研究論文

3 ポート高速電磁弁によるカムレスエンジン用電子油圧可変動弁の高速化*

豊田 希**, 田中 裕久**

Acceleration of the Electro-hydraulic Variable Valve Actuator
for a Cam-less Engine by using a 3-port switching valve

Nozomi TOYODA, Hirohisa TANAKA

In recent years, two types of variable valve actuators, electromagnetic and electro-hydraulic, have been developed for cam-less engines. The issue of these actuators is how to attain reliable control of the valve landing-velocity deceleration without any electronic position sensor. With this in mind, the former type of actuator is not so resistant to gas-pressure change, while the latter has issues of power waste and limited speed for quick motion control. The authors developed a sensor-less electro-hydraulic valve actuator (EHVA), with a hydro-mechanical position feedback mechanism in 2002 by using a 2-port switching valve. It operated in 24ms for positioning 12mm in stroke. This paper presents acceleration technology for working at an engine speed of 2100rpm and total valve opening time of 19ms, by applying a 3-port switching valve to the EHVA. The parameters of the EHVA were optimized using the bond graphs simulation program, and it succeeded in completing the valve lift motion within 19ms in a full stroke.

Key words : Electro-hydraulic System, Electronic control, Engine Valve Actuator, Cam-less Engine, Sensor-less, Landing Velocity Control, 3-port Switching Valve

1. ま え が き

自動車用エンジンの環境対策として、燃焼制御や代替燃料エンジンの開発が進められており、往復機関の圧縮比を自在に制御できるカムレス機構は、重要な要素技術となっている。その駆動方式には電磁式¹⁾と電子油圧式²⁾があり、電磁式は、高速作動が可能であるが、オンオフソレノイド機構であるため、給排気時の外力変化により、着座速度が変化しやすいという課題がある。一方、電子油圧式 (EHVA: Electro-hydraulic Valve Actuator) は、油圧力を利用するため、位置制御剛性が高く、外乱の影響を受けにくい、高速作動と動力消費に課題がある。

2002年に、著者らはハイドロメカニカル位置制御機構を持つ油圧ピストン式センサレスバルブアクチュエータを提案し、1号機として2ポート高速電磁弁³⁾で、吸気弁リフト12mmを24msで作動するEHVAの試験結果を報告した⁴⁾。

本報告では、本装置の高速化を目的に、EHVAの開閉行程を速くするため、強制給油を行える3ポート弁制御法に代えると共に、マルチパルス法による位置制御時の速

度制御法を提案し、動弁性能をボンドグラフ法により調べ、その成果を基に実機試験を行った結果を示す。

2. 主 な 記 号

A_c : 制御室側受圧面積
 A_f : 気筒内圧力等価受圧面積
 A_p : パイロット弁開口面積
 A_s : 供給側受圧面積
 a_x : フィードバックスロットの勾配係数 (傾斜)
 b : 主弁減衰係数
 K : 作動流体の体積弾性係数
 k_s : バルブスプリングのばね定数
 m : 動弁可動部質量
 P_c : 制御室圧力
 P_f : タンク圧力
 P_s : 供給圧力
 Q_c : フィードバックスロット通過流量
 Q_p : パイロット弁通過流量
 Q_s : 供給流量
 V_c : 制御室体積
 W_c : フィードバックスロット幅
 x : ピストン変位 (動弁変位に同じ)
 x_l : フィードバックスロットアンダーラップ量
 x_p : パイロット弁開度
 ρ : 作動流体の密度

*平成18年1月11日 原稿受付

**横浜国立大学大学院

(所在地 〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79—5)

(E-mail: nozomi@owl.forest.me.ynu.ac.jp)

3. 2ポート弁制御EHVAの構造と特性

3.1 構造

2ポート弁制御EHVA（1号機）の作動原理をFig. 1の模式図で示す。エンジンバルブと連結したピストンは、ボディにより3点支持され、上下で面積の異なる受圧面と、側面にフィードバックスロット（Fig. 2参照。以後、FBスロットと記す）を持つ。パイロット弁が閉じた状態では、FBスロットを介して制御室圧力は供給圧力と等しく、受圧面積差（ $A_c/A_s=1.2$ ，制御室側： A_c ，供給側： A_s ）により、ピストンは上方へ引き上げられ、動弁は閉じた状態を保つ。次に、パイロット弁が開くと、制御室圧力は低下し、制御室での流量関係（FBスロットからの流入とパイロット弁からの排出）とピストンに働く力関係が平衡するまで、ピストンは下降（開弁行程）し、平衡状態が得られた位置でピストンは位置制御される。再びパイロット弁が閉じると、制御室圧力が回復し、ピストンは上昇する（閉弁行程）。ピストンの上昇に比例したFBスロットの開口面積減少によって、制御室圧力の上昇速度が遅くなり、着座速度が緩やかに低下する構造になっている。

前述したように、アクチュエータに圧力が供給されると、パイロット弁が閉じている限りは、動弁は閉じた状態を保つ。なお、油圧が働かない場合にも動弁を閉めることができるように、動弁のばねは併用するものとし、そのばね定

Fig. 1 Schematic circuit of the EHVA controlled by 2-port switching valve

Fig. 2 Transparent view of the isoclinal Feedback Slot

数は、従来の機械カム式で使われているものに比べ低いものを用いた。油圧源は、供給圧力14MPa，供給流量22l・min⁻¹とし、ピストンの上下動に伴う供給圧力の変動を低減するために、供給側に金属ペローズ形のアキュムレータ（容量：65cm³）を取付け、瞬間的に必要な流量を補給している。2ポート高速電磁弁は、140Vによる過励磁、消磁回路により、動作時間1ms以下で高速動作される。

3.2 基礎式

EHVAの動作特性は下記のように表わせる。

フィードバックスロット通過流量 Q_c とパイロット弁通過流量 Q_p は、それぞれ以下の式で示される。

$$Q_c = C_{dc} a_s W_c (x + x_i) \cos \theta \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_s - P_c)} \quad (1)$$

$$Q_p = C_{dp} A_p \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_c - P_r)} \quad (2)$$

制御室に関する連続の式は、次式で与えられる。

$$Q_c + A_c \dot{x} - Q_p = \frac{V_c}{K} \dot{P}_c \quad (3)$$

主弁運動式はピストン変位を x として、次のようになる。

$$m \ddot{x} + b \dot{x} + k_s x = P_s A_s - P_c A_c \quad (4)$$

3.3 ボンドグラフ解析と基礎試験との比較

EHVAの応答性と着座速度をボンドグラフ解析により調べた。Fig. 3に、EHVAの1号機のボンドグラフモデルを示す。上方が作動油の流量と圧力，下方がピストンに働く力と速度を示している。今回の設計は、ピストンの受圧面積とFBスロットのアンダーラップ量，FBスロット幅の3つのパラメータに関して最適化解析を行った。アンダーラップ量を小さくすると、系は不安定になることが分かっている⁵⁾，それを踏まえてパラメータ値をそれぞれ、ピストン主直径 $d=14.3\text{mm}$ ， $A_s=22.9\text{mm}^2$ ， $A_c=27.5\text{mm}^2$ ， $a_s=0.25$ ， $W_c=0.3\text{mm}$ ， $x_i=0.5\text{mm}$ とした。

上記パラメータでの解析結果と試作機を用いて行った試験結果をFig. 4に示す（ここで、 $x=0\text{mm}$ は弁が閉じた状態を表す）。解析結果の着座時の挙動を見ると、ピストンのFBスロットの開口面積減少により、動弁に減速効果が

Fig. 3 Bond Graphs of the EHVA controlled by 2-port switching valve

Fig. 4 Comparison of the experiment and Bond Graphs Analysis of the EHVA controlled by 2-port switching valve

現れ、滑らかに着座する様子が見られる。一方、試験結果は着座直前に一時的に停滞している様子が見られる。これはFBスロット部で、急激に流路面積が低減したことによって、流量係数が低下したことが影響していると考えている。ほぼ全域で解析結果と試験結果は一致しており、ボンドモデルの整合性が取れたと言える。なお、1号機は、リフト量12mmの動弁を最短開閉時間24msで実験的に開閉できたので⁴⁾、開閉間をクランク角度240°とすると、エンジン回転数にして1670rpmまで動作することになる。

4. 3ポート弁制御によるEHVAの高速化

本報告では、閉じ速度を速くするため、パイロット弁を2ポート弁から3ポート弁に代え、パイロット弁閉弁時に制御室へ強制給油する方法を考えた。また、1号機では減衰力不足によるオーバーシュート抑制と着座速度減少のために、機械的なダンパを使用していたため、作動速度が低下していた。今回は、機械式ダンパに代わり、強制的に制動を行うためのマルチパルス制御法を適用した。

4.1 油圧制御法とボンドグラフ

1号機のシステムでは、ばね力の調整により開弁速度を速めると、閉弁速度が遅くなるという問題があった。そこで、本報告では、2ポート弁制御法から、3ポート弁制御法に代え、動弁が上昇する際に制御室へ強制給油し、動弁の上昇力をアシストする方法を考えた。Fig. 5に模式図をFig. 6にボンドモデルを示す。ボンドモデルの変更点としては、パイロット弁への指令信号がONの時には、制御室からの流量が外部へ排出され、信号がOFFの時には、作動油が供給側から制御室へと向かうようにした（破線の四角内）。

3ポート高速電磁弁⁶⁾の仕様は、最高圧力17.5MPa、定格流量 $8\text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ 、ソレノイドは24V駆動としている。圧力バランス形ポペット構造で、140Vの高速過励磁・消磁回路を用いて駆動すると、応答速度1msでオンオフ動作する。

Fig. 5 Schematic view of Variable Valve Actuator operated by 3-port pilot valve

Fig. 6 Bond Graphs of the EHVA controlled by 3-port switching valve

4.2 マルチパルス法による速度制御

高速化には、開弁時および閉弁時には最高速度でピストンを動かし、保持位置と着座位置の直前にのみ、制動効果を働かせる方法として、パイロット弁をマルチパルス法で制御することにした。ピストンが保持位置に達する手前でパイロット弁開口の指令信号をOFFにし、ピストンが慣性力により保持位置に達した時に再度、指令信号をONにすると、ピストンはオーバーシュート無く、保持位置に達する。また、着座の際にも着座直前に、OFFにしていた指令信号を3ms程度ONにすると、ピストンには逆向きの力が加わり、速度が低下する。パイロット弁をマルチパルスで開閉を細かく制御することで、ピストン速度を制御した。

Fig. 7は、パイロット弁を3ポート弁とし、マルチパルスで指令信号を制御したボンドグラフ解析の結果を示す。第一パルスは開弁用、第二パルスは保持用、第三パルスは着座制御用としている。第一・第三パルスの期間は気筒内圧力などの影響を考慮して、実験的にマッピングすることが可能である。なお、第二パルスはエンジン回転数に応じて t_{on} の期間を調整すればよく、これは容易に制御可能である。 $t_{on} = 0$ として、最短開閉動作を行った解析結果を

Fig. 7 BGSP simulation of multi-pulse control

Fig. 8 BGSP simulation of valve displacement by 3-port switching valve control

Fig. 9 Measurement of valve displacement by 3-port switching valve control (Long valve opening)

Fig. 10 Measurement of valve displacement by 3-port switching valve control (Short valve opening)

Fig. 8 に示す．所要時間は，19ms以下と速めることができる．

実機試験では，1号機EHVAの高速電磁弁の取付け部に，3ポート高速電磁弁用のサブプレートを取付け，電磁弁を通电していない時は供給圧力が制御室に供給され，通电している時は制御室から作動油が排出されるようにした．Fig. 9の試験結果は，低回転数での運転を想定した実測例で，着座速度制御用の制動パルスの効果で，閉弁速度が低下しているのが見られる．試作機は摺動抵抗がボンドモデルで設定したものよりも多少大きく，オーバーシュートは見られなかったもので，本試験では第一パルスと第二パルス間の信号の断絶は行っていない．続いて，最短開閉の実験結果をFig. 10に示す．応答特性は，Fig. 8の解析結果に裏付けられたものとなっている．最短開閉時間は19ms以下で，これはエンジン回転数2,100rpm以上に相当している．

5. あとがき

動弁の開閉タイミングとリフト量を自在に制御できるカムレスエンジン用のセンサレス電子油圧式動弁アクチュエータを3ポート高速電磁弁で高速化を図った．供給圧力14MPaにおいて12mmの動弁変位を，2ポート弁制御に比べ，最短動弁開閉時間を24msから19msに短縮し，想定エンジン回転数を1,670rpmから2,100rpmに運転可能範囲を拡大することが出来た．

参考文献

- 1) R. Uhlenbrock, J. Melbert and G. Lugert : Smart Actuator for Sensorless Electromagnetic Variable Valve Actuation, SAE, ATTCE2001, Vol. 5, Barcelona, No. 2001-01-3278, 85/90 (2001)
- 2) J. Aaltonen and M. Vilenius : Electrohydraulic System for High Speed Gas Exchange Valve Actuation, 5th JFPS International Symposium, 775/780 (2002)
- 3) 佐藤恭一，田中裕久：高速電磁弁の切り替え特性に及ぼす渦電流の影響，油圧と空気圧，24-4，104/110 (1992)
- 4) 伊藤希，田中裕久：カムレスエンジン用電子油圧動弁の開発，自動車技術会学術論文集，35-3，139/142 (2004)
- 5) 佐藤恭一，田中裕久：高速電磁弁制御比例シート弁の特性に関する研究，日本機械学会論文集（B編），57-533，178/181 (1991)
- 6) 田中裕久，田中弘義，荒木一雄：三方向形高速電磁弁のデジタル制御，日本機械学会論文集，50-458，2663/2666 (1984)

付 録

EHVAの外観写真をPhoto 1に示す．吸排気弁を一組としている．高速電磁弁は背後に装着されている．

Photo 1 Intake and exhaust valve actuator
(size : 110 (width) $\times$ 150 (height) $\times$ 93 (depth) mm)