



報道機関各位

東京工業大学

粒子混雑効果による自発的なラチェット輸送に成功 —外部操作を必要としない微小ロボット集団の制御に期待—

【要点】

- 外部のポテンシャル操作不必要の新原理による集団のラチェット輸送を実現
- 粒子混雑効果でラチェット型ポテンシャルが自発的に ON/OFF スwitching
- アクティブマター物理学や Lab-on-a-chip のための粒子操作技術に貢献

【概要】

東京工業大学 情報理工学院 情報工学系の瀧ノ上正浩准教授と早川雅之日本学術振興会特別研究員（現・理化学研究所）らは、定常的なラチェット型ポテンシャル（用語 1）のもとで、粒子同士の相互作用によって自己組織的に粒子が輸送される集団輸送方法の開発に成功した。

瀧ノ上准教授らは輸送される粒子間の相互作用を利用し、時間変化させないラチェット型ポテンシャルのもとで自己推進力を持たないマイクロ粒子を集団的に輸送することを実現した。また、この現象が粒子密度に依存して起こることを解明した。

今後は、粒子集団の運動原理を解明するアクティブマター物理学やソフトマター物理学（用語 2）における基礎研究や Lab-on-a-chip デバイス（用語 3）内などのマイクロメートルスケール環境における粒子操作技術などの応用研究への貢献が期待される。

従来は非対称形状のラチェット型ポテンシャルによって粒子を輸送するラチェット輸送（用語 4）では、ポテンシャル（用語 5）の時間変化または粒子の自己推進力のいずれかが、輸送方向の方向性を出すために必要だった。

研究成果は4月7日にドイツの科学誌「*Advanced Intelligent Systems*（アドバンスト・インテリジェント・システムズ）」のオンライン速報版で掲載された。

●研究の背景

近年のマイクロ加工技術の発展により、Lab-on-a-chip デバイス内などのマイクロメートルスケール環境における粒子操作技術は欠かせないものとなっている。中でも、**非対称な周期ポテンシャル**（用語 6）を用いた粒子の輸送が注目されている。この輸送手法は、粒子の運動をラチェット型ポテンシャルのような非対称な周期ポテンシャル（トータルの勾配はゼロ）によって整流することが可能であり、ラチェット輸送と呼ばれる。

したがって、ラチェット輸送は輸送方向に沿ったマクロなポテンシャルの勾配を必要とせず輸送を実現することができる。一般的に、ラチェット輸送では時間変化するポテンシャルまたは粒子の自己推進力のいずれかが必要である。

例として、**フラッシングラチェット**（用語 7）と呼ばれる周期ポテンシャルの ON/OFF 切り替えを利用した手法が、ブラウン運動のような等方拡散する粒子の輸送を実現することが知られている。また、細胞のような**自己推進粒子**（用語 8）は、ラチェット型に作られた立体障害などによって運動が整流され、**一方向性の輸送**（用語 9）が可能になる。

瀧ノ上准教授らは今回、新たなラチェット輸送として、粒子間相互作用によって実現する集団的なラチェット輸送を提案した。以前の研究とは異なり、今回の研究では時間変化するラチェット型ポテンシャルも粒子自身の自己推進力も必要とせず、粒子密度が高い場合に生じる**排除体積**（用語 10）的な**粒子混雑効果**（用語 11）によって、自己組織的にあたかもラチェット型ポテンシャルが ON/OFF されているような状況を自発的に生み出し、粒子集団が一方向に輸送される現象を実現した（図 1）。

●研究成果

瀧ノ上准教授らはノコギリ歯状マイクロ電極によって形成された**非対称静電ポテンシャル**（用語 12）の下で、マイクロ粒子同士が相互作用することで輸送される集団輸送方法の開発に初めて成功した。実験はポリスチレンマイクロ粒子をノコギリ歯状マイクロ電極上に分散させ、定電圧を印加、その様子を観察することで行われた（図 2）。

電極間の粒子密度が低い条件では粒子は最も安定な位置である図 3 の線分 PQ（点 P と点 Q を結んだ線）上に制限され、一方向の輸送は観察されなかった。一方、粒子密度が高い条件では、粒子集団内の混雑効果により、粒子が一方向へ集団輸送された（図 3）。それぞれの粒子は安定な PQ 上に集まろうとするが、粒子の排除体積により存在できる粒子数が限られているため、PQ 上を占有できなかった粒子が一方向へ輸送された。

この結果は粒子に作用する静電気力、**誘電泳動力**（用語 13）および衝突の効

果を導入したモデルによるシミュレーションにおいても同様に確かめられた(図4)。さらに研究グループはノコギリ歯状マイクロ電極によって形成された非対称静電ポテンシャルを一次元のラチェット型ポテンシャルとして単純化し、数理モデルを構築した。

モデル内ではそれぞれの周期内に存在する粒子の数によってポテンシャルが弱まる。この単純化モデルは実験で観察された集団輸送現象を再現するだけでなく、粒子数(混雑度合い)と輸送スピードの非自明な非線形的依存性を明らかにした(図4)。

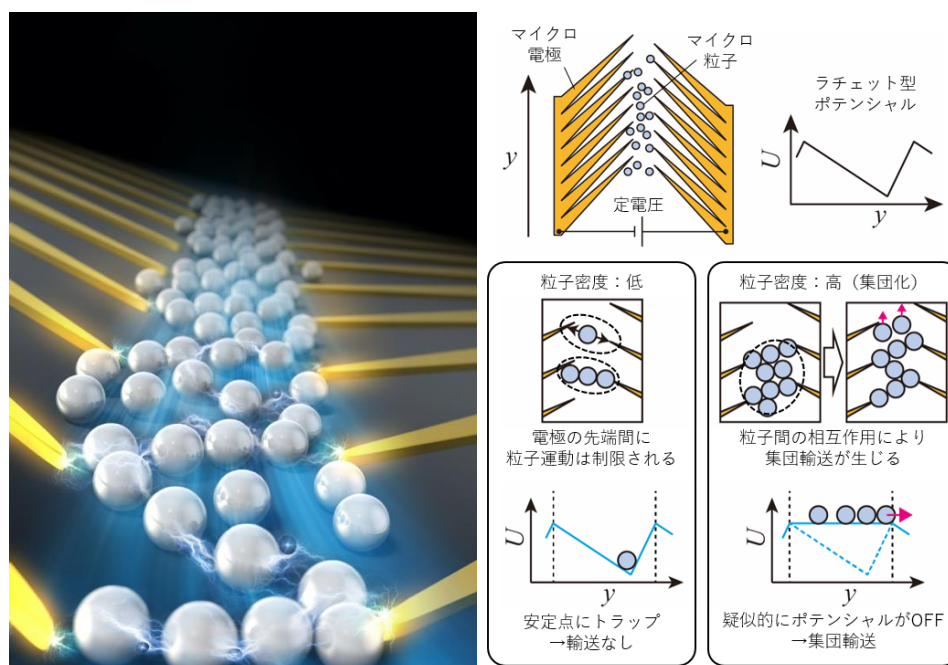


図 1: 研究グループは粒子間相互作用によって実現する集団的なラチェット輸送を提案した。この輸送はノコギリ歯状マイクロ電極を使用して形成された、ラチェット型の定常静電ポテンシャルのもとで実現した。粒子密度が低い場合、粒子は安定点にトラップされ、一方向の輸送は観察されなかった。一方、粒子密度が高い場合、粒子集団内で生じる相互作用により疑似的にポテンシャルが OFF になり、粒子が一方向へ集団輸送された。

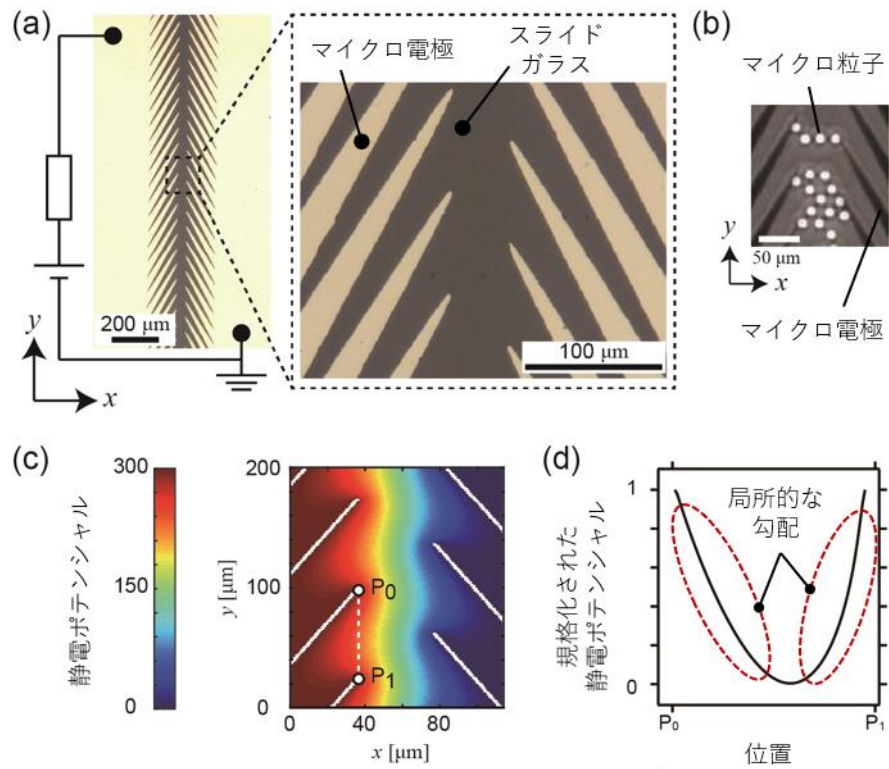


図 2: (a) ノコギリ状マイクロ電極。二次元スライドガラス上に金をマイクロパターニングすることで作製された。(b) ノコギリ状マイクロ電極上に分散されたポリスチレンマイクロ粒子。(c) 定電圧を印加することによって形成される静電ポテンシャル。(d) P_0P_1 間における静電ポテンシャルのプロファイル。 y 方向に関して局所的には勾配があるものの、総和をとるとゼロになる。

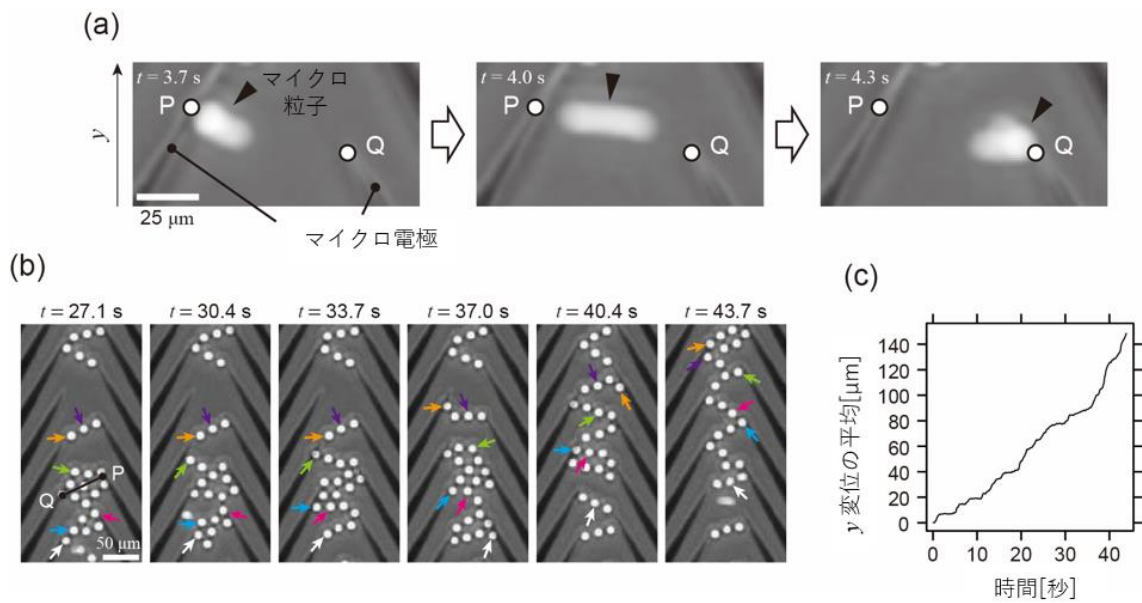


図 3: (a) 前後運動を示す粒子のスナップショット (粒子密度が低い条件)。粒子は点 P と点 Q を結んだ線分 PQ 上に制限され、一方向の輸送は観察されなかった。(b) 粒子集団のスナップショット (粒子密度が高い条件)。粒子密度が高い条件では粒子が集団を形成し、一方向へ集団輸送されることが観察された。(c) 個々の粒子の y 変位を平均した値の時間変化。集団輸送による y 変位の増加がみられた。

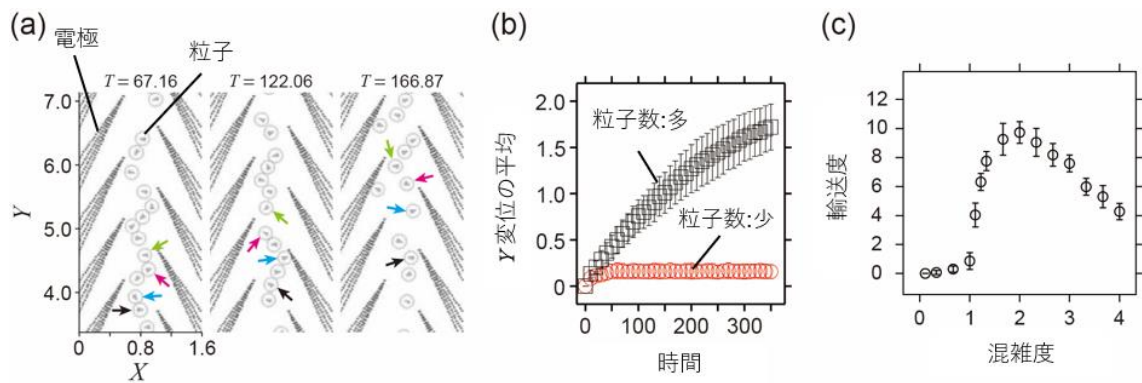


図 4: (a) 静電気力、誘電泳動力および衝突の効果を導入したモデルによるシミュレーションのスナップショット (粒子密度が高い条件)。一方向へ集団輸送されることが観察される。(b) 個々の粒子の Y 変位を平均した値の時間変化。実験結果と同様に、粒子数が多い場合のみ集団輸送が観察される。(c) 単純化モデルによって計算された輸送度と混雑度の関係。単純化モデルでは、それぞれの周期内に存在する粒子の数によってポテンシャルが弱まる。混雑度が増加するにつれて輸送度が増加する一方で、混雑度がある値を超えると輸送度が減少し始める。

●今後の展開

今回の研究では新たなラチェット輸送として、研究グループは粒子混雑効果によって実現する集団的なラチェット輸送の原理を示した。この集団輸送において、粒子には主に衝突と電氣的相互作用の力が加わる。

したがって、今後はサンプルの形状や大きさ、電氣的パラメーターと集団輸送の関係を考えることで、輸送速度や方向を選択するより高度な集団輸送原理の開発につながる。将来的には、**Lab-on-a-chip** などのマイクロメートルスケール環境における柔軟性と賢さを兼ね備えた高度なサンプル輸送の手法としての発展が期待される。

【謝辞】

本研究成果は、文部科学省 科学研究費補助金の支援のもとで得られたものである。また東京工業大学の岸野友輔学部生（当時）との共同研究である。

【用語説明】

- (1) **ラチェット型ポテンシャル**：ラチェットとは爪車のこと。図 1 に示してあるような、極小点の左右で傾きが異なるノコギリ歯の形状を持つ周期ポテンシャル。
- (2) **アクティブマター物理学やソフトマター物理学**：アクティブマターはエネルギーを消費して運動を持続する物質・物体、およびそれらの集合体を対象とする物理学。ソフトマターは高分子や液晶、コロイド、両親媒性分子などの物質系を対象とする物理学。
- (3) **Lab-on-a-chip デバイス**：チップ上に、フォトリソグラフィなどの微細加工技術を用いて作られた、反応・検出などを行う素子を統合したデバイス。サンプル消費量の少ない点や高い比表面積による反応時間の高速化などのメリットがあり、近年、顕著に発展している。
- (4) **ラチェット輸送**：ラチェット型ポテンシャルを利用し、**Lab-on-a-chip** デバイス内などの微小環境において、粒子などのサンプルを目的の場所に移動させること。
- (5) **ポテンシャル**：電氣的なエネルギーなどの高低を表す指標。ポテンシャルが低い方が安定なので、一般に、物体などはポテンシャルが低い方へ動いていく。
- (6) **非対称な周期ポテンシャル**：ポテンシャルの安定な位置が空間的に偏っている場合、非対称なポテンシャルであるという。それが周期的に繰り返されている場合、非対称な周期ポテンシャルという。今回の研究では、

ノコギリの歯のように周期的に並べられた電極の傾きが片方に偏っているため、非対称な周期ポテンシャルである。

- (7) **フラッシングラチェット**：ラチェット型ポテンシャルの ON/OFF 切り替えと粒子の等方拡散を利用した輸送モデル。ラチェット型ポテンシャルの極小点にトラップされた粒子はポテンシャルが OFF になると粒子は等方的に拡散する。再びポテンシャルが ON になると極小点にトラップされるが、ラチェット型ポテンシャルの極小点は非対称に偏っているため正味の輸送に方向性が出る。
- (8) **自己推進粒子**：周囲のエネルギーを利用して自発的に推進する粒子。例えば、遊走する細胞も自己推進粒子とみなすことができる。
- (9) **一方向性の輸送**：ブラウン運動のようなランダムな運動には粒子集団全体を見ると特別な方向に動いているわけではないため、輸送方法としては適していない。逆に、粒子集団全体が同じ方向に揃って輸送されている時、一方向性の輸送という。
- (10) **排除体積**：物質が占有する空間（体積）。この空間には他の物質は入り込めない。
- (11) **粒子混雑効果**：多数の粒子が密集することで現れる効果。本研究では、マイクロ粒子の排除体積により、いくつかの粒子が非対称ポテンシャルの極小点を占有できなくなる効果を指す。
- (12) **非対称静電ポテンシャル**：安定な位置が空間的に偏った電氣的エネルギーに関するポテンシャル。
- (13) **誘電泳動力**：静電ポテンシャルの分布が不均一な場所で、ポリスチレンなどの誘電体に働く力。

【論文情報】

掲載誌：*Advanced Intelligent Systems*

論文タイトル：Collective ratchet transport generated by particle crowding under asymmetric sawtooth-shaped static potential

著者：Masayuki Hayakawa, Yusuke Kishino, Masahiro Takinoue*（早川雅之、岸野友輔、瀧ノ上正浩*）

DOI: 10.1002/aisy.202000031

【問い合わせ先】

東京工業大学 情報理工学院 情報工学系
准教授 瀧ノ上正浩 (たきのうえ まさひろ)

E-mail: takinoue@c.titech.ac.jp,
masahiro.takinoue@takinoue-lab.jp

TEL: 045-924-5680 FAX: 045-924- 5206

【取材申し込み先】

東京工業大学 総務部 広報・社会連携課

E-mail: media@jim.titech.ac.jp

TEL: 03-5734-2975 FAX: 03-5734-3661