

(論文)

# サイジングミルによる精密圧延技術

串田 仁\*・服部重夫(工博)\*・森賀幹夫\*\*

\*技術開発本部・生産技術研究所 \*\*株式会社コベルコ科研

## Sizing Mill Rolling Technology for Close-tolerance Wire Rod

Hitoshi Kushida・Dr. Shigeo Hattori・Mikio Moriga

A new sizing-mill was installed in the No.7 wire rod mill at the Kobe Works to produce close-tolerance wire rod. It is extremely important to optimize the inter-stand tension and the roll pass design (groove design) in the production of close-tolerance wire rod. Inter-stand tension was optimized by using a newly developed form of tension control simulation based on empirical mathematical models for inter-stand tension and low-reduction. Roll pass design was optimized by using a generalized plane-strain FEM(Finite Element Method) model. As a result of these optimizations, close-tolerance wire rod ( $\pm 0.1\text{mm}$  tolerance) was successfully produced in the new sizing mill.

まえがき = 近年、線材製品の顧客では、生産性の向上、コスト削減を目的として、工程省略への動きがますます活発化している。これを実現するために、素材の寸法精度、機械的性質、表面性状といった品質特性の向上、あるいは中間寸法の拡大など、従来の圧延ラインでは製造困難と思われていた要求も拡大している。

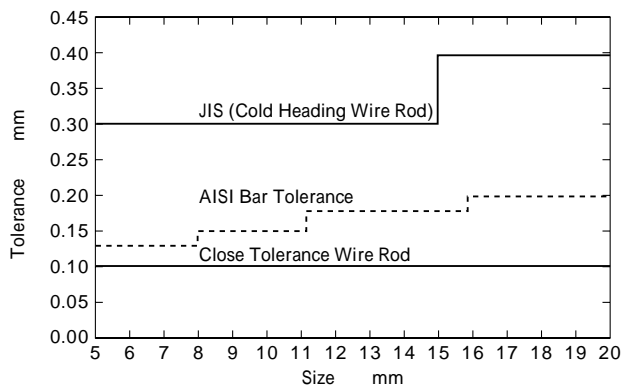
本稿では、上記要求品質の中の高寸法精度を確保するために第7線材工場リフレッシュ工事で導入した、サイジングミルによる精密圧延技術について報告する。

### 1. 精密圧延線材の用途と要求特性

線材は、圧延後に引抜加工が入ることから、これまで精密圧延材の需要は棒鋼ほど大きくはなかった。しかし、引抜加工などの2次加工工程を省略、あるいは簡略化するために、近年需要が高まっている。なお、ここでいう「精密圧延線材」とは、第1図に示すように、AISI Bar Tolerance 規格よりもさらに厳しい寸法公差 $\pm 0.10\text{mm}$ の製品を指している。

### 2. 精密圧延技術

当社第7線材工場のリフレッシュ工事では、線材の精密圧延・フリーサイズ圧延を可能にするための圧延設備として、写真1に示すサイジングミルを導入した。



第1図 線材寸法公差の比較 (JIS AISI Bar Tolerance 精密圧延)  
Fig. 1 Comparison of wire rod tolerance  
(JIS AISI Bar Tolerance Close Tolerance)

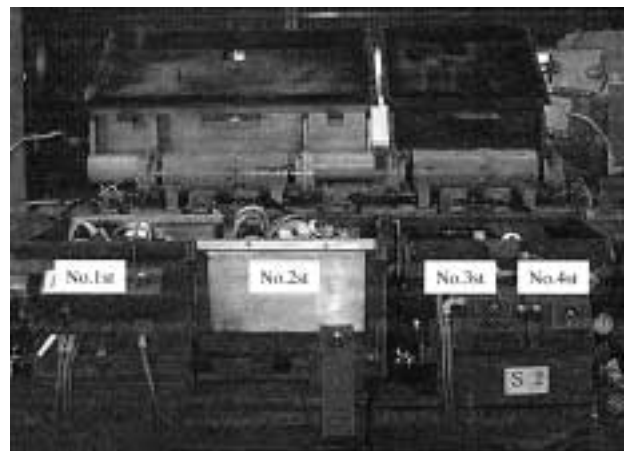


写真1 サイジングミル外観  
Photo 1 Sizing mill

第1表 寸法精度に影響する因子

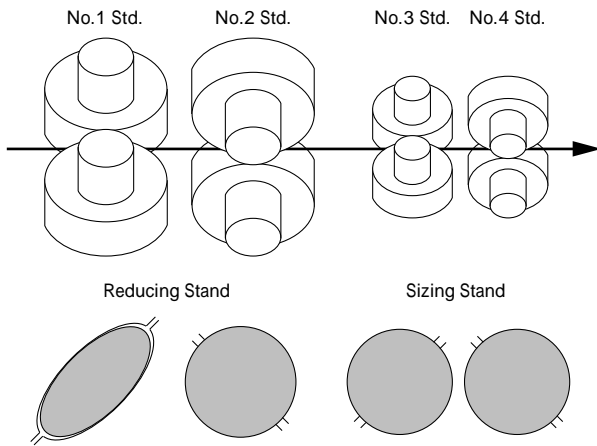
Table 1 Factors effect on close tolerance

	Effective Factor
Rolling Conditions	Shape of Groove
	Pass Schedule
	Interstand Tension
	Rolling Speed
	Roll Gap
	Tolerance of Initial Round
	Distribution of Material Temperature
Mill Hard Ware	Rigidity of Mill
	Pass Line
	Leading Guide
	Wear of Groove

一般に線材の寸法精度に影響する因子は、第1表に示すごとく多数挙げられるが、本稿では、このなかで、サイジングミルに特有であり、寸法精度にもっとも重要な影響を及ぼすと思われる「スタンド間張力」と「孔型形状」の影響について検討した。

#### 2.1 サイジングミルのスタンド間張力の推定

導入したサイジングミルは、第2図に示すように4スタンドで構成されており、上流2スタンドは通常のブロックミルと同程度の減面率、下流2スタンドがサイジングスタンドとなっている。一般的なブロックミルでは、スタンド間張力を決定する増速比は固定であるが、当社



第2図 サイジングミルのパススケジュール  
Fig. 2 Pass design of sizing mill

のサイジングミルでは各スタンドの張力（増速比）を可変としている。これにより1種類の母材寸法（サイジングミルに入る線材の寸法）で多寸法の製品をえることができる。

しかし、この4スタンドでマスバランスが崩れると、コブル（スタンド間で線材がたぐれて圧延できなくなる状態）が発生するか、あるいはコブルとならないまでも、スタンド間で線材が振動する。たとえば、No.1 Std. ~ No.2 Std. 間で振動が発生した場合には、この振動のためにローラーガイドのロールギャップが広がり、線材を適正に保持しておくことができなくなるために、線材が回転する恐れがある。No.2 Std. ~ No.3 Std. 間で振動した場合には、ガイドとの接触により表面きずが発生する恐れがある。また、とくに No.3 Std. ~ No.4 Std. のサイジングスタンド間で振動した場合には、製品の寸法精度が周期的に変化し、高寸法精度の製品がえられない。

このため、この振動に影響を及ぼすサイジングミルの「スタンド間張力」を推定し、最適値に制御（設定）することが、高寸法精度圧延のために不可欠となる。

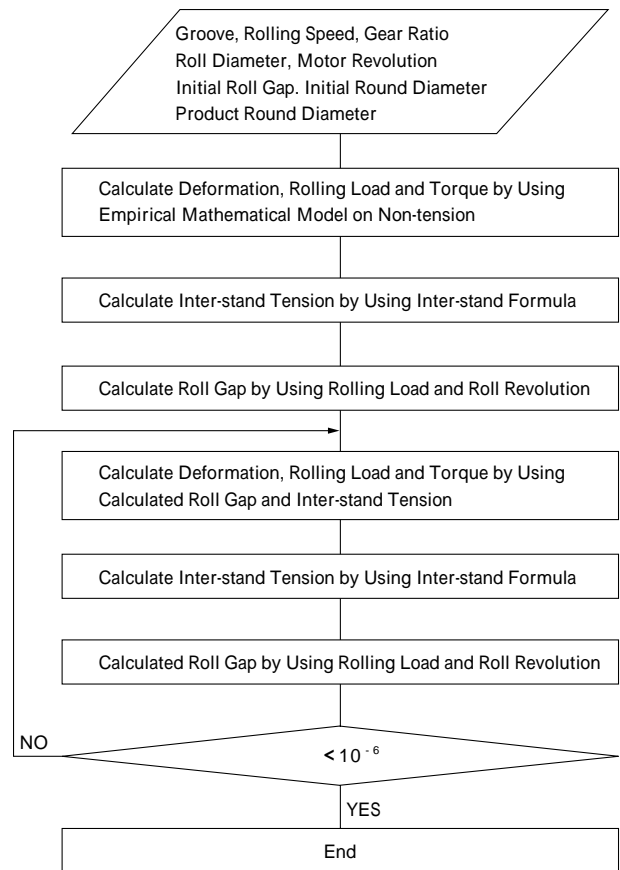
### 2.1.1 スタンド間張力推定用シミュレータの構成

ブロックミルでのスタンド間張力を推定する方法については種々の報告があるが<sup>(1)(2)</sup>、サイジングミルに適用された例はない。また第1次検討としては、多大な計算時間を使わずにスタンド間張力の概算をえる必要があった。ここでは、矩形換算法をもとにした連続圧延モデルに、さらにサイジング（低減面率）の効果を考慮したモデル式を導入した新たな連続圧延シミュレータを作成した。このシミュレータを活用して、スタンド間のマスバランスを適正化し、かつ所定の製品寸法をえることのできる、ロールギャップ、母材径、増速比を検討した。

第3図に連続圧延シミュレータの流れ図を示す。

#### 1) 矩形換算法の拡張によるモデル式

シミュレータにもちいたモデル式を、以下の式(1)~式(4)に示す。式(1)、式(2)は、無張力状態の幅広がり率  $n$ 、先進率  $n$  のモデル式であり、式(3)、式(4)の  $t$ 、 $t$  は張力を考慮した場合のそれぞれに対応するモデル式である。式中の  $Co1$ 、 $Co2$  はサイジング（低減面率）の効果係数、 $a$   $b$   $c$   $d$  は係数、 $f$ 、 $b$  はそれぞれ前方張力、後方張力、 $K_{fm}$  は平均変形抵



第3図 連続圧延シミュレータの流れ図  
Fig. 3 Flow chart of 'Tension control simulation'

抗、 $(-1)$  は延伸率、 $b_1$   $b_2$   $b_3$   $b_4$  は圧延方式により異なる定数、 $H_0$   $B_0$   $l_d$   $F_H$   $F_0$  は矩形換算法でのパラメータ、 $m_k$  は孔型軸比である<sup>3)</sup>。

$$n = \frac{B_1}{B_0} = 1 + Co1 \cdot \frac{2l_d}{H_0 + 2B_0} \cdot \frac{F_H}{F_0} \dots\dots\dots (1)$$

$$n = Co2 \{ (b_1 m_k + b_2) (-1) + b_3 m_k + b_4 \} \dots\dots\dots (2)$$

$$t = n \cdot \left( 1 + a \frac{f}{K_{fm}} + b \frac{b}{K_{fm}} \right) \dots\dots\dots (3)$$

$$t = n \cdot \left( 1 + c \frac{f}{K_{fm}} + d \frac{b}{K_{fm}} \right) \dots\dots\dots (4)$$

#### 2) ロール隙の変化

一般的にロールギャップの変化は、ミル剛性と圧延荷重によって決定されるゲージメータ式をもちいて求められる。しかし、ブロックミルなどの圧延では、ピニオン軸とメタル軸受との間に導入される油膜によってもロールギャップは変化し、高速になるほどロールギャップは小さくなる。この油膜厚さは回転数、軸径、ピニオン軸とメタル軸受け間の間隙、圧延荷重などによって変化するが、回転数と圧延荷重以外はスタンドによって決まる値である。また、圧延荷重はゲージメータ式に含まれる。このため、ロールギャップの変化には、回転数の関数として表す油膜厚さによる影響とゲージメータ式で表されるミル剛性の影響とを組合せた式(5)を考案した。

式(5)中の  $S$  は圧延中のロールギャップ、 $S_0$  は初期ロールギャップ、 $P$  は圧延荷重、 $K$  はミル剛性、 $N$  はロール回転数、 $f$  は係数である。

$$S = S_0 + \frac{P}{K} - f N \quad \dots\dots\dots (5)$$

### 3) スタンド間張力

スタンド間の圧延材の変形は、弾性変形として取扱い、スタンド間張力を式(6)のように表した。式中のEはヤング率、 $V_{i,out}$ はiスタンド出側速度で、 $V_{i+1,in}$ はi+1スタンド入側速度である。

$$= E \cdot 2 \frac{V_{i+1,in} - V_{i,out}}{V_{i+1,in} + V_{i,out}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

### 4) 収束条件

スタンド間張力の変化分を平均変形抵抗で無次元化し、その二乗和が $10^{-6}$ 以内とすることを収束条件とした。

#### 2.1.2 スタンド間張力の計算結果

前述したように、1駆動で多スタンドのロールを回転させるようなブロックミルの圧延では、全スタンド間で張力が引張りにならなければならない。しかし、張力の値が大きすぎると、スタンド間での線材の破断や、圧延中のすべり、孔型の摩耗増大などの問題を引き起こすため、適切な張力にする必要がある。

張力の変更が無限にできれば問題はないが、サイジングミルでのスタンド間張力の変更は歯車によるため、有限のいくつかの組み合わせとなる。このため、所定のパススケジュールのときに、最適な増速比を選択しなければならない。

例として、19mmの圧延に対して2.1節で述べたシミュレータを適用して、3水準の増速比で計算したときの、スタンド間張力の計算結果を第4図に、そのときの製品寸法の計算結果を第2表に示す。

第4図の例1の場合にはNo.2 Std. ~ No.3 Std. 間で圧縮、例2の場合にはNo.3 Std. ~ No.4 Std. 間で圧縮となっており、スタンド間でループが発生する。これらに対して、例3では全スタンド間で引張りとなっており、しかも極端に大きな張力は存在しない。また、例3では第2表に示すように、製品寸法も所定の寸法公差を満足することが予測できる。他の各サイズについても同様の方法で最適な増速比を決定した。

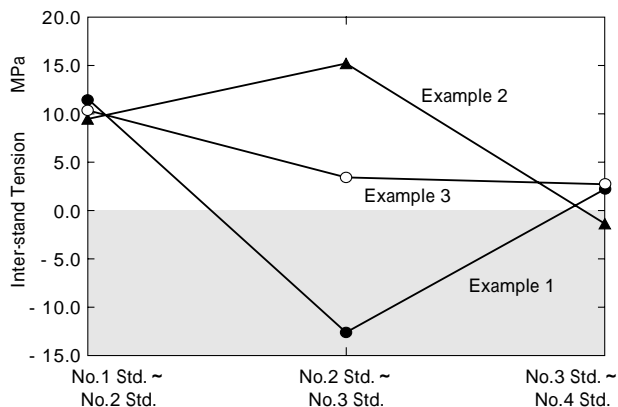
#### 2.2 サイジングミルの孔型設計

サイジングミルのパススケジュールは、第2図に示したように、オーバル 丸 丸 丸としている。上流2パスで通常の丸を作り、その丸を下流2パスで低減面率で整形する。このため、高寸法精度をえるにはとくに下流2パスの孔型設計が重要となる。

2.1節で示した矩形換算法による方法では、このような低減面率での圧延後の線材形状を正確に予測することはできない。このため、孔型設計には剛塑性FEMをもちいて解析した。

##### 2.2.1 FEMによる変形解析

近年孔型圧延の解析にも、剛塑性三次元FEMの解析が適用され始めている<sup>4)</sup>。しかし、精密圧延の変形解析に適用する場合には、正確な形状を表すために要素数が増加し、膨大な計算時間がかかる。このため、断面内の要素数を多く取ることができ、かつ三次元FEMよりも



第4図 スタンド間張力の計算結果  
Fig. 4 Calculated results of inter-stand tension

第2表 増速比を変えたときの、寸法精度の計算比較

Table 2 Calculated results of maximum and minimum diameter of wire rolled at 3 kinds of gear ratio

	Example 1	Example 2	Example 3
Max. mm	19.02	19.00	19.01
Min. mm	19.10	19.21	19.01

計算時間のかからない、一般化平面歪みによるFEM解析シミュレータ<sup>5)</sup>をもちいた。

#### 2.2.2 FEMによる変形解析結果

FEM解析シミュレータをもちいて孔型形状を種々変化させて解析をおこなった。解析条件を第3表に、解析結果の一例を第5図に示す。第5図は、サイジングミルNo.1 Std. ~ No.4 Std. 出側の断面内相当歪み分布を示している。No.1 Std., No.2 Std. では線材中心まで変形が及んでいるのに比較して、サイジングスタンドであるNo.3 Std., No.4 Std. では、ごく表層部のみ変形していることがわかる。このときのNo.4 Std. 出側での寸法精度は、長径19.04mm、短径18.96mmとなっており、孔型形状を最適化することで目標の寸法精度(±0.1mm)がえられることを示している。

第3表 FEM解析条件

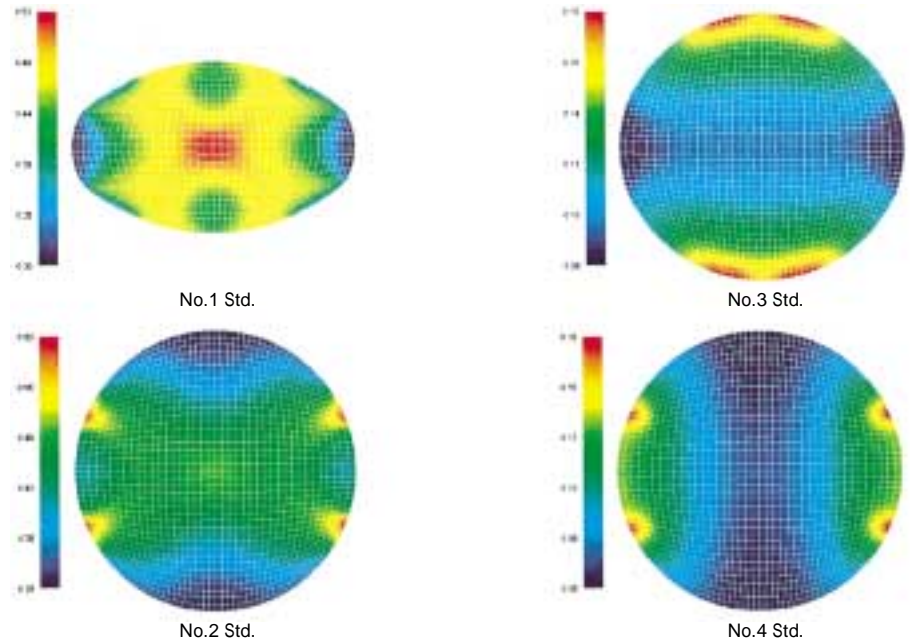
Table 3 Calculated conditions of FEM analysis

	Model	1/4 Model
Number of Division	Width Direction	20
	Thickness Direction	20
	Rolling Direction (Roll Bite)	20
Friction Coefficient		0.3

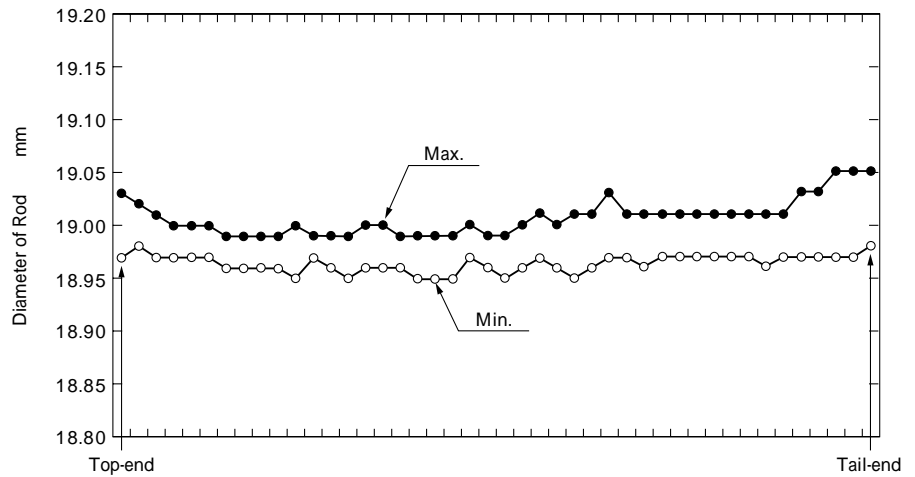
### 3. 実機での圧延結果

前述のスタンド間張力および孔型形状を最適化することによりえられた、圧延実績の例を第6図に示す。解析で予測されたとおり、製品寸法19mmに対して、寸法公差±0.10mm以内の高寸法精度の製品がえられることを確認した。

むすび=本稿で報告した解析は、第7線材工場の立ち上げ時、および営業運転に入ってから活用され、現在の



第5図 サイジングミルにおける各スタンド出側での相当歪み分布  
 Fig. 5 Calculated equivalent strain at exit of each rolling stand in sizing mill by FEM



第6図 精密圧延でえられた線材の長手方向の寸法測定結果 ( 19mm )  
 Fig. 6 Measured results of diameter through the wire length produced by precision rolling ( 19 mm )

高寸法精度の圧延に貢献している。なお、精密圧延材に影響を及ぼす因子は、本稿で対象としたスタンド間張力および孔型形状のみでなく、圧延材の温度分布、母材寸法精度など多々挙げられる。これらをすべてまとめた精密圧延技術を確立し、さらなる寸法精度の向上を実現するための活動を継続していく。

#### 参考文献

- 1) 黒川知明ほか：塑性と加工，Vol.22, No.242 (1981)，p.264.
- 2) 野口幸雄ほか：第33回塑性加工連合講演会，(1982)，p.159.
- 3) 斎藤好弘ほか：塑性と加工，Vol.24, No.273 (1983)，p.1070.
- 4) 中村 充ほか：塑性と加工，Vol.34, No.384 (1993)，p.87.
- 5) 森賀幹夫ほか：平成3年塑性加工春季講演会，(1991)，p.615.