

第2章 自動制御/フィードバック制御の世界

2.1 制御とは

制御とは英語のcontrolの訳です。controlの語源はラテン語のcontrarotulareで、contraは「対して」の意で、rotulareは「ロールすなわち巻物」を意味します。controlはこれらの意味を合成したもので「巻物に記載された権威(基準)に照らして、正しいかどうかを判断し、正しくなければ修正する」ということからきています。

JIS用語では、制御は「ある目的に適合するように、対象になっているものに所要の操作を加えること」と定義されています。つまり、制御すべき対象(制御対象)があって、この制御対象中の所望の温度、圧力、流量、液面、成分、位置、回転数などの制御しようとする量(制御量)が希望する値になるように所要の操作を持続的に加えることが、制御ということになります。

2.2 手動制御とフィードバック(FB)制御

身近な例をあげて、もう少し制御はどのような機能を実行することかを図2-1に示す湯沸かし器出口の湯温度の制御を例にして考えてみましょう。

湯沸かし器出口温度を希望の温度にするためには、どのような機能が必要で、どのような操作をすればよいかを分解してみると、次のようになります。

湯沸かし器出口温度の目標値を設定すること(例えば、目標値40)

制御量を知ること(湯沸かし器出口温度はいま何度になっているか)

目標値と制御量の差(偏差)を知ること(一致しているかどうか比較すること)

偏差があれば、偏差をなくすためにはどの程度操作すればよいかを判断し、操作する

このように“ある定められた目標値に合致するように比較・判断・操作すること”が「制御」ということになります。

図2-1(a)に示すように、制御量を目標値に一致させるように比較・判断・操作するのが人間である場合を手動制御と呼び、図2-1(b)に示すように人間を介さずに調節計を用いて比較・判断・操作を自動的に行う場合を自動制御と呼びます。

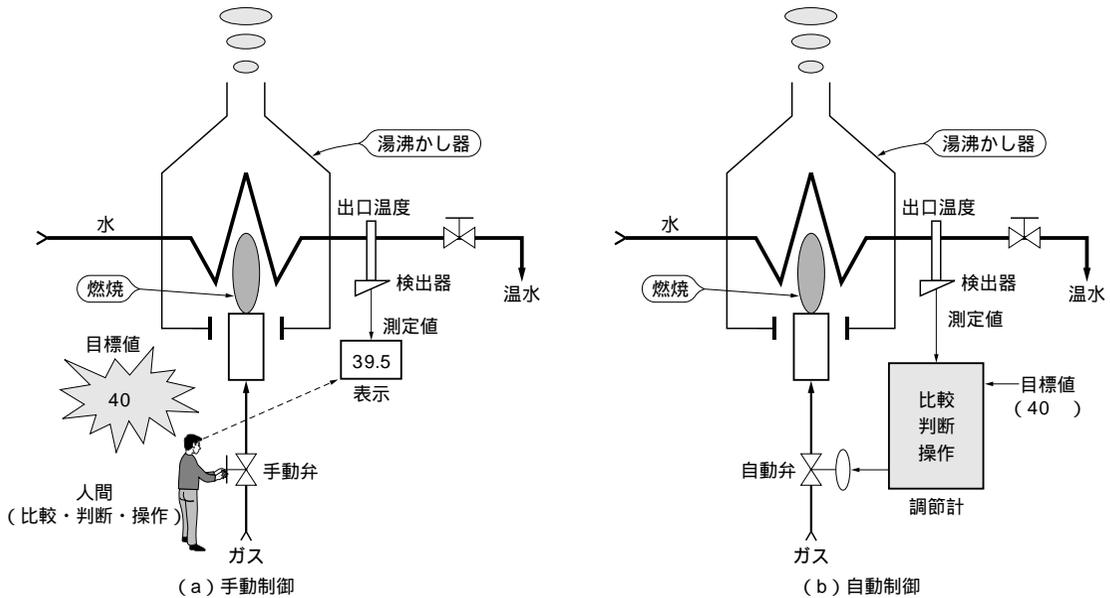


図2-1 湯沸かし器出口温度制御

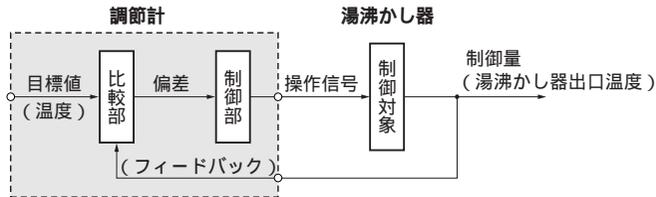


図2-2 フィードバック制御系の構成

図2-1(a)において、情報の流れを追って見ますと、出口温度 温度検出器 表示 目 頭脳(比較・判断・操作) 手 手動弁 ガス流量 燃烧 熱 出口温度というように情報の流れが人間を介して一巡しています。これを「閉ループ(closed loop)制御」と呼びます。またこの例のように制御した効果を測定して、次の制御信号の決定に用いる方法を「フィードバック制御」と呼びます。自動制御におけるフィードバック制御は、図2-1(b)の機能を分解して作成すると、図2-2に示す機能構成をもつことになります。この制御部の制御方式としては、一般的にPID制御が使用されています。

このPID制御については、その生い立ちから最先端まで詳しく説明していきますが、ここでは、説明の流れの都合上から、PID制御基本式はどんなものであるかについて、簡単にふれておきます。

PID制御基本式は(2-1)式あるいは(2-2)式に示すように、現在の偏差 e に比例した修正量を

$$y = K_p \left(e + \frac{1}{T_i} \int e dt + T_D \frac{de}{dt} \right) \dots\dots\dots(2-1)$$

$$y = \underbrace{K_P \cdot e}_{\text{比例動作}} + \underbrace{\frac{K_P}{T_I} \int e dt}_{\text{積分動作}} + \underbrace{K_P \cdot T_D \frac{de}{dt}}_{\text{微分動作}} \dots\dots\dots(2-2)$$

y : 操作量, e : 偏差, K_P : 比例ゲイン, T_I : 積分時間, T_D : 微分時間

出す比例動作(Proportional Action : P動作)と過去の偏差の累積値に比例した修正量を出す積分動作(Integral Action : I動作)と偏差eが増加しつつあるか、減少しつつあるか、その傾向の大きさに比例した修正量を出す微分動作(Derivative Action : D動作)の三つを加算合成したものです。図2-2の制御部として、このPID制御が圧倒的に多数使用されています。

2.3 制御の過去, 現在, 将来

2.3.1 制御の歴史

一般に「制御」という言葉を聞くと、複雑・難解な数式を駆使したものとのイメージをもってしまいます。したがって、制御関係は現代科学技術の粋を集めたもので、その歴史は浅いと思われがちですが、実際には長い歴史をもっています。それは、人間がより高度な欲求を求めるといふ本能に基づくもので、この欲求を実現する制御の歴史は紀元前から始まっています。現在の水洗トイレに使用されている浮き子(フロート)を使った水位調節機構に類似したフィードバック制御機構は、紀元前250年ごろすでにギリシャ人によって、水時計用として利用されていたといわれており、それが現在でも多く使用されています。

表2-1にPID制御関連の小史を示します。現在の制御技術の起源といわれているのは、時代は約2000年下った1778年にワット(J. Watt)の蒸気機関に初めて適用されたガバナ(flyball governor)による自動回転数制御でした。その原理を図2-3に示します。蒸気機関(制御対象)の回転数(制御量)が低下すると、遠心力が小さくなるため遠心振り子が下がることで、蒸気供給弁(操作端)が開き、蒸気供給量が増加して、回転数が上昇することになるというものです。この制御機構は回転数が設定値からずれると、その偏差に比例して修正動作をするフィードバック制御系を構成しています。この制御は比例(P)動作だけのため、比例ゲインを限界まで大きくしても、原理的にオフセット(定常偏差:制御を行っても定常的に残る偏差)が残ってしまうという限界があったものの、蒸気を回転動力に変換して利用する重要な役割を果たし、制御技術の起源といわれています。この時代の技術者はオフセットの除去に注力し、工夫を重ね、結果として積分(I)動作を導入することによってオフセットの除去に成功しました。このガバナの制御動作の力学的研究を行い、安定制御の条件を解明した1868年のマクスウェル(Maxwell)による“On Governor”の論文が制御理論の起源であると位置付けられています。

表2-1 PID制御関連小史

項目	年代	概要, 備考など
制御技術の起源	1778	ワット(Watt)蒸気機関の调速機(比例制御)
制御理論の起源	1868	マクスウェル(Maxwell) " On Governor "
PID制御の着想	1922	マイノースキー(Minorsky)
PID調節器の原型	1936	カレンダー(Callender) ㊦
PID調整則の誕生	1942	ジューグラー(Ziegler) & ニコルス(Nichols) (PID調節器の本格的普及始まる)
計算機誕生	1946	ENIAC
計算機集中形 DDC	1959	テキサコ
現代制御理論	1960	カルマン(R. E. Kalman) (周波数を忘れ, 制御理論を科学にした)
2自由度制御系の概念	1963	ホロビッツ(I. M. Horowitz)
ファジィ理論	1965	ザディ(L. A. Zadeh)
モデル予測制御	1960年代後半から	
マイコン分散形 DDC	1975	制御のデジタル化元年
知識工学	1977	ファイゲンバウム(Feigenbaum)
H 制御	1980	
ニューラル・ネットワーク	1986	
CIE 統合制御システム	1989	(C : 計算機, I : 計装, E : 電気制御)
遺伝アルゴリズム	1990	
ポスト現代制御理論	1990	(設計指標は周波数領域, 設計手法は状態空間法)
ライトサイジング・システム	1995	(パソコン化, オープン化, デファクト化)
制御技術の現状	2004	依然として PID 制御が 90% 以上を占めている PID 制御の見直し, 高度化が盛ん

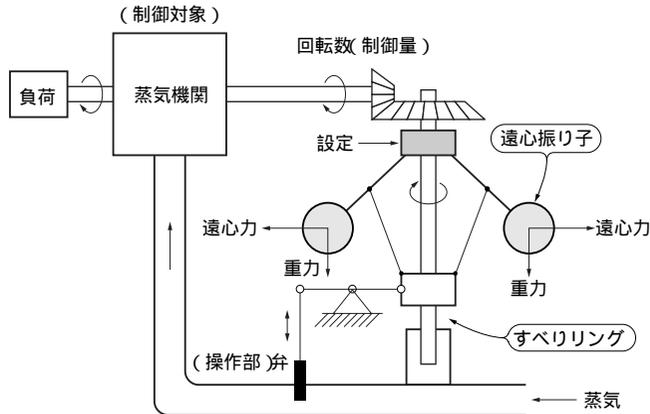


図2-3 蒸気機関の自動回転数制御の原理

2.3.2 PID制御の誕生と発展

20世紀に入った1922年にマイノースキー(Minorsky)が⁶⁾、現在でも制御の圧倒的シェアを維持しているPID制御を発想しています。ラプラス変換などの制御特性を解析する数学的手段のない時代にワット