

粗圧延機のプログラム制御の研究

Study of Programmed Control for Reversible Roughing Mill

小 西 務* 前 川 敏 明*
Tsutomu Konishi Toshiaki Maekawa

内 容 梗 概

圧延機の駆動設備には従来種々の精巧な自動制御系が必要不可欠のものとして取り入れられているが、最近一連の圧延作業を有機的に遂行するための全自動運転化の問題が取り上げられつつある。

ここに述べるプログラム制御の研究は逆転式熱間圧延機を対象とした全自動運転装置の基礎的方式に関するものである。試作装置は一連のプリセット指令による自動運転操作系よりなるが、なかんづく自動圧下制御系においてはデジタル式計算回路を含む最適制御装置を考案し採用している。これらは磁気増幅器、ヒタログ、トランジログなどの無接点式要素により構成され、予定の動作を遂行しうることが確かめられた。

1. 緒 言

鉄鋼生産の増加に伴い製鉄機械の増強と合理化が盛んであるが、最近圧延設備の自動化の問題が取り上げられつつある。日立製作所においては多数の圧延機、補機およびそれらの電気設備の製作に携わりつつあるが、圧延設備の自動化の問題についても鋭意研究を進め、ここに一連の圧延スケジュールを自動的に進めるプログラム制御装置を研究試作した。そのうち圧下自動制御装置では独自のデジタル・サーボ機構による最適制御方式⁽¹⁾の採用により圧下調整時間を短縮させ、またサンプリング制御方式⁽²⁾を用いて圧下ロール間げきの位置決め精度を向上させ、短時間に高精度の位置決めが可能になった。本装置は無接点継電器ヒタログおよびトランジログをはじめ多数のトランジスタ、ダイオードなどにより構成されているが、苛酷な使用環境における種々の要求性能を満たすため特に慎重な検討を行った。

本稿ではプログラム自動制御装置の構成と性能および圧下自動制御の理論、構成、性能などについて述べる。

2. 粗圧延機プログラム自動制御装置

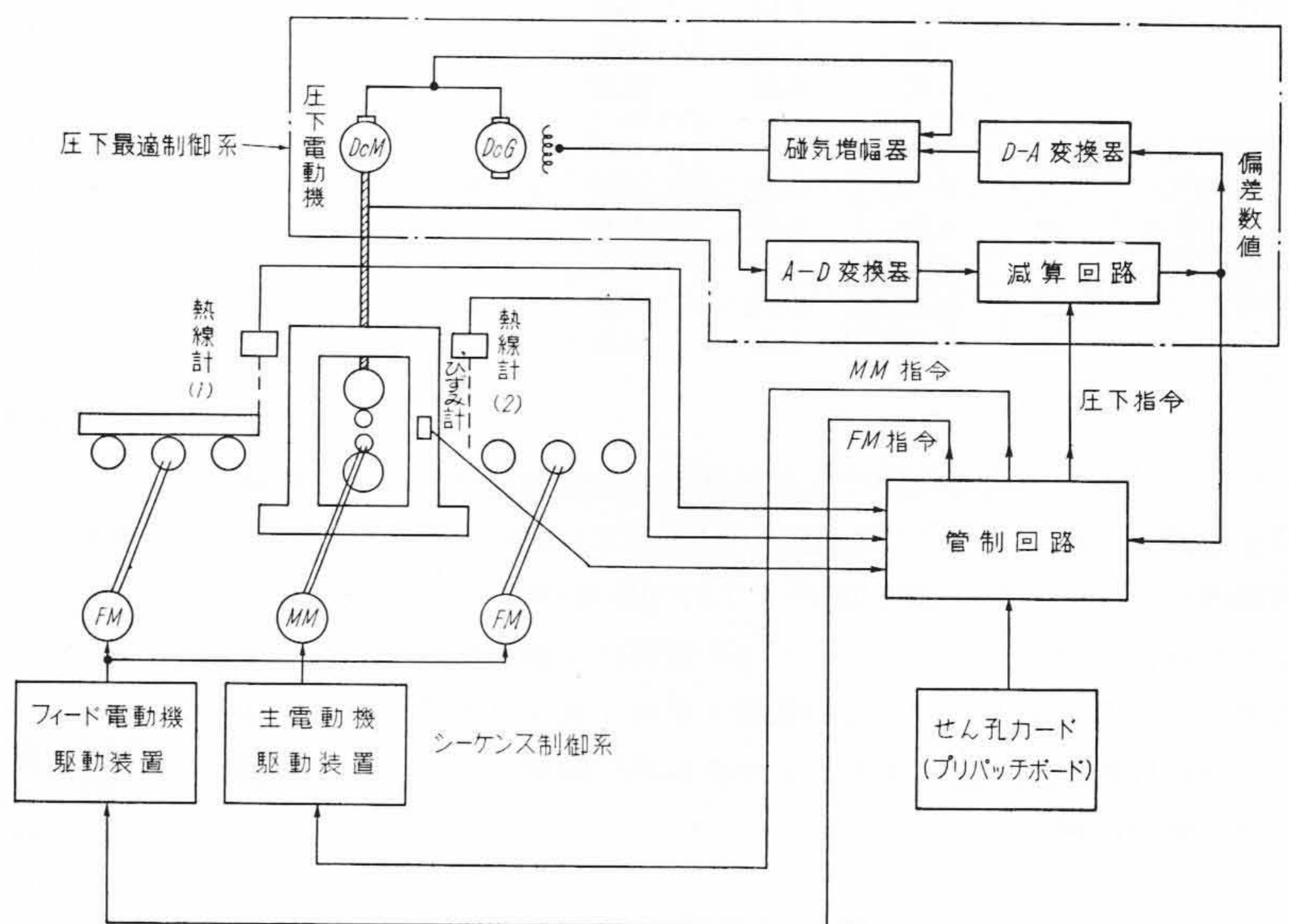
2.1 概 要

可逆粗圧延機において、圧延作業はあらかじめ定められた圧延スケジュールに従い、二、三人の運転者により数パスないし十数パスの圧延工程を繰返し、所定の寸法に仕上げている。プログラム制御とはこれら圧延スケジュールの最良の状態をあらかじめせん孔カードあるいはプリパッチ・ボードなどに記憶しておき、その動作をプログラム通りに再現させ最終製品を作る自動操作のことである。

可逆粗圧延機の駆動電気設備は圧延機の形式により異なるが、おもな構成は第1図に示すように、圧延を行う主ロールを駆動する主電動機、圧延ロール開度を調整する圧下電動機、素材を圧延機の前後に移動させるためのフィード・ロール電動機などがある。これ以外にサイド・ガイド駆動用電動機あるいは縦ロール駆動用電動機などもあり、これらの各電動機は種々の圧延スケジュールに応じて次のような動作をする。

- (1) 主電動機の正逆転
- (2) フィード・ロール電動機の正転、停止、逆転
- (3) (1)および(2)の速度の選定
- (4) 主ロール開度の調整を行うための圧下電動機の運転

* 日立製作所日立研究所



第1図 可逆圧延機の自動プログラム運転装置

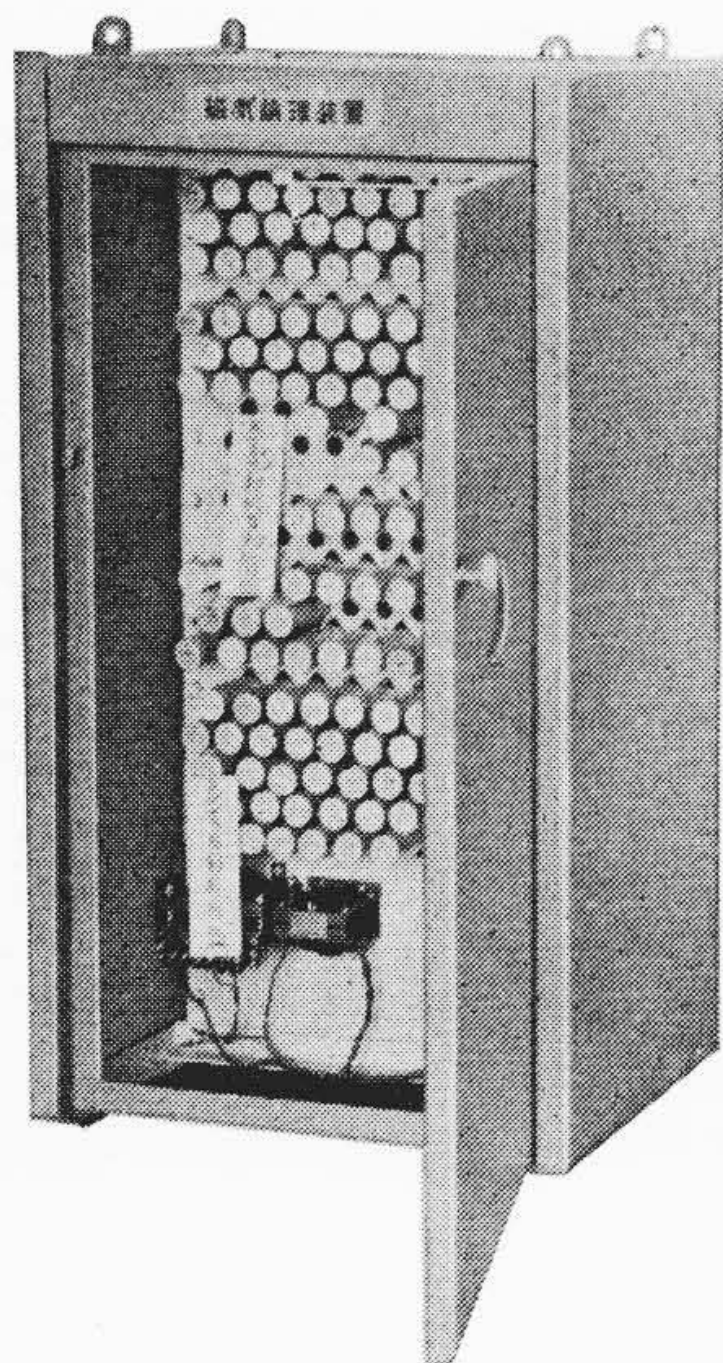
これらのほかに一般には次の動作を行う。

- (5) エッジ・ロールの開度の設定
- (6) 主ロールに対するエッジ・ロール速度の比率の設定
- あるいは
- (7) サイド・ガイドの動作およびフィンガの動作

圧延スケジュールが定まると、各圧延工程におけるこれら電動機の動作および圧延スケジュールに応ずる一連のシーケンス動作を、熱線計、ひずみ計などの素材位置検出器の信号、圧下完了信号などにより進める。

このうち、主ロール開度の調整（ならびにエッジ・ロール開度の調整）は、素材の温度低下を防ぎ、製品寸法の均一性を維持する目的から、短時間に高精度の位置決めを要求される。このため制御系をデジタル・サーボ機構とし、粗調整最適制御により短時間の位置決めをやり、サンプリング制御方式による微調整制御により精度を出すようにしている。圧下制御はこのように高度の技術を要求されるので後述する。

以上プログラム制御を行えば、圧延作業を熟練者が最良の状態で作業しているとおり、せん孔カード、プリパッチ・ボードなどにプログラムでき、運転者の熟練度や疲労に関係なく、各パスごとにあらかじめ計算した最良の状態に各作業量を設定できる。したがって、最終製品の寸法の均一性が保たれて品質を向上でき、圧延作業中の無駄時間を減少できるなど、品質の均一化および生産性を向上



第2図 ヒタログ式プログラム制御装置

することができる。これらの状態はせん孔カードなどの記憶媒体に、永久に保存でき、必要なときに任意の場所で再現できる。

2.2 特 長

プログラム自動制御装置は主として次のような特長をもつ、

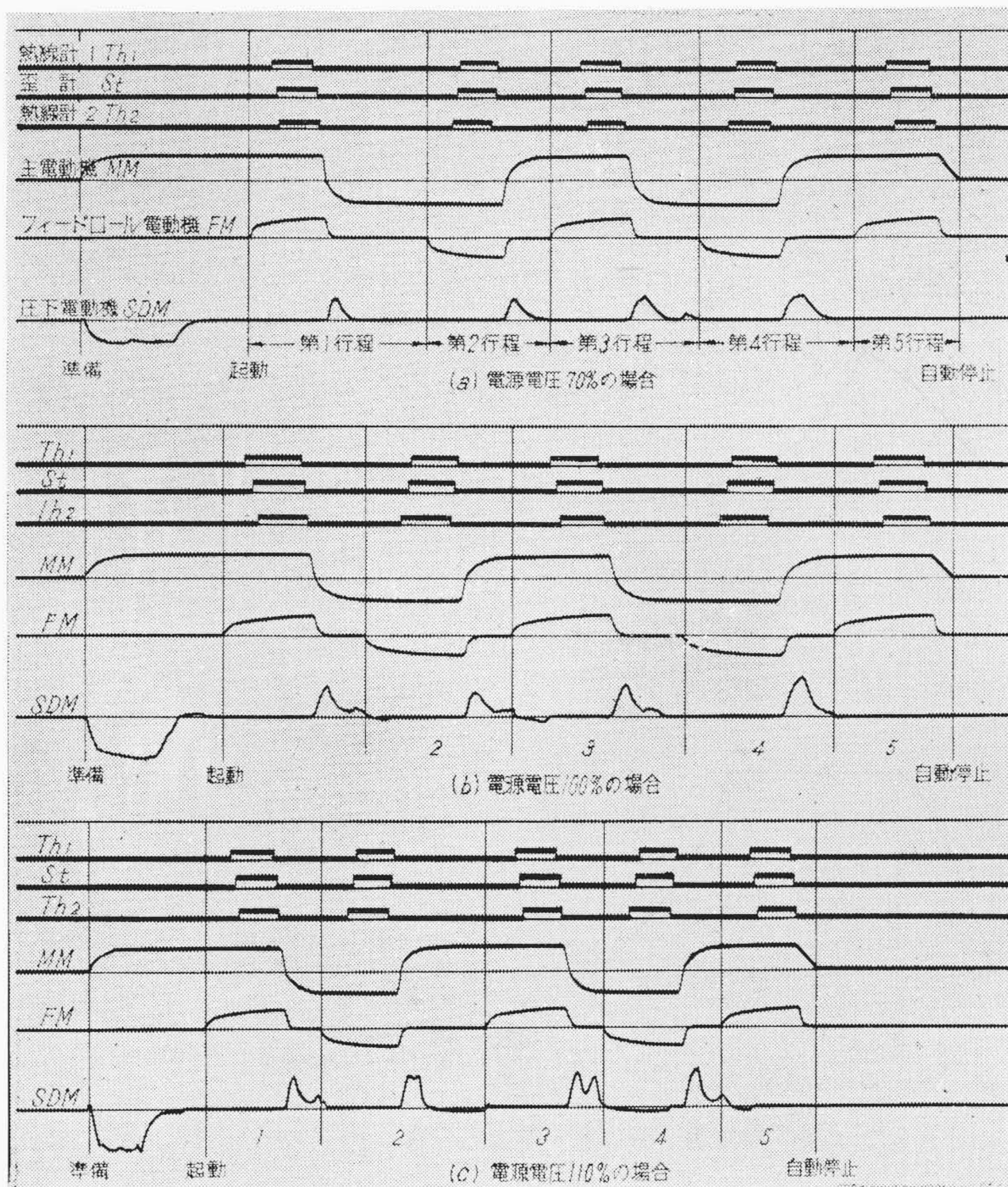
- (1) 圧下ロールの位置決めは演算方式によるデジタル・サーボ機構を用いたデジタル制御方式である。
- (2) 圧下制御装置と圧延シーケンス制御の連動を自動化した完全プログラム自動制御方式である。
- (3) 制御回路はトランジログ、ヒタログ、磁気増幅器などによる無接点制御方式である。

デジタル方式を採用しているので圧下ロール間げきの高精度、短時間の位置決めが可能である。指令の与え方は絶対値指令方式であるので圧下動作の繰り返しに対し誤差が積分されることはない。本装置には全般的に無接点継電器トランジログおよびヒタログを用い、接点のような消耗部分がないので長寿命、高信頼性が期待できる。またじんあいの多い場所、ガスのある場所にも使用でき、保守、点検の容易なことはいうまでもない。なおプリント板のプラグイン式になっていて取扱いやすく、電源投入と同時に動作して消費電力は小さい。

2.3 構成および動作

第1図に示したプログラム運転装置のうち、鎖線で囲まれた部分はデジタル方式の圧下制御系である。ロール間げきはアナログ→デジタル変換器⁽⁵⁾ (A-D変換器)により数値に変換される。圧下指令数値とこの帰還数値を減算回路に⁽⁶⁾⁽⁷⁾ 入れ偏差数値をうる。これをデジタル→アナログ変換器 (D-A変換器)によりアナログ量に変換し最適制御装置を経て磁気増幅器に入れる。磁気増幅器、直流発電機、直流電動機(圧下電動機)はワード・レオナード方式の電圧帰還制御回路となっており、加減速時間を短縮するとともに加減速曲線の直線化を行っている。

第1図において鎖線で囲まれた以外の部分はシーケンス制御系であり、せん孔カードに記憶された圧延スケジュールに従って一連のシーケンス動作を具現する。各パスのシーケンス動作は検出器および圧下制御系の位置決め信号により行う。検出器には熱線計、ひずみ計などを用い、ハウジング両側に位置した熱線計により素材がテーブルのいずれの側にあるか判断し、ひずみ計により圧延開始と終



第3図 プログラム制御実験結果の一例

了を判断させる。これらの信号は管制回路に入り、せん孔カードに記憶された符号を解読してシーケンス動作の指令信号を作る。これにより各パスが進められ最終パスが終了すると、リセット信号により全回路がリセットされ作業が完了する。

2.4 実 験 結 果

磁気論理要素を用いた試作プログラム制御装置の外観を第2図に示す。実験は5パスの圧延工程を仮定し、シーケンス動作のうち特に熱線計、ひずみ計の検出器と主電動機、フィード・ロール電動機、圧下電動機についてオシログラフにより測定した。その結果を第3図に示す。装置は正常にまた確実に動作し、所定の性能を収めることができた。電源電圧変動に対しても70~110%では確実に動作した。

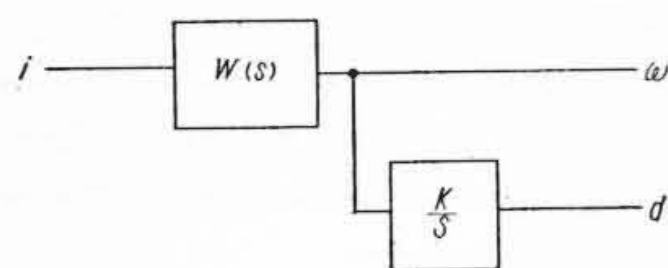
以上のプログラム制御装置のうち圧下制御系は技術的に重要な働きをするのであらためて次に検討する。

3. 自動圧下制御装置

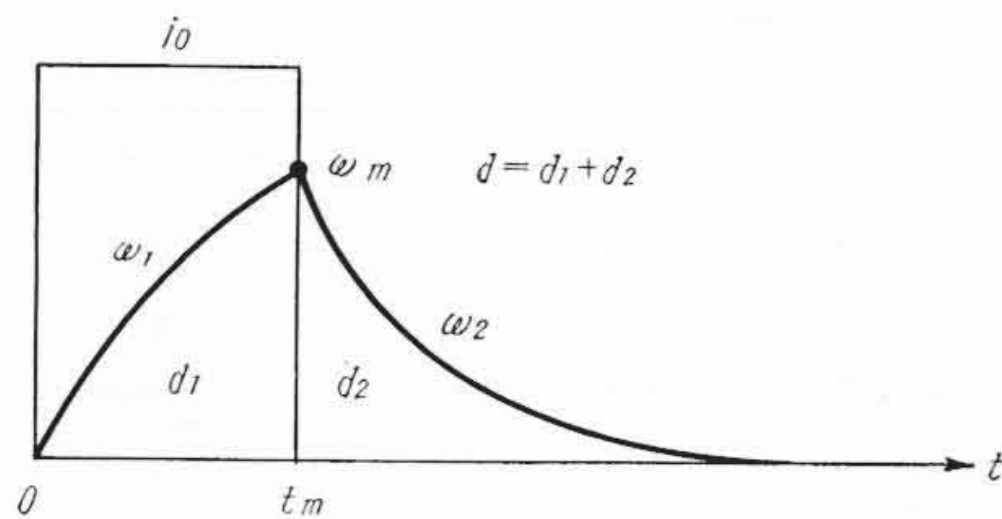
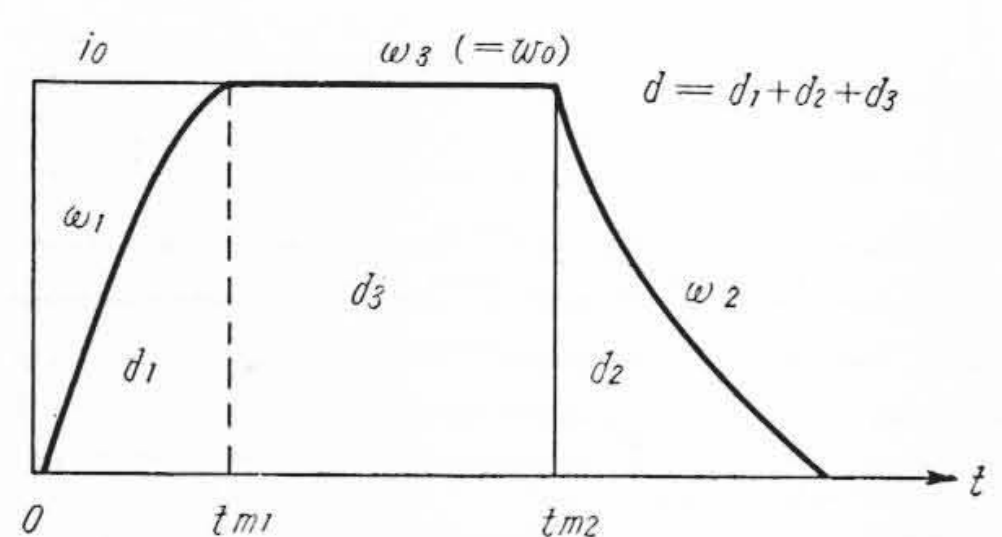
3.1 概 要

可逆圧延機では多種多様の圧延工程に応じて圧下量を調整して工程を進めてゆく。圧下制御は一種の位置決め制御であるが、鋼塊の温度低下を防ぎ圧延時間を短縮する目的から、位置決めに要する時間にも制限を受ける。すなわち圧下制御では短時間に高精度の位置決めが要求される。

そこでわれわれは独自の方法により最適制御方式の粗調整装置とそれに連動したサンプリング方式の微調整装置によりこの問題を解決した。粗調整装置は圧下量に応じて必要なノッチ・オフの位置を演算装置により判断させて最適の指令信号により粗位置調整をする。これのみでは種々の原因で精度に影響するので粗調整装置に連動した微調整装置により、位置決め点に応じた適当な大きさをもつ



第4図 圧下制御系のブロック線図

(A) $\omega_m < \omega_0$ の場合(B) $\omega_m = \omega_0$ の場合

i_0 = 指令信号
 $t_m = i_0$ の存在する時間
 ω_1 = 角速度 (増加)
 $\omega_m = t = t_m$ の時の ω_1
 ω_2 = 角速度 (減少)
 $d_1 = 0 \leq t < t_m$ の移動量
 $d_2 = t \geq t_m$ の移動量
 d = 全移動量
 ω_3 = 基本角速度
 $d_3 = \omega_3$ による移動量

第5図 制御系の応答

間欠的信号を与えて精密な位置決めを行ない精度が出るとこの操作は自動的に停止する。

3.2 位置決め理論

位置決め制御系のブロック線図を第4図に示す。図において $W(S)$ は制御系の伝達関数、 i は制御入力信号、 ω は圧下電動機の回転角速度、 d は圧下ロールの移動距離、 K は歯車系の減速比である。

伝達関数 $W(S)$ が与えられると i に対する応答 ω および d が一義的に求まる。いま矩形信号 i に対する応答 ω を第5図(A)、(B)に示すようなものとする。

第5図(A)で、 $0 \leq t < t_m$ を ON 期間

$t \geq t_m$ を OFF 期間

同図(B)で、 $0 \leq t < t_{m1}$ を ON₁ 期間

$t \geq t_{m2}$ を OFF 期間

$t_{m1} \leq t < t_{m2}$ を ON₂ 期間

ということにする。各期間の初めを時間の起点にとる。

(1) $\omega_m < \omega_0$ のとき [第5図(A)]

ON 期間最終値の回転角速度 ω_m が基本角速度 ω_0 に達しない場合を考える。

(A) ON 期間

基本制御電流を i_0 とすると制御電流 i は次のように表わされる。

$$i = i_0, [i(-0) = 0] \dots\dots\dots (1)$$

$$\omega_0 = K_1 i_0 \dots\dots\dots (2)$$

ただし K_1 : 制御系の増幅度

この場合回転角速度は一般に次のように表わすことができる。

$$\omega_1(t) = \omega_0 \left\{ L^{-1} \frac{1}{S} W(S) \right\}, \left[\omega_1(0) = 0, \omega_1(t_m) = \omega_m \right] \dots\dots\dots (3)$$

またこのときの移動量は次のようにして求められる。

$$d_1 \Big|_{\omega_m} = \omega_0 K \left\{ L^{-1} \frac{1}{S^2} W(S) \right\} \Big|_{t=t_m} \dots\dots\dots (4)$$

(B) OFF 期間

$$i = 0, [i(-0) = i_0] \dots\dots\dots (5)$$

$$\omega_2(t) = \omega_m \left\{ L^{-1} \frac{1}{S} \left(\frac{1}{S} - W(S) \right) \right\}, [\omega_2(0) = \omega_m] \dots\dots (6)$$

$$d_2 \Big|_{\omega_m} = \omega_m K \left\{ L^{-1} \frac{1}{S^2} \left(\frac{1}{S} - W(S) \right) \right\} \Big|_{t \rightarrow +\infty} \dots\dots (7)$$

したがって全移動量 d は次のようになる。

$$d \Big|_{\omega_m} = d_1 + d_2 \dots\dots\dots (8)$$

(2) $\omega_m = \omega_0$ のとき [第5図(B)]

ON₁ 期間の回転角速度を ω_1 とする。

$$\frac{\omega_0 - \omega_1}{\omega_0} \leq \nu \dots\dots\dots (9)$$

ここに ν : 定数

ならしめる時間および角速度をそれぞれ次のように表わす。

$$t = t_{m1} \dots\dots\dots (10)$$

$$\omega_1 = \omega_{m1} \dots\dots\dots (11)$$

(A) ON₁ 期間

$$i = i_0, [i(-0) = 0] \dots\dots\dots (12)$$

$$\omega_1(t) = \omega_0 \left\{ L^{-1} \frac{1}{S} W(S) \right\}, \left[\omega_1(0) = 0, \omega_1(t_{m1}) = \omega_{m1} \right] \dots\dots (13)$$

$$d_1 \Big|_{\omega_0} = \omega_0 K \left\{ L^{-1} \frac{1}{S^2} W(S) \right\} \Big|_{t=t_{m1}} \dots\dots\dots (14)$$

(B) OFF 期間

$$i = 0, [i(-0) = i_0] \dots\dots\dots (15)$$

$$\omega_2(t) = \omega_0 \left\{ L^{-1} \frac{1}{S} \left(\frac{1}{S} - W(S) \right) \right\} \dots\dots\dots (16)$$

$$d_2 \Big|_{\omega_0} = \omega_0 K \left\{ L^{-1} \frac{1}{S^2} \left(\frac{1}{S} - W(S) \right) \right\} \Big|_{t \rightarrow +\infty} \dots\dots (17)$$

(C) ON₂ 期間

$$i = i_0 \dots\dots\dots (18)$$

$$\omega_3(t) = \omega_0 \dots\dots\dots (19)$$

$$d_3 \Big|_{\omega_0} = \omega_0 K t_{m12} \dots\dots\dots (20)$$

ここに t_{m12} : ON₂ 期間の時間

したがって全移動量は次のようになる。

$$d \Big|_{\omega_0} = d_1 + d_2 + d_3 \dots\dots\dots (21)$$

(1) および (2) において、逆に d が与えられるとそれに対応した d_2 が存在する。この d に対する d_2 の関係を第6図(A)に、また電動機速度曲線との関係を同図(B)に示す。ただし(A)の横軸は位置の次元をもち、また(B)の横軸は時間の次元をもち左を正の方向にとってある。

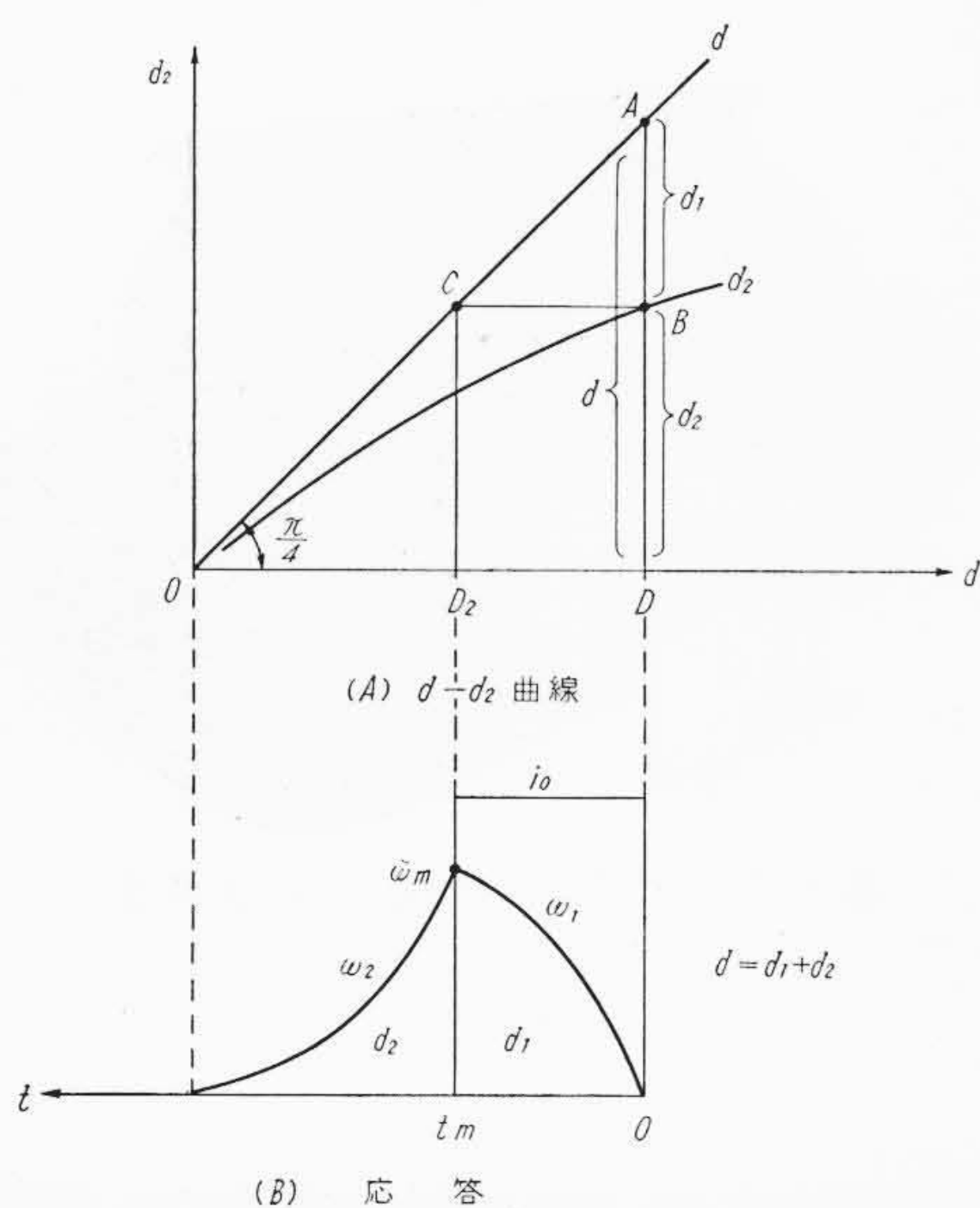
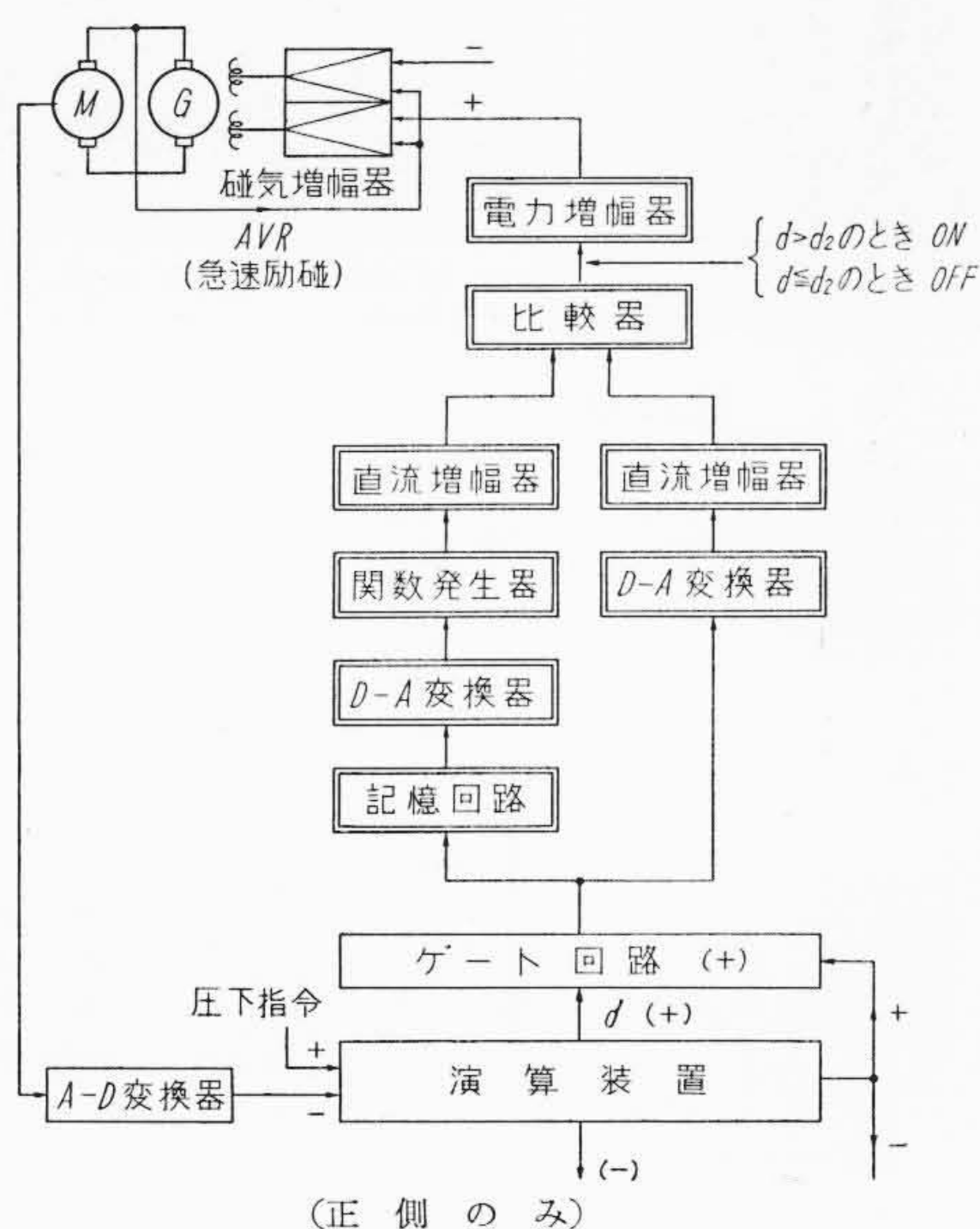
第6図(A)は指令信号 i_0 を与えて d だけ圧下しようとするには、位置決め点より手前 d_2 の位置で指令信号を0にすれば圧下量 d に対して最適の位置決めができることを表わしている。図(A)では時間的な関係は表わされていないので、回転角速度の時間的な関係を表わしたのが同図(B)である。

3.3 構成

3.2 で述べたように距離 d だけ移動するとき、ノッチ・オフしてからの移動量 d_2 は一義的に定まりその関係は第6図のようになる。第1図の減算回路出力の偏差数値は位置決め点までの距離を表わしているのでこの信号を利用して第6図(A)の d 曲線、 d_2 曲線に相似した量を作る。そしてある移動量 d に対する d_2 の量を記録しておき、これを d の量と比較して次のような信号を出すようにすればよい。

$$\begin{aligned} d > d_2 \text{ のときは } i &= i_0 \\ d \leq d_2 \text{ のときは } i &= 0 \end{aligned} \dots\dots\dots (22)$$

このような動作を具現するためのブロック線図を第7図に示す。こ

第6図 $d-d_2$ の 関 係

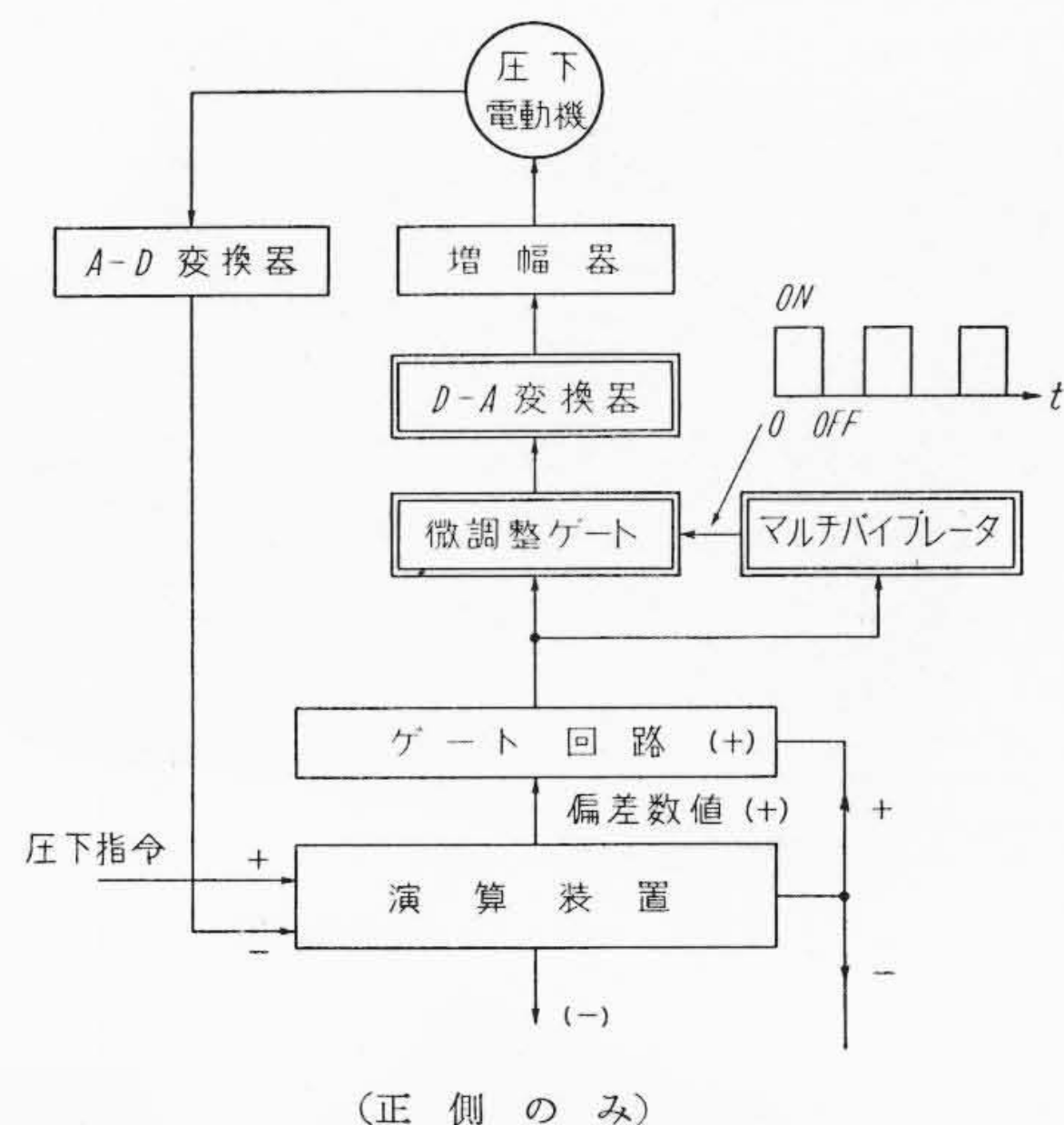
第7図 粗調整制御回路のブロック線図

の装置を粗調整装置ということにする。

粗調整装置によれば最適制御により短時間に位置決めできる特長を有するが、位置決め精度は d_2 曲線の近似度や圧下電動機の機械的外乱などに影響される。このため圧下電動機駆動回路を電圧帰還方式として電気的な変動を避け、さらに加減速曲線を直線化して d_2 曲線の近似度をよくしている。しかしなお粗調整制御系は減速開始後の位置決め動作が開回路制御系となっているので、0.1%以上を必要とする高精度位置決めに対しては完全な保証は困難である。そこで以下述べる微調整制御系によって位置誤差を帰還する閉回路系をつくり最終的な精度を保証している。

慣性の大きい電動機を用いて精密な位置決めをするためには、ごく低速度を安定に作る必要がある。ところが機械系の動摩擦と静摩擦の大幅な相異や電気系のヒステリシス特性などのため電動機の微速度運転を安定に行うことはきわめてむずかしい問題である。このためサンプリング制御によるパルス信号駆動方式を採用している。

第8図に示すようにマルチバイブレータに⁽⁸⁾より矩形波状信号を作りこれによりゲートを開閉した信号を $D-A$ 変換器によりアナログ量に変え電動機の指令信号とする。この装置を微調整装置と呼ぶことにする。微調整信号は位置に応じて大きさの異なる信号を $D-$



第8図 微調整制御回路のブロック線図

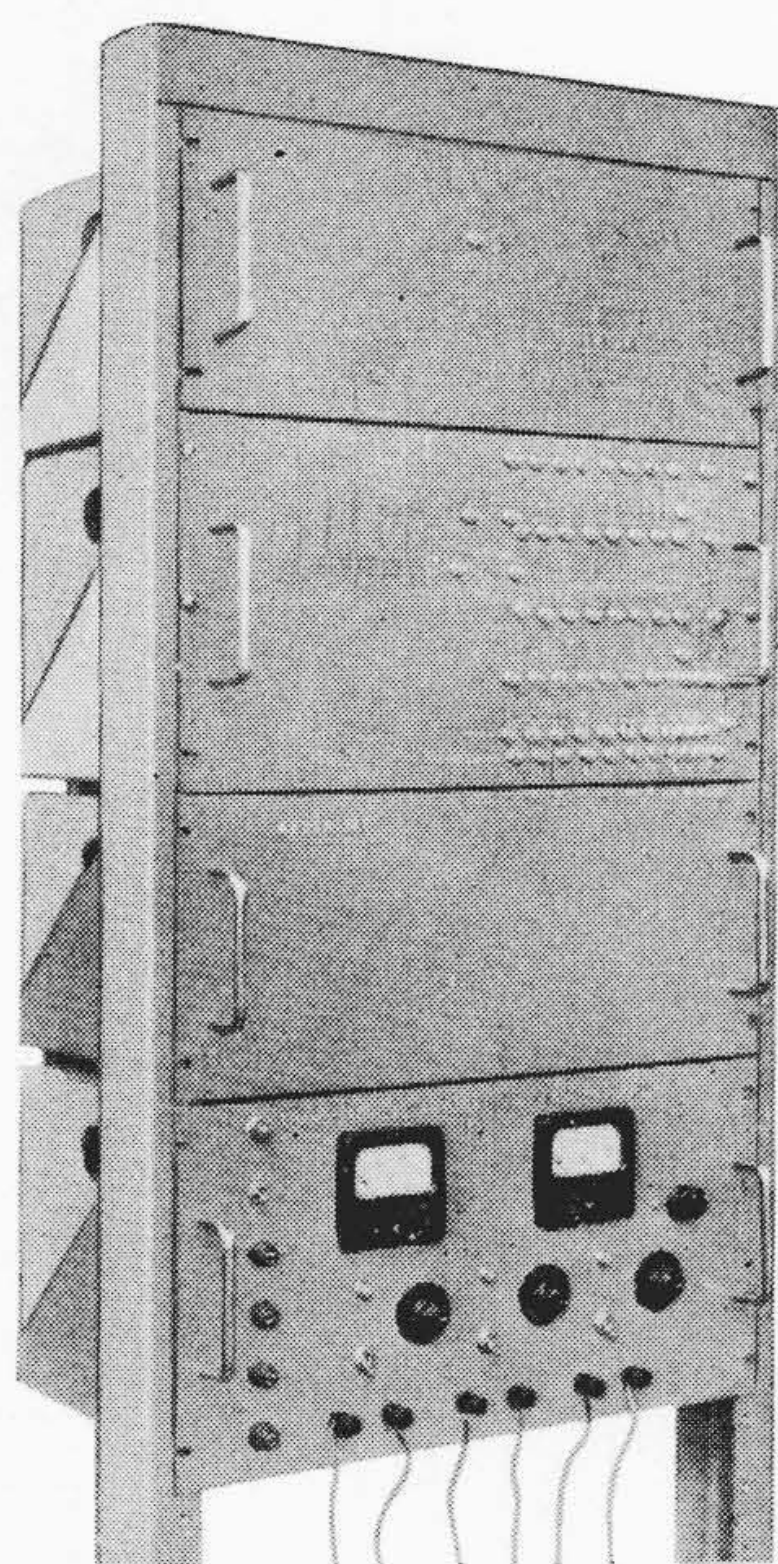
A 変換器より出し、その信号の幅および周期はマルチバイブレータの発振周期およびデューティ・ファクタを変えることにより任意に調整できる。微調整装置により最終的な位置決め精度を ± 1 デイジットにすることができる。

3.4 試 作 装 置

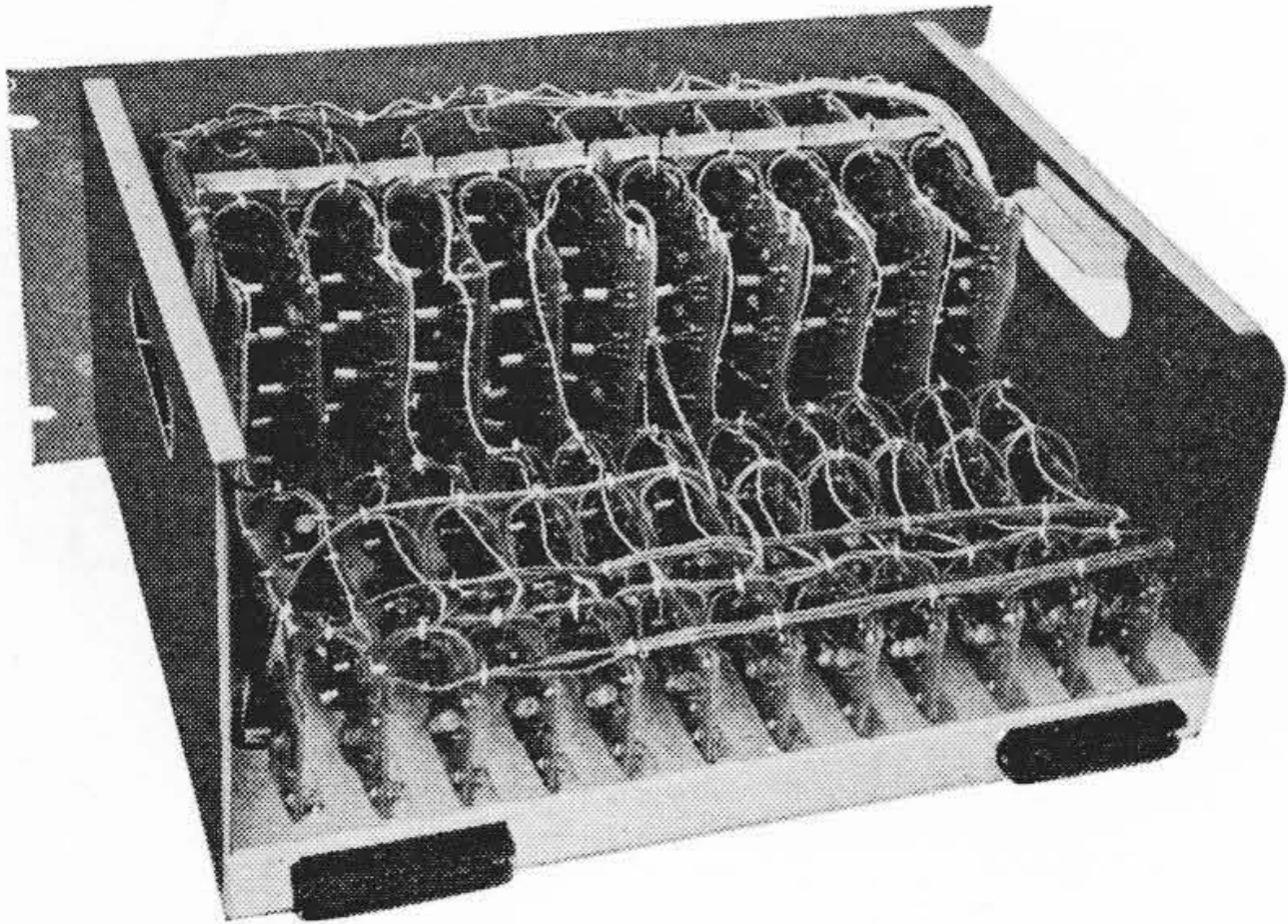
実験用に試作した圧下最適制御装置を第9図に示す。これはすべてトランジスタおよびダイオードよりなる半導体により構成されている。演算装置はトランジスタ式全加算器が単位となり第10図のような構造になっている。 $D-A$ 変換器は精密なダイオード・クリップを用いた高精度、高速度形のものである。関数発生器は折線近似形のもの

を使用しているがサーボ系が急速励磁方式になっているので d_2 曲線が直線化して近似は非常によい。直流増幅器⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾は直結方式で、簡明な回路であるにもかかわらずドリフトは小さく高精度である。比較器は電圧比較方式で高精度の性能を有する。これらの各トランジスタ装置は氷点下から高温の周囲条件に対し性能が保証されている。 $A-D$ 変換器は符号化板方式で第11図に示すような構造を有する。指令回路、記憶回路などは無接点継電器トランジログを使用している。トランジログは第12図のようなプリント板状になっており、その論理記号と入出力特性による動作のあらましを第13図に示す。このほかにバッファ要素、パワー要素、複合回路などが用意されている。なお微調整制御に用いるマルチバイブレータは普通弱电回路に用いられるものとは本質的に原理、回路構成が異なる。各構成要素が論理要素トランジログよりなっていて、その構成は第14図に示すとおりである。 W は発振開始信号で W が“1”なれば発振、 W が“0”なれば発振を停止する。 X, Y はそれぞれ遅延要素⁽¹¹⁾ D_1, D_2 の出力信号、 Z は記憶要素出力信号すなわち本発振器の出力信号である。遅延要素は第15図に示す構成で、限時動作瞬時復帰のリレーと同じ動作をする。

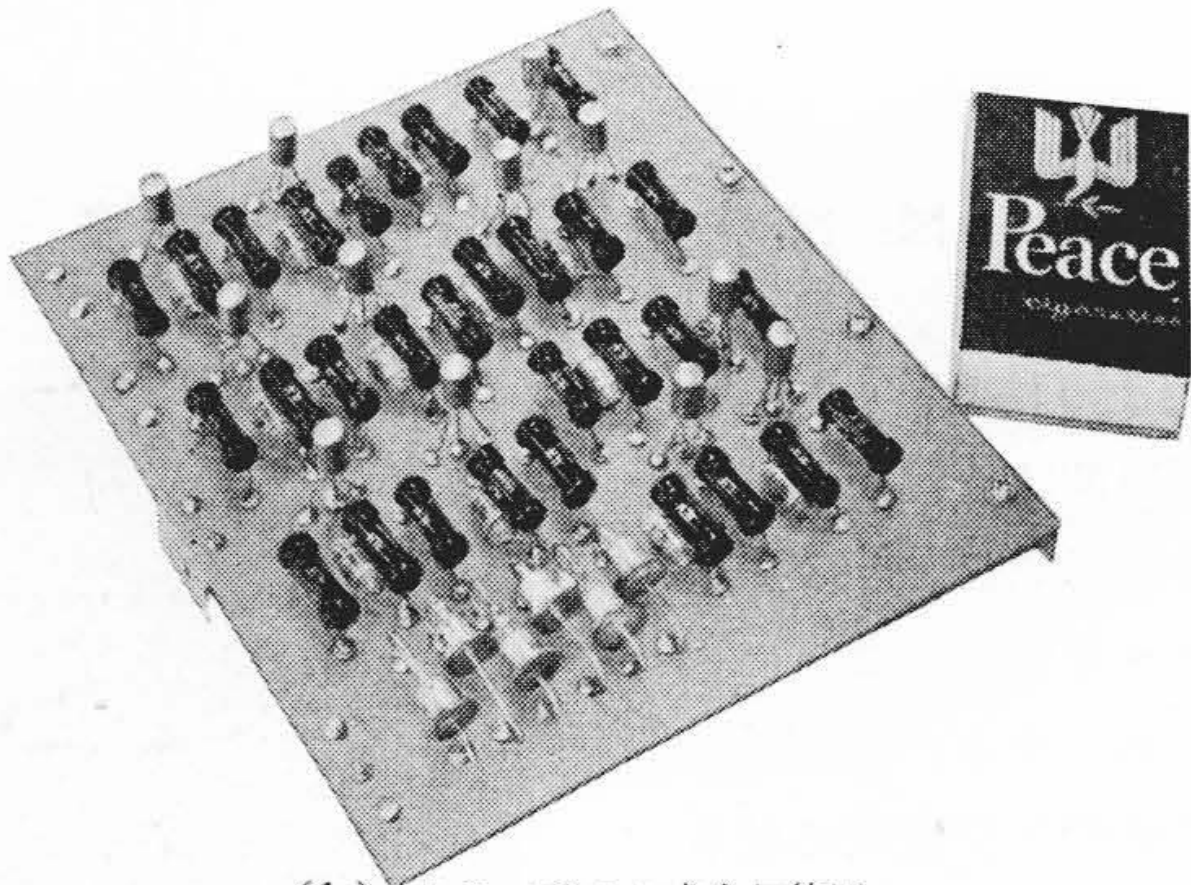
マルチバイブレータ回路各部の信号波形を第16図に示す。この図よりわかるように発振周期は D_1, D_2 の遅延時間 T_{d1}, T_{d2} を加減



第9図 トランジスタ式圧下最適制御装置



(a) トランジスタ式演算装置

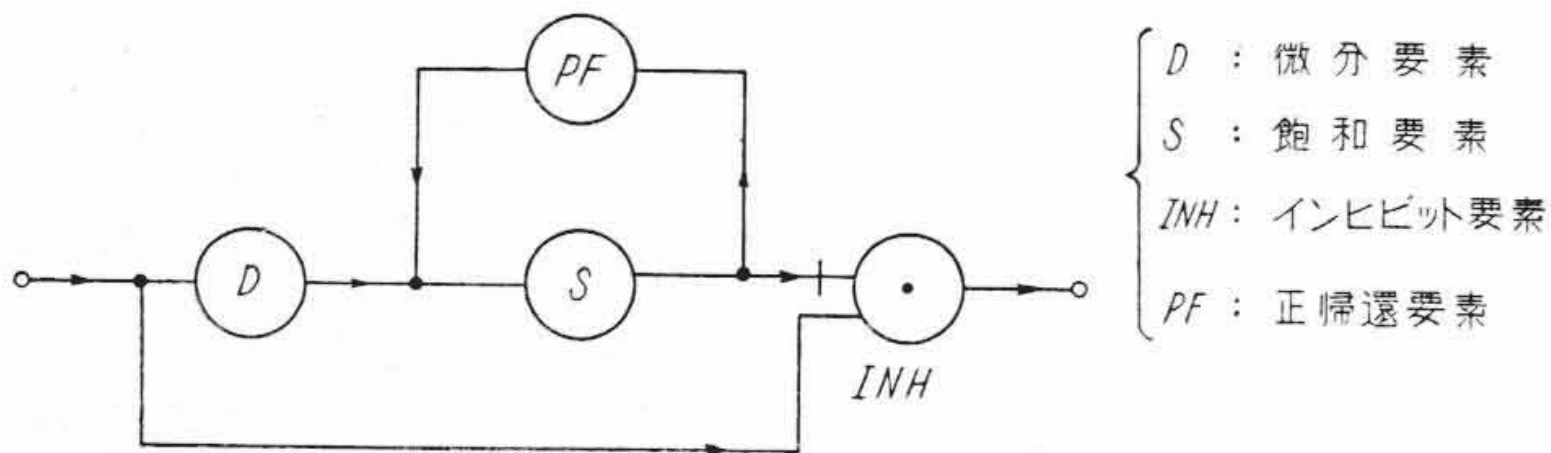


(b) トランジスタ式全加算器

第 10 図 演 算 装 置

	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)
要素	NOT 要素	OR 要素	AND 要素	記憶要素	遅延要素
論理記号					
入出力特性					
論理式	$Z = \bar{X}$	$Z = X + Y$	$Z = X \cdot Y$	—	—

第 13 図 トランジログの記号と特性

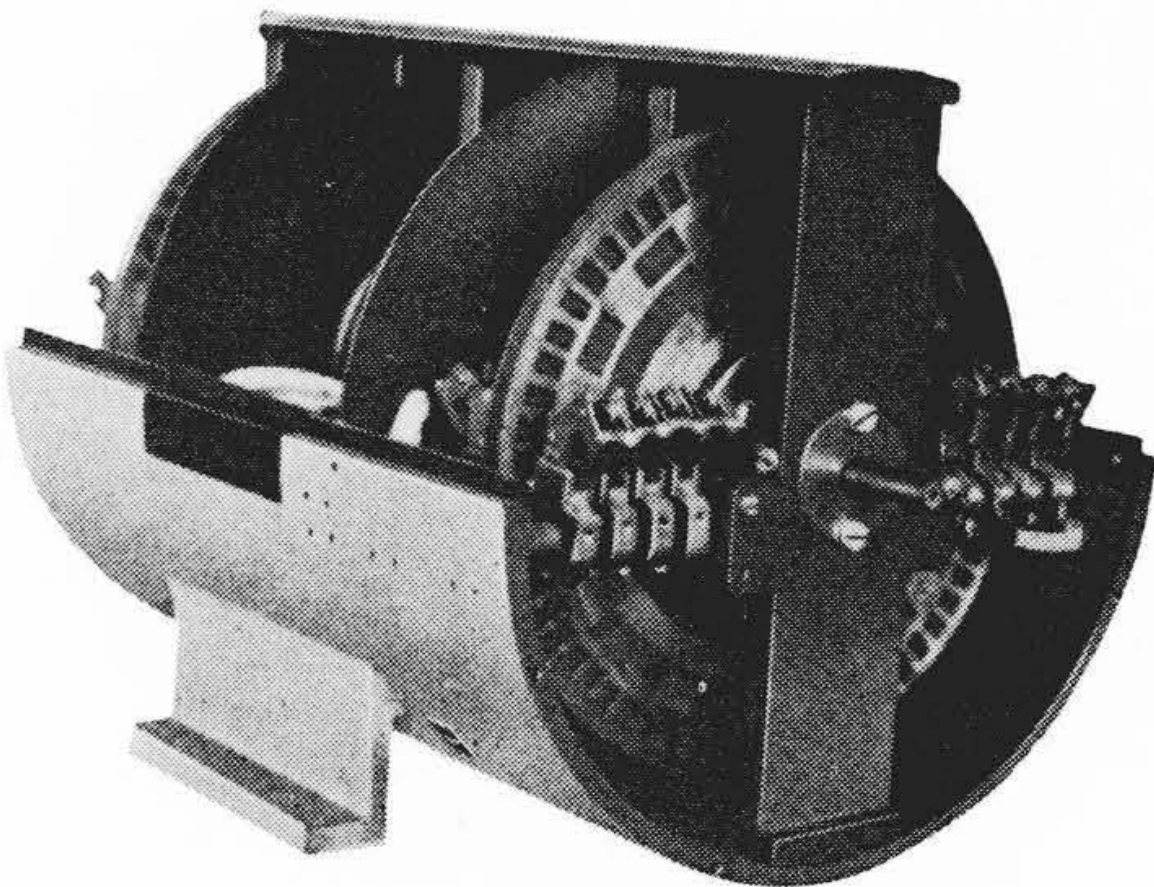


第 15 図 遅延回路のブロック線図

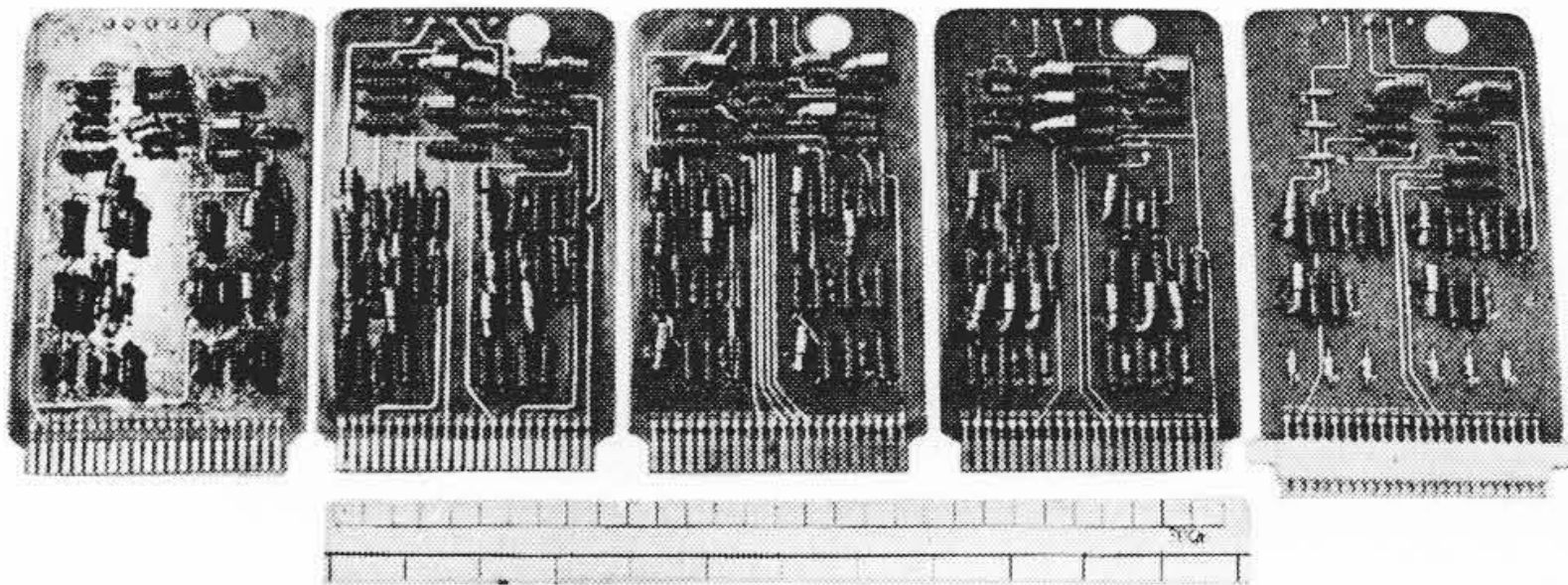
することにより調整できデューティ・ファクタは T_{d1} と $T_{d1}+T_{d2}$ の比によってきまる。

3.5 圧下最適制御装置のまとめ

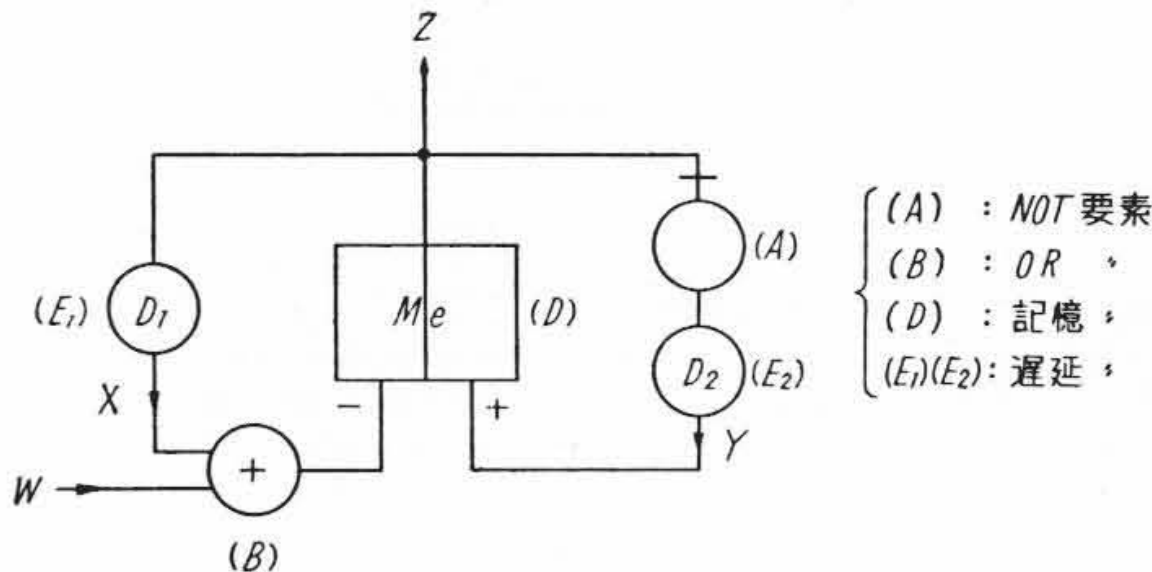
圧下最適制御装置は前節 3.3 で述べたように粗調整装置と微調整装置からなっている。圧下量に応じた最適の粗調整信号が出るが、その後論理的判断により自動的に微調整信号に切り替え、位置誤差を帰還する閉回路系をつくり最終精度を出して短時間に位置決めする。この模様を第 17 図に示す。



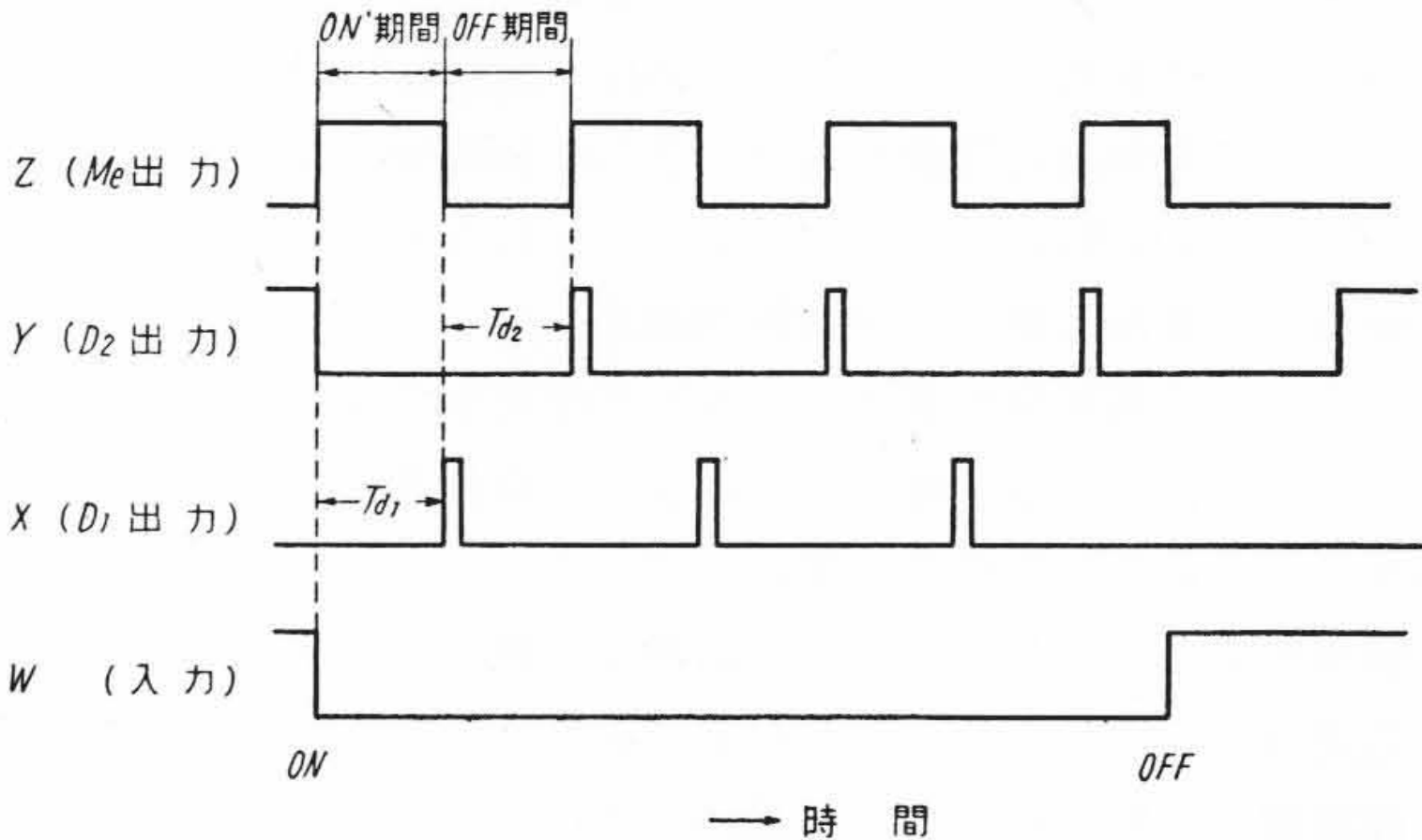
第 11 図 符号化板方式 A-D 変換器



第 12 図 トランジログ



第 14 図 マルチバイプレータの論理回路



第 16 図 マルチバイプレータ回路各部の信号

3.6 実験結果および検討

圧下最適制御装置の実験結果の一例を第 18 図に示す。圧下電動機制御系は実機と同等の伝達関数をもつように調整し、この相似系について実験を行った。第 18 図は圧下を続けて与えた場合の動作状態を表わしている。d 曲線①と d₂ 曲線②を比較して粗調整信号

③を出し、粗調整信号がOFFして微調整信号④がでる。粗調整信号と微調整信号により圧下電動機が⑤のような速度曲線を書いて位置決めする。位置決めする場合精度が出たか否かをみるため演算装置の各ビットの出力信号をOR要素を通して⑥のように記録した。したがって偏差数値が0になれば⑥の信号は0になる。この結果装置が予定通り確実に動作することを確認できた。

4. 結 言

以上粗圧延機プログラム制御装置について構成、動作および実験結果をあげ、特に技術的に多くの問題を有する圧下制御装置について理論的検討をなし装置の構成、動作および実験結果の一例をあげた。いずれも予定通りの結果をうることができた。

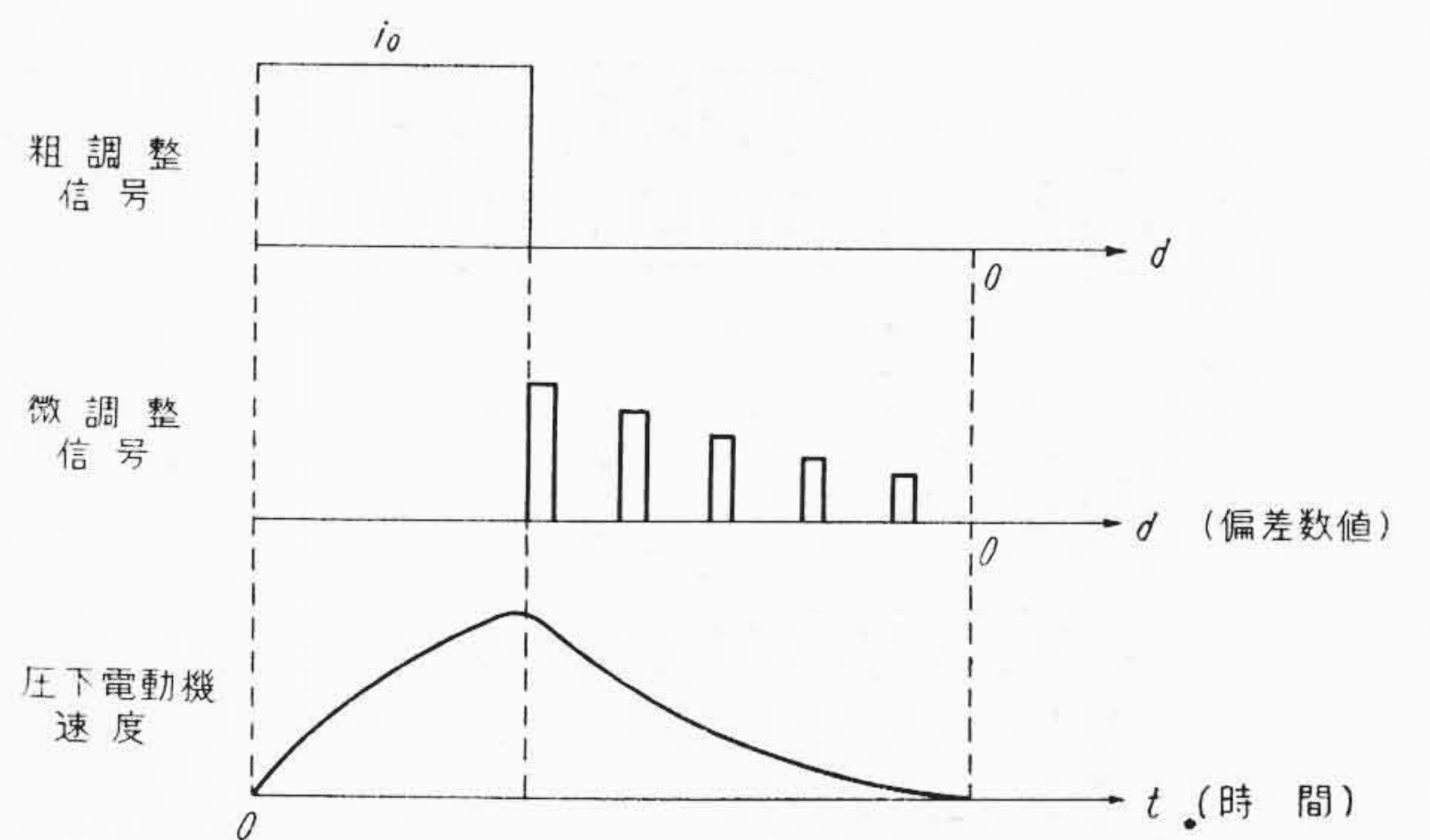
プログラム制御装置は種々の圧延動作を機械に実現させるためのシーケンス制御系と、圧下ロール間げきを短時間に高精度を出して位置決めさせるデジタル・サーボ系に分けて考えることができる。シーケンス制御系については基本的な圧延手順および動作例により実験を行ったが、実用上種々変形した手順、動作に対する要求にも容易に応じられるものである。自動圧下制御に用いたデジタル・サーボ系はこれを単独で用いることもできるが、さらに類似の位置決め装置にも利用しうるところが多い。

なお本装置はすでに多数の受注例があり、製品に関する具体的な事項については2,3箇月のうちに発表の予定である。

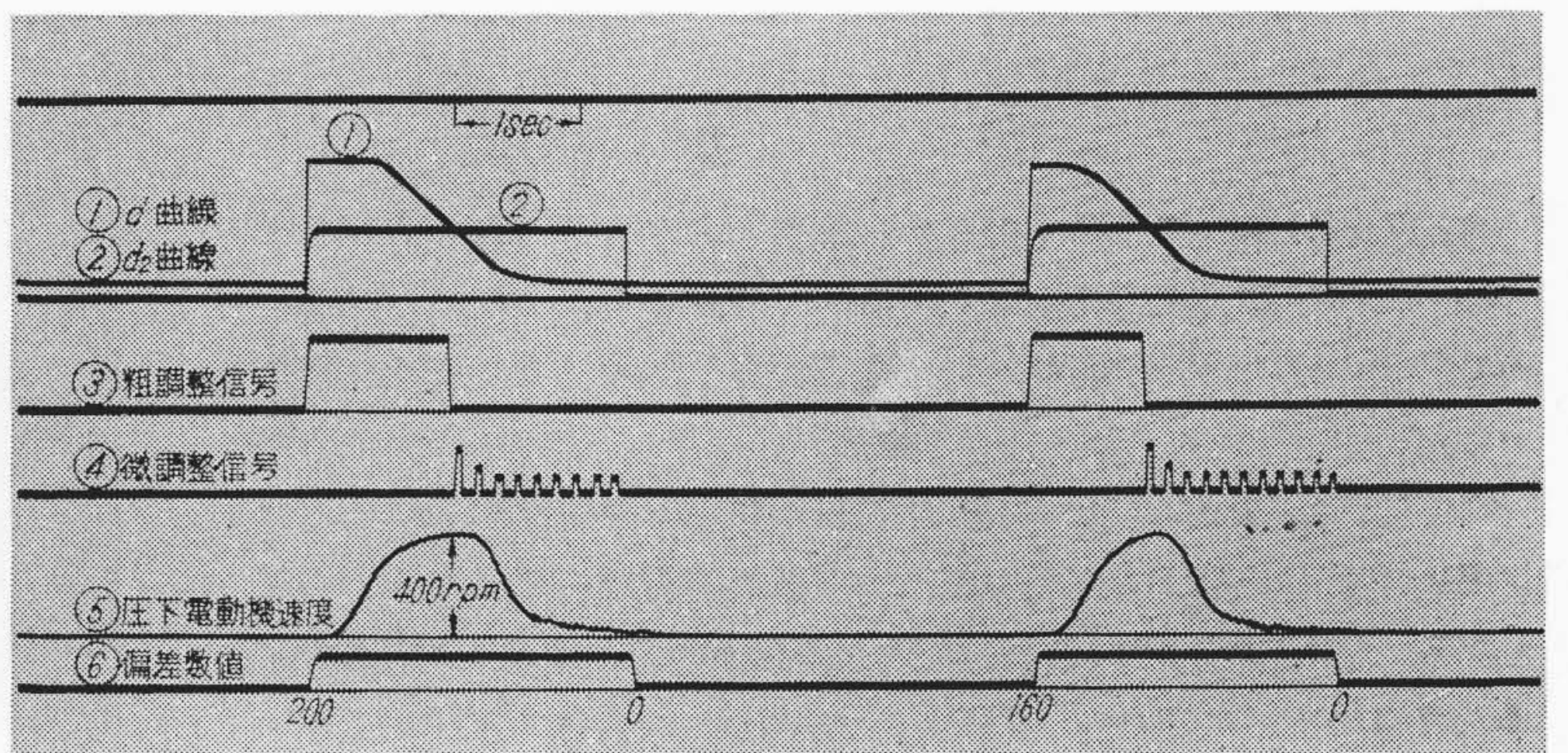
以上の研究にあたっては日立製作所日立研究所小林部長ならびに日立工場泉部長、平川副部長、松垣課長のご指導をいただき、また実験には大沢、株木両君の労苦に負うところが大きい。ここに厚く感謝の意を表する。

参 考 文 献

(1)~(6) 特許出願中



第17図 圧下制御信号と圧下電動機速度の関係



第18図 圧下最適制御装置の実験結果の一例

(7) 小西：第2回自動制御連合講演会，251（昭34-11）
(8)~(11) 特許出願中



特 許 の 紹 介



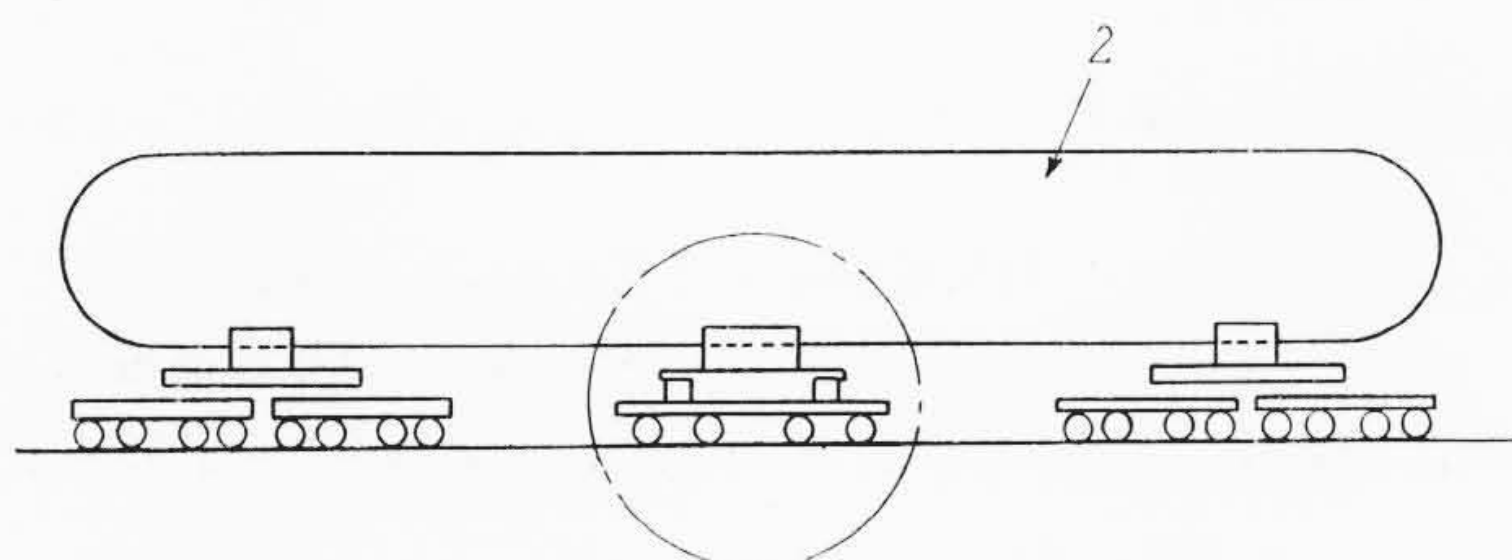
特 許 第 257474 号

中 村 陽 一

長 大 物 輸 送 用 中 間 台 車

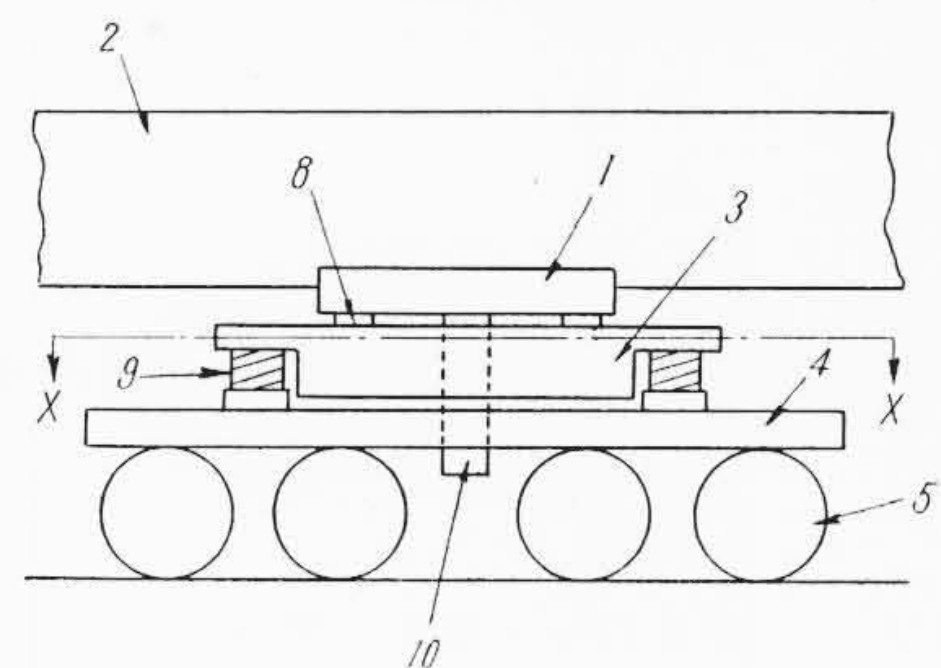
一般にボイラードラムなどのように長大でかつ重量を有する物を、鉄道を利用して輸送する方法としては、輸送物自体を車体としその両端を台車にのせて輸送することが行われている。このような輸送方法においてはさらにその中間にも台車を設けることが望ましいが、中間に台車を設けた場合、直線部においてはなんら差つかえないが、曲線部にさしかかると同台車と貨物との間に偏倚が生じる不便がある。

この発明はこの点を解決した台車であって、1は上面で貨物2を支持する貨物受け台、3はこの受け台を支承する中間受け台、4は車輪5を装備した台車枠である。中間受け台3の中央部には横方向に細長く摺動溝6を有し、かつ複数個の凹部7に進行方向と同方向の軸を有するローラー8が取付けられている。9は中間受け台3を耐振動的に台車枠4に載置する緩衝体である。貨物受け台1には下側中心部にピン10を有しており、この貨物受け台1はピン10を中間受け台3に設けた摺動溝6に係合せしめ、かつ中間受け台3上のローラー8に進行方向と直角方向の移動のみが可能のように載置される。

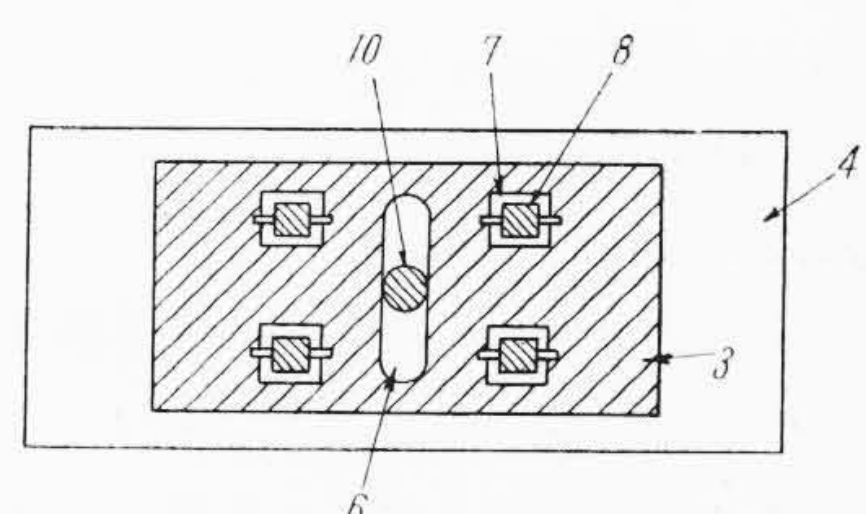


第1図

このような台車を第1図に鎖線円で示すように貨物2の中間を支持するように配置すれば、曲線部にさしかかった際に台車枠4と貨物2との間には偏倚を生ずるが、貨物受け台1は左右いずれの横方向にも摺動しうるので、貨物2を支持したまま台車枠4を移動する。したがって曲線部においても十分に台車の役を果たす。



X-X 断面



第2図