

平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26249110

研究課題名(和文) 3次元可視化による成形プロセスの粒子充填構造と焼結の熱力学的駆動力の解明と制御

研究課題名(英文) Understanding and control of the powder processing and the thermodynamic driving force of sintering through the 3D-visualization of particle packing structures

研究代表者

若井 史博 (Wakai, Fumihiro)

東京工業大学・科学技術創成研究院・教授

研究者番号：30293062

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,300,000円

研究成果の概要(和文)：焼結は成形した粉体を加熱して複雑形状部品を製造する技術である。成形プロセスならびに焼結過程での微構造形成過程をX線マイクロトモグラフィーにより可視化し、粒子充填構造と焼結の熱力学的駆動力の解明と制御を目指した研究を実施した。具体的に、1) X線マイクロトモグラフィーによるガラス粒子の粘性焼結における3次元気孔構造観察から焼結応力、体積粘性係数を推定する手法を提案した。2) アルミナ粉体成形体の焼結時の粗大気孔発生機構を解明し、微構造形成に及ぼす原料顆粒の影響を調べるとともに、異方性焼結に及ぼす結晶配向の影響を明らかにした。3) シミュレーションにより2球粒子焼結と気孔収縮の力学原理を解明した。

研究成果の概要(英文)：Sintering is a processing method to make complicated-shaped components by heating powder compacts. In order to understand and control the powder processing and sintering process, we used X-ray micromicrotomography to observe the microstructural evolution during sintering. The following results were obtained: 1) A method to estimate the sintering stress and the bulk viscosity was proposed from the observation of pore structures in viscous sintering of glass particles. 2) The evolution of coarse pores in sintering of alumina powder was elucidated by X-ray micro tomography observation. The effect of the orientation of crystalline particles on anisotropic shrinkage was clarified. 3) The mechanical principles for the sintering of two particles and the shrinkage of a closed pore were proved by using computer simulations.

研究分野：無機材料科学

キーワード：X線マイクロトモグラフィー 焼結 粉体プロセス シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

焼結は成形した粉体を加熱して複雑形状部品を製造するための基幹技術である。巨視的な焼成収縮は連続体力学にもとづく高温変形として扱うことができ、ひずみ速度は外部から加えられた機械的応力と緻密化の熱力学的駆動力、すなわち、焼結応力に対する線形応答として表わされる。この理論にもとづき、収縮挙動を予測し、製品の品質・形状および寸法精度を保証できる。特に複合材料、基板上的薄膜、低温同時焼成セラミックスや固体酸化燃料電池などの積層材料の焼結中に生じる内部応力場や部材の変形を精密に予測する上で有用であり、そのためには焼結応力の測定が必要である。

巨視的な収縮挙動は粒子スケールの局所構造に依存する。ところが、粉体成形の際に密度変動、粒度変動、粒子配向や異方的充填がおこる。多くの場合、収縮は完全に等方的でなく、異方性があり、かつ、不均一である。これまで等方性を前提としていた焼結の構成方程式に異方性を導入するためにはスカラー量ではなく、焼結応力テンソルとして扱う必要がある。かつ、その空間的な分布を把握する必要がある。しかし、既存の手法を用いて実験的に焼結応力テンソル分布を計測することは不可能であった。

2. 研究の目的

粉体成形プロセスを通じた粒子充填構造制御による焼結性の向上は焼結の熱力学的駆動力である焼結応力テンソルと関係する。X線マイクロトモグラフィーを用いて気孔構造を3次元可視化することにより焼結応力テンソルを計測し、粉体充填構造制御による焼結性向上の原理解明を目指す。

微視的構造から巨視的収縮に至るマルチスケールで、粉体成形プロセスによる組織異方性と不均一性を解析し、微構造と焼結の動力学との関連を探求する。粉体成形と焼結現象を支配する原理・原則をより深いところで捉えることにより、先進的な製造技術の革新につながる基盤を築く。

3. 研究の方法

3次元可視化による成形プロセスの粒子充填構造と焼結の熱力学的駆動力の解明と制御を目指す。a) 粉体成形プロセスの違いによる粒子充填構造のマルチスケールでの不均一性、異方性などの特徴をX線マイクロトモグラフィーにより解析し、粒子スケールの3次元気孔構造をもとに焼結応力テンソルを把握して、成形プロセスと収縮の駆動力との関係を調べる。b) 粉体成形プロセスで作成した成形体の焼結過程における巨視的な収縮、ミクロスケール、メゾスケールでの構造変化を様々な実験手法により測定し、焼結の動力学に及ぼす微構造、温度場の影響を調べ、実験と理論との比較を行う。c) 粒子スケールの焼結シミュレーションを行い、焼

結の駆動力ならびに動力学項に影響する要因を調べ、粉体成形プロセスを通じた焼結性の制御の原理を明らかにする。

4. 研究成果

1) X線マイクロトモグラフィーによる粘性焼結の熱力学的駆動力の解析

1-1) シンクロトロンX線マイクロトモグラフィーによるガラスの粘性焼結

微視的に不均一な組織をもつ材料を巨視的な連続体理論で取り扱う場合、代表体積要素(RVE)という中間スケールの概念が有用である。代表体積要素は粒子径より十分大きく多数の粒子を含んでおり、微構造を代表するが、巨視的な部材よりはずっと小さい要素である。粒径 $8\mu\text{m}$ のガラス球粒子を基板上にテープ成形した場合の粒子充填構造をX線マイクロトモグラフィーにより観察し、トモグラフィーによる可視化をもとに微構造の不均一性のスケールを解析し、代表体積要素の大きさを決定した。代表体積要素の大きさは対象とする物性値の種類により異なるが、粒径の10倍程度であった。

1-2) 焼結力と巨視的粘性係数の決定

X線マイクロトモグラフィーによる微構造観察に基づき、相対密度より微視的な緻密化曲線を決定するとともに、比表面積、気孔表面の平均曲率を相対密度の関数として測定した。粒径 $150\mu\text{m}$ のガラス粒子のスラリーをテープ成形、乾燥した試料を焼結、X線マイクロトモグラフィーによる内部構造観察を繰り返し、焼結の進行とともに、比表面積、気孔表面の平均曲率を相対密度の関数として可視化した。粘性焼結の力学解析より、緻密化の熱力学的駆動力である焼結応力を曲率法、エネルギー法、混合法の3つの方法で推定した。3つの方法は終期焼結では一致したが、初期焼結では異なった。初期焼結における焼結応力を、粒子の平均配位数と平均ネック半径をもとに粒子間に作用する焼結力から推定する方法を提案した。この結果、初期焼結、中期焼結では混合法が、また、終期焼結ではエネルギー法が正確な値を与えることを示した。さらに、緻密化曲線より得られる緻密化速度と焼結応力より巨視的粘性係数を決定した。膨大な粒子の関与する焼結現象は巨視的な緻密化曲線を用いて記述されてきたが、X線マイクロトモグラフィーによってミクロスケールの内部構造から直接緻密化曲線を決定するとともに、焼結現象を支配する焼結応力と巨視的粘性係数を相対密度の関数として決定できたことは、ミクロスケールとマクロスケールをつなぐものである。

1-3) 界面トポロジー変化にもとづく焼結過程の区別

複雑な気孔構造の形態変化を記述するための「言語」として、界面トポロジーの概念

を提案した．焼結における複雑な3次元気孔構造の変化は，気孔率，表面積，表面曲率で通常解析されるが，気孔形態の界面トポロジーの視点からの解析に取り組み，Euler 標数が初期焼結，中期焼結，終期焼結を区別する指標になることを提唱した．図1は Euler 指標と相対密度との関係を示す．初期焼結では Euler 指標は緻密化とともにゆるやかに減少する．ある相対密度以降は，緻密化とともに増加し，これが中期焼結に対応する．終期焼結では，閉気孔が収縮，消失し，Euler 指標も減少する．

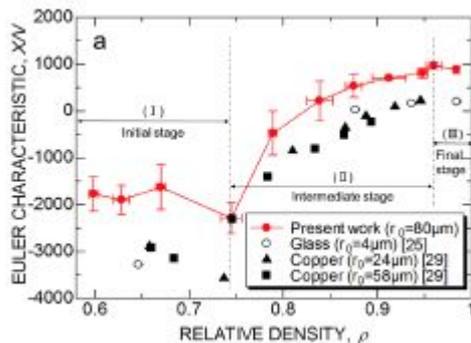


図1 Euler 指標と相対密度との関係

1-4) 焼結鍛造試験との比較

巨視的な焼結における収縮挙動を支配する焼結応力と体積粘性率を焼結鍛造試験により相対密度の関数として実験的に測定した．CAS ガラスの測定値を，ガラス球粒子粘性焼結の X 線マイクロトモグラフィーから推定した値と比較した．粒径ならびに化学組成の違いにもかかわらず，焼結鍛造の測定値はトモグラフィーからの推定値と良い一致を示した．手間と日時がかかる焼結鍛造試験に対し，計測時間の大幅な短縮が見込めるトモグラフィー法の正確さを実証した．

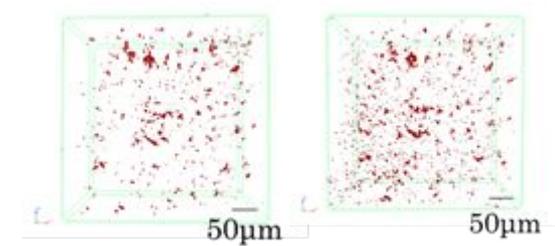
2) 粉体成形体の焼結時におけるマクロメゾスケールでの構造発達

2-1) 粉体成形体の焼結時の粗大気孔発生

マイクロ X 線マイクロトモグラフィーを使用してアルミナセラミックスの成形から焼結までのマクロメゾスケールでの観察を行った．まず，一定温度の焼結による内部構造変化を追跡し，初期から中期焼結に起こる粗大欠陥の発達機構を実験的に示した．

アルミナ顆粒を原料として一軸成形およびCIP成形によって成形体を作製し，焼結段階での収縮と構造発達を調べた．成形体では，高い圧力を負荷しても顆粒は変形し緻密化するもののその概形をとどめる構造となった．1200 で保持時間をかえることで，焼結時の線収縮量が 5-9%程度で相対密度が

63-66%となった．このような初期焼結では，一次粒子間でネックの形成と成長が開始するとともに，成形体中の変形顆粒の隙間にある欠陥の成長が観察された．それらの時間変化を測定することで，粗大欠陥は時間の 1/2 乗に比例して成長することを明らかにした．また，中には隣り合う欠陥が結合して粗大化する様子も明らかにした(図2)．一方，焼結温度 1250 で保持時間を変えることで，線収縮量が 10-14%で相対密度が 73%から 82%となった．この中期焼結では，観察結果から欠陥は時間の 1/2 乗に比例して成長することが明



らかとなった．これは焼結に伴う粒成長により周囲の気孔も移動し吸収して成長することを示唆する．

図2 焼結初期での粗大欠陥発達
(左) 1200 0分、1200 30分

2-2) マクロメゾスケールの構造に及ぼす原料顆粒の影響

成形体の構造は焼結時に大きな構造変化がおり，数 10 μ m 級の欠陥が発生すると考えられる．特に焼結体の機械的特性に影響を与える粗大欠陥は，原料顆粒の充填と変形に由来して変形後の顆粒間の隙間がその起源となる．そこで，性質の異なる顆粒を用いて成形体を作製し，焼結にともなう微構造および粗大欠陥の発達機構を X 線マイクロトモグラフィーにより明らかにした．一方の顆粒では相対密度が高く，結合剤が表面に偏析し，もう一方では有機物は含まない顆粒を用いた．

焼結温度を 1000 から 1350 まで昇温していく過程での欠陥の変化をマイクロトモグラフィーで観察した．結合剤を含む系では粗大欠陥が焼結初期，中期，終期と常に成長する様子であるのに対して，何も含まない系では粗大欠陥の発達は抑制されることがわかった．顆粒表面に残る結合剤や変形性が粗大欠陥形成に大きな影響を及ぼすことを示している．焼結体の曲げ強度は前者が 350MPa 程度であるのに対して，後者は約 550MPa となることも示した．これは成形体の均質性を上げることができれば，焼結時の粗大欠陥発生を抑制し，強度も向上できることを示している．

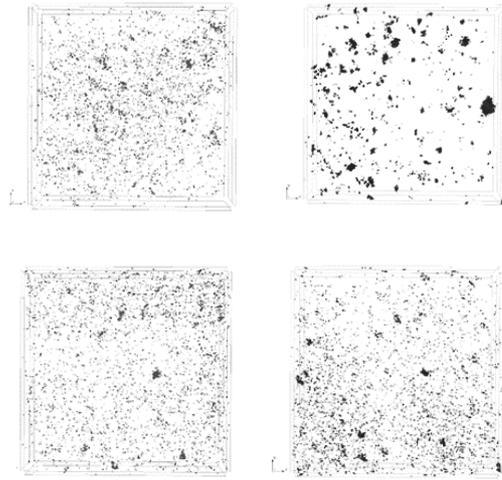


図 3 焼結前後での粗大欠陥発達
 (上) 結合剤を含む顆粒 (900 から 1300)
 (下) 結合剤を含まない (900 から 1300)

2-3) 異方性焼結に及ぼす結晶配向の影響

セラミックスの焼結収縮ではしばしば異方性が観察される。充填や粒度偏析以外の一因として粒子の配向構造も原因となる。特に粒子配向は粒子の接触数の異方性や界面の異方性も寄与する。そこで結晶および形状異方性が配向セラミックスの焼結収縮異方性に与える影響を微構造変化および焼結プロセス全体の定量的な評価を行った。

等軸状および異形状粒子を用いて強磁場中コロイド成形により結晶配向成形体を作製した。種々の焼結温度で時間を変えて焼結を行い配向方向ごとの焼結収縮を測定した。微構造を観察して焼結に伴う微構造の異方性について検討し、焼結異方性に及ぼす配向構造の影響を明らかにした。さらに、焼結開始から終了までの焼結収縮異方性をマスターラングリングカーブ(MSC)理論を適用して定量的に評価することを試みた。

等軸状および異形状の粒子を高磁場中コロイド成形で配向させたところ、粒子のc軸が配向した成形体を作製した。成形体を各焼結温度で焼結するとすべての成形体においてもc軸方向の焼結収縮量が大きくなることを確認した。異形状粒子ではその焼結収縮異方性がより顕著となった。c軸方向の収縮速度がa軸方向や無配向体の収縮速度よりも大きいことを確認した。a軸方向と無配向ではほぼ同じ値となった。一方、異形状粒子では、a粒子の長軸方向の収縮速度が無配向体よりも遅くなった。

微構造観察から等軸状粒子の焼結では、焼結の中期になると収縮の大きな方向の粒子間の界面が発達することがわかった。これはc面同士で粒子が生成しやすいことを示している。また、異形状粒子の焼結では、粒子の接触点数だけではなく、c面同士で接触しやすくなること収縮異方性に影響を与えることを示唆する。

MSC 理論を配向方向の焼結収縮に適用する

ことで、配向方向ごとにそれぞれMSC曲線が得られ焼結収縮異方性を示す方法として提案した。等軸状、異形状粒子ともにc軸方向の見かけの活性化エネルギーが他よりも高くなり、これは、ある一定温度で急速に焼結が進行することを示している。

3) 粒子スケールの焼結シミュレーション

3-1) 異方的粒子の球状化における焼結力概念の提唱

粘性流動によるガラス粒の形状変化は流体力学の原理に基づいて有限要素法によりシミュレーション可能である。最も単純なモデルとして単一粒の粘性流動による形状変化を考え、粒子内部で焼結力を定義できることを示し、粘性焼結の運動方程式を提案した。細長い楕円体粒子は粘性流動によって時間とともに短軸が増加し、最終的に球へと形状変化する(図3-1)。粒子の対称面に作用する焼結力と短軸径の増加速度との間に比例関係が成立することを示した。この知見に基づき、短軸径の増加速度の実験的測定から焼結力を決定する方法を提案した。

3-2) 2球粒子の粘性焼結における焼結力

2つのガラス球粒子の粘性焼結の流体力学的な解析を行い、焼結の駆動力である焼結力を接触面の平均圧力と表面張力より定義でき、それがネック成長と関係することを数学的に証明する理論を確立した。2球粒子の3次元有限要素法シミュレーションを行い、焼結力とネック成長に関する理論的な予測が厳密に成立することを実証した。さらに、焼結力は2球粒子間距離の収縮をも決定していることを見出した。2球粒子の粘性焼結モデルは1945年にFrenkelによって提唱されたが、今回、ネック成長と収縮の背後に焼結力が存在し、それが焼結挙動を支配していることを理論的に解明し、シミュレーションによって実証した。

3-3) 粒界拡散と表面拡散による結晶粒の焼結における焼結力

焼結中には気孔チャンネルの形成と閉鎖による複雑な微構造変化がおこる。気孔チャンネル閉鎖の最も単純なモデルとして3球粒子の粒界拡散/表面拡散による焼結シミュレーションを行い、初期焼結のみならず気孔チャンネル閉鎖後でも接触部におけるミクロスケールの焼結の熱力学的駆動力である焼結力が定義できることを示した(図4)。

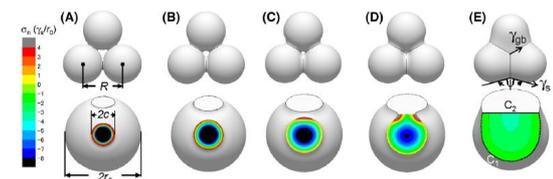


図 4 3球粒子の焼結における応力分布

3-4) 粘性焼結における閉気孔の収縮における重ね合わせの原理

X線マイクロトモグラフィ観察により形成された閉気孔の形状は不規則であるが、回転楕円体として近似することができる。有限要素法シミュレーションにより、任意形状の楕円体気孔の収縮を外部圧力、気孔内のガス圧力、局所的焼結応力から予測できる重ね合わせの原理を発見した。

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26件)

- 1) S. Tanaka, T. Takahashi, K. Uematsu, Fabrication of transparent crystal-oriented polycrystalline strontium barium niobate ceramics for electro-optical application, Journal of the European Ceramic Society, 34, 3423-3728 (2014) DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2014.05.006 査読有
- 2) T. Hondo, Z. Kato, S. Tanaka, Enhancing the contrast of low-density packing regions in images of ceramic powder compacts using a contrast agent for micro-X-ray computed tomography, Journal of the Ceramic Society of Japan, 122, 574-576 (2014) 査読有 DOI:10.2109/jcers2.122.574
- 3) 田中諭, セラミック成形体の内部構造の観察, 耐火物, 6, 121-127 (2014) 査読無
- 4) K. Katsura, Y. Shinoda, T. Akatsu, F. Wakai, Sintering force behind shape evolution by viscous flow, Journal of the European Ceramic Society, 35, 1119-1122 (2015) DOI:10.1016/j.jeurceramsoc.2014.10.014 査読有
- 5) F. Wakai, K. Katsura, Y. Shinoda, T. Akatsu, K. Shinagawa, Sintering force behind the viscous sintering of two particles, Acta Materialia, 109, 292-299 (2016) 査読有 DOI: 10.1016/j.actamat.2016.03.006
- 6) G. Okuma, D. Kadowaki, Y. Shinoda, T. Akatsu, O. Guillon, F. Wakai, Determination of the size of representative volume element for viscous sintering, Journal of the Ceramic Society of Japan, 124, 421-425 (2016) 査読有 DOI:10.2109/jcersj2.15275
- 7) B. Dargatz, J. Gonzalez-Julian, M. Bram, Y. Shined, F. Wakai, O. Guillon, FAST/SPS sintering of nanocrystalline zinc oxide Part II: Abnormal grain growth, texture and grain anisotropy, Journal of the European Ceramic Society, 36, 1221-1232 (2016) 査読有 DOI:10.1016/j.jeurceramsoc.2015.12.008
- 8) S. Tanaka, S. Goi, Z. Kato, Influence of granule characteristics on fabrication of

- translucent alumina ceramics with high strength and reliability, Journal of the Ceramic Society of Japan, 124, 426-431 (2016) 査読有 DOI:10.2109/jcersj2.15271
- 9) A. Zamorategui, L.E. Mendoza Pug, B. Noriega Luna, S. Tanaka, Effect of solid fraction and pH on the forces experienced by the gamma-Al₂O₃ nanoparticles in the form of precursor slurry and final ceramic, Journal of the Australian Ceramic Society, 52, 7-13 (2016) 査読有
 - 10) Y. Nagasawa, M. Uematsu, Y. Takahashi, Z. Kato, K. Uematsu, S. Tanaka, Observation of particle motion in high-concentration ceramic slurries under low shear rate, Journal of the American Ceramic Society, 98, 1429-1436 (2015) 査読有 DOI:10.1111/jace.13498
 - 11) S. Tanaka, K. Sano, M. Imai, K. Uematsu, T. Harada, Y. Doshida, Crystal-oriented (Bi_{0.5},Na_{0.5})_{0.85}Ba_{0.15}TiO₃ ceramics prepared by colloidal processing in rotating high magnetic field, Journal of the Ceramic Society of Japan, 123, 340-344 (2015) 査読有 DOI:10.2109/jcersj2.123.340
 - 12) Gaku Okuma, Daiki Kadowaki, Tsuyoshi Hondo, Akihiro Sato, Satoshi Tanaka, Fumihiko Wakai, Computation of sintering stress and bulk viscosity from microtomographic images in viscous sintering of glass particles, Journal of the American Ceramic Society, 100, 867-875 (2017). 査読有 DOI:10.1111/jace.14609
 - 13) Yoshihiro Nagasawa, Zenji Kato, Satoshi Tanaka, Particle sedimentation monitoring high-concentration slurries, AIP Advances, 6, 115206 (2016). 査読有 DOI: 10.1063/1.4967350
 - 14) Shoko Baba, Tomohiro Harada, Hiroyuki Shimizu, Yutaka Doshida, Satoshi Tanaka, Colloidal processing using UV curable resin under high magnetic field for textured ceramics, Journal of the European Ceramic Society, 36, 2739-2743 (2016). 査読有 DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2016.04.002
 - 15) Antonine Pringuet, Takuma Takahashi, Shoko Baba, Yuta Kamo, Zenji Kato, Keizo Uematsu, Satoshi Tanaka, Fabrication of transparent grain-oriented polycrystalline alumina by colloidal processing, Journal of the American Ceramic Society, 99, 3217-3219 (2016). 査読有 DOI: 10.1111/jace.14476
 - 16) Tsuyoshi Hondo, Zenji Kato, Kouichi Yasuda, Fumihiko Wakai, Satoshi Tanaka, Coarse pore evolution in dry-pressed alumina ceramics during sintering, Advanced Powder Technology, 27,

1006-1012 (2016). 査読有 DOI: 10.1016/j.appt.2016.04.009

17) Satoshi Tanaka, Yoshihiro Nagasawa, Zenji Kato, Complicated flow behavior of silica particles in concentrated slurry, 粉体工学会誌 53, 294-300 (2016) 査読無 DOI: 10.4164/sptj.53.294

18) Satoshi Tanaka, Shota Goi, Zenji Kato, Influence of granule characteristics on fabrication of translucent alumina ceramics with high strength and reliability, Journal of the Ceramic Society of Japan, 124, 426-431 (2016). 査読有 DOI: 10.2109/jcersj2.124.P4-1

19) 田中諭, 光学的異方性をもつ結晶系でのセラミックスの透明化, OPTRONICS, 35, 69-74 (2016). 査読無

20) Okuma Gaku, Kadowaki Daiki, Hondo Tsuyoshi, Tanaka Satoshi, Fumihiko Wakai, Interface topology for distinguishing stages of sintering, Scientific Reports, 11106 (2017) 査読有 DOI: 10.1038/s41598-017-11667-2

21) Gaku Okuma, Jesus Gonzalez-Julian, Olivier Guillon, Fumihiko Wakai, Comparison between sinter forging and X-ray microtomography methods for determining sintering stress and bulk viscosity, Journal of the European Ceramic Society, 38, 2053-2058 (2018). 査読有 DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2017.12.028

22) Fumihiko Wakai, Olivier Guillon, Gaku Okuma, Norimasa Nishiyama, Sintering forces acting among particles during sintering by grain boundary/surface diffusion, Journal of the American Ceramic Society, 査読有 DOI: 10.1111/jace.15716

23) Tsuyoshi Hondo, Kouichi Yasuda, Fumihiko Wakai, Satoshi Tanaka, Influence of binder layer of spray-dried granules on occurrence and evolution of coarse defects in alumina ceramics during sintering, Journal of the European Ceramic Society, 38, 1486-1852 (2018), 査読有 DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2017.12.014

24) 田中諭, 異方性結晶における透明多結晶セラミックスの開発, 日本セラミックス協会 Ceramics Japan, 52, 238-241 (2017). 査読無

25) 田中諭, セラミックスの脱脂体構造可視化と後工程への影響, 日本セラミックス協会 Ceramics Japan, 53, 9-12 (2018). 査読無

26) 大熊学, 菅近駿, 田中諭, 若井史博, X線マイクロトモグラフィ法による焼結過程の微構造の3次元可視化と巨視的力学量の評価, 粉体及び粉末冶金, 64, 495-500 (2017). 査読有

[学会発表](計81件)

- 1) F. Wakai, Mechanics of sintering in micro- and macro-scales, International Conference on SINTERING 2014, 2014年8月24日~8月28日, International Congress Center Dresden, Dresden, Germany. (招待講演)
- 2) F. Wakai, Tensor-Virial equation in sintering of aggregates of particles, 1st International conference on computational methods in manufacturing processes 2014, 2014年9月2日~9月4日, Ecole des Mines, Saint-Etienne, France. (招待講演)
- 3) S. Tanaka, K. Yasuda, H. Kita, M. Takahashi, Y. Takahashi, S. Honda, T. Mitsuoka, H. Muto, S. Yamamoto, Y. Yoshizawa, Observation of internal structures in porous ceramics by micor X-ray CT, 40th International Conference and Exposition on Advanced Ceramics and Composites (ICACC), 2016年1月28日, Daytona Beach, USA. (招待講演)
- 4) S. Tanaka, T. Hondo, F. Wakai, K. Yasuda, Observation of development of internal pores in dry-pressed alumina ceramics, 40th International Conference and Exposition on Advanced Ceramics and Composites (ICACC), 2016年1月28日, Daytona Beach, USA. (招待講演)
- 5) S. Tanaka, T. Hondo, Z. Kato, K. Yasuda, F. Wakai, Development of coarse defects in alumina ceramics during sintering, 25th Annual Meeting of MRS-Japan 2015, 2015年12月8日, 横浜 (招待講演) 他

[図書](計1件)

- 1) 田中諭 (分担), 技術情報協会, 全固体電池のイオン伝導性向上技術と材料, 製造プロセスの開発 (担当 粉体成形セラミックスにおける製造プロセスの最適化技術 (p.346-353) 2017

[産業財産権]

出願状況 (計0件)

取得状況 (計0件)

[その他] なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

若井 史博 (Wakai, Fumihiko)
東京工業大学・科学技術創成研究院・教授
研究者番号: 30293062

(2) 研究分担者

田中 諭 (Tanaka Satoshi)
長岡技術科学大学・工学部・准教授
研究者番号: 20324006