

ステンレス鋼冷間圧延における 板の表面性状形成機構のモデル化とその評価

札軒 富美夫*・荒木 純*²・井上 周一*²・梁井 和博*²

Development and Evaluation of Model for Mechanism of Formation of
Surface Properties of Cold-Rolled Stainless Steel Sheet

Fumio FUDANOKI, Jun ARAKI, Shuichi INOUE and Kazuhiro YANAI

Synopsis : The purpose of this study is to build a model for the transudation of rolling oil in cold rolling of stainless steel by referring to a micropool lubrication mechanism. The rolling oil transudation function or F value calculated by the model is proposed as a rolling pass characteristic parameter to describe the relationship between the kinematic behavior of the rolling oil mechanically trapped in micropits on the strip surface before cold rolling and the surface smoothness of the cold-rolled strip.

- 1) It is shown that the kinematic behavior of the rolling oil in the roll bite in rolling passes can be represented by the parameter of F value.
- 2) Increasing the F value toward 1 in early passes promotes the transudation of the rolling oil from micropits on the strip surface, and reduces the micropits of the mother strip.
- 3) In later passes the F value necessarily becomes smaller due to using smooth-surfaced rolls for getting the surface gloss, but even in this case increasing the F value makes the transudation of the rolling oil from micropits, and eliminates the oilpit-like micropits.
- 4) It is made clear that the very smooth surface is obtained by using rough-surfaced rolls in early passes and smooth-surfaced rolls in two or more later passes as an effective pass schedule based on the F value.

Key words : stainless steel ; cold rolling ; surface roughness ; lubrication mechanism ; rolling oil ; micropool ; micropit ; oilpit ; grain-boundary etched groove.

1. 緒言

近年、ステンレス鋼の冷間圧延板の表面光沢に関してトライボロジーの立場から種々の検討がなされている¹⁻⁶⁾。特に、小豆島らは光沢度が圧延速度と圧下率および圧延油の粘性によって決まる入口油膜厚み h_1 値によって大きく支配されることを明らかにした⁷⁾。しかし、 h_1 値が約 $3 \times 10^{-2} \mu\text{m}$ 以下と小さい範囲では光沢度(Gs(20°))は600以上となり、800付近でほぼ飽和し⁷⁾、この h_1 値での光沢度は他の要因によって決まると考えられる。また、SUS430、SUS304の冷間圧延において、冷延板表面の種々の微小表面欠陥を定量化し、表面光沢への影響を明らかにした報告がある³⁻⁶⁾。これらの h_1 値の範囲は圧延前の材料の表面平均粗さとロールのそれとの和の半分以下である。このような条件では、ロールと材料間に導入される油量は、流体力学的な動的効果よりも冷間圧延前の表面粗さの凹部に機械的捕捉される効果の方が大きくなり、ほぼその効果によって決まることが示されている⁷⁾。この場合、ステンレス鋼板の冷間圧延後の表

面性状は、圧延油のロールバイト内部からの排出あるいは内部における移動の状況によって決まると考えられることが報告されつつある⁸⁻¹⁰⁾。

一方、材料の表面粗さの凹部に機械的捕捉された潤滑油の材料・工具の間の摩擦界面における潤滑について、木原ら¹¹⁻¹⁵⁾は「マイクロプール潤滑モデル」としてChannel Jacking Mechanism(CJM)モデルを提案している。このモデルは、流体力学的な動的効果よりも表面凹部に機械的捕捉された効果で潤滑油が工具と材料の摩擦界面に供給される条件下で適用されるものである。

本研究では、ステンレス鋼冷間圧延において10 cSt前後の低粘度圧延油が使用される場合が多いので h_1 値が小さく^{4,10)}、従って小豆島らの研究で明らかにされたように、 $d(\text{Gs})/dh_1$ も小さいと考えられる条件で行われることを前提とし、その時の冷間圧延前の表面粗さの凹部に機械的捕捉された圧延油のしみ出し挙動を上記のCJMモデルを参考に考察した。そして、同モデルを参考に使用油の粘性、圧延条件、ロール表面粗さから計算されるパス特性値(以下、F

平成8年7月5日受付 平成9年4月11日受理 (Received on July 5, 1996; Accepted on Apr. 11, 1997)

* 新日本製鐵(株)光技術研究部 (Hikari R&D Lab., Nippon Steel Corp., 3434 Oaza-Shimata Hikari 734)

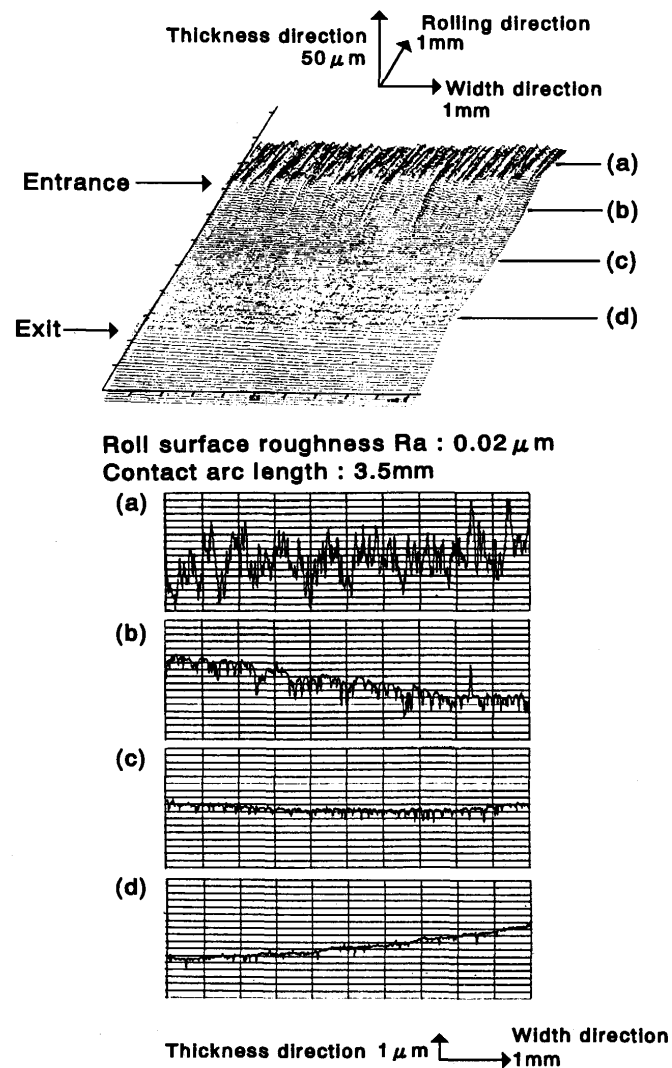
* 2 新日本製鐵(株)光製鐵所 (Hikari Works, Nippon Steel Corp.)

値と称する)によって各パスのしみ出し挙動を評価することを提案した。このF値のパススケジュールと圧延後の表面性状の変化の関係を検討したので報告する。

2. 圧延油しみ出しモデルに基づくF値の提案

2.1 圧延油しみ出し現象の検討

まず、実際のステンレス鋼の冷間圧延において、圧延板表面の凹部に機械的捕捉された圧延油がチャンネルを通過してロールバイト内から外へしみ出して排出しているかを検討した。著者ら⁹⁾、SUS430の冷間圧延において圧延を途中で停止させて咬み止めたサンプルを作製し、咬み止め部の表面性状を3次元粗さ計により測定した。その結果をFig.1に示す。ロールバイトに入る前の表面には圧延方向に沿った筋状の凹部があり、この凹部はロールバイト内の前半部分で軽減し、ロールバイト内の後半部分ではロール表面粗さ程度にまで減少している。これは、圧延板表面の凹部に機械的捕捉された圧延油は圧延圧力によりロール目のレプリカであるラインチャンネルを通過して入口側にしみ



出し、ロールバイトの外へ排出していく様子を示しているものと考えられる。

2.2 パス特性値F値の計算法

CJMモデルでは、板状の材料と工具の摩擦界面におけるマイクロプールから潤滑油がチャンネルを通過してしみ出す時間tの定式化を提案しており、次式で表される¹⁵⁾。

$$t = 2 \eta_0 \gamma \left[\frac{L}{D} \right]^2 \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 η_0 は大気圧での潤滑油の粘性係数、 γ は粘度の圧力指数である。また、Lはマイクロプールからのチャンネルの長さ、Dはそのチャンネルの直径である。

実際のステンレス鋼冷間圧延においては圧延素材に表面凹部が存在し、圧延油はこの凹部による機械的捕捉のためロールバイト内部に入り、マイクロプールを形成する。このようなマイクロプールの中で繋がるチャンネルとしては、Fig.2に示すように、ロールの周方向に沿った研削目に相当する細長い溝状形態を有するラインチャンネルが認められる。また、前パスで形成したマイクロプールや結晶粒界に沿った溝状の凹みなどのラインチャンネル間を連結するチャンネルも存在する。

Fig.3は、ステンレス鋼冷間圧延に、CJMモデルを適用する際に、圧延板表面の凹部から延びるチャンネルに対する考え方を模式的に示した図である。圧延板表面の凹部に機械的捕捉された圧延油がチャンネルを通過してしみ出され排出される最大時間は、チャンネルの長さが接触弧長であ

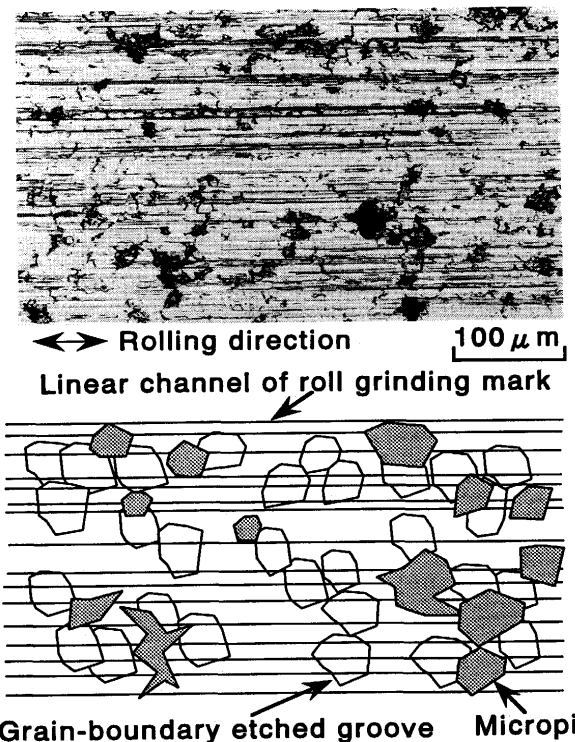


Fig. 2. Micrograph of surface of cold-rolled sheet and schematic illustration of linear channels, micropits and grain-boundary etched grooves.

Fig. 1. Surface roughness profiles of cold-rolled SUS430 sheet in roll bite.

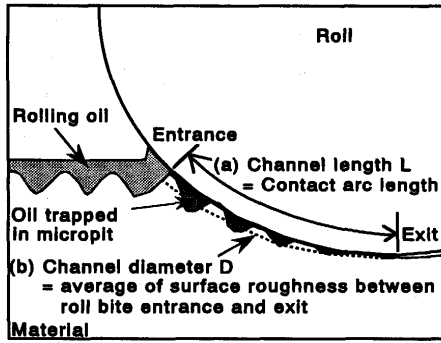


Fig. 3. Application of CJM model to cold rolling of stainless steel.

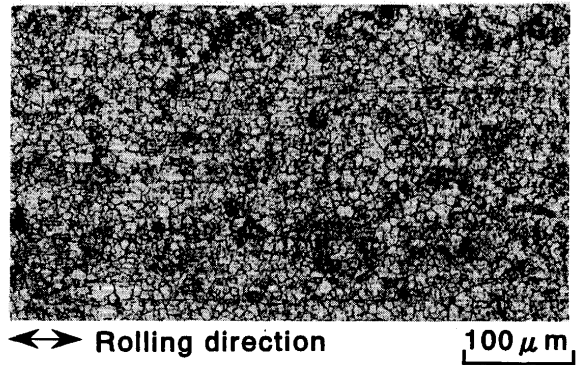


Fig. 4. Micrograph of surface of mother sheet.

るとして求めた時間になる。また、チャンネルの直径Dはロールと圧延板の間隙であり、ロールバイトの入口および出口におけるロール表面粗さと圧延板表面粗さの自乗平均粗さの平均値を用いる。

$$D = \frac{1}{2} \{R.M.S.(0) + R.M.S.(L)\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$R.M.S.(0) = \sqrt{\{\sigma_R(0)\}^2 + \{\sigma_S(0)\}^2}$$

$$R.M.S.(L) = \sqrt{\{\sigma_R(L)\}^2 + \{\sigma_S(L)\}^2}$$

ここで、R.M.S.(0)、R.M.S.(L)はロールバイトの入口および出口でのロール表面粗さ σ_R と圧延板表面粗さ σ_S の自乗平均粗さ(Root Mean Square)を表す。 σ_R と σ_S は実用的に測定しやすい、圧延方向と直交する幅方向の平均粗さRaを用いる。Fig. 2で示した圧延板表面の写真のようにオイルピット以外の粗さは、ロール目のレプリカであるので、R.M.S.をDと近似できる。

そこで、圧延油のしみ出し時間を t_a と置けば、(1)式に(2)式を代入して次のように表される。

$$t_a = \frac{8 \eta_0 \gamma L^2}{\{R.M.S.(0) + R.M.S.(L)\}^2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

次に、圧延板表面の凹部がロールバイト内部を移動しつつその中の油をチャンネルによってロール入口に排出できる時間の目安として凹部の移動時間 t_d を求める。ステンレス鋼冷間圧延では中立点がロールバイトの出口近くにあるので、出口での凹部の速度は圧延速度 V_r に等しいと置いて良い。また、ロールバイトの入口での凹部の速度は、圧下率を r とすると圧延速度 V_r と材料速度 $(1-r)V_r$ との平均値をとることが可能である。従って、ロールバイト内における凹部の移動速度 V は入口と出口での速度の平均値として(4)式で示される。

$$V = \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{2} \{ (1-r)V_r + V_r \} + V_r \right\} \\ = \frac{1}{4} (4-r)V_r \quad \dots\dots\dots (4)$$

凹部の移動時間 t_d は、接触弧長 L を平均速度 V で割って算

Table 1. Cold rolling conditions.

Pass number	0	1	2	3	4	5		
Thickness (mm)	1.50	1.15	0.95	0.79	0.68	0.59		
Reduction (%)	—	23	17	17	14	13		
Rolling speed (m/min)	—	150	240	290	340	150	200	250
Roll surface roughness Ra (μm)	A	—	0.05	0.05	0.05	0.05	—	0.05
	B	—	—	—	—	—	—	0.05
	B'	—	0.20	0.20	0.20	0.05	0.05	—
	B''	—	—	—	—	—	—	0.05
	C	—	0.20	0.20	0.20	0.20	—	0.05

出されるので、(5)式となる。

$$t_d = \frac{L}{V} = \frac{4L}{(4-r)V_r} \quad \dots\dots\dots (5)$$

このようにして求めた圧延油のしみ出し時間 t_a と凹部の移動時間 t_d を用いて、 t_a が t_d より長い場合には圧延油のしみ出しは t_d の時間だけ生じると考え、F値を t_d/t_a と定義する。一方、 t_a が t_d より短い場合には圧延油のしみ出しが十分に起こると考えて、F値は1とおく。

$$F = \frac{t_d}{t_a} \quad \text{when } t_a \geq t_d \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$F = 1 \quad \text{when } t_a < t_d \quad \dots\dots\dots (7)$$

この定義から、F値は必ず0と1の間の値をとる。F値が大きくなるほど圧延油のしみ出しが促進される。このF値をパス特性値として考える。

3. 表面平滑化とF値のパススケジュールとの関係

ここでは、低粘度ニート系圧延油におけるSUS304の冷間圧延板の表面平滑化とF値のパススケジュールとの関係について検討を行った。

3.1 実験方法

実験に用いた材料は、板厚1.5mmのSUS304の焼鈍酸洗板である。その表面の顕微鏡写真をFig. 4に示す。表面には、SUS304の板に特有の網目状の形態を示す粒界浸食溝が認められる。この材料を圧延素材として、ロール直径が60mm

Table 2. Rolling oil properties.

Kinematic viscosity ν (cSt)	40°C	10
	100°C	2
Pressure coefficient of viscosity γ (1/GPa)	5	
Density ρ (g/cm ³)	0.87	

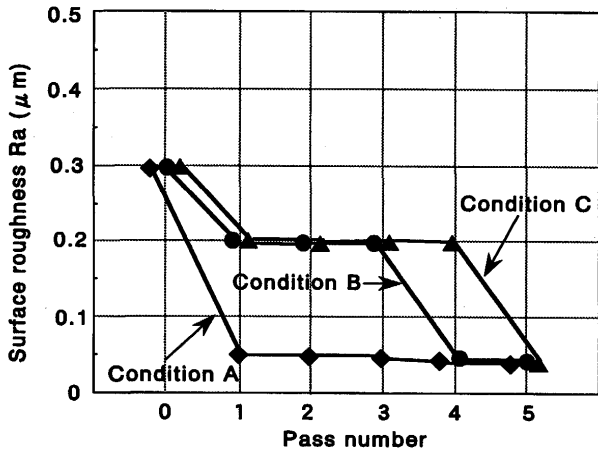


Fig. 5. Surface roughness Ra of sheets rolled in pass schedules under conditions A, B, and C.

の20段センジア型冷間圧延機を用いてTable 1で示す条件で圧延した。本実験では、F値は(3)式よりロール表面粗さの2乗に影響されるので、同粗さを変えることにより変化させた。すなわち、条件Aは、全パスにおいてロール表面粗さが0.05 μ mRaと平滑なロールを用いて圧延を行った。条件Bは、条件Aの前段1~3パス目においてロール表面粗さが0.20 μ mRaと粗いロールを用いて圧延を行った。条件Cは、前段1~4パス目において表面粗さが0.20 μ mRaと粗いロールで、最終パスのみ表面粗さが0.05 μ mRaの平滑なロールで圧延を行った。また、条件B', B'として、5パス目の圧延速度を変化させた実験も行った。ロールは回転砥石により研磨した。圧延油はTable 2に示す特性のニート油を使用した。圧延後、材料表面は触針式表面粗さ計により圧延方向と直交する幅方向に表面粗さRaを測定し、また光学顕微鏡による表面観察と画像解析装置による凹部の面積率の測定を行った。

3・2 実験結果および考察

3・2・1 ロール・材料の表面粗さと入口油膜厚みの関係

条件A, BおよびCで圧延することにより得られた冷間圧延後の鋼板表面の粗さRaをFig. 5に示す。各パスの圧延板の表面粗さはロール表面粗さに対応して変化していることがわかる。これより、各パスにおける圧延前の材料の表面粗さRa^{mat}とロールの表面粗さRa^{roll}の和の半分を算出した結果をFig. 6に示す。また、同図には流体力学的な動的効果による入口油膜厚みh₁値を、(8)式¹⁶⁻¹⁷⁾に基づいて算出した結果を併せて示している。

$$h_1 = \frac{3 \eta_0 \gamma (2 - \gamma) V_r}{\{1 - \exp(-\gamma \sigma_0)\} \tan \theta} \dots (8)$$

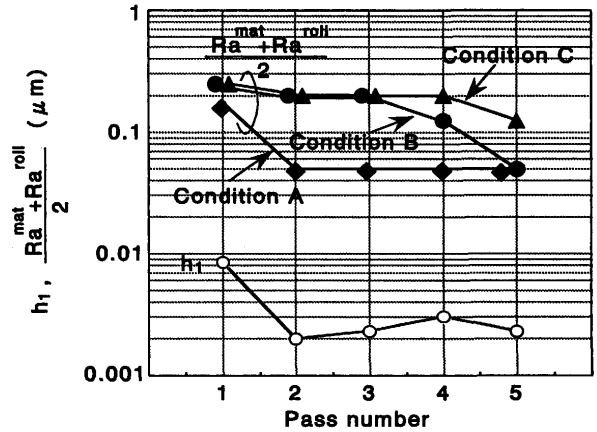


Fig. 6. Average of initial sheet surface roughness Ra^{mat} and roll surface roughness Ra^{roll}, and inlet oil film thickness h₁ in pass schedules under conditions A, B, and C.

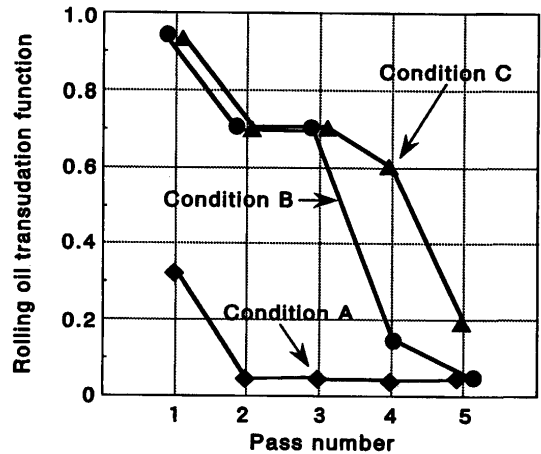


Fig. 7. Rolling oil transudation function in pass schedules under conditions A, B, and C.

Table 3. Computational conditions to determine rolling oil transudation function.

Pass number	1	2	3	4	5
Temperature of roll bite (°C)	111	122	127	116	96
Kinematic viscosity ν (cSt)	1.7	1.4	1.3	1.5	2.2
Viscosity η_0 (mPa·sec)	1.5	1.2	1.1	1.3	1.9
Roll bite length L (mm)	3.2	2.4	2.2	1.8	1.6

ここで、 σ_0 は材料の降伏応力で、 θ はロールと材料の咬み込み角である。

Fig. 6から、h₁値は約1×10⁻² μ m以下であり、(Ra^{mat}+Ra^{roll})/2の値より小さいことがわかる。従って、本実験条件ではロールと材料間に導入される油量は、小豆島らの研究⁷⁾によって明らかにされたように、流体力学的な動的効果よりも表面凹部に機械的捕捉される効果で決まると考えられる。

3・2・2 圧延油しみ出し関数F値の算出結果

Fig. 7は、ロール表面粗さのパススケジュールA, BおよびC

びCにおける各パスのF値を示した図である。F値の算出は、(3)式および(5)式からそれぞれ t_a , t_d を計算し、(6)式および(7)式に従って行った。ここで、計算に必要な数値をTable 3に示す。 m_0 は圧延油の動粘度 ν と密度 ρ の積として計算した。 ν は40°Cと100°Cの値を用いて任意の温度における値をWaltherの式¹⁸⁾から求めた。各パスのロールバイトにおける温度は、加工および摩擦による温度上昇と圧延油の冷却効果による温度下降に分けて計算した¹⁹⁻²¹⁾。接触弧長はロール半径Rと圧下量 Δh (圧延前の板厚と圧延後の板厚の差)を用いて(9)式の簡便式を使用した。

$$L = \sqrt{(R \cdot \Delta h)} \dots\dots\dots (9)$$

条件Aは、F値が1パス目で約0.3で残りのパスで0.1以下と比較的小さい。逆に、条件CはF値が最終パスを除く各パ

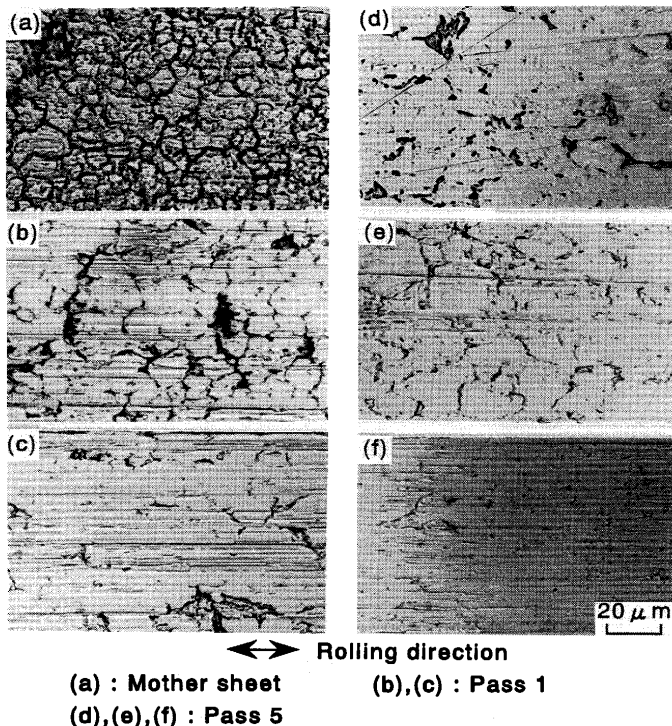
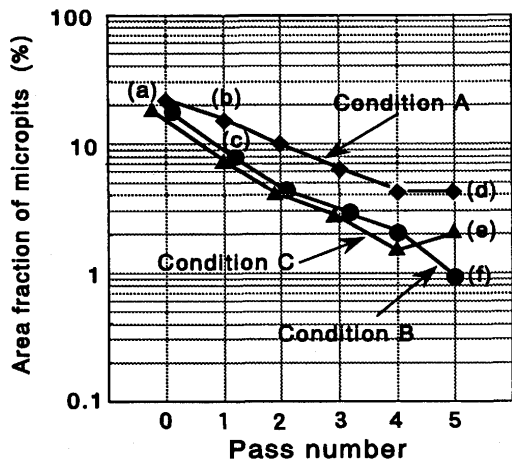


Fig. 8. Area fraction of micropits and micrographs of sheets rolled in pass schedules under conditions A, B, and C.

スにおいて0.6以上と大きく、最終パスでも0.2程度の値を有している。一方、条件BはF値が前段パスで0.7以上と大きく、逆に後段パスで0.15以下と小さく、条件Aと条件Cの中間的な条件になっている。したがって、ロール表面粗さを変化させることにより、F値のパススケジュールとして3種類のパターンを得ることができた。

3.2.3 F値のパススケジュールと圧延後の板表面の関係

Fig. 5から、冷間圧延を終了した時の鋼板表面は、条件A, BおよびCとも同じ表面粗さとなっている。しかしながら、条件A, BおよびCについて冷間圧延後の鋼板表面の表面凹部の面積率を測定すると、Fig. 8に示すようになる。すなわち、冷間圧延を終了した時の圧延板表面の凹部の面積率は、条件Aの約4%や条件Cの約2%に比べて条件Bが0.9%と最も低減して平滑化している。これは、Fig. 8の(b)と(c)の比較からわかるように、条件Bの場合1パス目において凹部の軽減が認められるが、条件Aでは凹部の残留が顕著である。一方、同図の(e)と(f)の比較から条件Cの場合5パス目においてオイルピット状の凹部が多いため、凹部の面積率が増加している。

圧延油しみ出しモデルに基づいて考えると、この圧延実験におけるSUS304の板の表面平滑化には、前段パスで表面粗さが粗いロールを用いて圧延し、後段2パスで粗さが小さい平滑なロールを用いて圧延することが有効であったと言える。前段パスにおいては、圧延原板の粒界浸食溝に起因する凹部からロール粗さの溝に沿って圧延油がしみ出し排出するため、圧延板表面の凹部が圧延圧力により軽減消失したと考えられる。1パス目の圧延において、F値と圧延後の凹部面積率の関係を整理した結果がFig. 9である。ここで、圧延素材は $t_d = 0$ と考えて、F値=0の凹部面積率として採用した。同図から、1パス目でF値を大きくするほど圧延素材表面の凹部が減少していることがわかる。

一方、圧延板の表面光沢を確保するため、後段パスにおいて圧延板の表面粗さを小さくしなければならない。これ

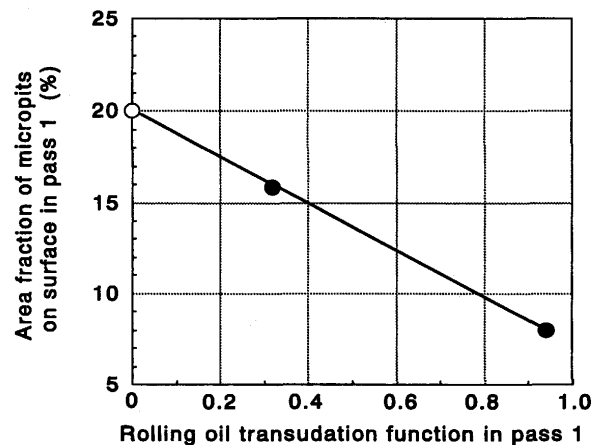


Fig. 9. Relationship between rolling oil transudation function and area fraction of micropits on surface of sheet in pass 1.

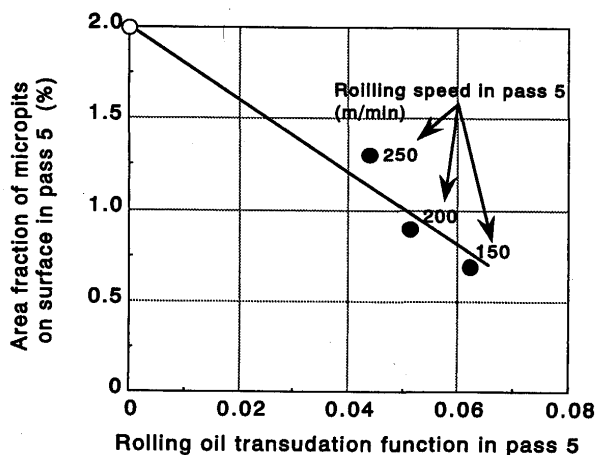


Fig. 10. Relationship between rolling oil transudation function and area fraction of micropits on surface of sheet in pass 5 under conditions B, B', and B''.

は板表面にロール表面を転写することによって実現されるので、後段パスでは平滑なロールを使用する必要がある。したがって、一定の圧延速度ではF値が必然的に小さくなる。条件Cでは、圧延後の凹部面積率が条件Bの4パス目とほぼ等しいことがわかる。条件Bのように、同一平滑ロールを用いて2パス続けて圧延することにより、オイルピット状の凹部からの圧延油をしみ出させて、同凹部を軽減消失させると予想される。この点について、条件Bのロール表面粗さを用いて、5パス目の圧延速度を150, 250m/min(条件B', B'')と変化させた追加圧延実験を行い、5パス目の圧延後の板表面のオイルピット状の凹部面積率と5パス目のF値との関係を調査した。その結果をFig.10に示す。ここで、圧延前の板表面は $td=0$ と考えて、 $F=0$ の面積率として採用した。同図から、5パス目のF値を大きくするほど板表面のオイルピット状の凹部が減少していることがわかる。したがって、後段パスにおいても、F値を大きくすることにより凹部から圧延油のしみ出しが起り、オイルピット状の凹部の消失をより完全に行わせることになると考えられる。

4. 結言

(1) ステンレス鋼冷間圧延における咬み止め部の表面性状を調査した結果から、圧延板表面の凹部に機械的捕捉された圧延油がラインチャンネルに沿ってしみ出す様子が認められた。

(2) ステンレス鋼冷間圧延において、入口油膜厚 h_1 値が圧延前の材料の表面平均粗さとロールのそれとの和の半分以下の条件下では、圧延前表面の凹部に機械的捕捉された圧延油のロールバイト内部での運動挙動が板の表面性状形成に大きな影響を与えることを示唆し、更に以下の知見

が得られた。

- ・ 圧延油の粘性、ロール/材料の表面粗さおよび圧延条件等から計算されるパス特性値として圧延油しみ出し関数F値を提案し、圧延各パスでのロールバイト内部での圧延油の運動挙動を代表できる可能性を示した。

- ・ 圧延油しみ出し関数は $0 \leq F \leq 1$ であり、F値を大きくするほどロール/材料界面における圧延板表面凹部からの圧延油のしみ出しを促進する。

- ・ 前段パスにおいて、F値を大きくすることにより圧延素材の凹部から圧延油のしみ出しを促進し、圧延素材の凹部を軽減消失することができる。

- ・ 後段パスにおいては、光沢確保のため平滑なロールを使用しなければならないので、F値が必然的に小さくなる。しかし、同一平滑なロールを用いた場合、F値を大きくすることにより凹部面積率を小さくすることができる。

- ・ したがって、前段パスにおいても、後段パスにおいてもF値を大きくすることにより凹部面積率は小さくすることができる。

- ・ 圧延後の板表面が平滑になるF値のパススケジュールの一つは、前段パスで比較的粗い表面を有するロールを使用し、後段パスで平滑なロールを2パス以上使用することである。本実験において、凹部面積率が小さい高平滑な表面が得られることを明らかにした。

文 献

- 1) 小豆島明, 野呂和也, 井柳好貴, 出川浩樹: 鉄と鋼, 77 (1990), 576.
- 2) 小豆島明: 鉄と鋼, 80 (1994), 635.
- 3) 剣持一仁, 鏑田征雄, 阿部英夫, 福原明彦, 小松富夫, 垣内博之, 岸田 朗: 鉄と鋼, 78 (1992), 1546.
- 4) 剣持一仁, 鏑田征雄, 河澄英輔, 小堀克浩, 清野芳一: 鉄と鋼, 81 (1995), 809.
- 5) 札軒富美夫, 荒木 純, 井上周一, 阿部光範, 梁井和博: 材料とプロセス, 7 (1994), 1375.
- 6) 井上周一, 阿部光範, 梁井和博, 札軒富美夫, 荒木 純: 材料とプロセス, 8 (1995), 766.
- 7) 小豆島明: 塑性と加工, 36 (1995), 737.
- 8) 山本秀男, 松平行彦, 芝原 隆, 益居 健: 鉄と鋼, 82 (1996), 677.
- 9) 札軒富美夫, 荒木 純, 井上周一, 阿部光範, 梁井和博: 材料とプロセス, 8 (1994), 765.
- 10) 剣持一仁: 第155回塑性加工シンポジウムテキスト, 日本塑性加工学会編, 東京, (1994), 42.
- 11) 片岡征二, 木原諄二, 相澤龍彦: 塑性と加工, 30 (1989), 709.
- 12) 片岡征二, 木原諄二, 相澤龍彦: 塑性と加工, 30 (1989), 1058.
- 13) 片岡征二, 木原諄二, 相澤龍彦: 平成元年塑性加工春季講演論文集, (1989), 378.
- 14) 片岡征二, 木原諄二, 相澤龍彦: 平成2年塑性加工春季講演論文集, (1990), 173.
- 15) 片岡征二, 木原諄二, 相澤龍彦: 塑性と加工, 33 (1992), 556.
- 16) W.R.P. WILSON and J.A. WALOWIT: Trans. ASME, F93 (1971), 69.
- 17) R.W. SNIDLE, D.DOWSON and B.PARSONS: Trans. ASME, F95 (1973), 113.
- 18) 潤滑ハンドブック, 日本潤滑学会編, 養賢堂, 東京, (1974), 260.
- 19) 小島之夫, 武山幹根, 水野高爾: 塑性と加工, 30 (1989), 1004.
- 20) 鏑田征雄, 北村邦雄, 北浜正法: 潤滑, 30 (1985), 116.
- 21) 井上周一, 阿部光範, 梁井和博, 札軒富美夫, 荒木 純: 材料とプロセス, 7 (1994), 1376.