

生物の階層構造への自己組織化

個体ベースモデルを用いた計算結果から見えたもの

石川芳男 (Yoshio Ishikawa)

日本大学 理工学部 航空宇宙工学科

杉浦 桂 (Katsura Sugiura)

相模女子大学 栄養科学部 健康栄養学科

本研究が対象としている水系の微生物生態系は、生産者（クロレラ）・分解者（バクテリア）・消費者（ロティファ）から成る最小単位の生態系である。この系は、自然の中から自己淘汰を通じて実験的に選び出されたものであり、エネルギーを例外として閉鎖された環境の中で、上記の生物の各個体が強い相互作用のもと絶妙にバランスを取り合いながら共存を保っている。光の入射と熱の放射すなわちエネルギーフローが存在するため、この系は非平衡であり、いわゆる複雑適応系の典型である。

この種の生態系の計算を目指す従来の数理生態学では、生物数に関する Lotka-Volterra の関係式（捕食/被食関係式）に必要な拡張を施した常微分方程式系と物質循環のそれを連立させ、数値的にこれを解く方法が主流であった。こうした取り扱い、系内の生物数と物質量の時間履歴を記述するものであるが、そもそも空間の概念を含まないため、それらの空間分布に関する情報は排除されていた。それゆえ、空間的距離を介した自然な生物個体間の関係性や物質環境と生物との相互作用をモデルに組み込むことは不可能であった。また、偏微分方程式系を用いて空間を考慮する試みも行われているが、生物が有する基本的な特性パラメーターと方程式系のそれとを 1 対 1 で対応させることが困難であり、塗りつぶされて中身のわからないパラメーター値を根拠が不明確なまま決定しなければならないなどの困難が生じる。それゆえ、理由はわからないが、何となくそれらしい結果が得られた程度の議論に陥りやすい。

実験によれば、系の安定期において、生物は培地底面に多数のコロニー（階層構造）を形成して共生し、生物数や物質濃度の分布は空間的に不均一となる。生態系としての長期の継続性と高度な安定性は、これらの発生とその内部構造に根本的に関わっているはずであり、これを創発することが出来る記述方法が望まれていた。

ここで述べる個体ベースモデルは、これに応えることが可能であり、微分方程式などの明示的な方法によらず、生物個体間および生物個体と代謝生成物間の局

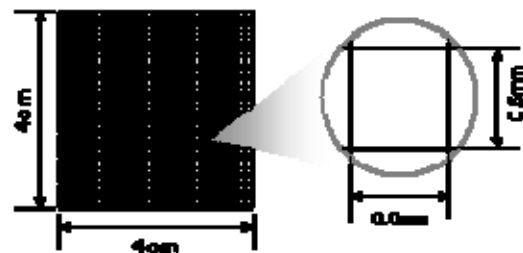


図1 培地（計算領域）

所作用則だけで生物活動を記述できる。また、個々の生物に対して、個体差や環境条件との相互作用を反映させることが可能なため、生物に固有な非線形的・自己調節的振る舞いを表現できる。そのため、ミクロな個体の振る舞いからマクロな階層構造の出現までを **self consistent** に記述することを可能とした。

図1は、培地（計算領域）を示す。4cm×4cm×3cmの立方領域が1辺0.5mmのメッシュで80×80×60個のセルに分割されている。生物個体は、この底面上で、移動・栄養摂取・排泄・成長・増殖・死滅などの活動を行う。代謝生成物は、3次元的に空間を拡散する。

図2は、生物間および生物と代謝生成物間の相互作用則である。これらを差分方程式で表現することにより、代謝過程での散逸を含む物質循環（エネルギー循環）を記述する。

図3は、撒布から、遷移期の個体数爆発を経て、安定期に至るまでの生物数の履歴である。実験とのよい一致が確認されている。

図4は、そのときの培地上の生物分布である。撒布から遷移期を経てコロニーが形成される過程がわかる。各生物種は、物質循環を図るため、培地上の同じ位置に存在している。

図5は、光合成により系に取り込まれるエネルギー量と熱として系外に放出されるエネルギーロス量の関係の変遷である。逸脱した状態から出発しても、系は自発的に固有の安定点（釣合点）に向かって収束してゆく。

図6は、生産者と消費者の分裂体力を変化させたときの系のエネルギーロス量と、そのときに出現する生態構造との対応を示す。●はコロニーが形成された領域、○は培地一面にマット状に生物が分布した領域、□は生物数履歴に大きな振動を伴う不安定領域、×は消費者が脱離し3者の共存が破綻した領域である。×領域は例外として、上の順番で系のエネルギーロスが増加する。逆に言えば、生物は安定な生態構造（階層構造）を創発・持続することで効率的な共生を実現している。

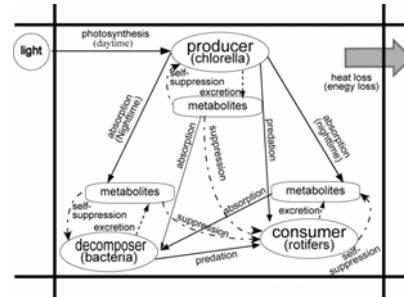


図2 相互作用ルール

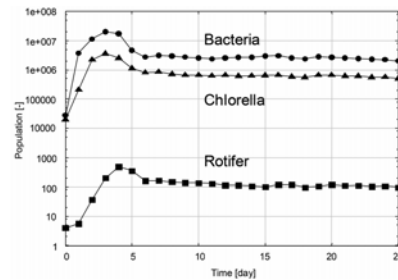


図3 生物数の履歴

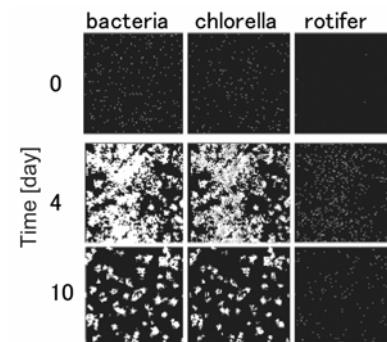


図4 培地上の生物分布の履歴

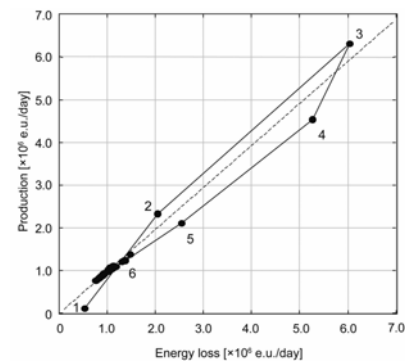


図5 系の生産量とロス量

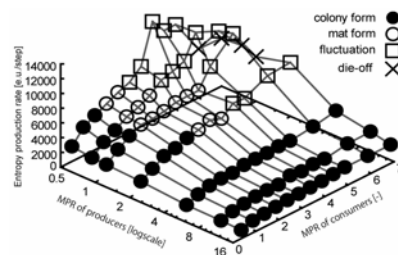


図6 生態学的マップ