

三宅 祐史^{*2} 鋤田 征雄^{*3} 浜田 圭一^{*4} 広瀬 勇次^{*5} 小川 洋三^{*6} 豊島 貢^{*7}

Development of Hot Rolling Process Technology for Higher Quality Strip Profile and Flatness

Yushi Miyake, Ikuro Yarita, Keiichi Hamada, Yuji Hirose, Yozo Ogawa, Kou Toyoshima

要旨

近年、ホットストリップミル製品のプロフィール・平坦度に対する需要家の要求は一段と厳しさを増している。所望の板プロフィールを常に安定して確保するためには、大きなプロフィール制御機能を有する仕上圧延機の導入が必要である。また、最終製品の平坦度を保証するためには、仕上ミルだけでなく冷却過程も含めた平坦度制御が重要である。

当社では、千葉、水島の各ホットストリップミルに、それぞれテーパ付ワークロールシフトミル (K-WRS ミル)、HC ミルを導入すると共に、ランアウトテーブルでの冷却過程まで含めた平坦度制御技術の開発を行い、プロフィール、平坦度の優れた熱延鋼板の製造技術を確立したので操業実績を中心にその概要を述べる。

Synopsis:

The traverse gage profile and the flatness of hot-rolled strip are important quality requirements reflecting user's demands growing ever more severe. The hot strip mill with a high capacity for profile control is required to consistently produce hot-rolled strip of good profile and flatness. Also, to guarantee the flatness of finished products, control at finishing mill alone is not sufficient and must cover the cooling process as well.

Kawasaki Steel recently established a hot strip mill rolling technology that assures excellent profile and flatness by installing a tapered-crown work-roll shifting mill (K-WRS mill), the company's own development, and HC (high crown control) mill at hot strip mills of Chiba and Mizushima Works respectively and by extending the flatness control process down to the cooling stage on the runout table.

This paper outlines the technology, focusing on the results of operations.

1 緒 言

近年、時代を反映して需要家における歩留り向上、省工程、自動化のニーズが高まり、それに合致した鋼板の供給が強く求められている。このような情勢のもとで、ホットストリップミルに対する品質要求は一段と厳しいものとなり、材質特性はもちろん、板厚、板幅、平坦度、プロフィール (Fig. 1 に示すように、板の中高の大きさを表す板クラウン、ロールの局部摩耗によって生じるハイスポットおよび板幅端部のエッジドロップからなる幅方向板厚分布をいう) 等の寸法、形状の高精度化が強く要望されるようになってきた。これらの要求にこたえるために、新しい高度な技術が次々と開発され、新世代のホットストリップミルへの脱皮が進みつつある。

板厚、板幅精度に関しては、従来の電動式に比べ一段と高速高応答の油圧式の自動板厚制御、自動板幅制御が多くのホットストリップミルで適用され良好な結果が得られている。

平坦度制御に関しては、信頼性の高い高精度な形状検出器が開発され、その信号により仕上ミル最終スタンドのワークロールベンダーの油圧を調整し、ワークロールのたわみ量を制御する自動制御¹⁾が実用化されており、仕上ミル出側までの平坦度制御技術は完成の域に近づきつつある。しかし、需要家での製品の平坦度を保証するためにはこれだけでは十分とはいえず、仕上ミル出側以降の冷却過程における平坦度変化を制御することが重要であり、この技術開発

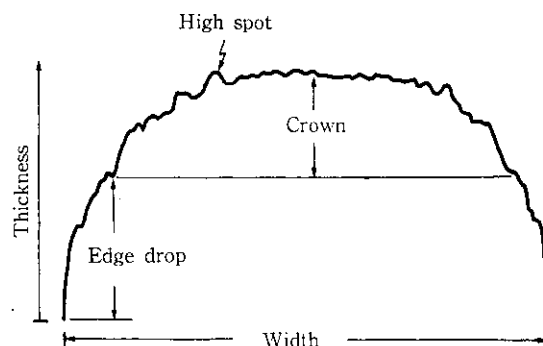


Fig. 1 Definition of strip profile (crown, edge drop and high spot)

も進みつつある²⁾。

一方、板プロフィールに関しては、従来の圧延機では効果的な制御手段がなかった上に、圧延中の板プロフィールを高精度に測定するセンサーの開発が遅れたことも加わり、クラウン、プロフィール制御技術は、ごく最近まで顕著な進歩はみられなかった。

需要家の板クラウンに対する要求は、自動車部品、モーターコア、ブリキ缶用材等をはじめとして、基本的には熱延鋼板、冷延鋼板共にデッドフラット (クラウン=0) である。しかし、冷延鋼板用熱延素材に対しては、冷延時の通板形状や冷延後の平坦度を確保するために、適度な大きさのクラウン値にホットストリップミルで調整して、コールドストリップミルに供給する必要がある。従って、Fig.

*1 昭和59年3月13日原稿受付

*2 千葉製鉄所企画部企画室主査 (部長補)

*3 技術研究所圧延研究室主任研究員 (課長)

*4 水島製鉄所薄板圧延部薄板技術室主査 (課長)

*5 水島製鉄所薄板圧延部薄板技術室主査 (掛長)

*6 水島製鉄所管理部薄板管理室主査 (課長)

*7 千葉製鉄所熱延設備検討班主査 (課長)

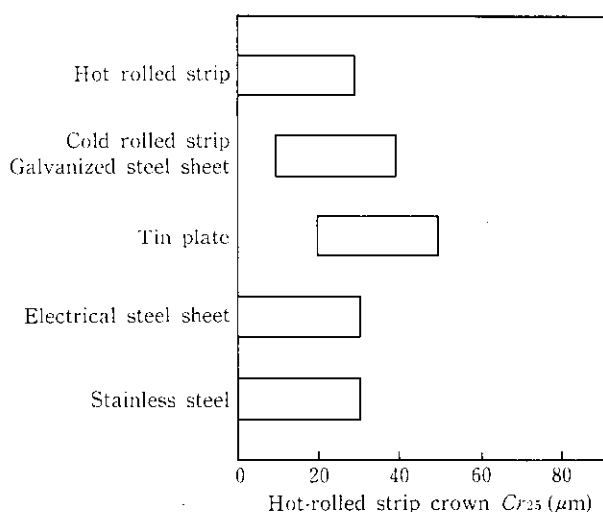


Fig. 2 Suitable hot rolled strip crown for products use

2に示すようにホットストリップに要求される最適なクラウン（クラウンを板幅中央と板端から25 mm位置との板厚差で定義し、 Cr_{25} と表す）は、鋼種、用途により異なる。同時に、ハイスポットは冷延鋼板の平坦度に大きく影響するために、ある許容値以下に抑制する必要がある。

通常の4段圧延機で構成されるホットストリップミルでは効果的な板クラウンの制御手段がないために、ワークロールの熱膨張及び摩耗に伴うロールプロフィールの経時的変化や圧延材の板厚・板幅変化に伴うロールたわみ変形の変化により、ロール組替直後から次の組替までの間（以下圧延サイクルと称す）に約100 μm の板クラウンの変動が生じる³⁾。従って、Fig. 2の所望の板クラウンを常に安定して確保することは不可能であり、需要家のニーズに十分こたえることができなかった。また、板エッジ部のロール局部摩耗はハイスポットの原因となるため、板幅による圧延順位を規制したり、同一幅圧延本数を規制するなど圧延スケジュールに著しい制約を与え、前後工程との同期化をはかる上で大きな阻害要因となっていた。これらの問題を解決するために、大きなクラウン制御能力とハイスポット防止機能及びエッジドロップ制御能力を有する圧延機の出現が長い間待望されていた。

最近、プロフィール制御機能の拡大と圧延スケジュールの規制緩和をわらった各種の新しい圧延機の提案がなされ、一部のホットストリップミルで実用化されている。

当社においては、千葉 No. 1 ホットストリップミルには自社開発技術を活用したテーパ付ワークロールシフトミル⁴⁾ (K-WRS ミル: Kawasaki Steel-Work Roll Shifting Mill)、水島ホットストリップミルにはHCミル（6段圧延機）の適用をそれぞれ完了した。これによって需要家要求に十分にこたえうる良好なプロフィールの製品を得ると共に、安定した操業を実現しえたので以下にその概要について報告する。同時に、水島ホットストリップにおいては、形状検出器と最終スタンドワークロールベンダーからなる閉ループ平坦度制御に加え、ランアウトテーブルでの幅方向冷却制御による平坦度制御の実用化にも成功し、平坦度の優れた製品を需要家に供給できるようになったのであわせて報告する。

2 ホットストリップミルにおけるプロフィール制御

2.1 従来のプロフィール制御法の問題点

熱間仕上圧延では、通常、前段強圧下、後段軽圧下の圧下スケジ

ュールが採用され、後段（とくに最終）スタンドにワークロールベンダーを装備し、平坦度制御を行っていた。圧延材のプロフィールはロールの摩耗とサーマルクラウンの合成プロフィールの変化に応じて変わるため、とくに寸法・形状に対する要求が厳しい材料に対しては、ワークロール（以下WR）の初期クラウンの適正化、サイクル内の幅構成を広幅材から狭幅材へと変更していく圧延スケジュール及び圧延スケジュールにおける組込位置を規制するなどの方法を採用することにより対処してきた。

平坦度、プロフィールに対する品質要求は年々厳しさを増し、1970年代の後半から、オンライン用の形状検出器やプロフィールメータの開発、導入に伴い、従来の4段圧延機による圧延法に種々の改良が試みられた。

ソフトの面からは、圧延負荷によるロールの弾性変形を摩耗やサーマルクラウンの変化に合わせて制御し、WRの組替サイクル内におけるクラウンを一定に制御することを目的とした仕上トータルフォース変更法⁵⁾、仕上下配分変更法⁶⁾などが開発された。

ハードの面からは、圧延荷重を低下し、ロール弾性変形を減少させる異径単ロール駆動による圧延法⁷⁾、2重軸受箱構造などによる強力WRベンダーの開発⁸⁾、ロールの幾何学的形状効果により板端部の急激な板厚の落ち込み（エッジドロップ）を減少させる台形クラウンWR⁹⁾の採用、バックアップロール（以下BUR）の胴長をWRの胴長より短かくし、WRベンダーの効果を向上させる段付BUR (BCM)¹⁰⁾の採用などにより、クラウンやエッジドロップの低減が図られてきた。

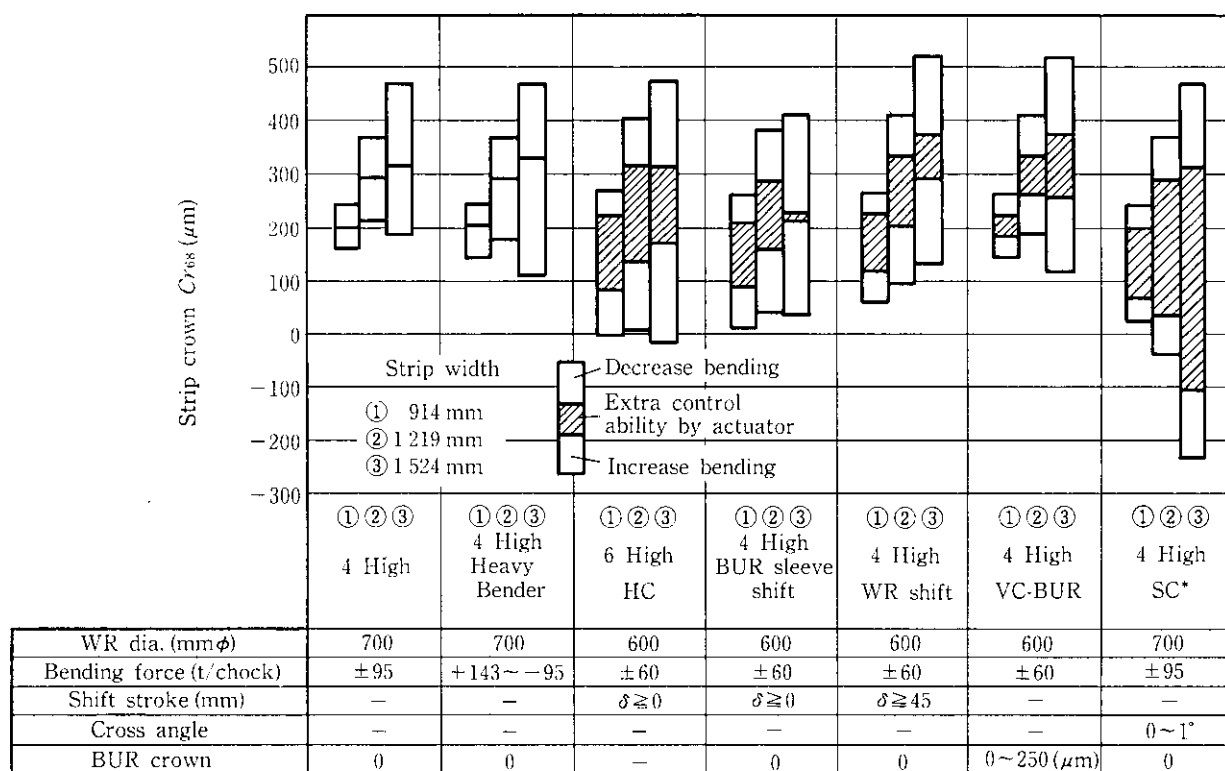
しかしながら、これらいずれの方法を用いても、満足のゆく効果を得るには不十分であり、とくに局所的なプロフィール異常であるハイスポットの制御は不可能であった。そこでさらに高機能なプロフィール・平坦度制御ミルが必要とされた。

2.2 新しいプロフィール制御法

中間ロールを軸方向にシフトし、ロールベンダー効果の向上を図った6段式HCミル¹¹⁾は多くの冷延ミルに採用されてきたが、1980年代に入り、圧延スケジュールの規制を大幅に緩和するスケジュールフリー圧延への対応をも考慮して、WRのシフト機構を装備し、熱延仕上ミルにも導入されるようになってきた¹²⁾。また、BURにスリーブを焼きばめし、ロール芯材とスリーブとの間に油圧室を設け、油圧力によりスリーブのふくらみを制御しようとするVCロール¹³⁾、6段HCミルの機能を4段ミルにおいて実現したWRシフトミルや台形クラウンロールの効果を板幅変化に対応させるべく片テーパクラウンを用い、クラウン、エッジドロップ及びハイスポットを同時に制御することを可能とした当社開発のWRシフト (K-WRS) ミル⁴⁾、上下ロールを圧延方向に交互にクロスさせ、ロール間隙を軸方向に変化させたクロスロール (SC) ミル¹⁴⁾などハード面からの技術開発、導入が活発に進められている。

上記の各種、圧延機のクラウン制御能力はFig. 3に示すような評価がなされている¹⁵⁾。

クロスロールミルの制御能力は非常に大きいですが、構造の複雑さや、ハイスポットに対して制御機能を有していないこと、及び圧延中におけるロールベンダーの機能向上が図られていないことなどが問題と思われる。VCロールは平坦度制御には有効な技術ではあるが、プロフィール制御能力が小さく、エッジドロップとハイスポットの制御機能を有していない。BURのスリーブシフトミルはハイスポット制御機能を有しないことや技術的に未知な点があることは現時点では否めない。6段HCミルは狭幅から広幅まで制御能力が大きく、スケジュールフリー圧延にも対応できる。4段WRSミルは



*calculated by the authors

Fig. 3 Comparison of crown control ability between new developed crown control mills and conventional 4-high mill

狭幅材に対する能力は十分であり、WRにテーパクラウンを付与した K-WRS ミルにすることにより制御効果はさらに増大される。なお、これらのプロフィール制御ミルにおいて、平坦度の許容限界からクラウン制御範囲が規制されることがあり、プロフィール制御と平坦度制御に自由度をもたせたミル型式とミル配列の選択が重要となる。

クラウン、エッジドロップ、ハイスポットなどを対象とした総合的なプロフィール制御と今後の課題であるスケジュールフリー圧延への対応を考慮すると、WRシフト機構を有する6段HCミルと4段WRSミルが機能的に優れていると判断される。

当社は、Table 1 に示す各仕上ミルの特質に合わせて、以下のようにプロフィール制御ミルを採用している。

(1) 千葉 No. 1 ホットストリップミル

狭幅ミルであり、従来から台形クラウン WR を採用しており、

そのクラウン、エッジドロップの減少効果を確認している。また、実操業における技術的なノウハウの蓄積もなされてきた。この技術を発展させ、板幅変化に追従するように機能拡大したテーパ付 WRS ミル (K-WRS) を F3, 4, 5 スタンドに採用し、F6 スタンドでは平坦度制御を行う方式を採用した。

Table 2 に千葉 No. 1 ホット仕上ミルに採用した K-WRS の設備仕様の概要を示す。

(2) 水島ホットストリップミル

広幅ミルであり、圧延材料の鋼種・寸法も多岐にわたることを考慮して、6段HCミルをF5, 6, 7 スタンドに採用し、プロフィールと平坦度の制御を図っている。Table 3 に水島ホット仕上ミルに導入した HC ミルの設備仕様を示す。

(3) 千葉 No. 2 ホットストリップミル

広幅ミルであり、圧延材料の鋼種・寸法も多岐にわたるが、改

Table 1 Specifications of hot strip mills before refreshment

Mill	Number of stands	Roll size	Products	Product's size
No. 1 hot strip mill in Chiba Works	6	WR 596~700 $\phi \times 1422 L$ BUR 1118~1255 $\phi \times 1372 L$ (mm)	Mild steel High carbon steel Low alloy steel Silicon steel Stainless steel (Ferrite phase)	Thickness: 1.2~12.7 t (mm) Width: 610~1310 W (mm)
No. 2 hot strip mill in Chiba Works	7	WR 647~755 $\phi \times 2032 L$ BUR 1413~1495 $\phi \times 1032 L$ (mm)	Mild steel High carbon steel Silicon steel Stainless steel (Austenite phase)	Thickness: 1.2~19.0 t (mm) Width: 700~1880 W (mm)
Hot strip mill in Mizushima Works	7	WR 700~815 $\phi \times 2300 L$ BUR 1470~1630 $\phi \times 2300 L$ (mm)	Mild steel High carbon steel Low alloy steel Silicon steel Stainless steel	Thickness: 1.2~25.4 t (mm) Width: 700~2200 W (mm)

Table 2 Specifications of K-WRS mill at No. 1 hot strip mill in Chiba Works

Roll size		Max. work-roll shift		Max. work-roll bending force
WR	BUR	Stroke	Force	
597~700 $\phi \times 1\,700\ L$ (mm)	1 118~1 255 $\phi \times 1\,372\ L$ (mm)	275 mm	100 tf	53 tf/chock (increase)

Table 3 Specifications of HC mill in hot strip mill of Mizushima Works

Roll dia.	WR	685~ 585 $\phi \times 2\,380\ L$
	IMR	675~ 540 $\phi \times 2\,300\ L$
	BUR	1 340~1 190 $\phi \times 2\,300\ L$
IMR shift stroke		0~750 mm
WR shift stroke		± 150 mm
Hydraulic screw down		Cylinder: 930 $\phi \times 20$ st Max. rolling force: 2 600 tf/std Max. screw down speed: 4.0 mm/s Frequency response: 20 Hz (phase delay: 90°)
Max. work-roll bending force	Increase	75 tf/chock
	Decrease	75 tf/chock (for only upper roll)
Mill motor		DC 2 800 kW $\times$ 3/std

造の際、構造上6段HCミル化が困難なことや、K-WRSミルの将来の技術的發展を図るべく、シフト量の増大と強力バンダーを採用することにより、6段HCミルに近い制御機能を確保しうるとの技術的検討結果をもとにF5, 6, 7スタンドへのK-WRSミルの導入を計画している。

3 千葉ホットストリップミルにおける K-WRS ミルの適用

3.1 K-WRS ミルの制御原理

千葉 No. 1 ホットストリップミルにおいて、クラウンとエッジド

ロップを減少することを目的として開発された台形クラウン WR 圧延法を發展させ、片テーパクラウンを有する WR を軸方向にシフトし、圧延材の板幅変化への対応を図ると同時に、WRの摩耗分散によりハイスポットの発生を抑制し、スケジュールフリー圧延への対応をも可能となるよう考慮して開発された圧延機である。

K-WRS ミルのプロフィール制御機能の内容は

- (1) WR テーパクラウンによる幾何学的形状効果
- (2) WR シフトによる摩耗分布やサーマルクラウンの平滑化を基本としている。

WR シフト法には、Fig. 4 に模式図を示すように

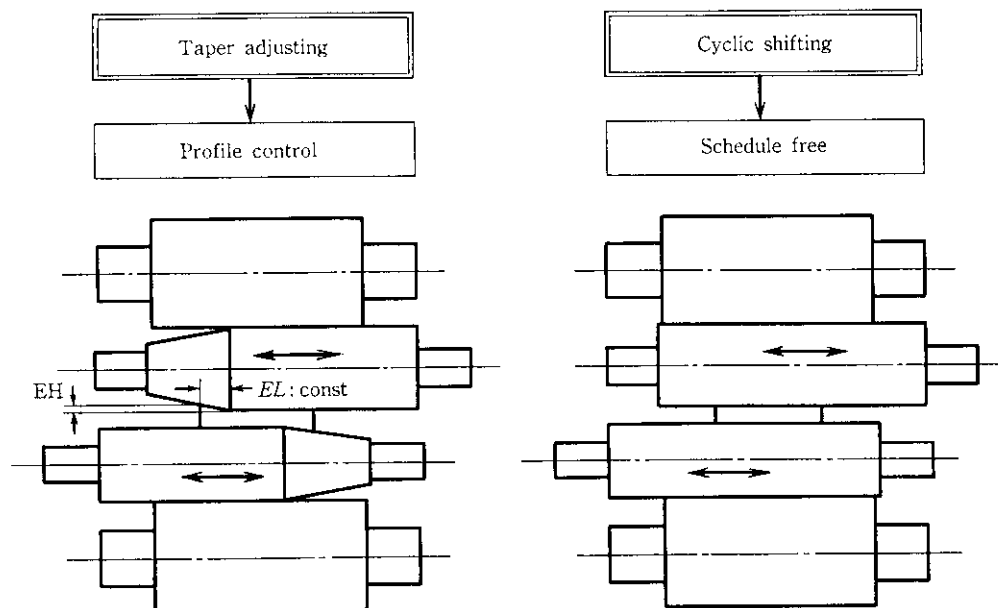
- (1) クラウン、エッジドロップ制御を主目的とした有効テーパ長さ (EL) を一定にするテーパ・アジャスト法
- (2) ロール摩耗分布の平滑化を主目的としたサイクリックシフト法

の2方法がある。これらは材料に対するプロフィールの要求に応じて使い分けられている。Fig. 5 に両シフト法によるロール組替までのサイクル内のクラウン変化を従来の4段圧延機の場合と比較して示す。いずれの方法も従来法に比較して板クラウンは小さく、一定の範囲内で制御されていることがわかる。

3.2 K-WRS ミルのプロフィール制御能力

Fig. 6 に有効テーパ長さ (EL) と板クラウンとの関係につき単スタンドにおいて実機実験した結果を示す。 EL の最適化及び複数スタンドに適用することにより、広範囲のプロフィール制御が可能であることが推定される。

圧延本数の増大に伴う WR テーパ部の摩耗形状は有効テーパ長さを一定にして圧延しても、Fig. 7 に示すように、初期形状を維持している（テーパ部の傾斜及び水平部が摩耗前後で平行）のでプロフィール制御能力は圧延本数が増えても損なわれないことがわか

**Fig. 4** Schematic diagrams of work-roll shifting methods in K-WRS mill

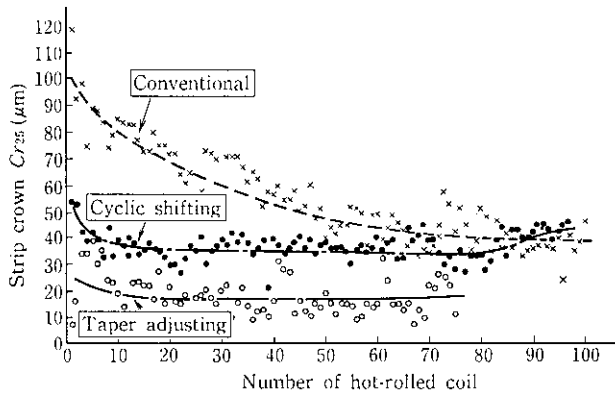


Fig. 5 Strip crowns obtained by taper adjusting method and cyclic shifting method in K-WRS mill and conventional rolling method

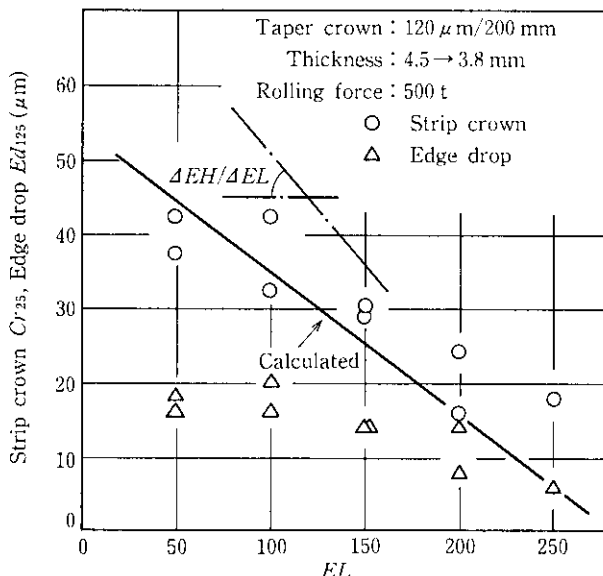


Fig. 6 Effect of EL on crown and edge drop in single stand of K-WRS mill

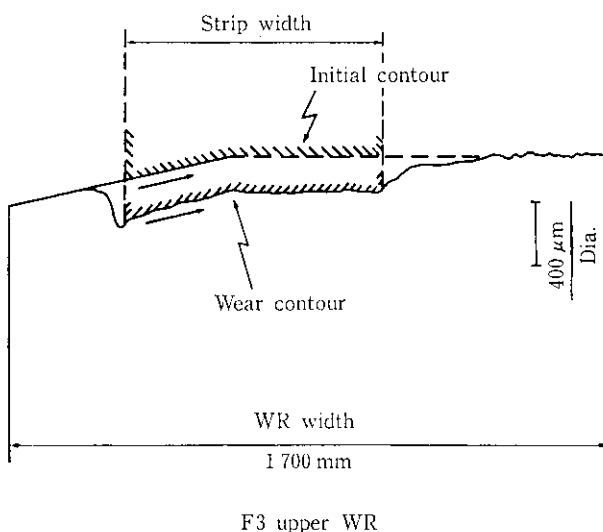


Fig. 7 Typical example of wear contour of work-roll after hot rolling

る。

Fig. 8 に従来の4段ミル、台形クラウンWRミル、K-WRSミルの概念図と代表的な圧延材のプロフィールを示す。狭幅ミルでは

K-WRSミルを採用することにより満足のゆくプロフィール制御機能が得られることがわかる。

3.3 操業実績

千葉 No. 1 ホットストリップミルにおける K-WRS ミルによるプロフィール制御の実績を各製品品種ごとに以下に示す。

(1) ブリキ原板、一般冷延鋼板

同一幅の材料を多く圧延する場合にはサイクリックシフト法を、ブリキ原板の DI 缶素材のように小さいクラウンが要求される場合にはテーパ・アジャスト法を採用して操業している。Fig. 9 (a) に DI 缶素材の代表的な圧延材プロフィールを示す。ロール組替えまでのサイクル内のクラウン変化も小さく、ハイスポットの少ないホットコイルが製造されている。

ブリキ原板はホットコイルのハイスポットに起因する冷延工程における巻取り時の圧着による表面疵や焼鈍時の焼付きが大きな問題のひとつであったが、K-WRS ミルの導入により解決が図られた。また、DI 缶素材、TMW (Theoretical minimum weighing) オーダー材などの小クラウンを要求される材料の大量製造も可能となっている。

(2) 高炭素、低合金鋼板

従来から台形クラウンロールを用いることによりクラウン、エッジドロップの減少に対処してきた。Fig. 9 (b) にプロフィールの一例を示すように、K-WRS ミルによるテーパ・アジャスト法により幅横変化にも対応が可能となり、サイクルを通してクラウン量を 40 μm 以下に制御することが可能となっている。

(3) ステンレス鋼板

ステンレス鋼板は熱延時の変形抵抗が大きく、圧延荷重も高くなるので、普通鋼に比べクラウン、エッジドロップが大きく、これを小さくすることが大きな課題であった。K-WRS ミルを導入し、テーパ・アジャスト法を採用することにより、Fig. 8 (c) に示すように、ほとんどの規格・寸法に対して 40 μm 以下のクラウンに制御することが可能となっている。ステンレス鋼板の熱間圧延では WR をシフトすることによりロールの板幅相当部の肌荒れによる材料表面の悪化が心配されたが、テーパ・アジャスト法ではこの問題は発生していない。

(4) その他の特殊鋼板

製品として板取り後に積層されて使用される電磁鋼板ではクラウン、エッジドロップに対する要求が厳しい材料とエッジビルドアップに対する要求が厳しい材料とがある。前者に対してはテーパ・アジャスト法を採用し、クラウンを 0~30 μm に制御することが可能となり、後者に対してはサイクリックシフト法を採用することにより、60 μm 以下の範囲内に収めることでプロフィールの適正化が図られている。

以上に述べたごとく、千葉 No. 1 ホットストリップミルでは K-WRS ミルとその圧延技術の開発により、ほぼ全鋼種、全寸法にわたりプロフィールの大幅な改善がなされた。

4 水島ホットストリップミルにおける HC ミルの適用

4.1 HC ミルのプロフィール制御原理

Fig. 10 に HC ミルのプロフィール制御原理を従来の4段ミルと比較して示す。4段ミルにおいては、圧延材からの圧延反力により、WR, BUR に図に示すようなたわみを生じ板プロフィールは中高の

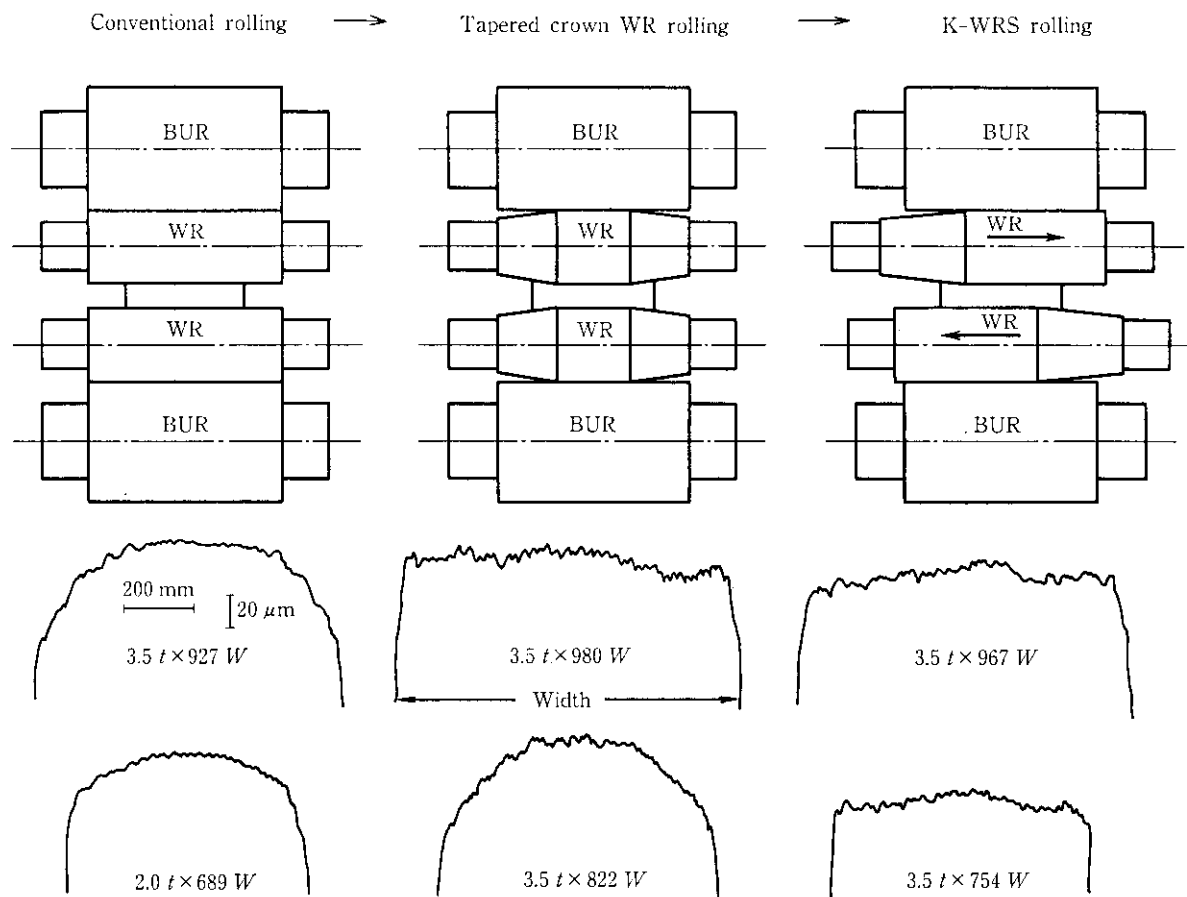


Fig. 8 Improvement of strip profile by K-WRS mill

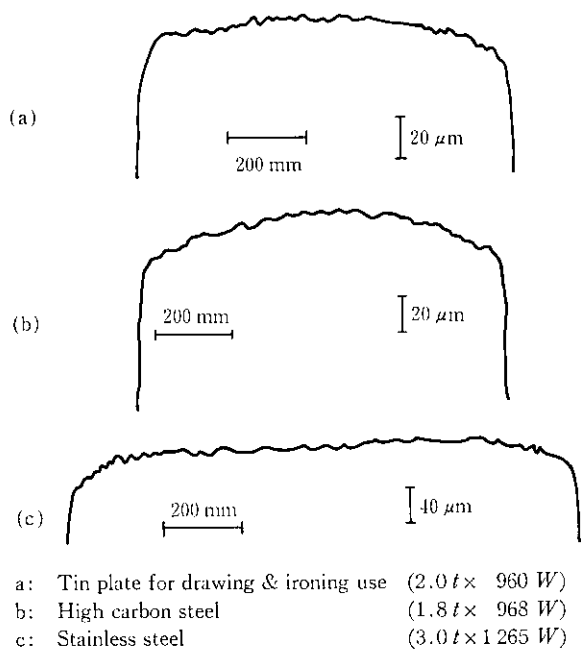


Fig. 9 Typical examples of hot-rolled strip profile by taper adjusting method in K-WRS mill

凸形になる。WRのたわみ量を減少させるため、圧延反力によるロールたわみとは逆方向へロールを曲げる WR ベンダーが従来から設置されていた。しかし、WR と BUR がロールバレル全長にわたって接触しているために、WR ベンダーの効果が小さく、板クラウ

ンを制御する能力はほとんどなかった。

一方、HC ミルでは、上下の WR と BUR の間に、ロールバレル方向にシフトが可能な中間ロール (IMR) を設置し、これを板幅に応じて上下互いに逆方向にシフトすることにより、WR のバレル端で IMR との間に非接触部分をつくる。この結果圧延反力による WR のたわみ量が減少すると共に、WR ベンダーの効果も格段に大きくなる。この IMR のシフト量及び WR ベンダー力を調整することにより、WR のたわみ量を自在に変更でき、板クラウンを広範囲に制御することが可能となる。

また、WR にシフト機構を付加することにより、WR の局部摩耗とサーマルクラウンがロールバレル方向に分散され、ハイスポット抑止も可能となる。即ち、HC ミルは中間ロールシフトと WR ベンダーによる大きなクラウン制御能力と WR シフトによるハイスポット抑止機能を有し、総合的なプロフィール制御が可能なミルである。同時に同一幅連続圧延、幅戻り圧延など、いわゆるスケジュールフリー圧延技術確立のための強力な手段となり得る圧延機である。

4.2 実機適用にあたっての仕様検討

4.2.1 クラウン制御能力と適用スタンド数

水島ホットストリップミルにおける代表的な製品寸法、鋼種の 5 ケースについて、計算により推定したクラウン制御能力を Table 4 に示す。単スタンド制御能力は、仕上ミル最終スタンド (F7) において、平坦度の変化を無視して能力を最大限に発揮した場合である。いずれのケースにおいても十分広い制御能力があることがわかるが、平坦度を良好に保持した状態で板クラウン制御を実行するた

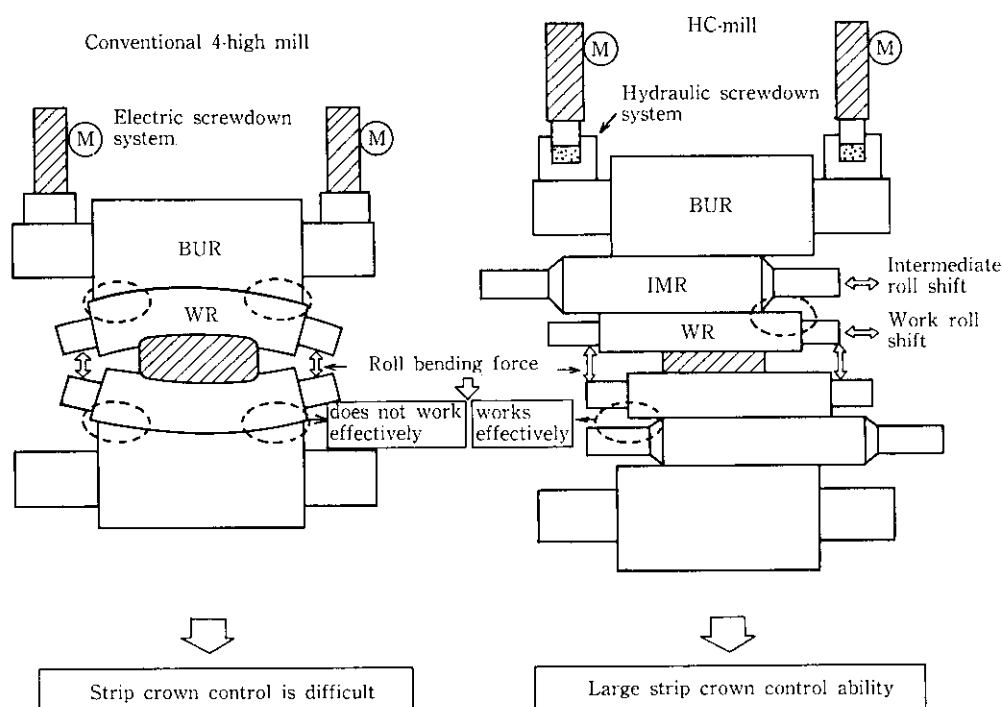


Fig. 10 Comparison of crown control mechanism between conventional 4-high mill and HC mill

Table 4 Strip crown control ability of HC mill (μm)

Case	Products	Amount of crown control ^{a)}		
		F7 single stand	F5, 6, 7, HC mill ^{b)}	F4, 5, 6, 7 HC mill ^{b)}
1	Mild steel 3.2 t $\times$ 2 100 W	194	102	136
2	Mild steel 3.2 t $\times$ 1 200 W	184	115	131
3	High-strength steel 2.3 t $\times$ 1 200 W	140	82	104
4	High-strength steel 2.3 t $\times$ 1 600 W	175	79	94
5	Mild steel 6.0 t $\times$ 950 W	128	94	106

^{a)} Calculation condition for crown control:

IMR shift stroke: $HC\delta = \text{Max} \sim -50 \text{ mm}$
 Roll bender : 0~65 tf/chock
 WR diameter : 650 mm
 IMR diameter : 650 mm
 BUR diameter : 1 320 mm

^{b)} The flatness was assumed as follows:

Inter-stand steepness = $\pm 2\%$
 Final-stand steepness = 0%

めには、複数スタンドに HC ミルを適用する必要がある。

仕上ミルにおける HC ミルの適用スタンド数と、板の平坦度を考慮したクラウン制御能力に関する研究で、クラウン制御能力は、HC ミルのスタンド数が多くなるほど増大するが、後段 3~4 スタンドに HC ミルを適用することによりほぼ飽和することが報告されている¹³⁾。Table 4 には、水島ホット仕上ミル後段 3 スタンド、及び 4 スタンドに HC ミルを適用した場合のクラウン制御能力の比較を示している。平坦度変化の許容値として、スタンド間では急峻度 2%，最終スタンド出側では急峻度 0% とした。表より、いずれの

ケースにおいても、HC ミル適用スタンド数を 3 スタンドとするより 4 スタンドとする方が、クラウン制御能力は増加するが、その差は小さい。3 スタンドに HC ミルを適用することで、ほとんどのケースについて、80 μm 以上のクラウン制御能力があり、ロールのサーマルクラウン及び摩耗に起因する同一圧延サイクル内の板クラウン変化を十分に補償でき、圧延サイクル内の任意の位置で、Fig. 1 に示した用途に応じた最適板クラウン値を達成することができる。さらに、投資額、工事期間などを総合的に考慮して、F5, 6, 7 の 3 スタンドに HC ミルを適用することに決定した。

なお、IMR の最大シフト量は、板幅 800 mm の材料まで $HC\delta = 0$ 圧延 ($HC\delta$ は、IMR ロール端の板端に対する相対位置をいう) が可能のように 750 mm と決定した。

4.2.2 WR シフト量

高温ホットチャージ圧延を軸とした連続・熱延間の物流の最適化をねらいとした総合システムの構築が計画されている。そこでは、単に板エッジに生じるハイスポットによる同一幅連続圧延量の規制の緩和にとどまらず、幅戻り圧延を含む広い意味でのスケジュールフリー圧延技術が必要となり、少なくとも 300 mm の幅戻り圧延が必要となる。このため、ロール摩耗をバレル方向 300 mm にわたって分散させることを目標として WR シフト量は $\pm 150 \text{ mm}$ に決定した。

4.2.3 ロール径配分

HC ミルの総合性能はロール径によるところが極めて大きい。既設ハウジングの上に 6 本のロールを収めるという制限条件のもとで、BUR, IMR, WR の最適ロール径配分を、機械強度面、ロール及び電力の原単位面、寸法制御、走行安定性などの操業面からの総合的な検討¹⁶⁾によって決定した。以下にその概要をのべる。

WR: クラウン制御性、圧延エネルギーの観点からは小径ほど有利である。一方 WR ネックとスピンドルの強度により 585 mm ϕ 以上必要である。また、圧延材の走行安定性の解析によりほぼ 600 mm ϕ を境として、これ以下になると急激に走行安定性が低下することが明らかになり、685~585 mm ϕ に決定した。

IMR: WR—IMR 間のヘルツ応力制限により 515 mmφ 以上必要となり、面圧の点では径が大きい方が有利である。WR, BUR とハウジング寸法に制約されるところが大きい、可能な限り大径化を狙い 675~540 mmφ とした。

BUR: 機械強度面からは大径の方が有利であり、ベアリングネック部の耐疲労強度より 1180 mmφ 以上必要である。一方、原単位面より小径の方が操業コスト的には有利であり、機械強度の制限内で小径化を狙い 1340~1190 mmφ とした。

4.2.4 油圧圧下

板プロフィールと同様に板厚精度に対する要求もますます厳しくなりつつある。電動圧下では、長手方向の板厚変動の制御能力に限界があり、±3% というような厳しい要求精度を工程的に保証することはできなかった。さらに、HC ミル化により板クラウンが小さくなること及び IMR シフトによるミル平行剛性の低下に伴い、圧延材の走行安定性の悪化が懸念された。このため、新たに蛇行制御を適用する必要性が生じた。これらの理由により、F5~F7 スタンドに油圧圧下装置を導入することとし、その応答性、圧下速度、許容荷重などの主仕様は、板厚制御性能、蛇行制御性能及び後段スタンド強圧下圧延への対応を十分に考慮して決定した¹⁷⁾。

4.2.5 その他仕様

後段スタンド強圧下圧延への対応としての F7 スタンド主機モーターの 5600 kW から 8400 kW への増強、各種の制御に十分な能力を有するプロコン、DDC システムの採用、HC ミル化で複雑度が増すロール組替え、移送の完全自動化など多岐にわたってハード、ソフトの更新、増強を実施した。

4.3 操業実績

水島ホットストリップミルにおける HC ミルは、足掛け 1 年に及び改修工事の結果、1983 年 9 月稼働を開始した。以来各種の確実実験を行った結果、当初の計画通りの基本性能を有することを確認した。現在、さらにレベルアップを図っているが、以下に現時点までに得られた操業実績について報告する。

4.3.1 クラウン制御能力

(1) 単スタンドによるクラウン制御効果

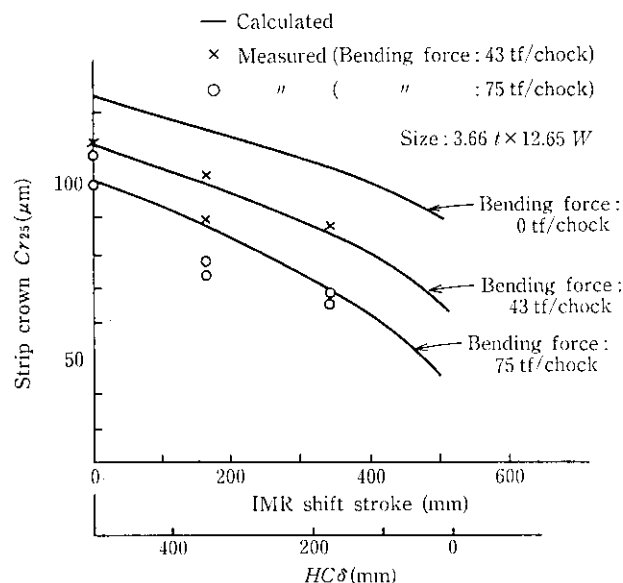


Fig. 11 Comparison between calculated and measured strip crown at F7 stand after hot rolling

Fig. 11 に F7 スタンドのみの IMR シフト量、ベンダー力変更を行った時の板クラウン変化の計算値と実績値の比較を示す。図より、両者はほぼ一致しており、今回の HC ミルが計画通りのクラウン制御能力を有することが明らかとなった。

(2) 3 スタンドによるクラウン制御効果

Fig. 12 に F5~7 スタンドの IMR シフト量、及びベンダー力を同時に変更した時の板クラウン変化を示す。従来と同じような凸型のプロフィールから、ほぼフラットなプロフィールに至るまで広範囲に変更が可能であることがわかる。この図の勾配から IMR シフトの効果は、シフト量変化 1 mm につきクラウン変化 0.1 μm 程度である。また、ベンダーの効果は、IMR シフト量が大きいほど顕著に現われる。本サイズの場合 IMR シフトとインクリーズベンダーの併用で、実績として 80 μm 程度の板クラウン制御能力が確認された。また、HC ミルのクラウン制御能力は一般に広幅材圧延時ほど大きくなることも確認されている。

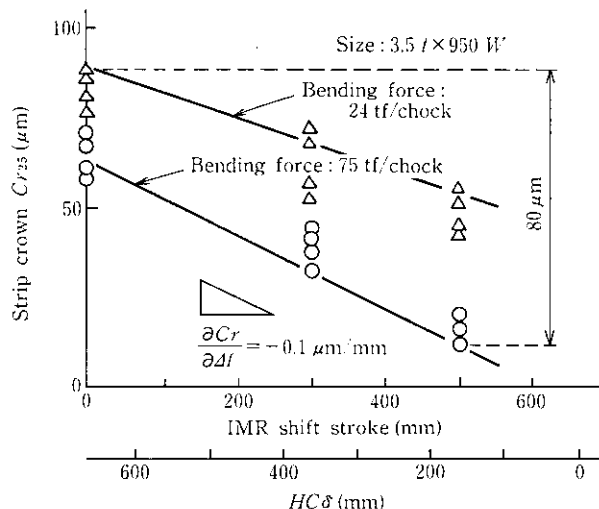


Fig. 12 Effect of IMR shift stroke in F5~F7 stand on hot-rolled strip crown

(3) サイクル内クラウン変化

Fig. 13 に HC ミルでクラウン制御を実施した時の同一圧延サイクル内でのクラウン量推移、及び実測プロフィール変化の例を示す。従来の 4 段ミルではサイクル開始直後の 120~130 μm からサイクル終了直前の 30~40 μm へと 90~100 μm のサイクル内クラウン変動が不可避であったが、HC ミルでは、10~40 μm の範囲に制御することができる。この結果、従来は非常に困難であったクラウンのほとんどないほぼ矩形形状のプロフィールの製品を、サイクル内の任意の位置で容易に作る事が可能になった。

4.3.2 ハイスポット防止効果

WR シフトによるハイスポットの防止効果の一例を Fig. 14 (b) に示す。2.1 mm 厚×950 mm 幅のコイルを連続 50 コイル圧延後も板プロフィールにはエッジハイスポットの兆候は全く見られない。従来は同サイズで 30 本連続圧延でも Fig. 14 (a) のようにエッジ部分にハイスポットが発生していたのに対して著しい改善効果を発揮している。この時の F4 スタンドと F7 スタンドの WR 摩耗プロフィールを Fig. 15 に比較して示す。WR シフトのない F4 スタンドでは板エッジ相当部に局部摩耗が発生した箱形の摩耗プロフィールであるのに対し、WR シフトを行った F7 スタンドでは、局部摩耗

のないきれいなテーパ状摩耗プロフィールを呈しており、予想通りの WR シフト効果を発揮している。

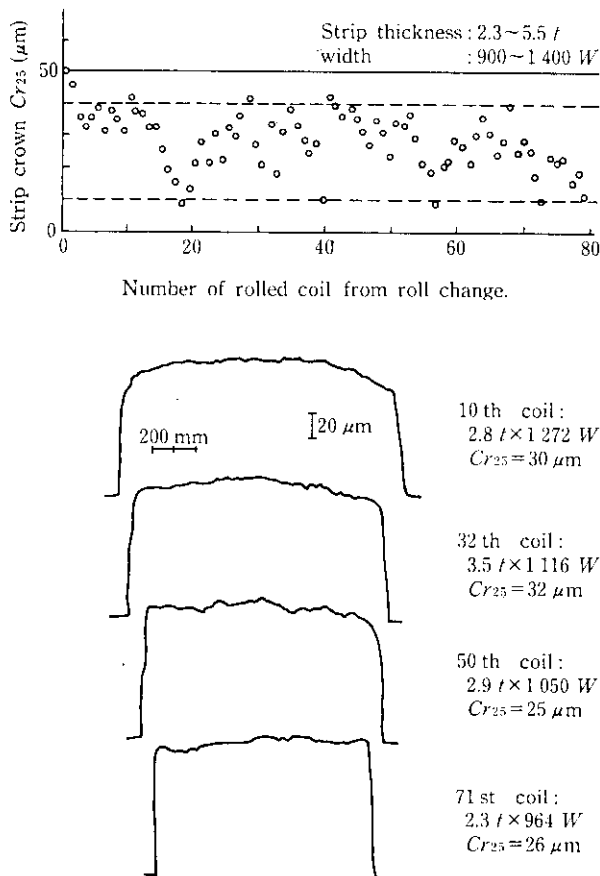


Fig. 13 Change of strip crowns and profiles through rolling cycle

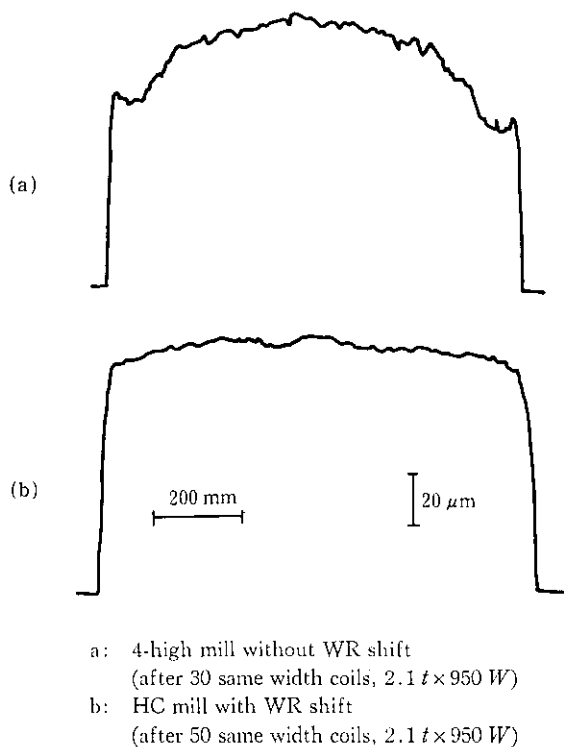


Fig. 14 Comparison of profile after a lot of same width coils rolling between conventional 4-high mill and HC mill

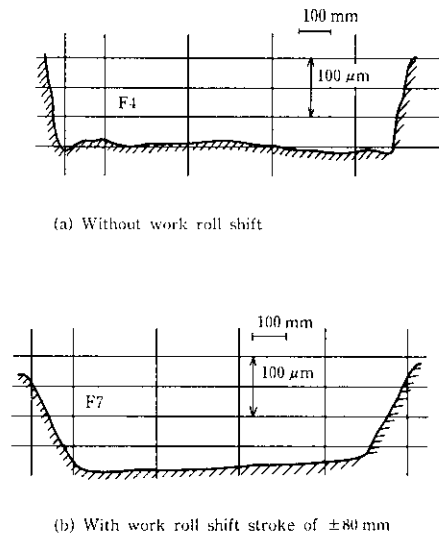


Fig. 15 Comparison of work roll wear contour between 4-high mill (F4) and HC mill (F7)

4.3.3 油圧圧下の効果

高応答速度の油圧圧下による AGC (Automatic gage control) の導入によりストリップ長手方向の板厚精度が著しく向上した。Fig. 16 に、従来の電動 AGC と HC ミル化後の油圧 AGC の場合の板厚チャートと比較する。油圧 AGC の効果がよく現われており、スキッドマークによる板厚の周期的な変動が激減した。Fig. 17 に板厚別の板厚精度の比較を示す。特に中板以上の改善効果が顕著である。

油圧圧下のもうひとつの応用技術として蛇行制御をオンライン化した^(18,19)。これは圧延材のオフセンター量を左右ハウジングに生じる圧延荷重差の変化として把握し、圧延荷重差信号により油圧レベリング圧下を自動制御するものである。特に薄物材での尾端の絞り込み防止に顕著な効果があることが確認されている。

以上に述べたように、HC ミルの導入により、ミルの基本性能としてのプロフィール制御能力、ハイスポット防止効果、油圧圧下によ

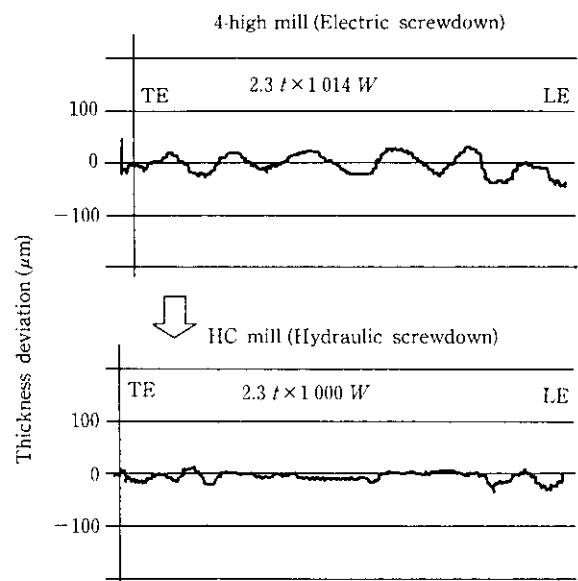


Fig. 16 Comparison of gage accuracy between 4-high mill with electric screwdown and HC mill with hydraulic screwdown

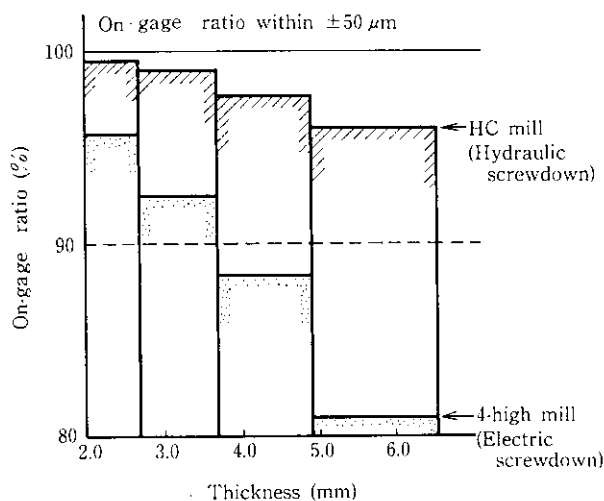


Fig. 17 Improvement gage accuracy by hydraulic screwdown in HC mill

る板厚制御効果など、ほぼ計画通りの性能が確認され、需要家の品質要求に十分応えうる製造体制が確立された。

5 平坦度制御

熱間圧延において平坦度良好な板を生産することは、プロフィール制御と並んで最重要課題である。製品としての平坦度を良好に保つためには、

- (1) 仕上ミルにおける平坦度制御技術
- (2) ランアウトテーブルでの冷却過程における平坦度制御技術の確立が重要である。

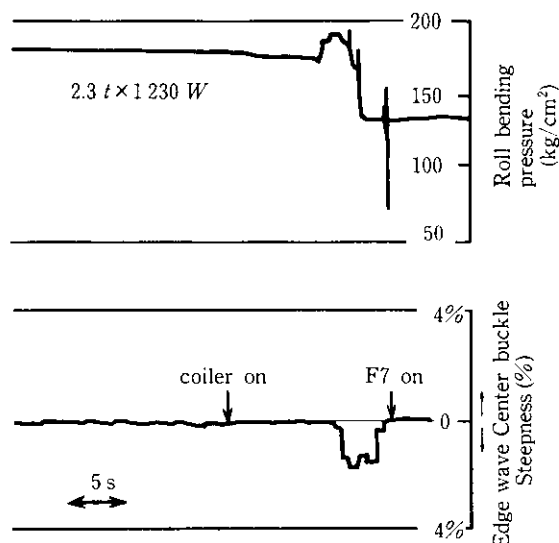
水島ホットストリップミルでは、上記について、それぞれ特色ある画期的な技術の開発、実用化に成功し、多大な効果を得ている。本章では、それらの概要を紹介する。

(1) 仕上ミルにおける平坦度制御

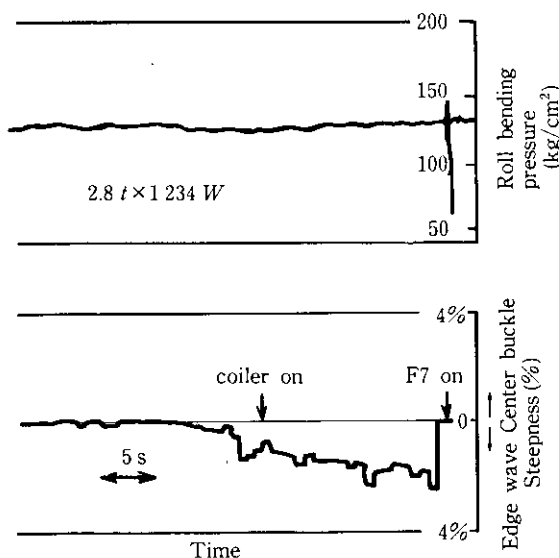
仕上ミル出側での平坦度を定量的に高精度に測定できる水流式形状検出器²⁰⁾の開発に成功した。本装置はランアウトテーブル上での板の上下動を、板幅方向 3~5 箇所（水島では 3 箇所）で、板下方より板面に水流を噴射するように配置したノズルからの水柱の電気抵抗の変化に変換して測定し、板の急峻度を連続的に測定するものである。この検出器は水滴、蒸気などの悪環境下での測定精度 ($2\sigma = \pm 0.22\%$)、及び装置の保全性に極めて優れている。この形状検出器とロールベンダー、及び仕上圧下配分を連動した閉ループ平坦度制御システムを開発し¹⁾、4 段ミルでの平坦度制御を実施してきた。Fig. 18 に 4 段ミルでのフィードバック平坦度制御例を示す。板先端部の耳伸形状を自動的にフラットに修正していることが判る。

HC ミルにおいては、スタンド間の平坦度と最終スタンド出側の平坦度、クラウンを目標値に制御するためのクラウン・平坦度セットアップシステムの開発を進めている。さらに板長手方向に対しては形状検出器からのフィードバック信号により最終スタンドのロールベンダーをダイナミックに制御する閉ループ制御と、圧延荷重変動による平坦度変化を防止するためのフィードフォワード制御を適用している。なお、IMR シフト位置によりベンダー効果が大きく異なるため、シフト位置に応じた最適自動ゲイン設定が可能なシステムとなっている。

(2) 冷却過程における平坦度制御



(a) With flatness control



(b) Without flatness control

Fig. 18 Effect of feed back flatness control on strip flatness in 4-high mill

仕上ミル出側での平坦度をフラットに制御しても、仕上圧延後の冷却過程における板幅方向の温度不均一に起因して冷却終了後の平坦度が耳波となる場合が多い。このような冷却過程における平坦度変化を制御するために、ホットランクーラント上部冷却装置に Fig. 19 のような CT (巻取温度) 幅方向制御装置を設置した。

この幅方向温度不均一（エッジ部分の温度低下）による耳波形状発生メカニズムは、冷却過程においてエッジ過冷部に発生した圧縮応力が臨界座屈応力を越えた際に、板エッジ部が座屈することによることが確認されている^{2,21)}。

CT 幅方向制御装置は、このようなホットランクーラントにおける板エッジ部の過冷却を防止するために、板エッジ部にかかる冷却水を一部遮へいするものである。Fig. 20 に CT 幅方向制御装置の使用の有無による冷却後の急峻度の比較を示す。本制御により冷却後の平坦度が著しく改善されている。

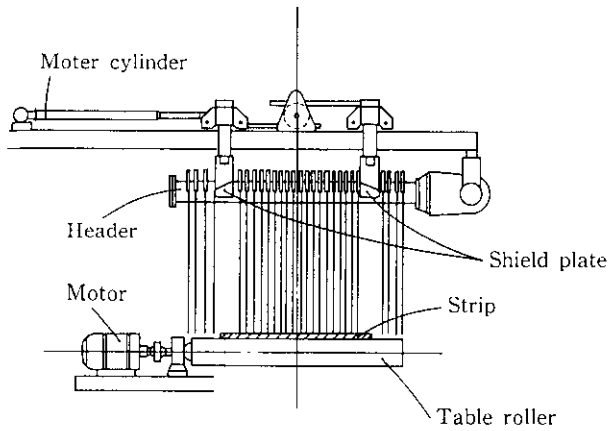


Fig. 19 Schematic diagram of cooling device with shield plate on runout table

以上に述べたように、従来平坦度制御に対する最大のネックポイントであった形状検出器を完全に実用化したことと、HC ミルという強力なアクチュエーターを設置したことにより、仕上ミルでの平坦度制御はほぼ完成した。さらに、CT 幅方向制御により冷却過程における平坦度変化を防止することが可能となり、需要家での良好な平坦度を保証する製造技術が確立できた。

6 結 言

千葉 No. 1 ホットストリップミルに K-WRS ミル、水島ホットストリップミルに HC ミルの実機適用を完了しいずれも順調に稼動している。両者共に、大きなプロフィール制御機能を有しており、ほぼ全ての製品に対して板クラウン 40 μm 以下を達成することが可能となり、期待通りの成果を発揮している。

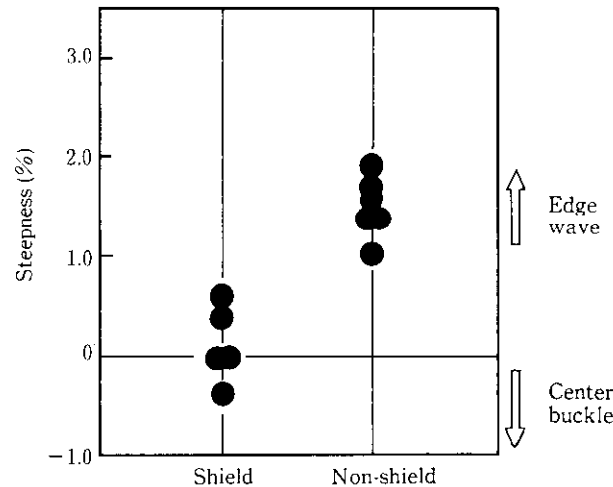


Fig. 20 Comparison of flatness after cooling between shield and non-shield

さらに、水島ホットストリップミルにおいて、形状検出器とワークロールベンダーによる仕上ミル平坦度制御に加えて、CT 幅方向制御法によるランアウトテーブル冷却過程での平坦度制御技術を開発した。本技術により最終製品の良好な平坦度を保証することが可能となった。

以上により、高度な品質要求にも十分にこたえうる板厚精度、プロフィール、及び平坦度の優れたホットストリップ製品を安定して製造する技術が確立できた。

今後、本技術を発展させて、連铸から熱延までの製造工程の連続化を高度に達成するために必要なロールチャンスフリー技術の確立を図ってゆく予定である。

なお、千葉 No. 2 ホットストリップミルに対しても K-WRS ミル及び平坦度制御の導入を図っている。

参 考 文 献

- 1) 北尾斉治, 広瀬勇次, 齊川夏樹, 江端貞夫, 浜田圭一, 直井孝之: 「水流式形状検出器によるホットストリップミルの形状制御」, 塑性と加工, 23 (1982) 263, 1145~1151
- 2) 吉田 博, 佐々木徹, 田中智夫, 広瀬勇次: 「ホットストリップ冷却後の平坦度不良の解析」, 鉄と鋼, 68 (1982) 8, 965~973
- 3) 土屋健治, 福田武幸, 若子敦弘, 猪井善生: 「ホットストリップにおけるプロフィール制御方法」, 鉄と鋼, 61 (1975) 12, S552
- 4) 北浜正法, 北村邦雄, 田中富夫, 豊島 貢: 「テーパ付ワークロールシフトミルによる熱延鋼板のクラウン制御」, 塑性と加工, 23 (1982) 263, 1165~1171
- 5) 鑑田征雄, 北村邦雄, 中川吉左衛門, 玉井敏行, 若嶋英彦: 「圧下率配分の変更によるホットストリップのクラウン制御」, 塑性と加工, 21 (1980) 238, 990~998
- 6) 神居詮正, 寺門良二: 「ホットストリップミル仕上圧延における異径ロール圧延法の研究」, 塑性と加工, 17 (1976) 191, 966~972
- 7) 木城 恒, 木崎俊司, 宮阪清人: 「ダブルショックワークロールベンディングによるクラウンと形状の制御」, 塑性と加工, 23 (1982) 263, 1132~1138
- 8) 足立明夫, 豊島 貢, 福岡 謙, 浅川長正, 北村邦雄, 鑑田征雄, 片岡健二, 中川吉左衛門: 「台形クラウン付ワークロールによるホットストリップのエッジドロップ減少圧延方法の適正化」, 昭和53年度塑性加工春季講演会講演論文集, (1978), 45~48
- 9) 渡辺英一, 本郷政信, 西本正則, 徳長啓恵: 「ホットストリップにおける大クラウンバックアップロールによる板プロフィール制御」, 塑性と加工, 23 (1982) 263, 1139~1144
- 10) 梶原利幸, 藤野伸弘, 西 英俊, 芳村泰嗣, 志田 茂: 「新形圧延機“HC-MILL”の圧延特性」, 日立評論, 58 (1976) 9, 689~694
- 11) 福井嘉吉, 中西恒夫, 杉山徳治, 西村貞夫: 「熱間帯鋼圧延におけるHC-MILLの応用」, 日立評論, 64 (1983) 2, 97~102
- 12) 益居 健, 山田純造, 長井俊彦, 西野隆夫: 「可変クラウンロールによる板の形状・プロフィール制御」, 塑性と加工, 23 (1982) 263, 1188~1194
- 13) 大森舜二, 塚本寛彦, 日野裕之, 中島浩衛, 森本磨雄, 中沢 吉: 「ベアクロス方式圧延機の開発(第1報)」, 第33回塑性加工連合講演会講演論文集, (1982), 419~422
- 14) 川並高雄, 松本結美: 「薄鋼板圧延における各種の形状・クラウン制御法の発展」, 鉄と鋼, 69 (1983) 3, 348~356
- 15) 中島浩衛, 菊間敏夫, 梶原利幸, 谷口哲二, 木村智明, 中西恒夫: 「“HC-MILL”によるホットストリップの板クラウン・形状制御」, 日立評論, 61 (1979) 9, 1~6
- 16) 直井孝之, 柴田克巳, 浜田圭一, 梅本純生, 広瀬勇次, 三宅祐史: 「水島熱延ハイクラウン制御ミルの基本仕様」, 鉄と鋼, 70 (1984) 5, S430
- 17) 高木 清, 内藤 謙, 浜田一明, 浜田圭一, 渡辺敏雄, 中野貞則: 「水島熱延ハイクラウン制御ミルの機械設備」, 鉄と鋼, 70 (1984) 5, S431
- 18) 木村智明, 田川昌良: 「ストリップ圧延における蛇行制御」, 日立評論, 65 (1983) 2, 115~120
- 19) 尾崎一貴, 浅田宏一, 村田寛夫, 田川昌良, 橋本 直, 内藤 清: 「熱間仕上圧延機における蛇行制御」, 第34回塑性加工連合講演会講演論文集 (1983), 225

- 20) 江端貞夫, 井上利夫, 齊川夏樹: 「水流電気抵抗式平坦度検出装置」, 川崎製鉄技報, 10 (1978) 4, 91~98
- 21) 宮口雅史, 山田信男, 三芳 純, 三宅祐史, 滝沢 昇, 吉田 博: 「幅方向冷却制御によるホットストリップの平坦度改善」, 鉄と鋼, 68 (1982) 12, S 1132