

小野崎ゼミナールⅡA

食物連鎖

参加者

田中 靖啓	戸口 拓弥	寺門 優
山崎 憲	南塚 裕介	吉田 達哉

目次

第1章 はじめに

1.1 研究の背景・目的

1.2 本論文の構成

第2章 準備

2.1 artisoc とは

2.2 食物連鎖について

2.3 ロトカ・ヴォルテラの方程式について

第3章 本論

第4章 考察

第5章 結論と今後の課題

参考文献一覧

1 章 はじめに

1.1 研究の背景・目的

我々は、ゼミ活動で主に使っている **artisoc(artificial society)** というシミュレーションソフトを用いて、仮想空間上で生態系を再現することで、複雑な食物連鎖のメカニズムを研究することを試みた。

しかし **artisoc** を用いて

学習する上で、食物連鎖のサンプルモデルを作成した所、瞬間に一種の生物が絶滅してしまい、食物連鎖の循環が失敗してしまった。食物連鎖は生物の個体数のわずかな増減など、生態系の一部に少しでも変化があると、この連鎖がスムーズにいかなくなってしまうのである。

そこから我々は、改めて現実世界における食物連鎖は絶妙なバランスの上で、成り立っていることを知り、どのようにしたらシミュレーション上で模倣させている食物連鎖が循環するのかを研究した。

1.2 本論文の構成

本論文では食物連鎖についての研究を行う。本論文の以下の構成は次のようになっている。第2章では、私たちが扱うシミュレーションソフトや研究テーマである食物連鎖の概要について説明する。

第3章では、ロトカ＝ヴォルテラの要素を用いた食物連鎖シミュレーションが本当に循環するのか検証する。

第4章では、ロトカ＝ヴォルテラの要素を用いた食物連鎖シミュレーションに、現実に応じた要素を取り入れることで、どういった変化が生まれるのかを観察していく。

第5章では、本論文の結論を述べる。

2 章 準備

2.1 artisoc について

まず **artisoc** とは、人工社会の構築を目指し、人間同士で行われる相互作用をコンピューター上で、再現するソフトで、多様に变化する社会現象を生きたまま、分析することのできるマルチエージェントシミュレーションと呼ばれるソフトである。これは、汎用性のあるマルチエージェントシミュレータで、C言語に代表されるプログラミング言語やプログラミング技法を、学ばずとも利用することができるソフトである。

このソフトにはエージェントと呼ばれる個体に、ルールや変数など行動条件を設定することで、各々のエージェントが異なった行動をすることができ、また仮想空間上で動かすことで、通常の計算や手法では調べるのが、難しい実験結果を得ることが出来るのである。

端的にいうならば、行動学の実験が出来るソフトなのだ。だが、このソフトはこれだけに留まらず、木から木へ火が移

変わるシミュレーションや、交通速度違反の取締のシミュレーションも出来るが、本論文では省略する。

ここではそのartisocの概要について説明する。

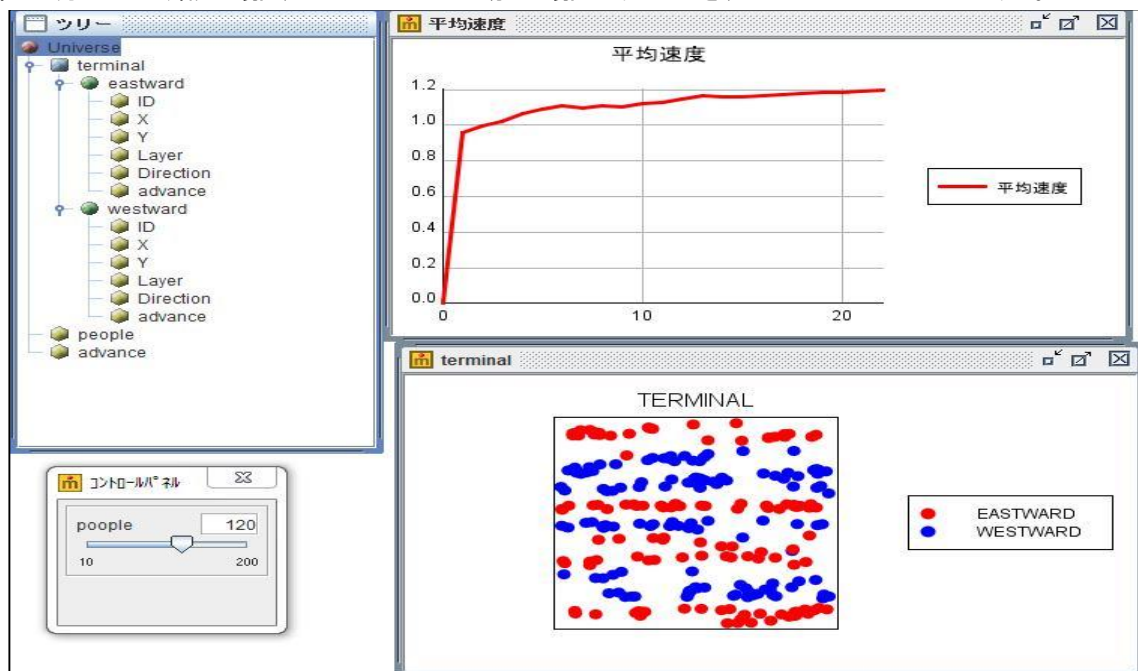
まず、artisocには空間というものがある。空間は空や駅など、その場の空間のことを示している。
例えば、駅の人の流れをシミュレーションしたい場合には、空間は駅と記載することになる。

次にエージェントである。エージェントは人であり、動物であり、植物である。そのエージェントがどういう行動を行うのか、どういう性質を持つのかを付随させることで、エージェントに特徴を出すことができる。そしてその行動原理全般を設定するのが、「ルール」と呼ばれるものである。簡単な物でいえば、先に設定したエージェントに対して初期位置であったり、移動方向といったようなものを書き込むことで、自在にエージェントを操作できるのが、ルールと言える。

また、ルールを補佐するものとして、変数というものが存在し、変数にはさまざまな名前を定義づけられるが、その内容は一例えば、エージェントの速度を決定するにあたって、他のエージェントが接近したら、速度を落とすという行動や、逆に進行方向に他のエージェントがいない場合には速度を少しあげるといったように、詳細に決めたい場合ルールに準拠する。

さらにコントロールパネルを追加することで、値を直接入力ではなく、バーを動かすことで簡単に数値を変更することが出来る。

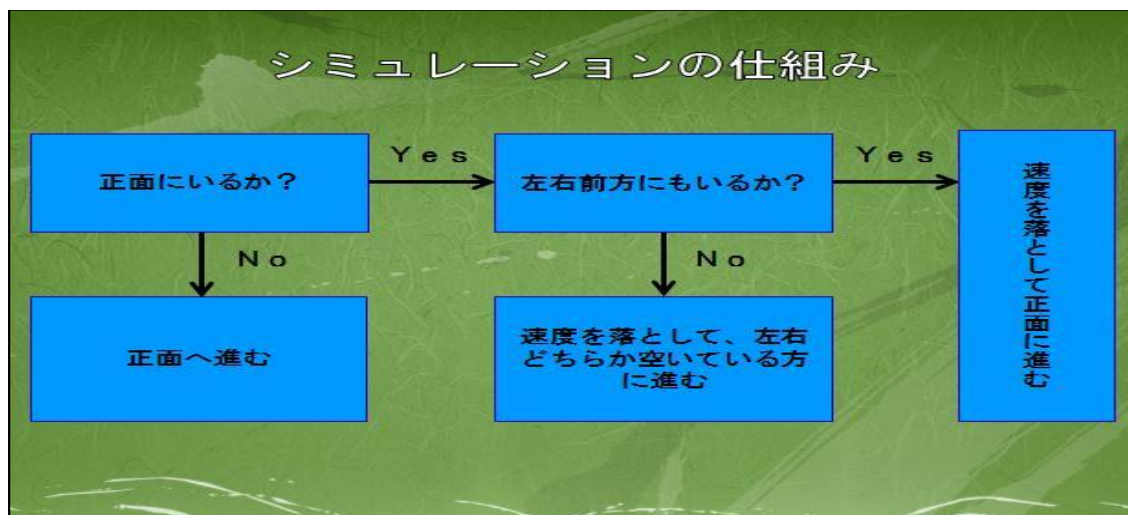
以下に例をとって説明する。下の図にあるのが実際のartisocの実行画面である。今回は駅のターミナルを行きかう人が、東西に分かれて交錯する場合、なぜかスムーズに動ける場合があることを、シミュレートしたものである。



まず、ツリーというウィンドウに注目する。

この空間はテーマが駅のターミナルだから、青い四角のフィールドがterminalという名前になっている。つまり、このシミュレーションは駅のターミナルで行われているということである。次にエージェントだが緑色の丸印がそれである。今回、エージェントは2つあり、eastwardとwestwardの2種類があることがわかるだろう。それぞれ東方、西方を示す言葉でこのシミュレーションでは東からくる人、西からくる人を指している。そして、エージェントの下にある黄色い六角形が変数を示している。

今回、エージェントが出来るだけ早く目的地に向かうと、仮定する。正面が空いていたら、正面に。正面が相手なければ、斜め前方に。それでもない場合、人を避けるために速度を下ずつ、正面に進むというルールを書き込む。 下図参照。



次にterminalと書かれたウィンドウに注目する。
これが実際に動いているエージェントであり、青い丸が西に向かう westwardであり、赤い丸がeastwardである。

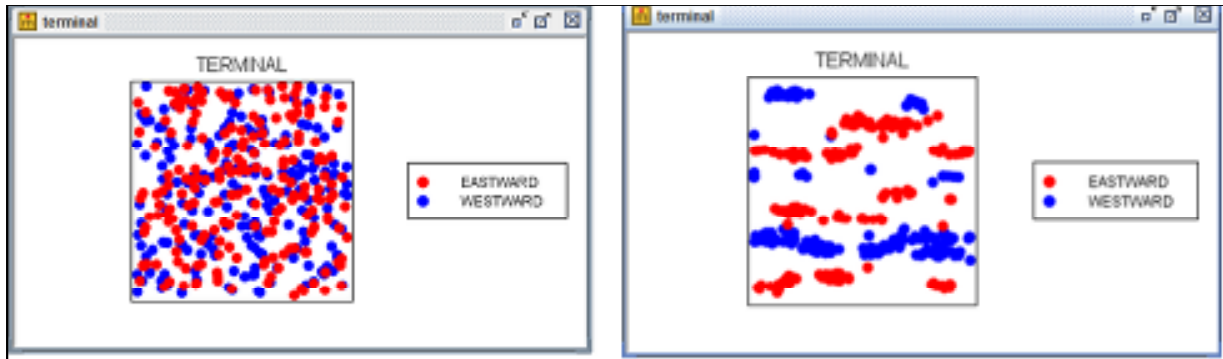
シミュレーションを開始した当初では、ごちゃごちゃしていた赤い丸と青い丸であるが、時間が経つにつれて、だんだんと「流れ」が出来てきて、スムーズに動けるようになる。これが駅でスムーズに動ける場合の正体である。

最後に右上の平均速度というウィンドウだが、横軸が時間であり、縦軸が速さを示しているものであり、その名の通り、シミュレーション上で、西に向かう人と東に向かう人の平均速度を示しているものである。高ければ高いほど、スムーズに動けていることを示している。

今回、時間が経つに連れ、エージェントの動きがスムーズになっていったのが、この平均速度のウィンドウで確認できる。そして最後にコントロールパネルのウィンドウに注目する。今回は、このコントロールパネルのバーを、動かすことで人数を増減することができる。

では、実際に開始直後と終了直前の画像を見比べて比較してみる。下の図の左側が開始直後の、右側が終了直前の画像と

なっている。開始直後はバラバラに配置されたエージェントが、組み込まれたルールに従って人を避けていくことにより終了間際には進行方向によって列をなしているのわかるだろう。



このシミュレーションでは、人の流れの変化を追ってみると、開始直後と終了直前では、随分と様子が違うことがわかる。また、人を避けるといった現実的な要素を含ませることでシミュレーションをより現実味のあるものに近づけさせたといえる。

このように、artisocはエージェントにルールや変数を付け加えることで、さまざまな実験ができるのである。

今回はこのartisocを用いて食物連鎖のモデルを作り、検証した。

2.2 食物連鎖について

食物連鎖とは、広辞苑によると、「生物が群衆内でたがいに捕食者・被捕食者の関係によって連鎖的につながっていること」と記されている。現実であれば、本来多種多様な生物が食う・食われるの相関関係が複雑に入り混じって形成しているのだが、シミュレーションに何十、何百種類の生物を組み込むことは難しい以前に、食う・食われるの相関関係を検証するには向いていないので、我々が作ったシミュレーションでは3つの要素から食物連鎖が構成されている。フィールドに生えている「草」、その草を食べる「草食動物」、その草食動物を食べる「肉食動物」である。

また、我々が作成したシミュレーションでは、草は絶えず、フィールド内に無尽蔵に生えていることを前提条件に作られている。理由は2つある。

1、現実で草食動物が餓死することは早々ない＝草が絶えることも早々ないことから、シミュレーション全体の相互作用を分かりやすくするためのデフォルメのため。

2、我々のシミュレーションでは「草食動物」と「肉食動物」の2種の相互作用に重点を置いているため である。

では、なぜ重要ではない要素を表示しているかという点、草は草食動物に捕食されている関係から、草食動物の個体数の増減率に関与しているため、表示する必要があると判断したためである。

以上のことから、我々のシミュレーションでは現実から離れ過ぎず、適切なデフォルメを施した食物連鎖モデルを目指している。



2.3 ロトカ＝ヴォルテラの方程式について

ロトカ＝ヴォルテラの方程式とは、捕食者・被食者の個体数どのように、増減するかを数式で表した微分方程式のこと

である。

計算式は、X(被食者)とY(捕食者)の生物がいるとして、XはYに捕食され、時間をtとする。この場合に、

Xの増殖速度の式は、 $dX/dt = aX - bXY$

Yの増殖速度の式は、 $dY/dt = cXY - eY$

となる。また、a,b,c,eは定数である。

X式右辺のaは被食者の増殖率を、bは被食者の減少率を表している。

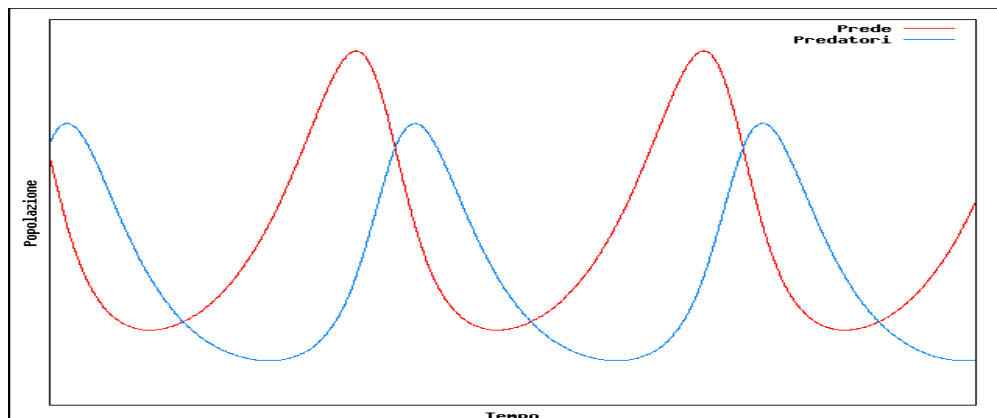
一方、Y式右辺のcは捕食者の増殖率を、eは捕食者の減少率を表している。

しかし、我々の作ったシミュレーションには、計算式そのものを組み込んでいるわけではなく、各個体の増減率の性質を利用している。そのため具体的な計算方法の記述は省略する。

その性質とは、

- ・「個体数が増えてくると増殖率が下がり、やがて減少率が増えていき個体数が減少するようになる」
- ・「個体数が減少してくると減少率が下がり、やがて増殖率が増えていき個体数が増えるようになる」というものである。

つまり、元に戻ろうとする力が働いているのである。



上の画像は、あるモデルをロトカ＝ヴォルテラの方程式に、当てはめて計算してグラフ化したものの一例である。縦軸は個体(X,Y)の数、横軸は経過時間(=t)である。このように各グラフ線が一定の個体数の間で、波打っているのが視覚的に分かると思う。個体数が一定の値まで近づくと、増減率が0に向かってブレーキがかかるのである。この性質をシミュレーションに組み込むことにより、我々はシミュレーション上での動作に置き換えて、食物連鎖を再現しようとしている。組み込んでいる具体的な内容は本論のほうに後述する。

3章 本論

私たちは以上の話を基に、研究テーマのシミュレーション作成を試みた。まず、シミュレーション環境の構築を練ることにした。今回は、食物連鎖ということでTVでも、よく取り上げられるサバンナという場所が想像しやすいと考え、サバンナをモデルとして空間に設定した。

サバンナには、約百万頭にもものぼる大型哺乳類が生息している。その中で肉食動物の割合は少なく、草食動物の総数よりはるかに下回っている。一般には、食物連鎖は下位にいるほど個体は小さく数は多く、上位にいるほど個体は大きく数は少ないピラミッド型の仕組みになっている。ここからおおよその値を取って、肉食動物と草食動物の数を決定した。



ここでは視覚的にわかりやすくするためにリカオン、ガゼルの二種のエージェントを設定した。（上図参照。左がリカオン。右がガゼル）

エージェントは、サバンナのように障害物何もない、広い平原を想定した仮想空間上で行動するものとする。また、草のエージェントは無限増殖であるため、草食動物に死亡影響を与えないため、私たちの研究においてはそこまで重要ではないが、視覚的に増減数を表現するために設定した。今回、リカオンとガゼルという2種類のエージェントを、設定した理由は以下の2つである。

1つ目は、リカオンはサバンナに生息している肉食動物で、主に中型の哺乳類を捕食する。ガゼルは中型哺乳類という分類に存在するため捕食対象となるというのが一点。2つ目に、リカオンという生物は捕食成功率85%という記録する上に、イヌ科の性質で獲物を追跡するためである。私たちが行うシミュレーションは、肉食動物が草食動物を追いかける構図になるため、リカオンの性質は非常に向いていると考えられたからだ。

次にモデルの基本的なルールの説明をする。各々のエージェントには、共通して体力値、移動に伴う体力の消費、捕食対象を認識するための視界の広さ、捕食、生殖率が設定されている。まず体力値だが、体力という変数を寿命に模して設定した。リカオンとガゼルの平均寿命は、ともに10~12歳と推定されているので、初期体力値を10~12に変動するものとする。また、移動に伴う体力の消費は1ステップ（1フレーム）に1消費され、この体力値が0になった場合、そのエージェントは死亡する。この体力が、ロトカ＝ヴォルテラ方程式の減少率を模した部分である。被食者のガゼルは $\frac{dX}{dt} = aX - bXY$ の式に則り、リカオンに捕食されてしまったり、周囲に植物がない場合に個体数が一定の減少率で減る（第1項

bXY)捕食者のリカオンは、 $dY/dt = cXY - eY$ の式に則り、被食者が存在しない場合には、捕食者の個体数が一定の減少率で減る(第1項 eY)ものとする。

視界に関しては、ともにリカオンとガゼルは捕食対象と接触した場合、捕食対象を捕食するものとする。例えば、3mという距離を設定した場合、リカオンの周囲3m以内にガゼルが侵入した場合に捕食行動に入るという要素である。

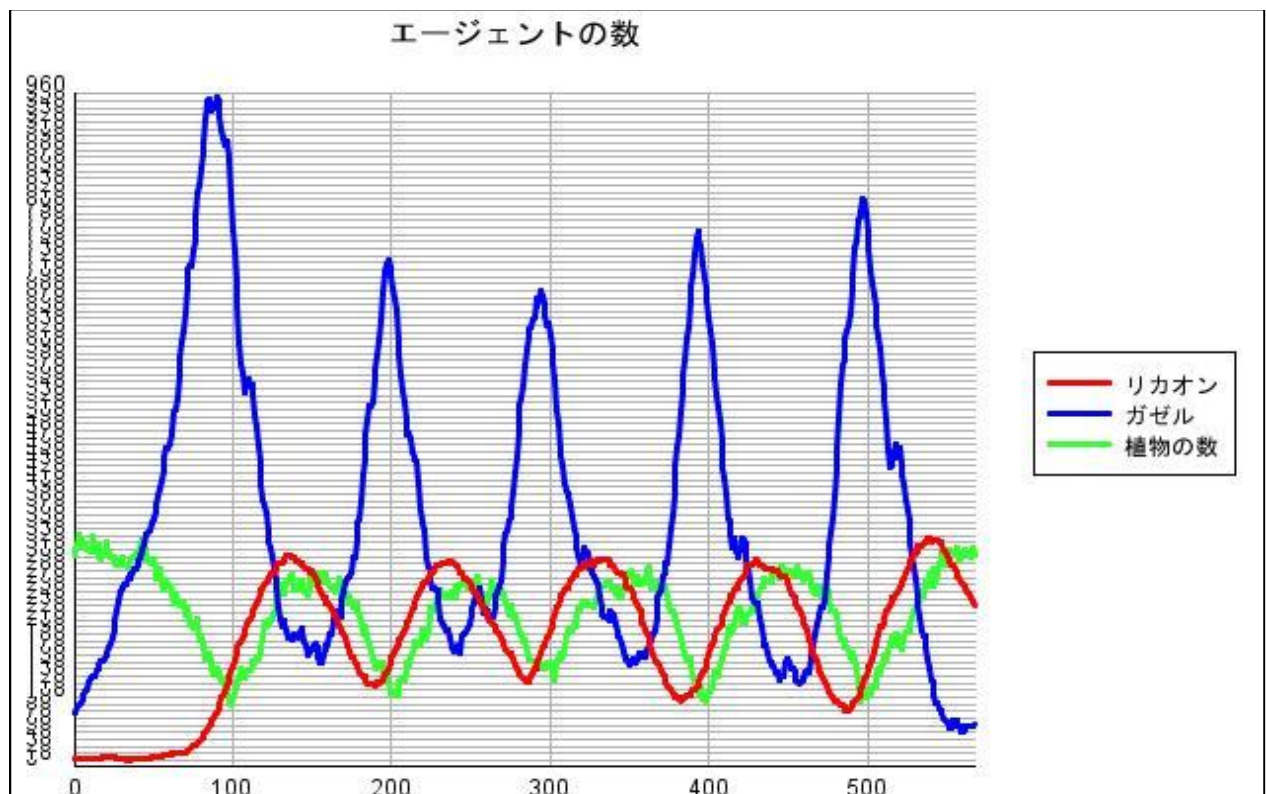
そして生殖率だが、ここにもロトカ＝ヴォルテラの要素が含まれている。被食者であるガゼルの生殖率はロトカ＝ヴォルテラの $dX/dt = aX - bXY$ の被食者の式に則り、捕食者がいない場合には、一定の増加率で個体数が増える(第1項 aX)ようにし、捕食者のリカオンは、 $dY/dt = cXY - eY$ の捕食者の式に則り捕食対象を食べることによって生殖率は増加していく(第2項 cXY)ものとする。

つまり、私たちのモデルではモデルの要素を以下のようにロトカ＝ヴォルテラ式に組み込んだことになる。

ガゼル(X) の式 $dX/dt = aX$ (体力) $- bXY$ (生殖率)

リカオン(Y) の式 $dY/dt = cXY$ (生殖率) $- eY$ (体力)

このモデルを実行した結果、下図のようになる。横軸が時間であり、縦軸が個体の数である。



青いグラフがガゼルの数を表し、赤いグラフはリカオンの数を表している。この図からわかることはガゼルの増加に伴いリカオンが増加し、逆にガゼルの減少に伴いリカオンも減少していることがわかる。またリカオン(捕食者)の変動の位相は、ガゼル(被捕食者)の変動の位相に対して遅れており両者のピークは一致していない。これらはロトカ＝ヴォルテ

ラ方程式の特徴であるので、このモデルはロトカ＝ヴォルテラ方程式の性質を組み込み、食物連鎖を循環させることができたといえる。

第四章 考察

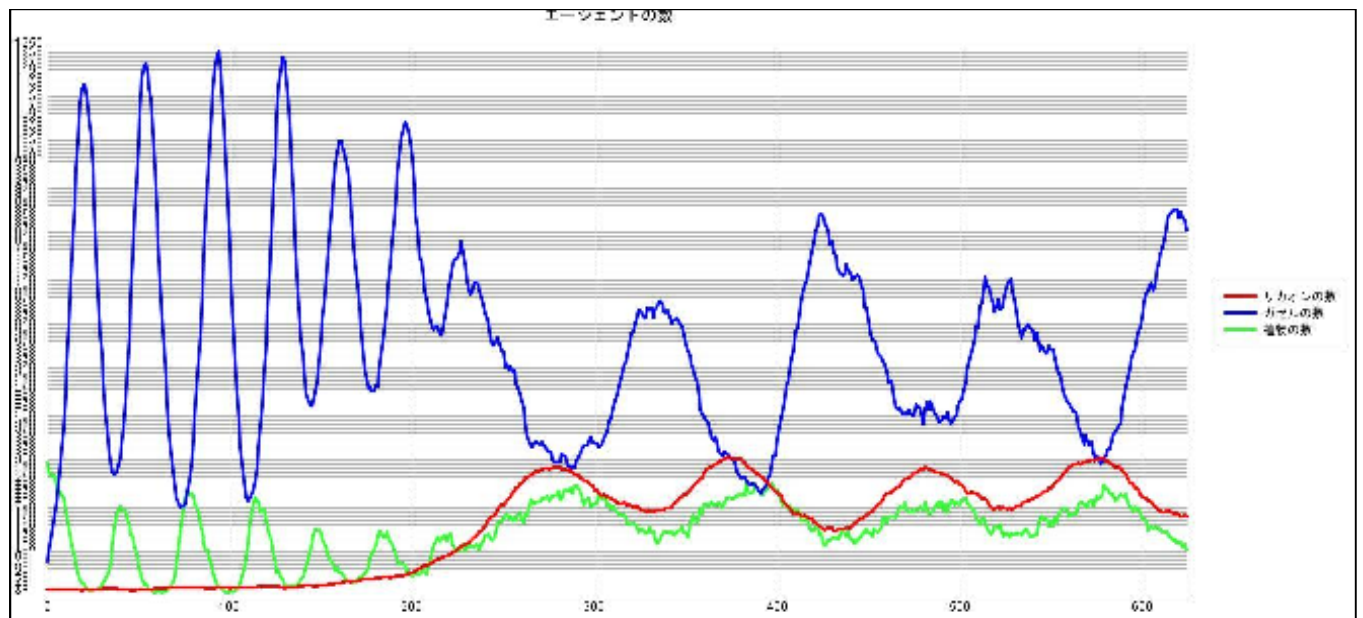
ではロトカ＝ヴォルテラなどの数式では表すことができない、現実即した要素を、このロトカ＝ヴォルテラをモデルに取り入れた場合どのように変化するだろうか。本論では、追う追われるという要素をこのモデルに取り入れ検証していく。

・追う追われるの関係

まず、現実において捕食者である肉食動物は、草食動物を捕食しなければ、生き残ることはできない。被捕食者である草食動物は、なんとしてでも自分を狙う肉食動物から逃が、生き延びたいだろう。そこで、リカオンにはガゼルを追うようにし、ガゼルにはリカオンから逃がるように、以下のルールを追加した。

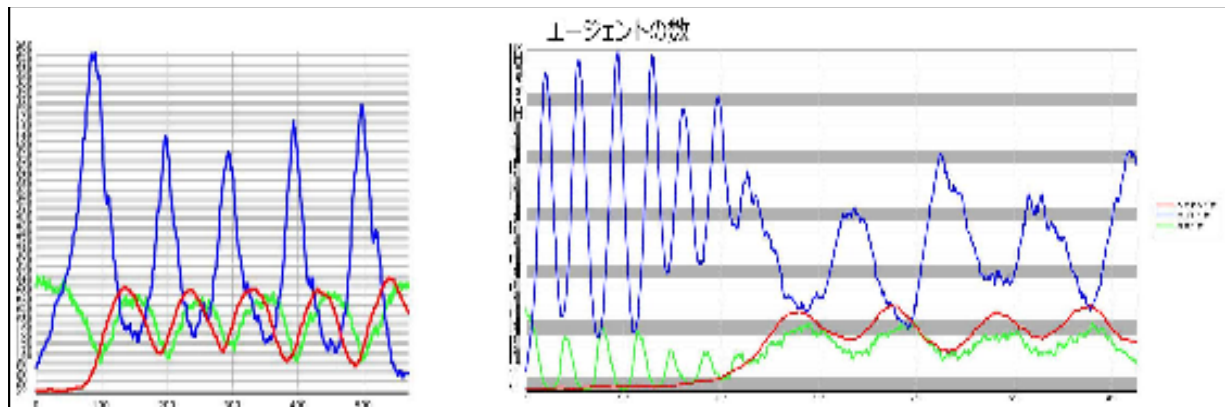
- ・リカオン：捕食対象であるガゼルが自分の視界の範囲内に存在した場合これを追跡し捕食する
- ・ガゼル：自分の視界の範囲内にリカオンが存在していた場合これを脅威の対象と認識しリカオンとは反対方向に逃がする

このモデルで以下の図のような検証結果が得られた。



追う追われるという、生物の行動の要素を取り入れても、食物連鎖は循環した。しかし横軸の300の値までの各グラフの変化は、非常に不安定な変動となっている。これはリカオンがガゼルを捕まえるまでの、タイムロスにより、リカオンの数がガゼルの数に影響されず、この時点では食物連鎖がまだ成り立っていない状況である。また、この図では循環が成功しているものをあげているが、リカオンがガゼルを捕まえられず、絶滅してしまう場合もあった。

そこでこのモデルを100回試し再び検証した。結果として100回中成功したのは、35回と失敗よりも下回り基本のモデルよりも、不安定なものとなった。しかしリカオンの個体数の初期値を上げていくにつれて、狩りの成功率が上がり安定した循環を形成するようになった。検証中わかったことはリカオン単独ではガゼルを捕まえるのは難しいということである。循環が成功した場合の多くは、集団によるリカオンのチームワークでガゼルの逃げ道を塞ぎ捕らえることで、安定した狩りを行うことができていた。実際のリカオンもアフリカの地では立場が弱いため組織力が強く、最大で30頭ほどの群れを形成し、持久力を活かしたチームワークで狩りを行っている動物である。



※ロトカ・ヴォルテラのみ(左)と、追う追われる(右) 比較画像

第5章 結論 今後の課題

食物連鎖を再現するにあたって、ロトカ＝ヴォルテラ方程式は、非常に重要であることがわかった。ロトカ＝ヴォルテラを用いるまで作ってきたモデルは、各々のエージェントに固定の生産率を設定していたため、生態系が安定して循環しなかった。しかし、捕食者が被食者を捕食するかしないかで、生産率を増減させることで安定した循環を形成することができ、食物連鎖を維持するために不可欠な要素であることを認識した。

今後の課題として、さらに現実の食物連鎖に近づけるべく、今回の二種のエージェントではなく、それ以上のエージェントを追加した食物連鎖を再現する。また本論ではできなかった実際の動物達の行動を要素としてモデルに組み込むことで、どのような変化が得られるか検証していきたい。

また絶滅危惧種が密猟され、高額で取引されている事実がある。その具体例として、象牙やサイといった動物があげられる。象牙、サイの角が象牙は1000ドル、サイの角は1500ドルと高額で取引されている。象牙は美術品的価値、サイの角にはガン治療があるとされているためだ。だが、食物連鎖というのは、我々の少しの介入で、生態系が崩れてしまう可能性が分かった。

そしてこの密猟は、単に生態系消失だけの問題ではない。生態系消失に伴う食物連鎖の循環が行われず環境の変化が起こり、人間の生活にも関わってくるが予想される。

ただ単に、密猟の取引というミクロの金の動きだけではなく、もっと大きなマクロの経済や政治にも関わってくるのが、考えられるので、具体的な結果を求めて行きたい。

参考文献

- ・ 人工社会構築指南 artisocによるマルチエージェント・シミュレーション入門(山崎進 著)
- ・ ロトカ=ヴォルテラ wikipedia
- ・ Excelで試す非線形力学 (平山修 著)
- ・ <http://www.tomorrow-is-lived.net/wildlife/canidae/lycaon.html>
- ・ <http://www.tomorrow-is-lived.net/wildlife/artiodactyla/t-gazelle.html>
- ・ <http://www.j-cast.com/2013/10/15185986.html>

