

特集 「複雑系と集合知」

人工生命から見た集合知

Collective Intelligence from Artificial Life

池上 高志
Takashi Ikegami

東京大学総合文化研究科広域科学専攻
Department of General Systems Studies, The Graduate School of Arts and Sciences, The University of Tokyo
ikeg@sacral.c.u-tokyo.ac.jp

Keywords: emergence, artificial life, cognitive behavior.

1. エマージェンス

集合知を考えるには、マイクロとマクロの複雑さに注目する必要がある。特に、人工生命で議論されてきた「創発」(エマージェンス)という概念が大事である。まずそのことを認識してもらうために、人工生命からエマージェンスの例をいくつか紹介し、そのマイクロ・マクロの複雑さの問題を集合知の問題として議論していきたい。

R P ファインマンは、20世紀に確立した科学的知見の一つを取り上げるとしたら、それは物質が粒粒(つぶつぶ)からできていることだ、と話している。さまざまなマクロな振舞いを、我々は原子・分子などのマイクロな振舞いから説明する、そのことが自然を理解することだというのが、現代の自然科学のわかるという意味である。それはもちろん生命現象の理解にも当てはめられるので、マイクロの分子が集まって示すマクロな細胞としての振舞い、マイクロなニューロン細胞が集まってつくるマクロな脳の認知現象、といった構図が出来上がる。つまりマクロな性質としてどんなものが出現するかは、マイクロな構成要素を見てもわからない。その性質は集合としての性質、相互作用の中に宿っている。

しかし注意しなくてはいけないのは、マクロとマイクロのレベルの切分けが絶対的に与えられないということである。集合(マクロ)とその要素(マイクロ)の関係は単純ではない。例えば人間の言語を原子分子から説明しようとする試みや、カルマン渦の生成を水分子から説明しようとする事の無意味さを考えてみればわかるだろう。例えば、言語というものが、一つの遺伝子あるいは分子構造に還元できて初めてわかる、ということはある得ないだろう。どういうコンテキストの中での遺伝子であり分子であるかということが問題である以上、究極の何々の分子という単純なわかり方は存在しないからだ。つまり、「わかる=構成要素に分解してわかる」という図式以外のものが、我々に要求される。

マイクロは必ず原子、分子である必要はない。そのマクロにとって、説明原理としてのマイクロを選び出さなくてはいけない。マイクロは天下り的には与えられない。「マクロ

がマイクロを指定するのだ」。通常はマイクロのレベルを固定し、それとマクロをつなぐように考える。しかしもっとフレキシブルにマイクロレベルは選ばれる必要がある。創発はマイクロとマクロの関連性の問題である。ここで創発(emergence)とは、マイクロな構成要素から出現するマクロな振舞い、と通常定義される。しかし当時からクリス・ラントンも主張しているように、マイクロとマクロの間には循環的な流れがなければならない。それがエマージェンスである。自己組織化を、マイクロからマクロへの一方向的な流れとするなら、エマージェンスとは逆にマクロからマイクロに向かう自己組織化も同時に考えるということである。例えばマクロに出現したパターン(例えばアリの行進がつくるパターン)が、個々のアリの運動の仕方を制約するという意味である。アリの行進がつかれるようにアリの個々の運動を設計することは、それほど難しくない。それは作り込んだ一方向性の自己組織化にすぎない。実は行進以外のマクロな性質が出現し、我々が一般的だと考えていたマクロな振舞い(この場合は行進)は、裏切られる。例えば(えさを円周に並べると時計回りに食べる、など)が出現する。そのマクロな現象がマイクロな運動を制約し、それがまたマクロに跳返りという形で、システムは組織化していく。そういう意味でエマージェンスするシステムのわかり方は単純に要素に分解してわかるというものではない。それはマクロとマイクロの循環的な関係性を見いだしていくということなのである。

コンピュータの構成論的な研究はともすると、なんでも可能、と思われがちだが、そこに出現する「マクロとマイクロの自然な制約循環のあり方」を発見し、それによってリアリティを構成することである。そのリアリティこそ理解なのだということ、そのことが人工生命の研究を通じて見る「集合知」の心であると思う。次章では具体的にそのことを見ていこうと思うが、このリアリティというのと現代の科学のわかり方は相反する部分がある。それは、普遍性と個性・多様性の問題である。そのもつれはまた独特なリアリティを形づくっている。

2. ビット、分子、細胞、鳥、魚

人工生命は、Life As It Could be, 可能な生命の記述である。したがってマイクロな要素として物理化学法則に従う原子・分子を置く必要はない。逆にいうと、どのような抽象化 (abstraction) を行っているがすべてだといえる。人工生命の原点といえるモデルは、コンウェイの Life Game にさかのぼる。

2.1 Life Game

これは、五目のます目の上で 0 と 1 の状態が点滅しながらいろいろと形を変えて時間発展するコンピュータのプログラム画像である。その発展のルールは、自分のまわりの八つのます目のうち、自分が 0 のときは八つのうち三つが 1 か、自分が 1 のときは八つのうち二つか三つが 1 ならば次の時間に自分の状態を 1 にする。そうでなければ自分の状態を 0 にする。

しかし、この簡単な 0 と 1 の世界には魔物は住んでいる。ある空間の形 (ひとかたまりの 1 のつくる空間パターン) は形を回転させながら移動する。このグライダーと呼ばれるパターンは、最も簡単な移動体 (図 1) の一つで、グライダーを周期的に打ち出す複雑な空間配置パターンがいくつも発見されている。例えば、次の pufftran は非周期な時空間パターンを生成し、グライダーもつくり出す (図 2)。より強烈な時間空間パターンが存在することが知られている [Hensel, lfegame]。またライフゲームはそうしたパターンを組み合わせて巨大な計算を万能に実行できることがわかっている [パウンドストーン 90]。

どんな形が存在するかは、もちろんこのビットで書かれたルールに非明示的に埋め込まれているが、「それを予測することはできない」という意味でライフゲームはおもしろいが、「最初にいったマイクロとマクロの循環的な関係性

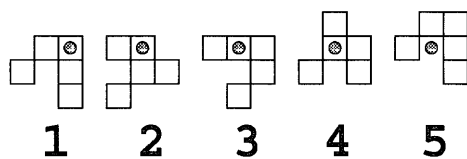


図 1 クライタの移動 5 ステップで斜め方向にひとます進む。これ以外に速度と形の違ういろいろな移動体が知られている

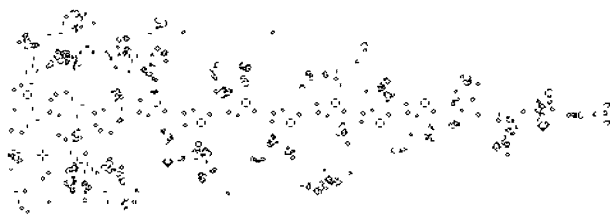


図 2 ある初期条件から 1063 ステップ目の蒸気機関車の形。いろいろなパターンを後方に生成しながら右方向に進んでいく

を我々は構成し得ない」という意味では、システマティックに研究を進めるのが難しい。

ライフゲームに関して我々ができることは、初期値を設定することである。そのまれな初期値にすべてが埋まっているが、初期値鋭敏性は諸刃の剣でもある。自然現象では例えば皮膚をちょっと引っかいたくらいでは人が死なないというロバストネス (頑強さ) がある。ライフゲームのもつ発見可能性を失わないまま、もっとロバストでマイクロ・マクロの循環的な関係性をもつシステムはないだろうか。人工生命は、この疑問から結果として始まり、クレイグの魚と鳥が最初のヒントとなった。

2.2 魚 と 鳥

クレイグは 1986 年に boids (ボイド) という群れのモデルを提案した [Craig]。3 次元の空間で群れる構造は、鳥も魚も変わらない。ボイドは三つの運動規則、1) 近傍のほかのボイドとは反発しあい、2) 近傍のボイドと頭の向きをそろえ、3) 近傍のボイドの平均位置に近づく、をもつが、これはポテンシャル関数で表すことができる。つまり向きをもったベクトル粒子が、モース型のポテンシャルの中で運動しているような感じになる。ボイドのつくる集団運動は我々が鳥や魚の群れの運動に見る群れそのものである。障害物を置くとそれを避けるように群れをなして飛ぶ様は、まさに鳥のそれである。特にこの群れはカオス的な運動と定常的な運動の両方を兼ねそろえている。つまり完全に規則的なわけでもランダムなわけでもない運動を示す。クレイグ自身は、このことを遠い将来の予測不可能性と、近い将来の予測可能性の両方を兼ねそろえている、と書いている。これはまた大自由度のカオス力学系の運動の特徴、特にカオスの遍歴現象の特徴でもある。このあと菅原・佐野らによって、集団運動モードは大体四つ (行進、振動、彷徨、群れる) に分けられる [Sugawara 98]。それ以後モバイルロボットを使った群れ実験も行われている。西村・池上はこうした群れ運動を進化的なコンテキストで調べている [Nishimura 98]。どのような運動モードが進化的に選ばれるかといった問題を扱っている。ただし、この群れの進化モデルでは群れは二つのグループ (捕食者と被捕食者) からなる。その四つの運動モードは図 3 のようであり、菅原らの群れ分類とは異なっている。

ところでこれらの群れパターンは、どのくらい生物的で、またどのくらいそうではないのだろうか。群れが秩序だった運動をするとき、個体自身の性質は抑制されている。マクロな群れ現象は、マイクロな物理粒子の集団でも示すことができる。何か間違っているのだろうか。我々は、統計物理学の立場からは、個々の粒子の運動について知り得なくとも、その集団の性質は語り得ることを知っている。つまりは、粒子どうしが (相互作用しない場合はもちろん) 相互作用することでいかに個の性質を失って、統計的な性質に従うということ。マイクロな生物の

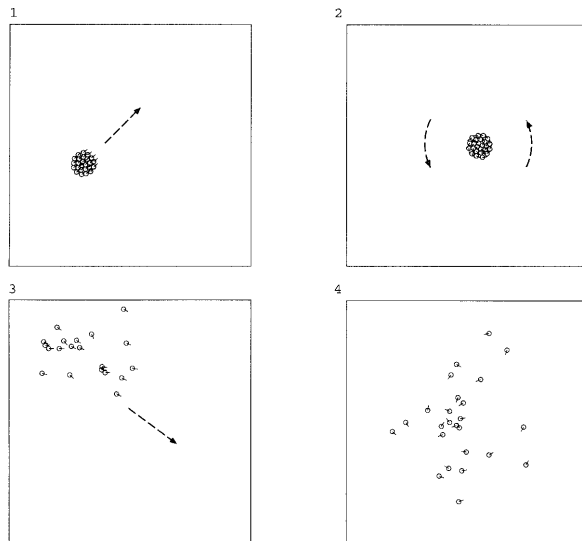


図3 被捕食者のとる空間パターン 1) かたまって行進 2) かたまって回転 3) 乱れたまま一方向に行進 4) 乱れた群れ モデル詳細は[Shun 98]を参照のこと

マクロな非生命現象の出現。例えば、テトラヒメナが示す生物対流現象もその例である。ミクロの個の性質にはよらないマクロなパターンの普遍性である。生命の集団はむしろ非生命な規則に従う。このことそのものは自然の理屈としておもしろい。しかし「集合知」といわれるものは、このレベルでは見えてこない。

そこで、ここでの逆を考えてみる必要がある。つまり非生命から生命へ、である。

2・3 分子から細胞の誕生

無機、有機の化学スープの中から生命が出現するというテーマは、100年来の夢である。例えばミラーとユレーイは、1951年に初めて原始の大気環境の中で有機分子が無機分子から出現する可能性を示し、生命を人工的に化学反応からつくり出す可能性を示したし、シュピーゲルマン、アイゲン、シュスター[Eigen 79]は、遺伝子と酵素の自己触媒と自己維持の可能性を実験的にも示すことに成功している。非生命から細胞という生命への進化を理論的にも実験的にも始めたのはスイス ZTH のルイシ[Luisi 99]であろう。彼は、実験室でどのように膜がつくられ、その中に化学反応を閉じ込められ、複製周期をまわしはじめるかを研究してきた*1。しかし遺伝的分子をもち、酵素反応系が膜に取り込まれ、全体として複製を始める。という一連のストーリーは、なかなか実験的には困難を伴うようである。ここでの生命の定義とは、分子が集まって示す「システム性」、「自己複製」と「自己維持」の性質である。これが、分子の示す生命的集合知である。シス

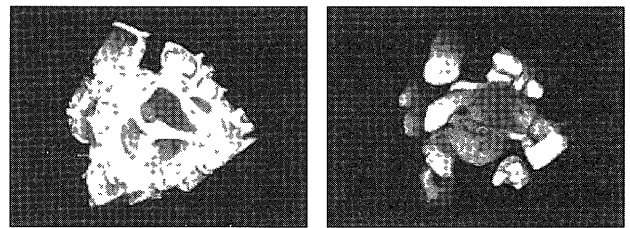


図4 空間全体に広がった細胞膜構造(左)と、その中の触媒分子の分布のようす(右) 細胞どうしてエネルギー源となる分子の競合が起き、うまくエネルギーをとれない領域(細胞)は触媒分子を生成できず死んでいく

テム性とは、個々の化学反応があたかも中枢からコントロールされているかのような協調的振舞いをするのである。自己複製は膜の複製とそれに伴う内部反応の複製であり、自己維持は膜が失われずにつくり続け、それによって内部の反応を保つことである。

小野と池上は、化学反応と膜分子を関係させたモデルをシミュレートした[Ono 00, Ono 01, Ono 02]。ミクロな構成要素として、反応性をもった粒子をおき、マクロにはその化学反応を囲う細胞膜の生成を考える。例えば反応の強さと粒子の空間上の拡散の強さをパラメータとして、化学反応のマクロな振舞いを観察する。すると、はじめに囲った膜がしだいに消えていく場合(このとき中の膜をつくってくれる反応粒子は拡散してしまう)、そのまま保たれる場合(このとき中の反応系は膜をつくり続ける)さらに分裂・複製を行う場合(反応系も複製される)とクラス分けされる。

このように膜を内部の反応系がつくり、膜があることで内部の反応系が保ち続ける構造を進化させるのは、自己維持の発生といえるものである。さらに自己複製という性質が生まれる。自己維持はオートポイエシスの理論のコアでもある。これは、免疫系、神経系、脳へと続くもとであるという意味において生命システムの「集合知」と呼べると思う。このときミクロに要請されるものは、膜分子どうし、膜分子(疎水)とほかの親水分子との相互作用ポテンシャルの形である。ボイドのときと同じく、膜分子どうしは同じ向きを向きやすく、親水疎水は反発が強く近くに来にくい、となっている。ボイドと違うのは、分子は向きをそろえることと反発作用以外に互いに反応して変化するという点である。群れの進化モデルでは、食う・食われるの関係と複製能が個体に与えられているので、ここでの細胞のモデルに近いといえる。そこで群れと細胞の違いは、出現したマクロな構造がミクロな構造に及ぼすフィードバックだといえる。ボイドの群れの場合、ある群れの形をとれないからといって、ボイドが絶滅することはない。進化の群れのモデルの場合、ある種の群れ構造のときのみ、食う・食われるの関係が長続きすることがわかってきている。その群れ構造以外だと群れの個体は死に絶えてしまう。化学反応と膜の場合、うまく膜で囲えないと反応は続かず、化学反応は消え膜も消えてしまう。

*1 例えは日本では最近になって菅原らのグループによる2種類の膜分子による複製の実験がある[Sugawara 02] 本稿では横道にそれらため生命を実験的につくり上げる仕事は、ここでは一部しかあけていないことを断っておく

つまり、マクロとミクロの間の循環というのは、生命的集合知の基盤として重要である、といえるだろう。3次元の膜・化学反応シミュレーションの最近の成果[Madina 03]では、いろいろな形の膜が生まれ、その中で膜によるコンパートメント化が進み、化学反応が促進する様が見て取れる。こうしたマクロな形(境界条件)とミクロな化学反応の循環を見ていくことは、生命現象としての集合知の起源である。しかし、先にも述べたように個体の個性は集団をつくることで消えてしまう。個体のもつ多様性、認識の様式や記憶が関与しないではすまされないような集合知の問題はあるだろうか。次は相互作用の様式の複雑さを見てみる。

3. 相互作用の複雑さ

生命、非生命の個体の違いは、その相互作用の複雑さに顕著に現れる。ゾウリムシのような単細胞生物であっても、好き嫌い、学習効果、他個体の認識などを示すといわれている。より複雑な生命となると、個々に発現する振舞いは複雑だし相互作用は洗練されてくる。例えば、ほかの個体間の関係の認知(「あれは恋人どうしだ」とか)や、ほかの個体のしぐさからその心の向きを推し測る(心の理論)、相手と自分の志向性をそろえる(ジョイントアテンション)などがそれである。これは次章で論じるとして、ここではモデルシミュレーションに基づいて前章までとは質的に異なる高次の相互作用について議論してみよう。

V ブライテンベルグ[Braitenberg]は、14個の仮想ロボットによる思考実験を行い、観測者にとって高次・複雑な行為のパターンはどのようにして生み出されるかを、ロボットのデザインの立場から論じている*2。ブライテンベルグは、複雑な認知行為と解釈されるというものを生む単純な内部の構造を議論する。しかし徐々にそのロボットに要求する認知レベルが高尙になるにつれ、内部に複雑なものを用意するという方向に変わっていく(例えば彼のvehicleの8番以降)。具体的な彼のロボットは車輪を二つもち、体についたセンサで外界と相互作用して動き回る自律vehicleである。例えば、臆病か勇敢かの解釈を観測者に与え得る、進む・離れるという運動がセンサと車輪駆動部への結線の仕方デザインされる。これは、いってみれば前章で議論した自然な群れのパターンを生み出す単純な物理ポテンシャルに対応させられる。

高次の認知的振舞いはどうか。ブライテンベルグは、二つの回路を導入して高次認知を考える。一つは二つの種類の異なるセンサ入力の時(空間)相関を見るもの

であり、もう一つは、時間的に離れたものの時間相関を見るものである。前者はロボットに連想解釈を与え、後者は因果律の認知を与える。この連想と因果律の認知能力は、ロボットどうしの相互作用を複雑なものとする。複雑なものとするというのは、いろいろなことができるようになる、という意味ではない。むしろ、いろいろできなくなるのかもしれない。というのは、こうした認識能力は判断や推論における迷い・揺らぎの基盤となるからである。

そうした揺らぎを見た例として我々の研究の一つを紹介したい。それはターンテークを行うvehiclesのシミュレーションである。人は相手の視線やしぐさ、それに声のトーンなどから、会話での発言やサッカーでのパスのタイミングをはかたりする。意識的あるいは無意識的に順番をもらいあるいは譲り、事態が進行する。これをターンテークという。ロボットにとってのターンはここでは相手の背後を取ることとする。ずっと相手の背後を取っているとターンの独り占めになるので、ここではそれを時間的にいかに譲り合っていくかがポイントになる。ロボットの内部には再帰的なニューラルネットが入っており、それを遺伝的なアルゴリズムで進化させる。ネットワークはセンサとロボットのモータを結んでおり、その結び方によっていろいろな運動をつくり出す。センサ入力としては相手の相対的な位置と頭の向きが与えられる。アウトプットには次時間のモータ出力と相手の位置が出力されるようになっている。

詳しい解説は論文[Iizuka 03, Ikegami 03]を見てもらうとして、ここでは二者の織りなす行動パターンの多様性に注目したい(2・3節)。この行動パターンの多様性は、個々のエージェントが単独でつくり出すものではなく、相互作用を通じて初めて現れたものである。というのは相手を変えることによって、違うターンテークのパターンをつくり、そもそもターンテークが成立しなかったりするからである。センサ入力にはそのつどそのつどスナップショットの相手の位置情報が入ってくるだけなのに、結果として全体的な運動の構造に鋭敏であるというのが興味深い。

この運動の多様性は、群れの場合と違い、共進化的に育ってきたエージェントどうしで初めてターンテークできるようになる。それゆえ外的に与えられたポテンシャルが運動の多様性を決めているわけではなく、個体の内部につくられた構造が決めているのである。実際ここで起きているターンテークは、非線形振動子の引込現象とは異なったメカニズムによる。誰と相互作用を成立させるかは、内部の状態とパラメータによって決められている。つまり内部のコンテキスト状態によって外的には同じセンサ入力も異なる解釈(それに伴う運動の違い)が施される。そこにターンテークするかどうかの「選択の芽」が見られる。それが、前章までの群れや細胞と違う点である。人と人との相互作用、その最も洗練された形である言語について次章で議論する。

*2 G ウォルターが60年代に実質的に同様に考え、かつロボットを組み立てていたことは特筆に値する。ウォルターは当初から、感情や遊びの行為をロボットで見ることを考えていた[Walter 50]。

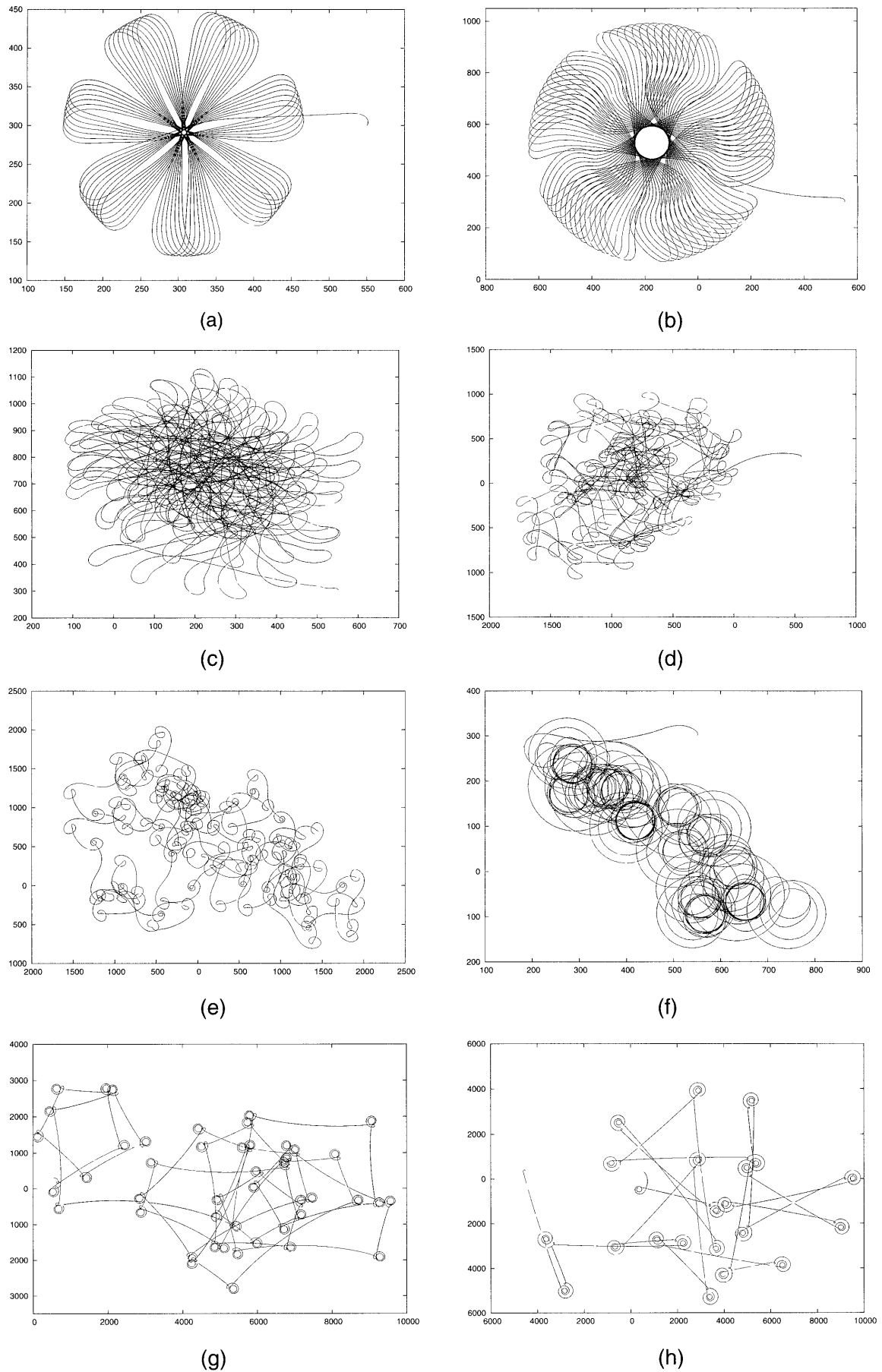


図5 シミュレーションで観測されるターンテークの一人のエージェントの軌跡。遺伝的アルゴリズムで発見して出現したものが、はじめは秩序だった軌跡を描くが、あとなってカオス的な軌跡へと進化していく。(a)と(b)はその秩序だったもので、あとはカオス的なもの。ただし適応能力はカオス的なもののほうが大きい。詳しくは、[Izuka 03, Ikegami 03]を参照のこと。

4. 心、意識、言語

認知的主体の集団を考えると、次のことだと思う。それは、相互作用のオンオフを自分で決定できることである。相互作用をずっと続けるのは生物的ではない。それはエネルギーの問題（例えば疲れるから）からだけではなく、飽きあるいはアテンションの問題である。例えば、乳幼児は見慣れると興味を急速に失って、例えば視線を向けなくなる、あるいは母親と乳幼児のビデオモニタを介した相互作用において、相互作用が続くかどうか、一見仔細に見えることによって決まることが知られている [Trevvarthen 77, Trevvarthen 93]。宇野・池上の論文では、二つのジョイントアテンションという相互作用の様式を区別して論じている [宇野 02]。ジョイントアテンションとは、複数の人間（二人）が互いに共通の事象あるいは思惑に志向性を向けることである、ツール型ジョイントアテンションと呼ぶもので、これは例えば A が B に「おもちゃ」と言って B におもちゃをとってもらい、というように A の欲求に注意を向けてもらい、その欲求を満たす行為を促すことである。一方でゴール型のジョイントアテンションは、A が B に A と同じことに注意を向けてもらうこと、同じメンタルステートに入ってもらい望むものである。つまりジョイントアテンションそのものを目的とする。例えば、「今日は寒いね」というのが、単に同意を求めてばかりではない場面などである。この二つのジョイントアテンションは連続なスペクトルでつながれている。ゴール型のジョイントアテンションは、ツール型よりもより人の心的に近い分つき出すことが難しいと思われるがちである。しかし実際にはツールジョイントアテンションの能力をロボットにもたせるために苦勞している。一方でゴール型は、例えばイライザのような中身の無い、いくつかの決まった言い回しと繰返しで会話する対話型ソフトでも可能になる。

実際に問題となるのは、連続であるがゆえに二つのジョイントアテンションの区別を明示的に行い得ないことにある。ゴールジョイントアテンションの場合、その相互作用そのものの維持が目的である。つまり相手が相互作用をいつでもオフできる状況においていかにそれをオンにし、継続するかが問題となる。自閉症児の研究から、自閉症児はジョイントアテンションを求めないという研究がある。また自閉症児は振りあそびをしないということもよく知られている。しかし J. ナーデルは、自閉症児を相互模倣あそびに引き込むことに成功している [Nadel 00]。これは、相互作用のチャンネルが自閉症児が健常児とは違うだけで、そのチャンネルさえわかれば、相互作用を立ち上げて持続できる可能性を示している。また日常的な場面における、ある種の言い回しはジョイントアテンションの生成と維持と深くかかわっていることがわかってきた。例えば、眼前に雪を見て「雪！」という感嘆の一語文や、「秋

だから、しみじみするね」といったある種の理由文は、ゴール型のジョイントアテンションに寄与することが議論されている [宇野]。一語文と理由文による伝達のようなすを模式的に示したのが図 6 である。

我々のとりあえずの結論は、相手の中に見いだす不定性をとりあえず承認することだ、というものである。ツールの場合は、できる限り曖昧性を消すことで行動目的を明白にする必要があるが、ゴールにおいては相手の自律性を尊重し、個として認めるために、不定性を消さないことがむしろ肝要となる。その結果、情報論的には価値が低いと思われる発話や、通常とは異なるモノの使用などが相互作用の契機となり、行動によるあるいは言葉による継続的な新奇性の提示が相互作用の維持のメカニズムとなり得る。上のターンテークのシミュレーション実験において、それぞれのエージェントは相手の行動予測がゆらぐ。予測がうまくいかないときにターンが切り換わることがわかっている。結果としては相手の将来の行動にミクロな予測不可能性を伴うことがマクロな繰返しのターンテークを可能にすることが示唆される。相互作用のオンとオフのメカニズムは、だから相手の中の不定性の検知や情報のリダンダンシーと関係があると思われる。

この最後の章で問題にしたかったことは、現象学的な悩みでもある。というのも、自分の視点から見た相互作用のつくり方と、世界に対する志向性の形が相互作用を決めていくからである。相互作用をつなぐか切るかを決めるのは極めて主観的な行為であり、実際の状況においても本人以外に知ることはできない。しかしその存在を疑い

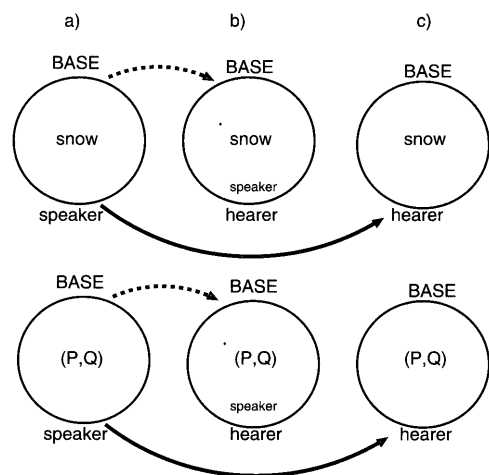


図 6 ゴール JA を行う一語文（上）と理由文（下）上の例で一語文は例えば、「雪」と発話することで、「私は雪に感動している」を暗示し、かつ、メンタルスペース（話者の発話の背後にある意図構造）の配置が揃う（これが a）から c）へのマップである。一方で「私は雪に感動している」を直接発話すると、聞き手のメンタルスペースは話し手のそれと異なったものとなる。これは a）から b）へのマップで表されるように、「発話者の心の中（点線で表示）に「雪」というイメージがある」というメンタルスペースを構築してしまう。同様に下の例では、理由文「P だから Q」は、「P は Q なものだ（私は P は Q だと思っている）」をメタ的に示すことで、一語文同様メンタルスペースの配置が揃う（これを a）から c）へのマップで同様に示す。詳しくは [宇野 02] 参照

得ないと感じる自分がある。その第一人称的な視点と、第三人称的なターンテークのパターンや相互作用のパターンとの結びつけるから、主観的な経験を「わかる」ことができる。期待できる。不定性のあるメッセージを与えることで相手に主体的に意図・意味を決定させる。それによって主体的に相互作用の場に参加させることができる。

5. ま と め

集団知の問題は、したがって、内と外の問題をはらんでいる。見かけ上の群れのパターンは、物理的なポテンシャルで模倣できる。それはまた生命の集団の非生命化現象でもある。知性というものが、生命状態の随伴現象とするならば、集団知の発生は、非生命ミクロの集まりがいかんして生命マクロになるかを見なくてはならない。原始細胞生成のモデルがその試みである。しかし、原始細胞が同時に、記憶・認知・感覚から主体など我々が呼ぶべき性質を携えているわけではない。この問題に関するここでのメッセージは次のとおりである。

感覚・認知はエージェントの内部コンテキストから生まれ、主体はエージェント間の相互作用の上に出現する。

特に最後に議論したような、主観的な経験と相互作用の生成と維持の関係はエージェントの内部構造なくしては議論できない。集合知の問題とは結局我々が第一人称としての主体をいかに理解するか、という問題に集約されるのである。

謝 辞

共同研究者の西村信一郎さん、小野直亮さん、飯塚博幸さん、宇野良子さん、Duraid Madina さんに感謝します。

この仕事は、文部科学省 21 世紀 COE 「融合科学創生ステーション」からの援助を得て行っています。

◇ 参 考 文 献 ◇

- [Braitenberg] Braitenberg, V *Vehicles Experiments in Synthetic Psychology*
- [Craig] クレイクのサイト <http://www.red3d.com/cwr/booids/>
- [Eigen 79] Eigen, M and Schuster, P *The Hypercycle A principle of natural self-organization*, Springer, Berlin (1979)
- [Hensel] Alan Hensel 氏によるライフのコレクション ftp で彼のコレクションを取ってくるができるが、その一部は、<http://www.cs.jhu.edu/callahan/patterns/contents.html> で見ることができる
- [Iizuka 03] Iizuka, H and Ikegami, T *Adaptive Coupling and Intersubjectivity in Simulated Turn-Taking Behaviours, ECAL03, Jena*
- [Ikegami 03] Ikegami, T and Iizuka, H *Joint attention and Dynamics repertoire in Coupled Dynamical Recognizers, Proceedings of the AISB 03 the Second International Symposium on Imitation in Animals and Artifacts*, pp 125-

130, UK (Apr 2003)

- [lifegame] <http://www.cs.jhu.edu/callahan/lifepage.html>
これは Paul Callahan 氏によってつくられたライフゲームの秀逸なサイト
- [Luisi 99] Luisi, P L, Walde, P and Oberholzer, T *Lipid Vesicles as Possible Intermediates in the Origin of Life, Curr Opin Coll*, Vol 4, pp 33-39 (1999)
- [Madina 03] Madina, D, Ono, N and Ikegami, T *Cellular Evolution in a 3D Lattice Artificial Chemistry, Proceedings of ECAL 03*, W Banzhaf, et al (eds), pp 59-68, Springer, Dortmund (2003)
- [Nadel 00] Nadel, J and Field, T *Organizers of the symposium "Imitation and communicative skills in children with autism and Down Syndrome"*, ICIS, Brighton (2000)
- [Nishimura 98] Nishimura, S I and Ikegami, T *Emergence of Collective strategies in a prey-predator game model, Artificial Life Journal*, Vol 3, No 4, pp 243-260 (1998)
- [Ono 00] Ono, N and Ikegami, T *Self-maintenance and Self-reproduction in an Abstract Cell Model, J Theor Biol*, Vol 206, pp 243-253 (2000)
- [Ono 01] Ono, N and Ikegami, T *Artificial Chemistry Computational Studies on the Emergence of Self-Reproducing Units, Proceedings of ECAL 01*, J Kelemen and P Sosik (eds), pp 186-195, Springer (2001)
- [Ono 02] Ono, N and Ikegami, T *Selection of Catalysts through Cellular Reproduction, Proceedings of Artificial Life VIII*, (R K Standish, M A Bedau and H A (eds), pp 57-64, Abbass, MIT (2002)
- [バウンドストーン 90] バウンドストーン, W 著, 有澤 誠 訳 ライフゲームの宇宙, 日本評論社 (1990)
- [Sugawara 98] Sugawara, K, Sano, M, Yoshihara, I and Abe, K *Cooperative behavior of interacting robots, Artificial Life and Robotics*, Vol 2, pp 62-67 (1998)
- [Takakura 02] Takakura, K, Toyota, T, Yamada, K, Ishimaru, M, Yasuda, K and Sugawara, T *Morphological Change of Giant Vesicles Triggered by Dehydrocondensation Reaction, Chem Lett*, pp 404-405 (2002)
- [Trevarthen 77] Trevarthen, C *Descriptive Analyses of Infant Communicative Behaviour*, H R Schaffer (ed), *Studies in Mother-Infant Interaction*, London Academic Press (1977)
- [Trevarthen 93] Trevarthen, C *The Self Born in Intersubjectivity The Psychology of an Infant Communicating*, U Neisser (ed), *The Perceived Self*, pp 121-173, Cambridge University Press (1993)
- [宇野 02] 宇野良子, 池上高志 ショイントアテンション/予測と言語～志向性をそろえるメカニズム～, 認知言語学論考, No 2 (2002)
- [宇野] 宇野良子 理由文の表す動的な関係と静的な関係—因果関係の重層性がもたらす志向性の共有—, 投稿中
- [Walter 50] Walter, W G *An imitation of life, Scientific American*, Vol 182, 5, pp 42-45 (May 1950)

2003年9月25日 受理

著 者 紹 介



池上 高志

1989年東京大学大学院理工学研究科博士課程物理専攻修了(理学博士,その後1年間の学振期間(京都大学基礎物理学研究所)を経て,1990年より神戸大学自然科学研究科助手,1994年より東京大学総合文化研究科,現在に至る。専門は複雑系の数理科学、コンピュータシミュレーションによる生命や認知の基本問題を研究する。