

定板厚製品を得る解析を行った。

(討27) 超塑性成形法の精密機械部品への応用

(オリエント時計(株) 木村 南)

複雑かつ精密な機械部品の製造のためには、変形抵抗の低い超塑性材料が製造工程数の減少、ひいてはコスト低減のために利用できる。腕時計用の文字板の例では、従来 15 部品を組み立てていたものを 1 個の部品にすることができた。しかも、シャープエッジの成形が可能であることから、デザイン的にも斬新なものが得られる。

別の例では、高摩擦抵抗材料として超塑性材の上に SiC 粉末を圧入した機能性複合超塑性材の開発を行った結果について述べている。プリンターの紙送りローラー、ロボットチャック等への応用が試みられている。

(討28) チタン合金の超塑性精密鍛造技術

(日本鋳業(株)沢村一郎ほか)

加工性の悪いチタン合金の Near net shape 加工法として超塑性精密鍛造が多く行われている。3000 t の恒温鍛造プレスを用いて、直径 150 mm のピレットからタービンディスク等を恒温鍛造する技術について紹介があった。ピレットの組織観察、高温引張試験、さらに恒温鍛造条件としての温度、速度、加工度等の条件が製品の強度、じん性に及ぼす影響の検討、鍛造材のラム速度コントロール、金型の材質の検討、金型の設計等多くの技術的問題について詳細な報告があった。最近この種の設備を数社で導入しているが、金型のコストをはじめ技術的に解決しなければならない問題は多い。

(討29) 超塑性を利用した接合技術

(千葉大学工学部 広橋光治)

超塑性の一つの特性に活性化した界面を利用した接合技術が多く用いられるようになった。前述の SPF/DB もその一例である。変態超塑性を利用した接合法として、熱サイクルを与えながら外力を加えて固相接合する方法が鋳鉄/鋳鉄、チタン/SUS 304、チタン/SS 材等の材料で行われている。恒温超塑性を利用した接合では、酸化皮膜の強固なアルミニウム合金、チタン、ニッケル、亜鉛合金等で用いられる。機械的接合では、形状回復を利用した接合がユニークである。超弾性的な形状回復と熱サイクル時の熱膨張が変態時に大きいという性質を積極的に利用して、鋼と超硬合金のチップを SPZ をバインダーとして利用して接合した。

以上 13 件の討論講演をふりかえってみたが、前回の討論会のときと比べて、極めて内容が多岐にわたってきたという感じが強い。超塑性の工業的利用も今後ますます増大するであろうが、その内容は材料加工プロセス中で利用するものと、製品機能として利用するものとに分けられる。今回の発表では、前者の例が多かったが、今後は後者の例を開発する必要がある。

会場は常に満席に近い状態であり、本テーマに関する関心が高いことがうかがわれた。最後に熱心に講演をし

ていただいた講演者各位、ならびに討論に参加していただいた聴講者の方々に謝意を表します。

## IV. 粉末成形技術の最近の進歩

座 長 (株)神戸製鋼所材料研究所  
滝 川 博

粉末成形技術は従来より各種金属、セラミックス製品の製造手段の一つとして発展してきたが、近年、新素材開発の進展とあいまつてその重要性がさらに高まっている。技術的にも高密度化、複雑形状化、複合化、さらに理論解析などの面でも大きな進歩が見られる。本討論会は、これら新しい技術の課題および今後の展開についての討論を目的に企画された。

講演では 9 件の論文が発表されたが、あらかじめ内容ごとに 3 件ずつ三つのセッションに分け、各セッションごとに討論を行った。

第 1 セッションの 3 件は、それぞれ粉末が有する微細結晶を成形加工に利用しようとするもので、超塑性加工、アトライタ加工、あるいは SWAP と呼ばれる新しい加工法に関するものである。

第 2 セッションの 3 件は、静水圧あるいは磁場中の粉末の成形に関して理論解析を行い、実際の工業的問題を解決しようとするものである。

第 3 セッションの 3 件は、爆発成形、水バインダーを用いた押出成形、および粉末を用いた半溶融複合加工といった、それぞれユニークで新しい粉末成形加工に関するもので、将来の新素材開発に大きな役割を演じると期待されるものである。

(討30) Zn-22% Al 合金粉末を用いた超塑性ホットプレス

(立命館大学研究員、日鐵溶接工業(株) 磯西和夫ほか)

近年、粉末の成形法として HIP などによる加圧焼結法が盛んに用いられるようになった。このような加圧焼結法における緻密化は主として粉末の塑性流動により進行するので、その過程は粉末内部の組織状態と密接な関連をもつことになる。しかしながら、このような過程について、とくに粉末の組織状態との関連に着目した検討はほとんどなされていない。本研究では、Zn-22% Al 合金のガスアトマイズ粉を用いて、緻密化過程に及ぼす粉末組織の影響について真空ホットプレスを用いて検討を行い、緻密化機構図を作製するとともに超塑性変形を利用した粉末成形に必要な加圧焼結条件を明らかにした。

(討31) 難成形性粉末の成形性改善

(住友電気工業(株)伊丹研究所 武田義信ほか)

急冷凝固法によつて得た合金粉末は、強制固溶強化、

結晶微細化強化、分散強化などによつて、あるいは高合金化によつて強度が高く、硬質のため一般に成形性が悪い。そこで、成形性を改善するために、ガスアトマイズ超合金粉についてはアトライタ処理法を、回転電極法 Ti-6 Al-4 V 粉末については水素化処理法を適用した結果について発表がなされた。

まず、アトライタ処理の場合、成形体強度の改善が確認されたが、成形体の密度は高い値が得られず、これは加工硬化のために塑性変形が難しいものと推定される。水素化処理では、高い引張強度を有する焼結体を得られたが、水素化処理時の酸素含有量の増加に基づく延性の低下が認められた。粉末冶金法の特徴を十分に活かすには、さらに粉末処理を工夫することが必要であるが、一方、このような加工によつて微細結晶粒超塑性の改善効果があることも見出された。

(討32) Ni 基超耐熱合金粉末の新加工プロセス

(工業技術院機械技術研究所 鳥阪泰憲)

超塑性を利用した Ni 基超耐熱合金の成形加工法としては、Gatorizing 法と呼ばれる恒温鍛造法があるに過ぎない。しかし、当方法は高価な Mo 合金の金型材を必要とし、また変形速度は  $10^{-3} \cdot s^{-1}$  台と非常に遅いという問題がある。

そこで、これらの問題を解決するために開発された新しい超塑性鍛造法、つまり SWAP (Superplastic Warm-die and Pack の略) 鍛造法と P-SWAP (Powder-SWAP) 鍛造法について発表がなされた。ともに、被加工物を金属でバックして鍛造を行うものであるが、加工速度が従来よりも 10 倍も速いところに特徴がある。とくに、P-SWAP 法では超合金粉末を直接 SUS 304 でバックして鍛造すると、組織は微細なままで、かつ全域ではないが Prior Particle Boundary が粉砕された超合金材が得られた。これは、当方法が HIP、あるいは熱間押出不要の予加工として使用できることを示唆している。

以上 3 件の発表に対し、緻密化機構図から逆に成形時間を短縮できる条件が把握できないかという点、あるいはアトライタ処理過程で材料特性が変化する理由などに関して討議がなされた。

(討33) HIP 成形プロセスにおける金属粉末の緻密化挙動の数値解析

((株)神戸製鋼所機械研究所 野原 章ほか)

HIP 成形プロセスにおいて、粉末は最終的に真密度にまで緻密化するが、カプセルの剛性や HIP 中に処理体内部に生じる不均一な温度分布、粉末の密度分布等の影響により、HIP 前後で処理体の形状は相似形とはならない。そこで、高温状態における金属粉末材料が剛粘塑性特性を示すものと仮定し、多孔質材料の降伏関数を用い、さらに材料特性の温度依存性を考慮して、有限要素法により定式化を行った。

さらに、超合金粉末 MERL 76 の軸対称モデルについて HIP 実験ならびに数値シミュレーションを行い、処理体の最終形状を比較することにより当法の妥当性を確認した。

(討34) 粉末成形の力学と静水圧成形のシミュレーション

(京都大学工学部 島 進ほか)

金属粉末の成形シミュレーションに用いられる構成式は、いわゆる法線則を仮定した連合流れ則である。しかしながら、セラミックス粉末の場合には金属粉末の場合と異なり、密度の不均一が生じやすいなどといわれている。そこで、法線則からのずれを考慮しうるパラメータを含む新しい構成式を導入し、これについて考察した。

また、それを用いて剛塑性有限要素法によつて静水圧成形の解析を行い、パラメータの相違による成形体の形状、密度比の分布の変化を調べた。その結果、たとえば従来にくらべてカプセル中央部のへこみが大きくなるなど、法線則を破ることによつて従来の構成式による解析結果とは異なる結果が見いだされた。

(討35) 磁界の中で圧縮される磁性粉体の応力

(東京大学工学部 長尾高明)

磁界の中で磁粉を圧縮する場合、普通の粉体を普通の環境で圧縮する場合と違って、圧縮成形しにくいとか、クラックが生じやすい等の問題が生じる。このような問題は、圧縮粉体の磁場による応力を考えることにより解決される。つまり、粒子が隣接する粒子から受ける力は、その接する位置によつて異なり、磁界の向きの方向にある粒子からは引力、つまり圧縮力を受け、磁界の向きに直角の方向にある粒子からは斥力を受ける。さらに、遠方の粒子の影響を考慮して求めた応力式から、実際の一軸圧縮の場合、軸方向には磁場による引力が、半径または円周方向には斥力が生じ、これらがクラック発生の原因になることがわかる。これらの結果を踏まえて、クラック防止のためのいくつかの方法が提案された。

以上の 3 件の発表に対し、カプセルの肉厚の影響などに関して討議がなされた。これらの数値シミュレーションの結果は、すでに現実の問題点の解決に使われはじめている。しかし、セラミックス粉末については力学的特性が十分に把握されていないため、さらに厳密な定式化を行うための研究が待たれる。

(討36) 爆発エネルギーを利用した粉末の高密度圧縮成形

(熊本大学工学部 高島和希ほか)

当方法では衝撃波の通過による極短時間の高圧状態により、粉末粒子間の接合が行われるため、難焼結性粉末や通常の焼結では有為な特徴が失われる急冷凝固粉末の緻密化に有効であると期待されている。まず、原料粉末に純鉄粉を用いて、直接円筒法により成形を行った時の圧縮成形性に及ぼす成形条件の影響、ならびに得られた

成形体の機械的特性を調べた。さらに、この結果を利用して  $Y_2O_3$  分散添加 Fe 基耐熱合金粉、Ti 合金粉の成形を試みた。その結果、いずれの粉末を用いた場合についても、円筒法を用いると適正な E/M 比のもとで 99% 以上の高密度成形体を得ることができた。また、爆発圧縮後の成形体に焼結を施すと、溶解材とほぼ同程度の引張強度が得られることが明らかとなった。

#### (討37) 水バインダーによるファインセラミックス粉末の押出成形

(東京大学生産技術研究所 中川威雄ほか)

セラミックス成形法の一つである射出成形法は有機バインダーを多量に添加して成形し、その後の工程で加熱してバインダー除去を行うため、肉厚体成形には不適とされている。この問題を解決するために、バインダーとして水を使用し、少量の PVA (0.9~2.2 wt%) の添加でセラミックス線材の押し出し成形が可能であることを明らかにした。また、圧縮成形においても少量の水バインダーにより流動を伴ったアルミナ粉末の成形が行えることを明らかにした。さらに、この場合パンチに振動を重畳させながら成形するだけで極めて小さい成形面圧で高密度成形品が得られることがわかった。これによつて、既存の圧縮成形法や水バインダーだけによる圧縮成形法では得られない形状の成形が可能となった。

#### (討38) アルミニウム合金粉末の半熔融複合加工

(住友軽金属工業(株) 高木茂義ほか)

粉末冶金法により Al 合金粉末を加工する場合、粒子表面の強固な酸化皮膜の存在が問題となる。そこで、粒子間の十分な接合を得るために種々の加工法が行われている。本報告の半熔融複合加工法は、金属粉末を固液共存状態に加熱し、その状態で加圧成形し、金属粉末の部分熔融によつて発生する液相成分を介して粒子相互を接合させ、あわせて各種の半熔融あるいは熱間・冷間の塑性加工を加え、所要の製品を得るもので、比較的小規模の設備で実行しうる簡便かつ有用な加工法と考えられる。

本研究では Al 合金粉末をマトリックスとし、アルミナ強化粒子を体積含有率で 10~40% 含有する複合板材を製造し、かたさおよび曲げ性の関係を調べた結果について報告がなされた。その結果、当方法が強化粒子を含む粒子相互の良好な接合を達成するうえで有効であることが明らかとなった。

以上 3 件の発表に対し、爆発成形時の初期充填密度と成形状態の関係、あるいは長手方向における緻密化機構に関して討議が行われた。水バインダーを用いたセラミックス粉末の成形については、とくに振動圧縮成形の効果が著しく、この点に関して討議がなされた。また、半熔融鍛造時の加工温度と加工性についても活発な討議が交わされた。

最後に、本討論会では対象材料として鉄、非鉄、セラ

ミックスと多様な分野の材料がとりあげられたため、特性面からは議論の焦点が絞れない心配があつた。しかし、粉末成形という共通の土台のもとに、粉末粒度の影響、成形性の改善、あるいは複雑形状化といった共通問題について多方面から討議できたことは有益であつた。

講演者をはじめ、本討論会に参加していただき熱心に討論していただいた方々に厚くお礼申し上げます。

## V. 直接鑄造薄鋼板の組織と材質特性

座長 新日本製鉄(株)中央研究本部

武智 弘

現在薄スラブ連鑄法によつて薄鋼板を製造する技術開発が世界的に進められており、一部は実用化が始まる段階にある。この技術開発を成功させるためには鑄造法、鑄造装置の開発と共にプロセス・メタラジーの研究が不可欠である。今回は後者に的を絞つて討論会を行い、基調講演 1 件、炭素鋼板関係 4 件、ステンレス鋼板関係 3 件の各講演を半日の日程で討議した。当日は大きな階段教室に座れない聴講者もかなり出るなど盛況で本テーマに対する関心の大きさをうかがわせた。本テーマに関するまとまった公開討論は世界的に見ても恐らく最初ではないかと思われるが、技術的重要度や今回のような関心の高さから見て今後も機会あればこうした企画の開発が期待される所である。以下に当日の概要を報告する。

#### (討39) (基調講演) 薄板連鑄プロセスにおける金属学的諸現象

(京都大学工学部金属加工学教室 牧 正志)

組織制御の観点から薄鋼板(スラブ)鑄造プロセス中に生ずる主要な金属学的現象について原理的に明快な解説と問題点の指摘、その対策などが詳しく述べられた。その骨子となる所を以下に要約する。

#### 1. 粗大 $\gamma$ 粒にかかわる幾つかの金属学的現象

##### (1) $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態

$\gamma$  粒界上に生成する初析  $\alpha$  粒の結晶方位と  $\gamma$  粒径の関係についての実験結果が示され、粗大  $\gamma$  粒になると同一粒界内で同じ方位(バリエント)の  $\alpha$  粒が生成されやすくなる傾向があり、 $\alpha$  粒微細化には好ましくない。このような傾向は  $\gamma$  粒界の平滑性と関係しており、粗大  $\gamma$  粒において方位の異なる  $\alpha$  粒を  $\gamma$  粒界上に多く生成させるには粒界を湾曲させることが必要である。

##### (2) $(\alpha + \gamma)$ 2 相域からの $\gamma$ 化

2 相域まで一度冷却され初析  $\alpha$  が一部生成した試料を一定速度で再加熱する場合、初析  $\alpha$  が完全に消滅する温度は  $\gamma$  粒が大きくなるほど高温になることが示され、粗大  $\gamma$  粒の場合初析  $\alpha$  の消滅が起こりにくくなることが指摘された。

##### (3) $\gamma$ の熱間圧延時の再結晶挙動