

ナノシートの光操作に世界で初めて成功

【ポイント】

- ・光を利用することで、ナノシートを基盤とする材料を実用化する上でボトルネックとなっていた、ナノシートを個別に自在に操作する技術を世界に先駆け実現した。
- ・液晶状態にしたナノシートを用いることで、光による操作を光が当たらない場所へも伝播させ、広い範囲でナノシートの配列を制御することに成功した。
- ・高機能な光・エレクトロニクス素子実現に向けた基盤技術が確立できた。飛躍的に省エネルギーなディスプレイ、光シャッターなどへの応用が期待できる。

【概要】

山口大学創成科学研究科理学系学域化学分野の川俣純教授と鈴木康孝准教授のグループは、九州工業大学工学研究院の中戸晃之教授、東京農工大学工学研究院の岩井俊昭教授のグループと共同で、ニオブ酸ナノシートの光操作に成功しました。この成果は、光によりナノシートを動かした初めての例であるのみならず、ナノシートの位置や向きを自在に制御できた初めての例でもあります。ナノシートをレーザー光の焦点に捕捉し、その向きをレーザー光の偏光により自在に回転させること、また、ナノシート間の相互作用が大きいナノシート液晶にレーザー光を照射すると、焦点(光があたっている場所)にあるナノシートの向きの変化によって、その周囲の数百倍にもおよぶ光があたっていない範囲に存在するナノシートの向きを、ドミノ倒し的に制御できることを見いだしました。

これらの成果は、以下の2編の論文として発表されています。

M. Tominaga, Y. Higashi, T. Kumamoto, T. Nagashita, T. Nakato, Y. Suzuki, J. Kawamata, "Optical trapping and orientation manipulation of 2D inorganic materials using a linearly polarized laser beam", *Clays and Clay Minerals*, DOI: 10.1346/CCMN.2017.064075, The Clay Minerals Society (国際粘土鉱物協会) 2017年11月23日 IF = 1.014

M. Tominaga, T. Nagashita, T. Kumamoto, Y. Higashi, T. Iwai, T. Nakato, Y. Suzuki, J. Kawamata, "Radiation pressure induced hierarchical structure of liquid crystalline inorganic nanosheets", *ACS Photonics*, DOI: 10.1021/acsphotonics.7b01230, American Chemical Society (米国化学会) 2018年2月3日 IF = 6.756

【詳細な説明】

グラフェンに代表されるナノシートは、極めて二次元性の高いナノサイズの粒子です。ナノシートは、積み重なったときと、一枚一枚にバラバラになったときとで大きく異なる性質を示します。たとえばグラフェンは、グラフェンが積み重なった状態であるグラファイト(黒鉛)と比べ、驚くほど高い伝導性を示します。磁気・光学的性質、触媒能、物質認識能などの性質においても、ナノシートの状態にすると優れた機能を示すようになる物質が数多く知られています。ナノシートの形状が厚さ方向と拡がり方向とで大きく異なる事を反映し、ナノシートの性質も厚さ方向と拡がり方向とで大きく異なります。したがって、ナノシートが示す優れた性質を最大限に引き出すためには、ナノシートの向きを、「オンデマンド」、「空間選択的」かつ「自在」に制御することが必要です。しかしながら、一枚一枚のナノシートの位置や向きを意のままに制御する技術はありませんでした。

本研究では、ナノシートに光を照射するだけで、その向きを「オンデマンド」、「空間選択的」かつ「自在」に操る方法論を構築しました。近年、光の放射圧を利用して物質を捕捉し、動かすことのできる技術、「光ピンセット」が注目を集めています。光ピンセットは、生物学やマイクロマシンの分野で成果をあげていますが、ナノシートを光ピンセットで操作した例は皆無でした。

水中にナノシートを均一に分散させ、直線偏光のレーザー光を集光して照射すると、ナノシートは焦点でその面をレーザー光の進行方向に対して平行になるように捕捉されることがわかりました。さらに、捕捉されたナノシートは、照射したレーザー光の偏光の向きと同じ向きになりました。照射する直線偏光のレーザー光の偏光の向きを回転させると、ナノシートの向きはそれに同期して回転しました。以上のように、ナノシートの光操作を世界で初めて実現し、レーザー光の照射によるナノシートの光捕捉および、配向挙動の特徴を明らかにしました。

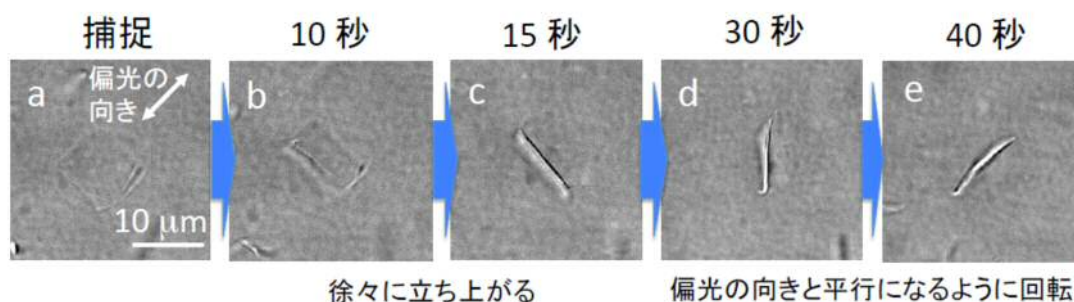


図 1、一枚のナノシートが捕捉され、向きを変えていく様子。

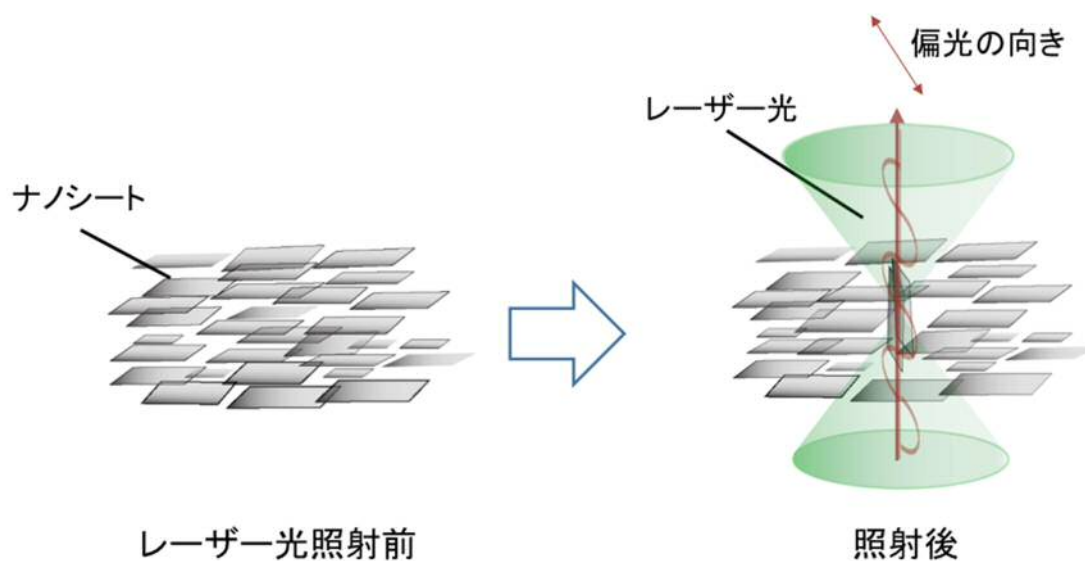


図 2、ナノシートの光捕捉の模式図。

次に、液晶状態にあるナノシートの光操作を行いました。ナノシート液晶に直線偏光のレーザー光を照射すると、焦点の大きさは $1\ \mu\text{m}$ に満たないにもかかわらず、焦点を中心とした $100\ \mu\text{m}$ 以上の範囲に存在するナノシートの向きに変化が生じました。変化の生じ方には二通りあることが確認されました。ひとつめの変化は、焦点近くで生じ、ナノシートを水中に均一に分散させた系と同様でした。もうひとつの変化は、焦点の外側で生じ、ナノシートがレーザー光の進行方向に対して平行になり、かつ、焦点を中心とする木の年輪のようなパターンに配列することがわかりました。このような、焦点の大きさの 100 倍以上もの大きな構造体を光により生成できた例は、本研究のナノシート液晶が初めてで、厚さと拡がり方向の大きさとの差が極めて大きなナノシートならではの新しい機能として高く評価されました。

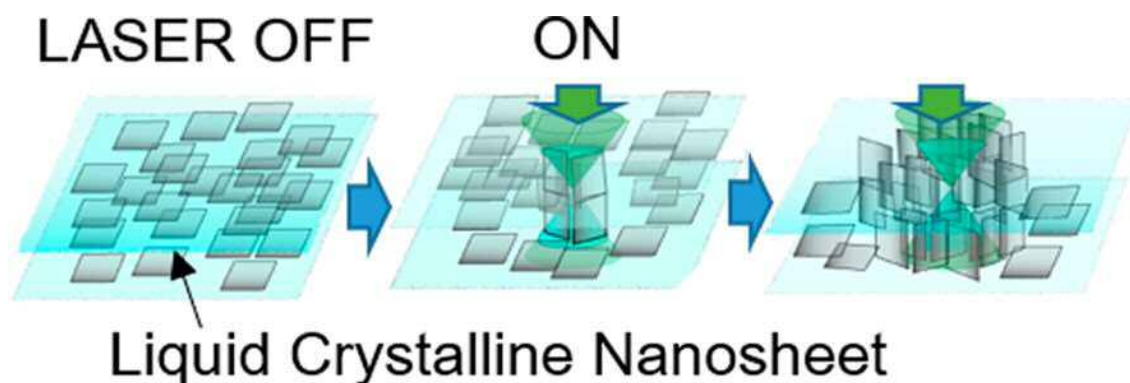


図 3、ナノシート液晶の光捕捉。ACS Photonics, DOI: 10.1021/acsp Photonics.7b01230 に掲載の図を転載。

以上のように、本研究では、これまで有効な手段がなかったナノシートの向きの「オンデマンド」、「空間選択的」かつ「自在」な制御を、光を活用することで可能にしました。ナノシートには、高性能な半導体素子や透明導電体としての応用が、また、ナノシート液晶には表示素子や光シャッターとしての応用が期待されています。本発見によりもたらされたナノシートの向きの制御技術は、これらの素子を作る上で不可欠なものとして、今後工業的に利用されていくでしょう。また、光にはさまざまな種類があります。今回利用した光は、1点に集光した直線偏光と呼ばれる光ですが、光は線状にもパターン状にも集光することが可能です。さらに、らせん状の光を照射すれば、ナノシートにらせん状の配列が誘起できるかも知れません。化学反応に対する触媒機能を持ったナノシートをらせん状に配列すれば、医薬品や酵素など、らせん状の形でなければならない有用物質の反応場としての利用にも道が拓がり、高価な薬品が安価に製造できるようになることも期待できます。

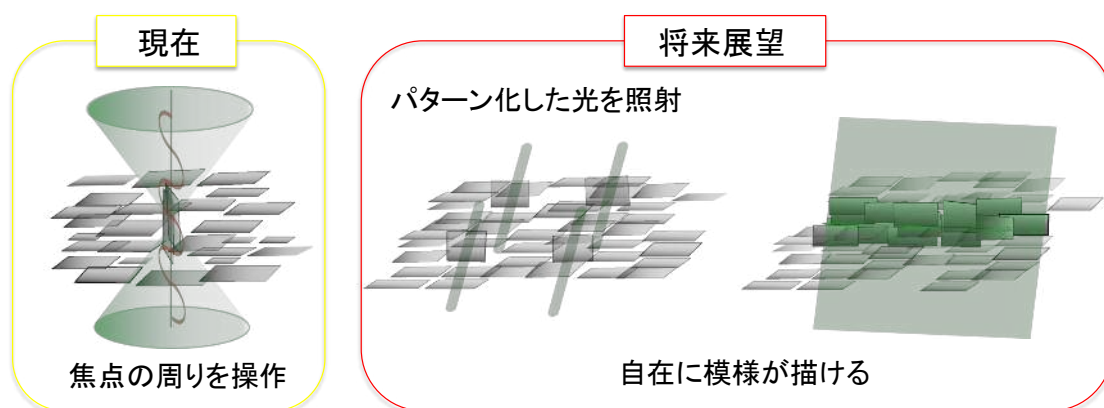


図4、将来展望。

光操作は近年長足の発展を遂げていますが、これまで光操作が行われてきた対象は、理論が確立している球形の物質が中心でした。一方で、ナノシートのように、長辺方向と短辺方向との大きさの差が著しい形状の粒子の光操作は未だ黎明期で、近年になって棒状粒子の光操作が示され始めたに過ぎませんでした。このような粒子に作用する光の放射圧については、理論すら未だ確立していません。本研究で実証されたナノシートの光操作は、形状が複雑な粒子の光操作という新しい学問分野を構築するための礎となり、基礎科学の発展に大きく貢献します。この発見を基盤とする基礎科学の発展により、上で述べた高性能な素子や、有用物質の簡単な合成が可能となります。現時点ではまだ、人類の生活に直接貢献できる成果はありませんが、近い将来、人類の健康で幸福な生活に貢献できる可能性を大きく秘めた新しい技術を世に送り出すことが出来ました。

【謝辞】

本研究は、日本学術振興会、科学研究費補助金、15J07557、15H03878、15K13676、17H05466 の補助により行われました。

【用語解説】

ナノシート

ナノシートとは、厚さがナノメートル(百万分の1ミリ)程度なのに対して、拡がり方向の大きさが数十から数千倍にもおよぶ物質です。厚さと大きさの比率は、コピー用紙に近いです。代表的なナノシートとして、黒鉛(グラファイト)やチタン酸やマンガン酸などの金属酸化物、粘土鉱物を剥離して得られたナノシートをあげることができます。

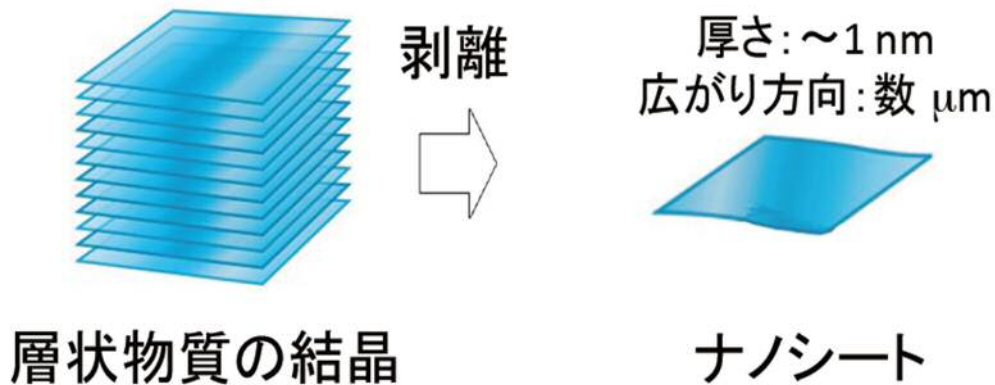


図5、ナノシート。

光の放射圧

光が物質に衝突すると、反射や屈折、吸収が生じ、光の運動量が変化します。鏡で光が反射されると光の運動量は反対向きとなり、運動量保存の法則に従えば鏡には押す力が作用します。このような力を光の放射圧と言います。光の放射圧は大気圧と比べて極めて小さいため、大気中で太陽光や電灯の光が物体に衝突しても、放射圧を感じることはありません。しかし、宇宙空間のような無重力かつ真空中では、放射圧で宇宙船を動かすことも可能であり、宇宙航空研究開発機構 JAXA が、小型ソーラ電力セイル実証機 IKAROS によって、世界ではじめて太陽光の放射圧を利用して宇宙船を制御することに成功しています。

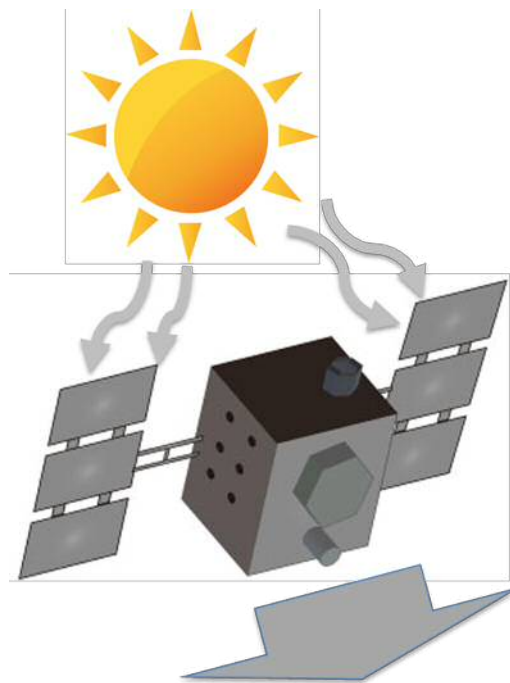


図6、宇宙空間では、光の放射圧で宇宙船を動かすこともできる。

直線偏光

光は携帯電話やテレビ・ラジオの電波と同じ電磁波の一種です。電磁波とは空間を電場と磁場が振動しながら伝わっていく波動です。電磁波(光)の進行方向と、電場と磁場の振動方向は互いに直交しています。電場(あるいは磁場)の振動方向に規則性のある光を偏光と言います。電場(あるいは磁場)の振動方向が一方に揃っている光を、直線偏光と言います。

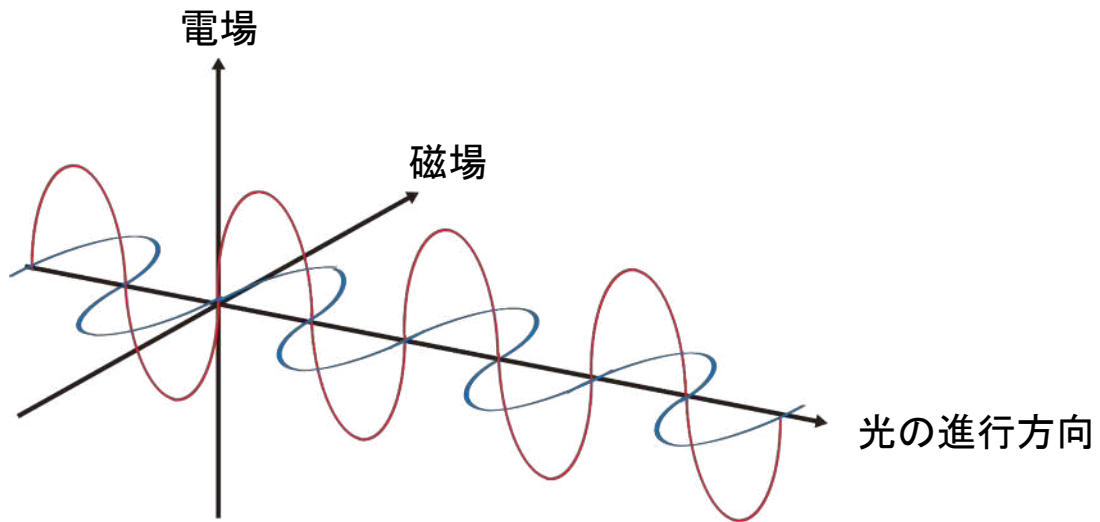


図7、光が空間を伝播していく様子。

ナノシート液晶

結晶のような決まった構造をもちながら、液体のように流れる性質ももつ物質を液晶と呼びます。ディスプレイとして有名ですが、スキンケア製品などにも使われています。ナノシート液晶は、ナノシートを高濃度で水中に分散させたときに作られる液晶で、セラミックスの仲間である無機物を作る液晶です。現在世の中で使われている液晶がすべて有機物であるのに対し、耐熱性や耐候性にすぐれた新しい液晶として注目されています。

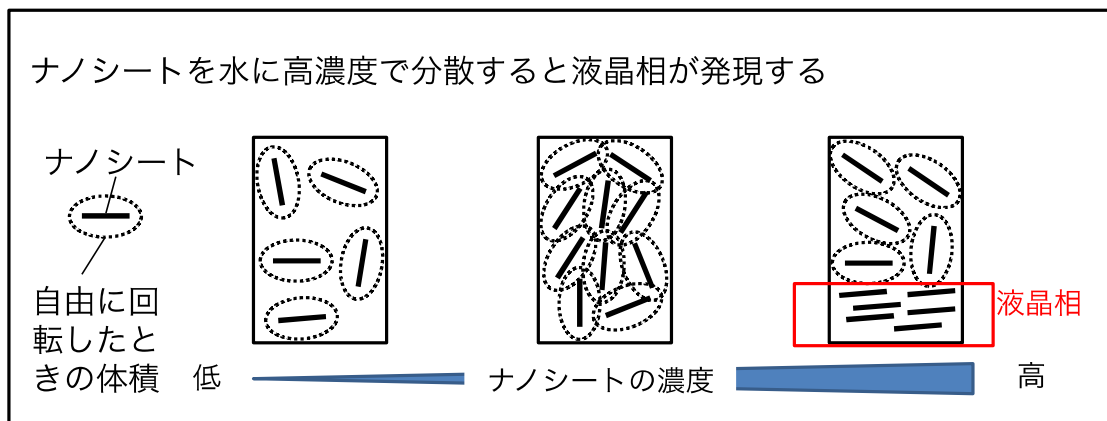


図8、ナノシート液晶。