

冷間タンデムミルにおける板幅制御技術

角谷 泰則*・岡田 敦司*²・浜田 龍次*・鷺北 芳郎*・木村 和喜*

Strip Width Control Technology for Cold Tandem Mill

Yasunori KADOYA, Toshitsugu OKADA, Ryuji HAMADA, Yoshiro WASHIKITA and Kazuyoshi KIMURA

Synopsis : A new strip width control technique has been proposed for a cold tandem mill.

First, the phenomena of the strip width change during the cold rolling were investigated. The results are as follows. The strip width changes on materials and sizes. Moreover, when rolling conditions like the rolling speed are changed, the strip width deviations are caused for the same grade strips. These mechanisms can be explained based on the relationship between the transverse metal flow and the change of the strip profile at the edge.

Second, the strip width control technique to compensate for the strip width deviation caused by rolling speed change was examined. The relationship between the rolling speed and the target strip crown for the strip width control has been derived since the strip width change is related with the integration of the change of strip profile. The strip width control is adjusted the work roll bender in response to rolling speed, so as to become the strip crown to the target crown. The effectiveness of this control technique was confirmed through experiments.

Key words : cold rolling; tandem mill; strip width control; strip profile; rolling speed.

1. 緒言

冷延鋼板の寸法精度に対する顧客ニーズの厳格化への対応や歩留まり向上によるコスト合理化を図るため、板厚制御や板クラウン制御、板形状制御といった鋼板寸法を高精度に制御する技術が開発されている。

薄鋼板の板幅精度に関しては、熱間圧延を対象に、粗圧延機のエッジ開度を初期設定するセットアップ制御と長手方向板幅変動に応じてエッジ開度を修正する自動板幅制御技術が開発されている¹⁾。また粗圧延機で生じた板幅偏差や仕上圧延機内で生じる板幅変化による板幅精度悪化を抑制するため、仕上圧延機のスタンド間張力を活用した板幅制御技術も開発されている²⁾。

一方、冷間圧延での板幅精度向上に関する報告はなく、下記に述べる事実から、前述の熱間圧延を対象にした制御技術を、そのまま冷間圧延に適用することが困難である。冷間圧延機には通常エッジング圧延機がなく、また圧延機間の張力修正に関しては、板厚制御の操作端として用いられており³⁾、板厚精度に与える影響が大きいため、板幅精度向上を目的としたスタンド間張力の積極的な活用は困難である。

また熱延仕上圧延では、板プロフィール変化により板幅が変化することも知られている⁴⁾が、この事実を積極的に活用し、板幅を制御する報告例はない。

しかしながら、冷間圧延においても板幅変動が生じてお

り、板幅精度が厳格に要求される製品については、圧延後にエッジトリミングが必要となり、歩留まり低下の原因となっており、冷間圧延での板幅変化の挙動解明と板幅変動を抑制する技術が必要であった。

そこで、筆者らは、まず冷間タンデムミルでの板幅挙動を調査し、前述の熱間圧延同様、板プロフィール変化によって板幅変動が生じることを確認した。また圧延中の板幅変動は、主に圧延速度変更時に生じていることをつきとめた。すなわち、圧延速度変更時には、圧延ロールと鋼板との間の潤滑状態が変化し、圧延荷重変動が生じるため、板プロフィールが変化する。

ここで、板クラウン（板幅方向中央位置と板幅方向端部25 mm位置の板厚差）を評価指標とし、圧延荷重変動による板クラウン変動を抑制する目的で、荷重変動に応じて、ロールバンド力などの形状制御アクチュエータを操作する制御方法が用いられている場合がある。しかし板幅変動抑制の観点からは、板クラウンでなく、エッジ近傍を含めた板プロフィール全体の変化を評価する必要があるため、従来から知られている板クラウン制御方法の適用だけでは、板幅変動を完全に抑制することはできなかった。

そこで、冷間タンデムミルにて実機テストを実施し、圧延荷重変動による板プロフィール変化への影響や、板プロフィール変化が板幅変動に与える影響を検証した。そして、本検証結果に基づいて、板幅制御方法として、圧延速度変更に応じてロールバンド力を操作し、板プロフィール変化を

平成16年2月26日受付 平成16年8月6日受理 (Received on Feb. 26, 2004; Accepted on Aug. 6, 2004)

* 住友金属工業 (株) 総合技術研究所 (Corporate Research & Development Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 3 Hikari Kashima 314-0014)

*2 住友金属工業 (株) 鋼板・建材カンパニー (Steel Sheet, Plate, Titanium & Structural Steel Company, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

制御することにより、板幅変動を抑制する方法を考案し、実機テストにてその効果を確認した。

2. 冷間タンデムミルでの板幅変化

2.1 板幅変化の実態

冷間タンデムミルでの板幅変化の実態を調査すべく、圧延前にエッジトリミングし、長手方向板幅を一定とした鋼板を冷間タンデム圧延し、圧延後の長手方向板幅を測定した。その結果を Fig. 1 に示すが、板幅変動は、主に圧延速度変更時に生じていることが判明した。

2.2 板幅変化メカニズム

圧延速度変更による板幅変化のメカニズムは、Fig. 2 に示す通りと仮定した。

圧延速度変更に伴い、圧延ロールと鋼板との間の潤滑状態が変化し、摩擦係数が変化する。これに伴い圧延荷重が変化する。圧延速度と圧延荷重の関係は、Fig. 3 に示すように、低速になるほど、圧延荷重が増加し、ある速度以上

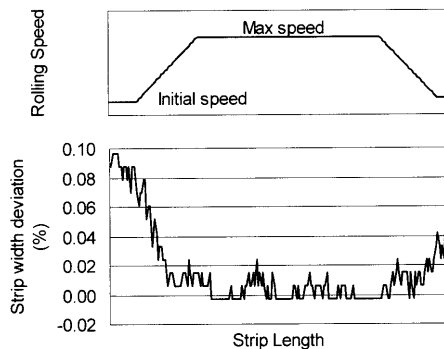


Fig. 1. An example of strip width deviation in cold tandem rolling.

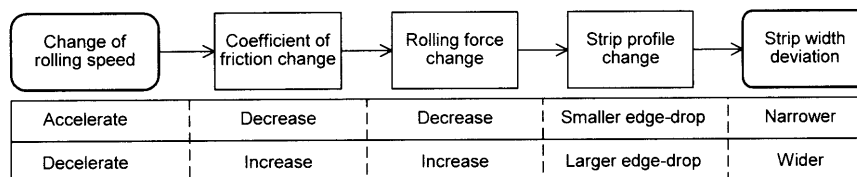


Fig. 2. Mechanism of strip width change in response to rolling speed.

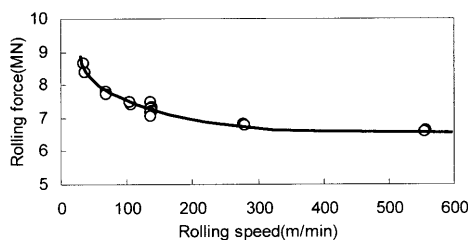


Fig. 3. Relationship between rolling speed and rolling force.

の高速域では圧延荷重が変化しなくなるという傾向がある。

次に、圧延荷重が変化すると、板プロフィールが変化する。圧延荷重に対する圧延後板プロフィールへの影響を計算した結果を Fig. 4 に示すが、圧延荷重が 7MN から 8.4MN まで増加した場合、出側板プロフィールが変化し、特に板端部で板厚が薄くなる。なお圧延前の板プロフィールは、板端部 25 mm での板クラウンが 30 μm となるように 4 次曲線で近似した上で、圧延による板プロフィール変化を Shohet の考え方⁵⁾に基づく分割モデルにて計算した。

さらに、板プロフィール変化と板幅変化の挙動に関して、定性的なメタルフローは Fig. 5 に示すように説明できる。

圧延による板厚歪みは、長さ方向歪みと、幅方向歪みとなって現れる。このため圧延荷重が増加すると板端部での板厚が薄くなる、すなわちエッジドロップが大きくなるので、幅方向歪みすなわち幅方向メタルフローが大きくなり板幅が広がる。逆にエッジドロップが小さくなると、幅方向メタルフローが小さくなり板幅は狭くなる。

3. 冷間タンデムミル実機テストによる板幅変化挙動

3.1 モデルミルでのテスト結果

前述の板幅変化メカニズムを検証するため、Table 1 に示す 4Hi モデル圧延機を用いて、板プロフィール変化と板幅変化の関係を調査した。

Fig. 6 に、モデル圧延機でのエッジドロップ変化と板幅変化の関係を示す。ここでエッジドロップ変化を表す指標としては、板幅端部 50 mm と 5 mm 位置での板厚差を板幅中央部の板厚で除したエッジドロップ比率 E_{50-5} (下式 (1))

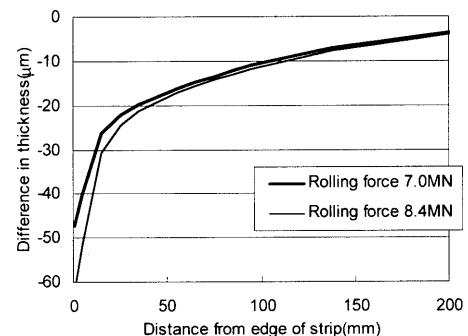


Fig. 4. Influence of rolling force on strip profiles.

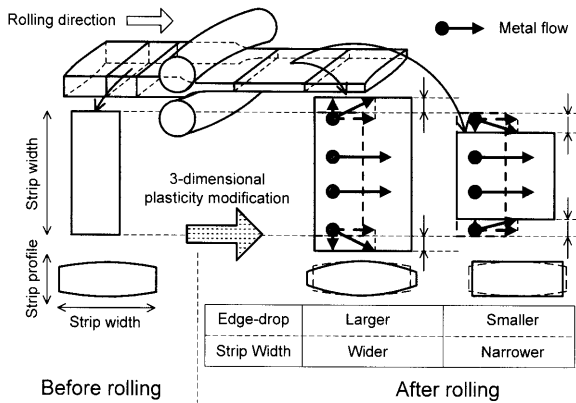


Fig. 5. Mechanism of strip width change caused by strip profile change.

Table 1. Experimental conditions.

Mill dimensions	BUR diameter : 350mm WR diameter : 200mm Barrel length : 400mm
Materials	Low carbon steel 2.0→1.4mm ^t ×300mm [*]
Tension stress	Entry 59MPa, Exit 29MPa Entry 98MPa, Exit 49MPa
Work roll crown	-0.1 ~ 0.2 mm/dia

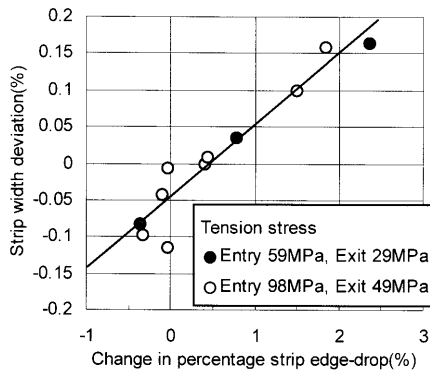


Fig. 6. Effect of change in percentage strip edge-drop on strip width deviation.

の入側、出側での変化量を用いた。冷間圧延での板幅変化は、圧延前後でのエッジドロップ比率変化にほぼ比例することがわかる。

$$E_{50-5} = \frac{h_{50} - h_5}{h_c} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 h_{50} :板幅端部50mm位置での板厚、 h_5 :板幅端部5mm位置での板厚、 h_c :板幅方向センタ部の板厚である。

さらにFig. 6より、圧延機入/出側の張力レベルが大きく変化した場合でも、エッジドロップ比率変化と板幅変化との関係は変化しておらず、通常の操業範囲では冷間圧延での板幅変動は、張力レベルによらずエッジプロファイルの変化に支配されることも確認できた。

3.2 実機タンデムミルでのテスト結果

Table 2 に示す実機冷間タンデムミルにて、鋼板圧延中

Table 2. Experimental conditions.

Mill specifications	No.1-3std : PC mill(4Hi) Pair Cross : 0~1.2deg WR Bender : 0~+500kN/chock No.4,5std : CVC mill(6Hi) IMR Shift : -120~+120mm WR Bender : -350~+450kN/chock IMR Bender : -450~+650kN/chock
Mill dimensions	BUR diameter : 1400mm WR diameter : 480mm Barrel length : 2000mm
Materials	Low carbon steel 4.0→0.9mm ^t ×1200mm [*]

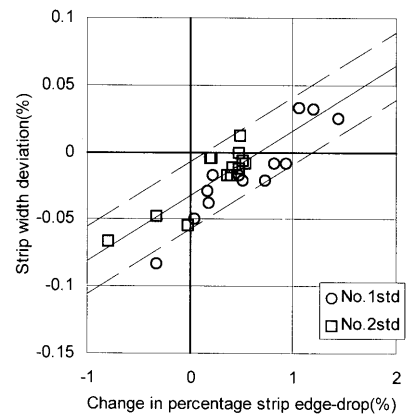


Fig. 7. Effect of change in percentage strip edge-drop on strip width deviation at each rolling stand.

に圧延機を停止し、各スタンド入出側の材料の板幅、板プロフィールを測定するテスト（以下、噛み止めテストと称す）を実施し、板プロフィール変化と板幅変化の関係を調査した。テストでは、No. 1, No. 2 スタンドのロールクロス角を0~0.7 degまで種々変化させて、噛み止めを行い、各スタンド出側にてサンプルを採取、板プロフィール、板幅を実測した。Fig. 7に各スタンド入/出側でのエッジドロップ比率変化と板幅変化の関係を示す。ここで、エッジドロップは板幅端部200mmと10mm位置での板厚差とした。

各スタンドの板幅変化はエッジドロップ比率変化に比例している。また板厚、変形抵抗等異なる No. 1, No. 2 スタンドの幅変化挙動が、ほぼ同一直線上にあり、板幅変化に対する圧延材の材質、サイズの影響は小さいと考えられる。

さらに、実操業に近い条件にて、ロールバンド力を変更する実機テストを実施し、圧延前後の板プロフィール変化と、板幅変化とを測定した。板プロフィール変化を下記式(2)で定義される板クラウン比率変化 $\Delta\gamma$ で評価すると、Fig. 8に示すように、板クラウン比率変化と板幅変化は、ほぼ比例関係にあり、板クラウン比率変化が増加する、すなわちエッジドロップが大きくなると板幅が広がり、逆に、エッジドロップが小さくなると板幅が縮むという現象が確認できた。

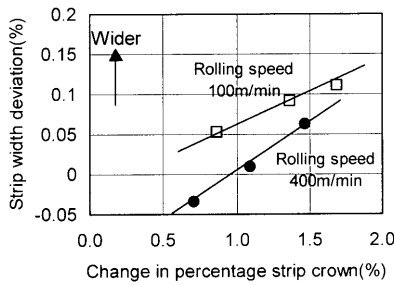


Fig. 8. Effect of rolling speed on strip width deviation.

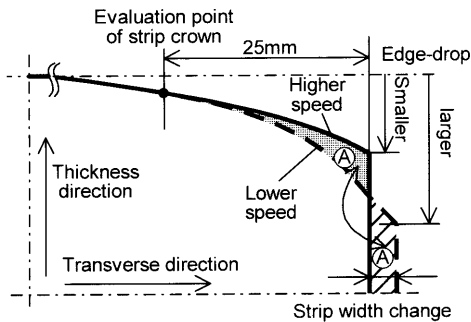


Fig. 9. Effect of strip edge-drop on strip width deviation.

$$\Delta\gamma = \frac{h_c - h_e}{h_c} - \frac{H_c - H_e}{H_c} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 h_c : 圧延後の板幅方向センタ部板厚、 h_e : 圧延後の板幅端部 25 mm 位置での板厚、 H_c : 圧延前の板幅方向センタ部板厚、 H_e : 圧延前の板幅端部 25 mm 位置での板厚である。

また圧延速度を 100 m/min と 400 m/min の 2 条件にて、同様の実機テストを実施した結果、圧延速度レベルに応じて、板クラウン比率変化と板幅変化の傾きおよび絶対量が異なることも確認された (Fig. 8)。

このように圧延速度の変化に応じて、板幅変化の挙動が異なる要因は、以下の通りと推察した。

圧延速度が変化すると、圧延荷重変化を介して、ロールの表面変位が変化し、板プロフィール変化を生じる。高速圧延の場合と低速圧延の場合では、板幅端部でのロールの変形が異なる。このため Fig. 9 に示すように、板クラウン評価位置 (板幅方向端部 25 mm 位置) での板プロフィール変化が同一、すなわち (2) 式で計算される $\Delta\gamma$ が高速圧延時と低速圧延時で同一であったとしても、板クラウン評価位置より端部側での板プロフィール変化が異なり、低速圧延時に板幅端部での板厚が、面積 A だけ薄くなっていれば、その分だけ板幅が広がると考えられる。

4. 冷間タンデムミルにおける板幅制御の構築

圧延速度を変更すると、板クラウン比率変化と板幅変化の関係を表す直線の傾きや切片が変化することが明らかに

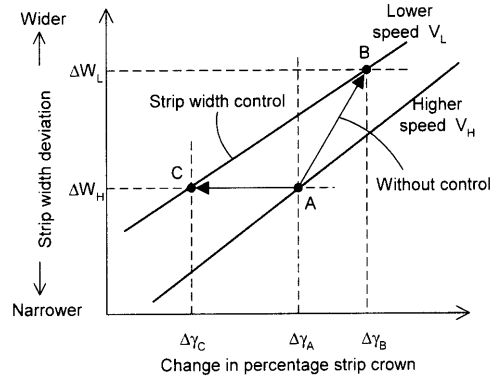


Fig. 10. Scheme of strip width control.

なった。圧延速度変更時の板幅変動を抑制するためには、圧延速度の変化に応じて、板幅が一定となるように板クラウン比率変化を修正すればよい。具体的には、ロールベンド力を操作して、板クラウン比率変化を修正することになる。

圧延速度減速時の板幅制御の考え方を、以下に述べる。まず圧延前後の板クラウン比率変化 $\Delta\gamma$ と板幅変化 ΔW の関係を実機テスト結果に基づき、下式 (3) のように圧延速度の関数として与える。

$$\Delta W = \alpha(V) \cdot \Delta\gamma + \beta(V) \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 V : 圧延速度、 $\alpha(V)$ 、 $\beta(V)$: パラメータである。

Fig.10 に示すように、圧延速度減速前 (速度 = V_H) にて、板クラウン比率変化が $\Delta\gamma_A$ 、板幅が ΔW_H であったとする (Fig.10 中の点 A)。ロールベンド力を操作せずに圧延速度 V_L まで減速すると、圧延荷重が増加し、ロール撓みが大きくなるため、板クラウン比率変化は $\Delta\gamma_B$ となり、板幅が ΔW_L へと広がってしまう (動作点が Fig.10 中の点 B へ移行する)。

したがって、減速時の板幅変動を抑制する制御を実現するためには、板幅変化が生じないように減速後の板クラウン比率変化が $\Delta\gamma_C$ となる (動作点が点 C へ移行する) ように、ロールベンド力を操作する必要がある。

減速時に、板幅が変化しない条件は、(3) 式を用いて、下式 (4) で与えられる。したがって、減速後の板クラウン比率変化目標値 $\Delta\gamma_C$ は、(4) 式を展開して、下式 (5) にて決定できる。

$$\Delta W_H = \alpha(V_H) \cdot \Delta\gamma_A + \beta(V_H) = \alpha(V_L) \cdot \Delta\gamma_C + \beta(V_L) \dots\dots\dots (4)$$

$$\Delta\gamma_C = \frac{\alpha(V_H) \cdot \Delta\gamma_A + \beta(V_H) - \beta(V_L)}{\alpha(V_L)} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、添え字 H, L は高速圧延および低速圧延を示す。以上の考え方に基づくと、圧延速度の変更にに応じて、板クラウン比率変化が $\delta(\Delta\gamma) = \Delta\gamma_C - \Delta\gamma_A$ だけ変化するように、形状制御アクチュエータを操作すれば、板幅変動を抑制で

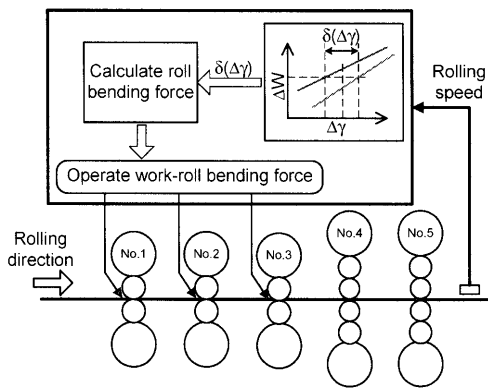


Fig. 11. Schematic diagram of strip width control.

きる。この考え方に基づき、Fig.11 に示す板幅制御を考案した。

ここで、後段スタンドについては、製品形状の悪化を招くため、板幅制御を目的とした形状制御アクチュエータ操作は実施せず、第1~第3スタンドのロールベンド力を操作して、板幅制御を実施する。

本制御にて、タンデムミル入/出側の板クラウン比率変化を $\delta(\Delta\gamma)$ 修正するための各スタンドロールベンド力修正量 F は、下式(6)~(9)に基づき、(10)式で求められる。

①出側板クラウン ΔC_i の変化

出側板クラウンは、ロールベンド力、圧延荷重、入側板クラウンの変化量から次式で計算する。

$$\Delta C_i = \alpha_{Fi} \cdot \Delta F_i + \alpha_{Pi} \cdot \Delta P_i + \alpha_{Ci} \cdot \Delta C_{i-1} \dots\dots\dots (6)$$

②ロールベンド力操作による $\Delta\gamma_i$ の変化

上記式(6)を用いると、次式が得られる。

$$\delta(\Delta\gamma_i) = \frac{1}{h_i} (\alpha_{Fi} \cdot \Delta F_i + \alpha_{Pi} \cdot \Delta P_i + \alpha_{Ci} \cdot \Delta C_{i-1}) - \frac{\Delta C_{i-1}}{h_{i-1}} \dots\dots\dots (7)$$

③板幅制御での板クラウン比率変化修正量

制御対象3スタンドトータルで、必要な板クラウン比率変化を得る。

$$\delta(\Delta\gamma) = \delta(\Delta\gamma_1) + \delta(\Delta\gamma_2) + \delta(\Delta\gamma_3) \dots\dots\dots (8)$$

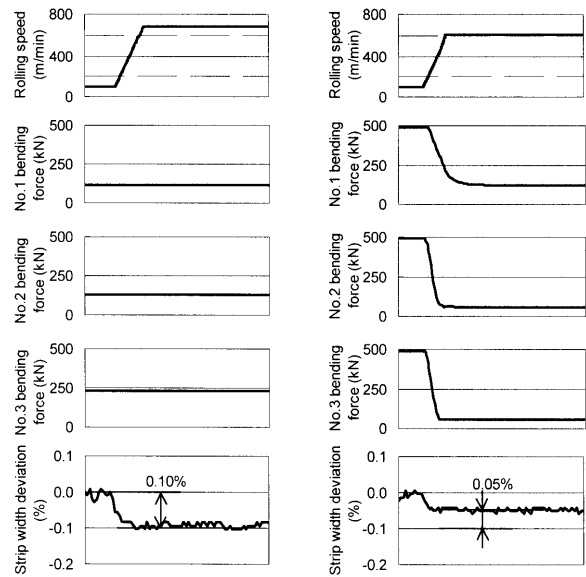
$$w_1 \delta(\Delta\gamma_1) = w_2 \delta(\Delta\gamma_2) = w_3 \delta(\Delta\gamma_3) \dots\dots\dots (9)$$

ここで、板クラウン比率変化修正量の各スタンド配分(重み係数 w_i) は、後段スタンドほど大きく設定することで、板厚の薄い後段スタンドでの板形状への悪影響を抑制し、操業トラブル発生を抑制できる。

④板幅制御でのロールベンド力操作量

上記式(6)~(9)から、各スタンドのロールベンド力修正量は次式で計算できる。

$$\Delta F_i = \frac{h_i}{\alpha_{Fi}} \cdot \frac{1}{w_i \cdot \sum_{j=1}^3 \frac{1}{w_j}} \delta(\Delta\gamma) - \frac{\alpha_{Pi}}{\alpha_{Fi}} \cdot \Delta P_i \dots\dots\dots (10)$$



(a) without control (b) with Strip width control

Fig. 12. Experimental results of strip width control.

ここで、 $\delta(\Delta\gamma)$: 板クラウン比率変化修正量、 $w (>0)$: 重み係数、 h : 出側板厚、 ΔF : ロールベンド力修正量、 ΔP : 圧延荷重変化量、 ΔC_{i-1} : 入側板クラウン変化量、 α_F : ロールベンド力変更による出側板クラウン変化への影響係数 ($\alpha_F < 0$)、 α_P : 圧延荷重変化による出側板クラウン変化への影響係数 ($\alpha_P > 0$)、 α_C : 入側板クラウン変化による出側板クラウン変化への影響係数 ($\alpha_C > 0$)、添字 i : スタンド番号である。

5. 実機テスト

冷間タンデムミル(ミル仕様: Table 2)にて、圧延速度を 100 m/min から 600~700 m/min へ加速する実機テストを実施した。本テストでは、各スタンド板クラウン比率変化修正の重み係数 w_i を $w_1=0.6, w_2=0.8, w_3=1.0$ と設定した。

実機テストの結果、Fig.12に示すように、本制御を実施しない場合、ロールベンド力が一定のため、エッジドロップが小さくなり、加速にて板幅が 0.10% 縮んだ。

これに対して、本板幅制御を実施し、加速に応じてロールベンド力を減少させて、エッジドロップ変化を抑制すると、板幅は 0.05% だけ縮み、制御実施により板幅変動を半減できた。

6. 結言

冷延鋼板の板幅精度向上を図るため、冷延タンデムミルでの板幅変化挙動を解析し、以下の知見を得た。

- (1) 板内での板幅変動は、主に圧延速度変更時に生じる。

(2) 板幅変化量は、圧延前後の幅方向メタルフローによる板プロフィール変化量とほぼ比例関係にある。

(3) 圧延前後の板プロフィール変化を制御することで、板幅変動の抑制が可能である。

上記知見に基づいて、圧延速度変更時の板幅制御方法を考案した。本制御方法は、圧延速度に応じてロールベンド力を操作し、板クラウン比率変化を修正することで、板幅変動を抑制する方法である。

そして、本制御による板幅変動抑制効果を実機テストを通して確認した。

今後、本制御技術の実用化に当たり、

- (1) ロールベンド力操作による板形状変化に伴う操業への影響評価と、実用性の見極め。
- (2) 鋼種・サイズに応じて、圧延速度と板クラウン比

率変化、板幅変化の関係を特定し、圧延速度変更時のロールベンド力修正量を決定するシステムの構築。

の2つの課題を解決するべく研究を継続する。

文 献

- 1) T. Shibahara, T. Kono, Y. Misaka and T. Nunokawa: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **25-277** (1984), 115.
- 2) K. Kimura and K. Sakagami: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **43-493** (2002), 109.
- 3) A. Sugie, I. Hoshino, H. Kimura and T. Okamoto: Proc. of the 1981 Japanese Spring Conf. for the Technology of Plasticity, JSTP, Tokyo, (1981), 79.
- 4) T. Sasaki, T. Kono, S. Ban, K. Sakagami and K. Kita: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 304.
- 5) K. N. Shohet and N. A. Townsend: *J. Iron Steel Inst.*, **206-11** (1968) 1088.