

ステンレス鋼箔の冷間圧延における負荷特性と形状特性及び表面性状

© 1991 ISIJ
技術報告
////////////////////////////////////

山本 普康*・中村 和男*²・白石 利幸*³
菊間 敏夫*⁴・松元 俊彦*⁵・高橋 勝彦*⁵

Characteristics of Rolling Load, Strip Shape and Strip Surface in Cold Rolling of Stainless Steel Foil

Hiroyasu YAMAMOTO, Kazuo NAKAMURA, Toshiyuki SHIRAISHI,
Toshio KIKUMA, Toshihiko MATSUMOTO and Katsuhiko TAKAHASHI

Synopsis :

A demand of stainless steel foil has been recently increasing in electronic apparatuses, electric cells and construction materials. Main subjects in cold rolling of stainless steel foil are strip shape like flatness and fine wrinkles, and surface conditions of rolled strip like gloss and roughness. This paper shows the characteristics of rolling, strip shape and strip surface in cold rolling of stainless steel foil which were obtained by experiments of cold rolling in a twelve-high cluster mill. Main results are as follows. Controllability of strip shape increases more by using doubled-tapered intermediate rolls than by using single-tapered ones. Surface gloss of rolled strip increases with the decrease of surface roughness of work rolls and rolling speed, and with the increase of reduction in thickness.

Key words : stainless steel; stainless steel foil; cold rolling; flatness; surface gloss; surface roughness; shape control.

1. 緒 言

近年、ステンレス箔は電子機器部品や電池部品あるいは建材用に需要が増加しつつある。新日本製鉄(株)においてもステンレス箔の生産を開始し、製造技術の向上が進められてきた。ステンレス箔の冷間圧延では、板厚精度、板形状および表面性状が主要な品質課題である¹⁾²⁾。板厚精度については、薄板の冷延に用いられている板厚自動制御方式³⁾と類似のものが用いられ、良好な板厚精度が得られている。一方、圧延された板の形状と表面性状に関しては、新型式圧延機⁴⁾が導入されたが、最適な品質が得られるまでには多くの課題の克服が必要であった。ここでは、ステンレス箔の冷間圧延において、圧延荷重や摩擦係数などの一般的な圧延特性に加え、板の平坦度やちりめんじわなどの板形状の特性および板表面の

光沢度や粗度などの表面性状と、それらの品質向上の方法について述べる。

2. 圧 延 特 性

実験に用いた圧延機は12段クラスター圧延機⁴⁾である。ワークロール(WR)には主として $\phi 30$ mmを用い、中間ロール(IMR)径は $\phi 67$ mmである。バックアップロール(BUR)径は $\phi 120$ mmで、5分割されている。ロール胴長は450 mm、圧延荷重は最大588 kNであり、圧延速度は最大300 m/minである。この圧延機には形状制御機構として、中間ロールシフト⁴⁾と上下の分割バックアップロールのロール偏心機構⁴⁾とがある。

圧延荷重と摩擦係数の特性を明らかにするために行った圧延の条件をTable 1に示す。用いた材料は板厚70 μ mのステンレス鋼 SUS304 であり、その材料の相当応

平成元年9月本会講演大会にて発表 平成2年12月25日受付 (Received Dec. 25, 1990)

* 新日本製鉄(株)プロセス技術研究所 工博 (Process Technology Research Laboratories., Nippon Steel Corp., 20-1 Shintomi Futtsu 299-12)

*² 新日本製鉄(株)TSセンター (Technical Service Support Center, Nippon Steel Corp.)

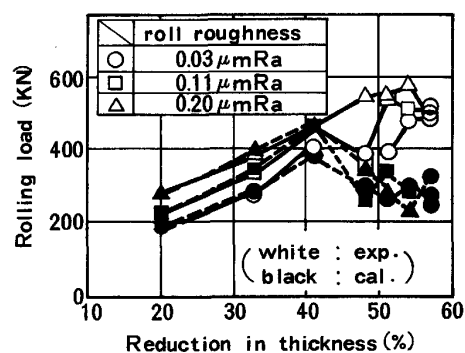
*³ 新日本製鉄(株)プロセス技術研究所 (Process Technology Research Laboratories., Nippon Steel Corp.)

*⁴ 新日本製鉄(株)君津技術研究部 工博 (Kimitsu R & D Lab., Nippon Steel Corp.)

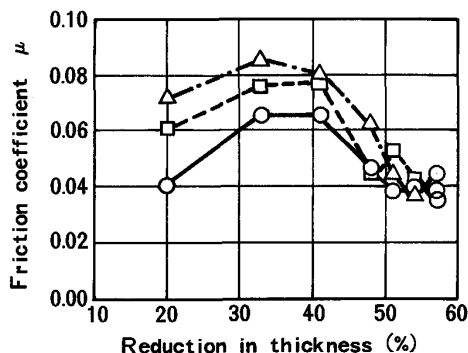
*⁵ 新日本製鉄(株)光製鉄所 (Hikari Works., Nippon Steel Corp.)

Table 1. Rolling conditions.

Material	Stainless steel (SUS304) 70 $\mu\text{m}^t \times 340 \text{ mm}^w$
Reduction	4~40 % / pass
Number of pass	1~7
Tension	Back tension : 177~588 MPa Front tension : 265~588 MPa
Rolling speed	30, 50, 100, 200, 270 m/min
Roll radius	ϕ 30 mm
Roll material	High speed steel
Roll roughness	0.20, 0.11, 0.03 μmRa (0.03 μmRa at 7th pass)
Roll lubricants	Neat mineral oil Temp. : 40 °C



(a) Rolling load



(b) Friction coefficient

Rolling speed : 30 m/min

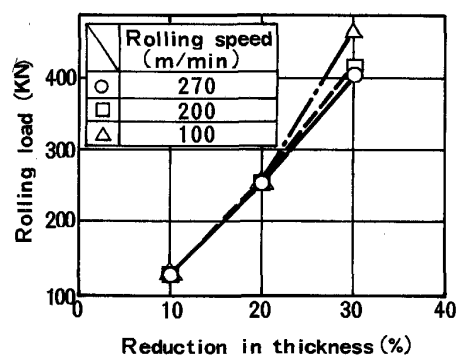
Fig. 1. Effect of reduction in thickness and roll surface roughness on rolling load and friction coefficient.

力 $\bar{\sigma}$ と相当ひずみ $\bar{\epsilon}$ の関係式で示される.

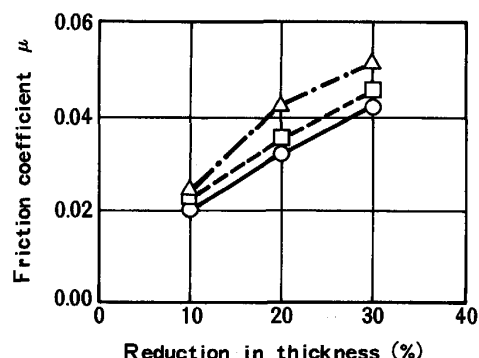
$$\bar{\sigma} = 1364.2(\bar{\epsilon} + 0.022)^{0.348} [\text{MPa}] \quad \dots\dots\dots (1)$$

圧下率は 1 パス当たり 4~40% で, 7 パスまで圧延した. ワークロールは $\phi 30 \text{ mm}$ のハイスロールであり, 圧延潤滑油には, 40°C の時の粘度が 10.2 mPa·s である鉱油系潤滑油 (100% 濃度) を 40°C で用いた.

Fig. 1 は, 圧延荷重および摩擦係数に及ぼす冷延率 (多パス圧延のトータル圧下率) とロール粗度の影響を



(a) Rolling load



(b) Friction coefficient

$\sigma_b \doteq 200 \text{ MPa}$ $\sigma_f \doteq 300 \text{ MPa}$
Roll roughness : 0.11 μmRa

Fig. 2. Effect of reduction in thickness and rolling speed on rolling load and friction coefficient.

示す. ここで, 圧延速度は 30 m/min であり, ワークロールの表面粗度は 1~6 パスが 0.03, 0.11 および 0.20 μmRa の 3 種類であり, 7 パス目はすべて 0.03 μmRa である. また, 摩擦係数は圧延解析モデル⁵⁾を用いて, 先進率の実測値と計算値が一致するように求められた. 図中の白印は圧延荷重の実測値であり, 黒印は圧延解析モデル⁵⁾から求められた圧延荷重の計算値である. ロール粗度が増加するにつれて, 圧延荷重と摩擦係数は増大する. 3 パス目までは圧延荷重の計算値と実測値がほぼ一致しているが, 4 パス目以降では圧延荷重の計算値は実測値よりも小さくなっている. これは, 4 パス目以降で上下のロール端が接触するキスロールが発生しているためと予想される. キスロールが発生していないと推測される 3 パス目辺りまでは, 摩擦係数は冷延率の増加とともに増大する. キスロールが発生していると予想される 4 パス目以降では, 摩擦係数は冷延率の増加に従って減少する. なお, 4 パス目以降の摩擦係数の減少は薄板の冷間圧延で一般に認められる摩擦係数の傾向⁶⁾と異なっているが, この原因は今回の実験では明確でない.

Fig. 2 は, 1 パスでキスロールが発生しないと予想される圧下率 10~30% の圧延を行った場合の圧延荷重

と摩擦係数に及ぼす圧下率と圧延速度の影響である。ここで、ワークロールの表面粗度は $0.11 \mu\text{m Ra}$ である。圧下率が増加するにつれて、圧延荷重と摩擦係数は増大し、Fig. 2 に示した結果とも一致している。また、圧延速度が増大するにつれて、圧延荷重と摩擦係数は減少する。これらは、薄板の冷間圧延における圧延荷重および摩擦係数の傾向⁶⁾と同じである。

3. 形状特性

3.1 板形状(平坦度)

ここでは、ステンレス箔の冷間圧延の板形状に及ぼす中間ロール形状の効果、および板形状とキスロール荷重の関係を明らかにする。Table 2 に板形状の実験のため

Table 2. Rolling conditions of shape experiments.

Material	Stainless steel (SUS 304) $70 \mu\text{m} \times 340 \text{mm}^w$
Reduction	14.3% ($h_0 = 60 \mu\text{m}$) (Rolling load: about 300 kN)
Tension	Back tension: 392 MPa Front tension: 490 MPa
Rolling speed	20 m/min
Roll roughness	$0.05 \mu\text{m Ra}$ (High speed steel)
Lubrication	Neat mineral oil
Shape of IMR	a) IMR-A (Single taper) b) IMR-B (Double taper)

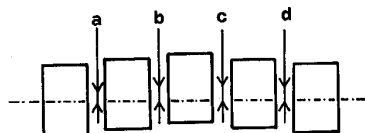
($\ell_1 = 170 \text{mm}$, $\ell_2 = 80 \text{mm}$, $\ell_3 = 50 \text{mm}$)
($a_1 = 12 \mu\text{m}$, $a_2 = 16 \mu\text{m}$, $a_3 = 85 \mu\text{m}$)

Table 3. Conditions of eccentricity of divided back-up rolls.

No	Mark	Upper BUR eccent. (μm)				Lower BUR eccent. (μm)			
		a	b	c	d	a	b	c	d
I	○	0	0	0	0	0	0	0	0
II	⊙	0	0	0	0	36	60	60	36
III	⊖	0	0	0	0	70	117	117	70
IV	●	0	135	135	0	70	117	117	70
V	⊕	0	135	135	0	141	0	0	141
VI	⊗	0	135	135	0	141	235	235	141

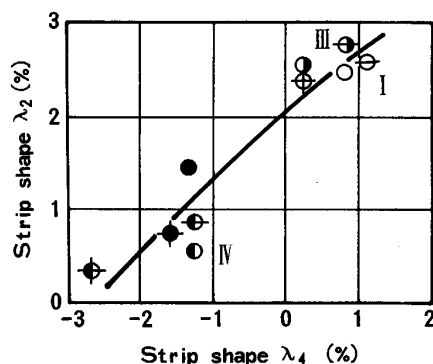
Note IMR shift amount ⊖: 20 mm, ○: 0 mm, ⊕: -20 mm, ⊗: -30 mm, ⊙: -35 mm,

[a~b: Direction of pushing BUR to material is positive
IMR shift: Direction of shifting IMR to strip center is positive]

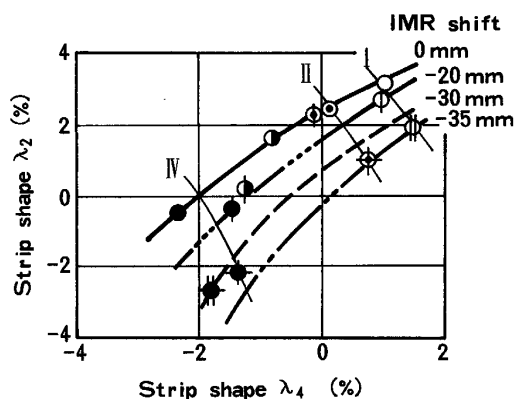


の圧延条件を、Table 3 に分割バックアップロールのロール偏心の条件を示す。用いた材料は板厚 $70 \mu\text{m}$ 、板幅 340mm のステンレス鋼 SUS304 であり、ワークロールは $\phi 30 \text{mm}$ のハイスロールである。また、中間ロールの形状は1段テーパ(中間ロール A)と2段テーパ(中間ロール B)である。

Fig. 3 は、板形状に及ぼす中間ロール形状の効果を示す。ここで、板形状の急峻度⁷⁾は、コイルの圧延方向に間隔 800mm の2本の直線をけがいた後、板幅方向に幅 5mm でスリットし、けがき線間距離を測定することによって求められた。そして、板幅方向の急峻度分布を4次式近似した後、その近似式から求めた板端と板中央位置との急峻度差を λ_2 、板中央から $2/\sqrt{2}$ (b は板幅の半分) 離れた位置と板中央位置との急峻度差を λ_4 として⁷⁾、板形状を評価した。1段テーパの中間ロール A を用いた場合には、分割バックアップロールのロール偏心(凸型)と中間ロールシフトによる形状制御範囲は小さい。2段テーパの中間ロール B を用いた場合には、形状制御範囲は拡大し、バックアップロールのロール偏心(凸型)によって板形状は端伸びから中伸びへ、



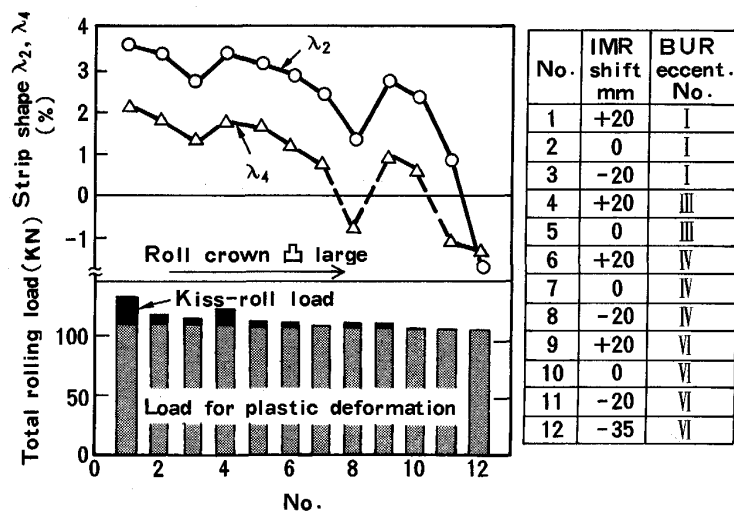
(a) IMR-A (Single taper)



(b) IMR-B (Double taper)

Conditions of No. I ~ IV in the figure are given in Table 3

Fig. 3. Effect of IMR shape on strip shape λ_2 and λ_4 .



Strip width 150 mm, other conditions are the same as those in Table 2, and conditions of BUR eccent. No. are given in Table 3

Fig. 4. Relation between control conditions of strip shape, kiss-roll load and strip shape.

Table 4. Experimental conditions of fine wrinkles.

Material	Stainless steel (SUS 304) 44 $\mu\text{m}^t \times 200 \text{ mm}^t$ (Pre-r=37%)
Reduction	2 ~ 20 %
Tension	Back tension : $\sigma_b = 392 \text{ MPa}$ Front tension : $\sigma_f = 294 \sim 785 \text{ MPa}$
Rolling speed	10 m/min
Roll radius	$\phi 50 \text{ mm}$
Roll material	WC-roll A ($E = 620 \text{ GPa}$) WC-roll B ($E = 450 \text{ GPa}$)
Roll roughness	0.03 μmRa
Lubrication	Neat mineral oil Temp. : 40°C

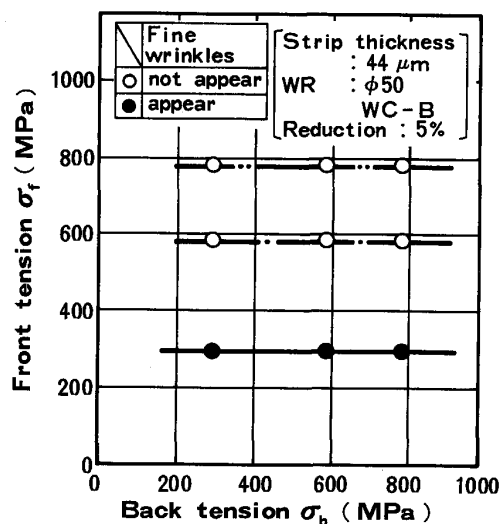


Fig. 5. Effect of back and front tensions on appearance of fine wrinkles.

また中間ロールシフト (板中央側へシフト) によって板形状は中端伸びから 2.4 番伸びへ変化し, 2 段テーパの方が好ましいことが分かる。

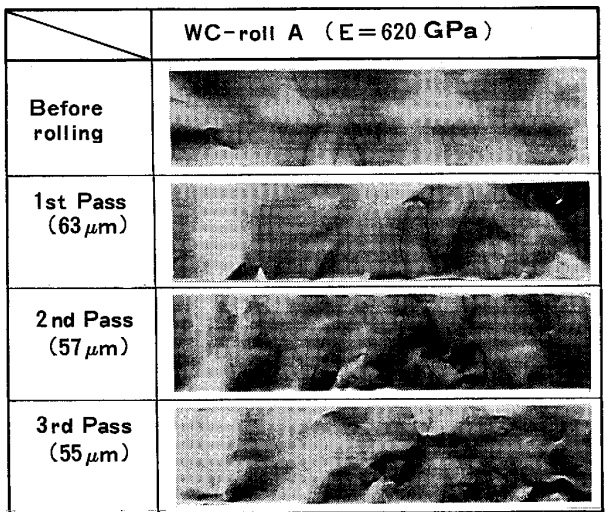
Fig. 4 は, 板幅以外の圧延条件が Table 2 と同一のもので, 数値解析⁸⁾ によって求めた形状制御設定条件と板形状およびキスロール荷重との関係である。なお, 板幅は狭いほどキスロールの影響が大きく生じるため, ここでは 150 mm を用いた。板形状が端伸びから中伸びに変化するに従って, キスロール荷重は減少する傾向にある。

3.2 ちりめんじわ

ちりめんじわ⁹⁾ は, 板厚が薄くなると現れる形状不良である。Photo. 1 (a), (b) に示すように, 70 μm のステンレス鋼 SUS304 をヤング率 E が 620 GPa (約 63 000 kgf/mm²) のタングステン・カーバイド・ワークロール (以後, WC-roll A と記す) で圧延すると, 4 パス目 (圧延後の板厚は 52 μm) でちりめんじわの発生が観察される。このようなちりめんじわの発生に及ぼす

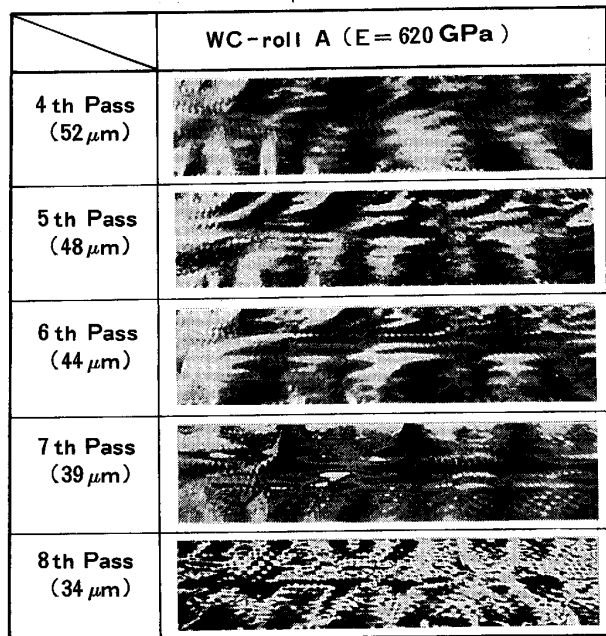
圧延要因の影響を明らかにするため, Table 4 に示す圧延条件で実験を行った。用いた材料は 44 μm のステンレス鋼 SUS304 であり, ワークロール径は $\phi 50 \text{ mm}$ である。

Fig. 5 は, ちりめんじわの発生に及ぼす後方張力と前方張力の効果である。この時の圧下率は 5%, ロールはヤング率が 450 GPa (約 46 000 kgf/mm²) のタングステン・カーバイド・ワークロール (以後, WC-roll B と記す) である。ちりめんじわの発生に対して後方張力はほとんど影響しない。しかし, 前方張力に関しては, 294 MPa でちりめんじわが発生するが, 584 MPa および 785 MPa ではちりめんじわは消失する。この結果から, ちりめんじわの発生防止には高前方張力が有効であり, これは薄板の冷延で観察されるヘリングボーンの傾向¹⁰⁾ と類似している。



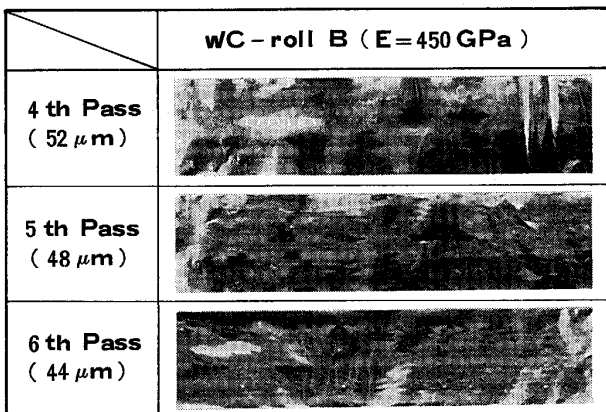
(a) 1st~3rd Pass, WC-roll A
(1st Pass : $\sigma_f=294$ MPa,
2nd & 3rd Pass : $\sigma_f=343$ MPa)

100mm



(b) 4th~8th Pass, WC-roll A
(4th~7th Pass : $\sigma_f=490$ MPa,
8th Pass : $\sigma_f=588$ MPa)

100mm



(c) 4th~6th Pass, WC-roll B
(4th~6th Pass : $\sigma_f=490$ MPa)

100mm

Photo. 1. Photographs of strip surface for fine wrinkles.

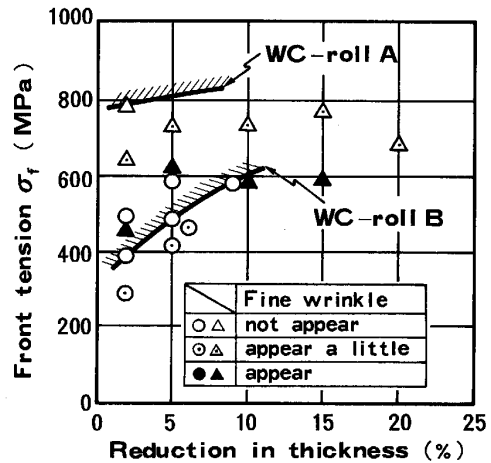


Fig. 6. Effect of roll materials and front tension on appearance of fine wrinkles.

Fig. 6 は、ちりめんじわの発生に及ぼすロール材質と前方張力の効果である。ヤング率が 620 GPa の WC-roll A を用いた場合には、前方張力が 785~883 MPa でちりめんじわは消失するのに対し、ヤング率が 450 GPa の WC-roll B を用いた場合には、前方張力が 392~686 MPa 以上でちりめんじわは消失する。また、Photo. 1(b), (c)に見られるように、ヤング率が 620 GPa の WC-roll A を用いると、4 パス目(圧延後の板厚は 52 μm)でちりめんじわが発生するのに対し、ヤング率が 450 GPa の WC-roll B を用いると、6 パス目(圧延後の板厚は 44 μm)でちりめんじわが発生する。これらの結果から、ちりめんじわの発生防止にはヤング率の小さいロール材質が好ましい。

Fig. 7 は、ちりめんじわの発生に及ぼす出側パスライン角度の効果を示す。実験に用いた圧延機が 12 段クラスター圧延機であるため、パスライン角度を大きく取ることができないが、それでもパスライン角度 0° より 4°の方がちりめんじわの発生量は少ない。このことから、ちりめんじわの発生防止には出側パスラインの傾斜も有効であり、これも薄板の冷延のヘリングボーンの傾向¹⁰⁾と同じである。

4. 表面性状

表面性状に及ぼすロール粗度と圧延速度の影響を明らかにするため、Table 1 と同一の圧延条件で実験を行った。用いた材料は板厚 70 μm のステンレス鋼 SUS304 であり、ワークロールは φ30 mm のハイスロールである。また、1~6 パスでは 3 種類のロール表面粗度 (0.03, 0.11, 0.20 μm Ra) を用いて圧延を行ったが、7 パス目ではすべて 0.03 μm Ra のロール表面粗度で圧延を行っ

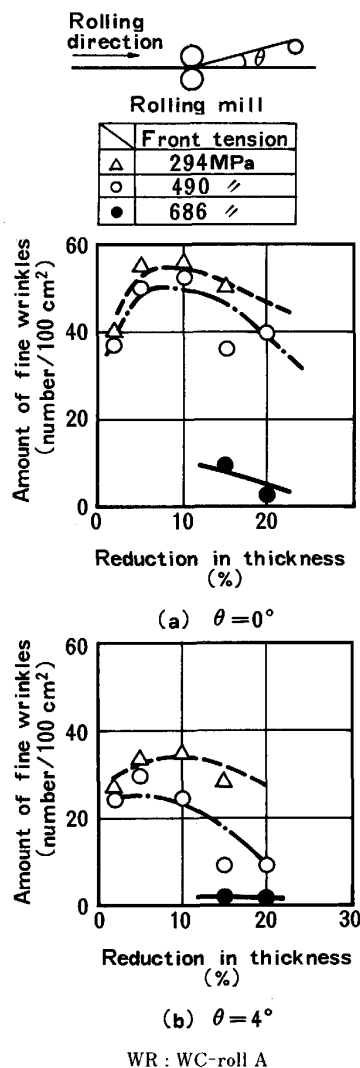


Fig. 7. Effect of exit pass line angle on amount of fine wrinkles.

た。なお板表面の光沢度は、JIS・Z8741¹¹⁾に従ってGs45で圧延方向とその直角方向を測定し、それらの平均値で表した。また板表面の粗度は、JIS・B0601¹²⁾に従って圧延方向に直角な方向で測定した。

Fig. 8は、圧延した板の表面の光沢度と粗度に及ぼすロール粗度と冷延率の影響である。その時の板表面の走査型電子顕微鏡写真をPhoto. 2に示す。ロール粗度が増加するにつれて、板表面の光沢度は減少し、板表面の粗度は増大する。同一のロール表面粗度で多パス圧延をする場合、冷延率が増加するにつれて光沢度は増大する。これは薄板の冷延の傾向¹³⁾と同じである。一方、Table 4に示した今回の圧延条件では、最終パスの板表面の光沢度は途中パスのロール表面粗度の影響をほとんど受けず、ほぼ最終パスのロール表面粗度によって決定されている。このことは、Photo. 2に示した板表面の写真からも確認できる。

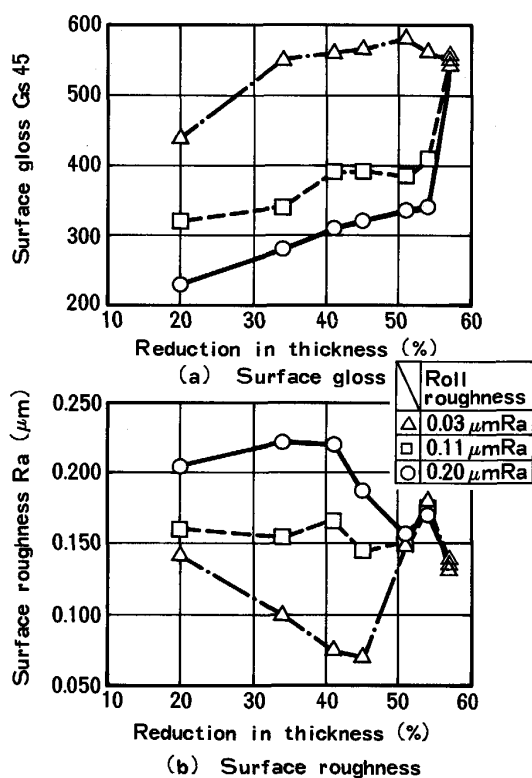


Fig. 8. Effect of roll roughness and reduction in thickness on gloss and roughness of strip surface.

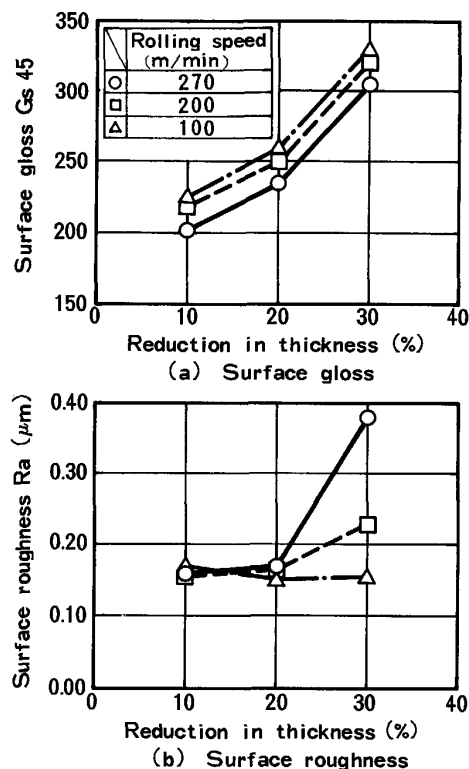


Fig. 9. Effect of rolling speed and reduction in thickness on gloss and roughness of strip surface.

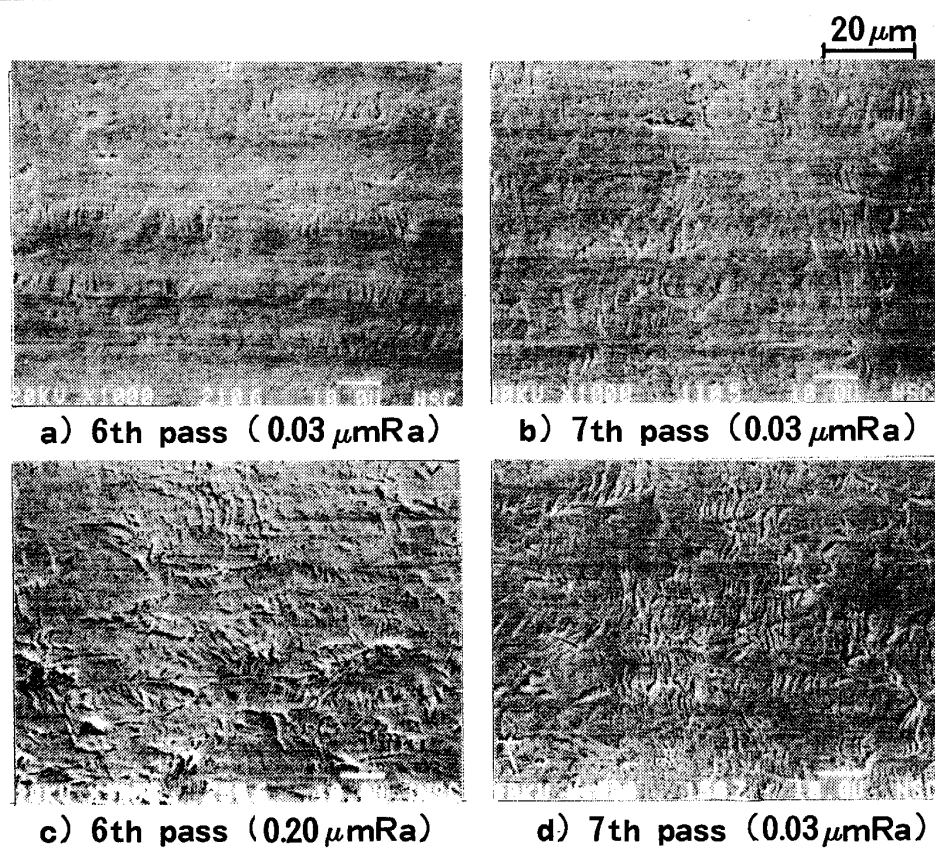


Photo. 2. Photographs of strip surface at each rolling pass.

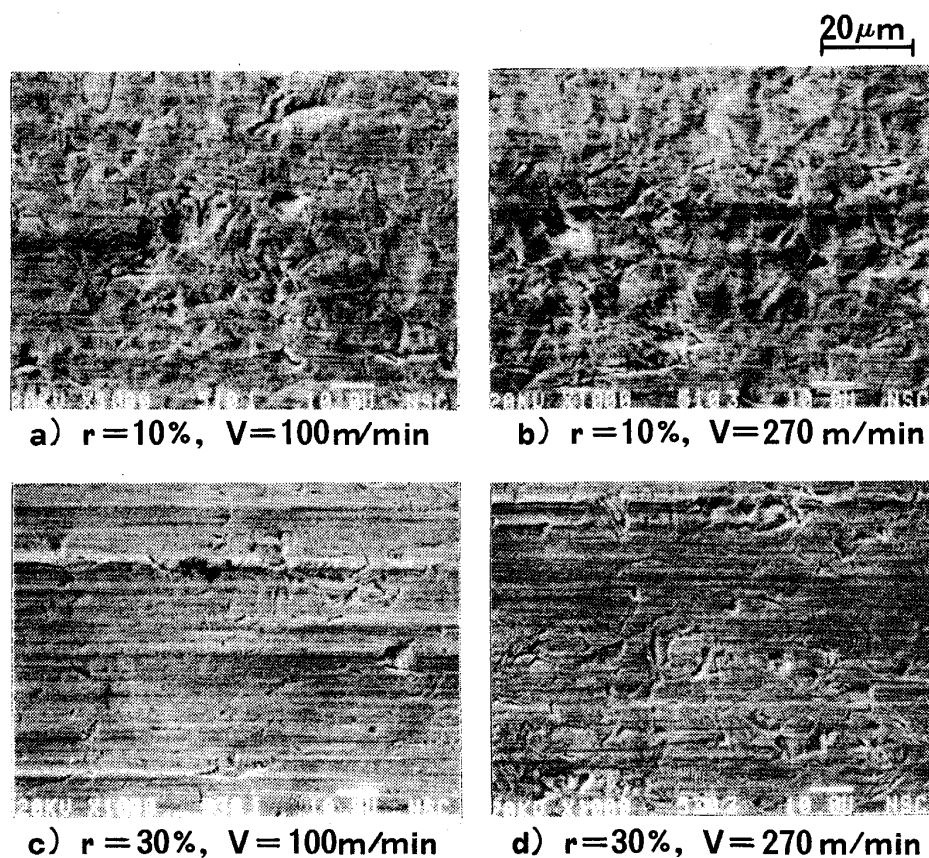


Photo. 3. Photographs of strip surface at each reduction in thickness and rolling speed.

Fig. 9 は、1 パスの圧延を行った場合の板表面の光沢度と粗度に及ぼす圧延速度と圧下率の影響を示す。その時の板表面の走査型電子顕微鏡写真を Photo. 3 に示す。圧延速度が減少するにつれて、あるいは圧下率が増加するにつれて、板表面の光沢度は増大する。これも薄板の冷延の傾向¹³⁾と同じである。一方、板表面の粗度に及ぼす圧延速度と圧下率の影響に関しては光沢度ほど明瞭ではなく、圧下率 20% や 30% のように圧下率の大きいところでは、圧延速度の増加とともに板表面の粗度の増加が認められる。これらのことは、Photo. 3 に示した板表面の写真からも観察される。

5. 結 言

12 段クラスター圧延機を用いた圧延実験によって、ステンレス箔の圧延特性、形状特性および表面性状を明らかにした。主要な結果を以下に要約する。

1) 今回の実験では、キスロールが発生していないと推測される 3 パス目辺りまでは、摩擦係数は冷延率の増加とともに増大する。キスロールが発生していると予想される 4 パス目以降では、摩擦係数は冷延率の増加に従って減少する。また、圧延速度の減少につれて、圧延荷重と摩擦係数は増大する。

2) 中間ロールに 1 段テーパーを用いた場合、分割バックアップロールのロール偏心と中間ロールシフトによる形状制御範囲は小さい。しかし、中間ロールに 2 段テーパーを用いると、形状制御範囲は拡大する。

3) その際、バックアップロールのロール偏心 (凸型) によって形状は端伸びから中伸びへ、また中間ロールシフト (板中央側へシフト) によって形状は中端伸びから 2.4 番伸びへ変化する。

4) ちりめんじわの発生防止には、前方張力の増加、ヤング率の小さいロール材質および出側パスラインの傾斜が有効である。

5) 1 パス圧延の場合、ロール表面粗度が減少するにつれて、あるいは圧延速度が減少するにつれて、板表面の光沢度は増大する。

6) 多パス圧延の冷延率、あるいは 1 パス圧延の圧下率が増加するにつれて、板表面の光沢度は増大する。

7) 今回の圧延条件では、最終パスの板表面の光沢度は途中パスのロール表面粗度の影響をほとんど受けず、ほぼ最終パスのロール表面粗度によって決定される。

文 献

- 1) 石川孝司, 湯川伸樹: 材料とプロセス, **2** (1989), p. 1406
- 2) 田口輝彦: 材料とプロセス, **2** (1989), p. 1410
- 3) 梁井和博, 片山健史, 矢野博光: 第 36 回塑加連講論 (1985), p. 125
- 4) 酒巻弘吉, 北川聡一: 神戸製鋼技報, **33** (1983), p. 47
- 5) 松本紘美, 上堀雄司: 第 35 回塑加連講論 (1984), p. 201
- 6) 山本普康, 橋本 淳, 新留照英, 白石利幸, 浅村 峻: 鉄と鋼, **73** (1987), p. 1358
- 7) 山田健夫, 川畑成夫, 欽本 紘, 渡辺勝治朗, 可知康彦: 塑性と加工, **23** (1982), p. 1201
- 8) 小川 茂, 浜渦修一, 松本紘美, 川並高雄: 第 38 回塑加連講論 (1987), p. 105
- 9) 小林 勝, 野沢悠夫: 塑性と加工, **8** (1967), p. 178
- 10) 安田健一, 成田健次郎, 志田 茂: 第 37 回塑加連講論 (1986), p. 25
- 11) 日本工業標準調査会, 日本工業規格 JIS-Z8741, 表面光沢度測定方法 (1983)
- 12) 日本工業標準調査会, 日本工業規格 JIS-B0601, 表面粗さの定義と規格 (1982)
- 13) H. YAMAMOTO, K. NAKAMURA, M. ATAKA and K. NAKAJIMA: Proc. the Japan International Tribology Conference, Nagoya (1990), p. 1731