

熱間可逆圧延機の計算機制御

(厚板ミル)

Computing Controls of Reversible Hot Mills (Plate Mills)

北之園 英 博*

Hidehiro Kitanosono

要 旨

鉄鋼関係の計算機制御は、近時長足の進歩を示しつつあるが、スラブミル、プレートミルなどでも実用化の段階に達し、新設のミルでは今後ほとんどが計算機を導入するであろう。ここでは主としてプレートミルに焦点を合わせ、計算機制御をどのような方式で行ない、どのような利益を期待できるかについて述べる。

1. 緒 言

プレートミルでは加熱炉からレベラーに至るミルラインと、検板以降シャーライン、およびそれ以降の工程に大別される。これら各工程はそれぞれ計算機制御上技術的にむずかしい問題を含んでいるが、計算機制御によって品質の向上と生産性の点で期待されるのはミルラインである。

ミルラインの一例を図1に示す。ミルラインの制御のねらいは

- (1) 加熱炉の制御
- (2) ミルの制御
- (3) 板厚の御制
- (4) 板幅の御制
- (5) 形状の御制

にある。加熱炉はミルの制御上要求される材料温度を得るよう押出率（プッシングレート）と燃料を制御し、ミルは最適のパススケジュールを計算してロール開度、ロール速度を設定し、かつ加減速動作を自動化する。板厚については全長にわたって目標厚みを得るよう自動板厚制御を行ない、板幅についても目標値を得るよう最適のターン制御を行なう。形状については計算機制御の一つの大きなねらいであって、幅方向の板厚を制御し、かつ端伸びや中伸びのない良質の製品を得るようにする。

こうした制御を行なうために必要最小限度の情報を計算機に与え、冶金学的制約を満足しつつ所定の寸法のプレートを圧延するようパススケジュールを計算し、最適のプッシングレートで加熱炉の制御を行なうのである。以下これらについて詳しく述べる。

2. ミル制御の自動化

自動化する場合に必要な最小限度の情報として

- (1) 材料の寸法
- (2) 材料の鋼種
- (3) 仕上寸法

などがある。これらの情報をどのような形で計算機に与えるかは、それぞれのシステムによって変わるが、一般的にはプラントとしての生産スケジュールを作成する情報処理装置からカードまたはテープの形で与えられるとしてよい。この場合臨時のスケジュール変更を考慮して手動設定ができるようにしておくことは当然必要である。

さらにこれら情報と現物と照合（アイデンティフィケーション）をするため材料の寸法測定を行なうことが望ましい。このため図1では寸法測定区域を設けてある。

* 日立製作所日立工場

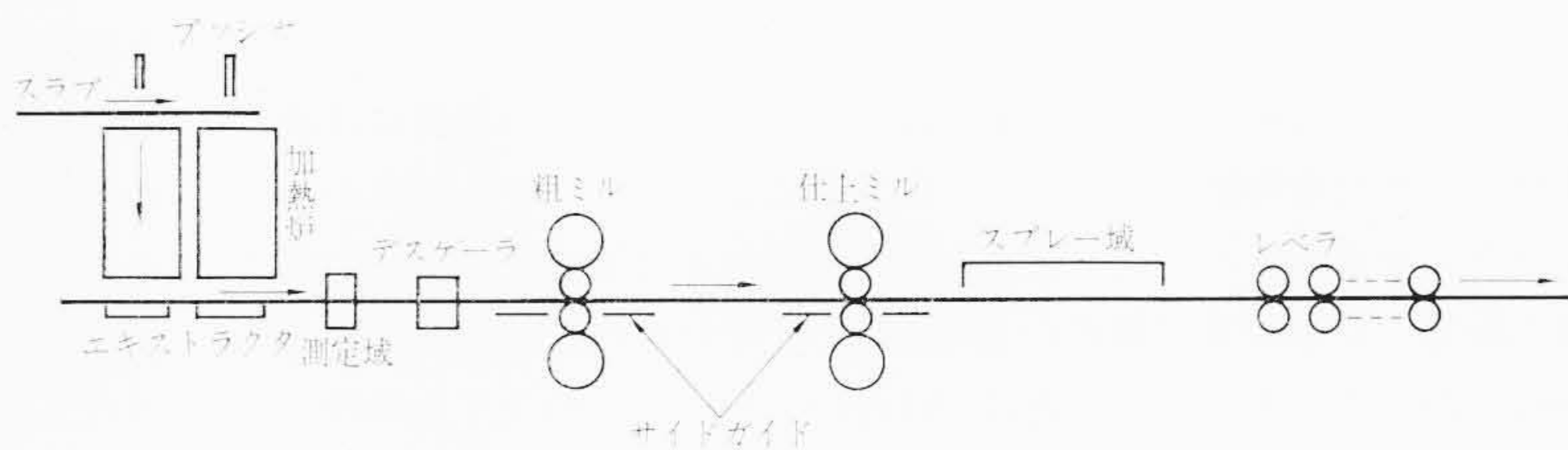


図1 プレートミルライン

こうして仕様が計算機に与えられるが、材料が炉から工程が進むにつれ仕様もそれに付随して動く必要があり、このようなトラッキングを行なうため必要個所に鋼材検出器を配置する。材料がミルに達すると計算機はオンライン情報を得て最適パススケジュールを計算し、各パスごとに

- (1) 水平ロール速度
- (2) 水平ロール開度
- (3) 垂直ロール速度またはドラフト補償
- (4) 垂直ロール開度
- (5) テーブル連動範囲
- (6) フィードローラ、テーブルなどの速度
- (7) 正逆転の指令
- (8) 材料かみ込み速度
- (9) 材料かみ放し速度
- (10) 加減速度
- (11) 圧下設定の粗密の区別

などの命令を出力する。

このほか厚み計に対する設定値、温度補償値、鋼成分補償値など、付随した設定命令を出す。

ミル制御装置はこれら情報を最高のタイミングで受けて自動的に運転を実行する。

3. パススケジュールの計算

設定の成否を左右するのは、圧延荷重と圧延トルクの計算式の適不適であるといっても過言ではない。プレートミルの場合パススケジュールに対して制約する要因は

- (1) 荷重リミット
- (2) トルクリミット
- (3) ドラフトリミット（または圧下率リミット）
- (4) 厚み、幅
- (5) 形状

などであるが、このうち(1)～(3)が基本的な計算上の要因で、この制限をとともに満足する荷重、トルク、ドラフトを決定することが数式モデルの基本となる。そしてそのいずれから計算に着手するか

によって数式モデルの形もおのずから変わってくる。そのいずれから計算に着手すべきかはそれぞれの設備や生産計画によって最適の順序がある。ここでは、荷重リミットの制限を受けるパス回数がトルクリミットの制限を受けるパス回数よりも多い場合について問題点を述べる。

圧延荷重の計算式として現在まで発表されているものの中では次の式が最も現実的で使いやすい⁽¹⁾。

$$P = k_p b \sqrt{R(H-h)} Q(H, h, R) \dots\dots\dots (1)$$

ただし、

- P : 圧 延 荷 重
- k_p : 荷重計算の平均変形抵抗
- b : 材 料 の 幅
- R : ロール半径
- H : 入 側 板 厚
- h : 出 側 板 厚

ところでこの関係式はそのままではパススケジュールの計算には使えない。平均変形抵抗をどのように求めるかということ、荷重からドラフトを求めるのには不適当な形であることなどがその第一の理由である。この荷重計算式の適中度は k_p をいかに正しく評価するかにかかっているといって過言ではない。そしてこのような問題点をいかに解決するかでパススケジュールの成否が左右される。一例としてWH社は次の形をとっている。

$$\begin{aligned} \log \frac{P}{\sqrt{R(H-h)}} = & \beta_0 + \beta_1 \log \sqrt{\frac{H}{R}} + \beta_2 \log \gamma + \beta_3 \log \gamma \sqrt{\frac{H}{R}} \\ & + \beta_4 T + \beta_5 T \log \gamma + B_6 \left(\log \sqrt{\frac{H}{R}} \right)^2 \log \gamma \\ & + \beta_7 T^2 \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

ただし T は材料温度をあらわしている⁽²⁾。

この式の左辺は平均圧延圧力 P_m の対数である。この関係式は P_m と γ との関係を表わしていて、かつ $\log P_m$ と $\log \gamma$ とは1次の関係にある。したがっていずれか一方が与えられると他方が求められる。この場合入側厚みは既知と考えているから、ドラフトリミットより P_m を求め、 P_m から P を算出して荷重リミットをチェックする形となる。もし、求めた P が荷重の制限値 P_{MAX} を越えるときは

$$\Delta \gamma = C_1 + C_2 (P - P_{MAX})$$

によって $\Delta P = P - P_{MAX}$ の変分に対応するドラフトを求めて P と γ とを決定する。本質的に繰返し計算を必要とするが、荷重の制限はそれほどクリティカルなものではなく、したがって上式程度の一次近似で十分である。ただし終期のパスでは、板厚を正しく制御するため相当な精度で荷重を計算する必要があるから上式で決ったドラフトに対応する P の値を一回だけ算出しておくことが必要となる。

このようにして P と γ とは決定されるが、(2)式で注意を要するのは形が対数であるため、式の精度はよく検討しておく必要があることと、速度の要因が含まれていないことである。速度を考慮すれば式の精度は多少向上するが、まだこの段階では速度が決定されていないから暫定的な値をパターンとして用いることになり、むしろそれよりは、速度を除いて回帰係数にしわ寄せするほうが賢明である。

圧延トルクの計算にはいろいろの方式がある。大筋としてはSIMSの式⁽¹⁾

$$\tau = 2R^2 b k_g \left(\frac{\alpha}{2} - \phi \right) \dots\dots\dots (3)$$

があるが、この式が採用できるのは、トルク算出の平均変形抵抗 k_g が計算できることと、中性点角 ϕ が求められる場合で、一般的にはいずれの計算式も精度の点で疑問がある。トルクアームで表わした式を簡易化すると⁽²⁾

$$\tau = F(H) P \sqrt{R(H-h)} \dots\dots\dots (4)$$

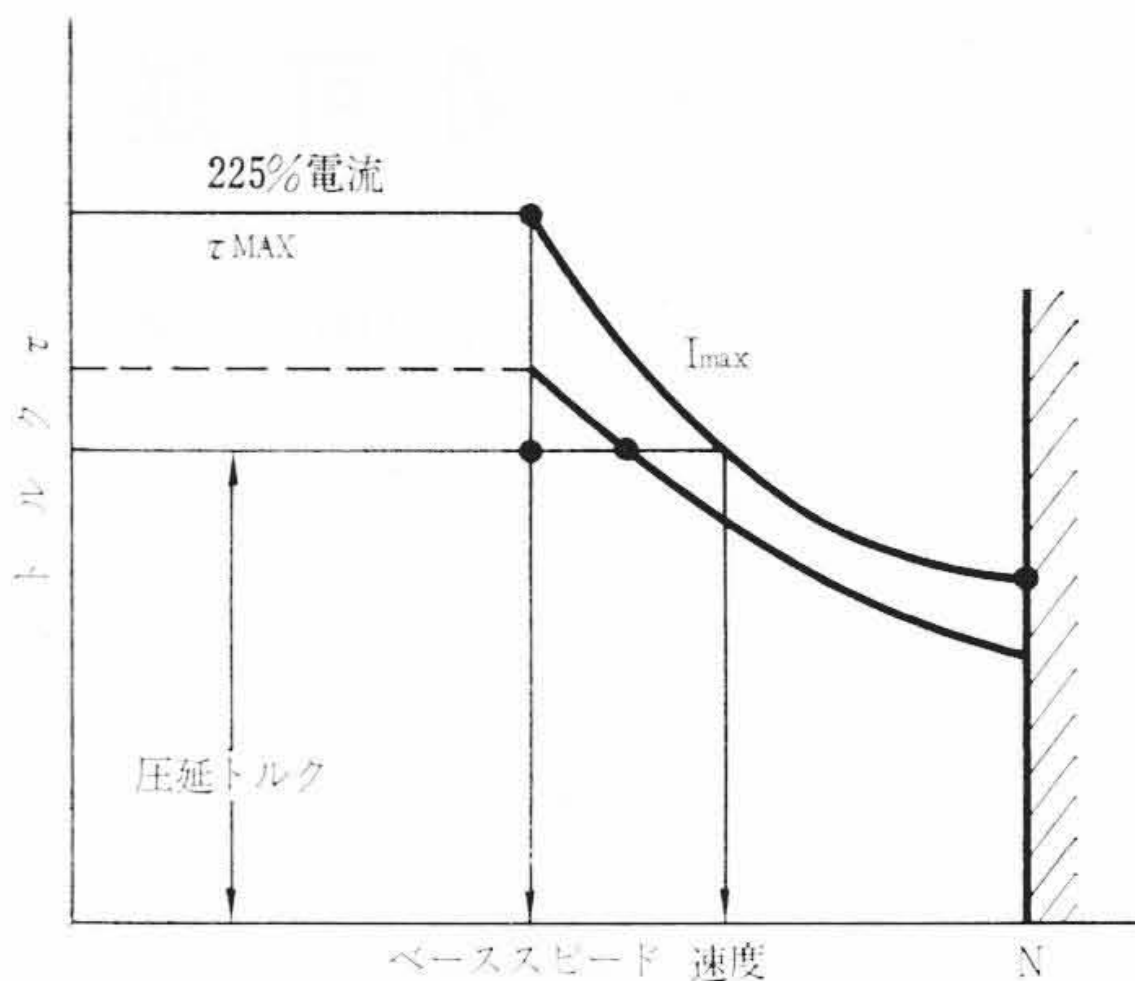


図2 速度-トルク特性

と表現できるが、この式は厚板では比較的良好に適用する。プレートでも板厚が薄くなってくると適中度が落ちるから、多少手を加える必要がある。というのはトルクアームが非線形だからである。

このトルクの場合も制限値を越えたとすると荷重、ドラフトに立戻って計算をやり直す必要があるが、ここでも繰返すほどのことはなく、(1)より

$$\Delta h = f(P) \dots\dots\dots (5)$$

であることを用いて

$$\Delta P = d_1 + d_2 (\tau - \tau_{MAX}) \dots\dots\dots (6)$$

とし、(2)式によって最終的に $P, \Delta h, \tau$ が決定される。

以上の場合には圧延荷重に重点を置いたが、結果的には $P, \tau, \Delta h$ のいずれから出発しても同一となる。ただ数式モデルは同一精度で可逆的ではないことに違いが出る可能性を持っている。このことは、数式モデルがエンジニアリングデータの母集団の中から必要なサンプルを選んで多重回帰によって決定されていることに本質的な原因を含むからである。

各要因の中で問題となるのはトルクリミットで、これをいかに算出決定するかは計算機制御の一つのキーポイントとなる。

それともう一つのキーポイントは圧延温度の評価で、特に終期のパスでは重要性を増してくる。温度算出のモデルはあまり単純化することは危険で、ダイナミックモデルを採用することが妥当である⁽³⁾。

このようにして P, τ, γ が決まると、次のようにして圧延速度とロール開度が決まる。

圧延速度はトルク速度特性の制約のもとに算出されるもので、

$$N = N(G) \dots\dots\dots (7)$$

となるが、図式的に示せば図2のようになる。 $\tau = \tau_{MAX}$ となるときはベーススピード N_B が圧延速度となり、 $\tau < \tau_{MAX}$ のときは界磁弱めとなる。実際にはこのトルクと速度の設定は機器の制御方式(いわゆる電気品)によって変わる。トルクの分配として加減速トルクと圧延トルクの比率をいかに選択するかが関係するからである。

ロール開度の計算は単純ではない。図3は圧延荷重と板厚の関係を示しているが、ミルの弾性特性が図に示すように曲線部を有することと、速度によってこの特性が多少変化すること、材料の幅によっても変化することを考慮に入れる必要がある。一般にはゲージメータ方式として

$$S = h - \frac{P}{M} + \varepsilon \dots\dots\dots (8)$$

の形で表現されるが、 M と ε がプレートミルでは単なる定数として扱えないことに注意を要する。この二つの変数は学習制御によって最適修正を加えることにより、同一ロットでは相応の成果が得られるが、スケジュール変更を越えて最適修正を加えようとしても乱調

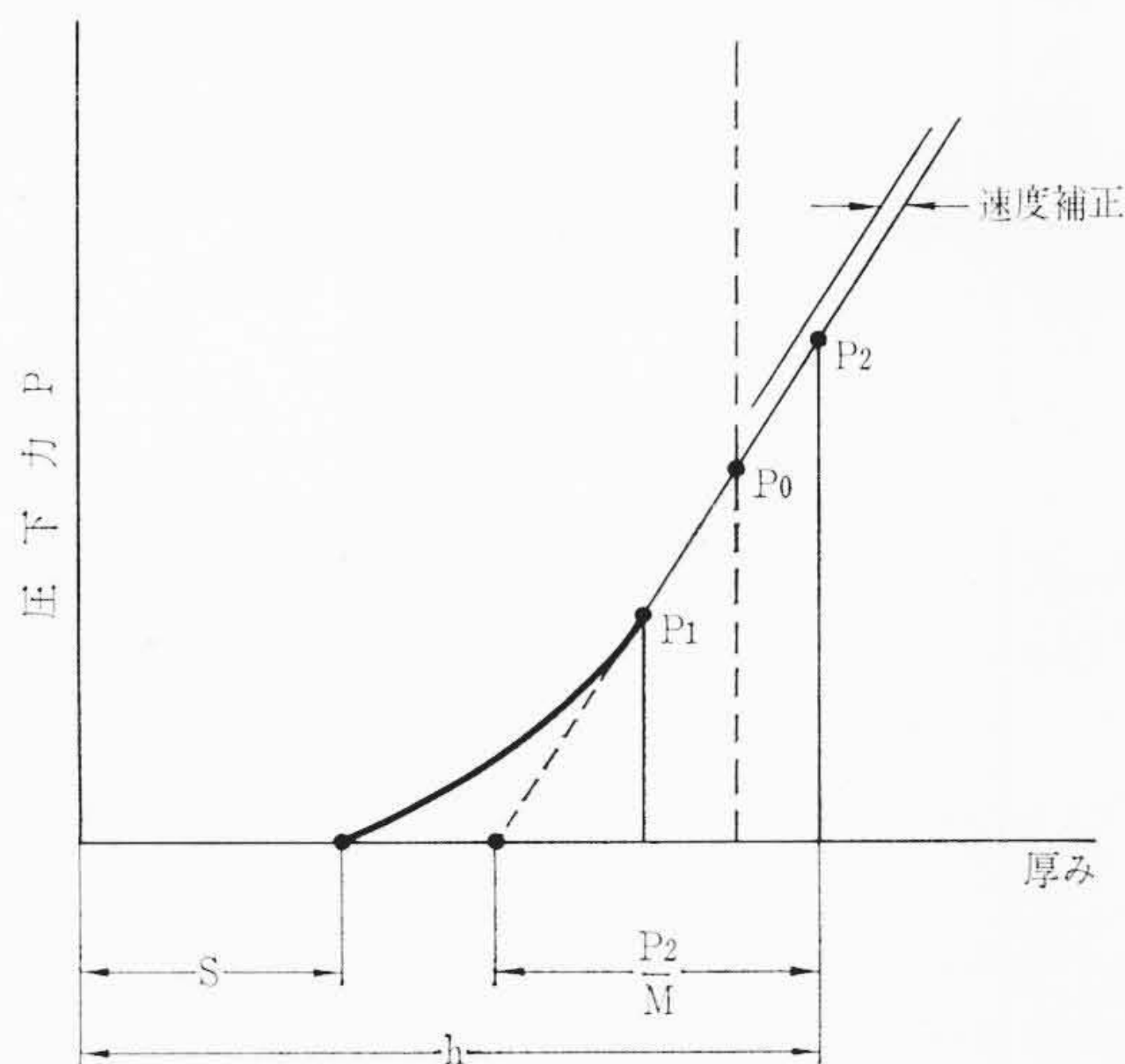


図3 圧下力特性

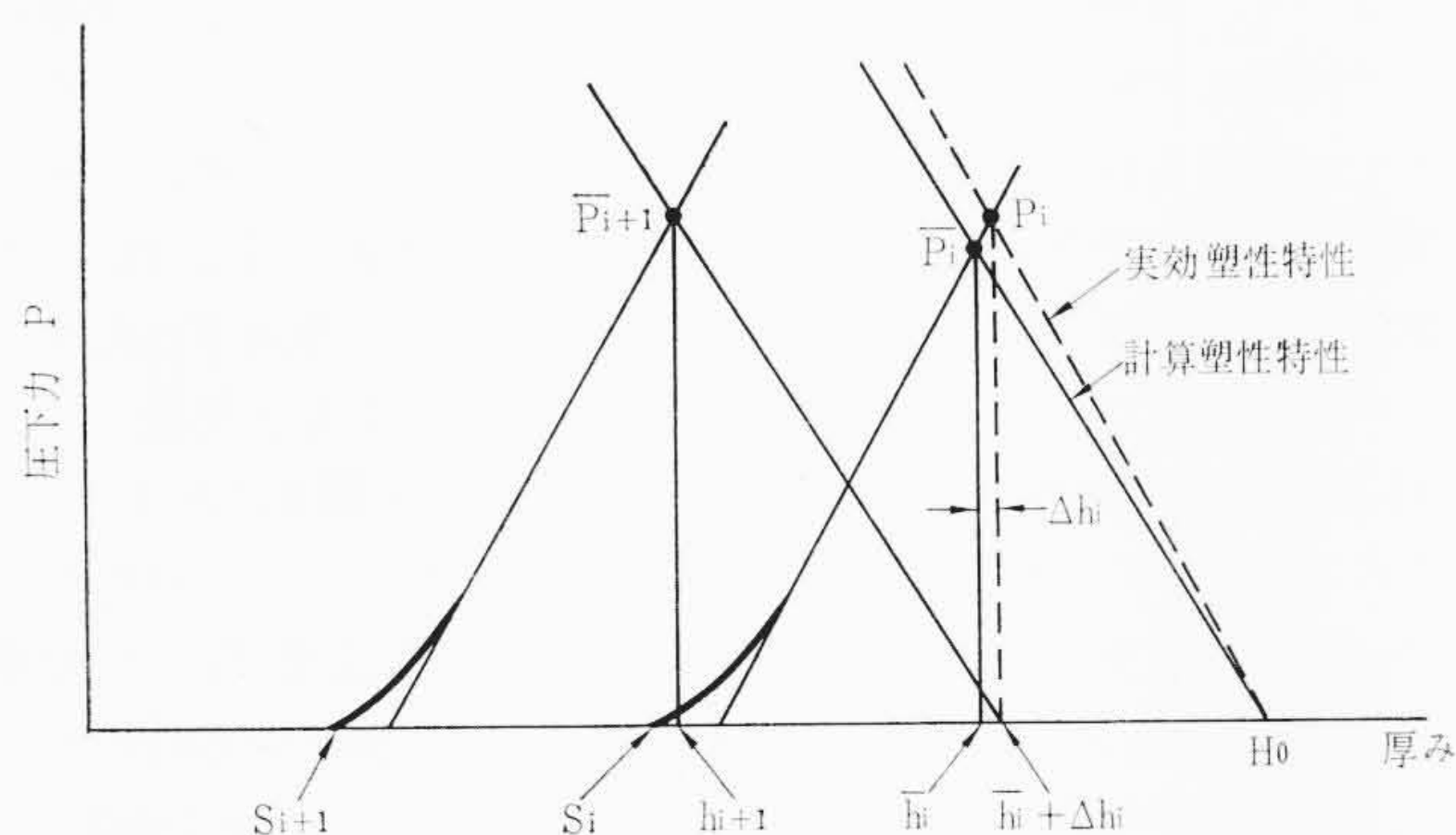


図4 実効塑性特性

を起こすだけである。

以上のようにして1パス分の基本的要素が計算されるが全パスのセットアップを算出するためにこの計算を順次実行する必要があるが、それは別項で述べる。

4. 板厚の制御

タンデム熱延や、タンデム冷延ではそれぞれの特殊性を考慮した自動板厚制御装置 (AGC: Automatic gage Control) が採用されているが、プレートミルの場合は多少事情が異なる。最も重要なことは板厚の絶対値を制御にどのような方式で取り入れるかである。先に述べたゲージメータ方式は間接的に板厚を算出する代表的な方法であるが、これだけでは不十分であるから板幅の絶対値をX線厚み計、またはγ線厚み計によって測定するが、厚み計と主ロールとの間隔が比較的離れているためタイムラグの点で制御上大きな制約を受け、実際には次のようにして制御に生かす形となる。

すなわち、いまミル出側に厚み計が置かれており、奇数パス出側の厚みを測定し (実際には終期のパスのみ測定可能となる)、ゲージメータの計算値と比較し、その差 Δh が次パスに再現性を有するものとして修正するとすれば、圧延荷重実測値を P とするとき、

$$\Delta h = S + \frac{P}{M(b \cdot D_B)} + \varepsilon - h_x \quad (9)$$

となる。 h_x は厚みの実測値である。この Δh は実際には、荷重、厚みなどによって修正を加えて次パスの最適化に使用されるが、これらの関係を示したのが図4である。すなわち実測荷重 P_i と、実測厚み h_{xi} とを用い、A, B 曲線の修正を行ない計算ゲージ h_i に対する計算式の修正を行なう。

このようにして最適の初期ロール開度を設定するが、それ以後の板全長にわたる制御は出力装置が負担する。なおこのような最適学

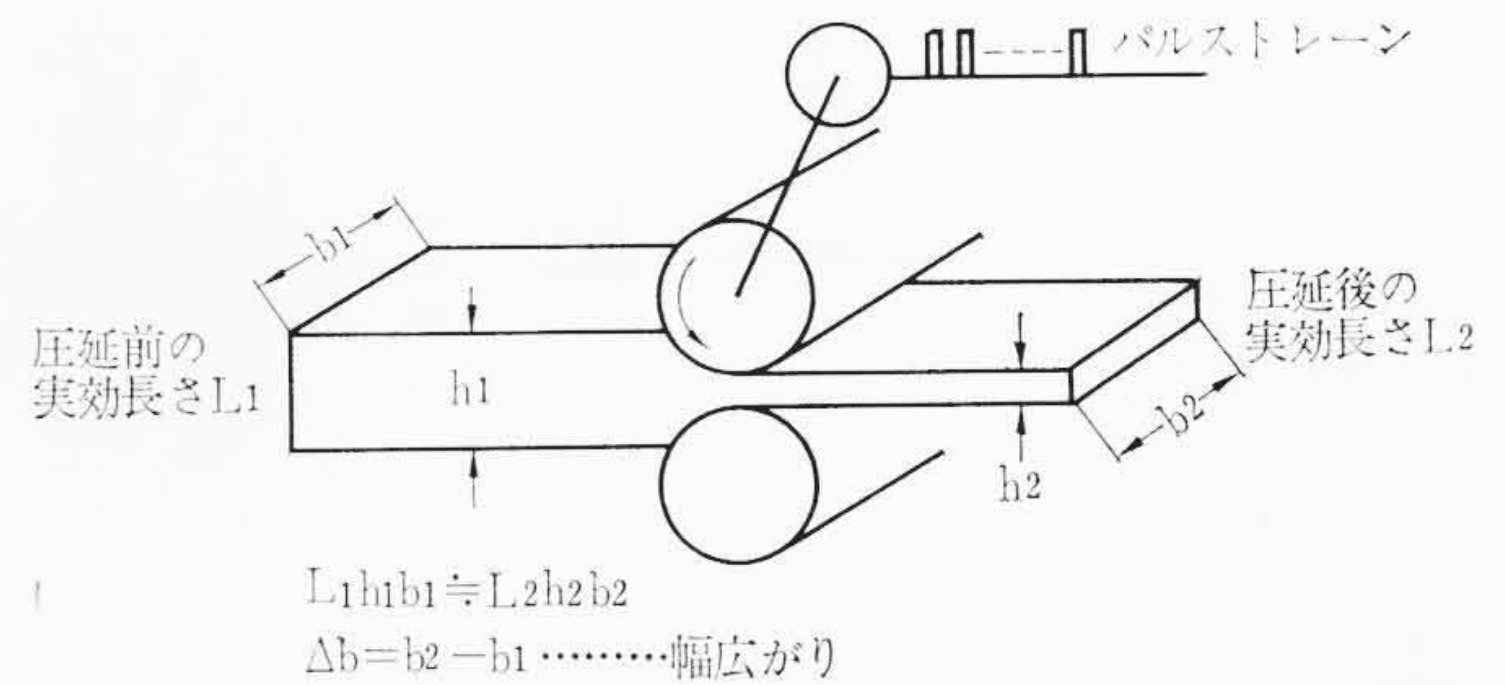


図5 ターン制御

習制御において注意を要するのはその再現性で、これをどのようにシステムで判断するかは一つのキーポイントになる。

5. 板幅の制御

プレートミルの場合、幅出しの制御方式は機械品の仕様によって変わってくる。ここではエッジャーを持たないミルについて述べる。

図5は幅制御の説明図であるが、いま入側の板幅を b_1 、板厚を h_1 、長さを L_1 とする。このうち h_1, L_1 は前回パスの圧延情報より、 b_1 は前回ターンの情報から求められる。また出側の板幅を b_2 、板厚を h_2 、長さを L_2 とすると、圧延前後の体積は等しいから、近似的に

$$h_1 b_1 L_1 \approx h_2 b_2 L_2 \quad (10)$$

が成り立つ。近似的に成立するという意味は b, L に形状の影響がはいるためである。この圧延後ターンを行なえば L_2 が次回パスの入側板幅となる。 b_2 は幅広がり Δb_1 があるため

$$b_2 = b_1 + \Delta b_1 \quad (11)$$

のようになる。したがって L_2 を目標の板幅とするためには

$$h_2 = \frac{h_1 b_1 L_1}{(b_1 + \Delta b_1) L_2} \quad (12)$$

を満足するように圧下設定を行なえばよいから

$$S_2 = \frac{h_1 b_1 L_1}{(b_1 + \Delta b_1) L_2} - \frac{P_2(h_1, h_2)}{M} - \varepsilon \quad (13)$$

とすればよい。

ここに P_2 は出側厚み h_2 を満足する圧延荷重で、別項に述べた荷重計算式によって算出したものを使用すればよい。

ここに述べたのは単なる原理であって実際には複雑な多くの要因がからんでくる。

6. 形状制御

形状制御は計算機制御上、重要な機能の一つであるが、具体的にどのような方式で計算機制御にとり入れるかについては議論のあるところである。その理由はもし各パス間の荷重分配を制御することによって形状を調整するとすれば板厚の制御と干渉するため必ずしもミルユエティリティの点で好ましくなく、またロールベンディング装置を備える場合は、ロール胴長が長く、ロール径も大きいいため機構的に自由度が押えられるからである。したがって計算機としてはこの両者を併用することが好ましく、荷重分配においては板厚の制御を優先させ、形状偏差をロールベンディング装置で吸収するようにする。

7. パススケジュールの最適化

以上に述べた数式を組み合わせ、各パスの最適設定を行なうが、実際には数式が現象を忠実に表現していないことと、設定が命令を忠実に実行しないことから、実際の圧延は必ずしも最適のものにはならない。このため測定器よりの情報によって、数式モデルの修正を行ない可及的速やかにこの修正を実行する。この場合互いに従属関係にあるモデルの修正には注意を要する。また制御装置の設定精

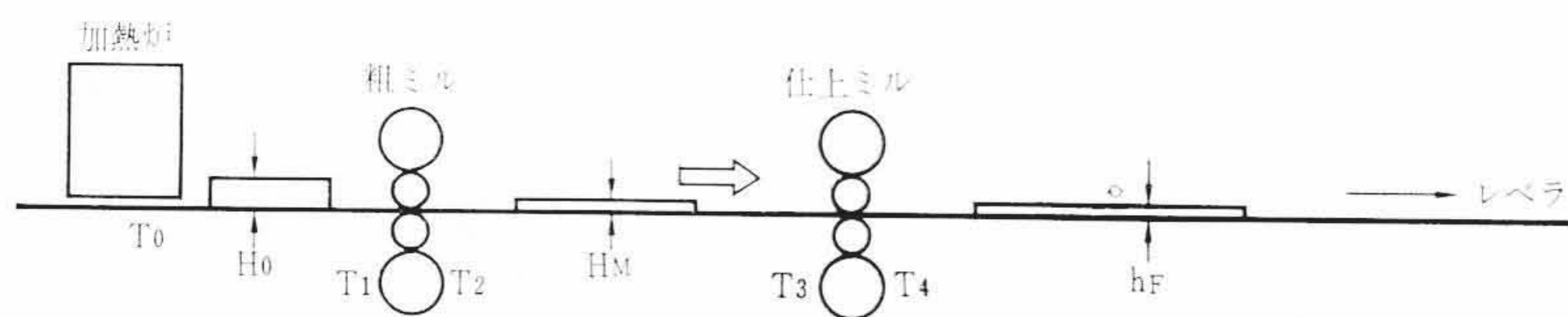


図 6 ミ ル ラ イ ン

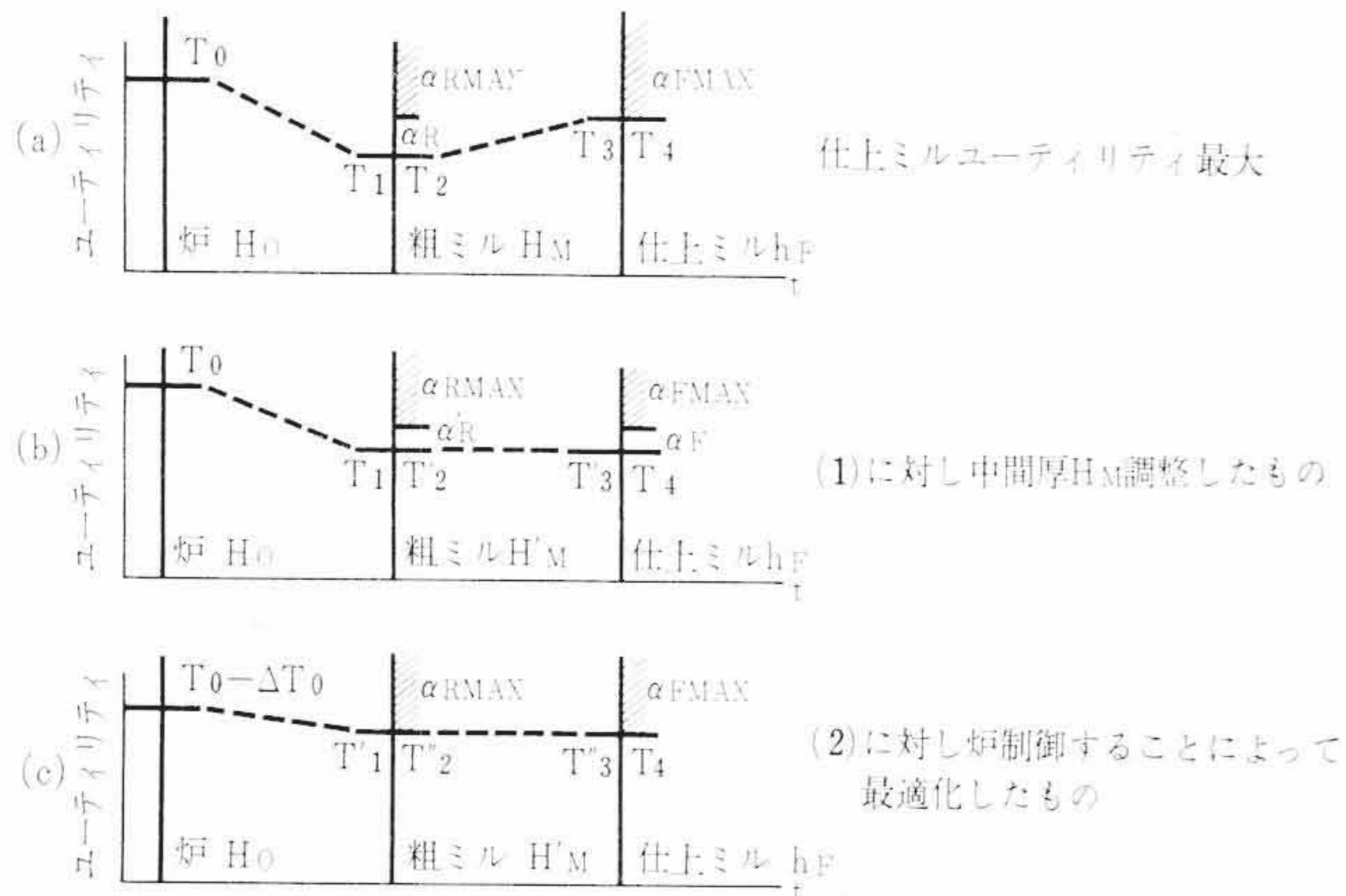


図 7 ユーティリティ制御

度も関係してくる。たとえば初期のパスでは設定精度より、設定時間を短縮するほうが優先するから、必ずしも目標どおりに設定されなくてもよい。逆にこのことが他の測定値に影響を有することに注意しなければならない。

さて全パスにわたって最適なパススケジュールを決定するために先に述べた手法にしたがって、順次第 1 パスから設定計算を行なうが、最終パスの計算が $h_n \leq h_F$ となったとき完了し、このときはじめて奇数パスで終わるか偶数パスで終わるかわかる。もしエッジがないミルのときは、偶数パスで終わることはサイクル時間の点で不経済であるから、動力の 2 乗平均がなお余裕のあるときは各パスでの負荷分担を増し、1 パス分減らして奇数パスで完了するようにする。この場合加速動力が圧延動力増分に見合って減少するから加速時間はわずかにのびるが、全作業時間は短くなる。

8. ミルユーティリティ

生産性を最大ならしめるためミル許容限界まで動力を使う。このためモータパワーの RMS (Root Mean Square) を計算する。理想的にはつぎのようにする。すなわち各パスごとに圧延時間とギャップ時間とを計測し、現時点までの動力の RMS を計算し、次パス動力の分配を加減する。さらにこの方法では計算によって過去の RMS を求める形になっているが、バックアップとして、モータアーマチャまたはインタポールの温度を実測してチェックする。この実測は応答が悪いが、比較的長時間の RMS ベースとして活用できる。

したがって

$$I_{RMS} = \left[\frac{\{(\text{前パスまでの等価電流})^2 \times (\text{等価時間}) + (\text{今回パス予定電流})^2 \times (\text{圧延時間})\}}{(\text{等価時間}) + (\text{圧延時間}) + (\text{ギャップタイム})} \right]^{1/2} \quad (14)$$

となる。この I_{RMS} が定格の 100% を越えていなければ今回パスは、その動力の余裕分だけ全圧延時間の短縮に貢献する。

このようにして圧延時間が短縮されることは、圧延ピッチの短縮につながり、加熱炉のプッシュグレートも小になってくる。実際の設備では仕上ミル、粗ミル、加熱炉の三者に協調のとれたユーティリティが期待される。このことを考慮したトータルユーティリティに関する基本的な要因に板厚と温度がある。炉から T_0 , H_0 で押出された材料が粗ミルで圧延された後 H_M , T_2 で、移送された後仕上ミルに T_3 ではいり、仕上圧延の後 h_F , T_4 で仕上るとする。この T_4 はあらかじめ定められている。これらの関係を図 6 に示す。

ここで与えられた仕様、すなわち T_0 で炉を押出された材料が、 H_0 から h_F まで圧延されるとする。このとき仕上温度 T_F と仕上厚 h_F を満足する仕上ミル最高効率運転を行なって図 7 の (a) になったとする。この場合は仕上ミルはよいが、粗ミルはなお余力がある。そこで中間厚 H_M を調整して粗ミルと仕上ミルのバランスをとったのが (b) である。これは (a) に比べ協調はとれているが、それぞれのミルはなお余力がある。この余力を利用するには加熱炉を制御する。第一に炉のプッシュレートを上げる。このことは結果として炉のユーティリティを上回るときは炉出測温度の低下をまねく。しかしもし炉に余力があれば燃料を増すことによってさらに生産性が向上する。そして炉のプッシュレートと燃料制御とが最適に制御されると (b) の温度条件を満足し、かつ $\Delta T_0 = 0$ の最適条件を満たしうような制御が実現できる。

9. 結 言

厚板ミルの計算機制御は生産性の向上のみならず、品質の向上をねらいとする高度なものである。このためにはプロセスを正しくは握するために検出装置がそれにふさわしいものでなければならない。かつ出力制御装置が、所定の精度で速応性を有するものでなければならない。計算機制御は、こうした検出部、制御部が、計算部情報処理部と協調のとれたシステムとなってはじめて高い性能を発揮するのである。今回は主として計算部に重点をおいて述べたが、機会を得て総合的な制御システムについて述べる予定である。

参 考 文 献

- (1) R. B. Sims: PIME 168, 191 (1954)
- (2) R. G. Schulz: Iron and Steel Eng. 127 (May. 1965)
- (3) 特許申請中