

薄鋼板の調質圧延における粗さ転写メカニズムの検討

Mechanism of Roughness Profile Transfer in Skin-pass Rolling of Thin Steel Strip

木島 秀夫 KIJIMA Hideo JFE スチール スチール研究所 圧延・加工プロセス研究部 主任研究員 (部長)・博士 (工学)

要旨

調質圧延は薄鋼板の最終工程にあつて、わずかな塑性ひずみを加えることで商品性を決定する重要な役割を担っている。本報では、調質圧延における被圧延材の表面粗さプロフィール形成メカニズムについて、材料変形および潤滑の観点から、ラボ実験および FEM 解析により検討した結果について述べた。調質圧延では板厚変化量に対して大きな径のワークロールを使用することが特徴であり、接触長が十分大きくなることで接触長中央の静水圧が大きくなる。その結果として単純垂直挟圧により粗さの転写を模擬できるとともに、粗さ転写に最も重要な指標となるピーク面圧をヘルツ接触により近似することもできる。潤滑の影響は表面粗さプロフィールの潤滑性評価パラメータを用いることで明快かつ合理的に説明され、初期に凸部が接触して凹部を形成したあとに潤滑剤が封入されて伸び率や粗さ転写率に影響することがわかった。

Abstract:

Skin-pass rolling (or temper rolling) is usually the final process in the production of cold-rolled steel sheets. One of the main objectives in skin-pass rolling is to obtain a certain surface roughness profile. In this paper, the mechanism of roughness profile transfer in skin-pass rolling is investigated by experimental rolling tests as well as numerical analysis by elastic-plastic FEM in terms of material deformation and lubrication. Roughness transfer in skin-pass rolling could be modeled as vertical indentation of the roughness profile because the peak pressure which can be estimated by Hertzian elastic contact is the most important parameter. The effect of the lubrication can be explained convincingly and reasonably by height characterization parameters. When elongation is small, the effect of lubrication is not observed in elongation and roughness transfer. After the effect of lubrication had appeared, the trapped lubricant supports pressure.

1. はじめに

調質圧延は薄鋼板製造工程の最後にあり、焼き鈍し後の鋼板にわずかな圧下ひずみを付与して機械的特性、平坦度、表面粗さ、光沢度など商品性を決定する^{1,2)}。加工プロセスとしての調質圧延は、伸び率で示される加工量が1%程度と非常に小さいこと、工具であるワークロールの径が板厚変化量に対して非常に大きいこと、潤滑がドライもしくはごく低粘度の潤滑剤を用いて行われ大きな摩擦係数が予測されること、工具表面を意図的にダル化することが多く変形量が小さいことから不均一な変形状態が予測されること、といった特徴から通常の熱間や冷間の板圧延とは条件が大きく異なり、従来の古典圧延理論による解析が困難である。これまで、古典的二次元圧延理論 (スラブ法) による調質圧延荷重予測³⁾ や、 $\phi 100$ mm 程度のラボ小径ミルを用いた圧延実験⁴⁾ が行われてきた。

一方、鋼板表面粗さを適切に設定することで耐食性、塗装後鮮映性、プレス成形性 (摺動性、耐型かじり性など) が向上することが知られており⁵⁾、ワークロール表面粗さの造り込み技術の発展と相まって、所望の表面粗さプロフィールを得るため実験的研究が多く報告されている^{6,7)}。特に、プレス成形性については、表面粗さプロフィールの凹部における潤滑油の保持性に優れること、また、自動車用外板のように塗装後鮮映性が要求される場合には、うねり (長波長の凹凸) を除去していくことが重要であると言われている。

近年、計算機能力と市販コードの解析安定性、信頼性が著しく向上してきたため、上述のように古典圧延理論の適用が困難な調質圧延条件の解析に FEM (有限要素法、以下 FEM) が適用されるようになってきた⁸⁻¹⁰⁾。さらにモデル内にワークロール表面粗さを考慮し被圧延材表面への粗さ転写挙動を含めたマイクロ解析に関する研究^{11,12)} や、さらに三次元の解析も行われるようになってきている¹³⁾。

そこで、本研究では、薄鋼板の調質圧延について被圧延材内部の変形状態やワークロールと被圧延材の接触状態の

特徴¹⁰⁾ から粗さ転写と潤滑の影響に関するメカニズム^{12, 14, 15)} を明らかにし、妥当性を担保された単純化の指針を示して実操業に有用な知見を得ることを目的とした。本報では、調質圧延の薄板圧延プロセスとしての特徴と表面粗さの転写について、ラボ圧延実験およびその条件のFEM解析によりメカニズムを検討した結果について述べる。

2. 調質圧延における面圧分布のFEM解析

2.1 実験およびFEM解析の条件

ラボ圧延機を用いて無潤滑の調質圧延実験を行い、その条件を模擬する二次元平面ひずみFEM解析を行った。

ラボ実験における被圧延材料は板厚 0.69 mm、板幅 80 mm、長さ 300 mm の切り板状の焼鈍された低炭素鋼板である。工具であるワークロールの材質は冷間ダイス鋼 (SUS2), ロール径は 500 mm, バレル長 150 mm, 表面を円筒研磨により $0.2\mu\text{mRa}$ に仕上げた。ワークロール径は実生産用調質圧延機とほぼ同等である。無潤滑状態とするため、ロール及び材料表面を石油ベンゼンを用いて良く脱脂した。切り板圧延のため入側張力は負荷されていない。

図1¹⁰⁾ にFEM解析モデルの概要を示す。上下の対称性から上半分を解析対象としている。ロールは弾性体 (ヤング率 205.8 GPa, ポアソン比 0.3) とし、計算負荷軽減のため径の半分に相当する中央部分は剛体としている。被圧延材料は弾塑性体であり、弾性特性はロールと同一とし、初期降伏応力および加工硬化曲線は引っ張り試験結果から決定した。両者の接触問題の解法にはペナルティ法を用い、ドライ潤滑を模擬するためアモントン・クーロン摩擦における接触摩擦係数を 0.3 とした¹⁶⁾。使用ソフトは Abaqus Standard (v6) である。比較のため、上記の同一条件においてロールによる単純垂直挟圧の解析も行った。ワークロール、被圧延材表面とも粗さは考慮していない。

2.2 FEM解析による面圧分布の比較

図2¹⁰⁾ に調質圧延条件のFEM解析により計算されたロールバイト内の面圧分布を示す。同図中には比較のためワークロールによる同一荷重での単純垂直挟圧およびヘルツ接触の面圧分布も示した。なお、計算結果の妥当性については、圧延荷重と伸び率の関係により確認されている¹⁰⁾。同図より、典型的な調質圧延条件の特徴として、以下のことが明らかとなった。すなわち、調質圧延における面圧分布はいわゆるフリクションヒルと呼ばれるように静水圧により接触長の中央部で最大となる。その分布は同一荷重の単純垂直挟圧で類推可能であり、さらに接触長中央の最大面圧はヘルツ接触として推定可能である。特に、通常の操業条件である伸び率 1% 程度までであれば誤差は十分小さい。このような特徴は、調質圧延が大径ワークロールを使用するため接触長中央の固着域が大きく¹⁶⁾ 板厚変化量に比べて接触長が

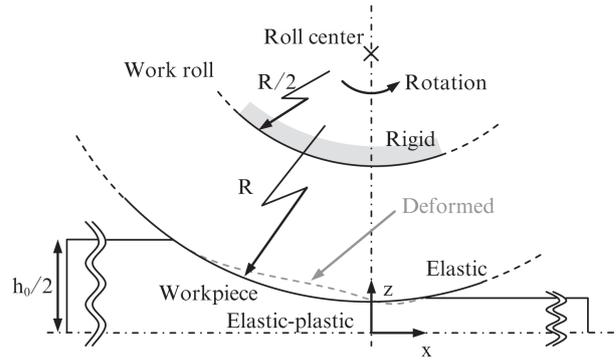


図1 FEM解析モデルの概要¹⁰⁾

Fig. 1 Schematic outline of skin-pass rolling model¹⁰⁾

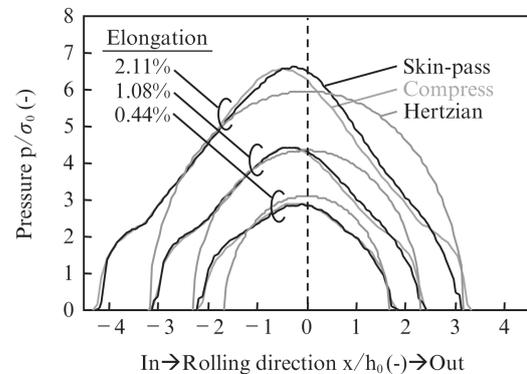


図2 FEM解析によるロールバイト内の面圧分布¹⁰⁾

Fig. 2 Pressure distribution in skin-pass rolling, simple compression and Hertzian elastic contact¹⁰⁾

非常に大きいという加工条件から得られるものである。たとえば図2の例の場合、伸び率 1% での板厚変化量に対する接触長の比は 500 倍以上であり、ワークロールの弾性変形に着目すればヘルツ接触として模擬可能なことも理解される。

3. ダル調質圧延における粗さ転写

3.1 実験条件とロール表面粗さを考慮したFEM解析条件

次に上記のワークロール (R250) 表面を放電加工によりダル加工し、上記同様の調質圧延実験および単純垂直挟圧実験を行った。軸方向のワークロール表面粗さを $Ra=3\mu\text{m}$ とした。なお、カットオフを 2.5 mm, 測定長を 12.5 mm としている。比較として、ワークロール径がラボ圧延機として典型的な $\phi 100\text{ mm}$ と小径 (R50) のラボ圧延機でも同様の実験を行った。調質圧延および単純垂直挟圧後の鋼板表面粗さを測定し、(1)式のとおり母板粗さを控除してワークロールから被圧延材への粗さ転写率を求めた。

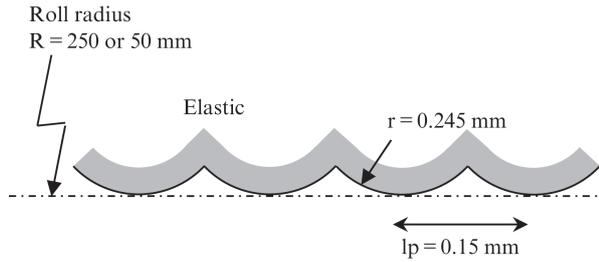


図3 ロール表面粗さプロフィールモデル¹²⁾
Fig. 3 Roughness profile model of roll surface¹²⁾

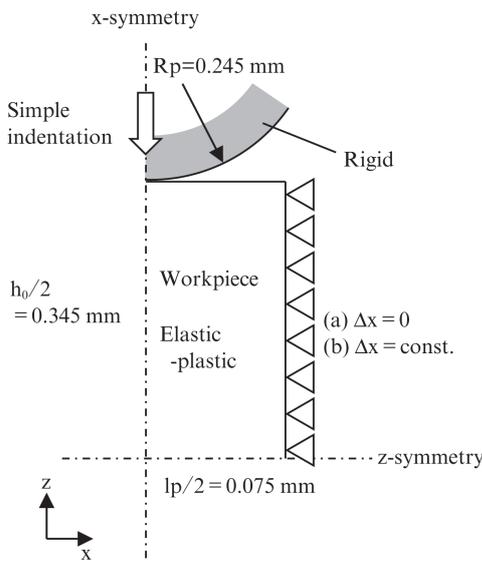


図4 粗さプロフィールの垂直押し込み解析モデル¹²⁾
Fig. 4 Schematic outline of vertical indentation model of one roughness profile¹²⁾

$$\gamma[\%] = 100 \cdot (Ra_{s1} - Ra_{s0}) / (Ra_R - Ra_{s0}) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 Ra_{s0} : 母板粗さ、 Ra_{s1} : 圧延後粗さ、 Ra_R : ロール粗さである。鋼板粗さの測定方向は幅方向である。垂直挟圧の場合は接触長中央近傍において粗さを測定した。

大径ロールにおける粗さ転写の特徴を明確にするため、ワークロール表面粗さプロフィールを考慮した調質圧延および単純垂直挟圧のFEM解析を行った。本解析では、図1に示したワークロール表面の円周方向に図3¹²⁾のような連続的な部分円弧状の模擬粗さプロフィールを付与した。模擬粗さプロフィールの算術平均粗さが $Ra = 3\mu\text{m}$ となるように部分円弧の半径を決定した。但し、二次元解析のため長手方向（圧延方向）の粗さである。それ以外の解析条件は全て第2章と同様である。

さらに、接触長内においてピーク面圧を示す部分は大きな静水圧により長手方向の変形も拘束されていると推定されることから、図4¹²⁾に示すような粗さプロフィール半ピッ

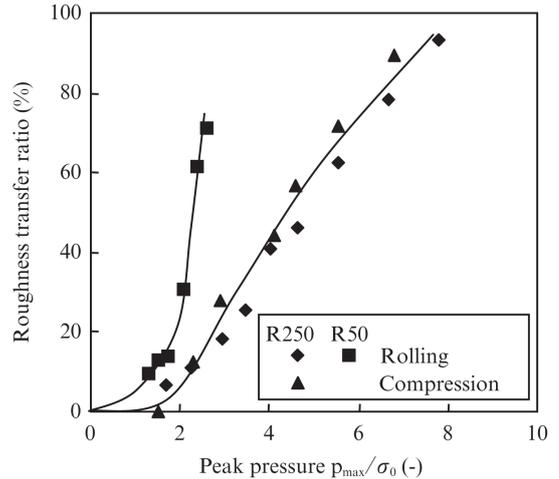


図5 ピーク面圧と粗さ転写率の関係¹²⁾
Fig. 5 Roughness transfer ratio by peak pressure¹²⁾

チ分（図中の円弧はワークロール自体の外周円弧ではない）の垂直押し込み解析も行った。モデルの材料パラメータは第2章と同様であるが、この押し込み解析では粗さプロフィール円弧を剛体壁としている。大きな静水圧が作用している部分を模擬しているため、右側自由端面のx方向変位を拘束してバルクの変形を固定している。

3.2 ピーク面圧と粗さ転写率

図5¹²⁾に上記第2章のFEM解析で得られた調質圧延および挟圧時のピーク面圧（材料の初期降伏応力で無次元化）と実験による粗さ転写率の関係を示す。図2より、調質圧延条件と単純垂直挟圧で同じ荷重であればピーク面圧もほぼ同一となる。大径（R250）条件における横軸最大ピーク面圧に対応する伸び率は約2%である。同図より、調質圧延における粗さ転写率は同一荷重の単純垂直挟圧で模擬可能である。すなわち、ピーク面圧が粗さ転写に最も重要な指標であることが強く示唆された。

図6¹²⁾に、ワークロール表面粗さを考慮したFEM解析の結果を示す。同図は、調質圧延条件の接触長内における粗さ1ピッチ分の局所的な垂直面圧とその位置での粗さ転写率を整理したものであり、比較としてワークロールによる単純垂直挟圧条件と、図5に示す粗さプロフィール半ピッチ分の垂直押し込み解析の結果を破線で示してある。この両者は、ほぼ同じ値となったため、図中では1本の破線で示されている。

調質圧延の場合、図の原点が接触域入口に相当し、圧延の進行につれて面圧の増加とともに粗さの転写率も増加する。ピーク面圧の部分で横軸最大値となり、接触域出口に向かって図中左側に移動して出口で横軸（面圧）ゼロとなる。調質圧延条件におけるピーク面圧位置での粗さ転写率は単純垂直挟圧条件および粗さプロフィールの垂直押し込み条

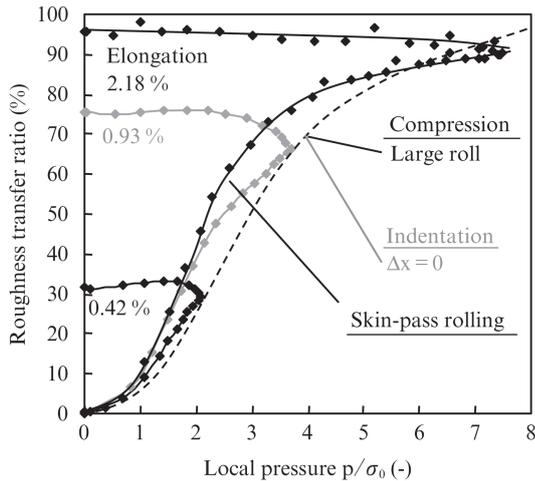


図6 ロールバイト内における局所面圧と粗さ転写率の関係¹²⁾

Fig. 6 Calculated relationship between local pressure and roughness transfer, compared with simple compression and indentation¹²⁾

件の解析とほぼ一致した。すなわち、第2章で明らかになったように十分大きな接触長と固着域により接触長中央付近で静水圧が高まるという調質圧延の特徴からピーク面圧における粗さの転写は粗さプロフィールの垂直押し込みと考えることができ、実際、図5に示したとおり粗さ転写率はピーク面圧による整理が可能であった。図2に示したとおり、ピーク面圧はヘルツ接触として近似的・簡易的に推定することもできる。

また、図6のとおり計算上はピーク面圧を過ぎた後にわずかに粗さの転写率が増加する傾向にあるが、図3の結果からも実際には粗さの転写率に大きな影響を与えない事が分かる。このように面圧が低い条件で粗さの転写率が増加するのは接触域出口付近が先進域となっており、ワークロールと被圧延材が圧延方向に相対速度を持つことでジャンクション・グロースを起しているためであり、この現象は平行平板の軽圧下により検討されている^{17,18)}。

さらに、図5のとおり小径ロールでは大径ロールと定量的な比較が困難である。上記のような調質圧延条件における粗さ転写に関する現象は大径ワークロールを用いることで接触長が大きくなるために発生するのであって、小径ワークロールでは接触長が小さいために適切な模擬が難しい。むしろ、同様の接触長を有する平行平板の軽圧下で模擬した方が定性的なメカニズムを再現できる。

4. ダル調質圧延における潤滑の影響

4.1 実験条件と評価パラメータ

第3章と同様の調質圧延実験において、潤滑剤を供給し潤滑の影響について調査した。潤滑剤として、有機アミン系調質圧延液 (Skin-pass rolling lubricant, 以下 SKL, 粘度

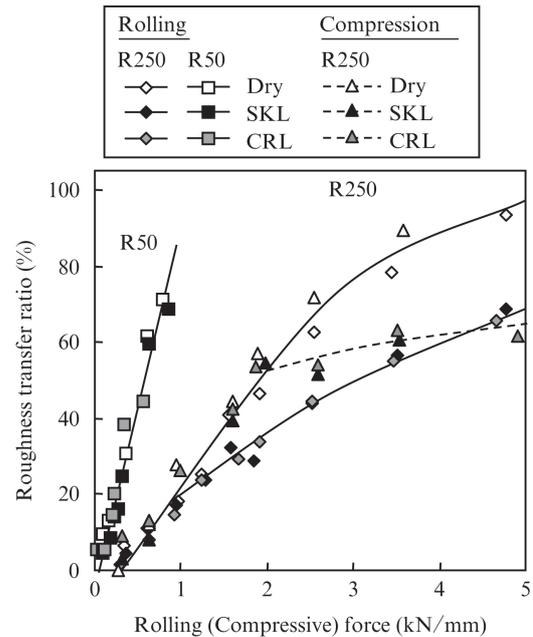


図7 圧延荷重と粗さ転写率の関係¹⁵⁾

Fig. 7 Relationship of roughness transfer ratio and rolling/compressive force¹⁵⁾

1 mm²/sec at 50℃) および比較として合成エステル系冷間圧延油 (Cold rolling lubricant, 以下 CRL, 粘度 19 mm²/sec at 50℃) を用い、原液 (ニート) のままワークロールと被圧延材の表面に十分塗布した。

粗さ転写における潤滑の影響を定量的に把握するため、圧延後の被圧延材表面粗さを、プレス時の潤滑性評価にも使われる潤滑性評価パラメータ (JIS B0671) で評価することを試みた。すなわち、線形負荷曲線による高さ特性を表す Rk (コア部のレベル差), Rpk (突出山部高さ), Rvk (突出谷部深さ) である。 Rk がワークロール表面粗さプロフィールの全体的な転写を、 Rvk が凸部の食い込みによる被圧延材表面凹部の形成を、 Rpk は粗さプロフィールの谷部で直接被圧延材表面と接触していない空隙に被圧延材表面が盛り上がり行くことにより形成される凸部を表す。

4.2 実験結果と考察

図7¹⁵⁾ に圧延荷重と粗さ転写率の関係を示す。伸び率約0.5%に相当する圧延荷重 1 kN/mm から潤滑による粗さ転写の低下が見られる。潤滑の影響は調質圧延条件と挟圧で異なるものとなった。小径ワークロールでは、大径ワークロールと傾向が一致せず、潤滑の影響も明確には現われなかった。

図8¹⁵⁾ に Rk , Rvk の測定結果を示す。ごく低い伸び率では、ロール凸部の食い込みによる被圧延材表面凹部の形成に対応して Rvk が急速に増加し、伸び率1%以下の領域で上限となる。潤滑剤は接触間隙に容易に逃げられるから潤滑の影響はほとんど無い。 Rvk が上限になるとワークロール表面粗

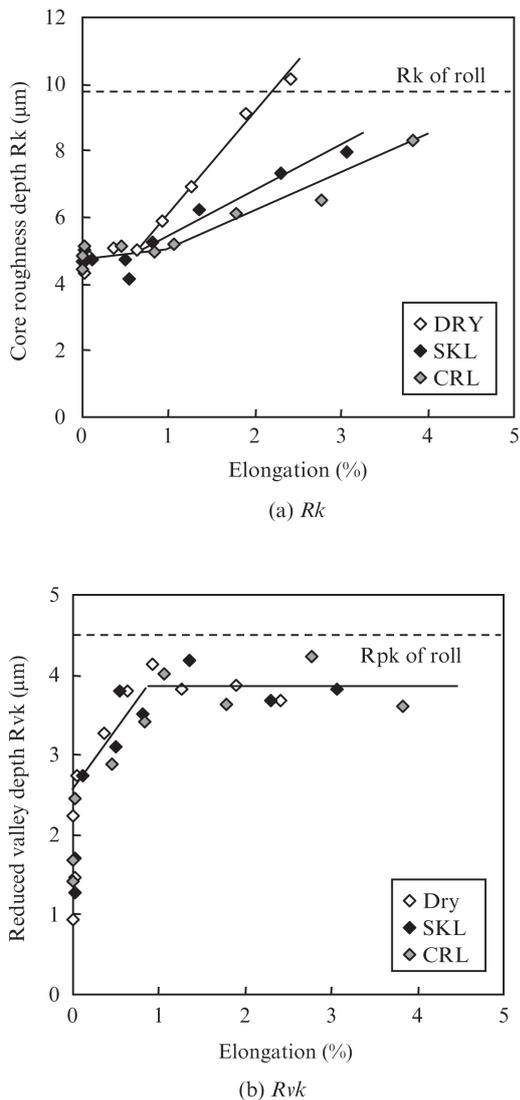


図8 調質圧延伸び率と潤滑性評価パラメータの関係¹⁵⁾

Fig. 8 Relationship of elongation and roughness parameters¹⁵⁾

さのコア部が転写されて R_k が上昇し始める。潤滑の影響はこのコア部の転写に現われている。すなわち、コア部の転写では封入された潤滑剤がこれを阻害するので、潤滑剤の粘度が大きいほど影響も大きい。図示していないが、 R_{pk} は圧延荷重あるいは伸び率の変化に対する変化の絶対値も小さく、潤滑の影響も見られなかった。

このように粗さの転写について潤滑性評価パラメータを用いた評価を行うことで、ダルロールの粗さ転写における潤滑の影響が明快かつ合理的に説明された。

5. おわりに

本報では、調質圧延における被圧延材の表面粗さプロフィール形成メカニズムについて、材料変形および潤滑の観点から、ラボ実験および FEM 解析により検討した結果について述べた。調質圧延では板厚変化量に対して大きな径

のワークロールを使用することが特徴であり、接触長が十分大きくなることで接触長中央の静水圧が大きくなる。その結果として単純垂直挟圧により粗さの転写を模擬できるとともに、粗さ転写に最も重要な指標となるピーク面圧をヘルツ接触により近似することもできる。潤滑の影響は表面粗さプロフィールの潤滑性評価パラメータを用いることで明快かつ合理的に説明され、初期に凸部が接触して凹部を形成したあとに潤滑剤が封入されて伸び率や粗さ転写率に影響することがわかった。一般にラボ圧延で用いられる小径ワークロールの圧延機では接触長の点で調質圧延における種々の特徴的な現象を再現することは難しい。

上記メカニズムの考察も、FEM 解析においてワークロール表面粗さを考慮可能となったことで大きく進展した。今後さらに計算機能力が高まれば、より前提条件の少ない三次元解析も行えるようになると思われる。また、本来、調質圧延は降伏現象を有する材料の加工プロセスであることから、材料モデルの同定方法や急激な加工軟化の取り扱いに課題が残されている¹⁹⁾。すでに、ある仮定された材料モデルでは、かなり詳細な不均一変形の解析も行われている²⁰⁾。さらにロールの軸たわみや偏平も含めた系全体の解析も行われるようになり、未解明の形状不良メカニズム^{21, 22)}も明らかになると考えられる。

本稿は、日本塑性加工学会第 320 回塑性加工シンポジウムのテキスト原稿²³⁾を再編集しています。

参考文献

- Finstermann, G.; Nopp, G.; Eisenköck, N.; Keintzel, G. Proc. 2002 AISE Annual Conventions and Steel Expo. 2002, (CD-ROM).
- Richter, H. P.; Pawelski, H.; Denker, W.; Holz, R.; Koen, K. Proc. 9th Int. Steel Rolling Conf., ATIS, Paris, 2006, vol. 9, p. 198 (Session 14, Paper 5, CD-ROM).
- 梶原哲雄, 森本和夫, 中野恒夫, 福山五郎. 塑加連講論. 1991, vol. 42, p. 465.
- 鍵田征雄, 伊藤正登. 鉄と鋼. 2008, vol. 94, p. 391.
- 青木至. 塑性と加工. 1979, vol. 20, p. 1121.
- 加藤俊之. 塑性と加工. 1995, vol. 36, p. 332.
- 木村幸雄, 植野雅康, 三原豊. 鉄と鋼. 2009, vol. 95, p. 399.
- Sun, J.; Huang, H.; Du, F.; Li, X. J. Iron Steel Res. Int. 2009, vol. 16, p. 27.
- 明石透, 白石利幸, 小川茂, 松瀬善信. 塑性と加工. 2013, vol. 54, p. 606.
- Kijima, H. J. Mater. Process. Technol. 2013, vol. 213, p. 1764.
- 明石透, 白石利幸, 小川茂, 松瀬善信. 塑性と加工. 2014, vol. 55, p. 324.
- Kijima, H. J. Mater. Process. Technol. 2014, vol. 214, p. 1111.
- 明石透, 白石利幸, 小川茂, 松瀬善信, 森原秀征. 塑性と加工. 2015, vol. 56, p. 53.
- Kijima, H. J. Mater. Process. Technol. 2015, vol. 216, p. 1.
- Kijima, H. J. Mater. Process. Technol. 2015, vol. 225, p. 1.
- Kijima, H.; Bay, N. CIRP Ann. 2007, vol. 56, p. 301.
- Kijima, H.; Bay, N. Int. J. Mach. Tools Manuf. 2008, vol. 48, p. 1313.
- Kijima, H.; Bay, N. Int. J. Mach. Tools Manuf. 2008, vol. 48, p. 1308.
- Sun, H. B.; Kaneda, Y.; Ohmori, M.; Yoshida, F. Mater. Trans. 2006, vol. 47, p. 96.
- Giarola, A. M.; Pereira, P. H. R.; Stemler, P. A.; Pertence, A. E. M.; Campos, H. B.; Aguilar, M. T. P.; Cetlin, P. R. J. Mater. Process. Technol. 2015, vol. 216, p. 234.

- 21) 木島秀夫, 剣持一仁, 北浜正法. 塑性と加工. 2002, vol. 43, p. 199.
- 22) 木島秀夫, 北浜正法. 塑性と加工. 2002, vol. 43, p. 150.
- 23) 木島秀夫. 塑性加工シンポジウム. 2016, vol. 320, p. 31.



木島 秀夫