

**ユニバーサルペルチェドライバ
PLP-300W14A
テクニカルマニュアル**

PID 制御パラメータの設定

(Rev. 2. 00)

2016 年 5 月 11 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. PID制御の基本	.....	6 ページ
5. 最大電流・最大電圧の設定	.....	7 ページ
6. PID制御パラメータの設定方法	.....	9 ページ
7. 微分制御の効果について	.....	19 ページ
変更履歴	.....	20 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

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 “PLP300_Driver.exe”
PLP-300W14A を PC から制御するソフトウェアです。
- ② パラメータ設定用ソフト “PLP300_MEAS.exe”
PLP-300W14A 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 “PLP300_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。

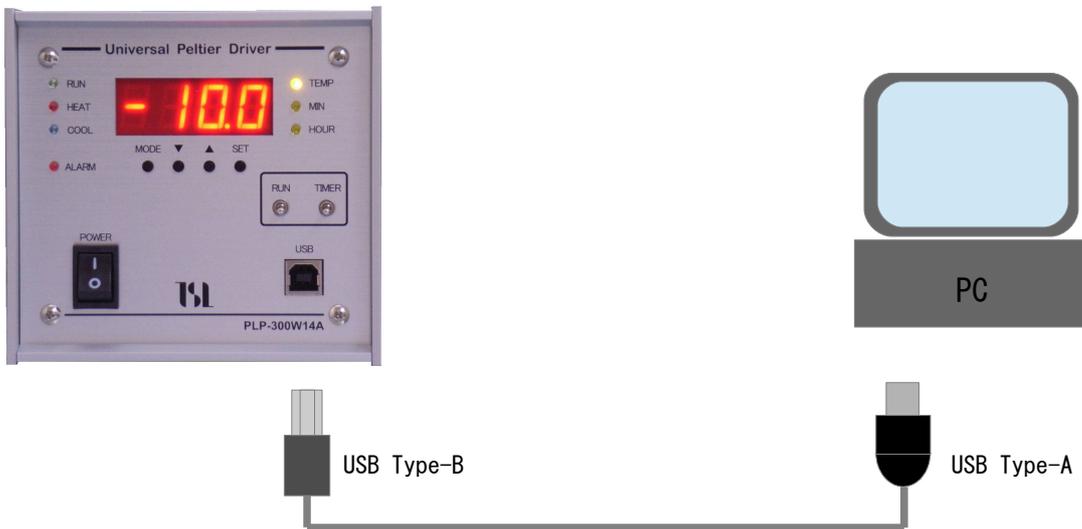
【重要】 ソフトウェアの入手方法について

制御用ソフトは、ティーエスラボの WEB サイトからダウンロードできます。最新版をダウンロードしてご利用ください。
設定用ソフトは、ハードウェアのバージョンにより対応するソフトのバージョンが異なりますので、入手希望の方はペルチェコントローラサポート窓口までご連絡ください。その際、製品のシリアル番号（製品底面のラベルの 12 桁の数字）をお知らせください。

3. PCとの接続

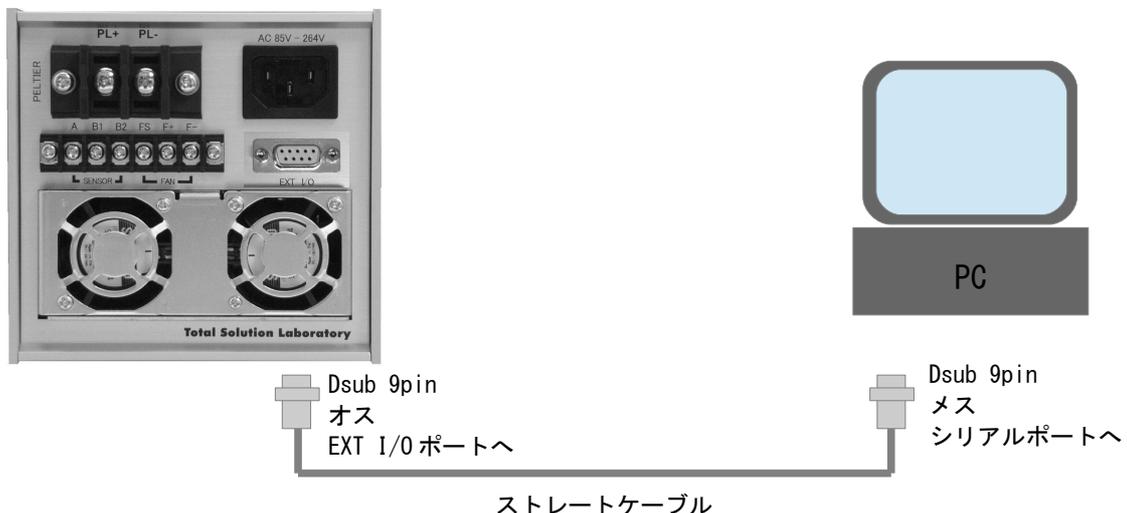
PLP-300W14A と PC を USB ケーブルで接続します。

- (*1) USB ケーブルは製品に付属していません。
Type-A~Type-B の USB ケーブルを別途ご用意下さい。
- (*2) PLP シリーズの電源を ON してから USB ケーブルを接続してください。
- (*3) USB 通信ポートをパソコンと接続して使用するためには、デバイスドライバのインストールが必要です。
PLPシリーズは、FTDI社のUSB-シリアル変換IC FT232Rを搭載しています。
必要な場合は、FTDI社のWEBサイトからデバイスドライバを入手してください。
<http://www.ftdichip.com/FTDrivers.htm>
※URLが変更される場合があります。
※デバイスドライバのインストールに関する詳細は、テクニカルマニュアル
「FTDIデバイスドライバのインストール(モデル共通)」をご覧ください。



RS-232 オプション搭載モデルの場合は、PC のシリアルポートと接続することも出来ます。

- (*1) USB と RS-232 両方を接続した場合は、USB が優先されます。



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)

PLP-300W14A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)

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

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 : 制御周期

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

※PLP-300W14A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. 最大電流・最大電圧の設定

PLP-300W14A はペルチェ駆動の最大電流、最大電圧を設定することができます。PLP-300W14A は設定された最大電圧、最大電流の範囲内で、自動的に定電流動作、定電圧動作、PID 制御動作を組み合わせて動作を行います。

最大電流、最大電圧は以下のように設定します。

- ・ PLP-300W14A の電源の ON し、通信ケーブルを接続して、“PLP300_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 PLP-300W14A を通信状態にしてください。
「パラメータ」のタブをクリックし、出力制限(電流)の最大電流欄と出力制限(電圧)の最大電圧欄に数値を入力(数値を直接入力または UP/DOWN ボタンを操作して入力)してください。
- ・ 「WRITE_CURRENT」と「WRITE_VOLT」ボタンを押して、Receive Message 欄に“WCU, OK”、“WVO, OK”と表示されれば設定完了です。

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 パラメータのタブを選択します。

③ 数値を入力します。
直接入力または UP/DOWN ボタンで入力します。
設定範囲は
最大電流： 0.0[A] ~ 14.0[A] (0.1[A] ステップ)
最大電圧： 0.0[V] ~ 24.0[V] (0.1[V] ステップ)

④ 「WRITE_CURRENT」ボタン
「WRITE_VOLT」ボタンを押します。

⑤ 「WRITE_CURRENT」ボタンを押して「WCU, OK」、
「WRITE_VOLT」ボタンを押して「WVO, OK」のメッセージが
返れば設定完了です。

⑥ 設定値を確認するには「READ_CURRENT」、「READ_VOLT」ボタンを
押します。

【重要】

最大電流、最大電圧の設定値は、使用するペルチェ素子の最大電流、最大電圧の規格値以下に設定してください。

【ヒント】

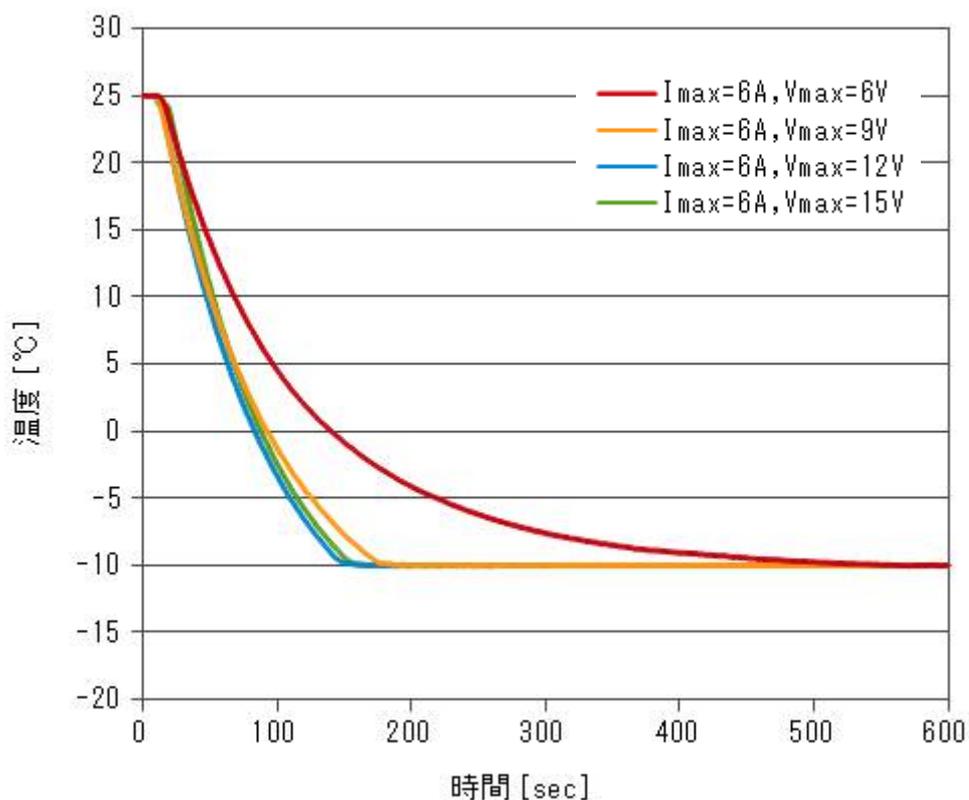
最大電流、最大電圧の設定値は、必ずしも大きい値を設定すればペルチェ素子の能力が高まるわけではありません。

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、電力値（電流×電圧）で70～80%程度になるように設定した方が、より高い冷却能力が得られます。

以下のグラフは、ペルチェ素子の規格値が15V/6Aのペルチェ素子に対して、25℃から-10℃へ冷却動作させた場合の温度変化の応答を、PLP-300W14Aの最大電圧設定値を変えて測定した例です。

この例の場合、最大電圧を12Vに設定した時が最も早く-10℃に到達し、それより電圧を上げてても応答は改善されないことがわかります。



6. PID制御パラメータの設定方法（限界感度法による設定）

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 PLP-300W14A に設定する

- ・ PLP-300W14A の電源の ON し、通信ケーブルを接続して、“PLP300_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 PLP-300W14A を通信状態にしてください。「パラメータ」のタブをクリックし、PID 制御の K_p 、 K_i 、 K_d に数字を入力して「Write_PID_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。

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 パラメータのタブを選択します。

③ 数値を入力します。
 K_p は小さい値から徐々に増やす。
 K_i 、 K_d には0を入力。

④ WRITE_PID_CONTROL ボタンを押します。

⑤ 「WRITE_PID_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。

⑥ 設定値を確認するには「READ_PID_CONTROL」ボタンを押します。

1-2) ステップ応答を測定する

- ・ 設定用ソフト“PLP300_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。
- ・ 制御用ソフト “PLP300_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 PLP-300W14A 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範囲の上限、下限、その中間点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。

(実施例では、目標値を 25℃→50℃→0℃→25℃と変化させて応答を測定しています。)

- ・ 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。

The screenshot shows the PLP300_Driver software interface with several callouts explaining the step response measurement process:

- ④ Manual Mode を選択し、「START」ボタンを押す。**
ボタン表示が「STOP」のときは動作中、「START」のときは停止中です。
- 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。
- ③ 目標温度を入力し「SET」ボタンを押す。**
画面例では 25℃
- ② 「連続」を選択。**
- グラフのスケール（縦軸 - 温度）を変更する場合は、Auto のチェックを外して、温度範囲を入力します。**
- 赤が設定温度（目標温度）です。目標温度設定に合わせて変化します。緑が現在温度（計測温度）です。**
- グラフが右端に近づくとき時間軸がスクロールします。**
- 時間スケールは PC の時計時刻を表示しています。（目盛は分単位）**
※連続モードでは横軸（時間）のスケールは変更できません。

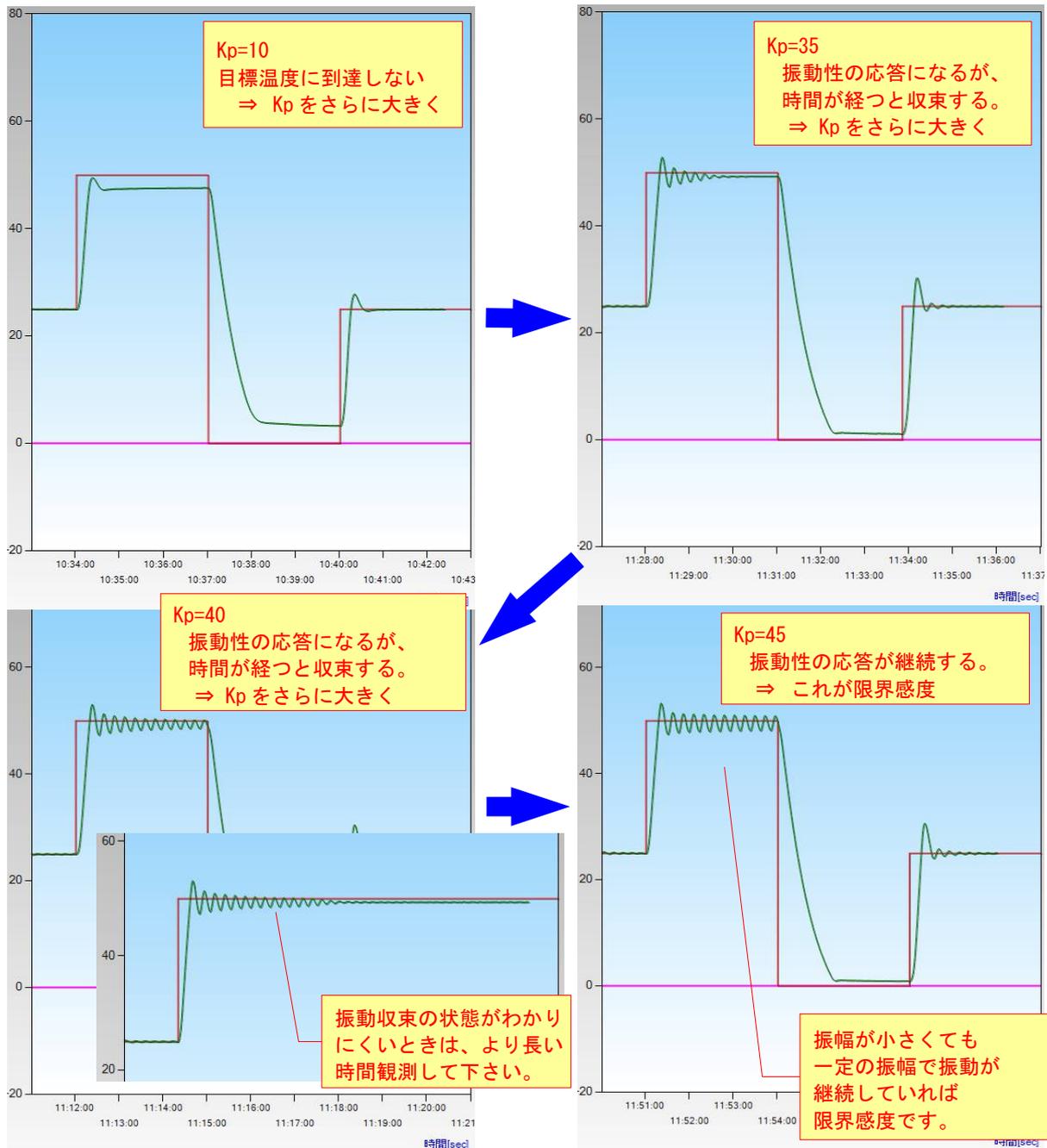
1-3) ステップ応答の評価～限界感度 K_u を求める

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“PLP300_Driver.exe”の通信を停止してから、ペルチェ設定ツール“PLP300_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 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 50°C で動作中の温度応答から振動周期を求めています。

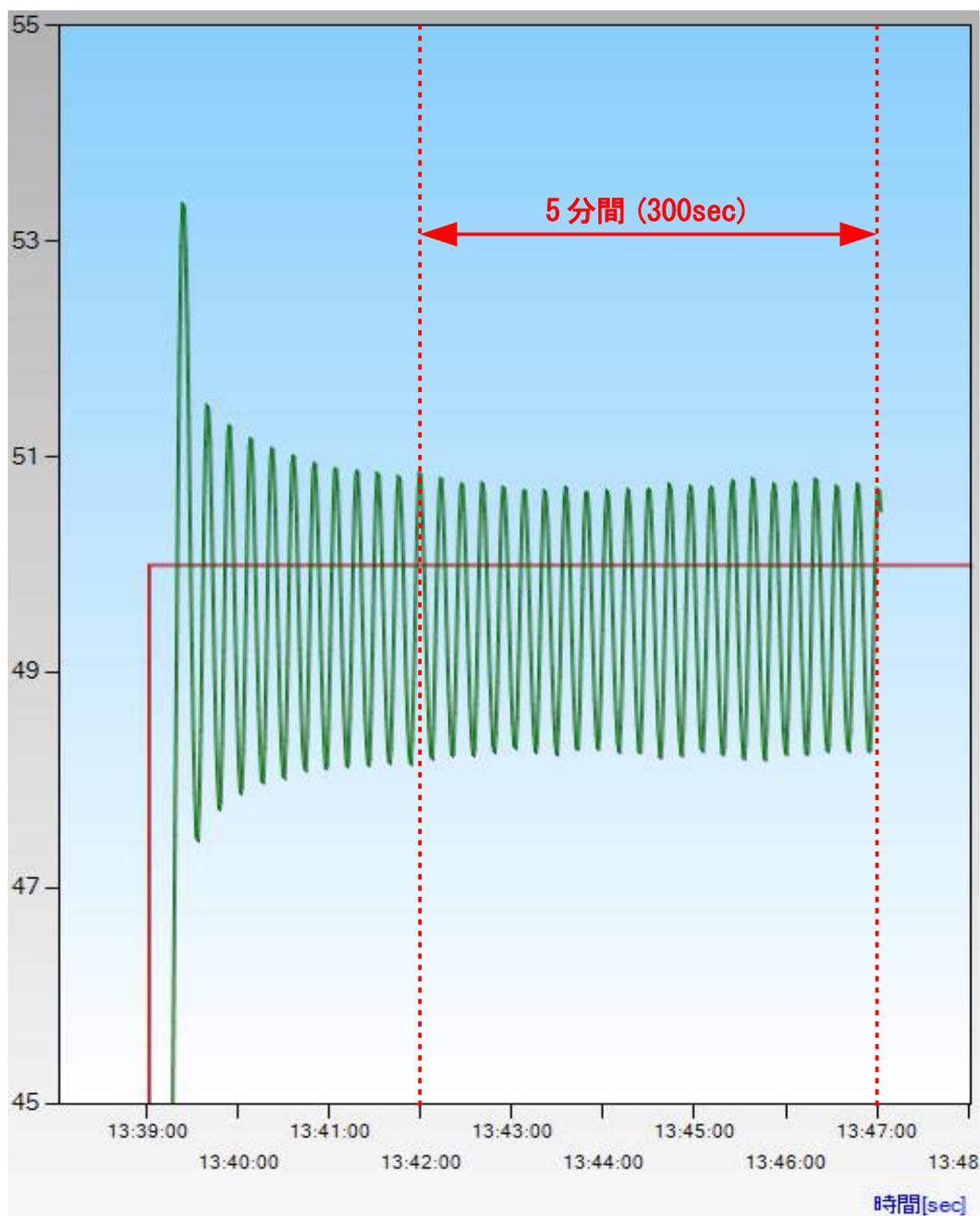
5分(300[sec])間に振動回数が22回なので、

振動周期 $P_u = 300[\text{sec}] / 22 = 13.6[\text{sec}]$

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	$0.6 \times K_u$	$1.25 \times P_u$	$0.05 \times P_u$
②	安定性重視	$0.3 \times K_u$	$3.75 \times P_u$	$0.05 \times P_u$

※PLP-300W14A 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っています。

積分時間 T_i から、積分係数 K_i を計算します。

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

微分時間 T_d から、微分係数 K_d を計算します

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

※ Δt :制御周期 PLP-300W14A の場合 0.05[sec]

実施例の $K_u=45$ 、 $P_u=13.6$ を当てはめて計算すると、

$$\begin{aligned} \text{条件①} \quad K_p &= 0.6 \times 45 = 27 \\ K_i &= 27 \times \{0.05 / (1.25 \times 13.6)\} = 0.079 \\ K_d &= 27 \times \{(0.05 \times 13.6) / 0.05\} = 367 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{条件②} \quad K_p &= 0.3 \times 45 = 13.5 \\ K_i &= 13.5 \times \{0.05 / (3.75 \times 13.6)\} = 0.013 \\ K_d &= 13.5 \times \{(0.05 \times 13.6) / 0.05\} = 184 \end{aligned}$$

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	$0.45 \times Ku$	$2 \times Pu$	-
②	安定性重視	$0.25 \times Ku$	$5 \times Pu$	-

※PLP-300W14A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っています。

積分時間Tiから、積分係数Kiを計算します。

$$Ki = Kp \times (\Delta t / Ti)$$

※ Δt : サンプルング周期 PLP-300W14Aの場合 0.05[sec]

実施例のKu=45、Pu=13.6を当てはめて計算すると、

$$\begin{aligned} \text{条件①} \quad Kp &= 0.45 \times 45 = 20.3 \\ Ki &= 20.3 \times \{0.05 / (2 \times 13.6)\} = 0.037 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{条件②} \quad Kp &= 0.25 \times 45 = 11.3 \\ Ki &= 11.3 \times \{0.05 / (5 \times 13.6)\} = 0.008 \end{aligned}$$

となります。

4) K_p 、 K_i 、 K_d をペルチェコントローラに設定する

画面例はPID制御の条件①のパラメータをPLP-300W14Aに設定するときの操作について説明しています。

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 パラメータのタブを選択します。

③ 数値を入力します。
 $K_p = 27$
 $K_i = 0.079$
 $K_d = 367$

※SET_PID_CONTROL ボタンは一時的な設定を行います。EEPROMには記憶されないため、電源をOFFすると設定は元に戻ります。

④ WRITE_PID_CONTROL ボタンを押します。

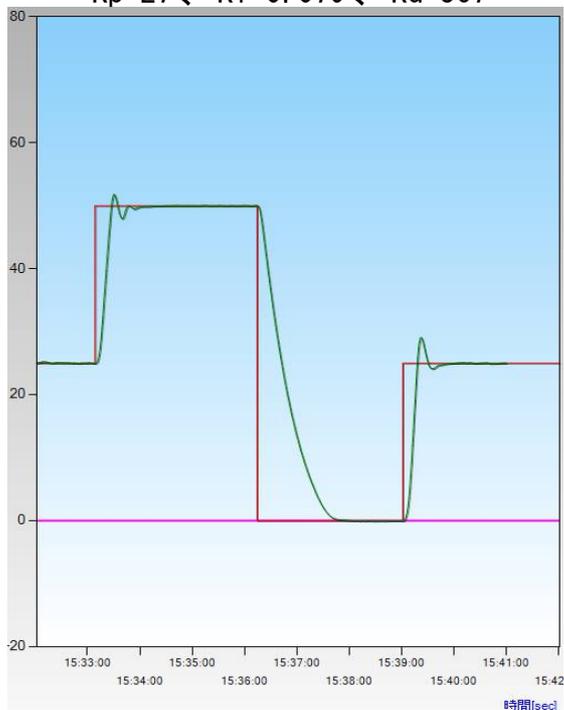
⑤ 「WRITE_PID_CONTROL」ボタンを押して、「WPI,OK」のメッセージが返れば設定完了です。

⑥ 設定値を確認するには「READ_PID_CONTROL」ボタンを押します。

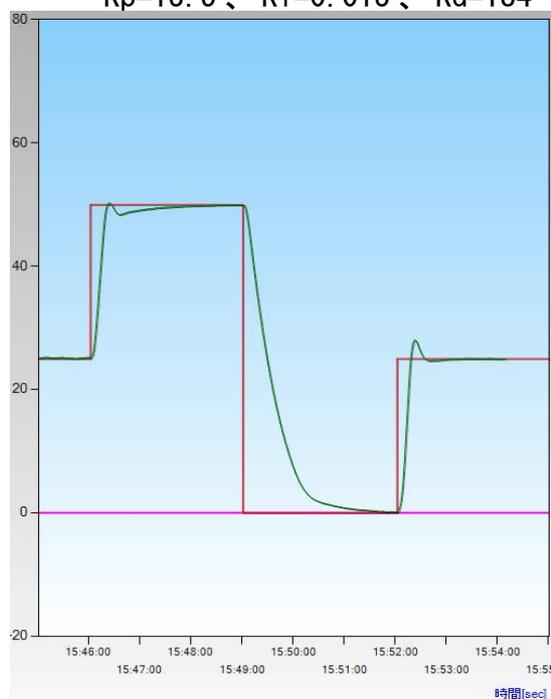
5) 設定後のステップ応答確認

ペルチェドライバ “PLP300_Driver.exe” を用いてステップ応答を確認します。

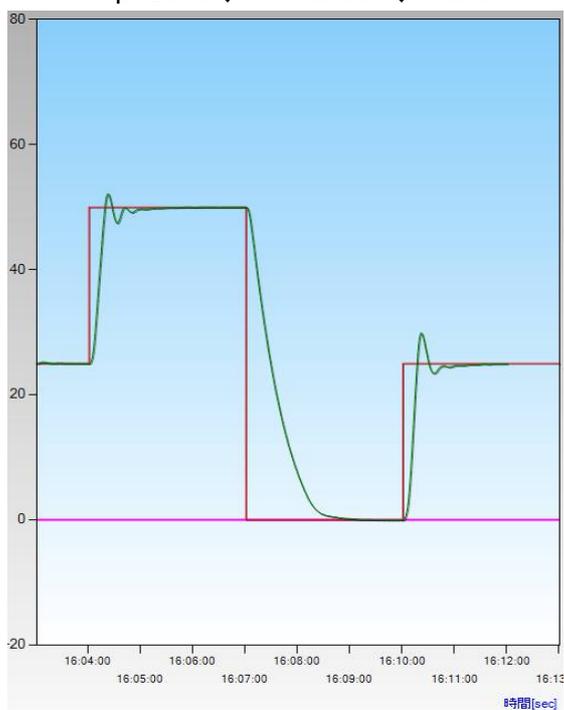
PID 制御 条件①
 $K_p=27$ 、 $K_i=0.079$ 、 $K_d=367$



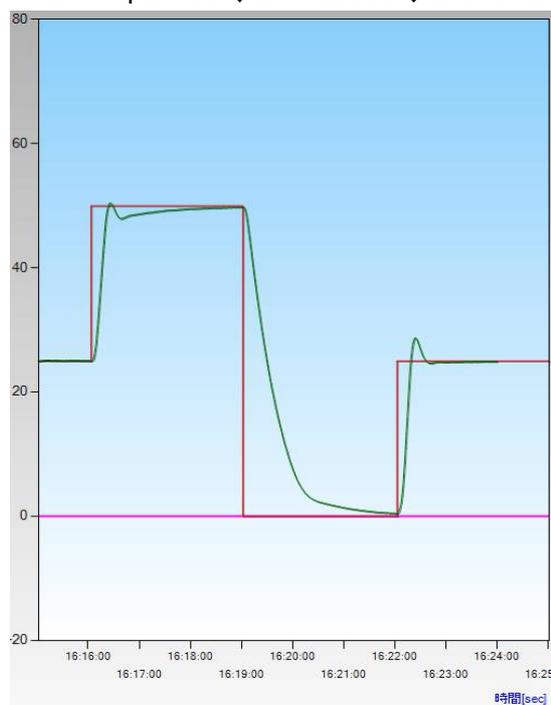
PID 制御 条件②
 $K_p=13.5$ 、 $K_i=0.013$ 、 $K_d=184$



PI 制御 条件①
 $K_p=20.3$ 、 $K_i=0.037$ 、 $K_d=0$



PI 制御 条件②
 $K_p=11.3$ 、 $K_i=0.008$ 、 $K_d=0$

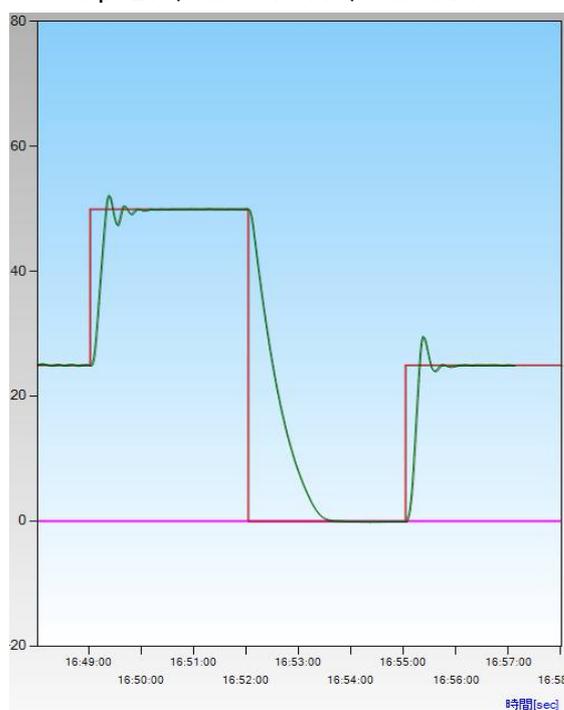


6) パラメータの合わせ込み

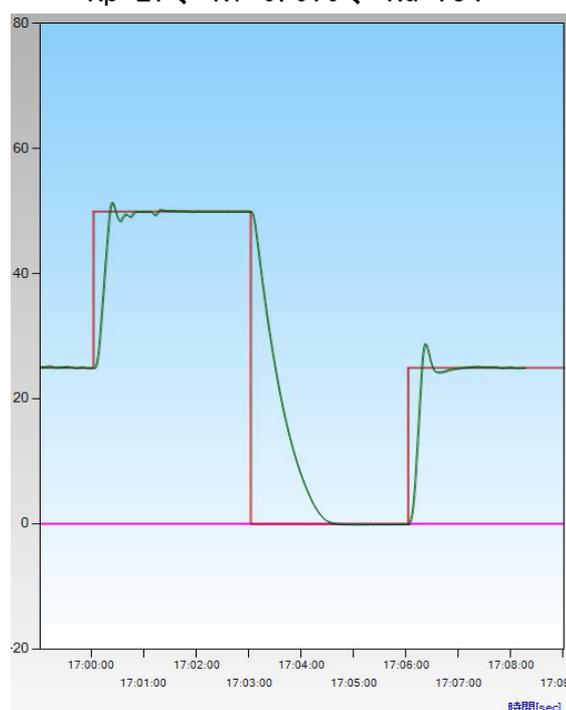
6-1) Kdの合わせ込み

Kdを大きくするとオーバーシュートが抑えられ、振動の収束が早まります。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。

Kp=27、Ki=0.079、Kd=184

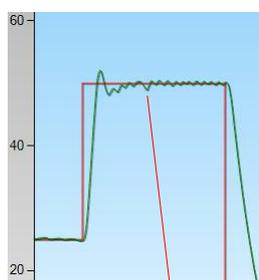


Kp=27、Ki=0.079、Kd=734



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「7. 微分制御の効果について」をご覧ください。



Kdが大きすぎると、細かい振動性応答や外乱、ノイズによる不規則な応答が発生します。

6-2) Ki の合わせ込み

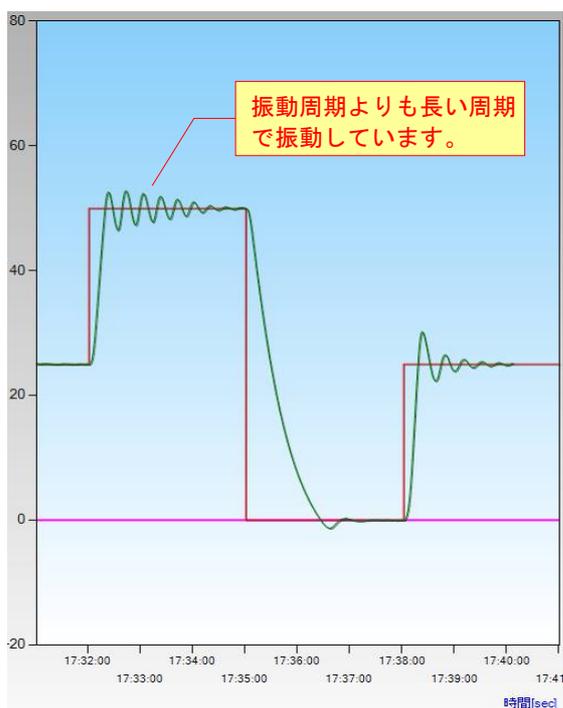
振動周期 P_u とは異なる周期で温度が上下している場合は、 K_p に対して K_i が相対的に大きすぎる可能性がありますので、 K_i を小さくしてください。

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。

※ 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。

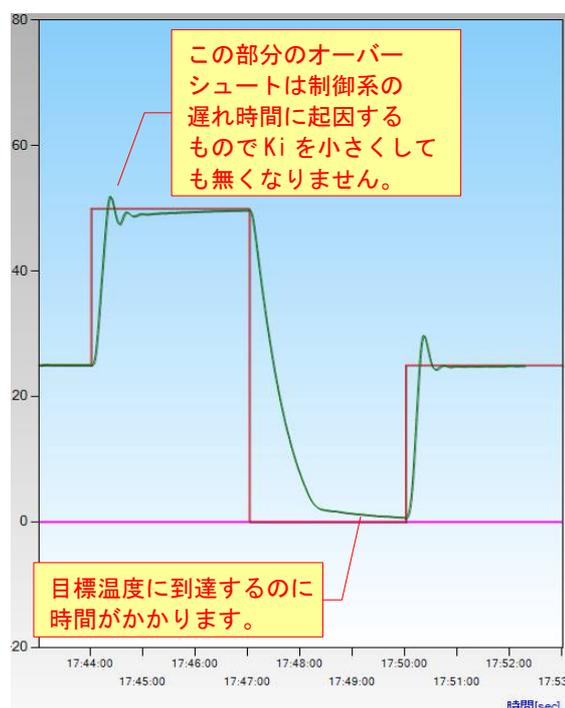
Ki が大きすぎる場合

$K_p=20.3$ 、 $K_i=0.148$ 、 $K_d=0$



Ki が小さすぎる場合

$K_p=20.3$ 、 $K_i=0.009$ 、 $K_d=0$



7. 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。

変更履歴

Rev.	日付	内容	担当
1.00	2014/01/15	初版発行	Y0
2.00	2016/05/11	Ki、Kdの計算式修正。 ペルチェモジュールを変更し、温度応答グラフを差替え。 デバイスドライバのインストールに関するテクニカルマニュアルの案内を追記。 制御用ソフトの注記追加。	Y0

ユニバーサルペルチェドライバー
PLP-300W14A
テクニカルマニュアル
PID 制御パラメータの設定
(Rev. 2. 00)

2016年5月11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/>