

## プロセス制御系設計用CADソフト(その24) —省エネを考慮に入れたPIDコントローラの調整—

黒須 茂, 松本 武士\*, 野田善之\*\*

### CAD Software for Designing Process Control System (part 24) —Tuning of PID Controller under Consideration of Energy Savings—

Sigeru KUROSU, Takeshi MATSUMOTO\*, Yoshiyuki NODA\*\*

#### 1. はじめに

本研究は, 評価関数にエネルギーを考慮して, 1次おくれ+むだ時間系に対してPIDコントローラの種々の調整法を適用して応答特性ならびに操作量に関する評価を比較検討している. 前稿では<sup>1)</sup>, ある特定のプラント( $K_p = 1, T_p = 10$  [min],  $L_p = 1$  [min])を選んで, 応答特性ならびに操作量に関する評価を定量的に検討した. そこでは,

制御方式: PID方式とI-PD方式

調整法: 限界感度法, 部分的モデルマッチング法, 最適化手法

応答特性: 目標値追従特性と外乱抑制特性についてまとめている. その結果, つぎのことが明らかとなった.

1. PID方式で目標値追従特性に対して求めたゲインを, I-PD方式に使用してはならない.
2. I-PD方式には, 目標追従特性においてオーバーシュートを抑える働きがある.
3. 省エネを考慮した場合には, PID方式よりI-PD方式の方が優れている.
4. 目標値追従特性に対して求めたゲインは, 外乱抑制に対しては応答が緩慢になる. また外乱抑制特性に対して求めたゲインは, 目標追従特性に対しては応答が振動的になる.
5. 外乱抑制特性において偏差の自乗積分(ISE)と同時に, 操作量の自乗積分値(ISC), 操作量の時間微分の自乗積分値(ISTC)が少ない

調整法は

- ・限界感度法
  - ・部分的モデルマッチング法(オーバーシュート10%の参照モデル-外乱抑制特性)
- これはPID方式でもPI方式でも成り立つ.

6. PI方式とPID方式とを比較した結果, PI方式の方が目標値追従は低下するものの, ISCもISTCも少ない. 省エネにはPID方式のD動作は貢献しない.
7. PI方式とI-P方式とを比較した結果, I-P方式の方が目標追従特性は低下するものの, ISCもISTCも少ない. 最も省エネに貢献できる制御方式はI-P方式である.
8. 最適化手法では, ISCとISTCが大きくなり, 省エネの観点からみてISEの評価だけでは使いものにならない.

本研究は, 前稿の結論を踏まえて, むだ時間を変化させて省エネを考慮した調整法に関する一般的な結論を導くことを目的とする.

#### 2. 制御方式

Fig.1に示すような2つの制御方式について検討する.

プラントの $G_p(s)$ は

$$G_p(s) = \frac{K_p}{1+T_p s} e^{-L_p s} \quad (1)$$

であり,ここにプラントのゲイン $K_p = 1$ , 時定数

\*) 平成11年度機械工学科卒業生(現株第一テクノ)

\*\*) 平成12年度電子システム専攻科卒業生(現豊橋技術科大学)

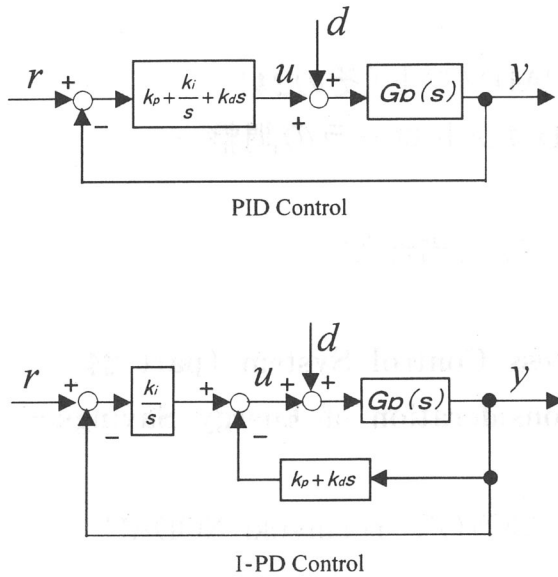


Fig. 1 PID and I-PD Control Schemes

$T_p = 10[\text{min}]$ , むだ時間:  $L_p = 1 \sim 10[\text{min}]$ として比較する. 前稿でも述べたが, 外乱応答はPID方式とI-PD方式とでは閉ループ系の伝達関数が同じとなり, 制御方式による相違はない.

コントローラの伝達関数  $G_c(s)$  は

$$G_c(s) = \frac{k_i + k_p s + k_d s^2}{s} \quad (2)$$

であり,  $k_i$ : 積分ゲイン,  $k_p$ : 比例ゲイン,  $k_d$ : 微分ゲインである.

ここで (1) 式において,  $T_p$  を固定して  $L_p$  だけを可変にして一般性を失わないことを証明しておこう. (1) と (2) 式から開ループ伝達関数  $G_0(s)$  は

$$G_0(s) = \frac{K_p e^{-L_p s} (k_i + k_p s + k_d s^2)}{(1 + T_p s) s} \quad (3)$$

となり, 時定数を 1 に規格化する.

$$\tilde{s} = T_p s \quad (t = T_p \tilde{t}) \quad (4)$$

(4) を (3) 式に代入すると

$$G_0(\tilde{s}) = \frac{K_p e^{-\frac{L_p}{T_p} \tilde{s}} (k_i T_p + k_p \tilde{s} + k_d \tilde{s}^2)}{(1 + \tilde{s}) \tilde{s}} \quad (5)$$

がえられ,  $k_p \rightarrow \tilde{k}_p$ ,  $k_i T_p \rightarrow \tilde{k}_i$ ,  $k_d / T_p \rightarrow \tilde{k}_d$  とおけば速応性, 安定性などのすべての特性は  $L_p / T_p$  だけに依存していることがわかる.

### 3. 種々の調整法

つぎの 3 種類の調整法

- ・ 限界感度法

- ・ 部分的モデルマッチング法

- ・ 最適化手法

によって比較検討する. 以下のように ( ) の中に示す短縮語を用いることにする.

- (1) 限界感度法 (USM)

- (2) ~ (5) 部分的モデルマッチング法 (PMM)

- (2) オーバーシュート10%の参照モデル(目標値追従特性) (PMM10% - r)

- (3) オーバーシュート10%の参照モデル(外乱抑制特性) (PMM10% - d)

- (4) オーバーシュート0%の参照モデル(目標値追従特性) (PMM 0% - r)

- (5) オーバーシュート0%の参照モデル(外乱抑制特性) (PMM 0% - d)

- (6) ~ (8) 最適化手法

- (6) PID方式(目標値追従特性) (OPT PID - r)

- (7) I-PD方式(目標値追従特性) (OPT I-PD - r)

- (8) 外乱抑制特性 (OPT - d)

本稿で述べる最適化手法では, 前稿にならって偏差の自乗積分値 (ISE)

$$ISE = \int_{L_p}^{100} (r - y)^2 dt \quad (6)$$

が最小になるようにPIDゲインを求めている.

ここに,  $r$  は目標値であり,  $y$  は制御量である.

### 4. 評価関数

3. で述べた種々の調整法に対する制御成績を相対的に比較するために, つぎの3種類を考える.

$$ISE = \int_{L_p}^{80} (r - y)^2 dt \quad \text{誤差自乗積分値 (ISE)} \quad (7)$$

$$ISC = \int_0^{80} (u - u_0)^2 dt \quad \text{操作量自乗積分値 (ISC)} \quad (8)$$

$$ISTC = \int_0^{80} \left( \frac{du}{dt} \right)^2 dt \quad \text{操作量の時間微分自乗積分値 (ISTC)} \quad (9)$$

ここに,  $r$ : 目標値,  $y$ : 制御量,  $u$ : 操作量,  $u_0$ :  $r$  に対する操作量の定常値である.

(8) 式と (9) 式で示した評価関数は, 制御成績を相対的に比較するために用いるのであって, 最適化手法には使用していないことに注意しよう.

## 5. 調整法に対する制御成績の比較

3. で述べた種々の調整法に対してPID, I-PD方式においてPID, PIゲインならびに制御成績を求めることとしよう。

### 5.1 限界感度法 (USM)

限界感度法を適用して求めたPID・PIゲインをTable 1に示す。

Table 1 Tuned PID and PI gains (USM)

dead time	PID			PI	
	$L_p$	$k_p$	$k_i$	$k_p$	$k_i$
1	9.77	5.06	4.72	7.33	2.28
2	5.09	1.36	4.72	3.82	0.62
3	3.53	0.65	4.77	2.65	0.29
4	2.75	0.39	4.84	2.06	0.18
5	2.28	0.27	4.88	1.71	0.12
6	1.97	0.20	4.94	1.48	0.09
7	1.75	0.15	5.01	1.31	0.07
8	1.59	0.12	5.10	1.19	0.06
9	1.46	0.10	5.20	1.09	0.05
10	1.36	0.09	5.26	1.02	0.04

#### (1) 目標値追従特性

PID, I-PD, PI, I-P方式に対する制御成績を

Table 2に示す。

Table 2 Control Performance Indices for Various Control Schemes

dead time	PID Control			PI Control		
	ISE	ISC	ISTC	ISE	ISC	ISTC
1	0.95	171	2955	1	120	63
2	1.49	77	776	1.46	49	7.3
3	1.83	47	376	1.72	26	2
4	2.06	32	236	2.03	16	0.85
5	2.29	24	165	2.32	10.3	0.43
6	2.47	18.6	127	2.7	7.1	0.25
7	2.54	14.4	104	3.15	5	0.16
8	2.68	11.8	90	3.55	3.9	0.11
9	2.85	9.8	80	4.06	3	0.08
10	3.12	8.9	71	4.8	2.6	0.06

dead time	I-PD Control			I-P Control		
	ISE	ISC	ISTC	ISE	ISC	ISTC
1	1.18	36.4	36.5	1.76	15.4	10.4
2	2.3	13.3	4.8	3.58	4.2	1.3
3	3.3	6.6	1.5	5.6	1.9	0.4

4	4.4	3.9	0.7	7.5	2	0.2
5	5.3	2.9	0.4	9.8	3.1	0.1
6	6.3	2.5	0.3	11.8	4.5	0.07
7	7.6	2.5	0.17	14	6.3	0.05
8	8.8	2.8	0.12	15.2	7.4	0.04
9	9.8	3.4	0.1	17.3	9.2	0.03
10	10.3	3.8	0.09	20.6	12.4	0.02

Table 2より, つぎのことがわかる。

1. PID方式のISTCはすべてむだ時間 $L_p$ に対して群を抜いて悪化している。
2. むだ時間 $L_p > 7$  [min]になると, I-P方式の目標値追従特性は劣化し, 緩慢な応答になる。PI方式は多少オーバーシュートをもった緩やかな振動特性を示すが, I-P方式よりも良好である。

#### (2) 外乱抑制特性

PID, I-PD, PI, I-P方式に対する制御成績を

Table 3に示す。

Table 3 Control Performance Indices for Various Control Schemes

dead time	PID and I-PD Control			PI and I-P Control		
	ISE	ISC	ISTC	ISE	ISC	ISTC
1	0.017	1.44	30.9	0.05	2.01	1.3
2	0.11	2.6	30	0.28	3.47	0.57
3	0.31	3.66	30.2	0.74	4.73	0.34
4	0.63	4.66	31.2	1.42	6.04	0.24
5	1.04	5.69	31.7	2.32	7.33	0.18
6	1.54	6.7	32.7	3.35	8.71	0.14
7	2.15	7.71	33.9	4.55	10.16	0.12
8	2.83	8.77	35.5	5.66	11.56	0.1
9	3.57	9.85	37.4	7.01	13.7	0.09
10	4.28	10.9	38.5	8.64	14.8	0.08

Table 3より, つぎのことがわかる。

1. D動作が入ると, すべてのむだ時間 $L_p$ に対してISTCが著しく劣化する。
2. ISTCを除けば, PID, I-PD方式の方がPI, I-P方式より良好な成績を示している。

### 5.2 PMM10%-r

PMM10%-rを適用して求めたPID・PIゲインをTable 4に示す。

Table 4 Tuned PID and PI gains  
(PMM10%-r)

dead time	PID			PI	
	$L_p$	$k_p$	$k_i$	$k_d$	$k_i$
1	7.43	0.72	2.24	5.03	0.50
2	3.84	0.36	2.24	2.55	0.25
3	2.64	0.24	2.24	1.73	0.17
4	2.03	0.18	2.25	1.32	0.13
5	1.67	0.15	2.25	1.07	0.11
6	1.43	0.12	2.25	0.91	0.09
7	1.26	0.10	2.26	0.79	0.08
8	1.13	0.09	2.26	0.71	0.07
9	1.03	0.08	2.26	0.64	0.06
10	0.95	0.07	2.27	0.59	0.05

## (1) 目標値追従特性

PID, I-PD, PI, I-P方式に対する制御成績をTable 5に示す。

Table 5 Control Performance Indices for Various Control Schemes

dead time	PID Control			PI Control		
	ISE	ISC	ISTC	ISE	ISC	ISTC
1	0.46	57.88	334.90	0.69	33.37	8.74
2	0.90	26.33	11.87	1.35	13.14	0.99
3	1.32	15.87	38.34	1.99	6.80	0.29
4	1.73	10.82	22.80	2.61	3.96	0.14
5	2.12	7.86	15.34	3.21	2.48	0.08
6	2.50	5.96	11.20	3.79	1.64	0.06
7	2.87	4.68	8.74	4.35	1.20	0.05
8	3.21	3.72	7.03	4.90	0.99	0.04
9	3.55	2.99	5.84	5.43	0.93	0.04
10	3.85	2.27	5.00	5.94	0.94	0.03

dead time	I-PD Control			I-P Control		
	ISE	ISC	ISTC	ISE	ISC	ISTC
1	5.70	0.47	0.64	6.02	0.69	0.42
2	6.39	0.94	0.32	6.95	1.35	0.22
3	7.06	1.41	0.21	7.86	2.01	0.15
4	7.68	1.87	0.16	8.71	2.64	0.11
5	8.32	2.33	0.13	9.54	3.26	0.09
6	8.94	2.79	0.11	10.38	3.89	0.08
7	9.54	3.25	0.09	11.17	4.49	0.07
8	10.20	3.73	0.08	11.94	5.09	0.06
9	10.87	4.22	0.07	12.68	5.69	0.05
10	11.76	4.84	0.06	13.48	6.31	0.05

Table 5 より, つぎのことがわかる。

1. PID方式はつねにISEが小さく, 速応性はよい。むだ時間  $L_p$  が大きくなると, ISC, ISTCは少なくなるものの, ISTCは郡を抜いて大きい。
2. I-PD, I-Pはすべてのむだ時間  $L_p$  に対して緩慢な応答になり, 速応性を劣化させている。

## (2) 外乱抑制特性

PID, I-PD, PI, I-P方式に対する制御成績

Table 6に示す。

Table 6 Control Performance Indices for Various Control Schemes

dead time	PID and I-PD Control			PI and I-P Control		
	ISE	ISC	ISTC	ISE	ISC	ISTC
1	0.09	1.24	6.15	0.19	1.70	0.43
2	0.35	2.45	5.72	0.68	3.36	0.22
3	0.76	3.67	5.58	1.42	5.00	0.15
4	1.28	4.89	5.56	2.32	6.62	0.11
5	1.91	6.10	5.52	3.36	8.22	0.09
6	2.63	7.31	5.49	4.52	9.80	0.08
7	3.42	8.53	5.52	5.74	11.36	0.07
8	4.30	9.74	5.50	7.01	12.91	0.06
9	5.23	10.96	5.49	8.33	14.44	0.06
10	6.27	12.17	5.53	9.70	15.95	0.05

Table 6 より, つぎのことがわかる。

1. PID・I-PD方式はつねにISE, ISCが小さいが, ISTCは郡を抜いて大きい。
2. むだ時間が小さい場合 ( $L_p < 2$ ) では, PID・I-PD方式はISTCが大きく使用できないが, むだ時間が大きい場合 ( $L_p > 3$ ) では, ISTCも小さくなり使用可能となる。

## 5.3 PMM10%-d

PMM10%-dを適用して求めたPID・PIゲインをTable 7に示す。

Table 7 Tuned PID and PI gains  
(PMM10%-d)

dead time	PID			PI	
	$L_p$	$k_p$	$k_i$	$k_d$	$k_i$
1	10.52	4.65	3.26	5.89	2.16
2	5.23	1.28	3.14	2.92	0.64
3	3.46	0.62	3.01	1.94	0.33
4	2.58	0.38	2.94	1.45	0.21
5	2.06	0.26	2.86	1.16	0.16
6	1.71	0.2	2.77	0.97	0.12
7	1.46	0.15	2.7	0.83	0.1
8	1.28	0.13	2.64	0.8	0.07

9	1.14	0.11	2.57	0.66	0.07
10	1.02	0.09	2.44	0.6	0.06

## (1) 目標値追従特性

PID,I-PD,PI,I-P方式に対する制御成績を  
Table 8 に示す.

Table 8 Control Performance Indices for Various Control Schemes

dead time	PID Control			PI Control		
	ISE	ISC	ISTC	ISE	ISC	ISTC
1	1.03	211	1570	1.1	90	31.6
2	1.71	90.8	327.1	1.8	35.7	3.4
3	2.21	52.1	126.6	2.3	19	0.9
4	2.59	33.8	65.8	2.8	11.1	0.4
5	2.85	23.1	39.1	3.4	8	0.2
6	3.27	17.5	25	3.8	5	0.13
7	3.31	11.9	17.2	4.4	3.8	0.1
8	3.84	10.2	12.6	4.75	2.3	0.06
9	4.14	8.1	9.4	5.3	1.96	0.05
10	4.2	5.5	7	5.8	1.49	0.04

dead time	I-PD Control			I-P Control		
	ISE	ISC	ISTC	ISE	ISC	ISTC
1	1.18	32.2	35.3	1.79	19.2	9.85
2	2.3	13.3	4.88	3.35	7.78	1.56
3	3.35	7.58	1.61	4.76	4.74	0.58
4	4.35	5.24	0.77	6.08	3.68	0.3
5	5.34	3.99	0.43	7.07	3.93	0.22
6	6.17	3.89	0.3	8.29	3.82	0.14
7	7.25	3.37	0.19	9.21	4.27	0.11
8	7.86	3.87	0.17	10.49	4.6	0.08
9	8.65	4.1	0.13	11.34	5.16	0.07
10	9.712	5.8	0.06	12.46	5.8	0.06

## (2) 外乱抑制特性

PID,I-PD,PI,I-P方式に対する制御成績を  
Table 9 に示す.

Table 9 Control Performance Indices for Various Control Schemes

dead time	PID and I-PD Control			PI and I-P Control		
	ISE	ISC	ISTC	ISE	ISC	ISTC
1	0.09	1.24	6.15	0.19	1.70	0.43
2	0.35	2.45	5.72	0.68	3.36	0.22
3	0.76	3.67	5.58	1.42	5.00	0.15

4	0.754	5.31	9.9	1.724	6.82	0.18
5	1.28	6.38	9.23	2.68	8.44	0.15
6	1.93	7.57	8.57	3.83	9.83	0.11
7	2.71	8.55	8.06	5.06	11.4	0.09
8	3.56	9.85	7.66	6.41	12.8	0.08
9	4.5	11.04	7.22	7.78	14.31	0.07
10	5.59	12.11	6.73	9.27	15.81	0.06

## 5.4 PMM 0%-r

PMM 0%-r を適用して求めたPID・PI  
ゲインをTable10に示す.

Table10 Tuned PID and PI gains  
(PMM0%-r)

dead time	PID			PI	
	$Lp$	$kp$	$ki$	$kp$	$ki$
1	4.231	0.419	0.458	3.722	0.372
2	2.150	0.210	0.500	1.85	0.185
3	1.457	0.141	0.542	1.223	0.123
4	1.112	0.106	0.583	0.908	0.092
5	0.905	0.085	0.625	0.718	0.073
6	0.768	0.071	0.667	0.591	0.06
7	0.671	0.062	0.708	0.499	0.051
8	0.598	0.054	0.750	0.429	0.045
9	0.542	0.048	0.792	0.374	0.039
10	0.497	0.044	0.833	0.33	0.035

## (1) 目標値追従特性

PID,I-PD,PI,I-P方式に対する制御成績を  
Table11に示す.

Table11 Control Performance Indices for Various Control Schemes

dead time	PID Control			PI Control		
	ISE	ISC	ISTC	ISE	ISC	ISTC
1	0.85	22.22	8.19	0.97	18.28	2.68
2	1.67	7.61	1.63	1.95	5.48	0.26
3	2.46	3.26	0.76	2.95	1.89	0.07
4	3.24	1.44	0.49	3.96	0.62	0.04
5	3.99	0.63	0.36	5.01	0.27	0.03
6	4.74	0.32	0.29	6.10	0.41	0.02
7	5.42	0.31	0.25	7.21	0.86	0.02
8	6.15	0.44	0.23	8.27	1.47	0.02
9	6.85	0.69	0.21	9.54	2.31	0.02
10	7.46	1.00	0.19	10.71	3.18	0.02

dead time	I-PD Control			I-P Control		
	ISE	ISC	ISTC	ISE	ISC	ISTC
1	6.40	0.86	0.31	6.61	0.97	0.27
2	7.75	1.72	0.15	8.10	1.95	0.14
3	8.96	2.55	0.10	9.48	2.93	0.09
4	10.13	3.40	0.08	10.80	3.92	0.07
5	11.25	4.25	0.06	12.12	4.94	0.05
6	12.33	5.09	0.05	13.49	6.03	0.04
7	13.18	5.80	0.05	14.78	7.10	0.04
8	14.27	6.68	0.04	15.82	8.01	0.03
9	15.28	7.53	0.03	17.32	9.30	0.03
10	16.01	8.17	0.03	18.50	10.35	0.03

## (2) 外乱抑制特性

PID, I-PD, PI, I-P方式に対する制御成績を Table12に示す。

Table12 Control Performance Indices for Various Control Schemes

dead time	PID and I-PD Control			PI and I-P Control		
	ISE	ISC	ISTC	ISE	ISC	ISTC
1	0.25	1.77	0.54	0.32	1.95	0.27
2	0.90	5.50	0.42	1.12	3.96	0.14
3	1.81	5.21	0.41	2.28	5.96	0.09
4	2.90	6.90	0.43	3.67	7.97	0.07
5	4.14	8.58	0.46	5.27	10.02	0.05
6	5.46	10.25	0.50	7.05	12.11	0.04
7	6.79	11.86	0.55	8.91	14.22	0.04
8	8.25	13.52	0.61	10.78	16.28	0.03
9	9.73	15.15	0.67	12.94	18.55	0.03
10	11.13	16.70	0.73	15.00	20.72	0.02

## 5.5 PMM 0%-d

PMM0%-dを適用して求めたPID・PIゲインを Table13に示す。

Table13 Tuned PID and PI gains (PMM0%-d)

dead time	PID			PI	
	$k_p$	$k_i$	$k_d$	$k_p$	$k_i$
1	6.853	1.973	1.700	4.122	0.894
2	3.237	0.540	1.503	1.919	0.248
3	2.035	0.261	1.311	1.177	0.137
4	1.436	0.159	1.124	0.815	0.088
5	1.079	0.110	0.942	0.600	0.064
6	0.842	0.082	0.764	0.459	0.050
7	0.674	0.065	0.590	0.359	0.041

8	0.549	0.053	0.419	0.286	0.034
9	0.452	0.044	0.251	0.229	0.030
10	0.375	0.038	0.087	0.185	0.026

## (1) 目標値追従特性

PID, I-PD, PI, I-P方式に対する制御成績を Table14に示す。

Table14 Control Performance Indices for Various Control Schemes

dead time	PID Control			PI Control		
	ISE	ISC	ISTC	ISE	ISC	ISTC
1	0.74	72.19	163.46	0.93	32.48	4.93
2	1.27	25.31	26.51	1.90	7.40	0.30
3	1.83	10.89	7.35	2.95	2.26	0.08
4	2.51	4.79	2.62	4.38	0.41	0.03
5	3.34	1.92	1.04	6.06	0.36	0.02
6	4.35	0.68	0.42	7.91	1.20	0.02
7	5.54	0.41	0.17	9.89	2.53	0.02
8	6.91	0.76	0.07	12.15	4.30	0.02
9	8.42	1.58	0.03	14.13	6.02	0.01
10	10.04	2.70	0.02	16.54	8.19	0.01

dead time	I-PD Control			I-P Control		
	ISE	ISC	ISTC	ISE	ISC	ISTC
1	2.07	9.70	5.34	3.16	4.31	1.54
2	4.31	3.01	0.78	6.24	1.81	0.24
3	5.95	2.00	0.27	8.55	2.60	0.11
4	7.80	2.38	0.14	10.97	4.09	0.06
5	9.53	3.27	0.09	13.17	5.75	0.05
6	11.22	4.39	0.06	15.22	7.44	0.03
7	12.89	5.63	0.05	17.15	9.11	0.03
8	14.63	7.02	0.04	19.34	11.06	0.02
9	16.19	8.34	0.03	20.82	12.44	0.02
10	17.74	9.70	0.03	22.90	14.39	0.02

## (2) 外乱抑制特性

PID, I-PD, PI, I-P方式に対する制御成績を Table15に示す。

Table15 Control Performance Indices for Various Control Schemes

dead time	PID and I-PD Control			PI and I-P Control		
	ISE	ISC	ISTC	ISE	ISC	ISTC
1	0.05	1.48	3.80	0.14	1.94	0.42
2	0.32	2.82	2.72	0.91	3.91	0.16
3	0.94	4.27	1.93	2.15	5.96	0.09
4	1.93	5.90	1.40	4.02	8.39	0.06

5	3.26	7.73	0.98	6.29	11.07	0.04
6	4.93	9.79	0.64	8.85	13.92	0.03
7	6.89	12.06	0.39	11.62	16.90	0.03
8	9.16	14.55	0.21	14.71	20.16	0.03
9	11.60	17.19	0.09	17.51	23.14	0.02
10	14.23	19.97	0.03	20.69	26.55	0.02

## 5.6 OPT PID-r

OPT PID-rを適用して求めたPID・PIゲインをTable16に示す。

Table16 Tuned PID and PI gains  
(OPT PID-r)

dead time	PID			PI		
	$Lp$	$kp$	$ki$	$kd$	$kp$	$ki$
1	10.24	0.79	4.92	7.64	0.52	
2	5.33	0.38	5.01	4.00	0.26	
3	3.65	0.26	5.05	2.78	0.18	
4	2.82	0.19	5.11	2.17	0.14	
5	2.33	0.15	5.15	1.80	0.11	
6	1.99	0.13	5.33	1.57	0.09	
7	1.75	0.11	5.39	1.39	0.08	
8	1.58	0.097	5.25	1.26	0.07	
9	1.44	0.087	5.37	1.16	0.06	
10	1.32	0.081	5.57	1.10	0.05	

### (1) 目標値追従特性

PID, I-PD, PI, I-P方式に対する制御成績をTable17に示す。

Table17 Control Performance Indices for Various Control Schemes

dead time	PID Control			PI Control		
	ISE	ISC	ISTC	ISE	ISC	ISTC
1	0.36	107.7	3593	0.52	75.6	46.2
2	0.69	51.94	986.1	1.01	34.8	6.19
3	1.01	32.70	467	1.46	21.7	1.98
4	1.32	23.20	286	1.89	15.3	0.92
5	1.61	17.70	199	2.3	11.2	0.5
6	1.91	14.20	159	2.68	8.73	0.33
7	2.18	11.40	127	3.04	7.14	0.23
8	2.45	9.69	95.8	3.39	5.87	0.17
9	2.71	8.27	84.7	3.74	4.72	0.12
10	2.98	7.20	78.9	4.14	4.03	0.1

dead time	I-PD Control			I-P Control		
	ISE	ISC	ISTC	ISE	ISC	ISTC
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

1	6.85	0.7	0.71	7.98	1.34	0.41
2	7.79	1.31	0.33	8.95	2.1	0.2
3	8.13	1.64	0.23	9.49	2.6	0.15
4	8.93	2.22	0.16	9.97	3.06	0.12
5	9.65	2.76	0.13	11	3.86	0.09
6	9.8	2.97	0.11	12.1	4.76	0.07
7	10.5	3.5	0.09	12.4	5.09	0.06
8	10.9	3.88	0.08	13.2	5.77	0.06
9	11.4	4.25	0.08	14.6	6.89	0.05
10	11.5	4.41	0.07	16.8	8.84	0.04

### (2) 外乱抑制特性

PID, I-PD, PI, I-P方式に対する制御成績をTable18に示す。

Table18 Control Performance Indices for Various Control Schemes

dead time	PID and I-PD Control			PI and I-P Control		
	ISE	ISC	ISTC	ISE	ISC	ISTC
1	0.06	1.15	34.3	0.12	1.53	0.85
2	0.24	2.28	34.7	0.47	3.02	0.44
3	0.52	3.39	35.1	0.96	4.47	0.3
4	0.91	4.51	36	1.58	5.9	0.23
5	1.38	5.62	36.6	2.36	7.31	0.19
6	1.87	6.7	40.1	3.24	8.69	0.16
7	2.48	7.8	41.4	4.12	10.1	0.14
8	3.13	8.86	38.4	5.11	11.4	0.13
9	3.81	9.93	40.8	6.25	12.75	0.11
10	4.49	11	45.3	7.53	14.1	0.1

## 5.7 OPT I-PD-r

OPT I-PD-rを適用して求めたPID・PIゲインをTable19に示す。

Table19 Tuned PID and PI gains  
(OPT I-PD-r)

dead time	PID			PI		
	$Lp$	$kp$	$ki$	$kd$	$kp$	$ki$
1	14.79	9.28	7.43	9.91	4.00	
2	7.79	2.59	7.51	5.09	1.16	
3	5.29	1.25	7.57	3.45	0.59	
4	4.05	0.76	7.63	2.66	0.37	
5	3.29	0.52	7.77	2.18	0.27	
6	2.79	0.39	7.76	1.87	0.21	
7	2.40	0.30	7.84	1.65	0.17	
8	2.19	0.25	7.92	1.48	0.14	
9	1.98	0.21	8.07	1.36	0.12	
10	1.82	0.18	7.97	1.25	0.10	

## (1) 目標値追従特性

PID, I-PD, PI, I-P方式に対する制御成績を  
Table20に示す.

Table20 Control Performance Indices for  
Various Control Schemes

dead time	PID Control			PI Control		
	ISE	ISC	ISTC	ISE	ISC	ISTC
1	1.66	664	30083	2.47	389	408
2	3.31	364	8333	4.06	176	49.6
3	4.44	228	3905	5.13	106	14
4	5.41	164	2352	5.78	72.8	5.82
5	6.08	125	1686	6.68	57.2	3.14
6	6.73	98.2	1199	7.38	46.9	1.93
7	6.79	75.3	929	7.83	39	1.27
8	7.93	71.4	806	7.89	31.7	0.839
9	8.28	61.6	717	8.13	27.6	0.627
10	8.66	53.2	559	7.51	21.2	0.415

dead time	I-PD Control			I-P Control		
	ISE	ISC	ISTC	ISE	ISC	ISTC
1	0.86	84.3	228	1.35	49.7	55.5
2	1.66	42.9	35.7	2.55	23.1	8.15
3	2.41	27.3	11.4	3.64	15.1	2.83
4	3.13	19.9	5.26	4.63	10.7	1.34
5	3.82	15.2	2.89	5.55	9.65	0.851
6	4.47	12.8	1.81	6.41	8.87	0.59
7	5.11	10.2	1.14	7.21	8.23	0.429
8	5.7	10	0.912	7.95	7.37	0.312
9	6.28	9.17	0.695	8.66	7.19	0.247
10	6.85	8.56	0.535	9.4	6.24	0.175

## (2) 外乱抑制特性

PID, I-PD, PI, I-P方式に対する制御成績を  
Table21に示す.

Table21 Control Performance Indices for  
Various Control Schemes

dead time	PID and I-PD Control			PI and I-P Control		
	ISE	ISC	ISTC	ISE	ISC	ISTC
1	0.01	2.65	136	0.04	3.48	3.97
2	0.08	5.33	137	0.23	6.07	1.82
3	0.22	7.32	139	0.62	8.14	1.11
4	0.46	9.11	143	1.16	9.79	0.77
5	0.79	10.7	155	1.93	11.7	0.61
6	1.21	11.9	154	2.82	13.4	0.49
7	1.68	12.7	161	3.79	14.8	0.41

8	2.29	14.6	168	4.78	15.9	0.33
9	2.91	15.8	183	5.84	17.1	0.29
10	3.59	16.5	168	6.75	17.5	0.23

## 5.8 OPT I-PD-d

OPT I-PD-dを適用して求めたPID・PIゲイン  
をTable22に示す.

Table22 Tuned PID and PI gains  
(OPT-d)

dead time	PID			PI	
	$Lp$	$kp$	$ki$	$kp$	$ki$
1	13.26	8.99	7.91	11.23	2.80
2	6.86	2.65	8.11	5.74	0.82
3	4.44	1.40	8.63	3.9	0.42
4	3.52	0.77	8.17	3.0	0.27
5	2.86	0.52	8.21	2.45	0.19
6	2.41	0.39	8.27	2.08	0.15
7	2.10	0.30	8.32	1.84	0.12
8	1.89	0.24	8.19	1.60	0.10
9	1.67	0.21	8.51	1.50	0.086
10	1.54	0.18	8.55	1.38	0.075

## (1) 目標値追従特性

PID, I-PD, PI, I-P方式に対する制御成績を  
Table23に示す.

Table23 Control Performance Indices for  
Various Control Schemes

dead time	PID Control			PI Control		
	ISE	ISC	ISTC	ISE	ISC	ISTC
1	1.3	463	31884	1.81	368	467
2	2.53	240	9438	2.93	162	54.6
3	3.76	152	5902	3.66	96.3	15.2
4	4.09	105	2541	4.25	66.8	6.33
5	4.58	78.9	1717	4.51	47.6	3.07
6	5.13	62.6	1267	4.89	36.9	1.75
7	5.43	51	987	5.16	29.9	1.13
8	5.72	42.7	716	5.01	21.7	0.652
9	6.37	37.4	684	5.51	20.2	0.53
10	6.73	33.4	578	5.57	16.8	0.387

dead time	I-PD Control			I-P Control		
	ISE	ISC	ISTC	ISE	ISC	ISTC
1	0.91	75.7	177	1.82	16.7	22.1
2	1.76	41.6	29.9	3.38	6.74	3.32

3	2.79	33.9	12	4.73	4.25	1.17
4	3.32	18.8	4.31	5.94	3.57	0.602
5	4.03	14	2.32	7.2	3.34	0.343
6	4.74	11.9	1.49	8.05	3.62	0.245
7	5.38	9.76	0.984	9.17	3.99	0.175
8	5.95	8.26	0.682	10	4.33	0.13
9	6.7	8.76	0.579	11	4.97	0.107
10	7.26	8.24	0.46	11.9	5.53	0.088

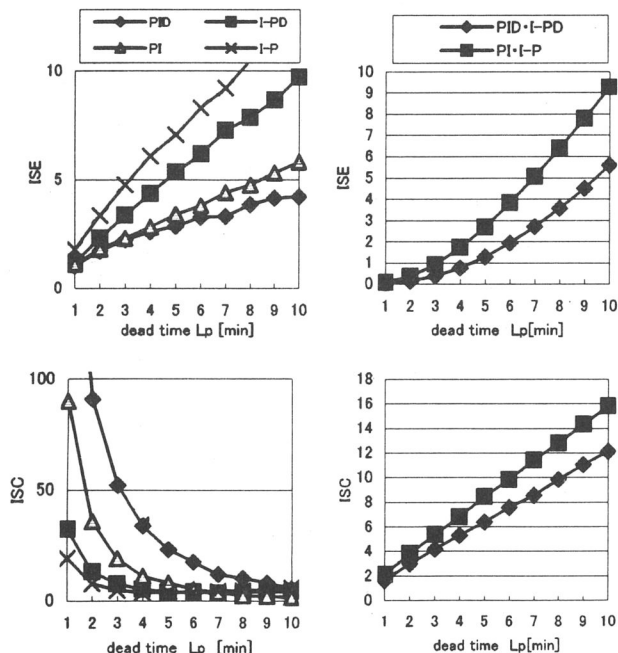
(2) 外乱抑制特性

PID, I-PD, PI, I-P方式に対する制御成績をTable24に示す。

Table24 Control Performance Indices for Various Control Schemes

dead time	PID and I-PD Control			PI and I-P Control		
	ISE	ISC	ISTC	ISE	ISC	ISTC
1	0.01	2.21	180	0.03	2.82	3.77
2	0.07	4.26	200	0.2	4.94	1.7
3	0.21	6.15	299	0.54	6.67	1.03
4	0.43	7.29	204	1.05	8.26	0.726
5	0.74	8.6	209	1.7	9.52	0.531
6	1.13	9.78	218	2.47	10.9	0.42
7	1.6	10.9	223	3.34	12.2	0.346
8	2.14	11.9	200	4.28	13	0.266
9	2.73	13.1	245	5.27	14.5	0.244
10	3.38	14.2	243	6.32	15.6	0.211

6. 制御方式PID, PI, I-PD, I-Pとの比較



Reference Tracking Disturbance Suppression

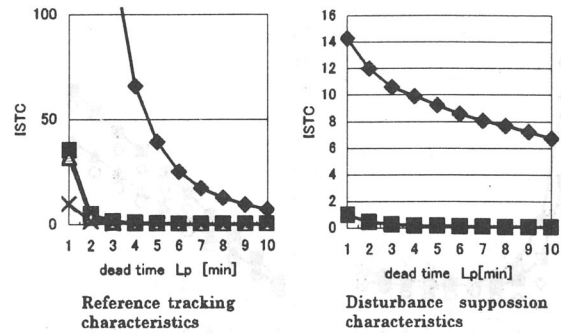


Fig.2 Comparison of Control Performance Indices for Various Control Schemes

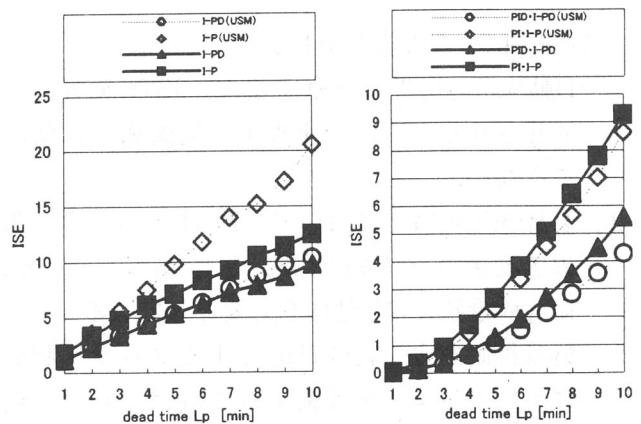
制御方式のちがいによる制御成績を調べるために調整法はPMM10%-dに限定して、PIDゲインを求めた。相対評価を調べるために、目標値追従特性ならびに外乱抑制特性に対してISE, ISC, ISTCを算出した結果をFig. 2に示す。

この結果、つぎのことがわかる。

1. 外乱抑制特性に関しては、PID・I-PD方式の方がISE, ISCともに小さいが、ISTCが大きくなる。
2. 目標値追従特性に関してはPID方式の方がI-PD方式と比較して、ISEは少ないがISC, ISTCともに大きくなる。
3. PID・I-PD方式とPI・I-P方式とを比較すると、PI・I-P方式は目標値追従特性では若干の効果があるものの、1で述べたように外乱抑制特性では劣化している。

7. 限界感度法と部分的モデルマッチング法との比較

Reference Tracking Disturbance Suppression



Reference Tracking Disturbance Suppression

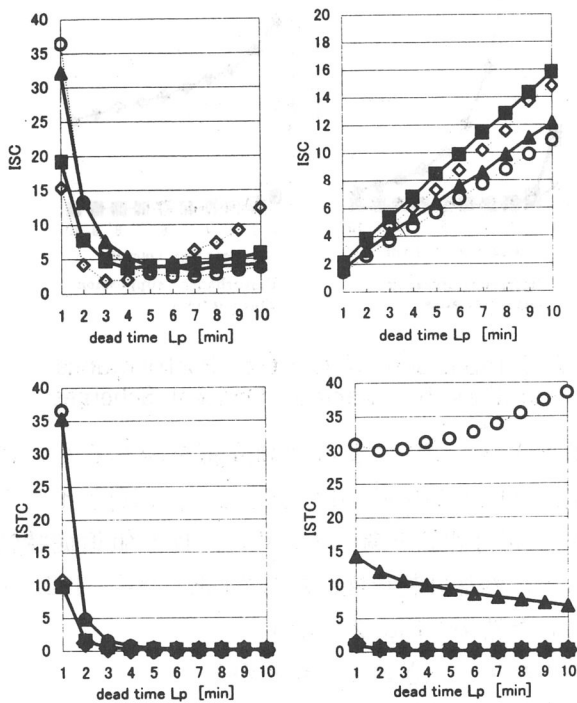


Fig.3 Comparison of Control Performance Indices for Tuning Methods

つぎに、限界感度法とPMM10% - dによる制御成績の比較を検討する。その理由は外乱抑制特性において限界感度法と比較してISE, ISCが同程度で、ISTCが少ないのがPMM10% - dのみである。また、目標値追従特性においても限界感度法と比較してISE, ISC, ISTCが同程度か少ないのはPMM10% - dとPMM10% - rである。

ここで、制御方式はI-PDとI-P方式に限定し、PIDとPI方式について言及してない。相対評価を調べるために、目標値追従特性ならびに外乱抑制特性に対して、ISE, ISC, ISTCを算出した結果をFig. 3に示す。

この結果、つぎのことがわかる。

1. D動作は速応性に貢献するが、ISTCを著しく劣化させる。ISTCを重視する制御系では使用できない。
2. 目標値追従特性において、 $L_p \geq 6$ のとき、限界感度法のI-P方式のISE, ISCが増大している。限界感度法にはD動作を必要としている。
3. 外乱抑制を主な制御目的とするプロセス制御において省エネを考慮するならば、むだ時間および調整法に関わらず、制御方式は外乱抑制特性においてISE, ISCがつかねに小さいI-PD方式を用いるべきである。

4. 最も省エネに適した調整法は、PMM10% - dである。また、外乱抑制特性でISTCの大きさを考慮しないのであれば、USMもよいであろう。応答が緩慢になるが、PMM0% - dも省エネのための調整法として有効である。

#### 参考文献

- 文献1) 黒須 茂, 佐藤 隆太ほか: プロセス制御系設計用CADソフト (その19), 小山高専, No32 (1999)

「受理年月日 2000年9月28日」