

最近の圧延設備における制御装置

Recent Control Equipment for Rolling Mill

斎藤 奎二* 水野 雄弘*
Keizi Saitō Katsuhiko Mizuno

松香 茂道* 桜井 孝員*
Shigemichi Matsuka Takakazu Sakurai

要 旨

高品質の製品を高効率で圧延するために各種の新しい制御が採用されているが、ここではこれらのうち最近特に話題になっているサイリスタによる制御の高性能化、操作の自動化による操作員の低減、自動運転制御による稼働率の向上、自動板厚制御の最近の動向などについて日立製作所の実績をもとにその理論と実際の回路について説明を加えた。

1. 緒 言

近年における圧延設備用制御装置は高品質の製品を歩留りよく、高効率に生産することが課題とされ、そのため種々の自動化がとり入れられるとともにサイリスタ、トランジスタなどの制御要素の発達により、その目的を達している。

わが国においてはここ数年の設備投資の活発化により、最新の圧延設備が続々と建設され稼働にはいっているものが多い。本稿ではこれらの設備のうち特長と考えられるサイリスタ制御、操作の自動化、自動運転制御装置、自動板厚制御装置などについて述べ、最新の圧延設備用制御装置の一端を紹介したい。

2. サイリスタ制御⁽¹⁾

サイリスタが圧延機の駆動電源に用いられてからすでに5～6年を経過しているが、エレメントの大容量化、高耐圧化とあいまってその適用範囲も年々拡大され、ほとんどの分野で電動発電機を凌駕(りょうが)している。日立製作所においてはすでにこの分野で約40万kWのサイリスタを製作しており、最大容量8,500kWの電動機電源にも用いられている。本稿ではこのサイリスタ制御のうち特長のある二、三の制御について説明を加える。

2.1 逆並列無循環電流制御と

マイナーループ電流制御

可逆電動機の運転法には、従来水銀整流器時代から使用されている交直接続法、逆並列結線、電動機の界磁を逆転させる界磁逆転方式、主回路を切り換える単基切換方式などがあるが、このうち電源トランスが共通にできる逆並列結線が最も多く用いられ、特にインバータ、コンバータ間に電流を流さない無循環電流制御が世界的すう勢である。

日立製作所においてもこの無循環電流制御逆並列結線を採用し、その特長を十分に発揮し、各応用で満足すべき運転結果を得ている。

この無循環電流逆並列接続制御はサイリスタトランスなどの設備容量をむだな循環電流のために増加せしめる必要がなく、また通常の場合にはインバータは常に生きていないので転流失敗の機会が少ないので、安定な運転ができる。これに比べて循環電流方式は常にコンバータ、インバータが生きていますので転流失敗の機会が常にあり不安定である。

* 日立製作所日立工場

表1 マイナーループ電流制御付速度制御系と電流制限付速度制御系の比較

	マイナーループ電流制御付速度制御系 (A) ASR	電流制限付速度制御系 (B) ASR	備 考
ブロック線図			ASR系のオフセットを同一としたときの利得関係 $G_1' = G_1 (1 + \frac{G_2 G_3}{R})$ $= G_1 (1 + A_C)$ A_C : ACR ループゲイン
速度変動率(%)	$(1 + A_C) R$	R	A は $(1 + A_C)$ 倍
機械的時定数(s)	$(1 + A_C) T_M$	T_M	$T = R \bar{H} / (\xi \phi)^2$ A は $(1 + A_C)$ 倍
速度応答	$\frac{\omega_0}{\omega_i} = \frac{\frac{A_S (1 + A_C)}{1 + A_S (1 + A_C)} \times \frac{1}{G_2}}{1 + \frac{T + (1 + A_C) T_M}{1 + A_S A_C} p + \frac{T T_M}{1 + A_S A_C} p^2}$	$\frac{\omega_0}{\omega_i} = \frac{\frac{A_S}{1 + A_S} \times \frac{1}{G_2}}{1 + \frac{T + T_M}{1 + A_S} p + \frac{T T_M}{1 + A_S} p^2}$	A_S : ASR ループゲイン $= \frac{G_1 G_2 G_3}{\xi \phi}$ A はオーバーシュート小 A は $\sqrt{A_C}$ 倍減衰定数大
電流制限特性	一定トルクじょう乱を加えた場合 		A が電流制限効果が大い
結 果	マイナーループ電流制御付ASRでは速度変動率が大きくなるがその速度変動率を補償するだけ利得を上げても安定性はよく、電流制限効果が大い。		

この制御方式で問題になる切換時間は数msできわめて短時間であるので、ほとんど問題にならない。

速度もしくは電圧制御において、マイナーループとして電流制御を行なう方式があり、世界的にこの方式が採用されつつある。

この方式は表1のブロック図に示すように速度制御系の増幅器に飽和特性をもたせて速度偏差が大きいときにはこの増幅器を飽和させることにより速度制御系が無効となり電流制御のみとなるので、電流制限効果は大きいばかりでなく、安定な制御ができ、したがって高い性能が得られる。この関係を表1に示した。

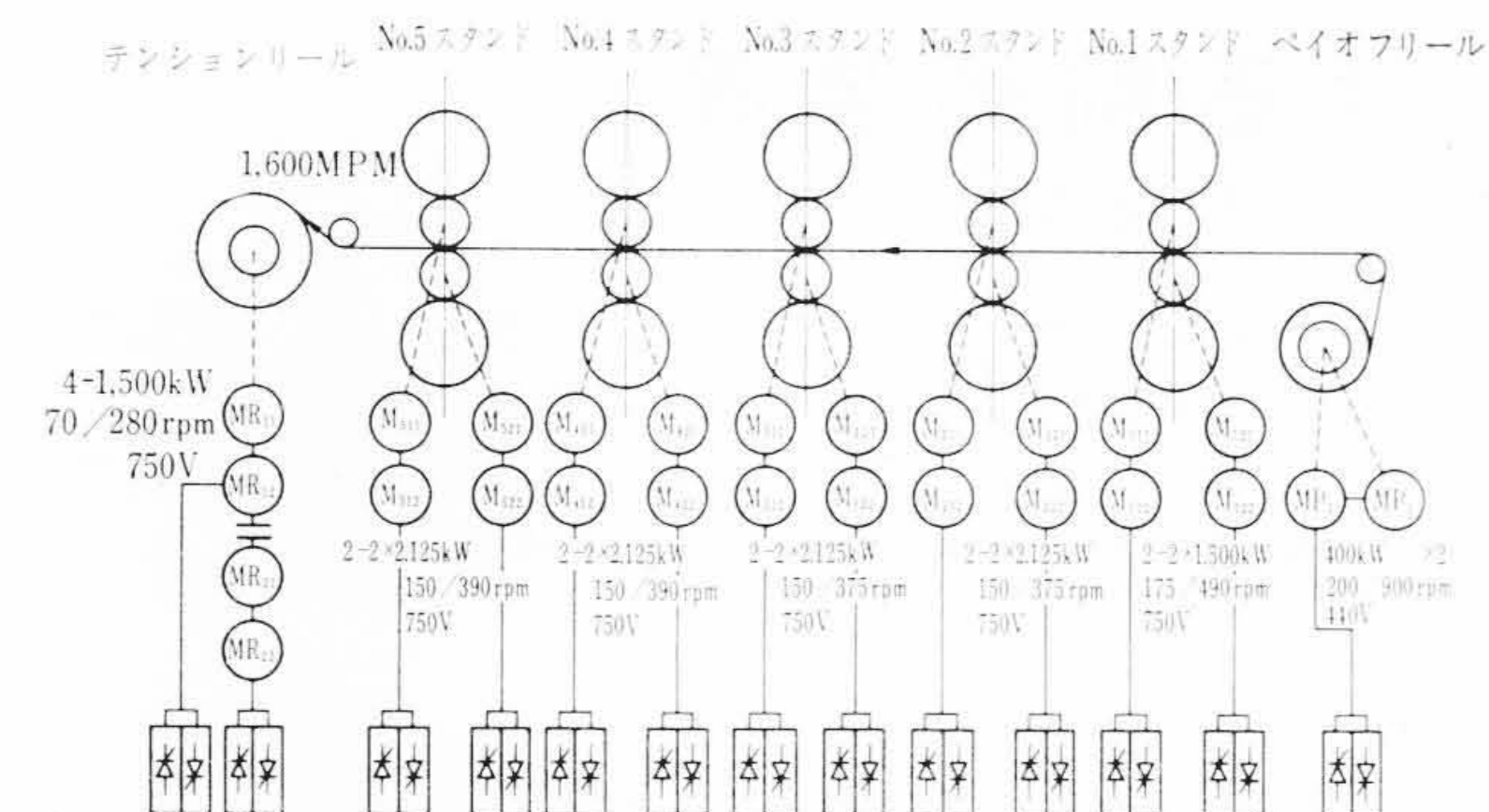


図1 コールドタンデムミル説明図

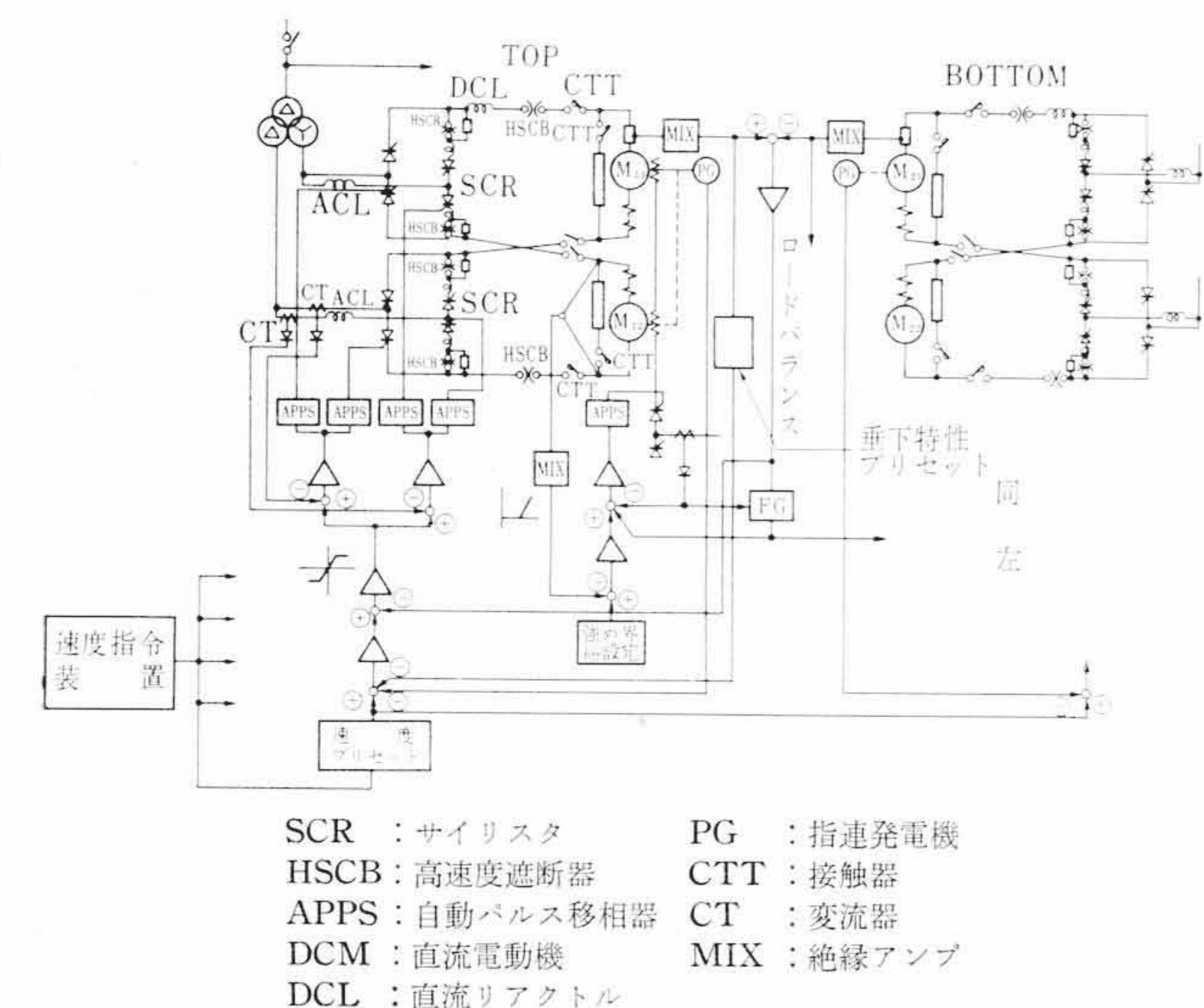


図2 コールドタンデムミル主スタンド制御結線図

2.2 コールドタンデムミルの制御

図1はコールドタンデムミルのスタンド制御の概要を示したものである。各スタンド、リール、圧下電動機などすべて直流電動機の電機子および界磁はサイリスタにより駆動されている。また制御に無循環電流逆並列結線を用い安定な制御を行なっている。主電動機電源は移相トランスにより電源に対して36相効果をもたせている。サイリスタ素子には2,500V、400A素子を使用し、750V回路を直列数1としてある。

図2は主スタンドの制御結線図を示したもので、円滑な制御のできるアナログ演算回路と、高精度の保持性のあるデジタル制御を組み合わせた全く静止化された速度基準指令により、各スタンドに速度指令を与えている。

タンデムミルにおいては各スタンドの速度設定により加減速時間を調整する必要があり、従来は入側がコイルボックスの場合には最終スタンドの速度設定のみにより加減速時間を決定すればよいが、入側にペイオフリールのある場合には加減速時間を左右するのは厚物厚延においては入側、薄物では出側が支配的になる。したがって本設備ではNo.1およびNo.5スタンドの速度設定を自動的に監視して、全体の加減速時間を決定し、最短の加減速を行ない、歩留りの向上を図っている。また急停止の場合には各スタンドの電流を監視しながら、どれか1スタンドが過電流になる場合には、減速レートを調整して可能最大限の短い時間でトリップすることなしに停止できるようにしている。

コールドタンデムミルのスタンド電動機の制御には従来AVR+IR補償制御を行なっているが、加減速中のオフゲージおよびコブル

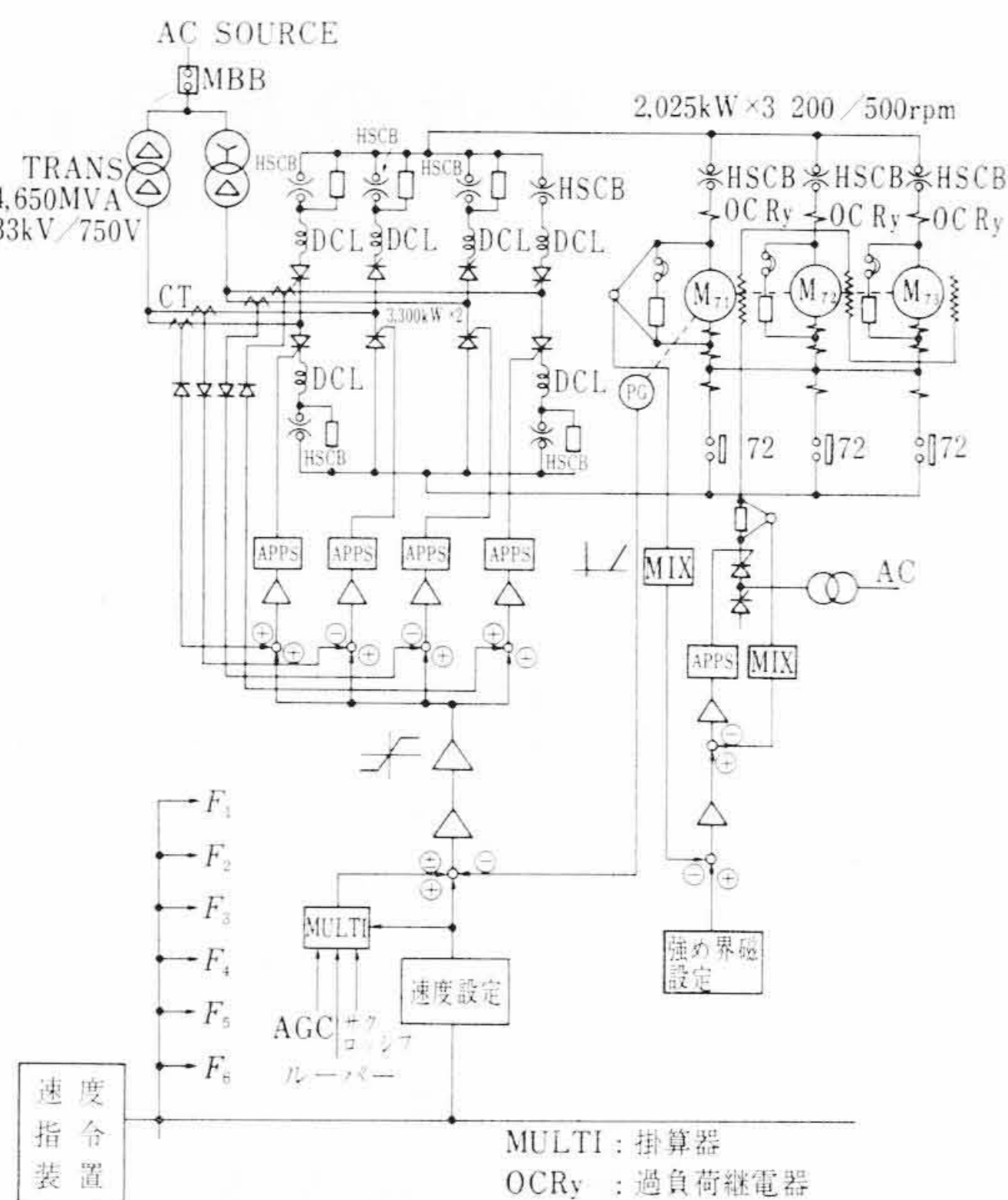


図3 ホットストリップミル仕上主スタンド制御結線図

の発生防止のため100% IR補償したASRの研究が1960年ごろから行なわれた。また一方サイリスタ、トランジスタなどの発達により高応答性の制御ができASR制御が可能となり最近の設備ではASR制御を採用している。

加減速時各スタンドは速度協調して、加減速する必要があるが、最も理想的には完全にASRを加えて指令に対して、おくれのない速度制御をし、速度偏差のない加減速を行ないオフゲージを少なくする必要がある。しかし完全ASRではわずかな速度設定のミスでも大きな張力変動となるので従来どおり若干のドループ特性をささえる必要があるので、本設備ではドループがプリセットされるよう考慮してある。

ASRの性能で問題になるのはパイロット発電機であるが、本設備では低リップル低ドリフトで高精度の永久磁石式パイロット発電機を用いている。また各スタンドには双駆動方式を採用しているのでロードバランスを加えている。即応性の早い電源の系統でアンバランスをおさえて、徐々に界磁にて補正する方法を用いている。

高能率に圧延するため、スケジュール替えの迅速化を図るとともに、あとで述べるようにプリセット制御を行なっている。また運転員の削減と監視の容易化を図るためNo.5スタンド出側に主運転室をもうけて集中監視方式を採用している。この主運転室ではオイルセラーの集中監視、クーラントのグラフィックによる系統監視、ITVによる自動通板の監視などができるようにしており、コールドタンデムミルの集中監視によるワンマンオペレーションが行なわれている。

2.3 ホットストリップミルの制御

図3はホットストリップミルの仕上スタンドの制御結線図を示したもので、制御系の主体はコールドタンデムミルとほぼ同様であるが、特に材料かみ込み時の速度の瞬時降下とその回復時間を小さくかつ回復時の電流のオーバーシュートを少なくするように考慮されている。

図4はインパクト速度降下のオシログラムの一例である。運転中のループ制御、AGCからの速度補正などの各スタンドの補正量は、そのスタンドの運転速度のパーセントイコールできるよう特に考慮されている。また運転中の加減速制御は仕上出側温度制御、巻取り温度制御のため可変レートで行なうようになっている。各スタンドは無負荷で400 FPM/sの減速度で減速できるようインバータが設

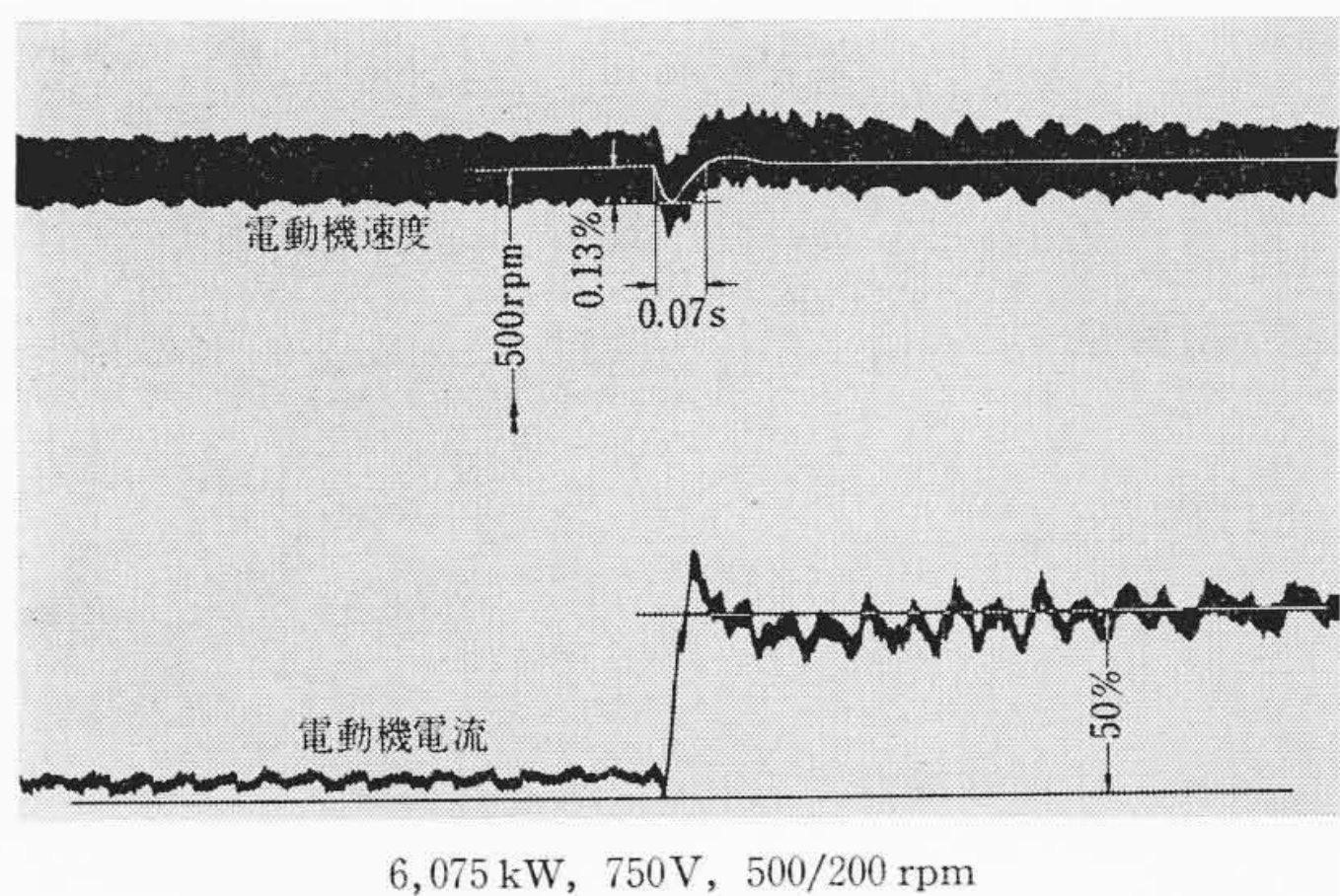


図4 インパクト速度降下のオシログラムの一例

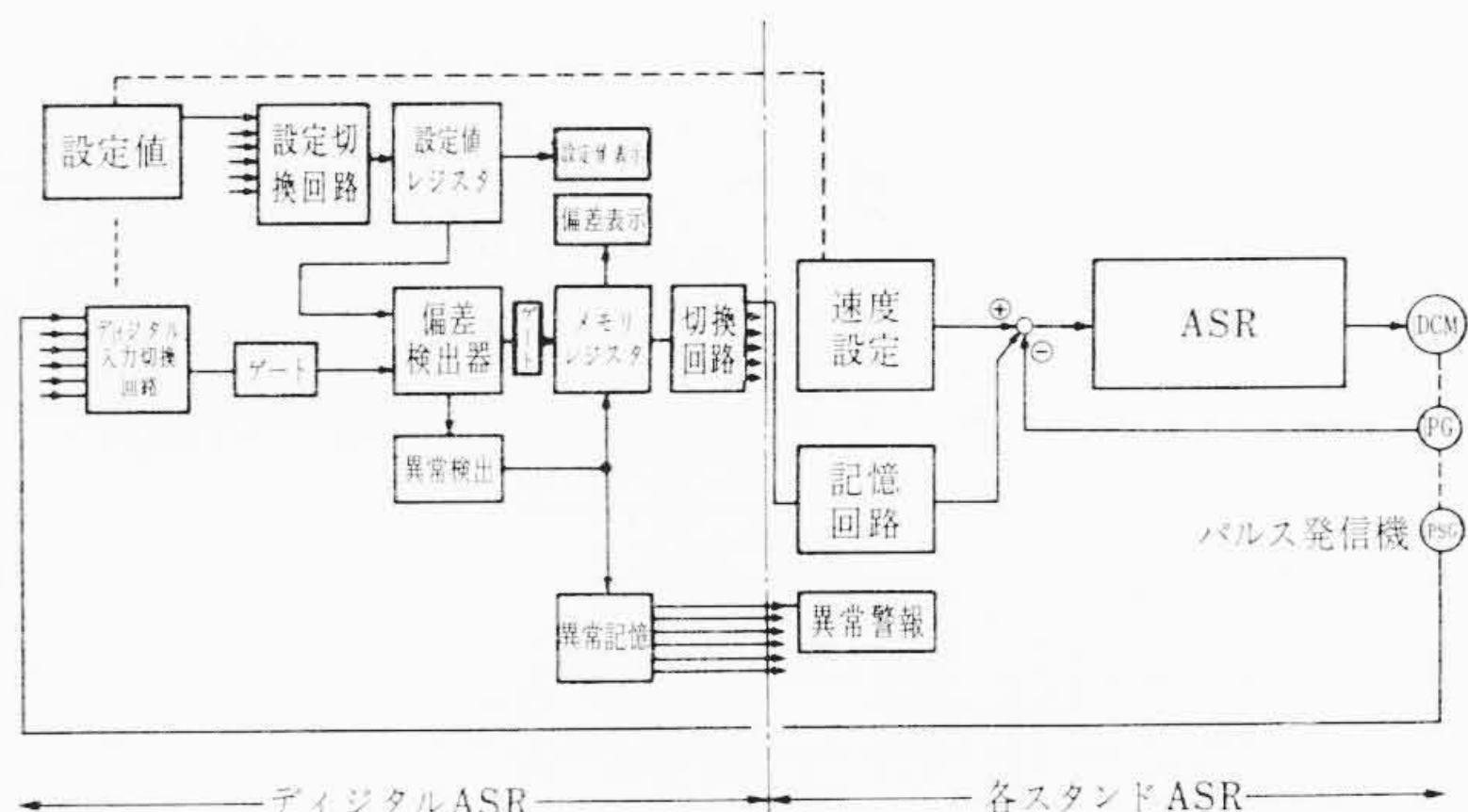


図6 デジタルASR制御結線図

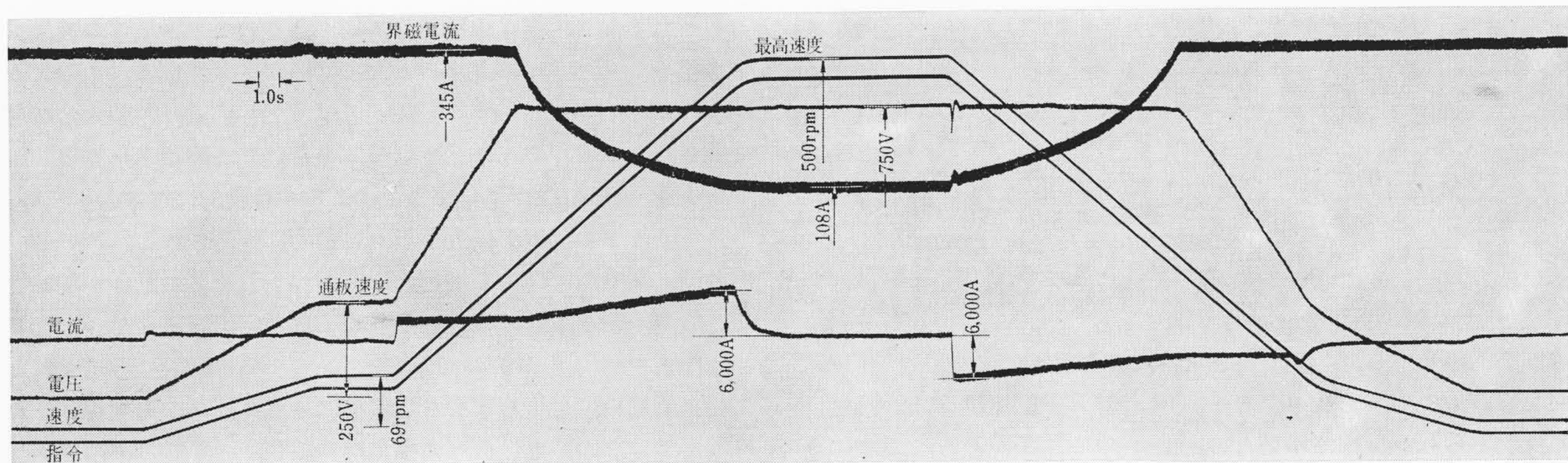


図5 ホットストリップミルの加減速オシログラム

表2 各種応用における自動化の例

対象	共通	熱間可逆圧延機	ホットストリップミル	線材ミル	タンデムコールドミル	コールドリブミル
目的						
人員の削減		(1) APC CPC	(1) 炉入出側の自動化 (2) 自動加減速制御 (3) コイラの正確停止	(1) 形決めの自動化 (2) 炉まわりの自動化 (3) リール以降搬送システムの自動化	(1) 入出側のハンドリングの自動化 (2) 自動通板自動蛇行修正 (3) ミルまわりの自動化 (3) リール正確停止 (5) 自動減速	(1) 入出側のハンドリングの自動化 (2) 自動通板 (3) ミルまわりの自動化 (4) 重量分割制御
稼働率の向上	(1) プリセット制御		(1) ロール自動組替え	(1) ミスロール自動処理	(1) ロール自動組替え	(1) ロール自動組替え
品質の向上			(1) AGC (2) 計算機制御 (3) 仕上、巻取温度制御	(1) ループ制御 (2) 後端補正	(1) AGC (2) 形状制御 (3) 計算機制御	(1) AGC (2) 形状制御 (3) スリップ自動検出 (4) 圧下率一定制御
保守の容易化	(1) 無接点化 (2) 保守用計算機 (3) 静止器化					

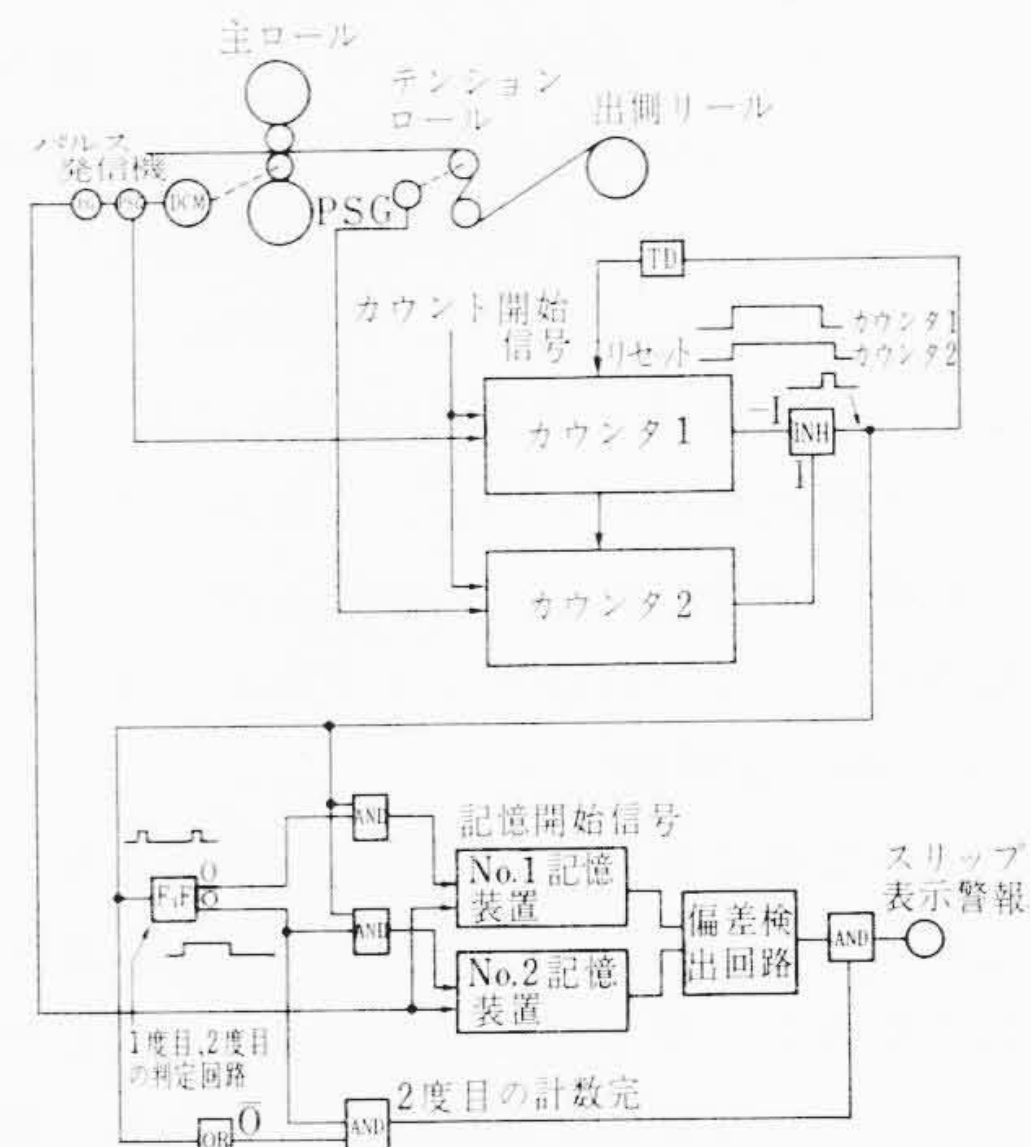


図7 スリップ検出原理図

備されている。図5は加減速オシログラムである。

また仕上スタンドは計算機制御により指令された、速度、圧下位置、サイドガイド、X線厚み計、幅計などをセットするが(詳細は4.1記載)特に速度においては、高精度の設定を必要とするため、段取替えもしくは必要に応じて手動リクエストによりデジタルASRを加えることができるよう考慮されている。このデジタルASRは全体で1セットでリクエストおよび優先順位に従って、各スタンドにASRを加えるようになっている。図6はこのデジタルASRの説明図を示したものである。

ホットストリップミルの制御で特長のあるものにコイラがあるが、コイラの張力制御は基本的にはコールドミルのそれとかわり

ないが、ピンチロールとの総合特性上、かみ込み時のスムーズな張力のビルドアップによる良好な巻きすがたのコイルを生産することと、仕上最終スタンドをストリップの後端が通過したことによる後面張力の減少、したがって速度の上昇を防止することにより巻取り温度制御に対するじょう乱を減少するよう特に考慮する必要がある。これらの問題を解決するためにピンチロールには特殊速度制御を加えている。

3. 自動化

品質の向上、稼働率の向上、人員の削減を目的として圧延設備では大幅な自動化が行なわれている。表2は自動化に関連した新しい制御の例を示したもので、本稿ではこのうち代表的制御について説明を加えることにする。

3.1 自動スリップ検出装置⁽²⁾

スキンパスミルにおいて入出側テンションローラにおけるスリッ

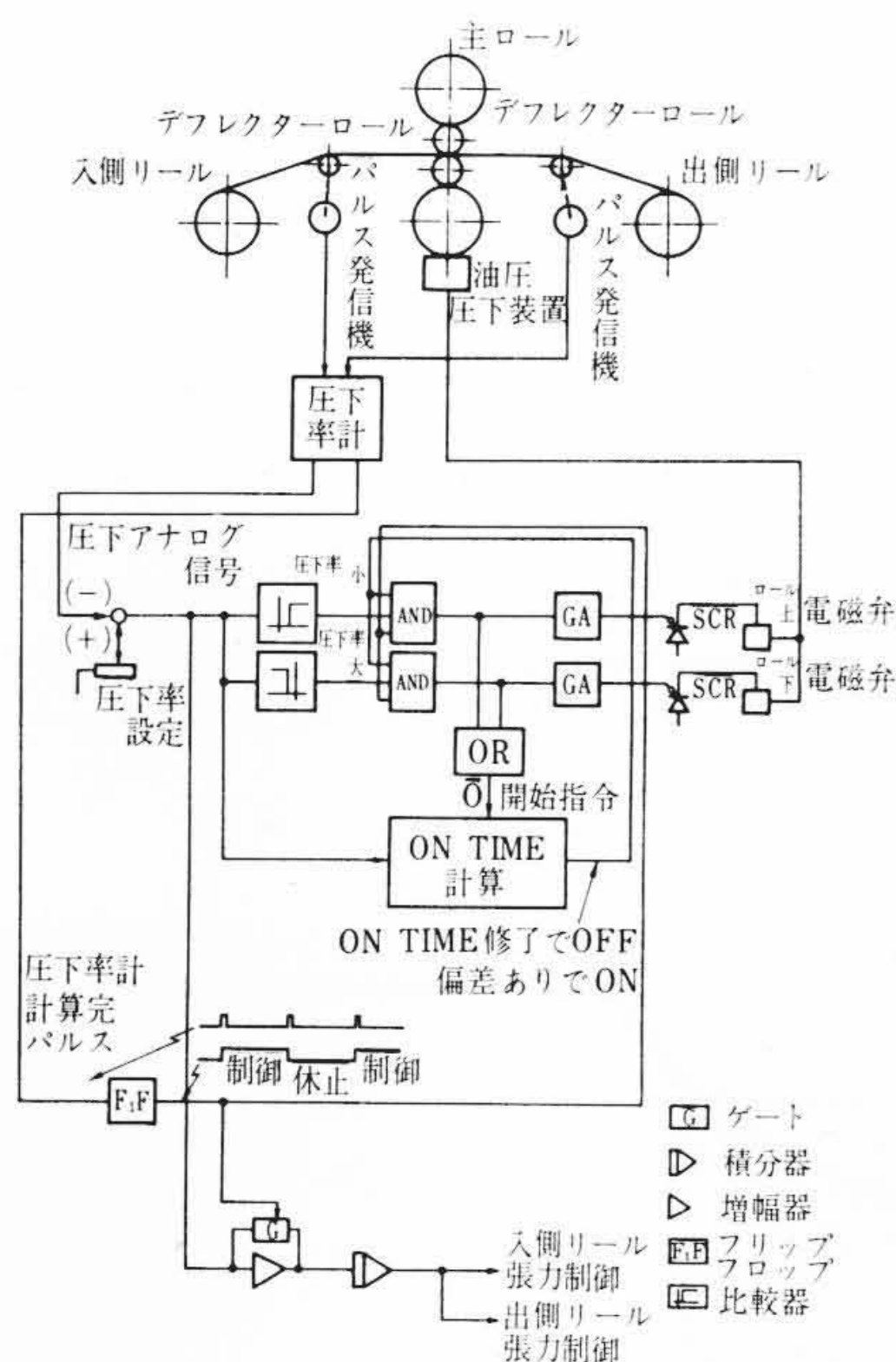


図8 圧下率一定制御

プは間断的に発生し、かつスリップのためのきずが次の工程で初めて発見されるので、圧延中にスリップが検出され、直ちにしかるべき処置がとられるならば歩留りの向上に大いに貢献する。図7はスリップ検出器の原理図を示したもので、この制御の特長は主ロールのロール径の変化、ドラフトの変化、テンションローラの径の変化をいちいち設定したのでは、セットのはん雑さ以外に高い精度が期待できない。そのためこの種のスリップは間断的に発生することに着眼し、これらロール径、圧下率などの変化があってもこれをいちいちセットすることなく、スリップの検出ができるようにしてある。この精度はライン速度が1,200 m/minにおいて20 mmのスリップを検出できる精度を有している。すなわち主ロールとテンションローラの回転数の差を計測し、この値と次のサイクル時の実際とを比較し、双方に差がなければスリップゼロとする原理を示している。

3.2 圧下率一定制御

スキンパス圧延において均等な調質効果を与えるためには、圧下率を一定にすることが必要である。そのため従来は圧下率計の指示を操作員が監視して圧下もしくは張力を制御したが、これを自動的に行なう圧下率一定制御が採用されつつある。図8はその動作原理を示したもので、圧下率計からの信号により圧下は圧下率の偏差を補正するに必要な圧下時間を与えるオンタイムとその結果を再測定するオフタイムのサンプリング制御により、また張力は連続制御により圧下率を一定に制御している。この制御の結果、圧下率は常に1,200 MPMのスキンパスミルで±0.2~0.1%の誤差範囲に制御することができる。

3.3 コールドタンデムミルの自動通板

コールドタンデムミルにおける自動化のうち最も特異性のあるのはストリップの先端がNo.1スタンドから順次かみ込まれて出側リールまで人為的操作なしに行なわれる自動通板である。

先行ストリップ後端がNo.1スタンド入側を通過したことにより上部に待機した次のコイルの先端がパスラインに下がり直ちにピンチロールで送り込みを開始する。送り込みながらコイルはクレードルローラで回転させられながらペイオフリールのマンドレルに装入される。マドレル装入とストリップがNo.1スタンドにかみ込まれたことによりスライテンションが与えられる。

順次後続スタンドにかみ込まれるが、このかみ込みによりクーラントの噴射、蛇行(だこう)修正などを開始させる。また各スタン

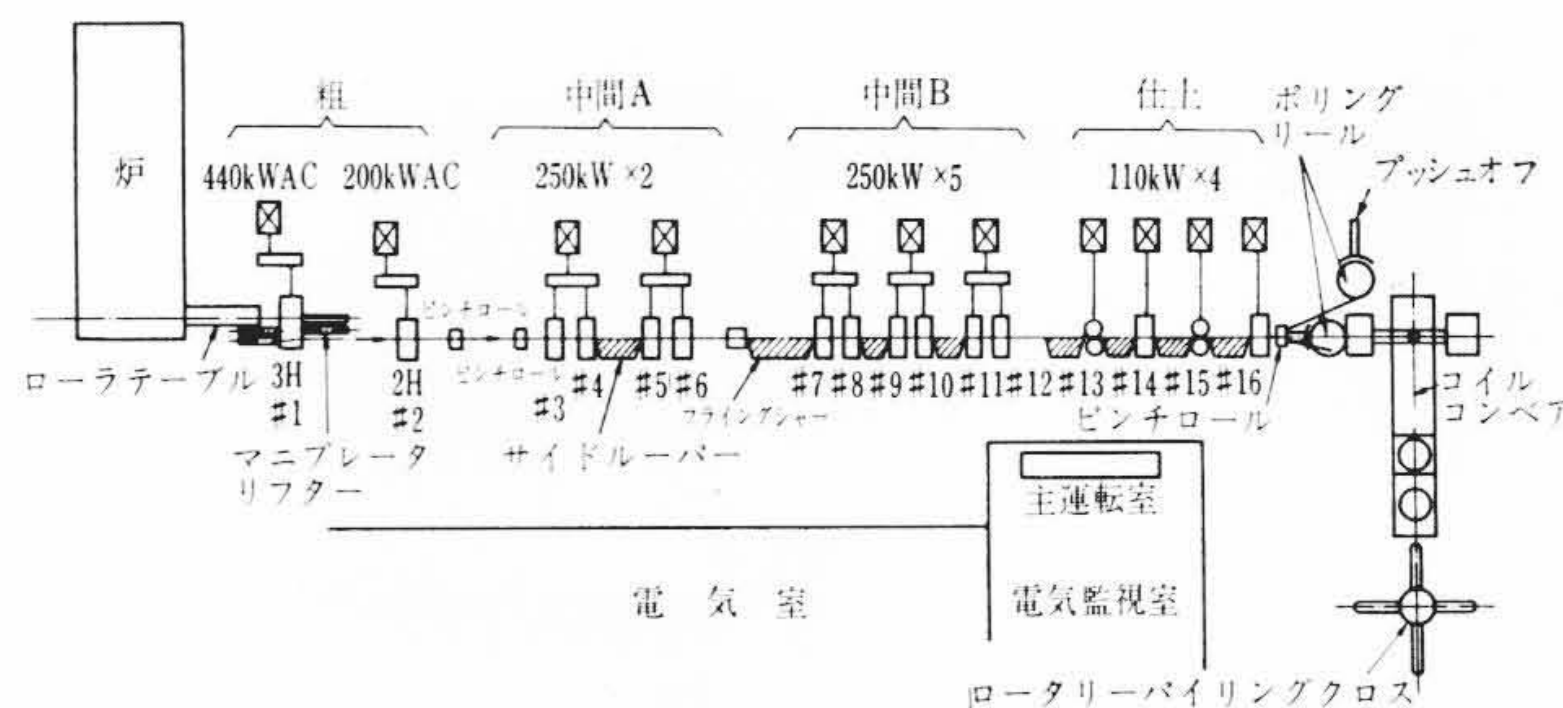


図9 日立電線株式会社納銅線材ミルレイアウト

ドの電動機の回転数から、ストリップの進行距離を測定し、サイドガイド操作、板押え指令などの動作を行なわせる。順次スタンドを通過したストリップは圧延されて薄くなるのでスタンドの後半ではマグネットコンベヤによりストリップがガイドされる。このようにNo.5スタンドから出たストリップはベルトラッパ装入の状態に待機されたリールに巻き込まれて、巻き取りが開始され加速し圧延される。これらの操作は全く人手によらず自動的に行なわれている。

ストリップの後端が接近すると自動的に減速される。ストリップが各スタンドぬけにより板押えサイドガイドなどの動作が開始される。ちょうどコイルの後端がリール下部の定位置にきたことでリールは停止され、コイルカーによりコンベヤに自動的に搬送される。この自動通板で最もむずかしい制御はストリップの先端がロールのラインアップの誤差、板厚の幅方向の誤差、ストリップのセンターとミルセンターの不一致などから生ずる蛇行を修正することで、このために蛇行量と圧下量を定量的には握し最適な制御が行なわれるようになっている。

3.4 線材ミルの自動化

線材ミルの制御の目的は少数の操作員で、線径公差の少ない製品を高効率に圧延することであるが、ここでも新しい自動化が行なわれているが、このうちハンドリングの自動化と自動故障処理について説明を加える。図9は日立電線株式会社納銅線材ミルのレイアウトであるが、この炉出側から製品を集めるパイリングクロスまで完全ワンマンオペレーションが行ない得ようになっている。また主運転室と電気監視室は一室になっているため電源の準備、補機モータのスタートアップなどはこの主操作室の操作員が行なうので、常駐する電気保全員は不要となっている。

炉からの抽出は炉出ピッチ一定で、後続工程とインターロックされながら抽出されている。3Hミルで5パス圧延されるが、この3Hミルはマニプレータとリフタの上下操作が熱塊検出器(HMD)とリミットスイッチの組合せで自動的に行なわれる。この様子は主運転室でITVにより監視されている。次いで2Hミルで1パス圧延後中間A、B系列、仕上圧延機という順で圧延されて巻取機(ポーリングリール)に巻き取られる。巻き取り後のパイリングクロスまでの搬送も完全に自動的に行なわれている。このラインに使用されている電磁弁は無接点論理回路からサイリスタのスイッチングで駆動されている。線材ミルではいったんミスロールが発生するとラインに抽出された圧延材を自動的に処理することがワンマンオペレーションでは必要である。本設備では各所でミスロールの検出を行ない、自動的にそのときのスケジュールにより後続材料の処理を行なうよう故障発生個所と、それにより動作せしめられる処理機構とをダイオードマトリックス状として、スケジュールによりその処理機構を使用するか否かを選定できるよう考慮されている。

4. 自動運転装置

自動プログラム制御(Automatic Program Control, APC)、カードプログラム制御(Card Program Control, CPC)およびプリ

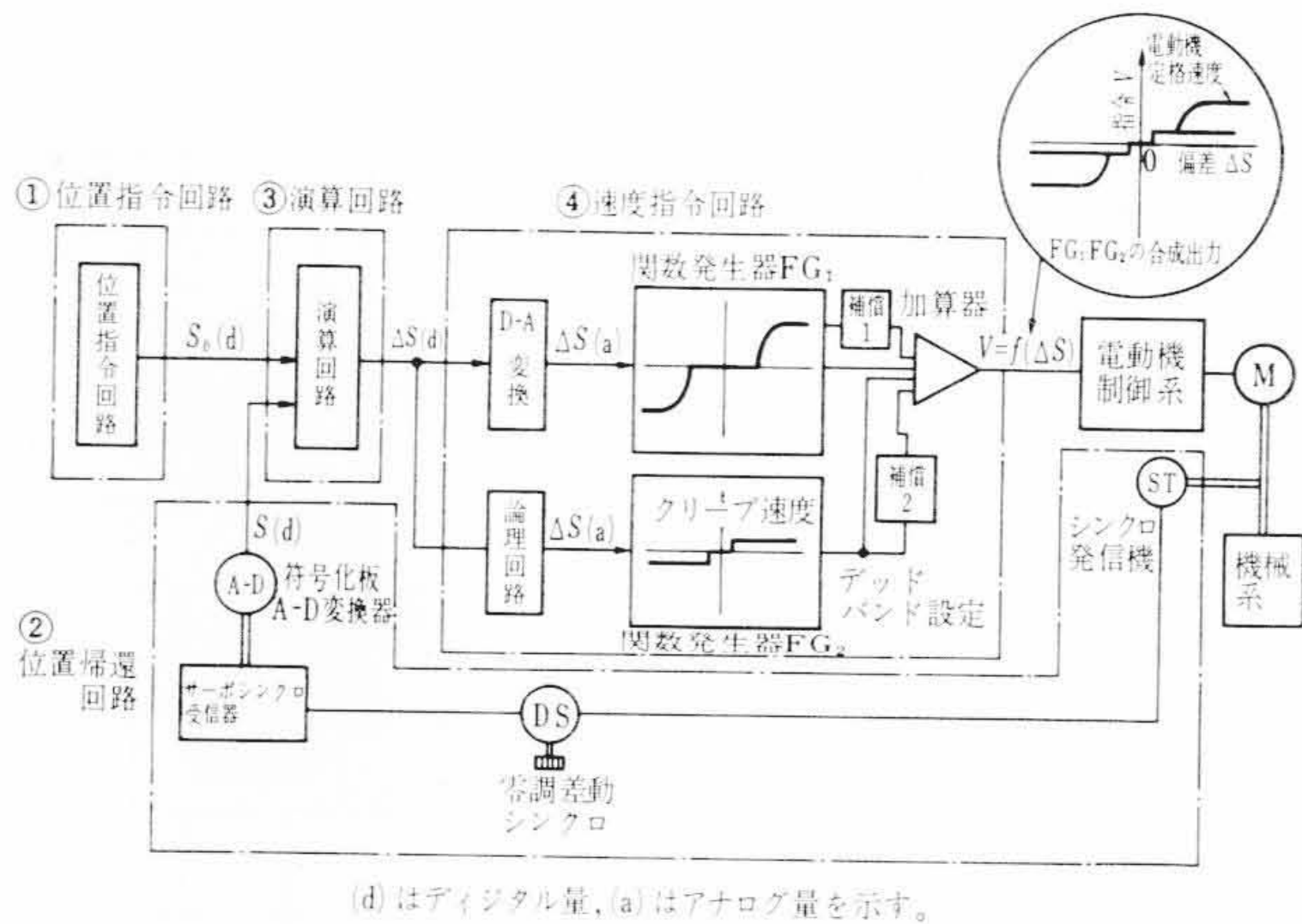


図12 デジタル位置決め制御回路の一例

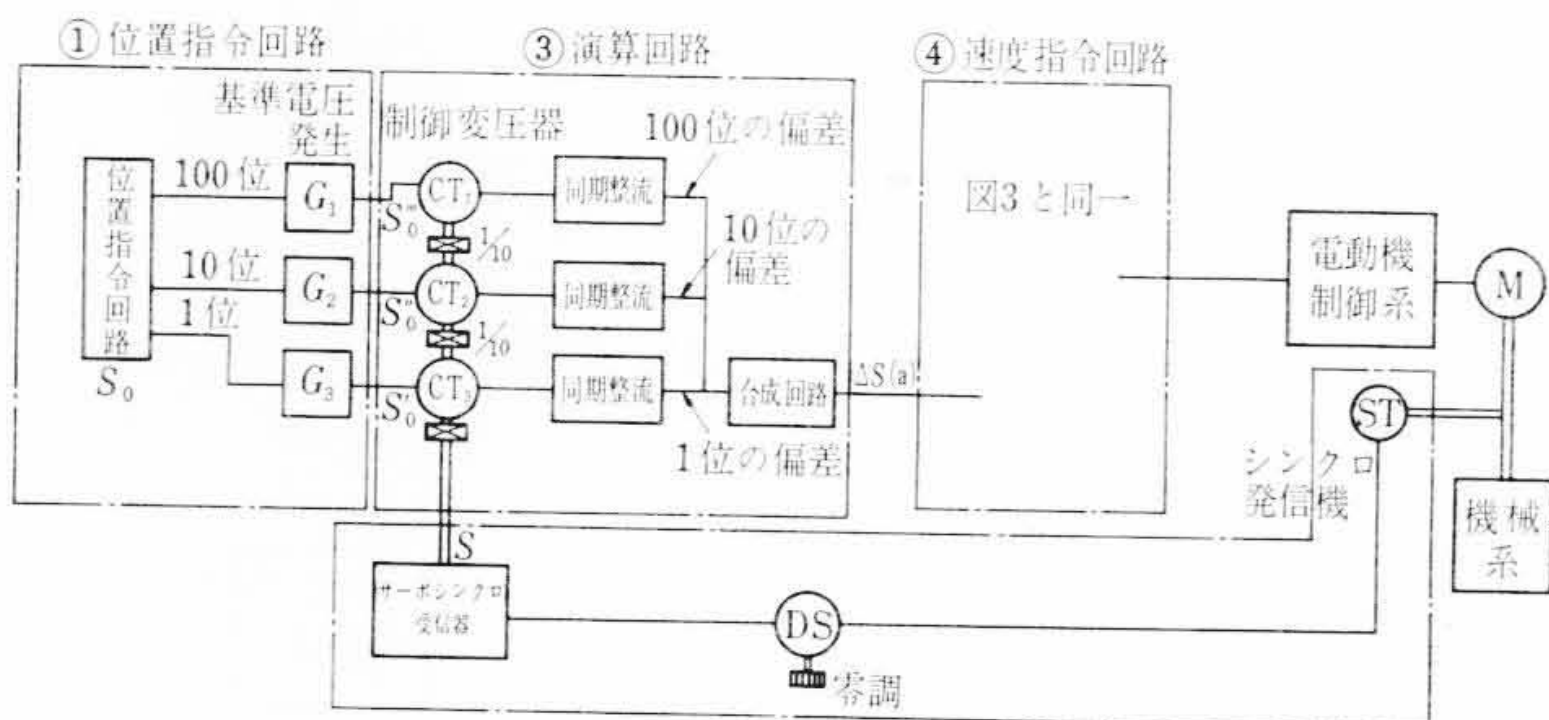


図13 アナログ位置決め制御回路の一例

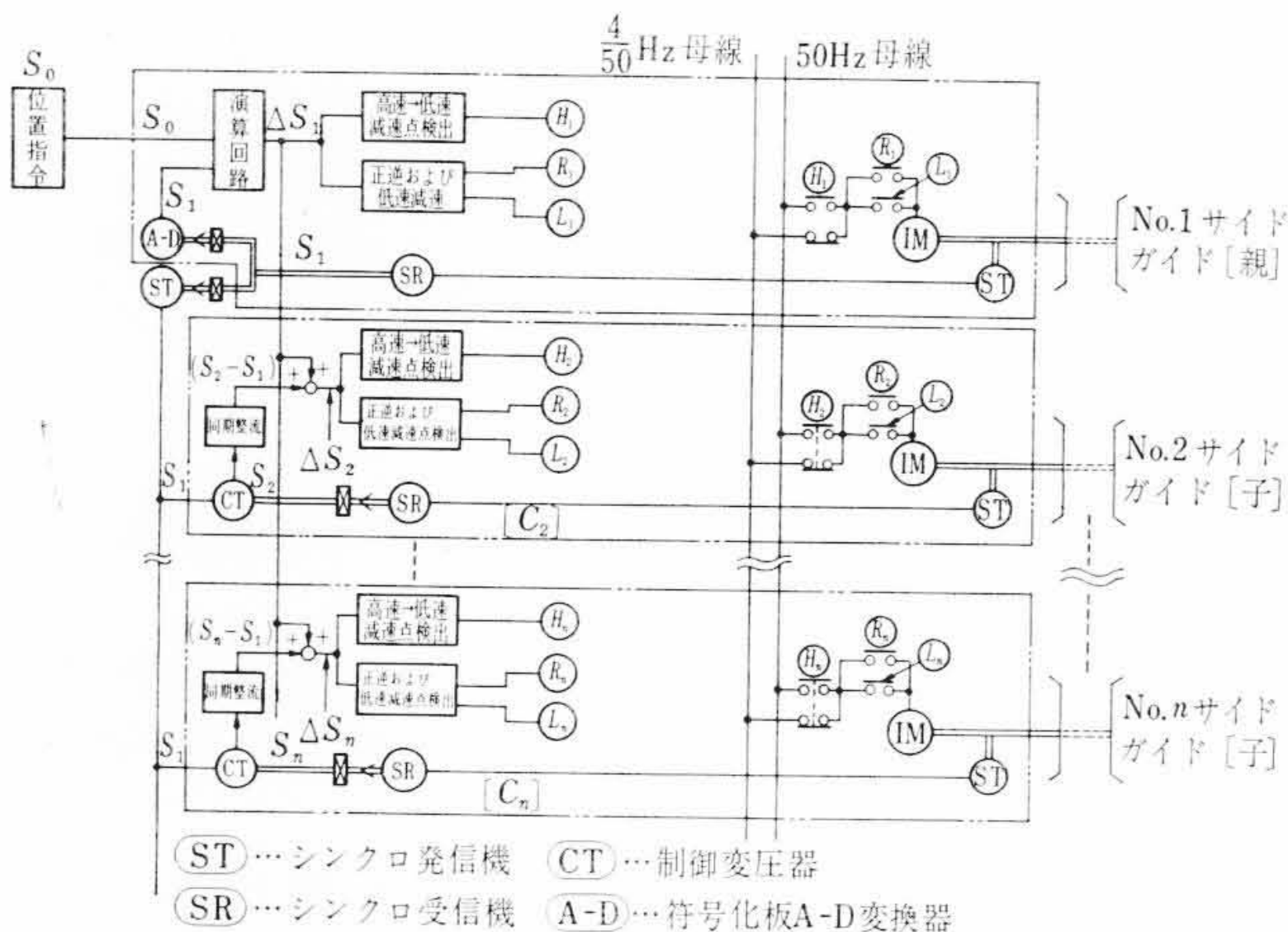


図14 親子式サイドガイド位置決め装置

の代表的なもののブロック図である。

次に、この中で最近改良を加えてきた速度指令回路について説明することにする。

偏差 ΔS に応じた速度指令 V を発生するために、関数発生器が用いられる。電動機を一定減速度（電動機最大定格）で減速する場合の ΔS と速度との関係は、

$$V = \pm K \sqrt{\Delta S} \quad (1)$$

$$\Delta S > 0 \cdots \cdots +$$

$$\Delta S < 0 \cdots \cdots -$$

$$K \cdots \cdots \text{定数}$$

となる。したがって、速度指令回路は基本的には偏差の平方根の曲線で構成すればよいことがわかる。

実際には、

(a) 精度を上げるため、いったん高速よりクリーブ速度に減速して止める。

(b) 制御系安定性のために、デッドバンドを設ける。

表4 コールドタンデムミルプリセットの一例

項 目	方 式	設 定 器
圧下プリセット	デジタル位置決め方式	① デジタルスイッチ設定盤
速度プリセット	デジタルセット	② カードリーダー
溶接点速度プリセット	+D-A変換	③ 計算機
速度垂下特性プリセット		
リール張力セット		
X ray プリセット	デジタルセット	
AGC プリセット		
サイドガイドプリセット	デジタル位置決め方式 +親子位置決め方式	
設定替え シーケンス制御	① 手動設定替え ② 自動設定替え	

上記必要性から、関数発生器は、偏差の平方根の曲線からなる関数発生器 FG_1 とクリーブ速度およびデッドバンドを設定する関数発生器 FG_2 に分けて設定され、演算増幅器により、両出力は加算される。 FG_1 と FG_2 との合成出力は図12に示すようになるから、位置決め電動機の標準運転モードは図11のタイムチャートのようになる。

実際には図12にも示すとおり、関数発生器 FG_1 は ΔS に対応した電動機速度を得るものであるから、電動機制御系の遅れを補償するために補償回路1が必要である。

関数発生器 FG_2 には、デッドバンド付近で起動する場合、機械系は通常、摩擦トルクが大きく、いったん起動してしまうと、動摩擦トルクは静止摩擦トルクの数分の1だから、行き過ぎてしまうという不具合を除くために、微分補償回路を設ける。

以上をまとめると、

(a) 偏差が比較的大きい場合には FG_1 と補償回路によって即応性に主眼を置いた制御が行なわれる。

(b) 偏差が比較的小さく、デッドバンド付近における位置決め制御の難点を除くため、 FG_2 と補償回路2が設けられた。

上記によって、全範囲において良好な位置決め制御が行なわれている。

(iv) 分塊圧延機マニプレーションの自動化

分塊工程におけるマニプレーション自動化はすでに日本鋼管株式会社において行なわれており⁽³⁾、日立製作所が機器一式を納入している。

4.2 プリセット関係

表4にコールドタンデムミルのプリセット制御の一例を示す。タンデムミルプリセット関係で、最近行なわれたことを下記に紹介する。

(i) 位置決め関係

位置決め回路は、基本的には前項で紹介した2方式が制御対象あるいは要求精度によって、若干修正され採用されている。

タンデムミル位置決めの中で特殊なものとして多数のサイドガイドを同時に位置決めするため、サイドガイド親子位置決め方式があげられる。

図14にサイドガイド親子位置決め装置のブロック図を示す。No.1サイドガイドを親、No.2～No.nサイドガイドを子としている。一方サイドガイドは誘導電動機によって駆動される。高速時は50Hz母線に接続され、低速時は50/4Hz母線に切り換えられほぼ定格の1/4の速度となる。

(a) 位置指令回路

No.1～No.nサイドガイドに対して指令値 S_0 を設定する。

(b) 親サイドガイド (No.1サイドガイド)

図14の上部に示すとおり通常の位置決め回路と特に変わると

ころはない。すなわちシンクロ発信機→シンクロ受信機→サイドガイドの全ストロークをカバーするA→D変換器からなる位置帰還回路、 S_0 に対する偏差 $\Delta S_1 (=S_1-S_0)$ の演算回路、位置偏差 ΔS_1 に応じて電動機を高速→低速→停止させる減速点検出回路からなる。

(c) 子サイドガイド (No. 2～No. n サイドガイド)

S_0 に対する各子サイドガイドの位置偏差 $\Delta S_n (=S_n-S_0)$ がわかればおのおの子サイドガイドについて設置した減速点検出回路により親サイドガイドと同様の位置決めが可能である。

本例のように各サイドガイドの電気的および機械的特性にあまり大きな相違がない場合には、 ΔS_n を求めるために、親サイドガイドの場合のようにサイドガイドの全ストロークをカバーする検出器をつける必要はなく、親と子の差を検出する親子偏差検出器を設け、親の S_0 に対する偏差 ΔS_1 を補正して子の S_0 に対する偏差 ΔS_n を求めればよい。すなわち次式のとおりと

$$\Delta S_n = S_n - S_0 = \underbrace{(S_n - S_1)}_{\text{親と子との偏差}} + \underbrace{(S_1 - S_0)}_{\Delta S_1: \text{親の } S_0 \text{ に対する偏差}} \dots\dots\dots (2)$$

したがって各子サイドガイドの偏差 ΔS_n は親の偏差 ΔS_1 と親と子との偏差 $(S_n - S_1)$ の和であることがわかる。親と子の偏差 $(S_n - S_1)$ は本例の場合全ストロークのせいぜい数百分の1にすぎないから、各子サイドガイドには全ストロークの百分の1程度をカバーする1段の親子偏差検出器を設置すれば十分である。親子偏差検出は親、子の位置をおのおのシンクロ発信機およびシンクロ受信機にて伝達し、これらを制御変圧器の固定子巻線、回転子軸に加え、回転子巻線より親と子との偏差電圧を得、これを同期整流して $(S_n - S_1)$ を検出する。 $(S_n - S_1)$ を ΔS_1 に加え ΔS_n を得る。

以上により多数のサイドガイドを比較的簡単な位置決め回路にて制御することが可能である。

5. 自動板厚制御装置

5.1 最近の自動板厚制御装置の傾向

最近の圧延機においては、製品の厚み精度と歩留まりの向上が強く要望されるようになり、新設の圧延機には自動板厚制御装置が取り付けられるのが常識となった。自動板厚制御装置自体も、X線厚み計などを用いて実際に圧延された鋼帯の厚みを測定し、圧下・張力をフィードバック制御する比較的単純な方式から、板厚偏差を生ずる原因を積極的に補償する回路を付加した高度で複雑な機能を有するものへと進歩している。

加減速時の板厚変動の一つの原因は、ベアリングの油膜厚み変化と、鋼帯とワークロール間の摩擦係数の変化とであるが、この変化を圧延速度と圧延圧力とから算出して、板厚に影響を与えないように圧下制御している。また通板・尻抜時の端末補正にも圧下制御方式が用いられている。

このような補償回路は一種の開ループ制御であって、板厚精度の維持は最終的には厚み計に頼ることになるが、通板時と圧延速度の低い間は、遅れ時間のため厚み計からの信号が間に合わぬという問題がある。この問題の解決策の一つとして、圧延圧力とロール間げきとから板厚を算出するゲージメータ方式が、コールドタンデムミルにおいてもホットタンデムミルと同様に用いられることがある。

現在のところ、自動板厚制御における最大の問題はロール偏心の影響を克服することにある。この変動の周期が短いために通常の制御回路でこれを吸収することはできないので、ロール偏心を検出してこれと逆極性に圧下を動かそうという方式が提案されている。油

圧下装置の進歩によって圧下の応答速度を向上したため可能となったものであるが、ロール偏心の検出方式には実用上解決すべき問題が残っている。

圧延現象は各種の要因が複雑にからみあったものであり、またスタンド間の相互干渉があるため、制御をした場合の過渡現象を解析するのは困難であった。しかし大形計算機を使用した解析プログラムが完成し実圧延のデータとの照合が進むにつれて、かなり確実なシミュレーションが可能となり自動板厚制御装置の各構成要素の最適な設定がスケジュールごとに求められるようになった。

タンデムミルでは自動化が進みプリセット装置が採用されたため圧延スケジュールに関する情報を取り込むことが可能となった。自動板厚制御装置内部でこれらの情報から各部のゲイン設定の補正をしているので、スケジュール変更のたびに調整をしなくても最良の性能を発揮することができる。

計算機の導入された圧延機では、シミュレーションモデルの修正ができ、圧延中の各種のデータから最適の制御条件の算出が可能となるので、計算機の信号で自動板厚制御装置の各部の設定が変更されている。このような状態に達すれば、製品の質も飛躍的に向上すると期待される。

5.2 AGC の構成

タンデムミルの第 n スタンドの張力、板厚、圧下、速度の関係はその設定近傍における微小変動について考えると、下式で示される^{(4)~(6)} (コールド・リバーズも同じ)。

$$\begin{aligned} \frac{\Delta T_0(n)}{T_0(n)} = & \frac{1}{G_1(n) - G_2(n+1)} \left[\frac{\Delta v(n+1)}{v(n+1)} - \frac{\Delta v(n)}{v(n)} \right. \\ & - G_3(n) \frac{\Delta T_0(n-1)}{T_0(n-1)} + G_4(n+1) \frac{\Delta T_0(n+1)}{T_0(n+1)} \\ & - G_5(n) l \frac{-\frac{L(n-1)}{v_0(n-1)} p}{h_0(n-1)} \frac{\Delta h_0(n-1)}{h_0(n-1)} \\ & + G_6(n+1) l \frac{-\frac{L(n)}{v_0(n)} p}{h_0(n)} \frac{\Delta h_0(n)}{h_0(n)} \\ & \left. + G_7(n+1) \Delta S(n+1) - G_8(n) \cdot \Delta S(n) \right] \dots (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\Delta h_0(n)}{h_0(n)} = & G_9(n) \frac{\Delta T_0(n-1)}{T_0(n-1)} + G_{10}(n) \frac{\Delta T_0(n)}{T_0(n)} \\ & + G_{11}(n) l \frac{-\frac{L(n-1)}{v_0(n-1)} p}{h_0(n-1)} \frac{\Delta h_0(n-1)}{h_0(n-1)} \\ & + G_{12}(n) \cdot \Delta S(n) \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

ここで

$\frac{\Delta T_0(n)}{T_0(n)}$: 第 n スタンド出側張力変動

$\frac{\Delta h_0(n)}{h_0(n)}$: 第 n スタンド出側板厚変動

$\frac{\Delta v(n)}{v(n)}$: 第 n スタンド圧延速度変動

$\Delta S(n)$: 第 n スタンド圧下変位 (1/100 mm)

$L(n)$: 第 n ～第 $(n+1)$ スタンド間距離 (m)

$v_0(n)$: 第 n スタンド圧延速度 (m/s)

$G_1(n) \sim G_{12}(n)$: 第 n スタンドの影響係数

上式より明らかなように、板厚、張力、圧下、速度の関係は、シングルスタンドでは比較的簡単だが、タンデムでは張力、板厚の伝ばを介して各スタンドが密接に結合しているので、相互干渉によりきわめて複雑である。

表5は5タンデムミルで、表に示した圧延スケジュールについて、影響係数 $G_1(n) \sim G_{12}(n)$ をHITAC 5020 Fで求めた例で

ある。

5.2.1 圧下制御 AGC

圧下制御 AGC はスタンドの出側板厚を、厚み計にて検出し、板厚偏差に応じて圧下位置を制御するものである。

この方式では圧延材が検出器に到達するまでの移送遅れおよび制御系の時間遅れが問題となる。前者は圧延速度の遅い場合には 0.5～1.0 秒にもなり、連続制御がむずかしく、オンタイム、オフタイム式サンプリング制御を行なっている。後者は近年油圧圧下系の使用とサイリスタ制御により時間遅れが大幅に短縮されるようになった。

(3)(4)式にて 1/100 mm の圧下を行なった場合、張力変動の一次の効果まで考えた出側板厚の変動は

$$\frac{\Delta h_0(n)}{h_0(n)} = \left\{ \frac{G_7(n) \cdot G_9(n)}{G_1(n-1) - G_2(n)} - \frac{G_8(n) \cdot G_{10}(n)}{G_1(n) - G_2(n+1)} + G_{12}(n) \right\} \Delta S \dots \dots \dots (5)$$

(5)式右辺第1項は入側張力変化による圧下制御を相殺する効果、第2項は出側張力変化の影響、第3項は圧下の直接の効果である。これより明らかなように出側張力変動はほとんどないが、入側張力変動はきわめて大きく、ほとんど圧下の効果を相殺してしまう。二次以降の効果を考えてみるとその割合はたかだか 20% 程度である。上述のように圧下 AGC には入側張力一定制御を併用する必要がある、かつその応答速度は圧下制御系よりも早いことが必要である。したがってコールドリブスミルの圧下 AGC には入側張力制御を併用し、タンデムミルのときは通常ペイオフリールに張力制御がかかっているの、第1スタンドの圧下制御を行なうのが通例である。

なお多品種圧延を行なう圧延機では、圧下制御の板厚への効果は、圧延スケジュールにより大幅に変化し、従来の硬度補償のほかに、板厚、板幅による補正も必要である。これらはプリセット装置のある場合には、プリセット値を用いて自動的に補正できる。

図15は表5の圧延スケジュールについて、母材板厚が1%変化したとき、第1スタンド出側厚み計で板厚偏差を検出し、第1スタンドの圧下制御をした場合の板厚、張力変化の計算例を示したものである。

5.2.2 速度制御 AGC

(3)、(4)式より明らかなように、張力あるいは速度を制御して出側板厚を制御することができる。張力制御と速度制御は同じ効果なので速度制御につい

表5 スケジュール 1,300 mm×2.3 t→0.25 t における影響係数算出例

スタンド番号		1	2	3	4	5
項目	入側板厚 (mm)	2.30	1.60	0.98	0.55	0.32
	出側板厚 (mm)	1.60	0.98	0.55	0.32	0.25
圧延スケジュール	入側張力 (kg/mm ²)	1.30	20.0	20.0	20.0	20.0
	出側張力 (kg/mm ²)	20.0	20.0	20.0	20.0	5.0
	圧延荷重 (t)	1,208	1,001	1,176	995	968
	圧延速度 (m/m)	280	460	820	1,400	1,800
影響係数	G ₁	0.0713	0.0274	0.0331	0.0260	0.0046
	G ₂	-0.0304	-0.4641	-0.5059	-0.7689	-0.4364
	G ₃	-0.0113	-0.0409	-0.0405	-0.0463	-0.0107
	G ₄	-0.0158	-0.0143	-0.0481	-0.0945	-0.0167
	G ₅	0.0088	-0.0222	-0.0347	-0.0412	-0.0200
	G ₆	-0.1975	-0.4636	-0.3618	-0.4079	-0.4693
	G ₇	0.1340	0.4312	0.5474	0.9926	0.5352
	G ₈	-0.0053	0.0060	-0.0005	0.0166	-0.0160
	G ₉	-0.0192	-0.4232	-0.4653	-0.7227	-0.4258
	G ₁₀	-0.0871	-0.0417	-0.0812	-0.1204	-0.0213
	G ₁₁	0.7937	0.5586	0.6729	0.6333	0.5506
	G ₁₂	0.1393	0.4252	0.5479	0.9760	0.5511
注	板幅=1,300 mm		ミルバネ定数=500 t/mm			
	ワークロール半径=330 mm					

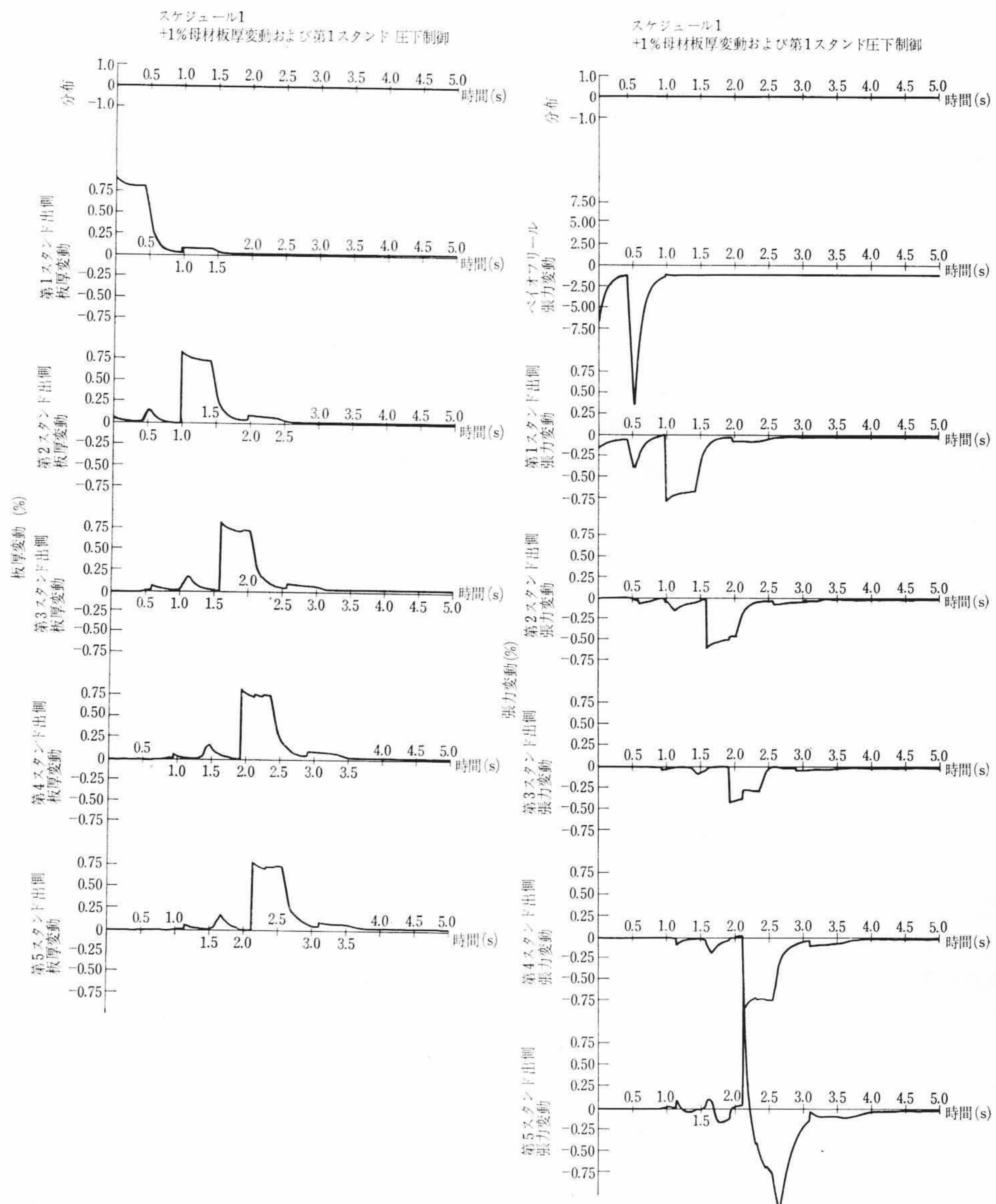


図15 1% 母材板厚変動にたいし、第1スタンド圧下制御をしたときの各スタンドの板厚、張力の変動

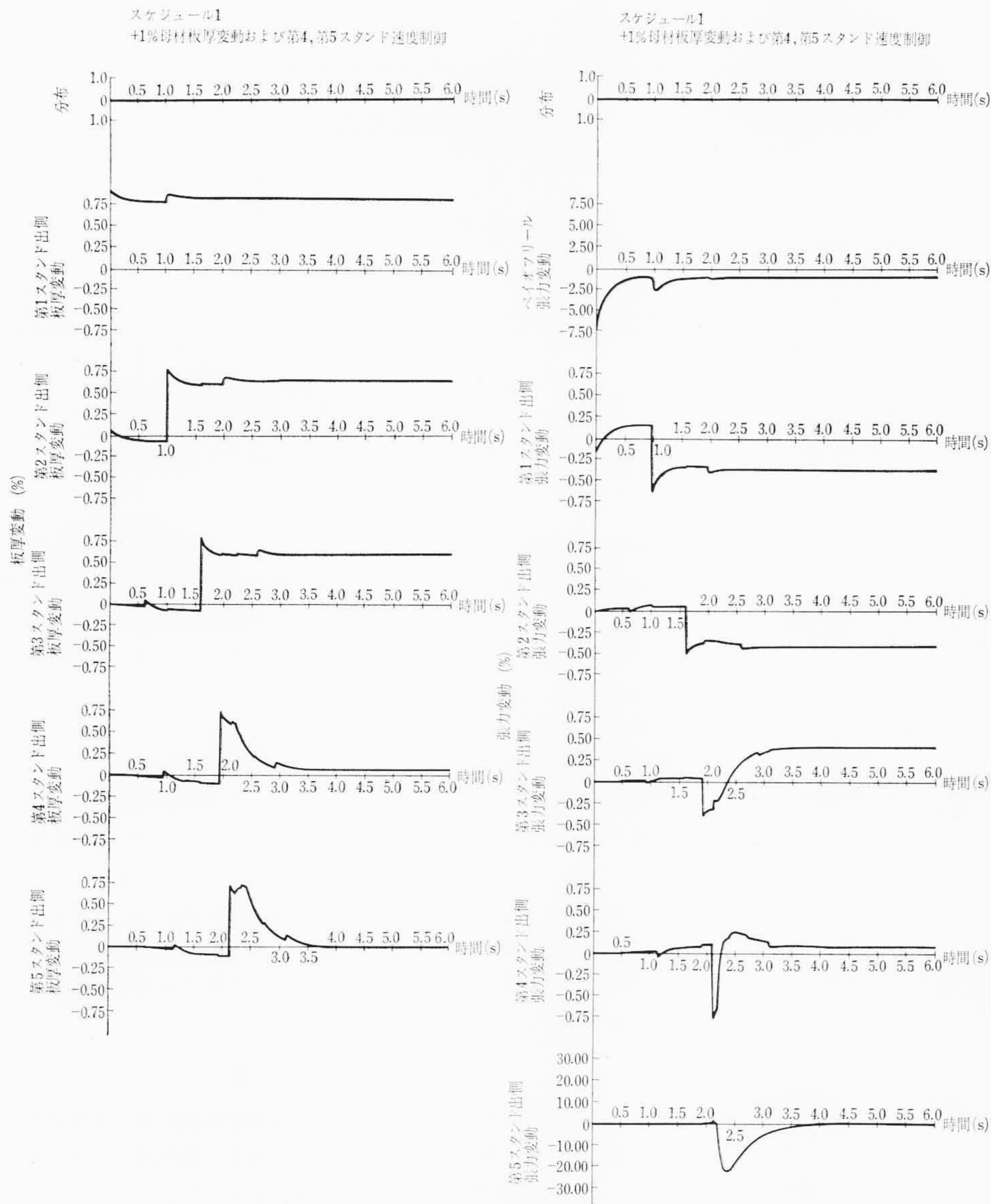


図16 1%母材板厚変動にたいし、第4,5スタンドの速度制御をしたときの各スタンドの板厚張力の変動

て考えると、いま第 n スタンドの主モータの速度を操作した場合、張力による一次効果のみ考えたときの第 n スタンド出側板厚の変動は

$$\frac{\Delta h_0(n)}{h_0(n)} = \left\{ \frac{G_9(n)}{G_1(n-1) - G_2(n)} - \frac{G_{10}(n)}{G_1(n) - G_2(n+1)} \right\} \frac{\Delta v(n)}{v(n)} \quad (6)$$

となり、右辺第1項は入側張力変動の効果、第2項は出側張力変動の効果である。表5より明らかなように後者は前者に比べて格段に小さいので、速度制御による張力制御にて第 n スタンドの出側板厚は十分に制御できる。この場合シングルスタンドでは、問題ないがタンデムミルの場合は、第 n スタンドの速度を制御することは（たとえば速度を増したとき）第 n スタンドの入側張力を増すと同時に、第 $(n+1)$ スタンド入側張力を減らすことになり第 $(n+1)$ スタンドの出側板厚でみると、上記の相殺効果によって第 n スタンドの板厚が第 $(n+1)$ スタンドに到達したあとでは、ほぼ

$$\frac{\Delta h(n+1)}{h(n+1)} = \left\{ \frac{1}{G_1(n) - G_2(n+1)} - \frac{1}{G_1(n-1) - G_2(n)} \right\} \times G_9(n) \cdot \frac{\Delta v(n)}{v(n)} \quad (7)$$

となり、その効果はほとんどなくなってしまう。したがってタンデ

ムミルの場合、ペイオフロールに張力制御がかかっていることを利用して第1スタンドの速度を制御して第2スタンドの入側張力を変えて板厚制御をするが、最終スタンドの速度制御をするのが通例となっている。特に最終スタンドは圧下制御の効果が期待できないので、最終スタンド出側板厚偏差に応じて速度制御を行なっている。最終スタンドは圧延速度が上昇しているので移送遅れ時間も短く通常のPID連続制御が可能である。

ただし最終スタンドの速度をAGCのため操作することは、製品の形状を悪化させる原因となるので、最終スタンドと一つ手前のスタンドの速度を同時に同方向に制御して、最終スタンドの入側張力を一定に保ちながら、一つ手前の入側張力のみを制御して、製品の良い形状を保ちつつAGCを実施する方式がとられている。

なお、板厚板幅による補正については圧下制御と同様である。

図16に図15と同じく母材板厚が1%変した場合について、最終スタンド出側板厚を検出し、第4,5スタンドの速度制御を実施した場合の各スタンドの板厚、張力変動の計算例を示す。

5.2.3 速度補正

速度補正は速度による油膜厚み変化の補正と、摩擦係数変化の二つに分けられる。前者は圧延圧力と速度の関係で、実測値によれば両

者は変数分離できて、加減速中の油膜補正量は、

$$\Delta h = f(N) \cdot g(P) \quad (8)$$

ここで、 N : 圧延速度

P : 圧延圧力

関数形 f, g はバックアップロールの形状、軸受、油の粘性が決まれば定まるので、同じ圧延機については、速度、圧延圧力を検出し計算機にて f, g の積を作れば(8)式にて補正量を算出することができる。後者は、圧延圧力の変化となるので、スケジュールごとにあらかじめ速度変化に対する圧力変化の関数形を求めておき圧下を操作して、予側制御できる。

なおタンデムミルにおける通板、戻抜時は出側、入側、張力喪失のため板厚が変動するので、圧延圧力などの変化から鋼帯のかみ込み、離脱を検出し、これと同期して圧下制御することによって補正している。

5.2.4 ロール偏心の影響

バックアップロールの偏心は通常10~50 μ 程度ある。この偏心量そのまま板厚に影響するわけではないが、通常2~8割程度影響する。したがって薄板圧延の場合はその影響は甚大である。特に鋼帯の全範囲に及ぶと、変化周期が短く、厚み計で検出してから制御するのでは板の移送遅れと制御系の遅れのため除去するこ

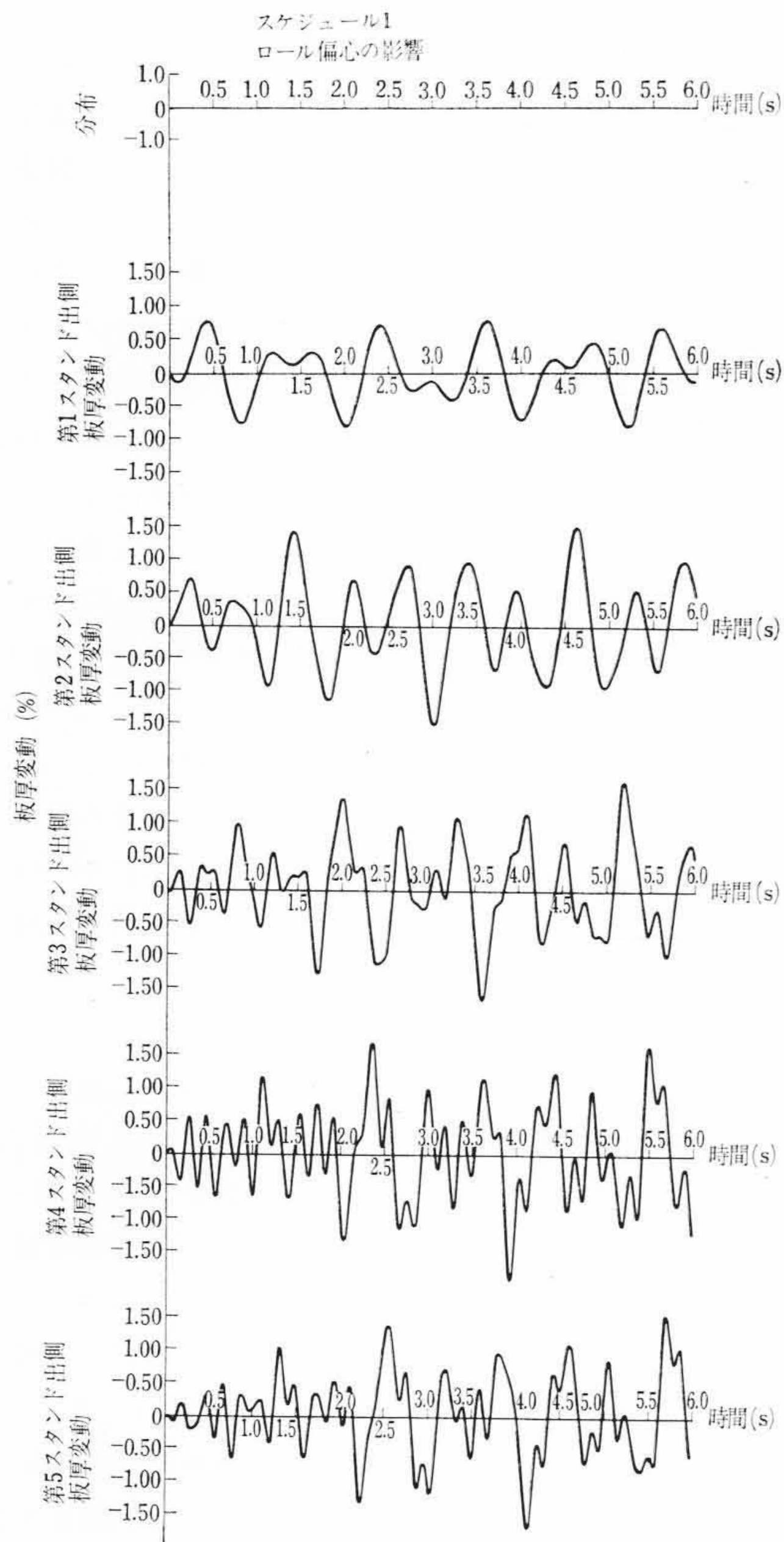


図17 各スタンドに40 μ のロール偏心があるときの板厚変動

とが困難である。これは現在のAGCに残された重要な課題になっている。

タンデムミルの場合は上下ロールの偏心量、偏心位置の違いのほかに、スタンドごとの回転周期、偏心量の差、各スタンドが張力および板厚伝ばで結合されていることによる強調、相殺効果があらわれて複雑な現象を示す。図17は各スタンドに40 μ のロール偏心量がある場合の板厚変化の模様を計算した例で上記の現象がはっきりあらわれている。

5.3 実施例

5.3.1 タンデムコールドミル

図18はタンデムコールドミルのAGC実施例のブロック図を示したものである。タンデムミルでは、通常入側AGCで母材板厚変動を除去し、出側AGCで鋼帯がスタンドを通り抜けていく間

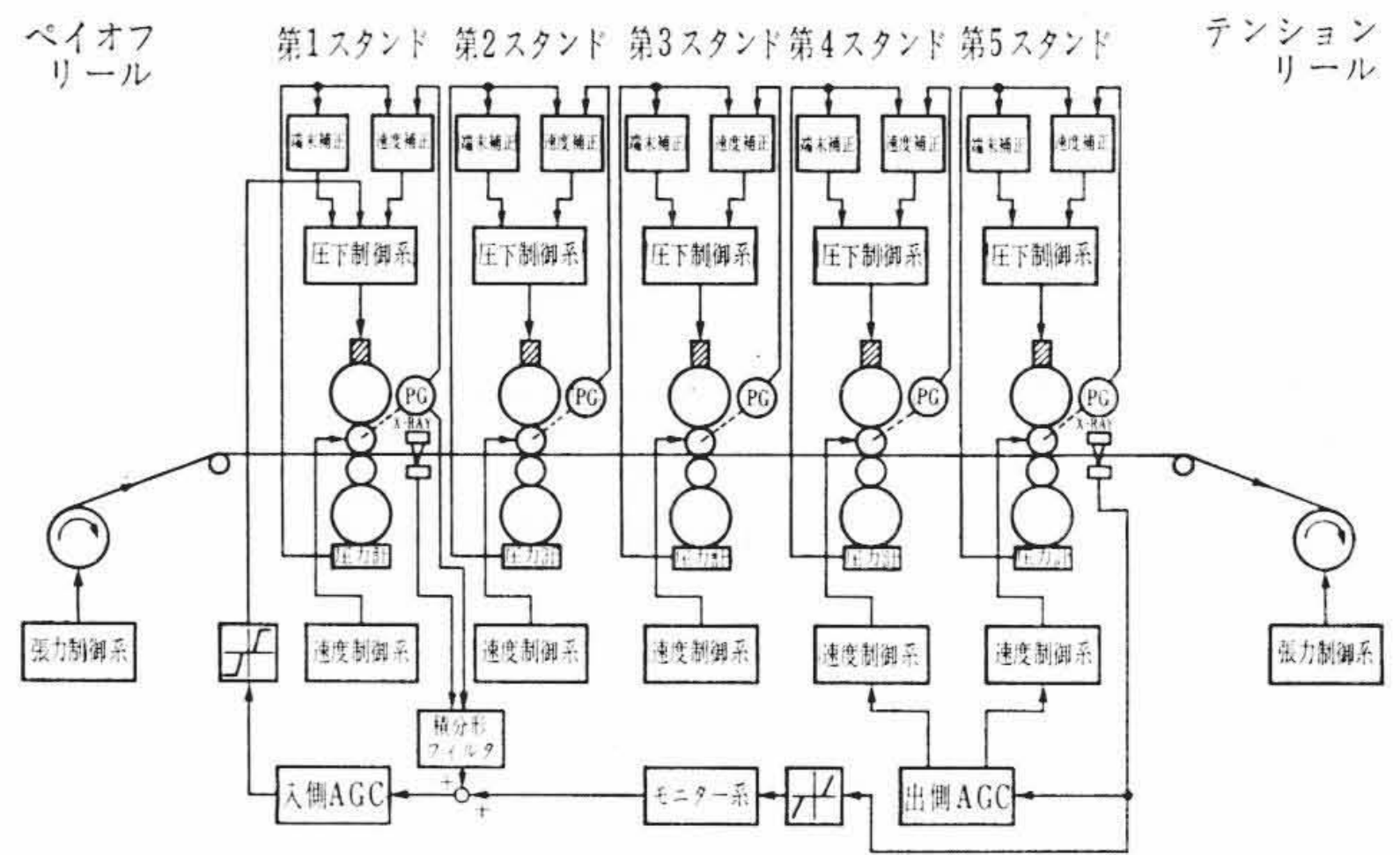


図18 タンデムミルのAGCブロック図

に受ける外乱による板厚変動を除去する。入側AGCは図に示したように、第1スタンド出側板厚を検出して、第1スタンドの圧下制御を行なう方法と、第2スタンド出側板厚を検出して第1スタンドの速度制御をする方法と2種類が考えられる。出側AGCは図に示したように第4～5間張力を一定に保ちながら、第3～4間張力を変える方式が最近多くとられているが、これは前述のように製品の良好な形状を保つためである。図に示したモニター系は、圧延スケジュールの設定誤りなどにより所定の板厚が出ない場合、すなわち設定デッドバンドを越えたとき信号を入側AGC系に戻して、両者の協調で所定板厚にしようとするもので、モニター系は偏差を積分保持して、出側板厚が所定値にはいってもモニター系からの信号は入側AGCに加えられたままになっている。このほか端末補正、速度補正は各スタンドの圧下制御系を操作して実施されている。圧下系は油圧圧下である。

6. 結 言

以上日立製作所における最近の圧延設備電気品における制御のうち、品質の向上、稼働率および歩留りの向上、操作員の低減に貢献している各種自動制御につきその一端を紹介した。これらの自動操作および制御は計算機制御と密接な関連のもとに圧延理論に立脚し、実際の圧延操作を十分に考慮したものでなくてはならず、製鉄メーカーのご指導ご協力と電気機械メーカーの研究により今後の発達が期待されるものである。終わりにこれら最新の技術を採用されたユーザー各位に感謝する次第である。

参 考 文 献

- (1) 岩城, 宅間, 上田: 日立評論 48, 1212 (昭42-10)
- (2) 特許出願中
- (3) 日立評論 (昭42-1)
- (4) R. A. Philips: Amer. Inst. Elect. Engr. (Jan. 1957)
- (5) D. R. Bland, H. Ford: Proc. Inst. Mech. Eng. Vol. 159 (1948)
- (6) 西, 庄山: 日立評論 45, 1798 (昭38-11)