

# PID 制御系の最適調整

松 井 稜 治\*

On the optimum setting of PID Control systems

Ryoji MATSUI

## Abstract

In this report, on the PID control systems,

- 1) about three integral performance indices (ISE, ITAE, IAE), some methods for PID parameter settings are compared each other, and
- 2) when the control systems of 2nd order lag with dead time are approximated to the 1st order systems with dead time, some problems for PID parameter settings are discussed.

## 1. ま え が き

PID 制御は、プロセス制御などの分野で広く使用されている。一般に PID 制御を使用する際に、パラメータの設定については、比較的経験的手法により決められることが多い。ここでは、いくつかの PID パラメータ設定法<sup>1)2)</sup>を用いたときの制御系について、数値的に応答、評価を計算し、比較、検討を試みた。このとき、評価基準としては、ISE, ITAE, IAE の3種の積分評価を用い、同時に、これら積分評価の選び方に関する問題についても、検討を試みた。

PID 制御系を構成するにあたって、制御対象（プロセス）の動特性については、一般に簡単な形（例えば、1次おくれ+むだ時間とか2次おくれ+むだ時間など）に近似することが多い。中でも、1次おくれ+むだ時間は取扱いが簡単であることや、近似法が容易であることなどのため手軽に用いられる。高次系を1次系に近似することは、かなり粗っぽい近似とも考えられるので、PID 制御系におけるこのような近似により生ずるいくつかの問題についても検討を試みた。

## 2. 計 算 法

### 2. 1. ステップ応答

制御対象が1次おくれ+むだ時間であるとき、PID 制

御系は、図1. のように表される。但し、微分動作については計算の都合上、不完全な微分動作とし、計算においては制御対象の比例ゲイン  $K=1$  と基準化を行なっている。又、 $V$  は目標値、 $Z$  は制御偏差、 $U$  は操作量、 $X$  は制御量を表わす。

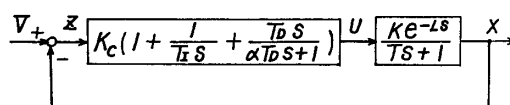


図1. PID 制御系（1次系）

図1. の系を時間領域の関係で表わすと<sup>3)</sup>

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{1}{T}x + \frac{K}{T}u(t-L) \quad (1)$$

$$z = v - x \quad (2)$$

$$\frac{du_1}{dt} = -\frac{1}{\alpha T_D}u_1 + \frac{K_c}{T_D}\left(\frac{\alpha T_D}{T_I} - \frac{1}{\alpha}\right)z + \frac{K_c}{T_I T_D} \int_0^t z dt \quad (3)$$

$$u = \frac{1}{\alpha} \left\{ u_1 + K_c (1 + \alpha) z \right\} \quad (4)$$

となる。

制御対象が2次おくれ+むだ時間のときは、図2. のように表わされ（但し、計算では  $K=1$  と基準化する。）、時間領域における関係は、次のようになる。

$$\frac{dy}{dt} = -\frac{1}{T_1}y + \frac{K}{T_1}u(t-L) \quad (5)$$

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{1}{T_2}x + \frac{1}{T_2}y \quad (6)$$

\* 宇部工業高等専門学校機械工学科

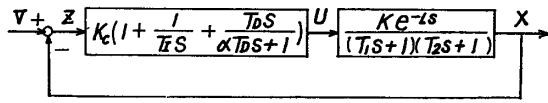


図 2. PID 制御系 (2 次系)

$$z = v - x \quad (7)$$

$$\frac{du_1}{dt} = -\frac{1}{\alpha T_D} u_1 + \frac{K_C}{T_D} \left( \frac{\alpha T_D}{T_I} - \frac{1}{\alpha} \right) z + \frac{K_C}{T_I T_D} \int_0^t z dt \quad (8)$$

$$u = \frac{1}{\alpha} \{ u_1 + K_C (1 + \alpha) z \} \quad (9)$$

今、目標値が単位ステップ入力であるとき、1次系、2次系共、 $0 \leq t \leq L$  では、 $x(t) = 0$  であるので、

$$u(t) = K_C \left( 1 + t/T_I + \frac{1}{\alpha} e^{-\frac{t}{\alpha T_D}} \right) v \quad (v=1) \quad (0 \leq t \leq L) \quad (10)$$

又、(1)式又は(5)式において  $u(t-L)$  は過去の値であり、時間  $t$  における計算では既知の値であるから、数値計算するにあたって、1次系では(1)、(2)、(3)、(4)式の順序で、2次系でも同様に、(5)、(6)、(7)、(8)、(9)式の順序で数値解を得ることができる。

ここでは、(1)、(3)、(5)、(6)、(8)の微分方程式は、予測子-修正子法を用いて計算した。このとき、(1)式或いは(5)式において、前述のように、操作量  $u$  の過去の値を用いなければならない。即ち、計算におけるきざみ巾を  $h$  とし、 $L = N_L \cdot h$  とすれば、直前  $N_L$  個の  $u$  の値を記憶しておかなければならない。当然のことながら  $N_L$  は整数でなければならないので、むだ時間  $L$  が  $h$  の整数倍となるように、きざみ巾  $h$  の値を決めてやらなければならない。制御対象が2次おくれ+むだ時間の場合の計算式を参考のため次に挙げておく。

(i)  $0 \leq t \leq L$  (但し、 $L$ : むだ時間)

$$x(t), y(t) = 0 \quad (11)$$

$$u(t): (10) \text{式}$$

(ii)  $t > L$

$x(kh)$  を  $x_k$  のように表すことにすれば、

イ)  $t = L + h = (N_L + 1)h$  に対して

$$y_{NL+\frac{1}{2}} = y_{NL} + \frac{1}{2} h f_y(y_{NL}, u_0) \quad (12)$$

(但し、 $f_y$  は(5)式の右辺を表す。)

$$y_{NL+1}^0 = y_{NL} + h f_y(y_{NL+\frac{1}{2}}, u_{\frac{1}{2}}) \quad (13)$$

$$y_{NL+1}^i = y_{NL} + \frac{h}{2} \{ f_y(y_{NL}, u_0) + f_y(y_{NL+1}^{i-1}, u_1) \} \quad (14)$$

$|y_{NL+1}^i - y_{NL+1}^{i-1}| \leq \varepsilon$  (許容誤差) ならば、

$y_{NL+1} \leftarrow y_{NL+1}^i$  とする。

同様に、

$$x_{NL+\frac{1}{2}} = x_{NL} + \frac{1}{2} h f_x(x_{NL}, y_{NL}) \quad (15)$$

$$x_{NL+1}^0 = x_{NL} + h f_x(x_{NL+\frac{1}{2}}, y_{NL+\frac{1}{2}}) \quad (16)$$

$$x_{NL+1}^i = x_{NL} + \frac{h}{2} \{ f_x(x_{NL}, y_{NL}) + f_x(x_{NL+1}^{i-1}, y_{NL+1}) \} \quad (17)$$

$|x_{NL+1}^i - x_{NL+1}^{i-1}| \leq \varepsilon$  ならば、

$x_{NL+1} \leftarrow x_{NL+1}^i$  とする。

$$z_{NL+\frac{1}{2}} = v_{NL+\frac{1}{2}} - x_{NL+\frac{1}{2}} \quad (18)$$

$$z_{NL+1} = v_{NL+1} - x_{NL+1} \quad (19)$$

$$S_{NL+\frac{1}{2}} = S_{NL} + \frac{h}{4} (z_{NL} + z_{NL+\frac{1}{2}}) \quad (20)$$

(但し、 $S: \int_0^t z dt$ )

$$S_{NL+1} = S_{NL} + \frac{h}{2} (z_{NL} + z_{NL+1}) \quad (21)$$

$$u_{1NL+\frac{1}{2}} = u_{1NL} + \frac{1}{2} h f_u(u_{1NL}, z_{NL}, S_{NL}) \quad (22)$$

(但し、 $f_u$ : (8)式右辺。)

$$u_{1NL+1}^0 = u_{1NL} + h f_u(u_{1NL+\frac{1}{2}}, z_{NL+\frac{1}{2}}, S_{NL+\frac{1}{2}}) \quad (23)$$

$$u_{1NL+1}^i = u_{1NL} + \frac{h}{2} \{ f_u(u_{1NL}, z_{NL}, S_{NL}) + f_u(u_{1NL+1}^{i-1}, z_{NL+1}, S_{NL+1}) \} \quad (24)$$

$|u_{1NL+1}^i - u_{1NL+1}^{i-1}| < \varepsilon$  ならば、

$u_{1NL+1} \leftarrow u_{1NL+1}^i$  とする。

$$u_{NL+1} = \frac{1}{\alpha} \{ u_{1NL+1} + K_C (1 + \alpha) z_{NL+1} \} \quad (25)$$

ロ)  $t = L + kh = (N_L + k)h$  ( $k = 2, 3, \dots$ )

$$y_{NL+k}^0 = y_{NL+k-2} + 2 h f_y(y_{NL+k-1}, u_{k-1}) \quad (26)$$

$$y_{NL+k}^i = y_{NL+k-1} + \frac{h}{2} \{ f_y(y_{NL+k-1}, u_{k-1}) + f_y(y_{NL+k}^{i-1}, u_k) \} \quad (27)$$

$|y_{NL+k}^i - y_{NL+k}^{i-1}| < \varepsilon$  ならば、

$y_{NL+k} \leftarrow y_{NL+k}^i$  とする。

同様に

$$x_{NL+k}^0 = x_{NL+k-2} + 2 h f_x(x_{NL+k-1}, y_{NL+k-1}) \quad (28)$$

$$x_{NL+k}^i = x_{NL+k-1} + \frac{h}{2} \{ f_x(x_{NL+k-1}, y_{NL+k-1}) + f_x(x_{NL+k}^{i-1}, y_{NL+k}) \} \quad (29)$$

$$|x_{iNL+k} - x_{iNL+k}^{i-1}| \leq \varepsilon \text{ ならば,}$$

$$x_{NL+k} \leftarrow x_{iNL+k}^i \text{ とする.}$$

$$z_{NL+k} = v_{NL+k} - x_{NL+k} \quad (30)$$

$$S_{NL+k} = S_{NL+k-1} + \frac{h}{2} (z_{NL+k-1} + z_{NL+k}) \quad (31)$$

$$u_{1NL+k}^0 = u_{1NL+k-2} + 2hf_u (u_{1NL+k-1}, z_{NL+k-1}, S_{NL+k-1}) \quad (32)$$

$$u_{1NL+k}^i = u_{1NL+k-1} + \frac{h}{2} \{f_u (u_{1NL+k-1}, z_{NL+k-1}, S_{NL+k-1}) + f_u (u_{1NL+k}^{i-1}, z_{NL+k}, S_{NL+k})\} \quad (33)$$

$$|u_{1NL+k}^i - u_{1NL+k}^{i-1}| \leq \varepsilon \text{ ならば,}$$

$$u_{1NL+k} \leftarrow u_{1NL+k}^i \text{ とする.}$$

$$u_{NL+k} = \frac{1}{\alpha} \{u_{1NL+k} + k_c (1 + \alpha) z_{NL+k}\} \quad (34)$$

積分評価関数値は、それぞれ次のように表される。

$$ISE = \int_0^{\infty} z^2 dt \quad (35)$$

$$ITAE = \int_0^{\infty} t |z| dt \quad (36)$$

$$IAE = \int_0^{\infty} |z| dt \quad (37)$$

これらは数値計算では次のように台形積分によった。

$$ISE \cong \frac{h}{2} \sum_k (z_k^2 + z_{k-1}^2) \quad (38)$$

$$ITAE \cong \frac{h}{2} \sum_k \{kh |z_k| + (k-1)h |z_{k-1}|\} \quad (39)$$

$$IAE \cong \frac{h}{2} \sum_k (|z_k| + |z_{k-1}|) \quad (40)$$

比較、検討のため、各評価関数値を最小にするような PID パラメータを数値計算により求めたが、最適化計算法としては、Zangwill の方法を若干改良して<sup>4)5)</sup>、使用した。

### 2.2 PID パラメータ設定法

PID パラメータ設定法として、ここでは

- 1) ジーグラ・ニコルスの限界感度法 (以後、ZN-1 と省略形を用いる。)
- 2) ジーグラ・ニコルスの過渡応答法 (ZN-2 とする)
- 3) Chien-Hrones-Reswick の方法 (CHR とする。)
- 4) 高田らの方法 (TOM とする)

$$K_c = \frac{3}{4} \left(0.5 + \frac{T}{L}\right) \quad (41)$$

$$T_I = 0.95 (0.5 L + T) \quad (42)$$

$$T_D = 1.1 T / (1 + 2 T/L) \quad (43)$$

をとりあげた<sup>6)2)</sup>。

### 2.3 1次おくれ+むだ時間への近似法

制御対象の近似により生ずる問題を調べるため、取扱いい易い例として、2次おくれ+むだ時間より1次おくれ+むだ時間への近似の場合をとりあげた。

このとき、近似法としては次のような衆知の方法<sup>6)</sup>を用いた。即ち、制御対象の単位ステップ応答が図3. のように表されるとき、図中の K, T, L を用いて

$$G(s) = \frac{Ke^{-Ls}}{Ts+1} \quad (44)$$

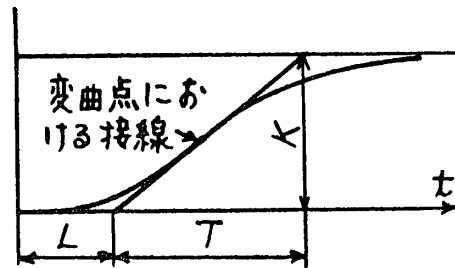


図3. 1次おくれ+むだ時間への近似

のように近似する。但し、制御対象が2次おくれ+むだ時間、即ち

$$G(s) = \frac{ke^{-L2s}}{(T_1s+1)(T_2s+1)} \quad (45)$$

の場合

$$t_v = \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \ln \frac{T_1}{T_2} \quad (46)$$

$$x(t_v) = 1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t_v}{T_1}} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t_v}{T_2}} \quad (47)$$

$$x'(t_v) = \frac{1}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t_v}{T_1}} + \frac{1}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t_v}{T_2}} \quad (48)$$

とすれば

$$T = 1/x'(t_v) \quad (49)$$

$$L = L_2 + t_v - x(t_v)/x'(t_v) \quad (50)$$

のように表すことができる。

### 3. 計算結果

①. 制御対象が1次おくれ+むだ時間の場合

① T=0.5, L=1.0, α=0.1, k=1, ② T=2.0,

L=1.0, α=0.1, k=1 の例について、前記の各設定法による場合及び ISE, ITAE, IAE を最小にする場合の計算結果を表1,表2に示す。又,②の場合の各設定法に

表 1.  $T=0.5, L=1.0, \alpha=0.1$  (1次)

	$K_c$	$T_I$	$T_D$	ISE	ITAE	IAE
1. ZN-1	0.91	1.37	0.34	1.171	3.286	1.790
2. ZN-2	0.60	2.00	0.50	1.668	11.325	3.254
3. CHR	0.48	0.68	0.47	1.200	2.148	1.682
4. TOM	0.75	0.95	0.28	1.105	1.189	1.355
5. ISE	0.76	0.80	0.39	1.079	1.506	1.383
6. ITAE	0.70	0.86	0.29	1.112	1.070	1.331
7. IAE	0.71	0.86	0.32	1.099	1.122	1.328

表 2  $T=2.0, L=1.0, \alpha=0.1$  (1次)

	$K_c$	$T_I$	$T_D$	ISE	ITAE	IAE
1. ZN-1	2.30	1.70	0.43	1.186	2.444	1.702
2. ZN-2	2.40	2.00	0.50	1.243	4.421	2.023
3. CHR	1.90	2.70	0.47	1.130	1.830	1.513
4. TOM	1.88	2.38	0.44	1.122	1.514	1.437
5. ISE	1.90	2.05	0.50	1.114	1.952	1.508
6. ITAE	1.73	2.36	0.32	1.181	1.160	1.411
7. IAE	1.79	2.40	0.37	1.150	1.238	1.403

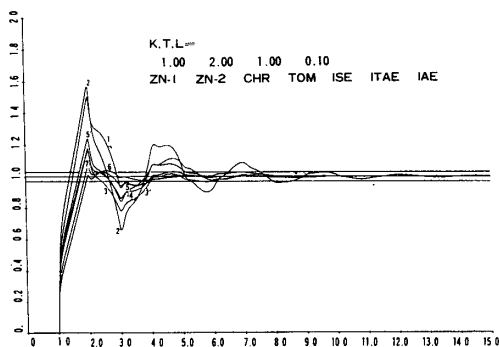


図 4. ステップ応答 (1次)

対するステップ応答を図 4. に示す. 図中の数字 1, 2, 3, ..., 7 は, それぞれ表 2 の番号と対応している.

② 制御対象が 2 次おくれ+むだ時間の場合

①  $T_1=1.61, T_2=0.67 (T_1/T_2 \cong 1.5), L_2=0.64, \alpha=0.1$  の系 ( $S_1$ ) についての各設定法に対する結果を表 3. に示す. 表中, 番号 8~10 はそれぞれ 1 次近似した系の最適パラメータに対する結果を示している. 各設

定法に対する単位ステップ応答を, 図 5, 図 6 に分けて示す.

又, この系を 2.3 節で示す方法で, 1 次近似すると,  $T=3.62, L=1.0, K=1.0$  となり, この近似系に対して, 各設定法を適用した場合の計算結果を表 4 に示す. その場合のステップ応答を図 7 に示す.

②  $T_1=3.34, T_2=0.67 (T_1/T_2 \cong 5), L_2=0.64, \alpha=1.0, K=1.0$  の系 ( $S_2$ ) に各設定法を適用した場合の計算結果を表 5 に示す. この系 ( $S_2$ ) を 1 次近似すると,  $T=4.99, L=1.0, K=1.0$  となり, この 1 次近似系に, 各設定法を適用した場合の計算結果を表 6 に示す.

なお, 2 次の系に, CHR や TOM の方法を適用するとき, これらの方法は 1 次おくれ+むだ時間の制御対象の特性パラメータを用いて, PID パラメータを決定しなければならないので, 一たん 1 次近似して, 近似系のパラメータを用いて, 計算を行っている.

以上の計算で, 制御量  $x$  の精度は  $10^{-3}$ , 最適化パラメータの精度は  $10^{-2}$  としている.

表 3.  $S_1$  ( $T_1=1.61, T_2=1.07, L_2=0.64, \alpha=0.1$ )

	$K_C$	$T_I$	$T_D$	ISE	ITAE	IAE
1. ZN-1	2.94	2.11	0.53	1.161	2.812	1.182
2. ZN-2	4.34	2.00	0.50	1.577	8.527	2.840
3. CHR	3.44	4.89	0.47	1.130	5.706	2.046
4. ToM	3.09	3.73	0.48	1.104	3.482	1.799
5. ISE	2.44	2.39	0.92	1.009	2.162	1.496
6. ITAE	1.98	2.70	0.66	1.121	1.238	1.418
7. IAE	2.22	2.77	0.74	1.052	1.342	1.373
8. ISE(1)	3.17	3.44	0.51	1.095	3.074	1.758
9. ITAE(1)	2.87	3.98	0.34	1.208	4.869	2.056
10. IAE(1)	2.93	4.03	0.38	1.170	4.561	1.976

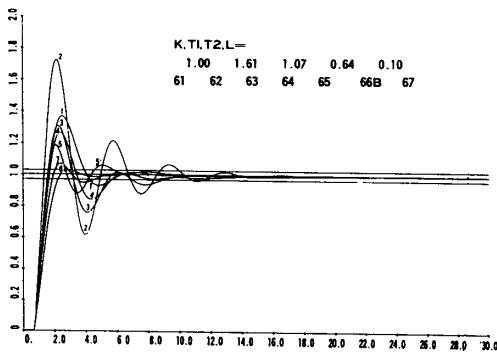


図 5. ステップ応答 (2次)

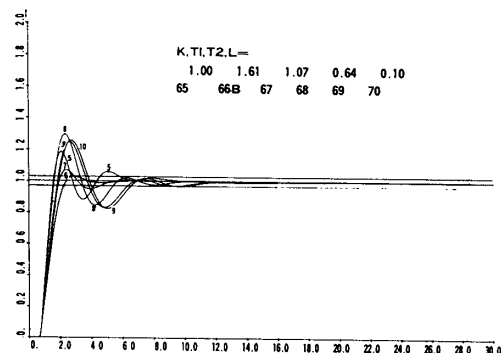


図 6. ステップ応答 (2次)

表 4.  $S_1$  1次近似 ( $T=3.62, L=1.0, \alpha=0.1$ )

	$K_C$	$T_I$	$T_D$	ISE	ITAE	IAE
1. ZN-1	3.80	1.82	0.45	1.281	3.177	1.930
2. ZN-2	4.34	2.00	0.50	1.411	5.453	2.306
3. CHR	3.44	4.89	0.47	1.138	2.924	1.645
4. ToM	3.09	3.73	0.48	1.126	1.865	1.480
5. ISE	3.17	3.44	0.51	1.122	2.273	1.547
6. ITAE	2.87	3.98	0.34	1.189	1.172	1.422
7. IAE	2.93	4.03	0.38	1.166	1.208	1.410

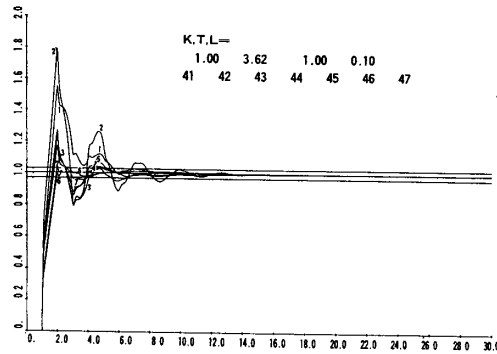


図 7. ステップ応答 (1次近似)

表 5.  $S_2$  ( $T_1=3.34, T_2=3.34, T_2=0.67, L_2=0.64, \alpha=0.1$ )

	$K_C$	$T_I$	$T_D$	ISE	ITAE	IAE
1. ZN-1	4.42	2.07	0.52	1.209	2.837	1.868
2. ZN-2	5.99	2.00	0.50	1.448	5.228	2.374
3. CHR	4.74	6.74	0.47	1.069	5.854	1.923
4. ToM	4.12	5.22	0.50	1.050	3.226	1.638
5. ISE	3.70	3.57	0.84	0.989	2.190	1.468
6. ITAE	3.32	4.11	0.62	1.052	1.159	1.344
7. IAE	3.50	4.10	0.67	1.021	1.272	1.337
8. ISE(1)	4.23	4.64	0.52	1.041	2.296	1.546
9. ITAE(1)	3.73	5.31	0.34	1.169	4.280	1.879
10. IAE(1)	3.83	5.44	0.42	1.105	4.033	1.765

表 6.  $S_2$  1次近似 ( $T=4.99, L=L=1.0, \alpha=0.1$ )

	$k_C$	$T_I$	$T_D$	ISE	ITAE	IAE
1. ZN-1	5.09	1.86	0.47	1.341	3.866	2.094
2. ZN-2	5.99	2.00	0.50	1.513	5.851	2.429
3. DHR	4.74	6.74	0.47	1.143	3.672	1.714
4. ToM	4.12	5.22	0.50	1.129	1.825	1.475
5. ISE	4.23	4.64	0.52	1.124	2.521	1.563
6. ITD	3.73	5.31	0.34	1.207	1.230	1.447
7. IAE	3.83	5.44	0.42	1.165	1.269	1.424

## 4. 比較・考察

## 4.1 制御対象が1次おくれ+むだ時間の場合

最適化パラメータを基準として、PIDパラメータの大きさを比較してみると、次のようになる。

1) ZN-1, ZN-2, CHR, TOM の4種の設定法のうち、TOM 法によるものが最適パラメータに最も近い。

2) 最適パラメータ相互間では、ISE 最適パラメータはITAE, IAE 最適パラメータとやや異なる値をとる

が、ITAE, IAE 最適パラメータの大きさは殆んど差異はない。

評価関数値の比較をすると、次のようになる。

1) 4つの設定法のうち、TOMの方法によるパラメータが最適値に近いだけに、ISE, ITAE, IAEのいずれについても最小であり、次に良い成績を示しているのは、CHRの方法である。ステップ応答図において、大きい変動成分をもっていることからわかるように、ZN-2の方法はITAE, IAEなどの値が特に大きく、ZN-1の方法もこれらの値はやや大きい。

2) ISE最適パラメータでは、ITAE, IAE値はITAE, IAE最適パラメータの場合よりもかなり大きく、むしろ、TOMの方法によるものよりも大きい値をとっている。

以上のことから、1次おくれ+むだ時間の制御対象の場合、4種のパラメータ設定法のうちTOM法が最も優れていて、次にCHR法、ZN-1法の順の成績を示し、ZN-2法はかなり成績は悪いといえる。

ISEはその最適パラメータでは、ITAE, IAE値にかなりの悪化を示すのに対し、ITAE, IAE最適パラメータでは他の評価関数値もそれ程悪化せず、又最適パラメータ値も、ITAE, IAEでは同程度の値をもつのにに対し、ISE最適パラメータ値は、他の最適パラメータ値とかなり異っている。以上のことから、評価関数としては、ITAEか又はIAEを選択するのが良いように思われる。

#### 4.2 制御対象が2次おくれ+むだ時間の場合

パラメータ値の大きさについては、次のようなことがいえる。

1) 最適化パラメータに対して、ZN-1, ZN-2, CHR, TOMのいずれの場合もかなり異っている。

2) 最適化パラメータ相互間では、1次系の場合と同様に、ITAEとIAE最適化パラメータは近い値をとり、ISE最適化パラメータは他の最適化パラメータとかなり異なる値をとっている。しかしながら、ITAEとIAE最適化パラメータの間でも1次系の場合に比べてややその値に差異がみられる。

評価関数値については、1次系の場合とかなり様相を異にして、次のようなことがいえる。

1) 4設定法については、ISE, IAE値は1次の場合と同様に、TOM法が最良となっているが、最適値に比し1次の場合より差異が大きい、ITAE値は、ZN-1が最良となっているのが、特徴的である。ステップ応答図を見ても、4設定法のうち、ZN-1の場合が最も減衰が早い。

2) 1次の場合に比し、CHR法やTOM法はさほど良好とはいえ、特にCHR法は、 $T_1/T_2 \cong 5$ の場合、ITAE値について最悪の成績を示している。これら2つの方法では、制御対象を1次おくれ+むだ時間と仮定して、制御対象パラメータからPIDパラメータ値を決めなければならないため、ここでは1次おくれ系への近似を図3の方法で行っており、この近似による悪影響が表れているものと推察される。1次おくれへの近似でもっと精度の良好な方法を用いれば、様相は変わるかも知れないが、少くとも、図3のような近似を行うとすればCHR法を用いるよりも、ZN-1法を用いる方が良いように思われる。

3) 最適化パラメータ相互間では、1次おくれ系の場合と同様に、ISE最適パラメータに対するITAE値、IAE値は他の最適パラメータに比しかなり劣っているようにみえる。

但し、2次おくれ系を1次おくれ系に近似した時の最適化パラメータを、元の2次おくれ系に適用してみるとISE最適パラメータに対する成績が、ITAE, IAE最適化パラメータに対するものよりも、かなり優っている。そればかりか、近似系に対するITAE, IAE最適化パラメータを2次おくれ系に適用した結果は、ZN-1法やTOM法に対するものよりも劣っている。

以上のことから、制御対象の動特性を、不十分な精度で近似すれば、近似系に対するITAEやIAE最適化は、元の系に対して無意味であるということになる。近似の精度が不十分である時には、むしろZN-1法などの既製の方法を使用する方が無難であるといえる。但し、十分な精度で制御対象の動特性が表現されているときには、ITAEやIAEは感度が高いだけに、これらを基準として最適化を行えば、良い応答が得られることになるであろう。

#### 4.3 結 論

以上のことをまとめて、次のことが結論される。

- 1) 十分な精度で制御対象が1次おくれ+むだ時間で表現できる場合には、PIDパラメータ設定法としては4設定法のうちTOM法、CHR法を使用することにより良い応答が得られる。
- 2) 制御対象が1次おくれ+むだ時間に十分な精度で近似できないような高次系の場合、むしろZN-1法などを使用するのが良いようである。
- 3) 最適化については、制御対象の動特性が十分な精度で表現されている場合には、基準としてITAEかIAEを使用すべきであるが、そうでない場合に

は、ISE 基準を用いる方が無難であろう。

なお、今後の問題として、ここでは図3の方法で1次系への近似を行なったが他の方法による近似についても調べてみる必要がある。又、ここでは2次系をとりあげたが更に一般的な高次系についても調べてみる必要がある。

## 5. ま わ り に

本研究を進めるにあたって、九大工学部、高田勝教授より多大なる御助言を頂きましたことに感謝致します。又、計算にあたり、本校電算機室・山岡技官ならびに卒業研究の諸君より多くの御協力を頂きましたことに謝意を表します。

なお、本計算には本校電算機室 TOSBAC-3400 及び XY-プロッタを使用した。計算時間は、ステップ応答

について約1~2分、最適化について5~90分程度を要した。

## 参 考 文 献

- 1) 計測自動制御学会編：自動制御便覧，コロナ社。
- 2) 高田ほか：長いむだ時間をもつプロセス制御系の最適調整について，九大工学集報，Vol 39 No 2，昭41
- 3) 松井：自動制御教育用プログラム，宇部高専研報，Vol 26，昭55
- 4) Zangwill, W. I. : Minimizing a function without calculating derivatives, *Compt. J.*, Vol 10, 1967.
- 5) 松井：PID 制御系の ISE 値，宇部高専研究報告，Vol 24，昭53.
- 6) 増淵：自動制御基礎理論，コロナ社。

(昭和55年9月1日受理)