

形材圧延の変形・負荷特性に関する研究Ⅳ

——多パスアングル圧延の FEM 解析およびプラスチック実験との比較——

Characterization of Angle Shape Rolling by Three-Dimensional FEM IV

——Analysis of Multi-Pass Angle Shape Rolling and Comparison with Experiment with Plasticine——

柳 本 潤*・木 内 学*・柴 田 一 良*

Jun YANAGIMOTO, Manabu KIUCHI and Kazuyoshi SHIBATA

1. は じ め に

アングル材等の形材圧延において用いられる孔型は、一般に複雑かつ上下非対称であり、被圧延材には、予変形域での曲げ・ロールバイト内での圧下を含む複雑な3次元変形が生じる。そのため形材圧延の3次元変形解析には多くの困難が伴い、このことが形材圧延の孔型設計の高度化・高効率化への障害となってきた。

形材圧延の分野については、従来、有限要素エネルギー法¹⁾、複合数値解析法^{2),3)}などの近似3次元解析手法の適用が試みられてきたが、解析精度・適用範囲などの限界により、孔型設計の場に広く活用されるに至っていない。そのため形材圧延の際に被圧延材に生じる3次元塑性変形特性・負荷特性の解明は、プラスチックを試験材としたモデル実験^{4)~6)}によるメタルフローの観察や、圧延荷重などの測定を通して行われてきた。

筆者らは、圧延加工時の3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、薄板材圧延⁷⁾・棒線材圧延^{8),9)}・形材圧延^{10),11)}などの3次元塑性変形に関する一連の検討を行ってきた。前報¹¹⁾ではロールと被圧延材との幾何学的不適合量を修正しつつ接触解析を行うことにより、広範囲な圧延条件において定常解を得ることが可能であることを示し、またアングル材の粗・仕上げ圧延を例にとり、曲げ/圧下複合変形を呈する圧延加工の基本的な変形・負荷特性について検討を行った。

本報では、形材圧延の変形・負荷特性に関する研究の一環として、CORMILL System の多パスアングル材圧延への適用結果につき示す。また解析結果をプラスチックを用いたモデル実験結果および熱間鋼圧延実験結果と比較しつつ解析精度に検討を加えるとともに、CORMILL System の形材圧延の孔型設計への適用の可能性につき検討を加える。

*東京大学生産技術研究所 第2部

2. 解 析 手 法

図1に CORMILL System による形材の多パス圧延のフローチャートを示す。各パスの定常3次元塑性変形は、ラグランジュ乗数法剛塑性 FEM による速度場の解析と接触解析とを交互に繰り返すことにより求めるが、接触解析においては前報¹¹⁾と同様、ロールと被圧延材との幾何学的不適合量のロール法線方向への補正を行っている。本報では多パス圧延を対象としており、前パスの出側断面節点座標・相当ひずみ分布を次パスの入側断面節点座標・相当ひずみ分布とし、最終パスまで解析を行っている。各パスの変形域入口面における圧延方向横断面内での厚さ方向節点座標の定め方については既報¹⁰⁾を、剛塑性 FEM 解析の詳細については別報¹²⁾を参照されたい。

3. 解析条件および実験条件

本報では、アングル材の造形から仕上げ圧延までを、6パスで圧延する一般的なパススケジュール¹³⁾を解析対象とし、曲げ/圧下の複合変形が顕在化するよう孔

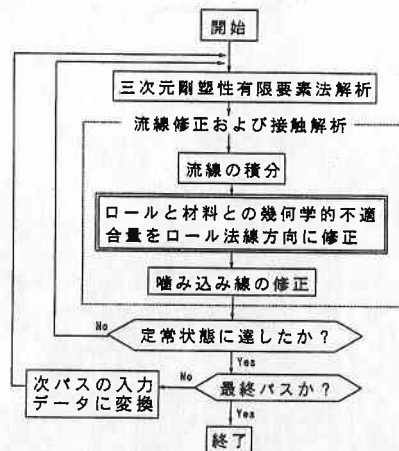


図1 解析のフローチャート

型角度を変更し、さらに被圧延材の幅広がりについて検討するために、すべて開式カリパーとした。表 1 および 図 2 にロール孔型形状ならびに寸法を示す。各パスの曲げ角度および斜辺法線方向の圧下率は後段パスに近づくほど小さくなっている。また、最終パス終了後の頂角部の未充満が生じ難いように、第 4 パスまでは頂角部に逃がしを設けてある。

表 2・表 3 に解析条件・実験条件を示す。プラスチックは白色単体と白色・灰色の幅方向縞状の 2 種類を用いた。潤滑剤は炭酸カルシウム^{14)~16)} を使用し、脱脂綿で被圧延材に均一に塗布した。被圧延材は水平に挿入し、1 パスごとに定常域後端部をサンプルとして切りだした。解析での摩擦条件はせん断摩擦則で $m=1.0$ としたが、これは炭酸カルシウム潤滑プラスチックの摩擦係数が $\mu=0.4\sim0.6$ であると報告されているためである^{14)~16)}。

表 1 ロール孔型寸法

pass	θ_1	t	b_1	h_1	h_2	R_1	R_2	R_3	D_1
1	180	12.5	24.0	10.0	16.2	2.0	15	-	240
2	Edging pass								
3	140	10.0	16.0	5.9	12.6	2.0	20	20	240
4	115	8.2	16.0	7.1	15.3	1.5	15	10	240
5	100	7.0	0	0	13.0	1.0	-	5	240
6	90	6.0	0	0	14.0	1.0	-	4	240

[mm]

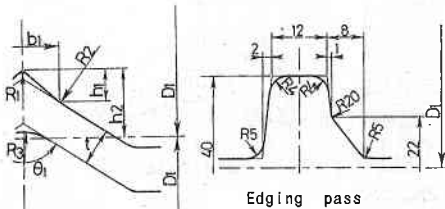


図 2 孔型形状

表 2 解析条件

ロール回転数 N [rpm]	3
変形抵抗式 [Kgf/mm ²]	美坂の式 (S35C 1000°C) $\sigma = 12.6 \epsilon^{0.21} \frac{1}{\dot{\epsilon}^{0.13}}$
摩擦定数	$m = 1.0$
前後方張力 [Kgf/mm ²]	$T_s = T_r = 0.0$
FEM要素分割数 (幅方向 / 厚さ方向 / 圧延方向 (予変形域 + 0-4n° f + 出側))	(9/4 / (2+8+2))
母材寸法 [mm]	40° × 18°

表 3 実験条件

プラスチック	白色プラスチック (白色・灰色縞状)
実験温度	20 ± 1°C
潤滑剤	炭酸カルシウム
均質化処理	20°C 2.4 時間以上
ロール材質・表面性状	石膏・ $R_2 = \text{約 } 10 \mu\text{m}$
ロール回転数 N [rpm]	3
母材寸法 [mm]	40° × 18° × 250°

4. 解析結果と実験結果の比較

4.1 解析結果とプラスチック実験との比較

(1) 圧延後断面形状・幅広がり 図 3(a) に解析により得られた 3 次元変形形状を、図 3(b) に各パスの断面形状の解析結果と白色プラスチックによる実験結果とを比較して示す。図中破線は解析結果、実線は実験結果である。実験では左右の辺長さに多少の違いがでたが、図 3(b) は 5 本実験したうちの最も左右辺長さの差が小さい場合の実験結果を示してある。頂角部の寸法・形状は解析結果と実験結果でよく一致している。幅広がり実験結果のほうが大きい。プラスチック実験の精度¹⁴⁾、およびアングル材の製品公差を考えれば、孔型設計に充分使用できる精度があると言える。しかし第 1 パスについては、エッジ部のバルジ形状がプラスチック実験と解析とは異なっており、解析では均一なバルジ変形が生じているのに対し、実験では上ロール側のバルジ変形量が多い。プラスチック実験により得られた不均一なバルジ変形は、プラスチックでは局所変形が大きいという特性に起因していることを、熱間鋼による追加実験で確認しているが、これについては次節にて詳しく述べる。

図 4 は上ロール面、下ロール面、厚み方向中央での幅方向中央からの辺長さの各パスでの推移を示す。なお、実験点は左右辺長さの平均値である。下ロール面での辺長さは両者ほぼ一致しているのに対し、上ロール面では実験の方が大きくなっている。また第 4 パス以降の幅変化挙動についての解析結果は、実験結果と一致している。

(2) 圧延荷重 図 5 に各パスの圧延荷重を示す。解析においては S35C (1000°C) の変形抵抗式を用いているため、プラスチック実験結果と直接比較することはできないが、各パスの圧延荷重の推移は解析と実験でよく似た傾向にある。しかし、白色単体と縞状についてのプラスチック実験結果は、第 1 パスが大きく違っている。この理由は、縞状の白色と灰色の接合面が弱く、圧下により各層が座屈を起こすためであると考えられる (図 6 参照)。

4.2 解析と熱間鋼実験との比較・検討

プラスチックにおいては、工具と接触部端面での局所変形が大きいことが言われている。また、Mises の降伏条件が満足されている保障もない¹⁵⁾。そこで、第 1 パスと類似の孔型を用いた熱間鋼圧延実験を行い、解析結果・プラスチック実験結果と再度比較した。熱間鋼実験の条件および孔型寸法を表 4 に示す。孔型形状は図 2 を参照されたい。

図 8 に第 1 パス終了後の断面形状を、熱間鋼実験、プラスチック実験、解析とで比較して示す。

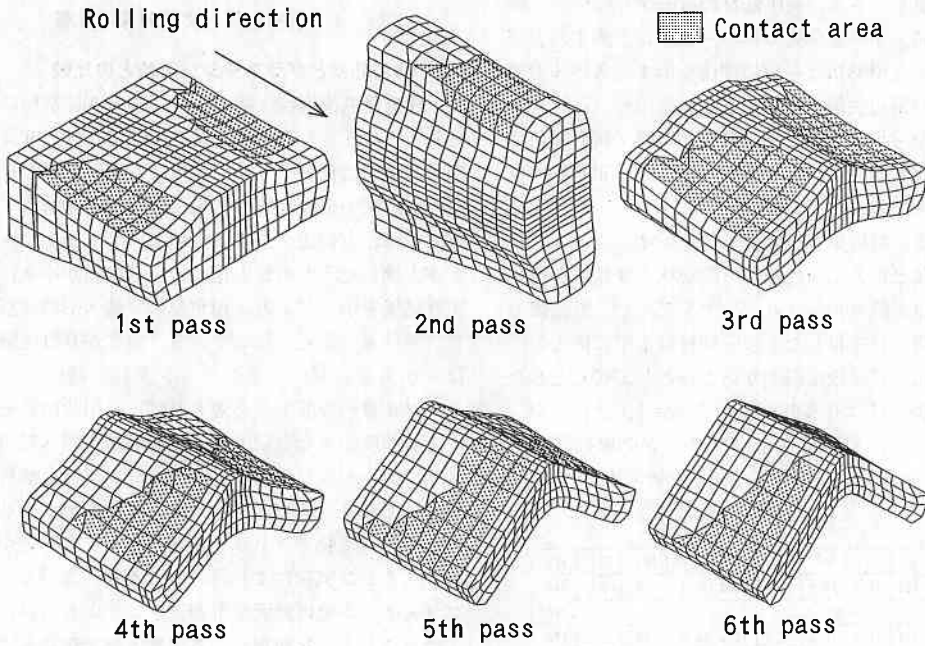


図 3(a) 解析結果の 3 次元変形状

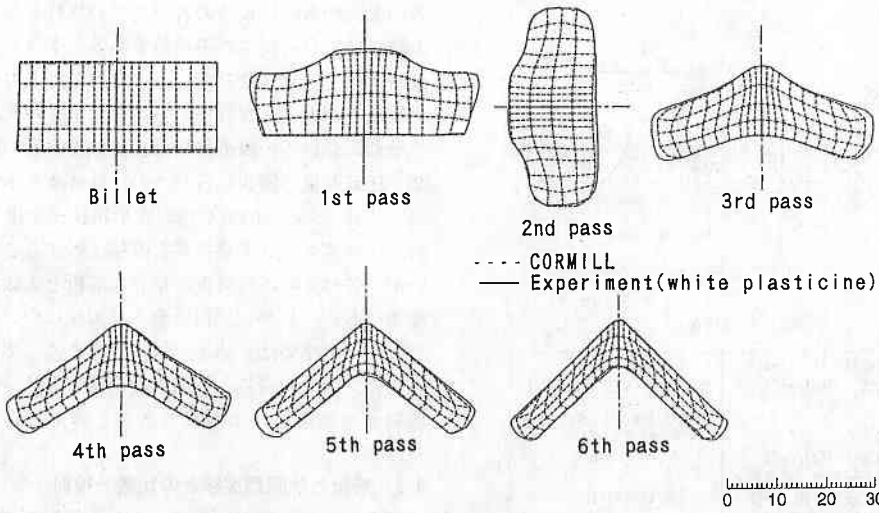


図 3(b) 白色プラスチックと解析結果の断面形状の比較

解析と熱間鋼との比較では、解析において、断面内温度が均一であることを想定しているため、エッジ部上下ロール面では0.2mm程度の差があるものの、3次元剛塑性FEM解析結果と熱間鋼による実験結果は非常に一致している。それに対し、プラスチック実験結果はエッジ部上ロール面および頂角部にかなり違いがある。以上により、第1パス終了後の断面形状についてのプラ

スチシン実験結果と3次元剛塑性FEM解析結果の差は、解析よりはむしろプラスチック実験の誤差が大きいこと、言い換えれば、3次元剛塑性FEM解析は、プラスチック実験と少なくとも同程度か、それ以上の精度の結果が得られることがわかる。

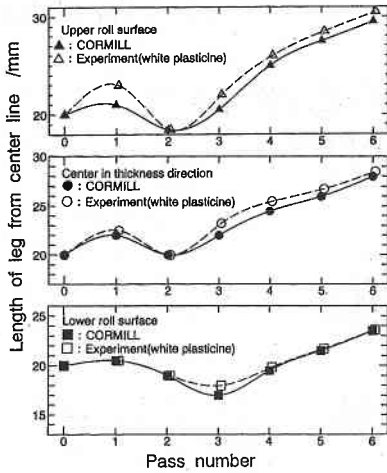


図4 各パスの辺長さ

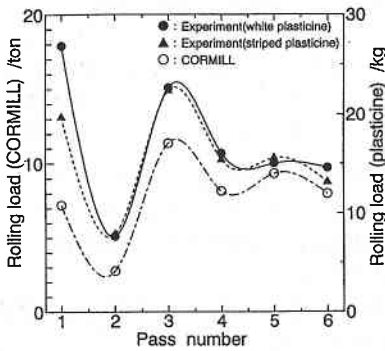


図5 各パスの圧延荷重

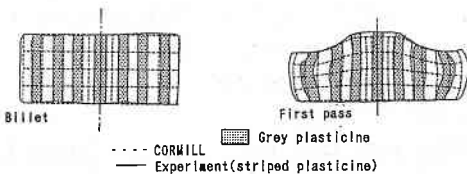


図6 縞状プラスチックと解析の断面形状の比較

5. ま と め

本報では、形材圧延の変形・負荷特性に関する研究の一環として、CORMILL System アングル圧延の多パス圧延を行い、プラスチックによるモデル実験および熱間鋼実験と比較した。結論を以下に要約する。

1) アングル圧延の多パス解析が可能となり、形材孔型設計への CORMILL System の適用の可能性が示された。

表4 熱間鋼実験条件

孔型	$\theta_1=180$ $t=12$ $b_1=28$ $h_1=12$ $h_2=17.2$ $R_1=3$ $R_2=3$ $D_1=190$ ロール回転数 = 3 r p m	解	変形抵抗式：美坂の式 (S10C, 1000°C) $\bar{\sigma}=11.3 \bar{\epsilon}^{0.21} \bar{\epsilon}^{0.13}$ 摩擦係数： $\mu=0.3$
熱間鋼	鋼種：S10C 圧延温度：1000°C 潤滑：無潤滑	析	

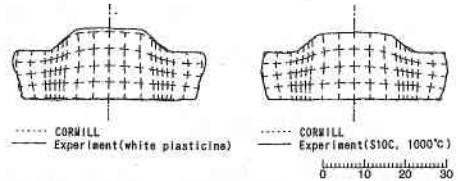


図8 熱間鋼との断面形状の比較

2) プラスチシンによるモデル実験結果と CORMILL System での解析結果の違いはプラスチック特有の変形挙動に起因していると思われる。CORMILL System により得られた解析結果と熱間鋼圧延実験結果との差はわずかであり、このことから CORMILL System はいわゆる数値実験装置としての機能を十分に果たし得ると考えられる。

本報の解析には、NSSUN SP/10 Model 30 (86.IMIPS) を使用し、計算時間は6パス合計で約15時間であった。(1993年7月8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) 中島ほか：塑性と加工, 13-141(1972), 751.
- 5) 日下部ほか：日本鋼管技報, 59(1973), 13.
- 6) 京井ほか：29回塑加連講論, (1978), 115.
- 7) 柳本ほか：塑性と加工, 33-383(1992), 1406.
- 8) 柳本ほか：塑性と加工, 34-384(1993), 75.
- 9) 柳本ほか：塑性と加工, 34-384(1993), 81.
- 10) 柳本ほか：平4春塑加講論, (1992), 516.
- 11) 柳本ほか：43回塑加連講論, (1992), 199.
- 12) 柳本：生産研究, 43-11(1991), 512.
- 13) R. E. Beynon: Roll Design and Mill Layout, (1956), 163, AISE.
- 14) 栗野ほか：塑性と加工, 13-141(1972), 768.
- 15) 柳下ほか：三菱重工技報, 11-1(1974), 43.
- 16) 千々岩ほか：鉄と鋼, 66-5(1980), 48.