

強磁場を用いた反磁性セラミックスの 配向制御

鈴木 達* 打越哲郎** 目 義雄***

1. 緒 言

セラミックス材料における機械的特性や電気的特性などの各種特性改善, また信頼性向上が求められる中で, その微細組織は特性を支配する重要な因子の一つであることから, 金属材料と同様に結晶粒微細化, 粒子分散, 粒界制御等において巧緻な組織制御技術が期待されている. 気体や液体を除いた物質や材料においては, その特性が完全に等方的であることは稀であり, 性質が異方的であることを利用して有用な材料とする場合が多くある. 鉄鋼等金属材料における集合組織の創製, 長繊維やウィスカーによる一軸性強化の利用, 誘電体材料における分極異方性の利用, など様々な例を挙げることができる. これらの様に材料の配向を制御することは, その特性を改善させたり, 信頼性を向上させたりするのに非常に有効な方法である. 金属材料では加工・再結晶などの手法を用いて精緻な集合組織制御が可能であり, その技術も既に高度に発達しているが, これら集合組織制御手法を脆性材料であるセラミックスへ適用することは難しい.

従来, セラミックスの配向制御方法は, テープキャストなどで配向させた形状異方性粒子をシードとして粒成長させる⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾, ホットプレスやホットフォーミングする⁽⁵⁾⁽⁶⁾, 一軸押し出し成形する⁽⁷⁾等が行われている. これらの手法を用いることで高い配向性を得ることが可能であるが, 板状粒子などの形状異方性粒子の作製に制約され, また, 基本的にはせん断力等を用いるために形状が限定される. さらに, 形状に対する配向方位を任意に設定することが難しく, 部材形状に対する配向方位が限られてしまうのが現状である.

鉄などの強磁性体が外部磁場に影響を受ける物質であることは周知の事実であり, フェライトなどの強磁性体における

磁場による結晶配向制御は良く知られた方法である. それに対して, Al_2O_3 , AlN , TiO_2 などの反磁性体, 常磁性体では, その磁化率が極めて小さいことから磁場の作用を受けない物質(いわゆる非磁性物質)として扱われることが通常であり, 磁場による配向などの組織制御は出来ないとするのが常識的な考えであった. しかしながら, 近年の超伝導技術の発達と冷凍技術の著しい進歩により, 10 T を超える強磁場が比較的容易に得られるようになり, 従来は磁場作用が無視されていた物質などでもその影響が無視できないような現象が多々報告されるようになってきた⁽⁸⁾⁽⁹⁾. 更にその利用の簡便性から, いわゆる物性研究以外の材料プロセス分野においても磁場の利用が拡大しつつある⁽¹⁰⁾⁻⁽¹²⁾.

本稿では, セラミックスにおける磁場配向プロセスを概説し⁽¹³⁾⁻⁽¹⁵⁾, 筆者らの結果も含めた適用例を紹介する.

2. 磁場による配向プロセス

(1) 磁場配向の原理

磁気による粒子の回転には結晶磁気異方性に起因する磁気トルクを利用する. その結晶が, 正方晶, 六方晶, また層状構造のように非対称な構造であるならば, 結晶軸方向に依存した磁化率に異方性が存在し, その磁気異方性と磁場の相互作用により磁気トルクが発生し, 磁化エネルギーを安定にする方向へ粒子が回転する⁽¹⁶⁾. (図 1)

$$T = -\frac{\Delta\chi VB^2}{2\mu_0} \sin 2\theta \quad (1)$$

ここで, T は磁気トルク, $\Delta\chi$ は結晶軸方向に依存する磁化率の異方性, V は粒子の体積, B は磁束密度, μ_0 は真空の透磁率, θ は粒子の磁化容易軸と磁場印加方向とがなす角度である. しかしながら, 常磁性・反磁性体の磁化率は小さ

* 物質・材料研究機構ナノセラミックスセンター微粒子プロセスグループ; 主幹研究員(〒305-0047 つくば市千現 1-2-1)

** 物質・材料研究機構ナノセラミックスセンター微粒子プロセスグループ; 主席研究員

*** 物質・材料研究機構ナノセラミックスセンター微粒子プロセスグループ; センター長

Control of Texture in Diamagnetic Ceramics by Using a Strong Magnetic Field; Tohru S. Suzuki, Tetsuo Uchikoshi, Yoshio Sakka (Fine Particle Processing Group, Nano Ceramics Center, National Institute for Materials Science, Tsukuba)

Keywords: ceramics, strong magnetic field, texture, colloidal processing, slip casting, EPD; electrophoretic deposition

2009年2月18日受理

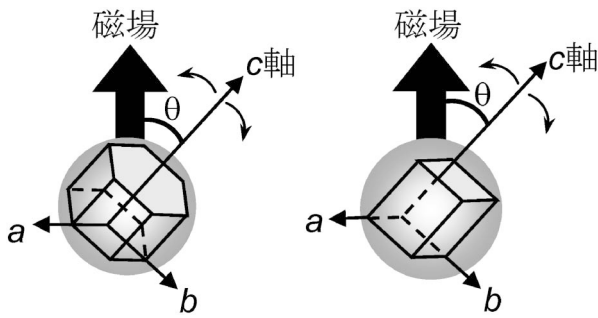


図1 非立方晶系粒子を磁場に置いた場合の、結晶磁気異方性と磁場による粒子の回転。

く、強磁場を用いたとしても磁気トルクは僅少となる。粒子間の相互作用が大きく粒子間引力が強くなり凝集している場合には、個々の粒子の回転が妨げられ、磁場の効果が十分に得られない。このため、個々の粒子が分散して、回転しやすい状況にあることが重要となる。

(2) コロイドプロセス(セラミックスの成形)

原料粉を一度溶媒中に分散し、溶媒中で粒子間相互作用を制御した状態から固化させることで成形体組織の微構造制御を行うセラミックスの湿式プロセス(=コロイドプロセス)は、粒子を分散させる手法として有効である⁽¹⁷⁾。しかし、微粒子を用いた場合には凝集しやすく、安定した微粒子分散系の設計には、粒子間相互作用を考慮してスラリーの調製を行うことが重要となる。一般に、溶媒中に存在する粒子間には、ファンデルワールス力 V_A (van der Waals attraction), 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 V_R (double layer repulsion), 重力, 浮力などの力が作用する。一般的な粒子間のポテンシャル曲線を図2に示す。溶媒中における粒子間の相互作用エネルギー V_T は引力と斥力の和 ($V_T = V_A + V_R$) で決定され、図のポテンシャル障壁 (V_{max}) 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、スラリー中における粒子の分散性は良好となる。逆に V_{max} が低い場合、熱振動により障壁を越えた粒子同士は容易に凝集する。一般的には、 V_{max} を大きくするためには V_R を大きくすればよく、そのためには粒子表面の帯電を大きくすればよいが、物質系によっては粒子表面のチャージ(実験的にはゼータ電位)を十分に高い値までに制御できないこともしばしばある。特にナノ粒子系では、pHの制御⁽¹⁸⁾だけで十分高いゼータ電位を得るのは難しいことが多く、多くの場合、解離性の官能基を持った高分子電解質をスラリーに適量添加して、側鎖による静電反発効果とポリマーチェーンによる立体反発効果を利用することが不可欠になってくる⁽¹⁹⁾。この様な指導原理を基にして微粒子の分散を良好にしたスラリーを用いることにより、小さな結晶磁気異方性から得られる磁気トルクでも粒子の回転が可能になる。

コロイドプロセスにおける固化成形には、テープ成形、遠心成形、電気泳動堆積(electrophoretic deposition (EPD))法などがあり、スリップキャストは最も広く用いられている成形方法のひとつである。図3のように、スリップキャストは

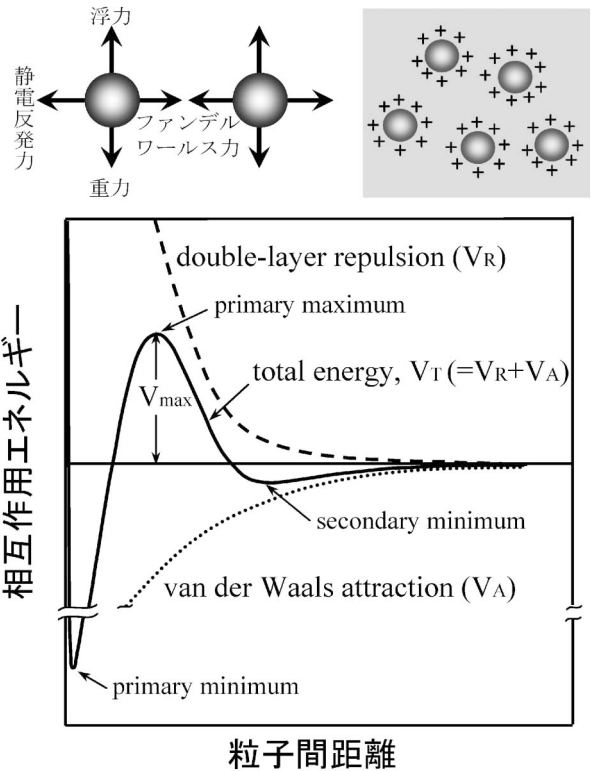


図2 粒子に作用する力と粒子間での相互作用エネルギー一図(DLVO理論)。

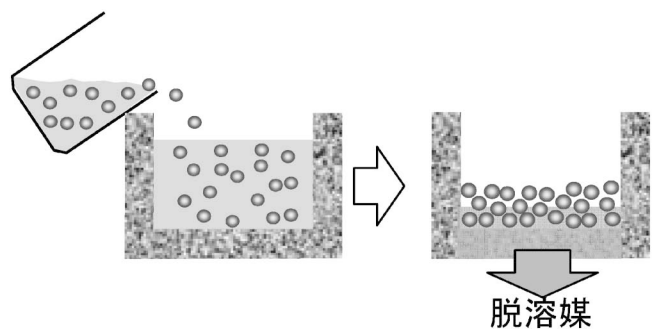


図3 スリップキャスト(鑄込み成形)法の模式図。

吸湿性のある多孔質型にスラリー(スリップ)を流し込み溶媒を取り除くことで着肉層を得る方法であり、鑄込み成形とも呼ばれるろ過プロセスである。このスリップキャスト等の固化成形を強磁場中で行うことにより、配向性セラミックスを作製することが可能となる。次節では、強磁場中スリップキャストにより作成した配向性セラミックスについて例を示す。

3. 磁場配向制御の適用

(1) 静磁場による配向制御

Al_2O_3 はコランダム構造をもつので、a, b 軸方向と c 軸方向とで磁化率が異なり結晶磁気異方性を示す⁽²⁰⁾。形状異方性がない球状の $\alpha-Al_2O_3$ 微粒子を分散したスラリーを調製して 12 T の磁場を印加しながらスリップキャストを行い、この成形体を大気中で磁場印加せずに焼結することで配向性

Al₂O₃ を作製することが可能である⁽²¹⁾。図4に磁場中成形後に1500℃で焼結した試料の磁場印加方向垂直面(VT)と平行面(VS)におけるEBSD測定結果を示す。磁場印加垂直面内で0001面が磁場印加方向平行面内にa, b面が集積していることが分かる。また、Al₂O₃結晶粒は若干板状に成長し、それら結晶粒が磁場印加方向に積み重なるように組織が発達している。Al₂O₃の場合には磁場中成形直後の配向体段階での配向性は低いながら、焼結時の粒成長により配向性が向上することを見出している⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾⁽²²⁾。さらに、この粒成長による配向発達は他の物質でも認められており⁽²³⁾⁽²⁴⁾、磁場成形だけでは高配向を得ることが難しい場合の配向促進手段となる。Guoらのグループでは、全く同様の手法で配向性を付与した透明Al₂O₃を作製し、ランダム材に比べて透明性が高くなることを報告している⁽²⁵⁾。

SiCはセラミックスの中でも難焼結材として緻密化が難しい材料の代表であり、通常の焼結では助剤を必要とする。この様に助剤等の添加物がある場合でも、スラリー中の粒子の分散が劣化しないことに注意すれば、磁場配向が可能となる。焼結助剤としてAl₂O₃微粒子を添加したα-SiC(6H結晶構造)微粒子を分散したスラリーを強磁場中で成形し、ホットプレスを用いて緻密化することでc軸配向SiCの作製が可能である⁽²⁶⁾。さらに、このプロセスでは磁場は成形中のみ印加すればよいので緻密化にはホットプレスや放電プラズマ焼結など種々の方法を採用することが出来る。図5には、磁場印加方向とc軸とのなす角をαとし、磁場印加方向からのc軸の傾きの分布を示す。この場合には、約76%の結晶粒がα<20°の中にあり、また、αが35°以上傾いている粒子は全体の1割程度しかなく、高い配向性が得られる。この配向性SiCは配向方位に依存した曲げ強度を持ち、

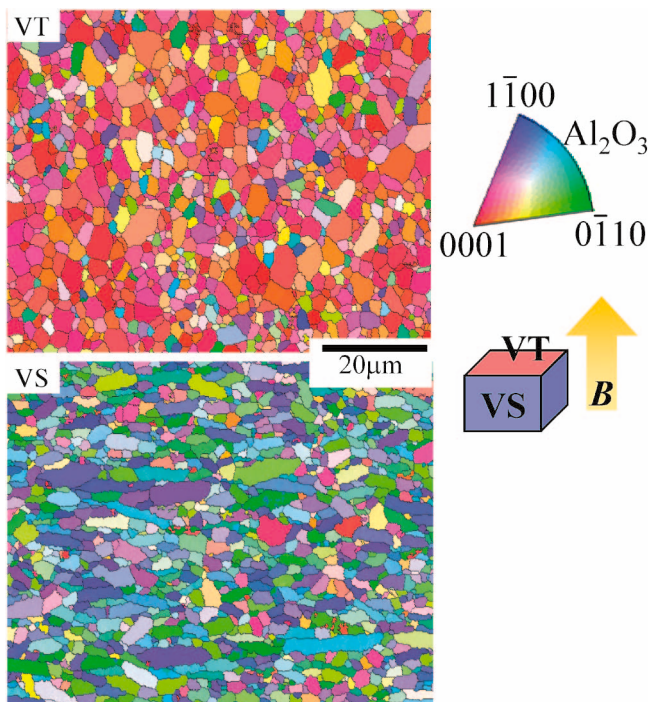


図4 磁場中成型後に1500℃で焼結したアルミナのEBSD解析。

Al₂O₃とY₂O₃を助剤にした場合には、1 GPa近い高い強度が得られている。

(2) 回転磁場による磁化困難軸の配向

静磁場を用いた場合には、結晶方位は磁化容易軸と磁場印加方向とが平行になるように配向することは前述に述べたと

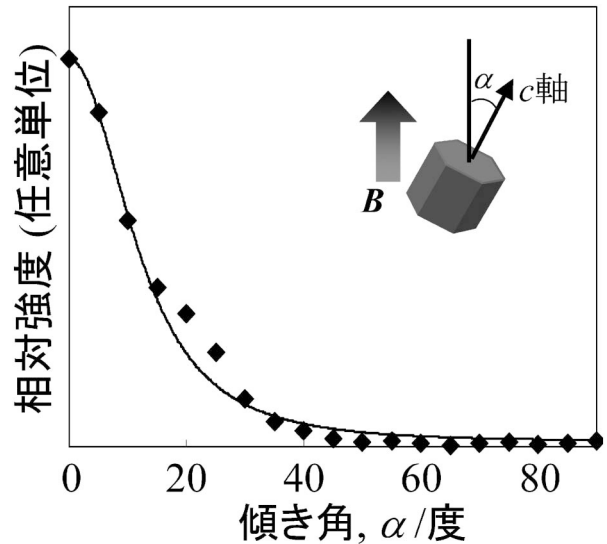


図5 磁場配向炭化ケイ素焼結体でのc軸と磁場方位との角度分布。

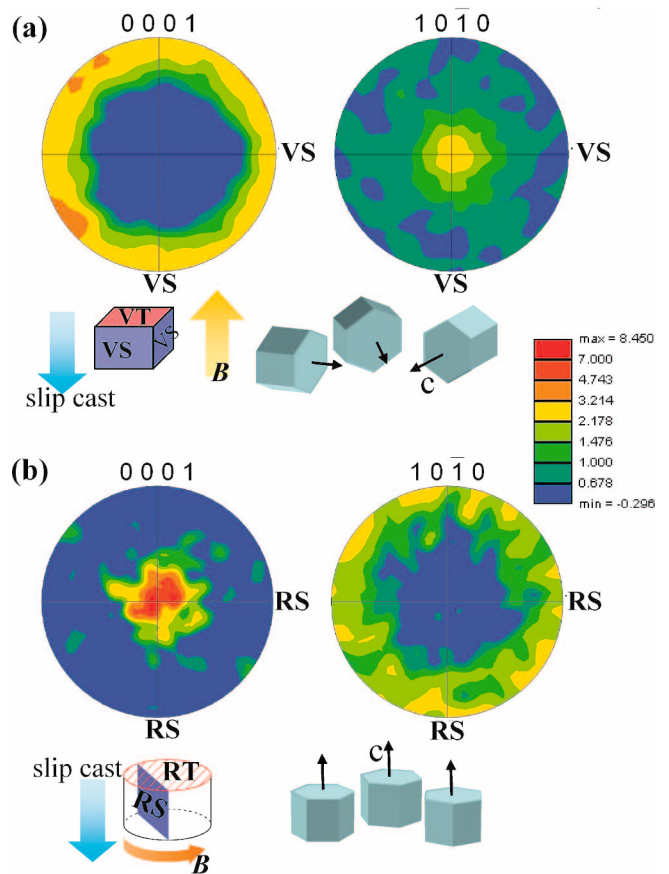


図6 静磁場(a)と回転磁場(b)を用いて配向制御したAlNの正極点図。

おりである。しかしながら、物質とその物性によっては、磁化困難軸を配向したいという要望も出てくる。この点に関しては、木村らにより提唱された回転磁場による磁化困難軸の配向制御⁽²⁷⁾がセラミックスの成形にも有効であることが実証されている。例えば、植松ら⁽²⁸⁾や浅井ら⁽²⁹⁾により ZnO やアパタイトにおいて磁化困難軸である c 軸の配向制御が報告され、セラミックスへの回転磁場の適用が可能であることが示されている。また、加賀らは回転磁場により c 軸配向した Al ドープ ZnO を作製し、熱電特性に対してその有用性を検討している⁽³⁰⁾⁽³¹⁾。

a, b 軸が磁化容易軸で、静磁場では a, b 軸配向となることを既に見出している AlN に対して⁽³²⁾、回転磁場による c 軸配向を試みた例を示す。球状である窒化アルミニウム粒子を分散したスラリーを磁場中にて回転しながらスリップキャストを行うことにより実効的に回転磁場を印加しながら固化成形した。図 6(a)には静磁場により作製した配向性 AlN の磁場印加垂直面 (VT 面) での 0001 および 10 $\bar{1}$ 0 正極点図を示す。このとき 0001 面は磁場印加方向と平行に集積し、a, b 面が垂直面に集積していることが確認できる。それに対して、回転磁場を用いた場合 (図 6(b)) には、磁場の回転面と平行に 0001 面が集積し、c 軸の一軸配向となっていることが確認できる。

(3) 変調磁場を用いた多軸配向制御

現在の磁場配向技術では、そのほとんどが一軸のみの配向制御に止まっているが、組織制御としては 3 軸配向へとその高度化が望まれる。この配向方位の多軸化の試みとして、磁場印加を順次 2 方向から行うことで CaBi₄Ti₄O₁₅ の 2 軸配向に成功している⁽³³⁾。さらに、堀井らは磁場の回転速度を所定の角度で変化させることにより磁場強度を制御する手法 (回転変調磁場)⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾を用いて、常温では常磁性セラミックスである Y₂Ba₄Cu₇O_y をエポキシ樹脂中で 3 軸配向させることに成功している⁽³⁶⁾。この様に、定速回転だけでなく磁場印加方法を更に工夫することによる多軸の配向制御も検討されて、成果を出しつつある。

(4) 誘電体での磁場配向

誘電体は自発分極が結晶軸方位により大きく異なるため、特性向上に対して配向の効果が高い材料である。近年の環境への配慮から非鉛系誘電体として期待される Bi 層状化合物においても TGG 法⁽³⁷⁾⁽³⁸⁾、反応性テンプレートを用いる RTGG 法⁽³⁹⁾⁽⁴⁰⁾や磁場⁽⁴¹⁾を使った配向制御が報告されている。Bi 層状化合物では一般に大きな自発分極が a, b 軸と平行な面にあるが、従来の TGG 法、RTGG 法では c 軸配向となるために積層素子を作製した場合には電極に対して a, b 軸を立てることが難しかった。そこで、CaBi₄Ti₄O₁₅ において磁場印加方向を電極の面内方向となるように成形し、電極との一体焼成で a, b 軸を内部電極に立てて分極方向を揃えた配向積層素子の作製を試みた例を示す。図 7 は積層配向試料断面の SEM 像である。板状の結晶粒が内部電極と垂直に配向した構造となっており、圧電定数を約 2 倍にする事に

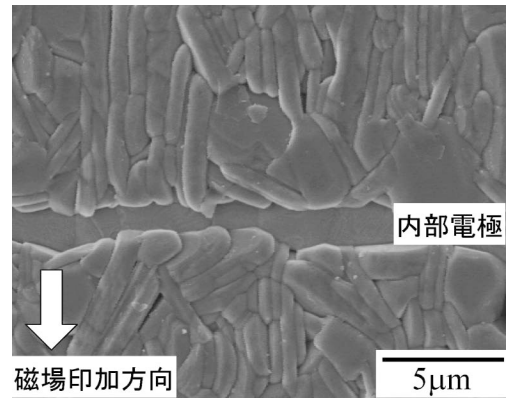


図 7 磁場中成形後に内部電極と一体焼成した積層配向 CaBi₄Ti₄O₁₅ の断面 SEM 像。

成功しており⁽⁴²⁾、磁場により任意の方向に配向が可能であるという特長が生かされた例である。他にも、タングステンブロンズ型結晶構造をもつ誘電体へ回転磁場を適用した例⁽⁴³⁾や異方性が小さくテンプレート粒子の作製が難しいペロプスカイト化合物である PbTiO₃ の磁場配向例も報告されている⁽⁴⁴⁾。

また、田中らは、Bi₄Ti₃O₁₂ と SrTiO₃ の混合粉末をスラリーとし磁場中にて成形し、Bi₄Ti₃O₁₂ 相が a, b 軸配向した成形体を作製し、その後の焼結過程において Bi₄Ti₃O₁₂ と SrTiO₃ とを反応させて a, b 軸配向 SrBi₄Ti₄O₁₅ を、また Bi₄Ti₃O₁₂ と BaTiO₃ の磁場中成形とその後の反応焼結から a, b 軸配向 BaBi₄Ti₄O₁₅ 作製している。この様に、磁場配向と反応焼結を組み合わせた作製法も提案されている⁽⁴⁵⁾。

4. 磁場中 EPD による配向積層体の創製

EPD 法は、セラミックス粒子のスラリーに電極を浸漬、電場を印加することにより、粒子を任意形状の電極基板上に直接堆積させる固化成形方法であり、近年では積層体や傾斜組成材料などの新規なセラミックスコンポジットの作製方法として注目されている⁽⁴⁶⁾⁽⁴⁷⁾。当グループでは、強磁場配向制御と EPD を組み合わせることによる新規な組織制御手法を提案している⁽⁴⁸⁾⁽⁴⁹⁾。溶媒中に分散した粒子の配向方位は磁場により固定されており、その状態で電場を重畳印加することで、粒子は磁場に対する配向方位を保ったまま電極基板方向へ泳動、堆積する。このことにより方位制御された層を積み上げることが可能となる。その際に、磁場と電場 (基板) のなす角度 (ϕ_{B-E}) を任意に設定することにより、基板に対してある特定の配向方向を選ぶことが出来る (図 8)。また、一定時間毎に ϕ_{B-E} を変化させることで、結晶配向の方位が異なる層を積層することが可能となり、様々な微構造をデザインすることができる。また、成分が異なるスラリーを用意することにより、各層毎に成分と結晶方位を制御した複合体の作製も可能となると期待される。

図 9 には、強磁場中 EPD により作製した配向積層 Al₂O₃ の微細組織を EBSD 解析した結果を示す⁽⁵⁰⁾。 $\phi_{B-E} = 0^\circ$ と $\phi_{B-E} = 90^\circ$ を交互に繰り返して積層させた後に 1600°C で焼結

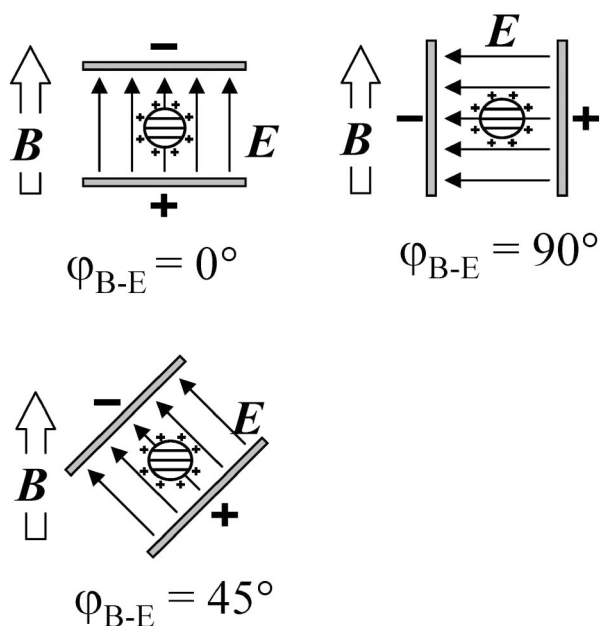


図8 磁場中 EPD 中での電極基板に対する配向方位の模式図.

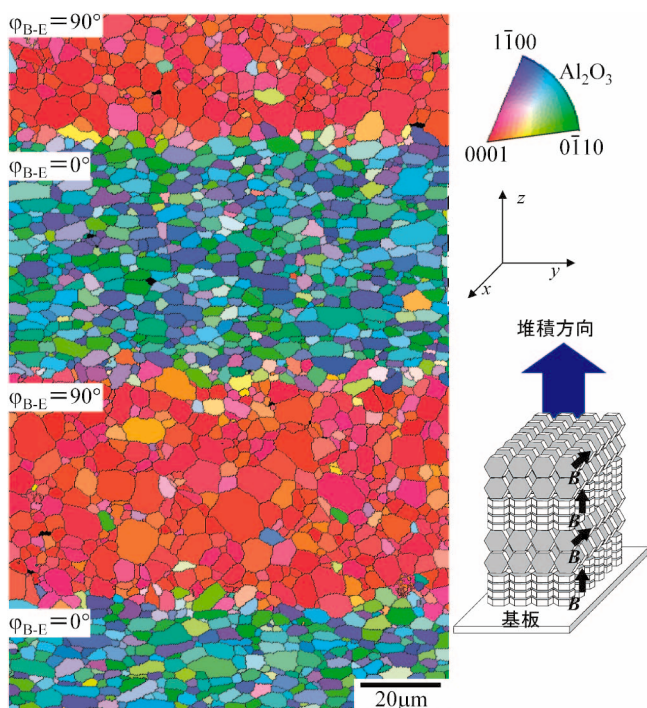


図9 磁場中 EPD で作製した配向積層アルミナの EBSD 解析.

した Al_2O_3 の例であり、赤が濃い粒子は Al_2O_3 の 0001 面が紙面内に揃っていることを表しており、また、青と緑の結晶粒は a, b 面が紙面内に揃っていることを示している. 図 4 の 1500°C 焼結体に比べて粒成長が進み、配向性が促進されている. $\phi_{B-E} = 0^\circ$ の層で板状の Al_2O_3 結晶粒が基板に横たわるように堆積しており、c 面は見られない. 逆に $\phi_{B-E} = 90^\circ$ の層では板状結晶粒が基板に立って並ぶように堆積しており、c 面が面内に揃っていることが確認できる. このことより、

積層させた場合でも結晶配向制御を行うことができ、 ϕ_{B-E} を設定することで基板に対して任意の方向に結晶を向けることが可能であることが実証された. この様にして作製した配向積層 Al_2O_3 では、亀裂をジグザグに進展させたり、軸に依存した熱膨張差に起因する残留応力を制御することで亀裂進展を制御したりする可能性が示唆されている⁽⁵¹⁾.

この磁場中 EPD の機能性材料への応用として、野口らにより強誘電体への適用が試みられている⁽⁵²⁾. $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ - $\text{BaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ ビスマス交代層構造強誘電体を磁場中 EPD により積層することにより、ランダム材と比較して 3 倍以上の残留分極値と大きな電気機械結合係数を得ることに成功している. さらに、Co 系層状酸化物の p 型熱電材料 ($(\text{Ca}_2\text{Co}_{3-\delta})_{0.62}\text{CoO}_2$) を磁場中 EPD で配向積層させ、絶縁体である Al_2O_3 と n 型酸化熱電材料を多層に堆積させることで酸化熱電素子を作製可能であることが、堀井らにより実証されている⁽⁵³⁾⁽⁵⁴⁾. 現在のところ最大出力密度はまだ十分とは言えないが、配向化による熱電特性への有効性が見出され、さらに磁場中 EPD 法が酸化熱電素子の小型化や集積化に有効であることが示されている. 将来、より特性の高い素子の作製が期待される.

5. ま と め

コロイドプロセスを用いたセラミックスの固化成形時に強磁場を印加することで反磁性セラミックスにおいても結晶配向制御が可能であり、また種々の磁場印加方法や成形方法を駆使することにより、巧緻な結晶配向制御や積層制御が可能であることを紹介した.

磁場中成形による結晶配向制御は、結晶構造に異方性があればテンプレート粒子を作製する必要がなく、適用可能な物質系が広く、簡便な配向制御手法である. また、成形も種々の手法が適用可能であり、バルク部材の結晶配向を制御するのに汎用性の高い手法であると言える. しかしながら、配向性は磁化率の異方性に依存するため物質によっては成形段階では配向性が低く、焼結中での粒成長による配向性の向上が必要となるものも多い. そこでは成形段階での配向性を向上させるための工夫や焼結中での配向発達過程の解明も必要となる. また、原料となる粉末の形状、粒径、粉末表面などによりスラリー中での分散性が問題となり、たとえ結晶磁気異方性が大きくても分散性に乏しい粉末を配向させることは難しくなる. そこで、粒子の高い分散性が重要となりコロイド科学に立脚した分散制御技術によるスラリー調製が必要となる.

磁場を用いた組織制御プロセスは磁場の印加方法の更なる工夫や成形法の組み合わせで、より精巧な組織制御をデザインできる可能性があり、今後の発展が期待される.

本稿で紹介した当グループの研究成果については、科学技術振興調整費、原子力試験研究、科学研究費補助金、資生堂サイエンス研究グラント、石川カーボン科学技術振興財団研究助成の支援を受けた. ここに記して感謝の意を表すものである.

文 献

(1) T. Takeuchi, T. Tani and Y. Saito: Jpn. J. Appl. Phys., **38**(1999), 5553-5556.

(2) T. Kimura: J. Ceram. Soc. Japan, **114**(2006), 15-25.

(3) Y. Saito, H. Takao, T. Tani, T. Nonoyama, K. Takatori, T. Homma, T. Nagaya and M. Nakamura: Nature, **406**(2000), 473-474.

(4) M. M. Seabaugh, I. H. Kerscht and G. L. Messing: J. Am. Ceram. Soc., **80**(1997), 1181-1188.

(5) Y. Yoshizawa, M. Toriyama and S. Kanzaki: J. Am. Ceram. Soc., **84**(2001), 1392-1394.

(6) T. Takenaka and K. Sakata: Jpn. J. Appl. Phys., **19**(1980), 31-39.

(7) 手島博幸, 平尾喜代司, 鳥山素弘, 神崎修三: J. Ceram. Soc. Japan, **107**(1999), 1216-1220.

(8) E. Beaugnon and R. Tournier: Nature, **349**(1991), 470.

(9) N. Hirota, T. Homma, H. Sugawara, K. Kitazawa, M. Iwasaka, S. Ueno, H. Yokoi, Y. Kakudate, S. Fujiwara and M. Kawamura: Jpn. J. Appl. Phys., **34**(1995), L991-L993.

(10) P. de Rango, M. Lees, P. Lejay, A. Sulpice, R. Tournier, M. Ingold, P. Germe and M. Pernet: Nature, **349**(1991), 770-772.

(11) D. E. Farrel, B. S. Chandrasekhar, M. R. DeGuire, M. M. Fang, V. G. Kogan, J. R. Clem and D. K. Finnemore: Phys. Rev. B, **36**(1987), 4025-4027.

(12) H. Morikawa, K. Sassa and S. Asai: Mater. Trans., JIM, **39**(1998), 814-818.

(13) Y. Sakka and T. S. Suzuki: J. Ceram. Soc. Japan, **113**(2005), 26-36.

(14) T. S. Suzuki, T. Uchikoshi and Y. Sakka: Sci. Tech. Adv. Mater., **7**(2006), 356-364.

(15) 鈴木 達, 目 義雄, 北澤宏一: 粉体および粉末冶金, **53**(2006), 479-487.

(16) T. Sugiyama, M. Tahashi, K. Sassa and S. Asai: ISIJ Inter., **43**(2003), 855-861.

(17) F. F. Lange: J. Am. Ceram. Soc., **72**(1989), 3-15.

(18) I. A. Aksay, F. F. Lange and B. I. Davis: J. Am. Ceram. Soc., **66**(1983), C190-C192.

(19) J. Cesaramo III, I. A. Aksay and A. Bleier: J. Am. Ceram. Soc., **71**(1988), 250-255.

(20) C. Uyeda: Jpn. J. Appl. Phys., **32**(1993), L268-L270.

(21) T. S. Suzuki, Y. Sakka and K. Kitazawa: Adv. Eng. Mater., **3**(2001), 490-492.

(22) T. S. Suzuki, Y. Sakka and K. Kitazawa: IEEE Trans. on Applied Superconductivity, **14**(2004), 1584-1587.

(23) T. S. Suzuki and Y. Sakka: Jpn. J. Appl. Phys., **41**(2002), L1272-L1274.

(24) T. S. Suzuki and Y. Sakka: Chem. Lett., **31**(2002), 1204-1205.

(25) X. Mao, S. Wang, S. Shimai and J. Guo: J. Am. Ceram. Soc., **91**(2008), 3431-3433.

(26) T. S. Suzuki, T. Uchikoshi and Y. Sakka: Mater. Trans., **48**(2007), 2883-2887.

(27) T. Kimura, M. Yoshino, T. Yamane, M. Yamato and M. Tobita: Langmuir, **20**(2004), 5669-5672.

(28) S. Tanaka, A. Makiya, Z. Kato, N. Uchida, T. Kimura and K. Uematsu: J. Mater. Res., **21**(2006), 703-707.

(29) J. Akiyama, M. Hashimoto, H. Takadama, F. Nagata, Y. Yokogawa, K. Sassa, K. Iwai and S. Asai: Mater. Trans., **46**(2005), 203-206.

(30) H. Kaga, Y. Kinemuchi, S. Tanaka, A. Makiya, Z. Kato, K. Uematsu and K. Watari: J. Ceram. Soc. Japan, **114**(2006), 1085-1088.

(31) H. Kaga, Y. Kinemuchi, H. Yilmaz, K. Watari, H. Nakano, H. Nakano, S. Tanaka, A. Makiya, Z. Kato and K. Uematsu: Acta Mater., **55**(2007), 4743-4757.

(32) T. S. Suzuki and Y. Sakka: Scripta Materialia, **52**(2005), 583-586.

(33) T. S. Suzuki, M. Kimura, K. Shiratsuyu, A. Ando, Y. Sakka and Y. Sakabe: Appl. Phys. Lett., **89**(2006), 132902.

(34) T. Kimura and M. Yoshino: Langmuir, **21**(2005), 4805-4808.

(35) T. Kimura, F. Kimura and M. Yoshino: Langmuir, **22**(2006), 3464-3466.

(36) T. Fukushima, S. Horii, H. Ogino, T. Uchikoshi, T. S. Suzuki, Y. Sakka, A. Ishihara, J. Shimoyama and K. Kishio: Appl. Phys. Express, **1**(2008), 111701.

(37) H. Watanabe, T. Kimura and T. Yamaguchi: J. Am. Ceram. Soc., **72**(1989), 289-293.

(38) H. Ogawa, M. Kimura, A. Ando and Y. Sakabe: Jpn. J. Appl. Phys., **40**(2001), 5715-5718.

(39) T. Tani: J. Korean Phys. Soc., **32**(1998), S1217-S1220.

(40) 谷 俊彦, 木村敏夫: 粉体および粉末冶金, **50**(2003), 284-291.

(41) A. Makiya, D. Kusano, S. Tanaka, N. Uchida, K. Uematsu, T. Kimura, K. Kitazawa and Y. Doshida: J. Ceram. Soc. Japan, **111**(2003), 702-704.

(42) M. Kimura, T. S. Suzuki, K. Shiratsuyu, A. Ando and Y. Sakka: J. Am. Ceram. Soc., **90**(2007), 1463-1466.

(43) S. Tanaka, A. Makiya, T. Okada, T. Kawase, Z. Kato and K. Uematsu: J. Am. Ceram. Soc., **90**(2007), 3503-3506.

(44) Y. Miwa, S. Kawada, M. Kimura, Y. Higuchi, H. Takagi, T. S. Suzuki, T. Uchikoshi and Y. Sakka: submitted to J. Am. Ceram. Soc.

(45) K. Tabara, A. Makiya, S. Tanaka, K. Uematsu and Y. Doshida: J. Ceram. Soc. Japan, **115**(2007), 237-240.

(46) P. Sarkar and P. S. Nicholson: J. Am. Ceram. Soc., **79**(1996), 1987-2002.

(47) 打越哲郎: マテリアルインテグレーション, **13**(2000), 18-24.

(48) 鈴木 達, 打越哲郎, 奥山秀男, 目 義雄: セラミックス, **40**(2005), 168-172.

(49) 鈴木 達, 打越哲郎, 目 義雄: マテリアルインテグレーション, **18**(2005), 26-30.

(50) 材料開発のための顕微鏡法と応用写真集, 日本金属学会編(2006) p173.

(51) T. S. Suzuki, T. Uchikoshi, H. Okuyama, Y. Sakka and K. Hiraga: J. Euro. Ceram. Soc., **26**(2006), 661-665.

(52) M. Suzuki, M. Miyayama, Y. Noguchi and T. Uchikoshi: J. Appl. Phys., **104**(2008), 014102.

(53) S. Horii, T. Kumagai, T. Uchikoshi, T. S. Suzuki, Y. Sakka, J. Shimoyama and K. Kishio: Scripta Mater., **57**(2007), 333-336.

(54) T. Okamoto, S. Horii, T. Uchikoshi, T. S. Suzuki, Y. Sakka, R. Funahashi, N. Ando, M. Sakurai, J. Shimoyama and K. Kishio: Appl. Phys. Lett., **21**(2006), 081912.

★★
鈴木 達

1995年 早稲田大学大学院理工学研究科博士後期課程修了
1995年 早稲田大学理工学部助手
1996年 科学技術庁金属材料技術研究所研究員
2006年4月- 現職
専門分野: 粉体プロセス, 磁場配向プロセス
セラミックス粉末にまみれながら, 配向性を高めることで優れた特性を有するセラミックスを開発すべく実験に明け暮れる日々を過ごす。

★★



鈴木 達



打越哲郎



目 義雄