

# 自ら流体中を泳ぐ「奇弾性体」の発見

## —生き物らしい自律的なマイクロマシンの仕組み—

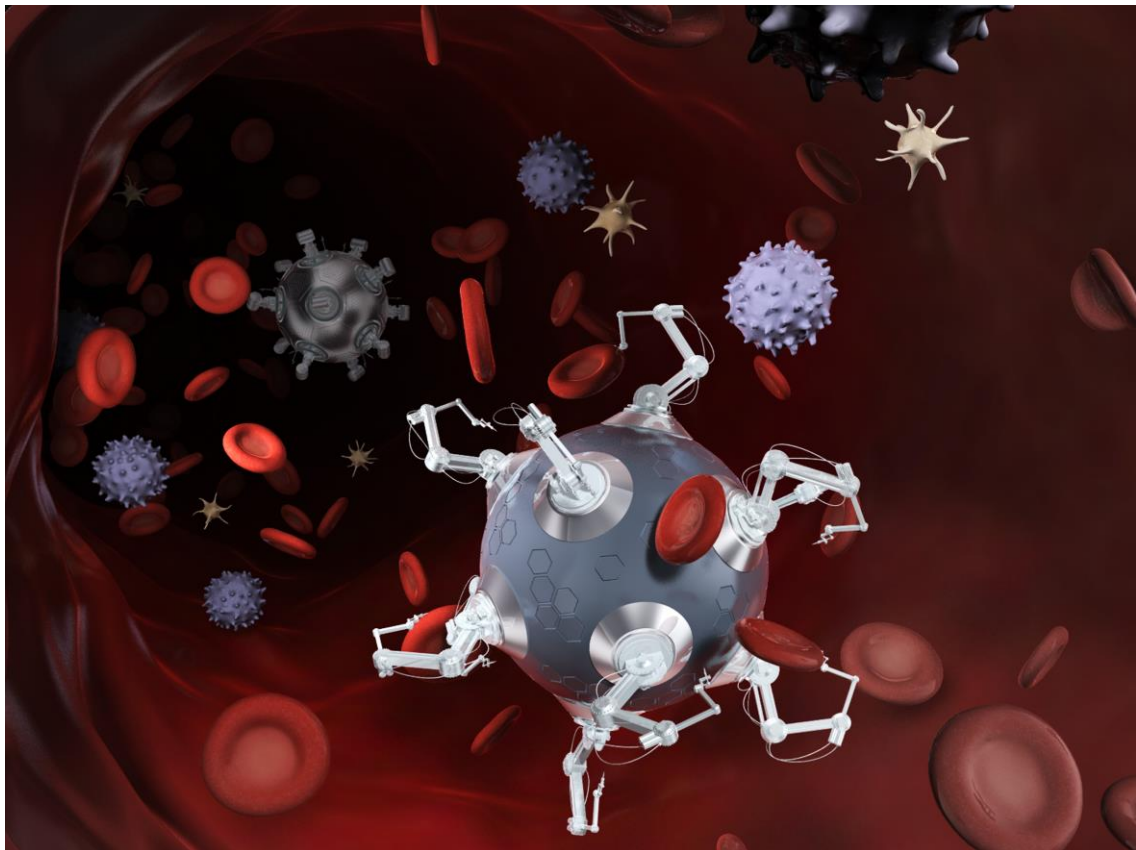
### 概要

水中を泳ぐ、という行動は、身体と流体の複雑な力学的絡み合いの産物です。地球上の生物の大多数を占める微生物の遊泳もその例外ではありません。このような微小遊泳の法則として、変形と遊泳の対応関係を表す遊泳公式が知られています。しかし、物体が柔らかい（弾性体）場合には、変形と遊泳が切り離せないため、これまでの遊泳公式は適用できません。そのため、弾性体の遊泳公式は長年の未解決問題でした。

京都大学数理解析研究所 安田健人 日本学術振興会特別研究員、Clément Moreau 同研究員と石本健太 同准教授らの研究グループは、従来の弾性体の拡張概念である「奇弾性体」が、流体中で自発的に遊泳することを理論的に発見し、その遊泳公式の導出に成功しました。

「奇弾性」は、これまでの弾性体理論では存在し得ないとされてきましたが、生き物のようなエネルギー保存則を満たさない物体には存在することが、ごく近年になって分かってきました。本研究グループは、この弾性体の隠れていた基本的な性質に注目することにより、生き物のように自律的に泳ぐマイクロマシンの基本原理を明らかにしました。本研究成果は、自律的なマイクロマシンの開発と実現に向けた、基礎と応用の両面における貢献が期待されます。

本成果は、2022年6月6日（現地時刻）に米国物理学会の学術誌「Physical Review E」にオンライン掲載されました。



## 1. 背景

多くの水生生物が水中で自身の体を変形させ、遊泳していることは我々の日常生活でよく見かける現象です。このような生物の多様な遊泳挙動は生物学者を始め、バイオミメティクス（生物模倣）の工学分野でも注目を集めています。特に細胞スケールの遊泳は、受精や感染症とも関わる生物・医学的にも重要な課題であるばかりでなく、体内を移動するマイクロマシンの設計原理にも利用されています。このような微小遊泳は、多くの分野にまたがる重要な問題であり、流体や弾性体の基本法則に関する物理・数理の分野においても、古くから研究されてきました。その中でも最もよく知られた遊泳の基礎法則として「パーセルの帆立貝定理」があります。この定理は、微小スケールで遊泳するためには、行きの変形と帰りの変形が異なっている「非相反な変形」が必要であることを意味しています。また、帆立貝定理を含む遊泳公式により、与えられた変形に対して遊泳挙動を計算することが可能になります。この方法論は非常に強力で、様々な遊泳研究に応用されてきました。しかしながら、物体が柔らかい(弾性体)場合には、変形そのものが物体と流体の複雑な相互作用によって生じるため、その変形の挙動を予め知ることはできません。そのため、従来の遊泳公式は適用できず、弾性体に対する遊泳公式は大きな課題として残されていました。

そもそも、**自ら変形し泳ぎ出すような柔らかな物体はどのような物理法則に従うでしょうか。**柔らかな物体といっても、ゴムの塊を水中に沈めてもひとりでは変形し遊泳することはありません。それは、エネルギー保存則が成り立っているからです。一方、生物はゴムとは異なり内部にエネルギー源を持ち、これを積極的に使うことができます。そのため、生物の遊泳挙動を理解するためには、エネルギー保存則が破れた新たな力学理論が必要となります。そこで研究グループが注目したのが、エネルギー保存則が破れた物体に現れる「奇弾性」(odd elasticity)と呼ばれる性質です。

## 2. 研究手法・成果

エネルギー保存則を満たす物体には、力と変形の間関係を表す「マクスウェル・ベッチ相反性」があるために、通常の弾性体(ゴム)が自発的に変形することはありません。**本研究では、生物のように自発的に変形する物体を、エネルギー保存則が成り立たない物体、と捉えることにしました。**すると、上記のマクスウェル・ベッチ相反性が破れてしまいます。この破れのことを数学的な性質から「奇弾性」と呼んでいます。この奇弾性体の流体中の挙動はどのようになるのでしょうか。

研究グループは、最も基本的な遊泳の数理モデルであるパーセル・スイマー (図 1) を解析することから始めました。これは、3本の棒が2つのヒンジ(蝶番)で結合したロボットで、ヒンジを動かすことにより変形することができます。**パーセル・スイマーに奇弾性を導入し、流体計算を行なった結果、自律的な遊泳挙動が現れることを発見**しました。奇弾性体の内的なゆらぎがスイッチのように働き、しなやかな遊泳運動が自発的に生まれます。

次に、研究グループは、この挙動の背後に潜む仕組みの解明に取り組みました。マクスウェル・ベッチの非相反性と、帆立貝定理に現れる変形の非相反性は、全く異なる2つの概念ですが、両者を結びつけるというアイデアが研究の鍵となりました。これらはいずれも物体の形状を表現する形状空間内の確率的な流れとして表現できることを見出しました。さらに、形状空間を表現する曲がった空間の幾何学を用いることにより、**奇弾性体の遊泳公式を導くことに成功**しました。この遊泳公式により、自発的な遊泳が奇弾性そのものに起因していることを証明することができます。このようなゆらぎを伴う物理現象は非平衡統計力学の研究分野で活発に研究されていましたが、その概念と手法を、流体と弾性体の遊泳問題に持ち込んだ画期的な枠組みになっています。

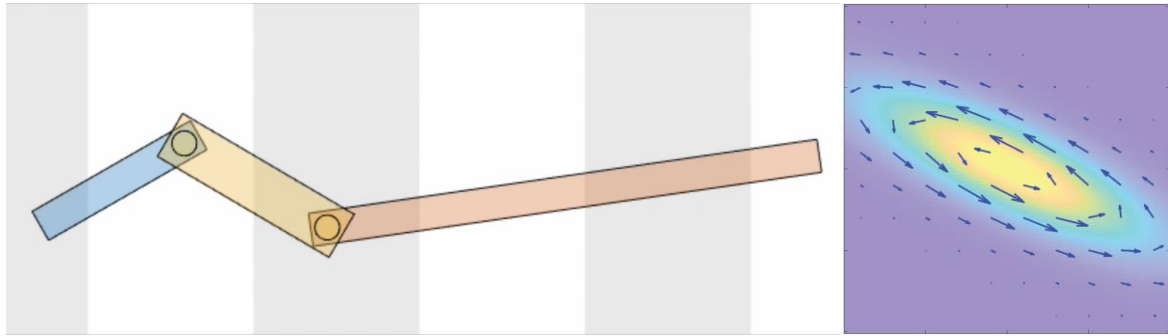


図1：パーセル・スイマーの模式図（左）形状空間における確率的な流れの様子（右）

これらの結果は奇弾性という新しい物質観によって様々な生体现象や自発現象を統一的に理解できる可能性を示しました。実際には、生体现象は細胞内部の多数のタンパク質分子の相互作用によって発現します。しかし、すべての分子の振る舞いを精密に調べることは最新のスーパーコンピューターでも全く不可能と言えます。本研究では、**一步引いた視点から生命を捉え、奇弾性というひとつの性質によって生物らしさを特徴づけ**ました。このようなアプローチは多様で複雑な生体现象に対してある種の普遍性を発見することにつながり、基礎理論の大きな発展をもたらすものです。ちょうど、ニュートンの万有引力において、内部物質の全く異なるりんごと月に、その詳細に依らない普遍的な引力が働いていることと同様の発想です。

### 3. 波及効果、今後の予定

本研究の結果は、柔らかく変形する物質（ソフトマター）や自発的に運動する物質（アクティブマター）の理論の適用範囲を飛躍的に広げるものです。近年では、遊泳以外の這いずりや歩行といった推進様式に関しても帆立貝定理が成り立つことが議論されており、本研究の遊泳公式は多様な推進機構に適用できる可能性があります。また、推進機構に限らず、生体発生や集団挙動などの多様な生体现象は自発的自律的に起こるため、奇弾性の適用可能性の広がりが期待されます。今後は、これらの奇弾性率を現実の系で見積もり、実際の微生物などがどの程度の大きさの奇弾性を持っているか調べる予定です。さらに、体内を移動する自律型マイクロマシンの設計についても本研究の遊泳公式は応用可能です。これまでマイクロマシンの設計においては外部からコントロールする制御理論が重要な役割を果たしていました。しかし、本研究で提案した「奇弾性」遊泳理論では、生物のように内部から自発的に変形が起こり、自律的な遊泳が可能です。このような弾性体の遊泳の基本原理は、自律的なマイクロマシンの開発と実現に向けて、基礎と応用の両面においての貢献が期待されます。さらに、この奇弾性による大胆な試みは新しい科学や技術の発展の礎となるものです。

### 4. 研究プロジェクトについて

本研究は日本学術振興会による科学研究費補助金事業「受精ダイナミクスに潜む連続体の数理：実験データに基づいた理論的アプローチ」（若手研究・18K13456）、「微細藻の形態形成と生殖・生態・進化に関する環境連成力学モデルの構築」（学術変革領域研究 A 21H05309）、「マイクロマシンの非平衡形状ゆらぎと推進機構」（特別研究員研究奨励費・21J00096）、外国人研究者招へい事業(PE20021)、及び科学技術振興機構(JST)「生命ダイナミクスのための流体数理活用基盤」（さきがけ・JPMJPR1921）の助成を受けました。

### <研究者のコメント>

本研究ではバックグラウンドの異なる3人の若手研究者が集まったことで、「奇弾性」と遊泳問題の対応関係という世界でも類を見ない研究が発足しました。当初、「奇弾性」という大胆な発想は我々の間でも受け入れ難かったのですが、本研究によって「奇弾性」の持つ大きな可能性の一部を垣間見ることができました。今後も多様で奥深い生体现象に対して、独自の視点から切り込んでいきたいです。(安田健人)

### <論文タイトルと著者>

タイトル：Self-organized swimming with odd elasticity (奇弾性による自律的な遊泳)

著者：Kenta Ishimoto, Clément Moreau, and Kento Yasuda

掲載誌：Physical Review E DOI：10.1103/PhysRevE.105.064603

### <参考図表>

自律的に流体中を泳ぐ奇弾性マイクロマシン [https://www.youtube.com/watch?v=M\\_JSq7sS69A](https://www.youtube.com/watch?v=M_JSq7sS69A)

微小遊泳の数理モデルであるパーセル・スイマーに、「奇弾性」を取り入れた流体数値シミュレーション。外部からの入力・制御がなくても、ひとりでの泳ぐ。