

Feature: We are the ROBOTS

ロボットの生態系

浅田稔+佐倉統

ASADA Minoru and SAKURA

Robot Ecosystems



浅田稔



佐倉統

「ロボカップ」の実践と課題

浅田——「ロボカップ」については最近知名度が上がりましたが、これは6年ぐらい前に北野宏明[★1]さん、国吉康夫[★2]さんと私の3人を中心にして、日本が欧米型の人工知能(AI)に対して新たなチャレンジを発信するべきではないか、という趣旨で始めた一連のワークショップから生まれたものです。ロボット研究者は「スキル(行動知能)」という言葉を使うのですが、人工知能は、シンボル[★3]ではなくボデイル[★4]が動く知能なんです。それが知能と呼べるかどうか、という議論があつて、そうした話から知の新たな局面を引き出せないか、という議論が始まったのですが、93年頃にそれを具体的に示せるものはないだろうかと考え、形にしたのが「ロボカップ」でした。

北野さんは「AAAI(American Association of AI)」というアメリカの人工知能学会が主催するロボット・コンテストをその前に観戦していて、面白くないと言っていました。それは例えばロボットが机の上にある紙コップを取ってくる時間を競うタイム・トライアルだったりしたのですが、ロボットはまず、テレビカメラで環境を見て画像を取ってモデルを作ってという具合で、10分間ぐらい動かずにいた後でやっと10cmぐらい動いて、またじっと止まってしまうんです。すると観客は飽きてしまう。これだと生き生きしたイメージがないんですね。そこでロボットにサッカーをやらせるコンテストはどうだろうか、という発想で「ロボカップ」が始まったんです。

最初は「ロボットJリーグ」という名称でしたが、そのときじつは、われわれの研究室ではシューティングをするロボットの研究が始まっていました。従来のように、工場で役に立つロボットというイメージではなくて、もう少し遊びに近い面白いものをやりかっただし、さらにそこに新しい概念を埋め込みたいと考えていました。ちょうどその頃北野さんと国吉さんも同じような発想をもっていて、3人とも似たことを考えていたんですね。

そして93年の秋ぐらいには、97年に名古屋で第1回大会を開催しよう、という話になっていたんです。ですからだいたい4年の準備期間をおいたことにな

ります。これは面白いお遊びに一見受け取られますが、研究テーマとして、いろんな意味があつて何が有効かをはっきりさせようとしてきました。ここにはマルチエージェント[★5]の問題を含め、いろいろな問題が入っています。特に標準問題[★6]が格好の例に挙げられます。チェスに代表されるように、ある標準問題をみんなが解くことによっていろいろな科学技術の発展に役立つのではないか、というようなテーマづけをしてきたのです。

組織的な立場から言う、「ロボカップ」の試みは一般的なテーマとして面白いのですが、個人的な立場としては、ロボットの学習・進化や認知プロセスを含め、できれば認知モデルを発展させたいと考えており、そのベースとして「ロボカップ」を使いたい、というのが私自身の主旨でした。チェスが40年ものあいだ人工知能の標準問題になっていましたが、IBMのコンピュータ「ディープ・ブルー」が世界チャンピオンのガルリ・カスパロフを破って、一応の終結を見たのですから、新たに、チェスによる標準問題とは対照的な問題を設定すべきであろうということです。というのも、チェスは静的で、完全に情報が記述されており、一対一の闘いであるのに対して、「ロボカップ」のほうは複数のエージェントが協調しなければなりません。そして決定的に違うのは、多分、複数の意思決定エージェントが存在して何かをするという



サッカー・サーバーの画面

作業は、結論として解答を得ることのできない問題だということなんです。それが一番本質的な差異だと思うのですが、それをどう解くかがわれわれの使命です。そのプロセスのなかでロボットが社会性を帯びて——というも協調しなければいけませんから——自分なり他者とどう協調するかについて、ロボット自身の内部構造の設計から純粋にボトムアップ的にどれぐらい可能なのか、ということを確認したいと思いました。

「ロボカップ」には三つのリーグがあります。一つは「シミュレーション・リーグ」で、これは実際にロボットを作るための経済的、人的、空間的資源がない人用の、サッカー・サーバーというメインのプログラム上で試合をするもので、コンピュータ科学者が参加しやすいリーグでもあります(笑)。サーバー上で11対11の合計22のプログラムが競います。これはテレビゲームにも似ていますが、基本的には11対11のプログラムの闘いですから、完全に分散的な、つまり協調をどうするのかといった学習進化の問題がそこには入っています。シミュレーション・エージェントも、ロボットの視覚は全方向ではなく90度で、テレビカメラによって捉えられた画像のように、遠くが非常に曖昧になり、近くが明瞭になります。それから味方と交信も可能ですが、それは敵にも聞こえてしまう。つまりオンエア状態なので、だますこともできるし

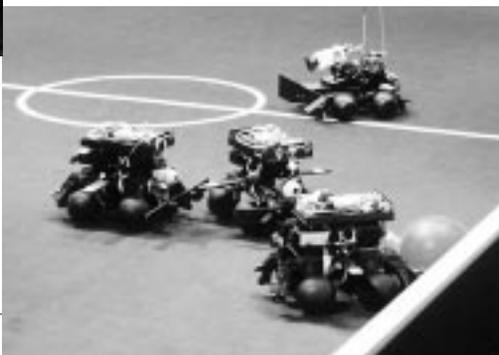
ノイズ合戦もできる。そして発信したぶんだけエネルギーをロスしてスタミナが減るので、最初に動きすぎると後で疲れてしまう。そういったわりとリアルな状況を再現し、しかもそこそこ動くサッカー・シミュレーションを可能な限りつくろうとしました。

残りの二つのリーグは実機のロボットによるもので、「小型リーグ」と「中型リーグ」に分かれていて、小型は直径15cmくらいのロボットなのですが、最初の頃はそこにセンサーやカメラ、CPUを搭載することに無理があったので——もちろん現在ではそれは可能ですが——、最大5台の小さなロボットを、天井のカメラを使って全体のフィールドを見て制御するというものでした。つまり、1つのCPUで複数のボディが稼働するというタイプだったわけです。サッカーフィールドとしては卓球台を使い、サッカーボールとしてゴルフボールを使用しました。「中型リーグ」はだいたいロボットの直径が45cmくらいで、このサイズだとロボットにすべて搭載可能なため、天井カメラは禁止しました(第1回の名古屋大会では一部で許可したのですが)。そして純粋な分散制御、つまりロボットが自分自身のテレビカメラで見た映像だけを頼りに戦略を立てるもので、フィールドは卓球台の面積の9倍で、実際のサッカーフィールドの15分の1くらいの大きさです。現状ではスローイングができないので周囲に壁を作っています。アイスホッケーみた



ロボカップ中型リーグのフィールド
(1998年パリ大会)

ロボカップ小型リーグのフィールド
(1998年パリ大会)



いなんです、アイスホッケーは愛好者はサッカーよりも少ないので(笑)、サッカーと呼んでいます。

われわれが野球ではなくサッカーを選んだ理由は、野球はほとんどがピッチャーとキャッチャーのやりとりだし、ルールがあまりにも複雑すぎるからです。単純なルールで攻守が瞬時に入れ替わり、場を共有するとなると、サッカーやホッケーのほかにバスケットボールもありますが、ロボットに「手」を付けるのが難しく、一番単純なのがサッカーだということを選んだのです。

佐倉——私が以前アフリカでチンパンジーの研究をしていたときに、現地の子供たちがグレープフルーツをボール代わりにしてサッカーをやっていました。確かにサッカーは非常にシンプルなスポーツで、それが人気の原因かもしれません。

浅田——われわれとしても、ロボットにとっても、ルールがシンプルなので取っつきやすいんです。とは言っても、もちろん11台のロボット同士を戦わせるのはかなり難しいですし、しかもわれわれの最終目標は、2050年までに11台のヒューマノイド・ロボットが、実際のワールドカップのチャンピオンチームを破ることだ、と言っていましたから。これは要するにチェスで40年かかって人間のグランド・マスターを破ったのと同じような目標を立てているわけです。

佐倉——チェスもコンピュータが人間に勝てるのは1960年代だろうと言われていましたから、それから30年くらい遅れたわけですね。するとサッカーは21世紀末ぐらいになるかと予想できますけど……。

浅田——といっても2050年には私は97歳ですから、生きていますか……。最初は不可能だと思われても、例えばライト兄弟が飛行機を発明してからジャンボジェット機まで何年かかったかを考えてみると、科学技術の予測ほど難しいものはありませんよね。昔は部屋一つ分の大きさのコンピュータが、いまではノートサイズですから、その進展を考えると、11台のヒューマノイド・ロボットが、ワールドカップのチャンピオン・チームとまではいかなくとも普通に人間と試合できるぐらいならば、それほど難しくはないだろう、と言ってくれた方もいます。

佐倉——浅田さんと北野さん、国吉さんの3人がほぼ同時期に同じことを独立に考えたということは面白いですね。歴史を振り返ってみると、なにか新しい動きがあるときには、同じ場所で同じ時代に複数の人たちが、よく似たアイデアを独立に考え出すということがしばしばあるように思います。例えばフォ

ン・ノイマン(1903-1957)はハンガリーの人ですが、あの時代のハンガリーはボランニー兄弟(カール, 1886-1964/マイケル, 1891-1976)もいるし、ルカーチ(1885-1971)も出てくるということで、いろいろシンクロしていた「知的スポット」だったと思います。ディアギレフ(1872-1929)のロシア・バレエ団(バレエ・リュス)も同じような現象ですね。ニジンスキーとカルサヴィーナが踊り手にいて、音楽はストラヴィンスキーやラヴェル、美術がピカソ、脚本はジャン・コクトーというふう集まった。いろんな分野で、そういうアトラクターのような時代と場所があると思うんです。

それともう一つ面白いと思ったのは、ヨーロッパもアメリカもずっとチェスが標準問題であったわけですが、日本のAIは後発だったためにチェスに取り組むタイミングを逸した。逆にそれが次のプロジェクトを考える際に有利に働いたのではないかとも思うのですが……。

浅田——私自身にはあまりそういった意識はないですね。ただ、北野さんが言い出したときに私はすでにサッカーをするロボットの研究を始めていて、国吉さんも同じことを考えていたんです。

佐倉——お互いにそれを知らなかったわけですね。**浅田**——そんなにはよくわからなかったですね。どちらかといえば、北野さんは人工知能研究の側面から、国吉さんはロボティクスの立場から研究していましたが、それまで扱われていた問題がそれほど面白くないというので、それに代わるプロジェクトをやろうとして始まったのです。北野さんはもともと日本人的発想をもった方ではありませんから、研究者として面白くことができればいいという感じで、それが結果として日本よりは欧米で受け容れられるようになっているんです。確かに同時発生的であるという見方は面白いですね。

ボディを欲しが ロボットの視覚

佐倉——ところで浅田さんはもともと視覚を研究されていて、それからスキルやボディを取り入れようと考えたわけですね。視覚だけで研究を進めることの限界はどのへんでどういうふうにお感じになったのですか？

浅田——認識問題そのものに限界を感じましたね。というのは当初、機械がどのように認識をするのか、といった点に興味があったので、パターン認識やコ

ンピュータ・ビジョンの分野に入ったのですが、実際にやってみると難しい問題なんです。人間の視覚機能を機械に代行させるわけですが、例えば認識問題でよく例に挙げるのは「これはリンゴですか、ミカンですか?」といった問いで、リンゴの写真を撮って、色、形、大きさをコンピュータに見せ、コンピュータが丸くて直径約15cmくらいと計測して「これはリンゴだ」と判断したときに、本当にそれをリンゴと認識したと言えるのかという疑問が生じます。われわれがリンゴを認識するのは、視覚だけではなく、触覚や臭覚、重量や、かじると酸っぱい、歯茎から血が出るかもしれない、といったいろいろな語り方があって、そういった関わり合いのなかで初めてわれわれにとってリンゴが意味をもつんです。

われわれは三次元の環境のなかで、リンゴをモデル化するプロセスと認識するプロセスを同時発生的に体験します。しかしそういう過程を経ずに、リンゴは「赤くて、丸くて、直径が約15cmのもの」といったテンプレート・マッチング[★7]のみで捉えると、本当の認識はできないのではないかと、つまり、シンボルだけでなく、ボディが重要なのであって、身体をもってリンゴを持ち、触り、嗅ぎ、かじることで初めてリンゴの意味が理解できる。コンピュータに閉じた内部の世界だけではなく、ボディをも体験させるからこそ意味論が発生しようと思うのです。

佐倉——生物を研究対象としている立場から言うと、視覚というのはとても高度な情報処理なんですね。哺乳類はほとんどが嗅覚をおもなメディアとしていて、視覚が主体なのは人間をはじめとする霊長類ぐらいです。動物全体を見わたしても、視覚に頼っているのは鳥ぐらいで、あとは視覚は白黒だったり明暗しかわからなかったりといった具合で、匂いやフェロモンのような化学物質をおもなメディアにしている動物がほとんどです。ですから、生物の進化の過程を系統発生的に見ると、身体による認識が先にあって、それがだんだん洗練されてきて、視覚はかなり後になって出てきたと思うんです。ところが、どうしても人間が研究しているために、ロボットをつくるときにはまず、視覚だ、となる。あるいはAIだと言語処理だということになって、「難しい、難しい」と言っているんですね。しかしそのようなやり方では限界が見えてきたので、ロボット研究やAIに生物的な特徴をとり入れていこう、という流れになっているのでしょうか?

浅田——ええ、私自身の研究の方向性はそうです

ね、機械工学でもそうなんですが、人間の認識をもとにすると、視覚情報を処理しようというときに最初からある種の合意ができています。ところがいまおっしゃったように、視覚は進化の歴史のなかでリファインを繰り返した結果であって、断片的なものでしかないんですが、実際に生きている空間のなかで認知をするプロセスは、そうした断片的なものを扱っているだけでは駄目で、フレーム問題[★8]にぶつかってしまう。だからもっと根源的に考えると、視覚情報を考えるときにも、視覚情報だけでなく、身体との関わり合いを考えないといけません。

いま言語についておっしゃいましたが、言語もそういうレヴェルから始めて、つまり視覚情報を自分との関わり合いのなかで抽象化していく過程のなかで、ある状態に対して自分が行動を取るというS-R図式[★9]が出てきて、それが私にとってシンボルになる可能性がある。つまりいままでの行動に対して自分がどういう反応をするか、というときに、最初からシンボルがあるというのではなく、最初から自らの体験によってシンボルが出てくるのです。それを複数のエージェントが共有すると、ある種言語発生的なことが起きないかと思っているんです。「ロボカップ」の場合、複数のエージェントが協調しますから、何らかのコミュニケーションが発生しなければいけませんね。しかも明示的なコミュニケーションではなくて、阿吽の呼吸とかアイ・コンタクトができたときに、お互いにシンボルが共有されはじめたとすれば、言語的なある種の構造が構築され、言語の発生について説明ができるのではないかと。視覚だけではなく、言語を含めたいろいろな問題についてやってみたいですね。そしてそれをテストケースにしたいと思っています。

佐倉——去年の春に、横浜の「みなとみらい」で浅田さんも一緒に出席されていたフォーラムがありましたが、そこで、人間や動物が相手の気持ちを理解するとはどういうことか、という「心の理論(theory of mind)」の話題が出ました。人間が他者を理解するときには、言語で理解するというイメージがまずありますが、動物同士が理解し合うときには、多分それだけではなく、もっとアイ・コンタクトや阿吽の呼吸のようなものが重要になっている。そして、それをロボットにやらせるためにはアルゴリズム自体が変わってくる必要があるということを浅田さんはおっしゃっていたように思うのですが、そこで素朴な質問なんですけど、そういった新しいアルゴリズムというの



は、はたしていまのコンピュータ・プログラムのできるのでしょうか。

ただ門外漢のイメージとしては、コンピュータ・プログラムはやはり言語だから、結局はそれをどううまく使うかという話に終始しちゃうのではないか。だけど「心の理論」や他者理解の問題はそういうところにあるのではなく、もやもやとしたところから言語や理解の構造が創発★10]するためには、ちょっと無理ではないか、力不足ではないか、という気がするんです。

浅田——基本的にロボットの脳の構造としてどういうものを仮定するかということですが、本質的に言語をつくるという意味合いなのか、それともコンピュータのベーシックな仮想上のツールの上でそれを再現することかなのか、異なりますね。例えば、従来のやり方は逆に、ウェットタイプのボディを採用して、ボディ自体を変えていけば、これまでのコンピュータという概念はなくなってしまう。そこまで行けば嬉しいのですが、自分の研究室でシミュレートなり検証できる範囲では、ボディそのものを発達させることが難しいので、現時点ではボディは固定してソフト的な内部構造を変化というか進化させるかたしかないんです。でも究極的には、ウェットタイプのボディ自体の進化も考慮に入れなくては、本質には到らないと思います。

ロボットのメント・モリ

浅田——ちょっと話が飛びますが、ロボット自身が自分の死を理解するかどうかはすべてだと思うんですね。死の認識こそが、自我の発生を含めて必然的になるのではないかと。しかし、そのためには脳が足りないんですよ。自律神経がまだできていませんから、どこが痛いとか調子が悪いとかいうことを認識できない。それができて初めて、自分が発生してから死に至るまでを意識することができるし、それが可能になれば、つまり時間意識を獲得できれば、ある意味で生物のアナロジーに戻ることができると思っています。そのためには腐らなければなりませんから、ボディがウェットタイプにならなくてはと思っています。いまのままだと、モーターやギアがあって、スチールやプラスチックのボディなんですけど、ギアが欠けても自分で調子が悪いとは思いませんからね、ロボット自身がボディを変えていくというやり方は非常に現実的で、ロボット病院で「右腕が悪いから

換えてくれ」とかロボット自身が言えたらいいと思います。そのためには自律神経がないと難しいんです。じつはいまの話は、もしもロボットが人間と試合をやろうとしたら、ロボット自身が痛みを感じないといけないということを意味します。ヘディングして人間が脳震盪を起こしてもロボットがケロッとしていたらまずいんですよ(笑)。やはり人間並みに傷ついたりする体をつくろうとしたら、痛みを感じないといけない。まさしくアシモフの三原則★11]どおりに、ロボットがちゃんと自分の身を守るようにならなければいけないわけですね。

佐倉——それは自分をモニターするということですよ。その機能が問題だと。

浅田——いまはそこが足りないんです。

佐倉——言葉でモニターしていても絶対に「死」には至らないかもしれないですね。死は生殖や再生産と表裏の関係にあると思うんです。再生産・生殖のときの、いわゆるセットが死でしょう。前の世代が死ぬことで、次の世代が生きていけるという面がありますよね。死があるから生がある。

浅田——ロボットの場合、ボディが古くなれば、脳だけを取り出してボディを交換すればよいという気もしますが、しかしわれわれの主張は、ボディがあつて初めて脳が成長するので、交換だけでは意味がないのです。

佐倉——美学の問題になるわけですね(笑)。

浅田——「ロボカップ」をメディアがとりあげる際に一番多く使われる言葉は、「人工知能を搭載したロボット」といった言い方ですが、それはやめてほしいのです。「一方に人工知能があり他方にロボットがあつて、それらがつながるというのではなく、ロボットのボディがあるからこそ知能が発生するんですよ」と言っても、「人工知能搭載」と書かれてしまう。それから脳だけとつておいてボディを換えたときには、多分ロボット自体の価値が変わるんですね。ジェリー・ルイスの映画《底抜け! 大学教授》(1963年)のようにボディが変わると発想がまったく変わってくる。ボディが価値観を変え、発想されるものを変えるわけです。だから頭脳をそのままにしてボディを変えましょうというのはちょっと違うんです。少なくとも腐っていくボディであること。そして死には生殖が伴うからどうしようもないんですが、その問題への対応が一番悩ましいところです。

佐倉——逆に言うと、それがきちんとしていないと、非計算的知性にはならないだろうということですね。

浅田——つまり「昨日はああいうことをしたけど今日はこうしよう」といっかどうかです。もちろんいろいろな制約がありますよ。それによって一日のサイクルを決めたり、環境からの情報によって時間概念が決まるわけですから、ロボットにとっては12時間が一日であるかもしれません。しかし、少なくとも時間という概念が出てこない限りは、自我も発生しないし、他者認識も難しいのではないかと思います。相手という意識が出てくるのは、自分が過去／現在／未来という軸のある時間概念をもって生きているからこそ、相手の行動を理解する可能性が出てくると思います。

サッカーで言うと、フェイントをかけるロボットがつくれればいいと思っています。というのも、フェイントは相手という概念をもち、相手の行動を予測して、その裏をかいてだますということですが、だますためには自我の意識がなければならぬと思うんです。また、他人の視点に立てる、相手が何を見ているかがわかるということは、相手の目がどれかがわかるということですね。それが遺伝子的に規定されているのか経験から出てくるのがポイントですね。

佐倉——そうですね。それは遺伝と学習と両方あると思うんです。京大霊長類研究所でチンパンジーのアイちゃんを使った種弁別の実験をやっています。チンパンジーの写真とヒトの写真を見せるとちゃんと区別するんですね。だけどアイちゃん自身の写真を見せると、これは「ヒトだ!」と答える(笑)。

浅田——最近の発達認知心理学によると、基本的には両方の要素があるらしいです。つまり何らかのポテンシャルがあつて、経験によってコネクションができる。経験や環境、その他がある種のパターンをつくるらしく、それは理解できるのですが、われわれとしてはロボットの設計をしなければならない。するとどういっかたちで何を埋め込んでいっかということの見極めがつかないと、私自身としても納得できないんですね。

個の同定は結果なのか、
要因なのか

浅田——いまやっているのは、例えばパソコンで、相手の大きさや向き、位置の変化の情報によって動きを予測して、それによって自分の動きを決めているということをしています。ある種他者の記述をつくっているんですね。自分の行動と観測される相手の行動の相関関係を取つていると言えます。ただ、まだ心の記述が少ないんですね。つまり先程アイ・コンタク

トと言いましたが、実際はまだそこまでは行っていないですね。例えばロボットが2体あつた場合に、相手のロボットがこちらのロボットの行動を認識するためには相手のロボットの視点が必要になりますが、現段階では、相手の視点がどこかを認識することはできません。ただし、もし相手の目の前にボールがあつたときに、ボールの動きに連動して相手が首を振り回すといった因果関係を記述することによって、それが視点の動きかどうかまではわからないけれど、どうもそこが連動しているという記述はできるんですね。それはあくまでも後天的な話です。しかし完全に後天的にできるかという、生物はそうでもないし、では何を埋め込んだらいいかということですね。

佐倉——生物の場合でもいろいろなケースがあると思います。動物のだまし信号として一番単純なのは、信号の意味が完全に遺伝的に形成されていて、それを悪用するというパターンです。例えばあるホタルは別の種のホタルを食べるのですが、そのメスが餌になるほうの種の求愛信号を出すんですね。そうするとオスがつられてフラフラと寄ってくる。それをメスが食べるという例があります。この信号のもとの意味は、ほとんど遺伝的に埋め込まれていますから、何を使っているかという部分は決まっているのです。

あとアマゾン流域に棲む鳥でも、違う種同士で混群をつくるのがいるんですが——これは捕食者から身を守るためだと考えられていますけど——、そうすると餌場が十分大きいときはいいのですが、小さな餌が足りなくなってしまうことがあるわけですね。そのときに、自分たちではないほうの種の警戒音(捕食者が来たことを知らせる音声)を真似て鳴くんですね。そうすると相手はバーツと逃げていなくなつてしまいますから、自分たちだけで餌を独占できる。「オオカミが来た!」と同じことですが、これも使い方が決まってる部分で別の信号を出して攪乱するというものですね。このたぐいのもは、ほかにもいろいろな動物で見られます。しかし、サッカーのフェイントでは、相手が自分の出している信号をどう受け取るかということまで見越して、意図的にだます必要があるわけで、これはかなり高度なことですね。

浅田——いま言われているテンプレートが、なぜ進化の歴史のなかでできたのかどうか問題ですね。

佐倉——いろいろな遺伝的な変異があつて、そのな

かで適応的なものが残ってきた、と、試行錯誤という自然選択の結果、できたと言われていますね。確かめたことはないですが、

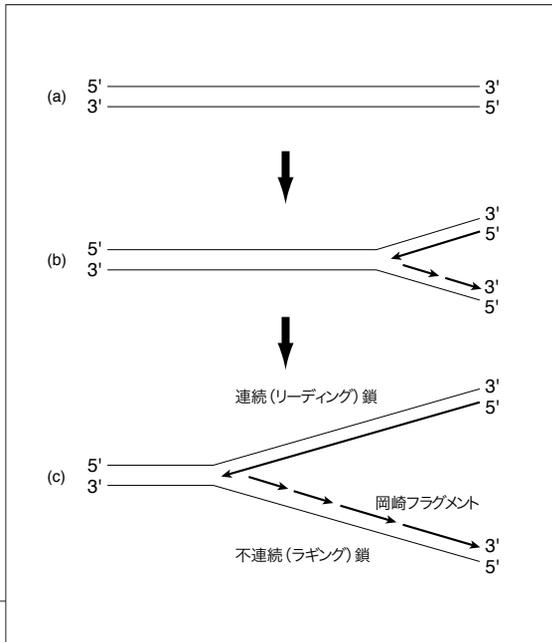
浅田——このあいだ団まりな(大阪府立大学)さんという生物学者がおっしゃるには、明らかに意図がある、つまりパッシヴな状態では出てこないだろうと言うんです。何らかのかたちで遺伝子レベルか細胞レベルにおいて、何らかの意図が出てきているとしか解釈できないんですね。例えばテンプレートは単なる進化でできたのかどうか。この点についても、個という遺伝子レベルで自然に出てきたのか、もしくは何らかのコーディングがあるのか、ということに興味があります。というのは逆に言うと、虫にしても鳥類にしてもテンプレートについて言うと、ライフタイムにおいては変化がありません。しかし私が思うには、霊長類になって大脳皮質が発達すると可塑性が増すので、ライフタイムにおいて変化が起こりうると思うんです。それが、経験つまりライフタイムにおいて、スキルを獲得するメカニズムがわかれば、ロボットにも応用できると思うんです。

佐倉——鳥は学習能力はかなりありますから、生涯

のあいだにかなり変わると思いますね、信号そのものの地域差はかなり大きいはずですよ。ホテルも、学習しているんじゃないかな。そういう意味では遺伝的なテンプレートと経験による可能性というのは相対立する概念ではなくて、量的な違いでしかない。ちょっと前からよく言われているのが、学習による行動変化が、遺伝的進化に先立つという考え方です。つまり、行動が生物進化のプロモーターとして作用するわけです。行動が変われば生物の生息環境そのものが変わりますから、それが何世代か続くうちには遺伝的組成も変わってくるということですね。

テンプレートと可塑性で思い出したんですが、第一製薬の古沢満さんが、遺伝子の進化について「不均衡進化仮説」という大変面白い仮説を出しています。DNAは二本鎖ですが、これは実際に使われる鎖は片方だけなので無駄に見える。いままでは情報の冗長性をもたせておく。つまり、何かあったときのためにバックアップをとってあるんだ、と考えられていたんですが、なんだかピンとこない話でした。古沢さんはそこに積極的な意義がある、二本鎖

DNAの二本鎖構造と不連続複製



DNAを遺伝子にしたから、生物はこんなに急速にいろいろに進化できたんだ、というんです。

DNAの二本線は、じつはまったく同じなのではなくて、突然変異率の高いほう(連続鎖あるいはリーディング鎖)と低いほう(不連続鎖あるいはラギング鎖)があるんです。どういうことかという、DNAの複製の方向は3'末端から5'末端へと決まっていますが、二本鎖はその向きが逆に向き合っているんです(図a)。DNAの二本鎖全体が複製をつくるときは端から順に塩基の配列を読みとって複製するのですが、そうすると、二本鎖の片方(連続鎖)は全体の複製方向と同じにどんどん読んでいってそのまま複製を作れますが、もう片方(不連続鎖)の読みとりは全体の複製方向と逆になってしまいます。だから端から順に一定方向に読んでいくことができなくて、ちょっと読んでまた戻って、そこからまたちょっと読んでまた戻って……、ということを繰り返しています(図b, c)。せっせと小さな断片をつくりながら、後ろに下がっていくわけですね。この断片は岡崎令治[★12]さんという、当時名古屋大学にいた生物学者が1966年に発見したので、彼の名にちなんで「岡崎フラグメント」と言いますが、この「岡崎フラグメント」がたくさんできた後で、全部つなぎあわせて一本のDNAにするわけです。不連続複製と言うんですけど、こんな複雑なことをしているので複製の効率が悪くて、コピーミスが多い。つまり、不連続のほうは突然変異率がものすごく高くなるんです。だけど、コピーミスの確率を増やしてまで、いったい何でこんなめんどくさい複製をやっているのか？それはなぜDNAが二本鎖かということも通じる疑問です。でも、「岡崎フラグメント」の発見から30年以上たつのに、いままでこのことはきちんと説明されていなかったんです。

そこで古沢さんが言うには、わざと突然変異率の違う二本鎖を組み合わせているのではないか。つまり片方(連続鎖)は正確に忠実なコピーができるから、少なくともいまの環境にいま現在の程度に適応している、その遺伝情報は確保できる。もう片方(不連続鎖)はコピーミスが多いから、いまとは違った遺伝情報ができやすい。そのほとんどは、だいたい駄目なんだけど、ごくごくたまに、いまよりうまくいくものが出てくる。そうしたら、今度はそっちをベースにして、複製を続けていけばいい。これを古沢さんは「元本補償制度」と言っているんですが、最低限の元本は確保しておいて、自由な部分で冒険してみる

という感じですね。そういう、進化のために非常に優れたメカニズムをDNAはもっている。だから生物の遺伝子として、RNAやほかのものではなくDNAが残ってきたのだらう、というわけです。いままで、突然変異体には適応的でないものが多いからそれで進化できるのか、という疑問が多かったんですが、この仮説だとその点も解決できるので、私はとても面白いと思うんです。さっきの話に直接結び付くかどうかはわかりませんが、一方には基準となる不変のテンプレートがあつて、もう一方でかなり大胆に周囲を探索する可能性を留保するという、その両面がないと、学習も進化もうまくいかないのではないかと思いますね。

浅田——それは面白いですね。例えば、コオロギの場合、オスのホロホロという美しい鳴き声にメスが反応して交尾するんですが、鳴くのがうまくないオスは、うまく鳴くオスの近くに行って、メスを横取りしてしまう。メスは、鳴いているのがどのオスカわからなくなってしまうからなんですね。つまり、自分がうまく鳴けないということをどうやって知るのか、そして、うまく鳴くものの近くに行って横取りするというのは、かなりインテリジェントな行動にも見えます。そうした行動を虫がとるからといって虫は、個を同定しているかという、長尾隆司(金沢工業大学)さんという研究者は、個の同定は行なっていないと言うんです。私は個の同定が、さっき言った自我などに関わっていると思うんですが、コオロギにおいては生殖したいという本能にしたがつて、そうした行動を取っているわけです。そこでは個の同定をしていないと言うんですが、私は同定しているんだとも思っています。

サッカーで言えば、A君、B君、C君と個を識別することで、敵・味方の違いはわかります。そして、味方のなかでもあいつはシュートがうまいからパスしてやろうということは、行動や学習を通して個を識別するメカニズムが何かあれば、チームワークによっていろいろなことができると思うんです。コオロギの場合、個の同定はしていないと言うんですが、それに近いレベルの賢さをもっているとも言えると思います。

佐倉——いまおつしやられたのは、「^{スニーカー}間男戦略」と言つてヒキガエルとか魚とかいろいろな動物で同じようなやり口が見つかっています。自分がうまく鳴けないことをオスがどうやって知るかというのは、難しい問題ですが、単純にメスが来ないからではないですかね。それと、どういう条件が満たされると個の同

定と言えるのか、ちょっと浅田さんのおっしゃっているのがわからないところがあるのですが、やはり脳とか中枢神経系の発達がものすごく関係していると思います。

浅田——鳥類は社会生活を営みますし、一夫一婦制を取っているものもありますね。あれは明らかに個を同定していることを示しますね。コオロギの場合はメスとならばどんなものでも交尾しますから、社会性ということはありませんが……。

佐倉——コオロギはやはり無理でしょうね。コオロギみたいに、卵を大量に産む生物は、そのなかで淘汰がかなりきびしく行なわれてしまいますから、同定してもなくても、結果的に数で勝負というか、生き残ったものが個という、結果オーライなところがあります。鳥類や哺乳類のように、一回に数匹の子供しか産まない生き物では、一個体一個体が大事になるので、「個」の重要性が出てくるのでないか。もちろんコオロギでも個体差があるにはありますが、それが個々の行動の決定要因になっているかという、望み薄のような気がします。

浅田——つまり個を同定する必要がない限り、同定はしないと、しかし進化の歴史を考えると、個の同定が結果なのか要因なのかはわからない……。

佐倉——生物の進化の過程で、多分二つの道があったと思うんです。一つは、統計的にしか個が出てこないもの。つまり、コオロギのように匿名性の世界で成り立つもので、ミツバチやアリのように社会性をもつとしても、それは個性の結果として社会が出てくるのではなくて、あくまで集団が単位として考えられる生物です。もう一つは脊椎動物のように、一つ一つの個体を大事にするもの。人間がその典型です。地球上の生物はこの二つに、どこかで分かれていったのではないか。前者の場合、個とか個体差というのは結果でしかないけれども、後者の場合は、個性というのが重要になると思います。多分ロボットの場合は、目指しているのは個性をもつことでしょうが、現状の行動能力は匿名的なものなんだろうね。

自他の関係性と 時間を意識する自我

浅田——ロボットでは、埋め込みやコーディングを明示的に書いてしまうと、その範囲内ではちゃんと動くけれども、少しでも外れてしまうと全然動かなくなってしまう。それはある意味では役に立つロボットな

んですが、可塑性をつくっておかないと、個の同定なり相手をだましたり、ということができない。そういうことができるようになって欲しいと思います。

佐倉——それはよくわかりますね。これは動物行動学者のコンラート・ローレンツが言い出したことですが、私は生物の進化は一つの学習だと思うんです。遺伝子が環境に適應するということは、「学習」しているのだと言うこともできる。けれども個体の生涯における学習——普通の意味での学習——は、中枢神経系に情報を蓄えるメカニズムがないと不可能です。ロボットに学習させる場合でも場合でも、だんだん難しくしていくんですよ？

浅田——基本的には強化学習★13を利用していくんですが、時間の概念がないから、記憶はもっていないんです。いまは時間概念をいかに獲得するか、ということが問題になります。数コマとかの範囲での時間はあるんですが、それより長いシークエンスではない、というより明示的な時間的構造を使っていない。その意味ではまだ反応的なんです。

佐倉——それは難しいことなんですか？

浅田——どういうやり方でやるかによりますが……。私としては、ある種の経験や学習を通してできた構造のなかに、どのように時間の概念ができるのか、ということを考えていると思います。空間であれば、三次元情報なので、三次元のプロジェクションのなかで自分の位置関係が空間として得られますが、時間軸の概念は難しい。いまは単純に物理的な時計で入れてありますが、主観的時間については、時間のセグメントを区切って計っているんです。しかし、こちらの意図で分けるのではなくて、学習を通じて自律的に区切って欲しい。

佐倉——シュート成功率のようなロボットにとつての学習時間、主観的時間と、一方では物理的な時間もあるって、という二本立て……。

浅田——基本的には物理的な時計があって、それが行動の構造化を行なっていますが、例えば明示的に、昨日、一昨日という区別は付けていないんです。そして、昨日はここまでしかできなかったけれど、今日はここまでできた、という時間的なフォルムの構造化ができるようになって欲しい。そうするとロボット自身が自分の過去を語れるようになると思います。

佐倉——それは「ロボカップ」をはるかに超えた話ですね。これは直感的な話なんですが、生命の進化の過程では、細かい時間概念は多分出現していないと思うんです。人間の文化的な制度や教育の産

物なんじゃないかな。文字とか数字とかいろいろ使うようになって、それで初めて「昨日、今日」みたいな話が出てきたんじゃないでしょうか。自然には発生しないんじゃないかと思いますが。

浅田——それはいろいろな人に言われます。要するに人間は時間感覚が特殊なんだと。

佐倉——これもまたアフリカの話なんですけど、村人からしょっちゅう果物を買っていたんですが、小銭がなかったりしてツケになることが多かったんですね。そうしたら、ある日おじさんが、「昨日のバナナ5本分のお金をもらっていない」と言うんです。そこで帳面を見ると、昨日はその人からバナナを買っていないことになっている。一昨日も一昨日も買っていない。それでだいぶ口論したんですけど、いろいろ聞いてみるとバナナの売買があったのは2週間前なんです。それはちゃんと帳面の記録とあっていて、つまりそのおじさんには、昨日と今日と明日、あるいは過去と現在と未来しか、ヴォキャブラリー—というか時間感覚がないんですね(笑)。一日二日の区別はぜんぜんない。だけどこれは、どこでもついでこのあいだまではそうだったのではないかな。日本でも平安時代の結婚は、男が結婚したいと言って三日間ちゃんと女のところへ通ってきたら正式の結婚式になって、「三日の餅の式」というのをあげたそうです。三日というのがやはり節目で、昨日とか今日とか数えられる時間を超越した、永遠の時間の象徴と考えられていた。結局世界中どこでも、細かい厳密な時間の概念が出てきたのは、やはり近代資本主義社会になってからではないかな。そうだとすれば、ロボットに「今日の自分」「昨日の自分」と言えるようにしたいというのは……。

浅田——時間をどう捉えるかということ、最終的には自己を創出したいということ。時間概念をロボット自身がどう捉えるかということに関わってくると思うんです。

佐倉——そのときに、遠い過去・近い過去・いま現在・近い未来・遠い未来ぐらいでも十分なんじゃないでしょうか。10年前・3か月前・1週間前・一昨日・昨日・今日・明日・明後日……という概念が必要になってくるのかどうか……。

浅田——これは少し極端な言い方ですが、少なくとも自分がどう発達してきたかを語れるぐらいの時間的構造がないと、自己は出てこないだろうと思います。

佐倉——どちらが先なんでしょうね。自己ということ

がずっと同じだということと……。

浅田——そこなんです。自己が同じだと思えることが大事で、これは他者もそうなんですけど、それを意識できるためには、何らかのかたちで時間がコード化できないとだめだと思いますね。

佐倉——「昨日、今日」という話になるとトップダウン[★14]の話かなと思いますが、もうちょっと漠然とした、「昔と今と未来」みたいな話はあると思います。それはチンパンジーやゴリラだってもつていますよ。しかし先程も言ったように、それを意識できる要素や道具があるかどうかが重要だと思いますね。

浅田——少なくとも時間の概念のなかの自己と無数に絡み合っていると思います。それは、他者がいつも他者でありつづけるという同定が自己というものにとって本質的でありつづけるのと同じことなのです。

共進化に向けて/ 競合より難しい協調

浅田——最近「遺伝的プログラミング(Genetic Programming)」[★15]という研究をしています。ここでは、2体のエージェントがどれだけ協調行動できるかという研究を進めています。しかし、なかなか協調しないんですね。つまり意思決定機能が一つであれば、最適化や効率という概念が使えるんですが、意思決定機能が複数あると、そうした概念は吹き飛んでしまう。いかにだましながら協調させるかというのが難しいのです。ロボットが2体だけで、第三者たる敵がいらないから協調しません。つまり2体だけだと協調する必要がありませんから。もちろん協調したほうが効率がいいことはわかっているんですが、それだと2体の仕事の差というか、タスクの難易度がそろっていないとダメだとか、いろいろ工夫しないと協調してくれない。例えば、パス&シュートの場合、パスするロボットのタスクはシュートだけするロボットより複雑です。なぜなら、相手に正確にパスし、なおかつシュートするロボットがちゃんとシュートしてくれないと自分のパスが評価されない。そこで自分でシュートしてしまう。そのほうがたやすいですよ(笑)。敵を置くと協調せざるをえなくなるんですが、それでもなかなかうまく協調してくれない。

佐倉——それは面白いですね。

浅田——その話をどこかの研究会でしたら、本当に子供たちのサッカーのチームでそれをやってみたと

いんです(笑)。ゴールキーパーがいて、残り二人がパスとシュートするんですが、キーパーが圧倒的に強いというんです。つまり邪魔することはとても簡単で、協調するのはとても難しいんですね。するとキーパーばかりが勝ってしまい、攻める側はやる気をなくして全然進化するんですね。それでキーパーにいろいろな制約をかけると、三人が同時に共進化するんです。

佐倉——イギリスの心理学者がやった、ブタを使った古典的な実験があるんですが、順位の強いブタと弱いブタがいて、ボタンを押すとそこから離れた場所にエサが出るような装置を使わせます。最初の予想では、強いブタは餌の出口にデンと陣取って、弱いブタがせっせとボタンを押すだろうと考えられていたんですが、実際には協調関係に似たような状態になったんです。ボタンを押すのは強いブタで、弱いほうが餌の出口に座ったまま、動かずして餌を食べられる。強いほうはボタンを押すやいなや出口にかけつけて、弱いブタをはじき飛ばして、餌を少しは手に入れることができるんです。ではなぜこうなるかという、強いブタが餌の出口で陣取っちゃうと弱いほうはぜんぜん餌をとることができないので、ボタンを押さなくなっちゃうんですね。そうすると強いブタも餌にありつけない。しょうがないから、自分でボタンを押す。弱いほうは労せずして餌を獲得できますが、かけつけた強いほうもおこぼれにあずかれるわけです。だからこの状態が一番いいんですね、双方にとって。もちろんこれは、餌の量とか、ボタンから餌の出口までの距離とかによって、変わってきますから、ある条件下では協調するということですね。個体の力関係の差とタスクの難易度の差のバランスがうまくとれたポイントで、ブタの協調関係も生じるんです。

浅田——まさしくそうした問題があつて、関係の複雑さと初期位置が同期しないとうまく共進化しないですね。

佐倉——そうですね。人間の場合、社会的な制約がそういう外部条件として機能することがあるんじゃないでしょうか。人間はかなり協調するようにできている動物だと思いますが、それは、外部集団との対立関係の裏返しとして存在しているのではないかと思うんです。例えば、水利をめぐるつとりのグループと対立するから自分たちは一致してそれを守るとか。つまり外圧ですね。敵となる第三者がいると協調関係が促進するという構造があると思います。

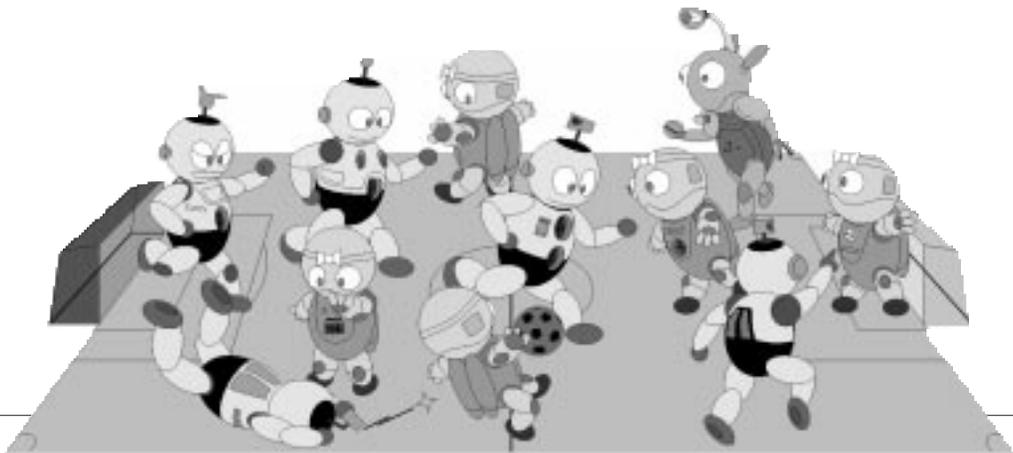
浅田——面白いですね。競合はできるんですが、協調は難しく、すごく苦勞しています。ゲーム的にそういうシチュエーションがなかなか出てこないんです。最近ではようやく一番下のレベル、つまりシュートさせるなどの学習はできるんですが、そこから上のレベルにはなかなか到達しない。そこで、人間の場合でも選手をコーチが教えるように、最近では、ボトムアップの手法で、コーチと共進化【★16】させる実験をやっています。コーチが指示を出して一度でわからなくても何度か繰り返すうちに、「こんなことを言っていたのか」とわかる。またコーチの側からも、何度言ってもわからない選手に、何度か繰り返すうちに、「こいつにはこう言えばいいのか」ということをお互いにやっていく。そういう共進化実験です。つまり同じ視点に立つロボット同士とは異なり、違う視点で見ているコーチがロボット・プレイヤーとインタラクションする共進化実験をやっているのです。

期待される自我ロボット像

佐倉——自我、時間意識、身体感覚、他者との協調などたくさんのテーマで話をしてきましたが、そうしたものをロボットが獲得することの社会的意義というか、人間がどういう恩恵を受けるのかについてはいかがお考えでしょうか？

浅田——基本的にロボットは必ず人間の社会に入って共存するだろうと思うんです。そのとき従来のロボットだと機能が限られていて、融通が利かない。いわゆる産業ロボットをはじめとする非常に断片的な局面だけの作業ではなく、人間と共存するロボットという、人間とのコミュニケーションを含めていろいろな多様性を含むだろうと考えられます。つまり、人間を対象にした場合、ある単一のタスクを遂行するだけではなくて、買い物をしたり話を聞いたりという人間相手のインタラクションをどう捉えるかが問題になる。現状のロボティクスでは難しく、もう少し現場でカスタマイズしてきちんと言うことを聞いてくれないとダメだと思うんです。そのためにはロボット自体がきちんと他者を認識し、人間とは何かということを理解してくれないと困るんです。

いま一番問題になっているのが、コミュニケーションです。現状の音声認識システムでは言語に関してはまったくトップダウン的に与えています。それでわれわれが最終的に目指しているのは、先程の話で



5対5のロボットの戦いとレフリーロボットの様子

言う、ロボット自身が成長する過程のなかでシンボルが発生すれば、ロボット同士でコミュニケーションを取るようになる。それが確立すると、対人間で何が起こるかという、ペットとの交流のようなコミュニケーションです。つまりペットは話せないけれど、人間とは何らかのコミュニケーションを取っているわけですね。人間の赤ん坊も初めはしゃべることができないのに言葉を覚えていくわけですから、ロボットも、人間が教えることで言葉を覚えるようなメカニズムを設計していかなければならない。そうしてカスタマイズの過程を含めて、人間と接触することで人間を理解するようになるでしょう。

最初に言いましたように、自分の体を使って物と関わることによってその意味を捉える。リンゴを取り出して「これはおいしい」とやるかどうかはわかりませんが、ロボットにとって意味があるものとの関わり合いで言葉を提示することで、人間とのコミュニケーションの可能性が出てくると思います。それが多分人間と共存するロボットにとって必要な機能なり能力であって、自我とまでいかななくても認知プロセス、いろいろなことを理解して言葉を発声し、人間とコミュニケーションがとれる人工システムをつくりたいですね。

佐倉——よく世間では、ロボットがやたらと自我をもつとかえって危険だと言われます。人間に反抗するようになるんじゃないか、と。しかしそうではなくて、自我をもたないと人間とはコミュニケーションできないということですね。そうしてこそ、初めて人間と共存するロボットができる。

浅田——言い換えるとアシモフの三原則をきちんと守ってくれるロボットということなんですが、そんなロボットはまだいないんです。まず人間を守る、人間の命令を聞くということは、人間がコンピュータに明示的に行動を指示したプログラムを入れてそれを実行するというのではなく、やはり音声なりで指示したことを守るということです。そしてこれが一番難しいんですが、ロボットが自分を守るということ、ロボット三原則のヴァリエーションはいろいろあるんですが、ロボットが人間社会で生きていくうえで必要なルールだと思うんです。まあSFではそれを破るロボットが数多く現われていますが、しかし少なくとも三原則を実現するためのメカニズムは明らかにしたいですね。

佐倉——浅田さんのそのへんのお考えにはやはり、『鉄腕アトム』の影響があつたりするんでしょうか？

浅田——個人的にはそうでもないですが、やはり日

本のロボット研究における『鉄腕アトム』の影響には計りしれないものがあると思います。欧米のロボット研究にはそういう文化的な意識はないですね。彼らは、「壊れる機械」という認識です。それに対して日本の研究者は認知とかは関係なく、最終の姿は『鉄腕アトム』だというのが多いんです。その意味では生命論的というか、認知プロセスを含めてもう少しヴィヴィッドな人間との円滑なコミュニケーションを目指しているところがあります。

佐倉——前に聞いた話ですが、アメリカでは、産業ロボットが導入された際に「俺たちの職を奪うな」と工場労働者がストライキをする。昔なら機械打ち壊し運動。それに対して、日本では「モモエちゃん」とか名前を付けて歓迎パーティーまで開いたりしちゃう(笑)。

浅田——やはり手塚治虫の影響は大きいですし、文化的な違いも大きいですね。最終的にロボットが人間社会に入るにあたって、私は、日本がそれに取り組みむ世界で最初の国になるのではないかと思っています。ホンダがヒューマノイド型のロボットをつくるという発想も、欧米ではできないと思います。

佐倉——すると「日本から発信の……」というは期せずしてそうになっているということですね。

浅田——「日本発」と言いすぎるのは欧米に対するコンプレックスの裏返しだと思うし、私にはそういう意識は全然ありませんが、結果としてそうになっているのかもしれないし、そこに文化的なものも関係しているのかもしれない。

佐倉——賛成です。そもそも、「欧米vs日本」という図式は無意味ですよ。欧と米は一つじゃないし、中国や韓国も無視しちゃってますもんね。コンプレックスの発露ではなく、いろいろなアプローチの仕方、いろんな視点がありうるということだと思います。ロボットの共存というのも、文化によって、さまざまな仕方があるということですね。 *

[1999年1月6日、ICC]

■注

★1——ソニーコンピュータサイエンス研究所シニアリサーチャー。音声翻訳システムの開発、超並列人工知能の提唱を経て、分子生物学・計算生物学と「ロボカップ」の研究を通じて、新たな知的システムの構築を目指している。

★2——電総研知能システム部勤務。ヒューマノイド、インタラクションなど知覚と行動の相互作用による知能の研究に従事。

★3——コンピュータのなかで操作される記号。

★4——実際のロボットの手や脚、頭などの物理的な身体。

★5——複数のエージェント(ロボットも含む)が、協調したり、競争する行動を学習したり、獲得する研究分野。

★6——コンピュータ・チェスに代表されるように、多くの研究者が共通の問題にアプローチすることで、その分野の発達・展開を促すために設定される共通のテーマ。特に、優劣を判定するために対戦型の競技が選ばれていることが多い。

★7——直訳すると「ひな型照合」。中身を吟味せず、表層的に照合可能かどうか調べること。

★8——知識表現(データとそれを実行する手続きの統合的表現)が実用化システムに応用されることによって起きた問題。状態とその変化を知識表現の基礎として用いるときには、ある時点で変化する状態だけではなく、変化しない状態のすべてを記述しなければ、次の状態が確定しないこと。

★9——刺激=反応(stimulus-response)図式。ある感覚入力を得られたときにどのような行動をとるかは、その入力状況だけに依存し、それ以前に得られた入力やエージェントの内部状態には依存しないという考え方。ここでは、感覚入力をより一般的に状態や状況とすることにより、ロボットの内部状態やある程度の時間的な推移をも含めた意味で、ある状況に対する行動決定が、学習を通じて行なわれていることをさす。このことは逆に、状況そのものもロボット自身が規定していくことが重要な点であることを意味する。

★10——いくつかの解釈があるが、ここでは上下双方向の相互規定関係を意味する。下位レベルの要素の個別的局所的運動が合成され、下の階層ではみられなかった上位の大域的秩序が形成されるボトムアップの過程と、上位の大域的秩序が再び下位の個別運動の発現の動機や境界条件となるトップダウンの過程の両方の動機が創発である。例えば生命システムでは、細胞(下位要素)が集まって器官や個体(上位大域的秩序)が形成される(ボトムアップ)が、個体の振る舞いや器官の状態は細胞の活性にも影響する(トップダウン)。同じような関係は、さまざまな階層システムで普遍的に見られる。

★11——SF作家アイザック・アシモフが提唱した「ロボット工学の三原則」。

第一条 ロボットは人間に危害を加えてはならない。また、その危険を看過することによって、人間に危害を及ぼしてはならない。

第二条 ロボットは人間にあたえられた命令に服従しなければならない。ただし、あたえられた命令が、第一条に反する場合は、この限りでない。

第三条 ロボットは、前掲第一条および第二条に反するおそれのないかぎり、自己をまもらなければならない。

——ロボット工学ハンドブック、第56版、西暦2058年

(『われはロボット』小尾英佐訳、ハヤカワ文庫SFから)

★12——1930-75。分子生物学者。元名古屋大学教授。不連続複製を発見してDNA複製機構の解明に大きく貢献した。原爆被爆の後遺症のため、早世。

★13——Reinforcement Learning。外部環境から報酬や懲罰など行動の良否の評価を与え、それを繰り返すことで、エージェント(ロボット)自身が評価の良いものへと改善し最適な行動を自律的に獲得していくことを目指す手法。

★14——註10参照。

★15——コンピュータ言語で書かれたプログラムを、そのまま染色体(遺伝子型)とみなして、それに遺伝子的アルゴリズム(遺伝子型中に生存に有利な構造を自然選択によって順次獲得し、それらの有利な部分を逐次結合することで、より環境とその変化に適応する個体へと発展する進化の過程をシミュレートする方法)を適用し、性能評価によって淘汰をかけるという枠組みで問題を解く試み。

★16——複数の進化の過程が、相互に影響を与えながら進化していくこと。生物進化の場合は複数の種が相互作用しながら進化することをさすが、ここではサッカーのプレーヤーとコーチが互いに影響しあひながら学習していくことを意味している。

あさだ・みのる——1953年生まれ。大阪大学大学院工学研究科教授。知能・機能創成工学専攻。ロボットの視覚研究から知的システム構築を目指して、ロボットによるサッカー試合「ロボカップ」を提唱、実践し、身体による知能発現、認知ロボティクスの研究を行なっている。

さくら・おさむ——1960年生まれ。横浜国立大学経営学部助教授。進化論に基づく科学技術論と人間論が研究目標。著書=『現代思想としての環境問題』(中公新書)、『生命の見方』(法蔵館)、『進化論の挑戦』(角川書店)、『生命をめぐる冒険』(河出書房新社)など。

