

リングローリングの変形挙動についての数値シミュレーション

Numerical simulation of deformation behavior for ring rolling process

中崎盛彦*

Morihiko Nakasaki

Synopsis: Ring rolling is one of useful processes for bearing race production. CAE analysis is useful even for the ring rolling process to solve various problems, although the analysis requires long computational time by using Lagrangian mesh through all processes. In this study, ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) mesh was applied to 3-D CAE analysis of 2-roll type and 3-roll type ring rolling, where non-deformed area was excluded from the calculation. In the 2-roll rolling analysis, predicted velocity for rolls and rings showed good agreement with the experiment and predicted diameter growth could be explained by Hayama's equation. In the 3-roll rolling analysis, the predicted deformed shape of cross section and the predicted forward slip shape on the side of the ring showed good agreement with the experiment. Forward slipped shape in the center of ring outer caused by the difference in peripheral velocity of drive rolls was observed in 3-roll type ring rolling, the analysis also showed this phenomenon. The calculation time with the ALE mesh was half of that with the Lagrange mesh. Consequently, it was found that ALE mesh was practically useful for the CAE analysis of ring rolling processes.

Key words: cold ring rolling process; bearing steel; 3-D CAE analysis; ALE method; hot ring rolling process; 3-roll rolling

1. 緒言

リングローリングは環状部品の代表的加工方法であり、代表的な製品として各種フランジ、大型ギアブランク、ヘアリングレースなどがある¹⁾。加工温度も熱間、冷間、加工機械も2ロール、3ロールなど様々な形態がある²⁾。

リングローリングの研究としては葉山らの先駆的な研究^{3), 4)}があり、理論値として広く用いられているが、断面内の詳細なメタルフローを知ることは難しい。最近のコンピュータの発達に伴い、鍛造・圧延工程にCAE (Computer Aided Engineering) 解析を適用する例が増えている。CAE解析は、工程設計や、実機の問題解決に有用であるが、リングローリングにおいては三次元形状の環状物同士の接触離脱判定が困難であるため、これまで解析の実用化が困難であるとされてきた。しかし、近年の計算機および解析技術の発達に伴い、実用的な解析がようやく可能となりつつある^{5) ~9)}。

複雑断面形状を有するリングの解析には三次元解析の適用が必要である一方で、ラグランジュ要素を用いた三次元解析では、単純形状でも計算時間が長く、リメッシュも必要であるため、困難とされてきた。実用レベルで最も優れたモデルは部分解析モデルである^{8), 9)}。これは、2種類の

要素を使用する方法で、実行時間においてリングローリングの解析がなされ、横型リングローリングに適用されている。また、部分解析モデルの一種で計算時間の高速化を目的とした手法としてALE法 (Arbitrary Lagrangian Eulerian)¹⁰⁾があり、矩形リングへの適用が報告されている¹¹⁾。

ところで、ボールベアリング外輪の製造には2ロール型の冷間リングローリング (CRF, Cold Roll Forming) が用いられる。この方式では、リングローリング時にリング内面のボール溝肩部に微細な割れ疵が発生することがある。これらの疵の防止法として、尾崎らはマンドレル圧下率の改善による方法を提唱したが¹²⁾、このプロセスの力学的なメカニズムや、リング圧延中の各ロールとリングの変形挙動は解明されていない。

一方、3ロール型リングローリングについては、縦型では大型ベアリングの製造などに使用されている。3ロールはリング幅面の圧下力が働くため、プロフィール品の製造に有利であると言われているが¹³⁾、3ロール型リングローリングについて調査・解析を行った事例は見あたらない。特に複雑断面を有する形状の場合、鍛造上がりの断面形状がその後の成形性に大きな影響を及ぼすと考えられ、リング圧延時の応力、荷重、従動する中ロール (マンドレル)

* 研究・開発センター プロセス開発グループ、博士 (工学)

の回転数などの圧延条件、成形メカニズムを明らかにすることは有用と考えられる。

本研究では、溝付きリングの2ロール冷間リングローリング¹⁴⁾及び3ロール型リングローリングの矩形断面リング圧延¹⁵⁾に、ALE法を適用した剛塑性有限要素法を用いてCAE解析を行い、実測のリング及びロール速度や断面形状との比較を行い、その有用性を確認したので報告する。

2. 溝付きリングの2ロール冷間リングローリング

2.1 実験方法

Fig. 1にリングローリングの模式図を示す。リングは、成形ロール (Drive roll) とマンドレル (Mandrel) の間で回転しながら、板厚が減少させられる。冷間リングローリング時の変形挙動及びリング・成形ロール・マンドレルの挙動を解明するため、実機実験を行った。実験機は共栄精工 (株) 製CRF120であり、成形ロール、受けロール (Mandrel drive roll) を別々のモータで駆動できるように改造を施したものである。マンドレルは受けロールの駆動を受けて回転し、圧延荷が増大すると受けロールの駆動が外れてマンドレルがフリーで回転するような機構になっている。本実験機にて、矩形断面のリングからFig.2に示す断面を有する溝付きベアリングレース外輪を圧延した。実験の設定値をTable 1に示す。供試材は軸受鋼SUS2の球状化焼鈍材であり、リングは $\phi 65.5 \times \phi 50.5 \times 20.0$ Lのリング形状を $\phi 83.0 \times \phi 71.0 \times 20.8$ Lに圧延する工程とした。成形ロールと受けロールの回転速度及び压下速度を変更した2種類の条件で加工を行った。

リングと各ロールの周速の測定方法を以下に述べる。Fig. 3に示すように成形ロール、受けロール、マンドレル、素材リングに $\pi/3$ ラジアンごとにマーキングを施し、圧延の様子をビデオにて撮影した。ビデオのシャッター速度は1/1msの高速モードとし、静止画の画質を確保した。コマ送りで再生しながら $\pi/3$ ラジアン毎にコマ数をカウントし、原初データとした。原初データを直接周速に計算する

と値の振動が激しくなる。これは時間、角度ともに、離散的な値しか取れないために生じる誤差である。そこで、適当に進行速度を大きく取り、平滑化を行い、リング及び各ロールの圧延中の周速挙動を算出した¹²⁾。

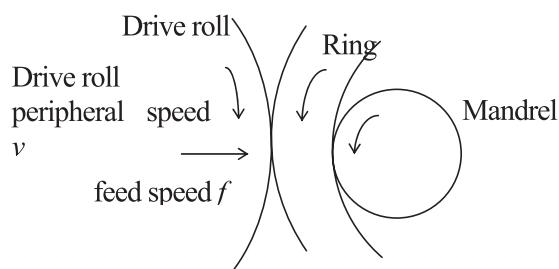


Fig. 1 2-roll type ring rolling model

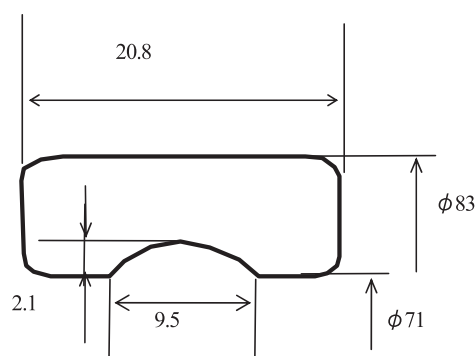


Fig. 2 Cross-section shape of cold ring-rolled ring

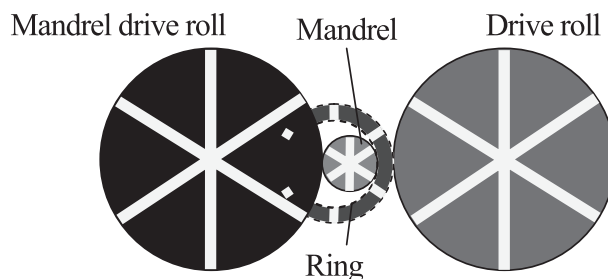


Fig. 3 Schematic diagram of cold ring rolling experiment

Table 1 Cold rolling conditions

Condition	1	2
Material	SUS2 (spheroidized annealed)	
Bearing type	6210	
Drive roll diameter /mm	$\phi 195$	
Mandrel diameter /mm	$\phi 37$	
Mandrel drive roll diameter /mm	$\phi 200$	
Angular velocity of drive roll /rad·s ⁻¹	6.28	10.47
Angular velocity of mandrel /rad·s ⁻¹	12.30	20.68
Feed speed of drive roll /mm·s ⁻¹	0.47	0.13

2.2 各ロール及びリング周速の実測値

Table 2に実験で得られた各ロール、マンドレル周速の実測平均値及び送り速度、圧延時間、圧下速度比 f/v 、平ロールの場合のマンドレル圧下率の実測値を示す。Fig. 4は条件1,2のリング及び各ロールの周速をそれぞれ比較したものである。成形ロール周速は、圧延開始から終了までほぼ一定であったが、条件1の2~4s付近など、圧延条件によっては圧延途中で低下する場合があった。一方、マンドレル周速は、圧延初期は一定速度で回転しているが、圧延半ば以降で上昇していき、終了時に一定値に収束している。これは、圧延が進むに従い、リング内径が拡大し、周速が大きくなっていくのに追従しており、2.1節で述べたマンドレルが設定値よりも大きい速度を与えられると受けロールの駆動が外れフリーになる機構により、速度上昇は降はリングから与えられた周速にて回転しているものと推定される。両条件とも加工初期においては、成形ロール周速とリング外周速がほぼ一致しているが、加工の進展に伴いリング内周速とマンドレル周速が一致するようになる。すなわち、加工初期ではリングとマンドレルの間の相対すべりが大きく、末期ではリングと成形ロールの間の相対すべりが大きい。

なお、圧延前後のリングの肉厚差を圧延時間で除して求

めた成形ロールの実測平均圧下速度 f は、無負荷時の20~35%程度であった。

2.3 解析条件

2.2節で述べた冷間リングローリング工程の三次元CAE解析を行った。リングローリングの解析には、HP社のワークステーション (CPU:Xeon 3.00GHz、メモリ:3GB) を、解析コードはDEFORM 3D™ Ver6.1をそれぞれ用いた。要素は8節点六面体要素を用い、一定値以下のひずみ速度では変形体と見なさない、ALE法の一種を使用しているソルバーを用いた。

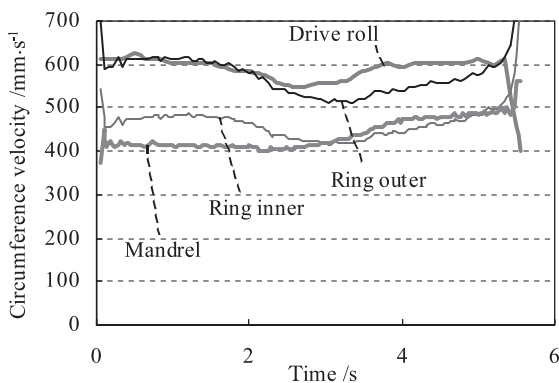
要素分割法にはLagrange (材料固定) 要素とEuler (空間固定) 要素とがある。Fig. 5にその違いを示す。Lagrange要素は変形解析には最も一般的に用いられる方法で、変形体や工具そのものを要素で分割する方法であり、メタルフローなどの外形形状も良く再現できる。しかしリングローリングの場合、リング全周のうちほんの一部であるロールバイト下のみが変形するので、変形に寄与しない要素が大部分を占めるが、全体をLanrange要素で分割すると、それらの要素でも全て収束計算を行うため、計算時間が冗長になる。また、ロールバイト下のみを細かくしようとしてロールバイト下を詳細分割すると、詳細分割した部分が通過するとまた次の場所を詳細分割せねばならず、リメッシュが頻繁になる。すると、リメッシュの追加による計算時間の増大のみならず、変形の詳細な情報がリメッシュで消滅してしまう問題があった。

一方、Euler要素は流体解析でよく用いられる方法で、要素自体ではなく、変形の起こる空間を要素分割する方法である。変形解析においても要素自体は変形しないのでリメッシュは不要であり、従って計算時間が短い。材料の自由表面部分に要素が定義されておらず、その変形が不明

Table 2 Measurement of cold ring rolling conditions

Condition	1	2
Feed speed of drive roll (measured) /mm·s ⁻¹	0.35	0.13
Angular velocity of drive roll /rad·s ⁻¹	5.8	10.2
Peripheral speed of drive roll /mm·s ⁻¹	563.0	993.0
Angular velocity of mandrel /rad·s ⁻¹	21.8	37.2
Peripheral speed of mandrel /mm·s ⁻¹	436.5	743.3
Ring revolution number	13.8	70.7
Rolling time /s	5.6	15.2
f/v value $\times 10^{-4}$	9.4	2.1
Mandrel reduction ratio /%	33.8	44.8

(a) Condition 1



(b) Condition 2

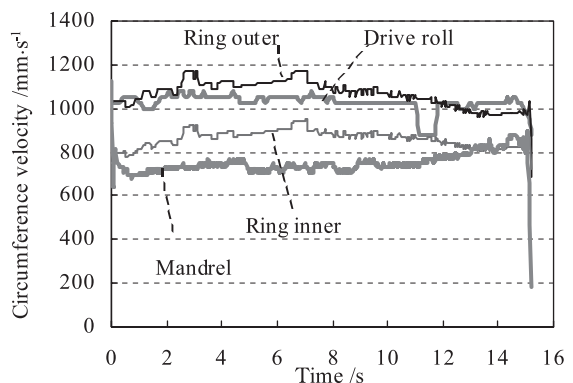


Fig.4 Transition of the peripheral speed

隙になることがある。

ALE法は双方の長所を用いる手法で、ロールバイト下をLagrange要素、それ以外をEuler要素としている。これにより、Lagrange要素のような詳細分割やリメッシュが不要になり、計算時間の短縮が期待される。一方、全面Lagrange要素で解析した時のようにロールや材料が実際の変形に追従して回転するわけではなく、材料の特定点を追跡するポイントトラッキングの手法は使えないので、材料データの取り出しに手間が必要となる。これについては、第3章の3ロール圧延にて取り組みを行ったので後述する。

Table 3にCAE解析条件を示す。成形ロールの回転数はTable 2の実測値から計算し、送り速度は圧延所要時間が実測値と合致するように決定した。周速とロール圧下速度の組み合わせを変更した2条件の解析を行った。また、実機ではマンデルは初期に受けロールの回転を受けて回転し、途中からリングの速度に追従して回転するが、解析上では最初からマンデルをフリー（従動、アイドル）で回転、すなわちトルク0であると定義して計算を行った。加工中は圧下速度一定とし、ロールバイト下の肉厚が所定の値（平坦部で6mm）となったところでマンデル圧下速度を0にして1回転させ、板厚を円周方向にわたって一様とする仕上げ加工する計算を行った。解析結果と実測結果で各ロールの角速度、変形形状を比較した。

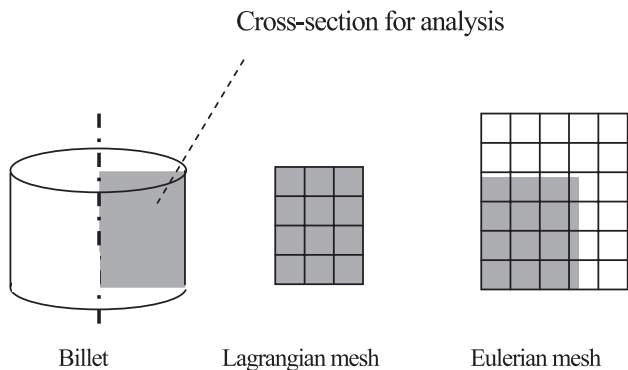


Fig.5 Lagrangian mesh and Eulerian mesh

Table 3 CAE analysis conditions of cold ring rolling

Condition	1	2
Angular velocity of drive roll /rad·s ⁻¹	5.77	10.18
Feed velocity /mm·s ⁻¹	1.010	0.369
Mandrel control	Torque 0	
Ring size	φ 65.5 × φ 50.5 × 20.0L	
Friction factor	m _f =0.4	
Flow stress /MPa	AISI52100 cold	
Mesh	Brick mesh	

2.4 ロール及びリング角速度の解析と実測の比較

冷間リングローリング2条件の解析にALE法を適用した結果、解析時間は、短時間の条件1で約10時間、長時間の条件2で約30時間であった。これは、第3章で後述する3ロールリングローリングをDEFORMのLagrange要素で計算した結果（約3日）より短くなっている。このことから、本手法によって実用的な計算時間で解析が可能であることが明らかとなった。

CAE解析により各ロール及びリング周速を調査した。圧延初期において、条件1では1s、条件2では3sほど角速度が安定しない時期があることがわかった。これは、成形ロールとリング、リングとマンデルの接触点が少ないため、十分な摩擦力が作用せず、回転が安定しないと推定される。実測でも同様の現象が見られるため、実測においてはマンデルが安定した回転を始めた時点を押延開始時点とした。解析においては、リングを条件1で2回転、条件2で1回転を捨てて回転とし、リング1回転あたりの時間がほぼ等間隔になる時点を安定回転開始とし、安定回転を始めた後の結果で比較を行った。

成形ロールの角速度については、設定値通りTable 2の周速平均値一定で回転していることが確認され、実測で見られたような一時的な周速の低下は見られなかった。次に、マンデル角速度の推移をFig. 6に示す。速度の与え方が実機と異なるにも関わらず、安定回転を始めた後のマンデル角速度は実測値とほぼ同等であり、また圧延途中で角速度が上昇する様子など、実機とよく傾向が一致することがわかった。

次に、リング角速度の推移をFig. 7に示す。リングの角速度は圧延初期で高く、途中から減少傾向となることがFig.4の実測値でも観察されたが、解析結果においても同様の現象を示した。これは、圧延速度の増大よりも、リング径の拡大による見かけ上の角速度の減少が大きいためと考えられる。

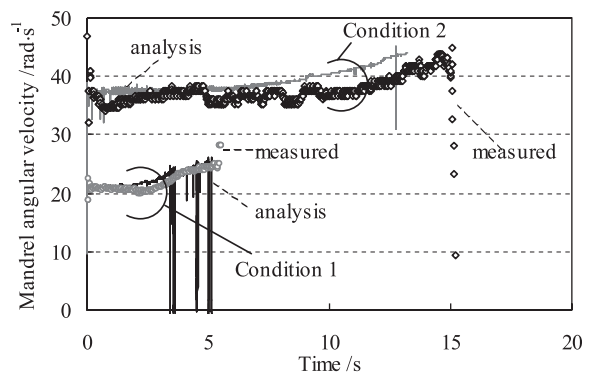


Fig.6 Comparison of mandrel angular velocity between measured value and analysis

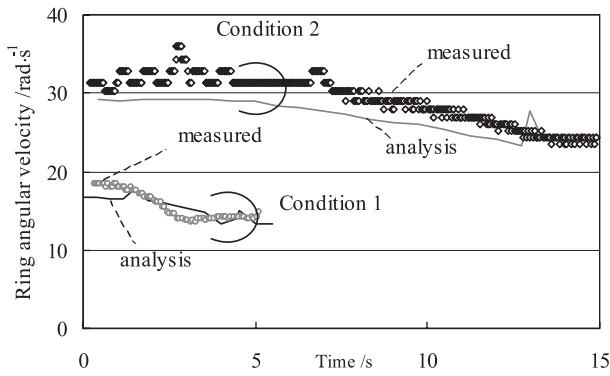


Fig.7 Comparison of ring angular velocity between measured value and analysis

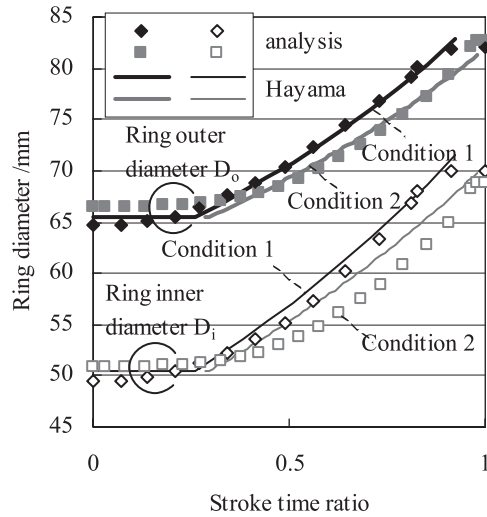


Fig.8 Ring diameter behavior of ring rolling

2.5 リングの拡径挙動

リングローリングにおいて、リングの1回転あたりの拡径度合いは、圧延を制御する重要なパラメータである。一般に、リングの拡径を一定にすることで圧延が安定と言われており、その制御を行っている報告もある¹⁶⁾。そこで、本圧延におけるリングの拡径挙動について調査を行った。Fig. 8に圧延中の外径、内径と肉厚の推移を、矩形断面と仮定した場合の葉山らの計算法³⁾による結果も合わせて示す。横軸のStroke time ratioは、全体を1として、両条件を比較するために変形時間を規格化したものである。図中、解析結果の1つの点は条件1で1回転毎、条件2で3回転毎の結果を表している。初期の拡径は緩やかであり、途中から拡径度合いが大きくなる。拡径度合いが低い初期は圧延材がロールの型に沿って変形し、なじんでいく段階である。実測でもこの段階ではリング周速が徐々に増加して成形ロールの速度に近づいていく段階であり、このことを裏付けている。中期の段階は拡径度合いが大きくなる段階で、放物線則に近い径成長が見られた。計算結果は外径については上記の葉山の式による結果と精度良く一致しているが、内径はややずれることがわかった。これは、葉山の式が矩形断面リングを想定したものであるためであると考えられる。すなわち、圧下率が同じ場合、本実験での排除面積は矩形リングの場合に比べて小さいため、径が小さいことに対応する。

以上の結果、冷間リングローリングの有限要素解析結果は実機と良く一致しており、ALE法を用いた有限要素法解析により冷間リングローリングの変形挙動を再現できることが明らかとなった。

3. 矩形断面リングの3ロール熱間リングローリング

3.1 実験方法

実験を行った3ロール型熱間リングローリング機の模式図をFig. 9に示す。この形式は一般に齊藤式主ロール2枚式リングローリング機と呼ばれている^{17) 18)}。回転する2枚の主ロールとトルクフリーのマンドレルの間に材料を挟み、マンドレルを押しつけて圧延を行う。主ロールを2個有し、傾斜角を持っているため、リング幅方向にスラスト荷重が掛かり、プロフィール品の製造に有利であるとされているが¹³⁾、ロール形態の変形への寄与については必ずしも明らかにされていない。

Fig. 10に熱間リングの製造工程を示す。ピレットを加熱し、据込み、成形、中抜き等の3段鍛造を行い、得られた鍛造素材をリングローリングにて加工する。なお、リングローリング前の素材リングは鍛造時の抜きテーパなどを有するため、完全な矩形断面ではない。 $\phi 187 \times \phi 75 \times 42L$ の矩形断面リングを $\phi 234 \times \phi 170 \times 42L$ に圧延する工程を対象として、2種類の実験を行った。第一に、圧延途中止めした試験片の断面変形形状の調査、第二に、鍛造にて製造したローリング前リングを空冷後、外表面及び側面に旋削痕を付けた後、この試験片をバッチ炉にて再加熱してリングローリングを行うことにより、表面のメタルフローの挙動を観察した。Table 4に実験条件を示す。主ロール軸の傾斜角 θ は 20° とした。圧延中のロール圧下速度については、実験時の圧延時間で除し平均速度を 6.8mm/s と推定した。

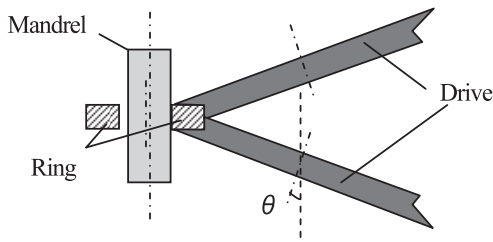


Fig.9 Schematic diagram of 3-roll-type ring rolling experiment

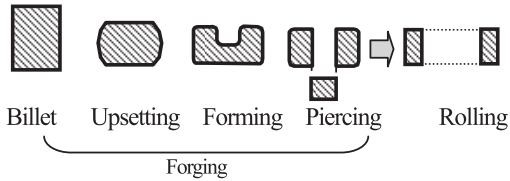


Fig.10 Process of ring production

Table 4 3-roll type ring rolling conditions

Material	S45C
Temperature /°C	1000
Drive roll diameter /mm	φ 370
Mandrel diameter /mm	φ 72
Drive roll axis gradient angle θ /deg.	20
Angular velocity of drive roll /rad·s ⁻¹	12.5

3.2 CAE解析条件

CAE解析には第2章と同様DEFORM 3D™にALE法を用いた3ロール型リングローリング解析モジュールを付加したものをを用いて解析を行った。CAE解析条件をTable 5に示す。摩擦係数は熱間でよく用いられるせん断摩擦係数 $m=0.7$ を用い、材質はS45C、温度は1000℃一定とした。主ロールの角速度は実測の $\omega_{WR}=12.5\text{rad/s}$ とし、マンドレルについては、実機と同じトルク0の条件とした。

次に、表面メタルフローの追跡方法について述べる。一般的なLagrange要素を用いた解析では、設定した節点の追跡によるメタルフローの調査が可能であるが¹⁹⁾、ALE法の場合、流線の計算を行っているため固定部位の追跡は困難である。そこで、ALE法の変形挙動の追跡については、以下に示す方法で節点追跡を行った。すなわち、リングはロールバイト下を除いて角速度一定で回転していると考えられるので、ロールバイト直下での圧延による周方向速度の微小な変化を積算していけば、周方向への先進形状を取得できると考えられる。そこで、ロールバイト下における1回転毎の節点座標を採取し、周方向速度から周方向に垂直な断面の座標変化を計算し、この座標変化の累積値をロールバイト下での先進形状とした。

Table 5 CAE analysis conditions

Mandrel torque	ALE 0
Friction coefficient	$m=0.7$ (Shear)
Feed speed of mandrel /mm·s ⁻¹	$v=4.5, 6.0$
Mesh type	8-node brick mesh
Number of elements	12000
Number of calculation steps	4000~7000

3.3 実験及び解析結果

3.3.1 矩形断面リングの拡張挙動と断面形状

まず、矩形断面リングの途中止め断面との比較を行った。実験ではリングを途中止めしたが、その際機械の負担を考えて、圧下のみを途中でストップさせたため、圧下中断後もリングは回転し、実機のリングは途中止め材でも周方向で肉厚が均一となった。一方、解析ではかみ止め時のままであり、周方向に肉厚分布が存在したままである。そこで、解析と実験の比較においては、リングの外径が一致する場所ではなく、リング肉厚が一致する場所でデータを採取し、実験と比較を行った。結果をFig. 11に示す。2種類の途中止め形状において、肉厚はそれぞれ52.1mm、44.8mmとなった。ALE法による断面形状は、肉厚44.8mmの条件においては、マンドレル側角部の充填において解析が実験より若干早いなどの違いはあるが、その他の部分については断面形状は解析と実験は良く一致していると考えられる。

次に、拡張挙動について比較を行った。第2章で述べた2ロールリング圧延の拡張挙動と葉山らのエネルギー法による拡張挙動⁴⁾は良く一致し、精度は高い。今回、同様に解析結果から求めた内径 d_i と外径 d_o について比較した結果をFig. 12に示す。肉厚で整理すると、ALE法の解析結果は実験値と良く一致することがわかった。一方、葉山の式の拡張挙動とは一致しないことがわかった。これは、2ロールと3ロールで断面内の変形挙動が異なるためと考えられる。解析結果は実測結果と良く一致したことから、3ロール型リングローリングの解析にはALE法が好適であると考えられる。

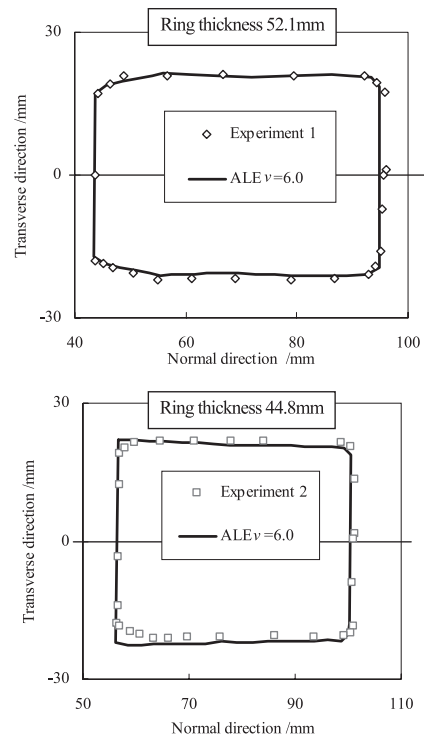


Fig.11 Comparison of ring-rolled cross-section shape between experiment and analysis

3.3.2 矩形断面リングの荷重と先進形状

リング圧延時の荷重推移をFig. 13に示す。実測速度に近い $v=6.0\text{mm/s}$ の場合、荷重は実測最大値に近いが、 $v=4.5\text{mm/s}$ ではやや荷重が低い結果となった。これは、変形抵抗の速度依存性によるものと推定され、本手法は荷重でも実測に近いと考えられる。

次に、旋削痕付きリングの実機実験による先進形状と解析との比較を行った。Fig. 14にリング側面の先進形状を示す。解析と実験では形状が良く一致し、リング圧延の場合はロール間隙形状比（接触長さ／平均板厚）が小さいスキンプラス圧延に近い先進形状を示すことが確認された。

また、外表面における旋削痕形状も比較した。Fig. 15にその結果を示す。リング幅中央部が先進している様子が解析でも再現された。リング幅中央部が先進するのは、この3ロール型リングローリングでは主ロール2個が傾斜配置されているため、主ロールの周速が材料の幅中央部で速く、端になるにつれて遅くなるためと考えられる。

以上のように、ALE法からロールバイト下のデータのみを抽出し節点座標を追跡して得た側面・外表面の変形挙動は、実験結果と良く一致することが確認された。

3.4 解析所要時間

矩形断面リングの圧延において、Lagrange要素の場合3日を要したが、今回の解析では約30時間と、半分に短縮された。精度も十分であることから、ALE法を用いる有限要素解析手法が3ロール型リングローリングの実用的な解析に有用であることがわかった。

4. 結言

溝付き冷間2ロールリングローリング及び矩形断面熱間3ロールリングローリングの実機実験及びALE法を用いた有限要素解析を実施し、以下の知見を得た。

- (1) 溝付き冷間2ロールリングローリングの変形解析にALE法を適用した結果、実用時間内で解析が可能であった。また、成形ロール、マンドレルとリングの周速の変化は実測値と解析で良く一致した。
- (2) 2ロールリングローリングの有限要素解析と葉山の理論によるリングの径変化は良く一致した。
- (3) 矩形断面リングの熱間3ロールリングローリングにおけるリングの断面形状、外径の拡張挙動及び荷重について、ALE法を用いた解析と実験結果が良く一致することがわかった。
- (4) ロールバイト下の速度データから外径形状変形挙動を可視化した。計算された周方向に垂直な側面、外

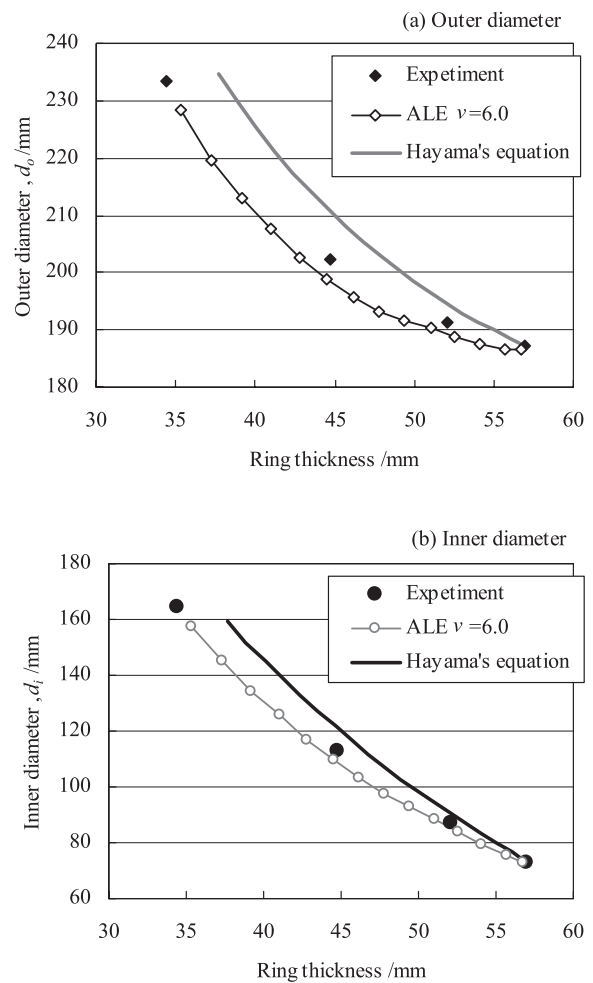


Fig.12 Ring diameter change during three-roll-type ring rolling

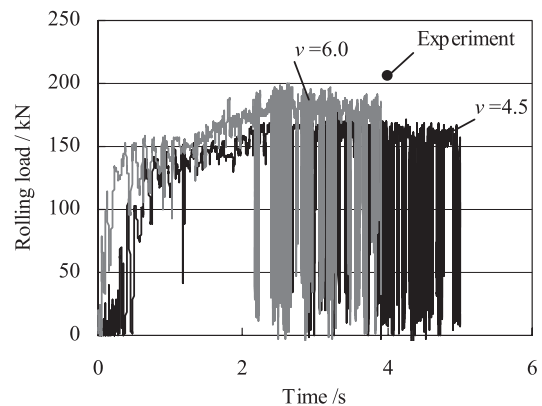


Fig.13 Transition of load in three-roll-type ring rolling (Mandrel)

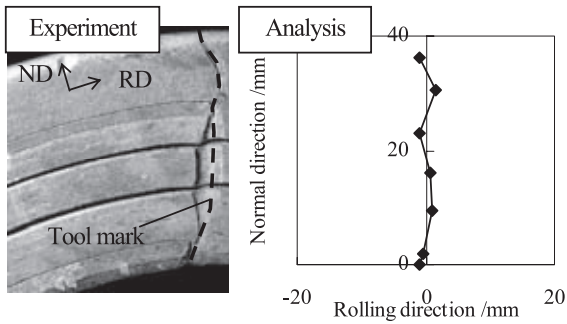


Fig.14 Forward slip shape of three-roll-type ring rolling (side)

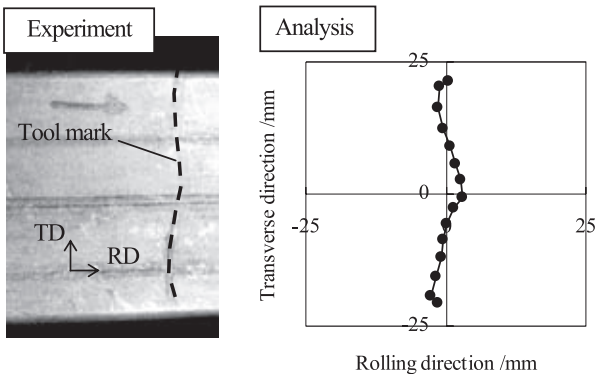


Fig.15 Forward slip shape of 3-roll ring type ring rolling (Ring outer)

表面の先進形状は実機と良く一致することがわかった。

(5) ALE法の適用により、矩形断面リングでは3日→30時間と、大幅な計算時間短縮効果が得られた。

以上の結果、ALE法によるリングローリング解析結果は2ロール,3ロール問わず実機と良く一致しており、ALE法を用いた有限要素法解析により冷間リングローリングの変形挙動を再現でき、かつ計算時間も短縮されることがわかった。

参考文献

- 1) 日本塑性加工学会編：回転加工，(1990)，106-127,コロナ社.
- 2) Allwood J., Tekkaya A.E. & Stanistreet, T.F.: Steel Res. Int., **76** (2005)，111-120.
- 3) 葉山益次郎・大島勉：塑性と加工，**22-240** (1981)，71-79.
- 4) 葉山益次郎：同上，**22-246** (1981)，717-724.
- 5) Utsunomiya, H., Saito, Y., Shinoda, T. & Takasu, I.: J. Mater. Process. Technol., **125-126**

- (2002)，613-618.
- 6) 海老原治・好井健司・松尾直哉・森謙一郎：49回塑加連講論，(1998)，417-418.
- 7) 豊島史郎：平3塑加春講論，(1991)，603-606.
- 8) Hu Z.M., Pillinger I., Hartely P., McKenzie S., Spence P.J.: J.Mater. Process. Tech., **45** (1994)，143-148.
- 9) 瀧沢英男：51回塑加連講論，(2000)，283-284.
- 10) 日本塑性加工学会：静的解法FEM-バルク加工，(2003)，78-98, コロナ社.
- 11) Davey K. & Ward M.J.: Int. J. Numer. Methods Eng., **47** (2000)，1997-2018.
- 12) 尾崎勝彦・野方一勲：山陽特殊製鋼技報，**1** (1994)，42-47.
- 13) 斎藤正之・斎藤正也：特願昭34-7408 (1959) .
- 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・高須一郎・宇都宮裕：塑性と加工,投稿中
- 16) 加藤高明・荒井隆・谷口一男・渡戸貢朔・浦田英三：機論C, **57-539** (1991)，105-110.
- 17) 中小企業総合事業団：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，(2000)
- 18) 中溝利尚：山陽特殊製鋼技報，**11** (20094)，70-73.
- 19) 笠井貴之・雲丹亀泰和・高須一郎・林亮二・北出真一：山陽特殊製鋼技報，**10** (2003)，29-34.

■ 著者



中崎 盛彦