

ホットストリップ巻取温度計算機制御

Computing Control of Hot Strip Coiling Temperature

伊 佐 早 恒 夫* 平 川 克 巳**
Tsuneo Isahaya Katsumi Hirakawa

北 之 園 英 博** 三 浦 武 雄***
Hidehiro Kitanosono Takeo Miura

要 旨

ホットストリップの巻取温度は、品質上指定されたモードにしたがって制御されることが望まれるが、近時高速圧延が行なわれるにつれ運転員による手動制御がむずかしくなり、新しい制御方式として計算機制御が採用される機運になった。ここでは計算機によっていかなる制御方式でいかなる成果が得られたかについて、主としてシステム設計と現地実験結果に重点をおいて述べる。

1. 緒 言

ホットストリップミル巻取温度制御では操作部としての冷却用スプレー装置と制御量検出部としての巻取温度計とがかなり離れて設置されているため、PIDのような単純なフィードバック制御のみによっては制御偏差を所要の範囲に収めることがきわめて困難である。

このような場合フィードフォワード制御を可能とするモデル修正法⁽¹⁾を適用するのが有効である。しかし冷却スプレーの分布を無視するようなモデルを使用する場合、フィードフォワード制御は巻取速度と仕上圧延機出口におけるストリップ温度の時間的変化とが、冷却スプレーの分布範囲に比較してかなり高率であり、かつ冷却スプレーの分布範囲内に温度計を設置できないため十分なものとならない。

われわれは、実時間でこの分布的プロセスそのものと相似的に動作するダイナミックモデルを用い、温度計を設定できない範囲における任意箇所の温度を認識することによって簡単かつ精緻なフィードフォワード制御を可能とし、フィードバック制御およびモデル修正を効果的なものとした。

このようなダイナミックモデルを中心とする制御装置全体は混然一体アナログ・デジタルハイブリッド方式を用いて構成することが経済的で、制御装置を現地に持込み、この方式の妥当性を確認した。

2. プラントの説明

図1にホットストリップミル巻取温度制御プロセスの状態を示す。図1 $F_1 F_2 \dots F_6$ で示される仕上圧延機で圧延されたストリップは巻取速度 V_m/s が最終スタンド F_6 のロール回転数で、厚み h mm が F_6 出口のX線厚み計で、ミル出口における温度 T_6 がふく射高温計で続いて検出される。冷却スプレー装置はほぼ等間隔の6セクションで上下に分かれたバンクに分割されて分布している。冷却スプレー装置と巻取部の巻取温度 T_c を測定する温度計の間は、ある種の作業の必要上ある程度以上の間隔を持たせてあるのが普通である。スプレー装置の設置区間およびそれから T_c 温度計に至る間に温度計設置は計測ふん囲気の点から困難である。

3. 運転状況および制御条件

仕上圧延機に断続的に供給されるストリップが圧延されて、冷却

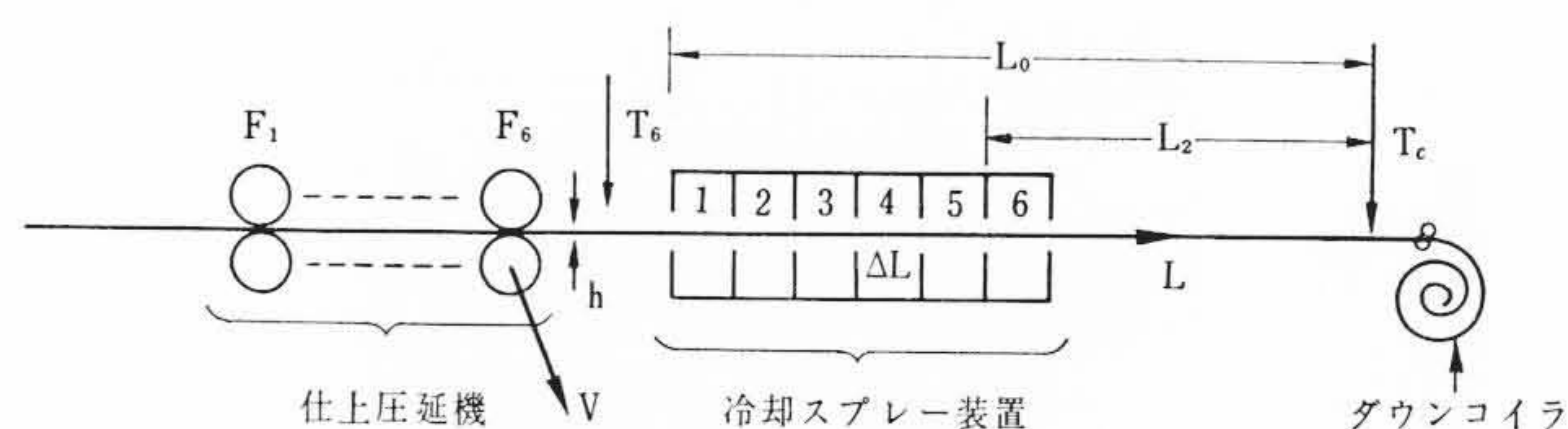


図1 ホットストリップミル巻取温度制御プロセス

スプレー装置で冷却されたのちダウンコイルに巻取られる。目標温度 $T_{co}^{\circ}C$ で巻取るために関係する量はおもに h , T_6 , V , そしてスプレーによる冷却の度合である。 h は自動板厚制御装置によってほぼ一定に保たれるので、与えられた T_{co} に対し時間的に変化する T_6 , V のもとに適切なスプレーによる冷却量を与えることが、要求される制御の内容である。この場合 V は、ミルの出口における温度 T_6 をある目標温度範囲内に入れるため操作されるので、 T_c を制御するために積極的に操作することはできない。

4. 物理的数式モデルとスタティックモデル制御方式

図1のような系の制御を行なう場合 T_c 検出部と冷却スプレー装置すなわち操作部との間にかかなりの距離のあることから T_6 , V の時間的変化率が大である程度によって、PID制御などのフィードバック制御のみによっては制御偏差を所要の範囲内におさめ得ない事態も生じてくる。このような場合一般にモデルによる予測制御を行なわせる方法が考えられる。モデルを作るにはまずスプレーによる冷却および同時に行なわれているふく射による冷却の物理プロセスを数式で表わすことが必要である。

ストリップ上の一点をとり、その冷却プロセスを示せば(1)式のようなになる⁽²⁾⁽³⁾。

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{1}{h} \left\{ \frac{dK}{dL} T + \frac{K'}{3} (T + 273)^4 \right\} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 T : ストリップ上の一点の温度 $^{\circ}C$

t : 時 間 s

K : スプレー冷却能力 $mm \cdot m \cdot s^{-1}$

L : T_6 温度計位置を基準として T_c 温度計位置の方向にとった距離 m

K' : ふく射冷却係数 $mm \cdot s^{-1} \cdot deg^{-3}$

(1)式を基とし T_6 , V の時間的変化を検出して刻々行なうフィードフォワード制御数式モデルとして(2), (3)式のような冷却スプレーの分布を無視したスタティックモデルが得られる。

$$\sum_{ij} \delta_{ij} K_{ij} \div hV \log_e \frac{T_6}{T_c'} \dots \dots \dots (2)$$

* 住友金属工業株式会社和歌山製鉄所

** 日立製作所日立工場

*** 日立製作所中央研究所 工学博士

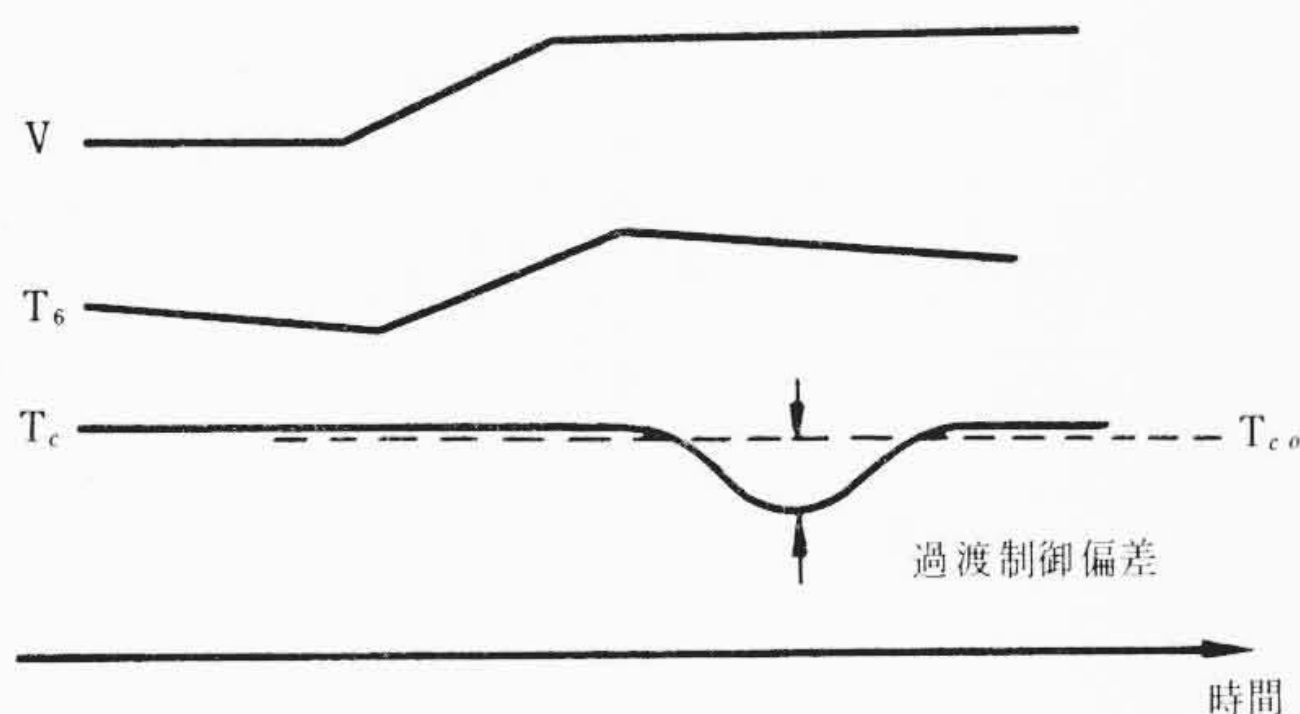


図2 スタティックモデルによる予測制御

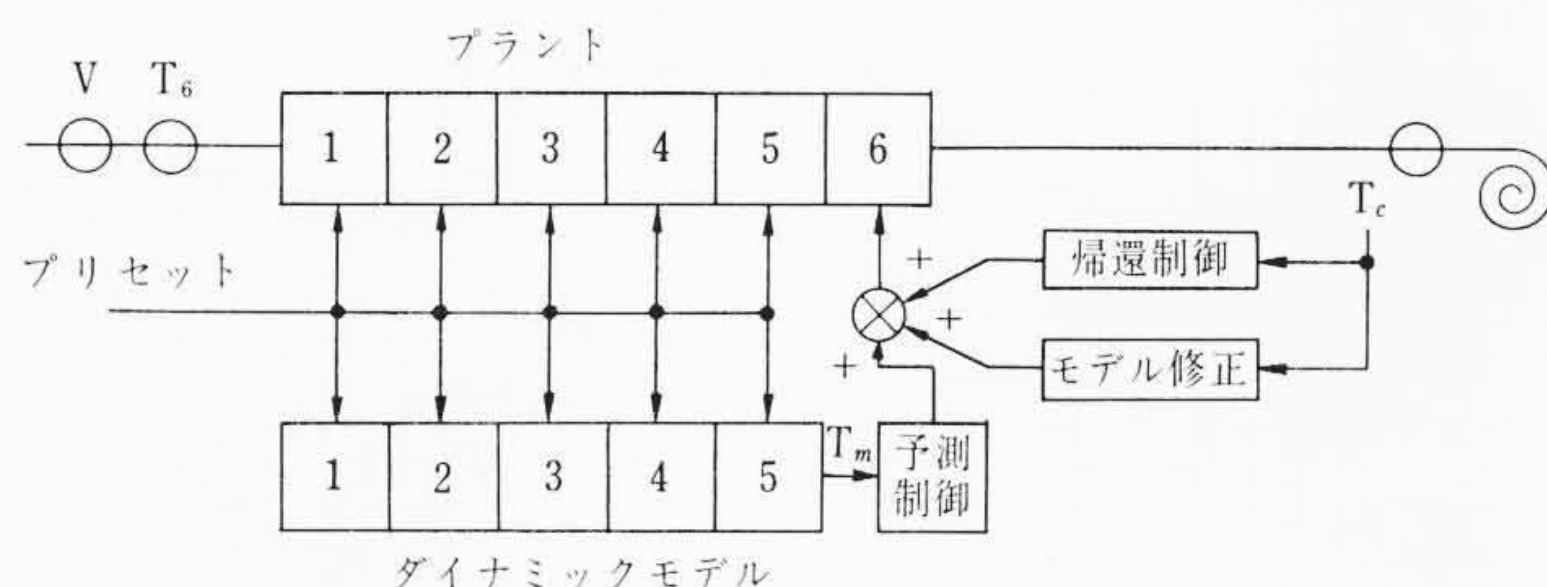


図3 ダイナミックモデル制御方式

$$\frac{1}{(T_6' + 273)^3} = \frac{1}{(T_{co} + 273)^3} - \frac{K'L_0}{hV} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 i : スプレーバンク No.

j : 同一スプレーバンク内のバルブ No.

δ_{ij} : バルブが開のとき1, 閉のとき0

K_{ij} : 各バルブの冷却能力 $\text{mm} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

L_0 : T_6 温度計と T_c 温度計との間の距離 m

(2), (3) 式によるフィードフォワード制御は冷却能力 K_{ij} のすべてが T_6 温度計のもとに集中し T_6 温度計を過ぎて T_c 温度計に至る間はふく射冷却のみが行なわれると考えたもので、図2のように V, T_6 の過度的変化によって T_c に大きな制御偏差を生じてしまう。

5. ダイナミックモデル制御方式

これに対し(4)式のような冷却スプレーの分布を考慮したダイナミックモデルを用い、(5), (6) 式によりフィードフォワード制御を行なうことを考える。

$$\frac{\partial T}{\partial t} + V \frac{\partial T}{\partial L} = -\frac{1}{h} \left\{ \frac{dK}{dL} T + \frac{K'}{3} (T + 273)^4 \right\},$$

$$L=0 \sim (L_0 - L_2), \quad L=L_0 - L_2 \text{ にて } T=T_m \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$K_6 \doteq hV \log_e \frac{T_m}{T_m'} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\frac{1}{(T_m' + 273)^3} \doteq \frac{1}{(T_{co} + 273)^3} - \frac{K'L_2}{hV} \quad \dots\dots\dots (6)$$

(4)～(6) 式はダイナミックモデル制御方式を示す図3と対応づけられる。(4) 式はスプレーバンク #1～#5 における冷却分布プロセスを刻々相似し温度計の設置不能な5バンク出口におけるストリップ温度 T_m °C を刻々表示することができる。したがってここで T_m を T_6 と相似に考えると、 T_m と T_c 間における制御を(5), (6) 式のように(2), (3) 式と同形に扱うことは操作部としてのスプレー装置が#6バンクのみでありしかも T_m 測定点に隣接することから内容的に(2), (3) 式の場合より適していることになる。(2), (3) 式における T_6, L_0 を T_m, L_2 に置換えており、 K_6 は#6バンクに加えられるフィードフォワード制御量である。このようなダイナミックモデルによるフィードフォワード制御によって図2に示すような T_c の過度偏差はきわめて減少すると考えられる。

フィードフォワード制御によってもなお生ずる制御偏差は(7)式

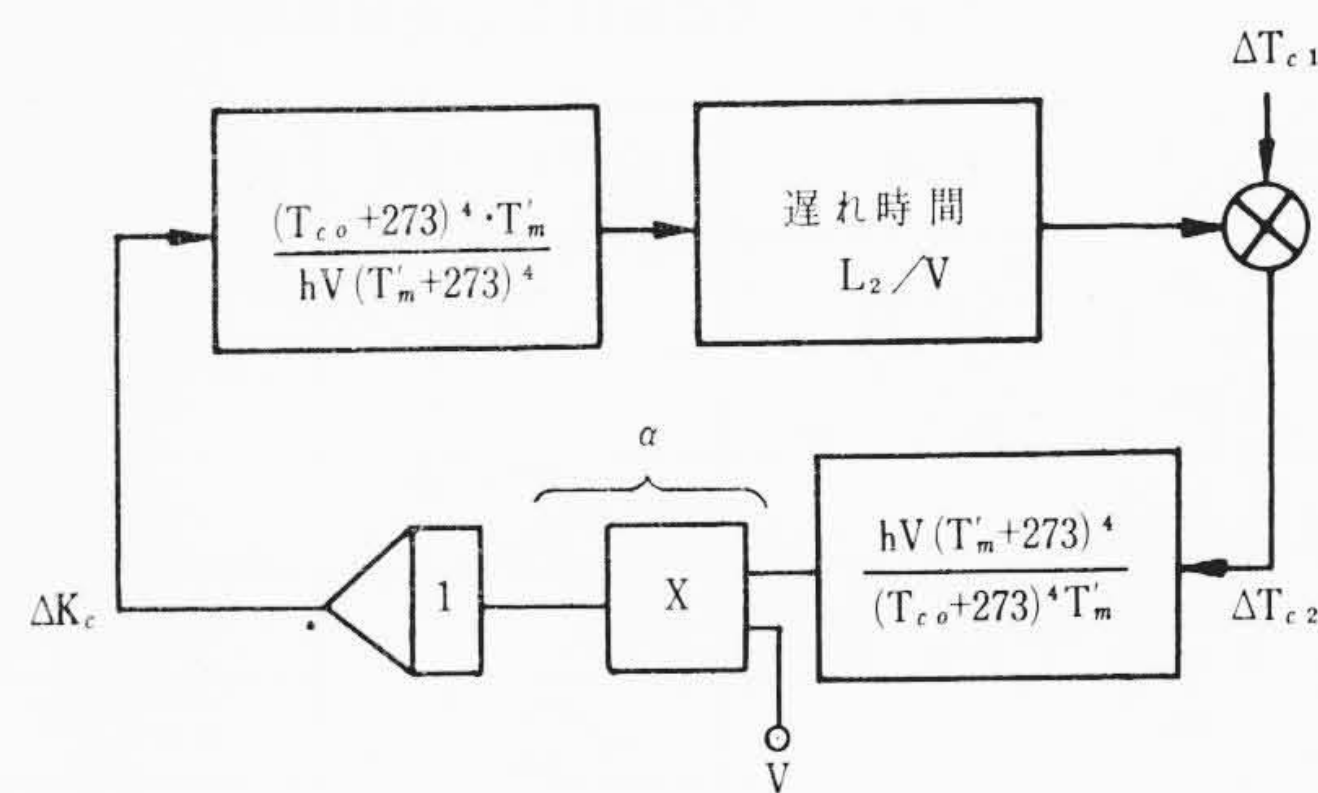


図4 帰還制御ブロックダイアグラム

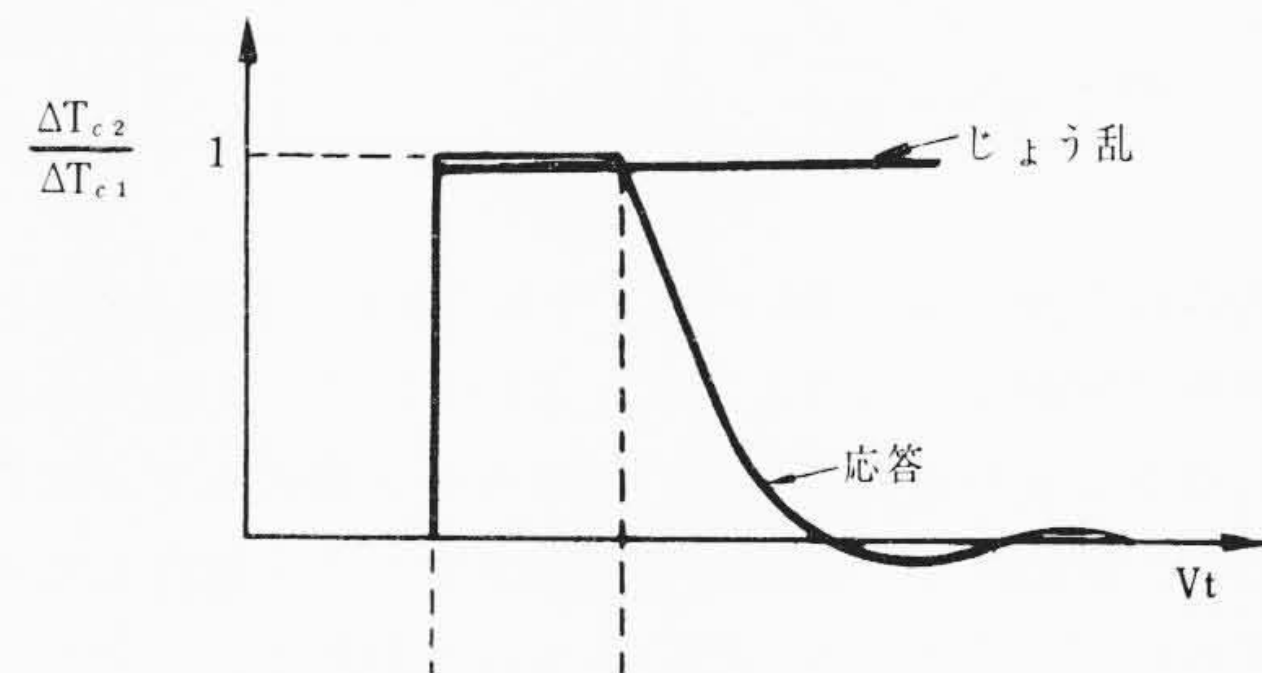


図5 帰還制御ステップ応答

のような積分形フィードバック制御で打消しさらにフィードバック制御量をなるべく減ずるためのモデル修正は(8)式のように一本のストリップの初頭のある期間における制御偏差の平均値を#6バンク冷却能力に換算しつぎのストリップの初頭がスプレー区間にはいる前に#6バンク操作量に加えるものとする。

(7), (8) 式はともに(5), (6) 式の偏微分形をもとに得たものである。

#6バンクの操作量は(9)式に示すようにフィードフォワード制御量、フィードバック制御量およびモデル修正量の和として表われる。

$$\Delta K_c = -\alpha h \int_0^t \frac{V(T_m' + 273)^4 (T_c - T_{co})}{(T_{co} + 273)^4 T_m'} dt \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\Delta K_a = -\frac{h}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \frac{V(T_m' + 273)^4 (T_c - T_{co})}{(T_{co} + 273)^4 T_m'} dt + \Delta K_{ao} \dots\dots\dots (8)$$

$$\sum_j \delta_{6j} K_{6j} \doteq K_6 + \Delta K_c + \Delta K_a \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 ΔK_{ao} : 前回ストリップまでのモデル修正量積算値

ここにおけるモデル修正の特長はモデルがある評価関数の最大値または最小値などを求めるものではなく制御偏差を零とすることを目的とするものであるから、フィードフォワード制御量に加算するような簡単な形式で十分である。すなわち h, T_{co} が同一で T_6, V がほぼ同じ時間的経過をたどるいわゆる同一スケジュールのストリップが続けて巻取られるような場合、固定的なフィードフォワードモデルに対し生ずる制御偏差はほぼ同一と考えられるから、このようなモデル修正法によって同一スケジュールの最初のストリップのみを犠牲とし後続のストリップの初頭における制御偏差をきわめて小さくすることが期待される。ストリップの初頭の制御偏差を小さくすることはむだ時間の大きなフィードバック制御系においてきわめて有効である。フィードバック制御は純積分形であるが、ループ積分時定数をむだ時間を常に一定比におけば、最適ダイナミクスを常に保持できることは A. Haalman 氏⁽⁴⁾ が述べている。(7) 式の α を V に比例するものとして最適値を選ぶことがそのことに相当する。フィードバック制御系のみをとり上げたブロックダイアグラムを図4に、そのステップ応答特性のステップ入力大きさ、巻取速度の大きさに関し無次元化したものを図5に示す。

(a) 式のようにフィードフォワード、フィードバック、モデル修

表 1 各制御方式における過渡制御偏差

方式	手 動	スタティック方式	ダイナミック方式
1.2mm	20% $+10^{\circ}$ 30m -10°		
	50% $+33^{\circ}$ 70m -20°		
2mm	20% $+30^{\circ}$ 144m -15°	$+30^{\circ}$ 100m -12°	$+5^{\circ}$ 20m -2°
	50% $+37^{\circ}$ 144m -15°		$+6^{\circ}$ 72m -2°
5mm	20% $+12^{\circ}$ 30m -10°	$+18^{\circ}$ 80m -10°	$+3^{\circ}$ 50m -2°
	50% $+4^{\circ}$ 75m -22°		-5° 10m -5°
6.3mm	20% $+12^{\circ}$ 30m -10°	$+30^{\circ}$ 70m -30°	
	50% $+4^{\circ}$ 75m -22°		

正の集約された操作端が #6 バンクであるから、有限な #6 バンク容量の範囲内で制御を行なうために、#1~#5 バンクのプリセットを適正に行なうことが必要である。プリセット数式モデルは(10)式に示すもので、左辺に示す設定は実際のプラントと並行してダイナミックモデルのバンクモデル(後述)にも行なわれる。

$$\sum_{ij} \delta_{ij} K_{ij} \div hV \log_e \frac{T_6}{T_6'} - \Delta K_{ao} - K_{6o} \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 $i=1\sim5$

K_{6o} : #6 バンク全容量の 1/2

6. シミュレーションによる制御方式の確認

ダイナミックモデル制御方式がスタティックモデル制御方式または手動制御方式にまさっているかどうかを確認するために、シミュレーションを行なった。シミュレーション回路中 #1~#5 スプレーバンクに対するダイナミックモデルは特異なものであるが、後述する制御装置におけるものとほぼ同一なことからともに記述を略し、各方式の典型的 h, V 値における特性比較として示したのが表 1 である。

表 1 において手動およびスタティックモデル方式では 10 秒間で 20% および 50% のスピードアップに対し過度制御偏差を $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 以内に収めることは不可能であるがダイナミックモデル方式では最高 $+6^{\circ}\text{C}\sim-5^{\circ}\text{C}$ であって十分要求を満たすものとなる。

7. 混然一体ハイブリッド方式による制御装置

現在各種産業のプロセス制御において一つのデジタル計算機による総括制御方式が多くとられている。しかし制御の内容をすべて一つのデジタル計算機で純デジタル的に行なうのが必ずしも適当とは限らない。計算のあるものはアナログ計算または以下にのべる混然一体ハイブリッド計算方式によるほうがコストあたりのパフォーマンスが大なる点ですぐれていることがある。本稿のダイナミックモデル制御方式では計算そのものが混然一体ハイブリッド方式に適したものであり、巻取温度制御のみを単独に行なうことを条件にすればデジタル計算機を用いることが本計算システムの規模からみてきわめて不経済であることが経済性評価より明らかになった。

混然一体ハイブリッド方式とは普通いわれるハイブリッド方式のように、アナログ計算機とデジタル計算機とを併置してその間の信号と A-D および D-A 変換器でやりとりしそれぞれに得意の計算を分担せしめるものとは異なり、アナログ計算機の演算制御を拡張したもので、アナログ演算回路を論理演算結果によってオン、オフし、または切換え、さらにアナログ演算出力がある値以上になるかならないかに対応した論理でもって論理演算を行なう方式であっ

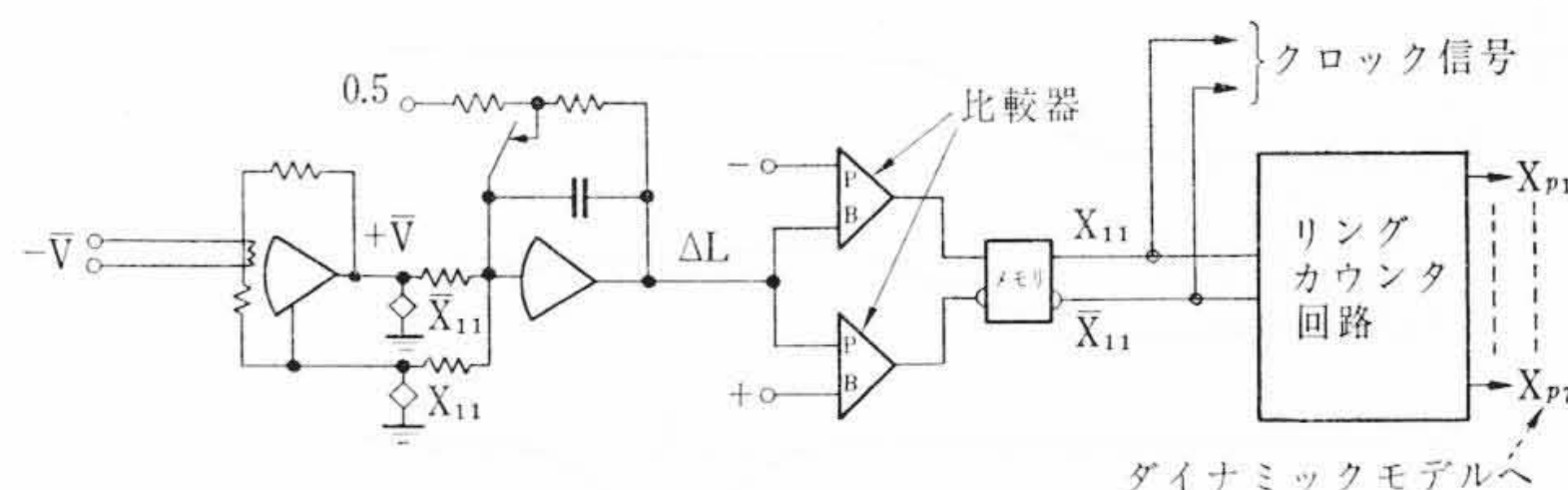


図 6 ペース回路

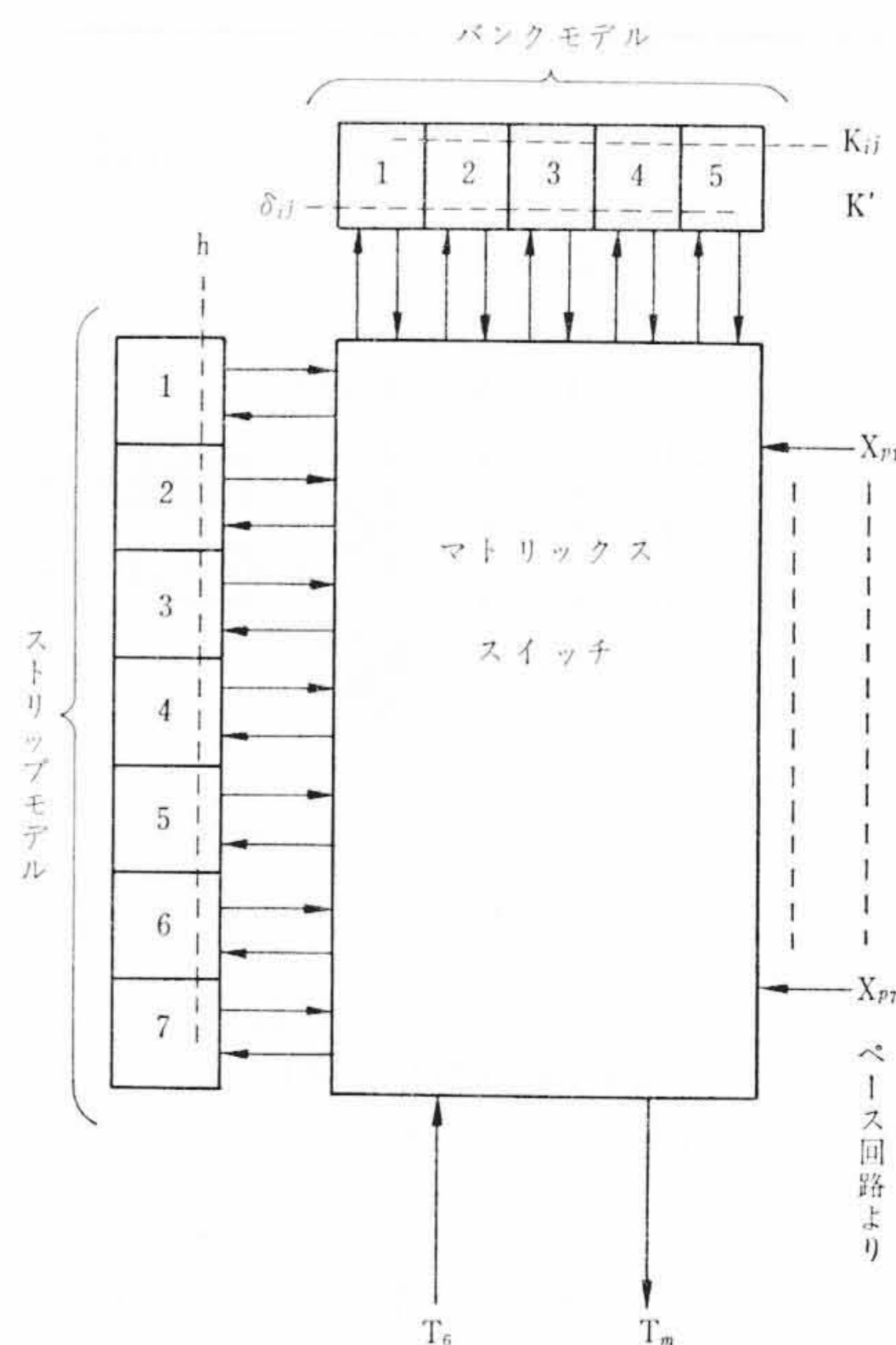


図 7 ダイナミックモデル回路

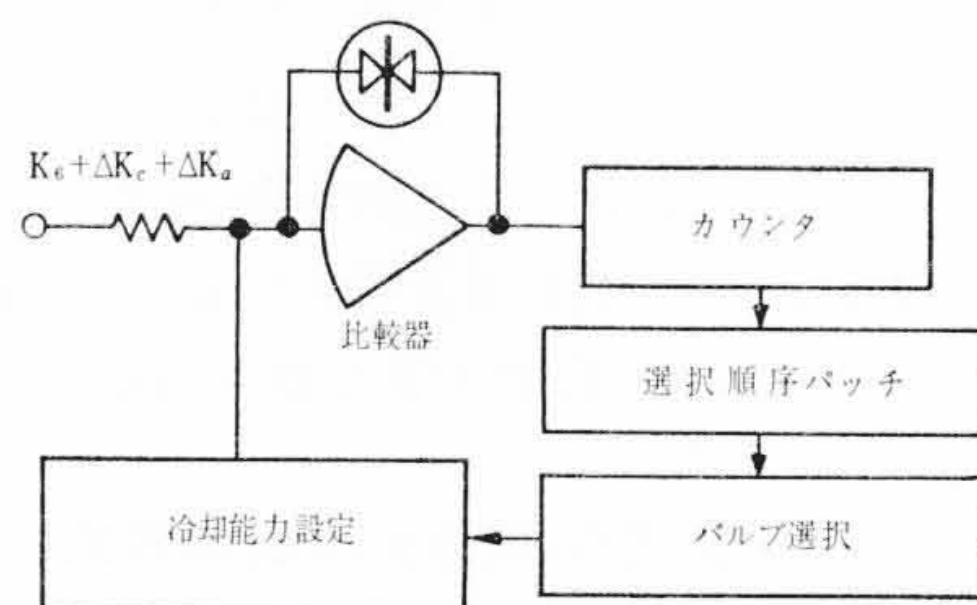


図 8 連続量の量子化配分制御装置

て、アナログ単独、デジタル単独または両者の併置によっても得られない計算能力・特長を有している。図 6、図 7 は本巻取温度制御装置において最も特長のあるペース回路およびダイナミックモデル回路をそれぞれ示したものである。

ペース回路はダイナミックモデル回路の演算制御を行なうことを主目的とするが、ストリップの単位距離進行ごとにクロック信号を出しそのペースに基づきフィードフォワード、フィードバック、モデル修正などを行なっていくためのものである。ストリップ進行距離はスプレーバンクの幅に対応するようにとられている。両比較器の論理出力は積分器の入力極性を切り換えて積分器出力が常に両境界値の間を往復するようにするとともに、リングカウンタの論理出力がダイナミックモデルの演算制御を行なうようにする。

ダイナミックモデル回路は 7 個の積分器よりなり単位進行距離ごとに、ストリップ上巻取方向にとられたサンプル点の温度を相似するところのストリップモデル、5 個の非線形回路よりなり #1~#5 スプレーバンクそれぞれにおけるスプレー冷却とふく射冷却の重畳を表わすところのバンクモデルおよびペース回路のリングカウンタ論理出力によりマトリックス状にオン、オフされ、ダイナミックモデルの各積分器とバンクモデルの各非線形回路との結合を時々刻々実際のプロセス状態に対応させるところのマトリックススイッチなどより成る。ストリップモデルの一つの積分器に着目すればその動

作は(11)式で表わされる。

$$T = T_6(t=0) - \frac{1}{h} \int_0^t \left\{ \frac{dK}{dL} T + \frac{K'}{3} (T+273)^4 \right\} dt \dots\dots (11)$$

(11)式における時刻 t の基準は、着目した積分器の表わすサンプル点が #1 バンクにはいった時点にとってある。ある時点に着目すればストリップモデル 6 個のうち 5 個はそれぞれ #1~#5 バンクスプレーの下にあるストリップ上のサンプル点の温度を表わしているコンピュータモードにあり、他の 1 個は T_6 に追従中でリセットモードにあり、残り 1 個は T_m を保持中でホールドモードにある。

図 8 は (9), (10) 式の右辺の冷却能力を左辺の量子化された各バルブの選択に冶金学的に指定された選択順で変換する連続量の量子化配分制御装置いかえれば広義の A-D 変換装置であって各バルブの冷却能力評価が変化に対するリファレンス部設定の変更も容易であり、混然一体ハイブリッド方式適用の典型例といえる。

混然一体ハイブリッド方式における演算方程式は混然状態が回路や金物に直観的に対応して表現されることが便であるから表 2 のような約束を設けてその目的を達している。演算器単体で要求される精度としてはたとえばストリップ全長に対して 2σ が 10°C 以内というような統計的量で与えられるので、計算総合精度や各計測器誤差もそれに対応する統計的量で与えるのが妥当である。各演算器単体出力誤差は(12)式のようにして入力と演算器自身の統計的誤差から求められる。このようにすることによって起こり得る最大誤差で演算精度評価する場合に比べ、入力および演算器自身の精度への要求をゆるめることができ、実用的な計算精度を経済的に得ることができる。

$$\overline{\Delta Y_\sigma^2} = \left(\frac{\partial f}{\partial X_1} \right)^2 \overline{\Delta X_{1\sigma}^2} + \left(\frac{\partial f}{\partial X_2} \right)^2 \overline{\Delta X_{2\sigma}^2} + \dots\dots + \left(\frac{\partial f}{\partial X_n} \right)^2 \overline{\Delta X_{n\sigma}^2} + \overline{\Delta f_\sigma^2} \dots\dots (12)$$

ここに $\overline{Y} = f(\overline{X}_1, \overline{X}_2, \dots, \overline{X}_n)$ で $\overline{X}_1, \overline{X}_2, \dots, \overline{X}_n$ は入力、 $\overline{Y}$ は出力、 $\overline{\Delta X_{1\sigma}}, \overline{\Delta X_{2\sigma}}, \dots, \overline{\Delta X_{n\sigma}}, \overline{\Delta Y_\sigma}$ は $\overline{X}_1, \overline{X}_2, \dots, \overline{X}_n$ の統計的誤差、 $\overline{\Delta f_\sigma}$ は演算器自身の出力に換算した統計的誤差である。

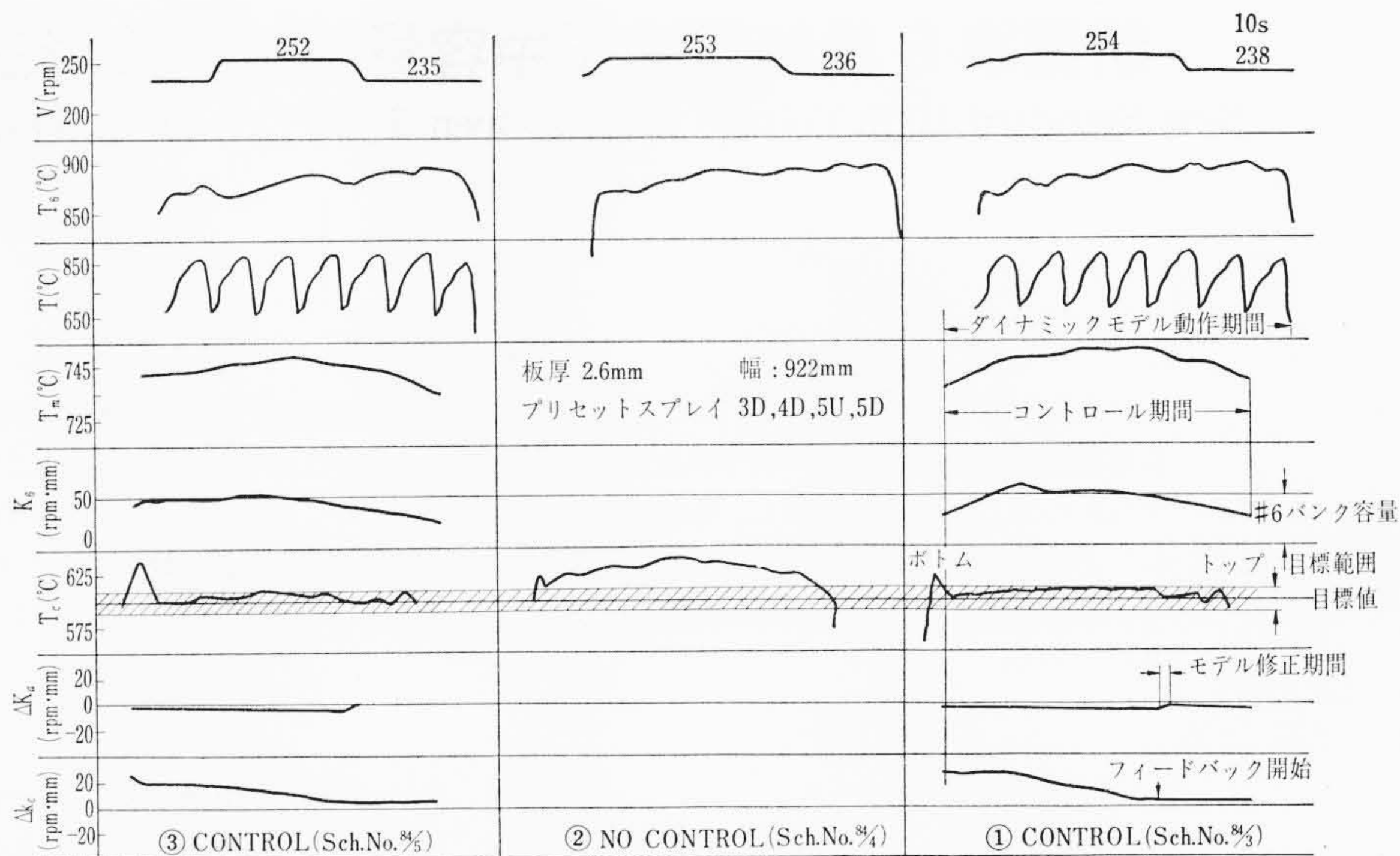
8. 現地実験の成果と問題点

混然一体ハイブリッド方式による制御装置を現地にて用いた結果、下記のように所期の成果が得られた。

- (1) 各ストリップのトップにおける制御偏差は 1σ , 10°C 程度となる。
- (2) 各ストリップのトップを除く以降の部分については制御偏差を $\pm 10^\circ\text{C}$ 以内とすることができる。
- (3) ストリップ全長に対し 2σ , 10°C 以内の制御偏差とすることができる。

図 9 は実験チャートの一例を示したものである。

こうした制御システムの設計においては数式モデルのパラメータとしての各冷却能力の統計的評価、ストリップテイルにおける巻取速度の計測、 T_6 の測定ふん囲気、バルブ応答時間の見積りなどについて注意すべきである。 T_6 は直接の計測ではなく、仕上圧延機入口における温度から間接測定することが好ましい⁽⁶⁾。



(66-2-24 板厚 2.6mm, 板幅 922mm, プリセットスプレー: 3D, 4D, 5U, 5D)

図 9 制御ダイナミクス記録の一例

表 2 渾然一体ハイブリッド演算方程式の表現

論理的アナログ演算子の使用法		
	回路	演算方程式
X: 接点リレー・無接点リレーなどの自動論理	基本則	$A = X_1 B + C(1+2X_1)$
Y: 切換スイッチ・押ボタンスイッチなどの手動論理		
Z(X ₁): 時間遅れ要素論理	論理積則	$A = X_1 X_2 B + C(1+2X_1)$
X ₁₁₁ (JL>0.5): 比較器による論理		
t ₁ (X ₁): 論理が 0→1 となる時刻	排反論理和則	$A = (X_1 + X_2) B + C(1+2X_1)$

9. 結 言

プラントの動的挙動をダイナミックモデルでとらえた結果、制御方式が簡単となり、それを混然一体ハイブリッド方式で装置化することにより、任意のスケジュールに対し適応性大で精緻な制御を経済的に実現することができた。これによって一般的にいえることは

- (1) スタティックにマイクロでダイナミックにマクロなモデルよりもスタティックにマクロでダイナミックにマイクロなモデルのほうがフィードフォワード制御用としてより有効である。
- (2) ダイナミックにマイクロなモデルを作るのに混然一体ハイブリッド方式は有力な武器である。
- (3) 動的制御性を重んずる中規模以下の専用計算制御装置として混然一体ハイブリッド方式は、コスト当たりのパフォーマンスが大なる点で純デジタル方式よりまさると考えられる。

ここに報告した制御システムは、単にホットストリップの品質の向上に貢献するということだけでなく、制御技術的にも多くの分野の制御に参考になると思われる。

終わりにこの制御システムの完成のために多くのかたがたの献身的なご協力を得た。住友金属工業株式会社石井次長、岡本主任研究員、町田氏、小野氏、三矢氏、日立製作所、奈良氏、柏木氏、春名氏ほか関係各位に深く感謝する。

参 考 文 献

- (1) 三浦, 岩田, 石川: 計測と制御 8, 116 (昭 38-8)
- (2) 福田, 木村, 和田: 鉄と鋼 3, 482 (1963)
- (3) 福田, 木村, 和田: 鉄と鋼 3, 484 (1963)
- (4) A. Haalman: Control Eng. 7, (1965)
- (5) R. Meredith et al: Iron and Steel Eng. 12, 73, (1965)
- (6) 特許申請中