



調質圧延におけるズーミング法を用いた 表面粗さの転写解析

湯川 伸樹*・秋山 友彦*²・吉田 佳典*・石川 孝司*

Analysis of Surface Roughness Transcription in Skin-pass Rolling Using Zooming Method

Nobuki YUKAWA, Tomohiko AKIYAMA, Yoshinori YOSHIDA and Takashi ISHIKAWA

Synopsis : It is known that the transcription ratio of roughness in skinpass rolling is varied with various rolling conditions, but the relation between rolling conditions and the conditions of surface roughness of rolled strip is not well known yet. In this paper, zooming method is adopted to a rigid plastic finite element analysis, and applied to dry skin-pass rolling processes of steel to investigate the deformation behavior of the surface of strip. The profile of roll surface shape is modeled from measured profile of electrical discharge machined dull roll (ED model, $Ra=2.7$ mm) and shot dull roll (SD model, $Ra=3.6$ mm). Although the reduction of total thickness is small, it is found that the equivalent strain near the surface of strip is considerably large because of the microscopic deformation caused by transcription of the surface roughness. When the reduction is small, the surface roughness transcription ratio with ED model is larger than that with SD model. The transcription ratio increases as the reduction increase, and become almost 100% when the reduction become 6% for ED model, and 10% for SD model. The transcription ratio slightly decreases when the reduction exceeds the peak reduction because of the relative slip between the strip and the roll. The strip materials seem to have little effect on the transcription ratio. The transcription ratio becomes slightly large when the diameter of roll increases.

Key words : skinpass rolling; surface roughness; transcription ratio; finite element method; zooming method.

1. 緒言

薄鋼板の表面粗さは、塗装した場合の鮮映性やプレス成形時の潤滑状態に大きく影響するため、重要な品質の一つである。その表面粗さの制御は、主に鋼板製造工程の最後にある調質圧延においてロール表面のミクロな凹凸を板材へ転写することによって行われている。ロール表面粗さの板表面への転写率はロール、圧延の条件、あるいは潤滑油の特性などにより変化する¹⁾ため、転写挙動を詳しく調べることは重要である。種々の圧延条件とロール表面粗さの転写状態との関係を実験的に調べた研究²⁻⁴⁾はいくつかあるが未だ不明確な点が多く、理論的な研究が望まれている。しかし粗さ転写挙動についての解析的なアプローチの研究もほとんど行われておらず、そのため生産現場においては過去の経験に頼って対処しているのが現状である。

このような目的に、有限要素法をはじめとするシミュレーション技術は有用であるが、粗さ転写の解析は板の大きさに比べ極めて微小な表面付近の領域の変形を解析しなければならない。すなわち材料表面付近はミクロレベルの凹凸に対応できるように要素の大きさが数 μm という非常に細かい要素分割を必要とするため、通常の解析手法では要

素分割数が膨大となり、現実的な時間内で解析を行うことは困難である。

そこで本研究では、マルチスケール解析の一種であるズーミング法を平面ひずみ剛塑性有限要素解析に適用し、板表面の微小領域の詳細な解析を試みた。この解析により、ドライ調質圧延を対象にロールのミクロな凹凸が材料に転写されてゆく機構を調べた。さらに圧下率や表面凹凸のプロフィールの違い、ロール径、被圧延材料など各種圧延条件の粗さ転写率に及ぼす影響について調査した。

2. 解析方法

2.1 ズーミング法

ズーミング法は、板全体の変形を解析するマクロ解析と、着目したい一部だけを詳細に解析するミクロ解析の2段階で構成される。まず、材料全体をモデル化した通常の圧延解析を行う（以降これをマクロ解析と呼ぶ）。このときにはロール表面の微小凹凸は考慮せずに解析を行い、材料全体の変形挙動を求める。次に、特に詳しく調べたい微小領域に着目し、その領域だけを切り出したようなミクロモデルを作成し、解析を行う（以降これをミクロ解析と呼ぶ）。

平成20年2月1日受付 平成20年6月3日受理 (Received on Feb. 1, 2008; Accepted on June 3, 2008)

* 名古屋大学大学院工学研究科 (Graduate School of Engineering, Nagoya University, C2-4 (621) Furo-cho Chikusa-ku Nagoya 464-8603)

*2 名古屋大学大学院生 (Graduate Student, Nagoya University)

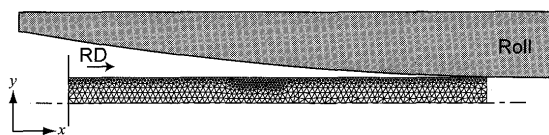


Fig. 1. Example of macro analysis mesh.

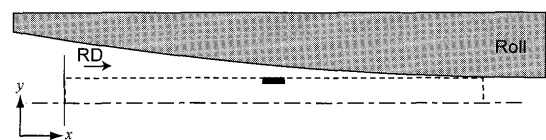


Fig. 2. Example of micro analysis mesh.

このとき、ミクロモデルの境界条件はマクロ解析の結果より該当する位置の変位もしくは荷重を算出してそれを適用する。このような解析を行う事により、マクロ解析・ミクロ解析それぞれに必要なかつ十分な要素数のモデルで解析を実行し、要素数の増加を防いで現実的な時間内で高い精度の解析が可能となる。

本研究においては、板表面の微小領域におけるロール凹凸の転写挙動を調べるため、平面ひずみ剛塑性有限要素解析にズームング法を適用して用いた。以下にその手順について、詳しく述べる。

2・2 マクロ解析

マクロ解析においてはFig. 1に示すように、通常材料全体の変形解析を、ロール表面の微小凹凸を考慮せずに解析する。この解析によって得られる各時間ステップにおける速度場より、後述するミクロ解析のための速度境界条件を算出する。またロールと材料の間の接触圧力分布を求め、ミクロ解析を行う領域の接触単位幅荷重の境界条件をやはり各時間ステップごとに算出した。

2・3 ミクロ解析

次に詳細に解析したいミクロ解析領域を設定し、Fig. 2に示すようにメッシュモデルをマクロモデルと独立に作成する。ミクロ解析ではロール表面に粗さを表現した凹凸を考慮してモデル化する。

マクロ解析結果より得られたミクロ解析領域のその時間ステップにおける境界変位速度を、ミクロ解析における境界変位速度条件とする。すなわちFig. 3に示すように、ミクロ解析領域の左右辺上の各節点においては、その位置における圧延方向の速度 $V_{xL(x,y)}$ がマクロ解析結果から算出されるその節点位置における速度 $V_{xG(x,y)}$ と、また底辺上の節点においては圧延方向の速度 $V_{xL(x,y)}$ に加えて板厚方向の速度 $V_{yL(x,y)}$ がその節点位置における速度 $V_{yG(x,y)}$ と一致するとした。

ロールと接触するミクロ解析領域の上辺においては、その辺に作用する板厚方向の単位幅荷重 P_L がマクロ解析結果から算出した該当部分の領域に作用する荷重 P_G と等しいという境界条件を設定した(Fig. 3)。

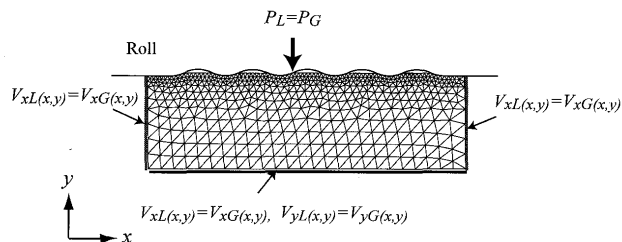


Fig. 3. Boundary conditions for micro analysis model.

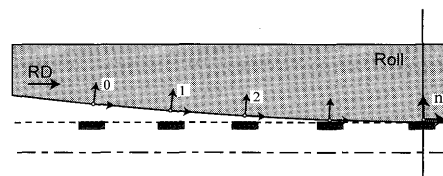


Fig. 4. Moving coordinate fixed to the surface of roll.

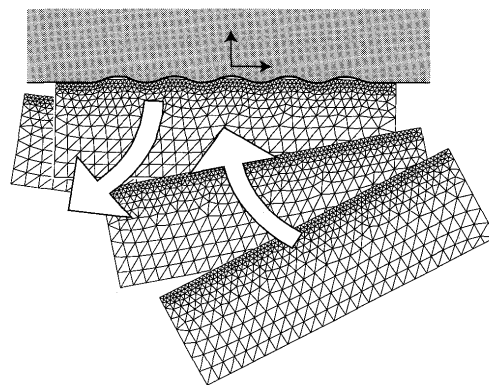


Fig. 5. Micro analysis using moving coordinate.

圧延解析では、ミクロ解析においてマクロ解析と同じ固定座標系で解析を行うと、微小な凹凸がついたロール表面が軸を中心にして回転するため、解析上の取り扱いが煩雑になる。そこで、ミクロモデルや境界条件を座標変換し、ロールに固定された移動座標系で解くという方法を新たに開発した。すなわちFig. 4に示すように、マクロ解析において、着目した微小領域中央点がロール中心直下に来る時に微小領域と接触しているロール表面上の点をミクロ解析における原点とする（以降ミクロ基準点と呼ぶ）。ミクロ基準点を原点とし、ロールの回転と共に移動する座標系を考える。この移動座標系では、座標軸がロール表面に対して常に垂直・水平である。移動座標系データを用いて、2・2節で算出した境界変位速度データを全ステップにわたって座標変換する。このようにすることにより、Fig. 5に示すように移動座標系では見かけ上は凹凸のついた工具が停止し、その工具へミクロ解析モデルが近づいていって凹凸が転写されるような解析となる。これにより複雑な工具データを回転させながら解析を行う必要が無くなり、既存の解析プログラムの大幅な変更なしに解析を可能とした。

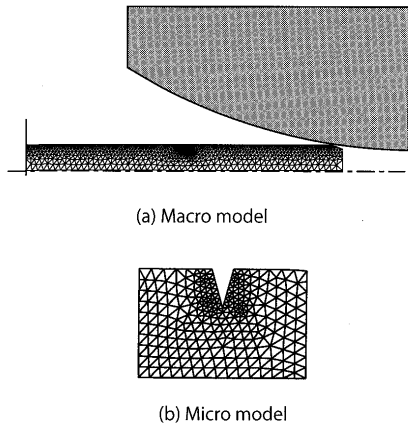


Fig. 6. Analysis model for deformation of surface micro defect.

本研究では、これら開発した手法を筆者等が開発した2次元剛塑性有限要素解析プログラムRIPAD-2D⁵⁾に組み込んだ。

3. 解析の妥当性の検証

3.1 解析および実験条件

本研究で開発した解析手法の妥当性を検証するため、圧延板表面の微小領域の変形が大きな影響を及ぼす表面疵の変形解析に適用し、その解析結果を実験による結果⁶⁾と比較した。

マクロ解析として、Fig. 6(a)に示すような板厚10mm矩形断面のAl板を、直径200mmのロールで圧下率20%、圧延する場合を考える。解析は平面ひずみとし、対称性より板の上半分の領域を解析領域とした。材料の変形抵抗は圧縮試験より $\bar{\sigma} = 112\bar{\epsilon}^{0.18}$ MPa、ロールと板の間の摩擦係数は $\mu = 0.2$ とした。

ミクロ解析の領域の大きさはFig. 6(b)に示すように、厚さ1.4mm、長さ2.0mmとし、その長手方向中央に0.27mm、深さ0.5mm（疵先端角度30°）のV字疵があるとした。

実験は解析と同じ条件で行った。厚さ10mm、長さ150mm、幅47mmのAl板の長手中央に、圧延方向と直角にミクロ解析で用いた疵形状と同じ形状のV字疵を切削で付与した。圧延は無潤滑で行った。

3.2 結果の比較

圧延後の疵形状のミクロ解析結果を実験結果とともにFig. 7に示す。圧延後の疵形状は、材料のマクロ的流動の影響を受け、疵先端部が閉じ、若干圧延方向に傾いた形状となっている。ズームング法による結果と実験結果を比較すると、全体的に大きさ、形状ともによく一致していると言える。

Fig. 8に、圧延後の疵深さと疵開口幅を示す。両者は良く一致しており、本研究で開発した解析手法を用いて、材

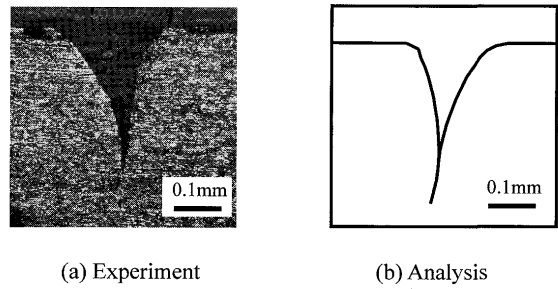


Fig. 7. Comparison between experimental and analytical results after rolling ($d_0=0.5$ mm, $a_0=30^\circ$, $r=20\%$).

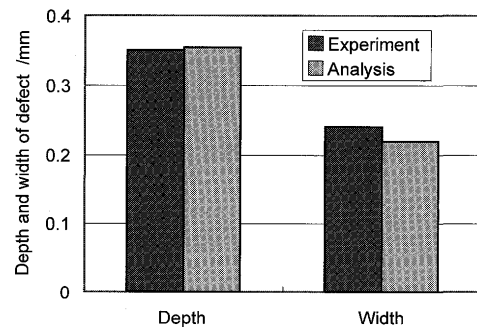


Fig. 8. Depth and width of defect after rolling ($d_0=0.5$ mm, $a_0=30^\circ$, $r=20\%$).

Table 1. Analysis condition for skinpass rolling.

Strip materials and its flow stress	SPCC	$\bar{\sigma} = 260 + 350\bar{\epsilon}^{0.60}$ MPa
	S65C	$\bar{\sigma} = 400 + 650\bar{\epsilon}^{0.55}$ MPa
Initial strip thickness t_0	1.0 mm	
Roll diameter D	120, 70mm	
Reduction r	2, 3, 4, 5, 6, 8, 10 %	
Friction coefficient μ	0.2 (macro analysis), 0.1 (micro analysis)	

料表面の微小領域の変形解析を精度よく行えることがわかる。

4. 粗さ転写解析

4.1 解析条件

4.1.1 材料特性

材料はSPCCおよびS65Cの焼鈍材を対象とし、引張試験の結果より変形抵抗はTable 1の値を用いた。また圧延前の板表面は完全に平坦と仮定し、ロール表面の凹凸がそこにどれだけ転写されるかを調べた。

4.1.2 マクロ解析モデル

Table 1にマクロ解析における解析条件をまとめて示す。ロール径は70mmおよび120mm、板材は厚さ1mmとし、対称性より上1/2の領域を解析領域とした。圧下率は2, 3, 4, 5, 6, 8, 10%として解析した。また、ロールは剛体として取扱い、材料とロールと間の摩擦係数はドライ圧延を想定

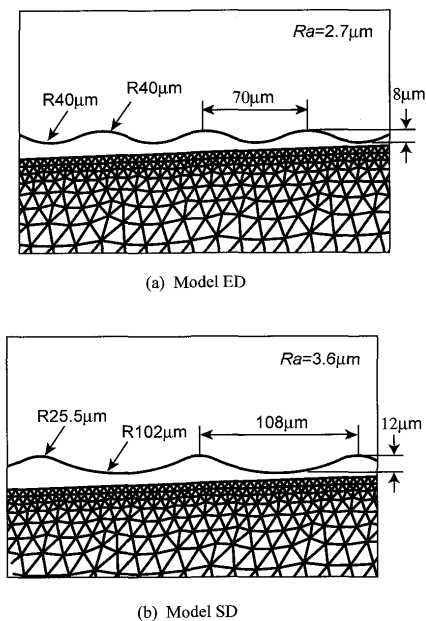


Fig. 9. Modeled profile of roll surface for micro analysis.

して $\mu=0.2$ とした。

4・1・3 ミクロ解析モデル

ミクロ解析の解析領域の大きさは、高さ0.5mm、長さ1.0mmとし、マクロ解析モデルの長手方向中央に位置するとした。材料とロール凹凸との間の摩擦係数については、マクロ解析時には本来あるはずのミクロな凹凸を省略して解析するがミクロな凹凸に材料が食い込むことによって作用する接線方向の力が增大するはずであるという考え方より、ミクロ解析ではマクロ解析の半分の $\mu=0.1$ とした。

ロール表面の凹凸プロフィールは実際の放電ダルロールおよびショットダルロールの計測結果をもとに、Fig. 9のようにモデル化した。特徴として、放電ダルロール相当(Model ED)では山部と谷部が対称であり、ピッチは70 μm と比較的短い。ショットダルロール相当(Model SD)ではなだらかな山部に対して谷部が狭くて深く、ピッチは108 μm と放電ダルロールに比べて長い。算術平均粗さはそれぞれ(a) Model EDが $Ra=2.7\mu\text{m}$ 、(b) Model SDが $Ra=3.6\mu\text{m}$ である。

4・2 圧延中における凹凸の転写過程

Fig.10は放電ダルロール相当のモデル(Model ED)、またFig.11はショットダルロール相当のモデル(Model SD)を用いて圧下率6%で圧延した場合の、材料表面の変形過程の解析結果を、相当ひずみ分布とともに示したものである。いずれのモデルにも共通する傾向として、ロールギャップ内にかみ込まれた前半では、まず材料がロール表面に対して相対的に圧延入口方向へ変位し、結果ロール凸部の右側(圧延出口側)に接触する部分の相当ひずみが增大する。後半は逆に、材料がロール表面に対して相対的に圧延出口側へ変位していくので、ロール凸部の左側(圧延入口側)に接触する領域において一度刻まれた凹凸がつぶされるよ

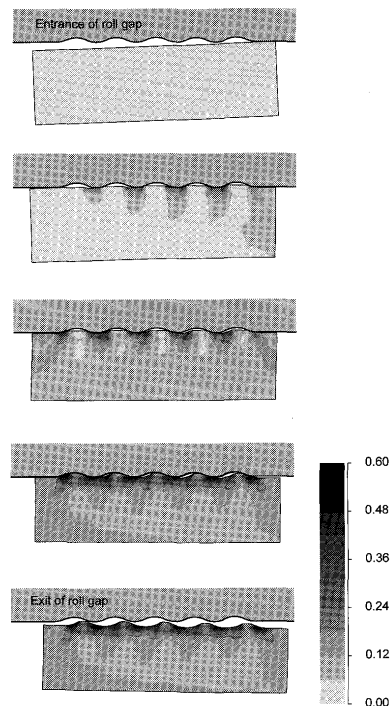


Fig. 10. Distribution of equivalent strain (Model ED, SPCC, $D=120\text{ mm}$, $r=6\%$).

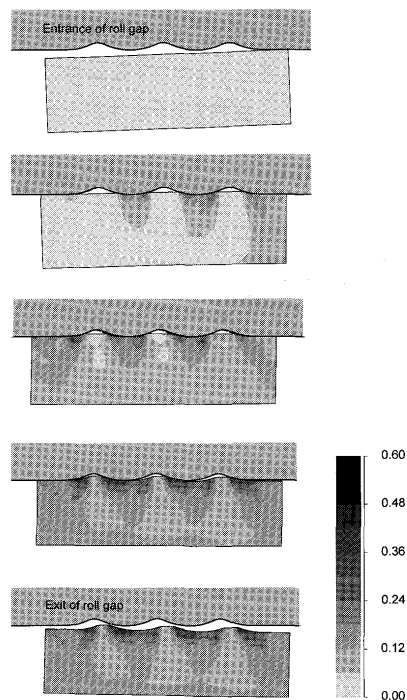


Fig. 11. Distribution of equivalent strain (Model SD, SPCC, $D=120\text{ mm}$, $r=6\%$).

うに変形する。Model EDとModel SDのいずれの結果においても、ロール凹凸に食い込んだ表面部分では、相当ひずみが0.5以上となっており、表層部分でかなり大きい変形がおこることが分かる。しかしその変形の大きい領域は板厚方向には表層からロール凹凸の深さ程度までしか広がらず、ミクロ解析領域の底辺近くでは圧下率に応じたほぼ均一なひずみとなることが分かる。

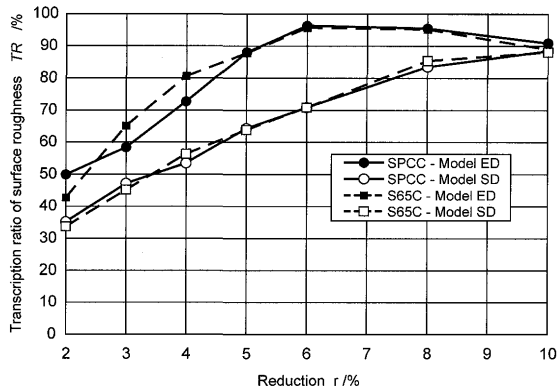


Fig. 12. Influence of reduction on transcription ratio of surface roughness ($D=120$ mm).

Model EDとModel SDを比較すると、Model EDの方がロール凹凸の山部の曲率が大きいいため、そこに接触した部分において変形がより集中し、相当ひずみ大きい。そして谷部に充填されたあと、ロールギャップ内後半の一度刻まれた凹凸をつぶすような動きに対してModel EDの方が大きな相当ひずみを生じている。

4・3 各種圧延条件の粗さ転写に及ぼす影響

Fig.12はSPCCおよびS65Cの圧延に対して、圧下率の粗さ転写率に対する影響を示したものである。ここで粗さ転写率 TR とは、次式で与えられる値である。

$$TR = \frac{Ra_{(strip)} - Ra_{(strip)}^0}{Ra_{(roll)} - Ra_{(strip)}^0} \quad (1)$$

ここで、 $Ra_{(strip)}^0$, $Ra_{(strip)}$ はそれぞれ圧延前後の板の算術平均粗さであり、 $Ra_{(roll)}$ はロール表面の算術平均粗さである。本解析においては、圧延前の板表面は平坦と仮定しているため、 $TR = Ra_{(strip)} / Ra_{(roll)}$ である。

このグラフより、Model EDにおいては圧下率2%から6%にかけて急激に粗さ転写率が増大し、圧下率6%において転写率がほぼ100%でピークとなることから分かる。圧下率が6%以上になると転写率はわずかに減少する。これは先述の通り、圧延中にロールと材料の相対変位が影響していると考えられる。Fig.13にロールギャップ出口面を基準としたロールと材料の相対滑り変位量を、またFig.14にModel ED、圧下率2, 5, 10%の場合のロールギャップ出口面における材料の凹凸形成状況を示す。圧下率が小さい場合は材料とロールの相対滑りは小さいが、圧下率が大きくなると相対滑り量が大きくなるため、過大な圧下率で圧延すると一度形成された凹凸がロールギャップ出側においてつぶされる現象が顕著になり、そのために粗さ転写率が低下する考えられる。

Model EDとModel SDを比較すると、全体的にModel SDの方が粗さ転写率が低くなっており、また粗さ転写率がピークとなる圧下率も大きくなっている。これは、Model SDではロールの凹凸の谷部が山部に比較して相対

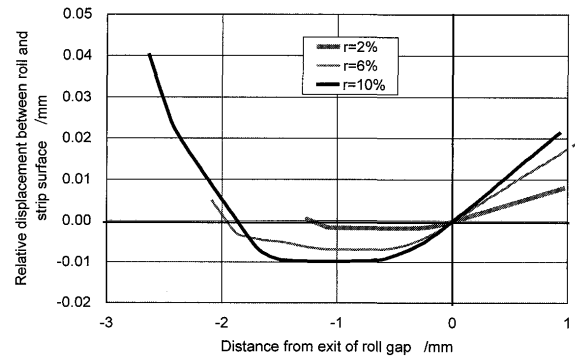


Fig. 13. Relative displacement between roll and strip surface inside the roll gap (SPCC, $D=120$ mm).

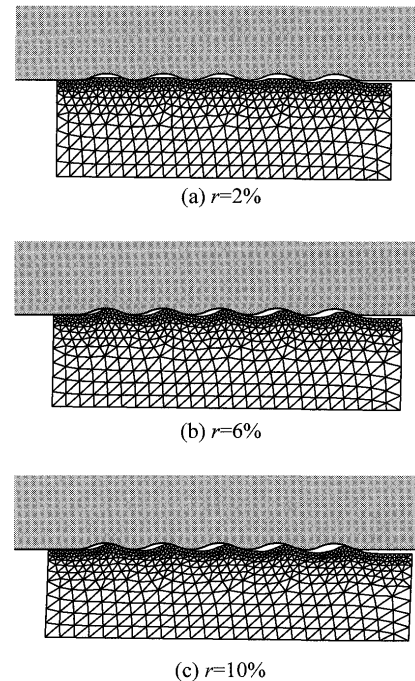


Fig. 14. Deformed micro analysis mesh at the exit of roll gap (Model ED, SPCC, $D=120$ mm).

的に狭く深いため、その部分へのミクロ的な材料流動が難しいためであると考えられる。

Fig.12中の実線は材料がSPCCと、破線はS65Cとした場合であるが、図から材料の違いは粗さの転写率には、あまり大きな影響を与えないと思われる。変形抵抗はS65Cの方がSPCCの場合に比べ高いため、同じ圧下率において荷重も倍近い値となっている。荷重が高ければ材料がミクロの凹凸に侵入する駆動力も大きくなると考えられるが、変形抵抗が高いことは逆にミクロ変形を起こしにくい要因でもあるため、結果として両者の効果が相殺されて粗さ転写率にあまり影響しなかったものと考えられる。

Fig.15はロール径を70, 120 mmと変化させて、各圧下率における粗さ転写率を求めたものである。ロール径が小さくなると、粗さ転写率がわずかに小さくなることから分かる。これはロール径が小さくなると接触荷重が小さくなるのに対し、ミクロ変形における変形抵抗は変化しないため、荷

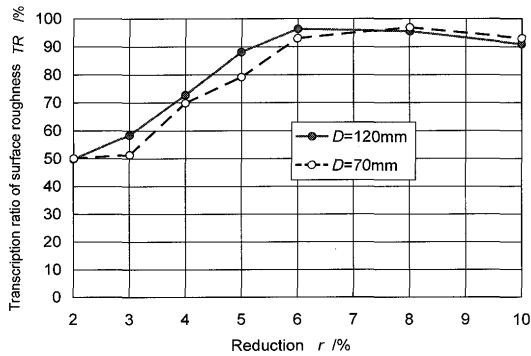


Fig. 15. Influence of roll diameter on transcription ratio of surface roughness (Model ED, SPCC).

重が小さくなった分、粗さ転写率が低下したのと考えられる。

5. まとめ

平面ひずみ剛塑性有限要素解析コード RIPAD2D に、新しく開発した座標変換を用いたブーミング法を適用した。これを用いて調質圧延における粗さ転写解析を行った。

(1) 開発した解析手法を表面疵を有する材料の圧延における変形解析に適用し、その解析結果と実験結果を比較して、開発した手法が材料表面の微小領域の変形について十分な解析精度を有することを確認した。

(2) 放電ダルロールおよびショットダルロールをモデル化した表面凹凸を有するロールを用いた圧延の解析を行った。その結果、圧下率が増大すると粗さ転写率が増大し、放電ダルロールをモデル化したものではある圧下率において粗さ転写率がピークとなることが分かった。圧下率

をさらに大きくすると、材料とロールの相対滑りにより一度刻まれた凹凸がロールギャップ内後半においてつぶされるような挙動が見られ、粗さ転写率が減少することが分かった。

(3) ショットダルロールをモデル化したものは放電ダルロールをモデル化したものに比べ粗さ転写率は低く、ロール表面凹凸のプロフィールが粗さ転写率に影響を及ぼす事が分かった。

(4) SPCC 材と S65C 材とでは、粗さ転写率の違いはほとんどなかった。これは S65C 材では荷重が高いことによって粗さ転写率を増大させる効果と、変形抵抗が高いことによってマイクロ変形を抑制する効果とが相殺されたためと考えられる。

(5) ロール径を小さくした場合、粗さ転写率は小さくなった。これは荷重が低下したことによる影響と考えられる。

最後に、本論文は日本鉄鋼協会「調質圧延のマイクロ変形解析」研究会での成果の一部をまとめたものであることを付記し、謝意を表する。

文 献

- 1) I.Aoki: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **20** (1979), 1121.
- 2) I.Yarita, M.Itoh, N.Nagase and S.Shido: *CAMP-ISIJ*, **20** (2007), 353.
- 3) N.Nagase, S.Shido, S.Simoda and I.Yarita: *CAMP-ISIJ*, **20** (2007), 354.
- 4) M.Ataoka, Y.Iino and K.Watanuki: *CAMP-ISIJ*, **20** (2007), 356.
- 5) N.Yukawa, T.Ishikawa and K.Nanba: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **36** (1995), 248.
- 6) T.Ishikawa, N.Yukawa, Y.Yoshida and Y.Tonohata: *Tetsu-to-Hagané*, **80** (2003), 1142.