

モデル動物が群れをつくるメカニズムを解明

滋賀医科大学神経難病研究センターの杉 拓磨助教、西村正樹教授、九州大学芸術工学研究院の伊藤浩史准教授、北陸先端科学技術大学院大学の永井健講師は、動物集団が群れをつくる際のメカニズムを解明しました。これにより将来的に渋滞時や災害時の群衆の効率的な流動制御や、ロボットの群知能制御などへつながることが期待されます。この研究成果は、平成31年2月18日（月）午後7時に英国科学誌「Nature Communications（ネイチャー・コミュニケーションズ）」に掲載されました。

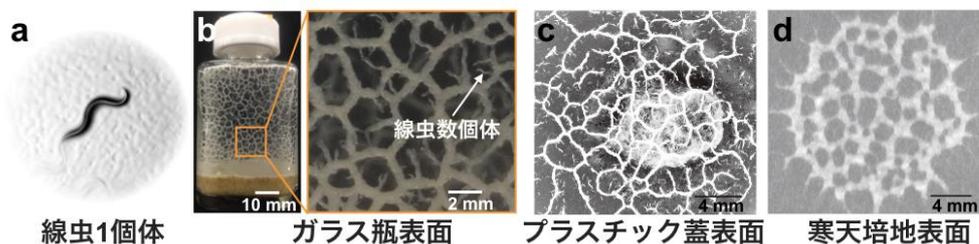
【POINT】

- ・ 生物学でよく使われる線虫という動物がたくさん集まるとネットワーク状に群れることを発見。
- ・ 線虫の群れと、人、鳥、魚の群れは共通するメカニズムで形成されることを強く示唆。

【概要】

- ・ 半世紀近く世界中で研究されているモデル動物の線虫 *C. エレガンス* が、集団でネットワーク状の群れをつくることを発見。世界で初めてモデル動物の集団行動の実験システムを開発。
- ・ 人、鳥、魚の群れ形成メカニズムの理論的研究で用いられてきた数理モデルをもとに数値シミュレーションを行った。
- ・ その結果、①ぶつかった線虫が移動方向をそらせることと②線虫1個体が弧を描くように動くことが、線虫の不思議なネットワークをつくる鍵であることを明らかにした。
- ・ 渋滞時や災害時の人の集団行動の解析やロボットの群知能の効率的制御につながることが期待できる。

図1. 線虫がたくさん集まるとネットワーク状に群れをつくることを発見



《詳細に関するお問い合わせ先》

滋賀医科大学 神経難病研究センター 杉 拓磨
 TEL : 090-1714-9717
 e-mail : tsugi@belle.shiga-med.ac.jp

《広報に関するお問い合わせ先》

滋賀医科大学 総務企画課（鎌田・竹島）
 TEL : 077-548-2012
 e-mail : hqkouhou@belle.shiga-med.ac.jp
 九州大学広報室
 TEL : 092-802-2130
 e-mail : koho@jimu.kyushu-u.ac.jp

モデル動物が群れをつくるメカニズムを解明

【研究背景と経緯】

夕暮れどきに浮かぶ鳥の群れや水族館のイワシの群れなど、大量の動物による組織的な行動は多くの人を魅了します。また駅などの混雑時や渋滞時の人の群衆を効率的に流動させることは重要な問題です。これまで、群れ形成について理論研究が盛んに行われ、様々な群れに共通する形成メカニズムの存在が予言される一方、実験的な証明はほとんどありませんでした。これは、野外の鳥や魚の大規模な群れを実験室に再現することが不可能という、ある意味、当然の理由によるものでした。

土壌に生息する線虫 *C. エレガンス* (図 1 a) は、モデル動物として半世紀近く研究され、細胞死機構の発見や緑色蛍光タンパク質の動物応用などで数々のノーベル賞の対象となりました。われわれは、線虫の体長はわずか 1 mm 弱であるため、仮に一度に大量飼育できれば、コンパクトな群れ形成の解析システムを作れるのではないかと考えました。さらにモデル動物としての利点である変異体を用いた解析ができることから、過去の理論的研究で提案されたメカニズムを実験的に検証できると考えました。

本学の杉拓磨助教、西村正樹教授、九州大学の伊藤浩史准教授、北陸先端科学技術大学院大学の永井健講師は、線虫 *C. エレガンス* を大量飼育する方法を確立し、集団によりネットワーク状に群れをつくることを発見しました (図 1)。実験と数理シミュレーションを組み合わせた解析の結果、①隣接する線虫同士が相互作用し移動方向をそろえることと②線虫 1 個体が弧を描くように動くことがこの群れの形成条件であることを明らかにしました (図 2)。このメカニズムは人や鳥、魚の群れ形成の理論的研究から提唱されてきたものと類似していることから、本研究は、群れ形成の根底に共通のメカニズムがあることを実験で強く示唆した初めての例となります。

【研究内容】

線虫の飼育では通常、寒天培地上に塗布した大腸菌を餌として与えますが、この従来法では餌が枯渇すると線虫の増殖は止まってしまい、大量の線虫を得ることはできません。そこで本研究では、技術的ブレークスルーの 1 つとして、栄養に富む「ドッグフード」を線虫の餌として利用することにより、餌の枯渇なく、大量の線虫 *C. エレガンス* を飼育することが可能になりました。そして驚くべきことに線虫集団はガラス表面 (図 1 b)、プラスチック表面 (図 1 c)、寒天培地表面 (図 1 d) でネットワーク状に群れることを発見しました。この群れ形成の意味は、1 個体では乾燥状態で干からびてしまう線虫が集団で群れることにより、表面張力により水を保持し、乾燥への耐性を獲得することにあると考えられます。

次に、1 個体レベルと集団レベルの線虫の観察から、図 2 に記載の①と②が特徴的な線虫の運動であると示されました。この単純な物理的条件は過去の人や鳥、魚の群れの理論的研究から予想されたメカニズムと類似していることから、過去のこれらの研究をもとに数理モデルを作成しました。このモデルはシミュレーションにおいて線虫のネットワーク状の群れを再現しました。

つづいて、実験とシミュレーションで数理モデルのパラメータを変えた場合のそれぞれの結果の整合性を確認し、モデルの正確性を検証しました。まず上述①と②の条件 (図 2) に焦点をあて、線虫周囲の湿度を変えることにより相互作用の強さを変えることや (図 3)、描く弧の大きさが小さい線虫変異体を用いた実験を行いました (図 3)。その結果、数理モデルのシミュレーションと実験結果はよく一致しました。さらに神経科学分野の最先端テクノロジーであるオプトジェネティクス (p 4 参照) を用いた実験結果も再現されました。以上の実験とシミュレーションを用いた検証から、上述 2 条件 (図 2) が線虫集団による群れ形成の基本メカニズムであると結論づけました。

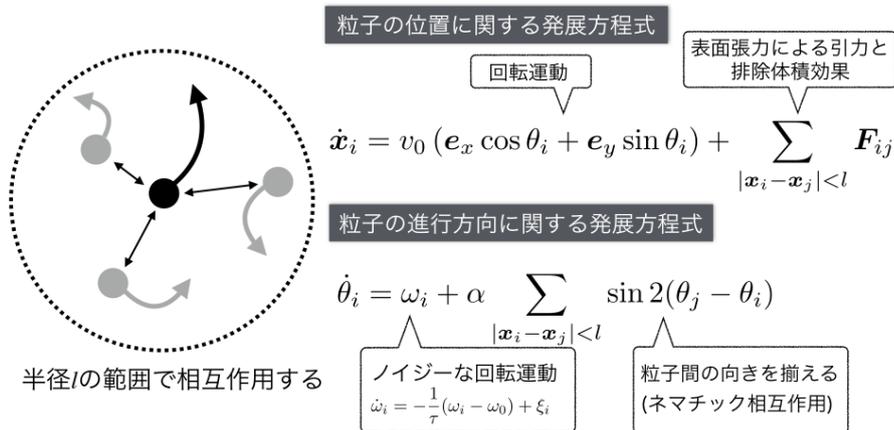
【今後の展開】

本研究は、人や鳥、魚などの動物集団の群れ形成に共通するメカニズムの存在を初めて実験的に示しました。今後、まずこの独自のモデル動物を用いた実験システムを用いて、さらに数理モデルの正確性を高める予定です。このようなモデルは、避難時や渋滞時の人の動きの解析につながります。実際、国内においても企業と大学が連携して、魚の群れが協調して行動する仕組みを自動運転技術に応用し、渋滞緩和に活かすための共同研究ラボを開設しています（2016年記者発表記事）。また、災害時や祭典での群衆の渋滞における圧死を避けるための緊急避難方法の解析は類似のモデルを用いて行われており、今後、本研究により数理モデルによる予測精度が向上すれば、効率的な避難方法の提案などにつながります。人間以外にも羊や魚の群れの効率的な制御を行うことにより、畜産や漁業などにも有用な知見を与えることも期待できます。

また、世界中で盛んなロボット開発では、ロボット単体では困難な作業を集団で行わせるため、群知能と呼ばれるアルゴリズムの開発が進められています。例えば、スイスの会社は超小型群ロボット Kilobot を開発し、群制御を通して、がれき中の生存者探索や汚染物質除去などを実現しようとしています。本研究は、これらの研究分野とも密接に関連していくことが期待されます。

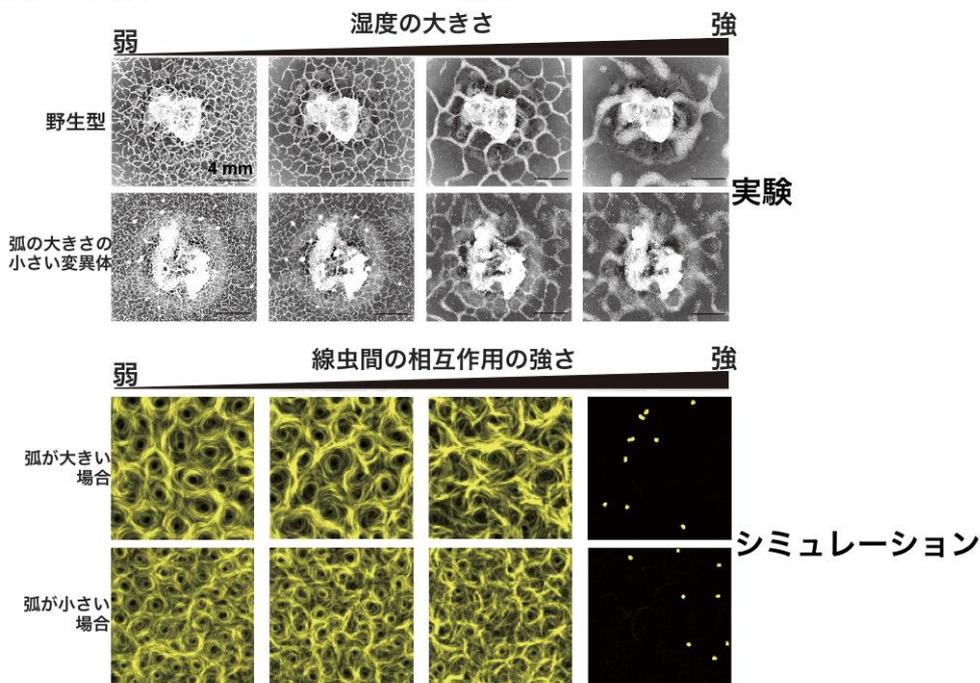
【参考図】

図2. 数理モデルについて



- ①動物（線虫）同士が相互作用し、移動方向をそろえること
- ②動物1個体が弧を描くように動くこと

図3. 実験とシミュレーションの結果



【論文情報】

論文名:

C. elegans collectively forms dynamical networks

著者名:

Takuma Sugi*, Hiroshi Ito*, Masaki Nishimura, Ken H. Nagai*

(*は責任著者)

雑誌名, 巻号, DOI:

Nature Communications , doi:10.1038/s41467-019-08537-y

【研究資金情報】

- ・ 科学研究費補助金 基盤研究(B)、若手研究(B)、新学術領域研究
- ・ 科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業「さきがけ」
- ・ 持田記念医学薬学振興財団

【用語説明】

- ・ 線虫 *C. エレガンス*

土壌に生息する非寄生性の線虫で、正式名称はセノハブダイディス・エレガンス。分子遺伝学的な解析の可能なモデル動物の1つ。半世紀近く前にシドニー・ブレナーにより利用され始め、細胞死の発見、RNA 干渉の発見、緑色蛍光タンパク質の個体レベルでの応用により 2002 年と 2006 年のノーベル医学生理学賞、2008 年のノーベル化学賞の対象となった。1998 年には多細胞生物で初めて全ゲノム配列の解読が終了した。ヒトの遺伝子数と同程度の約 2 万個の遺伝子を持ち、それらの中にはヒトの遺伝子と類似したものが 40%弱も含まれる。また体が透明なため、体外から体を傷つけずに蛍光観察できる。

- ・ オプトジェネティクス

光遺伝学と呼ばれる、最先端のテクノロジー。光感受性のイオンチャネル分子を標的の神経細胞に発現させ、光刺激によりそのイオンチャネルを活性化させることで標的の神経細胞を活性化できる。線虫の場合、体が透明で光透過性が高いので、体を傷つけずに標的の神経細胞のみを活性化させることができる。本研究では、前進と後進を駆動する神経細胞にイオンチャネル分子を発現し、活性化した。