

機関番号：13102

研究種目：若手研究 (A)

研究期間：2008～2010

課題番号：20686045

研究課題名 (和文) セラミックス磁気キネティクスプロセッシング

研究課題名 (英文) Fabrication Processing based on Kinetics for Crystal-Oriented Ceramics using a Magnetic Field and Subsequent Sintering

研究代表者

田中 諭 (TANAKA SATOSHI)

長岡技術科学大学・産学融合トップランナー養成センター・特任准教授

研究者番号：20324006

研究成果の概要 (和文)：高磁場配向セラミックスの製造プロセスにおいて、磁場中での粒子の配向挙動、および焼結時の配向構造発達過程について検討した。成形時の配向挙動では、粒子径やスラリー中の固体の体積分率による粘度の増加による配向の時間依存性を理論的に示した。実験的には零せん断速度での粘度により、この傾向を示すことができたが、配向の時間依存性については再現性も含めて継続した検討が必要である。焼結時の配向構造発達では、焼結条件を制御することで、成形体の配向状態が低くても、十分に配向構造が発達する結果が得られた。すなわち、焼結時の配向構造発達を積極的に利用することで、成形時に必要な磁場も抑えられる可能性が示された。その結果、成形-焼結での配向をひとつの連続した配向方法とみなす、磁気キネティクスプロセスのコンセプトを提案することができた。

研究成果の概要 (英文)：Fabrication methods for textured ceramics have been studied for improving properties of and manufacturing efficiency. Strong magnetic orientation is a key technology for tailoring microstructure of functional materials. Furthermore, it is important that textured microstructure is promoted by subsequent sintering through densification and grain growth processes. We focus on the continuous fabrication processing of both particle-orientation in a magnetic field and development of oriented structure during sintering. Conditions as particle size, magnetic field, and sintering temperature can be optimized for controlling textured microstructures. The mechanism and implication are explained using experimental data here.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	11,100,000	3,330,000	14,430,000
2009年度	6,900,000	2,070,000	8,970,000
2010年度	1,800,000	540,000	2,340,000
年度			
年度			
総計	19,800,000	5,940,000	25,740,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・無機材料・物性

キーワード：セラミックス、キネティクス、配向、非鉛材料、圧電性、透光性、粒子配向、磁場、成形、HIP

1. 研究開始当初の背景

人類が恒久的に安定した生活を送るためには、新規材料開発は有効な手段である。結晶配向制御は、既知物質の特性を最大活用する材料設計手法であり、研究が盛んな分野である。強磁場を利用した成形プロセスは、非接触で配向組織をビルドアップする画期的な方法である。これまで、超伝導磁石による広域での 10 テスラ強の磁気空間を利用してアルミナ、非鉛圧電体のピスマス層状化合物、および種々の配向セラミックスを報告している。また、回転磁場成形法においても c 軸配向 ZnO および c 軸配向タングステンブロンズ系酸化物 $\text{KSr}_2\text{Nb}_5\text{O}_{15}$ を作製し、圧電特性の向上も報告している。これらの報告に伴い、近年、磁気プロセスへの関心が国内外のセラミックス製造分野において高まってきた。

今後、更なる高性能化、二軸配向化、各種材料への適用、工業化等へと飛躍発展させていくためには、ここで、現象の本質を説明する非平衡での基礎理論を構築し、理論に基づくプロセス設計をすべきである。なぜなら、従来の熱的平衡論に基づく配向理論は、真空中の配向を扱うものであり、現実プロセスを説明できないからである。

2. 研究の目的

本研究では、高機能結晶配向セラミックス製造のための強磁場中配向キネティクスおよび焼結キネティクスを明らかにして、時間軸を考慮した“磁気キネティクスプロセッシング”を新たに提案することを目的とした。これにより、短時間高配向や、配向での低磁場化が見通せるようになるだけでなく、さらには、逐次回転磁場による二軸配向化の達成も将来可能となる。得られる結晶配向セラミックスは、圧電アクチュエータ、強誘電体、センサ、光通信部品、熱・エネルギー変換材料、電池材料等の高機能材料であり、これらは次世代情報・環境産業分野の中核材料である。本研究では、磁気配向プロセスをより展開発展させるために、従来の理想的な平衡状態での統計論的アプローチではなく、製造科学の本質である非平衡状態での弱磁性結晶粒子の強磁場配向運動論、および粒子配向体の異方性焼結速度論を明らかにすることを目指した。

3. 研究の方法

1 年目は強磁場配向キネティクスを検討した。2 年目は、異方性焼結キネティクスを扱った。そして、3 年目にこれらを総括し、磁気キネティクスプロセッシングを提案した。

強磁場配向キネティクスでは、Langevin の回転運動方程式に基づいて、各物性測定を行った。特に、粒子の粘性抵抗は、超低せん断

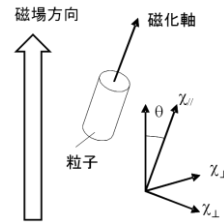


図 1 磁場中の粒子

速度領域でのスラリーの粘度評価により評価した。レオメーターを購入して測定した。そして、配向度を時間の関数として示した。配向は静置磁場および回転磁場で行った。異方性焼結キネティクスでは、微構造変化と関係づけ、異方性焼結キネティクスを示した。そして、これらを組合せて、原料から焼結体構造までの一貫した製造設計理論を提案した。試料には、静置磁場用として Al_2O_3 、 TiO_2 、 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 、回転磁場用として、 ZnO や $\text{Sr}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$ を用いてパラメータを制御してその有効性を示した。

4. 研究成果

(1) 磁場中配向キネティクス

図 1 のような結晶粒子が磁場に置かれた状態を考える。式 (1) で示したように結晶粒子に磁場 H が印加されたときの粒子の磁化 M は、帯磁率を用いると $M = \chi H$ で表される。すべての結晶の主軸方向にはそれぞれの帯磁率 $\Delta\chi$ が存在し、結晶系が六方晶や正方晶のように一軸異方性の場合、a, b 軸方向の磁化率は等しく、c 軸方向のみ異なる。磁場の強さ H のとき、磁化させた状態での半径 r の結晶粒子にはたらく、磁気トルク L_m は、結晶の磁化軸方向と磁場方向とのなす角を θ とすると、次式で表される。

$$L_m = -\frac{1}{2\mu_0} \Delta\chi B^2 \sin 2\theta_0 \quad (1)$$

ここで、 $\Delta\chi$ は帯磁率の異方性である。この他、粒子は粘性抵抗を受けることが想定される。それらの影響によって粒子の磁化軸方向 θ は計算され、それは時間 t を用いて以下の式で表される。

$$\theta = \tan^{-1} \left(\tan \theta_0 \exp \left(-\frac{\Delta\chi B^2}{6\mu_0 \eta_i} t \right) \right) \quad (2)$$

ここで θ_0 は初期の粒子の方向と磁場とのなす角、 μ_0 は真空の透磁率、 η_i は粒子まわりの粘度、 t は時間である。

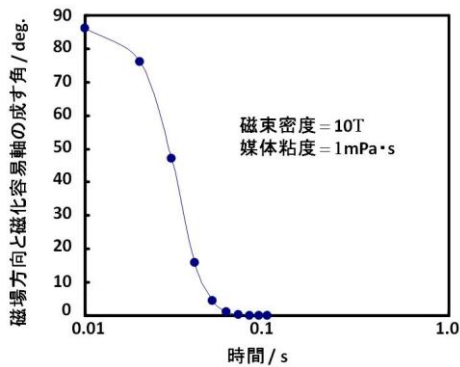


図2 粒子方向と配向時間

式(2)より、液中に分散された粒子は、帯磁率の異方性、磁束密度、および、粒子まわりの粘度の影響を受けて配向することが分かる。すなわち、実際の製造プロセスでは、これらを総合的に検討して条件を決めればよいことになる。

図2に計算結果例を示す。磁場を10テスラ、粒子まわりの粘度を1mPa·sとして計算した。これより粒子は0.1秒以内で回転して配向する結果となった。現実のプロセスでは、スラリーの粘度は10-100mPa·sと高いことがしばしばおこる(図3)。実際の1μm以下の粒子の配向時間は、実測できていないが、計算では1秒から100秒程度となる。

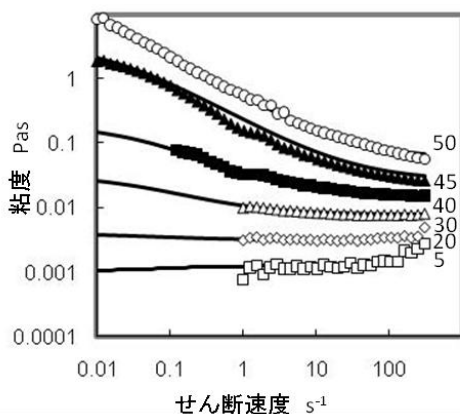


図3 各スラリーの固体含有率と零せん断速度粘度

(2) 焼結配向のキネティクス

粒子配向成形体をセラミックスとするには、焼結させる必要がある。結晶を配向させた成形体の微細構造は多くの場合、配向構造が発達した微細構造となる(図4)。

焼結時の微細構造変化は、系のエネルギーを最小にしようとする駆動力によって進む。通常の焼結体では、大きな粒子と小さな粒子の間の界面では、大きな粒子側に凸になるように粒界が存在する。この粒界はその界面張力によって曲率の中心方向に移動する。その

結果、大きな粒子はより大きく、小さな粒子は消滅する。配向セラミックスでも同様なことがおこる。大粒子は粒成長により周囲の粒子をとりくみながらさらに大きくなる。

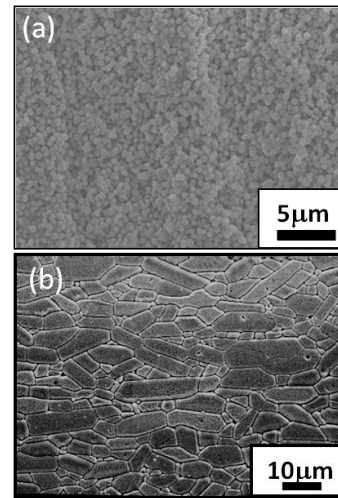


図4 Al₂O₃ 配向セラミックスの焼結前(a)と後(b)の微細構造

配向体の焼結においても大粒子は小粒子より配向しやすいことが明らかとなった。つまり、配向しやすい大きな粒子は、配向しにくい小さな粒子を取り込みながら成長することで、焼結体の配向構造はより発達するといえる。さらに、板状や針状の結晶粒子が見られる微細構造では、粒子の異方的な粒成長も寄与する。結晶の原子配列に異方性がある場合、その粒成長のしやすさにも異方性が生じる。加えて、粒子界面でのエネルギーの異方性にも影響される。板状に成長することで、系全体のエネルギーを下げているのである。

(3) 磁気キネティクスプロセッシング

磁場配向法を実用化するためには、磁場強度の低下は必須である。これは、10テスラの強磁場空間の周囲環境への影響、巨大磁場を発生させる超伝導磁石の使用、および製造のための利用空間の拡大化による。そこで、磁場中配向と焼結中配向構造発達を一連のプロセッシングとみなして配向体を製造する概念“磁気キネティクスプロセッシング”を提案する。これは、成形時の配向と焼結時の配向発達を有効に利用して、配向構造を得る新しいコンセプトであり、配向に必要な磁場を下げる効果がある。成形体段階では、粒子をよく分散させて配向させ、焼結配向を促進させる程度の配向構造を得る。より積極的に発現させるためには、配向しやすく、かつ、粒成長のコアとなるような平均粒径よりも僅かに大きな粒子を分布させることが想定される。

図5にAl₂O₃成形における配向度に及ぼす粒径と磁場強度依存性を示す。スラリーでは

30 体積%を使用した。配向度は磁束密度に従って高くなり、また、粒径が大きくなる程、配向度は高くなった。磁場依存性については、式(1)によれば、磁気トルクは磁場の 2 乗に比例し、粒径依存性については、粒径の 3 乗に比例する。また、粒径が小さくなると、配向にかかる時間は長くなるとともに、粒子は凝集体をつくり易くなり、配向はしにくくなる。

図 6 に各粒径ごとの成形体の配向度と、そ

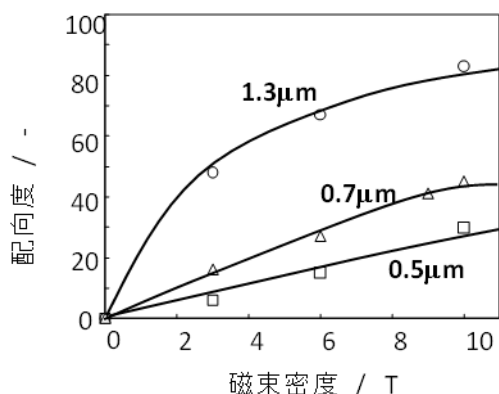


図 5 配向度におよぼす磁場強度と原料粒径の影響

れを焼結後の配向度を示す。0.5 μm からなる成形体では配向度が 30%程度のもが焼結後には 80%以上に上がる。0.7 μm では 40%の配向度が焼結によって急激にあがる。他方、1.3 μm では成形体と焼結体での配向度はほぼ同じとなる。これは、粒径が小さくなると焼結時の緻密化と粒成長が容易となるためである。今回は粒度分布が小さい粉を利用しているため、粒成長のコアとなる大きな粒子はあまりなく、全体的に配向が上がったとみることができる。

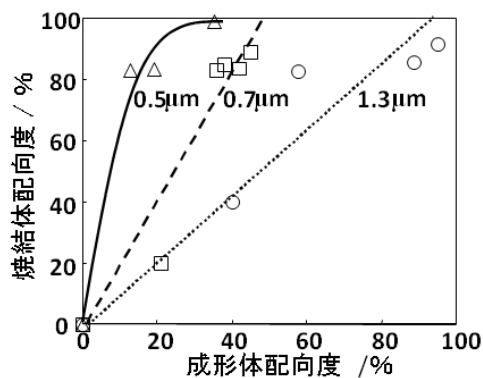


図 6 成形体配向度と焼結体配向度の関係

図 6 から、0.5 μm の粒子を用いて 6 テスラ以上であれば成形時に 20%以上の配向度となり、焼結により 80%の配向度が達成できることがわかる。1.3 μm の粒子を用いると、成形

時の配向度は良くなるが、焼結後の配向度の向上はあまり見込めない。緻密化の点ではむしろ悪いともいえる。このように、焼結時の配向構造発達を利用すると、磁場強度は十分下げられる可能性がある。磁場の役割は成形段階で結晶粒子の方向をおおよそ決定することだといえる。

(4) 回転磁場での高配向酸化亜鉛の作製

図 7 に回転磁場で作製された c 軸配向 ZnO の配向度を示す。回転磁場の回転数を変えて作製している。磁場の強さは 10 テスラで一定である。回転磁場での配向に適した回転速度を実験的に求めた。

ZnO を用いた場合の実験結果では、30rpm 以上の回転数で成形時の配向度は飽和しました。30rpm であればよいと判断できる。ただし、その後の焼結体での配向度をみると、10rpm 以上でほぼ 100%の配向度が達成されていた。焼結での緻密化と粒成長により、成形時の配向がそれほど高くなくても十分挽回できることを示している。工程を考慮すれば、少ない回転数の方が効率がよい場合もある。磁場の強さももっと下げられる可能性もある。

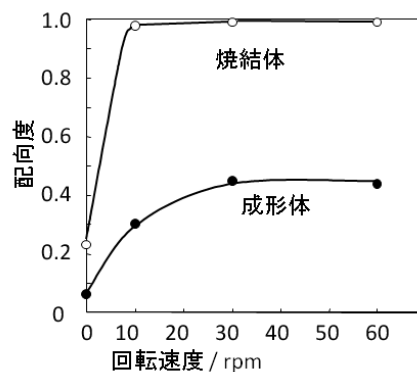


図 7 回転磁場で作製された c 軸配向 ZnO の配向度

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 30 件)

- ① S.Tanaka, A.Makiya and K.Uematsu, Oriented alumina ceramics prepared from colloidal processing in magnetic field, 査読付、*Ceramic Eng. Sci. Proc.*, 2011、印刷中
- ② S.Tanaka, T.Takahashi, T.Kawase, R.Furushima, H.Shimizu, Y.Doshida and K.Uematsu, Influence of magnetic flux density and sintering process on the oriented structure of c-axis-oriented $\text{Sr}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$

- piezoelectric ceramics, *Ceramic Transaction*, 査読付、印刷中
- ③ R.Furushima, S.Tanaka, Z.Kato, T.Shiomi and K.Uematsu, Compatibility of PVB in mixture organic solvents in alumina slurries and its effect on morphology of green sheets, *J.Am.Ceram.Soc.*, 査読付、印刷中
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1551-2916.2010.04364.x/full>
- ④ Y.Kinemuchi, K.Okanoue, H.Kaga, J.P.Wiff, S.Tanaka, K.Uematsu and K.Watari, Microstructural evidence of Hall mobility anisotropy in c-axis textured Al-doped ZnO, *J.Am.Ceram.Soc.*, 査読付、印刷中、
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1551-2916.2010.04373.x/pdf>
- ⑤ S.Tanaka, Y.Nagashima, R.Furushima and K.Uematsu, Anisotropic sintering of oriented ceramics prepared by a rotating magnetic field, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 査読付、21 巻、2011、012008
- ⑥ S.Tanaka, Y. Doshida, H. Shimizu, R.Furushima and K.Uematsu, Crystal-oriented tungsten-bronze type ceramics prepared by a rotating magnetic field, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 査読付、20 巻、2011、012002
- ⑦ R.Furushima, S.Tanaka, Z.Kato and K.Uematsu, Fabrication of highly particle-oriented alumina green compact from non aqueous slurry, *J.Ceram.Soc.Jpn.*, 査読付、119 巻、2011、198-202
- ⑧ H-Baek Cho, T.Nakayama, T.Suzuki, S.Tanaka, W.Jiang, H.Suematsu and K.Niihara, Formation and structural characteristic of perpendicularly-aligned BN nanosheet bridges in polymer/BN composite film and its thermal conductivity, *Japanese Journal of Applied Physics*, 査読付、50 巻、2011、01BJ05-1~6
- ⑨ H-B. Cho, Y.Tokoi, S.Tanaka, T.Suzuki, W.Jiang, H.Suematsu, K.Niihara and T.Nakayama, Facile orientation of unmodified BN nanosheets in polysiloxane/BN composite films using a high magnetic field, *J.Mater.Sci.*, 査読付、46 巻、2011、2318-2323
- ⑩ M.I.Zainuddin, S.Tanaka, R.Furushima and K.Uematsu, Influence of particles packing in granules on the particles orientation in compacts, *J.Euro.Ceram.Soc.*, 査読付、31 巻、2011、3-11
- ⑪ H-B.Cho, T.Nakayama, T.Suzuki, S.Tanaka, W.Jiang, H.Suematsu and K.Niihara, Linear assembles of BN nanosheets fabricated in polymer/BN nanosheet composite film, *J.Nanomaterials*, 査読付、2011, ID693454, 7pages
- ⑫ H-B. Cho, T.Nakayama, Y.Tokoi, S.Endo, S.Tanaka, T.Suzuki, W.Jiang, H.Suematsu and K.Niihara, Facile preparation of a polysiloxane-based hybrid composite with highly-oriented boron nitride nanosheets and an unmodified surface, *Composites Science and Technology*, 査読付、70 巻、2010 1681-1686
- ⑬ M.I.Zainuddin, S.Tanaka, R.Furushima and K.Uematsu, Correlation between slurry properties and structures and properties of granules, *J.Euro.Ceram.Soc.*, 査読付、30 巻、2010、3291-3296
- ⑭ R.Furushima, S.Tanaka, Z.Kato and K.Uematsu, Orientation distribution – Lotgering factor relationship in a polycrystalline material –as an example of bismuth titanate prepared by a magnetic field, *J.Ceram.Soc.Jpn.*, 査読付、118 巻、2010、921-926
- ⑮ S.Tanaka, T.Takahashi, R.Furushima, A.Makiya and K.Uematsu, Fabrication of c-axis-oriented potassium strontium niobate ($\text{KSr}_2\text{Nb}_5\text{O}_{15}$) ceramics by a rotating magnetic field and electrical property, *J.Ceram.Soc.Jpn.*, 査読付、118 巻、2010、722-725
- ⑯ H.Shimizu, Y.Doshida, S.Tanaka, and K.Uematsu, Piezoelectric properties of c-axis-oriented $(\text{Sr,Ca})_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$ piezoelectric ceramics with single-plate type and multilayered type fabricated using crystal-oriented sheet forming, *Key Eng.Mater.*, 査読付、421-422 巻、2010、21-25
- ⑰ 田中諭、結晶配向セラミックスのための磁気キネティックプロセッシング、マテリアルインテグレーション、査読無、23 巻、2010、94-100
- ⑱ M.I.Zainuddin S.Tanaka and K.Uematsu, Effect of polyacrylic acid (PAA) binder system on particle orientation during dry-pressing, *Powder Technology*, 査読付、196 巻、2009、133-138
- ⑲ S.Tanaka, K.Mishina and K.Uematsu, Fabrication of $\text{SrTi}_4\text{Bi}_4\text{O}_{15}$ piezoelectric ceramics with oriented structure using magnetic field-assisted shaping and subsequent sintering processing (MFSS), *Ceramic Transaction*, 査読付、204 巻、2009、39-46
- ⑳ S.Nakamura, S.Tanaka, R.Furushima, K.Sato

- and K.Uematsu, Estimation of Weibull modulus from coarser defect distribution in dry-pressed alumina ceramics, *J.Ceram.Soc.Jpn.*, 査読付, 117 巻, 2009 742-747
- (21) S.Tanaka, Y.Tomita, R.Furushima H.Shimizu Y.Doshida and K.Uematsu, Fabrication of crystal-oriented Barium-bismuth titanate ceramics in a high magnetic field and subsequent reaction sintering, *Sci.Tech. Adv. Mater.*, 査読付, 10 巻, 2009, 014602 5pages
- (22) S.Tanaka, A.Makiya, Z.Kato, N.Uchida and K.Uematsu, C-axis oriented ZnO formed in a rotating magnetic field with various rotation speeds, *J.Euro.Ceram.Soc.*, 査読付, 29 巻, 2009, 955-959
- (23) N.Chantaramee, S.Tanaka, Z.Kato, N.Uchida and K.Uematsu, Characterization of particles packing in alumina green tape, *J.Euro.Ceram.Soc.*, 査読付, 29 巻, 2009, 943-948
- (24) S.Nakamura, S.Tanaka, Z.Kato and K.Uematsu, Strength-processing defects relationship based on micrographic analysis and fracture mechanics in alumina ceramics, *J.Am.Ceram.Soc.*, 査読付, 92 巻, 2009 688-693
- (25) Y.Kinemuchi, K.Okanoue, H.Kaga, J.P.Wiff, S.Tanaka, K.Uematsu and K.Watari, Influence of grain-boundary on textured Al-ZnO, *Ceramic Eng. Sci. Proc.*, 査読付, 29 巻, 2009, 63-68
- (26) Y.Kinemuchi, K.Okanoue, H.Kaga, J.P.Wiff, S.Tanaka, K.Uematsu and K.Watari, Anisotropic varistor via magnetic texturing, *Ceramic Eng. Sci. Proc.*, 査読付, 29 巻, 2009, 163-168
- (27) M.I.Zainuddin S.Tanaka and K.Uematsu, Effect of poly-acrylic-acid (PAA) binder system on characteristics of dry-pressed alumina, *J.Am.Ceram.Soc.*, 査読付, 91 巻, 2008, 3896-3902
- (28) N.Chantaramee, S.Tanaka, T.Takahashi and K.Uematsu, Evolution of discontinuity in particle orientation in ceramic tape casting, *J.Am.Ceram.Soc.*, 査読付, 91 巻, 2008, 3181-3184
- (29) H.Shimizu, Y.Doshida, S.Tanaka and K.Uematsu, C-axis-oriented $(\text{Sr,Ca})_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$ multilayer piezoelectric ceramics fabricated using high-magnetic-field method, *J.J.Appl.Phys.*, 査読付, 47 巻, 2008, 7693-7697
- (30) 田中諭, 植松敬三, 回転高磁場成形, 工業製品技術協会セラミックスデータブック 2008, 査読無, 36 巻, 2008, 153-157
- [学会発表] (計 15 件)
- ① 田中諭, 磁場配向成形と反応焼結によるチタン酸ビスマスナトリウムの作製, セラミックス協会年会, 2011. 3. 16, 浜松
- ② 田中諭, PVB バインダーの混合溶剤との親和性およびアルミナスラリーの分散効果, 第 49 回セラミックス基礎討論会, 2011.1.11, 岡山
- ③ S.Tanaka, Textured Bismuth Layer-Structured Ferroelectrics Prepared by High Magnetic Field and a Subsequent Reaction Sintering, ICC3, 2010.11.15, 大阪
- ④ 田中諭, 結晶配向成形体の異方性焼結, 日本セラミックス協会サテライト, 「粉体プロセスによる材料構造制御と新機能創製」 2010.11.15, 大阪
- ⑤ S.Tanaka, Oriented structure and electrical property of tungsten bronze type dielectric ceramics formed by using a rotating magnetic field, MS&T '10, 2010.10.18 ヒューストン, アメリカ
- ⑥ S. Tanaka, Influence of particle-particle interaction on the time-dependent orientation of particles in high magnetic field, 11th International Conference on Ceramic Processing Science, 2010.8.30, チューリッヒ, スイス
- ⑦ S.Tanaka, Fabrication of bismuth layer-structured ferroelectrics ceramics by reaction sintering of crystal-oriented $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$, China-Japan-Korea Seminar and Summer Workshop for Advanced Materials (CJK2010), 2010.7.4, 武漢, 中国
- ⑧ 田中諭, 磁場中成形と焼結における配向構造発達, 日本セラミックス協会年会, 2010. 3. 22, 東京
- ⑨ S.Tanaka, Development of grain oriented tungsten bronze ceramics with magnetic field, Shaping4 Conference, 2009.11.15, マドリッド, スペイン
- ⑩ S.Tanaka, Crystal-oriented bismuth- layer-structured ferroelectrics ceramics prepared by a high magnetic field and subsequent reaction sintering, MS&T '09, 1009.10.25, ピッツバーグ, アメリカ
- ⑪ 田中諭, 磁場中粒子配向に及ぼすスラリー中の粒子間相互作用の影響, 第 22 回秋季シンポジウム, 2009. 9. 16, 松山
- ⑫ S.Tanaka, Microstructure of crystal-oriented strontium bismuth titanate ferroelectrics ceramics prepared by reaction sintering, 2009.9.7, 倉敷
- ⑬ S.Tanaka, Orientation control of piezoelectric ceramics by shaping in a rotating high-magnetic-field and subsequent sintering, 11th ECerS, 2009.6.22, クラクフ, ポーランド

- ⑭ S.Tanaka、Crystal oriented ZnO ceramics prepared in a rotating high magnetic field、International symposium on multifunctional ceramic materials based on nanotechnology、2009.2.14、長岡
- ⑮ S.Tanaka、Forming of crystal-oriented ferroelectrics ceramics in a high magnetic field、The 2nd Anisotropic Science and Technology of Materials and Devices Workshop、2008.6.28、ゲブゼ、トルコ

〔図書〕(計2件)

- ①植松敬三、田中諭、均質構造を作る、門粉体材料設計、内藤牧男、牧野尚夫、多々見純一、米屋勝利編、日刊工業新聞社、2011、119-132
- ②植松敬三、田中諭、セラミック構造欠陥制御-総論、セラミックス機能化ハンドブック、福長脩編、株式会社NTS、2010、525-532

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 諭 (TANAKA SATOSHI)

長岡技術科学大学・産学融合トップランナー養成センター 准教授

研究者番号：20324006