

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 29 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23685047

研究課題名(和文) 固体アイオニクス技術を活用した振動発電素子の開発

研究課題名(英文) Utilization of ionic conduction for developing ceramic electrets applicable to vibration power generator

研究代表者

田中 優実 (Tanaka, Yumi)

東京理科大学・工学部・准教授

研究者番号：00436619

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 21,200,000円、(間接経費) 6,360,000円

研究成果の概要(和文)：静電式振動発電機とは、静電場を提供する物質であるエレクトレットと対向電極を基本構成とする振動駆動型発電機であるが、今後の普及に向けて、出力の向上が大きな課題となっている。静電式振動発電機の出力向上に向けた最も効果的な手段は、エレクトレットの表面電位を増大させることである。そこで本課題では、既存のポリマーではなく、イオン伝導製セラミックスを基材とする新たなエレクトレット材料の開発を目指した。結果、生体材料である水酸アパタイトにプロトン欠陥を導入したオキシハイドロキシアパタイトを基材とすることで、1000 V超の表面電位を、実測ベースで1年間以上維持し続ける高性能エレクトレットの作製に成功した。

研究成果の概要(英文)：An electret power generator can convert low-frequency vibrations (1-100 Hz) directly into electricity, however, the applications are limited because of its low electrogenic ability. Although the higher surface potential on the electrets is effective to promote the power density, the potential level of currently-used polymer electrets is almost saturated due to their poor resistivity against the hard charging treatment. Hence we aimed to develop new ceramic electrets based on the approach of controlling ionic migrations and their congelation within the ceramics. Through this study, we found that oxyhydroxyapatite (OHA) could be polarized under a dc electrical field at elevated temperature. The surface potential on polarized OHA ceramics reached above 1000 V, which was stable at least over a year. Considering the fact that the surface potential of polymer electrets is limited to several hundred volts, OHA electrets should be promising materials applicable to the electret power generator.

研究分野：化学

科研費の分科・細目：材料化学・無機工業材料

キーワード：セラミックス イオン結晶 誘電体物性 表面・界面物性 新エネルギー

1. 研究開始当初の背景

(1) 静電式振動発電機について

日常生活においては、人の歩行や乗り物の移動に際して 1~100 Hz の振動が常に発生している。最近になって、このような「環境振動」をエネルギー源として有効活用しようとする動きが活発化してきた。

環境振動を価値の高いエネルギーである電力に直接変換するためのシステムの一つに、静電式振動発電機がある。これは、エレクトレットと呼ばれる永続帯電材料が作り出す電場空間内で対向電極を相対的に振動させることで、電極内の静電誘導電荷量を変化させ、交流電流の発生に至らしめる自立型発電機¹⁾である。低周波振動から効率よく電流が取り出せることに加え、小型化が容易で集積回路内への組み込みも可能であるため、試作段階ながら、この方式による自己発電型の万歩計や腕時計がすでに開発されている。ただし発電量が小さいために応用範囲が限定されているのが課題であり、今後様々なアプリケーションに利用してゆくためには、少なくとも現状より 1~3 桁高いレベルまで発電量を向上させなければならない。

静電式振動発電機の最大出力 P_{max} は、Boland ら²⁾によって提案された次式で表すことができる。

$$P_{max} = \frac{q^2 n A f}{4 \frac{\epsilon_r \epsilon_0}{d} (\frac{\epsilon_r g}{d} + 1)}$$

ここで、 q はエレクトレットの表面電荷密度、 n はエレクトレットの配置数、 A はエレクトレットと対向電極の重なり面積の最大値、 f は印加振動の周波数、 ϵ_r と ϵ_0 はそれぞれエレクトレットの比誘電率と真空の誘電率、 d はエレクトレットの厚み、 g は対向電極とエレクトレットとの距離である。この式によると、電極や素子の幾何学的配置 (n 、 A 、 d 、 g) および印加する振動 (f) が同一であれば、

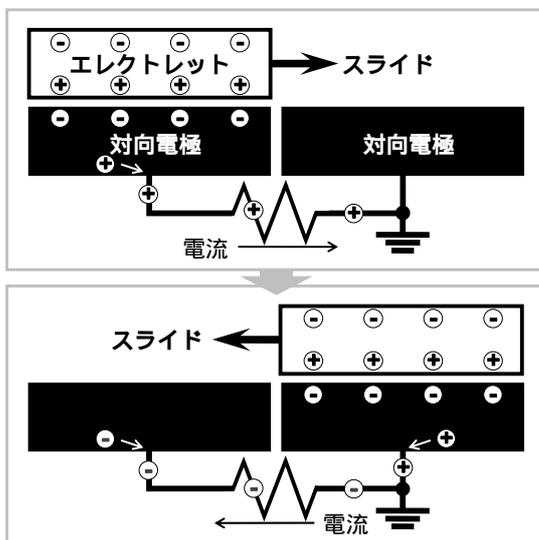


図1 静電式振動発電機概念図

P_{max} はエレクトレットの表面電荷密度 q (正確には表面電位 E_s : $E_s = dq/\epsilon_r \epsilon_0$) の二乗に比例して増加することになる。すなわち、静電式振動発電機の出力を向上させるための最も効果的な手段は、エレクトレットの表面電荷密度 q (E_s) を飛躍的に増大させることであるものと理解できる。しかし、現在試作されている静電式振動発電機に利用されているポリマー製エレクトレットの場合、耐熱性や対絶縁破壊性の観点から帯電処理の条件に制約があり、 q を飛躍的に向上させるのは難しい。従ってエレクトレットの改良によって静電式振動発電機の飛躍的な出力向上を狙うためには、既存のポリマー素材にはよらない、新たな基材を検討することが重要となる。ここで筆者は、イオン伝導性セラミックスを、振動発電用エレクトレットの基材として利用したいと考えた。

(2) 水酸アパタイトエレクトレット

イオン伝導性セラミックスとはその名の通り、「焼きもの」でありながら、電解液のようにイオンによって「電気が導かれる材料」である。ただし、イオン伝導体を介して直流電界下で電気が導かれるのは、イオン伝導体と電極の界面で定常的に電荷移動反応が進行するためであり、言い換えるなら、電極反応を遮断することができれば、イオン伝導体はきわめて長距離にわたってイオンが変位することのできる優れた誘電体とみなすことができる。この観点に立脚し、筆者らはこれまで、イオン伝導体中のキャリアを移動途中で凍結させるというコンセプトに基づいて、生体材料としての用途に向けた水酸アパタイトエレクトレットの開発³⁾に取り組んできた。

水酸アパタイト ($\text{Ca}_{10}[\text{PO}_4]_6[\text{OH}]_2 : \text{HA}$) は生体材料であると同時に、僅かではあるものでもプロトン伝導性を有するイオン伝導体⁴⁾である。従って、比較的高い温度で HA に直流電界を印加すると、プロトンの移動に起因して分極が生じ、さらに電界を印加したまま室温まで冷却すると分極状態が凍結されるため、HA を基材とするエレクトレットを作製することができる。実際筆者らはこの手法により、本研究の開始時点において、振動発電用の素子として利用するには低い表面電位レベル (数十~数百 V) ではあったものの、最大 1 Cm^{-2} に至る高密度な「蓄積電荷」を有する HA エレクトレットの作製に成功していた。

2. 本研究の目的

上述のように、イオン伝導性セラミックスをエレクトレット化する際のコンセプトは、直流電界下でのイオン分極の誘起とその凍結であり、したがって、この手法を用いて高密度かつ長寿命な表面電荷をセラミックス上に形成するためには、多くのイオンを長距離にわたって移動させるとともに、移動したイオンをできるだけ「深い準位」にトラップしておく必要がある。

ところで、HA を大気中で焼成すると、800 °C 付近で水酸化物イオンの脱離が進行し、オキシ水酸アパタイト($\text{Ca}_{10}[\text{PO}_4]_6[\text{OH}, \text{O}, \text{Vacancy}]_2$; OHA) が生成する。OHA セラミックスは、水蒸気中の焼結処理が必要となる HA セラミックスよりも作成が容易であることに加え、HA と比較して高いイオン伝導性およびイオン移動の活性化エネルギーを有していることから、HA よりも優れたエレクトレット基材であると考えられた。しかし、本研究の開始時点においては、エレクトレットの作製という観点から OHA セラミックスを系統的に評価するには至っていなかった。このような背景に基づき、本研究では、OHA セラミックスに照準を合わせ、そのイオン伝導特性および分極特性に関する系統的な評価を通じて静電式振動発電機の高出力化に直結する高性能セラミックエレクトレットの提供を目指した。さらに、得られたエレクトレット上に帯電パターンを形成する技術の確立を試みるとともに出力特性の関係を検討したが、本報では主に、前者に関する研究成果を報告する。

3. 研究の方法

(1) 焼結体の作成とキャラクタリゼーション

市販の HA 粉末を圧粉体ディスクに成形し、1250 °C で 2 h、HA の場合には水蒸気供給下で、OHA の場合には大気下でそれぞれ焼成することで焼結体ディスク ($10 \sim 11 \text{ mm} \times \text{T} 0.7 \sim 1 \text{ mm}$ 、焼結率 = 約 90%) を作製した。焼結体の微構造と結晶相は、走査型電子顕微鏡 (SEM) 像および粉末 X 線回折 (XRD) パターンからそれぞれ評価し、水酸化物イオンの量は、フーリエ変換型赤外分光 (FT-IR) スペクトルにおける、リン酸イオンの伸縮振動に起因する吸収帯 (960 ~ 1090 cm^{-1}) と、水酸化物イオンの伸縮振動に起因する吸収ピーク (3570 cm^{-1} 付近) との積分強度比 ($I_{\text{PO}_4}/I_{\text{OH}}$ と表記) より概算した。また、イオン伝導特性は、室温 ~ 850 °C の温度範囲、 $10 \sim 10^7 \text{ Hz}$ の周波数範囲における複素インピーダンス測定結果より評価した。

(2) エレクトレットの作成と評価

焼結体ディスクに金電極をスパッタ製膜したのち、これをシリコンペースト中で 200 °C に加熱し、 $2 \text{ kV} \sim 80 \text{ kVcm}^{-1}$ の直流電界を 1 時間印加することでエレクトレットを作成した。この際、冷却過程における分極緩和を阻止するため、電界は、焼結体ディスクの温度が完全に室温となるまで印加し続けた。得られたエレクトレットの分極状態は、室温から 800 °C までの等速加熱 (昇温速度 = 5 Kmin^{-1}) 過程でエレクトレットの熱的分極緩和に起因して発生する熱刺激脱分極電流 (TSDC) の温度依存性およびケルビンプローブ方式による表面電位の測定結果より評価した。なお、各試料の蓄積電荷量 Q は、TSDC 測定において検出された脱分極電流 I を時間積分することにより見積もった。

4. 研究成果

(1) 焼結体のキャラクタリゼーション

作製した焼結体ディスクの SEM 観察を行ったところ、HA と OHA の微構造にはほとんど差異はなく、共に平均粒径が約 2 μm の緻密な焼結体となっていることが確認された。また両者の XRD ピークは全て六方晶アパタイト (空間群 = $\text{P6}_3/\text{m}$) として帰属可能であったことから、HA と OHA が目的のアパタイトの単一相となっているものと判断できた。

図 2 は HA と OHA の FT-IR スペクトルである。570 から 600 cm^{-1} および 960 から 1090 cm^{-1} にかけて HA 骨格中のリン酸イオンに特徴的な変角振動および伸縮振動由来の吸収が表れており、これらの位置および強度、すなわちリン酸イオンの結合環境および含有量は焼結雰囲気の影響をほとんど受けないことが分かった。対して、水酸化物イオンの伸縮振動と伸縮振動にそれぞれ由来する 630 および 3570 cm^{-1} 付近のピークに注目したところ、HA に比して OHA の吸収強度が顕著に低下している様子が確認できた。これは、OHA の焼結処理過程において、HA の水酸化物イオンが部分的に脱離したこと ($2\text{OH}^- \rightarrow \text{O}^{2-} + \text{H}_2\text{O}$) を反映している。 $I_{\text{PO}_4}/I_{\text{OH}}$ の算出値から、OHA 中の水酸化物イオン含有量は HA の半分程度となっているものと予想された。

HA の分極発生の起源はプロトン伝導であり、これは主に c 軸に沿って並んだ水酸化物イオン間で形成される水素結合を介して生じる⁴⁾ものと報告されている。従って OHA は、伝導キャリアであるべきプロトン量が少ないこと、水酸化物イオンの脱離により水素結合チャンネルが部分的に断絶していることから、キャリア濃度と移動度の両面で、HA よりもイオン伝導性に劣る化合物であると考えられた。しかし実際には、「2」でも述べたとおり、イオン伝導の活性化エネルギーこそ HA より高いものの、OHA の導電率は HA より 2 ~ 3 倍程度高くなっている (図 3) XRD

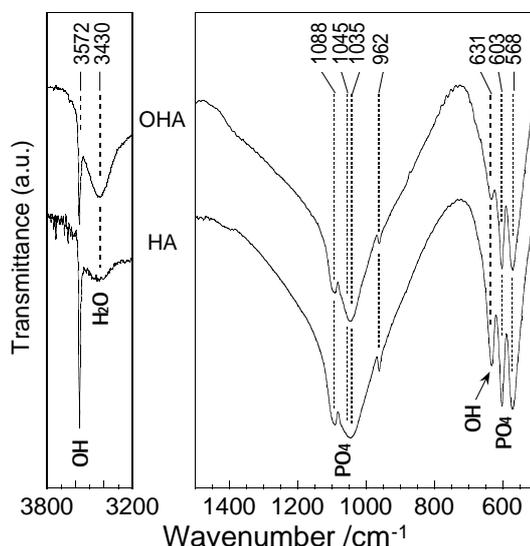


図 2 HA および OHA の IR スペクトル

測定結果に対して別途行った Rietveld 解析の結果⁵⁾を考慮すると、これはおそらく、OHA におけるプロトン伝導が、HA に対して提案されている1次元パスを介した伝導のみならず、リン酸イオンを利用した3次元パスを介して生じているためであると考えている。

(2) OHA エレクトレットの分極性能

HA および OHA に対して200 °C で1時間、大気中で 10 kVcm⁻¹ の直流電界を印加することで作製した HA および OHA エレクトレットの TSDC 測定を行ったところ、最大電流密度 I [Acm⁻²] は、OHA において HA の約3倍、蓄積電荷量 Q [Ccm⁻²] は、約1.5倍大きく、OHA が HA よりも優れたエレクトレット基材であることが示された。以降、OHA エレクトレットの分極性能に特化して報告する。

図4は、OHA に対して200 °C で1時間、2~80 kVcm⁻¹ (実電圧=0.2~8 kV) の条件で作製した OHA エレクトレットの TSDC 測定結果であり、図5は、TSDC 曲線から算出した各エレクトレットの蓄積電荷量と印加電界の関係である。未分極を除く全ての試料において TSDC ピークが検出され、OHA 表面に電荷が形成されていることが示された。また、蓄積電荷量は印加電圧が増加するにつれて、ほぼ直線的に増加してゆくことが分かった。

ところで、狭義の誘電体とイオン伝導体の最大の違いは、直流電界中に置かれた時、狭義の誘電体の場合にはキャリアが瞬時に変位した後、そこから移動することがないのに対して、イオン伝導体の場合には隣接サイトへジャンプしたキャリアがさらに次のサイトへと飛び移ることができるために継続的な移動が生じるという点である。すなわち、もし電極界面における電荷移動反応が無視できるのであれば、直流電界印加中に固体内で流れた電流はそのまま電荷として材料に蓄積されることになるため、総蓄積電荷量 Q と印加電圧 E の間には理想的に以下のような関係が成立するものと考えられる。

$$Q = tIl = tI\sigma E = (\sigma_0 t I E / T) \exp[-Ea / (kT)]$$

ここで、 t は処理時間、 l はキャリアの可動距離、 I は電流密度、 σ は直流導電率、 T は分極温度、 σ_0 は σ の pre-exponential factor、 Ea はイオン伝導の活性化エネルギー、 k は Boltzmann 定数である。したがってこの場合、 Q は温度の関数であるとともに、 t と E に対して正比例の関係を示すことになる。すなわち、図5において印加電界と蓄積電荷量の間に関係が見られたのは、OHA への分極処理に際して「イオンが固体内に電荷として蓄積された」ことを反映しているものと考えられた。

図6は、OHA エレクトレットの表面電位と印加電界の関係である。印加電界が 2~40 kVcm⁻¹ の範囲において、表面電位の絶対値は印加電界の増加とともにほぼ直線的に増大したのに対し、40 kVcm⁻¹ 以上の処理電界においては、増大挙動が緩慢化してゆく傾向を示す

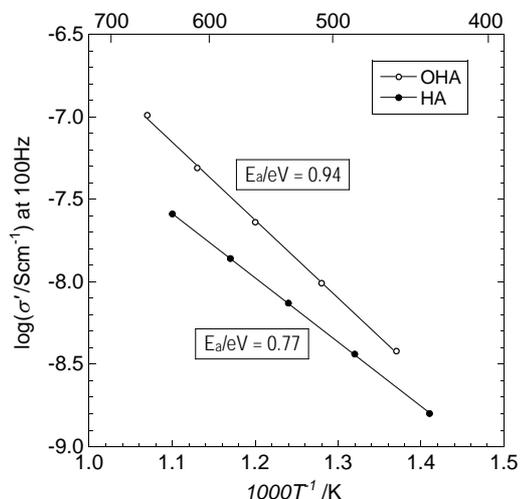


図3 HA および OHA の 100 Hz における複素導電率のアレニウスプロット

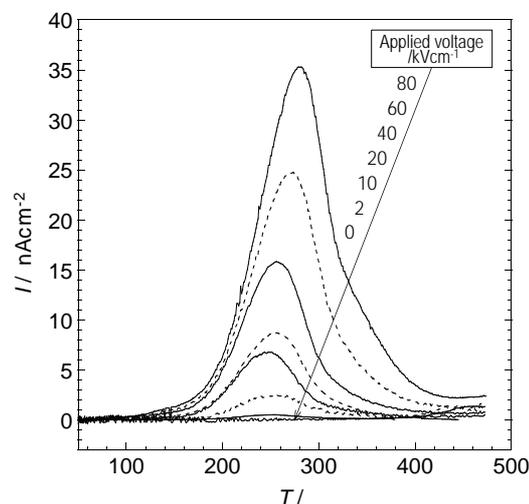


図4 OHA エレクトレットの TSDC 曲線
分極温度: 200 °C、分極時間: 1 時間
分極処理電界: 2 ~ 80 kVcm⁻¹

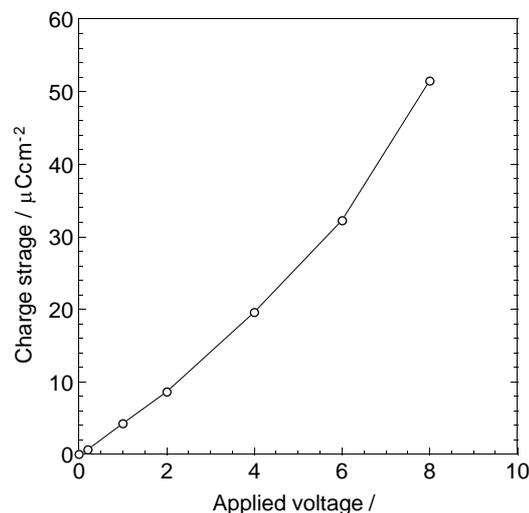


図5 OHA エレクトレットの分極処理電界と蓄積電荷量の関係
分極温度: 200 °C、分極時間: 1 時間

ことが分かった。また、全ての試料において、表面電位はアノード側で正の値、カソード側で負の値を示しており、これはイオン伝導による分極形成から予想される結果とは逆の傾向である。おそらく、試料内部ではイオン伝導による分極形成により電荷が蓄積されているものの、最表面においては、分極処理時に電極から注入された電荷が試料内部の蓄積電荷と二重層を形成する形で、表面電位の形成に寄与しているものと考えられた。図7は、200 で1時間、80 kVcm⁻¹の直流電界下で作製したOHAエレクトレットを、必要に応じて除湿のための熱処理(100 で3時間)を行いながら、表面電位の経時変化を調べた結果である。実測ベースで1年間にわたって1000 Vを超える表面電位を保持し続けていることが確認され、OHAを基材とすることで、振動発電用の素子としての実装に足る表面電位と安定性を具備する新たなセラミックエレクトレットの提供が可能であることが示された。

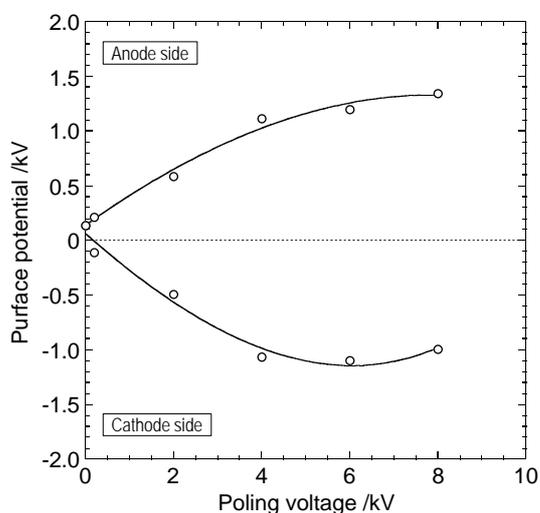


図6 OHAエレクトレットの表面電位
分極温度: 200、分極時間: 1時間
分極処理電界: 2~80 kVcm⁻¹

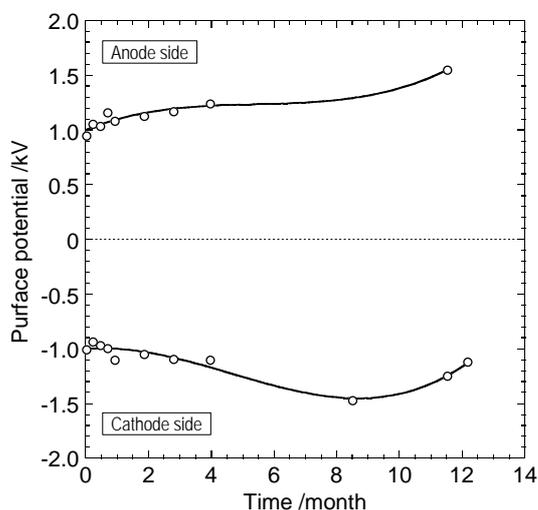


図7 200 で1時間、80 kVcm⁻¹の電界下
で作製したOHAエレクトレットにおける
表面電位の経時変化

参考文献

- 1) 鈴木雄二(監修), 環境発電ハンドブック, 株式会社NTS, pp. 1-25.
- 2) J.Boland, et al., 16th IEEE Int. Conf. Micro Electro Mechanical System, 2003, pp. 538-541
- 3) Y. Tanaka, et al., J. Appl. Phys., 107, 2010, pp. 014107 (10pages)
- 4) K. Yamashita, et al., J. Amer. Ceram. Soc., 78[5], 1995, pp.1191-1197
- 5) Y. Tanaka, et al., J. Jpn. Soc. Powder Powder Metallurgy, 57[7], 2010, pp. 520-528

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計12件)

- H. Tong, D. Chu, K. Zuo, Yu-Ping Zeng, N. Enomoto, M. Inada, Y. Tanaka, J. Hojo, Effect of Ni doping on the structure and properties of In₂O₃ nanocrystals prepared under magnetic field, 査読あり, Ceramics International, [40]7A, 2014, pp. 9121-9125
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.01.126>
- 田中優実, 固体電解質としての展開に向けた炭酸アパタイト系イオン伝導体の開発, 燃料電池, 査読なし, 13[4], 2014, pp. 54-59
- H. Tong, N. Enomoto, M. Inada, Y. Tanaka, J. Hojo, Hydrothermal synthesis of mesoporous TiO₂-SiO₂ core-shell composites for dye-sensitized solar cells, Electrochimica Acta, 査読あり, 130[1], 2014, pp. 329-334
<http://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2014.03.032>
- W. Yang, J. Hojo, N. Enomoto, Y. Tanaka, M. Inada, Influence of Sintering Aid on the Translucency of Spark Plasma Sintered Silicon Nitride Ceramics, Journal of the American Ceramic Society, 査読あり, 96[8], 2013, pp. 2556-2561
DOI: 10.1111/jace.12370
- W. Yang, J. Hojo, N. Enomoto, Y. Tanaka, M. Inada, Near Infrared Transmittance of Translucent Si₃N₄ Sintered Ceramics, Materials Letters, 査読あり, 196, 2013, pp. 155-157
<http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2013.01.040>
- W. Yang M. Inada, Y. Tanaka, N. Enomoto, J. Hojo, Fabrication of Translucent Silicon Nitride Ceramics with Various Sintering Aids, International Journal of Nanotechnology, 査読あり, 10[1/2], 2013, pp. 119-125
DOI: 10.1504/IJNT.2013.050888
- J. Hojo, H. Tong, S. Shintani, M. Inada, Y. Tanaka, N. Enomoto, Photovoltaic Properties of TiO₂-ZnO Composite Electrodes for Dye-Sensitized Solar Cells, Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy, 査読あり, 59[11], 2012, pp. 621-625
- 田中優実, 稲田幹, 榎本尚也, 北條純一, 山下仁大, イオン伝導性セラミックス表面における電荷固定, スマートプロセス学会誌, 査読あり, 1[4], 2012, pp. 167-178
- W. Yang, M. Inada, Y. Tanaka, N. Enomoto, J.

Hojo, Effects of Sintering Conditions and Additives on Translucent Silicon Nitride Ceramics, Materials Science Forum, Eco-Materials Processing and Design XIII, 査読あり, 724, 2012, pp. 282-286

DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.724.282

H. Tong, M. Inada, Y. Tanaka, N. Enomoto, J. Hojo, Dye Sensitized Solar Cells Based on ZnO Nanorod/TiO₂ Nanoparticle Composite Films, Materials Science Forum Eco-Materials, Processing and Design XIII, 査読あり, 724, 2012, pp. 397-403

DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.724.397

H. Tong, M. Inada, Y. Tanaka, N. Enomoto, J. Hojo, Preparation of Nanocrystalline ZnO/TiO₂ Film and Its Application to Dye-Sensitized Solar Cells, Functional Material Letters, 査読あり, 5[2], 2012, pp. 1260006/1-5

DOI: 10.1142/S1793604712600065

A. Nagai, K. Tanaka, Y. Tanaka, M. Nakamura, K. Hashimoto, K. Yamashita, Electric polarization and mechanism of B-type carbonated apatite ceramics, J. Biomed. Mater. Res. A, 査読あり, 99A[1], 2011, pp. 116-124

DOI: 10.1002/jbm.a.33131

〔学会発表〕(計 14 件)

Y. Tanaka, Challenges for development of new SOFC electrolyte made of "bone", 2nd FC International Meeting, 2014.2 (招待)

田中優実, 久貫悠美, 北條純一, 炭酸アパタイトの酸化イオン伝導に及ぼすフッ素添加効果, 第 52 回セラミックス基礎科学討論会, 2014.1

田中優実, 水酸アパタイト系セラミックスのイオン伝導特性とその応用展開, 第 52 回セラミックス基礎科学討論会, 2014.1 (招待)

田中優実, 久貫悠美, 北條純一, フッ素置換 B 型炭酸アパタイトの合成と酸化イオン伝導特性, 有機エレクトロニクス研究会, 2013.12

田中優実, SOFC 用電解質としての展開に向けた炭酸アパタイト系イオン伝導体の開発, FC 懇談会第 34 回定例講演会, 2013.11 (招待)

田中優実, アパタイト型化合物の構造と電気化学的機能, 東北大学多元物質科学研究所第 2 回新機能無機物質探索研究センターシンポジウム, 2013.2 (招待)

田中優実, 松本孝平, 稲田幹, 榎本尚也, 北條純一, 欠陥過剰型ジルコニアセラミックスの誘電分散特性, 第 51 回セラミックス基礎科学討論会, 2013.1

田中優実, 超高密度な表面拘束電荷により触媒活性を発現するセラミックセレクトレット, 九州大学新技術説明会, 2012.11

田中優実, 久貫悠美, 稲田幹, 榎本尚也, 北條純一, フッ素添加炭酸アパタイトのイオン電導特性, セラミックス基礎科学

討論会第 50 回記念大会, 2012.1

田中優実, 久貫悠美, 稲田幹, 榎本尚也, 北條純一, 炭酸アパタイト系化合物の固体電解質特性, 第 37 回固体イオニクス討論会, 2011.12

田中優実, イオン伝導性セラミックスの新たな可能性～エレクトレットの創製とその活用～, 第 4 回ワークショップ 固体材料合成および評価技術の新展開, 2011.9

田中優実, 原浩之, 稲田幹, 榎本尚也, 北條純一, 酸素還元触媒反応活系に及ぼす静電場導入効果, 日本セラミックス協会第 24 回秋季シンポジウム, 2011.9

田中優実, イオン伝導体の新たな活用法～エレクトレットの可能性～, 電気化学会九州支部トークショー・イン・九州, 2011.9
Y. Tanaka, H. Hara, A. Nagai, M. Inada, N. Enomoto, K. Yamashita, J. Hojo, Electrically induced charge storage on zirconia ceramic electrets, 18th International Conference on Solid State Ionics, 2011.7

〔図書〕(計 1 件)

田中優実, “環境発電ハンドブック 第 3 章 9 「イオン電導を利用したセラミックエレクトレット材料”, 47-65, 株式会社 NTS (2012) 分担/編集委員長: 鈴木雄二

〔産業財産権〕

出願状況 (計 2 件)

名称: 触媒担体、触媒担体用エレクトレット、触媒反応系の製造方法、及び、触媒担体用エレクトレットの製造方法

発明者: 田中優実, 稲田幹, 榎本尚也, 北條純一
権利者: 国立大学法人 九州大学

種類: 特許

番号: 特願 2012-196205

出願年月日: 2012 年 9 月 6 日

国内外の別: 国内

名称: Catalyst Carrier, Electret for Catalyst and Manufacturing Method Thereof

発明者: Y. Tanaka, H. Hara, M. Inada, N. Enomoto, J. Hojo

権利者: 国立大学法人 九州大学

種類: 特許

番号: P126517-A (米国/仮出願)

出願年月日: 2011 年 9 月 6 日

国内外の別: 国外

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 優実 (Tanaka, Yumi)

東京理科大学・工学部工業化学科・准教授
研究者番号: 00436619