

新塑性加工技術シリーズ 10

粉 末 成 形

—— 粉末加工による機能と形状のつくり込み ——

日本塑性加工学会 編

コロナ社

■ 新塑性加工技術シリーズ出版部会

部会長	浅川基男	(早稲田大学名誉教授)
副部会長	石川孝司	(名古屋大学名誉教授, 中部大学)
副部会長	小川茂	(新日鉄住金エンジニアリング株式会社顧問)
幹事	瀧澤英男	(日本工業大学)
幹事	鳥塚史郎	(兵庫県立大学)
顧問	真鍋健一	(首都大学東京)
委員	宇都宮裕	(大阪大学)
委員	高橋進	(日本大学)
委員	中哲夫	(徳島工業短期大学)
委員	村田良美	(明治大学)

(所属は2016年5月現在)

刊行のことば

ものづくりの重要な基盤である塑性加工技術は、わが国ではいまや成熟し、新たな展開への時代を迎えている。

当学会編の「塑性加工技術シリーズ」全19巻は1990年に刊行され、わが国で初めて塑性加工の全分野を網羅し体系立てられたシリーズの専門書として、好評を博してきた。しかし、塑性加工の基礎は変わらないまでも、この四半世紀の間、周辺技術の発展に伴い塑性加工技術も進歩を遂げ、内容の見直しが必要となってきた。そこで、当学会では2014年より新塑性加工技術シリーズ出版部会を立ち上げ、本学会の会員を中心とした各分野の専門家からなる専門出版部会で本シリーズの改編に取り組むことになった。改編にあたって、各巻とも基本的には旧シリーズの特長を引き継ぎ、その後の発展と最新データを盛り込む方針としている。

新シリーズが、塑性加工とその関連分野に携わる技術者・研究者に、旧シリーズにも増して有益な技術書として活用されることを念じている。

2016年4月

日本塑性加工学会 第51期会長 真 鍋 健 一

(首都大学東京教授 工博)

■ 「粉末成形」 専門部会

部 会 長 磯 西 和 夫 (滋賀大学)

■ 執筆者

磯 西 和 夫 (滋賀大学) 1章, 2.3.1, 2.3.2, 3.2.2項

上 野 友 之 (住友電気工業株式会社) 2.1.1 ~ 2.1.3, 3.5.2項

谷 口 幸 典 (奈良工業高等専門学校) 2.1.4, 2.1.5項

三 浦 大 基 (神鋼テクノ株式会社) 2.2節

嶋 田 正 雄 (株式会社エヌジェーエス) 2.3.3, 3.5.6項

南 野 友 哉 (株式会社神戸製鋼所) 2.4節

近 藤 勝 義 (大阪大学) 2.5節, 2.8.2項

三 浦 秀 士 (九州大学) 2.6節

清 水 透 (東京電機大学) 2.7節

橋 井 光 弥 (豊臣熱処理工業株式会社)

2.8.1, 2.8.3, 3.2.3, 3.5.3項

沖 本 邦 郎 (元 摂南大学) 2.8.4, 2.8.5項

武 田 義 信 (ヘガネスジャパン株式会社)

3.1.1, 3.1.3, 3.1.4, 3.2.1, 3.2.4項

長 瀬 石 根 (大同特殊鋼株式会社) 3.1.2項

鈴 木 裕 之 (広島大学) 3.3節

高 橋 俊 行 (株式会社タンガロイ) 3.4節

吉 年 規 治 (東北大学金属材料研究所) 3.5.1項

川 崎 亮 (東北大学) 3.5.1項

川 畑 美 絵 (立命館大学) 3.5.4項

館 山 恵 (立命館大学) 3.5.4項

金 武 直 幸 (名古屋大学名誉教授) 3.5.5項

まつ	した	とみ	はる	(中部大学)	3.5.7 項
松	下	富	春		
つ	もり	ふ	じ	(九州大学)	4 章
津	守	不	二	夫	

(2018 年 10 月現在, 執筆順)

浅	沼	博	鈴	木	直	弘
館	山	惠	滝	川		博
粟	井	清	武	田	義	信
沖	本	邦	多	田	吉	宏
海	江	義	田	端		強
加	藤	豊	西	尾	浩	明
木	内	学	西	口		勝
木	村	尚	松	岡	信	一
木	村	敏	松	下	富	春
寒	川	喜	三	輪	真	一
島		進	山	口	克	彦
白	樫	高				
		洋				

(五十音順)

まえがき

日本塑性加工学会編の塑性加工技術シリーズ第18巻として『粉末の成形と加工』が出版されたのは1994年のことであった。「粉末冶金」全般に関する書籍とは一線を画し、粉末の成形に関連する事項に焦点を絞り、実際の技術から成形理論までを詳しく解説した。それから約25年が経過し、粉末を原料とする素材や機械部品・製品の製造プロセスは大きく変化しつつある。そこで本書では『粉末の成形と加工』出版後の粉末成形技術の進歩を反映させるために、『粉末の成形と加工』の編集方針を踏まえつつ内容を再検討し、新たな解説を書き加え、また、従来の内容を最近の内容に置き換えて改編した。あわせて、書名をより簡潔な『粉末成形』に変更した。

粉末を原料とする製造プロセスは、原料粉の作製から粉末の混合、成形、焼結、後処理から成り立つ。この製品の完成までの製造プロセスを「粉末冶金法」という。『粉末の成形と加工』の「まえがき」に述べられているように、粉末の製造方法を選択することから始まる製造プロセスを制御することによって、溶製材では実現することができない多様な特性を有する材料が得られ、さまざまな分野で用いられている。

例えば、組織制御が容易であることに基づく特徴ある優れた材料特性、難加工材の成形、自由度の高い三次元複雑形状の付与、ニアネットシェイプあるいはネットシェイプ製品、材料特性と生産性向上がもたらす製造コスト的優位性等があげられる。

最近の動向として、粉末を原料とする製造プロセスは省エネ化や製造の高効率化、次世代を担う新しい素材の創成への寄与が期待されている。特に粉末積

層造形やポーラス金属のように、三次元複雑形状や構造を有する材料の製造プロセスとして注目されている。これらの実現のためにはシミュレーション技術の発展も欠かすことができない。

そこで本書は、粉末の成形に焦点を絞る『粉末の成形と加工』の方針を受け継ぎ、つぎのような構成とした。1章では、粉末を用いた素材作製の歴史と粉末成形プロセスから焼結工程までを概説した。2章では、各種粉末成形法の原理と方法、実際の成形挙動から成形の特徴について解説し、新しいホットプレスおよび粉末積層造形について新たな節を加えた。3章では、種々な粉末の成形について、内容を改めて解説した。セラミックス粉末、硬質材料の成形と作製、さらに近年注目を浴びている機能性材料を解説する節を新たに書き下ろした。4章は、個別要素法についての節を加えつつ、本書の特徴である粉末成形の力学を詳細に解説した。

本書は、『粉末の成形と加工』の執筆に携わった方々のご苦勞の上に成り立っていることを最初に申し上げなければならない。その上で、『粉末成形』の専門部会を、一般社団法人日本塑性加工学会の「粉体加工成形分科会」の運営委員会が務めた。粉末成形は幅広い分野から成り立っている。執筆に際しては、それぞれの分野に携われている多数の専門家の方々に快くご協力いただいた。厚くお礼申し上げます。

最後に、一般社団法人日本塑性加工学会、新塑性加工技術シリーズ出版部会、および本書の発刊にご尽力いただいた株式会社コロナ社に、出版までにさまざまな助言をいただいたことに深く感謝申し上げます。

2018年10月

「粉末成形」専門部会長 磯西 和夫

目 次

1. 粉末成形プロセスの概説

1.1 粉末成形の歴史	1
1.2 粉末成形の工程	3
1.2.1 概 要	3
1.2.2 粉 末	3
1.2.3 混 合	5
1.2.4 成 形	6
1.2.5 焼 結	6
1.2.6 後 処 理	9
引用・参考文献	10

2. 各種成形法

2.1 金 型 成 形	11
2.1.1 金型の基本構成と代表的成形法	11
2.1.2 粉末成形プレスとその成形法	14
2.1.3 金型の構成と作動	18
2.1.4 工具と粉末との摩擦	21
2.1.5 成形中のせん断挙動	25
2.2 冷間等方圧成形 (CIP)	27

2.2.1	CIP 成形法の種類	27
2.2.2	CIP 法の特徴	31
2.2.3	CIP の用途	31
2.3	ホットプレス	32
2.3.1	ホットプレス法	33
2.3.2	圧力下における焼結のち密化とその特徴	34
2.3.3	新しいホットプレス	39
2.4	熱間等方圧成形 (HIP)	43
2.4.1	HIP の概略	43
2.4.2	HIP 装置の構成	43
2.4.3	HIP 装置の発展	45
2.4.4	HIP の用途	49
2.4.5	今後の展望	52
2.5	粉末押出し	52
2.5.1	粉末押出し加工	52
2.5.2	コンフォーム	58
2.5.3	押出し装置	60
2.5.4	成形工程	62
2.5.5	適用分野	63
2.5.6	今後の展望	65
2.6	金属粉末射出成形 (MIM)	66
2.6.1	MIM の原理, 工程	66
2.6.2	MIM の特徴	76
2.7	粉末積層造形	79
2.7.1	三次元積層造形技術の歴史	79
2.7.2	金属の三次元積層造形	81
2.7.3	金属積層造形法の適用分野	87
2.8	その他の成形法	89
2.8.1	粉末鍛造	89
2.8.2	粉末圧延	94
2.8.3	溶射成形	99
2.8.4	溶浸	100

2.8.5 接 合	102
引用・参考文献	109

3. 各種粉末の成形特性

3.1 鉄系粉末の成形特性	115
3.1.1 鉄系粉末	115
3.1.2 ステンレス鋼粉末	123
3.1.3 高速度鋼粉末	128
3.1.4 造粒粉	128
3.2 非鉄系金属粉末の成形特性	130
3.2.1 アルミニウム粉末	130
3.2.2 超合金粉末	130
3.2.3 チタンおよびチタン合金粉末	138
3.2.4 銅合金粉末	144
3.3 セラミックス粉末の成形特性	145
3.3.1 セラミックスの粉末成形法の分類	145
3.3.2 セラミックス粉末の成形前処理	145
3.3.3 乾式成形法	147
3.3.4 湿式成形法	149
3.3.5 樹脂コンパウンド成形法	153
3.4 工具材料としての超硬合金，サーメットの成形特性	154
3.4.1 切削工具	154
3.4.2 超硬合金の強度	155
3.4.3 超硬合金工具の製造工程	157
3.5 機能性材料粉末の成形特性	161
3.5.1 金属ガラス	161
3.5.2 磁性材料	165
3.5.3 熱電変換材料	170
3.5.4 MM粉末	175
3.5.5 ポーラス材料	180

3.5.6 傾斜機能材料	185
3.5.7 生体材料	193
引用・参考文献	198

4. 粉体成形の力学

4.1 粉体成形の力学的取扱い	205
4.1.1 基礎	205
4.1.2 粉体の弾性変形	211
4.1.3 異方性の発達を考慮した構成式	212
4.1.4 力学的な解析	214
4.2 多孔質体の塑性変形の力学	223
4.2.1 塑性変形について	223
4.2.2 基礎となる構成式	223
4.2.3 構成式の応用	236
4.3 個別要素法の適用	254
4.3.1 個別要素法について	254
4.3.2 個別要素法における粒子の取扱い方	256
4.3.3 DEMの問題点とその対処	257
4.3.4 DEMと連成解析	259
引用・参考文献	260
索引	263

1

粉末成形プロセスの概説

1.1 粉末成形の歴史^{1)†}

粉末成形は石器時代に人類が発明した最古の成形技術といえる。粘土を水で練り容器の形に成形して、天日で乾燥することによって食器、貯蔵容器や祭器が作られた。さらに火で焼き固めることによって強さを増すことができた。しかしもろくて壊れやすく、水が漏るという欠点があった。この欠点は長年の改良の結果、釉薬（うわぐすり）による表面のち密化によって解決された。広い意味でのセラミックスの製造ではそれ以来、現在まで基本的にはそのままの手法が用いられており、高温が得られるに従って品質は向上し、成形方法も多様化して、陶磁器等のオールドセラミックスから精製した高純度の原料を用いるファインセラミックスまで、多様なセラミックスが製造されている。

石と土の次に人類が手にしたのは金属である。金属を溶解するのに十分な温度が得られない時代は、金属粉を成形し固相反応だけで固化する方法が、エジプトで行われた。金、銀、銅についても同様である。しかし、しだいに金属を溶融できるような高温を得る技術の進歩によって、溶解法が一般的になり粉末成形は省みられなくなった。

その後 19 世紀になって、当時の技術で溶解できない白金の製造技術として、金属の粉末成形と焼結が再登場した。さらに 20 世紀に入り、1910 年アメリカの GE で Coolidge が粉末成形を利用して、常温でじん性のある電球用タンク

† 肩付き数字は、章末の引用・参考文献番号を表す。

ステンフィラメントの製造方法が発明された。タングステン粉を金型に入れて圧縮成形した成形体を、通電によって固化成形した後、熱間スエーピング加工で密化したものを線引きしてフィラメントが作られた。これをもって近代金属粉末成形技術の幕開けとされている。

1925年タングステンフィラメントの線引きダイス用に、ダイヤモンドに代わるWC-Co複合合金がドイツで開発された。現在超硬合金と呼ばれるセラミックス-金属系の複合材料で、溶解法では製造できない材料である。同じ発想に基づいて、W-Cu、W-Ag合金のように融点と比重に著しく差がある金属どうしの組合せの複合材料が作られた。溶解法で作ることのできない粉末成形独特のもう一つのものとして、Cu-Sn系多孔質合金が開発された。表面や内部にある空隙が毛細管のようにつながった焼結合金に油を浸み込ませて、自己潤滑性をもつ含油軸受の開発に成功した。また1930年代には新しい磁性材として、酸化鉄粉を原料とするフェライトが日本で生まれた。

1939年に始まった第二次世界大戦において、ドイツは含油軸受に用いられる大量生産技術に注目して、銃弾に指向性を与えるための弾帯の製造に適用した。ドイツは銅資源に乏しいので、多孔質の焼結鉄にパラフィンを含浸させたもので銅弾帯に置き換えることに成功した。鉄粉の製造、成形プレス、焼結炉など、大量生産が可能な技術が開発された。

1950年代に期待されたのは、原子力材料と航空機用ガスタービンエンジン材料である。原子炉用燃料は現在も酸化ウランなどのセラミックスの粉末成形体が用いられている。ガスタービン用耐熱材料として、セラミックスと金属の複合合金であるサーメットが登場した。残念ながら長時間使用の信頼性の点で、溶製材のNi基超合金に軍配が上げられた結果、耐熱性の優れた切削工具として使われている。

同じ金属とセラミックスの組合せであるが、セラミックスの添加量が少なく、微細なセラミックス粉を金属に分散させた分散粒子強化合金も開発された。高温強度が金属の融点近くまで維持できるが、あまり使用は伸びなかった。ところが1970年代にメカニカルアロイング法の登場によって、超合金

に酸化物微粉を分散させた高性能耐熱合金として脚光を浴びている。現在、メカニカルアロイング法は微細組織制御が可能な素材製造法として用いられている。

1970年代に研究開発が進んだ粉末鍛造技術（粉末成形プリフォームを熱間鍛造で密化する方法）が、1980年代にようやく実用期に入った。一方、急冷凝固粉の真密度合金が、溶製材をしのぐ特性をもつ先端材料として関心を集め、超合金、高速度鋼、アルミニウム合金などの高性能材料、部品を作る技術として開発が進められた。

1980年代は旧来のセラミックスの常識を破るファインセラミックスが実用化の域に達し、爆発的ブームとなった。また金属粉やセラミックス粉にバインダー（熱可塑性樹脂とワックス）を混ぜて、プラスチック同様に射出成形後、バインダーを除去して焼結する粉末射出成形法が、小型複雑形状部品の成形技術として注目されている。

1.2 粉末成形の工程^{2)~6)}

1.2.1 概要

粉末成形の製造工程は、原則として原料粉→混合→成形→焼結→後処理からなっている。粉末を原料として混合調整した後、粉末の流動性を利用することによって完成品に近い形状に成形し、溶解することなく固相反応を利用して固化成形する。必要に応じて後処理を加える場合がある。

1.2.2 粉末

〔1〕粉末の製造方法

粉末成形の原材料である粉末の特性（純度、形状、粒度分布など）は、粉末の製造方法によって大きく異なる。したがって、粉末の製造方法は、成形、焼結工程に大きく影響する。

金属粉末の製造方法は多岐にわたり、機械的方法、アトマイズ法、化学的方

法に大別され、製造工程、焼結体の特性、用途によって、最も適した製造方法の粉末が選択されている。機械的方法の代表例である粉碎法は、もろい材料の粉末化に適している。また、近年では延性材料の切りくずなどのスクラップを粉碎した粉末も利用されている。複数の粉末に機械的エネルギーを与えて合金粉末を製造するメカニカルアロイング法（MA法）や、粉末に大きな加工を加えるメカニカルミリング法（MM法）もこの一種である。

噴霧法（アトマイズ法）は、タンディッシュ底部のノズルから流出させた溶湯流を高圧の噴霧媒体あるいは高速回転する円盤によって飛散、凝固させる粉末製造方法であり、噴霧媒体により水アトマイズ法およびガスアトマイズ法、また遠心アトマイズ法に大別される。回転電極法もこの一種である。特に水およびガスアトマイズ法は大量生産が可能であり、広範囲の金属や合金粉の製造法として産業用に多く用いられている。

化学的方法には、還元法、電解法、湿式冶金法、カルボニル反応法がある。酸化物から出発する還元法も一般的な金属粉製造法である。鉄粉の場合、ミルスケールあるいは鉄鉱石を炭素（コークス）で粗還元した後に、さらに水素で仕上げ還元した還元鉄粉が広く用いられている。電解法は金属塩の水溶液を電気分解することにより高純度な粉末の製造が可能であり、銅粉末の製造に広く用いられている。湿式冶金法は、金属塩溶液から還元剤を用いて抽出する方法で、銀、ニッケル、銅などの粉末の製造に適用されている。カルボニル法は一酸化炭素と金属を反応させた金属カルボニルを熱分解し、高純度の微粉末が製造できる方法である。鉄およびニッケル粉末の生産方法として用いられている。

セラミックスは、陶磁器、耐火物、セメント、ガラスなどのオールドセラミックスとファインセラミックスに分類される。オールドセラミックスは、天然に産出する原料をそのまま、あるいは粉碎した粉末を用いて製造されている。工業的に有用なファインセラミックスの原料粉末は天然に産しないので、気相、液相および固相下における化学的方法で合成されている。

〔2〕 粉末の特性

粉末成形において重要な粉末の特性として、粒子径と粒子径分布、粉末形状、比表面積、粒子の集合体としての特性（安息角、流動度、見掛密度、タップ密度、圧縮性）がある。

粒子径と粒度分布の測定にはJIS標準ふるいを用いるふるい分け法、各種沈降法、顕微鏡を用いる方法やレーザ回折法などがあり、粉末特性によって使い分けられている。

粒子径と粉末の成形性の関係に注目すると、粒子径の減少とともに見掛密度が低下し、合わせて流動度や圧縮性も低下するが、成形体の強度は増す傾向にある。粉末形状が不規則であるほど、低い流動性や見掛密度を示すが、成形体の強度は増加し、焼結性も優れている。これに対して、球状粉は高い見掛密度を示すが、粉末どうしの絡み合いが悪いので成形体が欠けやすく、成形性が劣るのが欠点である。超硬合金粉やセラミックス粉は一般に微粉であり流動性が悪く、ホッパーから流下しないので、造粒し粗粉にして流動性を改善して圧粉用金型に充てんしやすくしている。

1.2.3 混 合

粉末成形の前処理として、金属粉の場合は原料粉の粒度調整、他の粉末の添加、さらに潤滑剤などの補助剤添加が行われ、混合機を用いて均一になるように混合が行われる。金属粉ではダブルコーン形、V形混合機が一般に使用される。

セラミックス粉の場合は、水のような液体を加えてスラリーとして湿式で混合する。槽の中で粘性の低い液体と粉末を分散させて、羽根やプロペラで混合する。水分が少なく非常に粘性が高い場合には混練と呼ばれており、混練機を用いてせん断、圧延、折りたたみ、圧縮などの作用によって混ぜ合わせる。混練中に入る気泡を取り除いて水分を均一に分散させるように、真空中で混練する方法も用いられている。

索 引

<p>【あ】</p> <p>圧縮性 5, 115</p> <p>圧 媒 27</p> <p>圧粉密度 124</p> <p>圧力媒体 27</p> <p>後処理 3, 9</p> <p>アトマイズ 3, 4, 173, 174</p> <p>アモルファス金属 162</p> <p>アルミナ 193</p> <p>アルミニウム粉末 130</p> <p>アルミブロンズ 144</p> <p>安息角 5</p> <p>【い】</p> <p>鑄ぐるみ 10</p> <p>異形グラファイト型 188</p> <p>鑄込み成形 6, 145</p> <p>異周速圧延 97</p> <p>一次粒子 146</p> <p>異方性 212</p> <p>医療機器 193</p> <p>インラインスクリー式 70</p> <p>インライン方式 29</p> <p>【う】</p> <p>ウイズドロール法 14</p> <p>ウェルダブル FGMs 超硬 191</p> <p>ウェルドライン 70</p> <p>ウォーキングビーム炉 8</p> <p>釉薬 (うわぐすり) 1</p> <p>【え】</p> <p>エアレーション法 120</p>	<p>液相焼結 6, 7, 8</p> <p>液相接合 105</p> <p>液相光重合法 80</p> <p>遠心アトマイズ法 4</p> <p>【お】</p> <p>押し出し成形 6, 150</p> <p>押し出し比 56</p> <p>オスプレイ 99</p> <p>オフライン方式 29</p> <p>オールドセラミックス 1, 4</p> <p>温間等方加圧装置 28</p> <p>温度傾斜焼結 186</p> <p>温度勾配場 187</p> <p>【か】</p> <p>加圧焼結 33, 34, 149</p> <p>開気孔 34</p> <p>邂逅剤 146</p> <p>回転電極法 4, 140</p> <p>開放気孔 34</p> <p>海綿鉄粉 119</p> <p>化学分解 74</p> <p>拡 散 34, 38</p> <p>拡散接合 51</p> <p>ガスアトマイズ 4, 68, 139</p> <p>ガスアトマイズ粉 128</p> <p>ガスタービン 132</p> <p>可塑剤 68</p> <p>型 孔 72</p> <p>片押し法 12</p> <p>型締めユニット 70</p> <p>型充てん 73</p> <p>型潤滑 22</p> <p>型鍛造 78</p>	<p>カップリング剤 68</p> <p>金 型 33, 70</p> <p>金型潤滑 115</p> <p>金型成形 6, 33</p> <p>加熱分解 74</p> <p>カムプレス 15</p> <p>顆 粒 147</p> <p>顆粒形状 158</p> <p>顆粒巢 157</p> <p>カルボニル 68</p> <p>カルボニル反応法 4</p> <p>過冷却液体状態 162</p> <p>還元鉄粉 4</p> <p>還元法 4</p> <p>乾式成形法 145</p> <p>乾式法 24</p> <p>含浸用 HIP 装置 46</p> <p>完全合金粉 122</p> <p>乾 燥 158</p> <p>含油軸受 2</p> <p>【き】</p> <p>擬 HIP 7, 34</p> <p>機械的性質 156</p> <p>気 孔 6, 37, 38, 66</p> <p>気孔率傾斜型 FGMs 187</p> <p>キャビティー 72</p> <p>球状粉 5</p> <p>急速冷却機能付き HIP 装置 45</p> <p>旧粒子界面 135</p> <p>急冷凝固粉 3, 64</p> <p>凝 集 146</p> <p>巨大ひずみ加工 178</p> <p>許容肉厚 75</p>
---	--	---

金属ガラス	161	コンパウンド	67	ジルコニア強化型アルミナ	
金属系生体材料	195	コンフォーム	58		194
金属三次元積層造形技術	79	混練	67	浸液透光法	148
金属製多孔体	196	混練温度	69	真空雰囲気	75
金属粉末射出成形	66	混練機	5	真空ホットプレス	141
金属粉末積層造形	143	混練物	67		
		混練物密度	69		
【く】		【さ】		【す】	
組合せ焼結接合	107	サイジング	9	水酸アパタイト	194
クラック	122, 157	材料押出し法	80	水蒸気処理	9
クランクプレス	15	サーメット	2, 154	水素化脱水素化	138
クリーブ	37	酸化物還元	68	ステアリン酸亜鉛	12
クリーブ変形	34	酸化膜	53	スプリットダイ式プレス	17
クロール法	138	三次元複雑形状金属部品	77	スプリングバック	121, 159, 211
【け】		【し】		スプレードライ法	128
傾斜機能材料	185	指向性エネルギー堆積法	83	スプレーフォーミング	99
ゲータライジング	134	自己伝播反応	184	スパーサー法	182
結合剤	68, 146	自己発熱反応合成法	186	すべり線場法	240
結合剤噴射法	80	磁性材料	165	スポンジチタン	138
ゲル化法	184	湿式成形法	145, 149	スラリー	5
限界状態線	27	湿式法	27	スラリー発泡法	184
健全性	78	湿式冶金法	4	スリップ調製	146
【こ】		射出成形	6, 70	寸法収縮	160
コインング	9	射出成形機	70	寸法精度	75, 78
高エネルギー速度成形	6	射出ユニット	70	【せ】	
硬質金属材料	76	充てん性	120	成形	3, 6, 62
硬質磁性材料	169	充てん性評価装置	120	成形圧力	73
構成式	205	樹脂コンパウンド成形法	145	成形助剤	31, 157
高速遠心成形法	145	潤滑剤	68	成形性	117
高速度鋼	3, 7	常圧焼結法	186	成形体強さ	117
高速度鋼粉末	128	上界法	245	成形体密度	160
剛塑性有限要素法	215, 252	焼結	3, 6, 75, 77	製造工程	157
高分子系生体材料	195	焼結含油軸受	9	生体活性結晶化ガラス	195
極微細水アトマイズ粉	128	焼結助剤	146	生体材料	193
固相焼結	6	焼結鍛造	130	青銅含油軸受	144
固相接合	10	焼結変形	160	積層造形法	145
固体装てん	69	助剤	68	切削加工	78
個別要素法	254	初等解法	237	切削工具	154, 155
混合	3, 5, 157	ジルコニア	193	ゼーベック効果	170
混合機	5			セラミックス	1, 4, 8
混合潤滑	22			セラミックス-金属系傾斜機能材料	185

セラミックス系生体材料	193				
セラミックモールド法	142				
せん断速度	69				
		【そ】			
造粒	158				
造粒粉	128				
速度感受性指数	92				
塑性成形	6, 145				
塑性変形	34, 37				
		【た】			
ダイキャスト	78				
ダイス	53				
体積拡散	7, 36, 38				
多孔質金属	180				
多孔質樹脂	151				
多孔質体	223				
脱ガス処理	56				
脱脂	74				
脱脂工程	6, 68				
脱バインダー	74				
タップ密度	5, 69				
脱泡剤	146				
弾性係数	211				
弾性変形	211				
弾塑性有限要素法	216, 221, 252				
		【ち】			
ち密化	34, 67, 164				
ち密化速度式	38				
超合金	130				
超硬合金	2, 154				
超高分子量ポリエチレン	195				
超塑性	136				
超臨界ガス	74				
調和組織	178				
沈降法	5				
		【つ】			
通気孔	74				
		【て】			
定常クリープ	36, 37				
低熱膨張合金	76				
鉄系粉末	115				
テープキャストイング	145, 151				
電界拡散効果	42				
電解法	4				
電気泳動堆積法	151				
電気・熱伝導度傾斜型 FGMs	187				
電磁エネルギー支援焼結法	39				
電子電気制御ユニット	70				
		【と】			
銅合金粉末	144				
銅溶浸接合	103				
ドクターブレード	184				
独立気孔	180				
トンネル炉	8				
		【な】			
内部摩擦角	23				
ナックルプレス	16				
難加工性機能材料	76				
軟質磁性材料	76, 167				
		【に】			
ニアネットシェイブ	91, 142				
ニアネットシェイブ成形	7				
ニーダー	70				
ニュートラルゾーン	117				
		【ぬ】			
抜き出し特性	119				
抜き出し力測定方法	119				
		【ね】			
熱応力緩和型 FGMs	187				
熱可塑性	67				
熱間押し出し	7, 34, 130, 134				
				【は】	
				熱間鍛造	7
				熱間等方圧成形	7, 34, 43, 186
				ネック	6, 38
				ネック半径	38
				燃焼合成法	183, 186
				粘性流動加工	164
				粘塑性有限要素法	221
				粘弾塑性有限要素法	221
				粘着力	23
				粘 度	69
				【は】	
				ハイブリッド合金粉	122
				ハイブリッド式粉末成形 プレス	16
				バインダー	6, 67
				破壊の起源	156
				発泡金属	180
				バルク状傾斜機能材料	188
				バルス	174
				バルス通電加圧焼結法	40
				ハンター法	138, 139
				【ひ】	
				比表面積	5
				表面拡散	6
				表面粗度	78
				【ふ】	
				ファインセラミックス	1, 4
				フィードストック	59
				封孔処理	9
				フェライト	2
				フォトリソグラフィ	82
				不純物量	158
				プッシャー炉	8
				部分拡散合金粉	122
				プラズマ回転電極法	139
				フラッシュシンタリング	42
				ブランジャー式	70
				ブリカーサ法	181
				プリスタ	65

ふるい分け法	5	マシナブル超硬材	187	溶融接合	10
ブレーカー	155			溶融堆積法	80
プレス成形	159	【み】			
プレス成形粉末冶金	77	見掛密度	5	【ら】	
フローティングダイ法	12, 33	水アトマイズ	4, 128, 174	ラティス構造	87
		水凍結法	75	ラトラ試験	117
フローマーク	70	【む】		ラトラ値	124
雰囲気制御 HIP 装置	47				
粉 砕	4, 157	無加圧焼結	33, 186	【り】	
分 散	146	無気孔組織	149	粒界拡散	36, 38
分散剤	146	【め】		粒子間摩擦	27
粉末圧延	94			粒子径	5
粉末押し出し	52	メカニカルアロイング		粒子径分布	5
粉末形状	5		2, 4, 172, 176	粒子配向	151
粉末射出成形法	3, 153	メカニカルグライン		流動性	5, 120, 158
粉末床溶融結合法	81	ディング	172	流動度	5
粉末積層造形	6, 138, 197	メカニカルミリング	4, 175	粒度分布	3
粉末鍛造技術	3	メッシュベルト炉	8	両押し法	12
【へ】		【も】		理論密度	115
閉気孔	33	モジュラー方式	45	臨界固体装てん	69
ベルチェ効果	170	【や】			
ベレット	6			【れ】	
変成ガス	8	焼き・冷やしばめ	10	冷間押し出し	60
【ほ】		【ゆ】		冷間等方圧成形	6, 27
放電プラズマ焼結法	40, 186	油圧プレス	14	レーザ回折法	5
保形性	150	油圧ユニット	70	レーザ焼結法	81
ホットプレス	7, 32, 34, 52	有機バインダー	67	連成解析	259
	145, 186	有限要素法	214, 251	連続焼結炉	8
ホッパー	94	有効応力	34, 38	連通気孔	180
ポーラス金属	180	【よ】		【ろ】	
ボールミル	146			ろう接	105
【ま】		溶射成形	6	ロストワックス鑄造法	78
マイクロ MIM	143	溶 浸	9, 100	ロータリープレス	17
		溶媒抽出	74	ローラーハース炉	8
				ロールギャップ	96

【A】

AM 52, 79, 143

【B】

BJ 80

【C】

CIM 153
 CIP 27, 141, 145
 CNC 式粉末成形プレス 14

Coble クリープ	36, 37, 38			PREP	139, 140
			[J]	PREP 粉末	141
[D]		JIS 標準ふるい	5		[R]
DED	83		[L]	REP	140
DEM	256	LaB6	85		[S]
			[M]	SHS 法	186
EBM	83	MA	4, 172, 173, 174, 176	SLM	83, 143
		ME	80	SPS 法	39, 145, 186
[F]		MG	172, 173		[V]
FDM	80	MIM	66, 81, 126, 137, 142	VHP	141
FGMs	185	MM	4, 173, 175	VP	80
FGMs 超硬	187	<i>m</i> 値	92		[W]
FS	42		[N]	WC/Co 系超硬合金	186
			Nabarro-Herring クリープ	WIP 装置	28
[H]			36, 37, 38		[Y]
HDH	138	Ni 基超合金	2, 132	YAG ファイバーレーザ	84
HIP	7, 34, 38, 43, 52, 139, 141, 142, 145, 186	NS 法	186		[Z]
HIP マップ	36		[P]	ZrO ₂ (3Y) / SUS410L	188
HP 法	186		PBF	ZrO ₂ -Ti 合金系 FGMs	192
			PIM		
[I]			PLS 法		
IN100	135		PPB		

粉末成形——粉末加工による機能と形状のつくり込み——

Advances in Powder Forming Processes
— Shape Production, Properties and Applications —

© 一般社団法人 日本塑性加工学会 2018

2018年12月28日 初版第1刷発行

検印省略

編 者 一般社団法人
日本塑性加工学会
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 萩原印刷株式会社
製本所 有限会社 愛千製本所

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話 (03)3941-3131(代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-04380-8 C3353 Printed in Japan

(高橋)



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。
購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めていません。
落丁・乱丁はお取替えいたします。