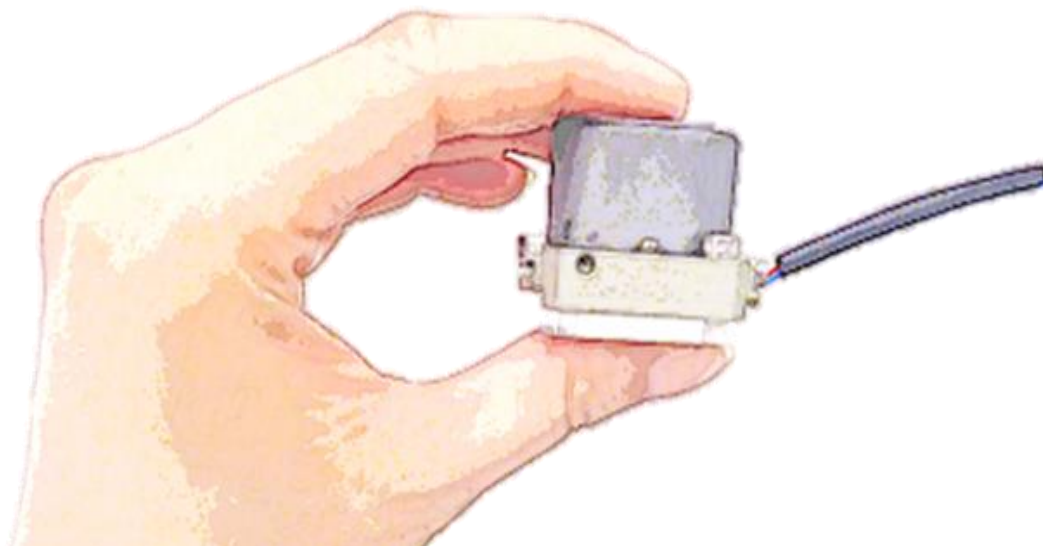


技術レポート NO.2



ノズルフラップ弁による制御

メカ&トロ研究チーム

1.はじめに

ノズルフラップ弁（以降 NF 弁）は比較的小さな流量を高応答で制御できる小型・軽量のサーボバルブである。NF 弁は空気の流れを基に分類すると、2 方弁、3 方弁、4 方弁と分類することができるが、本稿では 3 方弁および 4 方弁を取り上げることにする。これらの弁は大きさなどの違いがあるが、基本的な構成は同じである。以下ではまず NF 弁の基本的な特徴や構造を述べ、その後 NF 弁を用いた制御の実例について述べる。

2.NF 弁の構造と特徴

NF 弁の種類を図 1 に示す。3 方弁、4 方弁と制御流量によっておおまかに分類されている。

3 方弁および 4 方弁について、弁のサイズ(容積)と制御流量(供給圧力 600kPa)を対比させて図 2 に示す。

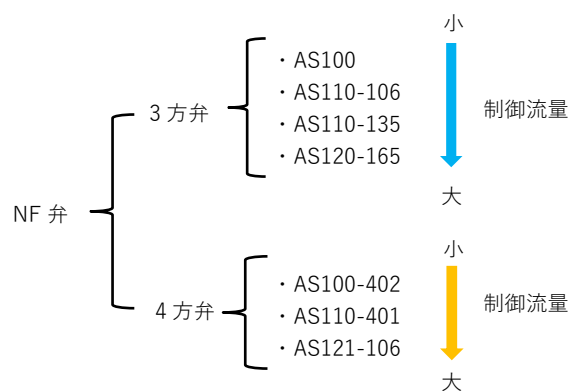


図 1. NF 弁の種類

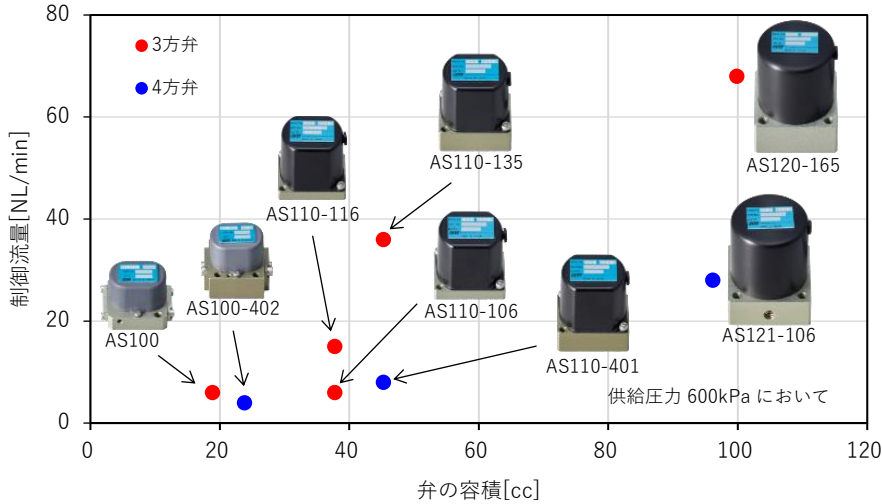


図 2. NF 弁の容積と制御流量

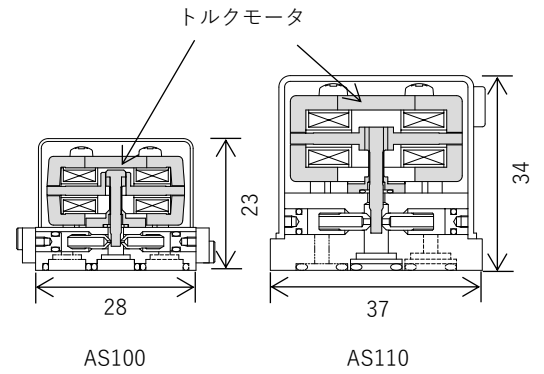


図 3. 外形比較

図 3 に AS100 シリーズ、AS110 シリーズの代表的な構造図を示す。AS100 は AS110 に比べて全体的に小型化されている。NF 弁の電気-機械変換部にはトルクモータが用いられているが、トルクモータについても小型のものを使用している。AS100 で用いられるトルクモータの定格トルクは AS110 に使用されているものに比べて 2/3 程度となっている。

NF 弁(3 方弁)の代表的な構造を図 4 に示す。電気-機械変換部であるトルクモータはマグネット、ヨークで形成された磁気回路の中でアマチュアがフレキシブル管に支えられて回転動作する。それに伴ってアマチュアに固定されたフラップが動作し、フラップの両側に配置されたノズルの開閉を連続的に行う。フラップとノズルの先端で形成される絞りは、その形状からカー

テンオリフィスと呼ばれる。フラップの動作によって供給側または排気側のオリフィス抵抗が変化し、制御ポートへの流れが制御される。トルクモータの可動部はフレキシブル管により支えられているため、摺動する

部分がなく、O リングに見られるような経年変化がない。また、磁気的なヒステリシスはあるもののメカ的なヒステリシスがなないので、非常に小さいスレシヨルド(分解能)特性を持っている。

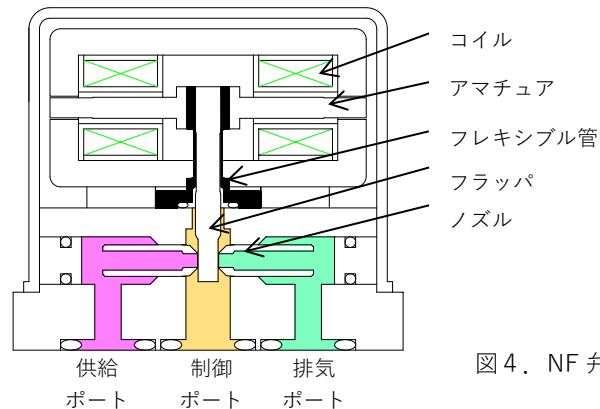


図 4. NF 弁(3 方弁)構造図

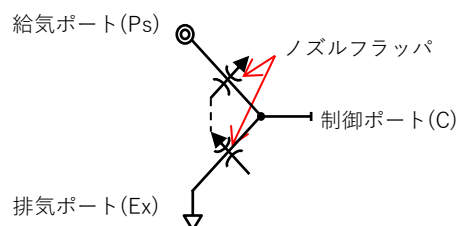


図 5. NF 弁(3 方弁)構成図

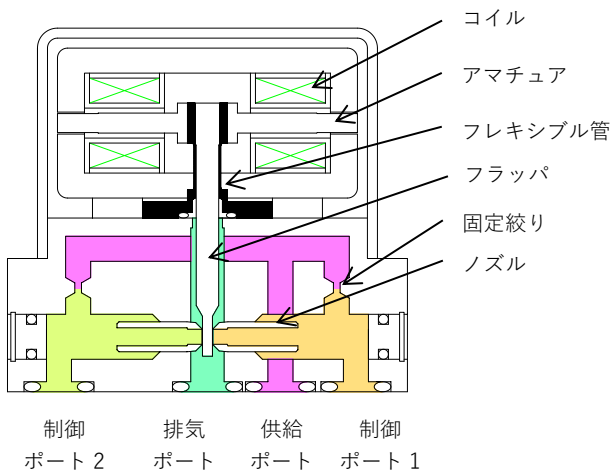


図 6. NF 弁(4 方弁)構造図

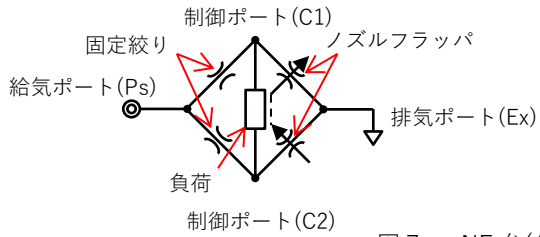


図 7. NF 弁(4 方弁)構成図



図 8. ディスク絞り

NF 弁(4 方弁)の構造を図 6 に示す。トルクモータ部は 3 方弁と同じであるがポート数およびポート配置が異なる。

4 方弁では図 7 のようにノズルフラップの上流側に固定絞りが配置されており、ノズルフラップ部とブリッジを形成している。

固定絞りは一般的なオリフィスにみられるような穴状のものと、隙間流れを利用したディスク状のものがある。図 8 に示されるディスク絞りは隙間流れを利用したものである。このディスク絞りでは流入した空気は入り口(円中心)から出口(円外周)に向かって放射状に拡張しながら流れる。また、この絞りでは絞り出口での流速が音速以下となるように設計されており、流体ノイズを低減することができる。このディスク絞りは、4 方弁の AS121-106 や 3 方弁である

AS100 と組み合わせて 4 方弁とする場合に用いられている。

3.NF 弁の特性

NF 弁の代表的な特性を 3 方弁、4 方弁についてそれぞれ示

す。これらの特性の意味については油圧サーボ弁に準拠している。静的特性として負荷圧力-流量特性、無負荷流量特性、負荷圧力特性および内部流量特性を図 9, 10, 11, 12 にそれぞれ示す。

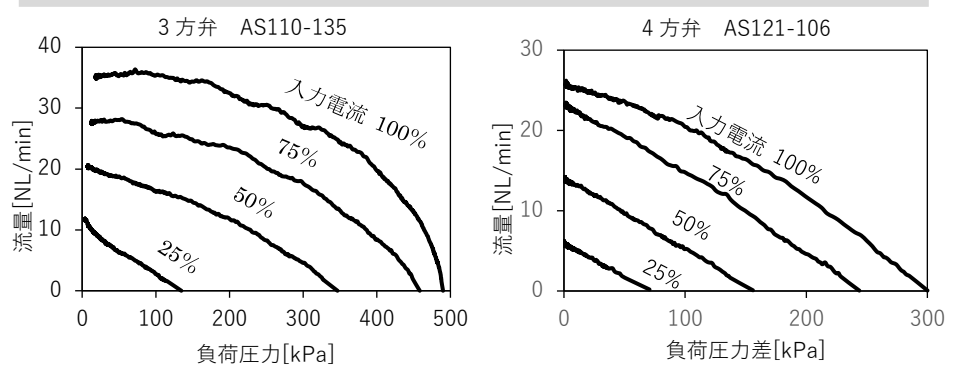


図 9. 負荷圧力 - 流量特性

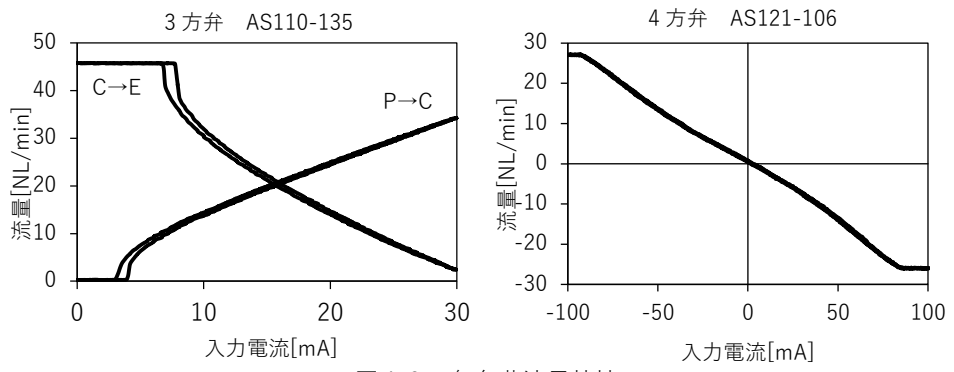


図 10. 無負荷流量特性

これらの特性により、制御圧力範囲、定格流量、ヒステリシスなどがわかる。NF弁で特徴的なのは、その構造のために制御流量に比べ内部流量が大きくなることである。内部流量を小さくするには低リークタイプのNF弁を用いることができるが、制御流量が小さくなる。

NF弁の動的特性についてはトルクモータの共振周波数が高いため、その周波数域まで評価しようとするすると空気の圧縮性を無視できなくなる。そのため、油圧サーボ弁にあるような周波数特性測定装置では装置の追従性の問題からその使用は難しい。

空気圧サーボ弁の周波数測定方法は別途考えることとする。

負荷の容量の影響を考慮し周波数特性を推定した。周波数特性を図14に示す。NF弁に使用されるトルクモータの共振周波数は700Hz~900Hzと高い一方で減衰係数は0.4程度と小さい。そのため、管路の共振周波数とトルクモータの共振周波数が近いと共鳴が発生し、負荷圧力が振動的になる場合があるので注意が必要である。その場合は、管路長等の検討が必要になる。

管路共振の概算方法を文末に添付して示す。

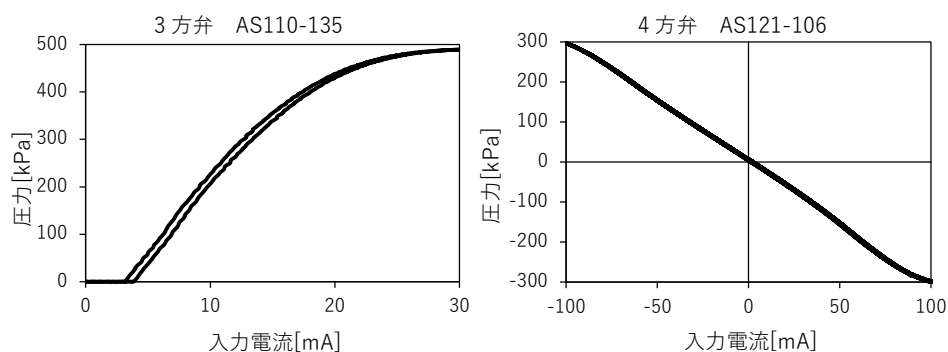


図1.1. 負荷圧力特性

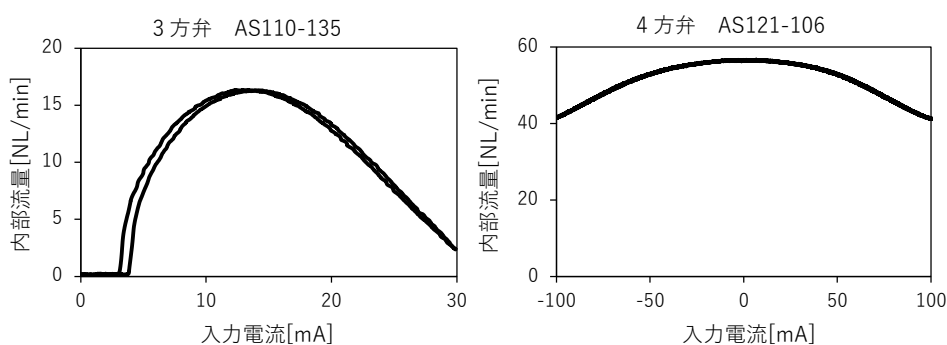


図1.2. 内部流量特性

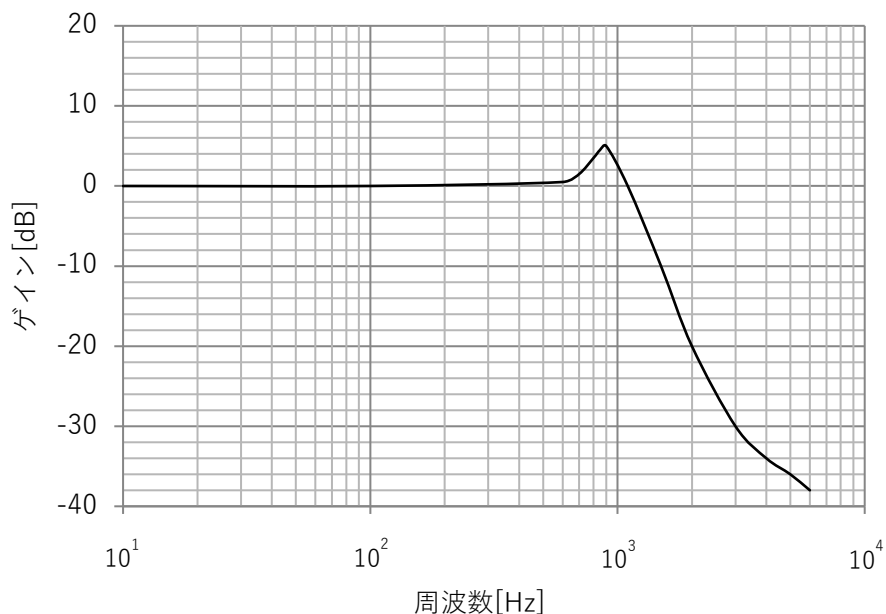


図1.4. NF弁の周波数特性

4.NF 弁による圧力制御

ここでは NF 弁による圧力制御を行う。3 方弁タイプの NF 弁である AS110-115 を使用し、負荷容量を 150cc、300cc と変えて圧力制御を行った。圧力制御を行った際の制御系を図 1 5 に示す。

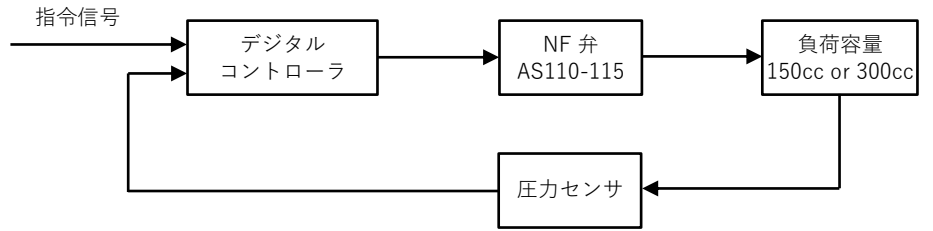


図 1 5. NF 弁による圧力制御の制御系

図 1 6 に指令-圧力特性を示す。履歴特性であるのでヒステリシス、直線性等がわかる。ただし圧力センサを基準にしているため、圧力センサの直線性等はグラフに現れず圧力センサの精度内での評価になる。グラフ中に数か所、スレシヨルドを求めるため、微小の繰り返し入力による応答を示している。それによるとヒステリシス 0.13%、スレシヨルド 0.06%であった。

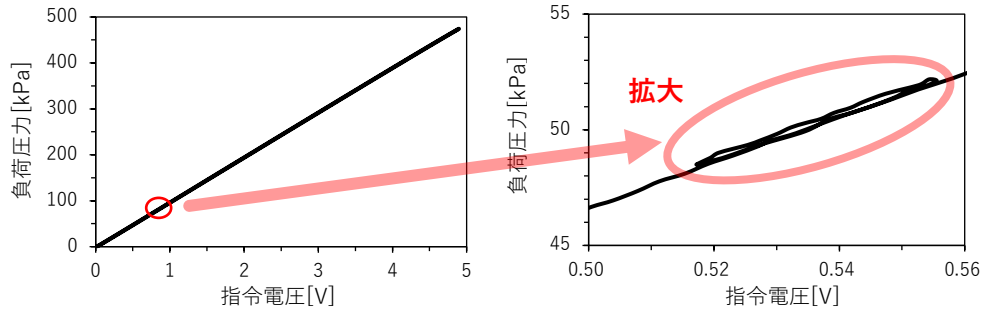


図 1 6. 圧力特性

図 1 7 にステップ応答を示す。負荷容量と指令信号の大きさに応じ、応答が変わることを示している。

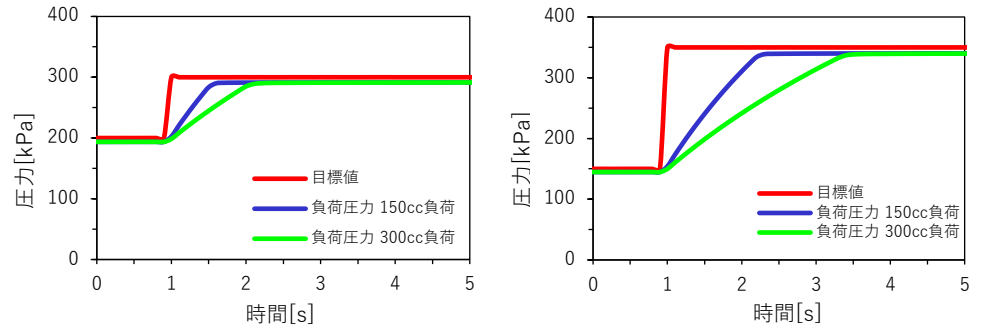


図 1 7. ステップ応答

5.NF 弁を用いたアクチュエータの制御

この項目では NF 弁を空圧シリンダと組み合わせ、変位制御を行う (詳細については試験機のレポートを参照)。特にここでは NF 弁に焦点を当ててその制御性能を論ずる。使用した NF 弁は、AS100-402 と AS100 にディスク絞りを組み合わせたものである。いずれ

も、4 方弁としての機能を有する。シリンダの仕様は表 1 に示すとおりである。組み合わせられるシリンダは、変位センサを備えた二ロッドタイプの空圧シリンダでロッド部分には静圧軸受けが設けられている。この静圧軸受けによって摺動摩擦が非常に小さく抑えられており、スムーズに動作することができる。

型式	AC600-001
使用圧力範囲	200~1000kPa
定格圧力	400kPa
定格推力	50N
ストローク	±6mm
サーボ弁型式	AS100-402,AS100

表 1. シリンダ仕様

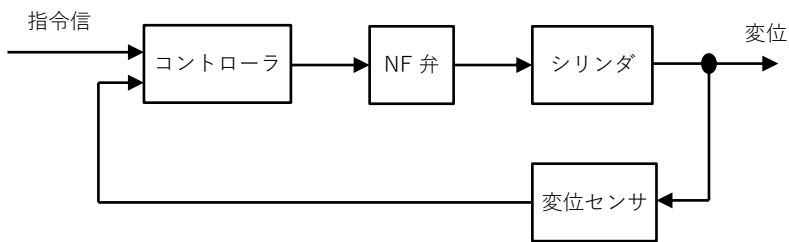


図 18. 荷重制御・変位制御の制御系



図 19. コントローラ外観

図 18 に変位制御の制御系を示す。また変位センサの代わりに荷重センサを用いることで荷重制御の制御系を構成することもできる。

ここではデジタルコントローラを使用している。アナログのサーボアンプでも同様の制御ができるが、設定したゲイン等が分かりやすいためデジタルコントローラを用いた。デジタルコントローラの外観を図 19 に示す。

変位制御のための変位センサには、アナログセンサである一般的な LVDT を用いた。変位センサの分解能によってアクチュエータの分解能は制限を受けるため評価しておく。

図 24 にステップ応答、図 25 に微小ステップ応答を示す。

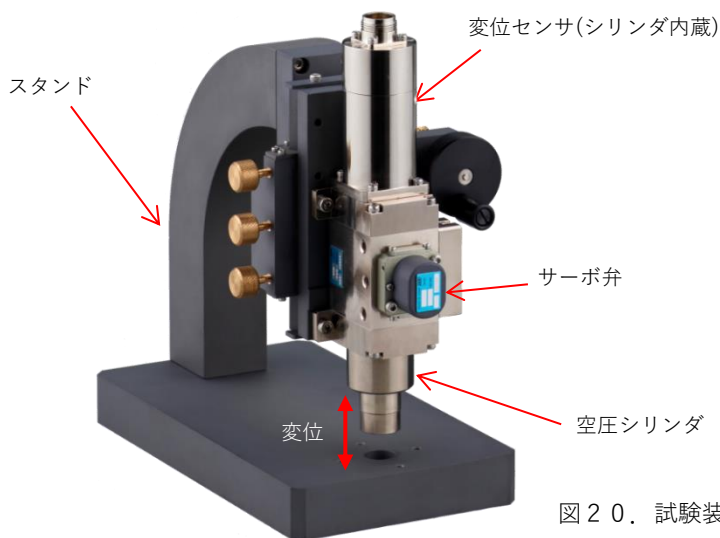


図 20. 試験装置の様子

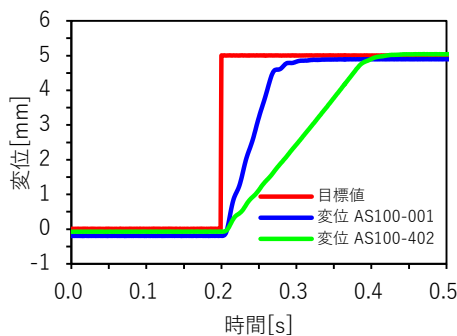


図 24. ステップ応答

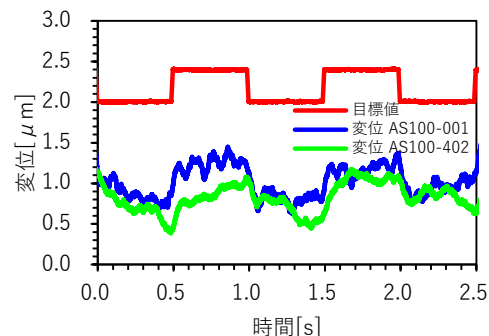


図 25. 微小ステップ応答

6. サーボアンプについて

NF 弁で使用されるサーボアンプについて示す。サーボアンプの基本機能は電流ブースタである。電流ブースタには電流制

御型と電圧制御型があり目的に応じて使い分けられる。ここでは電流ブースタについての基本事項の確認のみにとどめる。

電流制御型の基本回路は図 27 に示すとおりである。

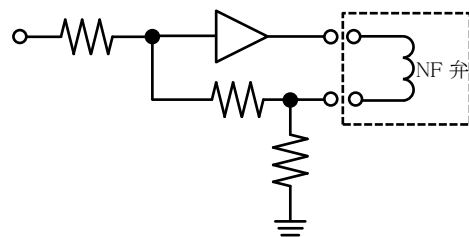


図 27. 電流制御型アンプの回路図

電流制御型はコイルに流れる電流をフィードバックすることで、コイルの抵抗やインダクタンスの変化から受ける影響を小さくする目的がある。負荷であるコイル側から見て、その出力インピーダンスが高いことに特徴がある。

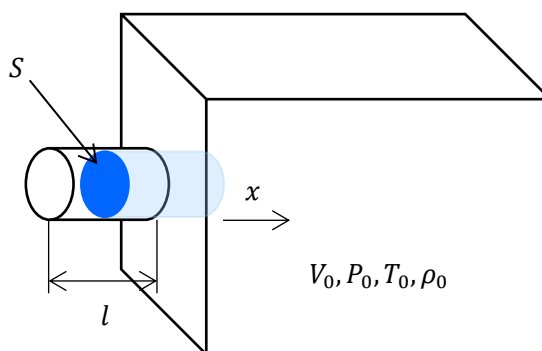


図 28. ヘルムホルツの共振器

- S : 管路面積[m²]
- l : 管路長さ[m]
- V_0 : 体積[m³]
- P_0 : 初期圧力[Pa abs]
- T_0 : 初期温度[K]
- ρ_0 : 空気の初期密度[kg/m³]
- R : 空気の気体定数[J/(K·kg)]
- c : 音速[m/s]
- x : 変位[m]
- κ : 空気の比熱比[-]
- f_0 : 共振周波数[Hz]

7. おわりに

本稿では NF 弁を使用するときに参考となる技術的な情報をまとめた。NF 弁は構造がシンプルで経年変化する部分がなく、高応答であるため幅広い用途で使用されている。本稿で見てきたように NF 弁は高い分解能を持っているため、非常に高い制御性能を実現することができる。また、弁自体が小型・軽量であるため小さなアクチュエータによく適合する。

8. 付録 (管路共振)

バルブにつながれた管路と容量を模擬したものを図 28 に示す。これは十分に大きな容器に管路がついたもので図はヘルムホルツの共振器とも呼ばれる。

今、図中の気柱が x だけ容器側に押し込まれたときを考える。このとき気体が断熱変化とすると次式が成り立つ。

$$P_0 V_0^\kappa = P(V_0 - Sx)^\kappa$$

この式を変形すると

$$\begin{aligned} P &= P_0 \left(\frac{V_0}{V_0 - Sx} \right)^\kappa \\ &= P_0 \left(\frac{V_0 - Sx}{V_0} \right)^{-\kappa} \\ &= P_0 \left(1 - \frac{Sx}{V_0} \right)^{-\kappa} \end{aligned}$$

ここで、気柱の体積 Sx が容器の体積 V_0 に比較して十分小さいと考える。それで次のような近似を適用することとする。

$$(1 + a)^n \approx 1 + na \quad (|a| \ll 1)$$

この近似を用いると

$$P_0 \left(1 - \frac{Sx}{V_0} \right)^{-\kappa} \approx P_0 \left(1 + \kappa \frac{Sx}{V_0} \right)$$

となる。一方で気柱にかかる力のつり合いを考えると

$$\begin{aligned} (\rho_0 S l) \frac{d^2 x}{dt^2} &= -S(P - P_0) \\ &= -S \left[P_0 \left(1 + \kappa \frac{Sx}{V_0} \right) - P_0 \right] \\ &= -\frac{\kappa P_0 S^2}{V_0} x \end{aligned}$$

となる。この式は質量 $m = \rho_0 S l$ 、ばね定数 $k = \kappa P_0 S^2 / V_0$ のバネ - マス系の運動方程式となって

いる。それで固有振動数は以下のようなになる。

$$\begin{aligned} f_0 &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \\ &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\kappa P_0 S^2 / V_0}{\rho_0 S l}} \\ &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\kappa P_0 S}{\rho_0 l V_0}} \end{aligned}$$

ここで音速 $c = \sqrt{\kappa R T_0}$ は理想気体の状態方程式 $P_0 = \rho_0 R T_0$ を用いると

$$c = \sqrt{\kappa R T_0} = \sqrt{\kappa R \left(\frac{P_0}{\rho_0 R} \right)} = \sqrt{\frac{\kappa P_0}{\rho_0}}$$

と書ける。これを用いて固有振動数を整理すると $f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{l V_0}}$

となり、ヘルムホルツ共振器の共振周波数と呼ばれる。これにより管路の共振周波数はバルブにつながれた「負荷容量」、「管路長」および「管路径」によって決まることがわかる。そしてこれが微細なノイズや共振等、しばしばサーボ弁の応答に影響を与えることがある。