

# 型材圧延の変形・負荷特性に関する研究 Ⅲ

## —剛塑性 FEM によるアングル材圧延の三次元解析 3—

Characterization of Angle Rolling by Three-Dimensional FEM Ⅲ

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

### 1. は じ め に

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>1)</sup>・棒線材圧延<sup>2),3)</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。既報<sup>4)</sup>においては、CORMILL System をアングル圧延に適用し、予変形域の速度を仮定しつつ擬定常解を求め、この擬定常解を初期値として定常解を求めることにより上下/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。

前報<sup>5)</sup>では既報<sup>4)</sup>の未解決の問題であった接触解析に検討を加え、流線積分後のロールと被圧延材との幾何学的不適合量を幅・厚さ方向に補正する部分を追加することにより広い圧延条件範囲について定常解を求めることが可能となった。

本報では、前報<sup>5)</sup>の解析手法を用い、アングル材圧延の粗圧延・仕上げ圧延を対象事例とし、曲げ/圧下複合変形を呈する圧延加工の変形・負荷特性につき基礎的な検討を行った結果を示す。なお、剛塑性 FEM の詳細については別報<sup>2)</sup>を参照されたい。

### 2. 解 析 手 法

本報では前報と同じ解析手法を用いて解析を行った。以後幅方向を x-, 厚さ方向を y-, 圧延方向を z-軸とする。

### 3. 解 析 条 件

本報ではアングルの粗圧延と仕上げ圧延を対象とし、それぞれ同じ孔型を用いつつ圧延前被圧延材の頂角角度を変化させた場合についての解析を行った。表 1 に解析

条件を、図 1 にロール孔型形状ならびに寸法を、図 2 に被圧延材の寸法を示す。ここで、 $\Delta t_1$ ,  $\Delta t_2$  は板幅方向中央の圧下量を示しており、また、被圧延材辺長さについては、粗圧延で厚さ方向中央での辺長さを、仕上げ圧

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/最大接触円張長)	粗圧延 $\leq 0.01$ 仕上げ圧延 $\leq 0.03$

粗 圧 延		仕 上 げ 圧 延	
D <sub>1</sub> : 650mm	R <sub>1</sub> : 36mm	D <sub>2</sub> : 650mm	h <sub>2</sub> : 21mm
b <sub>1</sub> : 100mm	R <sub>2</sub> : 20mm	b <sub>2</sub> : 80mm	R <sub>3</sub> : 6.5mm
t <sub>1</sub> : 16mm	$\theta_1$ : 140deg.	t <sub>2</sub> : 6mm	$\theta_2$ : 90deg.
h <sub>1</sub> : 17mm			

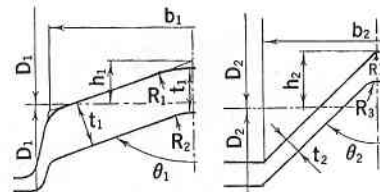


図 1 ロール孔型形状

粗圧延					仕上げ圧延			
$\theta_3$	140	150	160	180	$\theta_3$	90	95	100
A <sub>1</sub>	73.2	76.6	80.4	84.2	A <sub>1</sub>	70.4	73.8	76.6
t <sub>a</sub>	20	20	20	20	t	7.5	7.5	7.5
R <sub>4</sub>	20	20	20	-	R <sub>4</sub>	6.5	9.0	11.5
R <sub>5</sub>	36	36	36	-	R <sub>5</sub>	1.0	1.0	1.0
$\Delta t_1$	2.16	0.23	-1.33	-4.56	$\Delta t_1$	1.07	-0.54	-2.03
$\Delta t_2$	2.18	3.76	5.33	8.56	$\Delta t_2$	1.03	2.63	4.13
中央圧下率	0.223	0.223	0.223	0.223	中央圧下率	0.178	0.178	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 2 被圧延材形状

\*東京大学生産技術研究所 第 2 部

研 究 速 報  
 延で上面での辺長さをそれぞれ同じにしてある。仕上げ  
 圧延での被圧延材頂角部内側 R( $R_4$ ) は中心高さの圧下  
 率が同じになるように設定した。斜辺法線方向の圧下率  
 は、粗圧延・仕上げ圧延それぞれについてすべて同じで  
 ある。

4. 解 析 結 果

4.1 三次元変形形状

図 3, 図 4 に粗圧延・仕上げ圧延それぞれについて圧  
 延加工による被圧延材の曲げ角度が最も小さく、孔型角  
 度と被圧延材の頂角角度が同じ条件 (圧延前被圧延材の  
 頂角は粗圧延では $140^\circ$ , 仕上げ圧延では $90^\circ$ ) について、  
 上下から見た三次元変形形状を示す。また、被圧延材の  
 曲げ角度が最も大きい条件 (圧延前被圧延材の頂角角度  
 は粗圧延では $180^\circ$ , 仕上げ圧延では $100^\circ$ ) については、  
 前報<sup>5)</sup>における解析手法の確認解析と同じ条件であり、  
 前報<sup>5)</sup>を参照されたい。図中陰付部は接触領域、太線は  
 中立線である。前報<sup>5)</sup>で示した曲げ変形を伴う圧延では  
 上下ロールの接触開始位置が大きく異なるのに対して、  
 本条件のごとく曲げ変形を伴わない圧延では上下ロール  
 の接触開始位置が上下ロールおよび幅方向でほぼ同じで  
 あることがわかる。中立線の位置は幅方向に大きく変化  
 しており、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、曲げ変形を伴う伴わないに関わらず同じ傾

向にあることが判る。

4.2 面圧分布

図 5, 図 6 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、圧延加工に  
 による被圧延材の曲げ角度が最も小さい条件につき示す。  
 陰を付けてある領域は粗圧延では $12\text{kgf/mm}^2$   
 ( $118\text{MPa}$ ) 以上、仕上げ圧延では $15\text{kgf/mm}^2$   
 ( $147\text{MPa}$ ) 以上の範囲である。粗圧延・仕上げ圧延の  
 場合とも、前報<sup>5)</sup>では曲げ変形により、頂角部厚さが減  
 少し、上ロール側頂角部で面圧値の低下が認められた。  
 これに対し曲げ変形を伴わない本条件では頂角部の面圧  
 値低下は認められない。

4.3 圧延荷重

被圧延材と頂角角度と圧延荷重の関係を図 7 に示す。  
 仕上げ圧延での圧延荷重は被圧延材の頂角角度の増加に  
 伴い単調に減少しているが、粗圧延の場合には、被圧延  
 材の頂角角度の減少に伴い一旦減少し、その後増加して  
 いる。これは図 8 のように曲げ変形を受けている領域に  
 おいては、被圧延材幅方向に延伸力が作用するため、厚  
 さが減少する。そのため、被圧延材の頂角角度が増すほ  
 ど (換言すれば、曲げ変形が大きくなるほど) 上下ロール  
 による圧下される圧下量が減少するため、厚さ方向へ  
 の圧下変形に必要な荷重が減少し、逆に曲げ変形に必要な  
 荷重は増大する。仕上げ圧延の場合、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く、圧下変形  
 によりほぼ圧延荷重が決まるため圧延荷重は頂角角度

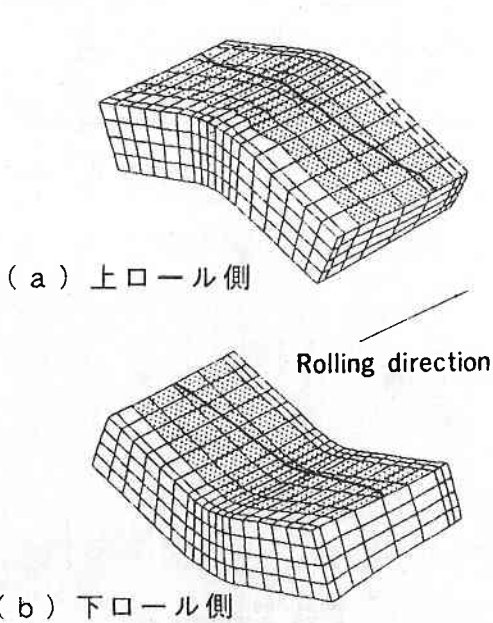


図 3 粗圧延の三次元変形形状 (被圧延材の頂角角度 $140^\circ$ )

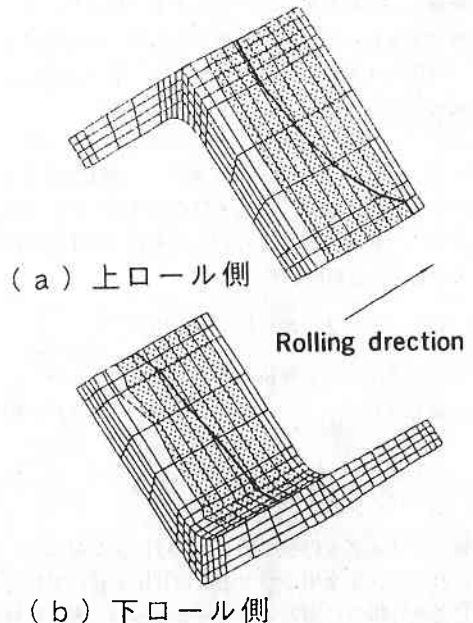


図 4 仕上げ圧延の三次元変形形状 (被圧延材の頂角角度 $90^\circ$ )

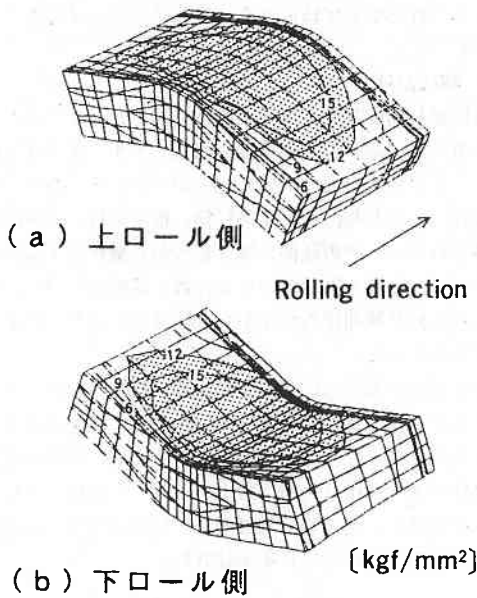


図5 粗圧延の面圧分布 (被圧延材の頂角角度140°)

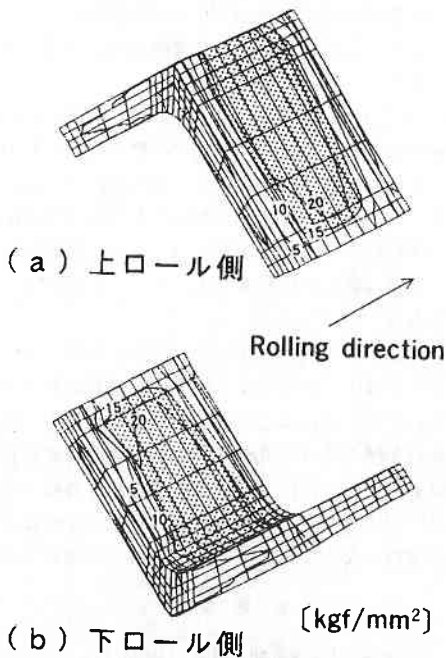


図6 仕上げ圧延の面圧分布 (被圧延材の頂角角度90°)

(曲げ角度)の増加に伴い単調に減少する。これに対して、粗圧延では、曲げ変形に必要な荷重が仕上げ圧延に比べ大きく、圧下に必要な荷重と同程度であるため、曲げ変形に必要な荷重と圧下変形に必要な荷重の和である

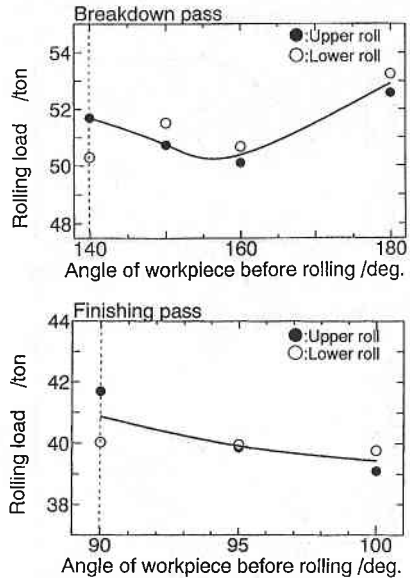


図7 被圧延材の頂角角度と圧延荷重の関係

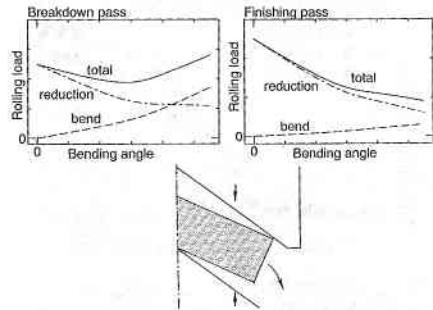


図8 曲げ・圧下による圧延荷重への影響

圧延荷重に極小値が現れるものと考えられる。見方を変えれば、本圧延条件においては、被圧延材の頂角角度が160°の場合が、圧延荷重より見た最適なパスであるといえる。また、図7により明らかなどおり、上下ロールに作用する圧延荷重の間に若干のずれがあるが、この理由は、本報による解析では既報<sup>4)</sup>と同様、実作業においての入口ガイド設置による材料拘束があることを考慮しつつ、被圧延材の上下表面上のそれぞれ一個の節点が、被圧延材先端部が圧延方向に剛體的に移動した場合に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、入り側節点座標を固定したためである。

なお、平面ひずみ非対称圧延の剛塑性FEM解析<sup>6)</sup>において、上下ロールの圧下力の平衡条件を厳密に満足させるために、上下ロールによる圧下量を制御する手法が適用されているが、この手法を用いることにより、上下

研 究 速 報

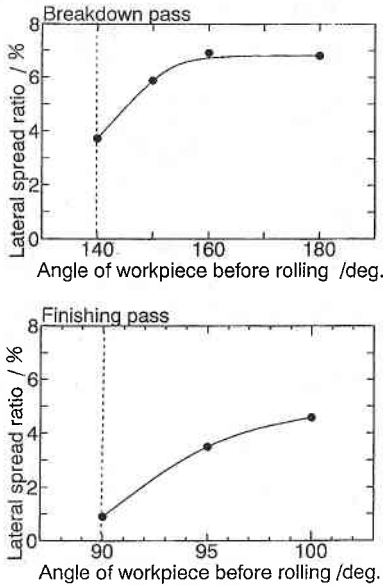


図9 被圧延材の頂角角度と幅広がり関係

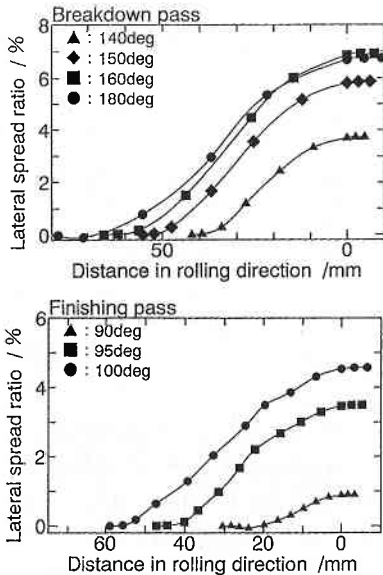


図10 圧延方向距離による幅広がり推移

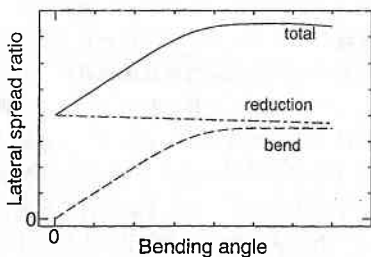


図11 曲げ・圧下による幅広がりへの影響

ロールに作用する圧延荷重を一致させることは可能である。

4.4 幅広がり

被圧延材角度と幅広がり関係を図9に示す。また、圧延方向への幅広がり推移を図10に示す。仕上げ圧延では、曲げ角度が大きいかほど幅広がりが大きくなる。前節で述べたとおり、曲げ変形に伴い被圧延材は幅方向に延伸されるが、その延伸に伴う幅広がり量が圧下に起因する幅広がり量と同程度であるため、接触弧長が長い場合(被圧延材初期頂角角度が大きい場合)ほど、幅広がりが大きくなる。

粗圧延でも基本的には同一の傾向となるが、曲げ角度がある値に達すると、それ以降幅広がり増加はなくなる。この理由としては、被圧延材が厚く曲げ剛性が高い本条件のような場合、曲げ角度がある一定値以上となると、曲げ変形による被圧延材の幅・厚さの変化が飽和するためであると考えられる。(図11)

5. ま と め

本報では CORMILL System を用いアングル材圧延を対象事例としつつ、曲げ/圧下複合変形を呈する圧延加工の変形・負荷特性につき基礎的な検討を行った。その内容を以下にまとめる。

1. 被圧延材の頂角角度が増すほど圧下変形に必要な荷重が減少し、逆に曲げ変形に必要な荷重は増大する。仕上げ圧延では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、頂角角度の増加に伴い圧延荷重は単調に減少する。粗圧延では、曲げに必要な荷重と圧下に必要な荷重が同程度であるため、圧延荷重に極小値が現れる。

2. 曲げ変形に伴い幅方向に延伸されることによる幅広がり量は圧下に起因する幅広がり量と同程度であり、接触弧長が長い場合ほど幅広がりが大きくなる。ただし、被圧延材が厚く曲げ剛性が高い場合、曲げ角度がある一定値以上になると曲げ変形による被圧延材の幅・厚さの変化は飽和するため、曲げ角度がある値に達すると幅広がり増加はなくなる。(1993年3月15日受理)

参 考 文 献

- 1) 佐々木ほか：平3春塑加講論，(1991)，157.
- 2) 柳本：生産研究，43-11(1991)，512.
- 3) 柳本ほか：42回塑加連講論，(1991)，413.
- 4) 柳本ほか：平4春塑加講論，(1992)，516.
- 5) 柳本ほか：生産研究，45-6(1993)，470.
- 6) 山田ほか：昭60春塑加講論，(1986)，233.