



2023年2月24日

報道関係者各位

慶應義塾大学

アクティブコロイド間へのフェロモン相互作用実装による集団運動の創発 ーコロニーや隊列を形成するマイクロ蟻ロボット群ー

慶應義塾大学理工学部電気情報工学科の齋木敏治教授、同大学同学部システムデザイン工学科の山本詠士専任講師、同大学大学院理工学研究科の中山牧水（博士課程3年、産業技術総合研究所技術研修員）らは、産業技術総合研究所デバイス技術研究部門の齊藤雄太研究グループ付らと共同で、アリの群れにおいて見られるようなフェロモン相互作用を、水中で自己推進運動するヤヌス粒子系に実装することに成功しました。相互作用の大きさを変調させることによって、ヤヌス粒子集団の中に、コロニーを形成する運動状態や隊列を形成する運動状態を創発しました。本研究成果は、2023年2月22日（米国東部時間）に米国科学雑誌『*Proceedings National Academy of Sciences (PNAS)*』に掲載されました。

1. 本研究のポイント

- ・アリ個体をアクティブコロイド(ヤヌス粒子^{*1})に、フェロモン状態を相変化材料 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST^{*2}) の相状態に対応させ、フェロモンが有する①局所性、②誘引性、③連続性を物理現象によって再現し、アリ集団運動に見られるフェロモン相互作用をアクティブコロイド系に実装した。
- ・加える交流電界の周波数を変えることで相互作用の大きさを変調することが可能になり、これによりコロイド集団の中にコロニー形成や隊列形成のような異なる複数の運動相が創発された。

2. 研究背景

アリの群れはフェロモンを利用して、効率よく採餌することが知られています。フェロモンの蒸発によって遠回り経路が淘汰される一方で、短い経路ではフェロモン強化によって多くのアリが集まり、群れは巣穴と餌場を結ぶ最短経路を見つけます。これを群知能と呼びます。このフェロモン相互作用の素過程をモデル化して得られるアルゴリズムは、組み合わせ最適化問題などに有用です。この群知能を深く理解するために、また群知能に触発されたマイクロデバイスを作製するために、本研究ではフェロモン相互作用をアクティブコロイド系に実装し動作させることを目的としました。そのためにはフェロモンが有する以下3つの性質を物理的に実装する必要があります。

- ①局所性：フェロモンはアリ個体が通過した箇所にもみ塗布される
- ②誘引性：フェロモンが塗布された箇所はアリ個体を誘引する
- ③連続性：フェロモン濃度は強化などによって連続的に変化する

3. 研究内容・成果

フェロモン相互作用をアクティブコロイド系に実装するため、本研究グループは以下を含むサンプルを作製しました(図1A)。

- ・ヤヌス粒子：交流電界を加えると水中で自己推進運動を示す。アリの個体の代替となる。
- ・GST：強い光が照射されると結晶化する。フェロモンプラットフォームとして機能する。

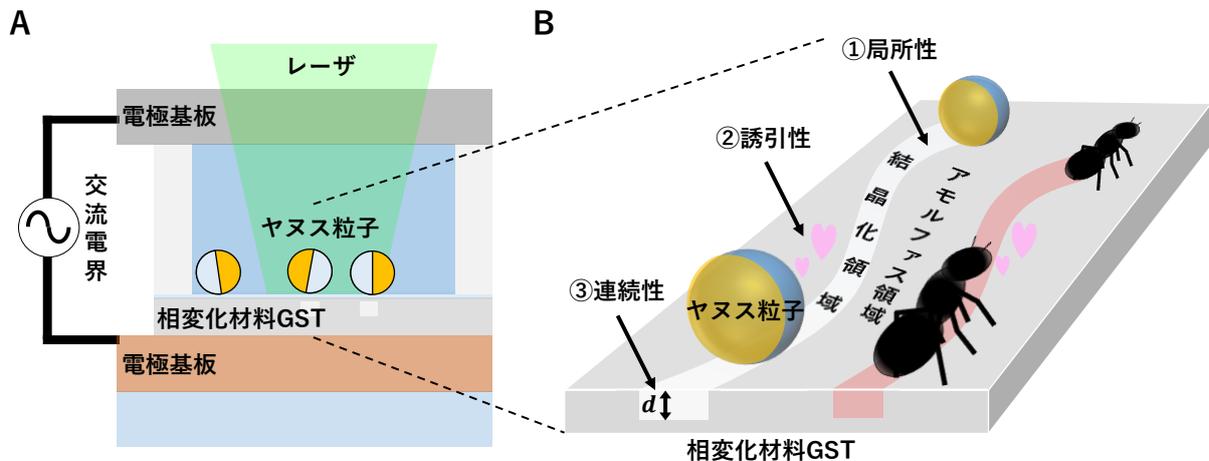


図1. (A) サンプルの概略図(B)アクティブコロイド系におけるフェロモン相互作用実装戦略の概要図

これらを組み合わせ、図1Bのようにフェロモン相互作用を実装しました。まず自己推進するヤヌス粒子にレーザーを照射すると、そのレンズ効果^{*3}によって粒子直下のGSTが結晶化し軌跡が残ります(①局所性)。また結晶化した領域に交流電気浸透(ACEO)流^{*4}が発生し、これにより粒子は軌跡へ誘引されます(②誘引性)。加えて粒子が継続的に通過することで結晶化深さ d は大きくなり、ACEO流は強化されます(③連続性)。

ここで本研究グループはACEO流の電界周波数依存性に着目しました。一般的に周波数を高くするとACEO流が弱くなることが知られています。この調節によって、結晶化領域に対して粒子がどれだけ誘引されやすいか、すなわちフェロモンに対する感度をコントロールすることが可能になります。周波数が低いとき($f = 1$ kHz)は感度が高く、ヤヌス粒子集団はマイクロコロニーを形成しました(図2A)。これは感度があまりに高いため、自身のフェロモンにトラップされ運動が制限されることに起因します。一方で周波数が高いとき($f = 4$ kHz)には感度が低く、トラッピングは見られませんでした。ヤヌス粒子はあたかも誘引などないかのように自己推進運動を示しましたが、時間経過とともに特定の経路に誘引されるように変化しました。最終的にヤヌス粒子群の運動はアリの隊列同様に線状にまとまりました(図2B)。以上のように、ヤヌス粒子間に調節可能なフェロモン相互作用を実装することによって、異なる複数の運動相を創発することに成功しました(図2C)。

4. 今後の展開

フェロモン相互作用に基づくアクティブコロイド集団運動をマイクロスケールにて創発しました。今回の成果は、群知能を活用した電気回路デバイスや流体デバイス開発への工学的な応用が期待されます。また、「知性とは何か」「生命とは何か」という理学的な問いに対しても一定の解釈を与える可能性を秘めています。

<原論文情報>

(タイトル) Tunable Pheromone Interactions among Microswimmers

(著者名) Bokusui Nakayama, Hikaru Nagase, Hiromori Takahashi, Yuta Saito, Shogo Hatayama, Kotaro Makino, Eiji Yamamoto, and Toshiharu Saiki

(雑誌) *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*

(DOI) <https://doi.org/10.1073/pnas.2213713120>

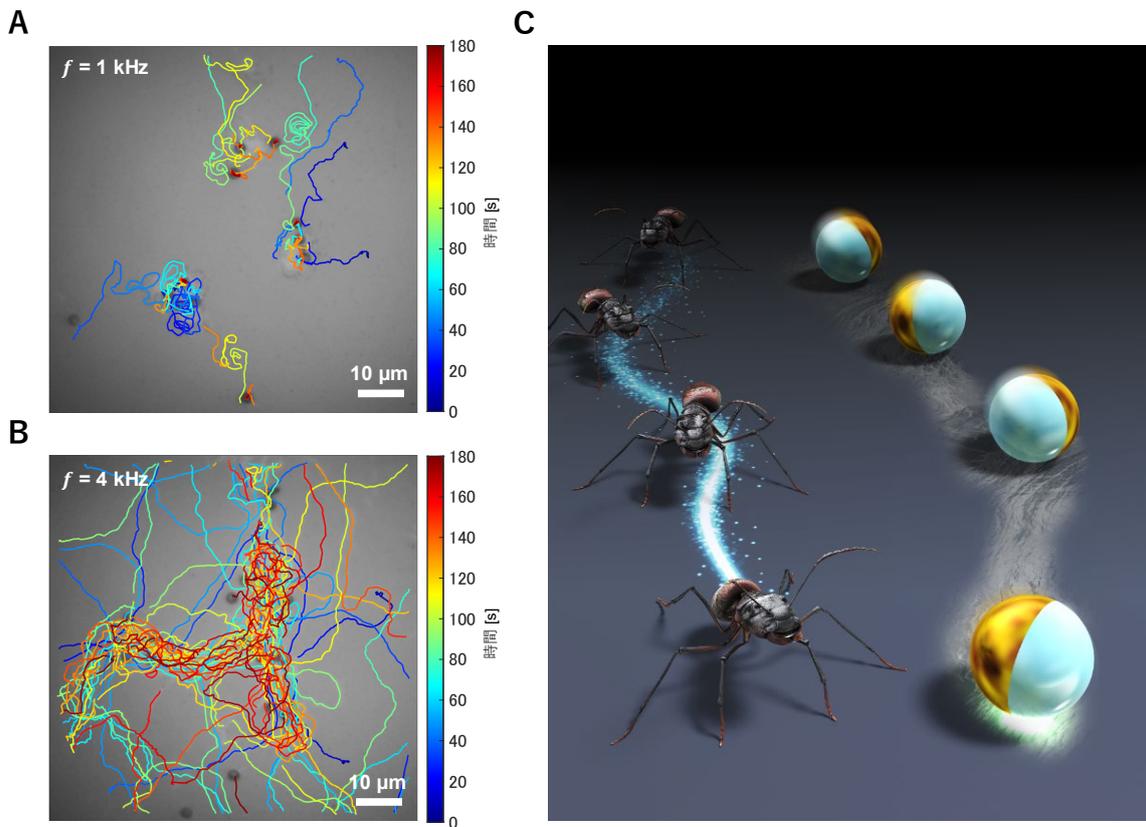


図 2. (A) 感度が高い周波数 $f = 1$ kHz および (B) 感度が低い周波数 $f = 4$ kHz におけるヤヌス粒子集団の運動軌跡 (C) ヤヌス粒子間のフェロモン相互作用のイメージ図

<用語説明>

※1 ヤヌス粒子: 異質な半球で構成される非対称なコロイド粒子であり、液中に分散するヤヌス粒子に対して交流電界を印加すると自己推進運動を示す。

※2 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST): カルコゲナイド系相変化材料の一種で、2つの相状態を可逆的に変化できる。アモルファス相(原子配置がランダムな状態)の GST にレーザー光を照射すると加熱され、結晶相(原子配置が秩序立った状態)に相変化する。この相変化を結晶化と呼び、この過程で顕著な反射率増加、また電気抵抗率低下が起こる。

※3 レンズ効果: 粒子と溶媒の屈折率差によってレーザー光が粒子直下に集光される。

※4 交流電気浸透(ACEO)流: 非対称な電極間に交流電界を加えた際に誘導されるカウンターイオンの電気泳動によって浸透流が発生する。電界の周波数を増加させるとイオンの追従が困難になり流速が減少する。構成として図 1A のように 2 種の電極を平行に対面させるものが一般的である。

※ご取材の際には、事前に下記までご一報くださいますようお願い申し上げます。

※本リリースは文部科学記者会、科学記者会、各社科学部等に送信させていただいております。

・研究内容についてのお問い合わせ先

慶應義塾大学 理工学部 電気情報工学科 教授 齋木 敏治 (さいき としはる)

TEL : 045-566-1784 FAX : 045-566-1529 E-mail : saiki@elec.keio.ac.jp

- 本リリースの配信元

慶應義塾広報室（望月）

TEL：03-5427-1541 FAX：03-5441-7640

E-mail：m-pr@adst.keio.ac.jp <https://www.keio.ac.jp/>