

# 型材圧延の変形・負荷特性に関する研究 II ——剛塑性 FEM によるアングル材圧延の三次元解析 2——

Characterization of Angle Rolling by Three-Dimensional FEM II

柳 本 潤\*・木 内 学\*, 柴 田 一 良\*  
Jun YANAGIMOTO, Manabu KIUCHI and Kazuyoshi SHIBATA

## 1. はじめに

型材の圧延において用いられる孔型は、一般に複雑かつ上下・左右非対称であり、被圧延材には複雑な三次元変形が生じる。そのため型材の圧延に際して被圧延材に生ずる三次元変形の理論解析は困難であり、このことが孔型設計の高度化・高効率化に対する大きな障害となってきた。この分野については、有限要素エネルギー法<sup>1)</sup>、複合数値解析法<sup>2),3)</sup>などの近似三次元解析手法の適用が試みられてきたが、いずれの手法も精度もしくは適用範囲などについての限界により、孔型設計の場に広く活用されるには至っていない。また、三次元剛塑性有限要素法の型材圧延への適用は、従来ほとんど行われていないのが現状である。

筆者らは、板材および棒線材圧延の際に生ずる三次元塑性変形の統一的な解明を可能とする解析システム CORMILL (Computational Rolling Mill) System を開発し、薄板材<sup>4)</sup>・棒線材圧延<sup>5),6)</sup>を対象とし、三次元塑性変形の統一的な検討を行って来た。前報<sup>7)</sup>においては、CORMILL System をアングル圧延に適用し、上下/左右非対称な変形を呈する型材圧延の三次元理論解析の可能性を示したが、接触解析に関して未解決の問題が残されていたため、広い圧延条件範囲につき定常解を求めることには若干困難があった。

本報では、接触解析法に検討を加えた結果、広い圧延条件範囲につき定常解を求めることに成功した。

## 2. 解析手法

以後幅方向を x-, 厚さ方向を y-, 圧延方向を z-軸とする。

### 2.1 前報にて用いた接触解析法

圧延加工の定常三次元剛塑性 FEM 解析においては、定常状態を満足するロールとの接触領域分布を繰り返し計算により求める必要があり、この接触解析の成否が、

\*東京大学生産技術研究所 第2部

解析精度に大きく影響を及ぼす。前報<sup>7)</sup>にて行ったアングル材圧延の解析では、**図1**のフローチャートのように予変形域の速度を仮定しつつ擬定常解を求め、これを初期値として定常解を求めた。しかし、この方法では二段階の解析を行う必要があるため、定常解を得るために多くの計算時間が必要であり、また予変形域において、大きな曲げ変形を伴う条件では、擬定常解を求める際に仮定すべき予変形域での速度分布を定めることそのものが難しく、定常状態を満足する上下ロールとの接触領域を広範囲な圧延条件にわたり求めることがきわめて困難であった。

### 2.2 解析手法の考え方

型材の圧延における被圧延材は、多くの場合予変形域での曲げ・ロールパイト内での圧下という複合変形をうける。前報<sup>7)</sup>にて指摘したとおり、上下ロールとの接触領域と、予変形域での速度分布は大きく影響しあうために、定常解を得る過程において何れかを安定化させるための操作が必要となる。解析手法の考え方を**図2**に示す前報<sup>7)</sup>では予変形域での速度分布を安定化させるために予変形域の速度を  $\dot{u}_x = 0, \dot{u}_y = 0$  とし強制的に予変形域の変形を安定化させる手法につき検討を加えた。

本報では上下ロールとの接触領域を安定化させるためにロールと被圧延材との幾何学的不適合量の補正を行った。また、できるだけ予変形域の変形が安定するように、

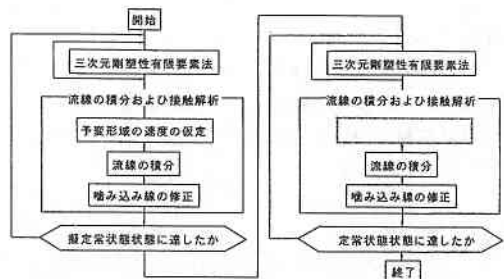


図1 前報のフローチャート

予変形域の圧延方向要素長さを短くすることを合わせて行った。

2.3 拡張内容

図3に本報において用いた解析のフローチャートを示す。図3に示すとおり接触解析においては、まず三次元剛塑性FEM解析で得られた速度場により流線を積分・修正するが、その結果として、図4の破線のように流線上の各節点の座標はロール表面位置との幾何学的適合条件を満足しなくなり、被圧延材とロールとが重なりあったり、空隙が生じたりする。このようにして生じるロールと被圧延材との幾何学的不適合を補正する方法としては、山田<sup>8)</sup>により圧延方向に節点を移動する方法が提案されているが、本報で対象とする上下非対称圧延においては、上下ロールについての不適合量に差があり、かつその幅方向分布に差が大きいため、この方法を直接用

いることはできない。そこで、図4に示すように節点のxy座標を幅・厚み方向断面内においてロール法線方向に移動させ、幾何学的不適合を幅・厚さ方向に補正した。また内部流線を上下ロール補正量の厚み方向座標値で比例配分した量だけ移動し、ロールと被圧延材との幾何学的不適合量の補正による内部流線の片寄りを防いだ。以上のような補正部分を新たに追加した。その後噛み込み線の修正を従来と同様に行っている。上記の修正を行った結果、予変形域の速度を仮定することなく、広範囲な圧延条件にわたり定常状態を満足する上下ロールとの接触領域分布・三次元変形形状を得ることが可能となった。なお、変形域入口面における圧延方向横断面内の節点座標の定め方については前報<sup>7)</sup>を、剛塑性FEM解析の詳細については別報<sup>6)</sup>を参照されたい。

3. 解析条件

解析手法拡張の効果の確認として、本報ではアングルの粗圧延と仕上げ圧延を対象とし、前報<sup>7)</sup>にて用いた解析手法では困難であった大きな曲げ変形を伴う条件での解析を行った。表1に解析条件、図5にロール孔型形状ならびに寸法を、図6に被圧延材の寸法を示す。ここで $\Delta t_1 \cdot \Delta t_2$ は図7のように、変形域入口面における圧延方向横断面を前報と同様、被圧延材の上下表面上の節点がある圧延方向位置において、それぞれ上下ロールに同時に接触する位置に定めた時の板幅方向中央の圧下量を示す。(空隙の場合は負の値で示す、図7で $\Delta t_1 < 0 \cdot \Delta t_2 > 0$ )

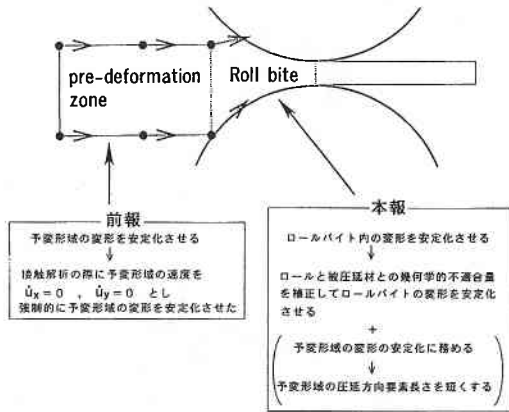


図2 解析手法の考え方

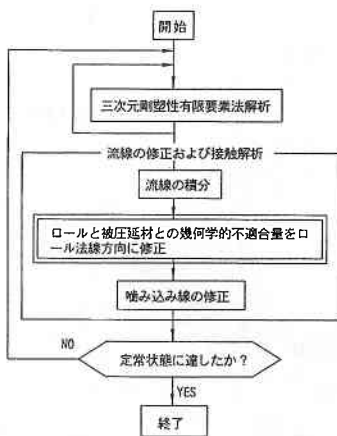


図3 本報のフローチャート

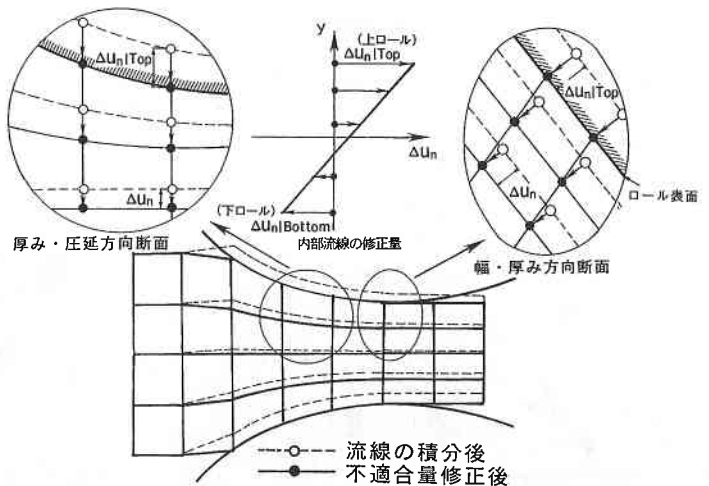


図4 流線不適合量の修正方法

研 究 速 報

4. 解 析 結 果

4-1 三 次 元 変 形 形 状

図 8, 図 9 に粗圧延・仕上げ圧延それぞれ上下から見

た三次元変形形状を示す. 図中陰付部は接触領域, 太線は中立線である. 本条件のごとく曲げ変形を伴う圧延で

表 1 解析条件

ロール回転数 N [rpm]	150
変形抵抗式 [kgf/mm <sup>2</sup> ]	$\bar{\sigma} = 4.5(1+2\bar{\epsilon})^{0.21} \bar{\epsilon}^{0.31}$
まさつ係数	$\mu = 0.25$
前後方張力 [kgf/mm <sup>2</sup> ]	$T_0 = T_1 = 0.0$
FEM要素分割数 (NX/NY/NZ)	粗圧延 9/4/(2+4+2) 仕上げ圧延 9/4/(2+8+2)
定常判別条件 (噛み込み線の 最大節点移動量/最大接触円弧長)	粗圧延 $\leq 0.01$ 仕上げ圧延 $\leq 0.03$

粗 圧 延

$D_1 : 650\text{mm}$	$R_1 : 36\text{mm}$
$b_1 : 100\text{mm}$	$R_2 : 20\text{mm}$
$t_1 : 16\text{mm}$	$\theta_1 : 140\text{deg.}$
$h_1 : 17\text{mm}$	

仕 上 げ 圧 延

$D_2 : 650\text{mm}$	$h_2 : 21\text{mm}$
$b_2 : 80\text{mm}$	$R_3 : 6.5\text{mm}$
$t_2 : 6\text{mm}$	$\theta_2 : 90\text{deg.}$

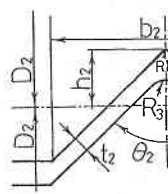
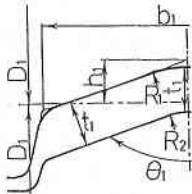


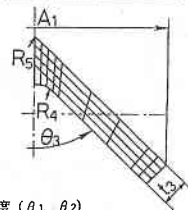
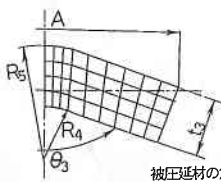
図 5 解析孔型形状・寸法

粗 圧 延

$\theta_3$	180
$A_1$	84.2
$t_3$	20.0
$R_4$	-
$R_5$	-
$\Delta t_1$	-4.56
$\Delta t_2$	8.56
中央圧下率	0.223

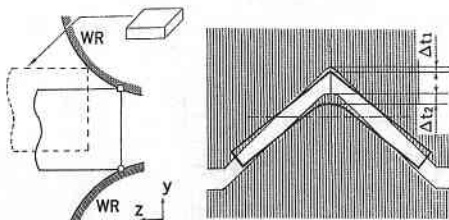
仕 上 げ 圧 延

$\theta_3$	100
$A_1$	76.6
$t_3$	7.5
$R_4$	11.5
$R_5$	1.0
$\Delta t_1$	-2.03
$\Delta t_2$	4.13
中央圧下率	0.178



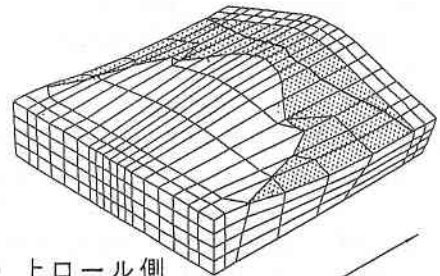
被圧延材の角度:  $\theta_3$   
曲げ角度:  $\theta_3$ -孔型角度 ( $\theta_1, \theta_2$ )

図 6 被圧延材の寸法

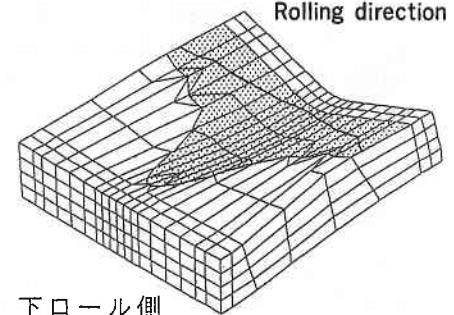


入り側高さの設定方法

図 7 幅方向中央圧下量 ( $\Delta t_1, \Delta t_2$ )

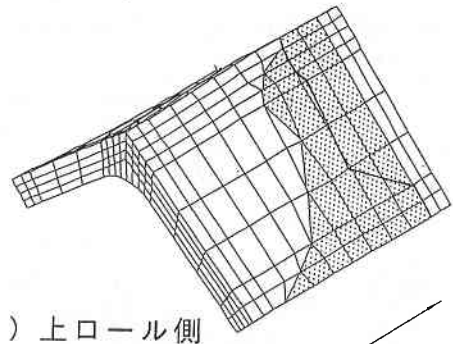


(a) 上ロール側

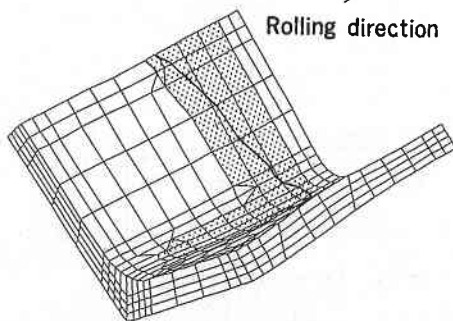


(b) 下ロール側

図 8 粗圧延の三次元変形形状 (被圧延材の頂角角度180°)



(a) 上ロール側



(b) 下ロール側

図 9 仕上げ圧延の三次元変形形状 (被圧延材の頂角角度100°)

研究速報  
 は上下ロールの接触開始位置が大きく異なっていること、中立線の位置が幅方向に大きく変化していることがわかる。中立線の位置は、ロール径が小さい箇所（上ロール

頂角部、下ロールエッジ部）においては入側に、ロール径が大きい箇所（上ロールエッジ部、下ロール頂角部）では出側にずれており、妥当な結果であると考えられる。

4.2 面圧分布

図10, 図11に粗圧延・仕上げ圧延それぞれについて、ロール法線方向の応力分布（面圧分布）を示す。陰をつけてある領域は粗圧延では $12\text{kgf/mm}^2$  (118MPa) 以上、仕上げ圧延では $15\text{kgf/mm}^2$  (147MPa) 以上の範囲である。粗圧延・仕上げ圧延の場合とも、上ロール側頂角部での面圧値が若干低下しているが、これは上下ロールにより圧下される前におこる曲げ変形により、この部分の厚さが減少していることに起因している。また、粗圧延では曲げ変形の領域（上ロール面コバ部の接触開始付近、下ロール面頂角部の接触開始付近）の面圧が増加しているのに対して、仕上げ圧延では曲げ変形の領域での面圧の増加が認められない。これは仕上げ圧延で曲げ変形に必要な荷重が圧下変形に必要な荷重に比べ小さいためである。

5. ま と め

本報では CORMILL System の接触解析法に検討を加えることにより、今まで解析が困難であった曲げ・圧下の複合変形を伴うアングル材圧延のような事例を解析可能とし、アングル材圧延の粗圧延と仕上げ圧延を対象に曲げ角度の大きな条件で確認のための解析を行った。

その内容を以下にまとめる。

1. ロールと被圧延材との幾何学的不適合を幅・厚さ方向に補正し、内部流線を幾何学的不適合の補正量により移動することにより、予変形域の速度を仮定することなく、広範囲な圧延条件において定常解を得ることが可能となった。

今後は、形材圧延の際に生ずる曲げ・圧下複合変形につき、基本的な変形・負荷特性について検討を行う予定である。

今回の解析には、NSSUN-SP2 (28.5MIPS, 4.2MFLOPS) を使用し、計算時間は粗圧延 1 条件あたり約 2 ~ 3 時間であった。 (1993年3月15日受理)

参 考 文 献

- 1) 小森ほか：機論 A, 52-479 (1985), 1724.
- 2) 木内ほか：塑性と加工, 30-336 (1989), 19.
- 3) 木内ほか：昭63春塑加講論, (1988), 447.
- 4) 佐々木ほか：平 3 春塑加講論, (1991), 157.
- 5) 柳本：生産研究, 43-11 (1991), 512.
- 6) 柳本ほか：42回塑加連講論, (1991), 413.
- 7) 柳本ほか：平 4 春塑加講論, (1992), 516.
- 8) 山田ほか：41回塑加連講論, (1990), 201.

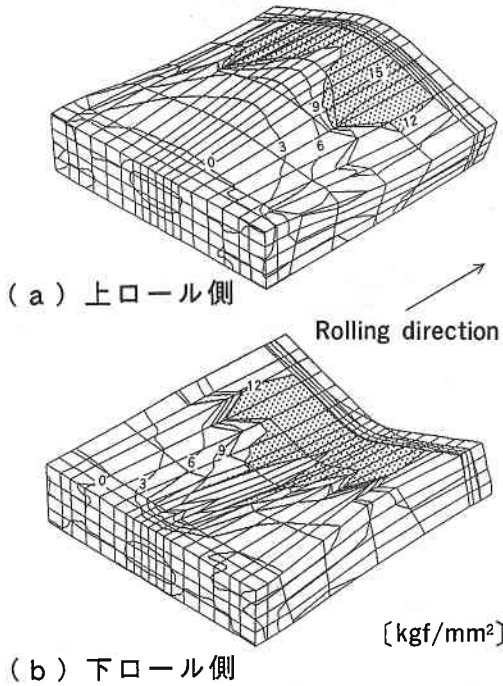


図10 粗圧延の面圧分布 (被圧延材の頂角角度 $180^\circ$ )

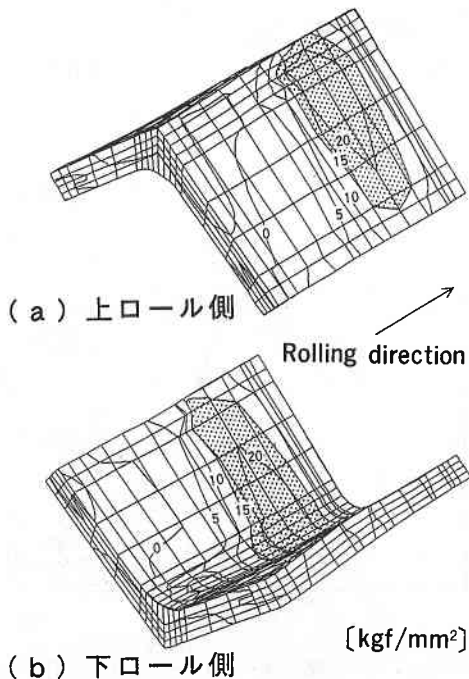


図11 仕上げ圧延の面圧分布 (被圧延材の頂角角度 $100^\circ$ )