

純流体素子による圧力のオンオフ制御について

米 澤 洋*・逢 坂 一 正**

On the On-off Control of Pressure with Fluidic Elements

Abstract

In recent years, it has been reported a number of application of fluidics to industry. But there is few application to process control. This report deals with an on-off control of pressure in air tank by means of fluidics.

The control system is constructed with an air tank, an on-off operation valve, needle valves, an orifice and one fluidic bistable element etc..

The characteristics of elements are examined, and the results is presented. As one of result, it was recognized that the plant consisting of capacitance and restriction is not the first order element, and about this point a theoretical explanation is offered.

This control system is very simple but sufficient results were obtained in respect to the response of system. But in this system, adjustment of supply pressure to a fluidic element is unavoidable in order to get good responses of system. This problem is the subject for a future study.

1. は し が き

近年、純流体技術の応用例として種々の報告がなされているが、プロセス制御系に関するものは比較的少ないようである。そこで重要なプロセス量の一つであるタンク内圧力のオンオフ制御に純流体素子を用いた研究結果を、主として実験結果に基づいて報告する。

本研究では

- (a) 制御系はできるだけ簡単にすること
- (b) 純流体素子を用いることによる問題点を明確にすること
- (c) 実在のプロセスへの適用性を検討すること

を明らかにすることを目的とした。

2. 系 の 構 成

実験に用いた制御系を Fig. 1 に示す。

タンク；鉄製，容積 $4.085 \times 10^4 \text{ cm}^3$ ，耐圧 2 kg/cm^2g

オンオフ操作弁；超低圧空気作動弁，操作入力圧 $0.04 \sim 0.06 \text{ kg/cm}^2g$ ，250 AH（小金井製作所）

オリフィス； $0.1 \text{ cm}\phi$

針弁 1， 2；高性能マイクロバルブ，MV-212（大倉電気 K. K.）

* 九州工業大学（北九州市戸畑区仙水町1の1）

** 岡山理科大学

フリップフロップ素子; 4FF-010 (米国, ノルグレン社)

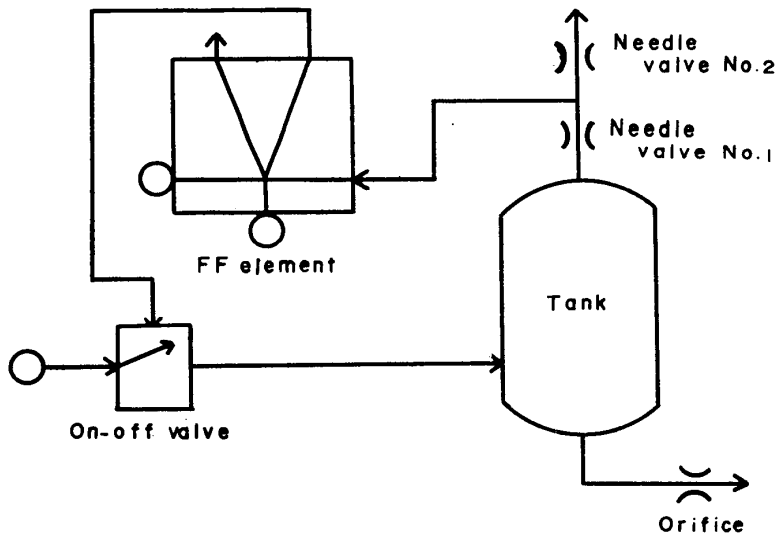


Fig. 1 On-off control system

オンオフ操作弁はフリップフロップ素子からの入力圧がないときは閉の状態, 逆のときは開の状態になる. タンク内圧力の目標値設定はフリップフロップ素子の左側の制御圧で行なう. 針弁1および2により, タンク内の圧力変動を約0.1のゲインで検出し, フリップフロップ素子の右側制御口に与える. タンク内空気はオリフィスを経て, 常時

大気中へ排出される. このオリフィスは次段に結合する装置のインピーダンスを代用したものである.

ここで動作原理を簡単に述べる. ある時点でタンク内圧力が目標値より高くなれば, その圧力は針弁1, 2よりなる検出部によりフリップフロップ素子にフィードバックされ, その出力信号は左側の出力口に切り換わる. したがってオンオフ操作弁は閉じて, タンクへの流入空気を遮断する. しかしタンク内の空気はオリフィスを経て絶えず排出されているので, タンク内圧力はしだいに低下しある圧力でフリップフロップ素子の出力信号は右側に切り換わる. そこでオンオフ操作弁は閉となり, タンクに空気が供給される. 上述の動作の繰り返しでタンク内圧力は目標値のわまりでオンオフ制御される.

3. 各要素の特性

3-1 フリップフロップ素子のオンオフ特性

制御性能に重要な影響をおよぼすコントローラ, フリップフロップ素子の切り換え特性が問題となる. フリップフロップ素子の出力の切り換えは素子への供給圧 p_s , 左側制御圧 p_{c1} , 右側制御圧 p_{c2} の相対関係によって定まり, 実験結果から安定に切り換わ

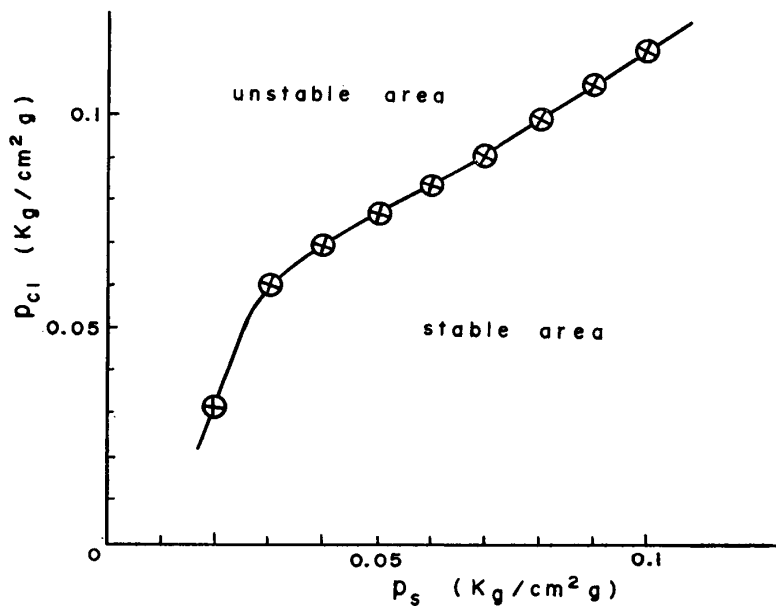


Fig. 2 Stable area of swiching

る領域と不安定になる領域が存在することが分り、その領域を Fig. 2 に示す。不安定領域では発振現象が生じるなどして、コントローラとして用いることはできない。

つぎにオンオフ特性を求めると Fig. 3 に示すようにヒステリシスを持つオンオフ特性になることが判明した。しかも、素子の出力圧 p_o は供給圧 p_s に依存し、ヒステ

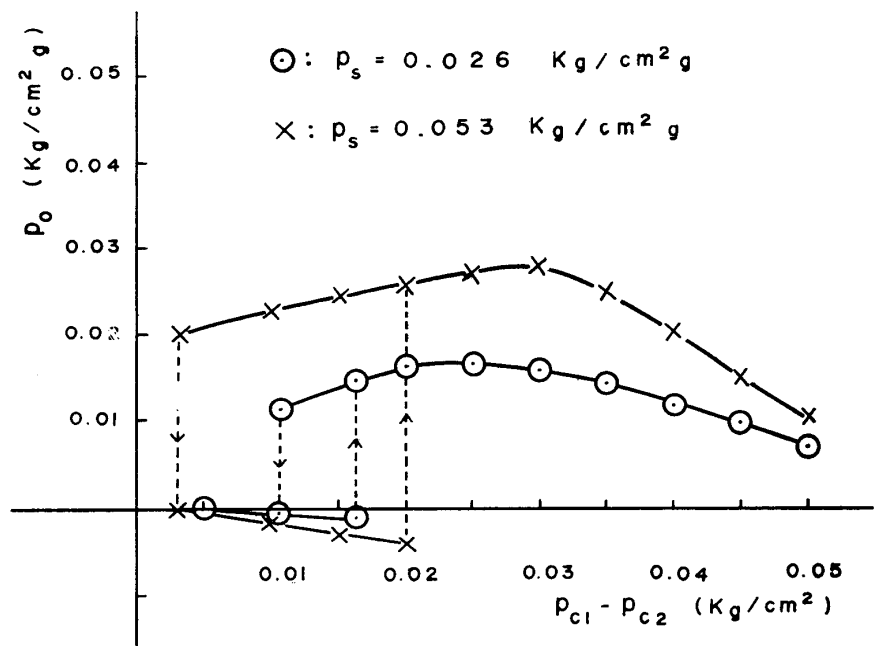


Fig. 3 Switching characteristics of FF element

リシス幅は p_s と制御差圧 $p_{c1}-p_{c2}$ の両者に依存するので、希望する特性をうるためには p_s , p_{c1} , p_{c2} を調整しなければならない。したがって制御性能は目標値 (p_{c1} で設定) に応じた p_s の調整により左右される。

3-2 圧力検出部の特性

タンク内圧力は針弁2個を用いて、Fig. 1 に示したような方法で検出した。検出圧はタンク内圧力と線形性を有するのが望ましい。針弁1, 2の開度を適当にとると Fig. 4 に示す特性を得た。ここで P はタンク内圧力であり、 P_f は針弁1, 2間の圧力である。フリップフロップ素子を結合しない場合はほぼ理想的な直線関係、ゲイロン0.1を有する。フリップフロップ素子を結合するとゲインが少し低下し、直線性が少し悪くなるが実用上はこの程度の精度でも十分であろう。なお、針弁を通る流量は微少でオリフィスを通る流量に比べて無視でき

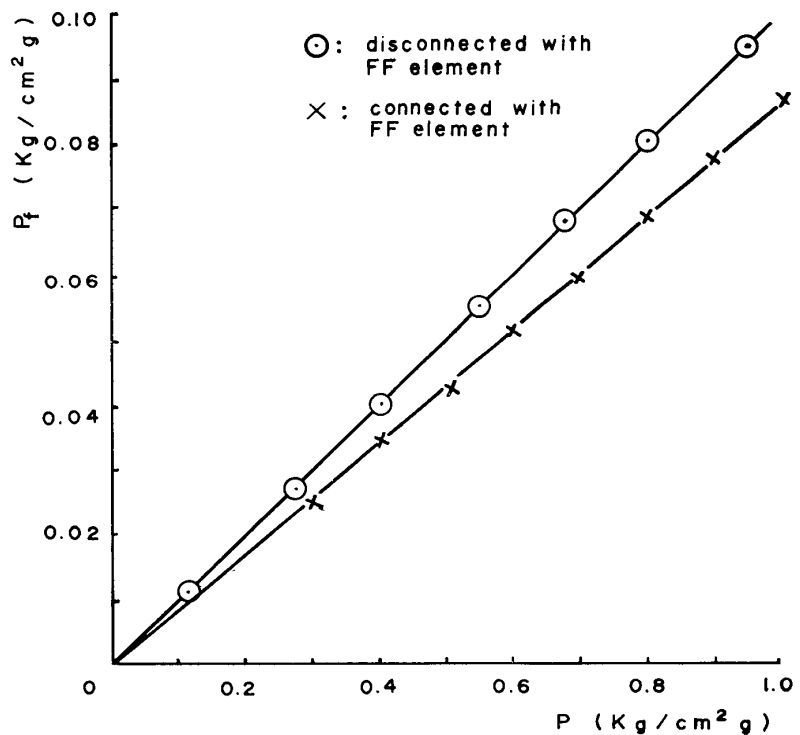


Fig. 4 Relation of P and P_f

る程度であった。

3-3 操作弁およびオリフィスの流量特性

開時の操作弁およびオリフィスの流量特性を Fig. 5 (a), (b) に示す。図 (a) では操作弁の上

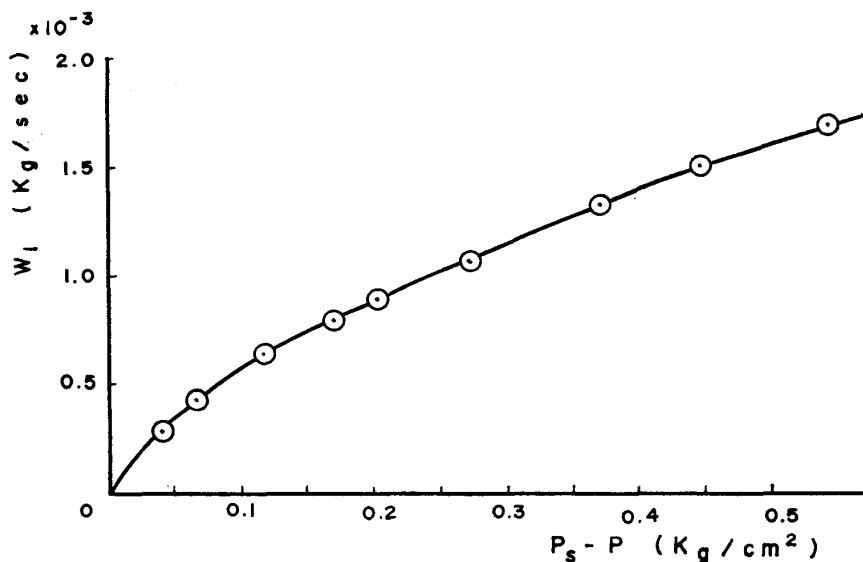


Fig. 5 Characteristics of mass flow rate
(a) : on-off valve

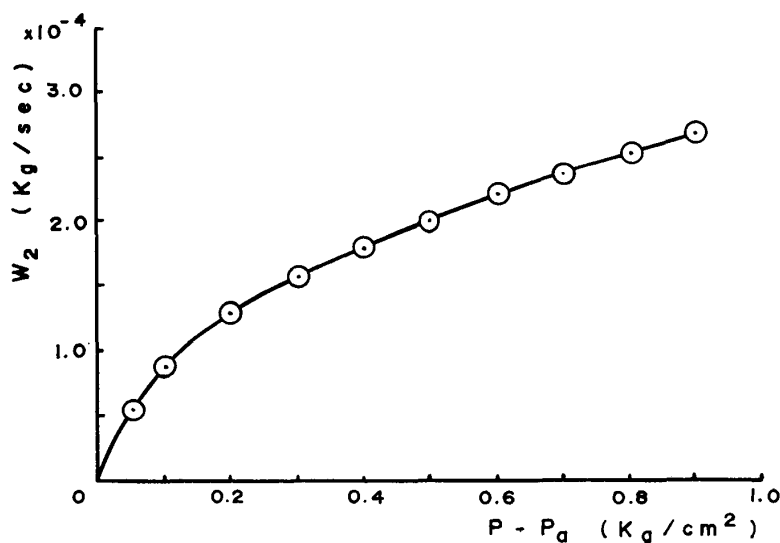


Fig. 5 Characteristics of mass flow rate
(b) : orifice

流側圧力を P_s , 下流側圧力を P とし, 差圧 $P_s - P$ と重量流量 W_1 との関係を示す。図 (b) ではオリフィスの上流側圧力 P , 下流側圧力 P_a として同様の関係を示す。これらの図から, 操作弁を開にした状態において, タンク内圧力 P の最終到達圧 $P_{(\infty)}$ に対応する P_s の大略値を読みとることが可能である。たとえば $P_{(\infty)} = 0.6 \text{ kg/cm}^2g$ ならば $P_s \doteq 0.64 \text{ kg/cm}^2g$ となる。

つぎに操作弁, オリフィスの流量係数を実験結果より求めると Fig. 6 (a), (b) が得られた。いま $\alpha_1 P_1$ を操作弁の流量係数と流通面積の積とし, α_2 をオリフィスの流量係数とすると, 実験式として

$$\alpha_1 F_1 = 0.001 \log(P_s - P) + 0.017 \text{ (cm}^2\text{)} \dots\dots\dots (1)$$

$$\alpha_2 = 0.0188 \log(P - P_a) + 0.775 \dots\dots\dots (2)$$

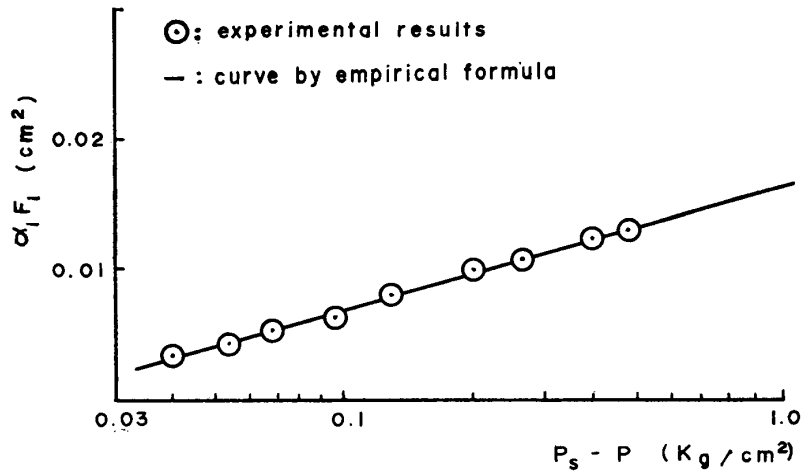


Fig. 6 Discharge coefficient
(a) : on-off valve

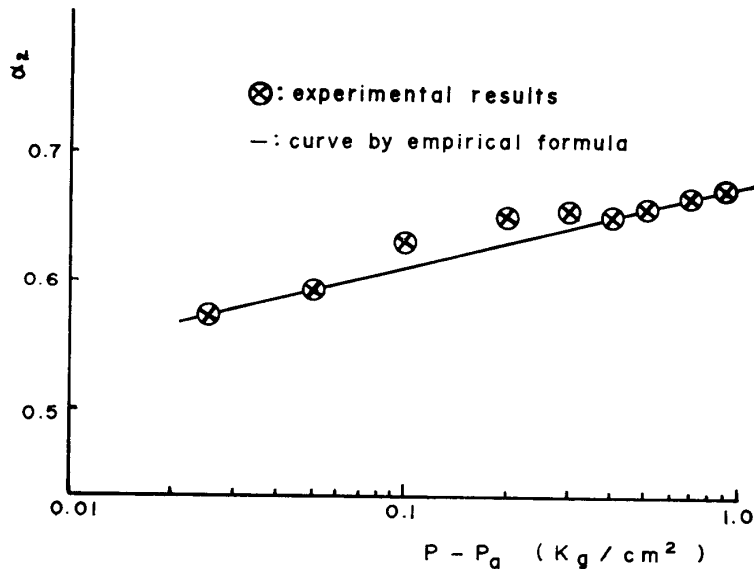


Fig. 6 Discharge coefficient
(b) : orifice

が導かれる。ただし、操作弁の開時の流通面積 F_1 は測定不能なので、流量係数に含めて考えた。

3-4 制御対象の過渡応答

タンク・絞りよりなる制御対象の特性を求めめるため、過渡応答法を用いることにする。以下、簡略に理論的考察をする。いま、タンクへの流入流量を W_1 (kg/sec), 流出流量を W_2 (kg/sec), タンクへの供給圧を P_s (kg/cm² abs), タンク内圧力を P (kg/cm² abs), 大気圧を P_a (kg/cm² abs), タンク内の空気量を G (kg), タンクの容積を V (cm³) とする。流入、流出量のつり合い条件より、操作弁が開の状態では

$$\frac{dG}{dt} = W_1 - W_2 \dots\dots\dots (3)$$

操作弁が閉の状態では

$$\frac{dG}{dt} = -W_2 \dots\dots\dots (4)$$

空気を理想ガスと見なして、状態方程式 $PV=GR T$ (T ; タンク内空気の絶対温度 °K, R ; 空気のがス定数 $\text{cm}^3/\text{°K}$) より

$$\frac{dG}{dt} = \frac{V}{RT} \frac{dP}{dt} \dots\dots\dots (5)$$

また W_1, W_2 は断熱噴流と見なし、タンク内で空気温度は回復すると仮定すると

$$W_1 = \alpha_1 F_1 \frac{P_s}{\sqrt{RT}} \phi\left(\frac{P}{P_s}\right) \dots\dots\dots (6)$$

$$W_s = \alpha_2 F_2 \frac{P}{\sqrt{RT}} \phi\left(\frac{P_a}{P}\right) \dots\dots\dots (7)$$

ただし、 $\left(\phi\left(\frac{P_2}{P_1}\right) = \sqrt{\frac{2g}{\kappa-1} \left\{ \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right\}}\right)$, κ ; 空気の定容、定圧比熱比,

$\frac{P_2}{P_1} \geq 0.528$, $\frac{P_2}{P_1} < 0.528$ のときも流量係数を補正して準用

が得られる¹.

結局、操作弁が開の状態では (3), (5), (6), (7) 式より

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\sqrt{RT}}{V} \{ \alpha_1 F_1 \phi\left(\frac{P}{P_s}\right) P_s - \alpha_2 F_2 \phi\left(\frac{P_a}{P}\right) P \} \dots\dots (8)$$

操作弁が閉の状態では (4), (5), (7) 式より

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{\sqrt{RT}}{V} \alpha_2 F_2 \phi\left(\frac{P_a}{P}\right) P \dots\dots\dots (9)$$

となる。この (8), (9) の微分方程式に実験式 (1), (2) を適用し、初期条件を考慮してステップ応答の数値解を求めると Fig. 7 (a), (b) の実線の曲線が得られる。図(a)では、 $P_s = 1.16 \text{ kg/cm}^2\text{g}$ として計算した。

図中⊙, ⊗は実験値であるが、かなりの精度で一致している。

図からわかるように、この制御対象は一次おくれ要素とはいえない。したがって厳密な意味での時定数は存在しない。そこでステップ応答における63%変化に要する時間を近似時定数と考えて、それを図示すると Fig. 8 が得られ

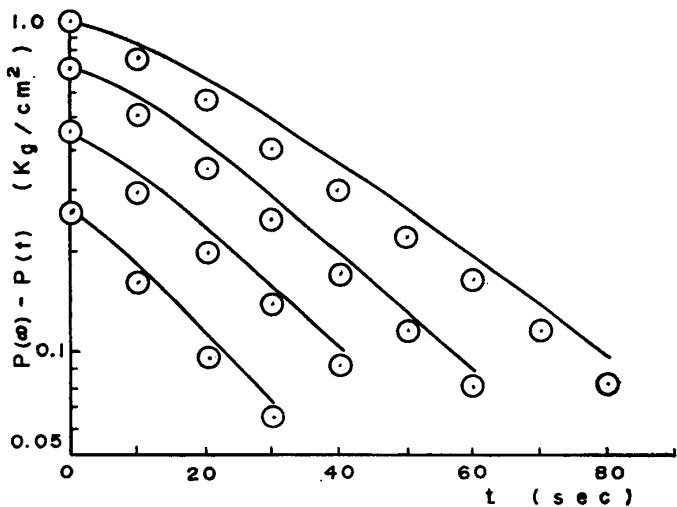


Fig. 7 Step response characteristics
(a) : filling the tank

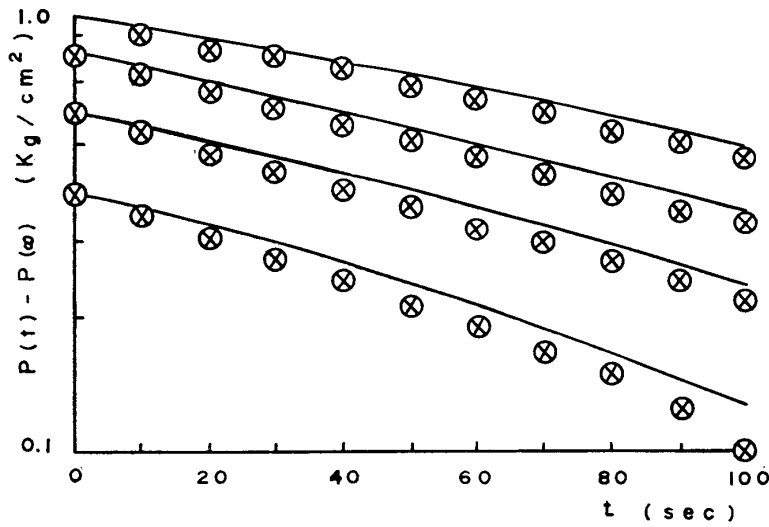


Fig. 7 Step response characteristics (b) : emptying the tank

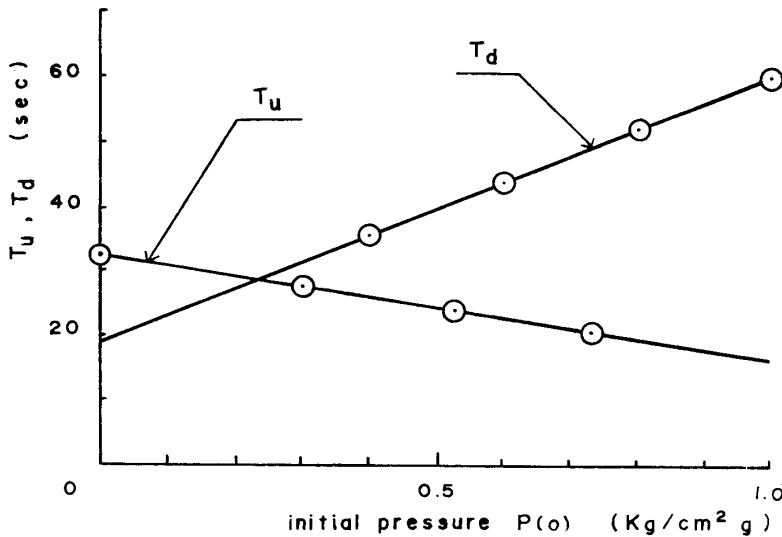


Fig. 8 Approximate time constants of plant

る。 T_u は圧力上昇時、 T_d は圧力降下時の近似時定数である。これより近似時定数は、実験した範囲内ではタンク内圧力の一次関数と考えることができ

$$T_u = -15.0P + 32.0 \text{ (sec)} \dots\dots\dots (10)$$

$$T_d = 41.4P + 19.0 \text{ (sec)} \dots\dots\dots (11)$$

が得られる。

4. 制御系の応答

操作弁への供給圧 $P_s = 1.6 \text{ kg/cm}^2g$ として、目標値を一定 (0.47 kg/cm^2g) にしたときの定常状態における制御系の応答結果を Fig. 9 (a), (b) に示す。設定圧 (フリップフロップ素子の左側制御圧) は $p_{r1} = 0.05 \text{ kg/cm}^2g$ であり、図 (a) ではフリップフロップ素子への供給圧 $p_s = 0.027 \text{ kg/cm}^2g$ であり、図 (b) では $p_s = 0.034 \text{ kg/cm}^2g$ のときの結果である。これらの図で上側の曲線はタンク内圧力を、下側の曲線は操作弁への入力圧をそれぞれ記録したものである。フリップフロップ素子がヒステリシスを有するオンオフ特性であるため、制御量にリミットサイク

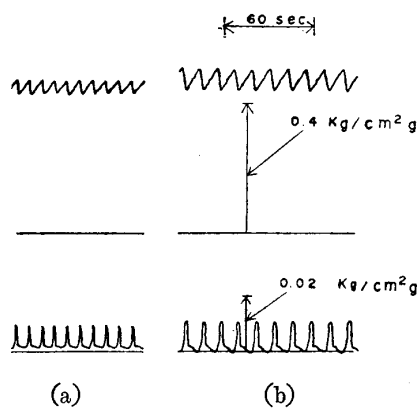


Fig. 9 Records of system variable

リングを発生している。図(a), (b)より、目標値が変化しなくてもフリップフロップ素子への供給圧を変更すれば、平均制御量、制御量振動振幅および振動周期が変化することがわかり、したがって供給圧に対するフリップフロップ素子のヒステリシス幅の感度の充分低い素子が望ましい。

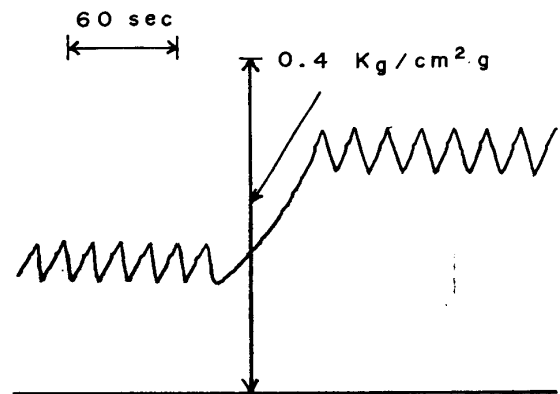
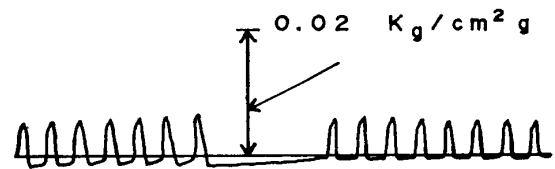


Fig. 10 Record of system variable



つぎに目標値を変更($0.13 \rightarrow 0.44 \text{ kg/cm}^2\text{g}$)したときの結果を Fig. 10 に示す。データは $P_s = 1.6 \text{ kg/cm}^2\text{g}$, $p_s = 0.03 \text{ kg/cm}^2\text{g}$, p_{c1} は $0.012 \text{ kg/cm}^2\text{g}$ から $0.03 \text{ kg/cm}^2\text{g}$ に突変した。このときの応答は一般のオンオフ制御系におけると同様に連続制御の場合よりすぐれた特性を有しているので問題はない。

5. あとがき

純流体素子を用いたタンク内圧力のオンオフ制御に関して種々検討した結果、つぎのことが判明した。

- (a) コントローラはフリップフロップ素子一個だけでも可能で制御系は非常に簡単にできる。
- (b) フリップフロップ素子のリレー特性では、供給圧に対してヒステリシス幅が目標値に応じて変動する。
- (c) 実用化のためには、供給圧に関するヒステリシス幅の感度の充分低いフリップフロップ素子を用いるか、あるいは複数個の素子を用いて目標値が変更されてもコントローラ特性を不変にする必要がある。
- (d) 定常状態における制御量の振動振幅、振動周期をある程度調節できる。

以上の点について考慮するならば、このような純流体素子を用いたアナログ的オンオフ制御方式は充分実用に耐えうるであろう。

おわりに本実験を行なう際に大変お世話になりました現在出光石油化学の藪木秀二氏に心より感謝します。

参 考 文 献

1. たとえば菅原菅雄校閲：“応用熱力学”，P. P. 144~146, 産業図書, (1961)