

特集 創発システム

電子メール討論

—人工システムの新たなパラダイムをめざして—

創発システム研究がめざすもの

《討論者》池上高志君(東京大学)・玉置久君(神戸大学)
 三上貞芳君(北海道大学)・三宅美博君(東京工業大学)
 山村雅幸君(東京工業大学)
 《司会者》小林重信君(東京工業大学)

小林：標記のテーマで、電子メールによる座談会をはじめたいと思います。私は、司会をおおせつかりました東工大の小林です。どうぞ、よろしくお願いします。

討論会の趣旨は、「創発システム」の最前線にいる研究者に集まっていただき、研究を進めるうえでの基本的考え方はなんなのか、どのような研究に取り組んでいるのか、現在どういう問題に直面しているのか、創発システムの応用としてどのようなものが考えられるのか、将来の展望はどうかなどを議論していただくことにあります。

まずは自己紹介をかねて、創発システムをどのようにとらえ、どのような研究に取り組んでいるのか、お話しいただきたいと思います。

1. 創発とは何か？

三上：北大の三上です。私は、強化学習などの機械学習の手法と創発とのかかわり合い、そして実環境を対象とした工学利用への方法論を探るという方向で研究を進めております。現在、強化学習を用いたマルチエージェントの実環境での群行動の学習獲得に関する研究に取り組んでいまして、通信に制約をおいたマルチエージェント学習やその交通信号機の群制御への応用、多足歩行ロボットの適応的な歩容獲得問題などの研究を進めてきました。



創発という言葉は、私は予定調和ではない、設計者の予期せぬ現象を生むようなしくみ、という意味で使っております。この意味での創発システムとして、私はこのような予期せぬ現象を自己生成させて、これを抽出してまた別の対象に応用するような利用を可能とするシステムを実現できればと考えています。

強化学習自体は、ユーザ設定の目標関数最大化の予定調和型の手法ですが、マルチエージェントでの学習

に関しては、予期せぬ興味深い現象をいろいろと含むように思います。まずは、創発現象の生成装置としての強化学習とマルチエージェントの具体的設計をいろいろと探してみたいと考えています。

山村：東工大の山村です。私は、工学的な立場から創発について考えています。工学は人類が現実には抱えている問題をどのように解決するかを追求しますので、創発とは問題を解決するうえで役に立つヒントを与えてくれるもろもろの現象の一種であるとみなします。



創発には2つの側面があると考えます。第1に、創発には局所的な相互作用から高次の機能を発現するボトムアップのメカニズムと、逆に高いレベルの秩序が低いレベルの挙動を拘束するトップダウンのメカニズムの両者が要請されます。従来の工学におけるなんでも要求に合わせて作り込むトップダウンオンリーの接近と比較して、創発は新鮮で魅力的なメカニズムだと思います。

私は主として遺伝的アルゴリズム(GA)による最適化を手がけておりますが、GAは個体と集団の2つの明らかな階層をもっており、メカニズムの面の要請はわりと簡単にクリアされます。しかしながら、創発にはメカニズムのほかに、「新しい」とか「思いがけない」とかいった結果の評価にかかわる第2の要請がありまして、単にGAが走っただけでは創発が起こったとは認めがたいのも事実でしょう。この第2の要請には主観が含まれているため一般論は困難で、対象ごとに議論せざるを得ないのではないかと思います。

玉置：神戸大の玉置です。私は、生産スケジューリング問題のモデル化と解法、ならびに遺伝的アルゴリズムなどの進化型計算法に基づく組合せ最適化を中心に研究を進めております。

最適値探索法としての進化型計算法の特徴として、解候補の集合を用いて探索が進められること、および評価値のみに基づいて探索方向が(事後的に)決められることがあげられます。探索過程においては、探索近傍を多様化すること、多様な個体を保持選択すること、および解表現の自由度を高めることなどが可能となると考えられます。これらの可能性をうまく引き出すことができれば、最適値探索の効率が高められますし、さらには、問題の適応的モデリングや探索パラメータの適応的調節という点において、適応的な探索が可能となると考えます。

まずは、このような意味での創発的な探索を実現するための要件および方法論を整理/構築していきたいと思っています。その後、あらためて“創発とは？”に対する答えを模索していくつもりです。

池上：東大の池上です。私は、複雑系の科学をテーマに研究しており、なかでも計算機のなかに人工世界を構築することで生命を理解しようという、人工生命のアプローチをとっています。具体的な問題としては、自己複製の起源、多様性と突然変異の機構、遺伝的コードの進化、さらにそのゲーム理論的アプローチなどについて研究を行っています。たとえば、共生にいたるにはホストとパラサイトの間でどんな力学あるいは論理が必要とされているのか。遺伝子の進化というのは遺伝子にかかっている情報に注目するのではなく、情報の読み手に注目することでわかるのではないかなどについていろいろな計算機のモデルでシミュレートしています。

創発と物理現象にみられる自己組織化との違いですが、マクロな構造ができるのが自己組織化だとすれば、ミクロな個性が多様でありつづけるのが創発といえるのではないかと。それはその系の記述の問題であるといってもいいかもしれません。N人集まったら記述が簡単になっちゃうのが自己組織化で、かえって記述が複雑になるのが創発と考えます。このとき大事な点は、記述者は外から与えないで、系の内部から構成されなければならないということです。

三宅：東工大の三宅です。私の研究生活におけるスタート地点は実験生物学でした。その頃のいちばんの関心は生命のもっている自律性とは何かを理解したいということでした。そこで、粘菌の走性をモデル系として用い、その情報統合機構を細胞生物学的に調べてきました。その結果、自律



性にかかわるいくつかのメカニズムを明らかにできましたが、それと同時に、このような科学的アプローチが根本的な問題をはらんでいることにも気づきました。それは「これが生命的自律性だ！と発見したとたんにはそれは単なるアルゴリズムになってしまう」という矛盾です。これは、自律性という現象を前にしたとき、われわれ観察者からの記述というものが本質的な限界をもっていることを端的に示しているように思われました。

ちょうどその頃、私の所属が工学系に移動したことから、工学的アプローチにだんだんと関心が向かいました。そこには、設計(デザイン)という人間に向かって開かれた表現方法がありました。この設計行為にこそ、記述される閉じた世界を超えて、生き活用される開かれた世界における自律性の表現を求められるのではないかと直感しました。1つは構成的アプローチとして人間の自律性のなかへ人工システムを埋め込むということであり、もう1つが、分析的アプローチとして自律性を支援するシステム設計論を構築することです。前者に関しては人間とロボットの協調問題を例題として、後者は群ロボットにおける機能生成の問題を例題として、これまで取り組んできました。

2. 創発研究は現代の錬金術？

小林：「記述者は外から与えないで、システムの内部から構成されなければならない」という池上さんの発言、「生命システムの自律的(創発的)現象を外から記述することには本質的な限界がある」という三宅さんの発言は、ともに「自己言及性」や「自己創出」に関連することだと思えます。まずはこのあたりから議論をはじめることにはしましうか。

池上：私は、自分自身の記述をつくるシステムを考えることにより創発がきちんと定義されるのではないかと考えています。そのためには系は自分で自分を観測するとか、自分という境界を定めることが必要になってきます。これはある意味で錬金術(Alchemy)的な考えかもしれません。

錬金術が創発と関係しているのは、やはり必然なのかもしれないとも思っています。過激な意味ではわれわれは創発を論じようとするので、脱デカルトをやろうとしているのかもしれませんが、しかし、それはアニミズムに戻ろうということでは全然なくて、そこから仕切り直して、物質と運動の理論をニュートンが考えたように、自己と記述の理論を考えることが創発を



真面目に考えるためには必要なということです。

三宅：池上さんがいわれるように、内側からの記述が必要ということにはまったく賛成です。ただし、記述する以上、その視点はどこにあるのかということがやはり気になります。池上さんは内側が重要だといわれますが、創発の力学としてダーウィン進化が重要であるというとき、観察者の視点をシステム自身にとっての視点と混同されてはいないでしょうか？

池上：私が問題としているのはダーウィン進化の起源であり、遺伝子的記述のはじまりです。遺伝的コードの重要性はコードの読み方自体がコードされているという点にあります。記述者はシステムに内在・偏在しているわけです。

たとえばチューリングパターンを使ってある種のパターン認識をするとみなせるシステムがあったとします。Logical Jump とは、チューリングパターンを示すシステムが自分が解いているということに気がつくことだといってもいいかもしれませんが。

三宅：私が問題にしたいことは、記述者のモデルを記述したのは池上さんという記述者であるということです。このときに両方の記述者の視点は一致するのか？ということ。当然、池上さんは遺伝子的記述者の立場にたって記述されようとしていることはわかりますが、それと池上さんの目を通して記述されたものです。つまり、われわれが記述することによって規定する空間の中では、記述される記述者の自律性(創発性)は説明という形式でしか成立しえないのではないかということです。

池上：まずダイナミクスを考えてください。僕は記述生成システムがどう発展していくか、を調べているわけで、どう記述が変化していくかはわれわれにもわからない内部ロジックが生まれるので、なんでそいつを記述しはじめるかわからんということが起こります。もし三宅さんは外の何かを僕がモデルつくって記述する場合についていってるんだしたら、それはまた別の問題です。外にみる自律性とは、つねにわれわれの記述を破壊する行為としてしか解釈できないからその記述の壊れていくダイナミクス自体を研究することは意味がある。たとえば神戸大の郡司さんは、記述といわず観測というが、それをやっている。説明という形式でしか成立しえない、のではなくて、そいつが壊れていくダイナミクスをみるということです。

山村：いままで、劇的な変化を伴う創発が議論されてきましたが、創発はさまざまなタイムスパンあるいはレベルで起こっています。同じ進化でも、新しい種の創出は何千世代もかけて起こったはず。ひとつの

種のなかでの品種改良は数十～数百世代で起こります。もっとスパンが短くなると、遺伝以外の相互作用による数世代かけての文化形成などの社会現象、1世代以内でも協調的問題解決などが考えられます。もちろん、もっとミクロな神経回路網での問題解決や物理的な相転移現象、もっと降りていけるかもしれません。

われわれ工学屋にとっては、これらすべての局面が宝の山に見えます。素朴な感想ですが、池上さんの「自己言及性」は大きな進化のレベルに、三宅さんの「自律性」は個体の活動のレベルにはぴったりくるけれど、ほかのすべてにまで及ぼすのは無理があるように思われます。私などはどうしても「疑わしきは罰せず」になってしまいます。

3. 創発を利用した問題解決

小林：話題を工学的なものに転じることにします。創発を工学的に利用する際には、「無に近い状態から出発して、価値あるものが生まれてくる」のを気長に待つわけにはいきませんから、創発的挙動が期待できる枠組み(たとえば、GA)を用いて、そこに種を巧妙に「仕込む」または「仕掛ける」ことが必要となります。仕込んだ「種」を公理系と考えれば、われわれは演繹的閉包の内から外に出ることはできないのですが、問題解決の性能が著しく改善することが期待できるので、工学的には十分価値があります。

山村：GAで最適化を行う場合、解の候補には制約条件がありますから、「まったく新しい」ものが結果として出てくることは望めません。このため私たちは、ある問題のクラスにおいて創発のメカニズムをもたないほかの手法では実現できない性能が発揮される時、これを創発的探索と呼んでいます。

小林：これぞ創発的探索という例を示してください。

山村：2重の同心円上に都市を配置した2重円TSPをご紹介します。2重円TSPにはC型とO型の2種類の局所最適解があります。C型解は局所探索で簡単に求められますが、O型解はたぶんどんな局所探索でも終盤に広い高原を探索しなければならないためきわめて困難です。これがサブツアー交換交叉(SXX)によるGAを使うと実にきれいに解決できます。SXXは同じ都市集合からなるサブツアーを交換します。探索の序盤ではランダムな順列同士なので、交換可能なサブツアーがあったとしても長さ2のものがほとんどです。これは序盤のSXXは順列上で隣り合う都市を交換する局所探索と同じ機能しかもたないことを意味します。中盤以降、しだいに交換可能なサブツアーが増えて探索は加速されます。終盤、局所探索がひっかかっ

ていた高原を一発で解消できる交叉が可能となり、めでたく O 型解が得られます。

小林：対象を最適化にかぎったとしても、進化的計算の潜在能力はまだ十分に開発されていないのではないかという印象を私はもっています。山村さんは形質遺伝の重要性を主張されていますが。

山村：私たちのいう形質とは GA のいわゆるビルディングブロックに対応するものです。これを適切に遺伝するとは、遺伝子空間におけるビルディングブロック仮説が、問題空間においてもうまく働くという意図です。もちろん、形質は問題領域によって異なります。「形質遺伝に凝ることは、問題ごとにヒューリスティックスを追求するのと同じになるのでは？」との疑問をもたれることがあります。私たちは、形質としては領域ごとに最も基本的・原子的なものがよく遺伝されれば十分であると感じています。ビルディングブロック仮説によれば GA は小さいブロックを組み立ててより大きなブロックを得るように働くことに注意してください。最も小さなブロックがしっかり用意されれば、あとは勝手に創発されるのです。

山村：私はつねづね最適化などに定式化された問題の記述は、本来解かなければならない問題にとっては不格好な近似にすぎないと考えております。これは玉置さんがいうところの「十分に定式化/モデル化しきれない状況」に対応すると思います。

玉置：対象とする最適化問題の定式化/モデル化が十分に定式化/モデル化しきれない、あるいは大雑把にしか定量化されていない状況を考えますと、探索の効率化という側面だけでなく、適応/学習的な側面も重要になってくると考えられます。たとえば、遺伝子表現(遺伝子型) X を $X = (X_1; X_2)$ 、最適化問題の解候補 x との対応 G を $G(X_2) : X_2 \rightarrow x$ (あるいは評価関数 F を $F(X_2) : x \rightarrow f$) のように設計し、探索の過程において、 X_1 (直接的に解候補を特定する部分) の最適化と並行して X_2 (問題のモデリングパラメータに相当する部分と解釈できます) をも、実際に観測できる量に基づいて適応的に調節していくメカニズムを考えることができます。このようなメカニズムを適応的モデリングと呼ぶことにします。

また、問題の特徴・性質が十分にわからず、探索パラメータを十分に調整しきれない場合には、たとえば、次世代の個体群を生成するオペレータ(あるいはオペレータ列) H を、 $H(X_2) : X \rightarrow X'$ のように設計したうえで、 X_2 (探索オペレータを特定するパラメータと解釈) を内生化し、この X_2 を探索過程を通して調節していくことが考えられます。これを「探索パラメー

タの適応的調節」と呼ぶことにします。

適応的モデリングあるいは探索パラメータの適応的調節では、 X_2 の部分が直接評価の対象とはならないので、「適応」の部分を実現するための計算量が多くなると考えられます。この点において「効率」が犠牲になっているといえますが、適応/学習という観点から「創発」との接点を探ろうとする場合、意義のある枠組みになるのではないかと考えています。

小林：適応的モデリングでは多様性が重要ですね。

玉置：適応的モデリングと適応的パラメータ調整において、キーとなるのは、(a) いかにかに遺伝子型を設計し、(b) (表現型ではなく) 遺伝子型の多様性を維持するかということになります。このとき、(a) では、直接的な評価となって現れないという意味での遺伝子型の「冗長性」が、また (b) では、マイクロなレベルでの多様性を維持することが肝要となります。すなわち、結果として有望(有用)なマクロの(時)系列が生じるようにマイクロレベルの設計を行い、かつその多様性を維持することが必要となります。この際、マイクロ(遺伝子型) → マクロ(表現型)の変換部分もきわめて重要になります。しかしながら、現時点では、この部分をも遺伝子型の一部に書いておくという工学的アプローチをとらざるをえないのではないかと考えています。

山村：創発的探索は、多様な答えを出すことが本質的であるような問題に本領を発揮するのではないのでしょうか。たとえば、多目的最適化は、従来はいかにして単目的すなわち答えがひとつの世界に落とすかがメインテーマでした。しかし、答えが一意には決まらないからこそ多目的なわけで、多様な答えを出すことには意味があると思います。機械学習は伝統的には答えがひとつと考えられがちですが、本来は正答率や記述の長さなどの複数の評価が複雑に絡み合った多目的最適化です。こうして見ると従来むりやり答えをひとつにして解いてきた問題の多くが、創発的探索の対象にひきこめるのではないかと思います。

玉置：多目的最適化では適応的モデリングの場合とは違ったかたちの多様性が問題となるのではないのでしょうか。すなわち、多目的最適化では問題そのものの定義は明確になされていますので(もちろん多目的関数間のトレードオフをどのように解消するかという本質的な部分を後回しにしてはいますが……)、マイクロなレベルの冗長性はあえて必要とされません。探索過程で必要となる多様性についても、表現型レベル、すなわちマクロなレベルでの多様性が重要となります。適応的モデリングや適応的パラメータ調整では、直接的には評価できないマイクロレベルでの多様性の維持と、マ

クローレベルでの(探索)有望領域の特定を同時にしなければならなかったのに対して、ここでは、いずれをも直接的に(多次元的に)評価できるマクロレベルで考えればいいことになります。いずれにしても、基本的には、(1)多様な候補の生成/保持と(2)なんらかの評価尺度(制約充足に関連するものを含む)に基づく選択/複製を繰り返し、(3)最終的に得られた結果(候補だけでなく探索過程そのものを含む)を吟味するということにはかわりはないのですが、工学的な課題において創発(現象)を考える場合、(2)および(3)における評価基準が同一であるということがネックとなります。

結局、(工学的最適化)問題および解法を特定するパラメータの設定に少しでも手を抜ける(あるいはそれらの設定に鈍感である)ようにすることによって、すなわち得られた結果だけで創発を「感じる」のではなく、(本来の目的に対して)十分に作り込みできなかった部分を補完するという点から、創発(現象)をとらえてみようと考えています。そのためには、上に述べたような多様性(冗長性)が中心的な役割を果たすのではないかと考えています。いずれにしても、なんらかの「作り込み」からは逃れられないことは確かであります。

4. マルチエージェント系における協調の創発

小林：最近、マルチエージェント系における学習への関心が高まっています。特に、協調を創発させる機械学習の枠組みとして、強化学習が注目されています。

三上：強化学習自体は、ユーザ設定の目標関数最大化の予定調和型の手法ですが、マルチエージェントでの学習に関しては、予期せぬ興味深い現象をいろいろと含むように思います。たとえば相対的な評価関数を導入して学習させるような系では、設計者の予期せぬ構造、たとえば交通ルールのような秩序を自己生成する例がみうけられるようです。生成機構だけではなく、この構造がほかに利用できるかどうか、たとえばいちど交通ルールを獲得したエージェント群に、外部からエージェントが流入した場合に、交通ルールがどれほど効くかなどを調べてみる必要があります。現在のところまだ例による検討の範囲を出ておりません。

小林：相対的な評価とはどういう意味ですか。通信は考えておられるのでしょうか。

三上：相対的な評価とは、ほかのエージェントの状態を評価に含めた関数を各エージェントが使うという評価という意味で使いました。競合しても構わないから好き勝手に自分の主張を通す方向へすすむ力を確率的な学習でかけておけば、物理系の自己組織化現象同様に相転移して(環境が変わっても)全体が満足するよう

に同期するのではないかという期待で、いろいろな対象で試してみたのが現在までの状況です。ですから積極的に通信で伝えられるだけ情報を伝えるという必要はなく、プロトコルなしで行動の干渉を介するだけの最小限の枠組みでどんなことがおきるのかというのを確かめてみようというのが現状です。

もっとも実験で行いましたのはもっと恣意的でして、行き先だけ異なる同一の移動ロボットを用意して、簡単な通信として自分の行動の主張の強さを(たとえば音の強弱などのように)見せあうような設定で、結果として(実際とても弱い確率収束ですが)右方優先のようなルールが出てくるのを観察した例があります。

山村：私たちは、マルチエージェント系における協調の創発の例として、獲物の捕獲問題を調べています。三上さんと同様に、私たちもなるべく単純な最小限の枠組みでどんなことが起きるかを追求しています。2人のハンターが協力して1匹の獲物を捕獲する典型的な例ですが、ハンターにとっては獲物も仲間も単なる環境の一部で、捕獲に成功したときのみ報酬が与えられるという問題設定です。そこでハンターが独立して利己的に報酬を追求するだけで、勢子と猟師の役割分担のような高度な協調的行動を生み出すのに十分であることを実験によって観察しています。

報酬の追求には強化学習を使いますが、ほかの機械学習ではなく強化学習を使うのは、強化学習が不確実性と同時に報酬の遅れを取り扱えるためです。報酬の遅れは、一連の行動の結果のみが評価されるような弱い情報源によって生じます。マルチエージェント系のように何が正解であるかあらかじめ決められないような状況では、通常の機械学習のように一挙手一投足に正解を与えることはそもそもナンセンスです。

私は、強化学習によってはじめてマルチエージェント系での学習というものが議論できるようになったとまで考えています。当然、予想もしなかったような結果が生じます。大抵の場合は人間があらかじめ考えた協調的な手順よりも、ある意味で効率よく報酬を得る手順を獲得します。私たちはこれを「サボる」と呼んでいます。たとえば、2人協力したほうが単独での捕獲より成功の確率を高くしておいても、単独での捕獲しか学習しない場合がありますが、後で計算してみると確かにそちらのほうが効率的であることがわかったりします。

小林：強化学習は使い方がだいで、手取り足取り教える教師つき学習として振る舞わせることもできるし、本来の自律的な学習として振る舞わせることもできます。強化学習は協調を創発させる枠組みとして適切だ

と思いますが、ポイントは報酬の設計にあると思います。副目標に対しても報酬を与えると、収束は加速されますが、予想される行動しか学習されません。同様に、収束を加速するために通信やフィードバックの機構を入れてしまうと、おもしろい行動は観察されないようです。

5. 創発研究の将来

小林：少し視点を変えて創発の本質やこれからの研究課題について議論したいと思います。

池上：普通の意味での最適化問題には創発はないように思うのは、与えられた課題を解くだけで、その課題を解かなくてはならない状況には言及できないからです。以前ロボットコンテストをみてて、青いボールと赤いボールを集めてきてそれぞれの籠に入れて多く入れたほうが勝ちというのがあったが、そこで赤いボールに青いペンキをかけて青くして自分のボールにしちゃうという超ウルトラ戦略があった。これはロボットじゃなくて製作者の思いつきなんだが Logical Jump しかかっていると思う。そういう裏わざは、明確に評価関数が与えられた問題では出現しえないと思います。

三宅：同感です。問いを発するということが創発の本質なのであって、解くということはアルゴリズムにすぎないと思います。

玉置：工学においては、解くことがその本質となります。もちろん、問題を定義する部分で「創発」を絡めた議論をすることもできるでしょうが、評価関数を事前に与えてしまう以上、なかなか「思いがけないものが出てきた」ということは起こりえないと感じます。

池上：TVゲームなどにひそむプログラマーのバグがプレイヤーに使われてしまう状況は上の例と似ていなくもない。ラベル張りできないような反則技がいっぱいあるようなゲームには創発としかいえないものをみることができます。

三宅：少なくとも完結した論理からは創発の可能性はないわけで、その意味で、工学のもつ不完結であるということの重要性に注目したいと思っています。不完結という言葉は、悪い意味で使われるべきではなく、むしろ、そうであるからこそ開かれるという意味で使われるべきだと思っています。

小林：その話はコミュニケーションと創発の関係に関連しますね。

三宅：論理の不完結性という点から、コミュニケーションと創発の問題は考える必要があると思います。われわれは、内的世界をベースにしてしか生きられない

いからこそ、ア priori に不完結であることを運命づけられているのだと思います。そして、そのことが、他者に向かって開かれていくことを必要としているわけであり、そこにこそコミュニケーションの基盤があり、創発の可能性があるように思います。したがって、異なる内的世界が相互にかかわり合うなかで、個々の内的世界がもつ論理の不完結性を完結させるための条件をどのように自己生成するのか？という視点から「創発」の問題をとらえる必要があると思います。

小林：内的世界が異なるからこそ、生命システムはコミュニケーションを必要とするのであり、コミュニケーションによって何かが創発されるからこそ、生命システムの多くは、個体としてでなく、集団としての生活を維持していると考えerわけですね。

三宅：まったく同感です。工学システム、特に「道具」とは本来不完結性をもっていたのだと思います。しかし、近年の知能化(?)とやらで、どんどん完結性に近づいてしまった。それとともに人間とのコミュニケーションを拒絶しているような人工システムが増えてしまったということです。その結果、そのシステムを人間がどう使えばいいかという情報を創発してくれなくなったと考えられないでしょうか。

池上：三宅さんのいわれる「自己完結しない」システム/論理は、すごくよくわかるんだけど、自己完結しないためにはどうすればいいか、について話しをしなきゃいかん時期なんですよ。あるいはなんである観測/記述は自己完結を許さないかを。記述が壊れゆくダイナミクスの研究はそこをやろうとしてるわけです。

三宅：私は少し違います。「否定」(池上さんの言葉では「破壊」という方法で自律性の一面は表現できているようにも思いますが、それは記述という世界にとどまった場合の話です。私は行為的なアプローチをとりたいたいと思っています。つまり、自律性とは絶対的に内部の問題であるから、その世界を記述するのではなく、その世界に参加しようということです。

池上：僕は記述の作成の失敗の連続として、遺伝子の進化や突然変異が理解できないかということをやっています。「書けない」ということが創発の源ということにならないかと考えています。

三宅：たとえば1本の包丁があったとする。この包丁はそれ自体では機能が規定されていない。それを使う人間との関係においてはじめて規定されるわけです。人間の身体の一部となることで、実にさまざまな機能を創発させてくれるわけです。包丁そのものは決して自律システムではない。しかし、それを使うことによって、人間の自律性の表現能力が高まっている。そ

して使う人を育ててくれる。包丁を使うとき、包丁を作った人間は、その使用者の自律性を記述してはいない。しかし、その作成者が内的に体験した創発的世界を、その使用者は追体験できている。こういうかたちで自律性を表現することが有効ではないかということです。

山村：池上さんの「赤いボールに青いペンキを」という例は非常におもしろいと思います。「創発」に期待しているもののひとつに、このようなアツと驚く解・解法があるのではないかと思います。しかし、池上さんの「自己言及性」は、このようなアツと驚く現象を起こすのに十分であると思いますが、必ずしも必要ではないのではないのでしょうか？このことは、三宅さんの「自律性」についてもいえます。

池上：遺伝子の研究にしろ、生態系の観測にしろ、確かに自己言及だの Logical Jump だのといってる研究者は多くないし、なくても研究できます。山村さんがいわれるように、一見「アツと驚く」研究はできるかもしれないけど、それは実はみせかけで、よく考えれば「アツと驚く」ことではなかったということが多い。本質的な驚きは記述の仕方自身に言及しているようなときに起きるのではないかということが僕の主張です。

計算機ゲームに仕込まれたバグのようにメタ記述に言及してしまってる部分がバグとして働いて、創発性の起源にならないか、と考えているからです。ちゃんと記述が定まらない部分といいかえてもいいかもしれない。自己言及もそういう居心地の悪さ「うまく決まらない」という感じがあるが、使える場合がある。

たとえば、赤いボールに青いペンキの話も赤いペンキで塗り変えた場合のルールは未定義、つまり何を赤いボールとみなすかが、未定義だったのにゲームは行われてしまったわけで、そこに一見「アツと驚く」があったわけです。法律にはつねに例外が生まれてしまうようにルールの完全な規定は無理なのです。にもかかわらずわれわれはゲームをはじめることができるし、みんなが典型的だと思うルールにのっとなって戦略も生まれたりする。しかし、それとは別にルールの例外がつつかれてゲームがひっくりかえることがある。これをみていくのは、工学的アプローチがいいという三宅さんの意見には賛成です。ロジックが完全に定まっていなくても動いてしまうものを容易に構成できそうだから。計算機でそれをやろうとしたら下のビットについては決められないが、それが大きく影響を及ぼさうるカオスに関連させて語られることになるのではないか。カオスを用いて計算機にも未定義のまま動

くロジックをシミュレートできたら、大きなブレークスルーになると思います。

6. おわりに

小林：議論は尽きないのですが、時間がリミットに近づいたようです。冒頭に紹介しましたように、本討論会には「創発システム研究」の最前線にいる若手研究者に集まっていたいただき、忌憚のない意見を述べていただきました。討論会ですので、なんらかの統一の見解を導きだすことは目的ではありません。討論を通じて、皆さんがどのような考えをもち、何をめざして、どのように研究を進めているのかが明らかになったとすれば、目的は達成されたと思います。この討論会に触発されて、読者のなかに新しい考えが創発され、創発システムへの関心が高まることを祈念しまして、討論会を終えたいと思います。どうもありがとうございました。
(1996年5月31日受付)

[著者紹介]

池上高志君

1961年2月15日生。89年東京大学大学院理学系研究科博士課程修了。89年京都大学基礎物理学研究所学振特別研究員。90年神戸大学大学院自然科学研究科助手。94年東京大学教養学部物理教室助教授、現在に至る。進化するゲーム、共進化、自己複製の理論などの研究に従事。

玉置久君 (正会員)

1962年12月14日生。90年京都大学大学院(電気工学専攻)博士後期課程研究指導認定退学。同年4月同大学工学部電気工学第二学科助手。95年10月神戸大学工学部電気電子工学科講師現在に至る。スケジューリング問題のモデル化と解法、進化型計算論に基づく組合せ最適化手法に興味をもつ。

三上貞芳君 (正会員)

1962年6月4日生。90年北海道大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年同大学工学部精密工学科助手。93年同大学システム情報工学科助教授、現在に至る。強化学習、自律ロボット群などの研究に従事。

三宅美博君

(本号 p. 544 参照)

山村雅幸君 (正会員)

1960年5月25日生。89年東京工業大学大学院総合理工学研究科システム科学専攻博士後期課程満期退学。同年同大学同研究科助手。96年5月同研究科知能システム科学専攻助教授、現在に至る。多戦略学習、進化型計算、創発システムなどの研究に従事。

小林重信君 (正会員)

(本号 p. 513 参照)