

やさしい自動制御のお話

〔(社) 日本計装工業会技術委員会編〕

執筆者：(株) 山武 制御機器事業部
 プロダクト事業統括部製品企画部
 金森 武洋

第1章 よく使われる制御方法 その1

本章は、温度制御の構成要素の中の一つである制御部に注目し、よく使われる制御方法について説明する。制御方法には、大きくON-OFF制御と比例制御の2つがあり、使用する制御対象や操作端の種類、求める制御結果の安定性によって使い分ける必要がある。

1. ON-OFF制御とは

ON-OFF制御とは、例えば一昔前の電気こたつのヒーターのような動作で、電気こたつのヒーターが熱くなると自動的に切れ、また冷えてくると自動的に入るといった動作である。そのON-OFF動作を表わしたのが図1である。ON-OFFの領域はオーバーラップするのが普通でこれを動作すき間(デファレンシャル)と言う。

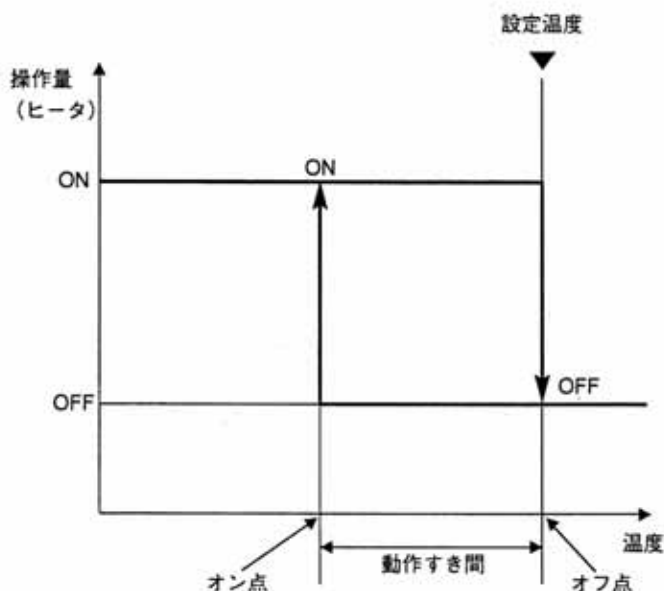


図1 ON-OFF動作

1-1 ON-OFF制御の結果

ON-OFF制御の結果は電気こたつのON-OFF制御を例にとると図2の点線のように設定値A点でヒーターは切れて温度は下がり設定値より低い温度B点でヒーターは入り、温度は上がって行く。この動作を繰り返して、制御結果はA点とB点の間にはいる。

しかし、実際には、センサ部の検出遅れや装置の熱伝達遅れ、熱容量（むだ時間という）等により、設定A点で電気こたつのヒーターがOFFになってもしばらく温度上昇が続き、また温度が下がってヒーターがONになるB点にきても、しばらく温度が下がり続けるのが普通である。

図2のように、温度が設定値を行き過ぎることをオーバーシュートと言ひ、制御結果が波を打つことをサイクリングと言う。特に、サイクリングが大きくて制御上、好ましくないものをハンチングという。

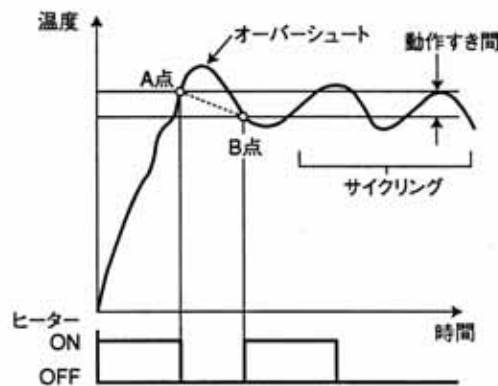


図2 ON-OFF制御結果

1-2 実際のON-OFF制御

ON-OFF制御の場合リレー接点出力を持つものが多く、操作端としてはリレー（電磁開閉器）や電磁弁等があり、リレーは電気ヒーター等に用い、水、蒸気、ガス等の流体は電磁弁を用いることが多い。

ON点・OFF点の動作すき間の設定は制御対象によって異なるが、狭く設定した場合、頻繁にON、OFFを繰り返すので一般的に制御性は良くなる。しかし、あまり動作すき間を狭く設定しすぎると、リレーや電磁弁等の操作端等の寿命が短くなり、ハンチングの恐れがあるので注意する必要がある。操作端の負荷に対して、電気ヒーターの容量や電磁弁の口径が大きい場合は制御対象に大きく影響するためハンチングする恐れがある。そのため、動作すき間を広くとる必要がある。

1-3 よく使われるON-OFF制御の操作端

ここでよくON-OFF制御と組み合わせて使用する操作端を紹介する。

◆リレー

通常、リレーと呼ばれる電磁開閉器の原理は電磁石と同じで、電磁コイルに電流を流したり（励磁）、電流を遮断したり（非励磁）することにより接点を閉閉し、ヒーター等を動作させる。

接点にはN.C（Normally Closed）とN.O（Normally Open）があり、N.C接点は非励磁の時に（電流が流れないとき）接点閉となり励磁の時に（電流が流れたとき）接点開にな

る。それとは逆にN.Oは非励磁の時に接点開になり、励磁の時に接点閉となる。

◆電磁弁（ソレノイドバルブ）

電磁弁は駆動部に電磁コイルを用いた調節弁で、電磁コイルに通電させると磁力が生じ、プランジャを吸引して弁の開閉を行う。電磁弁には常時閉形と常時開形があり、常時閉形は電磁コイルに通電させると弁が開き、常時開形は電磁コイルを通電させると弁が閉じる。また、流体の種類により耐熱用や耐薬品等を選択する。設置場所によっても防滴形や耐圧防爆形等を使用する。

1-4 ON-OFF制御の欠点

ON-OFF制御では操作量が0%か100%の何れかの状態となり、これにより検出の遅れ等の影響により制御結果がオーバーシュートしがちとなり、サイクリングを繰り返す。その状態を図3に示すようにON-OFF制御の調節計と電磁弁で、蒸気を制御する場合を考えてみる。

図3のように制御対象（ここでは水）が移動する場合は、操作量に変化してから、制御量に変化するまでに遅れ時間が生じるため、制御結果は100%の操作量の時、大幅に設定値を上回り、0%の操作量の時には、大幅に設定値を下回る結果となる。即ち、この場合温水と冷水とが交互に出てくることになる。このような場合、ON-OFF制御では安定した制御結果を得ることは困難である。

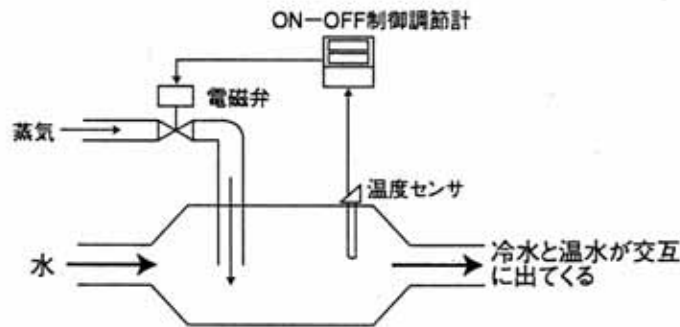


図3 ON-OFF制御での流体制御

2. 比例制御とは

そこで、ON-OFF制御のような不安定な制御結果を改善する方法として、操作量を0%と100%の2つの状態だけではなく、ある範囲内の制御量の変化に応じて0~100%の間を連続的に変化させるように考えられたのが比例制御である。（図4を参照）このような方法を取り入れることにより、図3のような移動する制御対象でも安定した制御結果を得ることが可能である。比例制御を行う上で次のような設定を行う必要がある。

◆比例帯

比例帯とは図5が示すように操作量を0~100%変化させるために必要な制御量（温度や圧力等）の変化する幅のことを言う。

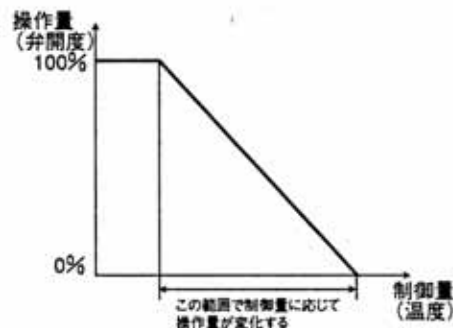


図4 比例制御の考え

比例帯が狭く設定されると、制御量のわずかな変化にも操作量が大きく変化してしまう。従って操作量の感度は上がるが、制御結果の安定性は悪くなり、比例帯を極端に狭くすると、ON-OFF制御と同じような制御結果となる。それとは反対に比例帯を広くした場合は、制御量の変化に対し、操作量の変化の割合は小さくなる。従って操作量の感度は下がるが、制御結果の安定性は上がる。そのため、最適な制御を行うためには、比例帯の幅を調整することが重要である。

◆設定値

比例制御における設定値の役割は図6に示すように比例帯の中心に定めることである。例えば、設定値を200℃から300℃に変更した場合、比例帯も新しい設定値300℃を中心とした比例帯となる。

◆正動作と逆動作

比例制御には正動作と逆動作の2つがある。正動作は図7のように制御量が増大すると操作量も大きくなる。一般的に正動作は冷却制御に用いられる。また、逆動作は図8のように制御量が増大すると操作量が小さくなるものを言い、加熱制御に多く用いられる。

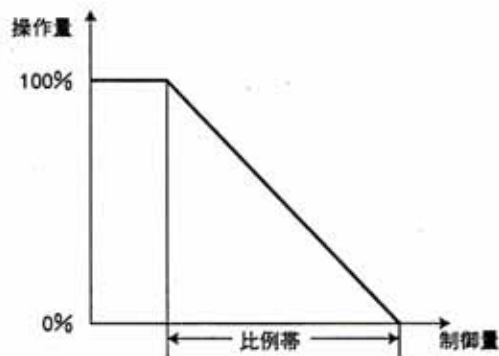


図5 比例帯

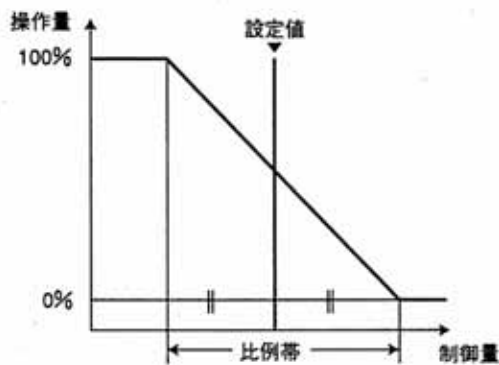


図6 設定値

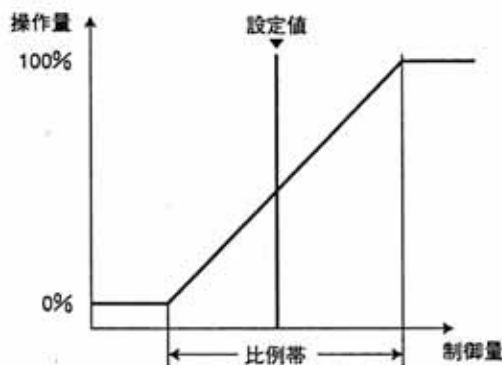


図7 正動作

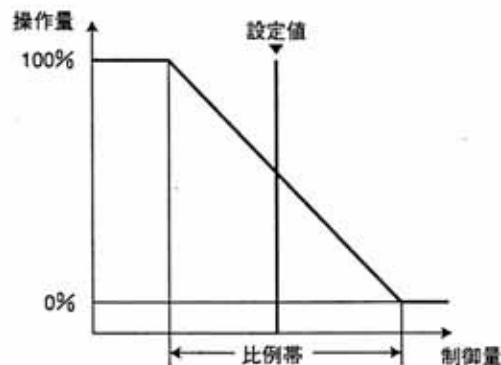


図8 逆動作

2-1 偏差と操作量の関係

比例制御では偏差（制御量と設定値との差）に比例した操作量が修正動作として働く。図9に示すような比例制御調節計と電動調節弁の組み合わせで、蒸気量を比例制御する例で考えてみる。比例制御では図10のように設定値と制御量が一致したときは、操作量はちょうど50%

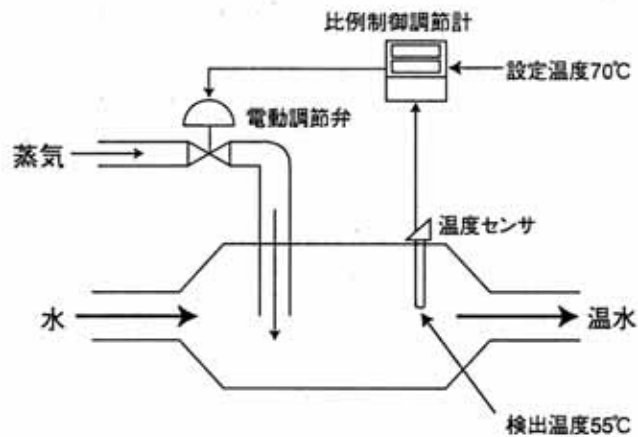


図9 比例制御での流体制御

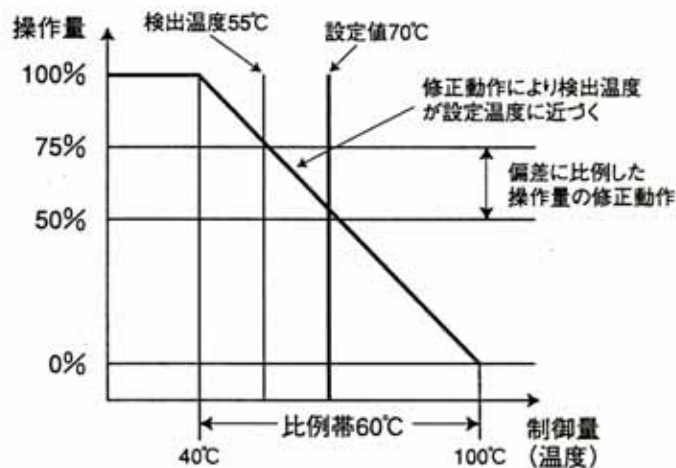


図10 比例制御

となる。この操作量50%を基準として、偏差に比例した操作量の修正が行われ、制御量が設定値に近づいていく。

3. まとめ

本章は基本的な制御方法について説明した。現在では、省資源・省エネルギーや品質の均一・向上化のための安定した操作条件が求められているため、ほとんどの装置や工場では比例制御が用いられている。

比例制御には、制御対象や操作端の種類によりいくつかの種類がある。次章はそれについて説明する。

第2章 よく使われる制御方法 その2

前章では、よく使われる制御方法として、ON-OFF制御と比例制御について説明した。どちらの制御方法を使用するかは、求める制御結果の安定性によって使い分け、あまり制御結果の安定性を求めない場合はON-OFF制御を用い、より安定した制御結果を求める場合は比例制御を用いることが一般的であることについて述べた。

比例制御には、制御対象、操作端の種類によって時間比例制御、連続比例制御、位置比例制御の3つに分れ、本章はそれぞれの比例制御について説明する。

1. 時間比例制御とは

時間比例制御はON-OFF制御の形態をとった比例制御であり、設定値を中心とした比例帯の中で、ONとOFFの時間の長さを、設定値との偏差に比例させて変えていくものである。(図1を参照)

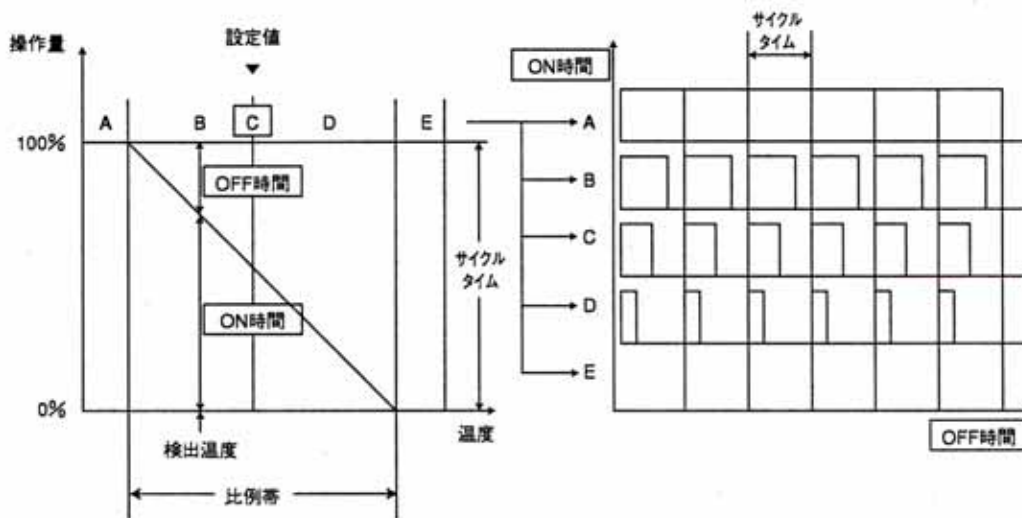


図1 時間比例制御の概要

このONとOFFの1サイクルの時間は一定で、この時間をサイクルタイムと呼んでいる。このサイクルタイムを仮に10秒と設定したとすると、現在値が比例帯より低い範囲にある場合は、調節計からの出力は常にONの状態となる。また、現在値が比例帯より高い範囲にある場合は、調節計からの出力は常にOFFの状態となる。

比例帯内では温度により、ONとOFFの時間比率は、設定値との偏差に比例して変わる。例えば、現在値が設定値より低い場合、ON時間が7秒だとすると、OFF時間は3秒となり、ON時間の方が長くなる。現在値が設定値に達した場合は、ON時間、OFF時間も5秒で、同じとなる。以上の関係を表に表わすと、表1のようになる。

表1 時間比例制御の制御状態

現在値の状態	操作量
比例帯外	
比例帯より低い	常にONの状態
比例帯内	
設定値より低い	ON時間が長くOFF時間が短い
設定値	ON時間とOFF時間が等しい
設定値より高い	ON時間が短くOFF時間が長い
比例帯外	
比例帯より高い	常にOFFの状態

2. 時間比例の制御結果

ここで時間比例の制御結果をON-OFFの制御結果と比較してみる。図2のように、電気ヒータの制御で考えてみると、ON-OFF制御の場合、電気ヒータはON点とOFF点（設定値）で切り替わってしまうので、検出遅れ等による行き過ぎ量は大きくなってしまいます。これに対し、時間比例は、現在値が比例帯内に入ると、設定値との偏差に応じてONとOFFの時間比率を変えていくため、図3のように、ON-OFF制御と比較して、検出遅れ等による行き過ぎ量は小さくてすむ。

しかしながら、時間比例制御はON-OFF動作を繰り返す制御形態を取るため、サイクルタイムが長すぎたりすると、行き過ぎ量が大きくなり、制御結果が悪くなる。逆にサイクルタイムが短すぎると、ハンチングが起こり、制御結果は安定しない。また、ON-OFF動作が頻繁に起こるため、操作端の寿命を縮めてしまうことにもなる。

従って、時間比例制御では、適切なサイクルタイムの設定が良好な制御結果を得るための重要な要素となる。

時間比例制御には、リレー出力と電圧出力があり、前者は電磁開閉器と、後者はソリッドステートリレー（SSR）と組み合わせて使用される。一般的にリレー出力のサイクルタイムは10秒から60秒程度で、このサイクルタイムを短くしすぎると電磁開閉器の寿命を縮めることとなる。逆に、電圧出力は、無接点リレーのSSRと組み合わせて使用されるため、サイクルタイムは2～4秒程度と短く、寿命の問題もないため、良好な制御結果が得られる。

3. 連続比例制御とは

連続比例制御とは、図4のように現在値と設定値との偏差に応じて、調節計から連続的な出力を出して、制御することを言う。電気ヒータの制御を例にとると、調節計を4～20mAの出力が連続的に出るタイプとし、その出力をサイリスタユニットと呼ばれる操作器に入力し、電気ヒータを連続的に制御することを言う。

連続制御は、時間比例制御のようなON-OFFの制御形態をとっていないため、滑らかに操作量を変化させることができ、より安定

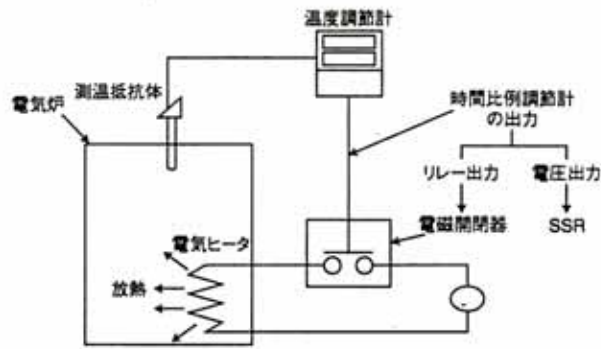


図2 電気ヒータの制御

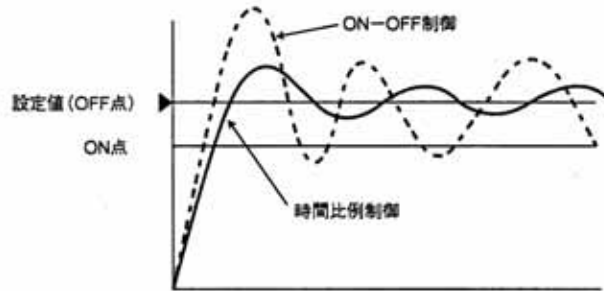


図3 時間比例とON-OFF制御の比較

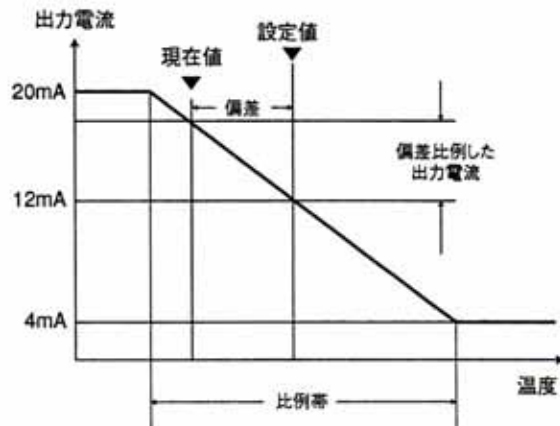


図4 連続比例制御の特性

した、精度のよい制御結果を得ることができる。特にプラント、半導体製造装置、精密試験装置等、高い安定性、精度を求めるアプリケーションで多く用いられている。

以下に連続比例制御の一例としてサイリスタユニットによる電気ヒータ制御（位相角制御）について説明する。

図5は、サイリスタユニットを使用した電気ヒータの位相角制御を示す結線例である。調節計の電流信号に従い、ドライブアンプから負荷電源の位相角に合ったトリガパルスが出る。このパルスがサイリスタ（トライアック）のゲート回路に印加され、サイリスタがONとなる。そして、負荷電源の電圧がゼロになるまで、サイリスタはON状態となる。

このように調節計からの出力に応じて、トリガパルスを出す位置（時間）を比例的に変え、電気ヒータに流れる負荷電流を連続的に制御する。（図6）

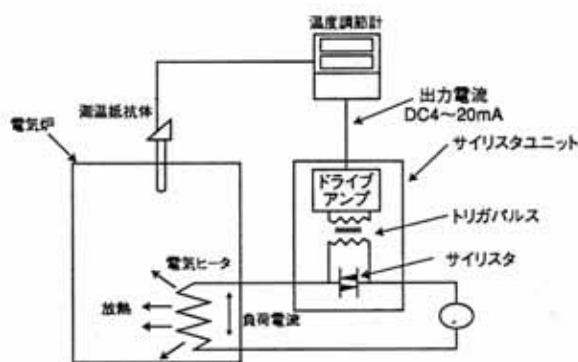


図5 サイリスタユニットによる位相角制御

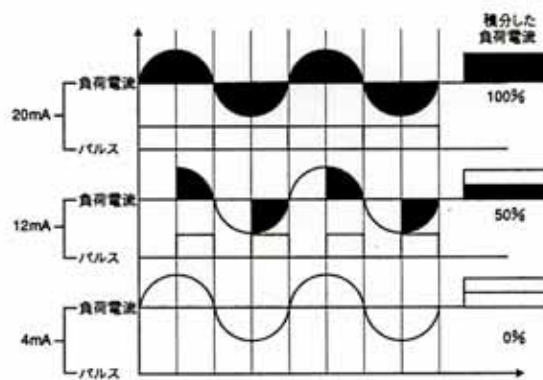


図6 電気ヒータに流れる負荷電流

4. 位置比例制御とは

位置比例制御とは、時間比例制御、連続比例制御と同様に、現在値と設定値との差、すなわち偏差に比例した操作量で働く制御動作を言い、調節計のリレー出力で電動調節弁を開閉し、ガスや重油の燃焼炉等の制御を行うために用いられる。

図7に示すように、設定温度が700℃、比例帯は設定値の±100℃（600～800℃）の範囲に設定したとする。熱電対による検出温度が比例帯より低い温度範囲（600℃以下）にある時、電動調節弁のモータの開度は100%（全開）になる。

検出温度が600℃以上になって比例帯内にはいると、偏差に比例した操作量が働く。例えば図8に示すように、検出温度が650℃の時、モータの開度は75%となり、検出温度がちょうど設定値に達した時、偏差がなくなりモータの開度は50%となる。

更に検出温度が設定温度を越え、高くなると、モータの開度は徐々に閉じて行き、比例帯の上限値である800℃を越えると、モータの開度は0%（全閉）となる。

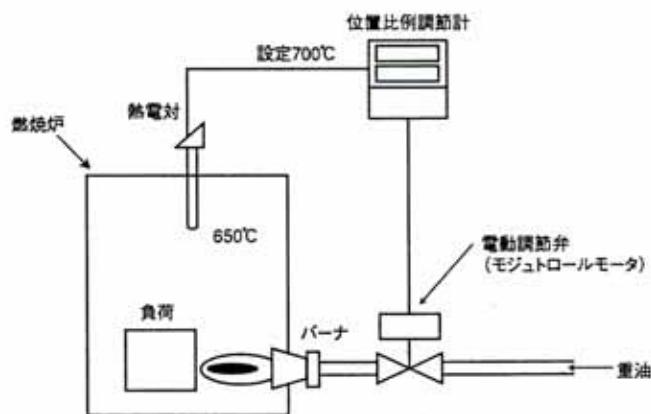


図7 燃焼炉の制御例

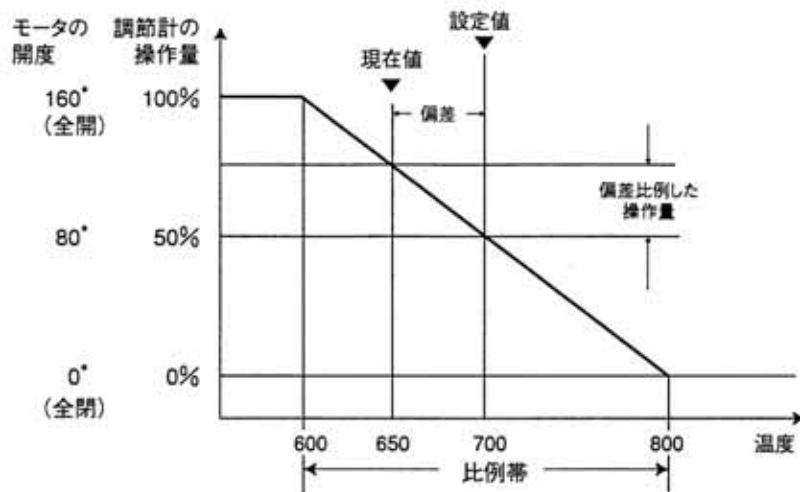


図8 位置比例制御

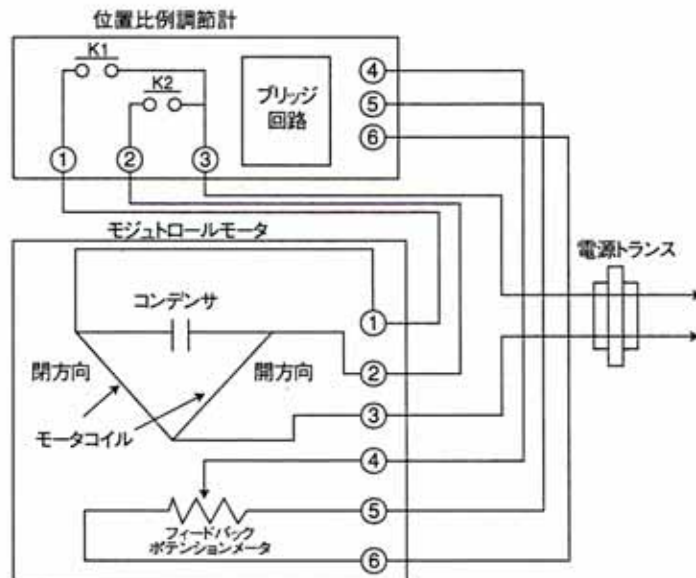


図9 位置比例制御によるモータ駆動

一般的にモータの開度は0～160°の範囲で回転し、操作量50%の時、モータ開度は80°となる。

次に位置比例制御の調節計（2個のリレー接点出力）とモジュトロールモータ（リレー接点入力）がどのように動作し、制御をしているかについて説明する。

図9は、調節計から出す操作量とモータの開度がちょうど同じとなり、調節計内部にあるブリッジ回路が平衡状態にある場合を示している。この場合、モータを駆動させるための調節計のリレー接点K1とK2はオープン状態となり、モータは停止している。

次に温度が下降し、調節計からの操作量とモータの開度にずれが生じ、ブリッジ回路の平衡がくずれると、調節計のリレー接点K2が閉じ、モータの端子②－③間に電圧が印加され、モータは開方向に回り始める。モータの回転に伴い、フィードバックポテンションのワイバは、ブリッジ回路を再平衡する方向に移動する。モータが温度降下分だけ回転すると、ブリッジ回路は再平衡して、調節計のリレー接点K2が開き、モータはその位置で停止する。

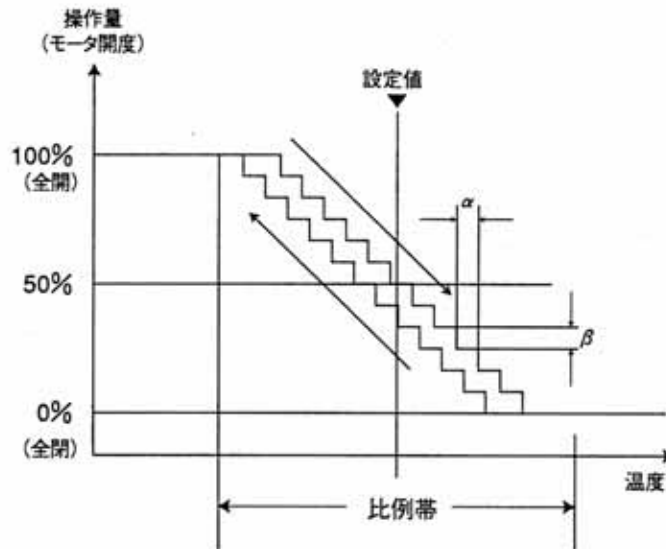


図 10 モータの動作

逆に温度が上昇すると、温度が下降した時と同様に、調節計からの操作量とモータの開度にずれが生じ、ブリッジ回路の平衡がくずれ、調節計のリレー接点K1が閉じ、モータの端子① - ③間に電圧が印加され、モータは閉まる方向に回り始める。モータが温度上昇分だけ回転すると、ブリッジ回路が再平衡し、リレー接点K1が開いてモータはその位置で停止する。

実際のモータの動作は、図10に示すようにモータの分解能があるため、ステップ状に変化する。モータは、温度変化が a だけ変化すると、 β だけ動作し、温度変化が a より小さい場合は、モータは動作しない。この a は、フィードバックポテンションメータの有効巻数によって決まり、多い方が分解能が高く、制御精度が良くなる。また、制御精度は比例帯の大小によっても異なり、小さいほうがモータの開閉動作が頻繁に起こり、制御精度は良くなるが、極端に狭くするとハンチングを起こしてしまい、モータの製品寿命を縮めてしまう。逆に比例帯を大きくしすぎると、温度変化が大きく変化しない限り、モータは動作しないため、制御精度は悪くなる。

5. まとめ

本章で、時間比例、連続比例、位置比例の3種類の比例制御方法について説明した。それぞれの制御方法は、制御する操作端、求める制御結果によって使い分けられ、一般的に連続比例制御がもっとも制御結果が良い。

次章は、制御の歴史が始まって以来、制御の主役を務めているPID制御について説明する。

第3章 PID制御について

前章では、時間比例・連続比例・位置比例の3種類の制御方法について説明した。本章は、その制御方法に最もよく使われるPID（P：比例，I：積分，D：微分）制御について説明する。基本的にPID制御は、現在値（PV）と設定値（SP）の偏差に比例した出力を出す比例動作（Proportional Action：P動作）と、その偏差の積分に比例する出力を出す積分動作（Integral Action：I動作）と、偏差の微分に比例した出力を出す微分動作（Derivative Action：D動作）の和を出力し、目標値に向かって制御することを言う。

まずは、比例・積分・微分のそれぞれの動作について説明する。

1. 比例動作について

比例動作（P動作）とは、比例帯内で、現在値と設定値の偏差に比例した操作量を働かす動作を言い、比例帯の目安は、装置によって異なるが、2～10%となる。

しかしながら、P動作だけでは、次に述べるようなオフセット（残留偏差）が生じるため、I（積分）動作を加え、設定値との偏差をなくすような制御を行うことが一般的である。

2. オフセットとは

オフセットとは、図1にあるように設定値と現在値とのズレ（偏差）が一定の値で、永続的に続くものである。比例動作のみで制御を行っている場合は、負荷の変動や装置の固有特性によってオフセットが現れ、図2にあるように負荷特性線と制御特性線の交点が、必ずしも設定値と一致しないことが原因である。

以下に具体的にどんな理由でオフセットが現れるのかを説明する。

1) 負荷が変化した場合

理想的な条件に比べ、大きな負荷を入れた場合、この負荷によって奪われる熱量が増えるため、検出温度は設定値より低いところで安定する。逆に負荷の小さなものを入れた場合は、その逆となり、検出温度より高めとなる。

2) 装置の周囲温度が変化した場合

冬場等は、装置の周囲温度が低いため、これに奪われる熱量が増えるため、検出温度は、設定値より低めとなる。逆に夏場等、周囲温度が高い場合は、奪われる熱量が少ないため、検出温度は、設定値よりも高めとなる。

3) 設定値を変更した場合

例えば800℃用に設計された燃焼炉では、800℃よりも高く設定値を設定した場合、検出温度は設定値よりも低めとなり、800℃よりも低く設定した場合、検出温度は設定値よりも高めとなる。

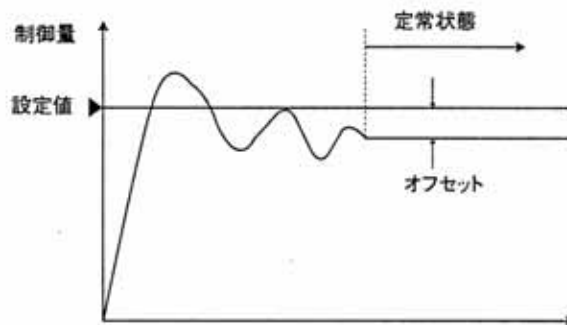


図1 オフセット

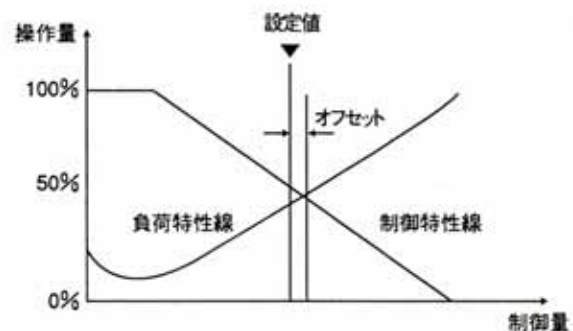


図2 オフセットの原因

3. マニュアルリセット (設定値手動補正)

前述のように、比例動作だけの制御では、オフセットを避けることは不可能である。そこで、オフセットをなくす方法として、マニュアルリセットまたは積分動作という機能がある。

マニュアルリセットとは、現場で温度調節計の出力を調整する機能で、図3のように、オフセットが設定値より下側にある場合は、50%より高めに設定する。

従って、手動で調整するマニュアルリセットは、年に数回程度の調整ですむ場合に適しており、負荷が頻繁に変動する場合は、次に説明する積分動作が適している。

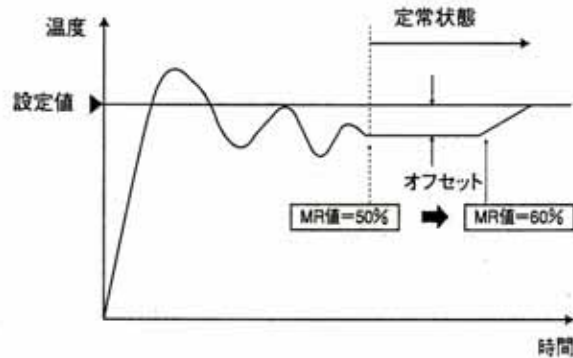


図3 マニュアルリセット

4. 積分動作

積分動作 (I動作) は、オフセットが現れた場合に操作量を変えて、マニュアルリセットと同様にオフセットをなくすように働く動作である。

図4のように上記の状態はP動作の制御特性線と負荷特性線は交点Aでバランスし、操作量は60%となっている。次にI動作を加えPI動作とすると、時間と共に余分な出力を出し続け、制御特性線は右方向に平行移動し、制御特性線と負荷特性線がちょうど設定温度と等しくなった交点Bでバランスさせるように働く。

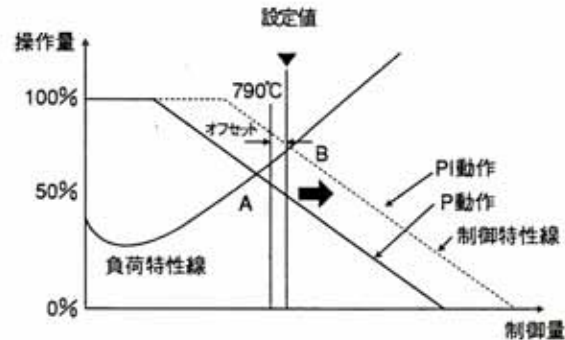


図4 積分動作

1) 積分動作

偏差がある場合、I動作を利かせると、その大きさによって調節計の出力は一定速度で変化し、その偏差が完全にならないうり出力し続ける。

2) 積分時間の定義

PI動作の調節計に時間T1の時、図5のようなステップ入力を加えると、P動作による出力の変化分とI動作による出力変化分が等しくなる時間T1 - T2が積分時間となる。

3) 積分時間と修正時間

積分時間の長さが長い時間 (T1 - T2)

と短い時間 (T1 - T3) を比べると、時間の短い方が、積分が強く掛かることとなり、大きな修正量が、短時間で働き、偏差を短時間で修正することができる。しかし、積分時間を短く設定しすぎると、ハンチングが起きやすく、安定した制御結果が求められなくなるので、注意が必要である。目安としては100~150秒ぐらいである。

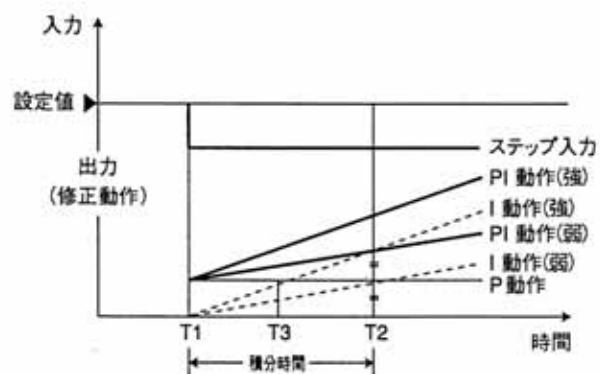


図5 積分時間の定義

5. 微分動作

微分動作（D動作）は、外乱等により、検出温度が変化し始めると、その変化の度合いに応じ、偏差の少ないうちに大きな修正動作を加え、制御結果が大きく変動するのを防ぐ動作である。

図6に示すように、温度センサが下がる室温を検出すると、調節計はそれに追従して、少しずつ修正出力を出す。温度センサの応答遅れが生じ、むだ時間（ $T1 - T2$ ）となるため、調節計はあくまでむだ時間をもって追従することとなる。そのため、室温はかなり低いところまで下がってしまう。

ここで微分動作を利かせると、温度の下がる傾向（単位時間あたりの温度変化分）を検知し、予め下がる温度を想定して、大きな修正出力を出すことができる。そのため、室温は大きく下がらず、すぐに元の温度に安定させる。

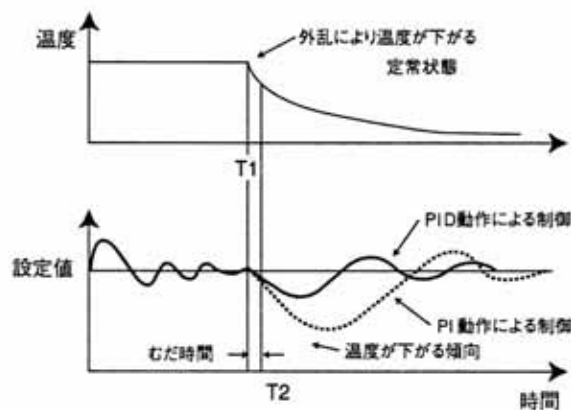


図6 微分動作

以下に具体的な動作について説明する。

1) 微分動作

微分動作は、温度が下がり始めたときから、調節計はその傾向（温度の変化分）を判断し、それに見合った修正出力を出し、温度が急激に変化するのを抑える動作である。

2) 微分時間の定義

図7のように時間 $T1$ の時に入力を連続的に、一様な速さで変化させると、P動作による出力の変化量とD動作による出力の変化量が時間 $T2$ のときに等しくなる時間 $T1 - T2$ を微分時間と言う。

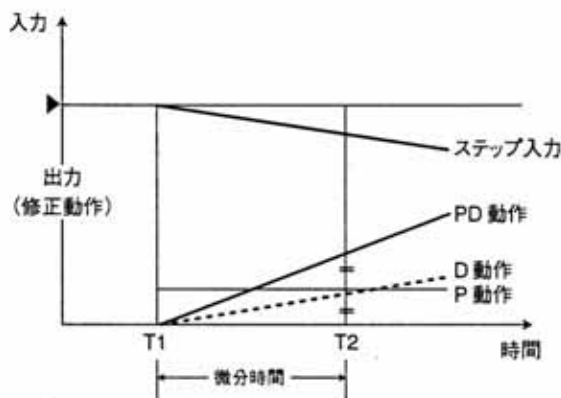


図7 微分時間の定義

3) 微分時間と修正時間

次に図8のように、時間T1でステップ入力を加えると、P動作出力はステップ状に変化し、D動作は瞬間に最大出力となり、偏差が一定になると、直ちに出力は減衰し始める。この時間T1-T2が微分時間となり、微分時間が長くなるほど、強く働くことになる。積分時間と同様に微分時間を長く設定しすぎると、小さな変化に対して、大きな出力が出てしまうためハンチングが生じ、制御性は安定しない。装置等によって異なるが、微分時間の目安は10～50秒ぐらいとなる。

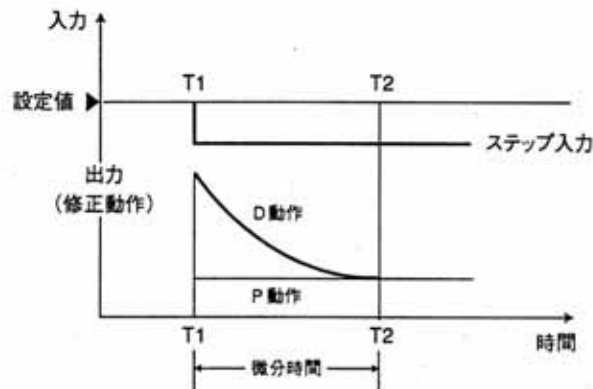


図8 ステップ入力時の微分動作

6. PIDオートチューニング

PIDの最適値を求めるためには、多くの経験や知識を必要とするため、現在の調節計のほとんどにオートチューニング機能が搭載され、簡単にPIDの最適値を求めることが可能である。

しかし、このオートチューニングも装置や環境によっては必ずしも最適値を求められないため、人の手による修正が必要ある。そのため、最近では、人の手をできるだけ借りず、より最適な値を求めるため、学習機能やファジィ推論を備えたオートチューニングや調節計自身が常時、制御対象を監視し、それに適応した制御を行うセルフチューニング等が登場してきている。

今回ここでは、オートチューニングの基本的な原理について説明する。

図9のように、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)を設定値近くまでもっていき、設定値付近のA点で、調節計の出力を0%→100%→0%→100%と2回サイクルを繰り返す。

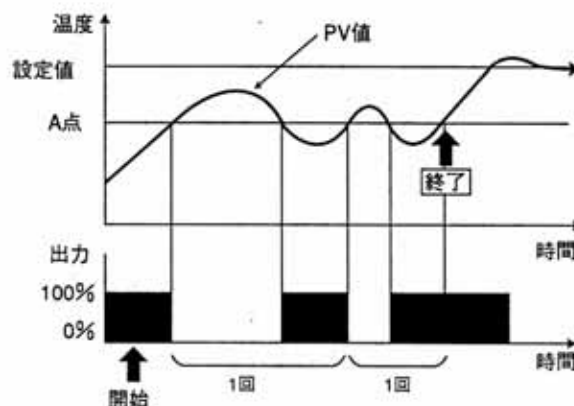


図9 オートチューニング

この時のPV値波形の振幅と周期（むだ時間）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となる。

7. まとめ

近年のソフトウェアの進歩により、様々なアプリケーションに対応した機能が調節計に搭載され、より最適な制御が行えるようになってきた。しかし、制御ループは調節計が役割となる制御部の他に、温度や圧力等を計測するセンサ部と、バルブ・モータ等の操作部で構成されるため、それぞれの組み合わせがうまく行って始めて安定した制御結果が得られるのである。

最近では、制御ループを構成するセンサ部、制御部、操作部の他に、ユーザの簡単操作・簡単メンテナンスニーズに対応するためのマンマシンインターフェイスが重要になってきている。そのため、これらの制御は、センサ部・制御部・操作部の組み合わせだけではなく、ユーザの使いやすさやメンテナンス性を考慮したマンマシンインターフェイスを含めた制御ループを構成することが重要である。