

## 水中を漂っているナノシートの形状を世界で初めて捉えた！

### -光学顕微鏡を用いたナノシートの直接観察-

九州工業大学大学院工学研究院 物質工学研究系の中戸晃之教授のグループと山口大学大学院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、および東京農工大学大学院工学研究院先端電気電子部門（生物システム応用科学府）の岩井俊昭教授のグループは、光ピンセットの技術を用いることで、水中に分散しているニオブ酸ナノシートの形を光学顕微鏡によって評価することに世界で初めて成功しました。

#### ポイント

- ・光ピンセットと光学顕微鏡の技術を併用して、水中に分散したナノシートの正確な形を把握した。
- ・平らな形状のナノシートは少なく、多くのナノシートがこれまで想定されていなかった曲がった形状であったことを確認した。
- ・ナノシートの“作りたて”の姿をはじめて捉えた成果であり、ナノシートから新しい材料を作る多くの研究に影響を与える。

ナノシートの形状は、フラットなシート状だけでなく、折れ曲がった構造をしているものも多数あることがわかりました。現在、ナノシートをレゴブロックのように組み立てて新しい材料を作る研究が世界中で行われていますが、肝心のナノシートの正しい形状を液体の中で顕微鏡で直接観察した例は、これまでありませんでした。

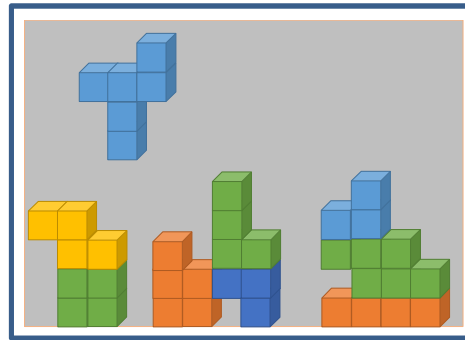
本研究の成果により、今後は、ナノシートが変形していることを前提としたブロックの組み立てを行わなくてはならないことが明らかとなりました。ナノシートは、医療から電池に至る広い分野の新素材への応用が期待されており、これら多方面の研究に波及する発見です。

なお、この成果は、以下の論文として発表されています。

T. Nakato, Y. Higashi, W. Ishitobi, T. Nagashita, M. Tominaga, Y. Suzuki, T. Iwai, J. Kawamata, "Microscope Observation of Morphology of Colloidally Dispersed Niobate Nanosheets Combined with Optical Trapping", *Langmuir*, DOI: 10.1021/acs.langmuir.9b00356, American Chemical Society (米国化学会) 2019年4月3日 IF = 3.789



研究のイメージ図、光ピンセット技術でナノシートを掴んでいる様子

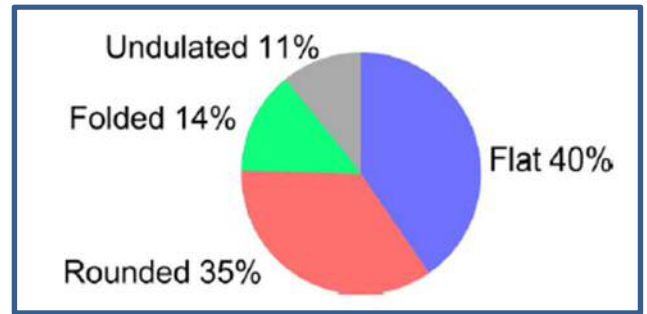
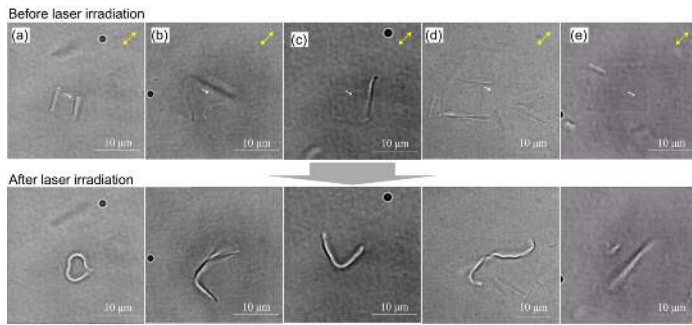


キナノシートが変形していることを前提としたナノシートからなる構造の組み上げのイメージ図、色々な形のブロックの組み合わせで、任意の形を組み上げることが出来る様子

### 【詳細な説明】

グラフェンに代表されるナノシートは、広がり方向のサイズが数マイクロメートルにも及ぶものの、厚さ方向のサイズがナノメートルオーダーのサイズの二次元性の高い粒子です。ナノシートは、その特異な形状・サイズのため、ナノシート内に存在する電子の振る舞い\*<sup>1</sup>が、通常材料とは異なるため優れた機能を示すことが知られています。例えば、ナノシートからなるキャパシタ、トランジスタ、EL など優れた性質を示す半導体デバイスが提案されています。すなわち、ナノシートを用いたデバイスでは、これまでよりも省エネルギーに、より早く、より小さい電子機器が実現すると考えられています。さらに、ナノシートは、その非常に薄いシート状の形状から、フレキシブルで高性能な半導体素子や透明導電体としての応用が期待されており、将来的には、太陽電池、蓄電池、タッチパネル、皮膚に貼り付ける電子デバイス（電子皮膚）の高機能化などにも繋がると考えられています。そのような、電子デバイスの実現には、ナノメートルスケール\*<sup>2</sup>でのデバイスの作り込みが重要です。そのようなナノシートからなるナノメートルスケールの構造体の構築には、ナノシート自身の形状が非常に重要です。一方で、層状化合物を剥離することで生み出される、コロイド中に存在する“作りたての”ナノシートの形状については、確認する手法がなかったため、ほとんどわかっていませんでした。

本研究では、研究グループで独自に発展させてきたナノシートに対する光ピンセット\*<sup>3</sup>の技術を用いて、液中に分散しているナノシート一枚を捉え回転させることで、一枚のナノシートの正確な形状を光学顕微鏡で直接観察し、これまで未解明であったナノシートの形状を評価できるようにしました。試料としては、ニオブ酸ナノシートの分散液を用いました。ナノシートの形状の直接観察の結果、完全に平らなシートとして存在するナノシートは、試料の中の40%しかなく、残りの60%は、曲がっていたり、波打っていたり、スクロールしている形状であることを明らかにしました。層状化合物を剥離すれば平らなナノシートが生成するという、ナノシートの研究の常識を覆す全く新しい結果が得られました。また、ナノシートの曲がっている形状は、ブラウン運動\*<sup>4</sup>の間や光トラッピングの間中、安定で、ナノシートの形状は、液中ではほとんど変化しないことも明らかになりました。



様々な形のナノシートを光ピンセット技術を用いて回して液中プロセスによって得られたナノシートの形状の存在比率を観察した光学顕微鏡像

本研究では、①液中ではナノシートは平面的な構造だけでなく曲がった構造のものがある、②平面構造や曲がった構造は液中では安定である、という二つの知見を新たに明らかにしました。この二つの知見から、液中でナノシートを集積させれば、自然と複雑な構造体が形成すること、また、光ピンセット技術を用いて、曲がったナノシートのみを集積させれば、自然と多孔構造を構築し非常に広い表面積を持つ材料を得ることもできると考えられます。ナノシートは、医療から電子機器に至る広い分野の新素材への応用が期待されており、それら新素材を構築する際に本研究成果は非常に重要な知見を与えます。そのため、今後の研究の発展次第では、健康やエネルギーなど多方面で人類の生活に役立つと考えられます。

#### 【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、19H04677の補助により行われました。

#### 【用語解説】

- \*1 ナノシートの電子の振る舞い：力学的な振る舞い、薬理作用、伝導性、磁性などのほとんど全て物質の性質は、物質中の電子の振る舞いが担っています。ナノシートにおける電子は、シート状の構造に由来して、基本的には二次元面内に閉じ込められます。この性質から、ナノシートは特異な性質を示すことが知られています。
- \*2 ナノメートルスケール：1メートルの1億分の1の大きさ。原子や分子の大きさに対応しています。
- \*3 光ピンセット：レーザー光を対物レンズなどで集光すると、その集光点で物体を、あたかもピンセットで掴むかのように、捉えることができる技術。通常の光ピンセットでは、捉える対象として、球状物質が用いられてきています。一方で、我々の研究グループでは、この光ピンセット技術を、ナノシートを捉えることに用いてきています。これまでの研究で、集光点でナノシートを安定に捉えられることで、捉えたナノシートの向きをレーザー光の照射条件によって制御できることを明らかにしています。レーザー光を用いた光ピンセットを開発した A. Ashkin 氏は、2018 年ノーベル物理学賞を受賞した。
- \*4 ブラウン運動：液体中に存在する粒子が、熱によって不規則に運動する液体の分子と衝突することによって、ランダムに運動する現象。水の中に沈めたビー玉が運動しているようには見えないように、日常的に見られるセンチメートルやメートルオーダーの大きさでは、液体の分子の運動による作用は平均化されてほとんど無視できます。一方で、非常に小さい粒子では、この現象がよく現れます。例えば、水にインクを入れると、かき混ぜなくても自発的にインクが水中を拡散します。これは、インクが非常に小さい粒子から構成されていて、不規則なブラウン運動が生じるためです。