

技術資料

UDC 681.3.08 : 53.08.621.77

圧延工程における計測技術の進歩*

大島 真**・三浦 恒**・宇野 義雄**

Recent Progress of Measurement and Control Techniques on Rolling Process

Makoto OSHIMA, Hisashi MIURA, and Yoshio UNO

1. ま え が き

計測技術の進歩は鉄鋼業における重要課題である省力化や品質向上をはじめ諸コストの低減に大きな役割を果たしてきた。圧延工程の主要設備は炉、圧延機、酸洗やメッキ、せん断などのライン、検査や梱包のラインなど多岐にわたり、一方製品も板、形鋼、線材、パイプなどそれぞれ多様化し、これらの自動化には一般のプロセスオートメーションとは別に、対象ごとの専門的研究、開発が必要となつている。このためわが国でも、また欧米にあつても鉄鋼業内でこれら計測技術の研究開発は重点的に進められ、ここ数年の研究の成果は圧延機の制御や検査の自動化の面で顕著なものがある。

計測技術の基盤をなす検出端の開発は、圧延機の制御のためまた省力化が強く望まれている検査工程の自動化のために忍耐強い研究、開発が続けられている。圧延機自体も応答の速い油圧圧下ミルの実用化など、制御技術の進歩と相まって、性能の著しい向上がみられる。プロセスコンピュータの応用も諸圧延工程で開発が進められ、厚板やストリップなどの圧延機では十分実用期に達したと言える。また小型コンピュータのDDC(ダイレクトデジタルコントロール)など制御への応用も進み、生産管理用コンピュータを頂点とした。これらコンピュータのハイアラキによるトータル生産管理システムの開発、実用化がはかられてきた。ここでは圧延工程における計測技術の最近の開発、進歩について、若干の例を挙げながら概説する。

2. 検 出 端

2.1 概 要

圧延工程の検出端はその目的から2つに大別できる。第1は圧延機の周辺に配置されて運転の自動化ないし操業の改善を目的としたものであり、第2は主としてミル

後方ないし精整ラインに配置されて検査作業の自動化による省力と検査精度の向上を目的とした検出端である。製品の品質向上という点から見ると、前者は圧延中の個々の製品の品質向上に直接関与しており、一方後者は検査作業を通じて不合格品のリジェクトあるいは検査結果を前工程へフィードバックして、その工場の全製品の品質レベルを維持向上させるという間接的な関与をしている。

2.2 圧延機用検出端

2.2.1 ロードセル

圧延機の自動化にとって圧延荷重の測定は不可欠なもので、方法としてはロードセルによる測定が最も一般的である。圧延機用ロードセル¹⁾の完全な姿は、精度がよく、耐久性があり、安価なものであるが、まだ多くの問題点があつて完全なものは得られていない。圧延機用ロードセルの現在の主流をなしている磁歪型もしくは抵抗線歪型のものの改良、あるいは新しい容量型ロードセル²⁾の開発などの努力がなされている。鉄鋼協会計測部会では1970年から1972年にかけて圧延用ロードセル小委員会を設置し、(a)ロードセルの設備状況、故障状況の調査、(b)故障対策、(c)設置上の注意事項、(d)メンテナンス、(e)校正などをまとめた³⁾。設置状況は1970年6月現在で約550であり、その87%をASEA社、KELK社製が占めている。また据付に関してはロードセル表面に局部荷重がかかつて変形破損することのないように負荷を均等に分布させることが重要である。

一例としてKELK社製ストレングージ型ロードセルの仕様を記す。型式：ワッシャ型、取付箇所：ミルハウジングとスクリーナット間、使用目的：計算機制御、AGC(自動板厚制御)、荷重指示、嚙込み検出、定格：0~1800t、寸法：外径700φ、内径535φ、高さ110、

* 昭和47年8月14日受付(依頼技術資料)

** 川崎製鉄(株)水島製鉄所

応答速度：100m sec, 精度：直線性 $\pm 0.5\%$, ヒステリシス $\pm 0.5\%$

2.2.2 寸法形状測定

圧延荷重についてミルの自動化に重要なデータは圧延下の鋼材の寸法形状, すなわち鋼材の厚さ, 幅, 形状, また条鋼の断面寸法などである. 対象が移動中に行なう測定であるから, その測定は非接触かつ瞬時に行なわれることが要求され, 手法⁴⁾としてはおもに放射線方式と光学(光電)方式が用いられる. たとえば熱延, 冷延, 厚板のX線, γ 線厚さ計は古くから実用化されているが, さらに分塊のスラブ厚測定⁵⁾, 厚板の幅測定⁶⁾, 冷延鋼板の形状測定^{7)~10)}, 形鋼の熱間厚さ¹¹⁾, 幅¹²⁾, 断面形状測定¹³⁾線材の断面形状測定¹⁴⁾¹⁵⁾などが開発ないし一部実用化されている. 実用化された技術はさらに安定性, 精度, 応答性などの向上が目指されるが, 同時にたとえば熱延, 冷延における厚さという単一寸法の測定からクラウンという複合された寸法の測定へのごとく, 複雑化高度化の方向をも辿っている. 以下に数例を挙げる.

(1) X線厚さ計

昭和46年に日本鉄鋼協会計測部会内にX線厚さ計小委員会が設置され, 国内鉄鋼6社のX線厚さ計について(a)既設X線厚さ計の実状調査, (b)整備上の問題点, (c)将来に対する要望をまとめている¹⁶⁾. 導入は1948年から始まっているが, 当初故障の多い機器であつたのがエレクトロニクスそのほか周辺技術の進歩によつて信頼性が向上し, また整備技術も向上して, 問題点が少なくなつてきている. 現在の問題点としてはX線タンクの保守と精度管理用標準テストピースの製作, 管理, 使用方法とが挙げられている.

機器自体については今後応答性の良好な(10m sec以下)ものが強く要望される. これは圧延プロセスのラインスピードが上がつてきたことと, 形状制御を目的とした断面形状測定のためである.

X線厚さ計の例としてGE社のRAYMIKE 600の仕様を記す. 方式: 2ビーム方式, 測定範囲: 15mm(max), 応答速度: 0.05 sec(max)/63% ステップ変化, 設定精度: 測定範囲の $\pm 0.2\%$ または測定値の $\pm 1\%$ のうちの小さい方の値, 偏差精度: 偏差指示値の10%, ノイズ: 測定値の $\pm 0.2\%$ 以下, ドリフト: 測定範囲の $\pm 0.1\%$ 以下/8hr 以下, 測定ビーム径: 放射窓で約40mm ϕ , X線管電圧: 140 KVP(max), 測定空間: 760mm(max), X線検出方法: 電離箱

(2) H形鋼の厚さ測定¹¹⁾

熱間H形鋼のウェブおよび両側フランジ計3箇所

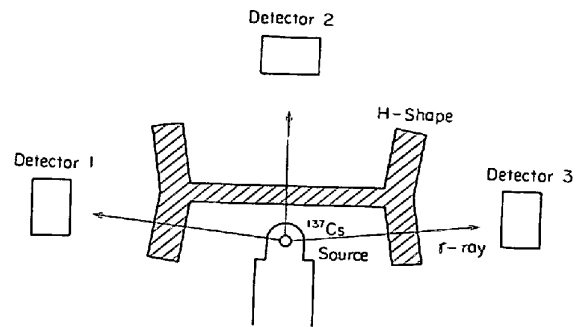


Fig. 1. Measuring method of web and flange thickness.

に示す. 線源は ^{137}Cs 5Ci を用いる. 実測精度として, (a)統計誤差: 2σ (標準偏差の2倍)で設定厚さの $\pm 0.5\%$ 以内, (b)ドリフト誤差: $\pm 0.25\%/8\text{hr}$, (c)パスマイン誤差: $\pm 0.5\%/ \pm 100\text{mm}$ を得ている.

(3) 冷延鋼板の形状測定

ここで言う形状とは板が平坦であるか否かを指し, いわゆる耳のび, 中のび, 反りを測定の対象とするが, 測定方法としては直接変位を測る方法と間接的に張力を測定する方法とがある. 前者にはたとえば工業用テレビジョンを利用した光学的な方法⁸⁾があるが, この変位を測る方法は無張力の状態で測らなければならない. 圧延機での測定にはむしろ板を引張つた状態で張力分布を測定する方法についての試みが多くなされている. それには分割ロールに加わる力を測定することによつて張力分布を測定する方法, あるいは鋼板の磁歪現象を利用して張力分布を測定する方法がある. Fig. 2はVDEhとMax-Plank-Institute⁹⁾が共同で開発した多分割ロール中にストレンゲージを組込んだ張力分布測定方式の検出器であり, Fig. 3はBISRA¹⁰⁾の開発した磁歪方式の検出器である. 検出器は幅方向に複数個を並べて使用する. これら形状検出器はいずれもまだ開発中のものであり完全なものとは言いがたく, また適用範囲も冷間圧延に限られており, 熱間圧延用の検出器を含め実用化に対する要求の強い課題である.

(4) 線材の断面形状測定

圧延直後の線材断面形状(長径と短径, もしくは垂直

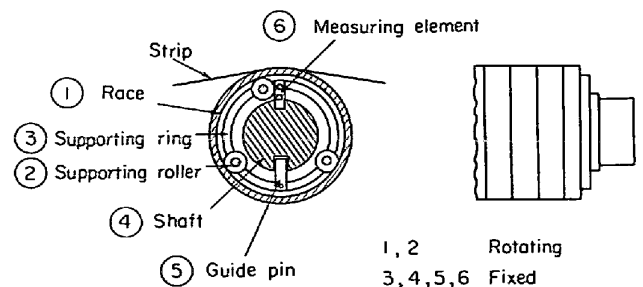


Fig. 2. Principle sketch of shape sensor.

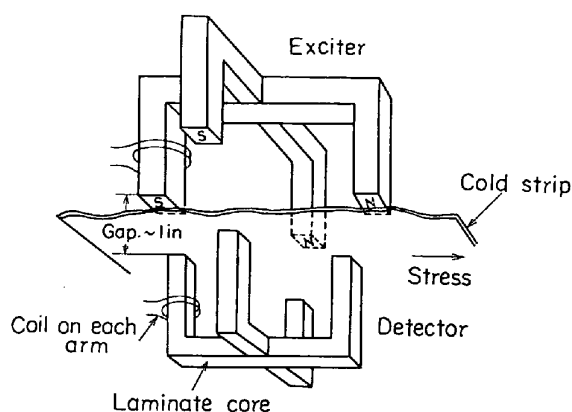


Fig. 3. Arrangement of single probe of shapemeter of strip.

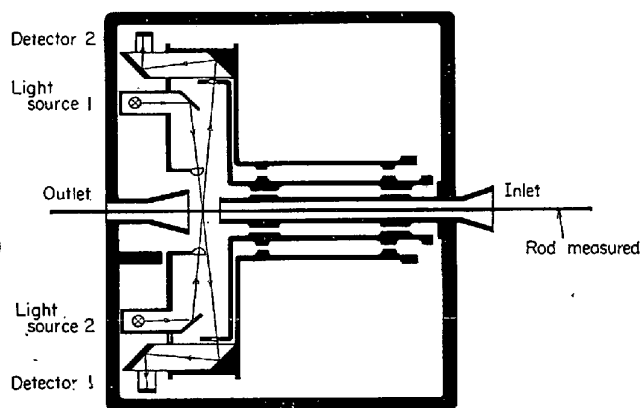


Fig. 4. Section of DIAROT in which optical systems rotate around the rod measured.

径と水平径)を測定して最終数スタンドの調整にフィードバックしようとするものである。例として全周の直径を測定するものを記す¹⁵⁾。これは被測定ロッドの周囲を光学系が回転しながら直径を測定する。測定は 10° 回転することに行なわれ、連続する18回の測定によつて1周の輪郭が捉えられる。180 scan/secであるから0.1 secで1つの輪郭が完成する。測定器は Fig. 4 に示すが、仕様は次の通りである。対象材温度：常温 \sim 1000°C、測定レンジ：5 \sim 15 mm ϕ 、分解能：0.01 mm、偏差レンジ： $\pm 0\sim 0.99$ mm、精度： ± 0.075 mm ± 1 digit、

2.2.3 鋼材温度測定

圧延工程では鋼材温度を鋼材の移動中に測定しなければならぬため非接触測定が要求され、放射温度計による表面温度の測定が行なわれるが、放射温度計の問題点として、(1)放射率の補正、(2)雰囲気、外乱光の影響、(3)精度維持の困難さ、などがあつて、使用方法の確立が重要なポイントとなつている。機器自体はサーモパイル型、光電管高温計、Si素子・PbS素子など光電型放射温度計の順に開発されてきたが、また2色高温計も

用いられている。開発の方向としては測定温度に対する波長帯の選択、大きい距離係数、速い応答速度、精度の向上と安定化を目指している。

最もよく利用されているのは熱延においてであり、次いで厚板である。測定データは仕上温度の制御と変形抵抗の算出とに使われるが、仕上温度が製品の品質にとくに大きな影響を及ぼすのが熱延鋼板であり、次いで厚板であることが利用状況の背景にある。そのほか形鋼、線材でも使用されている。線材圧延の場合、調整冷却装置における冷却速度の調節に重要な役割を果たしている。

2.2.4 その他

圧延機自動運転のための検出端としては位置検出器(圧下、サイドガイドの位置検出器)、熱塊検出器(HMD)も欠かすことができず、精度と信頼性の向上を目指した開発が続けられている。

また鋼材の非接触速度計の開発も行なわれている。応用場面は線材の圧延スピード測定¹⁷⁾冷延スキンパスの非接触伸び率計¹⁸⁾などである。

2.3 検査用検出端

この目的は省力が第1であるが、そのほかに処理量、検査能力の向上、検査結果のデータ処理の迅速自動化が挙げられ、人手に頼つていた従来の姿を改めるべく、現在集中的な努力の注がれている課題である。

2.3.1 欠陥検出

欠陥は表面欠陥と内部欠陥とに大別され、現行の検査方法をその2者にあてはめると Table 1 のとおりである。

これらの検査は素材段階に比べて製品段階で行なわれることが多く、最終的に製品の品質を確保することが目的である。一方素材の良不良と圧延工程を経た製品のそれとに必ずしも明確な対応が得られないが、因果関係のはつきりした欠陥では素材段階まで逆上つて検査される例もある。素材の表面目視検査と手入れなどがそれである。また製品段階(ミル以降)に限つた範囲では、(a)なるべく上流で施行し全製品を抑える、(b)下流に検査ラインを設けて確実な検査を行なう(ただし、分岐した末端に位置するので多数機を要する)の2つの考え方ができ、検査機器の性能と見比べながら個々の場で設置場

Table 1. 欠陥検出方法の分類

欠 陥	検 出 方 法
表面欠陥	目視検査、光学探傷、磁気探傷、渦電流探傷、浸透探傷、超音波探傷
内部欠陥	超音波探傷、放射線探傷

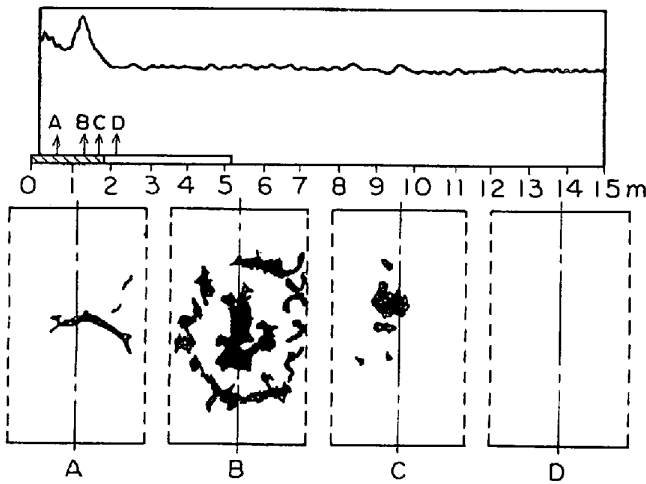


Fig. 5. γ -ray inspection curve (upper) of a bloom with the section of 160 mm \times 160 mm and 22m long. A, B, C and D (under) show the cut section of the bloom at the corresponding mark in the upper.

所が決定されているのが現状である。最近目立つた進歩の得られたものとしては、分塊でのパイプ検出¹⁹⁾、厚板の超音波自動探傷^{20)~22)}、薄板の表面欠陥検出²³⁾²⁴⁾、ピンホール検出²⁵⁾、棒鋼の磁気探傷²⁶⁾、線材の熱間渦電流探傷²⁷⁾などがある。以下にそれらを紹介する。

(1) 分塊でのパイプ検出¹⁹⁾

ブルームのトップクランプをパイプの長さに応じて適切に切落す目的で γ 線透過による探傷を行なった例である。実際に得られた効果として、(a)歩止向上2.2% (切捨量で 7.3% \rightarrow 5.1%)、(b)次工程で障害を起こすような内部欠陥の早期発見、(c)製鋼工場の作業変化の影響の早期把握が挙げられている。

装置仕様は、線源： ^{60}Co 1000 Ci、被測定材の厚さ：120~250 mm、材料移動速度：2.2m/sec、測定時定数：0.02 sec、分塊圧延ピッチ：約 2 min/本であり、強力な放射線源を使用するので障害防止のための設備が重要である。検査結果の一例を Fig. 5 に示す。

(2) 厚板の超音波自動探傷

装置は現在透過法と反射法の2つの方式によつているが、今後もそれぞれの特徴を生かした使い方により両者が存続することになる。

a. 透過法²⁰⁾²¹⁾

1962年に Krautkrämer 社が開発した方式に端を発しており、これが1968年にわが国にも導入されたが、これと別個に1966年から日本学術振興会製鋼第19委員会超音波探傷法協議会内に自動探傷法研究会が鉄鋼メーカー、装置メーカーなどの参加によつて発足し、主として透過法の研究を行なつて1967年と1968年に結果を発表した。これらに基づいて1969年から国産機が稼働を始めている。透過法は超音波(パルスもしくは連続波)を水柱を通して被検査材に透過させ、その際の内部欠陥による減衰を捉える方式であり、Fig. 6にライン全体図を示す。

仕様の一例は次のとおりである。

- (a) 被検査材 厚さ 5~40 mm, 幅 4000 mm(max)
速度 60m/min(max)
- (b) 感 度 幅 10 mm 以上, 長さ 10 mm 以上の板厚中央に設けた模擬ラミネーション人工欠陥を 100% 検出する。
- (c) 方 法 パルス透過法, 100 mm ピッチで C 方向に 40 個のプロブを配置し, L 方向に被検査材を移動しながら検査する。
- (d) プロブ 水柱接触, 水柱長さ上面 100 mm, 下面 50 mm, 使用水量 1.2m³/min, ノズル径 10 mm, 周波数 5 MHz, 繰返し周波数 1 KHZ

b. 反射法²¹⁾²²⁾

厚板の手動探傷の主流であるパルス反射垂直探傷法を多チャンネル化し機械化することによつて能率を高めようとしたのが端緒である。その後探触子の点では1探触子の使用から分割型探触子の使用へと進んでほぼ定型化し、他の点すなわち、(a)走査パターンをいかなるもの

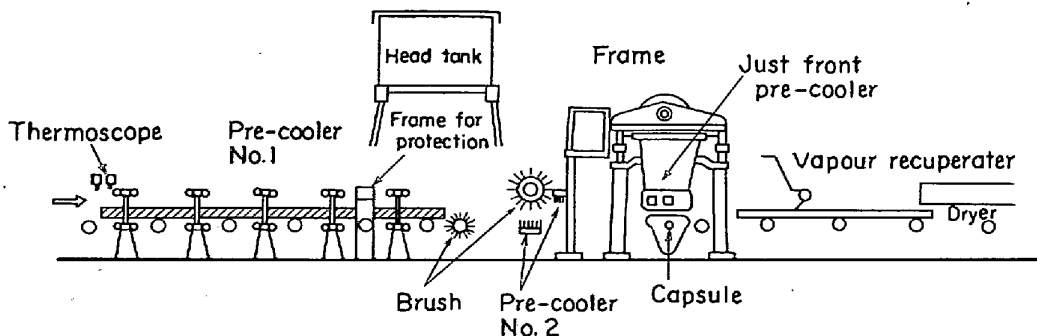


Fig. 6. Schematic view of on-line UST apparatus.

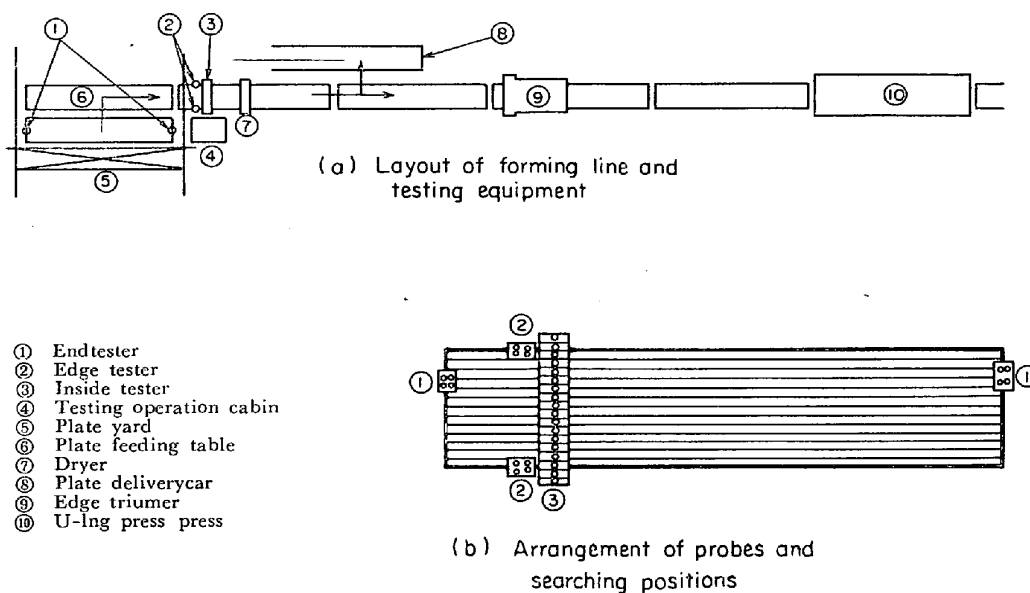


Fig. 7. Arrangement of automatic ultrasonic testing equipment.

にするか、(b)搬入搬出走査を含めた板のハンドリング、(c)探傷成績の処理およびその記録などは異なつたものが各所で稼動している。Fig. 7は大径管溶接工場の成型ラインにおける原板用探傷装置の配置を示すものである。

(3) 熱間線材の渦電流検査²⁷⁾

コイル型式は貫通型、自己比較方式である。最終圧延機と巻取機の間計置するが、この間を走行する材料の温度はキュリー点(770°C)以上のため常磁性であり、常温におけるごとき直流磁化の必要がここではない。それに代わつて耐熱の目的でコイルの水冷が行なわれる。

完全に検出可能な表面欠陥の最小深さは線径の1%程度である。

(4) ピンホール検出²⁵⁾

ブリキ用鋼板その他の極薄鋼板ではピンホール検出器が使われていて、目視検査の能力をはるかに上回る性能をもち能率向上に役立つ。代表的仕様を以下に記す。板幅：600~1300mm，板厚：0.6~1.0mm，走行速度：1.2~1200m/min，板端不感帯：3~9mm，シートの変動許容値：1mm以下，検出感度：最小25μφの垂直穴を検出する。光源：よう素電球，検出器：光電子増倍管

2.3.2 材質検査

鋼材材質の検査ならびに試験はJISによつてすべて破壊試験法が規定されており、最終的ないわゆる guarantee用の試験方法としては今後もその大勢が変わることはないと思われる。一方、迅速なアクションを必要とする圧延工程の現場では、非破壊試験法によつて簡便かつ迅速

に材質に関する判別を行ないたい要求が常に存在している。非破壊検査の方法自体は非常に多岐にわたり²⁸⁾、それらの中から測定したい鋼材特性に最適と思われる検査方法が種々試みられているが、(a)超音波による方法、(b)電磁気的方法の2者が代表的である。また放射線の利用も多い。たとえばメッキ層の厚さ測定にはβ線の後方散乱によるものと、螢光X線²⁹⁾によるものがある。また同じブリキにおいて厚板の硬さを連続的に測定する³⁰⁾ことも行なわれている。以下に硬さ測定の例を紹介

Table 2. 硬さ測定方法

区分	方法
放射線	β線背面反射法
電磁気	a. 保磁力測定法 b. 残留磁気測定法 c. 直流磁界透過法 ⁴³⁾ d. 巻棒式磁気硬度 e. 渦電流法

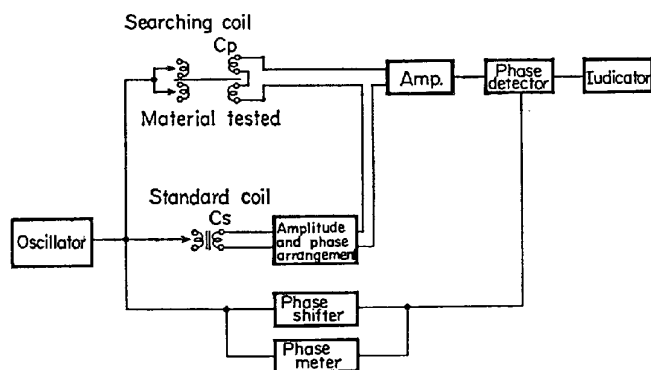


Fig. 8. Measuring method of hardness.

する。

これはブリキ用鋼板の連続焼鈍ラインで連続して硬さを測定し、硬さ管理を行なうことを目的としたもので、渦電流法であり、Table 2 に挙げた多くの方法のうちの一例である。測定系のブロック図を Fig. 8 に示すが、渦電流法による 2 次コイル誘起電圧が初透磁率とほぼ直線的関係にあること、および材料硬さと初透磁率とがほぼ直線的関係にあることを利用して材料硬さを測定するものである。オンラインにおいて 0.203~0.314 mm 厚の材料に対し標準偏差が $1.0 H_{R30T}$ の総合精度を得ている。

2.3.3 その他

製品検査の自動化を目的とした寸法形状測定も行なわれている。精整ヤードの環境のよい時点で施行できる有利さがあるが、一方では要求項目が多く、また要求精度も高い傾向がある。実用化されているものの例には熱延鋼板の厚さ・幅測定(圧延機用のものが兼用)、冷延鋼板の X 線、 γ 線厚さ計、光電管式あるいはメジャリングロール方式による形鋼、鋼管の長さ計などがあげられる。ITV を利用した厚板の粗採寸用の寸法測定³²⁾も行なわれている。

3. 圧延機の自動制御

3.1 概要

圧延工程の主要機能は素材に塑性変形を与え、厚さ、幅、長さ、形状などを所定の寸法に仕上げることでありまた熱間圧延においては圧延終了時に目標の鋼材温度を得ることにより、製品の金属学的特性を制御することにある。これら寸法、温度などの仕様を忠実に守り、製品の品質を向上し、安定化するために圧延機の諸自動化が強く望まれてきた。とくに製品の厚さ、形状は圧延段階で決定され、後続の精整工程での修正はほとんど不可能なため、圧延工程での最重要課題として自動板厚制御ならびに圧延機の計算機制御の開発が進められてきた。

また、幅、長さ、温度に関しては一般に操作から最終結果の検出までに相当の時間遅れがあるのが常であり、適応制御、予測制御に頼らざるを得ず、計算機制御システムの 1 機能として開発が進められてきた。その結果、鋼板の圧延の場では、自動板厚制御 (AGC) は完全に実用化され、現在の開発の主題は形状制御に移ってきたと言える。一方、条鋼などの鋼板以外の圧延においては検出端の開発が遅れており、現状の技術では投資効果の問題などで、寸法の自動制御は実用化されておらず今後の開発が待たれている。また、冷間圧延の最終工程であるコールドスキンパスミルでの最重要課題である伸び率制

御が最近実用化されるにいたつた。ここでは自動板厚制御、形状制御、伸び率制御に関する最近の進歩について概要を説明する。

3.2 自動板厚制御 (AGC)

厚板ミル、ホットストリップミル、リバースコールドミル、タンデムコールドミルなどの鋼板の圧延機では、製品の長手方向の板厚変動を制御し、かつ目標の厚さを得るための AGC は、1960 年代から開発が進められた結果、今日ではすでに完成された技術として、圧延機の建設または改造に際して必ず装備されるようになった。

板厚の制御方法には

(a) BISRA の開発したゲージメータ方式により、スタンド出側での板厚偏差を時間遅れなく検出し、圧下を制御する方式

(b) 厚さ計からの偏差信号にもとづき、前記ゲージメータ方式の板厚制御におけるスタンド出側基準厚を修正し絶対厚を得るモニタ制御方式

(c) 厚さ計からの偏差信号にもとづき、スタンド間張力を調整して板厚を制御する方式

などがある。一般にはこれら制御方式の特徴を生かした最適組合せにより板厚制御を行なうが、その組合せは、

(a) 厚板ミルにおいては単純なゲージメータ方式により均一な板厚を得ることを目的とした AGC

(b) ホットストリップミルにおいては、ゲージメータ方式を基本とし、最終スタンド出側の厚さ計偏差信号にもとづくモニタ制御と場合によつては最終スタンドでの張力制御方式

(c) タンデムコールドミルにおいては前方のスタンドではゲージメータ方式とモニタ制御、後方スタンドでは張力制御方式

といったプラントによりほぼ一定の組合せができ上っている。最近では AGC の制御方式に関する新規性のある開発は少なく、現状の制御方式の範疇での構成要素の性能改善による制御性の改善、あるいは制御装置の DDC 化による制御性、保全性の改善、設備費の削減といった方向に進みつつあると言える。

電動圧下方式の圧延機においては、高出力低慣性電動機や応答性の優れたサイリスタレオナード方式の速度制御装置が採用されるようになった。このため板の長さが短くきわめて速い応答性を要求される厚板圧延機においても AGC が装備され、厚板制御に大きな威力を発揮するようになった³³⁾。

また、最近の板厚精度、形状などに関する要求はますます厳しくなりつつあり、圧延速度の高速化とともに、従来の電動圧下方式の圧延機では応答性に限界があり、

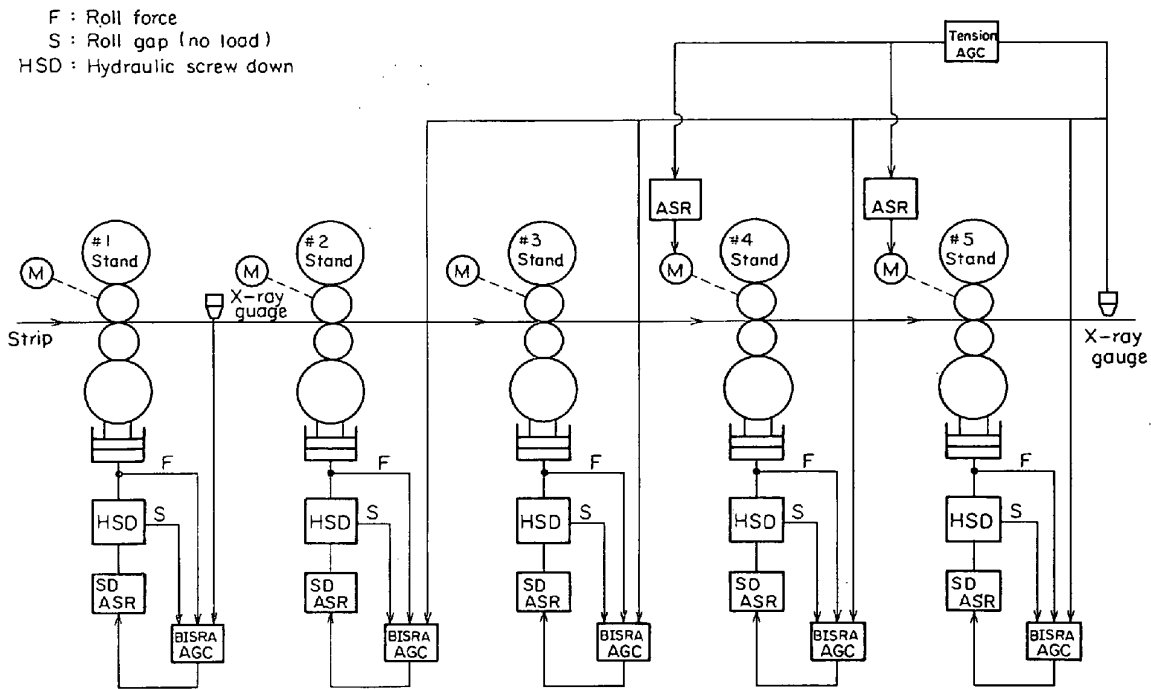


Fig. 9. Blockdiagram of AGC of hydraulic tandem cold mill.

油圧圧下方式の圧延機が採用されるようになった。初期の油圧ミルでは定圧制御装置を装備したものが一般的で、ロール間隙の制御ができないために板厚の制御は不可能であったが、最近では油圧ミルにおいても位置制御装置などとの結合により、ロール間隙の制御方式が開発され応答性のすぐれた AGC が可能となり、タンデムコールドミルなどで多く採用されるようになった。最近の油圧ミルにおけるロール間隙、板厚の制御方式について代表的な例を説明する。

(a) 油圧圧下シリンダ内の油量を制御することにより無負荷時のロール間隙を制御する方式³⁴⁾で、電動圧下の場合の圧下スクリュを油柱に置き換えたことになる。圧延荷重をロードセルなどにより検出することにより、油圧圧下の優れた応答性を活かしたゲージメータ方式の AGC が装備可能になる。Fig. 9 はタンデムコールドミルに適用した場合の AGC ブロック図の一例である。

(b) 最近の油圧ミルにはプレストレスドミルに見られるごとく、油圧圧下制御装置との組合せによりミルの剛性（ミル常数）を自由に変えうる圧延機が開発されている³⁵⁾。この種のミルでミル常数を無限大に設定することにより板厚を均一に制御するもので、Fig. 10 にその制御方式の一例を示す。

一方、最近の制御用計算機の信頼性が著しく向上した結果、従来のハードウェア方式の AGC に代わり、DDC 方式の AGC が採用されるようになった³⁶⁾³⁷⁾。DDC 方式

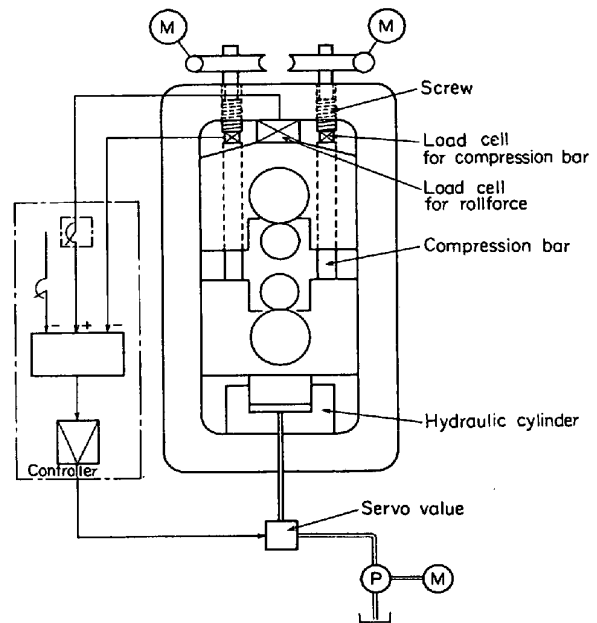


Fig. 10. Explanative drawing of hydraulic loading.

の場合はアルゴリズムがソフトウェアで構成されるため制御方式の変更などに柔軟性のある AGC の実現が可能であり、かつ複雑なロジックも容易に実用できるため制御性の向上が期待できること、アナログ方式にみられるドリフトによる性能劣化がなく、かつ最近の計算機の信頼性の向上により保守負担の軽減が可能など多くのメリットがある。とくにタンデムミルのように同一仕様の制御ループが多くある場合はイニシャルコストを

も削減できるため制御装置を DDC 化する傾向がある。

3.3 形状制御

鋼板の圧延工程においては、AGC あるいは計算機制御による板厚制御は完全に実用段階に達し、開発の中心は形状制御に移りつつある。とくに最近の新鋭圧延機では形状制御の有力な操作端であるロールベンディング装置が装備され、圧延中にロールクラウンないし形状を調整しうようになった。圧延中のロールクラウンの定量的解析および形状検出器の開発も進み、形状制御の実用化に本格的に取り組めるようになってきた。

形状制御にとって最大の問題は検出端であるが、2.2.2 項に述べたごとく各種検出器の開発と併行して、形状制御の試験結果が多く報告されるよう^{8)~10)38)39)} になってきた。しかし、鋼板の形状制御は開発の緒についたばかりであり現在報告されているものも冷間圧延に限られていて、熱間圧延の場合を含め形状制御の完全実用化には今後の開発に待つべき課題が山積している。最近では板厚と形状の同時制御に関するタンデムミルの総合特性の研究なども発表されており⁴⁰⁾、将来の形状制御は AGC と有機的に結合され、さらにこの上に計算機制御システムがリンクされて、鋼板の全長にわたって板厚と形状の双方を制御する方向へ開発が進められるであろう。

Fig. 11 は ALCAN-ASEA が開発した多分割ロール方式の検出器をアルミ用ミルに適用した場合の形状制御装置のブロック図である³⁹⁾。

3.4 調質圧延機の伸び率制御

冷間圧延の最終工程である調質圧延機は、出荷先での

プレス加工時にストレッチャストレーンやスプリングバックの発生を防止するために、最適な伸び率を与えることが主要な目的である。伸び率は圧延機の入側・出側のストリップ速度比より求めるが、伸び率検出のためにはストリップ速度差を高精度で検出する必要がある。入側・出側のデフレクタロールに結合したパルス発生器からのパルスを間歇的にカウントアップし、伸び率を演算するデジタル方式の検出器が使用される。最近の調質圧延機では検出器からの信号にもとづき圧下ないしはストリップ張力を制御する伸び率制御装置が設備されるようになった。Fig. 12 にその一例を示す⁴¹⁾。

4. 圧延工程の計算機制御

4.1 概要

鉄鋼業における製品の品質向上、生産コストの削減は設備の大型化、連続化、高速化と円滑な操業によつて達成される。操業の円滑化、安定化によつて自動化は不可欠な要素であり、圧延工場にあつても各種の計測設備、自動化設備、自動制御装置が導入されてきた。しかしながらプラント内外で発生する外乱的要素を単一フィードバック制御を主体とする自動制御装置で吸収し、操業の安定化をはかるには限界があるため、適応制御などによりプラント操業を最適化させる機能を持つ計算機制御システムが導入されるようになった。さらに最近の鉄鋼製品の品質、納期に対する要求はますます厳しさを増しており、これに対処するため生産管理、工程管理に必要な情報量が増大するとともに、情報処理の高速化が要求さ

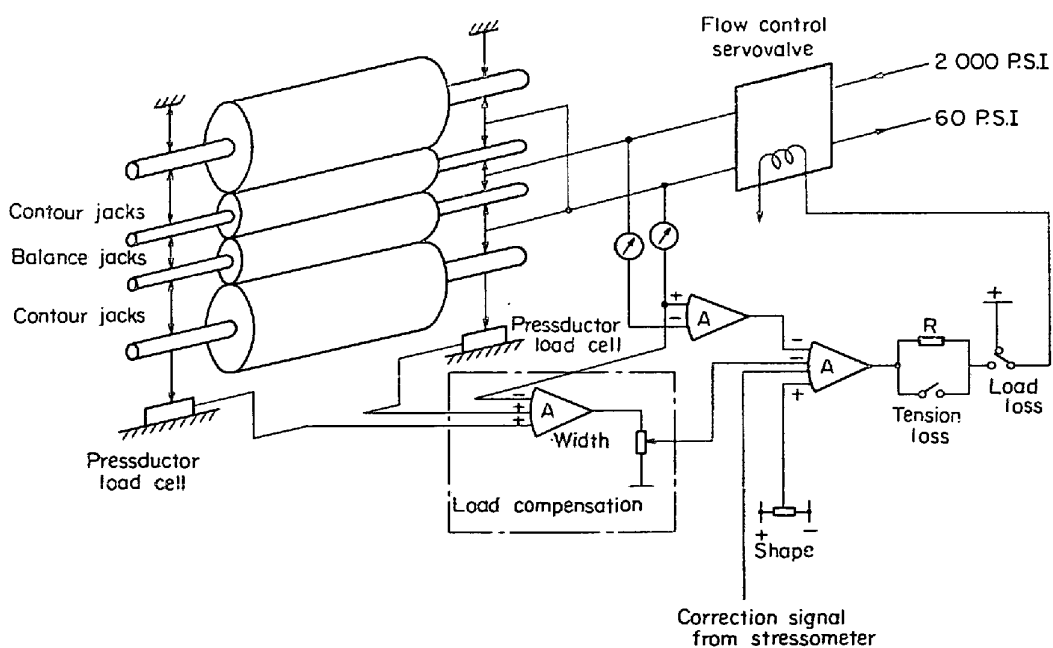


Fig. 11. Block diagram of Alcan-Asea automatic roll deflection control.

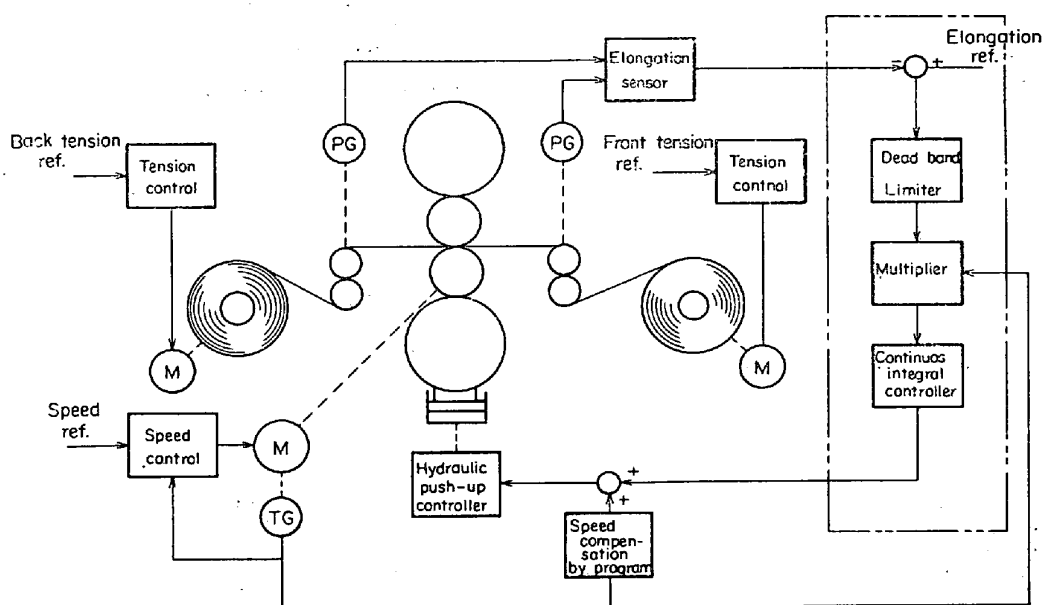


Fig. 12. Block diagram of elongation control system.

れるようになった。とくに製鉄所における最終工程である圧延部門ではその感が強い。そこで現在の新鋭一貫製鉄所では生産管理システムを頂点とするハイアラキシステムにより、受注から出荷までの一貫管理方式が採用されるようになってきた⁴²⁾。圧延工程の計算機制御システムも生産管理システムのサブシステムとして何らかの形で上位システムとリンクされ操業に必要な情報を受取り一方プラントに設置した検出器より受信するオンラインの情報にもとづきプロセスを制御する方式となってきた。この方式によつて製品の品質、歩止、生産能率の向上をはかる制御機能とともに、生産管理、工程管理用の情報処理機能をもあわせ持つようになった。

制御用計算機の性能向上、計算機制御に必要な検出端および制御モデルの開発が進められた結果、製鉄所の各種設備に計算機制御システムが導入されるようになったが、圧延機の制御という観点からみると、検出端と制御モデルの開発が進んでいて、かつ投資効果の大きい、分塊、厚板、ホットストリップミル、タンデムコールドミルなどにおいてはすでに十分実用段階に達していると言えよう。しかしながら形鋼、線材などの圧延機においてはごく特殊な機能を除き実用化されていないのが現状である。

4.2 分塊工場の計算機制御

分塊工場はスラブ・ブルームなどの中間製品を生産するプラントであり、ほかの圧延工場と違い寸法精度などに対する要求よりも、生産能率の向上、歩止の向上が重要な課題である。したがって計算機制御システムもこのような効果を狙つて導入されている。分塊工場の計算機

制御システムには情報处理的な機能を主要機能としたものと圧延機制御を主要機能としたものとの2つの流れがあり、最近では双方の機能を持つシステムも報告されている⁴³⁾。前者は均熱炉の焼上り予測⁴⁴⁾、複雑な段取作業の自動化⁴³⁾、作業情報指示、実績収集の自動化により分塊工場の操業の円滑化と効率化により、生産能率の向上をはかろうとするものである。後者は従来のCPC(カードプログラミングコントロール)あるいはAPC(自動プリセット制御)装置と計算機による自動スケジューリング機能とを結合し、能率、歩止を考慮した圧延スケジュールの作成と、それにもとづく圧延機の自動セットアップ、およびオンライン情報にもとづくパススケジュールの最適化により圧延能率の一層の向上をはかろうとするものである⁴⁵⁾⁴⁶⁾。

分塊・厚板圧延機などの可逆圧延機における能率向上は

- (a) ミル能力を限界まで利用する最適パススケジュールによるパス回数の削減
- (b) 可逆シーケンスの最適化による圧延時間の短縮の2つの面から追求されてきた。前者は制御モデルの改善により比較的容易に達成されるが、後者については人間の目視による予測動作の取入れ、加減速タイミングの最適化による無駄時間の削減の努力がハードウェアとソフトウェアの両面からなされてきた。しかし現時点では手動圧延時の能率を完全に凌駕する例は少なく、可逆圧延機の完全自動運転の完成には、素材位置の認識装置を含めた、可逆シーケンスの最適化ならびにタンデムローリング、転回などの複雑なミルシーケンス制御の開発が

必要であり、今後の分塊圧延での課題といえる。

4.3 厚板圧延機の計算機制御

厚板工場は多種多様の製品を一般には小口単位で生産するプラントである。素材から製品に至るまでに加熱、圧延、矯正、冷却、採寸、剪断、熱処理、検査などの多くの工程があり、しかも製品の仕様によつてかなり工程も変わる複雑なプラントである。厚板工場はレバラを境に、圧延ラインと精整ラインに分割されるが、工程的には後者の方が非常に複雑で、人手に頼る作業が多い。現在まだ採寸、表示、刻印、検査工程の省力化のための自動化設備の開発が進められている段階であり、いわゆる計算機制御の適用はむずかしい。しかし、最近の品質、納期に対する厳しい要求を満すためには必然的に操業に必要な情報量が増大し、かつ実績収集の自動化、高速化が必要となる。このため、厚板工場では作業指示と情報収集処理のオンラインリアルタイム化を狙った情報処理システムが導入され、精整ラインはこれらシステムの管理のもとに工程の円滑化がはかれるようになった³³⁾⁴⁷⁾。

一方圧延ラインの素材の流れは比較的単純であるが、製品の仕様が多種多様であるため、圧延作業の標準化もむずかしく、従来は熟練した操業者の経験と勘に頼る圧延機の運転が続けられてきた。

寸法精度を始めとする品質向上に対処するため、1962年頃から米国で自動パススケジューリングと適応制御による板厚制御を主要機能とする計算機制御システムが開発された。この結果わが国においても、厚板工場建設時には圧延機の計算機制御システムが導入されるようになり、圧延部門においてはホットストリップミルに次いで導入例が多い。

厚板圧延機の計算機制御の主要機能は、能率：形状を

考慮した最適パススケジュールの計算と、各パスごとの実績データにもとづく数式モデルの適応修正により圧延圧力などの予測精度を向上させ、製品の厚さ、幅を目標通りに仕上げることである。Fig. 13 は Hoesch AG の厚板工場における手動および計算機圧延時の板厚精度の比較を示すものである⁴⁸⁾が、計算機システムの導入により板厚精度は大幅に向上する。このほかに鋼板の仕上温度制御、粗・仕上圧延機の負荷配分制御などが主な機能である。

4.4 ホットストリップミルの計算機制御

ホットストリップミルは圧延部門では最も生産性の高いプラントである。素材の流れは加熱炉からコイラへとほぼ一方向に流れる単調なプラントであり、従来から操業の自動化が進み、自動プリセット装置、AGC、自動シーケンス制御装置が採用されてきた。したがって、計算機制御システム導入の基礎はでき上っていたと言える。このため圧延機の計算機制御の分野では最も歴史が古く、1965年頃からその定量的効果についても報告されるようになった⁴⁹⁾。わが国においても18基のホットストリップミル中すでに14のプラントに計算機制御システムが導入されており⁵⁰⁾、個々のシステムを詳細に比較すれば機能面などで多少の差はあるが、主要機能については標準的なパターンができ上っている。

ホットストリップミルの計算機制御の主要機能は、粗圧延機・仕上圧延機のセットアップ、仕上出側温度制御、巻取温度制御である。厚さ計、幅計、ロードセル、温度計などの圧延ラインに設置されている検出端からの情報にもとづき最適化された数式モデルにより、ストリップの厚さ、幅、仕上出側温度、巻取温度を目標値に制御するものである。Fig. 14 は Bethlehem Steel 社の

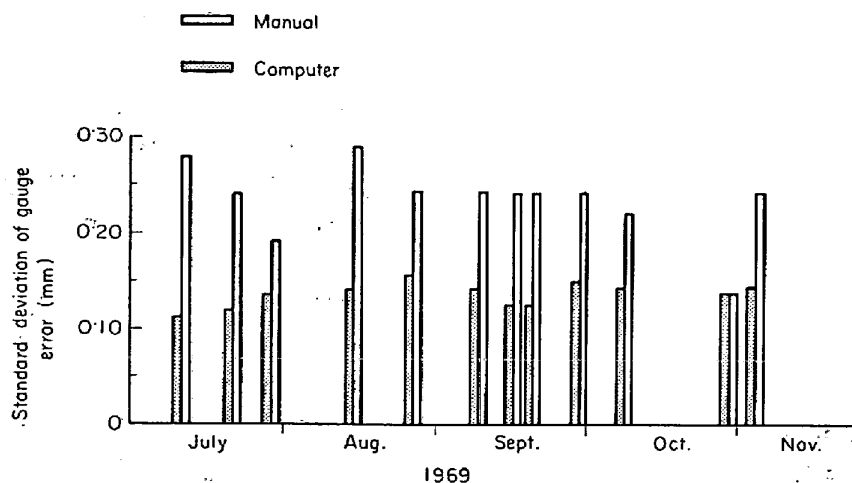


Fig. 13. Comparison of manual and computer gauge performance of plate mill at Hoesch AG.

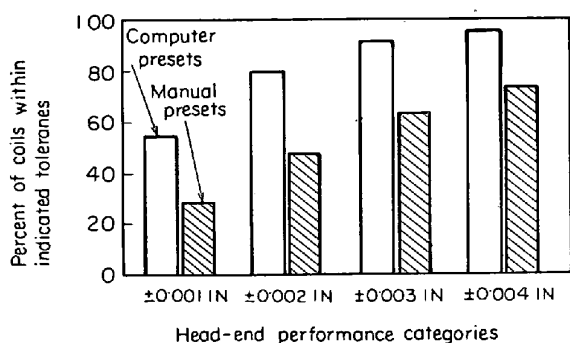


Fig. 14. Comparison of computer presets (7562 coils) vs. manual (desk) presets (756 coils).

Sparrow Point 工場での手動および計算機圧延時のコイル先端の板厚精度について比較したものである⁵¹⁾。

最近の特徴としては、ミル制御用計算機の1機能として、または別個の計算機により、加熱炉の燃焼制御を行なわせ、圧延ラインとの調和のとれた最適な操業から生産能率の向上や熱量原単位の削減を狙ったシステムが開発されている。また大型のミル制御システムの下に、自動プリセット、AGC あるいはシーケンス制御を主機能とする小型の DDC システムを配置し、相互にデータリンクで結合したハイアラキシステムによりプラント全体を制御する方式が開発されたことを挙げることができる³⁷⁾⁵²⁾⁵³⁾。

4.5 タンデムコールドミルの計算機制御

タンデムコールドミルの場合は熱間圧延に比較して、計算機制御の歴史も新しく、かつ導入例もあまり多くない。しかしながら、オンゲージ率の向上、ストリップ破断の防止、形状の安定化、製品の品質、歩止の向上には操業の標準化と自動化が必要であり、1965年頃から圧延機の初期設定を主要機能とする計算機制御システムが開発され、導入例が急速に増加してきている⁵⁴⁾。

ホットストリップミルにおける計算機制御システムは通常ストリップ先端の板厚を制御し、その他の部分については AGC がほぼ単独で制御するが、タンデムコールドミルにおいては、通板、加速、定常圧延、溶接点前後の減速・加速、戻抜け時の減速という激しい圧延状況の変化がある。この結果ロールとストリップ間の摩擦係数の変化、スタンド間張力の変化が発生し、これらが大きな外乱として作用するため、AGC のみによる板厚制御では十分な効果は得られず、オフゲージ率の削減、形状調整、ストリップの破断防止などに相当量の手動介入を必要としていた。これらの問題解決のためには、当然計算機がストリップ全長にわたって何らかの制御を行なう

必要がある。最近ではタンデムミル全体を1つの系として把握した過渡状態、加減速時の特性解析、各圧延因子間の相互影響係数の解析が進み⁴⁰⁾⁵⁵⁾、これらの圧延理論の発展と共に、通板時の張力制御、加減速時の速度補償、ストリップ全長にわたる厚さ、張力の監視と制御などのダイナミックな制御機能を持つシステムの実用化が報告されるようになった⁵⁶⁾⁵⁷⁾。

4.6 その他

鋼板以外の圧延工程については、検出端および制御モデルの開発段階にあり、圧延機のオンライン閉ループ制御を主機能とするような計算機制御システムの実施例は報告されていない。しかしながら最近の制御用計算機の信頼性と性能の向上により、種々の分野でごく限られた機能を実行する計算機システムが導入され、十分な効果が得られるようになった。以下にそれら導入例の代表的なものを挙げると、

(a) 従来は専用のアナログ型ハードウェアで構成されていた圧延機の AGC やプリセット装置を DDC 方式の制御用計算機に置換えたもの³⁷⁾⁵²⁾⁵³⁾、またさらにこの機能を拡張し、形鋼ミルで素材のトラッキングを行ない、記憶装置にストアされた標準圧下テーブルから圧延機のセットアップを行なう計算機システム⁵⁸⁾。

(b) 従来のワイヤードロジックの制御装置に代わり小型制御用計算機をシーケンスコントローラとして使用するもので、ホットストリップのコンベアライン⁵²⁾テーブルラインの制御、調質圧延機のコイルの定位置停止、コイル尾端定位置停止重量分割制御、伸び率表示を主機能とする計算機システム⁵⁹⁾。

(c) 形鋼ミル、マンドレルミル⁶⁰⁾、ビレットミルなどでアズロール長さを測定し最適鋸断を行なう計算機システム。

(d) 炉操業の場合において、均熱炉、焼鈍炉の自動燃焼制御を DDC 化したシステム、あるいは調質炉などで ACC と結合し、作業標準に従った燃焼制御を行なわせ、製品の品質向上を狙った計算機システム、など種々の分野で導入されており、今後とも制御用計算機の利用範囲は拡大すると考えられる。

5. 炉の計装

圧延工程では均熱炉、加熱炉など熱間圧延用素材の加熱炉と焼鈍炉、焼準炉、焼入炉などの製品熱処理用の炉に大別されるが、これらの炉の計装はいずれも早くから工業計器による自動化が進められ、すでに標準化も十分なレベルに達している。新しいガス分析計による雰囲気ガスの制御や廃ガス分析による燃焼制御などの開発⁶¹⁾を

除けばここ数年顕著な進歩はとくにみられない。

炉計装の分野における新しい動きはここでもまた制御用計算機の導入であり、従来の工業計器による制御システムを上回るより高度な自動化を実現すべく開発が進められ、多くの実用例が報告されている^{62)~67)}。連続式加熱炉の計算機制御では操業の最適化を目的としたもの、均熱炉や焼鈍炉ではいわゆる DDC 化による設備費低減品種向上等の効果を目的としたものなどが挙げられる。

5.1 加熱炉の計算機制御

ホットストリップミルなどの大型連続式加熱炉に計算機システムを導入し、炉操業の最適化をはかろうとするものである⁶²⁾⁶³⁾。連続式加熱炉の機能は圧延に適した温度に均一に加熱された材料を圧延機側の要求に合致した抽出速度で供給することである。したがってスラブの炉内移動速度は圧延ピッチにより変動し、また個々の材料の寸法は一樣ではないから、各ゾーンにおける熱の供給量を制御することが望ましい。従来の標準的な計装では各ゾーンに独立した炉内温度の定値制御系が設けてあるにとどまり各ゾーンの熱負荷の調整はオペレータの経験的な判断にもとづいて手動で行われてきた。計算機制御はこの作業を自動化し、オペレーションの自動化とともに材料の良好な焼上り、炉の能力の向上、熱効率の向上などを実現させようとしている。

計算機の機能は基本的には炉内を移動する材料のトラッキングとそれぞれのゾーンにおける所要熱量を材料の量と通過速度との関連のもとで最適に制御することにある。計算機には材料への伝熱に関する数式モデルが与えられており、平均寸法、平均移動速度、そのゾーンに到達したときの材料の温度、出ていく際の必要温度などの

Table 3. 炉のインラインコンピュータコントロールの利点

		マニュアルコントロール中の記録との比較	熟練されたマニュアルコントロールとの比較
1 生産性	a. 粗圧延機後の最適温度制御によるもの	12.5%	5%
	b. 炉能力とミル能力の最適整合によるもの	10.0%	10%
	計	25.5%	15%
2	燃料経済性	25%	10%

条件から、そのゾーンの設定温度を計算して工業計器による炉温制御系に与える。1つの実用例における計算機制御の効果を Table 3 に示す⁶³⁾。

5.2 均熱炉、バッチ焼鈍炉の計算機制御

均熱炉、バッチ焼鈍炉への制御用計算機の導入はきわめて盛んで最近では実用化域に達している。これらの炉では計算機制御は操業の最適化、省力化のみならず、さらに DDC 化することによつて計装設備費の低減と、優れた制御による効果をもたらしているが、いずれも1つのプラントにおける炉の数が多いことが、計算機制御導入を有効にさせている。

均熱炉では操業の最適化を目的として計算機を用いて焼上り予測を行なわせた例がある⁴⁴⁾。これは炉計装の範疇に計算機を導入した最も初期のものと言えよう。その後計算機自体の機能、信頼性が向上するにつれ、最近では計装システム全体を DDC 化した例も見られるように

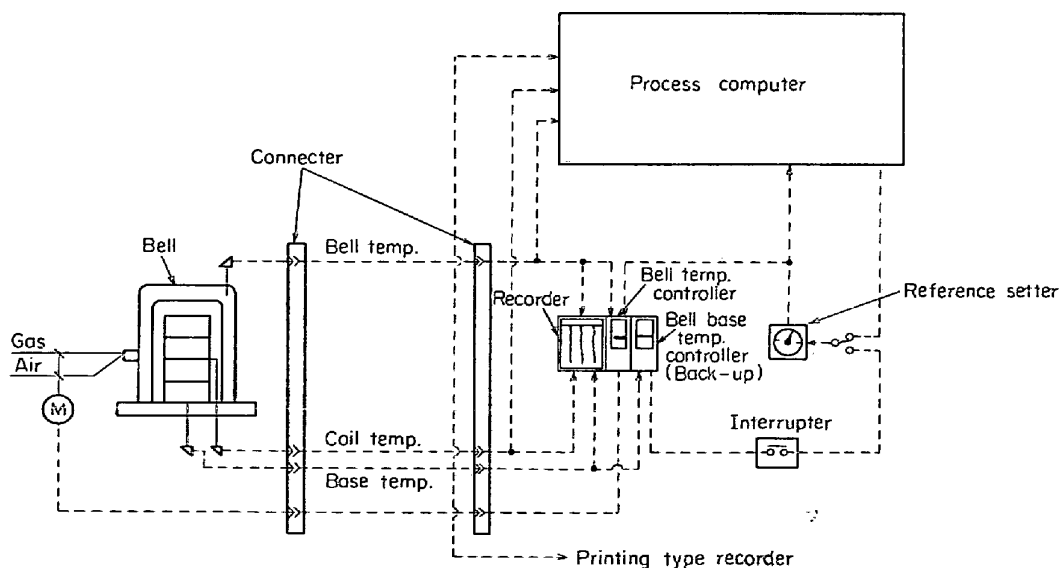


Fig. 15. Block diagram of annealing furnace control system.

なつた⁶⁴⁾。

均熱炉や焼鈍炉では DDC の採用によりオペレーションの人間工学面の効果や省力化も得られている。通常、従来の工業計器による計器盤は、炉の数に比例したきわめて大きなものになるが、演算、記録などの機能が、計算機によつて処理されるから、計器盤に装着される機器が大幅に単純になり、盤自体が小型化する。また、炉の工程の進行の監視、オペレーションガイド、制御が正常か否かなどのモニタを計算機に代行させることによつてオペレーションが著しく容易になる。以上のほか操業表の作成の自動化、さらには上位の生産管理計算機システムと結合させて、生産管理に必要なデータを自動的に授受させ、操業の合理化、省力化を期待することができる。またプラント全体の操業の改善、すなわち多数の同一仕様の炉の最適スケジューリングによる能率向上といつた生産管理面での最適化によるメリットが大きい。

焼鈍炉の計算機制御の 1 例を Fig. 15 に示す⁶⁵⁾。温度制御系を部分的に工業計器によつて構成し、計算機制御システムがスーパーバイザリイに全体をカバーしている。ここでは省力効果、温度制御性の向上と共に、とくにプログラム制御の自動化による操業の標準化を通じての品質向上を主たる目的としている。1つの計算機システムで 27 基、54ベースのタイトコイル焼鈍炉をカバーしている。

圧延プラントの炉の制御への計算機制御システムの導入は、このほかにも連続調質炉⁶⁶⁾その他の炉における例も報告されている。

6. む す び

以上、圧延工程における最近の計測技術の進歩について概説した。ここ数年のこの分野の進歩は著しいとは言え、多様な設備の中で、開発すべき課題に比べると、比較的開発の容易な鋼板の圧延工程に関するものが大部分であり、形鋼、パイプなどに関しては今後の開発に待たなければならないのが現状と言える。またすでに実用に供されている計測装置にあつても、精度や信頼性、保全性の面で十分とは言えず、一層の改善が必要である。これらの課題はいずれも技術的にきわめてむずかしいものばかりであり、今後は一層強力な研究、開発体制が望まれる。

文 献

- 1) 矢吹：圧延用ロードセルについて、鉄と鋼，55 (1969) 14, p. 1399
- 2) 容量型ロードセルについて、計測部会資料，計 48-7-1 (1971)

- 3) 圧延用ロードセル小委員会報告，計測部会資料，計 49-9-1 (1971)
- 4) 芥田：圧延における寸法形測定について，鉄と鋼 57 (1971) 4, S 304
- 5) R. PIRLET: 圧延製品の寸法測定，論文集，圧延編，(1970)，p. 17 [日本鉄鋼協会共同研究会計測部会]
- 6) 厚板 Camber Gauge, 計測部会資料，計 51-4-3
- 7) 吉谷：薄板形状測定の現状，鉄と鋼，56 (1970) 11, S 637
- 8) 柴田，ほか：光学式形状検出器による自動形状制御，塑性と加工，12 (1971) 124, p. 353
- 9) O. PAWLSKI, et al.: Development of a Shape Control System in Cold Strip Rolling, Proc. of ICSTIS, (1970), Part II, Sec. 4, p. 692 [日本鉄鋼協会]
- 10) J. G. WISTREICH: Measurement and Control of Strip Shape in Cold Rolling, Proc. of ICSTIS, (1970), Part II, Sec. 4, p. 675 [日本鉄鋼協会]
- 11) H形鋼用放射線厚さ計について，計測部会資料，計 50-4-3 (1972)
- 12) 大形工場フランジ幅計について，計測部会資料計 45-4-4 (1970)
- 13) Combined I-Profile Gauging System, EXATEST 社カタログ
- 14) 線材の連続熱間太さ測定について，計測部会資料計 50-4-3 (1972)
- 15) Wire and Rod Diameter Gauging System DIAROT, EXATEST 社カタログ
- 16) X線厚さ計小委員会，計測部会資料，計 51-1-1 (1972)
- 17) G. POKLEKOWSKI, et al.: レーザ光線を用いた高速圧延機の世界測定，論文集圧延編，(1971)，p. 30, [日本鉄鋼協会共同研究会計測部会]
- 18) 着磁法の圧延プロセス計測への応用，計測部会資料，計 50-4-5 (1972)
- 19) A. KOHN: Lunkerprüfung an Warmen Vorblöcken Mit Gammastahlen, Stahl u. Eisen, 90 (1970) 23, p. 1333
- 20) 厚板の自動超音波探傷法研究報告 (第 1 次および第 2 次)，(1967 および 1968)，[学振製鋼第 19 委自動探傷法研究会]
- 21) 土門：鉄鋼業におけるオンライン超音波探傷の進歩，鉄と鋼，57 (1971) 8, p. 1372
- 22) 武藤，ほか：鋼板の自動超音波探傷，19 (1970) 10, p. 526
- 23) 冷延鋼板表面欠陥検出器，計測部会資料，計 49-4-8 (1971)
- 24) 表面検査装置トスペクター 86 形，計測部会資料，計 50-7-3 (1972)
- 25) ピンホール検出器，東芝技術資料
- 26) 白岩，ほか：熱間圧延棒鋼の表面欠陥の自動探傷法，57 (1971) 3, p. 601
- 27) A. ARNELO ほか：熱間線材ロッドの渦電流検査，非破壊検査，18 (1969) 5, p. 235

- 注) Materials Evaluation, 26 (1968) 11, p. 235
より邦訳したもの
- 28) 磯野: 非破壊検査法による鋼材の材質判定法について, 鉄と鋼, 55 (1969) 10, p. 916
 - 29) 電気ブリキラインにおける蛍光X線分析法による錫メッキ厚さ測定, 計測部会資料, 計 46-4-3 (1970)
 - 30) ブリキ用鋼板の連続硬度計の開発, 計測部会資料計 48-6-2 (1971)
 - 31) シェフィールドX線厚み計の使用状況, 計測部会資料, 計 48-6-1 (1971)
 - 32) 工業テレビを利用する厚板ホットシヤー剪断長指示装置, 計測部会資料, 計 44-7-2 (1969)
 - 33) M. OSHIMA, et al.: 厚板工場の計算機システム, 論文集, 圧延編(1970), p. 150 [日本鉄鋼協会共同研究会計測部会]
 - 34) 梶原, ほか: 油圧圧下式圧延機, 日立評論, 47 (1965) 9, p. 1953
 - 35) 野村: 新形式剛性可変油圧圧下式圧延機, 石川島播磨技報, (1969) 別冊2号, p. 29
 - 36) J. W. WALLACE: Automatic Gage Control for Modern Hot Strip Mill, Iron Steel Eng., 44 (1967) 12, p. 75
 - 37) ホットストリップミルのデジタル AGC・APC, 計測部会資料, 計 45-4-3 (1970)
 - 38) T. KAWAMATA, et al.: Automatic Shape Control in Cold Rolling, Proc. of ICSTIS, (1970), Part II, Sec. 4, p. 702 [日本鉄鋼協会]
 - 39) M. HENZE et al.: ALCAN-ASEA Automatic Flatness Control System (AFC), Proc. of ICSTIS, (1970), Part II, Sec. 4, p. 687 [日本鉄鋼協会]
 - 40) 鎌田, ほか: タンデムミルの総合特性に関する研究, 第1報, 塑性と加工, 9 (1968) 89, p. 395
 - 41) T. KAWAMATA: Elongation Control in the Cold Temper Rolling Process, Proc. of ICSTIS, (1970), Part II, Sec. 4, p. 793 [日本鉄鋼協会]
 - 42) M. OSHIMA, et al.: On-line Production Scheduling and Process Control System in Integrated Steelworks, Preprints of the IFAC 5th World Congress, (19-2), 4-4
 - 43) 宮崎, ほか: 分塊工場の計算機制御システム, 日立評論, 53 (1971) 6, p. 542
 - 44) M. OSHIMA, et al.: 分塊工場における集中管理情報システム, 鉄鋼オートメーション国際会議, (1965) 発表論文集, II 工程管理・圧延編, (1966) p. 33 [日本鉄鋼連盟]
 - 45) W. BADING: ユニバーサル分塊圧延機におけるプロセス計算機の利用, 論文集, 圧延編, (1970), p. 84 [日本鉄鋼協会共同研究会計測部会]
 - 46) 分塊工場の計算機制御計測部会資料計 49-4-1 (1971)
 - 47) T. MINE et al.: 厚板工場における情報処理システムについて, 論文集, 圧延編, (1970), p. 135 [日本鉄鋼協会共同研究会計測部会]
 - 48) G. WISSHOFF, et al.: 厚中板圧延機のプロセス制御に関する新結果, 論文集, 圧延編, (1970), p. 118 [日本鉄鋼協会共同研究会計測部会]
 - 49) R. MEREDITH: Computer Control of Hot Strip Mills at Spencer Works, Iron Steel Eng., 42 (1965) 12, p. 73
 - 50) 日本鉄鋼協会, 共同研究会, 圧延部会, 第16回ホットストリップミル分科会, 提出資料
 - 51) G. E. HECK, et al.: Computer Control of the Sparrow Point 56-In. Hot Strip Mill, Iron Steel Eng., 49 (1978) 4, p. 44
 - 52) J. W. WALLACE: Process Control for a Continuous Hot Strip Mill, Steel & Metals International, 7 (1970) 2, p. 138
 - 53) 連続熱延工場の計算機ハイアラキシステム, 計測部会資料, 計 48-4-3 (1971)
 - 54) M. H. BUTTERFIELD: Set-up buy Computer, and Automatic Gauge Control of a 4-Stand Cold Steel Strip Mill, Transactions of the Society of Instrument Technology, (1965) 9, p. 76
 - 55) 美坂: コールドタンデムミルの影響係数, 塑性と加工, 8, (1967) 75, p. 188
 - 56) B. C. BRADLEY: U. S. Steel. Fairfield Works' 6 Stand Computer Controlled Cold Mill, Iron Steel Eng., 47 (1970) 5, p. 57
 - 57) 冷間タンデムミルの計算機制御, 計測部会資料, 計 50-4-1 (1972)
 - 58) Bethlehem's Newest BOF Shuts Down 29 Open Hearths, 33, 7 (1969) 12, p. 72
 - 59) 調質圧延機の計算機制御, 計測部会資料
 - 60) W. H. PHILIPP: Fertigungablauf in Einem Kontinuierlichen Rohrwalzwerk und Fertigungssteuerung mit einer Datenverarbeitungsanlage, Stahl u. Eisen, 88 (1968) 9, p. 445
 - 61) 均熱炉排ガス O₂ 制御について, 計測部会資料, 計 38-5-1 (1967)
 - 62) H. KLAMMER: Entwicklungslinier in der Regelung Hüttenmachiner Wärm und Warmbehandlungs Öfen, Stahl u. Eisen, 89 (1969) 4, p. 165
 - 63) H. HOLLANDER, et al.: 新ホットストリップミルにおける5带式加熱炉のオンライン計算機制御, 論文集, 圧延編, (1970), p. 182 [日本鉄鋼協会共同研究会計測部会]
 - 64) 均熱炉 DDC について, 計測部会資料, 計 45-4-2
 - 65) タイトコイル焼鈍炉の計装, 計測部会資料, 計 46-4-1
 - 66) D. SCHNÖMERT: Prozessüberwachung von Haubenglühofen für Kaltband mit einem Rechner, Stahl u. Eisen, 90 (1970) 6, p. 71
 - 67) パッチ式焼鈍炉の計算機制御, 論文集, 圧延編, (1970), p. 305 [日本鉄鋼協会共同研究会計測部会]
 - 68) 調質炉 DDC システムについて, 計測部会資料, 計 42-4-1