

調質圧延におけるロール表面テクスチャーの転写

鍵田 征雄*・伊藤 正登*²・長瀬 直樹*³・志渡 誠一*³

Transcription of Roll Surface Texture onto Deforming Material in Temper Rolling

Ikuko YARITA, Masato ITOH, Naoki NAGASE and Seiichi SHIDO

Synopsis : The surface texture of thin steel sheet provides considerable effect on sheet press formability and image clarity after coating for automotive body parts and beverage can uses. However, the transcription mechanism of surface texture, such as surface roughness, from roll onto deformed sheet has not been clarified, because of the complexity of elastic-plastic deformation of the rolled sheet in temper rolling. Temper rolling experiments for as-annealed low- and high-carbon steel sheets have been conducted in the reduction range from 1.0 to 8.0% using a laboratory-scale rolling mill. Bright rolls, shot dull rolls and electric-discharged rolls were employed. Dry, soluble oil and mineral oil were applied as lubrication states in the rolling experiments. The surface microstructures of temper-rolled sheets were observed. Three-dimensional (3D) surface textures of the rolled sheets were measured, in terms of 3D mean roughness (SRa), 3D maximum profile peak height (SRp), 3D minimum profile valley depth (SRv) and 3D material ratio (Rmr) curves. The probability densities of surface roughness were analyzed from the Rmr curves for both rolls and deformed sheets. From the results, the transcription of roll surface textures onto the temper-rolled sheets was discussed.

Key words: temper rolling; steel sheet; surface texture; transcription; bright roll; shot dull roll; electric discharged dull roll; lubrication.

1. 緒言

薄鋼板の重要な品質のひとつに表面テクスチャーがある。自動車用鋼板では、プレス成形性を改善し、塗装鮮映性を向上させ付加価値を高め、飲料缶用鋼板では、表面光沢度を高め、印刷後の鮮映性を良くして感性価値を高めるために重要である。表面テクスチャーは最終的に調質圧延工程において所望の粗さ、うねり、光沢度に制御される。実際の調質圧延における表面テクスチャーの制御は、圧延荷重や伸び率（圧下率）などの操業データの蓄積と経験により技術的な対応がなされている^{1,2)}が、ロール表面から板材への転写は不明な点が多い。

表面粗さの転写機構については、ロール表面加工法や潤滑状態の影響を調査したラボスケールの実験研究^{3,4)}、さらには、ロール粗さが圧延材に転写していく微小表面の変形挙動に関する3次元弾塑性有限要素法⁵⁾や2次元剛塑性有限要素法⁶⁾の解析結果が報告されている。

本研究では、プライトロールやダルロールにショットダルロールと放電ダルロールを用い、無潤滑(Dry)、水溶性調質圧延液、鉱物油などの潤滑条件において、ロール面粗さの圧延板表面への転写挙動を低炭素鋼板や高炭素鋼板についてラボ実験により調査した。ロール表面粗さ、圧延板

表面粗さは三次元粗さで、中心面平均粗さSRa、中心面山高さSRp、中心面谷深さSRv、および負荷曲線Rmrについて測定した。さらに、負荷曲線からは粗さの確率密度を算出し、ロールから圧延材への表面粗さの転写機構を検討した⁷⁻¹²⁾。

2. 圧延実験条件

2.1 供試材

0.08 wt% C、板厚 0.61 mm の低炭素鋼板の焼鈍材及び 0.65 wt% C、板厚 0.62 mm の高炭素鋼板の焼鈍材を使用した。両材料とも中心面平均粗さSRaは $0.2\ \mu\text{m}$ である。Fig. 1に引張速度 100 mm/minによる引張試験より得られた真応力-真ひずみ線図を示す。また、低炭素鋼板の上降伏点は328 MPa、下降伏点320 MPa、高炭素鋼板の上降伏点は454 MPa、下降伏点は427 MPaと両者は100 MPa以上の違いがある。

2.2 圧延機及びロール

Table 1に実験に使用した圧延機の仕様と実験条件を示す。圧延機は2-highのWR径 $\phi 130\ \text{mm}$ を使用している。潤滑状態は無潤滑(Dry)、水溶性調質圧延液($0.69\ \text{mm}^2/\text{s}$, 313K)、および鉱物油($4.21\ \text{mm}^2/\text{s}$, 313K)の3条件でシート

平成20年1月25日受付 平成20年4月12日受理 (Received on Jan. 25, 2008; Accepted on Apr. 12, 2008)

* 千葉工業大学機械サイエンス学科 (Department of Mechanical Science & Engineering, Chiba Institute of Technology, 2-17-1 Tsudanuma Narashino 275-0016)

*2 千葉工業大学 (院) 機械サイエンス専攻 (現: (株) オシキリ) (Graduate School of Mechanical Science & Engineering, Chiba Institute of Technology, now Oshikiri Machinery Co., Ltd.)

*3 出光興産 (株) 営業研究所 (Lubricants Research Laboratory, Idemitsu Kosan Co., Ltd.)

圧延（無張力）を行い、目標圧下率 1.0, 2.0, 4.0, 6.0（高炭素鋼板）または 8.0%（低炭素鋼板）について行った。ロールはブライトロール ($0.12\text{ }\mu\text{m}$ SRa) およびダルロールについて行い、ダルロールはショットダルロール ($4.1\text{ }\mu\text{m}$

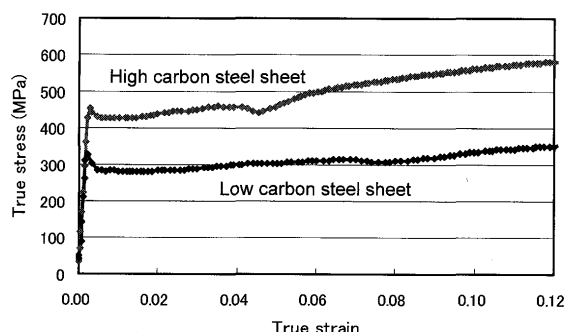
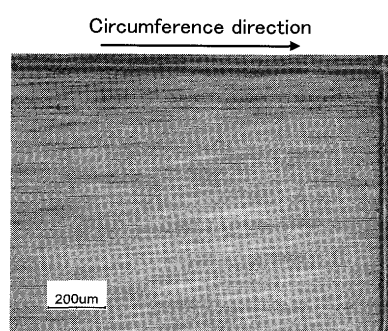


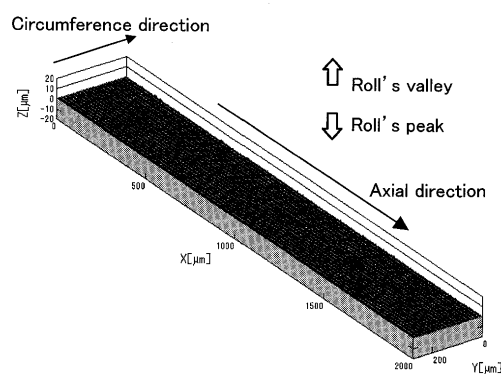
Fig. 1. True stress-true strain curve.

Table 1. Rolling mill specifications and rolling conditions.

Rolling mill	Mill type	2-high
	Roll size	$\phi 130\text{mm} \times 160\text{wmm}$
	Roll material	SUJ2
	Roll hardness	Hs 93° up
	Roll roughness	Bright roll: $0.12\text{ }\mu\text{mRa}$ Shot dull roll: $4.1\text{ }\mu\text{mRa}$ Electric-discharged roll: $2.5\text{ }\mu\text{mRa}$
Rolling condition	Load capacity	25 tonf
	Rolling speed	4.2 m/min
	Tension	0 MPa
	Aimed reduction	1.0, 2.0, 4.0, 6.0 or 8.0%
Lubrication	Dry	
	Soluble oil ($0.69\text{mm}^2/\text{s}$ at 313K)	
	Mineral oil ($4.21\text{mm}^2/\text{s}$ at 313K)	

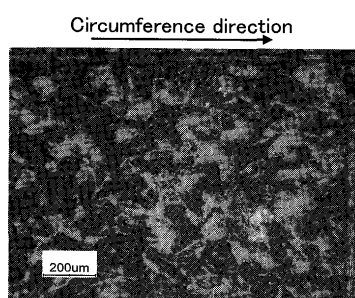


(a) Microstructure

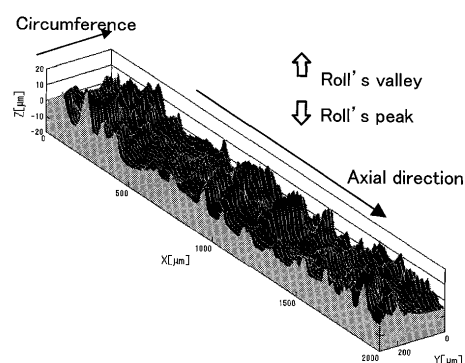


(b) Three dimensional surface roughness

Fig. 2. Bright roll surface.



(a) Microstructure



(b) Three dimensional surface roughness

Fig. 3. Shot dull roll surface.

SRa), 放電ダルロール ($2.5\text{ }\mu\text{m}$ SRa) の両者を使用した。ダルロールの中心面平均表面粗さはいずれも $3.0\text{ }\mu\text{m}$ SRa を目標としたが、実際の加工後は上記の値となった。各ロールは焼入れ後に表面粗さの調整を行っており、表面硬度は Hs 93° 以上である。また、各ロール表面の特定部に L 字の罫書き線を描き、圧延材へ転写させことで表面顕微鏡写真や表面粗さの測定位置を特定している。ロールの表面顕微鏡写真や表面粗さはレプリカを用いて間接的に行った。

なお、三次元表面粗さの測定は（株）小坂研究所サーフコーダ SEF-30D を使用して、ロールは軸方向に $2000\text{ }\mu\text{m}$ 走査し、円周方向に $250\text{ }\mu\text{m}$ に渡り $25\text{ }\mu\text{m}$ 間隔で測定した。圧延材も幅方向に $2000\text{ }\mu\text{m}$ 走査し、圧延方向に $250\text{ }\mu\text{m}$ に渡り $25\text{ }\mu\text{m}$ 間隔で測定した。

Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4 にレプリカから調査したブライトロール、ショットダルロール、放電ダルロールの表面顕微鏡写真および 3 次元表面粗さをそれぞれ示す。ブライトロールは研削スクラッチによる谷部があるが、非常に平滑である。ショットダルロールは山部と谷部が独立して部分的に谷部が存在しているが、放電ダルロールは比較的規則的な粗さ分布を示している。

Fig. 5, Fig. 6 にブライトロールおよびダルロールの表面粗さの負荷曲線および確率密度分布をそれぞれ示す。ブライトロールは研削スクラッチによる谷部は残ってはいるが、山部、谷部の分布が正規分布になっていることが分か

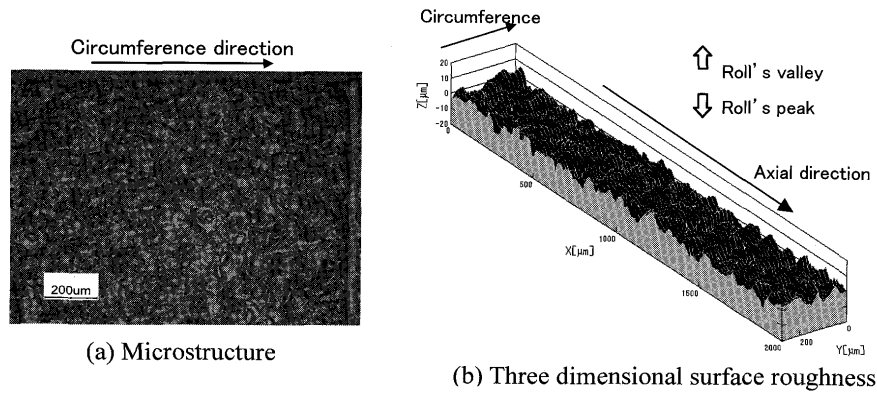


Fig. 4. Electric discharged dull roll surface.

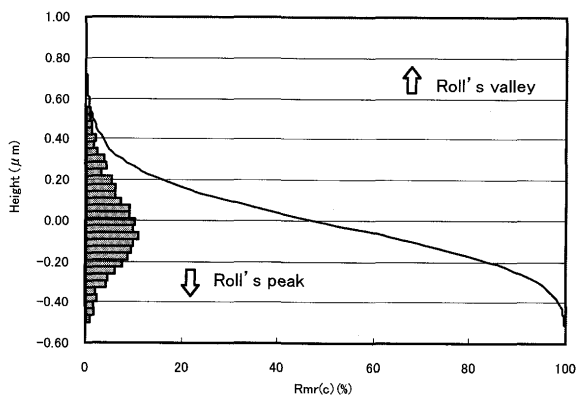


Fig. 5. Material ratio curve and their probability density of bright roll.

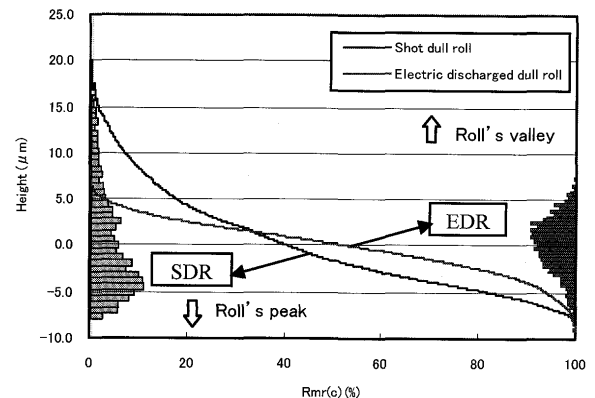


Fig. 6. Material ratio curve and their probability density of dull roll.

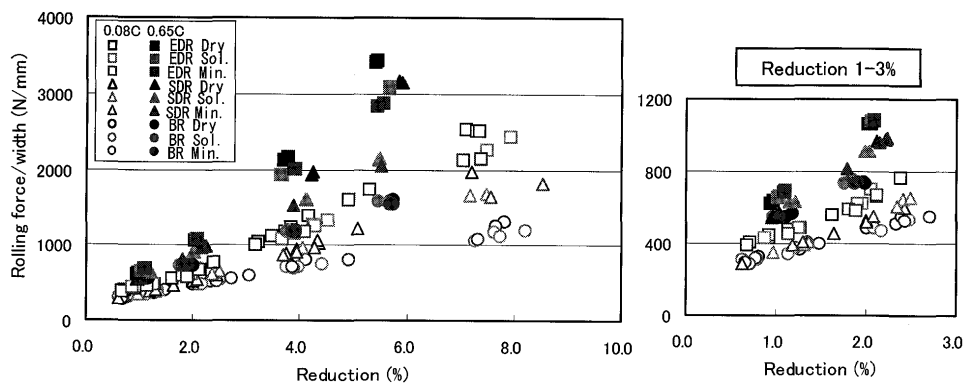


Fig. 7. Experiment results of rolling force/width.

る。また、ショットダルロールは山部側に偏りがあり、一部に深い谷部を有している。放電ダルロールはショットダルロールに比べ山部、谷部の間隔が細かく、高さの低い山部、谷部が正規分布になっていることが分かる。

3. 圧延荷重の結果

Fig. 7に調質圧延実験から得られた圧延荷重と圧下率との関係および通常の調質圧延の圧下率である1~3%の範囲を拡大した図を示す。図中のBR, SDR, EDRはそれぞれブライト、ショットダル、放電ダルロールを示している。

(1) ブライtrol

ブライトロールは山部、谷部の凹凸がなく、平滑なため圧延荷重が低い。低炭素鋼板、高炭素鋼板の両板材ともいずれの潤滑条件においても圧下率の増大にともない圧延荷重は増大する。また、両板材ともに潤滑剤による荷重低減効果は顕著には現れていない。当然ながら、低炭素鋼板を用いた場合の方が高炭素鋼板を用いた場合に比べ圧延荷重が低くなっている。

(2) ダルロール

ショットダルロール、放電ダルロールでも、両板材ともいずれの潤滑条件の場合においても圧下率の増大にとも

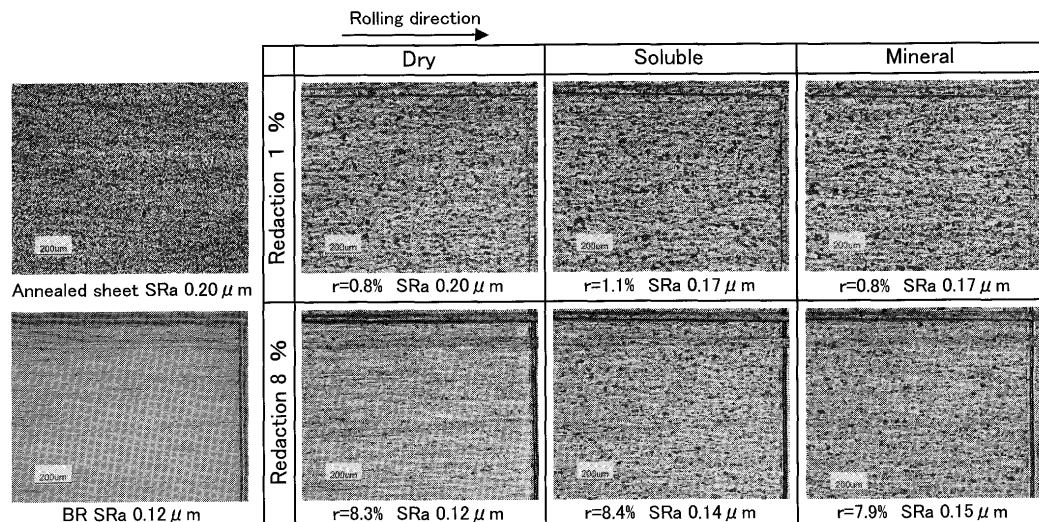


Fig. 8. Microstructures of temper rolled low carbon steel sheet surface with bright roll.

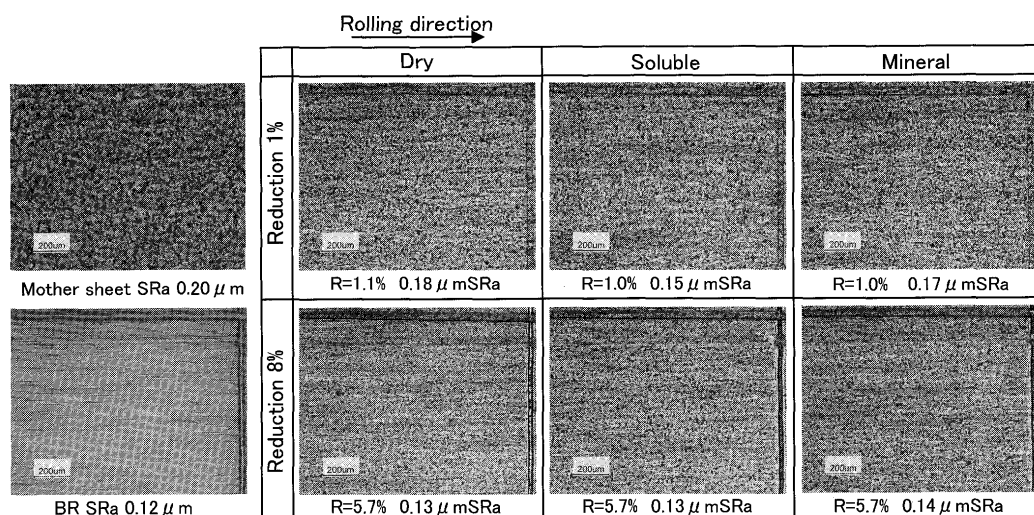


Fig. 9. Microstructures of temper rolled high carbon steel sheet surface with bright roll.

に真実接触面積が増加し、圧延荷重は増大する。また、両板材ともに潤滑剤による荷重低減効果は圧下率の増大にともない顕著に現れる。潤滑剤について比較すると、鉱物油（高粘度潤滑剤）を用いた場合のほうが水溶性調質圧延液（低粘度潤滑液）を用いた場合に比べ、荷重低減効果は大きく、その差は圧下率の増大にともない顕著になる。しかしながら、通常の調質圧延の低い圧下率の範囲では潤滑状態の荷重への影響はほとんど見られない。板材について比較すると、低炭素鋼板を圧延する場合のほうが高炭素鋼板の場合に比べ圧延荷重が低く、潤滑による荷重への影響も減少している。ダルロールの表面テクスチャーについて比較すると、ショットダルロールは放電ダルロールに比べ、山部、谷部の間隔が広く深い谷部を有しており真実接触面積が少ないため、圧延荷重が低くなったと考えられる。また、放電ダルロールを用いた場合の方がショットダルロールを用いた場合に比べ、潤滑条件が圧延荷重に及ぼす影響は小さくなった。これは、放電ダルロールはショットダル

ロールに比べ、山部、谷部の間隔が細かく、低い山部、谷部が正規分布になっており潤滑剤がロールと板材の間に留まりにくくなることにより、潤滑剤による荷重低減効果は小さくなったと考えられる。

4. ロール表面テクスチャーの転写

4・1 ブライトロール表面テクスチャーの転写機構

ブライトリロールの中心面平均表面粗さは(0.12 μm SRa)で低炭素鋼および高炭素鋼圧延材の中心面平均表面粗さ(0.2 μm SRa)より小さい。ロール鏡面の圧延板への転写挙動を調べた。Fig. 8およびFig. 9に圧下率1%と6%または8%における低炭素鋼と高炭素鋼圧延材の表面顕微鏡写真をそれぞれ潤滑状態ごとに示す。圧延材表面顕微鏡写真はロール表面のL字罫書き線部と同一箇所を観察している。また、Fig.10に低炭素鋼圧延材の圧延時の表面粗さ負荷曲線の変化を例に、Fig.11に中心面山高さ及び中心面谷深さの変化

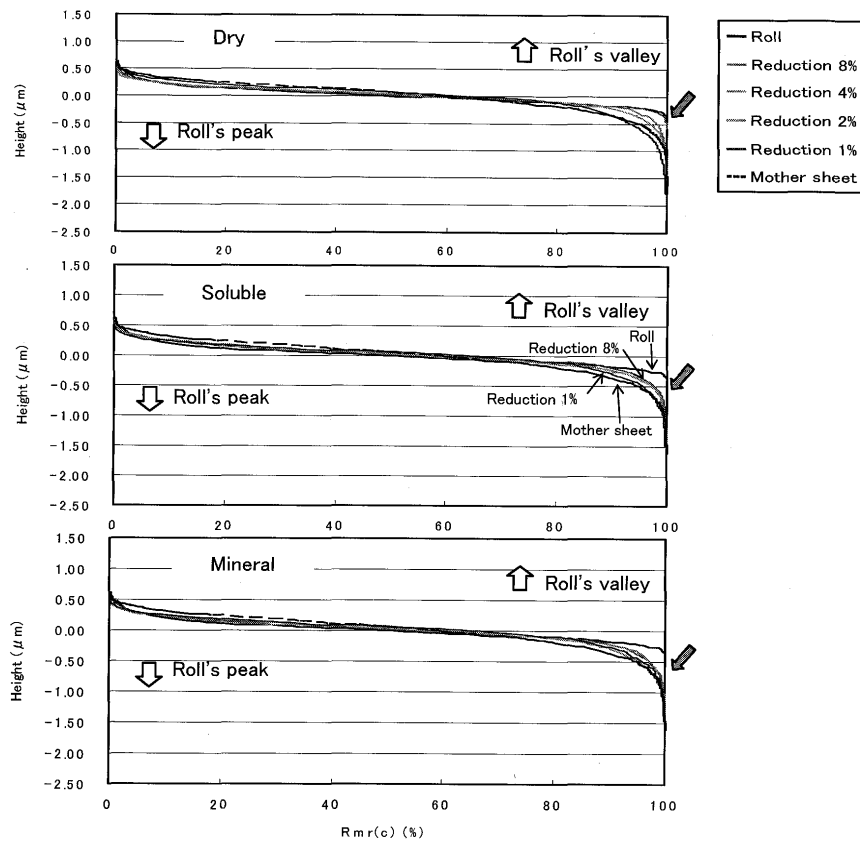


Fig. 10. Material ratio curves of temper rolled low carbon steel sheet with bright roll.

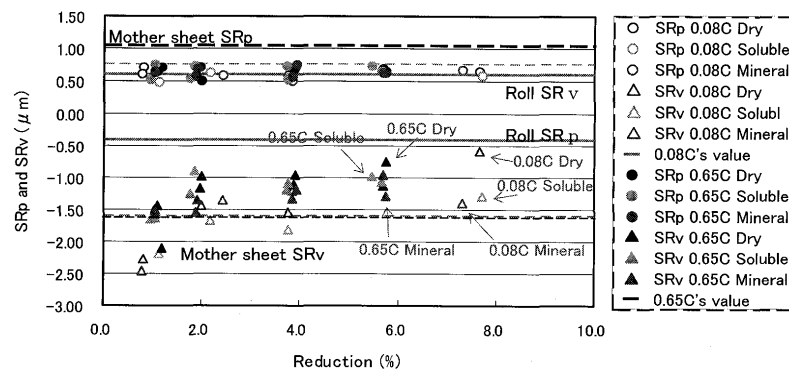


Fig. 11. SRp and SRv of temper rolled steel sheet with bright roll.

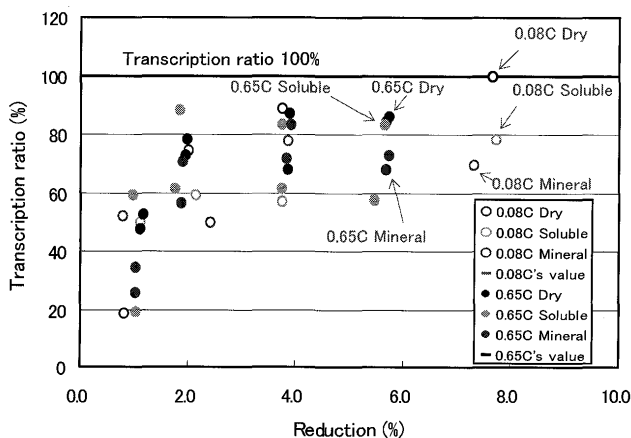


Fig. 12. Transcription ratio of temper rolled steel sheet with bright roll.

を示す。さらに、Fig.12に中心面平均粗さ(SRa)から求めた転写率の変化を示す。ロールのレプリカは両圧延材において、全ての圧延条件で実験が終了した後に採取した。転写率は圧延材の初期の中心面平均表面粗さの影響をなくするため次式で求めた。

$$\text{転写率} = \frac{\left(\begin{array}{l} \text{圧延材の中心面平均粗さ } S_{Ra} \\ - \text{母板の中心面平均粗さ } S_{Ra} \end{array} \right)}{\left(\begin{array}{l} \text{ロールの中心面平均粗さ } S_{Ra} \\ - \text{母板の中心面平均粗さ } S_{Ra} \end{array} \right)} \times 100 (\%)$$

(1) 転写に及ぼす圧下率の影響

低炭素鋼板および高炭素鋼板ともに、いずれの潤滑条件においても、圧下率の増大にともない圧延材の表面は山部

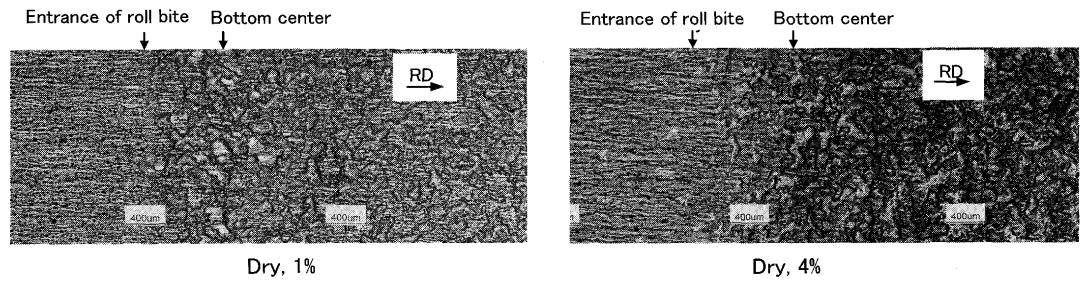


Fig. 13. Transcription behaviors of surface roughness of deforming low carbon steel sheets with shot dull roll.

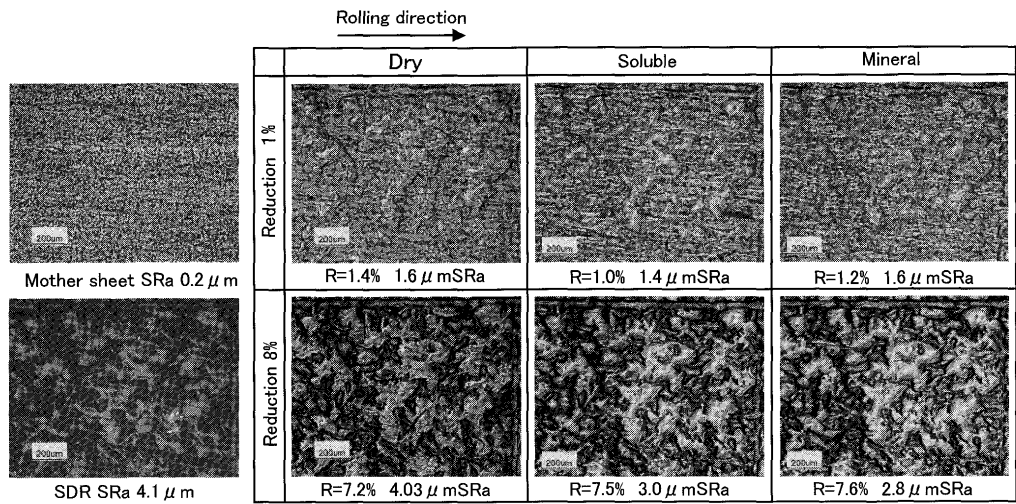


Fig. 14. Microstructures of temper rolled low carbon steel sheet surface with shot dull roll.

がロールにより押しつぶされ平滑になっている。しかし、高い圧下率においても、母板の深い谷部はそのまま残留している。Fig.10をみると、いずれの潤滑条件においても、圧延材の山部は圧下率1~2%でもロールの負荷曲線の形状に変化しているが、しかしながら、圧延材の谷部は圧下率が增大しても母板の負荷曲線に近い形状であり変化していない。これはFig.11からも、圧延材の最大谷深さがロールの最大山高さまで達していないことでわかる。したがって、転写率は両板材とも圧下率4%以上ではいずれの潤滑条件においてもほぼ飽和しており、ロールの表面テクスチャーは圧延材へ完全には転写されていない。

(2) 転写に及ぼす潤滑条件の影響

潤滑剤を用いると、両板材とも圧延材の表面粗さ谷部に潤滑油がトラップされ、オイルピットが形成される。これにより、ロールの表面テクスチャーの転写が阻害されている。低粘度潤滑剤を用いた場合のほうが高粘度潤滑剤を用いた場合に比べ、オイルピットの面積が小さくなっている。Fig.10から分かるように、両板材とも、圧延材の谷部（ロールの山部側）の負荷曲線は無潤滑の場合には、圧下率の増大にともないほぼロールの負荷曲線まで変化している。しかしながら、潤滑剤を用いた場合には圧延材の谷部では、圧下率が增大してもロールの負荷曲線まで変化せず、表面の転写が阻害されている。低粘度潤滑剤を用いた場合のほうがロールの負荷曲線に近づいている。

(3) 転写に及ぼす板材の影響

高炭素鋼板のほうが低炭素鋼板に比べ潤滑の影響もやや小さい。個々のオイルピットの面積が小さく、表面粗さの転写も若干ながらよくなっている。これは、高炭素鋼板のほうが降伏応力も高く、加工発熱が大きくなり、導入油膜も薄くなるためである。

4・2 ダルロール表面テクスチャーの転写機構

4・2・1 接触弧内の鋼板表面粗さの観察

接触弧内で圧延板の表面粗さがどのように転写されるか途中止めを行い観察した。Fig.13に低炭素鋼板をショットダルロールによりDry条件にて1%および4%圧延した例を示す。図中の接触弧入口点とロール下死点はEP-FEMの解析結果の接触弧長さから類推している。表面粗さは接触弧内を入り側から徐々に転写され、ロール下死点近傍にて最大となる。

4・2・2 ダルロール表面テクスチャーの転写と表面粗さ

Fig.14, Fig.15に圧下率1%と8%における潤滑状態ごとのショットダルロールおよび放電ダルロールを用い圧延した低炭素鋼板の表面顕微鏡写真をそれぞれ示す。Fig.16, Fig.17にはそれぞれの場合の負荷曲線から求めた表面粗さの確率密度分布を示す。また、Fig.18に圧延後の低炭素鋼板および高炭素鋼板の中心面山高さ及び中心面谷深さを示す。さらに、Fig.19に中心面平均粗さから求めた転写率を示す。ロールのレプリカは両ロールとも全ての圧延条件で

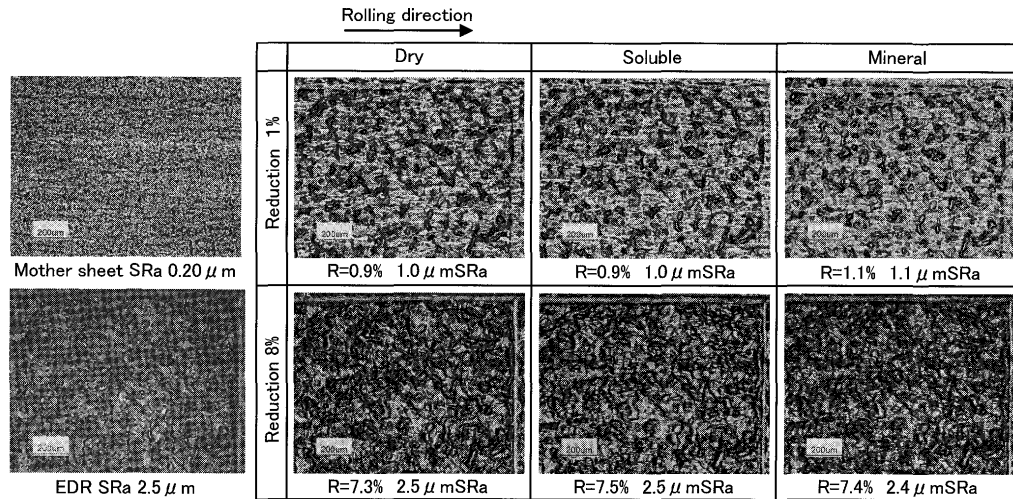


Fig. 15. Microstructures of temper rolled low carbon steel sheet surface with electric discharged dull roll.

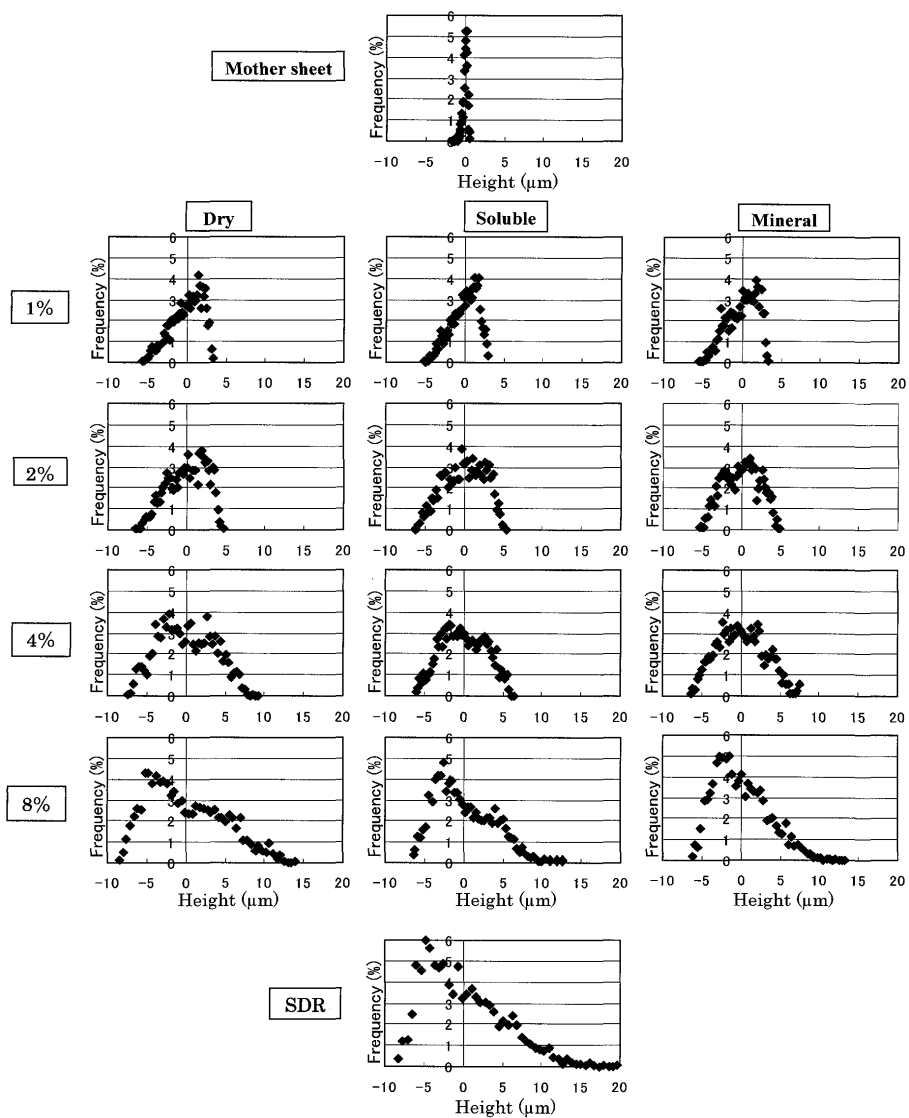


Fig. 16. Probability density of surface roughness for low carbon steel sheet with shot dull roll.

実験が終了した後に採取した。

4・2・3 転写に及ぼす圧延条件の影響

(1) 転写に及ぼす圧下率の影響

Fig.14, Fig.15から、低炭素鋼板ではショットダルロール、放電ダルロールのどちらの場合も、圧下率の増大にと
もない圧延材表面ではロールの山部が押し込まれ凹凸が形

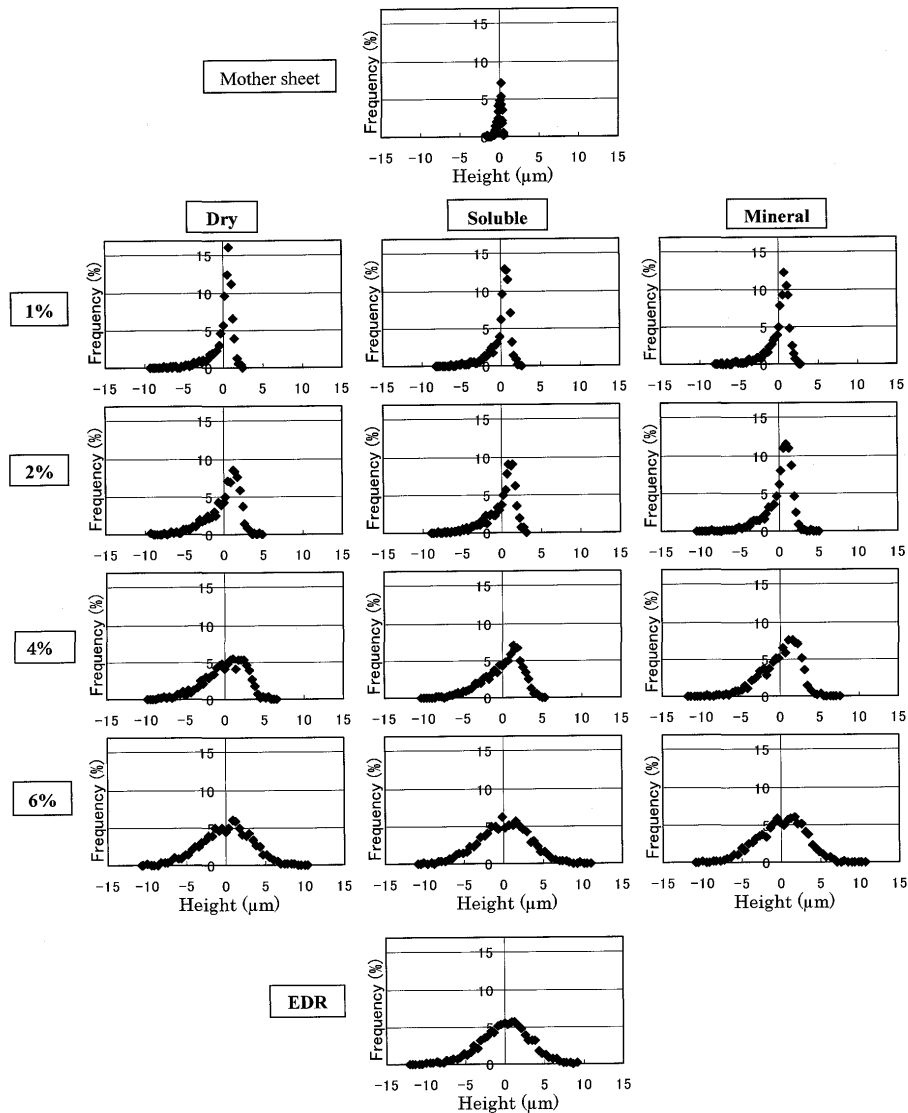


Fig. 17. Probability density of surface roughness for low carbon steel sheet with electric discharged dull roll.

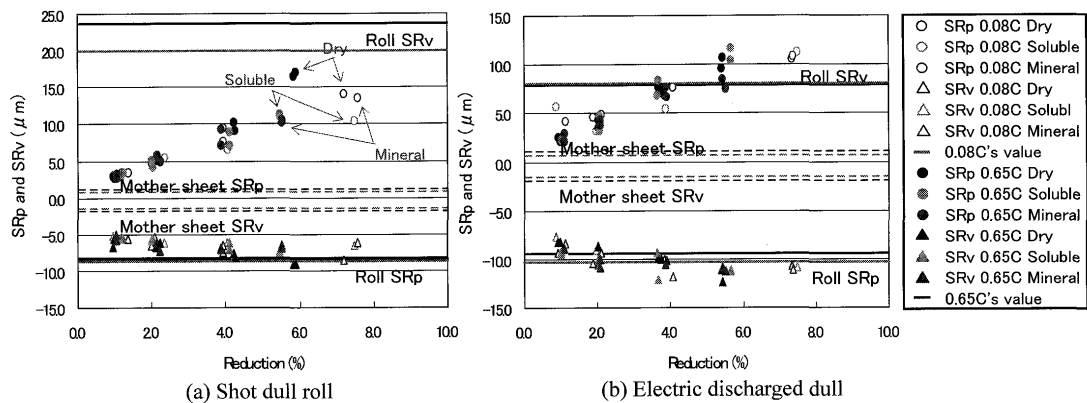


Fig. 18. SRp and SRv of temper rolled steel sheet with shot dull and electric discharged dull rolls.

成されていくのが分かる。圧下率が高くなると圧延材の表面層はロールの谷部に除々に充満し、粗さが転写されていく。これは高炭素鋼板の場合も同様であった。

Fig.16およびFig.17から、両ロールとも圧下率1%でもロールの粗さ山部形状は圧延材に転写され凹部を形成する

ことが分かる。しかし、ロールの粗さ谷部形状は圧下率の増大にともない除々に転写されるが、完全には転写されていない。Fig.18から、圧延材の谷深さのほうが圧延材の山高さより低い圧下率でロールの値まで達しているのが分かる。中心面平均粗さ、転写率は、両ロール、両板材とも、

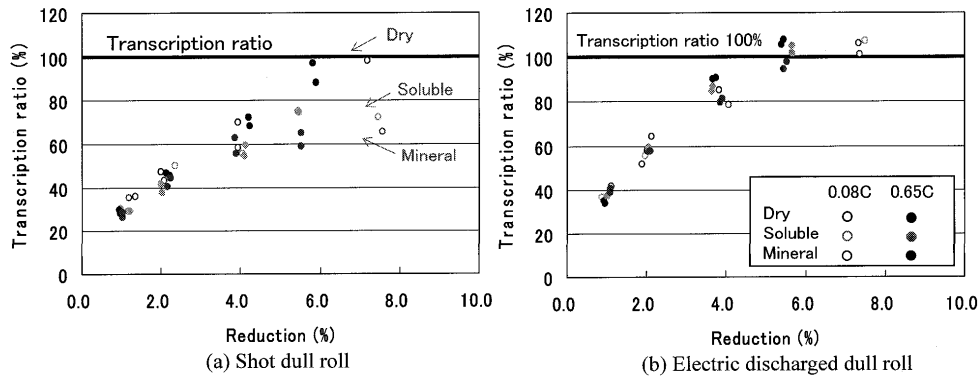


Fig. 19. Transcription ratio of temper rolled steel sheet with shot dull and electric discharged dull rolls.

いずれの条件においても、通常の調質圧延の圧下率1~2%ではロールの表面テクスチャーは圧延材へ完全には転写されていない。

(2) 転写に及ぼす潤滑条件の影響

ショットダルロール、放電ダルロールとも、潤滑剤を用いた場合はロールの表面テクスチャーの転写は阻害されている。低粘度潤滑剤を用いた場合のほうが高粘度潤滑剤を用いた場合に比べ、ロールの表面テクスチャーは圧延材に転写され易くなっている。また、圧下率の増大にともない粗さの転写に及ぼす潤滑条件の影響は顕著になり、無潤滑の場合が最も転写し易く、高粘度潤滑剤が最も転写しにくくなっている。しかしながら、通常の調質圧延の圧下率1~2%では転写に及ぼす潤滑条件の影響はほとんど見られない。

(3) 転写に及ぼすロール表面テクスチャーの影響

放電ダルロールの場合のほうがショットダルロールに比べ、表面粗さの転写に及ぼす潤滑の影響は小さく、より低い圧下率でロールの表面テクスチャーが圧延材へ転写されている。転写率は圧下率2%で、ショットダルロールが50%程度、放電ダルロールが60%程度となっている。Fig. 3とFig. 4、またFig.16とFig.17に示したように、放電ダルロールに比べ、ショットダルロールは部分的に深い谷部を有する表面テクスチャーであるため、谷部への圧延材の充填が不十分で、転写率が低くなっている。表面粗さの転写には、中心面平均粗さSRaの評価だけでなく、粗さの確率密度分布のようなロールの詳細な表面テクスチャーによる評価が必要であることを示唆している。なお、本実験では、ロールの中心面平均粗さがショットダルでは4.1 μm SRa、放電ダルでは2.5 μm SRaと異なっており、粗さの転写にはこの影響もあると思われる。さらに検討を行う予定である。

(4) 転写に及ぼす板材の影響

ショットダルロール、放電ダルロールとも、圧下率が1~2%ではほとんど差はないが、圧下率が高くなると高炭素鋼板のほうが低炭素鋼板に比べ、転写率はやや大きい。なお、粗さの確率密度分布からもほぼ同様であった。

(5) 圧延荷重の影響

各ロール、両板材ともに転写率と圧延荷重との関係は、転写率と圧下率との関係と同様の傾向で、圧延荷重が高いほど転写率は大きい。

5. 結論

低炭素鋼板および高炭素鋼板を用いて、ブライトロール、ショットダルロール、放電ダルロールについて、潤滑条件を変え、実験室規模の調質圧延実験を行い、圧延材の表面の観察、三次元表面粗さの測定よりロールから板材への表面テクスチャーの転写に及ぼす圧延条件の影響を調査し、ロール表面粗さの転写機構を検討した。その結果。以下の結論を得た。

[ブライトロールについて]

(1) いずれの潤滑条件においても、圧下率の増大にともない圧延材は山部がロールにより押しつぶされ平滑になっていく。高い圧下率においても、深い谷部はそのまま残り、ロールの表面テクスチャーは圧延材へ完全には転写されない。

(2) 潤滑剤を用いると、圧延材表面にはオイルピットが形成され、ロールの表面テクスチャーの転写が阻害される。低粘度潤滑剤を用いた場合のほうが高粘度潤滑剤を用いた場合に比べ、オイルピットの占有面積が小さくなる。

(3) 高炭素鋼板の方が低炭素鋼板に比べオイルピットの面積が小さく、転写も若干よい。

[ダルロールについて]

(1) ショットダルロール、放電ダルロールとも、いずれの潤滑条件においても、圧下率の増大にともない圧延材表面にロールの山部が押し込まれ凹凸が形成されていく。さらに圧下率が高くなるとロールの谷部まで転写される。通常の調質圧延の圧下率1~2%ではロールの表面テクスチャーは圧延材へ完全には転写されない。

(2) ショットダルロール、放電ダルロールとも、潤滑剤を用いた場合では圧延荷重は低減されるが、ロールの表面テクスチャーの圧延材への転写は阻害される。転写に及

ぼす潤滑条件の影響は圧下率の増大にともない顕著になり、無潤滑が最も転写し易く、高粘度潤滑剤が最も転写しにくくなる。しかし、通常の調質圧延の圧下率1~2%では転写に及ぼす潤滑条件の影響はほとんど見られない。

(3) ショットダルロールは部分的に深い谷部が存在しているが、放電ダルロールは比較的規則的な粗さ分布を示している。ショットダルロールと比較し、放電ダルロールのほうが低い圧下率でロールの表面テクスチャーが圧延材へ転写されるとともに、転写に及ぼす潤滑の影響も小さい。

(4) 高炭素鋼板のほうが、低炭素鋼板に比べ、ロールの表面テクスチャーは圧延材へ転写され易い。

(5) 表面粗さの確率密度分布は、転写挙動を精度よく評価できるパラメータであることが判明した。

なお、生産部門冷延部会からは実験材料（低炭素鋼板、高炭素鋼板の焼鈍材）を提供していただくとともに、本研究会の遂行にあたり有益な助言と協力を賜りました。

文 献

- 1) G.Kawaguchi, S.Mutoh, A.Torao, H.Serio and H.Uchida: *CAMP-ISIJ*, **9**, (1996), 1341.
- 2) 虎尾 彰, 鏑田征雄: 第49回塑性加工連合講演会講演論文集, (1998), 255.
- 3) N.Nagase, S.Shido, S.Shimoda and I.Yarita: *CAMP-ISIJ*, **20**, (2007), 354.
- 4) M.Ataka, Y.Iino and K.Watanuki: *CAMP-ISIJ*, **20**, (2007), 356.
- 5) H.Ike: *CAMP-ISIJ*, **20**, (2007), 357.
- 6) T.Akiyama, N.Yukawa, Y.Yoshida and K.Ishikawa: *CAMP-ISIJ*, **20**, (2007), 358.
- 7) 鏑田征雄, 伊藤正登, 山本将純, 船倉康行: 第56回塑性加工連合講演会講演論文集, (2005), 505.
- 8) I.Yarita, M.Itoh, S.Shido and N.Nagase: *CAMP-ISIJ*, **19**, (2006), 405.
- 9) 鏑田征雄, 伊藤正登, 谷 修一, 志渡誠一, 長瀬直樹: 第57回塑性加工連合講演会講演論文集, (2006), 219.
- 10) I.Yarita, M.Itoh, S.Shido and N.Nagase: *CAMP-ISIJ*, **20**, (2007), 353.
- 11) 谷 修一, 鏑田征雄, 伊藤正登: 第14回機械材料・材料加工技術講演会講演論文集, (2006), 165.
- 12) I.Yarita, M.Itoh, N.Nagase and S.Shido: Proc. 3rd Int. Conf. on Tribology in Manufacturing Processes (ICTMP 2007), ed. by A.Azushima, SUBARU Planning, Yokohama, (2007), 109.