

多軸複合押出しに関する研究・第1報

——被加工材の変形挙動の数値シミュレーション——

Study on Complex Extrusion of Multi Billets · 1

木 内 学*・星 野 倫 彦*

Manabu KIUCHI and Michihiko HOSHINO

1. 緒 言

筆者らは、多様な複合材の製造を可能ならしめる多軸複合押出しの開発を目指している。この多軸複合押出法は、複数のビレットを並列的に押しつつダイス内で合流・一体化して所要の複合材を製造しようとするものであり、それぞれのビレットごとに望ましい変形量と押出速度、あるいは接合界面における圧力やすべり量等に関する望ましい条件を与えることが可能であり、複数の単純な形状のビレットより複雑多様な形状・寸法を有する製品を得ることができる新しい押出加工法である。本報においては、まずこの多軸複合押出加工法を開発する上で必要な知見を得るための基礎的な実験を行い、この結果を筆者らが開発を進めている押し・引抜き加工汎用シミュレータを用いた解析結果と比較検討し考察を加えたので、その経過を報告する。

2. 実験装置および実験方法

多軸複合押出し実験として、2本のビレットから一体化された一枚の板材を押し出す場合を想定し、図1の実験装置を作成した。2本のポンチによって独立したビレットが並列的にダイス孔を通して押し出され、一体化され板材となって製品化される構造となっている(図2参照)。2本の円筒コンテナの内径は同じであるが、ポンチは別々に押すことができる。また、2本のコンテナ間の距

離やダイスの左右側面の位置は、スペーサを交換することにより変化させることができる。今回の実験では、2本のコンテナから押し出された被加工材が合流し十分な圧着を得るために必要な加工条件を調べることを目的とし、同材質のビレットを左右対称条件の下で押し出している。被加工材としては、鋳造後切削加工した純鉛ビレットを用い、ビレットをコンテナに入れる際に少量の5-56(呉工業(株)製)を潤滑剤として用いたが、それ以外は潤滑剤を用いず、冷間で押し出しを行った。

3. 解析方法および解析モデル

押し・引抜き加工の汎用シミュレータについては既報¹⁾で述べたので、その説明は省略し、ここでは、本シミュレータを応用するに際して必要な多軸複合押し加工の速度場モデルについて説明する。

今回の実験条件に合わせて製品の1/4を解析対象とし、図3に示す解析範囲において被加工材の合流部およびダイス側部の2ヶ所にデッドゾーンを想定した(図2参照)。それぞれのデッドゾーン長さ $H1$, $H2$ は最適化パラメータとし、デッドゾーンと塑性域との境界面は指数関数曲線を線素とする曲面で近似した。塑性域の y 軸方向(押し出方向)にみた入口境界面(平面)の位置を $y=y_{s1}$ (ダイス入口面)、出口境界面(平面)の位置を $y=y_{s2}$ と仮定すると、既報¹⁾で説明した手順に従って動的相容速度場を構成することができる。速度場の表

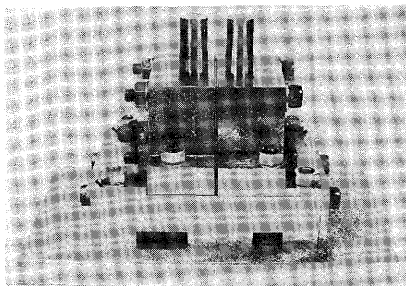


図1 多軸複合押し実験装置

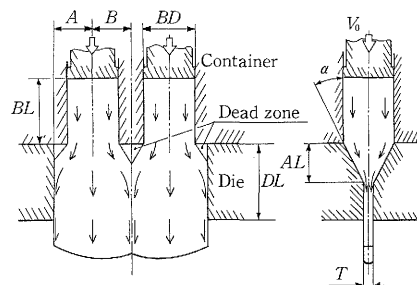


図2 多軸複合押し概略図

*東京大学生産技術研究所 第2部

研究速報

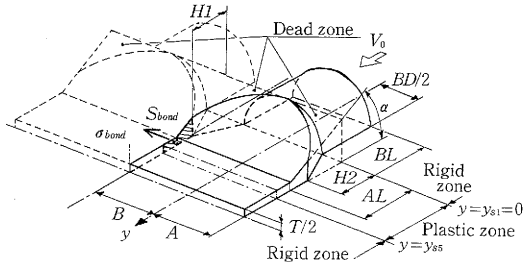


図3 多軸複合押し出しの解析モデル

示式は、既報と同じであるので参照されたい。なお、以下の解析においては、軸方向速度の偏差成分を表す関数 $P(r, \varphi, y)$ として式(1)を用いるものとする。

$$P(r, \varphi, y) = f_1(y) \cdot f_2(\varphi) \cdot f_3(r) \quad (1)$$

ただし、

$$f_1(y) = 0 \quad (y < y_{s1}, y_{ss} \leq y)$$

$$f_1(y) = C \cdot \left(\frac{y - y_{s1}}{DL}\right)^D \cdot \left(\frac{y - E}{DL}\right) \cdot \left(\frac{y_{ss} - y}{DL}\right)^F \quad (y_{s1} \leq y < y_{ss})$$

$$f_2(\varphi) = G \cdot \varphi^2 + H \cdot \varphi + 1.0$$

$$f_3(r) = I \cdot \left(\frac{2 \cdot r}{BD}\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot r}{BD}\right)$$

速度場の表示式には直接物理量を表す最適化パラメータが4個 ($H1, H2, n, y_{ss}$)、偏差速度成分の分布を表示するためのパラメータが7個 (C, D, E, F, G, H, I) 含まれている。被加工材の全仕事率の最小化を通してこの最適化パラメータを決定し、押し出加圧力や速度分布およびデッドゾーン形状・寸法を求める。

4. 解析手順と圧着応力の評価方法

多軸複合押し出し加工を解析する場合、まず各被加工材が合流し合うこと、すなわち、個々のピレットを単独で押し出した場合のダイス孔への被加工材の充満限界²⁾(被加工材の幅広がり限界)を計算し、多軸で押し出した場合に被加工材が互いにぶつかり合う領域が存在することを確認する必要がある。次に、このぶつかり合う領域が存在する場合に関して、接合圧着の良否を予測することが求められる。圧着の良否を左右すると思われる因子は、圧着面に作用する法線方向応力と圧着面への酸化皮膜や潤滑剤等の巻き込みの有無である。酸化皮膜や潤滑剤の巻き込みに関しては、前報³⁾においてブリッジダイスによる押し出し時の被加工材の接合部へのデッドメタル表層部から流出した異物の巻き込みについて若干の考察を行ったが、これに加えて圧着応力を推定することができれば、複合押し出し加工の良否の判定と加工条件の最適化が可能となる。以下に、この圧着応力の推定に対する考え方を示す。

ある加工条件での被加工材の全仕事率 \dot{W} と、圧着面の位置を被加工材が重なり合う側に ΔL 移動した時の全仕事率 \dot{W}' の差 $\Delta \dot{W} (\dot{W} - \dot{W}')$ を求め、この $\Delta \dot{W}$ が圧着応力(圧着面に作用する法線方向応力)による仕事率と考えることにより、圧着面での平均圧着応力 σ_{bond} を式(2)で求めるものとする。

$$\sigma_{bond} = \frac{\Delta \dot{W} \cdot \Delta t}{\Delta L \cdot S_{bond}} \quad (2)$$

ただし Δt は単位時間、 S_{bond} は圧着面の面積

S_{bond} は、ダイス孔内で個々の被加工材の塑性域同士が接触している面の面積を用いることとする(図3参照)。実際の圧着応力は圧着面内で分布を持つことが予想され、その最大値で圧着応力を評価したほうが好ましいと考えられるが、圧着応力の分布についてはいまだ不明であるので、この平均圧着応力 σ_{bond} で圧着の良否を判断するものとする。

5. 実験結果と解析結果との検討

図4には、実験より得られた多軸複合押し出しの荷重-ストローク線図と解析により得られた定常押し出し状態の荷重を示す。ポンチストロークは、ピレット先端がダイス入口面位置にある状態を0とし、直径 $BD=20\text{mm}$ 、長さ $BL=50\text{mm}$ のピレットをほぼ押し出きる段階までを示してある。被加工材がダイス孔に充満するまで荷重は増加し、ダイス孔より被加工材の先端が押し出されるとほぼ定常状態になる。この定常状態の押し出加圧力に関する解析結果と実験結果とは、よい対応を示している。

図5には、実験で得られた製品を側方から見た外観と、先端の非定常部分と定常的に押し出された部分とを上方より見た外観を示す。定常に押し出された部分では、良好な圧着が達成されている。

図6には、 $\phi 20 \times L30$ の鉛ピレットの後方に半田粉末と

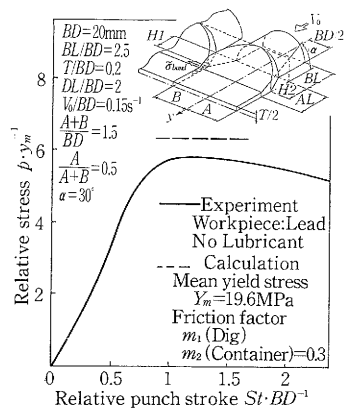


図4 多軸複合押し出しの荷重-ストローク線図

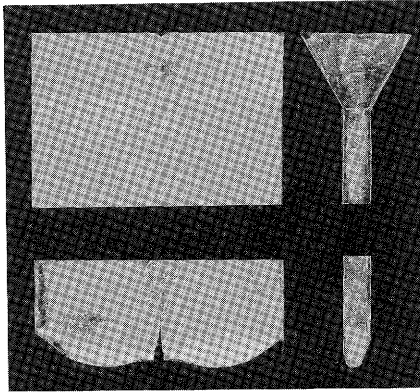


図5 押出し製品外観

黒鉛粉末を体積比で5:1に混合圧粉して得たピレットを接合して押出すことにより得られた製品の縦断面を示す。解析で想定したように、ダイスアプローチ側部と個別に押出された被加工材の合流部にデッドゾーンが存在し、側部のデッドゾーンの長さは9.5mm、合流部のデッドゾーンの長さは10.5mmであり、両者とも塑性域との境界線はほぼ直線であった。解析より得られた側部のデッドゾーン長さは9.1mm、合流部のデッドゾーン長さは9.2mmであり、曲線線素を表す最適化パラメータ n は0.999で、線素はほぼ直線となり、実験結果とよい対応を示した(図7参照)。

この解析モデルを用い、各加工条件が押出加圧力、デッドゾーン長さ、圧着応力に与える影響を調べるために、表1に示す加工条件での多軸複合押出しについて一連の解析を行った。

5-1 ピレット位置の影響

図7には、ダイス孔に対するピレットの位置を変化させた場合の解析結果を示す。ただし、ダイス出口での製品幅、すなわちダイスアプローチ側部間隔(図2中の $2 \cdot (A+B)$)に相当は一定としていることに注意されたい。ピレットがダイス孔の中央付近にある場合に、無次元化押出加圧力(p/Y_m)は最小となり、相対デッドゾ

表1 複合押出しの解析条件

$BD=20, BL=50, 2 \cdot (A+B)=60, T=4$, 押出し比2.618

Case	$A/(A+B)$	α	m_1	m_2
I	0.367	30°	0.6	0.3
	0.567			
II	0.500	15°	0.6	0.3
		60°		
III	0.500	30°	0.0 1.0	0.3

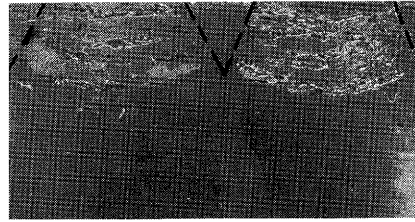


図6 ダイス孔内のデッドゾーン形状

ン長さ($H1/BD, H2/BD$)も極小値を示す。無次元化平均圧着応力(σ_{bond}/Y_m)は、ピレットが外側に移動すると増加するが、これは全体の押出加圧力が増加することと、圧着面で左右から合流する流れの角度が大きくなることによるものと思われる。図8には、それぞれのピレット位置で押出した場合の被加工材の形状とその表面の速度分布を示す。圧着面を対称面として反対側にもう一方の被加工材が存在することに注意されたい。ピレットが外側に位置した場合($A/(A+B)=0.367$)には、圧着開始点(高さ $H1$ のデッドゾーンの終了点)で被加工材が左右よりぶつかり合う角度が大きいがわかる。また、ピレットが内側に移動した場合($A/(A+B)=0.567$)は、合流点でのぶつかり合う角度が小さく、塑性域での被加工材の流れが全体的に外側に向かっていることがわかる。

5-2 ダイス半角の影響

図9には、ダイス半角を変化させた場合の解析結果を示す。押出加圧力は、あるダイス半角で最小値をとり、デッドゾーン長さは、ダイス半角が小さくすると長くなる。圧着応力は、あるダイス半角の範囲で正の値となり、ダイス半角15°と60°の場合は負となるが、これは被加工材の合流・圧着が生じない場合に相当する。

図10には、ダイス半角を15°と60°にして個々のピレットを単独で押出した場合の被加工材の形状と速度分布を示す。ダイス半角が小さい場合には、被加工材の流れは、

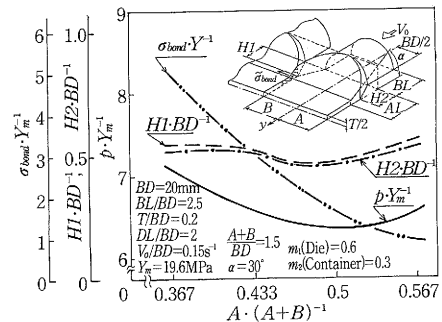


図7 ピレット位置の影響

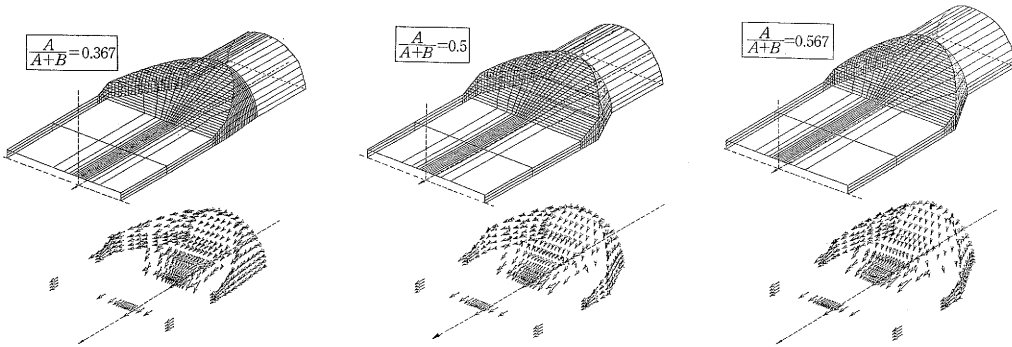


図8 ピレット位置を変えた場合の被加工材の形状と速度分布

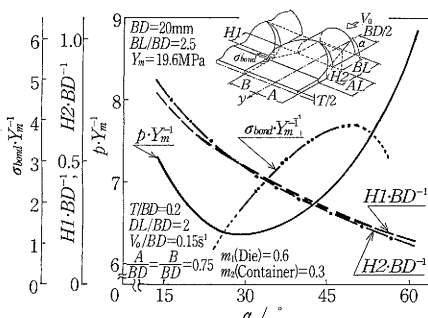


図9 ダイス半角の影響

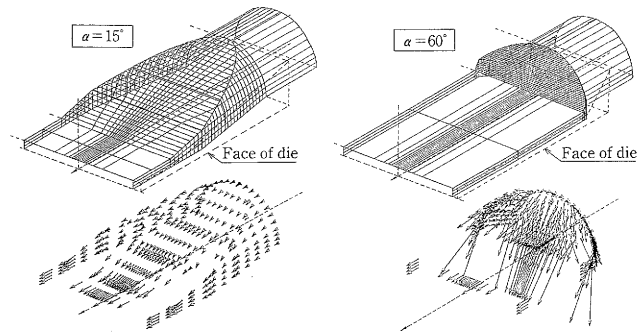


図10 ダイス半角を変えた場合の被加工材の形状と速度分布

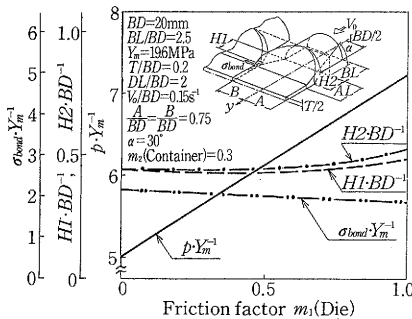


図11 ダイス面での摩擦の影響

幅方向に広がるよりも押し出し方向に優先的に流れる傾向が強くなる。ダイス半角が大きい場合は、ダイス入口で速度ベクトルの急激な方向変化があり、このことが被加工材の幅方向への広がりを阻害しているものと考えられる。また、ダイス半角が45°を越えると、解析に際して想定したデッドゾーンや塑性域がダイス入口面よりコンテナ側にも存在することが考えられ、塑性域のコンテナ側への拡がり考慮した解析を行うと結果が変化する可能性がある。

5-3 ダイス面での摩擦の影響

図11には、ダイス面での摩擦定数 m_s を変化させた場合

の解析結果を示す。押し出加圧力、デッドゾーン長さは、ダイス面での摩擦が大きくなるとそれに比例して増加するが、圧着応力はわずかであるが逆に減少する。これは、摩擦が大きい場合、被加工材のダイス面に対する相対すべり量ができるだけ小さくなるように、すなわち幅方向への流れが少なくなるように塑性流動が起こり、その結果、圧着面で被加工材がぶつかり合う速度が小さくなるためと考えられる。

6. ま と め

多軸複合押し出し加工の開発を進めるために基礎的な実験を行い、実験結果と解析結果との比較検討から想定した解析モデルの妥当性を確認した。多軸複合押し出し加工の場合に問題となる圧着について、圧着面での平均圧着応力を推定する手順を提案し、加工条件が圧着に対して与える影響についても解析を試みた。現在、異種金属を用いた多軸複合押し出し加工について実験と解析を進めており、各種複合材の製造技術の開発を目指して研究を進める予定である。(1989年5月23日受理)

参 考 文 献

- 1) 木内・星野ほか：塑性と加工, 30-336 (1989), 43.
- 2) 木内・飯島ほか：塑性と加工, 29-327 (1988), 356.
- 3) 木内・星野：第39期加連講論 (1988), 295.