

平成 22 年 5 月 25 日現在

研究種目：若手研究 B

研究期間：2008～2009

課題番号：20740241

研究課題名（和文）フィラメント状バクテリアの構造と運動に関する力学モデル研究

研究課題名（英文）Continuum mechanics approach to shape and motility of filamentous bacteria

研究代表者 和田 浩史 (WADA HIROFUMI)

京都大学 基礎物理学研究所 助教

研究者番号：50456753

研究成果の概要（和文）：本研究では、線状弾性体の非平衡かつ非線形ダイナミクスを理論的に調べる一般的手法を開発した。具体的には粘性流体中での弾性フィラメントの動力学を記述するモデルを発展させ、それを数値的かつ解析的に調べることによって、バクテリアの鞭毛フィラメントの多形質転移やらせん状のバクテリアの運動に関する定量的理解を進展させた。それらを実験結果と比較することで、微生物のデザイン原理の解明において力学の知見が重要であることを示した。

研究成果の概要（英文）：We have developed the general theoretical method to study nonlinear and nonequilibrium dynamics of elastic filaments in a viscous fluid. The method was applied to the problems of polymorphic transition kinetics of bacterial flagella filaments and of the swimming motility of helical-shaped bacterial cells. We have successfully obtained quantitative understandings on those problems. Comparison of our results to available experimental data suggests that the physical and mechanics point of view is indeed important to reveal “design principle” of shapes of microscopic life.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,900,000	570,000	2,470,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・生物物理、化学物理

キーワード：弾性理論、流体力学、バクテリア、らせん、アクティブマター

1. 研究開始当初の背景

らせん形の線状構造は細胞生物学におけるたいへん一般的なモチーフである。DNA, アルファ helix, バクテリアなど様々なスケ

ールに偏在する。本研究では、微生物の基本的モチーフとして、らせん状の基本構造を持つアクティブな弾性フィラメントの非平衡ダイナミクスを調べる。

2. 研究の目的

研究目的として具体的にターゲットとする現象は次の二つである：(A) 粘弾性媒質中でのらせん状細菌の運動メカニズムの解明、および(B) 細菌鞭毛のポリマーフィズム（多形質転移）のキティックスの解明。双安定性を持つフィラメントの弾性体モデルを構築し、粘性流体中で力学的、あるいは化学的に駆動されるフィラメントの散逸的ダイナミクスを考察する。この理論的枠組みは上記の二つのテーマに共通する。現象の物理的機構を明らかにし、関連する実験結果に解釈を与える。それを通じて、細菌はなぜそのようなかたちをしているのか、鞭毛のような構成要素をどのように利用するのか、といった生命のデザイン原理に力学の立場から説明を与えることを目指す。

3. 研究の方法

研究手法は解析的および数値的アプローチを組み合わせる。本研究計画では2年間のワークスケジュールを提案した。核となる研究ツールは stretch, bend, twist のすべての弾性モードを正しく扱い、かつ流体相互作用を効率的に取り入れた、らせんフィラメントのブラウン動力学モデルである。申請者の開発したこのモデルを応用、改善し、先項に挙げたテーマに取り組んだ。さらにはこの結果を解析的な考察によって検証し、かつ実際の実験結果との定量的な比較を試みた。

4. 研究成果

(1) 鞭毛フィラメントの多型転移を記述するため、局所的な双安定性を示す弾性フィラメントのモデルを構築した。具体的には二つの異なるらせんの安定状態をもつモデルを以下のように構築した。Zimm-Bragg の古典的モデルにしたがい、離散化したフィラメントの各点に内部自由度として二つの基底状態を指定する“スピン”変数を導入する。線形弾性論にしたがうと、自然なかたちでエネルギー表式にフィラメントの弾性ひずみとスピン変数のカップリングが出現する。Darnton-Berg の実験を念頭に、この bistable helix の力学的性質をハイブリッド型のシミュレーションによって調べた。ここでハイブリッドとは、フィラメントの変形を Brownian dynamics によって、スピンの発展を Monte-Carlo simulation によって行うことを指す。

計算機シミュレーションを用いて Darnton と Berg による光トラップの実験で得られた張力曲線を再現し、force-driven の多形質転移のダイナミクスを再現することができた。ベースとなるモデルから厳密に扱える解析的モデルを導出し、これを用いて、測定されている転移の張力の値などから、状態間の相対的な自由エネルギー安定性などを定量的に決定した。また force-driven の多形質転移のダイナミクスの引っぱり速度依存性など実験ではアクセスされていない性質まで明らかにした。これらの成果は文献[7]に出版済みである。

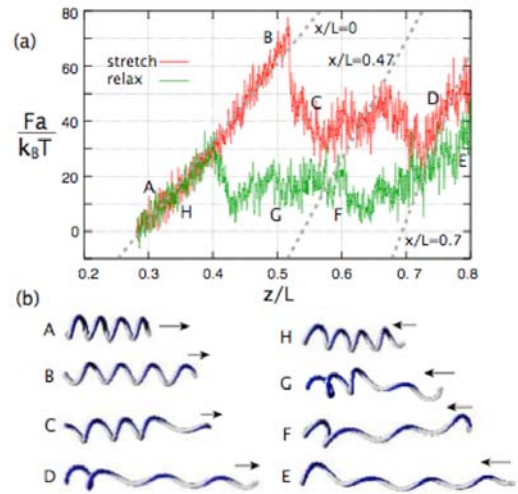


図1：シミュレーションで得られた bistable ならせんフィラメントの張力応答。張力に誘起されてピッチの短いらせん構造からよりピッチの長い別のらせん構造へと転移が起きている。

(2) スピロプラズマと呼ばれるらせん状の細菌は、らせんのカイラリティーを切り替えることで流体中を一方方向に遊泳する。我々はこのような細胞運動をモデル化し、その運動効率がらせんのピッチ角など種々のパラメータにどのように依存するかをシミュレーションによって詳しく調べ、それらの結果を解析的に説明した。とくに、実際の細菌においてピッチ角などのパラメータがもっとも効率的な運動を実現する最適値になっていることを見いだした。

またこの細菌は粘弾性媒質中ほどより素早く運動することが実験的に知られていたが、そのメカニズムについては謎であった。これは、絡み合った高分子の緩いネットワーク中に閉じ込められた線状の物体は、それ自身の長軸方向には動きやすいが、垂直

な方向の運動は著しく制約される、つまり実効的に流体からうける抵抗が極端に異方的になることによって実現する。まず現象論的なアプローチで粘弾性流体の異方的摩擦をモデル化し、そこから期待されるバクテリアの運動速度を予測した。するとこの計算結果は過去に得られた観測データをたいへんよく説明することがわかった。これらを含むこの研究に関する包括的報告は文献[3]に出版済みである。

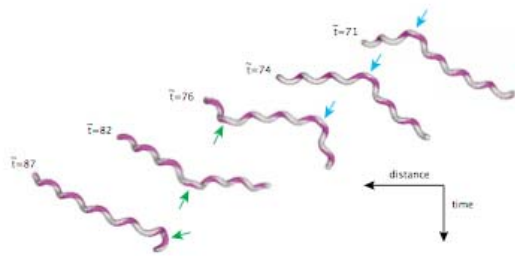


図2：シミュレーションから得られた bistable helix の粘性流体中での運動の様子。らせんが切り替わるにつれて流体中を一方方向に運動していく。これは *Spiroplasma* バクテリアの遊泳メカニズムと考えられている。

(3) さらにより一般的に、高分子溶液の流動ダイナミクスを記述するモデルとして広く知られている二流体モデルを用い、境界にアクティブな変形が加えられたとき、どれだけの流体の輸送があるか、あるいは自発的に変形する物体がどれだけの推進力を生み出さるかという問題を摂動計算によって明らかにした。

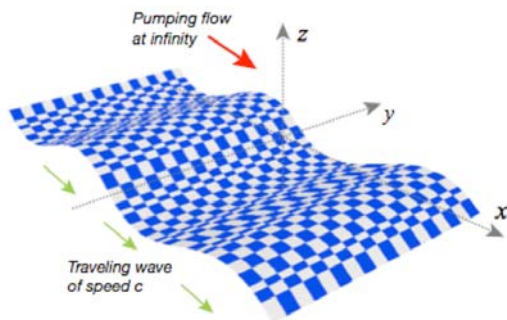


図3：モデル計算では境界に励起される進行波が沖合に誘起する流体の流れを計算することによって、粘弾性流体中で鞭毛を波打させて推進する微生物の運動に関する知見を得ることができる。

この分野の問題は近年の生物物理やアクティブマターにおいて盛んになりつつあるが、二流体モデルを用いた解析は世界に先駆けて行った。その結果、粘弾性流体の能動輸

送のふるまいは媒質のメソスケールの構造に著しく影響を受けることがわかった。このことは、これまで行われたきたように媒質を空間的に均一な粘弾性体として扱うことは不十分であり、動的な不均一構造を考慮する二流体モデルによる扱いが必要であることを示している。この結果は現在、投稿中である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 9 件)

1) H. Wada and Y. Tanaka, Mechanics and size-dependent elasticity of composite network, 査読有、Europhys. Lett. 87, 58001 (2009).

2) H. Wada and R. R. Netz, Plectoneme creation reduces the rotational friction of a polymer, 査読有、Europhys. Lett. 87, 38001 (2009). Erratum: Europhys. Lett. 88, 49901 (2009).

3) H. Wada and R. R. Netz, Hydrodynamics of helical-shaped bacterial motility, 査読有、Phys. Rev. E 80, 021921 (2009).

4) A. Alexander-Katz, H. Wada, and R. R. Netz, Internal friction and nonequilibrium unfolding of polymeric globules, 査読有、Phys. Rev. Lett. 103, 028102 (2009).

5) H-R. Jiang, H. Wada, N. Yoshinaga, and M. Sano, Manipulation of colloids by nonequilibrium depletion force under temperature gradients, 査読有、Phys. Rev. Lett. 102, 208301 (2009).

6) H. Wada, Semiflexible polymer ring acting as a nano-propeller, 査読有、Eur. Phys. J. E 28, 11 (2009).

7) H. Wada and R. R. Netz, Discrete elastic model for stretching-induced flagellar polymorphs, 査読有、Europhys. Lett. 82, 28001 (2008).

[学会発表] (計 5 件)

1) 和田浩史、粘弾性流体のポンピング、第

65 回日本物理学会、2010 年 3 月 22 日、
岡山大学

- 2) 和田 浩史、Working with elastic filaments: Some examples, 日本数理生物学会 (シンポジウム講演)、2009 年 9 月 9 日、東大駒場キャンパス
- 3) Hirofumi Wada, Spiroplasma Swimming: Active vs. Brownian Motion, Workshop on Active Matter: Physics of Biokinetics, 2009 年 7 月 24 日、東大本郷キャンパス
- 4) Hirofumi Wada, Rotating a polymer at nonequilibrium, ACAM Workshop: Driven microfluidic systems, 2009 年 5 月 23 日、ダブリン、アイルランド
- 5) 和田 浩史、Hydrodynamics of helical-shaped bacterial motility, 日本生物物理学会、2008 年 12 月 4 日、福岡

6. 研究組織

(1) 研究代表者

和田 浩史 (WADA HIROFUMI)
京都大学 基礎物理学研究所 助教
研究者番号 : 50456753

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :