

## 技術論文

# ステンレス鋼冷間圧延板における表面性状形成のモデル化と 実機への適用

## Development of Model for Formation of Surface Properties in Cold Rolling of Stainless Steels and Application to the Actual Mill

札 軒 富美夫\*  
Fumio FUDANOKI

荒 木 純  
Jun ARAKI

井 上 周 一  
Shuichi INOUE

梁 井 和 博  
Kazuhiro YANAI

## 抄 録

ステンレス鋼冷間圧延の表面欠陥の低減と表面の平滑化を形成するモデルとして、Channel Jacking Mechanismを応用し、“圧延油しみ出しモデル”を構築した。適用したエマルション油は高圧力下で高粘度になり、ロールバイト内部での高圧力下で移動しにくいので、ニート油と同一条件で圧延すると表面が平滑化されにくい。圧延油しみ出しモデルを基に圧延条件を決めることによりニート油とほぼ同等の表面が得られた。

## Abstract

The model “the rolling oil transudation model” by whom the decrease of the surface defect and smoothing the surface of the stainless steel cold-rolling was formed were constructed by applying Channel Jacking Mechanism. The surface of the sheet rolled with emulsion oil used this time is not smoothed easily when rolling on the same to neat oil condition, because this emulsion oil becomes a high viscosity under the high pressure, and is not moved easily under high-pressure in the roll byte. However the surface smoothness of the sheet rolled with emulsion oil is the same as one with neat oil with control of the rolling condition based on the rolling oil transudation model.

## 1. 緒 言

ステンレス鋼冷間圧延板は、最近家電や建材を中心に需要が著しく伸びている品種である。このような用途において、表面性状すなわち表面光沢、表面粗さ等に対する厳しい要求がユーザーから求められている。そのため、圧延条件や潤滑条件の表面性状への影響について研究すべき多くの課題がある。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<sup>1)6)</sup>。

この中で、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、片岡、木原ら<sup>7)11)</sup>は“ミクロプール潤滑モデル”としてChannel Jacking Mechanism (以下CJMと略す)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、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。更に、ニート系圧延油(以下ニート油と略す)に比べて表面性状が劣るとされている水溶性のエマルション圧延油(以下エマルション油と略す)における冷間圧延での表面平滑化にF値を適用した結果を報告する。

## 2. 圧延油しみ出し現象の検討とパス特性値F値の計算

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

\* 新日鐵住金ステンレス(株) 名古屋支店 ステンレス自動車鋼材室 部長代理 愛知県名古屋市中村区名駅南2-13-18 〒450-0003 TEL:(052)581-2015

討した。著者ら<sup>9)</sup>は、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三次元粗さ計により測定した。その結果を図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、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。

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じてしみ出す時間 $t$ の定式化を提案しており、次式で表される<sup>11)</sup>。

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

$\eta_0$ : 大気圧での潤滑油の粘性係数,  $\gamma$ : 粘度の圧力指数  
 $L$ : ミクロプールからのチャンネルの長さ  
 $D$ : ミクロプールのチャンネルの直径

図2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

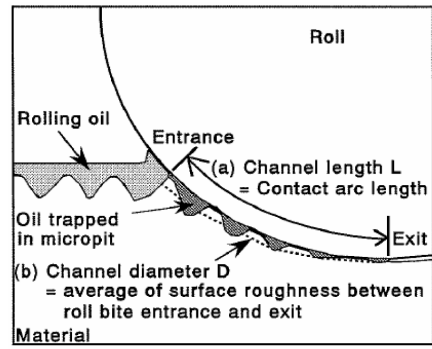


図2 ステンレス鋼冷間圧延にCJMモデルの適用する際の考え方を示す模式図

Application of CJM model to cold rolling of stainless steel

出される最大時間は、チャンネルの長さが接触弧長であるとして求めた時間になり、式(1)で表す。また圧延板表面の凹み部のロールバイト内部の移動時間を式(2)で表せる<sup>12)</sup>。

$$ta = \frac{8\eta_0\gamma L^2}{\{R. M. S. (0) + R. M. S. (L)\}^2} \quad (1)$$

$$td = \frac{4L}{(4-r)Vr} \quad (2)$$

$L$ : 接触弧長,  $Vr$ : 圧延速度,  $r$ : 圧下率

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

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

$\sigma_R$ : ロール表面粗さ,  $\sigma_S$ : 圧延板表面粗さ

このようにして求めた圧延油のしみ出し時間 $ta$ と凹部の移動時間 $td$ を用いて、 $ta$ が $td$ より長い場合には圧延油のしみ出しは $td$ の時間だけ生じると考え、 $F$ 値を $td/ta$ と定義する。一方、 $ta$ が $td$ 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。

$$F = \frac{td}{ta} \quad \text{when } ta \geq td \quad (3)$$

$$F = 1 \quad \text{when } ta < td \quad (4)$$

この定義から、 $F$ 値は必ず0と1の間の値を取る。 $F$ 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図3に示す。表面は、SUS304の板に特有の網目状の形態を示す粒界侵食溝が認められる。この材料を圧延素材として、ロール直径が

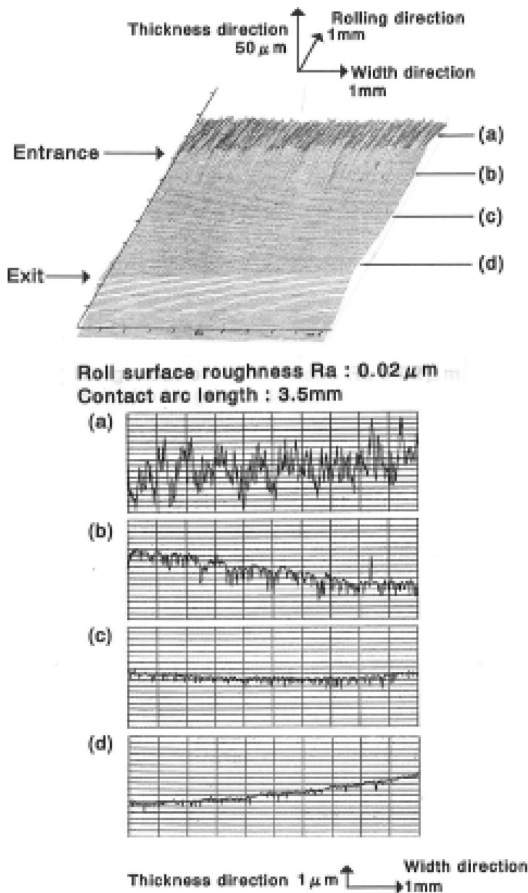


図1 SUS430板のロールバイトにおける表面粗さプロフィール

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

表1 圧延条件  
Rolling oil 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			
Neat oil	Rolling speed (m/min)	-	150	240	290	340	150	200	250	
	Roll surface roughness Ra ( $\mu$ m)	A	-	0.05	0.05	0.05	0.05	-	0.05	-
		B	-	-	-	-	-	-	-	-
		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	-		
Emulsion oil	Roll surface roughness Ra ( $\mu$ m)	-	0.20	0.20	0.20	0.05	-	0.05	-	
	Rolling speed [m/min]	D	-	150	500	500	400	-	200	
		E	-	50	-	-	-	-	-	

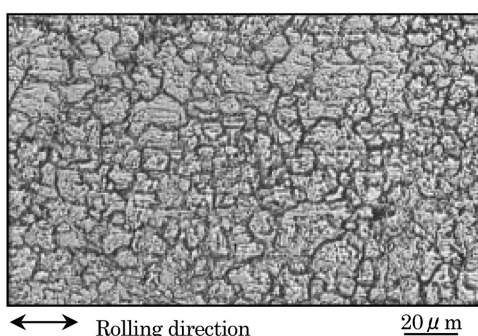


図3 素材表面の顕微鏡写真  
Micrograph of surface of mother sheet

表2 圧延油の物性  
Rolling oil properties

Oil type		Neat	Emulsion
Kinematic viscosity $\nu$ (mm <sup>2</sup> /s)	40°C	10	8 *
	100°C	2	2 *
Pressure coefficient of viscosity $\gamma$ (1/GPa) at 75°C		5	20 *
Density $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )		0.87	0.86 *
Emulsion diameter ( $\mu$ m)		-	5
Oil concentration (%)		-	10

\* Base oil properties

60mmの20段センジミア型冷間圧延機を用いて表1で示す条件で圧延した。

本実験では、F値は(1)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  $\mu$  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  $\mu$  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  $\mu$  mRaと粗いロールで、最終パスのみ表面粗さが0.05  $\mu$  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。圧延油は表2に示す特性のニート油を使用した。圧延後、材料表面は、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

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<sup>13)</sup>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。

#### 3.2.1 圧延油しみ出し関数F値の算出結果

図4は、ロール表面粗さのパススケジュールA、Bおよび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、(1)式及び(2)式からそれぞれ $ta$ 、 $td$ を計算し、(3)式及び(4)式に従って行った。ここで、計算に必要な数値を表3に示す。 $\eta_0$ は圧延油の動粘度 $\nu$ と密度 $\rho$ の積として計算した。 $\nu$ 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<sup>14)</sup>から求めた。各パスのロール

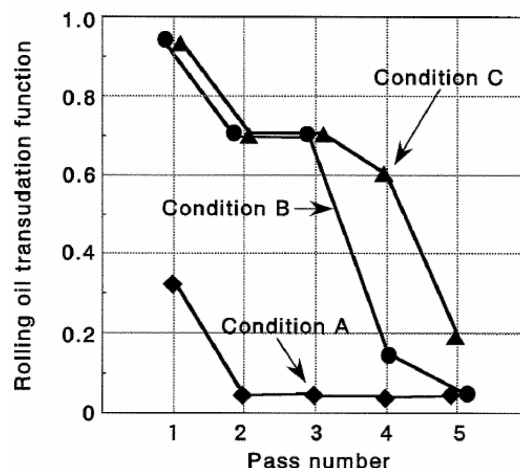


図4 条件A、BおよびCにおける各圧延パスのF値  
Rolling oil transudation function in pass schedules under conditions A, B, and C

表3 F値の計算に必要な数値

Computational conditions to determine rolling oil transudation function

Pass number	1	2	3	4	5
Temperature of roll bite (°C)	111	122	127	118	96
Kinematic viscosity $\nu$ (cSt)	1.7	1.4	1.3	1.5	2.2
Viscosity $\gamma_0$ (mPa · s)	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

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降下に分けて計算した<sup>14-17)</sup>。接触弧長はロール半径Rと圧下量 $\Delta h$  (圧延前の板厚と圧延後の板厚の差)を用いて (5) 式の簡便式を使用した。

$$L = \sqrt{(R \cdot \Delta h)} \quad (5)$$

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。

### 3.2.2 F値のパススケジュールと圧延後の板表面の関係

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図5に示す。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、図5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、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、圧延原板の粒界侵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パス目の圧延のF値と圧延後の凹部面積率の関係を図6に示す。ここで、圧延素材は $td=0$ と考えると、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。

一方、圧延板の表面光沢を確保するため、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。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

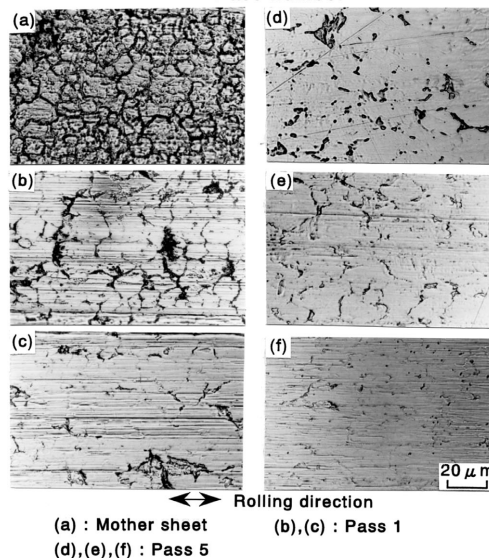
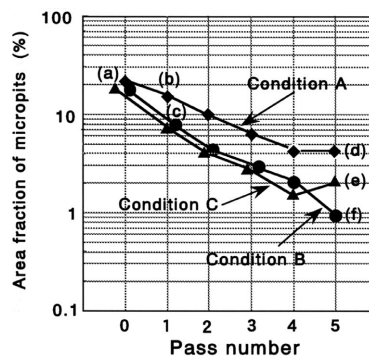


図5 条件A, B, Cにおける各パス圧延板の凹部面積率と表面写真

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

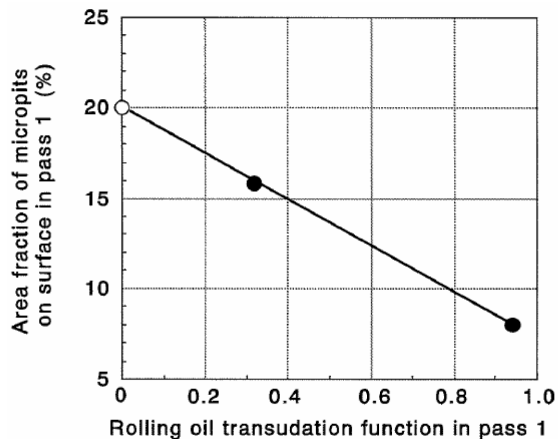


図6 1パス目のF値と凹部面積率の関係  
Relationship between F value and area fraction of micropits on surface of sheet in pass 1

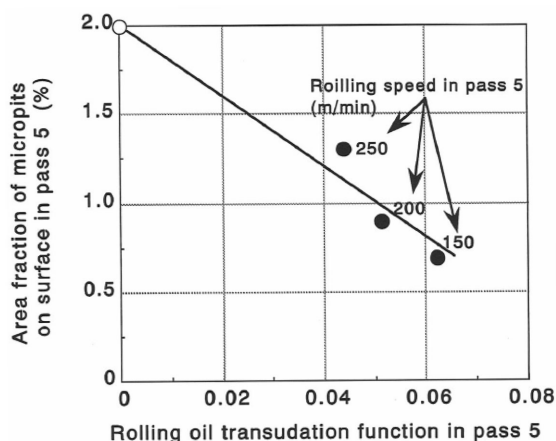


図7 条件B, B', B''における5パス目のF値と凹部面積率の関係

Relationship between F value and area fraction of micropits on surface of sheet in pass 5 under conditions B, B', and B''

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った。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値との関係を図7に示す。ここで、圧延前の板表面は $td=0$ と考えて、F値=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。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思われる。

#### 4. エマルション油におけるステンレス鋼冷間圧延への適用

前述の材料を圧延素材として、ロール直径が80mmの20段センジミア型冷間圧延機に、冷間圧延油に水溶性のエマルション油を使用して圧延した。エマルション油の物性を表2に示す。

ニート油条件Bと同条件の条件Dで圧延することにより得られた冷間圧延での各圧延パスの板および光輝焼鈍(BA)仕上板の表面性状について、表面凹部の面積率を測定した結果を図8に示す。

エマルション油で圧延された材料ではニート油のそれに比べ、5パス目およびBA仕上板において凹部面積率が大きくなっている。これはニート油と同条件で圧延した場合、各圧延パスにおいて粒界侵食溝がほとんど軽減せず、冷間圧延後ほとんど残存しているためである。

これは図9からわかるように、エマルション油のベース油の粘度の圧力依存性はニート油に比べて極めて大きいため、ロールバイト内の高圧力下において、エマルション油はニート油に比べてロールバイト内部での移動が極めて遅く、圧延前の粒界侵食溝に起因する凹部に機械的捕捉さ

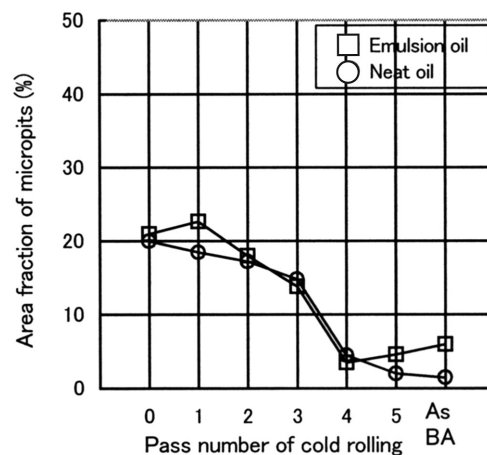


図8 条件B, Dの各パス圧延板およびBA仕上板の凹部面積率 Area fraction of micropits of sheets rolled in pass schedules under conditions B and D, and of sheets finished as BA

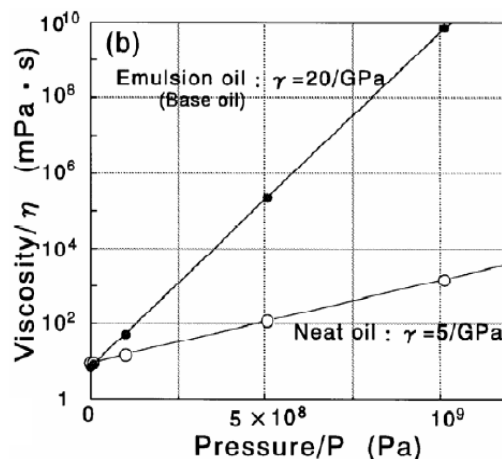


図9 エマルション油とニート油の粘度と圧力の関係 Relationship between viscosity and pressure of emulsion oil and neat oil

れた油がロールバイトからしみ出しできず、凹部として残留するためと考えられる。

そこで、エマルション油による冷間圧延板において、ニート油と同等の表面平滑性を得るための圧延条件を検討した。本実験で使用したエマルション油ではエマルションのプレートアウト厚み $hp$ 値について $h_1$ (入口油膜厚み) $< 2hp$ が成り立つことから、ベース油をニート油と考えて“圧延油しみ出しモデル”を適用できる<sup>18)</sup>。

そこで、1パス目の圧延速度を50mpmまで低速にした条件Eを追加圧延実験し、条件D, EおよびBについて1パス目のF値(横軸)と1, 5パス目の粒界侵食溝起因の凹部の面積率(縦軸)の関係図および条件DおよびEの1パス目と5パス目の表面観察結果を図10に示す。

図10から、圧延油種にかかわらず、1パス目と5パス目の凹部の面積率が1パス目のF値で整理されることがわかる。更に、1パス目の圧延速度を低減化して、F値をニート油の値に近づけた条件Eでは、粒界侵食溝起因の凹部が

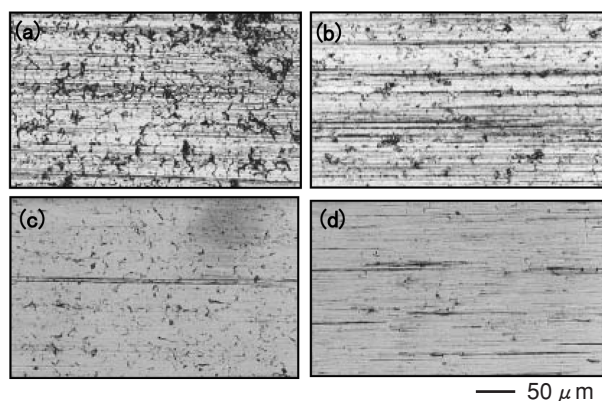
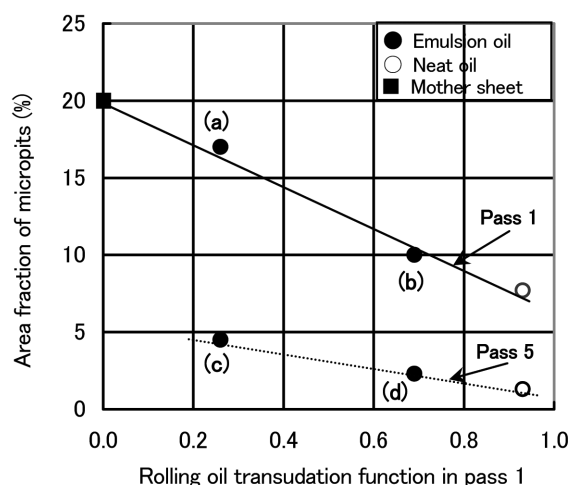


図10 1パス目のF値と凹部の面積率の関係及び条件D、Eの1パス目と5パス目の表面観察結果

(a)条件Dの1パス目, (b)条件Eの1パス目  
(c)条件Dの5パス目, (d)条件Eの5パス目

Relationship between rolling oil transudation function in pass 1 and area fraction of micropits on surface of sheet in pass 1 and 5, and micrographs of sheets rolled under conditions D and E

(a) Pass 1 of condition D, (b) Pass 1 of condition E  
(c) Pass 5 of condition D, (d) Pass 5 of condition E

1パス目で半減し、5パス目で約2%となり、ニート油に近い表面性状が得られることを明らかにした。

## 5. 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) 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。

(3) 使用したエマルジョン油は高圧力下で高粘度になり、ロールバイト内部での高圧力下で移動しにくいいため、ニート油と同一条件で圧延すると表面光沢が低くなるが、1パス目のF値を大きくすることにより、ニート油とほぼ同等の表面性状が得られる。

## 参照文献

- 1) 小豆島明, 野呂和也 ほか: 鉄と鋼. 77, 576(1990)
- 2) 小豆島明: 鉄と鋼. 80, 635(1994)
- 3) 剣持一仁 ほか: 鉄と鋼, 78, 1546(1992)
- 4) 剣持一仁 ほか: 鉄と鋼. 81, 809(1995)
- 5) 札軒富美夫 ほか: 材料とプロセス. 7, 1375(1994)
- 6) 井上周一 ほか: 材料とプロセス. 8, 766(1995)
- 7) 片岡征二 ほか: 塑性と加工. 30, 709(1989)
- 8) 片岡征二 ほか: 塑性と加工. 30, 1058(1989)
- 9) 片岡征二 ほか: 平成元年塑性加工春季講演論文集. 1989, p.378
- 10) 片岡征二 ほか: 平成2年塑性加工春季講演論文集. 1990, p.173
- 11) 片岡征二 ほか: 塑性と加工. 33, 556(1992)
- 12) 札軒富美夫 ほか: 塑性と加工. 39, 454(1998)
- 13) 小豆島明: 塑性と加工. 36, 737(1995)
- 14) 日本潤滑学会編: 潤滑ハンドブック. 東京, 養賢堂, 1974, p.260
- 15) 小島之夫 ほか: 塑性と加工. 30, 1004(1989)
- 16) 鐘田征雄 ほか: 潤滑. 30, 116(1985)
- 17) 井上周一 ほか: 材料とプロセス. 7, 1376(1994)
- 18) 札軒富美夫 ほか: 鉄と鋼. 83, 8(1997)



札軒富美夫 Fumio FUDANOKI  
新日鐵住金ステンレス(株) 名古屋支店 ステンレス自動車鋼材室 部長代理  
愛知県名古屋市中村区名駅南 2-13-18  
〒450-0003 TEL:(052)581-2015



井上周一 Shuichi INOUE  
(株)サステック 製造技術本部 関東工場 工場長 (元 新日鐵住金ステンレス(株) 光製造所 生産管理部 薄板管理室 マネジャー)



荒木 純 Jun ARAKI  
新日鐵住金ステンレス(株) 光製造所 薄板工場 薄板技術室 マネジャー



梁井和博 Kazuhiro YANAI  
新日鐵住金ステンレス(株) 取締役常務執行役員 技術部長 (現 取締役常務執行役員 製造本部副本部長)