

ビル計装の基礎

高橋 隆勇*

1. 自動制御と計装

ビル制御の分野では、自動制御と呼んだり計装と呼んだりして、どう違うのか、あるいは同じもののことと言っているのかわからない一面がある。計装という言葉は、石油精製などに代表されるプラントの分野で用いられている。一般的には“計器装備”的略とされているが、元をたどれば計装（Instrumentation）とは意外にも音楽用語で、「器楽編成法」と訳され、作曲者が「自分の作曲の、各々の楽章にそれに適した楽器を使用して、その楽曲の演奏効果を上げること」を意味している。（“計装工事マニュアル”より）空調制御に関して系統だった勉強をしようとするとき、この計装を避けて通るわけには行かない。プラントで築かれた、温度・流量・圧力・品質・効率などの設備の状態に関する諸量を制御する、プロセス制御が基になっているからである。プロセス制御は、閉ループ制御（Closed Loop）と開ループ制御（Open Loop）に分けられる。

1.1 フィードバック制御

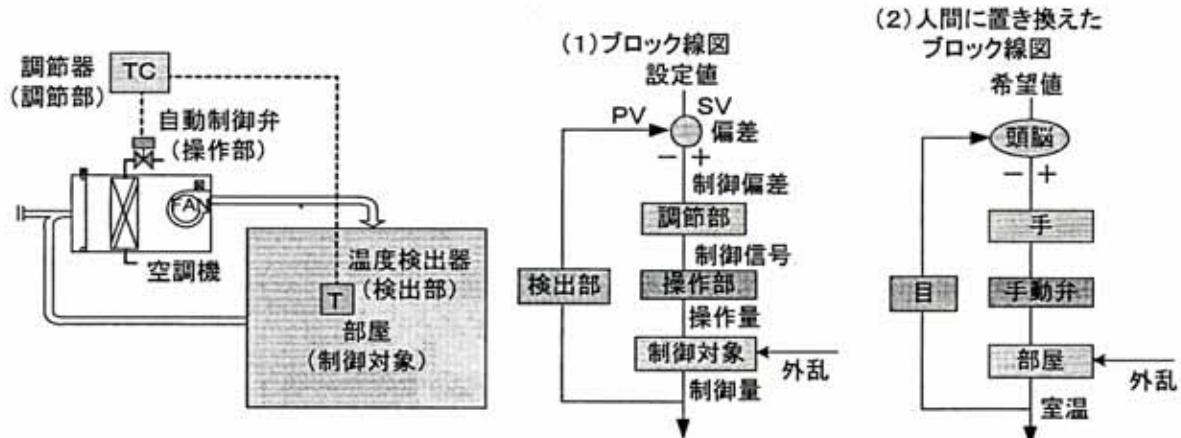


図1.1 フィードバック制御ループ

閉ループ制御の代表的なものがフィードバック制御である。バックという語感から過去の世代の制御と受け取る人がいるが、これは間違いであり自動制御の基本である。

*高砂熱学工業(株) 東京本店計装システム部

暑かったら冷房機のスイッチを入れる。寒くなったらスイッチを切る。実はこれも閉ループ制御のひとつである。結果を見て修正動作を加えているわけである。図1.1にフィードバック制御ループを示す。(2)のように人間の場合は、温度計で確認した人の目による検出値と、室温の希望値との差を頭で計算して、手で手動弁を操作して、室温を守るために水量を得る。(1)はこれらの関係を自動制御的に表現したものであり、自動制御の基本はこのフィードバック制御ループから成り立っている。

1.2 閉ループ制御

閉ループ制御には、予め定められた値に達したとき、次の動作が開始されるような制御であって、シーケンス制御やフィードフォワード制御などがある。

(1) シーケンス制御

リレーやタイマーを使った回路図を“シーケンス図”と呼んだりするように、予め定められた順序に従って制御の各段階を逐次進めて行く制御である。

(2) フィードフォワード制御

例えば、吸収冷凍機台数制御において、起動にはフル能力に達するまで10分～20分程度の時間がかかり、また停止時には起動時と同じくらいの希釈運転時間があることはよく知られる所である。この問題解消を目的として、ある冷凍機の起動あるいは停止のイベント発生時には、他の運転継続冷凍機はフィードバック制御の冷水出口温度制御信号を無視して、送水温度を一定にする目的に最適な信号で運転する場合などが、フィードフォワード制御になる。そのイベントが終了した後は、通常のフィードバック制御の冷水出口温度制御に戻る。このように因果関係が明確なときに用いられるものであり、フォワードは優れていてバックは遅れているという受け取り方をしてはいけない。

1.3 目標値による制御方式の分類

(1) 定值制御

目標値（設定値）が一定の場合で、大半の制御はこれに属する。室内温度を一定値に保つのも定值制御である。

(2) プログラム制御

目標値が予め定められた変化をする場合に用いる。

(3) 追值制御

通信衛星を追って自動的にその方向を変えるパラボラアンテナの自動追尾制御などの追従制御と、比率制御がある。

(4) 結合制御

この制御の代表的なものがカスケード制御である。最近の空調設備では、量的

にはかなりたくさん用いられている。最近のVAV方式ではほとんどのものに用いられている。VAV本体はダンパと風速センサを保有している。図1.2に示すように室内温度信号とその設定値の偏差から適切な風量設定値を導き出し、風量制御機構へこのカスケード信号を与える。前出のVAV本体の風速センサとダンパが与えられた風量を維持するための制御を行うわけである。このような方式を用いることにより、空調機に近いところに配置されたVAVと遠いところに配置されたVAVも同じように室内温度を制御することが可能になる。(雑誌“計装士”第10号「ビル空調設備のDDCブロック図事例集」参照)

1.4 制御エネルギー

空調設備で使われる主な制御機器のエネルギー源は表1.1に分類されるようなものがある。空調設備用の制御機器は、1980年代位まではプラント制御用の制御機器の流用が多かったので、空気式が多く使われた。しかし現在はマイクロコンピュータの普及に伴う制御機器のDDC(Direct Digital Control)方式が多くなっており、電子式全盛になっている。電子式の欠点は自動弁操作器の力が弱い点であるが、空調機に使われる自動弁などの場合には操作力が弱くても大きな力が加わらないので、使用上の問題はない。ただし熱源部分の自動制御弁には大きな操作力が要求されることと、圧力制御などに用いる場合には電子式は適さない。このような時には空気式自動制御弁を用いることがベストであるが、熱源だけのわずかな自動制御弁のために、高価でメンテナンスに手間のかかる空気源装置を導入しなければならないことが嫌われる。次善の策としては自力弁を用いることが多い。

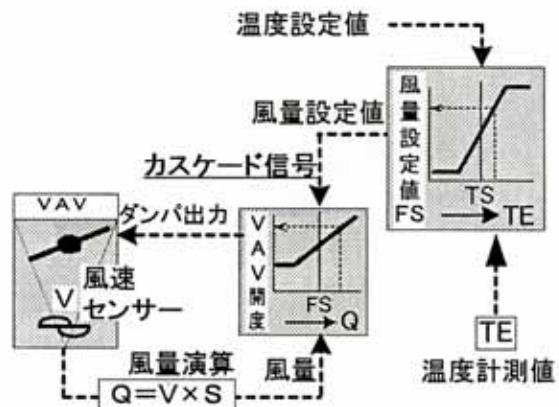


図1.2 VAV機器の例

表1.1 制御エネルギーによる分類

	電子式	空気式	自力式
長所	取り扱いが容易 DDC向き	操作力が強い 耐久性が良い	操作力が強い 耐久性が良い
短所	操作力が弱い 耐久性が劣る	DDC不向き 空気源装置を必要とする	I(積分)・D(微分)動作は出来ない

2. 制御動作種類

2.1 ON/OFF制御

電気こたつなどのようにヒータの入り切りで一定温度を保とうとする、最も基本的な制御方式がON/OFF制御である。一昔前まではルームクーラやパッケージ型空調機の制御はこの方式であったが、最近はインバータによる制御が多くなってきて、この分野ではあまり使われなくなった。制御の内容が単純で当たり前すぎるが故に軽んじられがちであるが、自動制御のルーツはここから始まる。図2.1に示すようにON点とOFF点の間には動作隙間(Differential)が設けられる。図2.2のヒータによる温度制御の例で見ると、温度をなるべく設定値近辺で推移させたければ、ON点とOFF点の動作隙間を小さくすれば良い。動作隙間を小さくするほどON/OFF頻度は多くなる。ヒータの場合ON/OFF頻度が多くなっても問題はないが、ルームクーラやパッケージなどのように動力発停の場合は、ON/OFFの頻度が多すぎると機器の寿命を縮めることになってしまう。この現象をハンチングと呼ぶ。

ON/OFFを繰り返しながら制御を行う様子をサイクリングという。またON点またはOFF点を超えてしばらくの間、ヒータの余熱などの理由で動作の反転が行われない状態があるが、これをオーバーシュートという。制御対象の容量に対してヒータが大きすぎたりした場合は、オーバーシュートも大きくなる。

2.2 比例(P)制御

空調機の冷水コイルのように、アナログ入力に対応できるバルブを制御する場合には比例(Proportional)制御方式とすると、ON/OFF制御より動作隙間が少なく、設定値に近い制御を行うことが出来る。比例制御では、図2.3に示すように比例帯(Proportional Band)という概念が入ってくる。26°Cの主設定温度に対して比例帯が2°Cということは、25°Cで弁は全閉になり27°Cで全開になることを表す。

いま、図2.3から、温度が26.5°Cで設定値が26.0°Cの場合の調節弁開度計算を行う。PB値が2°Cであるのでkの値は1/2で50%となり、PV-SVの0.5°Cを掛けると25%

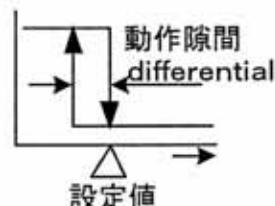


図2.1 ON/OFF制御

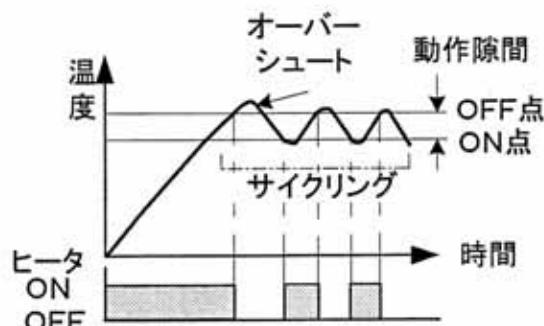


図2.2 ON/OFF制御の時間推移

が導き出される。偏差 0 の時の調節弁開度を 50% としているので、調節弁開度は $25 + 50 = 75$ (%) になる。設定値に対する 0.5°C の差はオフセット（定常偏差）として残る。

より設定値に近づけた制御を行いたければ、比例帯を小さくすれば良い。但し図 2.4 に示すように、比例帯を小さくしすぎると、オーバーシュート量が大きくなりすぎてハンチングを起こし、制御は発散してしまって安定は得られなくなる。逆に比例帯を大きくしすぎると、オフセット量も大きくなり、制御の安定は得られるが制御結果は大雑把なものになる。

2.3 比例+積分 (PI) 制御

比例制御の欠点であるオフセットを解消するのが積分 (Integral) 動作である。図 2.5 に示すようにオフセットがある限り比例帯自身が移動して、オフセットがなくなるまで動き続ける。目標値に達するまでリセットを繰り返す動作であるので、積分定数 T_i はリセット時間と呼ばれる。時間をかけて修正をして行くという概念を取り入れたところが積分動作の特徴である。このような理由から積分動作は単独で用いるよりも、比例動作と組み合わせて用いられる。このように PI 動作を用いれば、オフセットの問題は解消できる訳であるが、負荷変動が小さく伝達遅れの大きい場合には安定性が悪くなる。

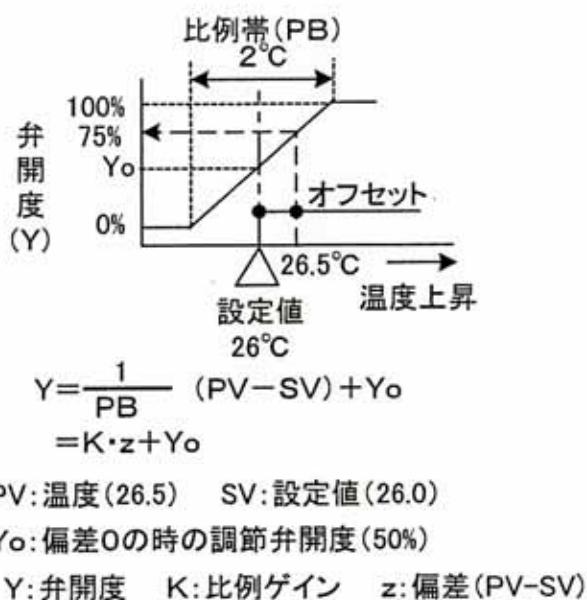


図2.3 比例制御

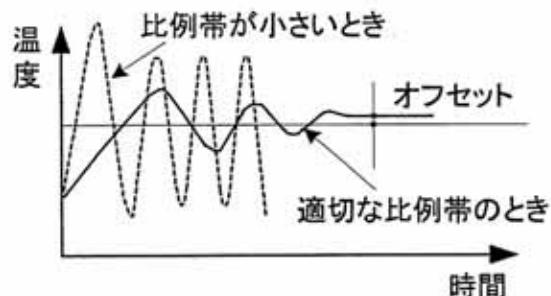
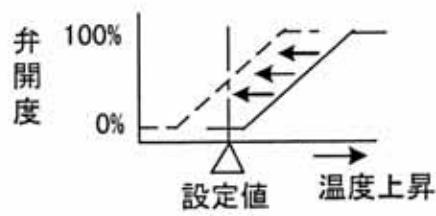


図2.4 比例制御の時間推移



$$Y = K \left(z + \frac{1}{T_i} \int z dt \right) + Yo$$

T_i : リセット時間

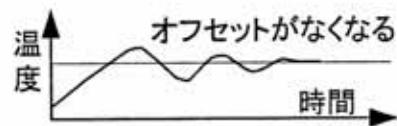
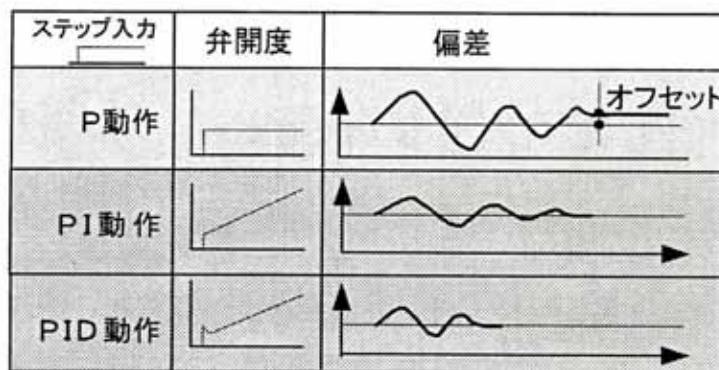


図2.5 比例 (P) + 積分 (I) 制御

2.4 比例+積分+微分（PID）制御

微分（Differential）動作は、入力の時間微分値に比例する大きさの出力を行う動作で、偏差の起こり始めに大きな訂正動作を与え、プロセスの遅れを相殺するものである。このため微分定数をレート時間と呼ぶ。前項のPI動作に加えると、過渡的な行き過ぎも避けることができて、伝達遅れのあるプロセスに対しても安定した制御を行うことができる。図2.6にPID動作式およびステップ入力に対する各動作とPID動作の制御量算出式を示す。



PID動作の制御量算出式

$$Y = K \left(z + \frac{1}{T_i} \int z dt + T_d \frac{dz}{dt} \right) + Y_0$$

Td : レート時間

図2.6 各動作とPID算出式

2.5 最適調整法

PID調節計の設定値決定に当たって、実際的な最適調整法としてジーグラ・ニコルスの限界感度法がある。制御ループを構成したままで、プロセス特性を知らなくても、適切なPID値を求めることができる実用的な方法で、次の手順で行う。

(1) P動作のみにする。

(積分時間 : ∞ 微分時間 : 0)

(2) 比例帯を最大値より徐々に小さくして行き、ハンチングを起こし始めたときの比例帯の値PBu (%) とハンチング周期Pu (分) を求める。

(3) PIDの最適値を表2.1より求める。

表2.1 限界感度法

	P	Ti	Td
P動作	2PBu	—	—
PI動作	2.2PBu	$\frac{P_u}{1.2}$	—
PID動作	1.7PBu	0.5P _u	0.125P _u

2.6 オートチューニング

PID 設定値を、システムの運転を行なながら自動的に決めてしまおうというのがオートチューニングである。最近のPID方式の調節器はマイコン化されたものが多く、このような機能を搭載することも難しいことではなくなった。

オートチューニングの基本原理は、図2.7に示すように、まずオートチューニングを実行すると、調節計は現在値(PV値)を設定値付近のA点までもって行き、調節計の出力を $0\% \rightarrow 100\% \rightarrow 0\% \rightarrow 100\%$ と2回のサイクルを繰り返す。このときのPV値波形の振幅と周期(無駄時間)を計測し、最適なPID値を演算する。ここで演算された値が調節計に保存され、安定した制御が可能になる。

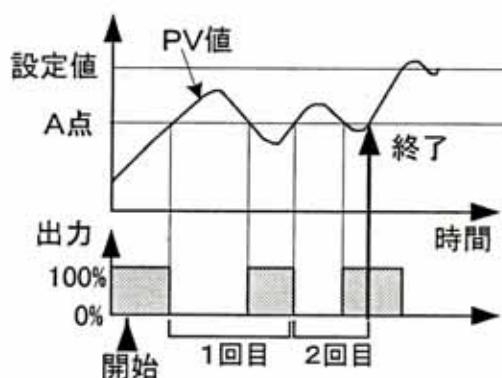


図2.7 オートチューニングの原理

3. ファジィ制御

洗濯機をはじめとして、一時期はいろいろな技術分野でファジィ制御がもてはやされた。しかし今ではファジィは、“いいかげん”とか“適当！”という意味を持つと言う印象だけを残して過去というベールに覆われてしまったような感じもある。しかしファジィ制御は流行語としての役割を終えただけで、自動制御の唯一の論理式であったPIDに対抗する制御方式であることには変わりない。PIDが行列式の応用であるのに対して、ファジィは集合論理の応用であり、いいかげんなものとして軽んじられるようなものではない。

一般的にファジィ制御を理解するためには、図3.1に示すメンバーシップ関数を知る必要がある。ZOは中間点で、プラス(P)とマイナス(N)に各々S・M・Bの大きさを持つ7階級の関数を定義する。入力値と出力値がこのうちのどこに属するかを選別する。図3.2に示すような温度入力に対するバルブ出力を例に取ると、

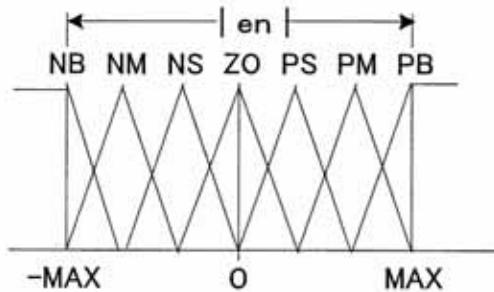


図3.1 メンバーシップ関数

PV値とSV値の偏差と、この偏差の微分値（即ち今回計測値と一定周期前の前回計測値の差）を、表3.1に示すような横軸を偏差とし、縦軸には微分値をマトリックス状に並べて、この中に出力の重み付けを考慮しながらメンバーシップ関数を当てはめて行く。この重み付けには特に法則はなく、経験値によって決めて行く。こんなところが“いいかけん”呼ばわりされる原因と思えるが、ファジィ愛好者は“風呂のいいかけん”的であると捉えているようである。図3.3のようにプロセスの特性に合わせた適切な数字の採用によって、PIDでは避けることのできないオーバーシュートなしに目標値に近づける効果を得られることもあり、空調機のバルブ制御に応用して効果を得ているメーカーもある。ただしファジィ制御は、論理の自由度が高い分だけ、設定値の決定は難しくなる。従って空調制御のように建物や設備のバラエティの多い分野では、汎用品として扱うに

表3.1 ルールマトリックスの例

		Δen							
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	
en	PB	ZO	NS	NM	NB	NB	NB	NB	
	PM				NM				
	PS	PM		ZO	NS				
	ZO	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB	
	NS				PS	ZO		NM	
	NM				PM				
	NB	PB	PB	PB	PB	PM	PS	ZO	

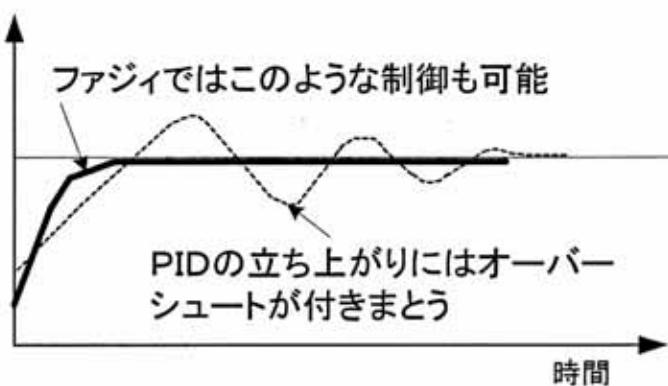


図3.3 ファジィとPIDの立上がり比較

は向かないようである。

家電品の洗濯機の制御分野などでは、限られた対象へのロジックの展開である分だけファジィも受け入れられ易く、それを使うことがあたりまえになってしまったために騒がれなくなってしまったようである。

