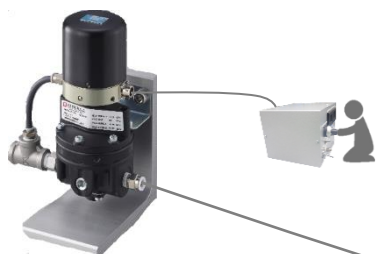


技術レポート NO.1



安定
自在
精密

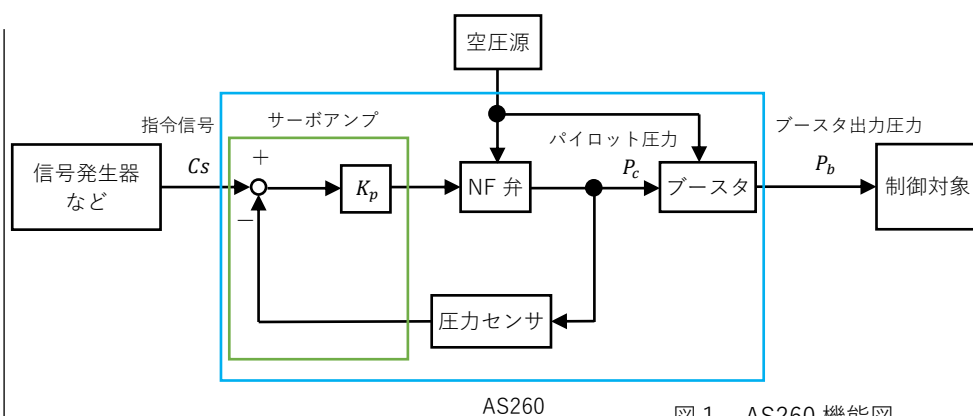
AS260 とその制御

メカ&トロ研究チーム

1. はじめに

AS260 はある程度大きな流量を、あまり早くない応答で圧力制御するために開発された圧力制御弁である。図 1 に本弁の機能図、図 2 に外観図を示す。本弁はブースタ、ノズルフラップ弁(以降 NF 弁)、圧力センサおよび制御アンプを一体化した構成となっている。圧力供給部は 2 股に分かれておりパイロット部とブースタに同じ供給圧力が加えられる。

本弁では、ブースタにフェアチャイルド社製のモデル 20 を



AS260

図 1 AS260 機能図

用いている。このブースタは制御圧力分解能が 1/4 インチ水柱 (0.062kPa) と高く、直線性も良い。このブースタのパイロット圧力を NF 弁によって精密に制御することで高応答、高分解能、

そして大容量の圧力制御弁を得ることができる。ブースタのパイロット圧を制御しているため、制御対象の影響を受けずに簡単に AS260 内部の制御パラメータを設定できる。制御対象の変



図2 AS260 外観図

動に対して、より精度よく圧力制御するにはブースタの出力圧力をフィードバックして制御する必要がある。この場合は制御対象に合わせた制御系となり、負荷容量、使用条件などにあわせた個別の調整となる。

以下の項目では AS260 を構成するそれぞれの要素について説明する。

2. 低リーク NF 弁

一般的な NF 弁は、スプール弁でいうところのアンダーラップ特性を持っており、制御流量と内部流量がほぼ拮抗する。今回 AS260 で用いた低リーク NF 弁はゼロラップ特性に近く、通常の NF 弁に比べて内部流量が小さいという特徴を持つ。この低リーク NF 弁の圧力特性は中立点近傍で急激に変化する。このため、低リーク NF 弁で圧力制御するには圧力センサを用い

て制御系を構成しなければならない。一方で圧力センサを用いることで、圧力センサの性能に相当する圧力制御の精度を得ることができる。この背景としてあるのは、「NF 弁の応答速度が 700Hz~900Hz と高い」、「NF 弁を駆動するトルクモータの分解能が高い」などがあげられる。

低リーク NF 弁は図 3 に示される構造を持っている (NF 弁全般についての詳細は技術資料 NO.2 を参照)。低リーク NF 弁

は、トルクモータとそれにより駆動されるフラップ、およびフラップに対向するノズルによって構成されている。フラップはリード状の可撓部材でできており、中立点では供給側及び排気側のノズルがほぼフラップに接触して配置されている。トルクモータに入力電流が印加されるとフラップが動作し、どちらか一方のノズルからフラップが離れてノズルが開放される。これによって制御ポートへの給排気が行われる。

低リーク NF 弁の主な仕様を以下に示す。

型式	AS110-204
定格電流	±30mA
コイル抵抗	200Ω
最大制御流量	6.0NL/min
内部リーク	0.6NL/min
使用圧力範囲	0~1.0MPa
耐圧(供給側、負荷側)	2.0MPa
使用温度範囲	-20~60℃
応答速度	700Hz

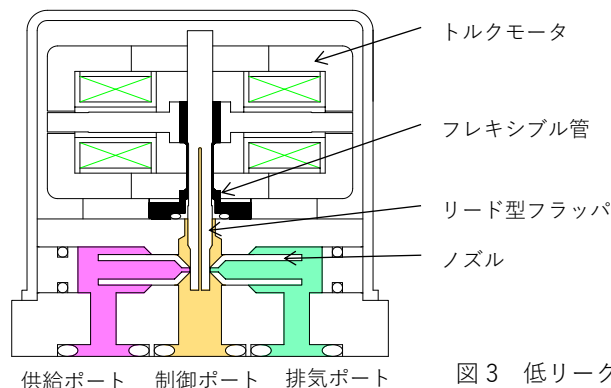


図3 低リーク NF 弁の内部構造

代表的な特性例を図4、5に掲げる。

図4の圧力特性が、低リークNF弁の特徴をよく表わしている。特性図にみられるように中立点で圧力が急に切り替わる。この弁はノーマルクローズ特性を持たせるため、入力電流が0mAになったときに負荷側の圧力が排気圧力になるよう機械的に調整されている。これによって低リークNF弁とブースタが組み合わされた時、入力電流が0mAのときにブースタ出力が排気圧力になる。逆にノーマルオープン特性としても調整可能である。

また、供給圧力が500kPaでの応答のほうが1000kPaの応答に対してプラス方向に数mAずれている。これはフラップに働くノズルからの噴流力が影響を与えている結果である。後述する系の誤差応答の検討に際して誤差の1つと考える。この値が系として許容できるかがポイントである。

図5に示される流量特性は、供給側から負荷側へ、そして負荷側から排気側へと流れる制御可能な流量の最大値を表している。流量は定格電流の1/2~1/3で飽和しており、供給圧力を変えると流量がほぼ圧力比に比例して変化していることが見て取れる。

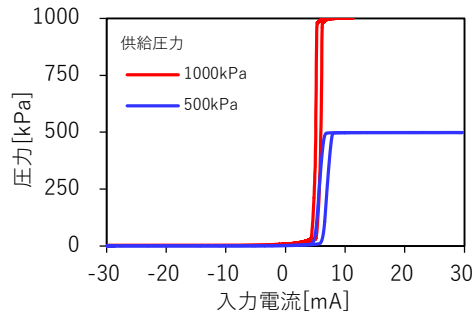


図4 圧力特性

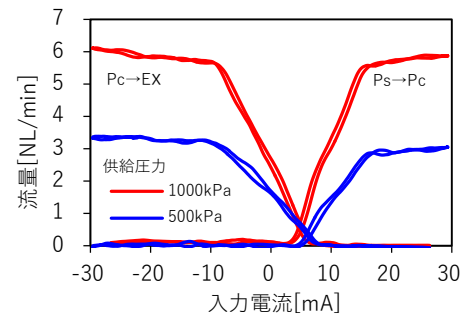


図5 流量特性

3. ブースタ

ブースタはフェアチャイルド社製で、標準的なモデル20を用いている。より大きな流量を制御するときはより大きいブースタを使用する必要がある。

このブースタはパイロット圧力(NF弁の制御圧力)とブースタの出力圧力が1:1で釣り合うようになっている。それでパイロット圧力を精密に制御すれば、それに釣り合うようにブースタの出力圧力を制御できる。

このブースタの圧力感度は0.062kPaと高く、パイロット圧力に対する出力圧力の追従性は非常に高いといえる。

パイロット圧力に対する出力圧力の特性例を図6に示す。ゼロ点で不感帯があるもののパイロット圧力に正確に追従していることがわかる。この不感帯はパイロット圧力を0kPa近くにすれば、ブースタの出力が0kPaになることを示しており、ノーマルクローズ特性にするときに都合がよい。

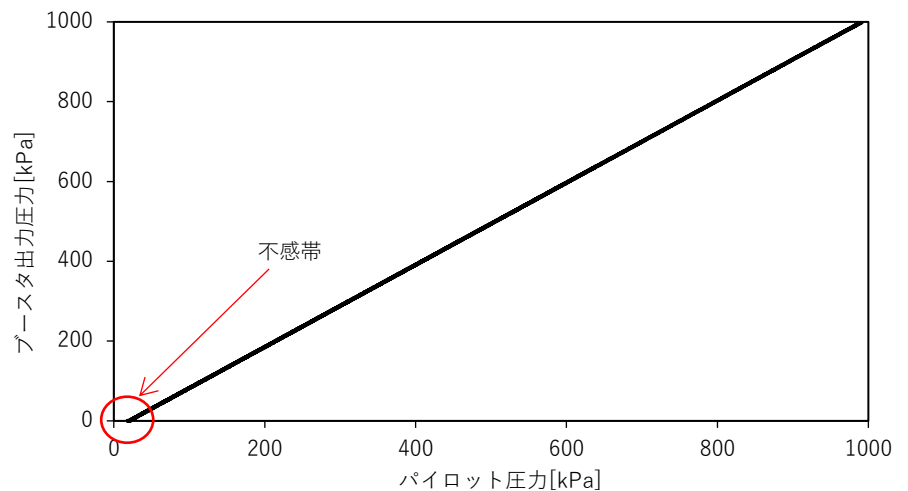


図6 パイロット圧力に対するブースタの出力圧力

4. 制御系とサーボアンプ

AS260 のパイロット部の圧力制御系のブロック図を図 7 に示す。

図 7 のブロック図からパイロット部の誤差応答を求める。見通しを良くするために、油圧サーボの位置決め系に良く用いられる手法を参考とし、その対比によって圧力の誤差応答を求める。

計算の前提として、以下を仮定する。

- ① 応答は釣り合い圧力近傍の微小範囲とする。
- ② 各定数は変化せず一定。
- ③ NF 弁の応答は数百 Hz と高いため比例要素として扱う。
- ④ ブースタ内のパイロット部は等温変化として扱う。

まず、油圧サーボの位置決め系で検討を行う。図 8 に油圧サーボの位置決め系の基本的なブロック線図を示す。

ここでループゲイン K_L は以下のようなになる。

$$K_L = K_A \cdot K_V \cdot \frac{1}{A} \cdot K_F$$

また、この系は裸の積分要素が 1 つある 1 型をしており、応答は 1 次遅れ系である。

外乱 d に対する変位 y の応答を求めると

$$y(s) = \frac{1/K_A K_F}{(A/K_A K_V K_F)s + 1} \cdot d(s)$$

$$= \frac{1/K_A K_F}{(1/K_L)s + 1} \cdot d(s)$$

となり、時定数 T は $1/K_L$ である。

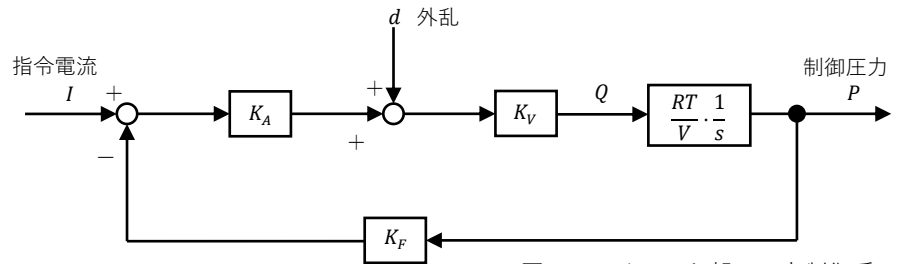


図 7 パイロット部の圧力制御系

K_A : サーボ増幅器直流ゲイン[-]

K_V : NF 弁流量ゲイン[(kg/s)/A]

K_L : ループゲイン[(Pa/s)/Pa]

K_F : フィードバック検出器ゲイン[A/Pa]

Q : NF 弁出力流量[kg/s]

R : 空気の気体定数[J/(K·kg)]

T : パイロット部温度 (一定) [K]

V : ブースタパイロット部容積 (一定) [m³]

P : 制御圧力[Pa]

I : 指令電流[A]

I_R : 定格電流[A]

d : 外乱 (NF 弁の中立点の非線形要素による誤差を主とする) [A]

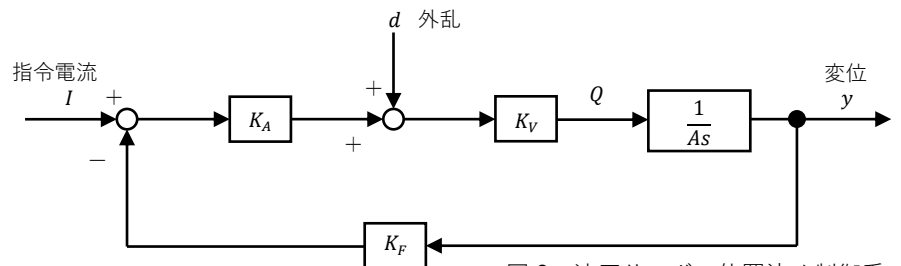


図 8 油圧サーボの位置決め制御系

K_A : サーボ増幅器直流ゲイン[-]

K_V : サーボ弁流量ゲイン[(m³/s)/A]

K_L : ループゲイン[(m/s)/m]

K_F : フィードバック検出器ゲイン[A/m]

Q : サーボ弁出力流量[m³/s]

A : 受圧面積[m²]

y : 変位[m]

I : 指令電流[A]

I_R : 定格電流[A]

d : 外乱[A]

外乱がステップ入力だとすると定常誤差 Δy は

$$\begin{aligned}\Delta y &= \lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s y(s) \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} \left[s \cdot \frac{1/K_A K_F}{(1/K_L)s + 1} \cdot \frac{\Delta I}{s} \right] \\ &= \frac{\Delta I}{K_A K_F}\end{aligned}$$

となる。ループゲイン K_L 、定格電流 I_R を用いて上式を変形すると以下のように書ける。

$$\Delta y = \frac{I_R}{K_A K_F} \cdot \frac{\Delta I}{I_R} = \frac{K_V I_R}{K_L A} \cdot \frac{\Delta I}{I_R}$$

このように、油圧サーボの位置決め制御系において（出力誤差 Δy ）と（入力誤差 ΔI /定格入力 I_R ）の関係が導かれた。

次に今対象としているAS260におけるパイロット部の誤差応答を油圧サーボの位置決め系と比較して求めることにする。 A を V/RT に、 Δy を ΔP に置き換えるとループゲイン K_L は

$$K_L = K_A \cdot K_V \cdot \frac{RT}{V} \cdot K_F$$

となり、定常誤差 ΔP は

$$\Delta P = \frac{K_V \cdot I_R}{K_L \cdot (V/RT)} \cdot \frac{\Delta I}{I_R}$$

となる。実際の数値を代入して計算すると

$$\Delta P = 2560 \times \frac{\Delta I}{I_R}$$

となる。

このことから、例えば定常誤差 ΔP について $\pm 0.083\text{kPa}$ を達成するためには、 $\Delta I/I_R$ は約 $\pm 3\%$ 以下の誤差であることが必要となる。NF弁の中立点変動もこの範囲であることが望ましい。

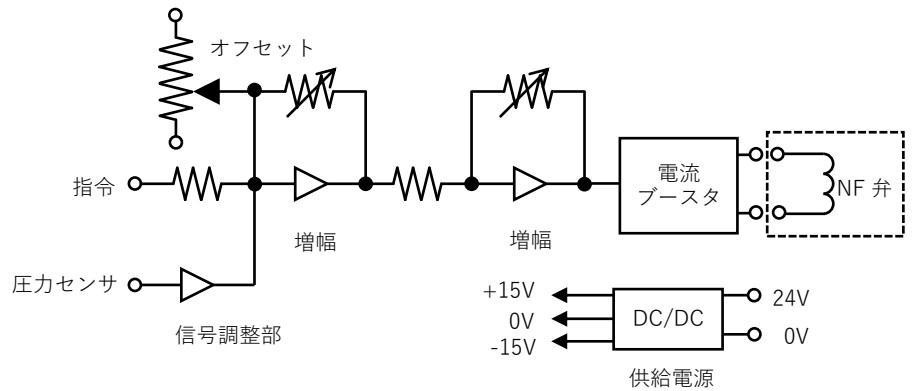


図9 サーボアンプの回路構成

サーボアンプの回路構成を図9に示す。制御系は最も単純な比例制御が構成されている。電源は24Vとしている。圧力センサは性能やサイズなどを検討し、SMC製のPSE540A-M5を選択した。総合的な精度は1%程度である。

5. AS260による圧力制御

AS260を用いて実際に圧力制御を行った実例を以下に示す。ブースタはフェアチャイルド社

製のモデル20を用い、その制御には低リークタイプのNF弁のAS110-024を使用している。

図10は指令信号に対するブースタ出力圧力の往復の特性を示している。直線性が良く、ヒステリシスが少ないことがわかる。ただし特性図に現れないのは圧力センサの直線性である。圧力センサによってパイロット圧を制御しているため、圧力センサの直線性は圧力制御の性能に直結している。

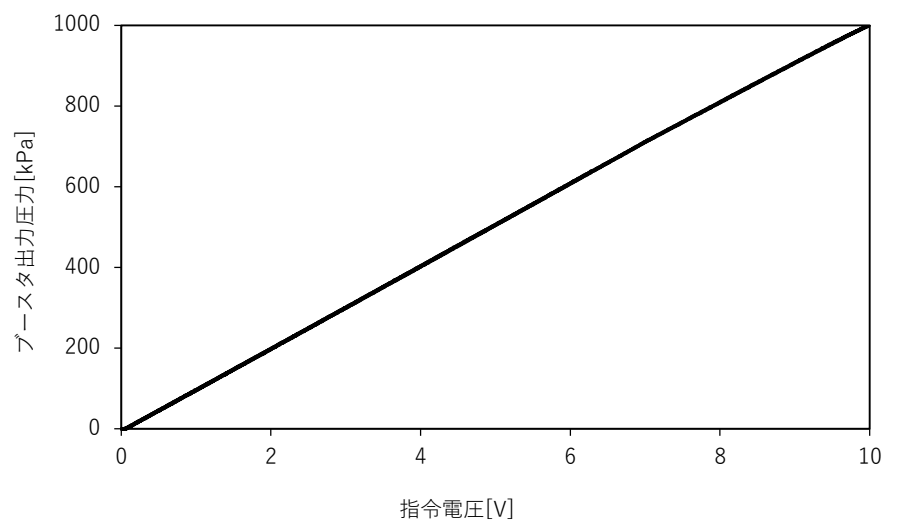


図10 AS260の出力圧力特性

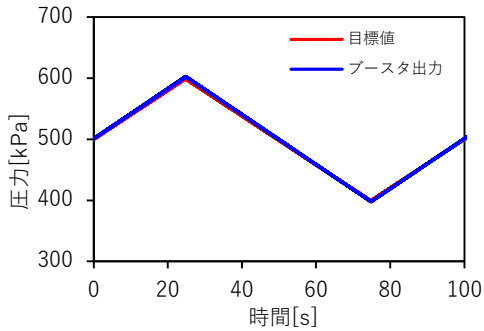


図 11 三角波応答

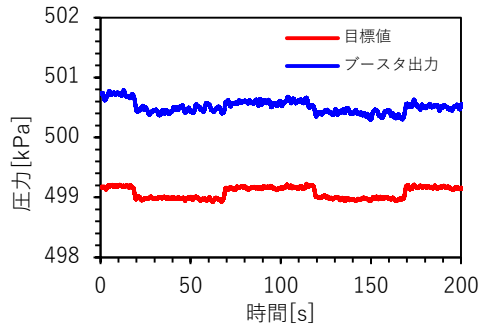


図 12 微小ステップ応答

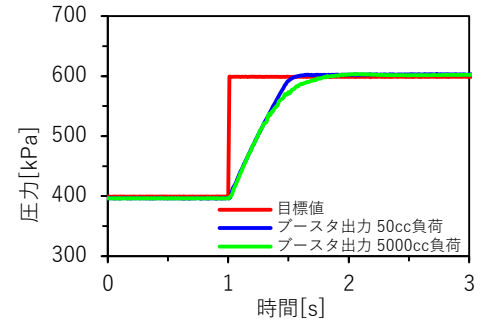


図 13 ステップ応答

図 11 は指令信号を低周波数 (0.01Hz) の三角波としたときのブースタ出力圧力の応答である。ゆっくりした動作のため、折り返し点(波形の両頂点)での波形の歪がないことがわかる。

図 12 は指令信号を微小ステップとしたときのブースタ出力圧力の応答で、およそ ±0.08kPa の振幅で動作していることが見て取れる。これよりこの振幅の範囲の分解能を持つことが示されている。これはブースタの最小分解能に近い。圧力センサの SN 比を上げることによって、ブースタの分解能により近づくことが考えられるが、現在の構成でも最大制御圧力 (1000kPa) に対する最小分解能の比率は 0.02% 以下である。

図 13 は負荷容量をそれぞれ 50cc、5000cc としたときのステップ応答であり、安定した応答であることが見て取れる。一方で応答時間はブースタの容量 (制御流量) と負荷容量によって変化する。

6. おわりに

圧力制御弁 AS260 は表紙にあるように、「安定・自在・精密」に圧力制御することができる。単独の圧力制御だけでなく、シリンダと組み合わせたクリープ試験の力制御をおこなう場合などにも使用していただけると考えている。弊社では AS260 を単独に用いて圧力制御を行うときに便利な設定ボックスも用意している。設定ボックスの外観図

を図 14 に示す。

AS260 で用いていた NF 弁は「内部構造がシンプル」、「摺動部が無い」、「使用流体に接触する部材が少ない」といった特徴を持っており、特殊な材料でも構成可能である。その他にも極低圧や負圧域まで使用できるものや、特殊なガスで使用できるものにも応用可能である。このように、NF 弁単体の使用範囲は広い。NF 弁の詳細については別稿で紹介する。

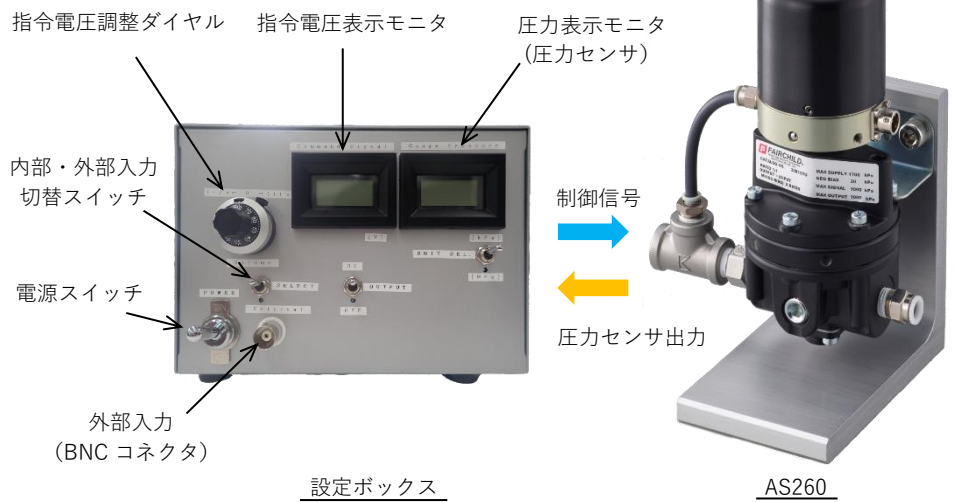


図 14 設定ボックス外観図