

薄板圧延寸法精度向上における計測制御技術

安部 可治*・深沢 千秋*2

Measurement and Control Technology for Strip Dimension Accuracy Upgrade

Yoshiharu ANBE and Chiaki FUKASAWA

Key words: rolling mill; measurement and control; tandem cold mill; hot strip mill.

1. はじめに

圧延された製品の寸法精度向上に対して、計測技術と制御技術がどのような現状であるか、以下に板材について述べる。

板材の製造プロセスは、連続鋳造スラブをホットストリップミルに送りホットコイルを圧延する方法と連続鋳造で50mm厚み程度のバー材を作り、ホットストリップミルの仕上圧延機で圧延してホットコイルを得る方法などがある。

ホットコイルは酸洗後、コールドストリップミルで冷間圧延し、焼鈍して調質圧延して冷延コイルを得る。

これらの板材の製造プロセスは最近では連続化が達成されつつある。また圧延機自体も6段ミルやペアクロスミルなどが我が国で開発され、圧延された板の寸法向上に寄与している。また、圧延駆動装置も従来の直流電動機駆動から交流電動機駆動へと変わりつつあり、高精度、高応答で容量の制限がなくなりつつある。オートメーション機器も数百MBPS(メガビット/秒)のLAN(Local Area Network)を介して、プロセスコンピュータ、プログラマブルコントローラ、操作用CRT、入出力装置などが統合されたいわゆるCIE(C:コンピュータ, I:インスツルメンテーション, E:エレクトリカル)統合システムへと変わりつつある。

これらのプロセス、機器の発展に伴い圧延寸法計測技術、

圧延制御技術も発展している。以下にこれらの技術について述べる。

2. 圧延寸法計測技術

2・1 厚み計¹⁾

X線、γ線、β線などの透過力を利用した放射線厚み計は、圧延制御や品質管理のための計測装置として広く使われている。Table 1に代表的な厚み計の概略仕様を示す。

X線厚み計は、X線エネルギーを制御することにより測定範囲を自由に設定できる利点がある。また、X線の線量は放射性同位元素(RI)のγ線、β線に比べ桁違いに多いため、測定値の統計的な揺らぎ(統計雑音)が小さく、応答速度の早い厚み計が実現できる。このような利点のため、X線厚み計は高精度、高速の厚み制御になくてはならないセンサとなっている。また最近では、圧延制御の高度化に伴い熱延スタンド間での厚み計測の要求が多くなっている。Fig. 1に熱延スタンド間X線厚み計検出部の例を示す。ここでは、ルーパの動きによりX線ビームがストリップを通過する角度(パスアングル)および高さ(パスライン)が変化する。このために生ずる誤差は、ルーパ角度信号を入力してリアルタイムに補正される²⁾。また、スタンド間スペースの制約から、検出器をコンパクトにまとめる必要があり、ミル

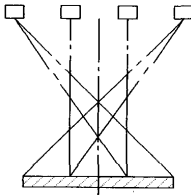
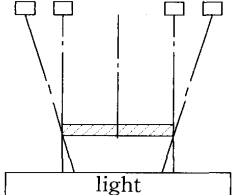
Table1. Specification of typical radioactive thickness gages.

Type	Source	Range	Accuracy	Response	Measuring space
Am γ-ray TG	RI (²⁴¹ Am)	0~8mm	Setting thickness ±(0.05%+1μm)	Time constant 0.05sec.	100~300mm
X-ray TG	X-ray generator (60kV~140kV)	0.1~30mm	Setting thickness ±0.1%	Time constant 0.01sec.	300~750mm
Cs γ-ray TG	RI (¹³⁷ Cs)	4.5~100mm	Setting thickness ±0.05% or ±10μm	Time constant 0.4sec.	1000~2500mm

TG: Thickness Gage
RI: Radioactive Isotope

平成4年7月8日受付 平成4年12月8日受理 (Received on July 8, 1992; Accepted on Dec. 8, 1992) (依頼解説)
* (株)東芝重電技術研究所技監 (Heavy Apparatus Engineering Laboratory, Toshiba Corp., 1 Toshiba-cho Fuchu 183)
* 2 (株)東芝府中工場 メカトロ装置部主幹 (Manufacturing Automation Equipment Department, Fuchu Works, Toshiba Corp.)

Table 2. Specification of width gage for hot strip mill.

	H200LA	H200LB
●Measuring method	●Fixed 4-CCD ●Intrinsic radiation type 	●Fixed 4-CCD ●Backlight type 
●Specification ○Width ○CCD ○Scope (each) ○Pass line ○Response ○Thickness compensation ○Strip temperature ○Accuracy	●400~2400mm ●5000bits ●1000mm ●0~+300mm ●40ms ●included ●Min. 650°C ●±0.5mm	●400~2400mm ●5000bits ●1000mm ●0~+300mm ●40ms ●included ●Max. 1200°C ●±0.5mm

板の像をとらえて幅を計測するもので、構成がシンプルなため据付や保守の点有利である。しかし鋼板の幅方向温度ムラや表面状態のムラのため端部のシャープな像が得にくい。このため測定対象の条件が良くないと測定精度を上げるのは困難である。

下部光源方式は、鋼板の下方に線状光源を設け、その遮光像を得るものである。エッジ部のシャープな像が得られるため精度が上がる。高精度化のために冷延用幅計と同様、平行光受光方式、2眼方式などがとられる。Fig. 2に2眼方式の測定原理を示す。各板端に2台のカメラを設けストリップの上下変動（片浮上りも含め）によらず精度良い測定が可能である。

Table 2 に代表的な熱延幅計の仕様を示す。

2・3 クロップ形状計

粗圧延後の鋼板の先端および後端部の形状を測定し、不良部分を検知して最適な切断位置を決めるものである。先端部、後端部の切断位置をクロップシャーに送ると同時に、

端部の形状とカットラインをモニタTV上に表示する。Fig. 3にシステム系統図を示す。

2・4 クラウン計⁴⁾

クラウン量やウェッジ量は幅方向断面形状のパラメータで、クラウン計（プロフィルメータ）はこれらを測定するものである。厚み計を幅方向に移動させて測定するが、実際は、この走査形厚み計の他に固定形厚み計を設け、走査形厚み計の測定出力に含まれるストリップの圧延方向の厚さ変動分を固定形厚み計信号を使って差引くことで鋼板の厚み分布を求めている。

なお、線源（Am- γ 線）と検出器を複数個板幅方向にならべて同時に走査することで走査時間を短縮するオシレート方式クラウン計もある⁵⁾。

圧延技術の進歩でワークロールベンディングなどの形状制御技術が普及し、リアルタイム形状制御のための測定器への要求が強くなっている。これに応えるものとしてFig. 4に示すエッジドロップ計（高速形クラウンメータ）が開発

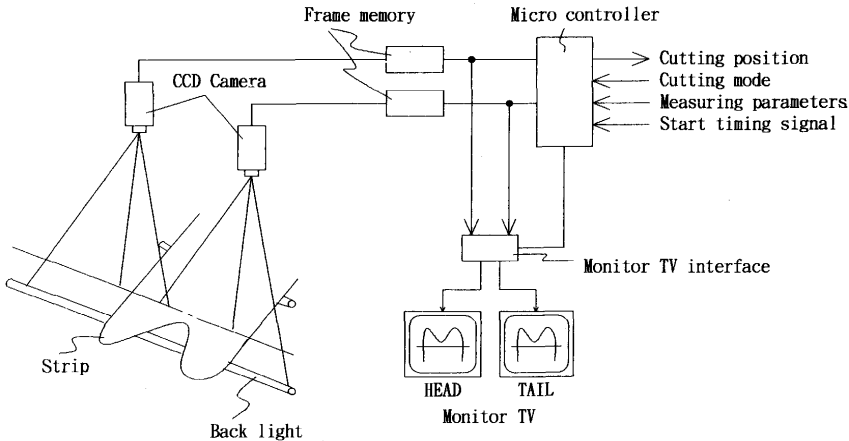


Fig. 3. Shape meter for crop shear.

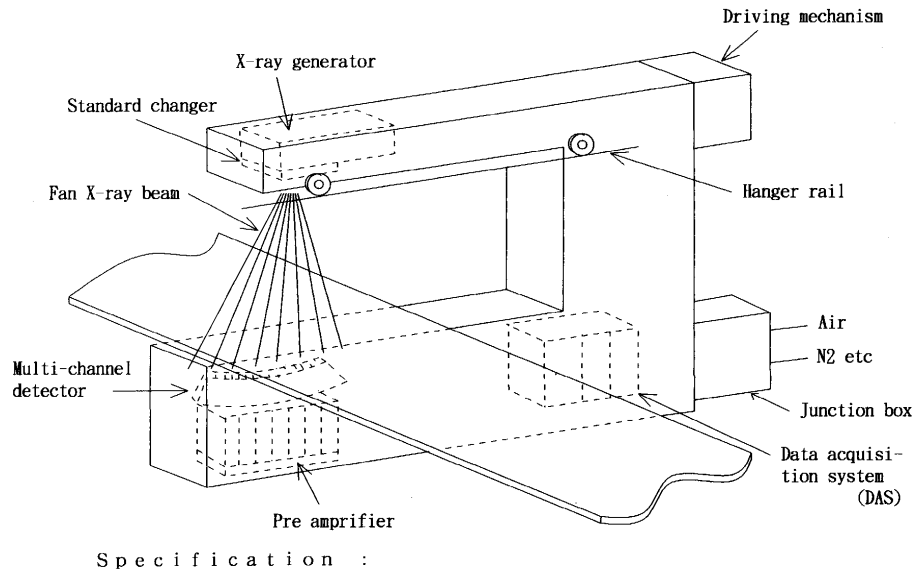


Fig. 4. Edge drop meter (Crown meter).

された。扇状X線ビームを鋼板に当て、その透過X線を多チャンネルX線検出器で受けることにより幅方向の厚み分布を高速に測定するものである。前述のクラウン計が機械的走査で遅い（20～30秒）のに対し、このエッジドロップ計は電氣的な走査であり、最小0.2秒ごとに測定値を出力できる。従ってストリップを幅方向に切断したプロフィールを得ることができる。また、幅方向約3mmのX線ビームで測定でき、従来のクラウン計に比べ1/2以下の分解能が得られる。しかし、複雑な構造であることと検出幅は約200mmであり、全幅カバーするには複数台必要であることのため高価なことが欠点である。現在では厚さ変化の激しいエッジドロップ部の測定に使用されている。

2.5 平坦度計

冷間圧延機では、板幅方向の分割ロールにより張力分布を測定する方法が一般的である。分割ロールの内部に周方向に4個のロードセル（荷重計）を設置して、一回転分測定し平均値をとる方式がある。銅種などの影響を受けないので多用されている（Fig.5）⁹⁾。他の方法としては分割ロールを各々エアベアリングとし、この圧力を測定する方法もある（Fig.6）⁷⁾。分割ロールの幅は、一般に26mm, 52mmなどの例がある。較正はテコの原理を用いて、回転中に分割ロール上のローラーと重りにより行う。

ホットストリップミルでは、レーザー光線による平坦度計⁹⁾やルーパロールを分割してこれにかかる荷重を測定して板幅方向の張力分布を測定するもの⁹⁾などが開発されつつある。これらのホットストリップミル用平坦度計をFig. 7 (a),

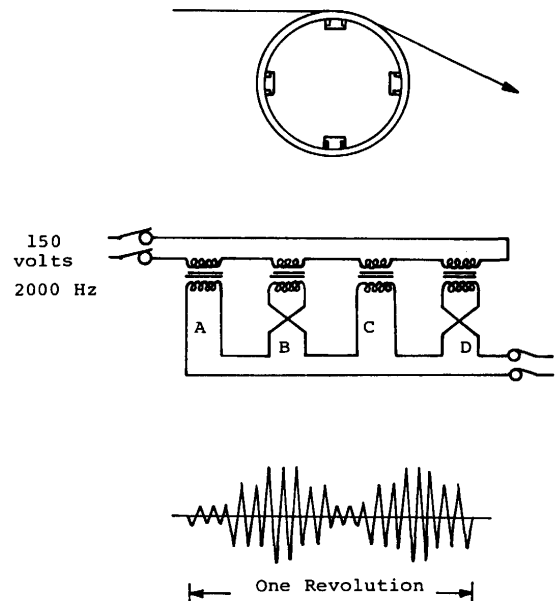


Fig. 5. Load cell type flatness sensor.

(b)に示す。

3. 圧延制御技術

圧延制御技術は圧延製造プロセス、圧延機、駆動装置、オートメーション機器、計測機器などの発展と共に進歩している。

圧延製造プロセスは直結化、連続化を指向している。こ

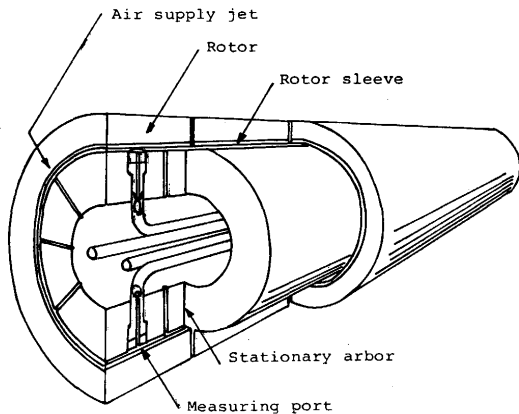


Fig. 6. Air bearing type flatness sensor.

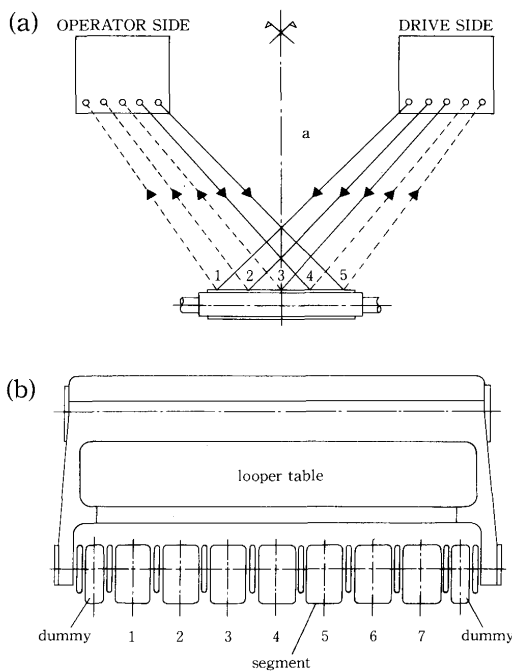


Fig. 7. (a) laser beam type flatness sensor.
(b) segmented loop roll type flatness sensor.

のため、走間板厚、板幅変更技術などが開発されつつある。圧延機は6段ミル、ベアクロスシフトミル、CVCミルなどクラウン、平坦度制御機能の大きいミルが開発されている。

圧延機の駆動装置には、従来直流電動機が用いられ、その速度応答つまり遮断角周波数 ω_c (RAD/sec) は15~30程度であった。最近では交流電動機（誘導電動機または同期電動機）をサイクロコンバータやインバータで駆動することにより ω_c を50~100へと高めることが実用化されつつある。これにより高精度、高応答となり、また電動機容量の制限（最大定格）が実用上なくなりつつある。

ロールギャップ制御は、従来直流電動機が用いられ、位置制御系の応答つまり遮断角周波数 ω_{cp} (RAD/sec) は、5~10であった。最近では油圧圧下装置により ω_{cp} が100~120程度と高応答となっており、1 μ mの精度である。これらの圧延機駆動装置、ロールギャップ制御装置により圧延され

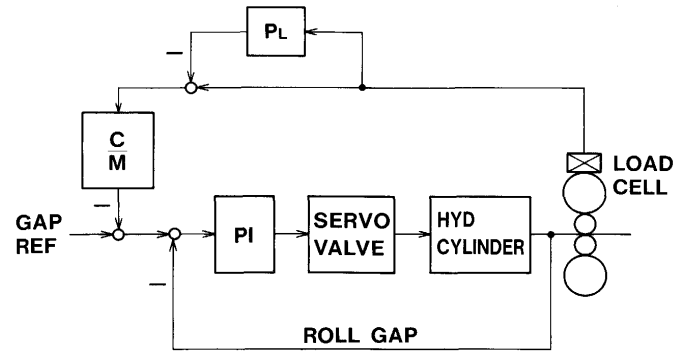


Fig. 8. MMC (Mill Modulus Control).

た製品の寸法精度が向上している。

オートメーション機器はいわゆるCIE統合システムとなっており、圧延ラインのデータが数百MBPSのLAN上で利用できることから、高速、高応答の圧延寸法計測制御ができるようになった。さらにバックアップや拡張性に優れたシステム構成となっている。

3・1 板厚制御

タンデムコールドミルでは、従来、ロール駆動とロール圧下は直流電動機が用いられていたが、最近ではロール駆動には応答の早い交流電動機が、またロール圧下は油圧圧下が用いられることが多い。

ロール圧下による板厚制御はMMC (Mill Modulus Control) と呼ばれている。これはFig.8に示すように、圧延荷重を記憶して、この記憶値と現在値との差を用いて、

$$\Delta S = -(C/M) \cdot (P - P_L)$$

によりロールギャップを動かす制御である。ここで ΔS はロールギャップ移動量、 C は定数、 M はミル定数、 P は圧延荷重現在値、 P_L は圧延荷重の記憶値である。等価ミル定数は $M/(1-C)$ となり、例えば $C=0.8$ では等価ミル定数は5倍となる。MMCはロール偏心を増幅する作用があるので注意が必要である。

ロール駆動の交流電動機の高応答を用いたマスフロー板厚制御も使われている。タンデムコールドミルの任意の2スタンドにおけるマスフロー板厚制御をFig. 9に示す。板厚計の測定板厚を $(i+1)$ スタンドまで板速にしたがって遅延する。マスフロー1定則つまり

$$H_{i+1} \cdot V_{i+1} = h_{i+1} \cdot v_{i+1} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$V_{i+1} = V_R (1 + f_i) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$v_{i+1} = V_{Ri+1} (1 + f_{i+1}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

により出側板厚 h_{i+1} を求める。ここで H は入側板厚、 h は出側板厚、 V は入側板速度、 v は出側板速度、 V_R はロール周速、 f は先進率、 i はスタンド番号である。 $(i+1)$ スタンドの出側板厚希望値 h_{i+1}^{REF} と上記のマスフロー板厚 h_{i+1} の差をPI制御を介して、 i スタンドのロール駆動装置にフィードバックして板厚を制御する。このときスタンド間の張力計の張力は張

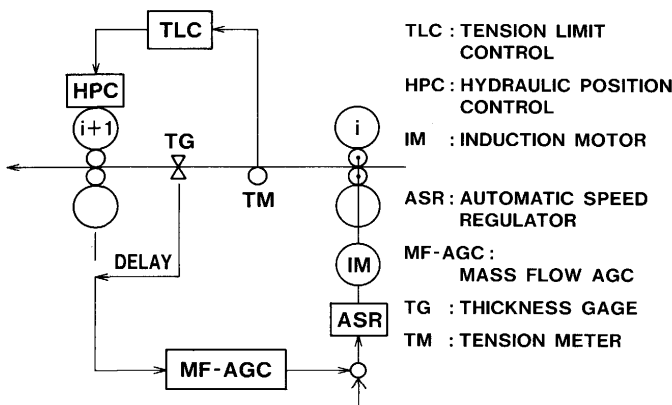


Fig. 9. Mass flow AGC.

力制限制御により、 $(i+1)$ スタンドの油圧圧下に印加する。

最近のタンデムコールドミルでは、各スタンドの入出側にそれぞれ板厚計を設置しているミルがある。板厚精度は0.5 (mm)の板厚において $\pm 0.5\%$ が達成されている¹⁰⁾ものもある。

ホットストリップミル仕上圧延機では、ロール駆動とロール圧下は直流電動機が用いられていたが、ロール駆動に応答の早い交流電動機が用いられはじめている。ロール圧下は一部のスタンドを油圧圧下にしたものや、全スタンドとも油圧圧下¹¹⁾の例もある。板厚制御はタンデムコールドミルと同様にMMC板厚制御やゲージメータ板厚制御が用いられている。この他に補助機能として、仕上圧延機の出側X線板厚計を用いたモニター制御などがある。設定計算の精度向上に伴って、絶対値AGCが用いられ板厚の精度向上に寄与している。

従来、ホットストリップミルの仕上圧延機では、仕上圧延機の出側にのみ板厚計が設置されていたが、住友金属工業(株)鹿島HOT¹²⁾では、F₄-F₅間にX線厚み計を増設している。そしてF₄出口の板厚測定値の目標値からの偏差にもとづいて仕上ミル出口の板厚偏差が零になるように、F₆、F₇の圧下位置をフィードフォワードで修正するとともに、圧下修正によるスタンド間のマスフロー変化を吸収するように、F₅、F₆のロール周速度の修正を行うことにより、通板に影響を与えず板厚制御を行っている。この結果、先端部の板厚精度は、標準偏差 σ で非適用時に比べて12 μ m(28%)改善できたという報告がある。このような仕上ミル内の板厚計の設置は今後も続くものと思われる。

バックアップロールのロール偏芯は、油圧圧下を用いてのロール偏芯除去装置を用いるもの、ロールに工夫をこらすものなどがある。

また、粗圧延機と仕上圧延機の間にコイルボックスを設置してトランスファークラップを一旦巻き取り、巻戻して仕上圧延機に送る方法もとられている。コイルボックスでは加熱炉のスキッドマークによる材温変動が均一化されること、ディレータブルでの温度降下が均一化される効果がある。したがって、板厚制御の負担が軽減されることが多い。

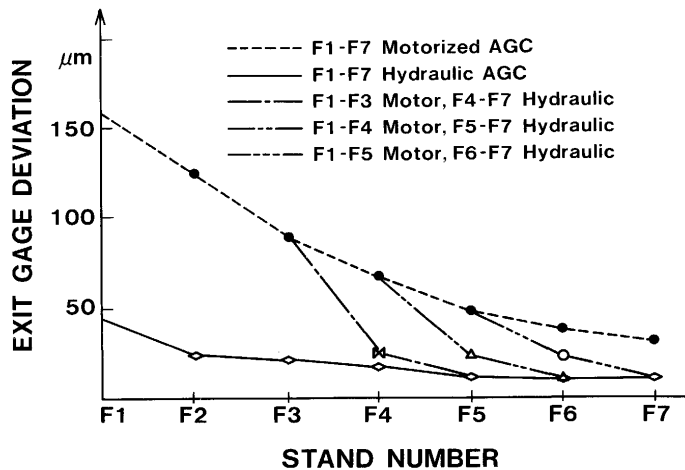


Fig. 10. AGC (motor or hydraulic screw down) simulation.

電動圧下の仕上ミルにおいて、どのスタンドを油圧圧下に改造すれば板厚の精度がどれ位改善されるかという課題が多い。このような場合には、被圧延材、圧延機、ロール駆動装置、ロール圧下装置、ルーパ、AGCなどを含んだ仕上ミルのダイナミックシミュレータを用いることができる。Fig.10はこのような検討の一例であり、後段スタンドの一部を油圧圧下に改造すれば効果の大きいことを示している¹³⁾。

多変数制御の1つである最適レギュレータを板厚や張力の制御に適用する試みもいろいろと開発されつつある。

3・2 板幅制御

ホットストリップミルの板幅変動要因として、スラブ幅変動、先後端の幅狭り、スキッドマークの影響、仕上スタン間張力の影響、ネッキング変動などがある。まず粗圧延機の板幅制御では先後端部の幅落ちに対してエッジの開度をパターン修正するいわゆるショートストローク制御が行われている。また、定常部に対しては板厚のAGCと同様な板幅AGCをエッジで行う方法と前パスでの幅計信号を用いて、水平圧延でのドッグボーン部幅戻り量と水平圧延での幅広り量をモデルを用いて予測し、スラブの長手方向各点においてエッジ開度を動かすフィードフォワード制御がある。モデル式は種々のものが提案されている。

仕上圧延機の板幅制御では、例えば、7スタンドの仕上ミルのF₁-F₂間、F₄-F₅間、F₅-F₆間、F₆-F₇間とF₇出側に幅計を設置して、多変数制御系を構成し張力により板幅を制御した例¹⁴⁾がある。この例では、板幅偏差の平均値が従来のモニタ制御に比べて約1 mm減少し、板幅偏差が6 mmを越えるコイルがなくなったと報告されている。

3・3 走間変更

圧延機において、異なる鋼種、板厚、板幅の板材を入側で接続し、異なる鋼種、板厚、板幅の板を圧延中に得る技術を走間変更と呼ぶ。冷間圧延機では、NKKの福山製鉄所で世界で初めて連続ミルが稼動した¹⁵⁾。このとき走間変更は、設定計算によりタンデムコールドミルのロールギャップと

ロール速度とを予め計算しておき、溶接点が第1スタンドに到達したら、第1スタンドのロールギャップとロール速度を変更し、次々に第2、第3スタンド、最終スタンドも同様に変更するものであった。走間変更の他の方式としては、ロールギャップで張力制御を行い、設定計算でロール速度のみを与える方法もある。逆にロール速度で張力制御を行い、設定計算でロールギャップのみを与える方法もある。このような連続圧延ではバッチ圧延における通板、尻抜け部がなくなるので、板厚や平坦度のオフゲージ部分が極めて短くなり、歩留りの向上に寄与した。したがって、最近の新設タンデムコールドミルは、連続圧延が多い。

ホットストリップミル仕上圧延における走間変更は、材温確保のため走間変更速度が高い特徴がある。このため走間変更の移行長さが2つのスタンドにまたがることが多いので、タンデムコールドミルと同じ方法が困難である。1つの実施例では¹⁶⁾、設定計算により仕上圧延機各スタンドの板厚を求めておき、接合部分が該当スタンドに到達したら、そのスタンドのAGCの板厚基準を変えてロールギャップをAGCにより変更し、ロール速度は最適マスフロー制御によって自動的に変更するやり方がある。

最適マスフロー制御は、基本的には板厚、先進率、他スタンドのロール速度などの変更があった場合に、或るスタンドの出側材料速度と次のスタンドの入側材料速度とをダイナミック（時間刻々と）に一致するように制御することにより、スタンド間張力変動を生じないように張力一定に制御するものである。式でかけば

$$\frac{\Delta V_{Ri}}{V_{Ri}} = \frac{\Delta V_{Ri+1}}{V_{Ri+1}} + \frac{\Delta h_{i+1}}{h_{i+1}} - \frac{\Delta H_{i+1}}{H_{i+1}} + \frac{\Delta f_{i+1}}{1+f_{i+1}} - \frac{\Delta f_i}{1+f_i} \dots\dots\dots (4)$$

である。ここで V_R はロール周速、 h は出側板厚、 H は入側板厚、 f は先進率、 i はスタンド番号である。実際の適用に当たっては、スタンド間張力による板厚、先進率への圧延機内フィードバックループが存在するので、これらのフィードバックループを補償することが必要となる。

6スタンドのホットストリップミル仕上圧延機では1.0 (mm) 程度の仕上り板厚の変更が問題なく出来たと報告されている。

3・4 張力制御

タンデムコールドミルではスタンド間の張力計により油圧圧下を介した張力制御が行われている。また、ロール駆動電動機による張力制御もある。

ホットストリップミルの仕上圧延機では最近ルーパーに張力計が設置されることが多い。従来のルーパー制御法は、ルーパー角度をロール駆動電動機で制御し、ストリップ張力をルーパー電動機の電流制御系で制御するものであった。この場合、ルーパー角度とストリップ張力には相互干渉が

あった。

ルーパー電動機に速度検出器をとりつけ、ルーパーを速度制御系にして、ルーパー角度をルーパー電動機で、ストリップ張力をロール駆動電動機で制御し、クロスコントローラで両者の相互干渉を打消す非干渉ルーパー制御法が開発され¹⁷⁾、制御性能が格段に向上した。

この他に多変数制御の1つである最適レギュレータがルーパー制御に適用された¹⁸⁾¹⁹⁾。この場合には、ルーパー角度、ストリップ張力の他にルーパー電動機の数もフィードバックしている。最適レギュレータではリカッチ方程式を解いて、操作量を求めることになるが、 Q 、 R の決定は困難である。

従来制御、非干渉制御、最適レギュレータのルーパー制御例をFig.11に示す。

最近では、ルーパー制御に H_∞ 理論を応用することが開発されている²⁰⁾。最適レギュレータは時間領域での設計法であるが、 H_∞ 理論は多変数制御系をボード線図で代表される周波数領域での設計法である。

尚、ルーパーを用いない方式としてルーパレス張力制御打術もあるがここでは省略する。

3・5 クラウン・平坦度制御

冷間圧延機の平坦度制御は実用になっており高精度化が計られている。制御方法として、例えば分割ロールで測定した平坦度を板幅方向座標 X で直交関数に展開する²¹⁾。

$$\beta = A_0\phi_0 + A_1\phi_1 + A_2\phi_2 + \dots\dots\dots + A_n\phi_n \dots\dots\dots (5)$$

ここで β は平坦度、 ϕ は直交関数である。 ϕ_1 は直線形状、 ϕ_2 は放物線形状などである。直線形状は圧下レベリング、放物線形状はベンダーなどで制御する。6段ミルでは中間ロールシフト、ワークロールベンダー、中間ロールベンダーの組合せでクォータバックルの制御などもできる。また、スポットクーラントにより局部的平坦度不良を制御する。

ホットストリップミル仕上圧延機のクラウン制御ではベアクロスミルを用いた例がある²²⁾。圧延前の初期設定では、

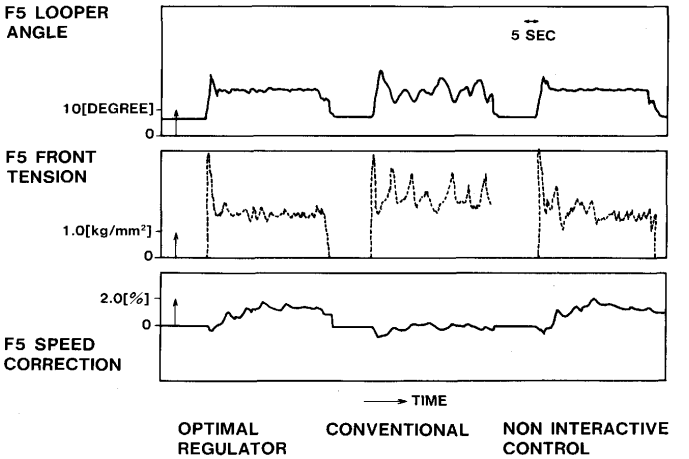


Fig. 11. Hot strip mill looper control.

前コイルの実績値と計算値の差をロールプロファイルの補正として用い、クロス角とベンダー力を決める。この場合、均一荷重板クラウンを演算式で求めている。圧延中は出側のクラウンメータの測定値によりベンダー力をフィードバック制御する。これらの設定制御では、平坦度不良を生じないで板クラウンを制御することが重要である。

4. おわりに

板圧延における圧延寸法計測技術、圧延制御技術の一部について述べた。本文が今後これらの技術にたずさわる人々の御参考になれば幸いである。これらの技術は完全に完成されたものではなく、圧延製造プロセスの発展、圧延機の進歩、電気設備の進歩によりますます発展していくであろう。

文 献

- 1) 深沢千秋, 沖野孝昭, 森岡義久: 塑性と加工, **32**(1991), p.445
- 2) 木村和喜, 木島和郎, 本城 基, 吾妻正敏, 布川 剛: 住友金属, **44** (1992), p.47
- 3) 虎尾 彰, 柳本隆光, 内田洋之, 市川文彦, 片岡健二: 川崎製鉄技報, **21** (1989), p.112
- 4) 村上純一, 小原 哲: 東芝レビュー, **41** (1986), p.255
- 5) G.Osmont: FAG技術資料 (FAG FRANCE, DIVISION NUCLEOMETRE A29/Hot Strip/0991 (1991-3)
- 6) W. L. Roberts: Flat Processing of Steel, (1988), p.520 [MARCEL DEKKER, INC. New York and Basel]
- 7) W. L. Roberts: Flat Processing of Steel, (1988), p.522 [MARCEL DEKKER, INC. New York and Basel]
- 8) H. J. Kopineck and W. H. Tappe: Hot Strip Mill Profile and Flatness Seminar, Pittsburgh PA U.S.A., (1988)
- 9) B. Mairy, P. Balthasart and J. Lückers: Hot Strip Mill Profile and Flatness Seminar, Pittsburgh PA U.S.A., (1988)
- 10) 大西忠治, 寺崎忠男, 谷口弘志, 吉見 洋, 井ノ口齊亮, 石原明, 平山嘆一, 谷口政隆, 服部正志: 材料とプロセス, **4**(1991), p.1388
- 11) 辻 勇一, 島津 智, 平石勇一, 福島賢也, 加藤勝弘, 平世和雄: 鉄と鋼, **74** (1988), p.481
- 12) 木村和喜: 第133回塑性加工シンポジウム, (1990), p.1
- 13) Y. Anbe and T. Sadamasu: Proc. Summer Computer Conference, U.S.A., (1982)
- 14) 北村 章, 中山万希志, 能勢和夫, 小西正躬, 浅田秀樹: システム制御情報学会論文誌, **4** (1991), p.347
- 15) 鎌田正誠: 塑性と加工, **32** (1991), p.837
- 16) 小菅 宏, 辻 勇一, 西尾充弘, 関口邦男, 柴田 寛, 野口正晴, 三代川勝: 第36回塑性加工連合講演会, (1985), p.181
- 17) 安部可治, 渡辺 一, 小林和夫, 森高常之: 電気学会論文誌C, **107**(1987), p.857
- 18) 関口邦男, 関 義朗, 安部可治, 福島賢也, 辻 勇一, 上野伸二: 電気学会論文誌C, **108** (1988), p.31
- 19) Y.Seki, K.Sekiguchi, Y.Anbe, K.Fukushima, Y.Tsuji and S.Ueno: IEEE Trans., IA, **27** (1991), p.124
- 20) 今成宏幸, 関口邦男, 安部可治: 平成4年電気学会全国大会予稿集, **678** (1992), p.6-145
- 21) 齊藤輝弘, 福田昌人, 北村秀樹, 北浜正法: 第133回塑性加工シンポジウム, (1990), p.39
- 22) 島津 智, 青田英樹: 同上, p.19