

報告番号	※甲	第	号
------	----	---	---

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目 三次元仮想物理環境下での捕食被食関係に基づく形質進化と個体群動態の相互作用  
氏 名 伊藤 孝

### 論 文 内 容 の 要 旨

生態系において捕食被食関係は生物の発展をもたらす最も基本的な相互作用である。この相互作用は、生物群集における重要な構造である食物連鎖を形作っており、個体群動態の主要因の一つとなっている。また、食物網内において捕食被食関係がもたらす捕食圧は、生態系の多様性と生物の機能を形作る主要因の一つとされており、捕食被食関係における生物の戦略進化に大きな影響を与えている。最近まで、この個体群動態と戦略進化、すなわち生態と形質進化の両者は、時間スケールの違いから互いに影響を及ぼすことはないと言われてきた。しかし近年の研究において、生態学的現象と同じ時間スケールで生じる「迅速な進化」の存在が明らかとなり、生態と形質進化は相互作用しうることが報告された。両者の相互作用はEco-evolutionary feedback (Ecogenetic feedback) と呼ばれており、生態系理解において非常に重要であると考えられ、現在研究が進められている。しかし、この相互作用を実証的に調べるためには、生物の長期的で大量の観測データを取得しなければならず、また、そのデータから形質進化と他の生態的要因を分離した分析を行う必要があるため非常に難しい。一方で、微分方程式などに基づく数理生物学的手法を用いる手法や微生物を用いた実験室環境下での実験では、形質進化を事前に定義したパラメータの変動や遺伝子頻度の変化として取り扱っており、実験中に生物の新奇な機能が創発したとしても、その特徴や進化の過程を直接的に議論するには別のアプローチが求められる。

そこで本研究では、捕食被食関係に基づく形質進化と個体群動態の相互作用のダイナミクスを、人工生命を用いた抽象モデルを用いて解明することを目的とし、様々な実験を行った。抽象モデルとして、本研究では三次元仮想物理環境下での仮想生物の進化モデルを用い、その中で仮想生物の捕食被食関係を構築した。この環境下では、仮想生物の形態と行動は実際の自然に近い物理法則に基づいており、

戦略進化は形態及び行動の進化として取り扱われるため、より具体的に形質進化と個体群動態の相互作用のダイナミクスを議論可能である。また、実世界では非常に長期にわたり膨大な観測データが必要となる進化の影響について、短時間のシミュレーションの結果から議論することが可能となる。

本研究では、まず一対一の捕食被食相互作用モデルを構築し、三次元仮想物理環境下での仮想生物の進化についての基本的知見を得るための実験を行った。戦略の進化を、捕食被食間、形態行動間の二重の共進化によるものと位置づけ、どのような共進化ダイナミクスが生じているのか、その特徴やダイナミクスに影響する要因についての分析を行った。また、従来あまり議論されてこなかった被食者の防衛戦略に着目し、創発した戦略の特徴の分類を通し、多様な戦略がどのように進化したかについて議論した。次に、これまでの知見に基づいて多対多の捕食被食相互作用モデルを構築し、そこに個体群動態を導入することで形質進化との相互作用の影響を調査するための実験を行った。加えて、本研究で構築したフレームワークの形質進化と個体群動態の相互作用を分析する上での発展可能性を探るため、様々な角度からの分析を行った。

本論文の構成は次の通りである。第一部では、一対一の捕食被食関係に基づく戦略の創発やその共進化ダイナミクスを対象とした研究を行った。まず第1章において、研究の背景と第一部での目的を示した。第2章において、本研究を通して用いる三次元仮想物理環境下での仮想生物進化モデルを示した。本研究では、実験環境に Pilat が開発したオープンソースな三次元物理空間での形態と行動の進化シミュレーションソフトウェアである Morphid Academy を用いている。摩擦と重力が働く三次元物理空間上のフラットな平面上を、ヒンジ状の関節で接続された複数の直方体のパーツによって構成されたエージェントが行動する。エージェントの形態は部品に対応したノードと関節に対応したリンクによって構成される再帰的な構造が可能な有向グラフによって決定され、エージェントの行動はこの有向グラフの中に組み込まれたニューラルネットワークにより決定する。捕食者のいずれかのパーツが被食者のノードパーツに触れることを捕獲と定義し、シミュレーションでの相互作用の結果を適応度として、遺伝的アルゴリズムによって進化する。第3章では、被食者の戦略進化に着目し、進化実験においてどのような戦略が創発するのか、その特徴や自然界の戦略との類似性などを明らかにするための実験を行った。捕食者は捕食の成功数を、被食者は回避の成功と移動距離に基づいた適応度を用い、捕食者を事前に進化させた上で、連続世代モデルの遺伝的アルゴリズムによる進化実験を行った。進化した被食者の戦略は、行動に依存し捕食者から移動することで捕獲から逃れる逃走戦略、形態に依存し捕獲されないようにメインパーツに触れられないような形態を持つ防御戦略、この2つの特徴を併せ持つハイブリッド戦略と、多様なものがあり、これらは実際の自然でも観察できるものであった。第4章では、

捕食者被食者間、形態行動間の二重の共進化に着目し、そのダイナミクスやそれを引き起こす要因を明らかにするための共進化実験を行った。実験の結果、一般的に簡単な被食者のタスクと難しい捕食者のタスクという種間レベルの非対称性と、より劇的な形態の進化とより穏やかな行動の進化という種内レベルの非対称性によって二重の共進化のダイナミクスが形成されていることが示された。特に形態と行動の非対称性によって、新たな戦略が生まれる際には形態が大きな戦略変化を伴って進化した一方、相手の戦略変化に対応し、自らの戦略を変化させる際には、従来の戦略を大きく変えない細かい変化が可能な行動が先に変化することが示された。また、マスタートーナメントを用いて戦略の性能の測定をすることで、戦略の創発、消滅、維持といった捕食-被食共進化によるダイナミクスを観察することができ、共進化による軍拡競争的な捕食者と被食者の戦略の向上が確認できた。

第二部では多対多の捕食被食関係に基づく形質進化と個体群動態の相互作用のダイナミクスを対象とした研究を行った。まず第5章において、研究の背景と第二部での目的を示した。第6章では、第一部で用いたモデルに個体群動態をどのように適応させるかについて示した。捕食者/被食者の適応度は捕食/回避の成功数と体の体積の大きさに比例したコストによって決まり、生成される次世代個体の数は適応度に従って決まる。これによって、仮想生物はその形質を進化させると同時にその個体数を変化させることができる。第7章では、この相互作用の基本的な挙動を明らかにするための実験を行った。単純化のため、被食者のみを進化させ、捕食者は事前に進化させた、被食者を捕食可能な個体集団を用いた。進化実験の結果、短期間と長期間において異なる形質進化と個体群動態のダイナミクスが観察された。短期間でのダイナミクスではLotka-Volterra方程式のような捕食者、被食者の個体数変化を示し、解析により、進化の影響はなく、個体数変化のみによって生じていることがわかった。一方で長期間では、個体数の増減によって、被食者に対する防御形質とコストの選択圧が切り替わり、進化により変化した形質によって、個体数が再度増減するといった、形質進化と個体群動態間でのフィードバックループが観察された。このダイナミクスは実験室環境下の実際の生物の系で観察されたものとよく類似していた。次に第8章、第9章では、両者の共進化が可能とする拡張を行い、両者の共進化の様々な面へのアプローチを行った。まず第8章では、遺伝オペレータがこの相互作用に及ぼす影響を分析した。その結果、遺伝オペレータの種類と捕食-被食間の非対称性によって、変異の大きさが異なっており、ダイナミクスに異なる影響を与えることが示された。第9章では、生態系に大きな影響を与える絶滅について、進化が与える影響のダイナミクスの分析と予測を行った。その結果、捕食/防衛戦略進化の軍拡競争が系を不安定にさせ、捕食者の絶滅リスクを高めることがわかり、それが起こっていることを示す進化による体積の変化率と絶滅までの残り時間の関係性を分析したところ、変化率によって絶滅までの残り

時間に大きな差があることがわかった。

本研究では、三次元仮想物理空間上で仮想生物による捕食被食関係を構築し、戦略進化を捕食被食間、形態行動間の二重の共進化によるものと位置づけ、進化実験を行うことで、その戦略進化と個体群動態の相互作用のダイナミクスを分析した。一対一のモデルにおいて、戦略進化の多様性や、共進化ダイナミクスの特徴、ダイナミクスを形成する共進化における非対称性を明らかにした。また、多対多のモデルにおいて実際に戦略進化と個体群動態の相互作用が生じることを示し、そのダイナミクスを明らかにするとともに、本研究のフレームワークの発展可能性を示した。これらの知見は人工生命のフレームワークのみならず実世界での事例に対しても適用することが期待できる。また、本研究を発展させることで、捕食被食関係における群れの構造と生物の形質との相互作用の解明などより複雑な相互作用への応用や、タスクに応じて構造と制御を同時に最適化するような進化ロボティクスの分野への応用が期待できる。