

条鋼における寸法制御と精度向上

小椋 徹也*・小林 敏彦*2

Recent Technologies for Controlling Dimensional Accuracy of Long Products

Tetsuya OGURA and Toshihiko KOBAYASHI

Key words: wire rod rolling; bar rolling; shape rolling; precise control; close tolerance; preciseness; dimension control; automatic gauge control; sizing block; universal mill.

1. 形鋼における寸法制御と精度向上

1.1 まえがき

形鋼は多岐にわたる製品を有するが、ここでは生産の主流を占め、技術的進歩の大きいH形鋼の寸法、形状精度向上について述べることにする。寸法精度向上はユーザーの要求および製造サイドからの必要性の両面から推進されてきた。ユーザー側としては、労働力不足の深刻化、あるいはより一層のコスト削減からファブリケータにおける加工自動化・プレファブ化が進展し、これに対応して精度向上要求が増大した。また高層化、大スパン化等建築物の高度化・多様化による限界設計面から精度向上要求も顕在化しつつある(図1)。一方製造サイドからは、歩留向上によるソフト削減、品質競争力強化の点から必要性が提起され、両者のもとに寸法精度向上が推進されてきた。特に最近の外法一定H形鋼製造技術の実用化により寸法精度向上技術は大幅に進歩してきている。

本稿では精度向上技術を大きく、素材、圧延技術、測定技術の3つに区分して概説し、最後に今後の展望を述べることにする。

1.2 圧延素材工程における高精度化対応技術

素材工程における高精度化対応としては素材そのものの寸法形状高精度化と加熱炉での均一加熱が課題である。

製造プロセスはコスト削減、品質向上を目的にIC材からCC材への転換が図られ、その結果、素材寸法も精度向上が図られた。CC断面はジュニアサイズはブルーム、シニアサイズはビームブランクおよびスラブが一般的であったが素材の寸法精度向上の点からビームブランクの適用範囲が拡大している。また近年、形鋼においてもより製品形状に近いニアネットCCが実用化され、今後の動向が注目される。

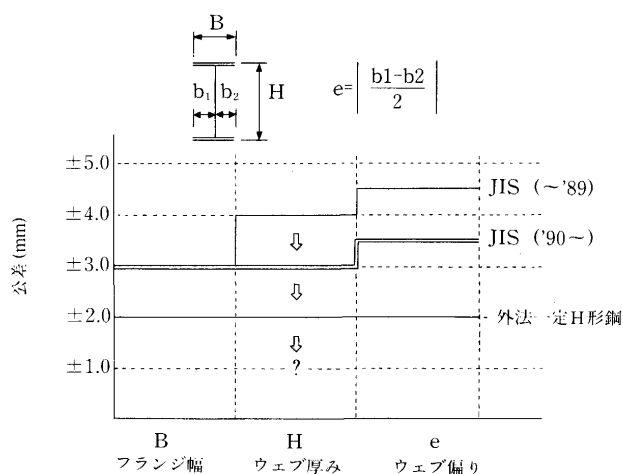


図1 H形鋼寸法公差の推移 (H500×200の例)

一方均一加熱の側面からは、表面性状の改善ニーズと併せプッシャー式からウォーキングビーム方式への転換が進んでいる。また、燃焼制御についてはDDC制御が多く使用されており、さらに焼き上げ燃焼モデルを使用した制御方式も開発が進んでいる。

1.3 圧延における寸法・形状制御技術の進歩

1.3.1 ユニバーサル圧延における課題

形鋼圧延はカリバー圧延とユニバーサル圧延に大別される。カリバー圧延は孔型設計の良し悪しにより寸法形状はほぼ決定され、長年の経験によりその最適化が図られてきた。

一方、並行フランジを有するH形鋼の圧延法であるユニバーサル圧延法は、多サイズのH形鋼を効率的に圧延する画期的技術であるが、寸法精度面ではカリバー圧延法の閉空間での圧延から、開空間での圧延に変わったために自由度が増大し、特にフランジ幅やウェブ中心偏りの変動に対して

平成4年8月4日受付 平成4年12月8日受理 (Received on Aug. 4, 1992; Accepted on Dec. 8, 1992) (依頼展望)

* (社)日本鉄鋼協会共同研究会条鋼部会大形分科会主査 (Chairman, Large Section Subcommittee, Sections and Wire Rods, Committee, The Joint Research Society, The Iron and Steel Institute of Japan)

*2 (社)日本鉄鋼協会共同研究会条鋼部会中小形分科会主査 (Chairman, Medium and Small Section Subcommittee, Sections and Wire Rods Committee, The Joint Research Society, The Iron and Steel Institute of Japan, 1-9-4 Ohtemachi Chiyoda-ku Tokyo 100)

高度な制御が要求されるようになった。またユニバーサル圧延では、水平・垂直2方向同時圧延でそれぞれの圧延反力が相互影響しあうこと、さらにロールをパス毎にセットアップするためセッティング精度も大きな課題である。

1.3.2 圧延機と付帯設備

(1) 圧延機の改善

ユニバーサル圧延機の精度向上対策として既存ミルではロール軸受のローラーベアリング化やスラスト調整の遠隔操作化が普及している。一部ミルではチョックの油圧クランプや、摺動面へのセラミック使用によりガタや摩耗の最小化を図っている。圧下機構の高精度化としては、連続式圧延機で偏心圧下機構を用いた高剛性コンパクトミルがある¹⁾ (図2)。リバース式圧延機ではロールストロークが大きいので電動スクリュウ方式が中心であるが、最近油圧圧下と組み合わせて精度向上を図っているミルもある。

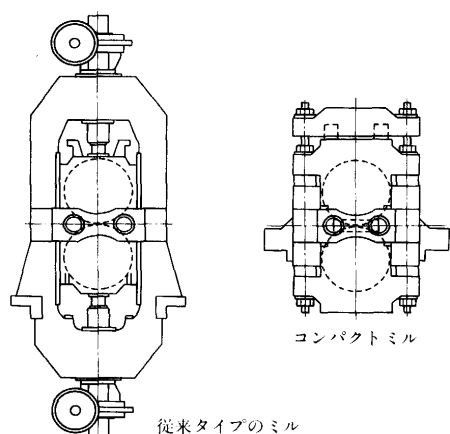


図2 コンパクトユニバーサルミル¹⁾

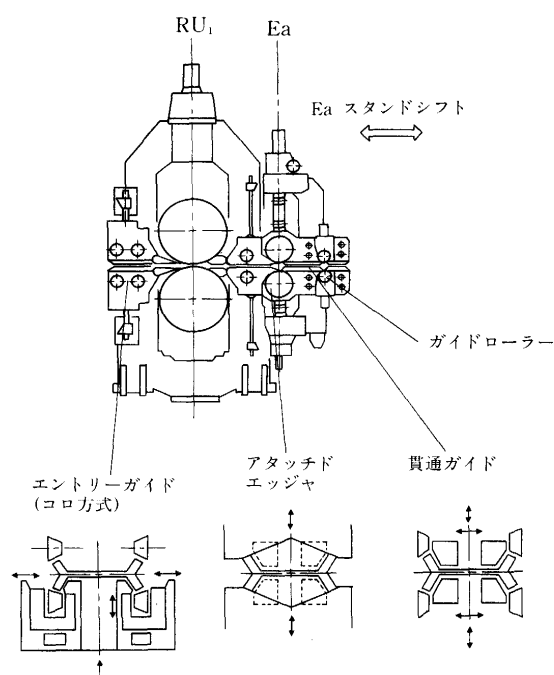


図3 アタッチドエッジャミルと高精度誘導装置²⁾

また前節で述べたようにH形鋼圧延ではフランジ幅制御が一つのポイントであり、エッジャ圧延機も重要である。従来エッジャ圧延ではウェブタッチ圧延方式が試みられてきたが、リバース圧延では限度があった。フランジ幅の自在制御を目的として、外法一定H形鋼開発では従来とは全く異なった思想の、センタリングとエッジング機能を分割したアタッチドエッジャ²⁾ (図3) や偏心スリーブ式エッジャロール³⁾ (図4) が開発され、また孔型可変ロールのような新機構の研究が進んできた。

外法一定H形鋼開発により、水平ロールを左右2つに分割し、ロール胴幅を可変できるロール⁴⁾が開発されたことも画期的である (図5)。このロールによりウェブ高さ精度の大幅向上とともにロール側面摩耗の影響の排除が可能となり、フランジ厚み精度の向上に大きく貢献している。これらは、今後通常のH形鋼圧延にも適用拡大されていくであろう。

(2) 付帯設備の改善

圧延機の高精度化とともに、ユニバーサル圧延においては、圧延鋼材を圧延ロールの中心に正確に誘導し噛み込ませることが重要であり、そのためパスライン制御や誘導装置の開発が行われている。パスライン制御は圧延機前後テーブルのチルチング化から始まったが、鋼材の傾斜の改善からリフティングテーブルが開発され、さらに最近では圧延スタンドそのものを昇降させ常に圧延鋼材のパスラインと圧延ロールのパスラインを一致させる改善が行われて

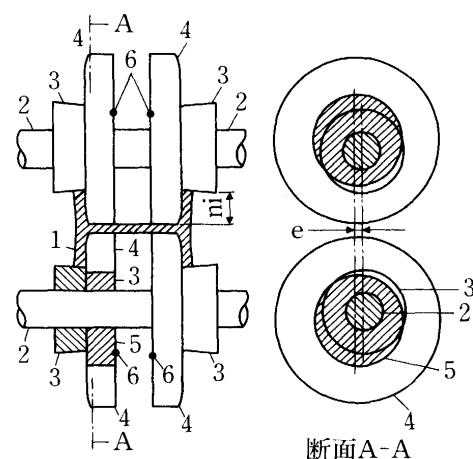


図4 偏心スリーブ式エッジングロール³⁾

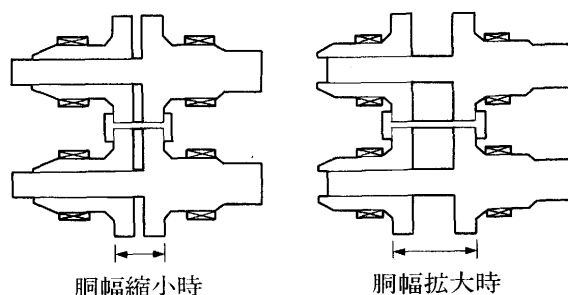


図5 胴幅可変水平ロール⁴⁾

いる。

誘導装置については、リバース圧延時のパス毎の精度良い誘導性を確保するため、パスアジャスタブル化が進んでおり、電動ウェブガイドは有名である。最近ではフランジガイドもパスアジャスタブル化され、さらにローラーガイドの使用により設定精度のシビア化も可能となっている。また、鋼材の誘導性向上のために誘導装置を如何に圧延機に接近させるかも重要な因子であり、前後面を連結した貫通ガイドは理想的な姿であろう。

これら望ましい機能を総合化したものが図3に示すように外法一定H形鋼製造設備として開発実用化されており、今後の高精度圧延技術として注目を集めている²⁾。

1.3.3 セットアップモデルと圧延制御

(1) ミルセットアップモデルの進歩

H形鋼圧延における寸法精度向上、自動化を目的にバー毎に圧延条件を計算して自動圧下設定(図6)する研究開発が進められてきている⁵⁾。すでに20年前に計算機による自動制御が開発実用化されるとともに、形鋼の連続圧延に対するスタンド間張力制御技術も確立された。しかしユニバーサル圧延ではH形鋼のウェブとフランジが一体として圧延されるため、相互に影響しあうことを考慮しなければならず、板圧延とは異なり理論化は非常に複雑である。そのために制御精度的には解決すべき課題を多く有していた。

その後、水平垂直2方向それぞれの圧延反力の変化が互いに影響をおよぼさないように、非干渉制御を導入したAGCシステムが開発された¹¹⁾。さらに最近発表された技術としては影響係数法がある。これはH形鋼のユニバーサル圧延で多数の圧延因子の成品寸法におよぼす影響を解析し、寸法制御のためのロール開度修正量をもとめるもので大きな効果が期待されている。

(2) 圧下制御精度の向上

電気制御設備は従来ワードレオナード～アナログ制御が中心であったが、サイリスタレオナード～デジタル制御化が進展し、各機器の設定精度向上とソフトシーケンス化による制御機能のレベルアップが図られ、寸法形状精度向上にも大きく寄与している。

特徴の一つは電源のサイリスタ化であり制御の応答性および制御精度は大幅に向上した。

もう一つは制御のデジタル化(ソフト化)である。ディジタルシーケンサ(PC: Programable Controller)の導入により、複雑な制御が可能となり、加えて設備の改造や操業条件の変化に対するシーケンス変更が容易になり、総合的制御機能向上が図られている。

1.3.4 冷却・矯正における高精度化技術

形鋼では圧延中および冷却中に発生した曲がり、反りをローラー矯正機で真直化する方式が基本である。従来は片持ち固定ピッチ方式が主流であったが、剛性の不足のため矯正可能断面が限定される、ガタのために再現性が小さい

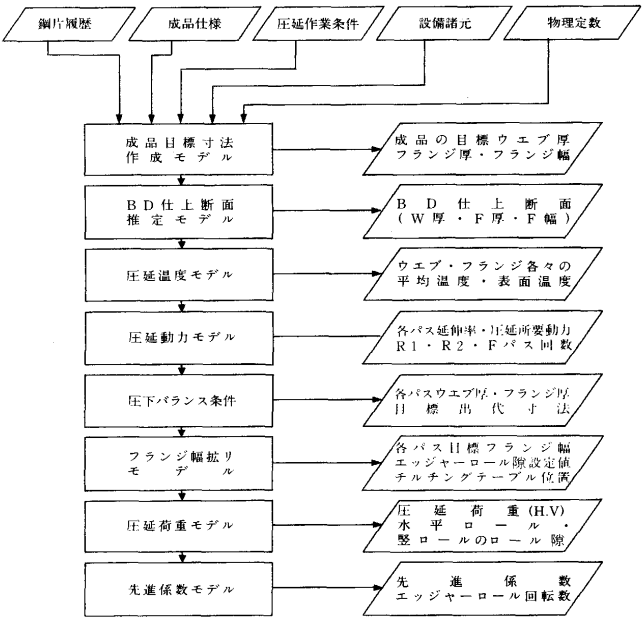


図6 ミルセットアップモデルの基本構成⁵⁾

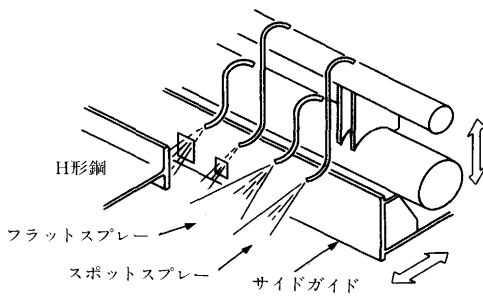


図7 フランジ水冷装置の例⁶⁾

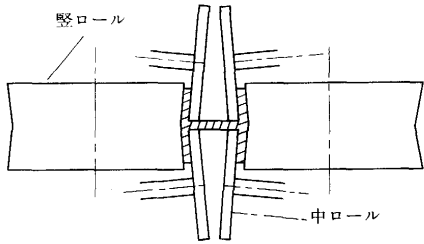


図8 熱間角度矯正装置の概念図

などの問題があり真直性確保に難点があった。この改善のために、ローラーピッチ可変化による矯正負荷の軽減、油圧クランプによるガタの削減が図られている。また、剛性、再現性の抜本的改善を目的に両持ち式矯正機も実用化されている。

さらに、矯正前の素材形状の改善を目的とした、冷却段階の変形制御がある。とくに薄肉ウェブH形鋼製造技術開発において設置された水冷装置(図7)を活用して、圧延ラインでの本格的曲がり制御が実用化されるようになった⁶⁾。また、熱間でフランジ角度を成形する熱間角度矯正機(図8)が導入された例もでてきている⁷⁾。

1.3.5 ロール設計・ロール材質における高精度化技術

孔型設計は従来は熟練技術者の経験が殆どであったが、最近ではCADシステムが広範囲に使われるようになってきた。FEM解析の形鋼への適用についても近年多大の進歩がみられる。これらを用いた最適設計方式の確立がのぞまれる。

ロール材質については、摩耗による寸法変動を抑制する点から耐摩耗性に優れた材質が望ましいが、焼き付き、クラック、スポーリング等も考慮しなければならない。強度の点からは鍛造アダマイト、耐焼き付き性からは高合金グレン等の材質が採用されてきた。ハイスロールについて形鋼でもいよいよ適用が開始されはじめた。今後の適用拡大に注目したい。

1.4 寸法・形状測定技術の進歩

形鋼は形状の複雑さから、従来オンラインでは長さ、幅、厚み等単純な項目しか測定できておらず、熱間サンプルを採取し、手動で測定し、フィードバックする方法がとられていた。サンプル測定のロボット化は一部で実施されていたが、オンラインでのプロフィール測定は長年の夢であった。最近に至って、いくつかのミルにおいて熱間形状測定装置実用化が図られるようになった。その実用例を図9に示す。一方、品質保証レベルの向上のために、冷間形状測定装置の開発も進んでいる。今後、さらに測定機器の精度向上が図られ、圧延ラインでの本格的形状検出が実用化されていくであろう。

1.5 今後の展望

寸法・形状高精度化に関する今後の方向としては、圧延技術としては検出端開発と高精度圧延モデル、およびAGCを組み合わせた総合制御システムを、造形解析においてはFEM解析の実用化とCAD、CAMを組み合わせ設計から製作までの自動化を、そしてロールにおいては材質および潤滑技術の開発によるメンテナンスフリー化を目指し、これらの技術を総合システム化し、自動化高精度圧延技術の開発が進められていくであろう。

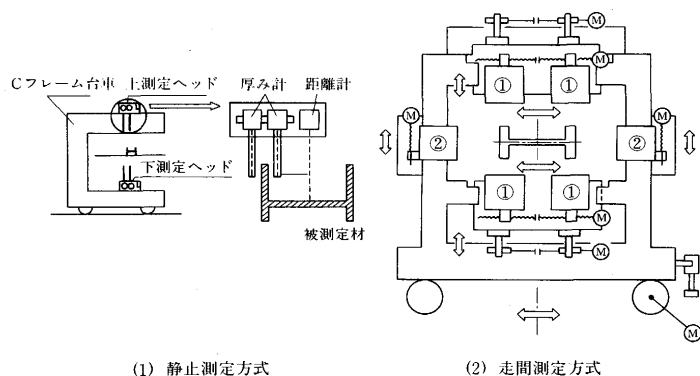


図9 熱間形状測定装置

2. 線材と棒鋼における寸法制御と精度向上

2.1 まえがき

線材、棒鋼は工業製品の素材として広く使用され、素材品質に対する需要家の要望も多岐にわたる。製品寸法に関しては、従来から精度向上が図られてきたが、近年、二次加工工程における工程省略、生産性向上や歩留り向上のため、ニアネットサイズ即ちJIS規格以外の中間サイズや、寸法公差そのものの厳格化といったニーズが高まっており、精密圧延棒鋼に加え、超精密圧延棒鋼の生産も行われるようになった。この傾向は20mmφ~70mmφ程度の鍛造用棒鋼に対して顕著であり、今後もこの傾向が続くものと思われる。図10に一般的な寸法公差の例を示す。

一方、圧延工場における寸法制御は、製品の寸法を目標値に圧延するためだけでなく、圧延過程の断面形状を正確に保ち表面疵やミスロールの発生を防止するためにも重要であり、圧延設備、制御機器といったハードでの対応は当然のことながら、操業ノウハウや作業者の技能といったソフトも含めて寸法精度向上に関する技術開発努力が続けられている。近年我が国の棒鋼圧延において寸法の精度向上を目的としてサイジングミルが急速に広まったことは特筆すべきであろう。

ここでは、線材、棒鋼の丸鋼圧延における寸法制御と精度向上における圧延技術および検査技術の最近の動向について概説する。

2.2 圧延設備

2.2.1 加熱設備

寸法精度の向上を図るためには圧延温度の均一化は不可欠である。最近の加熱炉はコイル単重の増大、それに伴う大断面の鋼片の使用により下部加熱帯を持つウォーキングビームタイプが主流となっている。このタイプの加熱炉ではスキッドマーク減少のため、スキッドボタンの千鳥状配置や移動、固定ビームの交互配置が実施され、炉内で温度勾配を持たせる傾斜加熱も実施されているほか、加熱炉より抽出後の鋼材の温度不均一除去方法として中間列における水冷帯を用いたフィードフォワード冷却制御技術や、インダクションヒーターによる温度降下防止技術も試みられ

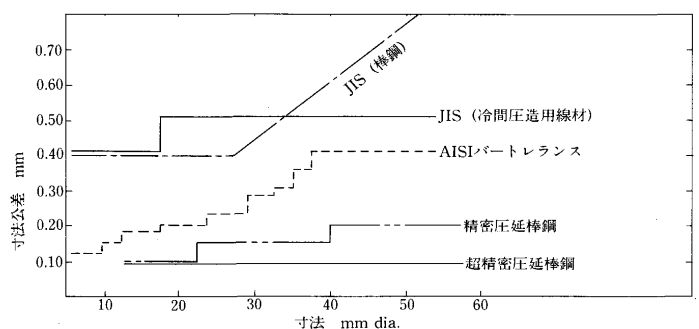


図10 精密圧延棒鋼、超精密圧延棒鋼の寸法公差

ている。

2・2・2 圧延機と付帯設備

高精度の寸法制御のためには、ロール隙を一定に保つことが重要であり、このロール隙変動を最小限にするため、線材、棒鋼工場においては、粗列では100～250t/mm、中間列では70～170t/mm、仕上げ列では50～70t/mmの剛性を持つハウジングが使われている。

また、圧延機の遊隙を防止する目的で油圧によるチョッククランプが使用されるほか、チョックとロールのスラスト方向の遊隙を油圧によって固定するプリロード化も行われている。

圧延機の出入口ガイドでは、熱鋼をロールの孔型の中心に正確に誘導するためダブルローラーガイド、ノーズピース付きローラーガイドや熱鋼保持力の信頼性を高めた油圧式ローラーガイドが実用化されている。仕上げ丸鋼の整形の目的で圧延機出側にローラーガイドを使用することも試みられたが、近年サイジングミルの設置によってかわれつつある。

ピンチロールは線材圧延において巻き取り機へ鋼材を誘導する目的で設置されるが、殊にポーリング式捲線機による太径線材の誘導には、ピンチ圧力を高める必要があり、ピンチロールによる寸法変化を避けるため垂直—水平交互配置の方式も開発されている。

2・2・3 ロール

(1) ロール形状と材質

ロール隙変動に及ぼす各構成要素の影響のなかでは一般に圧延材によるロールの変形が最も大きく、この変形防止のため近年ロール径に対するとロール胴長の比 L/D を小さくする傾向が見られる。図11は、ロール径とロール胴長の比を建設年代別に層別したものである。

一方、ロールの孔型摩耗を減少するため、仕上げ圧延機には鋳鉄ロールの10倍以上の耐摩耗性を持つタングステンカーバイド(WC)ロールが普及しており、最近では中間列にもWCロールや粉末ハイスロールが適用されるようになった。

(2) ロール孔型設計技術

線材、棒鋼の丸鋼の最終仕上げ圧延はリーダーオーバルと呼ばれる楕円孔型と仕上げ丸型孔型で行われるが、製品寸法の精度を高めるために図12に示すように丸型孔型の幅方向のフレアーを小さくすることが一般に行われる¹²⁾。精密圧延では、図13に示すように仕上げの2～3パスに真円に近い孔型を使い少ない減面率で幅がりを抑制しながら目標寸法に近づける整形孔型圧延も適用されている。

また、精密圧延のような狭い寸法公差で圧延する場合には熱鋼の収縮率や圧延工程以降での矯正、酸洗い、熱処理などの二次加工による寸法変化も考慮して孔型を設計することが必要であり、それに対応できる図14のようなシステムも開発されている¹³⁾。

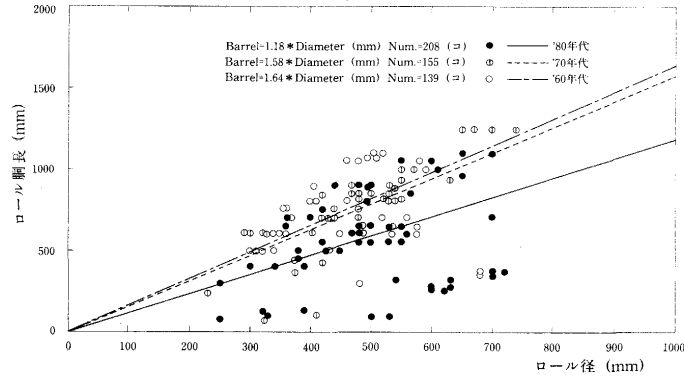


図11 線材、棒鋼工場のロール径とロール胴長の関係 (建設年代別)

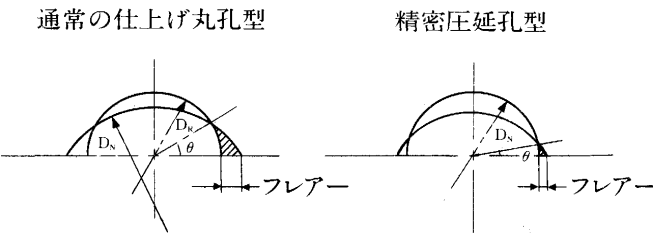


図12 通常仕上げ丸孔型と精圧孔型¹²⁾

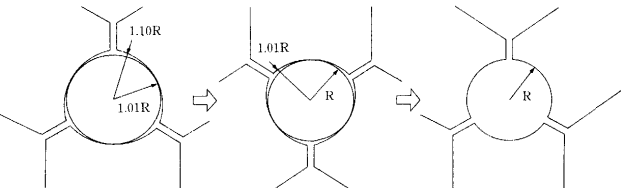


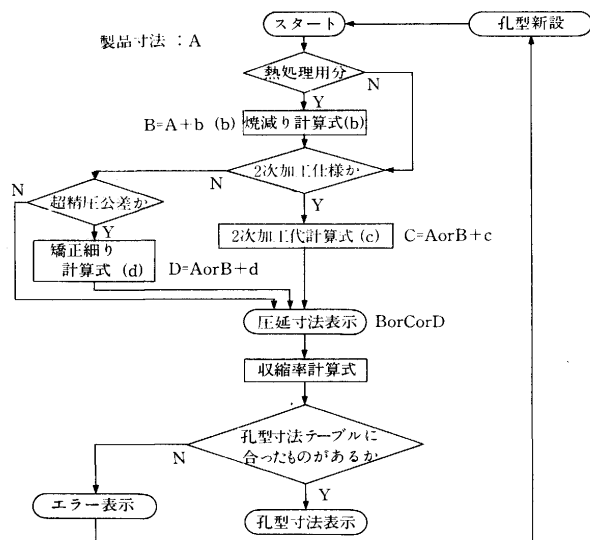
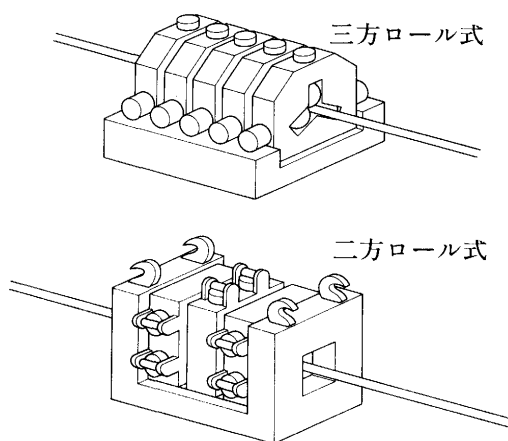
図13 整形孔型の例 (三方ロールの場合)

2・2・4 サイジングミル

寸法精度の向上における最近の傾向のひとつに棒鋼工場におけるサイジングミル (精密圧延機) の急速な普及がある。

サイジングミルは図15に示すようなものであり、一般に2～5台のブロックミルで構成されており仕上げ圧延機の後方に設置される。 L/D の小さなロールが使用され、ミル剛性は150t/mm以上と高く、スタンド間隔は可能な限り短く設計されている。二方ロール式、三方ロール式が実用化されているが、最近では四方ロールのものも開発されている¹⁴⁾¹⁵⁾。二方ロール式はよりコンパクトで高速圧延にも適用でき、また、三方ロール式は圧下方式の点から幅がりが小さいことから圧下率などの変動に対し幅方向の寸法変化が小さいという特徴がある。図16に二方ロールと三方ロールの圧延変形特性の比較を示す。いずれも整形を目的とするため減面率は数%でパススケジュールが設計されている。

サイジングミルではロール組み込み誤差を発生させないために図17のような特殊なロール旋盤を使用して圧延機ハウジングにロールを組み込んだまま孔型を切削することが行われている。また、サイジングミルは圧延機のアフライ


図14 孔型設計システム¹³⁾

図15 サイジングミルの例¹⁴⁾

ンセッティングおよび台車による迅速組み替え装置を有し、中間サイズや精密寸法の増大への対応も図られている。

2・3 圧延制御技術

2・3・1 圧下制御

(1) ロール隙設定

線材、棒鋼圧延機のロール隙調整は従来からの手動方式に加え、油圧または電動による遠隔調整方式が一般化し、ロール隙のプリセット等に活用されるようになった。このロール隙プリセットはロールショップ等オフラインで標準の値に設定し、オンラインで微調整するのが普通である。

(2) 自動圧下調整技術 (AGC)

線材、棒鋼の圧延では、高さ、幅を含む複雑な3次元の寸法制御が必要となることから、圧延調整は未だ手動調整が一般的である。しかし最近、熱鋼圧延中にロール隙の調整を行う図18のような自動圧下調整 (AGC) も試みられている¹⁶⁾。これは、最適レギュレータ理論に基づいた多変数制御技術を適用したもので、寸法測定機で熱鋼の仕上がり寸法を測定し、仕上げ列における張力制御とロール隙調整と

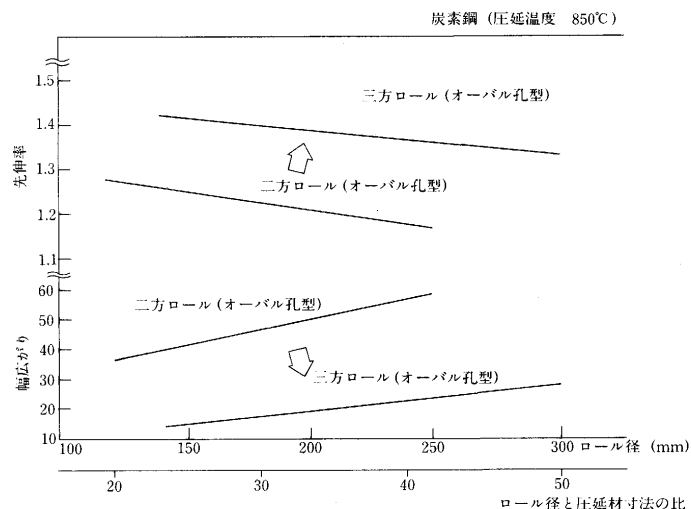
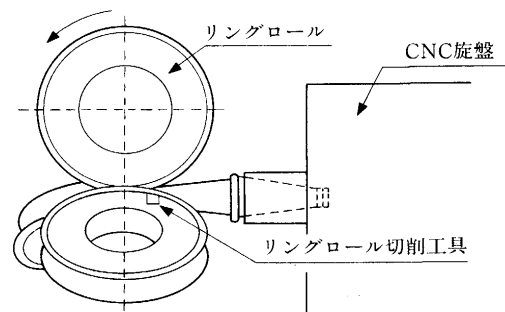

図16 二方ロールと三方ロールの圧延変形特性の比較¹⁵⁾


図17 特殊ロール旋盤

を組み合わせることでビレット全長にわたるダイナミック制御と学習制御による次材のロール隙プリセットを自動化したものである。

2・3・2 回転数制御

(1) ロール回転数設定

線材、棒鋼圧延機のロール回転数は従来の手動プリセットからロールショップ等でロール径をインプットすることによりプロコンで自動的にプリセットする方式へ移行しつつある。この場合、ロットの2本目の鋼片からは先行材での実績回転数によりプリセット値を修正する学習機能を併用している場合が多い。

(2) 噛み込み補償制御

鋼材先端はモーター回転数のインパクトドロップにより寸法変動が生ずるため、無負荷時の回転数をドロップ量に見合うだけ高く設定しておき、インパクトドロップが回復するタイミングで通常回転数に戻す噛み込み補償制御が一般に行われている¹⁷⁾。また、この補償時間を短縮するためにインパクトの瞬間だけ速度制御系の応答性を高める図19のような方式も採用されている。

(3) 無張力制御

ロールの回転制御精度はデジタル制御によるサイリスタレオナードの採用で飛躍的に向上し設定速度に対して土

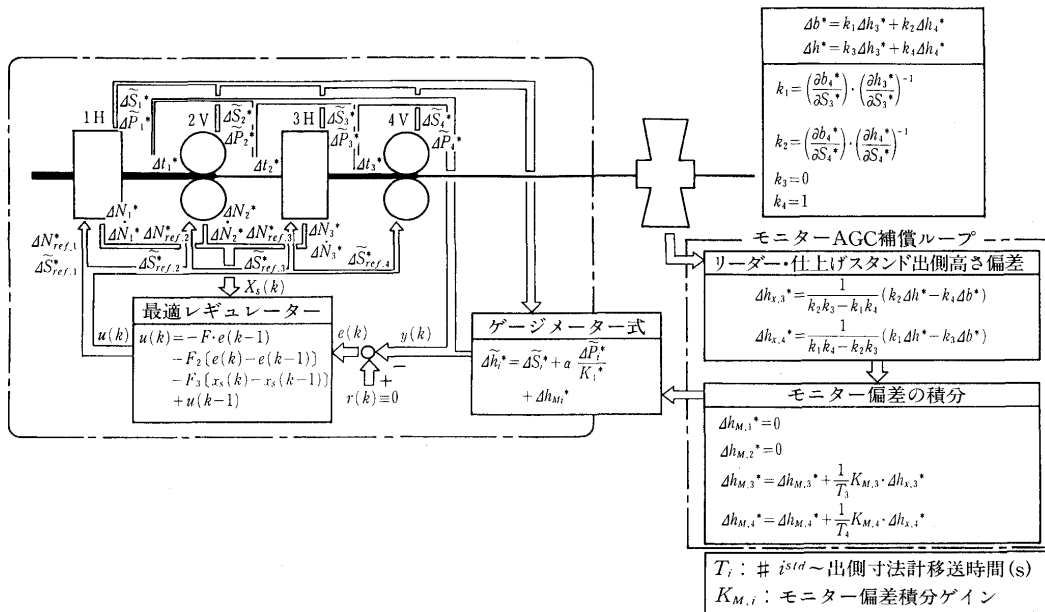


図18 自動圧下調整技術 (AGC) のシステムフローの例¹⁶⁾

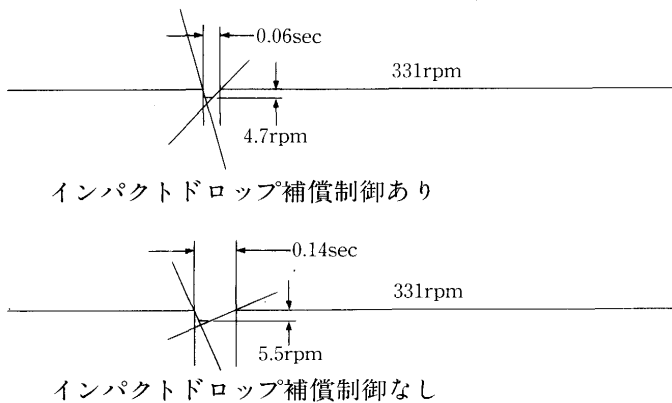


図19 噛み込み保証制御の応答性改善の一例¹⁷⁾

0.02%程度、応答速度も30rad/sec程度となっており、最近の交流可変速制御ではより高速の応答も可能である。

鋼材中央部の寸法変動を防止する無張力制御方法としては、ループ方式とループ無し方式がある。中間列や仕上げ列ではループ制御が一般的であり、鋼材自重によるダウンルーパー方式や強制的にループを形成するアップルーパー

あるいはサイドルーパーが使われている。

しかし、圧延速度が30m/秒を越えるような高速圧延の場合においてはループ圧延は種々の困難を伴うため、スタンド間に一定の張力を掛けて圧延を行うコモンドライブ方式が採用されている。

また、大断面のためループを形成しがたい粗列ではスタンド間張力を直接あるいは間接的に測定しロール回転数を制御する無張力制御が採用されている¹²⁾。張力を直接測定するにはスタンドのロールチョックにロードセルを装着する方法が一般的である。間接的に測定する方法としては、従来、圧延負荷電流が利用されていたが鋼材温度変化と張力変化を弁別することが困難なため、近年ではロードセルで実測した圧延荷重と圧延トルクから算出されるトルクアーム値を使った方式なども採用されている。

2・4 寸法検査技術

寸法精度の向上のためには寸法検査技術も重要な技術である。従来、寸法測定は圧延材からサンプルを採取、冷却後にマイクロメーター等で行ってきたが、近年、圧延中の

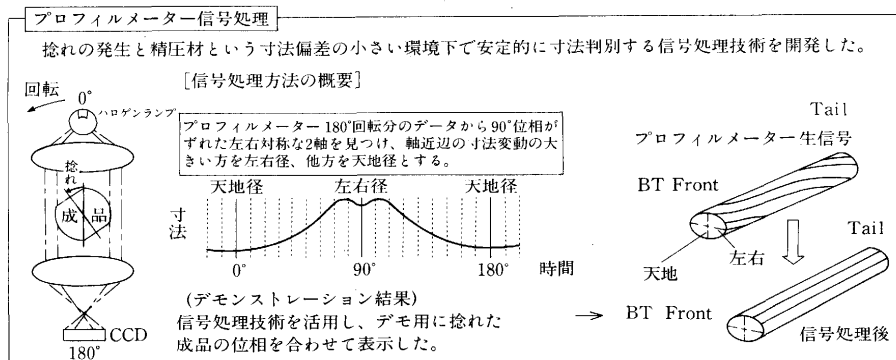


図20 寸法測定器による天地-オーバルの識別技術¹⁶⁾

鋼材の全長にわたり連続的に寸法測定を行うため、圧延中の熱鋼にハロゲンランプやレーザー光などの平行光線を照射し、その影を画像解析する熱間プロフィールメーターがほとんどの線材、棒鋼工場で使用されるようになった。

このプロフィールメーターの測定精度は、 $\pm 0.01\text{mm} \sim 0.02\text{mm}$ 程度で、断面形状や寸法が、CRT画面やデジタル表示盤に表示される。しかし、この熱間プロフィールメーターは圧延調整モニター用として有効であるが、温度補正が難しいこともあり、出荷品質の保証のためには冷間の寸法測定が併用されている。

プロフィールメーターをAGCに活用するためには、材料の天地寸法と幅寸法の識別が必要であり、信号処理技術を用いた図20のような天地、オーバルの識別技術も開発されている¹⁶⁾。

2・5 今後の展望

寸法制御技術は、温度制御技術の向上、圧延機や付帯設備の改善、ロールの適正化、圧延制御の高度化等により向上してきた。近年は、これらにプロフィールメーターの普及、サイジングミルの普及、AGCの実用化が行われ、寸法の高精度化が図られている。

精密圧延材は今後ますます需要量が増大するとともに寸法公差のさらに厳しい鋼材の要望も高まるであろうが、このためには、脱炭、表面疵、等の表面品質の向上や顧客での熱処理省略が可能な圧延組織の確保など、寸法精度向上

だけでなく、圧延鋼材の品質全体のレベルアップが不可欠となるであろう。

文 献

- 1) 新日鉄カタログ, (1985)
- 2) 瀬戸恒雄, 島中 淳, 芳村嘉夫, 藤本洋二, 馬場和文, 大本至宏: 川崎製鉄技報, **23** (1991), p.8
- 3) 西野胤治, 生田和重: 塑性加工春季講演会論文集, (1991), p.577
- 4) 稲垣 彰, 安河内醇, 板橋義則, 青柳幸四郎, 藤本 武, 山本洋春, 川田 勇: 新日鉄技報, (1992) 343, p.9
- 5) 製鉄研究, (1982) 310, p.88
- 6) 吉田 博, 近藤信行, 三浦啓徳, 奥井隆徳, 橋本隆文, 河野幹夫: 川崎製鉄技報, **23** (1991), p.23
- 7) 樋口美貴雄, 高橋 清, 角野康治, 梅原 悟, 渡辺 健, 渡辺勝夫: 中山製鋼技報, (1991) 29, p.14
- 8) 菱屋久保, 井上忠世, 的場弘行, 中村健二, 松本好正, 井上 健, 川口清彦, 瀬井改喜: 材料とプロセス, **3** (1990), p.1274
- 9) 川崎製鉄(株) (私信) 1992年6月
- 10) 有泉 孝, 平沢猛志, 中内一郎, 森岡清孝, 脇本信幸: 材料とプロセス, **4** (1991), p.1446
- 11) 遠山一郎, 賀屋和昭, 湯井勝彦, 福谷和彦, 平松洋之, 野呂弘幸, 川口忠雄: 鉄と鋼, **72** (1986), A61
- 12) 上村真彦, 前田征良, 市田 豊, 三越賢次, 高橋洋一: 神戸製鋼技報, **35** (1985), p.28
- 13) 天野益夫, 伊藤 孝, 小坂鎮雄: 石川賞受賞記念講演予稿集, (1991) p.13
- 14) 小林秀雄, 田中照章: 電気製鋼, **63** (1992) 1, p.76
- 15) W.-Jurgen Ammerling and Hns Brauer: Considerations on the Future Development of Rolling Blocks in Wire Rod, Rolling Mills of KOCKS Design, **22** (1978), p.22
- 16) 野口幸雄, 大貝晴俊, 馬場勲次, 岡村邦彦, 岡 敏博, 石井 仁, 馬場 誠: 第139回塑性加工シンポジウム予稿集, (1991), p.11
- 17) 三科陽弘, 塩沢武夫, 吾妻秀昭, 板敷政和: 神戸製鋼技報, **35** (1985), p.14