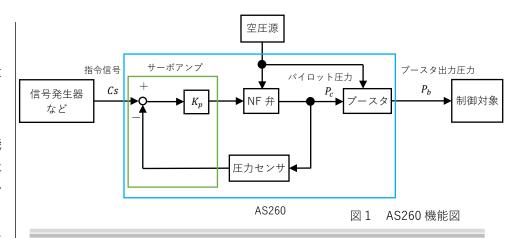


メカ&トロ研究チーム

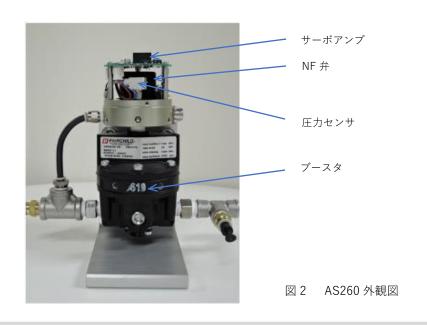
### 1. はじめに

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、ノズルフラッパ弁(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



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便に AS260 内部の制御パラメータを設定できる。制御対象の変



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 駆動されるフラッパ、およびフ ラッパに対向するノズルにがっ で構成されている。フラッパで では代の可撓部材でできびが サーン点では供給側及びがほぼフラットルク モータに入力電流が印からフラッパが動作し、どちらか ー方のノズルが開放される。 たフラッパが開放されるか れてノズルが開放される。 によって制御ポートへの によったがれる。 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  $\pm 30 \text{mA}$ 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  $0\sim1.0\text{MPa}$ 耐圧(供給側、負荷側) 2.0MPa 使用温度範囲 -20~60°C 応答速度 700Hz

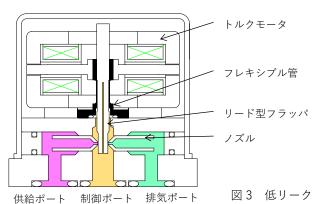


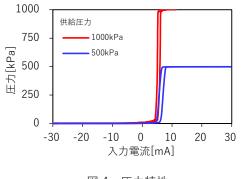
図3 低リーク NF 弁の内部構造

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切り替わるに切り替わるに切り替わずにかられるとしてもあたときなったときなる。これで圧力が排気圧力になる。これにスで圧力が排気圧力にある。これにスをが組み合わされた時、入力を出って低リークNF弁とである。がが排気圧力になる。逆にも調整がのMAのときにブースターでもである。

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。これはフラッパ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。



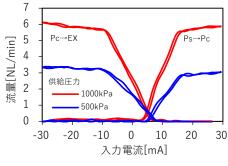


図 4 圧力特性

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。

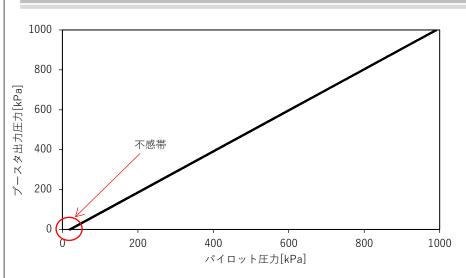


図6パイロット圧力に対するブースタの出力圧力

#### 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。

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

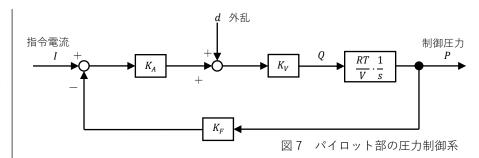
また、この系は裸の積分要素 が1つある1型をしており、応 答は1次遅れ系である。

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。



 $K_A$ : 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]

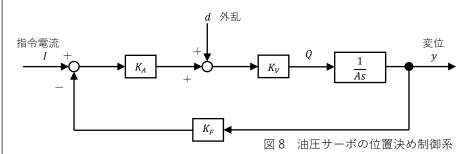
V: ブースタパイロット部容積 (一定) [m<sup>3</sup>]

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]



 $K_A$ : サーボ増幅器直流ゲイン[-]

 $K_V$ : サーボ弁流量ゲイン[( $m^3/s$ )/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 $[m^3/s]$ 

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 $\Delta y$ は

$$\Delta y = \lim_{t \to \infty} y(t) = \lim_{s \to 0} sy(s)$$

$$= \lim_{s \to 0} \left[ s \cdot \frac{1/K_A K_F}{(1/K_L)s + 1} \cdot \frac{\Delta I}{s} \right]$$

$$= \frac{\Delta I}{K_A K_F}$$

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 $\Delta y$ )と(入力誤差 $\Delta I$ /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、 $\Delta y$ を $\Delta P$ に置き換えるとループゲイン $K_I$ は

$$K_L = K_A \cdot K_V \cdot \frac{RT}{V} \cdot K_F$$
となり、定常誤差 $\Delta P$ 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  $\Delta P$ について $\pm 0.083$ 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。

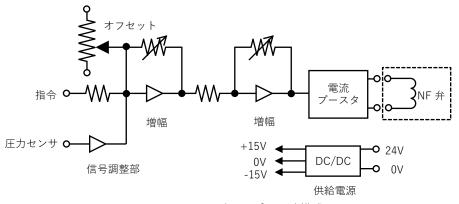


図 9 サーボアンプの回路構成

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 AS110-204 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。

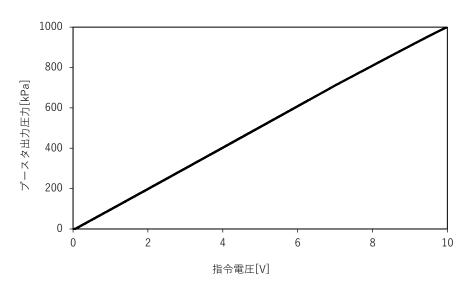
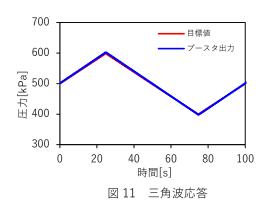
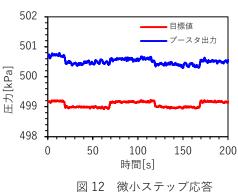


図 10 AS260 の出力圧力特性





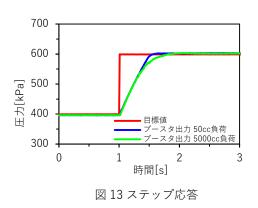


図 11 は指令信号を低周波数 (0.01Hz) の三角波としたとき のブースタ出力圧力の応答である。ゆっくりした動作のため、 折り返し点(波形の両頂点)での 波形の歪がないことがわかる。

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 せ 0.083kPa 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。その他にもを 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

ピー・エス・シー株式会社 www.psc-net.co.jp

