

(論文)

線材のサイジング圧延における3次元変形解析技術

Three Dimensional Deformation Analysis for Wire Rod Sizing Rolling



串田 仁*
Hitoshi Kushida



豊島史郎**
Shiro Toyoshima



宮崎庄司***
Shoji Miyazaki



高岡克也***
Katsuya Takaoka



石田 健***
Ken Ishida

Recently, a final rolling machine was installed in a new sizing mill to improve productivity and size accuracy. The inlet-tension of the sizing mill directly influences the size accuracy of end-products in low-reduction sizing mills. This report describes the development of a three dimensional FEM analysis simulator and how it can be used to control inlet-tension.

まえがき = 近年、線材圧延工場では、生産性の向上、寸法精度の向上、あるいは制御圧延との組み合わせによる材質の作り込みなどを目的として、これまでの最終圧延機であるブロックミルの後方にサイジングミルを配置したレイアウトが採用されてきている。ここでブロックミルとは、ひとつのフレーム内に直列に8~10台の圧延機を短い間隔で90度ずつ交互に傾けて配置した圧延機であり、サイジングミルとは、数台の圧延機からなる主に寸法精度の向上を目的とした低減面率の圧延機である。しかしながらサイジングミルでは、ブロックミル-サイジングミル間に作用する張力(サイジングミル入側張力)が、サイジングミル内スタンド間の張力を介して、最終製品の寸法精度に大きな影響を及ぼす。

サイジングミル入側張力が最終製品寸法精度に及ぼす影響を明らかにするために、3次元多スタンドFEM解析シミュレータを開発した。本稿では、シミュレータの概要を示すとともに、その解析結果について記述する。

1. サイジングミルにおける課題

当社神戸製鉄所の第7線材工場レイアウトを図1に示す。通常の圧延機20台の後に8スタンドブロックミル、その下流にサイジングミルが配置されている¹⁾。当社サイジングミルは、写真1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スタンドが低減面率のサイジングスタンドとなっている。スタンド間の張力を決定する増速比のパターンは可変となっているが、同一の製品サイズを圧延する場合は、ギャ比一定のもとでスタンド間に張力を作用させて圧延する圧延機である。

線材圧延での圧延機間の張力制御は、圧延機間に若干量のループを形成させ、ループ量の変化に応じてロール回転数の調整を行うループ制御が一般的に用いられてい

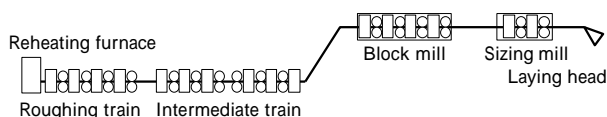


図1 第7線材工場レイアウト
Fig. 1 No.7 wire rod mill layout

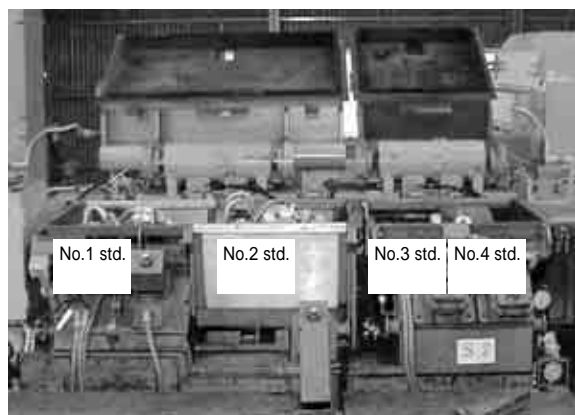


写真1 サイジングミル外観
Photo 1 Sizing mill

る。一方、ブロックミル-サイジングミル間での線径は最小7.0mm、線材速度は60m/s程度となり、ループ制御が困難である。このため、これらの圧延機間の張力制御はオペレータの感覚によるものが主流である。

しかしながら、上記圧延機間の張力は最終製品の寸法精度に大きな影響を及ぼすため、張力と最終製品幅寸法との関係を定量化する必要がある。これを実現するため、サイジングミル入側張力およびミル内の張力変化を考慮し、サイジングミルでの変形負荷解析を可能とする3次元多スタンドシミュレータを開発した。次に、このシミュレータを用い入側張力と製品幅寸法との関係を定量化し、さらにループ制御にかかわる張力制御方法の可能性を検討した(本号 p.18, 線材圧延における張力制御参

*技術開発本部 材料研究所 **機コベルコ科研 ***鉄鋼部門 神戸製鉄所 条鋼圧延部

照)

2.3 次元多スタンド FEM シミュレータ

近年、棒鋼、線材圧延の寸法を高精度に予測するために、3次元 FEM (有限要素法) が用いられているが、通常の 3次元 FEM 解析は単スタンド解析が主流である。しかしながら上述したように、サイジングミル内のスタンド間張力には、入側張力、ギヤ比設定、カリバ形状、ロールギャップなどの全ての要因が影響を及ぼす。これらを実験によって調査することは困難であるため、この未知であるスタンド間張力も合わせて解析できる多スタンドシミュレータの開発を試みた²⁾。

2.1 多スタンド FEM シミュレータアルゴリズム

本シミュレータは、当社で開発した 3次元単スタンド FEM シミュレータ³⁾ を拡張して構築した。スタンド間で材料は変形しないと仮定し、スタンド間の収束条件を第 i スタンド出側速度 V_{i0} と第 $i+1$ スタンド入側速度 $V_{(i+1)}$ とが等しくなった場合と定義した。

スタンド間の速度連続性を、スタンド間張力を未定常数とした拡張ラグランジュ法によって記述し、繰返し計算手法を用いて解を求めた。2 スタンドの場合を例にとり、以下の式 (1) ~ 式 (4) で表す。

$$[K_1] \begin{Bmatrix} V_{1j} \\ V_{10} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_{1j} \\ -F_{12,k} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

$$[K_2] \begin{Bmatrix} V_{2l} \\ V_{2j} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_{12,k} \\ f_{2j} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (2)$$

$$V_{10} - V_{2l} + F_{12,k+1} = F_{12,k} \dots\dots\dots (3)$$

$$F_{12,k+1} = F_{12,k} - \frac{1}{\dots} (V_{10} - V_{2l}) \dots\dots\dots (4)$$

$[K_1][K_2]$ は、それぞれ第 1, 第 2 スタンドの被圧延材の剛性行列で、材料非線形、ロールとの接触、入出側面の速度均一条件を含んだ行列である。 V_{1j} および V_{2j} は、それぞれ第 1, 第 2 スタンドの節点速度ベクトル、 V_{10} は第 1 スタンド出側、 V_{2l} は第 2 スタンド入側の圧延材代表速度であり、 V_{10} は V_{2l} と等しくなる必要がある。 $F_{12,k}$ を第 1, 第 2 スタンド間張力とすると、速度偏差が存在する場合は張力が適正ではないため、張力補正が必要である。この張力補正と速度偏差の係数を とする。従って、繰返し計算における次のステップのスタンド間張力 $F_{12,k+1}$ は、式 (4) で与えられる。計算の流れは、入出側張力を仮定した単スタンド解析結果 (V_{10} と V_{2l}) を式 (4) に代入し、次ステップで出側張力を $F_{12,k+1}$ に修正し、収束条件を満たすまで繰返し計算を行うこととなる。

式 (4) を多スタンド圧延に拡張すると、以下の式 (5) の形となる。

$$V_{(i-1)0} - V_{il} + \dots F_{(i-1),k+1} = \dots F_{(i-1),k} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、添字 i はスタンド番号、添字 k は繰返し計算でのステップ番号、添字 $(i-1)$ は第 $(i-1)$ スタンドと i スタンド間を表す。次に、 V_{il} は入側速度、 V_{i0} は出側速度、 $F_{(i-1),k}$ は第 $(i-1)$ スタンドと第 i スタンド間張力、 \dots が第 $(i-1)$ スタンドと第 i スタンド間の張力を予測するパラメータである。フローチャートを図 2 に示す。

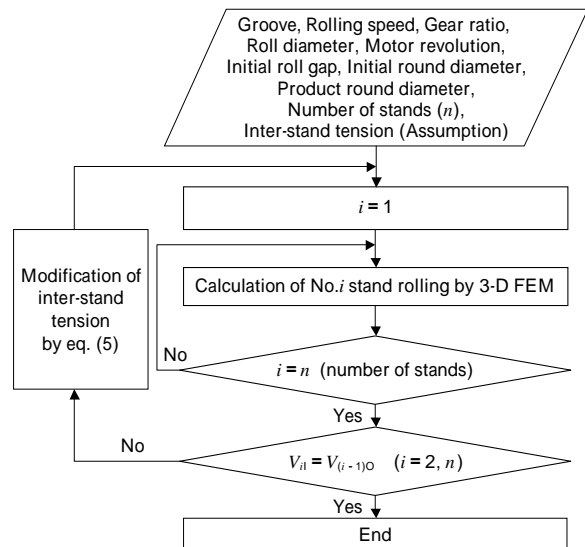


図 2 FEM シミュレーションのフローチャート
Fig. 2 Flow chart of FEM simulation

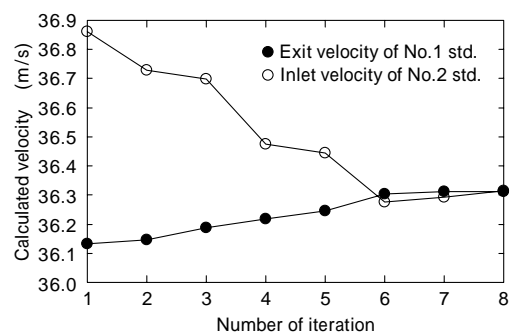


図 3 繰返し計算におけるサイジングミル内速度の変化
Fig. 3 Change of inter-stand velocity in iterative computation

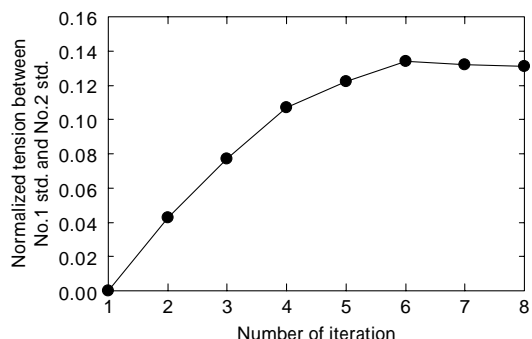


図 4 繰返し計算におけるサイジングミル内張力の変化
Fig. 4 Change of inter-stand tension in iterative computation

2.2 シミュレータの収束性

4 スタンド圧延における、繰返し計算回数と各ステップでの第 1 スタンド出側速度および第 2 スタンド入側速度の推移の一例を図 3 に、そのときの繰返し計算回数と各ステップでの第 1, 第 2 スタンド間張力の推移を図 4 に示す。収束する回数は初期値として与える各スタンドのスタンド間張力にも依存するが、式 (5) で与えられる張力修正により、第 1 スタンド出側速度と第 2 スタンド入側速度が等しくなっていくことが確認できる。

3. サイジングミルの変形解析

サイジングミルにおける入側張力が各スタンドの形状、スタンド間張力などに及ぼす影響を、2 章で示した多スタンド FEM シミュレータにより解析した。

表 1 FEM 解析条件

Table 1 FEM analysis conditions

Number of divisions	Cross section		16
	Rolling direction	Inlet	5
		Roll bite	10
		Exit	5
Friction coefficient			0.5

表 2 圧延条件

Table 2 Rolling conditions

Number of stands	Reduction per pass (%)	Shape	Roll dia. (mm)
1	22	Oval	247
2	22	Round	247
3	10	Round	156
4	5	Round	156

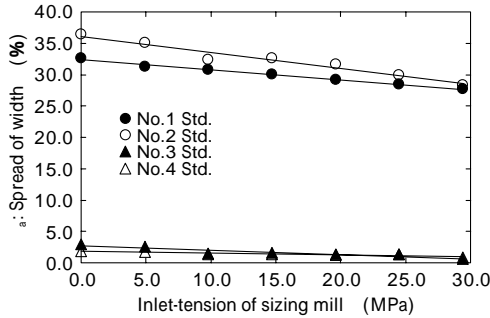


図 5 サイジングミル入側張力が各スタンド幅広がり率に及ぼす影響
Fig. 5 Influence of inlet-tension of sizing mill on spread of width (a)

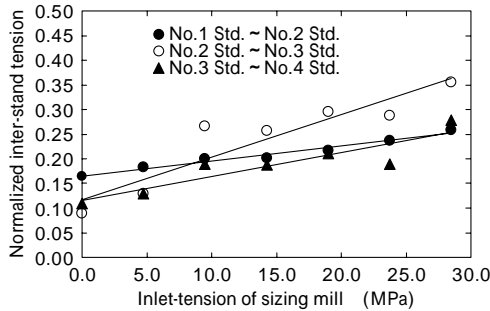


図 6 サイジングミル入側張力が無次元化スタンド間張力に及ぼす影響
Fig. 6 Influence of inlet-tension of sizing mill on change of normalized inter-stand tension

3.1 解析条件

多スタンド解析での解析条件を表 1 に、圧延条件を表 2 に示す。なお、表 2 に示した減面率は基準条件（サイジング入側張力 0 のとき）での値である。変形抵抗は、材料温度 1,173K、炭素含有量 0.45% での美坂の式⁴⁾とした。

3.2 解析結果

3.2.1 サイジングミル入側張力が幅寸法に及ぼす影響

サイジングミル入側張力と下記の式(6)で定義する幅広がり率 a との関係を図 5 に、サイジングミル入側張力と無次元化したスタンド間張力の関係を図 6 に示す。なお、張力の無次元化は、解析結果のスタンド間張力を、解析に用いた美坂の式の σ_0 で除した値を用いた。

$$a = (B_{out} - B_{in}) / B_{in} \times 100 (\%) \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 B_{in} : 圧延前幅、 B_{out} : 圧延後幅である。

通常の減面率で圧延する第 1、第 2 スタンドと比較して、サイジングスタンドである第 3、第 4 スタンドの幅広がり率は極端に小さい。また、サイジングスタンド入

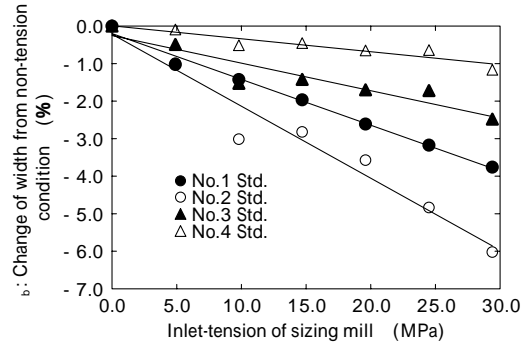


図 7 サイジングミル入側張力が各スタンド幅寸法変動率に及ぼす影響

Fig. 7 Influence of inlet-tension of sizing mill on change of width from non-tension condition (b)

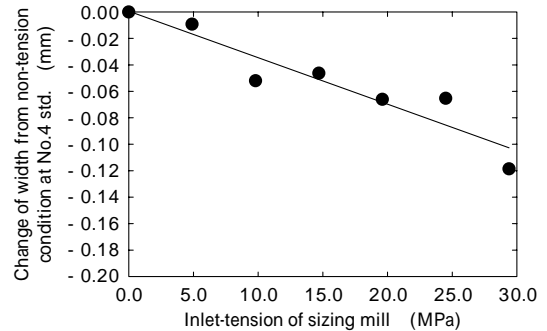


図 8 サイジングミル入側張力が No.4 スタンド幅寸法変動量に及ぼす影響

Fig. 8 Influence of inlet-tension of sizing mill on the change of width from non-tension condition at No.4 std.

側張力の上昇とともに、全スタンドの幅広がり率が減少する。サイジングミル入側張力は、サイジングミル内のスタンド間張力にも影響を及ぼし、入側張力が大きくなるほど各スタンド間張力も増大する。このため、図 5 で示した幅広がり率も各スタンドで減少することとなる。

サイジングミル入側張力と下記の式(7)で定義するサイジングミル入側無張力時からの各スタンド幅寸法変動率 b の関係を図 7 に示す。

$$b = (B_{T,put} - B_{0,put}) / B_{0,put} \times 100 (\%) \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 $B_{0,put}$: サイジングミル入側無張力時圧延後幅

$B_{T,put}$: サイジングミル入側張力負荷時圧延後幅

図 7 は、サイジングミル入側張力が、サイジングミル入側無張力時幅寸法の変動に与える影響度を示したものである。図 5 から類推できるように、サイジングミル入側張力が大きくなるほど幅寸法変動率は減少し、勾配はほぼ直線の関係をとる。また、幅広がり率が最も大きい第 2 スタンドで、勾配が最も大きくなる。これと比較して、幅広がり率が小さい第 3 スタンドでは、前方/後方張力の増加率が第 2 スタンドよりも大きい(図 6)にもかかわらず、寸法変動の勾配は小さくなる。このことは、幅広がり率が小さい圧延モードほど、入側張力が幅広がり率に及ぼす影響が小さいことを意味しており、サイジングミルの利点のひとつに上げられる。

サイジングミル入側張力と第 4 スタンド幅寸法変動量 ($B_{T,put} - B_{0,put}$) の関係を図 8 に示す。上述したように、サイジングスタンドである第 4 スタンドの幅寸法(製品幅寸法)は、幅広がり率が小さいためサイジングミル入側張力の影響を受けにくい、絶対量としては入側張力

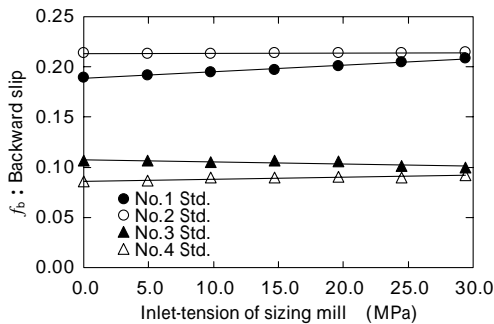


図9 サイジングミル入側張力が各スタンド後進率に及ぼす影響
Fig.9 Influence of inlet-tension of sizing mill on the change of backward slip

30MPaで0.12mm程度となる。実機では、線材後端部がブロックミルを抜けた瞬間に、ブロックミルとサイジングミルとの間に大きな張力減少が発生する場合がある。この張力変動が30MPaに達すると、幅寸法が0.12mm上昇することとなり、一般的に精密圧延材と呼ばれている寸法公差0.10mmと比較して十分大きな値となる。

このことから、サイジングミルの特徴として、製品幅寸法はサイジングミル入側張力を受けにくい圧延モードであるが、線材全長にわたって近年求められている高寸法精度を満足させるためには、ブロックミル-サイジングミル間の張力を制御する必要があることも分かった。

3.2.2 サイジングミル入側張力が後進率に及ぼす影響

サイジングミル入側張力と下記の式(8)で定義する各スタンド後進率 f_b の関係を図9に示す。後進率の定義におけるロール周速については、孔型圧延の場合にはロールバレル方向で変化するため、孔型加工されていないロール直径(フランジ径)での周速をロール周速と定義した。

$$f_b = (V_{Rj} - V_{INj}) / V_{Rj} \dots\dots\dots(8)$$

ここに、 V_{Rj} : i スタンドロール周速

V_{INj} : i スタンド入側材料速度

サイジングミル入側張力が各スタンドでの後進率に及ぼす影響は、第1スタンドで正の相関が見受けられるが、そのほかのスタンドでの変動は小さい。これは、第1スタンド以外の条件においては、式(8)における V_{INj} はサイジングミル内の材料速度であり、マスバランスを満たすための張力の変動に連動して材料速度も変化するためである。

式(8)で定義した後進率と第4スタンドの幅寸法変動

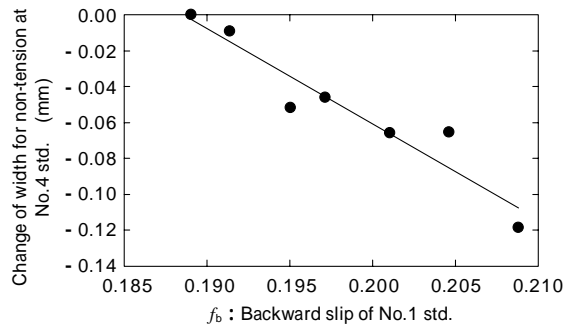


図10 No.1 スタンド後進率と No.4 スタンド幅寸法変動量との関係
Fig.10 Relationship between backward slip of No.1 std. and the change of width at No.4 std.

量との関係を図10に示す。この図より、第1スタンドの後進率と第4スタンド幅寸法変動とは良好な関係となることが分かる。この関係は、サイジングミル入側張力が無張力となるサイジングミルに線材先端が嘔込むまでの材料速度、或いは後端部がブロックミルを抜けてからの材料速度と、張力が負荷されているときの材料速度を測定すれば、その変動率より、ブロックミル-サイジングミル間の張力および最終製品寸法変動が類推できることを表している(参考文献5)および本号 p.18, 線材圧延における張力制御参照)。

むすび= スタンド間張力を考慮した3次元FEMシミュレータを開発し、サイジングミル入側張力と出側形状の関係を明らかにした。また、サイジングミル入側張力とサイジングミル第1スタンドの後進率とが関係することから、上記後進率と出側寸法にも相関があることを理論的に検証した。本結果は、ブロックミル-サイジングミル間の線速測定による寸法制御に活用され、全長にわたる寸法公差 $\pm 0.10\text{mm}$ の高寸法精度の安定圧延に貢献している(本号 p.18, 線材圧延における張力制御参照)。

今後は、ブロックミル-サイジングミル間の水冷による材料温度分布などの外乱を含めた解析により、さらなる高精度圧延技術の確立を行う。

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) 久保木孝ほか: 塑性と加工, Vol.41, No.474 (2000) p.701.
- 3) 豊島史郎ほか: 圧延理論部会理論解析技術検討会最終報告書第3章, (1998) p.35.
- 4) 美坂佳助ほか: 塑性と加工, Vol.8, No.79 (1967) p.414.
- 5) 公開特許: 2004-66263.