

ダルワークロール調質圧延現象の解明 —極薄鋼板の調質圧延現象の数値解析—

Skin Pass Rolling Characteristic of Tin Plates with Dull Work Rolls

— Numerical Analysis of Skin Pass Rolling of Tin Plate —

明 石 透* 白 石 利 幸 小 川 茂
Tooru AKASHI Toshiyuki SHIRAISHI Shigeru OGAWA
松 瀬 善 信 森 原 秀 征
Yoshihito MATSUSE Hideyuki MORIHARA

抄 録

ロール表面の突起とロールの弾性変形を考慮したブリキのダルワークロール調質圧延に対する数値解析手法を確立し、その圧延特性を解明した。実機調質圧延機と同等の直径のダルワークロールによる圧延では、ブライトロール圧延に比べ、比較的小さい圧延荷重領域から有意な伸び率を示すものの大きい圧延荷重領域になっても伸び率は非常に小さいことを実験および2次元FEM圧延解析によって明らかにした。表面粗度転写特性については、2次元FEM圧延解析では粗度転写を実験に比べ過大評価することが明らかになった。そこで2次元FEM圧延解析とワークロールの1周期分の突起と圧延板を模擬した3次元押圧解析を組み合わせた新しい粗度転写予測手法を提案した。

Abstract

A numerical analysis method for the skin pass rolling of tin plates with dull work rolls is established considering the surface asperity and elastic deformation of such work rolls. A rolling experiment using dull work rolls of comparable diameter to those used in commercial-scale skin pass rolling mills reveals higher elongation for smaller rolling force and much smaller elongation for larger rolling force compared with elongation behavior in the case of bright work rolls; such elongation characteristics also have predicted by the two-dimensional rolling FE analysis. Concerning surface roughness formation, it is found that the two-dimensional rolling FE analysis overestimates surface roughness compared with experimental results. To improve surface roughness prediction, a combination of two-dimensional rolling analysis with three-dimensional die press analysis simulating a generic piece of the rolled plate and a unit of asperity of the work roll is proposed.

1. 緒 言

ダルワークロール調質圧延では、実機レベルの大径ワークロールを用いた場合、常用される圧延荷重領域において、圧延荷重が増大し、ブライトワークロール圧延では10%前後の伸び率が出る領域になっても、1%未満の微小伸びしか出ないような特有の現象があることが知られている¹⁾。これに対しダルワークロール圧延に関する従来の数値解析的研究²⁻⁴⁾では、このような実操業レベルの大径ワークロール特有の現象を定量的に説明することができていない。

さらにダルワークロール圧延では、伸び率とともに所定の表面粗度を実現することも重要な目的となるが、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⁾、放電ダルワークロール、ショットダルワーク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⁵⁾、3次元表面突起形状を模擬した押圧解析の取り組み⁶⁾や2次元のロール表面に突起を付けた解析^{4,7)}、スラブ法を用いた理論解析²⁾、弾塑性FEM解析による検討^{8,9)}等、多くの研究者が実験および解析に基づいた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、ロール径の効果も含めて統一的に解明し、転写粗度を予測する汎用的手法を確立することはできていない。

そこで本研究では、実機ロール径サイズのブライトワークロール圧延のメカニズム解明(既報¹⁰⁾)で示したロール

* プロセス研究所 一貫プロセス研究部 上席主幹研究員 工博 千葉県富津市新富 20-1 〒 293-8511

の弾性変形を正確に考慮した弾塑性圧延解析手法を基本として、同一の圧延潤滑（摩擦）条件の下にワークロールに微小な突起を付与することで、伸び率1%未満の圧延現象をシミュレートする解析手法を開発し、その解析手法の妥当性を示しながら、この解析結果を使ってダルワークロール圧延の圧延メカニズムと圧延特性について考察する¹¹⁾。そしてさらにダルワーク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、転写粗度の汎用的予測方法を提案する¹²⁾。

2. ダルワークロール圧延の実験および数値解析

2.1 調質圧延実験

実験は既報¹⁰⁾で用いた板厚 0.2mm、板幅 150mm のブリキ原板を用い、伸び率はケガキ線法で測定した。基準圧延条件を表1に示す。なお、潤滑条件は既報と同じエマルジョン潤滑と無潤滑状態の実験を行った。

2.2 実験結果

図1に、ダルワークロールの実験結果と、比較のため既報¹⁰⁾で示した直径 $\phi 480$ mm のブライトワークロールの実験およびシミュレーション結果を示す。ブライトワークロールでは単位幅あたりの圧延荷重 $2.5 \text{ MN}\cdot\text{m}^{-1}$ 前後より急激な伸びを示すジャンピング現象が発生しているのに対し、ダルワークロールは1%未満の伸びである。次に図1の伸

表1 圧延条件
Rolling conditions

Work roll (WR)	$\phi 480 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ width Roughness: $3.1 - 3.3 \mu\text{mRa}$ (shot dull)
Lubrication	5% emulsion (50°C), no lubrication
Tin plate	Thickness: 0.2 mm, Width: 150 mm Upper yield stress: 400 MPa Lower yield stress: 312 MPa
Rolling condition	Entry unit tension: 82 MPa Delivery unit tension: 98 MPa Rolling speed: 10 m/min

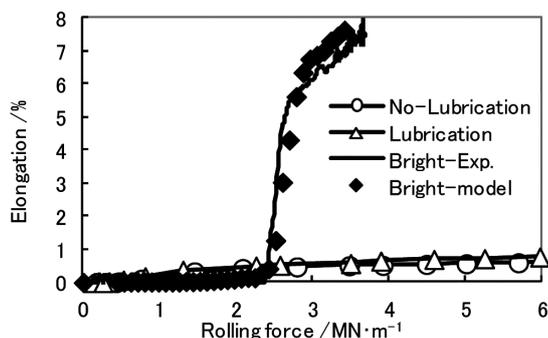


図1 ブライトロールおよびダルロール圧延による伸び率
Elongation of rolled tin plate with dull and bright rolls

び率のスケールを拡大した図2を見ると、ジャンピングが始まる前の圧延荷重領域では、ダルワークロール圧延の方がブライトワークロール圧延より伸びが大きいことがわかる。それも僅か $0.5 \text{ MN}\cdot\text{m}^{-1}$ 付近から伸び始め、ジャンピングを生じる $2.5 \text{ MN}\cdot\text{m}^{-1}$ までには0.4%も伸び、その後は緩やかな勾配で伸び率が增大するのがダルワークロール圧延の特徴である。

2.3 調質圧延用弾塑性 FEM モデル

数値解析手段として弾塑性 FEM 解析汎用ソフト (MSC. Marc) を用いた。そして数値解析対象を図3に示すような平面ひずみ要素による2次元モデルとし、ワークロールは弾性体、圧延板は上下降伏点を有する弾塑性体とした。ロール表面の突起は本来3次元的な形態であるが、ここでは2次元平面ひずみ条件を仮定して解析した。本来3次元的な突起であるが故に突起が板に食い込めば圧延の幅方向ひずみを拘束することになるので2次元平面ひずみ条件の仮定にも一定の合理性があると考えられる。

扇状のロールに一体ロールと同様の剛性を与えるため、扇の両辺に半径方向変位のみを許容する剛体梁を付与し、ワークロールを強制変位で回転させながら実験と同様に圧延荷重を徐々に付加する条件で解析を行い、圧延荷重に対

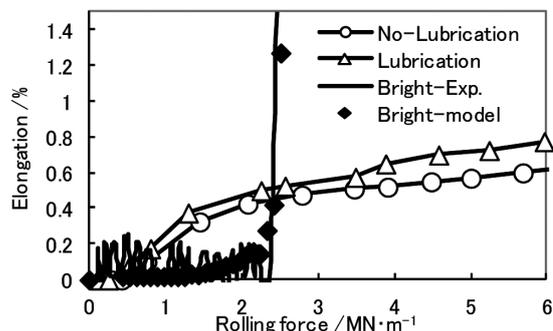


図2 ブライトロールおよびダルロール圧延による伸び率 (拡大)
Elongation of rolled tin plate with dull and bright rolls (enlargement)

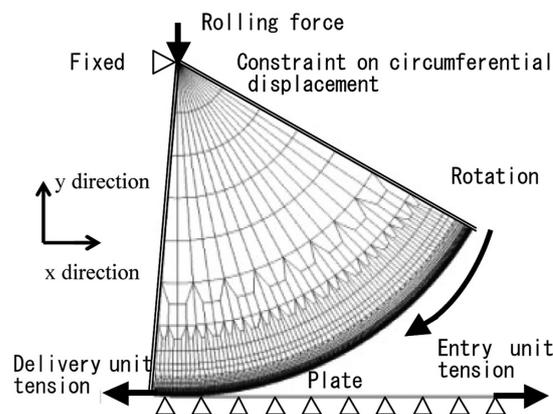


図3 調質圧延の FEM モデル
FEM model of skin pass rolling

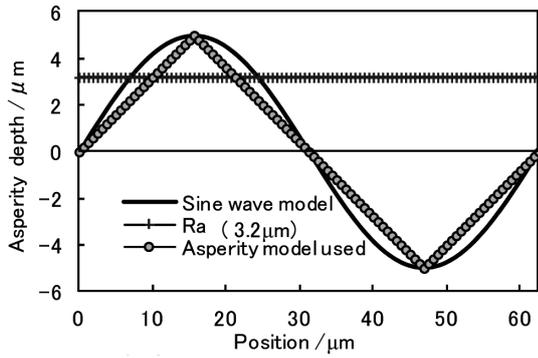


図4 ロール表面突起
Roll surface asperity model

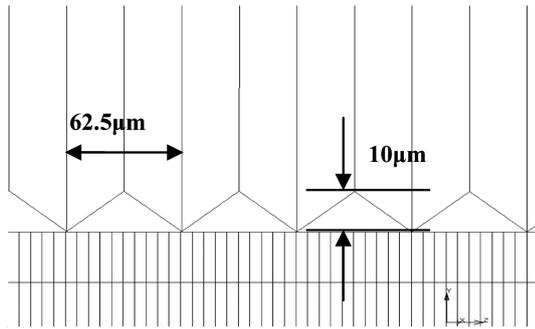


図5 ロール表面の要素拡大図
Magnified finite element mesh at roll-plate interface

する圧延板の伸びを求めた。

また実験に用いたロール表面の算術平均粗さは $Ra \approx 3.1 \sim 3.3 \mu\text{m}$ であるが、実際の突起のピーク値は Ra よりも大きいことを考慮してロール表面形状をモデル化した。具体的には突起を正弦波と置いて片振幅 D とした場合の平均値は式 (1) に示すように $0.637D$ となることから、FEM 解析では突起を三角形波と仮定し、最大片側振幅を逆算して $D = 3.2 \mu\text{m} / 0.637 \approx 5 \mu\text{m}$ (計算では両振幅 $10 \mu\text{m}$) で設定した。ここで $Ra = 3.2 \mu\text{m}$ に対応する正弦波と本研究の FEM 解析で設定した三角波の関係を図 4 に示し、ロール表面の突起と圧延板のメッシュの拡大詳細図を図 5 に示す。

$$dave = \frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} |D \cdot \sin(2\pi x / \ell)| dx = \frac{2D}{\pi} = 0.637 D \quad (1)$$

ここで、 ℓ : 正弦波の一周期 (μm)、 x : 変位量 (μm)、 D : 片振幅 (μm)。

計算対象は既報¹⁰⁾で実施したブライトワークロール圧延と同じ潤滑条件と圧延板を用いた実験であるので表 1 に示す条件に合わせ、ブライトワークロール圧延解析と整合性を持たせるために摩擦モデルはせん断摩擦モデルを利用し、その摩擦ファクター m (摩擦応力/せん断降伏応力) は潤滑時には既報¹⁰⁾と同じ $m = 0.2$ 、無潤滑時には $m = 0.275$ と設定し、圧延板を焼鈍後のブリキ原板としたため流動応力を図 6 のように設定した。以上のロール表面および潤滑に関する前提条件を表 2 にまとめ、表 1 に示した圧延条件の下に FEM モデルを作成し、解析を行った。

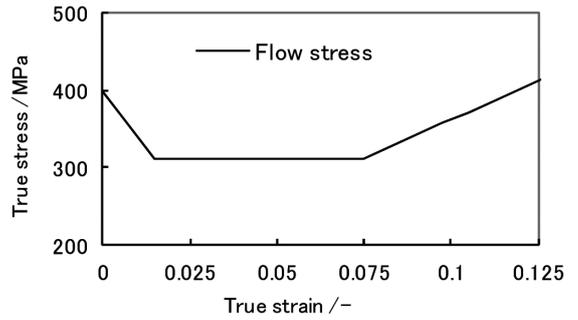


図6 解析で用いた流動応力
Flow stress used in the analysis

表2 ロール表面と潤滑条件
Roll surface and lubrication conditions

WR asperity	Roughness: 3.1 - 3.3 μmRa (shot dull) → Triangle wave type Asperity height: 10 μm Asperity pitch: 62.5 μm
Lubrication	5% emulsion (50°C) → $m = 0.2$ No lubricating → $m = 0.275$

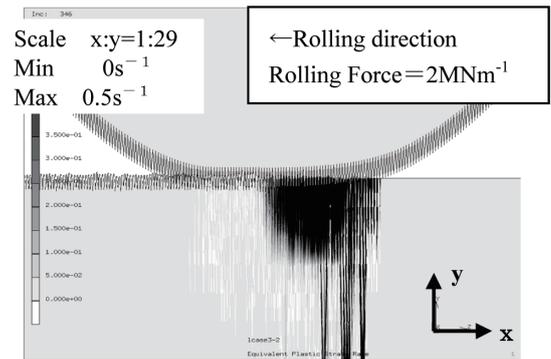


図7 圧延形状と相当塑性ひずみ速度
Rolling configuration and equivalent plastic strain rate

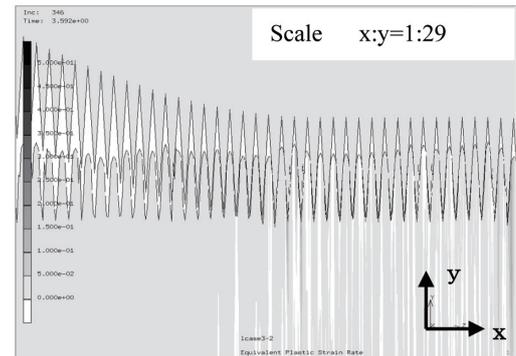


図8 圧延形状と相当塑性ひずみ速度 (拡大)
Rolling configuration and equivalent plastic strain rate (enlargement)

2.4 数値解析結果と実験結果の比較

数値解析で得られた圧延状況の一例として、図 7 および図 8 に、圧延荷重 $2\text{MN} \cdot \text{m}^{-1}$ で圧延中のロールと圧延板の接触状態を示す図とその拡大図を示す。なおいずれの図も

板厚方向を圧延方向に対して 29 倍に拡大して示している。図 7, 図 8 より, ダルワークロール圧延ではワークロール自体はほぼ前後対称形状に扁平変形しており, ロール表面の突起を起点に塑性変形が発生し, 圧延板表層部を主体に塑性変形が進行している状況がわかる。

次に荷重を徐々に増加させた場合の, 板厚方向で平均化した圧延方向の伸びひずみの変化を図 9, 図 10 に示す。伸びひずみについてはロール表面の突起周期で圧延方向に大きく変動しているため移動平均による平滑化処理を施した。なお, 伸びひずみの上記変動の原因はロール表面に付与した突起の影響と考えられる。本研究で用いた突起高さ $10\mu\text{m}$ の値は半板厚 0.1mm (板厚 0.2mm) の 10% に相当し, 1% 未満の圧延伸びに対しては非常に大きな値である。その結果, 圧下率そして伸びひずみが周期的かつ顕著に変動し, 平均的な伸びひずみに対し, 変動の絶対値は 5 倍程度となっている。本論文ではこれ以降の圧延シミュレーションによる圧延荷重と伸びの検討においては, 原則として, この移動平均後の伸びひずみを伸び率と呼称して用いる。

図 1 および図 2 に示した実験に対応した計算による荷重と伸び率の関係を図 11 に示す。計算による伸び率は, 潤

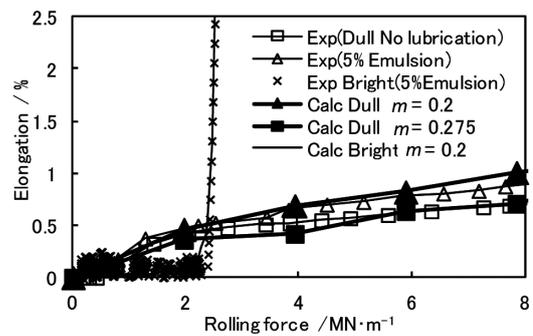


図 11 ダルロール圧延による伸び率の実験と計算の比較
Comparison of calculation with experiment on elongation of rolled plate with dull rolls

滑時は $m=0.2$, 無潤滑時は $m=0.275$ と摩擦ファクターを微調整することで実験値と非常に良い一致を示している。

また図 11 には既報¹⁰⁾に示したブライトワークロールで圧延した際のジャンピング現象の実験と計算結果も併せて示している。この結果が示すように, 本解析では, ブライト圧延条件の時の摩擦条件を変更することなく, ロール表面性状を実態に応じて与えることで, ブライトワークロール圧延とダルワークロール圧延の双方の条件における圧延荷重と伸びの関係を正確に表現できており, 本解析の妥当性と解の普遍性を示していると考えられる。

3. ダル圧延現象の数値解析に基づく考察

前章で示したように, ワークロールの弾性変形と圧延板の弾塑性変形を正確に考慮する本解析手法によって, 従来研究では不可能であった大径ワークロールを用いたダルワークロール圧延の正確な数値解析が可能となった。そこで本章では, 本解析手法を用いて摩擦ファクターおよびロール表面の突起が圧延荷重-伸び率関係におよぼす影響について感度解析を行い, ダルワークロール圧延現象についてさらに考察した。

3.1 摩擦ファクターの影響

ロール表面の突起や摩擦ファクターが伸び率に及ぼす影響を考察するため, 摩擦ファクター m をパラメータにして単位幅あたりの圧延荷重に対する伸び率の計算結果を図 12 に示す。いずれの摩擦ファクターにおいても圧延荷重が増えれば伸び率は増加する。また摩擦ファクターが小さくなると伸び率が增大するが, 摩擦ファクターが $m=0$ の極限状態を仮定しても, スリップを生ずることなく, 圧延現象は成り立つことが判明した。これはロール表面の突起による圧延板の塑性変形に起因する幾何学的な摩擦効果によるものと考えられる。具体的にはダルワークロール表面の突起が圧延板と局所的に接すると接触部では応力の集中でただちに塑性変形を生じ, 局所的には突起が元板厚の 5% 前後も深く食い込むことで, ロール表面の突起斜面と圧延板とが有意な面積の接触面をもち, この斜面から作用する

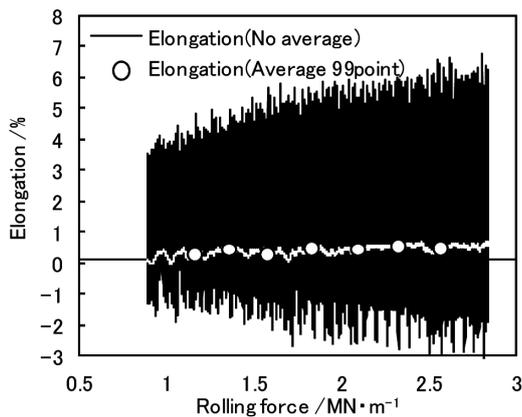


図 9 伸び率と圧延荷重の関係
Relation between elongation and rolling force

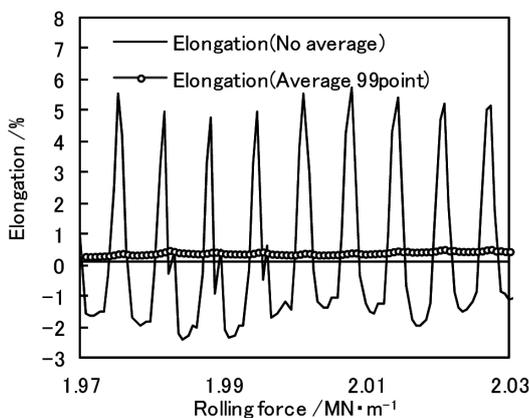


図 10 伸び率と圧延荷重の関係 (拡大)
Relation between elongation and rolling force (enlargement)

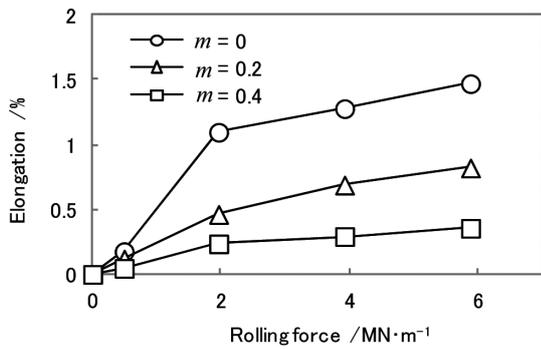


図 12 伸び率に対する摩擦ファクターの影響
Effect of friction factor on elongation

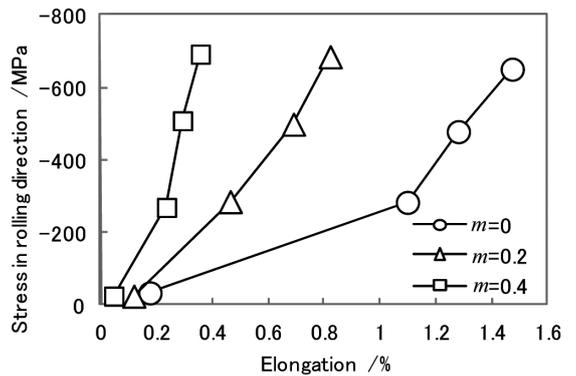


図 13 圧延方向応力と伸び率の関係
Relation between elongation and stress in rolling direction

垂直応力の圧延方向成分が見かけ上の摩擦力として圧延板に作用するためと考えられる。

さらにロールバイト内の全領域で平均した圧延方向応力を摩擦ファクター条件毎に整理した図を図 13 に示す。図 13 において同じ伸び率で比較すると、摩擦ファクターが大きいほど圧延方向の圧縮応力が大きいことがわかる。これは上記した幾何学的な摩擦力だけでなく、摩擦ファクターが大きくなることによってロールの突起斜面と圧延板との間に作用する摩擦力が大きくなり、その圧延方向成分が見かけ上の摩擦力に加わるため、圧延板に作用する圧延方向圧縮応力が増加していると説明することができる。圧延方向圧縮応力が増加すると降伏条件より圧延圧力が増大することになるため、図 12 のように同じ伸び率に対して圧延荷重が増大することになる。

次に上記の現象を同じ圧延荷重状態で考察する。図 14、図 15 には、摩擦ファクター $m=0$ および $m=0.4$ 条件での圧延荷重 $4\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$ 時のロールと圧延板との接触開始時の同一圧延位置での塑性ひずみ速度の分布図を示す。圧延板に示された白い部分は 1s^{-1} 以上の高い相当塑性ひずみ速度が発生していることを示しているが、図 14 と図 15 の二つの圧延状態を比較すると大きな違いがあることがわかる。

すなわち、図 14 の摩擦ファクター $m=0$ の場合は、ロール突起部から発生した塑性領域が板厚全体を貫通して圧延板全体の伸びに寄与しているのに対して、図 15 の $m=0.4$ の場合は、ロール突起部から発生した塑性領域のほとんどが板表層領域にとどまり伸びに寄与することなく、ポンチ押し込み時に発生する塑性領域と類似の形態となっている。この差異は、上記したように、摩擦ファクターが大きい場合、圧延方向圧縮応力が大きくなり圧延方向の塑性ひずみの源泉である偏差応力が小さくなるためと説明できる。

3.2 ロール表面の突起高さ（高さ）の影響

前節で考察したようにロール表面の突起はダルワークロール圧延を特徴づける最も重要な因子である。そこでここではロール表面の突起形状が圧延特性におよぼす影響について検討する。まず摩擦ファクター m を 0.2 とし、突起

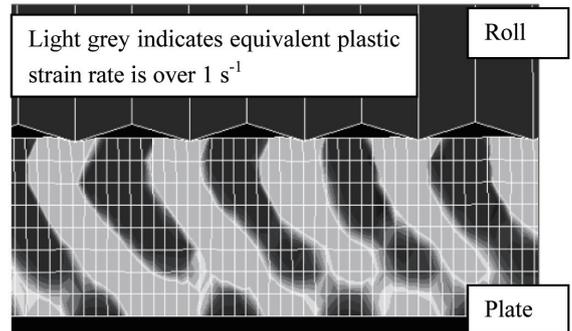


図 14 ロールバイトでの相当塑性ひずみ速度 ($m=0$)
Equivalent plastic strain rate at roll bite ($m=0$)

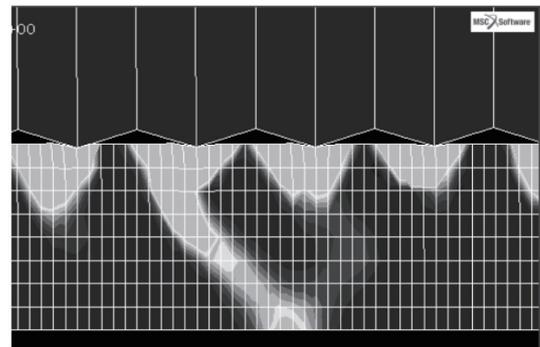


図 15 ロールバイトでの相当塑性ひずみ速度 ($m=0.4$)
Equivalent plastic strain rate at roll bite ($m=0.4$)

のピッチは変えず突起の高さを $1.5\sim 10\mu\text{m}$ に変化した場合の荷重と伸びの関係を図 16 に示す。図 16 より、突起の高さが大きいと伸び率が小さくなり、小さいと伸び率が大きくなることがわかる。これは、ロール表面の突起高さが大きくなることで突起が鋭くなり、突起が圧延板に深く食い込み、接触面積が増大すること、突起斜面の勾配が大きくなることで、ロール-圧延板間に作用する面圧の圧延方向成分が大きくなり見かけの摩擦力が増大するためと考えられる。

3.3 ロール表面の突起ピッチの影響

次に突起ピッチの影響について考察を行う。摩擦ファク

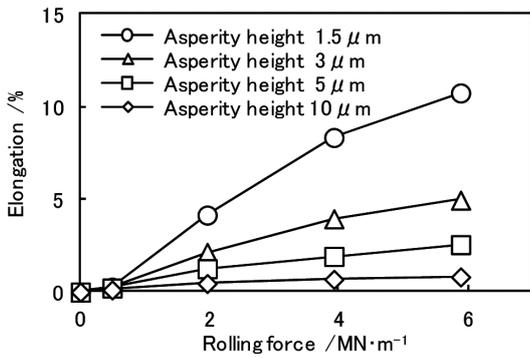


図 16 伸び率に対するロールの突起高さの影響
Effect of roll asperity height on elongation

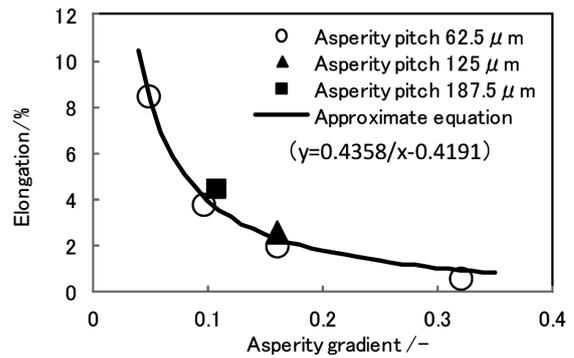


図 18 伸び率に対するロールの突起角度の影響
Effect of roll asperity angle on elongation

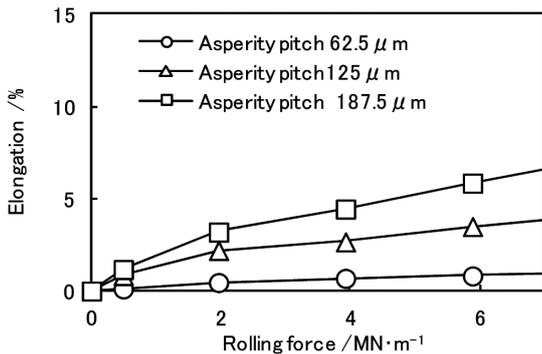


図 17 伸び率に対するロールの突起ピッチの影響
Effect of roll asperity pitch on elongation

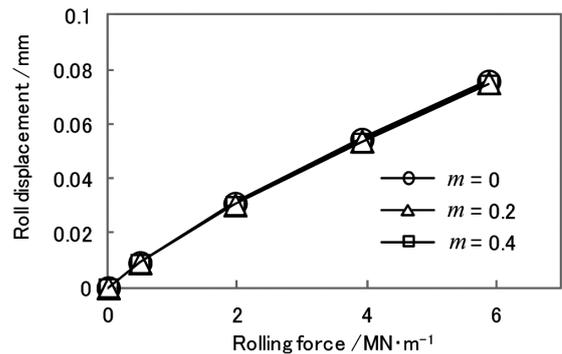


図 19 圧延荷重とロール変位の関係
Relation between roll displacement and rolling force

ター m を 0.2 とし、ロール表面の突起高さ $10\mu\text{m}$ は変えず突起のピッチを $62.5\sim 187.5\mu\text{m}$ に変化させた場合の荷重と伸びの関係を図 17 に示す。図 17 より突起のピッチが小さくなると伸び率が小さくなることからわかる。これは、突起高さの影響と類似のメカニズムで、突起ピッチが小さくなることで、ロール表面突起が鋭くなることと単位面積あたりの突起の数が増大することで、ロール-圧延板間の接触面積が相対的に増大し、さらに突起斜面の勾配が大きくなることで、ロール-圧延板間に作用する面圧の圧延方向成分が大きくなり見かけの摩擦力が増大するためと考えられる。

3.4 ロール表面突起斜面の角度の影響

これまでのロール表面の突起の影響を、高さ h 、ピッチ p の視点から検討してきたが、いずれの場合もロール表面突起斜面の勾配が重要な要因の一つと考察された。そこで突起ピッチ p と高さ h から式 (2) で定義されるロール表面突起の斜面角度を求め伸び率におよぼす影響を、圧延荷重 $4\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$ の条件に対して整理した結果を図 18 に示す。

$$\text{grad} = \frac{h}{(p/2)} \quad (2)$$

図 18 より、これまでに考察したように突起斜面角度が大きくなると伸び率が減少していることが確認できる。また図 18 には、突起高さを変更した条件と突起ピッチを変更し

た条件の双方をプロットしているが、いずれもほぼ双曲線状の一本の曲線に乗っている。このことはロール表面突起の勾配が、ダルワークロール圧延における見かけの摩擦力の支配的因子であることを示しているものと考えられる。

3.5 圧下位置変化と圧延荷重、伸び率の関係

次にロール変形と圧延板変形との関係を定量的に検討するため、ロール中心の圧下方向への移動量、すなわち圧下操作量に相当するパラメータに着目して考察する。図 19 には、図 12、図 13 に示した摩擦ファクターを 3 水準とった解析条件を前提として、ロール中心の圧下方向への移動量すなわちロール圧下量と圧延荷重の関係を示す。

図 19 より、摩擦ファクターの値にかかわらず、ロール圧下量と圧延荷重は、ほぼ一対一の関係を有し大略比例関係にあることがわかる。この結果を図 12 の結果と併せて、調質圧延操作をイメージすると、ロール圧下量を与えることで圧延荷重がほぼ一意に決まるが、そのとき得られる伸び率は摩擦ファクターによって大きく変化することを示している。この状況は入側板厚とロール圧下位置すなわちロールギャップによって圧延荷重そして板厚が決定される古典圧延理論の見識とは異なるように思われる。すなわち古典圧延理論ではロール圧下位置が与えられれば圧延荷重と板厚は一対一に対応するが、図 12 と図 19 によると圧延荷重と伸び率、すなわち板厚が一対一に対応しないことを示し

ている。

ダルワークロール圧延における上記現象は次のように理解することができる。図 12 より、今考えている圧延荷重領域で得られる圧延板の伸び率は 1% 前後であり入側板厚 0.2mm を考慮すると板厚圧下量は 2 μ m 前後である。一方、図 19 に見られるロール圧下量は片側で 50 μ m 前後であるので上下ロール分を合わせて 100 μ m 前後となる。したがって、ロール圧下量の大部分は板厚圧下ではなくロール偏平変形に費やされていることがわかる。つまり解析対象とした圧延条件のように 0.2mm の薄鋼板に対して 1% 前後の伸び率を問題にするような圧延領域では、ロール偏平変形に比べて伸び率変化を与える板厚変化は無視できるほどに小さいこと、そして摩擦条件の違いによる圧延板の見かけの塑性係数の変化が極めて大きいこと、の二つの要因を考慮することで古典圧延理論の延長上の考え方でダルワークロール圧延現象を理解することが可能となる。

4. ブライトワークロール圧延との相違に関する考察

4.1 低荷重領域における塑性変形特性の相違

ブライトワークロール圧延に比べてダルワークロール圧延の伸び率が小さくなる高圧延荷重領域の現象については、ダルワークロール表面の突起による幾何学的摩擦効果を考慮することで説明可能であることをこれまでの検討で明らかにした。そこでここではブライトワークロール圧延に比べてダルワークロール圧延の伸び率が大きくなる低荷重領域について考察する。

摩擦ファクター $m=0.2$ で、圧延荷重 $2\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$ における接触弧長内の板厚平均の相当塑性ひずみ速度および相当塑性ひずみを、それぞれ図 20 および図 21 に示す。図 20、図 21 では同じ圧延荷重でダルワークロールとブライトワークロールの圧延状態を塑性ひずみの観点から比較している。前章における考察より、ブライトワークロールとダルワークロールとでロール偏平量はほぼ同じであるがダルワークロールは表面の突起があることによって図 14、図 15 に示す見掛けの接触長が増大するとともにロール表面突起が圧延板に食い込むことによって大きな塑性変形が生じる。

圧延荷重が $2\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$ の時、ブライトワークロール圧延では図 11 に示したように、ジャンピング開始前の状態であるため、図 20 に示すように僅かに相当塑性ひずみ速度は発生しているもの図 21 に示すように相当塑性ひずみは 0.002 程度であり、図 6 に示した流動応力モデルでは流動応力は上降伏点近傍にとどまっている。一方ダルワークロールの圧延条件では図 14、図 15 に示したようにロール突起部を起点として 1.0s^{-1} 以上の相当塑性ひずみ速度が発生しており、図 20 で確認できるようにロールバイト入口近傍で相当塑性ひずみは下降伏点に到達する 0.015 を超えて

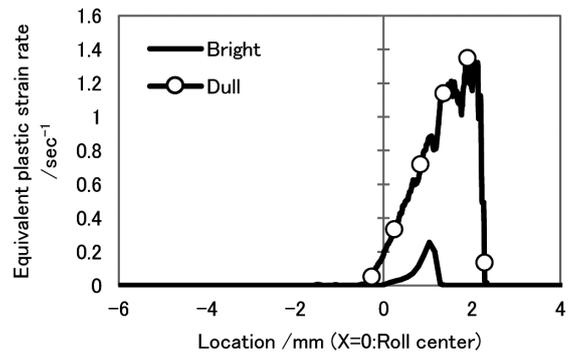


図 20 ロールバイト近傍の相当塑性ひずみ速度分布
Distribution of equivalent plastic strain rate along the roll-bite ($m=0.2$)

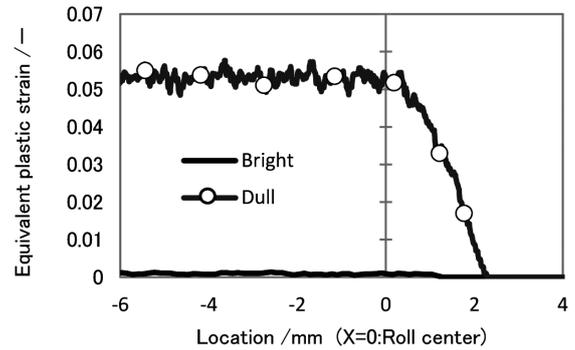


図 21 ロールバイト近傍の圧延方向の塑性ひずみ分布
Variation of plastic strain in the rolling direction along the roll-bite ($m=0.2$)

いる。すなわち、ダルワークロール圧延条件ではロール突起部が圧延板に食い込むことによって早い段階で流動応力が下降伏点に到達することで、ジャンピング開始前のブライトワークロール圧延条件よりも大きい伸び率が与えられていると説明することができる。

4.2 圧延張力に関する考察

既報¹⁰⁾において、ジャンピングが生じてしまった状態でのブライトワークロール圧延では入側張力に比べ出側張力の方が伸び率に及ぼす影響が大きいことを明らかにした。そこでここでは、ダルワークロール圧延に対して、入側張力 82MPa、出側張力 98MPa を基準条件にして入側張力を変化させて圧延荷重に対する伸び率の変化を調べた。

図 22 および図 23 に結果を示すが、ダルワークロール圧延の場合はブライト圧延と異なり入側張力の方が伸び率に大きな影響を及ぼすことがわかる。これは図 20 で考察したようにジャンピング後のブライトワークロール圧延では塑性変形が接触弧長の後半部に集中しているのに対して、ダルワークロール圧延では接触弧長全体で塑性ひずみ速度が発生し、しかもロールバイト入口側で顕著な塑性ひずみ速度が発生しているため入側張力の影響が大きくなったものと推測される。

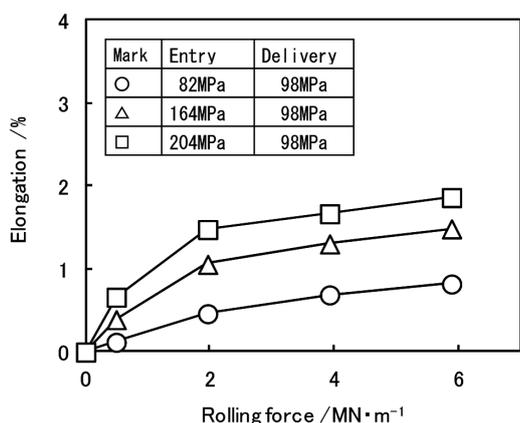


図 22 入側張力の影響
Effect of entry tension on elongation

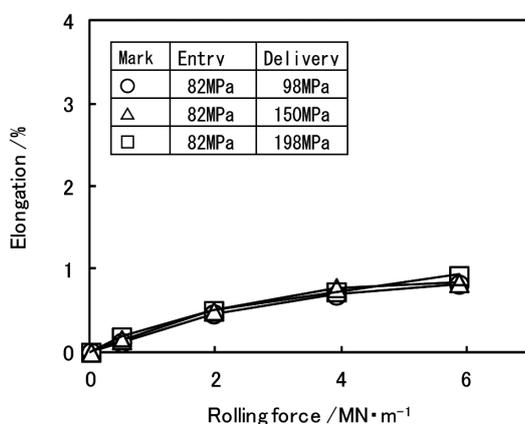


図 23 出側張力の影響
Effect of delivery tension on elongation

5. ダルワークロール圧延解析による粗度転写

次に粗度転写現象のメカニズムについて検討を行う。図 24 は前記ダルワークロール圧延解析で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一例である。本検討では前記ダルワークロール調質圧延の解析結果を踏まえ、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て、表面粗度 Ra の計算と実験結果を比較する。

5.1 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述の取り組みと同様にした。表 3 に実験および計算条件を示す。

5.2 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図 25 に解析と実験結果を比較して示した。 $\phi 480\text{mm}$ 径の大径ロールおよび新たに追加した $\phi 165\text{mm}$ 径の小径ロールも潤滑条件 $m=0.2$ 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

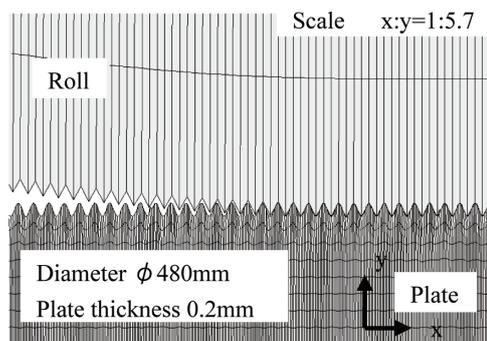


図 24 (出側における) ロール表面の転写
Transcription of the roll surface asperity (in delivery side)

表 3 圧延条件
Rolling conditions

WR	($\phi 480\text{mm}$, $\phi 165\text{mm}$) \times 400 mm width, Roughness: 3.1 - 3.3 μmRa (shot dull) → Asperity height: 10 μm Asperity pitch: 62.5 μm
Lubrication	5% emulsion (50°C) → $m=0.2$ No lubricating → $m=0.275$
Plate	Thickness: 0.2 mm, Width: 150 mm Upper yield stress: 400 MPa Lower yield stress: 312 MPa
Rolling conditions	Entry unit tension: 82 MPa Delivery unit tension: 98 MPa Rolling speed: 10 m/min

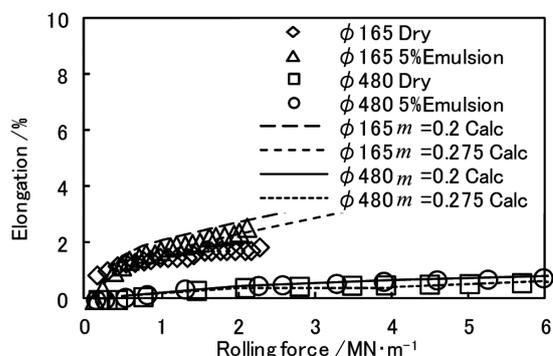


図 25 ダルロールによる圧延板の伸び率
Elongation of rolled plate with dull rolls

くなっているが、大径ロールとの相違、潤滑効果を含め、本数値解析はダルワーク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。

図 26 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既報¹⁰⁾の結果も併せて示す。ブライトワークロールはダルワークロール条件に比べ $0.5\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$ 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図 27 に示す。

この結果より、 $\phi 165\text{mm}$ 径のロール表面に突起を付与していないブライトワークロール圧延では、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、大径のダルワーク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径のダルワーク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ワーク

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。

5.3 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。

図28はφ165mm径、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で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。

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図29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

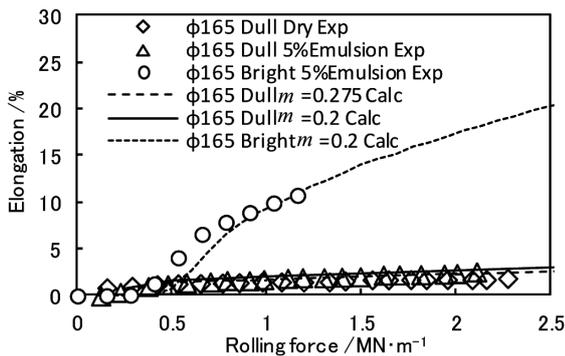


図26 ダルロールおよびブライトロールによる圧延板の伸び率
Elongation of rolled plate with dull and bright rolls

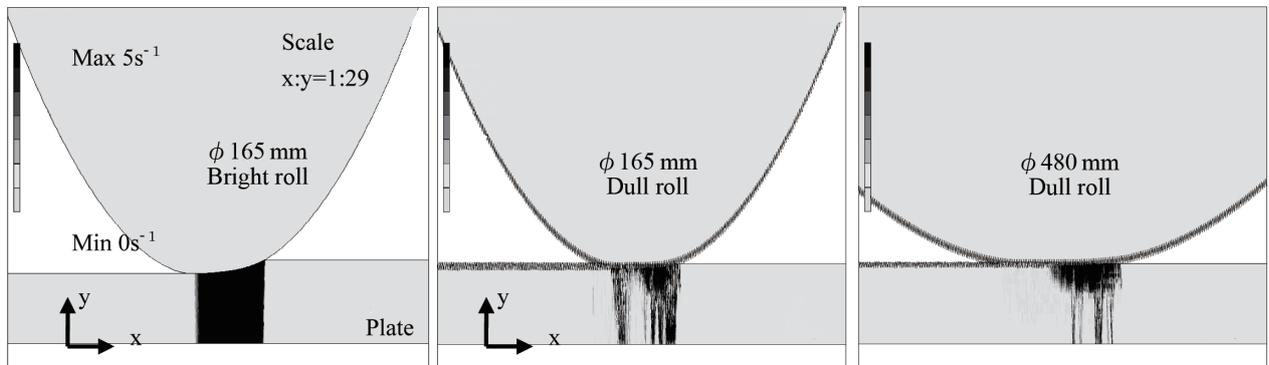


図27 圧延荷重 $2\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$ 時のφ165mm径ブライト、φ165、480mm径ダルによるロールバイト近傍の相当塑性ひずみ分布
Distribution of plastic strain rate around the roll bite with φ165, 480mm dull and φ165mm bright rolls at rolling force $2\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$

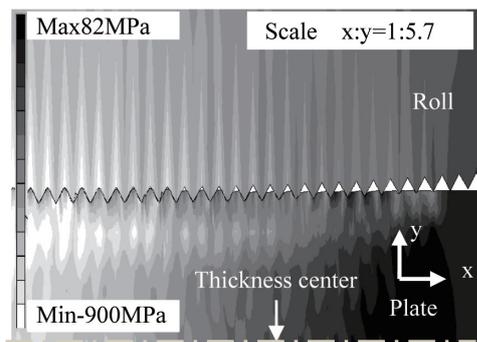


図28 圧延荷重 $2\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$ での圧延方向応力
Stress in rolling direction at rolling force $2\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$

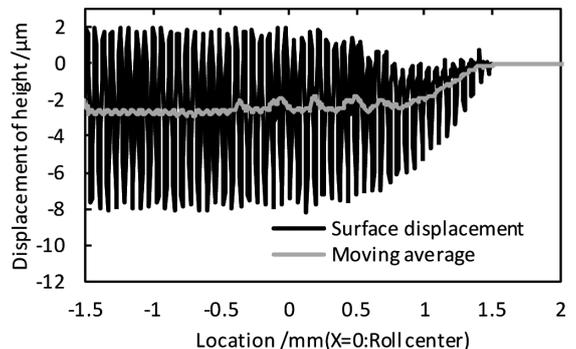


図29 ロールバイト近傍の幾何学的変化(φ165mm径)
Geometrical changes around the roll bite (with φ165mm roll)

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図 30 に示し、圧延方向 (x) 応力 $\bar{\sigma}_x$ と板厚方向 (y) 応力 $\bar{\sigma}_y$ のロールバイトにおける推移を図 31 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して定義した。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。図 30 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。また図 31 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

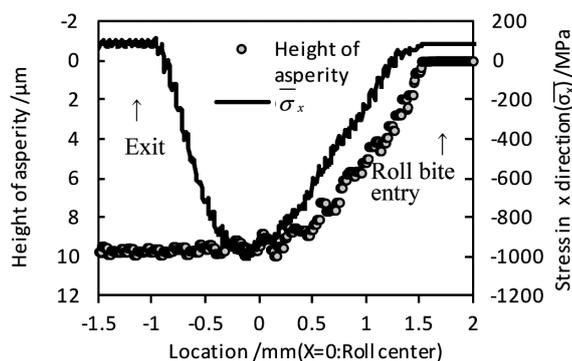


図 30 圧延方向応力と突起高さの関係 ($\phi 165\text{mm}$ 径, 圧延荷重 $2\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$)

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

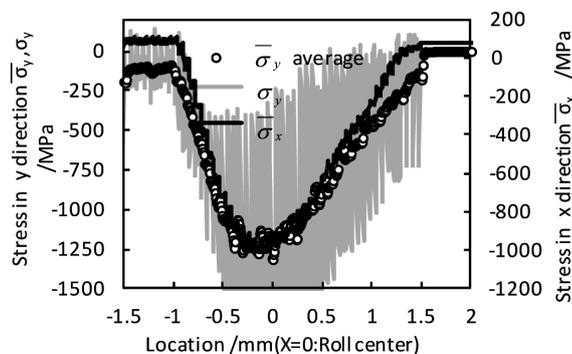


図 31 圧延方向応力と板厚方向応力の関係 ($\phi 165\text{mm}$ 径, 圧延荷重 $2\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$)

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

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。

5.4 粗度転写解析の評価

ダルワーク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、 $\phi 165\text{mm}$ 径、 $\phi 480\text{mm}$ 径ロールに対してそれぞれ図 32、図 33 に示す。 $\phi 165\text{mm}$ 径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、 $\phi 480\text{mm}$ 径の大径ロールの実験では圧延荷重が大きくなってでも小径に比べなかなか転写が進まず、圧延荷重が $4\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$ 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きている。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。

次に図 34、図 35 に伸び率に対する粗度 Ra 転写の関係を比較した。 $\phi 165\text{mm}$ 径の小径ロールに関しては図 32 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 $\phi 480\text{mm}$ 径の大径ロールでは摩擦ファク

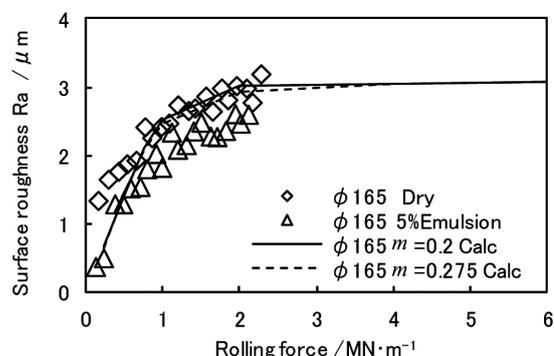


図 32 圧延荷重と表面粗度の関係 ($\phi 165\text{mm}$ 径)
Relation between surface roughness and rolling force (with $\phi 165\text{mm}$ roll)

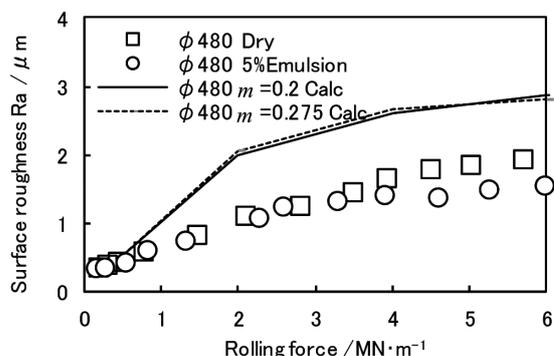


図 33 圧延荷重と表面粗度の関係 ($\phi 480\text{mm}$ 径)
Relation between surface roughness and rolling force (with $\phi 480\text{mm}$ roll)

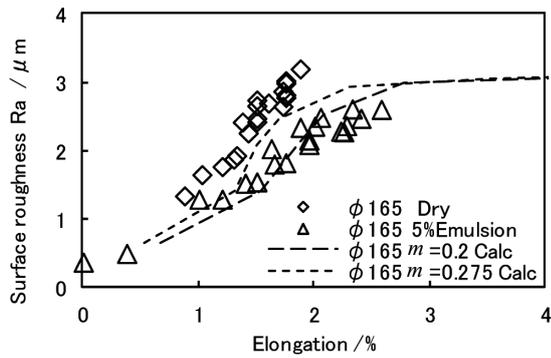


図 34 伸び率と表面粗度の関係 (φ165mm 径)
Relation between surface roughness and elongation (with φ165mm roll)

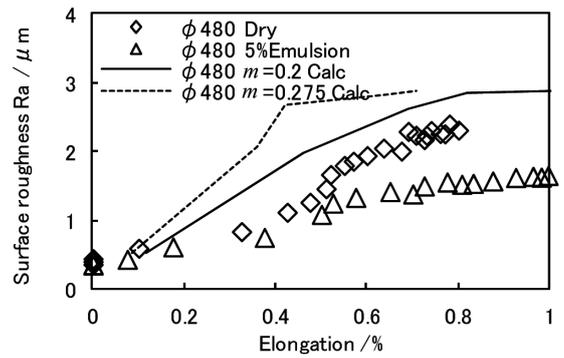


図 35 伸び率と表面粗度の関係 (φ480mm 径)
Relation between surface roughness and elongation (with φ480mm roll)

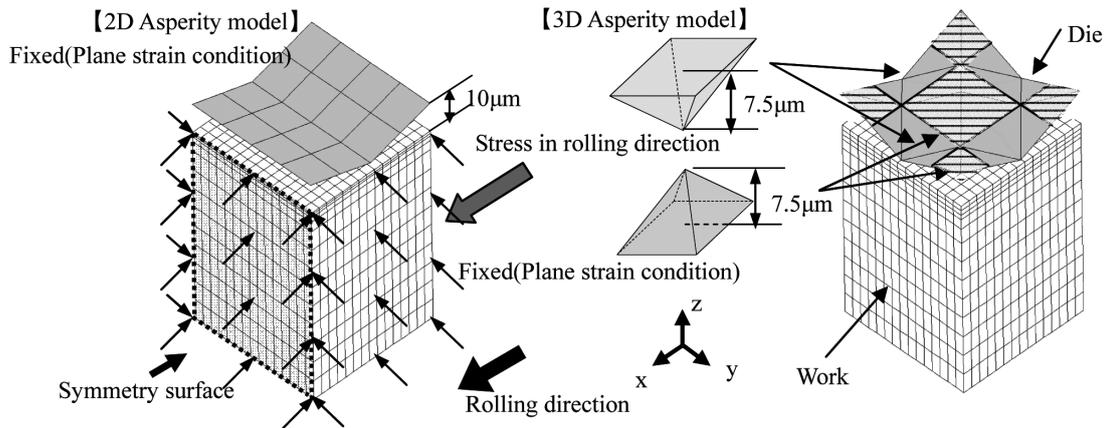


図 36 2D, 3D ワークと工具の形状と要素メッシュ
2D, 3D die and work configuration and finite element mesh

ターの影響は現れるものの、定量的には一致していない。
こ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¹³⁾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。

6. 粗度転写現象に関する考察

6.1 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 が実測と定量的にはほぼ一致したが、大径ロールでは20~30%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、工具形状は図36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)。また図36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。詳細な計算条件は図36並びに表4に示す。

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する [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

表4 押圧解析条件
Conditions of die press simulation

Work (rolled material)	Width 62.5 μ m, Length 62.5 μ m Thickness 0.1mm (1/2 symmetry) Upper yield stress: 400 MPa Lower yield stress: 312 MPa Entry unit tension: 82 MPa
Asperity	Height (p-p) 10 μ m (2D), 15 μ m (3D) Pitch 62.5 μ m
Pressing conditions	0.6%, 1.0% reduction Friction factor $m=0.275$ (MK-model) Prescribed stress at boundary = -2000 - 0 MPa

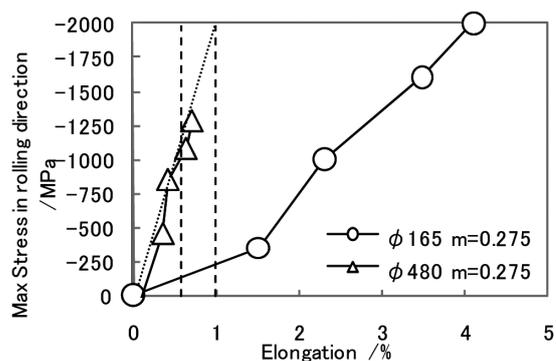


図37 圧延方向応力と伸び率の関係
Relation between stress in rolling direction and elongation

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でさら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の分割は図29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、図30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、図34、図35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図37に示す2次元圧延解析の結果より0～-2000MPa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図38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。

次に図38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。この結果を図34、図35、図37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、図37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図37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、図38に示すように、この領域は2D突起が

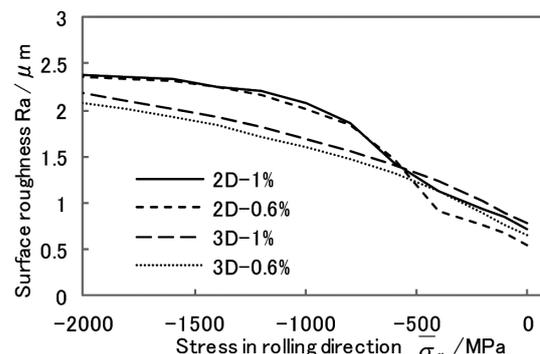


図38 圧延方向応力と表面粗度の関係
(0.6%および1%伸び率)
Relation between surface roughness and stress in rolling direction (0.6% and 1% elongation)

3D突起よりも転写効率が高くなるので、図33、図35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、図38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0.1～0.2 μ 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図39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メタル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メタル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。

この観点で図39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メタル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。

図40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メタル充填が遅れるため2D突起よりも転写粗度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粗度を過大評価することになる。

ところで、図38より、2D突起の場合、圧延方向圧縮応力が小さくなると転写粗度がステップ状に低下しており、結果的に3D突起と同等の転写粗度になっている。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図32に示すように転写粗度の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。

この原因を考察するため図41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メタル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、このことにより図38における2D

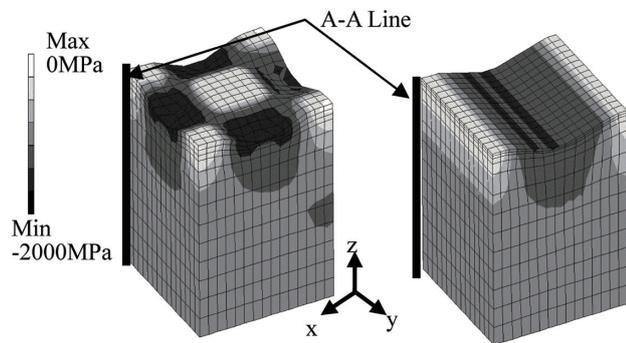


図39 板厚方向応力分布 ($\bar{\sigma}_x = -1200$ MPa)
Distribution of stress in thickness direction (at $\bar{\sigma}_x = -1200$ MPa)

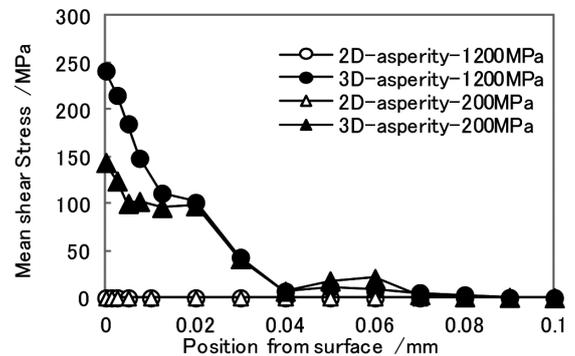


図40 対称面における平均せん断応力 ($\bar{\sigma}_x = -1200$ MPa)
Mean shear stress in symmetry surface (at $\bar{\sigma}_x = -1200$ MPa)

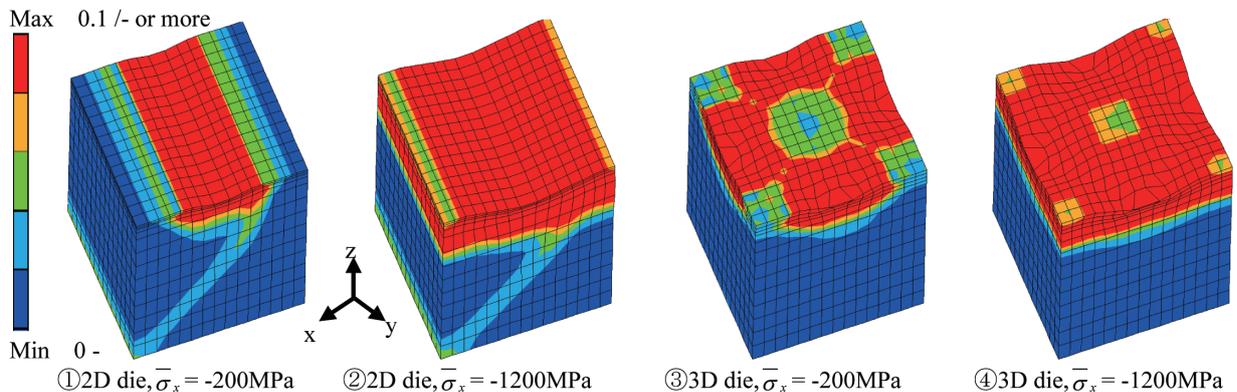


図41 相当塑性ひずみ分布 (伸び率0.6%, 圧延方向応力 = -200MPa および = -1200MPa)
Distribution of equivalent plastic strain (at stress in rolling direction -200MPa or -1200MPa, elongation 0.6%)

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ものと考えられる。

6.2 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て、実用的な粗度転写予測手法を提案する。

前述したように、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、ダルワーク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図 36、表 4 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。

図 42 には、φ165mm 径ロールの伸び率 1% の条件、および φ480mm 径ロールの伸び率 0.6% 条件について上記の方法で予測した粗度を図 34 および図 35 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。

7. 結 言

ダルワークロールを用いた極薄鋼板の調質圧延特性を解明するため、大径ワークロールの試験圧延機を用いた実験

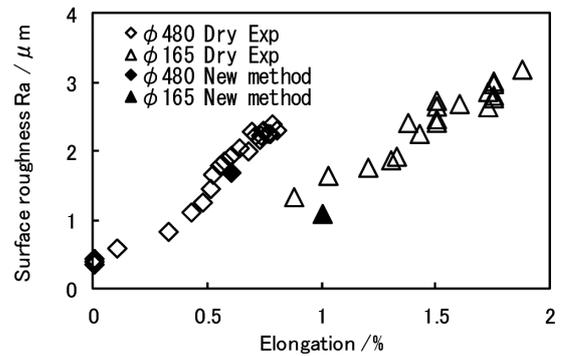


図 42 提案した方法による表面粗度の予測
Prediction of surface roughness by proposed method

を行い、実験条件に基づき弾塑性有限要素法による数値解析を実施し、以下の結果が得られた。

- 1) ダルワークロール圧延では圧延荷重の増大に伴って伸び率が漸増するが、ブライトワークロール圧延と比べると、ジャンピング前の低荷重領域では伸び率が大きく、ジャンピング後の高荷重領域では伸び率が著しく小さくなる。
- 2) 圧延板の弾塑性変形のみならずロールの弾性変形を正確に考慮する2次元圧延数値解析手法を用い、ロール表面の突起を三角形状で適切にモデル化することにより、実験で得られたダルワークロール圧延特性を正確に再現することができた。
- 3) ダルワークロール圧延の圧延荷重－伸び率関係特性は、ロール表面突起による局所塑性変形が板厚方向に貫通する効果と、ロール表面突起による幾何学的摩擦効果の二つの因子によって説明可能であることを明らかにした。
- 4) ロール表面突起による幾何学的摩擦効果は突起斜面の角度に支配されることを明らかにした。
- 5) 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。
- 6) 2次元圧延解析による転写予測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。

参照文献

- 1) 白石利幸, 明石透, 高浜義久, 小川茂: 塑性と加工. 51 (597), 969-973 (2010)
- 2) 松本紘美: 調質圧延のマイクロ変形解析研究会最終報告. 日本鉄鋼協会, 2007, p. 25-34
- 3) 窪田征雄, 伊藤正登: 鉄と鋼. 94 (10), 405-414 (2008)
- 4) Yoshida, F., Kaneda, Y., Yamamoto, S.: Int. J. Plasticity. 24, 1792-

- 1818 (2008)
- 5) 鎌田征雄, 伊藤正登: 鉄と鋼. 94 (10), 391-398 (2008)
- 6) 池浩: 調質圧延のミクロ変形解析研究会最終報告. 2007, p. 99-110
- 7) 湯川伸樹, 秋山友彦, 吉田佳典, 石川孝司: 鉄と鋼. 94 (10), 399-404 (2008)
- 8) 明石透, 白石利幸, 小川茂, 松瀬善信: CAMP-ISIJ. 24, 909 (2011)
- 9) Kijima, H.: J. Mat. Proc. Technol. 214, 1111-1119 (2014)
- 10) 明石透, 白石利幸, 小川茂, 松瀬善信: 塑性と加工. 54 (630), 606-611 (2013)
- 11) 明石透, 白石利幸, 小川茂, 松瀬善信: 塑性と加工. 55 (639), 324-330 (2014)
- 12) 明石透, 白石利幸, 小川茂, 松瀬善信, 森原秀征: 塑性と加工. 56 (648), 53-59 (2015)
- 13) 長瀬直樹, 志渡誠一, 鎌田征雄: 鉄と鋼. 94 (10), 429-437 (2008)



明石 透 Tooru AKASHI
プロセス研究所 一貫プロセス研究部
首席主幹研究員 工博
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



白石利幸 Toshiyuki SHIRAISHI
プロセス研究所 圧延研究部
主幹研究員 工博



小川 茂 Shigeru OGAWA
技術開発本部 顧問 工博



松瀬善信 Yoshihito MATSUSE
NSプラント設計(株)
シミュレーションエンジニアリング・ソリューション部
チーフ



森原秀征 Hideyuki MORIHARA
産機エンジニアリング(株)
CAE室 マネージャー