

報道関係者各位

令和 8 年 10 月 1 日

国立大学法人 京都工芸繊維大学

光でナノ粒子を集めてパターンを描く

— 光の「空間」と「時間」を制御し、機能性ナノ材料を配置する新しい材料設計原理 —

1. 発表者：

中西 英行（京都工芸繊維大学 材料化学系 教授）

2. 発表のポイント：

- ◆光の強さを空間的に制御することで、均一に分散していたナノ粒子（注 1）が自発的に移動・集積し、さまざまな発光パターンを形成することを示しました。
- ◆ナノ粒子の移動は、光によって生じる化学組成の差だけでなく、重合の進行に伴って粒子が動きにくくなる過程との競合によって支配されることを明らかにしました。
- ◆光を途中で止める断続照射や、オン・オフを繰り返す周期照射によってナノ粒子の移動を制御できることを示し、「どこに光を当てるか」という空間制御に加えて、「いつ、どのように光を当てるか」という時間制御が重要であることを明らかにしました。
- ◆本成果は、JST A-STEP で進める「金属を組み込んだ新しい導電性ソフトマテリアルの開発」において、金属ナノ材料を樹脂中の必要な場所に集積・配置するための基盤となる設計指針を与えるもので、導電性を持つ機能性ソフトマテリアルへの展開が期待されます。

3. 発表概要：

京都工芸繊維大学の材料化学系 中西英行 教授らの研究グループは、光を当てることで固まる樹脂の中で、ペロブスカイト量子ドット（注 2）と呼ばれる発光性ナノ粒子が自発的に移動・集積し、模様を形成する過程を詳しく調べました。

通常、物質は拡散によって均一に広がろうとします。例えば、水に落としたインクは時間とともに広がり、濃さの差が小さくなっていきます。ところが、ナノ粒子を含む光硬化樹脂（注 3）に空間的に強弱をつけた光を照射すると、最初は均一に分散していたナノ粒子が特定の場所へ移動し、濃淡のあるパターンを形成します。一見すると、通常の拡散とは逆向きに物質が集まっていくように見える興味深い現象です。

本研究グループは、デジタルマイクロミラーデバイス (DMD) (注 4) を用いて光の空間分布を制御し、顕微鏡によるその場観察と組み合わせることで、ナノ粒子の移動と光重合反応との関係を調べました。その結果、ナノ粒子を移動させる駆動力は、光の強弱によって生じる化学組成の差と密接に関係する一方、最終的な模様はその駆動力だけでは決まらず、重合の進行に伴ってナノ粒子の移動性が失われていく過程との競合によって決まることが分かりました。

さらに、光を連続して照射するだけでなく、途中で止める断続照射や、オン・オフを繰り返す周期照射を行うことで、ナノ粒子の移動量と最終的なパターンを制御できることを示しました。すなわち、「どこに光を当てるか」という空間情報だけでなく、「いつ、どのように光を当てるか」という時間情報も、ナノ粒子を配置するための重要な設計因子になります。

本研究は、光硬化樹脂を単に形を固める材料としてではなく、光によって内部のナノ材料を動かし、集め、配置することのできる「プログラム可能な反応場」として利用する新しい考え方を示すものです。本成果は、JST 研究成果最適展開支援プログラム (A-STEP) 産学共同 ステージ I (育成フェーズ)「金属を組み込んだ新しい導電性ソフトマテリアルの開発」(研究責任者：中西英行、課題番号：JPMJTR25TC)の一環として得られたもので、今後、金属ナノ材料を樹脂中の必要な位置へ集積させる技術への展開を目指します。

なお、本研究成果は、2026 年 10 月 1 日付で学術雑誌『Advanced Science』にオンライン掲載されました。

4. 発表内容：

研究の背景

光を当てることで短時間に固まる「光硬化樹脂」は、3D プリンティング、コーティング、接着など、さまざまな加工技術に利用されています。こうした樹脂に、発光性や導電性などの機能を持つナノ材料を組み込み、さらに樹脂内部の必要な場所へ配置できれば、材料そのものに空間的な機能を与えることができます。例えば、導電性を持つ金属ナノ材料を柔らかな樹脂の中の特定の場所に集積できれば、柔軟性と電氣的機能を併せ持つ新しいソフトマテリアルの創製につながります。

しかし、ナノ材料を樹脂に均一に混ぜることと、必要な場所へ選択的に集めることは全く異なります。従来のリソグラフィーや印刷などを用いてナノ材料を配置する方法では、複数の加工工程が必要になったり、溶媒や加工条件によって材料が損傷したりする場合があります。特に、本研究で用いたペロブスカイト量子ドットは高い発光性能を持つ一方、水分や溶媒などに対して不安定であり、加工方法が制限される材料です。

これまで本研究グループでは、光を空間的に不均一に照射して樹脂を重合させると、樹脂内部に一時的な化学組成の差が生じ、それに応答してナノ粒子が自発的に移動・集積する現象を研究してきました。しかし、光重合中には化学組成の変化、分子やナノ粒子の移動、粘度上昇、固化などが同時に進行します。そのため、ナノ粒子を移動させる駆動力がどのように生まれ、それが粒子の移動性の低下と時間的にどのように競合するのかは、十分に明らかになっていませんでした。

研究内容

本研究では、ペロブスカイト量子ドットを含む光硬化樹脂に対し、デジタルマイクロミラーデバイスを用いて空間的に強弱をつけたパターン光を照射し、光重合の進行に伴ってナノ粒子がどのように移動・集積するかをその場で観察しました。

その結果、ペロブスカイト量子ドットは、光が強く当たる領域から弱く当たる領域へ移動し、発光パターンを形成しました。光の強弱によって重合の進み方に差が生じると、高照度領域と低照度領域の間に化学組成の差が形成され、これがナノ粒子移動の駆動力になると考えられます。

しかし、最終的な模様の鮮明さは、この駆動力の大きさだけでは説明できませんでした。

光が弱い場合には、重合がゆっくり進むため、ナノ粒子以外の移動性成分も再分布し、形成された化学組成の差が緩和されることが示唆されました。一方、光が強い場合には、重合が急速に進むため、重合に伴う粘度上昇や固化によってナノ粒子の移動性が早い段階で低下すると考えられます。

つまり、鮮明なナノ粒子パターンを形成するためには、粒子を移動させる駆動力を十分に発達させる一方で、粒子が動ける時間を確保する必要があります。「粒子を動かす力」と「粒子が動けなくなるまでの時間」との競争が、最終的なパターン形成を左右することが、本研究から明らかになりました。

この考えをさらに検証するため、本研究グループは、パターン光の照射を途中で停止する断続照射と、オン・オフを繰り返す周期照射を行いました。その結果、パターン光の照射を止めた後にもナノ粒子の移動が進行する場合があること、また光をオン・オフする時間間隔によって最終的なパターンの鮮明さが変化することが分かりました。

これらの結果は、ナノ粒子の配置を制御するには、光を当てる「場所」だけでなく、光を当てる「タイミング」も重要であることを示しています。光の空間パターンと時間パターンを組み合わせることで、反応中のナノ材料の移動を制御するという、新しい材料設計の考え方が得られました。

今後の展開

今回の論文で直接扱ったのは、発光性を持つペロブスカイト量子ドットです。一方、本研究グループではこれまで、銀ナノワイヤや金ナノ粒子などの金属ナノ材料についても、光重合反応によって生じる組成差を利用して粒子を移動・集積させる研究を進めてきました。今回、ナノ粒子の移動を支配する時間的な要因を明らかにしたことで、こうした現象をより合理的に制御するための設計指針が得られました。

今後は、本研究で得られた「粒子移動の駆動力を形成する過程」と「重合・固化によって粒子の移動性が低下する過程」との時間的なバランスを金属ナノ材料の集積へ応用します。金属ナノ材料を樹脂全体に均一に混合するのではなく、光によって必要な場所へ自発的に集めることができれば、材料内部に導電経路を形成する新しい手法につながる可能性があります。

本研究は、JST A-STEP 産学共同 ステージⅠ（育成フェーズ）「金属を組み込んだ新しい導電性ソフトマテリアルの開発」の一環として進めています。今後、材料組成、光照射条件、金属ナノ材料の種類などを最適化し、柔軟性と導電性を併せ持つ新しい機能性ソフトマテリアルの創製へと発展させるとともに、企業との共同研究につながる技術シーズとしての確立を目指します。

※本研究成果は、JST 研究成果最適展開支援プログラム (A-STEP) 産学共同 ステージⅠ (育成フェーズ) 「金属を組み込んだ新しい導電性ソフトマテリアルの開発」 (研究責任者：中西英行、課題番号：JPMJTR25TC) および日本学術振興会 (JSPS) 科学研究費補助金 基盤研究 (A) (JP26H02224、JP21H04639) の支援を受けて実施したものです。

5. 発表雑誌：

雑誌名：Advanced Science

論文タイトル：Reaction-Driven Self-Organization of Nanocrystals by Kinetic Control of Inhomogeneous Photopolymerization

著者：Kazuto Uchida, Shiryu Kitajima, Koki Ito, and Hideyuki Nakanishi*

DOI 番号：10.1002/adv.78014

6. 用語解説：

注 1) ナノ粒子

大きさがナノメートル (10 億分の 1 メートル) の範囲にある非常に小さな粒子のこと。ナノ粒子は、サイズが極めて小さく、普通の大きさの物質とは異なる性質を示すことがあり、発光、触媒作用、電気的・光学的機能など、さまざまな分野で利用が期待されている。

注 2) ペロブスカイト量子ドット

ペロブスカイトと呼ばれる結晶構造を持つ材料からできた、数ナノメートル程度の非常に小さな発光性粒子のこと。光を当てると非常に明るく光り、しかも色を鮮やかに制御できることから、次世代のディスプレイや照明、太陽電池材料として注目されている。一方で、水分や溶媒などに弱く、加工や取り扱いが難しいという課題もある。

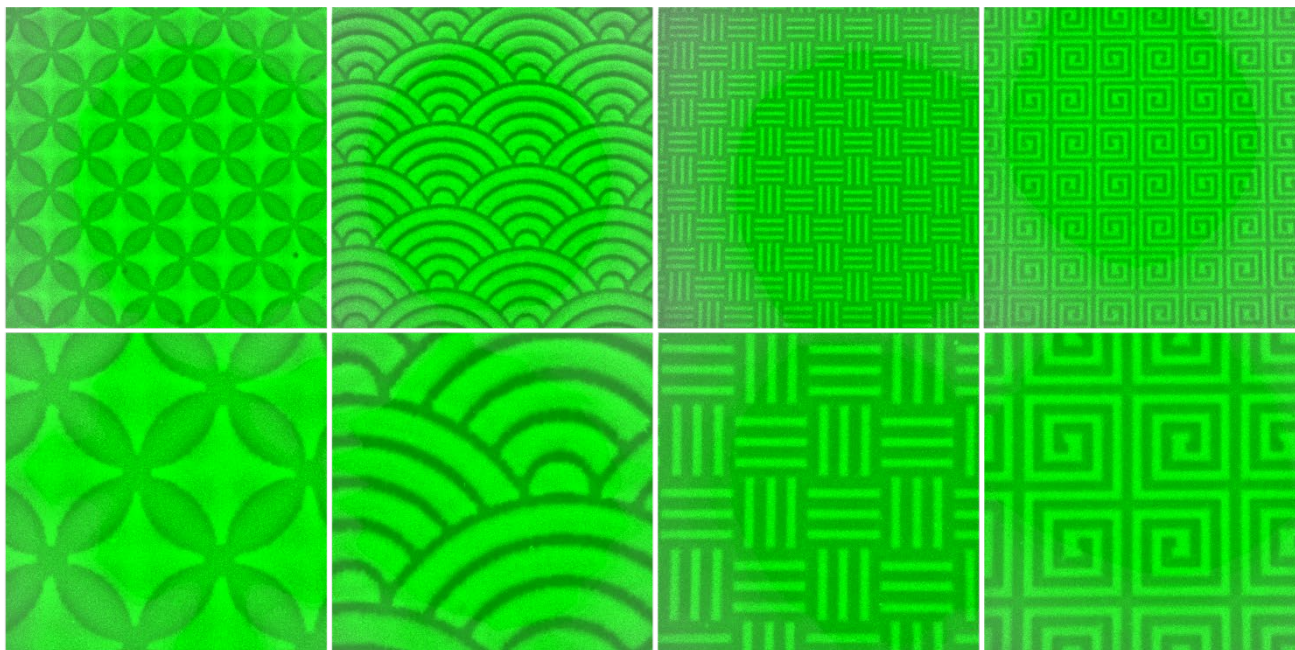
注 3) 光硬化樹脂

光を当てることによって化学反応が進み、液体から固体へと変化する樹脂のこと。3D プリンティング、コーティング、接着剤などに広く使われている。必要な場所にだけ光を当てて固められるため、微細な加工に向いている。本研究では、この光硬化樹脂が単に固まるだけでなく、内部のナノ粒子の動きや集まり方を左右する場として働くことが重要なポイントです。

注 4) デジタルマイクロミラーデバイス (DMD)

非常に小さな鏡を大量に並べた光制御デバイスのこと。1 つ 1 つの鏡は個別に傾きを変えることができ、光を反射するかしないかを高速で切り替えられる。これにより、光の当たる場所や強さを細かく制御できる。プロジェクターなどにも使われている技術で、本研究ではこの仕組みを利用して、試料上の位置ごとに異なる強さの光パターンをつくり、ナノ粒子の動きを精密に調べた。

7. 添付資料：



光を当てると、ナノ結晶が自ら動き、日本の伝統文様を描き出す。

図は、光重合反応を利用してペロブスカイト量子ドット (PQD) を移動・集積させることで形成した発光パターンです。量子ドットを直接印刷したものではなく、はじめは樹脂中に均一に分散していた量子ドットが、場所によって異なる光重合反応に応答して自発的に移動・集積することで、日本の伝統文様を描き出しています。

DMD を用いて光の空間分布を制御することで、複雑な図柄に沿ってナノ結晶を組織化できることを示しました（上段：一辺 3185 μm 、下段：一辺 1270 μm ）。

さらに本研究では、「どこに光を当てるか」という空間パターンだけでなく、「いつ、どのように光を当てるか」という時間パターンによってもナノ粒子の移動を制御できることを明らかにしました。この「空間」と「時間」の二つの光制御は、将来的に金属をはじめとする機能性ナノ材料を、樹脂中の必要な場所へ集積・配置するための設計指針につながります。

8. 問い合わせ先：

< 研究に関すること >

京都工芸繊維大学 材料化学系 教授

中西 英行（なかにし ひでゆき）

TEL：075-724-7848

E-mail：hnakanis@kit.ac.jp

< 報道担当 >

京都工芸繊維大学 総務企画課広報係

TEL：075-724-7016

E-mail：kit-kisya@jim.kit.ac.jp