

# PFC の PLC への実装および温度制御性能の検証

沼津工業高等専門学校 三谷祐一郎  
株式会社新冷熱技研 馬場勝人

## 1. 緒言

本研究の動機は、例えばコロナ禍に伴う景気の悪化に起因する、主として中小製造業における業績の悪化を工学技術により救いたいという思いである。産業用冷熱機器の修理や点検を主業務とする静岡県浜松市にある会社「新冷熱技研」によれば、設備投資予算を削減せざるを得ない状況は、不良が発生している設備を更新することもままならず、製品の開発や生産の妨げとなっているとのことである。設備の中でも、本研究で注目したのは、産業界に必須の環境試験器である。ここ 10 年の、ロボットや各種センサを用いた生産ラインの高機能化、高効率化は目覚ましいが、環境試験器における温度・湿度同時制御は、従来の古典制御である PID 制御が用いられており、多入出力系の設計ができない PID 制御では、高い精度と効率化を期待できない。

そこで 2020 年度に、環境試験器の制御則として、多入出力系の設計が可能な現代制御理論の導入の検討を開始した。現代制御理論の中でも近年、簡易的なモデル予測制御手法として産業界において適用することが検討され始めた、PFC (Predictive Functional Control) を用いることを考える。PFC は、その制御系設計における調整パラメータが 2 種類のみであり、PID 以上の使いやすさを持ちながら、モデル予測制御が持つ目標値の急激な変化への追従性や、外乱に対する制御性能の良さを持った制御側である<sup>1)</sup>。本報においては、PFC の設計パラメータである、閉ループ系の応答性を定めた際、もう一つの設計パラメータである一致点の違いの影響を、温度制御装置を用いて実験により検証することを目的とする。

## 2. 実験装置

図 1 に、試作した温度制御教材を示す。この教材は、2018 年度に製作した、単軸ステージを用いた単振子の制振制御教材の制御盤を、温

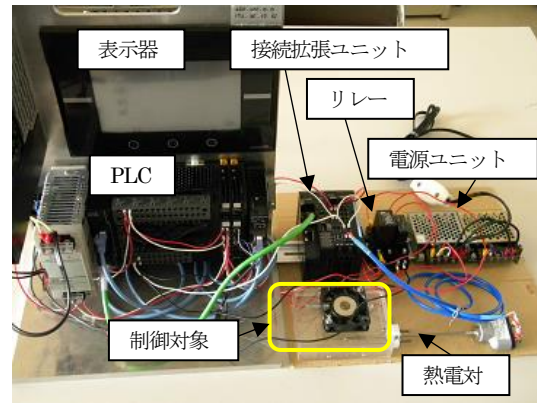


図 1 温度制御教材

度制御教材として拡張したものであり、教材の主要な制御機器は、オムロン株式会社の製品を用いている<sup>2)</sup>。汎用制御機器である表示器や PLC (Programmable Logic Controller) 等を、アルミ材を用いて固定した本体に、接続拡張ユニットを経由して、温度制御装置を接続している。すなわち、単振子の教材における PLC とサーボドライバを接続する EtherCAT ケーブルを、接続拡張ユニットにつなぎ変えることで、図のように容易に、温度制御教材として利用できる汎用性を持つ。制御対象は、透明なアクリル製の小箱内の温度であり、PLC からの信号によりリレーを開閉することで、小箱の中に設置したニクロム線を通電加熱する仕組みとなっている。また、小箱上面にファンを設置し、小箱中の空気を均一にするとともに、ファンの強度を変化させることで、外乱としての要素も持たせている。ニクロム線およびファンの駆動は、PLC とは別の外部電源ユニットを用いた。

## 3. 制御実験

前述した装置において、以下の手順で制御実験を行う。

- (1) ステップ応答によるモデリング
- (2) PID 制御と PFC の制御性能の比較
- (3) PFC における設計パラメータの差による影響の検証

### 3. 1 モデリング

図2に、制御対象におけるステップ応答の実験値と、その一次遅れ要素による近似モデルの応答との比較を示す。ニクロム線に流す電流は、PLCが持つ時分割比例制御と呼ばれる機能を用い、一定周期でONとOFFの信号を、ある時間割合でかけることで調整しており、ここでは、その周期を1秒に設定した。また、ファンに加える信号も同様の手法で調整しており、ステップ応答を取る際には、ニクロム線およびファン共に、ONの時間を50%と設定した。図より、近似モデルは制御対象を正確に表現しているといえる。なお、縦軸は初期温度を0°Cに補正した温度であり、そのステップ応答の実験値より、モデルの時定数は0.122秒、ゲイン定数は240と、それぞれ読み取った。

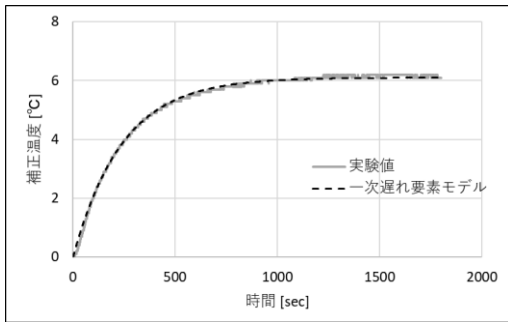


図2 ステップ応答

### 3. 2 PID制御とPFCの性能比較

前節3.1にて求めたモデルを用い、PID制御器およびPFCを設計した。ここでは、一次遅れ要素の規範モデルを設定し、閉ループ伝達関数が規範モデルに一致するように設計を行った。図3に、初期温度より3°C高い目標値をステップ関数として与えた際の、PID制御、PFCおよび、規範モデルの、三つの応答の比較を示す。規範モデルの時定数は150秒と設定した。

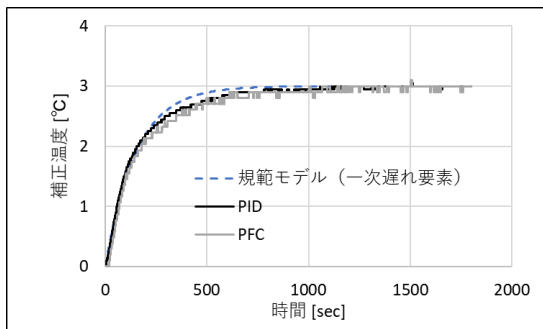


図3 PID・PFC制御結果

図より、目標値への収束に若干の遅れがみられるものの、二つの制御手法ともに、ほぼ規範モデルと同等の応答が得られた。なお制御中は、モデリングの時と同様に、ファンを50%で一定の時分割比例制御にて駆動した。

次に、PID制御およびPFCの、外乱に対する応答の比較を図4に示す。目標値は、30°Cのステップ関数として与え、応答がほぼ目標値に収束する1000秒にて、ステップ関数の外乱を与え始め、2000秒にて停止した。外乱は、ファンを時分割比例制御100%、すなわち1000秒間ONとして与えた。PID制御およびPFCともに、ほぼ同等の耐外乱性能があることが分かった。すなわち、外乱を与え始めた1000秒から一時的に温度が低下するが、さらにその1000秒後にはほぼ目標値に復帰する。また、2000秒の時点で外乱が停止すると、温度が1.5°C程度上昇するが、3000秒付近で再び目標値に復帰する。なお、二つの制御器は、前節3.2にて設計したものをを用いた。

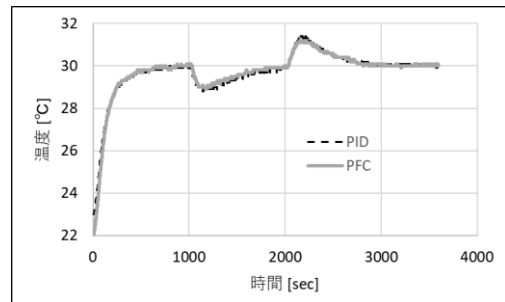


図4 耐外乱性能の比較

### 3. 3 PFCにおける制御性能

PFCの設計において、閉ループ系の応答性を決めるパラメータは固定し、もう一つのパラメータである、参照軌道における一致点の取り方を变化させた際の制御性能の違いを検証した。ここで、制御対象が二次系以上の場合、一致点は開ループ応答が参照軌道に追従するために充分小さく取る必要がある<sup>1)</sup>。しかし、ここでの制御対象は一次系と見なせることから、一致点の取り方は、それほど制御性能に影響しないと考えられる。そこで表1に示すように、5種類的一致点を用いてPFCを設計し、実験を行った。一致点の数値の単位は秒である。

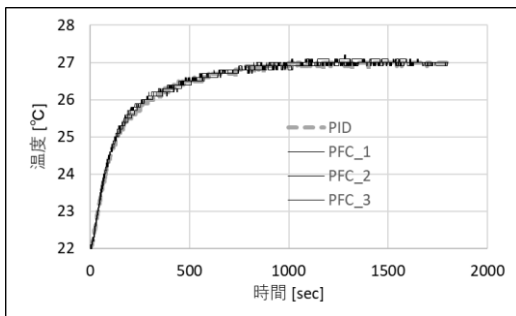
PFCにおける制御入力信号は、基底関数の線形和で表現される。一般に、基底関数として

は、0次(ステップ)関数, 1次(ランプ関数), 2次(パラボラ)関数の, 3つの関数が用いられ, その際, 3つの一致点が必要となる. 表1に, 用いた5とおりの3つの一致点  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$  の値を示す. それら3つの比はほぼ等しく設定した. また, 表における PFC\_1 の値は, 前節 3.2 の設計に用いた値であり,  $h_3$  の値は, PFC における閉ループの応答性を決める, CLTR (Closed Loop Time Response) 値に等しく取った.

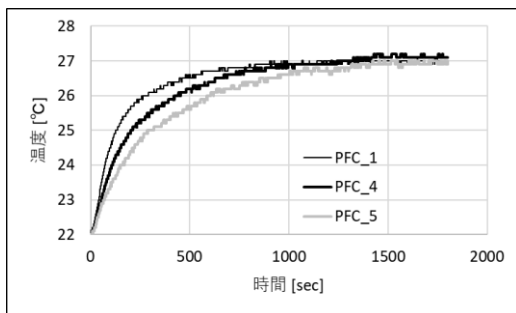
一致点を, PFC\_1 から PFC\_3 に示すように小さくした場合の制御実験結果を, 図5(a)に示す. 比較として前節 3.2 同様, PFC と同等の応答性を持たせた PID 制御結果も合わせて示した. 3種類の PFC の制御結果はほぼ重なっており, 異なる一致点を用いて設計した PFC の制御性能は, 同一であることが分かる. しかし, 最も小さい時刻における一致点  $h_1$  を,

表 1 PFC 設計における一致点

	$h_1$	$h_2$	$h_3$
PFC_1	140	210	420
PFC_2	28	42	84
PFC_3	7	11	21
PFC_4	700	1050	2100
PFC_5	2800	4200	8400



(a) 一致点が小さい場合

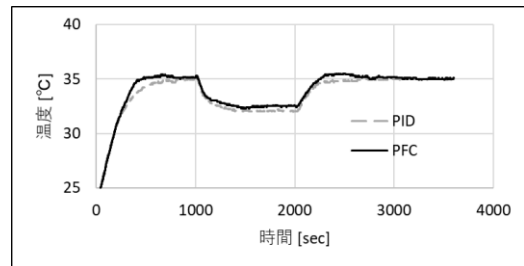


(b) 一致点が大きい場合

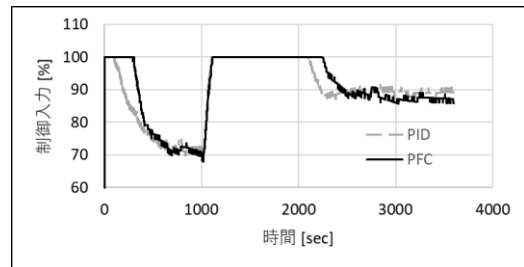
図 5 PFC における一致点の影響

CLTR 値よりも大きく取った PFC\_4 および PFC\_5 では, 図5(b)に示すように, 設計仕様どおりの応答を示した PFC\_1 と比べて, 立上りが緩やかとなり, 仕様を満たさなくなることが分かった. なお目標値は共に 27°C とした.

最後に, 制御入力信号が 100% となって飽和する場合の, PID 制御と PFC との比較を行った. 図6に, その結果を示す. 目標値は 35°C であり, 3.2 節と同様の外乱を与えた. その結果, 若干の応答の差異が見られ, 更なる検証が必要であると考えている.



(a) 温度



(b) 制御入力

図 6 制御入力が飽和する場合

## 5. 結言

PFC を PLC へ実装し, 温度制御系における性能を実験にて検証した. PID と同等の制御性能を有し, かつ, 設計パラメータである一致点を CLTR より小さく取れば, 制御性能に影響がなく, 調整が容易であることが分かった. 今後は, 温湿度同時制御系にて検証予定である.

## 謝辞

本研究を進めるにあたり, 新冷熱技研より研究費を補助頂いた. ここに謝意を表す.

## 参考文献

- 1) J.Richalet, D.O'Donovan, Predictive Functional Control, Springer, 2009
- 2) 三谷, 上, 小林, 教育工学論文集 Vol.43, 2020, pp.46-48