

空気圧アクチュエータ用小型比例制御弁の開発

立命館大学理工学部 上原正太*, 平井慎一*

Development of Small Proportional Valve for Pneumatic Actuator

Keywords : 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, 環境に対して常に清潔に保てるという点からも, 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. 装具などに应用する場合は, 比例弁が大きな荷物となる. また, アクチュエータ毎に比例弁が必要となるので, アクチュエータの数が多いほど, アクチュエータ本体と離れた場所に多くの比例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図ることを目指す.

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. 比例弁

2.1 比例弁の動作

比例弁のブロック図を図1に示す.

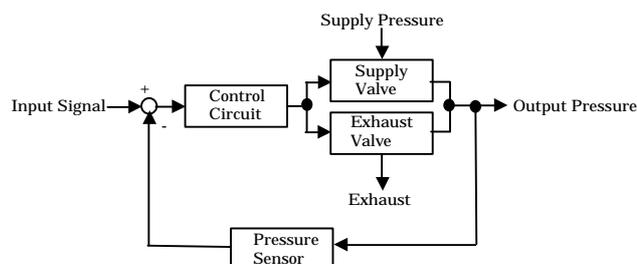


図1 比例弁のブロック図

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 比例弁の仕様

開発する比例弁は, 制御可能圧力が最大 0.2[MPa]で, 内径 34[mm] × 高さ 30[mm]の剛体容器を 0[Pa]から 0.2[MPa]まで 0.1[s]で加圧できる仕様とする. この容積の基準は, 現在本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. 比例弁の流量

3.1 必要な流量

比例弁の小型化は, 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. 比例弁の小型化にあたってオリフィスは他の要素と異なり, ただ小さければ良いというものではなく, 必要な流量を得られる範囲で小さくする必要がある.

図2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.

* 立命館大学理工学部ロボティクス学科
(〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

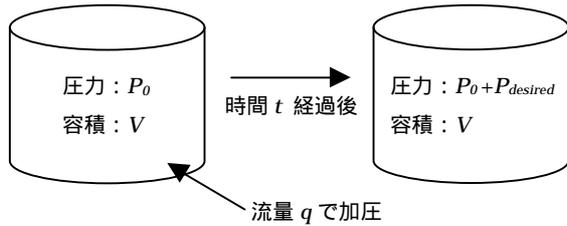


図2 制御対象への加圧

ボイルの法則を利用して、

$$q = \frac{P_{desired} V}{P_0 t} \times \frac{T_0}{T}$$

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 ($T_0=273[K]$) を乗じている。2.2節で示した仕様の値 $P_{desired}=0.2[MPa]$, $V=27237[mm^3]$, 加圧前の容器内の圧力 $P_0=1008[hPa]$, 空気 の温度 $T=296.8[K]$ を代入すると、

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

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3に示す。容器は、内径 34[mm] × 高さ 30[mm] のアクリル製容器を用い、供給側の圧力は 0.5[MPa] である。

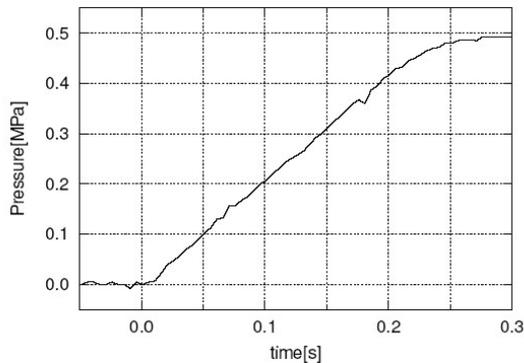


図3 制御対象の圧力の変化

図より、容器内の圧力が上昇を始めてから 0.095[s] 付近で目標値の 0.2[MPa] 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 29.8[l/min] であることが確認された。

3.2 必要な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4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⁾。

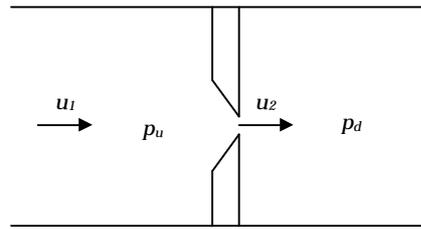


図4 オリフィス

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、

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

$$f(z) = \begin{cases} \sqrt{\frac{k}{k-1} (z^{2/k} - z^{(k+1)/k})} & (0.528 \leq z \leq 1) \\ \sqrt{\frac{k}{k-1} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{2/(k-1)}} & (0 \leq z < 0.528) \end{cases}$$

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、 k は比熱比 (空気は 1.4)、 R は気体定数、 r は密度 (空気は 1.2928[g/l])、 z は圧力比で p_d/p_u である。

特に、 $z < 0.528$ で $p_u=0.5[MPa]$ 、 $T=300[K]$ の空気の場合において、先ほど求めた流量 $q=29.8[l/min]$ を代入すると、

$$a \approx 0.55 \quad [mm^2]$$

となり、オリフィスの断面積は 0.55[mm²] 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 0.84[mm] 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5に示す。使用したオリフィスは 0.8mm である。

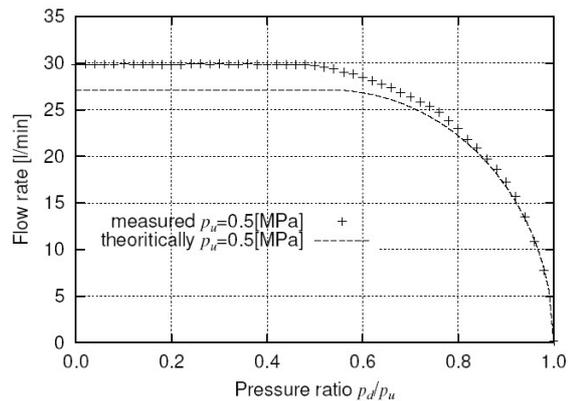


図5 オリフィスの圧力 - 流量特性測定結果

圧力比が 0.528 以下では流量は一定となる。理論値では 27.4[l/min] であるが、測定結果は 30.0[l/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 0.8[mm] 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 29.4[l/min] を確保するのに必要なオリフィスの直径は 0.84[mm] という結果が妥当であると考えられ

る。

4. 比例弁マクロモデル

ここでは、比例弁の構成を検討し、マクロモデルの製作と動作検証を行った。

比例弁は、目標圧力と制御対象内の圧力との差に応じてオリフィスの断面積を変化させ、流量をコントロールしながら圧力制御を行う。そこで、オリフィスの断面積が可変な弁を作成する必要がある。そこでオリフィスの断面積が決まっている 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制御する方法を考える。流量を連続的に変更することはできないが、ON/OFF の単純な動作であるので小型化に向いていると考えられる。この方法を検証するマクロモデルの構成を図 6 に示す。

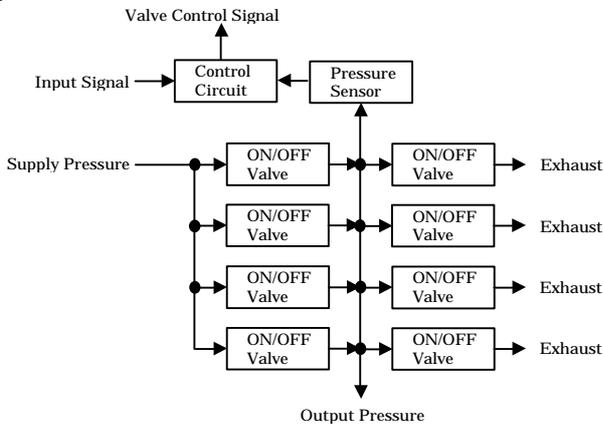


図 6 マクロモデルの構成

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 7、図 8 に示す。

両図からわかるように、ステップ入力に対して 0.1[s]以内に目標圧力に達している。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。

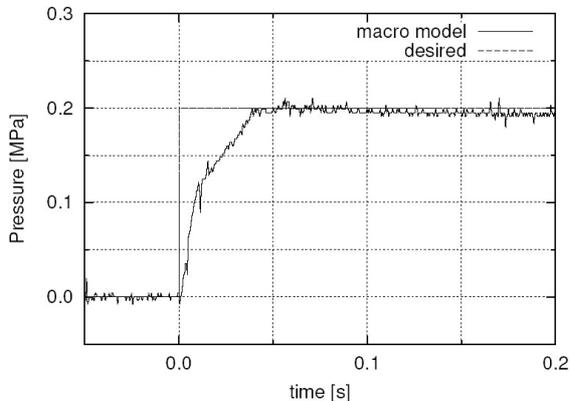


図 7 立ち上がり動作

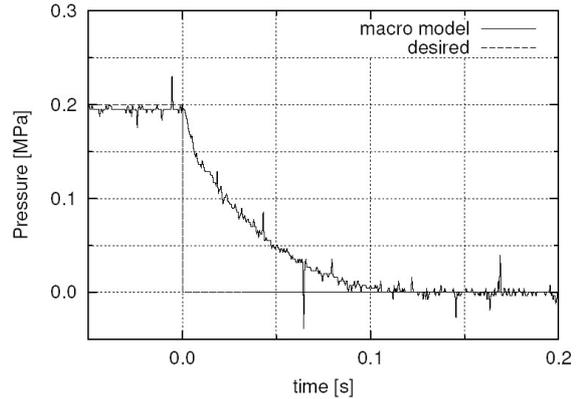


図 8 立ち下がり動作

5. 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 34[mm]×高さ 30[mm]の剛体容器を 0[Pa]から 0.2[MPa]まで 0.1[s]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 0.1[s]で 0[Pa]から 0.2[MPa]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、0.55[mm²]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。

実際の比例弁の構造は、小型化に向いているという観点から、単純な ON/OFF 弁を複数個並列に配置し、開く弁の個数を変化させることで流量を変更し、圧力制御を行う方式を採用し、マクロモデルの動作検証を行った。

今後は、マクロモデルをもとに圧電素子などのアクチュエータを採用した小型 ON/OFF 弁の製作を行う。

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(2002), pp.299/306.
- 2) 武藤高義: アクチュエータの駆動と制御, 2002, pp.147/150, コロナ社.