

# 焼結の基礎—理論的背景から実際まで—

## I. さまざまな焼結手法

吉 田 英 弘\*

### 1.1 はじめに

焼結とは、金属やセラミック原料粉末の成形体を、主に熱エネルギーによって緻密化せしめ、相対密度および微細組織が制御された多結晶体製品を製造するプロセスである。熱エネルギーが粉末成形体に印加されると、一般的に粉末粒子間の空隙は減少(緻密化)し粒径は増加(粒成長)する。焼結の熱力学的な駆動力は、この緻密化および粒成長に伴う全界面エネルギーの減少であることについては広く受け入れられている。焼結をプロセスとして利用するためには、粉末粒子間の空隙が収縮していわゆる開気孔から閉気孔へと変遷していく過程を適切にモデル化し、緻密化挙動を記述する速度式に基づいて現象を理解することが肝要である。

本講義ノートでは、主にセラミックスを対象とした焼結について、理論的な背景から実際の焼結事例まで、最近のトピックスも交えながら概説する。今回は現在知られているさまざまな焼結手法とその原理について概観し、これらの焼結緻密化の速度論がどのように定式化されるのか、固相焼結緻密化モデルの理論的取り扱いについて次回(第2回)に述べる。また様々な緻密化メカニズムが提唱される中で、実際の焼結過程に対する定量評価と焼結モデルの適用例(焼結メカニズムマップなど)を第3回に、焼結における組織形成過程と材料特性の発現の実例や、最近新たな焼結手法として国際的に注目されている電磁場の働きを利用した焼結技術について第4回(最終回)に紹介したい。

### 1.2 各種焼結手法

多結晶材料において所定の材料特性を発揮するためには、

微細組織の高度な制御が必須であり、それを実現するためには高度な製造プロセスが不可欠である。焼結によって得られる材料製品も例外ではなく、原料粉末の性状だけでなく粉末成形体の密度・微細構造の制御が図られ、さらに粉末成形体を効率的に緻密化するためのさまざまな焼結技術が開発されてきた。主な焼結手法を図1.1に分類して示す。教科書的には、焼結手法は常圧(無加圧)焼結と加圧焼結の二つに大別される。これらに加えて近年、電磁場の働きを利用した焼結手法(電磁場支援焼結とした)の研究開発が進んでおり、後述の如く一部工業的にも実用化が始まっている。このため本稿では、主な焼結手法の一つとして電磁場支援焼結を分類に加えた。以下、各焼結法の原理と特徴について述べていく。

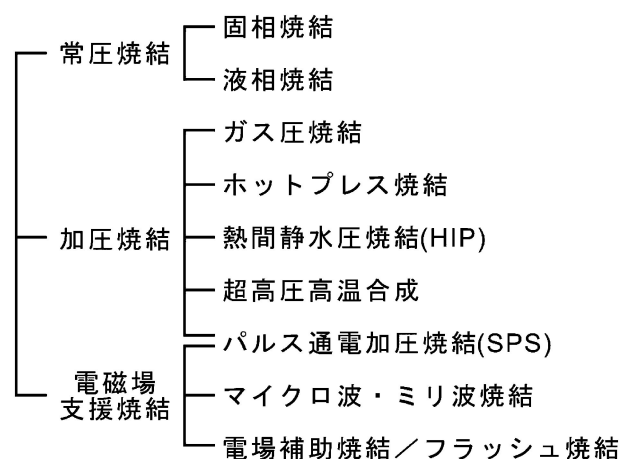


図1.1 主な焼結手法の分類。

\* 東京大学大学院工学系研究科マテリアル工学専攻; 教授(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)  
 Fundamentals of Sintering: —Theory and Practice —I. Various Sintering Methods; Hidehiro Yoshida (School of Engineering, Department of Materials Science, The University of Tokyo, Tokyo)  
 Keywords: sintering, powder, ceramics, high temperature, diffusion, densification, polycrystal, grain boundary  
 2018年5月31日受理[doi:10.2320/materia.58.570]

## 1・2・1 常圧焼結

### (1) 固相焼結・液相焼結

雰囲気を大気もしくは不活性ガスとして、大気圧下で焼結する手法が常圧焼結または無加圧焼結 (pressureless sintering) である。酸素分圧制御下で焼結することもしばしば行われている。常圧焼結も大まかには、添加物により高温で液相を生成させて緻密化を促す液相焼結と、液相生成を介さずに固相間での物質移動により緻密化を図る固相焼結とに分けられる。多くの焼結では、脱脂工程 (原料粉末の成形において加えられた有機物の除去) も含め、室温から炉内温度を単調増加させて焼結温度まで昇温する。プロセスとしては最も単純だが、焼結体の微細組織や機能は一般的に昇温・降温プロセスや雰囲気に大きく依存しており、高度な制御が要求される。

常圧焼結による組織微細化の手法として、二段階焼結法 (two step sintering) が知られている。この方法では、一旦通常の焼結温度まで試料を昇温させたのち直ちに降温し、より低い焼結温度で長時間保持する<sup>(1)</sup>。この温度制御により、通常焼結で得られるよりもより微細な結晶粒からなる微細組織を得ることが可能である。図1.2は粒子径30 nmの高純度

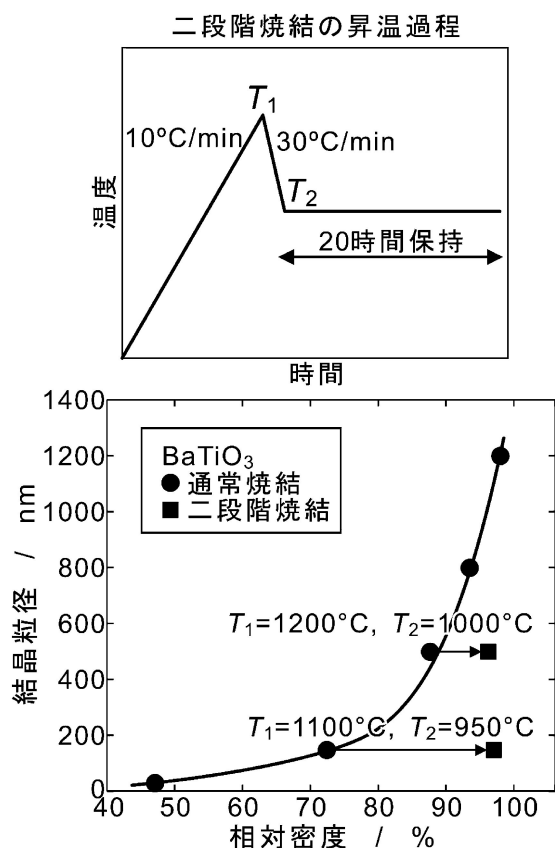


図1.2 初期粒径30 nmのBaTiO<sub>3</sub>における通常焼結と二段階焼結での相対密度と粒径の関係 (データ一部省略) (wan06)。二段階焼結では、第一段階温度 ( $T_1$ ) に到達後、ただちに第二段階温度 ( $T_2$ ) に降温し、20 h 保持している。

BaTiO<sub>3</sub>を原料粉末として、単一の焼結温度で焼結した場合と二段階焼結した場合とで、焼結体の相対密度と結晶粒径との関係を示している<sup>(2)</sup>。通常焼結では、試料の相対密度の上昇 (緻密化の進行) と共に結晶粒径も粗大化する。これに対して二段階焼結では、第二段階の温度 ( $T_2$ : 低温) での保持 (20時間) の間に相対密度が96%以上にまで緻密化が進む一方、第一段階の温度 ( $T_1$ : 高温) 到達時点での粒径はほぼそのまま維持される。すなわち二段階焼結で得られた焼結体の方が、より微細な結晶粒で高い相対密度が得られていることが分かる。

### (2) 反応焼結

常圧焼結の中でも、複数種の原料を用い、高温での化学反応により材料の反応生成と焼結緻密化を同一プロセス内で行うのが反応焼結 (reactive sintering) である。例えばYAG (Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>) の焼結では、原料粉末としてY<sub>2</sub>O<sub>3</sub>とAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を用い、焼結過程でYAGを反応生成させながら緻密化させることで透明多結晶体を得ることが可能である<sup>(3)</sup>。またSi微粉末成形体を窒素雰囲気中で加熱・化学反応させて窒化ケイ素 (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) 焼結体を製造する手法としても知られており<sup>(4)</sup>、この手法で作製されたSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>セラミックスはRBSN (reaction-bonded silicon nitride) とも呼ばれる。

## 1・2・2 加圧焼結

### (1) ガス圧焼結

Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>セラミックスなどにおいて、雰囲気ガスを加圧し焼結を促進する目的で用いられる手法である。例えば、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>粉末は1気圧、約1800°Cで分解し始めるが、この分解を防ぐため、成形体を50~120気圧 (5~12 MPa) のN<sub>2</sub>雰囲気下で1800~2000°Cの温度で焼結する。緻密なSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>を常圧焼結法で製造する場合、通常なら数~10 mass%の焼結助剤を必要とする一方、ガス圧焼結法では焼結助剤を低減できるため、優れた特性の窒化ケイ素焼結体を得られる<sup>(5)</sup>。

### (2) ホットプレス焼結

高温で成形体に一軸圧力をかけながら焼結することで焼結性を向上させる手法をホットプレス (hot pressing または hot-press sintering) と呼ぶ。装置構成の模式図を図1.3に示す。グラファイト製ダイスに原料粉末を充填し、パンチで10~40 MPaの一軸圧縮応力を加えながら焼結温度まで昇温する。殆どの場合、発熱体にグラファイトやタングステンを用い、真空または不活性ガス等の雰囲気下での超高温焼結が行われるため、特に非酸化物の焼結緻密化に有効なプロセスである。例えば炭化ケイ素 (SiC) であれば2000~2200°C、窒化ケイ素 (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) であれば1700~1800°Cといった条件で焼結が行われる。

### (3) 熱間静水圧焼結 (HIP)

熱間等方圧加圧焼結 (hot isostatic pressing, HIP) は、アルゴンなどのガスを圧力媒体として100~200 MPa程度の圧力を等方的に加えながら昇温 (~2000°Cまで) する焼結方法である。装置構成の模式図を図1.4に示す。上述のガス圧焼結よりもさらに圧力を高くしたものと解釈できる。ホットプ

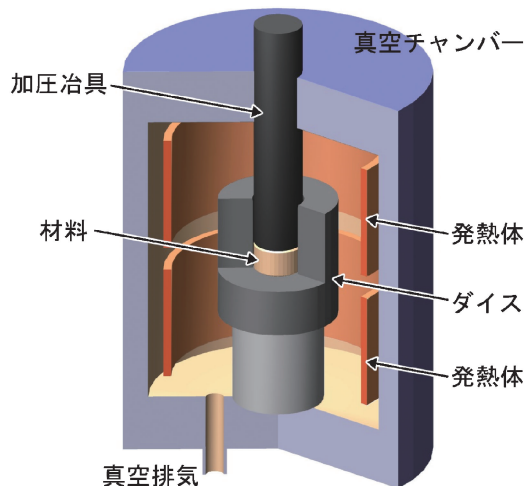


図1.3 ホットプレス装置の構成。真空チャンバー内でダイスに充填された原料粉末を一軸加圧しながら昇温する。(オンラインカラー)

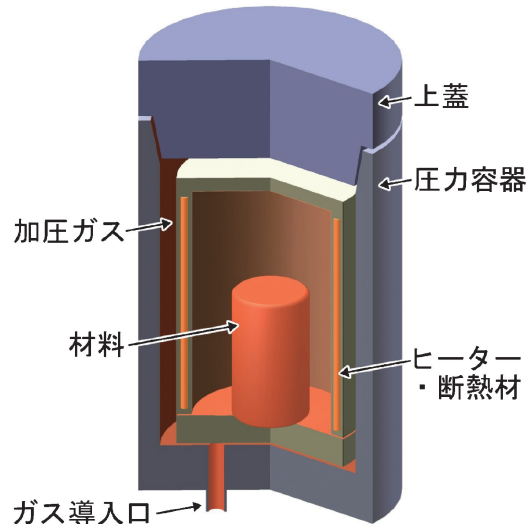


図1.4 HIP装置の構成。アルゴンなどのガスを圧力媒体として100~200 MPa程度の圧力を等方的に加えながら昇温し、焼結を行う。(オンラインカラー)

プレスに比べて形状の自由度が高く、また大型製品の製造も比較的制約が少ないという利点がある。原料粉末を容器に密封し、脱気後にHIP焼結する方法もあるが、多くの場合は他の手法で得られた予備焼結体(開気孔の無い状態にまで焼結した物)をさらに緻密化する目的で用いられる。例えば、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ などの酸化物セラミックスを一旦常圧焼結で相対密度96%程度まで焼結させた後、さらにHIPを施すことにより残留した閉気孔を消滅させ、透明多結晶体(焼結により光の散乱源となる残留空隙をほぼ100%除去した多結晶体)を得ることができる<sup>(6)</sup>。同様の手法で $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ や $\text{Y}_2\text{O}_3$ 、立方晶ジルコニア( $\text{ZrO}_2$ )の透明多結晶体の製造例が報告されている。また2.4 GPaの曲げ強度を達成した正方晶ジルコニア(tetragonal  $\text{ZrO}_2$  polycrystal; TZP)とアルミナの複合材(TZP-10 mass% $\text{Al}_2\text{O}_3$ )もHIPで製造されており<sup>(7)</sup>、焼結体内の残留空隙を極限まで除去することが強度向上の一要因と考えられる。このように、HIPは残留空隙の無い緻密体を得る上で極めて有効な手法である。

#### (4) 超高压高温合成

加圧焼結のうち、加える圧力を極限まで高めたものが超高压高温合成である。材料のサイズが極めて限られる等の傾向はあるものの、超高压・高温下でのみ実現するユニークな構造・物性を得ることができるという大きな利点がある。高压発生装置としてはピストン・シリンダー型装置(高压セル: 実現する圧力は1~数GPa(数十万気圧)), マルチアンビル装置(キュービックアンビル等, 等方的な加圧が可能: 数GPa~10GPa), ダイヤモンドアンビル装置(10GPa以上)などが知られている。いずれの場合も圧力媒体に材料を封入し、加圧と同時に通常500~2000°C程度の高温を発生させる。例えば、4~5 GPa程度の圧力により製造された立方晶窒化ホウ素(cBN)焼結体は、難削材切削工具などに用いられている<sup>(8)</sup>。高压・高温安定での安定構造・相構造をいかにして常圧・常温に戻したときに維持(凍結)できるかが一つの技

術的ポイントである。

### 1・2・3 電磁場支援焼結

#### (1) パルス通電加圧焼結

パルス通電加圧焼結(spark plasma sintering, SPSまたはpulse electric current sintering, PECS)は、グラファイト製のダイスおよび上下パンチ内に原料粉末を充填し、真空チャンバー内で一軸加圧しながら直流パルス通電を行うことで、材料を直接加熱する焼結手法である。装置構成の模式図を図1.5に示す。装置構造はホットプレスと共通する部分が多いが、炉内全体を加熱するホットプレスと異なり、SPSでは通電によってダイス・パンチおよび試料のみを加熱することから熱容量が小さく、それゆえ高速加熱・高速冷却(通常50~100°C/min)が可能となっている。加圧焼結と電磁場支援焼結の両方の特徴を取り入れていた技術とも言える。

SPSを用いることで、難焼結性で他の手法では緻密化が進まない材料の焼結が可能になる等、通電による焼結性向上効果が1990年代ごろから広く認識されるようになり、研究開発が急速に進められた<sup>(9)(10)</sup>。当初は、緻密化の素過程として原料の粒子-粒子間に放電プラズマが発生し、これがSPSを使用した場合のセラミックスの焼結性向上に寄与しているとされてきたが、最近ではプラズマの発生は疑問視されている<sup>(11)</sup>。以前から、製造できる材料のサイズが制限されることが問題点として指摘されていたが、最近では実用化に向けた装置開発が進められ、既に $\phi 300$  mmの大型 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 焼結緻密体の製造が可能になっているほか、国内ではバインダーレスWC系超硬材料をはじめとした実用材料がパルス通電加圧焼結により製造されている<sup>(12)</sup>。

#### (2) マイクロ波・ミリ波焼結

マイクロ波・ミリ波の電力を誘電体に吸収させ、誘電体内

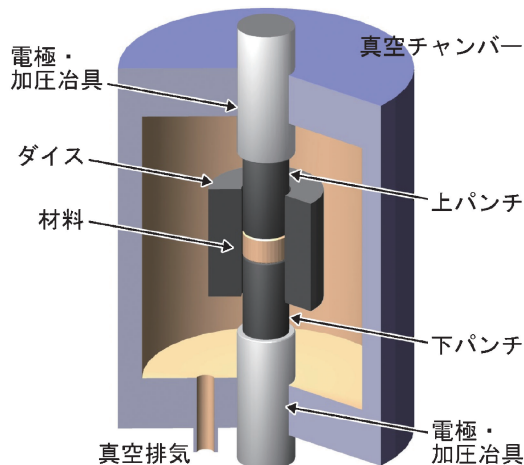


図1.5 パルス通電加圧焼結装置の模式図。電極兼加圧治具を通じてパンチ・ダイスと原料粉末に直流パルス電流を流し、加圧しながら通電加熱を行う。(オンラインカラー)

部より自己発熱させ焼結せしめる方法である。材料のみを自己発熱させるため、熱伝導や輻射による従来の炉加熱方式に比べて急速加熱が可能であり、しかも熱効率が高く短時間で加熱処理が行える<sup>(13)–(15)</sup>。入力電磁波としては周波数が2.45 GHz(波長125 mm)の電磁波がよく用いられる。マイクロ波・ミリ波と誘電体との相互作用を記述する上では、誘電体に吸収されるエネルギー $P$ と電磁場の侵入深さ $D$ の二つのパラメータが重要とされる<sup>(15)</sup>。 $P$ は単位体積当たりの吸収エネルギー( $\text{W}/\text{m}^3$ )として表すと

$$P = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon_r \tan \delta |E|^2$$

ここで $f$ は周波数、 $\epsilon_0$ は真空の誘電率、 $\epsilon_r$ は比誘電率、 $\tan \delta$ は誘電正接、 $E$ は電界強度である。また、 $D$ は電力が材料表面の50%になる深さ(m)で定義され、

$$D = \frac{3.31 \times 10^7}{f \sqrt{\epsilon_r \tan \delta}}$$

とされる。 $\epsilon_r \tan \delta$ は誘電損率であり、温度、周波数等に依存する。一般にセラミックスの誘電損率は常温では小さいが、温度の上昇につれて急激に増加するため、マイクロ波・ミリ波で加熱する場合、一旦加熱が始まればエネルギーの吸収効率は高くなり、より小さな入力電力で効率的に加熱できることになる。

図1.6に、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ の大気中常圧焼結とマイクロ波焼結(2.45 GHz)での焼結温度と焼結体の相対密度との比較を示す<sup>(16)</sup>。マイクロ波焼結における断熱材及びサセプタの配置もあわせて示す。アルミナ製容器内部の炭化ケイ素粉末は低温域のサセプタとして使われている(室温近傍で $\text{Al}_2\text{O}_3$ のマイクロ波吸収効率が低い)。  $\text{Al}_2\text{O}_3$ が相対密度95%に到達するためには、通常焼結なら1600°Cの焼結温度が必要である一方、マイクロ波焼結では1400°C以下にまで焼結温度を低減でき、マイクロ波焼結を採用することで焼結プロセスの省エネ化に大きく貢献することが分かる。この他、透明多結晶体の製造も試みられており、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ や酸化アルミニウム

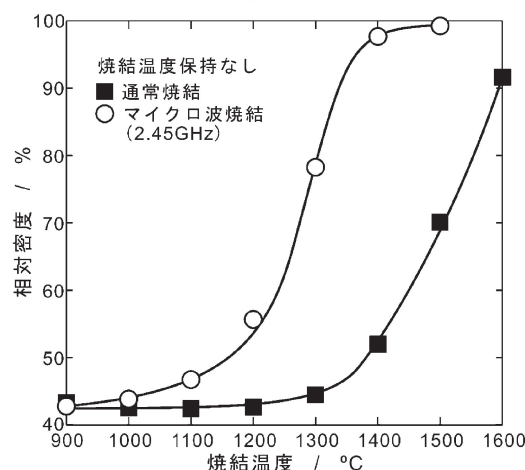
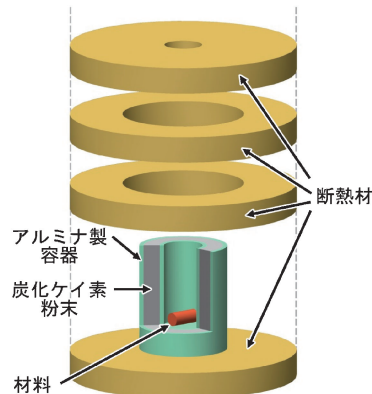


図1.6  $\text{Al}_2\text{O}_3$ におけるマイクロ波焼結の結果と、このとき用いられた試料、断熱材及びサセプタの配置の模式図<sup>(16)</sup>。大気中常圧焼結とマイクロ波焼結(2.45 GHz)での焼結温度と焼結体の相対密度を比較する。昇温速度は常圧焼結で10°C/min、マイクロ波焼結で45~60°C/minである。(オンラインカラー)

( $\text{AlON}$ )、スピネル( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ )、窒化アルミニウム( $\text{AlN}$ )において透明多結晶体の報告がある<sup>(17)</sup>。ただし誘電損失の温度依存性が大きい材料の場合、マイクロ波加熱中に局部過熱が生じ易いため、焼結体組織の不均一性や寸法の制限といった問題をいかに解決するかが実用化に向けた技術的ポイントとなる。

### (3) 電場支援焼結(FAST)/フラッシュ焼結

粉末成形体へ直接通電しながら周囲を昇温することで、通常の常圧焼結よりも低い温度で焼結緻密化が完了する電場支援焼結(electric field-assisted sintering technique; FAST)が近年、学術分野で注目されている。装置構成の一例を図1.7に示す。図では、通常の管状炉内で粉末成形体にPt線を介して電界を印加し、炉内温度を上昇させる。3 mol%  $\text{Y}_2\text{O}_3$ 安定化正方晶 $\text{ZrO}_2$ (3Y-TZP)においては、通常常圧焼結で1400°Cで数時間の焼結により緻密体が得られる一方、20 V/cmの直流電界下におかれた粉末成型体を炉内で昇温した場合、焼結温度を1300°Cに低減できる<sup>(18)</sup>。このとき材料に大電流は流れておらず、ジュール加熱の効果はむしろ限られて

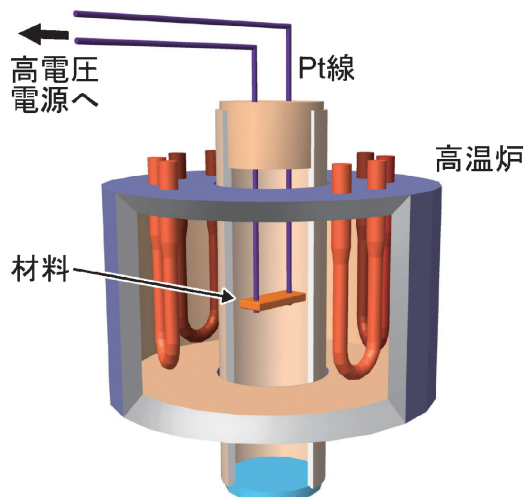


図1.7 電場支援焼結/フラッシュ焼結の装置構成の一例. この例では, 通常の管状炉内に粉末成形体を Pt 線で吊りし, Pt 線を通して成形体に直接電界を印加しながら炉を昇温する. (オンラインカラー)

おり, この焼結促進効果の起源は必ずしも明らかになっていない.

また同様の装置構成で, 粉末成形体に印加する電界強度をより高くすると, 臨界温度において急激に緻密化が開始し, ごく短時間のうちに完了してしまうという特異な現象が2010年に報告された<sup>(19)</sup>. この焼結手法はフラッシュ焼結 (flash sintering) と呼ばれている. 3Y-TZP であれば, 120 V/cm の直流電界下におかれた粉末成形体は, 炉内温度 850°C という低温で, 且つ僅か 5 秒で緻密化が完了してしまう. こうした低温・短時間での焼結は発表当初から高い関心を集め, 酸化物を中心にさまざまなセラミックスでフラッシュ焼結が起こることが明らかとなっている. 電場支援焼結およびフラッシュ焼結については第 4 回で詳しく述べる.

### 1・3 粉末混合・分散調整および成形

焼結に際し, 反応焼結の利用や第二相の分散, 焼結助剤の添加のため, 複数種の原料粉末を均一に混合し, 組成を調整する. そして原料粉末ができるだけ均一且つ高密度に充填された成形体を作製する必要がある. これら粉末調整および成形体の作製は, 焼結において相対密度の向上や高度な組織制御を実現する上では不可欠な工程であり, また焼結体の結晶配向性等のコントロールにおいて重要な役割を果たす. この節では, 粉末の混合・分散と成形について簡単に述べる.

#### 1・3・1 粉末混合・分散

複数の原料粉末を均一に混合させるには, 粒子の分散性向上が鍵であり, このため原料粉末を一旦溶媒中に分散し, 溶媒中で粒子間相互作用を制御した状態から混合・固化させる湿式プロセスがよく用いられる. 近年では原料製造技術の進

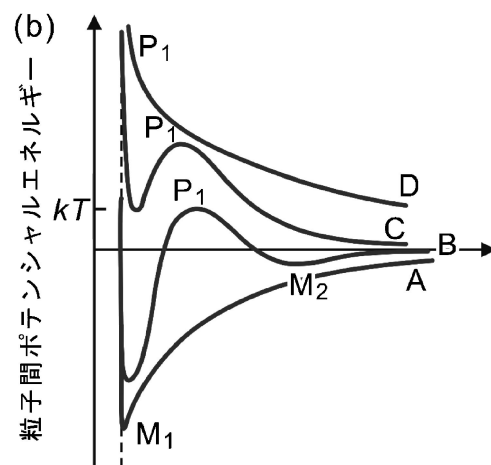
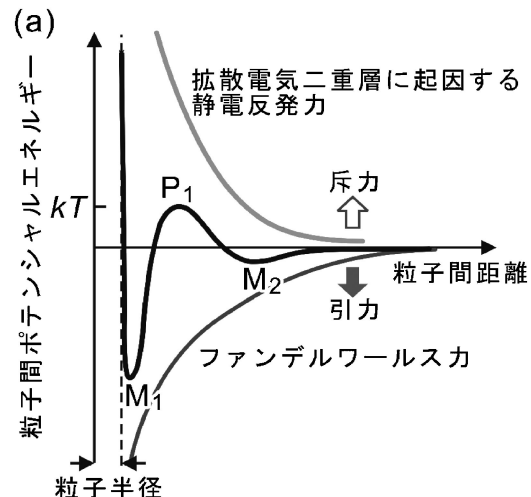


図1.8 (a) 代表的な二粒子間相互作用ポテンシャルエネルギー. (b) 斥力の変化によってあらわれる特徴的な二粒子間ポテンシャルエネルギー曲線<sup>(20)</sup>.

歩に伴い原料粉末の微細化(ナノ化)が進んでおり, 原料粉末における粒子の分散・凝集の解砕工程は重要度を増している.

二粒子間に働くポテンシャルエネルギーを模式的に図1.8 (a)に示す<sup>(20)</sup>. 一般に, 溶媒中に存在する粒子間には主にファンデルワールス力 (van der Waals attraction) と, 粒子の周囲に形成される拡散電気二重層に起因する静電反発力 (double layer repulsion) とが作用し<sup>(20)-(22)</sup>, これら引力 (ファンデルワールス力) と斥力 (静電反発力) の和が実際に粒子間に働くポテンシャルとなる. 十分距離の離れた二つの粒子が互いに近づく場合, ポテンシャル障壁 ( $P_1$ ) が十分高い場合には粒子同士はある一定距離より接近できず, 溶媒中の粒子の分散性は良好となる. 逆に  $P_1$  が低い場合, 熱振動 (熱エネルギー  $kT$ ) により障壁を越えた粒子同士は容易に凝集する ( $M_1$ ).  $P_1$  を大きくするためには, 斥力を高めるべく粒子表面の帯電を十分に高い値にすれば良い (粒子表面の電位の指標として, しばしばゼータ電位が用いられる). 図1.8(b)に四つの特徴的な粒子間ポテンシャル曲線を示す<sup>(20)</sup>. 曲線 A は斥力が殆ど作用していない例で, 粒子が容易に凝集してしまう.

曲線 B は A に比べて斥力は高く  $P_1$  が現れるが,  $P_1$  の高さが  $kT$  に対してまだ十分高くないため, 凝集してしまう恐れがある. 曲線 C は  $kT$  に対して  $P_1$  が十分高く, また曲線 D では斥力が顕著であり粒子は安定的に分散すると期待できる. ただし D では溶媒中の粒子濃度が低くなってしまいう可能性がある.

### 1.3.2 粉末成形

原料粉末を所定の形状に成形する手法を分類するとおおよそ次のようになる<sup>(23)</sup>.

#### (1) 乾式成形

機械プレス, 冷間静水圧 (CIP) 成形など, 原料粉末を金型中で一軸加圧またはゴム容器に封入して静水圧で加圧する.

#### (2) 塑性成形

射出成型, 押出成型など, 原料粉末と(熱)可塑性有機物との均一混合体を金型に加圧して押込み, または高压で一定断面形状の間隙から押出すことで求める形状に加工する.

#### (3) 湿式成形

原料粉末とバインダーおよび溶媒からなる低粘度の泥漿 (スラリー) から固化成形する手法. フィルム状のキャリアとブレードとの隙間から流出させシート状の成形体を得るテープキャスト, 石膏型等の吸水性の鋳型中や多孔質の鋳型に流し込み粉末堆積層を形成させる鋳込み成形, 遠心力により粒子を堆積させる遠心成形, 電界を加え帯電した粒子を移動させて電極上へ堆積させる電気泳動堆積 (electrophoretic deposition (EPD)), 強磁場 ( $> 10$  T) 中で結晶配向させながら堆積させる磁場配向などが知られる.

#### (4) 三次元成形

インクジェット法 (スラリーをノズルから発射し三次元構造物として印刷する), 押出材法 (ノズルから押し出した粉末調合物を積層・接着する) 等により三次元成形体を得る.

上述のような粉末成形工程での構造制御は, 焼結後に得られる多結晶の熱伝導性や強度・靱性の向上に寄与する. 粉末の混合・調整および成形技術は, 優れた焼結体の製造の上では焼結技術とは切り離せない重要なプロセスとなっている.

## 文 献

- (1) I.-W. Chen and X.-H. Wang: Nature, **404**(2000), 168-171.
- (2) X.-H. Wang, X.-Y. Deng, H.-L. Bai, H. Zhou, W.-G. Qu, L.-T. Li and I.-W. Chen: J. Am. Ceram. Soc., **89**(2006), 438-443.
- (3) A. Ikesue, I. Furusato and K. Kamata: J. Am. Ceram. Soc., **78**(1995), 225-228.
- (4) S. Y. Kee: J. Am. Ceram. Soc., **81**(1998), 1262-1268.
- (5) 三友 護: 圧力技術, **30**(1992), 78-83.
- (6) A. Krell, P. Blank, H. Ma, T. Hutzler, M.P.B. van Bruggen and R. Apetz: J. Am. Ceram. Soc., **86**(2003), 12-18.
- (7) K. Tsukuma, K. Ueda and M. Shimada: J. Am. Ceram. Soc., **68**(1985), C4-C-5.
- (8) 谷口 尚: 高压力の科学と技術, **21**(2011), 292-299.
- (9) S. Grasso, Y. Sakka and G. Maissa: Sci. Tech. Adv. Mater., **10**(2009), 053001.
- (10) 鶴田正雄: 材料の科学と工学, **53**(2016), 2-5.
- (11) D. M. Hulbert, A. Anders, J. Andersson, E.J. Lavernia and A.K. Mukherjee: Scripta Mater., **60**(2009), 835-838.
- (12) M. Tokita: Am. Ceram. Soc. Bull., **85**(2006), 32-34.
- (13) W. H. Sutton: MRS Bulletin, **18**(1993), 22-29.
- (14) 三宅正司: まてりあ, **45**(2006), 585-588.
- (15) M. Oghbaei and O. Mirzaee: J. Alloys Compounds, **494**(2010), 175-189.
- (16) K. H. Brosnan, G. L. Messing and D. K. Agrawal: J. Am. Ceram. Soc., **86**(2003), 1307-1312.
- (17) J. Cheng, D. Agrawal, Y. Zhang and R. Roy: Mater. Lett., **56**(2002), 587-592.
- (18) S. Ghosh, A. H. Chokshi, P. Lee and R. Raj: J. Am. Ceram. Soc., **92**(2009), 1856-1859.
- (19) M. Cologna, B. Rashkova and R. Raj: J. Am. Ceram. Soc., **93**(2010), 3556-3559.
- (20) M. N. Rahaman: Ceramic Processing and Sintering, CRC Press, (2003), 206-208.
- (21) 細川益男監修, ナノパティクルテクノロジーハンドブック編集委員会編: ナノパティクルテクノロジーハンドブック, 日刊工業新聞社, (2006), 233.
- (22) 鈴木 達, 打越哲郎, 目 義雄: まてりあ, **48**(2009), 321-326.
- (23) 植松敬三: セラミックス, **40**(2005), 686-702.

## 参 考 書

- (1) 守吉佑介, 笹本 忠, 植松敬三, 伊熊泰郎, 門間英毅, 池上隆康, 丸山俊夫: セラミックスの焼結, 内田老鶴圃, (1995).
- (2) R. M. German: Sintering Theory and Practice, John Wiley & Sons, NY, (1996).
- (3) S.-J. L. Kang: Sintering, Elsevier, MA, (2005).



吉田英弘

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★  
1997年 東京大学大学院工学系研究科修士課程修了  
2001年 博士号取得(論文博士(工学), 東京大学)  
1999年~2004年 東京大学大学院新領域創成科学研究科・助手  
2004年~2019年 物質・材料研究機構・研究員  
2019年~現職  
専門分野: セラミック材料学  
◎構造・機能セラミックスの微細組織制御と特性向上に関する研究に従事.  
★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★