

無潤滑下の調質圧延における表面粗さ転写

長瀬 直樹*・志渡 誠一*・鏑田 征雄*²

Imprinting of Dull Roll Surface Texture to Carbon Steel Strips in Temper Rolling by Dry Condition

Naoki NAGASE, Seiichi SHIDO and Ikuo YARITA

Synopsis : One of the important qualities of cold rolled steel sheet is the surface texture, which is obtained with imprinting of a dull roll surface texture. It is controlled by real operation data and experience, because the mechanism of the surface imprinting has not been clarified. In this study, surface imprinting is investigated in temper rolling as a dry condition by the 4Hi rolling mill. Temper rolling experiments for as-annealed low carbon steel strips and as-annealed high carbon steel strips are conducted in the range of 1 to 11% in reduction. A shot dull roll and an electric-discharged dull roll were employed. Surface microstructures of temper rolled strips are observed directly, as well as surface textures in terms of mean roughness (Ra), three dimensional textures, cross section profiles, material ratio curves, and probability densities applied to compare the surface imprinting.

As a result, the rolled steel strip surfaces have been transcribed with the same texture with peaks of the roll surface. The electric-discharged dull roll shows better surface imprinting than the shot dull roll.

Key words: temper rolling; dull roll; rolling force; imprinting; surface texture; dry; non lubricant; material ratio curve; probability density.

1. 緒言

冷間圧延で製造される鋼板の表面粗さは、後工程のプレス成形性、塗装密着性および鮮映性に大きく影響する。そのため重要な品質のひとつである。表面粗さは、ロール表面形状を鋼板に表面転写して調整している。表面転写はロール表面形状、鋼種や圧延条件によって大きく影響されるが、表面転写のメカニズムは明確になっていない¹⁻⁶⁾。そのため、過去の操業データや経験を基に対応されているのが現状である。

そこで、本報告では4段コイル圧延機を用いて、無潤滑下（ドライ）で調質圧延を行い、表面転写を評価した⁷⁻¹⁴⁾。圧延前のロールにけがき線を描き、鋼板に転写された箇所

を特定し、ロールおよびその表面形状が転写された鋼板は同一箇所を観察した。鋼板の表面は様々な粗さデータで整理して、表面転写を評価した。

2. 実験方法

2・1 供試材

供試材は、0.65 wt% C、板厚 0.62 mm の高炭素鋼板焼鈍材と 0.08 wt% C、板厚 0.61 mm の低炭素鋼板焼鈍材を用いた。いずれも幅 50 mm、長さ約 250m のコイル材である。Fig. 1 に、引張速度 100 mm/min と 2 mm/min における引張試験より得られた応力-ひずみ線図を示す。引張速度 100 mm/min では、高炭素鋼板は上降伏点 454 MPa、降伏点

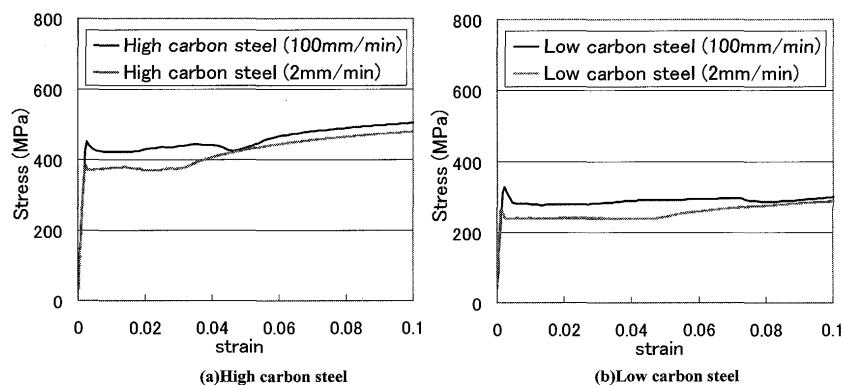


Fig. 1. True stress-true strain curves of test carbon steels.

平成 20 年 1 月 31 日受付 平成 20 年 4 月 10 日受理 (Received on Jan. 31, 2008; Accepted on Apr. 10, 2008)

* 出光興産 (株) 営業研究所 (Lubricants Research Laboratory, Idemitsu Kosan Co., Ltd., 24-4 Anesakikaigan Ichihara 299-0107)

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

Table 1. Rolling mill specifications and temper rolling conditions in laboratory mill.

Mill type		4-high
Work roll	Roll material	SUJ2
	Diameter (mm)	131~133
	Hardness Hs	Electric-discharged roll: 83 Shot dull roll: 89
	Roughness Ra (μm)	Electric-discharged roll: 2.1~2.3 Shot dull roll: 1.2~1.4
Back up roll	Roll material	SUJ2
	Diameter (mm)	200
	Hardness Hs	85
	Roughness Ra (μm)	0.25
Roll speed	① Normal (m/min)	50
	② Low (m/min)	7.5
Reduction	(%)	1~11
Tension	(MPa)	Entry 32.4, Delivery 47.1
Lubrication		Non lubricant (Dry)

427 MPa, 降伏点伸び4%である。低炭素鋼板は上降伏点328 MPa, 下降伏点320 MPa, 降伏点伸び8%である。両鋼板とも表面粗さはRaで約0.2 μm で、硬さは高炭素鋼板がHv₍₁₀₎で158, 低炭素鋼板がHv₍₁₀₎で95である。いずれも入手前にさび止め油が塗られていたので、強アルカリの脱脂液で脱脂した後、調質圧延に用いた。

2・2 調質圧延条件

Table 1に4段圧延機の仕様と調質圧延条件を示す。ワークロール径は $\phi 131\sim 133\text{ mm}$ である。表面は、放電加工あるいはショットブラストでダル仕上げを施した（以後それぞれ放電ダルロール、ショットダルロールと記す）。表面粗さはRaでそれぞれ2.1~2.3 μm と1.2~1.4 μm に調整した。4段圧延機では、圧延初期にロール表面粗さが摩耗するので、80 m圧延後のロールを表面転写の評価に用いた。バックアップロールは径が $\phi 200\text{ mm}$ で、表面粗さをRaで0.25 μm に調整した。放電ダルロール(Hs 83)は、ショットダルロール(Hs 89)やバックアップロール(Hs 85)に比べ、若干硬度が低い。張力は実機相当の入り側張力32.4 MPa, 出側張力47.1 MPaに設定した。圧延速度は50 m/minに設定した。この圧延速度は、実機のワークロール径 $\phi 550\text{ mm}$ で200 m/minの圧延速度で圧延した時と同じひずみ速度になる。これを標準条件とし、圧延速度の影響を見るため、安定に圧延出来る最小の圧延速度7.5 m/minでも実験した。

2・3 圧下率の測定

圧延前の鋼板表面に300 mm間隔で刻印を入れて圧延した。全コイル長さについて、コイル10 m毎に刻印間距離を測定した。その伸び率から圧下率を算出した。

2・4 ロールと鋼板の観察

ワークロールと鋼板の表面は、レーザー顕微鏡で直接観察し、SEMでも一部観察した。圧延前のロールにけがき線を描き、鋼板に転写された箇所を特定し、Fig. 2のように、ロールとその表面形状が転写された鋼板の同一箇所を観察した。顕微鏡画像は、0.35 mm $\times$ 0.30 mmの範囲についてステージを板面に垂直な方向（粗さ方向）へ移動させた

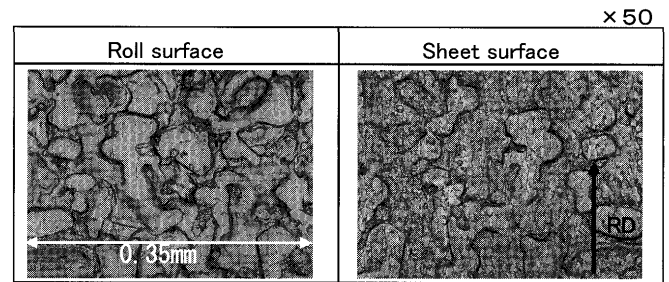


Fig. 2. Roll and sheet surfaces after temper rolling.

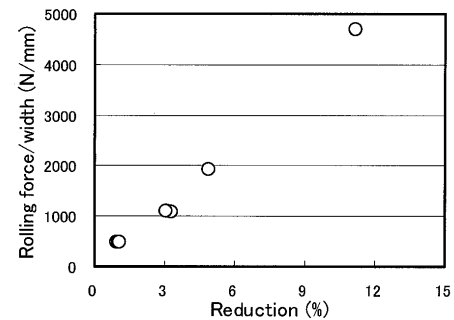


Fig. 3. The relationship between the rolling force/width and reduction (ED roll, high carbon steel sheet).

がら焦点映像を記憶し、三次元表面粗さデータに変換して用いた。得られたデータをもとに、表面転写は算術平均粗さRa, 三次元画像, 断面プロファイル, 負荷曲線および確率密度関数で整理した。負荷曲線の横軸は負荷長さ率Rmr(c)で、各粗さ高さにおける評価長さと粗さ曲線要素の比のことである。本報告では、縦軸は平均高さRcの値をゼロにして、プラス方向に最大山高さRp, マイナス方向に最大谷深さRvを示している。

2・5 転写率

転写率は次式で求めた。

$$\text{転写率} = \frac{\left(\begin{array}{l} \text{圧延後鋼板の表面粗さ Ra} \\ - \text{圧延前鋼板の表面粗さ Ra} \end{array} \right)}{\left(\begin{array}{l} \text{80 m 圧延後ロールの表面粗さ Ra} \\ - \text{圧延前鋼板の表面粗さ Ra} \end{array} \right)} \times 100 (\%)$$

3. 実験結果

3・1 表面転写に対する圧下率の影響

通常、実機の調質圧延は0.5~2%の軽圧下率で行われている。放電ダルロールを用い、高炭素鋼板に対し、圧延速度50 m/minで、圧下率1%から11%まで圧延した。Fig. 3に圧下率と圧延荷重の関係を示す。圧延荷重は圧下率の増加に比例して増大している。Fig. 4に圧下率と転写率の関係を示す。圧下率5%までは、転写率は圧下率に比例して増大し、圧下率5%でほぼ100%に到達している。更に圧下率が11%まで増加すると、転写率は圧下率に比例せず、その値も100%を超えている。次に、圧延後の鋼板表面を

観察した。Fig. 5にロール，圧延前鋼板および圧下率1~11%で圧延後鋼板の，レーザー顕微鏡画像を示す。圧下率1%では，ロール表面形状の一部が鋼板に転写されている。圧下率3%，5%では，ロール表面形状の細かいところまで鋼板に転写されている。さらに，圧下率が11%になると焼き付きが生じ，ロール表面形状とまったく異なる表面形状になっている。

次に，断面粗さプロファイルをFig. 6に示す。圧下率1%では，ロール表面形状の凸部の先端がそのままの形状で，

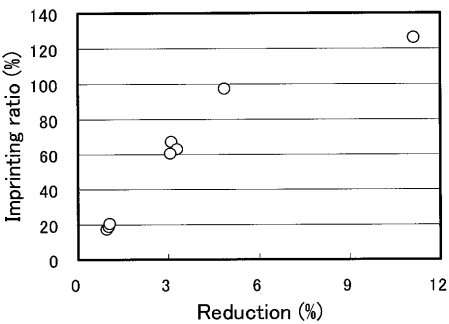


Fig. 4. The relationship between the imprinting ratio and reduction (ED roll, high carbon steel sheet).

鋼板の谷部に転写されている。圧下率3%，5%になると，凸部が鋼板の谷部により深くまで転写されている。また，鋼板の山部も形成されている。三次元粗さデータを用いた負荷曲線をFig. 7に示す。縦軸のプラス側は鋼板の山部，マイナス側は鋼板の谷部を示している。鋼板と比較し易いように，ロールの結果は上下反転し凸部がマイナス側になるように示している。まず鋼板の谷部に注目すると，圧下率1%でもロールの曲線の形に近づいている。圧下率3%，5%では，ほぼロールの曲線の形に等しくなっている。さらに圧下率11%になると，ロールの曲線の形とは異なる形状になっている。一方，鋼板の山部では，圧下率が増大するに従い，ロールの曲線の形に近づいているが，どの圧下率でも等しくなっていない。次に，負荷曲線から求めた確率密度関数をFig. 8に示す。縦軸のプラス側は鋼板の山部，マイナス側は鋼板の谷部を示している。圧下率1%では，圧延後鋼板の確率密度関数は，鋼板の谷部と山部の両方に少し偏っている。圧下率3%では，谷部側，つまりロールの凸部側に大きく偏っている。圧下率5%になると，山部側にも大きく偏っている。

圧下率5%以上では，ほぼ100%の転写率になるが，実

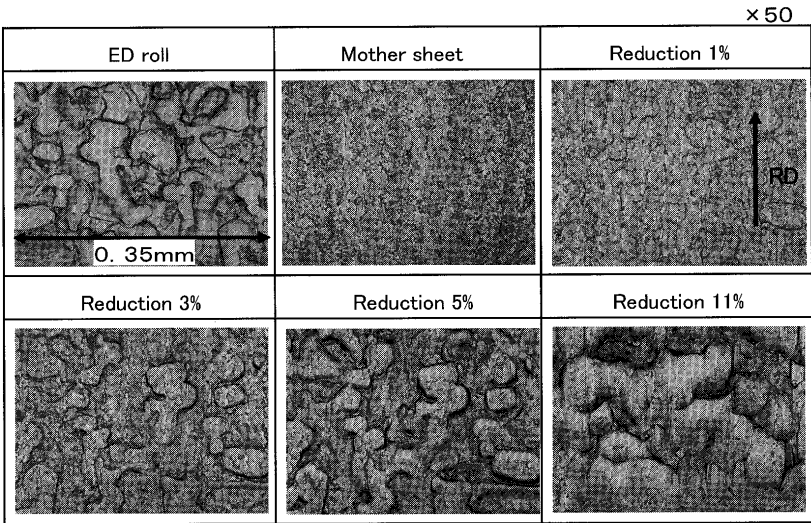


Fig. 5. Microscope images of high carbon steel sheet surfaces after temper rolling with ED roll.

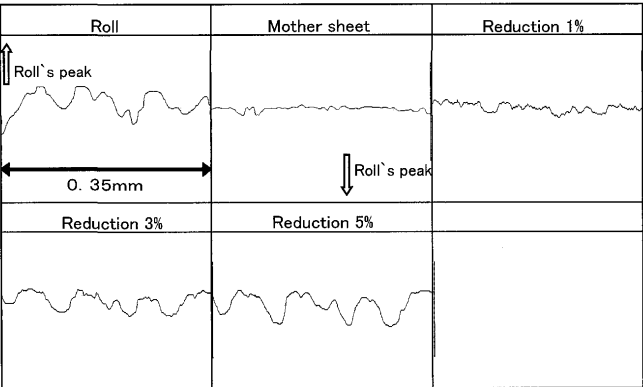


Fig. 6. Cross section profiles of high carbon steel sheet surfaces after temper rolling with ED roll.

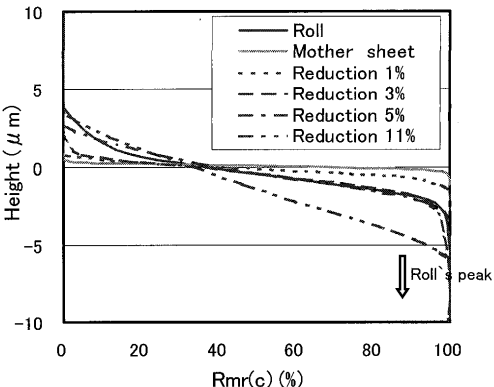


Fig. 7. Material ratio curves of high carbon steel sheet surfaces with ED roll.

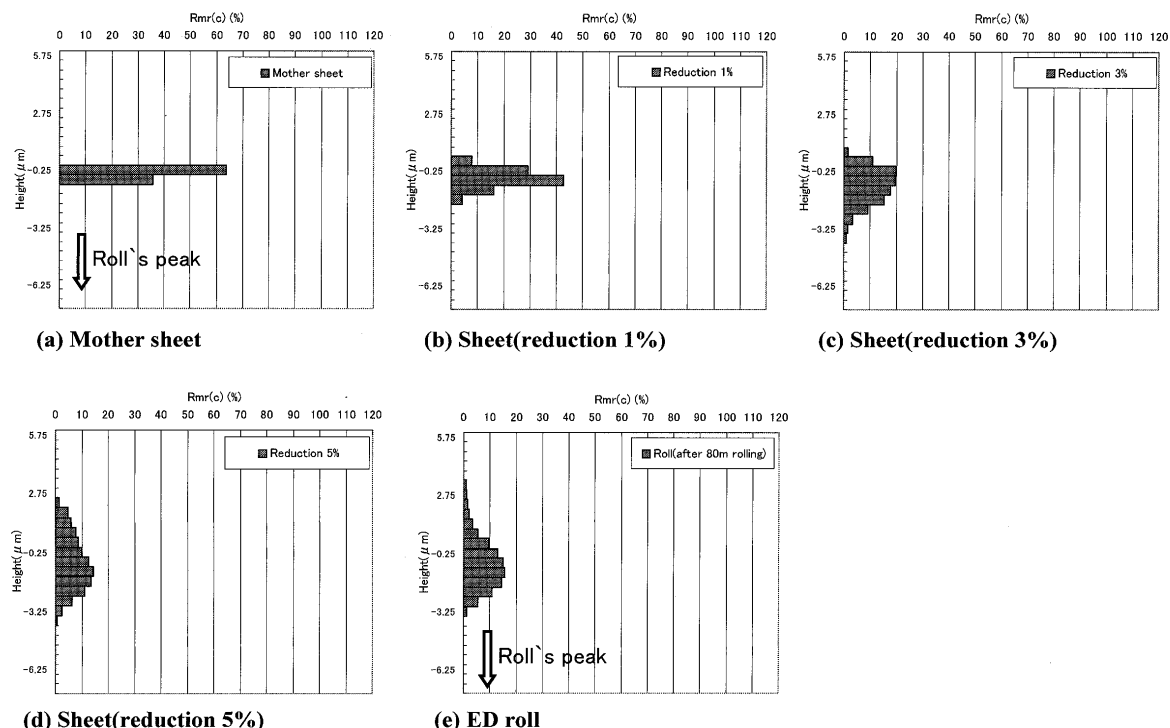


Fig. 8. Probability densities of sheet surfaces with ED roll.

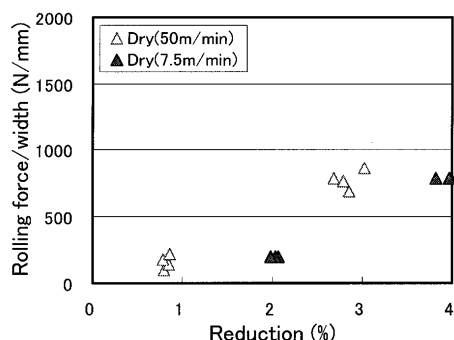


Fig. 9. Comparison of rolling speed on rolling force/width (low carbon steel sheet).

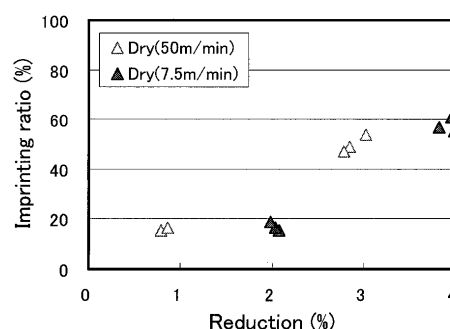


Fig. 10. Comparison of rolling speed on imprinting ratio (low carbon steel sheet).

機の圧下率とはかけ離れてしまう。そこで以下の検討では、圧下率1%と3%を目標に調質圧延し、表面転写を比較することにした。

3・2 圧延速度の影響

圧延速度の影響を評価するため、圧延速度7.5m/minで調質圧延し、50m/minの結果と比較した。ショットダルロールを用い、低炭素鋼板を圧延した。Fig. 9に圧下率と圧延荷重の関係を示す。高速圧延は低速圧延に比べ、同じ圧下率に対する圧延荷重が高い傾向を示している。Fig.10に圧下率と転写率の関係を示す。高速圧延は低速圧延にくらべ、転写率も高い傾向を示している。三次元粗さデータを用いた負荷曲線をFig.11に示す。いずれの圧延速度で圧延した鋼板も、谷部形状がロールの曲線の形に近づいている。高速圧延の方が低速圧延よりも、ロールの曲線に近づいている。

3・3 表面転写に対するロール表面形状の影響

放電ダルロールおよびショットダルロールを用い、高炭素鋼板について圧下率1%, 3%で圧延した。この時の圧下率と圧延荷重の関係をFig.12に示す。いずれのロールも、圧延荷重が圧下率とともに増大している。圧下率1%では、両者の差は認められない。圧下率3%になると、放電ダルロールはショットダルロールに比べ荷重が低くなっている。Fig.13に圧下率と転写率の関係を示す。転写率は、放電ダルロールの方がショットダルロールよりも若干高い。次に、圧下率1%, 3%で圧延した鋼板の顕微鏡画像をFig.14に示す。圧下率1%では、いずれのロールも、表面形状の一部が鋼板に転写されている。圧下率3%ではより明確に転写されている。いずれの圧下率でも、放電ダルロールで圧延した鋼板はショットダルロールの場合よりも鮮明にロール表面形状が転写されている。このことは

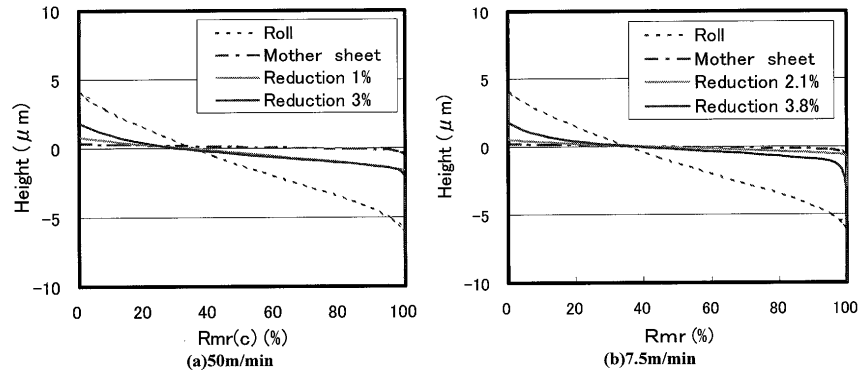


Fig. 11. Material ratio curves of low carbon steel sheet surfaces at low speed with SD roll.

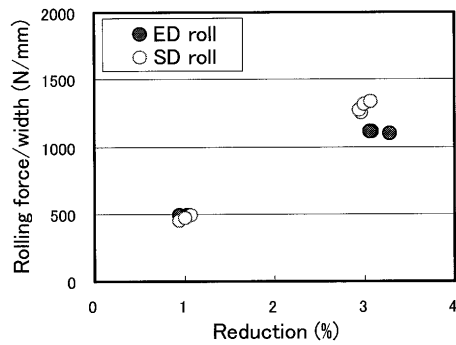


Fig. 12. Comparison of roll dull method on rolling force/width (high carbon steel sheet).

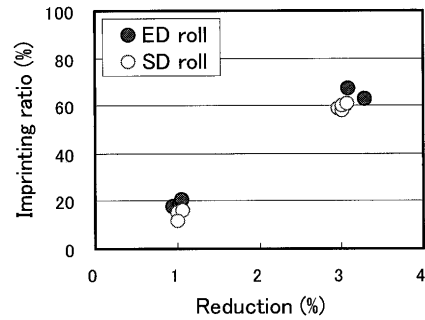


Fig. 13. Comparison of roll dull method on imprinting ratio (high carbon steel sheet).

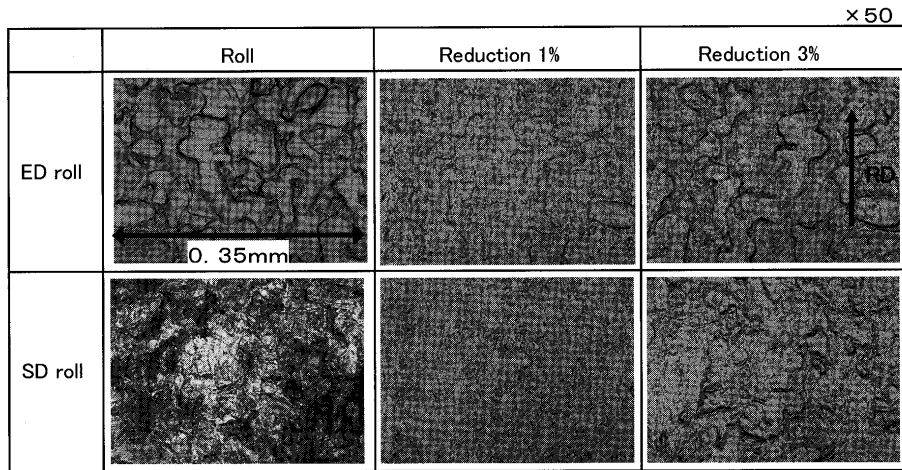


Fig. 14. Microscope images of high carbon steel sheet surfaces after temper rolling with rolls.

Fig.15のSEM画像でも確認できる。

次に、断面粗さプロファイルを Fig.16に示す。圧下率1%では、いずれのロールで圧延した鋼板も、ロール表面形状の凸部先端が鋼板に転写され谷部を形成している。圧下率3%では、凸部が鋼板の谷部に、より深くまで転写されている。Fig.17に三次元表面粗さデータを用いた負荷曲線を示す。圧下率1%では、いずれのロールで圧延した鋼板も、谷部形状がロールの曲線の形に近づいている。圧下率が3%になると、放電ダルロールで圧延した鋼板の谷部は、ロールの曲線の形とほぼ等しくなっている。一方、

ショットダルロールの場合は、圧下率が3%に増加してもロールの曲線の形に近づいていない。鋼板の山部でも、放電ダルロールの場合は、ショットダルロールの場合にくらべロールの曲線の形に近づいている。

3・4 表面転写に対する鋼種の影響

放電ダルロールを用い、高炭素鋼板および低炭素鋼板を圧延時の、圧下率と圧延荷重の関係を Fig.18に示す。いずれの鋼板も、圧下率とともに圧延荷重が増大している。Fig.19に圧下率と転写率の関係を示す。高炭素鋼板は低炭素鋼板にくらべ圧下率1%での転写率が若干低く、圧下率

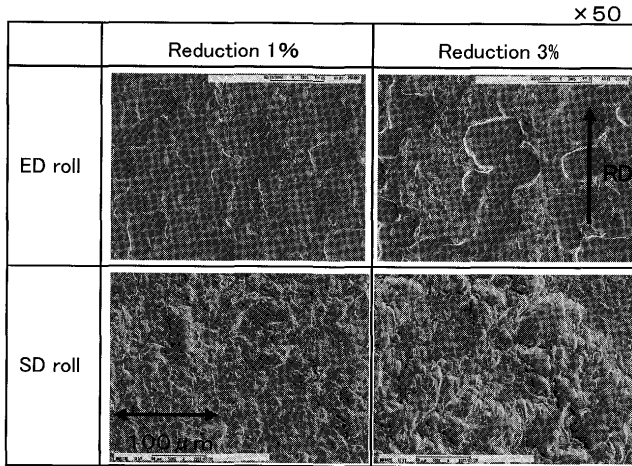


Fig. 15. SEM images of high carbon steel sheet surfaces after temper rolling.

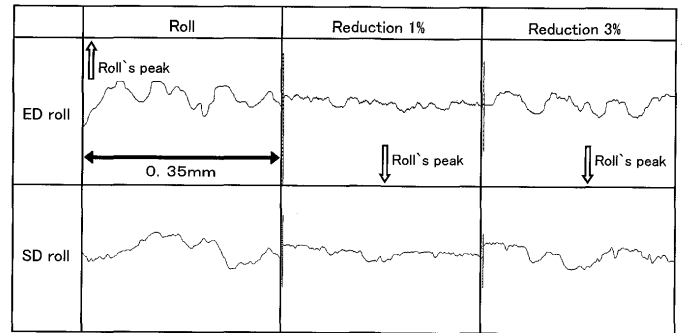


Fig. 16. Cross section profiles of high carbon steel sheet surfaces after temper rolling with rolls.

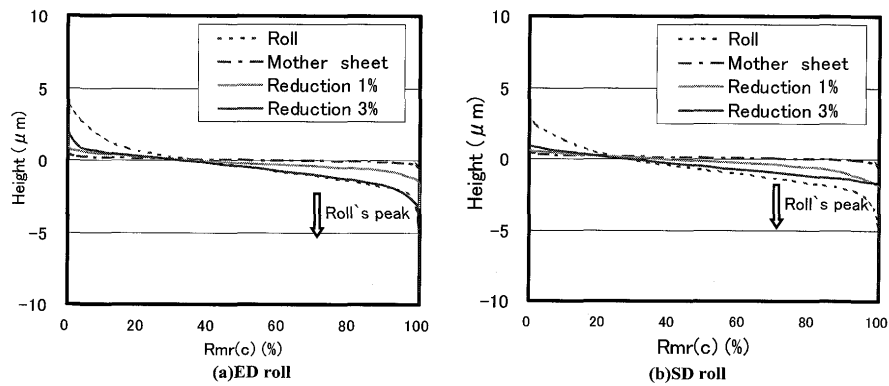


Fig. 17. Material ratio curves of high carbon steel sheet surfaces with rolls.

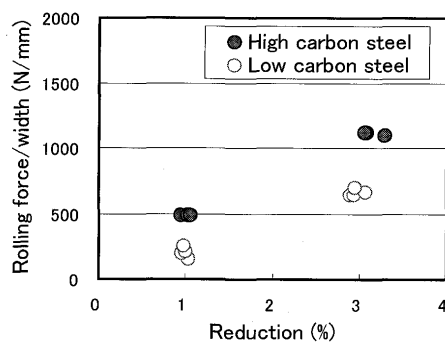


Fig. 18. Comparison of roll dull method on rolling force/width (low carbon steel sheet).

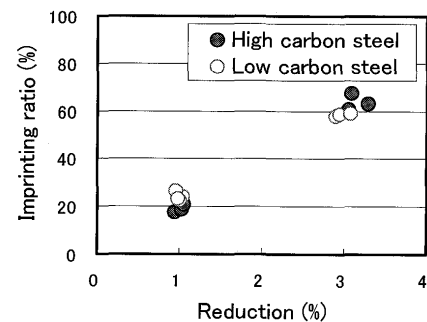


Fig. 19. Comparison of roll dull method on imprinting ratio (low carbon steel sheet).

3%での転写率は若干高い。Fig.20の負荷曲線をみると、高炭素鋼板は低炭素鋼板よりも、谷部がロールの曲線に近づいている。

4. 考察

4・1 圧下率の影響

Fig. 7の負荷曲線から、ロールから鋼板への表面転写は、以下のように行われると考える。ロール表面形状の凸部が鋼板に押し込まれて、鋼板に谷部が形成される。谷部の形

状は凸部にほぼ等しくなる。圧下率が高くなると、より深い谷部が形成される。それと同時に鋼板表面がロール表面粗さ形状の凹部に流動して充満し、鋼板の山部が形成されていく。圧下率が高くなると材料の流動も多くなり、鋼板山部も高くなる。

ただし、圧下率が11%まで高くなると、鋼板表面は、ロール表面とはまったく無関係な形状になる。転写率もロール表面粗さを越えてしまう。この時の鋼板表面には。せん断による変形や焼き付きと思われる部分も見られ、もはや表面転写ではなくなる。

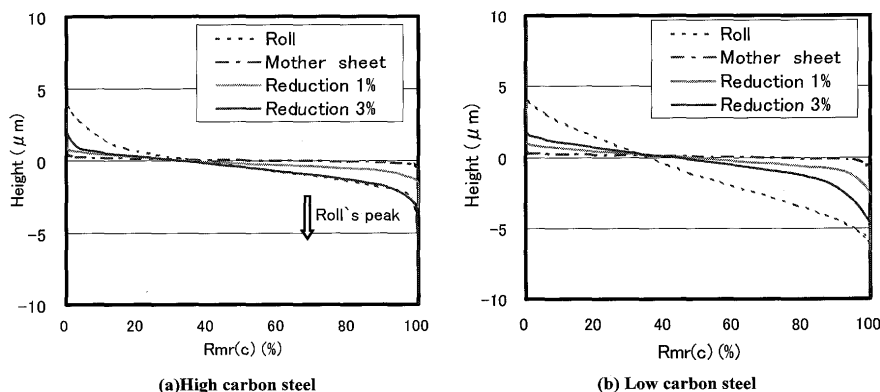


Fig. 20. Material ratio curves of low carbon steel sheet surfaces with rolls.

4・2 圧延速度の影響

高速圧延は低速圧延にくらべ転写率が高い。Fig.11の負荷曲線を見ると、高速圧延では低速圧延にくらべ、ロールの曲線の形に近づいている。このことから、ロール表面形状の凸部が鋼板の谷部に押し込まれ易く、転写され易いことが確認できる。

4・3 ロール表面形状の影響

放電ダルロールで圧延した鋼板は、ショットダルロールの場合よりも転写率が若干高い。ロール表面形状の違いが転写に影響していると考えられる。Fig.15の負荷曲線を見ると、放電ダルロールはショットダルロールにくらべ、表面形状の凸部が鋼板の谷部に転写され易いことが確認できる。

4・4 鋼種の影響

高炭素鋼板は低炭素鋼板にくらべ、転写され易いと考えられる。Raから求める転写率では、その違いが認められないが、Fig.20の負荷曲線を見ると高炭素鋼板の谷部は低炭素鋼板よりも、転写に優れることが明確に確認できる。高炭素鋼板が低炭素鋼板よりも転写され易い理由については、弾塑性有限要素法で解析して後報する。

5. 結言

本報告では、4段コイル圧延機を用いて、無潤滑下（ドライ）で調質圧延を行った。ロールは放電ダルロールとショットダルロールを用い、鋼板は高炭素鋼板焼鈍材と低炭素鋼板焼鈍材を用いて、表面転写を評価した。その結果、以下の結論を得た。

(1) 表面転写は、圧下率1%でも、ロール表面形状の凸部先端がほぼそのままの形状で鋼板の谷部に転写され

る。同時に鋼板表面が凹部に流動して鋼板の山部が形成される。圧下率が増大すると、より深くまで谷部に転写され、山部も高くなっていく。圧下率が11%まで高くなると、鋼板表面には焼付きが発生して、ロール表面形状とは無関係になる。

(2) 高速圧延は低速圧延にくらべ、同じ圧下率での転写に優れる。

(3) 放電ダルロールで圧延した鋼板は、ショットダルロールの場合にくらべ、同じ圧下率での転写に優れる。

(4) 高炭素鋼板は低炭素鋼板にくらべ、同じ圧下率での転写に優れる。

(5) 負荷曲線と確率密度関数は、表面粗さ転写を詳細に評価できることがわかった。

本報告の遂行にあたり、実験材料の提供および助言を頂いた生産部門冷延部会に対し、深く感謝の意を表する。

文 献

- 1) I.Aoki: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **20** (1979), 1121.
- 2) Y.Kimura, M.Ueno and Y.Sodani: *CAMP-ISIJ*, **18** (2005), 1214.
- 3) H.Hasimoto: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **20** (1979), 1121.
- 4) M.Yamasita: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **36** (1995), 1116.
- 5) G.Kawaguchi, S.Muto, A.Torao and H.Uchida: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 1341.
- 6) 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.
- 7) N.Nagase, S.Shido and I.Yarita: *CAMP-ISIJ*, **17** (2004), 1015.
- 8) N.Nagase, S.Shido and I.Yarita: *CAMP-ISIJ*, **18** (2005), 425.
- 9) N.Nagase, S.Shido and I.Yarita: *CAMP-ISIJ*, **18** (2005), 1217.
- 10) 長瀬直樹, 志渡誠一, 鏑田征雄: 第36回塑性加工春季講演会論文集, (2005), 223.
- 11) 長瀬直樹, 志渡誠一, 鏑田征雄: トライボロジー会議2005秋予稿集, (2005), 283.
- 12) N.Nagase, S.Shido and I.Yarita: *CAMP-ISIJ*, **19** (2006), 404.
- 13) N.Nagase, S.Shido and I.Yarita: *CAMP-ISIJ*, **19** (2006), 985.
- 14) N.Nagase, S.Shido and I.Yarita: *CAMP-ISIJ*, **20** (2007), 63.