

粉粒体工学

森 英利^{*1}／椿 淳一郎^{*2}

1. はじめに

粉体技術は産業分野を問わず生産に関する重要な基盤技術の一つである。その技術開発の変遷をみると、鉱石など付加価値としては低い粉体を対象とした時代では、低い消費動力で大量の粉体を処理する装置の開発が技術課題の中心であった。これに対して現在では製薬、食品、新素材開発の分野をはじめとして、多くの産業分野で付加価値の高い粉体が対象となってきており、粉体はその取り扱いにおいて、これまでのバルク体としてだけでなく個々の粒子の特性にも目が向けられるようになり、「粉体」が「粉粒体」として認識されるようになった。このことは、粉体の高機能化に対応して、個々の粒子に対する機能の高度化も要求されるようになり、粉体としての特性制御も、粒子個々のレベルで行われるようになってきたことを意味する。また一方では、従来のハンドリングを中心とした「単位操作」としての捉え方のみでは不十分であり、粉粒体に対する「評価」も重要な考慮項目になってきたことも意味している。

このような粉体技術の変遷については、微粒子の製造および評価技術、微粒子が関与する諸現象の解析とコンピュータシミュレーションの適用、製造プロセスにおける制御技術などを中心話題として、最近刊「微粒子制御」(化学工学の進歩30)¹⁾にまとめられている。本稿では、ファインセラミックス製造プロセスにおけるセラミックス

原料粉体の取り扱いを中心に、いくつかの最近の話題を提供する。

2. 微粒子の製造

セラミックスの低温焼成、焼結体粒径の微小化などを目的としたセラミックス原料粉体の製造法として、ゾル-ゲル法をはじめとしたビルドアップ合成法が注目され、圧電体や誘電体などの電子セラミックスの開発を中心に多くの研究が進められている。中でも、高純度の均一径粒子の合成に適しているとの理由により、アルコキシド法や共沈法などの液相法が一部実用化されている。一方、固相法によるセラミックス原料粉体の調製は、従来より粉体の解碎混合や粉碎に用いられているボールミル法などが微粉碎法としても広く検討されている。粉碎によって得られる粉体は、比較的粒子径分布が広く、また不純物混入の問題などもあるが、プロセス的には単純で、しかも多量の処理が可能であるためセラミックス製造プロセスでも広く用いられている。

ボールミル法による微粉碎については、直徑が数mmの小さい玉石を用いることによりサブミクロンの粒子径に粉碎できることが報告されているが²⁾、一般には、玉石の磨耗による不純物混入の影響なしに粉体を1μm以下に調製することは困難といわれている。そこでボールミル法の特徴を活かしつつ、高純度でしかも超微粒のセラミックス粉体を調製するいわゆるナノパウダープロセスも開発が進められている。一例としては、媒体攪拌型ミルを使用した湿式混合粉碎プロセスの開発が挙げられ^{3,4)}、圧電セラミックスPb(Zn-Nb-Sn-

^{*1} Mori Hidetoshi 名古屋大学工学研究科物質制御工学専攻
助手 工学博士

^{*2} Tsubaki JunIchiro 同上 教授 工学博士

$Ti-Zr)O_2$ 系の調製に利用されている。このプロセスでは、横型連続式媒体搅拌ミルにより、平均径 $2.2\text{ }\mu\text{m}$ の原料粉体が 0.4 mm 径のPSZ(イットリア安定化ジルコニア)玉石の使用により粉碎時間100minで20nmまでに調製されている。分散剤を少量添加して媒液量を少なくし、また原料粉体濃度を高めることにより玉石同士の共擦りを抑えて汚染量を低下させる工夫がなされている。このナノパウダープロセスによれば、10nmレベルでの超微粒子の調製が比較的容易に行うことができ、共沈法などの溶液法にも優る微粒子作製技術として注目されている。

ナノパウダープロセスでも利用される媒体搅拌ミルには、多くの形式が開発されている⁵⁾。本ミルは、粉碎容器と内部に挿入した搅拌機とを相対的に高速回転させ、容器内に充填した玉石と碎料を激しく搅拌することで発生する剪断力により微粉碎を行う装置である。中でも最近開発されたユニークな形式の湿式アニュラー型媒体搅拌ミルを図1に示した。この装置はその中央部に、ロータ回転式の分級機が組み込まれており、粒度分布の狭い微粒製品を得ることができるように工夫されている。このロータ型湿式分級機は液体サイクロンとデカンターの中間的な特性を有しており、数ミクロン以下の製品が効率的に得られる構造となっている。効率的に微粉を製造するためには、この例のように分級操作を取り入れた閉回路プロセスとしての開発が必要である。分級の主たる目的は、粗大粒子が含まない微粉を得ることにあり、微粉

碎に要する多大なエネルギーを効率よく利用するためにも、分級機と粉碎機の効率的な組み合わせが重要である⁶⁾。

粉碎に対する考え方そのものも従来とは変わっており、単に微粒化や粉碎エネルギー効率の向上を図るだけでなく、粉碎製品の粒子径分布や粒子形状、嵩密度や流動性などの粉体特性も制御することが要求されるようになってきた。特に粉碎目的が多様化する中で、複数の材料を原料として粒子の複合化を図り、粒子表面を改質したり、それぞれの材料特性を活かしてその高機能化を図る処理について強い関心が寄せられている。複合化を目的とする場合には、粉碎機によって粒子に作用する力の種類や大きさが異なるため、材料や目的に応じて装置を選択する必要がある。例えば、圧縮剪断式粉碎機での複数粒子の複合を図る場合、原理的にはエネルギーが核となる粒子表面に集中的に作用するため、いわゆる表面被覆型複合粒子の作成に有効であるといわれる⁷⁾。また、粉碎機の内筒ロータだけでなく外筒ケーシングが回転するタイプのアニュラー式媒体搅拌ミルも開発され、粉碎のみだけでなくメカノケミカル反応を利用した粉体処理にも応用されている。

3. 粒子径測定技術

各種プロセスで扱う粉体のファイン化に伴い、その評価技術としての粒子径測定技術も、ふるい分けから液相沈降法、レーザー回折・散乱法、クロマトグラフィー法と、新たな原理に基づく測定装置が開発され、より微粒子側へと測定範囲を拡げてきた。現在粒子径分布の測定法には、これら方法に加えて電気的検知法、遮光法などが主に用いられているが、測定範囲の拡大に最も貢献したのはレーザ回折・散乱法であり、現在ではレンジを切り替えることなしに、 $10^{-2} \sim 10^3\text{ }\mu\text{m}$ に分布を持つ粉体を1回で測定可能となっている。レーザー回折・散乱法は、ダイナミックレンジ(1回の測定でカバーできる最大粒子径と最小粒子径の比)が広いだけでなく、操作性に優れて再現性もよく、測定時間も短いために現在では粒子径測定技術の主流となっている⁸⁾。

最近の研究動向としては、新たな測定原理に基づく測定技術の開発に関しては一段落しており、

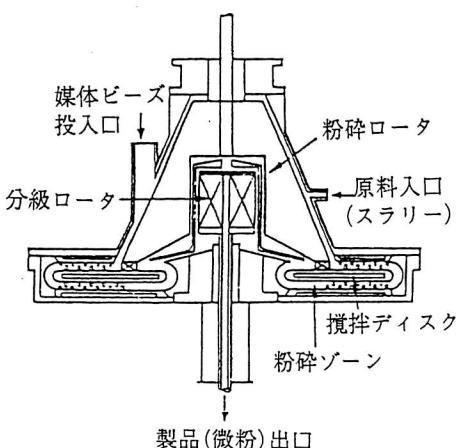


図1 分級ロータを内蔵した湿式アニュラー型媒体搅拌ミル

既存技術の改良による測定精度の向上を目指した研究が進められている。ここでは、最も広く利用されているレーザ回折・散乱法の測定精度を向上する上で重要な技術課題である、粒子屈折率の取り扱いと機種間で現れる差の問題について考察する。

粒子に光が照射されると、光はさまざまな方向に散乱される。粒子が球状の場合、光の散乱パターンは、粒子径と粒子屈折率の関数であるMieの理論式で表される。また散乱光の強度は粒子個数に比例するため、散乱パターンと散乱光強度を測定すれば、粒子径と粒子個数を求めることができる。しかし粒子径分布を有する粒子群を測定した場合には、得られる散乱光強度分布は大きさの異なる粒子からの散乱光が重なったものであるため、直接的に粒子径分布を求ることはできず、ある数学的手法を介して粒子径分布に換算される。

Mieの散乱理論に基づいて粒子径分布を求める場合には、粒子の相対屈折率(粒子屈折率/媒体の屈折率)が必要である。このことは、一つの散乱光強度分布からでも、使用する屈折率の値に応じて異なる粒子径分布が得られることを意味している。一般に屈折率は複素数で表され、実数部は光が折れ曲がる性質を、また虚数部は光を吸収する性質を表している。実数部は物性表などに記載されているが、合成物質や複合物質などについては記載されていない場合も多く、また物質名が特定できない試料については実測しなければならないが、密度の測定のようには容易でない。一方、虚数部については実測することは事実上不可能といつてよい。

物性表などの屈折率を利用する場合、使用する光源の波長や測定装置に組み込まれている演算ソフトが機種によって異なっているため、屈折率の入力値として文献値が不適切な場合があることに注意しなければならない。単分散球状シリカ粒子をレーザ回折・散乱法で測定した場合、屈折率に文献値を入力したにもかかわらず、公称径より一桁小さい測定結果が得られたという報告もある⁹⁾。したがって、装置に入力する値は屈折率そのものではなく、装置によって異なる光学特性値であると認識しておかなければならぬ。早川ら^{9,10)}は、ファインセラミックス原料粉体、金属粉体および

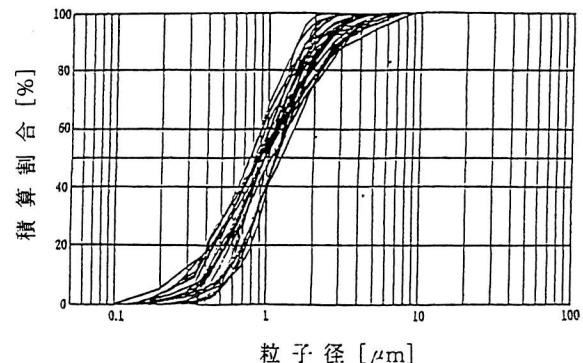


図2 レーザ回折・散乱法の機種による差

有機物粉体試料を、メーカーの異なる数機種の装置で測定し、装置に入力する光学特性値としての屈折率の予測方法を提案している。この方法は、光学特性値の入力値を変えて粒子径分布を算出した場合、最も粗い粒子径分布を与える入力値が最適な光学特性値であるらしいという経験に基づいたもので、特に屈折率に関する情報が全くない試料の測定に有用な方法であるといえる。

粒子径分布の測定も計測技術の一つである以上は、同一試料を同一原理で測定した場合には同じ結果が得られなければならない。しかし現実には無視できない機種間の差が存在する。図2に、レーザ回折・散乱法を含む22機種の比較を行った結果を示す¹¹⁾。共通試料は窒化ケイ素粉体で、測定装置に起因する差のみを調べるために、試料の調製条件および手順を統一して測定を行っている。50%径でみると測定結果の最大値と最小値の比は1.5程度で、試料調製条件・手順の統一によって分布のばらつきが大分抑えられているものの、分布の両端特に微粉側では、かなり測定結果にばらつきが現れていることがわかる。さらに、その後に市販された改良機種を加えて再度共通試料を測定したところ、図3に示すように最新の改良機種では図2の測定帶には入らないで、粒子径分布をより微細に測定する機種が多かった¹²⁾。装置メーカーの説明では、微粒子側からの散乱光の検出感度が向上したためとのことである。それが事実とすれば、レーザ回折・散乱法は未だ開発途上の技術ということになり、試料の調製条件・手順を統一することによってそれなりに整合性のあるデータが得られたにもかかわらず、サブミクロン以下

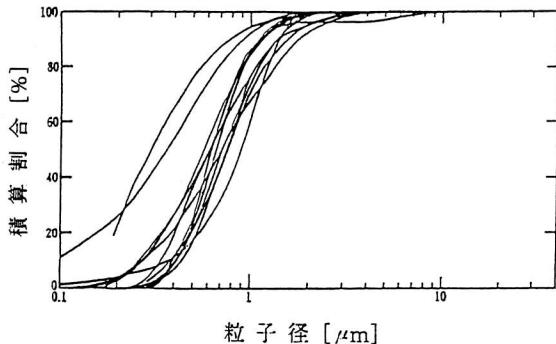


図3 レーザ回折・散乱法の新・旧機種の差

の粒子が本当に測定されているのか、疑問が残るところである。

機種間の差をなくすには、既知の標準粉体によって装置の校正を行うことで可能である。標準粉体としては、サブミクロン領域で粒子径分布と屈折率が既知で球形粒子、という条件を満たす必要があり、現在のところこの条件を満たす物質としてPSLが利用できる。種々な径のPSL単分散粒子を混合して、粒子径分布既知の試料を調製し、サブミクロン以下の粒子が本当に測定されているかどうか、既存の装置で改めて検討することが今後の課題である。

試料調製は、測定精度を向上させる上で重要な役割を果たしている。正しい粒子径分布を得るには、粉体試料中の粒子を個々に分散して凝集を防ぎ、使用する測定装置に最適な濃度に調製しなければならない。試料調製法に関しては、ファインセラミックスを対象としているがJIS規格(JIS R-1622, 1995)にまとめられており、これに準拠するのがよい。最近は合成法によって得られる粒子を利用するが多くなってきており、この場合、得られる粒子は合成プロセスに応じて強い凝集構造を形成する多いため、粉碎によって得られた粉体に比べて詳調製の影響を受けやすい。いずれにしても粒子径分布の測定において重要なことは、どのような状態(例えば一次粒子まで解碎した状態、あるいは水に分散しただけの状態など)の粒子径分布を測定したいのかを明確にして、試料調製条件を決定することである。

粒子径のみならず、粒子に関する情報を一番多く得るにはその画像を利用することである。近年、画像処理技術の発達により画像解析の迅速化が進

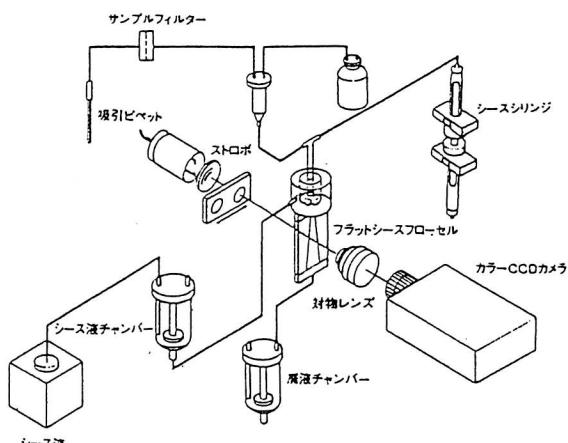


図4 フロー式粒子像分析装置

み、懸濁液中の粒子をリアルタイムで画像処理して粒子特性を評価する粒子像分析装置も市販されるようになってきた。図4に示したフロー式粒子像分析装置では¹³⁾、吸引された粒子懸濁液がフラットなシースフローセルに導入され、シース液により扁平な試料流が形成される。このフローセルを通過中の粒子は、対物レンズを通して1/30秒間隔でCCDカメラにより静止画像として撮像され、得られた粒子像の投影面積と周囲長から円相当径や円形度、あるいは液相単位積当たりの粒子数がリアルタイムで解析される。本装置では、粒子がフローセルの中心を通過するようにシース液により流体力学的制御が行われ、常にピントのあった粒子像が撮像されるように工夫がなされている。このタイプの測定装置は、光学的に撮像された粒子像を使用するため、対象とする粒子径がミクロンオーダー以上に限られる。しかし、粒子個々の情報のみならず実際の流れ系に存在する粒子凝集体構造の直接観察に応用できる可能性があり、その有用性を検討した報告もある¹⁴⁾。

粒子が凝集している場合、一次粒子の粒径分布も確かに重要ではあるが、凝集構造の評価もまた必要である。一般に凝集体は、その内部構造にフラクタル性を有することが知られており、フラクタル次元で構造評価の指標とする研究が最近多くなった¹⁵⁾。フラクタル次元は、凝集構造の評価のみならず粒子個々の形状評価にも利用されており¹⁶⁾、粉粒体工学における有用性についてはこれからも研究が進められるであろう。

4. ファインセラミックスの成形

ファインセラミックスの製造プロセスでは、成形体に一度賦与された不均質性は後工程の焼結操作によってさらに助長されるため、均質な成形体の作製が製造プロセスの信頼性向上のためのキーテクノロジーであるといえる¹⁷⁾。

セラミックスの原料調製は、均質な成形体を得るために重要な工程となる。一般に原料粉体は可塑性に乏しいため、成形性を賦与するためには流動性のよい顆粒状に整える造粒操作や、成形助剤を添加するなどの調製が行われる。顆粒の作製においては、原料粉体を結合剤、滑剤などと共に分散媒中に分散させてスラリー調製し、熱風中に噴霧して乾燥させるスプレードライヤーが多く用いられる。プレス成形においては、金型への流動性・充填性、加圧時の均一な圧力伝播、および加圧の初期段階までは崩壊せず加圧の中期段階で崩壊し加圧の最終段階ではその形骸が残らないような適切な強度を有すること、を目的とした顆粒の調製が必要である¹⁸⁾。

スプレードライヤーにより得られる顆粒の特性、特に形態はスラリーの調製条件と密接な関係にある。スラリーの評価は、一般にみかけ粘度によって行われるが、必ずしも粘度だけでは得られる顆粒の特性を評価することはできない¹⁹⁾。図5は、pH調製により分散状態を変化させたアルミニナスラリーから得られた顆粒の内部構造を、みかけ粘度とpH値の関係図上に整理した結果である²⁰⁾。得られる顆粒は中実、凹状あるいは中空状、およ

びこれらが混在する構造を有している。この結果より、スラリー粘度は、必ずしも顆粒体構造決定の指標にはならないことがわかる。粒子濃度が同じであれば、十分粘度の高いスラリーから中実顆粒を得ることができるが、ほぼ同じ粘度であっても顆粒の内部構造は異なっており、顆粒の構造決定には他の因子が関与していることが示唆される。顆粒の内部構造が、液滴の乾燥時に作用する毛管力に起因する圧縮力と、粒子間付着力に依存する顆粒強度の関係により決定されるとの考えより噴霧造粒過程の詳細な解析が始まられている。

一方、加圧プレスによる顆粒の成形過程を解析する場合、顆粒の崩壊強度を知ることは前処理としての造粒操作条件を検討する上でも重要である。従来、粉体層に低圧密を加えたときに生じる比較的小な付着・凝集力を精度よく測定する装置はいくつかみられるが、バインダーが混入した顆粒などに高圧密を加えた場合に生じる大きな付着・凝集力に対しては、安定した測定が困難であった。

最近、顆粒の崩壊が始まり易い1 MPa以下の圧力で崩壊を伴う粉体層の圧縮特性を精度よく測定する自動計測システム、アグロボット(ホソカワミクロン社製)が開発された²¹⁾。一般に、顆粒充填層の圧密に伴う構造変化の過程は、図6に示すように、圧縮応力-嵩密度特性と関連づけて整理されている。縦軸は顆粒充填層の嵩密度を原料粉体の真密度で割った値である。通常の粉体を充填した場合には、破線のように一様に圧密が進行していくが、顆粒の場合には実線のような特異な傾向を示す。圧密の初期段階では顆粒の再配列によ

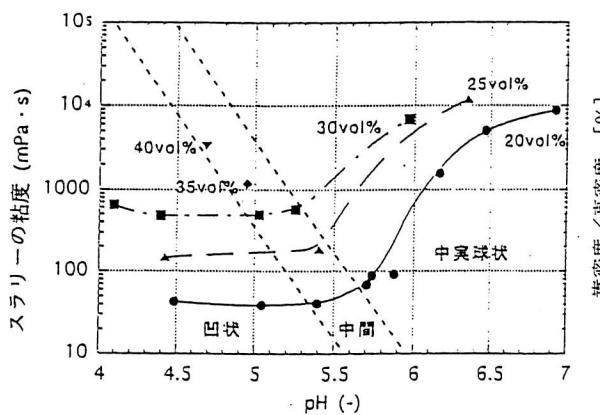


図5 顆粒構造とスラリー調製条件の関係

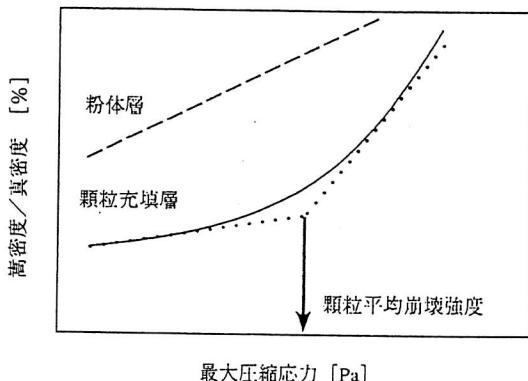


図6 粉体と顆粒の圧縮特性モデル

る充填が起こり、嵩密度は緩やかな上昇傾向を示す。そして顆粒の崩壊が始まり、それが進行するに従って密充填に移行し、後期の圧密区間では嵩密度が急激に増大する。この曲線の勾配が急激に変化する点での圧縮応力は顆粒の崩壊強度と関連しており、重要な評価項目となり得るといえる。実際の顆粒には強度や粒度、形状、内部構造などが不均一で分布を有しており、強度の弱い顆粒から崩壊が始まるために明確な折れ曲がりは観測されないかもしれない。しかし圧密の初期と後期で得られる曲線に引いた接線の交点は、平均的な強度を持った顆粒が崩壊し始める圧力（顆粒の崩壊開始強度）と考えることができ、折れ曲がりが鋭い場合には顆粒の強度が比較的均一で、逆に緩い場合には顆粒の強度に大きな分布があると考えることができる。スプレードライヤー法の造粒条件と得られる顆粒の崩壊開始強度との関係も調べられており、顆粒の造粒特性の評価から最適な強度を持った顆粒を製造するためのバインダー濃度や種類の設定、その他のスラリー調製条件を検討することが可能である。

鋳込み成形法においても、石膏型などの多孔質型への着肉性、着肉後の排泥性、脱型後の保形性を考慮した原料スラリーの調製が重要である²⁾。この場合にもスラリー調製条件の最適化が、均質な成形体の作製のためには重要な工程となる。一般にセラミックス原料に使用されるスラリーは高濃度であるため、スラリー中に含まれる微粒子群の分散・凝集構造が成形性に大きな影響を及ぼす。このためスラリー中の微粒子分散・凝集状態を的確に評価することが重要である。一般に微粒子分散系は熱力学的には不安定であり、常に凝集してその比表面積を小さくしようとする傾向がある。この傾向に逆らって分散系の安定化に寄与しているのが、微粒子表面形成される電気二重層に基づく静電反発力であり、粒子間に普遍的に存在するvan der Waals力との相互作用ポテンシャルから系の分散・凝集が論じられる(DLVO理論)²³⁾。最近では、SFA(表面間力測定装置)やAFM(原子間力顕微鏡)を用いた観察^{24, 25)}により、DLVO理論の定量性の評価や微粒子表面ミクロ構造のキャラクタライゼーションに関する研究が進み、微粒子表面のミクロ構造が分散系の安定性に及ぼす影

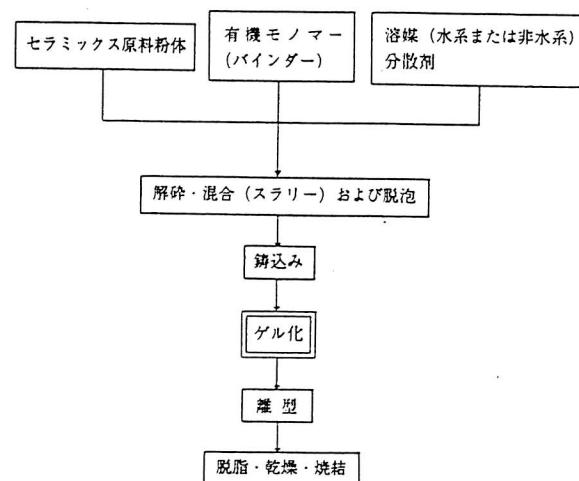


図7 ゲルキャスティング法フローシート

響が次第に明らかにされつつある。このような分散系の安定性理論を背景に、セラミックス原料スラリーの調製を行い、スラリーのレオロジー特性を制御することにより成形性の向上を図ることが重要である。

セラミックス成形技術は、上述の乾式プレス成形や鋳込み成形の他に、射出成形や押出成形、テープ成形などがあり、それぞれの成形に応じて流動性や可塑性、保形性を賦与するためのセラミックス原料調製法が検討されている¹⁸⁾。最近、射出成形と鋳込み成形を組み合わせた新しい成形法として、自己硬化性のスラリーを金型に鋳込むゲルキャスティング法が開発されている²⁶⁾。典型的なフローチャートを図7に示した。基本的には鋳込み成形で使用するスラリーと同様な流動性を有するスラリーを調製するが、スラリーには自己硬化性のバインダーが含まれているために、型は多孔質である必要がなく金属型が利用できる。スラリーに自己硬化性を賦与するためには、スラリー中に架橋性モノマーを添加しておき、このモノマーを高分子化させることによりセラミックス粉体を固定化して固化する。高分子量は通常の射出成形に比して少ないので、脱脂が容易である。スラリーの流動性と硬化の機能を別々の材料に分担させ、乾燥と脱脂によってそれぞれの成分を取り除く点が従来の成形法と異なるのが特徴的である。ポリマーゲルの形状制御性を考慮すれば、より複雑な三次

元形状の造形性と保形性を成形体に賦与することが可能であるが、反面、焼成時の収縮率が大きいことが緻密体を作製する場合には問題となつてゐる。

5. おわりに

高機能あるいは付加価値の高い粉体のニーズが高まるにつれ、粉体が関する単位操作もファイン化に対応した技術開発が進められてきており、本稿においてその一部を紹介した。微粒子合成法の詳細や、最近特に粉体现象の解明に大きく貢献してきる決定論的なコンピューターシミュレーションについては紹介できなかったが、これらについては本誌の既刊²⁷⁾にも特集されているので、参考にしていただきたい。

参考文献

- 1) 化学工学会編：化学工学の進歩30「微粒子制御」，模書店（1996）
- 2) 田代, 辻, 五十嵐：セラミックス論文誌, 96, 579 (1988)
- 3) 西田, 安藤, 釣宮：粉体および粉末冶金, 37, 827 (1990)
- 4) 釣宮：粉碎, 36, 177 (1992)
- 5) 神保, 横山：粉体機器・装置選定ハンドブック, 日刊工業新聞社, p. 26 (1989)
- 6) 山田：化学装置, 35(3), 30 (1993)
- 7) 内藤, 吉川, 田中, 近藤：粉体工学会誌, 29, 434 (1992)
- 8) 粉体工学会編：粒子径計測技術, 日刊工業新聞社 (1994)
- 9) 早川, 中平, 椿：粉体工学会誌, 30, 653 (1993)
- 10) 早川, 安田, 内藤, 椿：粉体工学会誌, 32, 796 (1995)
- 11) 早川, 中平, 椿: *J. Ceramic Soc. Japan*, 103, 500 (1995)
- 12) (社)日本ファインセラミックス協会：平成7年度日本規格協会委託工業標準新規原案調査作成「レーザ回折・散乱法によるファインセラミックス原料粒子径分布測定方法」
- 13) 宮下, 藤井, 古家, 小坂, 花岡：1996年度春季研究発表会講演論文集, 58, 粉体工学会 (1996)
- 14) 森, 吉田, 内藤, 早川, 椿: 粉碎, 40, 印刷中 (1996)
- 15) 永安, 塚本, 磐部, 仙名, 大坪: 第34回粉体に関する討論会講演要旨集, 62 (1996)
- 16) 鈴木, 六車, 廣田, 大島: 粉体工学会誌, 25, 287 (1988)
- 17) Reed, J.S.: *Principles of Ceramics Processing* (2nd ed.), p. 492, Wiley (1995)
- 18) 窯業協会編集委員会講座小委員会編セラミックスの製造プロセス-粉末調製と成形-, 窯業協会 (1984)
- 19) 内藤, 福田, 吉川, 神谷, 椿: 粉体工学会誌, 32, 617 (1995)
- 20) 椿, 広瀬, 塩田, 森: 日本セラミックス協会第9回秋季シンポジウム講演予稿集, 402 (1996)
- 21) 辻本, 井上, 横山: 粉碎, 38, 74 (1994)
- 22) 荒川, 小林, 平戸, 井上: 粉体工学会誌, 25, 585 (1988)
- 23) Hunter, R.J.: *Fundamentals of Colloid Science*, Clarendon Press, Oxford (1987)
- 24) Israelachvili, J.N.: *Intermolecular and Surface Forces*, Academic Press (1985)
- 25) 福田, 神田, 東谷: 化学工学会第60年会要旨集, M301 (1995)
- 26) Omante, O.O., M.A. Janney and R.A. Strehlow: *Ceramic Bull.*, 70, 1641 (1991)
- 27) ケミカルエンジニアリング: 1996, vol. 41 (10) 「粉粒体技術トピックス」およびvol. 41(12) 「数值解析と化学装置モデリング」など

●好評発売中

固体の反応性 <基礎編>

小寺嘉秀著 A5版 110頁 定価 2,575円

目

- 第1章 固体の性質
 1. 1 固体の結合
 イオン結合, 共有結晶, 金属, 分子結晶,
 水素結合を持つ結晶
 1. 2 固体の結合と機械的性質との関係
- 第2章 固体の構造
 2. 1 結晶格子と逆格子
 2. 2 結晶内の面の位置と方向
 2. 3 最密充填構造および体心立方構造
 2. 4 代表的な結晶構造
 2. 5 結晶構造の移行する現象
- 第3章 固体内での不規則箇所
 3. 1 点欠陥
 フレンケル欠陥, ショットキー欠陥, F中心,
 非化学量論的な結晶, 固溶体

次

3. 2 線欠陥および面欠陥
- 第4章 固体の物性
 4. 1 物性からみた固体の分類
 4. 2 エネルギー準位およびエネルギー帯
 4. 3 電気的性質
 電子電導, 整流作用, 金属と半導体の接触, 電磁効果,
 MOS構造, イオン電導, 超電導
 4. 4 光学的性質
 放射線と固体との相互作用, 光の吸収, 発光,
 変色および写真現象
 4. 5 磁気的性質
 磁場と磁化率, 磁性体の種類, 反磁性と常磁性,
 フェロ磁性, 反強磁性, フェリ磁性
- 付表
索引

発行所／株)化学工業社 TEL 03-3405-9767 FAX 03-3405-9769