

3.7 マルチポイント I-PD 制御事例

(1) マルチポイント I-PD 制御

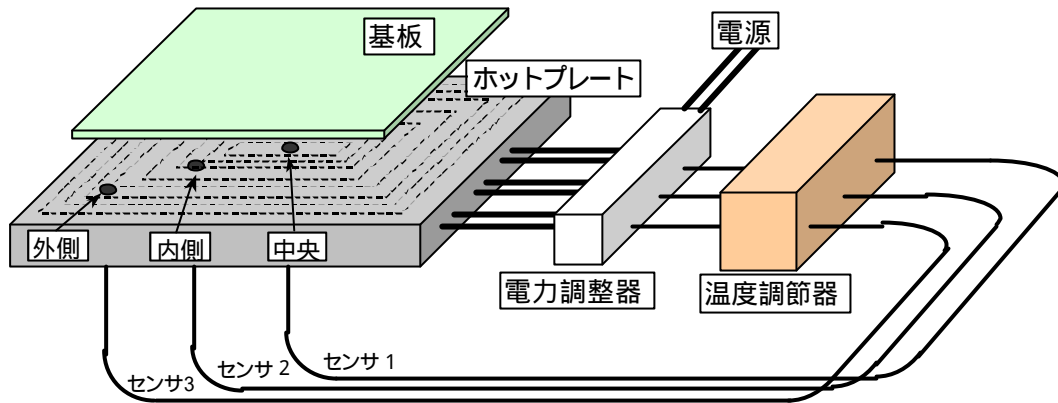


図 3.36 基板の加熱装置

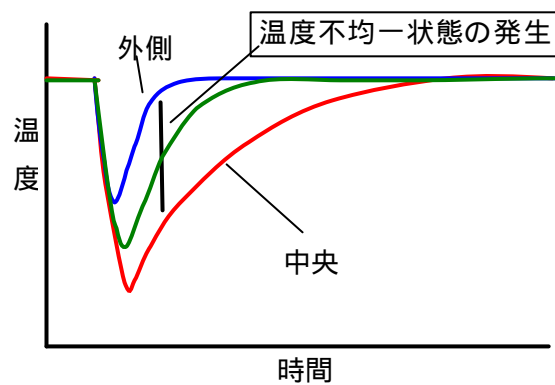


図 3.37 温度の不均一状態の模式図

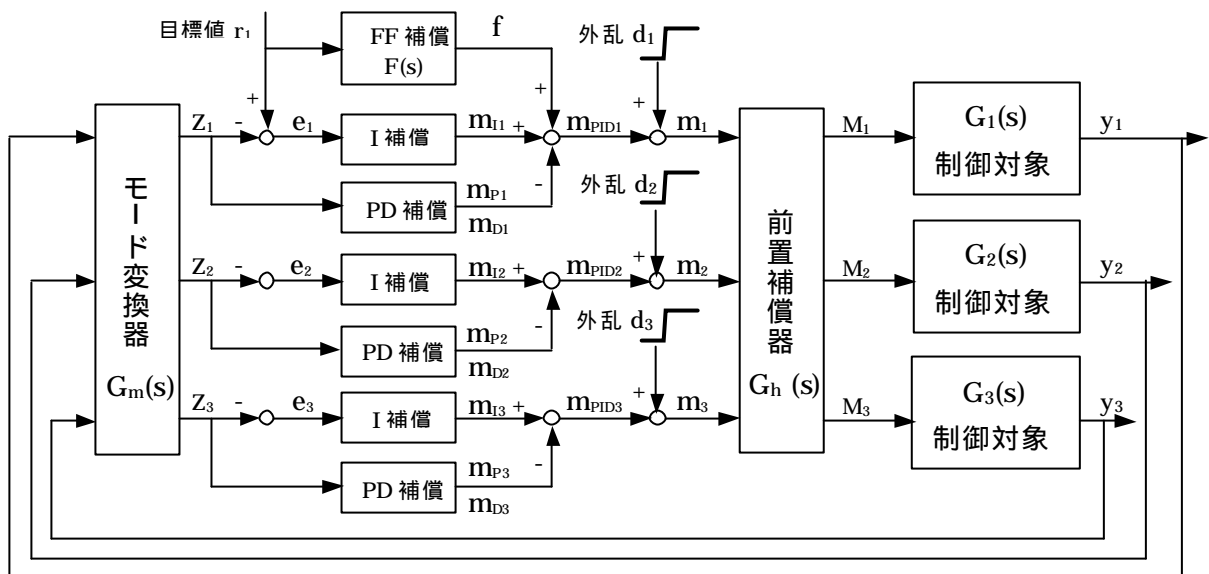


図 3.38 マルチポイント I-PD 制御のブロック線図

ここでは大きな面積を均一に加熱する温度制御を例にとり、マルチポイントI-PD制御を説明する。加熱装置は図 3.36 に示すようにホットプレート、温度計測のためのセンサ、温度調節器および電力調整器から構成される。ホットプレートは被加熱物である基板を均一な温度に加熱するために複数に分割された加熱領域を持ち、複数の電熱ヒータと複数の温度センサが組み込まれ、温度調節器によって独立に温度制御されている。

プロセスの運転では、一定温度に制御されたホットプレートに冷たい基板を乗せ、基板を均一に加熱することを要求される。しかし、現実には、図 3.37 に模式的に示すようにホットプレートの中央と外側では熱容量に違いがあるためリカバリー時に中央、内側および外側に温度の不均一な状態が発生する。ここでは冷たい基板がホットプレートに乗ることを制御系への外乱と考え、リカバリー時の温度不均一を改善するマルチポイント I-PD 制御を事例として、数値シミュレーションする手順について述べる。

(1) マルチポイント I - P D 制御

図 3.38 はホットプレートを 3 ゾーンに分割した場合のマルチポイント I-PD 制御のブロック線図である。中央の加熱領域 (ゾーン 1) では前節で取り上げたフィードフォワード補償をいれ、目標値の変更にも追従できるようにし、外乱の抑制に大きな効果のある I-PD フィードバック補償を導入している。また後でも詳しく述べるが、モード変換器と前置補償器とを I-PD 補償器の前後に挿入し、リカバリー時の温度均一性の改善とそれぞれのゾーンの相互干渉を抑制することを目的にブロック線図が設計されている。さらに外乱はそれぞれのゾーンに独立にステップ状外乱として入力し、制御対象は 2 次遅れ系としている。

(2) 制御式の導入

3 ゾーンマルチポイント I-PD 制御のブロック線図を元にその制御式を導入する。制御対象の伝達関数は式 (3.23) の 2 次遅れ系で表わし、FF 補償はその逆数を取り、式 (3.24) で表現する。またモード変換器は式 (3.25) に示す行列であり、Z と y を式 (3.27) で関係づけている。

$$\text{モード変換器の出力 : } Z = \begin{bmatrix} z_{1n} \\ z_{2n} \\ z_{3n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{1n} \\ y_{2n} \\ y_{3n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (y_{1n} + y_{2n} + y_{3n})/3 \\ y_{1n} - y_{2n} \\ y_{1n} - y_{3n} \end{bmatrix} \quad \text{..... (3.27a)}$$

今までに紹介してきたフィードバック制御は偏差 (目標値と制御量の差) を最小にする制御であったが、ここではモード変換器を導入することで、中央 (ゾーン 1 の z_1) では温度 $y_1 \sim y_3$ の平均値を、内側 (z_2) と外側 (z_3) は中央との温度差をとることで式 (3.28) で示される偏差を最小にする制御を行なっている。この様子を図 3.39 と図 3.40 に示している。

$$\text{偏 差 : } E = \begin{bmatrix} e_{1n} \\ e_{2n} \\ e_{3n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{1n} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} z_{1n} \\ z_{2n} \\ z_{3n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{1n} - (y_{1n} + y_{2n} + y_{3n})/3 \\ -(y_{1n} - y_{2n}) \\ -(y_{1n} - y_{3n}) \end{bmatrix} \quad \text{..... (3.28a)}$$

PID 動作の出力は前節でも導入しているが、できるだけ丁寧に説明するために、再記する。

$$\text{I 動作 : } m_I = \begin{bmatrix} m_{I1n} \\ m_{I2n} \\ m_{I3n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{I1n-1} + q e_{1n} / K_{I1} \\ m_{I2n-1} + q e_{2n} / K_{I2} \\ m_{I3n-1} + q e_{3n} / K_{I3} \end{bmatrix} \quad \text{..... (3.29a)}$$

(2) 制御式の導入

$$\text{制御対象} : G(s) = \begin{bmatrix} G_1(s) & 0 & 0 \\ 0 & G_2(s) & 0 \\ 0 & 0 & G_3(s) \end{bmatrix} \quad \text{ただし } G_i(s) = \frac{K_i}{1 + g_{1i}s + g_{2i}s^2} \quad \dots\dots (3.23)$$

$$\text{FF 補償} : F(s) = \frac{1 + f_1s + f_2s^2}{K_f} \quad \dots\dots (3.24)$$

$$\text{モード変換器} : G_m(s) = \begin{bmatrix} 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad \dots\dots (3.25)$$

$$\text{前置補償器} : G_h(s) = \begin{bmatrix} 1 & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & 1 & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & 1 \end{bmatrix} \quad \dots\dots (3.26)$$

$$\text{モード変換出力} : Z = G_m(s)y \quad \dots (3.27)$$

$$\text{偏差} : E = R - Z \quad \dots (3.28)$$

$$\text{I 動作} : m_I = \left[\frac{1}{K_I s} \right] E \quad \dots (3.29)$$

$$\text{P 動作} : m_P = [K_P]Z \quad \dots (3.30)$$

$$\text{D 動作} : m_D = [K_D s]Z \quad \dots (3.31)$$

$$\text{FF 補償出力} : f = F(s)R \quad \dots (3.32)$$

$$\text{PID 出力} : m = m_{pid} + f + d \quad \dots (3.33)$$

$$\text{温度調節器出力} : M = G_h(s)m \quad \dots (3.34)$$

$$\text{制御対象出力} : y = G(s)M \quad \dots (3.35)$$

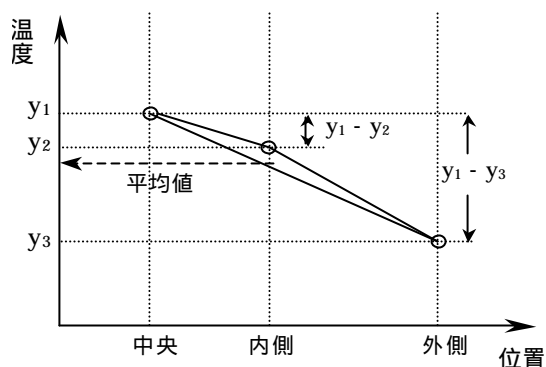


図 3.39 モード変換器の考え方

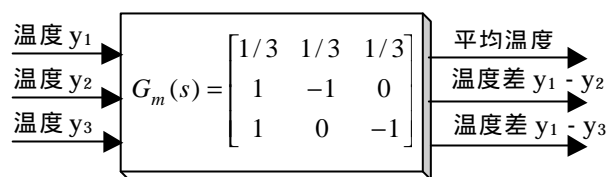
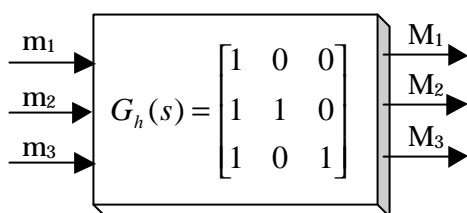
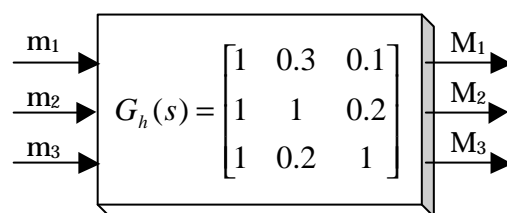


図 3.40 モード変換器



(a)



(b)

図 3.41 前置補償器

$$\text{P 動作: } m_P = \begin{bmatrix} m_{P1n} \\ m_{P2n} \\ m_{P3n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{P1\ n-1} + K_{P1}(z_{1\ n} - z_{1\ n-1}) \\ m_{P2\ n-1} + K_{P2}(z_{2\ n} - z_{2\ n-1}) \\ m_{P3\ n-1} + K_{P3}(z_{3\ n} - z_{3\ n-1}) \end{bmatrix} \quad \dots\dots (3.30a)$$

$$\text{D 動作: } m_D = \begin{bmatrix} m_{D1\ n} \\ m_{D2\ n} \\ m_{D3\ n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{D1\ n-1} + K_{D1}(z_{1\ n} - 2z_{1\ n-1} + z_{1\ n-2})/q \\ m_{D2\ n-1} + K_{D2}(z_{2\ n} - 2z_{2\ n-1} + z_{2\ n-2})/q \\ m_{D3\ n-1} + K_{D3}(z_{3\ n} - 2z_{3\ n-1} + z_{3\ n-2})/q \end{bmatrix} \quad \dots\dots (3.31a)$$

FF 補償は中央（ゾーン 1）にだけに行なっている。その理由は後で述べる前値補償器の構成で決まる。

$$\text{FF 補償出力: } f_n = (c_0 r_n + c_1 r_{n-1} + c_2 r_{n-2})/d_0 \quad \dots\dots (3.32a)$$

$$\text{ただし } c_0 = 1 + f_1/q + f_2/q^2$$

$$c_1 = -f_1/q - 2f_2/q^2$$

$$c_2 = f_2/q^2$$

$$d_0 = K_f$$

$$\text{PID 出力: } m = \begin{bmatrix} m_{1n} \\ m_{2n} \\ m_{3n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{IPD1} \\ m_{IPD2} \\ m_{IPD3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{I1n} + m_{P1n} + m_{D1n} + f_n + d_{1n} \\ m_{I2n} + m_{P2n} + m_{D2n} + d_{2n} \\ m_{I3n} + m_{P3n} + m_{D3n} + d_{3n} \end{bmatrix} \quad \dots\dots (3.33a)$$

また前値補償器の出力は次式で表わされ、それぞれのゾーンの相互干渉がない図 3.41(a)に示す行列の場合は中央（ゾーン 1）を基準にして制御し、内側（ゾーン 2）と外側（ゾーン 3）は補助的な制御になっている。これは内側と外側伝達関数が中央の伝達関数と大きなひらきがないことを前提にしている。

$$\text{温度調節器の出力: } M = \begin{bmatrix} M_{1n} \\ M_{2n} \\ M_{3n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{1n} \\ m_{2n} \\ m_{3n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{1n} \\ m_{1n} + m_{2n} \\ m_{1n} + m_{3n} \end{bmatrix} \quad \dots\dots (3.34a)$$

（相互干渉なし）

さらにそれぞれのゾーンの相互干渉を考慮すると図 3.41(b)に示すようにお互いが影響し合う係数を掛ける。ここでは仮にゾーン 1 とゾーン 2 の相互干渉を 0.3、ゾーン 1 とゾーン 3 のそれは 0.1 とし、ゾーン 2 とゾーン 3 は 0.2 としている。

$$\text{温度調節器の出力: } M = \begin{bmatrix} 1 & 0.3 & 0.1 \\ 1 & 1 & 0.2 \\ 1 & 0.2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{1n} \\ m_{2n} \\ m_{3n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{1n} + 0.3m_{2n} + 0.1m_{3n} \\ m_{1n} + m_{2n} + 0.2m_{3n} \\ m_{1n} + 0.2m_{2n} + m_{3n} \end{bmatrix} \quad \dots\dots (3.34b)$$

（相互干渉あり）

最後に制御量は下記の式で表わされる。

$$\text{制御量: } y = \begin{bmatrix} y_{1n} \\ y_{2n} \\ y_{3n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (b_{10}m_{1n} - a_{11}y_{1n-1} - a_{12}y_{1n-2})/a_{10} \\ (b_{20}m_{2n} - a_{21}y_{2n-1} - a_{22}y_{2n-2})/a_{20} \\ (b_{30}m_{3n} - a_{31}y_{3n-1} - a_{32}y_{3n-2})/a_{30} \end{bmatrix} \quad \dots\dots(3.35a)$$

$$\text{ただし } a_{i0} = 1 + g_{1i}/q + g_{2i}/q^2 \quad b_{i0} = K$$

$$a_{i1} = -g_{1i}/q - 2g_{2i}/q^2$$

$$a_{i2} = g_{2i}/q^2$$

(3) Excel の操作

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	制御対象	$G_1(s)$	$G_2(s)$	$G_3(s)$		FF補償	$F(s)$	不整合率
2	K	2.5	2.2	2		K_f	2.75	1.1
3	z_1	7	5.5	5		f_1	6.3	0.9
4	z_2	2	1.1	1		f_2	1.6	0.8
5	a0	941	551	501		c0	767	
6	a1	-1740	-990	-900		c1	-1406	
7	a2	800	440	400		c2	640	
8	b0	2.5	2.2	2		d0	2.75	

図 3.42 制御対象の伝達関数と FF 補償の入力エリア

	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1	前置補償			PID定数	ゾーン1	ゾーン2	ゾーン3		制御周期	
2	h_{12}	0.3		K_p	2	100	200		θ	0.05
3	h_{13}	0.1		K_t	2.5	0.02	0.01			
4	h_{21}	1		K_D	0.1	0.2	0.2		外乱	
5	h_{23}	0.2							d1	-50
6	h_{31}	1							d2	-80
7	h_{32}	0.2							d3	-100

図 3.43 前置補償、PID 定数、制御周期および外乱の入力エリア

C13		=(M12+W12+AG12)/3											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
10	時間	R	z_1	e_1	m_{P1}	m_{t1}	m_{D1}	m_{PID}	f	d_1	m_1	M_1	y_1
11	-0.05	200	200	-0.04	1200	1202	0.003	2.193	72.73	0	74.92	79.99	200
12	0	200	200	-0.04	1200	1202	0.003	2.193	72.73	0	74.92	79.99	200
13	0.05	200	200.04	-0.04	1200	1202	0.003	2.194	72.73	0	74.92	79.99	200.04
14	0.1	200	200.04	-0.04	1200	1202	0.003	2.194	72.73	0	74.92	79.99	200.04
15	0.15	200	200.04	-0.04	1200	1202	0.003	2.194	72.73	0	74.92	79.99	200.04
16	0.2	200	200.04	-0.04	1200	1202	0.003	2.194	72.73	0	74.92	79.99	200.04
17	0.25	200	200.04	-0.04	1200	1202	0.003	2.194	72.73	0	74.92	79.99	200.04

図 3.44 中央ゾーンの目標値から制御量までの計算エリア

(4) 数値シミュレーションの結果

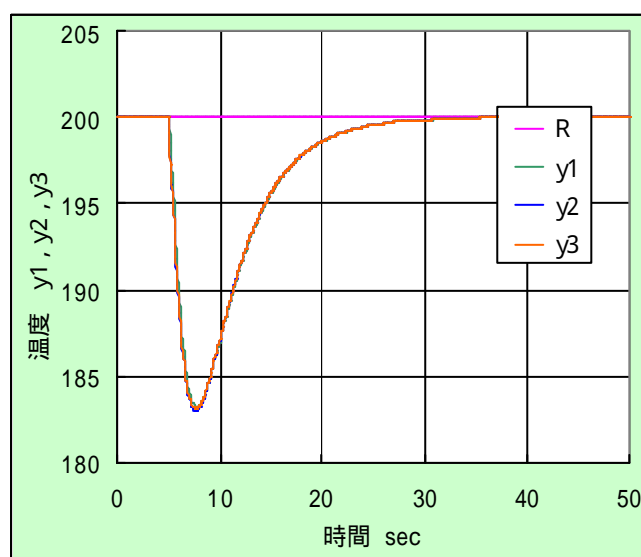


図 3.45 中央、内側および外側の制御結果

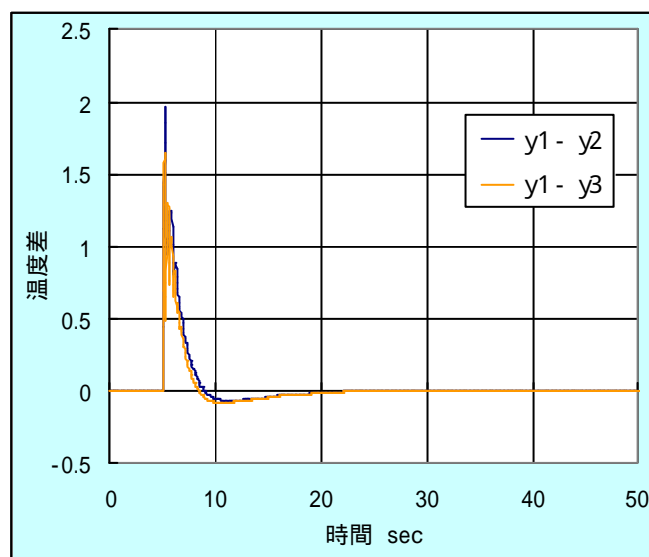


図 3.46 中央との温度差

(3) Excel の操作

図 3.42 は例によって制御対象の伝達関数と FF 補償関数の係数と離散化のための計算エリアである。制御対象の伝達関数はそれぞれのゾーンで大きく異なることはないと考えられるので近い値を入力し、FF 補償関数は、前節でも述べたように制御対象の伝達関数が誤差を含みながらも同定することができると仮定して、真の伝達関数との不整合率を入力することで計算している。離散化は式 (3.35a) である。

つぎに図 3.43 は前置補償器、PID 定数、制御周期および外乱の入力エリアである。前置補償器のそれぞれの係数は式 (3.34b) に挙げた係数列を用い、それぞれの加熱ゾーンの相互干渉がある場合を採用している。PID 定数は加熱ゾーン毎に入力し、制御周期はここでは 0.05 にしている。外乱は冷たい基板がホットプレートに接触することで生ずるが、それぞれの加熱ゾーンで外乱の大きさを変更できるようにしている。

さらに図 3.44 は加熱ゾーン 1 の目標値から制御量までの計算エリアを示し、その計算は下記に示すようになる。その他の加熱ゾーンは同様に計算できる。

モード変換器の出力 z_1 :	Cell(C13)	= <u>(M12+W12+AG12)/3</u>	
偏 差 e_1 :	Cell(D13)	=B13-C13	← 平均値 $(y_1+y_2+y_3)/3$ の計算
P 操作量 m_{P1} :	Cell(E 13)	=E12+N\$2*(C13-C12)	
I 操作量 m_{I1} :	Cell(F 13)	=F12+S\$2*D13/N\$3	
D 操作量 m_{D1} :	Cell(G 13)	=G12+N\$4/S\$2*(C13-2*C12+C11)	
PID 操作量 m_{PID1} :	Cell(H 13)	=-E13+F13-G13	← FF 補償 $(c_0*r_n+c_1*r_{n-1}+c_2*r_{n-2})/d_0$
FF 補償出力 f :	Cell(I 13)	= <u>(G\$5*B13+G\$6*B12+G\$7*B11)/G\$8</u>	
外 乱 d_1 :	Cell(J 13)	=IF (5>A13, 0,S\$5)	← 5 秒後に外乱 d_1 が入る
PID 出力 m_1 :	Cell(K 13)	=H13+I13+J13	
温度調節器出力 M_1 :	Cell(L 13)	= <u>K13+K\$2*U12+K\$3*AE12</u>	← 相互干渉 $M_1+0.3*M_2+0.1*M_3$
制 御 量 y_1 :	Cell(M13)	=(B\$8*L13-B\$6*M12-B\$7*M11)/B\$5	

(4) 数値シミュレーションの結果

図 3.45 は目標温度 200 に設定し、時刻 5 秒のところで冷たい基板をホットプレートの上に乗せた場合を想定して、制御状態を数値シミュレーションした結果である。外乱はそれぞれの加熱ゾーンの熱容量によって異なると考えられるので、それぞれ $d_1=-50$ 、 $d_2=-80$ および $d_3=-100$ を代入し、外側のゾーンほど大きな値にしている。また図 3.46 は同じ条件での中央と内側および外側の温度差を示している。PID 定数を試行錯誤で調整した結果、それぞれの加熱ゾーンは相互干渉があるにも拘わらずハンチングもなく、それぞれの温度は均一性を保ちながら目標温度 200 に向かって上昇している。

この制御事例では、外乱を抑制する、つまり目標温度 200 に直ちに回復することは物理的に不可能であるから、外乱を受けながらも過渡状態の温度均一性を保持する制御を紹介した。この制御は熱処理の再現性と製品の品質を向上し、不良品の低減に効果がある。