

論文の内容の要旨

氏名：寺 尾 卓 真

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：微小生態系における空間の効果

個体ベースモデルのモデル柔軟性と実生態系解析への応用

我々の生活している生態系は、様々な内外乱に晒されながらも、多くの生物種が共存し、生物の生息環境や物質およびエネルギー循環は安定している。これはあたかも、生態系自身が能動的に物質やエネルギー循環をうまく調整すること(生態系の自己調節機能)で、内外乱に対応し系の安定と種の共存を果たすように導いているようである。しかし、実際は何らかの原理が存在し、自己調節機能や種の共存が果たされているはずである。その原理を解明し工学的に応用できる形に導くことができれば、それを人工的な閉鎖生態系などの多数の要素から構成される、複雑なシステムの安定運用に適用できる可能性がある。そのため我々は、生態系の自己調節機能や種の共存などの原理を解明するために、最も単純な生態系である微小生態系(microcosm)を研究対象とし、生態系の解析を行ってきた。

生態系での生物種の共存や自己調節機能には、空間的な効果、つまり生物や物質の空間的な分布や生物を取り巻く環境の変動によって生み出される効果が深く関与していると考えられる。しかし、自然観察などの実生態系では、系を構成する要素が多く、また様々な影響を含んだ形でしかデータを得られないことが多い。そのため、現象の要因を明確にすることが難しく、解析は非常に複雑である。数学モデルを用いた生態系の研究では、多くが Lotka-Volterra モデルを代表とする空間を考慮していないモデルを用いている。それらの研究では生態系に関する多くの知見が得られたが、これまでに空間的な効果と生態系の自己調節機能や種の共存を結びつける原理に関して、得られた知見は少ない。

そこで本論文では、生態系の空間を考慮した数学モデル(個体ベースモデル)を用いて、生態系の空間的な効果が、生態系の挙動に重要な役割を果たしていることを示すことを目的とした。そのために、2つのシミュレーションを行った。1つは、同一ニッチを共有する2種の分解者の共存のシミュレーションである。これによって、従来の生態系のモデルでは複数のモデルを用いて表現していた種の共存の形態が、空間を考慮したモデルでは、1つのモデル、かつ1つのパラメータで表現できることを示した。また、生態系における種の共存と空間的な効果の関係を調べ、生態系の空間的な効果が種の共存を助長していることを示した。もう1つは、microcosm に化学物質を投与した場合を想定したシミュレーションである。これによって、空間を考慮したモデルを用いると実生態系の挙動を再現できることを示した。また、系が外乱を受けた後の生物の振る舞いと生物の活性の空間的な分布が密接に関与していることを示した。

本論文は次の第1章から第6章より構成されている。

第1章	序論
第2章	microcosm
第3章	microcosm のモデル化
第4章	個体ベースモデルの生態系の数学モデルとしての柔軟性 ：同一ニッチを共有する2種の分解者による共存
第5章	個体ベースモデルによる実生態系の解析
第6章	まとめ

第1章「序論」では、本研究の背景および目的を示した。また、従来の生態系の数学モデルの問題点と本論文で用いた数学モデルによる利点を示した。

第2章「microcosm」では、研究の対象となる実験系の微小生態系(microcosm)の特徴と実験結果の一例を示した。microcosm は、小さなフラスコの中に、生産者の chlorella, 分解者の bacteria, 捕食者の rotifer を閉じ込めた水系の生態系である。この microcosm は一度培養に成功すると、物質の補給なしに少なくとも

も数百日の間、安定して種の共存状態は維持される。また、microcosm は自然生態系に比べてはるかに構成要素が少ない。しかしながら、生物の個体数等に變動(外乱)を与えても再び安定な状態へと推移する現象(自己調節機能)や複数種の生物が集団を形成し生息する生物分布の空間的構造(コロニー)などの自然生態系によく見られる特徴を有している。そのため、生態系の様々な本質的な特徴を有する実験系モデルとして優れている。

第3章「microcosm のモデル化」では、従来の生態系の数学モデルと提案する microcosm のモデル化について述べた。従来の生態系の数学モデルによって、生態学における種内競争や種間競争の多くの知見が得られた。しかし、それらのモデルでは、空間は考慮されておらず、生物や物質の分布は一様であると仮定されている。実際の生態系では、そのような仮定が成り立つのはまれであり、実生態系では生物や物質の空間的な不均一性が生態系の種の共存や安定に深く関与していると考えられる。そのため、我々は生態系の空間を考慮した数学モデルである個体ベースモデルを用い、microcosm を表現した。このモデルを用いることにより、従来のモデルでは必要であった、実生態系では成り立たない仮定を排除することができ、実験系ともよい一致を得ることができる。そして、microcosm の特徴であるコロニーの形成等の空間的構造を表現することができる。

第4章「個体ベースモデルの生態系の数学モデルとしての柔軟性：同一ニッチを共有する2種の分解者による共存」では、系に増殖速度の異なる2種類の分解者が、突然変異により発生するシミュレーションを行った。そして、ニッチを共有し、かつ増殖に優劣のある2種の分解者が共存できるのかどうかを検証した。一般的に、ニッチを共有する複数の生物種が同じ系に存在した場合、それらの種の間では、系での存在をめぐる競争が起こる。そして、増殖に最も有利な種のみが存続し続けると考えられる。しかし、空間を考慮した個体ベースモデルを用いた場合、2種の分解者に増殖に関して優劣がありながらも共存を果たした。このとき、2種の分解者の増殖の優劣が大きいときは、2種はある一定の個体数の割合を維持しながら共存し、優劣が小さいときは2種の個体数が逆位相の同期振動をしながら共存した。これらの共存の形態は、従来の生態系の数学モデルでは、複数のモデルを用いて表現されてきたが、空間を考慮した個体ベースモデルでは、1つのモデルかつ生物の増殖速度に関する1つのパラメータ値を変化させることで表現された。これにより、我々の数学モデルが生態系の様々な現象を再現し得る柔軟なモデルであることが示された。さらに、これらの2種の分解者の共存の原理を調べるために、生物の空間的な分布を調べた。その結果、2種の分解者の共存は、生物の空間的な不均一性が、増殖に劣位な種に、局所的な2種の分解者の競争の少ない空間を与えることで可能となっていることが示された。すなわち、空間の効果が2種の共存を可能としていることが示された。

第5章「個体ベースモデルによる実生態系の解析」では、系に化学物質を投与することで、系を構成する生産者と捕食者の増殖速度が減少することを想定したシミュレーションを行い、系の挙動を解析した。まず、系が化学物質の投与(外乱)を受けた後の系の応答を、実験結果と計算結果で比較した。その比較において、空間を考慮した個体ベースモデルでは、従来の数学モデルでは再現できなかった実験系の応答を、よく再現できることが示された。次に、計算で得られた結果を基に、外乱により系が変動し再び安定した状態に至るまでの期間(過渡期)と、系が安定した状態に至った期間(極相期)について解析した。過渡期については、生物の振る舞いの指標となる相互作用強度、相互作用頻度および系のエネルギーロス量の関係を解析することで、外乱を受けた後に生物がどのように振る舞い、再び安定な状態へと向かうのかを調べた。その結果、系は外乱を受けた後、エネルギーロス量が小さくなる方向へ相互作用強度および相互作用頻度を変化させていることがわかった。そして、極相期については、生産者および捕食者の増殖速度の変化に対する系のエネルギーロス量の変化の傾向が、生産者と捕食者で異なることが示された。さらに、極相期の系の状態と生物の活性の空間的な分布は深く関与していることが示された。

第6章「まとめ」では、本論文の総括を述べた。

以上のように、空間を考慮した生態系の数学モデル(個体ベースモデル)を用いて、同一ニッチを有する2種の生物の共存と系への化学物質の投与を想定したシミュレーションを行い、それらから得た結果を解析することで、生態系の挙動と空間的な効果の関係性についての知見が得られた。したがって、本論文の目的を達成することができた。