

介在物を有する板材の圧延による欠陥（空隙）の発生挙動の解析

Study on Rolling of Sheet Containing Inclusions

木 内 学*・黄 永 茂*
Manabu KIUCHI and Yeong-Maw HWANG

1. ま え が き

金属材料の強度・耐摩耗性・弾性率などの特性を向上させるために、母材中にセラミック粒子や繊維などの強化材を入れ、粒子強化型あるいは繊維強化型の複合材料（いわゆるP.R.M., F.R.M.）の開発が盛んに試みられているが¹⁾²⁾、これらの金属基複合材料を圧延加工する際、強化材（以下、”介在物”と言う）の前方または後方に空隙が発生する場合があることが実験的に確かめられている³⁾⁴⁾。また、異種金属素板を重ね合わせ、圧延しつつ接合するいわゆる複合化圧延加工においては、素板界面における介在物（酸化物等）の存在は、接合の良否に大きな影響を与える。

本研究は、母材に比して著しく固い介在物を有する板材の圧延時に、介在物の周辺に発生する可能性のある空隙の挙動の解明を目指している。すなわち、筆者らがすでに提案した汎用性のある非対称複合圧延解析モデル⁵⁾を拡張して、被圧延材中の介在物の前方または後方に発生することが予想される空隙の挙動をシミュレートできる解析モデルの開発を試み、これを用いて、各加工条件因子が空隙の発生限界に及ぼす影響について、検討した結果を報告する。

2. 解析モデルの構成

介在物を有する被圧延材の圧延解析モデルの概要を図1に示す。図中に示すように、当面、介在物が被圧延材の板厚(y)方向の中央面に位置するものとする。ロール入口での剛塑性境界を圧延(x)方向と垂直な断面 B_1B_0 、ロール出口での剛塑性境界を同じく断面 A_1A_0 で近似する。介在物全体がロールバイト内に入っている場合の被圧延材の塑性域を五つの領域 (ZONE (I)~(V)) に分けて考えるものとする(図1を参照)。かつ、以下の仮定を用いる。

(1) 被圧延材は平面ひずみ変形を受けるものとする。

- (2) 介在物の縦断面は矩形(長さ l , 高さ $2h$)であり、かつ変形しない(剛体)ものとする。
- (3) 介在物と被圧延材の間には滑りが許容されるものとする。
- (4) ZONE (I), (II)の間の界面およびZONE (IV), (V)の間の界面は円弧で近似できるものとし、それぞれの半径を R_1^* , R_2^* とする。
- (5) 介在物の前方(境界 Γ_1)における被圧延材の圧延方向速度 u_{5n} が介在物の速度 u_n より大きい場合、または、介在物の後方(境界 Γ_2)における被圧延材の圧延方向速度 u_{2n} が介在物の速度 u_n より遅い場合には、介在物の前方または後方に空隙が発生するものとする。

したがって、前方の空隙の長さ l_{50} または後方の空隙の長さ l_{20} は、介在物の速度 u_n と介在物の前方・後方における被圧延材の速度 u_{5n} , u_{2n} によって決まり、式(1)のよ

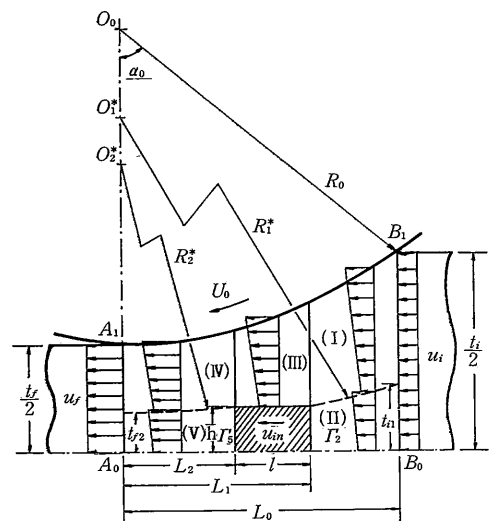


図1 介在物を有する板材の圧延解析モデル

*東京大学生産技術研究所 第2部

研究速報 うに近似することができる。

$$l_{su} = \sum(u_{sh} - u_{in}) \Delta t_1 \quad (1)$$

$$l_{2u} = \sum(u_{in} - u_{2h}) \Delta t_1$$

ただし、 Δt_1 は各ステップの経過時間(= $\Delta L_2/u_{in}$)である。

各塑性域での速度場を構成する際の考え方は、すでに提案した非対称複合圧延解析モデル⁹⁾の場合と同様であるため、速度場を導出する過程についてはここでは省略する(詳細は文献5を参照されたい)。速度場を最適化するための可変パラメータとしては、被圧延材の流入速度 u_1 、入口におけるZONE (II)の厚さ t_{11} 、出口におけるZONE (V)の厚さ t_{12} 、介在物の速度 u_{in} 、および $x=L_1$ (介在物の後方)と $x=L_2$ (介在物の前方)における速度勾配 f_{13} と f_{34} の合計6個となる。

なお、計算手順のフローチャートを図2に示す。

3. 速度場の解析例

圧延条件をロール周速 $U_0=50\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、ロール半径 $R_0=100\text{mm}$ 、被圧延材の初期板厚 $h_0=10.0\text{mm}$ 、圧下率 $r=30\%$ 、ロールと被圧延材との界面での摩擦係数 $m=1.0$ 、被圧延材の変形抵抗 $\sigma=1.0\text{kgf}\cdot\text{mm}^{-2}$ 、介在物の相対的大きさを $l/h_0=0.2$ 、 $2h/h_0=0.2$ 、介在物の前方から出口までの距離 L_2 を $1/2L_0$ (L_0 はロールと被圧延材との投影接触長さ)として、最適化した速度場を図3に示す。

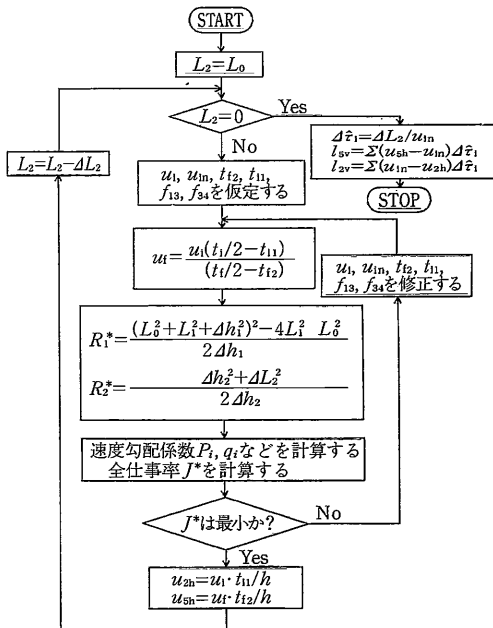


図2 空隙の発生挙動の数値計算のフローチャート

図より、構成した速度場はすべての境界条件を満足していること、最適化した介在物の速度は、 $u_{in}=46.5\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ になるが、介在物の前方・後方にある被圧延材の速度は、それぞれ $u_{sh}=48.4\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $u_{2h}=44.4\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ になるので、上記圧延条件下では、介在物の前方・後方に空隙が発生することがわかる。

圧延条件を $U_0=50\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $R_0=100\text{mm}$ 、 $h_0=10\text{mm}$ 、 $r=50\%$ 、 $m=1.0$ 、 $\sigma=1.0\text{kgf}\cdot\text{mm}^{-2}$ 、介在物の相対的大きさを $l/h_0=0.04$ 、 $2h/h_0=0.04$ として、介在物がロールバイトに入ってから出口に至るまでの各位置における最適化した介在物の速度 u_{in} およびその前方・後方にある被圧延材の速度 u_{sh} 、 u_{2h} を図4に示す。図より、介在物の前方にある被圧延材の速度 u_{sh} は常に介在物の速度 u_{in} より大きく、逆に、介在物の後方にある被圧延材の速度 u_{2h} は常に u_{in} より小さいことがわかる。すなわち、介在物の前方・後方において空隙が発生することを示している。

圧下率 $r=20\%$ 、他の圧延条件が図4と同様である場合の最適化した速度 u_{in} 、 u_{sh} 、 u_{2h} を図5に示す。圧下率 r が小さいため、入口での被圧延材速度 u_1 は図4の場合より大きくなるが、出口での被圧延材の速度と介在物の速度は図4の場合より小さくなる。また、 u_{in} と u_{sh} の差あるいは u_{in} と u_{2h} の差(すなわち介在物の前方・後方に空隙が発生するか否かを表す目安)は図4の場合より小さくなる。すなわち、圧下率 r の減少に伴って、空隙が発生しにくくなることを示している。

介在物の相対的大きさを $l/h_0=0.01$ 、 $2h/h_0=0.01$ とし、他の圧延条件が図5と同様である場合の解析結果を図6に示す。図より、明らかに、介在物が小さくなるほど、 u_{in} と u_{sh} の差あるいは u_{in} と u_{2h} の差が小さくなる、すなわち、空隙が発生しにくくなることがわかる。

以上の結果より、圧下率 r が大きくなるほど、または、介在物が大きくなるほど、介在物の前方・後方に空隙が発生しやすくなると言える。

4. 各圧延条件因子の影響

ロール半径 $R_0=100\text{mm}$ 、ロール周速 $U_0=500\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$

$$U_0=50 \quad R_0=100 \quad t_1=10 \quad r=30\% \quad L_0=17.3$$

$$l=2.0 \quad 2h=2.0 \quad m=1.0 \quad \sigma=1.0 \quad L_2=L_0/2$$

$$R_1^*=413 \quad R_2^*=429 \quad u_{sh}=48.4 \quad u_{2h}=44.4$$

$$u_{in}=46.5$$

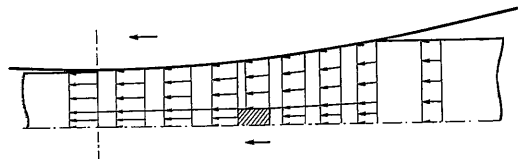


図3 介在物を有する板材の最適化した速度場

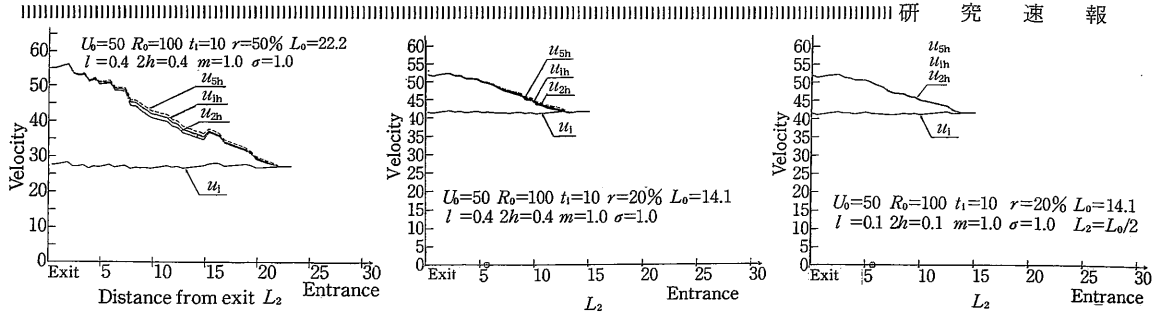


図4 介在物とその前方・後方の被圧延材の速度の推移 ($r=50\%$)

図5 介在物とその前方・後方の被圧延材の速度の推移 ($r=20\%$)

図6 介在物とその前方・後方の被圧延材の速度の推移 ($l/t_1=0.01, 2b/t_1=0.01$)

として、介在物の前方・後方における空隙の発生およびその長さに及ぼす各圧延条件因子の影響について調べた結果を以下に示す。ただし、解析結果の表示に際しては、介在物の長さ l を用いて、空隙の長さ l_0 を無次元化してある。解析の種類と条件をまとめて、表1に示す。

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 ロール半径・初期板厚比 R_0/t_1 の影響

ロール半径・初期板厚比 R_0/t_1 が変化する場合に、圧下率 r が介在物の前方・後方における空隙の相対長さ l_0/l ($l_{50}/l, l_{20}/l$) に及ぼす影響を図7に示す。図より以下のことがわかる。まず、一般的に r の増加に伴って、 l_{50}/l または l_{20}/l は、いずれも大きくなる。かつ、 l_{50}/l は常に l_{20}/l より大きい。また、 R_0/t_1 が大きくなるほど、 $l_{50}/l, l_{20}/l$ 共に大きくなる。すなわち、圧下率や使用するロール径を小さくすることにより、空隙を発生しにくくすることができる。

4.2 ロール・被圧延材間の摩擦定数 m の影響

ロール・被圧延材間の摩擦定数 m が介在物の前方・後方における空隙の相対長さ l_0/l ($l_{50}/l, l_{20}/l$) に及ぼす影響を図8に示す。図より、 m を減少させることにより、 l_0/l を減少させることができる。また、圧下率 $r=8\%$ 以下の場合、介在物の前方または後方において空隙が発生しないことがわかる。

4.3 介在物の相対的大きさ $2h/t_1$ の影響

介在物の形状比 $l/2h$ を一定にし、介在物の相対的大きさ、すなわち介在物の高さと同様に被圧延材の初期板厚との比

$2h/t_1$ が介在物の前方・後方における空隙の相対長さ l_0/l ($l_{50}/l, l_{20}/l$) に及ぼす影響を図9に示す。図中の縦軸は介在物の長さ l を用いて、空隙の長さ l_0 を無次元化したものであるため、介在物の相対的大きさ $2h/t_1$ が大きくなるほど、空隙の相対長さ l_0/l は小さくなる。もし空隙の長さ l_0 を被圧延材の初期板厚 t_1 で無次元化すれば、 $2h/t_1$ の増加に伴って、 l_0/t_1 は大きくなる。

4.4 介在物の形状比 $l/2h$ の影響

介在物の相対的大きさ $2h/t_1$ を一定にし、介在物の形状比 $l/2h$ がその前方・後方における空隙の相対長さ l_0/l ($l_{50}/l, l_{20}/l$) に及ぼす影響を図10に示す。図中の縦軸は、図9と同じように介在物の長さ l を用いて、空隙の長さ l_0 を無次元化した値を示す。介在物の形状比 $l/2h$ が大きくなるほど、空隙の相対長さ l_0/l は減少する。また、 $l/$

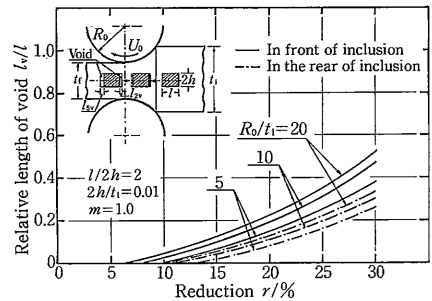


図7 圧下率が空隙の相対長さに及ぼす影響

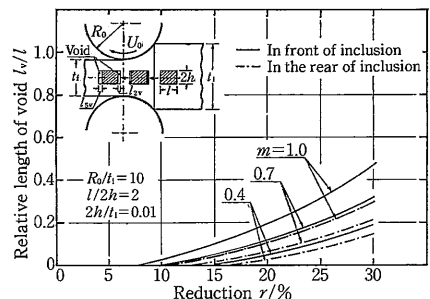


図8 摩擦定数が空隙の相対長さに及ぼす影響

表1 解析の加工条件と範囲

NO	R_0/t_1	m	$2h/t_1$	$l/2h$	$r/\%$
1	5~20	1.0	0.01	2.0	5~30
2	10	0.4~1.0	0.01	2.0	5~30
3	10	1.0	0.005~0.02	2.0	5~30
4	10	1.0	0.01	1.0~3.0	5~30
5	5~30	1.0	0.01	1.0~2.0	5~20

研 究 速 報

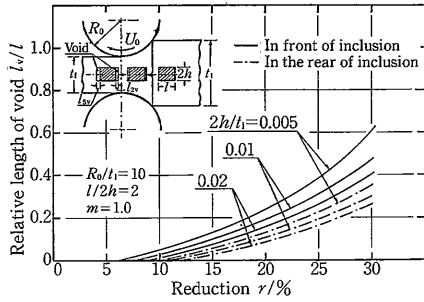


図9 介在物の相対的大きさが空隙の相対長さに及ぼす影響

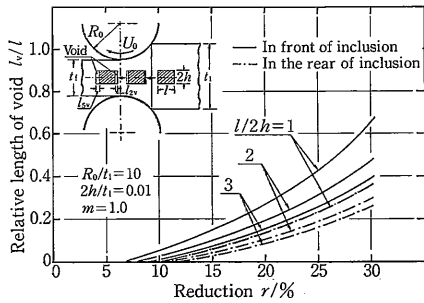


図10 介在物の形状比が空隙の相対長さに及ぼす影響

2hが大きくなるほど、 l_v/h は大きくなる。

4.5 空隙の発生限界

圧下率 r とロール半径・初期板厚比 R_0/t_1 が空隙の発生限界に与える影響を図11に示す。図より、全般的に、ロール半径・初期板厚比 R_0/t_1 が小さくなるほど、圧下率 r が大きくなっても、空隙が発生しにくくなること、また、介在物の相対的大きさ $2h/t_1$ が小さくなるほど、空隙の発生しない圧下率 r の限界が高くなること、などがわかる。

4.6 解析結果のまとめ

各種の加工条件因子が介在物の前方・後方における空隙の相対長さ l_{2U}/l 、 l_{5U}/l 、 l_{2U}/h 、 l_{5U}/h に及ぼす影響をまとめて、表2に示す。ただし、該当する加工条件因子の増加に伴って、'∧'は上述の l_{2U}/l 、 l_{5U}/l 、 l_{2U}/h 、 l_{5U}/h が増加、'∨'はそれらが減少する、ことを意味する。

表2を総括すると、ロール半径・初期板厚比 R_0/t_1 、ロールと素板間の摩擦定数 m 、介在物の相対的大きさ $2h/t_1$ 、介在物の形状比 $l/2h$ 、圧下率 r 、を小さくすることにより、前方または後方における空隙の相対長さ l_{5U}/h 、 l_{2U}/h を小さくする、すなわち、空隙が発生しにくくすることができると言える。

5. ま と め

本研究は、介在物を有する板材の圧延時に予想される欠陥(空隙)の発生挙動の解明を目指しており、すでに提案した非対称複合化圧着圧延解析モデルを拡張して、

表2 解析結果のまとめ

解析種類	前方空隙の相対長さ		後方空隙の相対長さ	
	l_{5U}/l	l_{2U}/h	l_{5U}/l	l_{2U}/h
ロール半径・板厚比 R_0/t_1	∧	∧	∧	∧
摩擦定数 m	∧	∧	∧	∧
介在物の大きさ $2h/t_1$	∨	∧	∨	∧
介在物の形状比 $l/2h$	∨	∧	∨	∧
圧下率 r	∧	∧	∧	∧

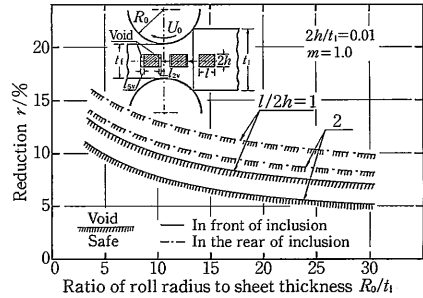


図11 介在物の形状比を変化させた場合の空隙の発生限界

介在物の前方または後方に発生することが予想される空隙の生成と成長をシミュレートできる解析モデルの開発を行った。いくつかの数値計算をとおして、速度場の妥当性を明らかにし、また、ロール半径・被圧延材の初期板厚比、ロール・被圧延材間の摩擦などの圧延条件因子と、介在物の形状比、介在物の相対的大きさなどの材料条件因子とが、介在物の前方・後方での空隙の発生に及ぼす影響について、系統的に考察した。これらの結果は従来経験的に知られている事実と定性的によく一致し、本解析手法が、空隙の発生挙動に関する体系的な知見を与えることが判明した。なお、本解析モデルを構成する際に、介在物が被圧延材の中央面に位置すると仮定しているが、解析手法そのものは介在物の位置により制約を受けないので、今後は、介在物の位置の影響も含めて、広く空隙の発生挙動について検討を進める予定である。

(1990年5月8日受理)

参 考 文 献

- 1) 木内 学・杉山澄雄・富岡美好：塑性と加工，30-340 (1989)，658
- 2) 木内 学・杉山澄雄：同上，23-260 (1982)，915.
- 3) 高田 寿・金子晃司・井上 毅・木下修司：神戸製鋼技報，27-4 (1977)，72.
- 4) 高田 寿・井上 毅・金子晃司・木下修司：同上，29-4 (1979)，58.
- 5) 木内 学・黄 永茂：塑性と加工，30-344 (1989)，1308.