PART II　制御系の設計

この第2部では，フィードバック制御系の構成，PID－制御器の特性，制御系の安定性と制御器パラメータの設定法について解説する．第1部で述べたプロセスの動特性の解析方法を基にして制御系の設計法を検討する．制御動作の良否を判定するためには，そのプロセスの特性をよく理解していることが大切である．したがって，化学プロセスにおける望ましい制御系の設計にあたっては，化学反応を初め，流動・伝熱，物質移動，分離操作の原理などの深い知識が必要となる．

7　フィードバック制御系

制御対象であるプロセスの動特性が明らかとなれば，このプロセスを望ましい状態に制御するために，制御系の設計が行われる．通常，最も多く用いられる基本的な制御方式は，フィードバック制御である．第7章では，この制御系の構成について解説する．

7・1　フィードバック制御

フィードバック制御系を構成する各要素を含んだブロック線図は，先に図1･1に示した．いま，各ブロックの特性が伝達関数の形で与えられたとすると，このブロック線図は，次のようになる．

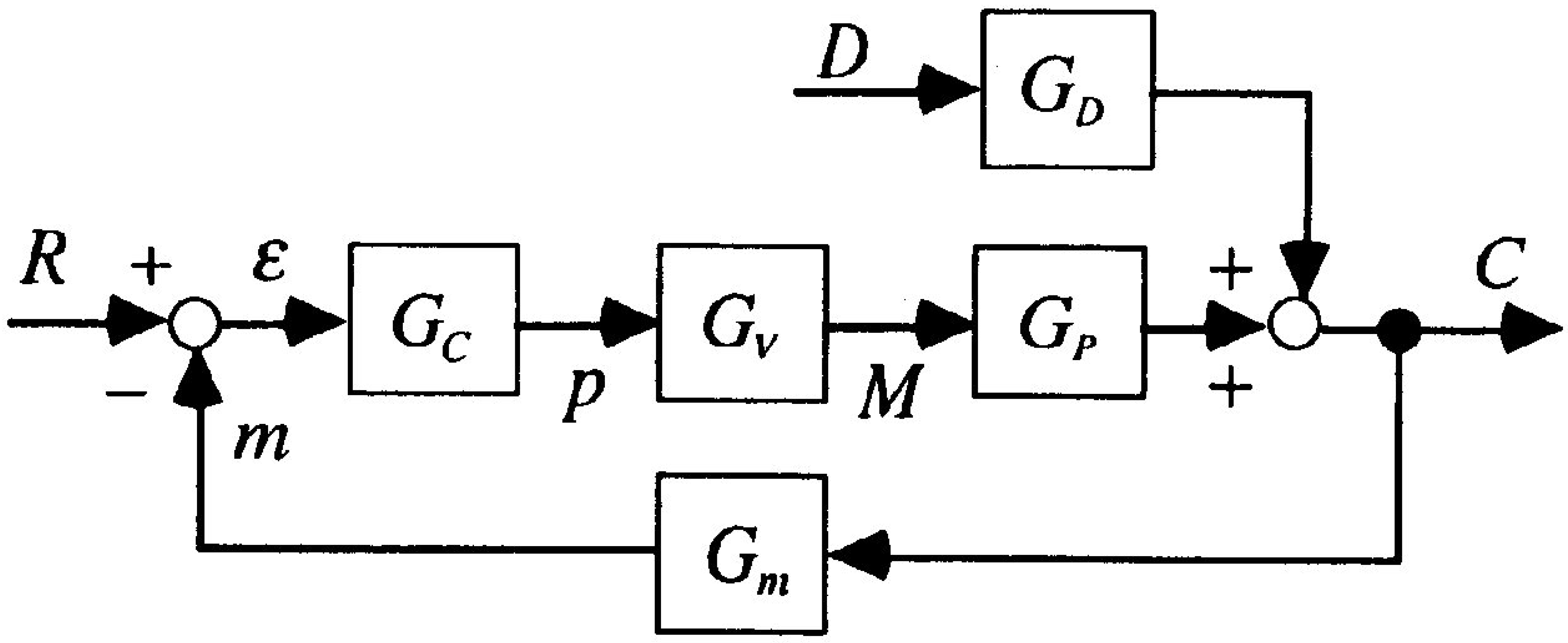

図 7·1　フィードバック制御系のブロック線図

ここで，具体的な制御例として，第2章で示した加熱タンク系（図2·3，p9）を取り上げ，タンク内の流体の温度を手動にて制御する方法について説明する．温度を制御するためには，まずはじめに流体の温度を測定しなければならない．いま，水銀温度計をタンク内に差し込み，温度を計るものとする．この温度が，所定の希望する温度より低い場合には，ヒータにて更に加熱するため，ヒータへの供給電圧を上げるよう操作する．この様子を図7·2に示す．

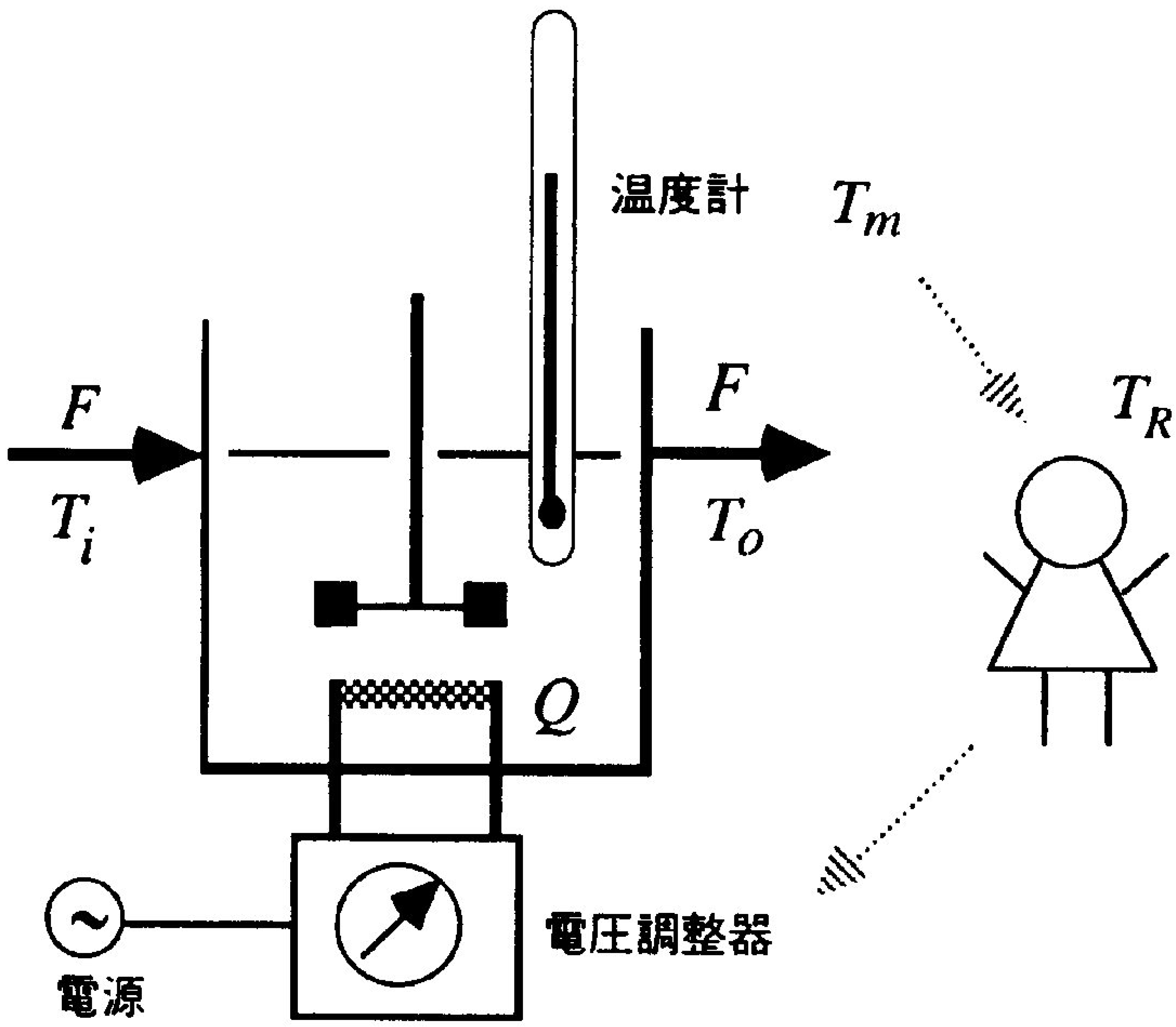

図 7·2　　加熱タンク制御系

この制御系を図7·1のブロック線図と対比させて見ると次のようになる．

制御の目的となる制御量 C はタンク内の流体温度 T_o に対応する．温度計の特性は検出部の G_m となり，その読み T_m は，検出量 m に対応する．流体の設定温度 T_R は，目標値 R に対応し，制御偏差 ε は，T_R と T_m との差となる．

所定の設定値と温度計の読みが一致しない場合には，すなわち制御偏差がゼロでない場合には，ヒータへ供給する電圧を調整する．ここで，どの程度の電圧変化を与えるかが，制御器 G_C の働きである．人間が介在する手動制御では，この制御器の働きを人間が判断して行い，さらに電圧調整器を手動にて操作する．自動制御においては，この制御動作を自動的に行うため調節計あるいはコンピュータが用いられる．そして，この制御器で決定された制御信号 p に基づいて，電圧調整器を自動的に操作し，ヒータから供給される熱量を加減する．この熱量 Q が図7·1の操作量 M に対応し，電圧調整器とヒータが，ブロック線図中の操作部 G_V に対応する．

ヒータからの熱量が変わるとタンク内の流体温度は変化する．この両変数 Q と T_o との間の伝達関数 G_P については，先の第3章にて説明した．

いま，この加熱タンク系の流入液の温度 T_i が変動したとすると，これが制御系への外乱 D となって，タンク内流体の温度が変化する．この T_i と T_o との間の伝達関数 G_D は，外乱伝達の伝達関数とよばれ，先の第3章にて説明した．

第3章・§3·3の(3·17)式によれば，

$$
\begin{aligned}
Y(s) &= G_1(s)X_1(s) + G_2(s)X_2(s) \\
&= \frac{1}{\tau s+1}X_1(s) + \frac{K}{\tau s+1}X_2(s) \qquad (7\cdot 1)
\end{aligned}
$$

ここで，$Y(s)$ は出力で，タンク内の流体温度すなわち出口流体温度である．また，入力 $X_1(s)$ は入口流体温度で，入力 $X_2(s)$ はヒータ供給熱量である．したがって，

$$
\begin{aligned}
G_P &= G_2 = \frac{K}{\tau s+1} \\
G_D &= G_1 = \frac{1}{\tau s+1}
\end{aligned}
\tag{7·2}
$$

となる．

伝達関数の導出にあたって，入出力変数には，定常状態からの偏差分，すなわち偏差変数を用いる．本例では，T_i および Q の代わりに，$X_1(s)=\mathcal{L}\left\{T_i(t)-T_{i,s}\right\}$ および $X_2(s)=\mathcal{L}\left\{Q(t)-Q_s\right\}$ を用いて伝達関数を求めた．一般に，伝達関数を求める場合，その基礎となる微分方程式の初期条件をゼロとするために，式中に現れる変数として偏差変数を用いる．したがって，この伝達関数を用いた制御系のブロック線図中に現れる各変数，$C, R, D, m, \varepsilon, p, M$ は，定常状態（制御動作が始まる以前の状態）からの偏差すなわち偏差変数をラプラス変換したものである．

7・2　制御系の総括伝達関数

一般に，フィードバック制御系のブロック線図は図7·1で与えられる．ここで，制御系全体を眺めると，この系への入力は R と D で，出力は C である，と見ることができる．そこで，先に説明した§3·3のブロック線図の等価変換の方法を用いて，図7·1を次のように変換する．

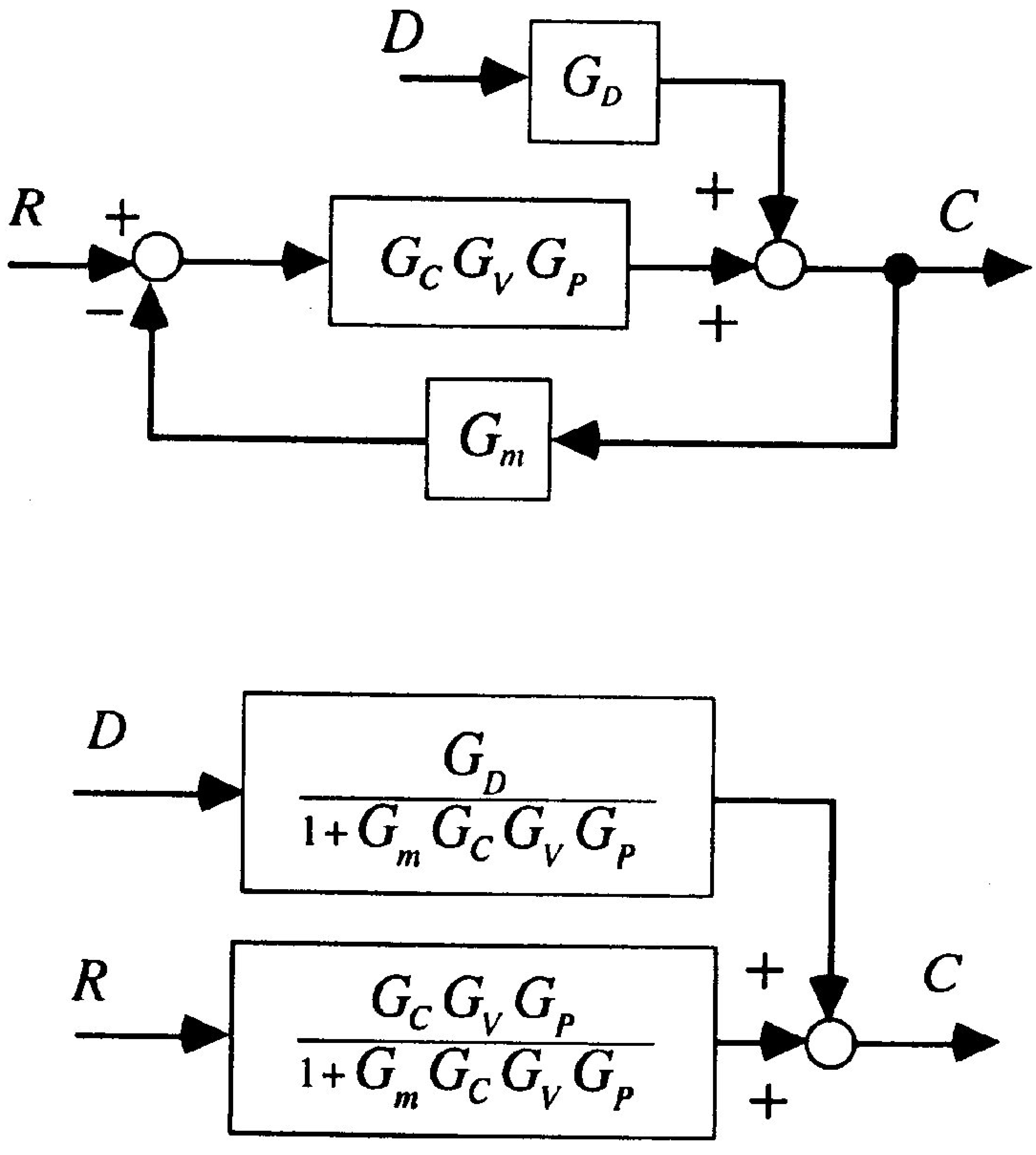

図7·3　フィードバック制御系のブロック線図の等価変換

いま，図7·3の伝達関数を次のように表す．

$$G_{OV,1}=\frac{G_C G_V G_P}{1+G_m G_C G_V G_P} \tag{7·3}$$

$$G_{OV,2}=\frac{G_D}{1+G_m G_C G_V G_P} \tag{7·4}$$

上記の伝達関数は，制御系の総括伝達関数(*overall transfer function*)と呼ばれる．

制御系の設計にあたっては，通常，次の二つの設計問題がある．一つは，プロセス制御などで多く用いられている定値制御問題である．これは，制御系の設定値は一定で，外乱の影響をできるだけ受けないように制御する場合である．制御系のブロック線図，図7·3で言えば，$R=0$ で，入力が D ，出力が C の場合である．そして，最も望ましい制御結果は，入力すなわち外乱が入ったにもかかわらず，出力の変化がない $C=0$ ，となる場合である．このような制御問題を，**調節問題**(*regulator problem*)と呼ぶことがある．

先に§7·1で述べたように，制御系で扱う変数は，偏差変数である．したがって，設定値を一定にする（設定値を変化させない）ということは，そのプロセスを操作するのに，制御動作が始まる以前の定常状態のままで操作する，ということである．すなわち，設定値の変更は無いので $R=0$ であり，また制御出力も変更が無いのが望ましいので，$C=0$ が最適の制御結果である．

もう一つの制御問題は，機械的な制御系に多く見られる問題で，追従制御の場合である．ここでは，外乱の導入は考えない．すなわち，$D=0$ とする．設定値を変化させて，制御出力がその設定値

に追従するように制御系を設計する問題である．したがって，最も望ましい制御結果は，$C=R$ である．
このような制御問題を，**サーボ問題**(*servo problem*)と呼ぶことがある．

上記の二つの制御問題は，制御系の総括伝達関数を使って表すと次のように言える．調節問題では，(7·4)式の $G_{OV,2}$ を基に制御系を設計することであり，サーボ問題では(7·3)式の $G_{OV,1}$ を基に制御系を考えることである．

ここで，二つの式を比べてみると，その分母は同じ形をしており，分子の形は異なっている．いま，分母の形を次のように表すと，

$$1+G_m G_C G_V G_P = 1+G_l \tag{7·5}$$

$G_l = G_m G_C G_V G_P$ は，制御系の信号がフィードバックの経路を一巡したときに通過するすべてのブロックの伝達関数を掛け合わせたものとなる．そこで，この G_l を**一巡伝達関数**(*loop transfer function*)・**開ループ伝達関数** (*open loop transfer function*)という．(7·3)，(7·4)式の分子の形をみると，

$$\begin{aligned} G_C G_V G_P &= G_{f,1} \\ G_D &= G_{f,2} \end{aligned} \tag{7·6}$$

この，$G_{f,1}, G_{f,2}$ はフォワードパス (*forward path*) の伝達関数と呼ばれ，入力信号が一方向にのみ進んで出力信号に達するまでの各ブロックの伝達関数を掛け合わせたものとなっている．そこで，図7·1のフィードバック制御系は次のように表すこともできる．

$$\frac{C}{R} = G_{OV,1} = \frac{G_{f,1}}{1+G_l}$$
$$(7\cdot7)$$
$$\frac{C}{D} = G_{OV,2} = \frac{G_{f,2}}{1+G_l}$$

制御系の安定性を調べるためには，後に詳しく述べるが，制御系の総括伝達関数の分母の式をゼロとおいた特性方程式が重要な働きをする．ここで，二つの制御問題の総括伝達関数の分母は同じ形なので，特性方程式はいずれの問題でも同じとなる．

$$1+G_l = 1+G_m G_C G_V G_P = 0 \tag{7·8}$$

そこで，制御系の安定性を調べる場合には，いずれか一方の問題について検討すればよいことになる．