3 ロール型, 2 ロール型リングローリングにおける 変形特性の実験的研究

—— リングローリングの圧延特性の比較 第 1 報 ——

中溝 利尚* 中崎 盛彦* 高須 一郎* 宇都宮 裕**

Experimental Study of Deformation Characteristics in Three-roll-type and Two-roll-type Ring Rolling Process

—— Comparison of Rolling Characteristics in Ring Rolling Process I ——

Toshifusa NAKAMIZO*, Morihiko NAKASAKI*, Ichiro TAKASU* and Hiroshi UTSUNOMIYA**

(Received on April 26, 2011)

Hot ring rolling is a useful process for producing large seamless rings such as bearing races for ships, airplanes and windmills. Ring rolling is classified into two types, i.e., two-roll-type and three-roll-type, by roll layout. A two-roll-type ring rolling mill is generally used for manufacturing processes. On the other hand, a three-roll-type ring rolling mill has fewer applications, and therefore has been less studied. In this study, the deformation characteristics in both types of ring rolling were investigated experimentally. It is found that the deformation characteristics near the center of the width of the ring in three-roll-type ring rolling are similar to those observed under plane strain compression. In this region, fiber flow toward the outer side is observed. It is also found that three-roll-type ring rolling shows less lateral spread and more uniform deformation than the two-roll-type process without axial rolls.

Key words: rotary forming, hot ring rolling, deformation characteristics, plane strain compression, fiber flow.

1. 緒 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, 製造時の歩留まりが良好で, 必要とされる加工力が小さいなどの利点をもっている. 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.

リングローリング加工は, 数個のロールを用いて, 被加工材の肉厚を減少させ拡張する加工方法である. 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¹⁾とに区別される. 2 ロール型は最も一般的なリングローリング加工であるが, フィッシュテールと呼ばれる不均一な幅広がりが生じるため, 形状を矯正するためにアキシャルロール (コニカルロール) が必要となる. 従来から, 加工時の変形挙動^{2),3)}や圧延時の制御方法などが研究されており,

技術的知見は多く見受けられる. 一方, 3 ロール型は 1950 年代に日本で開発された加工方式で, リング状素形材のニアネットシェイプ化を目的として開発されたが, 2 ロール型と比べ適用例が少なく, 加工時の材料変形挙動など技術的知見は少ない.

3 ロール型リングローリングミルによる加工では, 2 ロール型とは異なり, 3 つのロールで構成される閉塞孔型内にて圧延が行われ, アキシャルロールは使用されない. また, メインロールの回転軸が傾斜している特徴を有しており, 双方の加工方法では, 材料の変形挙動, 延伸効率などに相違があると予想される. また 3 ロール型は 2 ロール型に対して, 非対称製品のニアネットシェイプ化の点で有利と考えられているが, 技術的には明確になっていない.

本研究は, 2 ロール型との比較において, 3 ロール型リングローリングの圧延特性を明らかにすることを目的としている. 圧延特性を検証する手段として, 実験および FEM を用いたアプローチを行った. 本報はその第 1 報として, 実験的手法を用いた検証結果について述べる.

熱間リングローリング加工前の被加工材に人工空洞を設け, 3 ロール型, 2 ロール型リングローリングミルにより圧延加工を施した. 加工により生じる空洞の変位および空洞間隔の変化から材料内部のひずみ分布を測定した. また, RD 断面でのファイバーフロー観察結果も含めて, 被加工

* 山陽特殊製鋼㈱ 〒672-8677 姫路市飾磨区中島 3007
Research & Development Center, SANYO SPECIAL STEEL CO., LTD.
3007, Nakashima, Shikama-ku, Himeji, 672-8677, Japan.

** 大阪大学大学院工学研究科 〒565-0871 吹田市山田丘 2-1
Graduate School of Engineering OSAKA UNIVERSITY
2-1, Yamada-oka, Suita, Osaka, 565-0871, Japan.

材の変形挙動を考察した。

2. リングローリング加工方式

2.1 2 ロール型リングローリングミル

2 ロール型リングローリングミル^{4),5)}のロール配置を簡略化して Fig. 1 に示す。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 θ 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。

圧延に寄与する主なロールは、メインロール、マンドレルおよび一対のアキシャルロールである。ロールバイトはメインロールおよびマンドレルにて構成される部位と、一対のアキシャルロールにて構成される部位の2箇所が存在する。メインロールおよびマンドレル間では r 方向への圧下が行われ、アキシャルロール間では、 z 方向への圧下とともに、メイン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、加工中の被加工材を保持し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。

Fig. 1 Schematic diagram of two-roll-type ring rolling mill

2.2 3 ロール型リングローリングミル

3 ロール型リングローリングミルのロール配置を Fig. 2 に示す⁶⁾。このミルは、2つのメインロール、1つのマンドレルおよび複数のバックアップロールにより構成されている。左右のメインロールは水平方向から 20° もしくは 30° 傾斜した主軸にそれぞれ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支持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動する機構となっている。また、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、メイン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、不充足部分への材料流入を促進しつつ、被加工材の真円度が向上す

る。

ロールバイト部分は、2つのメインロールおよび1つのマンドレルにより閉塞孔型が1箇所構成されており、これは、3 ロール型リングローリングミル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およびバックアップロールが上昇し、メイン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、 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、メインロールは傾斜した主軸に取り付けられているため、加工完了後の形状が矩形リングの場合でも、被加工材と接触するメインロール表面には周速度の分布が存在している。

Fig. 2 Schematic diagram of three-roll-type ring rolling

3. 実験方法

3.1 供試材

3 ロール型、2 ロール型リングローリングミルによる加工時の材料変形挙動を明らかにするため、人工空洞を導入した加工前リングを用意し、リングローリング加工前後での空洞位置および間隔の変化を追跡する実験を行った。実験に用いた供試材の作製工程を Fig. 3 に示す。直径 200mm 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、放電加工を用いて $\phi 2\text{mm}$ の貫通型の人工空洞を r 方向および z 方向に 10mm 間隔で配置して圧延前の供試材とした。この供試材を、加熱炉にて 1150°C に加熱し、双方のリングローリングミルを用いて外径 $\phi 232.0\text{mm}$ 、内径 $\phi 163.3\text{mm}$ 、幅 43.0mm の矩形断面リングへと加工を行った。加工による外径拡大率は 1.27、内径拡大率は 2.18 で、幅方向の寸法変化は無い条件である。また、加工に用いた 3 ロール型リングローリングミルの主軸傾斜角度は 20° である。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、工業的には鍛造プレスを用いて製造されるのが一般的であるが、その場合には、棒鋼の段階で z 方向に整列していたファイバープロ

一は、鍛造加工の影響を受け褶曲する。本実験では、リングローリング加工によるファイバフローの変化のみを観察するため、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実験に供した。

Fig. 3 Preparation of the initial ring and the product after ring rolling

Table 1 Experimental conditions

Main rolls		/mm	three-roll	two-roll
			-type	-type
Main rolls	Max. diameter	/mm	330	400
	Angular velocity	/rad·s ⁻¹	14.2	4.2
	Max. circumferential speed	/mm·s ⁻¹	2350	838
mandrel	Diameter	/mm	72	55
	Average feed speed	/mm·s ⁻¹	3.8	1.0
	Feed speed ratio		0.0016	0.0012
ring	Material		JIS S45C	
	Temperature	/°C	1150	
	Expansion ratio of outer diameter		1.28	
	Expansion ratio of inner diameter		2.18	

3.2 加工後の空洞の調査方法

リングローリング加工前後での、内部人工空洞の変位量および間隔の変化を得るために、Fig. 4 で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の一片を切り出し、 r 方向および z 方向に 1mm 間隔で研磨追込みし、各断面について加工後の人工空洞の位置を調査した。この調査結果から、加工前後での人工空洞の変位量および間隔変化を算出し、被加工材内部の各方向ひずみを推定した。

(a) Slicing toward z direction (b) Slicing toward r direction

Fig. 4 Experimental procedure to observe inner hollows

4. 実験結果

4.1 被加工材および内部空洞の外観

3 ロール型リングローリングミルによる加工後の被加工材外観を Fig. 5 に示す。被加工材表面に観察される人工空洞は、従来知見⁷⁾と同様に、被加工材側面ではメインロール側の先進が、外径面ではメインロール周速度分布に対応した先進が観察された。

Fig. 6 に、 z 方向への追い込み調査から得られた各断面での人工空洞の外観の一例を示す。隣接する人工空洞の間隔や θ 方向への延び、あるいは空洞の大きさに差異が認められる。この結果から、各断面位置での r 方向、 θ 方向ひずみに差異があることが推察される。

Fig. 5 Overview of rolled ring and hollows on surface in three-roll-type ring rolling process

Fig. 6 Distribution of inner hollows on cross sections of ring in three-roll-ring rolling process

4.2 人工空洞の変位、およびひずみの検証

3 ロール型、2 ロール型それぞれのリングローリングミルにて圧延加工を行った被加工材の一部を z 方向へ研磨追込みし、各断面内での空洞位置から r 方向変位 U_r を算出した。その結果を Fig. 7 に示す。被加工材の z 方向中央を $z=0$ とし、図中には加工前の人工空洞の r 方向座標を併記している。また、平面ひずみ状態を仮定した場合の変位を一点鎖線にて表記している。

リングローリング加工であるため、双方とも内径

($r=45\text{mm}$) 近傍の r 方向変位が最も大きく、外径 ($r=85\text{mm}$) 近傍の変位が最も小さくなる。3 ロール型では z 方向中央付近の変位は、両側面での変位に比べて大きくなる傾向にあり、 r 方向の位置に依らず同様の傾向である。また、両側面近傍を除けば、変位は平面ひずみ状態を仮定した場合よりも大きい。一方、2 ロール型では、3 ロール型と比べると z 方向位置による変位の差は小さく、内径近傍を除けば、平面ひずみと同様の変位となっている。以上の結果から、3 ロール型リングローリングミルを用いた加工では、 z 方向中央付近では、側面近傍と比べてより外径側に材料が流動していることが分かる。

(a) Three-roll-type

(b) Two-roll-type

Fig. 7 Radial displacement U_r over z coordinate

Fig. 8 および Fig. 9 に、加工前の r 座標で整理した圧下ひずみ ε_r および延伸ひずみ ε_θ を示す。 z 方向位置として、幅中央部 ($z=0$) および端面近傍 ($z=20.2$) の 2 点を記載している。ここで、圧下ひずみ ε_r は加工前後での空洞間隔の変化から、延伸ひずみ ε_θ は r 方向変位 U_r から算出した。加工前の空洞間隔を h_0 、加工後の空洞間隔を h_1 とすると、両者は式(1)、(2)で表わされる。

$$\varepsilon_r = \ln \frac{h_1}{h_0} \quad (1)$$

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

図中の実線は、加工中の変形が平面ひずみ状態で進んでいると仮定した場合の結果である。圧下ひずみ ε_r は 3 ロール型、2 ロール型ともに、 z 方向中央部では平面ひずみに近い結果であるが、2 ロール型の方がより大きい傾向にある。また、両端面近傍では、3 ロール型、2 ロール型ともに平面ひずみ状態とは異なる。一方、延伸ひずみ ε_θ は z 方向中央部、両端面近傍ともに平面ひずみ状態での変形に近い。

以上のことから、2 ロール型では、3 ロール型と比べて圧下ひずみ ε_r に対する延伸ひずみ ε_θ の割合が小さい傾向にある。これは、2 ロール型が開放孔型での圧延で、幅方向への材料流動が存在するためと考えられる。一方、3 ロール型は閉塞孔型での圧延であるため、 z 方向への材料流動が抑制されており、圧下ひずみと延伸ひずみが同一となる平面ひずみ圧縮に近い状態で加工が進んでいると解釈できる。

Fig. 8 Radial strain ε_r over r coordinate before ring rolling Fig. 9 Circumferential strain ε_θ over r coordinate before ring rolling

4.3 RD 断面でのファイバーフロー比較

Fig. 10 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および材料流動の模式図を示す。3 ロール型、2 ロール型でリングローリング加工を行った被加工材から RD 断面を切り出し、塩酸にてマクロ腐食を行った。3 ロール型にて加工を行った被加工材では、 z 方向中央部分のファイバーフローが外径側に向けて湾曲しており、両側

面では、外径側から内径側に向かう材料挙動が観察される。これは、被加工材の z 方向中央部で r 方向変位 U_r が大きく、両側面で小さいことと対応している。一方、2 ロール型で加工を行った被加工材では、3 ロール型で見られるフローの湾曲は観察されず、両側面近傍では内径側から外径側に向かう挙動が認められる。また、表面の形状も2 ロール型ではフィッシュテールの痕跡が見受けられるが、3 ロール型では見受けられない。

Fig. 10 Comparison of grain flow on RD cross section and metal flow between three-roll-type and two-roll-type

5. 考 察

人工空洞の変形挙動から得られた r 方向変位 U_r および、各方向ひずみ ε_r , ε_θ の結果より、3 ロール型リングローリングミルでの加工では、 z 方向中央付近の半径方向変位 U_r は、両側面での結果と比べると大きい傾向にある。この結果は、被加工材 RD 断面内のファイバーフローからも観察されており、 z 方向中央付近では内径側から外径側に向かう材料流動が存在すると考えられる。

また、3 ロール型による加工では、メインロールおよびマンドレルで構成された閉塞孔型内にて圧延が行われるため、 z 方向への材料流動が抑制され、全体としては平面ひずみ圧縮に近い状態で変形が進んでいる。

一方、2 ロール型の場合、加工が行われるロールバイト部は、 r 方向・ z 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開放孔型である。このため、加工時に生じる幅広がり（フィッシュテール）が、アキシャルロール間あるいはメインロールとマンドレル間にて、コーナー部が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、Coupu ら⁸⁾が示しているように、変形が被加工材のコーナー部に集中し、また、Fig. 10 に示すファイバーフロー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ミルによる加工では、そのロール配置の特徴から、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、そのためフィッシュテールの発生を抑制でき、より平面ひずみ圧縮に近い状態で効率的に加工が進行する。また、幅方向の中央付近では、内径側から外径側に向かう材料流動が存在するため、この材料流動を活かせる製品への適用が期待できる。

6. 結 言

3 ロール型リングローリングでの圧延特性を解明するため、3 ロール型、2 ロール型リングローリングミルを用いて実験を行った。加工前の被加工材に人工空洞を配置し、加工前後での空洞位置の変化を追跡する手法を用いて調査を行った結果、以下のことが分かった。

- (1) 3 ロール型は、閉塞孔型によって幅広がり（フィッシュテール）が抑制される結果、アキシャルロールが不要で、幅中央（ z 方向中央）付近では平面ひずみ圧縮に近い状態で変形が進行する。
- (2) 3 ロール型では幅中央付近で、2 ロール型には見られない内径側から外径側への材料流動が存在する。

参 考 文 献

- 1) 斉藤正之・斉藤正也：特公 昭 34-7408.
- 2) 葉山益次郎・大島勉：塑性と加工, **22**-240(1981), 71-79.
- 3) Mamalis, A.G., Hawkyard, J.B. & Johnson, W.: Int. J. Mech. Sci., **18** (1976), 11.
- 4) 守谷厳樹：鍛造技報, **34** (1988), 43.
- 5) 日本塑性加工学会 編：「回転加工 ― 転造とスピニング ―」, (1990), 106.
- 6) 中溝利尚：山陽特殊製鋼技報, **11** (2004), 70-73.
- 7) 中崎盛彦・中溝利尚・高須一郎・宇都宮裕：塑性と加工, **50**-584 (2009), 873-877.
- 8) Coupu, J., Raulin, J.L. & Huez, J.: Proc. 3rd Int. Conf. Modeling of Metal Rolling Processes, (1999), 82-89.