冷間圧延した鋼板の表面粗度の形成機構に関する一考察

山本 普康^{*1}, 内村 智文^{*2}, 山田 広一郎^{*2}Discussion on Formation Mechanism of Surface Roughness
of Cold Rolled Steel SheetsHiroyasu YAMAMOTO^{*3}, Tomohumi UCHIMURA and Kouichiro YAMADA^{*3} Department of Mechanical Engineering, Kyushukyoryitsu University,
1-8 Jiyugaoka, Yawatanishi-ku, Kitakyushu-shi, Fukuoka, 807-8585 Japan

In order to clarify the formation mechanism of surface roughness of steel sheets in cold rolling, the cold rolling experiments are made using carbon steel (SPCC) and stainless steel (SUS430) sheets with various surface roughness at the entry of rolling, and in neat lubrication of two mineral oils with different viscosities. Also, the shifting coefficient of weighted average roughness, which is called m -value, in a surface roughness equation is calculated by applying the rolling experiment data to the surface roughness equation proposed in this paper. Then, the formation mechanism of surface roughness of cold rolled steel sheets is discussed. As a result, it has been found that the m -value is larger than 1 and increases with increase of the initial equivalent surface roughness.

Key Words: Rolling, Surface Roughness, Tribology, Lubrication, Carbon steel, Stainless Steel, Lubricant Viscosity, Cold Rolling, Experimental Analysis

1. 結 言

自動車や容器類等に使用される炭素鋼板, および厨房器具・食器類や建材等に用いられるステンレス鋼板は表面粗度が鋼板の品質に大きく影響するため, 冷間圧延においては表面粗度の制御と管理が重要な課題となっている。そのため, 冷間圧延した鋼板の表面粗度と圧延条件や潤滑条件等との関係が, これまでにも数多く報告されている^{(1)~(5)}。しかし, これらのほとんどは冷間圧延における鋼板の表面粗度の変化を現象的に説明したものであり, 表面粗度の形成を機構的に整理したものはほとんどない。

本研究では, 冷間圧延における鋼板の表面粗度の機構を明らかにするため, 入側材料の表面粗度を研磨によって変えた炭素鋼(SPCC)とステンレス鋼(SUS430)の材料を使用し, 2種類の粘度の鉱油系潤滑油を用いたニート潤滑で冷間圧延実験を行う。さらに, 冷間圧延した鋼板の表面粗度の形成は圧延によって生じる潤滑状態に起因する表面の変化である, と考えて提案した数式モデルに実験データを使用して, 数式モデルの中の定数である加重平均粗度のずれ係数を算出する。そ

して, この係数の特性から, 冷間圧延における鋼板の表面粗度の形成機構を考察する。

2. 実 験 方 法

冷間圧延の実験条件を表1に示す。用いた圧延機は2重式圧延機で, ロールは直径が100mm, 胴長が70mmの2%Cr鋼である。圧延材料(圧延前の鋼板)は, 板厚が1mm, 板幅が20mm, 長さが300mmの炭素鋼板(SPCC)と, 板厚が1mm, 板幅が15mm, 長さが250mmのステンレス鋼板(SUS430)である。これらの材料の降伏応力は, 五弓・木原の式⁽⁶⁾を適用して, 表1の中に示してある。式の中の $\bar{\sigma}$ は相当応力, $\bar{\epsilon}$ は相当ひずみ, k はボルツマン定数, T は圧延中の材料温度である。相当ひずみ速度 $\dot{\bar{\epsilon}}$ が0の時のこれらの材料の初期降伏応力は, 炭素鋼が210.8MPa, ステンレス鋼が407.8MPaである。圧延速度は42.3mm/sの低速度であり, 潤滑油には粘度40と粘度180の2種類の鉱油系潤滑油をニート(100%濃度)の状態 で用いる。これらの潤滑油の基準粘度 η_0 は粘度40が153.8mPa·s, 粘度180が919.8mPa·sであり, 温度粘度係数 δ は粘度40が0.0406 1/°C, 粘度180が0.0323 1/°Cである。また, ロールおよび鋼板の表面粗度は, それぞれの表面において, 任意8箇所の圧延方向(円周方向)と幅方向(胴長方向)の測定値をそれぞれの方向で平均した値で表す。ロールの表面粗度(R_a , 算術平均粗さ)は, 圧延方向と幅方向の平均値

* 原稿受付 2000年8月9日。

*¹ 正員, 九州共立大学工学部(〒807-8585 北九州市八幡西区自由ヶ丘1-8)。*² 九州共立大学工学部。

E-mail: yamamoto@kyukyo-u.ac.jp

Table 1 Conditions of cold rolling experiments

1)Rolling mill : 2 high mill

Roll size : $\phi 100\text{mm}\times 70\text{mmW}$

2)Material and yield stress equation

①Carbon steel

$$\bar{\sigma} = 595.8(\bar{\epsilon} + 0.00015)^{0.118} + 6522.8\left(\frac{\bar{\epsilon}}{\bar{\epsilon}_0}\right)^{\frac{1}{0.14}} \frac{kT}{0.14} \quad [\text{MPa}]$$

②Stainless steel (SUS430)

$$\bar{\sigma} = 893.0(\bar{\epsilon} + 0.00314)^{0.136} + 798.8\left(\frac{\bar{\epsilon}}{\bar{\epsilon}_0}\right)^{\frac{1}{0.32}} \frac{kT}{0.32} \quad [\text{MPa}]$$

where

$$\bar{\epsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{H}{h_o}, \bar{\epsilon}_0 = \frac{2}{\sqrt{3}} \exp(6.38\bar{\epsilon} + 23.0)$$

3)Material size

①Carbon steel : 300mmL $\times$ 20mmW $\times$ 1mmt

②Stainless steel : 250mmL $\times$ 15mmW $\times$ 1mmt

4)Rolling speed : 42.3mm/s

5)Rolling lubricants : Mineral oil

		Viscos. 40	Viscos. 180
Viscosity	40 $^{\circ}$ C	42.3	181.0
	100 $^{\circ}$ C	6.1	15.8
Density	g/cm ³	0.879	0.896

6)Surface roughness of roll ($\mu\text{m Ra}$)

Rolling direction	Width direction	Average
0.274	0.236	0.255

7)Surface roughness of material ($\mu\text{m Ra}$)

	Grinding condition	Rolling direc.	Width direc.	Average
Carbon steel	# 60	1.477	1.497	1.487
	# 120	1.077	1.080	1.079
	# 400	0.492	0.499	0.496
	No grind.	2.109	1.891	2.000
Stainless steel	# 60	1.000	1.010	1.005
	# 120	0.598	0.563	0.581
	# 400	0.143	0.164	0.154
	No grind.	0.099	0.144	0.122

$\bar{\sigma}$: Equivalent stress, $\bar{\epsilon}$: Equivalent strain
 H : Material thickness at entry
 h_0 : Material thickness at exit

(a) No grinding (b) #60 grinding

Fig.1 Photographs of strip surface of carbon steel before rolling

が $0.255\mu\text{m}$ である。圧延材料の表面粗度は、炭素鋼およびステンレス鋼のいずれも、圧延方向と幅方向で同程度の大きさになっている。炭素鋼の圧延材料の表面

粗度(Ra)は、圧延方向と幅方向の平均値で、#60研磨紙で研磨したものが $1.487\mu\text{m}$ 、#120研磨のものが $1.079\mu\text{m}$ 、#400研磨のものが $0.496\mu\text{m}$ 、無研磨のものが $2.000\mu\text{m}$ である。ステンレス鋼の圧延材料の表面粗度(Ra)は、圧延方向と幅方向の平均値で、#60研磨のものが $1.005\mu\text{m}$ 、#120研磨のものが $0.581\mu\text{m}$ 、#400研磨のものが $0.154\mu\text{m}$ 、無研磨のものが $0.122\mu\text{m}$ である。なお、同一番数の研磨紙を用いて研磨した場合、表面粗度は炭素鋼の方がステンレス鋼よりも粗くなっている。

3. 実験結果

図1は圧延前の炭素鋼板表面の顕微鏡写真の一例であり、(a)は無研磨の場合、(b)は#60研磨の場合である。無研磨材の表面には、1mm厚さの板に冷間圧延で仕上げる際に生じた表面の凹凸が見られる。#60研磨材の表面には縦横斜めの大きな研磨きずと残存した冷間圧延時の凹凸とが見られる。#120および#400研磨材にも同様な縦横斜めの研磨きずが生じているが、

(c) 40% reduction

Fig.2 Photographs of strip surface of carbon steel after rolling with lubricant of viscos. 180

きずの大きさは研磨紙番数が大きくなるほど小さくなる傾向にある。また、ステンレス鋼の場合には、炭素鋼で見られるような冷間圧延時の表面の凹凸はほとんど存在しない(写真省略)。

図2は圧延した炭素鋼板表面の顕微鏡写真の一例であり、(a)は圧下率20%、(b)は圧下率30%、(c)は圧下率40%の無研磨材と#60研磨材である。無研磨材および#60研磨材とも、圧下率の増加とともに鋼板表面の凹凸や研磨きずが薄くなっている。この傾向は#120研磨材と#400研磨材でも同様であり、またステンレス鋼板においても同様な結果が得られている(写真省略)。これらの写真の中で、滑らかな灰色の部分は圧延中にロールと鋼板が接触した境界潤滑領域であり、凹凸のある黒い部分は潤滑油が存在したオイルピットやオイルプールの流体潤滑領域である⁽³⁾。これらの鋼板表面の顕微鏡写真から、オイルピット・カウント法⁽³⁾によって求めた圧延鋼板の表面の接触率(全領域に対する境界潤滑領域の割合) α_0 と圧下率 r の関係のうち炭素鋼の場合を図3に、ステンレス鋼の場合を図4に示す。(a)は粘度40、(b)は粘度180の場合である。炭素鋼およびステンレス鋼の粘度40および180のいずれの場合も、圧下率の増加とともに圧延し

Fig. 3 Relation between ratio of contact area of rolled strip surface α_0 and reduction in thickness r in case of carbon steel

Fig. 4 Relation between ratio of contact area of rolled strip surface α_0 and reduction in thickness r in case of stainless steel

た鋼板の表面の接触率は増大する。また、ステンレス鋼の場合には圧延前の材料の表面粗度の小さい方が同一圧下率での圧延鋼板の表面の接触率が大きいものに対し、炭素鋼の場合には必ずしもそのような傾向は見られない。なお、炭素鋼およびステンレス鋼のいずれも、粘度40と粘度180とでは圧延鋼板の表面の接触率の大きさに顕著な差は見られない。

図5は、炭素鋼の粘度180の場合における圧延した鋼板表面の粗度 σ_s (Ra)の圧延方向と幅方向との比較である。圧延した鋼板表面の粗度は、圧延方向と幅方向でほぼ同じ大きさであり、圧下率 r に対してほぼ同じ傾向を示す。炭素鋼の粘度40の場合も、ステンレス鋼の粘度40および180の場合も図5と同様な結果を示す(図省略)。また、表1の中に示している圧延前の鋼板の表面粗度も、圧延方向と幅方向でほぼ同じ大きさである。これらのことを考慮して、以後は表面粗度を圧延方向と幅方向の平均値で取り扱う。図6は平均値で整理した圧延鋼板の表面粗度(Ra)と圧下率 r の関係のうち炭素鋼の場合を示しており、図7はステンレス

Fig. 7 Relation between surface roughness of rolled strip $\sigma_s(Ra)$ and reduction in thickness r in case of stainless steel (Average of rolling and width directions)

4. 考 察

The diagram illustrates the zones of lubrication in a rolling process. It shows a metal strip being rolled between two rollers. The inlet zone is where the strip enters the work zone (roll bite). The work zone is divided into boundary lubrication and hydrodynamic lubrication regions. The strip thickness is labeled t_b , and the roll velocity is V_R . The inlet zone is labeled 'Inlet zone' and the work zone is labeled 'Work zone (roll bite)'. An oil pit is shown in the hydrodynamic lubrication region.

— 339 —

境界潤滑と流体潤滑の混在した混合潤滑である⁽⁷⁾。そのため、ロールバイト内においては、境界潤滑領域でロールと鋼板が接触し、鋼板の表面の凹凸が変形して、ロールの表面粗度が鋼板の表面に転写される。一方、流体潤滑領域ではオイルピットやオイルプール等の凹部に潤滑油がトラップされて、潤滑油に静水圧が発生し、凹部はほぼその形状を維持して⁽⁸⁾、圧延入側の表面粗度がそのまま残ることが予想される。今、圧延入側の鋼板の表面粗度を σ_{s1} 、ロールの表面粗度を σ_R 、圧延した鋼板の接触率(全領域に対する境界潤滑領域の割合)を α_0 とする。鋼板が圧延されても、鋼板の表面が伸ばされないで、流体潤滑領域ではオイルピットやオイルプール等の凹部に潤滑油が完全にトラップされ、境界潤滑領域ではロールの表面粗度が鋼板の表面に単純に転写される場合には、鋼板の表面粗度は σ_R と σ_{s1} の間になることが予想される。そこで、その状態の鋼板の表面粗度を第一次近似として、ロールと圧延入側鋼板の表面の加重平均粗度 $\alpha_0 \sigma_R + (1 - \alpha_0) \sigma_{s1}$ で与える。しかし、実際の圧延では、鋼板の塑性変形によって鋼板表面が引き伸ばされたり、流体潤滑領域の凹部から潤滑油が漏れ出るしみ出し現象⁽⁸⁾等の発生によって、圧延した鋼板の表面粗

度はロールが鋼板に単純に転写した状態から変化することが予想される。このような影響を考慮して、冷間圧延した鋼板の表面粗度 σ_s を次式の形で与える。

$$\sigma_s = [\alpha_0 \sigma_R + (1 - \alpha_0) \sigma_{s1}]^m \quad \cdots (1)$$

ここで、 m は加重平均粗度のずれ係数であり、ロールと圧延入側鋼板の表面粗度の加重平均からのずれの大きさを示す。式(1)から、 m は次式で与えられる。

$$m = \frac{\ln \sigma_s}{\ln [\alpha_0 \sigma_R + (1 - \alpha_0) \sigma_{s1}]} \quad \cdots (2)$$

なお、ずれ係数 m の与え方を決めるにあたって、加重平均粗度に係数を掛ける方法等の比較的単純ないくつかの形を検討した。その結果、式(1)の形が最もデータのばらつきが小さく、整理されたグラフになることが判明した(図10参照)。しかし、式(1)の形を与える機構に関しては、今後の研究課題である。

4.2 加重平均粗度のずれ係数

図3と図4に示した圧延鋼板の表面の接触率 α_0 、および図6と図7に示した圧延鋼板の表面粗度 σ_s を用い、式(2)によって加重平均粗度のずれ係数 m を求める。図9は、粘度180における炭素鋼とステンレス鋼の加重平均粗度のずれ係数 m と圧下率 r の関係である。加重平均粗度のずれ係数 m は、炭素鋼の無研磨材以外は、炭素鋼お

Fig. 9 Relation between m -value of surface roughness equation and reduction in thickness r in case of viscos. 180

Fig. 10 Relation between m -value of surface roughness equation and initial equivalent surface roughness σ_{e1} (Ra), (CS: carbon steel, SS: stainless steel)

よびステンレス鋼のいずれの場合も圧下率に対してほとんど変化しないか、変化しても非常に小さい。一方、加重平均粗度のずれ係数 m は、圧延前の鋼板の表面粗度 σ_{SI} が大きい方が大きくなる。これらの傾向は、粘度40の場合の炭素鋼とステンレス鋼においても同様である(図省略)。

そこで、加重平均粗度のずれ係数 m を圧延前の等価表面粗度 $\sigma_{e1} = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_{SI}^2}$ で整理する。図10は、加重平均粗度のずれ係数 m と圧延前の等価表面粗度 σ_{e1} との関係であり、(a)は粘度40、(b)は粘度180の場合である。炭素鋼およびステンレス鋼の粘度40および180のいずれの場合も、加重平均粗度のずれ係数は1より大きく、表1に示しているロールと圧延材料の表面粗度および図3と図4に示している圧延鋼板の接触率を考慮すると、圧延鋼板の表面粗度は加重平均粗度よりも小さくなるのが分かる。また、炭素鋼およびステンレス鋼の粘度40および180のいずれの場合も、データにばらつきはあるが、加重平均粗度のずれ係数は圧延前の等価表面粗度の増大とともにほぼ直線的に増加する。これは、圧延材料の表面の凹凸が大きいほど、圧延鋼板の表面粗度が加重平均粗度よりも小さくなる度合いが大きいことを示している。また、この増加の割合は、粘度40および180のいずれも、炭素鋼よりステンレス鋼の方が大きい。これは、図3と図4に示している圧延鋼板の接触率を考慮すると、炭素鋼よりステンレス鋼の方が材料の降伏応力が大きく、材料表面の凹凸が変形し難いことが影響していると推察される。さらに、粘度40と180を比較した場合、炭素鋼およびステンレス鋼のいずれも、加重平均粗度のずれ係数に及ぼす圧延前の等価表面粗度の影響はほぼ同じであり、今回の潤滑油では、加重平均粗度のずれ係数に及ぼす粘度の影響は小さいと考えられる。

5. 結 論

冷間圧延における鋼板の表面粗度の形成機構を明らかにするため、入側材料の表面粗度を研磨によって変えた炭素鋼(SPCC)とステンレス鋼(SUS430)の材料を使

用し、2種類の粘度の鉱油系潤滑油を用いた二重潤滑で冷間圧延実験を行った。さらに、今回提案した圧延鋼板の表面粗度の数式モデルにこの実験データを使用して、数式モデルの中の定数である加重平均粗度のずれ係数を求めた。そして、この係数の特性から、冷間圧延における鋼板の表面粗度の形成機構を検討した。以下に主要な結果を要約する。

(1) 冷間圧延した鋼板の表面粗度の数式モデルとして、加重平均粗度のずれ係数 m を用いて、 $\sigma_s = [\alpha_0 \sigma_R + (1 - \alpha_0) \sigma_{SI}]^m$ の式を提案した。

(2) 今回の実験条件では、炭素鋼およびステンレス鋼のいずれも、加重平均粗度のずれ係数は1より大きく、圧延した鋼板の表面粗度はロールと圧延入側鋼板の表面の加重平均粗度より小さくなる。

(3) 加重平均粗度のずれ係数は、炭素鋼およびステンレス鋼のいずれも、圧延前の等価表面粗度の増大とともにほぼ直線的に増加する。この増加の割合は、炭素鋼よりステンレス鋼の方が大きい。

(4) 加重平均粗度のずれ係数に及ぼす圧延潤滑油の粘度の影響は小さい。

本研究を遂行するにあたり、圧延潤滑油のご提供をいただいた大同化学工業(株)に厚くお礼を申し上げます。

文 献

- (1) 小豆島明・木原淳二・五弓勇雄, 塑性と加工, 18-196 (1977), 337-343.
- (2) 小豆島明・野呂和也・井柳好貴・出川浩衛, 鉄と鋼, 76-4 (1990), 576-583.
- (3) 山本普康・白石利幸・井上剛・阿高松男・中島浩衛, 塑性と加工, 33-381 (1992), 1190-1195.
- (4) 山本秀男・松平行彦・芝原隆・益居健, 鉄と鋼, 82-8 (1996), 677-682.
- (5) 札軒富美夫・荒木純・井上周一・梁井和博, 塑性と加工, 39-454 (1998), 1123-1128.
- (6) 五弓勇雄・木原淳二・小豆島明, 塑性と加工, 14-144 (1973), 12-17.
- (7) 山本普康・柴田嘉基・中島浩衛・川並高雄, 塑性と加工, 24-272 (1983), 967-973.
- (8) 小豆島明・坪内昌生・工藤英明・古田憲明・峰村憲, 塑性と加工, 30-347 (1989), 1631-1638.