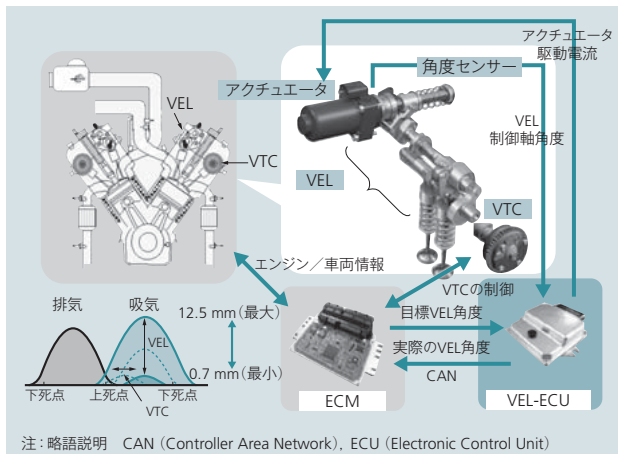


図6 VELシステム

VELによるリフト制御とVTCの位相制御が協調制御される。

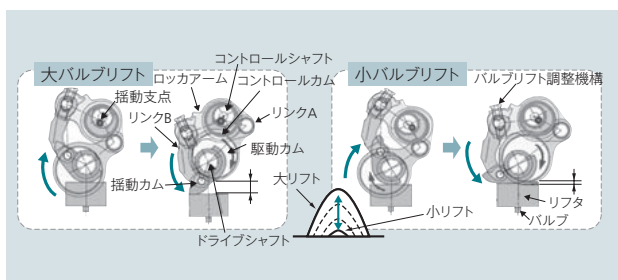


図7 VELの作動原理

揺動カムの揺動姿勢を変えてバルブのリフトを変化させる。

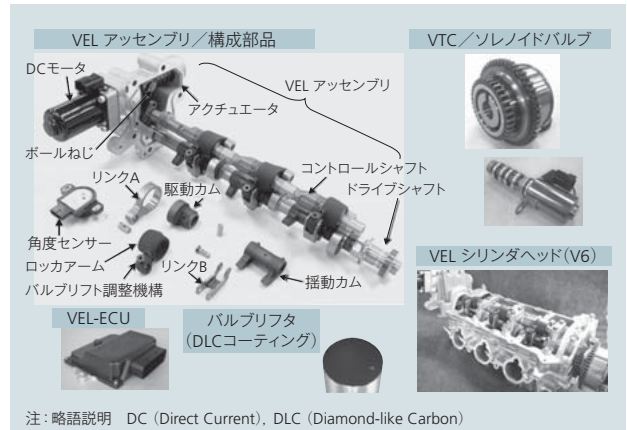


図8 VELアセンブリと構成部品

従来のカム軸位置にドライブシャフトを配置するのでシリンダヘッドにコンパクトに納まる。

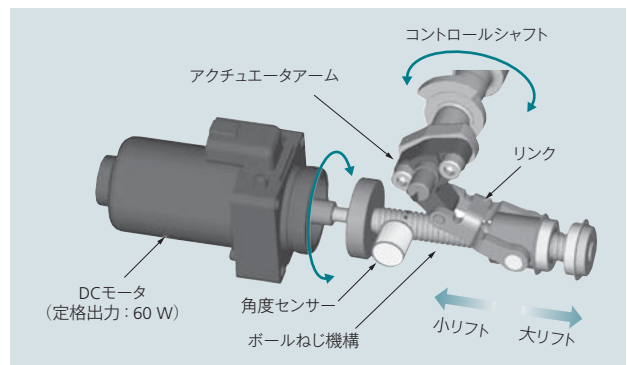


図9 VELアクチュエータ

高効率のボールねじ減速機の利用などにより、モータの小型化が可能となる。



り、定格出力60 Wの小型モータで高い制御応答性を実現している。

## 4.2 制御システム

VELの駆動制御は、車両やエンジン情報からエンジン制御モジュール (ECM : Engine Control Module) でVEL制御目標を演算し、CAN (Controller Area Network) 通信でVEL制御ユニット [VEL-ECU (Electronic Control Unit)] に送る (図6参照)。そしてVEL-ECUは、コントロールシャフトの角度センサー信号をフィードバックしてアクチュエータを駆動制御する。

VELの駆動制御に求められる機能は、高応答や高安定性に加え、(1) 応答周波数特性を規定できること、(2) 経時変化や環境変化に対するロバスト性が高いこと、および(3) モータ消費電力を抑えられることなどである。これらのうち(1)と(2)のために2自由度系のモデル規範制御を適用した。(3)に対してはモデル規範をベースに独自のフィルタ回路を設けた。VELはバルブスプリングの反力などからコントロールシャフトに交番トルクが発生する。この交番トルクはアクチュエータの外乱となり、これを抑えるための操作量が過大となることにより、モータの消費電力が増大する。この過大な操作量の抑制にはセンサー信号へのフィルタリング処理が有効であるが、応答性を損ねるという問題があった。そこで図10に示すように駆動制御出力段にフィルタを設定し、このフィルタもVEL機構の周波数特性の一部であるとして伝達特性を仮定し、規範モデルを含めた制御系を再構築した。この結果、応答性、安定性を確保しつつ過大な操作量を抑える制御系が構築できた。VELの実車走行の消費電力は2.2 Wと、VTCのソ

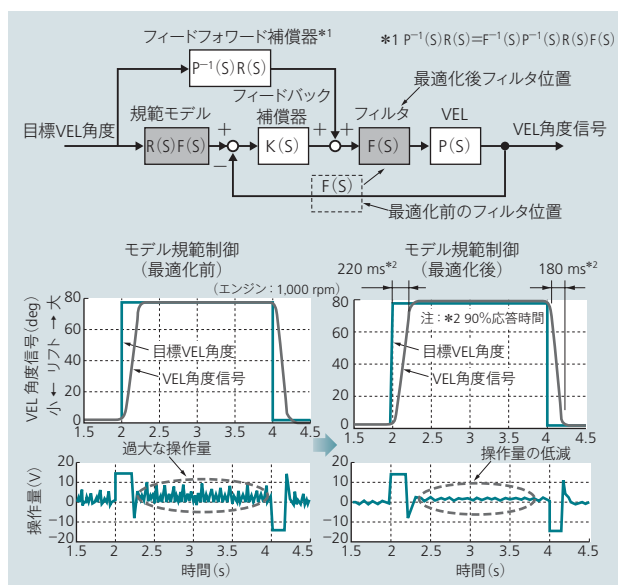


図10 VEL駆動制御のブロック線図とフィルタ位置の最適化  
駆動制御出力段にフィルタを設けて伝達特性を最適化し、過大な操作量を抑制した。

レノイド消費電力(2.8 W)よりも低いレベルに抑えられた。

以上の機構および制御開発により、VELは実車燃費(CO<sub>2</sub>)約10%低減、冷機始動時の排気(HC)約50%低減、出力約10%向上などの性能効果を達成できた。

VELの今後の課題としては、さらなる高応答性、可変レンジ拡大、低コスト化、コンパクト化などがある。

## 5. おわりに

ここでは、自動車エンジンの環境対応に有効な可変動弁システムの性能効果と、代表的な可変動弁システムVTCおよびVELの概要について述べた。

可変動弁は高機能型になるほど制御パラメータが増え、高度なシステム開発力が求められる。VELは機構開発と制御開発が一体となって最適なシステムを世に出すことができた。今後は厳しい環境規制の中でパワートレインの電動化が進むが、まだ当面の間は内燃エンジンが主役となるものと予想され、このエンジンの極限までの効率向上に、可変動弁はさらに重要な役割を果たすと期待される。

日立グループは、そのシステム開発力や各種基盤技術を活用して、合理的なコストで可変動弁の究極の高機能化をめざしていく。また直噴、過給、HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) 燃焼、ハイブリッドなどとの組み合わせ技術をさらに追求し、自動車エンジンのCO<sub>2</sub>低減に貢献していく所存である。

### 参考文献

- 1) 原：可変動弁システム、自動車エンジン要素技術 (I)、進化を続けるテクノロジーのすべて、p.165~181、山海堂 (2005.6)
- 2) M. Nakamura, et al.: A Continuous Variable Valve Event and Lift Control Device (VEL) for Automotive Engines, SAE 2001-01-0244
- 3) Y. Yamada, et al.: Development of Continuous Variable Valve Event and Lift Control System for SI Engine (VEL), SAE 2008-01-1348
- 4) S. Hara, et al.: Application of a Valve Lift and Timing Control System to an Automotive Engine, SAE 890681

### 執筆者紹介



#### 原 誠之助

1995年株式会社日立ユニシアオートモティブ入社、元 日立オートモティブシステムズ株式会社 エンジン機構事業部 設計開発本部 エンジン機構設計部 所属  
自動車技術会会員、SAE会員



#### 菅 聖治

1978年株式会社日立ユニシアオートモティブ入社、日立オートモティブシステムズ株式会社 エンジン機構事業部 エンジン・制御ブレーキ本部 エンジン機構設計部 所属  
現在、エンジン機構製品の設計開発に従事



#### 渡邊 悟

1985年株式会社日立ユニシアオートモティブ入社、日立オートモティブシステムズ株式会社 パワートレイン&電子事業部 パワートレイン設計本部 制御システム設計部 所属  
現在、パワートレインマネジメントシステムの開発に従事