コモンレール用比例制御形電子燃料噴射弁の特性に関する研究*

(第2報, タンデム形超磁歪アクチュエータによる制御特性)

佐藤 恭一^{*1}, 田中 裕久^{*2}
浦井 隆宏^{*3}, 山田 賢^{*4}

Characteristics of a Proportional Injector for Common Rail Injection System (2nd Report, Injection Characteristics of the Injector Controlled by a Tandem-Type Giant-Magnetostrictive Actuator)

Yasukazu SATO^{*5}, Hirohisa TANAKA,
Takahiro URAI and Satoshi YAMADA

^{*5} Yokohama National University, 79-5, Tokiwadai, Hodogayaku, Yokohama, Kanagawa, 240-8501 Japan.

A high-pressure common rail injection system with controllable injection rate has a high potential for reducing exhaust emissions. This system requires an injector which controls suitable injection rate for various engine load and speed. Conventional electric controllable injectors energized by on/off switching pilot valves, which are difficult to control the injection rate continuously. This paper has developed a new type electric controllable fuel injector to satisfy the requirement of such enhanced features. It consists of a main needle valve with a position feedback slot, and a 2-way pilot valve driven by a tandem-type giant-magnetostrictive linear actuator. In proportion to the pilot valve operation, this injector can control the transient characteristics of injection rate by the internal hydraulic position feedback mechanism insensitively to disturbances. In this paper, design strategies of the injector and giant-magnetostrictive actuator, and test results of variable injection rate control at the common rail pressure of 160 MPa are described.

Key Words: Fuel Injection, Diesel Engine, Fluid Power Systems, Giant-Magnetostrictive Actuator, Proportional Seat Valve

1. はじめに

ディーゼル機関排出ガスの窒素酸化物 (NOx), 排気黒煙およびパティキュレート (PM) の低減は, 地球環境問題における重要な課題となっている。噴射の自由度が高いコモンレール式の高圧燃料噴射システムは, エンジン回転数に依存せずに低速から高圧噴射が可能であること, 噴射圧力と噴射時期が独立に制御できること, 分割噴射 (パイロット噴射) も容易であることなどが低排ガス化に適すると考えられている。従来, コモンレールシステムでは, 小形オンオフ電磁弁をパイロット弁とする2段形燃料噴射弁が用いられて

いる^{(1),(2),(3)}。この種の噴射弁ではパイロット弁のオンオフの開閉に対応して噴射率形状が矩形となるが, 初期噴射量の急峻な立ち上がりはNOx増大の原因となるため, 実用的にはニードル弁とパイロット弁の間の油圧回路にオリフィスを設けて噴射開始時のニードル弁応答の立ち上がりを緩慢にし, 初期噴射量を低減するなどの対策が施されている。しかしながら, 固定絞りのオリフィスでは, 多様なエンジン回転数や負荷状態の変化にあわせて噴射率形状の最適化を図ることは困難である。この問題に対し, 著者らは前報において流体式位置フィードバック機能の適用により, ニードル弁のリフト量制御が可能なパイロット弁比例制御形燃料噴射弁を開発し, パイロット弁に高速オンオフ弁を用いた場合の制御特性を報告した⁽⁴⁾。この燃料噴射弁の機能を十分に引き出すためには, 目標となる最適な噴射率形状に対して, パイロット弁開度を高速高精度で制御できる小形リニアアクチュエータが必要となるが, 比例ソレノイドなどの従来形リニアアクチュエ

* 原稿受付 1999年12月20日。

^{*1} 正員, 横浜国立大学工学部 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)。

^{*2} 正員, 横浜国立大学工学研究科。

^{*3} 正員, 日本ムーグ(株) (〒254-0017 平塚市真土 1532)。

^{*4} 学生員, 横浜国立大学大学院。

E-mail: sato@post.me.ynu.ac.jp

ータでは、応答性、発生力、小形さの面で十分な性能を持つものがない。圧電素子駆動による高速応答燃料噴射弁が試作された例⁽⁵⁾⁽⁶⁾もあるが、軽油環境下での駆動に 600~1kV の高電圧を必要とするなどの実用上の課題がある。そこで本報では、著者らが開発したタンデム形超磁歪リニアアクチュエータ (Giant Magnetostrictive Actuator: 以下 GMA) をパイロット弁の駆動に適用した。GMA は外部磁界の変化に対して極めて速い応答で伸縮し、発生力も大きい超磁歪素子を用いたアクチュエータである。圧電素子と異なり、素子への電極結線がないので電気部と機械的駆動部を分離でき、また、ソレノイドにより低電圧で磁界を与え

られるので、軽油環境下での使用に適していると考えられる。これにより、コモンレール圧力 160MPa において噴射開始から終了までの一連の噴射率形状を制御できる燃料噴射弁を開発できたので、その構造および噴射率制御特性を報告する。

主な記号

E : ソレノイド励磁電圧

H : 磁界の強さ

i : ソレノイド励磁電流

P_s : コモンレール圧力

Q_d : 燃料噴射率

s : GMA 変位

t : 時間

u : GMA 駆動電気回路入力パルス信号 (噴射指令パルス)

2. 超磁歪アクチュエータ比例制御形電子燃料噴射弁の構造

2.1 構造と作動原理 燃料噴射弁の構造図を図 1 に、作動模式図および諸元を図 2、表 1 に示す。燃料噴射弁は主弁となる段付きのニードル弁と、それを制御するパイロット弁からなる。パイロット弁はタンデム形 GMA により駆動され、ニードル弁のリフト量は流体式位置フィードバック機構によりパイロット弁の開度に比例して制御されるので、GMA のストロークに比例したニードル弁のリフト量制御が可能である。

Fig.1 Electronically-controlled proportional fuel injector operated by the tandem-type GMA pilot valve

Fig.2 Schematic configuration of the pilot-valve-operated proportional injector

流体式位置フィードバック機構はニードル弁上部側面に設けられた矩形の溝流路（フィードバック流路、幅 W_c ）とコントロール室（容積 V_c ）により構成される。フィードバック流路はニードル弁が閉じた状態（ニードル弁リフト量 $x=0$ ）においてアンダーラップ量 x_l でコントロール室に開口している。パイロット弁が閉じた状態ではコントロール室圧力 P_c とコモンレール圧力 P_s はフィードバック流路を介して等しく、受圧面積の差 ($A_c > A_s$) によりニードル弁はバルブシートに押さえつけられ、高圧力下でのシールが保たれる。一方、パイロット弁が開くと、ニードル弁に作用する油圧力が平衡する位置（フィードバック流路開口面積とパイロット弁開口面積が等しくなる位置）にニードル弁が位置決めされる。フィードバック流路の開口面積はニードル弁リフト量に対して一次関数的に変化するので、その結果、ニードル弁リフト量はパイロット弁開度に比例して制御される⁽⁷⁾。

2.2 タンデム形超磁歪アクチュエータ GMA は、テルビウム、ディスプロシウムと鉄との二元系合金である超磁歪素子が、外部磁界の変化より歪を生じて伸縮する現象を利用したリニアアクチュエータである。超磁歪素子は、予め 7~14MPa 程度の軸方向圧縮

応力（プリストレス）を与えておくことにより、大きな磁歪定数（飽和状態の歪量）を示す特性があり、磁歪量は最大 1500×10^{-6} 程度である。GMA の作動機構は、ソレノイドの励磁により超磁歪ロッドが伸長してプランジヤを図上方に押し上げ、これに結合している出力軸（先端がパイロット弁を兼ねる）が変位する仕組みになっている。十分なアクチュエータストロークを得るためには、長い超磁歪ロッドが必要となるが、アクチュエータはエンジンへの取り付けスペースの制約から長くできないため、タンデム形 GMA を適用することにより小形化を図った。タンデム形 GMA は、図 3 に示すように円筒ホルダーに収めた 2 組の超磁歪ロッドをソレノイドで同時に磁化し、発生した両者の変位をホルダーを介して足し合わせることで、アクチュエータ長を増さずに 2 倍の長さの超磁歪ロッドと同等の変位を取り出せる構造になっている。超磁歪ロッドは 1 組当たり直径 3.5mm、長さ 30mm のものを 3 本使用している。プリストレスは皿ばねにより与え、ロッドへの曲げモーメントを回避するため、ロッドは円筒ホルダー内で交互に配置してある。

超磁歪ロッドの変位は微小なため、周囲環境の温度変化によるロッドの熱膨張がパイロット弁リフト量制御において無視できない大きさになることがあり、温度ドリフトの低減が必要である。そのため、円筒ホルダーには超磁歪ロッドとほぼ同じ線膨張係数の材料を

Table 1 Specifications of the pilot-valve-operated proportional injector

Main Needle Valve	
Diameter of Needle	$\phi 4.2\text{mm}$ (P_c -Side) $\phi 4.0\text{mm}$ (Needle Dia.) (d_r) $\phi 2.2\text{mm}$ (Valve Seat)
Feedback Slot Width (W_c)	$0.2\text{mm} \times 1\text{slot}$ (W_c)
Feedback Slot Under Lap (x_l)	0.2mm
Injection hole (d_d)	$\phi 0.16\text{mm} \times 6\text{holes}$
Max. Needle Lift ($x_{\max}$)	approx. 2.4mm
Pilot Valve (driven by Tandem-type GMA)	
Diameter of Valve Seat (d_p)	$\phi 0.5\text{mm}$
Giant Magnetstrictive Rod	$\phi 3.5\text{mm} \times 30\text{mm}$ $\times 3\text{Rods} \times 2\text{Set}$
Turn of GMA Solenoid	300 turn
Max. Pilot valve Lift ($x_{p\max}$)	approx. 0.2mm
Operated Common Rail Pressure	
(P_s)	$\sim 160\text{MPa}$

Fig.3 Tandem-type stroke enlargement mechanism for GMA

用いることにより、超磁歪ロッドの熱膨張による伸長を相殺し、アクチュエータストロークの温度ドリフトを抑える構造とした。

なお、GMA には渦電流式非接触位置センサーが取り付けられているが、これは実験時のアクチュエータ変位測定用であり、GMA の位置制御には用いていない。

2.3 超磁歪アクチュエータ駆動電気回路 GMA の駆動には、ソレノイドのインダクタンスによる電流の遅れ、および超磁歪素子を磁化する際に磁気回路に発生する渦電流による磁界の遅れを補償するため、噴射指令 1 パルスに対して図 4 に示す電流波形でソレノイドを励磁する高速駆動回路を用いた。駆動回路で形成される電圧、電流波形は (1) 電磁氣的遅れを補償する領域と (2) 定常状態を保つ領域に分けられる。駆動回路では入力パルス信号に対して、電源電圧 95V、時間幅 0.2ms のワンショット電圧パルスで電磁氣的遅れを低減し、その後は電源を電源電圧 24V のスイッチング電源に切り換え、予め設定された定常電流値になるように電流制御を行うシーケンスとなっている。

3. タンデム形超磁歪アクチュエータの静特性と動特性

図 5 にタンデム形 GMA の静特性を示す。コイルで発生する磁界の強さ 100kA/m に対し、約 50 μ m の最大アクチュエータ変位が得られる。図 6 にパルス幅 4ms の入力信号に対するタンデム形 GMA の過渡応答を示す。応答時間は伸長時で 0.3ms、縮長時で 0.5ms で高速応答であることがわかる。なお、過渡応答では 3.6kHz の減衰振動が見られるが、これはプリストレス

Fig.4 Voltage and current wave forms of the quick driver against input command pulse u ((1):Over-excitation 0.2ms, (2):Steady state)

用皿ばねと超磁歪ロッドを直列ばねとし、可動質量をプランジャ及び出力軸の質量とした時の固有振動数 3.1kHz にほぼ一致する。

4. 超磁歪アクチュエータ制御形電子燃料噴射弁の噴射率可変制御

4.1 実験装置 図 7 に燃料噴射率測定装置を示す。軽油は空気圧式インテンシファイア (最大発生圧力 250MPa) により加圧し、噴射率は長管法 (Bosch 方式) により計測する。GMA の高速駆動回路に入力する噴射指令パルスは関数発生器で生成する。

4.2 燃料噴射弁の動特性 図 8 は燃料噴射弁の応答性を把握するため、コモンレール圧力 160MPa において噴射指令 1 パルスに対する噴射率の過渡特性を測定した結果である。噴射指令パルスに対する噴射開始遅れは 0.3ms、噴射停止遅れは 0.5ms であり、ディー

Fig.5 Static characteristics of the tandem-type GMA (Actuator Stroke (s) vs. Strength of magnetic field (H) energized by the solenoid)

Fig.6 Transient characteristics of the tandem-type GMA driven by the quick-driver

ゼルエンジンの高速回転 3000rpm におけるクランク角 30 度相当の噴射 (噴射時間幅 1.67ms) に十分な応答性を持つことがわかる。

4.3 噴射率可変制御 噴射指令パルスによる単一噴射では、GMA パイロット弁の開度は弁閉と最大開度の 2 位置をとり、よって噴射率形状も図 8 のように矩形となる。しかし、急峻な噴射率の立ち上りは NOx 増大の原因となるため、ランプ形状に緩やかに噴射率を増加し、噴射停止については黒煙低減の観点から速やかに噴射を終えることが望ましい。このような噴射率波形をエンジン負荷と回転数に応じて適切に可変に制御するため、GMA ソレノイドの励磁電流制御より、電氣的に任意の噴射率立ち上がり特性を設定することを試みた。GMA ソレノイドのインダクタ

Fig.7 Measuring system of fuel injection rates

Fig.8 Transient characteristics of injection rate against one-shot input command pulse at common rail pressure of 160MPa

ンス L は 1.16mH、電気抵抗 R は 1.5Ωであり、これにより電流変化の時定数 τ ($\tau=L/R$) は 0.77ms となる。したがって、 τ より十分短い周期でソレノイド励磁電圧をパルス幅変調すればソレノイドの励磁電流制御が行える。図 9 に目標噴射率波形を形成するための電流、電圧波形、GMA 変位の概念図を示す。目標噴射率形状を形成するための入力信号は、噴射開始遅れを低減する補償パルス、噴射開始後の立ち上がり特性を制御するパルス幅変調領域、および定常状態領域で構成される。GMA 駆動回路において、補償パルス及びパルス幅変調領域では一パルスの幅が電磁氣的遅れを補償するためのワンショット電圧パルス幅 0.2ms より短いので、電磁氣的遅れ補償用の高電圧パルスによりソレノイド励磁電流が制御される。パルス幅変調領域が終了して定常状態に移行すると、噴射指令パルスに対する励磁シーケンスにしたがってパルス幅 0.2ms のワンショット高電圧パルスが印加された後、定常状態用の低電圧に切り替わる。

図 10、図 11 は、コモンレール圧力 160MPa において搬送波周波数 8kHz (サンプリング周期 0.125ms) でパルス幅変調された噴射指令パルスにより、噴射率立ち上り時の過渡特性が異なる傾きを持つように設定した場合の噴射率測定結果である。噴射開始から緩やかな傾きを持たせている図 11 においては、噴射初めに脈動が見られるが、これはニードル弁がわずかに開い

Fig.9 Concept for variable control of injection rate shaped by pulse width modulation of the input command pulse

Fig.10 Fast gradual rising injection by variable injection rate control
(Common rail P_s :160MPa, PWM carrier :8kHz)

Fig.11 Slow gradual rising injection by variable injection rate control
(Common rail P_s :160MPa, PWM carrier :8kHz)

たリフト量微小の位置では流体式位置フィードバック機構のゲインが高く、不安定になりやすいためである。いずれの噴射率測定結果においても、噴射率 $10\text{mm}^3/\text{ms}$ 以上では噴射率立ち上り特性の傾きに変化を与えられていることがわかる。

5. むすび

本報では、パイロット弁の開度に応じて燃料噴射率を制御できるコモンレール用比例制御形電子燃料噴射弁を開発した。パイロット弁の駆動に用いた GMA は高応答、高発生力であり、超磁歪ロッドの配置をタンデム構造とすることにより小形化が図られている。試作燃料噴射弁では、コモンレール圧力 160MPa において開弁時 0.3ms、閉弁時 0.5ms の噴射応答性が得られた。さらに、パルス幅変調した噴射指令信号で GMA を駆動することにより、パイロット弁にオンオフ弁を

用いた従来のコモンレール用電子燃料噴射弁では困難であった、噴射率形状の連続可変制御が可能であることを示した。

参考文献

- (1) Osuka, I., 他 3 名, *SAE paper* 940586, (1994).
- (2) 宇野, 他 4 名, いすゞ技報, No.99, (1998), 29-35.
- (3) 加藤, 他 3 名, 三菱自動車テクニカルレビュー, No.11, (1999), 16-24.
- (4) 佐藤, 田中, 伏屋, 機論, 66-646, C, (2000), 1857-1860.
- (5) M. Rumphorst, MTZ, Vol.56, No.3, (1995), 142-148.
- (6) E. Hayes, U.S Patent, No.5779149, (1998).
- (7) 佐藤, 田中, 機論, 57-533, B, (1991), 178-181.