

4. PID による温度制御

電気電子工学科 X 年 X 組 番号 氏名

2025 年 12 月 4 日

1 目的

本実験では、ワンボードマイコンを用いたヒーターの温度制御系を対象として、PID 制御の実装およびパラメータ調整を行った。各制御要素（比例・積分・微分）が応答特性に与える影響を定量的に把握するとともに、ステップ応答法による最適な PID パラメータの設計手法を習得することを目的とした。

2 原理

PID 制御は、フィードバック制御において最も一般的な手法の一つであり、偏差に対する比例 (Proportional), 積分 (Integral), 微分 (Derivative) の 3 要素を用いて操作量を決定する。

2.1 PID 制御の伝達関数

制御対象への操作量 $u(t)$ は、目標値と出力値の偏差 $e(t)$ を用いて式 (1) のように表される。

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

これをラプラス変換し、伝達関数 $K_C(s)$ として表すと式 (2) となる。

$$K_C(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (2)$$

ここで、 K_P は比例ゲイン、 K_I は積分ゲイン、 K_D は微分ゲインである。また、 $T_I (= K_P / K_I)$ は積分時間、 $T_D (= K_D / K_P)$ は微分時間と定義される。この制御系のブロック図を図 1 および図 2 に示す。

各パラメータが制御系に及ぼす影響は以下の通りである^[1]。

比例動作 (K_P) 偏差に比例した操作量を出力する。 K_P の増加に伴い応答速度は向上し定常偏差は減少するが、過大なゲインは振動的な挙動を招く。

積分動作 (K_I または T_I) 偏差の積分値に応じた操作量を出力する。低周波成分のゲインが無限大となるため、定常偏差を完全に除去できる。

微分動作 (K_D または T_D) 偏差の変化率に応じた操作量を出力する。未来の偏差を予測して補償するため、速応性の向上と振動抑制（ダンピング）に寄与する。

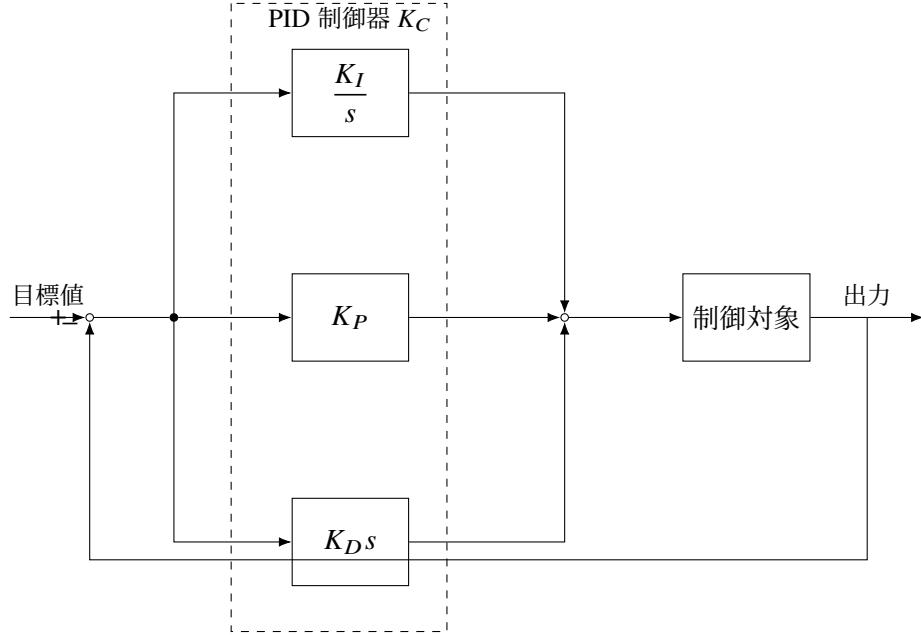


図 1 PID 制御のブロック図（並列型）

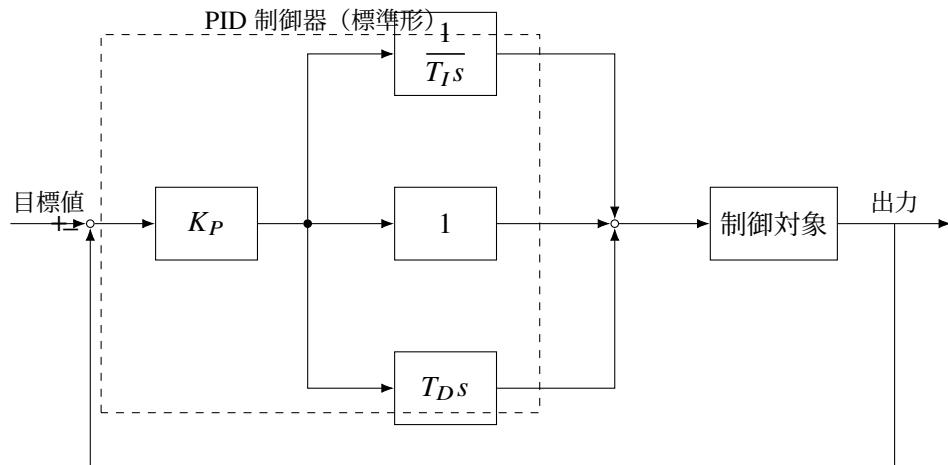


図 2 PID 制御のブロック図（標準型）

2.2 パラメータ調整法（ステップ応答法）

制御対象が開ループにおいて安定であり、式(3)のような1次遅れ系とむだ時間要素で近似できる場合、ステップ応答法によるパラメータ調整が可能である。

$$G_P(s) = \frac{K}{1 + sT} e^{-Ls} \quad (3)$$

図3に示すステップ応答波形から、むだ時間 L および時定数 T （または変曲点の接線から求めた傾き R ）を読み取り、表1に基づき各パラメータを設定する。

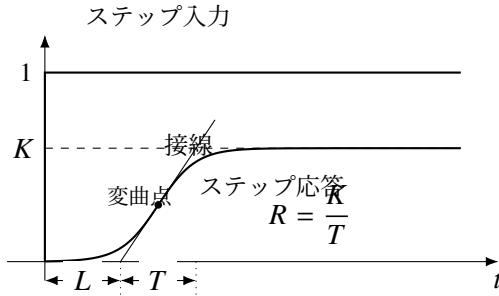


図 3 ステップ応答法におけるパラメータの読み取り

表 1 ステップ応答法による PID パラメータ調整則

制御則	K_P	T_I	T_D
P 制御	$\frac{1}{RL}$	—	—
PI 制御	$\frac{0.9}{RL}$	$3.3L$	—
PID 制御	$\frac{1.2}{RL}$	$2L$	$0.5L$

3 実験方法

3.1 使用機器

本実験で使用した主要機器を表 2 に示す.

表 2 使用機器一覧

品名	型番	備考
温度制御実習装置	KENTAC3522S	ヒーター, 温度センサ内蔵
制御用 PC	—	Windows OS, PidMonitor インストール済

3.2 実験手順

ヒーターの温度を制御量とし, 目標温度を 100°C に設定して以下の実験を行った.

3.2.1 ON・OFF 制御

制御用ソフトウェア (PidMonitor) の Auto モードを解除し, 手動による ON・OFF 制御を行った. MV (操作量) を 50.0 % に設定し, PV (現在温度) が 100°C に到達するまで加熱した. 100°C を超過した時点で MV を 0.0 % とし, 下回った時点で再度 50.0 % に戻す操作を繰り返し, その際の温度挙動 (ハンチング) を確認した.

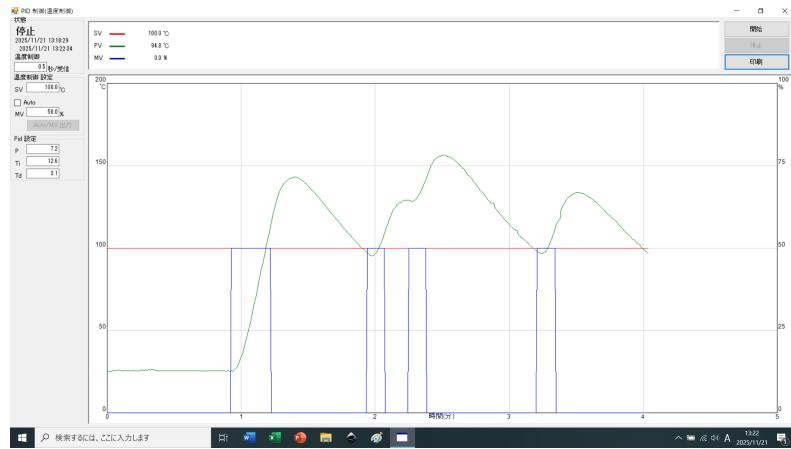
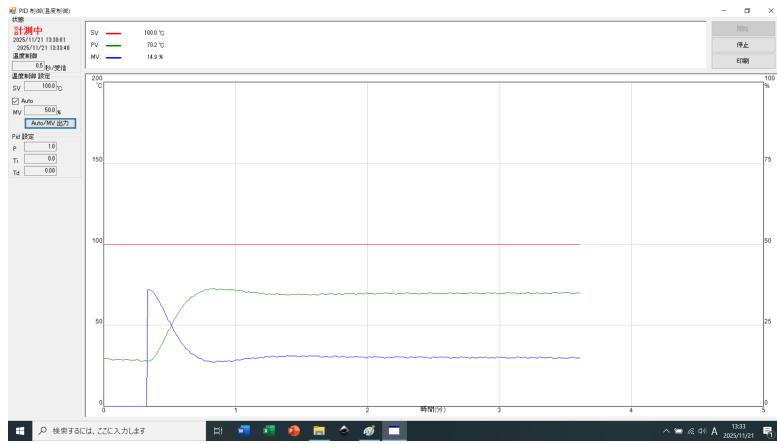


図 4 手動 ON/OFF 制御時の温度挙動

3.2.2 P 制御

積分時間 $T_I = 0$ (実験装置仕様), 微分時間 $T_D = 0$ とし, 比例制御のみを行った. 比例ゲイン K_P を 1, 5, および 100 に設定した場合の温度変化を測定した. 以下にそれぞれの応答波形を示す.



(a) $K_P = 1$



(b) $K_P = 5$

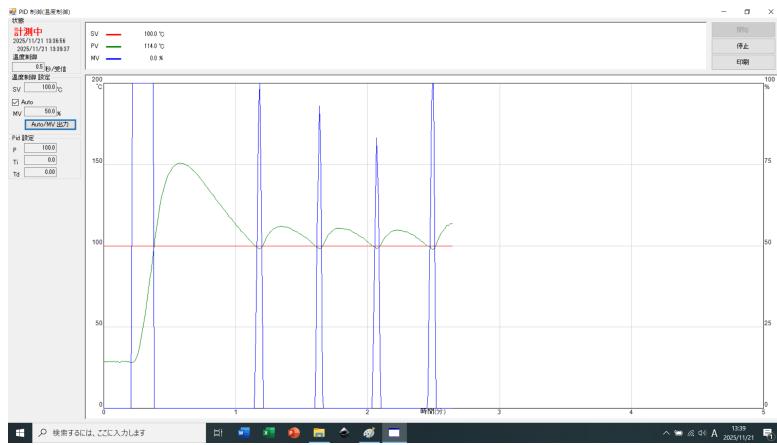
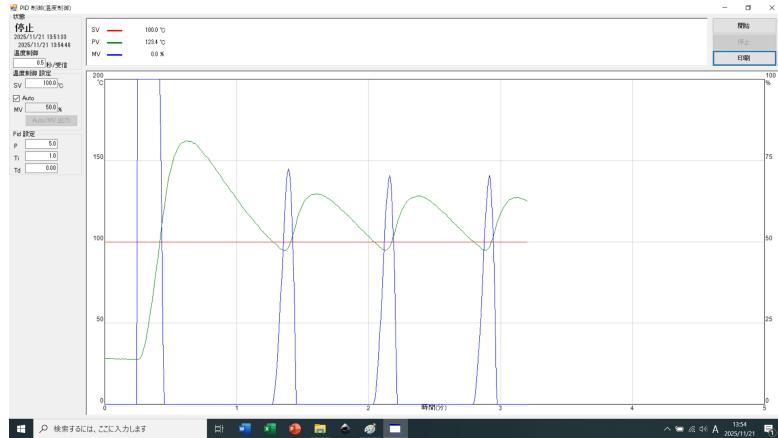


図 5 P 制御の比較 (K_P の違い)

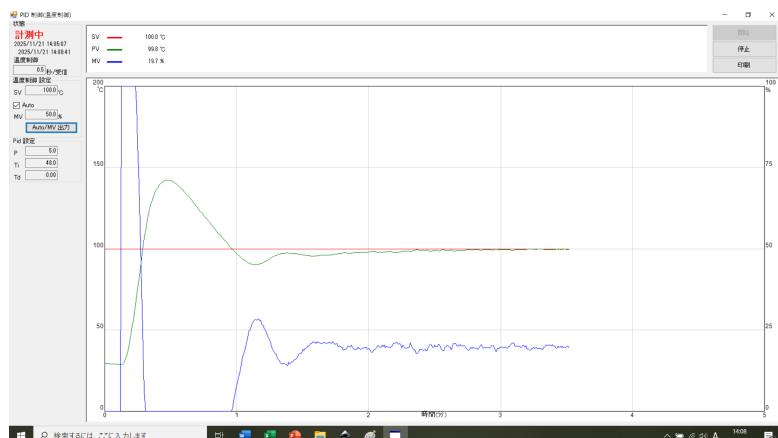
その後、3 分以内に目標温度 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ の範囲に収束する最適な $K_P = 5$ を試行錯誤により決定した。

3.2.3 PI 制御

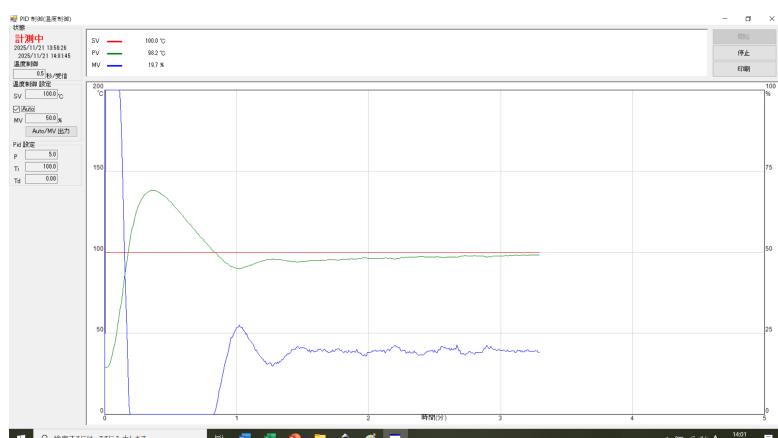
K_P を 5 に固定し, $T_D = 0$ として PI 制御を行った. 積分時間 T_I を 1, 48, および 100 に設定した場合の応答を確認した. 以下に代表的な波形を示す.



(a) $T_I = 1$



(b) $T_I = 48$



(c) $T_I = 100$

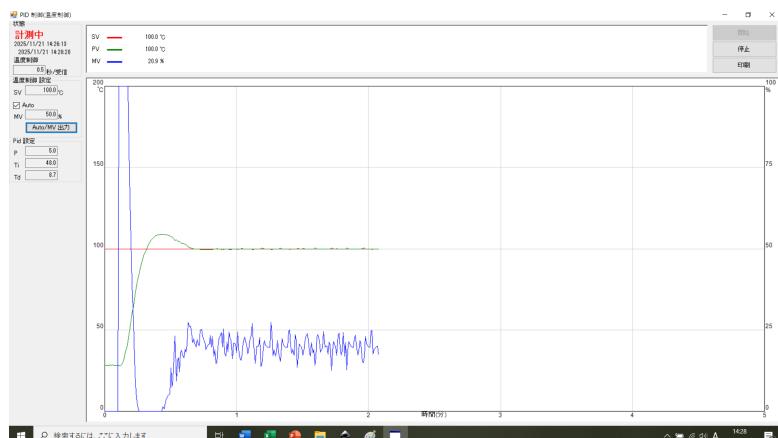
図 6 PI 制御における積分時間 T_I の影響 ($K_P = 5$ 固定)

3.2.4 PID 制御

K_P および T_I をそれぞれ 5 および 48 に固定し、PID 制御を行った。微分時間 T_D を 1, 8.7, および 100 に設定した場合の応答を確認した。以下に代表的な波形を示す。



(a) $T_D = 1$



(b) $T_D = 8.7$



(c) $T_D = 100$

図 7 PID 制御における微分時間 T_D の影響 ($K_P = 5, T_I = 48$ 固定)

その後、2分以内に目標温度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ の範囲に収束する最適な $T_D = 8.7$ を決定した。

3.2.5 ステップ応答法による同定

ステップ応答法を用いて制御対象のパラメータ同定を行った。

1. ヒーター温度が室温で安定している状態から、MVを10%～20%の範囲でステップ状に入力した。
2. 温度が定常状態に達した際の入力変化幅 $U [\%]$ および温度変化幅 $Y [\%]$ を式(5), (4)により求めた。
3. 定常ゲイン K および、図3に基づく L, T, R を算出した。

$$U = (\text{最終入力} - \text{初期入力}) \quad (4)$$

$$Y = \frac{(\text{最終温度} - \text{初期温度})}{200} \times 100 \quad (5)$$

$$K = \frac{Y}{U} \quad (6)$$

$$R = \frac{K}{T} \quad (7)$$

得られたパラメータを基に、表1を用いて K_P, T_I, T_D を算出し、これを用いた制御実験を行った。

4 結果および考察

4.1 各制御手法における応答特性の比較

本実験で観測されたP制御、PI制御、PID制御の応答波形を図5、図6、図7に示す。P制御では、ゲイン K_P を大きくすることで立ち上がり時間が短縮されたが、残留偏差（オフセット）が確認された。これは原理上、積分要素がないため定常偏差を除去しきれないことに起因する。一方、PI制御では T_I の導入により残留偏差が解消された。しかし…[ここに実験結果に基づく考察を記述]

4.2 パラメータ設定値による挙動の変化

K_P, T_I, T_D の各値を極端に変化させた際（1および100）の挙動について考察する。微分時間 T_D を過大に設定したケースでは、測定ノイズの増幅により操作量が激しく変動する現象が確認された。これは…[ここに物理的・数学的な考察を記述]

4.3 ステップ応答法による設計値の妥当性

ステップ応答法により算出したパラメータを用いた制御結果は、試行錯誤法で得られた結果と比較して…[ここに定量的な比較考察を記述]

5 報告事項

以下の制御対象 $G(s)$ に対し、ステップ応答法（表 1）を用いて PID パラメータを設計した結果を示す。

$$G(s) = \frac{5}{2s+4} e^{-3s} \quad (8)$$

まず、式を標準形 $K/(1+sT) \cdot e^{-Ls}$ に変形すると、

$$G(s) = \frac{1.25}{1+0.5s} e^{-3s} \quad (9)$$

となる。これより $K = 1.25, T = 0.5, L = 3$ が得られる。したがって、 $R = K/T = 2.5$ となり、PID 制御の各パラメータは以下のように算出される。

$$\begin{aligned} K_P &= \frac{1.2}{RL} = \frac{1.2}{2.5 \times 3} = 0.16 \\ T_I &= 2L = 6.0 \\ T_D &= 0.5L = 1.5 \end{aligned}$$

参考文献

- [1] 豊橋技術科学大学・高等専門学校制御工学教育連携プロジェクト 編:『制御工学』, 実教出版,
pp.146-147, 2012.