

空気圧サーボ弁と空気圧サーボ系の解析と設計 [7]

第2章 空気圧サーボ弁

2-3 2段型力フィードバック方式サーボ弁

序章で詳述した電気油圧2段型力フィードバック方式サーボ弁(図2-3-1)を空気圧で用いる場合、油圧の前段増幅部にある減衰の要素(いわゆる前段増幅部の出力圧力-流量特性の右下がり特性)が小さいために、場合によっては不安定現象(条件によっては発振する)が発生するであろうと考えられる。この不安定現象をなくすための工夫が必要である。このこと以外は電気油圧サーボ弁と機構的には同じである。サーボ弁の構成をボンドグラフ(文献[1, 2])で示す(図2-3-2)。



図 2-3-1

入力端、出力端はともに flow junction (0-junction) で変位共通、力が釣り合っていること(力の総和が0)を表している。油圧サーボと異なるところはNF系と案内弁の間に抵抗と容量が付加されている点にある。この抵抗と容量の付加は、案内弁の両端に配置されているが、図2-3-2のとおりシンボリックに1か所で代表させている。抵抗と容量部の接続は effort junction (1-junction) (文献[2])で流量共通、圧力が釣り合っていることを表している。抵抗と容量の付加による系の安定化は文献[3]に詳しい。この抵抗と容量系の付加は本技術資料の中でも今後様々なところで顔をだす。そして本弁でもこれが安定化のためのキモとなっている。

2段型力フィードバック空気圧サーボ弁

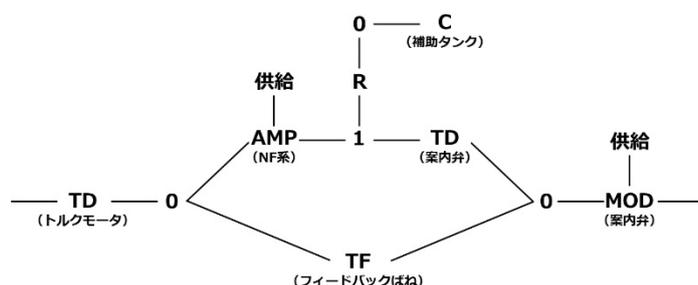


図 2-3-2 2段型力フィードバック空気圧サーボ弁の構成

アリアドネの糸6 抵抗-容量系の付加(文献[3])

At this point, some thought was given to the means of accomplishing the transient-pressure-feedback scheme in a simple, effective manner. Several arrangements requiring elaborate control and instrumentation techniques were discarded when the desired effect seemed obtainable by employing auxiliary tanks and flow resistances, as shown in Fig. 16.19. Such a scheme looks promising because flow to and from tanks a and b do occur through the flow resistances during periods when P_a and P_b

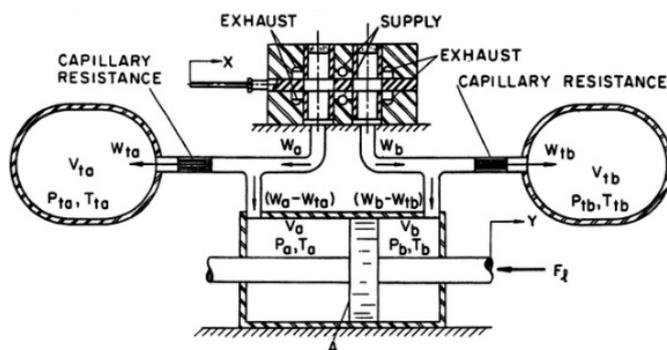


Fig. 16.19. Schematic diagram showing arrangement of tanks and flow resistances to provide system damping.

are changing, yet the tank pressures P_{ta} and P_{tb} must approach P_a and P_b when P_a and P_b reach steady values, and the flows W_{ta} and W_{tb} approach zero as $(P_a - P_{ta})$ and $(P_b - P_{tb})$ approach zero.

(中略)

Since this system is **potentially useful** for the continuous control of position, velocity, or acceleration, there are many possible considerations which may enter into its practical application.

(太字筆者)

これは空気圧独特の系（圧縮性のある系）の安定化のために考えられた有力な方法である。アクチュエータに用いられる以外に、除振装置の空気バネ、鉄道車両の枕バネ、ポケット型静圧軸受等に応用されている。

カフィードバック方式空気圧サーボ弁の研究は、荒木獻次が 1960 年代に行っている。ただし、本研究においても弁の発振の有力な解決方法は示されていない（文献[4, 5]）。

文献

- [1] Paynter HM. Analysis and design of engineering systems: class notes for M.I.T. course 2.751. Cambridge, Mass., M.I.T. Press, 1961, 303p.
- [2] Karnopp D, Rosenberg RC. Analysis and simulation of multiport systems. Cambridge, Mass., M.I.T. Press, 1968, 221p.
- [3] Blackburn JF, Reethof G, J. Shearer L. Fluid power control. Cambridge, Mass., M.I.T. Press, 1960, 710p.
- [4] 荒木獻次. カフィードバック空気圧サーボ弁のし張振動・スプールの質量と粘性抵抗係数が小さい場合. 生産研究 21(6), 408-410, 1969.
- [5] Araki K, Yoshida T. A Microcomputer Controlled Pneumatic Fatigue Tester. Proc. of ACI'83 - Applied Control and Identification, 22-1/22-6.

次に、構成要素であるトルクモータ、ノズルフラップ前段増幅部、補助タンク部、案内弁、フィードバックばねの順に詳細を説明する。その後に空圧システムとしてのサーボ弁の解析、設計を行う。

2-3-1 トルクモータの構成

トルクモータは電気入力を変換するトランスデューサであって、可動鉄片型モータである。本サーボ弁に用いられるトルクモータは、NF 弁の項でも説明した T 型構造を持っている。その磁気回路を説明するために図 2-3-3 を示す。図にあるとおり、アマチュアとヨークによって形成された空隙が 4 か所ある。この空隙での磁気の変化がトルクモータの出力トルクになる。

この磁気回路を電気回路に置き換えるとわかりやすくなる。置き換えるにあたり、以下の対応とする。

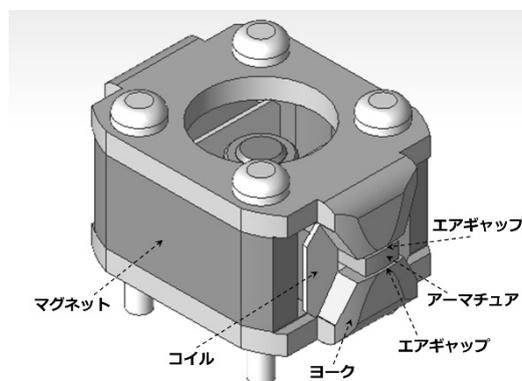


図 2-3-3 トルクモータの構造

磁束 —— 電流
 起磁力 —— 電圧
 磁気抵抗 —— 抵抗
 電気回路を図 2-3-4 に示す。

Φ_s は総磁束数 (単位面積当りは磁束密度)、 NI はコイルによる起磁力 (単位距離当たりの磁界の強さ) である。 Φ_s は電流源を模擬しており、内部抵抗は ∞ である。また NI の内部抵抗は 0 である。電気回路の左半分は磁石を模擬しており、右半分が空隙部になっている。空隙部は 4 か所の磁気抵抗で表されており、ブリッジを形成している。

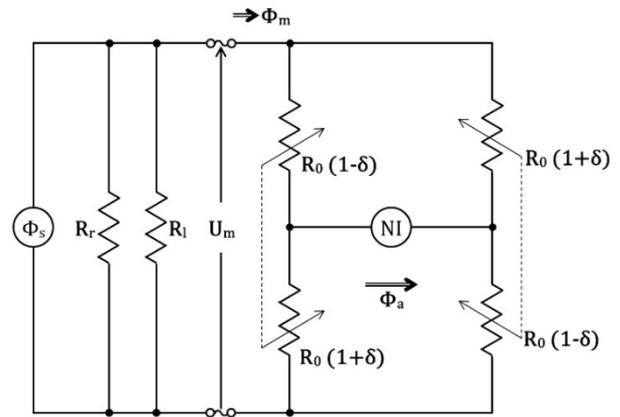


図 2-3-4 等価回路図

空隙部に流れる総磁束数を Φ_m とすれば、アマチュアの動きに伴い、

$$U_m = (1 + \delta)(1 - \delta)R_0 \cdot \Phi_m = (1 - \delta^2)R_0 \cdot \Phi_m$$

個々の空隙を流れる磁束は

$$\Phi_{m1} = \Phi_{m4} = \left(\frac{1 + \delta}{2}\right)\Phi_m$$

$$\Phi_{m2} = \Phi_{m3} = \left(\frac{1 - \delta}{2}\right)\Phi_m$$

また、アマチュア内を流れる磁束は

$$\Phi_{ma} = \delta\Phi_m$$

である。

コイルの起磁力による空隙に供給される磁束は、漏れ磁束を考えないとすれば、

$$\Phi_a = \frac{1}{R_0} \frac{1}{1 - \delta^2} \cdot NI$$

で求められる。空隙の通過磁束は

$$\Phi_{a1} = \Phi_{a4} = \frac{1 + \delta}{2}\Phi_a$$

$$\Phi_{a2} = \Phi_{a3} = \frac{1 - \delta}{2}\Phi_a$$

これらより出力トルクが計算できる。

$$\begin{aligned}
 T &= \frac{\ell_3}{2\mu S} \left\{ \frac{1 + \delta}{2} (\Phi_{m1} + \Phi_{a1})^2 - \frac{1 - \delta}{2} (\Phi_m - \Phi_a)^2 \right\} \frac{1}{9.8} \\
 &= \frac{1}{9.8} \cdot \frac{\ell_3}{2\mu S} \left\{ 2\delta(\Phi_m^2 + \Phi_a^2) + 2(1 + \delta^2)\Phi_m \cdot \Phi_a \right\}
 \end{aligned}$$

ここで

$$\mu : \text{真空中の透磁率} \quad 4\pi \times 10^{-7} \quad \text{Wb/AT} \cdot \text{m}$$

S : 空隙部有効面積

アマチュアが中立点で固定されているとき、すなわち $\delta = 0$ のときの出力トルクは

$$T = \frac{1}{9.8} \cdot \frac{\ell_3}{\mu \cdot S} \Phi_{m0} \cdot \Phi_{a0}$$

で示され、 Φ_{m0} は一定、 Φ_{a0} は

$$\Phi_{a0} = \frac{1}{R_0} \cdot NI$$

で示されることより、トルクを書き換えると

$$T = \frac{1}{9.8} \cdot \frac{\ell_3}{g_0} \Phi_{m0} \cdot NI$$

となる。ただし

$$R_0 = \frac{g_0}{\mu \cdot S} \quad g_0 : \text{空隙距離}$$

$NI = 0$ すなわち $\Phi_a = 0$ の場合

$$T = \frac{1}{9.8} \cdot \frac{\ell_3}{2\mu S} \cdot \delta \cdot \Phi_m^2$$

となり、アマチュア回転角度とトルクの関係を示したもので、トルクモータの負ばねを表している。負ばねを K_M とすると

$$K_M = -\frac{T}{\theta} = -\frac{1}{9.8} \cdot \frac{1}{\mu S} \cdot \frac{\ell_3^2}{g_0} \Phi_m^2$$

$$\theta = \frac{2 \cdot g}{\ell_3} \quad \delta = \frac{g}{g_0}$$

カフィードバック方式サーボ弁はつり合い状態で、トルクモータは中立点にあるため、評価は中立点で行えば、設計には十分である。

負ばねとトルクは以下の式で関係付けられている。

$$K_M = 9.8 \cdot 2R_0 \left(\frac{T}{NI} \right)^2$$

負ばねの大きさを決める大まかな目安は、アマチュアを支持している可撓管（フレキシブルチューブ）のばね定数とほぼ同じにすることである。これによって、アマチュアに対する回転方向のばねはフィードバックばねのみによることになる。このあたりのことは、具体的な例を示しながら詳細を説明するが、まずはトルクモータの磁石について検討を進める。

磁石はごく一般的なアルニコ系のものを使っている。ネオジ系を使うと、アルニコ系に比べて保持力が非常に高く、薄くすることができるが、トルクモータを組み立てて、着磁、減磁を行い、出力トルクを調整する必要があることから、ネオジ系の減磁は、磁気回路を構成したままでは難しいので、精密調整をする必要があるトルクモータには適していない。

磁石部分の等価電気回路を部分的に図 2-3-5 に再び記す。

図中 P_L は空隙部のパーミアンス ($P_L = 1/R_0$) を示す。ま

た、各磁気抵抗もパーミアンスに変更してある。 Φ_S は、磁石からの磁束で定電流源に相当し、内部パーミアンスは 0 である。これらの意味を含め、等価電気回路に反映させている。

本起磁力-磁束は、磁石の減磁曲線をもとに、磁石の長さおよび面積より算出される減磁曲線を図 2-3-6 に描く。減磁曲線を描く従来の例より、縦軸が磁束（磁束密度）になっており、電流と対応させているため、電圧-電流の特性図と 90 度回転している。よって磁気抵抗でなく、パーミアンスで表している。また、定磁束源としているのもこのあたりを考えて決めた。

フル着磁した後、減磁して磁力の安定を図り、トルクモータの必要トルクと負ばね定数を決める。減磁した後の可逆透磁率線の磁束線と交わったところを磁束 Φ_S と

し、漏れのパーミアンス P_L より、磁石の出力線図が求まる。これと、空隙部のパーミアンス線図の交点が空隙に供給される磁束 Φ_m である。

アマチュアの回転にともなう空隙の変化は、つり合い状態の空隙に対して数%である。以上の設計の妥当性を見るため、空隙変化に対する空隙に供給される磁束の変化などを図 2-3-7 で示す。

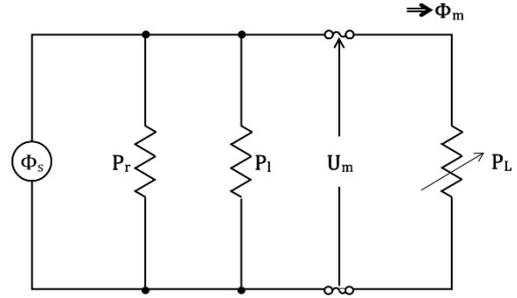


図 2-3-5 パーミアンス表示の磁石部等価回路

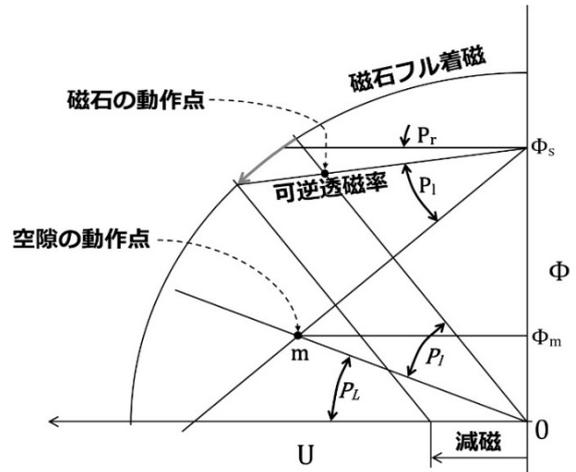


図 2-3-6 磁石の減磁曲線

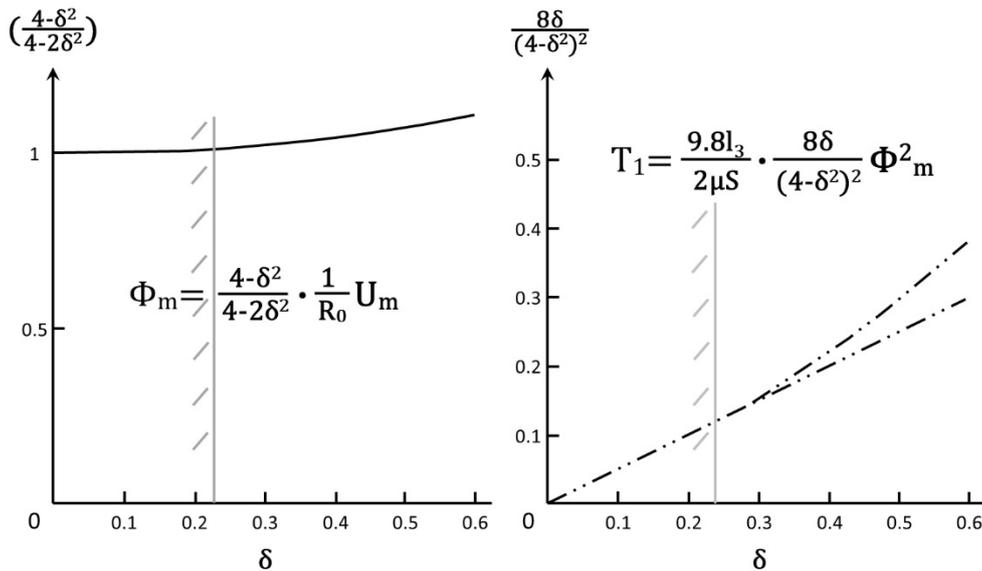


図 2-3-7 磁束の変化

アマチュア、継鉄に用いられる材料は、残留磁束密度や保持力の小さい、かつ透磁率が高く、飽和磁束密度の高い材料を用いる。これは、トルクモータの出力のヒステリシスを小さくすることを目的としてい

る。本トルクモータのような可動鉄片型は可動鉄片の内部を磁束が交番して流れるため、どうしてもヒステリシスが発生する。よって、できるだけ小さな磁束密度で使用したほうが良い。

材料の磁気的特性例を図 2-3-8、表 2-3-1 にまとめた。

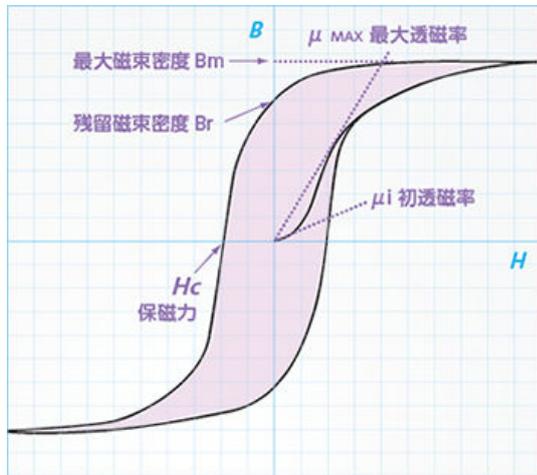


図 2-3-8 適正に熱処理されたパーマロイの BH カーブ 【株式会社オータマ.” よくあるご質問” . <https://www.ohtama.co.jp/faq.html>, (参照 2020-01-24).】

表 2-3-1 磁性材料の比較一覧

【株式会社オータマ.” パーマロイとは” . <https://www.ohtama.co.jp/whats.html>, (参照 2020-01-24).】

一般名称	最大(比)透磁率	最大磁束密度	保磁力
78%パーマロイPC	180,000	0.72T	0.8A/m
45%パーマロイPB	50,000	1.55T	12A/m
電磁軟鉄SUY	13,000	1.65T	50A/m
冷間圧延鋼SPC	5,500	1.3T	90A/m

磁気回路を構成する軟磁性材料は磁束の飽和特性を持っている。構成部材の大きさを決めるために、通過する磁束密度の最も大きくなる点で、飽和がないかを検討することによってその妥当性を判断する。

以上がトルクモータを設計または評価するうえでの必要かつ最小限の項目である。