OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	３ロール型リングローリングの圧延特性に関する研究
Author(s)	中溝, 利尚
Citation	大阪大学, 2012, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/24522
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

3ロール型リングローリングの
圧延特性に関する研究

2011年

中瀬　利尚

土坏 1576

３ロール型リングローリングの
圧延特性に関する研究

２０１１年

中溝　利尚

目次

第１章　序論
１．１　緒言・・・

第３章　３ロール型，２ロール型リングローリングにおける
　　変形特性の有限要素解析
３．１　緒言・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・４５
３．２　３ロール型リングローリング加工の特徴・・・・・・・・・・・・・４６
３．３　解析条件・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・４６
３．４　解析結果および考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・４９
　３．４．１　マンドレル荷重の比較・・・・・・・・・・・・・・・・・４９
　３．４．２　ひずみの比較による解析精度の検証・・・・・・・・・・・５０
　３．４．３　ＲＤ断面の相当ひずみ，静水圧応力分布の比較・・・・・・・５２
　３．４．４　延伸効率の比較・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・５４
３．５　結言・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・５７
参考文献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・５８

第４章　３ロール型，２ロール型リングローリングによる
　　非対称異形断面リング成形の有限要素解析
４．１　緒言・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・５９
４．２　３ロール型の特徴と非対称断面リング圧延の課題・・・・・・・・・６０
４．３　解析条件・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・６２
４．４　解析結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・６８
　４．４．１　ロールおよび被加工材の周速度推移・・・・・・・・・・・６８
　４．４．２　相対速度の幅方向（ｚ方向）分布・・・・・・・・・・・・７２
　４．４．３　肉厚減少率と外径拡大率の関係・・・・・・・・・・・・・７３
　４．４．４　メインロール回転主軸傾斜の影響・・・・・・・・・・・・７４
４．５　考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・７８
４．６　結言・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・７９
参考文献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・８０

第５章　総括・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・８１
資料・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・８３
謝辞・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・８４

第１章

序論

1.1 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[1-4]．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，加工機を小型化でき，また製品の寸法精度が高い点，直径を拡大させる加工方法のため歩留まりが良い点など，複数の工業的優位性を有しており，このため古くから用いられている塑性加工方法である．

リングローリングミルは，初期にはリングの半径方向のみを圧下するラジアルミルが普及したが，現在では半径方向に加え軸方向からも圧下を加えるラジアルーアキシャルミルが一般的となっている．これらのリングローリングミルは，ロールバイトでは半径方向もしくは軸方向に配置された一対のロールにより加工が行われており，このため２ロール型リングローリングとも呼ばれる．ロールバイト部のみに着目すれば，被加工材の半径方向もしくは軸方向の一方がロールで拘束されていないため，開式孔型でのリング圧延とも見ることができる．ロールに拘束されない自由端では，フィッシュテール（コンケーブ）が発生するため，歩留まり低下を招く場合がある．

一方，1950 年代に日本で開発された加工方式として３ロール型（斎藤式）リングローリングミルがある[5]．このリングローリングミルは，ロールバイト部が３つのロールで構成されているため３ロール型と呼ばれている．また，メインロール（駆動ロール）の回転主軸が傾斜しており，ロールバイト部では閉式孔型が構成されていることが，この３ロール型の特徴である．３ロール型リングローリングでは，そのロール配置の特徴により，２ロール型と比べて異なる圧延特性を有していると考えられる．また，異形断面リング，さらには非対称異形断面リングの製造に適していると言われており，実部品の製造へも古くから適用されている．しかし，３ロール型に関しての研究はほとんど行われておらず，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一切明らかになっていない．

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．また最近では，航空機用や宇宙産業用としてチタン合金などの高価な素材をリングローリングする場合が増えており，直接的には製造上の歩留まり向上が望まれている．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，すなわち異形断面リング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．また，高精度なリングは後工程での負荷をさせるため、省エネルギーにも貢献できる．3 ロール型を用いたリングローリング加工では，様々なリング部品が既にニアネット成形されており，異形断面リングの製造に適した加工方式であると考えている．よって，3 ロール型の圧延特性を研究し，非対称異形断面リングを含めた異形断面リングの成形性について明らかにすることは，工業的に重要であると考える．

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おり，実験的手法ならびに数値解析的手法を用いて取り組んだ．特に，非対称異形断面を有するリングに対して，3 ロール型特有の圧延特性を解明することを最終的な目的としている．以降，**1.2** にてリングローリング加工の特徴と歴史を，**1.3** にてリングローリングミルのロール構成と役割について，**1.4** にて 3 ロール型，2 ロール型リングローリングの特徴を，**1.5** にてリングローリング製造工程を述べ，**1.6** にてリングローリング加工の従来知見を整理して論じたあと，**1.7** にて本研究の目的，本論文の構成について述べる．

1.2 リングローリング加工の特徴と歴史

リング部品の製造方法の１つとして，被加工材の肉厚を減じて外径を拡大させる加工方法がある．これは，金型内で瞬間的に成形を行う型鍛造とは異なり，被加工材の一部を間歇的もしくは連続的に加工する方法である．間歇的に局所加工を行う方法として，馬掛け法が古くから存在する[6]．**Fig. 1-1** に馬掛け法の模式図を示す．芯金に加熱された素材となるリングを挿入し，芯金を間歇的に回転させる．芯金の回転に伴い被加工材が回転し，上金敷を上下動させることにより被加工材の肉厚を減ずる加工方法である．この方法は，加工に時間を要すため複数回の加熱が必要な場合が多く，またスケール等の影響で表面性状が必ずしも良くない．また，加工終止温度の管理が難しく，冷間での寸法がばらつき易いという問題がある．このため，超大型リングの製造もしくはリングローリング前の粗加工として以外はあまり用いられていない[7].

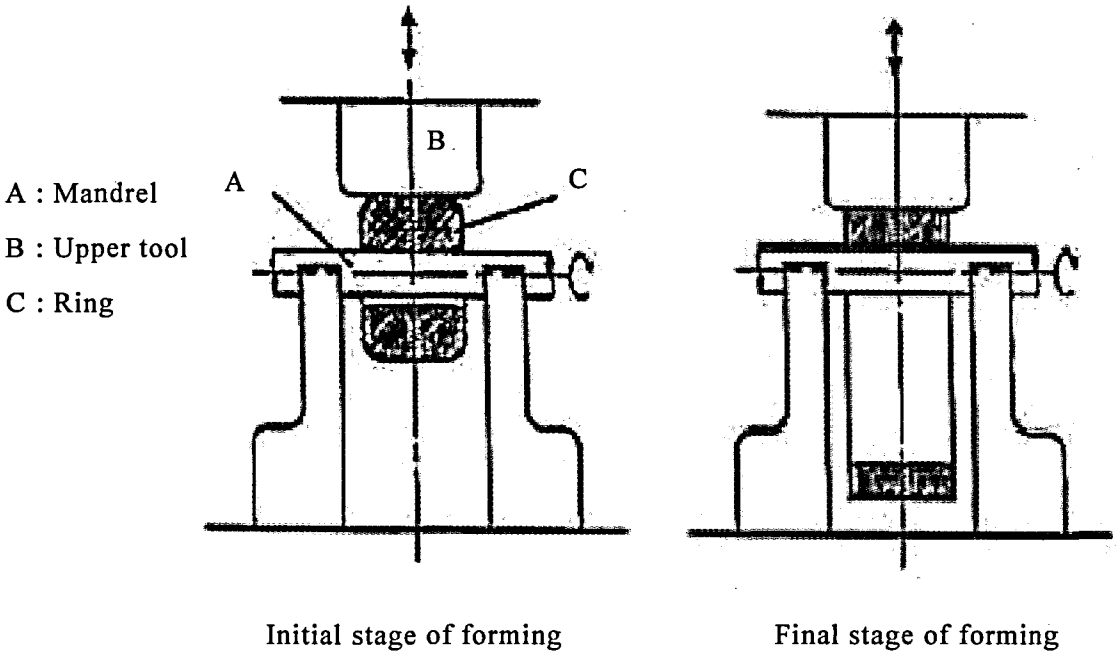


Fig. 1-1 Schematic diagram of free forging of ring [6]

一方，連続的に局所加工を行う方法としてリングローリング加工がある．**Fig. 1-2** にロール２個を用いたリングローリング加工の模式図を示す．JIS B 0112 には，「リング状の材料を数個のロールを用いて，半径方向の厚みを減らすことによって，より大きな直径の輪に成形する鍛造」と定義されている．２つの直径が異なるロールの間にリング状素材を挟み込み，メインロールまたは成形ロールと呼ばれる一方のロールを駆動させることにより被加工材を回転させながら，非駆動のロール（マンドレル）をリング半径方向に圧下させて外径を拡大する加工方法である．矩形断面リングの場合，メインロールとマンドレルの間隙調整で，様々な肉厚のリングを成形することが可能で，生産効率が良く多品種少量生産に適した製造プロセスである．また，最近では単に外径を拡大するに留まらず，同時に内外径面に形状を付与するニアネットシェイプ化の取り組みも積極的に行われている．加工分類としては鍛造の位置付けとして定義されているが，実態としては圧延に近い塑性加工方法である．

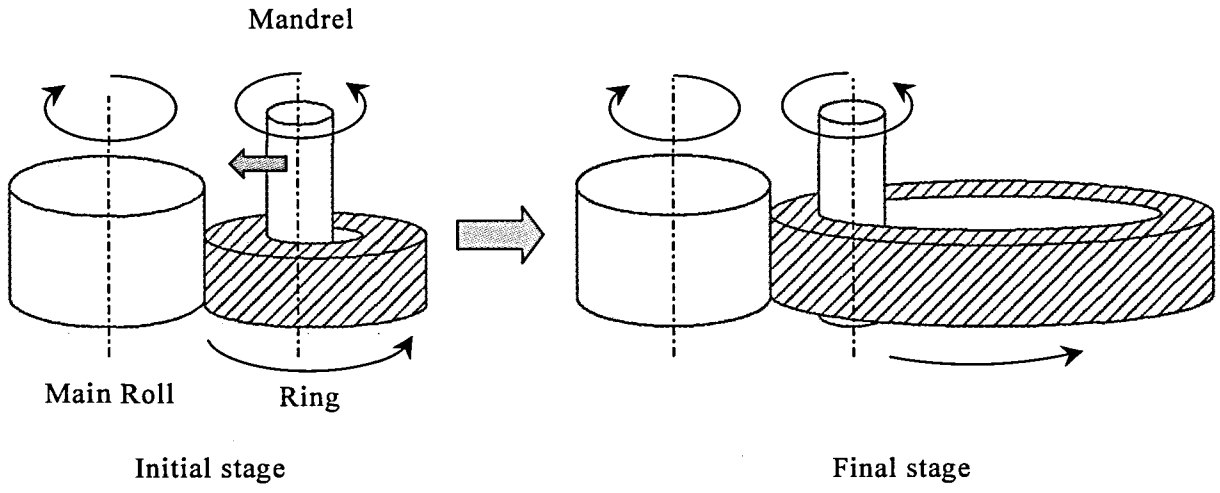


Fig. 1-2 Schematic diagram of ring rolling.

リングローリング加工の特徴は，矩形断面もしくは異形断面のリング部品を，小さい加工力にて高効率で製造できる点にある．すなわち，リング重量に対する必要な加工力が小さくて済むため，特に重量の大きいリング加工に適している．また，小径リングに加工を加えて直径を拡大する加工方法であるため，製造上の歩留まりが良好である．この点からも，大径リングの製造に適していると言える．品質面からは，逐次成形であるため表面平滑度が優れており良好な寸法精度が得られる．また，円周方向に均質なファイバーフローが得られるため優れた機械的特性を有する[8-10]．また，製品のニアネットシェイプ化が進むにつれ，後工程である旋削加工後も，転動面上でファイバーフローが切断されにくく連続的になるため，軸受として使用した場合の寿命向上の効果も期待できる[11]．このため，軸受素形材の製造プロセスとしても幅広く適用されている．

加工温度域としては，冷間域で行う冷間リングローリング（Cold Roll Forming, CRF），温熱間域で行う熱間リングローリングがある．比較的小径のリング製造には冷間リングローリングが用いられており，冷間であるが故に加工後の精度が良好で，一部では旋削加工を省略し，即，研磨加工が施せる程度までニアネットシェイプ化が進んでいるものもある．しかし，割れなどの問題により径拡大率に限界があり，また異形断面リングの成形にはあまり適していない．大径リング，異形リングあるいは難加工性の被加工材を用いる場合は，熱間域でのリングローリングが用いられるのが一般的である．

最初のリングローリングミルはイギリスのマンチェスターにて 1842 年に製作されたと言われており，欧州では鉄道の発展に伴って鉄道車両用タイヤの製造プロセスとして急速に普及した[12]．日本では 1906 年に初めてタイヤ圧延機が設置された．以降，ベアリングレースやギア素材，フランジなどの鋼を素材とした各種リング部品の需要増大に伴って，リングローリング技術も著しく発展した．**Fig. 1-3** に示すように，それまでのリングローリングミルはラジアル型と呼ばれる半径方向を圧下するものが主流であったが，現在では軸方向からの圧下を加えたラジアル－アキシャル型が一般的である．最近ではリングローリングミルの改良が進み，油圧サーボによる圧下制御や DC モータによる回転制御が可能なリングローリングミルの普及が著しい[6]．また，リングローリングの特徴である高歩留まり，高精度，高品質を更に高めるため，圧延制御技術も大きく進歩している．特に最近では，航空・宇宙産業の発展に伴い，チタン合金などの高変形抵抗で高価

な材料が素材として用いられるようになっており，一層の技術の高度化が求められている．

1.3 リングローリングミルでのロール構成と役割

以下に，リングローリングミルを構成する各ロールの名称と役割を示す．

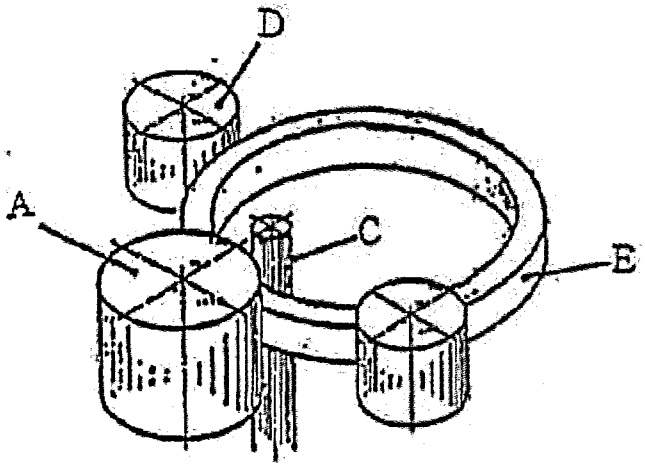
メインロール（Fig. 1-3　A）はモーターで駆動しており，半径方向への圧下を受け止めながらリングを回転させる役割を果たしている．他に，主ロール，キングロールとも呼ばれる．一般的に，後述するマンドレルよりも直径の大きいロールが使用される．

エッジロール（Fig. 1-3　B）はリング幅方向の圧延を行うロールで，幅面に発生するフィッシュテール（コンケーブ）の発生を防止する役目も果たしている．上下ロールともに駆動するタイプ，上ロールのみ駆動するタイプが存在するが，いずれもモーターで駆動される．ロールは円錐型となっており，ロールバイトではリングと平行になるように回転主軸が傾斜している．これは，リングとロールの周速度を一致させ，スリップのない回転を得ることを目的としている．このロール形状のため，テーパーロール，コニカルロールなどとも呼ばれる．

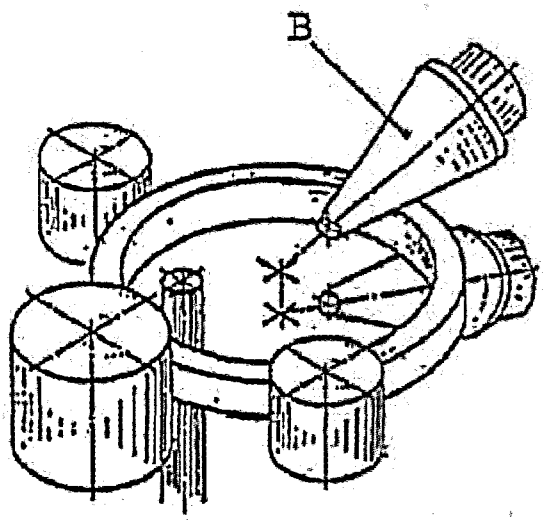
マンドレル（Fig. 1-3　C）はリング半径方向の圧下を行い，リングの肉厚を減少させる役割を果たしている．メインロールにより回転させられるリングとの摩擦により回転する被駆動タイプである．他に，中ロールとも呼ばれる．一般的に，メインロールよりも小さい直径のロールが使用される．

ガイドロール（Fig. 1-3　D）は，加工中にリングを保持し真円度を向上させることを目的としたロールである．一般的には，メインロールの入側出側に各１個配置され，被加工材との摩擦で回転する被駆動タイプである．この他にも，エッジロール近傍に一対のガイドロールが追加される構造のものもある．真円のリングを得るためには，このロールの保持力の強弱が重要である．他に，センタリングロール，抱きロールとも呼ばれる．

これらのロールの他に，被加工材の直径寸法，真円度を監視するため，エッジロール間に定寸ロールが配置される場合もある．



Radial ring rolling mill



Radial-Axial ring rolling mill

A : Main roll B : Edge rolls C : Mandrel

D : Guide rolls E : Ring

Fig. 1-3 Overview of ring rolling mill [6]

1.4 2ロール型，3ロール型リングローリングの特徴

1.4.1 2ロール型リングローリングミル

リングローリング加工の基本構想は，開発された当時とほとんど変わっていない．その代わり，使用するロール数の増加，アキシャルロールを活用した異形断面リングの成形，ガイドロール制御などの改善が加えられており，その方式は多様化している．同一ロールバイト内で圧延に寄与しているロール数で区別すると，ラジアル型，ラジアルアキシャル型リングローリングミルは２つのロールで構成されており，そのため２ロール型リングローリングミルと呼ばれる．より一般的に用いられている 2 ロール型リングローリングミルのロール配置を簡略化して **Fig. 1-4** に示す[13]．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．メインロールは一定の回転数で駆動しており，その回転軸はマンドレルの回転軸と平行である．マンドレルおよびアキシャルロールは，被加工材との摩擦で回転する従動式である．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．どちらのロールバイトも r, z 方向のどちらかがロールで拘束されておらず，開式孔型を構成している．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．

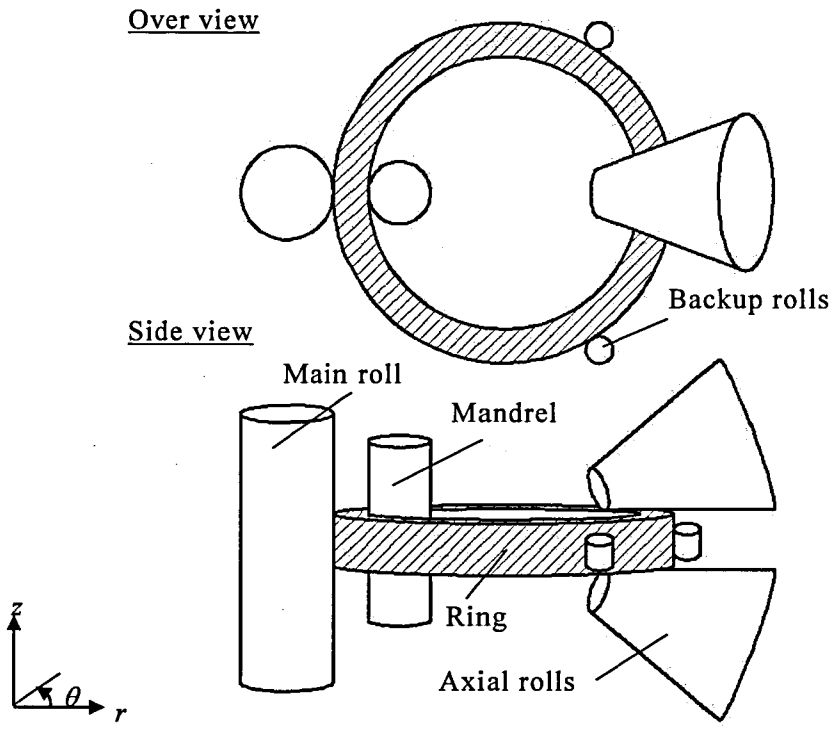


Fig. 1-4 Schematic diagram of two-roll-type ring rolling mill

1.4.2 3ロール型リングローリングミル

その一方で，ロールバイトが3つのロールで構成される3ロール型リングローリングがある[14]．3ロール型リングローリングミルのロール配置を **Fig. 1-5** 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式孔型が構成されている．ロールバイト部はこの1箇所のみで，閉式孔型の形状が加工終了後のリング形状となるよう設計されている．ロールバイトが1箇所の閉式孔型のみで，メインロールの回転主軸が傾斜していることが，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式孔型内にて，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 方向の拘束や圧下，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，加工完了後の被加工材断面が矩形形状の場合でも，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．これは，メインロールの回転主軸と被加工材の回転主軸が平行に存在する2ロール型では表われない特徴である．

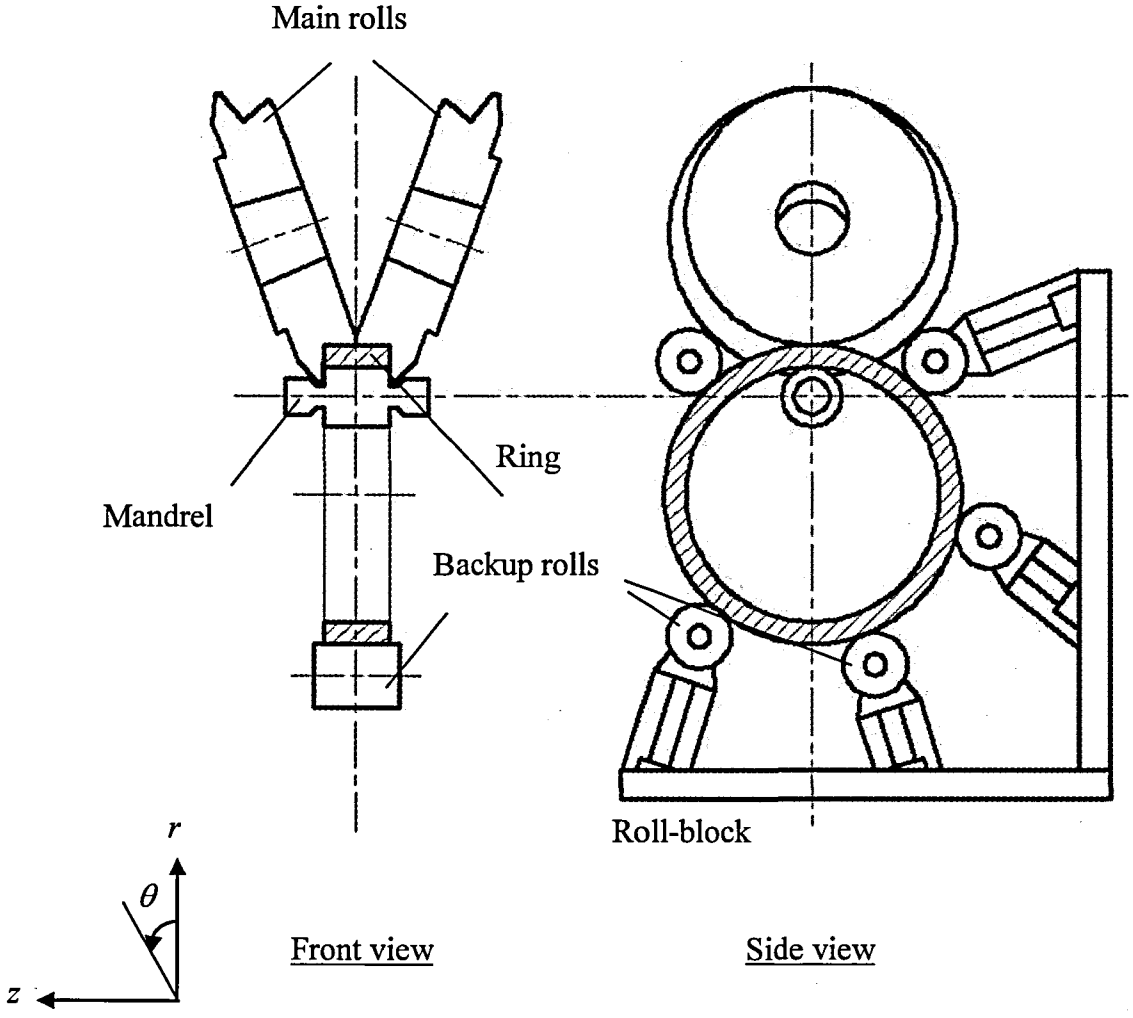


Fig. 1-5 Schematic diagram of three-roll-type ring rolling

３ロール型リングローリングは，斎藤らによって 1950 年代に日本で開発された加工方法で，非対称異形断面リングを含む異形断面リングの成形性向上を狙い開発された経緯がある[5]．リングローリング加工の実験的研究が Johnson ら[15,16]によって 1968 年に初めて為されたことを鑑みても，当時にリング部品のニアネットシェイプ化を目的としてリングローリングミルを独自に開発したことは驚嘆に値する．実際に，２ロール型では困難とされている異形断面リングおよび非対称異形断面リングが，３ロール型では長年安定製造されており，両者の間には加工時の材料挙動，延伸効率，ＲＤ断面内でのひずみ・応力分布に差異があると予想される．しかし，この３ロール型リングローリングについては，加工特性を含めてほとんど明らかになっていない．その背景として，３ロール型の適用数が少なく，あまり一般化していないことが挙げられる．技術的には２ロール型と比べて相違があると考えられているが，適用事例が少ないため，技術的な知見はほとんど無い状態である．

1.5 リングローリング製造工程

リングローリングによるリング製造工程は一般的に，リングローリング前の荒地（Preform）を製造する工程と，拡径を行うリングローリング工程とで構成されている．荒地製造には一般的にプレスが用いられ，小径物の場合はメカニカルプレスが，大径物の場合には油圧プレスが用いられる[6]．代表的な製造プロセスを **Fig. 1-6** に示す．直径が数ｍにも及ぶ超大型リング製造には鋳造ままの材料を用いる場合があるが，それよりも小さいサイズのリング製造には一般的には棒鋼が用いられる．また，冷間リングローリング加工には鋼管を素材として用いる場合も多い．

素材を必要な長さに切断し，所定の温度まで加熱した後，プレスを用いて荒地が製造される．この荒地製造は，リングローリング加工において重要な意味を持っている．矩形リングの場合はその影響は顕著には現れないが，複雑断面を有する異形リングの場合は，荒地製造の段階で適切な重量バランスをとっておく必要がある．このため，荒地における重量バランスが重要な場合には，金型を用いた型鍛造により荒地を製造する場合が多い．リングローリング加工におけるキーテクノロジーは，荒地形状の設計とリングローリングの圧延条件設計であると言っても良い．荒地製造後，必要であれば再加熱が行われリングローリング加工によ

り拡径が施される．この段階で，粗ローリングと仕上げローリングの２工程に分けられる場合もある．熱間域でのリングローリングは，加工完了時の温度ばらつきが大きく，特に大型リングで顕著である．加工完了時の温度ばらつきは，冷間での寸法ばらつきに影響を及ぼすため，その管理が重要である．加工が完了したリングは必要な熱処理，加工が施されて製品となる．

Fig. 1-7 にリングローリング製品の一例を示す[14]．図中には主にベアリングレース素形材を記載している．この他にも，各種フランジ，大型ギア素形材，産機用の旋回座などがある．直径は 100mm 前後のものから，数 m にも及ぶ大型リングまで様々である．また，単純な矩形断面リングから，対称断面のリング，さらには円錐コロ軸受（テーパーベアリング）に用いられる非対称異形断面のリングなどが製造されている．非対称異形断面リングは，荒地での重量バランス管理が特に重要で，被加工材とロール間のすべりにより表面性状が悪化する点や，加工時の被加工材の姿勢制御が困難であるなど，抱える問題が多いため，高度な製造技術が必要となる．3 ロール型リングローリングでは，従来から非対称異形断面のリングもニアネットシェイプで成形されている．

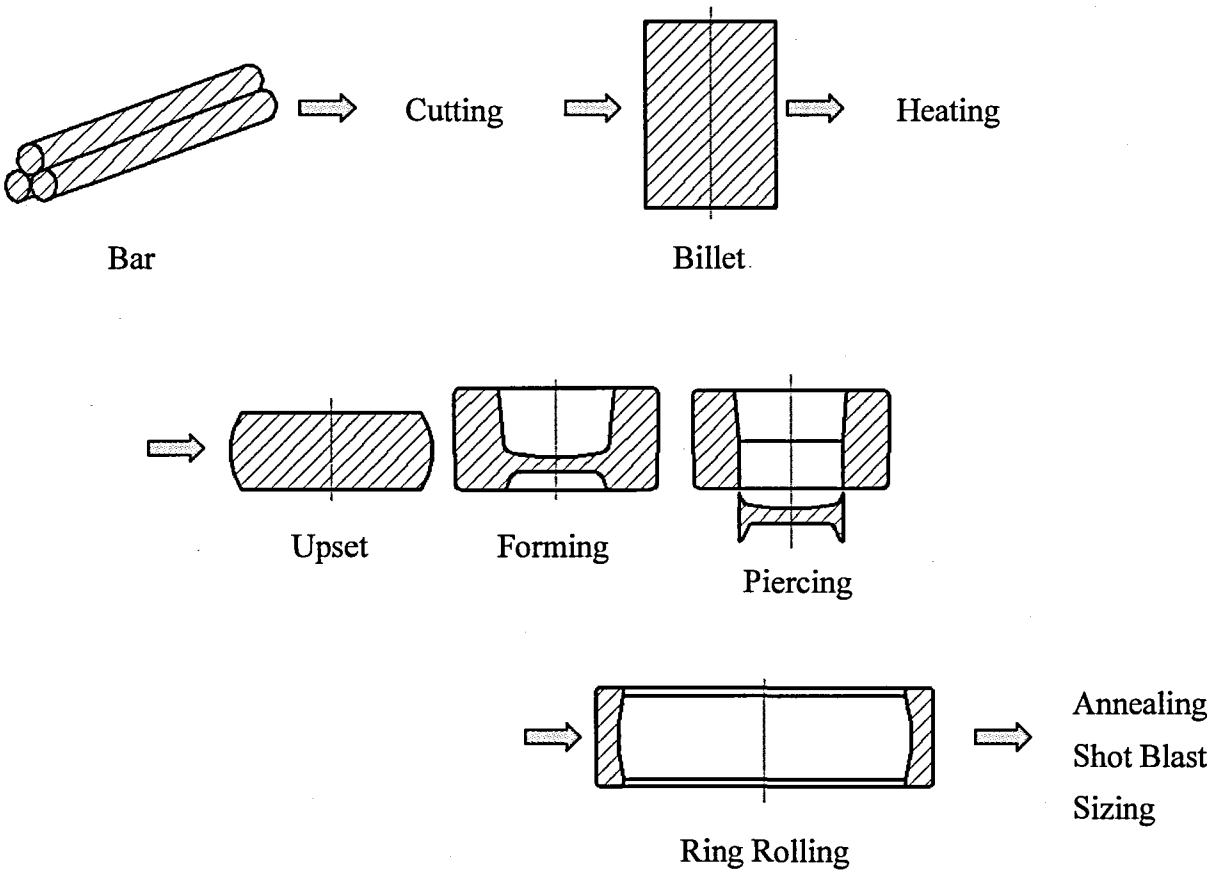


Fig. 1-6 Schematic diagram of ring rolling process.

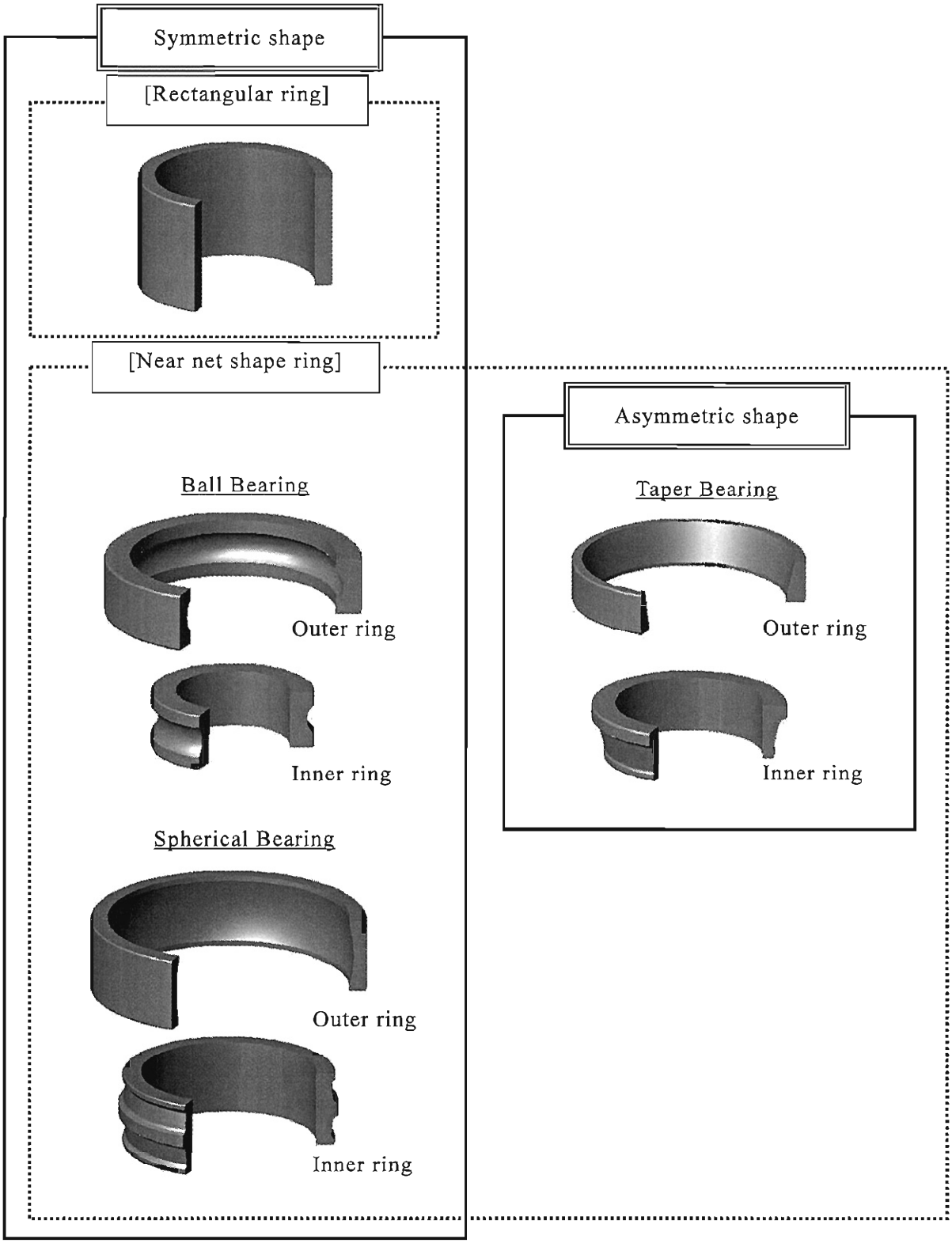


Fig. 1-7 Overview of ring rolled products.

1.6 リングローリング加工の従来知見

リングローリング加工は，１）３次元変形を伴う逐次成形である，２）被加工材が径成形を繰り返すためロールとの接触条件が刻々と変化する，３）加工に寄与するロール径が一般的に異なるため異径異周速圧延である，４）加工に寄与するロールが複数個存在し，それぞれの役割が異なるなどの特徴を有し，大別すれば圧延加工であるがその変形挙動は著しく複雑で，加工特性を把握するのは非常に困難である．そのため，理論的・数値解析的取り組みが後追いする形で技術が進んできた．また，以下に述べる従来知見はそのほとんどが一般的な２ロール型リングローリングに関するもので，３ロール型に関する研究事例はほとんど無い．

1.6.1 実験的研究による従来知見

リングローリングに関する初期の実験的研究は 1968 年に Johnson らによって為された[15,16]．実験機を用いてアルミニウムや鋼のリングローリングを行い，圧下速度が圧延力やロールトルクに及ぼす影響を明らかにした．また，リングの径成長，半径方向ひずみの検討も行っている．初期には，実際の製造に際して機械への負荷を事前に予測することが重要であり，圧延力や圧延トルクに関する研究が盛んに行われている．Mamalis らは実験により矩形リングおよびプロファイルリングのロール面圧を測定した[17-20]．また，矩形リングについて圧下速度と幅広がりの関係を明らかにし，内径突起付きリングについて外径部に発生するヒケの評価を行っている．日本では 1970 年代に本村らによって，リング圧延の研究が行われている[21,22]．被加工材とロールの形状比により，材料の変形域が変化するため圧延特性に大きく影響を及ぼすことが報告されている．1980 年代には，リングローリング品のニアネットシェイプ化のニーズを背景として，矩形断面ではなく内径突起あるいは外径突起を有するプロファイルリングの研究が盛んに行われている．例えば，本村らは圧下速度比 f/V によりフィッシュテールの形状が変わり，f/V が大きいほど断面成形に有利でヒケ等の発生も抑制できると結論付けている[23]．また，平井らはプラスティシンを用いて実験を行っており，外径突起は内径突起に比べて充満しにくいことや，f/V が小さい場合にはヒケ，クボミが生じやすいことを示した[24]．さらに，ロール等で背圧や拘束を付与することより断面内の充満性が向上することも示している[25,26]．冷間リングローリング（CRF）に関する研究も行われており，尾崎らは，ボールベアリング外輪の溝肩で発生する割れキズに対して，各ロールの回転数を実測し，f/V を適切に設定

することでキズを防止できることを示している[27-29]．また，ロール制御に関する研究[30,31]やロール形状が成形性に及ぼす影響などの研究も行われている[32]．これらの知見を活かして，複雑形状品や難加工品の成形を実現した事例も報告されている[33-35]．最近の研究では，幅広がりを有効活用しプロファイルリングを製造するスキームなどが提案されている[36]．

解析的研究としては，先駆的な取り組みとして葉山らの研究がある．葉山らはエネルギー法を用いて矩形断面リングの基本的な変形特性を明らかにしており，理論値として広く用いられている[37-39]．

1.6.2 数値解析的研究による従来知見

一方，近年のコンピューターの処理能力向上に伴い，様々な種類の数値シミュレーションが精力的に行われている．数値シミュレーションには様々な方法が存在するが，塑性加工分野では一般的に，スラブ法，すべり線場法，上界法，有限要素法（FEM= Finite Element Method），境界要素法，差分法などが用いられる．最近では有限要素法が用いられることが多い．有限要素法は変形体や金型を有限個の要素に分割してそれぞれに方程式を設定し，解を得る方法であり，大別すると弾塑性有限要素法と剛塑性有限要素法の２種類がある．弾塑性有限要素法は物体の弾性域と塑性域の双方を考慮に入れた数値解析法であり，要素数を多く，かつステップ数を小さく設定することで高精度な解が得られる．その反面，計算時間が大きくなりやすく，解の収束性がやや悪いなどの課題がある．一方，剛塑性有限要素法は，弾性域を考慮していないが，定式化が簡単で収束性が良いうえに解析時間が短く，少ない要素数でも十分な精度が得られる利点がある．このため大変形加工のシミュレーションに多く利用されるようになった．

有限要素法は 1960 年代に弾塑性微小変形理論から始まり，70 年代にはラグランジュ未定乗数法[40]，ペナルティ法[41]，圧縮特性法[42]など剛塑性有限要素法の基礎的な理論が確立した．80 年代後半から 90 年代前半にかけて二次元解析が実用化され，コンピューターの高速化に伴い，現在では三次元解析が当たり前の技術になりつつある．このように，剛塑性有限要素法はほぼ確立されており，多くの製造プロセスに対して問題なく適用されている．しかし，リングローリング加工は有限要素解析を行ううえで困難な問題を抱えており，十分に解明されていない課題である．

リングローリングでは，各種ロールと被加工材が回転体同士であり接触判定が頻繁で難しいこと，ロールと被加工材の接触長さが一般的な圧延と比べて小さいため，ロールバイト内では要素数を増やす必要があるが，計算時間が増大するという問題がある．しかし，Arbitrary Lagragian Eulerian Method（ALE 法）を用いることにより，現実的な解析時間で一定の精度を得ることが可能となってきている[43-47].有限要素解析で用いる要素分割法にはLagrange要素(材料固定)とEuler要素（空間固定）がある．Lagrange 要素は変形解析でよく用いられる手法で，変形体そのものを要素分割する方法である．リングローリング加工では，変形が生じている部位は限られており変形に寄与しない部分がほとんどである.しかし，リング全体を Lagrange 要素で分割すると，要素数が膨大になり，かつ計算時間も長大となる．また，ロールバイト部のみを詳細に分割した場合，被加工材の回転に伴い要素の再分割（リメッシュ）を行う必要が生じ，これも計算時間が長大となる．一方，Euler 要素は流体解析などでよく用いられる手法で，空間を要素分割する方法である．変形解析でも要素自体は変形しないため，リメッシュの必要がなく計算時間を短くすることが可能であるが，被加工材の自由表面部分が不明瞭になる場合がある．ALE 法はこの両者を組み合わせた手法で，ロールバイト部を Lagrange 要素，それ以外の部分を Euler 要素とするものである．これにより，計算時間の短縮が期待される．リングローリングの数値解析が実用的に可能となれば，冷間リングローリング時の疵発生の問題解決や，熱間リングローリングにて複雑断面品を製造する際のリングローリング前形状の決定など，工程設計に有用などの実用上のメリットがある．

リングローリングに関する数値解析の従来研究は以下の通りである．Yang らは平面ひずみ状態を仮定して数値解析を行い，圧延トルク等について実験値との比較を行った[48]．柳本らは主ロールおよびマンドレルの投影接触長さが同一であると仮定し有限要素解析を行っており，外径突起と比べて内径突起の方が成形しやすいことを示した[49]．また，フィッシュテールを再現可能であることも示している．豊島らは拡張した一般化平面ひずみモデルにて，外径突起を有するリング圧延のシミュレーションを行い，突起高さは実験値と良く一致することを示している[50]．Xu らは３次元有限要素解析を行い，幅広がり，ロール面圧の結果が実験値と良く一致することを示している[51]．Hahn らは UBET 法を用いて，矩形断面リングの３次元的な変形挙動を明らかにした．圧延トルク，突起成形，

外径成長について実験値と良く一致することを示している[52]. Yang らは3次元剛塑性有限要素解析にて，内径突起を有するT断面リングの解析を行った[53]. Kang らは矩形断面リングならびにT断面リングを対象として，逆解析を行うことで最適な荒地形状を検討するスキームを開発している[54]. また，Rachakonda らも矩形断面リングを対象として，圧延力，外径成長率，温度予測を行うことができるシステムを開発している[55]. Hu らは ALE 法を用いてリングローリングのシミュレーションを実施している[56]. また，ラグラジアンメッシュを2種類使用した3次元弾塑性有限要素解析を行い，解析精度を保ったまま解析時間を短くする試みを行っている[57]. 郭らは，上界法を用いてリングローリングをシミュレートする計算モデルを提案した[58]. 森らは一般化平面ひずみモデルにて剛塑性有限要素解析を実施し，矩形リング，プロファイルリングに対するシミュレーションを行った．断面内の充満性と圧下速度との関係を調査し，圧下速度が速い方が充満性が向上することを明らかにした[59,60]. その他にも，部分的な3次元モデルを導入したシミュレーションや[61-63]，熱応力連成によるシミュレーション[64]，CRF に関するシミュレーション[65-67]も積極的に行われている．最近では，安定圧延を目的としたロール制御技術の研究[68-77]や，解析精度を保ったまま計算時間を短くするための解析モデルの構築[78-80]，非対称異形断面リングのニアネットシェイプ化を目的とした研究[81-83]などが精力的に行われている．

3ロール型に関する従来知見としては，中崎らが剛塑性有限要素法を用いて検討を行っている[43,45]. ALE 法を用いた場合と，一般的な Lagrange 要素を用いた場合の有限要素解析を行っており，解析結果から断面形状，面積充満率，外径成長曲線，加工中の荷重推移などを整理している．解析結果と3ロール型で行った実験結果とを比較し，ALE 法を用いた場合がより精度良く再現できることを示している．また，両方式での解析時間の比較では，ALE 法を用いることで3日間の解析時間が 30 時間まで短縮されることが分かっており，実用的な解析時間まで短縮可能であることを示している．一方，解析精度の検討は被加工材の断面形状や圧延荷重の最大値を対象として行われているのみで，被加工材内部の変位，ひずみの解析精度までは検討されておらず，加工時に生じる応力についても言及していない．また，3ロール型に関する検討のみで，一般的に用いられている2ロール型との圧延特性の比較は行われておらず，検討の対象も矩形断面リングに留まっている．

また，形鋼圧延の分野で３ロール型を取り扱った研究がなされている[84-87]．被加工材とロール間の相対すべり速度が，被加工材の表面性状に及ぼす影響については同様と考えられることから，これらの研究結果を考察の参考とした．

以上，従来のリングローリング加工に関する技術知見を整理した．一般的に用いられている２ロール型に関する知見が主で，３ロール型を研究対象とした事例は極めて少ない．また，対象となる被加工材は矩形断面リングや内径，外径に簡単な突起を有するリングが主であり，非対称異形断面リングを扱った研究事例は少ない．研究内容としては，安定圧延のためのロール制御や形状予測，組織予測などが盛んに行われている．数値解析に関しては，実験では検討が難しい圧延条件の影響を定量的に評価することができるため有用であり，また，最近ではコンピューターの処理能力向上に伴い３次元での検討事例が増えてきている．ただし，３次元解析では計算時間を要すため，矩形断面リングの数値解析に留まっている事例も多い．

1.7 本研究の目的と論文の構成

本研究は，３ロール型リングローリングにおける圧延特性を，２ロール型との比較のうえで明らかにすることを目的としている．最終的には，異形断面リング，特に非対称異形断面リングの成形性について明らかにすることが，本研究の目的である．３ロール型リングローリングの圧延特性を研究し，非対称異形断面リングを含めた異形断面リングの成形性を明らかにすることは，異形リングローリング技術の進展に寄与するもので，工業的に価値があるものと考える．

本論文では，上記の点を明らかにするため，実鋼を用いた実験的アプローチならびに有限要素法を用いた数値シミュレーションによるアプローチを行った．双方の結果から，数値シミュレーションの妥当性を検証したうえで，３ロール型ならびに２ロール型リングローリング加工の圧延特性の違いについて比較・考察を行った．また，最終章では異形断面リングに対する数値シミュレーションを行い，３ロール型リングローリングの特徴を論じ，２ロール型との相違ならびに異形断面リングの成形性を検討した．

各章の目的と関連を示す図を **Fig. 1-8** に示す．

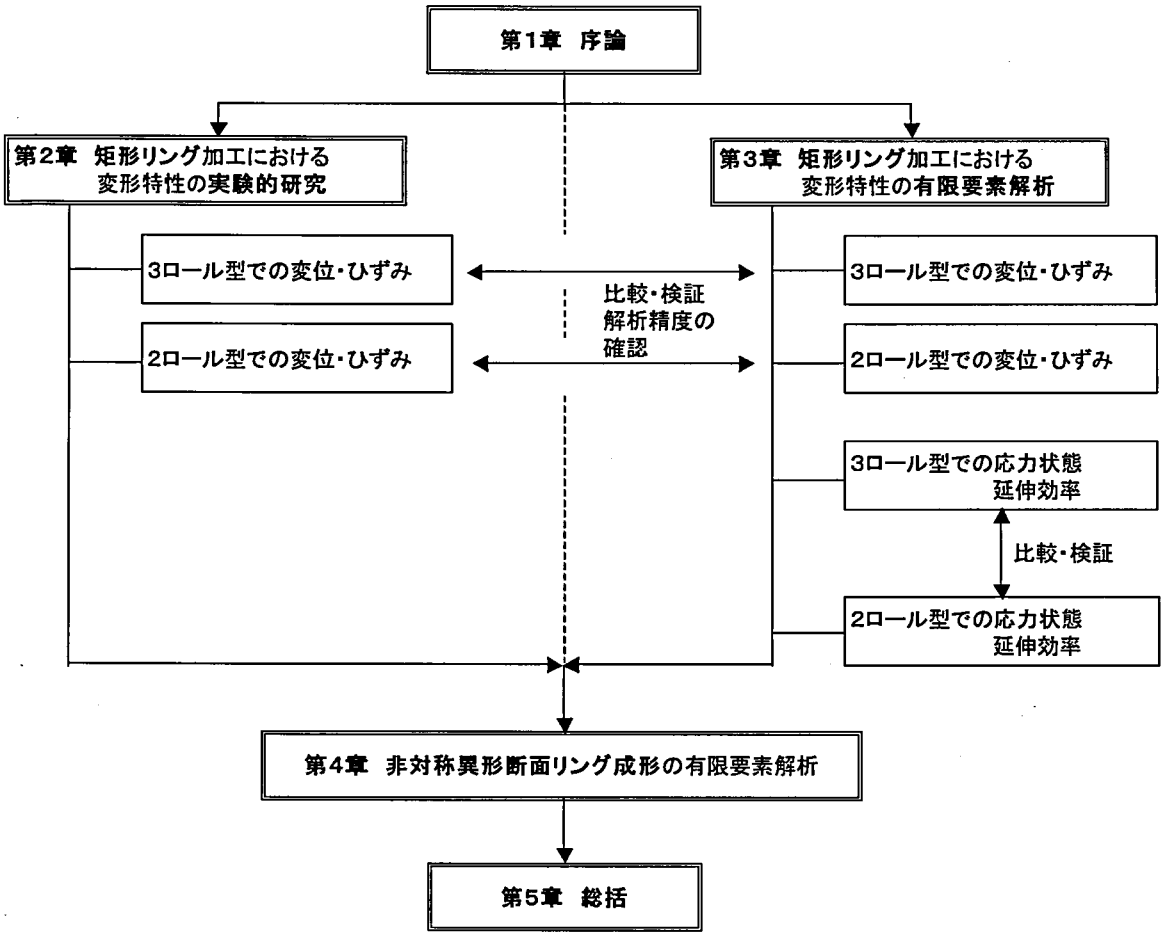


Fig.1-8 The issue of chapters and its association

第１章　序論

序論として，リングローリング加工の特徴と歴史，３ロール型・２ロール型の特徴を述べた．従来の研究から，リングローリングに関する実験的・数値解析的な先行知見を整理した．３ロール型に関しては知見が少なく，その圧延特性が明確になっていないため，これを背景として本論文の目的，工業的な位置付け・意義を説明した．また，本論文の構成ならびに各章の関連付けを述べた．

第２章　３ロール型，２ロール型リングローリングにおける材料変形特性の実験的研究

第２章では、３ロール型，２ロール型双方における材料変形特性を明らかにすべく，加工前の荒地に人口空洞を設け，加工前後での位置の変化，間隔の変化を整理することにより，実験的検討を行った．

３ロール型では，被加工材の幅中央部分では，平面ひずみ状態で加工が進行していることを明らかにした．また，当該部分では２ロール型には見られない内径側から外径側に向かう材料流動があることを明らかにした．

第３章　３ロール型，２ロール型リングローリングにおける材料変形特性の有限要素解析

第３章では、３ロール型，２ロール型双方における内部ひずみ，応力を明らかにすべくALE法を用いて有限要素解析を行った．

解析結果と実験結果を比較すると，両者の各方向ひずみは定性的傾向が一致することが分かり，ALE法を用いた有限要素解析の有効性を示した．また，３ロール型ではRD断面内のひずみが均一で，静水圧圧縮状態で加工が進行していることを示した．このことは，２ロール型と比べて，３ロール型は被加工材内部の空隙圧着効果が高いことを示唆しており，引張応力起因のキズ発生防止にも有効であることを示した．また，延伸効率の比較を行い，３ロール型では半径方向にわたって比較的均一であることを明らかにした．この点からも，３ロール型では２ロール型と比べ，より均一な変形が生じていることを示した．

第４章　３ロール型，２ロール型リングローリングによる非対称異形断面リング成形の有限要素解析

第４章では、非対称異形断面のリングに対して，３ロール型，２ロール型リングローリング双方での有限要素解析を行った．

非対称異形断面リングを加工する場合，被加工材とメインロールとの周速度の差，すなわち相対速度を低減することが重要である．3 ロール型では，左右のメインロール周速度を独立かつ任意に設定できるため，また，メインロールの回転主軸が傾斜しているため，2 ロール型と比べると相対速度が低減することが分かった．また，メインロール回転主軸の傾斜は，材料流動にも影響を及ぼしており，非対称異形断面リングの成形性が向上することを示した．

第５章　総括

３ロール型リングローリングの圧延特性を解明する目的のもと，前章までの研究で得られた結果を総括した．３ロール型では，最小ロールギャップ位置では静水圧圧縮の状態で加工が行われており，かつメインロール傾斜の効果として，ロールー被加工材間の相対速度が低減し，かつ幅方向への材料流動を効果的に補助していることが分かった．

参考文献

[1] J. M. Allwood, A. E. Tekkaya, T.F. Satnistreet : Steel Research Int., 76 (2005), 111-120.

[2] J. M. Allwood, A. E. Tekkaya, T.F. Satnistreet : 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] 斉藤正之, 斉藤正也 : 特公　昭 34-7408

[6] 熱間自由鍛造・鍛造荒地加工及びローリング鍛造マニュアル, 中小企業総合事業団 : (2000), 133-138.

[7] 宮澤武, 石川博將 : 塑性と加工, 34-384 (1993), 1252-1257.

[8] 西口勝, 戸谷靖隆 : 塑性と加工, 30-345 (1989), 1381-1386.

[9] 坂口鍛工㈱ : アルトピア, 12 (2010), 34-36.

[10] 山川隆久 : 特殊鋼, 59-4 (2010), 33-36

[11] 対馬全之 : 日本金属学会会報, 23 (1984), 50-56.

[12] 岡方義則 : 鉄道車両工業, 429 (2004), 22-23.

[13] 守谷厳樹 : 鍛造技報, **34** (1988), 43.

[14] 中溝利尚 : 山陽特殊製鋼技報, 11 (2004), 70-73.

[15] W. Johnson, G. Needham : Int. J. Mech. Sci., 10 (1968), 95-113.

[16] W. Johnson, I. Macleod, G. Needham : Int. J. Mech. Sci., 10 (1968), 455-468.

[17] A. G. Mamalis, J. B. Hawkyard, W. Johnson : Int. J. Mech. Sci., 17 (1975), 669-672.

[18] A. G. Mamalis, J. B. Hawkyard, W. Johnson : Int. J. Mech. Sci., 18 (1976), 11-16.

[19] A. G. Mamalis, W. Johnson, J. B. Hawkyard : Metallurgia and Metal Forming, (1976), 132-140.

[20] W. Johnson, A. G. Mamalis : Int. Met. Rev. 24-4 (1979), 137.

[21] 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.

[22] 本村貢, 船本宏幸 : 昭和５３年度　塑性加工春季講演会講演論文集, (1978), 77-80.

[23] 本村貢，渡部雅男 ：昭和５３年度　塑性加工春季講演会講演論文集，(1978), 81-84.

[24] 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.

[25] 平井恒夫，前川佳徳，片山傳生，河健二 ：第３７回　塑性加工連合講演会講演論文集，(1986), 181-184.

[26] 平井恒夫，片山傳生，池田賢司，林宏，草田祥平 ：第３９回　塑性加工連合講演会講演論文集，(1988), 672-630.

[27] 尾崎勝彦，野方一勲 ：平成４年度　塑性加工春季講演会講演論文集，(1992), 339-342.

[28] 尾崎勝彦 ：第４４回　塑性加工連合講演会講演論文集，(1993), 123-126.

[29] 中崎盛彦，尾崎勝彦，吉田忠継 ：第４６回　塑性加工連合講演会講演論文集，(1995), 385-386.

[30] A. Kluge, Y. H. Lee, H. Wiegels, R. Kopp : Journal of Material Processing Technology, (1994), 137-141.

[31] H. Lin, R. Wei : The 9th international conference on technology of plasticity, (2008), 1525-1530.

[32] 森田章靖，服部重夫，松下富春 ：昭和６３年度　塑性加工春季講演会講演論文集，(1988), 439-442.

[33] 海老原治，好井健司，松尾直哉，森謙一郎 ：第４９回　塑性加工連合講演会講演論文集，(1998), 417-418.

[34] 谷和人，石外伸也，武村厚，豊島史郎，佐藤隆夫，金丸信夫 ：神戸製鋼技報，49-3, (1999), 19-22.

[35] Z. Meng, H. Lin : Rotary Forming Proceedings of International Conference (1989), 243-248.

[36] V. Goldbach, D. Michl, G. Hirt : Metal Forming 2008, vol.1 (2008), 382-388.

[37] 葉山益次郎，大島勉 ：昭和５５年度　塑性加工春季講演会講演論文集，(1980), 25-28.

[38] 葉山益次郎 ：昭和５６年度　塑性加工春季講演会講演論文集，(1981), 179-182.

[39] 葉山益次郎，大島勉 ：塑性と加工，22-240 (1981), 71-79.

[40] C. H. Lee, S. Kobayashi : Trans. ASME, Ser.B, 95-3 (1973), 865-873.

[41] O. C. Zienkiewicz, P. N. Godbole : J. Strain Analysis, 10-3 (1975), 180-183.

[42] K. Osakada, J. Nakano, K. Mori : Int. J. Mech. Sci., 24-8 (1982), 459-468.

[43] 中崎盛彦，高須一郎，中溝利尚，宇都宮裕 ：第５９回　塑性加工連合講演会講演論文集，(2008), 239-240.

[44] 中崎盛彦，高須一郎，宇都宮裕 ：塑性と加工，50-579 (2009), 349-353.

[45] 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.

[46] 中溝利尚：第６１回　塑性加工連合講演会講演論文集，(2010), 391-392.

[47] 中溝利尚：平成２３年度　塑性加工春季講演会講演論文集，(2011), 129-130.

[48] D. Y. Yang, K. H. Kim : Int. J. Mech. Sci., 30-8 (1988), 571-580.

[49] 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.

[50] 豊島史郎 ：平成３年度　塑性加工春季講演会講演論文集，(1991), 603-606.

[51] S. G. Xu, J. C. Lian, J. B. Hawkyard : Int. J. Mech. Sci., 33-5 (1991), 393-401.

[52] Y. H. Hahn, D. Y. Yang : Journal of Material Processing Technology, 26 (1991), 267-280.

[53] D. Y. Yang, K. H. Kim, J. B. Hawkyard : Int. J. Mech. Sci., 33-7 (1991), 541-550.

[54] B. S. Kang, S. Kobayashi : Int. J. Mach. Tolls. Manufact., 31-1 (1991), 139-151.

[55] S. Rachakonda, S. Gengusamy, J. S. Gunasekera, S. N. Dwivedi : Int. J. Computer Integrated manufacturing, 4-2 (1991), 97-204.

[56] Y. K. Hu, W. K. Liu : International Journal for Numerical Methods in Engineering, 33 (1992), 1217-1236.

[57] Z. M. Hu, I. Pillinger, S. Hartley, S. McKenzie, P. J. Spence : J. Mater. Process. Technol., 45 (1994), 143-148.

[58] 郭乃成，済木弘行，羅子健 ：第４８回　塑性加工連合講演会講演論文集，(1997), 467-468.

[59] K. Mori, O. Ebihara : Proceedings of the 6th ICTP, (1999), 19-24.

[60] K. Mori, N. Hiramatsu : Simulation of Materials Processing, (2001), 607-612.

[61] 瀧澤英男 : 第５１回　塑性加工連合講演会講演論文集，(2000), 179-180.

[62] H. Takizawa, T. Matsui : Simulation of Materials Processing, (2001), 601-606.

[63] Y. C. Shiau, E. Eruc, R. Shivpuri : 19-31.

[64] J. L. Song, A. L. Dowson, M. H. Jacobs, J. Brooks, I. Beden : Journal of Materials Processing Technology, 121 (2002), 332-340.

[65] 斎藤好弘，宇都宮裕，篠田朋顕，高須一郎 : 平成１３年度　塑性加工春季講演会講演論文集，(2001), 179-180.

[66] H. Utsunomiya, Y. Saito, T. Shinoda, I. Takasu : J. Mater. Process. Tech., 125-126 (2002), 613-618.

[67] L. Hua, D. S. Qian, L. B. Pan : Journal of Mechanical Science and Technology, 22 (2008), 1374-1382.

[68] E. Eruc, R. Shivpuri : Int. J. Mach. Tolls. Manufact., 32-3 (1992), 399-413.

[69] J. Coupu, J. L. Raulin, J. Huez : Proc. 3rd Int. Conf. Modeling of Metal Rolling Processes, (1999), 82-89.

[70] H. Takizawa, T. Matsui, T. Fukuda, H. kikuchi : The 9th Iternational Conference on Technology of Plasticity, (2008), 807-812.

[71] H. K. Moon, M. C. Lee, M. S. Joun : International Journal of Mechanical Science, 50 (2008), 306-314.

[72] 石川孝司，祝文夫，湯川伸樹，吉田佳典，三吉宏治，野田拓也，宮崎孝範 : 平成２２年度　塑性加工春季講演会講演論文集，(2010), 147-148.

[73] L. Guo, H. Yang : Proc. 13th Int. Conf. on Metal Forming, 81-9 (2008), 198-201.

[74] 杉野敦，吉田広明 : 第６１回　塑性加工連合講演会講演論文集，(2010), 345-346.

[75] L. G. Guo, H. Yang : Steel Research Int., (2011), 188-193.

[76] X. K. Wang, L. Hua, C. D. Zhu : Steel Research Int., (2011), 194-198.

[77] J. Lan, Y. L. Qiu, L. Hua : Proc. 10th Int. Conf. Techn. Plast., (2011), 103-108.

[78] 鍛造技術研究所　技資 (1980), 1-9.

[79] D. Schafer, G. Hirt, M. Franzke, G. Barton : The 9th Internatinal Conference on Technology of Plasticity, (2008), 648-653.

[80] H. Schafstall, C. Barth : Proc. 13th Int. Conf. on Metal Forming 81-9 (2008), 202-205.

[81] V. Goldbach, G. Hirt : The 9th Iternational Conference on Technology of Plasticity, (2008), 813-818.

[82] H. K. Moon, M. C. Lee, S. C. Moon, J. H. Park, J. H. Chung, M. S. Joun : The 9th International Conference on Technology of Plasticity, (2008), 1329-

[83] Y. S. Lee, J. S. Lim, M. W. Lee, Y. H. Moon : Proc. 10th Int. Conf. Techn. Plast., (2011), 109-114.

[84] 柳本潤，木内学，井上幸雄 ：塑性と加工, 34-384 (1993), 75-80.

[85] 柳本潤，木内学，井上幸雄 ：塑性と加工, 34-384 (1993), 81-86.

[86] 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.

[87] 日刊工業新聞社「圧延技術」, (1971), 209-218.

第２章

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

2.1 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．

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径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．

本論文は，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．圧延特性を検討する手段として，矩形断面リングについて実験および有限要素解析を用いたアプローチを行った．本章はその第 1 弾として，実験的手法を用いた検討結果について述べる．

実験の内容は以下に示す通りである．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，被加工材の変形挙動を考察した．

2.2 リングローリング加工方式

3 ロール型，2 ロール型リングローリングミルの加工方式は，序論中 1.5 にてのべているとおりであって，ここでは割愛する．

2.3 実験方法

2.3.1 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. 2-1** に示す．直径 200㎜ の棒鋼（鋼種：JIS 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φ2㎜ 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℃に加熱し，双方のリングローリングミルを用いて外径φ232.0mm，内径φ163.3mm，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．各種ロール径やロール角速度などの詳細な加工条件は，**Table 2-1** に示す．マンドレルの平均圧下速度（表中 Average feed speed）は，3 ロール型では 3.8mm/s，2 ロール型では 1.0mm/s の条件である．また，リングローリング時の変形特性を表す 1 つの指標である圧下速度比（表中 Feed speed ratio）は，3 ロール型で 16×10^{-4}，2 ロール型で 12×10^{-4} とした．

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フローは，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ー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．

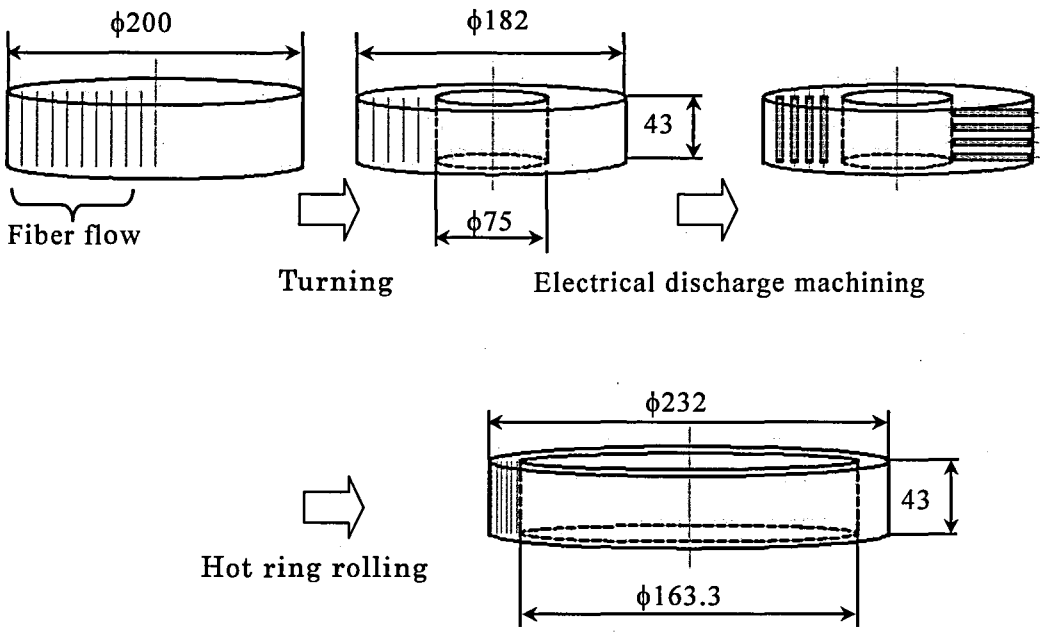


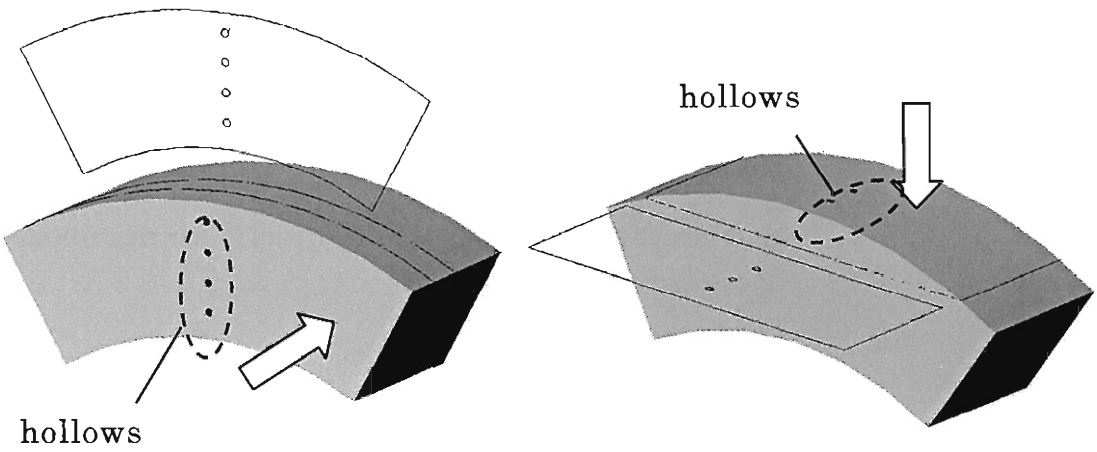
Fig. 2-1 Preparation of the initial ring and the product after ring rolling

Table 2-1 Experimental conditions

			three-roll -type	two-roll -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	/℃	1150	
	Expansion ratio of outer diameter		1.28	
	Expansion ratio of inner diameter		2.18	

2.3.2 加工後空洞の調査方法

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. 2-2** 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 間隔で研磨追い込みして，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，各断面における人工空洞の位置および間隔が算出される．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. 2-2　Experimental procedure to observe inner hollows

2.4 実験結果

2.4.1 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. 2-3** に示す．被加工材表面に観察される人工空洞は，従来知見[4]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. 2-4 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．

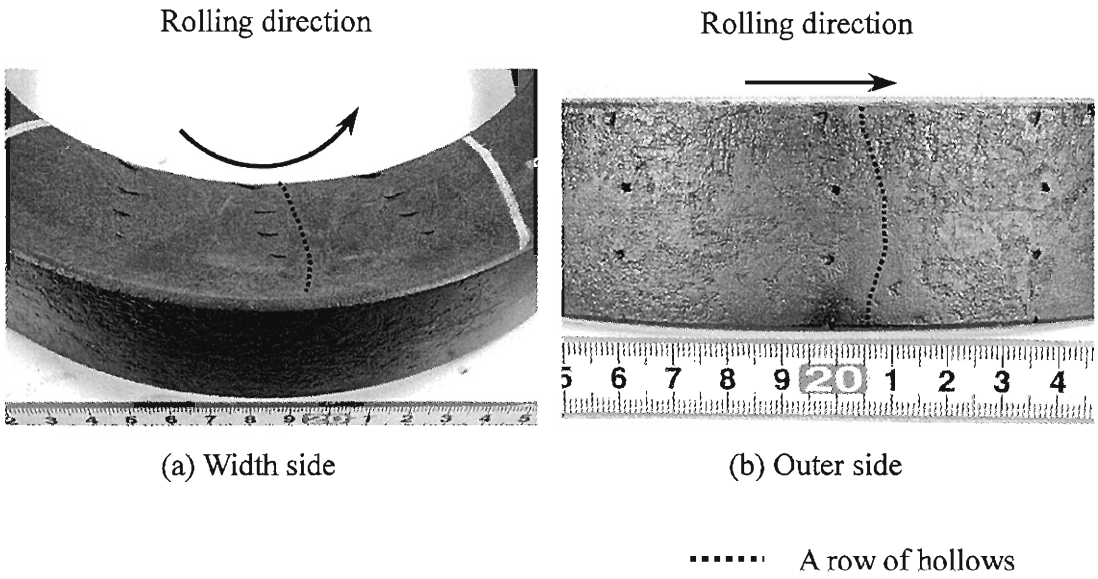


Fig. 2-3 Overview of rolled ring and hollows on surface in three-roll-type ring rolling process

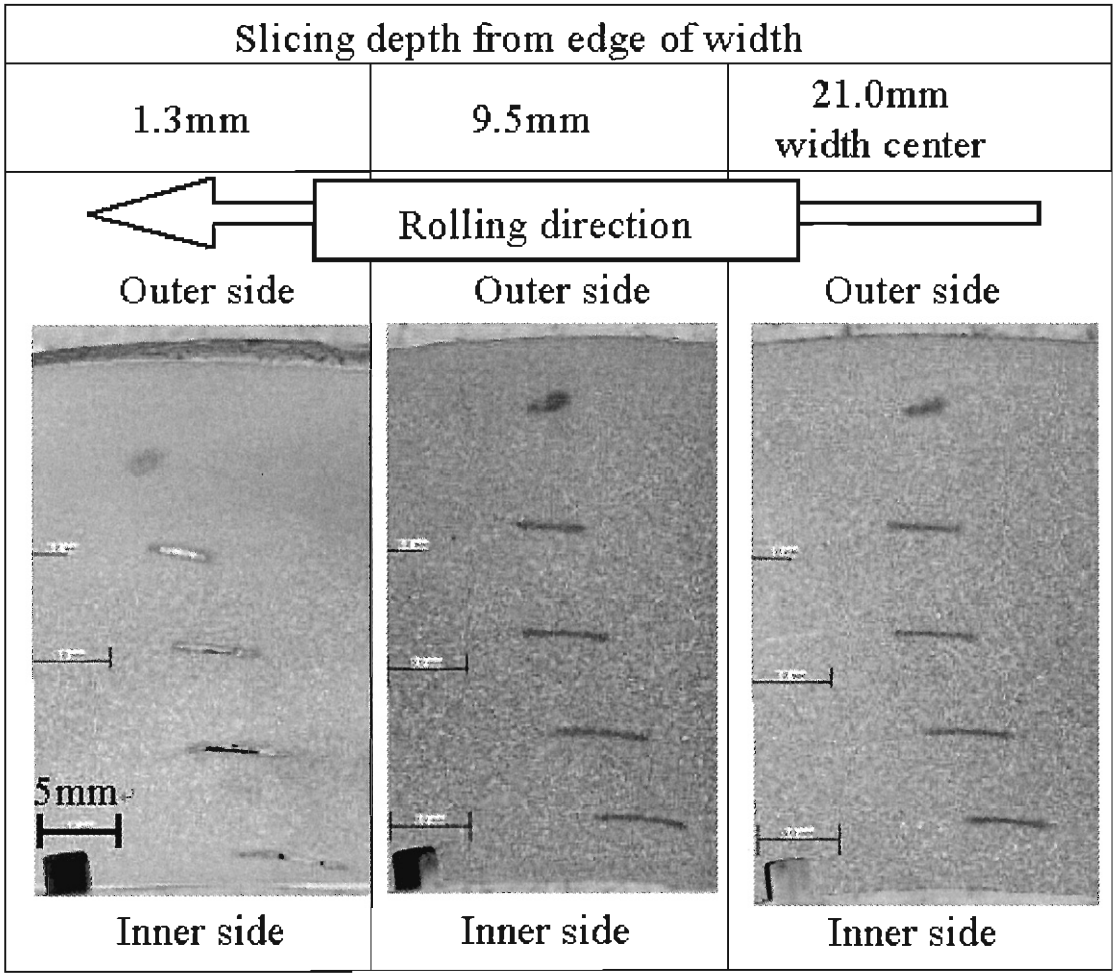
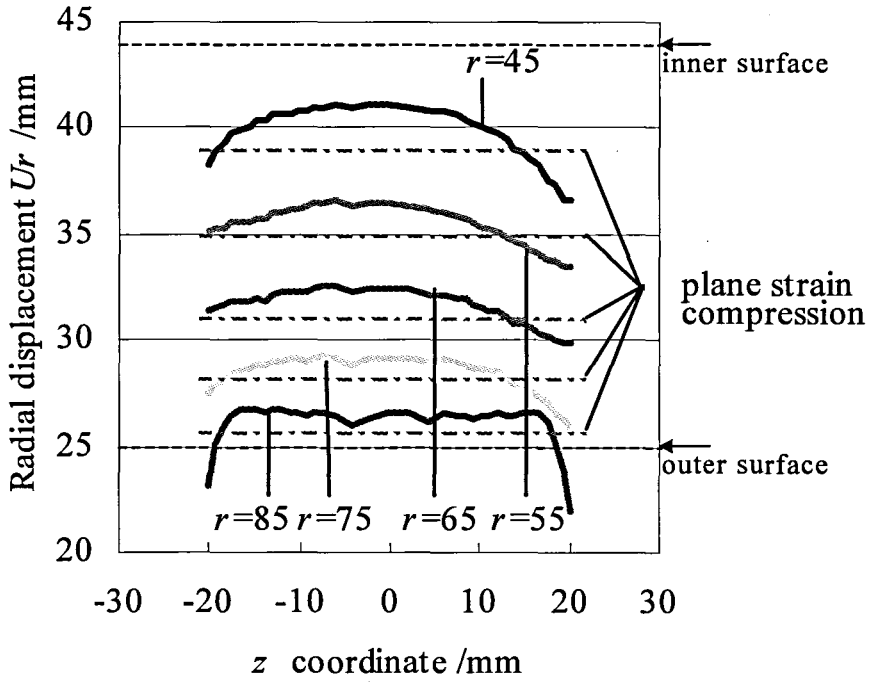


Fig. 2-4 Distribution of inner hollows on cross sections of ring in three-roll-ring rolling process

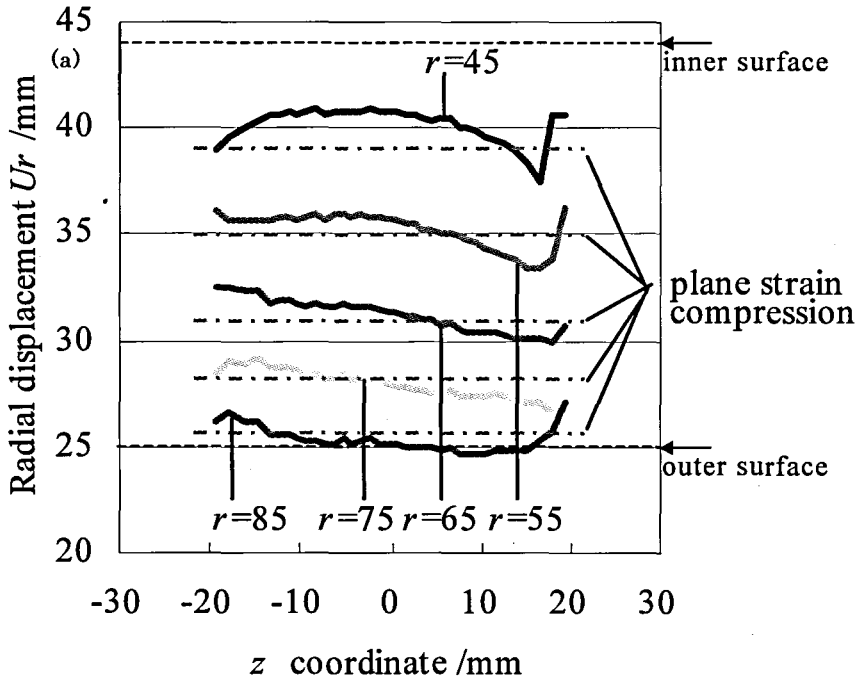
2.4.2 人工空洞の変位，およびひずみの検討

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 方向へ研磨追い込みし，各断面内での空洞位置から r 方向変位 Ur を算出した．その結果を **Fig. 2-5** 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，$r\theta$面内での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．具体的には，**Fig. 2-6** に示すように，荒地の内径を基準として同心円状のリングを複数想定した．z 方向への材料流動が無い条件であるため，加工前後でこの各リングの断面積は変化しないことから，加工後の各リングの外径寸法を算出した．この前後の寸法から，リングの各部位での変位を推定した．

リングローリング加工であるため，双方とも内径（r=45mm）近傍の r 方向変位が最も大きく，外径（r=85mm）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. 2-5 Radial displacement U_r over z coordinate

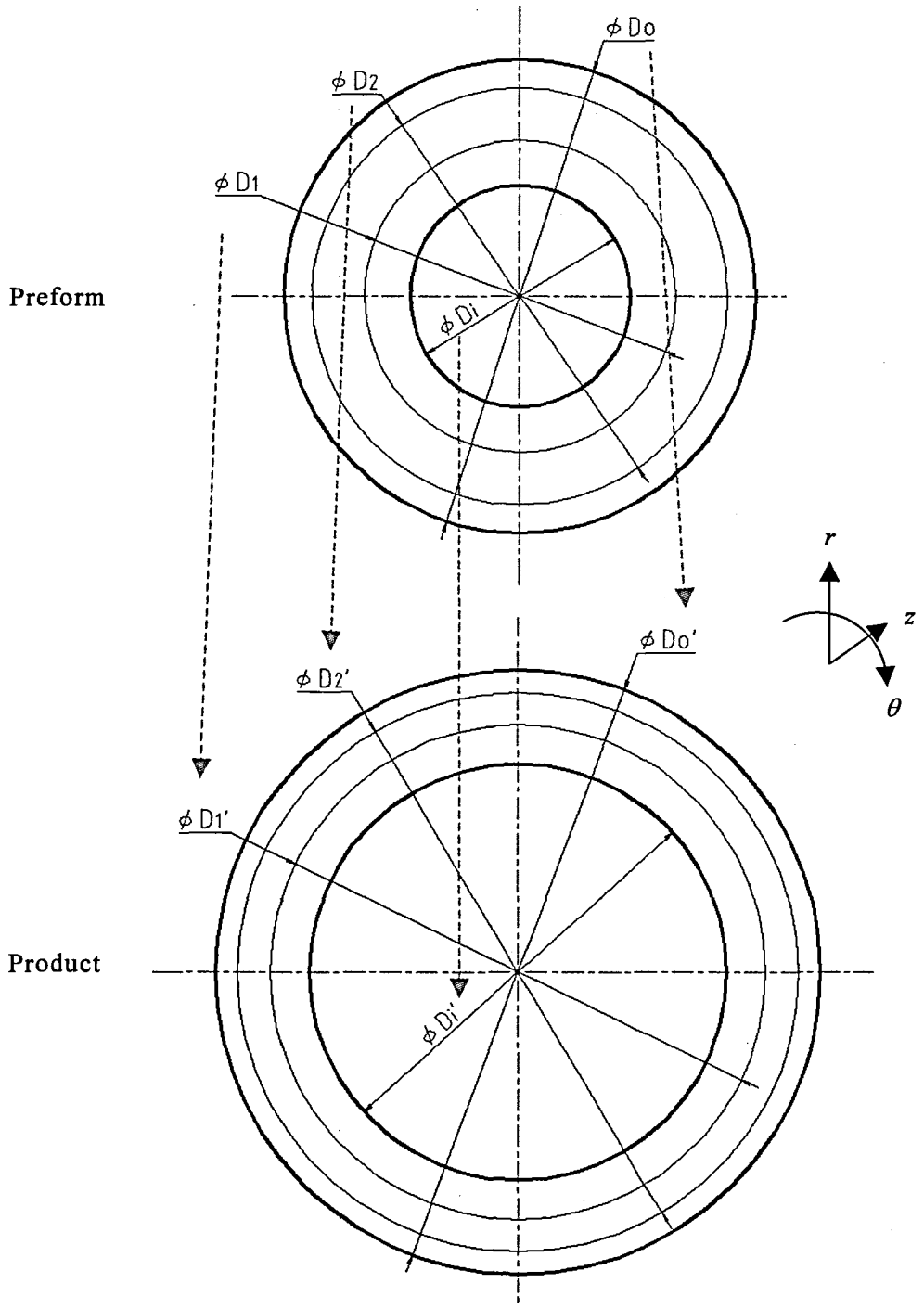


Fig.2-6 Displacement research on the plane strain deformation

Fig. 2-7 および **Fig. 2-8** 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．

$$\varepsilon_r = \ln\frac{h_1}{h_0} \tag{1}$$

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

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．

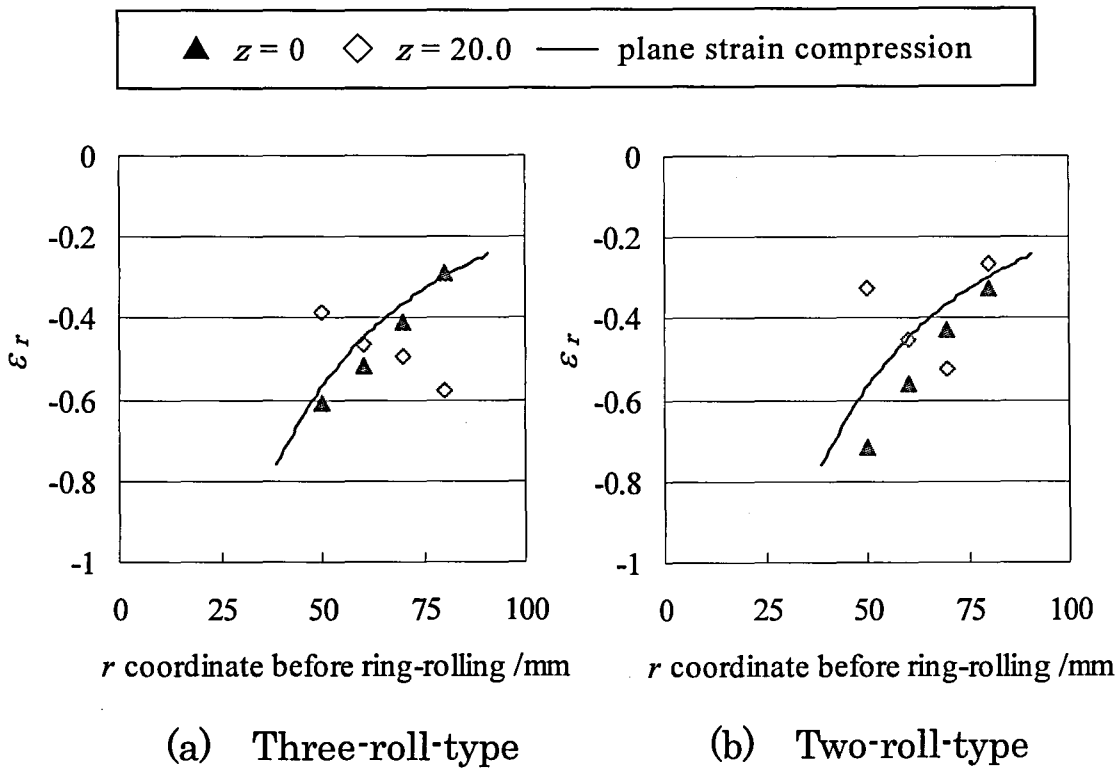


Fig. 2-7 Radial strain ε_r over r coordinate before ring rolling

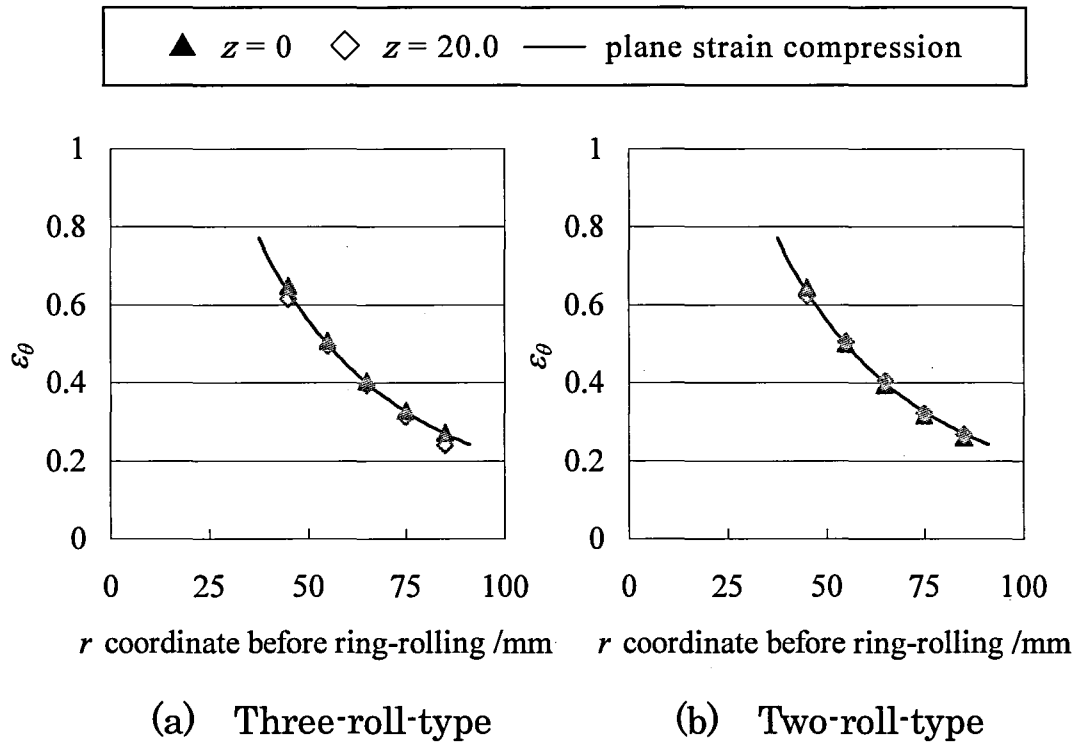


Fig. 2-8 Circumferential strain ε_θ over r coordinate before ring rolling

2.4.3 RD 断面でのファイバーフロー比較

Fig.2-9 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．

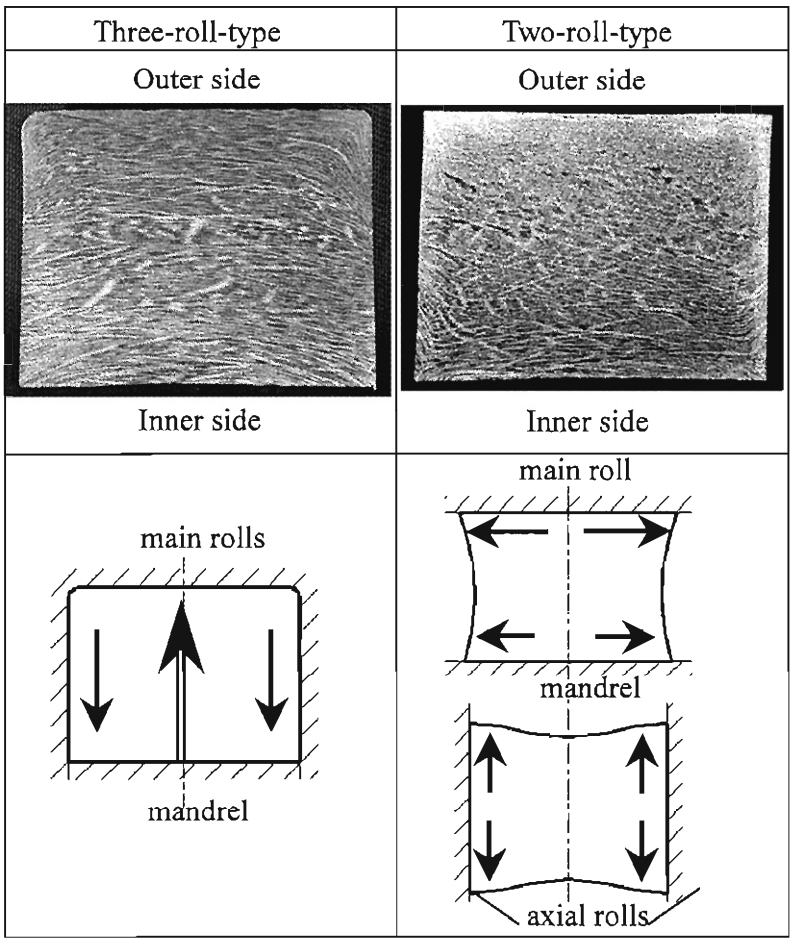


Fig. 2-9 Comparison of grain flow on RD cross section and metal flow between three-roll-type and two-roll-type

2.5 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[5]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. 12 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 箇所の閉塞孔型とすることができる．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挙動が存在するため，この材料流動を活かせる製品への適用が期待できる．

2.6 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] 中崎盛彦・高須一郎・中溝利尚・宇都宮裕：塑性と加工，**50**-579 (2009), 349-353.

[5] Coupu, J., Raulin, J.L. & Huez, J. : Proc. 3rd Int. Conf. Modeling of Metal Rolling Processes, (1999), 82-89.

第３章

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有限要素解析

3.1 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有利な点を有している．

熱間リングローリング加工は，ロール配置により 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方法で，加工時の変形挙動[2, 3]や圧延条件が変形に及ぼす影響[4, 5, 6]など従来から多くの研究がなされており技術的知見は多い．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あるが，2 ロール型と比べ適用例が少なく，加工時の変形挙動あるいは加工特性の報告はほとんど無い．

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点が特徴的で，双方の加工方式では，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．

本論文は，2 ロール型との比較を通して，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．筆者らは第 2 章にて，実験的手法を用いて 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試みを行った[7]．すなわち，加工前の被加工材に人工空洞を設け，加工により生じる空洞の変位から材料内部の変位・ひずみ状態を実験的に明らかにした[8]．

一方，コンピューターの処理能力向上を背景として，複雑な三次元非定常変形であるリングローリング加工の有限要素解析が近年盛んに行われている[9, 10, 11, 12]．しかし，この場合もほとんどの研究対象は 2 ロール型リングローリングミルでの加工についてであり，3 ロール型リングローリングミルに関する報告事例は極めて少ない[13]．

本章では，3 ロール型，2 ロール型リングローリングに対して，Arbitrary Lagrangian Eulerian Method （ALE 法）を用いて有限要素解析を行い，両加工方式で加工を行った場合の相当ひずみ・静水圧応力・延伸効率を導出し，両方式での圧延特性の違いを検討した．

3.2 3ロール型リングローリング加工の特徴

3ロール型リングローリング加工の特徴については，序論中 1.5 で述べているとおりであり，ここでは割愛する．

3.3 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^{TM} 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 法は，Lagrange 要素と Euler 要素を併用した解析手法で，ロールバイト内のみを Lagrange 要素に分割し，その他の部位は 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．

Fig. 3-1 に3ロール型での加工前の解析モデルを示す．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，第2章で行った実験と同様である．**Table 3-1** 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° である．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．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 1.27，内径拡大率は 2.18 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[13]．

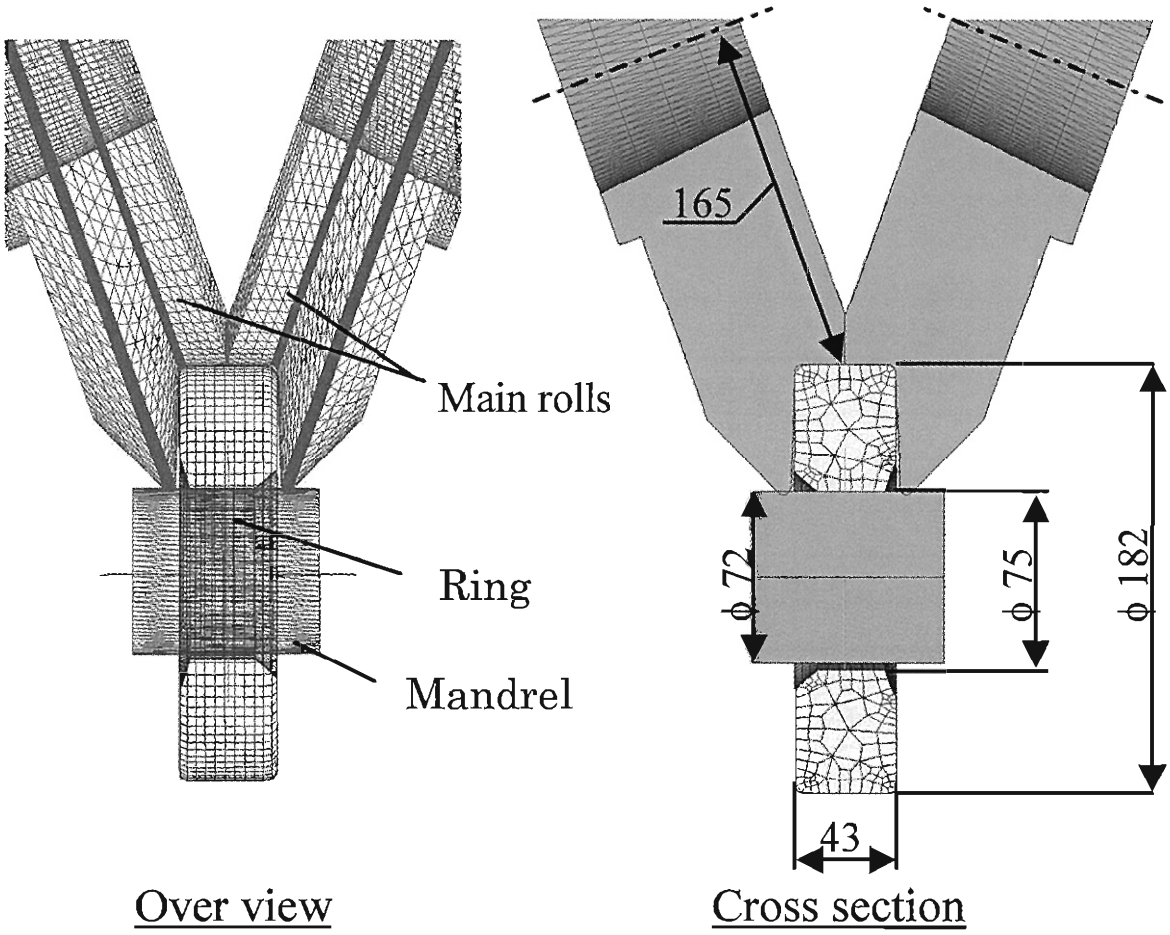


Fig. 3-1 FEM model used (three-roll-type)

Table 3-1 FEM conditions

			three-roll -type	two-roll -type
FEM code			DEFORM 3D^{TM} ver.10.1	
Solver			ALE ring rolling	
Flow stress		/MPa	$\sigma = 100\,\varepsilon^{0.01}\,\dot{\varepsilon}^{0.11}$	
Mesh shape			Hexahedral mesh with 8 nodes	
A number of initial mesh			9,500	
Shear friction			m =0.7	
Main rolls	Max. diameter	/mm	330	400
	Angular velocity	/rad・s^{-1}	14.2	4.2
	Max. circumferential speed	/mm・s^{-1}	2350	838
	Leaning angle of main roll shafts	/deg.	20	0
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	/℃	1050	
	Expansion ratio of outer diameter		1.28	
	Expansion ratio of inner diameter		2.18	

3.4 解析結果および考察

3.4.1 マンドレル荷重の比較

Fig. 3-2 に 3 ロール型リングローリングの有限要素解析により得られたマンドレル荷重の推移を示す．図中には，実機での圧延時に測定したマンドレル荷重も併せて示している．マンドレル荷重は加工初期から中期に向けて大きくなり，その後は緩やかに減少していく．最大荷重は約 240kN で加工中期で最大となる．実測値と有限要素解析から得られた結果は良く一致しており，解析結果は実機の現象を良く再現していると考える．

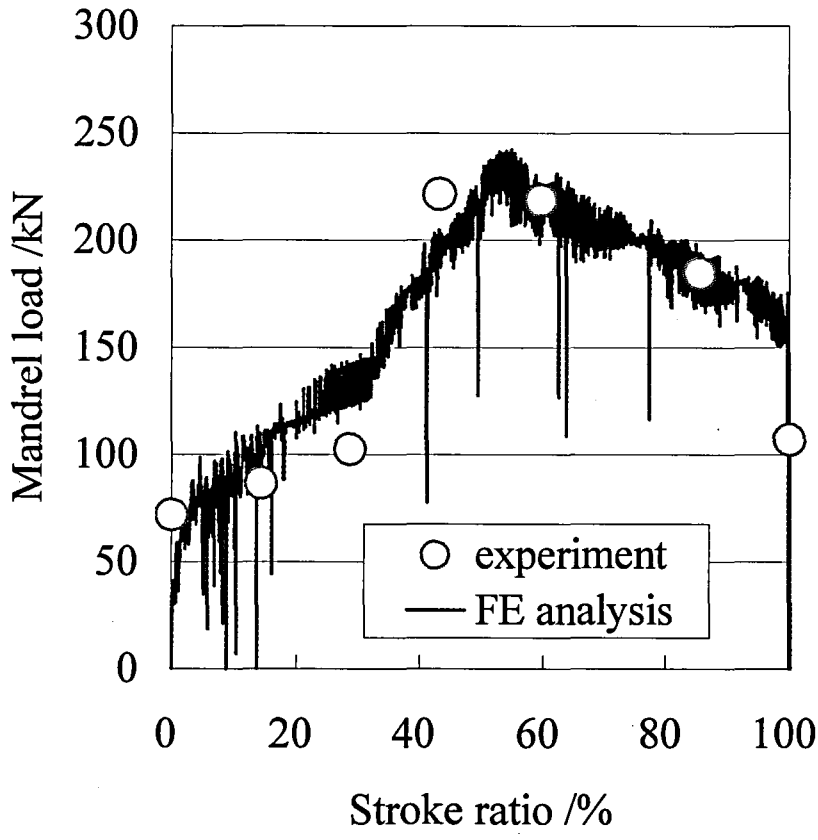
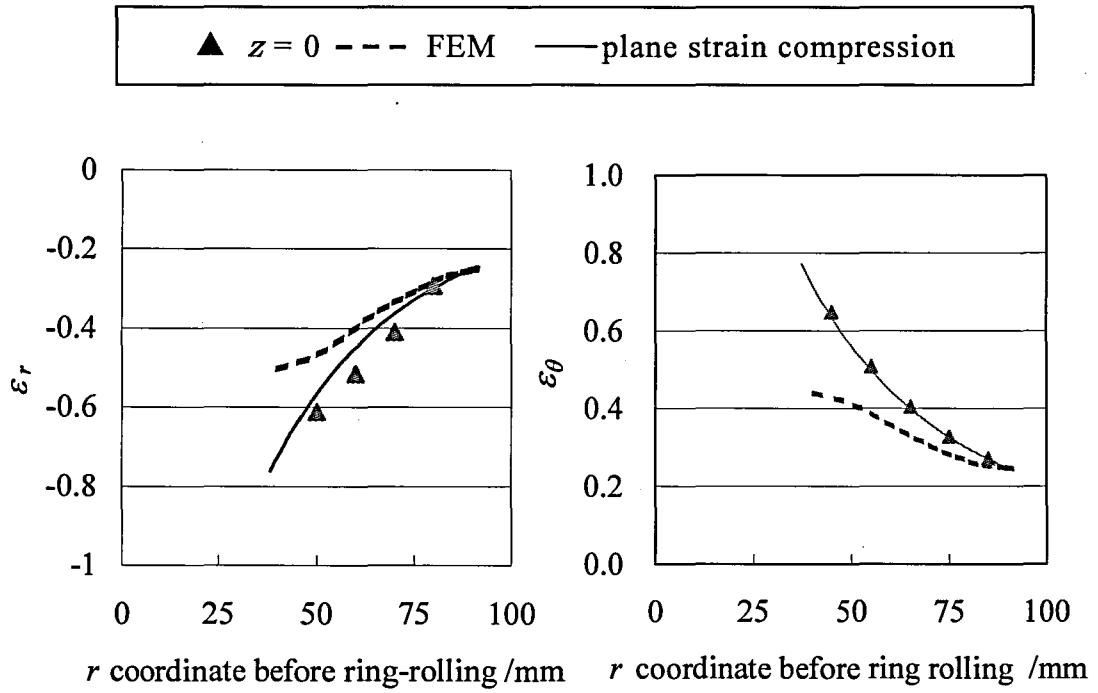


Fig. 3-2 Mandrel load history between experiment and FE analysis (three-roll-type)

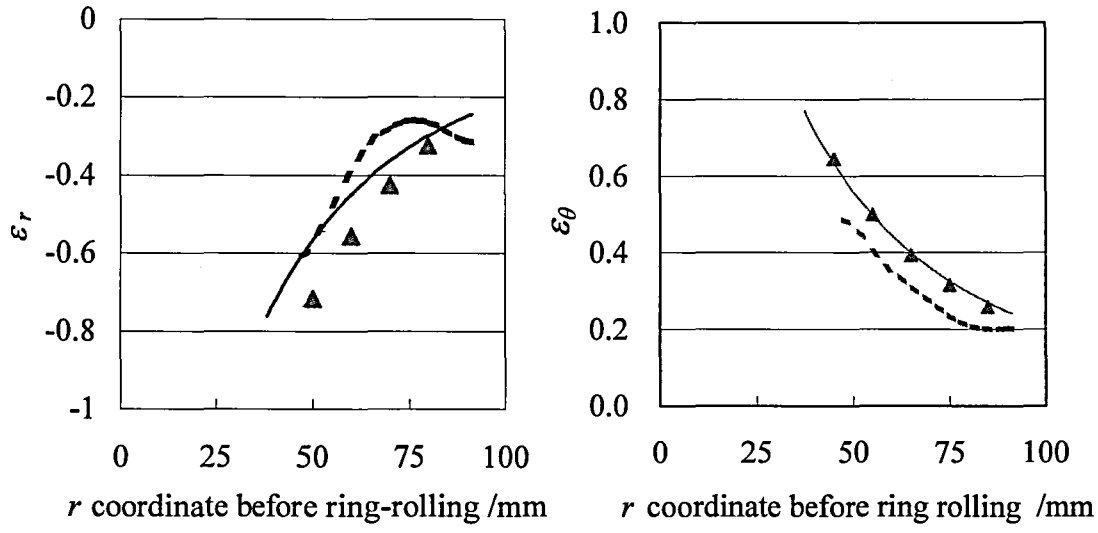
3.4.2 ひずみの比較による解析精度の検討

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，解析結果と実験値[7]との比較を行った．**Fig. 3-3** 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，$r\theta$面内で平面ひずみ変形を仮定した場合の結果である．

2 ロール型，3 ロール型双方とも，半径方向ひずみε_rは内径部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[6]と同様の傾向を示している．円周方向ひずみε_θでは，被加工材の内径近傍での結果が実機とは相違が見られるが，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では，外表面の材料流動[13]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．



(a) Three-roll-type



(a) Two-roll-type

Fig. 3-3 Comparison of each strain between FEM and experiment

3.4.3 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. 3-4** に，静水圧応力の分布を **Fig. 3-5** に示す．3 ロール型では，前述の通り，メインロールおよびマンドレルで構成される閉式孔型内で圧延が進行しているため，幅広がり（フィッシュテール）が生じない．一方，2 ロール型では 2 箇所あるロールバイトの双方とも，開放型の孔型である．そのため，ロール近傍ではフィッシュテールが生じている．

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[14]，被加工材コーナー部分にひずみの集中が観察される．3 ロール型ではフィッシュテールが発生しないため，断面内でより均一な加工が行われると考えられ，2 ロール型では，圧延時に発生したフィッシュテールをもう一方のロールバイトで加工し，その状態が繰り返された結果として，Fig. 5 に見られる相当ひずみ分布が生じたと推察される．

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 ロール型では被加工材の全域がロールにて拘束された状態で加工が進むため，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，加工時にロール近傍にて幅広がりが生じフィッシュテールとなる．このため，被加工材内部まで変形が及び難いと考えられる．

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．このことから，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・ボイド欠陥の生成・成長抑制および圧着においても有利な加工方法であると考えられる．

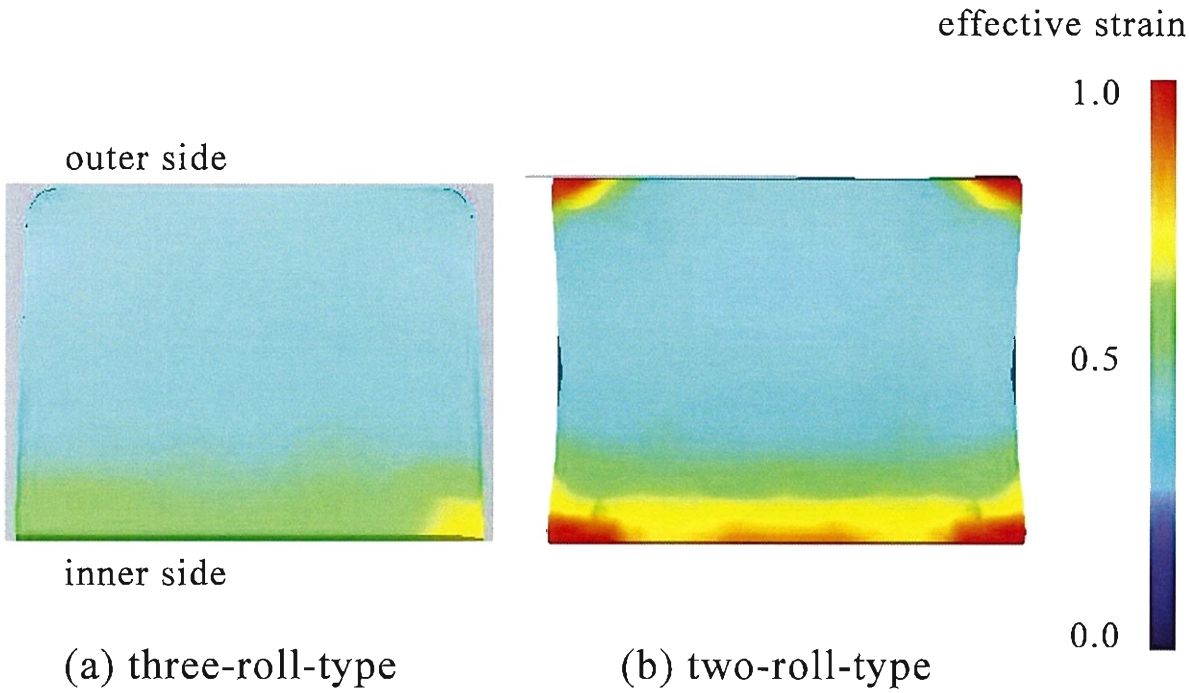


Fig. 3-4 Comparison of effective strain on the RD cross section

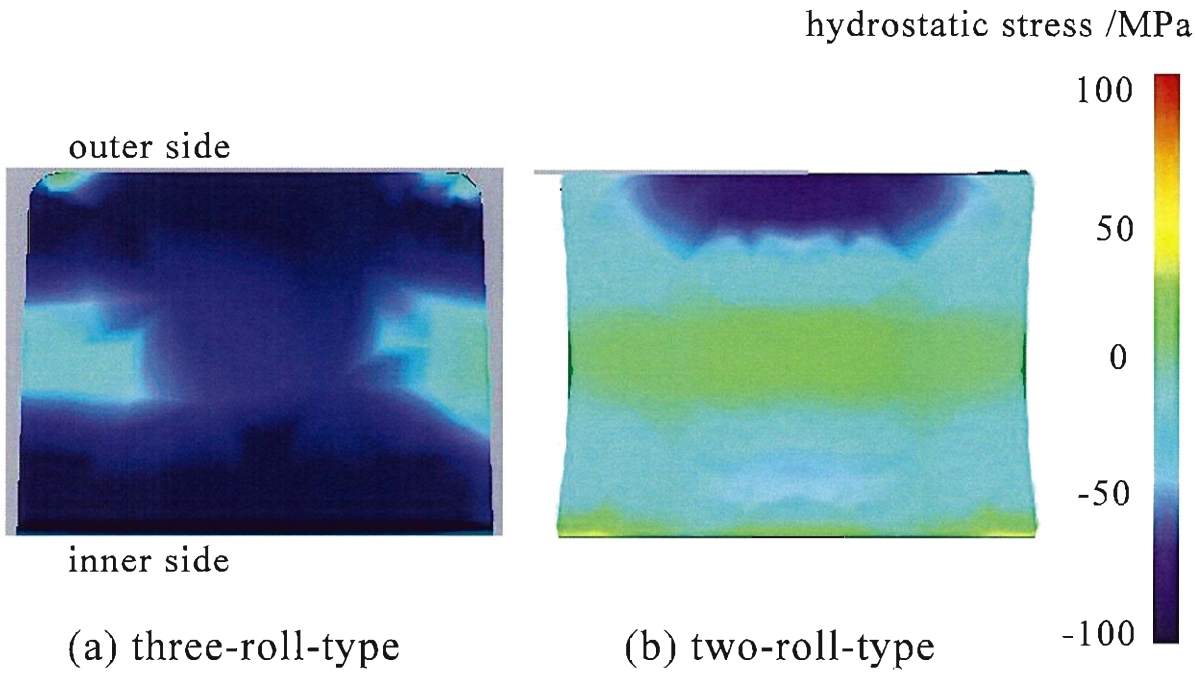


Fig. 3-5 Comparison of hydrostatic stress on the RD cross section

3.4.4 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[15]を算出した．

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

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=91mm)，厚み中央部(r=64mm)，内径部(r=37.5mm)の3箇所で導出した．**Fig. 3-6**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回転に相当）ではリングの挙動が不安定であるため，ストローク率20%以上の結果を示す．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径される加工であるため，特に加工初期では内径付近の延伸効率がより高い傾向にある．Fig. 7 より，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ており，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しているが，外径側での延伸効率の上昇は遅い．これは加工時に被加工材の外表面が顕著な幅広がりを示すためと考えられる．また，加工終了直前では，各部位での延伸効率の差が大きいことから，2 ロール型では，被加工材の半径方向位置により延伸効率が大きく異なっており，半径方向ひずみの不均一さが存在していると考えられる．**Fig. 3-7**に加工前r座標と延伸効率f_wの関係を示す．この結果より，3 ロール型では被加工材の内径側から外径側にかけて，比較的均一な延伸効率が得られているが，2 ロール型では，内径近傍および外径近傍では延伸効率が低下しており，肉厚中央付近の延伸効率が最も高い結果となっている．これは，前述の通り，開放孔型での圧延のため発生する幅広がりの影響と考えられる．

3 ロール型ではフィッシュテールの発生が無いため，RD 断面内で比較的均一な加工が行われており，その結果，延伸効率も比較的均一な分布を示している．一方，2 ロール型では，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ため，フィッシュテールが発生し，その結果として，延伸効率が低下すると考えられる．

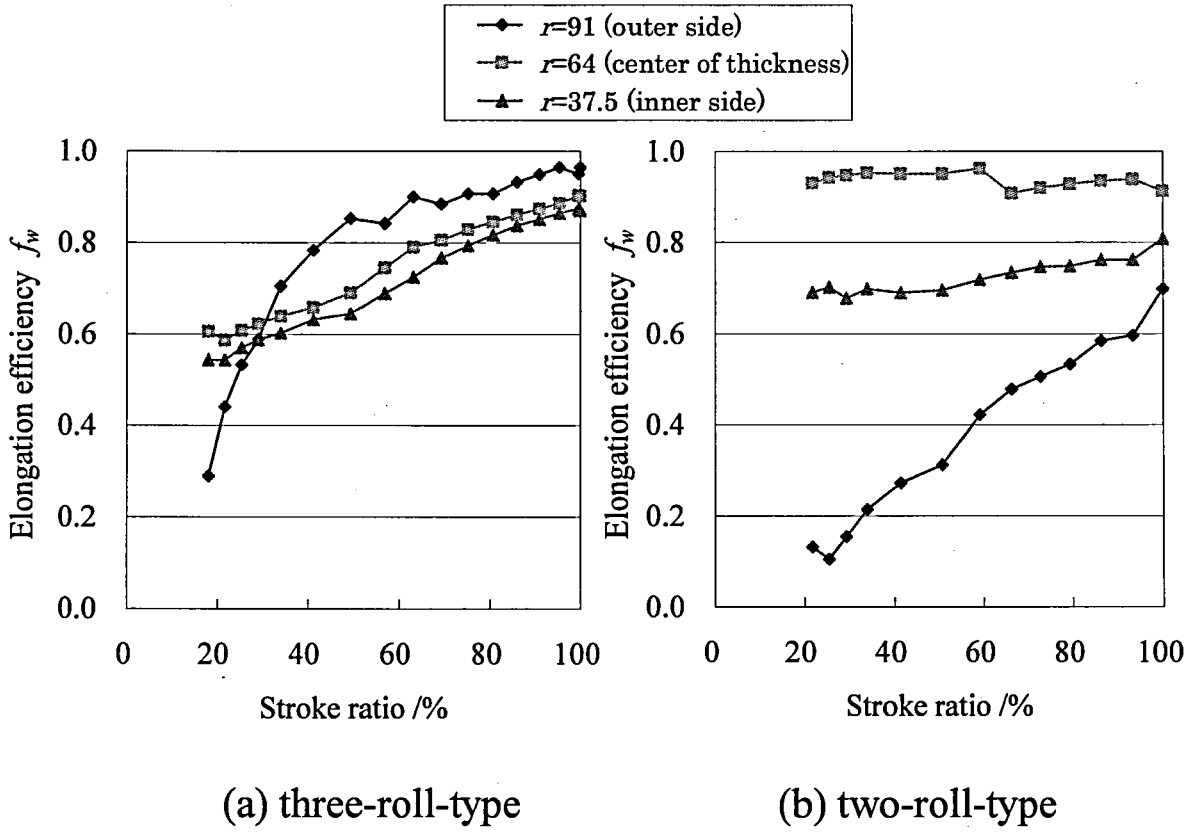


Fig. 3-6 Elongation efficiency over stroke ratio

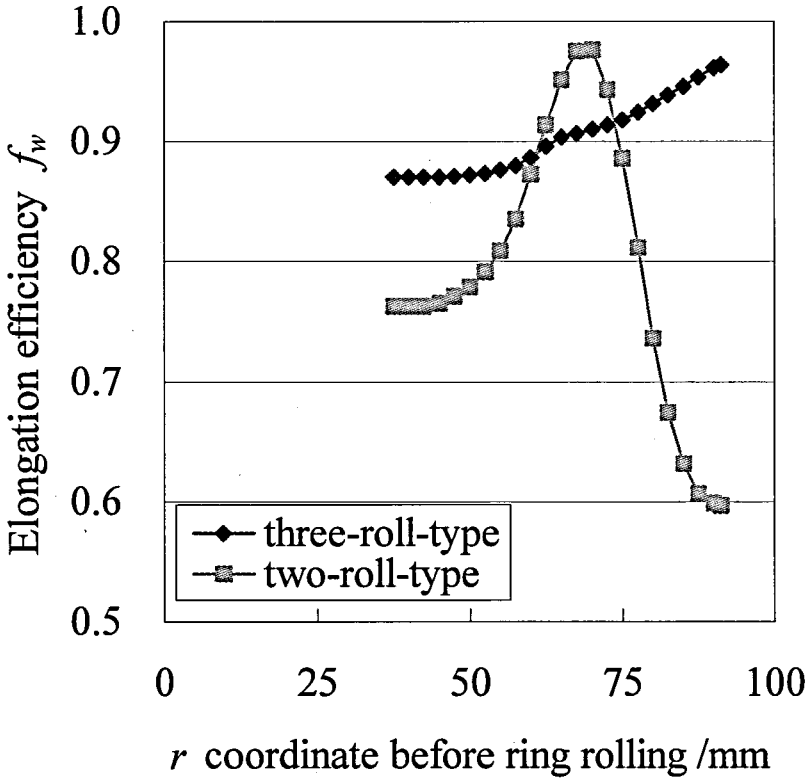


Fig. 3-7 Elongation efficiency over the initial r coordinate

3.5 結 言

3 ロール型，2 ロール型リングローリングにおける圧延特性を比較するため，ALE 法を用いた有限要素解析にて，相当ひずみ分布，静水圧応力分布，延伸効率の検討を行い以下の知見を得た．

(1) 有限要素解析で得られたひずみ成分は，今後の精度向上が期待されるものの，実験値と比較的良く一致している．すなわち，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再現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，実験結果と符合した．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，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では，2 ロール型と比べてより均一な変形が生じている．

(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塞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．

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] 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.

[5] 本村貢・船本宏幸：昭和 53 年度塑性加工春季講演会講演論文集，(1978)，77-80.

[6] 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.

[7] 中溝利尚・中崎盛彦・高須一郎・宇都宮裕：塑性と加工　投稿中

[8] Nakamizo, T., Takasu, I., Nakasaki, M. & Utsunomiya, H. : Steel Research Int, **81**-9 (2010), 194-197.

[9] Moon, H.K., Lee, M.C. & Joun, M.S. : Int J. Mech. Sci, **50** (2008) , 306-314.

[10] Takizawa, H., Matsui, T., Fukuda, T. & Kikuchi, H. : Proceedings of 9th ICTP, (2008), 807-812.

[11] Goldbach, V. & Hirt, G. : Proceedings of 9th ICTP, (2008), 813-818.

[12] 石川孝司・祝夫文・湯川伸樹・吉田佳典・三吉宏治・野田拓也・宮崎孝範：平成 23 年度塑性加工春季講演会講演論文集，(2010), 147-148.

[13] 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.

[14] Coupu, J., Raulin, J.L. & Huez, J. : Proc. 3rd Int. Conf.　Modeling of Metal Rolling Processes, (1999), 82-89.

[15] 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.

第４章

３ロール型，２ロール型リングローリング

による非対称異形断面リング成形の有限要素解析

4.1 緒言

ベアリングレース等のリング状素形材に対して，省エネルギー，省資源の観点からニアネットシェイプ化のニーズが近年特に高まっている．ニアネットシェイプ化が進むにつれ，材料歩留りの向上に加えて，ベアリング転動面でのファイバーフローが連続的になるため，軸受としての性能向上も期待できる[1]．しかし，対称断面を有する素形材と比較すると，非対称異形断面の素形材のニアネットシェイプ化は製造上困難な点が多く，あまり進んでいない．

リング状素形材の製造プロセスとしては熱間リングローリング加工があり，比較的大径の部品の製造に多く用いられている．リングローリングの加工方法は様々であるが，一般的な2ロール型の他に，非対称異形断面リングの加工に適すると考えられる方法として3ロール型リングローリング[2]がある．

3ロール型はニアネットシェイプ化を目的に1950年代に日本で開発されたリングローリングミルである．非対称異形断面を有する素形材は，3 ロール型では従来からニアネットシェイプで製造されており，2 ロール型と非対称断面リングの成形性に相違があると考えられる．これは，3 ロール型でのロール配置が起因していると考えられるが，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あるいは加工特性などの報告も少ない[3]．

筆者らは3ロール型の圧延特性を解明するため，矩形断面の被加工材を対象とした実験および有限要素解析を行った．リング圧延時の被加工材の変形挙動や被加工材内部のひずみ，応力状態などについて，2 ロール型との相違を検討した結果，3ロール型リングローリングミルの特長として，閉式孔型が構成されるため，RD 断面内での変形が比較的均一である点，圧縮静水圧下の状態で加工が進むため空隙圧着効果が高い点などを明らかにしている[4,5]．しかし，これらの研究は矩形断面の被加工材を対象としており，非対称異形断面を有する被加工材に対する圧延特性と成形性は不明である．

そこで本章では，非対称異形断面を有する被加工材に対して，3 ロール型リングローリングの圧延特性を解明するため，双方の加工について有限要素解析を行った．メインロールと被加工材の周速度推移，両者の相対速度およびメインロールの主軸傾斜の影響を調査し，非対称異形断面を有する被加工材の変形挙動を明らかにした．

4.2 3ロール型の特徴と非対称異形断面リング圧延の課題

3ロール型リングローリングミルの加工方式については，序論中 1.5 で述べているとおりであるため，ここでは割愛する．2 ロール型と比べて，ロールバイトが 1 箇所で閉式孔型が構成されており，コニカルロールを使用しない．また，メインロールの回転主軸は水平方向から角度ϕ傾斜している．

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，すなわち中立点が限られていることが挙げられる．**Fig. 4-1** 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（$R_{left-roll}$）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（$R_{right-roll}$）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．つまり，メインロールと被加工材の間に相対滑りが不可避的に存在し，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している．メインロールと被加工材の間で発生するすべりは，摩擦仕事の増加となるため，被加工材表面での欠陥の発生，ロール寿命の低下、加工中のリングが不安定になるなどの悪影響を及ぼすと考えられる[6,7]．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，ロールおよび被加工材間の相対速度およびその分布を低減することが重要である．

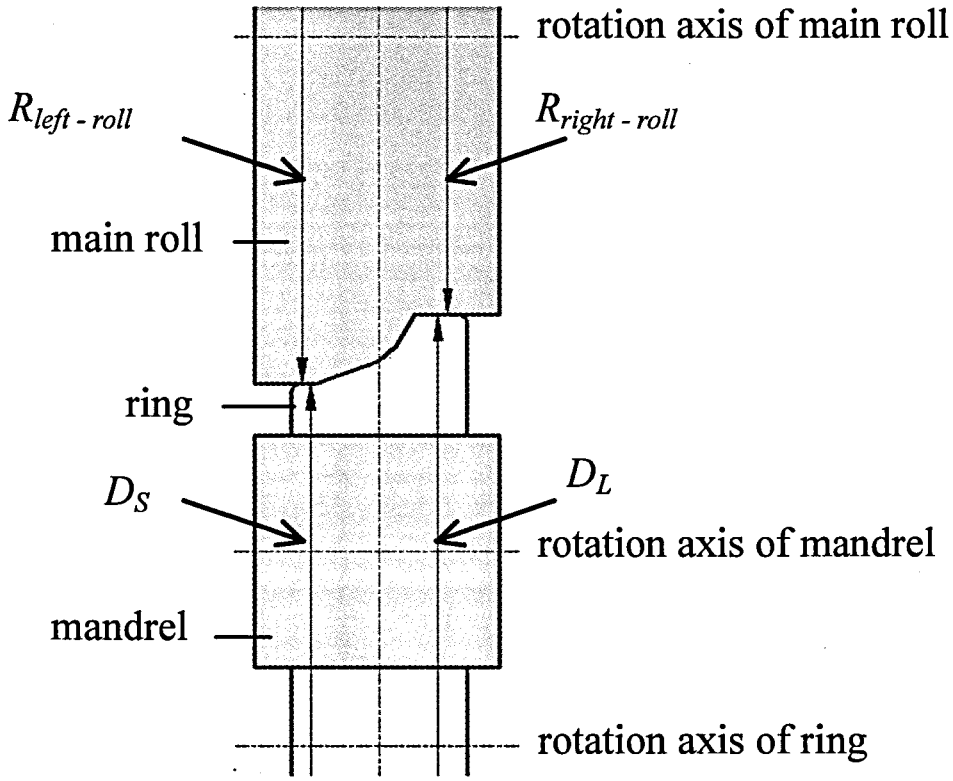


Fig. 4-1 Schematic diagram of two-roll-type ring rolling

4.3 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. 4-2** 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．

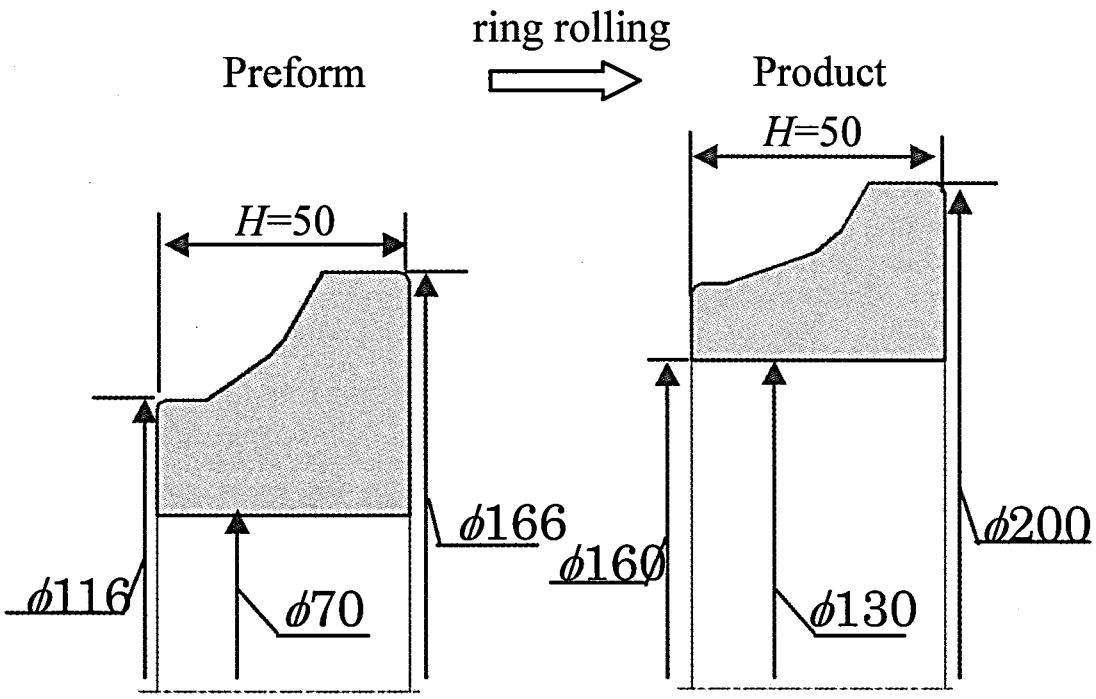


Fig. 4-2 Preform and product for FEM

有限要素解析は第3章と同様に，市販の有限要素解析ソフト DEFORM 3D^{TM} 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[5]．被加工材の要素分割は6面体8節点要素で行い，初期要素数は約10,000とした．有限要素解析で用いた3ロール型，2ロール型リングローリングのロール配置を **Fig. 4-3** に，解析条件を **Table 4-1** に示す．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ϕ=20°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. 4-3(b)に示すように2ロール型の被加工材側面でのロールとの摩擦は無いものとした．

非対称異形断面の被加工材をリング圧延する場合，孔型ロールは製品幅方向（z方向）の各位置でメインロール径が異なる．メインロール径の影響を同一の条件で評価するため，Fig. 4-3中に図示した矢印部（3ロール型でのロール分割位置）のメインロール径を基準寸法としてTable 4-1に示した．メインロール径，回転数を変数としてTable 4-1の3条件を有限要素解析にて検討した．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た条件で，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目的としている．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．

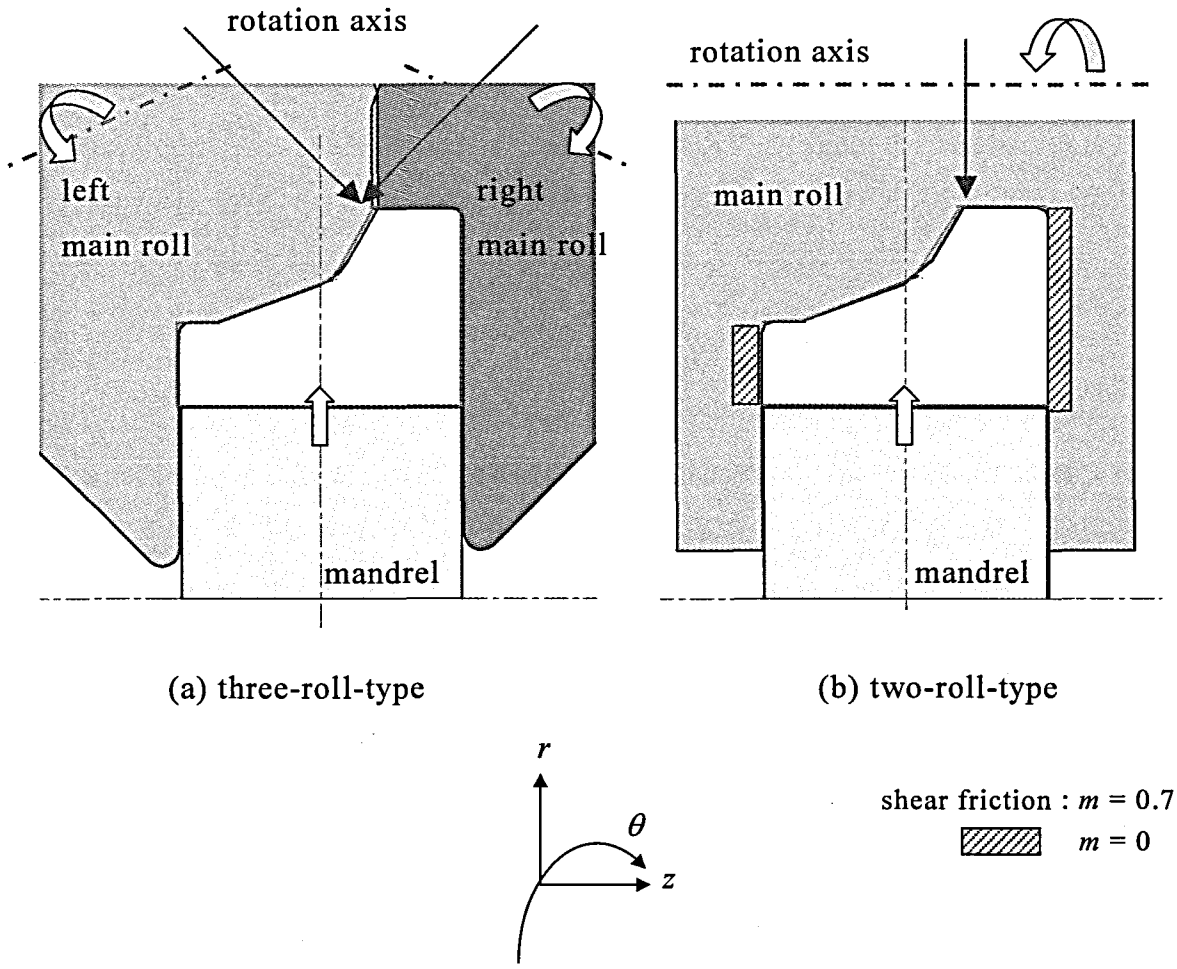


Fig. 4-3 FEM model

Table 4-1 FEM conditions

Objects	Conditions	No.1	No.2	No.3
		Three-roll		Two-roll
Left main roll	Diameter /mm	330	302	330
	Angular velocity /rad·s^{-1}	14.3	13.0	14.3
Right main roll	Diameter /mm	330		
	Angular velocity /rad·s^{-1}	14.3		
Mandrel	Diameter /mm	67.0		
	Feed speed /mm·s^{-1}	3.0		
Ring	Temperature /℃	1050		
	Flow stress /MPa	$\sigma = 70\ \varepsilon^{0.01}\ \dot{\varepsilon}^{0.14}$		
Leaning angle of main rolls ϕ/°		20		0
Friction coefficient		$m = 0.7$		

Table 4-1 の条件で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. 4-4** 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位置により約 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おり，z 軸方向各位置で発生するメインロール径差が小さいためである．また，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，Fig. 4-4 の条件 No.2 のように，メインロールと被加工材の相対速度を低減させることを目的として，メインロール径，角速度を任意に変更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．

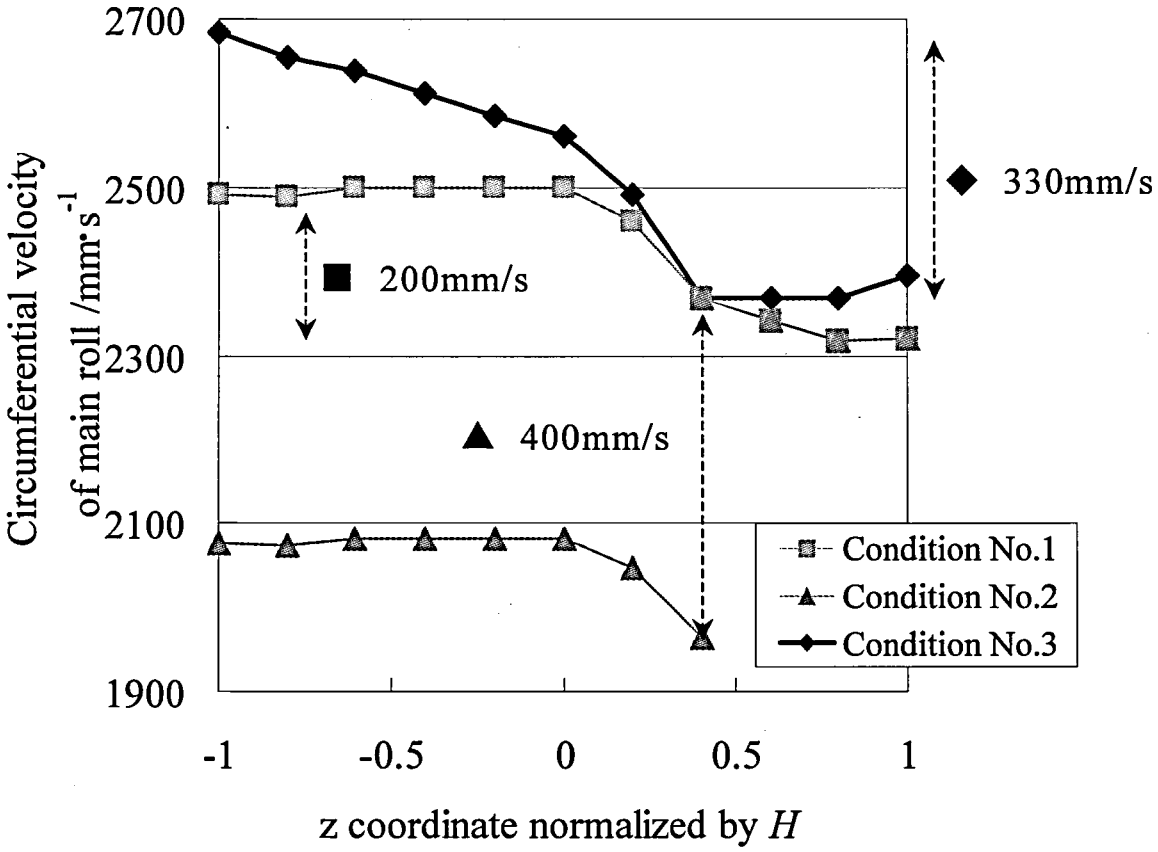


Fig. 4-4 Circumferential velocity of main rolls on each condition

4.4 解析結果

4.4.1 ロールおよび被加工材の周速度推移

各条件について，リング外径・内径でのロールおよび被加工材の間の相対速度をストローク率で整理した結果を **Fig. 4-5～4-7** に示す．なお，被加工材の周速度は最小ロールギャップ位置にて抽出し，大外径は z/H =0.75，小外径は z/H =-0.90，内径は z/H =0 の点で調査した．また，縦軸の相対速度は，正の値の場合，被加工材がメインロールに対して先進している状態を表している．

どの条件も，被加工材とロールとの相対速度は，大外径側 D_L の方が小さい．また，小外径 D_S 側は後進域にあり，条件 No.3＞No.1＞No.2 の順で相対速度の絶対値が大きい．条件 No.1，3 の差はメインロール回転主軸の傾斜によりロール径差を抑制した効果である．条件 No.1，2 の差は被加工材の外径周速度に合うようにメインロール周速度を設定した効果である．加工終了直前での相対速度の幅方向（z 方向）分布は次節で詳細に述べる．

2 ロール型の圧延初期においては，マンドレル側での相対速度の変動が観察される．この段階では大外径 D_L，小外径 D_S での相対速度も同様に変動しており，中立点が限られた状態で加工が進行しており不安定となるためである．一方，3 ロール型ではマンドレルと被加工材の相対速度が小さい状態で推移しており，初期から安定的な圧延が行われている．

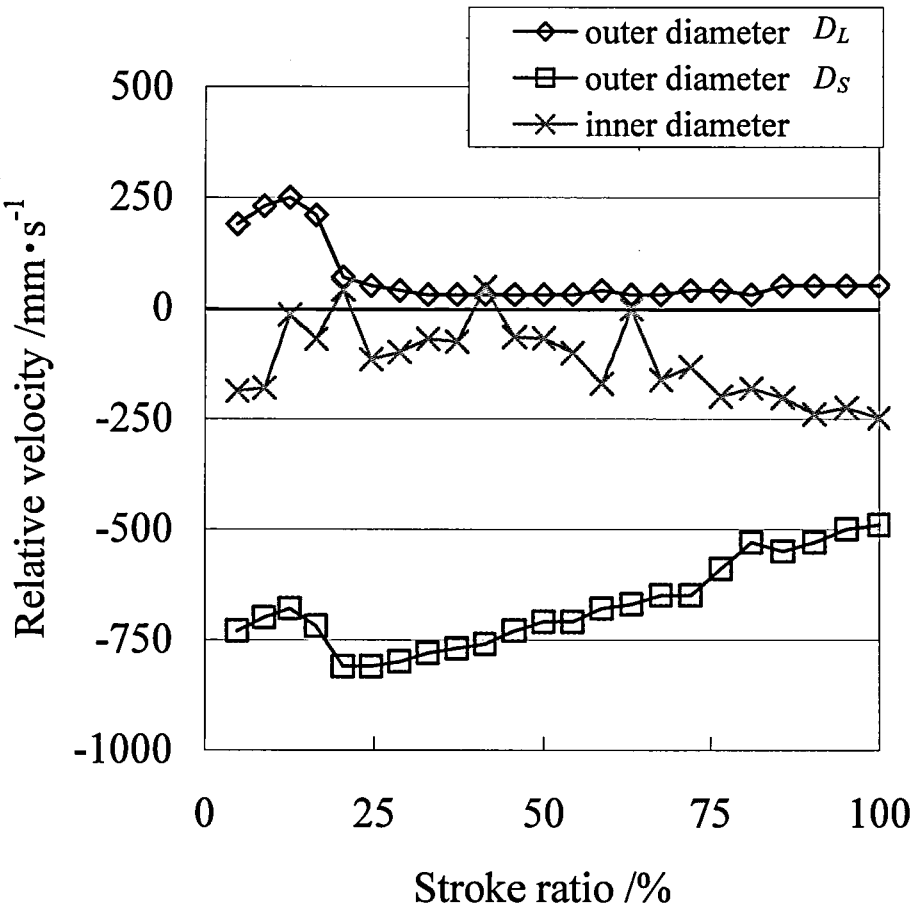


Fig. 4-5 Relative velocity over stroke ratio on condition No.1

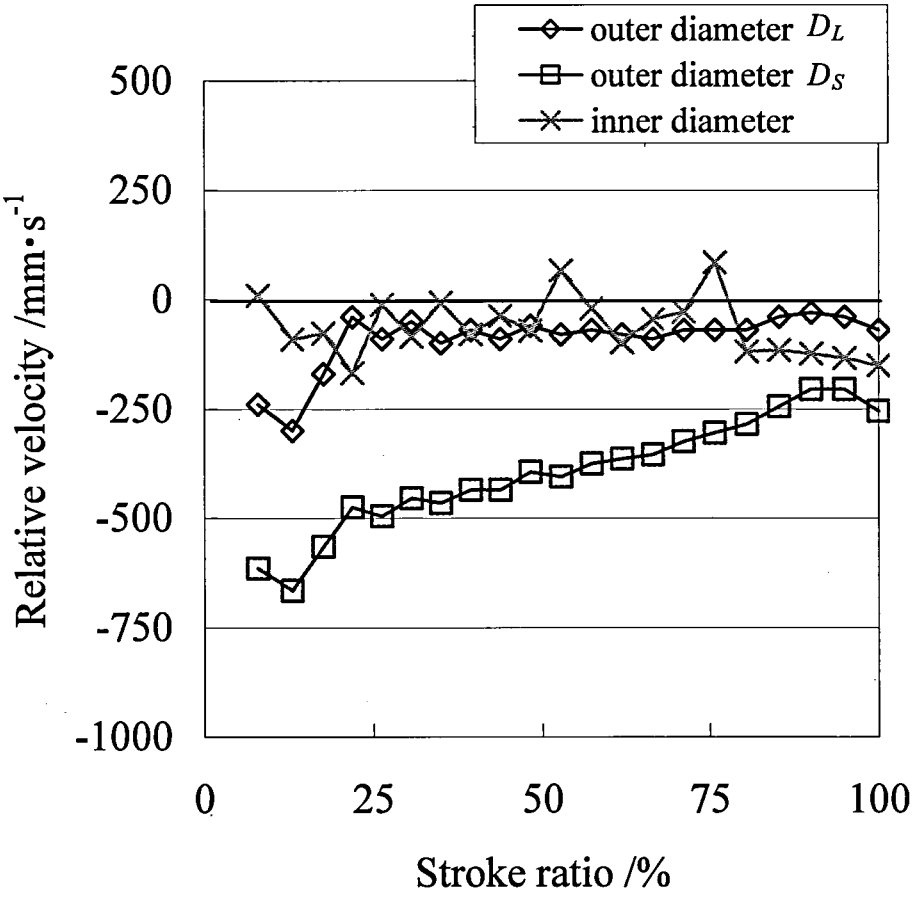


Fig. 4-6 Relative velocity over stroke ratio on condition No.2

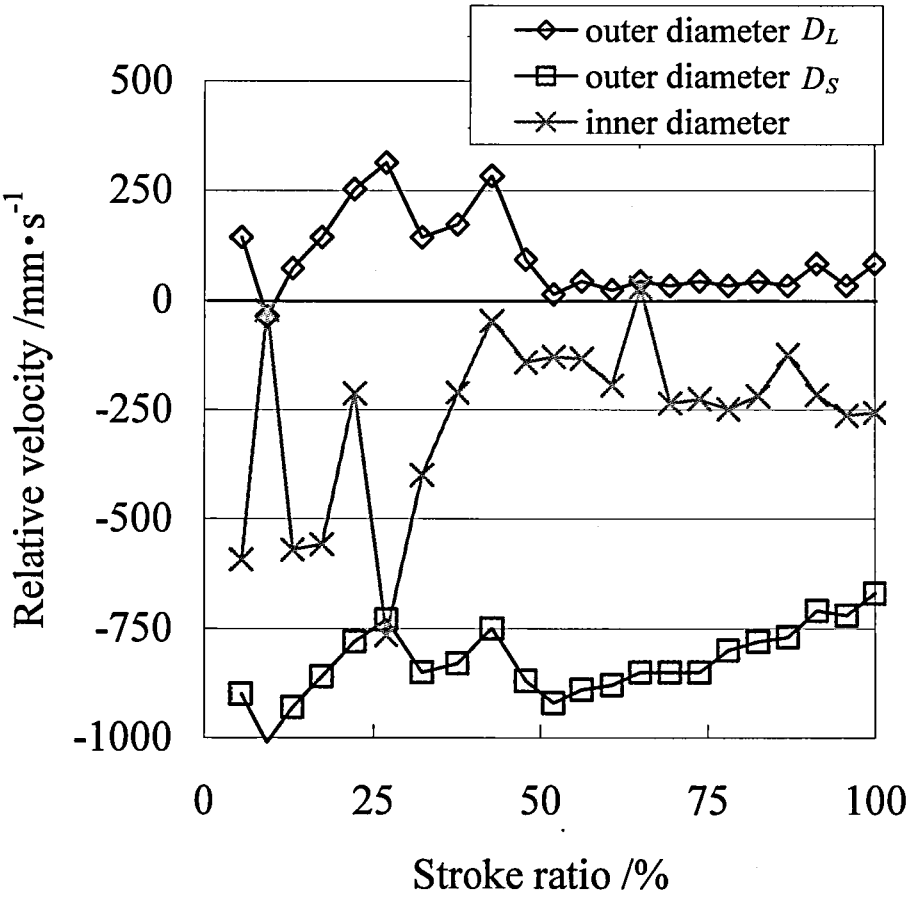


Fig. 4-7 Relative velocity over stroke ratio on condition No.3

4.4.2 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. 4-8** 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，角速度が同一の場合でも相対速度は 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の効果と考えられる．また，被加工材外径部の周速度分布に沿う形で設定した 3 ロール条件 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．

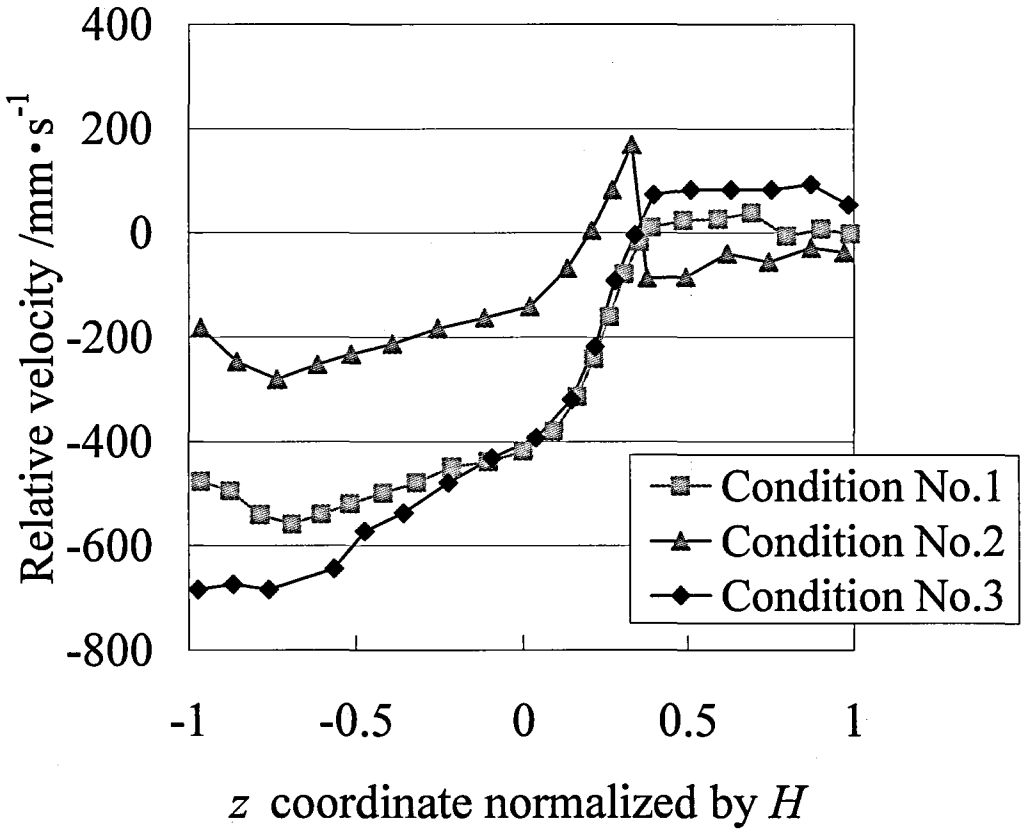
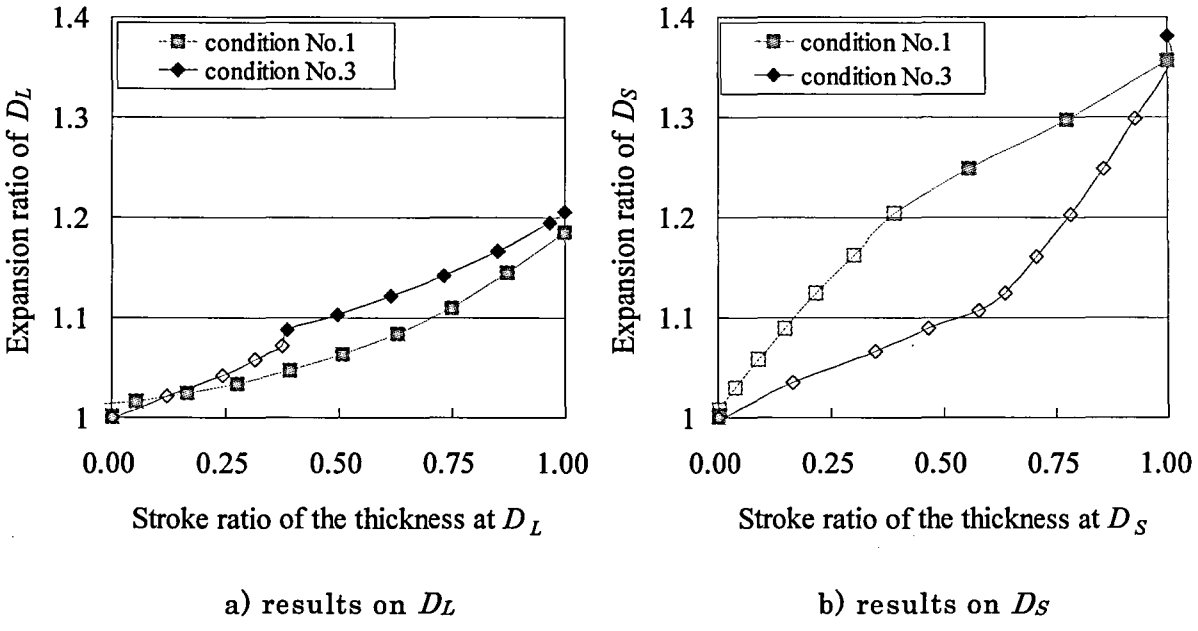


Fig. 4-8 Relative velocity between main rolls and the ring

4.4.3 肉厚減少率と外径拡大率の関係

Fig. 4-9 に，外径拡大率に対する大外径および小外径部での肉厚減少率の影響を示す．なお，条件 No.1 および No.2 ではほぼ同様の傾向であったため，条件 No.2 は省略している．図中の白抜きのプロットは，当該部分にて被加工材がロールと接触していない状態を表す．なお，径変化に影響を及ぼす FEM 中の体積変化は，全ての条件において±0.3%以下であったので，計算上の体積変化の影響は無視できる．3 ロール型と 2 ロール型の結果を比較すると，3 ロール型では加工の早い段階にて，大外径側での接触が起きている一方，2 ロール型では大外径側，小外径側ともにロールとの接触が遅く，特に小外径側は圧延終了直前でようやくロールに接触する．また，小外径側はロールと非接触の状態でも，大外径側の加工による延伸で間接的に径拡大が行われており，3 ロール型では加工初期における径拡大の変化率が，2 ロール型よりも大きいことも分かる．



a) results on D_L　　b) results on D_S

Fig. 4-9　Expansion ratio over stroke ratio of the thickness

4.4.4 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傾斜した回転軌道を描く[8]．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．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．この違いは，リング圧延時の被加工材の挙動に影響を及ぼすと考えられるため，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速度の z 軸方向成分 V_z を抽出した結果を **Fig. 4-10～4-12** に示す．図中の網掛け部は z 軸正方向への材料流動である．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存在するが，2 ロール型ではほとんど存在しないことが確認できる．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[9]，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ことが分かる．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の z 軸方向成分は，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の z 軸方向成分 V_z は，このメインロール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，左右独立にメインロール周速度を設定す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大きく，従って，相対速度の抑制は非対称異形断面リングの成形において有効と考えられる．

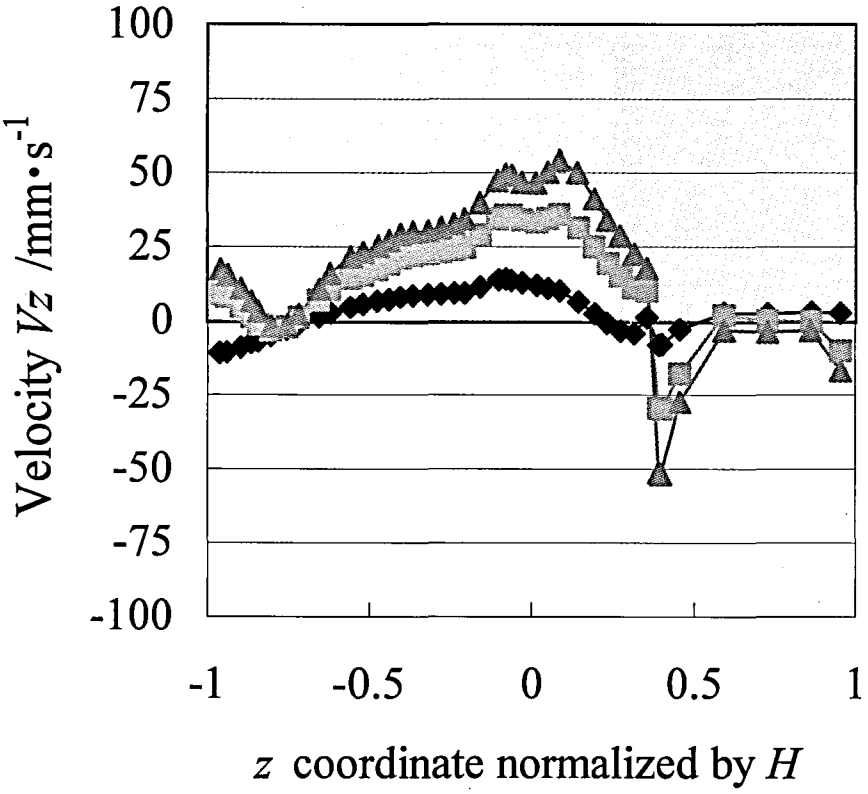


Fig. 4-10 Ring Velocity Vz on the outer surface in the roll gap (Condition No.1)

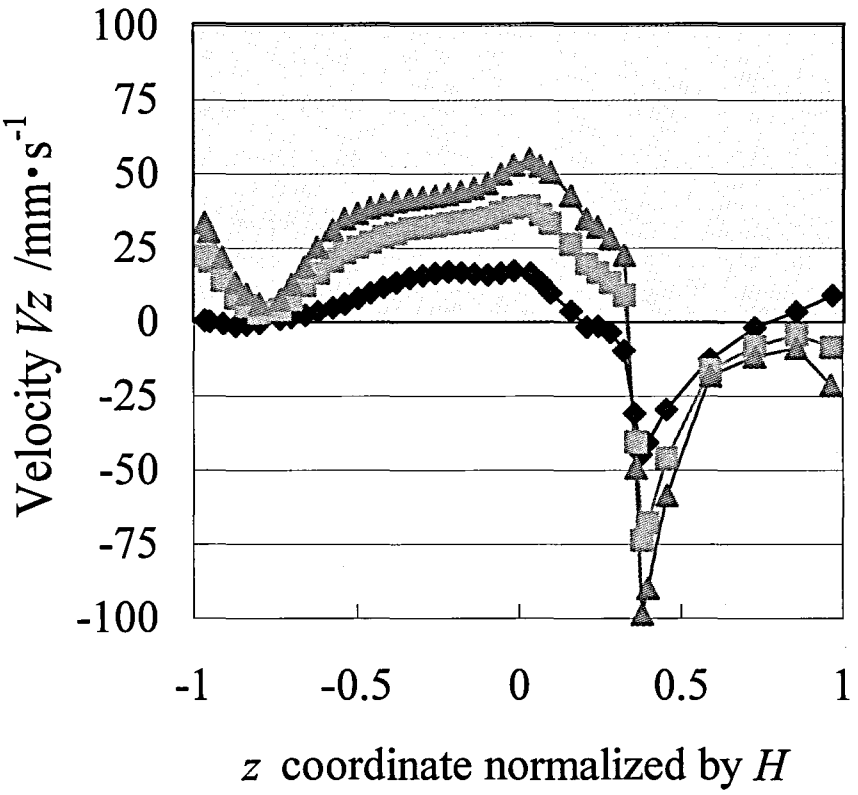


Fig. 4-11 Ring Velocity Vz on the outer surface in the roll gap (Condition No.2)

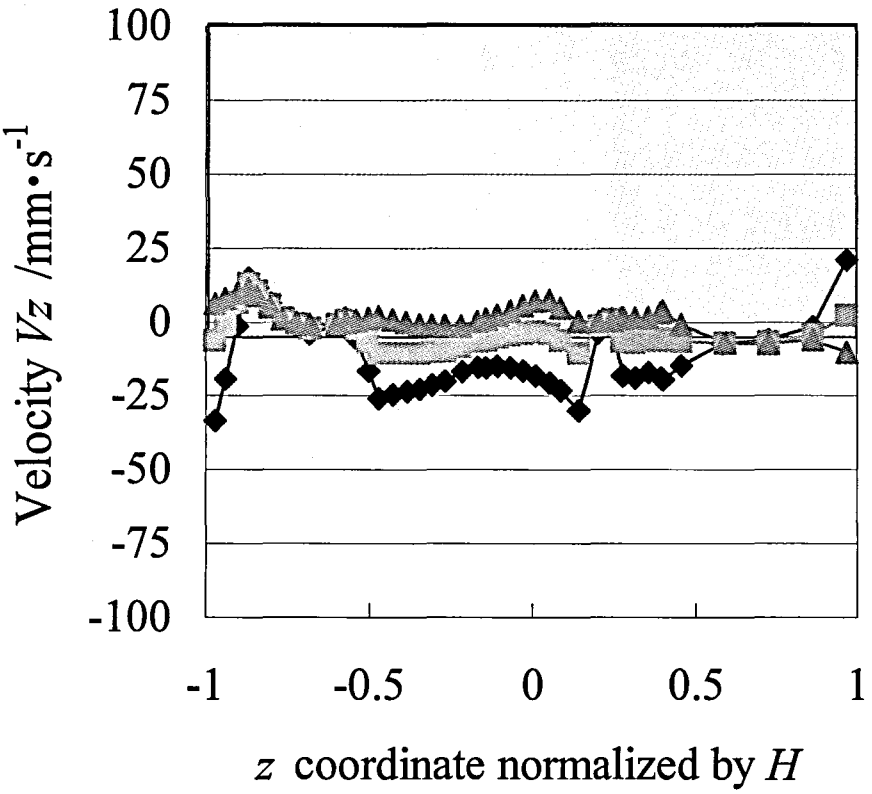


Fig. 4-12 Ring Velocity Vz on the outer surface in the roll gap (Condition No.3)

4.5 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を抑制するように，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．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，左右に独立してメインロールが存在するため，双方のメインロール周速度を任意に設定することが可能である．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，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．更には，被加工材の外径成長曲線を計測もしくは予測し，相対速度が最小となるよう経時的にメインロール角速度を制御するという方案も考えられる．

また，メインロール回転主軸を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であると考えられる．

4.6 結言

非対称異形断面を有する被加工材に対する 3 ロール型，2 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，有限要素解析を実施した結果，以下の知見を得た．

(1)今回対象とした被加工材形状の場合，3 ロール型，2 ロール型ともに，大外径側の被加工材表面では相対速度が小さい．小外径側は特に加工初期には，非接触状態で大外径側の加工による延伸で，間接的に圧延，拡大されている．

(2) 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った．

(3)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．この周速度成分から，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．

参考文献

[1] 対馬全之：日本金属学会会報，**23** (1984)，50-56.

[2] 斉藤正之・斉藤正也：特公　昭 34-7408.

[3] 中崎盛彦・高須一郎・中溝利尚・宇都宮裕：塑性と加工，**50**-579 (2009), 349-353.

[4] 中溝利尚・中崎盛彦・宇都宮裕：塑性と加工，投稿中.

[5] 中溝利尚・中崎盛彦・宇都宮裕：塑性と加工，投稿中.

[6] 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.

[7] 関本靖裕：塑性と加工，**23**-261 (1982), 952-957.

[8] 中溝利尚：山陽特殊製鋼技報，**11** (2004)，70-73.

[9] 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.

第５章

総括

リングローリング加工は，リング部品の製造方法として古くから活用されている．これは，第1章で述べたように，当該技術が他の製造プロセスと比べて，局所加工であるため加工荷重が小さく，加工機を小さく出来る点や，加工後製品の精度が良い点など，複数の技術的優位性を有するためであり，特に小さな外径から径拡大によりリングを製造する特徴から，将来に亘っても活用される技術であると考える．一方で，回転加工による逐次成形であるため，その挙動は著しく複雑で，加工特性などを見極めることは困難である．このため，2ロール型リングローリングについては古くから調査研究が行われており，圧延圧力，幅広がり特性などが明らかになっている．また，現在でも安定した圧延を目指したロール制御方法，熱応力連成解析での組織予測などの研究が続けられている．最近では，高付加価値材料の適用や後工程での負荷低減を目的として，ニアネットシェイプ化がますます求められている．すなわち，異形断面品のリングローリング技術が求められている．一方で3ロール型リングローリングについては，複雑断面リングのニアネットシェイプ化の可能性を持ちつつも，適用事例が少ないことから研究対象となっておらず，加工特性や圧延特性が未知のままである．本論文では，この3ロール型リングローリングに焦点を絞り，その圧延特性を解明することを目的として研究を行った．

第2章では，矩形リングを対象として実験的アプローチにより，加工時の変位およびひずみを明らかにした．その結果，リングの幅中央部では，平面ひずみ状態にて加工が進行していることが明らかとなった．また，この部位では内径から外径に向かう材料挙動が存在しており，これは2ロール型には見られない3ロール型独特の特徴であることが判明している．この材料挙動を活かした製品への適用が将来に期待される．

第3章では，矩形リングについてALE法を用いた有限要素解析を行い，被加工材内部のひずみや応力状態を明らかにした．第2章での実験結果と比較して，ALE法を用いた有限要素解析の有効性を明らかにした．また，2ロール型と比べて，3ロール型ではRD断面内のひずみが均一であること，静水圧圧縮の状態で加工が進行していることを明らかにした．RD断面での静水圧応力が圧縮状態であることから，内部ボイドやクラック等の欠陥抑制に有効であることを示唆している．また，延伸効率の比較から3ロール型では閉式孔型での圧延のため，2ロール型と比べてより均一であることを示した．

第４章では，テーパーベアリング内輪を想定した非対称形状リングに焦点を絞り，３ロール型リングローリング加工の特徴を調査した．３ロール型では，２つのメインロールを使用し，それぞれの回転主軸が傾斜していることにより，ロールと被加工材の周速度差，すなわち相対速度を２ロール型よりも緩和することが可能であることを明らかにした．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，加工中の被加工材の姿勢安定化に有利であり，この点からも３ロール型が非対称異形断面リングの製造に有利であることを示唆している．また，メインロール回転主軸が傾斜していることにより，被加工材の変形挙動にも影響を及ぼしていることを明らかにした．特に，リングローリング加工では成形が困難であると言われている，外径突起付き製品の製造にも有利であると考えられる．

このように，３ロール型リングローリングの圧延特性を，２ロール型との比較のうえで，実験，有限要素解析を用いて明らかにした．また，長年不明なままであった，非対称異形断面リングの成形性についても，ロール－被加工材間の相対速度の低減という観点で一定の知見を得ることができた．３ロール型リングローリングでは，２ロール型と比べて，延伸効率が比較的高い状態にあり，かつ均一であることから，生産性の向上が期待される．また，最小ロールギャップ位置では静水圧圧縮状態で加工が進行していることから，脆性材料へのリング圧延の適用などが今後期待される．

３ロール型リングローリング加工には，自動化のための圧延制御や，肉厚変化の大きいリングへの適用など多くの課題が存在するが，圧延特性を解明できたことにより，今後の生産への適用へ一定の寄与ができるものと考える．本研究が今後の技術発展の一助となれば幸いである．

資料

本論文は，以下の発表論文をまとめたものである．

[1] 著者：T. Nakamizo, I. Takasu, M. Nakasaki, & H. Utsunomiya
論文名：Three-Rolls-Type Hot Ring Rolling Process of Large Seamless Rings
論文誌：Steel Research International, 81-9 (2010), 194-197.

[2] 著者：中溝 利尚，中崎 盛彦，高須 一郎，宇都宮 裕
論文名：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　－
論文誌：塑性と加工　２０１２年２月号掲載予定

[3] 著者：中溝 利尚，中崎 盛彦，宇都宮 裕
論文名：３ロール型，２ロール型リングローリングにおける
変形特性の有限要素解析
－リングローリングの圧延特性の比較　第２報　－
論文誌：塑性と加工　２０１２年２月号掲載予定

[4] 著者：中溝 利尚，中崎 盛彦，宇都宮 裕
論文名：３ロール型，２ロール型リングローリングによる
非対称異形断面リング成形の有限要素解析
－リングローリングの圧延特性の比較　第３報　－
論文誌：塑性と加工　投稿済み（審査中）

謝辞

本研究の遂行ならびに本論文を完成するにあたり、終始懇切なるご指導を賜りました大阪大学大学院　工学研究科　教授　宇都宮裕博士に心より感謝し厚く御礼を申し上げます。

そして、詳細に御査読いただき、御懇切な御教示と有益な御助言を賜りました大阪大学大学院　工学研究科　教授　竹内栄一博士、教授　荒木秀樹博士に深甚なる感謝の意を表します。

また、本研究を遂行するにあたり、その機会を与えて頂き、また深い御理解と御支援を賜りました山陽特殊製鋼株式会社　常務取締役　磯本辰郎博士、前研究・開発センター長　柳本勝博士、東京支社部長　雲丹亀泰和氏に深く御礼を申し上げます。山陽特殊製鋼株式会社　研究・開発センター　加工プロセスグループ長　中崎盛彦博士，ならびに製鋼プロセスグループ長　高須一郎博士には，研究の遂行から論文のチェックまで御指導頂き感謝申し上げます．山陽特殊製鋼株式会社　研究・開発センター　研究業務課の各位には，供試材の調査に多大なるご協力を頂きました．感謝申し上げます．研究の遂行にあたり快く実験にご協力頂きました，長井昌也氏をはじめとするサントクテック株式会社の方々にも心から感謝申し上げます．

最後に、本論文はリングローリング製造現場での経験が無かったならば完成し得なかったことを附しておきます．製造現場にてリングローリングの特性から設計方法など，広く深きに渡って御指導を賜りました恩師　佐藤邦彦氏に深甚なる感謝の意を表します．