論文

ブリキ調質圧延における粗度転写現象の数値解析

—ブリキ原板の湿式調質圧延現象の解明 第3報—

明石 透* 白石 利幸*

小川 茂* 松瀬 善信** 森原 秀征***

Numerical Analysis of Roughness Transfer Phenomena in Skin Pass Rolling

—Numerical Analysis of Lubricated Skin Pass Rolling of Tin Plate III—

Tooru AKASHI*, Toshiyuki SHIRAISHI*,

Shigeru OGAWA*, Yoshihito MATSUSE** and Hideyuki MORIHARA***

(Received on June 24, 2014)

Surface roughness formation of tin plates during skin pass rolling with dull work rolls of 165mm and 480mm diameter has been investigated through rolling experiments and elastic-plastic finite-element (FE) analyses considering surface asperity and elastic deformation of the work rolls. Surface roughness predicted by two-dimensional rolling FE analysis exhibits fairly good agreement with experimental results obtained using smaller work rolls of 165mm diameter, but not with results obtained using larger work rolls of 480mm diameter. Discussion has been carried out on the characteristics of surface roughness formation and the validity of the two-dimensional rolling FE analysis in view of the surface roughness of the rolled plates, utilizing three-dimensional die press FE analysis simulating a generic piece of the rolled plate and a unit of asperity of the work roll. It is concluded that surface roughness formation is governed by mean stress in the rolling direction and elongation of the rolled plate, and that two-dimensional rolling FE analysis inevitably induces substantial error in predicting surface roughness for two reasons. One is the neglecting of shear stress acting from adjacent material in the width direction. The other is that, when mean stress in the rolling direction is small, unrealistic nonplastic regions appear in the rolled plate at the concave portion of the work roll. For a practical solution to these problems of the two-dimensional rolling FE analysis, a combination of two-dimensional rolling analysis with three-dimensional die press analysis connected with mean stress in the rolling direction and elongation of the rolled material is proposed for surface roughness prediction.

Key words: skin pass rolling, tin plate, dull work rolls, FEM, elongation, friction, lubrication, asperity, transcription.

1. 緒言

調質圧延プロセスではロール表面粗度の違いでブライトロールおよびダルロール圧延があり、その中でダルロール圧延での表面粗度の転写現象メカニズムを解明し、定量化することは鋼板の表面の作り込みには重要なことである。これまで実験的に表面粗度の転写特性を圧延実験で示した取り組み¹⁾、電解ダルロール、ショットダルロールの表面粗度を統計パラメータで定量化する取り組み^{2), 3)}、3次元表面突起形状を定義して模擬した押圧解析した取り組み³⁾や2次元のロール表面に突起を付けた解析^{4), 5)}、スラブ法を用

いた理論解析⁶⁾、弾塑性FEM解析による検討^{7), 8)}等、多くの研究者が実験および解析に基づいて転写メカニズムの解明に取り組んできている。しかしながら、ロール表面粗度の転写現象を、ロール径効果も含め統一的に解明し、転写率を予測する汎用的手法を確立することはできていない。

このような状況の中、筆者らは前報⁹⁾でFig.1に示す弾性ワークロール径φ480mmの表面に三角形の幾何学的な突起を付与したダルロールのモデル化を行い、計算で圧延荷重と伸び率の実験関係を正確に再現できることを示し、そのモデルを用いて圧延メカニズムを明らかにしてきた。Fig.2は前報の解析で示される圧延が終了してロールバイトから出てきたロール表面の突起と鋼板表面への突起の転写状況を示したものである。

本報告では前報のダルロール圧延の数値解析を踏まえ、結果として生じる鋼板表面に転写されたロール表面突起の転写現象に着目し、表面粗度 Ra の実験結果と数値解析結果を定量的に比較しながら、表面粗度転写のメカニズムを明らかにし、転写率の汎用的予測方法を提案した。

*新日鐵住金株式会社 技術開発本部 〒293-8511 富津市新富 20-1
Technical Development Bureau, Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation,
20-1 Shintomi Futu 293-8511, Japan.

**NSプラント設計株式会社 シミュレーションエンジニアリング・
ソリューション部 〒804-0002 北九州市戸畑区中原 46-59
Simulation Engineering Solution Dept, NS Plant Designing Corporation,
46-59 Nakabaru Tobata-ku Kitakyusyu 804-0002, Japan.

***産機エンジニアリング株式会社 CAE室 〒299-1147 君津市人見 1421-5
SANKI Engineering Corporation, CAE Section, 1421-5 Hitomi Kimitsu
299-1147, Japan.

Fig.1 FEM model of skin pass rolling

Fig.2 Transcription of the roll surface asperity(in delivery side)

2. 数値解析

2.1 実験および数値解析モデルの概要

表面突起仕様を含めた計算および実験条件はロール径の大小以外は前報⁹⁾同様にし、ソルバーは非線形弾塑性FEM解析汎用ソフト(MSC.Marc)を用いた。Table1に実験および計算条件を示す。

Table 1 Rolling conditions

WR	(φ480mm, 165mm)×w400mm, Roughness:3.1~3.3μmRa(Shot dull) ⇒Asperity height:10μm Asperity pitch:62.5μm
Lubrication	5%emulsion(50℃) ⇒ $m=0.2$ No lubricating ⇒ $m=0.275$ Friction model :m-k model
Plate	Thickness : 0.2mm, Width : 150mm Upper yield stress : 400MPa Lower yield stress : 312MPa
Rolling conditions	Entry unit tension : 82MPa Delivery unit tension : 98MPa Rolling Speed : 10m・min ⁻¹

2.2 圧延荷重、伸び率におよぼすロール径の効果

圧延荷重に対する伸び率の関係について Fig.3 に解析と実験結果を比較して示した。φ480mmの大径ロールおよび新たに追加したφ165mmの小径ロールも潤滑条件 m (摩擦応力/せん断降伏応力)=0.2では良く一致している。無潤滑条件では解析結果に比べ、実験結果の方が荷重に対して伸び率が1割程度小さくなっているが、大径ロールとの相違、

潤滑効果を含め、本数値解析はダルロール圧延の圧延荷重—伸び率関係を十分正確に表現できていると判断する。

Fig.3 Elongation of rolled plate with dull rolls

Fig.4に微小圧延荷重の領域を拡大して、ブライト圧延時の小径ロール圧延の前々報¹⁰⁾の結果も併せて示す。ブライトロールはダルロール条件に比べ0.5MN・m⁻¹以上の圧延荷重領域では荷重に対する伸び率の勾配が急になっている。そこでそれぞれの圧延形態の特徴を明らかにするためにロールバイト近傍のロールと板の接触状況と相当塑性ひずみ速度分布をFig.5に示す。

Fig.4 Elongation of rolled plate with dull and bright rolls

この結果より、φ165mmのロール表面に突起を付与していないブライトロール圧延では、若干のロール偏平はあるものの、接触弧はほぼ真円に近い形状となっており、ロールバイト入側から出側までロールバイト全域にわたって塑性変形が進行する一般的な古典理論の圧延状態と言える。一方、大径のダルロールは板と接触する全域で偏平し、板とロールが平行に接触しているように見える。同様にφ165mmのダルロール圧延もロール偏平部分を持っているが、大径に比べロールバイト入側近傍より板厚中心部におよぶ塑性ひずみ速度が大きい。これは大径に比べてロールと板とが幾何学的に鋭角に接触した分、応力集中が生じて塑性変形が顕著に生じたためと考えられる。しかしながら同じ小径ロールでもブライトロールに比べると、表面突起による幾何学的な摩擦効果のためロールバイト内の静水圧応力が高くなり伸び率は小さくなる。

以上より、本数値解析は、小径ロール条件、大径ロール条件を含む各調質圧延条件に対して、圧延荷重と伸び率が実験と整合性をもった結果が得られる点で普遍性を持った計算手法であると判断される。

Fig.5 Distribution of plastic strain rate around the roll bite with ϕ 165, 480 dull and ϕ 165 bright rolls at rolling force $2\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$

2.3 ロール表面突起の転写形態

本数値解析によってロール表面突起の板への転写形態について説明する。

Fig.6 は ϕ 165mm, 圧延荷重 $2\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$, 伸び率 2.3% 時のロールバイト入側近傍の突起の接触状況と圧延方向(x)応力分布の拡大図である。ロールバイト入側で板厚方向(y)に一樣に生じた入側ユニット張力 82MPa が、ロールバイト中心に向かうにつれて表層から板厚中心に向かって圧縮応力となっており、圧縮応力の増加に対応して突起が板に食い込み、突起の空間に板が充填されていることがわかる。

Fig.6 Stress in rolling direction at rolling force $2\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$

Fig.7 Geometrical changes around the roll bite (with ϕ 165roll)

さらにロールバイト近傍における幾何学的変化を定量的に観察するために鋼板の最表面の変位と移動平均後の値を Fig.7 に示す。ロール表面突起が接触開始すると同時に平均板厚が減少、即ち伸びが生じながら、表面突起が転写され、板厚減少の勾配が緩くなってからも転写は進行し、メタルが徐々に突起の空間に充填されることで最終的には板側の

突起頂点位置は元の板厚よりも $2\mu\text{m}$ 程度大きくなっていることがわかる。

そこでロールバイト近傍の圧延方向応力を板厚方向に平均した値 $\bar{\sigma}_x$ と板に転写された表面突起高さの関係を圧延方向位置毎に Fig.8 に示し、圧延方向(x)応力 $\bar{\sigma}_x$ と板厚方向(y)応力 σ_y のロールバイトにおける推移を Fig.9 に示す。

なお、表面突起高さは突起 1 周期分が約 12 節点あることから、各圧延方向位置の表面節点の前後 6 節点の区間における最大値と最小値を求め、その差を表面突起高さと定義した。また板厚方向応力は最表層の値を用いるが表面突起による影響でそのままと突起周期の大きな応力変動が生じるため、表面節点の前後の区間を用いて移動平均処理を実施した。

Fig.8 Relation between asperity height and stress in rolling direction (ϕ 165mm, rolling force $2\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$)

Fig.9 Relation between stress in rolling direction and stress in thickness direction (ϕ 165mm, rolling force $2\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$)

Fig.8 の計算結果ではロールバイト入口から中心に向かって圧延方向圧縮応力が大きくなるにつれて表面突起高さが大きくなっており、突起の転写は圧延方向圧縮応力がピ

ークを迎えるロールバイト中心近傍で飽和している．また Fig.9 に見られるように板厚方向応力は圧延方向応力とも相関が強く，静水圧の増加と共に突起の転写が生じていることがわかる．これらの結果から突起の転写現象は，ロールバイト内の圧延方向応力，板厚方向応力そして静水圧応力と強い相関を有する現象であることが理解できる．

2.4 粗度転写解析の評価

ダルロール圧延後の圧延材表面粗度 Ra の実験結果および数値解析結果を圧延荷重に対してプロットしたものを， $\phi 165\text{mm}$ ， $\phi 480\text{mm}$ ロールに対してそれぞれ Fig.10, Fig.11 に示す．

Fig.10 Relation between surface roughness and rolling load (with $\phi 165$ roll)

Fig.11 Relation between surface roughness and rolling load (with $\phi 480$ roll)

$\phi 165\text{mm}$ の小径ロール計算では摩擦ファクターの変化で転写した粗度 Ra に差は見られないが，実験では同一荷重なら僅かに無潤滑の方が表面粗度が大きい．しかし無潤滑条件に限れば実験結果と計算結果はほぼ一致している．

一方， $\phi 480\text{mm}$ の大径ロールの実験では圧延荷重が大きくなっても小径に比べなかなか転写が進まず，圧延荷重が $4\text{MN}\cdot\text{mm}^{-1}$ 以上になると無潤滑条件の転写粗度 Ra がやや大きくなっている．これに対し計算結果は実験粗度 Ra に比べ $20\sim 30\%$ 程大きく予測しており，小径同様摩擦ファクターの影響が見られない．

次に Fig.12, Fig.13 に伸び率に対する粗度 Ra 転写の関係を比較した． $\phi 165\text{mm}$ の小径ロールに関しては Fig.10 の圧延荷重による整理では摩擦ファクター m の効果が見えなかったが伸び率の視点で粗度 Ra を評価すると違いが表れている．しかし $\phi 480\text{mm}$ の大径ロールでは摩擦ファクターの影響は現れるものの，定量的には一致していない．

今回のアプローチではロールと板との間に封入された油

の抵抗を考慮していないため，潤滑状態の転写メカニズムの議論をするには限界があると考えられる．文献によれば潤滑圧延では油の巻き込みでロール表面と板の間に非圧縮性の油が巻き込まれて粗度 Ra の転写が小さく抑えられた事例¹¹⁾が示されており，以後の考察では無潤滑条件での転写に限定して考察を行う．

Fig.12 Relation between surface roughness and elongation (with $\phi 165$ roll)

Fig.13 Relation between surface roughness and elongation (with $\phi 480$ roll)

3. 考 察

3.1 突起の 3 次元押圧解析による転写現象の考察

これまで平面ひずみ条件を仮定した 2 次元圧延解析をベースに表面突起の転写特性を示してきた．小径ロールでは予測粗度 Ra が実測と定量的にほぼ一致したが，大径ロールでは $20\sim 30\%$ の誤差を生じていた．その原因として，実際のロールは幅方向にも凹凸がある 3 次元形状であることが原因ではないかと推定した．そこでロール表面突起 1 周期分の最小単位の工具要素を仮定し，転写の主要因と考えられる圧延方向応力の板厚方向平均値 $\bar{\sigma}_x$ と伸び率を 2 次元圧延解析から得られた値と一致するように境界条件を設定して簡便な 3 次元押圧転写数値解析を行い，転写現象およびそのメカニズムについて考察を行う．

(1) 解析モデル モデルはワークサイズ $0.1\text{mm}\times 0.0625\text{mm}\times 0.0625\text{mm}$ の直方体で幅方向に平面ひずみ状態とし，工具形状は Fig.14 に示すように，2 次元圧延を模擬する場合は幅方向に母線を有する三角柱形状とし，(以下 2D 突起と呼称)，実験に相当する 3 次元圧延を模擬する場合は突起を四角錐形状としてモデル化した(以下 3D 突起と呼称)．また Fig.14 に示す 3 次元工具のハッチング部が上に凸，その他の部分は下に凸とした．また 2D 突起の高さは

Fig.14 2D, 3D die and work configuration and finite element mesh

これまで通り山谷の頂点間で $10\mu\text{m}$ とし、3D 突起の高さは 2D 突起と算術平均粗さが等しく(粗さ中心面からの工具凸部と凹部の絶対値高さの平均値が一致する)なるように $15\mu\text{m}$ (片振幅 $7.5\mu\text{m}$)とした。これは圧延方向の任意の断面で Ra を計測したとき、多くの突起を含めることで 2D 突起の Ra と等しくなることを意図したものである。詳細な計算条件は Fig.14 並びに Table 2 に示す。

Table 2 Conditions of die press simulation

Work (Rolled material)	Width $62.5\mu\text{m}$, Length $62.5\mu\text{m}$ Thickness 0.1mm (1/2 symmetry) Upper yield stress : 400MPa Lower yield stress : 312MPa Entry unit tension : 82MPa
Asperity	Height(p-p) $10\mu\text{m}$ (2D), $15\mu\text{m}$ (3D) Pitch $62.5\mu\text{m}$
Pressing conditions	0.6%, 1% reduction Friction factor $m=0.275$ (MK-model) Prescribed stress at boundary= $-2000 \sim 0\text{MPa}$

解析手順は①工具を圧下しながら同時に所定の圧延方向応力の 1/2 を加える[STEP1]、②工具の圧下を止め、残りの圧延方向応力を負荷[STEP2]、③工具および圧延方向応力を除荷する[STEP3]、④除荷後、ワークの自由端(応力境界条件を付与)の変位で算出される伸び率が所定の値(0.6%, 1%)とならなかった場合は STEP1 で更に工具の圧下を調整して加え、除荷後の伸び率が所定の値となるように STEP3 ま

Fig.15 Relation between stress in rolling direction and elongation

でを繰り返す。ここで圧延を模擬するためワークの自由端は常時平面を保つように拘束している。なお STEP1, 2 の分割は Fig.7 から平均板厚変化(工具圧下)が圧延方向距離 0.7mm で停止した後、Fig.8 から 0.7mm 以降の圧延方向応力の増加を模擬したものである。以上の手順で押圧解析を行い、転写されたワークの表面粗度 Ra を求めた。また、転写特性の比較は塑性変形量すなわち伸び率を揃えて実施すべきと考えられるので、Fig.12, Fig.13 に示す小径ロール、大径ロールの実験結果および解析結果を踏まえ、伸び率 0.6%, 1.0%の押圧解析条件を決定した。また境界条件として与える圧延方向平均応力は Fig.15 に示す 2 次元圧延解析の結果より $0 \sim -2000\text{MPa}$ の範囲とした。

(2) 押圧解析による 2D 圧延粗度転写解析の誤差考察 押圧解析による圧延方向応力に対する表面粗度 Ra の関係を 2D, 3D 表面突起モデルおよび伸び率毎に Fig.16 に示す。この結果より、伸び率の大小に関わらず 2D 圧延解析の表面突起転写で考察したように、2D, 3D 突起共に圧延方向圧縮応力が大きくなると転写粗度 Ra が大きくなるという転写の基本原則が改めて確認できる。

Fig.16 Relation between surface roughness and stress in rolling direction (0.6% and 1% elongation)

次に Fig.16 において 2D, 3D 突起の転写特性を比較すると、圧延方向圧縮応力が 600MPa より小さいと 2D と 3D はほぼ等しく転写し、大きくなると 2D 突起の方が転写し易くなっている。この結果を Fig.12, 13, 15 に示した 2 次元圧延転写解析結果に照し合せて考えてみると、2 次元圧延解析による転写特性と実験結果との相違が説明可能となる。すなわち、小径ロール圧延では、Fig.15 より伸び率 2%以下の条件では圧延方向圧縮応力が 600MPa 以下となっており、

この領域では 2D と 3D 突起はほぼ同等の効率で転写が進むので 2 次元圧延解析による粗度転写特性は実験とほぼ一致したものと考えられる。

一方、大径ロールの場合は Fig.15 に示すように 0.6% の伸び率でも圧延方向圧縮応力は 1000MPa 前後の大きい値となっており、Fig.16 に示すように、この領域は 2D 突起が 3D 突起よりも転写効率が高くなるので、Fig.11, Fig.13 に示したように、2 次元圧延解析では粗度転写を実験に比べ過大評価したものと理解できる。

ところで、Fig.16 の 3D 突起の転写特性を注意深く比較すると、伸び率 0.6% に比べ 1% の方が同じ圧延方向圧縮応力に対しても粗度 Ra が $0.1 \sim 0.2 \mu\text{m}$ 程度大きくなっており、転写特性には圧延方向応力(板厚方向応力、静水圧応力も同様)のみならず、伸び率も有意な影響を与えることが確認できる。これは 0.6% から 1% への伸び率の増加により、実質的な板厚減少に起因する工具凹凸面への材料流動が連続的に継続された結果と考えられる。

(3) 2D, 3D 突起の転写の違いと 2D 圧延解析の妥当性 以上のように 3 次元押圧解析によって、粗度転写特性に関する 2 次元圧延解析の誤差が説明可能となったが、ここで、3 次元押圧解析における 2D 突起と 3D 突起の転写特性の差異の原因について考察しておく。

2D および 3D 突起工具による押圧解析において除荷直前(STEP2)の板厚方向応力のコンタ図を Fig.17 に示す。押圧条件は伸び率 1%、圧延方向応力 -1200MPa である。何れの工具の場合でも、工具凸部が押し込まれる部分に高い圧縮応力が発生し、工具凹部の板厚方向応力は非常に小さくなっている。このように工具凸部は高い面圧で板材に押し込まれるので、板は工具形状に忠実に変形するが、工具凹部の板厚方向応力は小さく板厚中心方向から金属が押し出されることによって工具凹部に充填されて行く。すなわち粗度転写特性は工具凹部への金属の充填現象で特徴づけられると言えるので、工具凹部に対応する材料の挙動に着目して考える必要がある。この観点で Fig.17 の変形状態を観察すると工具凹部と凸部の境界近傍で FEM 要素が激しくせん断変形を受けていることが観察される。すなわち工具凹部へ金属が流れ込もうとする動きを工具凸部の材料が拘束していることがわかる。そして 2D 突起と 3D 突起を比較した場合、当然ながら 3D 突起では幅方向にも工具凹凸が存在するので、幅方向からも拘束を受けることになる。この拘束の実体は凹部と凸部の境界近傍に発生するせん断応力と考えられるので次にせん断応力に着目して比較検討する。

Fig.18 には対称(y-z)面に作用するせん断応力 τ_{yz} の絶対値を幅方向に平均してその板厚方向分布を示す。当然ながら 2D 突起の場合は全くせん断応力が生じていないが 3D 突起の場合は表層部から 1/4 厚の範囲で大きなせん断応力が生じている。その結果、3D 突起は τ_{yz} の存在によって工具の凹部への金属充填が遅れるため 2D 突起よりも転写率が小さくなったと考えられる。見方を変えると、2D 突起に対応する 2 次元圧延解析では、実際には存在する幅方向の突起から作用するせん断拘束応力を考慮することができないので転写率を過大評価することになる。

ところで、Fig.16 より、2D 突起の場合、圧延方向圧縮

力が小さくなると転写率がステップ状に低下しており、結果的に 3D 突起と同等の転写率になっている。これは圧延方向圧縮応力が小さい小径ロール圧延条件で Fig.10 に示すように転写率の 2 次元圧延解析結果が実験結果にほぼ一致していることに対応していると考えられる。

Fig.17 Distribution of stress in thickness direction (at $\bar{\sigma}_x = -1200\text{MPa}$)

Fig.18 Mean shear stress in symmetry surface (at $\bar{\sigma}_x = -1200\text{MPa}$)

この原因を考察するため Fig.19 には 2D および 3D 突起による押圧解析で圧延方向圧縮応力が 200 および 1200MPa 時の除荷前(STEP2)の相当塑性ひずみ分布(0~0.1 の範囲)を示す(伸び率 0.6%)。この図から、3D 突起の場合は、圧延方向圧縮応力の違いによって相当塑性ひずみの大きさの違いは現れているもののワーク全体に塑性ひずみを生じており変形モードの変化のようなものは観察されない。一方、2D 突起の場合は、圧延方向圧縮応力 1200MPa では工具との接触領域全体に顕著な塑性ひずみが発生しているが、圧延方向圧縮応力 200MPa の条件では、工具凹部に対応する材料に塑性ひずみが発生しない状態になっていることが観察される。前記したように転写現象は工具凹部への金属の充填によって特徴づけられるので、この部分の材料が塑性変形しない状態になると、工具突起の転写が阻害されることになり、このことにより Fig.16 における 2D 突起押圧後の表面粗度が、圧延方向圧縮応力が小さくなった場合にステップ状に低下したのと考えられる。

3.2 2 次元圧延解析と 3 次元押圧解析による粗度予測手法の提案

以上の実験および数値解析による検討と考察により、調質圧延による粗度転写現象は、ロールバイト中の圧延圧力そして静水圧応力を代表する圧延方向応力の板厚方向平均値と、伸び率とに依存し、2 次元圧延解析によって得られ

①2D die, $\bar{\sigma}_x = -200\text{MPa}$ ②2D die, $\bar{\sigma}_x = -1200\text{MPa}$

Fig.19 Distribution of equivalent plastic strain (at stress in rolling direction -200MPa or -1200MPa, elongation 0.6%)

る粗度転写は、①幅方向に隣接する材料から作用するせん断応力による拘束を考慮できないため転写を過大評価すること、②圧延方向圧縮応力が小さい場合に、ロール凹部の材料に非現実的な非塑性変形領域が発生することで転写を過小評価する、という二つの本質的な誤差因子があることが判明した。本研究が対象とした圧延条件においては、上記①と②の誤差要因が打ち消し合って、圧延方向圧縮応力が小さい条件では2次元圧延解析によって実験値にほぼ一致する転写結果が得られたが、これは一般的に正当化できるものではなく、粗度転写現象については2次元圧延解析は誤差を含むものと考えなければならない。この問題はロール変形およびロール粗度を正確に考慮した3次元圧延解析を実施することで解決可能と思われるが、これは現状の計算機能力では計算時間の観点で実用的な計算手法とはならない。そこで、本報告で用いた2次元圧延解析と3次元押圧解析を組み合わせ、実用的な粗度転写予測手法を提案する。

前報⁹⁾で報告したように、本研究で提案しているロール変形と連成した2次元圧延解析によって、ダルロール圧延においても、圧延荷重および伸び率の計算については実験と良好な一致が得られている。圧延荷重および伸び率が一致するということは圧延荷重を決めるロールバイト内のマクロ的な応力状態が正確に計算できているものと考えられる。そこで、まず与えられた圧延条件(伸び率を含む)に基づいて、2次元圧延解析を実施し圧延方向応力の板厚方向平均を算出し、そのロールバイト中の最大値を抽出する。そして次に、この圧延方向応力と伸び率を与えて Fig.14, Table 2 に示したような3D突起条件による3次元押圧解析を実施して圧延後の粗度を予測する。

Fig.20 Prediction of surface roughness by proposed method

③3D die, $\bar{\sigma}_x = -200\text{MPa}$

④3D die, $\bar{\sigma}_x = -1200\text{MPa}$

Fig.20 には、 $\phi 165\text{mm}$ ロールの伸び率 1%の条件、および $\phi 480\text{mm}$ ロールの伸び率 0.6%条件について上記の方法で予測した粗度を Fig.12 および Fig.13 の実験データに◆および▲印で追記して示しているが実験結果とかなり良い一致を示している。なお広範囲な圧延条件における本手法の検証は今後の課題としたい。

4. まとめ

ダルワークロールによるブリキ材の調質圧延特性、特に粗度転写現象について、大径($\phi 480\text{mm}$)および小径($\phi 165\text{mm}$)ワークロールを用いた圧延実験および弾塑性有限要素法を用いた数値解析によって検討した。その結果、粗度転写現象は、ロールバイト中の圧延圧力そして静水圧応力を代表する圧延方向応力の板厚方向平均値と、伸び率とに依存すること、そして粗度転写に関して、2次元圧延解析は、幅方向せん断応力を無視することによる誤差、および圧延方向圧縮応力が小さい場合に非現実的な変形モード変化を生じることによる誤差、という二つの本質的な誤差因子があることが判明した。そしてこれらの問題を解決するため、2次元圧延解析と3次元押圧解析を組み合わせた簡便な粗度予測手法を提案した。

参 考 文 献

- 1) 白石利幸・明石透・高浜義久・小川茂：塑性と加工, **51**-597 (2010), 969-973.
- 2) 鍵田征雄・伊藤正登：鉄と鋼, **94**-10(2008), 391-398.
- 3) 池浩：調質圧延のミクロ変形解析研究会最終報告, (2007), 99-110.
- 4) 湯川伸樹・秋山友彦・吉田佳典・石川孝司：鉄と鋼, **94**-10 (2008), 399-404.
- 5) Yoshida, F., Kaneda, Y. & Yamamoto, S. : Int. J. Plasticity, **24**(2008), 1792-1818.
- 6) 松本紘美・白石利幸：塑性と加工, **49**-565(2008), 153-157.
- 7) 明石透・白石利幸・小川茂・松瀬善信：CAMP-ISIJ, **24** (2011), 909.
- 8) Kijima, H. : J. Mat. Proc. Technol. **214**(2014), 1111-1119.
- 9) 明石透・白石利幸・小川茂・松瀬善信：塑性と加工, **55**-639(2014), 324-330.
- 10) 明石透・白石利幸・小川茂・松瀬善信：塑性と加工, **54**-630(2013), 606-611.
- 11) 長瀬直樹・志渡誠一・鍵田征雄：鉄と鋼, **94**-10(2008), 429-437.