

形材圧延の変形・負荷特性に関する研究 I

——剛塑性 FEM によるアングル材圧延の三次元解析 1——

Characterization of Angle Rolling by Three-Dimensional FEM I

柳本 潤*・木内 学*・井上 幸雄**・柴田 一良*
Jun YANAGIMOTO, Manabu KIUCHI, Yukio INOUE and Kazuyoshi SHIBATA

1. はじめに

形材の圧延においては、一般に上下/左右非対称な孔型が使用される。多様な孔型を用いて行われる形材の圧延加工の際に被加工材に生ずる、三次元塑性変形特性の理論的解明が従来より強く望まれてきたが、上下ロール孔型が複雑かつ非対称であるために、三次元理論解析の適用には多くの困難を伴う。したがって実生産において用いられている孔型の設計は、現在経験的知見に頼らざるを得ず、このことが孔型設計時間の短縮および圧延条件最適化への大きな障害となってきた。

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 の開発に関する一連の研究を行っている。既報においては薄板材¹⁾・線棒材圧延^{2),3)}を対象とし、実験結果との比較を通し CORMILL System の精度につき検討するとともに、薄板材・線棒材圧延における種々の圧延条件因子が、三次元塑性変形特性に及ぼす影響を系統的に明らかにしてきた。既報³⁾において、CORMILL System を非対称線材圧延加工に適用し、上下ロール孔型の非対称性が、三次元塑性変形特性に及ぼす影響につき系統的な検討を行った。本報では、CORMILL System を一般の上下/左右非対称孔型圧延の解析が可能のように拡張し、代表的な形材圧延であるアングル材圧延に適用した結果を示す。

2. 解析手法

被圧延材の塑性変形の解析はラグランジュ乗数法三次元剛塑性 FEM に基づいておりその詳細については既報²⁾を参照されたい。本章では、一般の上下非対称形材圧延を取り扱う上で導入した境界条件および接触解析法につき述べる。なお以後の説明では幅方向を x 軸、厚

さ方向を y 軸、圧延方向を z 軸とする。

2.1 変形域入口角・出口角での境界条件ならびに変形域入口角の幅・厚さ方向位置の決定法

上下非対称圧延の解析においては、上下それぞれのロールとの接触領域の決定法が最も重要であり、特に形材圧延の三次元解析では、幅方向分布をも含めて接触領域を決定せねばならない。平面ひずみ非対称圧延の剛塑性 FEM 解析例が報告されている⁴⁾が、ここでは上下ロールの圧下力の釣り合い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しつつ、上下ロールとの接触弧長・圧延後の板のそり等が厳密に求められている。

同様の手法を適用することにより、形材圧延時に生ずるそりの解析も可能ではあるが、形材の圧延においては、ロール出口にガイドを設置することにより、真直な製品を得ることが多い。そのため、本報では圧延前後の製品のそりは無視できるものとし、変形域入口面・出口面での速度は次式を満足するものとした。

変形域入口面にて：

$$u_x = 0, u_y = 0, u_z = (\text{uniform})$$

変形域出口面にて：

$$u_x = 0, u_y = 0, u_z = (\text{uniform})$$

変形域入口面における各節点 $\langle n \rangle$ の x, y 座標 $(x^{\langle n \rangle}, y^{\langle n \rangle})$ は、以下の方法により定めた。上下ロールの表面厚さ方向位置は、幅方向座標 x 、圧延方向座標 z の関数としてそれぞれ $Y_U = Y_U(x, z)$ 、 $Y_D = Y_D(x, z)$ として与えられる。これよりロールギャップ間隙の分布は $Y_U(x, z) - Y_D(x, z)$ と表わすことができる。一方、被加工材入口面内での節点座標の初期値を $(x_0^{\langle n \rangle}, y_0^{\langle n \rangle})$ で与える。厚さ方向節点座標 $y_0^{\langle n \rangle}$ の定め方は任意であり、これを厚さ方向に Δy_0 剛体的に移動させることにより、上下ロールによる圧下量を任意に変更することができる。本報にて示す解析において用いる変形域入口面内の厚さ方向節点座標 $y^{\langle n \rangle} (= y_0^{\langle n \rangle} - \Delta y_0)$ は、入力データとして与えられる初期値 $y_0^{\langle n \rangle}$ をもとに、被圧延材の上下表面上の節点が、ある圧延方向位置 ($z =$

*東京大学生産技術研究所 第2部

**愛知製鋼㈱

z_{start})において、それぞれ上下ロールに同時に接触するために必要な移動量 Δy_0 をもとめ、 $y^{(n)} = y_0^{(n)} - \Delta y_0$ として定めた (図 1 参照)。

2.2 接触解析法

上下ロールとの接触領域 (幅方向接触弧長) は、剛塑性 FEM 解析と接触解析とを交互に繰り返すことにより定常解として定まるが、解析の途中において適用する上下ロールとの接触領域と、対応する予変形域の速度場 (変形) とが大きく影響しあうため、安定して定常流線を得るのは非常に困難である。そこで、解析は図 2 に示

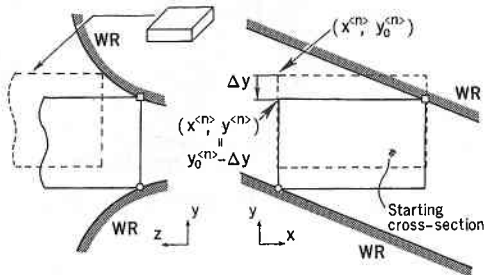
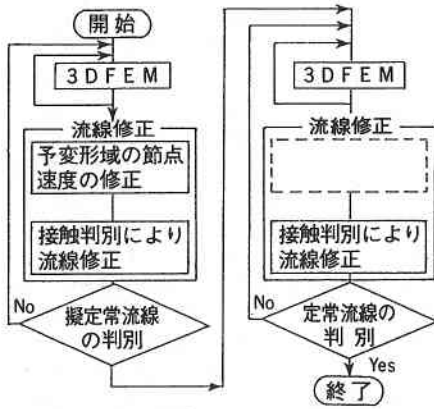


図 1 変形域入口面の断面内節点座標の決め方



1 段階

2 段階

図 2 解析のフローチャート

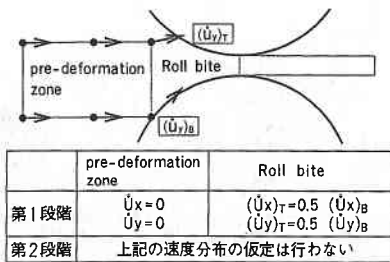


図 3 速度分布の仮定

すごとく 2 段階に分けて実行した。第 1 段階は、上下ロールとの接触領域を安定させるためのもので、予変形域の幅・厚さ変化がないものと仮定し、かつロールバイト内にありロールと接触していない節点の速度分布を図 3 のごとく仮定して接触解析を行い、予変形域での厚さ・幅変化が無いとした場合の収束解を求める (これを擬定常解とよぶ)。

次に第 2 段階として、擬定常解を初期値として通常の解析を行い、定常収束解を求める。

3. 解析結果

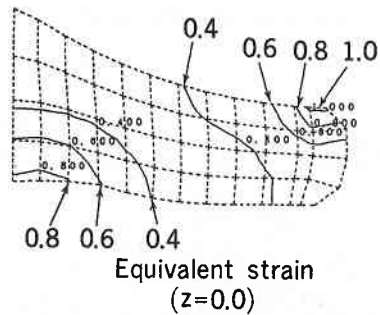
代表的な形材圧延であるアングル材圧延についての解析した結果を示す。

3.1 アングル材の粗圧延の解析 (上下非対称)

L150×150のアングル材の粗圧延過程に関する解析を

表 1 アングル材の粗圧延の解析条件 (上下非対称)

ピッチ径 ($D_1=D_2$)	[mm]	646
ロール回転数 N	[rpm]	30
変形抵抗式	[kgf/mm ²]	$\bar{\sigma} = 16(1+2\bar{\epsilon})^{0.3} \bar{\epsilon}^{0.02}$
まさつ定数		m = 0.8
前後方張力	[kgf/mm ²]	$T_b = T_f = 0.0$
FEM 要素分割数 (NX/NY/NZ)		12/4/(2+7+2)



Equivalent strain (z=0.0)

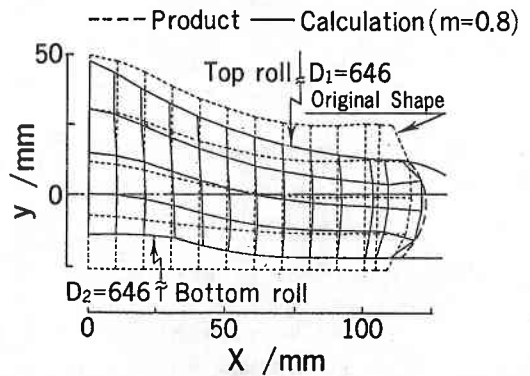


図 4 圧延後の横断面形状と相当ひずみ分布 (粗圧延)

研究速報
行い、圧延後半製品の横断面形状と実験と比較した。解析条件を表1に示す。

図4は、圧延後の半製品横断面形状と解析結果を比較したものである。自由表面の変形は両者一致しているの
のわかる。また圧延後の半製品横断面内の相当ひずみ分布を見ると、エッジ部上ロール接触域および中心部下
ロール接触域で横断面内の局所変形が大きい。相当ひずみが大きくなっていることがわかる。図5に、三次元変
形形状を示す。上下ロール接触領域をそれぞれ(a), (b)に陰をつけて示す。上下ロールで接触開始位置が異なっ
ているのが解析結果より読み取れる。

3.2 アングル材の仕上げ圧延の解析 (上下左右非対称)

左右両辺の厚さが異なるL50×50のアングル材の仕
上げ圧延過程に関する解析を行った。表2に計算条件を示
す。図6に、三次元変形形状を示す。

3.3 アングル材の仕上げ圧延の解析 (被圧延材初期形
状の影響)

L50×50のアングル材の仕上げ圧延過程について、被
圧延材初期形状を変化させた場合の解析結果を示す。被
圧延材の初期形状として、頂角部の角度が90°の場合
(CASE 1), 95°の場合 (CASE 2) を仮定した。孔型
形状は両条件共通であり、頂角部の角度は90°である。
被圧延材の初期辺長さを50mm, 厚さは7.8mmである。
計算条件については表3に示す。

図7にCASE1の圧延後の製品横断面形状および圧
延後の製品横断面内の相当ひずみ分布を示す。相当ひず
み分布は、下ロール中央部付近で最大となり、頂角部、
エッジ部にかけて減少している。図8に、CASE1の三
次元変形形状、および上下各ロールとの接触領域を示す。

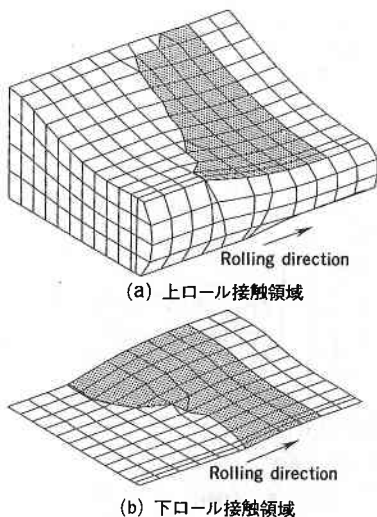


図5 三次元変形形状 (粗圧延)

表2 アングル材の仕上げ圧延の解析条件 (上下左右非対称)

ピッチ径 (D ₁ =D ₂)	[mm]	650
ロール回転数 N	[rpm]	150
変形抵抗式	[kgf/mm ²]	$\bar{\sigma} = 4.5(1+2\bar{\epsilon})^{0.21} \bar{\epsilon}^{0.31}$
まさつ定数		$\mu = 0.25$
前後方張力	[kgf/mm ²]	T _b = T _f = 0.0
FEM 要素分割数 (NX/NY/NZ)		14/4/(3+3+2)

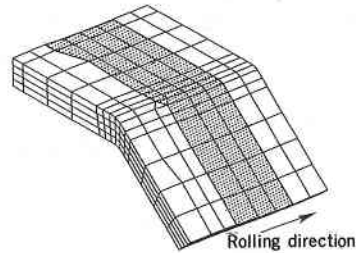


図6 三次元変形形状 (仕上げ圧延上下左右非対称)

表3 アングル材の仕上げ圧延の解析条件 (被圧延材初期形状の影響)

ピッチ径 (D ₁ =D ₂)	[mm]	650
ロール回転数 N	[rpm]	150
初期辺長さ [mm]/厚み [mm]		CASE 1, 2 = 50.0/7.8
まさつ定数		$\mu = 0.25$
中心高さ圧下率	[%]	CASE 1 = 10.4%, CASE 2 = 9.9%
変形抵抗式	[kgf/mm ²]	$\bar{\sigma} = 4.5(1+2\bar{\epsilon})^{0.21} \bar{\epsilon}^{0.31}$
まさつ定数		$\mu = 0.25$
前後方張力	[kgf/mm ²]	T _b = T _f = 0.0
FEM 要素分割数 (NX/NY/NZ)		CASE 1 = 9/4/(2+4+2) CASE 2 = 9/4/(1+4+2)

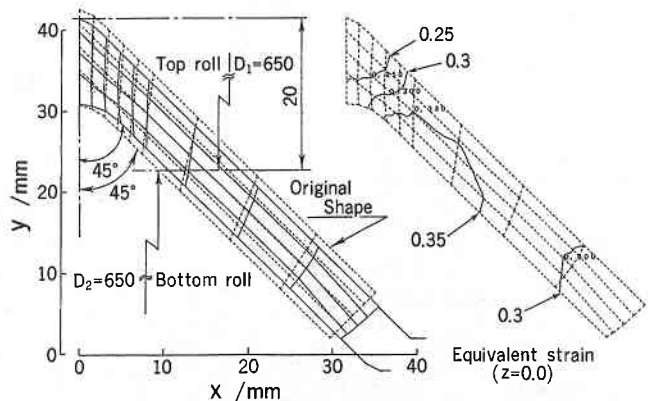


図7 圧延後の横断面形状と相当ひずみ分布 (CASE 1)

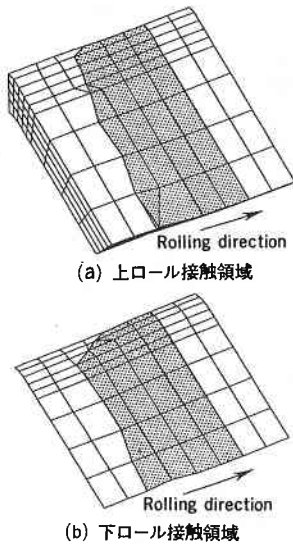


図8 三次元変形形状 (CASE 1)

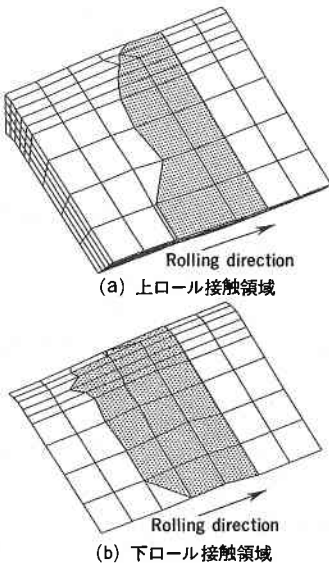


図10 三次元変形形状 (CASE 2)

本条件では、被圧延材とロールとの接触弧長は、上下ロール各幅方向位置ではほぼ等しいことがわかる。

図9は、CASE 2の圧延後の製品横断面形状および圧延後の製品横断面内の相当ひずみ分布を示す。図10は、三

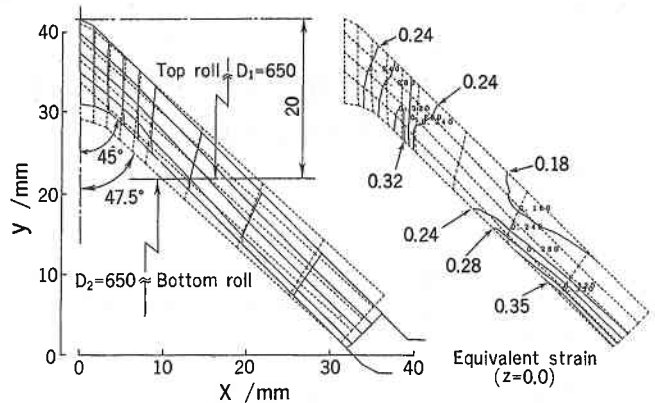


図9 圧延後の横断面形状と相当ひずみ分布 (CASE 2)

次元変形形状を示す。上下ロールと被圧延材との接触領域は、CASE 1とは大きく異なり、まず上ロールとエッジ部・下ロールと頂角部付近で接触し、曲げ変形を受けた後に圧下される。圧延後の相当ひずみ分布もCASE 1とは異なり、下ロールエッジ部付近で最大となる。

4. ま と め

本報では CORMILL System を一般の上下/左右非対称孔型圧延の解析が可能のように拡張し、アングル圧延の解析を行った。以下にシステムの改良点と今回の解析で得られた結果をまとめる。

1. 定常収束解を求めるために2段階に分けて計算する手法をとった。第1段階は予変形域での厚さ・幅変化がないとした場合の収束解(擬定常解)を求め、第2段階として擬定常解を初期値として通常の解析を行い、定常収束解を求める方法をとった。この解析手法により一般の上下/左右非対称孔型圧延の解析が可能になった。

2. アングル材圧延の粗および仕上げパスの解析を実行し、本圧延プロセスの三次元塑性変形特性の把握が可能であることを示した。(1993年3月15日受理)

参 考 文 献

- 1) 佐々木ほか：平3春塑加議論，(1991)，157.
- 2) 柳本：生産研究，43-11(1991)，512.
- 3) 柳本ほか：42回塑加議論，(1991)，413.
- 4) 山田ほか：昭61春塑加議論，(1986)，235.