

可逆冷間鋼帯圧延機自動板厚制御装置

Automatic Thickness Control System for Reversing Cold Strip Mill

佐藤 秀也*
Hideya Satō

前川 敏明**
Toshiaki Maekawa

西 一郎***
Ichirō Nishi

内 容 梗 概

可逆冷間鋼帯圧延機で圧延される板の厚さが変動する原因を解析し、これを補正する方法として圧下調整と張力調整が用いられることを述べ、次に具体的な自動板厚制御装置についてこの圧下と張力の制御のテクニック例を説明し、最後に運転データにより自動板厚制御の効果を述べている。

1. 緒 言

圧延によって製造される鋼帯において、圧延後の寸法、特に厚み精度に対する要求がしだいに過酷になってくる傾向がある。しかし圧延後の厚さを不均一にする原因はきわめて多いので、一定厚さの製品を能率よく大量生産するために、従来から運転者の技能、熟練が大きく評価されている。しかし圧延速度が高くなり、要求精度が上がってくるにつれて従来の方法では限界があり、ここに自動厚み制御装置の設置が必要とされるようになってきた。

日立製作所においては、昭和28年日立研究所内に実験用圧延機を設けて基礎研究より出発し、また一方圧延機ならびに電気品の一貫した製作経験を基にして厚み制御方式の研究を行ってきた。さらに高速大容量の圧延諸特性の測定ならびに基本的試験は株式会社大阪造船所の業務用圧延機について両社協力のもとに行われた結果、今春以来、株式会社大阪造船所のものを初めとして数セットのものが稼動にはいり成果を上げているので、厚み制御の基本的考え方と稼動中の設備の例について発表する。

2. 厚み調整の原理と自動厚み制御系

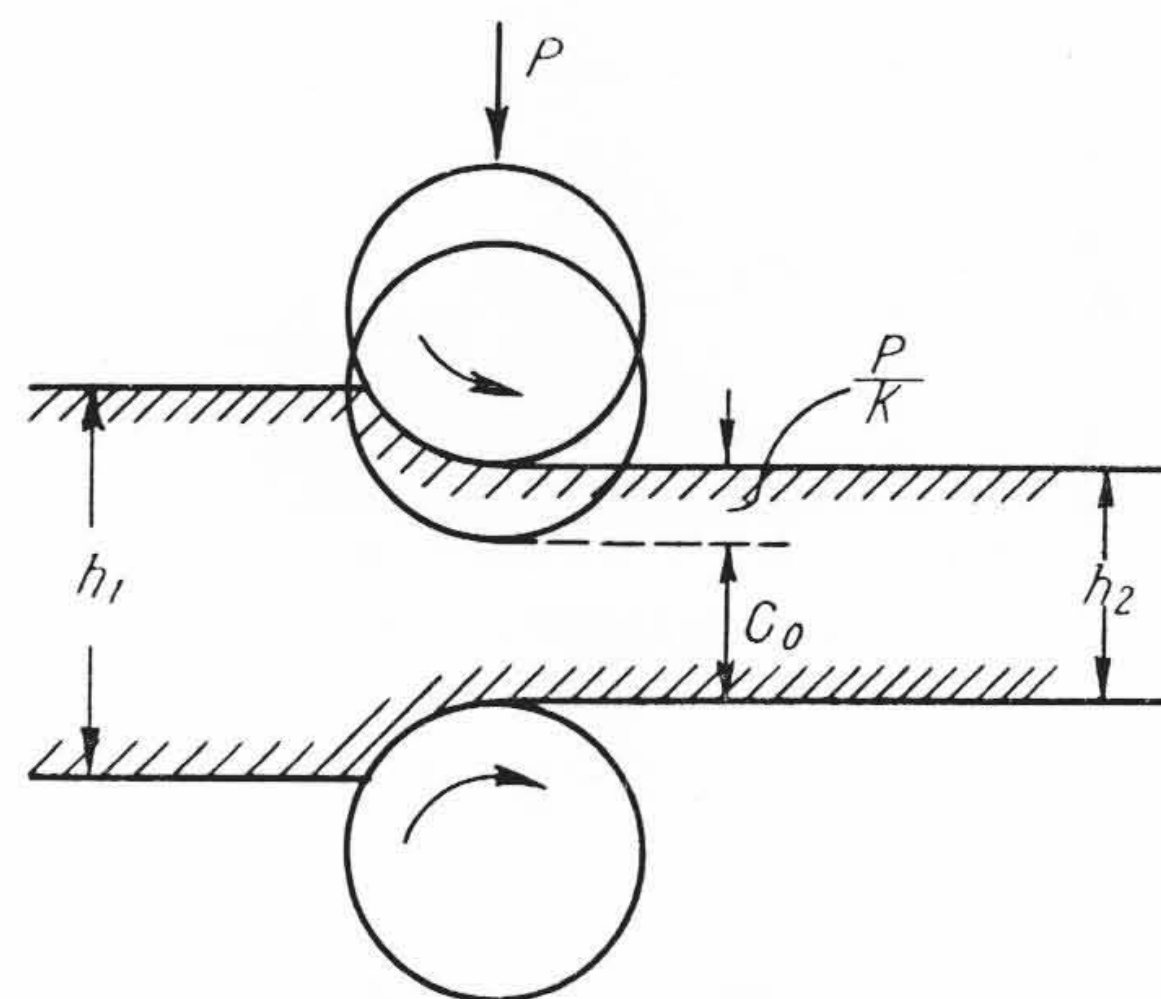
2.1 厚み変化の諸要因⁽¹⁾

冷間鋼帯圧延機において圧延された鋼帯の厚みを調整するには、圧下を変化する方法と、張力を変える方法の二つがあることはよく知られたことである。これを逆に考えれば厚み変化の大きな原因が上記の圧下変化と張力変化にあるためであるが、これをさらに詳しく考えてみよう。

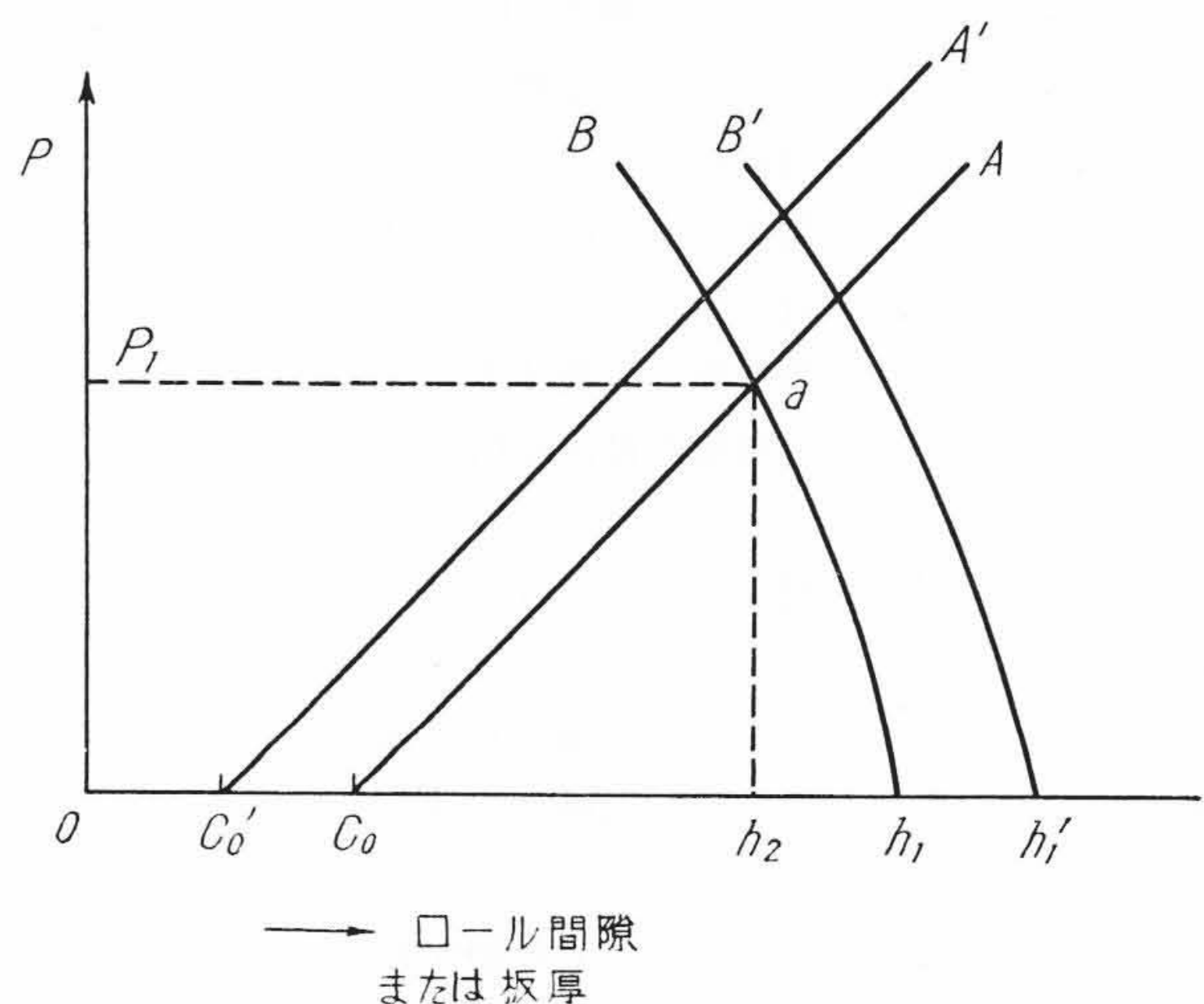
圧延機から出てくる鋼帯の厚みは、ほぼロール間げきによって決まるが、この圧延中のロール間げきは、鋼帯をかみ込まない場合のロール間げきよりもいくらか押し広げられる。すなわち第1図において鋼帯をかんでいない場合のロール間げき C_0 のところへ h_1 なる厚みをもった鋼帯がはさまれ、 P なる圧延圧力が加えられて h_2 なる厚みになって圧延機を出るものとする。この場合圧延圧力の反作用でロール間げきが押し広げられるからロール機の弾性変形によってロール間げきは P/K (ただし、 K はロール機のばね定数) だけ広がり、結局圧延中のロール間げきは $(C_0 + P/K)$ となる。圧延される鋼帯の弾性変形はきわめて小さいから、ここに示されたロール間げきは、圧延後の鋼帯の厚さに等しいと考えられる。

すなわち $h_2 = C_0 + \frac{P}{K}$ (1)

(1)式は圧延機の弾性変形特性を示す式で、第2図のA曲線はこれを表わす。これに対して圧延に必要な圧力は、鋼帯の塑性変形抵抗によって与えられ、一般に次のような式で表わされている。



第1図 圧延機のロール間げき



第2図 ロール間げきおよび板厚と圧延圧力との関係

$$P = B \sqrt{R' (h_1 - h_2)} \cdot f(S_0, S_1, S_2, \mu) \dots \dots \dots (2)$$

ただし B : 鋼帯の幅

R' : 圧延中のロールの半径

h_1, h_2 : 入口, 出口の厚さ

μ : 鋼帯とロール間の摩擦系数

S_1, S_2 : 入口および出口側の張力 $(S_1 + S_2)/2$ を平均張力 S とする。

S_0 : 鋼帯の拘束変形抵抗

入口側の厚さが h_1 なるとき、(2)式は第2図のB曲線のような形になる。圧延中には上述の(1)、(2)式がともに満足されていないから、A、B両曲線の交点aが圧延条件を示し、そのときの圧延圧力 P_1 、圧延後の鋼帯厚さは h_2 である。

第2図において圧延後の厚み h_2 の変化する原因を考えるに、A、B両曲線のうちいずれが変化しても h_2 が変ることが明らかである。

* 株式会社大阪造船所

** 日立製作所日立研究所

*** 日立製作所日立工場

これらに影響するおもなる要因には次のようなものが考えられている。

(1) 圧延機の弾性変形特性 (A 曲線) に影響する要因

(a) ロール間げき設定値の変化——これは意識的にロール間げきを変更する場合で、圧下電動機などによって C_0 を変更することになり、A 曲線は横に平行移動する ($C_0 \rightarrow C_0'$ の場合 $A \rightarrow A'$ となる)。

(b) ロールなどの熱膨脹による変化——これは一般に C_0 を減少させる場合が多い。なお、比較的長時間のあいだに徐々に現われるものである。

(c) ロールの偏心誤差

(d) ロール軸受の偏心、油膜の厚さ変化

(e) ばね定数の変化——これは A 曲線の傾斜を変えることになる。

(2) 鋼帯の塑性変形特性 (B 曲線) に影響する要因

(a) 圧延前の厚み変化——第 2 図において B 曲線が横に平行移動することになる ($h_1 \rightarrow h_1'$ の場合 $B \rightarrow B'$ となる)。

(b) 鋼帯の拘束変形抵抗の変化—— S_0 の増加は一般に B 曲線の傾斜を急にするようになる。

(c) 張力の変化——入口側、出口側の張力変化は、両者ともかなり大きく影響する。一般に張力を増せば B 曲線は傾斜がゆるやかになり、厚みは減少する。張力変化の影響についてはあとに詳述する。

(d) 摩擦係数の変化、鋼帯の幅の変化、そのほか圧延速度の影響は、上述の直接的要因を変化させて間接的に厚み変化をもたらす。

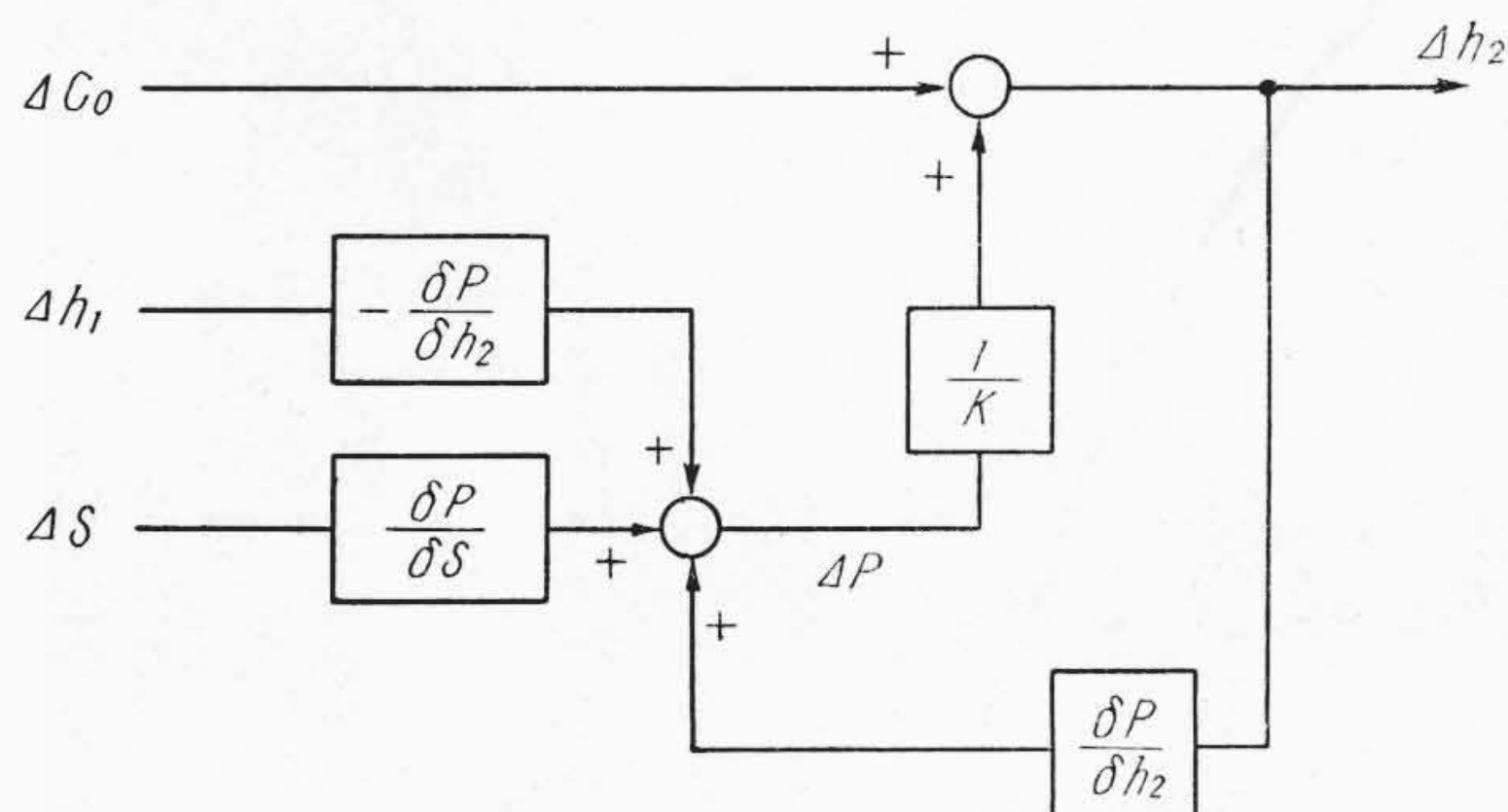
以上あげたような多くの厚み変化要因のうちで、人為的に変化するものを用いて他の諸原因による厚み変化を打ち消そうとするのがここに述べようとする自動厚み制御である。

2.2 圧延理論

前節には厚み変化のおもな原因をあげたが、その中で、人為的に調整しうるもの、特に調整しやすいものと考えると (1)(a) すなわち圧下と、(2)(c) すなわち張力である。自動制御の立場からみると、わずかの調整で大きな厚み変化の得られるものを利用するのが得策である。また制御装置の計画にあたっては、この数量的関係をあらかじめ推定しておくことが必要である。

さきに第 1 図および第 2 図によって圧延機の弾性変形特性、圧延材の塑性変形抵抗、ロール間げき設定値 C_0 、張力 S 、入口板厚 h_1 などと出口板厚 h_2 との関係を説明したが、いま圧延中のこれら諸変数の微小変化を考えて上の関係をブロック線図で表現すると第 3 図のようになる。これを整理して次の関係を容易に求めることができる。

$$\Delta h_2 = \frac{-\delta P / \delta h_2}{K - \delta P / \delta h_2} \cdot \Delta h_1 = \lambda \cdot \Delta h_1 \quad \dots\dots\dots (3)$$



第 3 図 圧延条件の微小変化に対する圧延機のブロック線図

$$\Delta h_2 = \frac{K}{K - \delta P / \delta h_2} \cdot \Delta C_0 = \nu \cdot \Delta C_0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\Delta h_2 = \frac{\delta P / \delta S}{K - \delta P / \delta h_2} \cdot \Delta S = \xi \cdot \Delta S \quad \dots\dots\dots (5)$$

(3) 式は入口板厚変化による厚み変化を示す。(4) 式は圧下調整による厚み変化を示し、ここで ν を圧下によるロール間げき移動係数と呼ぶことにする。(5) 式は張力調整による厚み変化を示し、ここで ξ を張力によるロール間げき移動係数と呼ぶことにする。

(3), (4) 式から次の関係が容易にわかる。

$$\lambda + \nu = 1 \quad \dots\dots\dots (6)$$

λ , ν , ξ などは厚み制御系を計画する場合、圧延機のゲインを表わす重要な値である。これを理論的に求めるには K , $\delta P / \delta h_2$, $\delta P / \delta S$ などを計算しておく必要がある。 K は圧延機の機械的構造から決まってくる値である。

$\delta P / \delta h_2$, $\delta P / \delta S$ は、前述の (2) 式から求められるわけであるが、これには多くの人々によって、いろいろな形の式が与えられている。ここには M. D. Stone の圧延理論式を示すと⁽²⁾

$$P = B L (S_0 - S) \frac{e^{\frac{\mu L}{h}} - 1}{\frac{\mu L}{h}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\left(\frac{\mu L}{h}\right)^2 = (e^{\frac{\mu L}{h}} - 1) 2 a \frac{\mu}{h} (S_0 - S) + \left(\frac{\mu l}{h}\right)^2 \quad \dots\dots\dots (8)$$

ただし B : 鋼帯の幅 (mm)

L : 偏平変形ロールと板の接触長 (mm)

S_0 : 板の拘束変形抵抗 (kg/mm²)

S : 前後張力の平均値 $\frac{S_1 + S_2}{2}$ (kg/mm²)

μ : 板とロール間の摩擦係数

h : 入口板厚 h_1 と出口板厚 h_2 の平均 (mm)

l : 剛性ロールの接触長 $\sqrt{R(h_1 - h_2)}$ (mm)

$$a = 4(1 - \rho^2) \frac{2R}{\pi E}$$

ρ : ポアソン比 (約 0.27)

E : ロールの縦弾性係数

(鋼ロールの場合約 2.1×10^4 kg/mm²)

R : 作業ロールの半径 (mm)

この式から、張力 S のわずかな変化 δS に対する圧延圧力変化 δP は次のように求められている⁽³⁾。

$$\frac{\delta P}{\delta S} = \frac{-Bh}{\mu} (e^{\frac{\mu L}{h}} - 1) \left\{ 1 + \frac{a(S_0 - S)e^{\frac{\mu L}{h}}}{L - a(S_0 - S)e^{\frac{\mu L}{h}}} \right\} \quad \dots\dots\dots (9)$$

次に $\delta P / \delta h_2$ は

$$\frac{\delta P}{\delta h_2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\delta P}{\delta h} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial P}{\partial h} + \frac{\partial P}{\partial L} \cdot \frac{\partial L}{\partial h} \right)$$

であるから (7) 式を用いて

$$\frac{\delta P}{\delta h_2} = \frac{B(S_0 - S)}{2\mu} \left\{ e^{\frac{\mu L}{h}} - 1 + e^{\frac{\mu L}{h}} \mu \left(\frac{\partial L}{\partial h} - \frac{L}{h} \right) \right\} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 $\partial L / \partial h$ としては (8) 式を用いて求めるべきであるが、これは非常に複雑になる。しかし、 h の微小変化によるロールの偏平変形を無視すれば、だいたい次の式で求められる。

$$\frac{\partial L}{\partial h} = -\frac{L}{h_1 - h_2} \quad \dots\dots\dots (11)$$

以上 (9) 式および (10), (11) 式によって $\delta P / \delta S$, $\delta P / \delta h_2$ が計算できるから、これを (3) ~ (5) 式に入れて、 λ , ν , ξ などの圧延機の厚み変化に関するゲインが理論的に求められる。

2.3 厚み測定法と自動制御系

さきに圧延機における厚みの調整手段について考えたが、自動厚

み制御を行うためには、厚み偏差の検出器が必要である。これにはフライングマイクロや放射線形の厚み計を用いることができるが、また(1)式に示されたような関係から圧延圧力 P の変化を出口板厚 h_2 の変化として間接的に利用しうることがわかる。

厚み計を出口側に設けて厚み偏差を検出する方法は一般的な考え方であり検出精度も十分得られるが、これを自動制御系に取り入れる際考えるべき重要な問題は、その検出遅れである。すなわち圧延機の構造上、厚み計はロール位置よりいくらか後方に配置せざるを得ないから、この距離を素材が輸送される時間が完全なデッドタイムとなる。しかもこの遅れ時間は圧延速度変更に伴って変化するものであるから制御系の取扱上すこぶる厄介な性格である。これに対処するためここに用いた方法は、特殊なサンプリング制御と前記の圧延圧力変化を加味した比例形制御系である。

厚みの調整手段には前述のように圧下と張力による方法があるが、この両者を比較するに、前者は大幅の調整能力をもっているが一般にその動作速度は遅い。これに対し後者は純電氣的に行いうるため応答速度が速いが調整範囲は比較的狭い。そこでこれらの特長と前記のサンプリング形ならびに比例形制御系の長所とを組み合わせ、完成されたものが以下述べる自動厚み制御装置である。

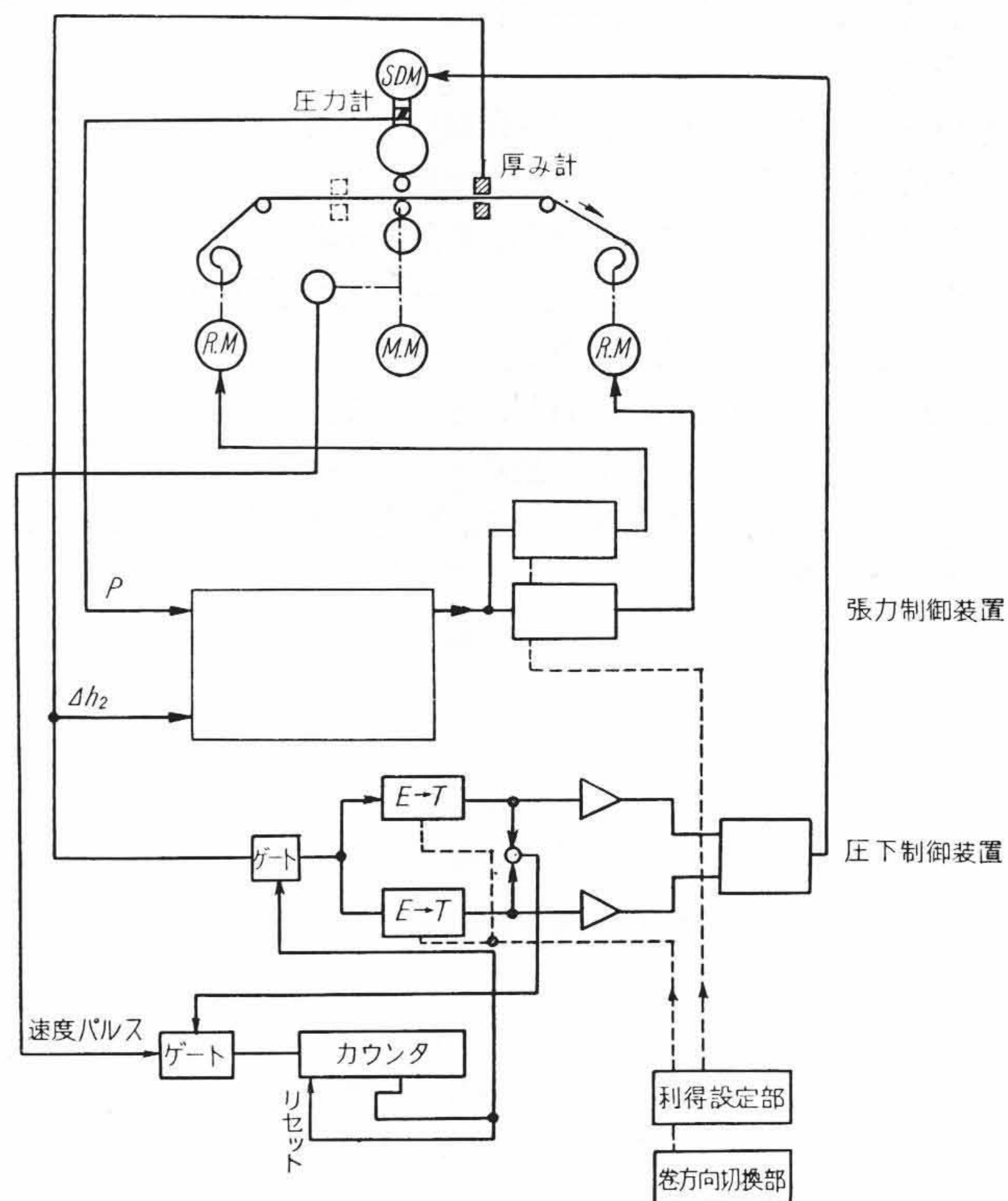
3. 自動厚み制御装置

前章に述べた考察に基づいて組み立てられた自動厚み制御装置の全構成図を第4図に示す。この動作を圧下調整と張力調整にわけて説明する。

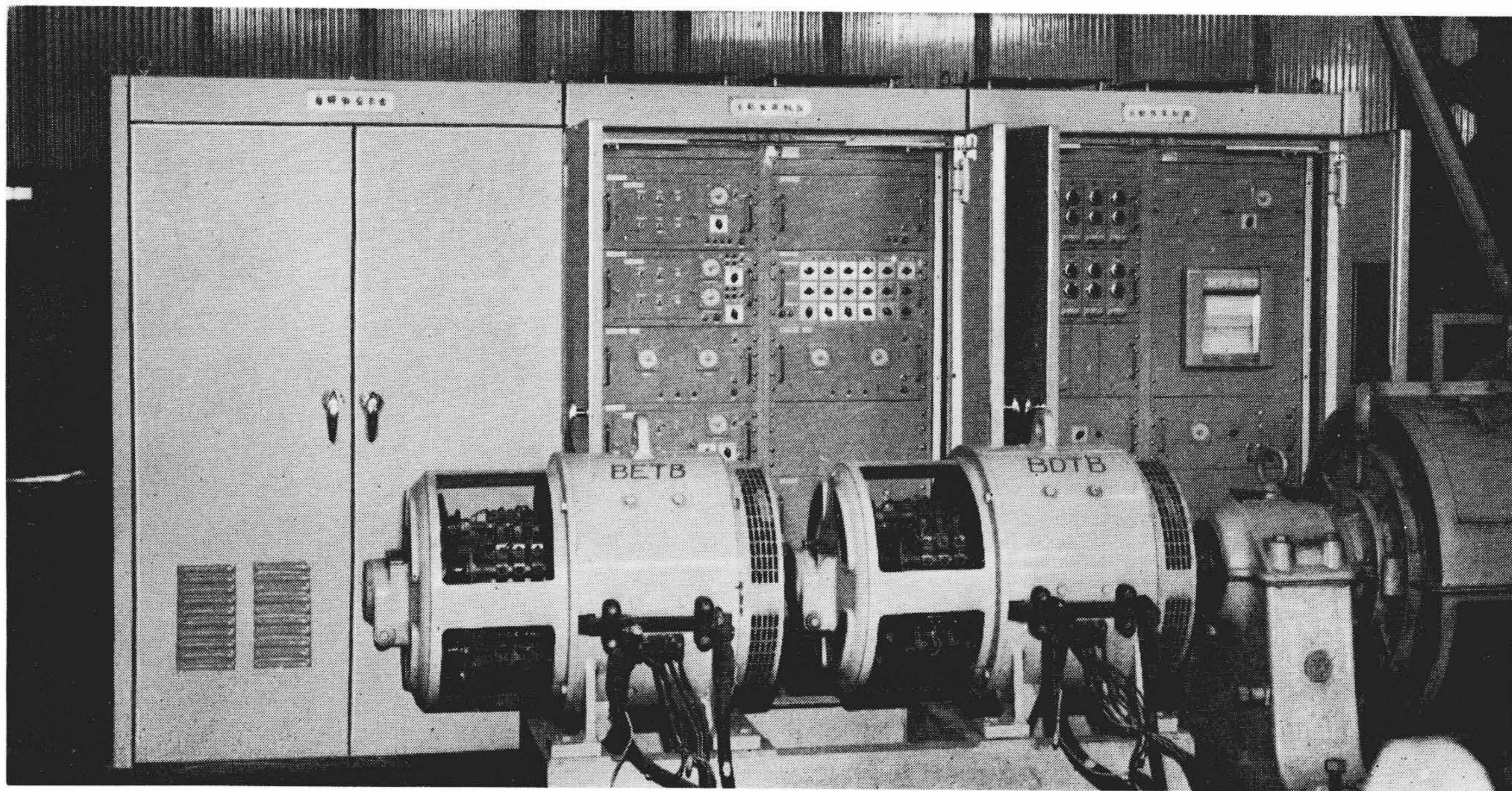
3.1 圧下調整による厚み制御

圧下調整には、厚み偏差と圧延速度に関係したサンプリング周期を有する特殊なサンプリング制御方式を採っている。その動作の概略を次に示す。厚み計からの厚み偏差信号 Δh_2 は直流増幅器によって増幅され、ゲートによってサンプルされて、E-T変換器に送られる。ここでまず厚み偏差が正であるか負であるかが判別され、正の厚み偏差信号の場合は圧下下げ信号を、負の厚み偏差信号は圧下上げ信号を出す。次に厚み偏差の大きさに応じた時間幅を有するパルスが作られる。ここでの入力(電圧)と出力(時間)との間の関係はデッドバンドを有する非線形関数である。圧下制御装置は、ワードレオナード制御を行っているが、この装置に対し、電動機回転の

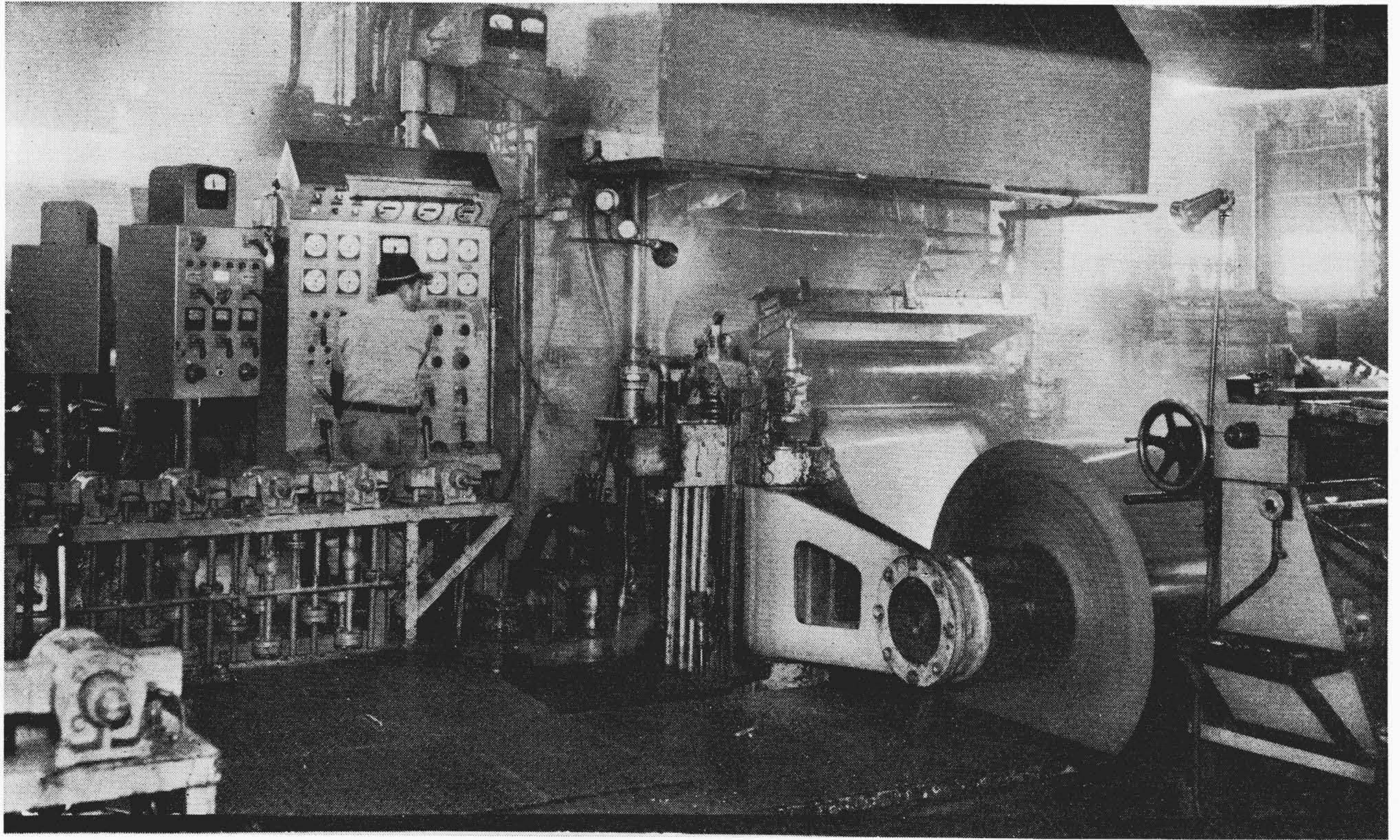
指令を与えるとき、指令の持続時間と電動機の回転角度——ここではそれが圧下調整量 ΔC_0 となる——との間には、比例関数が成立しない。特にこの場合のように、電動機は最高回転数に達することなく、起動停止を繰り返すような範囲内では、非線形性ははなはだしい。この非線形性を補償し、安定な制御を行うために、電圧入力、時間出力の関数発生器を用いているのである。 Δh_2 の厚み偏差があった場合、調整すべき圧下量は(4)式によって決まる。またデッドバンドは、製品板厚の許容公差に比して小さな値に設定してある。出力のパルスは電力増幅されて、圧下制御装置用の磁気増幅器に加えられ、圧下電動機を正転または逆転させ、圧下調整を行うのである。制御が終了すると終了信号がゲートに送られ、圧延機の主電動



第4図 自動板厚制御系構成



第5図 自動板厚制御キュービクル



第6図 自動板厚制御中の圧延機

機に連結されたパルス発信器からのパルスを実数カウンタに送り出す。ロールから厚み計までに鋼帯が移動するあいだ、ワークロールの回転する回数、すなわち主電動機の回転する回数は一定である。したがって、一回転するごとに一定数のパルスを出すパルス発信器を主電動機に連結し、これからのパルスを一定数だけ数えれば圧延速度に関係なく、ロールの下で圧延された鋼帯は厚み計まで達することとなる。制御完了とともにパルスを数え出し、このパルスが一定に達したときふたたびゲートを開いて厚み計からの厚み偏差信号 Δh_2 をE-T変換器に送る。この厚み偏差によってふたたび制御するようにすると、このときの板厚はさきに制御された鋼帯のものであるから、制御のゆきすぎがなく安定な制御ができる。

3.2 張力調整による厚み制御

張力調整には、圧延圧力の変化と厚み偏差とを加味した信号を指令とする比例制御系を用いている。圧延機の圧延圧力の絶対値というものは不安定で補正しにくい要素を含んでいる。その大きな原因となっているのは圧延中のロール熱変形、ロール摩耗、クーラントおよびベアリング油被膜厚さの変化など測定しにくいものである。幸いこれらの大部分は時間的にゆるやかに変化するものであるので圧延圧力の比較的急な変化のみを取り出し、これを板厚変化のきざしとみなして制御系を先行させる方式を用いている。この厚み偏差の信号は、鋼帯が厚み計に走るまでの時間だけ遅れている。この遅れ時間とさきの先行時間を同じ程度にすると、厚み計をロール直下に設置したものとほぼ同様な制御を行うことができる。このために死時間による不安定性というのは克服することができる。この計算回路から出た出力は前後面それぞれにリール発電機の界磁を制御し、リール電動機の電機子電流を制御して張力制御を行うのである。この張力調整は電動機のトルクを制御するものであるから速応性があり、圧下調整では取り除き得ない板厚の急激な変化を制御することができる。張力は圧延条件によって定められる値があって、あまり大幅に張力を調整して板厚を制御することができない。したがって張力制御は急激ではあるが、範囲の狭い変動を、圧下制御は

割合ゆっくりした大幅の変動を制御することとなる。このため両者を共用すると非常にすぐれた制御となる。

4. 稼動設備とその運転結果

現在稼動中の自動板厚制御装置は圧延機速度によって高速用と低速用とに大別されるが、根本的には同一の制御方式であって圧延機の大きさや圧延速度の大小に従って制御回路の一部と測定器が相違する。

4.1 稼動圧延設備概要

高速度圧延機仕様の一例として株式会社大阪造船所のものについてあげれば

ロ　　ール	420/1,340 mm 径×1,370 mm 長
4重可逆式冷間圧延機	
圧　延　速　度	最高 600 m/min
圧　延　材　料	軟鋼板
板　　　　　厚	最大 2.3 mm　最小 0.2 mm
	コイル重量　最大 15 ton
主ロール電動機	2,600 kW　ワードレオナード制御
リール電動機	900 kW　ワードレオナード制御 (おのおの)
使用厚み計	フライングマイクロメータ
圧下電動機	37 kW　ワードレオナード制御

低速圧延機の一例として特殊金属株式会社のものについてあげれば

圧　延　材　料	バネ　洋白板
板　　　　　厚	最大 0.6 mm　最小 0.2 mm
主ロール電動機	22 kW　ワードレオナード制御
リール電動機	7.5 kW×2　ワードレオナード制御
使用厚み計	β 線透過形

4.2 運転結果と考察

4.2.1 使用上の効果

大阪造船所横浜工場における運転の結果は次の効果を発揮して

いることが認められた。

(1) 技術差の補正

圧延中の板厚修正動作が自動化されたため、パス始めの圧下、張力の設定が適正なら未熟練者の技術をもっても熟練者とほとんど差のない結果をうることができる。この結果作業者の肉体的ならびに精神的負担は軽減された。

(2) 品質の向上

圧延中作業者は板厚修正の努力をほとんど必要とせぬため、板の平坦度、ロールクーラント、コイルの観察などに注意力を注ぎうるため、製品品質の向上ができた。

(3) 板厚精度の向上

製品板厚精度は当然のことながら向上し、特に未熟な作業者の場合この向上は著しく、また同一コイル内の板厚のバラツキが大幅に減少した。

4.2.2 実動結果とその考察

板厚制御系を人為と自動とに分けて制御系としての特性を比較すれば、自動制御装置の利点は

- (1) 板厚偏差を検出してから圧下あるいは張力を調整するまでの時間遅れが小であること。
- (2) 板厚偏差はいかなる場合にも必ず自動的に補正動作を伴い、人為における不注意、手の回り兼ねなどの漏れがない。

第7図は圧延中のオシログラムの一部を示す。図で明らかなように圧下がきわめてひん繁に動作しており人為操作ではとうてい及びきれぬことが推察される。

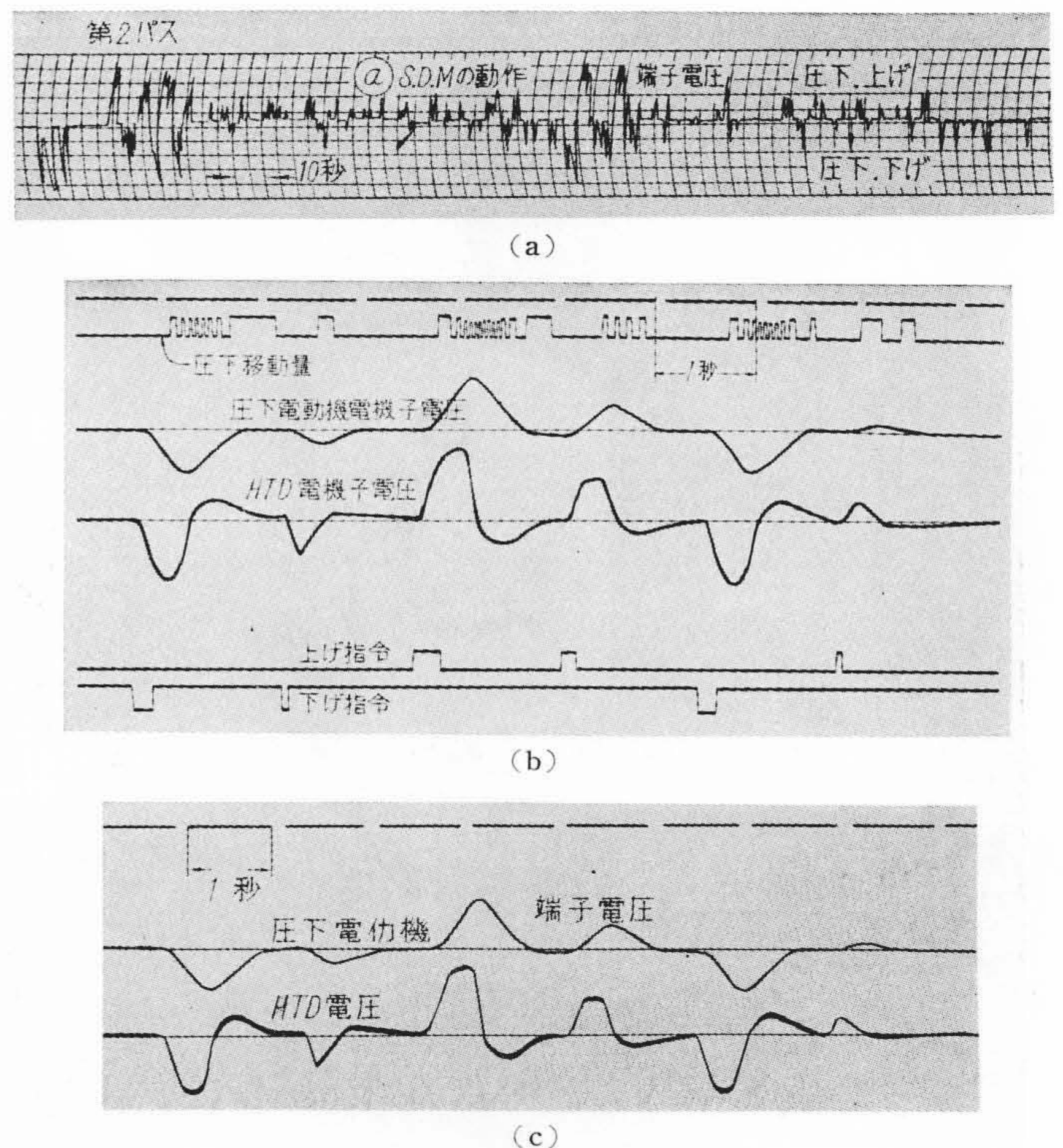
第8図は0.4mm板圧延時のオシログラムで図示のように早い時間内の記録であるので微細な現象がよくわかるが、この図により圧延開始後ただちに板厚は正常値に入り、熔接点以外は厚さの変動がきわめて少ないことがわかる。

圧延された板の長さはチャートに表われた時間と圧延速度との積で表わされるので全オフゲージ量はきわめて少ない。本オシログラムには現われていないが、前述のとおり圧下制御のほかに張力制御も併用しており、薄くなるにつれてその効果は増してくることが確認された。

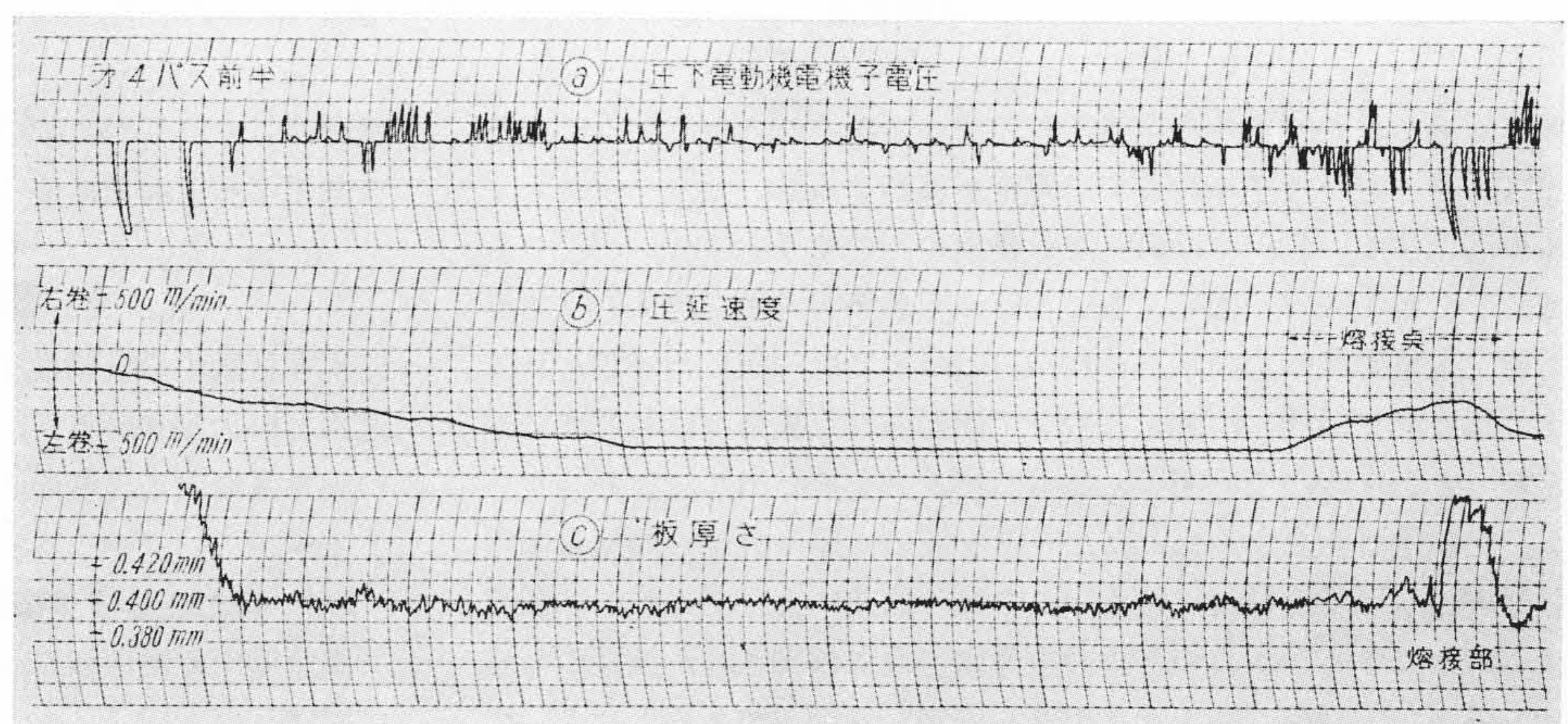
実際の板厚を左右する条件は、圧下、張力のほかにロールクーラント、圧材ホットコイルの履歴などの影響を受けること大なるため制御の調整設定は研究や工場における実験データに負うところが多大である。

5. 結 言

以上、主として可逆圧延機の自動板厚制御装置について理論と実際の概要を述べたが、圧延作業は板厚のほかにも形状、仕上りなどの課題があって、現在は熟練した作業者の勘に頼る点がきわめて多い。これらを逐次自動化して圧延の合理化を計る必要があり、本板



第7図 自動板厚制御中の圧下電動機動作オシログラム



第8図 自動板厚制御中の圧延オシログラム

厚制御はその端緒であって今後さらに高速度圧延機の板厚制御を始め、他の圧延条件の自動化へ進むものである。そのためには一つ一つの事項について基礎的な研究に出発して多数の実地経験に至る一貫した技術の蓄積が必要である。

参 考 文 献

- (1) たとえば 鈴木：圧延，機械の研究 10, 2~11, 12 (1958~1959)
- (2) M. D. Stone: Rolling of Thin Strip. Iron and Steel Eng. (Dec. 1956)
- (3) 山本, 梶原：四重冷間圧延機の動作特性について 日立評論別冊 29 (昭 34-5)