

(論文)

線材圧延における張力制御

Tension Control Technology for Wire Rod Rolling



高岡克也*
Katsuya Takaoka



石田 健*
Ken Ishida



宮崎庄司*
Shoji Miyazaki



串田 仁**
Hitoshi Kushida

The use of finishing block mills for sizing in alignment with an intermediate block mill in wire rod mills has increased. However, the control technology for the tension between the intermediate and finishing mills has not perfected because of problems with rolling size and the rolling velocity. This paper introduces new tension control technology which evaluates the tension force by measuring the change of the rolling velocity between the two block mills at the moment when the finishing mill bites the top of the stock.

まえがき = 近年、線材製品の顧客では、生産性の向上やコスト削減を目的として、工程省略への動きが活発化している。これを実現するために、素材の寸法精度、機械的性質、表面形状といった品質特性について、従来の技術では製造困難と思われていた厳しい要求が高まっている。

本稿では、上記要求品質の中で高寸法精度を確保するために導入した張力制御圧延技術について報告する。

1. 精密圧延線材の用途と要求精度

線材は、一般的に圧延後に引抜加工が入ることから、これまで精密圧延の需要はそれほど大きくなかった。しかし、引抜工程の省略や簡略化、あるいは軽圧下冷圧材の増加などによって、全長に渡って均一な寸法精度への要求が高まってきている。なお、ここでいう「精密圧延線材」とは、図1に示すように、AISI (Bar tolerance) 規格よりもさらに厳しい寸法公差 $\pm 0.10\text{mm}$ の製品を示している。

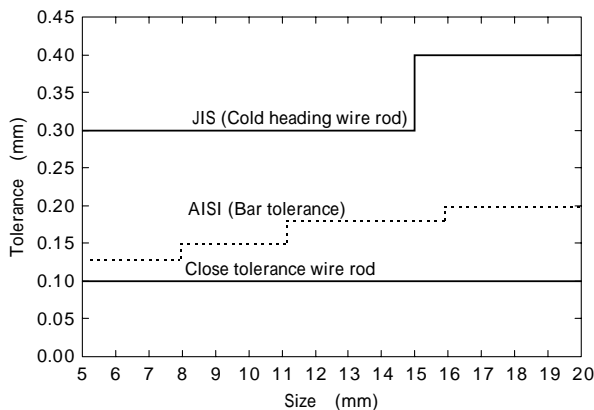


図1 JIS AISI 精密圧延の寸法公差の比較

Fig. 1 Comparison of size tolerance (JIS, AISI, Close tolerance wire rod)

2. 張力制御圧延技術

2.1 仕上圧延工程の概要

当社神戸製鉄所の第7線材工場では、1999年にリフレッシュ工事を実施し、図2に示すように、制御圧延および精密圧延を可能にすべく、ブロックミル、サイジングミル、仕上・製品水冷帯を導入した¹⁾。

ブロックミルより上流側のミルでは、低速のためループ制御を使った無張力圧延を実施している。ところが、ブロックミルとサイジングミル間は圧延速度が最大60m/秒と速く、線径が最小では7mmと小さいため、通常使われるループなどの張力制御はループを形成することでミスロールをまねく恐れがあり、使用できない。

その上、ブロックミルとサイジングミル間の張力は水冷による温度低下の影響を受け、シミュレーションによっても高精度に求めることは困難である。そのため、通常は木片で材料を持上げたときの手に掛かる抵抗力といった感覚的な手法で張力を調整せざるを得ず、張力不足でミスロールが発生しないように、ある程度高めに張力を設定しており、さらには毎回異なる張力で作業していたのが実情である。

サイジングミルの導入に当たり、専用のスタンド間張力シミュレータを開発し、全てのスタンド間で軽度の引張りになる圧延条件を求めるなどして、目標寸法 (\pm

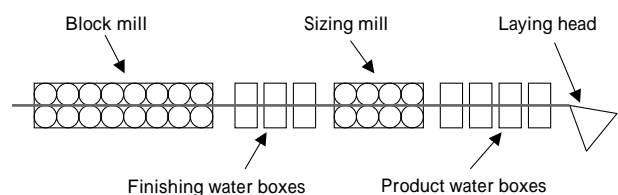


図2 仕上ラインレイアウト
Fig. 2 Layout of finishing line

* 鉄鋼部門 神戸製鉄所 条鋼圧延部 ** 技術開発本部 材料研究所

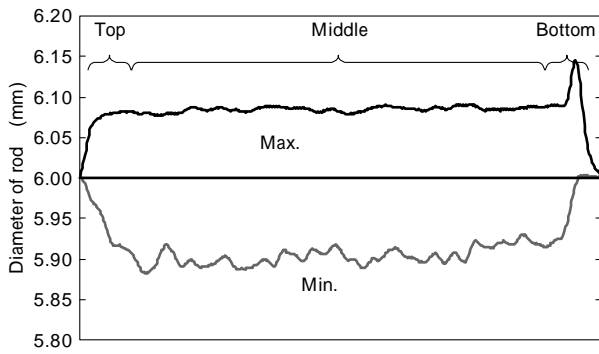


図3 寸法変動
Fig. 3 Change in diameter

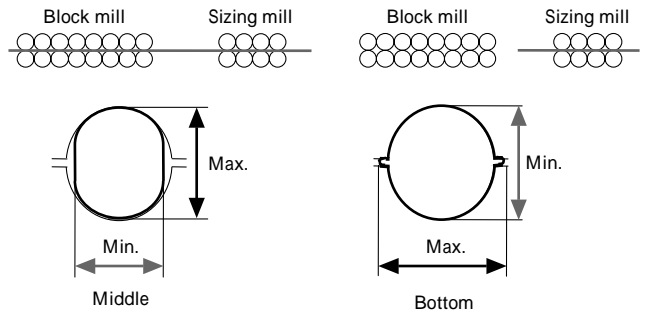


図4 V_t, V_m, V_b の定義
Fig. 4 Definition of V_t, V_m, V_b

0.10mm) を実現した²⁾。

2.2 スタンド間張カシミュレータの課題

上記のシミュレータでは、サイジングミル入側の張力はゼロと仮定している。ところが、ブロックミルとサイジングミルの間に張力が発生すると、寸法に影響を及ぼす。張力と幅広りの関係を式(1)に示す³⁾。

$$\epsilon = \left(1 + \frac{f}{K_{fm}} + \frac{b}{K_{fm}} \right) \dots \dots \dots (1)$$

- ここに、 ϵ_0 : 無張力時の幅広り係数
 ϵ : 張力時の幅広り係数
 K_{fm} : 変形抵抗
 f : 前方張力
 b : 後方張力
 f' : 前方張力係数
 b' : 後方張力係数

この式からも、張力が付加されると幅広りも変化することが理解できる。

実機における線材全長の寸法変動の例を図3に示す。例では最終製品径6mmを圧延しており、長径寸法と短径寸法を示している。ブロックミルとサイジングミルの両ミルに噛込んで圧延されている定常部の場合(以下、ミドル部と称す)、寸法はほぼ安定している。これに対して、線材の先端がサイジングミルに噛込むまでの非常常部(以下、トップ部と称す)と線材の後端がブロックミルを抜けた後の非常常部(以下、ボトム部と称す)では、急激に寸法変動が発生している。特にボトム部では、材料がローラガイドからはみ出す耳が発生し、長径寸法が0.15mm程度大きくなっている。これはブロックミルとサイジングミル間の後方張力の影響であり、張力が大きくなるほど、無張力部であるトップとボトム部と、張力の影響を受けるミドル部の幅広り寸法の差が大きくなり、長手方向の寸法変動が問題となる。

寸法変動を抑制するには、まずブロックミルとサイジングミル間の張力を測定する技術を確認し、張力を極力抑える圧延技術を確認する必要がある。

2.3 速度による張力測定方法の提案

張力を測定する方法として、我々は速度を使う方法に着目した。簡単な原理を図4で説明する。ブロックミルを出てサイジングミルに噛込む間でのトップ部の速度を V_t と定義する。これはサイジングミルで引張られていない無張力時の速度である。次にブロックミルとサイジ

ングミルの両ミルで噛込まれたミドル部の速度を V_m 、ブロックミルを抜けたボトム部の速度を V_b と定義する。 V_m はブロックミルとサイジングミル間の張力を受けた速度であり、 V_b はサイジングミルで引張られているだけの無張力時の速度である。

速度と張力の関係を式(2)~(5)に示す。式(2)は V_t 、式(3)は V_m 、式(4)は張力のモデル式であり、式(4)'は式(4)の変形である。

$$V_t = f \times V_{R1} \dots \dots \dots (2)$$

$$V_m = f' \times V_{R1} = (f + \dots) \times V_{R1} \dots \dots \dots (3)$$

ただし、 $f' = f + \dots$

$$= \frac{(f' - f)}{V_t} = \frac{(V_m - V_t)}{V_t} \times \frac{f}{V_t} \dots \dots \dots (4)$$

$$\frac{(V_m - V_t)}{V_t} \dots \dots \dots (4)'$$

$$V_t = \frac{(V_m - V_t)}{V_t} \dots \dots \dots (5)$$

- ここに、 f : ブロックミル最終スタンドの先進率
 V_{R1} : 上記スタンドのロール周速度
 f' : 張力を受けたときの f
: 係数
 V_t : 速度変動率

f と は同一鋼種の同一圧延条件であれば一定とみなすことができる。式(4)'より、 V_t と V_m から、張力を推定できることが分かる。そこで、式(4)'の右辺を式(5)に示すように速度変動率 V_t と定義する。なお、上述した式は、張力と速度変動率との関係を説明するために簡略化したモデル式であるが、別途3次元多スタンドFEMによる数値解析により、(4)'式の妥当性を理論的に検証し

ている（本号 p.14，線材のサイジング圧延における3次元変形解析技術参照）。

2.4 速度測定方法

速度を測定する方法として、後方散乱式のレーザドップラー速度計を利用した。測定の設置方法を図5に示す。レーザドップラー速度計では、レーザを測定対象に当て、その散乱光を受光する必要がある。ところが線材の場合、断面が円のため振れなどの影響で照射位置がずれると散乱光の強度は大きく違ってくる。影響を低減する方法として、信号処理に散乱光から得られた信号に基準周波数をミキシングしてドップラー周波数を導出するトラック方式を採用した⁴⁾。トラック方式の欠点である初期応答性が悪い点については、予測速度をあらかじめ速度計に入力することによって短縮化した。基本仕様を表1に示す。

2.5 速度による張力測定方法の実証

圧延中に速度を変動させたときの寸法と速度の時間変化をそれぞれ図6と図7に示す。長径寸法はほとんど変化していないが、短径寸法は大きく変化していることが分かる。ここで寸法の変動を式(6)に示すように寸法変

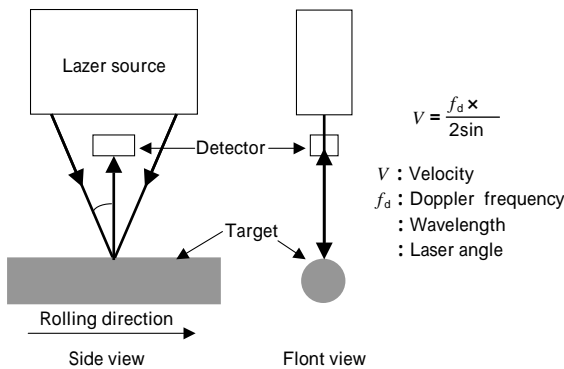


図5 レーザドップラー速度計
Fig. 5 Laser Doppler velocity meter

表1 レーザドップラー速度計の基本仕様

Table 1 Basic specifications of laser Doppler velocity meter

Laser power	40mW
Laser wavelength	780nm
Beam profile	5mm x 1mm
Measurement range	0 ~ 120m/s
Repeatability	±0.25%

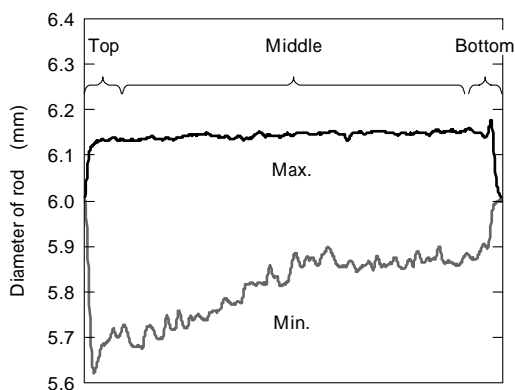


図6 速度変動時の寸法変動 (6mm)
Fig. 6 Change in diameter when speed is varied (6mm)

動量 D_f と定義する。

$$D_f = D_{min} - D_{avg} \dots\dots\dots(6)$$

ここに、 D_{min} ：短径寸法

D_{avg} ：長径寸法の平均値

式(6)で示した寸法変動量と式(5)で示した速度変動率の時間変化を図8に示す。両者の挙動はほぼ一致しており、速度が変化すれば寸法も変化していることが確認できる。

2.6 実操業への適用

実操業へ適用する上での問題点は、式(4)は同じサイズでの比較を行っているものであり、サイズが違えば比例係数が異なってくることと、鋼種などの違いによって、式(1)の係数や変形抵抗 (K_{fm}) が異なるため、寸法変動量も変化することである。

図9に、サイズが違う場合の寸法変動量と速度変動率の相関を示す。図から、サイズによって、 V_f と D_f の傾きが異なることが分かる。同様に鋼種によっても傾きが異なってくる。そのため、サイズおよび鋼種などの条件ごとにあらかじめ V_f と D_f の関係を導出しておく必要がある。

寸法変動量を下げるには張力を下げる（速度変動率を下げる）方が良いが、張力を下げ過ぎるとミスロールを誘発するなど安定操業に支障をきたす。理想的には、安定操業に影響を及ぼさない程度で可能な限り速度変動率を下げる（張力を下げる）圧延条件が望ましい。

そこで、安定操業に支障をきたさず、可能な限り張力を下げられる速度変動率をサイズと鋼種で分けてグルーピングしておき、それぞれに目標値 V_a としてあらかじめ

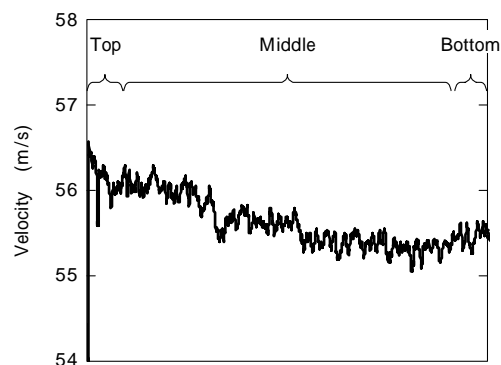


図7 速度変動 (6mm)
Fig. 7 Change in velocity (6mm)

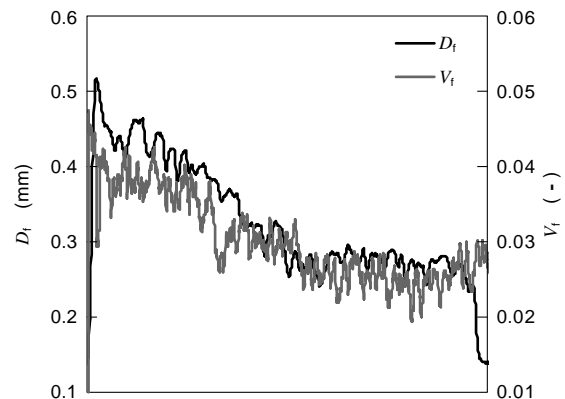


図8 寸法変動量と速度変動率
Fig. 8 Amount of change in diameter and velocity regulation

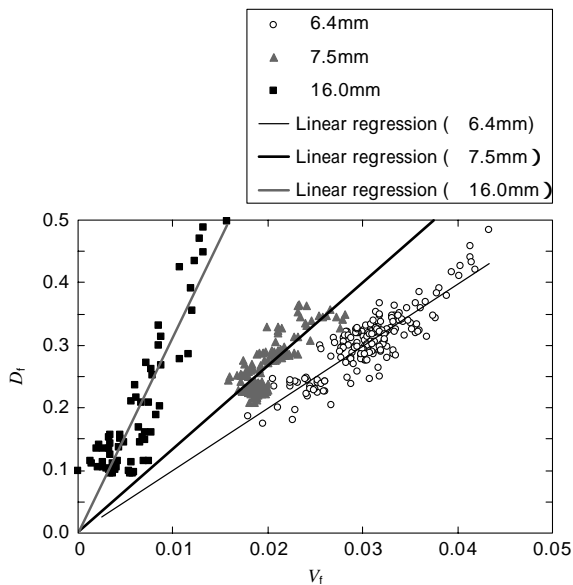


図9 サイズの違いによる V_f と D_f の相関
Fig. 9 Correlation of V_f and D_f by difference in size

持たせる。先端がブロックミルを通過し、後段であるサイジングミルに嚙込むまでに V_f を測定し、サイジングミルに嚙込んだら V_m を測定する。これらのデータから式(5)の速度変動率 V_f を圧延中に導出する。「 $V_f > V_a$ なら張力が大き過ぎるため速度を下げ、 $V_f < V_a$ なら張力が小さ過ぎるため速度を上げる」制御を行うことによって、寸法変動量を小さくすることが可能となる。制御ロジックを図10に示す。

むすび=本稿で報告したシステムは、作業者のガイダンスシステムとして順調に稼働しており、従来は作業者の感覚に頼っていた線材圧延時の張力制御を数値データ化

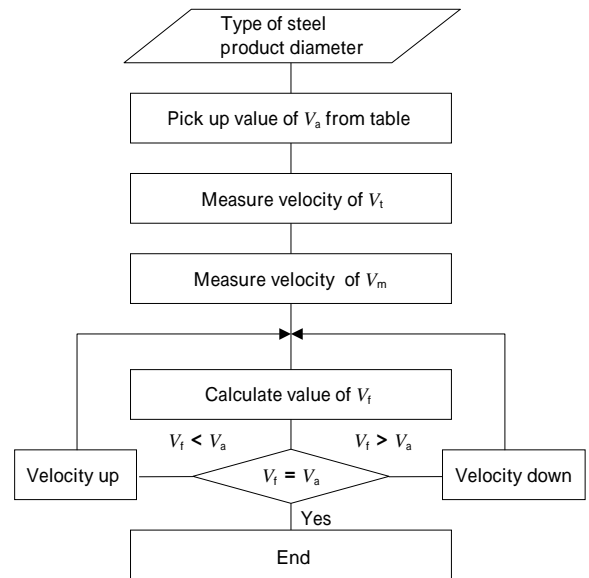


図10 張力制御の流れ図
Fig. 10 Flow chart of tension control

することを可能とした。その結果として、全長に渡る寸法公差 $\pm 0.10\text{mm}$ の製品に対し、寸法精度の向上とミスロール発生防止に大きく貢献している。今後は、材料温度などのほかの因子がどのように影響を与えているかを把握し、それらを考慮したさらに精度の高いシステムに構築していく。

参考文献

- 1) 市田 豊ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.50, No.1(2000)，p.6.
- 2) 串田 仁ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.50, No.1(2000) p.25.
- 3) 高橋洋一ほか：塑性と加工，Vol.30, No.338(1989) p.406.
- 4) 流れの計測懇談会：LDVの基礎と応用，(1980) p.43. 日刊工業新聞社.