

空気圧サーボ弁と空気圧サーボ系の解析と設計 [1]

はじめに

モーションコントロールの本質は、その制御媒体が電動、油圧、空気圧に関わらず、パワーをコントロールすることにある。このパワーをコントロールするという視点がアナリシスからシンセシスにいたる過程で大きくものをいう。どれほど大きなパワーをどれだけ高速に制御できるか(パワーレシオを大きくできるか)が、モーションコントロールをつかさどるサーボ技術の醍醐味であり、そこに技術上の限界がある。そしてサーボ技術は常にその限界を広げてきた。この限界の拡張は、アクチュエータに関連した機器の開発によってなされたとも言える。特に電動すなわちモータとその駆動技術及び制御技術は長足の進歩を遂げて、油圧サーボを駆逐しながら現在にある。反面、空気圧サーボは長い歴史があるけれども、軍用面など特殊な分野を除き、まだ一般化されていないし、使用分野も限られている。この空気圧サーボを、より広い分野で使ってもらえるよう試行してきた結果をここに披瀝している。まだ、試行の途上にあるはずだが、この結果をまとめることによって、現在の技術水準(もちろん我々の技術水準であるけれど)及び今後の課題について明らかにすることができればと願う。

また、ここでは、空気圧サーボに関わる機器を開発してきた過程における独自の技術を披露している。当然、アイデアや新しい知見についても述べている。空気圧サーボは、まだまだ偏った市場しか獲得できていないが、使用される範囲は広がっていくと考えるし、その潜在能力は高いものと考えている。ただ、本文は、独善に陥っているのではないかと懸念もしている(懸念ではなく、陥っているというほうが正確か)。ともあれ、空気圧サーボ技術に携わっていることの面白さを読者と共有できれば、これに勝るものはない。

工学上のよりどころは、高橋利衛著:工学の創造的学習法(オーム社)、図説工学対話(現代数学社)及び中田孝著:工学解析(オーム社)に負っている。この二人の先生に(高橋先生には大学での電機工学の授業で、中田先生には入社した会社での日常業務の中で)工学の面白さを教わった。これらの本は、絶版であるがおすすめです(内容を十分理解しておすすめしているわけではないけれど)。

序章で詳述する、電気-油圧サーボ弁の使用される環境を知っていただくため、MOOG社のテクニカルブリテン151(文献[1])等に記載されている、パワーと周波数特性図に倣って、ロボット、試験機、ダイ

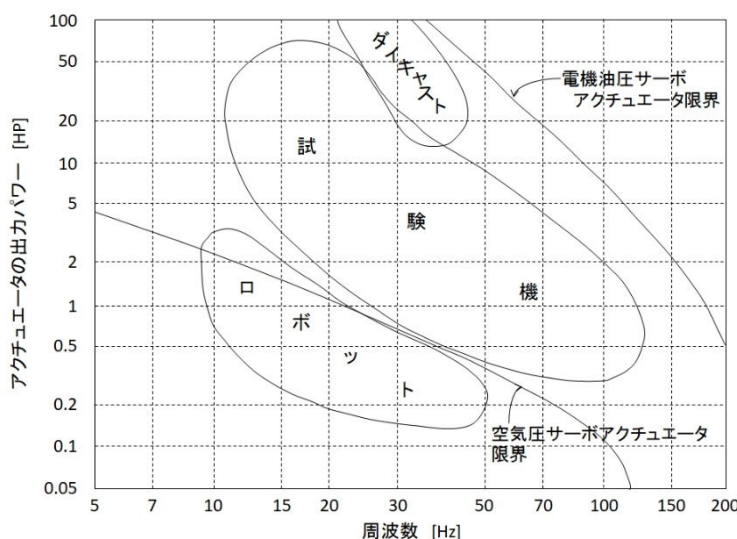


図 1 サーボアクチュエータの動作範囲(概念図)

キャスト動作領域を外観して図 1 に示す。この図は、電動アクチュエータでいうところのパワーレシオ(より大きなパワーをより早く、すなわちパワーの時間微分)を表しており、サーボアクチュエータの適応範囲を

俯瞰する場合に便利である。

序章

図 0-1 は、カフィードバック方式 - 電気油圧サーボ弁の断面を示している。この方式のサーボ弁は、国内では、東京精密測器㈱の高橋、米国では MOOG INC のムグそれぞれによって、ほぼ同じ時期に発明されている。電気機械変換部であるトルクモータ、前段増幅部、スプール型案内弁及びフィードバックばねにより構成されている。このフィードバックばねを構成したことが特許の主眼である。筆者はこの方式のサーボ弁が市場に出たころに関わるようになった。遅れて参入した一人である。

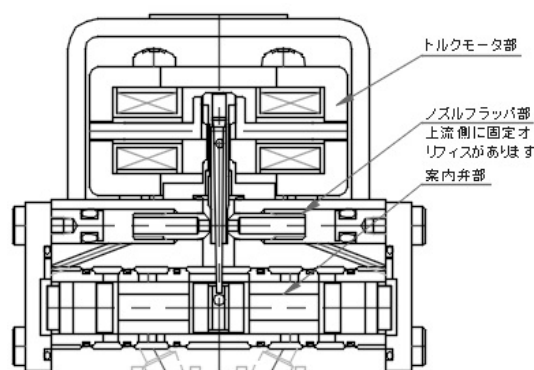


図 0-1 サーボ弁の断面構造図

このサーボ弁は、見た目も非常にバランスよくできていると

思う。が、トルクモータの大きさはどのように決めればよいか？という課題に直面することでもあった。

以下に本方式の弁の解析を示す。かなり煩雑で冗長的であるが、解析例としての意味があると考えるので、以下に詳述する。

サーボ弁の解析は、サーボ弁の各仕様に関してその構成要素の相互作用を明らかにすることにあると言てよい。

ここでのシステム表示は 4 端子回路論を援用して行った。4 端子回路論の具体的な適用は、文献[2]にみる事ができる。本文での解析についても方法論に関わる事項はすべて上記文献を参照して行った。ここにその前説となる主要事項を引用しておく。

そこで動力を 2 つのコンポーネント、位差量 (Across variable) と流通量 (Through variable) とに分けて、ポートにおける動力の授受伝達を考えることとなる。すなわち、動力に関するポートは、その動力の様相をあらわす位差量端子、流通量端子の 2 端子 (端子対) におきかえることができる。Fig.1 に示した単位要素のポートによる動力の連節としての動力伝達系の了解は、Fig.2 のように端子接続系としての了解に進展する。

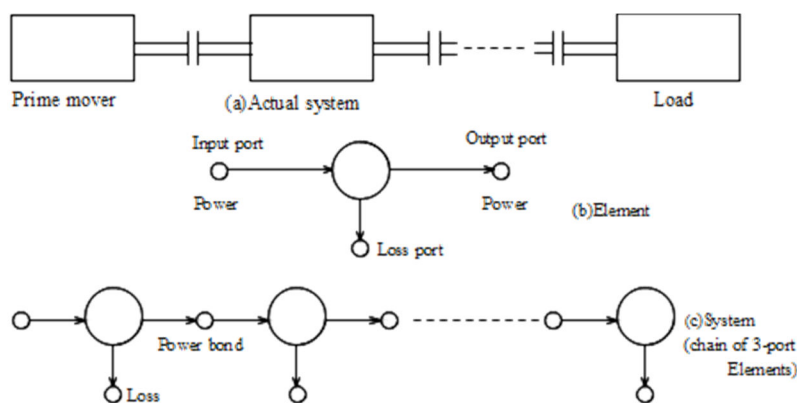


Fig.1. Representation of power transmission system by chain of 3-port power handling elements.

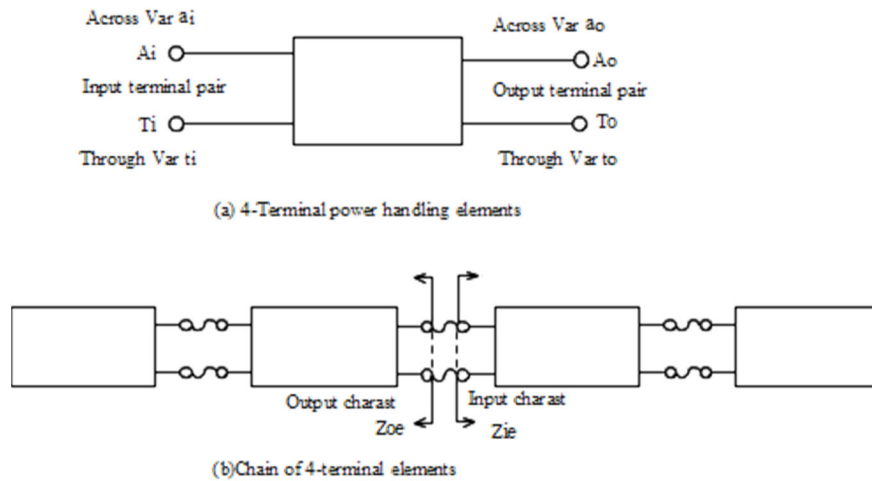


Fig.2. Representation of the system by the chain of 4-terminal Power handling elements.

Fig.2 に示すような形での系の力学的機能の評価は回路論的視点にほかならない。Fig.2 において系の任意の端子接続で切断して、動力源側の出力端子対について位差量と流通量との関係によってその特性づけを行い、負荷側の入力端子対についても同様の特性評価を行うならば、その端子接続における動力伝達の様相が明らかになる。これは回路論における端子特性の評価である。

ポートを端子対化した単位要素は、回路要素としての特性づけができる。入力端子対における端子間の位差量～流通量関係——入力端特性および出力端子間における出力端特性として外的な端子特性が、両者の相互関係として要素内の動的プロセスを端子間の関係として力学的機能が特性づけられる。

このような端子間特性は、要素および系の動力伝達機能の力学的評価をインピーダンス、アドミッタンス関係によって行うことにほかならない。ここにインピーダンス、アドミッタンスをつぎのように定義しておこう。

$$\text{インピーダンス} = \frac{\Delta (\text{位差量})}{\Delta (\text{流通量})}$$

$$\begin{aligned} \text{アドミッタンス} &= \frac{1}{(\text{インピーダンス})} \\ &= \frac{\Delta (\text{流通量})}{\Delta (\text{位差量})} \end{aligned}$$

尚、表 0-1 にエネルギープロセッサ、表 0-2 に流通量—位差量の各分類を、文献[2]より引用しておく。

表 0-1

Table 1 Energy processor

	Symbols	Functions	Examples
Transformer	TF	Energy transformation in the same category	lever, gear, boiler, electric transformer
Transducer	TD	Energy transduction in different categories	electric motor, engine, generator
Transmitter	TM	Energy transmission in the same category	shaft, belt, pipe, wire
Modulater	MOD	Higher level energy source is controlled by lower level energy input and the controlled medium level energy is supplied to load	valve
Amplifier	AMP	Supplied energy of higher level is controlled by lower level energy input, the output being of medium energy level	amplifier

* 高橋利衛：プラント回路網の解析，日本機械学会第216回講習会教材，81（1964）

表 0-2

Table 2 Through and across variables

Process	Through variables		Across Variables	
Dynamical	Momentum	$m = \int f dt$ [kg·s]	Velocity	$v = \dot{x}$ [m/s]
	Force	$f = \dot{m}$ [kg]	Coordinate	$x = \int v dt$ [m]
Prime mover	Angular Momentum	$q = \int \tau dt$ [kg·m·s]	Angular Velocity	$\omega = \dot{\theta}$ [rad/s]
	Torque	$\tau = \dot{q}$ [kg·m]	Rotation Angle	$\theta = \int \omega dt$ [rad]
Electric and Electromagnetic	Charge	$q = \int i dt$ [C]	Voltage	$e = \dot{\phi}$ [V]
	Current	$i = \dot{q}$ [A]	Flux	$\phi = \int e dt$ [V·s]
Hydraulic	Volume	$V = \int F dt$ [m ³]	Pressure	$p = \dot{P}$ [kg/m ²]
	Flow Rate	$F = \dot{V}$ [m ³ /s]	Pressure Integral	$P = \int p dt$ [kg·s/m ²]
Thermal	Heat	$Q = \int w dt$ [Kcal]	Temperature	$\theta = \dot{\Theta}$ [deg]
	Heat Flow	$w = \dot{Q}$ [Kcal/s]	Temperature Intergral	$\Theta = \int \theta dt$ [deg·s]
Thermodynamical	Volume	V [m ³]	Pressure	P [kg/m ²]
	Entropy	S [Kcal/K]	Absolute Temperature	T [°K]

サーボ弁の解析にあたり、システムを図 0-2 に示されるものとして評価する。図 0-2 において、各要素間の結合はボンド（エネルギー、パワー結合）を意味し、入、出力端での 0 接続は、位差量共通の流通量の平衡と考えればよい。ボンドグラフについては、文献[3],[4]を参照のこと。

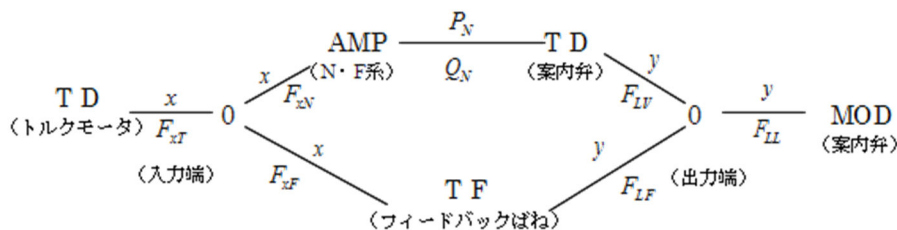


図 0-2 サーボ弁構成要素の 2 ポート結合

図 0-2 を入出力端での評価を行うために書きかえると、図 0-3 のごとくとなる。

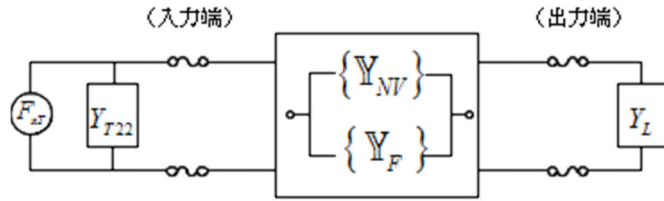


図 0-3 サーボ弁構成要素の 4 端子結合

ここで示すアドミッタンスは別項において述べる。

0-1 静特性 (サーボ弁の精度)

サーボ弁の静特性評価を、系に働くじょう乱に注目して行う。サーボ弁の静特性を決定づける主なるものをシステム評価のうちに求めると、スプール変位の定格値 (y_0) とじょう乱によるスプールの変化量 (Δy) との比である。これは静特性に関わる仕様 (例えばヌルシフト、ヒステリシス、分解能など) と、じょう乱によるサーボ弁の応答とを、システムを構成する要素のパラメータに関係づけて理解することであり、

(1) システムに働くじょう乱の量を知ること

(2) じょう乱による系の応答を、サーボ弁構成要素のパラメータと関連付けて評価しておくこと
とまとめることができる。

系に働くじょう乱をまとめ図 0-4 に示す。

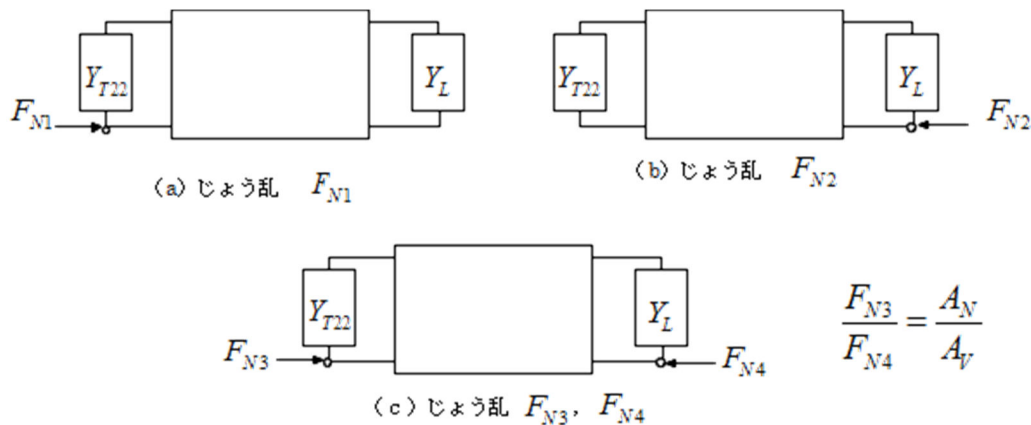


図 0-4 系に働くじょう乱

個々のじょう乱の主な項目を以下に示す。

(1) F_{N1} に関わるものとして

- ・トルクモータの出力ヒステリシス
- ・トルクモータの慣性外乱に対する変動力
- ・ノズル噴流力 (流体のモーメント変化分等) の変動
- ・スプールとフィードバックばねの結合部の摩擦力

(2) F_{N2} に関わるものとして

- ・案内弁の摩擦力
- ・案内弁部での軸力、その変動

(3) F_{N3} , F_{N4} に関わるものとして

・NF系の圧力バランスのくずれ

$$F_{N3} = A_N \cdot \Delta P_N$$

$$F_{N4} = A_V \cdot \Delta P_N$$

次に各構成要素のアドミッタンスを求め、解析を進めることとする。

(1) トルクモータ部

トルクモータは駆動アンプの出力アドミッタンスを $Y_{A0} \cong 0$ と考えた場合、トルクモータの特性表示は式(0-1)に示されるごとくになる。

$$F_{xT} = F_{xTS} - Y_{T22}x \quad (0-1)$$

$$F_{xTS} \propto i \quad (\text{入力電流対出力トルク比}) \quad (0-2)$$

ただし

$$Y_{T22} = \frac{J_a}{\ell_1^2} S^2 + \frac{C_T}{\ell_1^2} S + \frac{K_T}{\ell_1^2}$$

式(0-1)を端子表示及び出力端特性を示せば

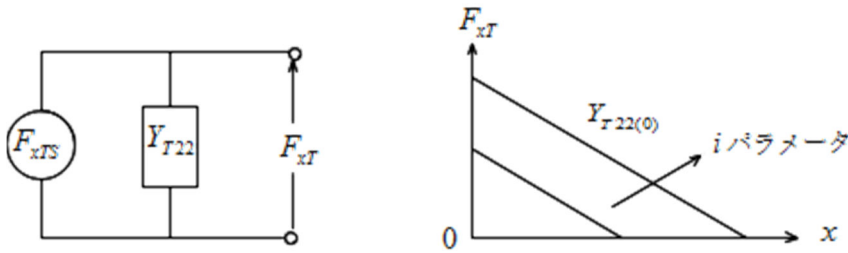


図 0-5 トルクモータの特性

となる。

なお駆動周波数が大となった場合、トルクモータの入力アドミッタンスは、駆動アンプのアドミッタンスに近づく。この場合は駆動アンプの出力特性を定電流源と考えることができない。

(2) N-F系部と案内弁部

N-F系部と案内弁部は、図0-6のように接続されている。これを一つのアドミッタンス Y_{NV} として示すため個々の接続マトリックス H_N H_V を求め H_{NV} を求めた後アドミッタンス Y_{NV} を算出する。

$$\text{---}\{H_N\}\text{---}\{H_V\}\text{---}$$

(a)

$$\text{---}\{H_{NV}\}\text{---}$$

(b)

$$\text{---}\{Y_{NV}\}\text{---}$$

(c)

図 0-6 N=F系と案内弁の接続

ここで接続マトリックス、アドミッタンスマトリックス相互関係を示しておく、

$$\begin{pmatrix} F_{xN} \\ Q_N \end{pmatrix} = \mathbf{Y}_N \begin{pmatrix} x \\ P_N \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} x \\ F_{xN} \end{pmatrix} = \mathbf{H}_N \begin{pmatrix} P_N \\ Q_N \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} Q_N \\ F_{LV} \end{pmatrix} = \mathbf{Y}_V \begin{pmatrix} P_N \\ y \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} P_N \\ Q_N \end{pmatrix} = \mathbf{H}_V \begin{pmatrix} y \\ F_{LV} \end{pmatrix}$$

(0-3)

$$\mathbf{H}_{NV} = \mathbf{H}_N \cdot \mathbf{H}_V$$

$$\mathbf{H}_N \equiv \begin{pmatrix} \frac{Y_{N22}}{Y_{N21}} & \frac{1}{Y_{N21}} \\ -\frac{Y_{N11} \cdot Y_{N22} - Y_{N12} \cdot Y_{N21}}{Y_{N21}} & \frac{Y_{M11}}{Y_{N21}} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{H}_V \equiv \begin{pmatrix} \frac{Y_{V22}}{Y_{V21}} & \frac{1}{Y_{V21}} \\ -\frac{Y_{V11} \cdot Y_{V22} - Y_{V12} \cdot Y_{V21}}{Y_{V21}} & \frac{Y_{V11}}{Y_{V21}} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{H}_{NV} \equiv \begin{pmatrix} \frac{Y_{N22} \cdot Y_{V22} - Y_{V11} \cdot Y_{V22} + Y_{V12} \cdot Y_{V21}}{Y_{N21} \cdot Y_{V21}} & \frac{Y_{V11} - Y_{N21}}{Y_{N21} \cdot Y_{V21}} \\ \frac{(Y_{N11} \cdot Y_{N22} - Y_{N12} \cdot Y_{N21}) Y_{V22} - Y_{N11} (Y_{V11} \cdot Y_{V22} - Y_{V12} \cdot Y_{V21})}{Y_{N21} \cdot Y_{V21}} & \frac{Y_{N11} \cdot Y_{V11} - Y_{M11} \cdot Y_{N22} - Y_{N12} \cdot Y_{N21}}{Y_{N21} \cdot Y_{V21}} \end{pmatrix}$$

(0-4)

これより \mathbf{Y}_{NV} を求める。 \mathbf{Y}_{NV} は

$$\begin{pmatrix} F_{xN} \\ F_{LV} \end{pmatrix} = \mathbf{Y}_{NV} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

(0-5)

$$\begin{aligned}
Y_{NV} &\equiv \begin{pmatrix} \frac{H_{NV22}}{H_{NV12}} & \frac{H_{NV12} \cdot H_{NV21} - H_{NV11} \cdot H_{NV22}}{H_{NV12}} \\ 1 & \frac{H_{NV11}}{H_{NV12}} \\ \frac{1}{H_{NV12}} & \frac{H_{NV11}}{H_{NV12}} \end{pmatrix} \\
&= \begin{pmatrix} \frac{Y_{N11} \cdot Y_{V11} - Y_{N11} \cdot Y_{N22} + Y_{N12} \cdot Y_{N21}}{Y_{V11} - Y_{N22}} & \frac{Y_{V12} \cdot Y_{N12}}{Y_{V11} - Y_{N22}} \\ \frac{Y_{N21} \cdot Y_{V21}}{Y_{V11} - Y_{N22}} & \frac{Y_{N22} \cdot Y_{V22} - Y_{V11} \cdot Y_{V22} + Y_{V12} \cdot Y_{V21}}{Y_{V11} - Y_{N22}} \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

要素のアドミッタンスを求める。N-F系部については、式(0-6)により示される。式(0-6)の算出は別項で行う。個々のアドミッタンスは、動作点近傍で線形近似したものである。

$$F_{xN} = -f(x)x + A_N P_N$$

$$Q_N = \frac{\partial Q_N}{\partial x} x - \frac{\partial Q_N}{\partial P_N} P_N$$

$$Y_{N11} = -f(x)$$

$$Y_{N12} = A_N$$

$$Y_{N21} = \frac{\partial Q_N}{\partial x}$$

$$Y_{N22} = -\frac{\partial Q_N}{\partial P_N}$$

(0-6)

案内弁部については、式(0-7)により示される。式(0-7)の算出は別項で行う。

$$Q_N = \frac{1}{2} \beta V_0 S \cdot P_N + A_V S y$$

$$F_{LV} = A_V P_N - (M_V S^2 + C_V S) y$$

$$Y_{V11} = \frac{1}{2} \beta V_0 S$$

$$Y_{V12} = A_V S$$

$$Y_{V21} = A_V$$

$$Y_{V22} = -(M_V S^2 + C_V S)$$

(0-7)

(3) フィードバックばね部

入力電流に対するスプール変位ゲインは、サーボ弁の負荷である、案内弁に働く流体力（主に軸力）が、サーボ弁の出力ポートが解放もしくは遮断で異なる。

しかしここでは案内弁の位置決め剛性が高いので、軸力等の変化による案内弁変位のバック量が小さいとし、定格変位 y_R のみに注目し、フィードバックばね定数を式(0-8)とする。

$$K_F = \frac{\text{定格入力トルク} (kg \cdot cm)}{\text{定格変位} (cm)} \quad [kg \cdot cm / cm]$$

と、各アドミッタンスは式(8)により示される。

$$\begin{pmatrix} F_{xF} \\ F_{LF} \end{pmatrix} = Y_F \begin{pmatrix} x \\ F \end{pmatrix}$$

(0-8)

$$F_{xF} = \frac{\ell_2 K_F}{\ell_1^2} x - \frac{K_F}{\ell_1} y$$

$$F_{LF} = -\frac{K_F}{\ell_1} x + \frac{K_F}{\ell_2} y$$

$$Y_{F11} = \frac{\ell_2 K_F}{\ell_1^2}$$

$$Y_{F12} = -\frac{K_F}{\ell_1}$$

$$Y_{F21} = -\frac{K_F}{\ell_1}$$

$$Y_{F22} = \frac{K_F}{\ell_2}$$

これらアドミッタンスは各要素固有のアドミッタンスであり、固有アドミッタンスとして、実行アドミッタンスと区別される。

サーボ弁のシグナルフロー線図を、これら固有アドミッタンスを用いて図0-7に示す。

図0-7に示されるように、系に働くじょう乱は、入出力端で評価することができる。これより入出力端での実効アドミッタンスを算出し、じょう乱による応答を調べる。

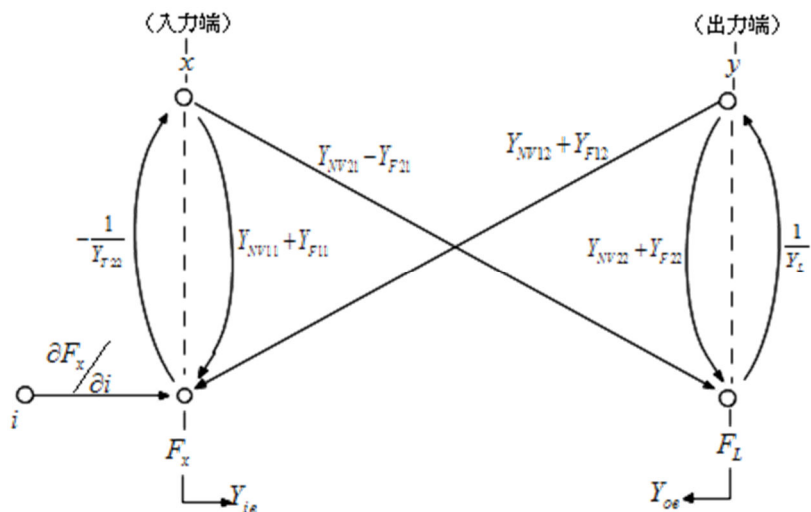


図 0-7 サーボ弁のシグナルフロー線図

実効入出力アドミッタンスをそれぞれ Y_{ie} , Y_{oe} とすれば

$$Y_{ie} = Y_{NV11} + Y_{F11} + \frac{(Y_{NV21} - Y_{F21})(Y_{NV12} - Y_{F12})}{Y_L - (Y_{NV22} + Y_{F22})} \quad (0-9)$$

$$Y_{oe} = Y_{NV22} + Y_{F22} - \frac{(Y_{NV21} - Y_{F21})(Y_{NV12} - Y_{F12})}{Y_{T22} + (Y_{NV11} + Y_{F11})}$$

と求まる。実効入力アドミッタンス Y_{ie} は入力端での負荷の影響を、実効出力アドミッタンス Y_{oe} は出力端でのトルクモータ出力端の影響をそれぞれ見ることができる。が、ここでは、じょう乱入力によるスプールの変動分 Δy を定格スプール変位 y_R に比して調べる。

(1) 入力端での外乱 F_{N1}

外乱 F_{N1} は、入力端で評価するかぎり、系に働く作用は、トルクモータの短絡出力と等質なものと考えることができるので、直接式(10)を導くことができる。

$$\frac{\Delta y}{y_R} = \frac{F_{N1}}{F_{xTRS}} \quad \text{ただし} \quad F_{xTS} = \frac{T_R}{\ell_1} \quad (0-10)$$

(2) 出力端での外乱 F_{N2}

じょう乱 F_{N2} によるスプールの変動分 Δy は、実効出力アドミッタンス Y_{oe} により次式のように求めることができる。この実効出力アドミッタンスは、一般にサーボ剛性と言われるものである。

$$\Delta y = \frac{F_{N2}}{Y_{oe}}$$

また、定格スプール変位 y_R は、概略次式により算出できるので、

$$y_R = \frac{F_{xTRS}}{Y_{F12}}$$

Δy と y_R の比は、式(0-11)となる。

$$\frac{\Delta y}{y_R} = \frac{Y_{F12}}{Y_{oe}} \cdot \frac{F_{N2}}{F_{xTRS}} \quad (0-11)$$

(3) 入出力端での外乱 F_{N3} , F_{N4}

じょう乱 F_{N3} , F_{N4} によるスプールの変動分 Δy は、 F_{N3} によるもの Δy_1 と F_{N4} によるもの Δy_2 との差となる。

$$\Delta y = |\Delta y_1| - |\Delta y_2|$$

これより Δy は、

$$\Delta y = \left| \frac{F_{N4}}{Y_{oe}} \right| - \left| \frac{F_{N3}}{Y_{Fx \cdot y}} \right|$$

(0-12)

ただし、 $Y_{F_x \cdot y}$ は F_x と y の間の伝達関数の逆数である。

$$\frac{1}{Y_{F_x \cdot y}} = -\frac{(Y_{NV21} - Y_{F21})}{(Y_{T22} + Y_{NV11} + Y_{F11})(Y_{NV22} + Y_{F22}) - (Y_{NV21} - Y_{F21})(Y_{NV12} - Y_{F12})}$$

入力端での相対量 x と F_x は負荷端を短絡した場合次のアドミッタンスで関係づけられる。

$$Y_{is} = Y_{T22} + Y_{NV11} + Y_{F11} \quad (0-13)$$

これより出力端実効アドミッタンス(式 0-9)は、

$$Y_{oe} = Y_{NV22} + Y_{F22} - \frac{(Y_{NV21} - Y_{F21})(Y_{NV12} - Y_{F12})}{Y_{is}}$$

これで、各じょう乱に対する応答を表せたことになる。次におのおののアドミッタンスに要素のパラメータを代入して、簡略化すれば

$$Y_{oe}(0) = \frac{K_F}{\ell_2} + \frac{\left(A_v \frac{\partial P_N}{\partial x} - \frac{K_F}{\ell_1} \right) \frac{K_F}{\ell_1}}{Y_{is}} \quad (0-14)$$

$$Y_{is}(0) = K_\tau + A_N \frac{\partial P_N}{\partial x} - f(x) + \frac{\ell_2 \cdot K_f}{\ell_1^2} \quad (0-15)$$

$$\frac{1}{Y_{F_x \cdot y}(0)} = \frac{\frac{K_F}{\ell_1}}{\frac{K_F}{\ell_2} \left(K_\tau + A_N \frac{\partial P_N}{\partial x} - f(x) \right) + \frac{K_F}{\ell_1} \cdot A_v \frac{\partial P_N}{\partial x}} \quad (0-16)$$

となる。

一方、サーボ弁の構成要素の、静特性評価に関わるパラメータを別の視点より選出しておく。

(1) トルクモータの評価パラメータ

入力端においては、トルクモータの出力端から負荷側へ、エネルギーの授受が行われる。このエネルギーの授受は、静特性、動特性をいろいろな意味で規定づけているはずである。トルクモータの出力端特性は図 0-5 に見るように、 F_{xTRS} と $Y_{T22}(0)$ により示されるが、いままで見てきたように、トルクモータの出力アドミッタンスを $Y_{T22} + Y_{F11}$ と考える。これは後に示すように、動特性評価の主要なパラメータである。また不変量である出力エネルギーレベル E_{TO} を考えることにより、トルクモータの出力端特性の意味がはっきりする。これらはそれぞれ次の式で示される。

$$E_{To} = \frac{1}{2} T_s \cdot \theta_f = \frac{1}{2} F_{xTS} \cdot x_f$$

$$Y_{T22} + Y_{F11} = \frac{K_\tau}{\ell_1^2} + \frac{\ell_2 \cdot K_f}{\ell_1^2} = \frac{K_T}{\ell_1^2} \quad (0-17)$$

式(0-17)を図として示す。

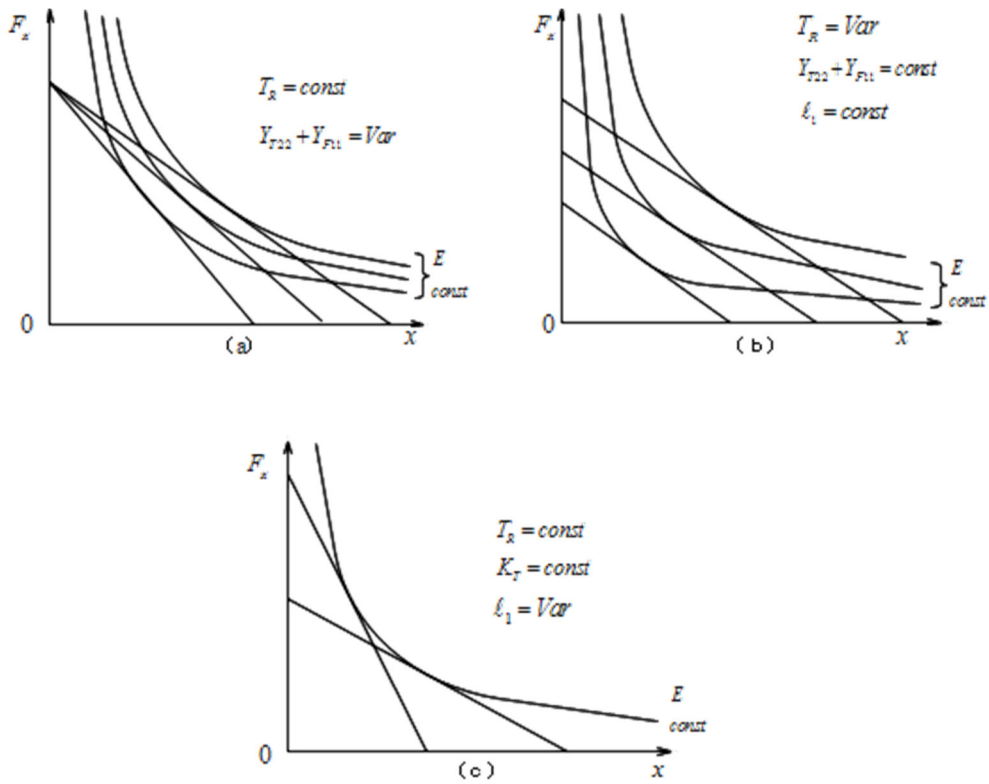


図 0-8 トルクモータ出力端特性

(2) 入力端負荷側アドミッタンス

入力端実効アドミッタンス Y_{ie} の負荷端短絡アドミッタンスは

$$Y_{ies} = Y_{NV11} + Y_{F11} \quad (0-18)$$

である。式(0-18)で Y_{F11} は、トルクモータの評価パラメータ決定時に評価してあるので、ここで取り上げるのは、 Y_{NV11} とする。 Y_{NV11} は

$$Y_{NV11}(0) = -f(x) + A_N \frac{\partial P_N}{\partial x} \quad (0-19)$$

で示される。これを図 0-9 で概観すれば、

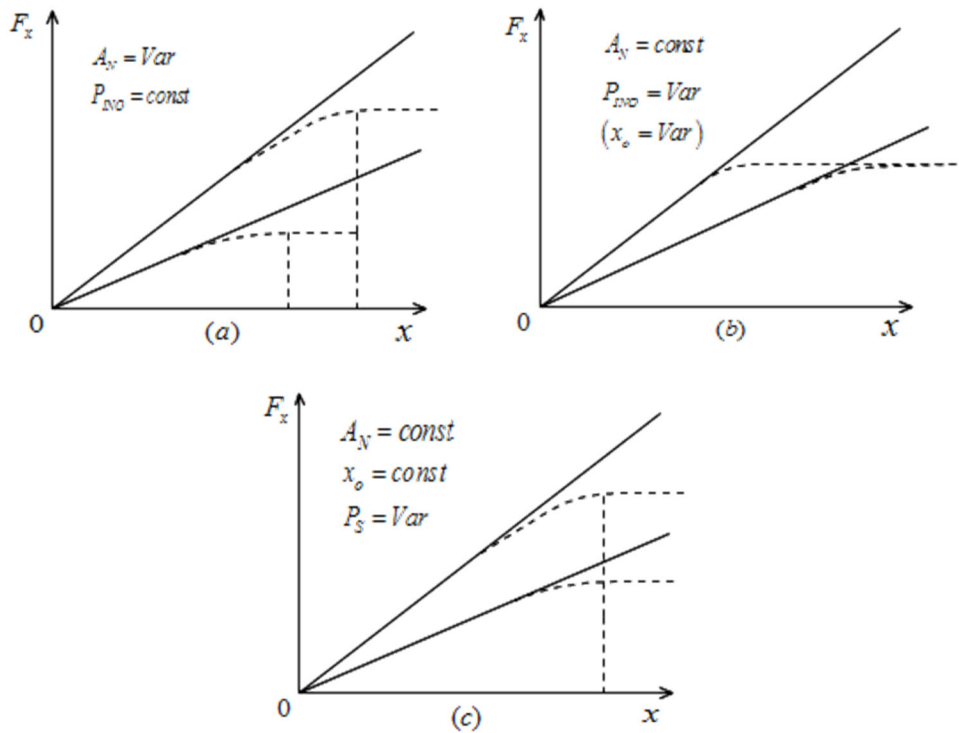


図 0-9 入力端での負荷側アドミッタンス

Y_{NV11} は、 $N \cdot F$ 系の噴流力に関するもので、別項で実験結果も含めて調べる。これは、ノズル部先端の形状、フラップ面の形状、流体のレイノルズ数等の変化により、流れの状態が大きく変わり、一般的な予測は困難である。しかし、現在製作しているサーボ弁についての実験結果より、定性的には図 0-9 に示したごとく考えて良い。

以上の結果より、静特性評価を入力端に注目して行うことができる。

(1) 出力端での外乱、 F_{N2}

式(0-11)を個々のパラメータを入れて再記すれば、

$$\frac{\Delta y}{y_R} = \frac{K_\tau + \frac{\ell_2 \cdot K_F}{\ell_1^2} - f(x) + A_N \frac{\partial P_N}{\partial x}}{A_V \frac{\partial P_N}{\partial x}} \cdot \frac{F_{N2}}{F_{XTRS}} \quad (0-20)$$

ここで

$$x_m = \frac{F_{XTRS}}{K_\tau + \frac{\ell_2 \cdot K_F}{\ell_1^2} - f(x) + A_N \frac{\partial P_N}{\partial x}} \quad (0-21)$$

とすれば、式(0.20)は、

$$\frac{\Delta y}{y_R} = \frac{F_{N2}}{A_V \frac{\partial P_N}{\partial x} \cdot x_m} \quad (0-22)$$

で示される。この x_m は、図 0-8、図 0-9 で示したように、入力端での相平面上での動作点である。

たとえば図 0-10 より明らか
なように、トルクモータの出力
エネルギーレベル E_{T0} と、負荷
側アドミッタンス Y_{NV11} が決定
された場合、 x_m の最大値は l_1
を変化させることにより、

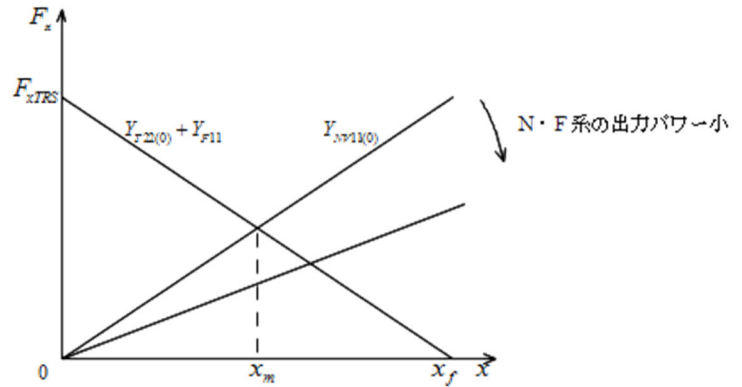


図 0-10 入力端での入出力特性

$$Y_{T22} = Y_{NV11} \quad (0-23)$$

を条件として決定される。これらパラメータの関係を式(2-24)に示す。

$$x_{m\max} = \sqrt{\frac{1}{2} \frac{E_{T0}}{Y_{NV11}(0)}} \quad (0-24)$$

また、 E_{T0} が大となれば x_m は大、 $Y_{NV11}(0)$ が小となれば x_m は大となる。

(2) 入出力端での外乱 F_{N3} , F_{N4}

式(0-12)を個々のパラメータを入れて再記する。

$$\frac{\Delta y}{y_R} = \frac{K_\tau + \frac{\ell_2 \cdot K_F}{\ell_1^2}}{\frac{\partial P_N}{\partial x}} \cdot \frac{\Delta P_N}{F_{XTRS}} \quad (0-25)$$

これは、図 0-10 よりも明らかのように

$$\frac{\Delta y}{y_R} = \frac{1}{\frac{\partial P_N}{\partial x} \cdot x_f} \Delta P_N \quad (0-26)$$

で示される。また出力エネルギーレベル E_{T0} との関係は、

$$x_f = \sqrt{2 \frac{E_{T0}}{Y_{T22} + Y_{F11}}} \quad (0-27)$$

で示される。

以上によって、じょう乱による系の応答をみてきたが、すべてのじょう乱に対する応答が入力端で評価されることがわかった。入力端の相対平面を再記して、整理しておく、

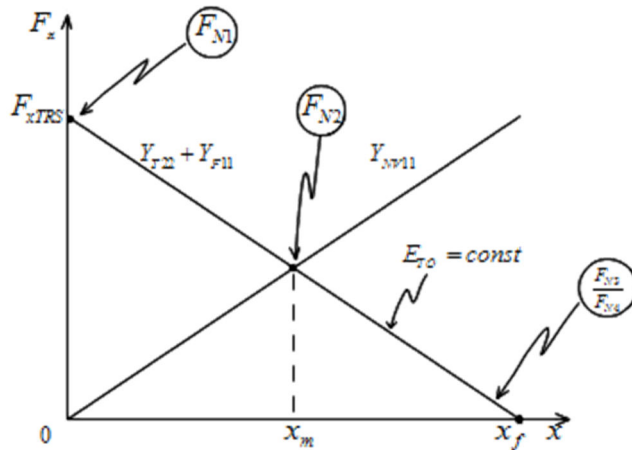


図 0-11 入力端の相平面

これで、サーボ弁の静特性評価を一応終える。ここで以上の結果を整理しておく、サーボ弁の静特性について、系に加わるじょう乱による出力端での変動 Δy を関連付けて検討を行い、評価に必要なパラメータを決定し、その意味するものを系の特性評価中で示した。

- (1) F_{N1} は入力 F_{XT} と等質なものとして、直接計算できる。
- (2) F_{N2} は、出力端の実効出力アドミッタンス Y_{oe} に関係し外乱として働く。実効出力アドミッタンスは、入力端で評価され、パラメータとして、 E_{To} 、 $Y_{T22} + Y_{F11}$ 、 l_1 が上げられた。
- (3) じょう乱 ΔP_N については、サーボ弁の静的なつり合い点では、 ΔP_N がほぼ 0 となることを条件として、 E_{To} 、 $Y_{T22} + Y_{F11}$ 、 l_1 が評価パラメータとして上げられた。
- (4) トルクモータ出力端特性は、 E_{To} 、 $Y_{T22} + Y_{F11}$ により評価される。

これらパラメータは、個々の構成要素の機構的、機能的な特性により相互に規制されるものである。それら個々の特性評価において、システム的には以上の観点より行うことが有用なものであると考える。

一方、系に働くじょう乱は、個々の構成要素より発生するものであって、構成要素の固有アドミッタンスとも関連させて、これらの量を調査する必要がある。これについては、別項で検討を行う。

以上で用いた各要素の変数及び定数は別項で詳述する個別要素の検討の中で記述することにする。ここまでは構成要素の大まかな働きについて述べた。

文献

- [1] William J. Thayer. ELECTROPNEUMATIC SERVOACTUATION AN ALTERNATIVE TO HYDRAULICS FOR SOME LOW POWER APPLICATIONS. MOOG TECHNICAL BULLETIN 151, 1984(revised 1988).
- [2] 町山忠弘, 川瀬武彦. 流体式トルクコンバータ系における動力伝達の回路論的考察. 早稲田大学理工学研究報告 35, 17-30, 1966.
- [3] Henry M Paynter. Analysis and Design of Engineering Systems. The M.I.T. Press. 1961.
- [4] Dean Karnopp, Ronald C Rosenberg. Analysis and Simulation of Multiport Systems - The Bond Graph Approach to Physical Dynamics. The M.I.T. Press. 1968.