

温度制御実習教材の開発

石原俊彦*

Development of educational material for temperature control experiment

Toshihiko ISHIHARA

電気エネルギー制御科では系基礎学科として制御工学 I・II, 専攻学科として自動制御の計 6 単位でフィードバック制御, サーボ機構・プロセス制御について学習するが, プロセス制御の理解を深めるための実習用として本教材を開発した. 実習は 4 h 程度, データの評価分析に更に 2 h 程度とする. 入手が容易で安価な温度調節計と SSR(Solid state relay)を使用し, ビーカの水温を例えば 60°C に維持したり, 外乱の影響に対してどのような応答が見られるかを観察記録し, 各種の制御動作を理解できるようにした. 本教材は, 平成 26 年度電気エネルギー制御科, 平成 26 年度, 27 年度セミナーで活用した.

Keywords: 温度調節計, PID 制御, オンオフ制御, SSR, フィードバック制御

1. はじめに

平成 24 年度に電気エネルギー制御科がスタートしてから 3 年目となり, 学科・実技(実験/実習)ともようやく軌道に乗ってきたところである. 特に実技科目においては実習手順書や補助資料の整備も進んできたところである. 一方, 学科目においては, 入校時の基礎数学力に大きなばらつきがあり, 効果的な訓練目標達成に支障をきたしている様子が見られる. 今回開発した教材は基礎数学力にかかわらず直感的にフィードバック制御, 特に PID 制御について理解できる実習を行うことを目標とした.

2. 本教材の対象となる制御理論

2.1 対象科目と課題 2 年次で履修する「制御工学 I」, 「制御工学 II」, 「自動制御」の計 6 単位の学科目が本教材の対象となる. これらの科目は微積分, 複素数平面, 極限の考え方など高校数学 III の内容を熟知し自在に操ることができる計算力が前提となる. 標準カリキュラムによると, 積分変換であるラプラス変換と伝達関数, 複素数平面のベクトル軌跡, 周波数応答などの内容に多くの時間を割いている. しかしながら数学力の問題から, これらの内容の理解に苦しんでいる学生が多いことが課題である. 以下にこれらの科目で扱われる制御理論を列挙した後, 教材の具体的な内容と実際に授業を行った結果を紹介する.

2.2 フィードバック制御 フィードバック制御とは, フィードバックによって制御量を目標値と比較し, それらを一致させるように操作量を生成する制御である. バイメタル式サーモスタットを用いた電気こたつやポットは簡単なオンオフ制御によるフィードバック制御の例である[1]. コンピュータの小型化, ワンチップ化により身近な電子機器の多くはさ

らに高度なフィードバック制御である PID 制御が採り入れられている. 図 1 に電熱器で水を温め, ある目標温度に保つ本実習教材のブロック図を示す.

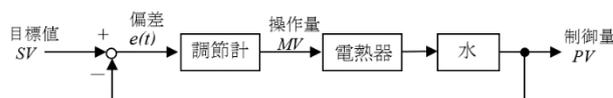


図 1 フィードバック制御のブロック図

但し図中の記号は以下を示す.

PV: Process Variable : 測定値(制御量)

SV: Set Variable : 設定値(目標値)

MV: Manipulative Variable : 操作量(出力)

$e(t)$: 偏差

図 1 より調節計は偏差入力 $e(t)$ に対して操作量 MV を生成し出力する役割を果たす.

2.3 オンオフ制御 調節計において, 設定値(SV)に対し測定値(PV)が低い場合には操作量(MV)は 100%すなわちオン, 逆に設定値(SV)に対し, 現在温度(PV)が高い場合には操作量(MV)は 0%すなわちオフとする制御であり, タイムチャートを図 2 に示す.

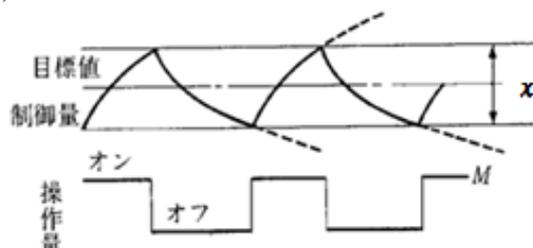


図 2 オンオフ制御

* 電気エネルギー制御科

図 2 において x で示される幅をヒステリシスまたは調節感度などと呼び、これが小さいと定常偏差や振れ幅(ハンチング)小さくなるがオンオフの頻度が高くなり、スイッチ素子の劣化を促す。また大きいと定常時の振れ幅が大きくなる。制御が簡単なのでパラメータも少なく、振れ幅の許容範囲が大きい場合には有効である。

2.4 PID 制御 比例(Proportional), 積分(Integral), 微分(Derivative)のそれぞれ頭文字をとって, PID 制御と呼ぶ。偏差 $e(t)$ に対する操作量 (MV) は下記の式で表される。

$$MV = K_p \left\{ e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right\}$$

$$= K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \dots (1)$$

(1)式の第1項, 2項, 3項がそれぞれ比例要素, 積分要素, 微分要素を表す。また, K_p , T_i , T_d はそれぞれ比例ゲイン, 積分時間, 微分時間と呼ぶ。比例ゲインの逆数を比例帯 θ [°C]と呼び, P 動作において偏差が比例帯の中にあるとき, 偏差に比例した操作量が出力される。なお, (1)式の第3項が無い場合は PI 動作であり, 第2項が無い場合は PD 動作である。

I 動作は, P 動作で発生する定常位置偏差(オフセット)を自動的に 0 となるような操作量を出力するものである。式(1)より積分時間が小さいほど I 動作が強くなる(操作量が大きく)なる。

D 動作は, 急激な外乱による変動を抑えるためのものであり, 式(1)より微分時間が大きいほど D 動作が強くなる(操作量が大きく)なる。D 動作は必ず P 動作, または PI 動作と組み合わせて, PD または PID 動作として使用される[2]。

2.4 操作量の調整 調節計で生成された操作量(%)に従って電熱器出力を調整する方法は, 調節計出力の 12/0V, すなわち電熱器のオンとオフとの時間比率を変えることによって行われる。図 3 に示すように, 例えば 50%出力時にはオン時間対オフ時間の比率が 1 : 1 になるように調節計出力により SSR*が ON/OFF を繰り返す, 結果として電熱器出力が 50%となる。制御周期 T は, 制御対象の時定数や無駄時間に対し十分に小さい値にする必要がある。本実習では 2 秒とした。

*SSR : Solid State Relay : 半導体により電流を ON/OFF するリレー。大電流を頻回に ON/OFF する場合に使用される。

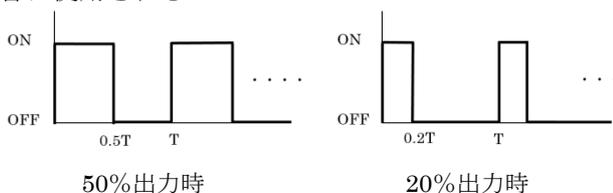


図 3 オン時間比率による電熱器出力の制御

3. 温度制御実習教材の概要

今回開発した温度制御実習教材はビーカ内の 600ml の水を 600W の電熱器(電気コンロ)で加熱し, 60°C一定に保つ制御を行うものである。構成要素は以下に示すように実際の現場で一般的に使われているものであり安価で入手が容易である。

- 1) 温度調節計 : OMRON E5CB-Q1TC (図 4)
熱電対 (K, J, T, R, S) 入力
電圧出力 (SSR 駆動用 DC12V, 21mA)
電源 : AC100~240V [3]
- 2) SSR : G3PE-215B DC12-24 (図 5)
フォトトライアック絶縁
電源相数 : 単相
出力の適用負荷 : 15A AC100~240V
入力定格電圧 : DC12~24V
ゼロクロス機能有 [4]
- 3) シース熱電対 : K 型 (図 6)
- 4) 電熱器(電気コンロ) : 300W/600W 切替式
- 5) その他 : 1000ml ビーカ, セラミック付金網等図 7 に全体図, 図 8 に結線図を示す。温度調節計に熱電対より現在温度が入力され, 温度調節計で操作量 MV が生成され 2 秒周期の ON/OFF 信号として SSR に出力される。SSR でこの ON/OFF 信号に従い電熱器の電流を ON/OFF する。



図 4 温度調節計



図 5 SSR



図 6 シース熱電対

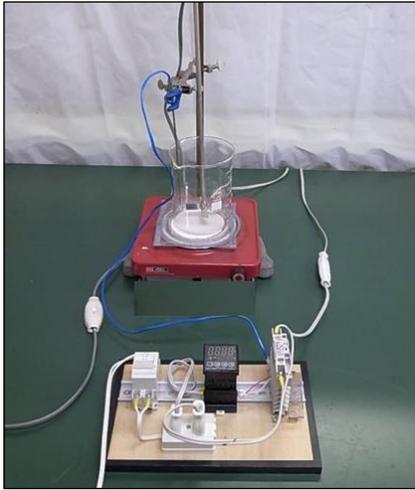


図7 全体図

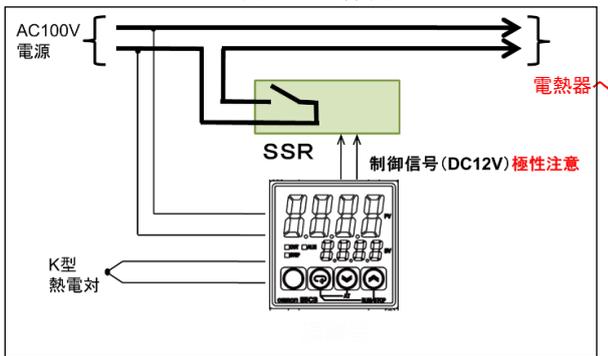


図8 結線図

4. 実習の進め方

4.1 実習準備 水 600ml をビーカーに入れ、温度調節計のオートチューニング機能を用いて各パラメータ（比例帯 θ [°C]、積分時間 T_i [秒]、微分時間 T_d [秒]）を得ておく。設定温度（SV）は 60°C とした。この時データロガーを用いて、温度上昇カーブを描くためのデータを収集しておく。今回オートチューニングにより得られた各パラメータは以下である。

比例帯 θ_p : 3.2 [°C]
 積分時間 T_i : 212 [秒]
 微分時間 T_d : 72 [秒]

4.2 実習 オンオフ制御動作、P 制御動作、PI 制御動作、PID 制御動作の 4 通りについて行う。設定温度を 60°C とし加熱を開始し約 1 時間後 60°C 付近で安定したところでデータロガーによる計測を開始し、約 10 分後に外乱として室温の水 50ml を投入する。その後約 80 分間、この外乱に対する応答を見て制御状態を評価する。

1) オンオフ制御動作

温度調節計の初期設定でオンオフ制御を選択し、ヒステリシス（調節感度）を 0.2°C とした。結果を図 9 に示す。4°C 以上のオーバーシュートが発生し、ハンチング幅は 2°C 程度である。

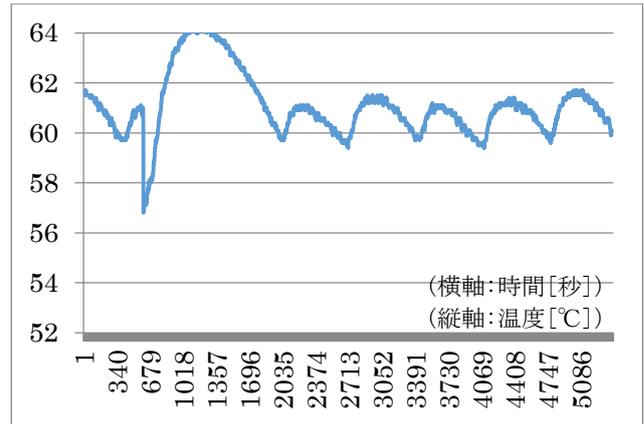


図9 オンオフ制御の応答

2) P（比例）制御動作

温度調節計の初期設定で PID を選択し、積分時間設定と微分時間設定を無効とすると P 制御動作となる。比例帯を 3.2°C とした。結果を図 10 に示す。3°C 程度のオーバーシュートがあるが、オンオフ制御のようなハンチングは起こっていない。2°C 近くのオフセットが残る。

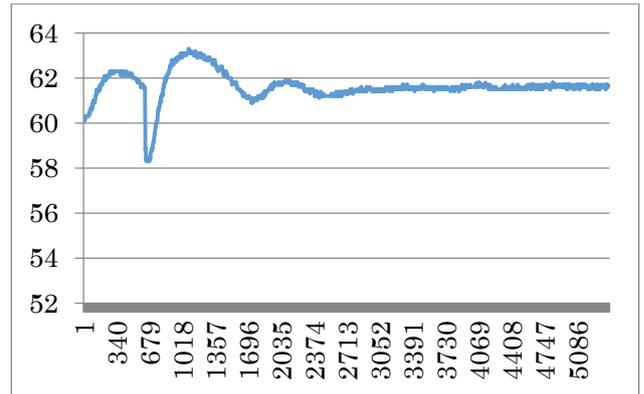


図10 P 比例制御動作の応答

3) PI（比例, 積分）制御動作

温度調節計の初期設定で PID を選択し、微分時間設定を無効とすると PI 制御動作となる。比例帯 3.2°C、積分時間 212 秒とした。結果を図 11 に示す。3°C 程度のオーバーシュートがあり、1°C 程度のハンチングがある。オフセットは無くなった。

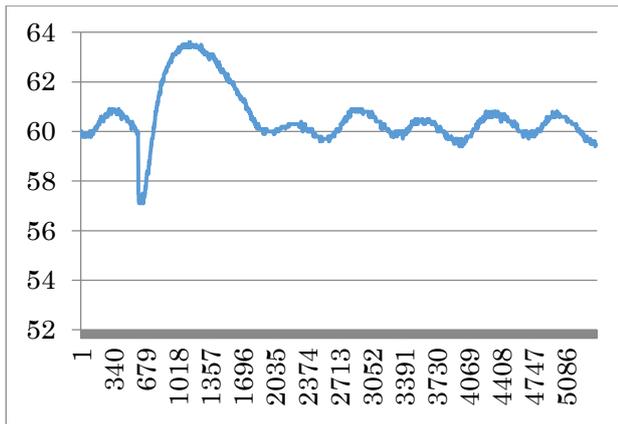


図 11 PI 制御動作の応答

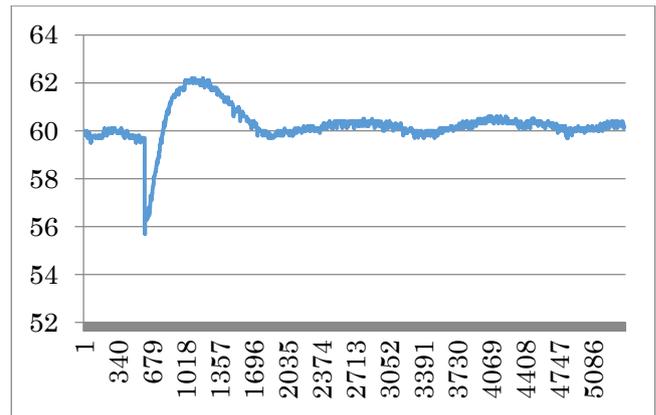


図 12 PID 制御動作の応答

4) PID (比例, 積分, 微分) 制御動作

温度調節計の初期設定で PID を選択し, 比例帯 3.2°C , 積分時間 $212[\text{秒}]$, 微分時間 $60[\text{秒}]$ とした。結果を図 12 に示す。 2°C 程度のオーバーシュートがあり, ハンチング幅は PI 制御より良好である。オフセットは無い。

以上の結果より, PID 制御が最も良好な応答となった。

5. 終わりに

本教材を用いて水温変化を観察評価することでオンオフ制御, P 制御, PI 制御, PID 制御の各動作の特徴が直感的に理解できるようになった。

今回は温度調節計のオートチューニング機能で得られた各パラメータを用い, 外乱に対する応答により評価したが, 今後, ジークラーニコルスの過渡応答法や限界感度法によりパラメータを求め, 今回と同様の方法により評価したい。

文献

- [1] 高橋寛・ほか 2 名：“絵ときでわかる自動制御”, pp.171-173, オーム社, 2010.
- [2] 広井和男：“PID 制御のお話”
http://www.m-system.co.jp/rensai/rensai_top.htm#pid
- [3] オムロン温度調節計 E5CB 取扱説明書
- [4] オムロン SSR G3PE 取扱説明書