高速電磁弁の試作 (I)^{*}

平野 恵一 (阪大工)^{**}

(1963年3月14日)

Abstract

A magnetically driven fast acting valve is constructed for our cusp experiment.

Some of the valve performance characteristics are obtained, which agree closely with theoretical estimation.

Maximum flight velocity of the valve is observed to be 10^3 m/sec, when the condenser is charged 10 KV.

Valve-opening durations of 0.1 m. sec. to 0.9 m sec are obtained.

まえがき

プラズマパフは色々なところで試作されているが、これは阪大カusp装置のために作られたので、電氣的、機械的特性について報告する。弁開閉時間に関しては、理論値と実験値とで完全な一致を見た。弁飛行速度はコンデンサーを10KVに充電した時 10^3 m/sec であった。

* The construction of magnetically driven fast acting valve.

** Keiichi Hirano. (Technological Dep. of Osaka Univ.)

高速電磁弁の試作 (I)

(I) 装置

Fig. 1 に示されているようなものである。ハウジングはステンレススチールを用いた。バルブディスクはアルミニウム製で、バネ (バネ定数 $1.1 \frac{\text{kg}}{\text{mm}}$) によってテフロン製のバルブシートに 11 kg で押えつけられ、真空を保つようにしてある。動作原理はエポキシの中に埋められた 5 ターンのリボン状スパイラルコイルにコンデンサー放電による衝撃大電流を流し、バルブディスクに渦電流を誘起してコイル電流との反撥力によりバルブが開くようになっている。

Fig 2 には放電回路の概略が示されている。高圧直流電源としてネオントランス及び 1 B 3 G T 2 個並列に用いることで充分満足なものが得られた。放電回路のスイッチには球ギャップを用いた。通電させる時は P 点にトリガーパルスを入れればよい。1 G 5 0 A が通電し、トリガーピンに高圧が発生するから、球との間に放電が起る。そのショックで 2 球間はブレイクダウンし、コイルに放電電流が流れる。放電電流の周期は $36 \mu \text{ sec}$ であった。又コイルをはづし、同軸ケーブルの終端で短絡した場合には $28 \mu \text{ sec}$ であった。故に回路の全インダクタンスは $1.65 \mu \text{ H}$ でコイルのインダクタンスは $0.65 \mu \text{ H}$ で、同軸ケーブル、ギャップ及びコンデンサーの寄生インダクタンスは $1 \mu \text{ H}$ となる。又対数減衰率を測り $\alpha = \frac{R}{2L} = 2.3 \times 10^4 / \text{sec}$ を得た。これより回路の全抵抗は $75 \text{ m}\Omega$ を得る。なお放電波形はバルブディスクを置いた場合と置かなかった場合とでは殆んど差異は認められなかった。

(II) 理論的考察

(a) 機械的特性

Fig. 3

バネは初め自然長より x_1 だけ圧縮されているとする。そして衝撃的な電磁力により更に Δx だけ圧縮されるものとする。ここで電磁力の働く時間は弁の開閉する時間 T より非常に短いものとする。衝撃力が弱い場合即ち $x_1 \gg \Delta x$ の時、電磁力によって弁に与えられる運動量を p とすると、運動量は力積に等しいから

$$p = k x_1 \cdot \frac{T}{2} \dots\dots\dots (1)$$

であり、ここで k はバネ定数である。

(1) 式より p , k , x_1 がわかれば、弁開閉時間 T は

高速電磁弁の試作(I)

Fig. 2

$$T = \frac{2p}{kx_1} \dots\dots\dots (1')$$

よりすぐに求まる。

又、 Δx はエネルギーの保存式

$$\frac{p^2}{2m} = kx_1 \cdot \Delta x \dots\dots\dots (2)$$

(m は弁とバネの有効質量)

から

$$\Delta x = \frac{p^2}{2m kx_1} \dots\dots\dots (2')$$

となり容易に求まる。

次に、衝撃力が弱くない場合を考える。弁が調和振動するものと仮定すると、弁の変位は

$$x = (x_1 + \Delta x) \cos \left(\frac{2\pi}{\tau} t \right) \dots\dots\dots (3)$$

で表される。ここで τ はバネの固有周期で

$$\tau = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \dots\dots\dots (4)$$

である。(3)式に存いて $t=0$ の時、 $x=x_1 + \Delta x$ であるから、 $x=x_1$ における時間は

$$t = \frac{\tau}{2\pi} \cos^{-1} \frac{x_1}{x_1 + \Delta x} \dots\dots\dots (5)$$

である。弁開閉時間 T は Δx の間を往復する時間で、それは

$$T = \frac{\tau}{\pi} \cos^{-1} \frac{x_1}{x_1 + \Delta x} \dots\dots\dots (6)$$

で与えられる。

運動エネルギーの 保存を仮定すると

高速電磁弁の試作(I)

$$\frac{p^2}{2m} + \frac{1}{2} \ell x_1^2 = \frac{1}{2} \ell (x_1 + \Delta x)^2 \dots\dots\dots (7)$$

であるから

$$x_1 + \Delta x = \left(\frac{1}{m \ell} p^2 + x_1^2 \right)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (7')$$

(7')を(6)に代入すると

$$T = \frac{\tau}{\pi} \cos^{-1} \left(1 + \frac{p^2}{m \ell x_1^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (8)$$

となり、弁開閉時間が求められる。

$\frac{p^2}{m \ell x_1^2} \ll 1$ の場合、即ち電磁力が弱い場合、(8)式をテーラー展開すると、(1')式が得られる。

(b) 電気的特性

バルブディスクに流れる渦電流の分布がよく解らないので p の正確な計算は出来ないが、以下のような簡単なモデルで計算してみた。

Fig. 4

であたえられる。

(1) バルブ上の渦電流は全部円周上に集中し、しかも、penetration-depth δ の円形断面を流れる。

(2) コイル電流は平均径 r_c のところに集中している。

則ちFig 4のような二つの円形線輪の反撥の問題に置き換える。計算は省略して結果だけを述べる。先ず、バルブに働く反撥力 F は近似的に次の式

$$F = m \ddot{x} = \frac{1}{2} \frac{\mu_0 (r_v + r_c) x}{x^2 + (r_v - r_c)^2} \cdot N^2 \cdot \frac{CM}{L(1 - \frac{\alpha^2}{\omega_0^2})} \cdot V_0^2$$

$$\times \frac{\sqrt{(\omega_0^2 L_v - \alpha R_v)^2 + \omega^2 R_v^2}}{(R_v - \alpha L_v)^2 + \omega^2 L_v^2} \cdot e^{-2\alpha t} \sin \omega t \cdot \sin(\omega t + \phi) \dots \dots (9)$$

ここで

μ_0 : $1.26 \mu \text{H/m}$, r_v : バルブ半径, r_c : コイルの距離, m : バルブの質量, N : コイルのターン数, C : コンデンサーの容量, M : コイルとバルブの相互インダクタンス, L : 放電回路全寄生インダクタンス, α : 減衰定数 ($R/2L$), ω_0 : 固有角周波数 ($\frac{1}{\sqrt{LC}}$), L_v : バルブの等価インダクタンス, R_v : バルブの等価抵抗, ω : $\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$, V_0 : コンデンサー充電電圧

$$\phi : \tan^{-1} \frac{\omega R_v}{L_v(\alpha^2 + \omega^2) - \alpha R_v} \cdot \text{我々の場合, 数値を入れると } 5.8 \mu \text{sec の時, 力は最}$$

大となり

$$F_{\max} = 7.4 \times V_0^2 \text{ (kg)} \quad V_0 : \text{KV}$$

を得る。

(9)式は $e^{-2\alpha t}$ で減衰するので并に与えられる力積を得る為に t について $0 \sim \infty$ まで積分すると

$$p = \int_0^\infty m \ddot{x} dt = \frac{1}{2} \frac{\mu_0 (r_v + r_c) x}{x^2 + (r_v - r_c)^2} \cdot N^2 \cdot \frac{CM}{L(1 - \frac{\alpha^2}{\omega_0^2})}$$

$$\times \frac{\sqrt{(\omega_0^2 L_v - \alpha R_v)^2 + \omega^2 R_v^2}}{(R_v - \alpha L_v)^2 + \omega^2 L_v^2} \cdot \frac{\omega}{4\alpha \sqrt{\alpha^2 + \omega^2}} \cdot \sin(\phi + \phi') V_0^2 \dots \dots (10)$$

となる。ここで $\phi' = \tan^{-1} \frac{\omega}{\alpha}$ で

数値を入れると

$$p = 8 \times 10^{-4} V_0^2 \text{ (kg-m/sec)}, V_0 : \text{(KV)}$$

高速電磁弁の試作 (I)

それに対して後述するが実測値は

$$P = 5.5 \times 10^{-4} V_o^2 \left(\frac{kg \cdot m}{sec} \right)$$

である。この程度の計算では比較的よく一致している。

Ⅱ) 測定法及び結果

(a) Pの測定

Fig. 5

まずバルブを自由な状態で測定し
後でバネの力を補正する。

測定方法はFig 5に示したよう
にバルブの上4mmの所に接点を置
き、バルブが接点にふれた時C ·
R · O上にパルスが出るようにし
た。C · R · O起動はFig-2

の1G50Aの起動パルスで行った。だからC · R · O上のパルスの位置はバルブの飛行時間に
相当する。

コンデンサーの充電電圧に対するプロットはFig 6に示される。これから実験式として、バル
ブの飛行速度を v_o として

$$v_o = 0.1 \times V_o^2 \dots\dots\dots (11)$$

V_o (KV) : コンデンサー充電電圧

U_o (m/sec)

を用いる。バルブの質量は5.5gであるから運動量としては

$$P_o = 5.5 \times 10^{-4} V_o^2 \left(\frac{kg \cdot m}{sec} \right) \dots\dots\dots (12)$$

を得る。

(b) 弁開閉時間の測定

Fig 7に示す回路で測定した。弁が閉じている時バルブと接点とは接触させておく。したが
ってコンデンサーC₁の端子はバルブとスプリングを通して接地されており端子電圧は0である。
ところで電磁力でバルブが跳ね飛ばされると接点とバルブは離れているからC₁は充電され、端

Fig. 6

子電圧は上昇する。バルブガスプリングにより押し戻されると再び C_1 の端子電圧は 0 となるから Fig 9 のような鋸歯状波が得られる。Fig 9 の波高値, 或いは波巾から開閉時間が測定出来る。コンデンサーの充電電圧に対してプロットしたものが Fig 8 である。

Fig 8 に於ける理論値とは (1') 式及び (12) 式より算出したものであるが, (12) 式ではスプリングの力は考えていない。電磁力の働く時間を Δt とすると, バルブはスプリングにより $kx_1 \Delta t$ だけ下向きに力積が与えられるから (12) 式より $kx_1 \Delta t$ だけ引いたものを用いた。(10) 式から解るように, 電磁力は $e^{-2\alpha t}$ で減衰するので Δt として $1/2\alpha$ を用いるのが適当である。結局, P としては

$$P = P_0 - \frac{kx_1}{2\alpha}$$

$$= (5.5 V_0^2 - 23.7) \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m} / \text{sec} \dots\dots\dots (13)$$

Fig. 7

高速電磁弁の試作(Ⅱ)

× Theoretical $T = \frac{2P}{k x_1}$ $k = 11 \text{ kg/cm}$
 ○ experimental $x_1 = 1 \text{ cm}$

Fig. 8

Fig. 9

を用いた。理論値と実験値とは充分満足分満足な一致が得られている。

B. Gorowitz 等の実験と理論

の不一致はバネの初めの蓄積エネルギー $\frac{1}{2} k x_1^2$ を見落したことで、コンデンサーの蓄積エネルギーと、バルブディスクの運動エネルギーの比、即ちバルブ駆動効率 η を一定と見なしたことによる。実際 η は (12) 式を用いると

$$\eta = \frac{p^2 / 2m}{\frac{1}{2} C V^2} \propto V_0^2 \dots (14)$$

となり、充電電圧の二乗に比例する。

Fig 9 を見てすぐ気付くことは 6.5 KV では鋸歯状波が二つ見られることである。これはバルブがシートの所でおどっていることを意味する。我々我々の場合、充電電圧 6.5 KV 以上の場合に観測出来た。

(c) Lever Action の確認

次に我々は念のために Gorowitz 等が言うバルブの lever action を check した。

三つの接点を并座に互に 120° に設置した Fig 10 のような回路を用いた。lever action がないなら C・R・O 上にパルスが一つしか見られないが、実際、我々は三つのパルスが出ることを確認したので、バルブが lever action していることは確かである。

* B. Gorowitz et al R.S.I. 31 146 1960.

高速電磁弁の試作 (I)

Fig. 10

以上我々が試作した弁の簡単な電氣的、機械的特性を述べたが、ガスの流れに対する特性は高速イオンゲージにより測定検討中である。又、この種の高速弁の統一的な設計法及び、技術的な問題点については次回に報告する予定である。

謝 辞

いろいろ議論していただいた、伊藤教授、石村助教授、バルブの製作を快よく引き受けて下さった甲南電機の中島技術部長、河島設計課員及び実験の手伝いをして載いた現在酒井鉄工の森君日本溶接機材の山本君の諸氏に、御礼申し上げます。