

センジマミルへの AGC および伸び率制御の採用について

Automatic Gage Control and Automatic Elongation Control for Sendzimir Mill

三 井 光*

Hikaru Mitsui

分 田 実**

Minoru Waketa

Synopsis:

In the manufacturing process of electrical steel strip, control of thickness accuracy is particularly important from the standpoint of quality control.

With special emphasis laid on this point, automatic gage control and elongation control were adopted for Sendzimir mill at Fukiai Works.

Automatic gage control is operated with a combined system of both the screw-down control and the tension control, based on the detected deviation of strip thickness measured on the delivery side.

Based on the result of careful analysis, various control factors such as ON TIME of screw-down, OFF TIME of control, and tension gain were set, and stable control results were obtained.

Automatic elongation control is operated with screw-down and tension control system as in the case of automatic gage control, based on detected deviation of elongation.

This brought about satisfactory result of holding down the deviation of elongation under 0.2%.

1. 緒 言

近年鋼板の板厚精度に対する要求は益々きびしくなりつつある。センジマミルではミル自体の剛性が高く、フォローバルブのフィードバック機構と相まってミル自体の板厚矯正能力が高いので、AGC の効果は他の圧延機ほどではないともいわれている。既存のセンジマミルでは手動制御によるものが多く、自動板厚制御を実施している例はまだ少い。当社荻合工場でも従来手動板厚制御を

行なっていたが、同時に自動板厚制御についても検討を行なってきた。

今回3号センジマミルの増設に際しては、ストリップの長手方向の板厚精度の向上、調質を目的とする場合の伸び率を一定にすること、および高度な作業が要求されるミルオペレーターの作業量を軽減させるという目的から、はじめて自動板厚制御装置および伸び率制御装置を採用することにした。

自動板厚制御装置は、板厚偏差検出をストリップ出側X線厚さ計で行ない、制御方式は圧下制御

* 荻合工場製造部鋼帯課長

** 荻合工場管理部熱管理課

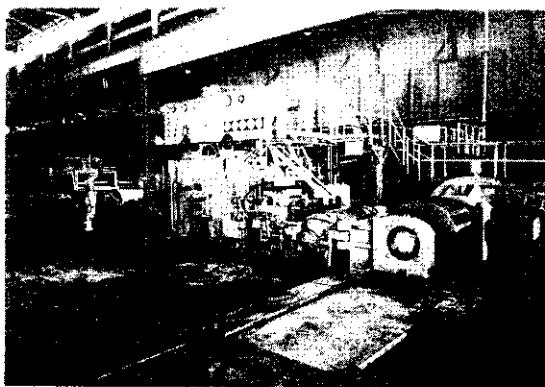


Photo. 1 No. 3 Sendzimir mill

系および張力制御系の両者を組合せた方式を用いている。

両制御系を組合せた自動板厚制御の運転調整においては、それぞれの調整要素を、圧下テスト、手動圧延における採取データ、遅れ時間の測定データなどを基にして設定し、これらの値を学習的な方法で圧延しながら補正していった。その結果自動板厚制御の運転結果は当初より改良され、かなり精度の高い板厚制御が可能となった。

一方、伸び率制御装置では、測定方式を非連続的なものとしたため、伸び率制御はサンプリング方式である。バネ定数が高いセンジミルにおいては、4段圧延機などに比べ伸び率制御にはむしろ不向の要素が強いが、各制御要素の調整によりかなり低い伸び率での制御も可能となった。

2. 圧延機仕様

今回、自動板厚制御装置および伸び率制御装置

Table 1 Specification of Sendzimir reversing cold strip mill

Mill type	ZR-21A-44
Rolling material	Electrical steel
Coil	
thickness	max 2.8mm
width	710~1,120mm
outer dia.	max 1,700mmφ
inner dia.	610mmφ
Work roll	80mmφ×1,226mm (face)
Mill speed	max. 600m/min

を設置したミルの主な仕様を示すと **Table 1** のようになる。

このミルでは直流変換方式に、従来1・2号ミルで用いて来たMG方式をやめ、シリコン制御整流器(サイリスタ)を採用した点が特徴である。

3. 自動板厚制御 (AGC)

一般的な板厚制御の原理について簡単にふれ、次いで今回設置した AGC の概要について以下に述べてみたい。

3.1 板厚制御の原理

冷間圧延において圧延方向の板厚変化を起す要因としては

- (1) 圧延機の弾性変形特性に影響する要因
- (2) 材料の塑性変形特性に影響する要因

の2つがあげられる。一般に自動板厚制御といわれるものは(1)については圧下制御を、(2)については張力制御を行なうのが通例である。理論的にはこれら一方の制御で AGC は可能であるが、一般には高速圧延に対して応答速度を高め、板厚精度をあげるために両者を組合せたものが採用されている。

圧延機の出側板厚はミルの弾性曲線と材料の塑性曲線の交点として表わされる。(Fig. 1)

弾性曲線は一般には次式で表わされる。

$$P = K(h - S_0) \dots\dots\dots (1)$$

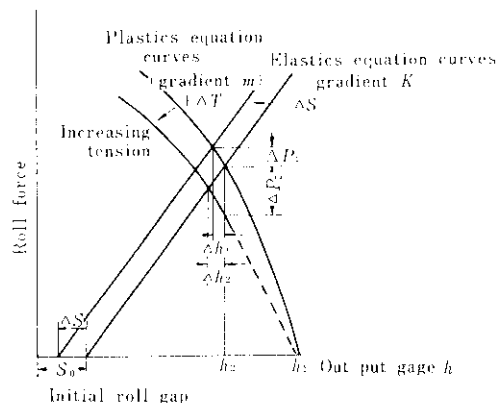


Fig. 1 A P/h diagram, effect of roll force and strip tension on rolled strip thickness

一方塑性曲線は良く知られた式として次式で示される。

$$P = kb \sqrt{R'} (h_1 - h_2) f(\gamma, \lambda, T) \dots\dots(2)$$

h : 板厚

h_1, h_2 : 入側, 出側板厚

P : 圧下力

K : ミルのバネ定数

k : 材料の平面均一変形抵抗

R' : ロール扁平時の半径

b : 板幅

γ : $\mu \sqrt{R'/h_2}$ μ : 摩擦係数

T : 前後面の平均張力

λ : 圧下率

S_0 : ロール間隙の初期値

AGC を考える場合その制御要因となるロールの圧下と張力についてそれぞれの影響をもう少し定性的に考えてみたい。

3.1.1 張力変化による板厚変化

前方後方張力の圧下力に及ぼす影響についての Hessenberg と Smis の報告によれば、張力圧延のロール圧下力 P は次式のごとくなる。

$$P = P_0 \{1 - (T_b + T_f) / 2k\} \dots\dots(3)$$

T_b, T_f : 後方, 前方張力

P_0 : 張力のない場合の圧下力

(3)式において $(T_b + T_f) / 2 = T$ とすると

$$P = P_0 (1 - T/k) \dots\dots(4)$$

となる。

今(2)式より張力のない場合の塑性曲線を表わす式として

$$P_0 = k \cdot b \sqrt{R'} (h_1 - h_2) f(\gamma, \lambda) \dots\dots(2')$$

を仮定すると

(4)式と(2')式より

$$P = (k - T) b \sqrt{R'} (h_1 - h_2) f(\gamma, \lambda) \dots\dots(5)$$

が得られる。(5)式において張力を ΔT 増加させて出側板厚が変化しないものとすれば圧下力 P の変化 ΔP_2 は

$$\Delta P_2 = \Delta T \cdot b \sqrt{R'} (h_1 - h_2) f(\gamma, \lambda)$$

したがって

$$\Delta P_2 / P = -\Delta T / (k - T) \dots\dots(6)$$

一方 Fig. 1 より $\Delta h_2 = \Delta P_2 / (K + m)$ (m : 塑性曲線で h_2 付近の勾配) の関係がなりたつから圧下力が変化せず張力が ΔT 変化したときの板厚変化は次式の関係となる。

$$\Delta h_2 = \{-P / (m + K)\} \{\Delta T / (k - T)\} \dots\dots(7)$$

3.1.2 ロール圧下による板厚変化

ロール圧下を ΔS だけ移動させた場合の板厚変化 Δh はミル弾性曲線および材料の塑性曲線を示す Fig. 1 より幾何学的に

$$\Delta h_1 = K / (m + K) \cdot \Delta S \dots\dots(8)$$

で示される。したがって板厚変化 Δh_1 に対してロール圧下量をいくらにすればよいかが(8)式により得られる。

3.2 自動板厚制御装置概要

厚さ計の採用に当っては、ミルの出側、入側のいずれか、あるいはその双方に取付けるかによって制御方式も異なってくるが、ここでは X 線厚さ計を用い出側で板厚偏差を検出する方法をとっている。この方法を AGC に用いる場合考慮しなければならないことはその検出遅れである。すなわちミルの構造上厚さ計はワークロール位置よりかなり後方に設置しなければならず、この距離を板が移動する時間が遅れ時間となり、これは圧延速度の変化に伴って変るものである。したがって、ここでは比較的大きな板厚制御能力をもつ圧下制御系においては、上記の遅れ時間を加味したサンプリング制御を行ない、板厚制御範囲が狭く応答速度の速い張力制御系においては比例制御を用いている。

ここで用いられる AGC のブロック図を Fig. 2 に、回路図を Fig. 3 に示す。

以下に圧下制御系と張力制御系について概略説明を加える。

3.2.1 圧下調整による厚さ制御

圧下調整には先に述べたように厚さ偏差と圧延速度に関係したサンプリング制御方式を用いているが、その動作の概要を示すと次のようになる。

厚さ計からの厚さ偏差信号は直流増幅器を通り、ゲートによってサンプリングされ電圧-時間

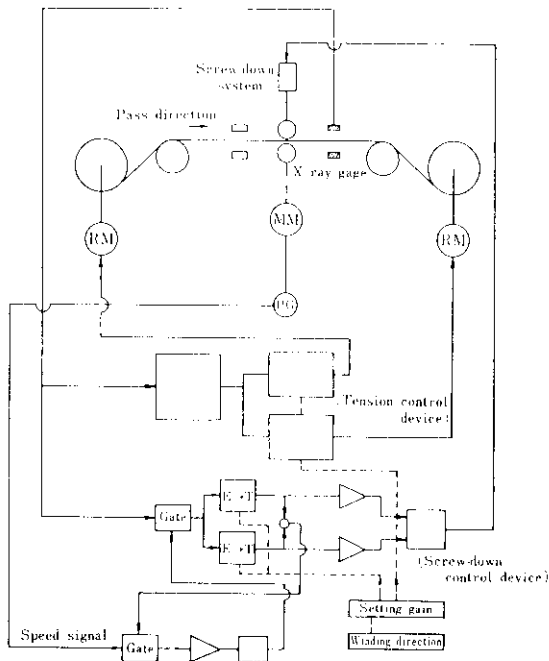


Fig. 2 Block diagram of AGC

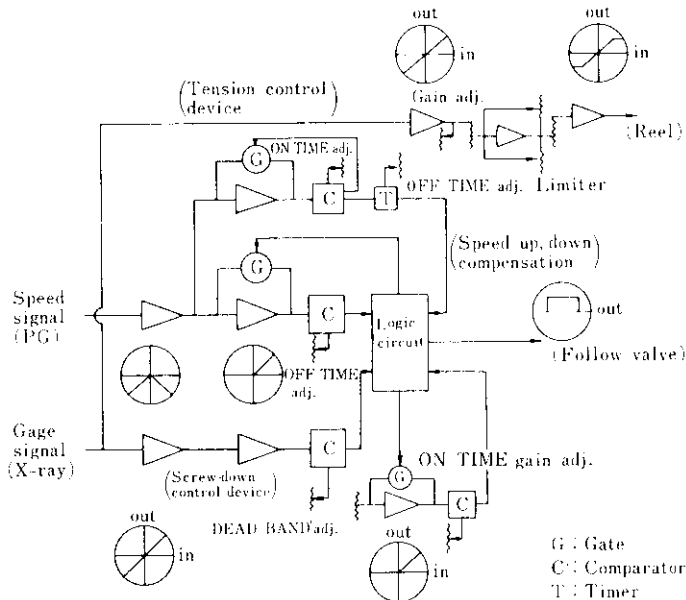


Fig. 3 Circuit of AGC

変換器に入る。ここでは厚さ偏差の正負を判別し、正の場合は圧下閉の信号を、負の場合は圧下開の信号を出すと同時に厚さ偏差量に応じた時間幅を持つパルスが発生する。しかしすべての偏差

領域で圧下調整を行なうことは不安定な制御になることが予測されるため、偏差量の小さい時は制御をしないよう DEAD BAND を設けて安定な制御を行なうようにしている。したがってここでは入力（電圧）→出力（時間）の関係は DEAD BAND を有する非線形関数となる。圧下はこのような厚さ偏差に応じた時間だけソレノイドバルブを通電し、油圧シリンダーを作動させワークロールを上下させることによって行なわれる。圧下操作が完了すると終了信号がゲートに送られ、圧延機の主電動機に直結された PG パルス発生器からの出力を積分して圧延速度に比例した時間、すなわちロール位置から厚さ計までの移動時間が決められ、この間が制御の OFF TIME となる。

OFF TIME が完了した時再びゲートを開いて、厚さ計からの厚さ偏差信号を電圧-時間変換器に送り、厚さ偏差に応じて再度制御を繰返す。この場合の板厚偏差は先に制御された板のものであるから、制御のゆきすぎもなく安定な制御が続けられる。

センチミルのように機能上加減速を割合頻繁に行なう圧延機では、加減速時にも安定な制御が得られることが必要である。一般に加減速時には速度変化に応じて摩擦係数などの変化を伴い圧延圧力が変化する傾向があるため、低速時には制御 ON TIME を長くし、高速になるに従って短かくして行くような回路を設け、加減速中に生ずる板厚偏差を除こうとしている。この制御出力は PG 出力を一定値まで積分するのに必要な時間より得られ、これを用いて加減速補償を行なう方式をとっている。

3.2.2 張力調整による厚さ制御

張力制御には厚さ偏差による信号を指令とする比例制御系を用いている。これは偏差を増幅してリール張力系の張力値を可変するもので、速応性の高い制御が行なえる。厚さ偏差信号は張力制御

系にとっては急峻なものなので、これに一次遅れ要素を加味して制御系になめらかな変化を与えている。張力制御系においては偏差の小さなものから大きなものまで調整することは困難なので制御範囲を全リール張力の10%以内に収めるようにしている。この意味では張力制御においても入力出力の関係は非線形関数である。制御量の出力は加工度補正回路（加工度が進むにつれて補正量を可変する回路）を通じて、入側、出側のリール張力制御系に偏差信号を与え張力を可変するようにしている。このように張力制御系は、偏差の小さな場合速応性のある制御が出来、圧下制御系とあいまってその効果を発揮する。

3.3 調整運転結果

本米ミルの AGC を調整するにあたっては、制御系全体の解析を行ない種々の変数を想定し、系の安定を考慮して各種設定要素を定めるべきである。しかしセンジマミルでは制御系の安定性が高いので、学習的方法によりファクターを決定しても十分目的を達成し得る。

本制御系の中にあつて外部設定要素としてあげられるものは次の5項目である。

- (1) 圧下ゲイン ON TIME
- (2) DEAD BAND
- (3) OFF TIME
- (4) 加減速補償量
- (5) 張力ゲイン

これら要素は個別に設定するのではなく、相互の関連をみて設定することで適正な制御が得られる。個々の役割およびその関連性について以下に述べる。

3.3.1 偏差—ON TIMEのゲイン

圧下調整においては厚さ偏差量に対しどれだけの圧下閉開をなすべきかを決定しなければならない。ON TIMEは板厚偏差に対するソレノイドバルブの開となる時間幅であるので、これを通る油の流量、すなわち油圧を一定にしておく必要があることは当然である。

調整の方法としてはまず静的な状態で板に各圧延スケジュールの圧下力に相当する圧下を加え

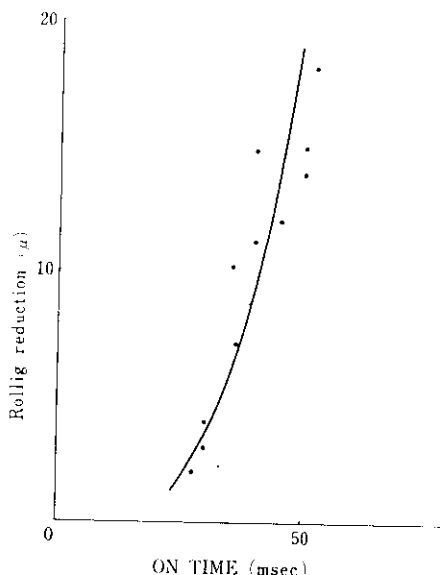


Fig. 4 An example of ON TIME—rolling reduction

て ON TIME—ロール移動量の関係を測定し (Fig. 4), 次に手動制御圧延時に安定な条件となる ON TIMEを測定し、これらを基に回路中の定数を決定していく方法をとった。しかしこの場合も圧延状態が各種条件で異なるため、実際には圧延結果を解析してこれを補正した。オペレーターは圧延状況に応じてゲイン調整ダイヤルを調整して ON TIME量を補正出来るようにしている。したがって同一スケジュールの下では硬度の高いものは圧下ゲインを大きく、低いものでは小さくすることでよい制御結果が得られる。

Fig. 5 に偏差に対する ON TIME 量の関係を示す。

ON TIME—圧下量, 偏差—ON TIMEの関係での非直線性はほぼ似たようなものであり、制御上問題はない。すなわち一般には圧下時間はミル特性および板の材質により変化するもので一般に次式で示される。

$$t = \sqrt{2S/A} \dots\dots\dots (9)$$

t : ON TIME

S : 圧下距離=厚さ偏差×効率(0.3~0.5)

A : 圧下加速度 mm/sec²

当初の装置では、板厚偏差(+)(-)を同様に検出し、その絶対値によって ON TIMEを決定して

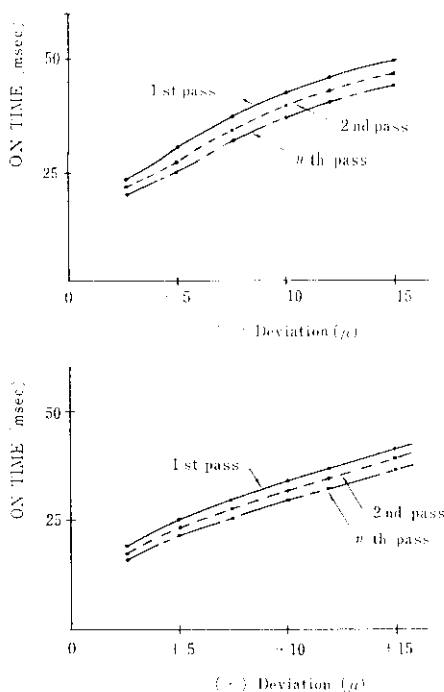


Fig. 5 Characteristic curve of ON TIME

いたが、実際には同一ON TIMEでも圧下装置の構造上シリンダーの下降、上昇量が多少異なる傾向にあり、厳密には別々の回路を設けなければならない。そこでON TIME調整回路を(+)(-)偏差別に設けた結果、(+)(-)両方の偏差に対して安定な制御が可能となった。

3.3.2 圧下制御のDEAD BAND

DEAD BANDの幅は板厚精度との兼ねいで決定すべきものであるが、DEAD BANDを小さくしすぎることは制御板厚のハンティング現象を生ずる恐れがあり、これをある程度大きくとってDEAD BAND内の偏差は張力制御系で制御するという考えに立っている。DEAD BANDの幅はパス回数、被圧延材種により感度VRにて調整できるようにしているが、前次のパスでは素材コイルの板厚偏差の大きい場合も考慮して後次のパスよりも大きくとっている。こうすることにより各パスの制御板厚のハンティング現象が最小限に抑えられ後次のパスについても安定な制御が得られる。Fig. 6にDEAD BANDの設定の1例を示す。

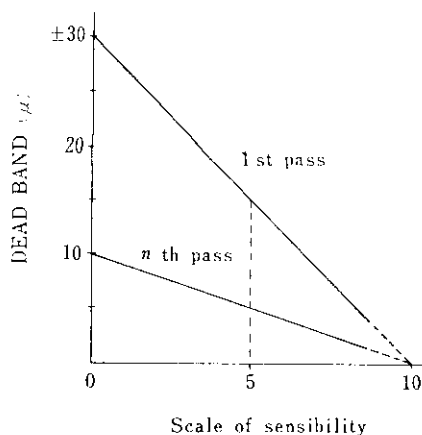


Fig. 6 DEAD BAND

3.3.3 OFF TIMEの決定

圧延機出側にて厚さ偏差を検出し、制御を行なうサンプリング方式においてはOFF TIMEを適正に設定することが必要である。通常OFF TIMEはワークロールより厚さ計まで板が走行する時間（これを純むだ時間と呼ぶことにする）をもって決めている。すなわち次式である。

$$t_{OFF} = \ell / V \quad (10)$$

t_{OFF} : OFF TIME

ℓ : ロール位置より厚さ計までの距離

V : 圧延速度

しかしながら実際問題としては制御系の伝達遅れをこれに加えた時間（等価むだ時間と呼ぶ）を考えねば適正なOFF TIMEは得られない。こ

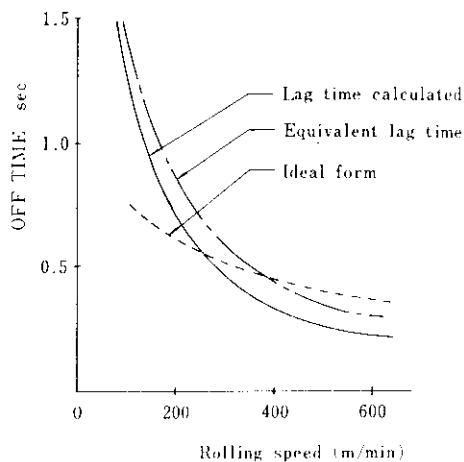


Fig. 7 Characteristic curve of OFF TIME

で制御系の伝達遅れは圧延速度などとは無関係に定めるべきものであり、回路の設定に当ってはこれを測定し、等価むだ時間を決めた。さらに圧延速度と摩擦の変化の影響などを加味し、入側板厚の定常的な変化にやや先行して圧下制御を行なう意味で、若干 OFF TIME を短かくする事がよいという結果を得て回路の修正を行なった。

このような回路の改造と調整を行なうことにより、速度変化などに対しても安定な板厚制御結果が得られるようになった。

Fig. 7 に圧延速度と OFF TIME の関係を示す。

3.3.4 加減速補償回路のゲイン

圧下ゲインの加減速時における変更の是非はミルのバネ定数と被圧延材の塑性変形特性によって決定すべきである。これについては種々検討したが特性のつかみにくい外乱によって乱れを生じやすく、期待した程の効果は得られていない。

3.3.5 張力制御系のゲイン

張力制御系のゲインは各バスごとにかわる固定ゲインと、オペレーターが操作する調整ゲインの2種からなっている。これは圧下制御の DEAD BAND との関係で、どの程度の板厚偏差まで張力制御で AGC の目的を達するかを考慮して決めるべきであるが、被圧延材の塑性特性変化に応じてそれぞれ安定な制御領域が異なる。この値を運転中に順次決定していくことにより所期の目的を

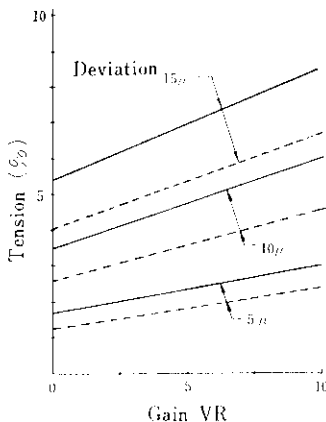


Fig. 8 Characteristic curve of tension

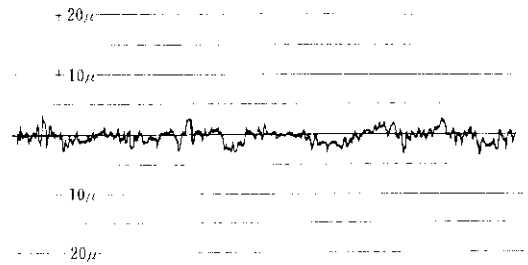


Fig. 9 An example of strip thickness

達している。全般にわたる張力ゲインはリールの電動機の定格上、およびストリップ破断の危険性を防止する上からも全張力の±10%を制御限界としている。Fig. 8 に張力ゲインと圧延張力増減の関係を示す。

3.3.6 運転結果

以上述べてきた各種設定要素の調整により安定した運転結果が得られた。Fig. 9 に AGC を用いて圧延した板厚チャートの例を示す。

4. 伸び率制御

4.1 伸び率制御装置概要

自動伸び率制御は、ミルの入側および出側のストリップの長さの差を伸び率計により検出し、この伸び率をプリセットされた基準値と比較し、誤差信号によって圧下および前後方張力を自動制御して伸び率制御を行なうものである。伸び率の検出は非連続的であるので、伸び率制御はサンプリング方式を採用している。Fig. 10 に伸び率制御のブロック図を示す。

4.1.1 伸び率計の原理

今圧延前の鋼板のある時間移動した長さを ℓ_1 、圧延後の同時間に移動した長さを ℓ_2 とすれば、伸び率 α は次式で表される。

$$\alpha = (\ell_2 - \ell_1) / \ell_1 \times 100 (\%) \quad \cdots \cdots (1)$$

この ℓ_1 、 ℓ_2 はそれぞれミル入側と出側のデフレクトロールの回転数を検出することにより得られる。

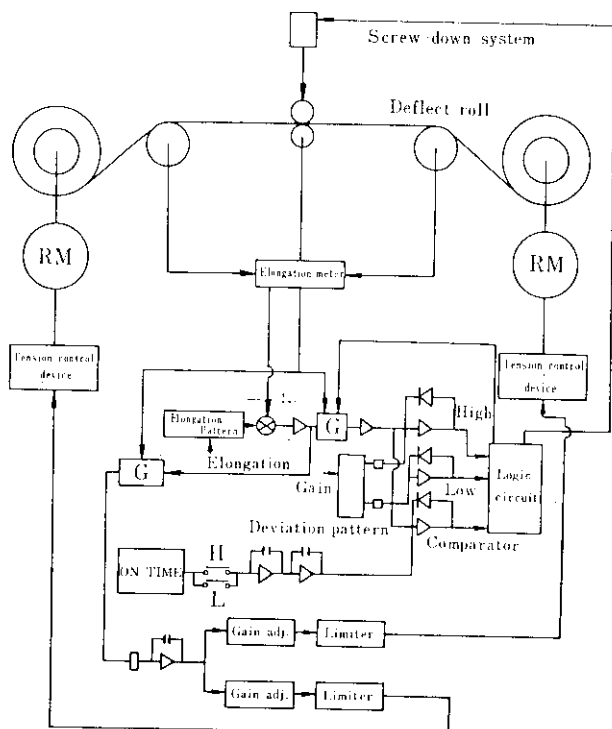


Fig. 10 Block diagram of automatic elongation control

圧延前の板が ℓ_1 移動したとき発生するパルス数を f_1 、圧延後のそれを f_2 とすると

$$f_1 = \ell_1 \eta N / \pi d \quad f_2 = \ell_2 \eta N / \pi d \quad \dots \dots (12)$$

d : デフレクトロール直径

η : ローラ歯数

N : 増速比

したがって伸び率 α は

$$\alpha = (f_2 - f_1) / f_1 \quad \dots \dots \dots (13)$$

となる。いま $f_1 = 1000$ のとき、 $f_2 = 1000 + \beta$ となったとすれば $\alpha = \beta / 1000$ で β は f_2 の 1000 を越えた端数となり、デジタル計数器の指示となる。ローラ径に差が出来た場合は補正回路のプリセット値を補正すればローラ径に関係なく伸び率が測定される。

4.1.2 圧下調整による制御

伸び率計より検出された伸び率のデジタル信号はD-A変換され、伸び率設定値と比較され、偏差信号がゲートに送られる。ゲートはON TIME終了信号によって閉じ、伸び率計のクリア信号が

2回入ったときに開く。すなわち圧下修正が終わって計数を開始して伸び率を測定し、修正確認後修正を行うことになる。

ゲートを通過した偏差は基準値に対して正または負の極性に従い、圧下閉または開の信号を出す。この場合のON TIMEは圧下装置のロール移動量—時間特性をシミュレートした関数発生器により決定されている。

ON TIMEによる出力が偏差量と一致したとき比較器が作動して圧下装置を停止させ、ゲートが閉じて修正後の伸び率を伸び率計が計数する間隔を待って再びゲートが開き、以下同様の操作を繰返して圧下率を自動制御していく。

伸び率設定および圧下のゲイン設定は操作盤にて行ない、圧延条件に合せてオペレーターが設定を行なう。

4.1.3 張力による制御

張力制御では特殊なサンプリング制御を行なっている。伸び率偏差信号は伸び率計クリア信号と同期し、一定微小時間だけ開くゲートを経て積分器に加えられる。積分器の出力はゲートを開いている期間に偏差に比例した値だけ変化しその値を保持する。

張力制御は応答速度が速く、修正効果は次の伸び率出力に表われる。次に第2次の偏差に比例した値がすでに積分器に記憶されている最初の値のうえに加算または減算され、この動作が繰返されて伸び率の制御が行なわれる。

なお張力の過大過小は被圧延材の形状への影響となって現われるので、出力にリミッターを設け制御幅を限定している。

4.2 運転結果

圧下制御系における伸び率偏差とON TIMEの関係を Fig. 11 に、張力制御系における偏差と張力の関係を Fig. 12 に示す。

Fig. 13 は一例として圧下率4%における伸び率制御による圧延の結果を示す。

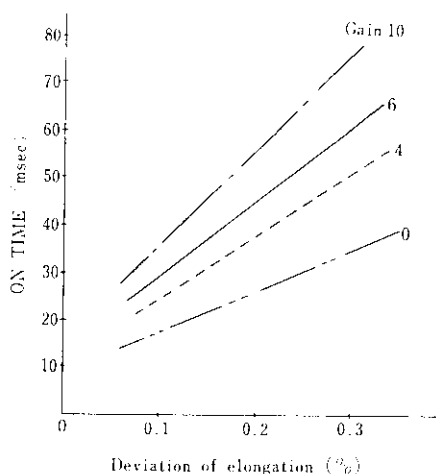


Fig. 11 Characteristic curve of ON TIME

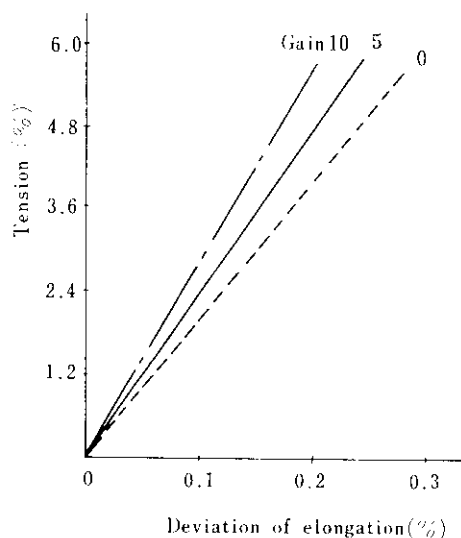


Fig. 12 Characteristic curve of tension

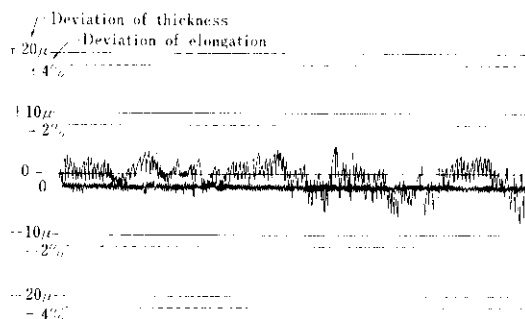


Fig. 13 An example of strip thickness and elongation

伸び率はデフレクトロールの速度で伸び率を測定しており、板とデフレクトロールの接触面におけるスリップをワイピングにより完全に防止することにより安定した制御が可能である。

5. 結 言

以上センジマミル (ZR-21A-44) における自動板厚制御および伸び率制御についてその装置および運転結果について概要をのべた。センジマミルのように単スタンドミルにおける板厚制御では、より完全な予測制御が行ないにくいという問題があるが、制御要素を種々調整して期待された運転結果が得られた。

板厚制御および伸び率制御では被圧延材の特性に応じて、外部設定要素を変化させねばならないので、回路定数を一律に決定することは困難で、AGC を採用しても被圧延材の変更が多い場合などは、それだけオペレーターに設定変更の負担が増加する。現状ではこの点に問題はないが、これを全面的に自動化しようとするれば計算機の手を借りるなどの手段を用いなければならないであろう。

実際の圧延作業においては、板厚精度の向上の他に、ストリップの形状調整などオペレーターの技術に依存する部分が多い。しかし AGC および伸び率制御装置の採用で期待した効果が得られ、オペレーターの精神的、肉体的負担の軽減に役立ち、一層の品質向上が期待出来る。

終りに本自動板厚制御装置および伸び率制御装置の据付、調整に当って、いろいろ御尽力いただいた日立製作所の関係者各位に感謝の意を表する次第である。