

弾塑性有限要素法による圧印加工時の表面転写解析

長瀬 直樹*・鏑田 征雄*²

Analysis of Surface Imprinting in Sheet Coining by Elastic-Plastic Finite Element Method

Naoki NAGASE and Ikuo YARITA

Synopsis : The surface roughness of cold rolled steel sheet is an important quality because it affects the press formability and image clarity after coating of steel sheet. The surface roughness is obtained by imprinting a roll surface onto a steel sheet surface in temper rolling process with or without lubricant. In the recent paper, we demonstrated that the surface imprinting is greatly affected by dull-finishing methods and lubricants using laboratory scale 4-high rolling mills. Various numerical analyses of surface imprinting have been performed, however imprinting mechanism has not been clarified. Because the roll surface textures depend on roll surface finishing methods and the deformation behaviors of rolled material are complicated.

In this paper, sheet coining analysis by three dimensional elastic-plastic finite element method have been conducted to clarify the effects of roll surface texture and lubrication state on surface imprinting. Then, the results are compared with those obtained by temper rolling experiments, as follows: The tool of modeling the electric-discharged dull roll results in a better surface imprinting than the tool of modeling the shot dull roll. A small friction coefficient between the tool and the steel are results in better surface imprinting. This indicate that agree with the soluble lubricant with small friction coefficient is better surface imprinting than dry condition in the rolling experiment. Those results from the 3D FEM analysis agree with those obtain in the rolling experiment.

Key words : elastic-plastic finite element method; sheet coining; surface imprinting; dull roll; friction coefficient; temper rolling.

1. 緒言

冷延鋼板の表面粗さは、鋼板のプレス成形性、塗装鮮鋭性等に影響する重要な品質である。表面粗さは、調質圧延工程において、ロール表面形状を鋼板に表面転写して調整されている。筆者らはコイル圧延実験を行い、ロール表面形状および潤滑条件が表面転写に大きな影響を与えることを確認してきた¹⁻⁴⁾。表面転写については、様々な理論的、数値的な解析も行われてきたが⁵⁻¹³⁾、いまだに不明な点が多い。その理由として、調質圧延は複雑な変形状態であるため、表面転写を予測し難いことなどが挙げられる。

そこで本報では、ダルロールの表面形状を模した粗さモデルを有する工具を作成し、圧印加工時の表面転写に対する工具表面形状の影響および摩擦係数の影響を3次元弾塑性有限要素法で解析した。その結果を調質圧延結果と比較した。

2. 有限要素法解析

2.1 解析条件

2.1.1 ロール表面形状のモデル化

既報¹⁻⁴⁾で、ショットダルロール(SD)および放電ダル

ロール(ED)を用いた調質圧延における表面転写を報告している。このとき調質圧延に用いたショットダルロールおよび放電ダルロールの表面粗さは、Raでそれぞれ $1.2\mu\text{m}$ と $1.5\mu\text{m}$ である。両ロール表面のレーザー顕微鏡による三次元観察画像をFig. 1に示す。ショットダルロールの表面は、放電ダルロール表面にくらべ突起の数が少ない。粗さ曲線要素の平均長さRsmは、ショットダルロールが $67.2\mu\text{m}$ 、放電ダルロールが $42.8\mu\text{m}$ であり、PPI(1インチあたりのピーク数)がそれぞれ378個と593個である。つぎに負荷曲線をFig. 2に示す。ロール表面形状の山部をマイナス側に反転して示している。Fig. 2のRdcはJISB0601:2001に定義される切断レベル差のことで、最大山高さRpを100%、最大谷深さRvを0%としたときのRvからの高さ比を示す。Rmrは、JISB0601:2001に定義される相対負荷長さ率のことで、各切断レベルにおける、評価長さに対する粗さ曲線要素の長さの比を示す。

ショットダルロールは、放電ダルロールにくらべ山部の負荷長さ率が大きく、谷部の負荷長さ率が小さい。

これら両ロールの表面形状をモデル化した工具を作成した。作成した工具は、Fig. 3(a)に示すように $180\mu\text{m} \times 180\mu\text{m}$ の平面上に粗さモデルが密に配列するものである。Fig. 3(b)の粗さモデル1はショットダルロールの表面形状

平成20年6月27日受付 平成20年9月2日受理 (Received on June 27, 2008; Accepted on Sep. 2, 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 Chiba Institute Technology)

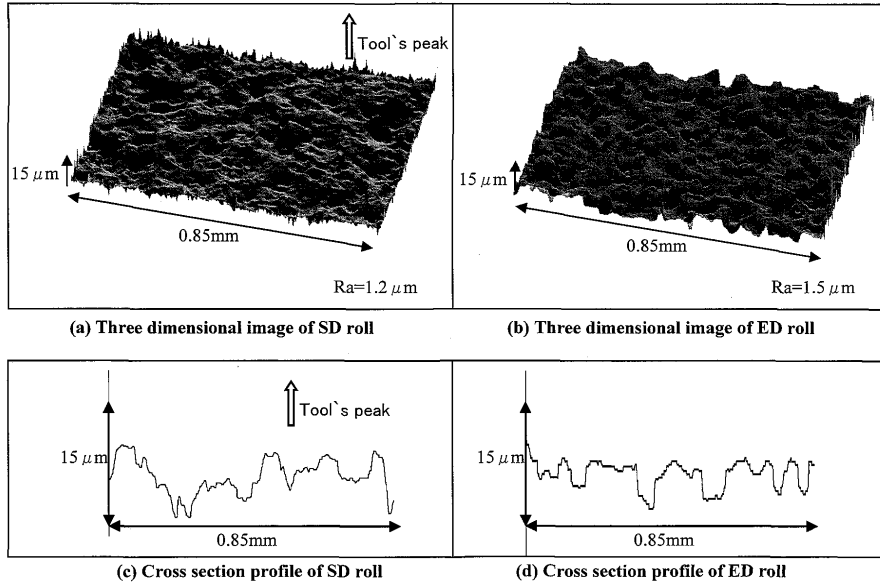


Fig. 1. Surface profiles of SD roll and ED roll.

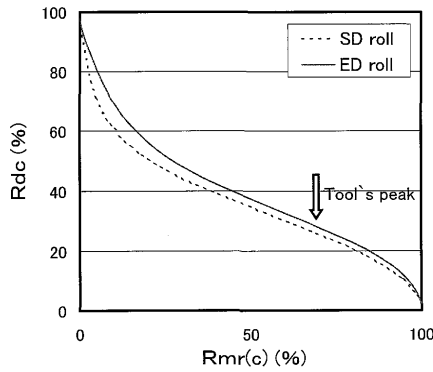
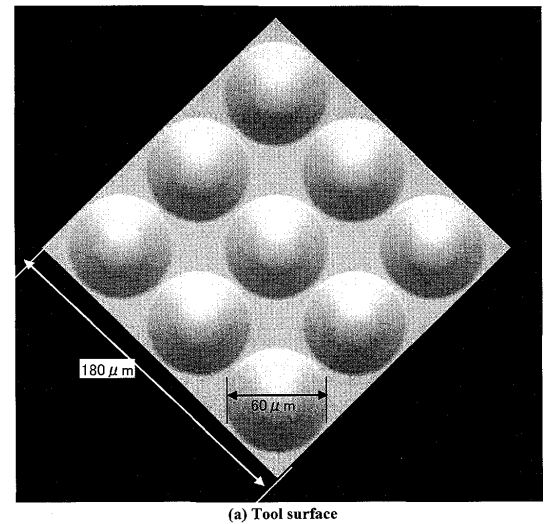


Fig. 2. Material ratio curves of the surface of SD roll and ED roll.

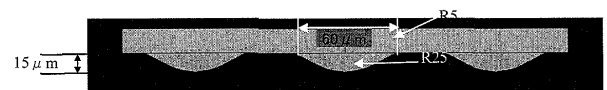
を模したもので、直径 $\phi 60\ \mu\text{m}$ 、高さ $15\ \mu\text{m}$ の円錐（頂点 $R25\ \mu\text{m}$ 及び底辺 $R5\ \mu\text{m}$ ）を配列している。Fig. 3(c)の粗さモデル2は放電ダルロールの表面形状を模しており、直径 $\phi 36\ \mu\text{m}$ 、高さ $15\ \mu\text{m}$ の円錐（頂点 $R5\ \mu\text{m}$ 及び底辺 $R5\ \mu\text{m}$ ）を配列したものである。またFig. 3(d)の粗さモデル3は、粗さモデル1の直径と粗さモデル2の山部Rを有する形状を配列している。粗さモデル1は、山部が緩やかな鈍い形状を有している。粗さモデル2と粗さモデル3は、山部が鋭い形状を有する。これら粗さモデルを配列した工具表面粗さの負荷曲線をFig. 4に示す。粗さモデル1および粗さモデル2を有する工具の表面は、それぞれショットダルロールおよび放電ダルロールの表面形状の特徴が拡大された形状になっている。

2・1・2 摩擦係数の設定

既報¹⁴⁾の調質圧延では、摩擦係数の小さい水系調質圧延液を用いた圧延は、ドライ圧延に比べ表面転写に優れていた。調質圧延で用いた水系調質圧延液は、脂肪酸のアルカノールアミン塩1%をイオン交換水に溶解させたもので、 40°C の動粘度が $0.690\ \text{mm}^2/\text{s}$ の液である。水系調質圧



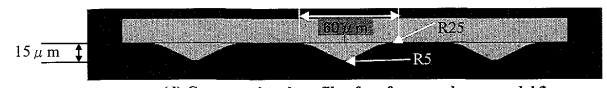
(a) Tool surface



(b) Cross-sectional profile of surface roughness model 1



(c) Cross-sectional profile of surface roughness model 2



(d) Cross-sectional profile of surface roughness model 3

Fig. 3. The surface profiles of tools in FEM analysis.

延液は、成分の99%がイオン交換水であることから、高圧粘性が非常に低い。摺動摩擦試験によるドライと水系調質圧延液の摩擦係数はそれぞれ0.479と0.162であり¹⁾、有限要素法解析ではドライ圧延および水系調質圧延液の摩擦係数をそれぞれ0.5、0.1と与えた。

2.1.3 解析条件

有限要素法による解析では、「3D-DEFORM」を用いて、Lagrangian陰解法で計算した。ダルロールの表面は、作成した粗さモデルを有する工具に置き換え剛体とした。鋼板は弾塑性体で $180\mu\text{m}\times 180\mu\text{m}\times 180\mu\text{m}$ の立方体とし、積分点を1個有する四面体で10万メッシュに分割した。ヤング率は206 GPa、ポアソン比は0.3を与え、調質圧延で用いた高炭素鋼板焼なまし材の応力とひずみの関係(Fig. 5)を用いた。鋼板の表面転写は、工具の頂点を鋼板に対面させた状態で圧印して得た。ロールと鋼板の摩擦境界条件は、クーロン摩擦則を採用し、ドライ圧延および水系調質圧延液の摩擦係数をそれぞれ0.5と0.1として計算した。工具と

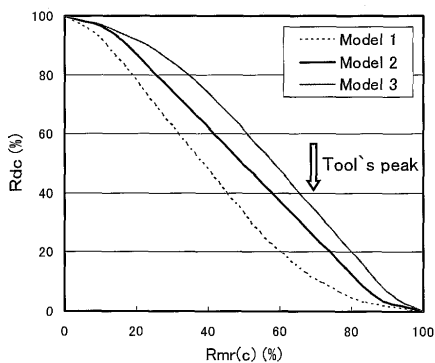


Fig. 4. Material ratio curves of the tool's surface.

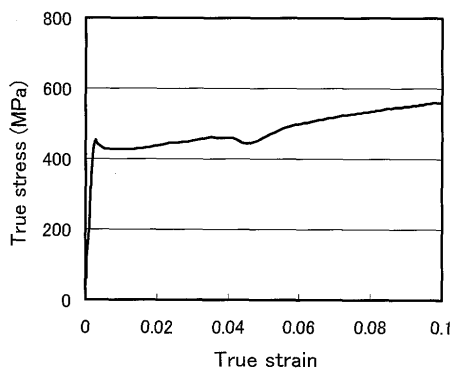


Fig. 5. Stress strain curve of high carbon steel sheet.

鋼板間には油膜圧力を生成するような物質が何も存在しないものとした。

2.2 解析結果

2.2.1 変形中のひずみ状態

粗さモデル1の工具を用い、摩擦係数0.1の条件で圧下率1%および3%まで圧印したときの、鋼板に生じた相当塑性ひずみ分布をFig. 6に示す。いずれの圧下率でも、工具の山部が鋼板に押し込まれて、鋼板表面に谷部を形成している。工具の山部と接触する鋼板の谷部で相当塑性ひずみが最大となり、圧下率1%および3%の最大ひずみはそれぞれ $\bar{\epsilon}_{\max}^p=0.361$ と $\bar{\epsilon}_{\max}^p=0.605$ である。圧下率の増加に伴って広い範囲で相当塑性ひずみが大きくなっている。

2.2.2 工具表面形状の影響

粗さモデル1~3の工具を用い、摩擦係数0.1の条件で圧下率1%まで圧印したときの鋼板の相当塑性ひずみ分布をFig. 7に示す。放電ダルロールを模した粗さモデル2の工具を用いた場合は、ショットダルロールを模した粗さモデル1の工具にくらべ鋼板の相当塑性ひずみ大きい。粗さモデル2と粗さモデル1による鋼板の最大ひずみはそれぞれ $\bar{\epsilon}_{\max}^p=2.86$ と $\bar{\epsilon}_{\max}^p=0.437$ である。粗さモデル3も $\bar{\epsilon}_{\max}^p=3.91$ と粗さモデル1にくらべ鋼板の相当塑性ひずみ大きい。次に、鋼板表面粗さの負荷曲線をFig. 8に示す。図中の点線は鋼板表面と比較するため、工具の山部をマイナス側に反転して示したものである。負荷曲線の高さは鋼板表面の最大高さ粗さRzに相当する。粗さモデル1の工具による鋼板表面のRzは、圧下率1%と2%でそれぞれ $5.5\mu\text{m}$ および $8.0\mu\text{m}$ である。粗さモデル2の工具による鋼板表面のRzは圧下率1%と2%でそれぞれ $7.2\mu\text{m}$ および $9.2\mu\text{m}$ である。いずれの圧下率でもRzは、粗さモデル2の方が高いことがわかる。また、粗さモデル3の工具による鋼板表面のRzは、圧下率1%と2%でそれぞれ $7.1\mu\text{m}$ および $9.5\mu\text{m}$ である。粗さモデル3は粗さモデル2と同様に粗さモデル1にくらべRzが高い。

2.2.3 摩擦係数の影響

圧下率3%、摩擦係数0.1と0.5の条件で粗さモデル1の

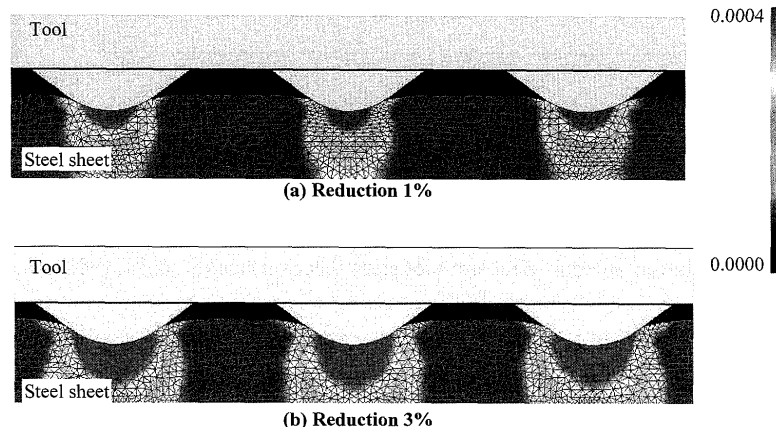


Fig. 6. Distribution of equivalent strain of steel sheet after calculation ($\mu 0.1$).

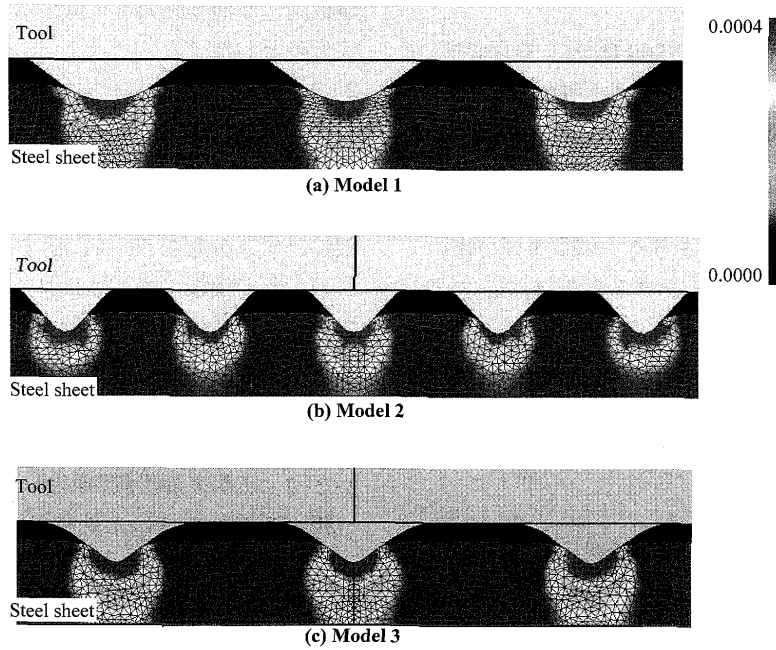


Fig. 7. Distribution of equivalent strain of the steel sheet surface (reduction 1%, $\mu 0.1$).

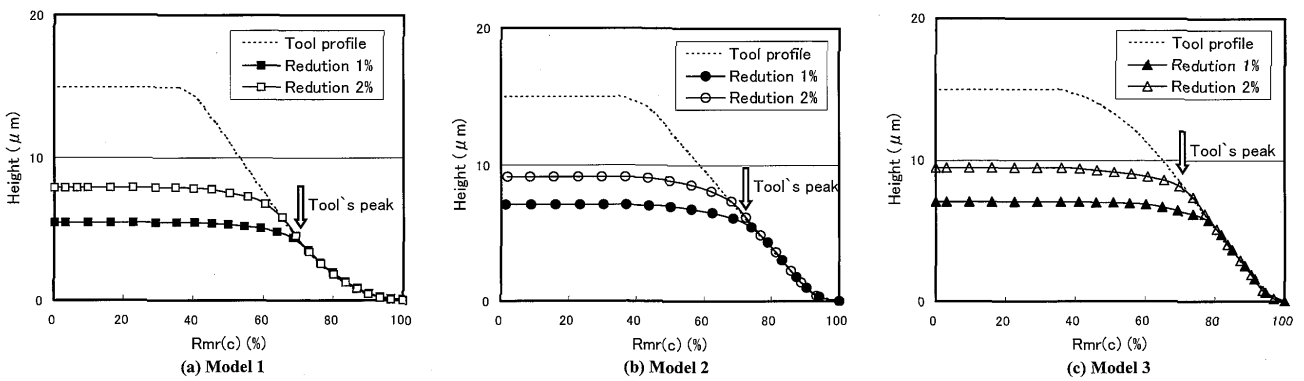


Fig. 8. Material ratio curves of tools and steel sheets surface roughness ($\mu 0.1$).

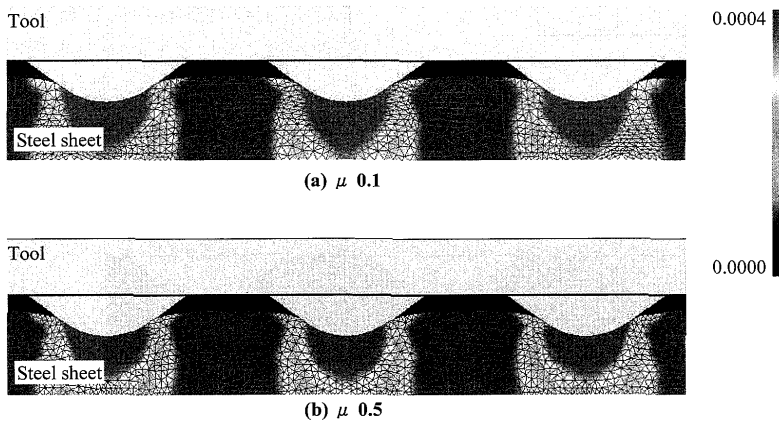


Fig. 9. Distribution of equivalent strain of steel sheet surface (model 1, reduction 3%).

工具を圧印したときの、鋼板の相当塑性ひずみ分布を Fig. 9 に示す。摩擦係数 0.1 および摩擦係数 0.5 の条件での鋼板表面の最大ひずみは、それぞれ $\epsilon_{max}^p = 0.605$ と $\epsilon_{max}^p = 0.487$ である。摩擦係数 0.1 の場合は、摩擦係数 0.5 にくらべ広い範囲

で鋼板表面の相当塑性ひずみが多い。次に鋼板表面粗さの負荷曲線を Fig. 10 に示す。摩擦係数 0.5 での鋼板表面の Rz は、圧下率 1% と 3% でそれぞれ $5.0 \mu m$ および $8.2 \mu m$ である。また摩擦係数 0.1 での鋼板表面の Rz は、圧下率 1%

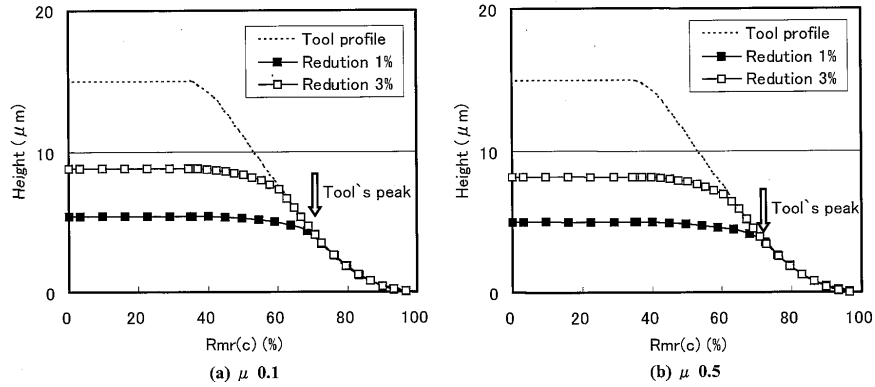


Fig. 10. Material ratio curves of tools and steel sheets surface roughness (Model 1).

と3%でそれぞれ5.5 μmおよび8.8 μmである。摩擦係数の小さい方が表面転写に優れる。

3. 圧延実験結果との比較

3.1 ロール表面形状

本節では、表面粗さの転写について、有限要素法による圧印解析結果と既報の調質圧延実験結果を比較した。既報の調質圧延実験では、負荷曲線および式(1)で算出される転写率により表面転写を評価してきた¹⁻⁴⁾。そこで、圧印による表面転写についても、式(2)を用い転写率を算出した。式(2)では圧印前の鋼板表面粗さがないものとしている。

$$\text{転写率} = \frac{\left(\begin{array}{l} \text{圧延後鋼板の表面粗さ Ra} \\ - \text{圧延前鋼板の表面粗さ Ra} \end{array} \right)}{\left(\begin{array}{l} \text{80m圧延後ロールの表面粗さ Ra} \\ - \text{圧延前鋼板の表面粗さ Ra} \end{array} \right)} \times 100(\%) \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{転写率} = \frac{\text{圧印後鋼板の表面粗さ Ra}}{\text{工具の表面粗さ Ra}} \times 100(\%) \dots\dots\dots (2)$$

有限要素法により得られた転写率を圧延実験から得られた転写率と比較してFig.11に示す。摩擦係数0.1の条件で、ショットダルロールを模した粗さモデル1の工具による転写率は、圧下率1%、2%でそれぞれ36.8%、55.7%である。これに対し、放電ダルロールを模した粗さモデル2の工具による転写率は、圧下率1%、2%でそれぞれ48.5%と64.3%であり、ショットダルロールを模した粗さモデル1の工具よりも高い。このことから、放電ダルロールは、ショットダルロールにくらべ表面転写に優れると示唆される。

一方、水系調質圧延液を用いた調質圧延実験による鋼板の転写率をみると、ショットダルロールの場合では、圧下率1%、3%でそれぞれ12~16%と58~61%であるのに対し、放電ダルロールの場合ではそれぞれ18~21%と61~67%で

Table 1. Rolling conditions.

Mill type		4-high
Work roll	Material	SUJ2
	Diameter (mm)	131~133
	Hardness Hs	ED roll; 83 SD roll; 89
	Ra (μm)	ED roll; 1.5~1.6 SD roll; 1.2~1.3
Back up roll	Material	SUJ2
	Diameter (mm)	200
	Hardness Hs	85
	Ra (μm)	0.25
Roll speed	(m/min)	50
Reduction	(%)	1~4
Tension	(MPa)	Entry; 32.4
		Delivery; 47.1
Lubricant temperature	(°C)	35

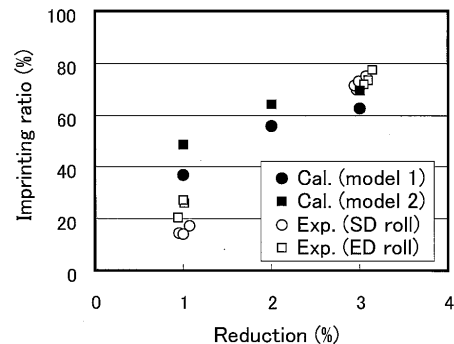


Fig. 11. Comparison of imprinting ratio between cal. results and exp. results (μ0.1, Soluble lubricant).

ある¹⁾。放電ダルロールを用いた場合は、ショットダルロールの場合にくらべ転写率が高い。この結果は、有限要素法による解析結果と同じ傾向である。

3.2 摩擦係数

潤滑条件を変えたときの有限要素法および圧延実験の転写率をFig.12に示す。まず有限要素法の結果では、摩擦係数0.5の条件で粗さモデル1の工具を圧印したときの転写率は、圧下率1%、3%でそれぞれ33.0%および58.3%である。それに対して、摩擦係数0.1の転写率は、圧下率1%、3%でそれぞれ36.8%および62.5%であり、摩擦係数0.5に

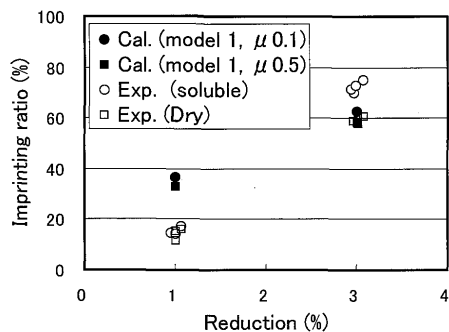


Fig. 12. Comparison of imprinting ratio between cal. results and exp. results (model 1, SD roll).

くらべ高い。

次に、ドライと水系調質圧延液の2潤滑条件に関して、放電ダルロールを用いて圧延時の転写率を比較する。摩擦係数の小さい水系調質圧延液を用いた圧延後の鋼板は、ドライ圧延に比べ転写率が高い。水系調質圧延液の転写率は圧下率1%と3%でそれぞれ20~27%と72~77%である。一方、ドライの転写率はそれぞれ18~21%と61~67%である¹⁾。この結果は、有限要素法による解析結果および湯川らのゾーミング法による解析結果と同じ傾向である^{14,15)}。

本解析では、調質圧延油剤の油膜の影響を考慮していないが、本報で用いた水系調質圧延液のように高圧粘性の低い油剤であれば、摩擦係数の小さい方が表面転写に優れると考えられる。今後は油膜を考慮した解析が必要と考えられる。

5. 結言

本報では、ショットダルロールおよび放電ダルロールの

表面形状を模した粗さモデルを有する工具を作成し、圧印加工時の鋼板への表面転写に対する工具表面形状の影響および摩擦係数の影響を、弾塑性有限要素法で解析した。その結果を調質圧延による表面転写と比較した。

(1) 放電ダルロールを模した表面形状を有する工具は、ショットダルロールを模した表面形状を有する工具に比べ表面転写に優れる。

(2) 工具と材料間の摩擦係数は、小さい方が表面転写に優れる。この結果は、摩擦係数の小さい水系調質圧延液の方が表面転写に優れていることを示している。

(3) 三次元弾塑性有限要素法を用いた圧印解析による表面転写は、調質圧延実験の結果と一致する傾向が得られた。

文 献

- 1) N.Nagase, S.Shido and I.Yarita: *CAMP-ISIJ*, **18** (2005), 1217.
- 2) N.Nagase, S.Shido and I.Yarita: *CAMP-ISIJ*, **19** (2006), 404.
- 3) N.Nagase, S.Shido and I.Yarita: *CAMP-ISIJ*, **19** (2006), 985.
- 4) N.Nagase, S.Shido and I.Yarita: *CAMP-ISIJ*, **20** (2007), 63.
- 5) O.Deutscher: *Iron Steel Eng.*, **74** (1997), 35.
- 6) N.Bay and T.Wanheim: *Wear*, **38** (1976), 225.
- 7) J.Simao, D.K.Aspinwall, M.L.H.Wise and K.Subari: *J. Mater. Process. Technol.*, **56** (1996), 177.
- 8) H.Kijima and N.Bay: *J. Mater. Process. Technol.*, **177** (2006), 509.
- 9) T.Akiyama, N.Yukawa, Y.Yoshida and T.Ishikawa: *CAMP-ISIJ*, **19** (2006), 986.
- 10) N.Yukawa, Y.Yoshida and T.Ishikawa: *CAMP-ISIJ*, **18** (2005), 1222.
- 11) H.Ike and A.Makinouchi: *Wear*, **1408** (1990), 17.
- 12) M.P.F.Sutcliffe: *Int. J. Mech. Sci.*, **30** (1988), 847.
- 13) J.Shi, D.L.S.Mcelwain and S.A.Domanti: *J. Mater. Process. Technol.*, **124** (2002), 227.
- 14) H.Ike: *CAMP-ISIJ*, **20** (2007), 357.
- 15) N.Yukawa, T.Akiyama, Y.Yoshida and T.Ishikawa: *CAMP-ISIJ*, **21** (2008), 101.