

非対称複合圧延に関する研究・3

——実験結果との対応——

Study on Complex Asymmetrical Rolling・3

——Comparison Between Analytical Results and Experimental Results——

木内 学*・黄 永茂*・新谷 賢*

Manabu KIUCHI, Yeong-Maw HWANG and Ken SHINTANI

1. はじめに

近年、高強度・高耐摩耗性・高耐食性・高熱伝導性など種々の優れた特性を併せ持つクラッド板（複合板）に対する需要が増えつつあり、それらの製造技術について、盛んに研究・開発が試みられている。異なる金属素板を重ね合わせて圧延・圧着する、いわゆる複合圧延に関する理論的な研究については、これまでに、二層クラッド板¹⁾²⁾、三層サンドイッチ板³⁾⁴⁾⁵⁾の圧延に関する研究が幾つか発表されているが、これらの研究に用いられた解析手法は、いずれも、当初鈴木ら⁶⁾⁷⁾が提案したスラブ法に基づく手法を応用したものであり、また、対称圧延（サンドイッチ）、非対称圧延いずれの場合もスラブ法による解析に適合しうるようにさまざまな仮定やモデル化のための近似を導入しており、複合圧延に関する体系的知見を与えるものではないと言える。

本研究は、材質の異なる二種類以上の金属素板を重ね合わせ圧着圧延する複合圧延に関し、素板の変形挙動、製品の形状・寸法、加工力等を総合的に体系的に解明することを目指している。前報では、二層の重ね板の複合圧延について、各種の加工条件因子が圧延後の製品の曲率、板厚比、および圧延荷重に与える影響について、検討を行った。本報では、二層合わせ板の異径同周速圧延実験を行い、本解析手法による解析結果と実験結果との比較を通して、本研究で提案した解析モデルの妥当性について、検討した結果を報告する。

2. 解析モデルの拡張（解析モデルⅢ）

本研究で対象とする非対称複合圧延の一般形を図1に示す。既報⁸⁾の解析モデルⅡでは、素板(b)の塑性域を分割面によって、上下二つの領域に分けているが、本報の解析モデルⅢでは、素板(b)の分割面を取り除いて、一つの塑性域として取り扱う。塑性域Zone Iの速度場構成は、モデルⅡの場合と同様であるので、そのまま適用す

*東京大学生産技術研究所 第2部

表1 解析モデルⅠ, Ⅱ, Ⅲの比較

相違点	モデルⅠ	モデルⅡ	モデルⅢ
① 圧延前の素板界面	接合されている (クラッド板)	接合されていない (重ね板)	接合されていない (重ね板)
② 加工中ロールパイ ト内の素板界面	流線と一致する	円弧で近似 (仮想ロール)	円弧で近似 (仮想ロール)
③ 塑性域	上ロール側領域: Zone I 下ロール側領域: Zone II	上ロール側領域: Zone I (a材(1) a, b材(1) b) 下ロール側領域: Zone II	a材: Zone I b材: Zone II
④ 座標原点位置	Zone(Ⅰ), (Ⅱ)の分割面 と出口の交差点	Zone(Ⅰ), (Ⅱ)の分割面 と出口の交差点	下ロールの中心点
⑤ 上下ロール径比	可変	可変	可変
⑥ 上下ロール周速比	可変	可変	可変
⑦ 素板流入角度	(一体)可変	(別々)可変	(別々)可変
⑧ 素板板厚比	可変	可変	可変
⑨ 素板変形抵抗比	可変	可変	可変
⑩ 前後方張力	(一体)可変	(別々)可変	(別々)可変
⑪ 可変パラメータ	$u_1, \varepsilon, \alpha_1, \ell$	$u_{01}, \varepsilon, \varepsilon^*, \alpha_1, \alpha_1^*, \ell$	$u_{01}, \varepsilon^*, \alpha_1, L_1^*, q_{0f}$

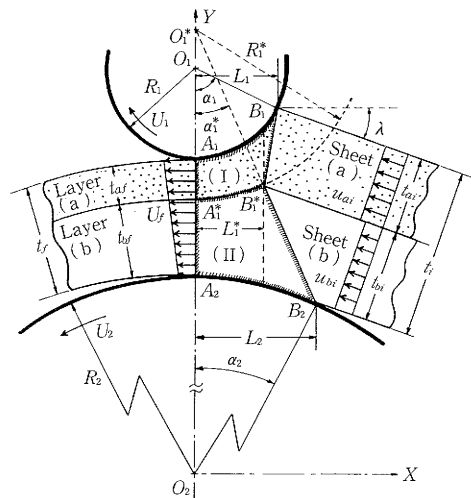


図1 非対称複合圧延解析モデル(Ⅲ)

研 究 速 報

ることができる (詳細は既報参照)。素板(b)の速度場は、 $0 \leq x \leq L_1^*$ と、 $L_1^* \leq x \leq L_2$ の二つの領域に分けて扱うものとし、次のように定式化する。

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq x \leq L_1^* \\ u_{xb} &= G_1(x) \cdot y + G_2(x) \\ v_{yb} &= -\frac{1}{2} G_1'(x) \cdot y^2 - G_2'(x) \cdot y + C_b(x) \end{aligned} \right\} (1)$$

$$\left. \begin{aligned} L_1^* \leq x \leq L_2 \\ u_{xb} &= F_1(x) \cdot y + F_2(x) \\ v_{yb} &= -\frac{1}{2} F_1'(x) \cdot y^2 - F_2'(x) \cdot y + C_b^*(x) \end{aligned} \right\} (1')$$

$$G_1(x) = u_{x_{bm}} \cdot (P_b \cdot x^2 + q_b)$$

$$G_2(x) = u_{x_{bm}} - G_1(x) \cdot \frac{1}{2} (y_{11}^* + y_{12})$$

$$F_1(x) = u_{x_{bm}}^* \cdot (p_b^* \cdot x + q_b^*)$$

$$F_2(x) = u_{x_{bm}}^* - F_1(x) \cdot \frac{1}{2} (y_{02} + y_{12})$$

$$C_b(x) = \{ G_1(x) \cdot y_{12} + G_2(x) \} \cdot y_{12}' + \frac{1}{2} G_1'(x) \cdot y_{12}^2 + G_2'(x) \cdot y_{12}$$

$$C_b^*(x) = \{ F_1(x) \cdot y_{12} + F_2(x) \} \cdot y_{12}' + \frac{1}{2} F_1'(x) \cdot y_{12}^2 + F_2'(x) \cdot y_{12} \quad (1')$$

$$f_b^*(L_1^*) = \frac{2 \{ u_{x_{bm}}^* \cdot (y_{b1}^* - y_{12}) + u_{x_{bm}} \cdot (y_{11}^* - y_{12}') \}}{u_{x_{bm}} \cdot (y_{b1}^* - y_{12}) \cdot (y_{02} - y_{11}^*)}$$

$$p_b = \frac{f_b^*(L_1^*) - q_{bf}}{L_1^{*2}}, \quad q_b = q_{bf}$$

$$p_b^* = \frac{f_b^*(L_1^*)}{L_1^* - L_2}, \quad q_b^* = \frac{-L_2 \cdot f_b^*(L_1^*)}{L_1^* - L_2}$$

ただし、

y_{11}^* : 素板(a), (b)の境界面のy (垂直) 座標

y_{12} : 下ロール表面のy (垂直) 座標

y_{02} : ロール入口での素板(b)の塑性域と剛性域の境界のy (垂直) 座標

$u_{x_{bm}}, u_{x_{bm}}^*$: 塑性域における素板(b)の垂直断面上の圧延方向平均速度

q_{bf} : 出口における素板(b)の曲率

なお、解析モデル I, II, IIIの比較を表1に示す。

3. 同径同周速圧延についての解析モデルの検証

図1において、素板(a), (b)の変形抵抗比、初期板厚比、上下ロール径比、上下ロール周速比をそれぞれ1.0とし、素板の入射角度を $\lambda = 0.0$ とすれば、単一材の同径同周速圧延の解析に帰着する。志田氏⁹⁾の実験条件に対応させ、歪速度効果と加工硬化を考慮し、下記の式(2)によって、平均圧延圧力 P_m を計算した。そして、Sims,

Nadai, およびOrowan & Pascoeの理論式によって計算した平均圧延圧力を含めて、計算値と実験値との比較を図2に示す。図より、圧下率が40%以上の場合、計算値が実験値よりやや高くなっているが、全体的に、本解析の結果がSims, Nadai, Orowan & Pascoeによる計算値よりも、実験値と合っていることがわかる。これらの結果は、本解析モデルの妥当性を示す証左の一つと考えられる。

$$P_m = \frac{J^* \cdot R}{L \cdot U \cdot b} \quad (2)$$

ただし、 J^* : 全変形仕事率, L : 接触長さ

R : ロールの半径, b : 素板の幅

U : ロールの周速

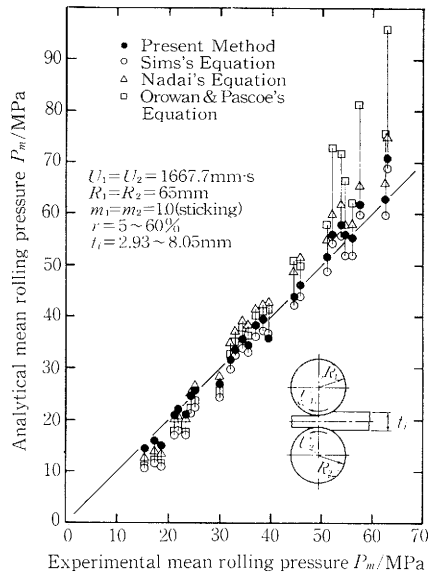


図2 理論値と実験値との比較

表2 材料の加工硬化係数

材質	板厚(mm)	加工硬化係数 ($\dot{\epsilon} = 0.16 \text{sec}^{-1}$)	
		c (Kgf/mm ²)	n
Al	2.00	18.46	0.1448
	4.97	19.73	0.1839
	8.00	25.13	0.2355
Cu	2.04	46.84	0.2397
	5.05	61.24	0.2844
	8.04	58.75	0.2921
SPCC	1.95	64.05	0.2979

幅 : 96mm, 長さ : 300mm

4. 二層合わせ板の圧延実験

4.1 実験方法

実験には、バックアップロール駆動、異径同周速の4段圧延機を用いた。ワークロール半径は50mm(上)、100mm(下)、バックアップロール半径は100mmであり、ロールパレル長さは210mmである。左右圧下スクリュと上側バックアップロールチョックの間に二つのロードセルを入れ、圧延荷重を測定し、ユニバーサルカップリングとバックアップロール軸との間にトルクメータを取り付け、圧延トルクを測定した。なお、圧延機の入り側に2個の変位計を設置し、素板の入射角を測定した。

4.2 素板(供試材)

圧延前に、素板(a),(b)が接合されておらず、圧延により接合が完了するものとして、ロール出口での素板(a),(b)の速度の適合条件を満足させるために、素板

(a),(b)の先端を機械的に接合させた後に圧延を行った。入側において、素板(a),(b)の入射角を同一にするために、型枠で両者を一体化し、両者の界面での滑りは許容するが、互いに分離しないようにして圧延した。潤滑条件については、素板(a),(b)の界面、および素板とロールとの界面をまず、紙やすりで磨いてから、アセトンで脱脂し、無潤滑状態で圧延した。圧延後、素板(a),(b)を一体化して、製品の曲率を測定した。

供試材の材質は、純銅C1100、アルミ板A1050、および鋼板SPCC、三種類である。JIS 5号試験片を用いて、歪速度を 0.16sec^{-1} として、引っ張り試験を行い、応力-歪線図より求めた素板の加工硬化係数を表2に示す。また、実験は、圧延前の板厚比(t_{a1}/t_1)が0.5と0.2の場合に分けて、圧下率 r が5~20%の範囲について行った。

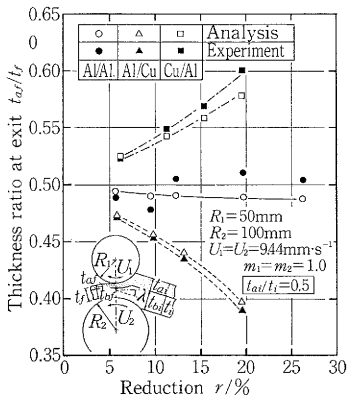


図3 圧下率が出口の板厚比に及ぼす影響

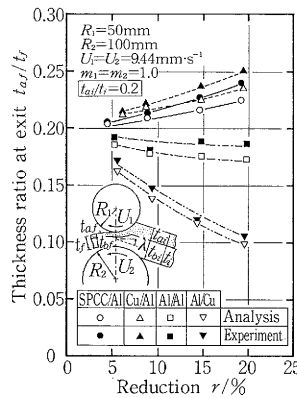


図4 圧下率が出口の板厚比に及ぼす影響

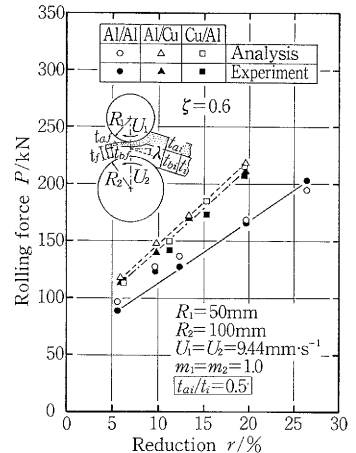


図5 圧下率が圧延荷重に及ぼす影響

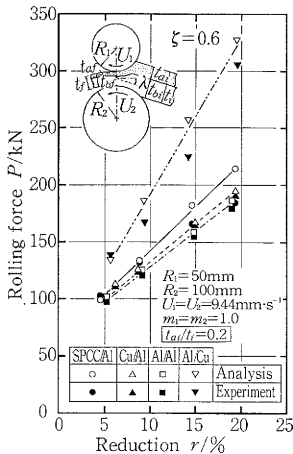


図6 圧下率が圧延荷重に及ぼす影響

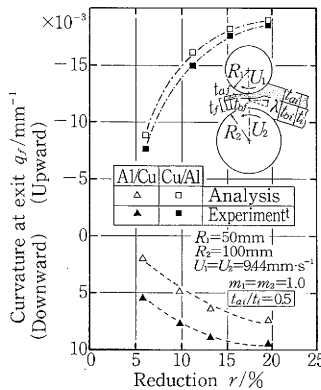


図7 圧下率が出口の曲率に及ぼす影響

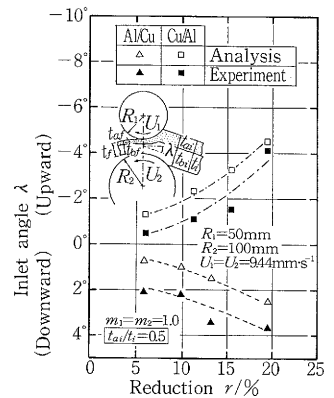


図8 圧下率が入側入射角に及ぼす影響

5. 実験結果

圧延前の板厚比 (t_{ai}/t_i) が0.5の場合について、圧下率 r が製品板厚比 t_{af}/t_f に及ぼす影響を図3に示す。(○), (△), (□)は, (Al/Al), (Al/Cu)および(Cu/Al)の場合の解析値であり, (●), (▲), (■)は, それぞれの実験値である。解析に際して, 入射角 λ は可変パラメータとして扱っており, その場合の可変パラメータの数は全部で6個である。図より, Al/Alの場合, 解析値と実験値がややずれているが, その差は5%に過ぎない。この場合は, 圧下率 r を増加させても, 製品の板厚比は余り変わらないことがわかる。Al/CuとCu/Alの場合, 上下の(a)材・(b)材の組み合わせが逆になり, 対応する上下ロールの径が異なっても, 圧下率の増加と共に, アルミの板厚比が小さくなり, 銅板の板厚比が大きくなることわかる。

圧延前の板厚比 (t_{ai}/t_i) が0.2の場合について、圧下率 r が製品の板厚比 t_{af}/t_f に及ぼす影響を図4に示す。(○), (△), (□), (▽)は, (SPCC/Al), (Cu/Al), (Al/Al), (Al/Cu)の場合の解析値であり, (●), (▲), (■), (▼)は, それぞれの実験値である。素板(a), (b)が同一の材質(Al/Al)の場合であっても, 上下ロールの径が異なっているので, 製品の板厚比が圧延前の板厚比と違っている。しかし, その変化は10%以内である。異なる材質の組み合わせの場合には, 素板(a), (b)の組み合わせと上下ロールの径との関係が変化しても, 圧下率の増加と共に, 製品の板厚比は, 軟質材の板厚比が小さくなり, 硬質材の板厚比が大きくなることわかる。その変化は, 圧下率 r の増加にともなって, 顕著になる。

圧延荷重について検討するためには, まずトルクアーム係数について検討する必要がある。図1に示すような非対称圧延の際の上下ロールと素板との接触長さ L_1, L_2 は, 圧延条件 ($U_1, U_2, R_1, R_2, t_i, r, \lambda$) によって変化し, L_1 と L_2 は相互に異なる。ところが, 実際の圧延時には, モーメントの釣り合いから考えても, 上下ロールのトルクアームはほぼ一致していると思われる。そこで, ここではとりあえず次の等価接触長さを用い, 上下ロール共通のトルクアーム係数を用いて, 圧延荷重の推定を試みた。

$$\bar{L} = \sqrt{\bar{R} \cdot t_i \cdot r} \quad (3)$$

$$P = \frac{J^*}{(\xi \cdot \bar{L} \cdot U_1 / R_1 + \xi \cdot \bar{L} \cdot U_2 / R_2)} \quad (4)$$

ただし, $\bar{R} = 2 \cdot R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$ (等価ロール半径)

トルクアーム係数 ξ を0.6として, 式(4)によって求めた圧延荷重と実測値との比較を図5, 6に示す。 $t_{ai}/t_i = 0.5$ に関する結果を図5に, $t_{ai}/t_i = 0.2$ に関する結果を図6に示す。図より, $\xi = 0.6$ として求めた圧延荷重はほぼ実験値と対応していることがわかる。

次に, $t_{ai}/t_i = 0.5$ に関して, 圧下率 r が製品曲率 q_f と入り側の入射角 λ に及ぼす影響を図7, 8に示す。製品曲率と入射角の正負は, 図1で製品が下ロール側に曲がる場合と入射角が下ロール側に傾いている場合を正とする。図より, 上下ロールの径によらず, 硬質材側に曲がりが生じていることがわかる。実験値より, 圧下率 $r =$ 約20%以上の場合, 製品がロールの表面に沿って, 巻き付いて出ることがわかる。

なお, $t_{ai}/t_i = 0.2$ の場合も, 製品の曲率 q_f と入り側の入射角 λ についてみると, 入り側・出側共に硬質材側にはね上がりまたは曲がりを生じている結果が得られている¹⁰⁾。

6. ま と め

本研究では, 二層クラッド材の非対称複合圧延について, 全変形仕事率, 製品板厚比, 製品の曲率等の解析結果と実験結果との比較を通して, クラッド板あるいは重ね板の圧着圧延を対象とする本解析モデルの妥当性を明らかにした。本研究では, 素板(a), (b)の界面がロール出口において, 接合を完了するという前提で解析し対応する実験結果と比較したが, 今後は, ロールバイト内において, 素板(a), (b)が接合を完了するかどうかを判定するモデルを開発し, 各種の加工条件因子がこの接合の進行および完了に及ぼす影響について, 体系的な研究を行う予定である。 (1988年10月12日受理)

参 考 文 献

- 1) 中島ほか: 昭53春塑加講論 (1978), 29.
- 2) 升田ほか: 鉄と鋼 (1987), 55.
- 3) R.R. Arnold, et al.: Proc. Instn. Mech. Engrs., 173 (1959), 241.
- 4) A.A. Afonja, et al.: Int. J. Mech. Sci. Pergamon Press. 15 (1973), 1.
- 5) 田中ほか: 昭59春塑加講論 (1984), 557.
- 6) 鈴木ほか: 塑性と加工, 13-133 (1972-2), 120.
- 7) 鈴木ほか: 同上, 15-166 (1974-11), 931.
- 8) 木内ほか: 38回塑加連講論 (1987), 29.
- 9) 志田 茂: 塑性と加工, 7-67 (1966-8), 424.
- 10) 木内ほか: 39回塑加連講論 (1988), 553.