

熱間薄板圧延における鋼板蛇行制御技術

Strip Walking Control Technology in Hot Strip Rolling

鷺北 芳郎*
Yoshiro WASHIKITA伊勢居 良仁
Yoshito ISEI武衛 康彦
Yasuhiko BUEI相原 康宏
Yasuhiro AIHARA竹田 真琴
Makoto TAKEDA

抄 録

熱間薄板の仕上圧延において、鋼板尾端部が圧延機を抜ける際に蛇行し、絞り込みと呼ばれるトラブルが生じることがある。特に、薄物材や高張度材などの難圧延材では発生頻度が高く、生産性の阻害要因になっていた。この課題を解決するため、圧延スタンド間の悪環境下でも高精度に安定測定できるコンパクトな蛇行計を開発するとともに、その測定値にモデル予測制御理論を適用して最適なレベリング操作量を決定する方式の蛇行制御技術を開発した。本方式の蛇行制御を適用することにより、絞り込みトラブルの発生率を従来の22%に低減した。

Abstract

In the hot strip finish rolling, the strip sometimes walks and results in a trouble when the strip tail end comes out of the mill. In particular, the frequency of occurrence in a thin or high-tensile steel rolling is relatively high and had become a impediment to productivity. In order to solve this problem, we developed a compact and highly accurate sensor that can be installed between the tandem rolling stands and a control method based on the model predictive control theory to optimize the leveling manipulation by using the measured strip position. This control system reduced the incidence of the trouble to 22% compared to the one before applied.

1. 緒 言

熱間薄板仕上圧延において、鋼板尾端部が圧延機を抜ける際に蛇行して圧延機入側の鋼板ガイドと接触し、座屈して折れ込んだ状態になって圧延される絞り込みと呼ばれるトラブルが発生することがある(写真1)。絞り込みが発生すると、疵ついた圧延ロールで圧延された鋼板が不良品となるだけでなく、予定外のロール交換による生産休止が必要となり、生産性を著しく阻害する。近年の薄厚化や高張度化は、圧延荷重が高く、蛇行が生じ易い圧延条件になるため、蛇行の抑制技術の開発は大きな課題であった。

従来の蛇行制御としては、鋼板が蛇行した側の荷重と反対側の荷重の差(以下、荷重差という)を検出して圧下レベリングにフィードバックする差荷重方式が用いられていた¹⁾⁴⁾。しかし、差荷重方式では、蛇行を生じる原因が圧延前のウェッジ(幅方向の板厚の非対称性)である場合、蛇行と差荷重の極性にアンマッチが生じ、とるべき方向と逆方向のレベリング操作をしてしまう⁵⁾。また、板幅が広く

なるほど、適正な制御ゲインの設定範囲が極端に狭くなり、実機適用上の安定余裕を考慮した制御ゲインでは制御効果が極端に減少するという問題があった⁶⁾。

そこで、仕上スタンド間の悪環境下でも高精度測定が可能な蛇行計を開発し、熱間薄板仕上圧延への適用を可能にした。また、鋼板が回転しながら並進しているため、蛇行計の蛇行量検出値が、制御量である圧延機位置の蛇行量と

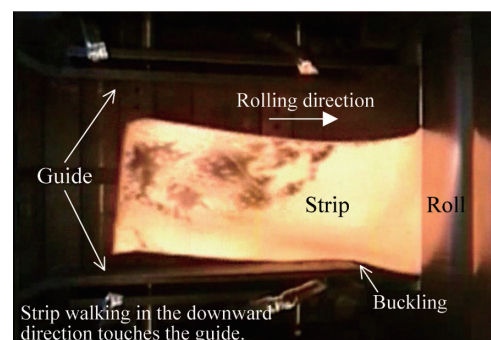


写真1 実験設備における鋼板の蛇行
Strip walking in experimental equipment

異なるという問題を解決するため、モデルを用いて制御量の未来値を予測する機能を有するモデル予測制御理論を適用し、レベリング操作量を最適化する制御方法を考案した。

本稿では、これらの新日鐵住金(株)が独自に開発した熱間薄板圧延における鋼板蛇行制御技術について述べる。

2. スタンド間蛇行計⁶⁾

2.1 スタンド間蛇行計の概要

蛇行計は、高速な2次元 CCD カメラで赤熱する高温の鋼板の画像を撮影し、画像処理により鋼板のエッジ位置を認識して蛇行量を算出する。

図1に蛇行計の装置構成を示す。使用した CCD カメラの解像度は、幅方向 767 画素×長手方向 580 画素、幅方向分解能は約 2.5mm/画素であり、この画像を高速に処理することにより 12ms 毎に蛇行測定値を出力する。また、鋼板温度が変化しても鋼板端部が鮮明に写るように、CCD カメラの感度は、仕上圧延温度に応じて自動的に変更する機構を設けた。また、各 CCD カメラは、粉塵防止および冷却機能を備えた環境箱内に収納されており、劣悪な環境であるスタンド間においても、数か月毎のレンズ清掃のみで連続運用ができています。

各スタンド間には2台の CCD カメラが設置されており、2台で鋼板をステレオ立体視することにより、カメラと鋼板の距離の変化に対応している。また、この方法を適用することにより、カメラを圧延ラインの中央に設置する必要がなくなり、スペースが制約される圧延機のハウジング内にも容易に設置できる。

熱間圧延仕上スタンド間では、霧状水滴やヒュームにより、鋼板エッジの視野の一部が遮られる場合がある。この対策として、2次元 CCD カメラの特徴を活用した方法を開発した。図2に示すように、まず、各走査線上のエッジを微分強度が最大となる位置を探索することにより検出し、つぎに、全ての走査線上のエッジ検出位置に関する回帰直線を最小自乗法により求め、鋼板エッジ線とする。この最小自乗法では、微分強度を重率とすることにより、エッジが不鮮明な走査線の影響を低減させる。最後に、画面上にあらかじめ設定した圧延方向位置（蛇行量測定位置）にお

ける鋼板エッジ線の座標を蛇行量測定位置のエッジ測定値とする。

この方法により、霧状水滴やヒュームによって視野が欠けているような場合であっても蛇行量を検出することが可能になり、さらに、エッジ検出の分解能は画素の大きさよりも小さい 1mm 以下に向上した。また、各走査線の微分強度の総和と閾値を比較し、閾値以下の場合には制御動作を中止するようなフェールセーフ機能も設けている。

蛇行計の仕様を表1に示す。要求される応答速度と測定精度は、最も鋼板速度が速い最終スタンド間を想定した値であるが、要求仕様を満足している。スタンド間蛇行計の測定精度は、最終スタンド間に設置された蛇行計と、既設の仕上出側の光学式板幅計の測定値を比較することにより確認した。一例を図3に示す。ダウンコイラに鋼板の先端が到達して張力が付与されてからは鋼板は回転しないた

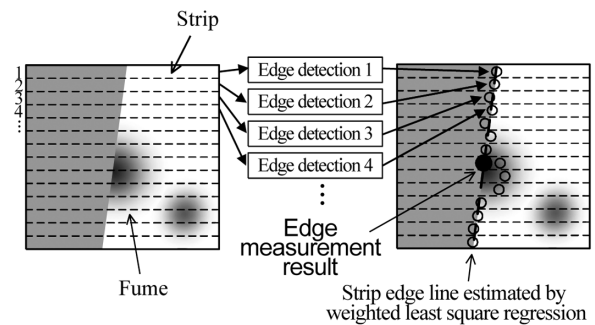


図2 エッジ検出方法
Edge measurement method

表1 開発した蛇行計の仕様
Specification of strip position sensor

Item	Specification	
	Required	Developed
Strip width	650-1650 mm	650-1650 mm
Strip temperature	700-1000 °C	700-1000 °C
Strip pass-line variation	±200 mm	±500 mm
Measurement range	±200 mm	±200 mm
Accuracy	±10 mm (2σ)	±6.4 mm (2σ)
Response	-20 ms	12 ms

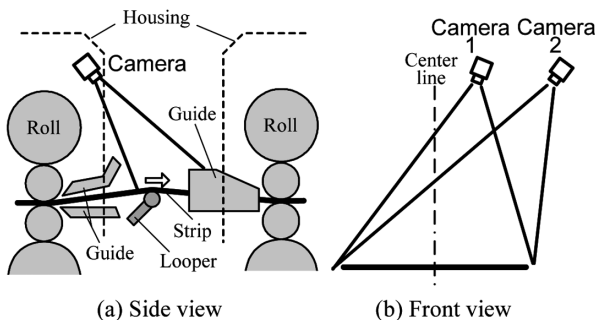


図1 スタンド間蛇行計のレイアウト
Layout of interstand strip position sensor

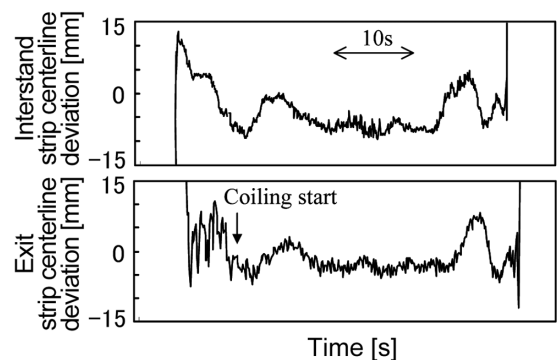


図3 蛇行測定例
Example of strip centerline measurement

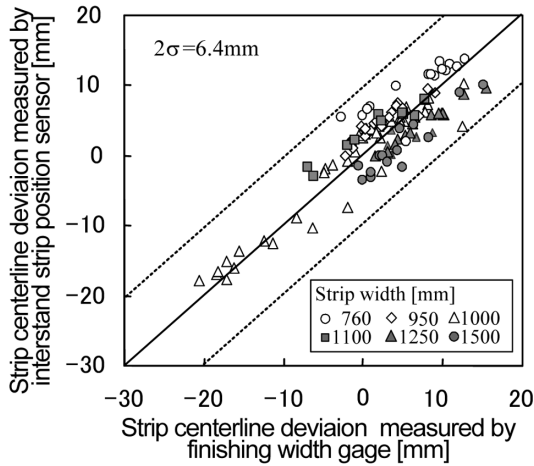


図4 蛇行計測定値と板幅計測定値の比較

Comparison of strip centerline deviation measured by strip position sensor with one measured by width gage

め、両測定値はほぼ一致した値を示している。板幅が異なる複数の鋼板について、両測定値を比較した結果を図4に示す。両測定値の差は $2\sigma = 6.4\text{mm}$ であり、蛇行制御に必要な測定精度を確保している。

2.2 蛇行計の設置位置

蛇行計を用いた制御方式では、圧延機入側に設置した蛇行計で検出された蛇行量に基づいて圧延機のレベリングを操作する。この際、鋼板の尾端が蛇行計を抜けてから圧延機を抜けるまでは蛇行量が測定できないので、蛇行計を抜けた時点のレベリング操作量をホールドする。したがって、スタンド間における蛇行計位置が制御効果に影響を与える。この最適位置をシミュレーションにより決定した。

圧延材の回転角速度外乱の存在下で、蛇行計から下流側圧延機までの距離を変更し、圧延機位置の蛇行量を $\pm 15\text{mm}$ 以内に抑えるための最小制御ゲインと、その制御ゲインを用いたときのレベリング操作量の最大値を計算した。結果を図5に示す。外乱は、レベリング設定不良に相当する一定値外乱と、尾端部のキャンバーに相当するランプ状外乱の2種類を想定した。また、横軸の距離は、スタンド間距離を1で正規化して示している。

ランプ状外乱の場合、蛇行計が上流圧延機に近いと、レベリング操作量をホールドする時間が長くなる影響が大きくなり、蛇行を $\pm 15\text{mm}$ 以内に抑える制御ゲインが見つからなかった(図中のプロットの無い部分)。また、蛇行計が下流圧延機に近づくにつれて、レベリング操作量は大きくなる。したがって、蛇行計を下流圧延機に近づけすぎると好ましくない。さらに、制御ゲインが小さいほどモデル化誤差の影響に強い制御系になることを考慮すると、蛇行計はレベリングを操作する下流側圧延機よりスタンド間距離の1/3 ~ 1/2 上流側に設置するのが望ましいことがわかった。実機においても、この指針に沿った位置に蛇行計を設置して

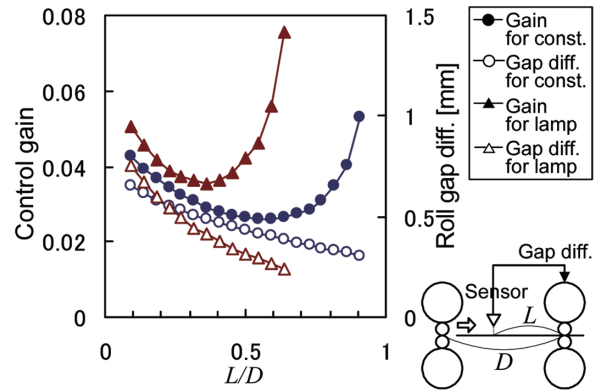


図5 蛇行計設置位置と制御効果の関係 Relationships between sensor location and control effects

いる。

3. モデル予測制御理論を用いた蛇行制御則⁶⁾

3.1 制御則の導出

上述したように、蛇行計を下流側の圧延機から離れた位置に設置すると、蛇行計位置で検出した蛇行量は、制御量である圧延機位置の蛇行量とは一致しない。この関係は、鋼板が回転を伴いながら並進するため、板厚制御における圧延機直下板厚と板厚計の検出板厚の関係のような単純な無駄時間をもつ関係ではない。そこで、蛇行計で検出した蛇行量から圧延機位置の蛇行量を予測し、その予測値を最適化するようにレベリング量を求めるモデル予測制御理論⁹⁾を適用することにより、その課題を解決した。

速度 v で並進する鋼板の時刻 t における圧延機入側での回転角速度を $\omega(t)$ とすると、圧延機から距離 x (下流方向を正とする) の位置での蛇行量は、並進運動と回転運動の合成式で (1) 式のように表される⁹⁾。

$$y(x, t) = -x \int_0^t \omega(t) dt + v \int_0^t \int_0^t \omega(t) dt dt \quad (1)$$

これより、圧延機入側で距離 L 離れた位置の蛇行量 $y_s(t)$ 、圧延機位置の蛇行量 $y(t)$ は、それぞれ (2), (3) 式となる。

$$y_s(t) = L \int_0^t \omega(t) dt + v \int_0^t \int_0^t \omega(t) dt dt \quad (2)$$

$$y(t) = v \int_0^t \int_0^t \omega(t) dt dt \quad (3)$$

また、回転角速度は鋼板の幅方向速度分布率 η に比例するので、 η を幅方向の非対称要因である蛇行量 y 、レベリング量 S 、外乱 d の線形和で表すと、(4) 式を得る。

$$\omega = v\eta = v \cdot (K_{ny} \cdot y + K_{ns} \cdot S + d) \quad (4)$$

ここで、 K_{ny} は y から η への影響係数、 K_{ns} は S から η への影響係数であり、オンライン板プロフィール予測モデル¹⁰⁾を用いて計算することができる。

ここで、 $z=y$ とおき、外乱 d に関して $\dot{d}=0$ を仮定し、(2) ~ (4) 式を周期 τ で離散化すると、つぎの離散時間系状態方程式を得る。

$$x[k+1] = A \cdot x[k] + B \cdot S[k] \quad (5)$$

$$y[k] = C \cdot x[k] \quad (6)$$

ただし、

$$x[k] = [y[k] \ z[k] \ d[k]]^T \quad (7)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \tau & 0 \\ \tau v^2 K_{ny} & 1 & \tau v^2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau v^2 K_{ns} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C = [1 \ 0 \ 0] \quad (8)$$

である。

(5), (6) 式より, 現ステップ k より j ステップ後の圧延機位置の蛇行量は, (9) 式で予測できる。

$$\hat{y}[k+j] = CA^j x[k] + \sum_{i=0}^{j-1} CA^{j+i-1} B \cdot S[k+i] \quad (9)$$

ここで, \hat{y} の評価区間をステップ $k+p \sim k+q$ にとり, 制御系の良否を表す評価関数を

$$J[k] = \frac{1}{q-p+1} \sum_{j=p}^q \hat{y}[k+j]^2 + r \cdot S[k]^2 \quad (10)$$

とおくと, (10) 式を最小にする現ステップ k の最適レベリング操作量は, (11) 式で与えられる。

$$S[k] = - \frac{G^T H}{G^T G + r(q-p+1)} x[k] \quad (11)$$

$$H \equiv \begin{bmatrix} CA^p \\ CA^{p+1} \\ \vdots \\ CA^q \end{bmatrix}, \quad G \equiv \begin{bmatrix} CA^{p-1}B \\ CA^p B \\ \vdots \\ CA^{q-1}B \end{bmatrix} \quad (12)$$

ここで, r は圧延機位置の蛇行量 \hat{y} とレベリング操作量 S のトレードオフをとる設計パラメータである。さらに, (2), (3) 式より, 蛇行計の検出値 y_s と圧延機位置の蛇行量 y の間には,

$$y_s = y + \frac{L}{v} z \quad (13)$$

の関係が成立するので, これを (11) 式に代入することにより, 検出できない y の代わりに, 検出値 y_s を用いた制御則 (14) 式を得る。

$$S[k] = - \frac{G^T H}{G^T G + r(q-p+1)} \begin{bmatrix} 1 & -L/v & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_s[k] \\ z[k] \\ d[k] \end{bmatrix} \quad (14)$$

制御則 (14) 式には, 制御量 y は直接現れていないが, その導出過程において, (9), (13) 式が用いられており, モデル予測制御理論を用いることにより, 蛇行計の検出値 y_s から圧延機位置の蛇行量 y を予測する過程が, 制御則の中に自然に取り込まれている。

なお, (14) 式のうち, z と d は直接検出することができない量であるが, 最小次元オブザーバ¹¹⁾を適用することによって, y_s と S から推定することができる。

3.2 制御パラメータの決定

モデル予測制御の設計パラメータである (10) 式の評価区間 p, q は, シミュレーションにより方針を決定した。

現在時刻から評価開始時刻までの時間 $t_1 = p\tau$ と蛇行制御効果の関係を図 6 (a) に示す。横軸は, 鋼板のスタンド間移動時間 T で正規化して表示している。 t_1 が, 蛇行計から

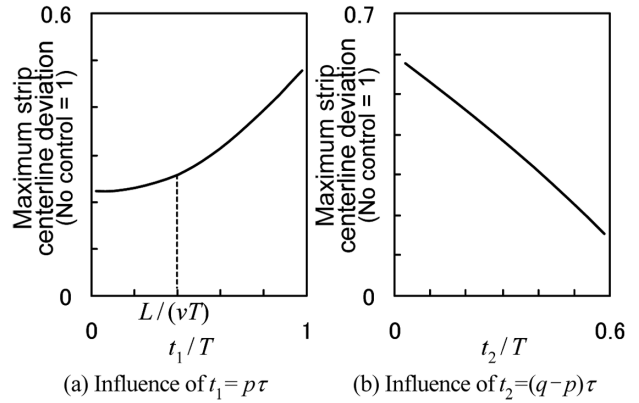


図6 モデル予測制御の評価区間と制御効果の関係
Relationships between evaluation period of model predictive control and control effects

圧延機までの鋼板移動時間 L/v 以下の場合, 制御効果はほぼ一定で小さい。これは, 蛇行量が測定された蛇行計直下にある点が, 圧延機位置に移動したときの蛇行量は, その移動時間内のレベリング操作の影響をあまり受けないことを意味している。すなわち, (2), (3) 式で表される制御対象の持つ二重積分による応答遅れが, 蛇行計から圧延機までの移動時間よりも長いため, t_1 を L/v より短くしてもレベリング操作量が大きくなるだけで, 制御効果はあまり変わらない。したがって, t_1 は蛇行計から圧延機までの鋼板移動時間 L/v くらいが妥当である。この検討結果に基づき, 実機においては, 鋼板の尾端が蛇行計を通過する際の速度 v を予測計算し, (10) 式の p を $p=L/(v\tau)$ により決定するようにしている。

つぎに, 上記のように, t_1 を定めた場合の, 評価区間の長さ $t_2 = (q-p)\tau$ と蛇行制御効果の関係を図 6 (b) に示す。シミュレーションではモデル予測誤差がないので, 評価区間 t_2 を長くするほど制御効果が大きくなる。しかし, 評価区間を長くすると, 想定していない外乱の変化やモデル予測誤差の影響を受け易くなるので, q は実機調整によって決定した。

4. 実機適用結果

実機においては, 板厚が薄いほど蛇行しやすく, また, 蛇行して鋼板ガイドに接触したときに座屈しやすいため, 絞り込みトラブルの発生率が高くなる傾向がある。そこで, 7 スタンドからなる熱間圧延仕上タンデム圧延機のうち, 図 7 に示すように, 板厚が薄くなる後段の 4 スタンド間に蛇行計を設置し, 本方式の蛇行制御を実施した。(14) 式で表されるモデル予測制御の最適制御ゲインは, 各鋼板の圧延開始前に, それぞれの製造条件に応じて, プロセスコンピュータで計算して設定する。

オブザーバで推定している d と z のうち, d の真値は不明であるが, z は (13) 式と $z=y$ を用いて微分方程式を解くことにより, 蛇行計の検出値 y_s から計算できる。このこと

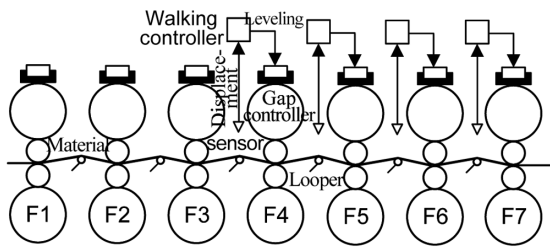


図7 蛇行制御システム
Strip walking control system

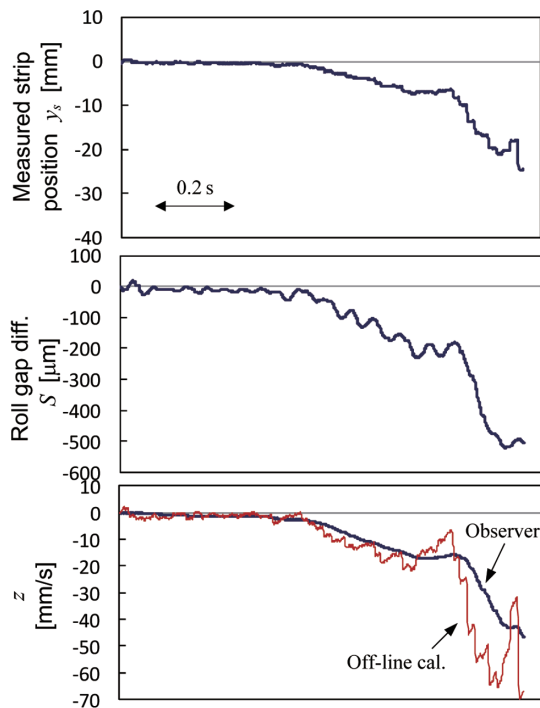
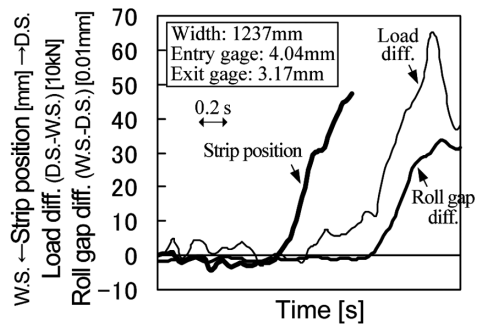


図8 オブザーバによる推定結果例
Example of estimated result by observer

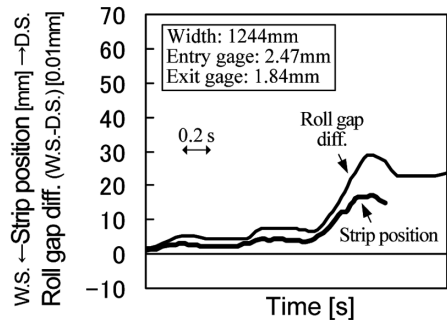
を利用して、オブザーバの推定値と y_s からの計算を比較することにより、オブザーバの推定値の妥当性を検証した。一例を図8に示す。オブザーバの推定値は、 y_s からの計算値に追従するように動いており、妥当であることが確認できる。オブザーバの推定値の方がやや緩やかに動いているのは、オブザーバを構成するフィードバック系の遅れによるものである。

蛇行制御実施時のチャート例を従来の差荷重方式と比較して図9に示す。差荷重方式の場合は、蛇行が増大する前から蛇行以外の要因で差荷重が変動している。これによる制御誤動作を避けるため、本例では±100kNのデッドバンドを付与している。これと差荷重方式のもつ制御特性上の問題点⁹⁾のため、レベリング量は最終的には約0.3mm動いているが、蛇行は抑制できていない。一方、本方法では、蛇行量の増大とともに時間遅れなくレベリングを操作することにより、蛇行を抑制できている。

尾端部における絞り込み発生率を図10に示す。総数で集計した場合と、板幅1100mmを境に板幅別に集計した



(a) Conventional method



(b) Newly developed method

図9 蛇行制御例
Examples of walking control

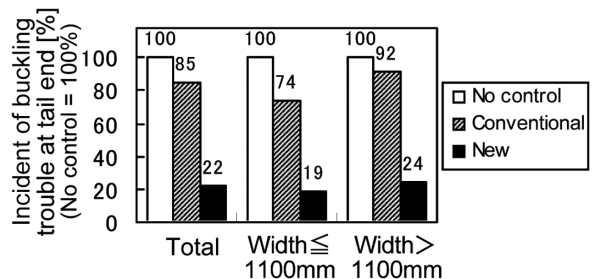


図10 絞り込み発生率の改善効果
Improvement of incidence of trouble at tail end rolling

場合とを示す。差荷重方式では幅材に対する効果が小さく、絞り込み発生率は総数で85%にしか低減していない。一方、本方法では板幅の影響は小さく、絞り込み発生率は総数で22%に低減し、薄物材や高張度材の安定製造に大きく寄与している。

5. 結 言

熱間薄板仕上圧延における鋼板蛇行制御技術として、スタンド間の悪環境下でも高精度に安定測定することができるスタンド間蛇行計と、モデル予測制御理論を適用して最適なレベリング操作量を決定する制御則を開発した。

本制御方法を実機適用することにより、従来の差荷重方式の蛇行制御に比べて、鋼板の尾端が圧延機を抜ける際の絞り込みの発生率は従来の22%に低減しており、本技術は薄物材や高張度材の安定製造に大きく寄与している。

参考文献

- 1) 中島浩衛 ほか：第 31 回塑性加工連合講演会. 東京, 1980, JSTP
- 2) 木村智明 ほか：日立評論. 65 (2), 25 (1983)
- 3) 山下道雄 ほか：材料とプロセス. 10, 1101 (1997)
- 4) 石井篤 ほか：材料とプロセス. 18, 1164 (2005)
- 5) 古川洋一 ほか：鉄と鋼. 78, T141 (1992)
- 6) 鷺北芳郎 ほか：鉄と鋼. 95 (1), 43 (2009)
- 7) 出口光一郎：画像と空間—コンピュータビジョンの幾何学—, 初版. 東京, 昭晃堂, 1991, p. 142
- 8) 増田士朗：計測と制御. 39 (5), 326 (2000)
- 9) 中島浩衛 ほか：昭和 55 年塑性加工春季講演大会. 東京, 1980, JSTP
- 10) 福島傑浩 ほか：鉄と鋼. 100 (12), 67 (2014)
- 11) Gopinath, G.: Bell Syst. Tech. J. 50, 1063 (1971)



鷺北芳郎 Yoshiro WASHIKITA
プロセス研究所 制御研究部
上席主幹研究員
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



伊勢居良仁 Yoshito ISEI
プロセス研究所 計測システム研究部
主幹研究員



武衛康彦 Yasuhiko BUEI
鹿島製鉄所 薄板部 薄板企画室 主幹



相原康宏 Yasuhiro AIHARA
鹿島製鉄所 薄板部 熱延技術室



竹田真琴 Makoto TAKEDA
鹿島製鉄所 設備部 制御技術室