

半溶融加工に関する実験的研究—第4報— —低固相分率域を含む Pb 合金・アルミ合金の 半溶融押し加工に関する検討—

Experimental Study on Metal Forming in Mashy State • 4th Report

— Study on Extrusion of Pb-alloy and Al-alloys over Wide Range of Solid Fraction in Mashy State —

木内 学*・杉山 澄雄*・新井 博男**

Manabu KIUCHI, Sumio SUGIYAMA and Kureo ARAI

1. はじめに

筆者らは、半溶融状態における金属(合金)材料の特性を利用した新しい加工プロセスの開発、特に半溶融押し加工の可能性について一連の研究を行っている。すでにアルミ合金を用いて行った研究の一部を第2報において報告し、実際加工への適用が十分可能であると考えられることを示した。

本報においては、引続いて Pb-19.2%Sn 合金・Al-5.7%Cu 合金を用いて行った半溶融押し加工実験の結果について報告する。特に今回は、押し加工を試みる固相分率 ϕ の範囲を、これまでの $\phi=70\sim 100\%$ から $\phi=0\sim 100\%$ まで拡大するとともに、ダイスの温度条件を変化させて、押し加工圧力や押し後の製品の特性の変化などについて調査を進め、併せて正常な押し加工が可能な温度条件などについて考察した。

2. 実験方法および条件

押し加工実験には、既報と同じ100 ton 横型押し試験機を用い、加熱には同じく上記試験機に取付けられた高周波誘導加熱炉を用いた。

Pb-19.2%Sn 合金の押し加工の場合には、ピレット・ポンチ・ダイス・コンテナを所定の位置にセットした後、上記加熱炉を以てこれらを同時に加熱し、所定温度に一定時間保持したうえで、室温中への押しを行った。ピレットと製品の形状寸法については表1を参照されたい。ただしこの場合、ダイスには空冷用の孔があげられており(図1参照)、これを通して圧縮空気によるダイス出側の強制冷却を行い、ピレット温度に対するダイス出側温度を変化させ、製品性状の変化および安定な押し加工の可・不可について検討した。

表1 押しし実験条件

ピレット材質	Pb-19.2%Sn合金 溶 製 材	Al-5.7%Cu合金 溶 製 材
ピレット寸法(mm)	$\phi 40 \times 30$	$\phi 40 \times 40$
固相分率 ϕ (%)	63~100	0~100
ダイス寸法および 温度条件(mm)	$1^{\circ} \times 10^{\circ} \times 10^{\circ}$; 180° 同時加熱+強制空冷	$\phi 10 \times 100^{\circ}$; 180° 予加熱なし
押し比 λ	126	16
ラムスピード(mm/min)	45~47	40~47

* 東京大学生産技術研究所 第2部

** (株) 横尾製作所

Al-5.7%Cu合金の押し加工の場合には、押し開始前にはコンテナとピレットのみを上記加熱炉で加熱し、押し開始直前にポンチ・ダイスを所定の位置にセットし、製品は同じく室温中へ押し出した。ピレットと製品の形状・寸法は表1に示す。この場合、ダイス出側の強制冷却は行っていない。また固相分率 $\phi=0\%$ に近い範囲まで実験を行ったのでコンテナ・ポンチ間のもれ止めにはプラスチックを用いた。

その他、実験条件をとりまとめて表1に示し、図2には Pb-19.2%Sn 合金・Al-5.7%Cu 合金の温度と固相分率の関係を示す。この関係はいずれも平衡状態図から得たものであり、誤差は約 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ であると考えられる。さらに押しされた製品の機械的特性を検討するために、一軸の引張り試験、製品断面の硬度試験、組織の顕微鏡観察などを行った。引張り試験片の形状寸法をまとめて図3に示す。

3. 実験結果および考察

3.1 ダイス出側温度の影響 図4は Pb-19.2%Sn 合金の押しの際に、圧縮空気圧を変化させることにより生じたピレット温度とダイス出側温度・コンテナ温度の相違を示す。ただし、ここでいうダイス出側温度は、図1に示されたその測定位置からも判るように、押しされてくる製品と直接接触しているダイス面の温度ではないことに注意されたい。図から強制空冷をしない場合には、ダイス出側温度はピレット温度と大差ないが、例えば5 kg/cm²の圧縮空気強制冷却を行うとこの場合約50 $^{\circ}\text{C}$ の温度の低下が起ることが判る。

図5には、[ダイス出側温度-固相分率]座標面上で、安定な押し加工の可・不可の判別を行った結果を示す。ここで、押しし不可とは、液相成分の初期流出や、押しされた製品内部における液相成分の過多などに起因するトラブルにより、押ししそのものが安定的に行われなかったことを意味し、健全な製品が得られなかったという意味ではない。したがって押しし可と示した範囲においても製品表面にクラックが発生した場合が含まれている。この結果から半溶融押しを安定的に行うためにはダイス温度には許容される上限が存在すると言えるが、このことは別の見地から言えば、押しされてくる製品に含まれる液相成分の量には許容され得る限度があり、それ以上の量の液相成分が含まれる場合には安定的な押し

研究速報

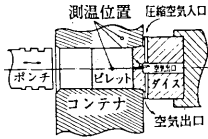


図1 ポンチ・コンテナ・ピレット・ダイスの取付け状態図および測温位置

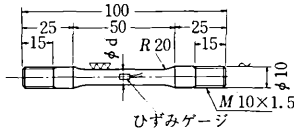


図3 引張り試験片の形状・寸法 (d = 8, 6, 4 mm)

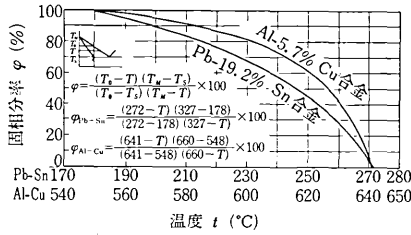


図2 Pb-Sn合金とAl-Cu合金の固相分率φと温度tの関係

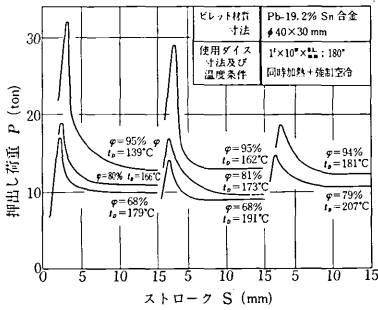


図6 押し出し荷重P—ストロークS線図

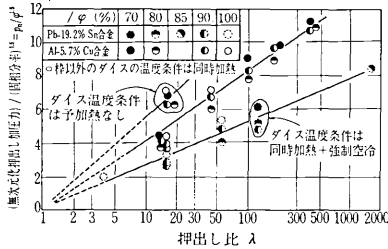


図10 (無次元化押し出し加圧力)/(固相分率)^{0.5} = P_a/φ^{0.5} と押し出し比λの関係

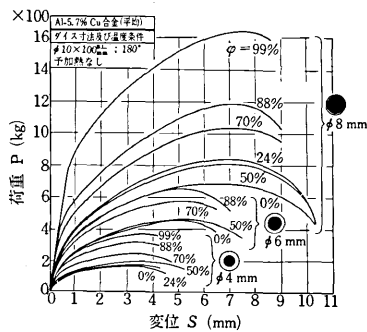


図11 荷重Pと変位Sの関係に与える試験片採取位の影響

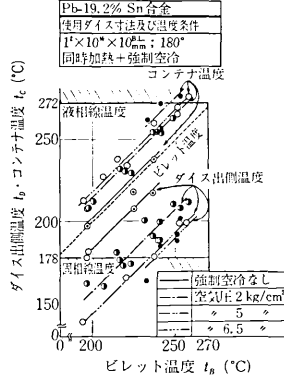


図4 ダイス出側温度 t_D・コンテナ温度 t_C とピレット温度 t_B の関係

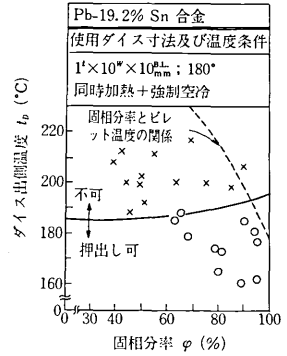


図5 ダイス出側温度 t_D と押し出し可、不可の関係

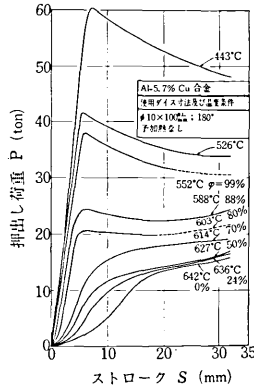


図7 押し出し荷重P—ストロークS線図

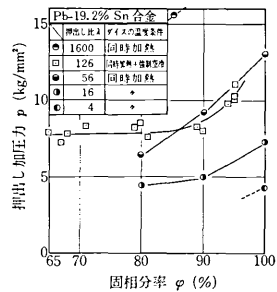


図8 押し出し加圧力 p と固相分率 φ の関係

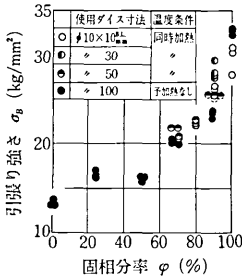


図12 引張り強さσ_Bと固相分率φの関係

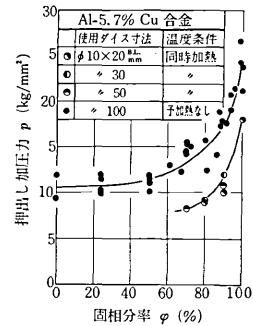


図9 押し出し加圧力 p と固相分率 φ の関係

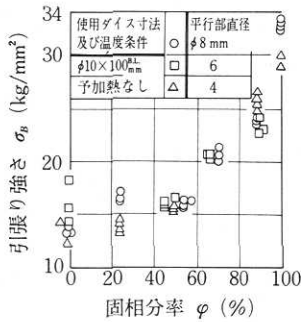


図13 半径方向の引張り強さの違い

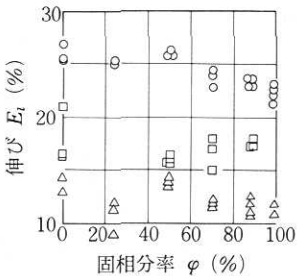


図16 半径方向の伸びの違い
(記号は図13と同じ)

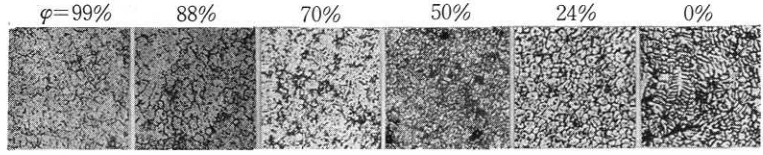


図15 固相分率の変化に対する製品内部(中央部)の組織

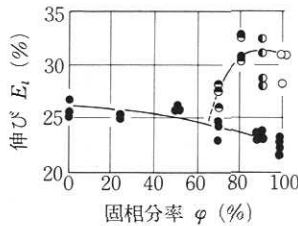


図14 伸び E_t と固相分率 ϕ の関係

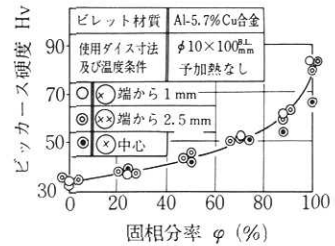


図17 硬度 Hv と固相分率 ϕ の関係

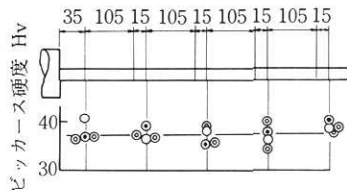


図18 $\phi = 24\%$ における製品の長手方向の硬度変化

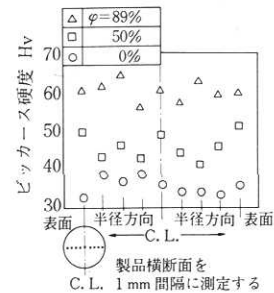


図19 各固相分率における製品の半径方向の硬度変化

し加工が期待できないことを意味している。許容され得るダイス温度は、ビレット・製品・ダイスあるいはダイスホルダー等の形状・寸法並びに熱的特性によって定まるものと考えられ、その具体的数値は個々のケースにより異なり得るので、この場合の数値を云々することはあまり意味がない。しかしながら、押出された製品に含まれる液相成分の量に関しては多少検討の余地がある。たとえば、図において、ビレットの固相分率が高い範囲では、ダイス温度がビレット温度より高くても押し出しが可能となる場合があり得ることが示されている。そこで、このダイス温度限界線と被加工材の温度-固相分率線の交点に注目してみると、少なくともこの温度、換言すればこの固相分率、で製品が押出されてきて問題はないと考えることができる。それゆえ、このPb-19.2%Sn合金の結果から推定して、押し出し時に製品内に残留する液相成分の量は少なくとも5~10%程度と考えることが可能である。

3.2 荷重-ストローク線図 図6にはPb-19.2%Snの荷重-ストローク線図を示す。固相分率の低下とともに押し出し荷重が低下することはすでに報告した通りであるが、押し出し開始時のピーク荷重が、ダイス出側温

度の低下とともに高くなることに注意された。

図7にはAl-5.7%Cu合金の荷重-ストローク線図を示す。図より、固相分率の低下とともに押し出し初期の荷重の立上りがゆるやかになること、固相分率が既略80%以下になるとピーク荷重があらわれなくなること、また固相分率が80%ないし70%以下になるとストロークに対して荷重が単調に増大していくことなどが判る。

荷重の立上りがゆるやかになること、およびピーク荷重があらわれなくなことは、ビレット中の液相成分の挙動と関係がある。通常、押し出し開始時には、液相成分自体あるいは液相成分が偏在する状態の素材が少量押し出される傾向があり、また固相分率の低下とともにこの傾向が助長されるが、このことが上述の結果をひき起すものと考えられる。

さらに荷重が増加しつつある傾向を示すのは、この場合ダイス・ポンチは室温に保たれた状態から押し出しが始まるので、押し出しの過程でビレット温度が低下し固相分率を実質的に上昇してくるためと考えられる。

なお、固相分率が50%以下の場合に荷重の立上りが中途から急になるのは、固相分率がこの程度に低くなるとコンテナの中でビレットが自重により変形し、押し出し開

研究速報

始時にはダイス前面に素材が充満していないことも原因していると考えられる。

3.3 押し加圧力-固相分率の関係 図8, 9には, Pb-19.2%Sn合金, Al-5.7%Cu合金各々について, 固相分率 ϕ に対する押し加圧力 p の変化を示す。ここで p は押しストローク20mmの段階での値である。図には比較のために, コンテナ・ポンチ・ダイス・ピレットを同時加熱しダイス冷却なしの場合の結果も示してある。図より, ダイスを冷却する場合またはダイスの予加熱をしない場合には, p の値が全般的に高くなると同時に, 固相分率の低下ともなう p の低下の割合が少なくなることが判る。これらのことは, すでに指摘したように, ピレット自体の固相分率は低下しても, ダイスを通過する材料はダイスにより冷却され, 実質的に固相分率が相当上昇した状態で押し出されることによると考えられる。特にダイス面に接触する部分は完全に凝固していることも十分予想される。Al-5.7%Cu合金についてみると, ピレットの固相分率を0%に近づけても, その押し加圧力 p は $\phi=85\%$ の同時加熱の場合の p にほぼ等しく, 換言すればダイス内ではその程度にまで冷却されていると考えることができる。

図10は, 押し加圧力 p と前報で示した固相成分の変形抵抗(σ_f) $_{0.04}$ との比, すなわち, 無次元化押し加圧力 p_n を求め, さらに p_n に対する ϕ の影響を考慮して $p_n/\phi^{1.5}$ と押し比 λ との関係をプロットしたものである。図より, 材質およびダイス温度条件の相違により, $p_n/\phi^{1.5}-\lambda$ の関係がそれぞれ異なる直線で近似できることが判る。しかし, 同時加熱の場合のPb-19.2%Sn合金とAl-5.7%Cu合金の結果が別々の直線で示されることについては, 未だその理由が明らかでない。

3.4 製品の機械的特性 押し出された製品の特性試験としての一軸引張り試験の結果を図11~16に示す。図11は荷重-変位線図であり, 各曲線は数本のテストピースに関する平均値を示している。これらの曲線を既報で示した同時加熱の場合の結果と比較すると, 荷重の立上りがやや急であり, 全般的に伸びが少ない。図12は引張り強さ σ_B と固相分率 ϕ の関係を示す。比較のために同時加熱の場合のデータも示してある。図より, σ_B に関しては同時加熱の場合とダイス予加熱なしの場合の相違がほとんどないこと, ϕ が低下すると σ_B は急速に低下していくことなどが判る。 ϕ に対する σ_B の変化は, 半溶融状態下の ϕ に対する変形抵抗の変化に類似している。図13には, 押し出された $\phi 10$ の丸棒から削り出した $\phi 8, \phi 6, \phi 4$ の各試験片に関する結果を示すが, これより製品の半径方向にみた σ_B の相違はほとんどないことが判る。このことは既報で指摘した結果とも一致する。

図14には, 固相分率 ϕ に対する伸び率 E_l の変化を示す。

E_l については, 同時加熱の場合とダイス予加熱なしの場合で大きく異なり, 後者の場合, E_l は全般的に低く, ϕ の低下とともにやや上昇する傾向を示す。これらの結果は, ダイス予加熱なしの場合, 材料がダイスを通過する際に急冷されることに起因しているものと考えられるが, 製品内部の組織や粒度分布等についての厳密な対比が未だ行われていないので, この問題に関する検討は今後の課題としたい。なお図15には固相分率の変化に対する製品内部の組織の変化の測定例を示す。 ϕ が0に近づくとつれて, 内部には铸造組織が残留する割合が高まっていく様子が判る。

図16には, 図14と同じく, $\phi 8, \phi 6, \phi 4$ の試験片より得た伸び率 E_l の ϕ に対する変化を示す。図から明らかなように, 製品の半径方向にみた各位置での E_l の差は大きく, 中心軸に近い部分程 E_l が低下する。

図17~19には, 押し出された製品の各部分の横断面上でみた硬度分布の測定例を示す。これらの結果から, 硬度については, 先に示した引張り強さ σ_B の場合同様, 製品の各部分間での相違はほとんどなく, ほぼ一様であると考えることができる。ただし, σ_B がそうであったように硬度も, ピレットの固相分率の低下と共に急激に減少する。

4. まとめ

本報では, Pb-19.2%Sn合金, Al-5.7%Cu合金を用いて半溶融押し実験を行い, 押し加圧力や製品の機械的特性に対するダイス温度の影響, 広い範囲にわたるピレットの固相分率の影響について検討した。その結果,

(1) 押し加工を安定的に行うためには, ダイス温度は或る限度以下に保つ必要があること, 換言すると製品内に残留する液相成分の量には限度があること。

(2) ダイスの温度条件が変化しても, 製品の引張り強さ硬度はほとんど変化しないが, ダイス温度が下り過ぎると製品の伸び率は低下すること。

(3) ダイスの温度管理が適切に行われるならば, ピレットの固相分率=0の近傍でも健全な製品の押し出しが可能であること。

(4) ただし, 固相分率が低下するとともに, 製品の強度は急速に低下すること。

などを明らかにし, 併せて押し加圧力の特性について種々の見地から検討を行った。(1978年9月12日受理)

参考文献

- 1) 木内・新井・杉山 第27回塑性加工連合講演会講演論文集P311(1976.11)
- 2) 木内・新井・杉山 第27回塑性加工連合講演会講演論文集P314(1976.11)