

非同期シグナルコミュニケーションを進化させる捕食・被食者エージェントモデルによる絶滅現象の解析

菅野貴成[†] 大林武[‡] 西羽美[§] 木下賢吾[¶]
 東北大学[†] 東北大学[‡] 東北大学[§] 東北大学[¶]

1 はじめに

微生物を含む多くの生物種はフェロモンなどの化学信号を利用し情報を同種他個体とやりとりしているが、特に捕食-被食関係において必ずしもそれが有益に働くとは限らない。例えば、ある蛾はオスをおびき寄せるフェロモンを出す、その捕食者であるシジュウカラはこれを盗聴して、蛾を食べにやってくる。[1] このように化学信号のやりとりは、同じ種だけでなく他の種にも利用され、結果、種間で複雑な相互作用が起こる。この相互作用やその適応行動を理解することは、生態系の保全や農業への応用に役立つが、複数の生物種が共進化する環境でこれらを実際に調べるのは困難である。

そこで、仮想的な環境としての計算機シミュレーションを観察することで、この複雑な問題にアプローチできないかと考え、本研究で試みた。本研究は特に捕食者-被食者間の化学信号に注目した共進化エージェントモデルを提案し、それをもとに捕食者-被食者関係におけるシグナルコミュニケーションの影響力を評価した。

2 関連研究

強化学習を用いた捕食者-被食者関係のモデルはWangら[2]などによって考案されているが、捕食者や被食者は格子内を動くエージェントとして定義されており、それよりも小さなシグナル物質を仮定できない。そこで、捕食者-被食者関係ではないもののWitkowskiら[3]の、採餌タスクによってシグナル利用の行動進化を行った手法を参考にしてモデルを構築した。

3 モデル

本研究では、捕食者、被食者、栄養生物の3つの生物集団のいる2次元空間を考える。図1に示すように、捕食者は被食者を、被食者は栄養生物を食べることで生存できる。捕食者、被食者はそれぞれシグナル物質を空間内にばらまいており、このシグナル物質は、栄養生物と

ともに、その濃度分布を100×100の格子で離散化された「場」に表現される。なお、この「場」は周期境界で、時間に伴う物質の拡散や消滅を計算している。



図1: モデルの概念図

捕食者と被食者は「場」の中を自由に動くことができ、「場」のシグナル濃度を検知して、それによって動きおよび自身の出すシグナル量を決定するエージェントである。このとき、個体の行動は再帰構造をもつニューラルネットワークによって決定される。そして、各個体はニューラルネットワーク内の重みを遺伝子型として、これをWitkowskiらの研究[3]で提案された非同期複製スキームを用いて進化させる。これは採餌によって十分にエネルギーを貯蓄した個体だけが自己複製して子孫を残すことができる一方、生存するためのエネルギーが無くなるとその個体は死に至る。この方法によって採餌が上手い個体が選別されることになる。

4 実験

捕食者・被食者の行動決定に用いられるシグナル検知を制限する実験を行った。シグナル検知は捕食者・被食者それぞれ4つの条件があり、何も検知しない「なし」、同種のシグナルのみを検知できる「シグナル」、別種(捕食者なら被食者、被食者なら捕食者)のシグナルのみを検知できる「盗聴」、「シグナル」と「盗聴」どちらも行う「両方」である。よって、その捕食者と被食者の各4条件の組み合わせである表1に示すような全16条件が対象になる。なお、表の縦が捕食者の検知条件であり、横が被食者の検知条件である。

表1: シグナル検知の違いによる実験条件

捕食者 \ 被食者	なし	シグナル	盗聴	両方
なし	(1)	(2)	(3)	(4)
シグナル	(5)	(6)	(7)	(8)
盗聴	(9)	(10)	(11)	(12)
両方	(13)	(14)	(15)	(16)

シミュレーションは、位置と遺伝子型をランダムに初

Analysis of extinction in predator-prey agent model that evolve asynchronous signal communication

[†] Takanari Kanno, Tohoku University

[‡] Takeshi Obayashi, Tohoku University

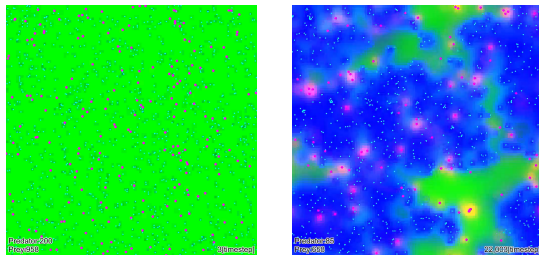
[§] Hafumi Nishi, Tohoku University

[¶] Kinoshita Kengo, Tohoku University

期化して、ある一定の時間経過後打ち切ったが、捕食者・被食者どちらかの集団一方でも絶滅すれば、打ち切る時間まで経過していなくても終了させた。

5 シミュレーションの結果

実験の16条件ごとに20回のシミュレーションを実行した。シミュレーションの様子を図2に示す。シミュレーションのうち、捕食者集団が絶滅してしまう例も見られたが、それ以外は捕食者・被食者ともに生き残った。



(a) 開始直後 (b) 時間経過後

図2: シミュレーションのスナップショット

6 非絶滅率解析

16条件の20回のシミュレーションのうち最終的に捕食者・被食者ともに絶滅せずに終えた例の割合（非絶滅率）を図3に示す。このヒートマップは表1の順序で並べられている。ヒートマップを見ると右上から左下にかけて徐々に非絶滅率が大きくなっていく傾向がある。



図3: シグナルの検知条件ごとの非絶滅率

つまり、捕食者は「なし」から「両方」に向かって複雑な戦略が取れるほど、被食者は「両方」から「なし」に向かって単純な戦略になるほど系は維持されやすいということがわかる。

7 「シグナル」と「盗聴」の効果

さらに、「シグナル」と「盗聴」で、どちらが系の維持に影響を与えたかを調べた。非絶滅率は、経過時間ごと

に割り出せる時系列データであり、図4に示すような曲線を描ける。

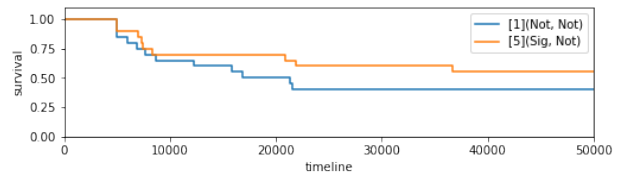


図4: 実験条件(1)と(5)の非絶滅率曲線

この曲線を用いて、「シグナル」がある条件とない条件、「盗聴」がある条件とない条件の比較をログランク検定で行ったところ、有意な差があったのは(2)と(10)、(6)と(14)、(13)と(15)の3つであり、どれも「盗聴」の影響によるものだった。つまり、「シグナル」よりも「盗聴」のほうが、系の維持に影響があることがわかる。

提案モデルでは、直接他個体を認識することはできず、シグナルの分布から密度を推定することしかできないため、同種同士よりも個体の生存に関する利害関係の大きい別種同士のシグナルに重きが置かれるのではないかと考えられる。

8 おわりに

本研究ではシグナルを伴う捕食者-被食者関係の共進化モデルを提案し、そのモデルに対してシグナル検知の制限の仕方を変えて実験を行った。結果、捕食者がより複雑な戦略が取れるほど、被食者がより単純な戦略しかとれないほど系は維持されやすいことがわかった。また、同種のシグナルを検知するよりも、別種のシグナルを検知するほうが、捕食者・被食者ともにその集団の生存に強く影響を与えた。しかし、现阶段の分析は俯瞰的なものに限られており、各個体がシミュレーション中でのどのように動いているのかの分析や、シミュレーションのパラメータ探索などが今後の課題として残されている。

参考文献

- [1] Irene Saavedra, Luisa Amo; Insectivorous birds eavesdrop on the pheromones of their prey, PLoS ONE, 2018
- [2] Xueting Wang, Jun Cheng, Lei Wang; A reinforcement learning-based predator-prey model, Ecological Complexity, 2020
- [3] Olaf Witkowski, Takashi Ikegami; Emergence of Swarming Behavior: Foraging Agents Evolve Collective Motion Based on Signaling, PLoS ONE, 2016