

福山 4SKP におけるインテリジェント多変数最適制御技術の開発

Development of Intelligent Multivariable Optimal Control for No. 4 Skin Pass Mill in Fukuyama District, West Japan Works

小笠原知義 OGASAHARA Tomoyoshi JFE スチール スチール研究所 計測制御研究部 主任研究員 (副課長)
館野 純一 TATENEO Junichi JFE スチール スチール研究所 機械研究部長 (理事)・博士 (工学)
浅野 一哉 ASANO Kazuya JFE テクノリサーチ 経営企画部 フェロー・博士 (工学)

要旨

JFE スチールは、熱延黒皮材のさらなる品質向上のため、西日本製鉄所福山地区に熱延スキンパスミル (以下、4SKP) を建設した。4SKP 新設にあたり、鋼板の形状、伸び率及び蛇行量等の各種制御量を高速圧延下で同時に制御する多変数最適制御技術 (本稿では、“インテリジェント多変数制御”と呼ぶ) を開発した。開発手法は、前工程である熱延工程の操業データと伸び率管理範囲の活用による制御性向上を特徴とする。本技術により、熱延スキンパスミルとしては世界最速となる 800 m/min で各種制御量を高精度に自動制御することが可能となり、製品品質の向上とともに生産能率向上に寄与している。

Abstract:

To enhance the quality of hot coils, JFE Steel Corp., constructed No. 4 skin pass mill (4SKP) in Fukuyama district, West Japan Works in 2015. Together with the construction of the mill, we developed intelligent multivariable optimal control of the flatness, elongation and walking of the strip during high speed rolling. The characteristic of this control is to utilize the operational data of the hot strip mill and control range of the elongation of the strip by improving the control performance. Application of this automatic control technology has improved the quality of the products at the mill speed of 800 m/min, which is the world fastest in hot skin pass rolling. As a result, we have achieved high productivity in 4SKP.

1. はじめに


JFE スチールでは、お客様からの熱延黒皮材のさらなる品質向上に対するご要望にお応えするため、2015 年に西日本製鉄所福山地区に熱延スキンパスミル (以下、4SKP) を建設し、営業運転を開始した。4SKP 新設にあたり、IT 技術を活用した最適化・シミュレーション技術と各種センサーデータの融合による“Cyber Physical System”のコンセプト¹⁾にもとづき、操業上の指標である形状及び伸び率、板厚、蛇行量といった各種制御量の最適制御技術を開発した。本技術は、前工程である熱延工程の操業データと伸び率管理範囲の活用による制御性向上という従来にない特徴を有することから、これを“インテリジェント多変数制御”と命名した。そして、この技術の適用により、熱延スキンパスミルとしては世界最速となる 800 m/min で高精度に自動制御することが可能となり、品質の向上とともに生産能率向上に寄与している。本稿では、スキンパスミルの概要を述べた後、開発

した技術について紹介し、数値例と実機実験により、その有効性を示す。

2. スキンパスミルの概要

2.1 スキンパスの役割と 4SKP

スキンパスミルは、製品品質を造り込む重要な圧延設備であり、鋼板の形状を改善する役割と、降伏点伸びの解消及び材料硬度といった材料の機械的性質を調整する役割を持つ。これらの役割は、ワークロールベンダ力、レベリング量 (片压下位置)、圧延荷重 (両压下位置)、圧延機前後の鋼板張力の調整により実現される。

4SKP は、 1 に示すように、上下に配置されたワークロールとバックアップロールで構成され、インクリースベンダとデクリースベンダを有する 4Hi タイプの独立式スキンパスミルを採用している。形状計や板厚計、板幅計を具備することで、各種制御量 (形状、伸び率、板厚、蛇行量) の管理及び制御に活用している。

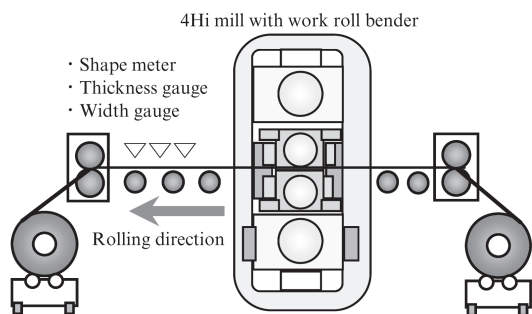


図1 調質圧延機
Fig. 1 Skin Pass Mill

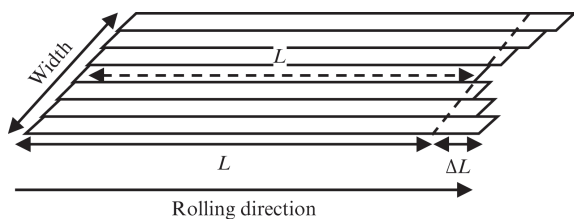


図2 鋼板の平坦度
Fig. 2 Flatness of the strip

2.2 操業指標

鋼板に対する操業指標は、鋼板の形状を表す伸び差率と機械的性質の決定因子である伸び率である。

伸び差率は、圧延方向の伸びの幅方向における不均一性を表す。これは、幅中央位置の圧延方向の伸び (L) を基準としたときの、幅中央位置以外の任意の幅位置における伸びと幅中央位置の伸びとの差 (ΔL) との比率 ($\Delta L/L$) で定義される (図2)。この伸び差率に 10^5 を掛けた値 ($\Delta L/L \times 10^5$) は、Iunit という単位として、一般的に品質管理や形状制御に使用される。形状不良の代表的な形態に耳伸びや腹伸びがある。耳伸びは、伸び差率の板幅方向分布が凸形状であり、腹伸びは、伸び差率の板幅方向分布が凹形状となる。また、その他の形状不良としては、伸び差率の板幅方向分布がW形やM形を呈する、複合伸びと呼ばれる形態がある。これらの全ての形状の形態は、伸び差率の板幅方向分布により、把握することが可能であるが、形状を構成するモード成分やその大きさの定量的評価には、伸び差率の板幅方向分布を正規直交関数の一次結合で近似する必要がある²⁾。

伸び率 (e) は、鋼板の入側速度 (V_1) と出側速度 (V_2) を使用して次に示す(1)式で定義され、その単位は%である。圧延材毎に達成すべき機械的性質の観点から、その目標値や管理範囲、コイル内変動の許容範囲等が規定される。なお、熱延スキンプラスでは一般的に 0.5%~2.0%程度の範囲に設定されることが多い。

$$e = \frac{V_2 - V_1}{V_1} \times 100 \dots\dots\dots (1)$$

その他の操業指標として、圧延中の鋼板とミル中心位置のずれである蛇行量があり、通板トラブル抑止のためには、これを最小化する必要がある。

3. インテリジェント多変数制御

2.2節で示したように、スキンプラスでは、複数の制御量が存在する。開発手法は、これらを制御するための3つの制御機能 (①熱延工程の操業実績情報を用いた高精度形状予測モデルに基づくアクチュエータの設定計算, ②形状と伸び率の最適フィードバック・フィードフォワード制御, ③最適蛇行制御) からなる。これらのうち、①及び②の制御機能で、必要とされる形状と伸び率を達成する。本稿では、これらの機能のうち、②のフィードバック・フィードフォワード制御を紹介する。

3.1 従来手法とその課題

一般的に形状を制御するための操作量は、レベリング量とワークロールベンダ力であり、伸び率を制御するための操作量は、圧延荷重と圧延機前後 (入側/出側) の鋼板張力である。形状制御の従来手法³⁾には、形状実績値に基づくフィードバック制御がある。これは、制御周期毎に形状計の出力 (板幅位置に対応した N チャンネル) から、形状の対称成分を表す指標 (A_1 と A_3) と非対称成分を表す指標 (A_2 と A_4) からなる形状指標を計算し、レベリング量とワークロールベンダ力の変化量に対する形状指標 (A_1, A_2, A_3, A_4) の変化量を表す影響係数に基づき、形状指標が目標値となるようにレベリング量とワークロールベンダ力を設定するものである。

伸び率制御の従来手法には、圧延機前後の速度から計算される伸び率を、荷重の調整により鋼板全長で一定の目標値に制御するフィードバック制御⁴⁾及びダイナミックセットアップ制御⁵⁾がある。フィードバック制御は、伸び率の実績値と目標値の制御偏差を最小化するように荷重をPID制御等で調整するものであり、ダイナミックセットアップ制御は、初期設定荷重の誤差に起因する伸び率の不合格長さを短縮化するために、初期の荷重、压下位置、伸び率の各実績から圧延材の塑性係数と入側厚を逐次推定し、伸び率目標値となるように荷重指令値を修正する手法である。

これらの従来手法^{3,5)}は、図3に示すように、個別の制御器で構成される。この構成では、伸び率制御による圧延荷重操作及び張力操作がロールたわみ状態に影響を与え、それが形状に影響するという干渉が生じ、その結果、達成可能な形状が制限されてしまうという課題がある。干渉の一例として、圧延荷重の変化量 (ΔP) に対する形状の変化量 (ΔF)

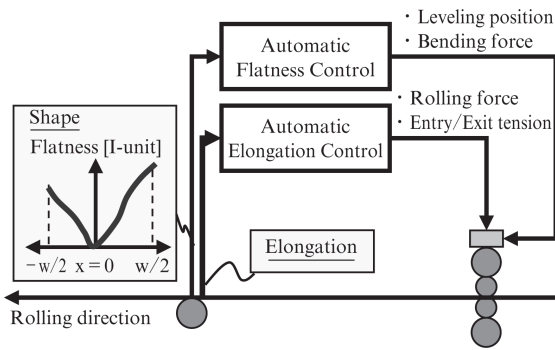


図3 一般的な制御システムの構成

Fig. 3 System configuration of the conventional control

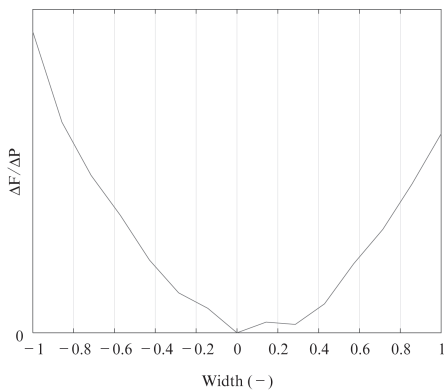


図4 圧延荷重の変化量 ΔP に対する形状の変化量 ΔF

Fig. 4 Influence coefficient ($\Delta F/\Delta P$)

を表す影響係数 ($\Delta F/\Delta P$) の実績値を図4に示す。ここで、板幅位置は、-1 から+1 の範囲で正規化している。この影響係数の板幅方向分布から、圧延荷重を上昇させるとエッジ部の伸び差率が大きくなり、耳伸び側に形状は変化する。

3.2 提案手法

圧延材毎に、伸び率の目標値や管理範囲（上限値と下限値に挟まれる範囲）等が規定されているが、伸び率が管理範囲を満たせば、目標値と厳密に一致していなくても品質が確保できる圧延材も存在する。従来法では、伸び率を一定の目標値に制御しようとする事により、形状との干渉が問題となったが、制御すべき伸び率を、管理範囲に緩和できるならば、一般的に伸び率制御に用いられているアクチュエータである圧延荷重や圧延機前後の鋼板張力を形状への影響を考慮して設定することができ、形状との干渉は最小化できると考えられる。そこで、本稿では、伸び率の管理範囲の活用により、形状制御と伸び率制御の干渉を最小化し、形状の制御性を向上させる制御手法を提案する。

制御対象は、操作量（入力）がワークロールベンダ力、レベリング量、圧延荷重、圧延機入側の鋼板張力、圧延機出側の鋼板張力の5変数であり、制御量（出力）が形状（板幅位置に対応したNチャンネル）と伸び率のN+1変数か

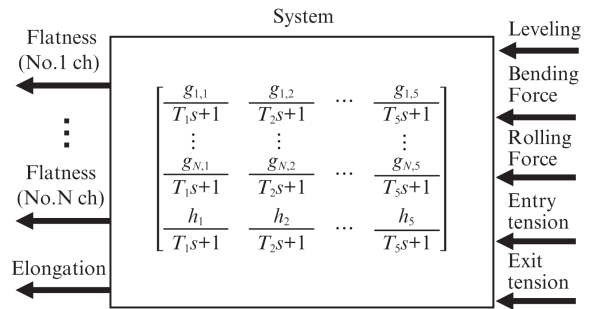


図5 制御対象の伝達関数行列

Fig. 5 Transfer function matrix of the system

らなる多入出力系である。これまでに、多入出力系に対する制御手法は研究開発されているが、本提案手法は、制約条件下での最適制御手法であるモデル予測制御⁶⁾を参考にしたものである。

まず、制御対象を、図5に示すように一次遅れの伝達関数を要素に持つ伝達係数行列でモデル化する。ここで、図中の変数の T_i ($i=1, 2, \dots, 5$) は時定数であり、 $g_{i,j}$ ($i=1, 2, \dots, 5, j=1, 2, \dots, N$) は形状に対するゲイン、 h_i ($i=1, 2, \dots, 5$) は伸び率に対するゲインである。ここで、変数 i ($1 \leq i \leq 5$) は昇順にレベリング量、ベンダ力、圧延荷重、入側張力、出側張力を指している。なお、 s はラプラス演算子である。この制御対象に対する制御周期を制御対象の動特性に対して十分に長くとり、制御周期内で制御入力が一一定値とすると、制御周期終端でのシステムの出力は、制御入力に上記ゲインを掛けた値とみなせる。したがって、この場合、制御入力とゲインを用いて、形状と伸び率を予測することが可能となる。これを形状予測モデル及び伸び率予測モデルとして以降の計算に用いる。

提案手法では、制御周期毎に、後述する制約条件下で形状の評価値と伸び率の評価値からなる評価関数 f (式(2)) を最小化する最適化問題を解き、制御入力を求める。

$$f = \sum_{i=1}^N q(i)(r(i) - y(i))^2 + q(N+1)(r(N+1) - y(N+1))^2 \quad \dots (2)$$

ここで、 $r(i)$, $i=1, 2, \dots, N$ は板幅位置に対応した形状目標値、 $r(N+1)$ は伸び率目標値、 $y(i)$, $i=1, 2, \dots, N$ は板幅位置に対応した形状予測値、 $y(N+1)$ は伸び率予測値である。そして、 $q(i)$, $i=1, 2, \dots, N$ は、板幅位置に対応した形状に対する重み、 $q(N+1)$ は、伸び率に対する重みであり、両者ともに0以上の値に設定する調整パラメータである。

この最適化問題の制約条件を以下とすることで、各種操業制約の逸脱を回避する。

- アクチュエータの動作範囲（上限値と下限値）
- アクチュエータの動作速度範囲（上限値と下限値）
- 板厚の公差上限値と下限値
- 伸び率の管理範囲（上限値と下限値）

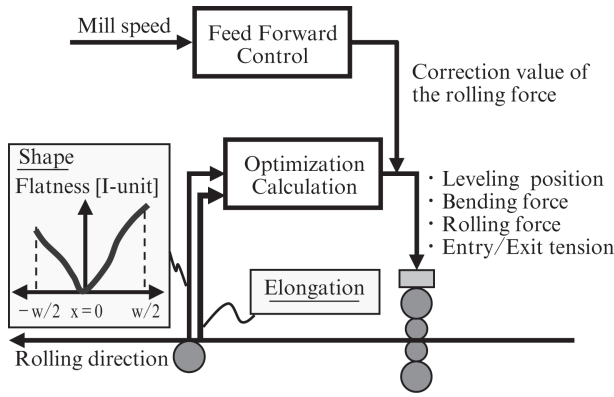


図 6 提案する制御システム
Fig. 6 Proposed control system

- ・形状予測モデル
- ・伸び率予測モデル

最後に、この最適計算結果を圧延機の制御システムに指令することで、各種操業制約下で形状と伸び率を同時に制御するフィードバック制御を実現する。なお、本制御の評価関数中の重みは、2つの制御量（形状と伸び率）の単位系の違いによる制御性への影響除去と形状と伸び率の制御上の優先度を決定する役割を持つ。伸び率を一定の目標値に制御する必要のある圧延材に対しては、 $q(N+1)$ を大きい数字に設定し、伸び率目標値は重要ではなく、管理範囲のみを満たす必要のある圧延材に対しては、 $q(N+1)$ を 0 以上の小さい値に設定することで、伸び率制御の方法を選択することが可能となっている。

実操業でのミル速度は、初期通板速度域（低速）、初期通板速度域からトップ速度域（高速）までの加速域、トップ速度域、トップ速度域から尾端速度域（低速）までの減速域、尾端速度域の順に遷移する。加速域と減速域では、鋼板変形抵抗の歪速度依存性により、ミル出側の板厚が時間的に変化するため、伸び率が変動する。そこで、この変動を抑制するために、伸び率変動の要因である圧延速度と加速率と鋼板変形抵抗の歪速度依存性の関係性を用いて、圧延荷重指令値を修正するフィードフォワード制御を開発した。

図 6 に示すように前記フィードバック制御とフィードフォワード制御を組み合わせることで、加減速量の大きい高速圧延においても形状と伸び率変動を適切に制御することが可能となっている。

4. シミュレーションによる形状制御性向上の検証

本章では、シミュレーションにより、提案法の形状制御性向上効果を検証する。効果検証のために、従来法との比較をおこなうが、両手法で操業条件（形状目標値、伸び率目標値、アクチュエータの動作範囲と動作速度範囲、板厚上

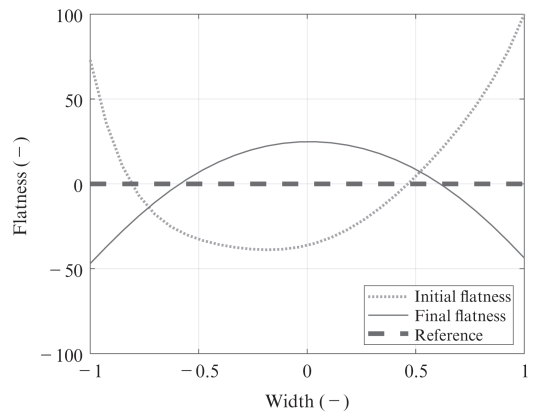


図 7 従来手法による形状制御結果（シミュレーション）
Fig. 7 Simulation results of the flatness by the conventional method

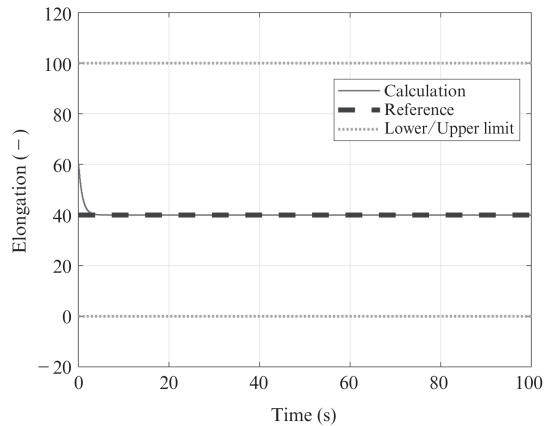


図 8 従来手法による伸び率制御結果（シミュレーション）
Fig. 8 Simulation results of the elongation by the conventional method

下限値、伸び率の管理範囲、圧延速度）は同じとする。ただし、従来法では、伸び率制御器によって、伸び率実績値が目標値となるように制御するのに対して、提案法では、伸び率目標値への追従性は求めないため、評価関数 f に含まれる伸び率目標値に対する重みを小さく設定し、管理範囲内に収まるように制御する点が異なる。また、使用する制御対象モデルのパラメータ（ゲイン及び時定数）の値は、事前の実験により同定した。

従来法と提案法の形状制御結果をそれぞれ図 7 と図 9 に示す。ここで、図の横軸は板幅位置（正規化済）を表し、縦軸は、形状（規格化済）を表す。図中の凡例の“Initial Flatness”は鋼板先端部の圧延後の形状、“Final Flatness”は鋼板尾端部の圧延後の形状、“Reference”は目標形状をそれぞれ表す。そして、従来法と提案法の伸び率制御結果を、図 8 と図 10 に示す。ここで、図の横軸の単位は時間であり、縦軸は、伸び率（規格化済）を表す。図中の凡例の“Calculation”はシミュレーション結果、“Reference”は目標値、“Upper/Lower Limit”は管理範囲の上下限値を表す。

形状制御結果（図 7 と図 9）を比較すると、提案法の方が

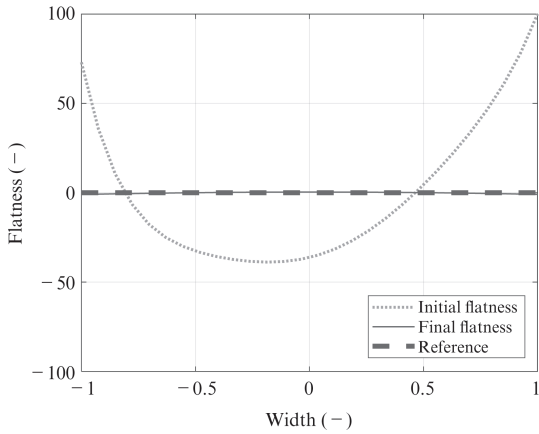


図 9 提案手法による形状制御結果 (シミュレーション)
Fig. 9 Simulation results of the flatness by the proposed method

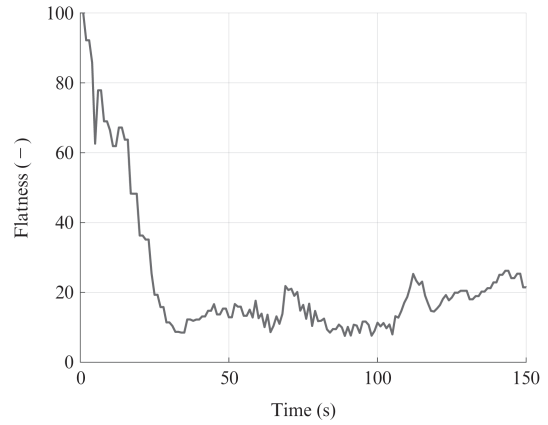


図 11 形状制御結果 (実験)
Fig. 11 Experimental results of the flatness

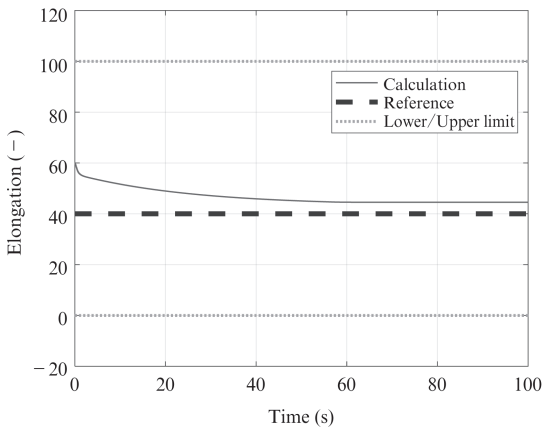


図 10 提案手法による伸び率制御結果 (シミュレーション)
Fig. 10 Simulation results of the elongation by the proposed method

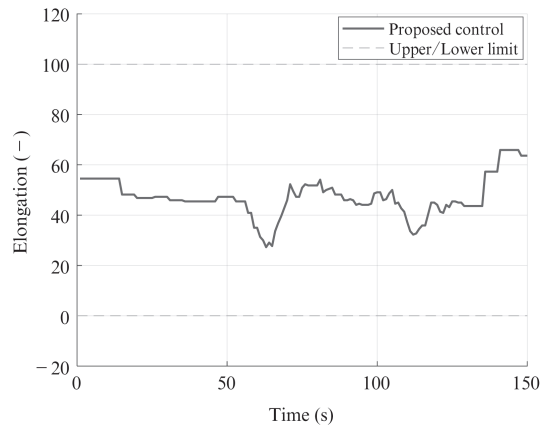


図 12 伸び率制御結果 (実験)
Fig. 12 Experimental results of the elongation

目標形状付近に制御できている。このとき、伸び率制御結果 (図 8 と図 10) を比較すると、従来法では、伸び率を目標値に制御しているのに対し、提案法では、管理範囲内ではあるが目標値とは異なる値に制御している。

提案法では、形状への影響を考慮して伸び率制御をおこなうため、形状との干渉を最小化できる。本シミュレーションでは、形状の制御性向上効果が確認できた。

5. 実機実験による検証

提案手法の有効性を実機実験により検証する。本実験で設定する形状目標値は、すべての幅位置で 0 (I-unit) とする。

実験結果である図 11, 図 12, 図 13 は、それぞれ形状, 伸び率, 圧延速度を示している。ここで、これらの図の横軸の単位は時間であり、縦軸はそれぞれの物理量を固定パラメータで規格化したものである。このうち、形状は、制御周期毎に得られる N チャンネルの実績値のうちの最大値を規格化している。図 11 に示すように、形状実績値は形状目標

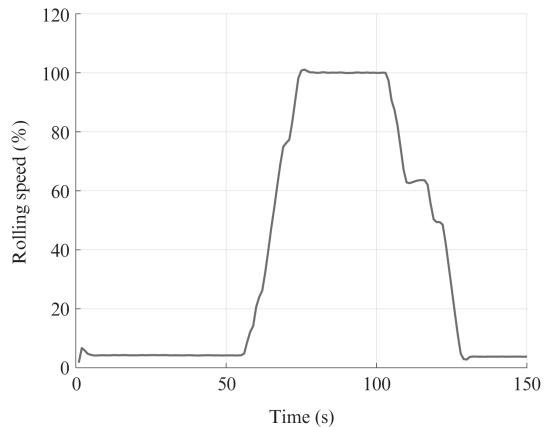


図 13 圧延速度 (実験)
Fig. 13 Experimental results of the rolling speed

値に近づいていることから、形状の改善に有効であることが分かる。また、図 12 の伸び率実績値は、管理範囲内に収まっているため、圧延材の品質は良好である。

続いて、フィードフォワード制御の有効性を検証する。本制御はミル速度変更時の伸び率変動を低減する目的がある

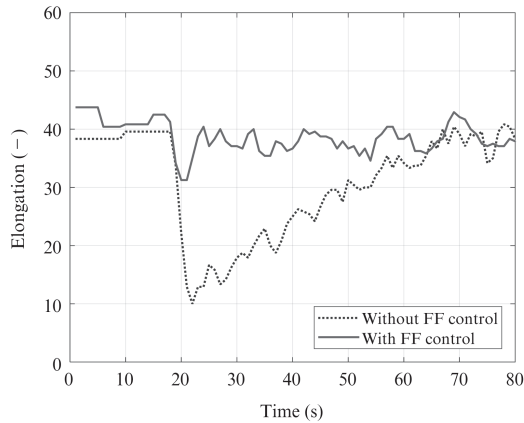


図 14 伸び率制御結果 (FF 制御の実機検証)

Fig. 14 Experimental results of the elongation (For validation of the FF control)

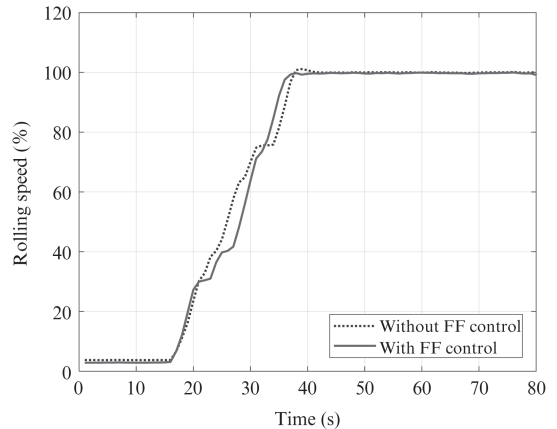


図 16 圧延速度 (FF 制御の実機検証)

Fig. 16 Experimental results of the rolling speed (For validation of the FF control)

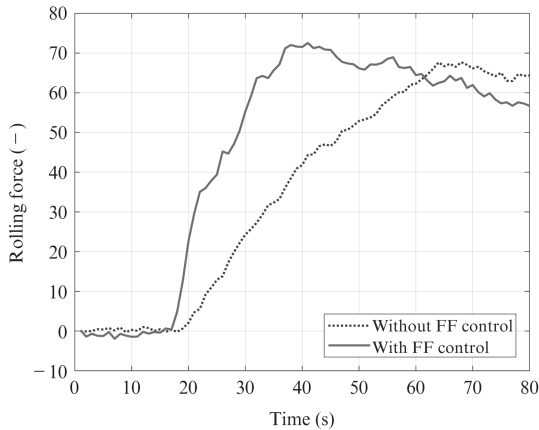


図 15 圧延荷重制御結果 (FF 制御の実機検証)

Fig. 15 Experimental results of the rolling force (For validation of the FF control)

ため、加速時という操業条件下で、フィードフォワード制御機能の有無で制御結果を比較する。制御結果である **図 14**、**図 15**、**図 16** は、それぞれ伸び率、荷重操作量及び圧延速度を示している。ここで凡例の“Without FF Control”と“With FF Control”は、それぞれフィードフォワード制御機能を無効にした場合と有効にした場合に対応している。フィードフォワード制御無効の場合では、加速時に伸び率が大きく低下している。これは、フィードバック制御のみでは、圧延荷重の修正動作が遅いためである。これに対して、フィードフォワード制御機能を有効にした場合では、圧延荷重の修正が迅速に行われており、伸び率変動が小さい。したがって、本制御の適用により、圧延速度変更時の伸び率変動を小さくできる。

次に、多数の自社他ミル材と 4SKP 材で圧延後の形状を比較した。その結果、自社他ミル材の形状（伸び差率の長

手方向平均値）を基準として、4SKP 材では 48%の形状改善効果を確認した。

6. おわりに

JFE スチールでは、熱延黒皮材の品質のさらなる向上のため、福山地区に 4SKP を新設した。そこで開発した各種制御量を高速圧延下で高精度に制御する多変数制御技術（インテリジェント多変数制御）の有効性をシミュレーションと実機実験により検証した。

本開発手法の適用により、熱延スキンパスミルとしては、世界最速で各種制御量を高精度に自動制御することが可能となり、品質の向上とともに生産能率向上に寄与している。

参考文献

- 1) Jeannette. M. W. Computing Research News. 2009, vol. 21, no. 1, p. 4.
- 2) 板圧延の理論と実際（改訂版）。日本鉄鋼協会圧延理論部会編。日本鉄鋼協会、2010, p. 310.
- 3) 板圧延の理論と実際（改訂版）。日本鉄鋼協会圧延理論部会編。日本鉄鋼協会、2010, p. 308.
- 4) 佐々木徹, 岸田朗, 小田島昭夫. 川鉄技報. JFE スチール株式会社, 1971, vol. 3, no. 1, p. 10.
- 5) 空尾謙嗣, 上之俊昭. CAMP ISIJ. 2005, vol. 18, p. 329.
- 6) モデル予測制御 制約のもとでの最適制御. 東京電機大学出版局, 2005.



小笠原知義



館野 純一



浅野 一哉