

半溶融金属の塑性加工の可能性

Possibility of Plastic Working of Half-Molten Metal

福岡 新五郎*

Shingoro FUKUOKA

半溶融状態(固液共存状態)における金属加工は近年いろいろと試みられており、実用化されている分野もあるが、この状態での塑性加工は多くの利点をもつながらまだ試みられていない。ここでは、その可能性を筆者らの実験研究にもとづいて検討する。

1. はじめに

従来の金属加工をその加工温度との関係で見ると、融点以上の温度で鋳込んで凝固させる鋳造と、融点以下の高温で加工する熱間塑性加工、および常温で加工する冷間の塑性加工や切削加工に分けられる。これらの加工法のうちで鋳造材は次の特徴がある。

- 1) 一般に結晶粒が大きく、欠陥が生じ易く、もろい。
- 2) 複雑な形状のものも比較的安く、容易にできるが寸法精度は良くない。
- 3) 主として素材の製造に用いられる。

これに対し塑性加工材は次の特徴がある。

- 1) 一般に結晶粒が細かく、機械的強度が大きい。
- 2) 形状によって加工ができないものもあり、とくに大きなビレットからうす肉の製品を作るような加工率の高い加工では、加工力が著しく大きくなることがある。
- 3) 寸法精度は鋳造により格段に良く、最終製品または二次素材(管、棒、板)の製造に用いられる。

鋳造の容易さと塑性加工の精度をともにもつものとしてダイキャストや溶湯鍛造が行われているが、これらはやはり鋳造の範囲に入るものの、ガスの巻き込みや内部欠陥等の鋳造特有の欠点をさけることができない。

ここでは固相線以上液相線以下の固液共存状態における塑性加工の可能性について考える。

この加工法の特徴は次の通りである。

- 1) 結晶粒が小さく、韌性がある。
- 2) ガスの巻き込みやひけ巣などの欠陥がない。
- 3) 通常の塑性加工よりも高加工率の加工が可能である。
- 4) 通常の塑性加工よりも加工力が小さい。したがってそれだけ加工機が小さくなる。
- 5) 寸法精度が良い。
- 6) 最終製品または二次素材の製造に適する。

半溶融状態での塑性加工法としては次のようなものが

考えられる。

- 1) 圧延(板、棒、型材)
- 2) 押出し(板、棒、管、型材)
- 3) 鍛造
- 4) 引抜き
- 5) 曲げ加工

このうち4), 5)は引張応力のかかる変形であるため難しい。1)~3)は比較的容易に実現可能と考えられるが、このうちでも圧縮応力下の加工であるという点で2)が最も実現しやすい方法と考えられる。

そこで本報では、筆者らが現在行っている実験をもとに、半溶融状態での金属の塑性加工の可能性について検討する。

2. 半溶融金属の押出し加工

1. 押出し加工

押出し加工とは、工藤¹⁾によれば「素材物体に圧力を加えて工具に設けられた隙間から押出し、押出された部分を目的とする品物の全体または一部とするような加工方法」であり、被加工材料は金属のほかプラスチックスや焼結材料にも適用されている。

図1は種々の押出し加工法を示したものであるが、ふつう押出し加工といわれるものは図1a, b及びeであり、円形、角形、中空管その他種々の形状を断面とする長い棒材を押出す加工法である。cやdはa, b, eとはやや性質が異なるが押出し加工に含めて考えられている。

実際は、近年急速に普及したアルミサッシ、真ちゅうや銅パイプ、ユジンセジュルネ法によるつぎ目なし鋼管等の加工に見られるように、前方押出しがほとんどである。

押出し加工では

- 1) 加工速度をより大きくする
- 2) 加工率をより大きくする
- 3) 欠陥、キズをなくす
- 4) 難加工材を容易に加工する
- 5) 加工機をコンパクト化する

* 東京大学生産技術研究所 第2部

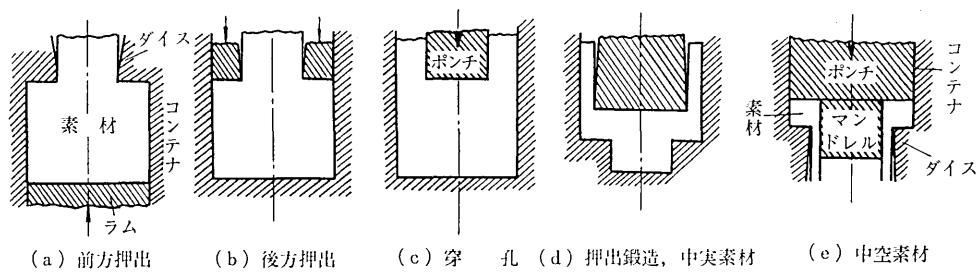


図1 種々の押出加工

6) 加工機の寿命を長くする

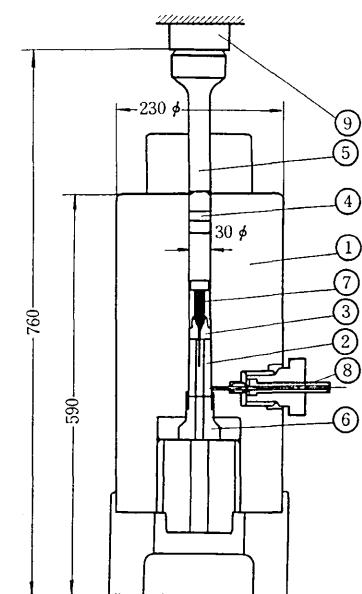
等の点が目標とされるが、各々に限界がある。上記各点はそれぞれ相互に関係がある。たとえばジュラルミンでは、高速化することは横われの発生（温度上昇による高温脆性によるものといわれている）により实际上不可能であり、鉄材の押出し加工では高加工率の加工は加工力が過大となって不可能となっている。またアルミニウムの加工でもうす肉材の高速加工は、温度上昇、加工力の増大により不可能である。

これらの限界をうち破るために現在試みられているのが静水圧押出し²⁾である。

静水圧押出しはラム押出しと異なり、図2に示すように、高圧容器①に封じ込めた油の静水圧により押出すものである。

静水圧押出しには次のような特徴がある。

1) 液圧をビレットの周囲に作用させる押出しを行う



①高圧容器 ②ダイス支持台
③ダイス ④フローティングピストン
⑤ポンチ ⑥プラグ ⑦ビレット
⑧背圧付加装置 ⑨ロードセル

図2 実験用静水圧押出し装置

ので、コンテナ壁とビレットとの摩擦がなく、また圧力媒体がビレットとダイスの間に強制潤滑の効果をもたらすのでラム押出しの場合より摩擦損失が軽減され、ダイス摩耗も減少する。

- 2) 冷間(常温)加工であることと、加工の高速度化が加工の安定化をもたらすことにより、高速、高加工率の加工が可能となり、かつ加工熱により軟化した材料がえられる。
- 3) 高静水圧下における金属の延性増加により、難加工材の押出加工が可能となる。
- 4) 細線、うす肉材が大きいビレットから押出し可能である。

これに対し、装置の複雑なこと、加工力が大きいことはやはり好ましくない点である。

2. 半溶融金属の変形抵抗³⁾

半溶融状態において金属を加工するためには、その基礎となる変形抵抗、変形挙動を知る必要がある。

そこで、筆者らが行ったカムプラスチメータによる圧縮実験について述べることにする。

試験片は純度 99.9% の鉛、錫、アルミニウムと 99.99% の銅から溶製した Pb-19.2% Sn, Al-5.7% Cu の合金を金型に鋳造し、これを旋盤加工して用いた。試験片寸法は 20φ×10 h (鉛・錫合金) と 26.5φ×23.5 h (鉛・錫及びアルミ・銅合金) の 2 種類とした。

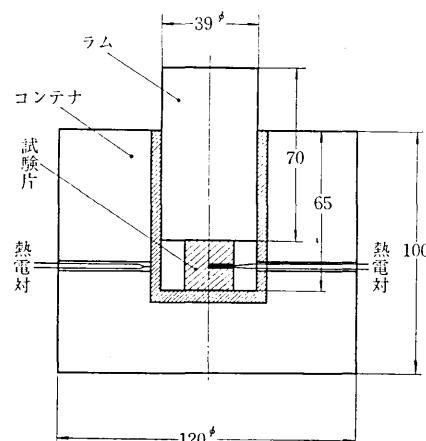


図3 サブプレス

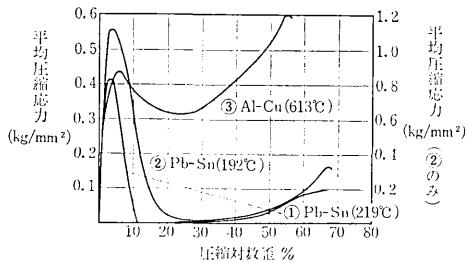


図4 ひずみと変形抵抗の関係

圧縮にはSUS 42(ステンレス)製のサブプレスを用い、実験中の試験片の温度変化をできるだけ小さくするようにした(図3参照)。

実験方法は次のようにある。

サブプレスの中心に試験片をセットし、これを電気炉中で所定の温度まで加熱し、一定時間保持したのちサブプレス全体をカムプラスチメータにのせて圧縮した。電気炉は温度コントロールを施し、試験片中心温度が一定となるようにした。サブプレスを大きく作ってあるため炉からとり出すときの温度の低下はほとんどなかった。

実験結果の応力歪線図を例示したのが図4である。

図のように鉛・錫合金では3~5%ひずみにおいて破碎がおこり、一気に変形抵抗が下る傾向を示す。この傾向は温度によらない。

図の歪の大きい範囲で再び応力が増大するのは、材料がコンテナの中に充満するために生じるものと考えられる。

アルミニウム-銅合金の場合も同様にひずみ5~10%で破碎がおこり、変形抵抗の低下をもたらす。後半の応力増大はやはりコンテナに充満することによって生じる。

次に、半溶融状態の合金の性質に影響するものとして材料に含まれる液体成分の比率は重要な因子と考えられるので、変形抵抗と固相分率(材料中の固体成分の比率)との関係を調べた。液体成分が20%以上(固相分率80%以下)の場合は材料中の液体が比較的自由に流动し、通常の固体とみなしえないので、実験では主として固相分率80%以上を行った。

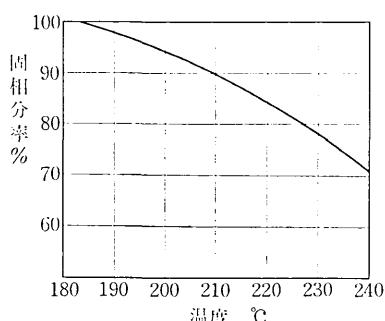
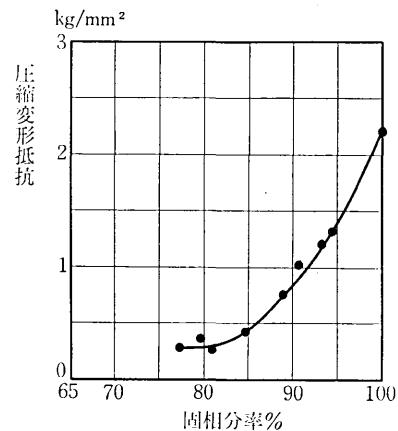
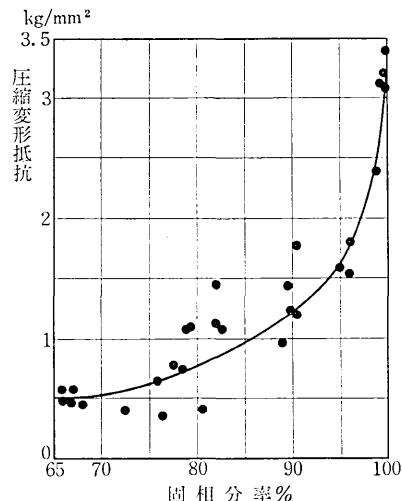


図5 温度と固相分率の関係(Pb-192% Sn)

図6 Pb-19.2% Sn 変形抵抗
(26φ×23.5h 4% ひずみにおける値)図7 Al-5.7% Cu 変形抵抗
(26φ×23.5h 4% ひずみにおける値)

固相分率は実験で用いたような2相合金では温度と状態図から容易に求めることができる。鉛-19.2%錫合金について温度と固相分率の関係を図5に示す。

図6、図7はそれぞれ鉛-錫、アルミニウム-銅合金についてひずみ4%における平均圧縮変形抵抗と固相分率の関係を示したものである。ひずみ4%における値をとったのは、最大応力はバラツキが大きく、かつ降伏点も判然としないためである。

図において、固相分率100%における値は固相線上の変形抵抗値であるが、これは常温の約1/2となっており、固相分率が100%から75~80%まで減少するに伴って変形抵抗は約1/4から1/5に減少する。

以上のように、固相分率80~100%の範囲の半溶融金属は固相分率の減少とともに変形抵抗が著しく低下するが、かなりもろいので、押出し加工のように圧縮荷重による加工は容易であるのに反し、引張り応力のかかる加工は難しいことが推察される。

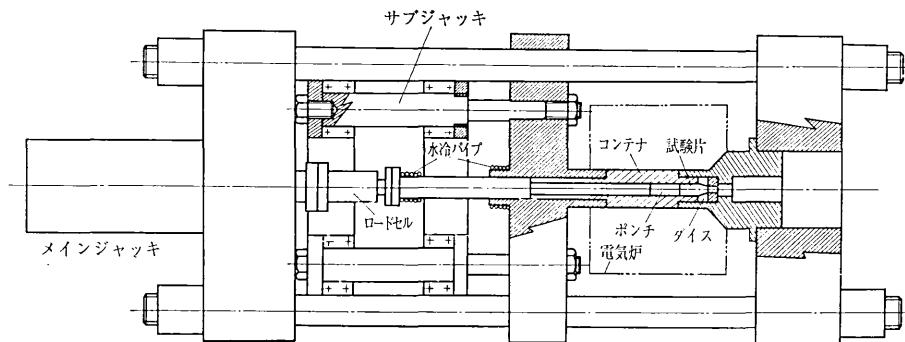


図8 押し出装置

3. 半溶融金属の押し出し加工⁴⁾

ここでは鉛-19.2%錫合金について行った実験にもとづいて、半溶融金属の押し出し加工の基本的な問題点について略述する。

押し出し装置は横型圧縮試験機に型おさえ用サブジャッキの付属した形式のもので、押し出し最大荷重 100 ton、最大型おさえ荷重 20 ton、押し出しラム最高スピード 70 mm/min の能力をもつ。付属の電気炉は常用 600°C、最高 700°C の昇温能力をもち、試験片を所定の温度に保つために温度コントロール装置を付属している。高温となる部分は水冷銅管により保護している。装置の概略を図 8 に示す。

実験はダイス角にあわせてノーズをつけた試験片(図 9)を内径 40 mm 外径 120 mm のコンテナ中に入れ、径 40 mm のポンチで半溶融状態のもとで押出すものである。コンテナ、ダイス、ポンチは熱間工具鋼 SKD 61 を焼入れ研磨して製作したもので、使用したダイスは径

が 20 mm, 10 mm, 4 mm, 1 mm の 4 種、ダイス角が前 2 者について 60°, 120°, 180° の種、後者については 180° を用いた。

荷重-ストローク線図の数例を図 10 に示す。いずれの場合も最初にピークが生じ、やや後に定常に達している。このピークはダイス角の大きいほど鋭い。以下に示す押し出し加圧力はすべて定常状態での値である。

押し出し加圧力と固相分率の関係を図 11 に示す。図中の破線は 2.2 で述べたひずみ 4% のにおける試験材(Pb-19.2% Sn)の変形抵抗を示している。

固相分率 100% から 80% への変化に対して、加圧力の減少率は減面率 93.8% (押し出し比 16) の場合は 30~40%，減面率 98% の場合 50% 程度となっているが、これらはいずれも単純圧縮試験から求めた変形抵抗の減少率に比して少ない。これは単純圧縮試験と押し出し加工における材料中の液体成分の流れ方のちがいに影響をうけているものと考えられる。

図 12 は押し出し加圧力と押し出し比の関係を示している。押し出し加圧力としては、図 6 で求めた 4% ひずみ時の変

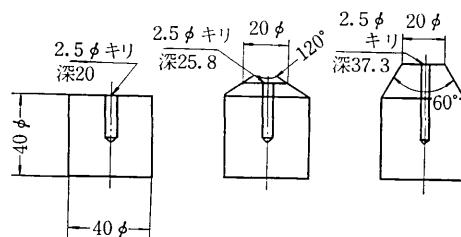


図9 試験片形状

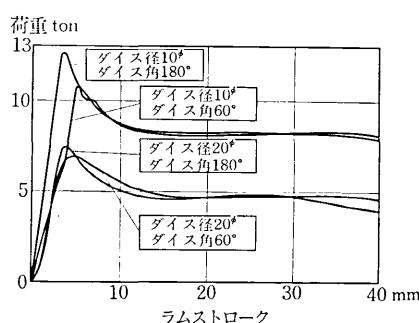


図 10 荷重ストローク線図(温度 183°C 固相分率 100%)

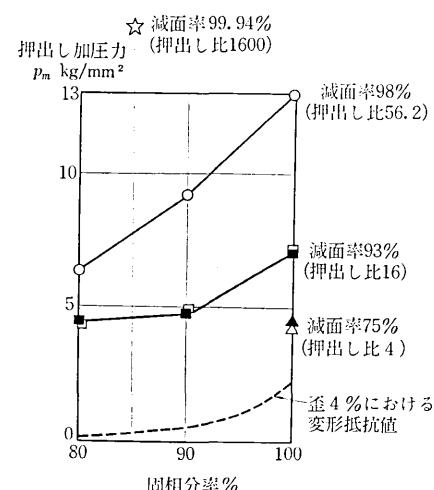


図 11 押し出し加圧力と固相分率 (Pb-19.2% Sn)

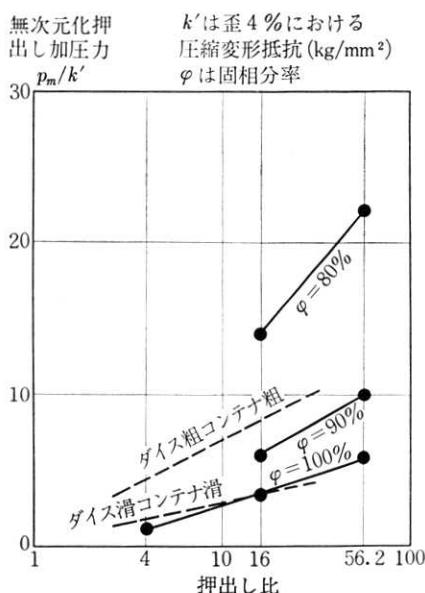


図 12 押出し加圧と押出比
(Pb-19.2% Sn 180° ダイス,
破線は単孔 180° ダイスの理論値)

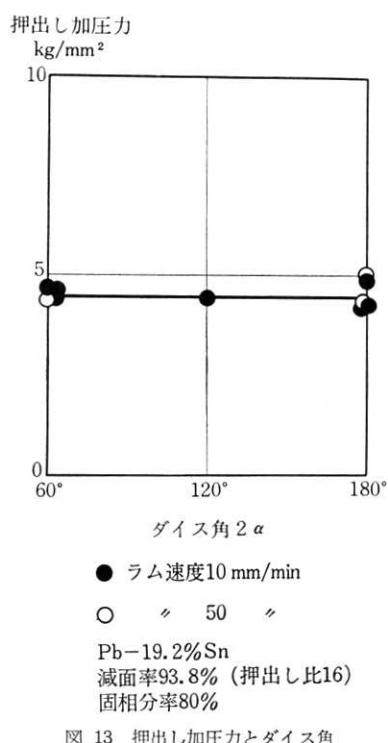


図 13 押出し加圧とダイス角

形抵抗で押出し加圧力を無次元化したものとっている。

図中の破線は工藤ら⁵⁾のすべり線場解析法による理論曲線で、図相分率 90~100% では実験結果は理論曲線ではさまれた領域にあり、材料の変形挙動が通常の熱間域における変形挙動と本質的に異らず、すべり線場解析法

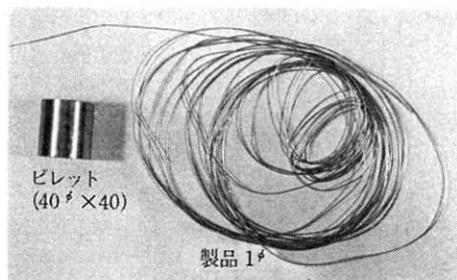


図 14 製品形状 (1φ 固相分率 85%)

によるシミュレーションが可能な範囲に入っていると考えられるが、固相分率 80% ではその値が著しく大きく、結晶粒間に保持された液体が、押出し加工では単純圧縮試験とは異なる流れ方をすることに起因すると考えられる。

図 13 は押出し加圧力とダイス角の関係 (固相分率 80% の場合) を示している。図に見られるように、押出し力はダイス角の影響をほとんど受けない。この傾向は固相分率 80~100% にわたって、固相分率の大小にかかわらず認められるものである。固相分率 80% の場合はすでに述べたように通常の固体とは異なった変形挙動を示す可能性があるので、図 13 に見られる傾向については現在検討中であるが、半溶融金属の押出し加工では摩擦が小さく剪断による変形仕事も小さいものと考えられる。

図 13 にも見られるように押出し速度はこの実験の範囲 (ラム速度 10 mm/min~50 mm/min) では押出し力に影響を与えない。これも固相分率の大小に拘らず現れている傾向である。

押出し製品は径 10 mm (減面率 93.8%) のほとんどの場合に横われが生じた。径 1 mm の場合は固相分率 85% で、図 14 に示すような健全な製品がえられた。横われについては、熱応力、高温脆性 (加工熱による温度上昇に起因する)、ダイス平行部 (ペアリング部) でのスティック・スリップ等が考えられるが、これも現在検討中である。

寸法精度については、各ケースで 0.1~0.05 mm の寸法減少が生じているが、これは主として凝固収縮と熱収縮によるものと考えられる。

以上は鉛-錫合金についての結果であるが、現在実験中のアルミニウム-銅合金についても同様の結果がえられている。

現在次に示す実験を行っている。

- 1) アルミニウム合金の管 (とくにうす肉) 材の押出し加工……これは一部成功している。
- 2) 同合金のうす板の押出し加工……0.6 mm の厚みのものが出来た。
- 3) 同合金について線材の押出し加工

製品強度についても検討したが、アルミ一銅合金では金型鋳造材より引張強さが増大し、韌性も増していることが分った。

3. 半溶融金属の塑性加工

前項ではビレット全体が均一な固液共存状態にある状態での押出し加工について述べた。半溶融金属の塑性加工法として次のようなものが考えられる。

1) 押出し加工

- a. 温度勾配のある（固相分率がビレットの部分によって異なる）状態での押出し加工
- b. 連続押出し：溶湯から連続的に押し出す
- c. 複合材（焼結材）の押出し
- d. 合金成分の不均一な材料の押出し

2) 圧延

- a. 連鉄材の直接圧延
- b. 穴型圧延
- c. 複合材の圧延

3) 鋳造

a. 型鋳造

b. 複合材（焼結材）の鋳造

これらの加工法は現在行われている他の塑性加工との競合状態を考えて、その特性を十分に発揮できる分野から手をつけて行くのが良いと考えている。

4. おわりに

主として筆者らの現在進行中の実験結果にもとづいて半溶融金属の塑性加工の可能性を検討した。現状では難しい点も多いが、色々と有利な点も多いので、この加工法の今後の発展を期待し、微力を注ぎたい。

(1973年8月4日受理)

参考文献

- 1) 工藤英明：“塑性と加工”Vol. 1, No. 2 (1960) 117
- 2) 西原正夫ほか：“塑性と加工” Vol. 10, No. 98 (1969) 149
- 3) 福岡・ほか：第23回塑性加工連合講演会前刷(1972)435
- 4) 福岡・木内：昭和48年度塑性加工春季講演会(1973)249
- 4) 工藤英明：日本機械学会誌，67 (1964) 392

