

その場観察による圧延現象の解明

Investigation of Rolling Phenomena by *in situ* Observation

宇都宮 裕*

UTSUNOMIYA Hiroshi

Synopsis: Deformation and force characteristics in rolling processes have been predicted numerically by the finite element method. However, there still exist many unveiled phenomena in rolling processes such as defect formation, lubricant entrapment on rolling interface, generation of debris from the sheet, coating formation on the rolls, shear banding in microstructure, strain localization, etc. In order to study mechanisms of these unveiled phenomena, direct observation of the deforming sheet in the roll bite during rolling is strongly demanded. However, direct observation has almost never been attempted because of high-speed roll rotation under heavy load. In order to overcome the difficulty, the author invented two novel techniques presented in this review article. The one technique is 'Ptolemaic rolling', where one roll is fixed in the space without rotation, while the other roll revolves around the fixed roll with rotation. A prototype machine with transparent rolls was fabricated, then the lubricant entrapment in the artificial defect on the sheet was observed in solder rolling. The other technique is 'Roll-propelled rolling' where the rotating rolls move upstream so as not to move a reference point on sheet to the rolling direction. A prototype machine was manufactured and mounted on a sample stage in an optical microscope. The changes in speed and strain rate of the sheet in the roll bite were made clear experimentally. Equations are derived to predict these experimental changes. It is concluded that the proposed *in situ* techniques are powerful tools to reveal rolling phenomena and to make mathematical models for industrial applications.

Keywords: Ptolemaic rolling; roll-propelled rolling; visualization; tribology; strain rate.

1. はじめに

圧延中の被加工材の変形特性や負荷特性は、有限要素法などの数値解析ソフトウェアを用いることによって、高精度で予測することが容易となっている。しかしながら、圧延現象には潤滑剤の引込みやピットの形成、表面欠陥や磨耗粉の発生、せん断帯などの加工組織の発展など、十分に解明されていない現象も存在する。

これまでの圧延の実験的研究は主として、圧延の前後で材料の組織を観察し、あるいは特性を測定して、加工による変化を解明し、ロールバイト中の現象を推定することでなされてきた。圧延以外の加工では、変形中の被加工材の直接観察、いわゆるその場観察もしばしばなされてきた。例えば、引抜き加工では、透明ダイスを利用した加工界面の観察によって、潤滑剤は被加工材表面の凹部にトラップされ、加工の進行にともなって加工界面に浸み出して再潤滑する (Micro Plast-Hydrodynamic Lubrication) 機構

が実証された^{1,2)}。しかしながら、圧延におけるその場観察を用いた研究はこれまでほとんど行われていない。これは、ロールが高速で回転し被加工材も高速に運動するためその場観察が困難なためと考えられる。圧延中に圧延界面のその場観察を行った数少ない先行研究として、池らは中空ロールの表面に観察窓を設け、その内部に反射鏡を設置して、ネック部に設置した CCD カメラで、アルミニウム板圧延中の圧延界面を観察した³⁻⁵⁾。また、安田は透明なアクリル製ロールの内部にカメラを設置してプラスチックの圧延界面を観察し、流線を求めている⁶⁾。

ところで、圧延を上下ロールと被加工材の三体問題と考えれば、片方のロールを固定しても通常の圧延と相對運動が等しい圧延が実現できることが可能であることが理解される。著者らは、その実現方法として、片方のロールを固定して、もう一方のロールを固定ロールのまわりを自転させながら公転させる方法を着想し⁷⁾、「天動説型圧延法」と名付けた^{8,9)}。固定ロールを透明材質とすれば、その内

原稿受付日：2022年5月9日

* 大阪大学大学院工学研究科 マテリアル生産科学専攻 教授

部から圧延界面をその場観察することが可能で、圧延中のロールバイトにおける潤滑剤の挙動を解明することが可能である。本稿ではその観察例^{10,11)}を紹介する。

さらに、別のその場観察手法として、被加工材中の1点(材料点)を空間に固定する方法も考えられる。材料点が空間に固定されれば、その点の周囲の変化を顕微鏡の視野内で観察し続けることで圧延現象の微視的解明が可能となる。そこで材料点を空間に近似的に固定する方法としてロールを回転させながら軸心を上流へ並進させる「ロール自走式圧延」を考案した¹²⁾。微視的な観察を実現するために光学顕微鏡の観察ステージ上に搭載可能な小型の実験装置を製作し、ロールバイト中の被加工材の速度とひずみ速度の変化を調査したので¹³⁾、後述する。

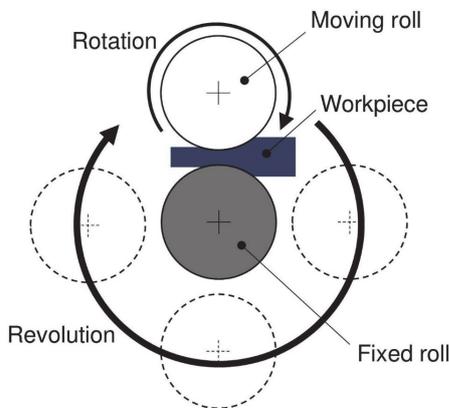


Fig. 1 天動説型圧延法の原理

そして、これらを通じて圧延プロセスにおける変形中の被加工材のその場観察は、圧延現象の解明の有効な手段となることを示す。

2. 天動説型圧延による圧延界面のその場観察

2.1 天動説型圧延の原理

この圧延法は1本のロール(固定ロール)が回転せずに空間に静止していることを特徴とする。そして、もう1本のロール(移動ロール)は自転しながら固定ロールの周りを公転する。Fig. 1はその模式図で、移動ロールは時計回りに自転しながら固定ロールの周りを時計回りに公転し、板は固定ロールと移動ロールの間のギャップで、幅方向を回転軸として時計回りに回転しながら圧延が行われる。Fig. 2は移動ロールの公転角 β によって変化する両ロールと板の幾何学的関係を表したものである。移動ロールは図(a)から(f)の間に 360° (1回転)公転し、その間に 720° (2回転)自転することがわかる。言い換えれば、移動ロールの自転速度を公転速度の2倍と設定することで板材とロールの相対的な幾何学的関係は通常の圧延と等しくなる。なお、それ以外の速度関係では、上下ロールの周速が異なることとなり異周速圧延に相当する圧延が実現される。

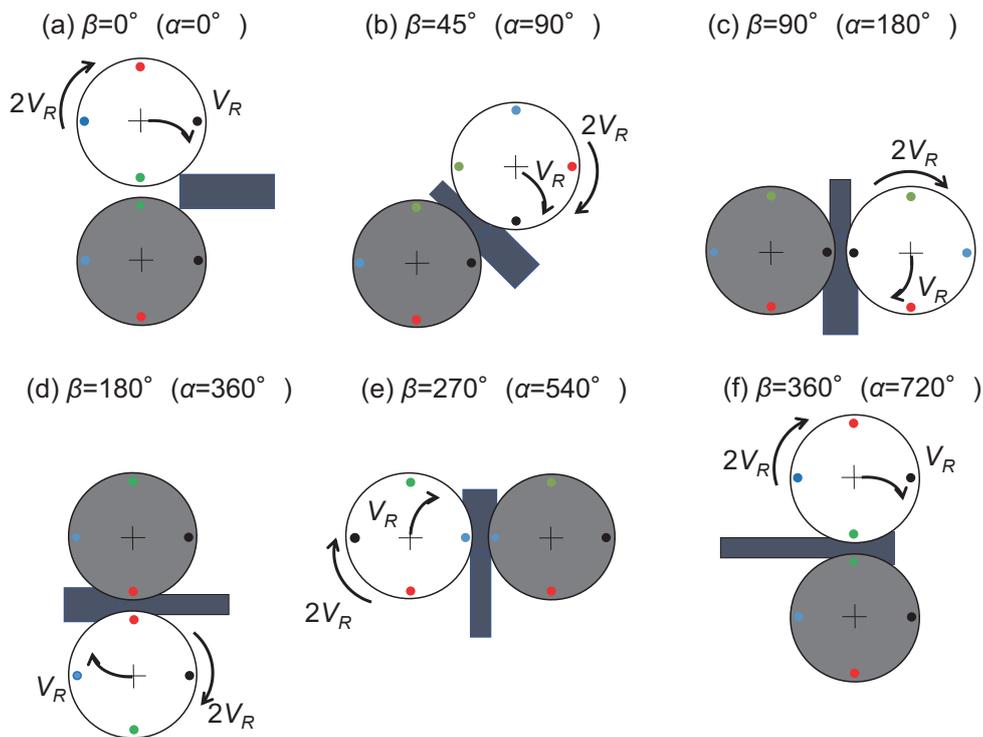


Fig. 2 公転にともなうロール配置の変化

固定ロールと移動ロールの幾何学的関係は、天動説における地球と天体の関係に類似しており、移動ロールの軌跡は Fig. 3 に示すカージオイド曲線となる。そこで、この圧延法を「天動説型圧延」と称することとする。歴史上、天動説から地動説への変更には宗教裁判など大きな犠牲をとらない、広く受け入れられるまでに時間を要したことは知られている。ここでは通常圧延から天動説型圧延へと逆に遷移したが、著者らもこの着想を得て実現するまでに長時間を要した。

天動説型圧延において、固定ロールは回転することなく空間に固定されていることが最大の特徴である。したがって、固定ロールに透明材料を用いたり観察窓を設けたり、あるいは放射線を透過させれば、圧延界面のその場観察が可能となる。その際に、反射鏡を用いればカメラを圧延機外に配置することも可能で、振動の影響を受けないため鮮明な画像を得ることができる利点もある。

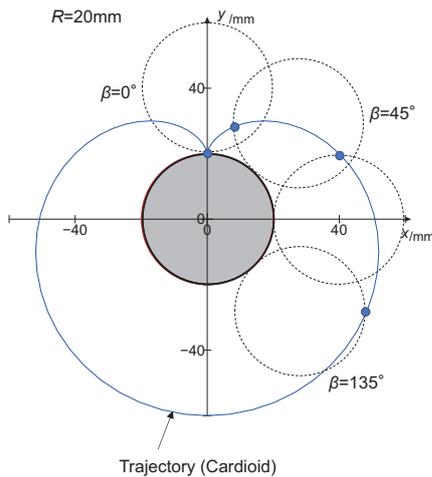


Fig. 3 移動ロール上の表面点の軌跡

2.2 試作した天動型圧延機

天動説型圧延の有効性を確認するために製作した試作圧延機の写真を図. 4 に、その構造を図. 5 に示す。圧延機は外枠と内枠からなる二重構造とし、外枠は固定され、内枠のみが手回しハンドルの回転に追従して公転運動を行う。中央の固定ロールは外枠に固定されているため、公転・自転ともにせず、移動ロールは内枠内に固定されているため、ハンドルの回転とともに公転し、そのとき固定ロールと上部のリングギヤで連結されているため公転速度の2倍の速度で自転する。被加工材は軟質金属の薄板を想定し、立てた状態すなわち板幅方向を鉛直方向として圧延を行う。両ロールの寸法は直径 $D=2R$ が40mm、胴長が55mmであり、材質は透明なポリカーボネート製とした。固定ロールの中心軸上に四角柱状の穴を明け、その中に圧延界面に対して45°に傾斜させて反射鏡が設置されている。そうすることで反射鏡により光路が90°曲げられ、Fig. 4 中に見られる圧延機下に設置された顕微鏡によって圧延界面の静止画または動画を撮影することができる。

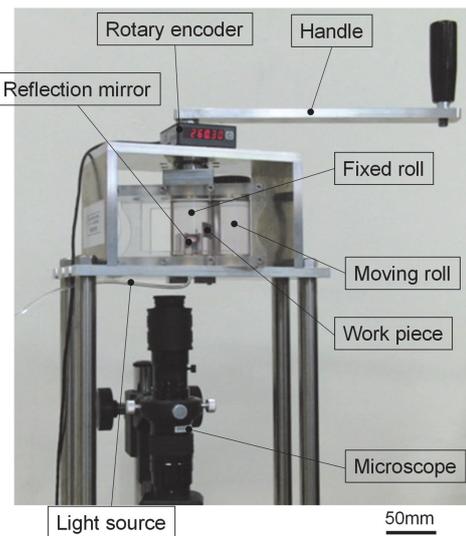


Fig. 4 天動説型圧延機の試作機

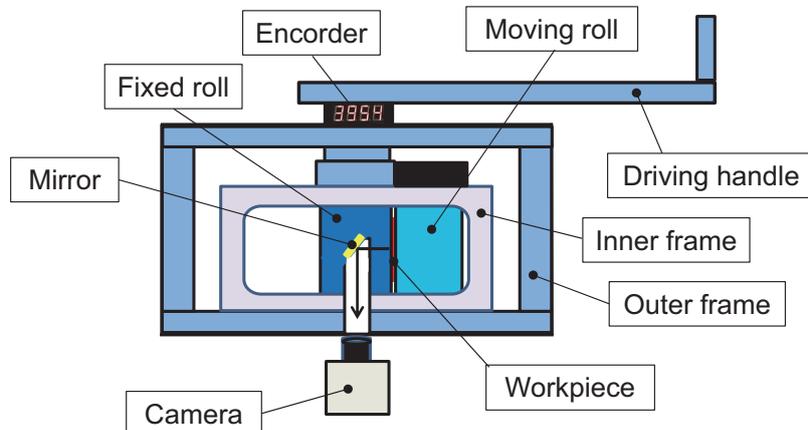


Fig. 5 天動説型圧延試作機の構造

2.3 被加工材の運動と変形

厚さ0.5mm,幅15mm,長さ50mmのはんだ(Sn-40%Pb)板材を被加工材として用い,潤滑・無潤滑の2条件で圧下率10%の圧延を行った.潤滑条件では鉱油ベース圧延油(動粘度:7.411 mm²/s @313K)を使用した. Fig. 6に実験の模式図を示す. x軸を圧延方向かつカメラ画像の横方向に設定した. 板材の表面に板幅方向に平行な標線をあらかじめ記しておき,圧延によって移動するその標線のx座標を公転角βが5°変化するごとに撮影した静止画から標線のx座標を計測した. なお,公転角β=0°のときの標線のx座標をx₀とする. 標線の軌跡の測定結果⁸⁾をFig. 7で表す. 丸記号は測定値,点線は最小ロールギャップ位置のx座標を表している. 板表面の標線は公転角βが大きくなるにつれて画面上で左から右へ移動し,そのx座標は負の値から正の値に変化した. この例ではβ=0°付近で標線は最小ロールギャップを通過するため,傾きは緩やかとなっている.

ところで,ロールバイト以外の領域において,標線のx座標の軌跡をベクトル解析によりx₀と先進率f_sの関数として求めると次の式(1)となる.

$$x = R\sin\beta - R\left(\beta - \frac{x_0}{R(1+f_s)}\right)(1+f_s)\cos\beta \quad (1)$$

式(1)を最小自乗法を用いて実験値にフィッティングすることによりx₀と先進率f_sを求めることが出来る. 図中の実線はその回帰式を表しており,無潤滑条件での先進率はf_s=4.8%,潤滑条件での先進率はf_s=1.0%であった. このことから,板表面上の標線の圧延界面における観察動画から先進率を測定することが可能であり,潤滑により先進率は減少することが確認された.

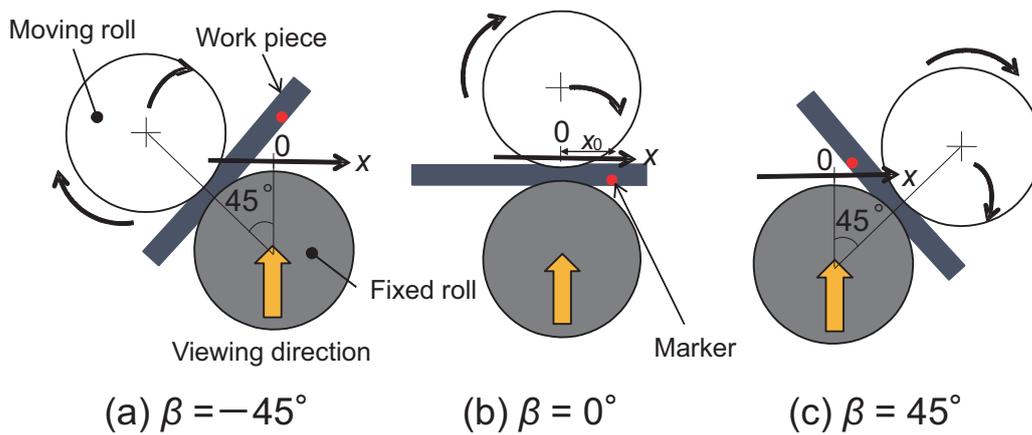


Fig. 6 実験の概略図

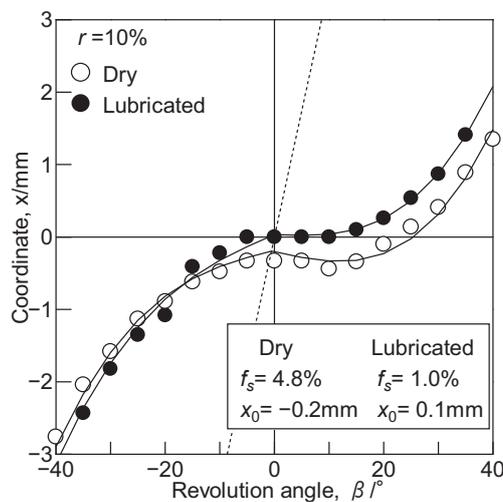


Fig. 7 標線の軌跡の測定結果

2.4 圧延界面の潤滑剤のその場観察

被加工材には、はんだ板を使用し、周速 0.19m/min、圧下率 15% の条件で圧延を行った。人工的な潤滑油の捕捉サイトとしてピッカース硬さの圧痕（対角線長：519 μ m）を板幅の中央で圧延方向に沿って圧延面に付与した。潤滑・無潤滑の2条件で実験を行い、潤滑の場合は、先の潤滑油に視認性向上のため着色剤を添加して用いた。圧痕の軌跡から上述の方法で求めた先進率は、無潤滑の条件で $f_s=1.5\%$ 、潤滑の条件で $f_s=0.8\%$ であった。Fig. 8 に、その場観察された圧延界面の圧痕の画像¹¹⁾を示す。上から順に A: ロールバイト入口付近、B: ロールバイト中間地点、C: ロールバイト出口付近に差し掛かった圧痕の画像である。なお画像中の縦線は固定ロール表面にサインペンで記した標線である。天動説型圧延では最小ロールギャップの位置は、観察する圧痕の板中での長手方向位置に依存して変化する。そこで、最小ロールギャップ位置を基準として撮影画像を圧延方向にシフトさせ、通常圧延に対応するように配置して示してある。潤滑・無潤滑どちらに関しても圧延によって圧痕の面積は減少するが、減少率は無潤滑圧延の方が大きい。

圧痕面積の変化¹¹⁾を Fig. 9 に示す。観察画像における圧痕の面積は、画像編集ソフトを使用して画素数から求め

た。縦軸に圧痕の面積、横軸に圧延方向の座標をとって示してある。白抜きは圧痕中に潤滑剤が存在しない状態を、黒塗りは潤滑剤で満たされている状態を示し、二重丸は圧痕が部分的にロールバイト外に出ていることを示す。図中には前述の先進率から求めた中立点の位置を矢印で示してある。圧延前の圧痕の面積は 0.143mm² であったが、圧延により無潤滑条件ではロールバイト中で単調に減少し 71% 減の 0.042mm² となった一方、潤滑条件では変化が小さく 13% 減の 0.125mm² にとどまった。

潤滑条件における圧痕の面積の変化は 2 ステップ状の変化を示した。圧痕がロールバイト入り口に差し掛かると顕著な面積減少を示した。圧痕が完全にロールバイト内に入るとシールドが達成されたと考えられる A 点から面積は変化せず、中立点より約 1mm 上流となる B 点から再び減少に転じ、中立点までは減少を続けた。中立点以降は、面積は 0.135mm² で変化しないほぼ一定の領域となり、ロールバイト出口から排出された。B 点での面積の減少は、圧延圧力の増加により捕捉された潤滑剤の静水圧が増加し、圧延界面に浸み出したことを意味する。そして、中立点以降では圧延圧力が減少するため圧痕面積に変化は生じなかったものと考えられる。

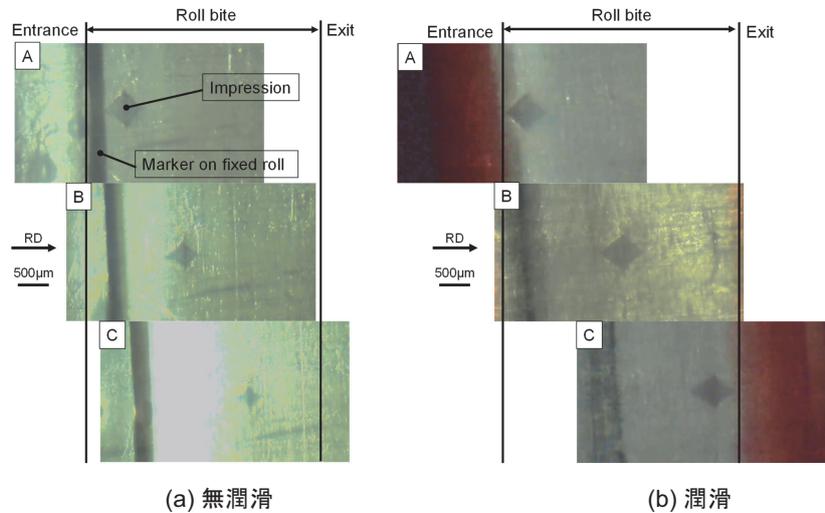


Fig. 8 圧延界面における圧痕の変化

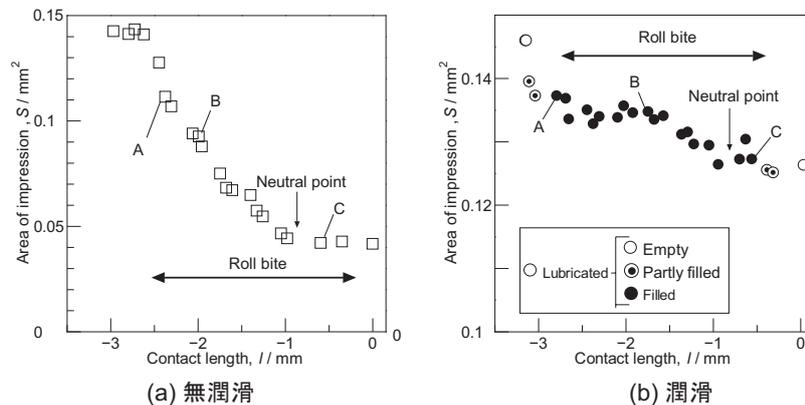


Fig. 9 ロールバイト中の圧痕面積の変化

3. ロール自走式圧延装置による被加工材側面 その場観察

3.1 材料点固定圧延法の原理

Fig. 10(a) に従来圧延法における被加工材の運動を模式的に示す。 $t=0$ において被加工材上の一点 A の空間固定の座標系（グローバル座標系）における X 座標を a_0 、ロール軸心の X 座標を b_0 とすると、点 A がロールバイトを通過した後 $t=t_1$ においても、ロール軸心の位置に変化はなく ($X=b_1=b_0$)、被加工材上の点 A の位置は圧延によって、 $X=a_0$ から $X=a_2$ に移動する。したがって、移動量が大きく観察し続けることが難しい。提案する材料点固定圧延法の材料点の移動を模式的に Fig. 10(b) に示した。この方法では、ロールを回転させつつ上流に移動させることによって、点 A の空間上の位置が変わらないように ($t=t_1$ においても $a_1=a_0$) 保つことを特徴とする。

3.2 試作したロール自走式圧延装置

上述の圧延法の有用性を実証すべく小型の圧延装置を設計・製作した。材料点を完全に静止させるにはロールの周速 v_R に対してロール軸心の上流への移動速度 v_L を独立に制御する必要がある。そして、その制御量は圧延条件に加えて、観察する材料点の初期座標にも依存する。そのためロールの回転と移動をつかさどるモータがそれぞれ必要となり、制御が複雑で装置も大型となる問題がある。そこで試作した圧延装置（ロール自走式圧延装置）では、ロールの回転と移動を 1 つのモータで賄うことで小型化を図った。その場合、ロールの移動速度が一定となるため材料点を空間に完全には固定することはできないが、装置をコンパクトにできる利点がある。それにより顕微鏡の試料ステージに搭載することが可能な実験装置を実現することができた。材料点が完全に固定されなくとも移動距離を十分短くすることができれば、材料点の移動を顕微鏡の視野内に留めることができる。その場合も必要に応じて顕微鏡の試料ステージを補助的に移動させれば、材料点を完全に静止させることも可能である。

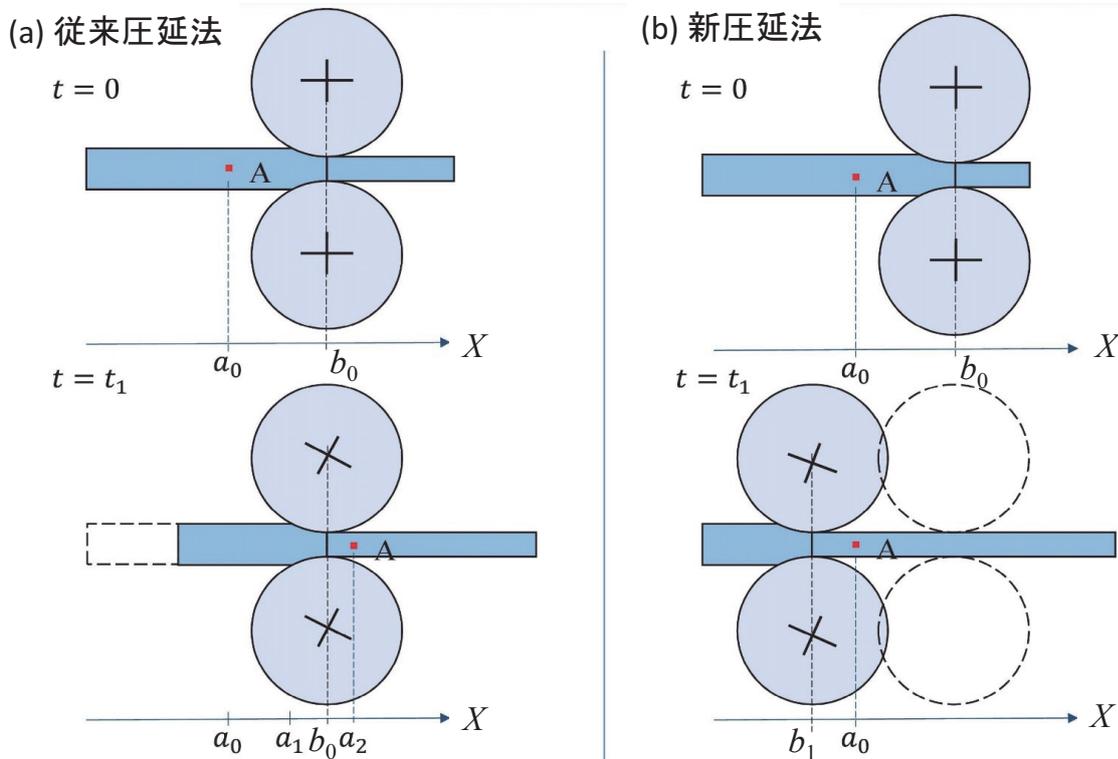


Fig. 10 従来圧延法と材料点固定圧延法（新法）の比較

Fig. 11 に製作した圧延装置の写真を示した。装置の全長は 200 mm、全幅は 150 mm、ロール径 D は 20 mm である。ロールをディスク状にして片持ち構造とし、顕微鏡の対物レンズを接近して配置し、被加工材の側面を観察する。圧延方向は図の左から右であり、一对のロールを搭載した圧延ユニットは圧延方向と逆向きに、すなわち図では右から左に平行移動する。圧延ユニット下部においてラックとピニオンがあり、ユニットの移動と連動してロールは回転する。ユニットは上下の中心で 2 分割できる構造で、その間にシムプレートを差し込むことによって設定ロールギャップを調整することができる。駆動は 1/178 の減速器を介しサーボモータにより行った。回転は図の右側の装置側面に沿って配置された 3 つの中間ギヤを経て圧延ユニットと連結されたシャフトへと伝達される。シャフトにはねじが加工されており、回転は圧延ユニットの左右方向の移動に変換される。

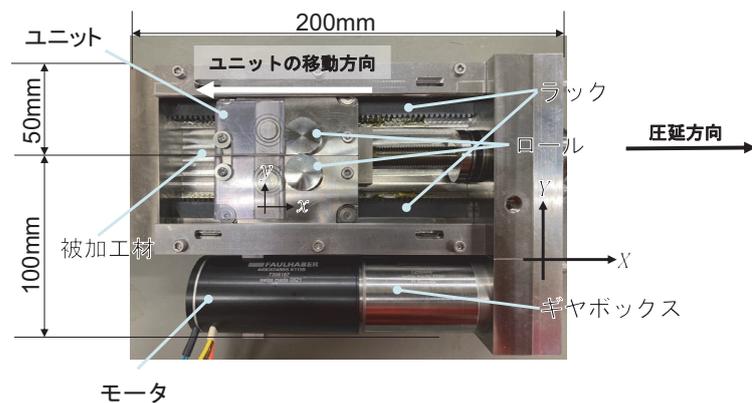


Fig. 11 ロール自走式圧延の原理

3.3 材料点の変位と速度変化

被加工材として、幅 5.0mm 厚さ 0.5mm のはんだ板を用いた。研磨した材料側面の板厚中心位置にビッカース硬さの圧痕をつけて標点とした。モータ回転数は 2000 rpm と設定した。このときのロール周速 v_R は 0.266mm/s、ユニット移動速度 v_f は 0.282mm/s であった。無潤滑で 2 種の圧下率 17%、60% の 1 パス圧延を行った。

圧延中を撮影した動画から静止画を抽出して、圧痕の位置座標を画像解析ソフトで計測し、移動速度の変化を求めた。(1) 17% と (2) 60% の 2 つの圧下率条件に対して Fig. 12(a) は、グローバル座標系、すなわち空間座標系における標点の位置の変化を、縦軸に圧延時間を取って表したものである。圧下率 (1) 17% の場合は、位置の変化はほとんどなく、(2) 60% の場合も、上流への 0.5mm 程度の移動量に抑えられたことが確認できる。Fig. 12 (b) は、(a) の標点の位置の変化を、圧延ユニット上の座標系、

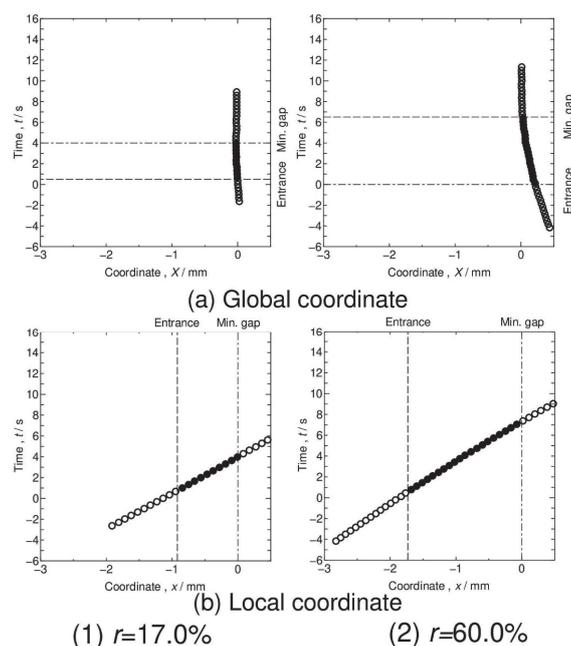


Fig. 12 (a)グローバル材料系と(b)ローカル座標系における標点の座標変化

すなわちローカル座標系で示したものである。この図は、通常圧延における標点の位置の変化に相当する。時間経過に伴う標点の位置変化はおおむね直線的であるが、高圧下率条件では延伸が大きいので、圧延後は圧延前に対して変化率が大きい。なお、黒塗りの記号は標点がロールバイト内に位置することを示している。

標点の座標変化から求めた速度変化¹³⁾を Fig. 13(a)に示す。(1) 圧下率 17% の場合、材料点はロール周速よりも遅い速度 (0.24mm/s) でロールバイトに進入した後増加し、-0.5mm 付近で中立点に達してロール周速を超え、最小ロールギャップ通過後は一定速度 (0.28mm/s) で排出された。(2) 圧下率 60% の場合は、(1) の低圧下率条件よりも遅い速度 (0.11mm/s) で、ロールバイトに進入した後に、ほぼ直線的に加速して中立点を経た後に 0.28mm/s で排出された。Fig. 13(b) は速度変化から求めた相当ひずみ速度の変化¹³⁾を表している。(1) 圧下率 17% の場合、相当ひずみ速度はロールバイト入口で最大値をとり単調に減少するのに対して、(2) 圧下率 60% の場合は、ロールバイトの中央付近で最大値をとることが明らかとなった。

圧延後厚さを h_1 、先進率を f_s 、接触弧を放物線近似してマスフロー一定則を仮定すると最小ロールギャップより上流 x の位置における材料点の速度は次式で表される。

$$\frac{dx}{dt} = v = \frac{h_1 v_1}{h(x)} = \frac{h_1 v_R (1 + f_s)}{h_1 + \frac{x^2}{R}} \quad (2)$$

この式による材料点の移動速度を Fig. 13(a) 中に示したが、実測された材料点の速度とおおむね一致することが確認される。式 (2) から相当ひずみ速度は次のように表される。

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon} &= d\bar{\epsilon}/dt = d\bar{\epsilon}/dx(dx/dt) = v d\bar{\epsilon}/dx \\ &= -\frac{4h_1 v_R (1 + f_s)}{\sqrt{3}R} \cdot \frac{x}{(h_1 + x^2/R)^2} \end{aligned} \quad (3)$$

式 (3) を Fig. 13(b) 中に曲線で示したが、これも実験値とよく一致している。式 (2) より極値は圧下率 25% 以上の条件で現れることが新たに明らかとなった。高圧下率でひずみ速度がロールバイト中央で極値を持つ理由は、ロールバイト入口付近では板厚減少が大きい反面で速度が遅いのにに対して、出口付近では板厚減少が小さい反面で速度が速いためと解釈することができる。なお、図中の相当ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{avg}$ は式 (2) の積分で求めた平均値であり、 $\dot{\epsilon}_{mean}$ は、板厚変化による相当ひずみを、通過時間 = (接触長さ / ロール周速) で除すことで、求めた従来概算法の値である。これは熱間圧延での組織予測の際に広く用いられている概算法である。低圧下率の場合は $\dot{\epsilon}_{avg}$ と、 $\dot{\epsilon}_{mean}$ の差はほとんど

ないが、高圧下率の場合には、概算法は平均ひずみ速度を過大評価することが明らかとなった。これは、 $\dot{\epsilon}_{mean}$ は、板材の延伸による圧延速度の増加が考慮されていないためである。したがって、その場観察結果に基づいて、新たに導いた式 (3) を応用することで、熱間圧延の組織予測の高精度化が期待できる。

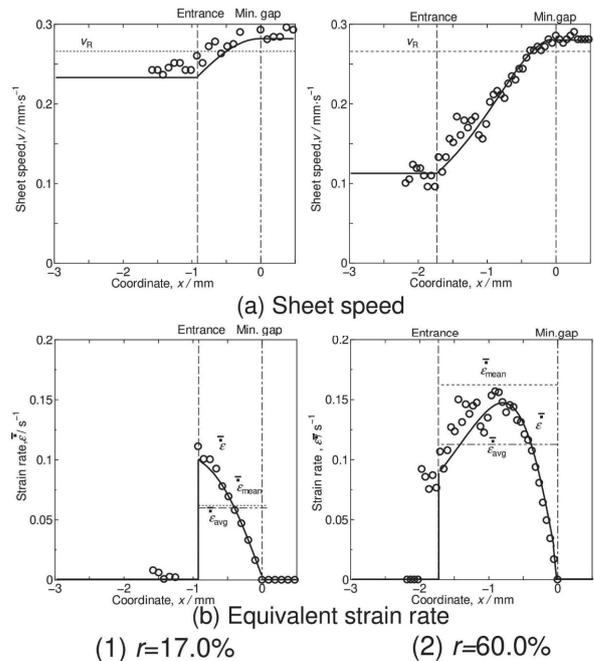


Fig. 13 ロールバイト付近での板材の(a)速度と(b)相当ひずみ速度の変化

4. 結 言

本稿では、圧延現象のその場観察方法として、天動説型圧延法とロール自走式圧延法の2法を紹介した。天動説型圧延では、1つのロールが回転せずに空間に固定されている特徴を有するため、透明ロールを用いることで、ロールバイト内で変形中の被加工材とロールの界面を直接観察可能であることを示した。一方、ロール自走式圧延では、ロール軸を上流に移動させつつ回転を行うことで、被圧延材側面上の1点を空間に近似的に固定できることが特徴で、光学顕微鏡の視野内で圧延中に起こる変化を観察し続けることができることを示した。現状、提案した2つのその場観察手法の有効性を、小型の実験装置を試作し軟質材料を用いて有効性を確認したに留まっている。しかし、両手法ともに、大型化や高速化上の制限は小さいと考えられるので、工業的なプロセスに近い条件で圧延が可能な装置への改良を続け、製造現場で生じている未知の圧延現象の解明に役立てたいと考えている。また、本稿では変形のそ

の場測定を紹介したが、応力のその場測定方法の開発も重要である。なぜなら、変形やひずみ分布の測定には画像相関 (DIC) 技術が応用できるが、応力測定は X 線回折などを用いるため、分布の迅速な測定は困難なためである。紙面の都合上割愛するが、著者らは応力発光現象を利用した応力分布のその場測定技術の開発も進めているので、関心があれば文献^{14,15)}を参考にされたい。

次の応用としては、天動説型圧延では、圧延界面における潤滑剤の流動・圧力変化や被加工材の表面性状の変化など圧延トライボロジー現象の解明が期待できる。また、回転しない固定ロールに測圧ピンやひずみゲージを導入すれば、圧延圧力分布やロールの弾性変形の圧延最中の動的な変化を測定することもできると考えられる。ロール自走式圧延装置では、被圧延材側面の 1 点の変化を観察し続けることができるため、局所変形や内部組織の発達過程の解明に役立つものと思われる。走査型電子顕微鏡のチャンパー内に挿入すれば、EBSD 法などとの組み合わせで圧延中の方位変化、すなわち集合組織の発達過程を解明することが可能となる。実験装置を高輝度 X 線放射光施設などに導入することも有効な可能性がある。

従来、圧延加工の研究は、加工の前で材料の組織を観察し特性を測定することで、加工による変化を明らかにして、ロールバイト中の圧延現象を推定することで発達してきた。しかしながら、これらは平均値などの統計量の変化に基づく確率的なアプローチである。近年は、機械学習や AI 技術の発達により確率的なアプローチが採られることが増えている。しかしながら、その一方で、その場観察・計測結果の実験データを積み重ねて物理現象を解明し、数式モデルを構築していくこともまた重要である。予測モデルが高精度化すれば、将来は組織や特性を確定論的な予測が可能となるものと予想される。すなわち、現状の技術レベルでは、圧延後の粒径を圧延前の粒径から、圧延材の集合組織を圧延前の集合組織から、あるいは圧延後の表面粗さを圧延前の粗さから予測するに留まることが多いが、確定論的なモデルが完成すれば、圧延前の組織から圧延後の組織そのものを、圧延前の方位分布から圧延後の方位分布を、あるいは圧延前の表面トポグラフィから圧延後のトポグラフィを完全に予測することが可能となる。すなわち、Digital Rolling が実現されることを意味する。さらには、逆問題解析を応用することで圧延前の組織や圧延条件の最適化が実現できると考えられる。

謝 辞

ここで紹介した 2 つの実験装置は、著者のおぼろげな着想を元に大阪大学科学機器リノベーション・工作支援センターで、設計・試作いただくことで具現化したものです。大野功司技術専門職員をはじめとする工作支援室の皆様へ深甚な謝意を表します。また研究室のスタッフ、修士あるいは学士論文の研究として実験に取り組んでくれた卒業生および学生諸士に感謝します。

参考文献

- 1) 小豆島明, 坪内昌生, 工藤英明, 古田憲明, 峯村憲: 塑性と加工, 30-347 (1989), 1631.
- 2) J. Bech, N. Bay and M. Eriksen: Wear, 232 (1999), 134.
- 3) 池浩, 辻邦夫: 特願平 9-133255, 特開平 10-325796.
- 4) 池浩, 辻邦夫, 高瀬誠: 平成 9 年度塑性加工春季講演大会講演論文集 (1997), 315.
- 5) H. Ike, K. Tsuji and M. Takase: Wear, 252 (2002), 48.
- 6) 安田健一: 第 66 回塑性加工連合講演会講演論文集 (2015), 345.
- 7) 宇都宮裕, 大野功司, 松本良, 藪田豊: 特願 2021-83743.
- 8) 宇都宮裕, 寺田喜満, 伊勢家雄次, 松本良: 2021 年度塑性加工春季講演大会講演論文集 (2021), 49.
- 9) 宇都宮裕, 寺田喜満, 松本良: 材料とプロセス, 34 (2021), 278.
- 10) H. Utsunomiya, Y. Terada, K. Ohno and R. Matsumoto: CIRP Annals - Manufacturing Technology, 71 (2022), in press.
- 11) 寺田喜満, 大野功司, 松本良, 宇都宮裕: 2022 年度塑性加工春季講演大会講演論文集 (2022), 233.
- 12) 宇都宮裕, 望月佑宇馬, 大野功司, 松本良: 特願 2022-48064.
- 13) 宇都宮裕, 望月佑宇馬, 大野功司, 松本良: 2022 年度塑性加工春季講演大会講演論文集 (2022), 231.
- 14) K. Kanamaru and H. Utsunomiya: Scripta Materialia, 209(2022), 114388.
- 15) 金丸訓明, 永棹航太, 宇都宮裕: 軽金属学会 142 回春季大会講演概要, (2022), 27.