

ステンレス鋼実機圧延に適用しうる 表面光沢推定システムの提案

小豆島 明*

Proposal of Estimation System for Surface Brightness of Rolled Sheet
in Stainless Steel Cold Rolling Process

Akira AZUSHIMA

Synopsis : In the previous paper, the author has reported that the surface brightness is expressed as three functions of the inlet oil film thickness and the surface brightnesses of roll and sheet before rolling, and a system for estimating and controlling the surface brightness before rolling can be constructed by using this relation. In this paper, a new system for estimating the surface brightness after each pass in actual mill for cold rolling of stainless steel is proposed by developing this relation. In the new system, the estimation is carried out as follows: (1) Preparation of as hot rolled specimen, (2) Input of rolling conditions at each pass in actual mill, (3) Calculation of the inlet oil film thickness at each pass, (4) Determination of rolling conditions at each pass in laboratory mill, (5) Rolling in laboratory mill and measurement of surface properties of rolled specimen, (6) Surface brightness after final pass.

By using the new estimating system, the surface properties after each pass are measured and it is seen that the system is able to estimate the surface brightness after each pass in actual mill.

Key words : stainless steel; cold rolling; surface qualities; surface brightness; surface roughness; inlet oil film thickness.

1. 緒言

現在、ステンレス鋼板の冷間圧延においては、優れた表面光沢を得るために低粘度鉱油ベースのニート形を用いて、小径ロールあるいは低圧延速度で圧延が行われている。しかし、生産性向上のために圧延速度の増加やロール径の大きな圧延機の使用の試みがなされているが、その場合製品の表面光沢が低下する問題に直面している。そのため圧延後の材料の表面性状を定量的に把握し、圧下率、圧延速度、圧延油粘度及びロール・材料の表面粗さなどのトライボロジー因子により精度よく、厳重に管理することが望まれている。

著者らは、この観点から冷間圧延後の表面性状に及ぼすトライボロジー因子の影響を定量的に調べるため、圧下率、圧延速度及びロール・材料の表面粗さを広範囲、系統的に変化させて圧延を行い、圧延後の表面性状を測定し、表面推定・管理のための系統的なデータ収集を行った。そして、これらのデータベースの中の表面光沢とレイノルズ方程式より計算した入口油膜厚みとの関係から、圧延後の材料の表面光沢を推定・管理しうる新たなシステムの構築が可能なることを示した。¹⁾

本研究は、以上の著者の研究をベースにし、ステンレス鋼板の冷間圧延における実機の各パス後の表面光沢を推定

するためのシステムを新たに提案し、この推定システムの実機への適用について検討し、更に高表面光沢創製の可能性についても検討したものである。

2. 表面光沢推定システムの構築

ステンレス鋼の冷間圧延におけるニート潤滑の場合、圧延後の材料の表面光沢 G_s は加工因子(ロール速度 V_r 、材料の入口速度 V_1 、入口板厚 t_1 、圧下率 r 、ロール半径 R 、変形抵抗 k)、潤滑油因子(常温・常圧の粘度 η_0 、圧力係数 α 、温度係数 β)及び圧延前のロールと材料の表面粗さ(R_{a0}^{ROLL} 、 R_{a0}^{MATE})などに影響を受けることが知られている^{1)~7)}。その結果から、圧延後の材料の表面光沢 G_s は加工因子、潤滑油因子を従属変数として、

$$G_s = G_s(V_r, V_1, t_1, r, R, k, \eta_0, \alpha, \beta, R_{a0}^{ROLL}, R_{a0}^{MATE}, \text{etc}) \dots\dots\dots (1)$$

で表すことができる。しかし、前報¹⁾において、各種圧延条件により圧延後の材料の表面光沢の実験データをレイノルズ方程式から計算した入口油膜厚みでプロットすると、圧延後の材料の表面光沢は

$$G_s = G_s(h_1, R_{a0}^{ROLL}, R_{a0}^{MATE}) \dots\dots\dots (2)$$

平成5年10月29日受付 平成6年5月13日受理 (Received on Oct. 29, 1993; Accepted on May 13, 1994)

* 横浜国立大学工学部 (Faculty of Engineering, Yokohama National University, 156 Tokiwadai Hodogaya-ku Yokohama 240)

のように表すことができることを示した。

(2)式の関係が完全に定量的に示されるならば、各パスの圧延条件から圧延前に圧延後の材料の表面光沢を定量的に推定することができる。しかし、現状では実際に適用しうる(2)式の定量的な関係が明らかでないので、実機に適用しうる別のシステムを構築しなければならない。

(2)式は、圧延後の材料の表面光沢が圧延前のロール及び材料の表面粗さ並びにレイノルズ方程式から計算される入口油膜厚みで与えられることを示している。更に、その関係式は(2)式が全ての条件で定量的に明らかでなくても、実験室レベルでの低速度の圧延機を用いることにより、実機における圧延後の製品の表面光沢が推定可能なことを示している。その方法とは、まず実際の同じ圧延材料を用意し、圧延前のロール表面粗さを実機における R_{a0}^{ROLL} と一致させ、つづいて実機の圧延条件から計算される入口油膜厚み h_1 と同じ値になるように実験室用圧延機の圧延条件を設定して圧延する方法である。その方法により実機の圧延後の表面光沢と一致する表面を実験室用圧延機によって圧延することが可能となる。この方法の推定システムの流れ図を Fig. 1 に示す。その内容は以下の通りである。

- (I) 実機で冷間圧延するために使用するものと同じ材料を用意する。
- (II) 実機の各パスにおける圧延条件(入口板厚 t_1 , ロール半径 R , ロール速度 V_r , 材料の入口速度 V_1 , 圧下率 r , 後方張力 T_b , 圧延油の粘度 η , 圧延油粘度の圧力係数及び温度係数 α, β , ロールの表面粗さ R_{a0}^{ROLL} , 材料及びロールの表面温度 T_{MATE} , T_{ROLL} など)のデータを調べる。
- (III) 各パスにおける入口油膜厚み h_1 を熱的効果を考慮したレイノルズ方程式を用いて計算する。
- (IV) 実験室用圧延機において、(III)で計算された各パスの

入口油膜厚み h_1 に一致する圧延条件を設定し(例えば、圧延速度、圧延油の粘度などを調整することにより入口油膜厚みを一致させる), 各パスの実験室用圧延機のロールの表面粗さを実機のロールの表面粗さに一致させる。

- (V) (IV)の圧延条件で圧延し、各パス圧延後の材料の表面性状を測定する。
- (IV) 最終パス後の材料の表面が実機で圧延を行った製品表面となる。

3. 推定システムの適用

3.1 実機の圧延条件

ステンレス鋼板の多くの冷間圧延は、センジミヤール圧延機を用いてニート潤滑による多パス圧延が行われている。そのため、今回の表面光沢推定システムを適用する圧延条件としては、その実機の最も一般的であると思われる各パスの圧延条件を取り上げた。その圧延条件を Table 1 に示す。圧延のワークロール径は $\phi 60\text{mm}$ で、圧延材料は初期板厚 4.0mm の SUS430 フェライト系ステンレス鋼である。圧延は 8 パスで行われ、圧延油は粘度 10cSt (40°C) の鉱油ベースである。

3.2 各パスにおける入口油膜厚みの計算

Fig. 2 は、ロールと材料間で流体潤滑されている入口部の模式図を示す。入口油膜厚みの計算のための仮定及び式の導出の詳細については著者らの文献⁸⁾⁹⁾で説明してあるのでここでは省略する。入口油膜厚み h_1 の計算に必要なレイノルズ方程式、エネルギー式、粘度式は Fig. 2 より

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{6\eta(V_r + V_1)}{\tan\theta} \left(\frac{h - h_1}{h^3} \right) \dots\dots\dots (3)$$

$$K \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \eta \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 = 0 \dots\dots\dots (4)$$

$$\eta = \eta_0 \exp\{\alpha p - \beta(T_0 - T)\} \dots\dots\dots (5)$$

Table 1. Pass schedule on a practical mill with 60mm diameter work rolls using a lubricant (mineral oil) with a viscosity of 10cSt (40°C).

Pass No.	Thickness (mm)	Rolling speed (m/min)
0	4.0	
1	3.5	100
2	2.9	100
3	2.4	100
4	1.9	200
5	1.5	200
6	1.2	200
7	1.0	200
8	0.8	200

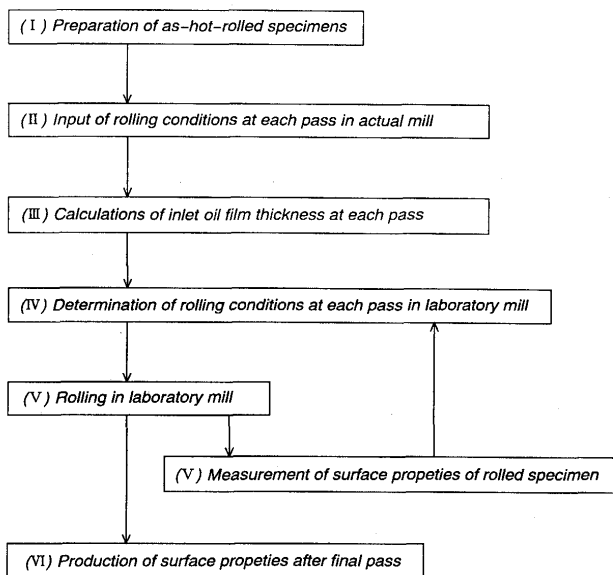


Fig. 1. Flow chart of estimation system for surface brightness of rolled sheet.

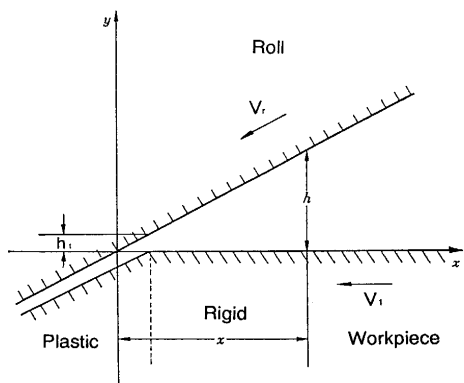


Fig. 2. Schematic representation of inlet zone between roll and workpiece.

を用いた。ここで、 p は圧力、 h は油膜厚み、 θ はかみ込み角、 T は温度、 T_0 は圧延油の温度、 K は圧延油の熱伝導率である。

(3)式を計算する境界条件としては、後方張力が無い場合

$$\begin{aligned} h &= 100 \times h_1 && \text{のとき} && p &= p^* \\ h &= h_1 && \text{のとき} && p &= \sigma_0 \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

とした。ここで、 p^* は油膜厚みが入口油膜厚みの100倍になれば熱的効果の影響を無視してよいとして、(3)式から求めた圧力であり、 σ_0 は材料の降伏応力である。次に、(4)式の圧延油の速度 u は、次式

$$u = \left\{ V_r + (V_1 - V_r) \frac{h-y}{h} \right\} + \left\{ -\frac{y(h-y)}{2\eta} \frac{dp}{dx} \right\} \dots\dots (7)$$

を用いた。(4)式の温度の境界条件としては

$$\begin{aligned} y &= 0 && \text{のとき} && T &= T_{MATE} \\ y &= h && \text{のとき} && T &= T_{ROLL} \end{aligned}$$

とし、(4)式の積分を行い油膜断面の平均温度 T_m を求めた。入口油膜厚みの計算方法は、入口油膜厚み h_1 を仮定して、初期値を求め、圧力及び温度をRunge-Kutta法及びNewton-Raphson法で計算し、油膜厚み h が h_1 になったときの圧力 p が材料の降伏応力 σ_0 に等しいかどうか比較して、 $p = \sigma_0$ になるまで h の変更を行い、入口油膜厚みを決定するものである。後方張力が作用する場合には、入口点での圧力 p を材料が塑性変形する降伏条件を満足するようにならなければならない。この方法を用いて、Table 1の各パスでの入口油膜厚みの計算を行った。

3・3 実験室用圧延機

推定システムのための圧延実験には、Fig. 3に示す広範囲速度可変実験室用圧延機¹⁰⁾を用いた。その圧延機の上下ロールは、100~1750rpmまで速度可変の22kW DCモータ①を電磁クラッチ②を通して回転するか、4~40rpmまで速度可変のACモータ③をカップリング④を通して回転させるかであ

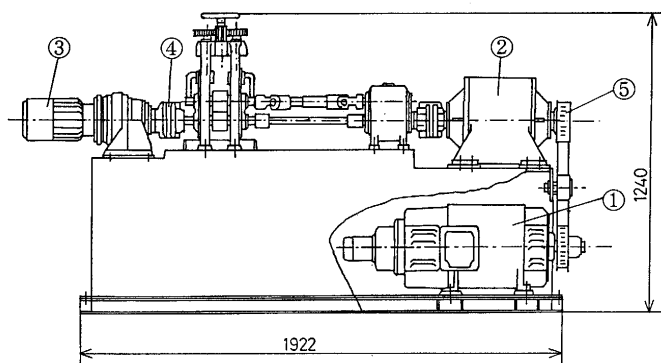


Fig. 3. Outside drawing of the laboratory mill with 76mm diameter work roll with a wide range of rolling speed (~420m/min). ① 22kW DC motor, ② magnetic clutch, ③ AC motor, ④ coupling, ⑤ timing belt.

る。DCモータの回転は、タイミングベルト⑤により上下ロールに伝えられ、それぞれの軸に取り付けられた歯車により回転比を1 : 1, 2 : 1及び3 : 1に変化することができる。現在この圧延機は2 : 1として、①と③の二つのモータを用いることにより上下ロール回転数を4~875rpmまで連続的に変化できるようにしてある。圧延機は2段で、上下ロールはSUJ-2製の径76mm、胴長60mmである。

3・4 実験室用圧延機の圧延条件と実験方法

実験に用いた材料は、板厚3.12mmのSUS430フェライト系ステンレス鋼熱延板である。その表面の顕微鏡写真をFig. 4に示す。この原板は実機の冷間圧延のために使用されている材料である。実験室用圧延機のロール表面は、実験[I]においてはロール表面をスムーズとし、#1500エメリ紙で各パスごとに研磨し、表面粗さを $R_{a0} = 0.015\mu\text{m}$ 一定に管理した。

実験[II]においては、実機の各パスでのロール表面粗さにできるだけ一致させるように1, 2パスでは#120エメリ紙, 3, 4パスでは#240エメリ紙, 5, 6パスでは#400エメリ紙及び7, 8パスでは#1500エメリ紙でロール表面を研磨した。それぞれのパスにおけるロールの表面加工条件及び表面粗さをTable 2に示す。

Table 1の実機のパススケジュールにおける各パスで計算した入口油膜厚みに一致させる実験室用圧延機における圧延条件をTable 2に示す。この実験に用いた圧延油はパラフ

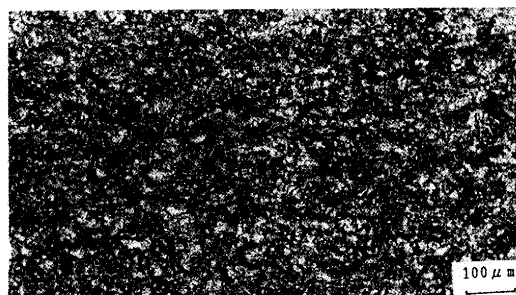


Fig. 4. Surface photograph of as-hot-rolled strip.

Table 2. Pass schedule and roll surface in experiment [II] on a laboratory mill with 76mm diameter work rolls using a lubricant (paraffinic base oil) with a viscosity of 340cSt (20°C).

Pass No.	Reduction (%)	Rolling speed (rpm)	Roll surface in experiment [II]	
			Emery No.	Surface roughness $R_a(\mu\text{m})$
1	13	17	120	0.40
2	13	17	120	0.40
3	13	17	240	0.14
4	17	33	240	0.14
5	18	33	400	0.045
6	18	33	400	0.045
7	17	33	1500	0.015
8	17	33	1500	0.015

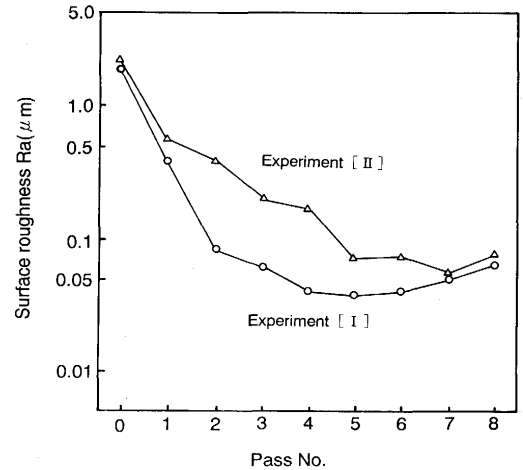


Fig. 6. Surface roughness of rolled sheets at each pass schedule in experiments [I] and [II].

イン系鉱油で、その粘度は340cSt(20°C)である。圧延は室温(20°C)で行った。

実験室用圧延機の各パスの圧延は、実機にできるだけ一致させたTable 2に示すパススケジュールで行った。圧延油はニートでロール全面に塗布し、圧延試験片はどぶ付けにした。最初の圧延試験片の寸法は、幅22mm、長さ250mmであった。本実験では、圧延試験片を多数用意し、各パス終了ごとにそれまでのパススケジュールで圧延された試験片を2本以上保存した。各パス後の材料表面は、光沢計により幅方向の $G_s(20)$ を、触針式表面粗さ計により幅方向の表面粗さ R_a を測定し、金属顕微鏡により表面写真を撮影した。

3・5 推定システムによる圧延後の表面性状

Fig. 5 及び Fig. 6 に実験 [I] 及び実験 [II] の各パス圧延後の材料表面の表面光沢 G_s と表面粗さ R_a を示し、Fig. 7 に金属顕微鏡写真を示す。

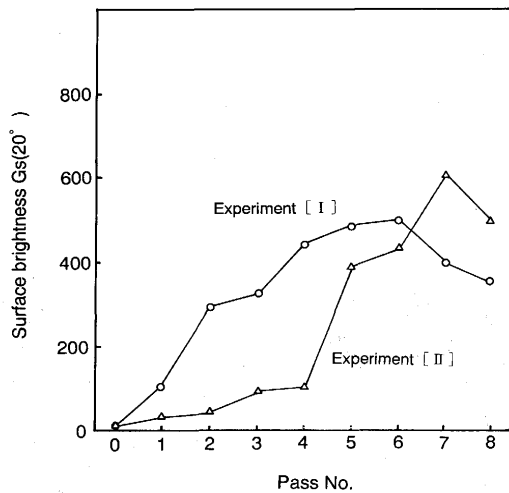


Fig. 5. Surface brightness $G_s(20)$ of rolled sheets at each pass schedule in experiments [I] and [II].

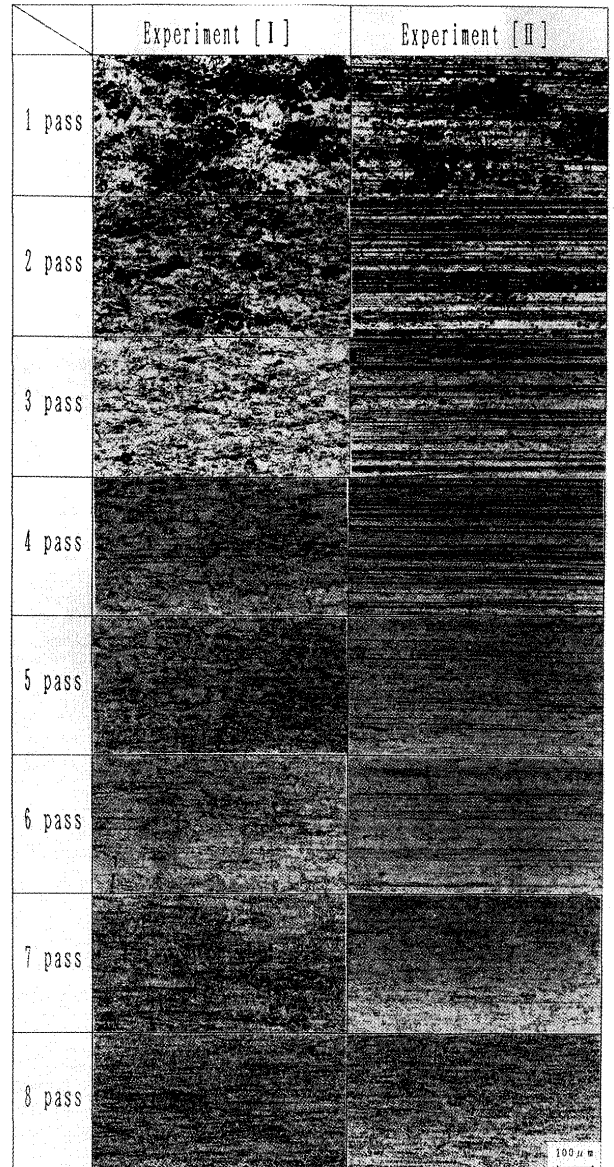


Fig. 7. Surface photographs of sheet rolled at each pass schedule in experiments [I] and [II].

実験 [I] の表面光沢は 6 パス目までは上昇し、500 を越える値にまで達しているが、その後の 7、8 パスになると低下している。同じ実験の表面粗さは、表面光沢とは異なり 5 パス目までは低下しているが、その後のパスでは増加している。一方、実験 [II] の表面光沢はロール表面粗さが大きい 4 パス目までは 100 以上と非常に低く、ロール表面粗さが小さくなった 5 パス及び 7 パス目でそれぞれ大きな増加が得られている。しかし、8 パス目では表面光沢は低下してしまった。同じ実験の表面粗さは、ロール表面粗さの変化と対応して 7 パス目まで低下しているが、8 パス目だけが前のパスと比べ増加した。

次に、実験 [I] と実験 [II] の結果を比較すると、Fig. 5 においてロール表面粗さを変化させた実験 [II] の方が 7 及び 8 パスにおける表面光沢が高くなっている。しかし、Fig. 6 から 7 及び 8 パスでの表面粗さが実験 [II] の方が低くなってはいない。このことは、大きな表面凹凸のある熱延板を多パス圧延して、材料表面を鏡面化していく過程において、それぞれの各パスでのロール表面を最適に管理する必要のあることが理解できる。そのことは、Fig. 7 の実験 [I] と実験 [II] の各パス後の材料表面の顕微鏡写真を比較すればよく理解できる。初期のパスでは、圧延油がトラップされて生じる材料表面凹部をできるだけ圧延変形により除去することが望ましい。そのためには、実験 [II] のような大きな圧延方向の規則的な凹凸をロール表面につける方が好ましいことがわかる¹¹⁾。

最終パスにおいて優れた表面光沢を得るためには、鋼板の材料表面の性状が重要なことが Fig. 7 の表面写真から理解しうる。即ち、実験 [I]、[II] の 7 及び 8 パスにおいては両方とも同じ表面粗さをもつロールを使用したにもかかわらず、実験 [II] の表面光沢が高くなっている。これは、6 パス終了後の表面写真を見ると実験 [I] ではランダムなオイルピット凹部が多数散在しているのに対し、実験 [II] では規則的なロール研磨による軽度のスジが観察される。この差が 7 パス後の表面光沢の差に大きな影響を与えたことになる。そこで、次にこの 7 パス圧延の際の差を更に定量的に理解するための検討を行った。

4. 本システムを用いた 7 パス圧延の際の表面光沢に及ぼす材料表面性状の影響の検討

前章において表面光沢推定システムの適用について検討を行った際、ロールの表面粗さの差によって多パス圧延後の材料の表面光沢に大きな差を生じることが理解できた。特に、7 パス圧延の際の差を定量的に理解して、高表面光沢創製の可能性についての検討を行うことが必要であることがわかった。

本実験においては 7 パス圧延の際の表面光沢に及ぼす材料表面性状の影響を定量的に調べるため、本システムを用

Table 3. Properties of rolling specimens. The specimens from No.2 to No.8 were rolled with work rolls having various surface roughnesses and the specimens from No.9 to No.12 were deformed up to various strain stages by tensile test.

Sample No.	Thickness (mm)	Surface roughness $R_a(\mu\text{m})$	Appendix	
			Emery paper No.	Tensile strain
1	0.770	0.029		
2	0.705	0.038	#1000	
3	0.705	0.045	# 600	
4	0.705	0.048	# 500	
5	0.705	0.079	# 400	
6	0.705	0.106	# 320	
7	0.705	0.12	# 240	
8	0.705	0.45	# 120	
9	0.763	0.40		5%
10	0.745	0.70		10%
11	0.720	1.46		15%
12	0.705	2.33		19%

いて、表面性状（表面粗さ、表面形態）の異なる材料を鏡面のロールを用いて圧延した後の材料表面の測定を行った。

4・1 実験方法

圧延試験材料は、板厚 0.77mm のブライト面をもつ SUS430 フェライト系ステンレス鋼を母材とし、種々の表面粗さをもつロールで圧下率 8% のドライ圧延により規則的な凹凸をつけたもの (No. 2 ~ No. 8) 及び数段階のひずみまでの引張変形によりランダムな凹凸をつけたもの (No. 9 ~ No. 12) を用意した。

それぞれの圧延試験片の性状を Table 3 に示す。No. 1 ~ 8 のドライ圧延の際のロールは Table 3 に示すエメリ研磨紙で研磨し、No. 9 ~ 12 は引張ひずみを 5 ~ 19% 与えたものである。

ロール表面は #1500 エメリ紙で研磨し表面粗さを $0.015 \mu\text{m} R_a$ 一定に管理した。圧延は、Table 1 の実機の 7 パスと同じ圧延条件を推定し、圧延速度 33rpm、圧下率 20% とした。圧延油は、粘度は 340cSt (20°C) のパラフィン系鉱油を用い、ニート潤滑で圧延した。圧延は室温 (20°C) で行った。圧延後、材料表面は光沢計により $G_s(20)$ を、触針式表面粗さ計により表面粗さ R_a を、金属顕微鏡により表面写真を測定及び撮影した。

4・2 実験結果及び考察

Fig. 8 に種々の表面性状をもつ圧延試験片の圧延前後の表面光沢の変化を示す。No. 9 ~ 12 のランダムな表面凹凸をもつ圧延試験片の場合、圧延後の表面光沢は No. 1 の試験片の値を越えることはなく、圧延前の表面粗さが低くなるに伴い、表面光沢は増加している。これは、圧延後の表面写真から、圧延前の表面粗さが大きいほどオイルピット量が多

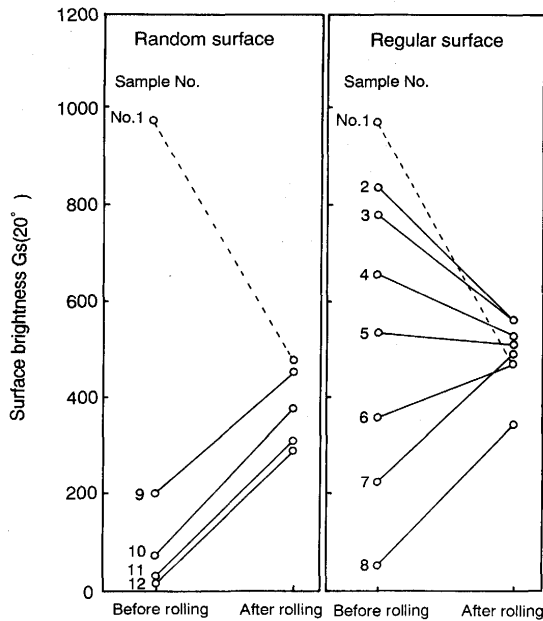


Fig. 8. Change of surface brightness of specimens having regular surface of No.2 to No.8 and random surface of No.9 to No.12 before and after rolling.

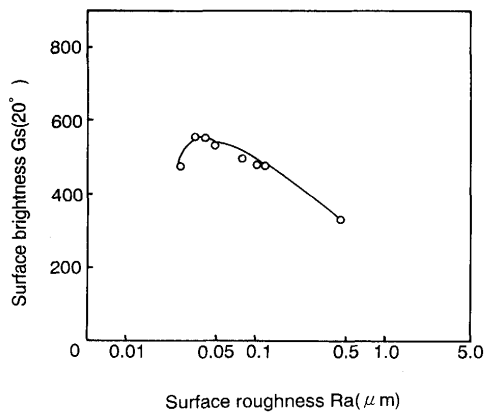


Fig. 9. Relationship between surface brightness after rolling and surface roughness before rolling for the specimens having regular surface.

いことから定量的に理解できる。

No. 2 ~ 8 の規則的な表面凹凸をもつ圧延試験片の場合、No. 8 の #120 エメリ紙で研磨したロールで圧延して作った

凹凸をもつ試験片以外は、No. 1 の試験片の圧延後の表面光沢よりも高い値が得られている。

Fig. 9 に規則的な凹凸をもつ圧延試験片 (No. 2 ~ No. 8) の圧延前の表面粗さと表面光沢の関係を示す。優れた表面光沢をもつ材料を圧延するためには、圧延前の材料表面光沢が規則的な凹凸をもっており、その表面粗さがある最適値をもっていることが望ましいことが本システムを用いた実験より理解できた。

5. 結言

本表面光沢推定システムを用いることにより、実機で各パス圧延後の表面性状を実験室レベルで非常に簡単に推定できる可能性を示した。今回の実験において、実機の各パスでのロール表面に一致したロール表面を選べば、実機と一致することになる。この推定システムを用いることにより、新しいパススケジュールでの表面光沢の推定、新しいロール材料を用いた場合の表面光沢の推定タラスタミルなどの新しい圧延機を使用した場合の表面光沢の推定などを簡単に行うことができる。

おわりに、本研究を遂行するにあたり、実験に御協力頂いた当時、横浜国立大学工学部学生鈴木肇氏、研究生野呂和也氏に深く感謝致します。

文 献

- 1) 小豆島明, 野呂和也, 井柳好貴, 出川浩樹: 鉄と鋼, 76 (1990), p.576
- 2) 小豆島明, 木原諄二, 五弓勇雄: 塑性と加工, 18 (1977), p.337
- 3) 升田貞和, 八木竜一, 村田宰一: 第42回塑性加工連合講演会, (1991), p.861
- 4) 山本秀男, 富澤 淳, 松浦征浩, 益居 健, 松平行彦: 第42回塑性加工連合講演会, (1991), p.873
- 5) 岡本昭治, 山本 昇: 第42回塑性加工連合講演会, (1991), p.837
- 6) 山本善康, 白石利幸, 井上 剛, 阿高松男, 中島浩樹: 塑性と加工, 33 (1992), p.1190
- 7) 剣持一仁, 鎌田征雄, 阿部英夫, 福原明彦, 小松秀夫, 坪内博之, 岸田 朗: 鉄と鋼, 78 (1992), p.1546
- 8) 小豆島明, 木原諄二, 五弓勇雄: 塑性と加工, 17 (1978), p.958
- 9) 小豆島明, 北村晃一: 昭和61年度塑性加工春期講演会講演論文集, (1986), p.151
- 10) 小豆島明: 鉄と鋼, 74 (1988), p.696
- 11) H. F. Atale and G. W. Rowe: Wear, 32 (1975), p.249