

## 1 はじめに

本稿では、まず、遺伝子をもつ個体から成る生態系の計算的数理的モデルを提示する。この生態系のモデルは、カウフマンが定式化したものである。一方、われわれが目じりたいのは、企業の生態系である。諸企業は、市場においてさまざまな活動を行ない、競争であれ、協調であれ、互いの行動が互いの利益に影響を与えるという意味で、相互作用を行なっている。本稿では、企業を要素とし、それらが市場において相互作用を行なっているシステムを企業生態系と呼ぶことにする。そして、企業生態系のなかでの標準アーキテクチャーの意味や特性を、カウフマンの生態系モデルの視点から探してみたい。これが本稿の目的である。

つぎの第2節から第4節までは、遺伝子をもつ個体から成る生態系の計算的数理的モデルを提示し、若干のシステム特性を抽出する。

第2節では、遺伝子の進化をコンピュータで模擬する方法として、遺伝アルゴリズムについて解説する。また分類子システムの例として、お掃除ロボット集団の環境適応行動を取り上げる。

第3節では、進化ゲームにおける進化的安定状態について考察する。対象は基本的なタカハトゲームである。ある戦略をとるグループと、別の戦略をとるグループの人口分布が、時間の経過にともなって均衡に近付いてゆくことを、数理的にモデル化する。

第4節では、生態系のなかで、さまざまな種が相互依存しながら、しかも絶滅の危機に瀕しながらもがいているようすをシミュレートする。自己組織化臨界現象という概念である。

最後の第5節は議論である。これまでに定義した概念を使って、カウフマンの生態系モデルの適用限界について考察する。また、標準アーキテクチャーの意味を考察する。

## 2 遺伝系

ここでは生物の進化、といっても人間以外の動物や植物、とくに昆虫レベルの生物を対象に議論を進める。

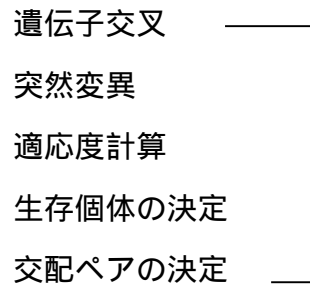
### (1) 進化

ダーウィンの進化論では、種の進化を「突然変異と適者生存（自然選択）」というキーワードで説明している。環境が常に変化しているひとつの生物種の集団を考える。環境変化のため、その生物集団は常に生存の危機に遭遇している。しかし、生物集団には、まれに突然変異をもつ個体が生まれることがある。その個体が、たまたま他の個体よりもより良く環境に適しているならば、より多くの子孫を残すであろう。また環境に適応できない個体は死滅してゆくであろう。したがって、突然変異した環境適応度の高い個体の子孫が繁栄し、その生物種全体に占める割合を高くしてゆくだろう。これがダーウィンによる種の進化の説明方法である。

その後、優勢遺伝の法則や DNA の 2 重らせん構造の発見にともない、われわれが知っている生物学の教科書で習うような、「遺伝子の概念を中心とした近代的な説明方法」に改められた。ネオダーウィニズムである。遺伝子の突然変異だけでなく、「遺伝子交叉（交配）」によって両親の遺伝子が混合されることによる変化をも取り込むのである。

## (2) 遺伝アルゴリズム

遺伝アルゴリズム (GA : Genetic Algorithm) は、コンピュータシミュレーションの中に、上記の3つの概念：遺伝子交叉、突然変異、適者生存を実現しようというものである。具体的には、つぎのようなアルゴリズムとなっている。



**図表 1 遺伝アルゴリズム**

複数の個体から成る集団を考えよう。各個体の遺伝子は、コンピュータの中では記号列（数値を含む）で表現する。たとえば、2つの個体 X と Y の遺伝子を、それぞれ、

$$X = x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 \qquad Y = y_1 y_2 y_3 y_4 y_5$$

などと表すのである。もしもこれらの個体が交配するならば、子供 Z の遺伝子は、たとえば、

$$Z = x_1 x_2 x_3 y_4 y_5$$

となる。どこかで切れて、他方と結合するのである。これを遺伝子交叉という。まれに、突然変異が起こる時は、

$$Z = x_1 x_2 z_3 y_4 y_5$$

などとなる。

プログラム作成の観点からは、いくつかの約束がある。まず、遺伝子は、直列の記号列だけでなく、tree 構造にするなど、いくらでも複雑に定義することが可能である。また、交叉の場所（切断点）は、モデル作成者が、あらかじめ決めておく。固定しても良いし、ランダムになるようにプログラムすることができる（random 関数を使う）。突然変異の場所や時期、それに何に変異するのかは、もちろんランダムでなくてはならない。

さて、こうして生まれた次世代の子供たちは、自分たちが置かれている環境の中で生きてゆく。あるものはうまく生きてゆき、別のものは環境不適應のため、弱ってゆく。

しかしここでは「生活すること」をシミュレーションすることはせず、環境適応度というものを考えてみる。

適応度とは、環境にどれくらい適応しているかを表す指標であり、数値で表現する。Z の適応度は  $f(Z)=0.8$ 、Z' の適応度は  $f(Z')=0.7$  といった具合に数値を割り当てる。ただし、関数  $f$  はすべての個体に適用するもので、すくなくとも同世代の中では一定のものを用いる。

子供の適応度が両親のものよりも低くなることもあるし、高くなることもある。たくさんの子供たちのなかで、適応度の高いものは生存確率も高く、繁殖力も高いだろう。したがって、適応度が高いものの中で交配させるようにペアを組む。適応度が低く、ペアにもれたものは死滅したものとみなされる。こうして新たな両親たちが、再び上の手順にしたがって、孫を生んでゆく。このような繰り返しが遺伝アルゴリズムである。

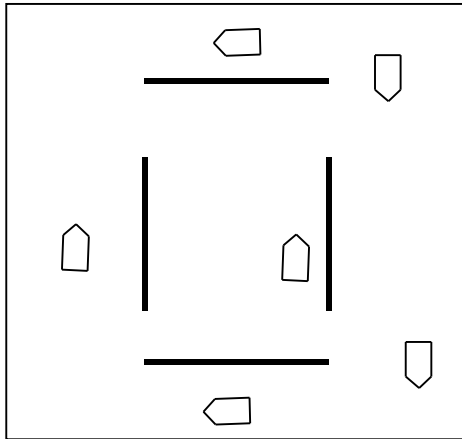
### (3) 遺伝系の挙動

環境変化がある場合（関数  $f$  が変化した場合）、遺伝アルゴリズムを繰り返してゆくと、環境変化前の集団に広く分布していた遺伝子と、環境変化後の集団に広く分布する遺伝子は異なるのは当然である。一方、環境変化のない場合（関数  $f$  が一定の場合）では、世代が交代してゆくにつれて、もちろん適応度の高い遺伝子が集団に広がってゆく。

この「環境が一定のとき、その値を高くする遺伝子が増えてゆく」という傾向を利用すると、工学的な応用として、最適解計算が考えられる。上記の例では、与えられた5変数関数  $f(X)$  の最大値を達成する  $X$  を求めよ、という問題に相当する。適当な数値を何個か用意し、それら数値を遺伝子群とみなす。この遺伝子群に遺伝アルゴリズムを適用し、数万世代を経て生き残った数値（遺伝子）を見るのである。数学的にいえば、このやり方で生き残った数値は必ずしも最適解とはいえないが、なんらかの手がかりが得られる。

## (4) 分類子システム

遺伝アルゴリズムとほとんど同じやり方を利用した、集団の学習について考えてみよう。畝見(1997)は「お掃除ロボット」の集団を考えた。



図表 2 学習するお掃除ロボット集団 [ 出典：畝見 (1997) ]

いま、つい立てで仕切られた大きな部屋を考える（図表 2）。そこには複数個の掃除機（お掃除ロボット）が自立走行しているものとする。各掃除機は触覚センサーをもち、壁やつい立て、および他の掃除機にぶつからないように、内部に制御ルール群をもっている。例えば、センサーが左と前に障害物を検知したら右にまがって前進する、などという if-then ルールをもっている。

If (front-sensor is on) and (left-sensor is on) then (turn right) and (go forward).

複数の if-then ルールが集まったものが制御ルール群である。このような制御ルール群をもつ個体の集団を分類子システム(classifier system)と呼んでいる。

この部屋には、ランダムな時刻、ランダムな場所にゴミが散らかるように設定されており、各掃除機は、自立走行しながらゴミを集め続け、吸引したゴミの量が多いほどポイントを獲得することになる。

さて、1 週間が経過し、各掃除機のポイントを比較する。そして、最も高いポイントを獲得した掃除機の行動パターンを近隣の掃除機が真似するのである。「掃除機 B が掃除機 A の行動を真似する」とは、1) 無線通信によって掃除機同士が情報交換し、2) 掃除機 A の制御ルール群を、掃除機 B にコピーすることで達成する。このようにして、時間が経過するにつれて、効率的な制御ルール群がロボット集団のなかに広まってゆく

のである。

この場合、制御ルールは記号列なのでコンピュータの中では遺伝子であると考えることができる。また遺伝子をコピーすることは、子供を増やすことに相当するものであり、言い換えれば、非効率的な遺伝子が消滅していく過程でもある。ただし、ここでは、ロボットの数は変化せず一定であり、エネルギーもつねに補充されているものとしている。また、雌雄の別がない（単性生殖な）ので、交配（遺伝子交叉）は行わない。しかし、コピーした制御ルール群に手を加えて突然変異させることは可能である。

#### (5) 分類子システムの挙動

最初は各ロボットに標準的な制御ルール群を与えておく。しかし、何週間にも渡ってシミュレーションを行うと、やがてロボットたちは「この部屋の構造に適した」効率的な行動パターンをとるようになる。図表2の場合には、マス目ごとに住み分けし、渦状に走り回ることによって、効率的にゴミを集めるようになる。この状況は、「情報共有にもとづく集団の学習」をあらわしているものと考えられる。

また、ここには相互作用の概念がある。たとえばロボット同士が接触することを防ぐことが必要であるし、別のロボットの後をついてまわっているだけではゴミを吸引できない（ポイントを獲得できない）。そうした疎外要因を避けるような制御ルール群が生き残ってゆくのである。ここでは、相手の行動が自分の利得に影響を与え、自分の行動が相手の利得に影響を与えている状況のなかで、集団の学習がおこなわれていると考えられる。

### 3 進化的安定性

生物には、見て分かるような形態の違いや、行動様式の違いをもっている。たとえば、鳥には翼の形や羽の色といった形態の違いがあり、動物には肉食であるか草食であるかといった行動様式の違いがある。このような生物学上の特徴を表現型という。進化ゲームでは、この表現型のことを「戦略」と呼んでいる。

進化ゲームは、ある限られた範囲で相互作用を行なっている、複数の戦略のどれかをもつ多数の個体から成る生物集団を分析対象とする。そこでは、各個体が共通のエサを求めて競争したり協力したりしている。時間が経過するにつれて、ある戦略が繁栄し、別の戦略が衰退していく。言い換えると、ある戦略をとる集団の栄枯盛衰を問題としている。そして、最終的にはどの戦略がどれくらいの割合で生き残るのかを問題とする。

#### (1) 人口分布の均衡

ここでは、いわゆる多型集団を考える。多型集団とは、各個体があるひとつの戦略をとるならば、死ぬまでその戦略をとりつづけることを意味する。ゲーム理論の言葉では、純粋戦略のみをとることができる場合に相当する。したがって、全体集団は複数の「純粋戦略をとる集団」から成ることになる。しかしながら、各個体の子孫は、突然変異により別の純粋戦略をとることがありえるものとする。その結果、世代の交代にしたがって、純粋戦略の人口分布は変化してゆくことになる。多型集団の分析では、純粋戦略の人口分布の変化を調べるのが主要な目的となる。

いま、生物集団がある人口分布Aをとっているときに、わずかな個体数の突然変異が起これば、人口分布Bになったと仮定する。それでも時間の経過にしたがって（自然選択によって）、最後には、もとの人口分布Aに戻ってしまう。そのような人口分布Aを「進化的に安定な状態」(Evolutionary Stable State : ESS)という。

#### (2) 個体間の相互作用

タカ・ハトゲーム [J.M.Smith (1982)] を定式化しながら、個体間の相互作用について述べる。ある集団を考え、そこには無限個数の個体がいるものとする。また各個体は、エサを求めて戦う時の性格として、次の2つの純粋戦略のうち、どちらかを生まれつき

もっているものとする。

「タカ戦略H」：自分が傷つくか相手が逃げ出すまで戦いを挑み続ける。

「ハト戦略D」：まず威嚇する。相手が戦いを挑めば、ただちに逃げ出す。

このとき、任意の2つの個体が出会って、エサを求めて戦ったら、どのような結果になるだろうか。図表7は、そのような戦いのあとの、適応度の増減を表わす行列である。

	H	D
H	$(V-C)/2$	V
D	0	$V/2$

図表 3 タカハトゲームの利得行列 [ J.M.Smith (1982) ]

縦軸に個体1の戦略{H,D}、横軸に個体2の戦略{H,D}が並んでおり、表の中は、個体1の利得の増加分を表わしている。表中の記号は、Vがエサを獲得したときの利得の増加分、Cは傷を受けたときの利得の減少分を表わしている。たとえば、タカ戦略Hをとる個体1が、同じくタカ戦略Hをとる個体2と出会ったとき、確率1/2でエサを獲得し、確率1/2で負傷するので、期待利得は $(V-C)/2$ である。また、ハト戦略D同士の個体が出会ったときは、仲良くエサを分け合うので、利得は $V/2$ だけ増加するのである。

このような利得の増減は、個体1だけでなく個体2もまったく同様であり、対称的に考えることができる。したがって、これを対称ゲームという。一般的には、非対称ゲームを考えることができるが、ここでは単純に対称性を仮定する。また、以下では、この表を2変数関数 $u(i,j)$ で表示する。たとえば、 $u(H,H) = (V-C)/2$ 、 $u(D,D) = V/2$ である。

個体間の相互作用は、なにも「戦い」に限ったわけではない。進化経済学への応用では、2人の人間が企業を起こして、利潤を獲得する状況を考えることもある。その場合、相互作用は「協力して企業を起こすこと」であり、適応度は「企業の利潤」とみなしていることになる。このように、

- 1) 各個体は、なんらかの意味の適応度をもち、
- 2) 相互作用によって、適応度が増減する。

という設定をすることが、進化ゲームにおける基本である。

さて、無限要素をもつ集団のなかで、各個体はランダムに相互作用を行なうものとする。これを「ランダムマッチング」という。では、そのような状況で、各個体の適応度



は、どのように計算することができるだろうか。

### (3) 個体の適応度と人口変化のダイナミクス

多型集団の分析の焦点は人口分布にある。そこで、現在時点で、タカ戦略をとる人口の割合が  $p_1$  で、ハト戦略の割合が  $p_2$  であるとしよう ( $p_1 + p_2 = 1$ )。その集団のなかでランダムマッチングがおこなわれると、各戦略をとる個体の適応度は、利得行列 (図表 6) を計算して、つぎのように増加する。

$$u(H,p) = c + p_1 * u(H,H) + p_2 * u(H,D)$$

$$u(D,p) = c + p_1 * u(D,H) + p_2 * u(D,D)$$

ただし、記号 \* は積の演算である。また、相互作用以前の時点での (生まれながらの) 適応度が定数  $c$  で、すべての個体に共通であるとする。

さて、直観的には適応度の高いものが生き残り、その子孫を増やすことができると考えられる。そこで、ここでは「各個体は、適応度に比例して子孫を残すことができる」と仮定する。

総人口を  $N$  とすると、適応度  $u(H)$  をもつ個体の数は  $N * p_1$  である。したがって、

タカ戦略の部分集団は、全体として  $N * p_1 * u(H)$  の適応度をもち、

ハト戦略の部分集団は、全体として  $N * p_2 * u(D)$  の適応度をもち、

そこで、次の世代 (子孫) の人口分布 (割合) に注目すると、戦略  $H$  をもつ子孫の割合  $p_1'$  と戦略  $D$  をもつ子孫の割合  $p_2'$  の比は、 $N * p_1 * u(H)$  対  $N * p_2 * u(D)$  のはずである。よって、 $u = p_1 * u(H) + p_2 * u(D)$  として、

$$p_1' = p_1 * u(H) / u$$

$$p_2' = p_2 * u(D) / u$$

となる。人口分布  $p = (p_1, p_2)$  が、次の世代には  $p' = (p_1', p_2')$  に変化することになる。これを「離散時間軸のダイナミクス」と呼ぶ。離散時間軸というのは、集団が 1 年毎のある時期に、一斉に子供を生むことに相当する。

## (4) タカハトゲームの進化的安定状態

さて、各ダイナミクスでの「定常状態」とは、時間に関して変化しない状態（人口分布）のことである。具体的には  $p' = p$  となる人口分布のことである。タカハトゲームの場合は、

$$p_1^*(u(H) - u) = 0 \text{ かつ } p_2^*(u(D) - u) = 0$$

を解けばよい。  $p_1 + p_2 = 1$  なので、  $p_1 = p_2 = 0$  はありえず、可能性としては3種類ある。

- 1)  $p_1 = 1, u(H) = u$
- 2)  $p_2 = 1, u(D) = u$
- 3)  $u(H) = u, u(D) = u$

しかしながら、3つの定常状態のすべてが「漸近安定」であるとはいえない。漸近安定とは、直観的に言えば、しだいにその点に近づくという概念である。一般に、定常であっても漸近安定とは限らないので、安定分析をする必要がある。タカハトゲームの場合は、変数の数が少ないので手計算で求解することができる。しかし多くの場合は、上記ダイナミクスをプログラミングし、コンピュータシミュレーションをおこなって漸近安定な状態を求めることになる。

進化ゲームでは、多型集団の分析において、上記ダイナミクスのもとで漸近安定な状態のことを「進化的安定状態」と定義している。漸近安定な状態を進化的安定状態と呼ぶのには理由がある。進化的安定状態の付近では、といっても限られた範囲のなかの、いづれの状態から出発しても、時間の経過にともなってその安定状態に変動してゆく。これは「わずかな人口分布の変化が起こっても、もとの分布に近づく」ということである。つまり、個体数の突然変異に対して、頑健性をもっているということを意味している。

タカハトゲームについては、対戦によるコストがエサの価値よりも高い場合（たとえば、  $V=2, C=4$  の場合）には、タカとハトの人口分布が半々のときに、進化的安定状態となる。なぜならば、ハトが多すぎる状態では、タカがハトを押し退けて容易にエサにありつけるので、タカが急速に人口を増やすであろう。しかし、タカが多すぎる状態では、タカ同士が互いに傷つけあうので、タカの人口は減少する。このようにしてバランスが保たれるのである。

## 4 生態系

社会や生態系では、異種の生物が互いに相互作用を及ぼしながら生活している。ここではエサと捕食者の関係について考察する。このエサと捕食者の関係は、前述した進化ゲームのように各個体が点在する共通のエサを求めて戦うのではなく、ある個体自身が他の個体のエサになってしまう点で異なっている。

### (1) エサと捕食者のモデル

アドリア海では、複数の種類の魚の捕獲量が周期的に変動する。小さな魚は大きな魚に食べられる。小さな魚は大きな魚の「エサ

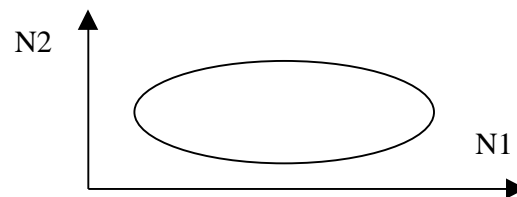
```
(prey)
```

」である。大きな魚は「捕食者

```
(predator)
```

」である。エサが少なくなれば捕食者の数も少なくなる。逆にエサが豊富になれば捕食者の数も増える。そのため周期性があらわれるのである。ロトカ ボルテラ方程式 (Lotka – Volterra equation) は、その周期性を説明するためのモデルであった。

$$\begin{aligned}\frac{dN_1}{dt} &= aN_1 - bN_1N_2 \\ \frac{dN_2}{dt} &= -cN_2 + dN_1N_2\end{aligned}$$



図表 4 エサと捕食者の関係 [Luenberger (1979)]

エサの個体数を  $N_1$ 、捕食者の個体数を  $N_2$  とする。エサの数  $N_1$  は、捕食者がいなければ、成長率  $a$  で指数的に成長し、同様に、捕食者の数  $N_2$  はエサがなければ係数  $c$  の割合で指数的に減少すると仮定する。またこのモデルは、両方の魚が存在する時、エサと捕食者が遭遇する頻度が両方の個体数の積に比例することを前提としている。両者が遭遇することにより、エサは減少し ( $-bN_1N_2$ )、捕食者は増加する ( $+dN_1N_2$ )。この微分方程式の解は  $N_1 = c/d$ 、 $N_2 = a/b$  のまわりで周期的な運動をすることが知られている。解法は省略するが、この微分方程式のリアプノフ関数を求めることができ、リアプノフの意味で安定である (周期解をもつ) ことを示すことができる。

## (2) 共進化

しかしながら、ロトカ ボルテラ方程式には短期的な視点だけがあり、進化という長期的な視点が抜けている。長期的な視点から見ると、小さな魚も進化するし、大きな魚も進化するはずである。エサとならずに生き延びた小さな魚は、それなりの逃避行動パターンを持っているだろうし、その子孫がその効果的な行動パターンを継承してゆくだろう。同様に、エサを捕獲する効果的な行動パターンをもった大きな魚だけが生き延びてゆくだろう。場合によっては捕食のパターンが変化するかも知れない。いま食べている小さな魚が捕れなくなると、別の魚を捕獲することになるかも知れないのである。このように、異なる種間の相互関係も、両方の種の進化を伴いながら変化してゆく。これを共進化と呼ぶ。

共進化は捕食関係だけでなく、相利共生をも含んでいる。花は昆虫とともに進化してきた。昆虫は花を受粉させ、花は昆虫に蜜を与える。昆虫は、花の蜜を効果的に得るためにくちばしの形を変えたり、特殊なおいに敏感になるように進化する。一方、花の方は、特定の昆虫に見つかりやすいように花びらの色や形を変化させてきたのである。

## (3) 共進化のモデル

カウフマンは、共進化のモデルを考案した [ Kauffman (1995) ]

G01	G02	G03	G04	G05
G06	G07	G08	G09	G10
G11	G12	G13	G14	G15
G16	G17	G18	G19	G20
G21	G22	G23	G24	G25

$$G_{05} = a_1 a_2 \dots a_N$$

$$G_{04} = b_1 b_2 \dots b_N$$

$$G_{10} = c_1 c_2 \dots c_N$$

$$F_{05} = f(G_{05}, G_{04}, G_{10})$$

図表 5 共進化のモデル

ある場所に 25 種類の種が生息しており、それぞれの種は近接する種と相互作用をしているものとする。この生態系のなかの、どの種がどの種と相互作用しているのかが上の 5 行 5 列の表に示されている。たとえば 18 番の種は 13 番と 17 番、19 番、23 番と相互作用している。結合数は、 $S = 4$  である。しかし 4 角に位置する種（たとえば 05 番）の結合数は  $S = 2$  である。説明のために、05 番の種は蛙、04 番の種はハエ、10

番の種は魚であるとする。ハエは蛙に食べられ、蛙の卵は池のなかの魚に食べられるのである。

それぞれの種のゲノム (genome: 遺伝子複合体、染色体) は  $N$  個の遺伝子から構成されているものとする。蛙のゲノムは、 $G_0 = a_1 a_2 \dots a_N$  である。この蛙の適応度を次のように定義する。ひとつひとつの遺伝子  $a_i$  は、0 と 1 のどれかの状態値を持つものとし、その適応度は、その遺伝子自身の状態と他の  $K$  個の遺伝子の影響を受け、それらの値の組み合わせで決まるものとする。さらに、蛙のゲノム全体の適応度  $F_0$  は、自身の  $N$  個の遺伝子適応度と、近接する  $S$  個 ( $S = 2$ ) の種のなかの  $C$  個ずつの遺伝子の影響を受けるものとする。蛙の場合、自分の  $N$  個の遺伝子と、ハエの  $C$  個の遺伝子  $b_i$  と魚の  $C$  個の遺伝子  $c_i$  の状態値が影響している。各「種」の適応度は、別の種の遺伝子の影響を受ける。これが適応度  $F_0$  の意味である。適応度  $F_j$  は、0 以上 1 以下の数値で与える。

実験は、近接種の配置は  $5 \times 5$  で固定されているものとし (これにより種の結合数  $S$  が定まる) 次のように行なう。まず準備として、遺伝子数  $N$ 、ゲノム内の影響数  $K$ 、近接種からの影響数  $C$  を任意に定める。また、適応度関数  $F_j$  を適当に定める。次に世代交代のシミュレーションを開始する。各世代ごとに、すべての種のゲノムのなかの、ランダムに選ばれたひとつの遺伝子を突然変異させる (0 と 1 を入れ替える)。もしもその突然変異が適応度  $F_j$  を高めるならばそれを次の世代のゲノムとして採用する。そうでないならば、もとのままのゲノムが次世代のゲノムとする。つまり各世代で、すべての種は一度だけ最適化のステップを踏む機会が与えられるのである。

しかし、適応度  $F_j$  の上の定義から分かるように、適応度が向上するかどうかは、同じ位置の遺伝子の変化であっても、別の種の遺伝子の変化に影響を受けることに注意する。たとえば蛙の舌の粘着力が強くなっても、ハエがより敏捷になれば、必ずしも蛙の適応度の向上に繋がらない。ここでは種の間での相互作用が考慮されているのである。

#### (4) 生態系の平均適応度

遺伝子数  $N$ 、ゲノム内の遺伝子結合数  $K$ 、近接種からの影響数  $C$  を任意に定め、固定する。そして世代交代のシミュレーションを進めてゆくと、次のような傾向が観測される。

遺伝子結合数  $K$  が大きく、近接種からの影響数  $C$  が小さい場合、この生態系は、進化的安定状態 (ESS) の秩序のある領域に落ち着く。種の間での相互作用が弱いので、各

「種」がほぼ独立に最適化を目指すことができるのである。

逆に、遺伝子結合数  $K$  が小さく、近接種からの影響数  $C$  が大きく、また種の結合数  $S$  が大きい場合、この生態系はカオス状態になる。基本的には、各「種」は適応度の向上を目指しているのだが、種間の相互作用が強いので、その頂上自体が動くことになり、いつまでたっても最適な状態にたどり着けないのである。

すべての種の適応度を平均してみると、上の2つの場合の生態系平均適応度はともに低いことが分かる。したがって、これらの中間の場合に、生態系平均適応度が高いことが分かる。

カウフマンは、さらに柔軟な生態系を準備した。ゲノム内遺伝子結合数  $K$  が変化する生態系である。その他の変数  $N$ 、 $C$ 、 $S$  は一定であるとする。これは各個体が自分のもっている（遺伝子に規定された）能力を自由に「組み合わせる」環境適応することが可能であることを意味する。

シミュレーションを実行すると、この生態系はどのような  $K$  から出発しても、時間が経過すれば、 $K$  の値は自発的に 15 から 25 の間の中間的な値に収束し、そこでの生態系平均適応度は最大となることが分かった。しかも、この生態系は自己組織化臨界現象を呈していたのである。

#### (5) 自己組織化臨界現象

いま丸いテーブルに小さな砂粒を一つひとつ落としてゆく実験を考えよう。はじめテーブル上には何もなく、落とした砂粒が散らばってゆくだけである。やがて砂山ができあがり、時間がたてば、テーブルの端からこぼれ落ちてゆく。その段階になると、底面はテーブルと同じで、頂点はテーブルの中央、ある程度の高さの砂山ができあがる。

注目するのはここからである。さらに砂粒を落としてゆくと、どうなるであろうか。観察されるのは砂山表面の崩壊現象である。あるときは小さくて短いなだれが発生し、またあるときは大きくて長いなだれが発生する。大きすぎると、なだれはテーブルの端に達して、こぼれ落ちてしまう。しかし、「山の高さ、大きさは、ほとんど一定である」。常に一部の崩壊を伴いながら、一定の構造を保ち続けること、これが自己組織化臨界現象である。

ここには一定の法則があり、「ベキ乗則」と呼ばれる。小さな崩壊は多数発生し、大きな崩壊は少数回しか起こらない。したがって横軸に崩壊の規模をとり、縦軸に発生回

数をとると、右下がりのグラフができあがる。正確には、規模の対数に比例して発生回数が少なくなる。

カウフマンの「柔軟な生態系」でも同様の現象が見られた。ある「種」の絶滅は、別の種の絶滅を引き起こす。たとえばエサとなる種が絶滅すると、それを補食する種が絶滅する。絶滅の連鎖反応である。この連鎖反応が砂山表面のなだれに相当する。絶滅の小さな連鎖反応は多数発生するが、大きな連鎖反応はまれにしか起こらない。確かに規模と発生回数には「ベキ乗則」が観測された。ある程度の時間が経過すると、前述したように生態系全体の平均適応度は最大化する。しかし、常に一部の種の絶滅の連鎖反応を伴っているのである。多様な生物が共進化しながら、そして一部には絶滅の危機を迎えながら、適応度を向上させつつ生き長らえてゆく、そのような世界をシミュレーションで表現していると考えることができる。

## 5．標準アーキテクチャーの意味

前節までに、遺伝子をもつ個体からなる生態系のシミュレーションを通して、さまざまなシステム特性を定義してきた。それらの概念を活用しながら、ここでは標準アーキテクチャーの意味を考察してゆく。

### (1) 標準をみる視点

標準には、少なくとも2つの視点があると思われる。ひとつは、選択肢としての標準であり、もうひとつは構造概念としての標準である。ある製品が、ある市場のなかで標準であるとは、その製品がその市場のなかで広く受け入れられていることであり、その製品の市場占有率が非常に高いことを意味する。これは、複数の製品の選択肢のなかから、多くの消費者がその製品を購入するからである。パソコンのオペレーティングシステム（OS：Operating System）の例として、Windows OS が広く使用されているならば、Windows OS は、パソコンを操作する道具（消費者の選択肢）として標準である。

進化ゲーム（第3章）は、これに対してのモデルとなりえるかも知れない。つまり、複数の戦略という選択肢のなかから、どれが生き残ってゆくのかという視点から、進化ゲームを定義して、最終的な進化的安定状態（選択肢の数量的分布）を求解するのである。しかしながら、これに関しては、相互作用をどのように考えるべきかの考察が残されている。本稿では、これに関しては扱わない。

一方、構造概念の標準とは、ある業界で支配的なオープン・アーキテクチャーのことである。ある構造（アーキテクチャー）が、ある業界で標準であるとは、その業界に属する多くの主体（企業）が、その構造の、ある部分機能に注目し、その部分機能を実現すべく努力している状態をさしている。たとえば、OS の Windows 98 は、「PC98 規格」のパソコン上で効率的に動くようにできている。PC98 規格は、Microsoft 社が 1997 年に提唱したパソコンの（ソフトウェア、ハードウェア）規格であり、パソコンの部分機能の規定およびソフトやハードの連携のしかたに関する規定から成るものである。PC 業界の各社は、この規格にしたがって、その部分に対応する自社の製品を設計することになる。

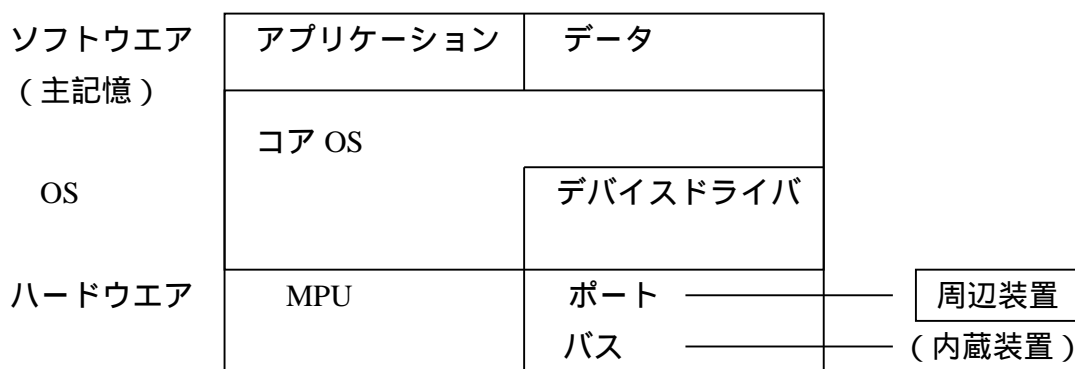
PC98 規格は、パソコン業界の企業にとって周知の概念であるという意味で、オープンなものである。また新しい企業が、いつでもどの部分機能に対しても新規参入・退出



することができるという意味でもオープンである。これをオープンアーキテクチャーという。以下では、選択肢としての標準ではなく、オープンアーキテクチャーの標準について考察する。

## (2) パソコンのアーキテクチャー

PC98 規格は、Windows パソコンの構造（アーキテクチャー）である。つぎの図は、アーキテクチャーの一部、部分機能の関連図である。



図表 6 パソコンの部分機能

通常、アプリケーションソフトウェアやデータは、内蔵 HDD（ハードディスクドライブ）や周辺機器としての外付け HDD に蓄積されている。ハードウェアに電源を入れ、OS が起動し、あるアプリケーションが起動すると、それは主記憶装置に取り込まれる（ロードされる）。たとえば、ワープロソフトを起動すると、それは主記憶装置にロードされる。

さらに文書を作成したとする。印刷するときには、印刷ボタンをクリックするのである。そのとき、OS を通じて、プリンタドライバという小さなソフトウェアが動き出す。文書データは、プリンタドライバにより、プリンタポート（最近では、USB ポートという多機能なポートがある）を通して、プリンタという周辺装置に送りだされる。データがいきなりプリンタに送信されないのは、プリンタメーカーの違いによるデータ処理の相違をデバイスドライバで吸収するためである。一般に、プリンタドライバのような、OS に組込まれる中間的な（ハードとソフトをのり付けするような）機能をもつ小さなソフトウェアを総称して、デバイスドライバという。

新しい周辺機器を購入したら、それに対応するデバイスドライバを OS に組込まなければならない。デバイスドライバは、周辺機器に付属してやってくる。周辺機器を作成する企業が、デバイスドライバを作成することになっているからである。この慣習あるいは規則は、消費者にとって覚えやすく、またメーカーにとっても分かりやすい。

ところが、PC98 規格というアーキテクチャが策定される以前は、そんなことはなかった。PC98 規格以前には、一太郎というワープロソフトを作っているジャストシステム社は、自社でプリンタドライバを作成していたのである。ワープロの会社が、つぎからつぎへと発売される新しいプリンタについて研究し、新しいプリンタドライバを作成しなければならなかった。ところが、PC98 規格のおかげで、そこまでする必要がなくなり、OS に印刷するように指示するだけで良くなったのである。PC98 規格のおかげで、ソフトウェアやハードウェアの明確な「分業生産体制」が出現した。その結果、パソコン業界は急速に発展期を迎えることになったのである。図表 6 は、その分業生産の構造であるとも考えることができる。

### (3) 標準アーキテクチャーの意味

先に述べたように、あるアーキテクチャーが、ある業界で標準であるとは、その業界に属する多くの主体（企業）が、その構造の、ある部分機能に注目し、その部分機能を実現すべく努力している状態をさしている。実は、この状態は、第 4 章で述べたカウフマン生態系の自己組織化臨界状態になっていることに相当すると考えられる。ここでは、つぎの点に注目すべきであろう。

まず第 1 に、パソコン業界の現在の状態は固定されたものではなく、ダイナミックな変化をしているということである。つねに諸部分機能が進化しているのである。例をあげれば、プリンタは、レーザープリンタやインクジェットプリンタなど、複数のメカニズムが発明されている。また、PC98 規格そのものも、時代に合わせて変化している。コア OS が提供する Win98 API（OS がアプリケーションに対して提供するソフトウェア連携の規格）も、つぎつぎとバージョンアップしている。これは、カウフマン生態系の各「種」の進化に対応している。

第 2 に、現実には部分機能がなくなってゆく傾向も発生している。たとえば、10 年前はパソコンを購入すると、2HD 規格のフロッピーディスクドライブが内蔵してあったが、今では CD-ROM ドライブが内蔵してある。そのため、多くの企業は内蔵フロッピーディスクドライブを作らなくなり、ごく少数の企業だけが作っている。カウフマン

生態系の視点から見れば、あるひとつの「種」の絶滅が引き金となり、それに関連する「種」の絶滅が連鎖反応としてあらわれることを意味する。

第3に、標準アーキテクチャーがあるということ、そのこと自体の意味である。アーキテクチャーは、部分を規定し、連携方式を規定するものである。これは、生態系の要素たる主体と他の主体との結合のしかた、相互作用のしかたを表現している。これは、カウフマン生態系モデルでの図表5に相当するものと考えることができる。つまりどの「種」がどの「種」に、どのように影響を与えているかを規定している。言い換えれば、標準アーキテクチャーは、カウフマン生態系モデルにおける「種間結合構造」そのものである、といえよう。パソコンに関していえば、図表6が種間結合構造に相当する。

第4に、歴史依存性がある。つまり現在の状態は、過去の経緯に依存して決まるという側面である。確かにカウフマン生態系モデルは歴史依存性である。複数の種が相互に依存しているシステムでは、そこに存在する種は、やはり存在する他の種に影響を受けて適応度が決まる。しかも、そのときそこに、その種が存在するには、数々の絶滅の危機を乗り越えてきたという歴史が必要である。

#### (4) カウフマン生態系モデルの限界

以上のように、カウフマン生態系の自己組織化臨界状態と企業生態系(パソコン業界)の現在の状態の一致点を見出すことは可能である。しかしながら相違点もある。以下では、カウフマン生態系モデルの適用限界について考察する。

まず文化的側面から考察する。カウフマン生態系と企業生態系の相違点の第1のものは、遺伝子の問題である。カウフマン生態系では、種を定義するのに遺伝子列を利用している。しかし果たして、企業に遺伝子が存在するのだろうか。これは、企業の行動原理だけでなく、保有する技術や、そこで働く人々の特性をも含む全体、すなわち組織や文化をシンボル表記することができるかという問題に帰着する。対象をある局面に限定すれば可能であろうが、いわゆる組織は非常に柔軟である。

第2の相違点は、認識の問題である。フロッピーディスクがCDに、あるいはCDがDVDに駆逐されるように、たしかに種の絶滅の連鎖反応はある。しかし、そこには環境認識にもとづく企業の判断がまずあって、それから行動がある。変化にうまく対応できた企業は衰退をまぬがれ、存在し続けることができる。これは意思決定の問題に帰着する。そうした認識に関する議論がカウフマンのモデルには抜け落ちているのである。個体の環境認識と意思決定のプロセスは、カウフマンのモデルにはない。

第3の相違点として、アーキテクチャーそのものの変化がある。言い換えれば、アーキテクチャー自身も絶滅する可能性があるということである。たとえば、「これからは、パソコンの時代ではなく、ネットワーク活用の時代である。」というのは、さまざまな企業経営者が口にする言葉である。それは、インターネットや携帯装置（携帯情報端末、携帯電話、ネット家電）の発達により、パソコンが売れなくなるだろうという予感をあらわしているのであろう。それは、カウフマン生態系の視点からみるまでもなく、何ごとも栄枯盛衰があるものであることは明らかである。

しかしながら、現在標準であるアーキテクチャーが、別のアーキテクチャーに取って代わられるとはどういうことなのだろうか。前項で述べたように、アーキテクチャーはカウフマン生態系の図表5に相当する。あるアーキテクチャーが、別のアーキテクチャーに置き換わることは、図表5の種間結合構造が変化することを意味している。テーブル上の砂山の例では、テーブルの形や砂粒の形状や粘着性が変化することに相当するだろう。ところが、カウフマン生態系のモデルでは、そのような変化を忠実にモデル化してはいない。要素の結合構造が固定されたモデルなのである。この点で、カウフマン生態系モデルを、直接的に企業生態系の分析に利用することはできない。

この問題は、先の認識の問題とも関連する。ある企業が、ある標準アーキテクチャーを守って、その部分機能を実現すべく努力している場合は、そのアーキテクチャーがあるという認識と、それがいいんだという判断が、企業のなかにあるはずである。もしも別のアーキテクチャーが出現し、そちらの方がいいならば、企業は認識を新たにすることになる。認識レベルの変化から、また新たな企業の影響関係が生まれるはずである。したがって、影響関係が固定された、単なる閉じた世界における、種の中の共進化だけでなく、それを越えたレベルの進化の概念が必要となる。

ここまで考えたとき、われわれは認識レベルの進化の概念を取り扱うことが必要であることに思い至るのである。認識レベルの変化と現実レベルの変化が、互いに相互作用しながら、共に進化するという構図である。企業生態系を分析するためには、このような構図をベースに議論を展開すべきであろう。

第4の相違点として、アーキテクチャー・デザイナーの問題がある。いったい誰がアーキテクチャーを構想し、実現するのかという点である。たとえ、カウフマンのモデルに影響関係（種間結合構造）が変化するように拡張したとしても、それだけでは、得られる結論は「自然発生的に影響関係が変化した」ということになるだけである。「誰かが意図的に構想し、それが定着する」というモデルにはならないであろう。重要なのは、構想力である。これをモデルに組込むことは可能であろうか。

仮に、構想力をモデルに組込んでシミュレーションを行なった場合に、どのような事態が発生するだろうか。そこでは、自然選択だけの場合よりも早いスピードで構造変動が起こるであろう。なぜなら、そこでは予想にもとづく行動変更が行なわれると推測されるからである。

## 6. おわりに

本稿では、遺伝系（第2節）や進化ゲーム（第3節）を経て、カウフマンの生態系モデル（第4節）を解説し、これらのシステム概念を利用しながら、パソコン業界における標準アーキテクチャーの意味を抽出した。

主たる議論は、第5節で行なった。その結果、標準アーキテクチャーは、カウフマン生態系における「種間結合構造（図表5）」に対応するものであることを指摘した。

また、カウフマン生態系モデルが企業生態系を分析するにふさわしいものであるかどうかについても考察した。その結果、若干の類似点が見出せるが、無視できない相違点があることを指摘した。

副産物として、認識レベルの進化と現実レベルの進化の両方を扱う理論が必要であることを示唆した。今後の研究課題となろう。

## 文献リスト

- 1 ) 『Agent Based Simulation マニュアル』 構造計画研究所 (1999 )
- 2 ) Stuart Kauffman, At Home in the Universe: The Search for Laws of Self-organization and Complexity, Oxford University Press (1995), 米沢富美子監訳 『自己組織化と進化の論理 : 宇宙を貫く複雑系の法則』 日本経済新聞社 (1999)。
- 3 ) 米澤保雄 『遺伝的アルゴリズム : 進化理論の情報科学』 森北出版 (1993)。
- 4 ) 畝見達夫 「コンピュータ上の生命現象 : 人工生命」 計測自動制御学会システム工学部会シンポジウム (1997 東京工業大学 )
- 5 ) Robert Axelrod, The Evolution of Cooperation, Basic Books (1984)。 松田裕之訳 『つきあい方の科学 : バクテリアから国際関係まで』 HBJ 出版 (1987 )
- 6 ) John Maynard Smith, Evolution and the Theory of Games, Cambridge University Press (1982). 寺本英、梯正之訳 『進化ゲーム理論 : 闘争の論理』 産業図書 (1985 )
- 7 ) David G. Luenberger, Introduction to Dynamic Systems: Theory, Models, and Applications, John Wiley & Sons (1979). 山田武夫、生田目章訳 『動的システム入門』 HBJ 出版局 (1985 )