

ペルチェコントローラ
PLCシリーズ
テクニカルマニュアル

限界感度法によるPI制御パラメータの設定

(Rev. 2.00)

適用機種：PLC-15V6A、PLC-24V6A

※PLC-24V10Aは、テクニカルマニュアル「PLC-24V10A_PID制御パラメータの設定」を
ご覧ください。

2016年5月12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	.....	4 ページ
3. PCとの接続	.....	5 ページ
4. PI制御の基本	.....	6 ページ
5. PI制御パラメータの設定方法	.....	7 ページ
6. 応答性改善のヒント	.....	16 ページ

1. 注意事項

本マニュアルで説明しているPI制御パラメータ設定方法は、「限界感度法」と呼ばれるものです。

この方法は、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ものです。

よって、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、この方法は実施しないで下さい。

2. 使用するソフトウェア

Pi 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 ペルチェドライバー “Peltier_Driver.exe”
ペルチェコントローラをPCから制御するソフトウェアです。
- ② ペルチェ設定ツール “PELTIER_MEAS.exe”
ペルチェコントローラ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。

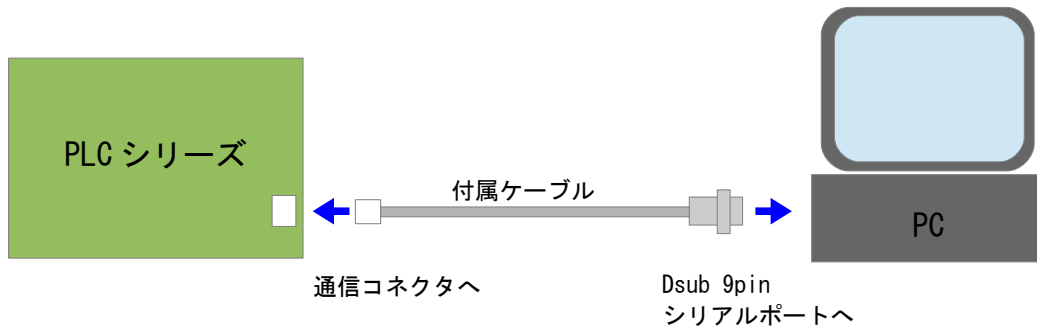
これらのソフトウェアのインストール方法は、ソフトウェアのマニュアルを参照して下さい。

【重要】

制御用ソフト“Peltier_Driver.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。

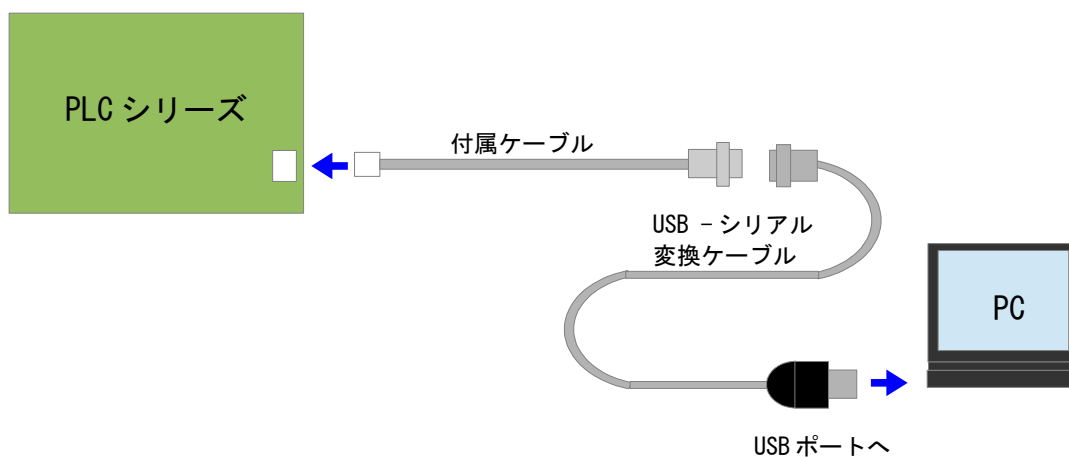
3. PCとの接続

ペルチェコントローラ PLC シリーズと PC を通信ケーブル (PLC シリーズに付属) で接続します。



※ケーブルを延長する場合は、Dsub9pin メスー 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. PI 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)

ペルチェコントローラ PLC シリーズの場合は、比例制御と積分制御を組み合わせ合わせた「PI 制御」を採用しています。

PI 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駆動量) は、次の式で計算されます。

$$MV(n) = K_p \times [\Delta T(n) + (\Delta t / T_i) \times \sum \Delta T(i)]$$

$$= K_p \times \Delta T(n) + K_i \times \sum \Delta T(i)$$

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

Δt : 制御周期

T_i : 積分時間

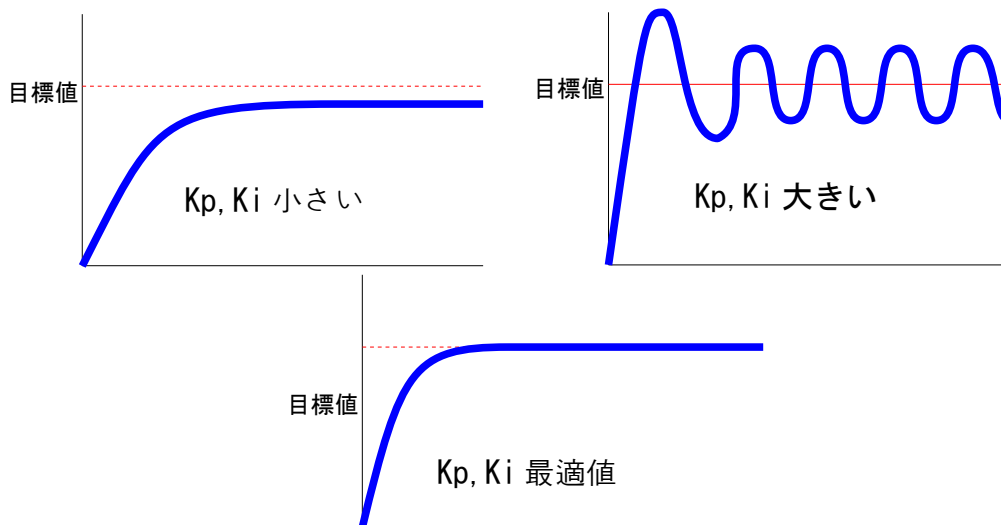
K_p : 比例係数

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

※PLC シリーズの PID 制御パラメータ設定は、 K_p 、 K_i の数値を入力します。

比例係数 (K_p) が小さすぎると目標値のと温度偏差 (定常偏差) が残ります。
 K_p が大きすぎると応答が過敏になりオーバーシュートが大きくなったり、振動状態になります。

積分係数 (K_i) が小さすぎると目標値になかなか近づくことができません。
 K_i が大きすぎるとオーバーシュートが大きくなったり、振動状態になります。
 Pi 制御パラメータの設定とは、 K_p 、 K_i の最適値を求めることです。



5. PI 制御パラメータの設定方法

1) 限界感度 Ku を求める

まず、 $K_i=0$ 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 を PLC シリーズに設定する

- ・ PLC シリーズの電源の ON し、ペルチェ設定ツール“PELTIER_MEAS. 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 シリーズを通信状態にしてください。
 「Write パラメータ」のタブをクリックし、PI 制御の K_p と K_i に数字を入力して「Write_PI_CONTROL」ボタンを押して下さい。
- ・ Receive Message 欄に “WPI, OK” と表示されれば設定完了です。

The screenshot shows the 'Peltier_Driver MeasCtrl Version 1.0.1.4' software interface. The 'Serial Port' section at the top shows 'COM3' selected and a '停止' (Stop) button. The 'Command' section has tabs for 'ボート番号', '設定', 'パラメータ', 'Readステータス', '制御コマンド', '一括操作', and 'NTC基準温度'. The 'パラメータ' (Parameters) tab is active, showing sections for 'NTCセンサ', 'Ptセンサ', 'PI制御', '電流制限', and '電圧検出'. The 'PI制御' section has input fields for K_p (10) and K_i (0), and a 'WRITE_PI_CONTROL' button. The 'Receive Message' section at the bottom shows 'WPIOK'. Five numbered callouts in yellow boxes provide instructions: ① points to the COM port and Start button; ② points to the Parameters tab; ③ points to the K_p and K_i input fields; ④ points to the WRITE_PI_CONTROL button; ⑤ points to the WPIOK message.

① COM ポートを設定し、「開始」ボタンを押す。
 ※ボタンが「停止」のときは通信中、「開始」のときは通信停止中です。

② パラメータタブを選択

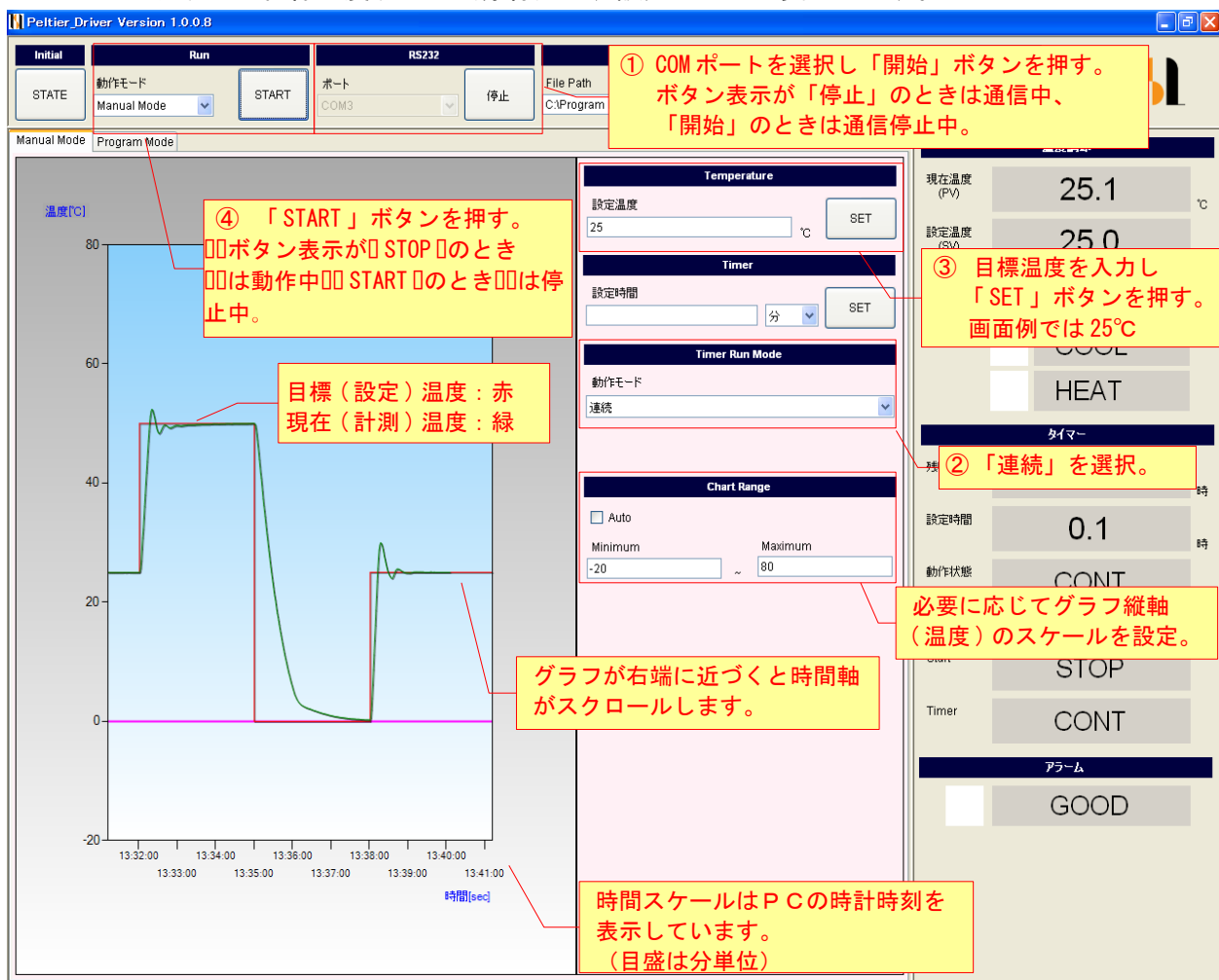
③ 数値を入力する。
 K_p は小さい値から徐々に増やす。
 K_i には 0 を入力。

④ WRITE_PI_CONTROL ボタンを押す。

⑤ 「WRITE_CONTROL」ボタンを押して、「WPI, OK」のメッセージが返れば設定完了です。

1-2) ステップ応答を測定する

- ・ペルチェ設定ツール“PELTIER_MEAS. exe”からの通信を停止するために Serial Port の「停止」ボタンを押して下さい。
- ・ペルチェドライバ “Peltier_Driver. 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 シリーズを通信状態にしてください。
- ・Timer Run Mode のプルダウンメニューで「連続」を選択して下さい。
- ・Temperature の設定温度欄に目標温度を入力して下さい。
 ※目標温度は実際に制御したい温度付近に設定して下さい。初期値は目標値に対して 10℃以上差がある温度にあらかじめ温度調節しておきます。
 実施例の場合、目標温度を 25℃→50℃→0℃→25℃と変化させて温度応答を観測しています。
- ・Run のプルダウンメニューで「Manual Mode」を選択の上、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。
 ※温度を変化させるときは、設定温度欄に数値を入力し、SET ボタンを押します。
 グラフの目標温度ライン（赤線）が、設定に応じて変化します。



1-3) ステップ応答の評価～限界感度 K_u を求める

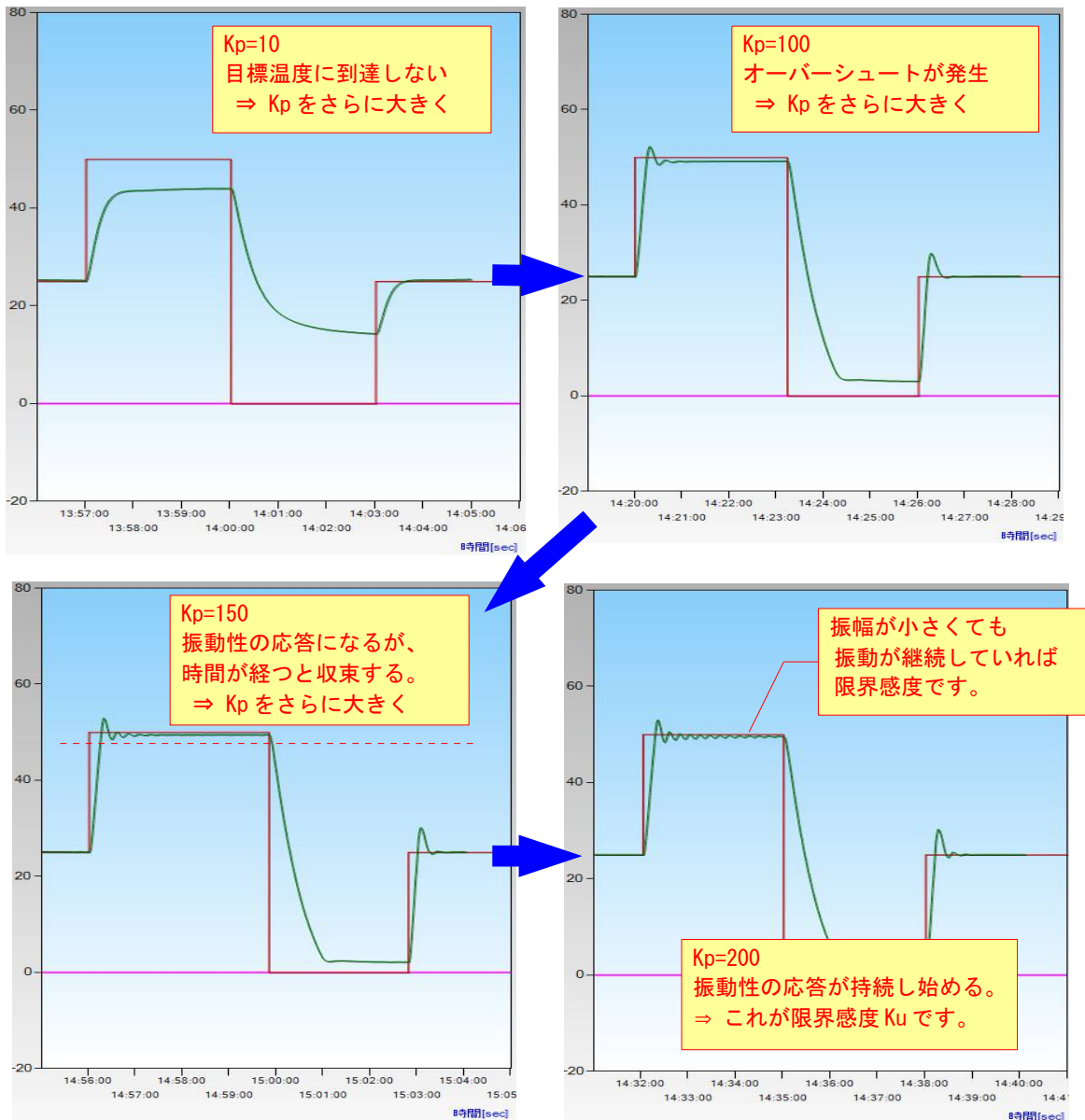
測定したステップ応答を評価します。

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。

※再度 K_p の設定を行う場合には、ペルチェドライバー“Peltier_Driver.exe”の通信を停止してから、ペルチェ設定ツール“PELTIER_MEAS.exe”の通信を開始して下さい。

プログラムを終了させる必要はありませんが、両方同時に通信ポートをオープンすることはできません。



2) 振動周期 P_u を求める

限界感度状態での振動周期を求めます。

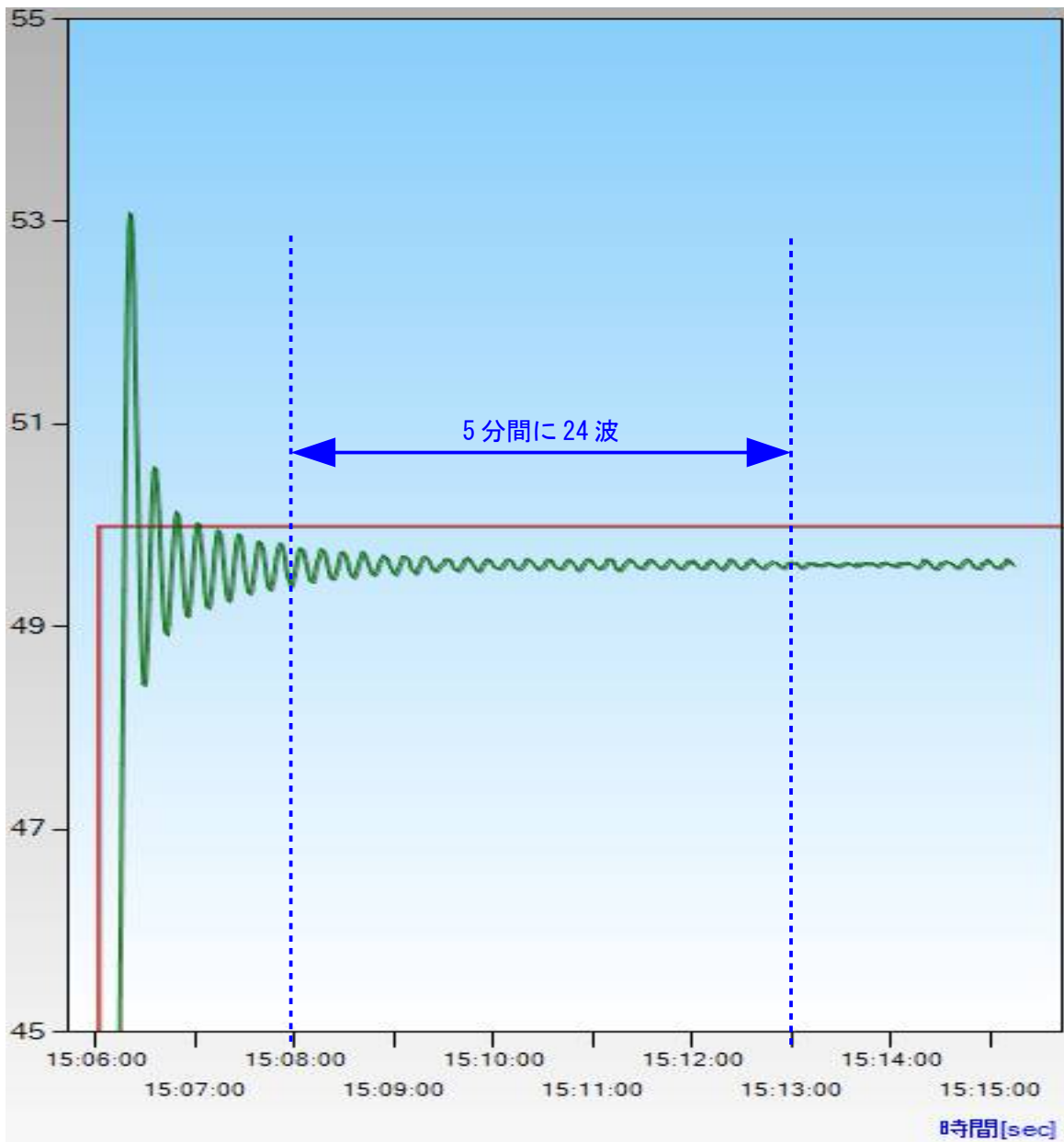
以下の例では、約5分(300[sec])間に24波なので、

$$\text{振動周期 } P_u = 300/24 = 12.5[\text{sec}]$$

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 を計算する

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 と積分係数 K_i を計算します。

まず、以下の表から比例係数 K_p と積分時間 T_i を計算します。

条件		K_p	T_i
①	応答性重視	$0.5 \times K_u$	$2 \times P_u$
②	安定性重視	$0.25 \times K_u$	$5 \times P_u$

※PLC シリーズの内部処理に適合させるため、一般的なPI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。

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

※ Δt : サンプルング周期 PLC シリーズの場合

Pt センサー対応モデル : 0.0005[sec]

NTC サーミスタ対応モデル : 0.0013[sec]

実施例の $K_u=200$ 、 $P_u=12.5$ 、 $\Delta t=0.0005$ を当てはめて計算すると、

$$\begin{aligned} \text{条件① } K_p &= 0.5 \times 200 = 100 \\ K_i &= 100 \times \{0.0005 / (2 \times 12.5)\} = 0.002 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{条件② } K_p &= 0.25 \times 200 = 50 \\ K_i &= 50 \times \{0.0005 / (5 \times 12.5)\} = 0.0004 \end{aligned}$$

となります。

4) Kp、Ki をペルチェコントローラに設定する

ここでは条件②のパラメータを PLC シリーズに設定します。

① 「開始」ボタンを押して通信を開始する。

② 「パラメータ」タブを選択する。

③ Kp、Ki 設定値を入力する。

④ 「WRITE_PI_CONTROL」ボタンを押す。

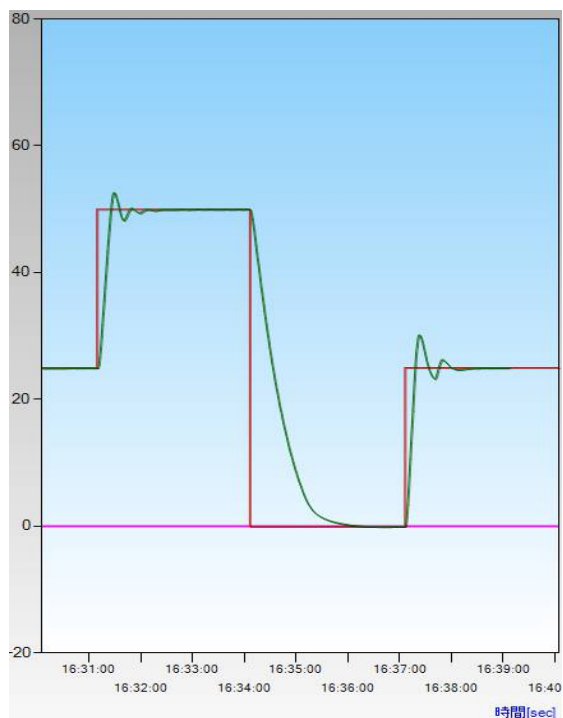
⑤ 「WPI, OK」が返れば設定完了。

5) 設定後のステップ応答確認

ペルチェドライバ “Peltier_Driver.exe” を用いてステップ応答を確認します。

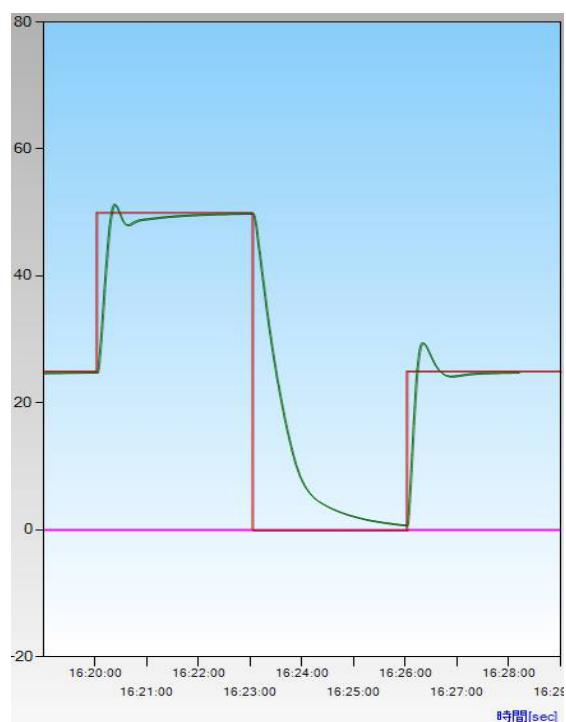
条件①

$K_p=100$ 、 $K_i=0.002$



条件②

$K_p=50$ 、 $K_i=0.0004$



6) パラメータの合わせ込み

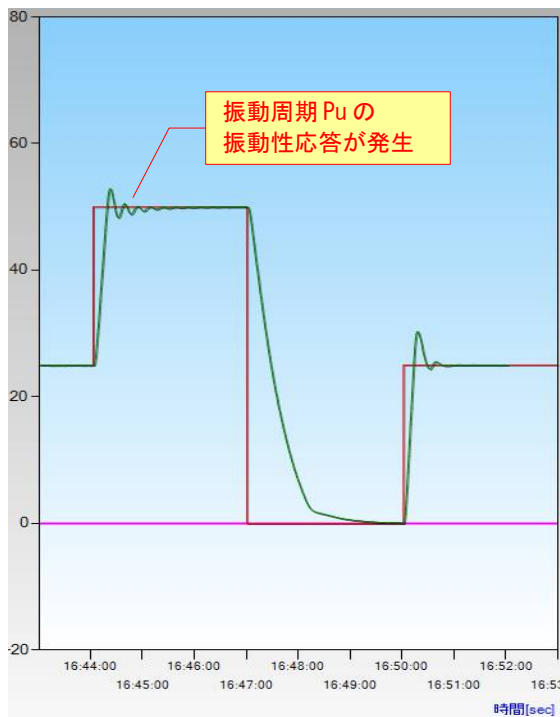
6-1) K_p の合わせ込み

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。応答性を重視したい場合は、 K_p を大きくしてください。

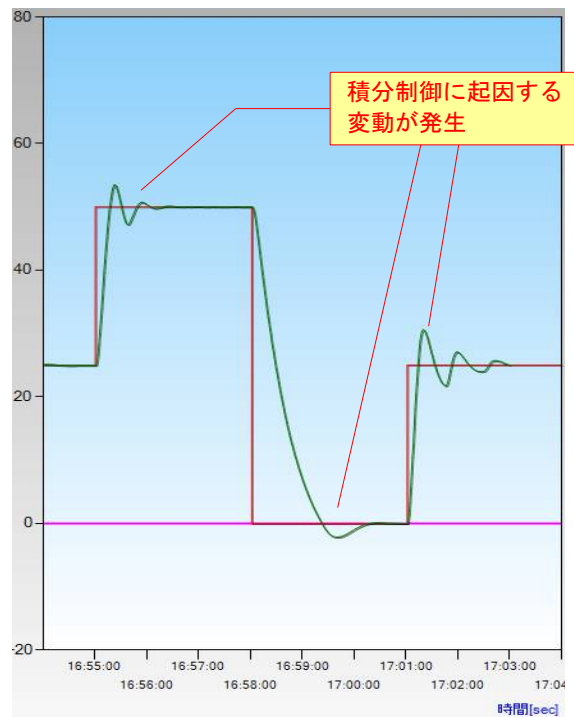
K_p を大きくしすぎると、制御系の遅れ時間に起因する振動性の応答が長引くようになり、さらに大きくすると発振状態になります。

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

K_p を大きくした場合
 $K_p=100 \rightarrow 150$ 、 $K_i=0.002$



K_p を小さくした場合
 $K_p=100 \rightarrow 50$ 、 $K_i=0.002$

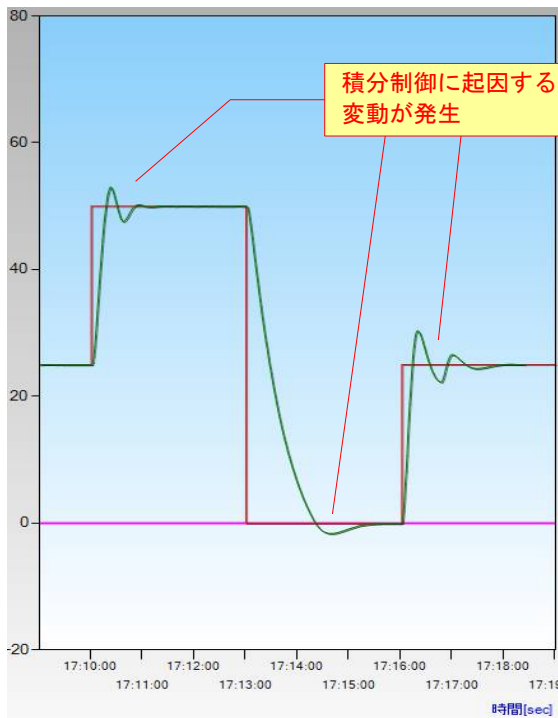


6-2) Ki の合わせ込み

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。
 逆に K_i が小さすぎると、目標温度に到達するまでの時間が長くなります。
 以下の例では、条件①の設定をベースに K_i を変えて応答を観測しています。

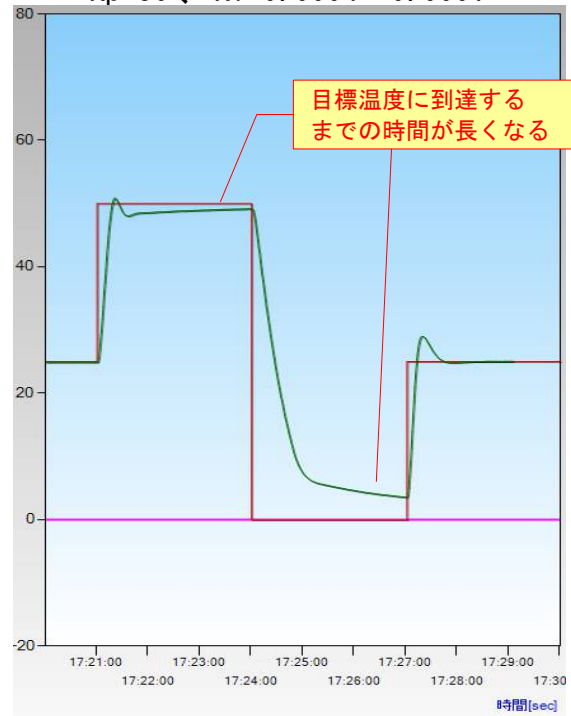
Ki を大きくした場合

$K_p=50$ 、 $K_i=0.0004 \rightarrow 0.0016$



Ki を小さくした場合

$K_p=50$ 、 $K_i=0.0004 \rightarrow 0.0001$

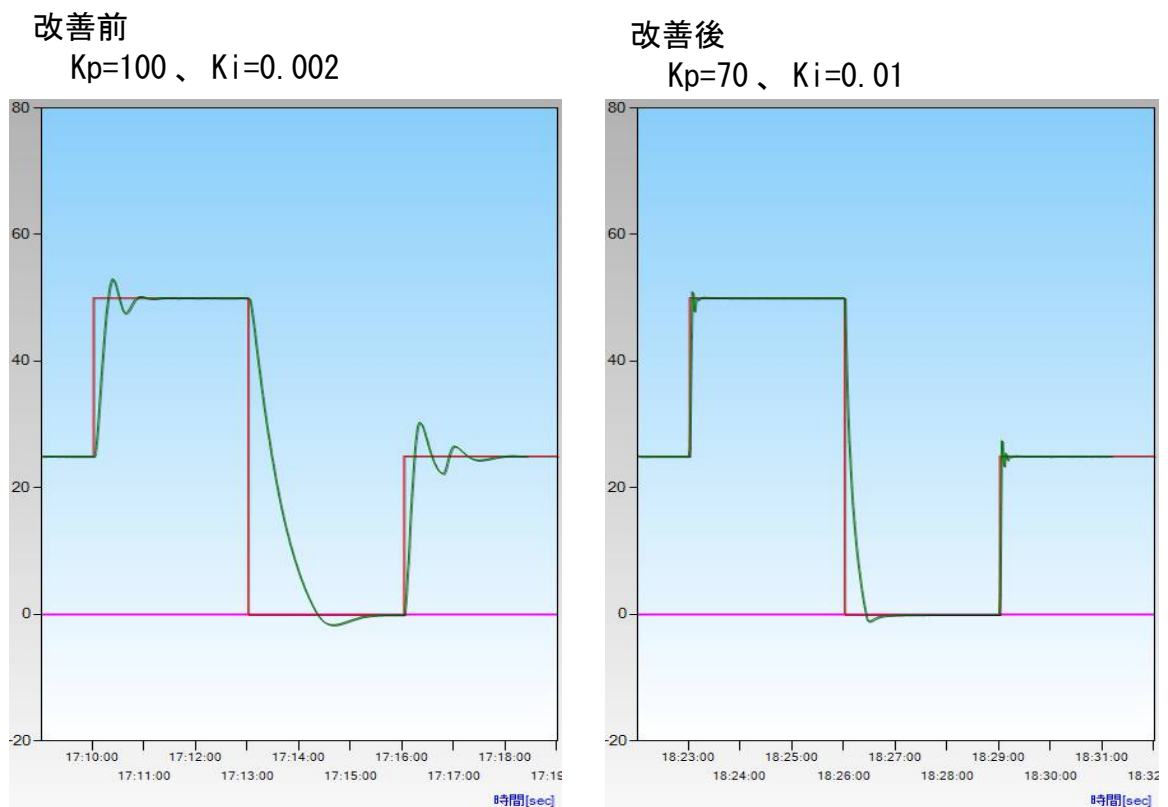


6. 応答性改善のヒント

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。



Memo

変更履歴

Rev.	日付	内容	担当
1.00	2010/08/18	初版発行	Y.0
1.10	2015/09/28	PLC-15V6A → PLC シリーズ、表紙に適用機種追記	Y.0
2.00	2016/05/12	Ki の計算式修正 温度応答の画面を新しいペルチェユニットのものに差替え ソフトウェアの画面を最新バージョンに差替え 「6. 応答性改善のヒント」を追加	Y.0

ペルチェコントローラ
PLCシリーズ
テクニカルマニュアル
限界感度法によるPI制御パラメータの設定
(Rev. 2.00)

2016年5月12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/>