

田野村 忠郎^{*2} 菱沼 至^{*3} 足立 明夫^{*4} 竹谷 昭彦^{*5} 広瀬 勇次^{*6} 三宅 祐史^{*7}

Crown Control of Hot-Rolled Stainless Steel Coils

Tadao Tanomura, Itaru Hishinuma, Akio Adachi, Akihiko Takeya, Yuji Hirose, Yushi Miyake

要旨

熱延鋼板のクラウン（幅方向板厚偏差）に対する需要家は年々厳しくなっており、特にステンレス鋼板などの特殊鋼については一段と厳しい。この要求に応えるため、1983年6月、千葉製鉄所 No. 1 熱延工場に片台形ワークロールシフトを主体とした Kawasaki Steel-Work Roll Shifting mill を、1983年9月には水島製鉄所熱延工場に中間ロールシフトおよびワークロールベンダーを主な制御手段とした HC ミル (High crown control mill, 6-high) を導入しステンレス鋼板に適用した。その結果、従来の4段圧延機に比べてクラウン制御能力を大幅に向上させることができ、断面形状がほぼ矩形に近いステンレス熱延鋼板の製造が可能となった。

Synopsis:

User's demand for the decrease in the traverse gauge deviation of hot-rolled strip is becoming more serious year after year, especially for the stainless or other special steel. To satisfy this demand, K-WRS (Kawasaki Steel-Work Roll Shifting) mill, which controls the strip crown by shifting a tapered work roll, was applied to Chiba No. 1 hot strip mill in June 1983. And HC mill (High crown control mill, 6-high), equipped with the IMR shifting device and work roll bender, was installed in Mizushima hot strip mill in September 1983. As a result, the capability of controlling the strip-crown has been improved to produce the stainless steel hot coil with a smaller strip crown and square cross section by applying the respective control methods used in K-WRS and HC mills.

1 緒 言

ホットコイルの寸法精度を決定する要素に板厚、板幅および板クラウン (Fig. 1 に示す様に板の中高の大きさを表す) がある。板厚と板幅に対しては、それぞれ AGC (Automatic gauge control) と AWC (Automatic width control) が多くの熱延ミルで導入されている。最近ではより応答性の高い油圧 AGC や油圧 AWC の採用も盛んである¹⁾。

板クラウンに関しては異径ロール圧延²⁾、強力ワークロールベンダー³⁾ などにより低減が図られ、当社でも台形ロール圧延法⁴⁾ を採用して需要家各位の要求に対応してきた。しかし、いずれの方法を用いても十分満足できる効果は得られず、特にステンレス鋼板の様に断面形状が矩形 (ゲッドフラットと呼ばれる) に近い板を求められる場合には、その要求に対応しきれないのが実情であった。

近年、クラウンに対する要求がさらに高まるにつれ、鉄鋼各社ともクラウン制御ミルの導入を実施、あるいは計画する様になってきた。当社は、早くからクラウン制御ミルの導入に積極的で、1983年6月に千葉 No. 1 熱間仕上ミルに4段ワークロールシフトミルである Kawasaki Steel-Work Roll Shifting mill (K-WRS ミル) を導入するとともに⁵⁾、1983年9月には水島熱間仕上ミルに6段圧延機である HC ミル (High crown control mill)⁶⁾ を導入した。さらに1986年春には、千葉 No. 2 熱間仕上ミルに K-WRS に強力ワークロールベンダーを組合わせたクラウン制御ミルの導入を予定しており、この改造終了時点で当社保有の3基の熱間仕上ミルすべてがク

ラウン制御ミルへ脱皮することとなる。

本報告では、K-WRS ミルおよび HC ミルのクラウン制御方法、ならびにそれぞれのミルでステンレス鋼板を圧延した結果について述べる。

2 熱延鋼板のクラウン

熱間圧延ロールによって圧延材に圧下を加える際、圧延材から受けた反力でロールの軸心が撓み、ロール表面が偏平する。特にステンレス鋼板の様に、一般材に比較して変形抵抗が高い材料についてはロールの受ける反力が大きく、撓みや偏平が大きくなる。またロールは圧延を重ねていくに従って摩耗と熱膨張を生じる。摩耗はロールへの圧延負荷と圧延長の積にほぼ比例して増加する。ロール熱膨張は、被圧延材との接触、摩擦、輻射による入熱のために生じるが、この際ロール胴長方向で主に熱を受ける胴長中央部分と熱を受けないロール端部で熱膨張量に差があるため、幅方向に分布を持った膨らみとなる。この膨らみはサーマルクラウンと呼ばれる。

以上のように、熱延板のクラウンは撓み、偏平、摩耗、熱膨張 (サーマルクラウン) の4つの要素に支配される。

3 従来のクラウン制御

従来のクラウン制御はワークロール (以下 WR と記す) の撓みを緩和する方法が主流であった。そのためベンダーにより WR の両端を押し広げる方法、および WR の初期カーブを凸にすること

*1 昭和60年5月13日原稿受付

*2 千葉製鉄所熱間圧延部熱延技術室

*3 千葉製鉄所熱間圧延部熱延技術室主査 (掛長)

*4 千葉製鉄所熱間圧延部第1熱間圧延課課長

*5 水島製鉄所薄板圧延部薄板技術室

*6 水島製鉄所薄板圧延部薄板技術室主査 (掛長)

*7 千葉製鉄所企画部企画室主査 (部長補)

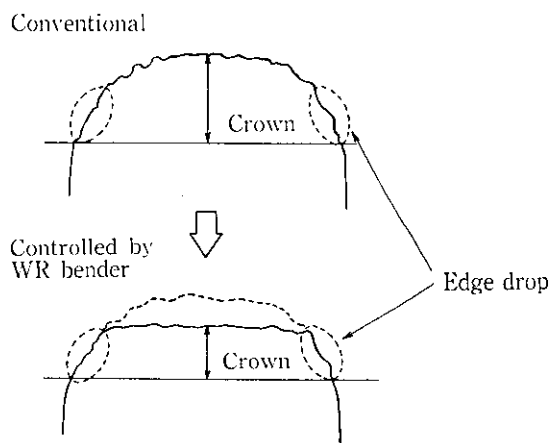


Fig. 1 Effect of WR bender on crown and edge drop of stainless steel strip

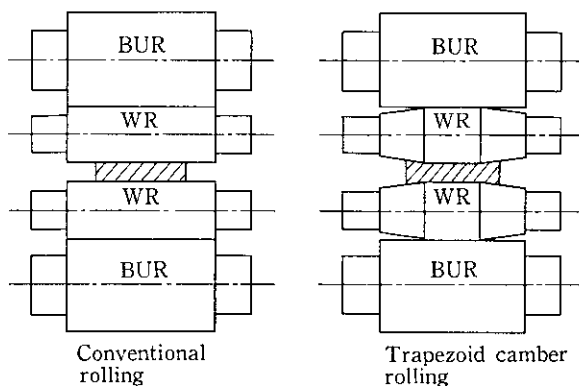


Fig. 2 Schematic diagram of conventional and trapezoid camber rolling

によりロール端部の接触圧力を緩和する方法が採られた。後者はロールの幾何学的形状より直接クラウンを減少させる効果もあった。

しかしこの方法では板クラウン中央部の膨らみを減少させることはできたが、Fig. 1 に示すような板エッジに近い部分に発生するエッジドロップと呼ばれる局所的な板厚減少についてはほとんど無力であった。

従来法の欠点を補うべく、当社が他社に先駆けて両台形ロール圧延法を開発した⁹⁾。Fig. 2 にその概念図を従来法と比較して示す。両台形法は WR の胴端部をテーパ状にすることにより、エッジ通板部のロールギャップが従来法に比べて増加し、WR とバックアップロール（以下 BUR と記す）の胴端部の接触圧も大幅に低下させることができたため、エッジドロップも改善された。しかし台形ロールの形状が固定のため、同一の台形ロールで効果を発揮できる板幅、および圧延できる板幅に制約があった。したがって圧延材の構成（圧延スケジュール）を作成する上で支障をきたした。

4 クラウン制御ミル

Table 1 に千葉 No. 1 熱間仕上ミルに設置された K-WRS ミルおよび水島熱間仕上ミルに設置された HC ミルの仕様を示す。

4.1 K-WRS ミルのクラウン制御

K-WRS ミルの使用方法には大別して 2 通りある。一つは、一般冷延材等を対象として、クラウンの制御よりむしろハイスポット

Table 1 Specifications of K-WRS mill and HC mill

Mill	Item	Specification
Chiba No. 1 hot strip mill (K-WRS)	Roll size	WR : 597 ~ 700 $\phi \times 1700$ L mm BUR : 1118 ~ 1255 $\phi \times 1372$ L mm
	Work roll shift	Stroke : ± 275 mm max Force : 100 tf max
	WR bending force	Increase : 53 tf/chock max
Mizushima hot strip mill (HC)	Roll size	WR : 585 ~ 685 $\phi \times 2380$ L mm IMR : 540 ~ 675 $\phi \times 2345$ L mm BUR : 1190 ~ 1340 $\phi \times 2300$ L mm
	Shift stroke	IMR : 0 ~ 750 mm WR : ± 150 mm
	Work-roll bending force	Increase : 75 tf/chock max
		Decrease : 75 tf/chock max (only for upper roll)

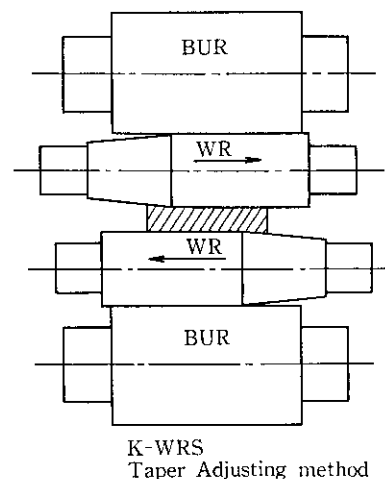


Fig. 3 Schematic diagram of K-WRS mill

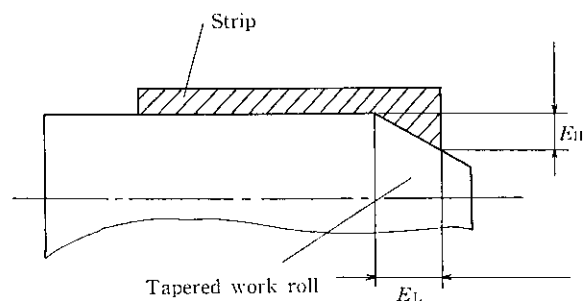


Fig. 4 Definition of E_H and E_L

（ロールの局部摩耗によって生じる鋼板の異常突起）などを防止するため、テーパを付与しないロールを用い、それをサイクリックにシフトさせる方法（サイクリックシフト法、CS 法^{7,8)}と呼ぶ）である。もう一つは、両台形法より発展した片台形ワークロールシフト法（テーパアジャスト法、TA 法^{9,10)}と呼ぶ）である。ステンレス鋼板には TA 法を適用している。

TA 法は、従来の両台形法より広範囲なクラウン制御性を持たせるべく、WR の片側にテーパを切り点対称に配置し、圧延材の板幅

に応じて上下 WR を軸方向に可動としたものである。Fig. 3 にその制御概念図を示す。クラウン制御パラメータは圧延材に対するテーパ量、すなわち Fig. 4 に示す E_L (Effective length) および E_H (Effective height) の値である。千葉 No. 1 熱間仕上ミルにおいては、 E_L 値は最大シフト量 275×2mm の範囲で変更できる。従来法では、同一圧延スケジュール内に組み込まれた圧延材のなかで、特にクラウン制御を必要とされる材料の幅に限定して、ロールテーパ量を決めていた。これに対し、TA 法では、同一圧延スケジュール内に組み込まれた圧延材の幅ごとに適正なテーパ量を選択できるため、クラウンを制御できる範囲が拡大し、圧延スケジュール作成上の制約も大幅に緩和された。

4.2 HC ミルのクラウン制御⁹⁾

Fig. 5 に HC ミルによるクラウンの制御原理を示す。HC ミルは、上下の WR と BUR の間にロールパレル方向にシフト可能な中間ロール（以下 IMR と記す）を設置し、さらに WR にもシフト機構を付加することによりクラウン制御を行っている。

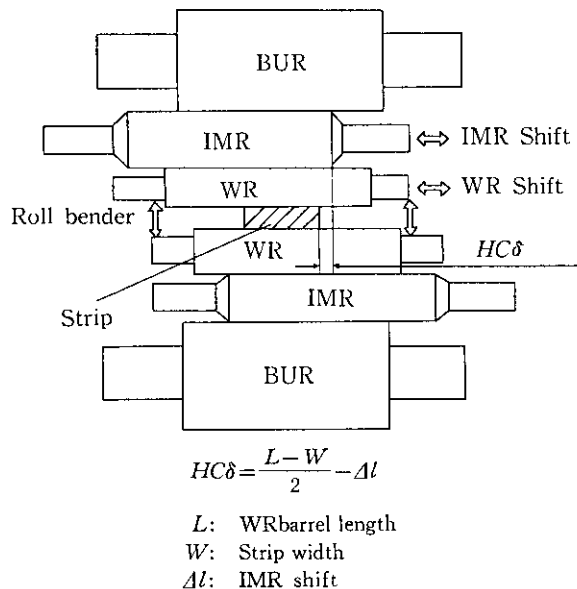
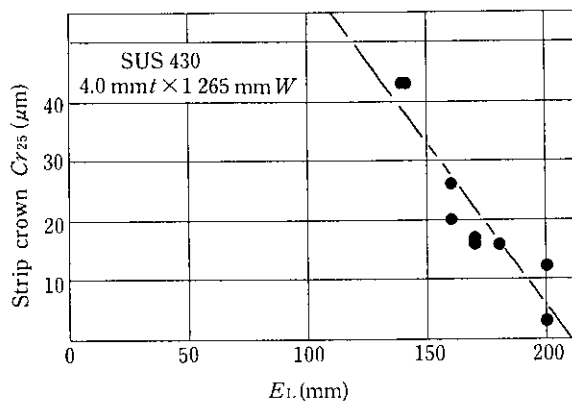


Fig. 5 Schematic diagram of HC mill



F3 upper WR
 Material : high carbon steel
 Size : 3.3~3.5 mm t x 668~967 mm W
 Amount of rolling materials : 602 t

Fig. 6 Effect of E_L changing on strip crown

IMR のシフト効果は、WR のパレル端で IMR との間に非接触部分をつくり、WR 端部におけるロール同士の接触圧を減少させ、撓みを減らすものである。板幅に応じて IMR のシフト量を調整して、板の端部と IMR のロール端部との距離、すなわち圧延材が接触していない WR の部分と IMR が接触している長さ（これを $HC\delta$ と記す）を変化させることにより、WR の撓み量を制御できる。いっぽう、ワークロールベンダーの効果も、IMR シフト量を大きく、すなわち $HC\delta$ を小さくすることにより増大する。したがって、HC ミルは IMR シフト効果により、従来の 4 段ミルに比較して強力なクラウン制御能力が得られる。また、ワークロールシフトを同時に使用することにより、もっと範囲の広いクラウン制御および圧延スケジュール規制の緩和が可能なミルである。

5 クラウン制御ミルのステンレス鋼板への適用

K-WRS ミルおよび HC ミルにおいてステンレス鋼板のクラウン制御を行った結果について述べる。

5.1 K-WRS ミルによるステンレス鋼板のクラウン制御

K-WRS ミルが設置されている千葉 No. 1 熱間仕上ミルは主にフェライト系およびマルテンサイト系ステンレスを圧延している。

5.1.1 E_L 値変更の効果

Fig. 6 に、板厚 4.0 mm×板幅 1265 mm の SUS 430 鋼を、K-WRS ミルで E_L 値を変更して圧延した場合のクラウン変化の一例を示す。板端から 25 mm の位置と板幅中央の板厚差 (Cr_{25}) でクラウンを評価する。

$$Cr_{25} = h_c - \frac{h_{W25} + h_{D25}}{2} \quad (1)$$

h_c : 板幅中央の板厚

h_{W25} : 板端より 25 mm の板厚 (work side)

h_{D25} : 板端より 25 mm の板厚 (drive side)

この場合、 E_L 値を 140~200 mm の範囲で変更することにより、 Cr_{25} を約 0~40 μm に制御することができる。また、TA 法で制御効果を十分得るためには、圧延スケジュールの進行につれて摩耗したロールの形状が、最初に与えられたロール形状と同じであることが必要である。TA 法を用いた場合のロール摩耗例を Fig. 7 に示す。ロールの摩耗底のテーパ形状が、ロール研削時に付与したテーパ形状と同じであり、圧延スケジュール内のその時点でもこの E_L

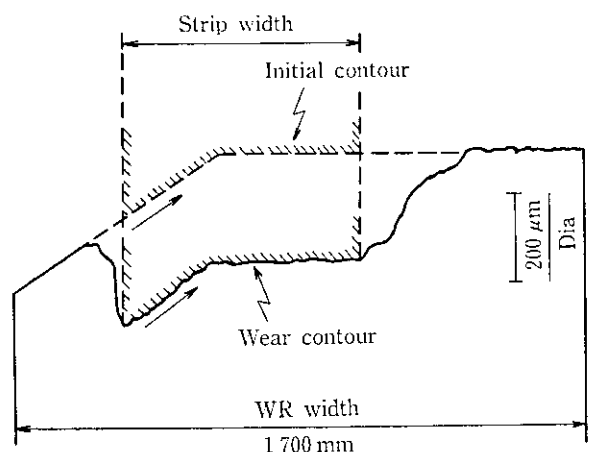


Fig. 7 Typical example of wear contour of tapered work roll after hot rolling

値変更による制御効果が持続されることが確認された。

ただし、ロール摩耗が進行した段階で、前圧延材に対して E_L 値を増加させることや、前圧延材よりも幅の広い材料を組込むことは、板エッジがロールのボックス型に摩耗した部分をまたいで通板されるため、大きなエッジドロップを招く。また SUS 430 鋼の場合は、他のステンレス鋼に比較して変形抵抗が小さく、 E_L 値を大きくとることによってクラウン制御効果を得やすいが、SUS 420 J₂ 鋼などのマルテンサイト系で変形抵抗が高い材料について、あまり大きな E_L 値を選択すれば通板性を阻害する場合があります、 E_L 値の設定範囲は限られる。

したがって、これらを考慮し、TA 法の機能を充分发挥することのできるように圧延スケジュールの構成および E_L 値の最適設定を行っている。

5.1.2 板クラウン・プロフィール

Fig. 8 は圧延スケジュール内の板クラウンの推移を示す。スケジ

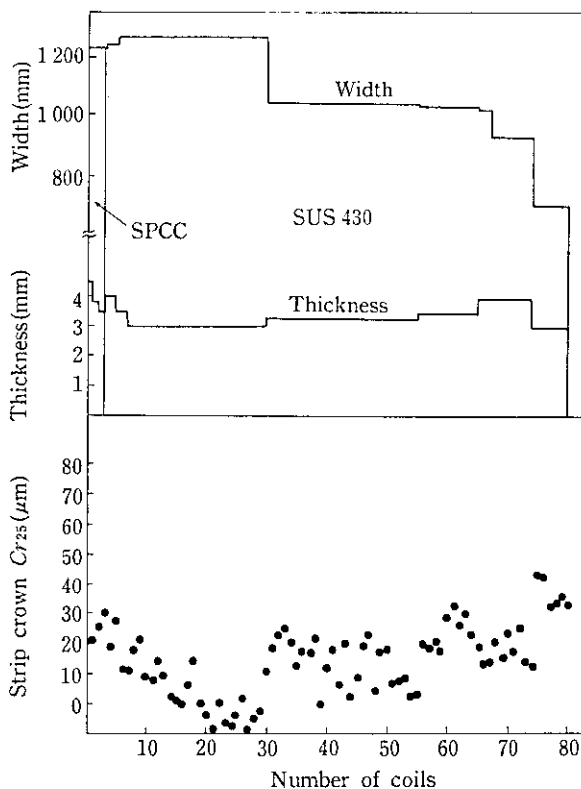


Fig. 8 Change of strip crown in hot rolling schedule by K-WRS mill (SUS 430)

ュールの厚みは 3~4 mm、幅は 720~1 260 mm と変化している。従来の方法では、台形ロールを用いてもある特定のサイズでしか十分なクラウン制御効果が得られず、スケジュールを通した Cr_{25} の平均値は約 100 μm であった。TA 法を用いれば圧延スケジュールの構成を考慮し、 E_L 値を適切に設定することにより、幅と厚み変動しても圧延スケジュールを通して、 Cr_{25} を 0~40 μm に制御することが可能となった。

SUS 430 鋼に対して TA 法を適用した場合の一般的なプロフィール（クラウン、エッジドロップ、ハイスポットなどからなる幅方向の板厚分布）の例を Fig. 9 に示すが、ほぼ矩形に近いプロフィールが得られている。

5.1.3 制御結果

K-WRS ミルの TA 法によるクラウン制御結果の一例を SUS 430, 410, 420 J₂ について Table 2 に示す。従来法では板厚 3.0~3.3 mm×板幅 1 000~1 300 mm の SUS 430 鋼、および板厚 4.0~5.3 mm×板幅 1 000 mm の SUS 410 鋼の Cr_{25} は約 100 μm あったが、TA 法を適用することによりほとんどが約 40 μm 以下となり、その平均値は 0~30 μm と、従来法のそれと比較すると、1/3 以下に低減することができた。

5.2 HC ミルによるステンレス鋼板のクラウン制御

HC ミルが設置されている水島熱間仕上ミルは、SUS 304 鋼の板

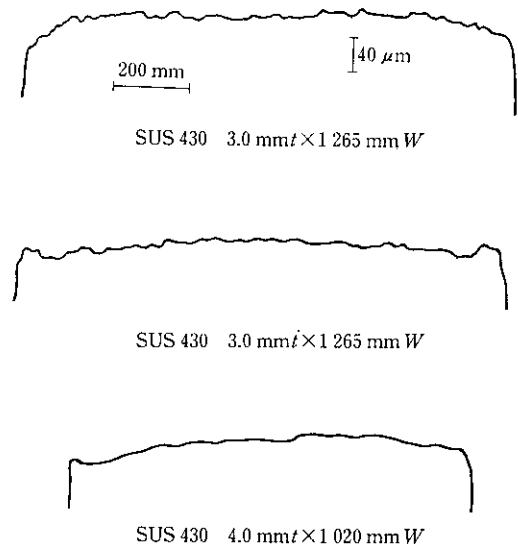


Fig. 9 Typical profiles of SUS 430 steel by K-WRS mill

Table 2 Crown control capability in K-WRS mill

Materials	Product size* (mm)	n**	Cr_{25} (μm)							
			-20	0	20	40	60	80	100	120
SUS 430	3.3×1 000	159			23					
SUS 430	3.0×1 219	133		4						
SUS 410	4.0~5.3×1 000	115		11						
SUS 420	5.0~8.0×914~1 000	73			24					
SUS 420 J ₂	4.0~5.5×914~1 000	61				48				

* Thickness × width

** Number of coils examined

○ Conventional

● K-WRS

厚公差が厳しい材料およびクラウンに対する要求が厳しい材料を主に圧延している。以下、SUS 304 鋼に対する HC ミルのクラウン制御技術および適用結果について述べる。

5.2.1 クラウン制御効果

Fig. 10 に、F5~7 スタンドの IMR シフト量およびワークロールベンダー力を、同時に変更した時の板クラウン変化を示す。IMR シフト量を 0~400 mm の範囲で変化させることにより、 Cr_{25} を 40~50 μm 制御することができる。この図の勾配から IMR のシフト効果は、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。また本サイズの場合、IMR シフトとベンダーの併用により約 70 μm のクラウン制御量を有することが確認された。

5.2.2 形状対策

HC ミルは、SUS 304 鋼に対しても普通鋼と同様に広範囲なクラウン制御能力を有する。しかし、スタンド間および仕上ミル出側における形状は各スタンド出側クラウン比率（板クラウン/板厚）の変化により変動する。HC ミルによりクラウン制御を行う際、仕上前段スタンド出側でのクラウン比率が大きい場合、後段で IMR のシフト量を調整してクラウンを小さくすると、クラウン比率が大き

く変化し、スタンド間および仕上ミル出側における形状が悪化し、十分なシフト効果が発揮できない場合が発生する。すなわち、仕上ミル出側の形状を乱すことなく、矩形状のプロフィールを確保するためには、仕上スタンド前段からクラウンを小さくする必要がある。以上の観点から、仕上前段ロールのカーブを凸状にすることより、形状を乱すことなく十分なシフト効果を得ることができた。

5.2.3 エッジドロップ対策

HC ミルにおいて、台形の WR を使用しない通常圧延では、板クラウン中央部の膨らみに対する制御は十分に可能であるが、エッジドロップの発生に対する防止効果に難点がある。

現在、水島熱間仕上ミルでは、仕上後段スタンドでの圧延荷重を低くすることにより、エッジドロップの減少を図っている。適用した方法としては、

- (1) シートバー厚と通板速度の増大による圧延温度の上昇
- (2) 後段軽圧下型ドラフトスケジュールの採用

である。

Fig. 11 に、同一圧延条件において、圧下配分を変更した場合の仕上圧延最終スタンド (F7) の圧延荷重と Cr_{25} の関係を示す。F7 スタンドの圧延荷重を軽くすることにより、クラウンが減少することが確認された。

5.2.4 板クラウン・プロフィール

以上に示した各種技術の適用により SUS 304 鋼に対しても、目標クラウンの達成が可能となった。Fig. 12 に HC ミルを適用した SUS 304 鋼のプロフィール例を示す。板厚 4.0 mm の場合は、ほぼ矩形のプロフィールが得られている。いっぽう、板厚 2.0 mm の場合は、圧延荷重が大きいため、ややエッジドロップの大きいプロフィールとなっている。

Fig. 13 に、HC ミルによりクラウン制御を実施した時の圧延スケジュール内での板クラウンの推移を示す。従来は同一圧延スケジュール内でステンレス鋼のクラウンは普通鋼のそれより 60 μm 以上も大きかったが、HC ミルにおいて上述の各種クラウン制御技術を適用した結果、ステンレス圧延スケジュールにおいても Cr_{25} を 10~60 μm の範囲に制御することができる。

5.2.5 制御結果

Table 3 に、現在まで適用してきたクラウン制御技術とその制御限界を示す。HC ミルに各種制御技術を適用することにより、板厚 2.0 mm × 板幅 1 065 mm の SUS 304 の Cr_{25} は、従来 180 μm 程度

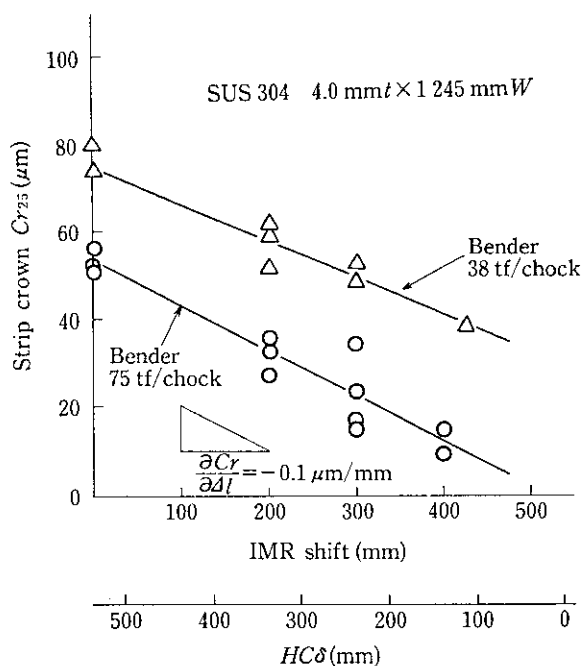


Fig. 10 Effect of IMR shift on strip crown

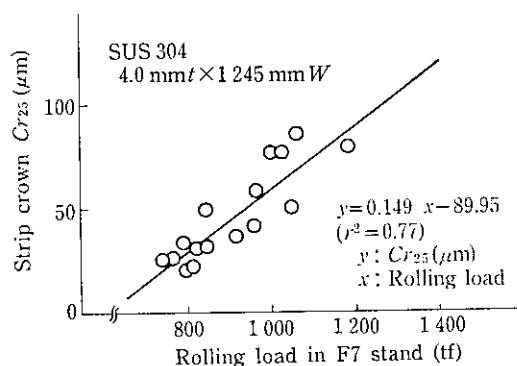


Fig. 11 Relation between rolling load in F7 stand and strip crown

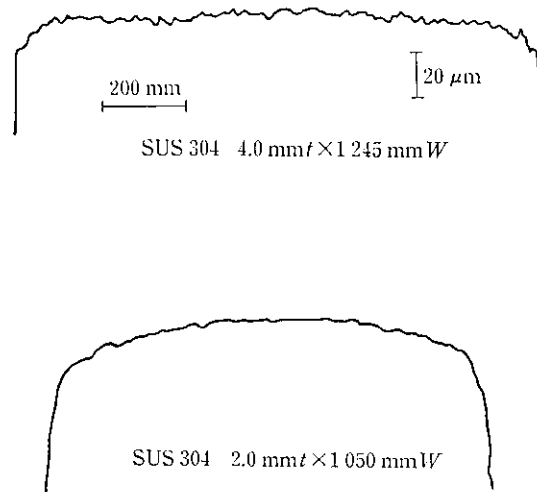


Fig. 12 Typical profiles of SUS 304 steel by HC mill

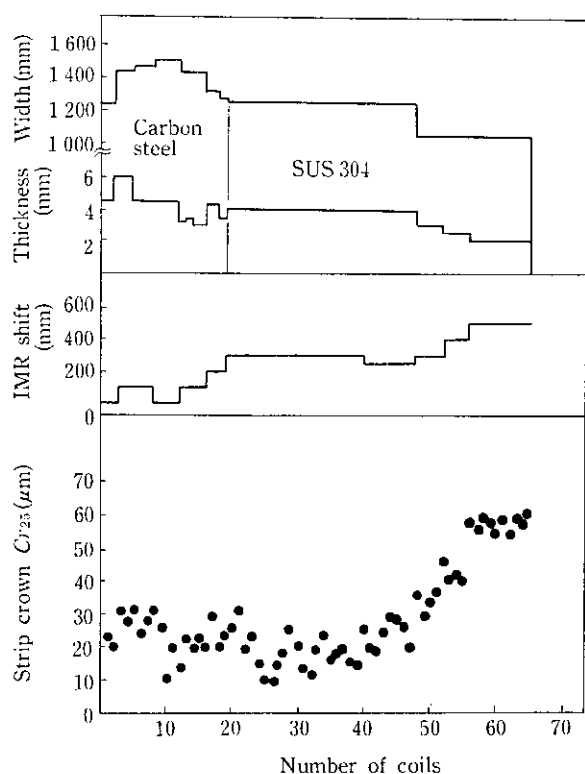


Fig. 13 Change of strip crown in hot rolling schedule by HC mill (SUS 304)

だったものが、60 μm 以下に、板厚 4.0 mm $\times$ 板幅 1 265 mm の場合は、150 μm 程度あったものが、40 μm 以下に制御することが可能となり、従来に比べて 1/3 以下にすることができた。さらに仕上ミル F5~7 スタンドの HC ミル化にともない油圧圧下を導入しており、これによって長手方向精度を向上させることが可能となった。したがって、ステンレス鋼板の板厚公差の厳しい材料の受注が可能となった。

Table 3 Crown control capability-comparison of Cr_{25} -in HC mill

		(μm)	
Method	Materials Size* (mm)	SUS 304	SUS 304
		2.0 $\times$ 1 065	4.0 $\times$ 1 265
Conventional mill		≤ 180	≤ 150
HC mill	①	≤ 100	≤ 70
	①+②	≤ 70	≤ 50
	①+②+③+④	≤ 60	≤ 40

① IMR shift

② Roll curve changed

③ High temp. rolling at finisher stands

④ Light reduction at the latter stands

* Thickness $\times$ width

6 まとめ

千葉 No. 1 熱間仕上ミルに K-WRS ミル、水島熱間仕上ミルに HC ミルを導入し、それぞれステンレス鋼板のクラウン制御を実施した。その結果、K-WRS ミルを適用した SUS 430 鋼の場合、板厚 3.3 mm $\times$ 板幅 1 039 mm の例で Cr_{25} 値で平均 23 μm に、HC ミルを適用した SUS 304 鋼の場合、板厚 2.0 mm $\times$ 板幅 1 065 mm の例で同じく 60 μm 以下へと、いずれも従来のレベルに比べて 1/3 以下に大幅に減少させることができた。また圧延スケジュールの全体を通してクラウン制御が可能となったことにより、クラウン制御対象材の拡大とともに、圧延スケジュール作成上の規制（クラウン制御対象材の組込位置規制等）の緩和が可能となった。

さらに来春、千葉 No. 2 熱間仕上ミルにおいて K-WRS ミルと強力ワークロールベンダーとを組み合わせたクラウン制御ミルの導入を計画しており、これで当社保有の 3 基の熱延ミルがすべてクラウン制御ミルへ脱皮できる。これを機会に、より一層のレベルアップを図っていきたいと思う。

参考文献

- 例えば「板圧延の理論と実際」, (1984), 89, [日本鉄鋼協会]
- 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
- 本城 恒, 木崎純司, 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
- 足立明夫, 豊島 貢, 福島 徹, 浅川長正, 北村邦雄, 鶴田征雄, 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
- 仲田卓史, 豊川 明, 市井康雄, 音田聡一郎, 豊島 貢, 鶴田征雄: 「設備仕様 (片台形ワークロールシフトミルにおける熱延鋼板のクラウン制御-4)」, 鉄と鋼: 70 (1984) 4, 434
- 直井孝之, 柴田克己, 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 (ハイクラウン制御ミルの建設-1)」, 鉄と鋼: 70 (1984) 4, 429
- 田野村忠郎, 足立明夫, 豊島 貢, 君嶋英彦, 北村邦雄: 「サイクリックシフトによる圧延特性 (片台形ワークロールシフトにおける熱延鋼板のクラウン制御-6)」, 鉄と鋼: 70 (1984) 4, 436
- 北浜正法, 北村邦雄, 鶴田征雄, 佐々木徹, 音田聡一郎, 足立明夫, 豊島 貢: 「プロフィール制御の方法 (K-WRS ミルによるプロフィール制御-第1報)」, 昭和59年度塑性加工春季講演会講演論文集, (1984), 217
- 広瀬勇次, 春日弘夫, 浜田圭一, 直井孝之, 山本義之, 金田逸規: 「水島熱延ハイクラウン制御ミルの板クラウン制御特性 (ハイクラウン制御ミルの操業と品質-2)」, 鉄と鋼: 70 (1984) 4, 433
- 音田聡一郎, 土屋 剛, 豊島 貢, 小林善二郎, 若林浩一, 北浜正法: 「実圧延におけるクラウン制御効果 (片台形ワークロールシフトミルにおける熱延鋼板のクラウン制御-5)」, 鉄と鋼: 70 (1984) 4, 435