
ステンレス BA 鋼板のゼンジミア圧延における表面高品質化技術

High Quality Cold Rolling Technology in Sendzimir Mill for Bright Annealed Stainless Steel Strips

渡辺 裕一郎 (Yuichiro Watanabe) 神丸 秋信 (Akinobu Kamimaru) 狩野 裕隆 (Hirotaka Kano)

要旨：

鏡面光沢を有するステンレス冷延鋼板の表面品質の向上，および，品質不良削減による生産能率の向上を図るにはすり疵を防止し，びびりと称する鋼板表面のうねり模様を防止する必要がある。すり疵発生の主な原因は光輝焼鈍炉内でのカヌーイングと称する鋼板の平坦度不良である。そこで，有限要素法を用いて炉内部における鋼板の応力を解析して炉内安定通板に有効な炉入側における鋼板の最適形状を求めた。さらに，第 1 中間ロールテーパの最適化によりゼンジミアミルにおける圧延形状を改善し，カヌーイングを防止してすり疵を低減した。またびびりを防止するため，ゼンジミアリング圧延における振動の測定および解析，ロール周速およびトルクの変動を測定し，びびりの発生原因を解明し，ミルの中間ロールの表面粗さを最適化して防止技術を確立した。

Synopsis：

To produce a high quality bright annealed stainless steel strip, scratches due to contact of the strip with inside walls of the bright annealing furnace, caused by poor strip flatness which is called canoeing, must be prevented. The desirable strip flatness was determined by a thermal elastic stress analysis using a finite element method, and was improved by optimizing the first intermediate roll profile of Sendzimir mill. Meanwhile, chatter marks were placed during cold rolling and deteriorated surface quality of the strip. The cause of the chatter mark was made clear by measuring and calculating vibration frequency of the rolling mill and by measuring rotation velocity and torque of each roll. And the chatter mark was prevented by optimizing the surface roughness of intermediate rolls.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

ステンレスBA鋼板のゼンジミア圧延における 表面高品質化技術*

川崎製鉄技報
28 (1996) 2, 119-125

High Quality Cold Rolling Technology in Sendzimir Mill for Bright Annealed Stainless Steel Strips



渡辺 裕一郎

Yuichiro Watanabe
技術研究所 加工・制御研究部門 主任研究員(掛長)



神丸 秋信

Akinobu Kamimaru
千葉製鉄所 ステンレス部西宮ステンレス課 主任部員(掛長)



狩野 裕隆

Hirotaka Kano
技術研究所 加工・制御研究部門 主任研究員(掛長)

要旨

鏡面光沢を有するステンレス冷延鋼板の表面品質の向上、および、品質不良削減による生産能率の向上を図るにはすり疵を防止し、びびりと称する鋼板表面のうねり模様を防止する必要がある。すり疵発生の主原因は光輝焼鈍炉内でのカヌーイングと称する鋼板の平坦度不良である。そこで、有限要素法を用いて炉内部における鋼板の応力を解析して炉内安定通板に有効な炉入側における鋼板の最適形状を求めた。さらに、第1中間ロールテーブルの最適化によりゼンジミアミルにおける圧延形状を改善し、カヌーイングを防止してすり疵を低減した。また、びびりを防止するため、ゼンジミア圧延における振動の測定および解析、ロール周速およびトルクの変動を測定し、びびりの発生原因を解明し、ミルの中間ロールの表面粗さを最適化して防止技術を確立した。

Synopsis:

To produce a high quality bright annealed stainless steel strip, scratches due to contact of the strip with inside walls of the bright annealing furnace, caused by poor strip flatness which is called canoeing, must be prevented. The desirable strip flatness was determined by a thermal elastic stress analysis using a finite element method, and was improved by optimizing the first intermediate roll profile of Sendzimir mill. Meanwhile, chatter marks were placed during cold rolling and deteriorated surface quality of the strip. The cause of the chatter mark was made clear by measuring and calculating vibration frequency of the rolling mill and by measuring rotation velocity and torque of each roll. And the chatter mark was prevented by optimizing the surface roughness of intermediate rolls.

1 緒 言

近年、ステンレス冷延鋼板の圧延能率の向上を目的として、高速化や強圧下圧延が指向されている。高速圧延および強圧下圧延は、鋼板の平坦度不良、圧延機の振動、表面光沢の低下等を招きやすく、特に良好な表面品質が要求される光輝焼鈍処理をほどこすステンレス鋼板において、表面品質の厳しい要求に対応しつつ生産能率を向上させることは重要な課題となっている。

本報では、光輝焼鈍処理をほどこすステンレス鋼板を圧延する千葉製鉄所西宮工場 No.2 ゼンジミアミル (ZR 22 型) において、光輝焼鈍炉内を安定通板するための圧延材の平坦度改善、および、鋼板の表面品質を劣化させるびびりとよばれる圧延材表面のうねりの防止について検討した結果を述べる。

2 カヌーイング防止技術

2.1 カヌーイングの解析¹⁾

ステンレス鋼板の光輝焼鈍炉における安定通板を阻害する要因の一つに、カヌーイングとよばれる鋼板の変形挙動が挙げられる。鋼板の変形が大きい場合には、鋼板が炉壁に接触してすり疵が生じ、表面品質は著しく低下する。光輝焼鈍炉におけるカヌーイング現象に関する報告²⁾は少なく、その発生要因は明らかではない。そこで、炉内での鋼板形状におよぼす鋼板の温度分布、機械的性質およびその温度依存性、張力などの操業条件、および、炉入側における鋼板形状 (圧延時の鋼板形状) の影響が解析可能な有限要素法を用いたモデルを構築した。

本モデルでは、鋼板を弾性体と仮定し、4 節点完全積分型の平面応力要素を用いており、メッシュ分割は幅方向に 20 要素、炉高さ方向に 800 要素とした。また、光輝焼鈍炉入側における鋼板の形状を初期歪の形で与えて解析し、圧縮応力分布の解析結果の比較によって、炉内における鋼板の変形を評価する。

解析結果の一例として、Fig. 1 に炉内における鋼板の温度分布を変更した場合を示す。板幅 600 ~ 1 300 mm、板厚 0.25 mm の単純支

* 平成 8 年 4 月 8 日原稿受付

持平板の座屈応力³⁾を概算すると $0.1 \sim 1.0 \text{ N/mm}^2$ 程度となり、条件 A においては鋼板に作用する圧縮応力が座屈応力より大幅に大きくなり、鋼板が大きく変形してすり疵が発生することが予想される。しかし、加熱・冷却条件は炉の構造や材質上の制約から大きく変更することができない。そこで、光輝焼鈍炉入側、即ちゼンジミアミル圧延後の鋼板形状に着目して検討した結果を Fig. 2 に示す。炉入側での鋼板形状を、完全に平坦な場合、中伸び、耳クォータ伸び、クォータ伸びおよび耳伸び形状に分類して解析した。冷却帯での圧縮応力の最大値は鋼板形状が平坦な場合に最も小さくなり、鋼板の炉内変形も小さいと推定される。次いで、中伸び、耳クォータ伸びの順に圧縮応力は大きくなり、耳伸びの場合に最も大きい結果となっ

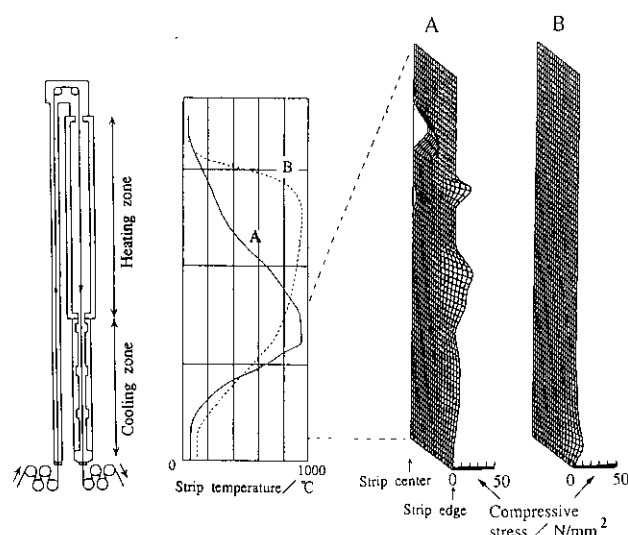


Fig. 1 Effect of strip temperature on compressive stress distribution of strips in cooling zone

た。したがって、カヌーイングを抑制するには、炉入側鋼板の平坦度を向上させることが有効であり、最大伸び率が同じであれば、中伸び、耳クォータ伸びが有利と推定される。

2.2 形状解析モデルの概要

有限要素法による検討結果にもとづき、鋼板の平坦度を向上させるために、圧延形状解析モデルを用いてゼンジミアミルの第1中間ロールのテーパの最適化について検討した。

本モデルは Fig. 3 に示すように、ロールバレル全長を細分割し、圧延荷重分布およびロール間接触圧力分布を各分割区間内で一様としてロールの変形を解析する Shohet らによる分割モデル⁴⁾を基本と

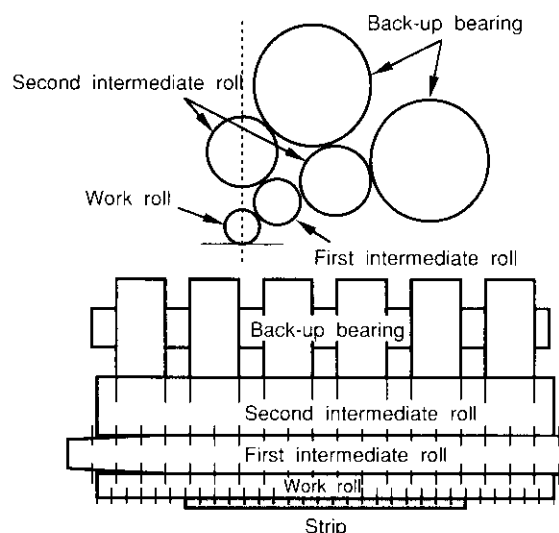


Fig. 3 Outline of model for strip shape 20-high cluster type mill

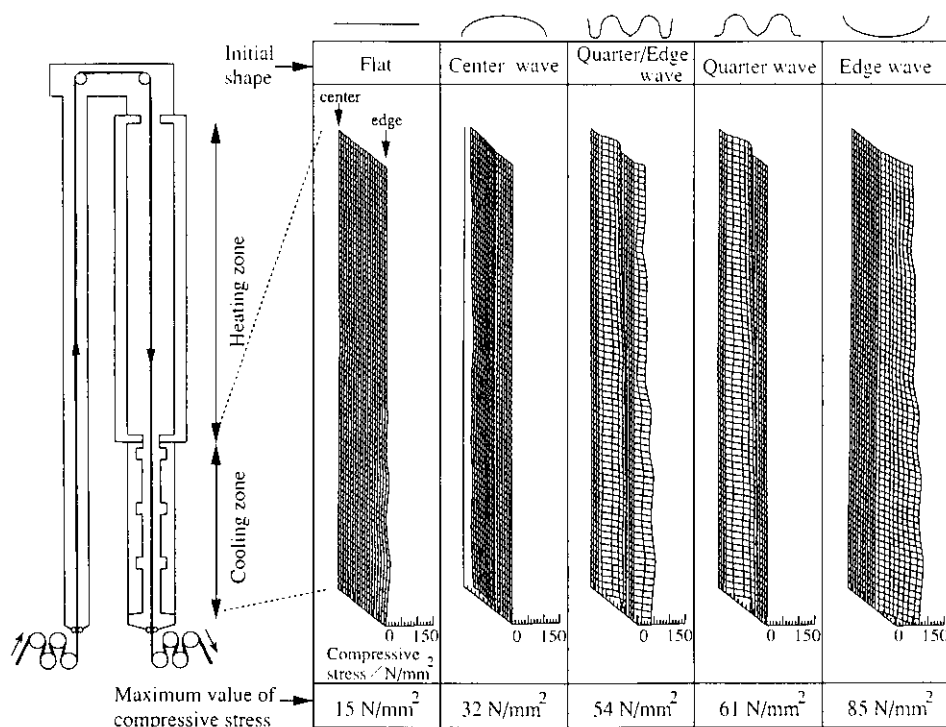


Fig. 2 Effect of initial shape on compressive stress distribution of strips in cooling zone

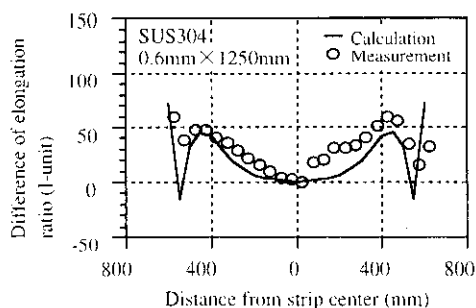


Fig. 4 Measured and calculated strip shape

した。また、圧延機は前後および上下で対称であると仮定し、圧延機ロール配置の1/4の部分のみ考慮するモデル⁵⁾とした。

本モデルによる圧延材の形状の計算結果と形状検出器による実測結果との比較を Fig. 4 に示す。計算結果と実測結果は比較的一致しており、モデルは十分な精度を有している。

2.3 第1中間ロールテーパの最適化⁶⁾

Table 1 に千葉製鉄所西宮工場 No. 2 ゼンジミアミルの主な仕様を示す。本圧延機は一体型ハウジングを有し、上下第2中間ロール6本のうち、外側に位置する4本のロールを駆動している。また、形状制御機能として、第1中間ロールのテーパシフトおよび分割バックアップベアリング押出し(As-U)を有し、さらに、左右のデフレクターロールには形状検出器を有している。

Table 1 Specification of ZR 22 type Sendzimir mill

Roll size (Diameter×Barrel length)	WR	54×1 394
	1 IMR	102×1 448
	2 IMR	173×1 389(Drive roll) 173×1 344(Idle roll)
	BUR	300× 172×6
Rolling velocity (m/min)		0 ~ 350
Tension (kN)		20 ~ 400

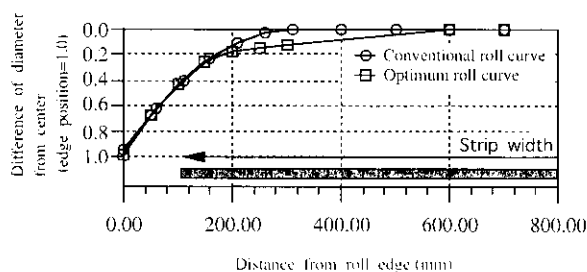


Fig. 5 Comparison of first intermediate roll profile between before and after improvement

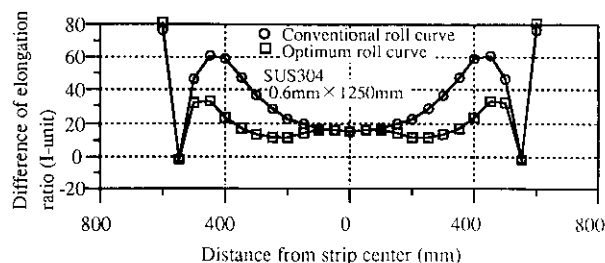


Fig. 6 Comparison of calculated strip shape between before and after improvement

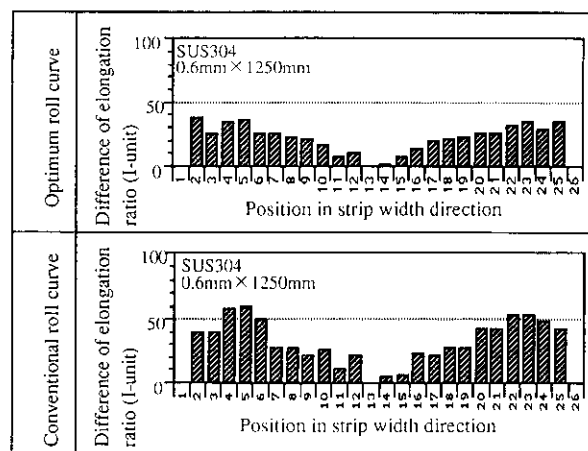


Fig. 7 Comparison of measured strip shape between before and after improvement

形状解析モデルを用いて検討した結果、第1中間ロールテーパの最適化により、カヌーイングの抑制に有効となる平坦な圧延形状が得られることが判明した。すなわち、Fig. 5 に示すように第1中間ロールにテーパを付与することにより、Fig. 6 に示すように圧延形状はクォータ部分の伸び率が大きく低減される。

最適なテーパを付与したロールを用いて実機圧延した結果、Fig. 7 に示すようにクォータ伸びも小さく最大伸び差率を従来より約3割低減できた。また、このテーパを工程的に用いることで、光輝焼鈍炉内におけるすり疵の発生率を従来の4%からほぼ皆無にすることができた。

3 びびり防止技術

ゼンジミアミルにより圧延されるステンレス鋼板の表面にはびびりとよばれる鋼板表面のうねり模様が発生し、鏡面光沢を必要とする製品の表面品質を劣化させることがある。びびりとは波高さ1μm程度、ピッチ5~20mmの鋼板のうねり現象であり、目視観察で見いだすことが難しく、鋼板表面の砥石研磨により Photo 1 に示すように顕著に確認できる。

びびりの発生機構を解明するために圧延機の振動測定および解析、ロール周速およびトルク変動を実測し、防止対策を検討した。

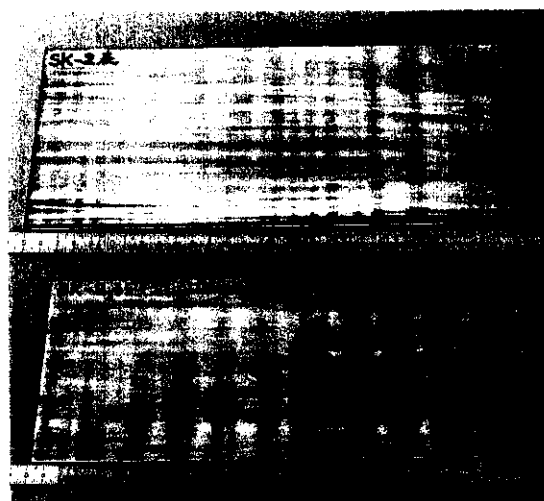


Photo 1 Typical example of chatter mark on stainless strip surface rubbed with a whetstone

3.1 振動測定および解析⁷⁾

縦型ロール配列の圧延機についての振動解析および実験結果は数多く報告⁸⁻¹⁰⁾されているが、ゼンジミア等の多段クラスター型圧延機の振動に関する報告はなく、その振動形態はロールの本数が多いことから複雑であることが予想される。

そこで、Fig. 8 に示す圧延機の各位置に振動計を取り付けて振動数を、スピンドルにひずみゲージを添付しトルク振動を測定した。圧延材は素材厚み 3.6 mm の SUS 304 および SUS 430 を用い、それぞれ 5 パスおよび 4 パスで厚み 1.5 mm まで、各パスごとに 20 m/min (低速圧延) および 170 ~ 240 m/min (高速圧延) の圧延速度で圧延した。

また、Fig. 9 に示す圧延ロールとハウジング系の振動モデル、および、Fig. 10 に示す駆動軸系のねじり振動モデルを作成して固有振動数を解析し、振動の実測値と解析結果とを比較した。

実測した振動数および解析モデルで計算した振動数を Fig. 11 に示す。

実測した圧延機の振動数においては 700 Hz 付近が特に顕著であり、この振動数は計算した固有振動数の一つにも表れている。また、低速圧延時には 200 Hz 近傍でトルク振動の実測値と計算値が一致している。

振動測定を実施した圧延材のびびりピッチは低速圧延部および高速圧延部とも 5 ~ 20 mm であり、周波数に換算するとそれぞれ 20 ~ 70 Hz, 140 ~ 800 Hz 程度となる。

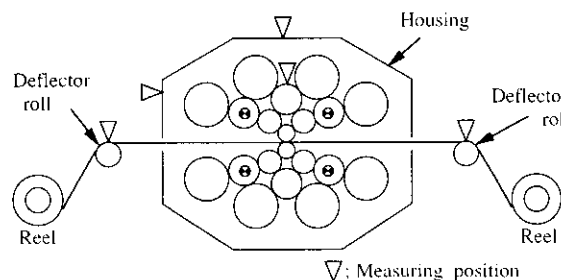


Fig. 8 Measuring positions for vibration in Sendzimir mill

3.2 実験用圧延機によるロール周速測定

ゼンジミア圧延機においては外側の第 2 中間ロールを駆動し、圧延トルクは第 1 中間ロールを介してワークロールに伝達される。そこで、ゼンジミアの駆動形式を想定して、バックアップロール

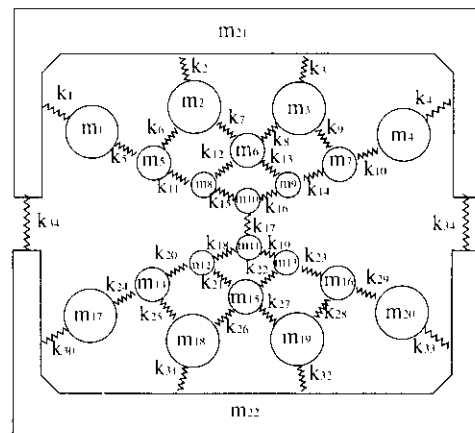


Fig. 9 Outline of model for vibration 20-high cluster type mill

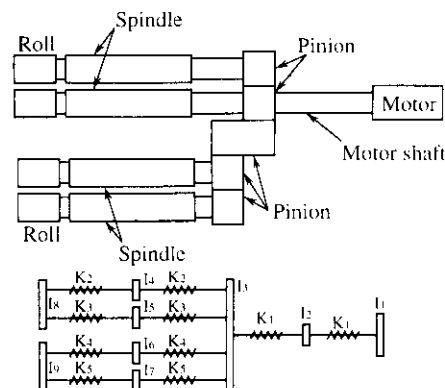


Fig. 10 Outline of model for torsional vibration of driving shaft

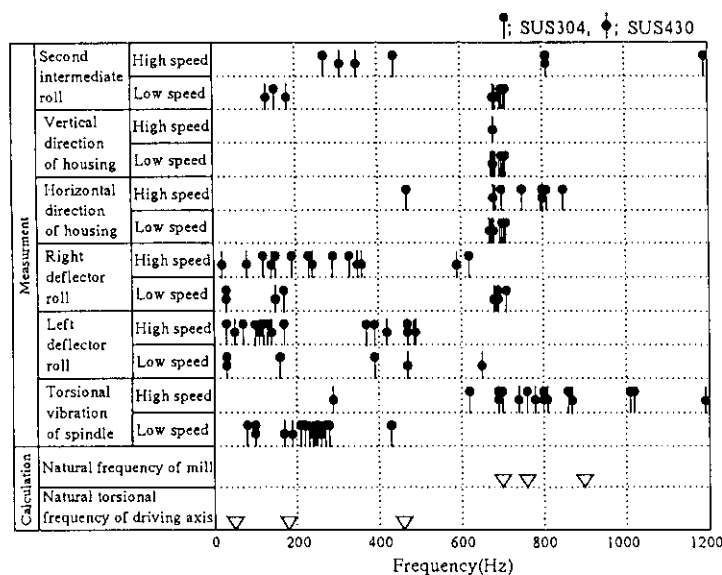


Fig. 11 Comparison between measured and calculated vibration frequency

駆動の実験用6段圧延機を用いてびびりとロール粗度およびロール周速との関係を調査した。

この圧延機は2モーターによるツインドライブ方式であり、粗さの異なる2種類の中間ロールを用いて、圧延中に上バックアップロールのみの周速を変動させ、すべてのロールに取り付けた回転計によりロールの周速を測定した。実験条件をTable 2に示す。

圧延後の鋼板を砥石で磨いてびびりを測定した結果、中間ロールの粗度が $Ra = 0.45 \mu m$ （以下、高粗度と記す）の場合に10～20 mm ピッチのびびりが確認できた。一方、 $Ra = 0.1 \mu m$ （以下、低粗度と記す）の中間ロールを用いた場合においてはびびりはほとんど確認されなかった。

Fig. 12に高粗度および低粗度の中間ロールを用いた場合それぞれにおける圧延時のロール周速の測定結果を示す。中間ロールが低粗度の場合、バックアップロールと中間ロールとの速度差が最も大きく、中間ロールとワークロール、および、上下ワークロール間の速度差はわずかである。一方、中間ロールが高粗度の場合、上バックアップロールの速度変動周期が上中間ロールを介して上ワークロールにまで伝達しており、上下ワークロール間に速度差が生じている。この結果から、圧延材に直接接触している上下ワークロールの周速差がびびりの発生要因であることが推測される。

3.3 トルク測定

実機ゼンジミアミルにおいて第2中間駆動ロール4本のスピンドルのトルク測定を行い、びびりととの関係を調査した。

Fig. 13にゼンジミアミルのトルク伝達経路を示す。トルクはモーターからピニオンギア、スピンドルを介して4本の第2中間駆動ロールに伝達される。ここでスピンドルBはモーターに直結した軸である。この4本のスピンドルにひずみゲージを貼付し、粗さの異なる2種類の第2中間ロールをそれぞれ使用して圧延トルクを測定し

Table 2 Rolling conditions

Roll size (Diameter×Barrel length)	WR	50 × 200
	IMR	50 × 200
	BUR	150 × 200
Roll roughness Ra (μm)	WR	0.3
	IMR	0.45, 0.1 (two conditions)
	BUR	0.5
Rolling Load (kN)	300	
Rolling Speed (m/min)	15	
Strip size (Thickness×Width)	3.0 × 50	

Table 3 Rolling condition

Strip material	SUS 304	
Strip size (mm)	Initial thickness	4.0
	Finished thickness	1.5
	Width	1 245
Rolling speed (m/min)	100	
Second intermediate roll roughness Ra (μm)	0.6, 0.1	

た。また、板のうねりを粗度計により測定することでびびりを評価した。測定時の圧延条件をTable 3に示す。Table 4にびびりの測定結果を、Fig. 14に各スピンドルのトルク波形を、Fig. 15にスピンドルAのトルク変動成分の周波数解析結果を示す。

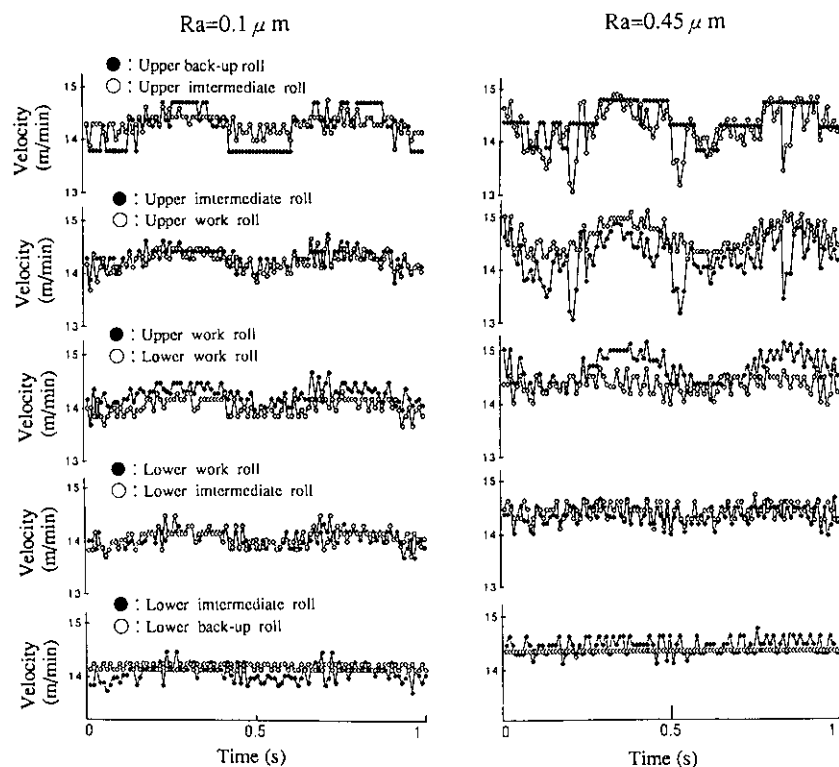


Fig. 12 Comparison of velocity between contacted two rolls

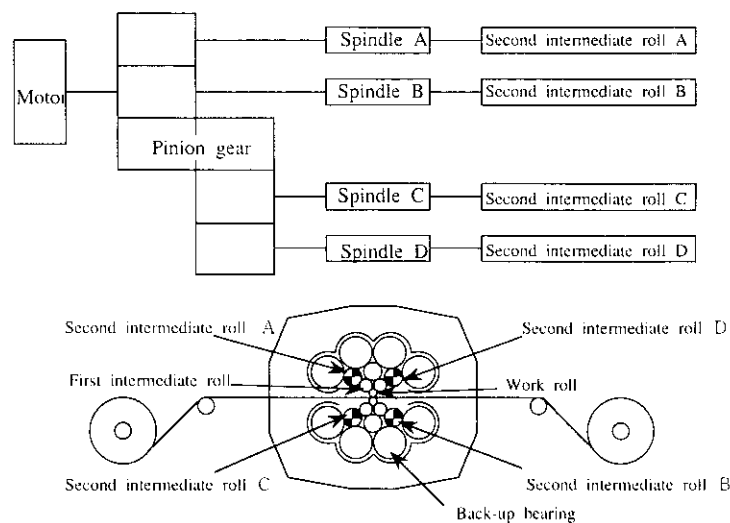


Fig. 13 Drive system of Sendzimir mill

Table 4 Measured surface wave of strip

Second intermediate roughness R_a		(μm)	0.6	0.1
Waving level	Appearance		Conspicuous	Slight
	Wave length (mm)		5 ~ 20	5 ~ 20
	Frequency (Hz)		83 ~ 333	83 ~ 333
	Amplitude (μm)		0.8 ~ 1.2	0.7 ~ 0.8

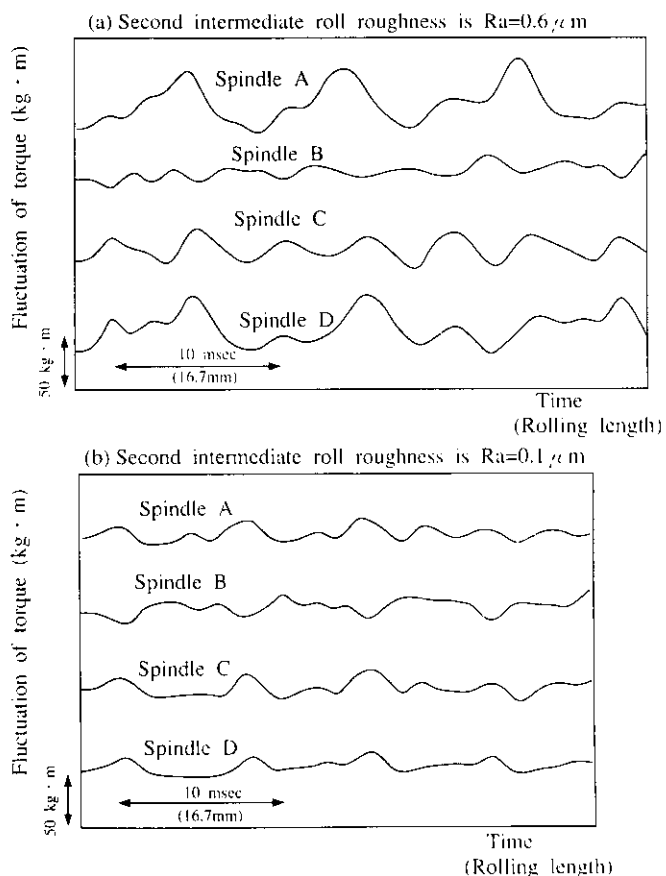


Fig. 14 Dynamic characteristics of spindle torque

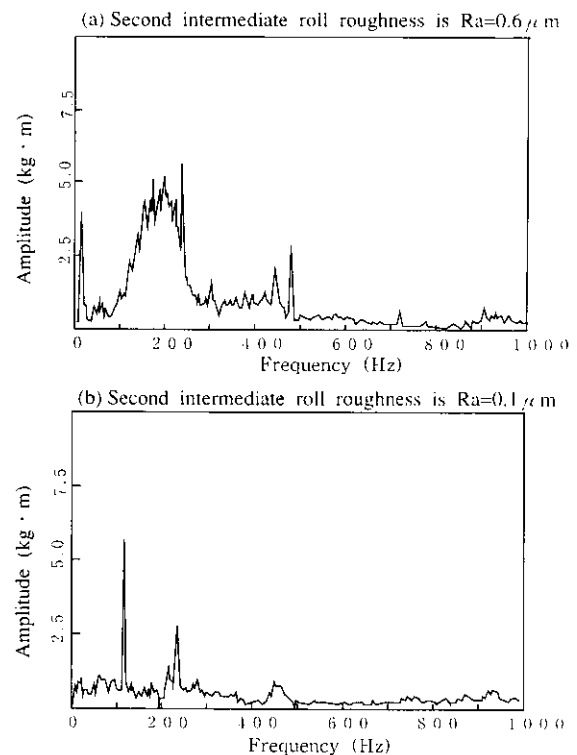


Fig. 15 Frequency spectrum of spindle torque

Fig. 14 より特にびびりが顕著に観察できた高粗度の第2 中間ロールを用いた場合にトルク変動の振幅が大きく、モーターに直結しているスピンドル B とその他 3 本のスピンドルのトルク波形の位相が逆転していることがわかる。また、Fig. 15 よりいずれの場合もびびりの周波数に近いトルク変動成分を有していることがわかる。

3.4 考察

びびりの発生状況はトルク変動の周波数、振幅に依存する。また、トルク変動の位相が中間ロールのスピンドル間で逆転していることから、圧延中において駆動ロール間でねじれによる弾性エネルギーの蓄積、開放が連続して発生しロール周速の違いが生じていると考

えられる。このねじれの蓄積、開放の過程は駆動軸系のねじり振動の固有振動数近傍で顕著化し、接触しているロール間でのスティック・スリップが上下ワークロールの速度変動となって板のうねり、すなわちびびりが発生すると考えられる。従って、びびりを軽減させるためには微小ロール間スリップを常時発生させてロールのねじれが大きくなる前に開放させ、トルク振動の振幅を小さくすることが有効と考えられる。

以上の推論をもとに実機ゼンジミアミルにおいて第2中間ロールの粗度を変更して圧延トルクの伝達が可能でトルク変動を大幅に減少できる条件を実験的に見出し、工程化することによりびびりにもなう不良発生率を1/8に減少できた。

4 結 言

ステンレス鋼板の品質の向上を阻害していたカヌーイングとびび

りについて検討し以下の結果を得た。

- (1) 有限要素法を用いて、光輝焼鈍炉内での鋼板の変形の原因であると推定される圧縮応力を解析するモデルを開発し、炉入側の鋼板形状を検討した結果、カヌーイングを抑制するには炉入側の鋼板の平坦度を向上させることが有効であるとの指針を得た。その結果に基づき、ゼンジミアミルの第1中間ロールテーブルの最適化を図り圧延材の平坦度を向上させカヌーイングを防止した。
- (2) ゼンジミアミルにおいてミルの振動測定および振動解析、トルク測定等を行った結果、ロール間のスティック・スリップによって発生するトルク変動、中間ロールの周速変動が上下ワークロール速度変動を起こしびびりが発生することが判明した。また、この結果に基づき第2中間ロールの粗度を最適化することによりびびりを軽減することができた。

参 考 文 献

- 1) 狩野裕隆, 渡辺裕一郎, 剣持一仁, 宮島 明, 梅津 明, 神丸秋信: 第46回塑性加工連合講演会論文集, (1995), 307
- 2) 松本 健, 佃 宣和: 材料とプロセス, 5(1992)5, 1475
- 3) S.P. Timoshenko and J.M. Gere: "Theory of Elastic Stability second edition", (1963), 356 [McGrawHill]
- 4) K.N. Shohet and N.A. Townsend: *J. of the Iron and Steel Institute*, 206(1968)11, 1088
- 5) 河野輝男, 鋤屋正喜, 松下 哲, 米山儀男, 相沢義治: 日本ステンレス技報, 17(1982), 95
- 6) 渡辺裕一郎, 狩野裕隆, 剣持一仁, 神丸秋信, 山田順也, 山本準一: 第46回塑性加工連合講演会論文集, (1995), 309
- 7) 渡辺裕一郎, 剣持一仁, 鋤田征雄, 和泉康男, 柴田信哉: 鉄と鋼, 78(1992)10, 1554
- 8) I. Yaritha, K. Furukawa, Y. Seino, Y. Nakazato, I. Fukunaga, T. Takimoto, and K. Nakagawa: *Trans. Iron Steel Inst. Jpn*, 18(1978), 1
- 9) 御園生一長, 塑性と加工, 21(1980), 1006
- 10) 安藤成海, 勝谷良頌, 古賀国彦, 豊田洋民: 塑性と加工, 16(1975), 78