

多軸複合押出しに関する研究・第2報 ——異種材の接合押出しの数値シミュレーション——

Study on Complex Extrusion of Multi Billets · 2

木内 学*・星野 倫彦*
Manabu KIUCHI and Michihiko HOSHINO

1. 緒 言

多軸複合押出し法は、複数組のコンテナ、ステム（ポンチ）を用いて、同種または異種の被加工材を並列的にダイス内に押出し、合流・接合・一体化して、所要の製品を得ようとする加工法である（図1参照）。この押出し法は、単純な形状のピレットから、従来困難と考えられてきた複雑形状品、あるいは複合化製品を製造可能とする新しい押出し加工法であり、特に、後者の製造に役立つことが予想される。

筆者らは、この多軸複合押出し法の開発を目指して理論・実験の両面から研究を進め、押出し加圧力や被加工材の変形挙動等に関する体系的なデータの収集と検討を行っている。既報¹⁾では、同材質の2本のピレットから中央で接合された板状製品への多軸複合押出しについて、実験と数値解析との両面から検討を加え、適切な加工条件を設定することにより、良好に接合された所要の製品が得られることを確認した。

本報では、異種材ピレットの多軸複合押出しを行い、異種被加工材間の流動・接合挙動について検討を加えたので、その結果を報告する。

2. 実験装置の概要

実験装置の基本的な構造ならびに操作方法については、既報¹⁾で述べたので、図2に概略図を示すのにとどめる。実験ならびに後述する解析は、2本の円柱状異種材ピレットから、中間で接合されている平板状製品を押し出す場合を対象として行った。具体的には、2本のピレットのうち一方を純鉛、他方を純錫とし、左右非対称な条件下で押し出つつ接合する問題について検討した。圧縮試験の結果より、用いた純鉛の平均変形抵抗 Y_{m1} は19.6 Mpaであり、純錫の平均変形抵抗 Y_{m2} は49.0 Mpaである。

3. 実験結果

異種材ピレットの多軸複合押出しを行う場合、ダイス内での両材の接合を安定的に達成するためには、少なくともダイス出側での両材の流出速度を一致させる必要があるが、適切な加工条件を選択しない限り、この流出速度の適合条件を満足することはできない。

押し出された製品のうち、接合が十分達成できなかった例を図3に示す。図中の製品の上部は錫、下部は鉛である。この場合、双方のポンチ速度を同一とし、ダイス出

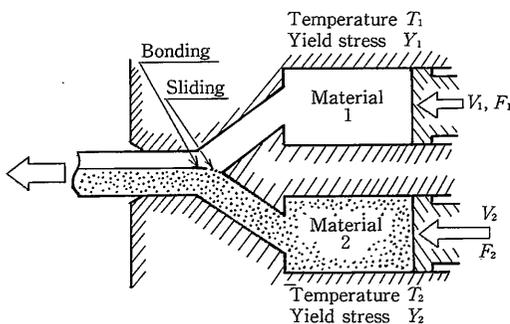


図1 多軸複合押出し加工の概念図

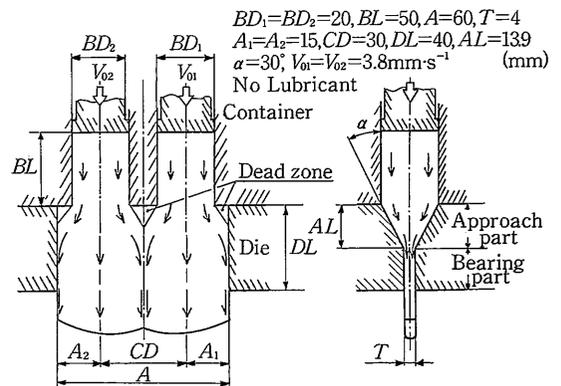


図2 多軸複合押出し実験装置

*東京大学生産技術研究所 第2部

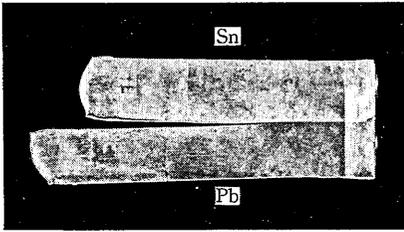


図3 接合不良の押出し製品の例

側からの拘束なしとした結果、ダイス内およびダイス出口における錫材と鉛材の速度の適合条件が満足されず、ダイス出口で両材がはく離を起こし、鉛部と錫部は別々に押出されていることがわかる。

4. 解析モデル

多軸複合押出しの各種条件下での被加工材の変形挙動を調べ、より好ましい接合を実現する加工条件を探索するために、すでに提案した解析モデル(図4参照)を用いて、一連の数値シミュレーションを行った。図中には、使用した座標軸および各部の寸法を表示してある。

既報¹⁾で用いた多軸複合押出しの解析モデルは、全体として左右対称条件下で押出す場合を対象としていたが、本報で用いた解析モデルは、すべての加工条件を左右別々に与えるように拡張してある。

図4に示すように、塑性変形域には、3種類のデッドゾーンを想定してある。それぞれのデッドゾーン長さ $H1$, $H2$, $H3$ とデッドゾーン1の頂点の位置を表す $E1$ (図5参照) は最適化パラメータとして取り扱う。ただし、既報¹⁾で用いた解析モデルでは、デッドゾーンと塑性域との境界面を指数関数曲線が線素である曲面で近似したが、本解析モデルでは、直線を線素とする曲面で近似することとした。その理由は、旧解析モデルにより得られた最適解およびこれまでの実験結果から、この境界面の線素はほぼ直線であることが判明しているためである。

図5には、正面からみた被加工材1, 2の合流界面を示す。被加工材1, 2の変形が、主としてダイスアプロ

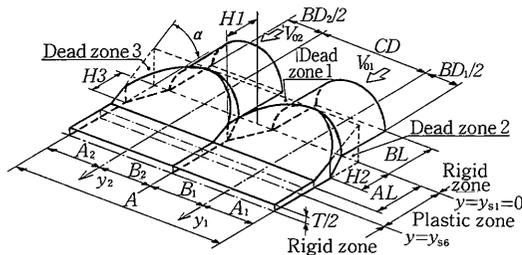


図4 解析モデル

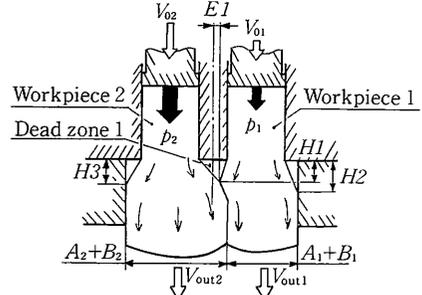


図5 合流界面のモデル

チ部 ($0 \leq y \leq AL$) で起こると考えると、ダイスアプローチ部出口 ($y = AL$) での各被加工材の幅 ($A_1 + B_1$, $A_2 + B_2$) は、ポンチ1, 2の速度 V_{01} と V_{02} 、被加工材1, 2のダイス出口での速度 V_{out1} と V_{out2} から、決定される²⁾。

被加工材1, 2間の境界面 ($H1 \leq y \leq AL$) は、デッドゾーン1の頂点 ($y = H1$) とダイスアプローチ部出口断面 ($y = AL$) での被加工材1, 2の境界線とを含む紙面に垂直な平面とする。塑性域入口断面を $y = y_{s6}$ 、出口断面を $y = y_{s6}$ とすると、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。構成された速度場の詳細については文献³⁾を参照されたい。速度場より計算される被加工材の全仕事率の最小化を通して、これらの最適化パラメータを決定し、押出し加圧力や速度分布およびデッドゾーンの形状・寸法を求める。

5. 解析条件

以下、被加工材1, 2がダイスアプローチ部出口から同じ速度で押出される場合、換言すれば、そのような速度の適合条件が満足されるよう出側から拘束した場合の被加工材の変形挙動について検討する。

まず、変形抵抗比 (Y_{m2}/Y_{m1}) とポンチ速度比 (V_{02}/V_{01}) が被加工材1, 2の変形挙動に与える影響を調べるために、一連の解析を行った。なお、設定した解析条件の詳細は、文献²⁾を参照されたい。

6. 解析結果

図6には、ポンチ速度比一定 ($V_{02}/V_{01} = 1.0$) とし、変形抵抗比 (Y_{m2}/Y_{m1}) を変化させた場合の、それぞれのポンチにかかる無次元化押出し加圧力 (p_1/Y_{m1} , p_2/Y_{m2}) と無次元化全押出し加圧力 (p_{a11}/Y_{mpro}) を示す。ただし、製品全体の等価変形抵抗 Y_{mpro} は、式(1)で定義される値である。なお、以下、断わりがある場合を除いて、無次元化押出し加圧力を単に押出し加圧力と呼ぶ。

$$Y_{mpro} = \frac{Y_{m1} \cdot V_{01} + Y_{m2} \cdot V_{02}}{V_{01} + V_{02}} \quad (1)$$

研究速報

図より、異種材ピレットの変形抵抗比の変化に伴う各ポンチ荷重の変化を知ることができる。この結果は、ポンチ1, 2の速度を同一とし、製品中の被加工材1, 2の構成(幅)比を1:1とすることを旨とする場合には、各ポンチに図に示すような異なる荷重を付加する必要がある、それによって両材間の接合を達成するための上述の速度の適合条件を満足することができること、逆にそのような荷重制御をしないと、製品中の両材の構成比が変化するか、または接合が達成できないことを意味している。

図7には、ポンチ速度比一定($V_{02}/V_{01}=1.0$)の下で、変形抵抗比(Y_{m2}/Y_{m1})の変化に伴う3つのデッドゾーンの長さやデッドゾーン1の頂点の位置の変化($E1$)を示す。被加工材1の変形抵抗が小さくなり、被加工材2の変形抵抗が大きくなると、デッドゾーン1, 2が短くなり、デッドゾーン3が長くなる。さらに、デッドゾーン1の頂点が被加工材2の方に移動し、被加工材2が滑らかに変形する状態になることがわかる。

図8には、ポンチ速度比が1.0で、変形抵抗比が1.0と5.0の場合の、被加工材1, 2の塑性域形状とダイス出口

での形状、および速度分布を示す。変形抵抗比が大きい場合、上述のデッドゾーンに関連して指摘したように、合流界面で被加工材1の流れが急変し、被加工材2が滑らかに流動していることがわかる。

図9には、ダイス出側での異種材の接合(一体化)が維持されているとの拘束条件の下に、変形抵抗比(Y_{m2}/Y_{m1})=2.0として、ポンチ速度比(V_{02}/V_{01})を変化させ

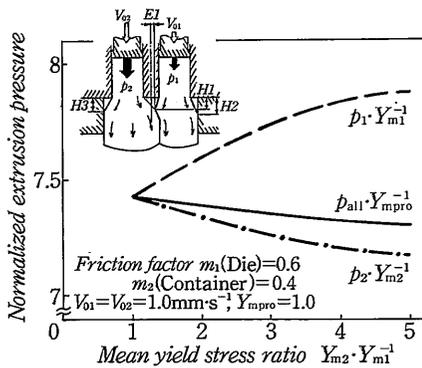


図6 変形抵抗比が押し加圧力に与える影響

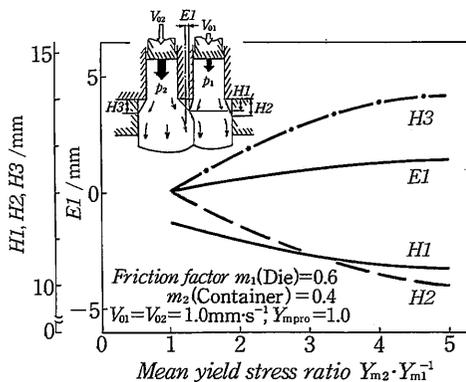


図7 変形抵抗比がデッドゾーン形状に与える影響

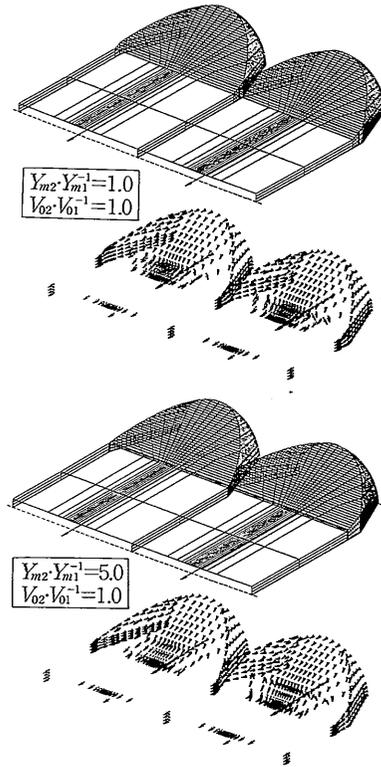


図8 変形抵抗比を変えた場合の塑性域形状と速度分布

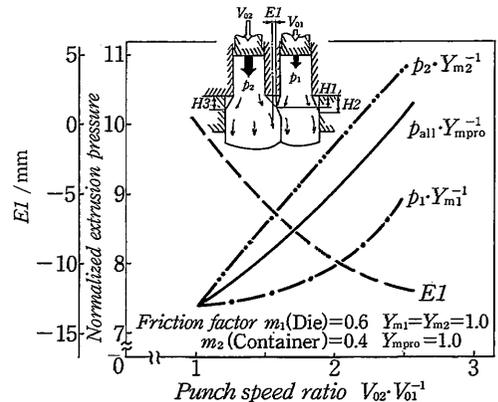


図9 変形抵抗比1.0の場合のポンチ速度比の影響

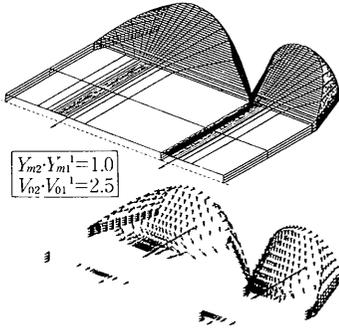


図10 ポンチ速度比2.5の場合の塑性域形状と速度分布

た場合、各ポンチの押し加圧力、全押し加圧力、およびデッドゾーン1の頂点の位置の変化を示す。ポンチ速度比が大きくなると、デッドゾーン1の頂点が被加工材1の側に移動し、全押し加圧力も増加することがわかる。この場合のデッドゾーン1の頂点の位置の変化を図10に示す。ポンチ速度比の変化に伴い、デッドゾーン1の頂点における被加工材1、2の合流が滑らかに起こる場合と、どちらかの被加工材の流れが急変する場合とがあることがわかる。実際には、軟質の被加工材1が滑らかに流れ、硬質の被加工材2の流れが急変する変形状態は予想し難いので、このようなポンチ速度比の場合には、ダイス出側からの拘束がない限り、接合が起りえないことが予想される。

以上は、いずれもダイス内における異種材間の接合が達成されるための必要条件について検討した結果であり、十分条件とはなっていない。接合が達成される十分条件については、被加工材1、2の流出速度をも可変パラメータとする解析を行う必要があるが、この問題については今後順次検討する予定である。

7. 金属学的・機械的接合 (MMB) の試行

従来、固相異種金属間の接合には、面状の界面を通して拡散により接合を達成するいわゆる拡散接合が考えられてきた。このような接合を、仮に金属学的接合と呼ぶこととすると、これに対して、界面の形状を制御して機械的な接合力を発生せしめる機械的接合が存在しうる。筆者らは、圧延・押し・鍛造加工等を応用し、上記両接合形態を同時に達成する金属学的・機械的接合 (MMB, Metallurgical Mechanical Bonding) 技術の開発を目指しているが、本多軸複合押し加工法は、ダイスの設計に自由度が大きいため、この金属学的・機械的接合 (MMB) を実現することもできる (図11参照)。

多軸複合押し法によるMMBの達成事例を以下に示

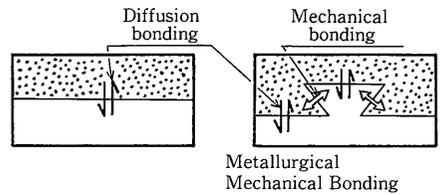


図11 MMBの概念図

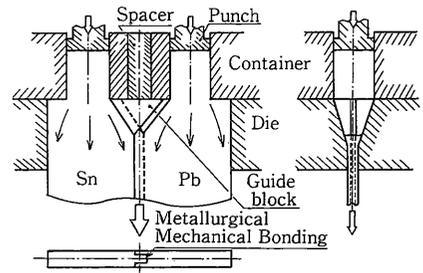


図12 MMBの基礎実験装置

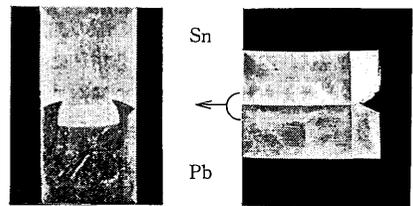


図13 ガイドブロックを用いて押し出した製品と横断面の写真

す。すなわち、図5のデッドゾーン1の個所にガイドブロックを取り付け、合流 (接合) 界面の形状を制御して凹凸形状を付与し、押し加工と同時にMMBの実現を図った例である (図12参照)。これにより、鉛-錫を接合した複合材を安定して得ることが可能となった。得られた製品の横断面の写真を図13に示す。

8. ま と め

異種金属の多軸複合押しについて、実験と解析による検討を加え、良好な接合を達成しうる適切な加工条件について考察した。さらに、接合界面の形状を制御して金属学的・機械的接合 (MMB) を実現しうることも示した。今後、さらに良好な複合化製品を得るためのデータの収集を図り、本技術の開発と応用のための研究を進める予定である。

(1990年4月27日受理)

参 考 文 献

- 1) 木内・星野：平1春塑加講論 (1989), 555.
- 2) 木内・星野：40回塑加連講論 (1989), 261.
- 3) 木内・星野ほか：塑性と加工, 30-336 (1989), 43.