

極薄高速タンデムコールドミル用自動形状制御技術の開発*

川崎製鉄技報
22 (1990) 1, 19-23

Automatic Flatness Control System in Tandem Cold Rolling Mill for Ultrathin Gauge Strips



斉藤 輝弘
Teruhiro Saito

千葉製鉄所 冷間圧延部冷延技術室



大西 建男
Takeo Ohnishi

千葉製鉄所 冷間圧延部冷延技術室 主任(部長補)



小松 富夫
Tomio Komatsu

千葉製鉄所 冷間圧延部冷延技術室 主任(課長補)



三吉 貞行
Sadayuki Miyoshi

千葉製鉄所 設備技術部電気計装技術室 主任(掛長)



北村 秀樹
Hideki Kitamura

千葉製鉄所 保全部保全技術室



北浜 正法
Masanori Kitahama

鉄鋼研究所 プロセス研究部圧延研究室 主任研究員(課長補)

1 緒言

近年のコンピュータ技術、自動化技術の発展に伴い、冷間圧延機の自動運転化、省力化が急速に進んだ。千葉製鉄所第一冷間圧延工場の6タンデムミルは、昭和38年稼働の圧延機であるが¹⁾、昭和59年には完全連続圧延機に改造²⁾され、大幅な自動化、省力化が図られた。そして平均仕上板厚0.24mmのぶりき、ティンフリーステール、亜鉛メッキ原板等の表面処理鋼板を主体に月間85000tを圧延して、極薄冷間圧延機としては、当社の主力ミルとなっている。

しかし、その後、圧延製品の薄物化および最終製品における要求形状レベルの高度化が進むにしたがい、従来から大半を圧延作業者の技能に頼っていた平坦度(形状)制御についても自動化の必要性が高まった。

これらの形状要求に応えることと、冷延後の工程における形状に起因する通板、品質面でのトラブルを未然に防ぐ目的で、6タンデ

要旨

近年、冷延鋼板の薄物化や要求形状の高度化にともなって、冷間圧延機の高精度な平坦度(形状)制御技術の必要性が高まった。

極薄鋼板の圧延を主とする千葉製鉄所第一冷間圧延工場6スタンドタンデムミルにおいて、1988年4月に接触ロールタイプの形状センサを設置し、自動形状制御システムを開発した。

操作端は、詳細なシミュレーション結果に基づき、インクリーズ及びディクリーズワークロールベンダ、板幅方向の流量分布が変更できるゾーンクーラントを選択した。

本システムの導入により、単純な端・中伸ばかりでなく、複合伸の制御も可能となった。この結果、最大急峻度が0.8%となり、冷延後工程における形状起因の不良が大幅に減少した。

Synopsis:

Recently, the necessity for more accurate automatic flatness control has increased because of customers' requirements for cold-rolled steel sheets with a thinner gauge and better flatness quality.

In April 1988, the authors installed a new flatness control system at the 6-stand tandem cold rolling mill, which rolled mainly ultrathin gauges, at No. 1 cold rolling plant of Chiba Works. This new automatic flatness control system consisted of actuators and a contact roll type sensor.

Through accurate simulations of the effect of flatness control, the authors chose two actuators for this system. One was an increasing and decreasing work roll bender. The other was a zone-controlled roll coolant system which permitted adjusting of the distribution of the coolant flow along the strip width.

Using this system, a complex distribution of steepness was controlled, for example, not only a quarter buckle but also a simple center buckle or edge wave.

As a result, the maximum steepness of the strip has been decreased to 0.8%, and troubles with the process and defects caused by poor shapes have been drastically decreased.

ムミルの最終スタンドにフィードバック制御を基本とする自動形状制御(Automatic Flatness Control: AFC)システムを開発した。

以下に、この自動形状制御システムの概要について述べる。

2 設備概要

2.1 6タンデムミル設備概要

6タンデムミルは、1984年7月に品質、歩留、原単位および生産

* 平成元年11月27日原稿受付

Table 1 Specifications of 6-stand tandem mill

Type	Fully continuous 6 stand tandem (4-Hi)
Rolled material	Mild steel (for tin plate, TFS, GI)
Max. mill speed (m/min)	2 260
Delivery thickness (mm)	0.1~1.0
Strip width (mm)	508~1 295
Work roll diameter (mm)	495~610
Backup roll diameter (mm)	1 270~1 427
Max. roll bending force (tf/chock)	45 (increase) 45 (decrease)
Application	Direct

性の向上を目的として完全連続ミルに改造された。本ラインの主要な設備仕様を Table 1 に示す。

本ラインの特徴は、平均仕上板厚 0.24 mm という極薄のぶりき、ティンフリースチールおよび亜鉛めっき原板を、2 200 m/min 以上の高速で連続的に圧延し、月間で約 85 000 t を処理することがあげられる。この特徴からも推測されるが、完全連続化後、順調に稼働率が向上するにつれて、最終スタンドのサーマルクラウンの制御が課題の一つとなった。さらに、最終スタンドから離れた運転室内でのミル出側セクションのモニタ画面を見ながらの形状調整という経験的で不安定な操業から脱却するために、新たに形状センサと形状制御用の操作端を設置し、自動形状制御システムを構築した。

2.2 自動形状制御設備概要

2.2.1 操作端の選択

6 タンデムミルの自動形状制御システムの開発にあたって、2 種類のシミュレーションを用いて操作端の選択と能力の検討を行った。一つはロールベンディングに関するもので Shohet による分割モデルを、他方はワークロールのサーマルクラウンに関するもので差分法⁹⁾を用いた。

Fig. 1 には、これらのシミュレーションを用いて中伸び形状をワークロールベンダとゾーンクーラントを用いて修正する場合の計算結果を示す。この結果より、以下の3点がわかった。

- (1) ワークロールクーラントを入側から出側に変更することで、中伸び急峻度で 0.5% 程度の改善が見られる。
- (2) ディクリーズベンダを -35 tf/chock 程度用いると、中伸び

- A : Conventional entry-side coolant (bending force : 0)
 B : Delivery-side coolant (bending force : 0)
 C : Delivery-side coolant + Decrease bender (-35 tf./chock)
 D : Delivery-side coolant + Spot cooling + Decrease bender (-35 tf./chock)

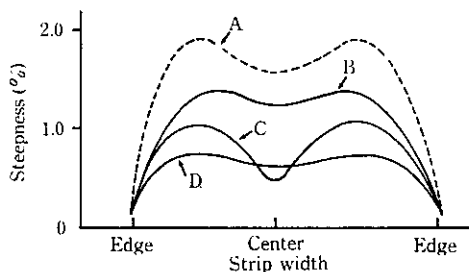


Fig. 1 Simulation of steepness (Coolant temperature 25°C, 0.17 mm gauge \times 750 mm width)

Table 2 Comparison of actuator between conventional system and developed system

	Conventional system	Developed system
Work roll bender force		
Upper limit (tf/chock)	50	45*1
Lower limit (tf/chock)	0	-45
Coolant		
Location	Entry side	Delivery side
Number of channels	—	26
Channel width (mm)	—	52
Flow level	—	8

*1 Symmetrical and asymmetrical

急峻度は改善されるが、クォータ伸びが発生する。

- (3) ワークロールパレル方向にクーラント流量分布を変化させるゾーンクーラントシステムを導入することにより、クォータ伸びが制御できる。

本シミュレーションの計算結果をもとに選択した AFC 用の操作端と従来設備の形状調整用操作端を比較して、Table 2 に示す。新設備の特徴としては、以下の3点があげられる。

- (1) ディクリーズベンダを追加設置し、インクリーズベンダと連続操作を可能とした。
- (2) ベンダ力はミル中心に対しての対称制御と非対称制御⁹⁾を用いた。
- (3) ワークロールクーラントは全量出側から噴射し、ワークロールパレル方向に流量を 8 レベルで可変としたゾーンクーラントシステムを採用した。

2.2.2 形法センサ

形状センサは、自動形状制御システムにおいて最も重要である。本システムでは、出力の安定性および応答性を考慮して、接触式分割ロールタイプの形状センサ (STRESSOMETER) を用いた。従来、6 タンデムミルのように極薄高速圧延機においては、鋼板表面のセンサとのすり疵を懸念して、国内では接触式センサの採用例はなかったが、今回は高精度の補助駆動装置を用いて板速とセンサ表面のスピードを同調させることによりすり疵の発生を防止した。

Table 3 に本システムで採用した形状センサの仕様を示す。また Fig. 2 には本形状センサの外観図を示す。センサの分割幅は基本的には前述した出側ゾーンクーラントのチャンネル幅と同一とし、高分解能が要求される鋼板端部位置は基本幅の 2 分の 1 の 26 mm とした。

STRESSOMETER の測定原理は、各分割ロール内に取り付けられた荷重計により板幅方向に張力分布を測定し、(1) および (2) 式を用いて板幅方向伸び率分布に変換する。

Table 3 Specifications of shape-sensor

Roll diameter (mm)	313
Accuracy (2σ) (I-unit)	2.6
Period of output (s)	0.35
Number of channels	
52-mm wide channel	10
26-mm wide channel	30
Total	40

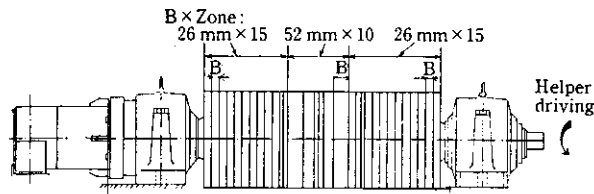


Fig. 2 Outline of shape sensor (STRESSOMETER)

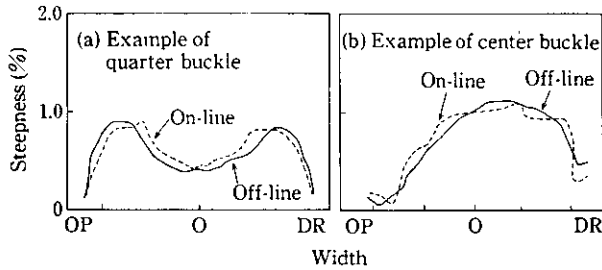


Fig. 3 Steepness comparison between off-line and on-line measurements

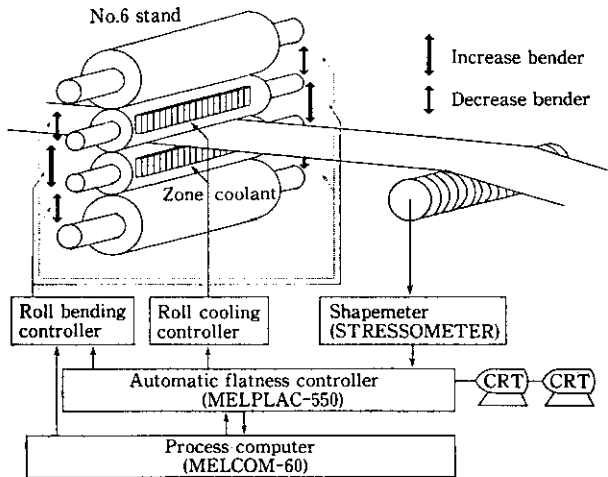


Fig. 4 Schematic diagram of automatic flatness control system

$$\Delta\sigma_i = \frac{F_i - \bar{F}}{\bar{F}} \times T \quad \dots \quad (1)$$

$$I_i = \frac{\Delta\sigma_i}{E} \quad \dots \quad (2)$$

F_i : i channel における検出値分布

\bar{F} : 検出値平均

T : ユニット張力 (kgf/mm²)

$\Delta\sigma_i$: 張力分布 (kgf/mm²)

E : ヤング率 (kgf/mm²)

I_i : i channel における伸び率差

Fig. 3 に, STRESSOMETER で測定したオンラインの形状とオフラインの定盤上で切板を測定した形状の比較を示す。2例の形状が異なる材料であるが, オンラインとオフラインの形状はよく一致している。

これらの操作端および形状センサを用いて構築した自動形状制御システムの概要図を Fig. 4 に示す。

2.2.3 制御方法

本システムの制御方法を述べるにあたり, 形状の表現方法について説明する。前述のように, 形状センサからの信号は板幅方向の伸び率分布 β を板幅方向座標 X の関数として, 直交関数に展開する^{5,6)}。ここでは0次から n 次までの直交関数 $\phi_0(X)$ から $\phi_n(X)$ を用いて (3) 式のように β を表現し, 各関数の係数 A_0 から A_n により形状を表すことにする。

$$\beta = A_0\phi_0 + A_1\phi_1 + A_2\phi_2 + \dots + A_n\phi_n \quad \dots \quad (3)$$

$$\sum_i \phi_i \phi_m = 1 \quad (i=m)$$

$$= 0 \quad (i \neq m)$$

i : 板幅方向位置

この形状表現を用いると, Fig. 5 に示すように形状パタンの認識が容易にできる。

Fig. 6 には自動形状制御のブロック図を示す。目標形状および各

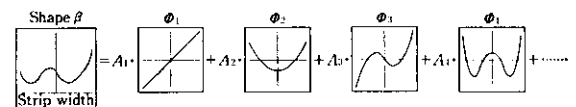


Fig. 5 Recognition of shape pattern

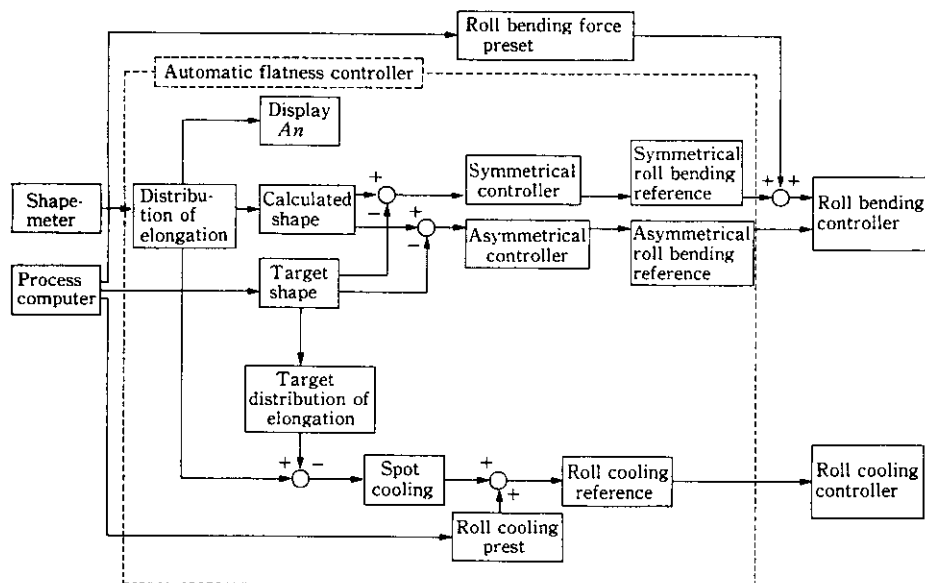


Fig. 6 Block diagram of automatic flatness control

操作端のプリセット値はプロセスコンピュータにより計算する。ダイナミック制御は、板幅方向でミル中心に対して対称な形状成分を対称ベンダでコントロールし、非対称な形状成分は非対称ベンダでコントロールする。

また、オンラインで測定した伸び率分布が、目標の伸び率分布から大きく外れたゾーンに対しては、部分的にクーラント流量を増減して対応するスポットクーリング制御を行っている。

3 自動形状制御の効果

3.1 ベンダシステムの効果

Fig. 7 にワークロールベンダによる自動形状制御例を示す。ベン

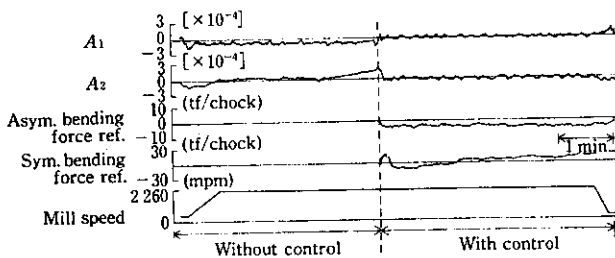


Fig. 7 Example of roll bending control

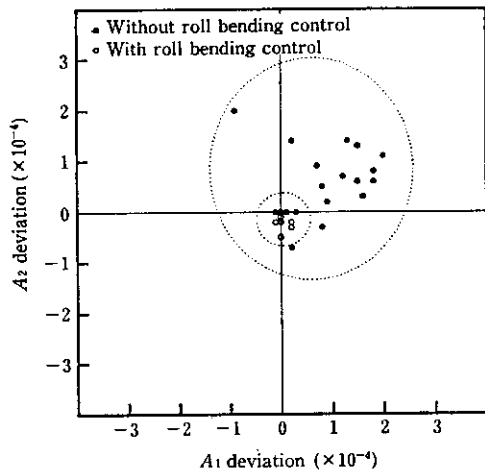


Fig. 8 Effect of roll bending control

ダ制御が「切」の時は、 A_1 で示される片伸びの値は原点から常時一定量ずれており、 A_2 で示される単純端伸びまたは単純中伸びは時間とともに変化していることが確認できた。また、ベンダ制御「入」とした時は、 A_1 および A_2 ともに0近傍に制御され、ベンダ制御が端伸び、中伸びおよび片伸びに対して十分な効果があることが確認できた。

Fig. 8 にはサンプル数を増した時のベンダ制御の効果を示した。ベンダ制御「切」の時には、オンライン測定した形状は、 A_1A_2 座標平面上でのばらつきが大きい。ベンダ制御「入」とすると A_1A_2 座標平面上でのばらつきが小さくなるとともに、原点近傍に集中しており、ベンダ制御が端伸び、中伸びおよび片伸びに対して大きな効果があることを示している。

3.2 クーラントシステムの効果

従来に入側クーラントから出側クーラントを導入し、さらにゾーンクーラントシステムによるスポットクーラント制御を行うまでの形状の変化を Fig. 9 に示す。この形状変化は、Fig. 1 で示したシミュレーションとよく一致して、入側クーラントから出側クーラントへの変更で、中伸びの抑制効果は非常に大きい。さらにスポットクーリング制御を入れて、局部的な形状をコントロールすると最大急峻度で0.8%程度の極めて平坦な形状となることが示された。

3.3 総合効果

Fig. 10 には、ベンダ制御およびクーラント制御の総合効果を示す。Fig. 10 より以下の3点が確認された。

- (1) 自動形状制御を行わないと、 A_1 よりも A_2 の方がばらつきの大きい分布となる。
- (2) この状態でベンダ制御を入れると、 A_2 のばらつきが小さくなり、 A_2 の絶対値は小さくなる。しかし、 A_1 のばらつきは大きくなる。
- (3) さらにこの状態からスポットクーリング制御を行うと、 A_2 および A_1 ともにばらつきが小さく、かつ絶対値が小さくなり原点に近づく。つまり、単純端伸び、中伸びおよびクォータ伸び等の複合伸びも制御されて、極めて平坦な形状となる。

また、Fig. 11 に示すように、冷間圧延時の形状不良（中伸び）が原因で発生するスキンプラス圧延時の耳しわ不良（Edge strain）は、自動形状制御導入前の発生率を100とした場合、導入後の発生率は0となっている。

本システムは最近多様な形状制御方式が紹介されているが、従来の四重式圧延機に比較的簡単な操作端を設置し、安定な形状出力の

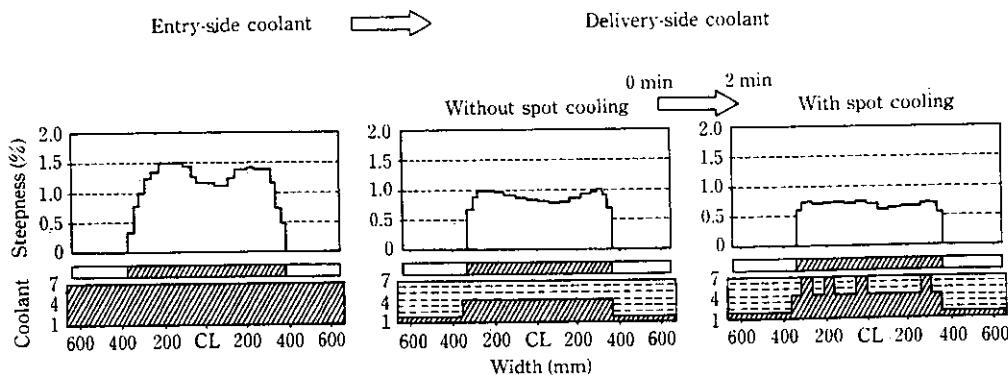


Fig. 9 Effect of delivery-side coolant and spot cooling

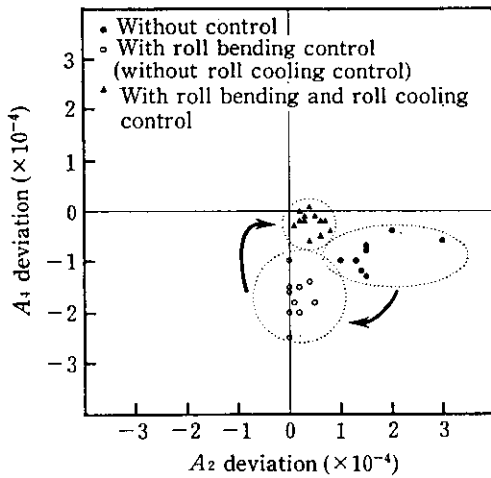


Fig. 10 Effect of roll bending and roll cooling control

得られる接触式形状センサを配して、大きな制御効果をあげることができた。

なお、本システムと同様の自動形状制御設備が千葉製鉄所第二冷間圧延工場4スタンドタンデムミル⁷⁾にも設置され、順調に稼働している。

4 結 言

冷間圧延機出側の形状品質の向上を目的として、千葉製鉄所の極薄鋼板の主力圧延機である6タンデムミルの最終スタンドに、自動形状制御システムを開発、導入した。

本システムの特徴は以下に示すとおりである。

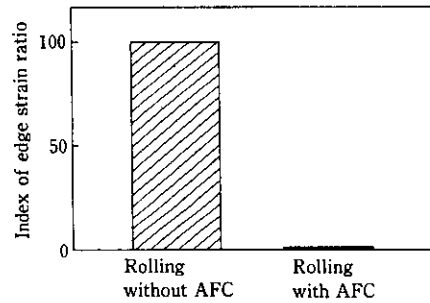


Fig. 11 Effect of AFC system on edge strain ratio at temper mill (Comparison of edge strain ratio between with and without AFC when the latter value is taken as 100)

- (1) 安定で高応答な出力を得ることができる接触式分割ロールタイプの形状センサを、高精度な補助駆動装置を用いて極薄高速ミルに採用することができた。
- (2) 操作端としては、インクリーズおよびディクリーズワークロールベンダを採用するとともに、ワークロールバレル方向の流量コントロールが可能なゾーンクーラントシステムを開発設置した。

また、本システムの効果は以下に示すとおりである。

- (1) ワークロールベンダによる単純端伸び、中伸びの制御だけでなく、ゾーンクーラントにより端中伸び、クォータ伸びといった複合伸びの制御も可能となった。
- (2) この結果、最大急峻度で0.8%程度の形状制御が可能となり、連続焼鈍ラインやスキンプライン等の冷延後工程における形状起因のトラブルや不良の減少に大きな効果をあげている。

参 考 文 献

- 1) 中里嘉夫, 柳島章也, 田宮稔士, 手柴東光, 久々湊英雄, 荒木卓也, 藤原俊二: 川崎製鉄技報, 14 (1982) 4, 476
- 2) 岸田 朗, 手柴東光, 井田幸夫, 坂本軍司, 御厨 尚, 鎌田征雄: 川崎製鉄技報, 17 (1985) 2, 154-160
- 3) 北浜正法, 鎌田征雄, 佐々木 徹, 成田健次郎, 鴨志田 隆, 栗津原博: 第35回塑性加工連合講演会講演論文集, (1984) 238, 243-246
- 4) 安田健一, 志田 茂: 塑性と加工, 23 (1982) 252, 418-423
- 5) 上住好章, 下田道雄, 白石 肇, 浜崎芳治, 渡辺文夫: 三菱電機技報, 55 (1981) 9, 660
- 6) 福原明彦, 加地孝行, 葉山安信, 寺戸 定, 阿部光博, 福山五郎: 三菱重工技報, 25 (1988) 4, 331
- 7) 小林泰夫, 小松富夫, 三本竹一光, 長南富雄, 三吉貞行: 材料とプロセス, 2 (1989) Vol. 2, 367, 466