特集号

解説

超塑性材料の成形と応用例

大澤 泰明*・西村 尚**

Manufacturing methods of superplastic materials
and commercial applications

Hiroaki OHSAWA* and Hisashi NISHIMURA**

1. はじめに

金属の超塑性に関する解説を日本で最初に公表したのは、当時（1965年）東北大学金属材料研究所に留学中の Oelschlägel¹⁾であった。英語で書かれたこの解説以来、20数年間にわたって、さまざまな角度からさまざまな研究者が、この現象について考え続けてきた^{*1,2),3)}。最近では、超塑性材料は次世代産業基盤技術研究開発プロジェクトの1テーマとして採り上げられ、また、超塑性材料の特性評価法⁴⁾、特性標準化⁵⁾およびデータベース⁶⁾に関する調査報告書が刊行されるなど、研究熱は依然として衰えていない。

超塑性の起源は1920年代にある⁷⁾が、戦後はソ連において再開され⁸⁾、欧米には Underwood によって紹介された⁹⁾。その後、Backofen に引き継がれた超塑性は、彼によって導入された m 値（ひずみ速度感受性指数）の概念¹⁰⁾によりしだいにその本質を明確に現し始めた。近年では、この6~7年の間に超塑性国際会議が3回も開催され^{11)~13)}、次回(1991年)は日本で開催予定である。このように東欧圏を含んで、超塑性に関する研究は国内外で活発に進められている。

このような状況のもとで、超塑性材料は塑性加工技術にどのようなインパクトを与えたのであろうか。また、超塑性の性質は金属加工製品にどのように利用され、生かされているのであろうか。材料開発やそれに伴う加工技術の開発に携わる者として、これらを理解しておくことが必要であろう¹⁴⁾。

超塑性を加工技術へ応用しようとする試みはすでに20年前、米国 IBM 社により始められた¹⁵⁾。その後は、対象となった材料が主として亜鉛系合金であったことも起因して予想した¹⁶⁾ほどの普及はなかった。ところが、米国を中心として航空機用部品として Al, Ti 系超塑性材料の開発や利用が活発になった¹¹⁾ことを契機にして、従来の亜鉛系合金主体から、軽量、耐熱性を買われて Al および Ti 系合金、さらには Ni 基超合金の難加工性を改善する目的での超塑性利用開発など、新たな進展が見られた。

ここでは、超塑性材料の成形に関する最近の研究と応用例について解説を試みたい。

2. 超塑性の特徴²⁾

超塑性は力学的現象に対する名称であり、超塑性材料ならば常に超塑性とは限らない。超塑性現象の発現条件としては、1) $m \geq 0.3$ 、2) 伸び $\geq 200\%$ が通常考えられている最も一般的な条件である¹⁷⁾。これを出発点とすれば、超塑性発現のために材料の具備しなければならない条件（内的因子）として、1) 安定かつ微細な等軸の結晶粒、変形条件（外的因子）として、2) $T > 0.5 T_m$ (T_m : 融点の絶対温度)、3) 低いひずみ速度、がある。これらの条件がすべて満足された時、超塑性材料は超塑性を示すのである。

超塑性の変形特性の特徴として、以下の i) ~ iv) が挙げられる。

i) 流動応力の温度依存性

変形抵抗、流動応力ないし引張強さは超塑性温度、低いひずみ速度において著しく小さい。場合によっては、室

*1 研究成果は、1980年を境としてそれ以前は文献2)、それ以後は文献3)にまとめられている。

* 法政大学工学部（小金井市）。Faculty of Technology, Hosei University (Koganei-shi, Tokyo).

** 東京都立大学工学部（世田谷区）。Faculty of Technology, Tokyo Metropolitan University (Setagaya-ku, Tokyo).

受理日：平成元年7月26日

温に対して100倍もの差が生ずる¹⁸⁾ことがある。このことは塑性加工において、非常に有利に作用しこの性質を利用した成形法が多い。

ii) 流動応力のひずみ速度依存性

流動応力がどれだけひずみ速度に依存するかを示す指標が m 値であり、この m の大きいことが超塑性を本質的に同定する。

iii) 伸びの温度依存性

超塑性の伸びは最高荷重点をすぎた後の擬一様変形、いわゆるくびれ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、くびれ伸びが増加してゆき超塑性温度では1000%を超える伸びが得られる。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

一般に、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 値との関連で説明される¹⁹⁾が、伸びのひずみ速度依存性は m 値のひずみ速度依存性を反映しており、材料特性値としての m 値のかかえる問題点の1つである。

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条件となる。

v) 自由変形面の平滑性

通常の延性金属の平均結晶粒径に比べて、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。これらは、利用価値の高い機能として注目されている。

vii) 等方性、非加工硬化性

Zn 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、カップ耳は生じにくい。さらに、超塑性材料は加工硬化せず、真応力-真ひずみ曲線上で n 値を算出すると負値となり、加工軟化性材料と考えた方がよい。したがって、加工による製品の強度上昇は望めない。

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非常に活性化し、他の金属との接合が容易である。この性質は、複合材料(合わせ板)の製造、軽量強度部材の製法に利用されよう。

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、容易さを意味する。したがって、型面の微細な凹凸にも簡単になじみ、転写性はきわめて秀れている。

3. 超塑性材料の成形

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1に示す。また、表2にはよく知られている超塑性材料を示す。超塑性という点、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が利用されることがわかる。塑性加工は圧縮応力場で行われることが多く、引張応力場での加工では、くびれよりもむしろ製品の板厚が加工限界を律するからであろう。

3.1 板材の真空・ブロー成形法

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・ブロー成形が、超塑性板材の加工に適用できる。比較的薄くて大きな成形物、たとえば各種事務用機器のカバー(図1)などが対象となる。真空成形法にはめ型法とお型法がある。め型法は外側の寸法精度が必要なものの、浅い容器、お型法は内側の寸法精度、深い容器など

表1 超塑性特性の加工への利用法

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	○	○						○	○
押出し加工	○	○						○	○
S P F / D B	○	○	○	○	○	○		○	○
粉末成形	○	○						○	○
恒温鍛造	○	○						○	○

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	6000	
	Supral 100	Al-6Cu-0.5Zr	350～ 470	1200	A2004
	Supral 150	Al-6Cu-0.5Zr	350～ 470	1200	
	Supral 210	Al-6Cu-0.5Zr-0.35Mg-0.14Si	450	900	耐食性向上のため Al をクラッドする
	Neopral	Al-5Mg-0.6Cu-0.6Mn	550	700	
	Al-Mg-Si	Al-9Si-1Mg	540	600	強度向上のため Mg, Si を添加
	A7475	Al-5.6Zn-2.3Mg-1.6Cu	515	600	
Cu 系	β 黄銅	Cu-40Zn	600	500	高力アルミニウム合金 新しい航空機用材料
	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	IMI 318	Ti-6Al-4V	800～1000	1000	SPF/DB が可能
	β-Ti (SP-35)	Ti-9.5V-2.5Mo-3Al	700～ 750	450	
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/r 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 (10 μm 以下), その状態が変形中, 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。

図1 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²⁰⁾。

の成形に利用される。しかし, 利用できる成形圧は高々 10気圧程度なので厚肉品, 高強度材には不向きである。

ブロー成形にもめ型法とお型法がある (図2)。真空成形と異なり, 利用できる圧力が高いので, 利用範囲の広い成形法である。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板厚一様化が常に大きな課題となる。一般に板厚一様化は, ひずみ速度分布^{21),22)}, 温度分布²³⁾, 摩擦力のコントロール²⁴⁾を行うことにより達成されるが, 一番多いのは摩擦力の利用によるものである。

超塑性板材のブロー成形法は, 通常のプレス加工法やプラスチック加工法と比べて, 中生産量 (50～10000個程度) においてコスト面で有利となる²⁰⁾。小生産量に対

め型成形法 お型成形法、予成形（パルジ）によって板厚の一樣化を計る。

図2 ブロー成形におけるめ型、お型成形法²⁰⁾

図3 Ti-6Al-4V 板材のブロー成形による上顎義歯床²⁵⁾

しても、たとえば以下の例（図3）のように高付加価値が可能ならば、コスト面での問題はなくなる。図3は、Ti-6Al-4V 板材を870°C、アルゴンガスによってブロー成形した義歯床である。この材料は航空機構造部材として有名であるが、軽量、高強度、安全性、装着感、清潔などの優れた物性を超塑性ブロー成形によって歯科に生かしたユニークな例である。

3.2 板材のホットプレス法

真空・ブロー成形は均肉化が困難であるが型費が安い。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型材を低級化できるとしても型費はかさみ、また油圧プレスも必要とするなど一般に設備は高い。その反面、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い変形抵抗をもつ材料、板厚の大きい製品などでは、ホットプレス法にたよらざるを得ない。ある程度板厚が大きければ、鍛造的な手法を取り入れられるので、かなり精度の高い製品が得られる。

3.3 深絞り法

通常の型による深絞りのように、一定圧のしわ押え圧

図4 油圧を補助的に使った深絞り実験装置²⁶⁾

を加えて超塑性材料を深絞りすると、カップ壁が破断してしまう。これは超塑性状態では、絞り荷重を負担するカップ壁部の強度が弱まるからである。そこで、Al-Naib ら²⁶⁾は図4に示すように、しわ押えを固定し、フランジ外周に油圧をかけることによって非常に深い筒状容器を作る方法を考案している。この方法ではパンチは単なるガイドであり、荷重を伝達するものではないので、深絞りというより押し出しに近い加工法である。精度の良い長い筒状容器が作られるが、加工時間が長いことが欠点である。

深絞り成形では、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である。フランジ部では変形抵抗は低いほうがいいし、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、荷重負担部を冷却する周辺加熱深絞り法の考え方はとくに新しいものではない²⁷⁾が、超塑性材料は流動応力の温度依存性が著しいので、この方法はきわめて有効と考えられる。図5に示す装置により、Zn-22Al 超塑性合金板を、フランジ部150~250°C、パンチ頭部およびダイス肩部を水冷（20°C）して、深絞り成形した結果では、限界絞り比（LDR）で6以上となり、非常に深いカップが1工程で得られた²⁸⁾。その後の実験でも、フランジ部250°C、中心部20°C、パンチ速度1 m/min の条件でLDRは8以上、製品直径に対するカップ高さの比11以上という驚異的な深絞り性が得られた²⁹⁾。

一様加工温度場での m 値と深絞り成形性（LDR）との相関については、LDR に及ぼすパンチ速度効果という形での主に実験的な研究が進められてきている³⁰⁾。 r 値や n 値と LDR との関係に関する定説³¹⁾のような一般的に認められている説は、 m 値と LDR の間には、現在

図5 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0.2 kgf/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20 kgf/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。

のところない。しかし、m値とLDRは逆相関とする報告³²⁾がある。

3.4 管材のバルジ加工

ここでは超塑性管材のバルジ加工をとりあげる。超塑性材料は変形抵抗が低く、延性が大きいので、鋼管などで用いられる大容量の加工機は必要としない。図6はIBM社の特許になっているブロー成形による管材のバルジ加工法である。この方法では、従来の金属では考えられないほど大きな変形ができる。また、管の肉厚もかなり厚いものまで可能で、型の表面に複雑な模様を彫っておけば、そのとおりに転写され鑄造品に匹敵するような製品が得られる³³⁾。

Zn-22Al板材を周辺加熱深絞りし、得られた円筒に内圧を加えて張出し加工を行った例を図7に示す。4つの張出し部を持ち、それぞれの部分の幅が異なり、張出しに要する圧力が異なる。それに対して内圧は同じなので各部の張出し高さが異なり、幅が小さいもののほうが成形圧力が高くなるので大きくは張出せない。幅の大きい部分から順に成形完了し、幅の小さい部分まで型になじませるためには長い時間がかかる。それにしても、延性は十分であり、このような加工は容易に行える。

中国でも超塑性の研究は盛んに行われている^{35),36)}が、図8には中国で製作されたTi合金のバルジ加工品、恒温鍛造品の例を示した。

3.5 ダイレス引抜き加工

図6 管材のブローによるバルジ成形³³⁾

図7 超塑性深絞り円筒（SPZ）の型張出し加工例³⁴⁾

図8 (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)

超塑性材の加工では、強度負担部と主変形部とを区別することがポイントである。ダイレス引抜き法（図9）はこのことをたくみに利用した方法である。加熱用誘導コイルによって加工したい部分だけを局部的に加熱して、延性を増加させると共に変形抵抗を下げ、加工力を低減している。このようにして、型がなくても任意の断面積に減面して各種の円筒を作ることが可能となる。この方法では、温度が上がるまでに時間がかかるので、引抜き速度を高くできない欠点がある。急速に局部加熱する方式が開発できれば、さらに有利になろう。

3.6 コイニング加工

ここでは Saller らが図10のような方法で、金型製作のためのコイニングとその金型を用いてスタンピングを行った結果について述べる。図10(a)では Pb-Sn 合金または Pb を試料とし、ダイス面上の凹凸（たとえばコイン）

図9 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³⁷⁾。

図10 Pb-Sn 超塑性合金のコイニング装置(a)とスタンピング装置(b)³⁸⁾

を転写しようとするものである。このコイニングで作られた Pb-Sn 合金をパンチとして使用してドロップハンマーによるスタンピングを行ったところ、パンチの損傷はわずかで、1つのパンチを多数のピレットに対し使用することができた。この研究の結果から、超塑性材料の変形抵抗のひずみ速度依存性を利用すれば、スタンピングやエンボス加工の少量生産金型に超塑性合金を使用することができ、その製作も容易であることがわかる。

超塑性材料 (SPZ) のコイニング加工を腕時計文字板の製作に応用した例³⁹⁾を図11に紹介する。(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 の凹凸のヘアライン状の模様がつけられる。この後、めっき、印刷等の表面処理をして完成部品となるには、14工程を要した。

(b)の超塑性一体成形品では、文字板成形と組立てを同時に行っており、14工程を7工程に減らすことができた。時計の文字板のように微細な模様が特に大切な製品に、超塑性材料のコイニングを応用した加工例の1つである。

3.7 ホットホッピング加工

ホットホッピング法による簡易金型としては、ロストワックス用のロウ型、プラスチックの射出成形金型、打抜き型等がある。プラスチックの射出成形用金型は、ロストワックス鑄造法に比べてかなりの高射出圧力下で使用される。図12はホッピングした型をダイセットに組込んだ例である。型は超塑性材料 (SPZ) である。この製品の例では ABS 樹脂の射出成形のランニング試験を行った。その結果は、8000ショットで実験を打ち切ったが型と製品にはまったく異常なく、2万ショット程度までは十分に使用に耐えるものと思われた。超塑性材料にとってはかなり苛酷とも考えられる成形条件下においても、型材とし

図11 腕時計文字板の構造例

(a) 従来品、(b) 超塑性一体成形品³⁹⁾

図12 超塑性合金金型。ホットホッピング法によりダイキャビテータを作ったところ。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ボブでそのままおす型に使う。

て使用可能であることがわかった。

鈴木ら⁴⁰⁾は、ホットホッピングした型（SPZ）とホブ（鋼製で断面は星形、外径約40 mm）をそのままダイスとパンチとして使用し、SPC板（厚さ0.8 mm）の打抜きを行い、4000個まで打抜けることを示した。すなわち、Zn-Al超塑性合金をダイスの切刃として用いたわけである。彼等は⁴¹⁾、その後、上述の方法で製作した超塑性合金製金型で、本来の打抜き開始前の1発目にダイス表面にねじ止めされたペイナイト鋼板を打抜くと、ペイナイト鋼板の抜きかすは、そのまま切刃となり、切刃は補強されて耐久性が著しく向上することを明らかにした。図13は、このときの打抜き型の製作工程を示したものである。

3.8 押し出し加工

IBM社では超塑性材料の加工法として鋳造と鍛造との中間的な低荷重押し出し法を開発した¹⁵⁾。原理図を図14に示す。(a)では、空洞内に加熱した超塑性ビレットを押出して、(b)の過程を経て型内に充満させ、最終的には(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。

広橋ら⁴²⁾は、後方押し出しによって中空品を作るとき

に、型を途中で止めては、横方向への張出しを順次行う方式の加工方法に成功している。実験装置を図15に示す。

供試材は Zn-22Al 共析合金で、微細粒状組織（粒径 $0.8\ \mu\text{m}$ ）の超塑性を示す試料について実験している。成

図14 圧加工の原理¹⁵⁾

図15 SPZ用に開発された複合押し出し加工装置⁴²⁾

図13 打抜き型の製作工程⁴¹⁾

形に必要な体積だけあれば試験片の形状は問わないが、基準としてダイス内に入る直径20 mmの円柱状に旋削したビレットを用いている。ダイスは割り型にし、内径20 mm（製品板厚1 mm）のストレート型を基準にして、横方向への張出しが大きいフィン形、表面の凹凸が微細なねじ形、および縦みぞを有するスプライン形の3種類の形状を成形している。超塑性の低荷重を利用した複合押出し加工法である。

3.9 SPF/DB, 拡散接合

超塑性材料の加工を考える上で、忘れてはならない方法がある。米国の航空機業界で開発された超塑性成形（Super Plastic Forming）と拡散接合（Diffusion Bonding）とを同時に行う SPF/DB という技術である。航空機、とりわけ軍用機の機体構造には、比強度の高い材料が好まれる。そこで、脚光を浴びたのが Ti 合金、とくに Ti-6Al-4V である。この材料は超塑性材料であり難切削性、難加工性を示すが、高強度、耐熱、耐摩、耐食性は非常に魅力があったので考えだされたのがこの方法である。

超塑性材料は超塑性状態で加圧すると拡散接合がきわめて容易に行える。接合性は材料によって異なるが、大変形を伴えばほとんど問題ない。拡散接合と超塑性成形温度が合致していることも大切である。図16は Ti-6Al-4V 板の SPF/DB の例である。STOPOFF 材を接合して欲しくないところに使って、中空構造を製作している。図17は SPF/DB による Ti-6Al-4V の航空機用構造部品である。SPF/DB により、部品点数の削減、コストの低下などさまざまな利点を得られた。

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 は、マトリックスの耐食性を補うために純 Al をクラッドした合わせ板

である。大澤ら⁴⁴⁾は、SPZ と純 Al の合わせ板を製作し、その力学的性質を検討している。さらに、小豆島ら⁴⁵⁾は、SPZ の吸振性に着目し、鋼板との合わせ板を作り制振性について考察している。

3.10 粉末成形法

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成形法は、新素材・複合材料の開発面で1つの大きなインパクトとなる考え方である。

浅沼ら⁴⁶⁾は、SPZ の粉末に SiC ウィスカーを混合し、これを複合押出し加工装置により圧粉と同時に成形、SiC ウィスカー/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としている。さらに、他の素材との複合化も行っている⁴⁷⁾。

SiC 長繊維ないし B 長繊維を強化素材とし、マトリックスに主として SPZ 粉末を使用し、ホットプレス法により製造する繊維強化金属（FRM）の製造および加工条件について、西村らは研究を続けている^{48), 49)}。図18

図17 Ti-6Al-4V の SPF/DB により製作された航空機部品⁴³⁾

図16 Ti 合金の SPF/DB における3つの基本的な方法⁴³⁾

図18 SPZ をマトリックスとする FRM 製造用ホットプレス装置⁴⁹⁾

は、この FRM を製造するためのホットプレス装置である。加工法としては、3点曲げとL曲げを行っているが、繊維を断面内のどこに入れるか、熱処理、工具条件などによって曲げ加工性は異なるが、難加工性と思われていた FRM の加工の新しい展望を開いた研究である。

分散強化粒子として Al_2O_3 粒子を用いた、SPZ 粉末との複合粉末圧粉体を板の形で製造する工程およびその性質について、大澤ら⁵⁰⁾が扱っている。さらに、高強度 Al 系焼結材料の製造にあたり SPZ 粉末を添加粉末として利用し、ち密化と結合強度の向上を計った例⁵¹⁾も見られる。沖本ら⁵²⁾は、SPZ 粉末とフェライトのような磁性粉末から成る複合体の製造工程と塑性加工性を考察している。また、磯西ら⁵³⁾は、ホットプレスした超高炭素鋼粉末焼結体の超塑性を検討している。

超塑性粉末をさまざまな形で利用しようとする試みは、量的にも質的にもかなりめざましいものがある。この節では、その内のいくつかを紹介したにすぎない。通常、圧粉固化は超塑性温度で実施することがよいように考えられるが、超塑性といえども半熔融以上の温度でさらに良好な結果が得られていることに注意したい。

3.11 恒温鍛造

近年の材料開発において、加工熱処理システムを利用して成功をおさめた例のうち、代表的なものとして1つは制御圧延、1つはニッケル基超耐熱合金粉末 IN 100 を圧密・固化する過程で成形するゲートライジング (Gatorizing) 法である⁵⁴⁾。これは、ジェットエンジン用タービンディスク (図19) の加工方法として、米国 P & W 社が開発した超塑性恒温鍛造法である。Ni 基超

表 3 超塑性材料の加工法一覧

加工法 材料	素材形状	真 ブ ロ 成	空 一 形	ホ ッ ト プ レ ス	深 絞 り 張 出 し	ダ レ イ ス 引 抜 き	コ イ ニ グ	ホ ッ ト 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 ショーン 変形面の平滑性 局部薄肉化
	棒管 粉	○ ×	○ ◎	×	◎ ×	◎ △	◎ △	◎ △	◎ ○	×	○ ○	固相接合性 転写性 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 粉	○ ×	◎ ◎	×	◎ ×	◎ ○	◎ △	◎ ○	◎ ○	×	◎ ○	転写性 難加工性改善 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 難加工性改善
	棒管 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 電波しゃへい性 耐食性 等方性 平滑性
	棒管 粉	○ ×	○ ◎	×	○ ×	◎ △	◎ ×	◎ ○	○ ○	×	△ △	
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

図19 ゲートライジング法によるタービンディスク・ブレード (P & W 社のパンフレットより)

合金は難加工性材料であり、Near Net Shape に鍛造することは非常にメリットがある。素材費の節約のみならず、加工費の低減が可能となった。

超塑性鍛造の詳細については解説⁵⁵⁾を参照されたい。

4. おわりに

表3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 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、より安価な手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割アップぐらいで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1つである。疲労特性の改善、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不十分である。付加的機能をさらに発見してゆくことが期待される。

参 考 文 献

- 1) D. Oelshlägel: 日本金属学会会報, **6** (1967), 11.
- 2) 超塑性研究会: 超塑性と金属加工技術, (1980), 日刊工業新聞社.
- 3) 超塑性研究会: 超塑性の利用開発に関する研究・調査 I - K, (1981-1989), 超塑性研究会.
- 4) 超塑性材料の特性評価法委員会: 超塑性材料の特性評価法に関する調査報告書, (1987), 次世代金属・複合材料研究開発協会.
- 5) 超塑性材料の特性評価法委員会: 超塑性材料の特性標準化に関する調査報告書, (1988), 次世代金属・複合材料研究開発協会.
- 6) 超塑性材料のデータベース調査委員会: 超塑性材料のデータベースに関する調査報告書, (1989), 次世代金属・複合材料研究開発協会.
- 7) W. Rosenhain, J. L. Haughton and K. E. Bingham: *J. Inst. Metals*, **23** (1920), 261.
- 8) A. A. Bochvar and Z. A. Sviderskaya: *Izvest. Akad. Nauk SSSR, Otdel. Tekh. Nauk*, **9** (1945), 821.
- 9) E. E. Underwood: *J. Metals*, **14** (1962), 914.
- 10) W. A. Backofen, I. R. Turner and D. H. Avery: *Trans. ASM*, **57** (1964), 980.
- 11) N. E. Paton and C. H. Hamilton: Superplastic Forming of Structural Alloys, (1982), AIME.
- 12) B. Baudalet: Superplasticity, (1985), CNRS.
- 13) C. H. Hamilton and N. E. Paton: Superplasticity and Superplastic Forming, (1988), TMS.
- 14) 宮川松男: 塑性と加工, **27** (1986), 325.
- 15) 特許公報, 昭46-21825.
- 16) 宮川松男: 塑性と加工, **16** (1975), 907.
- 17) 広橋光治: 塑性と加工, **27** (1986), 372.
- 18) H. Nishimura, H. Ohsawa and R. H. Wagoner: *Sheet Metal Industries*, **63** (1986), 549.
- 19) 文献13), 135.
- 20) Superform Metals 社 (英国) のパンフレット.
- 21) D. L. Holt: *Int. J. mech. Sci.*, **12** (1970), 491.
- 22) G. C. Cornfield and R. H. Johnson: *Int. J. mech. Sci.*, **12** (1970), 479.
- 23) 町田輝史, 中川威雄: 塑性と加工, **16** (1975), 988.
- 24) W. Johnson, T. Y. M. Al-Naib and J. L. Duncan: *J. Inst. Metals*, **100** (1972), 45.
- 25) 三金工業株式会社のパンフレット.
- 26) T. Y. M. Al-Naib and J. L. Duncan: *Int. J. mech. Sci.*, **12** (1970), 463.
- 27) 戸澤康寿: 塑性と加工, **1** (1960), 23.
- 28) 西村 尚, 川上芳正, 宮川松男: 塑性と加工, **16** (1975), 955.
- 29) 大澤泰明, 斎藤 務, 池田 弘, 西村 尚, 宮川松男: 塑加春講論, (1977), 499.
- 30) 花木香司, 加藤建三: 塑性と加工, **20** (1979), 138.
- 31) 宮内邦雄: 塑性と加工, **19** (1978), 861.
- 32) 池田 学, 伊藤栄一, 大澤泰明: 塑加春講論, (1989), 359.
- 33) T. H. Thomsen, D. L. Holt and W. A. Backofen: *Metals Engineering Quarterly*, **2** (1970), 1.
- 34) 大澤泰明, 西村 尚: 塑性と加工, **21** (1980), 953.
- 35) 中日超塑性学術論文集, (1985), 超塑性研究会.
- 36) 日中超塑性シンポジウム'86論文集, (1986), 超塑性研究会.
- 37) R. H. Johnson: *Design Engineering*, (1969), 33.
- 38) R. A. Saller and J. L. Duncan: *Inst. Metals*, **99** (1971), 173.
- 39) 木村 南: 塑性と加工, **29** (1988), 801.

- 40) 鈴木 清, 中川威雄, 大川陽康, 藤井寛司: 塑加
春講論, (1976), 313.
- 41) 中川威雄: プレス技術, **15** (1977), 12.
- 42) 広橋光治, 河合栄一郎, 六崎賢亮: 塑性と加工,
19 (1978), 420.
- 43) E. D. Weisert and G. W. Stacher: 文献11), 273.
- 44) 大澤泰明, 西村 尚: 塑性と加工, **27** (1986),
375.
- 45) 小豆島明, 三浦恒正, 宮川松男: 鉄と鋼, **70**
(1984), 2269.
- 46) 浅沼 博, 広橋光治, 河合栄一郎: 塑性と加工,
27 (1986), 1191.
- 47) 浅沼 博, 広橋光治, 阮 芳邦, 青木忠昭: 塑性
と加工, **29** (1988), 294.
- 48) 若山修一, 西村 尚: 軽金属, **38** (1988), 672.
- 49) 山岸新一, 山本弘暁, 西村 尚: 塑加連講論,
(1986), 271.
- 50) 大澤泰明, 吉澤宗晴, 唐澤秀司, 武知慎二: 塑加
春講論, (1989), 199.
- 51) 多田吉宏, 佐藤悌介: 塑性と加工, **27** (1986),
1178.
- 52) 沖本邦郎, 佐藤富雄, 堀石七生: 粉体および粉末
冶金, **35** (1988), 47.
- 53) 磯西和夫, 時実正治: 塑性と加工, **27** (1986),
391.
- 54) 鳥阪泰憲: 素形材の高機能化をめざして, (1987),
産業図書.
- 55) 松下富春: 塑性と加工, **29** (1988), 206.