

線材連続圧延特性と精密圧延システムの開発

Characteristics of Continuous Wire Rod Rolling and Precision Rolling System

野口 幸雄^{*(1)}

Yukio NOGUCHI

田邊 孝治^{*(5)}

Koji TANABE

大貝 晴俊^{*(2)}

Harutoshi OGAI

吉村 康嗣^{*(6)}

Koji YOSHIMURA

岡村 邦彦^{*(3)}

Kunihiko OKAMURA

樋爪 隆祥^{*(4)}

Takayoshi HIZUME

抄 録

線材精密圧延と材質向上のユーザーニーズは、連続圧延における洗練された寸法・温度制御技術の研究開発を促進した。これらの問題に対応するため、定常状態、非定常状態における張力、高さ、幅、温度、荷重、トルクと影響係数を計算する非線形シミュレーションモデルを開発した。計算結果は実測値とよく一致し、2ブロックミルの材料温度の推定結果を例示した。更にシミュレーションモデルの応用として多変数制御システム、そして精密圧延システム(NTミルAGC)を開発した。

Abstract

The demands of users for closer dimensional tolerances and improved metallurgical properties in wire rod products prompted the research and development of sophisticated dimensional and material temperature control technologies in continuous rolling. To cope with these problems, first, we have developed a nonlinear simulation model for calculating interstand tension, height, width, temperature, load and torque in steady state, transient state and influence coefficient of continuous rolling. The examples of simulation results were in good agreement with the measured values. As an example, material temperature of 2 block mill was simulated using this model. Second, as applications of the simulation model, we have developed multivariable control systems. Third, we have developed a precision rolling system (NT Block Mill Automatic Gauge Control).

1. 緒言

近年、線材・棒鋼ユーザーでは二次加工における引抜き・ピーリング工程の省略が可能な精密圧延材、鍛造工程における歩留り向上等を目的とした注文サイズの細分化(従来1mm毎→将来0.1mm毎)及び熱処理の短縮、省略が可能な材質造り込み、更に納期短縮を実現するフリーサイズ圧延等のニーズが高まっている。

精密圧延を実現する方法として、(1)ミルハードウェアによる方法と、(2)既設2ロールミルに圧下装置と制御システムを付加する方法がある。前者の方法の実機適用例として、軽圧下圧延により幅広がり非常に小さくした3ロールミル^{1,2)}、4ロールミル³⁾及び軽圧下圧延により幅広がりを小さくした2ロールサイジングミル⁴⁾が報告されている。後者の方法として、線材の寸法制御技術に関してはブロックミルの影響係数の解析^{5,6)}、2ストランド圧延の無張力制御⁷⁾、

及び中間ミルのセットアップ⁸⁾等が報告されている。仕上げブロックミルについては、従来、手動圧下操作で寸法調整をしていたため、寸法公差 $\pm 0.1\text{mm}$ の精密圧延は困難であった。

一方、材質造り込み実現には、圧延温度の制御が必要である。

これらの課題に対応するため、筆者らは圧延材の変形、負荷、温度を計算する線材連続圧延のシミュレーションモデル⁹⁾を作成し、圧延特性を検討してきた。次に線形状態方程式を用い、多変数制御理論を応用、拡張してミル形式に対応した多変数制御技術^{10,11)}を開発した。更に、寸法の絶対値制御による精密圧延、調整材の低減、操業の自動化によるLess Downtimeの実現等を目的として、線材仕上げブロックミルの精密圧延システム¹²⁾を実用化した。本論文では、シミュレーションモデルの概要と計算例、ブロックミルの多変数制御技術及び線材精密圧延システムについて述べる。

*⁽¹⁾ プロセス技術研究所 圧延プロセス研究部 主幹研究員 工博
千葉県富津市新富20-1 ☎293-8511 TEL: 0439-80-2193

*⁽²⁾ プロセス技術研究所 計測・制御研究部 主幹研究員 工博

*⁽³⁾ エレクトロニクス・情報通信事業部 金融システムソリューション部
グループリーダー

*⁽⁴⁾ 元室蘭製鐵所 圧延部

*⁽⁵⁾ 室蘭製鐵所 圧延工場 グループリーダー

*⁽⁶⁾ 君津製鐵所 条鋼工場 グループリーダー

2. 線材・棒鋼の単スタンド圧延モデル

2.1 変形・負荷モデル

2.1.1 変形モデル

(1)幅広がりモデル：篠倉の式¹³⁾に筆者らの張力の影響係数を加えた。

(2)先進モデル：斉藤の式¹⁴⁾に張力の影響係数を加えた。

(3)投影接触面積モデル：篠倉の式¹³⁾を用いた。

2.1.2 負荷モデル

(1)変形抵抗モデル：志田の式¹⁵⁾を用いた。

(2)荷重モデル：圧下力関数は斉藤の式¹⁴⁾に張力の影響係数を加えた。

(3)圧延トルクモデル：トルクアーム係数の計算には斉藤の式¹⁴⁾を用いた。

2.2 張力が変形、負荷に及ぼす影響係数¹⁶⁾

熱間連続モデルミルでの実験により、前方張力、後方張力が圧延特性に及ぼす影響係数を求めた。

2.3 温度モデル^{17,18)}

材料形状を同一断面積の円に変換し、半径方向の一次元熱伝導で近似し、断面内一様として加工熱を加工エネルギー(圧延トルク)から求める。ロール形状を材料外周の円筒に近似し、材料とロールの摩擦熱、接触熱伝導、更にスタンド間の水冷(ロール冷却水、強制冷却水)、空冷を計算する。森高らも同様のモデル¹⁹⁾を開発した。

(1)材料形状の変換

材料形状を同一断面積の円に変換し、半径方向の一次元熱伝導方程式を差分法で計算した。スタンド間における境界条件として、形状変換により熱流束が変化しないように表面積の減少分を熱伝達率で補正した。

(2)ロールバイト内の温度計算

ロール形状を材料外周に接触する同心円筒に近似して、与えられた境界条件のもとで円筒座標の熱伝導方程式を後退差分方程式(implicit)に変換して計算した²⁰⁾。

(3)スタンド間の計算

与えられた境界条件のもとで円筒座標の熱伝導方程式を前進差分方程式(explicit)に変換して計算した。

2.4 線材圧延における水噴流冷却の熱伝達率²¹⁾

(1)従来の研究

従来、棒鋼用浸漬冷却管の開発と冷却特性²²⁾等が報告されている。これらは冷却前後の温度の実測値から平均熱伝達率を求めており、線材の熱伝達率の実測値及び鋼板での水噴流冷却²³⁾に記載されている局所熱伝達率と無次元整理式は報告されていない。

(2)本研究の伝熱実験方法

モデルミルのクーリングトラフに設置した実機線材ミル用ノズルを用いて実験を行った。線材をN₂雰囲気電気加熱炉で950℃に加熱し、抽出後、トラフへ運び、冷却管の長手方向の各位置に置いて水噴流により冷却し、線材中心の温度履歴を計測し、その値と計算値が一致するような熱伝達率を算出した。

(3)実験結果

本報では、よどみ点から下流50mmの位置の伝熱実験結果を述べる。代表長さを線材直径、代表速度を冷却管内の水噴流速度、代表温度を60℃の水として、それに対する動粘性係数、熱伝達率を用いてレイノルズ数Re、ヌセルト数Nuを定義した。Re=31 300~

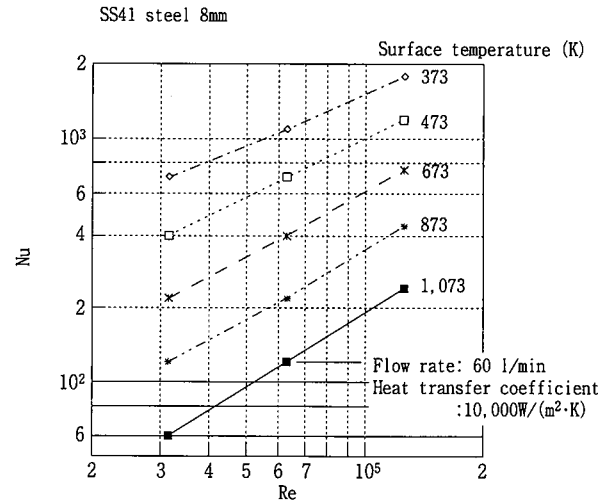


図1 Relation between Re number and Nu number in nozzle of water jet cooling for wire

125 200(ノズル流量30~120 l/min)の場合の各表面温度に対するRe数とNu数の関係を図1に示す。流量が増加するとほぼそれに比例してNuが増加する。Re=62 600の場合の熱伝達率は、表面温度が1 073Kの高温で10 000W/(m²·K)、400Kの常温近くで110 000W/(m²·K)で、鋼板の値²³⁾に比較して同一Re数で2~5倍程度で、棒鋼²²⁾の値以上である。

3. 棒鋼、線材の連続圧延モデル

3.1 定常状態の計算法²⁴⁾

各スタンドの張力、変形、負荷、温度を未知数とする非線形方程式において、張力またはロール回転数を連続の式解法時の未知数として解き、上流スタンドから下流スタンドへ順次計算する。

3.2 非定常状態の計算法²⁵⁾

初期時刻から最終時刻まで、微小時間毎に、スタンド間の材料移送遅れを考慮して張力、その関数として圧延特性を計算する。

3.3 影響係数の計算法⁶⁾

非線形方程式を解いて基準状態とそれから微小変化した状態の圧延特性を求め、2状態間の変化率を計算する。

4. 連続圧延のシミュレーションと実測値との比較⁹⁾

4.1 実機線材ミル定常状態のシミュレーション

材質SWRH62A、素材寸法120mm□、製品寸法5.5mmφ、仕上げ速度60m/sの圧延条件で、圧延荷重の計算値と実測値を図2に示す。計算値の精度は概略良好である。材料温度の計算値と実測値の比較を図3に示す。ロール冷却水の熱伝達率 $\alpha=500\sim1\ 000$ kcal/(m²·h·°C)とほぼ妥当な値に仮定したとき、材料表面温度の計算値は実測値とよく一致した。

4.2 実機線材2ブロックミルのシミュレーション

材質SWRH62A、素材寸法120mm□、製品寸法5.5mmφ、ノーツistroッド仕上げブロックミル(NTM)の出側にNo.2ブロックミル(レジュースイングサイジングミル等)を設置した仕上げ速度120m/sの場合の材料温度の計算値を図4に示す。この場合、強制冷却水の熱伝達率は9 300 W/(m²·K)、冷却長さは、NTM前ではNo.13、No.15出側各々、(水冷長3m+空冷長3m)×2ボックス+空冷長7m、NTM~No.2ブロックミル間では、(水冷長5m+

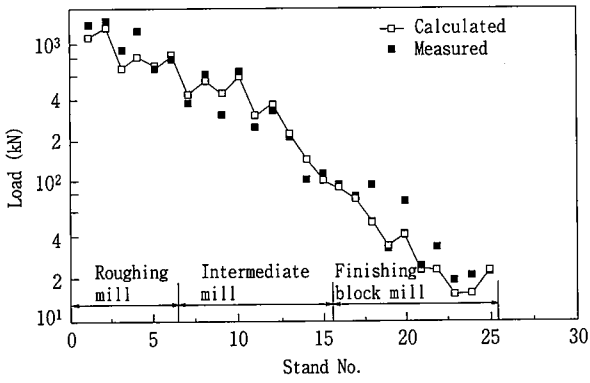


図2 Rolling load of wire rod mill

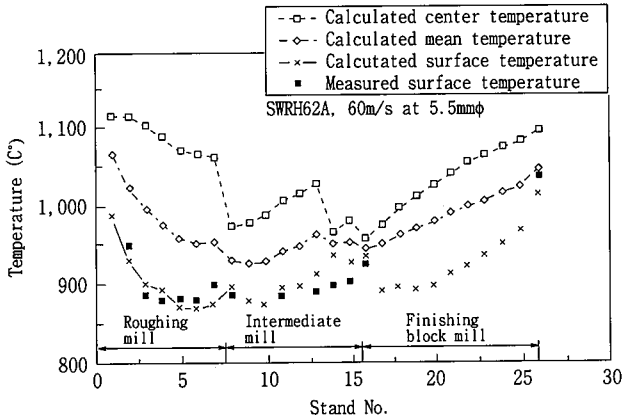


図3 Stock temperature of wire rod mill

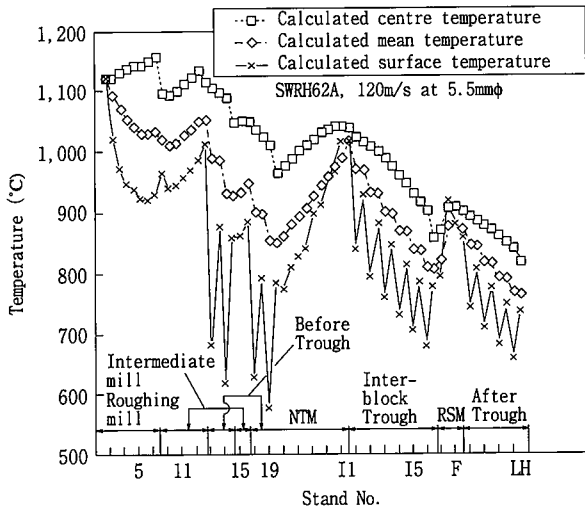


図4 Stock temperature of 2 block mills

空冷長5m)×6ボックス+空冷長10m, No.2ブロックミル出側では、(水冷長5m+空冷長5m)×4ボックス+空冷長5mである。No.2ブロックミル入側材料表面、平均、中心温度は各々、777、804、855°C、出側表面、平均、中心温度は、857、869、900°Cである。

5. 線材仕上げブロックミルの多変数制御

5.1 制御系設計

ミル入側寸法、温度外乱の実測値を用いるフィードフォワード制御+仕上げ寸法の実測値を用いるフィードバック制御の最適制御系を構成し、最適レギュレータ理論を拡張した¹¹⁾。この制御方式を

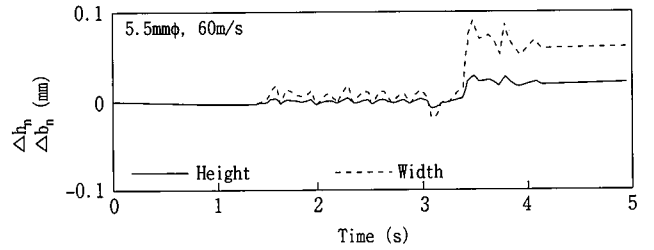


図5 Without control

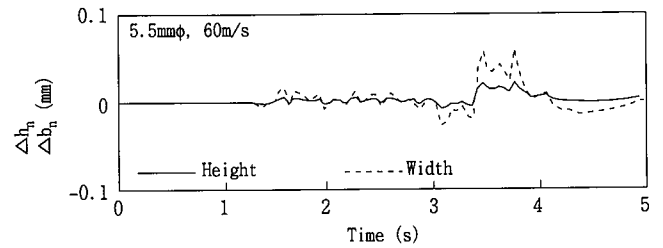


図6 With AGC (sampl. period=0.5s)

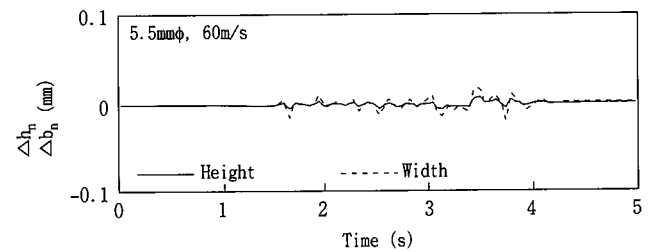


図7 With AGC (sampl. period=0.1s)

Δh_n : Deviation of Height, Δb_n : Deviation of Width

“ブロックミルAGC”と呼ぶ。

5.2 モデルミル実験結果¹¹⁾

熱間モデルミル(実験ミル)で“ブロックミルAGC”の実験により、直径がステップ状に変化する素材外乱に対して、仕上げ高さ(圧下方向の直径)、仕上げ幅(圧下と直角方向の直径)が短い整定時間で制御されていることを検証した。

5.3 実機4ストランドミルのシミュレーション

実機線材仕上げブロックミル入側の寸法実測値を用いて、“ブロックミルAGC”のシミュレーションを材質H72B、仕上寸法5.5mmφ、仕上速度60m/sの条件で検討した。

(1)制御なしの場合

応答を図5に示す。

(2)制御ありの場合

制御周期0.1sで寸法測定周期0.5s、寸法測定周期0.1sの場合の応答を各々、図6、7に示す。寸法測定周期0.5sでは寸法精度±0.05mmに制御され、0.1sではより高寸法精度の圧延が期待される。

6. 実機仕上げブロックミルの精密圧延システム¹²⁾

室蘭製鐵所線材ミル(1ストランド)において、圧下装置と多変数制御技術から構成される精密圧延システムが実用化された。

6.1 圧下制御設備

圧下制御装置を図8に示す。本装置は油圧モータで駆動され、ブリロードばねで遊び、バックラッシュを低減している。

6.2 制御システム

制御システムを図9に示す。本システムは、圧下装置、入側・出

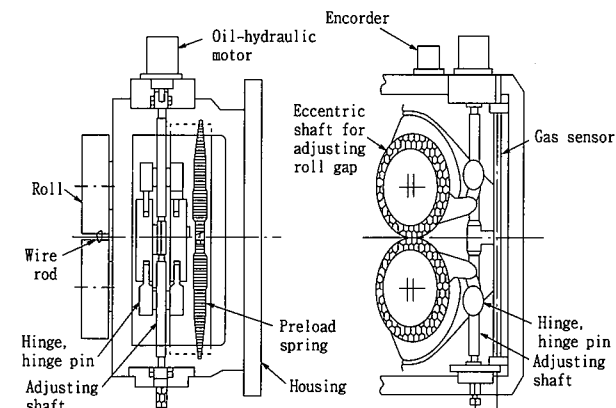


図8 Schematic drawing of the specially designed No-Twist rod finishing mill housing for AGC

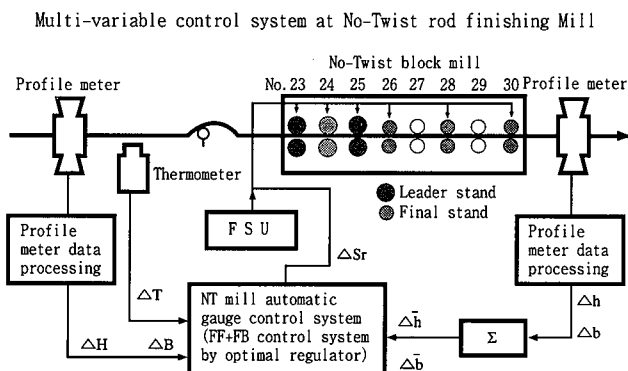


図9 室蘭製鐵所のブロックミルAGC制御システム

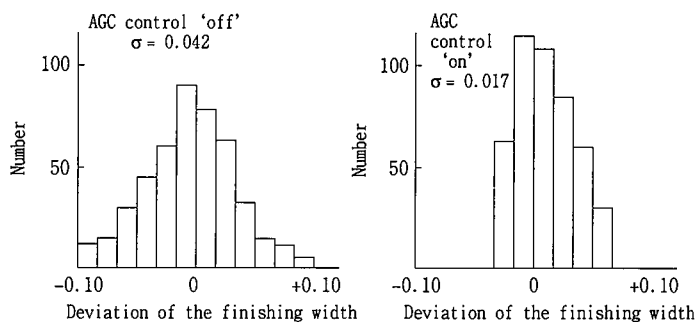


図10 ブロックミルAGCの影響(18mm径線材)

側プロフィールメータ、入側温度計、プロセスコンピュータから構成される。プロセスコンピュータの制御システムは、ブロックミルAGC(ピレット内制御)と仕上げセットアップ(FSU、ピレット間制御)から構成される。

6.3 制御結果

材質S45C、仕上寸法18mmφ、仕上圧延速度16.7m/sでの制御結果を図10に示す。ブロックミルAGCにより仕上げ幅の変動が低減され、寸法公差±0.1mmが実現された。

7. 結論

線材連続圧延の研究と精密圧延技術に取り組み、以下の技術を開発した。

- (1)線材連続圧延の変形、負荷、温度を効率的に計算するシミュレーションモデルを開発した。実機線材ミルの計算値と実測値を比較し、モデルの妥当性を確認した。
- (2)モデルミルのクーリングトラフで、実機ノズルの冷却水の熱伝達率を測定し、伝熱性能が優れていることを確認した。
- (3)新ミルの計算例として、2ブロックミルの圧延条件と材料温度の関係を推定した。
- (4)ブロックミルの仕上げ高さ・幅の多変数制御技術(ブロックミルAGC)を開発し、モデルミルの実験と実機ミルのシミュレーションによりその有効性を検証した。
- (5)圧下制御装置とブロックミルAGCによる線材精密圧延システムが実用化され、寸法精度±0.1mmの安定した精密圧延、寸法調整本数の低減、ダウンタイムの低減、圧延の自動化、オペレータの熟練度への依存が少ない操業等が達成された。

謝辞

AGC制御用のNTミルハウジングの設計製作に関する住友重材機工業とモルガンコンストラクションカンパニーの協力で謝辞を表します。

参考文献

- 1) 大岩, 川上: 第139回塑性加工シンポジウム, 1991, p.23
- 2) 小坂: 材料とプロセス, 2(5), 1561(1989)
- 3) 平木, 稲見, 鈴木, 越智, 賀本: 1992年度塑加春講論, p.335
- 4) 佐々木, 稲盛, 小林, 山口: 鉄と鋼, 79(3), 417(1993)
- 5) 黒川, 山川: 塑性と加工, 22(242), 264(1981)
- 6) 野口, 青柳, 川並, 中島: 1982年度塑加連講論, p.159
- 7) 池田, 下岡, 押方, 江連, 関, 小堀: 1982年度塑加連講論, p.155
- 8) 上野, 萩原, 山口, 中野, 岡庭, 野口: 鉄と鋼, 73(12), S1114(1987)
- 9) 野口, 青柳, 川並, 阿高, 中島, Advanced Tech. of Plasticity, 2, 1212(1984)
- 10) 野口, 岡村, 大貝, 川並, 永沼: 機論, 55-510C, 349(1989)
- 11) 野口, 岡村, 大貝, 川並, 1987年度塑加春講論, p.143
- 12) 高橋 ほか7名: 材料とプロセス, 8(2), 440(1995)
- 13) 篠倉, 高井: 鉄と鋼, 67(15), 2477(1981)
- 14) 斉藤, 高橋, 加藤: 鉄と鋼, 64(2), 250(1978)
- 15) 志田: 塑性と加工, 10(103), 610(1969)
- 16) 野口, 青柳, 川並: 第36回塑加連講論, 1985, p.45
- 17) 野口, 阿高, 青柳, 中島, 大賀: 第31回塑加連講論, 1980, p.395
- 18) 野口, 青柳, 川並: 第34回塑加連講論, 1983, p.169
- 19) 山口, 高塚, 森高: 神戸製鋼技報, 35(2), 32(1985)
- 20) 浜渦, 菊間, 中島, 細見: 1980年度塑加春講論, p.53
- 21) 野口: 日本機械学会第73期講論, 3, 35(1995)
- 22) 森高, 高塚, 平賀, 前田: 鉄と鋼講論, 71, S350(1985)
- 23) 国岡, 平田, 杉山, 神尾: 機論, 45(390), 279(1979)
- 24) 野口, 青柳, 中島, 川並, 阿高: 昭和57年度塑加春講論, 1982, p.97
- 25) 野口, 青柳, 中島, 阿高: 第32回塑加連講論, 1981, p.29