

空気圧アクチュエータ用小型比例制御弁の開発

Development of Small Proportional Control Valve for Pneumatic Actuator

上原 正太, 平井 慎一 (立命館大学)

Shota UEHARA and Shinichi HIRAI

Department of Robotics, Ritsumeikan University

This report describes a challenge to miniaturize proportional control valves. First, we decide the specification of a proportional control valve from demanded control time and working pressure range. Second, we calculate the flow rate to meet the demanded control time. Then we verify them experimentally. The size of the orifice to secure the flow rate is verified experimentally. Next, we propose a new structure of a proportional valve appropriate for its miniaturization, and verify the proposed structure using its macromodel. Finally, we propose a new concept of vibration valves to miniaturize valves.

Key Words: Proportional Control Valve, Pneumatics, Pressure Control

1. はじめに

近年、空気圧を動力源とした柔らかいアクチュエータの研究・開発が行われている¹⁾。空気圧は安全性に優れており、最近では産業界のみならず福祉機器の分野などにも用いられることが多くなった。最近では、ゴムチューブを用い、空気圧で膨らませることで出力を得る人工筋など、柔らかいアクチュエータの研究・開発も行われている。このようなアクチュエータは装具などへの応用が期待されている。

しかし、空気圧アクチュエータを制御するために必要となる比例制御弁が、アクチュエータに対し大型で重量も大きい。装具などに応用する場合は、比例制御弁が大きな荷物となる。また、アクチュエータ毎に比例制御弁が必要となるので、アクチュエータの数が多ければ、アクチュエータ本体と離れた場所に多くの比例制御弁を設置することになり、移動が困難なシステムとなる。それだけではなく、各アクチュエータと比例制御弁とを繋ぐホースの量が膨大なものとなり、場合によっては動作の制約が生じてしまうおそれがある。

そこで本研究では、比例制御弁をアクチュエータ本体に内蔵できるほど小型・軽量化し、空気圧システム全体の小型化を目指す。

本報告ではまず、制御時間などの仕様を定め、その実現に必要な流量が確保できる範囲で小型化を行うという方針を固め、流路の大きさなどを決めるべく実験を行った。そして、流路の大きさをどの程度まで小さくできるかを求めることで、比例制御弁がどの程度まで小型化可能かを把握した。そして、小型化に向けた弁の構造を考案し、マクロモデルの試作および動作確認を行った。

2. 比例制御弁

2.1 比例制御弁の動作

比例制御弁の動作を説明する。まず、入力信号が増大するとその大きさに応じて給気用弁が開き、排気用弁は閉じる。出力圧力は、圧力センサを介して制御回路にフィードバックされ、入力信号に比例した出力圧力になるまで訂正動作が働く。同様に、入力信号が減少すると給気用弁は閉じ、排気用弁が開くため、出力圧力が減少する。以上の動作により入力信号と比例した出力圧力を得ることができる。

2.2 開発する比例制御弁の仕様

開発する比例制御弁は、制御可能圧力が最大 0.2MPa で、内径 $\phi 34\text{mm}$ × 高さ 30mm の剛体容器を 0.0Pa から 0.2MPa まで 0.1s で加圧できる仕様とする。この容積の基準は当研究室にて行われているゴムチューブを用いた空気圧アクチュエータの研究にて使用しているアクチュエータの内容積をもとに決定した。

3. 弁の流量

3.1 仕様を満足する流量

比例制御弁の小型化は、センサや回路など各要素の小型化を行うことで実現できる。その要素の中に、流量を制御する部分となるオリフィス（流路中にある絞りの部分）が含まれる。その断面積が大きければ一度にたくさんの空気が流れ、小さければその逆である。オリフィスの断面積の縮小と流量の増大という目的がトレードオフの関係であるため、必要な流量を得られる範囲で小さくする必要がある。

図 1 に示すように、容積 V 、圧力 P_0 （大気圧）の容器を時間 t で P_{desired} に加圧する。これを実現するような流量 q を求める。

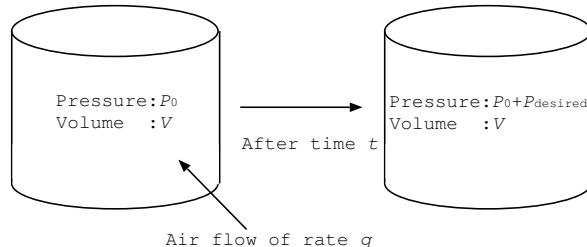


Fig.1 Apply pressure to container

ボイルの法則を利用すると流量は

$$q = \frac{P_{\text{desired}} V}{P_0 t} \times \frac{T_0}{T} \quad (1)$$

と求まる。なお、標準状態での流量に換算するため、 T_0/T の項 ($T_0 = 273\text{K}$) を乗じている。2.2 節で示した仕様の値 $P_{\text{desired}} = 0.2\text{MPa}$ 、 $V = 27237\text{mm}^3$ 、加圧前の容器内の圧力 $P_0 = 1008\text{hPa}$ 、空気の温度 $T = 296.8\text{K}$ を代入すると、

$$q = \frac{0.2 \times 10^6 \times 27237 \times 10^{-6}}{1008 \times 10^2 \times 0.1} \times \frac{273}{296.8} \times 60 \approx 29.8 \text{ l/min}$$

となる。

この流量にて実際に容器に加圧を行った結果を図 2 に示す。容器は、内径 $\phi 34\text{mm}$ × 高さ 30mm のアクリル製容器を用い、供給側の圧力は 0.5MPa である。図 2 より、容器内の圧力が上昇を始めてから 0.095s 付近で目標値の 0.2MPa に達している。つまり、要求仕様を満たすために必要な流量が 29.8l/min であることが確認された。

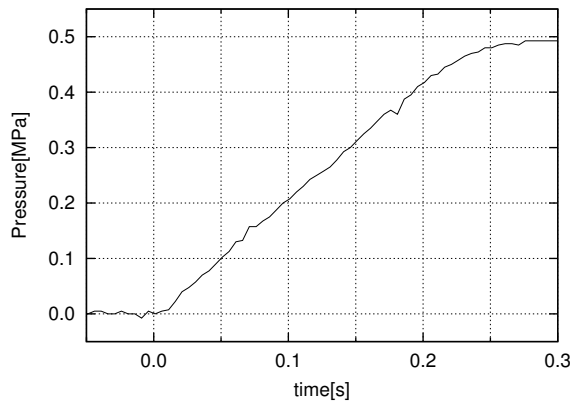


Fig.2 Pressure during air supply

3.2 必要な流量を確保するオリフィスの断面積

先ほど確認した流量を確保するためのオリフィスの断面積を求める。図3にオリフィスを模式的に表す。上流側の流速 u_1 が下流側の流速 u_2 に比べて十分小さいと近似し、上流側の任意の点とオリフィス部分の2点間に対し、気体に対するベルヌーイの定理の式を用いれば、流量とオリフィスの断面積の関係を得ることができる²⁾。

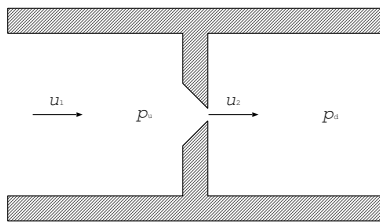


Fig.3 Orifice

任意の流量 q を確保するために必要なオリフィスの断面積 a は、

$$a = \frac{qp}{p_u} \sqrt{\frac{RT}{2}} \frac{1}{f(z)} \quad (2)$$

ただし、

$$f(z) = \begin{cases} \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa-1} (z^{2/\kappa} - z^{(\kappa+1)/\kappa})} & (0.528 \leq z \leq 1) \\ \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa-1} \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{2/(\kappa-1)}} & (z < 0.528) \end{cases} \quad (3)$$

で求めることができる。ただし、 p_u は上流側圧力、 p_d は下流側圧力、 κ は比熱比（空気は 1.4）、 R は気体定数、 ρ は密度（空気は 1.2928g/l）、 z は圧力比で p_d/p_u である。

特に、 $z < 0.528$ で $p_u = 0.5\text{MPa}$ 、 $T=300\text{K}$ の空気の場合において、3.1 節で計算した流量 $q=29.8\text{l/min}$ を代入すると、

$$a \approx 0.55 \text{ mm}^2$$

となり、オリフィスの断面積は 0.55mm^2 まで小さくできることがわかる。オリフィスが円形ならば直径は 0.84mm となる。実際にオリフィスを通して流量を測定した結果を図4に示す。使用したオリフィスは直径 0.8mm である。圧力比が 0.528 以下では流量は一定となる。理論値では 27.4l/min であるが、測定結果は 30.0l/min となっている。オリフィスはドリルで穴をあけることで製作したため、実際は 0.8mm よりやや直径は大きくなっている。このことを考慮すると、流量 29.4l/min を確保するのに必要なオリフィスの直径は 0.84mm という結果が妥当であると考えられる。

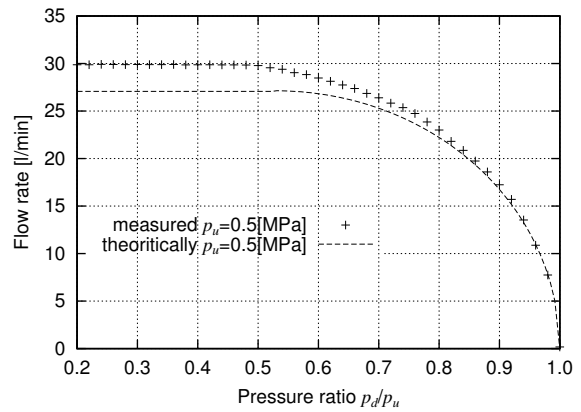


Fig.4 Flow rate - pressure ratio diagram

4. 比例制御弁マクロモデル

ここでは、比例制御弁の構成を検討し、マクロモデルの製作と動作検証を行った。

比例制御弁は、目標圧力と制御対象内の圧力との差に応じて流量を変化させながら空気を供給・排気し、圧力制御を行う。そこで、流量が可変の小型弁を作成する必要がある。ここでは流量が決まっている ON/OFF 弁を複数個並列に配置し、ON とする弁の数を変更することで流量を変更するマクロモデルを製作した。構成を図5に示す。

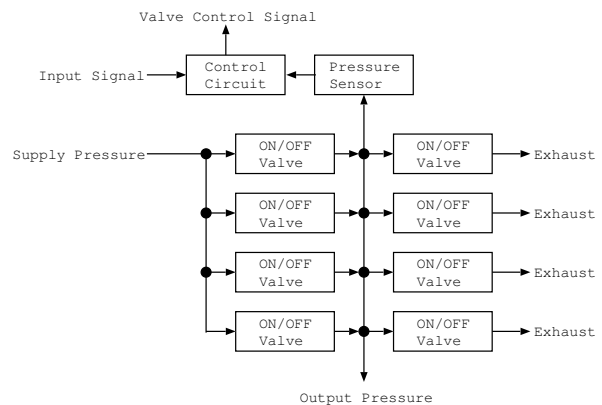


Fig.5 Macromodel of proportional control valve

このマクロモデルを実際に製作し、ステップ入力にて動作させた結果を図6、図7に示す。両図からわかるように、入力信号に対して圧力が追従している。流量の変化は連続的ではないが、圧力を制御できることが確認できた。

5. 振動を利用した小型 ON/OFF 弁の試作

前節までの試算を基に、小型化に有利な構造の弁を考案・試作し、動作検証を行った。

図8(a)は従来の弁の構造である。オリフィスを塞ぐ弁が梁などによって取り付けられており、それが開閉することで弁の ON/OFF を行っている。しかし小型化を考えた場合、この構造では弁とオリフィスの位置決めがシビアになり、製造において組み付け精度が要求される。また、熱などによる歪みによって生じるリークなども小型になるほど問題である。そこで、同図(b)のように弁の部分が梁などで固定されていない弁を考える。この構造では、弁が圧力によってオリフィスに押し付けられる際に位置がずれることがないため、小型になってもリークが生じにくいというメリットがある。しかし、この弁をどのようにして開閉するかが問題になる。そこで我々は振動によって弁を開閉する機構を考案した。

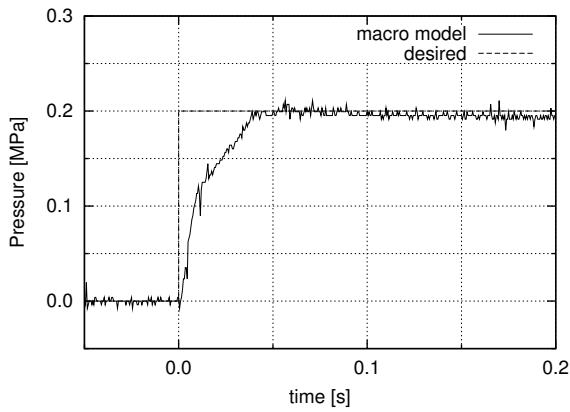


Fig.6 Pressure control by macromodel(During supply)

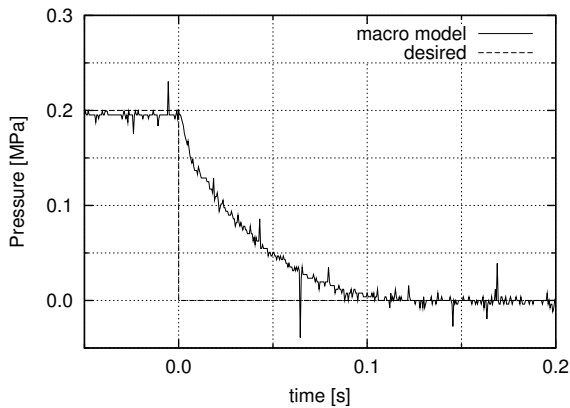


Fig.7 Pressure control by macromodel(During exhaust)

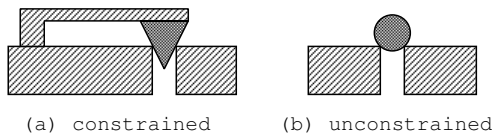


Fig.8 Orifice and plug

図9に考案した弁の構造を示す。流路を設けられた金属製台座で積層型圧電アクチュエータを挟む構造となっている。上下の台座の流路はチューブで接続されており、ケース外部から供給された空気はこれらの流路とチューブを通して外部へ排出される。通常は、上側の台座に設けられたオリフィス部分を金属球が塞いでいるため空気は流れない。つまり、弁はOFFの状態である。ここで積層型圧電アクチュエータを数kHz程度で駆動して振動させることでオリフィスと金属球の間に隙間を作り、空気を流すことができる。つまり、弁をONの状態にすることができる。

上記の原理を用いて弁を試作し、動作検証を行った結果を図10に示す。試作弁のオリフィスは2mm、金属球はφ6.0mmの鉄球を用い、供給圧力0.5MPa、駆動電圧40Vで動作させた。グラフからわかるように、駆動周波数2.0、4.0kHz付近で流量が大きく変化している。現段階では駆動周波数の変化と流量変化の因果関係は未確認である。しかし、駆動周波数の変化やPWMによって流量が制御できる可能性が考えられる。

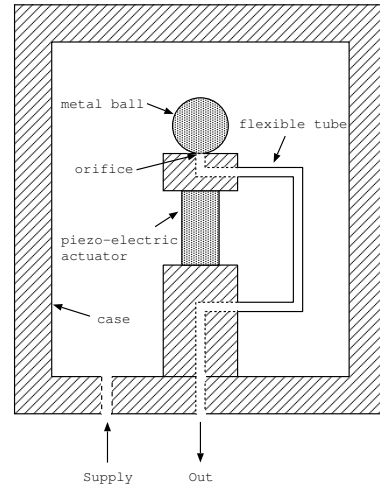


Fig.9 Concept of vibration valve

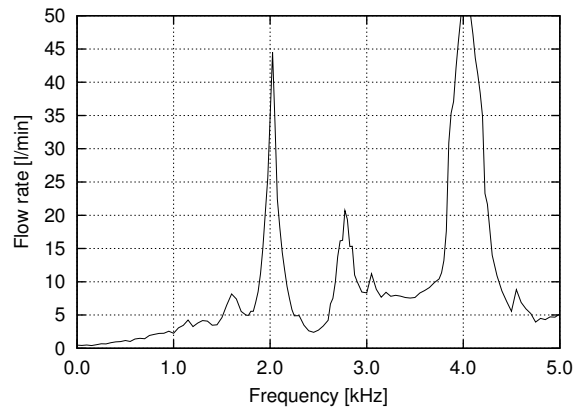


Fig.10 Drive frequency - flow rate diagram

6. おわりに

本研究では、小型化と高速応答のための流量の確保という目標を両立させるため、内径φ34mm×高さ30mmの剛体容器を0.0Paから0.2MPaまで0.1sで加圧するという仕様を定め、このために必要な流量が確保できる範囲で小型化を行うという方針を定めた。そして、その仕様を満たす流量を計算して求め、実際に制御対象を0.1sで0.0Paから0.2MPaに加圧できることを確認した。その上で、その流量を確保できるオリフィスの断面積を計算したところ、0.55mm²まで小さくできることがわかった。実際にオリフィスで検証したところ、仕様を満たす流量が流れることが確認された。

比例制御弁の動作を確認するため、単純なON/OFF弁を複数個並列に配置して開く弁の個数の変化により流量を変更するマクロモデルを製作し動作検証を行った。最後に、積層型圧電アクチュエータを用いた振動駆動弁の考案と原理検証を行った。今後はこの振動駆動弁の改良や解析などを行っていく予定である。

参考文献

- 1) 平井慎一, 升井友洋, 川村貞夫, "複数の単一運動チューブから構成される空気圧群アクチュエータの開発", 日本ロボット学会誌, 20巻3号, pp.299-306, 2002.
- 2) 武藤高義, "アクチュエータの駆動と制御", コロナ社, pp.147-150, 2002.