

遺伝的アルゴリズムと人工生命

星野 力

1. 遺伝的アルゴリズム

1940年代にサイバネティクスが提唱され、その余熱がまだ冷めなかった1950年代において、コンピュータを使った理論生物学的シミュレーションが盛んに始められた。1960年代にはホランド (Holland) が今日遺伝的アルゴリズム (以下GAと略称) と呼ばれる計算論的進化の枠組みを、一般のシステムの適応理論として定式化した[1]。その後、ホランドの弟子たちによって研究が続けられていたが、ようやく1980年代後半から、工学的な最適化手法として注目された[2]。

GAを一言でいえば、以下のようになる。ある生物 (一般にはシステム) が、それを特徴づけるあるパラメータの組で表わされるとしよう。これは実際の生物では染色体または遺伝子型にあたる。多様な染色体の集団を初期設定し、それから生物を発生 (デコード) させる。これを表現型という。各生物個体に対して適応度という点数評価をし、互いに比較する。競走力が明示的にわかっていればそれを適応度とするが、点数をつけず互いに争わせてもいい。

このとき重要なことは、評価が相対評価 (偏差値) でなされることである。単純なGAでは、集団中の相対的適応度 (ある集団中の偏差値) に比例して淘汰を受ける。生き残った生物個体 (偏差値秀才) は、適当な相手と互いの染色体を交叉し子を作る。また染色体は突然変異によって変化することもある。さらに最近の分子生物学の知見を導入して多数のバリエーションが可能である。適応度にもとづく選択方法と世代交代の仕方にも、多くのバリエーションがある。一般に淘汰の圧力を大きくすると、集団は均一になり、解への収束は速くなるが、衆愚 (局所最適解) に陥りやすい。その逆に淘汰圧をゆるめると多様性は保たれる収束が遅い。このサイクルを何世代もくりかえす。そのうちに最初には存在しなかった優れた生物 (システム) が出現すると期待できる。

一般のシステムを対象とするGAは、工学的な最適化の手法として発展し、今日、複雑な組合せ最適化問題などに適したロバストな手法として、多くの応用に使われ始めている。この場合は、現実の生物にこだわる必要はなく、自由な遺伝的オペレータを採用していいし、ダーウィンの自然選択の枠組みをはみ出ても一向にかまわない。いろいろな関数最適化問題をGAによって試みみると、染色体の多様性を維持することの重要性や、突然変異よりも交叉などの遺伝的オペレータが、新しい遺伝子型を生成する能力が大きいことなど、進化論でよく論じられているような仮説を、事実として確認することができる。

しかし、GAは多くの問題をかかえている。現実的な応用では、最適化には制約条件につきものである。このとき、問題ごとに制約条件を満たすような遺伝的オペレータを考案するか、遺伝型から表現型へ発生させるときに、制約を満たすような発生プロセスを経させて、解決するしかない。GAは、局所的な地形の類似性を当てにして探索しているので、全く規則性のない地形では、ランダムな山登り (ランダムにいくつかの方向へ歩いてみて、その中で改善された方向へ実際に進む) と同等の性能しかだせない。このような困難な問題は、組合せ最適化問題ではしばしば現われる。

またGAでは困難な問題として、「だまし」がある。集団の分布が偏っていて、たまたま絶対評価では成績の低いローカルな集団の場合、その中では偏差値の高いローカルな秀才は増殖し、集団は衆愚に陥り、全国的にみると高くないローカルな山に登ってしまう懸念がある。また、分布は均一でも、鋭いピーク (富士山) が平野にある場合のように、平均的には低い地帯に最高峰がある場合、そのピークが見つかりにくいので、集団はだまされて、別の山岳地帯 (南アルプス) へ集まってしまう、ということもある[4]。

これらの難題に対して、アドホックなノウハウの蓄積 (クッキングブック方式) が行なわれつつあり、また、ある複雑度の関数のクラスはどのような時間複雑度で探索可能か、といった理論的研究が始まったばかりである。

ほしの つとむ 筑波大学 構造工学系

〒305 つくば市天王台1-1-1

2. 人工生命

GAの初心は生物の適応と進化の計算理論であった。この初心を受け継ぐのは、最近にわかに脚光を浴びだした、「人工生命 (Artificial Life)」の分野である。人工生命は、往年のサイバネティックスのルネッサンスともいうべき、生物や人工のシステム一般を対象とするシステム論であり、生命特有の現象を、コンピュータシミュレーションや人工的なシステムを作ることによって再現する試みである。

人工生命研究を大きく2つに分類すれば、現存する(現存した)生命の解明をめざす「弱い人工生命 (weak ALIFE)」と、あり得た(あり得る)生命、架空の生命(しかし十分生命の本質を反映している)を目標とする「強い人工生命 (strong ALIFE)」がある。

2.1 マメゾウムシの研究

弱い人工生命の例としては、筆者らの行なった豆につく害虫のマメゾウムシの行動を解明した研究を紹介しよう。マメゾウムシの行動は遺伝子で決まっているとしてコンピュータ中でシミュレートし、生存競争を行なわせる。「好戦主義」マメゾウムシは、豆内部での資源を取り合い、相手をかみ殺して、たった1頭の成虫が羽化するだけである。また「平和主義」マメゾウムシは、皆と仲よく資源を分け合い、1豆から複数個体が羽化してくる。ただし、多くの卵が1つの豆に産みつけられると、飢えて共倒れになることもある。

ところで、「好戦主義」と「平和主義」の2つの戦略をとるマメゾウムシがいて、おのおの「主義」をとる個体どうしでかけ合わせができる種が存在する。「主義」の違いをもたらすような形質として、発育速度、豆の中心部へ向かう傾向(求心性)、成虫の産卵行動などが考えられ、これらの傾向を数値で表わして遺伝子とし、それを図1のようにつないで染色体とする。

2つの主義をとる純系統の間で交雑が起こる種内競争を、コンピュータ中で行なった。マメに卵が産みつけられ、遺伝子を解読して幼虫が生まれ行動を決める。豆の中の戦いに敗れてかみ殺されるか、平和のうち飢え死んだ幼虫は、淘汰される。

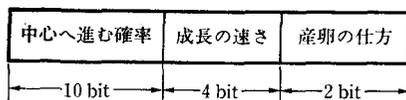


図1 マメゾウムシの染色体

成虫になれば相手を見つけて、その染色体同士を交叉し、突然変異を受ける。これがマメゾウムシの1世代である。

中心へ向かう傾向の遺伝子に従って、囓む・囓まないの行動が決まるとした場合(これは仮説)、約100世代のコンピュータ時間が経過したとき、実際の飼育実験の傾向(小さい豆では好戦主義、大きい豆では平和主義)を見事に再現した。別の、成長の早さで主義が決まるとした仮説では、実験事実を説明できなかったのである。このように、コンピュータ中の人工マメゾウムシは、現実のマメゾウムシと同じ遺伝的行動をするマメゾウムシに進化した。

2.2 原始の地球: TIERRA

強い人工生命の例として、生物学者のトーマス・レイ(Thomas Ray)が、パソコン中で自己を複製するプログラムをつくり、これを生物に見立て(太古の海の中の原始的生物のスープのようなもの)、このプログラムに突然変更と淘汰を加えてどのような時間的变化(進化)が生じるかを調べた TIERRA がある。

最初に存在するのは、図2のように自己(このプログラム自身のこと)をスープ中のどこかへコピーするプログラムである。プログラムの終わりの位置は01というコードで終わる約束にしておく。染色体はこのプログラム自身としよう。染色体はときどき突然変異によって変化する。たとえば、プログラムの途中にあった何かの命令が、プログラムの終わりを表わす01という終了記号に突然変化すると、プログラムは自己複製能力を失う。しかしプログラムの終了記号01自身が突然変異によって意味のない記号03(何も実行しない命令)へ変化すると、そのプログラムの実行は本来の停止位置を超えて別のプログラムへ入り込んでしまい、そこで複製命令に出会う。こうして自己複製機能を失ったプログラムは別のプロ

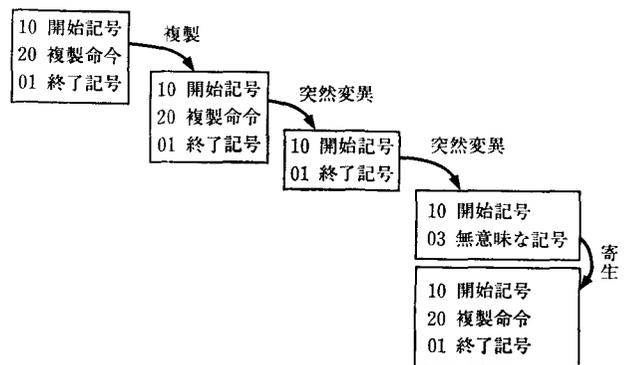


図2 TIERRAの原始生物

ラムの複製機能を利用する。これはプログラムを生物と考えれば、一種の寄生である。

シミュレーションが進むにつれて、まず寄生者が現われ自己増殖を始める。しばらくすると寄生者に対し免疫をもった種類が現われる。すると別の種類がこの免疫機構を攻撃し、いたちごっこが演じられる。しばらくすると寄生者に寄生する重寄生者が出現した。これが寄生者を絶滅に導く。次に、染色体集団中の多様性が失われ、ついにお互いに他の存在なくしてはやってゆけない、共生関係が出現する。寄生が起こると染色体のサイズはどんどん小さくなっていく傾向にある。どの種類の染色体も安定せず、自分と同じ子孫さえ残せない時代がしばらく続いたあと、2, 3の染色体で全体が占められてしまう時代がくる。これは断続平衡説が主張する進化の様子に似ている。

2.3 言語と意味の共進化

もう1つのボトムアップ的な人工生命のアプローチを紹介しよう。言語という記号にどのように意味を生物が与えてきたかという興味深いシミュレーションがある。そこでは、図3のように集団を形成しているオートマトン生物が共通環境をとりまいて暮らしている。

この共通環境に言葉を発すると、それは生物集団全体へ聞こえる。各生物は、聞こえてくるいろいろな記号に対してどのような行動をとるかという対応表をもっている(これが言語と意味の対応をつける)。表の中身は最初はランダムに設定しておく。記号対行動の対応関係(先天的遺伝のみならず後天的学習によってもこの内容は変わる)が適切であった生物が、淘汰を免れて生存し進化する。たとえば、「火事」という叫び声(これには意味はなく、ただの音声である)に対して、「熱いので逃げようという」反応をした個体は生きのび、そうでない個体は死ぬようにしておくことに相当する(実際は単なる数値データが言語や意味を表わしているだけだが)。対応表の中身は、染色体の遺伝子情報として扱われ交叉や突然変異を受ける。こうして多数の試行を多数の世代にわたって行なうと、正しい言語・意味の対応が学習される。これは言語と(それに意味を与えてきた)生物の「共進化」という観点で、言語が生得的であるかどうかという論争を止揚する(可能性が十分ある)枠組みである。

人工知能には原理的な困難がある。知識の体系を一定の枠内に限定し(背景や常識という外的要因を排除し)ない限り、知識が無限後退に陥る危険があること、また一定の静的な現象論的水準では、言葉はすでにその意味

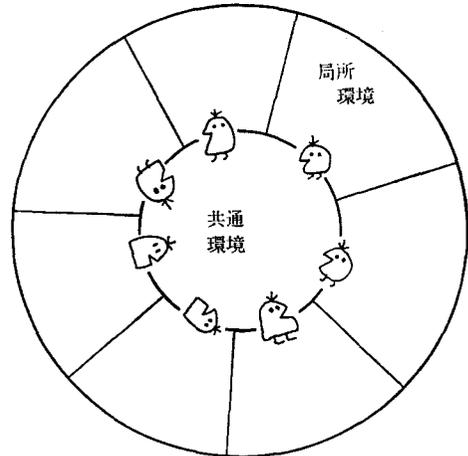


図3 言語と意味が共進化する生物界

や背景、知識に深く組み込まれて存在していて、外的な状況を陽に認識することは、なかなか難しいということである。言葉とその意味、状況認識や常識を幼時からわれわれは学習によって積んできたものであり、そのような能力は進化の過程で獲得したものであろう。このような動的な過程を経ないで、いきなり静的な知識や論理体系を構築しようとする方法論自身が、困難を招いている。

さて、ここで紹介した人工生命のモデルはまだまだ幼稚なものであり、分子進化や現実の生物の遺伝子のもつ複雑な機能を取り入れていない。しかしこのような簡単なモデルで、従来は説明不可能だった(または暗算か山勘でしか可能でなかった)現象を、コンピュータシミュレーションとしてではあるが、再現しているのである。

3. 人工生命の主張

人工生命の中心的キーワードは、自律、分散、発展と創発(Emergence)である。ラングトンの基調論文[3]を参考にして要約すれば、表1のようになる。

人工生命は、一気に神になったかのように、モデルを書き下ろしたりはしない。単純な素過程を積み上げてゆくボトムアップアプローチで生命を創発する。また最終の静的結果ではなく、時間的に発展する動的過程をモデル化する。

非明示性は、人工生命と従来のアプローチの違いを端的に表わすキーワードである。ボトムアップに生成される生命は、あらかじめどのようなものができるかわからない。

生物は他の個体との交叉や淘汰、他の種との寄生、共生、競合、棲み分けなどを通じて環境に適応し進化して

表 1 人工生命研究と従来の生命研究

| 従来の生命研究のアプローチ | 人工生命のアプローチ |
|----------------|----------------|
| トップダウン, 解析的モデル | ボトムアップ, 合成的モデル |
| 最終の静的結果 | 時間的に発展する動的過程 |
| 大域的制御 (集中) | 局所的制御 (自律分散) |
| 明示的 | 非明示的 |
| 個体単独の行動生成 | 集団の並列行動生成 |

きた。人工生命の観点からは、1 個体ではなく集団としての動的な発展こそ生命現象の本質にかかわっている。

また生物集団をシミュレートするとき、並列性は本質的である。コンピュータシミュレーションの技術としても、生物個体ごとに並列処理するのが自然であり、高並列スーパーコンピュータが普及しだした現在、当然利用すべき手段である。

4. おわりに

生命現象の論理的モデルをめざす「人工生命」においては、GAはメタレベルの手段として位置づけられている。生物の適応進化では、最適性は現象を理解する手がかりや解釈であっても、それ自体が目的ではない。事実、GAは最適化の手段としてではなく、生命を創造する手段として使われている。

一方工学的な最適化では、最適性がすべてである。最

適解がわかっているテスト関数を使って探索アルゴリズムを調べる場合を除いて、通常は最適解はわからない。したがって、現実的場面では、得られた解は従来の解からどれだけ改善されたか、それによる利益は改善努力に引き合うか、ということが評価基準であろう。最適解へ至るプロセスはどうでもいい。なりふり構わずちょっとでもいいが解が効率よく得られればいいのである。そのために生物の適応進化を真似たのが、最近工学的な応用においてもはやされているGAである。

現在は「人工生命の春」であり、夢と期待が多い。夢は進歩の原動力になる。人工生命は、自動制御工学へ矮小化したサイバネティックスの「弔い合戦」でもある。しかし過度の楽観や誇大宣伝に耽っていると、「人工生命の冬」がやってくるだろう。

- [1] Holland, J. H. : *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Univ. Michigan Press, (1975).
- [2] Goldberg, D. E. : *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley, (1989).
- [3] Langton, C. G. : *Artificial Life*, in *ARTIFICIAL LIFE*, Addison-Wesley, (1988).
- [4] 星野力, 遺伝的アルゴリズム [1]/[2], bit, 24, 9/10 (1992).

