

1-パラメータチューニングPID制御器の設計と 石油精製プロセスへの応用[†]

藤井 憲三*・山本 透**

Design of a One-Parameter Tuning PID Controller and Its Application for a Refinery Process

Kenzo FUJII* and Toru YAMAMOTO**

In large-scale process industries, for example, the oil refinery process, advanced stabilization of the total plant becomes an important problem. Authors have shown that the advanced stabilization can reduce the amount of the operation greatly by executing appropriate tuning of the PID controllers. However, in order to actually advance the stabilization, it is necessary to appropriately tune lots of PID controllers. Especially, even if PID controllers are adequately tuned, PID parameters must be tuned many times since the system property changes gradually corresponding to the change of materials and operation conditions.

Then, to overcome such a problem, and to achieve advanced stabilization easily, a design scheme of one-parameter PID controllers is newly proposed whose PID parameters are adjusted by the only one user-specified parameter. Concretely, the control performance is firstly evaluated, and PID parameters are tuned by the only one user-specified parameter if it is necessary to improve the control performance. The effectiveness of the proposed control scheme is discussed by applying it for a benzene tower.

Key Words: process control, PID control, control performance assessment

1. 緒 言

石油精製プロセスに代表される大規模なプロセス産業においては、装置の高度な安定化が重要な課題となっている。高度安定化はPID制御器のチューニング、前置フィルタの挿入や比例・微分先行型PID制御器の適切な配置を実施することにより、操作量を大幅に削減でき、無操作化に近づけることが可能であることを実プラントでの検証を通して提案した¹⁾⁻³⁾。さらに、提案法による効果は、プロセスが安定化することにより、モデル予測制御などのアドバンスド制御を適用した場合と同等な経済効果を得ることができることや、副次的にプロセス内の脈動を防止できることから、プロセス機器の信頼性を大幅に引き上げることができるなど、プロセストータルの競争力の観点からも、重要な技術と考えられる。しかしながら高度安定化を実際に進めるためには数千ループに及ぶPID制御器の適切な調整が必要であり、技術的な問

題だけでなく、マンパワー、スキルの問題をあわせて解決する必要があった。これまでに提案されている手法の多くはパラメータを決定し、そのまま設定しても過大なゲインであったり、装置の状況に合っていなかったりすることから、再度応答を見ながらチューニングする必要があった。そのためにチューニングシステムは初期値として使用し、再チューニングに際しては試行錯誤によるチューニングとならざるを得ず、チューニングのスキルをもつ技術者が実施する必要があった。

一方、プロセス全体の安全性(安定性)を維持したり、制御性能を劣化しているループを特定することを目的として、制御性能を操業データから評価する研究が、近年盛んに行なわれている⁴⁾⁻¹⁰⁾。制御性能を評価し、制御性能が十分に発揮されていないければ、所望の制御性が得られるように制御パラメータを調整するといった一連の手続きを、現場の技術者によって容易に実行できることが必要とされている。言い換えれば、「評価」と「設計」を統合したシステムの構築は、現在、プロセス産業界における重要な課題の一つと考えられる。

そこで本論文では、このような課題に対する一つの解決法として、まず制御性能を評価し、再調整が必要と判定されたPIDパラメータを、1つのパラメータで調整できる1-パラメータチューニングの概念を提案する¹¹⁾。具体的には、まず、プロセス応答のダンピング特性に着目し、これが予め設定した基準を超えるループを特定する。そのループのPIDパラメータを再調整するために、1つの可調整パラメータで

[†] 第6回制御部門大会で発表(2006・5)

* 出光興産(株)プロセスシステムセンター 千葉県市原市姉崎

** 広島大学大学院教育学研究科 広島県東広島市鏡山

* Process System Center, Idemitsu Kosan, Co. Ltd., Ichihara, Chiba

** Graduate School of Education, Hiroshima University, Higashi-Hiroshima, Hiroshima

(Received April 1, 2008)

連続的にオーバーシュート量が調整できる制御規範を導入し、その評価規範の最小化に基づいてPIDパラメータを算出する方法を与える。すなわち、3つのPIDパラメータを集約し、1-パラメータ化することで、容易に望ましい応答（減衰特性）を得ることができる手法を提案する。なお、プロセス制御ではシステムの安定性の観点から、望ましい制御応答として、クリティカルダンピングを有する応答が好ましいことを考え、本論文では、クリティカルダンピングが得られるように、制御性能を評価し、PID制御系を設計する手順について考察する。最後に、提案するPIDパラメータの1-パラメータチューニング法を、石油精製プロセスの一つである精密蒸留塔（ベンゼン塔）に適用し、その有効性について検証する。

2. 1-パラメータチューニングPID制御

2.1 問題の記述

これまで、多くのPIDパラメータ調整法¹²⁾が提案されており、すでにパッケージ化されたチューニングシステムも数多く提供されている。しかしながら、同じ記述モデルに対してPIDパラメータを計算しているにも関わらず、手法によって求まるゲインに大きな差が生じている。たとえば、同一のモデル（一次遅れ+むだ時間系）に対して、いくつかのPIDパラメータ調整法で各パラメータを算出したものを、Table 1にまとめる。ここで、Table 1において、(1)Lopez, Miller, Smith & Murrill法（ITAE規範）¹³⁾、(2)Cohen & Coon法¹⁴⁾、(3)Chien, Hrones & Reswick法（目標値応答オーバーシュートなし）¹⁵⁾、(4)北森法¹⁶⁾である。比例ゲインでみれば最大/最小は4倍以上、積分ゲイン($k_c \cdot T_s / T_I$)では10程度になるケースも存在する。制御知識が十分ある制御技術者が使用する場合は、整理しながら使用することが可能かもしれないが、見通しの悪さは否めない。また、プロセス制御の観点から、これらのチューニング手法が制御技術者にとって、適切に判断できる制御規範や安定性が、わかりやすい形で整理されているとはいえない状況にある。さらに、多くの場合において、実際の応答とチューニング規範とが一致していない場合が多く、実用上の大きな課題となっていた。

Table 1 Comparison of PID parameters in typical PID tuning schemes

	k_c	T_I	T_D
(1)	6.0	180	38
(2)	7.7	220	36
(3)	3.2	480	50
(4)	1.9	560	90

ところで、プロセス制御においてはコントローラ相互が協調をとり、プロセスとしての性能を最大限発揮できるチューニングが最も効果的なチューニングであるといえる。そこで本論文では、コントローラ（PID制御器）の性能を「制御

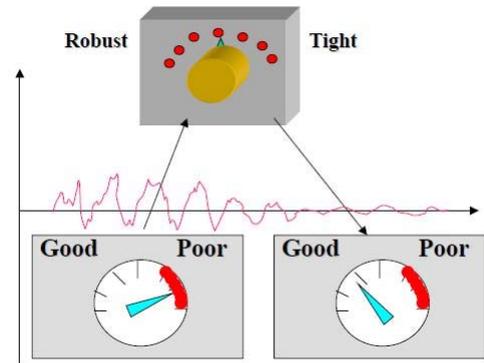


Fig. 1 Concept of 1-parameter tuning mechanism.

の強度」と捉え、その強度（パラメータ）をオペレータが調整し、この強度に対応してPIDパラメータを調整する方法について考察する。PID制御器の設計においてこのような扱いが可能になれば、応答を見ながらプロセス特性に合った調節が可能になり、調整時間の短縮やオペレータのスキル向上において効果的であると考えられる。

上述のように、制御性能（制御応答）を見ながら、強度に相当する設計パラメータを調整するという意味で、この調整方法を「1-パラメータチューニング」と呼ぶ。この概念図をFig.1に示す。

2.2 プロセスの記述モデル

プロセスシステムにおける遅れ時間は、純粋なむだ時間と高次遅れとして表現されるむだ時間の2つがある。提案されている多くの手法は、プロセスの特性を「一次遅れ+むだ時間」系で表現することが多く、高次の遅れ成分は、純粋なむだ時間として扱われる。このとき、PIDチューニングに与える影響は大きく、実用上の課題となっている。

そこで、むだ時間を実際に近い形で扱うことができるようにするために、その表現を純粋なむだ時間による表現と、二次遅れによる表現を混在させた次式を、プロセスシステムの記述モデルとして採用する。

$$G_P(s) = \frac{K}{1+Ts} \cdot \frac{e^{-\beta Ls}}{\{1+0.5L(1-\beta)s\}^2} \quad (1)$$

ここで、むだ時間の割合を表した係数を β とし、 $0 \leq \beta \leq 1.0$ の範囲の値をとる。すなわち、 $\beta = 1.0$ の場合は、すべて純粋なむだ時間で表現することを意味している。Fig.2に、(1)式による記述モデルを視覚的に示す。このような表現により、プロセス特性をより精緻に表現することが可能となり、PIDパラメータが、より実際に近い形で算出されることが期待される。

ここで、この記述モデルにおける β の影響について検証した一例を、Table 2に示す。ただし、PIDパラメータは、2.4節で述べる手法($\alpha = 2.0$)によって算出した。

Table 2から、遅れ要素の取り扱い方によっては、ゲイン比が3倍以上異なっていることがわかる。したがって、遅れ

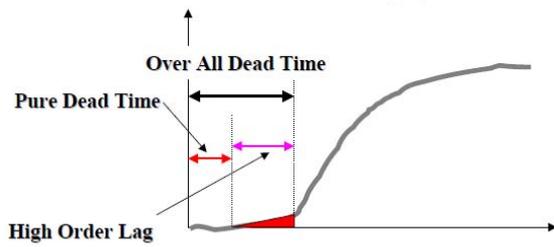


Fig. 2 Explanation of some parameters included in the process model (1).

Table 2 Comparison of PID parameters by changing β

β	k_c	T_I	T_D
0.2	3.8	130	24
0.8	1.1	126	30

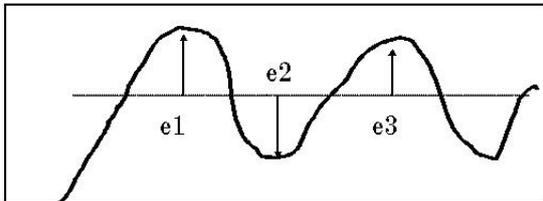


Fig. 3 Response characteristics.

要素の表現形式もPIDパラメータの推算精度を高める観点からも重要であると考えられる。種々のシミュレーションにより検討を行なった結果、 β を0.2~0.5程度に設定することが、実用上望ましいと考えられる。

2.3 制御性能の評価

つぎに、制御性能評価規範について考察する。このとき、後述するPIDパラメータの調整法との整合性をとくに重視する。

まず、定量的に評価できるように、次式により定義されるダンピング指数を考える。ただし、 e_i はFig.3に示すような制御誤差を示している。

$$I = \left| \frac{e_2}{e_1} \right| \times 100[\%] \quad (2)$$

多くのプロセスシステムでは、クリティカルダンピングのチューニングがシステムの安定性の観点から、現場において好まれている。実データから算出されるダンピング指数 I が、クリティカルダンピングと関連する基準量 \bar{I} を超えた場合、次節で述べるPIDパラメータ調整法により、新しくPIDパラメータが調整される。

2.4 PIDパラメータ調整

I S T A E 規範¹⁷⁾はオーバーシュート量がわずかであり、前述のクリティカルダンピングに限りなく近い。そこで、その領域をカバーする一般的な規範として関数として、時間重み付き絶対和に基づいた次式を採用する。

$$J = \int t^\alpha |e(t)| dt \quad (3)$$

実用的には α を $0 \leq \alpha \leq 3.0$ の範囲で設定するが、 α を大きく設定すると、応答は遅くなるが制御系の安定性が増す。一方、 α を小さく設定すると、応答は早くなる代わりに、安定度が小さくなる。このように、 α の設定は安定性に強く関係しており、本論文ではこれを、「制御強度」として捉え、オペレータがこの α を調整することで、制御系が設計できるようにする。なお、前述のI S T A E規範は、 $\alpha = 2.0$ である。このように、 α に制御性能を集約し、1-パラメータ化することで、設計の見通しを良くしている。

PIDパラメータの算出に際しては、制御器やモデルに汎用性をもたせるために、解析的な手法ではなく、数値計算による方法を採用する。とくに、応答形状を考慮するために、非線形探索法¹⁸⁾を用いる。一例として、I P D P F制御器に対して算出したPIDパラメータをTable 3に示す。ただし、 $\beta = 0.3$ としている。

Table 3 Comparison of PID parameters by changing α

α	k_c	T_I	T_D	I
0.0	2.4	132	23	9.3
1.0	2.2	130	23	5.6
2.0	1.8	130	21	1.7

Table 3から、 α は比例ゲインにのみ大きく影響し、積分時間および微分時間はほとんど変化していないことがわかる。したがって、 α の調整は比例ゲインの調整に直結しており、この意味からも、 α が制御強度を示す可調整パラメータであるといえる。この特徴に基づくと、さらに調整する必要が生じた場合は、比例ゲインを調整すれば良いことになる。

以上をまとめると、つぎのようになる。

[1-パラメータチューニング法]

1. 制御性能評価 制御性能を評価する指標として、(2)式のダンピング指数 I を用いる。 I が基準量 \bar{I} を超えた場合にのみ以下のステップに進む。ここで、 \bar{I} はクリティカルダンピング指向のプロセスにおいては、5%程度に設定することが実用的である。
2. システム同定 操業データに基づき、(1)式の形でパラメータ同定を行なう。ここでは、 β を予め設定し、パラメータ同定法としてNelder-Mead法¹⁸⁾を用いる。
3. PIDチューニング (3)式において α を設定し、その評価規範の最小化に基づいてPIDパラメータを算出する。ここでは、クリティカルダンピングとの関連から、 $\alpha = 2.0$ として、汎用のオプティマイザを利用して、PIDパラメータを算出する。このとき、次節において詳細に考察するが、 α の変化は比例ゲインの大きさに影響するが、そのほかの制御パラメータ(積分時間と微分時間)には、ほとんど影響しない。結果的には、 α の調整は、比例ゲインの調整に対応している。
4. 制御性能の再評価とチューニング $\alpha = 2.0$ に対応したPIDパラメータで制御を行ない、この制御性能を上述

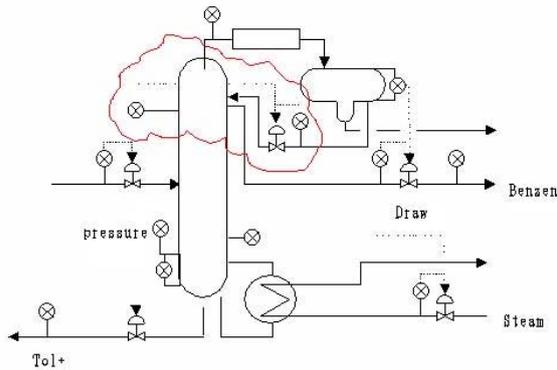


Fig. 4 Schematic figure of benzen distillation process.

の1.と同様に評価する。評価結果が基準量 \bar{I} を満足するまで、 α を調整する。(結果的には、上述のように、基準量を満足するまで比例ゲインのみを調整することになる。)

3. ベンゼン塔プロセスへの適用

3.1 ベンゼン塔の概要

本論文で提案した1-パラメータチューニングPID制御法の有効性を検証するために、本手法を石油精製プロセスの一つである高純度蒸留装置(ベンゼン、トルエン分離装置:以下ベンゼン塔)に適用する。本装置の概要図を Fig.5 に示す。本装置はむだ時間や遅れ時間が長く、条件数も大きいことから、モデル予測制御を適用しようとしても、そのチューニングが極めて難しいプロセスである。原料はベンゼンとトルエンの混合物であり、塔中央部に供給され塔頂側からベンゼン、塔底側からトルエンが高純度で分離される。蒸留塔は高純度を保つために多くの棚段を備えており、このために、段間の保持量が増え、むだ時間、遅れの大きいプロセス特性を持っている。本装置はすでにIMCチューニング法によりPIDパラメータを調整し、おおむね良好な制御結果が得られている塔頂温度制御ループに対して適用した。

3.2 適用結果

提案手法を、実際の精密蒸留塔の塔頂制御へ適用した結果を Fig.6 に示す。なお、可調整パラメータ α は 2.0 とし、記述モデルにおける β は 0.4 と設定した。また、制御性能評価規範となる \bar{I}_0 は、2.0 と設定した。先にも述べたように、本制御ループはすでにIMCチューニング法 ($k_c = 3.0$, $T_I = 2.5[\text{min}]$, および $T_D = 0.4[\text{min}]$) で調整されていた塔に適用したものであり、その結果よりもさらに良好な制御結果が得られ、提案手法の有効性は顕著である。なお、本手法の適用後は、 $k_c = 9.0$, $T_I = 3.0[\text{min}]$, および $T_D = 1.0[\text{min}]$ である。また、本件は一度のPIDチューニングで所望の制御性が得られたため、それ以降はPIDチューニング(具体的には、 α の調整)を行っていない。

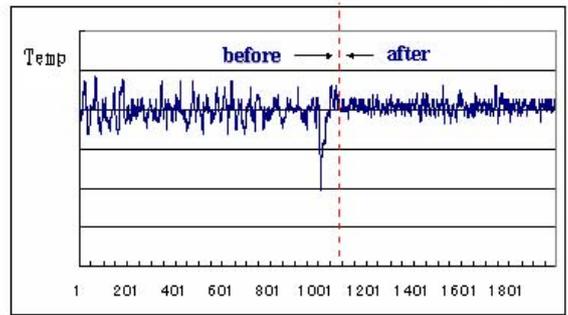


Fig. 5 Control result using the proposed 1-parameter tuning PID control scheme, where $\alpha = 2.0$ and $\beta = 0.4$.

4. 結 言

プロセス制御に用いられているPID制御器は、チューニング後しばらくは良好に機能するが、特性変化や操作条件変化によって制御性能が劣化する。再チューニングは専門的な知識経験が必要であり、対応可能な技術者は限られている。そこで制御性能を評価し、その評価に基づいて所望の制御性能から外れた場合にPIDパラメータを再調整するという一連の方策が性能を継続させるために必要不可欠であるがこの技術は確立されていない。本論文での提案法は、この技術の重要性に着眼し、制御性能と制御系設計を統合した新しいPIDパラメータの調整技術として開発した。本開発により、再チューニングやチューニングの指針を明確にすることができ、チューニングの経験を積んだ技術者でなくとも的確に、しかも早くチューニングすることができる。数千ループの規模を持つ石油精製装置において、常に性能を保持しなければならないという観点から、本技術は重要な意味をもっているといえる。プロセスの高度な安定化や高性能化は、装置内の脈動を防ぎ安定化することで突発外乱を押さえ、危険域への突入確率を下げ安全性を向上させる重要な役割をもっているだけでなく、装置機器(ポンプ、弁など)の損傷を防ぎ保全費を低下させるとともに信頼性を向上させることができる。さらに品質管理(工程能力)、省エネルギーにも多大な効果があり競争力の観点でも重要な技術といえる。しかも、すでに保有している資産(DCS)を高度に活用することで、達成可能でありアセットマネジメントの観点からも重要な技術と考えられる。従来、PIDチューニングは個別のループをいかに安定化するか、制御性を向上させるかといった観点からアプローチがなされていたが、実プラントを高度に安定化させるといった目的には、ループ間の解釈が必要であり、実用性が十分あるとはいえなかった。そのためには、必要に応じて制御の強さをあたかも調整ノブを回すように調整できることが必要である。本提案法によると、制御強度を連続的なパラメータで設定できることや、閉ループにおいてチューニングを複数回繰り返すことで、容易に目的が達成できる。今後、さらに自動チューニングが可能となるシステムを構築する予

定である。

参考文献

- 1) 藤井, 山本: 常圧蒸留装置のワンスポットチューニングPID制御, 計測自動制御学会論文集, **38-3**, 270/276 (2002)
- 2) T.Yamamoto and K.Fujii: One-Spot Tuning PID Control of a Sulforane Process, Proc. of IEEE Conference on Control Applications on CD, Taipei, 6 pages without page numbers (2004)
- 3) K.Fujii and T.Yamamoto: Design of a Multiloop One-Spot Tuning of PID Controller and its Application for a Crude Distillation Unit, SICE J. of Control, Measurement and System Integration, to be submitted.
- 4) T.J.Harris: Assessment of Closed Loop Performance, J. Canadian J. of Chemical Engineering, **67**, 856/861 (1989)
- 5) L.D.Desborough and T.J.Harris: Performance Assessment Measures for Univariate Feedback Control, Canadian J. of Chemical Engineering, **70**, 1186/1197 (1992)
- 6) B.Huang and S.L.Shah: Performance Assessment of Control Loops: Theory and Applications, Springer-Verlag, London (1999)
- 7) T.J.Harris, C.T.Seppala and L.D.Desborough: A Review of Performance Monitoring and Assessment Techniques for Univariate and Multivariate Control Systems, J. of Process Control, **9**, 1/17 (1999)
- 8) M.J.Grimble: Controller Performance Benchmarking and Tuning using Generalised Minimum Variance Control, Automatica, **38**, 2111/2119 (2002)
- 9) B.Huang: A Pragmatic Approach Towards Assessment of Control Loop Performance, Int. J. of Adaptive Control and Signal Processing, **17**, 589/608 (2003)
- 10) 加納, 山下: プロセス制御系の制御性能評価と監視, 計測と制御, **44-2**, 125/129 (2005)
- 11) 藤井, 山本: 1-パラメータチューニングPID制御の開発と適用, 第6回計測自動制御学会制御部門大会講演論文集, 名古屋 (2006)
- 12) 須田ほか: PID制御, 朝倉書店 (1992)
- 13) J.A.Miller, A.M.Lopez, C.L.Smith and P.W.Murrill: A Comparison of Controller Tuning Techniques, Control Engineering, **14**, 72/75 (1967)
- 14) G.H.Cohn and G.A.Coon: Theoretical Consideration of Retarded Control, Trans. of American Society of Mechanical Engineering, **75**, 827/834 (1953)
- 15) K.L.Chien, J.A.Hrones and J.B.Reswick: On the Automatic Control of Generalized Passive Systems, Trans. of American Society of Mechanical Engineering, **74**, 175/185 (1952)
- 16) 北森: 制御対象の部分的知識に基づく制御系の設計法, 計測自動制御学会論文集, **15-4**, 549/555 (1992)
- 17) 増淵: 改訂 自動制御基礎理論, コロナ社, 181/184 (1977)
- 18) J.A.Nelder and R.A.Mead: A Simplex Method for Function Minimization, Computer J., **7**, 308/313 (1965)

山本 透 (正会員)



1987年徳島大学大学院工学研究科修士課程(情報工学専攻)修了。大阪大学基礎工学部助手, 岡山県立大学情報工学部助教授, 広島大学教育学部助教授などを経て, 2005年広島大学大学院教育学研究科技術・情報教育学講座教授となり現在に至る。2006年3月~9月日本学術振興会特定国派遣研究員(アルバータ大学化学・材料工学科)。制御系設計の高度化と知能化に関する研究に従事。電気学会進歩賞, 計測自動制御学会技術賞などを受賞。電気学会, システム制御情報学会, IEEEなどの会員。工学博士。

[著者紹介]

藤井憲三 (正会員)



1972年宇部工業高等専門学校電気工学科卒業。同年出光興産(株)入社。システム制御関係の開発業務に従事。電気学会進歩賞, 計測自動制御学会技術賞などを受賞。化学工学会, 石油学会, 電気学会などの会員。