

# 微生物溶液のバイオメカニクス

(東北大学大学院工学研究科) 石川 拓司

## 【はじめに】

微生物溶液は我々の周りに数多く存在し、我々の生活に様々な影響を及ぼしている。例えば、海洋のプランクトン群は海洋生態系の底辺をなしており、炭素や窒素循環にも影響を及ぼすため、地球温暖化や環境問題と密接に関わっている。工学的には、微生物はバイオリアクターとして利用され、いろいろな食品や薬品、化学物質の精製に役立っている。また、我々の腸内にも約 1.5kg (成人男性の場合) のバクテリアがいることが知られており、腸内フローラを形成して健康問題と密接に関わっている。このように、微生物の研究は多くの分野に役立つ可能性を秘めており、今後の発展が大いに期待される分野である。

流体力学的な観点から見ると、微生物溶液のモデル化や定式化はまだまだ進んでいない。特に、従来の数値モデルでは微生物間の干渉が簡略化されており、微生物が引き起こすミクロな流動構造をきちんと表現できず、溶液の連続体としての特性を正確に予測できない欠点があった。こうした背景から、著者らは遊泳微生物の 2 体干渉を実験的、理論的、数値的に調べ<sup>(1-4)</sup>、それによりマクロな溶液特性がどう変化するのか、数値的に調べてきた<sup>(5-8)</sup>。本論文ではこれらの研究成果を振り返り、微生物溶液のバイオメカニクスを議論する。

## 【微生物の 2 体干渉】

遊泳微生物の干渉現象は、大別すると生物学的な干渉と流体力学的な干渉に分けられる。我々はせん毛虫の *Paramecium caudatum* を用い、溶液中の微生物の干渉がどの程度生物学的な反応の影響を受けるのか調べた<sup>(1)</sup>。*Paramecium* の生物学的な反応としては、回避反応、逃走反応が知られているが、我々の実験ではこうした生物学的な反応を示す細胞は全体の 15% ほどであった。その他 85% 程度の大多数は、流体力学的な干渉を示すことが分かった。

この実験結果をより詳細に調べるため、我々は *Paramecium* の数値モデル化を試みた。*Paramecium* を剛体楕円体と仮定し、表面に接線方向速度を持つ squirmer<sup>(2)</sup> とモデル化した。そして squirmer 周りのストークス流れを境界要素法で解くことにより、2 体の流体力学的干渉を解析し、*Paramecium* の実験結果と比較検討した<sup>(2)</sup>。横軸に干渉前の 2 体の細胞の方向ベクトルの差を取り、縦軸に 2 体の細胞の方向ベクトルの干渉前後での相対変化量を取って比較したところ、流体力学的干渉しか考慮していない squirmer の解析結果が、実験結果と非常に良く対応していることが分かった。

この他に、*Volvox* のダンス<sup>(3)</sup>やバクテリアの 2 体干渉<sup>(4)</sup>等についても調べ、微生物の干渉現象における流体力学的な相互作用の重要性を明らかにした。

## 【微生物の集団遊泳】

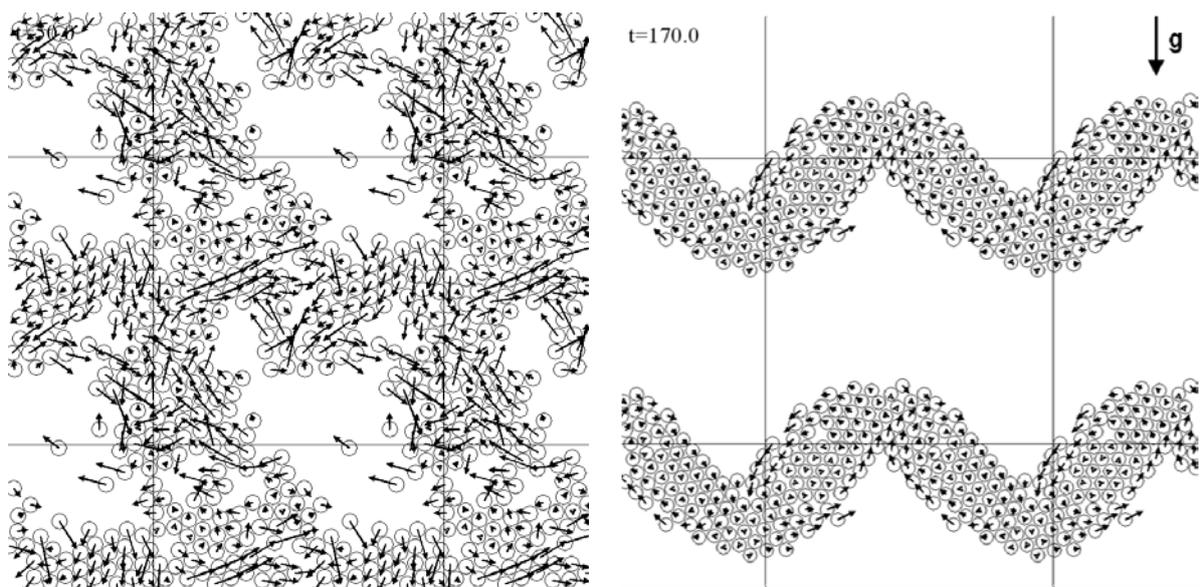
流体中に剛体粒子を入れる場合と異なり、微生物溶液は微生物の遊泳に起因する独特の溶液特性を示す。まず始めに、mono-layer 中の微生物がどのように集団遊泳するかを図 1 に示す<sup>(5)</sup>。この計算ではストークス動力学法<sup>(6)</sup>を用い、squirmer モデル周りの流体力学を厳密に解

いている. *squirmers* はメゾスケールのカオス的な集団遊泳 (図 2(a)) や, 帯状の集団遊泳 (図 2(b)) など, 従来の実験で観察された様々な集団遊泳を示した. メゾスケール流動構造の時間スケール, 空間スケールをこれまでに報告されている実験結果と比較したところ, 定量的にも良い一致を見た.

溶液の内部構造が変化すると, 溶液のマクロな特性である, 粒子応力テンソルや拡散テンソルなども大きく変化する. 例えば, バクテリア溶液の見かけの拡散係数は, メゾスケール流動構造の有無によって, 3 桁ほどのオーダーで変化するとの報告がされている. そこで *squirmers* 溶液の数値シミュレーションを行い, 自己拡散係数を調べた<sup>(7)</sup>. その結果, 微生物の遊泳が決定論的に記述されたとしても, 干渉を繰り返すたびに遊泳はカオス的となり, 時間スケールが十分に大きければ拡散現象となることが分かった.

我々は, 微生物溶液のレオロジー<sup>(8)</sup>も調べている. 溶液は強い非ニュートン性を示し, 見かけの粘度の増減や法線応力, ストレスオーバーシュートなど, 多くの興味深い現象が見られた.

このように, 微生物溶液は様々な興味深い特性を示すことが明らかになった.



(a) non-bottom-heavy squirmers

(b) bottom-heavy squirmers

Fig. 1 Position of squirmers in a mono-layer and velocity vectors relative to the average velocity<sup>(5)</sup>

### 【参考文献】

- (1) Ishikawa, T. and Hota, M., *J. Exp. Biol.*, **209**, 4452-4463 (2006)
- (2) Ishikawa, T., Simmonds, M. P. and Pedley, T. J., *J. Fluid Mech.*, **568**, 119-160 (2006)
- (3) Drescher, K., *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **102**, 168101 (2009)
- (4) Ishikawa, *et al.*, *Biophys. J.*, **93**, 2217-2225 (2007)
- (5) Ishikawa, T. and Pedley, T. J., *Phys. Rev. Lett.*, **100**, 088103 (2008)
- (6) Ishikawa, *et al.* T., Locsei, J. T. and Pedley, T. J., *J. Fluid Mech.*, **615**, 401-431 (2008)
- (7) Ishikawa, T. and Pedley, T. J., *J. Fluid Mech.*, **588**, 437-462 (2007)
- (8) Ishikawa, T. and Pedley, T. J., *J. Fluid Mech.*, **588**, 399-435 (2007)