

Propulsion in viscoelastic fluids

京都大学 基礎物理学研究所 和田 浩史¹

1 Introduction

マイクロスケールにおける微小流体の輸送や混合の問題は工学的観点から重要であるが、とりわけバイオリジカルな系に興味深い例が多く、基礎科学の視点からも重要な研究課題を提供する。たとえば、我々の呼吸気道や消化器官の内壁には cilia とよばれる繊毛が密に生えている。これらが協同的に波打つことで内部の流動性媒質を外部に輸送し健全な気道の機能を維持している。ゾウリムシやボルボックスなどの微生物は外表面にある cilia を協同的に波立たせることで推進力を発生し水中を遊泳する。

これらの現象はおもに空間のサイズにして $L \sim \text{nm} - \mu\text{m}$, 典型的な速度のスケールとして $v \sim \mu\text{m}/\text{sec}$ 程度で観測される。流れのレイノルズ数は 1 に比べて十分に小さく、流れのようすは粘性効果に支配される。このようないわゆる Low Reynolds number hydrodynamics における pumping や swimming の問題は近年特に精力的に調べられ、ニュートン流体に対する基本的な理解はほぼ完全に達成されたといえる [1]。しかし生体系に関わる流体は多くの場合、非常に viscous であると同時に viscoelastic でもある。つまり高分子溶液やゲルのようなメソスケールの内部構造を持ち、複雑な流動特性を示す。ところがこのような流体の内部構造あるいは不均一性が果たす役割については未解明の部分が多く、物理的なメカニズムやバイオリジカルな文脈でその役割を明らかにすることはたいへん重要である。たとえばある種のバクテリアはより媒質の粘性が大きいほど素早く運動するが、別の微生物では粘性とともに運動速度は単調に減少する。ニュートン流体に対する解析ではこのような粘性依存性はまったく説明できず、なぜこのような依存性が現れるかに関する説得力のある解釈すらない。本研究は動機は流体力学の立場からこのような問題を解決することである。

2 Model

本研究では媒質の viscoelasticity が果たす役割を明確にするため、いわゆる二流体モデルによる記述を採用する：注目している粘弾性流体を、ニュートン流体である溶媒相と弾性を支えるネットワーク構造を持つ高分子の相という二つの流体相の均一な混合流体として記述する。そして多少問題を理想化していわゆる Taylor のシートがこの流体中をどのように推進するかを摂動計算に

¹E-mail: hwada@yukawa.kyoto-u.ac.jp

よって考察する。Taylor のシートとは進行波型の変形をする無限に広がった境界面である。準定常的な流れの far field でのふるまいは near field の詳細によらないという事情のために、このようなシンプルなモデルにもとづく考察から鞭毛運動などの複雑な現象に対する重要な知見を得ることができる。対称性から明らかのように摂動の二次（振幅と波長の比の二乗）からゼロでない pumping/swimming flow が生じる。

3 Results

我々は摂動計算を二次まで進めることで、運動する物体（ここでは Taylor のシート）と高分子のネットワーク相との境界条件の詳細が決定的に重要であることを明らかにした [2]。すなわちネットワーク相（有限の緩和時間で高分子同士のからみあいがある程度には流動する）とシート表面とがすべりなしの境界条件を満たす場合には推進速度は粘弾性流体の実効的な（ゼロ周波数でのマクロな）粘性率とともに単調に減少する。一方、ネットワーク相とシートが直接には運動量のやり取りをせず溶媒を介してのみ流体的に相互作用する場合 [3] には、シートの推進速度はまったく逆の傾向を示す。つまり粘弾性流体の粘性率とともにより速く推進する。さらに我々は、最大の推進速度を得るために最適な波長が存在し、これがちょうど流体の持つ粘弾性長といわれる量に相当していることを示した。一般に絡みあいのある高分子溶液であっても高分子自体の体積分率は十分低いことが多く、またシート表面と高分子鎖との物理化学的な相互作用の詳細に依存してどちらの境界条件も実際の実験系において重要であることを強調しておく。したがってこのような視点から過去の関連する実験および観測結果をすっきり理解する手がかりが得られるかもしれない。

4 Conclusion

一般に、ミクロンスケールでの遅い流れのように粘性効果の支配的な流れの中では、運動の法則は我々の直感とはずいぶん異なる可逆性を示す。そのため、単純な周期運動から一方向性を運動を取り出す力学的なメカニズムを看破するために我々は多少の想像力を必要とするが、しばしば生物はそういった原理をうまく利用するようにデザインされている。流体と物体との界面における詳細が著しく重要であるという今回の知見は、微生物の運動の解析のみならず、発生過程における形態形成などミクロの流れが関与する生物物理の諸問題に対して幅広く有用であると期待される。

参考文献

- [1] E. Lauga and T. R. Powers, Rep. Prog. Phys. **79** (2009), 096601.
- [2] H. Wada, H. C. Fu and T. R. Powers, preprint (2010).
- [3] H. C. Fu, V. B. Shenoy and T. R. Powers, EPL **91** (2010), 24002.