

ネットシェープをめざす超塑性成形技術

西村 尚*

1. 緒言

超塑性を材料加工技術に取り入れ、従来塑性加工が不可能な材料の塑性加工を可能としたり、加工限界を大幅に向上しようとする試みがなされてから、20年以上が過ぎようとしている。^{1)~5)}企業として組織的な研究を初めて行ったのは米国IBM社で、数多くの特許を所有していた。開発当初は、最も利用しやすい超塑性亜鉛合金が多く用いられたが、構造材としては適当でなく、その後はアルミニウム、チタン、ステンレスなど、さらにジルコニア系のセラミックスなどにその座を譲っている。

超塑性の利用開発は航空機部品の製造法の改良と深い結びつきがあり、米国・英国等が我が国に先んじて進めてきた。とくに難加工性材料の塑性加工技術として、Ni基超耐熱材料、チタン合金、高力アルミニウム合金がその対象となり、多くの開発研究が行われてきた。

我が国でも約10年前より、通商産業省の大型プロジェクトとして超塑性材料及びその加工が開発課題として取り上げられ、最近成果が取りまとめられた。⁶⁾これらの成果は航空・宇宙産業に留まらず、多くの民生品の部品加工へ応用できる素地を残している。とくに大型部品の一体化加工が可能であることは、組立て工数の低減という効果をもたらし、少量生産の場で有効であろう。また、極めて精度の高い複雑形状部品の成形が可能であることも精密鑄造をしのぐ技術となろう。

本稿では、超塑性の加工技術への応用に視点を

当て、過去20年間の技術開発のあとを探ってみたい。従って、超塑性のメカニズム、超塑性材料の開発についてはここでは触れずに別の機会を待ちたい。

2. 超塑性の特徴と加工技術への利用

超塑性には、微細結晶粒超塑性と変態超塑性とがある。前者は、材料そのものに予め超塑性性能を付与するか変形過程中に結晶粒が微細化して超塑性性能が付与されるものであるが、後者は材料の変態を利用して超塑性を発現させるもので、材料そのものに特別な性質を保有しているわけではない。研究開発は圧倒的に前者が多く、実用化事例も前者に限られる。そこで本稿でも超塑性とは微細結晶粒超塑性に限るという前提で話を進めたい。

超塑性とは、巨大延性と異常に低い変形抵抗（流動応力）に特徴づけられる力学的特性である。この特性は、材料自身が微細でかつ変形中安定した結晶粒を保有しているだけでなく、環境条件として、適当な温度 ($T \geq 0.5T_m$ 、 T_m : 融点の絶対温度)、低ひずみ速度 ($10^{-4} \sim 10^{-1}/s$) でなければ現れてこない。このことが実用化に対して大きなネックとなっており、材料費が高い、成形速度が遅いという欠点が利用者側から指摘され続けている。

しかし、これらのマイナス要件が克服されれば、従来到達不可能な成形限界、成形精度の向上が可能となり難加工性材料の成形加工が容易になる。

このような超塑性特性は工業的にどのように利用されているか、もう少し具体的に分類して述べ

ると以下ようになる。

i) 流動応力の温度依存性 (図 1)

流動応力 (一般には引張強さで表示する) は超塑性条件において著しく小さい。場合によっては、室温における値の100分の1になることもある。このことは塑性加工において非常に有利な条件で、この特性を利用した成形法が最も多い。

ii) 流動応力のひずみ速度依存性 (図 2)

流動応力のひずみ速度依存性が強いことも超塑性の大きな特徴である。この特性は $\sigma = K \dot{\epsilon}^m$ で表され、 m 値が大きいことがネックなしに伸びることの条件となっている。一般に $m \geq 0.3$ を超塑性と呼ぶ。

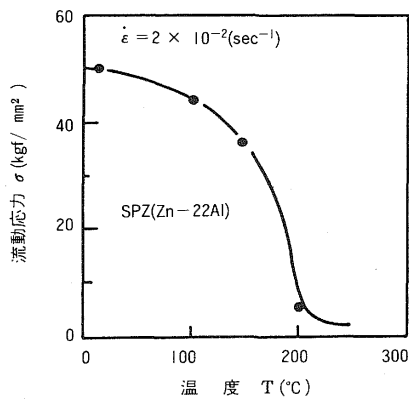


図 1 流動応力 σ と温度 T との関係⁷⁾

iii) 伸びの温度依存性 (図 3)

超塑性伸びは最高荷重点をすぎた後の局部伸びによって支配されている。室温から温度を上げてゆくと伸びが増加してゆくが、 $T \geq 0.5T_m$ 以上になると急に伸びが増加し、1000%を超える巨大伸びが得られる。しかし、このような大延性を必要とする加工法はほとんどない。

iv) 伸びのひずみ速度依存性 (図 4)

超塑性温度では伸びのひずみ速度依存性が著しい。伸びは m 値との関係で説明されるので m 値が一定のひずみ速度範囲では伸びは一定となる。

これらの変形特性に加えて、以下の諸特性も加工に際して考慮すべきである。

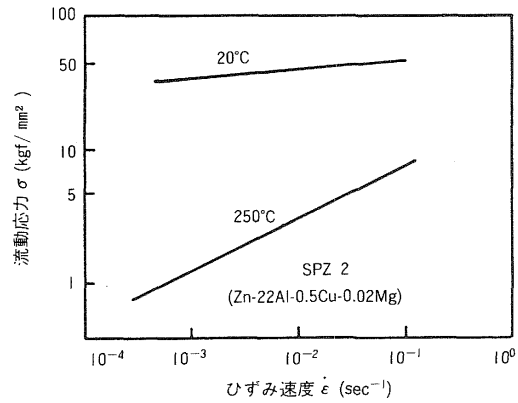


図 2 流動応力 σ とひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ との関係⁷⁾

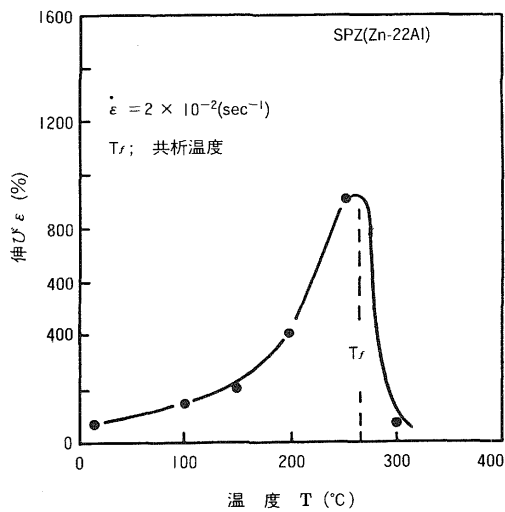


図 3 伸び ϵ と温度 T との関係⁷⁾

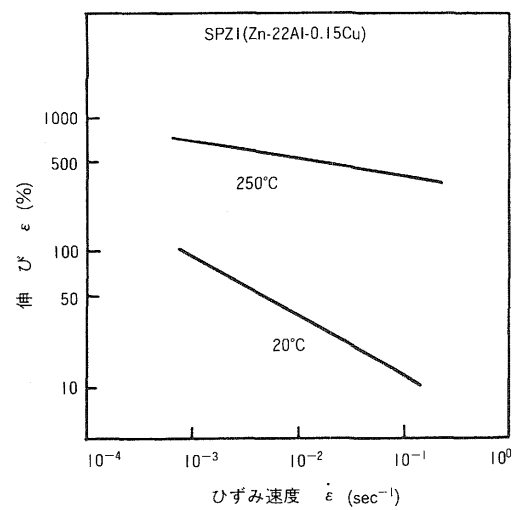


図 4 伸び ϵ とひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ との関係⁷⁾

v) 自由変形面の平滑性

通常の延性金属の平均結晶粒に比べて、かなり微細な結晶粒組織のため、大きな塑性変形後も肌あはほとんどない。きわめて平滑な面が得られる。

vi) 吸振性、電波の遮へい性

超塑性材料は製品機能として、すぐれた吸振性能および電波の遮へい性を有する。耐震構造物の一部に使用する試みもある。コンピュータのカバーに使用しノイズを防ぐ方法を実用化している。微細結晶粒の副利的利用である。

vii) 等方性、非硬化性

亜鉛系の超塑性材料では r 値はほとんど1に近く、板厚異方性はない。また、面内異方性も示さないでカップ耳は生じない。さらに、超塑性材料は加工硬化せず、 n 値はゼロに近い。そのため加工による強度増加は望めない。

viii) 拡散接合性

超塑性条件下で加圧しながら、大きな塑性変形を与えると界面が活性化し、異種材料との接合が容易である。この性質は、SPF / DB (超塑性成形 / 拡散接合) 法として、また複合材料 (合わせ材を含む) の製造、軽量構造部材の製造法に利用されている。

ix) 型へのなじみ性

超塑性の低い流動応力は、塑性変形のしやすさを意味する。型面のわずかな凸凹にもなじむのでコイニング加工、簡易なダイキャビティの製作に利用される。

3. 超塑性材料の加工法

超塑性材料の成形において、上記の諸性質がさまざまな加工法に対してどのように利用されているかを表1⁸⁾に示す。また、表2⁸⁾にはよく知られている超塑性材料を示す。超塑性というと、まず大きな延性が思い浮かぶが、加工への応用ではそのことよりも変形抵抗が低いことの方が利用されることが多い。加工法としては、板材は引張り変形が多いが、ブロック材は低変形抵抗を利用した圧縮加工が多い。

3.1 板材の真空・ブロー成形

従来、プラスチックやガラスの成形に用いられてきた真空成形、ブロー成形が金属材料にも用いることができる。比較的薄くて大きな成形物、たとえば、航空機機体、家庭用品、事務器、建材などが対象となる。真空成形には、お型法とめ型法とがある。お型法は内側寸法精度の高いもので深い容器の成形に用いられ、め型法は外側寸法精度が高く浅い容器の成形に用いられる。しかし、利用できる成形圧は1気圧までであるため、厚肉品、高強度材には不向きである。図5⁹⁾に事務器の例を示す。ブロー成形にも、お型法とめ型法がある(図6)。真空成形と異なり、利用できる成形圧も35気圧程度まで取れるので利用範囲は広い。圧力媒体としては空気または不活性ガスが使われる。これらの成形法では、大きな変形を伴うので製品の肉厚の一様化が課題となる。一般に肉厚の

表1 超塑性特性の加工への利用法⁸⁾

| 加工法 | 超塑性特性 | i) σ の温度依存性 | ii) σ の $\dot{\epsilon}$ 依存性 | iii) ϵ の温度依存性 | iv) ϵ の $\dot{\epsilon}$ 依存性 | v) 変形面の平滑性 | vi) 吸振性遮へい性 | vii) 等方性非硬化性 | viii) 拡散接合性 | ix) 型へのなじみ性 |
|------------|-------|--------------------|-------------------------------------|------------------------|---------------------------------------|------------|-------------|--------------|-------------|-------------|
| 真空・ブロー成形 | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| ホットプレス | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | ○ | ○ |
| 深絞り | | ○ | ○ | | | ○ | ○ | ○ | | |
| バルジ加工 | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | ○ |
| ダイレス引抜き | | ○ | ○ | | | ○ | | | | |
| コイニング | | ○ | ○ | | | | | | ○ | ○ |
| ホットホッピング加工 | | ○ | ○ | | | | | | ○ | ○ |
| 押し出し加工 | | ○ | ○ | | | | | | ○ | ○ |
| SPF / DB | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | ○ | ○ |
| 粉末成形 | | ○ | ○ | | | | | | ○ | ○ |
| 恒温鍛造 | | ○ | ○ | | | | | | ○ | ○ |

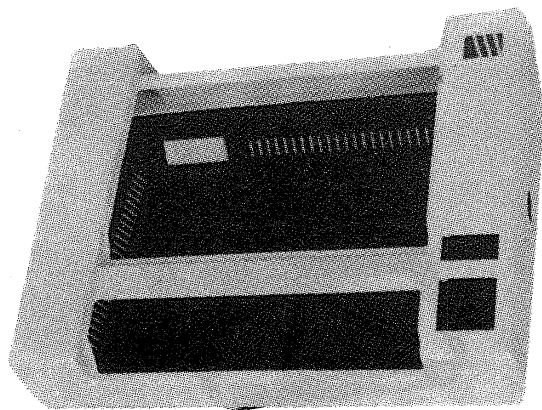
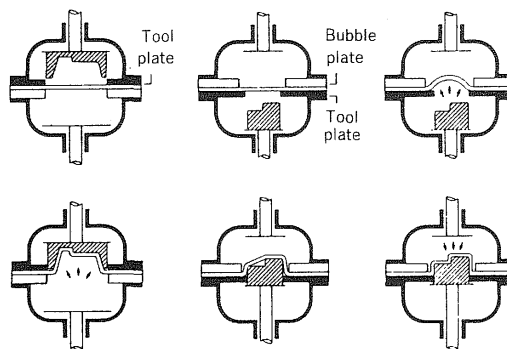


図5 卓上計量機器のディスプレイカバー
材料は Supral(Al 合金、Superform Metals 社の商品名)、電波の遮へい性が生かされている(東プラ)。



め型成形法 お型成形法、予成形(バルジ)によって板厚の一樣化を計る。

図6 ブロー成形におけるめ型、お型成形法^{*)}

表2 よく知られている超塑性材料^{*)}

| | 名称 | 組成 | 温度(°C) | 最大伸び(%) | 備考 |
|----------|------------------------------|------------------------------------|----------|------------|--|
| Zn系 | SPZ | Zn-22Al | 250 | 1500 | クリープ強度を向上させるため Mg を添加 |
| | SPZ 1 | Zn-22Al-1Cu | 250 | 1000 | |
| | SPZ 2 | Zn-22Al-1Cu-0.02Mg | 250 | 490 | |
| Al系 | Alcan 08050 | Al-5Ca-5Zn | 400~540 | 800 | 共晶合金 |
| | Al-Cu | Al-33Cu | 440~520 | 500 | |
| | Al-Cu-Mg | Al-25Cu-11Mg | 440~500 | 600 | A2004 耐食性向上のため Al をクラッドする 強度向上のため Mg, Si を添加 |
| | Supral 100 | Al-6Cu-0.5Zr | 350~470 | 1200 | |
| | Supral 150 | Al-6Cu-0.5Zr | 350~470 | 1200 | |
| | Supral 210 | Al-6Cu-0.5Zr-0.35Mg-0.14Si | 450 | 900 | |
| | Neopral | Al-5Mg-0.6Cu-0.6Mn | 550 | 700 | |
| Al-Mg-Si | Al-9Si-1Mg | 540 | 600 | | |
| A7475 | Al-5.6Zn-2.3Mg-1.6Cu | 515 | 600 | 高力アルミニウム合金 | |
| Al-Li | Al-2.3Li-1.2Cu-0.59Mg-0.12Zr | 520 | 550 | 新しい航空機用材料 | |
| Cu系 | β黄銅 | Cu-40Zn | 600 | 500 | |
| | C6301 | Cu-10Al-4.5Fe-6Ni-2Mn | 700 | 1300 | |
| Ni系 | IN-100 | Ni-10Cr-15Co-4.5Ti-5.5Al-3Mo | 930~1100 | 1300 | 粉末焼結材 次世代金属 (通産省プロジェクト) |
| | Mod.IN-100 | Ni-12.4Cr-18.3Co-4.3Ti-4.8Al-3.4Mo | 950~1100 | 580 | |
| Ti系 | α+β | Ti-6Al-4V | 800~1000 | 1000 | SPF/DB が可能 |
| | β-Ti(SP-35) | Ti-9.5V-2.5Mo-3Al | 700~750 | 450 | |
| | α+β(SP-700) | Ti-4.7Al-3.0V-2.0Fe-1.9Mo | 700~750 | 2500 | |
| | β | Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al | 700~750 | 400 | |
| Fe系 | 共析鋼 | Fe-0.91C-0.45Mn | 716 | 133 | |
| | 過共析鋼 | Fe-1.3~1.9C | 600~800 | 750 | |
| | 白鉄 | Fe-2.6C | 600~800 | 530 | |
| | 軸受鋼(SUJ-2) | Fe-0.75C-0.3Mn-1.3Cr | 730 | 850 | |
| | HSLA 鋼 | Fe-0.15C-0.2Si-1.16Mn | 790 | 700 | |
| | δ/γ 二相ステンレス鋼 | Fe-0.017C-6.8Ni-25Cr-2.8Mo | 950 | 2000 | |
| 高速度鋼 | Fe-1.25C-4Cr-5Mo-6W-3V-8Co | 1000 | 332 | | |

注) 超塑性材料は結晶粒が細かく(10μm 以下)、その状態が変化中、安定に持続していることが条件になる。成形温度と成形速度とを適切に選ばなければならない。

一様化は、ひずみ速度分布、温度分布、摩擦力のコントロールにより行う、一番多いのは摩擦力のコントロールによる方法でプラグアシスト法ともいう。

超塑性板のブロー成形法は通常のプレス加工法やプラスチック加工法と比べて、少、中量生産(50~10000個)においてコスト面で有利となる。極少量であっても高付加価値品であれば十分利用できる。図7はTi合金板を870℃においてアルゴンガスによってブロー成形した義歯床である。軽量かつ生体への影響を考慮して開発された高付加価値品である。

3.2 板材のホットプレス法

真空・ブロー成形は均肉化の点で難点はあるが経費が安い。ホットプレス法は上型、下型を用意しなければならないので経費はかさむ。また、プレス機械も圧力が大きくなるなど問題はあるが、

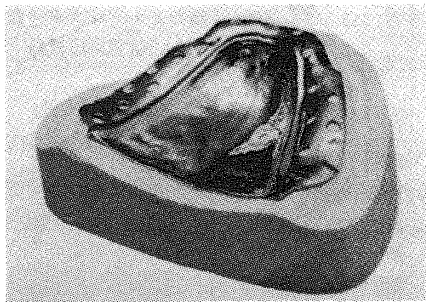


図7 Ti-6Al-4V 板材のブロー成形による上顎義歯床 (三金工業)

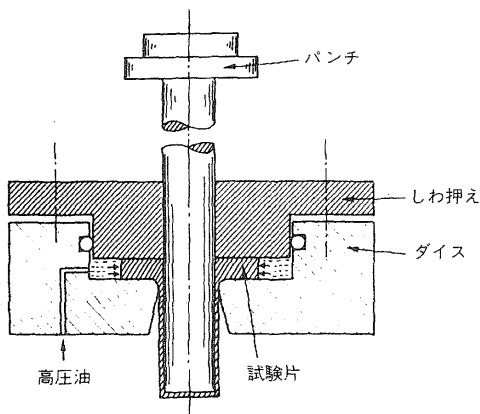


図8 油圧を補助的に使った深絞り実験装置⁹⁾

製品精度の高い品物を多量に作り出すのに適している。もっとも、ブロー成形では不可能な高変形抵抗材、板厚の大きな製品などはホットプレス法にたよらざるを得ない。中厚板の鑄造的な手法を取り入れられる。

3.3 深絞り法

通常の型による深絞りのように、一定圧のしわ押えを加えて超塑性材を絞るとカップ壁が伸びて破断する。Naib ら⁹⁾は図8に示すようなフランジ外周から油圧によって押し込む円筒容器の製造法を発表している。深絞りというより横押し込みといった方が当たっている。もちろん、材料は超塑性温度にまで加熱している。パンチはガイドにすぎず、荷重を伝達していないので限界絞り比のようなものは存在しない。加工時間が長いことが欠点である。

深絞りでは、主たる変形部であるフランジ部と変形するための力を負担する底部とでは、要求される材料の性質がまったく逆になる。フランジ部では変形抵抗が低いほうがいいし、パンチ肩部では強度の高いことが望まれる。フランジ部を加熱し、荷重負担部を冷却することにより、表1中i)の特性を利用することが可能となる。図9⁴⁾に示す装置により Zn-22Al 超塑性板をフランジ部を

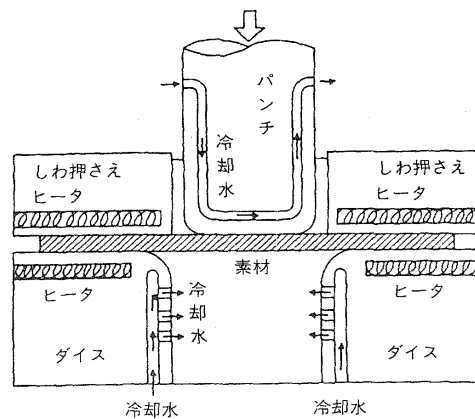


図9 超塑性材料にきわめて有効な加熱、冷却深絞り装置。フランジ部は超塑性温度 (SPZ では250℃) に加熱することによって変形抵抗を0.2kgf/mm²に低下させ、一方パンチ部は冷却することによって、強度を普通の Zn-Al 合金と同じ20kgf/mm²にしておくことができる。この差、20/0.2=100(倍)は普通の金属では得られない。LDR (限界絞り比)は6以上になる。⁴⁾

150℃～250℃、パンチ頭部及び円筒部を20℃に水冷することにより深絞りした例では、LDRが6以上となり、非常に深いカップが1工程で得られた。パンチ速度も1m/minの条件でカップ高さが直径の11倍の製品が得られた。パンチ速度とひずみ速度とは異なるので高速加工が可能である。図11の深絞りカップはこの方法で絞り途中止めを行った例である。

軟鋼板の深絞りで定説になっている。r値、n値との相関については超塑性板ではm値とr値が対応すると考えられるが、現在の所そのような材料特性値との相関は明らかにされていない。m値とLDRは逆相関とする報告もある。

3.4 管材のバルジ加工

管材のバルジ加工は基本的には板のブロー成形と類似の加工技術である。図10はブロー成形法とそれによって成形された容器である。この方法で

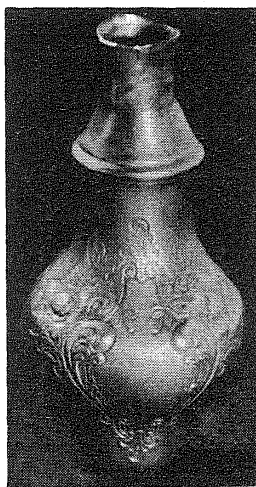
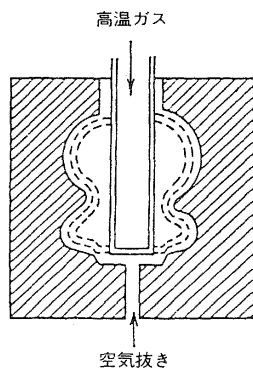


図10 管材のブロー成形法によるバルジ成形²⁾

はかなりの肉厚の管材までブロー成形でき、しかも型表面の凹凸を忠実に転写している。

3.3で述べた深絞り法によって作られた円管に内圧を加えて型張出し加工した例を図11に示す。四つの異なる形状の張出しを行うもので成形圧は同じであるため、張出し高さは異なり、幅がせまいものの方が張出し高さは低い、幅の広い部分から次々に成形が完了し、幅のせまい部分まで成形を完了するためには時間がかかる。材料の延性が十分であるため破断は生じない。

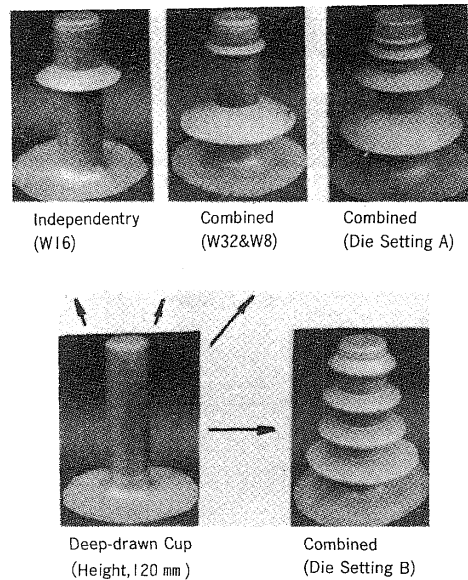


図11 超塑性深絞り円筒 (SPZ) の型張出し加工例¹⁰⁾

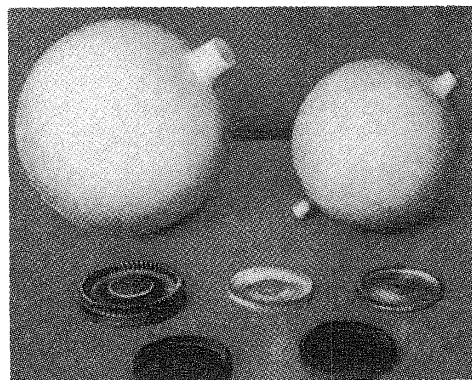


図12 (上)Ti合金チューブをバルジ加工した部品
(下)Ti合金の恒温鍛造品
Near Net Shapeに加工できる。
(中国北京机电研究所)

中国でも超塑性の研究は盛んに行われている。とくに Ti 合金の研究が盛んである。¹¹⁾⁻¹²⁾ 図12は中国で作られた Ti パイプのバルジ加工品と恒温鍛造品の例である。

3.5 ダイレスフォーミング

超塑性材料の加工では、強度負担部と主変形部とを区別して加工することがポイントである。すなわち、変形してほしい所は超塑性状態にし、荷重を伝達する部分は冷却して強度を向上させることである。前述の深絞り加工もこの原理を利用したもので、フランジ部分は加熱し、パンチ頭部は冷却して加工限界を向上している。一般の金属材料でも同様なことが行えるが、超塑性材料の場合には図1の結果をみても明らかのように、わずかな温度差で大きく変形抵抗が変化するので加工度を大きく取ることができる。図13³⁾は、この原理を引抜き加工に当てはめた場合の例でダイスなしで断面積を減少させることができる。引抜き速度をコントロールすることにより任意の直径の管または棒が得られる。直径精度は $\pm 5 \mu\text{m}$ まで可能で、しかも熱処理を同時に行うことができる。一度に大きな減面率を取ることができることが特徴である。

3.6 コイニング及びホットホッピング加工

流動応力のひずみ速度依存性を非常にたくみに利用した加工法にコイニング加工がある。コイニング加工はコインの表面のような微細な凹凸をブロック材に転写する方法で押し込み加工の一種である。コインよりもさらに深い凹凸をブロック材に押し込む方法がホッピングである。押し込み量のちがいはあるが原理的に同じで、超塑性材料の流動応力のひずみ速度依存性(図2)を利用する。図14はコイニング(a)とコイニングされた超塑性材をスタンピング型(b)として使用する例である。

(a)の場合はホブ(モデルの硬貨)をゆっくり押し込んで超塑性ブロックの低変形抵抗を利用した加工を行う。(b)の場合は型としての強度を期待するために、加工の終わった超塑性金型に対して高いひずみ速度を与えて銅のピレットに凹凸を転写する。この場合は室温で行う。Zn-Al合金材は 250°C 、 $\dot{\epsilon} = 10^{-2}/\text{s}$ で流動応力は $1 \text{ kgf}/\text{mm}^2$

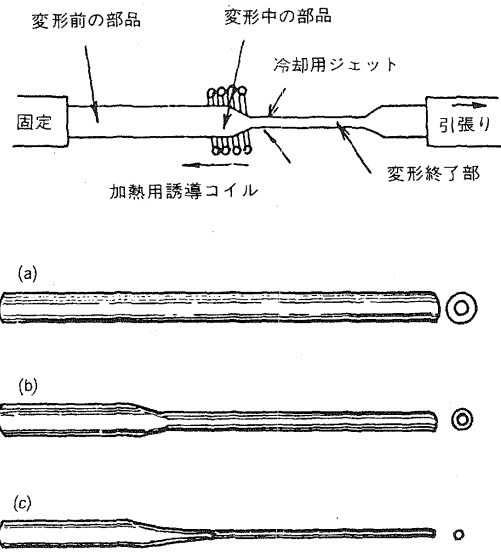


図13 ダイレス引抜き装置および製品例
(a) 素材のチタニウム合金チューブ、
(b)、(c) この方法により引き抜かれた製品。
誘導コイルの下にある材料は超塑性温度にまで加熱されて変形抵抗が大幅に下がっている。一方、冷却用ジェットが当たっている部分は温度が低く、充分な強度を有して荷重を伝達することができる。この方法をさらに発展させて、加工中に熱処理することも可能である³⁾。

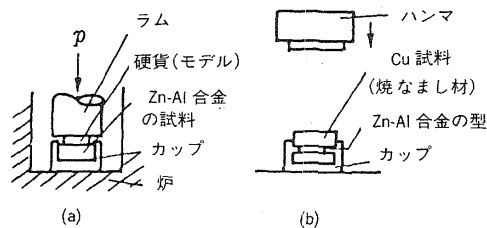


図14-a Zn-Al 超塑性合金のホッピング装置(a)とこれを型として使ったときのスタンピング装置(b)

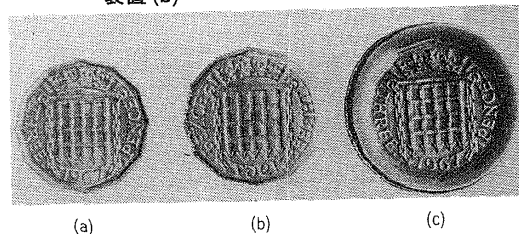


図14-b (a) はモデルとして使用した硬貨
(b) は 250°C で成形された Zn-Al 合金の型、
(c) は(b)をパンチとしてスタンピングされた Cu のピレット
Zn-22Al 超塑性合金の型を使って Cu のスタンピングを行った結果

以下であり、ホビング加工は容易である。ところがスタンピングに相当する高ひずみ速度 ($10^2/s$) における室温の流動応力は 102kgf/mm^2 であり、銅のピレットの変形抵抗 (20kgf/mm^2) の5倍である。この原理を利用して打抜き型、ロストワックスのろう型、プラスチックの射出成型が作られている(図15)。

次に超塑性材料のコイニング加工を腕時計の文字盤の製作に応用した例を図16¹³⁾に示す。(a)の従来品では、時字・マーク類はベースに接着剤により固定されるが、落下等の衝撃ではずれることがあった。ベース裏側には細い足が溶接され、表側には手加工の研磨作業で数 μm のヘアライン加工を行っていた。その後のメッキ、表面処理を入れると14工程を要していた。(b)の超塑性加工品では、文字板成形と組立てを同時に行っており、7工程で完成している。時計の文字板のように微細な模様が特に大切な製品に超塑性材料のコ

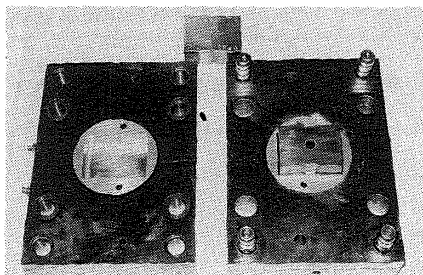


図15 超塑性合金金型。ホットホビング法によりダイキャビテーターを作ったところ。低変形抵抗を利用して、小さな力でキャビテーターを作ることができ、微細な模様を忠実に転写することができる。写真右はダイキャビティ(めす型)、左は押込みに使ったホブでそのままおす型に使う(東測研究所)。

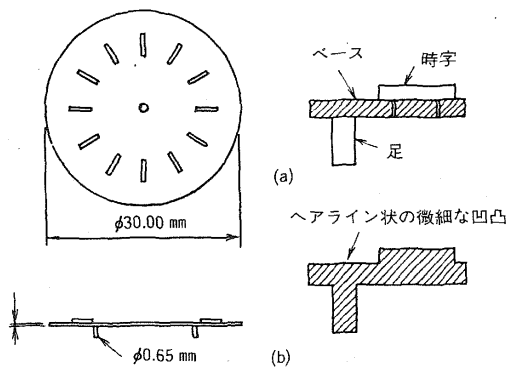


図16 腕時計文字板の構造例 (a) 従来品、(b) 超塑性一体成形品¹³⁾

イニング加工を利用した実用例として評価されている。

3.7 押し加工

超塑性材料の一定荷重加工法の一つに IBM の特許となった押し加工がある。一般の加工硬化材は加工力〜ストローク線図にピークを持つ。ところが、超塑性材料では摩擦力に打ち勝ちさえすれば一定荷重で加工ができる。それは、変形抵抗のひずみ速度依存性を利用するもので、低速度で加工すれば非常に低い応力で加工が完成する。

図17はIBM社の開発した定荷重押し法である。(a)の空洞に加熱した超塑性ピレットを押し出して、(b)の過程を経て型内に充満して最終的に(c)のような部品(タイプライターのボールヘッド)を作る方法である。圧接加工(Pressure Welding)と称し、構造的に強固な製品になる、超塑性材料の拡散接合性を利用した方法である。

3.8 超塑性成形/拡散接合 (SPF / DB)

上述したように、超塑性状態で加圧すると拡散接合が極めて容易に行えることが分っている。接

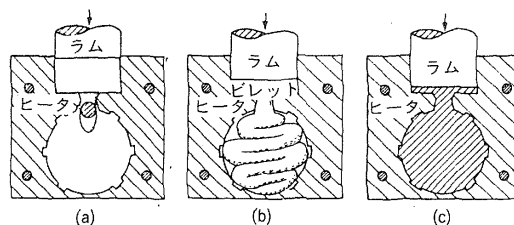


図17 圧接加工の原理 (IBM 社)

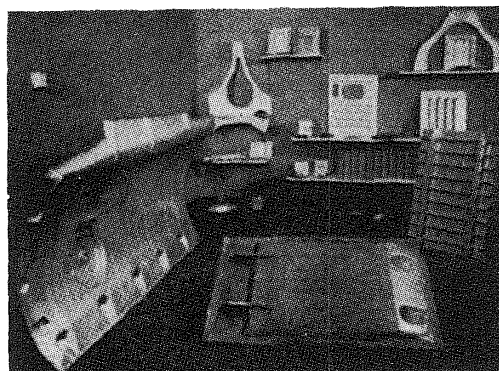


図18 Ti-6Al-4VのSPF/DBにより製作された航空機部品¹⁴⁾

合性は材料によって異なるがチタン合金とアルミニウム合金が特に優れている。チタン合金は拡散接合の温度条件が超塑性の温度と一致していることがそれほど大きな変形を与えなくても接合する理由である。図18¹⁴⁾はチタン合金のSPF/DB法で成形した航空機部品である。成形はブロー成形で厚物では30気圧程度の圧力で成形時間は長くないがDBは1時間以上高温のまま圧力を保持して行う。図19¹⁵⁾はTi合金の板4枚をSPF/DB法に航空機用構造物を製造するときの原理図である。SPOPOFF材を接合したくない部分に使って中空構造体を製造している。部品点数の削

減、軽量化、コスト低減等の効果をもたらしている。超塑性材料の優れた拡散接合性を利用して、圧着圧延により他の金属との合わせ板を作ることが行われている。表2中のAl系超塑性材料Supral 150マトリックスの耐食性を補うため純Alをクラッドして合わせ板としている。大沢ら¹⁶⁾はZn-22Al超塑性合金と純Alの合わせ板を製作し、その力学的挙動を $\sigma = K \dot{\epsilon}^m \epsilon^n$ の形で検討している。加工硬化性を持つ超塑性材料として期待される。また、小豆島ら¹⁷⁾は超塑性合金の吸振性に着目し、鋼板との合わせ板を作り、制振効果について考察している。

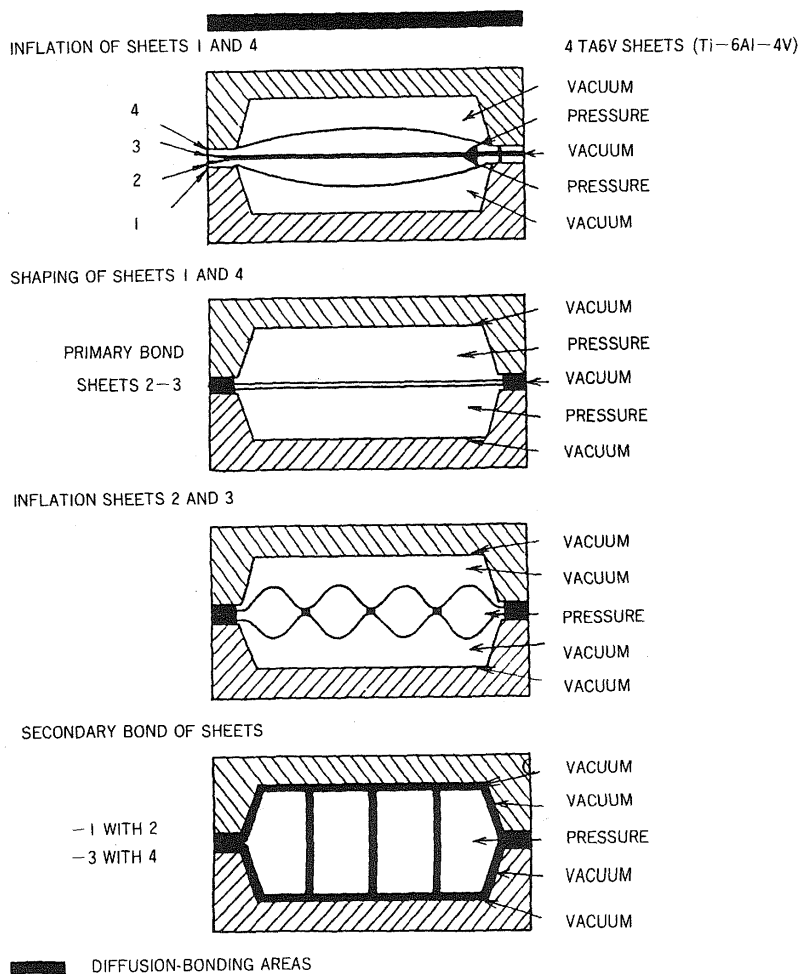


図19 4シートのSPF/DB法¹⁵⁾

3.9 粉末冶金法

超塑性粉末の優れた拡散接合性に着目し、機械的強度の向上をめざした強化素材との複合化あるいは他の機能の改善をねらった粉末冶金法は、新素材、複合材料の開発面で一つのインパクトを与えた。浅沼ら¹⁸⁾は超塑性亜鉛合金 (SPZ) 粉末に SiC ウィスカを混合し、これを複合押し加工装置により圧粉と同時に成形し、SiC_w/SPZ 複合材料の製造を試みた。複合化によって高温強度が著しく改善された。SiC ないし B 連続繊維を強化材とし、マトリックスに超塑性 Al 合金粉末を用いてホットプレス法により製造した FRM について、マトリックスの超塑性を利用した FRM の二次加工についての研究がある。複合材料の加工性の悪さを改善する方法として注目されている。図20¹⁹⁾ 図21²⁰⁾ は FRM の製造装置と製造された FRM の曲げ加工品を示す。圧粉時の温度は超塑性温度より高めの半熔融温度が適当で、曲げ等の二次加工時の温度は超塑性温度が適している。

3.10 恒温鍛造

超塑性材料の鍛造は鍛造時間が長いため、金型ごと超塑性温度に加熱して行う恒温鍛造法が用いられる。米国 Pratt & Whitney Aircraft 社がゲートライジング法と呼ばれる恒温鍛造法を開発して難加工性材料である Ni 基超耐熱合金の IN-100 のタービンディスクを成形した(図22)。この図から見られるように Near Net Shape に鍛造することができ、後加工の手間が省ける利点がある。我が国でも通産省の次世代プロジェクトのテーマに取り上げられ、材料の開発、加工法、金型の技術の確立、鍛造のシミュレーション解析など多くの成果を挙げることができた。この技術の利点は加工力が通常の加工法に比べて10分の1で済むことであるが、反面金型材料が1100℃という高温に耐えるものでなければならない欠点もある。極めて高価な型を使用するため、塑性加工が不可能な素材の高付加価値品に利用される。

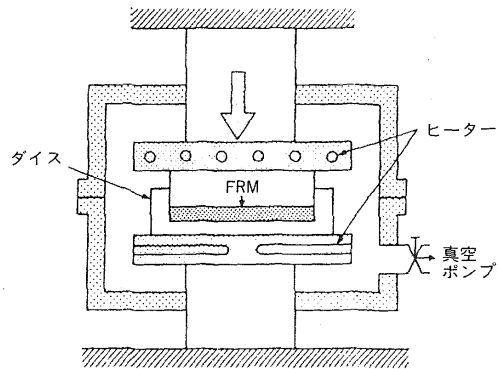
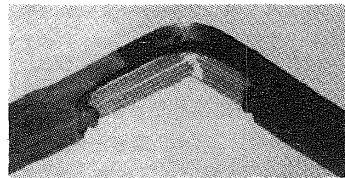
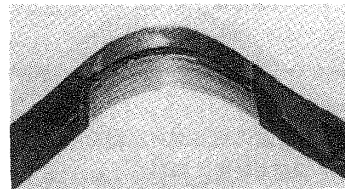


図20 SPZ をマトリックスとする FRM 製造用ホットプレス装置¹⁹⁾



(a) 繊維破断



(b) 組織破断なし

図21 FRM の曲げ加工品²⁰⁾
(繊維の破断状況を見るために部分的にマトリックスを除去してある)

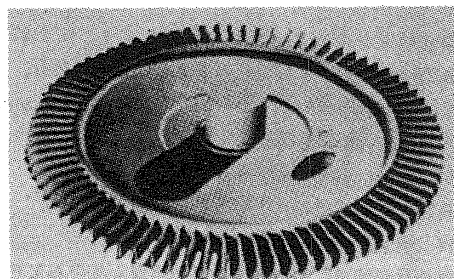


図22 ゲートライジング法によりタービンディスクブレード(P&W 社のパンフレットより)

4. 結言

表3⁸⁾は従来から用いられている材料に適用できる加工法の一覧である。これまでに試みられていないものは不明とした。表より、板材については真空・ブロー成形とその応用であるSPF/DB法が有効であり、棒、管材（ブロック材を含む）ではホットプレス、鍛造、押出しが有効である。粉末については、一部HIP処理してから鍛造的手法により成形するものもあるが、一般的にはホットプレス法が有効な手段となる。

超塑性材料が一般の構造用材料としてさらに普及してゆくためには、必要なデータベースを構築することが必要なことはもちろんであるが、より

安価な方法で結晶粒を微細化する手法の開発が不可欠である。超塑性材料の製造コストが同一組成の一般材料に比べて2～3割アップぐらいに収まることが必要であるが現状ではほど遠い話である。

次に超塑性材料で作られた製品が一般材に比べて特別な付加的機能を有するようになることも大切である。単に加工工程にのみ超塑性を利用するのではなく、完成した製品中に超塑性の付加的利点を生かすことである。振動吸収能、電波の遮へい性、面の平滑性などもその一つであるが、疲労強度の改善、耐食性の改善なども一部の合金で見出されているがいまだ十分とはいえない。付加的機能をそなえた高機能超塑性合金部材の開発が大切である。

表3 超塑性材料の加工法一覧⁸⁾

| 加工法 材料 | 素材 形状 | 真 ブ ロ 成 | 空 形 | ホ ッ ト プ レ ス | 深 絞 り 張 出 し | ダ イ ス 引 抜 き | コ イ ニ ン グ | ホ ッ ト ホ ン ビ ン グ | 押 出 し | SPF DB | 恒 温 鍛 造 | 付 加 的 特 性 ・ 注 意 事 項 |
|------------------|----------|------------------|--------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------|--------------------------------------|-------------|-----------|------------------|--|
| Al 合 金 | 板 | ◎ | ○ | ◎ | × | ○ | × | × | × | ○ | × | 電波の遮へい性 キャビテーション 変形面の平滑性 局部薄肉化 |
| | 棒 管 | ○ | ○ | × | ◎ | ◎ | ◎ | ◎ | ◎ | × | ○ | 固相接合性 転写性 |
| | 粉 | × | ◎ | × | × | △ | △ | △ | △ | × | ○ | 複合材料化(MMC) |
| Ti 合 金 | 板 | ◎ | ○ | ○ | × | ○ | × | × | × | ◎ | × | 部品の一体化 耐酸化 拡散 接合性 キャビテーション |
| | 棒 管 | ○ | ◎ | × | ◎ | ◎ | ◎ | ◎ | ◎ | × | ◎ | 転写性 難加工性改善 |
| | 粉 | × | ◎ | × | × | ○ | △ | ○ | ○ | × | ○ | Near Net Shape 複合材料化(MMC) |
| Cu 合 金 | 板 | ◎ | ○ | ◎ | × | △ | × | × | × | △ | × | |
| | 棒 管 | × | ◎ | × | △ | ◎ | ◎ | ◎ | ◎ | × | ○ | |
| | 粉 | × | ○ | × | × | △ | △ | △ | △ | × | ○ | |
| Fe 合 金 | 板 | ◎ | ○ | ○ | × | × | × | × | × | ○ | × | クラッド材 ラミネート材 |
| | 棒 管 | × | ○ | × | ○ | ○ | ○ | △ | ○ | × | ○ | 難加工性改善 |
| | 粉 | × | ◎ | × | × | × | × | △ | ○ | × | ◎ | 超高炭素鋼 2相ステンレス鋼 |
| Zn 合 金 | 板 | ◎ | ○ | ◎ | × | × | × | × | × | × | × | 振動吸収能 クリーブ強度 |
| | 棒 管 | ○ | ○ | × | ○ | ◎ | ◎ | ◎ | ○ | × | △ | 電波しゃへい性 耐食性 |
| | 粉 | × | ◎ | × | × | △ | × | × | ○ | × | △ | 等方性 平滑性 |
| Ni 合 金 | 板 | △ | × | △ | × | × | × | × | × | △ | × | 難加工性改善 |
| | 棒 管 | × | ○ | × | △ | ○ | ○ | ○ | ○ | × | ◎ | |
| | 粉 | × | ○ | × | △ | ○ | ○ | ○ | ○ | × | ◎ | 超合金 HIP 材 |
| セラミ ックス | 板 | △ | △ | △ | × | × | × | × | × | × | × | 難加工性改善 |
| | 棒 管 | ○ | ○ | × | △ | ○ | ○ | ○ | ○ | × | ○ | |
| | 粉 | × | ○ | × | × | ○ | ○ | ○ | ○ | × | ○ | |
| 複 合 材 料 | 板 | × | ○ | × | × | × | × | × | × | × | × | 難加工性改善 |
| | 棒 管 | × | ○ | × | △ | ○ | ○ | ◎ | △ | △ | ○ | |
| | 粉 | × | ○ | × | △ | ○ | ○ | ○ | △ | △ | ○ | |

注) ◎最適 ○適 ×不可 △不明

参考文献

- 1) W.Johnson,T.Y.M.AI-Naib and J.L.Duncan:J.Inst.-Metal.,100(1972),P.45
- 2) T.H.Thomsen,D.L.Holt,and W.A.Backofen:Metals Enging.Quartery,2(1970),P.1
- 3) R.H.Johnson:Design Enging(1969-3),P.33
- 4) 西村 尚, 川上 芳正, 宮川 松男, : 塑性と加工, 15(1974-11)166,P.909
- 5) R.A.Saller,and J.L.Duncan:J.Inst.Metal., 99(1971),P.173
- 6) 高性能結晶合金技術ハンドブック (日本規格協会) (1991)
- 7) 西村 尚 : 設計製図, 20(1985-1)117,P.25
- 8) 大沢 泰明, 西村 尚 : 軽金属, 39(1989)11,P.765
- 9) T.Y.M.AI-Naib and J.L.Duncan:Int.J.Mech.Sci., 12(1970),P.463
- 10) 大沢 泰明, 西村 尚 : 塑性と加工, 21(1980),P.953
- 11) 中日超塑性学術論文集 (超塑性研究会編) (1985)
- 12) 日中超塑性シンポジウム '86 論文集 (超塑性研究会編) (1986)
- 13) 木村 南 : 塑性と加工, 29(1988),P.801
- 14) E.D.Weisert and G.W.Stacher:Superplastic Forming of Structural Alloys(1982),P.273[AIME]
- 15) R.Bruno:Superplasticity and Superplastic Forming (1988),P.601
- 16) 大沢 泰明, 西村 尚 : 塑性と加工, 27(1986),P.375
- 17) 小豆島 明, 三浦 恒正, 宮川 松男 : 鉄と鋼, 70(1984),P.2269
- 18) 浅沼 博, 広橋 光治, 河合栄一郎 : 塑性と加工, 27(1986),P.1191
- 19) 西村 尚, 山本 弘暎, 山岸 新一 : 軽金属, 38(1988)10,P.665
- 20) 西村 尚, 伊藤 達也, 山本 弘暎, 若山 修一 : 軽金属, 39(1989)11,P.836