

# 3ロール型リングローリング加工における材料変形挙動の研究

Ring deformation characteristics in three-roll-type ring rolling process

中溝利尚\*1 中崎盛彦\*2 高須一郎\*3

Toshifusa Nakamizo, Morihiko Nakasaki and Ichiro Takasu

Synopsis: Hot ring rolling is one of useful processes for production of large seamless rings such as bearing races for ships, airplanes and windmills. The ring rolling is classified into two types, such as two-roll type and three-roll type by their roll layout. In this study, ring deformation characteristics on three-roll-type ring rolling process have been investigated. It has been found that deformation characteristics near the center of the width of ring were similar to those under plane-strain compression. In this region, grain flow toward the outer side was observed. It was found that three-roll-type ring rolling process shows less lateral spread and more uniform deformation than the two-roll-type process.

Key words: ring rolling , deformation characteristics , grain flow , plane strain compression

## 1. 諸言

熱間リングローリング加工は、リング状素形材の製造に適したプロセスとして、比較的大径の部品製造に多く用いられている。このプロセスは他の製造プロセスと比べて、製造時の歩留が良好で、必要とされる加工力が小さいなどの有利な点を有している。従来から、航空機や船舶用のリング状素形材の製造プロセスとして適用されており、最近では環境対応に伴い世界的に設置が進んでいる風力発電用リング状素形材への適用も進んでいる。

熱間リングローリング加工は、圧延に寄与するロールの配置により、2ロール型と3ロール型とに区別される。2ロール型はラジアルアキシャル型とも呼ばれ、幅広く用いられており、そのため加工時の材料挙動<sup>1)</sup>や、最適なプリフォームの検討など、技術的知見は多く見受けられる。一方、3ロール型は2ロール型と比べ適用例が少ないため、その知見はほとんど見受けられず、加工時の材料挙動など未知な部分が多く残っている。

3ロール型リングローリング加工では、2ロール型とは異なり、閉塞孔型内にて圧延が行われ、圧延に寄与するロールが速度分布を持つという特徴がある。このため、3ロール型と2ロール型とでは、材料の変形挙動・速度分布・延伸効率などに相違があると予想される。3ロール型リングローリング加工における圧延特性を明らかにすることは、生産技術・品質の更なる向上のために有用であると考えられる。

本報では、3ロール型リングローリング加工での材料変形挙動を解明するため、リングローリング前の被加工材に

人工空洞を設け、加工により生じる空洞変位から材料内部のひずみを算出する取り組みを行った。

## 2. リングローリング加工の特徴

Fig.1にリングローリング加工の概念図を示す。円柱座標系を用いて表し、被加工材の半径方向を $r$ 方向、円周方向を $\theta$ 方向、軸方向を $z$ 方向とする。また、リング形状に対応させ各表面を、外径面、内径面、側面と呼ぶこととする。リングローリング加工は、数個のロールを用いてリング状被加工材の $r$ 方向の肉厚を減少させ、より大きな直径に拡張する加工方法であり、塑性加工のうち回転鍛造の1つに分類される圧延に近い加工方法である。この加工方法は、

- 1) 回転加工による逐次成形のため、必要とされる加工力が小さい

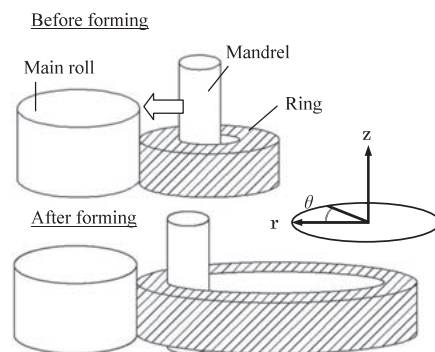


Fig. 1 Schematic diagram of ring rolling process.

\*1 研究・開発センター プロセス開発グループ  
 \*2 研究・開発センター プロセス開発グループ、博士(工学)  
 \*3 研究・開発センター プロセス開発グループ長、PhD

2) 小径の被加工材から拡径により大径リングを製造するため、歩留が良好である  
 などの特徴を有し、比較的大径のリング状部品の製造に対して有利なプロセスである<sup>2-3)</sup>。

## 2.1 2ロール型リングローリング

2ロール型の場合のロール配置を簡略化してFig.2に示

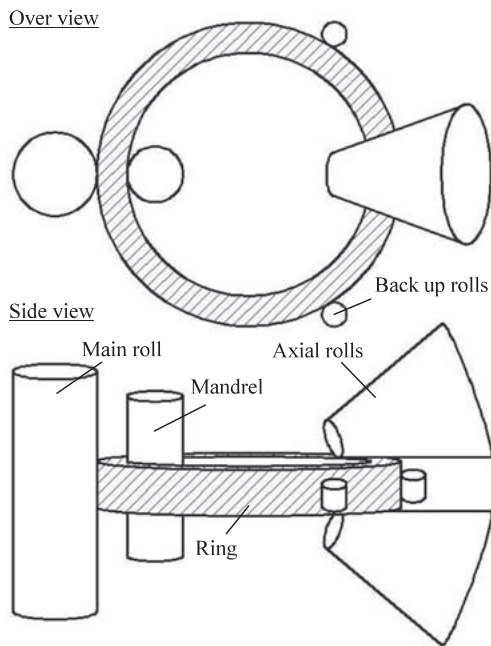


Fig .2 Schematic diagram of two-roll-type ring rolling mill.

す。被加工材のr方向に成形ロールおよびマンドレルが配置され、z方向にはテーパ形状を持つアキシャルロールが対で配置されている。成形ロールおよびマンドレルにより被加工材を挟み込みr方向の肉厚を減少させ、被加工材を拡径する。また、z方向に配置された2つのアキシャルロールにて、z方向の圧下を行うとともに、成形ロールおよびマンドレルでの圧下時に発生した幅広がり（フィッシュテール）を矯正する役割も果たしている。また、被加工材の周囲にはバックアップロールが配置されており、リングローリング加工中の被加工材を保持することにより、製品の真円度や表面性状を向上させる役割を果たしている。

## 2.2 3ロール型リングローリング

3ロール型の場合のロール配置をFig.3に示す。2つの主ロール、1つのマンドレルおよび複数のバックアップロールにて構成されている。主ロールは水平方向から20°もしくは30° 傾斜した主軸に取り付けられており、主軸は一定の回転数で駆動している。マンドレルおよびバックアップロールはロールブロックと呼ばれる駆動装置に取り付けられており、ロールブロックは油圧制御により上下する機構となっている。マンドレルおよびバックアップロールは、被加工材との摩擦により回転する従動式である。加工の最終段階では、被加工材の外径面はバックアップロールと接触し、主ロールおよびバックアップロールにより保持されたまま回転を受けることで、製品の真円度が向上する。

ロールバイト部分は、2つの主ロールおよび1つのマンドレルにより閉塞孔型が構成されており、これが3ロール

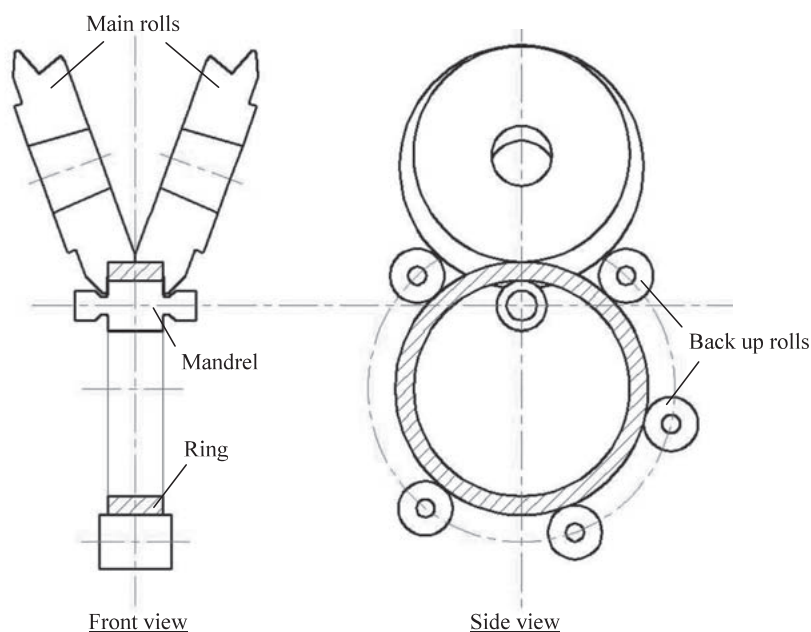


Fig .3 Schematic diagram of three-roll-type ring rolling mill.

型の特徴的な機構である。ロールブロックの上昇に伴いマンドレルが上昇し、主ロールおよびマンドレルで構成される閉塞孔型内にて被加工材の圧延が行われる。2ロール型とは異なり、ロールバイトはこの1箇所のみであり、r方向への圧下とともに、z方向への圧下や圧延時に発生したフィッシュテールの矯正も同時に行うことが可能である。また、主軸が傾斜しているため、被加工材と接触する主ロール表面では、周速度の分布が存在している。

当社関連会社のサントクテック（株）では、上記の3ロール型リングローリング機を10台所有しており、 $\phi 150 \sim \phi 520$ までのリング素形材の製造を行っている。Fig.4に製造している製品の外観を示す。矩形リングを始め、自動調芯軸受（通称：スフェリカル）、深溝玉軸受（通称：ラジアル）などの複雑形状部品をニアネットシェイプ加工により製造している。また、テーパベアリング内外輪に代表される非対称形状製品の場合、2ロール型でのニアネットシェイプ加工の事例はあまり見受けられないが、3ロール型の場合、ニアネットシェイプ加工を実現している<sup>4)</sup>。

これは3ロール型の特徴に起因すると考えられ、この部分を技術的に明らかにすることが本研究の目的である。

### 3. 実験方法

#### 3.1 供試材

3ロール型リングローリング加工時の、材料変形挙動を明らかにするため、実機を用いた実験を行った。実験に用いた供試材の作製工程をFig.5に示す。 $\phi 200$ の棒鋼（鋼種：S45C）を、旋削加工にて所定のリング状供試材とした。その後、放電加工にて $\phi 2\text{mm}$ の貫通孔をr方向およびz方向に一定間隔で配置した。この供試材を、 $1150^\circ\text{C}$ に加熱した後、3ロール型リングローリング機を用いて、外径 $\phi 232.0\text{mm}$ 、内径 $\phi 163.3\text{mm}$ 、幅 $43.0\text{mm}$ の矩形リングへと加工した。Table.1に加工条件を示す。

リングローリング加工前の被加工材は、鍛造プレスを用いて製造するのが一般的であるが、この場合、棒鋼の段階でz方向に整列していたファイバーフローは、プレス加工の影響を受け褶曲する。この状態では、リングローリング

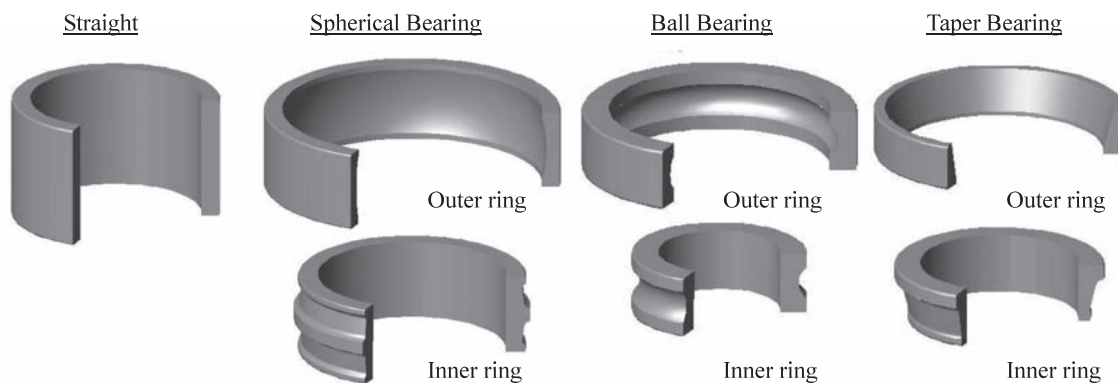


Fig. 4 Overview of ring-rolled products.

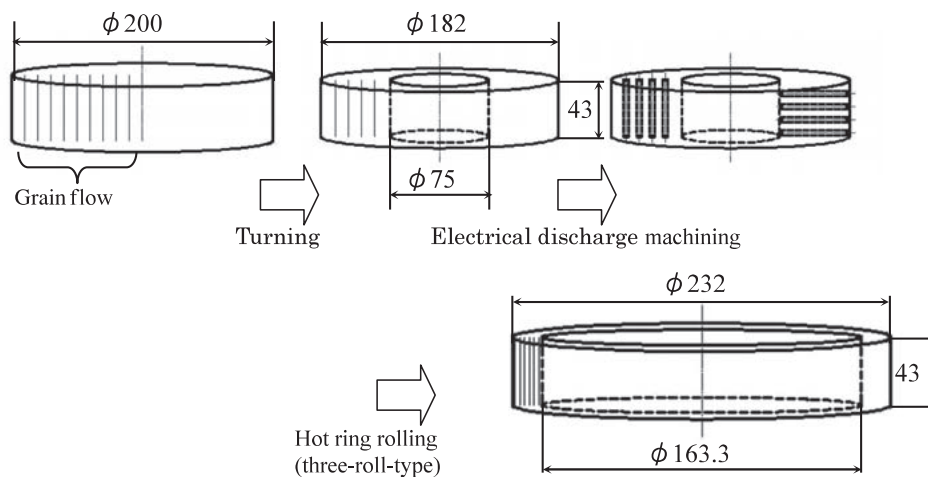


Fig. 5 Preparation of the initial ring and product after ring rolling.

Table 1 Experimental conditions.

Main rolls	Angular velocity /rad·s <sup>-1</sup>	14.2
	Max diameter /mm	330
	Max circumferential speed /mm·s <sup>-1</sup>	2350
Mandrel	Diameter /mm	72
	Average feed speed /mm·s <sup>-1</sup>	3.8
Ring	Material	JIS S45C
	Temperature /°C	1150
Lubrication		Water

加工によるファイバーフローの変化のみを観察することは難しい。よって、旋削加工にてリングローリング加工前の被加工材を作製して、これを供試材として用いた。

### 3.2 調査方法

リングローリング加工前後での、内部空洞の変位量を得るため、Fig.6に示す方法にて調査を行った。リングローリング加工後の被加工材をr方向およびz方向に一定間隔で追い込み、各断面で観察される空洞の位置を調査し、加工前後での空洞の変位量から、材料内部のひずみを推定した。

## 4. 実験結果

### 4.1 被加工材および内部空洞の外観

リングローリング加工後の被加工材外観をFig.7に示す。従来知見<sup>5)</sup>と同様に、側面では主ロール側の空洞の先進が、外径面では主ロール周速分布に対応した空洞の先進が観察された。

Fig.8に、z方向への追い込み調査から得られた各断面での空洞の状態を示す。空洞同士の間隔やθ方向への伸び、あるいは空洞の大きさに差異が認められる。

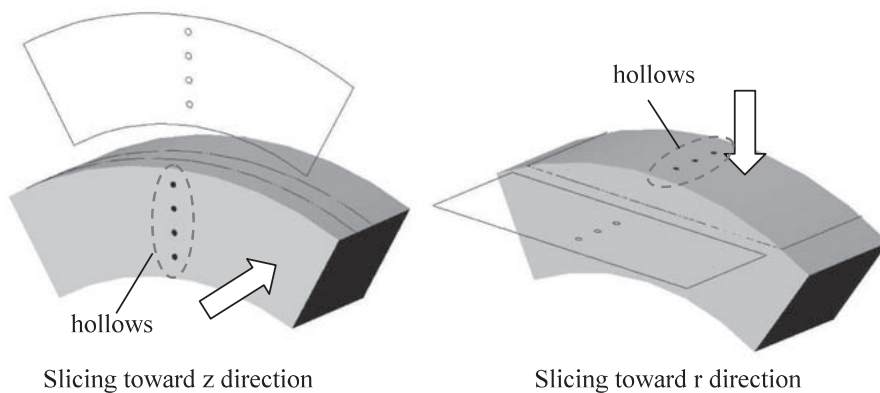


Fig.6 Experimental procedure to observe inner hollows.

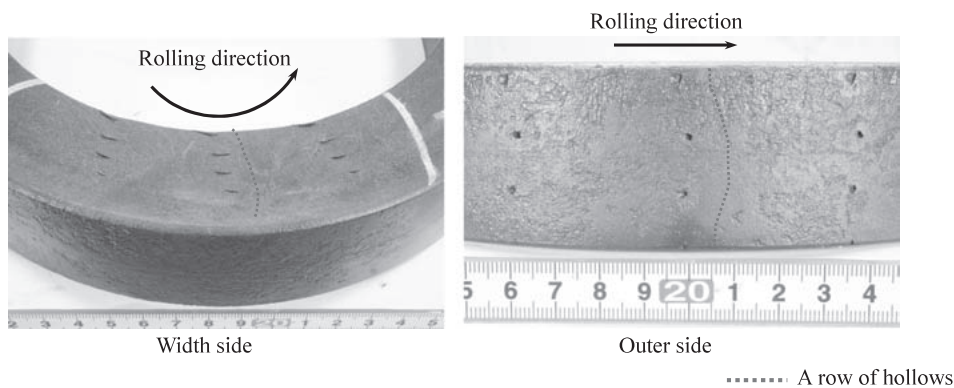


Fig.7 Overview of rolled ring and hollows on surface

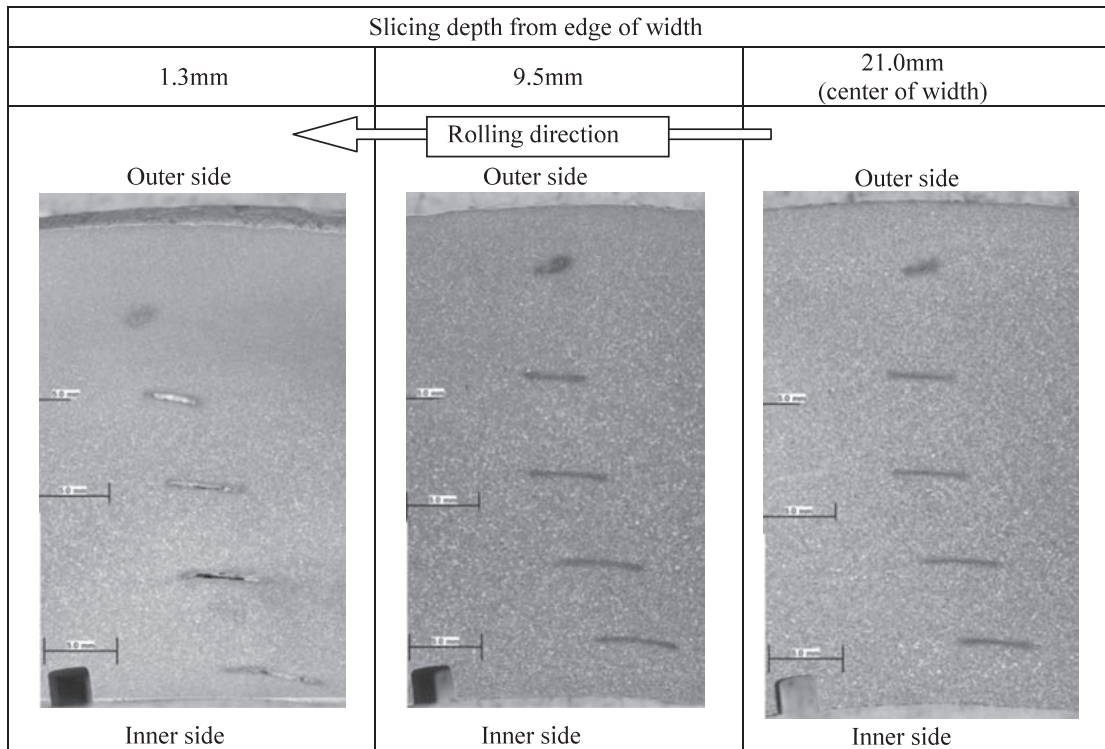


Fig.8 Distribution of inner hollows on cross sections of ring.

4.2 内部空洞の変位, ひずみの検証

z方向への追い込み調査から得られた, 断面内の各位置でのr方向変位UrをFig.9に示す。被加工材のz方向中央をz=0とし, 図中には加工前空洞のr方向位置も併せて記載している。リング圧延のため, 内径近傍 (r=45) の変位が最も大きく, 外径近傍 (r=85) の変位が最も小さくなる。また, 同一の空洞について変位を観察すると, z方向中央部の変位は, 両側面での変位に比べて大きくなる傾向にあることが分かる。

Fig.10~12に, 加工前のr座標で整理したr方向変位Ur, ひずみεr, εθを示す。ここで, r方向ひずみεrおよびθ方向ひずみεθは, 加工前の空孔間隔をh0, 加工後の空孔間隔をh1とすると式(1), (2)にて求めた。

$$\epsilon_r = \ln \frac{h_1}{h_0} \quad \text{----- (1)}$$

$$\epsilon_\theta = \ln \left( \frac{U_r}{r} + 1 \right) \quad \text{----- (2)}$$

図中の実線は, 平面ひずみ状態を仮定した場合の結果である。r方向変位Urおよびεθは, 平面ひずみ状態とほぼ等しく, 側面近傍では若干小さい値を示している。εrはバラツキが大きい傾向にあるが, 平面ひずみ状態とほぼ等しいと言える。

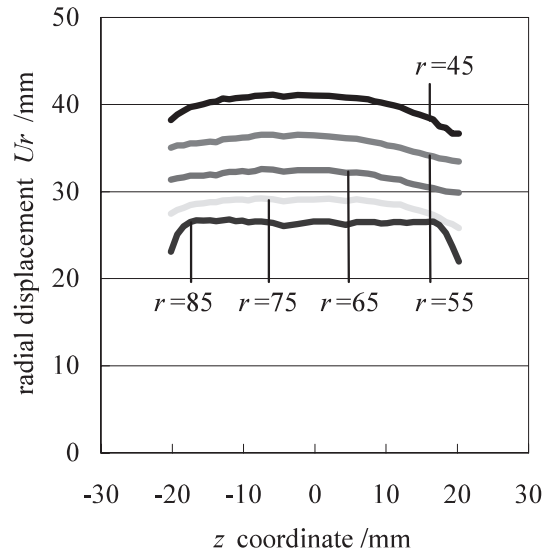


Fig.9 Radial displacement over z coordinate.

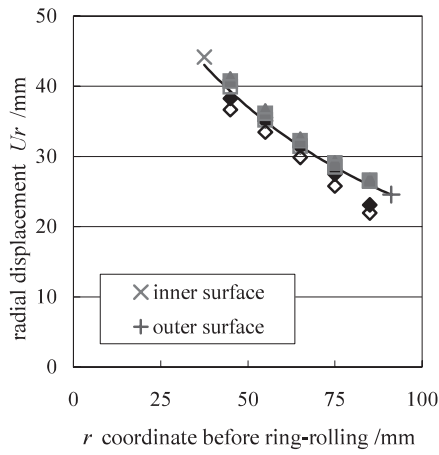


Fig. 10 Radial displacement  $U_r$  over  $r$  coordinate before ring rolling.

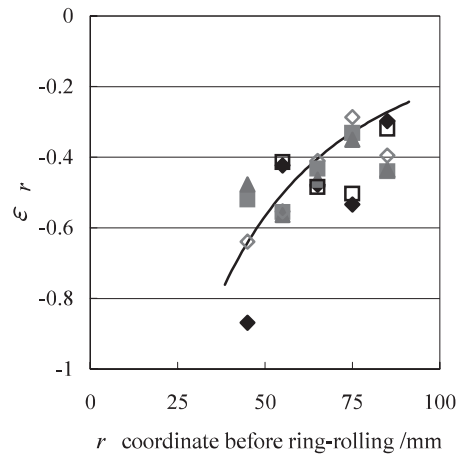


Fig. 11 Radial strain  $\epsilon_r$  over  $r$  coordinate before ring rolling.

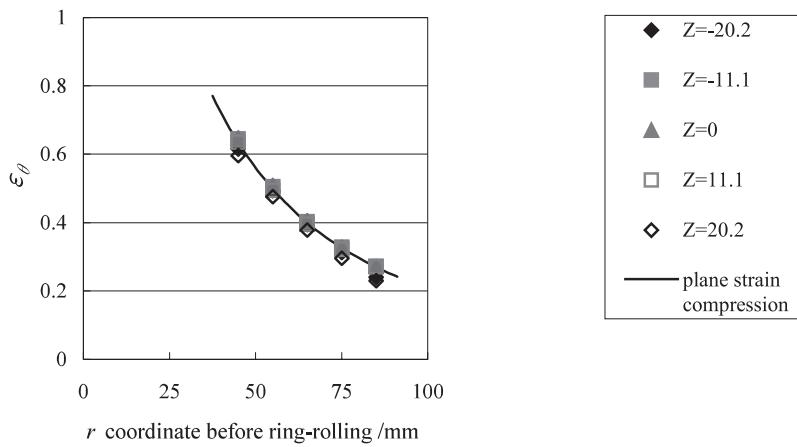


Fig. 12 Circumferential strain  $\epsilon_\theta$  over  $r$  coordinate before ring rolling.

#### 4.3 RD断面でのファイバーフロー

Fig. 13に圧延方向に垂直な断面（以降、RD断面）でのファイバーフローを示す。比較として、2ロール型での実験で得られた結果も併せて示す。3ロール型では、 $z$ 方向中央部分のファイバーフローが内径から外径に向けて湾曲しており、両側面では、外径から内径に向かう材料流動が

観察される。これは、3ロール型の構造から、 $z$ 方向中央部では外径への材料流動を促進する挙動<sup>6-7)</sup>があるためと推定される。一方、2ロール型では、上記のようなフローの湾曲は観察されず、両側面近傍では内径から外径に向かう挙動が認められる。

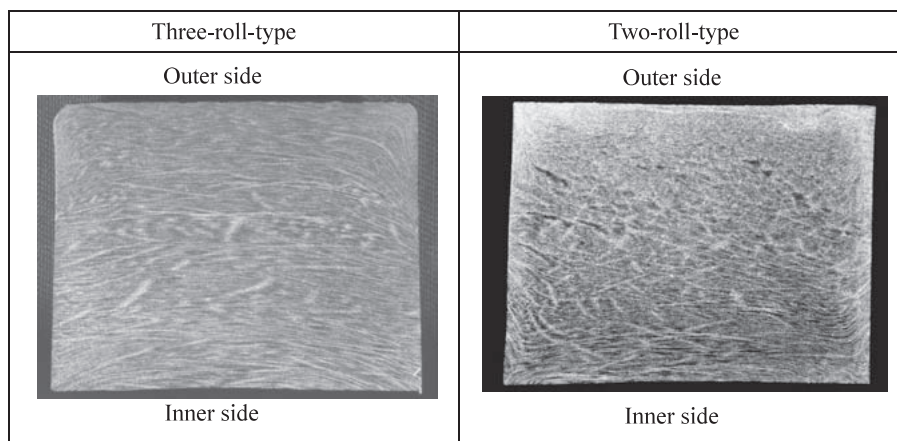


Fig. 13 Comparison of grain flow on RD cross section between three-roll-type and two-roll-type.

## 5. 考察

内部空洞の挙動から得られた $r$ 方向変位 $U_r$ および、ひずみ $\varepsilon_r$ 、 $\varepsilon_\theta$ の結果より、3ロール型リングローリングでは、特に $z$ 方向中央付近では、平面ひずみに近い状態で変形が進んでいることが推察される。また、RD断面内のファイバーフロー観察および $r$ 方向変位 $U_r$ の結果より、 $z$ 方向中央付近では内径から外径に向かう材料挙動が存在すると考えられる。これは、主ロールが傾斜した主軸上に取り付けられているためと考えられる。両側面近傍では、 $r$ 方向変位 $U_r$ が平面ひずみ状態よりも若干小さい値を示し、ファイバーフローからも外径から内径に向かう挙動が見られることから、この部位では主ロール側面に沿って材料が流動していると推察できる。また、3ロール型リングローリングでは、主ロールおよびマンドレルで密閉された孔型内にて加工が行われるため、変形はRD断面内で比較的均一になると考えられる。

一方、2ロール型でのRD断面ファイバーフローから以下のことが推察できる。2ロール型の場合、加工が行われるロールバイト部は、半径方向・軸方向のどちらか一方がロールによって拘束されていない。このため、加工時に生じた大きな幅広がり（フィッシュテール）が、アキシアルロール間あるいは、主ロールとマンドレル間で交互に矯正されている状態が繰り返すことになる。この結果、RD断面でのファイバーフローのように、端面近傍で内径から外径に向かいフローが褶曲する結果になったと推定される。

以上の考察から、3ロール型リングローリングでは、そのロール構成の特徴から、圧延に寄与するロールバイト部を1箇所閉塞孔型とすることができ、そのためRD断面内で比較的均一な加工が行われる。また、幅中央付近では、内径から外径に向かう材料挙動が存在するため、外径に凸形状を持つスフェリカルベアリング内輪、テーパベアリング内輪などには有利なプロセスであると考えられる。

## 6. 結言

3ロール型リングローリング加工における材料変形挙動を解明するため、被加工材に人工空洞を設け、加工前後での空洞位置を追跡する手法を用いて調査を行った。その結果、以下のことが分かった。

- 1) 3ロール型では、 $z$ 方向中央付近では平面ひずみに近い変形が起こっている。また、この部位には内径から外径に向かう材料挙動を促進する作用が働いている。
- 2) 閉塞孔型内で加工されるため、2ロール型と比べて幅広がりが小さく、断面内での変形が比較的均一となる加工方法である。

## 参考文献

- 1) 葉山益次郎・大島勉：塑性と加工，22-240(1981)，71-79.
- 2) 谷殿樹：鍛造技報，34(1988)，43.
- 3) 日本塑性加工学会 編：「回転加工－転造とスピニング」，(1990)，106.
- 4) 中溝利尚：山陽特殊製鋼技報，11(2004)，70-73.
- 5) 中崎盛彦・高須一郎・中溝利尚・宇都宮裕：第59回塑加連講論，(2008)，239-240.
- 6) 堀端眞彦・木村貢：塑性と加工，34-384(1993-1)，49-54.
- 7) 木村貢・堀端眞彦・井上靖彦：第39回塑加連講論，(1988)，623-626.

### ■著者



中溝 利尚



中崎 盛彦



高須 一郎