

# 非対称複合圧延に関する研究・4

## ——圧延条件が接合因子に与える影響——

Study on Complex Asymmetrical Rolling · 4

——Effects of Rolling Conditions on Bonding Factors——

木 内 学\*・黄 永 茂\*

Manabu KIUCHI and Yeong-Maw HWANG

### 1. は じ め に

個々の金属材料の優れた特性をあわせ持つクラッド板(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。クラッド板の製造技術については、従来より、爆着法、熱間圧接圧延法、冷間圧接圧延法、等についていくつかの研究<sup>1)~4)</sup>が発表されているが、これらの研究は実験的なものがほとんどであり、異種金属板のクラッド化圧延を対象とする体系的な解析手法はいまだ見当たらない。

異なる金属素板を重ね合わせ、圧延しつつ圧着させるいわゆるクラッド圧延においては、異種素板間の界面上にできるだけ多くの新生面を発生させると同時にできるだけ高い面圧を加えることが必要であると考えられる。そのため、高い圧下率すなわち新生面生成率が大きく取れる遊星圧延機を利用した冷間圧延によるクラッド板の製造も試みられている<sup>5)</sup>。接合界面での相対滑りが有効であるとの考えから、素板に大きなせん断変形が生じる異周速圧延によって、接合面に強制的相対滑りを発生さ

せ、接合を容易にする方法も試みられている<sup>6)</sup>。

本研究では、これまでに筆者らが提案した非対称複合圧延解析モデルを、接合強度を支配すると考えられる諸接合因子、すなわち新生面生成率、素板界面での相対滑り量、面圧、およびロールバイト内での接合完了位置を予測できるように拡張した上、各加工条件がこれらの接合因子に与える影響について、検討した結果を報告する。

### 2. 解 析 モ デ ル

本報で用いた解析モデルを図1に示す。解析モデルの基本的考え方は以下のとおりである。圧延前に素板(a)(b)の界面が接合されていないので、素板がロールバイト内に入ってから、素板界面には相対すべりが発生すると予想される。すなわち塑性域(I)と塑性域(II)の界面に相対滑りが発生するものとする。素板がロールバイト内を進むに従って界面での相対滑りが小さくなり、接合が完了した点で相対滑りがなくなると考えられる。この接合が完了したと考えられる位置を点C<sub>1</sub>\* (図1を参照)とする。つまり、塑性域(III)と塑性域(II)との界面には相対滑りが無いものとする。

ロールバイト内における素板(a)(b)の界面は既報<sup>7)</sup>の解析モデル(III)と同様に一つの円弧で表されるものとする。塑性域(I)(II)における速度場は既報の解析モデル(III)と全く同様であるので、そのまま適用することができる(詳細は既報参照)。塑性域(III)の速度場については、体積一定条件と境界条件より、式(1)のように定式化できる。

$$\left. \begin{aligned} u_{xh} &= H_1(x) \cdot y + H_2(x) \\ v_{yh} &= -\frac{1}{2} H_1'(x) \cdot y^2 - H_2'(x) \cdot y + C_h(x) \\ H_1(x) &= u_{xhm} \cdot f_h(x) \\ H_2(x) &= u_{xhm} - H_1(x) \cdot \frac{1}{2} (y_{11} + y_{11}^*) \\ C_h(x) &= \{ H_1(x) \cdot y_{11}^* + H_2(x) \} y_{11}^* \\ &\quad + \frac{1}{2} H_1'(x) \cdot y_{11}^{*2} + H_2'(x) \cdot y_{11}^* \end{aligned} \right\} (1)$$

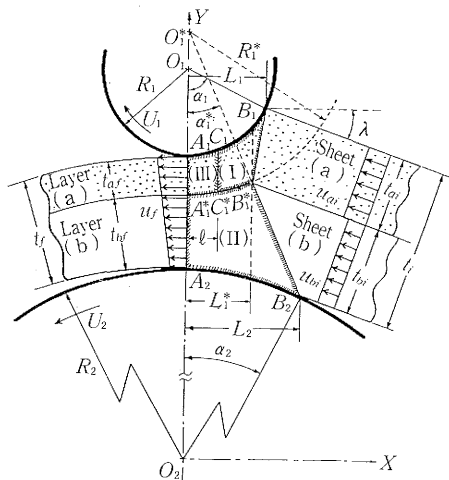


図1 非対称複合圧延解析モデル(IV)

\*東京大学生産技術研究所 第2部

研究速報

$$f_h(x) = \frac{2(u_{xhm} - u_{x0})}{y_{11} - y_{11}^*}$$

$$u_{xhm} = \frac{u_{ai} \cdot t_{ai}}{y_{11} - y_{11}^*}$$

$$u_{x0} = u_{xb}|_{y=y_1}$$

なお、従来の解析モデル(III)では、素板(b)の初期速度  $u_{bi}$ 、素板(a)と上ロールとの接触角  $\alpha_1$ 、出口における素板(a)の板厚比  $\xi^*(t_{af}/t_f)$ 、ロールバイト内における素板界面の接触長さ  $L_1^*$ 、および出口における素板(b)側からみた製品曲率  $q_{bf}$  を可変パラメータとしているが、新たに拡張した解析モデル(IV)では、以上のパラメータのほかに、素板界面における接合完了点  $C_1^*$  より出口までの距離すなわち接合後長さ  $l$  を追加し、可変パラメータは6個になる。数値計算を行う際、 $l \leq 0$  の場合は  $l = 0$  として、解析モデル(III)に帰着する。

3. 接合因子の定義

接合挙動を支配すると思われる接合因子  $\gamma_a, \gamma_b, \chi, P_m^*$  を次のように定義する。

(1) 素板(a), (b)の新生面生成率  $\gamma_a, \gamma_b$

$$\gamma_a = (t_{ai} - t_{af}) / t_{ai}$$

$$\gamma_b = (t_{bi} - t_{bf}) / t_{bi} \quad (2)$$

(2) ロールバイト内において素板(a)(b)界面の相対滑り量  $\chi$

$$\chi = \int_0^{\tau_s} u_s d\tau \quad (3)$$

ただし、 $u_s$  は素板(a)(b)界面における相対(滑り)速度、 $\tau_s$  は素板界面において、塑性変形(接合)が発生してから接合完了位置に至るまでの経過時間である。

(3) 素板界面での平均面圧  $P_m^*$

$$P_m^* = P / (L_1^* \cdot b) \quad (4)$$

ただし、 $P$  は圧延荷重(計算方法は既報<sup>7)</sup>を参照)、 $L_1^*$  は塑性域における素板界面の長さ、 $b$  は素板の幅である。

4. 解析結果

以下、上述の解析モデル(IV)を用いて、前節で定義した接合因子すなわち新生面率  $\gamma_a, \gamma_b$ 、相対滑り量  $\chi$ 、接合

後長さ  $l$ 、面圧  $P_m^*$  に及ぼす各加工条件の影響について調べた結果を示す。ただし、解析結果の表示に際しては、式(5)に示すロールと素板との等価接触長さ  $\bar{L}$  を用いて、相対滑り量  $\chi$  と接合後長さ  $l$  を無次元化してある。

$$\bar{L} = \sqrt{2 \cdot (R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2)) \cdot t_i \cdot r} \quad (5)$$

なお、各計算事例についての圧延条件の詳細はそれぞれ図中に示す。

4.1 後方張力  $T_b$  の影響

素板(a), (b)にそれぞれ後方張力  $(T_b)_a, (T_b)_b$  を加えた場合、圧下率  $r$  が素板(a), (b)の新生面生成率  $\gamma_a, \gamma_b$  と素板界面の面圧  $P_m^*$  に及ぼす影響を図2(a)と2(b)に示す。図2(a)より、圧下率  $r$  の増加に伴って、素板(a), (b)の新生面生成率  $\gamma_a, \gamma_b$  ともに増加することがわかる。また、素板(a)に後方張力  $(T_b)_a$  を加えた場合、素板(a)の新生面生成率  $\gamma_a$  を増加させることができるが、素板(b)の新生面生成率  $\gamma_b$  が減少することになる。逆に、素板(b)に後方張力  $(T_b)_b$  を加えた場合、 $\gamma_b$  を増加させることができるが、 $\gamma_a$  が減少することになる。

図2(b)より、圧下率  $r$  の増加に伴って、面圧  $P_m^*$  が増大するが、後方張力  $(T_b)$  の増加に伴って、 $P_m^*$  が減少することがわかる。

圧下率  $r$  が相対接合後長さ  $l/\bar{L}$  と相対滑り量  $\chi/\bar{L}$  に及ぼす影響を図2(c)と2(d)に示す。図2(c)より、圧下率  $r$  の増加に伴って、相対接合後長さ  $l/\bar{L}$  が増大することがわかり、また、素板(a)のみに後方張力  $(T_b)_a$  を加えた場合に、 $(T_b)_a$  の増加に伴って  $l/\bar{L}$  が減少するが、素板(b)のみに後方張力  $(T_b)_b$  を加えた場合には、 $(T_b)_b$  の増加に伴って、 $l/\bar{L}$  が増大することがわかる。

図2(d)より、素板(a)の後方張力  $(T_b)_a$  を増加させることにより、相対滑り量  $\chi/\bar{L}$  を増加させることができることがわかる。また、圧下率の増加に伴って、 $\chi/\bar{L}$  がいったん減少した後増加する、すなわちその極小値が約  $r=30\%$  の付近に存在することがわかる。

4.2 ロール半径と総板厚との比  $R/t_i$  の影響

ロール半径・総板厚比  $R/t_i$  が相対接合後長さ  $l/\bar{L}$  と相

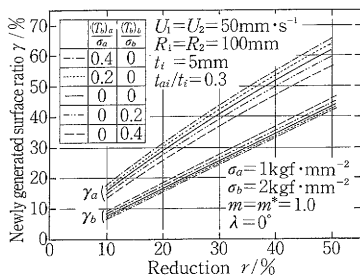


図2(a) 後方張力が新生面生成率に及ぼす影響

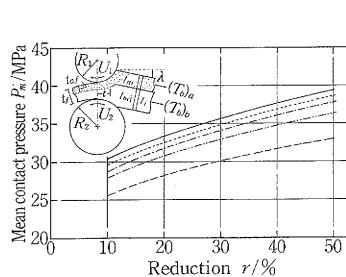


図2(b) 後方張力が面圧に及ぼす影響

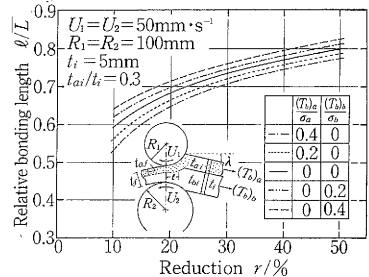


図2(c) 後方張力が接合後長さに及ぼす影響

研究速報

対滑り量 $\chi/\bar{L}$ に及ぼす影響を図3(a)と3(b)に示す。図3(a)より、圧下率 $r$ の増加と $R/t_i$ の増加に伴って、相対接合後長さ $l/\bar{L}$ が増大することがわかる。また、 $l/\bar{L}$ の圧下率 $r$ の増加による増大率は、 $R/t_i$ の増加に伴って小さくなることもわかる。

図3(b)より、 $R/t_i$ の増加に伴って、相対滑り量 $\chi/\bar{L}$ が減少することがわかる。また、圧下率 $r$ の増加に伴って、 $\chi/\bar{L}$ がいったん減少した後増加する傾向は図2(d)の場合と同様であるが、この極小値に対応する圧下率 $r$ は $R/t_i$ の増加に伴って、小さくなることがわかる。

4.3 摩擦定数 $m$ ,  $m^*$ の影響

ロール・素板間の摩擦定数 $m$ と素板(a), (b)間の摩擦定数 $m^*$ が相対接合後長さ $l/\bar{L}$ に及ぼす影響について、ロール・素板間の摩擦定数が増加すると、相対接合後長さが増大するが、素板(a), (b)間の摩擦定数が増加すると、 $l/\bar{L}$ が減少する結果が得られた<sup>9)</sup>。また、摩擦定数が相対滑り量に及ぼす影響については、ロール・素板間の摩擦定数 $m$ が増加すると、相対滑り量 $\chi/\bar{L}$ が増大するが、素板(a), (b)間の摩擦定数 $m^*$ が増加すると、 $\chi/\bar{L}$ が減少する結果も得られている<sup>9)</sup>。

4.4 ロール半径比 $R_1/R_2$ の影響

ロール半径比 $R_1/R_2$ が相対接合後長さ $l/\bar{L}$ に及ぼす影響については、圧下率 $r$ が増加すると、 $l/\bar{L}$ が単調に増大する結果が得られた<sup>9)</sup>。また、ロール半径比 $R_1/R_2$ が相対滑り量 $\chi/\bar{L}$ に及ぼす影響については、半径比 $R_1/R_2$ の増

加に伴って、相対滑り量 $\chi/\bar{L}$ が減少することと、圧下率 $r$ が増加すると、 $\chi/\bar{L}$ は、圧下率 $r=30\%$ のあたりで極小値を示すという結果が得られている<sup>9)</sup>。

4.5 ロール周速比 $U_1/U_2$ の影響

ロール周速比 $U_1/U_2$ が相対接合後長さ $l/\bar{L}$ と相対滑り量 $\chi/\bar{L}$ に及ぼす影響を図4(a)と4(b)に示す。図4(a)により、圧下率 $r$ の増加に伴って、 $l/\bar{L}$ は単調に増大するが、 $l/\bar{L}$ の周速比 $U_1/U_2$ の増加による変化率は圧下率の増加に伴って小さくなる。また、 $U_1/U_2$ の増加に伴って、 $l/\bar{L}$ は約 $U_1/U_2=1.1$ の近傍で極大値を示す傾向がある。

図4(b)より、 $U_1/U_2$ が増加すると、まず相対滑り量 $\chi/\bar{L}$ が減少すること、また、圧下率 $r$ が増加すると、 $\chi/\bar{L}$ が極小値を示し、その発生位置は $U_1/U_2$ の減少に伴って、高圧下率側に動くこともわかる。

4.6 入射角 $\lambda$ の影響

素板の入射角 $\lambda$ が相対接合後長さ $l/\bar{L}$ と相対滑り量 $\chi/\bar{L}$ に及ぼす影響を図5(a)と5(b)に示す。図5(a)より、圧下率 $r$ の増加に伴って、 $l/\bar{L}$ が単調に増大するが、入射角 $\lambda$ が増加すると、 $l/\bar{L}$ は入射角 $\lambda=0.2^\circ$ の近辺で極大値を示すことがわかる。

図5(b)より、入射角 $\lambda$ の増加に伴って、相対滑り量 $\chi/\bar{L}$ は単調に増加すること、また、 $\lambda$ の値いかんによらず、 $\chi/\bar{L}$ はほぼ $r=30\%$ の近辺で極小値を示すことがわかる。

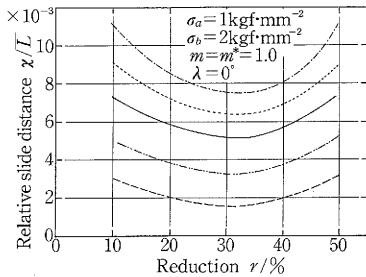


図2(d) 後方張力が相対滑り量に及ぼす影響

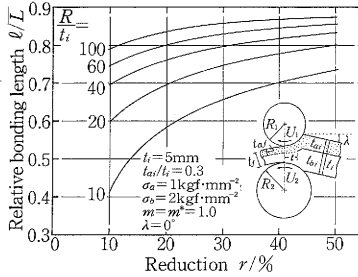


図3(a) ロール半径と総板厚との比が接合後長さ $l/\bar{L}$ に及ぼす影響

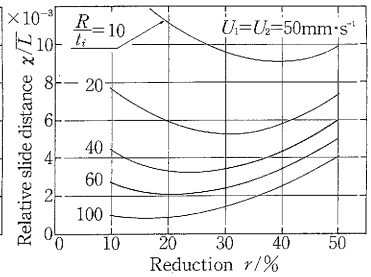


図3(b) ロール半径と総板厚との比が相対滑り量に及ぼす影響

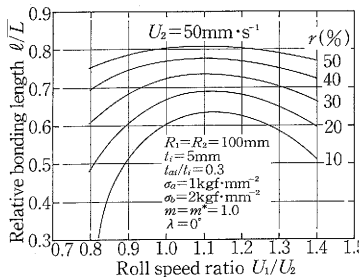


図4(a) ロール周速比が接合後長さ $l/\bar{L}$ に及ぼす影響

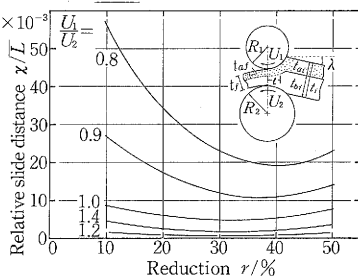


図4(b) ロール周速比が相対滑り量 $\chi/\bar{L}$ に及ぼす影響

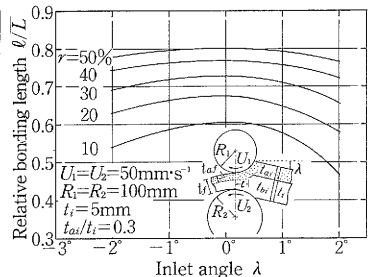


図5(a) 素板の入射角が接合後長さ $l/\bar{L}$ に及ぼす影響

研究速報

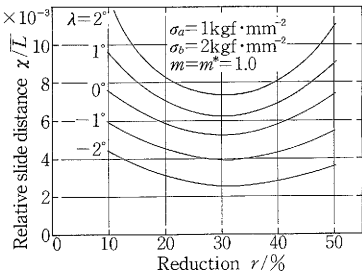


図5(b) 素板の入射角が相対滑り量に及ぼす影響

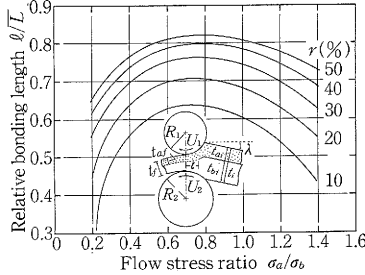


図6(a) 素板の変形抵抗比が接合後に及ぼす影響

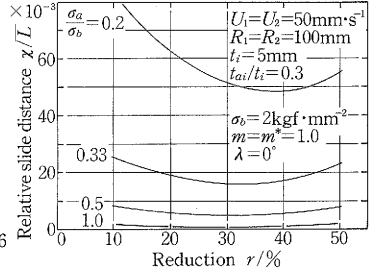


図6(b) 素板の変形抵抗比が相対滑り量に及ぼす影響

4.7 変形抵抗比 $\sigma_a/\sigma_b$ の影響

素板(a)(b)の変形抵抗比 $\sigma_a/\sigma_b$ が相対接合後長さ $l/\bar{L}$ と相対滑り量 $\chi/\bar{L}$ に及ぼす影響を図6(a)と6(b)に示す。図6(a)より、 $\sigma_a/\sigma_b$ のいかんによらず、圧下率 $r$ の増加に伴って、 $l/\bar{L}$ が単調に増大すること、また、 $l/\bar{L}$ は約 $\sigma_a/\sigma_b=0.7$ の近辺で極大値を示すこと、などがわかる。

図6(b)より、変形抵抗比 $\sigma_a/\sigma_b \le 1.0$ の場合、 $\sigma_a/\sigma_b$ の減少に伴って、相対滑り量 $\chi/\bar{L}$ が増加することがわかる。

4.8 解析結果のまとめ

各種の加工条件因子が圧延後の製品の板厚比 $t_{ar}/t_r$ 、素板(a)、(b)の新生面生成率 $\gamma_a$ 、 $\gamma_b$ 、相対接合後長さ $l/\bar{L}$ 、素板界面での相対滑り量 $\chi/\bar{L}$ 、面圧 $P_m^*$ に及ぼす影響をまとめると、次のことが言える。

- ① 素板(a)に加える後方張力 $(T_b)_a$ 、ロール・素板間の摩擦、入射角 $\lambda$ 、圧下率 $r$ を増加させることにより、素板(a)の新生面生成率 $\gamma_a$ を増加させることができる。素板(b)に加える後方張力 $(T_b)_b$ 、素板(a)、(b)間の摩擦、半径・総板厚比 $R/t_i$ 、半径比 $R_1/R_2$ 、周速比 $U_1/U_2$ 、変形抵抗比 $\sigma_a/\sigma_b$ 、圧下率 $r$ を増加させることにより、素板(b)の新生面生成率 $\gamma_b$ を増加させることができる。
- ② 素板(b)のみに加えた後方張力 $(T_b)_b$ 、素板(a)、(b)間の摩擦、半径・総板厚比 $R/t_i$ 、圧下率 $r$ を増加させることにより、または、ロール・素板間の摩擦、素板(a)の板厚比 $t_{ai}/t_i$ を減らすことにより、接合後長さを増加させることができる。また、半径比 $R_1/R_2$ 、周速比 $U_1/U_2$ 、変形抵抗比 $\sigma_a/\sigma_b$ 、入射角 $\lambda$ については、 $l/\bar{L}$ を最大にする最適値が存在することがわかる。
- ③ 素板(a)に加える後方張力 $(T_b)_a$ 、ロール・素板間の摩擦、入射角 $\lambda$ を増加させることにより、または、半径・総板厚比 $R/t_i$ 、半径比 $R_1/R_2$ 、周速比 $U_1/U_2$ を減らすこ

とにより、素板界面での相対滑り量 $\chi/\bar{L}$ を増加させることができる。

- ④ ロール・素板間の摩擦、素板(a)、(b)間の摩擦、半径・総板厚比 $R/t_i$ 、半径比 $R_1/R_2$ 、変形抵抗比 $\sigma_a/\sigma_b$ 、圧下率 $r$ を増加させることにより、または、入射角 $\lambda$ 、素板(a)の板厚比 $t_{ai}/t_i$ を減らすことにより、素板界面での平均面圧 $P_m^*$ を増加させることができる。

5. ま と め

本研究は、異なる金属素板を重ね合わせ、圧延しつつ圧着させるクラッド圧延について、純力学的解析によって、幾何的・加工条件因子が接合挙動を支配すると思われる因子、すなわち、新生面率、接合後長さ、相対滑り量および面圧に与える影響について、体系的な検討を行った。実際には、圧接圧延法によってクラッド板の界面をより確実に接合させるために、圧延前のワイヤーブラシングによる金属表面の酸化膜の除去、加熱による素板界面の異種金属原子の拡散の促進、圧延後の熱処理等も含めて金属学的問題も考慮しつつ、検討する必要があると思われる。今後は、実験との比較を通して、本解析モデルの有用性と汎用性を検討する予定である。

(1989年6月5日受理)

参 考 文 献

- 1) 小西・参木：塑性と加工，19-213 (1978-10)，814。
- 2) 中村：同上，28-322 (1987-11)，1087。
- 3) 田端・真崎：同上，28-322 (1987-11)，1094。
- 4) 川並・吉原：鉄と鋼，74-4 (1988)，27。
- 5) 城田・田頭：塑性と加工，24-268 (1983-5)，480。
- 6) 牧清・中村・松田・永井：同上，30-336 (1989-1)，71。
- 7) 木内・黄・新谷：39回塑加連講論 (1988)，553。
- 8) 木内・黄：平元春塑加講論 (1989)，681。