

MAS を利用したバッタの発生モデルと群生相の発生原因に関する考察

防衛大学校 理工学研究科 情報数理専攻 コンピュータ工学研究室
水野 弘章

1 はじめに

動物、特に昆虫においては、個体の生活条件によって性質の異なる成虫が発生することがある。この現象は相変異と呼ばれ、バッタ等が例として挙げられる。通常、バッタは群れることなく個別に生息するが、この状態は孤独相と呼ばれる。気象を初めとする何らかの影響で特異な生活環境を強いられて成長すると相変異が起こり、孤独相と異なる性質を持つ成虫が発生する。このような個体は群生相と呼ばれ、バッタの場合は運動（移動）能力、羽の長さ、食事の様子、行動の特性（行進行動）等が変化する。群生相のバッタは群れて大発生し、長距離移動しながら農作物等に大きな被害を与える。群生相のバッタによる様々な被害は総じて蝗害と呼ばれる。

現在の日本では蝗害が見られなくなったが、アフリカや中国では現在でも蝗害が発生する。相変異の発生メカニズムは科学的にはまだ不明な点があり、対策は農薬散布や益獣の飼育等となる。これには多大なコストがかかり、自然環境にも悪影響を与えるため、相変異の発生を的確に予想して効率良く対策を運用することが望ましいが、屋外を大移動するバッタの挙動を把握することは困難である。本研究は、バッタの発生をモデル化することで、蝗害への何らかの対策法の模索を試みるものである。

相変異の発生はバッタ密集時の、個々の相互作用に左右されると言われているが、バッタの相変異と大発生をモデル化した先行研究として、木崎らによる確率モデルや決定論モデルを利用した研究が挙げられる [1, 2]。木崎らの研究では、微視的な視点においてバッタの群れる習性を確率モデルで、行進行動特性を決定論モデルで表現し、粗視的な視点においては正方格子

上の確率的オートマトンを用いてバッタの生態をモデル化している。本論文ではこのようなバッタの行動特性をエージェントの機能として表現し、*artisoc* を利用してバッタの発生モデルを作成した。本論文ではアフリカなどで蝗害を引き起こすサバクトビバッタ

(*Schistocerca gregaria*) を例として作成したモデルと先行研究とで群生相の大量発生に関して比較・考察を行う。

2 サバクトビバッタの生態

本章では国際連合食糧農業機関が公表するサバクトビバッタの資料 [3] 及びバッタに関する書籍 [4] を参考にその生態について簡単に述べる。

2.1 サバクトビバッタの生態と相変異

サバクトビバッタの生活環を図 1 に示す。

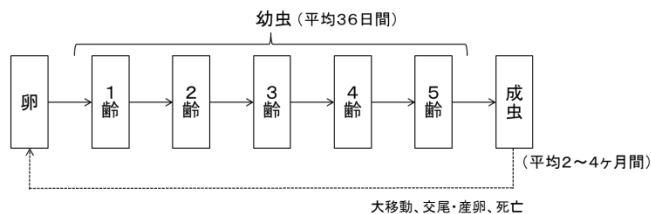


図 1 サバクトビバッタの生活環

サバクトビバッタの寿命は 2~6 ヶ月である。孵化した幼虫は 5~6 回の脱皮を経て成虫となる。成虫は長距離の移動を行うことが可能で、交尾もできるようになる。産卵は 2~3 回行われるが、産卵を行うと親は長生きできない。卵は気象や天敵の影響によりいくらかは孵化せずに死亡してしまう。産卵数とその死亡率について表 1 に示す。

表1 産卵数と卵の死亡率

相	孤独相			群生相		
	1	2	3	1	2	3
産卵回数	1	2	3	1	2	3
産卵数	150	120	60	60~80	50~70	35~70
死亡率	13%			33%		

卵の寿命（孵化可能な期間）は産み落とされてから10～65日の間である。生まれた幼虫が最終的に成虫になれる割合は16%程度であり、3回産卵した1匹のメスからは最終的に孤独相で53匹、群生相で22匹の成虫の発生が見積もられる。

成虫の行動と相転移の発生について図2に示す。

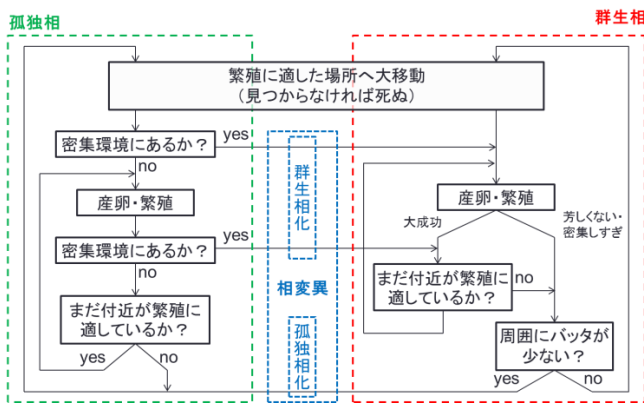


図2 成虫の行動と相変異の発生 ([3]より引用)

サバクトビバッタは通常、低密度で生息し、少数のまま発生し続けるため、無害である。(孤独相)しかし、数世代にわたって幼虫時代に密集環境に置かれた孤独相の系統には相変異が起こり、群生相の成虫が発生するようになる。逆に数世代にわたり群れなかった群生相の系統にも相変異が起こり、孤独相の成虫が発生するようになる。通常、相変異は2世代にかけて起こるが、突然密集環境に置かれた親が産卵して生まれた個体等では1世代で孤独相から群生相が発生する場合もある。

サバクトビバッタは西アフリカから中東・東南アジアにかけて生息するが、この地域は雨季・乾季が存在

するので、繁殖に適した環境へ風に乗って大移動する。

サバクトビバッタは草不足、低気温、乾燥などに弱く、大量に発生してもこれらの要因によりいずれ死滅する。逆に、これらの条件が揃えば突然大量発生することがある。(e.g. 2日間の大雨で突然蝗害が発生)

2.2 群生相の特徴

群生相の個体は孤独相の個体に比べて、下記のような特徴を有する。

- ・ 体が大きく、体色も異なる。
- ・ 性成熟は早い、一度に産む卵の数は少ない。
- ・ 群生相に成長する卵も大きい。
- ・ 幼虫は群れで行進する。
- ・ 成虫は群れをなして長距離飛行する。
- ・ 普段食べないものも食べ尽くす。
- ・ 餌がないと共食いを始める。

3 artisoc によるモデル化

本章では artisoc を用いてサバクトビバッタの発生モデルを表現するにあたり、その挙動及び特性をどのように組み込んだかについて述べる。

3.1 環境

サバクトビバッタの発生・生存には様々な自然環境が影響を及ぼすが、今回は自然環境の厳しさに伴う死亡率は確率で表現することとした。(気温・天敵・病気や成長の失敗等)

先行研究では、正方格子で場を表現しており、この格子のサイズで餌場の大小を表現している。ここでバッタの集団が格子上の粒子として表現される。例えば、大移動の結果降り立った場所の草地(餌場)が狭ければ格子を小さくする。

本論文では先行研究との比較を容易にするため、草地の面積(分布)と草量を制御することで季節を表現することとした。例えば乾季は、草地面積を減少させた上で全体の草量を減らすといった具合である。また、

雨季や局所的な雨により草が成長する様子は草量を増加させることで表現できる。バッタが存在する座標の草量はそのバッタによりステップ毎に消費されていく。

時間（ステップ）の考え方については、1ステップを1日と考えることとした。（雨季は約4ヶ月）

3.2 エージェント

エージェントとして、孤独層の個体、群生相の個体、卵を作成した。それぞれが有するパラメータを以下に示す。

- 孤独相の個体及び群生層の個体のパラメータ
座標、進行方向、周囲のバッタ数、寿命、虫齢、
密集経験レベル
- 卵のパラメータ
座標、寿命、（親から引き継いだ）密集経験レベル

ここで、寿命は2章で述べた寿命の平均を初期値とし、産卵したとき或いは餌がないときに減少するものとする。虫齢は初期値0でステップ毎に増加し、現在幼虫なのか、成虫なのかを判別するのに用いる。また、虫齢が寿命を上回ると死んでしまうこととする。密集経験レベルは、周囲のバッタ数が多い環境にあれば増加し、そうでなければ減少することとし、次世代が孤独相と群生相のどちらに生まれるかを決定する指標として用いる。

続いて各エージェントの機能について示す。バッタエージェントは草のある場所へ移動し、草を食べる。十分に草と寿命があれば産卵する。産卵数は表1の平均に基づく。また、移動可能距離は幼虫で3マス、成虫で10マスとした。エージェントによる機能の違いを下記に示す。

- 孤独相
なるべく他のバッタが居ない場所を探す。視野は3マスとした。
- 群生相
バッタエージェントの多い方に向かう（群れる）。

餌がない場合は周囲のバッタと共食いする。共食いする相手もない場合のみ寿命を削る。視野は10マスとした。

- 卵
ステップ毎に親の密集経験レベルに応じた相のバッタエージェントを生成する。簡単のため、卵ひとつ当たり、孤独相は53匹、群生相は22匹のエージェントを生成するようにした。

4 実験

4.1 定常状態の再現

異常気象或いは急な気候変動等がなければ、バッタの繁殖による個体の総数はある種の定常状態を示すと考えられる。バッタの発生モデルを作成するにあたり、このような定常状態を再現できるような各種パラメータを定めることとした。そこで、図3に示すように、草地を2箇所設け、交互に雨季・乾季が訪れるような場を表現した。

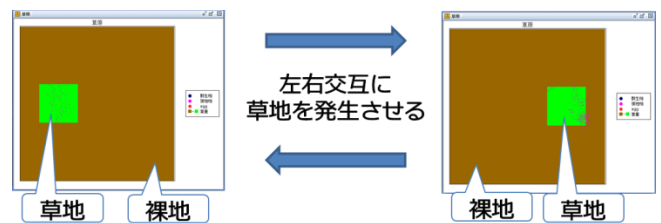


図3 場の設定

雨季が訪れれば草地は繁栄し緑色の部分が発生するが、乾季が訪れると草地は枯れ、茶色の裸地となり、バッタは長居できない。草地の面積はスライドバーで操作できるようにした。シミュレーションを当初雨季の草地付近に孤独相バッタを100匹配置した状態から開始した。ある種の定常状態を表現できているような結果の一例として、図4のような結果が得られた。

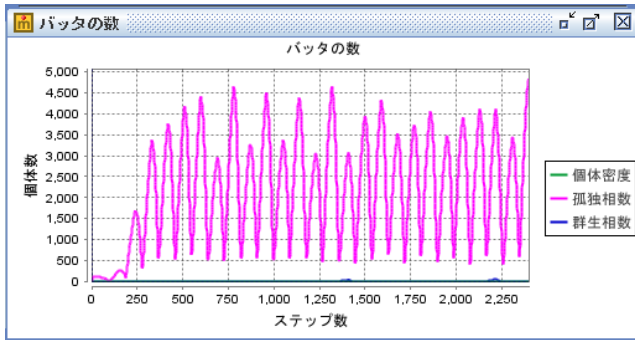


図4 定常状態におけるバッタ個体総数の推移

この結果は先行研究（確率格子モデル）によるシミュレーション結果とよく似ており、実際のバッタ個体総数の再現ができていないかと思われる。尚、所々で少数の群生相が発生することがあるが、群生相の発生数は密集経験レベルを相の決定にどの程度反映させるかの重み付けによってある程度操作することが可能であった。群生相が発生している状況を確認するため、重み付け（群生相の発生しやすさ）を意図的に強くした場合どうなるかを確認した。図4の結果に対して、その重みを2倍にした結果を図5に示す。

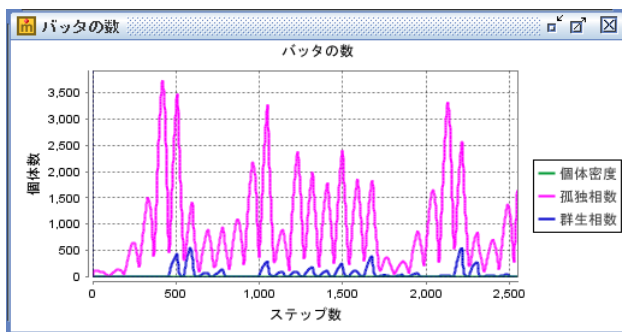


図5 密集経験レベルの反映重みを増加させた結果

図5より、群生相が増加する前には孤独相が多数発生していることがわかる。この間に密集経験レベルが上昇し、群生相が発生しやすい環境になっていると予想される。また、群生相が増加すると孤独相が減少し、群生相が減少すると孤独相が増加し始める傾向にある。従って両者は気象が安定している場合は共存できない

存在であろうと予想することができる。群生相の増加数に対して孤独相の減少数が非常に多いことについては、バッタ総数の増加によって食料となる草が不足することにより、死滅している孤独相が多数存在するためと考えられる。群生相発生時のバッタの分布の様子を図6に示す。

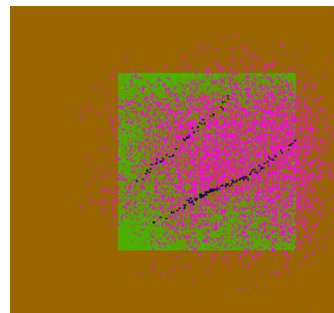


図6 群生相発生時のバッタの分布

図6において、ピンク色の点は孤独相エージェントを、青色の点は群生相エージェントを示す。この群生相エージェントはまだ孵化したばかりの幼虫の時期であるが、列を成して発生・行動しており、現実における群生相の幼虫の行進行動を再現したような結果が得られた。

4.2 草地の変化による群生相発生の再現

続いて、群生相発生の原因を考察するために、先行研究の考え方に基づいて環境を操作したらどうなるのかを確認することとした。先行研究においては雨季に増加した孤独相が乾季に突入し、限られた草地に殺到するために群生相が発生するというシナリオに基づいてモデル化を行っている。草地面積に対し意図的に急な縮小を行うと先行研究のシナリオと同様に群生相が大発生するのかが確認した。結果を図7に示す。

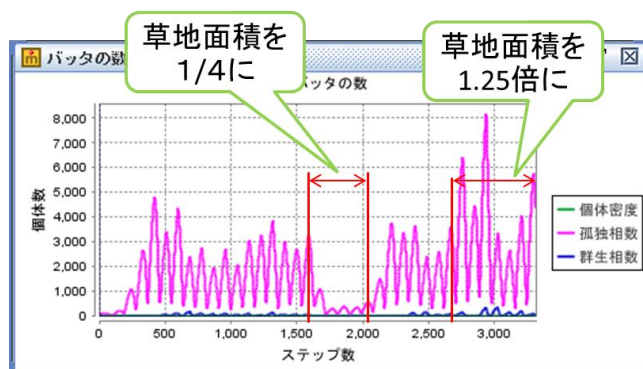


図7 草地面積の増減によるバッタ総数の推移

まず、草地面積を減少させた場合、群れないという孤独相の特性が強かったためか、全体のエージェント数が減少してしまい、密度が上昇することもなく、群生相発生には至らなかった。逆に草地面積を増加させたところ、急激な総数の伸びは認められたものの、面積も増加したために密度が上がらなかったのか、群生相が爆発的に発生することは確認されなかった。(但し、ある程度の増加は認められた。)

5 考察

一つ目の実験により、先行研究[1]において微視的な立場で用いられた確率モデル及び決定論モデルによるエージェントの表現はMASによって上手く表現ができていると考えられる。特に、決定論モデルで表現された行進行動についてはMASにおいても同様の事象が確認された。

二つ目の実験に関しては、先行研究では乾季に草地面積が少なくなるとバッタが密集して群生相が発生するという前提を用いているが、本実験ではバッタ総数の減少が確認され、逆に草地面積の総量を増加させた方が、群生相が発生しやすいことが確認された。これは最新のバッタ研究や国連食糧農業機関の主張に一致する。この結果の違いは、先行研究では粗視的なモデルにおいて局所的なバッタの分布をある程度の面積に対する密度として捉えていたが、MASにおいてはこれを個々のエージェントの混み合いで捉えることができることに起因するのではないかと考えられる。従って、

このようなバッタの発生モデルにはMASが適切であると考えられる。

今回の実験では群生相の大量発生については再現することができなかった。また、単に餌場の操作だけでは群生相の大発生を再現できないことが判明した。これについてはまず、単に相変異の発生を決定づける仕組みに問題があるという可能性がある。これについては今後様々な関数の試行による確認が必要である。また、今回のモデルは1組の餌場と移動グループのみを考慮しているが、実際には多数の餌場を用意することが望ましい。加えて、最新の研究では予め孤独相の成虫が生息する場所に別の場所からバッタが多数やってくると、その次の世代から群生相が発生するとも言われている(1世代で相変異が完了する)[4]。従って、多数の餌場や移動グループを用いた検証を行うことで群生相大発生に何らかの法則を見出すことができる可能性がある。最新の研究ではさらに降雨による餌場の成長が群生相を発生させるという考え方が広まっているようなので、これを考慮することでよりの確なモデル化が可能になると考えられる。

6 まとめ

本論文ではMASを利用したバッタの発生モデルを作成し、確率統計モデルを利用した従来手法によるモデルと比較した。結果、バッタの発生モデルにおいては、微視的な立場から確率モデル及び決定論モデルを用いて表現した先行研究のエージェントと同様の挙動を示すエージェントを容易に作成することが可能であると確認できた。一方で、粗視的なモデルにおいては先行研究で示される正方格子上的確率モデルのようなモデルとは異なった挙動が確認されたが、最新の研究や観測に主張が合致しており、混み合いの相互作用を表現できるMASはバッタの発生モデルの再現に適切であると考えられる。

今後の課題としては、降雨などによる局所的な気象の影響、複数の餌場や移動グループ等について考慮す

るとともに、実際のデータ等と照らし合わせてモデルを構築・検証し、群生相の大量発生を適切に表現できるよう、導入要因の特徴を明らかにすること等が挙げられる。

参考文献

- [1] 木崎 伸也, 生態系における協同現象に対する統計学的アプローチ, 物性研究 73(1), 138-162, 1999-10, 物性研究刊行会.
- [2] 香取 真理, 木崎 伸也, ワタリバッタ大発生のシナリオと確率モデル, Computer today 15(3), 10-17, 1998-05, サイエンス社.
- [3] P.M. Symmons and K. Cressman, Desert Locust Guidelines, second edition-2001, Food and Agriculture Organization of the United Nations (<http://www.fao.org/ag/locusts/en/publicat/gl/gl/index.html>).
- [4] 前野 ウルド 浩太郎, 孤独なバッタが群れるとき, ISBN978-4-486-01848-3, 東海大学出版会, 2012.