

多軸複合押出し加工のアルミニウム合金粉末材料への適用に関する研究

日本大学 理工学部 機械工学科
専任講師 星野倫彦
(平成5年度研究開発助成 AF-93028)

キーワード：押出し，粉末材料，せん断付加押出し，数値シミュレーション

1. 緒 言

近年，粉末材料製品は，高密度で均一な組織を持つものが求められているが，従来これらの製品を製造する場合には，粉末材料を圧縮，焼結し，塑性加工や機械加工により成形するという方法が一般的であった。しかし，粉末材料を熱間押出しする際に，高静水圧下で大きな塑性変形を与えれば，金属粉末粒子自身の塑性変形あるいは金属粉末同士の相対すべりにより，焼結をしなくても粉末成形体の密度や粉末粒同士の結合を高めることが可能であるとの考えに基づき，摩擦押出し¹⁾や半溶融押出し²⁾を粉末材料製品の製造に適用した研究が行われた。

本研究では，予備圧縮成形した粉末材料から熱間押出しで直接板材を製造する際に，静水圧による変形だけでなく，せん断変形を付加して粉末粒子同士の相対すべりを生じさせ，製品の相対密度の向上を図ることを試みた。そして，得られた製品の各部の相対密度，組織，機械的性質を調べることで，粉末材料製品の製造にせん断付加押出しが適するか否かを検討した。実際のアルミニウム粉末を材料とした押出し実験だけでなく，プラスチックを用いたモデル実験により被加工材の流動状況を観察し，被加工材に加えらるせん断変形量を測定した。開発を進めたせん断付加押出しを数値シミュレートすることを可能とする数値解析モデルを提案し，その有用性を検討したので合わせて報告する。

2. 2段階せん断付加押出し加工の概念

図1には，2段階せん断付加押出し加工で目指す被加工材の流動状況を示す。図に示す流動状態下では，高静水圧下での厳しいせん断変形による粉末粒自身の大きな塑性変形と粉末粒同士の大きな相対すべりが生じる。この粉末粒子自身の大きな塑性変形により新生面の生成が促進され，同時に発生する粉末粒子間の相対すべりにより直ちに新生面同士が圧接され，接合する機会が高まる。その際に，相対すべりによって粉末粒子間の空隙や酸化皮膜が圧接される面より排除され，製品の相対密度と機械的性質の向上が同時に達成されることが期待できる。

しかし，図2に示す1段階せん断付加押出し装置の場合，単軸型と対向型ともにある程度までの高密度の製品

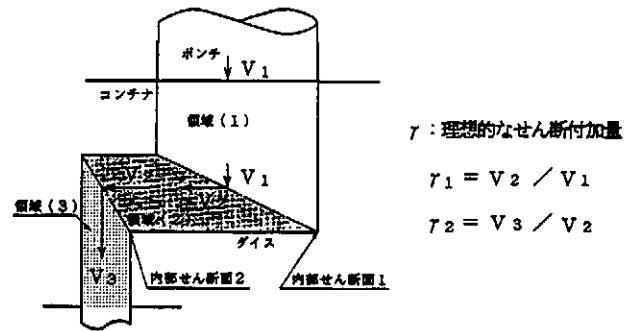
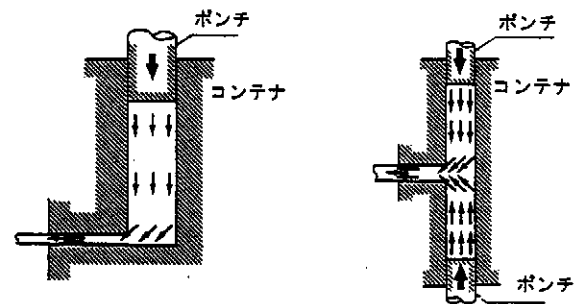


図1 せん断付加押出し加工の概念



(a) 単軸型 (b) 2軸対向型

図2 1段階せん断付加押出し装置

を得ることが可能であることが分かったが，1段階せん断方式であることから，製品内部の組織がせん断方向に偏平化し，酸化皮膜や空隙が一方向に並ぶ異方性が発生しやすいことも判明した³⁾。

上記の問題を解消する方法として，せん断変形を2段階に分け，かつ方向を変えて加えることを試みた。この方法により，新生面の発生とそれに続く接合の機会が増え，粒子間の接合そのものの促進が図られると同時に，最初のせん断変形で粉末粒子間の圧接面より排除された酸化物が，次のせん断変形で粉砕かつ分散されて，いわゆる分散強化材としての役割を持つことも期待した。この適切な加工条件が成り立つ2段階せん断付加により，組織の異方性がなくなり，より良好な製品が得られるものと考えられる。

3. せん断付加量の決定方法

せん断付加による効果は、被加工材の流動の方向が急激に変化する度合いに比例する。図1に示した流動状態では、 i 番目の内部せん断面におけるせん断付加量 γ_i は、

$$\gamma_i = \frac{V_{i+1}}{V_i} = \frac{\text{(領域}(i)\text{の断面積)}}{\text{(領域}(i+1)\text{の断面積)}} \quad (1)$$

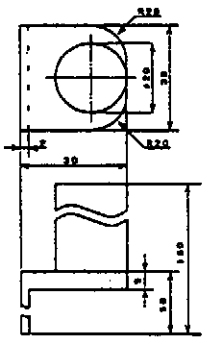
で表される。しかし、実際の流動時には、図2に示す R_i のように、内部せん断面に達する前に流動方向の変化が起こり、理想的なせん断付加量 γ_i を被加工材に与えないことになる。想定される内部せん断面上でのこの理想と現実との差 $d\gamma_i$ は、理想的な速度ベクトル V_i と実際の速度ベクトル R_i との差のベクトル E_i によって、

$$d\gamma_i = E_i / V_i \quad (2)$$

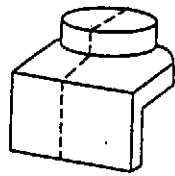
と求められる。そこで、想定される内部せん断面上でのせん断付加量 α_i は、

$$\alpha_i = \gamma_i - d\gamma_i \quad (3)$$

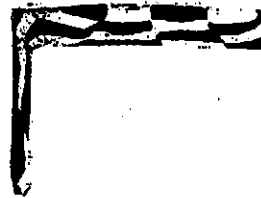
で計算できるものとする。



(a)



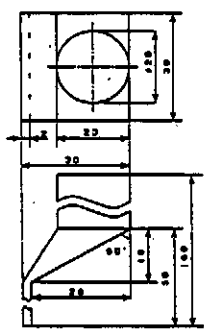
(a)板厚2mmダイス角90°



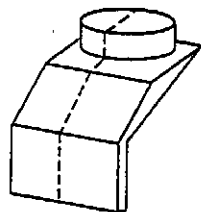
(a)板厚2mmダイス角90°



(a)板厚2mmダイス角90°



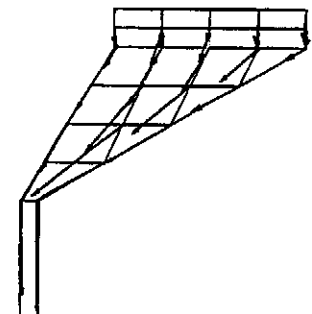
(b)



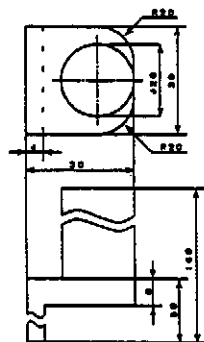
(b)板厚2mmダイス角60°



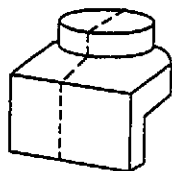
(b)板厚2mmダイス角60°



(b)板厚2mmダイス角60°



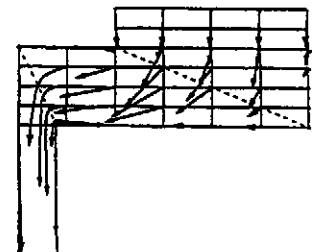
(c)



(c)板厚4mmダイス角90°



(c)板厚4mmダイス角90°



(c)板厚4mmダイス角90°

図3 ダイス孔形状と寸法

図4 プラスティシン押し製品と切断面

図5 プラスティシン切断面

図6 速度ベクトル

4. プラスティシンを用いた予備実験

図3には、2段階せん断付加押し実験装置のダイス孔形状を示す。コンテナ直径は $\phi 20\text{mm}$ 、製品の板幅は 30mm 一定として、(a)板厚 2mm でダイス角 90° 、(b)板厚 2mm でダイス角 60° 、(c)板厚 4mm でダイス角 90° とした3つの工具を試作した。

このそれぞれの実験装置に、垂直方向 2mm 水平方向 5mm の市松模様ができるように白黒2種類のプラスティシンを積層し、ポンチストローク 4mm 押し出した後、工具より取り出すと図4の製品が得られる。なお、プラスティシンを用いた実験においては、離型剤(東芝シリコーン製、シリコーンスプレー-KING)を用い、工具全面に塗布した。

このプラスティシン製品を左右対称の面で切断した断面が、図5である。各格子の元の位置と、変形後の格子を測定することにより得た速度ベクトルを図6に示す。速度ベクトル図より、ダイス角が 90° の(a)と(c)の場合、ダイス隅部にデッドゾーンが発生し、工具表面の被加工

材よりもダイス孔中心部の被加工材の方が速度が大きいことが分かる。ダイス角が 60° の(b)の場合、ダイス入口面と出口面とで速度ベクトルの方向の変化が明確に表れている。

表1に図6の速度ベクトルより求めたせん断付加量の合計 α を示す。(a) $>$ (c) $>$ (b)の順となっている。(a)と(b)は同一の押し出し比を有するが、このせん断付加量の差の分だけ(a)の方が、良好な製品が得られることが予想される。

図7にせん断付加量の理想値 γ とプラスチック実験結果 α を示す。製品の板厚とダイス角が同じでも、領域2の断面積(厚み b)を変化させることによって γ_1 と γ_2 の値が変わり、その合計の γ も変化する。従って、実験条件については更に検討が必要である。

5. 金属粉末を用いた実験

実験装置は、予備実験と同様のものを用い、実験試料として、純アルミニウム・アトマイズ粉末(-250mesh)と鉛・アトマイズ粉末(-200mesh)を用いた。試料はアルミニウム粉末を196MPa、鉛粉末を49MPaで予備圧縮したもの($h10\text{mm} \times \phi 20\text{mm}$)をコンテナに挿入した。製品の板厚が2mmの場合は図8(a)のように、4mmの場合は図8(b)のように試料を充填し押し出しを行った。押し出しは、アルミニウム粉末の場合は熱間押し出し(工具ごと 650°C に加熱し30分保持)、鉛粉末の場合は冷間押し出し(常温)で行った。アルミニウム、鉛のどちらも板厚2mm、4mmの平板を製造し、板幅はいずれも30mmとした。押し出し製品は、各部における密度を測定するとともに、組織観察を行った。押し出されたアルミニウム押し出し製品の機械的性質の評価として、引張り試験と硬さ試験を行った。引張り試験片は、押し出し製品(板厚4mm)の中心部をフライス盤により切削加工し、試験片の寸法は、JIS金属材料引張り試験片の5号試験片を参考にして、板厚3.0mm、幅5.0mm、平行部長さ15.5mmとした。同じ寸法の試験片をアルミニウム溶製材で作製し、引張り強さと引張りひずみの比較を行った。引張り速度は $2.0\text{mm}/\text{min}$ (公称ひずみ速度： $2.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$)、引張り方向は製品の押し出し方向と同じとした。

6. 金属粉末押し出し実験結果及び考察

図9には、押し出し製品の各部における相対密度を示す。定常状態における相対密度は、アルミニウムと鉛の板厚2mm、4mmともに100%近くになっており、よく圧縮されているのが分かる。図10(a)はアルミニウムの予備圧縮したものと、図10(b)はアルミニウム押し出し製品(板厚4mm)の押し出し軸に垂直な面の組織写真であるが、押し出すことにより粒子間の空隙がかなり減少している。図11はアルミニウム押し出し製品(板厚4mm)のコンテナ軸を含む縦断面の組織写真であるが、ダイス入口で試料にせん断が加わっており、ダイス内部では、押し

表1 せん断付加量の理想値と実測値

せん断量	(a)板厚2mm ダイス角 90°	(b)板厚2mm ダイス角 60°	(c)板厚4mm ダイス角 90°
γ_1	2.1	0.79	1.3
γ_2	2.5	1.4	2.0
γ	4.6	2.2	3.3
$d\gamma_1$	0.26	0.11	0.14
$d\gamma_2$	0.11	0.06	0.20
$d\gamma$	0.37	0.17	0.34
α_1	1.8	0.69	1.2
α_2	2.4	1.4	1.8
α	4.2	2.1	3.0

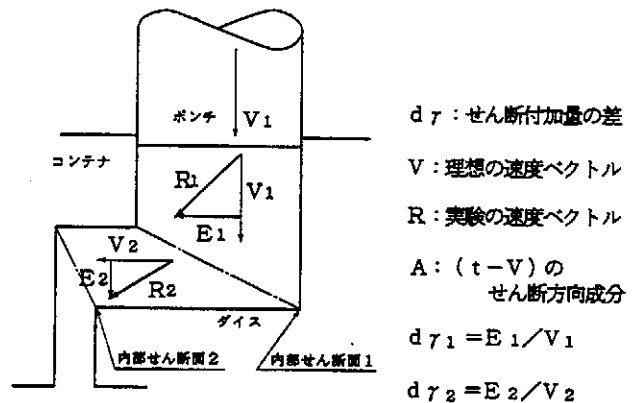
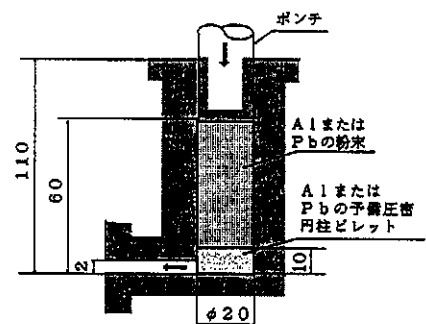
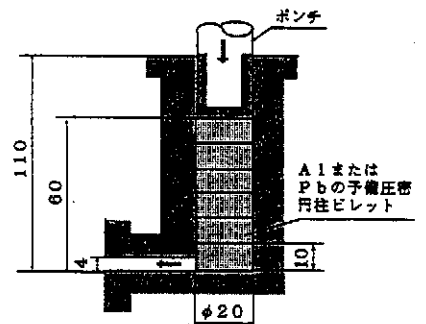


図7 総せん断付加量の理想値 γ と実測値 α



(a) 単軸型板厚2mm



(b) 単軸型板厚4mm

図8 金属粉末のせん断付加押し出し実験

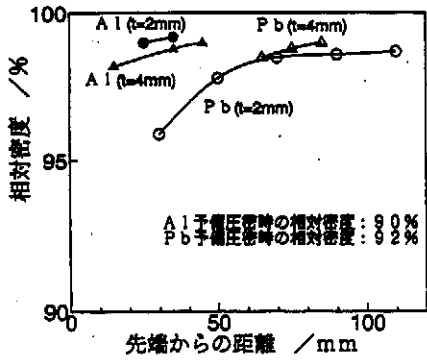
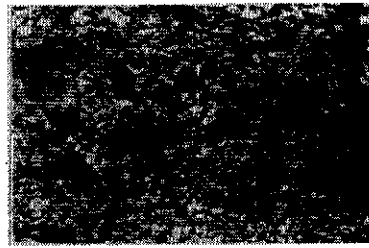
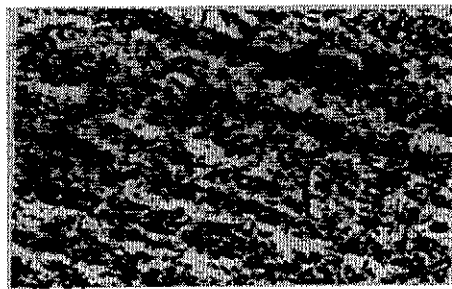


図9 各押し製品の相対密度分布

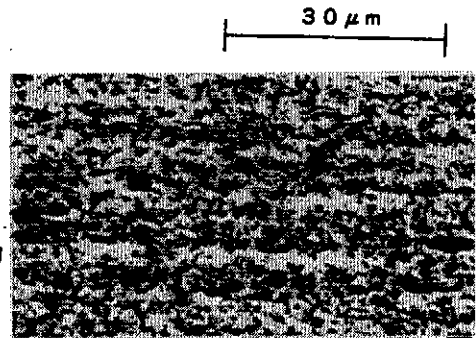
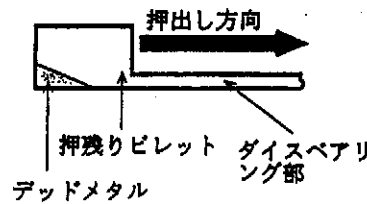


(a) 押し前の予備圧縮したピレット (b) 押し製品(押し軸に垂直な断面)

図10 押し前後の組織写真



(a) 押し残りピレット



(b) ダイスペアリング部分

図11 押し製品の縦断面写真 (NaOHで30秒エッチング)

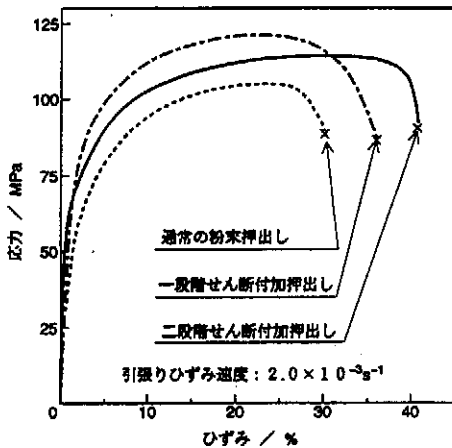


図12 各押し製品の応力-ひずみ線図

し方向に対しほぼ平行に流れているのが分かる。また粒子が押し方向に展伸しているのが観察され、そのアスペクト比は2.5であった。同様に、板厚2mmのアルミニウム押し製品のアスペクト比は2.5であり、板厚が4mmのときと同じように粒子が展伸していると考えられる。

図12はアルミニウム押し製品(板厚4mm)の応力-ひずみ線図である。せん断付押し製品の引張り強さは、通常の粉末押し製品の値よりも大きく、純アルミニウムとしては十分な引張り強さが得られている。これは、強せん断により粒子同士が圧着したためである。また伸び(引張り破断ひずみ)も、通常粉末押し材よりもかなり大きい。これは熱間押しの後、製品が焼き

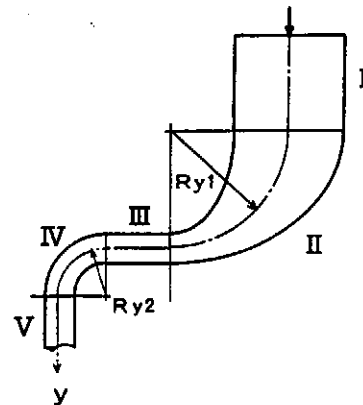


図13 押し軸曲線部のモデル化

なまされ、軟化した状態であることと、粒子が展伸し組織が微細化されたためだと考えられる。

7. 上界法を応用した数値解析

7.1 動的可容速度場の構成

これまでの上界法で用いられてきた動的可容速度場は、直交座標もしくは押し軸が直線の円筒座標に対して構成されてきたが、本研究では図13に示す円弧を押し軸とする塑性域に対して動的可容速度場を構成した⁴⁾。図14に1段階のせん断付押し加工の荷重ストローク線図を示すと、上述の動的可容速度場を用いた解析結果と定常押し状態の荷重は、良好な対応を示していることが分かる。

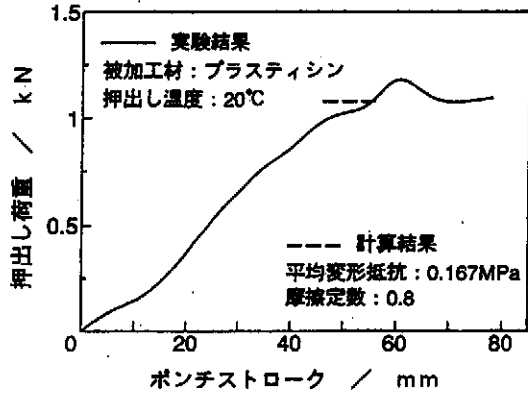


図14 押し荷重の計算結果と実験結果との比較

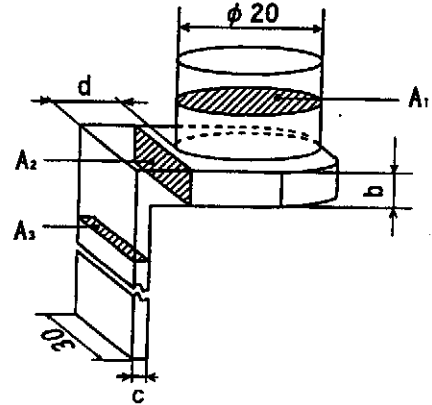


図15 解析に用いた2段階せん断付加押し装置

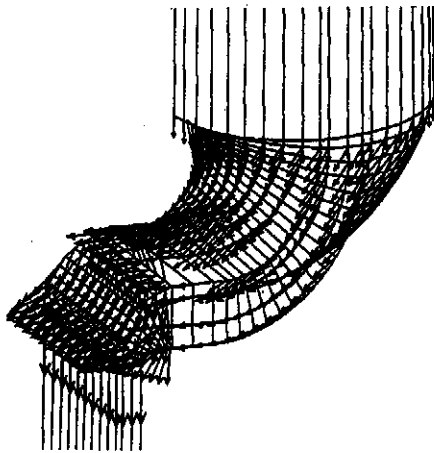


図16 せん断付加押し加工の速度場

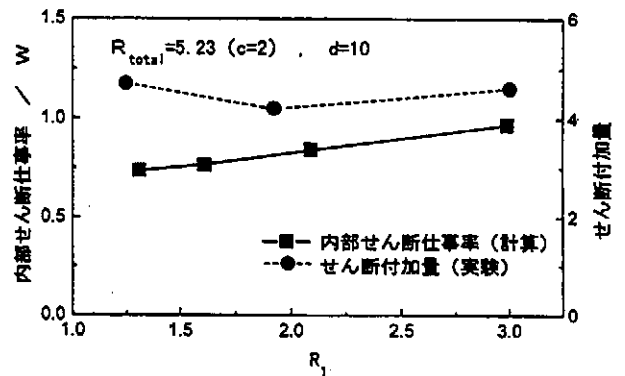


図17 R_1 とせん断付加量および内部せん断仕事率との関係

7.2 解析結果

図15に2段階せん断付加押し加工の解析に用いた被加工材の形状を示し、図16に得られた速度場の一例を示す。想定したデッドゾーン形状は、2段階目のダイス隅部の方が流動方向に滑らかであることが分かる。このために、後述するせん断付加量に対する R_1 （1段階目の押し比）の影響が過大評価されることとなった。

図17には、 R_1 とせん断付加量の関係を示した。せん断付加量は、図1で被加工材が工具表面にすべて平行に流動し内部せん断面でのみ変形すると仮定すると、 $R_1 + R_2$ となるため、 R_{total} （装置全体の押し比）一定とした場合、図17は下に凸の曲線となる。しかし、解析においては、前述したように2段階目のデッドゾーンの形状が滑らかであるため、 R_1 が大きいほど内部せん断仕事率が大きく、せん断付加がなされるという結果⁵⁾になった。

8. 結 論

(1) 本実験で得られた粉末製品は、通常粉末押し材よりも高い機械的強度を得ることができたから、本実験方法は、粉末から圧縮成形する場合に適した方法である

と言える。

(2) せん断付加押し加工製品は高密度で微細な組織をもち、延性に優れた製品であるので加工性が増し、二次成形し易い。

(3) せん断付加量を最大にする押し条件を開発した数値シミュレーションにより求めることができた。

最後に、研究に助成して頂いた(財)天田金属加工機械技術振興財団に感謝いたします。

参考文献

- 1) 中村保, 平岩正至, 加藤剛, 田中繁一, 加藤剛: 平成3年度塑性加工春季講演会概要, (1991), 271.
- 2) 木内学, 杉山澄雄: 塑性と加工, 29-326(1988), 279.
- 3) 星野倫彦, 小原嗣朗: 第44回塑性加工連合講演会概要, (1993), 683.
- 4) 星野倫彦: 平成7年度塑性加工春季講演会概要, (1995), 163.
- 5) 星野倫彦, 内田幸彦, 中村誠一: 平成10年度塑性加工春季講演会概要, (1998), 357.