

© 1992 ISIJ

論 文

ステンレス冷延鋼板の表面光沢におよぼす
微小表面欠陥の影響

剣持 一仁*・鏝田 征雄*²・阿部 英夫*・福原 明彦*³
小松 富夫*³・垣内 博之*³・岸田 朗*⁴

Effect of Micro-defects on Surface Brightness of Cold Rolled
Stainless Steel Strip

Kazuhito KENMOCHI, Ikuo YARITA, Hideo ABE, Akihiko FUKUHARA
Tomio KOMATU, Hiroyuki KAITO and Akira KISHIDA

Synopsis :

To produce cold rolled stainless steel strip efficiently, high speed rolling is attempted in cluster type rolling mill which has small diameter work rolls, or in tandem cold rolling mill which has large diameter work rolls.

To attain the high speed rolling, surface brightness of the stainless steel strip must be improved.

In this study, the effect of micro-defects on surface brightness is examined by actual and laboratory-scale rolling mills, and mechanisms of micro-pits occurring in cold rolling are discussed.

The results obtained are as follows :

(1) The surface brightness is strongly affected by micro surface defects. The brightness improved with decreasing micro-defects.

(2) Micro surface defects are sorted to four types such as micro-pits occurred from surface roughness on the mother sheet, oil-pits formed in cold rolling, grooves formed by intergranular corrosion in pickling, and scratches due to surface roughness of roll.

Key words : stainless steel; cold rolling; surface brightness; surface roughness; lubrication; rolling oil; micro-defect; micro-pit; oil-pit; groove formed by intergranular corrosion; scratch.

1. 緒 言

ステンレス冷延鋼板は、従来から小径ロールを用いたゼンジミアミル等のクラスター型可逆圧延機により圧延されてきたが、近年、これらの圧延の高速化による生産能率の向上が図られている。その一方で、大径ロールを用いた冷間タンデム圧延機による圧延が検討されている¹⁾。これは、普通鋼を圧延する完全連続圧延機を用いてステンレス鋼板を一方向に高速圧延することにより、従来の可逆式圧延に比べて著しく生産能率を向上させようとするものである。

しかし、高速圧延ではステンレス冷延鋼板の重要な品質の一つである表面光沢が低下する⁶⁾。さらに、小径ロー

ールを用いた場合に比べて、大径ロールを用いて圧延すると表面光沢が著しく劣る⁷⁾。したがって、ステンレス鋼板の高生産率を達成させるために表面光沢の向上を図ることは最も重要な課題である。

従来より、製造された鋼板の表面光沢に冷延直後の鋼板の表面性状が影響することが知られている²⁾。この表面性状に影響するロール径および圧延油の粘度等の圧延条件について種々の検討がなされて^{2)~8)}、これら圧延条件によって決まるロールバイト入口油膜厚みおよびその低減対策についても数多く論じられた^{9)~12)}。また、表面光沢は目視判定の他に、光沢度、白色度等の比較的広い視野を平均化した指標を用いて評価され、表面粗さとの関係で議論されてきた¹³⁾が、定量的には十分に説明

平成4年1月10日受付 平成4年6月10日受理 (Received on Jan. 10, 1992; Accepted on June 10, 1992)

- * 川崎製鉄(株)加工・制御研究センター (Mechanical Processing Instrumentation & Control Research Center, Kawasaki Steel Corp., 1 Kawasaki-cho Chuo-ku Chiba 260)
- *² 川崎製鉄(株)加工・制御研究センター 工博 (Mechanical Processing Instrumentation & Control Research Center, Kawasaki Steel Corp.)
- *³ 川崎製鉄(株)千葉製鉄所 (Chiba Works, Kawasaki Steel Corp.)
- *⁴ 川崎製鉄(株)千葉製鉄所 (現:川崎製鉄(株)阪神製造所) (Chiba Works, Now Hanshin Works, Kawasaki Steel Corp.)

Table 1. Rolling conditions on each cold rolling mill.

Steel	SUS430		SUS304	
	Tandem mill	Sendzimir mill	Tandem mill	Sendzimir mill
Rolling mill	Tandem mill	Sendzimir mill	Tandem mill	Sendzimir mill
Work roll diameter (mm)	530	50	530	50
Thickness of mother/finished strip (mm)	4.0/1.0	4.0/1.0	3.0/1.0	4.0/1.0
Surface roughness on mother strip (μm)	$R_a : 3.2, R_{max} : 27$	$R_a : 3.0, R_{max} : 25$	$R_a : 3.5, R_{max} : 30$	$R_a : 3.3, R_{max} : 27$
Number of stand or Number of pass	5stand	8pass	5stand	9pass
Maximum rolling speed (m/min)	300	300	300	300
Rolling oil	Mineral oil	Mineral oil	Mineral oil	Mineral oil
Viscosity of oil (mm^2/sec at 50°C)	35	15	35	15
Coolant	3% emulsion, 60°C	Neat, 50°C	3% emulsion, 60°C	Neat, 50°C

できない点もあった。

著者らは、圧延後の鋼板の表面性状を支配する主要因子が鋼板表面に生成した微小な表面欠陥であり¹⁾、これらの微小欠陥により平滑な表面が損なわれて光沢が低下することを見出した。

本研究では、代表的な鋼種であるフェライト系 SUS430 およびオーステナイト系 SUS304 について、鋼板表面の種々の微小表面欠陥を観察し、これらを定量化して表面光沢におよぼす影響を検討する。また、冷延素材表面の粗さの凸部が冷間圧延により平滑化されて、凹部（以下、母板表面凹部と称する）が冷延後に残留する機構についても述べる。

2. 実験方法

冷延後の鋼板表面に生成する微小欠陥を調べる実験では、ロール直径 530 mm の冷間タンデム圧延機およびロール直径 50 mm の 20 段ゼンジミア圧延機を用いて Table 1 に示す条件で鋼板を圧延した。ロールは回転砥石で研磨して、表面粗さを平均粗さ (R_a) で $0.3 \mu\text{m}$ に調整し、最終パスのロールのみ $0.1 \mu\text{m}$ とした。また、微小表面欠陥を光学顕微鏡および走査型電子顕微鏡 (SEM) により観察してその形態を分類し、画像解析装置¹⁴⁾により欠陥の面積率を求めるとともに、鋼板表面の光沢度¹⁵⁾を測定した。

母板表面凹部が冷延後に残留する機構を調べる実験では、ロール直径 530 mm の 4 段圧延およびロール直径 290 mm の 12 段圧延の切替えが可能な可逆式冷間圧延機を用いて、各パスともほぼ同一の圧下率および張力として Table 2 に示す条件により 4 パスで圧延した。また、各パス圧延後の鋼板表面を詳細に観察して、画像解析装置により各微小欠陥を明確に分離し、母板表面凹部が残留した欠陥の面積率を求めた。さらに、ロール直径 200 mm の実験室規模の冷間圧延機を用いて、Table 3

Table 2. Rolling conditions on reversing mill.

Steel	SUS430
Work roll diameter (mm)	290, 530
Thickness of mother strip (mm)	3.0
Number of pass	4
Delivery speed at final pass (m/min)	300
Back/Front tension (tonf)	13/13
Total reduction in thickness (%)	60.73, 76.80
Surface roughness on mother strip (μm)	$R_a : 3.0$
Surface roughness of work roll (μm)	1st pass 0.3, 0.5, 0.8 2nd pass 0.3 3rd pass 0.3 4th pass 0.1
Rolling oil	Synthetic oil
Viscosity of rolling oil (mm^2/sec at 50°C)	8, 11, 13
Coolant	5% emulsion, 50°C

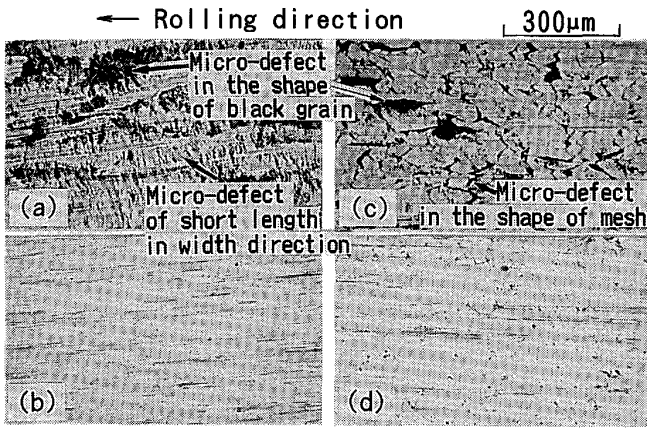
(: Standard conditions)

Table 3. Rolling conditions on laboratory mill.

Rolling mill	2-high mill
Work roll diameter (mm)	200
Steel	SUS430
Thickness of mother strip (mm)	3.0
Surface roughness on mother strip (μm)	$R_a : 3.2, R_{max} : 27$
Surface roughness of work roll (μm)	$R_a : 0.03, R_{max} : 0.3$
Reduction in thickness (%)	20
Rolling oil (Applied to strip)	Synthetic oil
Viscosity of rolling oil (mm^2/sec at 50°C)	13

に示す条件により単板を 3 mpm の速度で圧延し、圧延中にかみ止めてロールバイト部分の鋼板表面を光学顕微鏡により観察し、また、3次元粗さ計によりその粗さを調査した。

これら実験の供試材料として、熱延鋼板を焼鈍・酸洗した SUS430 鋼板および SUS304 鋼板を用いた。



(a), (b) : SUS 430 (c), (d) : SUS 304
 (a), (c) : Rolled by cold tandem mill
 (b), (d) : Rolled by Sendzimir mill

Photo. 1. Micrographs on surface of stainless steel strips after cold rolling.

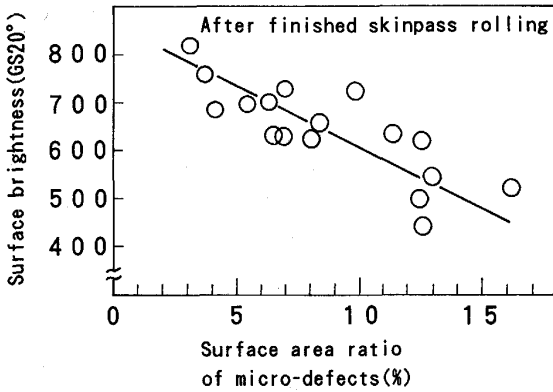


Fig. 1. Effect of surface area ratio of micro-defects on surface brightness.

3. 実験結果

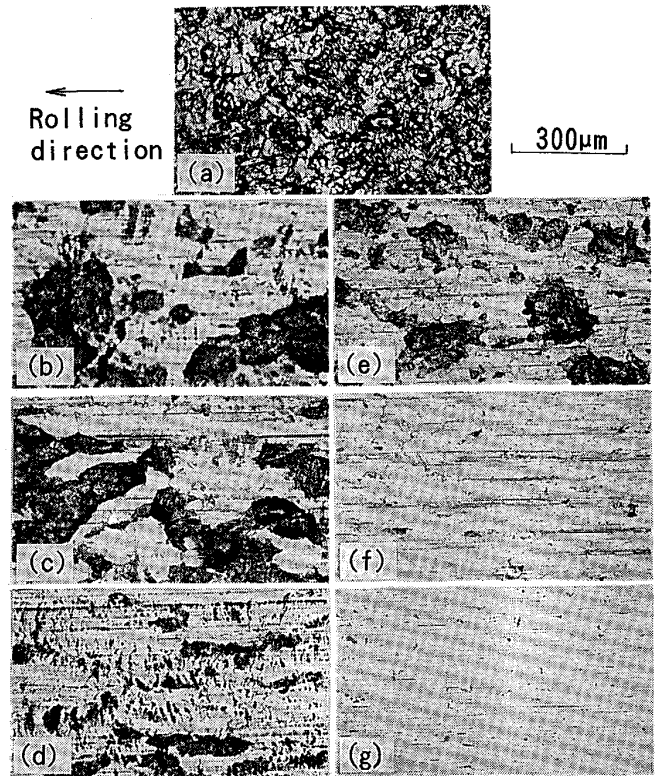
3.1 冷間圧延後の鋼板表面の顕微鏡観察結果

冷間タンデム圧延機およびゼンジミア圧延機により圧延した鋼板表面を Photo. 1 に示す。

タンデム圧延した SUS430 鋼板の表面には、黒色粒状欠陥、幅方向に短い線状欠陥および圧延方向の長い線状欠陥の 3 種類の微小欠陥がみられる。また、SUS304 鋼板の表面には、黒色粒状欠陥、網目状欠陥および圧延方向に長い線状欠陥の 3 種類がみられる。

3.2 微小欠陥と表面光沢との関係

Table 1 および Table 2 に示す種々の条件で SUS430 鋼板を冷間圧延した後に、同一の条件で焼鈍・酸洗および調質圧延を施した。これらの鋼板表面に生成した前節 3.1 に示す微小表面欠陥の面積率を画像解析装置により測定して、光沢度におよぼす影響を調べた。その結果を Fig. 1 に示す。



(a) Mother sheet
 (b) At 1st pass, DR = 530 mm, r_T = 23%
 (c) At 3rd pass, DR = 530 mm, r_T = 51%
 (d) At 5th pass, DR = 530 mm, r_T = 74%
 (e) At 1st pass, DR = 50 mm, r_T = 15%
 (f) At 4th pass, DR = 50 mm, r_T = 53%
 (g) At 8th pass, DR = 50 mm, r_T = 75%
 DR : Rolling diameter, r_T : Total reduction

Photo. 2. Micrographs on surface of cold rolled SUS 430 strips at each pass.

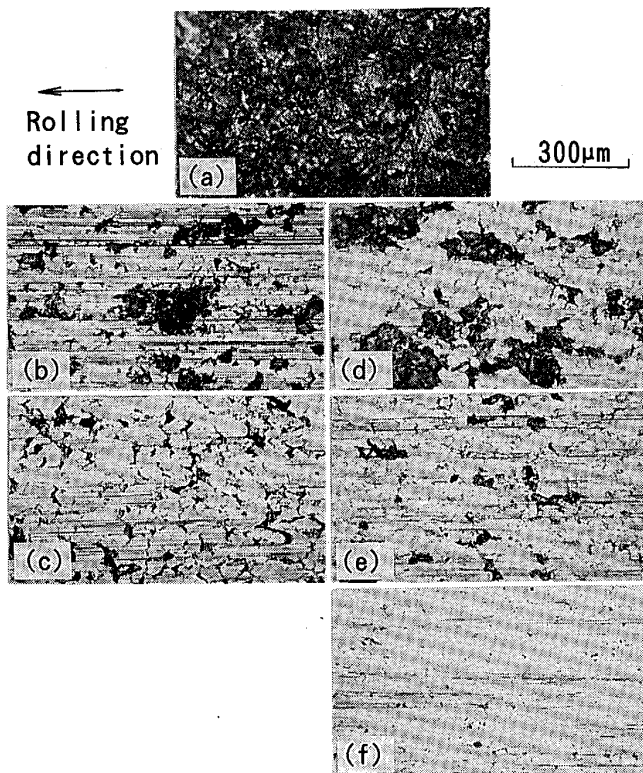
表面光沢と微小表面欠陥の面積率とは相関関係があり、欠陥が減少するにしたがって表面光沢は向上する。

4. 考 察

4.1 微小表面欠陥の生成機構

各パス圧延後の鋼板表面を詳細に観察して微小欠陥の生成機構を明らかにするため、ロール直径 530 mm およびロール直径 50 mm の可逆式圧延機を用いて、SUS430 鋼板および SUS304 鋼板を Table 1 と同じ条件で圧延した。各パス圧延後の表面の光学顕微鏡写真をそれぞれ Photo. 2 および Photo. 3 に示す。また、SEM により観察したこれら冷延後の鋼板表面を Photo. 4 に示す。

黒色粒状欠陥は各パス毎に減少し、ロール径 50 mm の場合には中間パスで消滅するが、ロール径 530 mm の場合には最終パス後も残留する。また、Photo. 4 より、その凹部に母板表面の粒界が存在することがわかる。したがって、母板表面凹部が冷間圧延した後にも残留する



(a) Mother sheet
 (b) At 2nd pass, DR = 530 mm, $r_T = 24\%$
 (c) At 5th pass, DR = 530 mm, $r_T = 43\%$
 (d) At 1st pass, DR = 50 mm, $r_T = 24\%$
 (e) At 3rd pass, DR = 50 mm, $r_T = 45\%$
 (f) At 9th pass, DR = 50 mm, $r_T = 75\%$
 DR: Rolling diameter, r_T : Total reduction

Photo. 3. Micrographs on surface of cold rolled SUS 304 strips at each pass.

と判断される。

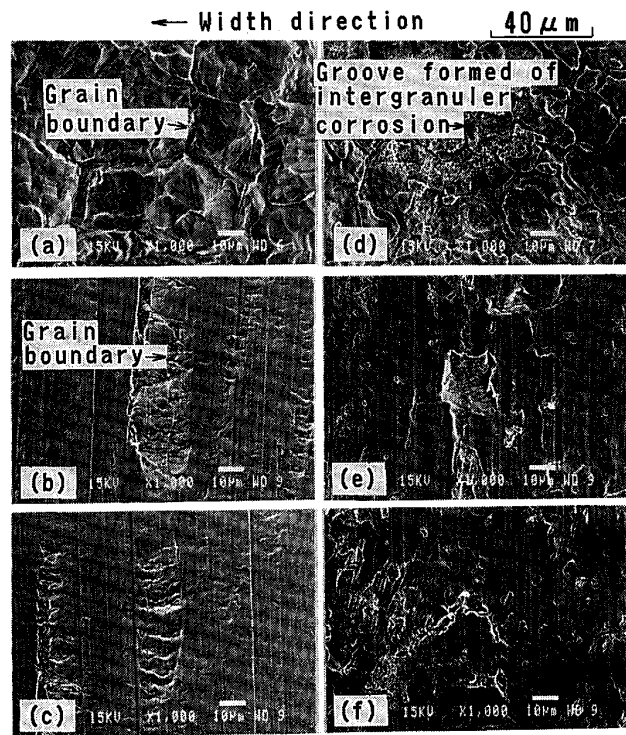
圧延方向の長い線状欠陥は各パスとも存在し、その形態からロール粗さが板へ転写した痕跡（以下、スクラッチと称する）であると考えられる。

幅方向に短い線状欠陥は、ロール径が 50 mm の場合にほとんど生成しないが、530 mm の場合に顕著に生成し、かつ、パス毎に増加する。また、この線状欠陥は、Photo. 4 よりスクラッチが存在する部分に生成し、微小な断層状の形態となっていることから、大貫らにより述べられているオイルピット¹⁶⁾であることがわかる。

網目状欠陥は SUS304 に特有なものであって、Photo. 3 に示すようにパス毎に減少する。ロール径が 50 mm の場合には中間パスでほとんどなくなるが、530 mm の場合には最終パス後も残留する。また、Photo. 4 に示す母板表面との比較により、この欠陥は粒界浸食溝が残留したものであることがわかる。

4.2 母板表面凹部の残留におよぼす圧延条件の影響

Table 2 に示す各条件で SUS430 鋼板を圧延し、圧



(a), (b), (c): SUS 430 (d), (e), (f): SUS 304
 (a), (d): Surface of mother sheet
 (b), (e): Micro-defect in the shape of black grain (Micro-pit occurred from surface roughness on mother sheet)
 (c): Micro-defect of short length in width direction (Oil-pit)
 (f): Micro-defect in the shape of mesh (Groove formed of intergranular corrosion)

Photo. 4. SEM micrographs on surface of mother sheets and cold rolled sheets.

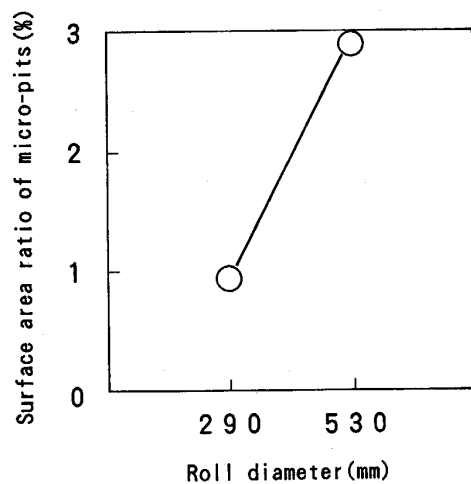


Fig. 2. Effect of roll diameter on surface area ratio of micro-pits.

延後の鋼板表面に残留した母板表面凹部の面積率を測定した。この面積率と、ロール径、母板表面粗さ、ロール粗さ、圧下率、圧延速度および圧延油の粘度との関係を調べて、それぞれ Fig. 2 から Fig. 7 に示す。

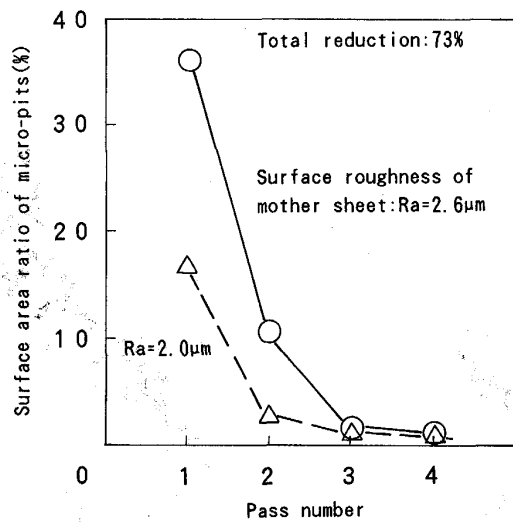


Fig. 3. Effect of surface roughness of mother sheet on surface area ratio of micro-pits.

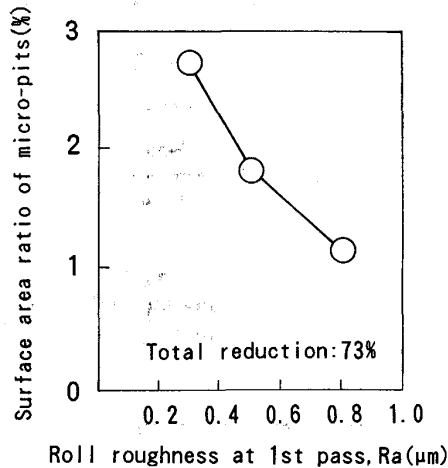


Fig. 4. Effect of roll roughness on surface area ratio of micro-pits.

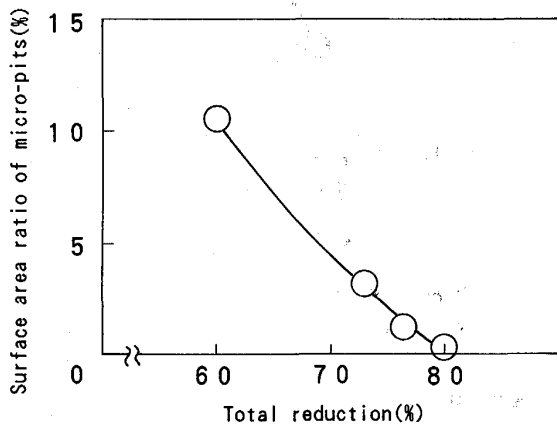


Fig. 5. Effect of total reduction on surface area ratio of micro-pits.

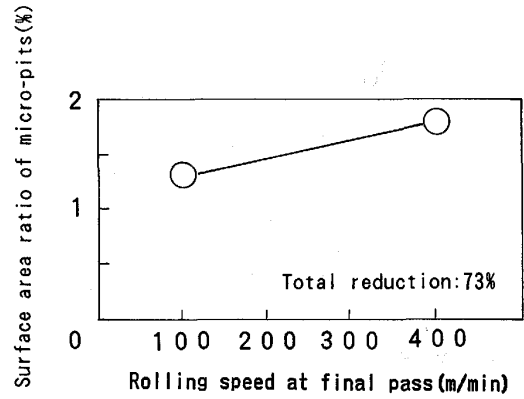


Fig. 6. Effect of rolling speed on surface area ratio of micro-pits.

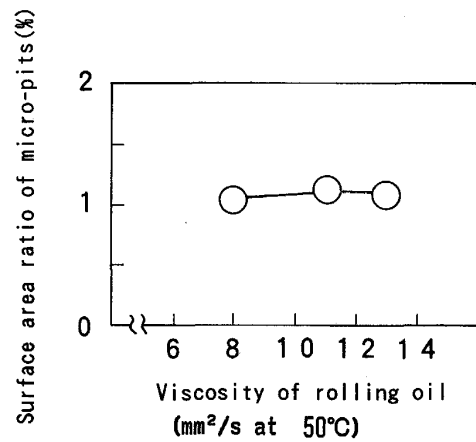


Fig. 7. Effect of viscosity of rolling oil on surface area ratio of micro-pits.

ロール径および母板粗さが小さくなると凹部の面積は減少し、ロール粗さおよび圧下率が大きくなると凹部の面積は減少する。また、圧延速度が減少すると凹部の面積はわずかに減少するが、本実験の範囲では圧延油の粘度が変わってもほとんど変化しない。

従来より、表面光沢におよぼす圧延条件の影響はロールバイト入口での流体力学的油膜厚みの形成とロールバイト内部でのオイルピットの生成に関して議論され、オイルピットの生成しやすさから圧延速度および圧延油の粘度の影響が大きいことが知られている²⁾¹⁰⁾¹²⁾。しかし、本実験条件の範囲では、母板表面凹部の残留におよぼす速度や粘度の影響は他の圧延条件に比較して小さいことが判明した。したがって、凹部が冷延後に残留する機構は、流体力学的油膜厚みの形成のみで充分に説明できない点がある。

4.3 母板表面凹部の残留機構の検討

4.3.1 ロールバイト内部の変化

実験室規模の圧延実験によりかみ止めた鋼板の表面について、ロールバイト部分の3次元粗さプロフィールおよ

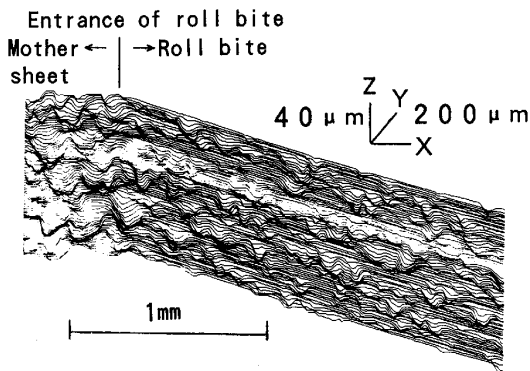


Fig. 8. Profile of surface roughness at entrance of roll bite (under lubricating condition).

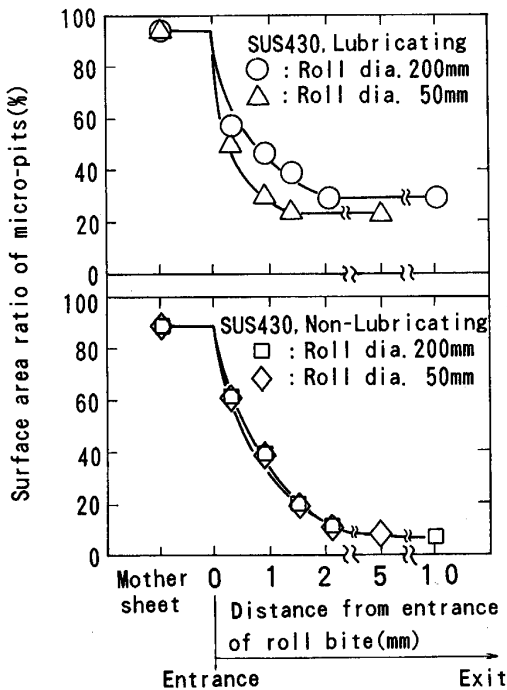


Fig. 9. Changes of surface area ratio of micro-pits in roll bite.

び凹部の面積率を測定した。これらの結果をそれぞれ Fig. 8 および Fig. 9 に示す。

母板表面凹部はロールバイト入側で著しく減少するが、ロールバイト中央から出側でほとんど変化しないこ

とがわかる。したがって、凹部はロールバイト入側における圧延油の挙動や圧延条件が関係して減少することが推定される。

4.3.2 ロールバイト入口における凹部への圧延油封入の影響

Fig. 8 より、ロールバイト入口において母板がロールにかみ込まれると、その表面粗さの凹部のみが残留する。この状態をロール径の大小により比較したものが Fig. 10 である。なお、本図に示す α_1 および α_2 は、各々大径ロールおよび小径ロールを用いた場合のかみ込み角度である。

(1) ロール径の影響

Fig. 10 より凹部の形成にロールと鋼板とのかみ込み角度が影響することがわかる。

かみ込み角度が増加すると、ロールバイト入口において凹部に封入される圧延油が減少するため、圧延後の凹部も減少する。かみ込み角度 α とロール径との関係は (1) 式で示される¹⁷⁾。

$$\cos \alpha = 1 - \Delta h / (2 \cdot R') \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 R' は偏平ロール半径、 Δh は圧下量を示す。

Fig. 2 より、ロール径が小さいほど凹部は減少している。

(2) 母板粗さプロファイルの影響

Fig. 10 よりロールバイト入口における凹部の面積が小さいほど凹部への圧延油の封入量が減少し、圧延後の凹部も減少する。

Fig. 3 から母板粗さが減少すると凹部の面積が減少することがわかる。

母板粗さは通常のゼンジミア圧延において平均粗さ (R_a) で 2 から 4 μm 、最大粗さ (R_{max}) で 20 から 40 μm であり、粗さの平均ピッチ (λ_a) で 50 から 200 μm である。

ステンレス鋼板の冷間圧延時に流体力学的に引き込まれる入口油膜厚みは、Table 1 に示す条件において油膜のせん断発熱を考慮した小豆島らの方法¹⁸⁾により計算すると 0.1 μm 以下となる¹⁹⁾。

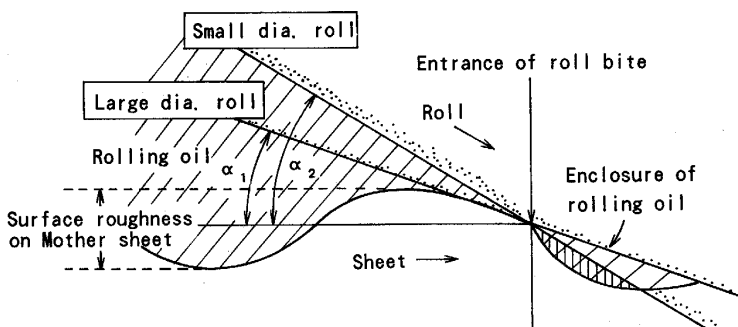


Fig. 10. Schematic diagram of condition on enclosing rolling oil in micro-pit at entrance of roll bite.

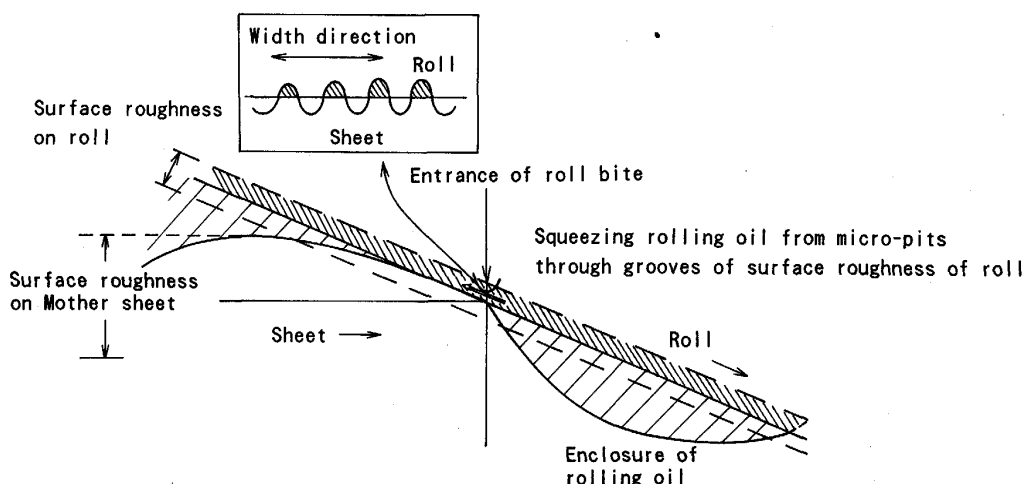


Fig. 11. Schematic diagram of effect of grooves formed of surface roughness of roll on squeezing rolling oil from micro-pit at entrance of roll bite.

このように、本実験範囲では入口油膜厚みに比較して母板粗さは著しく大きいことから、ロールバイトに導入される圧延油の量は、凹部による機械的捕捉¹⁰⁾が支配的であると考えられる。これは、Fig. 3 と Fig. 6 との比較により、母板粗さが凹部面積の変化におよぼす影響は圧延速度がおよぼす影響よりも大きいことにも対応している。

(3) 圧延油の有無の影響

Fig. 9 に示すように凹部の形成に圧延油の有無が影響する。無潤滑で圧延した場合は圧延油を供給した場合より凹部が著しく減少している。

空気等の気体の圧縮率は、例えば常温常圧で約 $7 \times 10^{-6} \text{ Pa}^{-1}$ である²⁰⁾。圧延油等の液体の圧縮率は、圧延油の組成が異なっても $5 \sim 10 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$ の範囲の値を示し、空気に比べて著しく圧縮されにくい²¹⁾。したがって、凹部に圧延油が封入されると、凹部は比較的那形状を保ってロールバイトにかみ込まれやすくなる。

(4) ロール粗さの影響

Fig. 4 に示すように凹部の減少にロール粗さが影響する。この概要を Fig. 11 に示す。本図は、大きな表面粗さを持つロールで母板を圧延した場合、ロールバイト入口において母板がロールにかみ込まれる状態を示したものである。

ロールは一般に砥石で研磨されるため、その表面粗さは周方向に細長い形態をとる。

ロール粗さが増加すると、ロールバイト入口において粗さの溝により凹部から圧延油が排出されやすくなる。その結果、凹部に封入される油量を減少させるため、圧延後の凹部も減少すると推定される。

これは小豆島らにより報告されている加工方向に並行な粗さを付与したアルミニウム板を引き抜く実験において、工具入口付近で潤滑油の排出される現象²²⁾と合致すると思われる。

4.3.3 ロールバイト内部における凹部からの圧延油噴き出しの影響

Fig. 9 より、母板表面凹部はロールバイト入口だけでなく内部においても減少している。

ロールバイト内部では、圧下の進行にともなって中立点位置までは圧延圧力が増加して、凹部の圧延油に加わる圧力が増加すると思われる。その圧力が凹部周辺の圧力と等しくなると、凹部から圧延油が噴き出して凹部が減少する²⁵⁾と推定される。

Fig. 5 より圧下率の増加にともない凹部は減少していることがわかる。

小豆島らにより、ピッカース圧痕を付与したアルミニウム板を引き抜く実験および解析が行われて、凹部から潤滑油が噴き出す現象²³⁾が報告されている。圧延においても同様の現象が起きているものと思われる。

ロールバイト入口では、圧延油が流体力学的に引き込まれて入口油膜厚みが形成される³⁾。この入口油膜厚みが増加すると凹部は減少しにくくなる。

一方、ロールバイト内部では、凹部に封入された圧延油に微小領域での流体力学的効果が作用して、凹み端部の圧力が増加すると思われる。この圧力が凹部周辺の圧力と等しくなると、圧延油が噴き出して凹部は減少しやすくなると推定される²⁴⁾。

これらのロールバイト入口での挙動と凹み端部での挙動とは凹部の減少に対して相反する作用を示す。

例えば、速度または粘度が増加すると、入口油膜厚み

が増加して凹部は減少しにくくなるが、その一方で、凹み端部の圧力は増加して凹部の圧延油が噴き出して凹部は減少しやすくなると推定される。

したがって、これらの流体力学的挙動が相殺し合うため、Fig. 5 から Fig. 7 に示すように、凹部の減少におよぼす速度や粘度の影響は圧下率の影響に比較して小さくなると思われる。

5. 結 論

SUS430 および SUS304 冷延鋼板の表面光沢におよぼす微小表面欠陥の影響を調べて、欠陥の一つである母板表面凹部が冷延後に残留する機構を検討した結果、以下の結論を得た。

1) 鋼板の表面光沢は、鋼板表面に生成した微小欠陥に大きく影響され、欠陥が減少すると光沢は向上する。

2) 冷間圧延後の鋼板表面に生成する主な微小欠陥は、母板表面凹部の残留、オイルピット、母板の粒界浸食溝およびロール粗さが転写したスクラッチの4種類である。

3) 母板表面凹部は、ロールバイト入側で著しく減少し、バイト中央部から出側にかけてほとんど変化しない。

4) 母板表面凹部の残留にワークロール径、母板粗さ、ワークロール粗さおよび圧下率が大きく影響し、本実験条件の範囲では圧延速度および圧延油の粘度の影響は小さい。

5) 母板表面凹部が冷延後に残留する機構は、ロールバイト入口における凹部への圧延油の封入、およびロールバイト内部における凹部からの圧延油の噴き出しとして説明される。

文 献

1) 剣持一仁, 鎌田征雄, 阿部英夫, 福原昭彦, 小松富夫, 垣内博之, 岸田 朗: 材料とプロセス, **4** (1991), p. 492

- 2) 澤谷 精, 南野 繁, 西村 弘, 水沼武久: 製鉄研究, **292** (1977), p. 100
- 3) 小豆島明, 木原諄二, 五弓勇雄: 塑性と加工, **18** (1977), p. 337
- 4) 小豆島明, 野呂和也, 井柳好貴: 第 37 回塑性加工連合講演会講演論文集 (1986), p. 453
- 5) 梶間 透, 駒野忠明, 梁井和博, 岩崎芳明, 高畑繁則: 第 38 回塑性加工連合講演会講演論文集 (1987), p. 117
- 6) 小豆島明, 野呂和也, 井柳好貴, 出川浩樹: 鉄と鋼, **76** (1990), p. 576
- 7) 飯野光明, 志渡誠一, 泊 康則, 小野寺健次, 三反崎裕雄: 昭和 61 年度塑性加工春季講演会講演論文集 (1986), p. 159
- 8) 岩崎芳明, 水田次士, 梶間 透, 梁井和博: 第 38 回塑性加工連合講演会講演論文集 (1987), p. 113
- 9) 小豆島明, 金子徳次郎: 第 36 回塑性加工連合講演会講演論文集 (1985), p. 33
- 10) 水野高爾: 塑性と加工, **12** (1971), p. 369
- 11) 小豆島明, 宮川松男: 潤滑, **24** (1979), p. 94
- 12) 小豆島明: 鉄と鋼, **76** (1990), p. 576
- 13) 蓮沼 宏: 光沢 (1960), p. 140 [コロナ社]
- 14) 宮崎 明, 柳澤 満, 古君 修, 齊藤文夫: 川崎製鉄技報, **21** (1989), p. 362
- 15) JIS-Z8741 (鏡面光沢測定方法)
- 16) 大貫 輝, 安富清次郎, 外山晴二, 橋口幸生, 泊 康則, 園田 栄, 広中清一郎: トライボロジスト, **35** (1990), p. 845
- 17) 板圧延の理論と実際 (日本鉄鋼協会共同研究会圧延理論部会編) (1984), p. 7 [日本鉄鋼協会]
- 18) 小豆島明, 木原諄二, 宮川松男: 昭和 52 年度塑性加工春季講演会講演論文集 (1977), p. 1
- 19) 剣持一仁, 鎌田征雄, 阿部英夫, 福原昭彦, 小松富夫, 垣内博之, 岸田 朗: 材料とプロセス, **4** (1991), p. 494
- 20) 機械工学便覧, A. 基礎編 (日本機械学会編) (1990), p. A5-5 [丸善]
- 21) 化学便覧, 基礎編 (日本化学会編) (1989), p. II-28 [丸善]
- 22) 小豆島明, 山岸一二三, 坪内昌生, 工藤英明: 第 37 回塑性加工連合講演会講演論文集 (1986), p. 451
- 23) 小豆島明, 坪内昌生, 工藤英明, 古田憲明, 峯村 憲: 塑性と加工, **30** (1989), p. 1631
- 24) 小豆島明, 工藤英明: 第 37 回塑性加工連合講演会講演論文集 (1988), p. 131
- 25) 剣持一仁, 鎌田征雄, 阿部英夫, 河澄英輔, 清野芳一, 小林 真: 材料とプロセス, **4** (1991), p. 1585