

## 生物対流現象の数値シミュレーションとその可視化

## 5U-3

井上千鶴<sup>1</sup>、原島省<sup>2</sup>、渡辺正孝<sup>2</sup>、池辺八州彦<sup>3</sup>、市川哲彦<sup>1</sup>、佐藤浩史<sup>1</sup>、藤代一成<sup>1</sup><sup>1</sup> お茶の水女子大学理学部      <sup>2</sup> 環境庁国立環境研究所<sup>3</sup> 筑波大学電子・情報工学系

## 1 はじめに

鞭毛藻などの数種の水生微生物の培養液の表面に、微生物を多く含む部分が筋状に垂れ下がることが知られている。Platt は、これを Bénard 型対流との相似性から生物対流と名付けた [1]。この対流現象は、微生物の反重走性によって培養液に密度不安定が生じ、それが原因となって起こると考えられるため、生物系と非生物系との間の相互作用を扱っている点で非常にユニークである。

80年代に著者の一部により、流体力学的アプローチによる生物対流の鉛直2次元数値シミュレーションが行なわれた [2]。本研究の目的は、同様のアプローチに基づいた数値シミュレーションを3次元化し、さらに効果的な可視化によって現象を解析することにある。

現在、この問題をとり上げる理由は大きく二点ある。一点は、この現象の同アプローチによる解析が2次元までしか行なわれていなかったこと、もう一点は、この現象がボリュームレイキャスティングと呼ばれるボリュームビジュアライゼーション手法によって効果的な可視化が可能となる典型的な例であることである。

本稿では生物対流現象を概説したあと、可視化手法を紹介しその結果を考察する。そして最後にまとめと今後の展望を述べる。

## 2 生物対流現象の概要

本節では、生物対流の命名者 Platt の説明 [1] を引用して同現象の概要を記すことにする。

鞭毛藻 *T. pryiiformis* は、深さ 1cm から 2cm、幅数 cm の培養液の表面に Bénard 対流によく似た多角形のパターンを形成する。個々の微生物はその多角形の中心のところ上方へ泳いでゆき、そこから、多角形の端の方へ数 mm 泳ぎ、そこで糸が垂れるように下に落ちて行く。その時、鉛直断面から観察すると、フィンガーパターンの形成が見られる。図 1 に著者の一部によって撮

影された *Heterosigma akashiwo* の下降フィンガーの形状を示す。

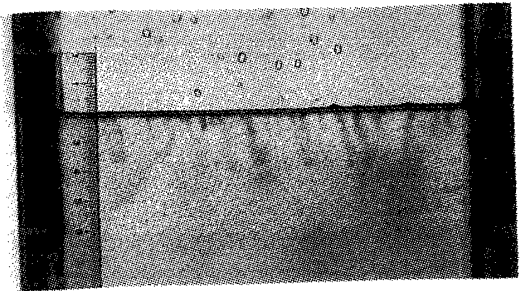


図 1: 鉛直 2 次元断面での下降フィンガーの形状

このパターン形成の原因としてはいくつか考えられるが、ここでは「水よりも重い微生物が上昇するときに引き起こされる密度転置による力学的不安定性」が主たる原因と考えることにする。基本方程式およびその数値計算スキームの詳細については文献 [2, 5] を参照されたい。

## 3 可視化手法とその結果

## 3.1 可視化手法

今回のシミュレーションは 3 次元での微生物個体数密度の推移を計算した。そして、各時刻ごとでボリュームデータを生成し、可視化を行なった。データサイズは  $80 \times 80 \times 20$  であり、可視化にはボリュームレイキャスティング法を用いた [3, 5]。

ボリュームレイキャスティング法は、等値面化などのように幾何学的変換を用いずにボリュームデータの内部構造を直接半透明表示する。この目的のために通常は、ボリュームが微小粒子の漂う半透明なゲル状の媒体と見なし、各ボクセルのフィールド値がそのボクセルを含む微小体積における微小粒子の密度を表現していると仮定する。微小粒子の密度の大きいところは当然、遮光効果が高くなる。このモデルに基づき、ボクセル集合内の各ボクセルに対し、フィールド値を不透明度やカラーパラメータのような光学的な値に変換し、各ピクセルごとに視点とピクセルとを結ぶ射影光線に沿って、交差するセルの各点における光学的な値を再サンプリングしながら、不透明度の積算値が 1 になるまで各点のシェーディング結

Simulation and Visualization of 3D Bioconvective Pattern Formation

Chizu Inoue<sup>1</sup>, Akira Harashima<sup>2</sup>, Masataka Watanabe<sup>2</sup>,  
Ikebe Yasuhiko<sup>3</sup>, Yoshihiko Ichikawa<sup>1</sup>, Hiroshi Sato<sup>1</sup>,  
and Issei Fujishiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ochanomizu University, <sup>2</sup>The National Institute for Environmental Studies, <sup>3</sup>University of Tsukuba

果をブレンディングして対応ピクセルの色を決定していく。

以上のように、ボリュームレイキャスティング法は、フィールド値を微粒子の密度そのものに変換する物理モデルに基づいている。この生物対流の場合は、微生物個体数密度そのものをフィールド値とするので、ボリュームレイキャスティング法によって非常にフォトリアスティックな3次元の生物対流パターンを表示することができる。と期待できる。

### 3.2 可視化結果の考察

シミュレーションにはTITAN3000システム、その可視化には同システム上のAVS4を用いた。

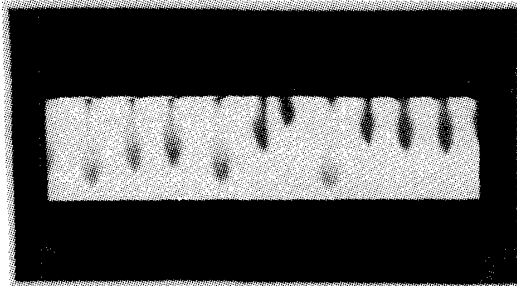


図2: 鉛直2次元断面での微生物個体数密度の可視化  
(本図は疑似的なボリュームデータを用いており、データサイズは $80 \times 20 \times 20$ である)

図2では個体数密度の小さいところほど白く、大きいところほど着色されて表示されている。ボリュームレイキャスティング法を使用し半透明的に表示したことにより、培養液中に微生物が広がっているような様子がよくわかる。個体数密度が高いところと低いところの境界があいまいに表現されて、薄ぼんやりとした特徴的なフィンガーパターンが浮かび上がっている。図1と比較すれば、現実の培養系で見られる現象と定性的に一致した微生物個体数密度分布が本シミュレーションにより得られていることが分かる。図2のような半透明的表現の手法を用いて静止画像を生成した場合、3D性が著しく減少してしまうので、よりよい3D効果を得るためにはアニメーションが欠かせないと考えられる。

### 4 まとめと今後の課題

本稿で採用した基礎方程式により得られた微生物個体数密度の分布パターンは、鞭毛藻 *Heterosigma akashiwo*

の培養液中におけるフィンガーと定性的によく一致していることがわかった。また、アニメーションによってパターン形成のプロセスも明らかになった。とくに、可視化手法にボリュームレイキャスティング法を使用したことにより、フォトリアスティックな可視化が実現でき、この手法が生物対流現象の可視化において有効な手段であることが確認できた。

今後の可視化に関する課題としては、以下のようなものがあげられる。

#### 1. 流線、渦度の同時表示

密度不安定によって引き起こされる培養液の対流がこの現象の重要な要素になっているので、これらの同時表示は、現象への理解を深めるためにも不可欠であると考えられる。

#### 2. 物理量の効果的な可視化手法の模索

運動エネルギーとポテンシャルの相関関係など基本物理量の可視化もこの現象の理論的な考察のために必要であると思われる。

### 参考文献

- [1] Platt, J.R. (1961): "Bioconvection patterns" in cultures of free-swimming microorganisms," *Science*, **133**, 1766-1767.
- [2] Harashima, A., Watanabe, M. and Fujishiro, I. (1988): "Evolution of bioconvection patterns in a culture of motile flagellates," *Phys. Fluids*, **31**, 764-775.
- [3] 藤代一成, 茅暁陽 (1992): ボリューム・ビジュアライゼーションの基本アルゴリズム, *PIXEL*, No.119, pp127-132, No.121, pp130-135, No.121, pp130-137.
- [4] Fujishiro, I., Ikebe, Y., Harashima, A. and Watanabe, M. (1989): "A note on cyclic reduction Poisson solvers with application to bioconvective phenomena problems," *Computers & Fluids*, **17** (3), 419-435.
- [5] 井上千鶴, 藤代一成, 原島省, 渡辺正孝, 池辺八州彦 (1993): 生物対流現象の数値シミュレーションとその可視化, 第3回 AVS カンファレンスプロシーディングズ