

創発システムとランダム性

* 柳井 孝介⁽¹⁾⁽²⁾ 伊庭 斉志⁽¹⁾

- (1) 東京大学大学院 新領域創成科学研究科 基盤情報学専攻
〒 277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5
- (2) (株) 日立製作所 中央研究所
〒 185-8601 東京都国分寺市東恋ヶ窪 1-280
連絡先: kohsuke.yanai@gmail.com

Abstract:

エントロピー駆動性の概念を定義し、創発システムにおけるランダム性の意味について議論する。本稿ではこれまでに得られている複数の実験結果を基に、(1) どのような構造がランダム性をポジティブなものに変換しているのか、(2) ランダム性の役割とは何か、について考察する。

1. はじめに

多くの要素が集まって局所的に相互作用することで、要素の集まりが全体的な性質を現すことを創発という。本稿では以下のような性質を持つ創発システムについて議論を行う。

エントロピー駆動性 システムはランダム性を構成要素として持ち、ランダム性がシステムの動作においてポジティブな役割を果たす。

一般的にはランダム性はシステムにとって害を及ぼすことが多い。例えば画像認識を行うようなシステムでは、ランダムなノイズはできるだけ少ない方が認識率は高い。しかしエントロピー駆動性を持つ創発システムにおいては、ランダム性が小さい場合にシステムの性能が著しく劣化するということが起こる。つまり、普通はシステムの動作を狂わせるようなランダム性を、これらの創発システムでは逆に利用していると考えられる。ランダム性はエントロピーと関連がある。従ってこれらの創発システムはエントロピー増大の過程を利用して、システム自身の秩序と性能を保っているともみなすことができ、自然科学の面から見ても非常に興味深いシステムであると思われる。

エントロピー駆動型システムのプロトタイプを図 1 に示す。本研究ではランダムさといった場合、擬似乱数により決定的に生成されるランダムさを表すことにする。しかしこれを認めると、擬似乱数を含むシステムは、究極的には決定的な手続きのみから構成されることになり、原理的にシステムからランダム性を含む部分を分離できない可能性がある。そこで本研究では創発システムの構造に注目し、システムの外部にあるとみなすことのできる記憶付き情報源の複雑さをランダム性と考えことにする。また置き換え可能かどうかを基準として、ランダム性を定義することも可能である。つまりシステムのある部分を、似たような統計的性質を持つ乱数で置き換えても、システムが同じ振る舞いをするならば、その部分はランダム性発生装置と見なすことができる。

ここで外部の情報源の情報量を変化させたときに、システムの振舞いがどのように変化するかを考える。外部の情報源の情報量が 0 である場合は、要素間の相互作用はシステムからみて決定的に行われる。逆に外部の情報源の情報量が大きくなると、システム側からは不確実度が高くなる。図 1 の a は不確実度が上がると創発性が高くなるシステムである。このようなシステムはエントロピーの増加をシステム全体としての特性に変換しており、我々の興味の対象となるシステムである。a のような特性を本稿ではエントロピー駆動性と呼ぶことにする。

上に述べたランダム性の定義を用いることにより、創発システムを表現形式に依存せずに規定できるようになる。プログラミング言語のレベルで創発システムのプログラムを見た場合、システムを構成する個々の要素や相互作用は明示的で、そのプログラムが創発システムであると断定できる。しかしながらこのプログラムをコンパイルしてバイナリにした場合、コンパイル後のプログラムにはもはや創発の構造は見えなくなり、創発システムとそれ以外を区別できない可能性

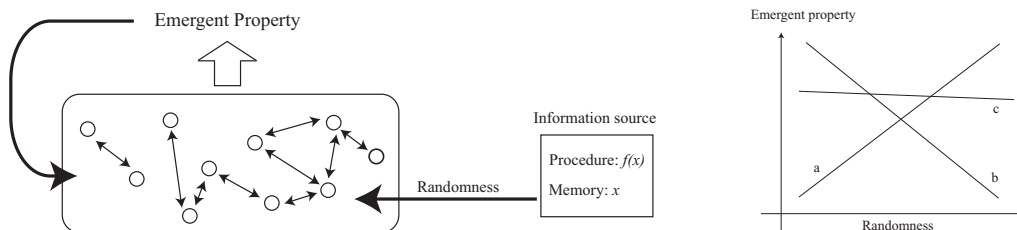


図 1 エントロピー駆動型システム。ランダム性はシステムの外部にある記憶付き情報源の複雑さとする (左)。エントロピー駆動型システムはシステムの不確実度が上がると創発性が高くなる (右)。

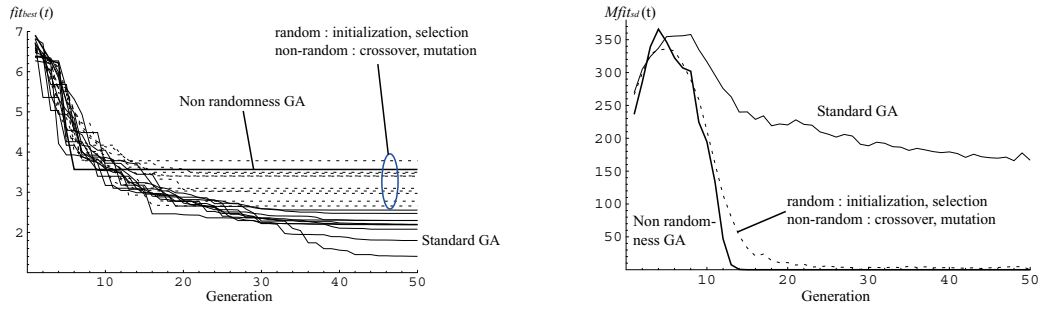


図 2 標準的な GP とランダム性を用いない GA の比較．左が試行に対する最適適合度で，右が集団内の適合度の標準偏差の試行に対する平均．

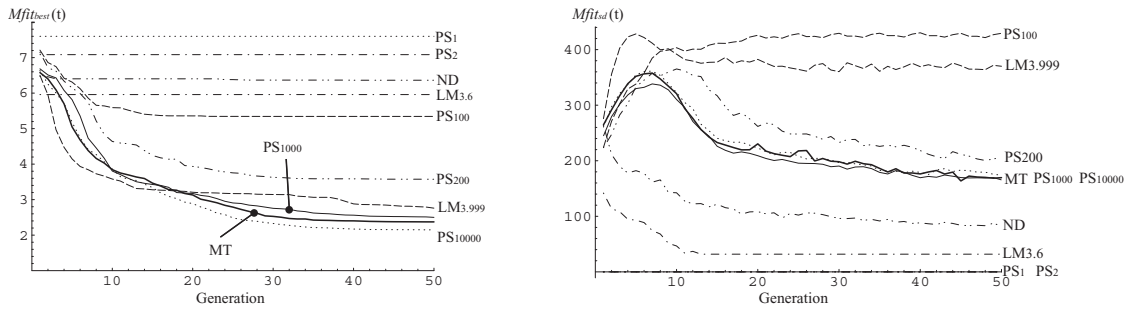


図 3 乱数の違いによる GA の性能の変化．左が最適適合度の平均で，右が適合度の標準偏差を試行で平均した値．

がある．ここでランダム性を用いることにより，創発システムに表現形式に依存しない構造を持たせることが可能となる．ランダム性とは情報量が極端に大きいことであつたから，情報量をたどることにより原理的にはシステムを分解できる．

2. 遺伝的アルゴリズムにおけるランダム性

エントロピー駆動型システムの代表例として，遺伝的アルゴリズム（以下 GA）が挙げられる．GA において乱数は重要な構成要素であり，乱数発生アルゴリズムの違いによってシステムの性能が変化するという報告がこれまでに多くなされている（[Cantú-Paz 02][Meysenburg 99] など）．乱数発生アルゴリズムが GA に与える影響については様々な結果があり，意見が分かれている．しかしながら一般的には，プログラミング言語に標準的に備わっている乱数よりも，メルセンヌツイスタなどの質の良い乱数発生アルゴリズムを用いた方がよいと考えられている．

標準的な GA とランダム性を用いない GA の比較実験の結果を図 2 に示す．評価関数は DeJong の標準関数：Shekel's foxholes を用いた．初期個体は，遺伝子が取り得る値の空間の中から等間隔にサンプリングすることにより生成した．選択はトーナメントサイズが 2 のトーナメント選択と淘汰圧をほぼ等しくなるような決定的アルゴリズムを用いた．交叉と突然変異は遺伝子の持つ情報を基に行う．解を表現するビットに余分に 16 ビット付け加えて，交叉や突然変異のために利用した．このうち 8 ビットは交叉位置の情報をコーディングし，残り 8 ビットは突然変異の位置の情報をコーディングする．

図 2 よりランダム性を用いない GA は標準的な GA よりも性能が悪いことがわかる．ランダム性を用いない GA は収束しているが，標準的な GA では多様性を保つことができていることがわかる．

また図 3 に乱数の違いによる GA の性能の変化を示す． PS_n (periodic sequence) は周期 n の周期乱数，MT (mersenne twister) はメルセンヌツイスタ， LM_a (logistic map) はロジスティック写像を用いる乱数，ND (normal distribution) は平均 0.5，標準偏差 0.16 の正規分布に従う乱数を表す．比較的良い性能を示した MT， PS_{200} ， PS_{1000} ， PS_{10000} ， $LM_{3.999}$ は，いずれも 10 世代目までに標準偏差がピークを持ち，以後集団における適合度の多様性は減少し，50 世代目には 200 から 400 までの値になる．

交叉と突然変異に乱数を用いない場合，遺伝子オペレータの位置をコーディングする遺伝子と解を表現する遺伝子が同時に収束を始める．従ってある時点で平衡状態になり，それ以後進化は進まない．一方，標準的な GA では常にランダム性に接しているため，平衡状態に陥りにくい．標準的な GA でも収束し平衡状態になることがあるが，それはラ

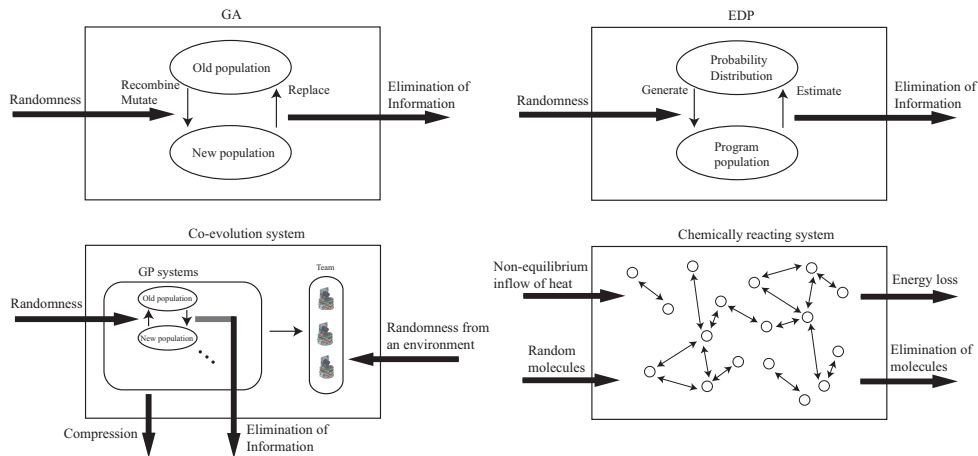


図 4 創発システムのメカニズム．いずれのシステムにも直線的な流れがある．

ランダム性を用いない場合に比べて、遅い時期に起こると考えられる．

ここで GA に対する次のような見方を提案する．

GA は、解の情報量（エントロピー）を消失して、それを解の質の向上に変換するシステムである．

このように考えると、システムが常にエントロピーの高い系に接していなければ、システムは収束し止まってしまうということが理解できる．またシステムによるエントロピーの消失分が、外部から取り入れるランダム性よりも大きければ、システムはいつかは収束してしまうことがわかる．逆に外部から取り入れるランダム性の方が大きければ、システムは最適解または準最適解を見つけるまで平衡状態に達しないと考えられる．

3. 過渡性と秩序形成メカニズム

本節では前節の結果と、著者らがこれまでにを行った他の創発システムの研究（確率モデルを用いたプログラム自動生成、マルチエージェント環境におけるロボットプログラムの共進化、 λ 関数モデルによる化学反応系など．詳しくは [柳井 06] を参照）の研究から得られた知見を基に、エントロピー駆動型システムにおけるランダム性の役割について考察する．

前節で示唆したように、エントロピー駆動型システムが動き続けるためには、平衡状態に完全に落ち込んでしまわないことが重要である．GA においては集団の多様性が小さくなると進化は停滞する．この見方に従えば、均質性が GA システムの性能を劣化させている．複数のエントロピー駆動型システムにおいて、システムの均一性が創発性の減衰につながっていることが分かっている．従ってシステム内に差があることが重要であり、均質でないことがシステムが動作するための必要条件であると考えられる．これは「電位差があれば電流が流れる」ということに類似している．

多くのエントロピー駆動型システムでは、均質な状態がアトラクタになっている．従って非均質な状態から均質な状態への自然な遷移があり、システムはこの自然な遷移を利用して作動していると考えられる．従って、システムがアトラクタである均質状態にならないこと、つまりアトラクタからはずれた状態にあることが重要である．

ランダム性はこの非均質性を生成していると考えられる．ランダム性はシステムに情報量を与えていると見なせる．情報量が小さい状態は均質な状態である．従って非均質性を生成する一つの要因としてランダム性が挙げられる．ランダム性が常にシステムを非均質な状態に保ち、アトラクタに落ち込んでしまわないように働きかけ、アトラクタへの引き込みとアトラクタからの離脱の間でのバランスが生じる．また、小さなきっかけが増幅されて、システムは別のアトラクタへ向かう．このような構造がエントロピー駆動型システムには含まれていると思われる．すなわちアトラクタへ引き込まれる自然な力と、ランダム性によるアトラクタからずれる方向へ向かう力との拮抗があり、この拮抗のなかでシステムが作動していると考えられる．

これまで議論してきたランダム性や非平衡性を考慮すると、エントロピー駆動型システムには図 4 のようなメカニズムがあることがわかる．本稿では詳細に扱うことができなかった EDP（確率モデルを用いたプログラム自動生成システム）、ロボットプログラムの共進化システム、 λ 関数モデルによる化学反応系に関しても、図 4 に構造を示している．

GA では、突然変異、交叉オペレータを用いる際にランダム性をシステムに取り入れる．これは情報量を獲得していることを意味する．一方で個体を選択淘汰することにより、情報の消却を行っている．ゆえに情報量の獲得と情報の消去という直線的な流れがある．

EDP の場合は、よりイメージが沸きやすい。EDP では個体群の状態と確率分布の状態を交互に繰り返す。確率分布から個体群が生成されるときには、ランダム性から情報量を獲得する。一方で集団からサンプル個体を選択する際には情報の消去が行われる。またサンプルした個体から確率分布を推定するときにも、個体が失われるため、情報は消去されていると考えられる。従って確率分布から個体を生成するときにはシステムの情報量は増加し、確率分布を推定するときには情報量は減少する。システムの中では情報量の増加と減少が繰り返され、システムの外からみると、やはり情報量の獲得と消去という直線的な流れがある。

またロボットプログラムの共進化システムでは、進化オペレータによる情報量の流れに加えて、ロボットが環境からランダム性を獲得している。 λ 関数モデルによる化学反応系では、分子による物質的な流れと、熱流入と熱損失によるエネルギー的な流れがあり、特にエネルギー的な流れの方は複雑な系が安定するために必要な要素であることが分かっている。

GA, EDP, 共進化システム, λ 関数による化学反応系では、個々の要素は頻繁に変化するが全体としてシステムは機能している。これらのシステムは 1 つあるいは 2 つの直線的な流れがあった。進化システムには、情報量の獲得と情報の消却という構造があった。創発システムにおいては、集団内の個々の要素の局所的なインタラクションのみが重視され、全体的な構造が注目されることが少ない。しかしながら、本節で述べたように、創発システムにおける直線的な流れのような全体的な構造も重要な要素であると考えられる。根本的には、この全体的な流れにより、個々の要素の構造が生成され、システム全体としての秩序が維持されていると考えられる。

4. お わ り に

本稿の最後に、熱力学の第二法則：エントロピー増大則に関連することからについて議論する。

一般に、情報の散逸はエントロピーが増大していることを意味する。例えば自然界の突然変異は、エントロピーの増大と見なせる。また化学反応が平衡状態 (A から B が生成される速度と B から A が生成される速度が釣りあう) に向かう現象もエントロピーの増大と見なせる。

本論文で議論したシステムは、ランダム性を利用して稼動する。ランダムな状態とはエントロピーの高い状態である。従ってエントロピー駆動型システムは、エントロピーの高い状態から秩序を形成しているように思われ、これは一見、エントロピー増大則に反しているように思われる。

しかしながら図 4 を見れば分かるように、エントロピー駆動型システムにおいては、情報の消去の機構が不可欠である。この情報の消去にエントロピー的なコストがかかる。例えばコンピュータシミュレーションにおいては、コンピュータの電源からエネルギーをもらって情報の消去をしている。電気エネルギーが熱エネルギーに変換される際にエントロピーは増大する。このハードウェアにおけるエントロピーの増大と引き換えに、ソフトウェアにおいて情報を消去する。従って電源システムも含めて考えれば、エントロピーは増大しており、エントロピー増大則には反していない。しかしながら局所的にみれば、特にソフトウェアの階層だけを見れば、エントロピーの高い状態から秩序を作り出しているように見える。

これは「マクスウェルの悪魔」と類似している。「マクスウェルの悪魔」システムは、情報の消去にエントロピー的なコストがかかるため、実現が不可能であると考えられている。「マクスウェルの悪魔」システムにおいてもエントロピー駆動型システムにおいても、エントロピーが階層化されている。

実世界の生物進化では情報の消去を効率良く行っているように思われる。生物界では「えさをとる」ということで情報の消去を行っている。従って生命は他の生命の情報を消去することにより、自身はエントロピー差を得ていることになる。つまり他の生命をよりエントロピーの高い状態に変換することを利用して、自身の生命活動を行っている。極自然に、情報消去のメカニズムが埋め込まれているといえる。ここにエントロピーの階層のもつれがある。生命は情報消去というマクロレベル (進化システムのレベル) でみるとエントロピー的にコストのかかることを行うことで、逆にその生命に関してみればエントロピー的収支において利得を得ている (負のエントロピーを得る) と考えられる。

本稿の内容に関するより詳しい議論については [柳井 06] を参照されたい。

◇ 参 考 文 献 ◇

- [Cantú-Paz 02] Cantú-Paz, E.: On random numbers and the performance of genetic algorithms, in *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference*, pp. 754–761 (2002)
- [Meysenburg 99] Meysenburg, M. M. and Foster, J. A.: Randomness and GA performance, revisited, in *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference*, pp. 425–432, Morgan kaufmann publishers (1999)
- [柳井 06] 柳井 孝介: プログラムのインタラクションによる情報構造の創発に関する研究, PhD thesis, 東京大学 (2006)