

圧延工程における計算機制御

Computer Control of the Rolling Mill

宅 間 豊*
Yutaka Takuma

内 容 梗 概

圧延工程の計算制御の目的は、生産能率をあげることと、品質向上とにあるが、ホットストリップミルにおける圧延スケジュール計算の簡単な例をあげて説明し、さらに、圧延機の設定計算、温度計算、シーケンス制御などの具体的な制御方法について述べる。また、計算機制御の範囲、対象は、各圧延機につき予想される効果と、費用につき検討して決定し、計算機の種類と、制御構成の方式も、それに応じて選択すべきであることを述べた。

1. 緒 言

圧延工程においても、計算機制御は、最近注目を浴びている問題であり、国外において、二、三の実施例についての報告があるが、国外、国内を問わず、いまだ研究、開発の途上にある。したがって、今後の開発、改善によりさらに進歩されるべきものであるが、計算機制御の目的、効果、およびその効果を得る方法の一例の説明と、計算制御される部分の考察を行ない、また、制御上の問題点についてふれる。

2. 計算機制御の目的と効果

最近の圧延設備においては、自動プログラム制御、自動板厚制御、ループ制御、シャアの自動切断など、設備の自動化が進められ、すでに多くの成果をあげている。また、多数のデータ処理装置も実用段階に達している。これらの自動設備は、圧延設備全体のうちで、単に各部分の自動運転、あるいは記録にとどまっているが、これらをさらに統括して有機的に運転するため、制御計算機により運転の指示を与える方法が最近提唱されている。

計算機制御の目的は、単位時間当たり生産量の向上、および品質、歩留りの向上の点で、合理化された圧延設備を最高の効率で活用することにあると言える。

ただ圧延工程がきわめて複雑な関係を有する多数の変数に支配され、また高い精度をもった決定的なプロセス方程式が明確にされていない部分が多く、さらに工程がきわめて高速度で行なわれるものであるため、全圧延工程の一貫した計算制御を行なうためには、計算機本体、各種の測定装置、自動運転装置などがかなりの価格の装置になると思われる。したがって、計算制御する対象と規模、その方式については、各圧延工程における生産の実際について厳密な解析と検討のうえで決定しなければならない。

圧延工程における計算機制御の実施状況をみると、最近、製作中のものを含めるとかなりの数の設備が報じられているが^{(1)~(4)}、その多くは、工程中の一部の部分的な計算制御化であることは、これをうらがきしているものと考えられる。しかし、すでに、ホットストリップミルの全工程の大規模な計算制御化についても報告されており⁽⁵⁾⁽⁶⁾、今後、急速に、圧延工程中の各部門に、種々の形のものが実施されていくであろう。

圧延工程における計算機制御の成果について、明確に数値的に報告されたものは現在までになく、また、各プラントにおいて、設備、生産方法などにつき特殊性を有するので一般的に述べることはむずかしいが、ホットストリップミルなどにおいては、次のような効果により、大規模な計算機制御を導入しても十分に利益があげら

れると言われている。

- (i) 製品仕様の変更のたびに行なわれる圧延機圧下、速度など、設定に要する時間が、計算、および設定の自動化により、従来よりはるかに短縮される。
- (ii) 圧延スケジュールの適正化により、設備能力を有効に用いる結果、圧延ピッチが短縮され、単位時間当たり生産量が増加する。
- (iii) 圧延設備が、その能力内において有効に利用されるため、設備の損傷などによる停止時間が減少する。
- (iv) 圧延失敗製品の減少により生産が向上し、また歩留りが向上する。
- (v) 合格トン数の増加とスクラップ減少により歩留りが向上する。

上述の数値的な結果を得るには、長期間の運転実績によらねばならないが、圧延プラントの生産量が多いほど、また、設備価格が高価であるほど、上述効果による計算機制御設置の妥当性が増すといえる。

3. 計算機制御の方法

3.1 自 動 化

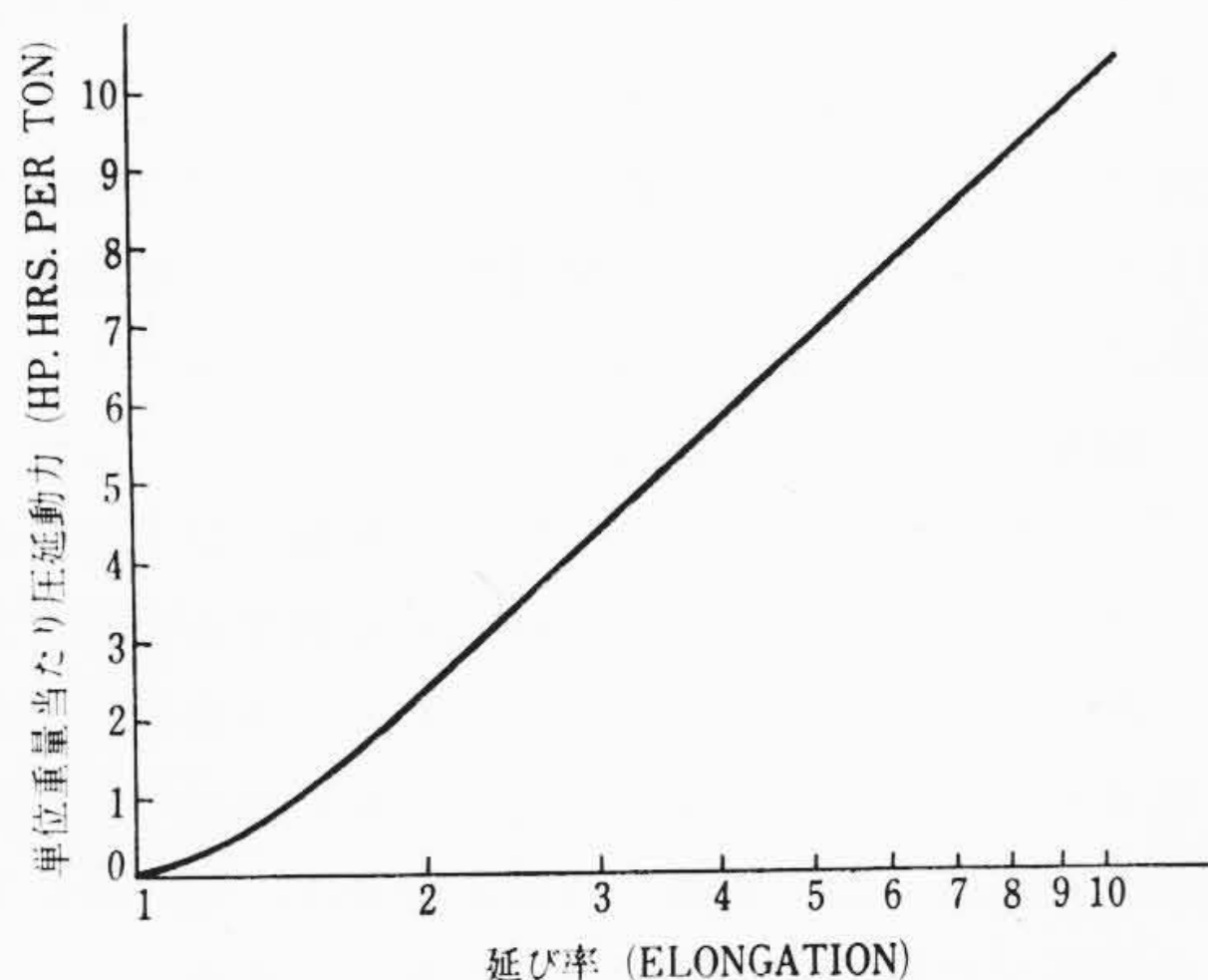
計算機制御においては、圧下、開閉などの位置ぎめや、速度制御などの設備の自動化が前提である。事実、圧延スケジュール変更時における圧延機の設定時間の短縮は、計算機制御による効率向上の効果のうちで大きく扱われているが、これは自動化そのものの成果である。また、自動化の内容において、ただ従来手計算によっていたものが自動化されたというだけでなく、ストアド・プログラム計算機の応用により、シーケンス制御的な意味でも、位置ぎめ、速度制御、厚み制御、データ処理などの各自動装置を有機的に連結して、有効に働かせることが可能になる点が大きな進歩といえるであろう。

3.2 圧延機設定制御

計算機制御においては、単にスケジュール計算を含めた工程の自動化ではなく、プラント内の各設備の能力を最大限に利用して、最高の生産効率をあげるのが、その責務であろう。そのために、圧延機の設定計算は、全プラント中の各圧延機の負荷分担が適当になり、同時に最大生産があげられるようにし、圧延機の許容圧延圧力、スピードコーン（許容速度範囲）など設備の有する能力、あるいは特定の圧延機の負荷率の軽減など特に運転員から与えられた指令、および温度計算より与えられた設定条件と照合し、各設備の圧下、速度などを設定する。

連続式のホットストリップ圧延機の圧延スケジュール計算の一例を簡単に紹介する。

* 日立製作所日立工場



第1図 Horse Power Hours per Ton 曲線

Horse Power Hours per Ton 曲線は、圧延前後における圧延材の伸び率と、圧延に要するトン当たりの Horse Power Hours との関係を示すもので⁽⁷⁾、その一例を第1図に示す。圧延を圧延条件により、粗圧延、仕上圧延などに分けて扱えば、実測値がよくこの曲線上にのることが知られている。

$$\text{伸び率} = \frac{\text{圧延後材料長さ}}{\text{圧延前材料長さ}} = \frac{\text{圧延前板厚}}{\text{圧延後板厚}} = \frac{h_0}{h} \quad (1)$$

とすると、第1図のように、伸び率の対数に対して直線で近似される場合には、

$$\text{Horse Power Hours per Ton} = p = F(h_0, h) \quad (2)$$

は、

$$p = m \log \frac{h_0}{h} + n \quad (3)$$

となる。板厚が薄くなるにしたがい、第1図の関係は直線からずれてくるが、その関数形については、これまで種々発表されており、適用に当たっては、その対象圧延機において実測された実験式を用いるべきである。

圧延の所要 Horse Power Hours per Ton は、6 スタンドの圧延においては、

$$\sum_{i=1}^6 p_i = F(h_0, h_6) \quad (4)$$

$$p_i = F((h_0, h_i) - F(h_0, h_{i-1})) \quad (5)$$

となる。各圧延スタンドの馬力の比を $K_1, K_2, \dots, K_6$ とすると、

$$p_i = \frac{K_i \sum_{j=1}^6 p_j}{\sum_{j=1}^6 K_j} = \xi_i \sum_{j=1}^6 p_j \quad (6)$$

となるように p_i をとると、各スタンドの圧延馬力の配分は希望する値となる。(6)式により定めた p_i を(5)式に代入することにより h_i が定められる。たとえば、(3)式の関係を用いると、

$$\sum_{i=1}^6 p_i = m \log \frac{h_0}{h_6} + n$$

$$p_i = \xi_i \sum_{i=1}^6 p_i = \xi_i m \log \frac{h_0}{h_6} + \xi_i n \quad (7)$$

また、

$$p_i = m \log \frac{h_0}{h_i} + n \quad (8)$$

であるから、

$$h_i = h_0 e^{n(1-\xi_i)} \left(\frac{h_6}{h_0} \right)^{\xi_i} \quad (9)$$

となり、材料厚み h_0 、仕上り厚み h_6 、定められた負荷配分率 ξ_i により一義的に負荷が配分され、出口板厚が決定される。

各圧延スタンドの圧下位置の設定指令は、各スタンドの圧延圧力を推定し、スタンドのバネ定数を考慮して設定しなければならない。圧延圧力 F_i を圧下量 $\Delta h_i = h_{i-1} - h_i$ より計算する式は多数発表されており、たとえば⁽⁸⁾、

$$F_i = \sigma_i \cdot \omega \cdot \sqrt{R_i \cdot \Delta h_i} \left(1 + 11.1 \times 10^{-4} \sigma_i \sqrt{\frac{R_i}{\Delta h_i}} \right) \quad (10)$$

ここで、 σ_i : 平均圧延圧力

ω : 板幅

R_i : 圧延ロール半径

などがあるが、一般に、計算結果が、実測値とかなり誤差を有する値を示すことがあるので、計算の定数、パラメータには、実測による経験値を用いることが必要である。

圧延圧力が求められると、圧延スタンドの実測バネ定数 M と、締め込み量などによる定数 S_0 より、圧下の設定位置は

$$S_i = h_i - \frac{F_i}{M_i} + S_0 \quad (11)$$

により与えられる。

圧下設定とともに重要なものは、圧延速度の設定であるが、最終圧延スタンドの出口速度 V_6 を与えると、各スタンドの出口速度は

$$V_i = V_6 \cdot \frac{h_6}{h_i} \quad (12)$$

で与えられる。圧延中における所要馬力は、1 スラブの重量を W トン、圧延時間を t_r とすると、

$$t_r = \frac{L_6}{V_6} \quad (13)$$

であるから、

$$\text{Horse Power} = P_i = p_i \times \frac{W}{t_r} \quad (14)$$

$$= \frac{p_i \cdot W \cdot V_6}{L_6} \quad (15)$$

となる。圧延ピッチを t_g とすると、圧延馬力の自乗平均値は、

$$P_{r,m,s,i} = \sqrt{\frac{P_i^2 \cdot t_r}{t_g}} = \sqrt{\frac{p_i^2 W^2 V_6}{L_6 t_g}} \quad (16)$$

圧延電動機をもっとも有効に使用するのには、 $P_{r,m,s,i}$ が電動機の定格馬力 $P_{R,i}$ に等しいときと考えられるが、そのときの t_g は

$$t_g = \frac{p_i^2 W^2 \cdot V_6}{P_{R,i}^2 L_6} \quad (17)$$

単位時間当たりの生産量 T_h トンは

$$T_h = \frac{W}{t_g} \quad (18)$$

で、当然 t_g を小さくすることが生産量をあげることになるが、各スラブの工程間に、作業上必要な時間を t_h とすると、

$$t_g = \frac{L_6}{V_6} + t_h \quad (19)$$

であるから、(17)式と(19)式より、 V_6 を求めると、(20)式となる。

$$V_6 = \frac{L_6 P_{R,i}^2}{2 p_i^2 W^2} \left\{ t_h + \sqrt{t_h^2 + \frac{4 p_i^2 W^2}{P_{R,i}^2}} \right\} \quad (20)$$

この V_6, t_g で圧延した場合に、電動機の自乗平均出力は定格値内において、最高の生産高があげられることになる。

(20) 式の V_6 は各圧延スタンドに対してそれぞれ求められるが、負荷配分率 K_i が、電動機定格に比例して与えられている場合には、同一の値となる。また、各圧延スタンドはスピードコーンで示される許容速度の範囲を有するので、その最大あるいは最小速度 $V_{\max}, V_{\min}$ の間になければならない。たとえば、計算された V_{6K} が、 $V_{6\max}$ より大きい場合には、 V_6 は $V_{6\max}$ に制限されるから、単位時間当たり生産高は、

$$T_h = W \cdot \frac{1}{t_h + \frac{L_6}{V_{6\max}}} \dots\dots\dots (21)$$

となり、分割負荷 p_i に関係のない一定値となる。

また計算された V_{6K} が、 $V_{6\min}$ より小さい場合には、 V_6 は $V_{6\min}$ に制限され、この場合には、電動機が過負荷とならぬよう、

$$t_g = \frac{p_i^2 W^2 V_{6\min}}{L_6 P_{R,i}^2} \dots\dots\dots (22)$$

にとらねばならない。この場合単位時間当たり生産高は

$$T_h = \frac{W}{t_h + \frac{p_i^2 W^2 V_{6\min}}{L_6 P_{R,i}^2}} \dots\dots\dots (23)$$

以上の計算を粗圧延、仕上圧延について行ない、おのこの圧延ピッチ t_{gR} と t_{gF} とを比較し、 t_{gR} と t_{gF} とが等しくなるようにおのこの負荷分担をとることにより、全プラントを通じて最大生産のスケジュールを得ることができる。

また、製品コイルの幅はむだなく所定の値となっていることが必要であるが、圧延工程中において、直接板幅を制御するものは、粗圧延機のエッジャーしかないので、以後の仕上圧延における幅広がりまでを計算して、粗圧延機エッジャー開度を設定しなければならない。以上は最大生産を得ることのみを考えて設定を計算したものであるが、仕上圧延機出口温度、コイラー前温度は、ストリップの質をきめる重要な要素であるので、温度計算に設定計算結果を与え温度降下を計算してチェックすることが必要である。

また実際圧延に当たっては、加熱炉中における経過、その後の工程における遅延、あるいは材料寸法や材料成分の多少の差によって、各圧延材ごとに偏差があるので、圧下や速度には、多少の余裕を与えた設定を基準とし、偏差に対する補正制御の余地を残しておかねばならない。第2図に、これら設定計算のブロック図を示す。図において、設定計算により粗圧延機、仕上圧延機の圧下位置、エッジャーの開度、仕上圧延機速度などの設定値が与えられるが、粗圧延機最終スタンドにおける圧延電流より、そのスラブの変形抵抗の偏差を推定して、さきの仕上圧延機圧下の設定計算の値に補正值を加えることにより、仕上圧延機における板厚変動が防がれる。また、先行圧延材のコブルなどにより、粗出口テーブル上で遅延を生じた場合は、設定計算の修正を行なって設定指令値を与える。また、仕上圧延機第1スタンドのロードセルにより、所定の圧下量に対する圧延圧力の変動を検出し、あらかじめ第2スタンド以下に補

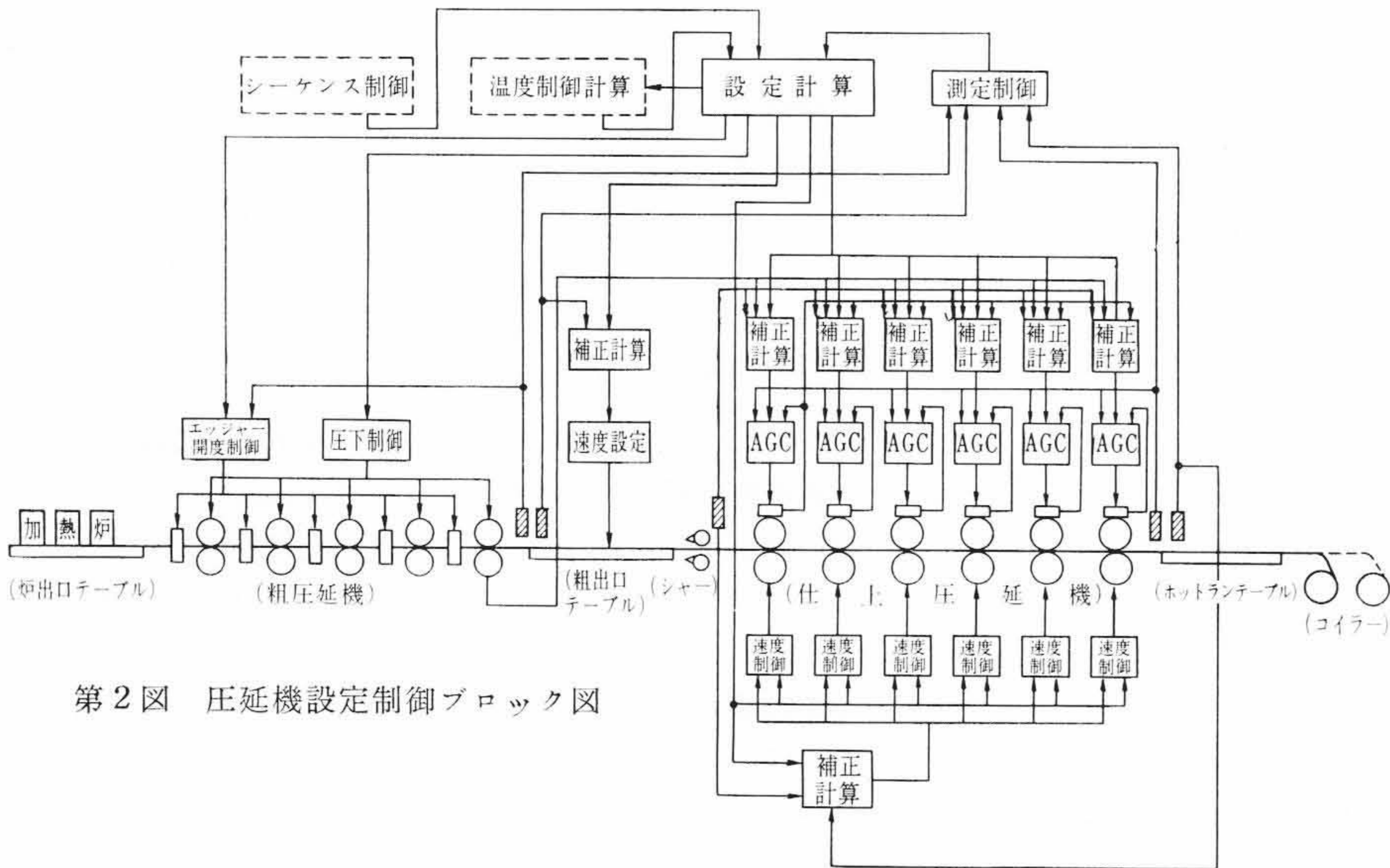
正計算を行なわせる。以上は圧延材の圧延スタンド通板前の補正であって、ストリップ先端のオフ・ゲージを減少させることができる。通板後は、各スタンドに設置された自動板厚制御装置により、厚み制御を行なわせる。仕上圧延機速度は、仕上圧延機出口、入口の温度検出により、温度偏差を補正するように制御される。また、エッジャー開度制御は、粗圧延機出口の板幅ゲージにより、通常のフィードバック制御すると同時に、粗出口板幅、仕上出口板幅の測定値に基づき、次のスラブに対する修正計算結果を設定計算より与えられて、次の圧延材にそなえる。すなわち、中央の設定計算において、圧延スケジュールの決定を行ない、各スラブの予定値よりの偏差に伴う板厚制御、温度制御上の補正計算は、偏差分に対する補正量のみの簡単な計算によって行なうことができる。

可逆圧延機的最適スケジュールは、自乗平均出力が定格値以下という制限のもとに、最短時間で圧延できるものといえるが、加減速、圧下などの位置ぎめの調整時間の測定値を含む繰り返し計算による長い計算を要する。この場合も、各スラブの標準に対する偏差にこの計算をくり返すのは得策でない。第1あるいは第2パスの圧延負荷により、材料の変形抵抗を知り、次回より最終までの圧下の増減量を計算して、パス回数の減少の可能性を判断し、あるいは、各パスの圧延速度の増加の可能性、または減少の必要性を判断して制御することにより、標準工程における余裕を少なくすること、および標準工程よりの圧延時間減少の可能性が得られる。

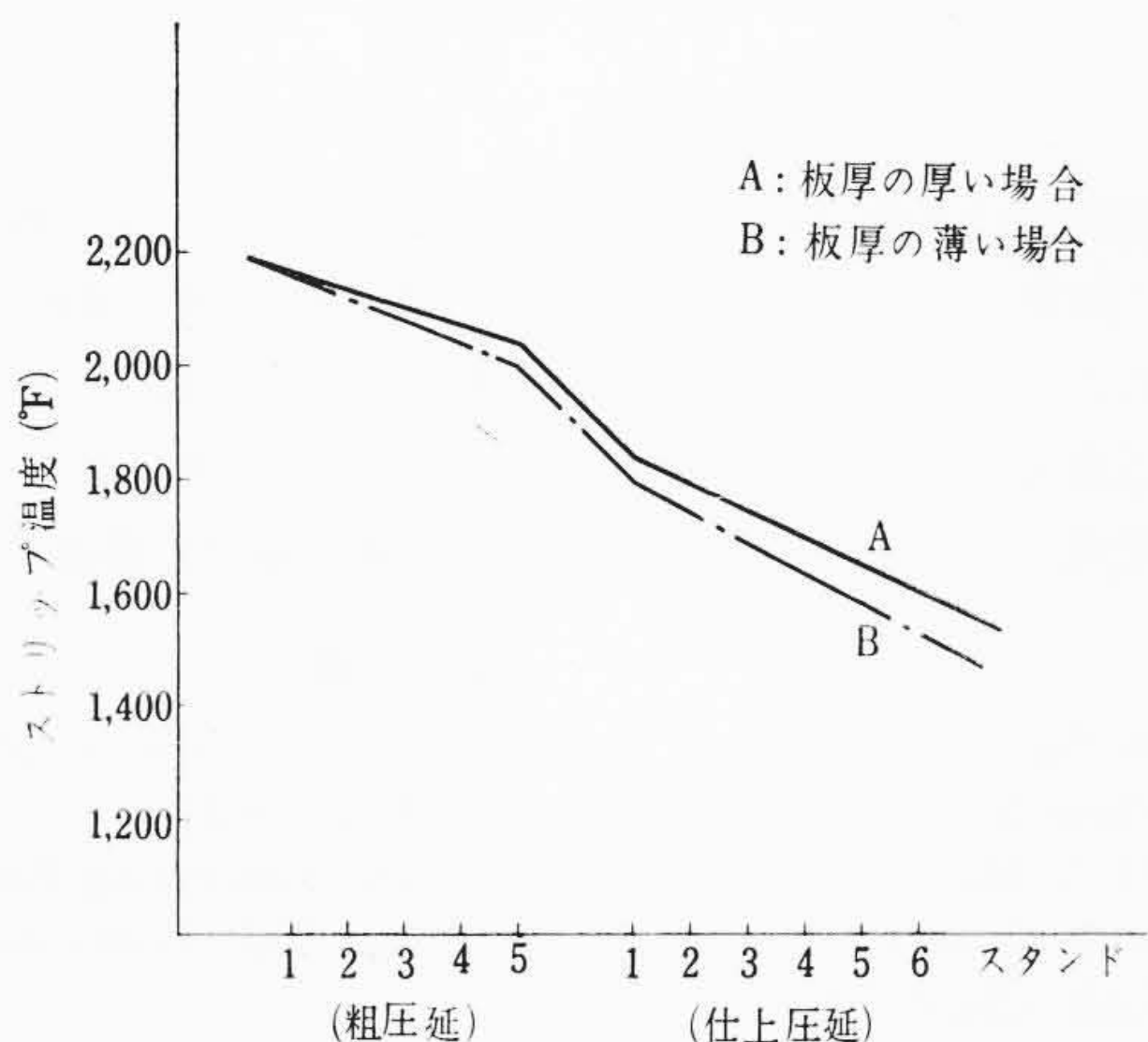
3.3 温度 制 御

ホットストリップミルにおいて、仕上圧延機出口温度、コイラー巻取時温度は、製品ストリップの品質を決定する重要な要素である。また、可逆圧延機、連続圧延機を問わず、温度降下の推定は、圧延負荷を正しく計算するためにも重要な問題である。圧延中における温度降下に影響するおもな要素は、圧延材表面からの輻射（ふくしゃ）による熱放射、圧延変形による熱の発生、および圧延ロールを通して逃げる熱の伝達と考えられる。また、圧延材のテーブル走行中の温度降下は主として輻射による熱放散と、テーブルロールによる熱伝達によるもの、また、ホットランテーブル上においては、冷却水による冷却であろう。これらの効果を理論的に算出するのはきわめて困難であり、多数の実測データより統計的な解析を行なわなければならない⁽⁹⁾。温度降下の傾向の一例を第3図に示す。粗圧延、および仕上圧延の設定計算に基づき、この実測関数に照らしておのこの温度降下をチェックし、それが適当な値にはいらぬ場合は、設定計算をやりなおす必要がある。温度制御の一例のブロック図を第4図に示す。

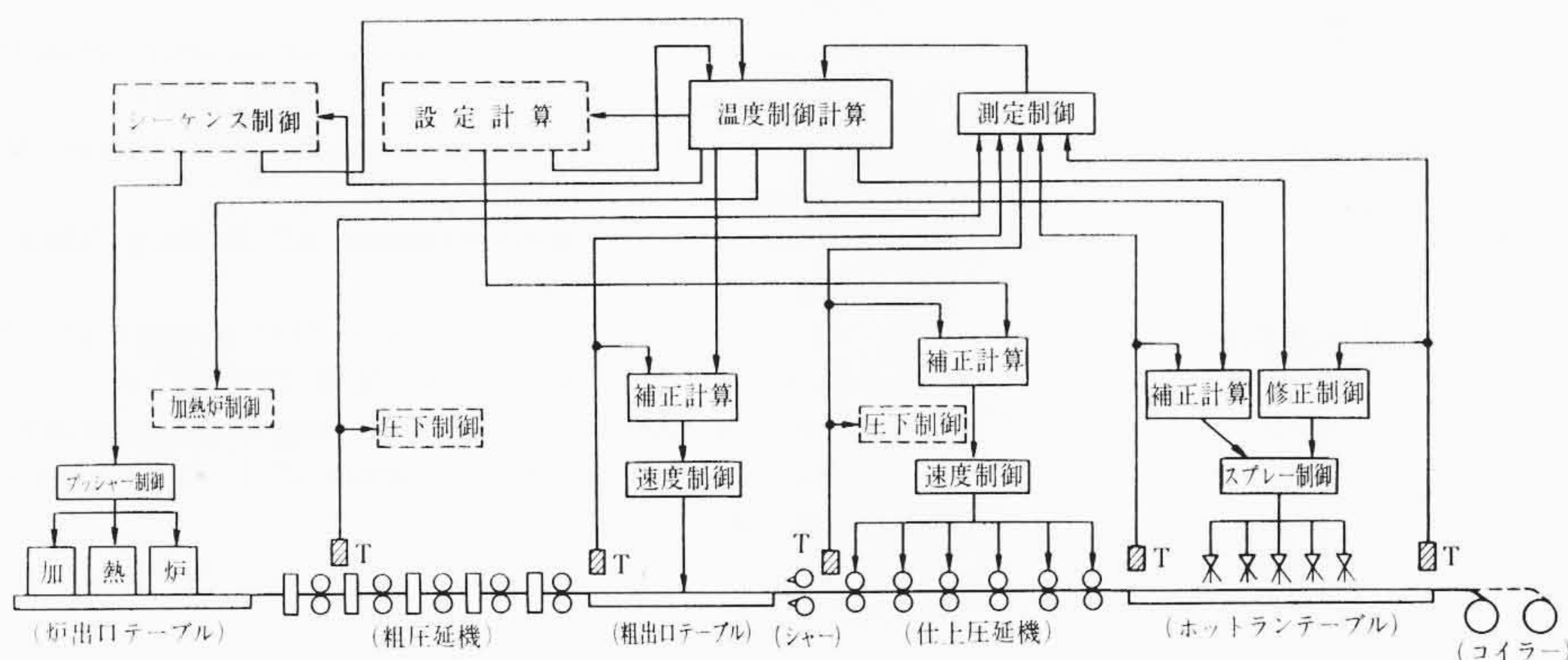
温度計算の修正を経た設定計算により圧延機圧下、速度が設定され、ホットランテーブル上の冷却水スプレーは、速度、および所要温度降下量より計算された値の開度に弁を設定する指示が与えられる。また各圧延材は加熱中の条件、および圧延工程中の多少の遅延などにより、予定値に対して偏差を有しているので、それを補正することが必要である。粗圧延機第1スタンド出口におけるスラブ温度を測定し、その偏差により、シーケンス制御を経て、加熱炉プッシャー制御に、スラブ押しし時機を早めるように指示を出すことができる。また、粗圧延機出口温度の測定により、粗出口テーブルの速度



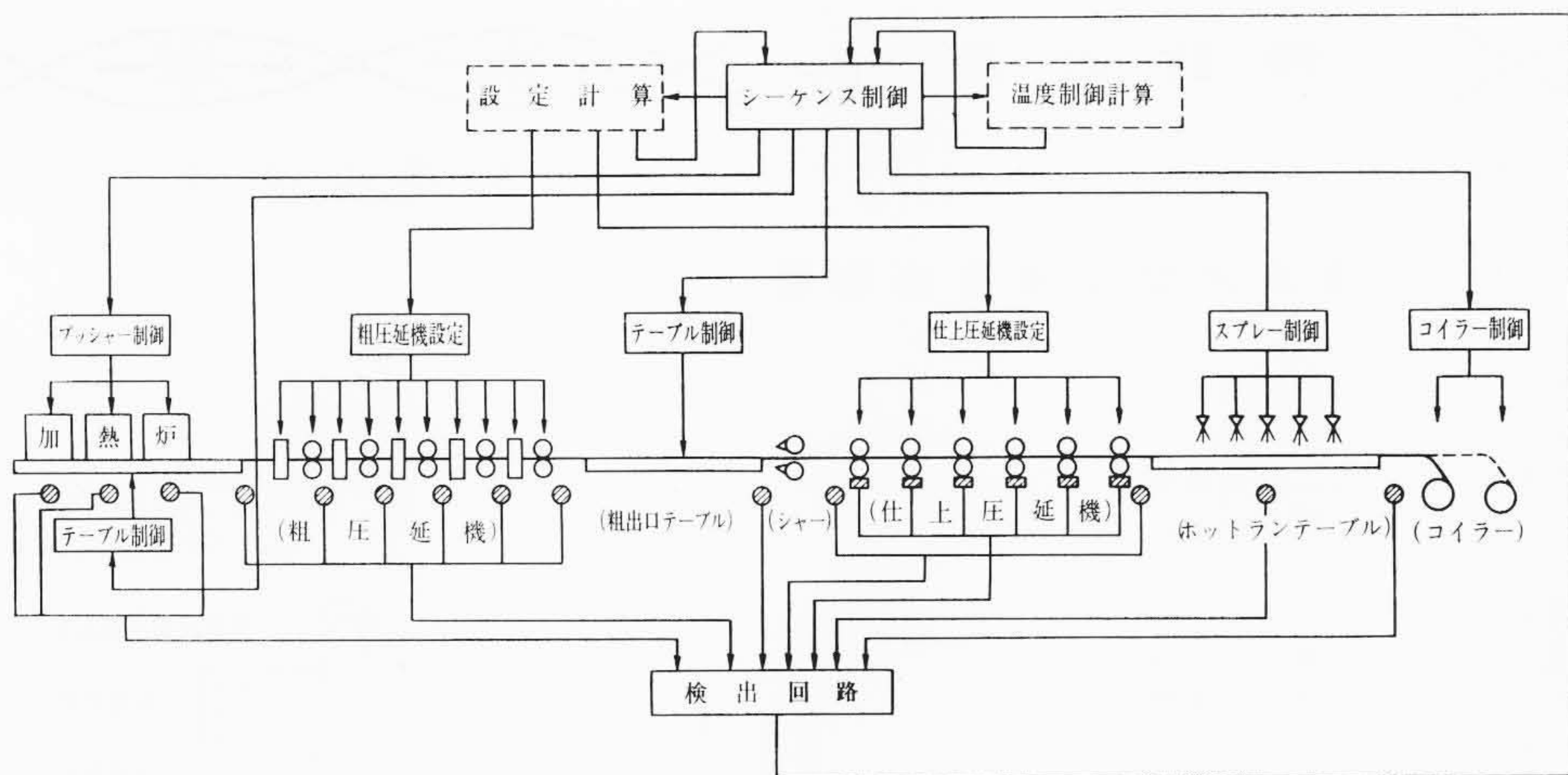
第2図 圧延機設定制御ブロック図



第3図 ホットストリップミルにおける
圧延材温度降下



第4図 温度制御ブロック図



第5図 シーケンス制御ブロック図

を変えて、仕上入口における圧延材温度を制御する。また、仕上入口における圧延材温度を測定し、その偏差により、仕上圧延速度を変化させ、仕上圧延機出口におけるストリップの温度のバラツキを減少させることができる。仕上圧延機出口温度の測定は、上述の温度計算の修正に使用されると同時に、その偏差により、ホットランテーブル上の冷却水開度の補正計算を行なって、あらかじめ制御し、ストリップ先端が、コイラー前の温度検出器に達してから後は、この温度をフィードバックして修正制御する。

3.4 シーケンス制御

シーケンス制御は、圧延材の工程中の流れを絶えず追跡し、計算を行なう指令を発すると同時に、圧延設備中の各制御装置に必要な情報指令を与えるもので第5図にそのブロックを示す。

加熱炉プッシャーの記録装置と連結して、加熱炉より次に押出されるスラブの情報を得、また工程上の適当な時機に、プッシャーに対してスラブ押出しの指令を与える。加熱炉より押出されたスラブは、炉出口テーブル、粗圧延機、粗出口テーブル、シャワー、仕上圧延機、ホットランアウトテーブルを経てコイラーに至るが、その間圧延材の工程を追跡する光電検出器あるいはロードセルを各工程中におき、その信号により、各圧延材が工程中のどの部分にあるかを常にチェック記憶しておく。圧延材の流れにしたがい、設定計算、温度計算を行なわしめる指令を与え、その結果を適当な時機に、位置、速度などの各制御装置に与える。この指令を与える時機、指令の与え方も、温度計算、設定計算の結果をチェックして進められる。全工程中には同時に3個のスラブが工程中にあり、そのおのこのために各種の制御と調整を行なわねばならない。したがって、圧延材の処理状況によっては、次のスラブの工程を一部で変化あるいは停止せしめねばならないので、炉出口テーブル、粗出口テーブル

に対する停止指令など、特別な指令を与えることが必要である。したがって、シーケンス制御には数個の優先順位がおかれ、優先順位にしたがって処理して行くことが必要となる。また、圧延失敗によりコブルを生じた場合には、追跡していた圧延材を、コブルとして別に処理して計算し、それにより工程の遅延を生じた圧延材が、続いて圧延に耐えるか、あるいは特別なスケジュールで処理するか、あるいはまったく圧延不能かを判断して、その結果により各制御装置および運転員に指示を与える機能も必要である。

4. 計算機制御の問題点と計算機

計算機制御の問題点として、次の点があげられる。

(i) 計算機の信頼性

オン・ラインで使用している機器が故障した場合の生産の遅延は大きいので、計算機に使用されている膨大な部品数を考えると、計算機故障時にもなるべく機能を落とさずに作業が続けられる方式を考えておくべきである。

(ii) 圧延工程の計算式

圧延工程が、複雑な現象であるため、計算式が多数の複雑なものになり、実験的なパラメータによる数値を使用しなければならないのでその解析を行なうことが必要である。

(iii) 圧延工程の速度

圧延工程が高速で行なわれるので、計算機の高速度性が要求される。

(iv) 測定器

測定器が大量使用され、また、その測定精度によって計算制御結果が左右されるものがあるが、温度その他、今後とも研究開発を進めていかねばならない問題が多い。

圧延工程の計算制御方式の決定と、計算機の選択は、これら問題点と、前述の制御目的とを考慮してそれぞれ適当なものを選ばねば

ならない。設定制御、温度制御などにおいて、材料と製品仕様とが与えられて最適の標準スケジュールを作成するのは、多数の変数と、多数の計算式および資料を用いて計算する作業であるため、かなり大容量高速度のデジタル計算機が必要である。また全体を統括するシーケンス制御も、その性格上デジタル計算機を使用することが適当である。しかし、標準工程に対する各製品ごとの偏差の補正制御は、多数の計算をほとんど同時に、またきわめて短時間に行なわねばならない。したがって、補正計算は変数を少なく、関係式を簡単に行なう必要があり、標準スケジュール計算とは別個の計算方法によるべきである。このような偏差補正の部分をも目的とした計算制御化には、アナログ計算機を使用するほうが適当な場合が多い。また、この部分的な計算機構が、それぞれ働きうるように設計されている場合には、故障による完全な停止の機会を非常に小さくすることができる。

前者の大容量デジタル計算機としては、多数の高速磁気コア記憶容量が必要であり、また、データなどのドラム記憶は数千ないしは数万程度まで、制御方法によっては必要となる。また、工程が高速で行なわれるため、ワード・タイムは非常に短いものが要求される。測定点も数百個の信号が対象となるので、多数のデータを信号の優先順位により、高速で処理して行く能力が必要である。

後者の部分的制御目的用途としては、小形のデジタル計算機もアナログ計算機もあり、最近のアナログ計算には、プログラミングの装置を有する便利なものもある。

5. 結 言

圧延工程の計算機制御につき、例によりその方法を一般的に説明したが、開発途上の問題であり、また、実際圧延機の運転上の問題、データによらなければならない点が多いので、今後さらに圧延機使用者のご協力をいただき、進歩させてゆきたいと考える。終わりに、日立研究所、日立工場の関係諸氏のご指導ご協力に感謝する。

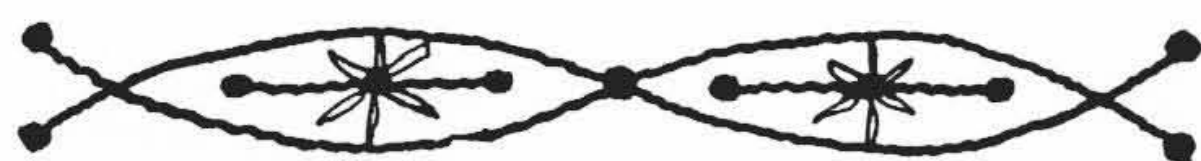
参 考 文 献

- (1) W. Smith: On-line Computer Control for a Reversing Plate Mill, I. & S. Eng., 77 (Aug. 1962)
- (2) M. D. McMahon: Installation and Operating Experience with Computer and Programmed Mill Controls, I. & S. Eng. (Sept. 1963)
- (3) M. D. McMahon: Control Computers, Instrument & Control Systems, Vol. 36, 100 (Sept. 1963)
- (4) M. D. McMahon: Digital Computer Control, Control Eng., 73 (Sept. 1963)
- (5) R. G. Massey: Three Interlinked Computers to Run New British Works, Control Eng., 128 (June. 1962)
- (6) A. S. Brower: Controlling a Complete Hot Strip Mill, Control Eng., 57 (Oct. 1963)
- (7) J. H. Taylor: Power Requirements of Rolling Mills, I. & S. Eng., 55 (Oct. 1956)
- (8) 今井一郎: ホットストリップミルにおける連続圧延の理論とその応用, 機械学会誌 Vol. 66, 938 (1963, 7月)
- (9) P. W. Lee: A Method for Predicting Temperatures in Continuous Hot Strip Mill, Journal of I. & S. Institute, 270 (Mar. 1963)



特許第413415号(特公昭38-9419号)

特 許 の 紹 介



菅 原 理 夫・山 本 学

高 周 波 放 電 高 温 発 生 装 置

通常プラズマジェットとしてよく知られているような放電現象を利用した高温発生装置としては、従来一般に直流アーク放電形のものを用いられている。しかしながら、この形式のものは、放電電極ごとに高温・高速のプラズマ炎の噴射ノズルを形成する陽極の消耗がはげしくて放電プラズマの安定性が悪い。

この発明では、主放電として高周波無電極放電を利用することにより、上述の欠点をなくすとともに、小電力の補助用直流アーク放電またはトーチ放電を併用することにより、主放電たる高周波無電極放電の起動、維持ならびに停止操作を容易にしている。

図は補助放電として小電力の直流アーク放電を用いたものを示す。放電気体導入口より適当な放電気体を導入し、不活性気体導入口より小量の不活性気体を導入しながら、高周波電源より空洞共振器に高周波電力を供給し、一方直流電源により陰、陽極間に直流高電圧を印加してやると、補助用直流アーク放電に続いて安定な高周波無電極放電が発生する。この場合の補助用直流アーク放電は、小電力かつ不活性気体中で動作するから、電極の消耗はほとんど問題とならない。また、主放電たる高周波無電極放電は、単独起動の場合は100kW程度以上の大電力を必要とするが、補助用アーク放電を用いることにより、10~20kW程度の小電力でも十分その起動および維持が可能となる。さらに、補助用アーク放電の制御により主放電の起動、維持ならびに停止操作が容易に行なわれ得る。

(松島)

