

熱間可逆圧延機のデジタル計算機による全自動化

The Full Automation System of Hot Reversing Mill by Digital Computer

坂口 邦治*
Kuniharu Sakaguchi

松井田 辰夫*
Tatsuo Matsuida

川野 滋祥**
Shigeyoshi Kawano

要 旨

熱間可逆圧延機の自動運転装置は、従来トランジスタ論理素子を使用したワイヤードロジック構成で製作され性能的には、品質の均一化、誤操作の防止に対して威力を発揮しているが、生産能率の点では、運転員による手動運転と比較していま一步の感があり、この意味で全自動化されている装置は少ないのが現状である。一方、計算機を使用した自動運転装置が国内外において活発に検討されているが、この理由としては、演算精度が上がる、複雑な論理式が簡単に導入できる、異常発生時の処理が簡単であるなどの利点が認識されてきたためといえる。

日立製作所においても小形計算機、HIDIC-100 または HIDIC-500 を使用した圧延機の自動運転装置を分塊圧延機、冷間タンデム圧延機、冷間圧延機などに適用しており、製作納入実績も豊富である。

1. 緒 言

熱間可逆圧延機の自動運転装置は、従来トランジスタ論理素子を主体としたワイヤードロジック構成にしていたが、下記の三つの理由により、生産量の点で手動運転に劣っている。したがって自動運転の使用率が低いのが現状である。

- (1) 予測演算において、経済性の理由により簡易式を使用しているため予測適中率が低い。
- (2) かみ込み速度、かみ放し速度の最適値の演算を行っていない。
- (3) 幅広がり現象に対する考慮がなされていない。

この三つの理由は、いずれも複雑な演算式を必要とし、個々にデジタル演算素子を使用したのでは高価となり、一方、アナログ演算素子を使用すると演算精度が不足し、性能を満足できないためである。したがって、複雑な演算式を、高精度でかつ安価な装置により演算する装置が必要であり、ここにデジタル計算機の導入が必要となる。

このほか、デジタル計算機を導入する利点としては下記の点があげられる。

- (1) 異常処理が簡単である。
具体的には、圧下の駆動系に異常が生じた場合に、正常な場合の圧下の動き量と所要時間をあらかじめ計算しておき、これと比較することにより異常を検出することができて、その後の処置ができる。

また、鋼材検出器の異常に対しても、その前後に設置してある鋼材検出器の状態および主ロールに取り付けられたパルス発信器のパルスを積算して鋼材の動き量を検出することにより、鋼材トラッキングの誤動作を防止できる。

- (2) マン・マシン・インターフェースが簡単である。

たとえば、作業方式が数種類ある場合も、それぞれの作業の論理式をあらかじめ計算機内に収容しておき、運転員は作業方式のどれかを指定するだけでよい。

一般には、これら異常処理、作業方法は、かなり複雑な論理式を必要とし、ワイヤードロジックで構成すると高価となり省略されることが多い。

以上述べたとおり、デジタル計算機を導入すると、種々の性能

および機能の向上が可能であり、しかも性能、機能向上分を含めても、従来のワイヤードロジック構成の自動運転装置と比較して経済的にも有利である。

2. 自動運転装置に計算機を導入するにあたっての考察

自動運転装置に計算機を導入する理由としては、前述したとおりであるが、ここで計算機を導入するにあたり注意しなければならないのは、計算機により直接圧延設備を駆動させる点であり、いわゆるオン・ライン (On Line) 機器として使用される点である。このことは、いかに高度化された自動運転装置であってもその稼働率が低いのでは所期の目的を果たすことはできない。このような意味において、まず自動運転装置に使用する計算機としては、信頼性の高いものであることが第一の条件である。次に演算速度の問題がある。最近の圧延設備は、高速でしかも高精度が要求されており、さらに直接圧延設備を駆動する点からも高速演算が必要である。このことは経済性の問題もからんでいる。一般に制御用計算機は従来のワイヤードロジックで構成された自動運転装置より高価であるため、単一用途、たとえば圧延設備のロールの位置決め一つに計算機を1台使ったのでは経済的に損失である。したがっていくつかの制御を時分割で行なうことにより経済性の問題をカバーする必要がある。これは従来の自動運転装置が数台並列に設置されているのに対し、計算機を使用した場合には、時間的に直列になることになり、この意味でも高速演算が要求される。

以上のとおり自動運転装置に制御用計算機を使用する場合、その機種をじゅうぶん選択する必要がある。そこで自動運転装置に使用する計算機には一般に小形計算機を使用し、自動運転項目が多い場合には小形計算機を数台使用したマルチ・コンピュータ・システム (Multi-Computer System) を構成している。その理由としては、第一に高信頼性といっても有限値であるため故障をした場合を考慮すると大形計算機1台のシステムでは、自動運転項目全部が一度に停止してしまう。これに対し小形計算機を数台使用しているシステムでは、部分的な自動運転の停止にとどまり、容易に手動運転に切り替えることができる。第二は、実質的に高速演算となる点である。計算機を使用した自動運転装置は、時間的に多項目の自動運転を直列処理するが、1台の大形計算機を使用した場合は、文字どおり直列処理となるのに対し、小形計算機を数台使用した場合は、時間的に並列処理となって実質的に高速演算ができるからである。第三の理由は経済性である。経済性の面で考えるとまず第一の理由で述べ

* 日立製作所大みか工場

** 日立製作所日立研究所

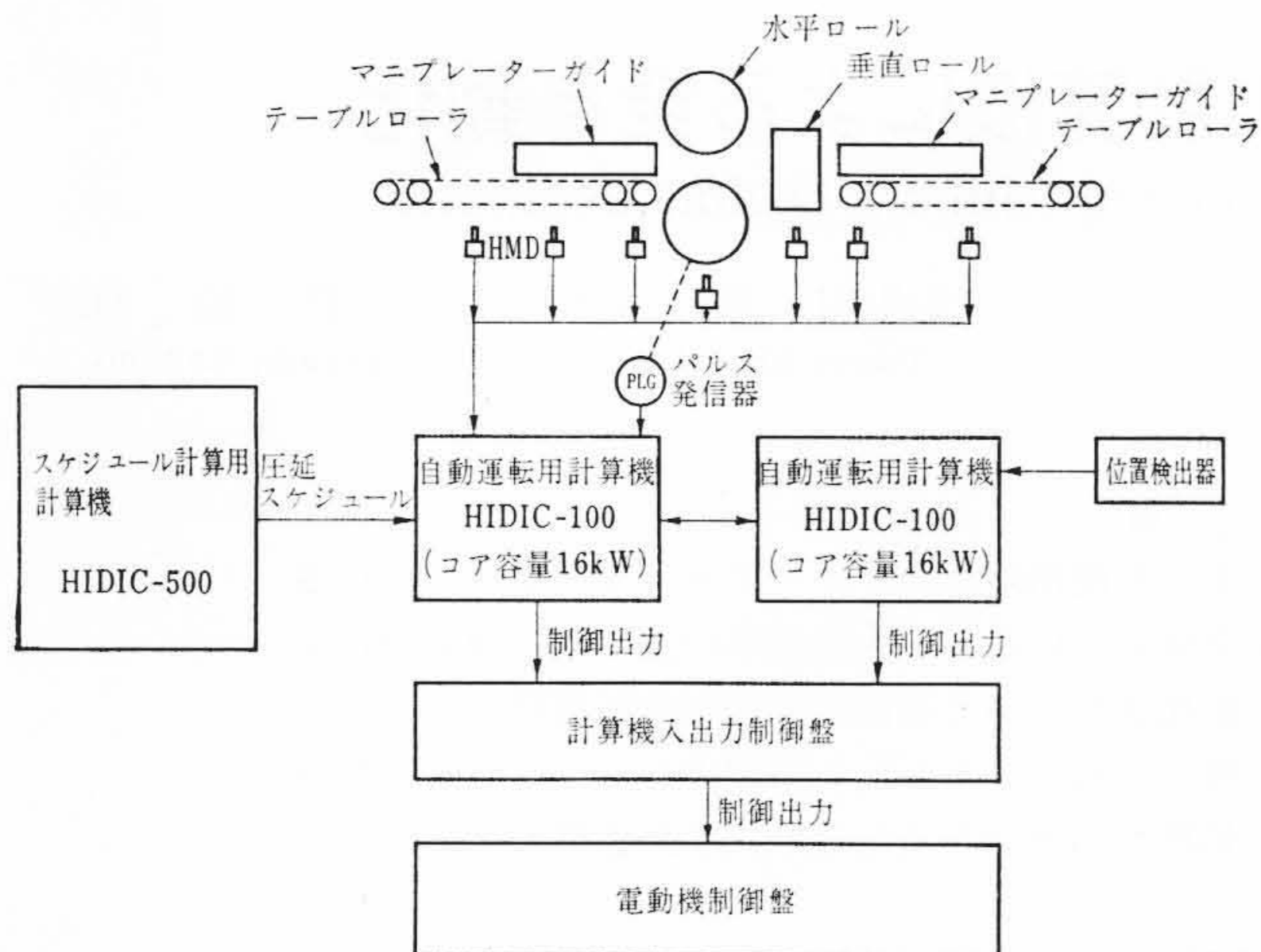


図1 分塊圧延機におけるシステム構成図

た故障時の問題を解決するために大形計算機の場合は、バックアップ用としてさらにもう1台の大形計算機を設けるいわゆるデュアル・システムを採用することがあるが、小形計算機を使用したマルチ・コンピュータ・システムの場合は、デュアル・システムを採用せず、部分的停止にとどめて手動運転に切り替えることが可能であり、また重要な自動運転項目の計算機が故障した場合は、比較的簡単に手動運転ができる項目を行なっている計算機と切り替えることができるなどの利点を有する。

第四に、工事費の問題がある。大形圧延機の場合、設備の配置面積が大きく、大形計算機においては、一個所に入出力の電線を集めなければならない。マルチ・コンピュータ・システムの場合は、その設備の近い所に分散して計算機を設置することにより入出力の電線が短くてすみ、かつ雑音レベルの点から電線の布設法も簡単で済み工事費が安くなる。

3. 熱間可逆圧延機自動運転装置の構成

図1は、分塊圧延機におけるシステム構成を示したもので、この図からわかるように、装置は2台の小形計算機 HIDIC-100 を2台使用したマルチ・コンピュータ・システムである。2台の小形計算機の用途はそれぞれ下記のとおりである。

- (a) 主ロール用 HIDIC-100
 - (i) ライントラッキング
 - (ii) 主ロール、テーブル速度制御
 - (iii) スケジュール計算用計算機とのリンケージ
- (b) 位置ぎめ制御用 HIDIC-100
 - (i) 水平ロール圧下位置ぎめ制御
 - (ii) 垂直ロール圧下位置ぎめ制御
 - (iii) マニプレータサイドガイド位置ぎめ制御
 - (iv) 圧延材転回制御

これらの制御は、従来のワイヤードロジック構成の装置に代わりデジタル計算機によるダイレクト・デジタル・コントロール・システム (Direct Digital Control (DDC) System) で行なわれる。

計算機の入出力は、直接に電動機制御回路あるいは、位置検出器、電動機速度検出用パイロット発電機などに接続されるために、レベル変換、電圧または電流増幅が必要であり、計算機入出力制御盤により変換されて接続される。

以下、各制御ごとに、デジタル計算機を導入した場合の演算方式について述べる。なおデジタル計算機を導入した最大の理由は、性能および機能の向上により、生産能率を上げることである。図2は理想的な主ロール、テーブルおよび圧下の速度の関係を示し

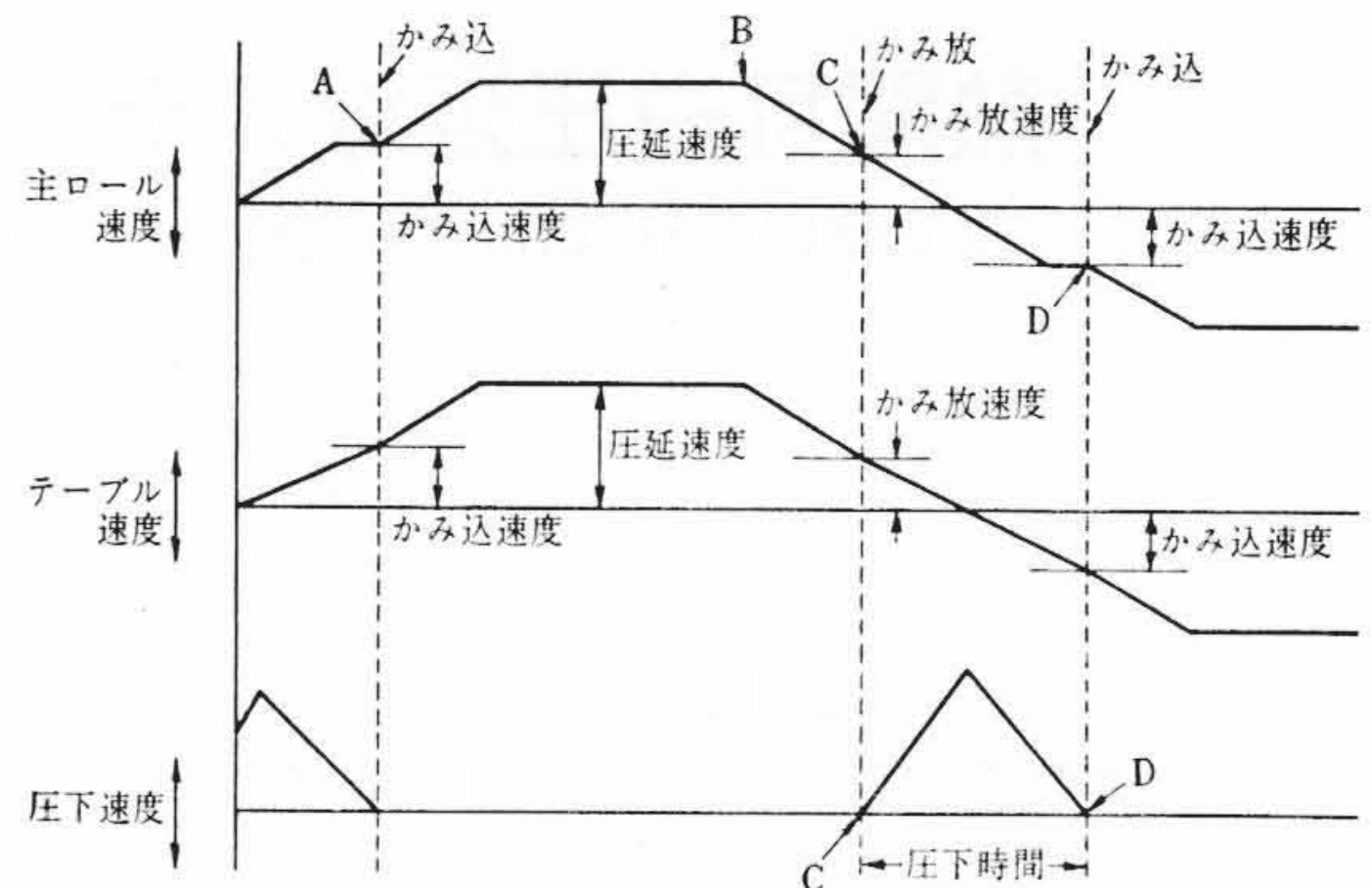


図2 可逆熱間圧延機における理想的圧延のタイムチャート

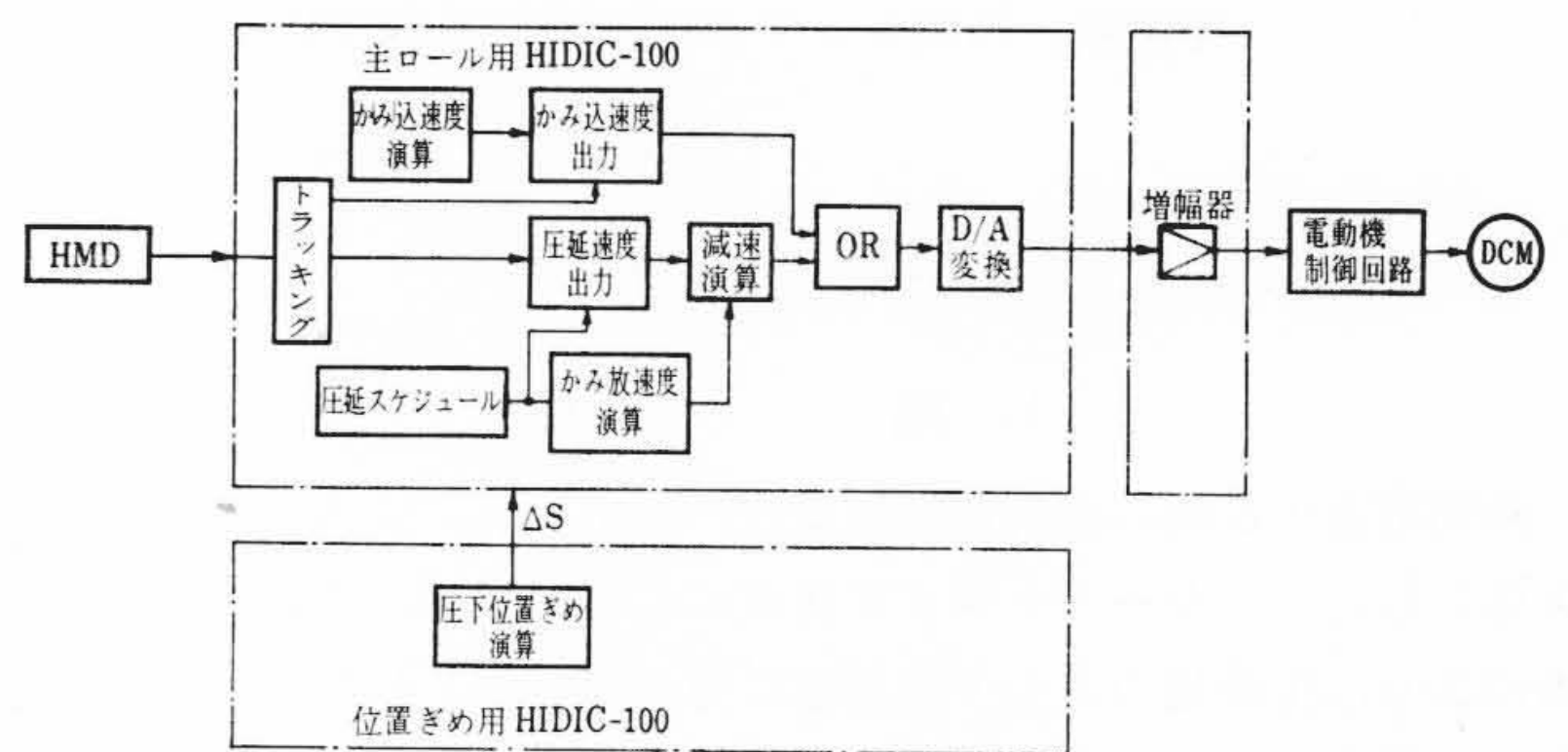


図3 主ロール速度制御ブロック図

たもので、生産能率上問題となる点は、

- (1) かみ込みにおいてかみ込み失敗を起こさないこと (図2のA点)
- (2) 圧延速度のかみ放し速度までの減速が適切であること (図2のB, C点)
- (3) かみ放し時点でただちに圧下位置ぎめを開始すること (図2のC点)
- (4) 圧下位置ぎめ完了時点で圧延材が次のパスのかみ込みを行なうこと (図2のD点)

である。従来のワイヤードロジック構成の装置では、上記の問題点の制御性能に不満足なところがあり、生産能率低下の原因となっている。

3.1 トラッキング

トラッキングはホット・メタル・デテクタ (Hot Metal Detector (HMD)) を圧延機の周辺に設置し、これらのオン、オフ信号を入力して論理判断を行ない、圧延材の先端および後端位置を追跡する。追跡結果は、パス No., 主ロール逆転開始、圧下位置ぎめ開始、主ロール減速開始などのタイミング情報であり、一連の動作が円滑に動くための重要な信号となる。したがって誤動作を起こすと、ただちに誤圧延、あるいは自動運転停止に結び付き、従来もかなり複雑な論理回路を構成していたが、さらにデシジョンテーブル法を使用すると、主ロールにパルス発振機を付けてこれを積算して鋼材の長さを算出する方式を採用するなどにより、確実なトラッキングが可能となっている。

3.2 主ロール、テーブル制御

主ロールおよびテーブルは、かみ込み速度→圧延速度→かみ放し速度→逆転の加減速を行なう。これらの加減速タイミングおよび加減速度は、圧延の円滑動作はもちろんのこと、生産能率上きわめて重要なことである。

主ロールおよびテーブルの制御は、図3のブロック図に示すとおり

りかみ込み速度演算および出力部、圧延速度出力部、かみ放し速度演算部、減速演算部より成る。これらの演算はディジタル計算機により行なわれ、最適演算し、トラッキング情報によりタイミングを制御し、計算機入出力制御盤で増幅されて電動機制御回路に出力する。

3.2.1 かみ込み速度演算

かみ込み速度の問題の一つは、かみ込み失敗を起こさぬことである。このため従来は、主ロールとテーブルの加速度が異なるためかみ込み速度は低い速度としているが、このことは圧延時間が長くなることを意味している。したがって最適かみ込み速度を出力する必要がある。実際に圧延スケジュールを作成する場合は、圧下スケジュールが先に求められ、その圧下量によりかみ込み角が定まる。ここでかみ込み角と摩擦係数の関係よりかみ込み速度が算出できる。ただこの場合、摩擦係数は、圧延材が高温であること、圧延材の不均一変形などの条件により理論的に求めるのはむずかしく、このため種々の実験式が報告されている⁽¹⁾。この実験式より摩擦係数 μ と、かみ込み速度 u の関係は次式で与えてよいと考えられる。

$$\mu = \mu_0 - K_1 \cdot u \quad (3.1)$$

一方、圧下量を Δh 、ロール半径を R とすると

$$\mu = \tan \alpha = \frac{\sqrt{R^2 - \left(R - \frac{\Delta h}{2}\right)^2}}{R - \frac{\Delta h}{2}} \quad (3.2)$$

で表わされるから圧下量 Δh により求めた $\tan \alpha$ 、すなわち必要な摩擦係数 μ を求めることにより (3.1 式) からかみ込み速度を決定することができる。

3.2.2 減速演算

圧延材が圧延ロールにかみ込まれると、圧延速度まで加速され次に、かみ放し速度に減速されるが、この減速は、速過ぎると圧延時間が長くなり、遅過ぎると速い速度でかみ放しされるためオーバーラン量が大きくなる。いずれの場合も圧延時間が延びるため、最適な減速が必要である。この減速制御は、図 4 において HMD の点を圧延材後端が通過したときに演算開始し、下式で演算された速度になるよう、電動機速度を制御する。

$$V_M = K\sqrt{(l' - l_c)} \quad (3.3)$$

ただし V_M は主ロール速度、 l' は HMD より圧延ロール中心までの距離を出側圧延材長に換算した値、 l_c は演算開始してから圧延材が進んだ距離で、主ロールに取り付けたパルス発振器のパルスを積算して行なっている。

3.2.3 かみ放し速度演算

かみ放し速度は、オーバーラン距離を決定する大きな要素である。一方、オーバーラン距離は図 2 の理想的圧延チャートからわかるように圧下時間の関数であるため、かみ放し速度は、次パスの圧下量の関数として表わすことができる。したがって圧下量より圧下時間を求め、次に次パスのかみ込み速度および加減速度よりかみ放し速度を求める。すなわち、かみ放し速度 v_0 は

$$v_0 = f(\Delta h \cdot v_l \cdot \alpha) \quad (3.4)$$

となる。ただし v_l はかみ込み速度、 α は加減速度である。

3.2.4 テーブル速度制御

テーブル速度は、圧延ロールに圧延材がかみ込んでいる間は圧延ロール速度に同調しているが、圧延材が圧延ロールよりかみ放されたのち、かみ込みまではテーブルによって圧延機の加減速および逆転が行なわれる。

したがって、テーブルの加減速制御は、圧延能率上重要な項目の一つである。従来はテーブルの速度制御は単にかみ放し速度より

停止させ、次にかみ込み速度で逆転起動させる方式としている。これでは圧延材とテーブルの間にスリップを生じて、駆動電動機が発生する減速トルク、加速トルクを、圧延材に 100% 伝達することができない。そこで、ディジタル計算機を導入した本方式では、テーブルの加減速度を制御することにより、圧延材とテーブル間にスリップを起こさずに短時間に圧延材の加減速を行なうように加速度を圧延材の重さ、形状、速度により演算を行なってテーブルの速度制御を行なうようにしてある。

演算方式は、圧延材がかみ放し速度でかみ放されたあとの圧延材の運動方程式と、テーブルの回転運動方程式とにより、圧延材とテーブルの速度が常に一定となるよう加減速度を算出する。

以上、主ロールおよびテーブルの速度制御の演算方式について述べた。これらの演算は自動運転装置に使用されたディジタル計算機により演算し出力されるが、この演算のタイミングも自動運転装置では重要である。すなわち、必要な最適情報を得るタイミングと演算タイミングを実際に制御するタイミングをうまく配合する必要がある。実際には、かみ込み速度、かみ放し速度、テーブルの加減速度の演算は、圧延材が圧延ロールにかみ込まれた直後にロール開度を取り込んで圧延材の出側厚みを測定したのち、この情報を基に演算を行ない、その後、減速演算を行なって速度制御を行なうのである。

3.3 スケジュール計算用計算機とのリンケージ

圧延スケジュールは、自動運転装置にオフ・ラインで計算されたものを入力する場合もあるが、最近では、計算機制御の一部として圧延機の状態(鋼種、焼上温度、成品形状など)に対する 1 本ごとの最適スケジュールを計算し生産量の増大を図っている。この最適スケジュールは 1 本ごとにリンケージし、しかもパスの途中で伝達を行なうため、高速でかつ正確なリンケージを行なう必要がある。したがって情報の信頼性を上げるため、合理性チェック、データの範囲チェック、パリティチェックなどの一連のチェックを行なっている。この一連のチェックは従来のワイヤードロジック構成の装置ではなく、かつリンケージもハード対ハードで行なわれていたため、か

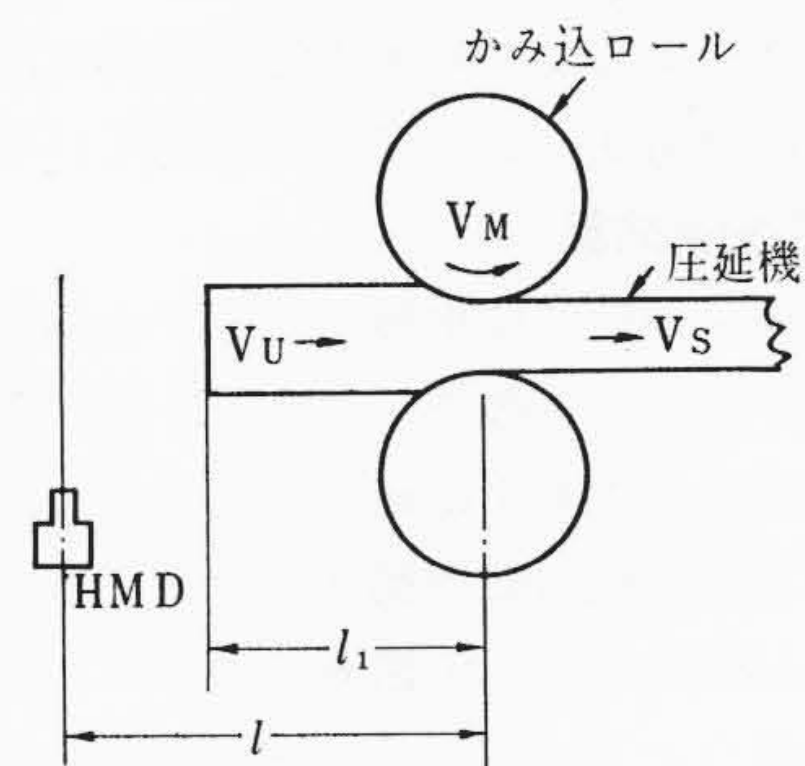


図4 かみ放減速演算

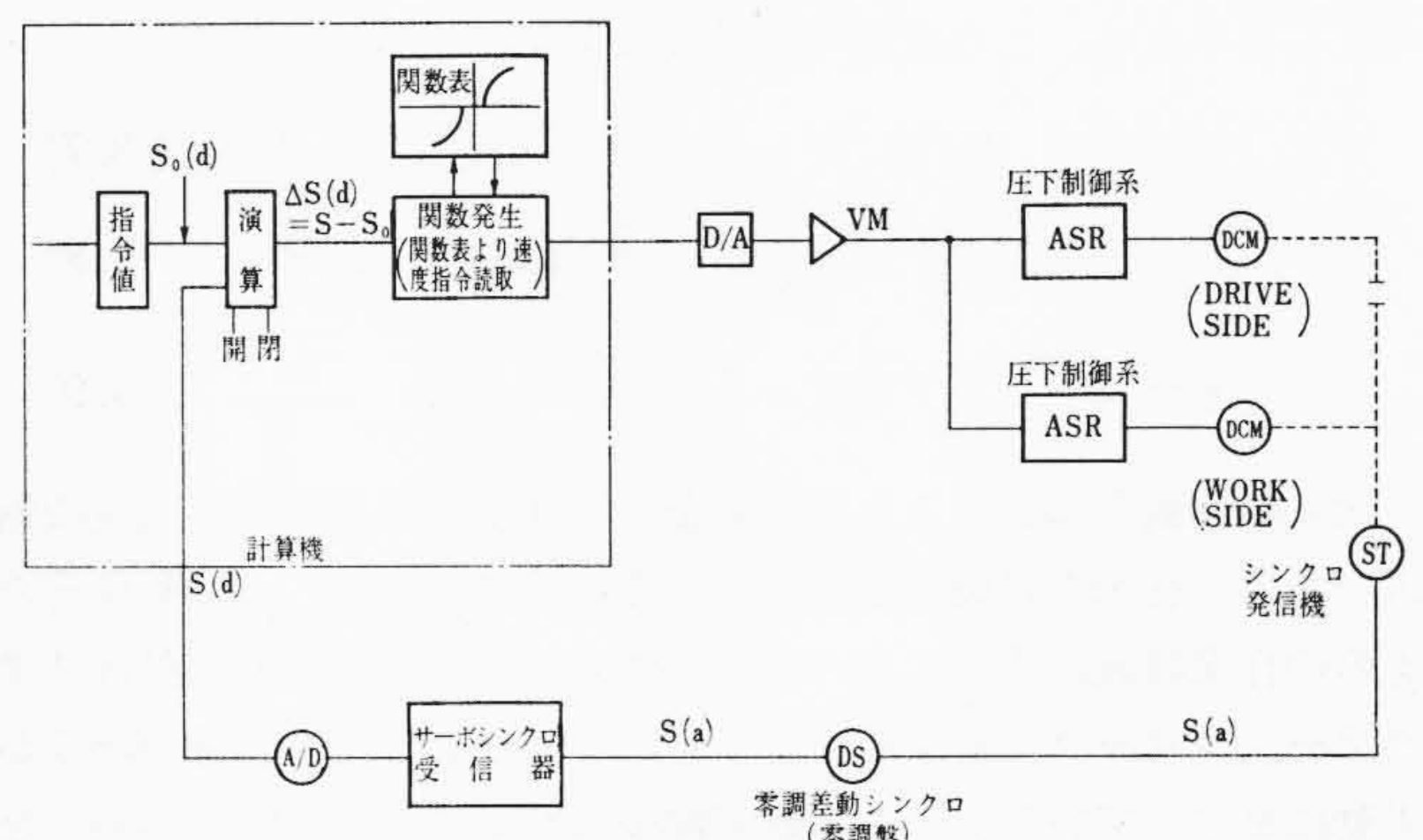


図5 圧下位置ぎめ制御ブロック

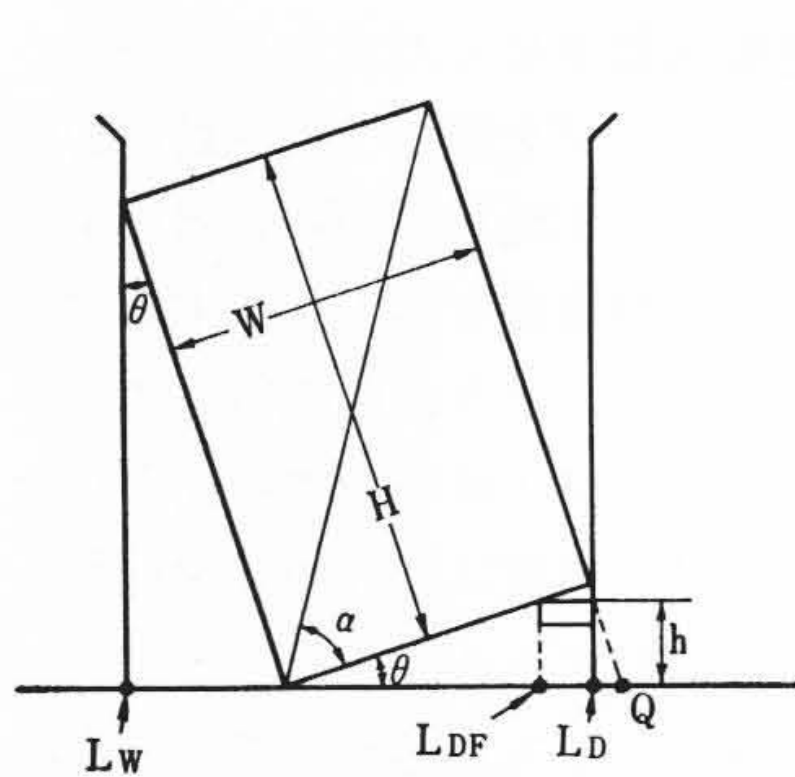


図6 転回中の位置関係

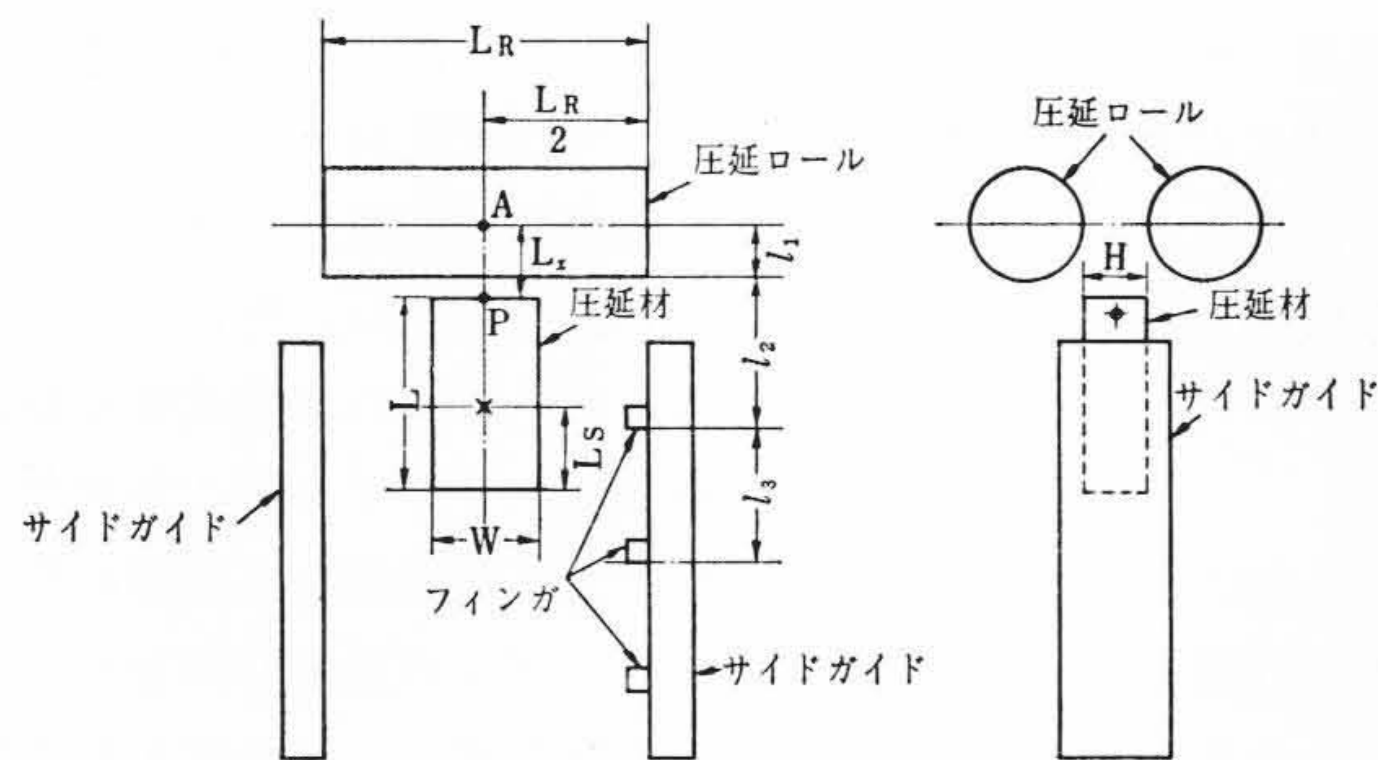


図7 転回前後動作における位置関係

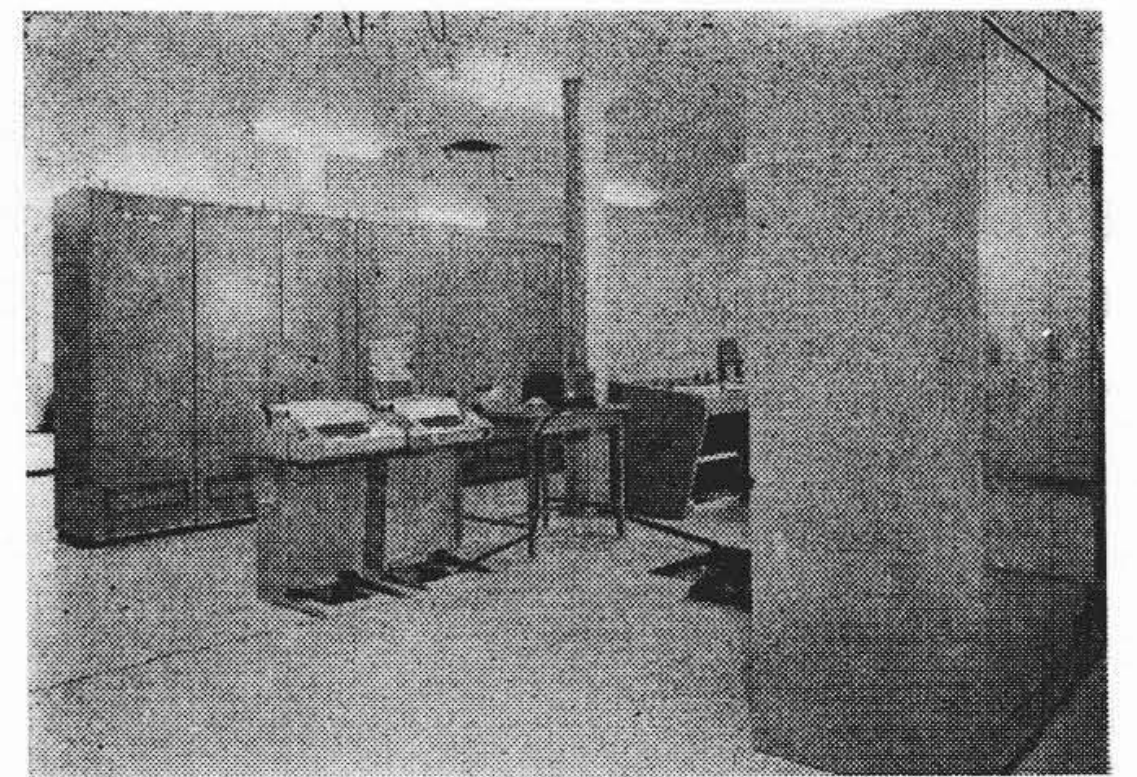


図8 株式会社神戸製鋼所加古川製鉄所納分塊圧延機の自動運転装置

なり複雑な回路となっていたが、制御用計算機を用いることによりソフト・リンケージとチェックにより高信頼性の情報伝送が可能となった。

3.4 位置ぎめ制御

図5は圧下の位置ぎめ制御のブロック図である。この図に見られるように計算機を演算部分とした位置のクローズループである。

位置ぎめ方式は、指令値を S_0 、帰還値を S_a とすると

$$\Delta S = S_0 - S_a \dots\dots\dots (3.5)$$

の演算を行なったのちに、電動機速度 V_s と下式の演算を行なって電動機制御系に速度指令を与える。

$$V_s = K\sqrt{\Delta S} \dots\dots\dots (3.6)$$

ただし K は電動機の定格、電動機と機械駆動系の変速比、機械系の慣性モーメントなどによって定まる定数である。

次に圧下位置ぎめにおいて、圧下開始のタイミングは、生産能率の向上で一つのポイントである。従来の装置では圧延材が圧延ロールよりかみ放されたこととトラッキング回路により検出して圧下起動指令を入れているが、これでは電磁制御機の開放時間および駆動系の機械時定数による圧下起動開始の遅れ時間が約0.5秒程度あり、たとえば圧延終了までの逆転回数（パス No.）を15とすると $0.5 \times 15 = 7.5$ 秒のロス時間を生ずる。15パスの圧延時間は約75秒程度であるため生産能率が10%落ちることになり、この意味で圧下開始時間を早める必要がある。この圧下先行起動は、主ロールの減速演算と同じような演算方法によって行なわれている。

3.5 圧延材転回制御演算

圧延材の転回制御については単純な位置ぎめ制御の方式では種々の機構が関連しているため失敗をしやすく、動作の各ポイントにおけるそれぞれの機構の位置および速度の協調が必要である。したがって一例として分塊圧延機の転回動作について各機構の速度協調について説明する。転回途中を示す図6において、転回開始前のフィンガの位置 Q 点を原点とし、左右サイドガイドの位置 L_w , L_D , フィンガの長さを L_{VF} , フィンガの高さを h としそれぞれの位置を時間で微分することにより速度を演算して各電動機制御回路に速度指令として与える。この速度の関係式は下記のとおりである。

$$\text{フィンガ速度} = \dot{h} \dots\dots\dots (3.7)$$

$$\text{右サイドガイド速度} = \dot{L}_D = \dot{h} \times \tan \theta \dots\dots\dots (3.8)$$

$$\text{左サイドガイド速度} = \dot{L}_w = \dot{h} \times \frac{H}{W - V_F} \dots\dots\dots (3.9)$$

次に転回動作における生産能率上の問題は、転回動作の前後の制御である。従来の自動運転装置による実績によると、転回動作そのものの作業時間は手動に比べ変わらず、むしろ円滑な転回動作によりテーブルローラに対するショックが小さいことより自動のほうが手動にまさっている。しかし転回前後の制御において時間が長くな

るという難点があった。

転回動作を分析すると、次の三つの段階に分かれる。

- (1) 圧延ロールよりかみ放された圧延材を転回装置まで移送させ、さらにフィンガの付いているサイドガイドのほうに寄せる作業
- (2) 転回作業
- (3) 転回終了した圧延材のセンターリング作業

上記三つの作業中(2)の転回作業については前述したとおりであるが(1)および(2)の作業の自動化において時間最短の考え方を説明する。

転回動作において圧延材と転回装置の位置関係の条件としては、圧延材が少なくとも2個のフィンガにかかること、フィンガの両端の間に圧延材の重心がはいることである。

したがって上記の条件を満足してしかも作業時間が最も短い場合は図7において圧延材の後端面の中心点 P が A 点を頂点とした二等辺三角形の軌跡を通りかつ L_x の値が最小の場合である。

すなわち鋼材の長さ L , 重心位置 L_s , フィンガの位置 l_1, l_2, l_3 および鋼材の幅 W , 長さ H により最適条件を求めて制御を行なうことにより最短時間の転回動作が可能である。

なお、図8は分塊圧延機の自動運転装置の写真である。

4. 結 言

以上、可逆圧延機の自動運転装置についてデジタル計算機を導入した理由およびおもな演算方式について述べたが、従来のワイヤードロジックを計算機ソフトに置き換えたほかに種々の機能向上を行なった。

この結果は、運転実績においてもじゅうぶんな効果が現われ総合的には、熟練した運転者の手動操作より約10%の生産能率向上が実現できた。個別に見ると、主ロールおよびテーブルの制御において、計算機を使用してかみ込み速度、減速演算、かみ放し速度の最適演算を行なった効果は、従来の装置に比較して約5%の圧延時間の短縮、圧下位置ぎめ制御において約10%の短縮ができた。このほかトラッキングの確実性、スケジュール計算機とのリンケージにおける情報の信頼性、マン・マシン・インターフェースの簡単化などもデジタル計算機を導入することによる効果である。さらに経済面より見ると、従来の装置と同程度またはいくぶん安価であるので機能向上分を評価すると計算機導入が有利であるといえる。

末文ながら本装置の開発にご協力、ご指導いただいた株式会社神戸製鋼所加古川製鉄所西崎允、尾崎太郎、田中英輔の3氏ならびに関係各位に対して深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- (1) 富士鐵：塑性加工におけるまさつ係数について（鉄鋼協会圧延理論分科会資料）