



名古屋大学
NAGOYA UNIVERSITY

配布先: 文部科学記者会、科学記者会、名古屋教育記者会

報道機関 各位

2025 年 5 月 15 日

リアル空間に「ナノ機械」を出現させるインタフェース —デバイス作製不要で分子やナノ材料の移動、サイズ分別が可能に—

【本研究のポイント】

- ・物理空間中にあたかも「ナノ機械」が存在するかのように出現させることに成功。
- ・任意の時刻と場所に、二次元ナノ材料のサイズ分別をする「マイクロ流体デバイス」を生成し、酸化グラフェン^{注1)}のサイズ分別と操作を実証した。
- ・呈示する電場パターンの設計により、電気浸透流^{注2)}と電気泳動^{注3)}の同時制御が行われ、二次元ナノ材料のサイズ分画の機能が出現する。
- ・モノを作製せずとも、情報空間から物理空間に「ナノ機械」の機能を出現させられる。

【研究概要】

名古屋大学大学院工学研究科の佐々木 建 博士後期課程学生と星野 隆行 教授の研究グループは、物理空間内にあたかもナノマシンが存在するかのように機能するインタフェースを開発し、任意の場所で二次元ナノ材料をサイズ分別することに成功しました。

二次元ナノ材料である酸化グラフェンは、サイズごとに細胞との相互作用が異なることが知られており、サイズごとに分別(分画)する技術が注目されています。従来のサイズ分画手法では、微細で複雑な構造をもつマイクロ流体デバイスをあらかじめつくる必要があり、細胞がいる場所など何の用意もないところでサイズ分画を実行することはできませんでした。

本研究グループは、電子線^{注4)}走査パターンを動的に切り替えながら電場を呈示するインタフェースを開発し、マイクロ流体デバイスと同等の機能をもつ「ナノ機械」を出現させることに成功しました。呈示電場により生じた電気泳動力と電気浸透流を組み合わせることで、酸化グラフェンのシートがもつ表面電荷密度に応じたサイズ分画をする原理です。本研究の成果は、ナノデバイスの機構構造の作製を不要とし、プログラム可能な力場情報を生成することによって、材料フリーなモノづくりを創生する新しい技術に貢献するものです。

本研究成果は、2025年4月27日付の学術雑誌『Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects』オンライン版に掲載されました。

【研究背景と内容】

名古屋大学大学院工学研究科の佐々木 建 博士後期課程学生(日本学術振興会特別研究員)と星野 隆行 教授の研究グループは、物理空間中にあたかも「ナノ機械」が存在するかのように機能するインタフェースを開発し、表面電荷をもつ二次元のシート材料をサイズ分別(分画)することに成功しました。

酸化グラフェン(GO)は、原子1層分の厚さをもった二次元の材料であり、シートの表面積に応じて細胞との相互作用が異なる材料です。そこで、生物学的な応用に向けて、溶液環境下の任意の場所で GO シートをサイズ分画する手法が求められています。しかし、従来のサイズ分画手法では、流速場を制御するために微細で複雑な構造をもつマイクロ流体デバイスであらかじめ作製する必要があるため、サイズ分画の設計や機能を動的に変えたり、また瞬時に作業場所を移動させたりすることはできませんでした。そのため、任意の時刻と場所でサイズ分画を実行するためには、マイクロ流路のような機械的な構造に依らない、新たなシステムを開発することが重要となります。

本研究グループは、これまで電子線走査パターンを動的に切り替えながら力場を呈示するインタフェースの開発を続けており([プレスリリース 2025年1月23日](#))、今回さらにマイクロ流体デバイスと同等の機能をもつ「ナノ機械」を自在に出現させ、GO シートをサイズ分画することに成功しました。図1に示すように、電子線を窒化ケイ素(SiN)薄膜に二次元走査したときに投影される光学像パターンが、電場を呈示するのに用いるプログラム可能な電極です。電場パターンを呈示すると、SiN 薄膜と溶液との界面には電気浸透流(EOF)が発生します。これにより、水溶液中に分散している GO シートは流体の流れを受け、パターンの呈示位置へと流れにのって輸送されます。このとき同時に、サイズごとに異なる負の表面電荷密度をもつ GO シートは、同じく負の電荷をもつ電場パターンから静電的な反発力(電気泳動力, EP)を受けます。この相対する流体力と電気泳動力の差は GO シートのサイズごとに異なることから、GO シートのサイズ分画が可能となります。

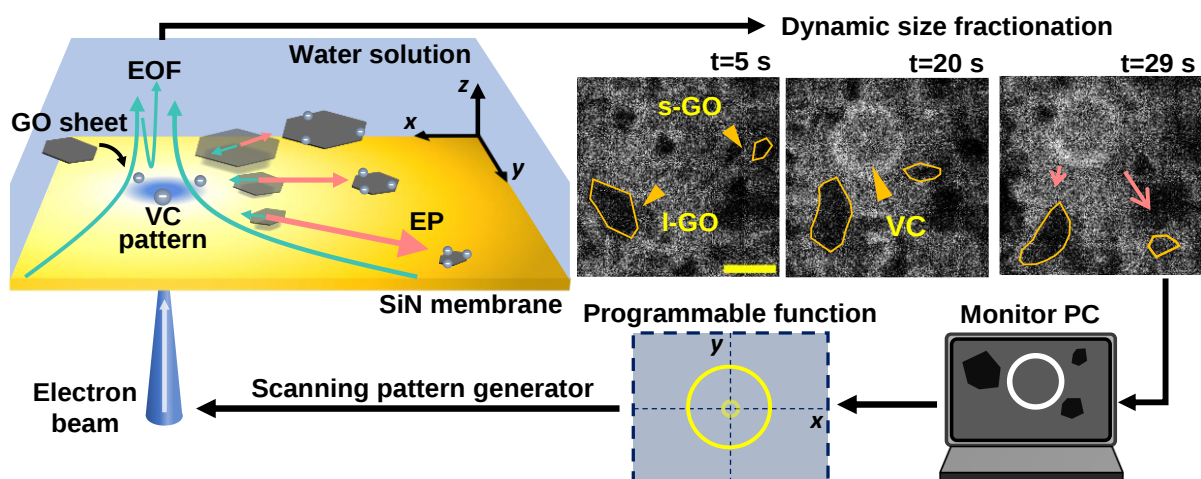


図1 電場呈示パターンによるサイズ分画システムの概要。コンピュータ上でプログラム可能な力場関数を用いて電子線の走査パターンを生成し、SiN 薄膜上に電場を呈示する。蛍光観察によって、電子線走査の光学像パターン周囲の GO シートの位置をリアルタイムに測定する。発表論文に掲載の動画参照。

図1に示すように、表面積が大きい GO シート(l-GO)と比べて、小さい GO シート(s-GO)の方が、電場パターンからより高速に退いている様子が観察され、このサイズ分画する「ナノ機械」の機能の出現は、電場パターンを呈示する時刻と場所で制御できることを確認しました。

図2(左)では、構築した GO シートのサイズ分画システムにおける、電場と溶液の流速場を数値シミュレーションにより検証しました。SiN 薄膜(通常、負に帯電)と水溶液との界面にバーチャル電極を模した負の電位を印加すると、距離に従い減衰する電場が生まれ、同時に求心方向に EOF が生じて中心領域で衝突して上昇流となります。電場の強さは距離の二乗に反比例して減衰するため、呈示パターンから十分遠い場所では GO シートは流体の流れによって求心方向に輸送され、電場呈示パターンに接近したとき距離の二乗に反比例する静電反発力を受けて流れに逆らう挙動を示すことが予測されます。このとき、GO シートのもつ電荷は官能基に由来することから静電反発力は周長に比例し、一方で流体抗力は面積に比例することが考えられ、これらの差によりサイズ分画が可能であると考えられます。

図2(右)では、GOシートの移動速度とシート表面積との関係を明らかにしました。呈示した電場パターンの遠方から接近した GO シートがパターン近傍で反発するときの速度(グラフ内の赤点)は GO のシート表面積が小さくなるほど増大する傾向を示しました。この結果は、電場パターン近傍の GO シートをシート表面積の違いによって局所的に分画できることを示しています。

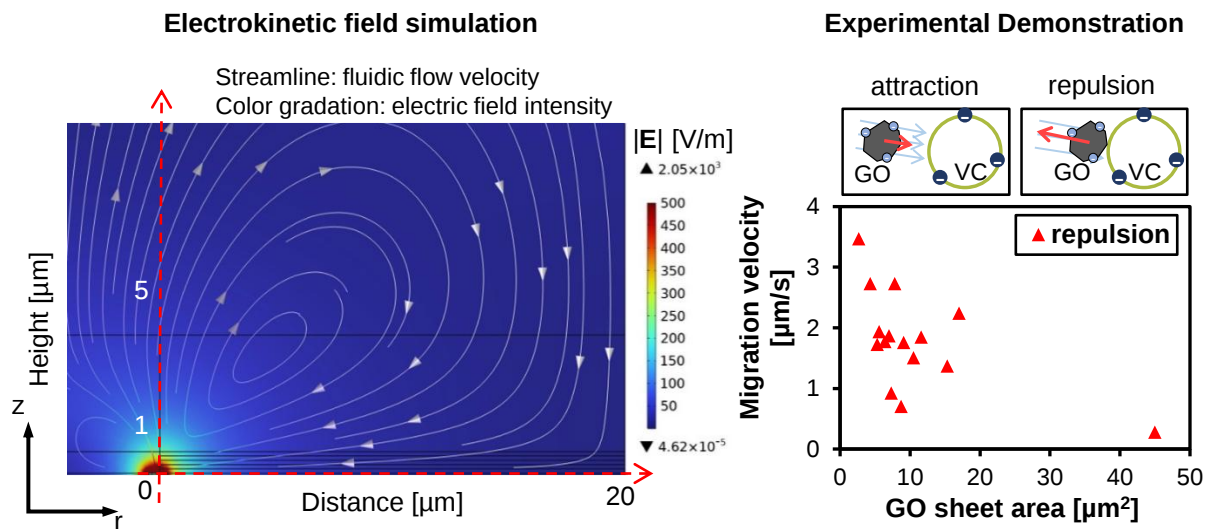


図2 構築した GO シートの局所サイズ分画システムの性能評価。(左)SiN 薄膜と水溶液との界面に電位を与えたときに水溶液中に生じる電場と流速場のシミュレーション結果。(右) 電場呈示パターン (VC) 周囲の GO シートの移動速度の実測結果。EP による GO シートの反発速度は、シート表面積が小さくなるほど増大する傾向を示した。

図3ではさらに、出現させた GO シートのサイズ分画を行う「ナノ機械」の機能を、動的に呈示する電場パターンにより制御できることを示します。図3(左)に示すのは、周期的に直径が変化する円環形状の電場パターンを与えることで、サイズごとの反発速度の違いを拡大させることを示した結果です。また、図3(右)に示すように、半円弧形状の呈示電場パターンを平行移動させることで、GO シートを移動させることができます。このように、電子線走査パターンの位置と形状を設計することで、サイズ分画する「ナノ機械」の出現や機能の変更・移動などの機械的な仕事をその場で瞬時に切り替えられることを示唆しています。

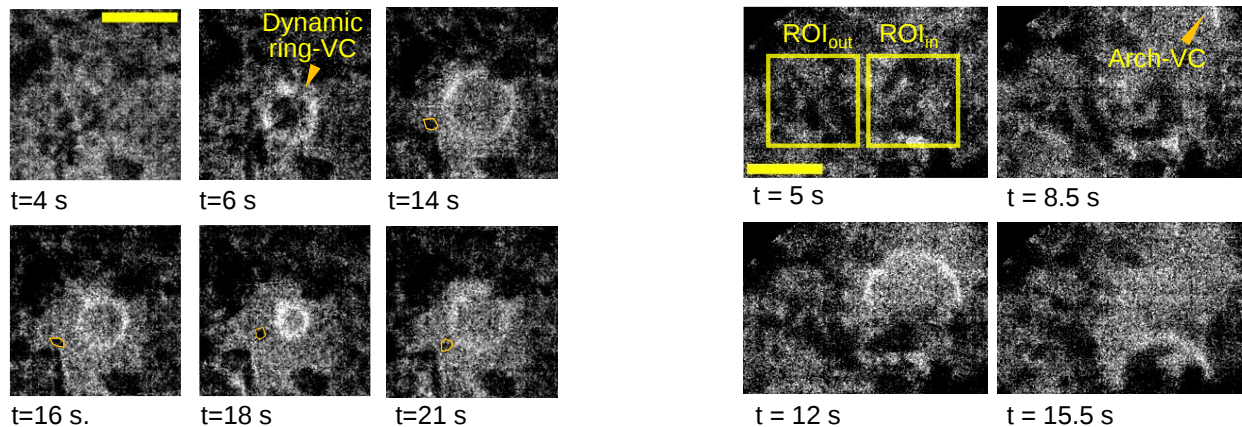


図3 サイズ分画の機能を動的に切り替えて呈示された電場パターン。(左)円環の内径が周期的に変化する電場パターンによって、GO シートのサイズ依存の反発速度が向上している。(右)呈示位置が一定速度で並進移動する半円弧形状の電場パターンを用いて、GOシートの移動方向をその場で操作している。

【成果の意義】

本研究の成果は、プログラム可能な力場情報を生成することで、物理空間上に「ナノ機械」の機能を出現させる世界初のインタフェースを実証したものです。マイクロ流体デバイスを用いる従来のサイズ分画技術では、微細な流路パターンや電気泳動、電気浸透流の制御のために、微細で複雑な流路構造とマイクロ電極アレイなどの機械構造体をあらかじめ作製しておく必要がありましたが、本研究で構築したインタフェース技術では、「マイクロ流体デバイス」が果たす機械的な仕事を電子線走査パターンの動的な制御により再現しました。本技術を応用することで、欲しいときに瞬時に「ナノ機械」の機能を具現化できるようになると考えられます。例えば、モノを作らずに材料フリーで機械をつくる「新しいモノづくり」の創生が期待できます。

本研究は、日本学術振興会 科研費 JP19H02100、JP22K18775、JP23K00078 および公益財団法人 JKA 機械振興補助事業 2022M-258、2024M-563 の支援を受けて行われたものです。

【用語説明】

注 1)酸化グラフェン:

原子 1 層分の厚さをもつ二次元的な炭素材料。高い導電性や熱伝導性をもつグラフェンを酸化処理することで合成され、表面にはさまざまな酸素官能基をもっている。溶液への分散性が改善されたことによる細胞への分子送達や、光学特性を利用したバイオセンサ応用へ向けた研究に使われている。

注 2)電気浸透流:

電場を与えたときに固液界面近傍の溶液が電場にしがいが移動する界面動電現象。シリンジポンプなどによる外部からの流体駆動が不要であり、分離・分析用のチップの小型化や分析時間の短縮に使われている。

注 3)電気泳動:

電場を与えた時に荷電粒子が溶液中を移動する現象。ゲル内で核酸分子やタンパク質を分離するゲル電気泳動や、毛細管内で分子を分離輸送するキャピラリー電気泳動などに使われている。

注 4)電子線:

負の電荷をもつ電子を高電圧によって加速し、ナノレベルまで集束させて照射する荷電粒子ビーム。極微再構造の観察や加工に使われている。

【論文情報】

雑誌名: Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects

論文タイトル: Size Fractionation of Graphene Oxide Sheets by Electron Beam-Addressing Localized Electrophoresis

著者: Ken Sasaki(名古屋大学), Takayuki Hoshino(名古屋大学)

DOI: 10.1016/j.colsurfa.2025.137056



東海国立大学機構は、岐阜大学と名古屋大学を運営する国立大学法人です。
国際的な競争力向上と地域創生への貢献を両輪とした発展を目指します。

東海国立大学機構 HP <https://www.thers.ac.jp/>

