



3ロール型リングローリングの圧延特性に関する研究

Rolling Characteristics in Three-roll-type Ring Rolling

中溝利尚*1 中崎盛彦*2

Toshifusa Nakamizo, Morihiko Nakasaki

Synopsis: Hot ring rolling is a useful process for producing large seamless rings such as bearing races for ships, airplanes and wind turbine. The ring rolling mills are classified into two types by roll layout, i.e., two-roll-type and three-roll-type. In this study, numerical simulation was performed by FEM together with the ALE method for each process. FEM together with the ALE method can simulate the deformation for the two types of ring rolling process. By the investigation for the product with rectangle cross-section, three-roll-type ring rolling gives a uniform distribution of effective strain and compressive hydrostatic stress on the RD cross-section. In the production of asymmetric products, the three-roll-type ring rolling has two advantages of formability over the two-roll-type ring rolling. One is the reduction of the relative velocity between the ring and the rolls. This reduction improves the roll life and the surface condition of the rolled ring. Another is the additional material flow toward the width side of the ring. It is caused by the axes leaning of two main rolls from horizontal axis.

Key words: ring rolling, rolling characteristics, FEM, ALE, effective strain, hydrostatic stress, asymmetric product, relative velocity

1. 緒言

近代工業技術の多くの分野において、ベアリングやギア、各種フランジなどに代表されるリング部品は機械や設備の重要な構成要素となっている。このリング部品の製造方法の1つとして、リングローリング加工がある。リングローリングは、鍛造により成形された荒地（Preform）リングの肉厚を減少させながら直径を拡大し、望む形状・寸法のリング部品を得る加工方法である。この加工方法は他の塑性加工方法と比べて、局所加工であるため必要な加工力が小さく、製品の寸法精度が高い、直径を拡大させる加工方法のため歩留まりが良いなど、複数の工業的優位性を有しており、古くから用いられている塑性加工方法である¹⁻⁴⁾。

昨今、低炭素社会の実現のため、また、製品の付加価値を高める加工技術の実現のため、省エネルギー、省資源が可能なリングローリング加工技術が望まれている。このような背景から、リングローリング製品のニアネットシェイプ化、すなわち異形断面製品のリングローリング技術を確立することは、工業的価値が高いと考えられる。

リングローリングミルの形態は、ロールバイトにて圧延に寄与するロール数により、2ロール型および3ロール型^{5,6)}に区別される。2ロール型は一般的に用いられているリン

グローリングミルであり、古くから研究されており技術的知見も多数ある⁷⁻¹²⁾。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、異形断面リングさらには非対称異形断面リングのニアネット成形が古くから行われており、2ロール型と比べ成形性に相違があると考えられる。しかし、3ロール型は適用例が少なく、基本的な圧延特性をはじめ異形断面リングの成形性に関する技術的知見は明らかになっていない。

本研究は、3ロール型リングローリングミルの圧延特性を解明することを目的としている。前報¹³⁾では、実験的にリングローリング時の変位・ひずみを導出した結果を報告した。本報では、有限要素解析を用いて数値解析的に加工を再現し、実験値との比較を行い、加工時のひずみ、応力分布を導出した。また、非対称異形断面リングの成形性に関する検討を行った。その結果、3ロール型リングローリングの基本的な圧延特性、ならびに、非対称異形断面を有するリングに関する圧延特性を明らかにしたので、ここに報告する。

*1 研究・開発センター 加工プロセスグループ、博士（工学）

*2 研究・開発センター 加工プロセスグループ長、博士（工学）

2. 3ロール型リングローリングの特徴

3ロール型リングローリングミルのロール配置をFig.1に示す。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個のバックアップロールにて構成されている。メインロールは水平方向に対して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。マンドレルは被加工材との摩擦により回転する従動式で、メインロールに向かって上昇させることで、被加工材の肉厚を減ずる。

ロールバイト部分は、3つのロール（2つのメインロールおよびマンドレル）により閉式孔型が構成されており、これが3ロール型に特有の機構である。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、メインロールの回転主軸が傾斜していることにより、被加工材と接触するメインロール表面では、周速度の分布が存在している。

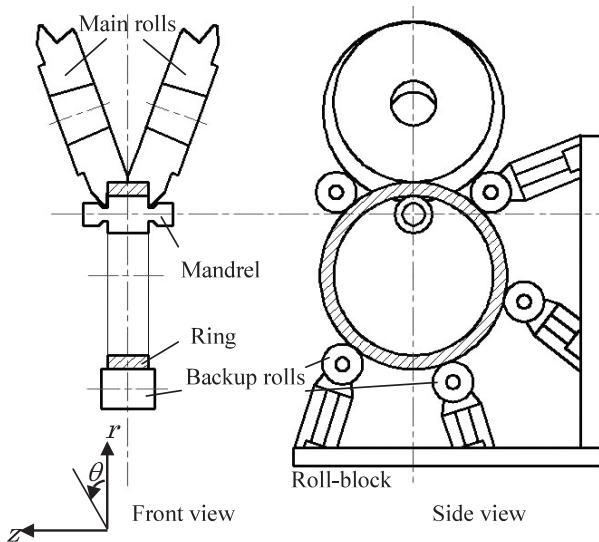


Fig.1 Schematic diagram of three-roll-type ring rolling¹³⁾

3. 矩形断面リングに対する圧延特性

3.1 有限要素解析条件

リングローリング加工により発生する被加工材内部のひずみを導出するため、有限要素解析を用いて3次元非定常変形解析を実施した。リングローリング加工は、一般的に異径異周速の逐次圧延であり、被加工材は各ロールとの接触離脱を繰り返すため、数値解析として扱うには難しい部類の加工である。解析には市販の有限要素解析ソフト DEFORM 3D™ ver.10.1を用い、ALE法を用いたリングローリング専用のソルバーを採用した。ALE法とは、Lagrange要素とEuler要素を併用する解析手法で、ロールバイト内のみをLagrange要素に分割し、それ以外の部位はEuler要素を使用することで、解析精度を保ったまま解析時間を短縮することが可能である¹⁴⁻¹⁶⁾。

有限要素解析に用いた加工条件は、3ロール型、2ロール型ともに、前報¹³⁾で行った実験と同様である。Table 1に有限要素解析で用いた条件を示す。被加工材の要素分割は6面体8節点要素で行い、初期要素数は9,500とした。3ロール型リングローリング加工におけるメインロール主軸の傾斜角度は、水平方向から20°とした。被加工材の鋼種はS45Cで、温度分布は考慮せず1050℃一定の条件で有限要素解析を実施した。この場合、リングローリングの加工前後で、被加工材の外径拡大率は1.3、内径拡大率は2.2となる条件である。また、被加工材と各ロールとのせん断摩擦係数は熱間加工で一般的に用いられる $m=0.7$ とした。

3.2 解析結果および考察

3.2.1 ひずみの比較による解析精度の検討

3ロール型および2ロール型リングローリングミルでの加工における被加工材内部のひずみ成分について、解析結果と前報¹³⁾で得られた実験値との比較を行った。Fig.2に、加工完了時の幅中央部分での半径方向ひずみ ϵ_r 、円周方向ひずみ ϵ_θ を示す。図中の実線は、幅方向(z方向)のひずみが無いとし、r θ 面内で平面ひずみ変形を仮定した場合

Table 1 FEM conditions

		Three-roll -type	Two-roll -type
FEM code		DEFORM 3D™ ver.10.1	
Solver		ALE ring rolling	
Flow stress /MPa		$\sigma = 100 \epsilon^{0.01} \cdot 0.11$	
Mesh shape		Hexahedral mesh with 8 nodes	
A number of initial mesh		9,500	
Shear friction		$m=0.7$	
Main rolls	Max. circumferential speed /mm·s ⁻¹	2350	838
	Leaning angle of main roll shafts /deg.	20	0
Mandrel	Feed speed ratio	0.0016	0.0012
Ring	Material	JIS S45C	
	Temperature /°C	1050	
	Expansion ratio of outer diameter	1.28	
	Expansion ratio of inner diameter	2.18	

の結果である。

2ロール型、3ロール型双方とも、半径方向ひずみ ϵ_r は内径側ほど圧縮側に大きく、それに伴い、円周方向ひずみ ϵ_θ も内径ほど引張側に大きくなる傾向である。半径方向ひずみ ϵ_r は、平井らの実験結果¹⁷⁾と同様の傾向を示している。解析結果と実験結果の全般的な傾向は一致しており、ALE法を用いた有限要素解析により、外表面の材料流動^{15, 16)}に加え、内部のひずみ状態もほぼ再現出来ていると考える。内径近傍でのひずみの差異は、初期メッシュ数の影響、温度の影響、マンドレルとの接触状態の違いなどが考えられ、今後精度を向上させる検討が必要である。

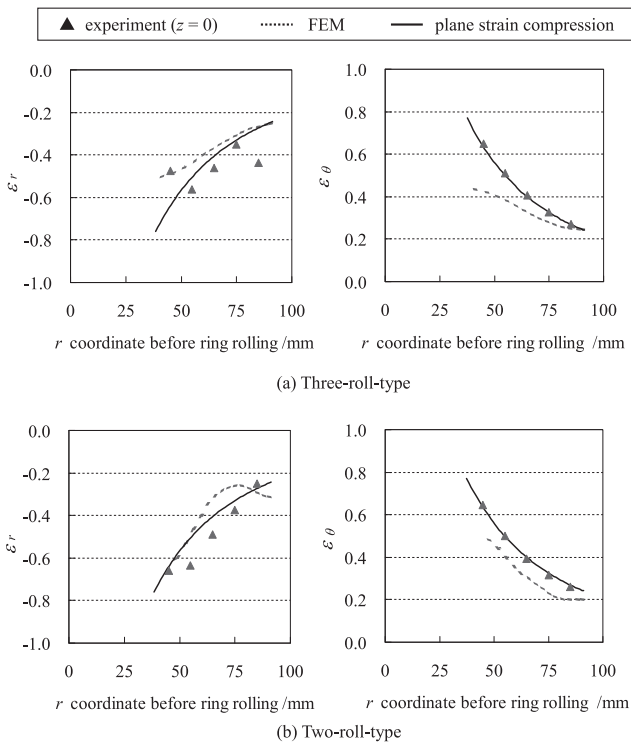


Fig.2 Each strain by the FEM and the experiment¹³⁾

3.2.2 RD断面の相当ひずみ、静水圧応力分布の比較

3ロール型、2ロール型リングローリングミルでの加工により発生するひずみ・応力を比較するため、マンドレル圧下速度などの加工条件は3ロール型と同一とし、ロール配置のみ2ロール型とした条件で有限要素解析を実施した。ロールバイト内での相当ひずみ分布をFig.3に、静水圧応力の分布をFig.4に示す。

相当ひずみは、3ロール型では、被加工材全域において比較的均一に分布しており、内径側に向かうほど大きくなる傾向である。一方、2ロール型では、Coupuらが指摘しているように¹⁸⁾、被加工材コーナー部分にひずみの集中が観察される。また、静水圧応力は、3ロール型では被加工材の全域において圧縮となるが、2ロール型では被加工材の肉厚中心から内径にかけて、弱い圧縮もしくは引張が作

用している。

3ロール型は最小ロールバイト位置では被加工材全域がロールで拘束される、いわゆる閉式孔型内での圧延のため、フィッシュテールが抑制された状態で加工が進行する。このため、断面内でより均一な加工が行われ、被加工材の肉厚中心付近まで圧縮の静水圧応力が作用すると考えられる。一方、2ロール型では開放型の孔型であるため、圧延時に発生したフィッシュテールがもう一方のロールバイトで加工され、その状態が繰り返される。その結果として、被加工材コーナー部に相当ひずみが集中し、被加工材内部まで変形が及び難くなると推察される。

以上の結果から、3ロール型は2ロール型と比べて、ロールバイト内でより均一な変形が行われることに加えて、ロールバイト内の被加工材全域において圧縮の静水圧応力が作用する加工方法である。これにより、引張応力を起因とした割れなどの欠陥抑制や、被加工材内部の空隙・ポイド欠陥の生成・成長の抑制および圧着に対しても有利な加工方法であると考えられる。また、静水圧応力圧縮下で加工が進行するため、例えば脆性材料や難加工性材料の圧延などに今後期待が持てる。

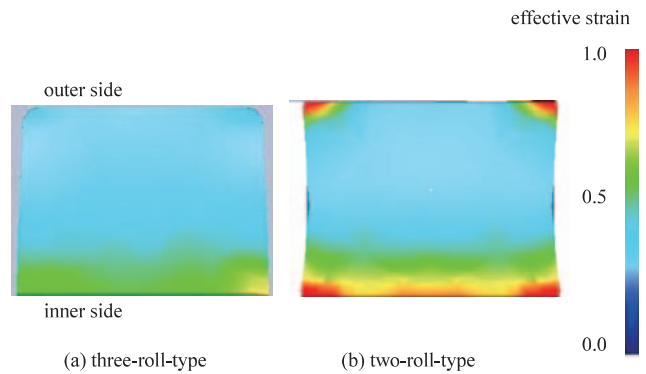


Fig.3 Effective strain on the RD cross section

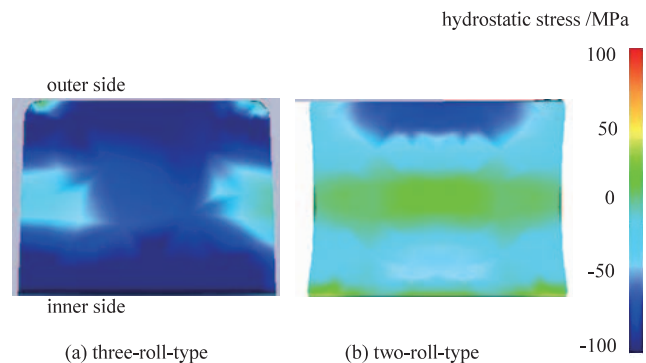


Fig.4 Hydrostatic stress on the RD cross section

3.2.3 延伸効率の比較

有限要素解析により得られた半径方向ひずみ ε_r 、および円周方向ひずみ ε_θ から、式(1)にて半径方向ひずみ(圧下ひずみ)に対する円周方向ひずみ(延伸ひずみ)の割合、すなわち延伸効率 f_w ¹⁹⁾を算出した。

$$f_w = \frac{\varepsilon_\theta}{|\varepsilon_r|} \quad (1)$$

延伸効率 f_w は、ロールバイト内での被加工材の幅中央部分について、外径部($r=91\text{mm}$)、厚み中央部($r=64\text{mm}$)、内径部($r=37.5\text{mm}$)の3箇所から導出した。Fig.5に3ロール型、2ロール型における延伸効率のストローク率に対する推移を示す。ストローク率20%までの加工初期(約4回転分に相当)ではリングの挙動は不安定であり、図中ではストローク率20%以上の結果について示す。一般に、孔型圧延の場合圧下率の増加とともに、RD面内の流動が減少して延伸効率は増加する。体積一定の条件でリングが拡張される加工であることにより、特に加工初期では内径付近の延伸効率がより高くなる傾向にある。

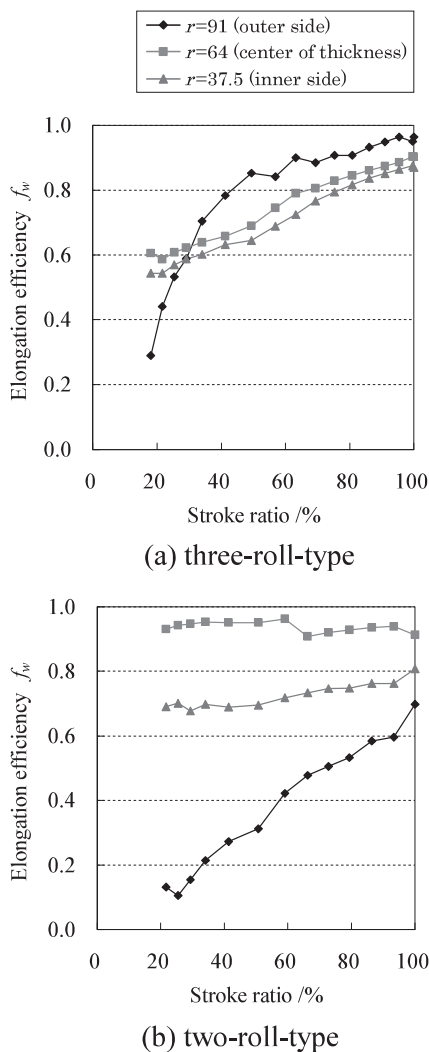


Fig.5 Elongation efficiency over stroke ratio

3ロール型では、加工が進むにつれ各部位の延伸効率は互いに漸近し、加工末期ではその差が小さい。このことから、半径方向の位置によらず半径方向ひずみに対して比較的均一な円周方向ひずみが生じていることが伺える。一方、2ロール型では、厚み中央部、内径部の延伸効率は加工初期から高い値を示すが、外径側での延伸効率は初期に低い値を取り、それ以外の部位の挙動に追従しない。加工終了直前でも、各部位での延伸効率の差は大きく、2ロール型は、被加工材の半径方向位置により延伸効率が大きく異なる特徴を示す。これにより、半径方向ひずみの不均一さが存在する加工であると考えられる。

2ロール型では開放孔型での圧延のため、ロール近傍である内径部および外径部では幅方向への材料変形が起こる。その結果として、フィッシュテールが発生し延伸効率が低下すると考えられる。一方、3ロール型では幅広がりによるフィッシュテールの発生が抑制されるため、RD断面内で比較的均一な加工が行われている。その結果、延伸効率も比較的均一な分布を示したと考えられる。

4. 非対称異形断面リングに対する圧延特性

4.1 3ロール型の特徴と非対称異形断面リング圧延の課題

非対称異形断面の被加工材をリング圧延する場合の問題点の1つとして、被加工材の外径周速度とロール周速度が一致する点(中立点)が限られていることが挙げられる。Fig.6に2ロール型の場合の概念図を示すが、被加工材の回転軸とメインロールの回転軸の位置関係より、メインロール周速度が最大となる箇所($R_{\text{left-roll}}$)では、被加工材が小外径 D_s のため周速度は最小となる。メインロール周速度が最小となる箇所($R_{\text{right-roll}}$)では、被加工材が大外径 D_L のため周速度は最大となる。このように非対称異形断面の被加工材をリング圧延する場合には、ロールバイト内での被加工材リングの周速度とメインロールの周速度の差、すなわち相対速度が大きくなる。その結果、メインロールと被加工材の間に相対滑りが不可避免的に生じ、ロールバイトのほぼ全域においてすべりを生じながら加工が進行することになる。メインロールと被加工材の間で発生するすべりは、摩擦仕事の増加をもたらし、被加工材表面での欠陥の発生、ロール寿命の低下、加工中のリング姿勢が不安定になるなどの悪影響を及ぼすと考えられる^{20, 21)}。このため、非対称異形断面の製品を安定的に製造するためには、ロールと被加工材間の相対速度を低減し、かつその分布を軽減することが重要である。

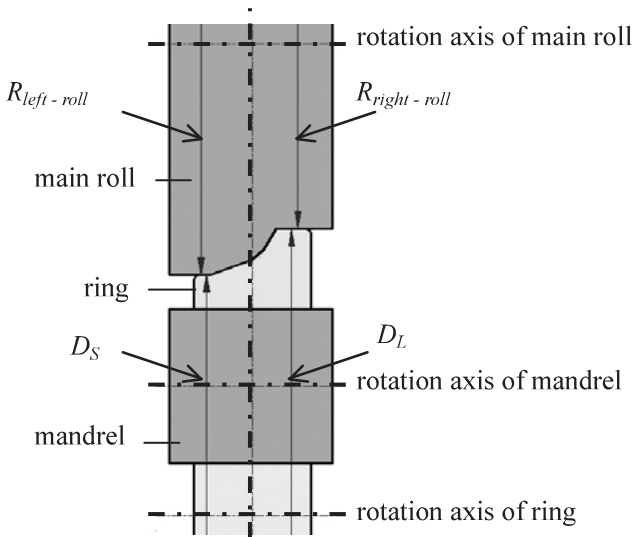


Fig.6 Schematic diagram of two-roll-type ring rolling

4.2 解析条件

非対称異形断面を有する被加工材をリング圧延する際の変形挙動を調査するため、有限要素解析を用いて3次元非定常変形解析を実施した。Fig.7に有限要素解析に用いたリングローリング加工前後の形状を示す。加工度は大外径

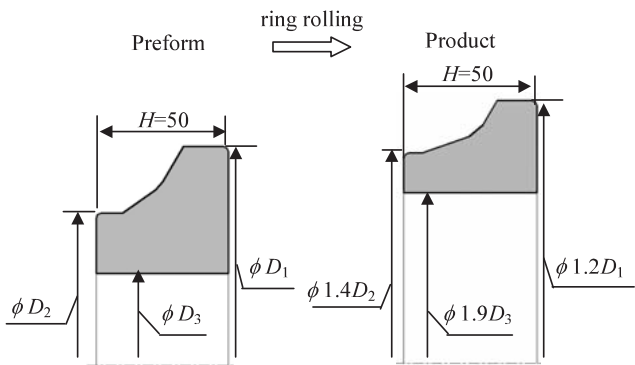


Fig.7 Preform and product for FEM

で約1.2倍、小外径で約1.4倍、内径で約1.9倍の拡大率となるように設定した。ここで、加工前後での幅寸法Hは変化しないものとした。

有限要素解析は、矩形断面リングの検討と同様とした。有限要素解析で用いたロール配置をFig.8に、解析条件をTable 2に示す。3ロール型リングローリングにおけるメインロール主軸の傾斜角度 $\phi = 20^\circ$ とした。被加工材は軸受鋼SUJ2で、温度分布は考慮せず1050℃一定の条件とした。また、被加工材と各ロールとのせん断摩擦係数は、熱間加工で一般的に用いられる $m=0.7$ とした。2ロール型の場合、被加工材側面の摩擦の効果が大きいと考えられるが、製品上下面の相対速度の効果のみを抽出するため、ここではFig.8 (b) に示すように2ロール型の被加工材側面とロールとの摩擦は無いものとして解析した。

非対称異形断面の被加工材をリング圧延する場合、製品幅方向 (z方向) の各位置でメインロール径が必然的に異なる。そこで、メインロール径の影響を同一の条件で評価するため、Fig.8中に図示した矢印部 (3ロール型でのロール分割位置に相当) のメインロール径を基準寸法としてTable 2に示した。メインロール径、回転数を変数としてTable 2の3条件について有限要素解析にて検討した。こ

Table 2 FEM conditions

Objects	Conditions	No.1	No.2	No.3
		Three-roll-type		Two-roll-type
Left main roll	Circumferential velocity at standard position /mm·s ⁻¹	2367	1963	2367
Right main roll	Circumferential velocity at standard position /mm·s ⁻¹	2367		
Mandrel	Feed speed /mm·s ⁻¹	3.0		
Ring	Temperature /°C	1050		
	Flow stress /MPa	$\sigma = 70 \epsilon^{0.01} \dot{\epsilon}^{0.14}$		
Leaning angle of main rolls $\phi /^\circ$		20	0	
Friction coefficient		$m = 0.7$		

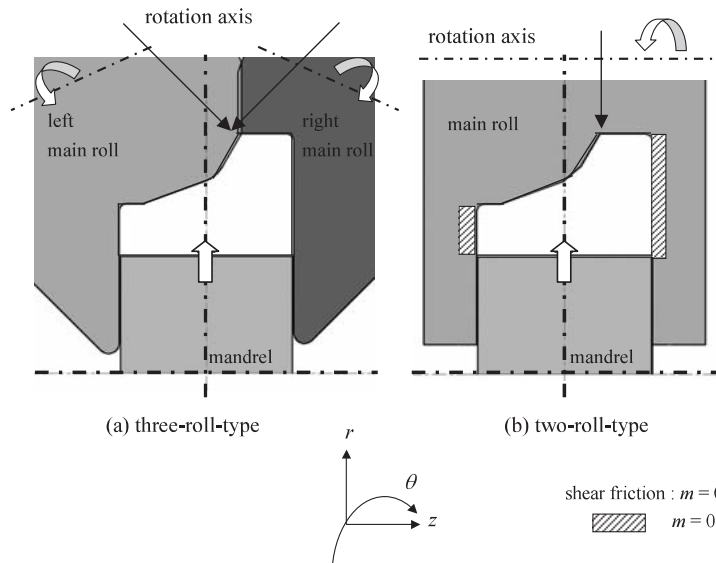


Fig.8 FEM model

ここで、条件No.1を3ロール型での基本条件とし、条件No.3は2ロール型で条件No.1と同じ設定とした場合である。条件No.2は3ロール型で左メインロールの周速度を小さくしており、メインロールと被加工材との相対速度を小さくすることを狙った。マンドレルは被加工材の摩擦にて回転する従動式とし、圧下速度は3.0mm/s一定とした。

Table 2の条件から決定される最小ロールギャップ位置でのメインロール周速度分布をFig.9に示す。横軸には被加工材幅Hで規格化したz軸座標を用いた。2ロール型の条件No.3の場合、メインロールの周速度は被加工材幅方向で最大約330mm/sの差が認められるが、3ロール型の条件No.1では約200mm/sに抑制されている。これは、3ロール型ではメインロール回転主軸が傾斜していることにより、z軸方向のメインロール径差が小さくなるためである。さらに、3ロール型では左右2つのメインロールが独立して存在するため、条件No.2のように、メインロールと被加工材の相対速度が低減するように、メインロール径、角速度を任意に設定することが可能である。この場合、右側メインロールと比べて、左側メインロールの周速度を小さくすることで、後述するように被加工材との相対速度が小さくなる。

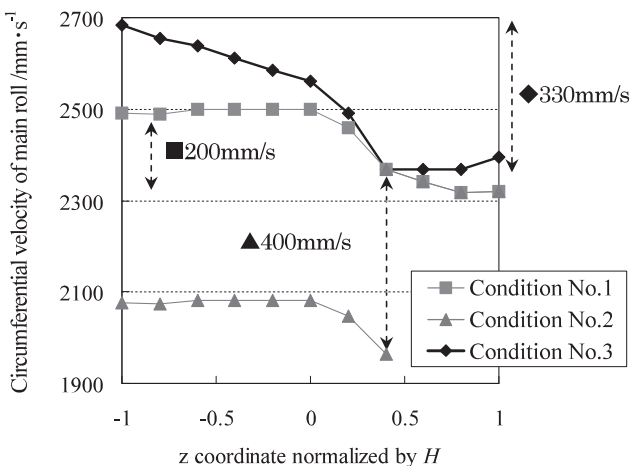


Fig.9 Circumferential velocity of main rolls on each condition

4.3 解析結果

4.3.1 相対速度の幅方向 (z方向) 分布

加工終了直前で、最小ロールギャップ位置での被加工材外径部の各節点について周速度を抽出し、相対速度を幅方向について整理した結果をFig.10に示す。2ロール型の条件No.3では相対速度約770mm/sであったが、3ロール型の条件No.1では約600mm/sとなり、相対速度を約22%低減することが可能であった。基準となるメインロール径、角速度が同一の条件で相対速度は2ロール型と比較して小さく、メインロール主軸が傾斜していることが好影響をも

たらしている。また、メインロールと被加工材の相対速度を小さくすることを狙った条件No.2では約450mm/sとなり、2ロール型と比べると約42%低減させることが可能であった。

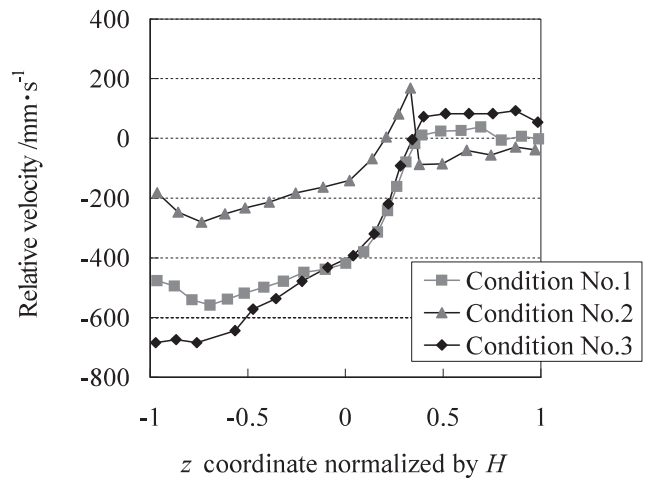


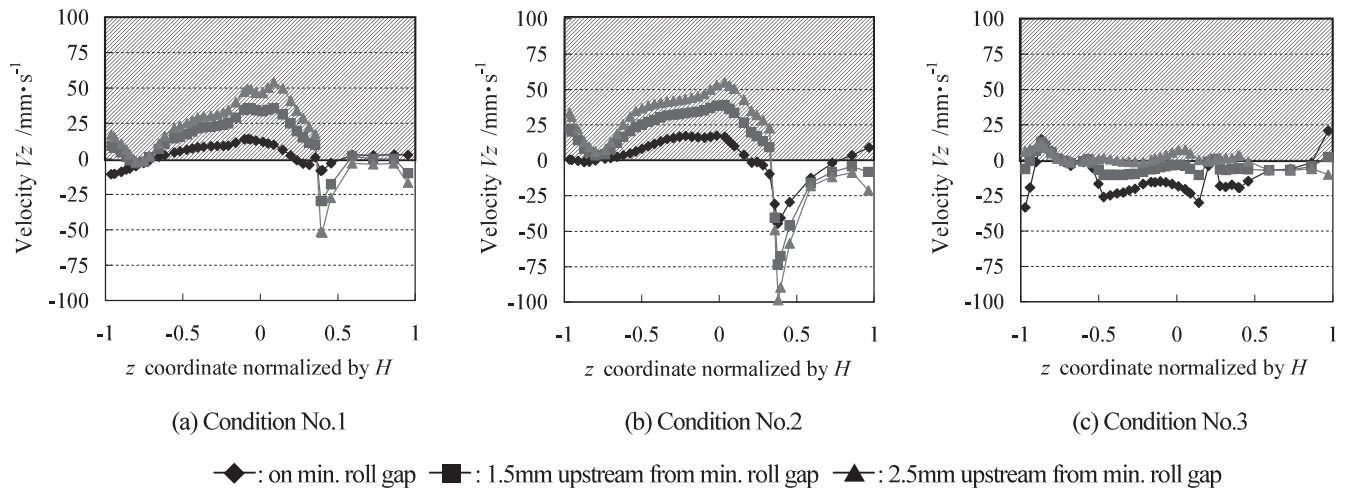
Fig.10 Relative velocity between main rolls and the ring

4.3.2 メインロール回転主軸傾斜の影響

3ロール型リングローリングミルは、メインロールの回転主軸が傾斜している点が特徴である。回転主軸が傾斜しているため、メインロール表面は被加工材に対して傾斜した回転軌道を描く。このため、最小ロールギャップ位置を除く加工域において、メインロール周速度は、 r 、 θ 、 z 軸方向の各成分を有することになる。一方、2ロール型では、被加工材の回転軸とメインロール回転軸が平行であるため、メインロール周速度には z 軸方向成分が存在しない。この違いが、リング圧延時の被加工材の変形挙動に影響を及ぼすことが考えられるため、有限要素解析にて検討を行った。

加工終了直前のロールバイト内において、被加工材外径部の節点における z 軸方向の速度成分 V_z を抽出した結果をFig.11に示す。図中の網掛け部は z 軸正方向への材料流動を意味する。この結果から、3ロール型では z 軸正方向への材料流動が認められるが、2ロール型ではこの材料流動はほとんど存在しない。リングローリング加工においては、外径側への突起成形は困難であるという知見があるが⁽²¹⁾、3ロール型ではメインロール主軸傾斜に起因する z 軸方向への材料流動が、外径側への突起成形に対して補助的な役割を果たしていると推察される。

また、最小ロールギャップ位置近傍で、ロールバイト出側から入側にかけての推移を見ると、ロールバイト入口から最小ロールギャップ位置に近づくにつれ、 z 軸方向の材料流動が小さくなるのが分かる。この現象は、傾斜したメインロール回転軌道から説明でき、メインロール周速度

Fig.11 Ring velocity V_z at the outer surface in the roll gap

の z 軸方向成分が、ロールバイト入側から最小ロールギャップ位置に近づくにつれ小さくなるためと考えられる。有限要素解析から得られた被加工材側の z 軸方向成分 V_z は、このメインロール側の周速度成分に対応した分布となっている。また相対速度の影響を見ると、左右のメインロール周速度に差を設けることで相対速度を低減させた条件No.2では、条件No.1よりも z 軸方向の材料流動がさらに大きい。この結果から、メインロールと被加工材の相対速度を小さくすることは断面内での材料流動に好適な影響を与えており、非対称異形断面リングの精度向上により有効であると考えられる。

4.4 考察

非対称異形断面の被加工材をリングローリングにて精度良く製造するためには、メインロールと被加工材間の相対速度が小さくなるように、メインロール径、角速度などの圧延条件を最適化することが重要である。相対速度の低減は、被加工材の表面性状向上、ロール寿命の向上、加工中のリングの安定性向上、および成形能の向上をもたらすと期待され、非対称異形断面を有する素形材の製造に有利であると考えられる。これに関し、2ロール型では被加工材の外径形状に応じて、メインロールの形状が一義的に決定されるのに対し、3ロール型では、左右独立のメインロール双方に対して周速度を任意に設定することが可能なため、相対速度の低減を追求することができる。相対速度低減のための最も容易な対策は、被加工材の外径周速度を予測し、メインロールとの相対速度が小さくなるようにメインロール周速度を左右独立に設定することである。

また、メインロール回転軸が傾斜していることは、相対速度の低減に効果があると同時に、 z 軸方向（幅方向）への材料流れを促進し、異形断面リングの成形性を向上させる役割も果たしている。従って、非対称異形断面を有す

る素形材の製造に対して、表面性状、成形性の観点から3ロール型は2ロール型と比べて有利な工法であると考えられる。

5. 結 言

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ため、矩形断面リングおよび非対称異形断面リングを対象として、有限要素解析を用いて検討を行った。3ロール型、2ロール型それぞれの圧延特性を比較し、3ロール型リングローリングに特有の圧延特性について以下の知見を得た。

矩形断面リングを対象とした検討より以下のことが明らかとなった。

- (1) 有限要素解析で得られたひずみ成分は、今後の精度向上の余地はあるものの、実験値と比較的良く一致している。本検討の、ALE法を用いたリングローリング加工の有限要素解析により、従来知見で見られる被加工材表面の材料挙動に加え、被加工材内部のひずみ状態を予測することが可能である。
- (2) 3ロール型リングローリングミルによる加工は、2ロール型での加工に比べて、RD断面内で比較的均一な相当ひずみ分布が得られる。この結果は、実験結果とも符合する。また、被加工材内部にはほぼ全域に圧縮の静水圧応力が作用しており、加工中の引張応力を起因とする割れなどの欠陥抑制や、被加工材内部の空隙・ボイド欠陥の生成・成長抑制および圧着に対しても有利な加工方法と考えられる。

(3) 3ロール型リングローリングでは、幅方向中央部での延伸効率は、半径方向にわたって比較的均一である。一方で、2ロール型では、被加工材の外径近傍、内径近傍において延伸効率が低下する傾向にあり、半径方向の各位置での差異も大きい。よって延伸効率の観点からも、3ロール型による加工は、2ロール型と比べてより均一な変形をもたらしている。

(4) 上記(2)、(3)で述べた結果は、3ロール型リングローリングミルのロール配置に起因すると考えられる。すなわち、3つのロールで構成された閉式孔型内で圧延が行われるため、被加工材外周がロールにて拘束され、フィッシュテールを抑制した状態で圧延が行われるためである。

非対称異形断面リングを対象とした検討により、以下のことが明らかとなった。

(5) 3ロール型では2ロール型と比べて、リング圧延中の被加工材とメインロールとの間の相対速度が小さい。また、3ロール型ではメインロール周速度を左右で独立かつ任意に設定できるため、被加工材とメインロールの間の相対速度をさらに小さくすることが可能である。

(6) 3ロール型リングローリングミルでは、メインロールの回転主軸が傾斜しているため、メインロール表面の周速度が幅方向(z方向)成分を持つ。この周速度成分によって、被加工材のz方向流動が促進されており、外径突起の成形に対し補助的な役割を果たしている。

上記(5)、(6)で述べた結果から、非対称異形断面リングの製造に対して、相対速度に起因する表面性状ならびに成形性の観点から、3ロール型は2ロール型と比べて優位性があると考えられる。

参考文献

- 1) J. M. Allwood, A. E. Tekkaya, T.F. Satnastreet : Steel Research Int., 76 (2005) , 111-120.
- 2) J. M. Allwood, A. E. Tekkaya, T.F. Satnastreet : Steel Research Int., 76 (2005) , 491-507.
- 3) 葉山益次郎 : 塑性と加工, 31-350 (1990) , 325-332.
- 4) 日本塑性加工学会 : 塑性加工技術シリーズ11 回転加工, (1990) , 106-127.

- 5) 齊藤正之, 齊藤正也 : 特公 昭34-7408
- 6) 中溝利尚 : 山陽特殊製鋼技報, 11 (2004) , 70-73.
- 7) W. Johnson, G. Needham : Int. J. Mech. Sci., 10 (1968) , 95-113.
- 8) A. G. Mamalis, J. B. Hawkyard, W. Johnson : Int. J. Mech. Sci., 17 (1975) , 669-672.
- 9) 本村貢, 船本宏幸 : 昭和52年度 塑性加工春季講演会講演論文集, (1977) , 65-68.
- 10) 葉山益次郎, 大島勉 : 塑性と加工, 22-240 (1981) , 71-79.
- 11) 柳本潤, 木内学 : 第40回 塑性加工連合講演会講演論文集, (1992) , 717-720.
- 12) V. Goldbach, G. Hirt : The 9th International Conference on Technology of Plasticity, (2008) , 813-818.
- 13) 中溝利尚, 中崎盛彦, 高須一郎 : 山陽特殊製鋼技報, 17 (2010) , 28-34.
- 14) 中崎盛彦, 高須一郎, 宇都宮裕 : 塑性と加工, 50-579 (2009) , 349-353.
- 15) 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.
- 16) 中崎盛彦 : 山陽特殊製鋼技報, 16 (2009) , 25-32.
- 17) 平井恒夫, 前川佳徳, 佐伯則人 : 第35回塑性加工連合講演会講演論文集, (1984) , 375-378.
- 18) Coupu, J., Raulin, J.L. & Huez, J. : Proc. 3rd Int. Conf. Modeling of Metal Rolling Processes, (1999) , 82-89.
- 19) 斎藤好弘, 森賀幹夫, 加藤俊二, 内田正二郎, 加藤健三 : 鉄と鋼, 62 (1976) , 1833-184.
- 20) 柳本潤, 木内学, 柴田一良 : 第44回塑性加工連合講演会講演論文集, (1993) , 23-26.
- 21) 関本靖裕 : 塑性と加工, 23-261 (1982) , 952-957.

■著者



中溝 利尚



中崎 盛彦