

8 操作部，検出部の特性

フィードバック制御系の操作部および検出部の特性について説明する。プロセス制御においては，化学工業・プロセス工業で使用する各種のプラント・装置の操業状態に関する諸量，温度，流量，圧力，レベル，濃度，組成などを制御する。そこで，検出部ではこれらの変量を自動的に測定するため，種々の計測器 (*measuring instrument*) が用いられる。

また，これらのプラントで取り扱う物質の大部分は，流体すなわち気体（蒸気，固気混相流を含む）および液体（固体粒子懸濁スラリーを含む）である。そのため，通常のプロセス制御では，流体の流量を操作することによって制御を行う。したがって，操作部には制御用のバルブ（調節弁・制御弁）が用いられる。

8・1 制御弁の特性

プロセス制御の操作部に数多く用いられている制御弁の構造・特性について説明する。

制御弁を自動的に操作するために，空気の圧力を利用するタイプがある。この弁は，ダイアフラム制御弁 (*diaphragm control valve*) あるいは空気式調節弁 (*pneumatic valve*) と呼ばれ，その構造を図 8・1 に示す。この弁は，大きく駆動部と弁本体とに分けられる。駆動部は，ダイアフラムおよびダイアフラムケース，ダイアフラムプレート，スプリングからなり，弁本体は，バルブプラグ，シートリング，ガイドブッシュからなる。ダイアフラムプレートに接続されているダイアフラムステムは，バルブプラグステムと連結され，弁

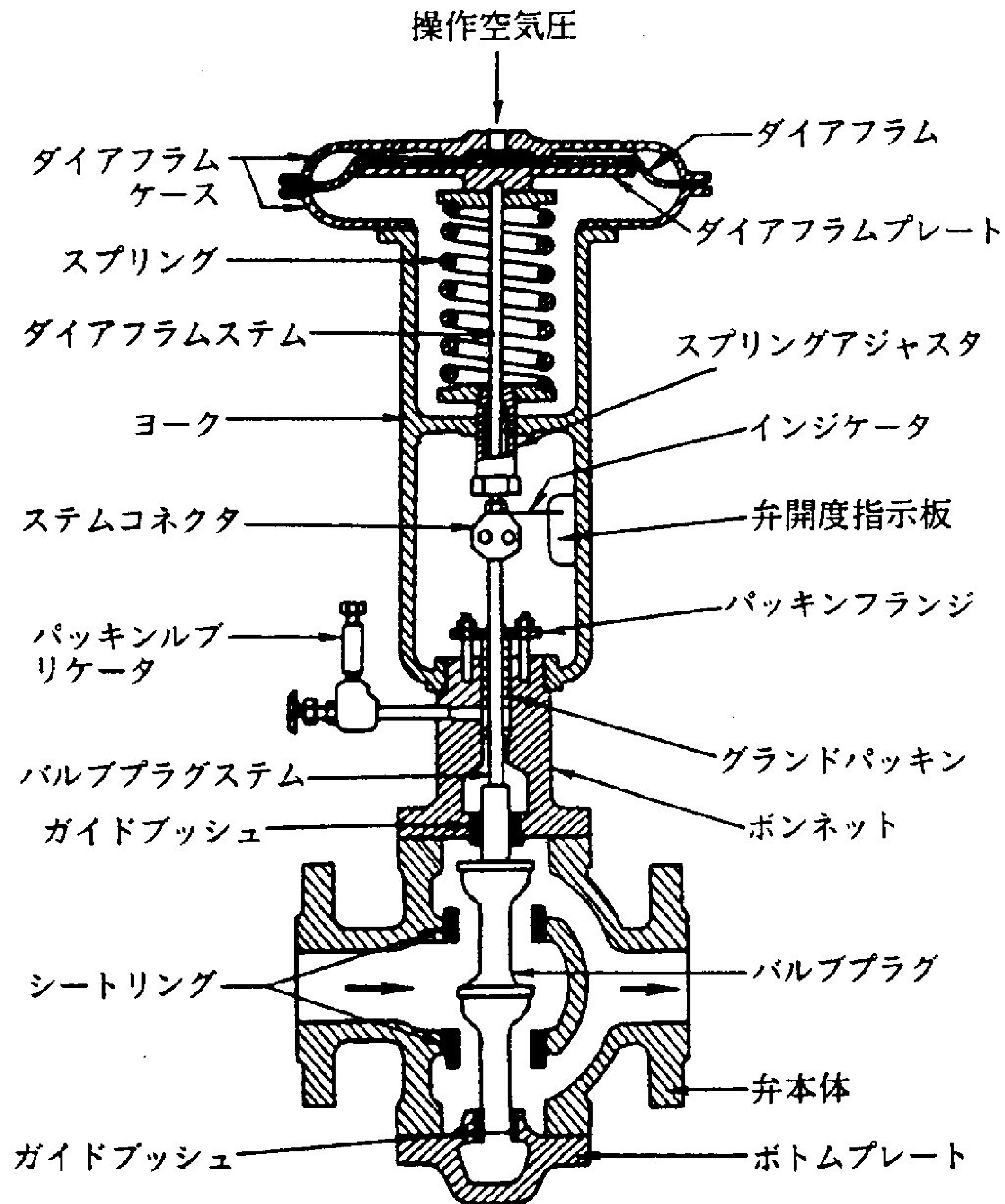


図 8.1 ダイアフラム制御弁の構造

開度支持部にも接合されている。

ダイアフラムは、ゴムシートからできており、ダイアフラムケースを上下に分割し、上部の部屋は気密になっている。この上部の部屋に制御操作信号である空気圧が加えられると、ダイアフラムを下部に押し下げる。一方、ダイアフラム下部にはスプリングがあるため、ダイアフラムが下がればダイアフラムプレートを上部に押し上げ、上下の力が釣り合った位置で静止する。このプレートにはステムが接続されているため、ダイアフラム部に供給される空気圧の強弱によってプラグステムの位置が変化する。その結果、操作信号である空気圧と弁の開度は正比例する。

操作信号である空気圧は、 $0.2 \sim 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ の圧力が使われる。弁の開度と弁を通過する流体流量との関係、すなわち、弁の流量特性は、各弁によって異なる。流体が液体の場合、流量は次式で与えられる。

$$F = 0.85 C_v \sqrt{\Delta P / G} \quad (8 \cdot 1)$$

ここで、 $F [\text{m}^3/\text{hr}]$ は液体流量、 $\Delta p [\text{kgf/cm}^2]$ は弁前後の差圧、 $G [-]$ は液体の水に対する比重である。 C_v は弁の流量係数 (*flow coefficient*) と呼ばれ弁固有の値で、弁の種類、弁の口径によって異なり、その数値はメーカーから示される。

C_v 値の定義は、アメリカで発表されて普及したため、次のようなヤード・ポンド法により行われている。 60°F (15.6°C) の清水を、弁の入口・出口間に 1 psi ($1 \text{ psi} = 1 \text{ lb/in}^2 = 0.07 \text{ kgf/cm}^2$) の差圧をかけて流したとき、その流量を $[\text{USgal}/\text{min}]$ の単位で表した値が C_v 値である。(1 米国ガロン: $1 \text{ USgal} = 3.785 \ell$) 通常は、弁全開時の値 $C_{v,\text{max}}$ が示される。なお、(8・1)式は、この C_v 値を使って、流量が $F [\text{m}^3/\text{hr}]$ となるように換算した式である。

いま、流体の供給圧力一定のもとで、任意の弁開度 $\mu [-]$ における流量と、弁全開時 ($\mu = 1$) の流量との比を求めると、

$$F / F_{\text{max}} = C_v / C_{v,\text{max}} = f(\mu) \quad (8 \cdot 2)$$

ここで、 $f(\mu)$ は弁開度の関数で、弁の流量特性 (*flow characteristics*) と呼ばれる。制御弁には、次の2種類の特性を持った弁、リニア弁 (*linear valve*) およびイコールパーセンテージ弁 (*equal percentage valve*) が広く使用されている。この特性

を数式にて表すと次のようになる。

リニア弁：

$$F / F_{\max} = f(\mu) = \mu \quad (8.3)$$

イコールパーセンテージ弁：

$$F / F_{\max} = f(\mu) = R^{\mu-1} \quad (8.4)$$

(8.4)式では、弁を完全に閉じてても($\mu=0$)、 $F = F_{\max} / R$ の流量が流れることを示している。この R を弁のレンジアビリティ (*rangeability*) と呼び、弁全開時の流量と調節可能な最小流量との比となる。これらの流量特性を図示すると図8.2のようになる。

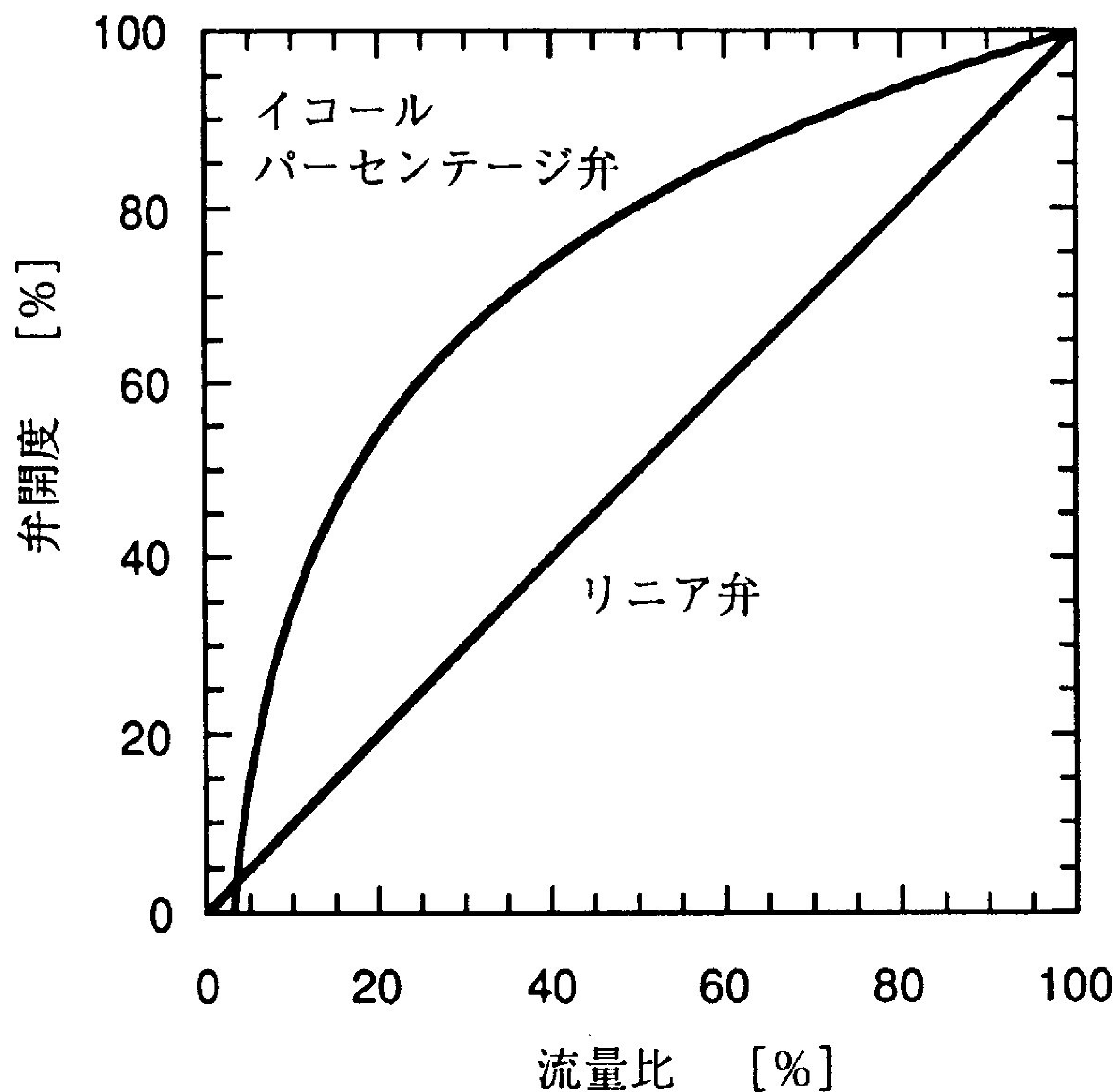


図 8.2 弁の流量特性

制御弁は、プラントの中で配管の中に設置されている。そして、この配管には、弁、ポンプ、バイパス、その他の装置の接続により生ずる流動抵抗が存在する。いま、この抵抗による圧降下を ΔP_L 、制御弁による圧降下を ΔP_V とし、これらの抵抗が直列に入っているものとする。

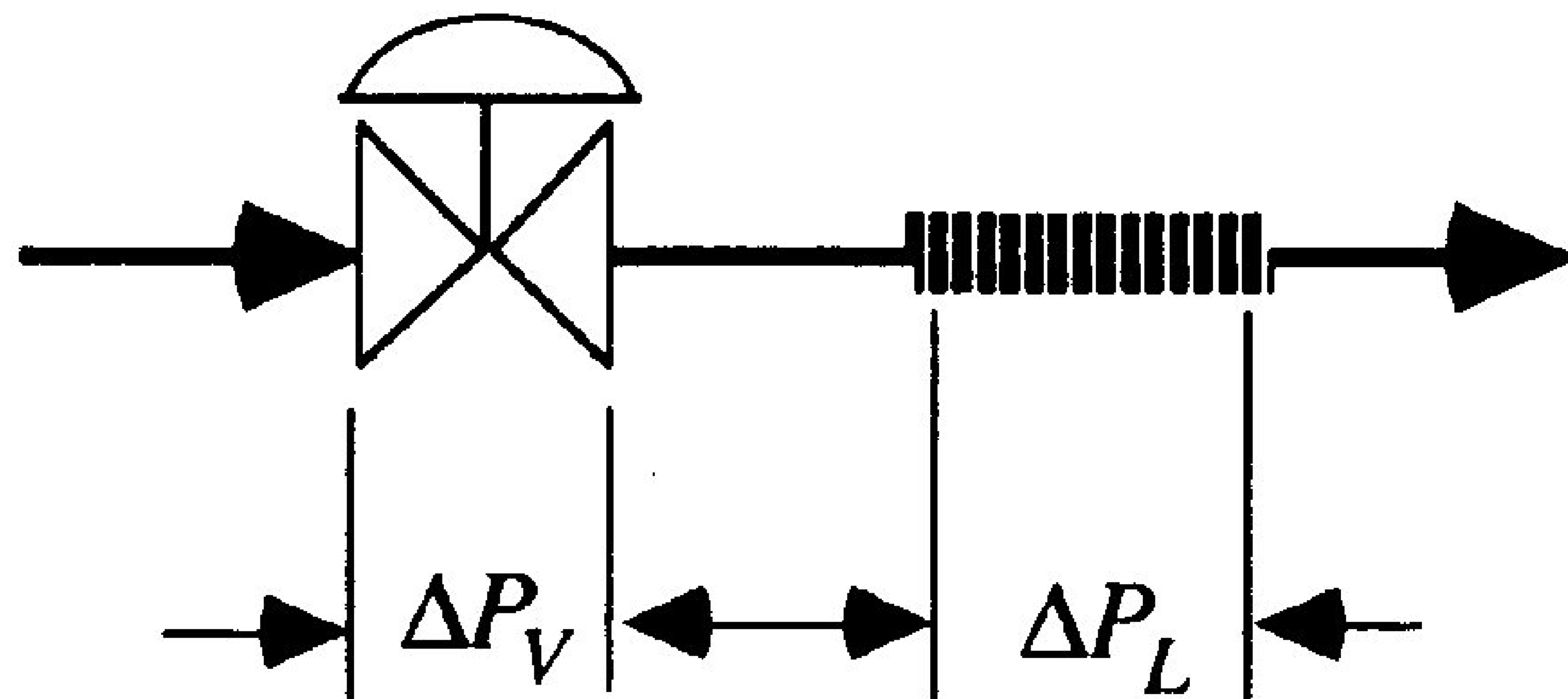


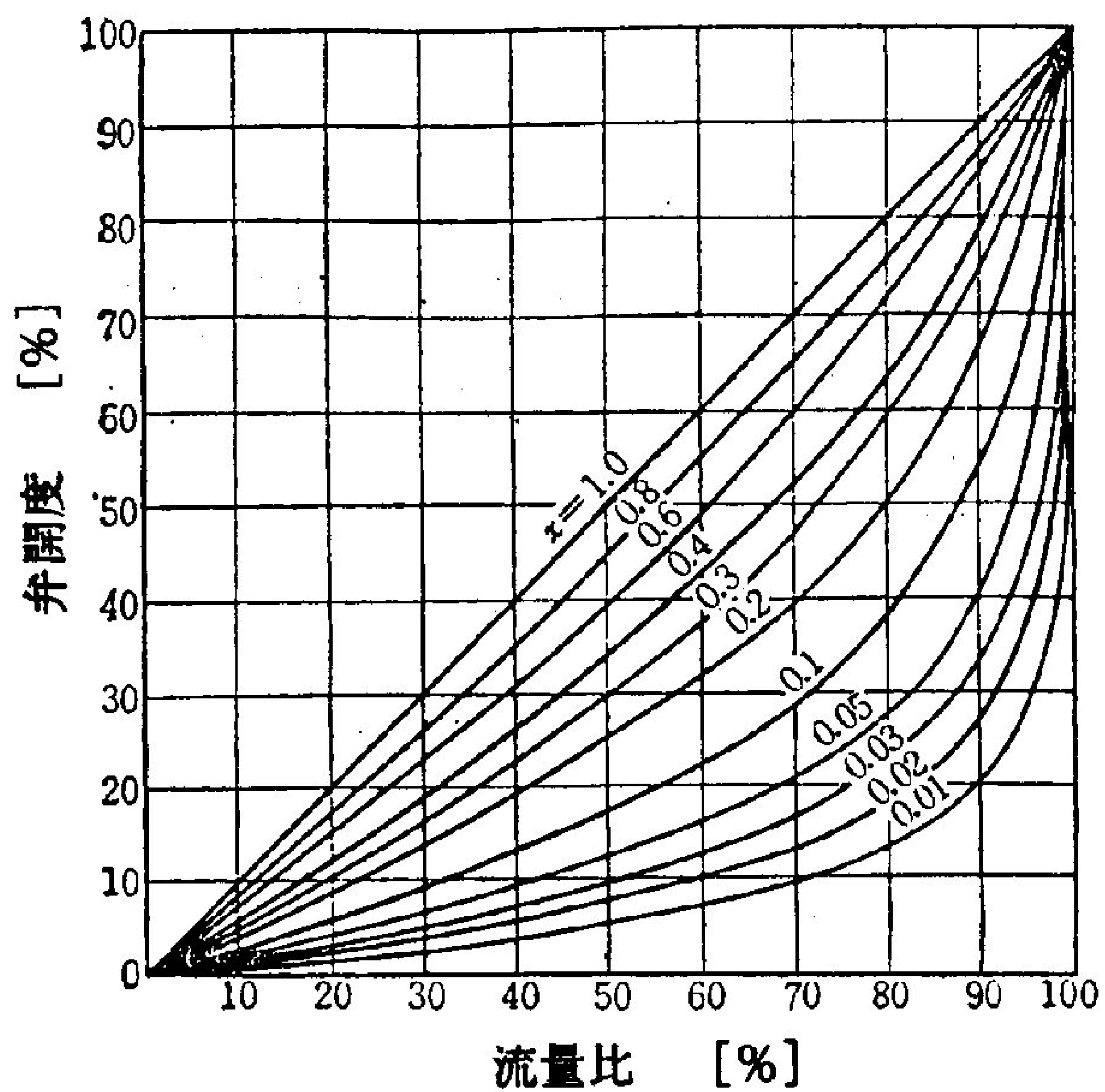
図 8・3 制御弁と直列の流出抵抗がある系

このように、系の中に組み込まれた弁の流量特性を、実効の流量特性と呼ぶ。この直列抵抗系の実効の流量特性を図示すると、図8・4のようになる*。ここで、パラメータ x は、弁全開時 ($\mu = 1$) における弁単独の圧降下 ($\Delta P_{v,m}$) と系全体の圧降下 ($\Delta P_{v,m} + \Delta P_{L,m}$) との比である。

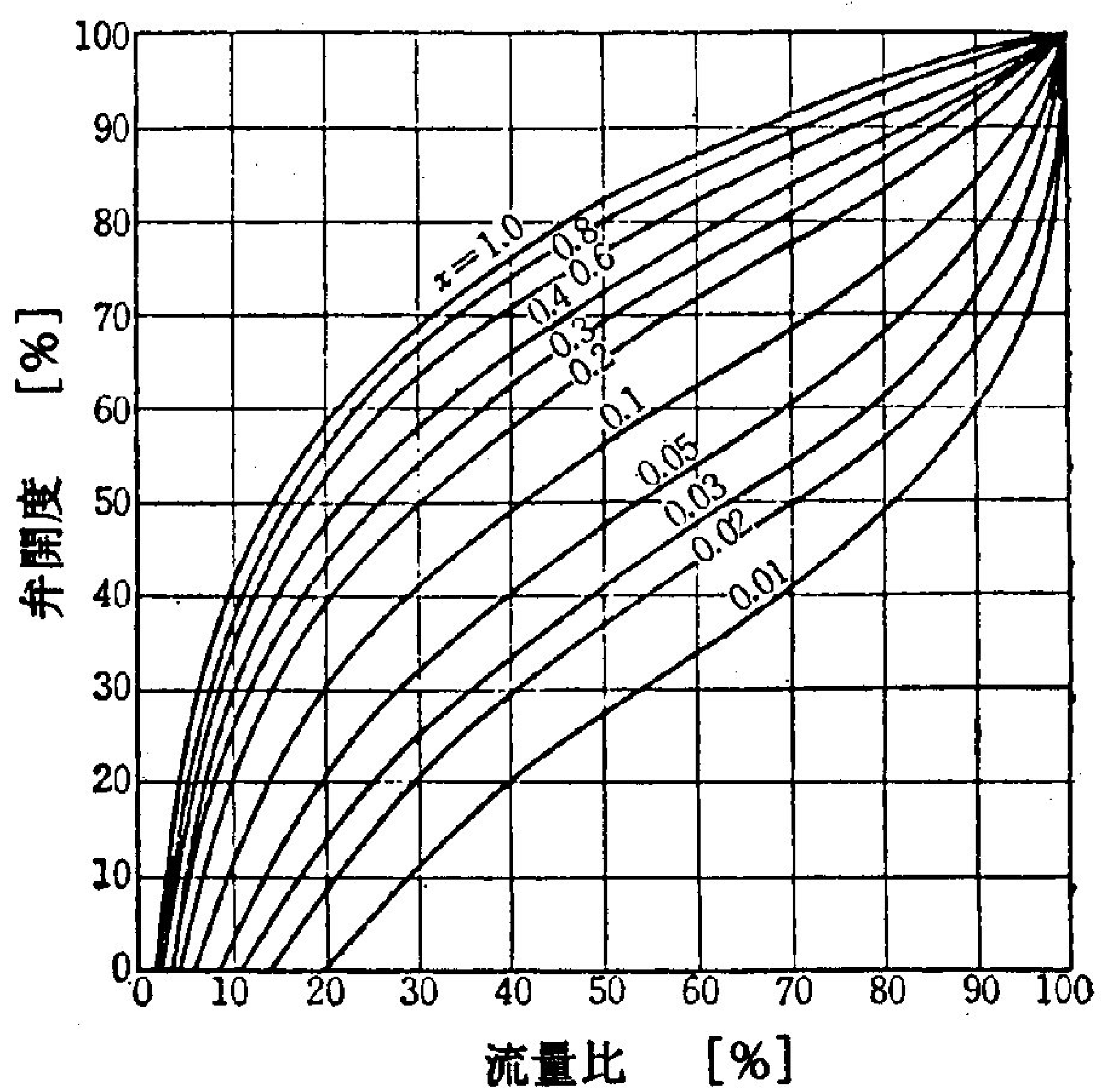
$$x = \frac{\Delta P_{v,m}}{\Delta P_{v,m} + \Delta P_{L,m}} \quad (8.5)$$

この実効の流量特性を見ると、イコールパーセンテージ弁のほうが、弁開度と流量との関係が直線的になる範囲が広いことがわかる。そのためこの弁が、より多く使用されている。リニア弁は、弁以外の抵抗が小さい場合や、制御弁の先端が大気開放になっている場合などに使用される。

* この実効流量特性を示す式の誘導、および図8・4については、宮崎誠一著「化学プラントの計装」日刊工業新聞社を参照のこと



リニア弁



イコールパーセンテージ弁

図 8・4 実効流量特性

空気式調節弁で、操作信号すなわち空気圧が増加すると弁が閉まるタイプを正動作弁 (*air-to-close, fail open valve*) といい、空気圧が増加すると弁が開くタイプを逆動作弁 (*air-to-open, fail closed valve*) という。その使い分けは、事故で空気圧がなくなったとき、弁を全開または全閉のどちらにしたほうがより安全であるかの判断によって行う。

制御弁の駆動部を電動式にした調節弁（略して電動弁という）がある。駆動部にモータを用い、操作信号と弁の開度信号とを比較してその差がゼロとなるようモータに信号を送る。この装置をポジショナという。電動弁には、弁とポジショナが一体となったもの、別々に配置されたものなど数種の形式がある。

これまで述べてきた制御弁の特性は静特性である。制御弁の動特性、すなわち入力・空気圧の変化に対する出力・弁開度の変化の間の動的な関係について次に説明する。

空気圧 $p(t)$ の変化によって弁システムの位置 $u(t)$ が変化するとき、システムに働く圧力、スプリングの反発力、システム移動による摩擦力を考えた運動方程式を立てる。そして、これをラプラス変換することにより伝達関数を求めると2次遅れとなる*。

$$\frac{U(s)}{P(s)} = \frac{b_0}{a_0 s^2 + a_1 s + 1} \quad (8.6)$$

上式で、 $a_0 \ll 1$ となるため、この伝達関数は1次遅れにて近似できる。すなわち、

$$\frac{U(s)}{P(s)} \approx \frac{b_0}{a_1 s + 1} = \frac{(A/K_S)}{(C/K_S)s + 1} \quad (8.7)$$

ここで、 A はダイヤフラムの面積、 K_S はスプリングのバネ定数、 C は弁システムがパッキングの中を移動するときの摩擦係数である。

* G.Stephanopoulos
"Chemical Process
Control", Prentice-
Hall Inc. (1984),
P210-211 参照

$T_v = C/K_S$ を制御弁の時定数とする。この T_v はプロセスの時定数 T_p と比較すると、 $T_v \ll T_p$ となることが多い。そのときには、(8.7)式は更に次式のように近似できる。

$$\frac{U(s)}{P(s)} \approx b_0 = (A/K_S) \quad (8.8)$$

すなわち、制御弁の動的な遅れは無視できる場合が多い。ステムの位置の変化、すなわち弁開度の変化 $U(s)$ と流量変化 $F(s)$ との間には遅れは無いとすると、

$$\frac{F(s)}{U(s)} = K_f \quad (8.9)$$

ここで、 $(1/K_f)$ は、図8.4の実効の流量特性における曲線の、操作点における接線の勾配に相当する。

式(8.7)、(8.8)および(8.9)から、制御弁の伝達関数は次のように表すことができる。

$$\frac{F(s)}{P(s)} = \frac{K_v}{T_v s + 1} \approx K_v (= K_f A / K_S) \quad (8.10)$$

プロセス制御において使用される操作部には、流量を制御する制御弁の他に、ポンプ・ブロワなどの回転数を制御するもの、ヒータなどに供給する電力を制御するものがある。回転数の制御には、機械的な無段変速機を用いるもの、また電氣的な制御方式によるものなどがある。電力の制御には、リレーを用いて電流を断続させるもの、サイリスタを用いて電流を連続的に制御するものなどがある*。

* 松山 裕著
「だれでもわかる自動制御」
(財)省エネ
センター発行、
(1992) 参照

8・2 検出部の特性

プロセスの制御変数を測定・検出し、その信号を制御器や指示記録器に伝達する部分が検出部である。したがって、検出部 (*detecting means, measuring element*) は検出器・センサ (*measuring device, sensor*) と伝送器 (*transmitter*) とからなる。また、これらを一次変換器、二次変換器と呼ぶこともある。

伝送器から制御器への伝送信号として、空気圧信号では0.2～1.0 kgf/cm²が、電気信号では4～20 mA DC (または1～5 V DC) が使用される。いま、検出器として圧力センサが使われ、その測定範囲が0～500 kgf/cm²とすると伝送器から出る信号と圧力との関係は次のようになる。

表 8.1 圧力と電流信号との関係

圧力 (kgf/cm ²)	0	100	200	300	400	500
電流信号 (mA DC)	4	7.2	10.4	13.6	16.8	20

ここで、圧力が0のとき、4mA DCの信号を送っている。しかし、検出部が故障であれば信号はゼロとなる。そこで、上記のように伝送信号の範囲を設定すると、測定値がゼロの場合と検出部が故障した場合とを区別することができる。

プロセス制御では、検出器・センサとして多くの機器が使用されている。これらの測定機器は、一般に工業計測器 (*industrial instrument*) と呼ばれ、プロセスの各変数を連続的に (あるいは半連続的・間欠的に) 測定する。そして、その値は伝送器を通して制御器に送られる。プロセス制御にて使用される主な計測器をまとめ

て表8・2に示す。

表 8・2 プロセス制御にて使用する工業計測器－1

変数	方式	計測器
温度	接触方式	熱電対 抵抗温度計（白金測温抵抗体，サーミスタ） 液体封入ガラス温度計 膨張温度計（充満式温度計・別名ブルドン管式温度計，バイメタル温度計）
	非接触方式	放射温度計
流量	差圧方式	オリフィス，フローノズル，ベンチュリー管
	面積方式	ロータメータ（ガラス管式，金属管式）
	容量方式	オーバル歯車式，ルーツ式
	流速測定方式	ピトー管，熱線流速計
	その他	タービン流量計，電磁流量計，超音波流量計，渦流量計，堰式，フリューム式
圧力	力の釣合を利用	液柱形（U字管，単管圧力計，フロート型） 重鐘形（ベル圧力計）
	弾性変形方式	ダイヤフラム式，ベローズ式，ブルドン管 ストレンゲージ式圧力変換器
	真空度測定	マクラウド型，ピラニー型，電離真空計
レベル	視認	ゲージグラス，検尺
	浮子方式	フロート式，ディスプレイメント式
	差圧方式	差圧計，気泡式
	その他	静電容量式，放射線式，超音波式，マイクロウェーブ式

表 8・2 プロセス制御にて使用する工業計測器 - 2

変数	方式	計測器
ガス組成	電気化学方式	イオン電極式, 導電率測定
	光学方式	赤外線吸収分析計, 紫外・可視吸光分析計, 発光分析計, 光散乱測定, 光透過測定
液組成	電磁気方式	磁気式O ₂ 計, 放射線吸収分析計
	クロマト方式	ガスクロマト装置
	熱式分析計	熱伝導式ガス分析計, 接触燃焼式ガスセンサ
	その他	水素炎イオン化式分析計, 半導体式ガスセンサ
その他	電気化学方式	COD測定, BOD測定, 溶存酸素計, 残留塩素計, 導電率測定, pHメータ
	光学方式	紫外・可視吸光分析式, TOC分析計, 濁度計
	クロマト方式	液体クロマトグラフ, ガスクロマトグラフ
その他		密度・比重計, 粘度計, 湿度・露点計, 水分計 厚さ・幅計, 角度・変位計, 回転計, 重量計

検出部の動特性はそれぞれの機器によって異なる。しかし、いずれの検出器を用いた場合でも、その動特性は1次遅れ要素にて近似することができる。

$$\frac{m(s)}{C(s)} = G_m = \frac{K_m}{T_m s + 1} \quad (8 \cdot 11)$$

ここで、検出部の時定数とプロセスの時定数 T を比較して、 $T_m \ll T$ と見なせる場合には次式のように定数となる。

$$G_m \approx K_m \quad (8 \cdot 12)$$