



Title	青色光照射下での自励振動により駆動する薄板状微結晶の水中遊泳とその粗視化モデルによる理解 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	小原, 一馬
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(理学)
Dissertation Number	甲第14898号
Issue Date	2022-03-24
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/85485
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	OBARA_Kazuma_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士 (理学)

氏名 小原 一馬

学 位 論 文 題 名

青色光照射下での自励振動により駆動する薄板状微結晶の水中遊泳とその粗視化モデルによる理解

本論文では、生物を模倣するマイクロサイズの自律駆動遊泳体の創出を目指した研究について、5章構成で著述した。

第1章では、研究の背景と意義、目的を述べた。加工によって作ることができないほど小さい大きさの、自律的に遊泳する物体の実現には、乗り越えなければならない条件が二つある。一つ目は、ボトムアップ的手法で作った物体の力学的変形に自己継続性を持たせる点である。二つ目は、マイクロ物体を水中で遊泳させるためには、水の粘性抵抗が時空間的に非対称に働く仕組みを導入する必要がある点である。一つ目については、オレイン酸とアゾベンゼン誘導体を混合して調製した結晶が、青色定常光照射下で巨視的に自励振動する現象を、池上が既に発見している^[1]。本研究では、この結晶を対象に、遊泳運動を明確に実現させることを目指した実験研究と、遊泳運動の粗視化数理モデルを通じた遊泳発現機構の理解を目指した研究とを行った。

第2章では、本研究の対象である自律駆動の微結晶の遊泳について、顕微鏡観察による解析結果と粗視化モデルを用いた数値計算結果を述べた。振動運動を示した薄板状微結晶は、振動する部分を後ろと見なしたとき、屈曲時に後退、平坦化時に前進した。なお、振動する部分について、本論文中では「ヒレ」と称することにする。多くの結晶は、一回の振動当りでの後退距離と前進距離が等しく、総和としては位置移動をしなかった。一方で、各サイクルでの後退距離と前進距離に偏りがある結晶も存在した。これらの結晶は、後退または前進する挙動を定常光照射下で継続しており、遊泳したと見なすことができる (Figure 1a,b)。

遊泳した微結晶について、その遊泳方向から二種に分類した。一つは、後退を繰り返すバタフライ型結晶、もう一つは、前進を繰り返すバタ足型結晶である。このうち、バタフライ型結晶の方が多く存在した (Figure 1c)。遊泳方向に差違が生じる理由を、結晶の形状やヒレの長さなどとの関連から見いだそうとしたものの、実験結果の統計的解析では明確には見いだせなかった。そこで、これら二種の遊泳の差異を理解するために、折れ曲がる結晶を粗視化したモデルに働く粘性抵抗の解析を行った。具体的には、粗視化モデルとして、三枚の曲がらない板 (板0、板1、板2) がトルクバネで連結された物体を想定した (Figure 1d)。板バネの力と、水から受ける粘性抵抗力とを考慮した運動方程式を立式し、その微分方程式を数値解析によって解いた。但し、粘性抵抗が支配的な環境では、バネでつながれた剛体の時間対称的な変化で、基本的には遊泳できないことが知られている。

そこで、本研究では、この粗視化モデルを解析するに当たり、「微結晶の上下方向の運動が制限されている点」「ヒレが片方向に振動運動する点」「ヒレの屈曲運動と遊泳運動に慣性項がわずかに働いている点」という観察結果に基づいた三つの仮定を導入した。その上で、板に接続されている2個のトルクバネの稼働方法の違いによって、遊泳方向や遊泳距離がどのように変化するかを算出した。数値解析結果の一例を Figure 1e に示す。これは、板1および板2が同時に動き出すと仮定したときの、ヒレ部分の長さ(b_1+b_2)に対する板2の長さ(b_2)の比(FR)と、板0の板1側結合点を原点とした板2の末端点の仰角(屈曲角: θ_{obs})と、算出された遊泳方向とその距離を表したものである。板1が長いと先端の板2が先に回転運動し、バタフライ型で遊泳し、板1が短いと板2には粘性抵抗が大きく加わり、板2の回転運動が遅れ、バタ足型で遊泳する挙動が算出された。

第3章では、第2章で述べた微結晶の遊泳運動の観察および解析結果と、モデルを用いた数値計算結果から導かれる考察を述べた。この際、粗視化モデル構築に当たって設定した仮定について、その妥当性を検討した。慣性項を加味した計算であるものの、粘性に支配された振る舞いが算出された結果や、実験結果と計算で算出された遊泳距離の整合性から、仮定は適切に設定されていると考えられた。

第4章では、本研究で明らかにした、粘性支配な環境における自励振動する薄板状微結晶の変形による水中遊泳について総括した。これまで、屈曲型の往復運動では遊泳が困難とされ、自己遊泳する分子ロボットの創出のためにはスクリュー状の自律的動きを実現することが必要と考えられてきた。本研究において、上下方向への運動が制約された環境ならば、屈曲型の運動でも水中を遊泳できることを実験的・理論的に示したことは、ボトムアップ的手法による分子ロボットの開発指針に転換をもたらすと期待される。

最後に第5章に、実験および計算の詳細を付した。

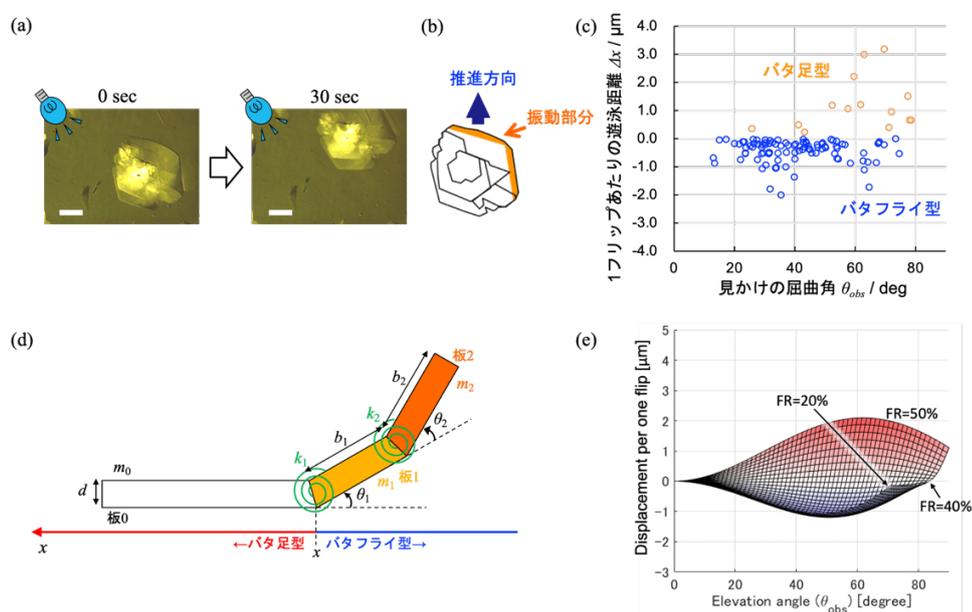


Figure 1 薄板状微結晶の遊泳運動と数値解析結果

- (a) 遊泳結晶の顕微鏡像で、スケールバーは $100 \mu\text{m}$ (b) 結晶の模式図
(c) 屈曲角と1フリップ当たりの遊泳距離 (d) 板3枚とトルクバネ2個の連結モデル
(e) 数値計算による屈曲角と1フリップ当たりの遊泳距離