



棒鋼・線材の精密圧延技術とその自動化

© 1984 ISIJ

浅川基男*・浜松久義*²

A High Dimensional and Automated Rolling Technology for Rod and Bar Gauge Performance

Motoh ASAKAWA and Hisayoshi HAMAMATSU

1. 緒 言

棒鋼・線材は高炉メーカーだけでなく、多くの電炉・単圧メーカーで製造されており、鉄鋼品の中でも特に競合の激しい製品分野である。またプラスチック、複合材料、新材料による鉄鋼代替品の攻勢も日増しに強くなり、いつそうの高級化、高付加価値化が要請されはじめている。その内容を大きく要約すれば(1)表面および内部に疵や欠陥がないこと(2)スケールの性状も含めて、金属的、機械的性質が優れていること(3)形状寸法精度が良いことなどが挙げられる。

従来の二次加工では、熱処理後引き抜き工程を経て、寸法精度を整えてから、冷間あるいは温間鍛造により最終製品を製造していたが、熱間圧延段階で高寸法精度が得られれば、そのまま冷・温鍛加工したり、あるいは巻バネのように、高寸法精度の断面形状をそのまま使用した素材として供給することができる。

また、二次加工工程の省略だけでなく、高寸法精度圧延技術を活用して、オフゲージの減少、伸ばし長さの最適化などによる圧延歩留り向上も期待できる。従来より JIS 規格、これよりやや厳しい AISI 規格、自動車工業規格などが設定されているが、 $\phi 30$ mm の棒鋼で ± 0.2 mm 程度の精度であった。しかし最近では、できるだけ冷間引き抜き寸法精度に近づけたいという要望から ± 0.1 mm 以内に精度を高める努力が傾注されている。この精度の段階に入ると、表面疵の手入れ後の寸法減少、スケール厚さの変動 ($0.05 \sim 0.1$ mm) も無視できなくなり、上述の三要素を同時に満足させる必要がある。すなわち高精密圧延とは圧延技術の総合力を結集してはじめて達成可能となる。そのためには個々の精密圧延技術の開発、現場操業の管理だけでなく、プロセスを可能な限り自動化させることにより品質の安定化とコスト低減を狙う必要がある。

ここでは、精密圧延技術とその自動化について、筆者らの経験と学会、分科会などで報告されている資料に基

づいてその現状と今後の方向について検討してみた。

2. 寸法精度に関係する要因

Fig. 1 に丸断面形状の棒・線材の寸法精度に直接関係する要因を分類して示した。まず最初に挙げられる要因は材料温度、材料特性である。寸法精度は材料のスキッドマーク、偏熱には非常に敏感で、特に幅寸法(ロールに接触していない自由面付近)の変動が激しくなる。これは材料特性とも関係するが、ロールとの摩擦係数、変形抵抗など圧延上の基本因子が変化するためである。

したがって均一に加熱するための炉構造、材料の性質を考慮したビレット装入法と炉温管理、自動燃焼制御法とそのセンサ技術が極めて重要である。圧延製品の主要形状は、最終スタンドの仕上げ孔型形状と、仕上げに至るまでのパス・スケジュールにより定められ、大部分は経験的手法によつて決められている。ロールの調整は圧下方向の設定だけでなく、ロール軸方向の孔型位置設定が寸法精度に大きく関係する。スタンド間張力は寸法変動に悪影響を与え、その対策としてすでにループコントロールが実用化されているが、最近ではループが形成されにくい粗列・中間列のスタンド間張力制御法に技術の焦点が絞られている。また必要とする形状(真円度: roundness)と寸法(絶対値とその精度: dimension)を把握するプロフィール計測に関心が持たれているが、いまだ自動寸法制御(A.G.C.)を行うまでには至らず、今後の発展が期待される分野である。

3. 孔型形状と精度

3.1 仕上げ孔型形状

棒・線材の最終スタンドでは、前スタンドのオーバル孔型の長径をラウンド孔型で圧下して、真円形状とする。通常は、幅拡がりの余裕しろを見込んで、Fig. 2 に示すようにフランジ側に一定の逃げ角 θ をとり、この範囲はラウンドの半径 R よりも大きな半径(たとえば $2R$)

昭和 58 年 8 月 2 日受付 (Received Aug. 2, 1983) (依頼技術資料)

* 住友金属工業(株)東京本社 工博 (Tokyo, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 1-1-3 Otemachi Chiyoda-ku 100)

*² 住友金属工業(株)小倉製鉄所 (Kokura Steel Works, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

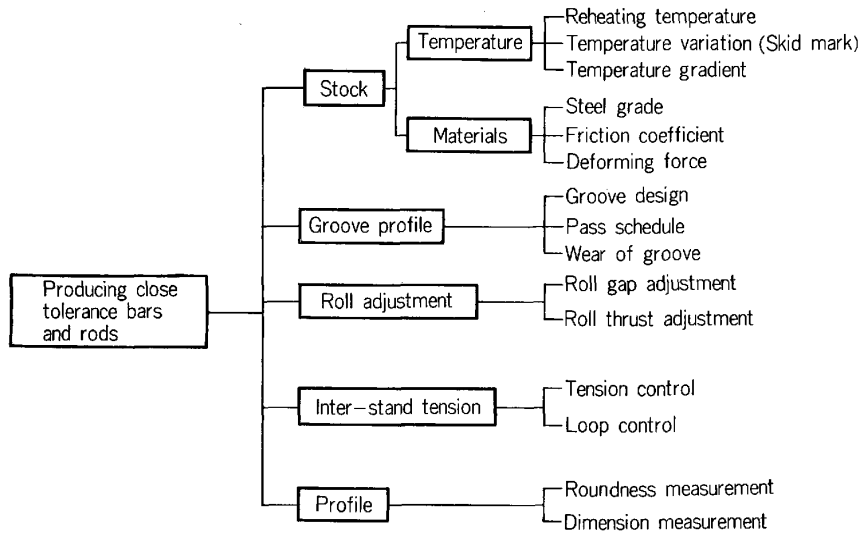


Fig. 1. Main factors of producing close tolerance bars and rods.

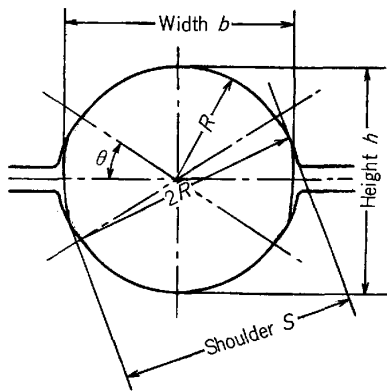


Fig. 2. Profile of finishing round pass and side relief angle θ .

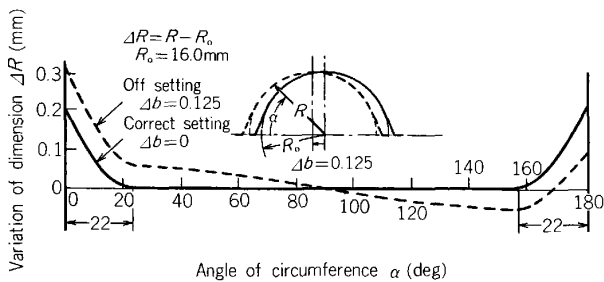


Fig. 3. Changing of geometrical stock dimensions effected by off setting of grooves along roll axial direction.

としている。このため高さ h と、幅 b を同一値に管理すると、図示の肩寸法 S が大きくなりやすい。したがって真円度の高い精密圧延ほど逃げ角 θ の範囲を小さくしている。しかし、小さくしすぎると噛み出しが生じやすいという圧延作業上の問題点が残る、ガイドの構造・パスライン上への設定精度、材料振れの程度、仕上げ圧延サイズに応じた最適な θ 値とする必要がある。

3.2 孔型ロールの軸方向位置設定

仕上げ孔型の一対のロール軸方向位置が相対的にずれ

を生じていると、寸法精度を悪化させる。Fig. 3 はラウンド半径 $R_0=16.0$ mm, 逃げ角 $\theta=22^\circ$, 上下のロールが相対的に 0.25 mm ずれたときの基準寸法 R_0 からの増減寸法 ΔR を示したものである。わずかなロール違いにより、寸法が大きく変動するようすが観察される。精密圧延にさいしては、軸方向の相対的な孔型のずれ防止が必要不可欠である。

3.3 アキシャル・プリストレス装置

ロール支持軸受の軸方向は、ロールの熱膨張、曲がりのため、やや余裕をもった間隙が設けられている。このため、軸受け箱をスラストクランプでハウジングに固定しても、ロール自体は軸方向に $0.1\sim 0.2$ mm 程度自由に変位してしまう。したがって一対の孔型では相対的に $0.2\sim 0.4$ mm ほどのずれが生じることがある。このずれは通常の規格品の圧延では問題ないが、精密圧延の場合には、寸法変動の重要な原因のひとつとなる。これを防止するためには、Fig. 4 に示すようなアキシャル・プリストレス装置が有効となる。ロール支持部に付けられたエンドカバーに締付けボルトを取り付け、これを締めることにより皿バネおよびスラスト軸受けを介してロールを他端部に押圧することにより、ロール支持軸受けの遊びを消去することができる。Fig. 5 は棒鋼工場の水平仕上げスタンドに同装置を設けて、プリストレスの有無と、右肩、左肩の寸法変動を観察した結果であるが、その効果がよくあらわれている。

3.4 サイジングローラ装置

アキシャル・プリストレス装置が完全に作用しても、3.1 で述べた肩寸法が大きくなりやすいという問題点はなお残る。さらに後述する幅の変動により、仕上げ孔型とその調整だけでは精密圧延に対処しにくい。そこで肩、幅寸法の整形のため、仕上げスタンドの後方に Fig. 6 のようなフリー・ローラ形式のサイジング・ローラ¹²⁾を設ける方法があり以下のような特長を持っている。

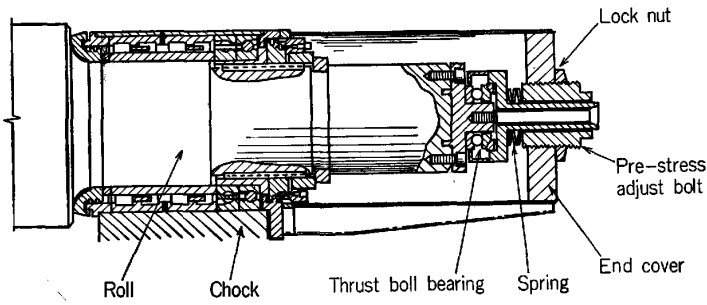


Fig. 4. "Axial pre-stress device" to eliminate play between chock and roller bearings.

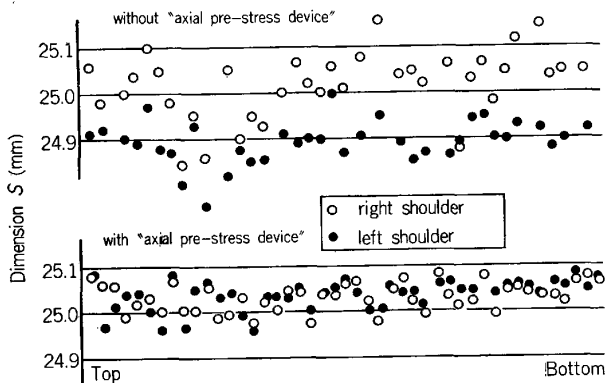


Fig. 5. Effect of "axial pre-stress device" on shoulder dimension.

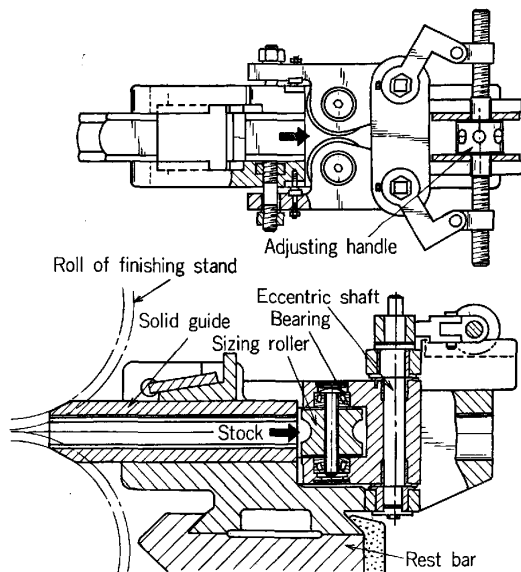


Fig. 6. Two-roll type "sizing-block" to eliminate width and shoulder variations.

(1) ローラが自由回転のため、最終スタンドとサイジングローラ間に、寸法に悪影響を及ぼす張力・圧縮力が作用しない。

(2) 高い剛性と軽圧下により寸法変動の修正が精度よく行われる。たとえば $\phi 30\text{mm}$ の圧延材に $\pm 0.2\text{mm}$ の幅変動があつた場合、 $\pm 0.04\text{mm}$ の変動に縮小される。

(3) 非常に小さいローラ径を用いるため、幅拡が

り、すなわち最終スタンド高さ方向の変動に与える影響が小さい。たとえば 0.2mm 圧下により、その高さ方向への増分は 0.03mm 程度である。このように比較的簡便な装置を使用することにより、高寸法精度を志向することが可能である。この他ロール孔型を作るときに誤差を決めるノモグラムを作製する方法³⁾、多方ロールによる精密圧延法などが報告されている⁴⁾⁵⁾。

4. ミル 剛 性

棒・線圧延では、板圧延ほど高荷重とはならず、また高さ寸法精度も一桁以上ゆるやかなことから、ミル剛性が小さい構造となつている。しかし最近の精密圧延精度は従来のミル構造では対処しえない段階にまで達している。たとえば中間列スタンドのミル剛性が 100tf/mm で1本通しの圧延荷重が 20tf とした場合、2本通しでは圧延荷重が倍となり、その結果約 0.2mm ほど高さ h が変動することになる。さらに1本通しと2本通しのロールギャップ変化によりスタンド間張力が変化し、幅 b の寸法変動も生じる。このような現象はブロックミルの手前の多ストランド線材圧延で顕著にあらわれる。たとえ1本通しであつても、ミル剛性が弱いことにより、温度変化、ビレットの寸法変動により、同様な変動が生じる。

Fig. 7 に棒鋼の仕上げ水平圧延機 (ロール径 $\phi 400\text{mm}$, ロールパレル 700mm) の各部要素ごとの剛性実測値 tonf/mm を示す⁶⁾。初期負荷時の非線形の大部分はベアリングおよびライナと圧下スクリュで占められている。これは、負荷で 10tf 、変位では 0.2mm に相当しており、軽負荷の場合には寸法変動が生じやすい点に注意する必要がある。またロールの変形がミル剛性の大部分を支配しており、ミル剛性はロールの剛性にほぼ比例しているという実験結果から、ロールの情報のみにより、ミル剛性 K を推定する方法を検討した結果、下式を得ている。

$$K = \frac{m \cdot E}{15000} \left\{ 3.33D + 780 \left(\frac{D}{d} \right) + 1381 \right\} \cdot 10^{-0.564(l/D)}$$

ただし $m = 1.55e^{-0.87(x/l)}$

$$0 < x/l \leq 0.5, L/l = 1.4 \sim 1.6, D/d = 1.6 \sim 1.9$$

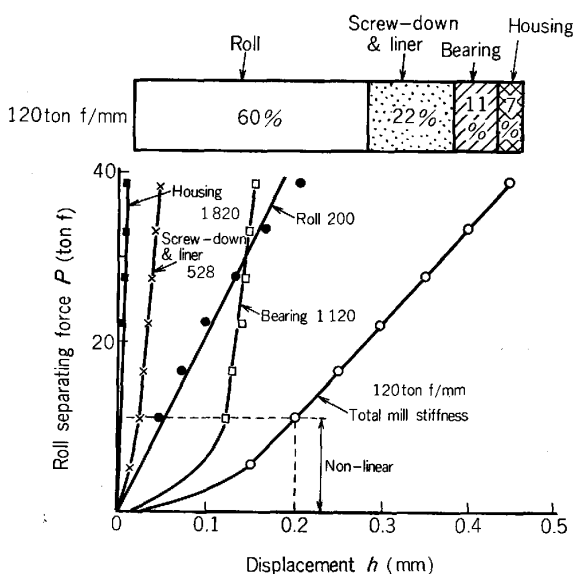


Fig. 7. Stiffness comparison of each element of finishing horizontal stand (roll dia. $\phi 400\text{mm}$, roll barrel length 700mm).

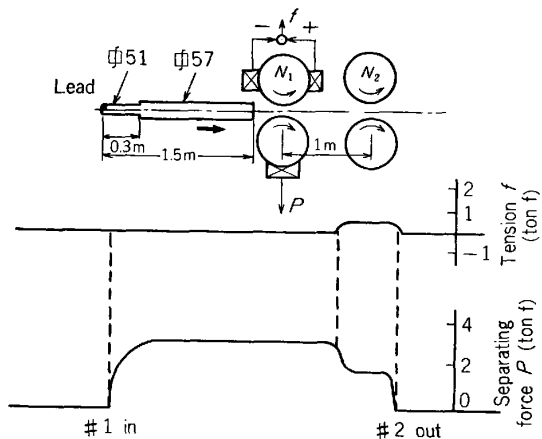


Fig. 8. Effect of cross-section variation on inter-stand tension by using continuous model rolling stands.

$l/D=1.6\sim 2.3$, $D=250\sim 450\text{mm}$ の範囲で使用すれば $\pm 10\%$ の精度でミル剛性を予測することができる。ここで E : ロールの縦弾性係数 (kgf/mm^2), D : ロールの孔型溝底径 (mm), d : ロールのネック径 (mm), l : ロール胴長 (mm), L : 荷重支持点間距離 (mm), x : 駆動側荷重支持点から圧延時の孔型までの距離 (mm) である。

プリ・ストレス圧延機は、非線形部を小さくする効果はあるが、基本的にはミル剛性値と無縁であり、ハウジングを小さくして、荷重経路を短くしたショートパスミルも大きな剛性向上は期待できず、ロール形状のくふう(たとえばディスク状ロール)により、ミル剛性を大きくすることが望まれる。剛性と寸法精度⁷⁾, 剛性を考えたコンパクトミル⁸⁾ についても報告されている。

5. スタンド間張力・圧縮力

圧延中に材料の後方から張力、圧縮力が作用したとき、その応力がわずかであつても、幅寸法に大きな変動を与えることはよく知られており、詳細な検討も多くなされている^{9)~13)}。寸法変動は速度アンバランスによる張力発生という直接原因だけでなく、材料の断面積変動あるいは圧延中の温度変化による断面積変動により張力が発生し、その結果再び寸法変動が生じることがある。

Fig. 8 に示すようにモデルミルにより $\phi 57\text{mm}$ の純鉛材の後端を段削りして $\phi 51\text{mm}$ にした素材を2スタンド連続圧延すると、素材寸法が変化した瞬間から一定張力が発生しはじめている。スタンド間のマス・フローが減少すると張力が発生し、増大すると圧縮力が発生することになるので、速度比一定とした連続圧延の場合、断面積の減少している部分はさらに小さく、増大している部分はさらに大きくなりやすい。Fig. 9 の b_{0i} は断面積 A_0 (素材 $\phi 30\text{mm}^2$) の各パスごとの幅、 b_i は断面積 A (素材 $\phi 29.3\sim 27.8\text{mm}^2$) の各パスごとの幅を示す。単スタンドの繰返し圧延、すなわち完全に無張力圧延を繰返せば、素材の断面積変動が大幅に緩和される傾向にある。また Fig. 10 の線材圧延に観察されるように、スキッドマークによる幅変動もたとえば6~7 スタンド間の張力を無張力圧延に近づければ、17 スタンド仕上げ後の幅寸法もかなり一様化されることが観察される。最近では、むしろ積極的に幅の増大している部分には張力、減少している部分には圧縮力を与える方法にも関心が示されている。このように張力・圧縮力

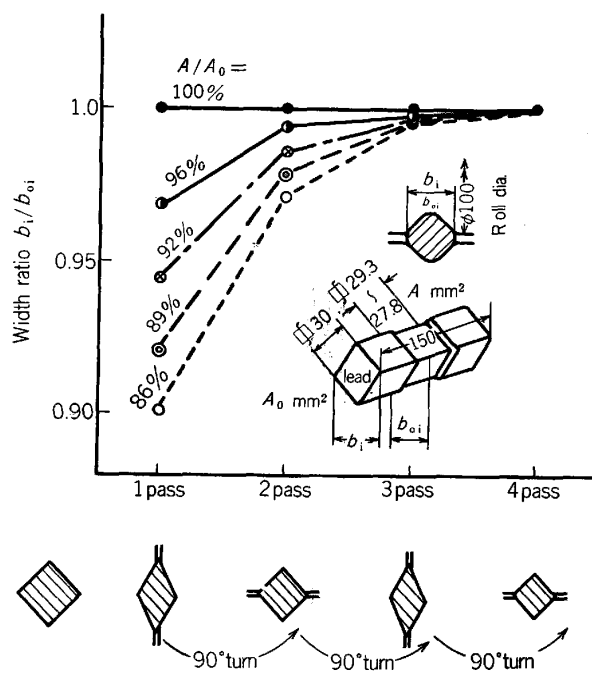


Fig. 9. Effect of cross-section changing on width ratio for each pass by using single model rolling stand (no-tension condition).

Table 1. Measuring method of inter-stand tension.

Method	Mill, Works, Company	Train	Size
FTC	bar mill Muroran Works Nippon Steel Corp.	roughing & intermediate	$\phi 59 \sim \phi 100$
	bar mill Mizushima Works Kawasaki Steel Corp.	roughing & intermediate	$\phi 11 \sim \phi 73$
	rod mill Funamachi Works Nakayama Steel Works Ltd.	roughing & intermediate	all size
	rod mill Sendai Works Azuma Steel Co., Ltd.	roughing & intermediate	all size
AMTC	bar mill Chiba Works Azuma Steel Corp.	roughing	$\phi 30 \sim \phi 44$
	bar mill Kokura Works Sumitomo Metal Industries, Ltd.	intermediate	$\phi 18.7 \sim \phi 86$
SNTC	bar mill Kokura Works Sumitomo Metal Industries, Ltd.	roughing	all size

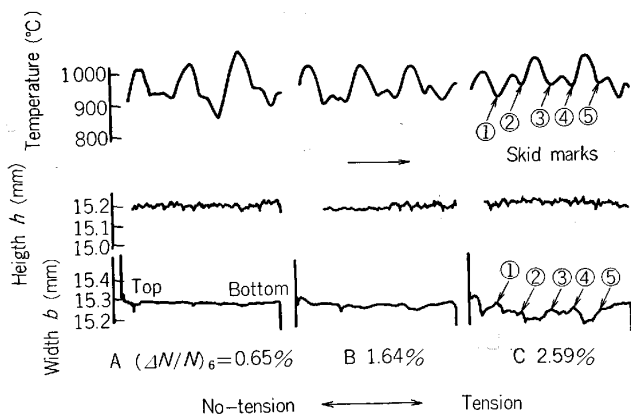


Fig. 10. Relation between temperature changing and width variation under some tension conditions.

制御圧延の必要性は高く、ループ形成が可能な小断面の中間～仕上げスタンド間にはループ・コントロールが採用されており、断面が大きい粗列では、Table 1に示す各種の直接・間接の張力検出と制御法が用いられている^{14)~17)}。Fig. 11にはコンパクトミルに適用される直接張力検出装置 SNTC (Sumitomo No Tension Control) を示す¹⁸⁾。従来型より検出器が非常にコンパクトになり、既設の圧延機にも適用できる構造にもなっている。フランスの IRSID 研究所では光学的測定機で圧延材の速度を非接触で測定し、張力制御への応用を試みている¹⁹⁾。

6. 形状・寸法測定

棒鋼・線材圧延において板圧延にみられるような寸法制御の発展が遅れた最大の原因は、圧延ラインで走行中の棒・線材形状 (roundness), 寸法 (dimension) を把握する計測技術が十分でなかつた点にある。すなわち任意の断面における形状認識と全周にわたる各位置の寸法測

定である。ポイントの計測は人間の感覚より優れた性能を発揮するが、ひろがりのある量、プロフィール認識にはまだ実用化に乏しいのが現状である。

最近連続回転式 (45 rpm) により、円周方向は 6 度ごと、長手方向は 22 ms ごとの等間隔測定を行い、最も高速走行中の棒鋼でも製品長さ 5.5m ごとに 1 回以上の全周測定が可能¹⁶⁾となり、実用に役立つ計測装置も開発されつつある²⁰⁾²¹⁾。さらに厳密に論じれば 1 チャンネルだけ使用すると、Fig. 12 に示す三角形状のように「寸法は全周一定値だが、真円ではない」というケースに対処しえない。このような場合、同図に示す V ブロック測定法の原理に示すように 3 チャンネル以上で、敏速回転させながらプロフィールを求めめる必要がある。Fig. 13 は、4 チャンネル法で描かせたプロフィールの例であるが、計算時間が長くなるため、瞬時対応ができず実用化まで至っていない¹⁾。このように正確なプロフィールの CRT 画面への表示ならびに寸法不良が生じたときに、どこを、どの程度修正すべきかを指示する計測技術の開発が期待される。

上記のような真円度よりも断面積一定、あるいは圧延伸ばし長さ一定の素材を得る方法については、すでに高さ、幅の 2 点を測定する寸法計を使用した圧下制御法が、垂直 (V)、水平 (H) 配列のビレット 6 連続ミルで実用化している²²⁾。Fig. 14 は仕上げスタンド出側に設置した寸法計により測定した高さ、幅寸法と、実測した丸ビレット断面積の関係を示したグラフである。数字はビレットの番号で幅・高さで一對となっている。断面積は幅寸法の変動には、ほとんど影響されず、高さ寸法と大きな相関があることがわかる。Fig. 15 に断面寸法制御の概略を示す。先行材の実測寸法を用いたフィードバックの結果と、上流側で測定した材料温度を用いたフ

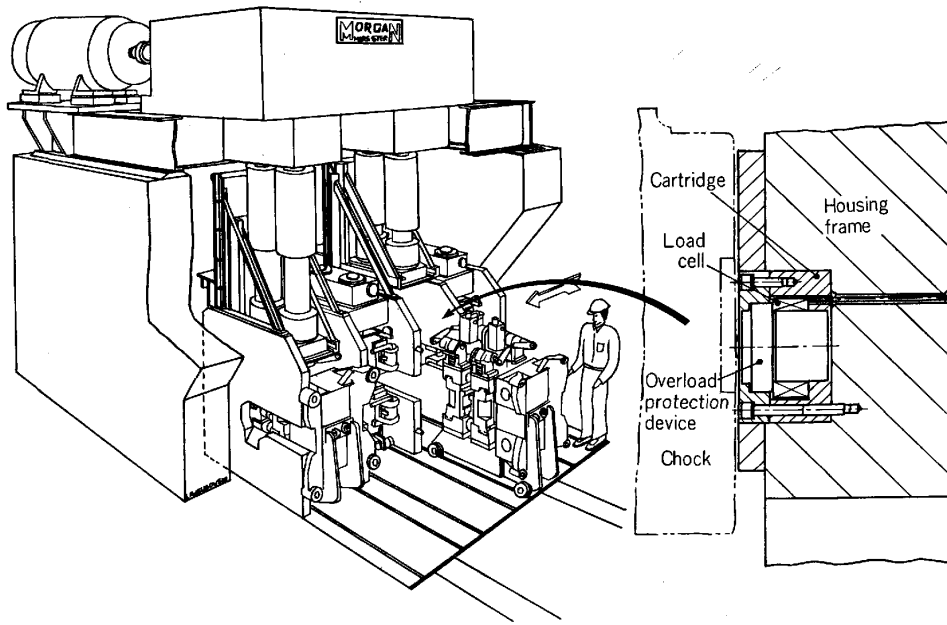


Fig. 11. Morgan compact mill and SNTC device.

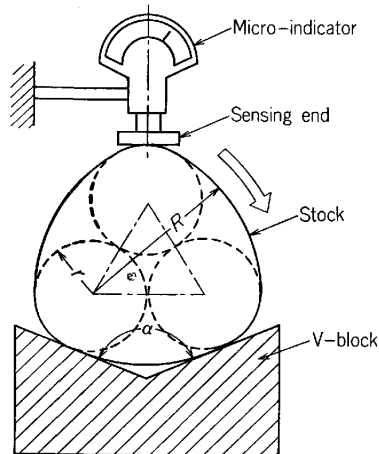


Fig. 12. "V-block method" for roundness measurement.

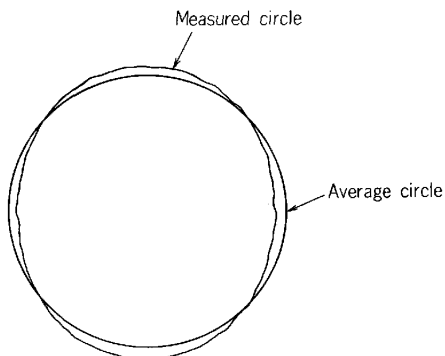


Fig. 13. Result of 4-channel profile measuring of elliptical test piece under state of stand still.

ィードフォワード予測によつて、材料が6Hスタンドにかみ込む前に高さ寸法をプリセットする。この予測高さ

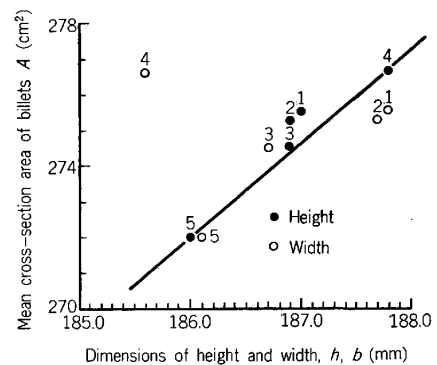


Fig. 14. Relation between mean cross-section area and dimensions of height and width.

寸法と目標寸法(熱膨張考慮)との間の偏差に基づいて必要な圧下位置の制御を行う。なお圧延中には圧下位置の変更はしない。これは圧延機の構造上大幅改造を要することと圧延伸ばし長さを均一にするという観点からである。Fig. 15 の下段には、187φ丸ビレットの寸法精度向上の例を示す。寸法偏差(σ)が手動操作時の0.27から制御時には0.11と向上し、圧延伸ばし長さを均一化させることとなり、歩留り向上に寄与している。

Bar in coilを含む線材圧延についても上記棒鋼と共通する点が多い。棒鋼と異なり線材は全長にわたるオフライン検査が不可能なため、インラインにおける寸法自動計測がより不可欠である。

最近の線材圧延は仕上げスタンドにブロックミルを使用して高速、高寸法精度に対処している。この場合、ブロックミルの中間スタンドの圧下量の影響は少なく、ブロックミル入側、出側付近の圧下量と入側の素材断面の影響を強く受ける²³⁾²⁴⁾。したがって線材の寸法制御は、

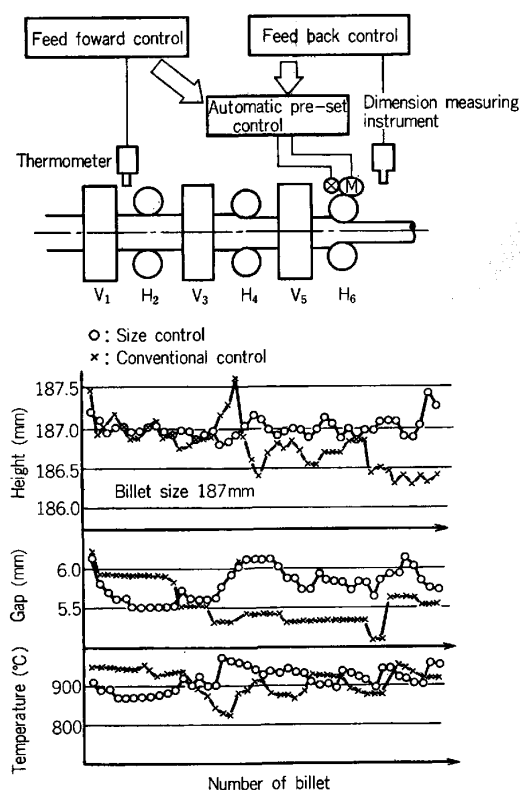


Fig. 15. Size control for continuous mill and applied result.

まず入側素材断面を一定化させる技術をベースとするべきであろう。

7. 結 言

一般的に高寸法精度に対処する方法として(1)特殊圧延加工法(2)圧延後の冷間加工による真円度向上法なども考えられるが、高寸法精度だけでは付加価値が小さいこと、量産メリットが得られないことから、従来の圧延法の延長線上で高寸法精度の圧延技術とその自動化に挑戦すべきであろう。そのためには(1)寸法計測と制御技術の開発(2)高寸法精度だけでなく加工熱処理、調整冷却法などのプラス α の魅力具备了高付加価値化が、今後の課題と考えられる。

文 献

- 1) M. ASAKAWA, T. MATSUI, and H. HAMAMATSU: Rod and Bar Prod. 1980s, The Metals Society (1981), p. 104
- 2) 浅川基男, 浜松久義, 坂口 登, 稲葉真一, 山内

- 裕: 鉄と鋼, 68 (1982), S 1165
- 3) В. П. Приходько, Ю. Е. Кулак. Ж. М. Роева, К. К. Дьяченко, В. И. Вергелес: Stal' (1981) 3, p. 43
- 4) В. И. Гулько, В. А. Войцеховский, А. И. Петров, Ю. И. Шустов, В. В. Панов: Stal', (1981) 1, p. 65
- 5) 藤田米章, 佐々木健人: 第 33 回塑性加工連合講演会 (1982 年 11 月), p. 151
- 6) 上田 智, 浅川基男, 坂口 登, 増田 満: 昭和 55 年度塑性加工春季講演論文集 (1980 年 5 月), p. 203
- 7) F. FLEMMING and R. KUHN: Drahtwelt, 68 (1982), p. 235
- 8) T. OGINO: SE AISI Conf. Prospects Mini-Steel Mills (1980), p. 387
- 9) 青柳幸四郎, 南部好機, 太田国照, 柳本左門: 第 27 回塑性加工連合講演会 (1976 年 7 月), p. 50
- 10) 浅川基男, 近藤勝也, 緒方俊治, 美坂佳助, 松井利光: 塑性と加工, 20 (1979), p. 841
- 11) 浅川基男: 塑性と加工, 20 (1979), p. 949
- 12) 松井利光, 美坂佳助, 緒方俊治, 浅川基男, 近藤勝也: 鉄と鋼, 67 (1981), S 1842
- 13) 森賀幹夫, 高橋洋一, 山口喜弘, 水田篤男: 第 34 回塑性加工連合講演会 (1983 年 11 月), p. 165
- 14) 早稲田孝, 稲崎宏治, 岡 敏博, 古川正弘: 鉄と鋼, 69 (1983), S 392
- 15) 池田和夫, 下岡啓治, 押方敏雄, 江連 久, 関義朗, 小堀 浩: 第 33 回塑性加工連合講演会 (1982 年 11 月), p. 155
- 16) 日本鉄鋼協会共同研究会: 第 53 回条鋼部会中小形分科会 (1982 年 11 月) (私信)
- 17) 日本鉄鋼協会共同研究会: 第 54 回条鋼部会線材分科会 (1982 年 11 月) (私信)
- 18) C. ROY, A. R. LEGER, D. L. PARISEAV, and K. F. SIMONS: Iron and Steel Engineer (1982), p. 25
- 19) P. FROU and J. C. LÈBRUN: Rod and Bar Prod. 1980s, The Metals Society (1981), p. 100, p. 109
- 20) Fochber Huettentrax Metallweiterverarb, 20 (1982), p. 952
- 21) J. W. MARSHALL: Rod and Bar Prod. 1980s, The Metals Society (1981), p. 88, p. 109
- 22) 吉田達也, 中島友弘, 福田和之, 北門達男, 近藤勝也, 岡本真明: 鉄と鋼, 69 (1983), S 388
- 23) 黒川知明, 山川富夫: 塑性と加工, 22 (1981), p. 264
- 24) В. С. Емченко, А. Т. Филиппов, Н. Н. Мищенко, А. А. Горбанев, Б. Н. Колосов, Ю. С. Галенко: Metallurg, (1983) 5, p. 27