

## やさしい自動制御のお話



日頃何気なく使っている機器や装置の温度制御ってどうやっているのだろう？  
PとかIとかよく聞くけど、よくわからない。

そう思ったことはありませんか？

ここでは、「やさしい自動制御のお話」と題して4章にわたり、  
温度制御 から P I D制御まで段階を追って連載いたします。

アズビル株式会社  
アドバンスオートメーションカンパニー  
COMPOCLUB 事務局

URL : <http://www.comoclub.com/>

COPYRIGHT 2012 Azbil Corporation All Rights Reserved

この資料の無断複製はお断りいたします。



# やさしい自動制御のお話

## 目次

### ■ 第一章 温度を制御するってどういうこと？

---

1. はじめに	1-1
2. 温度制御とは	1-1
3. 自動による温度制御	1-1
4. 周囲温度による影響	1-2
5. フィードバック制御について	1-2
6. フィードバック制御の欠点	1-3
7. 制御の構成要素	1-3
8. まとめ	1-4

### ■ 第二章 よく使われる制御方法 その1

---

1. はじめに	2-1
2. ON - OFF制御とは？	2-1
3. ON - OFF制御の結果	2-1
4. 実際のON - OFF制御	2-1
5. よく使われるON - OFF制御の操作端	2-2
6. ON - OFF制御の欠点	2-2
7. 比例制御とは	2-2
8. 偏差と操作量の関係	2-3
9. まとめ	2-3

### ■ 第三章 よく使われる制御方法 その2

---

1. はじめに	3-1
2. 時間比例制御とは？	3-1
3. 時間比例の制御結果	3-1
4. 連続比例制御とは？	3-2
5. 位置比例制御とは？	3-3
6. まとめ	3-4

### ■ 第四章 PID制御について

---

1. はじめに	4-1
2. 比例動作について	4-1
3. オフセットとは？	4-1
4. マニュアルリセット（設定値手動補正）	4-1
5. 積分動作	4-2
6. 微分動作	4-2
7. PIDオートチューニング	4-3
8. まとめ	4-3

# 第一章 温度を制御するってどういうこと？

## 1. はじめに

自動制御は、工場・プラントを効率よく運営していく上で、欠かせないものである。例えば、自動制御によって省資源、省エネルギー、省力化がはかられ、工場・プラント運営の目的の一つである運転コストの低減に寄与している。また、操業条件が一定化されるため、バラツキが減少し、均一性が確保でき、製品の品質を向上できるなどのメリットがある。最近では、環境保全のために、公害の少ない操業および公害防止装置などに様々な制御が使われている。中でも温度制御は多くのプロセスで用いられており、温度を一定にすることによって、均一な製品が得られる生産につながることが多い。

本章では、温度制御をテーマに基本的な制御の考え方について述べることにする。

## 2. 温度制御とは？

一般的に温度制御とはどのような機能を持ち、どんな操作が行われるかを図1に示す熱帯魚を飼育する場合を例として考えてみる。熱帯魚が育成するのに最も適した水温を30とし、ガラス温度計を見ながら水槽の中にある電気ヒータのスイッチを入切して水槽の温度を一定に保つ。

上記の行動を分解してみると次のようになる。

- 1) 運転目標を設定する。  
水槽の温度を30とする。
- 2) 運転状態を知る。  
ガラス温度計を目視する。
- 3) 運転目標と運転状態の差を知る。  
ガラス温度計の温度と目標値である30が一致しているか見る。
- 4) 差があれば差を無くすように操作を行う。  
ガラス温度計の温度と目標値30に差があればヒータを入切させる。

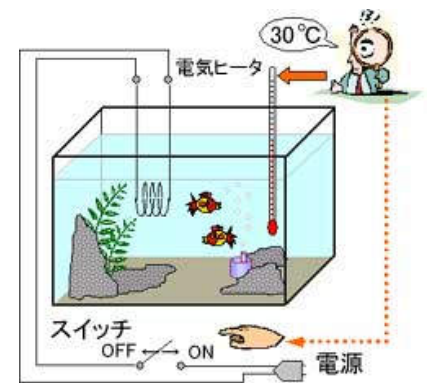


図1 手動による温度制御

このようにある定められた目標値に対し温度を一定に保つように判断し、行動することを“温度制御”または“温度コントロール”と言う。また、この場合人の手を介して温度を制御していることから“手動制御”と呼ぶ。

## 3. 自動による温度制御

人の手を介さずに自動的に水槽の温度を30に一定に保つためには、図2に示すように手でヒータのスイッチを入切する代わりに温度調節計を用いる。また、ガラス温度計の代わりに温度検出器を設置する。

温度センサが水槽の温度を検出し、温度調節計は検出された温度が30以下であればヒータの電源を入れ、30以上になればヒータの電源を切る。これを繰り返すことにより、水槽の温度は30付近に保たれる。

これらの行動を手動で温度制御を行った場合と同じように分解すると次のようになる。

- 1) 運転目標を設定する。  
水槽の温度を30と、温度調節計に設定する。
- 2) 運転状態を知る。  
温度センサで検知し、温度調節計に伝える。
- 3) 運転目標と運転状態の差を見る。  
温度調節計内で設定されている目標値と温度センサが検出した現在値を比較する。
- 4) 差があれば差を無くすように操作を行う。  
差があった場合に温度調節計からヒータの電源を入切する。

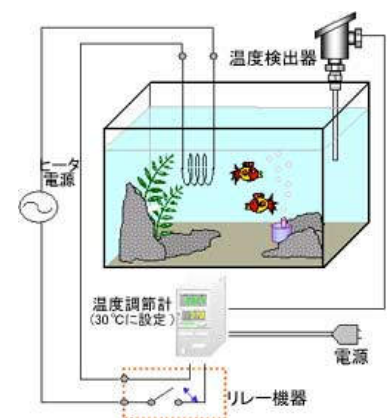


図2 自動による温度制御

以上のように水槽の温度、温度センサ、温度調節計、ヒータ、水槽の温度と言った一連の流れにより、温度を一定に保つことができる。

#### 4. 周囲温度による影響

ここで水槽の周囲温度による影響を考えてみる。周囲が風などのない安定した雰囲気、室温も30℃であるとする、水槽の温度が30℃になったとき、この状態が長時間安定する。しかし、室温が20℃のときには、水槽が30℃になりヒータの電源が切れても、周囲温度の影響により水温はすぐに下がり、頻りにヒータの電源を入れなければならない。逆に室温が40℃のとき、水槽の温度は自然に30℃以上になり、ヒータの代わりに冷却器で冷やさなければならない。このように水槽の温度は常にその周囲温度の影響を受けている、制御系の外から制御対象に直接影響を及ぼすものを“外乱”と言う。

これらをブロック図で書くと図3のようになり、これをフィードバックと呼ぶ。

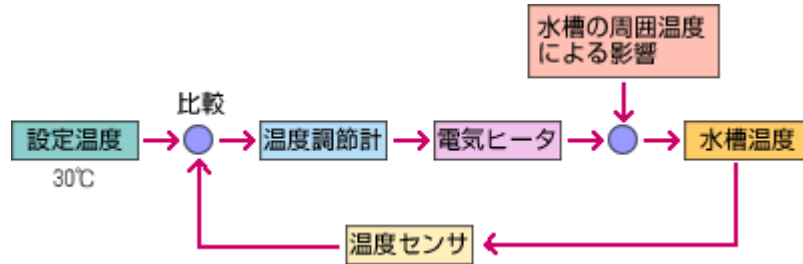


図3 自動による温度制御のブロック図

#### 5. フィードバック制御について

フィードバックグループによって制御した結果（出力）を入力側に戻し、目標値と比較して次の制御へ役立てようとすることをフィードバック制御と言い、今日の制御のほとんどがこれを採用している。

フィードバック制御の構造を詳しく示したものが図4である。

各項目の説明については以下の通りである。

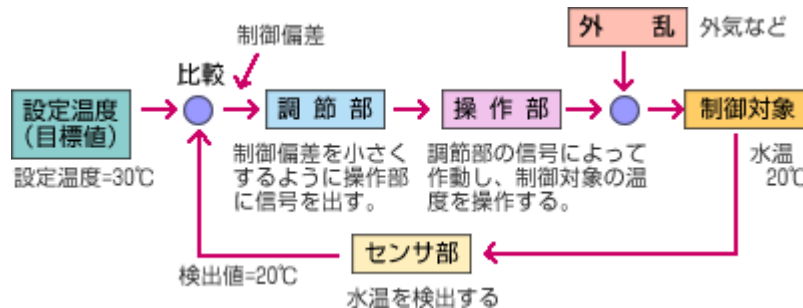


図4 フィードバックループ

##### 目標値

制御の目標となる値。（水槽の設定温度）

##### 調節部

設定温度と検出温度の差を比較し、その差を小さくするように操作部へ信号を出す。（温度調節計または人の手によるヒータのON/OFF）

##### 操作部

調節部の信号によって作動し、制御対象の温度を操作する。（ヒータ）

##### センサ部

制御対象の変化を検出する（温度検出器）

##### 制御対象

制御される対象（水槽の温度）

##### 外乱

制御対象に直接影響を与えるもの（室温）

## 6. フィードバック制御の欠点

フィードバック制御は、制御の定番と言っても過言ではないが、“結果をみてから修正する制御”であることから、外乱に弱いと言う欠点をもっている。つまり、風が窓から入り室温が変化するなどの外乱が発生すると、それが制御対象（水槽の温度）に影響を与え、設定温度と現在値の差が生まれる、その差が生まれてからの制御を行うために、外乱の影響を本質的に避けられない。

このフィードバック制御の欠点を補うために、PIDのパラメータ（第四章に詳しく紹介する）の細かな調整や、外乱が制御対象に影響を与える前に検出し必要な操作量を加えるなどの工夫が必要である。

## 7. 制御の構成要素

一般的にフィードバック制御を行う上で必要な要素を大きく分けるとセンサ部、制御部、操作部の3つに分かれている。このことから、水槽の温度制御の例を見ると**温度の検出を行う温度センサ** **比較・判断を行う温度調節計** **水槽の温度に変化を与える電気ヒータ**の組み合わせで、自動的にこの動作が繰り返され、水槽の温度が一定に調整される。

センサ部、制御部、操作部についての概要は以下の通りである。

### センサ部

センサは制御にとって、重要な要素である。センサによって、制御対象（水槽の温度）の正しい情報を得ることができなければ、制御もあやふやになってしまう。

図5に温度センサの種類と特長を示す。

種類	検出方法	特長	欠点	常用温度範囲
・熱電対T/C	・熱起電力 (ゼーベック効果)	・比較的高温度部の測定に適する。 ・遠隔測定ができる。 ・応答が速い。 ・精度がよい。	・冷接点補償が必要。 ・熱電対から計器までの配線は補償導線を用いなければならぬ。 ・低温部の測定に適しない。 (熱起電力が小さいため)	・-180 ~ 1400
・测温抵抗体 RTD	・抵抗値変化	・比較的低温度部の測定に適する。 ・遠隔測定ができる。 ・応答が速い。 ・精度がよい。	・高温部の測定ができない。	・-50 ~ 400
・液膨張式 (液体膨張)	・トルエン、シリコン油等の液体膨張	・現場計器 (検出部と指示、調節部が一体) ・比較的安価である。 ・使い易い。 ・簡単に操作できる。	・使用温度範囲が狭い。 ・遠隔測定ができない。 ・応答が遅い。 ・精度があまり良くない	・-15 ~ 200
・バイメタル式	・2金属の熱膨張率の違い	・安価である。 ・使い易い。 ・簡単に操作できる	・使用温度範囲が狭い。 ・応答が遅い。 ・精度が悪い。 ・寿命があまり長くない	・-15 ~ 200
・幅射検出器	・物体の幅射熱 (赤外線エネルギー)	・熱電対よりも高温部の測定ができる。 ・遠隔測定ができる。 ・応答が速い。 ・测温物質に非接触で測定できる。	・測定物質によって幅射率の補正が必要である。 ・高価である。 ・周囲環境や外乱の影響を受けやすい。	・0 ~ 数千度

図5 温度センサの種類と特長

### 制御部（温度調節計）

制御部である温度調節計は制御の中心となる部分で、PID制御が現在の制御アルゴリズムのほとんどを占めている。

従来、アナログ式の温度計が多く用いられてきた。その後1970年代半ばに登場したマイクロプロセッサを内蔵したデジタル式の温度調節計が出現し、現在使われているコントローラのほとんどがデジタル式である。（[図6](#)を参照）



図6 温度調節計の外観  
(ハンディローダ対応)

### 操作部

操作部は温度調節計からの操作信号を受けて直接制御対象に変化を与える装置を言い、扱うプロセスによって操作部は様々である。温度制御でよく使われる操作部の一例を紹介する。（[図7](#)を参照）

#### 電気ヒータを制御する場合

- リレー
- SSR（ソリッドステートリレー）
- SCR（サイリスタユニット）

#### 水などの流体を制御する場合

- 空気式調節弁（電空ポジションが必要）
- 電動弁
- 電磁弁



図7 サイリスタユニットの外観

## 8. まとめ

最近では制御を構成する3つの要素の他に、ユーザの簡単操作に対応するためのタッチパネルなどのマンマシンインターフェイスも制御にとって重要となってきている。ユーザの多様化するニーズに応えるため製品や装置も高機能化、多機能化が進んでいるが、その反面操作が複雑になりがちである。そのため、対話形式での設定やモニタができるタッチパネルなどが多くの装置に組み込まれている。（[図8](#)を参照）

また、温度調節計においても、ユーザの簡単操作ニーズに応えるためタッチパネルなどと接続できる通信機能付きの調節計のニーズが高まっている。



図8 タッチパネルの外観

これからの制御では、センサ部・制御部・操作部の組み合わせただけでなく、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も含めた制御ループを構成することが重要である。



## 第二章 よく使われる制御方法 その1

### 1. はじめに

前章では温度制御についての基本的な考え方について述べた。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。

### 2. 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のような動作で、電気こたつのヒータ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は普通でこれを動作すき間（デファレンシャル）と言う。

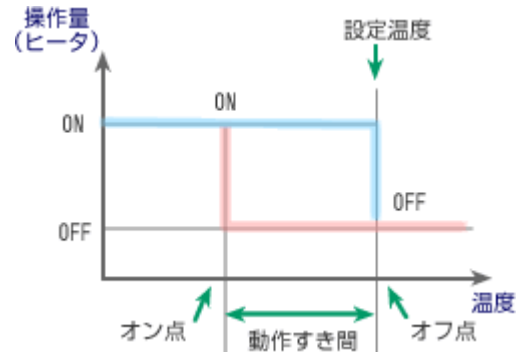


図1 ON - OFF動作

### 3. 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の点線のよう設定値A点でヒータは切れて温度は下がり設定値より低い温度B点ではヒータは入り、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）による影響などにより、設定A点で電気こたつのヒータが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がONになるB点にきて、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、温度が設定値を行過ぎることをオーバーシュートと言い、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。

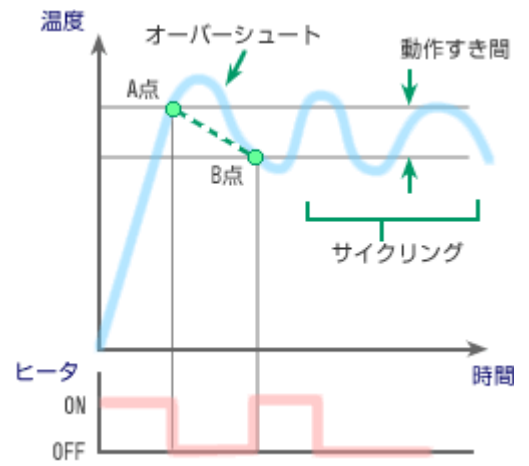


図2 ON - OFF制御結果

### 4. 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）や電磁弁などがあり、リレーは電気ヒータなどに用い、水、蒸気、ガスなど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、リレーや電磁弁などの操作端の寿命が短くなり、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に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。

## 5. 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開閉し、ヒータなどを動作させる。

接点にはN.C (Normally Closed) とN.O (Normally Open) があり、N.C接点是非励磁の時に（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）接点開となる。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に通電させると弁が閉じる。また、流体の種類により耐電用や耐薬用などを選択する。設置場所によっては防滴形や耐圧防爆形などを使用する。

## 6. 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など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）が異動する場合は、操作量が変化してから、制御量が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。すなわち、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。

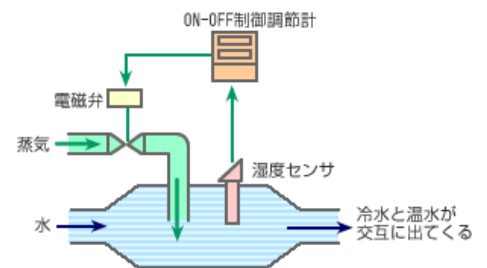


図3 ON - OFF制御での流体制御

## 7. 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（温度や圧力など）の変化する幅のことを言う。

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。したが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。

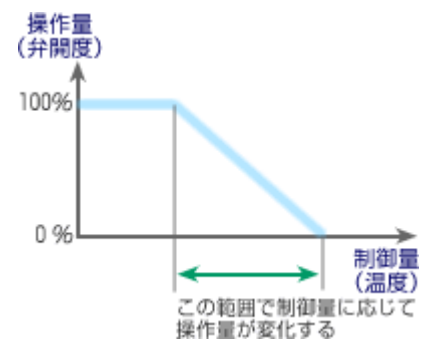


図4 比例制御の考え

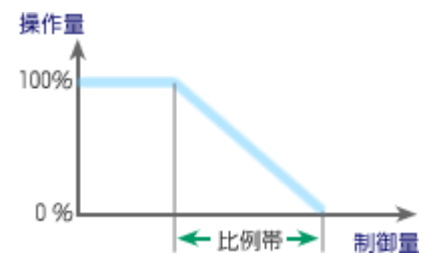


図5 比例帯



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。

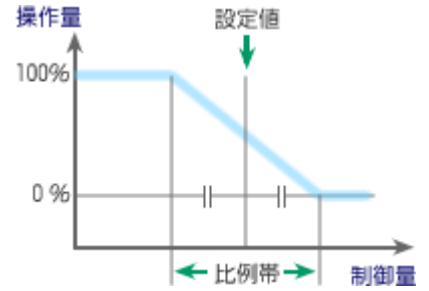


図6 設定値

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いい、加熱制御に用いられる。

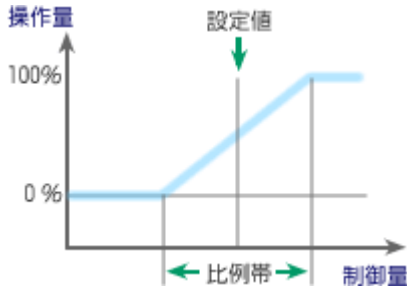


図7 正動作

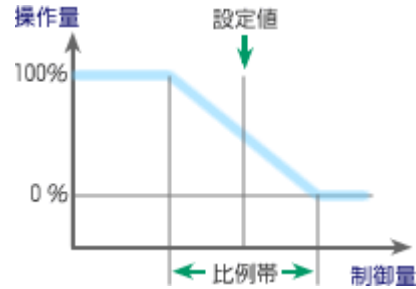


図8 逆動作

8. 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%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。

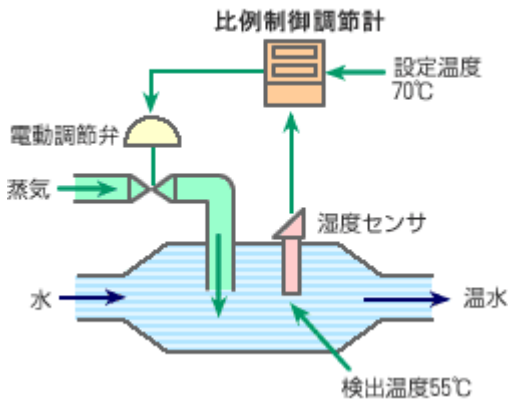


図9 比例制御での流体制御

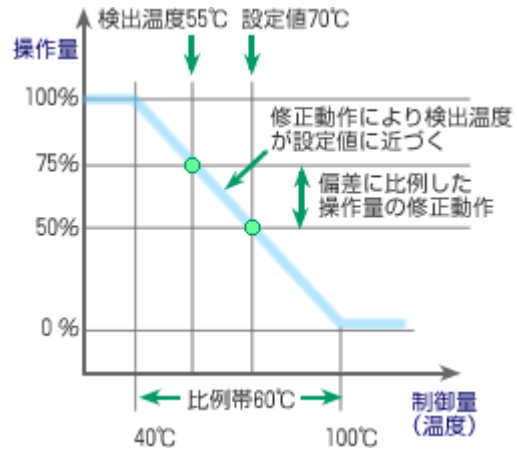


図10 比例制御

9. 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。

# 第三章 よく使われる制御方法 その2

## 1. はじめに

前回、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つに別れ、今回はそれぞれの比例制御について説明する。



## 2. 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）

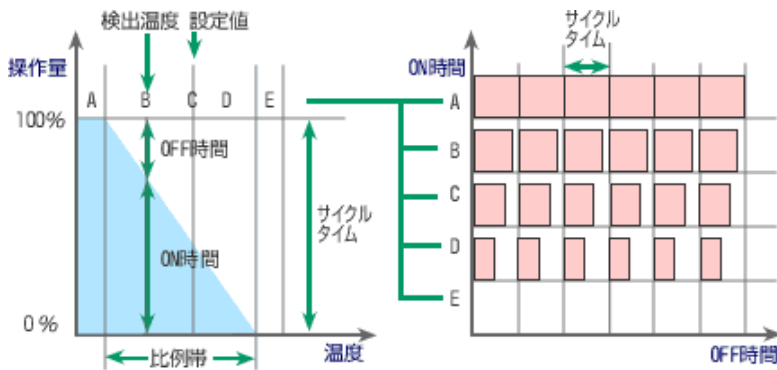


図1 時間比例制御の概要

現在の状態	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

表1 時間比例制御の制御状態

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時間とも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。



## 3. 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、検出遅れなどによる行き過ぎ量は大きくなってしまふ。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為、図3のように、ON - OFF制御と比較して、検出遅れなどによる行き過ぎ量は小さくて済む。

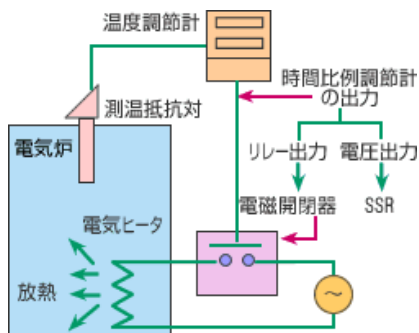


図2 電気ヒータの制御

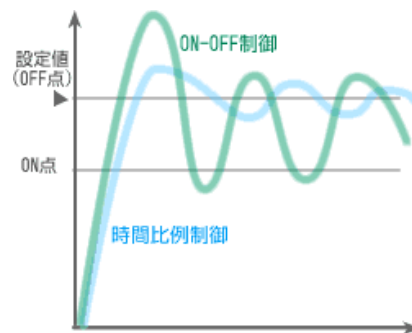


図3 時間比例とON - OFF制御の比較

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為、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を短くしすぎると、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為、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イトリレー（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。



#### 4. 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、調節計から連偏差的出力を出して、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。

連続比例制御は、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、精密試験装置など、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。

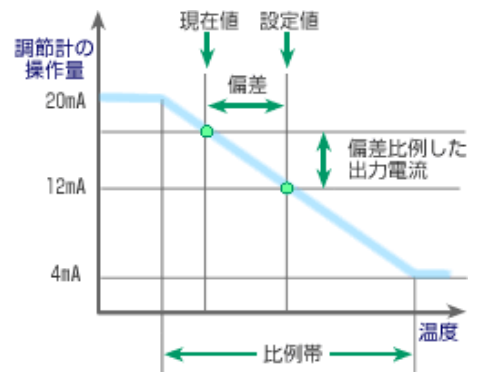


図4 連続比例制御の特性

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)のゲート回路に印可され、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)

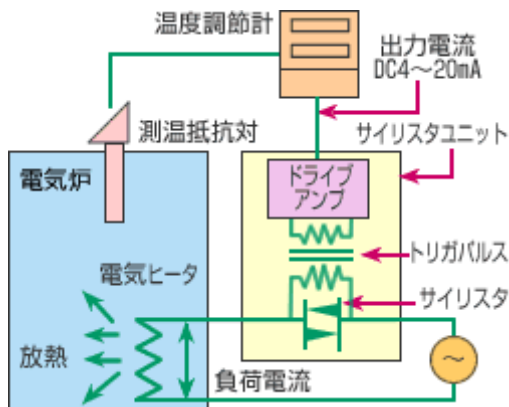


図5 サイリスタユニットによる位相角制御

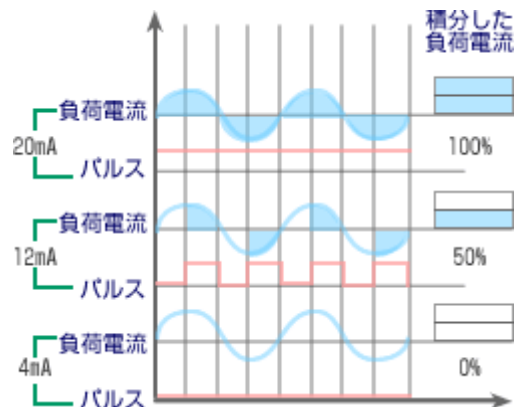


図6 電気ヒータに流れる負荷電流

### 5. 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。

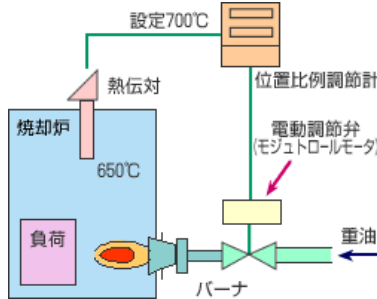


図7 燃焼炉の制御例

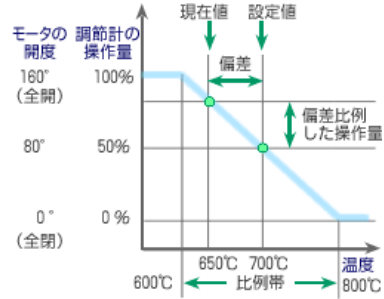


図8 位置比例制御

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、比例帯の上限值である800を越えると、モータの開度は0%（全閉）となる。

一般的にモータの開度は0～180°の範囲で回転し、操作量50%の時、モータ開度は90°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）とコントロールモータ（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為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。

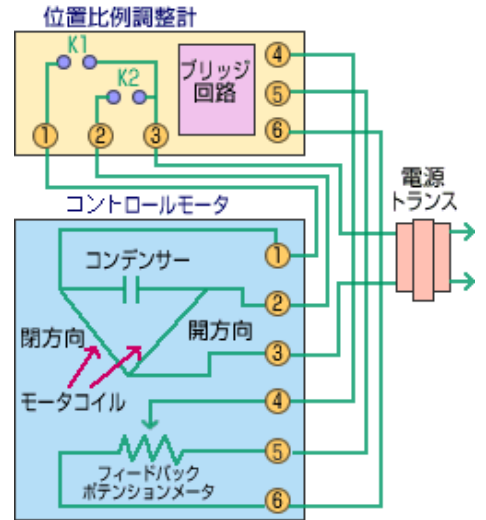


図9 位置比例制御によるモータ駆動

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、調節計のリレー接点K2が閉じ、モータの端子1-2間に電圧が印可され、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。

逆に温度が上昇すると、温度が降下した時と同様に、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2-3間に電圧が印可され、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。

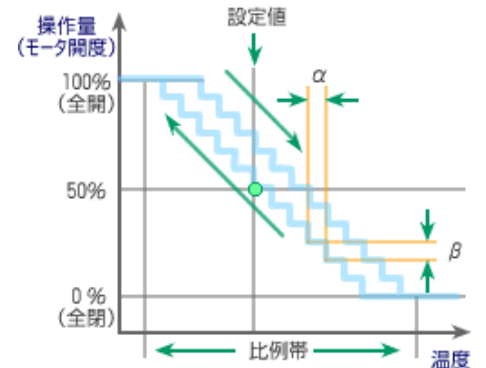


図10 モータの動作

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、温度変化が一定だけ変化すると、一定だけ動作し、温度変化がより小さい場合は、モータは動作しない。これは、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為、制御精度は悪くなる。

## 6.まとめ

今回、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。

次回は、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。



# 第四章 P I D制御について

## 1. はじめに

前回は、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。今回は、その制御方法に最もよく使われるP I D (P:比例、I:積分、D:微分)制御について説明する。基本的にP I D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(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。

## 2. 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動かす動作を言い、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)が生じる為、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。

## 3. 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為、検出温度は設定値より低いところで安定する。逆に負荷の小さな物を入れた場合は、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

冬場などは、装置の周囲温度が低い為、これに奪われる熱量が増える為、検出温度は、設定値より低めとなる。逆に夏場など、周囲温度が高い場合は、奪われる熱量が少ない為、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。

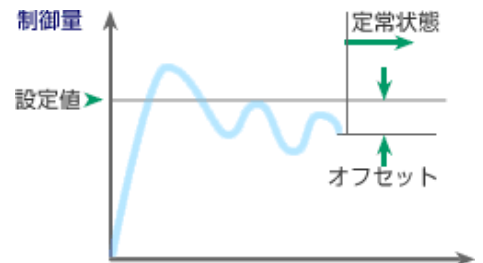


図1 オフセット

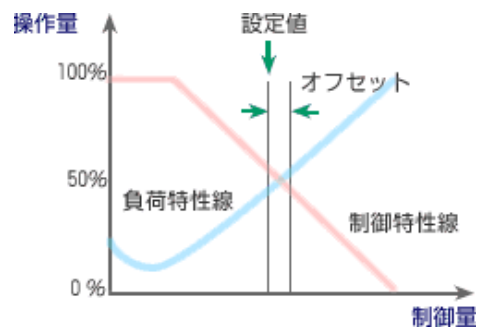


図2 オフセットの原因

## 4. マニュアルリセット(設定値手動補正)

前述のように、比例動作だけでの制御では、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済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。

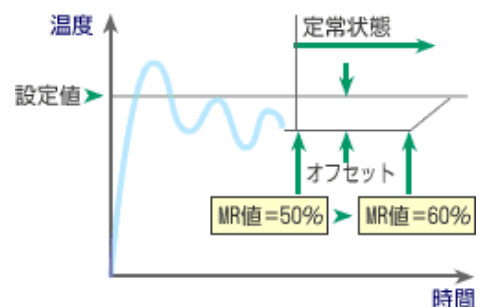


図3 マニュアルリセット

## 5. 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。

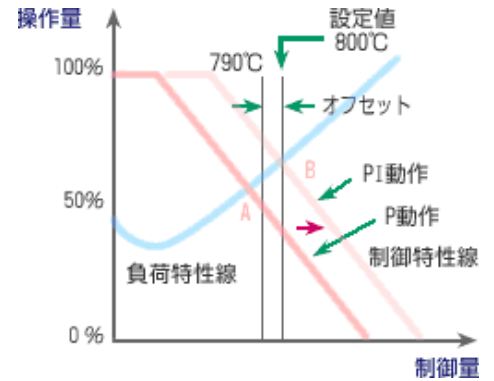


図4 積分動作

### 1) 積分動作

偏差がある場合、I動作を利かせると、その大きさに従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くならない限り出力し続ける。

### 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。

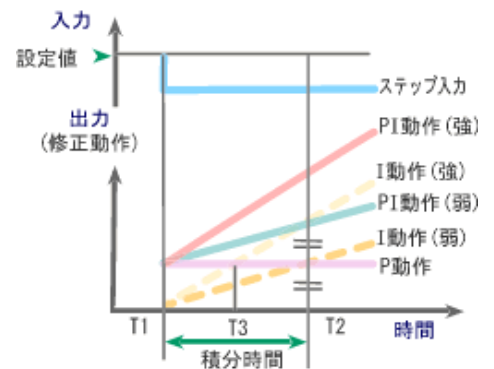


図5 積分時間の定義

### 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。

## 6. 微分動作

微分動作は（D動作）は、外乱などにより、検出温度が変化し始めると、その変化の割合に応じ、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、無駄時間（T1 - T2）となるため、調節計はあくまで無駄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。

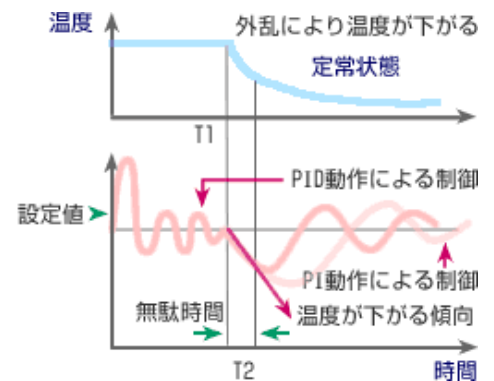


図6 微分動作

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、直に元の温度に安定させる。

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、一樣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。

### 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も、大きな出力が出てしまう為、ハンチングが生じ、制御性は安定しません。装置などによって異なるが、微分時間の目安は10～50秒ぐらいとなる。

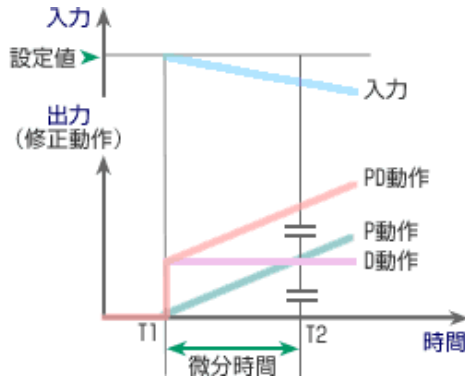


図7 微分時間の定義

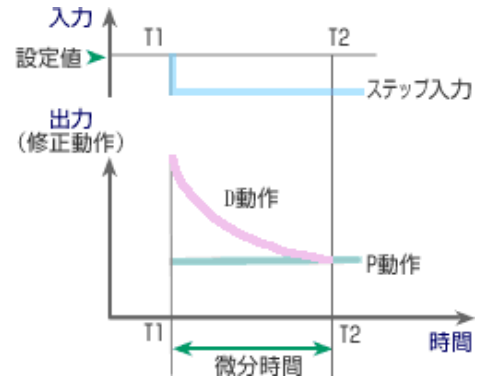


図8 ステップ入力時の微分動作

## 7. 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為、人の手による修正が必要である。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為、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など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。

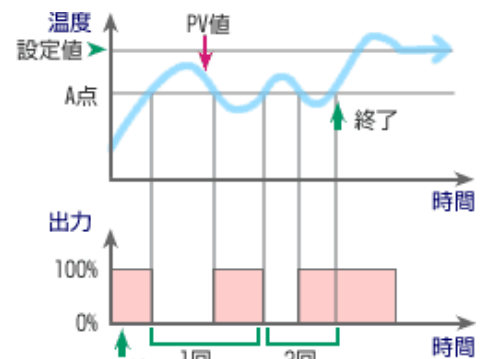


図9 オートチューニング

この時のPV値波形の振幅と周期(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となる。

## 8. 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、温度や圧力など計測するセンサ部と、バルブ・モータなどの操作部で構成される為、それぞれの組み合わせがうまくい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為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、これからの制御は、センサ部・制御部・操作部の組み合わせだけでなく、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。