

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05353

研究課題名(和文)超精密酸化物光結晶化技術の開発とフレキシブル酸化物生体センサの創製

研究課題名(英文)Development of oxide photocrystallization technology and creation of flexible oxide biosensors

研究代表者

中島 智彦(Nakajima, Tomohiko)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・上級主任研究員

研究者番号：50435749

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：光結晶化を用いた生体センシング用フレキシブル酸化物は薄膜センサの創製に関し、紫外パルスレーザー照射時の膜物性の過渡現象計測を行い、結晶成長の時間変化に対する知見を得た。この現象理解により複数のパルス幅を有する光源や連続光との併用など種々の光アシスト効果が光結晶成長に対して有効であることを見出した。これらの知見を活かし、照射条件の最適化や中間層形成によるパルス照射時の膜物性制御を行って、樹脂基材上でのセラミックス配向成長や5 μm 厚の極薄樹脂基材や15 μm 径の極細樹脂ワイヤー素材上へセラミックスセンサ形成を実現し新たな生体センサデバイス構築に繋がる重要な知見を得ることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

セラミックスの高い機能をどのような基材の上にも付与可能なプロセス開発は次世代デバイス開発にとって非常に重要なキーテクノロジーとなる。セラミックスの低温成膜において光利用は極めて有望な解の一つであると認識されている。本研究で得られた照射時の結晶成長に対する理解をベースとして、光エネルギーの前駆体薄膜への緻密な投入と高度結晶化の両立が可能となると同時に新たな次世代生体モニタリングセンサ実現へ向けた指針が得られた。本研究成果は光結晶化即ち無機固体の高速結晶成長の肝を解き明かす学術的価値の創出とフィジカルウェルビーイングという社会課題達成の一助となる技術に育つものと期待される。

研究成果の概要(英文)：To create a flexible oxide thin-film sensor for biological sensing using photocrystallization, we measured the transient phenomena of film properties during ultraviolet pulsed laser irradiation and obtained knowledge of the temporal changes in crystal growth. This understanding of the phenomena led to the discovery that various photo-assist effects, such as the use of light sources with multiple pulse widths and continuous light, are effective for photocrystallization. Based on these findings, we optimized light irradiation conditions and controlled film properties during pulse light irradiation by forming an intermediate layer to realize oriented growth of ceramics on a resin substrate and formation of ceramic sensors on a 5- μm -thick ultra-thin resin substrate and 15- μm -diameter ultra-thin resin wire material, thereby gaining important knowledge for building new biosensor devices. This is an important finding that will lead to the construction of new biometric sensor devices.

研究分野：固体化学

キーワード：レーザー工学 セラミックス膜 フレキシブル材料 ウェアラブルデバイス センサ膜 光結晶成長
配向制御 酸化物材料

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

「Society5.0」は経済発展とエネルギーや健康問題などの社会課題解決の両立を目指す。この社会目標実現へ向け、ヒトや様々なモノから有用な情報を効率的にセンシングする技術の高度化が欠かせない。現在、特に注目される生体モニタリング用センサでは体温や心拍に加え、汗や血糖値情報の収集により未病対策など生活水準を大きく向上させ得るが、装着するセンサと身体の親和性が重要で、旧来のチップセンサを板状基板に実装するシステムでは対応しきれない。そのため、人体への装着に適した有機基材を用いるフレキシブル化が進められ、現時点ではセンサ材料も低耐熱性基材に製膜可能な有機材料が選択されている。しかし有機材料は化学的な安定性に難があるため、高いセンサ特性を持ち、化学的安定性に対しても信頼の高い酸化物材料を有機基材上に直接製膜可能な製膜手法が強く望まれ、柔軟性を有する酸化物薄膜センサを実現できれば多様なセンサ設計が可能となって生体内、表面、屋外など種々の過酷環境下でも機能を果たすデバイス開発が可能となる。一般的に酸化物の結晶化には通常、500～1200 の高温が必要で、物理蒸着法などの薄膜育成技術で結晶質の膜を得るには真空中 300～600 程度の基板加熱が必要で製膜温度に制限が生まれる。そこで、“化学溶液法”、“光結晶化”の二つを軸に酸化物の室温結晶化技術開発を進めてきた。本手法を Photo-assisted Chemical Solution Deposition (PCSD) と呼ぶ。“化学溶液法”は原料溶液塗布・焼成によって低コスト・簡便に酸化物膜を得る手法で、様々な酸化物膜をパターンニングから大面積製膜まで広範に用いることが出来るが、結晶化においては 500～800 前後の高温加熱を必要とし、有機基材への適用は困難である。そこでもう一つの技術キーワードである“光結晶化”の研究を進めた。光結晶化は化学溶液法で塗布形成した前駆体膜に侵入長の浅い紫外光をランプやパルスレーザーを用いて照射し、基板加熱を行わず局所的なエネルギー投入によって室温で酸化物の結晶化を図る。そのため“光結晶化”はフレキシブル酸化物センサを始めとする多様な酸化物材料と有機基材との複合化に対する極めて有望な基礎技術となった。これらの研究開発により紫外パルス光照射時の光結晶化の機構の解明¹や世界初の紫外ランプ照射による多元系酸化物の室温結晶化²を始めとする光結晶化研究を推進し、光結晶化を用いた機能性酸化物薄膜の室温製膜や有機基材上への酸化物薄膜サーミスタセンサの作製などの研究へ展開してきた。PCSD 法は基板・薄膜対象材料の光吸収が重要であるため紫外光を用いることが有効で、紫外パルス光照射手法は前駆体膜に対して“パルス光加熱効果”と“反応界面の光化学的効果”を利用して広範な材料に適用できる。一方、投入エネルギーの尖頭値が連続光と比べて非常に高く、有機基材上への製膜を検討する場合、前駆体の調整と光照射法の最適解が得られなければ高品質な室温結晶成長が難しく、極めて薄い有機基材を用いる際、フレキシブル性と高結晶性の両立ができなかった。これには“光結晶化”の光照射時のナノ秒スケールで進行する結晶成長機構の理解とその結晶化時間の制御が不可欠であると理解される。

2. 研究の目的

PCSD 法における光結晶化を用いれば酸化物を室温でも結晶化させられることを明らかにし、有機基材上でも酸化物材料を製膜可能にする条件の一端を明らかにしたが、光結晶化の最大のゴールの一つとして設定する生体センシング用フレキシブルセンサのような次世代フレキシブル酸化物の実現には次の大きな課題がある (1)膜の微細化、(2)有機基材上でも制御できる配向結晶性高結晶膜が必要。現時点の技術では 1 μ m 以上の膜厚で基材の厚みも 50 μ m 程度であり、曲率半径 5mm 以下には曲げられず、実用的な生体センサの柔軟性には本研究のブレークスルーが不可欠である。また、薄く小さな酸化物薄膜を高結晶化させることは機能を最大化する上で不可欠であるが、有機基材上で結晶化のためのエネルギーを自由に投入できない制約がある中、非常に難易度が高い。応用上重要なこの二つの課題を克服するために必要なことが“光結晶化”のトリガとなる“光化学的効果”である。反応を期待する界面において光吸収をもたせ反応界面の結晶格子と対象材料の結晶格子のミスマッチを小さくすれば極めて高速に結晶成長を進行させられる。また、パルス光照射時の結晶成長の時間変化を正確に捉えられれば必要最小限なパルス光加熱効果となるように基材や中間層の熱物性値の制御を行う最適化が可能となる。これらの理解を通じて光エネルギーの前駆体薄膜への緻密な投入と高度結晶化を両立させ、基材へのダメージの大幅な低減と結晶成長の超高度化が実現することを本研究の目的とする。

3. 研究の方法

(1) 酸化物光結晶化の時間スケール理解と酸化物超精密結晶成長制御の実現

光結晶化のタイムスケールの定量的評価にはナノ秒パルス光源としてエキシマレーザー、YAG レーザー(4 倍波 266nm)を用い、結晶成長時の膜物性の時間変化を追う。ここから得られる情報を基に結晶成長時のイオン拡散を最大化する必要最小限のパルス光加熱効果を発現させる基材や中間層について熱拡散シミュレーションで得られるパルス光加熱の時間変化と合わせて薄膜材料構成と光照射条件の制御法を確立し、これまで実現してきた光結晶化による配向成長など高品質薄膜成長を極薄有機基材上でも可能にすることで目的のフレキシブル酸化物薄膜特性の最大化を実現する。

(2) 光結晶化を用いた生体センシング用フレキシブル酸化物センサの創製

項目(1)で緻密に最適化した条件を基にフィルム厚 10 μm 以下の極めて薄い有機基材上へ薄膜・微細酸化物センサ及び電極膜を形成し、酸化物サーミスタ材料などマイクロセンサとして機能するセラミック膜を製膜し膜厚を数百 nm 以内抑えた上で 10,000 回の屈曲耐性を有し、現行のチップ型センサの特性に匹敵する実用性の高いフレキシブル酸化物センサの実現を達成目標とする。

4. 研究成果

(1) 光結晶化時の過渡的变化

光結晶化を用いた生体センシング用フレキシブル酸化物薄膜センサの創製に関し、伝導性酸化物酸化物の前駆体膜に対し、紫外線パルスレーザー光を照射しながら伝導特性を計測する過渡現象計測実験を実施した。その結果、ナノ秒パルスレーザー照射によってパルス昇温の効果が得られると計算される数マイクロ秒よりも 10-100 倍以上長い期間に渡って結晶成長に伴うと考えられる抵抗値変化が観測された。この現象の観測により複数のパルス幅を有する光源の利用や連続光の併用など種々の光アシスト効果が光結晶成長に対して有効である可能性があることを見出した。ナノ秒パルスレーザーかつ、1kHz 以下の周波数を用いる場合、単パルス内の成長機構を踏まえた照射条件選択、膜と基材の物性値を踏まえた成膜を行うことが可能であり、光照射の ON/OFF によって精密に制御可能であることが明らかになった。

(2) PCSD 法を用いる自由形状フィルムセラミックスの形成

PCSD 法は基板温度を十分に上げずとも、光照射とパルス光加熱の効果によって効率的な結晶成長が進む。これにより、産業応用に適した多結晶成長のスループット向上が可能となり、基材選択の自由度も増す。樹脂基材が選択可能となることによって、基材の形状を問わない成膜、即ち、形状可変あるいは3次元構造を有する自由形状素材上へのセラミック成膜が可能となり、これまでにない“自由形状フィルムセラミックス”を形成することができる。以下、本研究で成功したフレキシブルサーミス形成の結果を報告する。

薄膜サーミスタ材料の樹脂基材上への適用はまず、塗布インク原料とするナノ粒子分散液の粒子径と塗布形成した前駆体膜への紫外パルスレーザーの照射エネルギーの制御により、結晶成長と基材ダメージの抑制を両立させる調整を行った。この制御を精緻に行うことにより、超薄型(厚さ 5 μm)かつ軽量(21mg)という極めて薄く軽量の基材上へのフレキシブルサーミスタの成膜を可能にした。サーミスタ材料にペロブスカイト酸化物 $\text{Sm}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Mn}_{0.9}\text{Ni}_{0.1}\text{O}_3$ (SSMN)を用い、5 μm 厚のポリイミド(PI)基板上へ屈曲耐性の高い下部電極を配した後、PCSD 法にて SSMN の成膜を行って 3x3 素子の極薄サーミスタアレイシートを作製した。工程を図3に示す。まずポリイミド樹脂へ電極パターンをフォトマスクを介して 50mJ/cm² で KrF レーザーを照射した。照射部は炭化する際、自己組織化ミクロ構造体を形成する。樹脂厚が非常に薄いために照射エネルギーの精密な制御が必要であり、炭化による焼損を防ぎながら炭化パターンを作製した。次にパターンを作製したカーボン μ 構造体へ Ag ナノ粒子、ナノワイヤーを連続して含浸し、200 °C で焼成する

ことによってフレキシブル性のある下部電極の作製に成功した。得られた下部電極として十分に低い抵抗値(0.074 Ω)を示し、鋭い曲げ角に対して良好な安定性を示した($R=1.085 @ 180^\circ$ 屈曲時)。

次いで、センシング部分の櫛型電極上へジェットディスペンサを用いてペロブスカイトナノ粒子分散インクを印刷した前駆体フィルムにパルス紫外線レーザーを 55mJ/cm² で照射し、厚さ 900nm のドット状(直径 900 μm)のペロブスカイトサーミスタ膜を形成した(図1(a))。55mJ/cm² の KrF レーザー照射により得られたサーミスタ膜は X 線回折ピークの増大が観測され(図1(b))、電気抵抗率の減少と B 定数は 2820K が得られ(図1(c))、サーミスタとして十分な機能を得ることに成功した。サーミスタセンサシートは、温度変化に対する応答が速く、室温から 80 °C までの温度サイクル試験において 1000 サイクル以上の高い安定性を示している。また、小さな曲げ半径(500 μm)で 60 °C

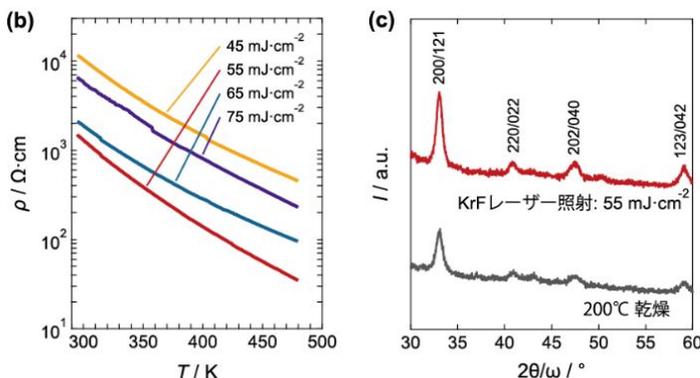
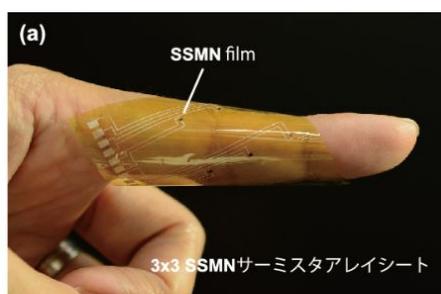


図1 (a)極薄 SSMN サーミスタシート、(b)SSMN サーミスタの電気抵抗率の温度変化、(c)塗布乾燥及び KrF レーザー照射による SSMN 膜の XRD パターン

曲げ角度に対する曲げ耐久性も高い。1000 回以上の曲げ試験において、モニター温度の変動は 0.1 以内に抑制された。この超薄型センサーアレイシートは、形状変化のある表面への実装が可能であり、運動中の人体皮膚の温度変化を正確に検出するために、ヘルスケアにおけるリアルタイムモニタリングなどへの活用が期待される。本成果は ACS Appl. Mater. Interfaces 12 (2020) 36600., Sensors 22 (2022) 01996.での発表等を通じ高い評価を得ている。

このようなフレキシブルなフィルムは“自由形状フィルムセラミックス”として最もシンプルな形状となる。同様の手法を用いて、3次元構造体上への成膜など新たな展開を可能にするため、同じくサーミスタ材料を 15 μm 径の極細樹脂細線上へ成膜した。これまで平面的な基板上への

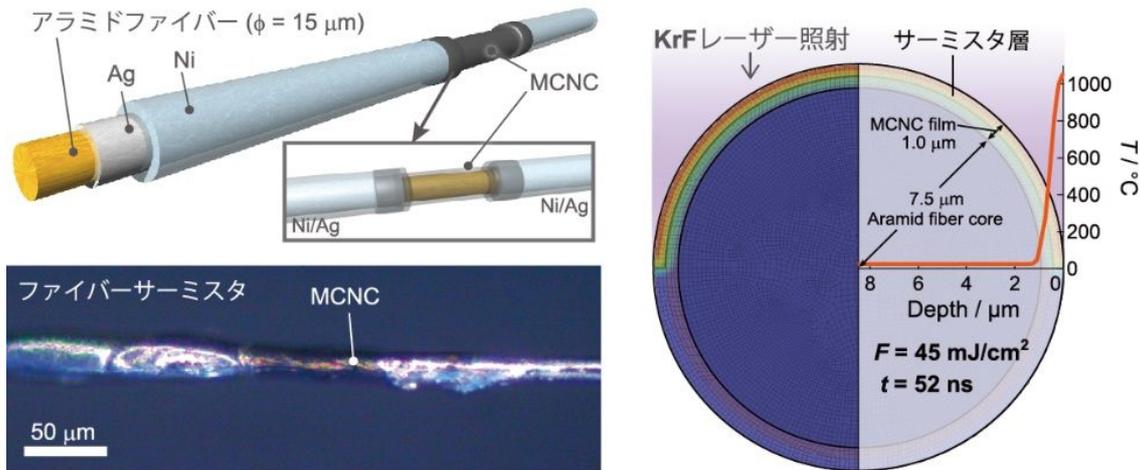


図 2 15 μm 極細アラミドファイバーへ形成した MCNC サーミスタの構造図と顕微鏡写真。ファイバー状に形成した MCNC サーミスタへ KrF レーザーを照射したときの 2 次元温度シミュレーションマップ

作製を行ってきたが、基材形状を円柱形上へ拡張させた結果となる。本研究では、15 μm 径の極細アラミド繊維上にスピネル $\text{Mn}_{1.4}\text{Co}_{0.9}\text{Ni}_{0.5}\text{Cu}_{0.2}\text{O}_4$ (MCNC) 膜サーミスタの前駆体膜を同じく微小塗布手法を用いて形成し、KrF レーザー照射による光結晶化法を用いて、室温結晶成長を進行させて作製した(図 2)。基材が微小となり、熱拡散方向が制限されるため、パルス光照射時のフルエンス制御はさらに精密に行う必要がある。本研究では 45 mJ/cm^2 で基材焼損を抑制しつつ、サーミスタ層の形成に成功した。断面方向の温度シミュレーション結果(図 2)では表面方向から膜/基材界面へ向けて急峻な温度勾配が発生していることを示しており、ここからも基材のダメージを抑制するために精密なフルエンス制御が必要であることが分かる。得られた超極細繊維サーミスタは、2767K という高いサーミスタ定数を持つ良好な半導体挙動を示し、応答速度も約 100ms と非常に速く、上昇速度

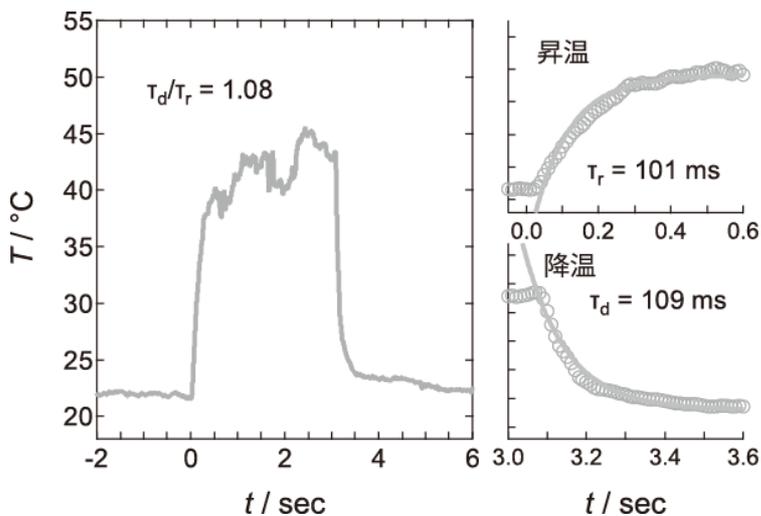


図 3 15 μm 極細アラミドファイバーの昇降温試験時のモニタリング温度。(抵抗値からモニタリング温度値へ変換)

と下降速度がほぼ同等であることがわかった(図 3)。このような高速応答は、繊維基板の断面積(S)が極小で、熱容量が小さいことに起因する。熱伝導シミュレーションの結果、15 μm コアファイバーサーミスタは、基板厚 60 μm のシート型サーミスタよりも、微細な物体の温度変化をより確実に検出できることがわかった。また、ファイバー型とシート型サーミスタの温度シミュレーションを行い、応答の立ち上がり(τ_r)と立ち下がり(τ_d)のタイムスケールが同等となり基板との熱流の影響を極めて小さくできていることも確認した。(サーミスタセンサが成膜あるいは実装される基板が測定対象物よりも有意に大きければ、センサへ流れ込む熱流はセンサ基板由来のものが無視できなくなり、何を測定しているか分からなくなる。) τ_d/τ_r は $\log S$ に比例するため、 τ_d/τ_r を 1.0 に近づけるために S の値をできるだけ小さくすることが非常に重要であることを意味しており、本 15 μm コアファイバーサーミスタでは、1.12 という小さな τ_d/τ_r 値を達成した。超微細な MCNC ファイバーサーミスタの迅速で正確な温度応答は、微小な温度センサーの候補として有望である。15 μm と同等の測定対象物は人体細胞からデバイス微

小回路など多岐に渡り、これまでにない微小部位測定に有効なセンサ構築が可能になると考えられる。このような自由形状素材への展開もゾル-ゲル法に代表される CSD 手法を用いれば場所を問わない成膜が可能になり、今後さらに意匠と機能が融合する新デバイス構築の実現が期待される状況となった。また、本成果は J. Mater. Chem. C 11 (2023) 2089. で発表を行い、Hot Article 及びカバー誌として選出されるとともに Advances in Engineering にて Significance 論文として紹介されるなど高い注目を集めた。

(3) PCSD 法によるフレキシブル 1 軸配向膜の形成

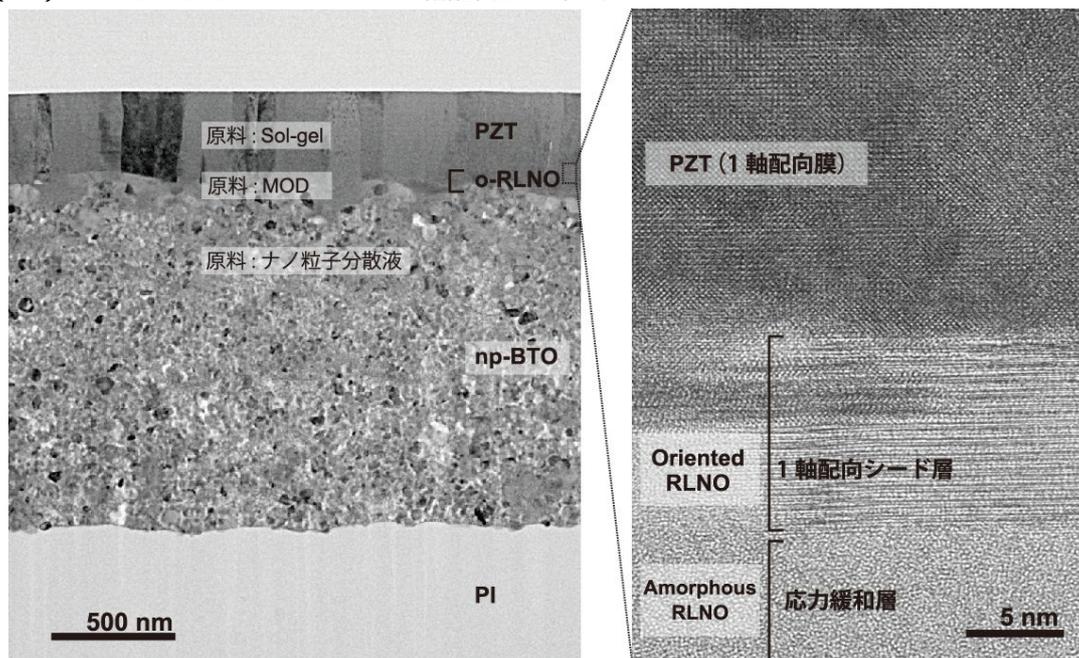


図 4 ポリイミド基板上へ作製した BaTiO₃ 層、1 軸配向 RbLaNb₂O₇ 層、1 軸配向 PZT 層の積層断面観察 TEM 像

アモルファス前駆体に紫外パルスレーザーを照射したとき、最表面から結晶核生成が起こる PCSD 法の特徴を利用すれば、1 軸配向膜を作製できる。2 次元的な結晶構造を有する Dion-Jacobson ペロブスカイト酸化物 RbLaNb₂O₇ を成膜すれば、層状構造を最表面に曝すように配向結晶核が生成する³。その核を中心に下方にホモエピタキシャル成長が進行するため、1 軸配向した RbLaNb₂O₇ 薄膜が得られることが分かっている。本研究ではこの配向性制御法を樹脂フレキシブル基材へ展開すべく検討を行った。前駆体膜への精密な光照射条件の設定とパルス光照射時の熱拡散の制御を行うことによって樹脂基材へのダメージを抑制しつつ配向成長させられる条件探索を行った。その結果、PI 基板上へ熱拡散層としての BaTiO₃ 層を中間層として成膜すれば、本プロセスを活用してフレキシブルな 1 軸配向 RbLaNb₂O₇ が得られることが明らかとなった。高い結晶性と、過剰な熱加熱による PI 基板表面の損傷を避けることを両立するために BaTiO₃ ナノ粒子分散を用いて中間膜を作製し、300 °C で 40mJ/cm² の条件で KrF レーザーを照射することで RbLaNb₂O₇ 配向成長させることに成功した。BaTiO₃/PI 基板上に作製した RbLaNb₂O₇ シード層は、非常に高い Lotgering factor ($F(010) = 1.0$) で (010)-配向成長を示した。この 1 軸配向膜をシード層として、PbZr_{0.52}Ti_{0.48}O₃ (PZT) 用ゾル-ゲル溶液を塗布乾燥して形成した前駆体膜に KrF レーザーを 50mJ/cm²、300 °C で照射することにより、(001)配向した PZT 膜の結晶成長に成功した (図 4)。得られた PZT 膜は、フレキシブル PI 基板上で $F(001)=0.92$ と高い (001)配向成長を示し、クラックの発生が見られない膜質を得ることに成功している。本作製条件において RbLaNb₂O₇ は RbLaNb₂O₇ アモルファス前駆体層の上部のみで一軸配向成長していることを確認した。この RbLaNb₂O₇ の配向成長相とアモルファス相は、この多層膜形成において、(1) 上部の PZT 膜の配向成長のトリガー、(2) 下層の BaTiO₃ 層の応力緩和によるマイクロクラックの発生抑制、という二つの重要な役割を果たすと考えている。エネルギーハーベスタとしてフレキシブル基板上に配向 PZT 膜を作製する試みは転写手法などが知られるが、基材上で直接結晶化させた例は、本例が初めてであり、塗布手法のオンデマンド性の高さは配向膜形成にも利用できる好例といえる。本成果は Materials 16 (2023) 2116. にて公表を行った。

以上のように光照射を用いたセラミックス膜の結晶成長について微細領域の現象理解を進め、配向制御を含め基材を選ばないセラミックスのオンデマンド製膜を実現した。

< 引用文献 >

- T. Nakajima *et al.* Chem. Mater. 20 (2008) 7344.
- T. Nakajima *et al.* Nature Mater. 7 (2008) 735.
- T. Nakajima *et al.* Cryst. Growth Des. 10 (2010) 4861.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Tomohiko Nakajima, Yuki Fujio, Tohru Sugahara, Tetsuo Tsuchiya	4. 巻 22
2. 論文標題 Flexible Ceramic Film Sensors for Free-Form Devices	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 1996-1~1996-28
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s22051996	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Nakajima Tomohiko, Tsuchiya Tetsuo	4. 巻 12
2. 論文標題 Ultrathin Highly Flexible Featherweight Ceramic Temperature Sensor Arrays	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 36600 ~ 36608
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acsami.0c08718	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nakajima Tomohiko, Tsuchiya Tetsuo	4. 巻 11
2. 論文標題 Ultrafine-fiber thermistors for microscale biomonitoring	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Materials Chemistry C	6. 最初と最後の頁 2089 ~ 2097
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1039/d2tc04548f	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nakajima Tomohiko, Kitanaka Yuuki	4. 巻 16
2. 論文標題 Printing Formation of Flexible (001)-Oriented PZT Films on Plastic Substrates	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Materials	6. 最初と最後の頁 2116-1 ~ 2116-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/ma16052116	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 中島 智彦
2. 発表標題 光結晶化が創るフレキシブルセラミックスフィルム
3. 学会等名 コーティング研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomohiko Nakajima, Tetsuo Tsuchiya
2. 発表標題 Flexible Ceramic Temperature Sensor Films for Free Form Devices
3. 学会等名 46th International Conference and Exposition on Advanced Ceramics and Composites（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中島 智彦、土屋 哲男
2. 発表標題 形状可変高耐久薄膜サーミスタセンサ
3. 学会等名 日本セラミックス協会2020年第33回秋季シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Nakajima Tomohiko, Tsuchiya Tetsuo
2. 発表標題 Pulsed Laser Processing for Ultra-Thin Flexible Ceramic Sensors
3. 学会等名 第30回日本MRS年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中島 智彦、土屋 哲男
2. 発表標題 光結晶化によるフレキシブル軸配向 PZT膜の製膜
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中島 智彦、土屋 哲男
2. 発表標題 微細線セラミックサーミスタ
3. 学会等名 第83回 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関