

**ペルチェコントローラ
PLC-24V10A
テクニカルマニュアル
PID 制御パラメータの設定
(Rev. 1.10)**

2016年5月26日
株式会社 ティーエスラボ

目次

1. 注意事項	.....	3 ページ
2. 使用するソフトウェア	.....	3 ページ
3. PCとの接続	.....	4 ページ
4. PID制御の基本	.....	5 ページ
5. 電源電圧とペルチェ駆動電圧／電流について	.....	6 ページ
6. 限界感度法によるPID制御パラメータの設定	.....	7 ページ
7. ステップ応答法によるPID制御パラメータの設定	.....	17 ページ
8. 微分制御の効果について	.....	22 ページ
9. 応答性改善のヒント	.....	23 ページ
変更履歴	.....	24 ページ

1. 注意事項

本マニュアルで説明しているPID制御パラメータ設定方法は、「限界感度法」と「ステップ応答法」と呼ばれる2種類の方法です。

「限界感度法」は、制御ゲインを徐々に上げながら実験を行い、意図的に制御の振動状態を作りだし、そこから最適なパラメータを求める方法です。

「ステップ応答法」は、無制御状態でステップ入力を加えた時の温度応答を観測し、そこから最大温度傾斜とむだ時間を求め、最適なパラメータを決定する方法です。

いずれの方法でも、温度応答を観測する過程で、実際の動作温度が目標として設定した温度を超える（上回るまたは下回る）場合が発生します。
もし、制御対象物の許容温度範囲を超える可能性がある場合は、これら方法は実施しないで下さい。

2. 使用するソフトウェア

PID制御パラメータの設定を行うためには、以下のソフトウェアをPCにインストールする必要があります。

- ① 制御用ソフト “PLC-24V10A Controller.exe”
PLC-24V10AをPCから制御するソフトウェアです。
- ② 設定用ソフト “PLC-24V10A Manager.exe”
PLC-24V10Aの各種パラメータを設定、確認するためのソフトウェアです。

これらのソフトウェアのインストール方法は、ソフトウェアのマニュアルを参照して下さい。

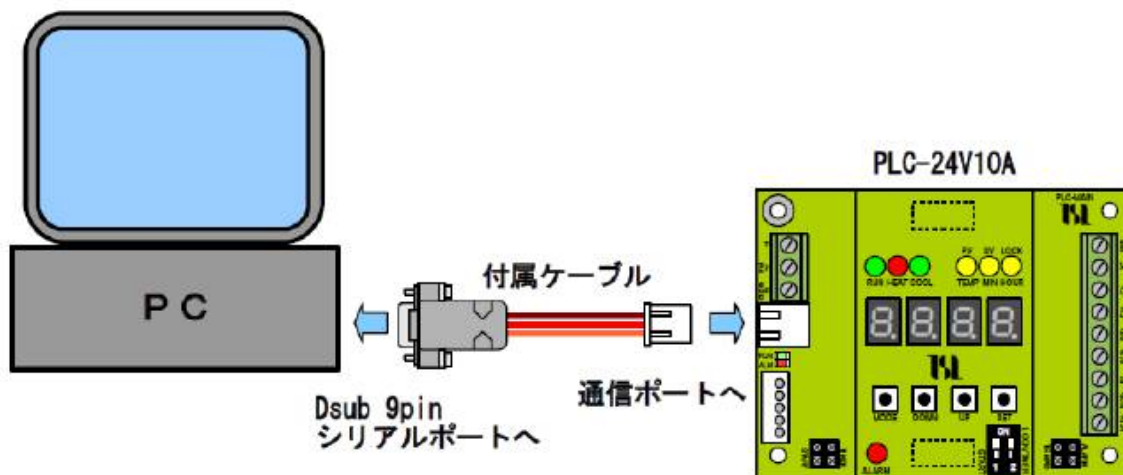
【重要】

制御用ソフト“PLC-24V10A Controller.exe”を用いて、温度応答を観測する際、温度計測の間隔が1秒間隔のため、それよりも早い応答の制御系の場合は正しい温度応答が観測できない場合があります。
その場合は、温度応答を別の計測器（温度ロガーなど）で観測してください。

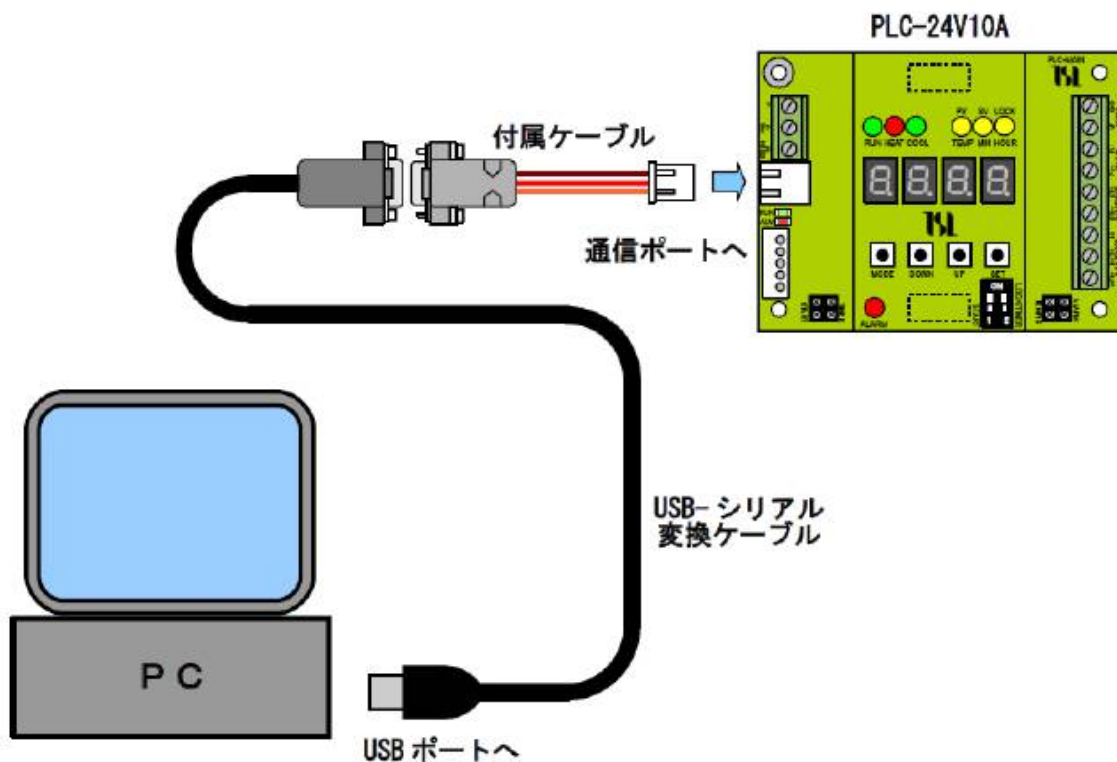
3. PCとの接続

ペルチェコントローラ PLC-24V10A と PC を通信ケーブル（PLC-24V10A に付属）で接続します。

※ケーブルを延長する場合は、Dsub9pin メス-Dsub9pin オス のストレートケーブルを使用して下さい。



PC にシリアルポート（RS-232）が無い場合は、別途 USB-シリアル変換ケーブルを用意して下さい。



4. PID制御の基本

一般にペルチェ素子を用いた温度制御には、以下の3つの制御方式を組み合わせたものが用いられます。

- ① 比例制御 (P制御; Proportional)
- ② 積分制御 (I制御; Integral)
- ③ 微分制御 (D制御; Differential)

PLC-24V10Aの場合は、比例制御、積分制御、微分制御を組み合わせた「PID制御」を採用しています。

PID制御では、操作量MV (温度を変化させるためのペルチェ素子の駆動量) は、次の式で計算されます。(デジタルPID制御の場合)

$$MV(n) = K_p \times [\Delta T(n) + (\Delta t / T_i) \times \sum \Delta T(i) + (T_d / \Delta t) \times \{\Delta T(n) - \Delta T(n-1)\}]$$

$$= K_p \times \Delta T(n) + K_i \times \sum \Delta T(i) + K_d \times \{\Delta T(n) - \Delta T(n-1)\}$$

MV(n): 操作量(n回目のサンプリング時)

$\Delta T(n)$: 温度偏差 (目標温度と現在温度の差)

$\sum \Delta T(i)$: 温度偏差の累積値

$\Delta T(n-1)$: 1回前のサンプリング時の温度偏差

Δt : サンプリング周期

T_i : 積分時間

T_d : 微分時間

K_p : 比例係数

K_i : 積分係数 = $K_p \times (\Delta t / T_i)$

K_d : 微分係数 = $K_p \times (T_d / \Delta t)$

※PLC-24V10AのPID制御パラメータ設定は、 K_p 、 K_i 、 K_d の数値を入力します。

5. 電源電圧とペルチェ駆動電圧／電流について

PLC-24V10A はペルチェ素子の駆動に、PWM 電圧駆動方式を採用しています。
ペルチェ素子には、ペルチェ駆動用電源端子 (VP) に加えた電圧をスイッチング素子で PWM 変調した電圧が加わります。
このため、電源電圧 (VP) は、以下の条件を満足するように設定する必要があります。

① $VP \leq V_{max}$

※ V_{max} : ペルチェ素子の最大電圧

② $VP \leq R_p \times I_{max} + V_s$

※ R_p : ペルチェ素子の内部抵抗

I_{max} : ペルチェ素子の最大電流

V_s : ペルチェ素子の内部熱起電力

【重要】

電源電圧は、ペルチェ素子の駆動条件が、ペルチェ素子の最大電圧、最大電流を超えないように設定してください。

【ヒント】

必ずしも、電源電圧 (VP) を高い電圧に設定すれば、ペルチェ素子の能力が高まるわけではありません。
特に冷却動作を行う場合は、駆動電流、電圧が大きすぎると、ペルチェ素子自体が消費する電力による発熱で冷却能力が低下してしまう場合があります。
通常はペルチェ素子の最大電流、最大電圧の規格値に対して、駆動電力値 (電流×電圧) が 70～80%程度になるように設定した方が、より高い能力が得られます。

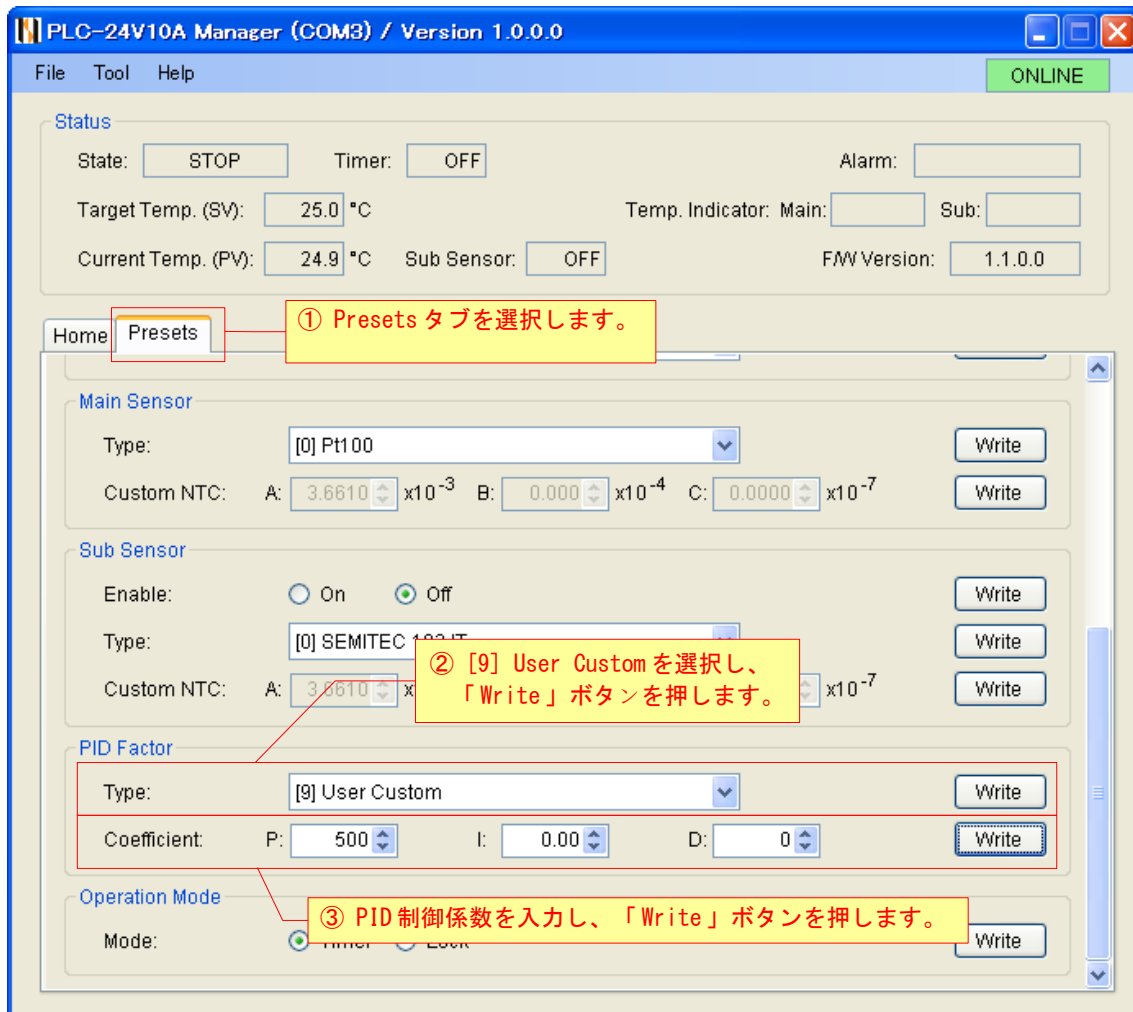
6. 限界感度法によるPID制御パラメータの設定

1) 限界感度 Ku を求める

まず、 $K_i=0$ 、 $K_d=0$ に設定し、 K_p を徐々に大きくしていきステップ応答（目標値をステップ的に変化させたときの制御温度の応答）を観測します。 K_p を大きくしていくと、オーバーシュートが発生するようになり、さらに大きくすると振動状態（目標値を中心として温度が上下する状態が継続）が発生します。振動状態となる最小の K_p を限界感度 (K_u) と呼びます。

1-1) K_p 、 K_i 、 K_d を PLC-24V10A に設定する

- ・ PLC-24V10A の電源の ON し、通信ケーブルを接続し、“PLC-24V10A Manager.exe” を起動して下さい。
- ・ Serial Port のプルダウンメニューで適切な COM ポート番号を選択し、「開始」ボタンを押して、PC と PLC-24V10A を通信状態にしてください。
- ・ 「Presets」のタブをクリックし、PID Factor の Type を「[9] User Custom」にして「WRITE」を押すと、Coefficient の入力欄が活性化され、PID 制御の係数の K_p 、 K_i 、 K_d が入力できるようになります。
- ・ 数値を入力後「WRITE」を押すと PID 制御の係数が PLC-24V10A に設定されます。



1-2) ステップ応答を測定する

- ・ 設定用ソフト“PLC-24V10A Manager.exe”を一旦終了します。
 ※終了しないと通信ポートが開放されないため、制御用ソフトからのアクセスできません。
- ・ 制御用ソフト “PLC-24V10A Controller.exe”を起動します。
- ・ RS232 のプルダウンメニューで適切な COM ポート番号を選択し、「開始」ボタンを押して、PC と PLC-24V10A を通信状態にしてください。
- ・ Program Mode のタブを選択し、実際に制御したい温度範囲に合わせて温度プロファイルを作成してください。
 ※目標温度の遷移時間をゼロに設定すると、ステップ応答のプロファイルが作成できます。
 実施例では 25℃→45℃→75℃→5℃→25℃と変化するプロファイルを作成しています。
 ※制御応答は目標温度によって異なりますので、実際に制御したい温度範囲をカバーするようなプロファイルを作成してください。
 一般的に、目標温度が室温よりやや高めの際に振動性の応答になりやすく、低い温度／高い温度から室温付近に戻る時がオーバーシュート／アンダーシュートが発生しやすくなります。
- ・ START ボタンを押すと温度制御動作を開始し、温度トレース画面に温度測定値の時間変化がグラフで表示されます。

① COMポートを選択し「開始」ボタンを押す。ボタン表示が「停止」のときは通信中、「開始」のときは通信停止中です。

赤：目標温度（温度プロファイル）
 緑：温度センサー計測温度

温度	時間	分
1	25	1
2	45	0
3	45	2
4	75	2
5	75	0
6	5	3
7	5	0
8	25	2
9	25	0
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		

② ステップ応答評価用の温度プロファイルを設定します。

時間スケールはPCの時計時刻を表示しています。
 ※目盛りは温度プロファイルの合計時間により変化します。

1-3) ステップ応答の評価～限界感度 K_u を求める

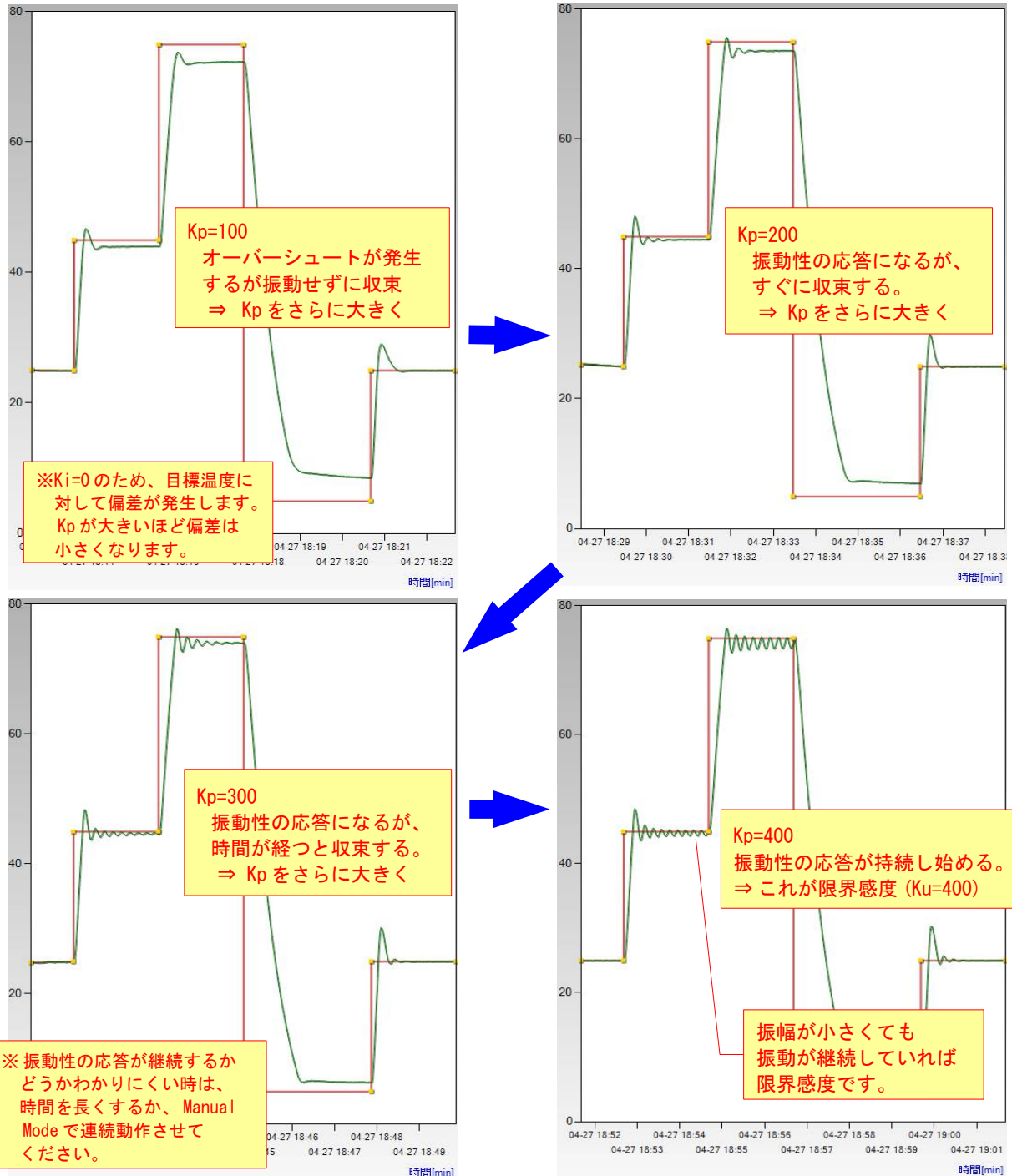
測定したステップ応答を評価します。

限界感度(継続的な振動状態)に到達していない場合は、 K_p をさらに大きい値に設定して、再度ステップ応答を測定します。

継続的な振動状態の応答の場合は、 K_p をさらに小さい値に設定して、再度ステップ応答を測定します。

※ K_p の設定範囲は、0 から 999 までの整数です。

※再度 K_p の設定を行う場合には、制御用ソフト“PLC-24V10A Controller.exe”の通信を停止してから、設定用ソフト“PLC-24V10A Manager.exe”を起動して下さい。



2) 振動周期 Pu を求める

限界感度状態での振動周期を求めます。

以下の例では、目標温度 75°C で動作中の温度応答から振動周期を求めています。

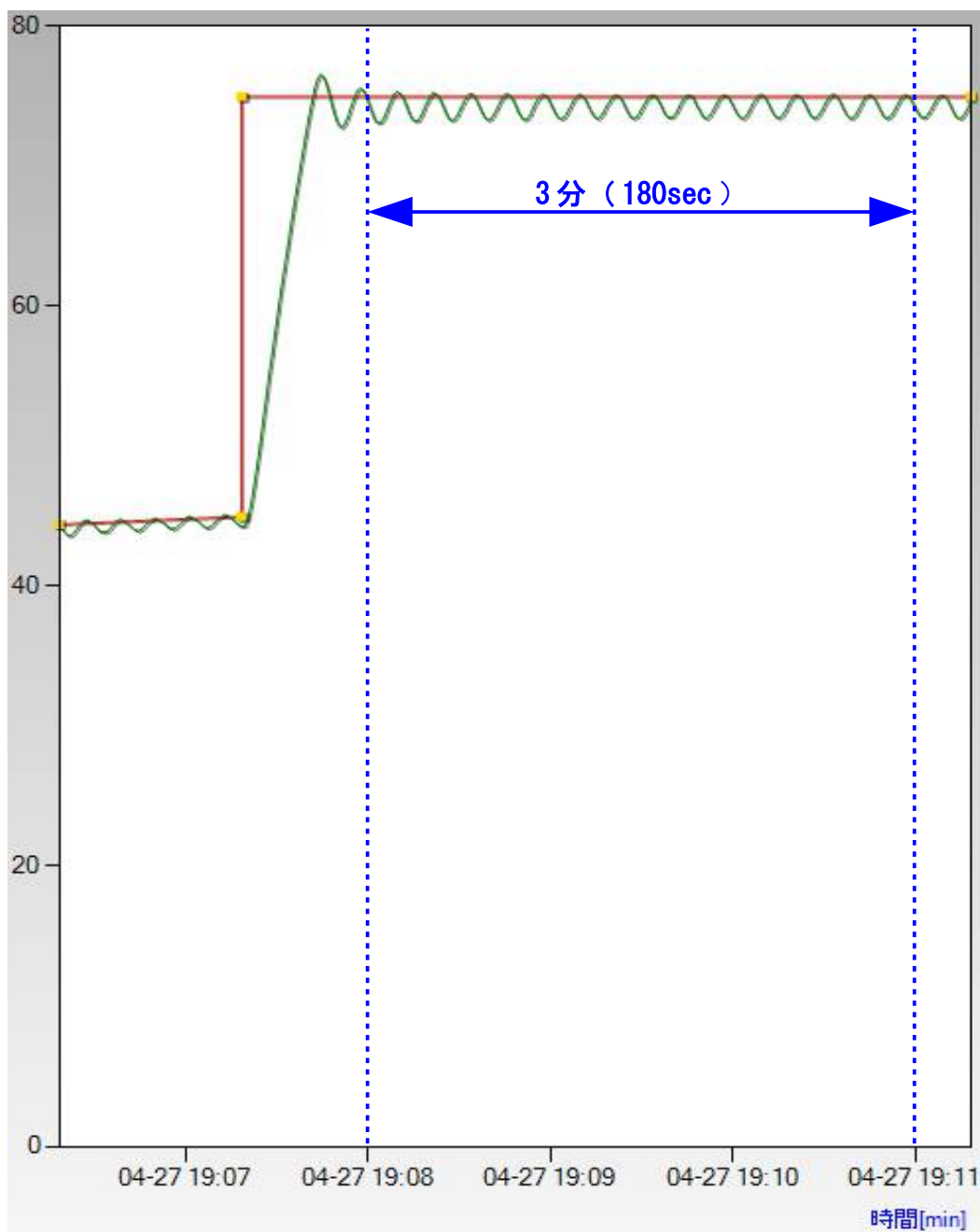
3分(180[sec])間に振動回数が15回なので、

$$\text{振動周期 } P_u = 180[\text{sec}] / 15 = 12[\text{sec}]$$

となります。

※限界感度や振動周期は、制御系により大きく異なります。

応答性のよい(遅れ要素が少ない)制御系では限界感度が高くなり、周期が短くなる傾向があります。



3) 最適な比例係数 K_p 、積分係数 K_i 、微分係数 K_d を計算する

3-1) PID 制御の場合

以上の実験により求められた限界感度 K_u および振動周期 P_u から、最適な比例係数 K_p 、積分係数 K_i 、微分係数 K_d を計算します。

まず、以下の表から比例係数 K_p 、積分時間 T_i 、微分時間 T_d を計算します。

条件		K_p	T_i	T_d
①	応答性重視	$0.6 \times K_u$	$0.5 \times P_u$	$0.0125 \times P_u$
②	安定性重視	$0.3 \times K_u$	$1.5 \times P_u$	$0.0125 \times P_u$

※PLC-24V10A の内部処理に適合させるため、一般的なPID制御の計算式とは係数が異なる場合があります。

積分時間 T_i から、積分係数 K_i を計算します。

$$K_i = K_p \times (\Delta t / T_i)$$

※ K_i の設定範囲は、0.00 から 9.99 の 0.01 単位です。

微分時間 T_d から、微分係数 K_d を計算します

$$K_d = K_p \times (T_d / \Delta t)$$

※内部でフィルタリング処理を行っているため、温度変化の状況により微分制御の効果が異なります。温度応答を観測しながら適切な値を設定してください。

・振動周期が短い場合は小さく、長い場合は大きく設定してください。

・オーバーシュートを抑えたい時は大きく設定してください。

※ K_d の設定範囲は、0 から 999 の整数です。

※ Δt : サンプル周期 PLC-24V10A の場合 0.05 [sec]

実施例の $K_u=400$ 、 $P_u=12$ を当てはめて計算すると、

$$\begin{aligned} \text{条件①} \quad K_p &= 0.6 \times 400 = 240 \\ K_i &= 240 \times \{0.05 / (0.5 \times 12)\} = 2.00 \\ K_d &= 240 \times \{(0.0125 \times 12) / 0.05\} = 720 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{条件②} \quad K_p &= 0.3 \times 400 = 120 \\ K_i &= 120 \times \{0.05 / (1.5 \times 12)\} = 0.33 \\ K_d &= 120 \times \{(0.0125 \times 12) / 0.05\} = 360 \end{aligned}$$

となります。

3-2) PI 制御の場合

微分制御を使用せず、PI 制御を行う場合は以下の表のように計算します。
※この場合、Kdには"0"(ゼロ)を入力してください。

条件		Kp	Ti	Td
①	応答性重視	$0.45 \times Ku$	$0.83 \times Pu$	-
②	安定性重視	$0.25 \times Ku$	$2 \times Pu$	-

※PLC-24V10Aの内部処理に適合させるため、一般的なPID制御の計算式とは係数が異なる場合があります。

実施例のKu=400、Pu=12 を当てはめて計算すると、

$$\begin{aligned} \text{条件① } K_p &= 0.45 \times 400 = 180 \\ K_i &= 180 \times 0.05 / (0.83 \times 12) = 0.90 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{条件② } K_p &= 0.25 \times 400 = 100 \\ K_i &= 100 \times 0.05 / (2 \times 12) = 0.21 \end{aligned}$$

となります。

4) Kp、Ki、Kd をペルチェコントローラに設定する

画面例は、設定用ソフト“PLC-24V10A Manager.exe”を用いて、PID制御の条件①のパラメータを PLC-24V10A に設定するときの操作について説明しています。
 ※設定用ソフトを起動すると、現在 PLC-24V10A に設定されているパラメータが読み込まれソフトの画面上に表示されます。

The screenshot shows the 'PLC-24V10A Manager (COM3) / Version 1.0.0.0' window. The interface includes a status bar at the top with 'ONLINE' and a menu bar with 'File', 'Tool', and 'Help'. The main area is divided into sections: 'Status' (State: STOP, Timer: OFF, Alarm: OFF), 'Main Sensor' (Type: [0] Pt100, Custom NTC: A: 3.6610 x10⁻³, B: 0.000 x10⁻⁴, C: 0.0000 x10⁻⁷), 'Sub Sensor' (Enable: Off, Type: [0] SEMITEC 100, Custom NTC: A: 3.6610 x10⁻³), 'PID Factor' (Type: [9] User Custom, Coefficient: P: 500, I: 0.00, D: 0), and 'Operation Mode' (Mode: Timer). Five callout boxes provide instructions: ① Select the 'Presets' tab; ② Use the scrollbar to move to the 'PID Factor' section; ③ If the 'Type' is not '[9] User Custom', select it and click 'Write'; ④ Enter values and click 'Write' (example: Kp=240, Ki=0.83, Kd=300); ⑤ Click the close button to exit the software.

⑤ “PLC-24V10A Manager.exe” を終了します。

① 「Presets」のタブを選択します。

② スクロールバーを操作してPID Factorの項目に移動します。

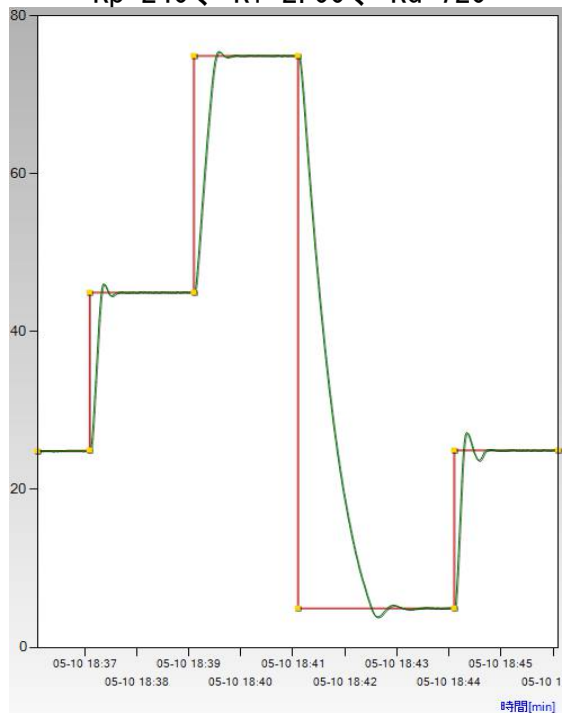
③ Typeが[9] User Customになっていない場合は、[9] User Customを選択して「Write」ボタンを押します。

④ 数値を入力して「Write」ボタンを押します。
 例) Kp=240, Ki=0.83, Kd=300

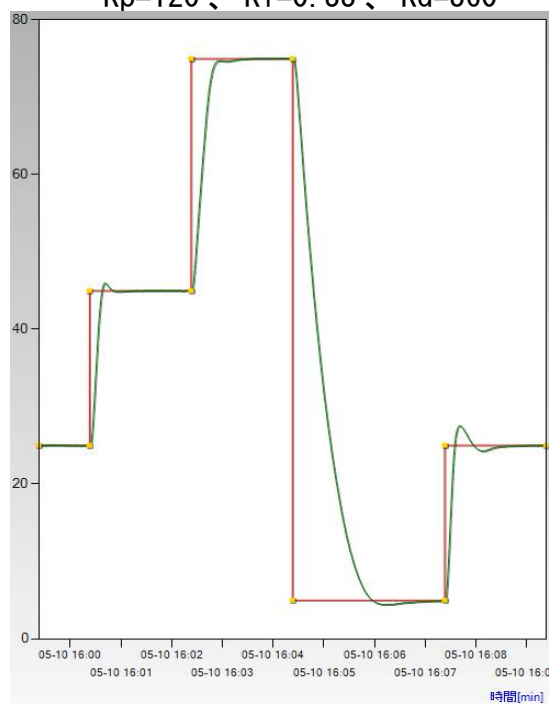
5) 設定後のステップ応答確認

制御用ソフト“PLC-24V10A Controller.exe”を用いてステップ応答を確認します。

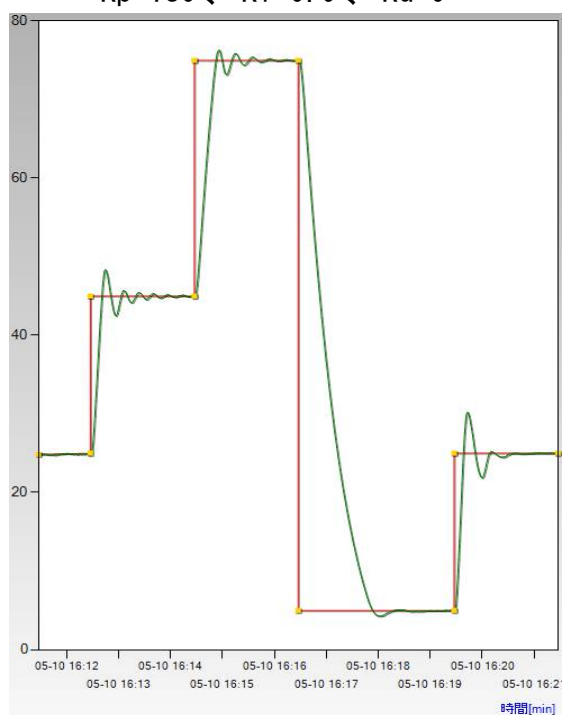
PID 制御 条件①
 $K_p=240$ 、 $K_i=2.00$ 、 $K_d=720$



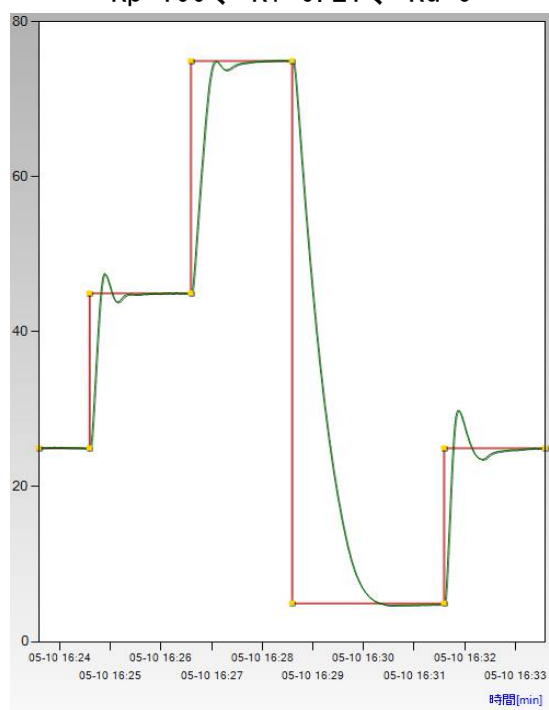
PID 制御 条件②
 $K_p=120$ 、 $K_i=0.33$ 、 $K_d=360$



PI 制御 条件①
 $K_p=180$ 、 $K_i=0.9$ 、 $K_d=0$



PI 制御 条件②
 $K_p=100$ 、 $K_i=0.21$ 、 $K_d=0$



6) パラメータの合わせ込み

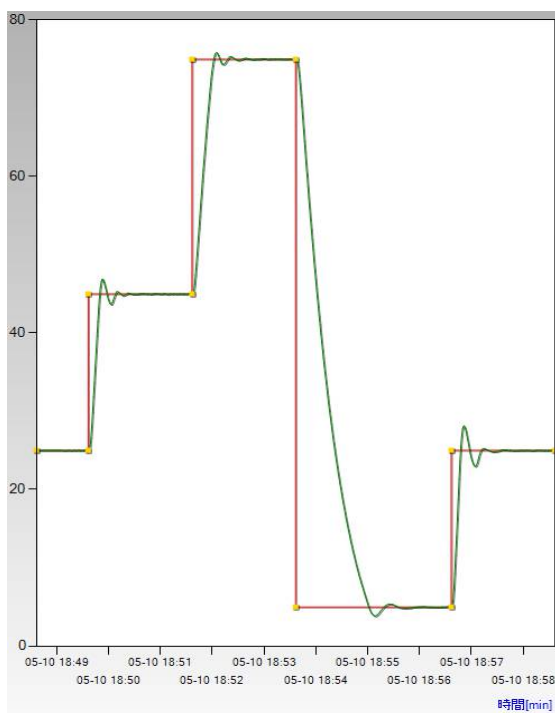
6-1) Kdの合わせ込み

Kdを大きくするとオーバーシュートが抑えられます。

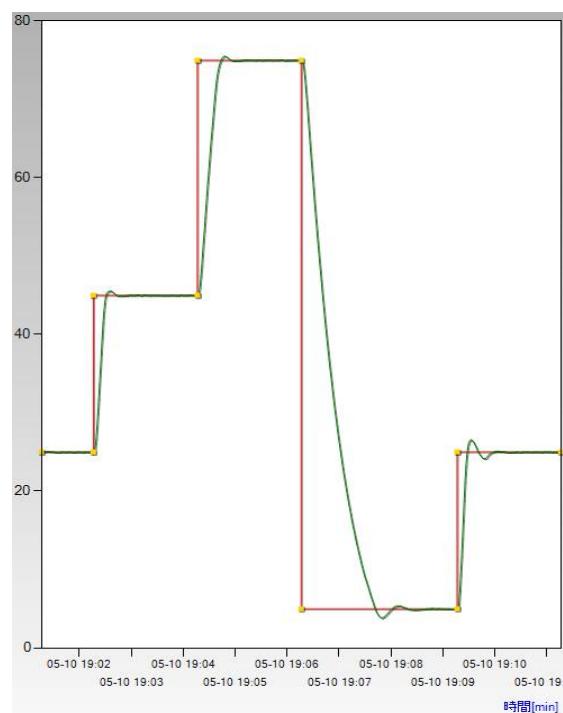
以下の例では、PID制御 条件①の設定をベースにKdを変えて応答を観測しています。

※Kdを大きくしすぎると、温度応答は一見安定に見えても制御動作が不安定になり、短い周期の振動性応答が発生したり、外乱やノイズに対して弱くなる場合があります。詳しくは本書「8. 微分制御の効果について」をご覧ください。

Kp=240、Ki=2.00、Kd=500



Kp=240、Ki=2.00、Kd=940



6-2) Ki の合わせ込み

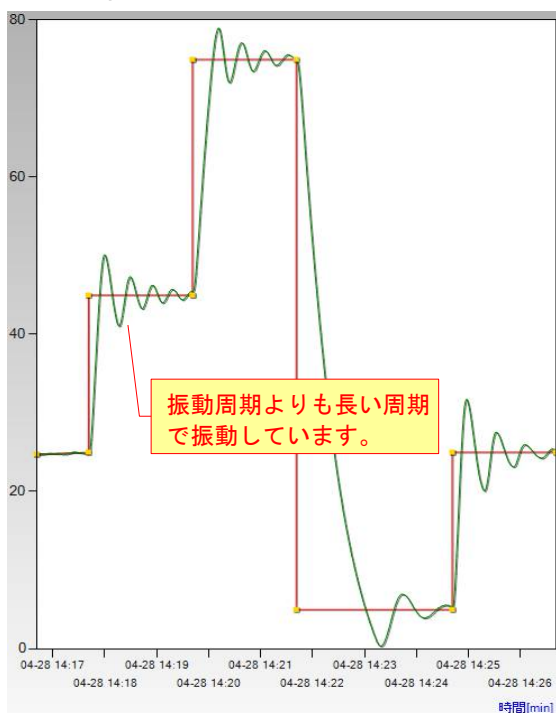
振動周期 P_u とは異なる周期で温度が上下している場合は、 K_p に対して K_i が相対的に大きすぎる可能性がありますので、 K_i を小さくしてください。

以下の例では、PI 制御 条件②の設定をベースに K_i を変えて応答を観測しています。

※ K_i を小さくしすぎると、目標温度に到達するまでの時間が長くなります。

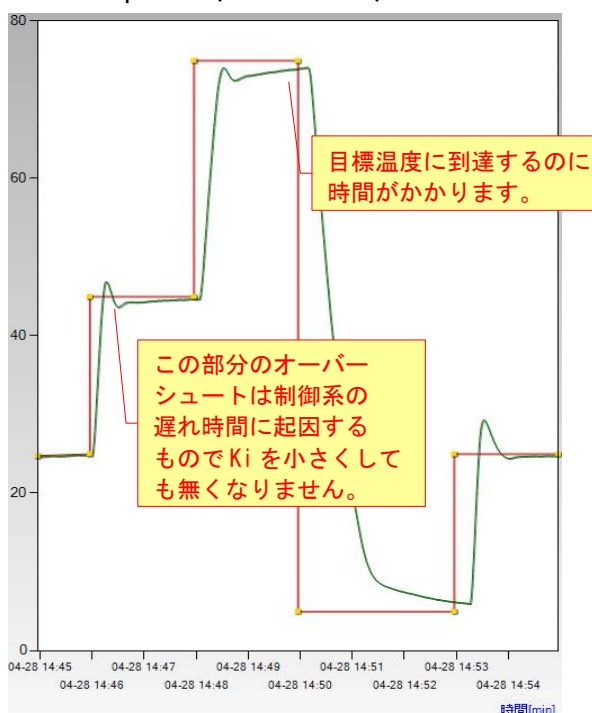
Ki が大きすぎる場合

$K_p=100$ 、 $K_i=0.84$ 、 $K_d=0$



Ki が小さすぎる場合

$K_p=100$ 、 $K_i=0.05$ 、 $K_d=0$



7. ステップ応答法によるPID制御パラメータの設定

1) 準備

ステップ応答を観測するための準備をします。

ステップ応答は無制御（フル駆動）状態で観測する必要があるため、目標温度に到達するまでは一定のDC電圧でペルチェ素子を駆動し、目標温度に到達したら駆動を停止する必要があります。

PLC-24V10A でこのような動作を行わせるためには、ペルチェ素子の接続を以下のように変更する必要があります。

①加熱方向に駆動する場合

ペルチェ素子の+側 → ペルチェ駆動電源端子のGNDに接続

ペルチェ素子の-側 → ペルチェ素子接続端子のPL-に接続

※このように接続すると加熱動作のときのみペルチェ素子がDC駆動され、冷却動作のときは駆動が停止します。

②冷却方向に駆動する場合

ペルチェ素子の+側 → ペルチェ素子接続端子のPL+に接続

ペルチェ素子の-側 → ペルチェ駆動電源端子のGNDに接続

※このように接続すると冷却動作のときのみペルチェ素子がDC駆動され、冷却動作のときは駆動が停止します。

※上記のような接続を行った場合、PLC-24V10A でペルチェ駆動電流の計測が出来ないため、電流アラーム機能をOFFとするか、電流アラーム検出下限を0[A]に設定してください。

次に、PLC-24V10A のPID 制御パラメータを以下のように設定します。

Kp=999（最大値）

Ki=0

Kd=0

※Kp を最大値とすることで、無制御に近い状態を作り出します。

少しでも温度偏差があれば制御量（PWM 駆動のDUTY 比）が100%になる状態。

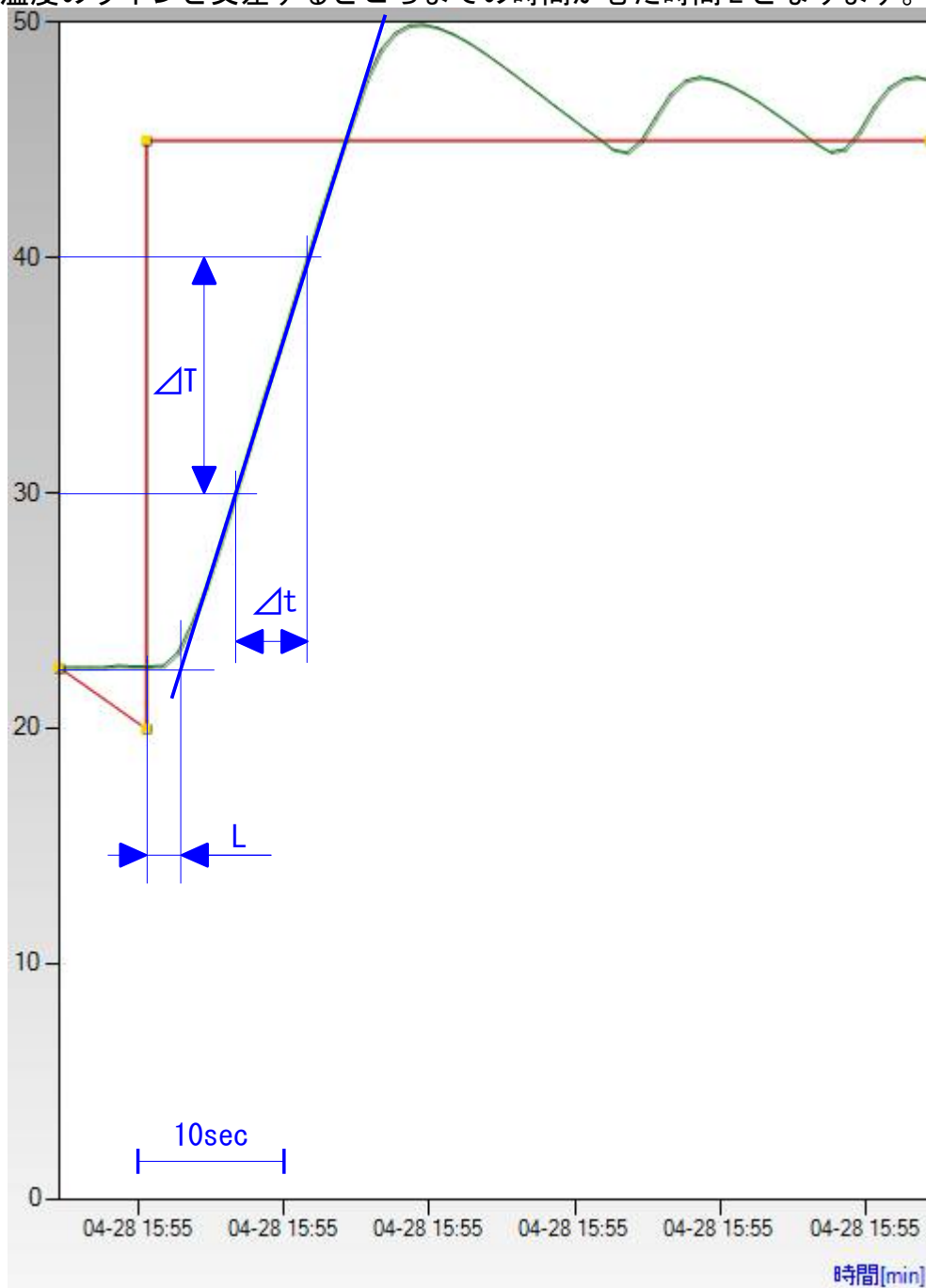
2) ステップ応答の観測とPID制御パラメータの算出

ここでは、室温から目標温度 45°Cに加熱動作させたときのステップ応答の観測方法を説明します。

制御用ソフト “PLC-24V10A Controller.exe”を起動して、ステップ応答観測用の温度プロファイルを作成します。

	温度	時間	分
1	20	0.1	分
2	45	0	分
3	45	0.9	分
4			分
5			
6			
7			
8			
9			分
10			分
11			分
12			分
13			分
14			分
15			分
16			分
17			分
18			分
19			分
20			分

温度制御をスタートさせ、温度応答を観測します。
 温度応答の傾きが最大となるところに接線を引きます。
 その接線の傾きが最大傾斜 $R(=\Delta T/\Delta t)$ 、目標温度が変化してから接線が変化前の温度のラインと交差するところまでの時間がむだ時間 L となります。



観測結果から最大傾斜 R とむだ時間 L を求めます。上記のステップ応答の場合、
 最大傾斜 $R=10[^\circ\text{C}]/5[\text{sec}]=2[^\circ\text{C}/\text{sec}]$
 むだ時間 $L=2.5[\text{sec}]$

以下の表から比例係数 K_p 、積分時間 T_i 、微分時間 T_d を計算します。

制御方法		K_p	T_i	T_d
①	PI 制御	$0.9 / (R \cdot L)$	$3.33L$	-
②	PID 制御	$1.2 / (R \cdot L)$	$2L$	$0.05L$

※PLC-24V10A の内部処理に適合させるため、一般的な PID 制御の計算式とは係数が異なる場合があります。

上記表の計算結果から、PLC-24V10A に設定する K_p 、 K_i 、 K_d を求めます。

※ Δt : サンプル周期 PLC-24V10A の場合 $0.05[\text{sec}]$

$$K_p = K_p \times 999$$

※ステップ応答測定時の制御量は、温度偏差を $K_p (=999)$ 倍しているため、設定値は 999 倍してください。

※ K_p の設定範囲は 0 から 999 の整数です。

$$K_i = K_p \times (\Delta t / T_i)$$

※ K_i の設定範囲は、0.00 から 9.99 の 0.01 単位です。

$$K_d = K_p \times (T_d / \Delta t)$$

※内部でフィルタリング処理を行っているため、温度変化の状況により微分制御の効果が異なります。温度応答を観測しながら適切な値を設定してください。

・振動周期が短い場合は小さく、長い場合は大きく設定してください。

・オーバーシュートを抑えたい時は大きく設定してください。

※ K_d の設定範囲は、0 から 999 の整数です。

実際に値を計算すると、以下のようになります。

① PI 制御の場合

$$K_p = 0.9 / (2 \times 2.5) \times 999 = 180$$

$$K_i = 180 \times 0.05 / (3.33 \times 2.5) = 1.08$$

$$K_d = 0$$

② PID 制御の場合

$$K_p = 1.2 / (2 \times 2.5) \times 999 = 240$$

$$K_i = 240 \times \{0.05 / (2 \times 2.5)\} = 2.40$$

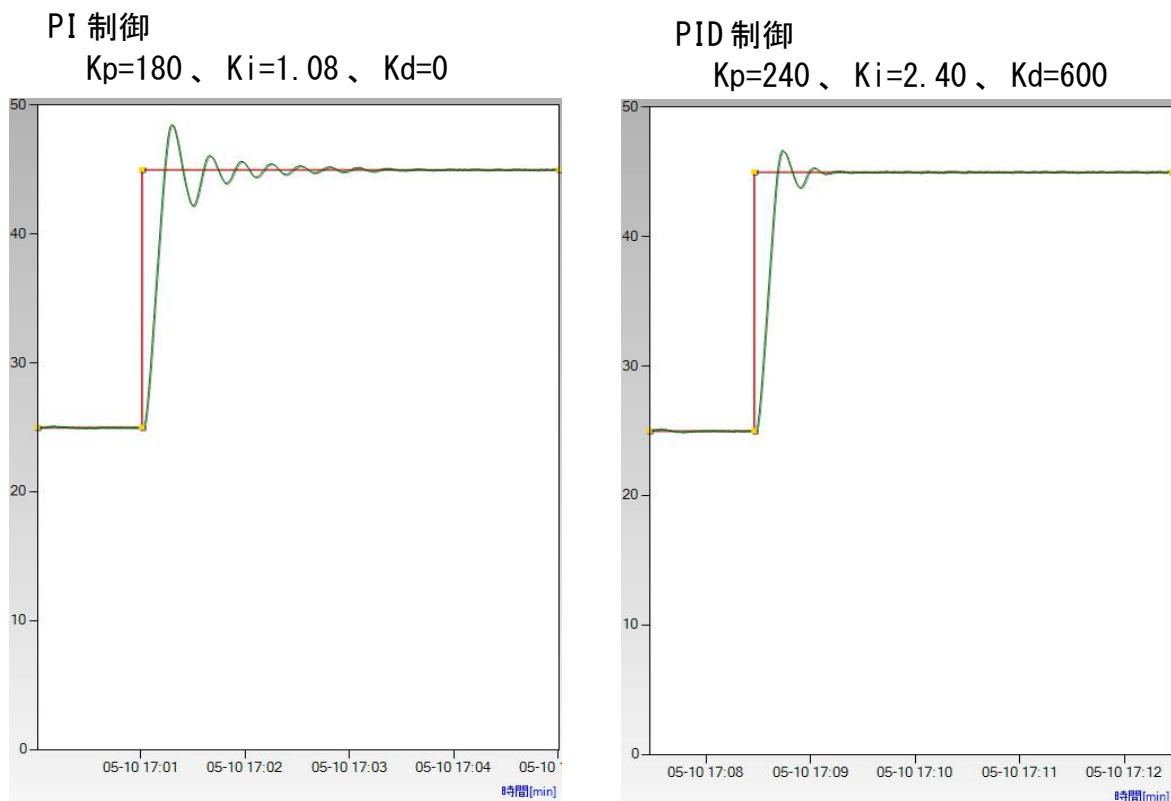
$$K_d = 240 \times \{(0.05 \times 2.5) / 0.05\} = 600$$

3) 設定後のステップ応答確認

PLC-24V10A とペルチェ素子の結線を通常状態に戻します。

設定用ソフト“PLC-24V10A Manager.exe”を用いて、PID制御パラメータを設定します。

制御用ソフト“PLC-24V10A Controller.exe”を用いてステップ応答を確認します。



4) パラメータの合わせ込み

必要に応じて、パラメータの合わせ込みを行います。

※「6. 限界感度法によるPID制御パラメータの設定 6) パラメータの合わせ込み」を参照

8. 微分制御の効果について

微分制御は急激な温度変化を抑制する作用がありますので、微分係数 K_d を適切に設定すると、温度応答のオーバーシュート抑えられるなどの効果があります。

しかし、微分係数 K_d が大きすぎると、外的なノイズに対しても過敏に応答するため、制御動作が不安定になる場合があります。
このような場合でも、熱的な容量が大きい制御系では、温度応答があまり変化しない場合があります。

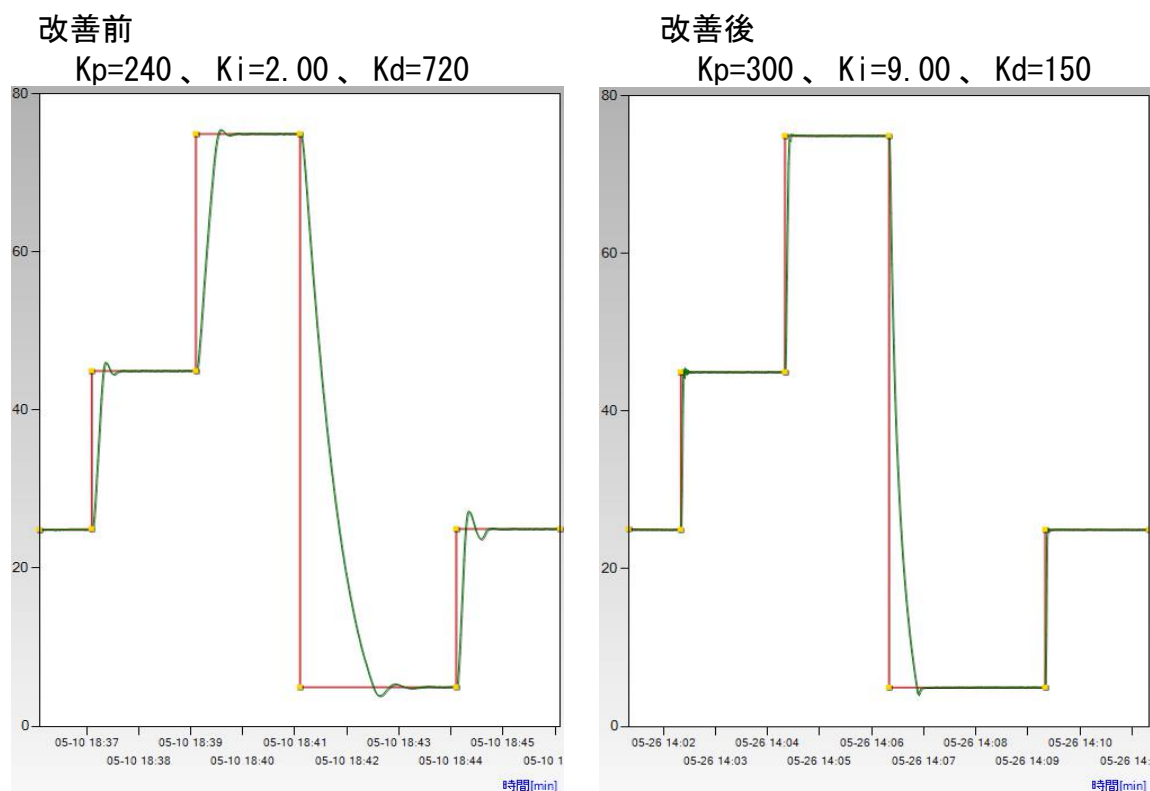
一定温度に制御しているのに、加熱動作と冷却動作が頻繁に切り替るような動きをしている場合は、制御動作が不安定になっている可能性がありますので、微分係数 K_d の設定を見直してください。

9. 応答性改善のヒント

温度応答を改善し、より早く安定な温度制御を行うためには、以下のような点を考慮してください。

- ・ 温度センサーの検出遅れ時間を短縮する
 - ・ 応答時間の早い温度センサーを使用する
 - ・ 温度センサーと温度制御対象物の熱的な結合を良くする
 - ・ 温度センサーと温度制御対象物を密着させる
 - ・ 熱伝導性の高い素材を挟む
- ・ ペルチェ素子の冷却／加熱能力を高める
 - ・ 適切な仕様のペルチェ素子を選定
 - ・ ペルチェ駆動電圧の最適化
 - ・ ペルチェ素子の自己発熱を考慮した最適な駆動電圧を求める
 - ・ ペルチェ素子の放熱を良くする
 - ・ ヒートシンク、冷却ファンの選定
 - ・ 水冷式放熱器の採用
- ・ ペルチェ素子と温度制御対象物の熱的な結合を良くする
 - ・ ペルチェ素子と温度制御対象物を密着させる
 - ・ 熱伝導性の高い素材を挟む

以下の温度応答は、応答性改善の前後での比較データの例です。



変更履歴

Rev.	日付	内容	担当
1. 00	2016/05/10	初版発行	Y0
1. 10	2016/05/26	Ti, Td の計算式係数を変更 「9. 応答性改善のヒント」を追加	Y0

ペルチェコントローラ
PLC-24V10A
テクニカルマニュアル
PID 制御パラメータの設定
(Rev. 1. 10)

2016 年 5 月 26 日

株式会社ティーエスラボ
〒 190-0023 東京都立川市柴崎町 3-9-23-702
<http://tslab.com/>