論文

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 ——

中溝 利尚* 中崎 盛彦* 宇都宮 裕**

Finite Element Analysis of Deformation Characteristics
in Three-roll-type and Two-roll-type Ring Rolling Process

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

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

(Received on April 26, 2011)

Hot ring rolling is a useful process for producing large seamless rings. Ring rolling mills are classified into two types, i.e., two-roll-type and three-roll-type, by roll layout. In our previous study, the deformation characteristics in three-roll-type ring rolling were investigated experimentally. It was found that the deformation characteristics near the center of the width of the ring are similar to those observed under plane strain compression. In this region, fiber flow toward the outer side was observed. 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 deformation for the two types of ring rolling process. In the three-roll-type process, effective strain distributes uniformly and hydrostatic stress shows a compression state on the RD cross section. On the other hand, in the two-roll-type process, effective strain concentrates at the corner of the ring and hydrostatic stress shows less compression or tensile state. The elongation efficiency at the center of the width also shows uniform deformation in the three-roll-type ring rolling process. These results show the advantage of the three-roll-type ring rolling process for preventing internal voids and surface cracks.

Key words: rotary forming, hot ring rolling, FEM, ALE, effective strain, hydrostatic stress, elongation efficiency.

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がある。

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ロール型はもっと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)~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、アキシア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。

本研究は、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。著者らは前報⁷⁾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。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)~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⁾。

本報では、3ロール型、2ロール型リングローリングに対

* 山陽特殊製鋼(株) 〒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.

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証した。

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ミルのロール配置を Fig. 1 に示す¹⁴⁾。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。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。

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式孔型が構成されており, 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, 閉式孔型内に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, 被加工材と接触するメインロール表面には周速度分布が存在し, また, メインロール表面の周速度は z 方向成分を持つ。

前報⁷⁾の結果より, 3 ロール型リングローリングミルを用いた加工では, フィッシュテールの発生が抑制される結果, 被加工材の幅中央 (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んでいることが分かっている。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への材料流動が存在することが判明している。

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

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 3DTM 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. 2 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, 前報⁷⁾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° である。被加工材の鋼種は S45C で, 温度分布は考慮せず 1050°C 一定の条件で有限要素解析を実施した。リングローリング加工前リングは, 外径 $\phi 182$, 内径 $\phi 75$ で, 加工前後での外径拡大率は 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. 2 FEM model used (three-roll-type)

Table 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 /°C	1050	
	Expansion ratio of outer diameter	1.28	
	Expansion ratio of inner diameter	2.18	

4. 解析結果および考察

4.1 マンドレル荷重の比較

Fig. 3 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。横軸には、全圧下量に対する割合としてストローク率を採用した。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られる。

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

4.2 ひずみの比較による解析精度の検証

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. 4 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 も内径部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、定性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再現可能であると考えられる。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証が必要である。

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. 5 に、静水圧応力の分布を Fig. 6 に示す。3 ロール型では、前述の通り、

Fig. 4 Comparison of each strain between FEM and experiment

Fig. 5 Comparison of effective strain on the RD cross section

Fig. 6 Comparison of hydrostatic stress on the RD cross section

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¹⁵⁾、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。

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 ¹⁶⁾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. 7 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張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出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. 8 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. 7 Elongation efficiency over stroke ratio

Fig. 8 Elongation efficiency over the initial r coordinate

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, 延伸効率の検証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¹³⁾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) 齊藤正之・齊藤正也: 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, **53**-613(2012), 130-134.
- 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) 中溝利尚: 山陽特殊製鋼技報, **11** (2004), 70-73.
- 15) Coupu, J., Raulin, J.L. & Huez, J.: Proc. 3rd Int. Conf. Modeling of Metal Rolling Processes, (1999), 82-89.
- 16) 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), 1833-1841.