

新型シミュレータ開発プロジェクト  
Project for New-Type Simulators

ワーキングペーパー・シリーズ  
Working Paper Series

Working Paper No. 3

生物個体群における自然選択と  
個体数変動の関係

----- ABSを用いたシミュレーション -----

阪本 拓人\*

2000年1月

( \* 東京大学大学院総合文化研究科修士課程 )

「シミュレータ開発プロジェクト」は、研究・教育を目的としたマルチエージェント型や繰り返しゲーム型のシミュレータやソフトの開発を目指しています。このワーキングペーパー・シリーズは、プロジェクトの活動・成果の一端を公開するものです。

“Project for New-Type Simulators” is developing a multi-agent based simulator and a simulator of iterated cognitive games, among others, for scientific and/or educational purposes. This working paper series aims at disseminating interim but interesting outcomes of this on-going project.

科学研究費補助金・基盤研究(B)(1)展開(10552001)

東京大学大学院総合文化研究科国際社会科学専攻 山影 進 研究室

お問い合わせ: tasuke@waka.c.u-tokyo.ac.jp

## 1. はじめに

以下では、構造計画研究所制作のマルチエージェント型シミュレーター Agent Based Simulator (以下ABS) を用いてシミュレートされた生物個体群の動態を観察し、そのメカニズムを探る。<sup>1</sup> 一定の環境におかれた個体群の規模が、それを構成する個体の属性及び行動ルールの変化により、どのような影響を受けるのかを検討するのが目的である。特に、個体間に遺伝的連関を持たせる時に生じる、自然選択と個体数変動との間の強い相互作用に考察の重点が置かれる。

本稿の構成は次の通りである。次節では、一連の試行の土台になる、ABS 付属のサンプルモデル「シュガーモデル」の内容を概説する。続いて、個体のルールと属性値の変化が個体群の規模に及ぼす影響を調べるための実験の結果が示される。前半では、サンプルモデルに「無性生殖」と「自然死」という新ルールを追加して、個体群に自然選択の過程を導入する。後半では、個体数変動のパターンの構造的安定性を検証する試みとして、個体の「繁殖力」を変化させる実験を行う。最後に、一連の実験結果から推察される生物個体群の動態のメカニズムについて、概括的で仮設的な図式的説明を与える。

---

<sup>1</sup> 構造計画研究所 Agent Based Simulator 及び付属の「シュガーモデル」は、2000/1/11 現在、<http://www2.kke.co.jp/abs/index.html> にて入手可能である。

## 2. 「シュガーモデル」の概要

### (1) サンプルモデルの概要

次節以降の実験の土台となる「シュガーモデル」は、もともと人口社会「育成」のための環境として Epstein と Axtell が開発したソフトウェアを、ABS用に簡素化して移植したものである。<sup>2</sup> このサンプルモデルでは、二つの砂糖の山が並ぶ「シュガースケープ」(Sugarscape)の中を、アリが砂糖を求めて動きまわる。それ以外に取り立てて特徴はないが、この点がモデルの自由度を高めている。以下で検討する生物個体群の動態をシミュレートするには、サンプルに若干の修正と拡張を加えれば十分である。

アリたちの生活環境を構成するシュガースケープを図 2-1 に示す。黄色の濃淡が砂糖の量を表わし、濃いものから順に 4 から 0 の数字が振られている。砂糖は消費されると 0 になるが、指定された「再生度」に従い、一定の間隔で各地点の限界値まで補充される。たとえば「再生度」を 4 とした場合、4 ステップに一度砂糖が再生することになる。

一方、アリの状態は「視野」「食欲」「財産」という三つの値で指定される。シュガースケープ上をアリはその「視野」に従って移動し、移動先で採取した砂糖を「食欲」の分だけ消費、残りは「財産」に加えられる。各ステップにおけるアリの行動ルールを簡単にまとめると以下ようになる。

- ・シュガースケープを見渡し、「視野」に入る地点のうち最も砂糖が多い場所に移動。
- ・移動先で砂糖を採取し「財産」に追加。「財産」から「食欲」の分だけ砂糖を消費。
- ・「財産」が「食欲」の 10 倍を越えると、子アリを生成。その属性はランダムに決定。
- ・「財産」が 0 を切ると餓死。

### (2) サンプルモデルにおけるアリの個体数変動

次節の実験との比較のため、上述のルールに何も手を加えずにサンプルを走らせ、アリの個体数の変動をざっと眺めてみよう。結果は図 2-2 に与えてある。図中の曲線はそれぞれ、300 匹のアリに「食欲」の初期水準として 2.0、3.0、4.0 を与えたときの、個体数の変動を示している。<sup>3</sup> ここで「食欲」の初期水準と言うとき、個々のアリの「食欲」の値は、この水準の  $\pm 1$  の範囲から一様乱数で決定される。また、アリの「視野」と「財産」の初期値は、それぞれ 3 ~ 5 及び 10 ~ 14 の範囲で一様乱数によって配分した。シュガースケープについては、砂糖の「再生度」は 4、「季節変動」は「なし」とした。<sup>4</sup>

図からわかるように結果は明瞭である。どの食欲水準からはじめても、数十ステップ後に個体数は一定値に収束し、微細な振動を除いてほとんど変化は見られなくなる。アリの個体数が収束する水準は、「食欲」の初期水準でほぼ決定される。初期水準 2.0 で収束個体数はおよそ 200 匹に達するが、この水準を上げていくと、収束値は単調に減少し、初期水準 4.0 を越えるについに 0 に至る。さらにこうした傾向が、何回試行しても変わらないという点は重要である。「食欲」と個体数の間の関係は非常に安定している。

<sup>2</sup> J.M.Epstein and Robert Axtell, *Growing Artificial Societies*. Washington, D.C.: Brooking Institution, 1996. 特に chapter 2 を参照。「シュガースケープ」などの呼び名は、本書の様式に基づいている。

<sup>3</sup> サンプルモデルには属性値が互いに異なる、「青アリ」「赤アリ」の 2 種のエージェントが存在する。以下では、「赤アリ」の個体数は常に 0 とし、その存在は考慮しない。

<sup>4</sup> 「季節変動」は、30 ステップごとに砂糖の全く再生しない「冬」が、シュガースケープの上半分と下半分に交互に訪れるルールである。環境からの変則的制約を排除するため、以下このルールは全く用いない。

図 2-1 シュガースケープ

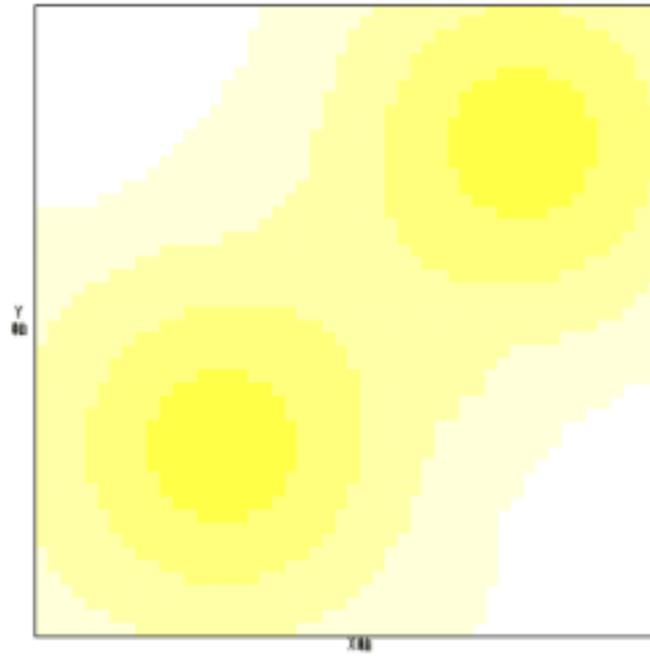
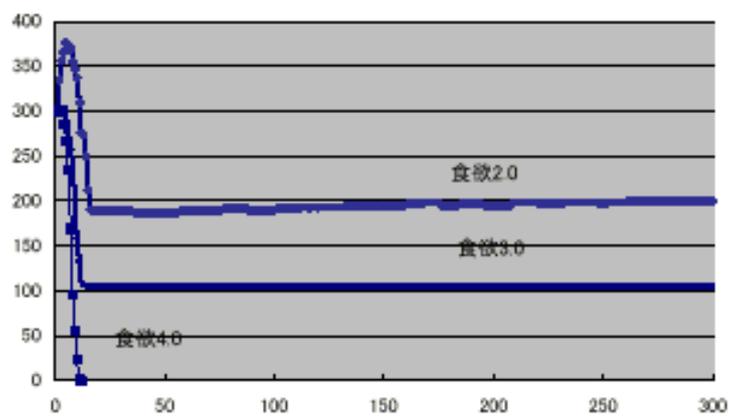


図2-2 サンプルモデルにおける個体数変動



「食欲」の水準と個体数の間に見られる密接な関係は、何ら奇異なものではない。「食欲」はアリの生存を左右する重要な属性である。「食欲」が少ないと、「財産」を食いつぶし餓死する危険性が少なくなる。「食欲」が少ないと、子アリの生成も容易になる。

以上の結果は、安定性という点では申し分ないが、単調でやや退屈な結果でもある。加えて、生物個体群の動態という観点から考えると、サンプルモデルにおいてアリの生態を律するルールには非現実的なものもかなり含まれている。特に問題だと思われるのが、生成される子アリの属性が親アリと全く無関係にランダムに決定される点であり、アリが餓死以外の死に直面しないという点である。次節では、この二つの問題に対処するため、「無性生殖」および「自然死」という新たなルールが導入されることになる。

### (3) サンプルモデルの修正

次節で述べる「無性生殖」「自然死」のルールを除き、サンプルモデルに加えた変更の大半は、出力に関係する技術的なものである。それ以外の変更点のうち、モデルの振る舞いに直接関係する重要なものを二点挙げておく。

ひとつは、個体数増大の空間的制約に関するものである。シュガースケープは  $50 \times 50$  の計 2500 の格子点からなっているが、サンプルモデルはこの各点に何匹でもアリが存在することを許容している。以下では、子アリ生成の条件として親アリの周囲に少なくともひとつの「空き地」が存在することを求めることで、一地点に複数のアリが存在することに制約を課すことにした。この制約は完全ではないが、シュガースケープにおけるアリの個体数の上限を 2500 匹前後に押さえることはできた。<sup>5</sup>

もうひとつの変更点は、「財産」の変数型を整数型から実数型に変更したことである。これは「食欲」が実数型であることに対応したもので、この変更を行わないと、「財産」から「食欲」が差し引かれた時に、残った「財産」の小数点は切り捨てられてしまう。技術的に見えるが、これもアリの生死に直接かかわる重要な変更と言える。

---

<sup>5</sup> シュガースケープにおけるアリの位置は、個々のアリが変数として持つ 2 次元空間上の「x 座標」「y 座標」によって決定される。一地点におけるアリの重複を完全に排除するには、この 2 つの変数値の組み合わせから重複をなくせばいい。これは技術的に不可能ではないが、アリが動くたびに空間上の全てのアリの変数を参照しなければならず、コンピューターに過大な負担をかけてしまうことになる。

### 3. 実験結果 個体の属性・ルールの変更と個体群の規模

修正した「シュガーモデル」に、「無性生殖」と「自然死」という新たなルールを導入した上で、アリの属性値、特に「食欲」とアリの個体数変動との関係を調べるのがこの節の課題である。下に一連の実験に共通する主要な環境設定をまとめておこう。

- ・シュガースケープの砂糖の「再生度」は4、「季節変動」はオフ。
- ・アリの「視野」は3～5、「財産」の初期値は10.0～14.0から一様乱数で配分。<sup>6</sup>
- ・シミュレーション開始時のアリ（青アリ）の数は300匹。

#### 実験 「無性生殖」と「自然死」の導入

##### ルールの内容

以下新たに追加する「無性生殖」ルールは、生成される子アリの諸属性を完全にランダムに決定するのではなく、それに親アリとの「遺伝的」連関を持たせることを目的とした、ごく単純な生殖ルールである。その内容を短くまとめると下のようになる。

- ・アリの「財産」がその「食欲」の10倍を越えると、子アリが生成される。
- ・子アリの「視野」は親アリのそれと同じ、「財産」は親アリから半分を譲り受ける。
- ・子アリの「食欲」は、親アリの「食欲」を基準とする一定範囲から乱数配分される。

この「一定範囲」を、以下では新たな変数として「ノイズ」と呼ぶ。たとえば、「ノイズ」が0.1の場合、子アリの「食欲」は、親アリの「食欲」 $\pm 0.1$ の範囲から決定される。ノイズが0なら、新たに生まれるアリの「食欲」は、既存のアリの「食欲」が決定する範囲のうちに完全に納まるが、0でない場合、この種の制約は取り払われることになる。<sup>7</sup> 当面、「ノイズ」は $\pm 0.05$ に固定される。

他方、「自然死」のルールは、アリに餓死以外の死のオプションを与えようというものがある。その内容は下に与えるような単純なものになっている。

- ・アリに新たな属性「寿命」「年齢」を付与。試行開始時の「年齢」は乱数配分する。<sup>8</sup>
- ・アリの「年齢」が「寿命」を越えると、そのアリは死を迎える。

以下の実験では、各アリの「寿命」がとり得る範囲は30～60、シミュレーション開始時における「年齢」分布の範囲は0～60に固定する。サンプルモデルには、個体数変動が安定すると、アリが全く死ななくなるという難点があった。上のルールはこの難点を克服してモデルをより「自然」に近づけるとともに、アリの個体群に恒常的な不安定要因を組み込もうとするものである。

##### 実験の結果

#### (1) 「食欲」の初期水準と個体数変動の関係

まず、前節の試行と同様に、個体群の「食欲」の初期水準を動かしてみる。新たなルールを導入することで、個体数変動のパターンに著しい変化が見られるようになる。

この変化の大半は、「無性生殖」に帰せられる。このルールを導入した際の結果の一部を図3-1-1～3-1-3に示す。図には個体群の規模の推移に加え、その食欲の平均値の時系列的

<sup>6</sup> 以下の全ての試行において、「乱数配分」とは一様乱数による数値の配分を意味する。

<sup>7</sup> ただし全く無制約ではない。「食欲」が0にならないよう、その下限を0.1に設定している。

<sup>8</sup> 開始時に「年齢」を乱数配分しないと、個体群に世代分化が起き、シミュレーション開始後しばらくの間、個体数変動は周期的振動を見せることになる。

図3-1-1 アリの個体数変動(「自然死」なし、食欲2.0)

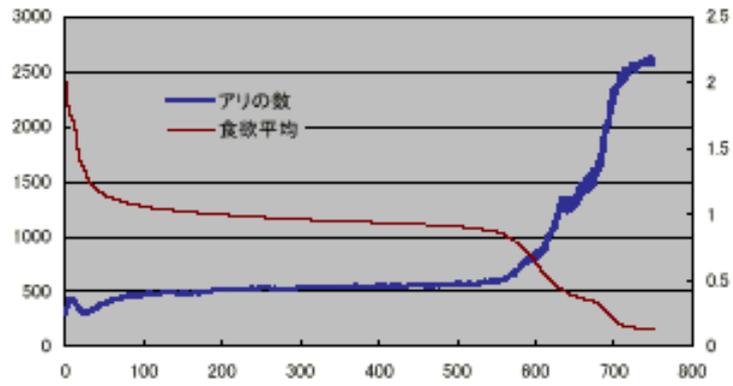


図3-1-2 アリの個体数変動(「自然死」なし、食欲2.5)

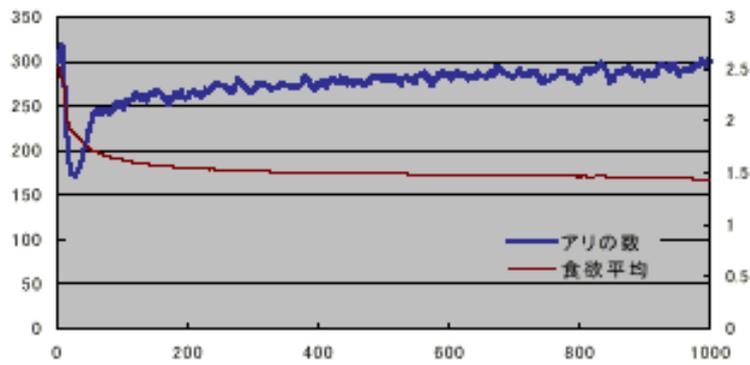
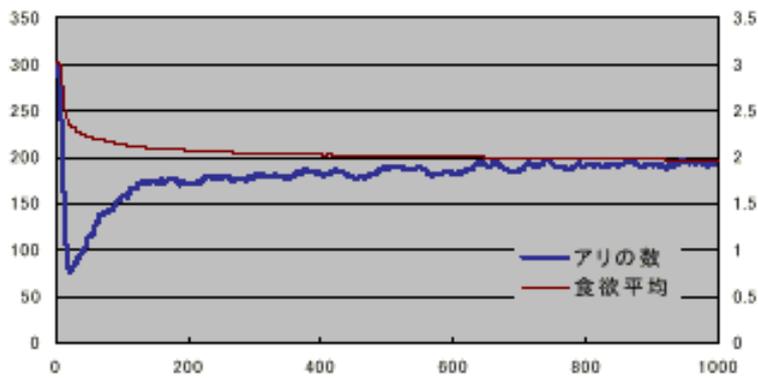


図3-1-3 アリの個体数変動(「自然死」なし、食欲3.0)



変化も示されている。全般的に個体数の水準自体が高まっていることが分かる。

「食欲」の初期水準 2.0 の場合（図 3-1-1）最初の 600 ステップ近くの間、アリの個体数は 500 匹前後の水準に留まる。実際にはこの間も個体数は微増しているが、はっきりとした変化が現れるのは 600 ステップを越えてからである。アリの個体数は約 100 ステップかけて急増し、空間をぎっしりと満たす 2500 匹以上の水準に達する。「食欲」の平均もやはり 600 ステップ前辺りを境に急落に転じ、最終的に 0.13 前後にまで落ち込む。

初期水準が 2.0 を越えると、個体数・食欲平均ともに、試行開始直後の「調整期間」を除けばこうした急激な変化は息を潜める。ただ、そこに見られる傾向は、サンプルモデルで見られた一定値への安定的な収束の傾向とは必ずしも同じではない。たとえば、初期水準 2.5 の場合（図 3-1-2）には、アリの個体数は、変動が落ち着く 50 ステップ前後から 1000 ステップまで、微小な振動を繰り返しながら 50 匹前後増加していることがわかる。試行したステップ数では、個体数及び食欲平均が行き着く先について確定的なことは言えない。

初期水準が 3.0 になると（図 3-1-3）個体数変動は 190 匹前後の低水準に収束していくように見える。初期水準が 4.5 を越えると、アリは数ステップのうちに確実に絶滅する。

次に、「無性生殖」に加えて「自然死」も導入してみよう。結果を図 3-1-4～3-1-6 に示す。全般的に個体数の増減の幅が大きくなり、変動速度も加速されている。さらに後者は、直前の試行では不明瞭であった、非常に重要な結果を明らかにした。アリの個体群は、絶滅しない場合、最終的には空間を飽和するまで規模を膨張させるという結果である。

「食欲」の初期水準が 2.0 の場合（図 3-1-4）一定の激増期間を経て最終的に個体数が 2500 匹以上の水準に達する点は前の試行と変わらないが、この水準に達する時間がおおよそ 200 ステップ程度短縮されている点が目を引く。「自然死」なしの場合に比べ、「食欲」の平均値の軌跡の傾きも大きくなっている。

上に述べた強力な結果が明らかになるのは、初期水準が 2.5（図 3-1-5）および 3.0（図 3-1-6）の場合である。前者では、900 ステップ前後から急増に転じ、1000 ステップまでに空間はアリで完全に満たされる。後者では、1600 ステップ近い時間の経過を待たねばならないが、それでも最終的に空間飽和へと至る急増が生じる点は他の試行と変わらない。「食欲」の平均値の推移についても同様のことが言える。

アリに絶滅をもたらす初期水準は、4.0 前後である。あらゆる水準で試行したわけではないが、後で述べる理由から、この値よりも「食欲」の初期水準の低いアリの個体群は、少なくとも極限においてどれも空間飽和へ向かうと予想できる。

## (2) 「食欲」の分布の動態と「自然選択」

個体数変動に関する前項の結果に解釈を与えるため、アリの「食欲」の動態をやや詳しく見てみよう。前節で触れたように、「食欲」の低いアリは、高いアリに比べて、相対的に厳しい環境で生き抜くことができる。一方、「食欲」の低いアリは、同じ「財産」が与えられたときに、相対的により多くの子アリを残すこともできる。<sup>9</sup> アリの生存力・繁殖力と「食欲」との間に見られるこの密接な関連は、アリの個体群全体の規模に対しても大きな影響

---

<sup>9</sup> アリは、1 ステップあたり一匹の子アリしか生めない。だが、子アリ生成の際に「財産 > 食欲 × 10」という条件が付されていることから、たとえば「食欲」0.1 のアリは 1.0 のアリに比べて、潜在的に 10 倍多くの子アリを残す繁殖力を持っていると考えられる。

図3-1-4 アリの個体数変動（食欲2.0）

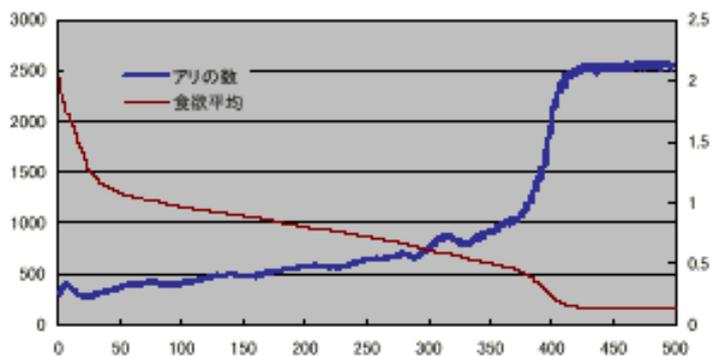


図3-1-5 アリの個体数変動（食欲2.5）

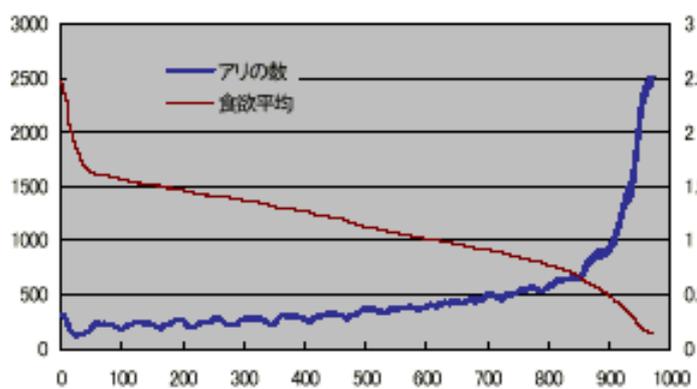
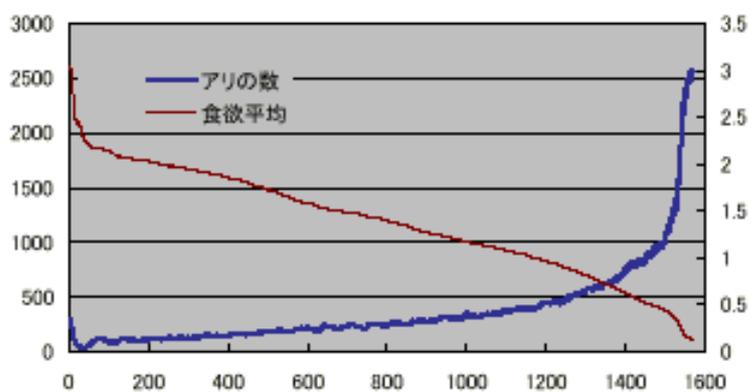


図3-1-6 アリの個体数変動（食欲3.0）



を及ぼしているように思われる。ひとつの目安として、前項の実験におけるアリの「食欲」平均値と個体数との相関係数を計算すると、どれも - 0.9 前後の強い負の相関を示す。

ここでは、「無性生殖」及び「自然死」を導入したケースのうち、「食欲」の初期水準が 2.0 の場合（図 3-1-4）を検討する。「食欲」の水準に従い、個体群を幾つかの階級に分割した時の個体数変動を図 3-1-7 に、幾つかのステップにおける個体群の食欲分布のヒストグラムを図 3-1-8 と 3-1-9 に示す。

「食欲」の平均値は一貫して単調に減少し続ける。これは個体数変動の過程で、厳しい環境に耐ええない「食欲」の高いアリが姿を消し、絶えず適応力の高いアリが輩出され続けるという基本的傾向を示す。ただ、減少の仕方は一様ではない。特に、試行開始後約 40 ステップまでと 400 ステップ前後からの急激な減少は、個体数変動のメカニズムを考える上で重要である。

図からは読み取りにくいですが、前者は、試行開始時の個体数 300 がいったん「絞りこまれて」200 匹程度にまで減少する過程に対応している。その後個体数は上昇に転じ、漸増の過程に入る。後者はもちろん、空間飽和に至る個体数の急増の過程に対応している。

両者を食欲の分布の動態という観点から眺めると、図 3-1-8 から、最初の減少過程では、個体群の「食欲」の分散も急速に小さくなっていくことが分かる。砂糖の「再生度」が 4 という相対的に厳しい環境に耐えうるアリは、初期個体群のごく一部である。

こうして、「食欲」の分散という形で現れるアリの生存範囲は試行開始直後に絞りこまれるが、変化は、一定の分散を維持する分布の低食欲水準への移行という形でその後も続く。図 3-1-9 はその過程の最終状態を示すものだが、そこに至る展開は図 3-1-7 から分かる。特に、長期間優勢を保っていた「食欲」0.5 ~ 1.0 のアリは、300 ステップ以降「食欲」0.5 未満のアリによって急速にその座を追われていく。後者の繁殖力の極端な高さは図から明らかである。400 ステップ前後を境とする個体数の急増と「食欲」平均値の急減は、この点に帰せられる。

個体数変動の過程に見られる、アリの「食欲」水準の全般的下落及びその分散の狭まりを以下では「自然選択」と呼ぶ。個体群に働く自然選択は、その規模の動態を直接に規定している。最後に、この点を別の角度から確かめた実験結果を示す。

図 3-1-10 は、「無性生殖」の「ノイズ」を  $\pm 0.15$  に増やした場合の試行結果を示したものである。これは、適応力の高いアリが確率的により出現しやすい環境に変えたことを意味する。<sup>10</sup> 「食欲」の初期水準は 3.0 であるが、「ノイズ」が  $\pm 0.05$  の場合に比べ、個体数が 2500 匹に達する時間は、1600 ステップから 350 ステップにまで短縮されている。初期水準 2.0 の場合には、飽和状態に達するのに 100 ステップもかからない。

#### 結果の説明

「無性生殖」及び「自然死」というルールの追加で、シュガースケープにおけるアリの個体群の規模は全般的に大きくなり、その動態は、最終的には絶滅か飽和かというはっきりとした傾向を示すようになった。これは、非常に長い目で見ると、シュガースケープにおけるアリの個体数変動の振る舞いは極めて安定していることを意味する。

---

<sup>10</sup> こうした効果は、たとえば「食欲」の配分を律する乱数を正規乱数に変えることによってももたらされる。この点は、上限・下限を持たない正規分布の形状に大きく関係しているように思われる。

図3-1-7 「食欲」水準ごとの個体数変動 (初期水準2.0)

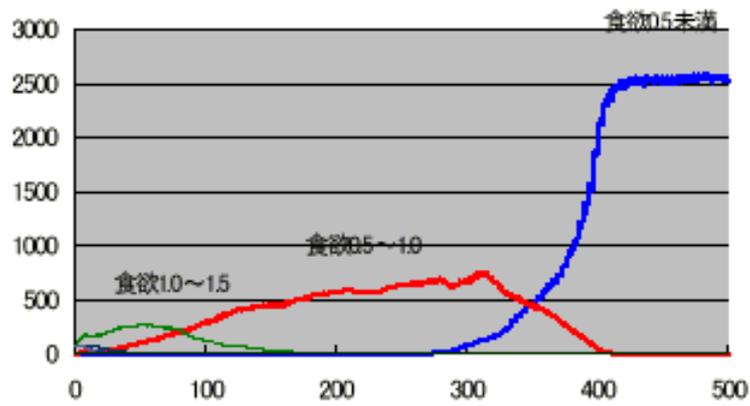


図3-1-8 食欲分布の変化 (1ステップと40ステップ)

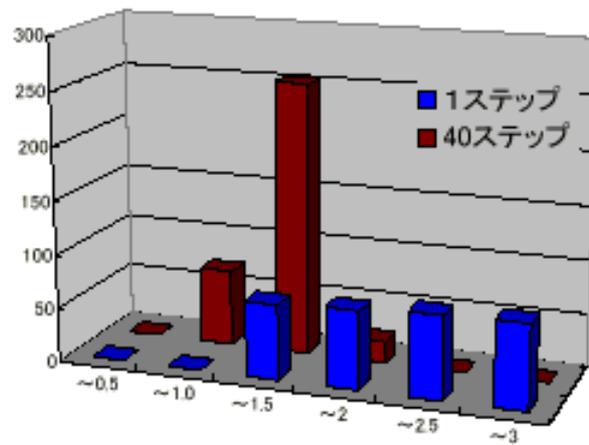


図3-1-9 食欲分布の移動 (1ステップと500ステップ、対数尺)

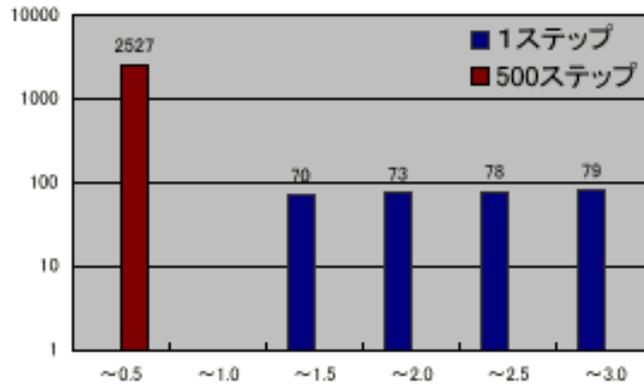
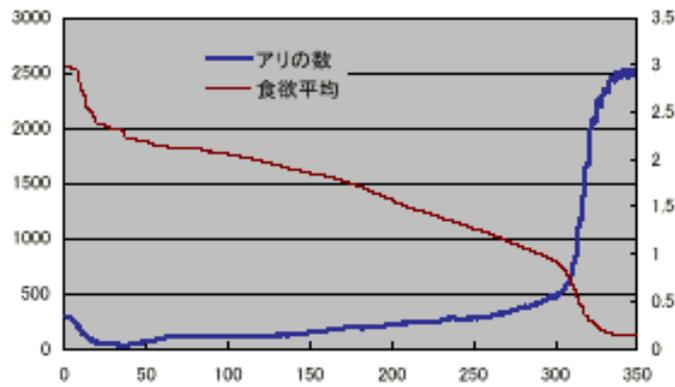


図3-1-10 アリの個体数変動 (ノイズ0.15、食欲3.0)



この強い安定性は、アリの個体群に働く自然選択が持つ定方向性と密接に関連している。これは「無性生殖」の導入によってもたらされた。ある個体群が与えられた時、「食欲」が相対的に高いアリは淘汰され、低いアリは生き残る。繁殖力にも優れる後者が、前者の「隙間」を埋めて子孫を残す時、新たにできる個体群は前のものより規模が大きくなっている。一方、親アリと子アリのノイズを伴う遺伝的連関は、新たな個体群において、以前存在したものよりも生存力と繁殖力に優れたアリが存在することを確率的に保証する。これによって、自然選択は個体群を規模の増大と「食欲」水準の低下の方向に導いていく。

このような過程は定方向的であるが、全く決定的なものでもない。個体数増大の加速という「自然死」の導入がもたらす結果は、自然選択そのものを加速しうることを示すものである。上で、「食欲」の高いアリが淘汰された後に残される潜在的成長空間を指して「隙間」と述べた。恒常的にアリの数を減らす「自然死」は、この隙間を広げる影響を持つと考えられる。隙間が広いほど、淘汰を免れたアリの繁殖率は高まる。今いるアリよりも、もっと「食欲」の低いアリが登場する確率もそれだけ上昇することになる。

### 実験 「繁殖力」の変化と個体数変動の安定性

「無性生殖」と「自然死」というルールの追加により、個体数変動が獲得した長期的な安定性は、これまで明示的に取り上げてこなかった、幾つかの環境的・個体的要因にも依存している。<sup>11</sup> だが、こうした複数の要因の影響を逐一調べあげ、個体群の動態の構造安定性を厳密に検証するのは、本稿の目的から逸脱している。以下では、アリの繁殖力に注目し、安定性を崩す端緒をつかむための付加的で小規模な実験を行う。

アリの繁殖力は、アリが無性生殖するための条件「財産 > 食欲 × 10」で決められた。食欲が小さいほど当然繁殖力は高い。以下の実験では、上の条件式中の 10 を変数に置き換え、この変数の変化とアリの個体数変動との関係を見る。新たに導入するこの変数を便宜的に「繁殖乗数」と呼ぶ。食欲が一定なら、「繁殖乗数」の低い方が子アリの生みやすいことになる。実験は、先の実験と同じ環境下で行い、様々な「繁殖乗数」のもとで「食欲」の初期水準を変化させていく。

#### 実験の結果

結果の一部を図 3-2-1 ~ 3-2-4 に示す。これらを見ると、変化に富んだ個体数変動が突如現れたような感覚になるが、実際には「繁殖乗数」をかなり低く設定しなければ、このような結果は生じない。実験 とは幾分異なる傾向が認められるようになるのは、「食欲」の初期水準が 2.0 の場合、「繁殖乗数」が 5 前後にまで下がってからのことである。

「食欲」の初期水準が 2.0 で「繁殖乗数」が 1 という極端な場合（図 3-2-1）、長い間周期の不定な大きな振動がくり返され、やがて振幅を縮小させながら、個体数が全体として 2500 匹の水準に向かっていく。この傾向はどの試行でも一貫しているが、空間飽和に達する時間には相当のばらつきがある。図の結果では、その時間はおよそ 150 ステップである。「繁殖乗数」が 10 の場合に比べ、250 ステップ以上も短縮されている。

---

<sup>11</sup> たとえば、「財産」の初期分布やシュガースケープの「再生度」。ただ、これらの変数を変化させても、ここでの定性的な結論に大きな変更は生じないように思われる。

図3-2-1 アリの個体数変動（繁殖乗数1、食欲2.0）

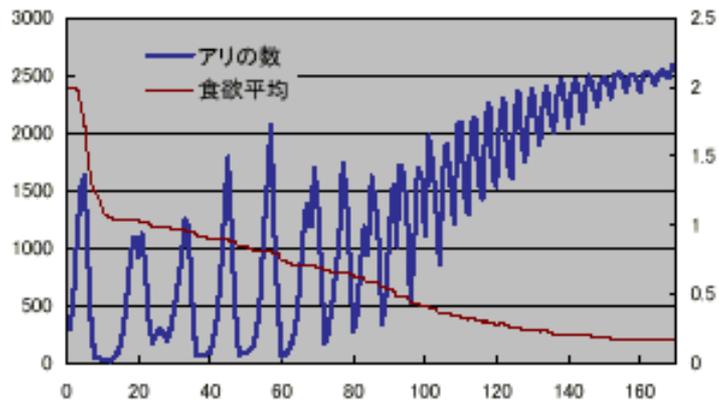


図3-2-2 アリの個体数変動（繁殖乗数3、食欲2.0）

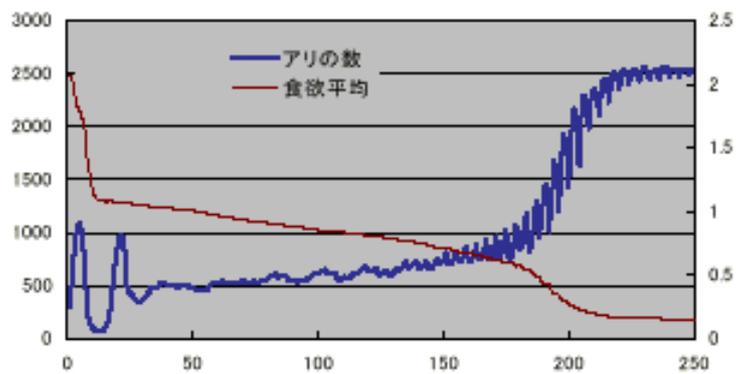


図3-2-3 アリの個体数変動（繁殖乗数3、食欲2.0）

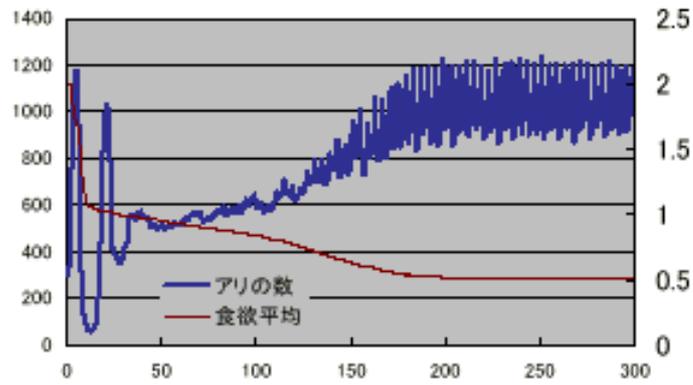
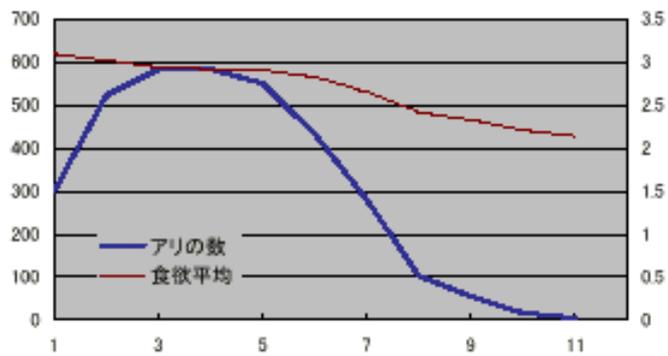


図3-2-4 アリの個体数変動（繁殖乗数3、食欲3.0）



振動の起り方は一様ではない。それを示すのが、「繁殖乗数」を3に上げた、図 3-2-2 と 3-2-3 の結果である。これらの場合、振動は、試行開始後かなりの時間が経過してから、徐々に振幅を拡大させながら起ってくる。それまでは、初期財産の影響と思われる開始直後の大きな波を除いて、個体数変動は比較的落ち着いている。

他方で、二つの図が示す個体数の動態は、長期的にかなり異なってくる。振動が顕在化して以降、図 3-2-2 の個体群は、ほぼ図 3-2-1 と似通った振る舞いをしながら、徐々に空間飽和へと向かっていく。ところが、図 3-2-3 の場合、振動はほぼ一定の振幅を保ったまま、個体数 900 ~ 1200 前後の水準を離れようとしめない。この間、「食欲」の平均値もほとんど変化していない。300 ステップ程度の試行では、個体数変動の長期的帰趨に関して確かなことは何も言えないが、少なくとも結果に大きなばらつきがあることは分かる。

最後に、乗数を3に維持したまま「食欲」の初期水準を3.0に上げてみると、図 3-2-4 のような結果を得る。これは典型的な絶滅の経路であり、初期水準が相対的に高い場合に頻繁に起きる。開始直後の極端な個体数の増大には、初期財産も影響していると思われる。

#### 結果の説明・解釈

「繁殖乗数」を下げることで、個体数変動に大きな振動が生じることとなったが、振動の生起そのものの説明はそれほど難しくはない。ここで再び「隙間」を持ち出そう。相対的に「食欲」の高いアリが淘汰された後に残る隙間は、生き残ったアリから生まれる子アリたちによって埋められる。ところが、残ったアリの繁殖力が極端に高いと、この子アリの数は、「隙間」を埋めるのに必要な数をはるかに上回ることになる。そうなると逆にアリの環境は極端に悪化する。アリの数を大きく減らす圧力がここから生じる。つまり振動は、隙間に対する個体群全体の調整がうまくいかない時に起きると言える。

以上は振動生起の一般的な説明だが、この図式で、たとえば図 3-2-2 及び 3-2-3 のような場合も扱うことができる。これらの場合、試行開始後かなりの時間が経過しないと振動は顕在化しなかった。この時間は、自然選択の進行に必要とされる時間と考えられる。試行開始直後を除き、自然選択は、個体群全体の「食欲」水準をゆっくりと押し下げていく。ふたつの図から、振動が顕在化し始めるのは、ともに150ステップ前後、「食欲」の平均値が0.5の水準に近付き始めてからということが分かる。「繁殖乗数」が3の場合、初期の「食欲」水準では、振動を引き起こす「極端に」高い繁殖力は得られない。「食欲」の水準が相当低くなってはじめて、隙間に対する目に見える形での「調整不良」が起きるわけである。

振動生起の説明に比べ、大きな困難を伴うのが、振動と自然選択の関係の解明である。図 3-2-1 及び 3-2-2 から分かるように、大きな振動が起きている間も、個体群を空間飽和へと導く自然選択の過程は依然強く働いていると思われる。だが、各試行の結果には、大きなばらつきもある。このばらつきを説明するには、「隙間」をめぐる個体群の調整過程とそこに働く自然選択のせめぎあいに目を向ける必要があるが、その過程がかなり確率的な要因に依存しているという以外に、確かなことは言えないのが現状である。

#### 4. むすび

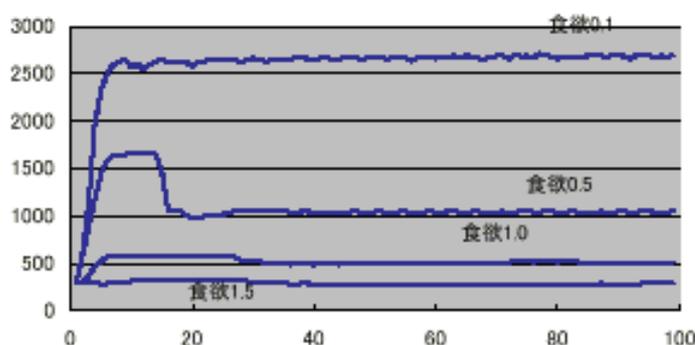
前節の一連の実験結果とその説明に多少の秩序と見通しを与えるために、最後にアリの個体数変動のメカニズムを図式的に描写して、議論を締めくくろう。シュガースケープを動きまわるアリの個体群に何が起きているかを考える時、その動態を、以下暫定的に「進化局面」「調整局面」と呼ぶ二つの側面から検討するのがいいように思える。

「進化局面」とは、「食欲」をはじめとするアリの諸属性に自然選択が働き、個体群の内部構成をダイナミックに変えていく過程である。アリ同士は食う食われるの関係にあるわけではないが、与えられた環境を共有することによって、僅かな属性値の差が生死を決定的に左右する、過酷な淘汰圧にさらされることになる。実験をはじめとする本稿の問題関心の大半は、この局面が個体数変動に及ぼす影響に集中していた。「無性生殖」「自然死」のルールを導入することで、自然選択は、個体群の規模を極限にまで膨張させるような、明確な方向性と強力な持続性を獲得することになった。

他方、「調整局面」とは、アリの個体群のある内部構成が与えられた時に、それに対応する一定の「環境容量」に、個体数が漸近していく傾向のことである。これまで幾度か曖昧な形で使ってきた「隙間」という言葉は、やや厳密に言えば、ある時点における個体群の諸属性の分布に対応する「環境容量」と、その時点での個体数の差を意味する。実験は、この調整局面の安定性を崩す試みでもある。

「環境容量」は、個体群の「食欲」分布や「財産」分布、シュガースケープの「再生度」などの諸変数に依存する関数である。この複雑な関係を少なくとも統計的に推測するには、さらに規模の大きな実験が必要である。ここではその存在を確認する結果を示すにとどめる。図4は、アリの諸属性から確率的要素を取り払い、定数化された「食欲」の値と個体数変動との関係を調べたものである。「視野」は4、「財産」は5、「ノイズ」は0、「自然死」は「なし」としている。他の環境はこれまでと同様である。

図4 食欲と環境容量



図より、砂糖の周期的再生を主因とする振動が見られるものの、各「食欲」に対応する個体群の規模は、試行開始後、ある一定の水準に向かって急速に収束していくように思われる。個体数が漸近する「環境容量」及びその漸近の過程は、試行ごとに全くと言っていいほどばらつきがなかった。「調整局面」は、この結果で近似されるような理想化された過程を指している。

実験において、自然選択と個体群の「調整不良」の関係がはっきりしなかったように、「進化局面」と「調整局面」との間には多くの不確定要因が介在している。だが、ここで検討してきた個体数の動態は、基本的にこの二つの側面の強い相互作用に支配されていると結論付けていいように思える。その図式をやや理想化された形で示すと次のようになる。

ある時点において、アリの個体群の規模と「環境容量」が一致するなら、個体数変動は起きない。逆に一致しない場合、個体群は「調整局面」に入る。だが、自然選択が絶えず働く状況においては、この調整はなかなか達成されない。「進化局面」では、ある時点における個体群の内部構成は次の時点における個体群のそれとは異なる。それに伴い、達成すべき「環境容量」は不断に変化する。仮に、運よく個体数と「環境容量」が一致を見ても、「自然死」など「環境容量」からの逸脱を促す要因が存在すれば、自然選択を免れるすべはない。こうして、アリの個体群は、不断の調整を繰り返しながら、「進化局面」の指し示す方向に引きずられていく。その行き着く先は、極限にまで適応力を高めたアリが、空間を完全に満たすという状態である。ここに至って、「進化局面」は前進を止める。それに伴い、「調整局面」が本来の機能を取り戻し、個体群の規模はようやく安定的な均衡状態に達することになる。

最後に、これまで用いてきた「シュガーモデル」の拡張の可能性と利用の方向性について、若干の指摘をつけ加えておこう。

生物個体の属性と個体群の規模の動態との間に関する以上の考察は、網羅的というには程遠い。視野の拡大とさらなるルールの追加を通じて、本稿が取り上げたテーマをより一層広く深く考察していくことが可能である。視野の拡大としては、これまでほとんど関心が払われてこなかった、アリの「財産」分布や、シュガースケープの形状、砂糖の「再生度」といった諸要因に対する考察が挙げられる。これらに目を向けることは、先ほど述べた「環境容量」に十分な説明を与えるためにも必要である。一方、ルールについては、「無性生殖」にかえて、「有性生殖」のルールを導入するというのがひとつの方向である。アリの属性遺伝に関するルールをさらに精緻化することもできる。

ただ、「シュガーモデル」そのものは、ここで扱ってきたテーマに限定されないような高い自由度を持っている。たとえば、新たな変数とルールを若干追加するだけで、遺伝的属性のみならず文化的な属性をも持ったアリたちによる、ダイナミックな文化交流や文化変容の過程をシュガースケープ上で容易に実現させることができる。戦争や交易といったアリ同士のより直接的でより社会的な相互作用についても同様のことが言える。本稿で検討してきた生物個体群の規模の変動は、解釈をさほど織り込まずに「シュガーモデル」の基本的設定を比較的素直に拡張すれば実現できるものであった。だがモデルそのものは、社会科学的な関心にもっと引き寄せて利用することが可能である。