

# セラミックスの製造プロセスと 解析評価技術および最新動向・応用

SAMPLE

## 目次

<b>第1章 原料の合成・製造プロセス</b> .....	17
<b>第1節 セラミックス粉体製造プロセスの流れ</b> .....	17
(内藤牧男、近藤 光)	
1 原料粉体の製造方法 .....	17
2 セラミックス製造プロセスにおける原料粉体の構造制御 .....	18
2.1 セラミックスの製造プロセス .....	18
2.2 原料粉体中の粗大（凝集）粒子制御 .....	19
2.2.1 原料粉体中の微量粗大粒子がセラミックスの特性に及ぼす影響 .....	19
2.2.2 原料粉体中の微量粗大粒子の粉碎 .....	20
2.3 原料粉体のスラリー調製条件がセラミックスの特性に及ぼす影響 .....	22
<b>第2節 セラミックス原材料の製造法</b> .....	25
(鈴木義和)	
1 アルミナ原材料の製造法 .....	25
1.1 アルミナ資源 .....	25
1.2 アルミナとアルミニウムの工業的製法 .....	25
2 シリカ原材料の製造法 .....	26
2.1 シリカ資源 .....	26
2.2 シリカとシリコンの工業的製法 .....	26
3 ジルコニア原材料の製造法 .....	27
3.1 ジルコニア資源 .....	27
3.2 ジルコニアとジルコニウムの工業的製法 .....	27
4 チタニア原材料の製造法 .....	29
4.1 チタニア資源 .....	29
4.2 チタニアとチタンの工業的製法 .....	29
5 希土類酸化物原材料の製造法 .....	30
5.1 希土類資源 .....	30
5.2 希土類酸化物の工業的製法 .....	30
6 炭酸リチウム、水酸化リチウム原材料の製造法 .....	31
6.1 リチウム資源 .....	31
6.2 炭酸リチウム、水酸化リチウムの工業的製法 .....	31

第3節 セラミックスの形態制御合成 .....	33
	(長田 実)
はじめに .....	33
1 無機ナノシートの剥離合成 .....	34
2 無機ナノシートのボトムアップ合成 .....	35
3 ナノシート的高速・液相集積 .....	38
おわりに .....	40
第4節 セラミックス微粉末の処理 .....	45
	(目 義雄)
1 粉体、成形体、焼結体の評価と微粉末プロセスの重要性 .....	45
2 微粉末の処理から見た溶液中の分散・制御とコロイドプロセス .....	46
2.1 分散・凝集制御 .....	46
2.2 凝集粒子の処理法 .....	47
2.3 多成分系のコロイドプロセス .....	48
3 粉末処理の具体例と構造制御および高機能セラミックスの創製 .....	49
3.1 元素添加と超塑性 .....	49
3.2 ヘテロ凝集を利用した規則多孔体の作製 .....	51
3.3 CNT (カーボンナノチューブ) 分散アルミナの作製 .....	51
3.4 超音波照射による貴金属ナノ粒子の析出と複合粒子の作製 .....	52
おわりに .....	53
第2章 成形工程 .....	55
第1節 ファインセラミックス高機能化に向けた成形プロセス .....	55
	(永田公一)
1 緒言 (三大材料の成形プロセスとの関わり) .....	55
2 ファインセラミックスの成形法 (概要、長所、課題、製品) .....	56
2.1 鋳込み成形 .....	56
2.2 テープ成形 .....	58
2.3 押し出し成形 .....	58
2.4 射出成形 .....	59
2.5 プレス成形 (a: 金型プレス、b: 静水圧プレス成形、c: 粉末圧延) .....	59
2.6 その他成形法 .....	60

3	サスペンションの3要素、分散の基礎事項	62
3.1	酸塩基概念	62
3.2	レオロジー	63
3.3	溶解度パラメータ	63
3.4	立体安定化理論	64
4	グリーンシート（テープ成形）における高分子の役割 ……セラミック IC-PKG、サブストレート	64
5	さいごに——プロセスの開発で心掛けてきたこと、感じたことを述べる	65
第2節 セラミックス材料の微構造制御成形プロセスと実例		69
		(鈴木 達)
	はじめに	69
1	サスペンション調製	69
1.1	粒子分散	69
1.2	微粒子表面の電荷制御と複合化	70
2	種々の成形手法と外場を用いた成形	71
2.1	鋳込み成形（スリップキャスト）	71
2.2	テープ成形（ドクターブレード）法	72
2.3	押し出し成形法、射出成形	73
2.4	金型成形（一軸成形）、冷間静水圧成形（CIP）	73
2.5	電気泳動堆積（EPD）法	74
2.6	磁場中成形	74
3	成形により微構造を制御したセラミックスの創製事例	76
3.1	超塑性セラミックスの創製	76
3.1.1	アルミナ基セラミックス	76
3.1.2	ジルコニア基セラミックス	77
3.2	透光性セラミックスの創製	78
3.2.1	酸化アルミニウム（Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ）	78
3.2.2	アルミナ（サファイア）	79
3.2.3	窒化アルミニウム（AlN）	79
3.3	その他の機能性セラミックスの創製	80
3.3.1	細孔制御 B <sub>4</sub> C	80
3.3.2	イオン伝導体	81
	まとめ	82

### 第3節 湿式成形プロセスにおける

#### セラミックスの粗大欠陥と制御 ..... 85

(田中 諭)

はじめに .....	85
1 薄片での透過観察による欠陥検出 .....	86
2 湿式成形プロセス .....	87
3 湿式成形プロセスにおける粗大欠陥 .....	87
3.1 凝集体や粗大粒子の影響 .....	87
3.2 気泡の影響 .....	88
3.3 スラリー境界での欠陥 (ウェルドライン) .....	89
3.4 配向の影響 .....	90
3.5 スラリーの分散・凝集の影響 .....	90
3.6 その他 .....	91
さいごに .....	92

### 第4節 セラミックグリーンシート成形技術 ..... 95

(栗原光一郎)

1 はじめに .....	95
1.1 セラミック多層基板・積層部品 .....	95
1.2 LTCC積層部品の構造 .....	95
1.3 LTCC積層部品の製造方法 .....	96
2 積層部品に適したシート成形技術 .....	98
2.1 積層部品に適したシート .....	98
2.2 シートの空隙率 .....	99
2.3 分散工程の適正化 .....	100
おわりに .....	101

## 第3章 焼結・焼成工程 ..... 103

### 第1節 焼結・焼成工程 (セラミックスの固相/液相焼結方法) ... 103

(大熊 学)

1 固相焼結 .....	103
1.1 焼結の基礎 .....	103
1.2 3つの焼結段階 .....	103

1.2.1 初期段階 (Initial stage) .....	104
1.2.2 中期段階 (Intermediate stage) .....	105
1.2.3 終期段階 (Final stage) .....	105
1.3 巨視的な焼結の連続体力学 .....	106
2 液相焼結 .....	107
3 結言 .....	110

## 第2節 セラミックスの大気/真空/加圧焼結方法 .....

(南口 誠、郭 妍伶、小柏悠太郎)

はじめに .....	113
1 大気焼結 .....	114
1.1 加熱方法 .....	114
1.2 断熱材 .....	116
2 真空・雰囲気焼結 .....	116
2.1 加熱方法 .....	116
2.2 断熱材 .....	116
2.3 雰囲気制御 .....	117
3 大気炉の自作 .....	118
4 加圧焼結 .....	119
4.1 ホットプレス .....	119
4.2 パルス通電焼結 .....	119

## 第3節 ミリ波照射による セラミックスの低温・迅速焼結と拡散促進 .....

(岸本 昭)

はじめに .....	123
1 常圧での難焼結材料のミリ波焼結による複雑形状部材の緻密化 .....	124
1.1 緒言 .....	124
1.2 実験操作 .....	124
1.3 実験結果 .....	125
1.4 結言 .....	126
2 ミリ波加熱による相互拡散の促進 .....	126
2.1 緒言 .....	126
2.2 実験手順 .....	127
2.3 結果 .....	128

2.4 結言 .....	128
3 ミリ波照射下での添加物に依存した選択的クリープ促進 .....	130
3.1 緒言 .....	130
3.2 実験と結果 .....	130
おわりに .....	132

## 第4節 焼結変形過程の解析 .....

(品川一成)

1 コンピュータ援用設計の概要 .....	135
2 焼結工程における現象と解析の有用性 .....	135
3 解析の道具と特徴 .....	136
4 粉末成形体の材料特性とそのモデル化 .....	137
5 構成式 .....	138
5.1 弾性構成式 .....	139
5.2 粘性構成式 .....	140
5.3 焼結応力と焼結構成式 .....	141
5.4 材料パラメータの関数形の例 .....	142
6 材料パラメータの計測法 .....	145
7 構成式の解析への適用 .....	146
7.1 有限要素法 .....	146
7.2 定式化 .....	148
7.3 計算機システムの概要 .....	149
8 解析例 .....	150

## 第4章 加工工程 .....

### 第1節 ファインセラミックスの研削加工 .....

(海野邦昭)

1 セラミックス研削の段取り .....	153
1.1 研削盤の選択 .....	153
1.2 研削砥石の選択 .....	153
1.3 ホイールのバランス調整 .....	154
1.4 ツルーイング・ドレッシング .....	154
1.5 工作物の取り付け .....	155

2	ファインセラミックスの研削特性 .....	155
2.1	セラミックスの機械的特性と研削性能 .....	155
2.2	研削表面におけるき裂の発生 .....	156
2.3	延性モード研削と脆性モード研削 .....	157
2.4	セラミックスの定切り込み研削特性 .....	159
2.5	セラミックス研削時の表面粗さとチップング .....	160
2.6	ファインセラミックスの機械的特性と目立て間寿命 .....	160
3	ファインセラミックスの研削技術の進展 .....	161
3.1	ファインセラミックスの高エネルギー研削 .....	161
3.2	ファインセラミックスの超精密研削 .....	162
3.3	ファインセラミックスの超音波研削 .....	162
<b>第2節 セラミックスの三次元造形技術 .....</b>		<b>165</b>
		(法貴哲夫)
	はじめに .....	165
1	三次元造形技術の歴史 .....	165
2	三次元造形の各種方法 .....	166
2.1	バインダージェット法 (binder jetting) .....	166
2.2	指向性エネルギー堆積法 (溶融堆積法、directed energy deposition) .....	166
2.3	フィラメント溶解法 (material extrusion) .....	166
2.4	押出積層法 (material extrusion) .....	169
2.5	マテリアルジェット法 (material jetting) .....	169
2.6	粉末床溶融結合法 (powder bed fusion) .....	170
2.7	シート積層法 (sheet lamination) .....	170
2.8	光造形 規制液面法 (vat photopolymerization) .....	170
2.9	光造形 自由液面法 (vat photopolymerization) .....	171
3	セラミックス光造形の具体例 .....	172
3.1	造形データの作成 .....	172
3.2	セラミックス造形材料 .....	173
3.3	光硬化性樹脂 .....	173
3.3.1	光ラジカル重合系樹脂 .....	174
3.3.2	光カチオン重合系樹脂 .....	174
3.3.3	酸素阻害 .....	175
3.3.4	重合収縮 .....	176
3.4	光造形用セラミックススラリー .....	177
3.5	光造形装置 .....	178

3.5.1	レーザ走査方式	178
3.5.2	DMD投影方式	178
3.5.3	DMD走査露光方式	179
3.6	洗浄	180
3.7	脱脂・焼結処理	181
3.8	低収縮焼結造形事例	182
4	セラミックス三次元造形品事例	183
5	セラミックス三次元光造形品の評価	185
6	セラミックス三次元造形の展開	187

## 第5章 セラミックスの解析・評価技術 ..... 191

### 第1節 回折法を用いた結晶構造解析 ..... 191 (岡 研吾)

1	回折法概要	191
2	粉末X線回折	192
3	粉末X線回折で得られる情報	193
3.1	回折ピークの現れる角度	194
3.2	回折ピークの強度	195
3.3	回折ピークの形	195
4	粉末X線回折を用いた相同定	196
4.1	粉末X線回折パターンに一致する結晶相がデータベースにない場合	197
4.2	回折パターンに複数の相が含まれる場合	198
5	粉末X線回折パターンの定量	199
	おわりに	200

### 第2節 セラミックスの破壊強度および疲労寿命評価 ..... 201 (松田伸也)

	はじめに	201
1	破壊機構と強度特性	201
2	強度信頼性	203
2.1	ワイブル分布	203
2.2	強度に及ぼす寸法および応力場の影響	204
2.2.1	3点曲げおよび4点曲げ強度	204

2.2.2 有効体積による強度評価 .....	204
3 疲労機構と寿命評価 .....	207
3.1 時間依存型と繰り返し依存型の疲労破壊機構 .....	207
3.2 き裂進展則と寿命評価 .....	207
3.3 静疲労に対する信頼性設計 .....	209
おわりに .....	210

### 第3節 セラミックスの高温変形・超塑性変形 .....

(吉田英弘)

はじめに .....	213
1 高温クリープ変形の概要 .....	213
1.1 高温クリープ変形的主要な機構 .....	214
1.1.1 結晶粒内の変形 .....	215
1.1.2 粒界が関与する変形 .....	215
1.1.3 粒界に液相が存在するセラミックスの高温変形機構 .....	219
1.2 セラミックスの超塑性 .....	219
1.3 高温クリープ速度と応力の関係 .....	221
2 各種高温クリープ試験法 .....	222
2.1 一軸圧縮試験 .....	223
2.2 一軸引っ張り試験 .....	223
2.3 曲げ試験 .....	223
2.4 セラミックスの高温クリープ試験の留意点 .....	224
3 最近のトピックス：高温通電下クリープ試験 .....	224
結言 .....	226

## 第6章 セラミックス分野の潮流・トレンド .....

### 第1節 電子材料（MLCC、LTCCなど）用途のトレンド .....

(山本 孝)

はじめに .....	231
1 固相法 .....	232
2 蒸気水よる促進固相反応法（Water vapor-assisted solid-state reaction） .....	235
3 Water Assisted Solid State Reaction（WASSR）法による低温合成法 .....	236
4 Cold sintering .....	239



第5節 セラミックスのためのインフォマティクス .....	283
(藤本憲次郎)	
はじめに .....	283
1 ハイスループット化の根幹にあるもの .....	284
2 セラミックスのハイスループット材料合成および評価ツール事例 .....	285
2.1 液体分注法および静電噴霧堆積法による高速ライブラリー作製 .....	285
2.2 ハイスループット高圧実験法の導入 .....	285
2.3 ハイスループット構造評価ツール .....	286
2.4 ハイスループット物性評価ツール .....	286
3 セラミックスにおけるインフォマティクス研究の精度向上に向けた挑戦 .....	287
4 セラミックスにおけるインフォマティクスの国内取り組み事例 .....	288
さいごに .....	289

SAMPLE

セラミックスの製造プロセスと解析評価技術および最新動向・応用

SAMPLE

## 第1章 原料の合成・製造プロセス

### 第1節 セラミックス粉体製造プロセスの流れ

大阪大学  
内藤 牧男

東洋炭素株式会社  
近藤 光

#### 1 原料粉体の製造方法

セラミックスを製造する最も一般的な方法は、原料粉体から成形体を作製し、焼成するプロセスから構成される。原料粉体の製造方法には、図1に示すように、固体を微細化して粉体を作製する方法（ブレイクダウン法）と、原子、分子を積み上げて固体粒子を生成する方法（ビルドアップ法）の2つのアプローチがある。

ブレイクダウン法では、固体に機械的作用を加えて微細化する粉碎法が一般的に利用される。粉碎法には、固体を乾いた状態、すなわち気相中で微細化する乾式粉碎と、液中で微細化する湿式粉碎がある。また粉碎法では、大きな固体を一段の粉碎操作で $\mu\text{m}$ オーダーまでに微細化することは極めて困難なので、通常は粗粉碎、中粉碎、微粉碎、超微粉碎というように、目的とする粉体の粒子径が徐々に小さくなるように、数段階の操作によって粉碎するのが効率的である。

一方ビルドアップ法においては、気相中で粒子を生成する気相法と液中で粒子を合成する液相法の2つの方法がある。前者には、物理的な方法（PVD）と化学的な方法（CVD）がある。また後者には、図1に示すように多様な手法が提案されている。

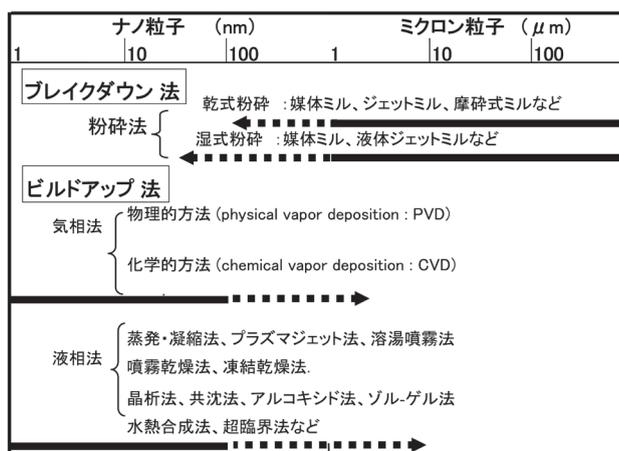


図1 粉体製造方法の2つのアプローチ

## 第1章 原料の合成・製造プロセス

ビルドアップ法で粒子を合成するには、原子、分子単位から集積していく必要があるため、ナノ粒子サイズでの合成を得意とする。この方法は、一般的にはサブミクロン以上の粒子を量産するには適していない。一方、ブレイクダウン法では、 $\mu\text{m}$ オーダーのサイズの粒子まで粉碎することは比較的容易であるが、 $1\ \mu\text{m}$ 以下のサイズまで固体を機械的に微細化することは、極めて困難である。従って、従来は $0.1\ \mu\text{m}\sim 1\ \mu\text{m}$ の範囲での粒子を効率的に得ることは極めて困難とされ、この領域を「サブミクロンの谷間」と呼ぶこともあった。しかし近年では、ビルドアップ法の技術の向上に加えて、粉碎法でも、特に液中での湿式微粉碎技術を向上させることによって、微細な粒子にも効果的に機械的作用を加えることができるようになったことから、粉体の製造方法におけるこの谷間は、克服されてきた。

また、特にビルドアップ法で合成される粉体は、合成された時点で、凝集体構造の二次粒子を形成していることが多いので、粉碎法を利用して一次粒子に近い状態まで、機械的に凝集体を分散させることが必要になる。粉碎法を利用した凝集体の分散方法を「解砕」というが、解砕を活用してビルドアップ法で作製された粒子の有効活用ができる。

## 2 セラミックス製造プロセスにおける原料粉体の構造制御

### 2.1 セラミックスの製造プロセス

原料粉体からセラミックスを作製するまでの製造プロセスを図2に示す。図は、原料粉体から造粒体を調製し、これを加圧成形後、焼成するというプロセスであり、最も一般的なセラミックスの作製方法といえる。

セラミックスは、粉体が集積した成形体を高温で焼成して作製するため、粉体の焼

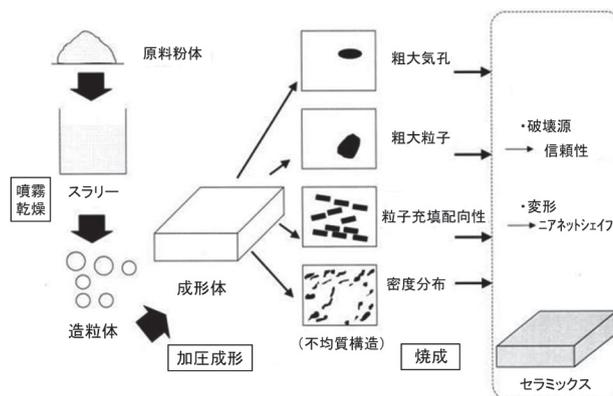


図2 セラミックスの製造プロセスの一例

結性向上の観点から、粒子径の小さい原料粉体が必要とされる。しかし、付着、凝集性の強い微細な原料粉体を直接加圧することによって、均質な成形体を作製することは困難である。この問題を解決するために、粉体を液中に分散したスラリーを調製し、それを噴霧乾燥造粒（スプレードライヤー）によって液滴化、乾燥して造粒体にする。造粒体にすると見掛けの粒子径が増大し、粉体の流動性は向上することから、均質に加圧成形することが可能になる。

成形体を焼成後のセラミックスは高い機械的強度を有するが、その内部に粗大気孔や粗大粒子などの不均質構造が存在すると、それらが破壊の起点（破壊源）となる。その結果、強度が低下するため、セラミックスの信頼性が低下する。これらの不均質構造の原因の大半は、焼成前の成形体中の粗大気孔や粗大粒子によるものであるため、成形体段階でこれらを制御することが望ましい。

一方、図に見るように原料粒子の形状異方性による成形体中の粒子充填配向性や、成形体内部に密度分布などの不均質構造が発生すると、焼結体の割れやひずみなどの原因となる。そこで目的とする形状の最終製品を得るためには、焼結体の加工が必要となる。この加工費を低減し、歩留まりを向上させて製造コストの低減を図る観点からは、焼成後に目的とするサイズに近い焼結体を作ることが必要である。そのためには、成形体中の不均質構造をあらかじめ十分に制御することが不可欠である。

以上より、セラミックスの信頼性向上と製造コストの低減という基本的な課題の解決には、成形体中の粉体の不均質構造制御が重要な役割を果たすことがわかる。そして、成形体の構造制御を実現するためには、成形体の前駆体となる造粒体の特性制御、造粒体の特性に影響するスラリーの特性制御、そしてその原料となる粉体の特性制御が不可欠であるといえる。

以下では、原料粉体中に存在する微量粗大粒子と原料粉体のスラリー調製条件の2つに着目し、これらが成形体中の不均質構造の形成と、セラミックスの強度特性に及ぼす影響について具体的に説明する。これらの事例を通じて、原料粉体制御の重要性を指摘する。

## 2.2 原料粉体中の粗大(凝集)粒子制御

### 2.2.1 原料粉体中の微量粗大粒子がセラミックスの特性に及ぼす影響

原料粉体中に微量の粗大粒子が存在すると、それが成形体中の粗大粒子の存在に大きく影響する。そこで、まず粗大粒子の微量混入がセラミックスの信頼性にどの程度影響するのか、モデル的な実験結果を紹介する。

まず、アルミナセラミックス原料粉体中の粗大粒子をふるいによって分離した後に、それを表1に示す3つの粗大粒子範囲に分けて、モデル粗大粒子を作製する。次に、それぞれの粗大粒子0.01~0.1mass%を、分離後の原料粉体に添加して3種類のスラリー

表1 粗大粒子を微量添加した3種類のアルミナ粉体スラリーから鑄込み成形によって作製された成形体、ならびに焼結体の密度測定結果<sup>1)</sup>

スラリー No.	粗大粒子サイズ/ $\mu\text{m}$	密度/ $10^3\text{kgm}^{-3}$	
		成形体	焼結体
1	38~45	2.31	3.95
2	53~63	2.32	3.95
3	75~90	2.31	3.96

を調製する。そして、スラリーの鑄込み成形によって3種類の成形体を作製し、その後焼成してアルミナ焼結体を作製した。表には、作製された成形体と焼結体の密度も示すが、これらの値は粗大粒子の添加率が微量であれば、粗大粒子サイズが異なってもほとんど影響を受けないことがわかる。

一方、図3は、得られた3種類の焼結体の強度と破壊靱性値を示したものである。図より粗大粒子の添加がごく微量の場合、焼結体の破壊靱性値には影響しないものの、その曲げ強度分布には大きく影響することがわかる。具体的には粗大粒子のサイズが大きいほど、曲げ強度は明らかに低下する。

図4aは、焼結体の強度を測定後、その破断面を観察した結果である。明らかに、粗大粒子が破壊源である様子が観察できる。またbは、赤外顕微鏡によって焼結体の内部構造の観察をした結果である。写真中の黒いドットが粗大粒子を表している。原料粉体として添加した粗大粒子は多孔質構造をしていたため、焼成によってもほとんど粒成長していない状態で焼結体中に存在し、これが破壊源になったことが理解できる。

## 2.2.2 原料粉体中の微量粗大粒子の粉碎

以上より、原料粉体中の微量粗大粒子が、セラミックスの信頼性に大きく影響することがわかった。そこで高品質のセラミックスを作製するための原料粉体においては、粗大粒子の精密な管理が必要となる。通常、原料粉体からスラリーを調製する場合には、最終的にふるいを用いて粗大粒子を除去することによって、その精密な制御が可能である。しかし、粗大粒子を制御するには、ふるいによる分離だけでなく、前もって粗大粒子を効率的に粉碎しておくことも大事である。

例えば図5aは、窒化ケイ素粉体を液中ボールミルにて粉碎した場合に、平均粒子径に及ぼす媒体ボール径と粉碎時間の影響を見たものである。ここで平均粒子径には、レーザ回折散乱法によって測定した累積50%径を用いている。図より、媒体ボール径にかかわらず、平均粒子径は粉碎時間とともに同様に減少することがわかる。一方bは、45  $\mu\text{m}$ 以上の粗大粒子含有率に及ぼす粉碎条件の影響を見たものである。ここで興味深いのは、媒体ボール径が大きいほど、短時間で粗大粒子を効果的に粉碎できること

著者一覧

● <sup>ないとう まきお</sup>内藤 牧男 (1章1節)

大阪大学  
名誉教授

● <sup>こんどう あきら</sup>近藤 光

東洋炭素株式会社 研究開拓室  
主事

● <sup>すずき よしかず</sup>鈴木 義和 (1章2節)

筑波大学 数理物質系物質工学域  
准教授

● <sup>おさだ みのる</sup>長田 実 (1章3節)

名古屋大学 未来材料・システム研究所  
教授

● <sup>さっか よしお</sup>目 義雄 (1章4節)

国立研究開発法人物質・材料研究機構  
NIMS 特別研究員

● <sup>ながた こういち</sup>永田 公一 (2章1節)

ファインセラミックスコンサルタント  
(元・京セラ株式会社)  
理学博士

● <sup>すずき とおる</sup>鈴木 達 (2章2節)

国立研究開発法人物質・材料研究機構  
電子・光機能材料研究センター 高機  
能光学セラミックスグループ  
グループリーダー

● <sup>たなか さとし</sup>田中 諭 (2章3節)

長岡技術科学大学  
教授

● <sup>くりはら こういちろう</sup>栗原 光一郎 (2章4節)

栗原光技術士事務所株式会社  
代表取締役

● <sup>おおくま がく</sup>大熊 学 (3章1節)

国立研究開発法人物質・材料研究機構  
構造材料研究センター セラミックス基  
複合材料グループ  
主任研究員

● <sup>なんこう まこと</sup>南口 誠 (3章2節)

長岡技術科学大学 機械系  
教授

● <sup>くお いえんりん</sup>郭 妍伶

長岡技術科学大学 機械系  
助教

● <sup>おがしわ ゆうたろう</sup>小柏 悠太郎

東京都立産業技術高等専門学校 もの  
づくり工学科機械システム工学コース  
助教

● <sup>きしもと あきら</sup>岸本 昭 (3章3節)

岡山大学 学術研究院環境生命自然科  
学学域  
教授

● <sup>しながわ かずなり</sup>品川 一成 (3章4節)

九州大学 大学院工学研究院機械工学  
部門  
教授

- うんの海野 くにあき邦昭 (4章1節)  
基盤加工技術研究所  
代表
- ほうき法貴 てつお哲夫 (4章2節)  
株式会社エスケーフライン  
技術顧問
- おか岡 けんご研吾 (5章1節)  
近畿大学 理工学部応用化学科  
准教授
- まつた松田 しんや伸也 (5章2節)  
香川大学 創造工学部創造工学科 材料  
物質科学領域  
准教授
- よしだ吉田 ひでひろ英弘 (5章3節)  
東京大学 大学院工学系研究科 マテリ  
アル工学専攻  
教授
- やまもと山本 たかし孝 (6章1節)  
防衛大学校  
名誉教授
- かごみや籠宮 いさお功 (6章2節)  
名古屋工業大学 大学院工学研究科  
教授
- ふじしろ藤代 ふみと史 (6章3節)  
高知大学 理工学部  
准教授
- いわもと岩本 ゆうじ雄二 (6章4節)  
名古屋工業大学 大学院工学研究科 工  
学専攻生命・応用化学系プログラム  
教授
- ふじもと藤本 けんじろう憲次郎 (6章5節)  
東京理科大学 創域理工学部先端化学科  
教授