Multi Agent Simulator による
多種生物間の生存競争と系の安定性に関する考察

関西大学　経済学部　経済学科
小 林　　亮

1　はじめに

捕食・被捕食者関係を微分方程式で表した有名なモデルとして Lotka-Volterra 方程式がある。この微分方程式は２種間生存競争を対象としており、そのモデル使いやすさから生態学はもちろんのこと経済学などにも幅広く応用されている。しかし、現実の生態系はより多種多様な生物が関わり合い、かつ系を存続させている。そこで、より現実に近づけるため、多種生物間競争を記述するハングリー Lotka-Volterra 方程式と呼ばれる数理モデルを参考にし、多種類の生物間の個体数推移を Multi Agent Simulator (以下 MAS) を使って見ていく。　本論文の構成は次のとおりである。第２章で基礎的な準備として捕食被捕食者関係を表す Lotka-Volterra 方程式、ハングリー Lotka-Volterra 方程式の説明と、多種生物間競争をシミュレートするうえでベースにした MAS のオオカミヒツジモデルの概要説明をする。次に、第３章では、３種生物間競争モデルの構成・概要を説明し、実行考察する。また、第４章でエージェントを５種類に拡張して実験を行う。このモデルは、ハングリー Lotka-Volterra 方程式を参考にして作ったモデルで、このモデルの考察が本論文のハイライトと言える。そして第５章でまとめとして今後の課題などを記す。

2　準備

2.1　Lotka-Volterra 方程式

種間の相互作用によって、2 種類の生物の生存競争を記述する数理モデルは、アメリカの数理科学者 A. J. Lotka と イタリアの数学者 V. Volterra によってはじめて独立に提示された。彼らが提示した方程式は、現在でも生物の種間相互作用を取り扱う方程式として基本的な役割を果たしてきている。Volterra はアドリア海のサメとそのエサになる魚の生存競争を次のような連立微分方程式で表わした [2, 3]。

$$\frac{dN_1}{dt} = -(a - bN_2)N_1, \quad \frac{dN_2}{dt} = -(c - dN_1)N_2 \quad (a, b, c, d > 0) \qquad (1)$$

ここで、N_1 はサメの数、N_2 はエサになる魚の数で、a はサメの自然減少率、c は魚の自然増加率である。この方程式 (1) は Lotka-Volterra 方程

式と呼ばれている。$-bN_2$ は魚の存在によってサメの減少率が小さくなる効果を、$-dN_1$ はサメの存在によって魚の増加率が小さくなる効果を表わしている。また、方程式 (1) を見れば大体の様子が予想できる。例えば、エサの魚が増加すればサメも増え、サメがあまりにもたくさんの魚を食べてしまうとエサの魚が減少する。つまり N_1 と N_2 が交互に増減を繰り返す周期性（周期解）を持つ。現実の自然界はもっと複雑で、魚は小魚を食べ、小魚はプランクトンを食べ、プランクトンは $\cdots$ というように生態系は連鎖している。
連鎖を表わすモデルとして、次のようなものを考えてみる。N_n を n 番目の種の個体数であるとする。N_n の増加率はエサ $n+1$ の出会いの数 N_nN_{n+1} に比例し、N_n の減少率は捕食者 $n-1$ の出会いの数 N_nN_{n-1} に比例すると仮定すると、

$$\frac{dN_n}{dt} = (N_{n+1} - N_{n-1})N_n \tag{2}$$

が成り立つ [4]。この方程式は工学的にも重要であると言われており、大変利用価 … tka-
Volter …

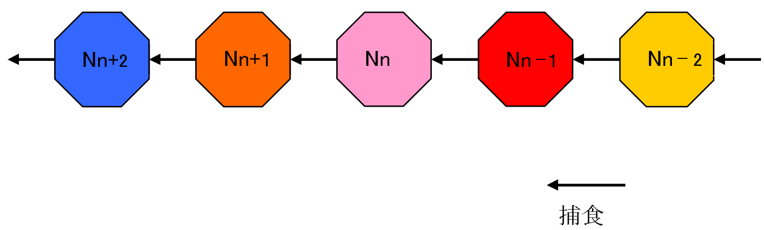

図 1: エサと捕食者の連鎖

2.2 ハングリー Lotka-Volterra 方程式

前節では、2 種間から連鎖系の数理モデルを構成した。ただし、連鎖系にも問題はある。それは、種 $n+1$ と 種 $n-1$ に直接的な競争原理が働いていない点である。というのは，サメが魚のエサである小魚を、そして魚がプランクトンを食べないと考えるのは不自然であると考えられる。そこで、連鎖系を構成している Lotka-Volterra 方程式 (2) を次のような形に拡張する [5, 6]。

$$\frac{dN_n}{dt} = (\sum_{j=1}^{M} N_{n+j} - \sum_{j=1}^{M} N_{n-j})N_n \tag{3}$$

この方程式は、ハングリー (hungry) Lotka-Volterra 方程式と呼ばれる。$M=1$ とおけば、前節の Lotka-Volterra 方程式になる。一般の M で、方程式 (3) を考察すると煩雑になるので、$M=2$ の場合について考えてみる。方程式（3）は次のような形になる。

$$\frac{dN_n}{dt}=(N_{n+2}+N_{n+1}-N_{n-1}-N_{n-2})N_n. \tag{4}$$

この方程式 (4) の意味を説明すると、N_n の増加率はエサ $n+1$ の出会いの数 N_nN_{n+1} と $n+1$ のエサである $n+2$ との出会いの数の和に比例し、N_n の減少率は捕食者 $n-1$ の出会いの数 N_nN_{n-1} と $n-1$ の捕食者である $n-2$ の出会いの数の和に比例している、と考えられる。方程式 (4) は、前節の Lotka-Volterra 方程式 (2) よりも複雑な相互作用が働いているが、ある特別な状況下においては、より現実に近い生存競争を記述している

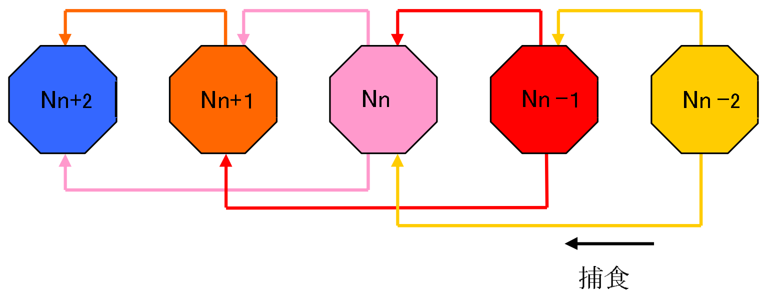

図 2: エサと捕食者の連鎖 (ハングリー)

2.3　オオカミとヒツジモデル

今回、多種生物間競争を MAS で記述するために、構造計画研究所のホームページ [7] 上にサンプルルールとして載っている“ オオカミとヒツジモデル ”を参考にした。オオカミとヒツジモデルは Lotka-Volterra 捕食系を MAS でボトムアップに創出されたものである。以下、モデルの基本構造およびルールについて説明する [2]。

このモデルは 40×40 の二次元空間上にランダムに配置されたオオカミエージェントとヒツジエージェントによって構成されている。そして、次のようにエージェントは定義づけられている。

- オオカミのエージェントルール
  オオカミは１ターンごとに二次元マップ上をランダムに移動する。最初に代謝率の２倍までランダムに体力をセットされ、１ステップ

ごとに体力を１単位消費し、体力が０になったら死ぬ。そして自分の位置にヒツジがいると１頭食べる。ヒツジを食べると代謝率に表示された（初期設定では３０）分の体力を回復する。ただし、代謝率の１０倍以上体力は増えない（満腹の場合でも食べるが体力にならない）。

- ヒツジのエージェントルール
  ヒツジも１ターンごとに二次元マップ上をランダムに移動する。牧草要素が ON の場合、最初に代謝率の２倍までランダムに体力をセットされ、１ステップごとに体力を１単位消費し、体力が０になったら死ぬ。牧草は成長ステップで指定された値の分、ターンのはじめに成長する。ヒツジは自分の位置の牧草が十分育っていれば食べる。そしてヒツジは牧草を食べると代謝率分の体力を回復する。ただし、代謝率（初期設定では５）の２０倍以上体力は増えない（満腹の場合でも食べるが体力にならない）。また、牧草要素が OFF の場合、ヒツジはその体力に関係なくオオカミに殺されるまで生き続ける（しかし、これは今回の現実の生態系に近づけるというコンセプトからはずれるので、３・４章の多種モデルにおいては牧草要素は常に ON にする）。

- エージェントの繁殖
  オオカミ・ヒツジともに１００までの乱数値が繁殖率より低い場合、子供を自分の位置に産み落とす。そのとき自分の体力は半分になる。当然エージェントが０になった場合、繁殖は行われない。

以上のモデルで繁殖率、代謝率などの設定をうまくすれば、長期にわたって系を持続することができる 。次章では、このモデルをベースにしてつくった多種生物間競争モデルについて説明する。

3　３種生物間生存競争モデルの構築

3.1　３種モデルの基本構造

多種生物間競争モデルとしてまず、この章では 3 種生物間競争モデル（以下 3 種モデル）を MAS で構築し、その挙動を見ていくことにする。そして今回作成したモデルは、”オオカミとヒツジモデル”をベースとしており、その基本設定の多くは変更を加えていない。しかしエージェントの追加等、多少の変更をおこなっているため、以下簡単に変更点を説明していく。

変更点１　エージェントの追加

3 種モデルでは使わなかったが、オオカミキラーの上位にオオカミキラー　オオカミキラー　という２種類のエージェントを加え、ヒツジ・オオカミ・オオカミキラー・オオカミキラー　オオカミキラー　という合計５種類のエージェントを用意した。ただ、この章では多種モデルの最小規模である 3 種間競争を考察するため、オオカミキ

·ジェ

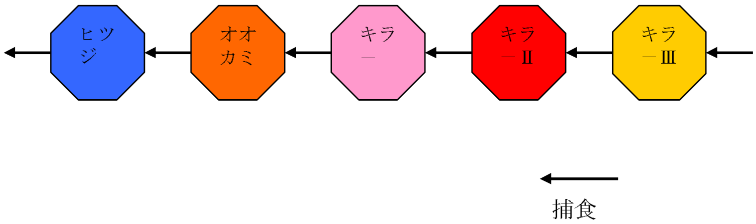

図 3: 5 種の食物連鎖

変更点２　捕食・被捕食者関係

３種生物間競争を記述するこのモデルでは、オオカミの後ろにオオカミキラーを置いた。つまり、オオカミとヒツジモデルでは食べる側であっても、飢餓以外で死ぬことのなかったオオカミを捕食の対象にし、捕食による死を与えた。そして今回新しくつくったオオカミキラーのエージェントルールは、オオカミのエージェントルールを参考にし、捕食対象をオオカミになるよう設定した。また次章で考察の対象とするオオカミキラー　、オオカミキラー　に関しても、捕食対象を変更しただけで、その設定の多くはオオカミエージェントと同一のものと考えてよい。

以上の変更点のほかは、モデルの基本構造・各エージェントのルールは、2.3 節のオオカミとヒツジモデルと同じ構造だと考えていただきたい。

3.2　３種モデルの挙動予想と初期値の設定

Lotka-Volterra 方程式を MAS で表したオオカミとヒツジモデルを評価する点で重要なことは、オオカミとヒツジの個体数の変化にオオカミ増→ヒツジ減→オオカミ減→ヒツジ増→オオカミ増 というような周期性が現れるかどうかということである。そして Lotka-Volterra 捕食系のこの周期的な変動をアイソクラインとその軌道で表したのが図 4 である [8]。

今回扱う 3 種モデルにおいてもオオカミとヒツジモデルで表われたよ

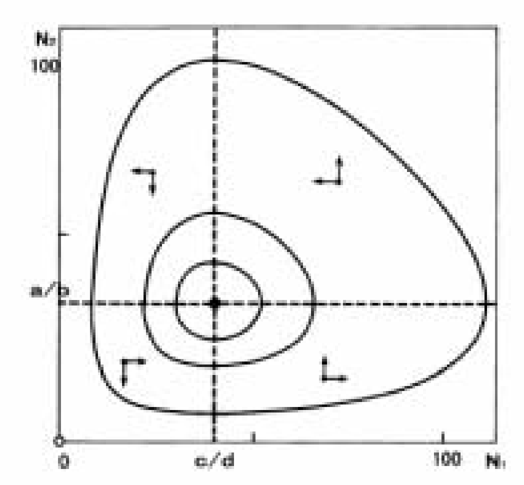

図 4: Lotka-Volterra 捕食系のアイソクラインとその軌道

うな周期的変動の、より複雑なものがみられると考えており、3 種の個体数推移にも注目したい。以下 3 種モデルの挙動について予想されることと、それを踏まえた初期値の設定について説明する。

- 予想
  3 種モデルでは捕食－被捕食関係がヒツジ VS オオカミとオオカミ VS オオカミキラー（以下キラー）という 2 つの形で成り立っている。そこで、オオカミの個体数を中心とした周期的変動の形として予想されるのが「オオカミ増→ヒツジ減，キラー増→オオカミ減→ヒツジ増，キラー減→オオカミ増」という形である。このサイクルを見ていて気づくことは、オオカミが直接影響を受けるヒツジとキラーの個体数の変化が互いに作用して、オオカミの増減に関わっているということである。これにより、オオカミの増減のリバウンドが大きくはたらき、そのことが系を不安定にする恐れがある。

- 初期値の設定
  より安定的な系の存続を目指すうえで、初期値の設定は慎重にする必要がある。初期値の設定次第で、存続するはずのモデルがすぐに破綻してしまうことがあるからである。まず、ヒツジ > オオカミ > オオカミキラーという風に初期の個体数に傾斜を与えた。これは、まず捕食がスムーズにできる環境で、捕食をしてからの変動を考えるほうが順番として妥当だと考えたからである。また、はじめの段階にたまたま同じ位置にエージェントが重なり、いきなりアンバランスな状態でシミュレーションを始めなければいけなくなる可能性を防ぐために、あまり各エージェントの個体数を多く設定しないよ

うにする（本実験では、25 × 25 の二次元空間にヒツジ 300・オオカミ 150・オオカミキラー 50）。代謝率については各エージェントとも同じ値（本実験では７）にし、エージェント間に体力の差を与えないようにした。繁殖率などほかのパラメータは予備的な実験でシミュレーションが長く続きやすい値を探し設定した。

3.3 モデルの実行

ここでは、実際に 3 種モデルを実行する。図 5 を見てみると前節で予想した周期的変動をある程度見ることができる。しかし、その変動が連続的に見られるというわけでなく、系の寿命は計 10 回の試行で平均 199.2 ステップであった。「オオカミ増→ヒツジ減，キラー増→オオカミ減→ヒツジ増，キラー減→オオカミ増」という周期性を確認できたのは２、３回ぐらいで、予想していたより系がはやく破綻してしまう場合が多かった。

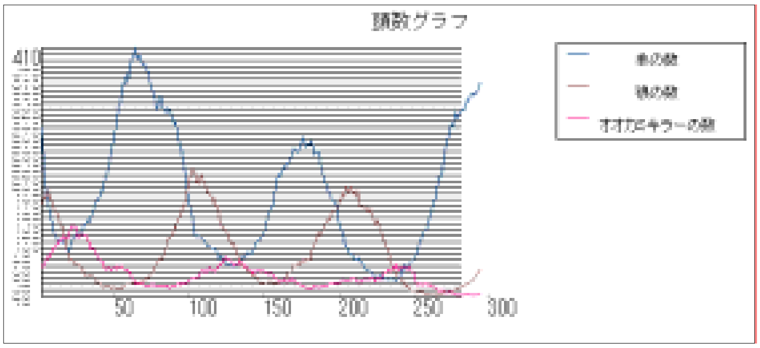

図 5: 3 種モデルの個体数推移

このモデルの破綻原因を見ていくとオオカミキラーの絶滅がよく目立った。その傾向は、ヒツジが減り、エサが無くなったことで起こるオオカミの減少過程でよく現れた。ヒツジはオオカミに食べられない限り、牧草を食べて複利的に増えていくため、オオカミは増減を繰り返しながらも安定的にヒツジを捕食できた。しかしオオカミキラーは捕食対象となるオオカミの増減が激しいため、その変動のあおりを受け安定的に捕食ができず、ステップを重ねるうちに飢餓が原因で絶滅してしまうことが分かった。つまり増減の激しいオオカミしかオオカミキラーが食べられないという点がこのモデルの長続きしなかった原因だと考えられる。

ただ興味深いことに、オオカミキラーがいても、オオカミとヒツジの捕食・被捕食者関係は比較的安定な周期を描いていることを確認できた。図 6 をみるとそのことが視覚的によく分かる。図 6 はオオカミキラーが絶滅するまでのオオカミとヒツジの個体数変動の周期性を表したものである

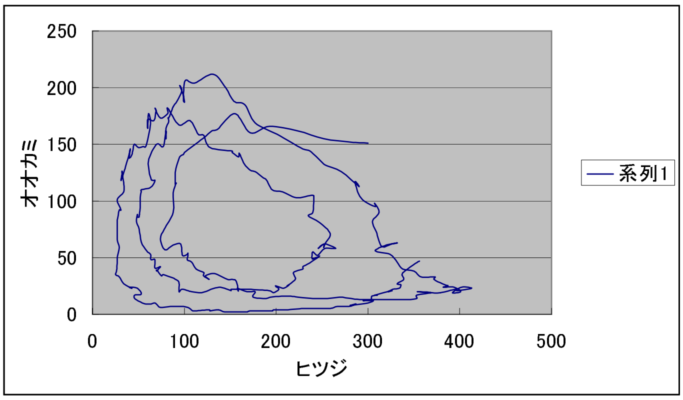

図 6: オオカミとヒツジの個体数

が、オオカミキラーが絶滅するまで徐々に変動幅が大きくなっているものの、ほぼ規則的な形の円を描いている。このような変動の周期性が、より多種で複雑な捕食・被捕食者関係を記述したモデルで現れるのかについても次章で見ていきたい。

4　５種生物間生存競争モデルの構築

4.1　５種モデルの基本構造

3 種モデル同様今回作成したモデルは、”オオカミとヒツジモデル”をベースとしており、その基本設定の多くは変更を加えていない。しかし、今回は 3 種モデルのような、エージェントの追加等の変更のほかに、捕食被捕食関係に大幅な変更を行っているので、以下説明をする。

変更点 1　エージェントの追加

３種モデルでは、ヒツジ・オオカミ・オオカミキラーという３エージェントでモデルが構成されているのであるが、このモデルではオオカミキラー　・オオカミキラー　（以下キラー　，キラー　）という２種類のエージェントを加えた。

変更点 2　捕食・被捕食者関係の変更

ハングリー Lotka-Volterra 方程式で記述されている捕食・被捕食者関係を忠実に再現するため、大幅に捕食・被捕食者関係に変更を加えた。図 7 を見てもらえれば分かると思うが、エージェントには直前に位置する 2 種類のエージェントを捕食させるようにした。つまりオオカミキラーを例にしていうと、３種モデルではオオカミはヒツジを、オオカミキラーはオオカミだけを捕食したが、このモデル

ではオオカミキラーはオオカミとその下位に位置するヒツジまでも

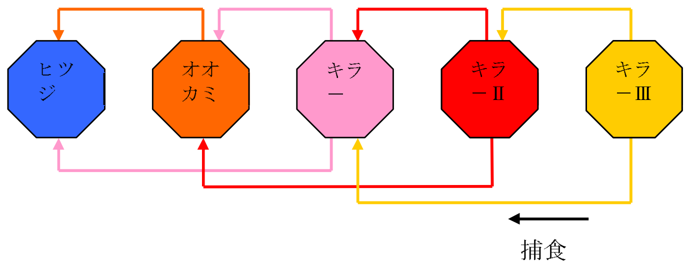

図 7: ５種モデルの捕食・被捕食者関係

変更点 3　空間の拡張

５種類のエージェントが介在するには、いままで使ってきた２５×２５という空間は狭すぎると考え、４２×４２のより広い空間を用意した。この効果は大きく、空間を広くすることで、最初のランダムで設置されるエージェントが、ほかのエージェントと重なりそれを捕食し、アンバランスな初期値からシミュレーションを開始しなくてはならなくなるという偶然性を、極力防ぐことができるからある。この効果については、全く同じ設定のモデルで、空間の広さだけ違う図 8,9 の初動を見れば一目瞭然で、２５×２５でシミュレーションを行ったモデルは、５０ステップになる前にオオカミキラーとキラー　が絶滅してしまっている。しかし、空間を広くするということは、それだけエサに出会う確率も低くなるというわけなので、すべてのエージェントの代謝率（体力）を高めに設定した（本実験では１０）。

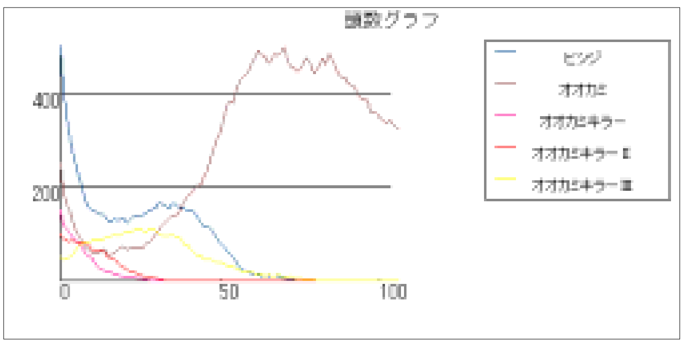

図 8: ５種モデル（２５×２５の二次元空間上）

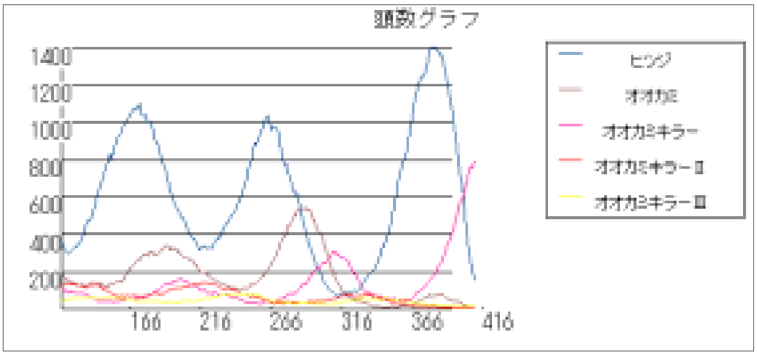

図 9: ５種モデル（４２×４２の二次元空間上）

4.2　初期値の設定

５種モデルにおいても、設定次第で存続するはずのモデルがすぐに破綻してしまうことがあるので、初期値の設定は慎重に行い、そのうえで次節このモデルを実行する。

この５種モデルをつくるにあたって参考にしたハングリーLotka-Volterra方程式をみると、Nn（このモデルでいうとオオカミキラー）を中心に前後の生物間の捕食・被捕食者関係を、記述していることが分かる。絵で表した図．７を見ると視覚的にそれがよく分かる。オオカミキラーが前後２種と捕食・被捕食者関係を結んでいるのに対し、ほかのエージェントは前後の数が合わず、ヒツジとオオカミキラー　にかんしては、食われるだけと食うだけという関係である。つまり、前のエージェントのほうが後ろのエージェントより捕食による死の確率が高いということになる。この不公平さを減らすために個体数・繁殖率とも前に位置するエージェントほど高く設定することにする。しかし、構造が複雑なので、くわしい値はほとんど予備的実験で、シミュレーションが長く続いた値を設定することにする。（まず本実験では個体数を前から５００，２５０，１５０，１００，５０とし、繁殖率を１５，１４，１０，８，７とした）

4.3　モデルの実行

実際にこのモデルを実行したところ、１０回の試行で平均２９９．１ステップという系の寿命が示された。この結果は３種モデルを平均１００ステップも上回り、多種間モデルの最小単位だと考えていた３種モデルより、ハングリーLotka-Volterra方程式を参考にしたこの５種モデルのほうが、モデルが複雑的でかつ長続きするという点できわめて優れていると

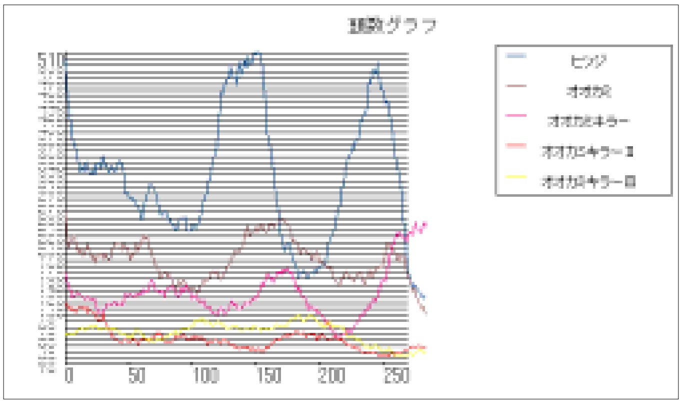

図 10: ５種モデルにおける個体数推移（頭数グラフ）

考えられる。そして, このモデルの個体数推移を見てみると、周期的変動も確認できた。しかし３種モデル同様、その変動は２，３回見られるのみで連続的に続くというわけではなかった。例えば図 10 は比較的周期的変動が確認できるが、その後３００ステップあたりで、ヒツジが大量発生したところをオオカミキラーが大量に捕食した。それにより、エサのヒツジが少なく敵のオオカミキラーが大量にはびこるという、オオカミにとって極めて住みにくい空間と化した。すると、オオカミは、３００ステップ前半〜後半にかけて急激に減っていき、４０６ステップ目で絶滅してしまった。それまで、周期的な変動の繰り返しが見られてもあるきっかけがもとで、系全体の破綻に結びついてしまうのである。

しかし図 10 において２５０ステップあたりまではある一定に周期性が確認できるので、アイソクラインで示されたような循環図がみられるかを、このモデルで試してみる。捕食・被捕食者関係（ヒツジ VS オオカミ＋オオカミキラー，オオカミ VS オオカミキラー＋キラー　，オオカミキラー VS キラー　＋キラー　）で２５０ステップまでのデータをもとに作ってみた。それが図 11,12,13 であるが、どれも一定の範囲で変動しているものの、規則的な円を描いているとは、いい難い。つまり５種モデルでは、５種それぞれのエージェントが相互に関わりあって、系の持続に貢献しているため、直接捕食・被捕食者関係を結んでいなくても、何かしらの影響を受けている。それが、特定のエージェント同士で周期変動の規則性を見ようとしても、ノイズとして表れてくるのだと予想される。

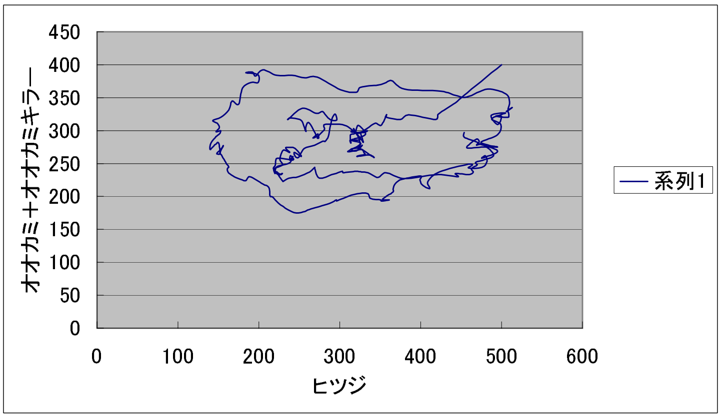

図 11: ヒツジとオオカミ＋オオカミキラーの個体数

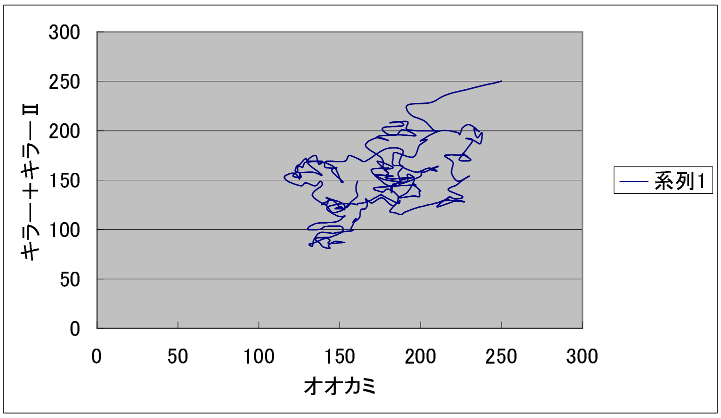

図 12: オオカミとオオカミキラー＋キラー　の個体数

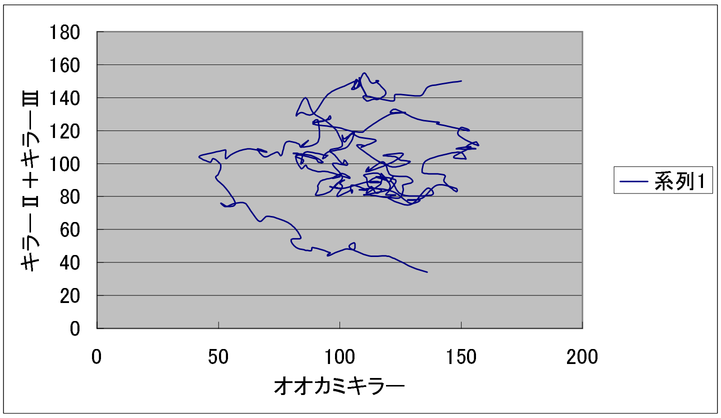

図 13: オオカミキラーとキラー　＋キラー　の個体数

4.4　５種モデルの破綻のパターン

ここでは、５種モデルのシミュレーションで、系の破綻（エージェントの絶滅）の原因とそのパターンを見つけ、考察の対象としたい。

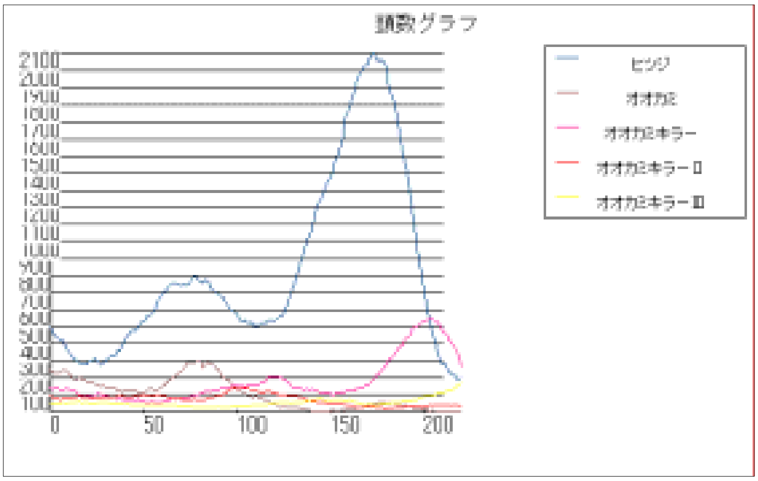

図 14: 破綻のパターン１

- ヒツジの急激な増加
  モデルの挙動を観察していく中で、とくに目立ったのがヒツジの急激な増加現象である。オオカミ以下のエージェントの個体数が拮抗していたり、直接捕食されるオオカミ・オオカミキラーの個体数が伸び悩んでいるとき、突如急な直線を描き増加をつづけ、その数が３０００を超えたりもする。そのあと比較的安定であったはずの生態系に狂いが生じ、結果、シミュレーションが短命におわってしまうというパターンである (図 14)。それではヒツジの繁殖率を下げれば、系の安定が図られるかというと、そうではなく、ヒツジの繁殖率がモデル全体の豊富なエサという役割を果たしているため、ヒツジの繁殖率を下げるとエサが行き渡らなくなり、かえって絶滅の確率を高めてしまうのである。よってヒツジが急激な増殖を始める前に、オオカミ・オオカミキラーが捕食を行うことが、安定的で長続きするシミュレーションができる条件の一つだと考えられる。

- 隣の強者エージェントのエサの横取り増加
  モデルを実行していてしばしば見られたのが、強者エージェントが隣のエージェントのエサを食べることでそのエージェントより大幅に増加する現象である。これはヒツジの急激な増加や、大きな変動が起きたとき、また不運にも最初のエージェントの設置時点に、主

に見られた現象で、図 15 のように、オオカミが大幅に増加しているときにキラー　がオオカミキラーを抜いて、オオカミを大量に捕食することで、オオカミキラーにとってエサのオオカミは減るわ、敵のキラー　は大量に増えるわで、行き場を失い、結局絶滅してしまうというパターンである。

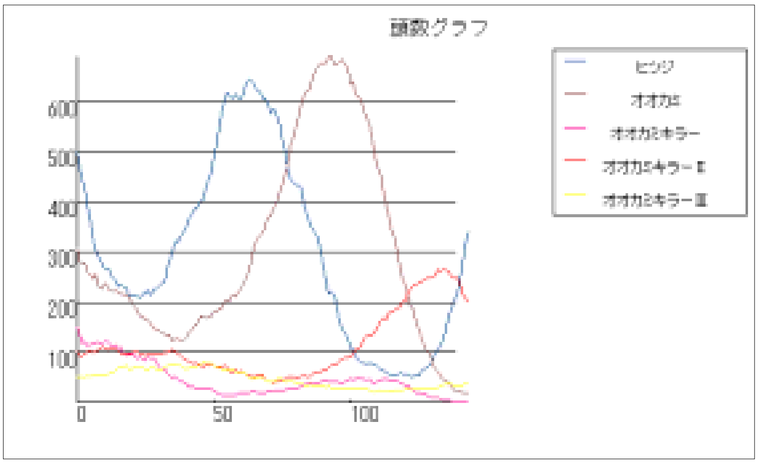

図 15: 破綻のパターン２

以上、５種モデルの挙動を観察したなかで、特に目立った２つの破綻要因について述べたが、２つに共通していえることは、エージェントの急増など、系に対して大きな変動が加わることで、それまで、比較的安定であったはずの系に狂いを生じさせ、破綻へと導くということである。このようなシミュレーション実行中に起きるノイズに耐えうる設定を行うのは困難であるが、より多種間の、より現実の生態系に近いモデルであれば可能だろうと予測している。

5　まとめ

以上、多種間生存競争モデルとして、３種間と５種間生存競争モデルについて論じてきた。それぞれ捕食・被捕食者関係などに、ある程度個性を持たせることはできたが、特別安定的な系を探しだすまでにはいたらなかった。しかし、シミュレーションではハングリー Lotka-Volterra 方程式を参考にして作った５種間生存競争モデルのほうが、３種間モデルより、複雑な捕食・被捕食者関係であるのにも関わらず、安定的であるという結果がでている。

今後の課題は、第１にシミュレーションを繰り返して、より精度の高い

成果を見つけ出すことである。本論文全体で、実験過程について触れている記述が少なく、モデルの紹介とその結果報告に終始している。シミュレーションが中心となる論文に、実験過程に関する記述がすくないのは問題であると反省している。第２に５種モデルより多種のより完全な生態系モデルをつくることである。５種モデルは連鎖している生態系をバッサリ５種に切ったというイメージなので、５種の中心の１エージェント以外は、不完全な捕食・被捕食者関係を結んでいるとも考えられるからである。第３に経済学への応用である。景気循環のモデルに Lotka-Volterra 方程式の周期性を応用することが知られているからである。

参考文献

[1] 塩沢由典: 経済学にとっての人工市場、人工知能学会誌 15 巻 6 号 (2000)

[2] 山影進、服部正太編: コンピュータのなかの人工社会、共立出版 (2002)

[3] 寺本英: 数理生態学、朝倉書店 (1997)

[4] 中村佳正：可積分系の応用数理、裳華房（2000)

[5] M. Hisakado: Hungry Volterra equation, multi boson KP hierarchy and Two Matrix Models, hep-th/9807001v1 (1998)

[6] A. Nagai and J. Satsuma: The Lotka- Volterra Equations and the QR Algorithm ,*Journal of Phisycal Society of Japan*, **64** 3669 (1995)

[7] 構造計画研究所ホームページ
http : //www2.kke.co.jp/mas/MAScommunity sample.html

[8] 山影研究室ホームページ
鈴木一敏：空間上の生態系モデルにおける個体密集度と系の安定性
http://citrus.c.u-tokyo.ac.jp/WP1.PDF