

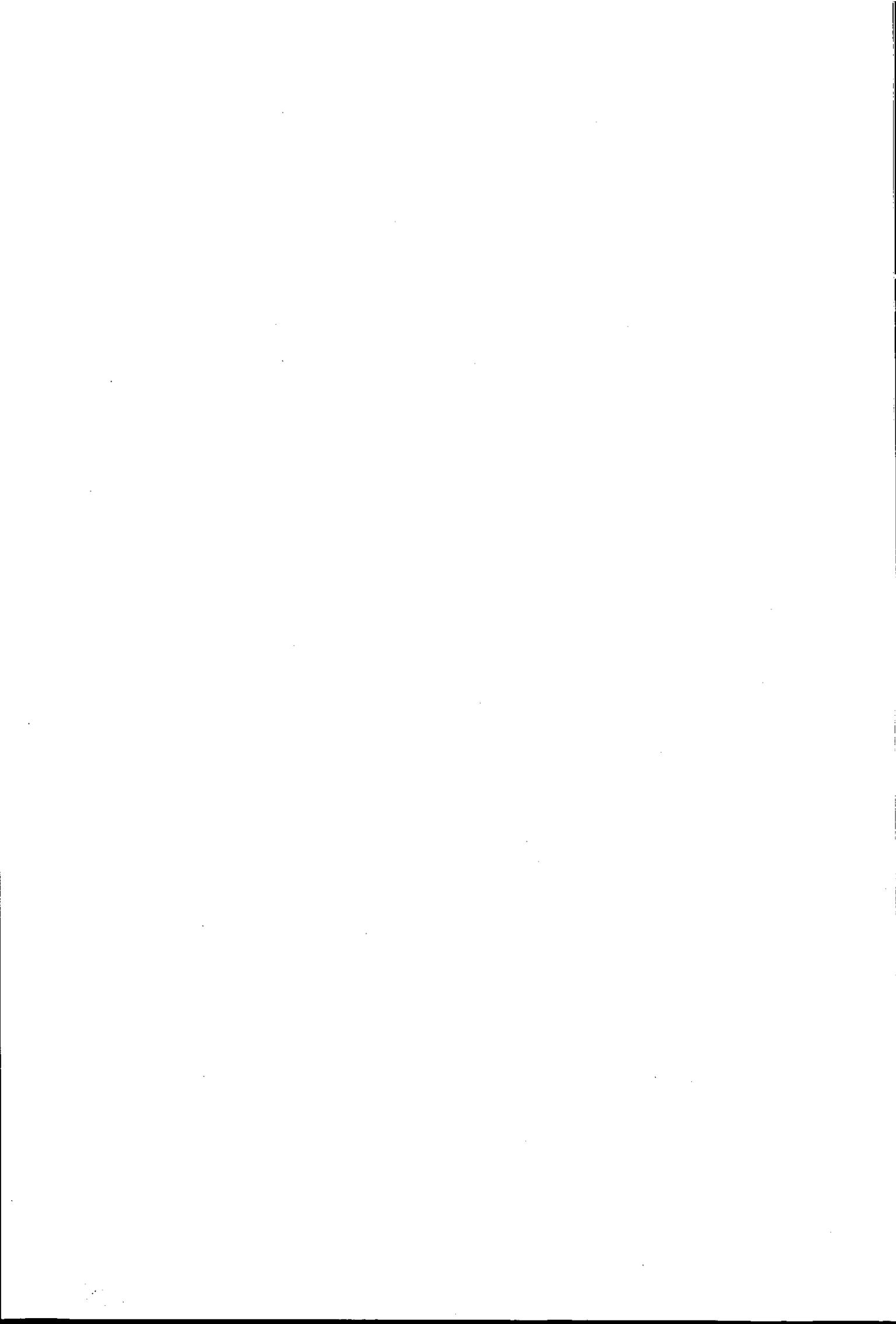
06-R 007

# 人工知能の技術と市場の動向に関する 調査研究報告書

平成7年3月



財団法人 日本情報処理開発協会



### 7.1.3 人工生命 (AL) は工学の新しいパラダイムとなりうるか？

司会 (柴田) 前半は AI と AL, そして生物学と AL という科学的な議論でした。これからは、ユーティリティ最大を目的とする工学において、AL が役に立つ技術になるかどうかについて、金沢工業大学の三宅先生と、ソニーコンピュータサイエンス研究所の谷さんにお話しいただきます。

#### (1) 場的制御の自律分散ロボットへの適用

最初に、三宅美博金沢工業大学教授に「場的制御の自律分散ロボットへの適用」についてお話しいただき、質疑応答が行われた。なお、本研究については「5.10場を用いた人工生命」の中でも紹介されている。

中島 人間が系のなかに含まれているようなシステムが大事だというのはそのとおりだと思います。

三宅 はい、それをやりたいわけです。

中島 ただ、よくよく考えてみるとブラックボックスのビデオだって、結局、人間は系のなかに含まれているのではないかと思いますけれども、もっと端的な例として、車の運転を考えますと、あれはほんとうに物理的ななかにいます。たとえば初心者が車を運転すると蛇行して、先ほどのオシレーションと同じようなことが見られるわけです。車はおっしゃっているような人間がなかに含まれたシステムとして見ていいのか、それとも今の話とは本質的に違うものがあるとしたらそれは何なのかということをお願いいたします。

三宅 一つだけ言っておきますと、完全な意味で人間が含まれているとか、完全に人間が除外されているという考え方はしないほうがいいと思います。つまり、どの程度人間が主体的に関与している状況にあるかという問題と、現時点でのエンジニアリングの趨勢はどちらに向かっているかという観点から判断したほうがいいのではないかと思います。

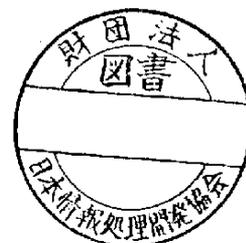
金沢は坂道が多いものでオートマでないといけないので私はオートマ車に乗っていますが、私は基本的にはマニュアルのほうが好きなんです。しかもサスペンションがあまり効いていないほうが (笑)。自動車から人間へ情報をいかにフィードバックするかという問題だと思います。それはべつにコンピュータならどうかという問題ではなくて、いろいろなシステムがそうだと思います。つまり、人間と人工システムの間情報の循環性をどの程度高めてやるかという方向での設計を心掛けることが重要ではないかというのが私の言いたいことです。

最近ナビゲータというものがあります。あれがそのうち進みますと、たとえば本郷三丁目と言うと勝手に車が行ったとします。これは便利かもしれないけれども、私はそんな車に乗りたくない。おもしろくないから。

これが目指しているものは自動化という人間を排除する方向ではなくて、人間を取り込むことです。これまではどちらかという人間は気まぐれだし予測不可能なものであったわけです。そういうものは明示的な設計にはそぐわない。人間の動きをすべて予測して設計することはできない。だからむしろこれまでは設計原理に依存して、人間はむしろ排除されてきた。人間をそういうふうにするのではなくて、積極的に取り込んでいくという考え方がおもしろいのではないかと考えているわけです。

寺野 先ほどの例ですとそれぞれ何をやりたいかというのはコンポーネントは知っているわけですか？合わせて動くとか自分は何番目のグループにいなさいとか。

三宅 基本的なルールセットは持っていると思ったほうがいいと思います。ただ、それがどのルールを適用するということはシチュエーションに応じて変わるわけです。



寺野 ですからやりたいことはとりあえず持っているわけですね。

三宅 そういう意味ではそうです。

寺野 それでいみじくも名古屋空港の飛行機着陸失敗事故の例でおっしゃいましたけれども、あれはまさに飛行機のやりたいことと人間のやりたいことが違っていたからということですね。その種のマルチエージェントでもALでもいいのですが、エンジニアリングシステムに適用しようと思うと、ゴールのコンフリクトをどうするかとかゴールの設定をどうするかという問題が依然として残ると思いますけれども、そのへんについてはどうお考えですか。

三宅 今のご指摘は非常にエッセンシャルなご指摘ですが、今のシステムのなかには矛盾を含んでいません。そういう意味では同じ目的性を持ったものなのでどう協調するか。それはまだ私のモデル化の不備なところですね。実際にこの研究はまだまとまったものではなくていま進行中のものなのですが、その方向は取り入れていきたいと思っています。

先ほど名古屋の話がありましたが、人間を排除した形で自動化をしてしまうと、人間と自動操縦システムのコンフリクトが起こるわけです。私がここで言いたかったのは、こういうものは人間がフォーメーションのあり方に介入することができる。つまり開かれた制御系なんです。私の話のいちばん最後に言いましたように、人間1人と後ろにロボットが4個あったときに、そのプロセスに人間が介入できましたので、そういう方向では、いわゆるブラックボックス的な自動制御システムとは違う。非常に開かれている。そこが私の言いたいことです。

北野 これは言葉の問題になってしまうかもしれませんが、名古屋の場合はエアバスですけれども、あれはいま排除したとおっしゃったのですが、エアバスの設計思想は人間をコントロールの一部だとみなして、人間の間違いをコレクトする、補正するのが、エアバスコックピットの設計思想なんです。ボーイング機のコックピットは人間が外にいるんです。人間が最終判断を下すのがボーイングコックピットの設計思想なんです。

エアバスで事故が多発しているのは人間が制御のなかに入っているがために、補正を勝手にされて、要するに人間がやるというのがコンポーネントのマルチファンクションなんです。ツールズでの事故とかエアバスはいくつかあるのですが、あの事故の後でエアバス社の公式声明では何と言っているかという、エアバスコックピットはコンピュータエアプレーンだ。だから人間は変なことはしないでくれ、全自動で飛ばしてくれと言ったわけです。でもそうもならなくて、最近のボーイング型コックピットみたいにコックピットを全部改造しているらしい。

ですから排除というか、言葉の問題だと思いますけれども、考え方として最終判断をだれが取るのかというのが一つ。ただし、飛行機をフル全自動から全部マニュアルにするとっても、全部マニュアルにしたら飛行機は飛ばないですから、どこのところまで人間のコントロールにすぐに戻せるか。あとそのプロシーチャーがどうなるかをエクスペクトしておくとか、そういうふうな考え方で見たほうがいいのではないかと思います。

三宅 それはおっしゃっていることはわかります。たとえば自動操縦が人間のエラーを補正するという背景には、何が適切か正解というものが仮定されていると思います。だからなぜ名古屋でああいうことが起こったかという、自動制御に任せるときにコックピットにいた人間が、これはまずいと思って修正しようとしたわけです。飛行機のようなまったく予測できない自然環境のなかで動作するシステムを考えた場合に、むしろわれわれは環境を規定することはできないということを前提にして設計しなければいけない。その点を忘れてしまっている。

だからコントローラの制御が完全であるという前提に立てば、今のお話はわかるのですが、だからこそこに人間というものがいかに参加していけるかという観点が重要になると思います。

北野 そうですね。だからコックピットの設計の分野だとそういう予測不能な状況に対処できるかどうか、脆弱性という言葉で呼んでいますけれども、関与できなくなっていたわけです。

三宅 そういうことなんです。結局、自動運転システムというのはいかに明示的設計というか、いかに人間の環境予測ができないものかということです。ですから今日言った話もそうだし、最近言われているインテリジェンスは環境が完全にモデル化できるということをあきらめなければいけないのではないかと。情報の部分性という問題が必ずつきまとうわけで、完全な理解ができないときに、じゃ、われわれはどうやって適切な戦略を取ることができるのか。この問題ではないかと思えます。

長尾 エアバスの設計はそうじゃなかったんじゃないですか。環境を制御できないことを前提に作ったんじゃないですか。人間が予測できないということを前提にして作ったわけです、設計上。

北野 だからそこを自動化して…。飛行機事故を見ると7~8割はパイロットミステークなわけです。だから人の関与する部分を減らしたいというのが思想であって、ボーイングもエアバスも両方ともそれをやっていた。それで事故率が半分以下まで落ちた。だけどまだ残っている。ボーイングはそこで人はあくまでもファイナルディシジョンで外に残して、そしてほかのところで自動化を全部させたわけです。エアバスは人が間違ふんだから、間違ったのはコンピュータが人の行動を直そうというところまで行ったわけです。究極まで自動化を推し進めたわけです。設計思想の最後のところで違いが出てきて明暗が分かれたわけです。

そのときの自動化のときに環境の変化に関する予測はたぶんできていたわけです。それがファクターであまり落ちていなかった。ただしその予測を人間のリアクションが間違っただけらしい。

佐倉 二つお聞きしたいと思えます。2番目のロボットの同調の話で、位相勾配があって、ずれてもまた秩序が出てくるという話で、全体と自分の関係を知っているという表現をなさったと思えますが、そのような表現をされていいものかどうか。ロボットは基本的に隣のニアレストネーバーに合わせるということです。あくまでも創発して全体の秩序が出てくるのであるとすれば、ロボットが知っているのは隣がどう動いているかで、それに合わせたただけであって、全体と自分の関係を知っているという表現をしていいものかどうかということが一つです。

三宅 結果的に言えば位相的なオーダーのなかに全体のなかの自分の位置を表現する特徴が埋め込まれていたという性質があるわけです。ただもう一つの問題として、ただしそこでロボット間のインタラクションはどうしてもニアレストネーバーなんです。じゃ、何がまずいかというと、要はロボット間のコミュニケーションを考えたときに、明示的なコミュニケーションを考えた場合、それはどうしてもシンボルというかメッセージというか、非常にローカルなインフォメーションしか使えなくなると思えます。隣がいま何を発して、隣のロボットがいま自分にどういうメッセージを送ったとか非常にローカルなものですが、いま私がここで使ったのはローカルではなくて、一種のパターンです。ローカルにパターンをもう一度読み解いたわけです。

佐倉 ロボットはそういうことをする能力を持っているわけですか。

三宅 ロボットがもともと持っているのではなくて、オーダーを解釈するシステムを付けてやることによって、先ほど言ったような能力ができたわけです。

佐倉 それをロボットが解釈しているかどうかは人間側の解釈の問題なのではないですか。

三宅 要はそういうふう設計してあるわけです。それはロボットにそういう解釈能力を私と与え

であるわけです。

佐倉 それはアプリアリに。

三宅 そうです。無から有が生まれるなんていう危険思想は私も持っておりません (笑)。

中島 クラシフィケーションの質問ですけれども、ロボットに入ってくる情報は全体の足音が入っているんですか。

三宅 すぐ隣だけです。

中島 ということはたとえインプリシットにせよ、位相のなかの自分の位置が何かに入っている、ロボットにはその情報は決して伝わっていないわけですね。そういう意味では知っていたとはいかなる意味でも言えない。要するにその情報がロボットにはない。隣との情報しかないわけですね。

三宅 そうです。そこが私の言いたいことのエッセンスなんです。

中島 だから全体のことは知らないわけですよ。

三宅 いや、そうじゃない。

中島 そうじゃないですか。

三宅 インタクションはすぐ隣としか相互作用しないから……。

司会 全体のスケールがあって、そのなかの自分の位置がわかるかわからないかということを知っていると思いますが。

三宅 それは隣との……。それはわかるんですよ (笑)。どう言えばいいのかな。

上田 最初はわからないけどわかるんですよ。

三宅 そうですね、最初は局所的にしかわからないけれども結果的に全体の中での位置に関する情報が生成するんですよ。

佐倉 いや、わからないんじゃないですかね。わからないでもうまくいく。

三宅 いや、どうかな。

徳永 それは前にやった円の問題とまったく同じわけですね。円を描くときに二つの描き方がある。中心から等距離のところを糸を引いてグッと回る回り方は、上から見て円は知っているというふうに見ます。それに対して1個のエージェントが角速度一定で回ると円を描きます。この場合は後者です。ただそれを設計するときには角速度一定というルールを人間が知っていれば、という意味で知っているとおっしゃっている。そういうたとえでいいと思います。

司会 ルールを埋め込んであるみたいな……。

三宅 そういう意味ではそうかもしれません。ただ、埋め込んだローカルルールを越えるものが生成している。

佐倉 それはロボットが知っていると言うんですか (笑)。たとえば巻き貝が形態形成のときに対数螺旋線ですけれども、あれはべつに巻き貝が対数螺旋線を知っているわけではないですよ。言葉の解釈の問題だけど、ふつうは知っているとは言わないのではないかと思うんです。

北野 知っていなんだよね。

司会 知らないほうが価値があるというか…… (笑)。

三宅 だから最初は知らないけれど、結果的にわかるようになるわけです。

## (2) Self-Organization of Symbolic Processes through Interaction with the Physical World

ソニーコンピュータサイエンス研究所の谷淳氏に最新研究についてお話いただき、質疑応答が行われた。

中島 今の仕事自体は非常におもしろいと思っているのですが、あれがシンボルグラウンディングであるという主張に対して、ちょっと違うのではないかということをお話ししたいと思います。

人間の場合、言葉を聞いて自分のなかで分け方を変えていくというのがあります。たとえばごく象徴的なのは色が実際にあったときに、それをだいたいと呼ぶか、黄色と呼ぶかというのは民族によって違うという話が人類学的にあります。あれは自分がどういうシンボルを作っていくか、なかでいくつに分けるかというのが明らかに言語によって規定されているわけです。要するに仲間がその色を何と呼んでいるかによって、自分の区切り方が違っているという例だと思います。

もう少し一般的な言い方をすると、外からシンボル、言葉をもたらしてきたときに、自分のセンサースペースをどういう区切り方をして、そのどこに対応づけるかというのが、むしろシンボルグラウンディングだと思います。だから今と方向が逆です。

今のはボトムアップの話で、あれはわりとパターン認識と呼ばれていた話で、逆にシンボルが来たときに自分の身体とか環境のどこにマップするかというのが、方向性としてはむしろシンボルグラウンディングではないかと思っています。

谷 シンボルグラウンディングというのはまだディスカッションの段階で、90年だとハナードが『フィジカディー』にいい論文を出していて、それを受けて最近『コグニティブサイエンス』という雑誌のなかでも、サイモン、それを受けたトーレーのディスカッションがありますが、その流れのなかではシンボルグラウンディングは下から上にあがっていく過程をシンボルグラウンディングと一応言っています。だからコグニティブサイエンスのメインストリームとしては今のところそうなのではないかと思うんです。

中島 言葉はそれでいいとして、AI屋として興味があるのはさっき言ったような話で……。

谷 新たにシンボルが外から来たときに、それがどういうふうにフィジカルワードと……。こういうことですね。今まで怪物を見たことがないのに怪物とか、物語を本で読んでシンボリックな表象をもたらしたとします。それを今まで自分が持っていた実体験とどういうふうになかに埋め込んでいくか。これも重要な話です。実はそれは長尾さんと昨日の夜中話したんですよ。

中島 物語という複雑なところまで行かなくてもいいんだけど、こういうロボットはいずれ人間と対話しながら何かやっていくと思ったら、机というのをやっぱりロボットに教え込まなければいけないわけです。そういう意味でこういうロボットのドメインでもそういうことはあります。それからたとえばいまだこかに行くだけでいいですけども、たとえばロボットを10台集めてサッカーをさせようと思ったら、やはり何らかの形でサッカーのルールは教えてやらなければいけないわけです。そういうふうなことをこの延長線上でどうやってやっていくのかなというのがちょっと興味のあるところなんです。

谷 これは完璧にイントリンジックに下からやっていくのだけれども、それに対して制約的な知識をどういうふうに入れていくかというところはけっこう難しい。なぜかというとしてすべてボトムアップ的にやってきているので、ここのところにシンボルがこういうふうに入ってきたときにどうするか。これはすごく難しいです。だけど私自身はそれは研究のターゲットのなかには入れていないんです。

北野 今の中島さんのお話は重要な指摘で、谷さんのこのロボットは人で言えば視覚はあるけれども、聴覚のない人の学習なんです。要するに言葉を持たない人の。それでどれだけの学習ができるのかというのがすごくおもしろい。

谷 それに対して私はもっとセンサをいっぱい付けたロボットを作っているんです。実はビデオに入っているんです。

北野 ただそのセンサの種類が聴覚系があるということは、人間はどうグラウンドされているかは別として言語という形でやはりシンボルをマニピュレートするわけです。その形で入ってくるのか、それともバラエティがスペクトラムが広がるのかというのは、もしかしたら本質的に違うかもしれない。

それから自然言語の学習とかいろいろたくさんあるけれども、どれもうまくいっていない。なぜかという、あれは視覚がない。だからたぶんうまくいかないのだと私は思っています。

だれか臨床をやっている人がいたら教えてほしいのですが、生まれて全盲の人はどうやって言語を獲得するのかというのはすごく興味があるんです。

谷 それはアフォーダンスの研究で、全盲の人がどういうふうに駅の構内を歩いていくかというのがありますね。

北野 歩いていくのもそうですけれども、要するに言語獲得。今の自然言語でコーパスをたくさんめて学習することができるかどうかというのは、目の見えない人が言葉だけずっと聞いていて学習できるかどうか。

谷 それは目が見えないという前に言語を使うというのは人間が言語を使うわけです。だからブルックスではないけれども、ロボットが人間と同じ身体的な条件を持って、人間と同じようなソーシャルとのかかわりを持つから、ロボットは人間の言語を使う必要があるわけです。ただどたとえばラボのなかだけ動くのであれば、人間と同じ言語をシェアすることはおかしい。

また人間と言語をコミュニケーションするとしても、このロボットの知能がかけ離れているのであれば、それは猫と人間の間のコミュニケーションみたいなものになるであろうし、そこにいきなり人間の言語を持っていくと、これはパラシティックになってだめなわけです。

北野 それはそういうインテリジェンスを作りたいならそれでいいし、たとえば言語仕様をちゃんとしたいとか、トップレベルで外からもらったシンボルをちゃんとグウランディングさせたいということになった場合には、そういうタイプのセンソリーインプットが必要になるのではないか。

ブルックスの理論は体はあると言うけれども、実はそうではなくて、あれはセンソリーがあることが重要であって、体はどっちでもいいというか……。

谷 でも体があるということは環境に対してフィジカルなインタラクションを取るから、そういう意味でフィジカルなボディは必要なのかもしれません。

佐倉 生物の進化の感じからいうとボトムアップ的なシンボルグラウンディングはすごくおもしろかったのですが、どこまで理解できたかわからないのですが一つお聞きしたいと思います。アトラクタができますよね。いつもできるわけではない。むしろできないほうが多いと最後にチラッとおっしゃっていましたが。

谷 複雑になったときにね。

佐倉 もしアトラクタみたいなものができたとして、それを子どもを生んで自己複製するときに遺伝情報に乗せてやることができれば、最初からアトラクタを持った形でそこから次を学習することができます。そうするとフレーム問題は解決するという話になるんですか。

谷 今の子孫にそれを伝えることによってフレーム問題は解決されたという話は違うと思うけれども、フレーム問題に関しては松原さんとも先ほど話したのですが、このタイプのロボットはフレー

ム問題は疑似解決しているんです。なぜかという、グローバルなすべての知識を使ってということではなくて、これは体験で得られるステートトランジションだけを学習していくわけだから、そういうもののなかにフレーム問題というようなコンビナトリアルなことは発生しないです。でもこれは疑似解決なんです。だけど人間もフレーム問題は疑似解決しているのではないかというのが私の思いなんです。

北野 だからフレーム問題というのはそもそもほんとうのバイオロジカルシステムではないんです。

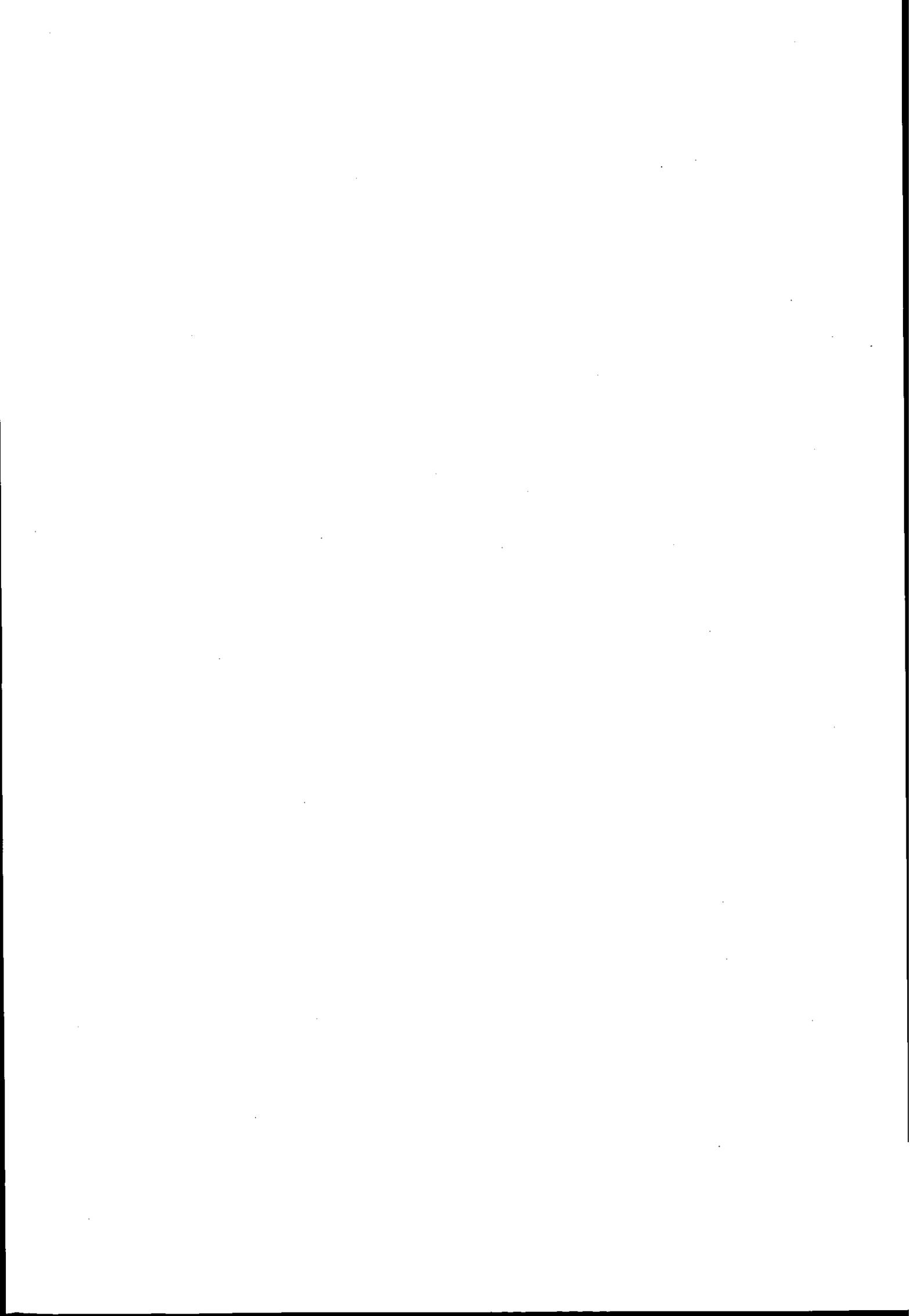
谷 ないから、でも……。

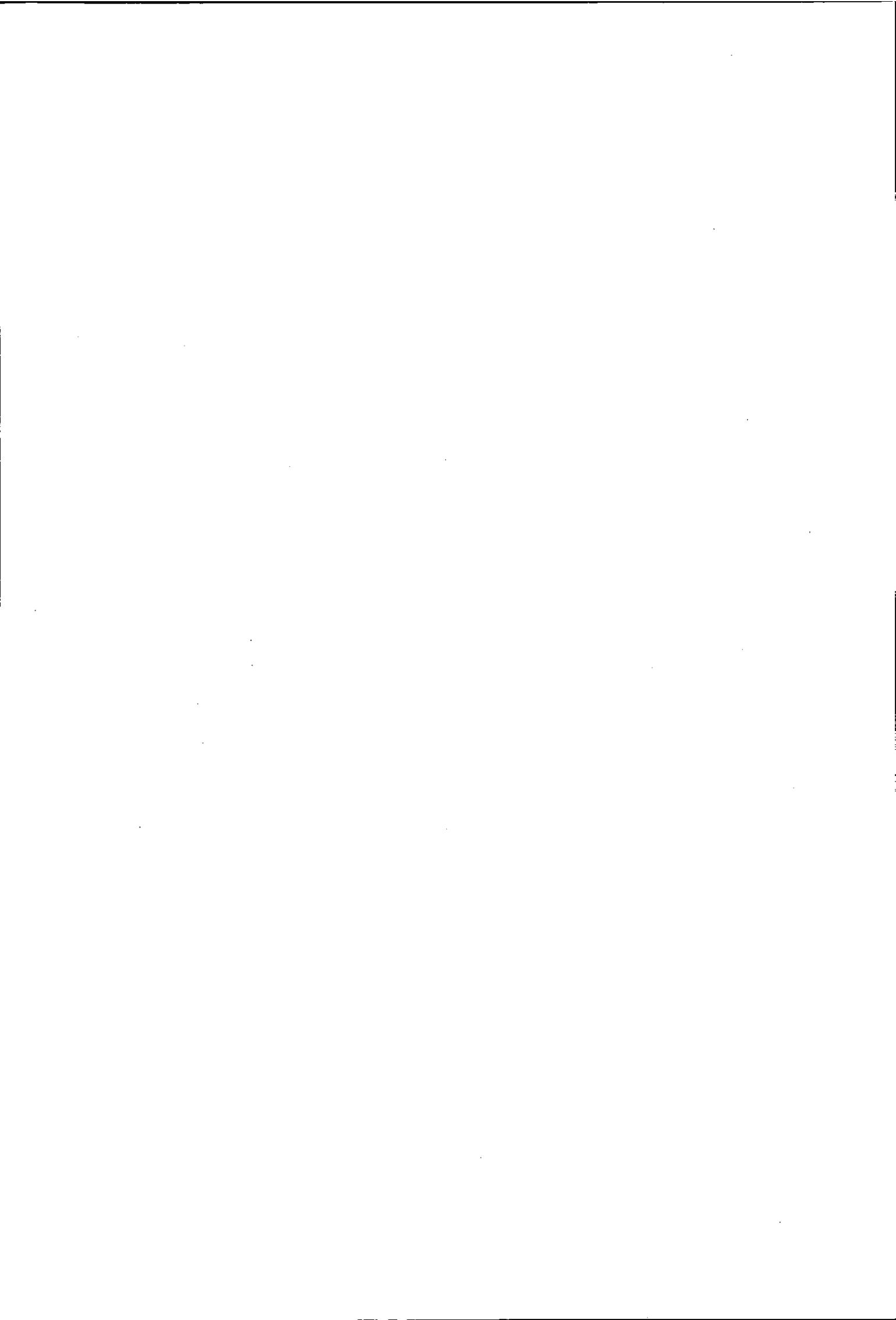
中島 ないか、あるとしても解決できないか。

北野 できないかどっちか。

谷 ないから困った生活を送っているわけです。

以上





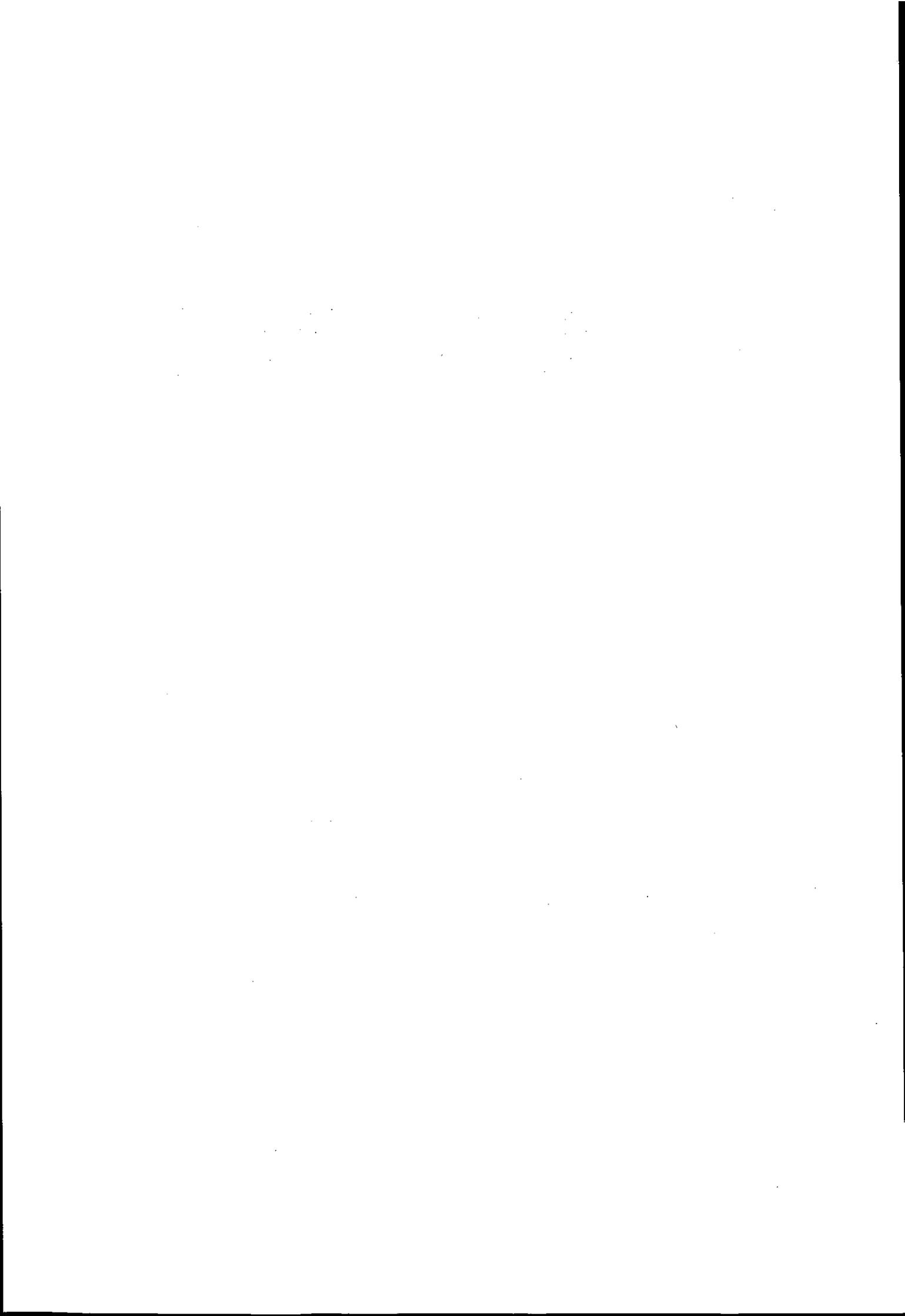
この報告書は、日本自転車振興会から競輪収益の一部である機械工業振興資金の補助を受けて平成6年度に実施した「人工知能の技術と市場の動向に関する調査研究」の成果の一部をまとめたものであります。

KBIRIN 00

この報告書は、競輪の補助金を受けて作成したものです。

人工知能の技術と市場の動向に関する  
調査研究報告書

財団法人 日本情報処理開発協会



## 序にかえて

1990年代に入って、人工知能(AI: Artificial Intelligence)技術のあり方は大きく変貌を遂げようとしております。しかも最近の動きは、この変化が単なる進歩に止まらず、基本概念の転換、すなわち、パラダイムシフトの様相を呈し始めていると云ってよい状況にあります。

このようなAIをめぐるパラダイムシフトの動きの中で、最近、研究が活発化しているテーマとして人工生命(アーティフィシャルライフ)があります。また、AIにおける研究と利用・実用化の間のギャップが指摘されている現状から、AIのさらなる普及を図るためには、研究・利用・製品供給の各面における課題を明らかにしておくことが重要となりましょう。

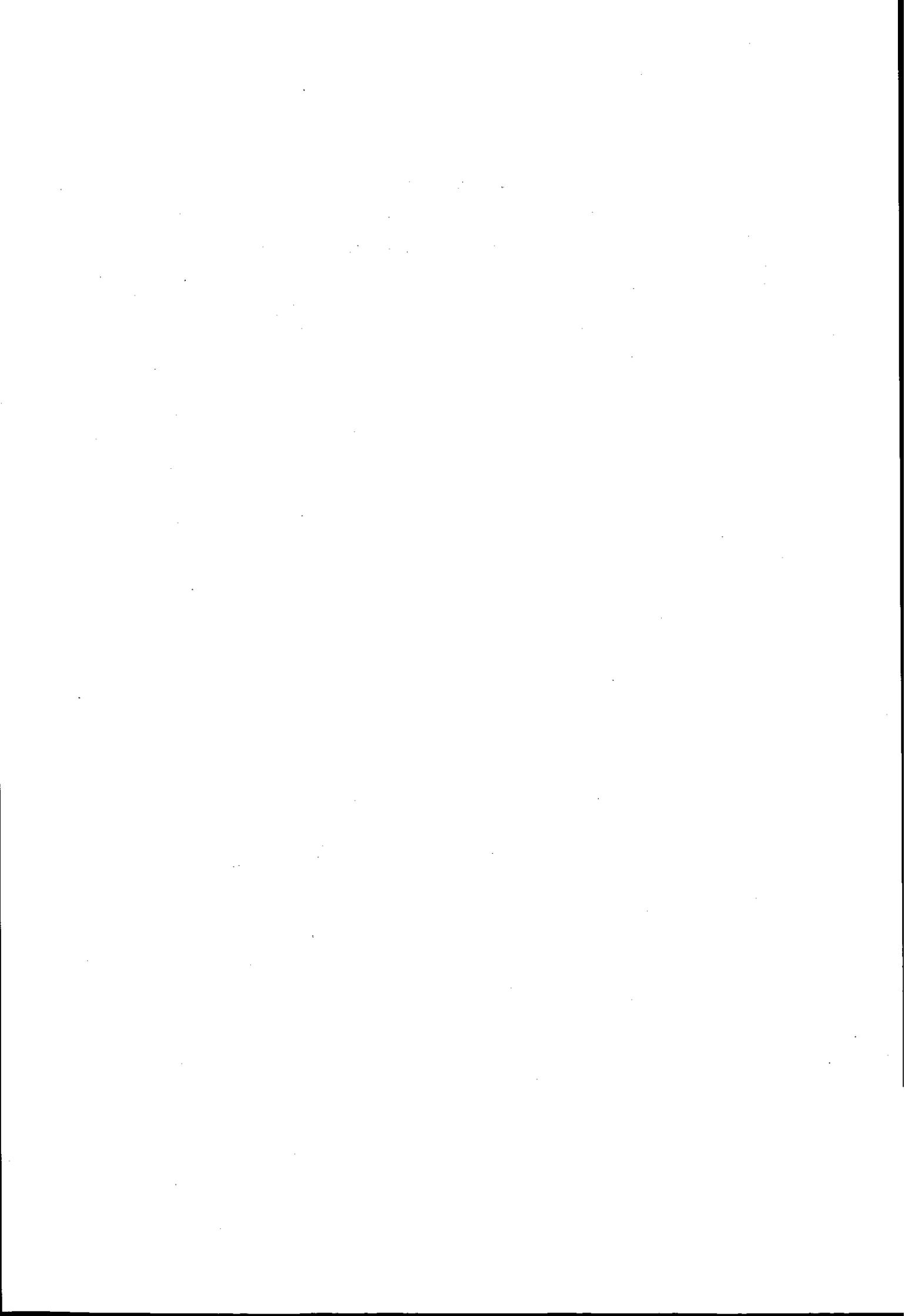
このような状況のもとに、当協会では、平成6年度人工知能の技術と市場の動向に関する調査研究を行いました。実施に当たりましては、AI動向調査委員会(委員長 大須賀節雄東京大学先端科学技術研究センター教授)のもとに、AI技術専門委員会(委員長 上田完次神戸大学工学部機械工学科教授)およびAIワークショップ検討小委員会(委員長 下原勝憲(株)エイ・ティ・アール人間情報通信研究所第6研究室長)を設置して、委員による調査、ワークショップの開催、海外調査員の派遣、文献調査等により調査研究を行いました。

本報告書は、この成果をとりまとめたものです。内容は、2部から構成されており、第1部はAI技術の利用・実用化の課題を、第2部は人工生命として、パラダイムの概説、歴史、計算モデルと手法、研究事例、関連研究機関および課題についてまとめております。本報告書が広く各界の方々に活用されることを念願する次第です。

最後に、ご協力ご指導いただきました委員をはじめ関係各位に心から感謝を申し上げます。

平成7年3月

財団法人 日本情報処理開発協会



## AI 動向調査委員会

(敬称略, 順不同)

委員長	大須賀節雄	東京大学先端科学技術研究センター教授
委員	上田 完次	神戸大学工学部機械工学科教授
〃	河岡 司	日本電信電話(株)コミュニケーション科学研究所所長
〃	倉石 英一	(株)東洋情報システム 取締役・技術本部長
〃	諏訪 基	通商産業省工業技術院電子技術総合研究所情報科学部部長
〃	関根 史麿	花王(株)情報事業本部開発部課長職
〃	武井 欣二	東京都立航空工業高等専門学校電子工学科教授
〃	中田 匡	第一勧業銀行事務企画部情報企画グループ副調査役
〃	那須 宗也	日揮情報システム(株)常務取締役
〃	林 弘	(株)富士通研究所 マルチメディア研究所システム研究部門長
〃	古川 康一	慶応義塾大学環境情報学部教授
〃	山崎 知彦	(株)豊田中央研究所 システム1部4421G グループリーダー
〃	市川 隆	(財)日本情報処理開発協会 常務理事
オブザーバ	古瀬 利博	通商産業省機械情報産業局電子政策課課長補佐
〃	戸田 裕之	通商産業省機械情報産業局電子政策課技術係長

## AI 技術専門委員会

(敬称略, 順不同)

委員長	上田 完次	神戸大学工学部機械工学科教授
幹事	下原 勝憲	(株)エイ・ティ・アール人間情報通信研究所第6研究室長
〃	伊庭 斉志	通商産業省工業技術院電子技術総合研究所知能情報部推論研究室研究官
委員	畝見 達夫	創価大学工学部情報システム学科講師
〃	柴田 崇徳	通商産業省工業技術院機械技術研究所ロボット工学部バイオロボティクス課研究員
〃	田浦 俊春	東京大学人工物工学研究センター助教授
〃	土居 洋文	(株)富士通研究所 情報社会科学研究所第2部主任研究員
〃	ヤリ・ワーリオ	奈良女子大学理学部情報科学科教授 前(株)エイ・ティ・アール人間情報通信研究所第6研究室客員研究員
〃	横井 浩史	通商産業省工業技術院生命工学工業技術研究所人間環境システム部情報伝達機能研究室技官
オブザーバ	大倉 知博	神戸大学工学部機械工学科助手

AIワークショップ検討小委員会

(敬称略，順不同)

- 委員長 下原 勝憲 (株)エイ・ティ・アール人間情報通信研究所第6研究室長
- 幹事 伊庭 斉志 通商産業省工業技術院電子技術総合研究所知能情報部推論研究室研究官
- 委員 池上 高志 東京大学教養学部物理教室助教授
- 〃 畝見 達夫 創価大学工学部情報システム学科講師
- 〃 北野 宏明 (株)ソニーコンピュータサイエンス研究所リサーチ
- 〃 柴田 崇徳 通商産業省工業技術院機械技術研究所ロボット工学部バイオロボティクス課研究員
- 事務局 市川 隆 (財)日本情報処理開発協会 常務理事
- 茂呂 知明 (財)日本情報処理開発協会 AIファジィ振興センター主任部員

# 目次

序にかえて

## 第1部 AI技術の利用・実用化における課題

第1章 はじめに .....	3
第2章 AIについての現状認識 .....	5
2.1 研究の立場 .....	5
2.2 利用の立場 .....	6
2.3 供給の立場 .....	7
第3章 AIにおける課題 .....	9
3.1 AI技術の研究開発における課題 .....	9
3.2 AI技術の利用実用化における課題 .....	10
3.3 AIのハードウェアおよびソフトウェア製品供給における課題 .....	11
3.4 社会的課題 .....	12
第4章 提言 .....	15

## 第2部 人工生命

第1章 序論 .....	21
第2章 人工生命パラダイム .....	23
2.1 基本思想 .....	24
2.1.1 対象分野 .....	24
2.1.2 方法論 .....	24
2.2 人工生命とは——各々はALに何を期待しているか .....	26
2.2.1 生命科学として .....	26
2.2.2 工学として .....	29
2.2.3 アートとして .....	31

第3章 人工生命の歴史 .....	33
3.1 人工生命への道のり .....	33
3.1.1 「人工化」研究の画期的な出来事 .....	33
3.1.2 「生命」研究の画期的な出来事 .....	36
3.1.3 人工生命：「人工化」研究と「生命」研究の合成 .....	36
3.2 カオスの縁の生命 .....	38
第4章 人工生命研究の計算モデルと手法 .....	41
4.1 GOFAI から ALife へ .....	41
4.2 創発計算論 (Emergent Computation) .....	42
4.2.1 Fortana の $\lambda$ -gas .....	43
4.3 進化計算論 (Evolutionary Computation) .....	52
4.3.1 遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms) .....	52
4.3.2 進化論的戦略 (Evolutionary Strategy) .....	53
4.3.3 進化論的プログラミング (Evolutionary Programming) .....	56
4.3.4 遺伝的プログラミング (Genetic Programming) .....	57
4.4 適応行動 (Adaptive behavior) .....	60
4.4.1 分類子システム .....	60
4.4.2 ニューラルネットワーク .....	61
4.4.3 強化学習 .....	62
4.4.4 免疫ネットワーク .....	63
4.4.5 プーリアンネットワーク .....	64
4.4.6 場を用いた計算モデル .....	65
4.5 発生/発達モデル (Development Models) .....	69
4.5.1 セルオートマトン (CA: Cellular Automata) .....	69
4.5.2 Movable Finite Automata .....	70
4.5.3 L (リンデンマイヤ) システム .....	71
第5章 人工生命の研究事例 .....	81
5.1 カール・シムズの “Artificial Evolution” .....	81
5.1.1 仮想生物の形態形成 .....	82
5.1.2 クリーチャーの行動 .....	82
5.1.3 物理シミュレーション .....	84
5.1.4 仮想生物の進化 .....	85

5.2	Tierra：デジタル生命の進化	87
5.3	共進化	93
5.4	ハードウェアシンセシス	94
5.4.1	行動型ロボット	94
5.4.2	階層的知的制御	94
5.4.3	自己組織化システム	97
5.5	ウェットウェアによるALへのアプローチ（名古屋大学理学部宝谷研究室）	99
5.6	虫型探索システム：BURG（電子技術総合研究所）	102
5.7	細胞もどき（電子技術総合研究所）	106
5.7.1	細胞もどき（“Cell-oid”）について	106
5.7.2	“flow-ism”の提唱	108
5.8	進化するハードウェア（電子技術総合研究所）	109
5.8.1	ニューロ的なパターン認識器	109
5.8.2	適応型システムの構築	110
5.9	適応行動の自己組織化と進化（奈良女子大学理学部 Jari Vaario 研究室）	112
5.9.1	自己組織化の原理	113
5.9.2	シミュレーション方法	115
5.9.3	環境のモデル	115
5.9.4	生命的な行動	116
5.10	場を用いた人工生命	121
5.10.1	場の制御	121
5.10.2	波動場を用いた生命体モデル	124
5.10.3	創発的学習	127
5.11	群行動	131
5.12	脳コミュニケーションのための進化システムの研究（ATR 人間情報通信研究所）	131
5.12.1	機能進化モデル（ソフトウェア進化のモデル）	132
5.12.2	構造進化モデル（ハードウェア進化のモデル）	133
5.12.3	進化システムとしての人工脳を目指して	134
5.13	生物指向型生産システム（神戸大学工学部上田研究室）	136
5.13.1	自己創発する人工物	136
5.13.2	BMSの簡単なモデルとその振る舞い	137
5.13.3	展望	139
5.14	発達システムの進化——進化する成長システムと生態系（創価大学畝見研究室）	140
5.15	学習能力の進化（創価大学畝見研究室）	143

5.16 不均衡進化論 (第一製薬(株)分子生物研究室) .....	146
<b>第6章 人工生命関連の研究機関</b> .....	153
6.1 外国の研究機関.....	153
6.2 国内の研究機関.....	160
<b>第7章 人工生命研究の課題と展望</b> .....	173
7.1 人工生命 (AL) は新しいパラダイムとなりうるか? .....	173
7.1.1 人工生命 (AL) は人工知能 (AI) の新しいパラダイムとなりうるか? .....	175
7.1.2 人工生命 (AL) は生物学の新しいパラダイムとなりうるか? .....	184
7.1.3 人工生命 (AL) は工学の新しいパラダイムとなりうるか? .....	
7.2 人工物工学, マルチメディアと人工生命.....	197
7.2.1 人工物工学と人工生命.....	197
7.2.2 マルチメディアと人工生命.....	199
<b>第8章 むすびにかえて</b> .....	201
各委員の人工生命研究に対する考え方 .....	202
<b>〈付録〉人工生命関連出版物・文献リスト (日本語書籍)</b> .....	205

[第2部の執筆及びまとめ分担]

上田 完次

第1章/第4章4.1/第5章5.13/第7章7.1まえがき/第8章

下原 勝憲

第2章2.1/第3章/第4章4.5/第5章5.12/第6章6.1, 6.2

伊庭 斉志

第4章4.2.1, 4.3/第5章5.2, 5.6, 5.7, 5.8/第7章7.1.1

畝見 達夫

第2章2.2.3/第4章4.4.1~4.4.5/第5章5.3, 5.11, 5.14, 5.15/第7章7.1.3

柴田 崇徳

第2章2.2.2/第5章5.4/第7章7.1.3

田浦 俊春

第7章7.2.1

土居 洋文

第2章2.2.1/第5章5.16/第7章7.1.2

ヤリ ワーリオ

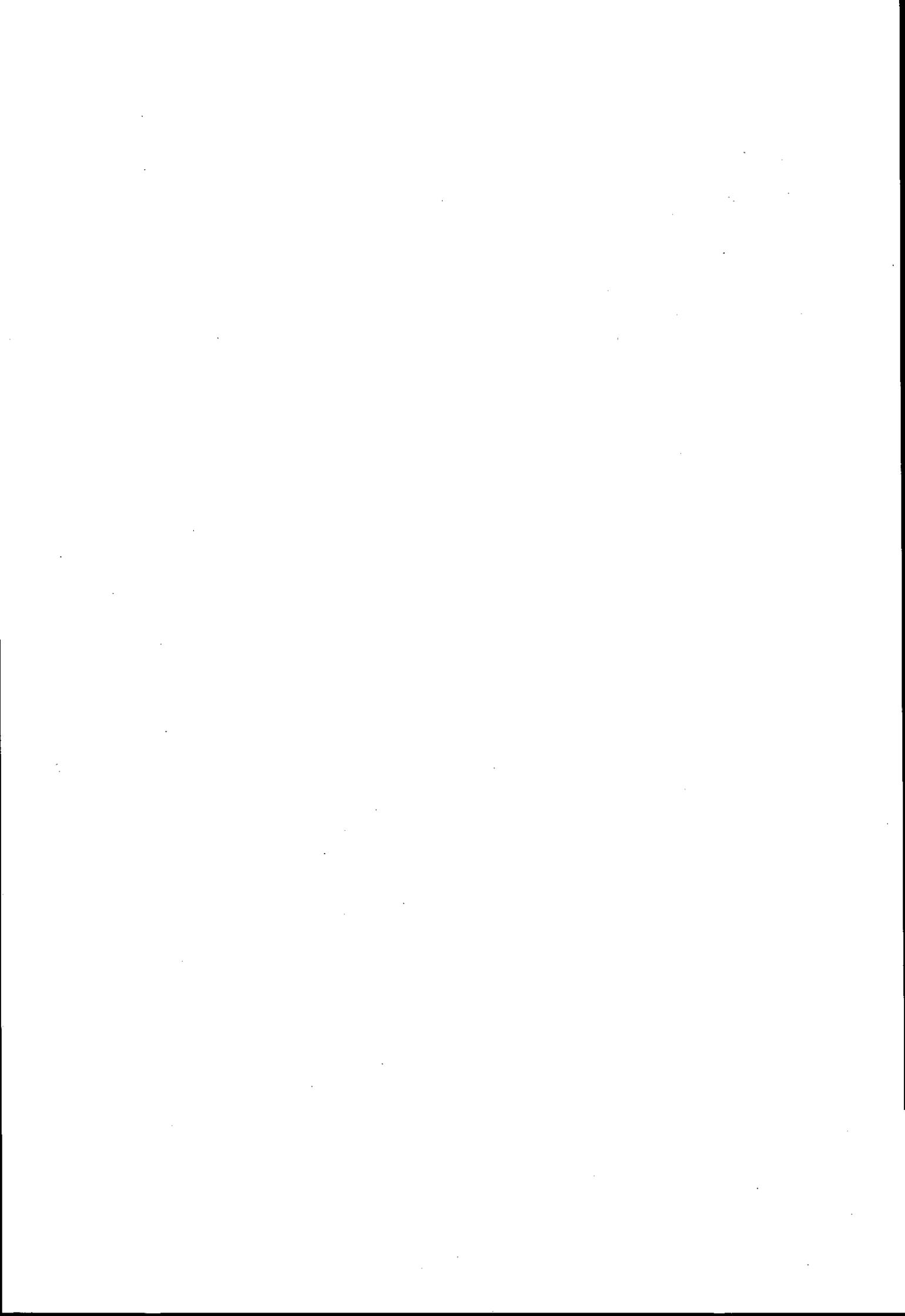
第2章2.1/第3章/第4章4.5/第5章5.1, 5.9/第6章6.1

横井 浩史

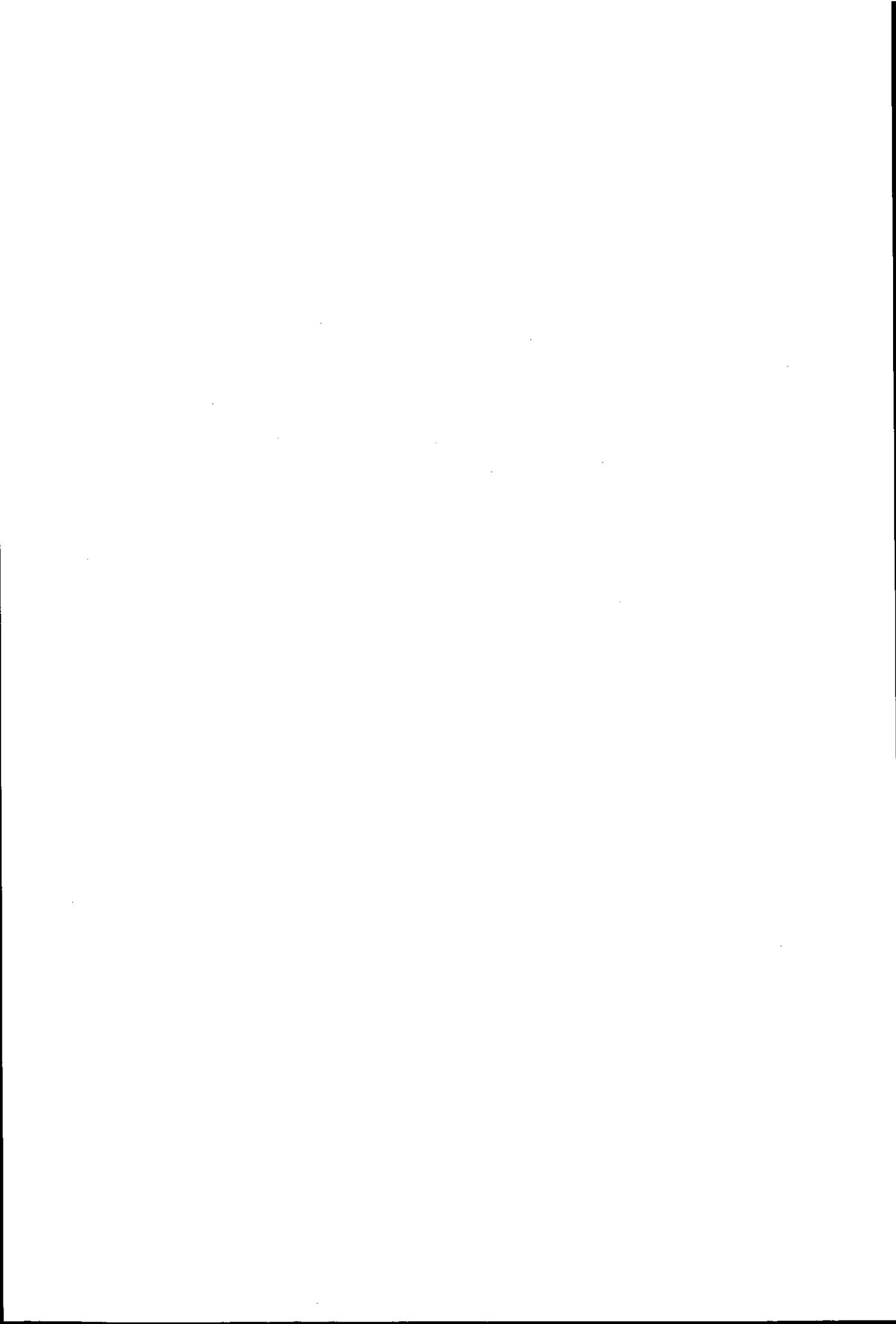
第4章4.4.6/第5章5.10/第7章7.2.2

池上 高志

第7章7.1.2



# **第1部 AI技術の利用・実用化に おける課題**



# 第1章 はじめに

人工知能 (AI: Artificial Intelligence) 技術の研究開発が進む中で、AI に対する風当たりは決して良いとはいえない。

たとえば、

- ・ AI 関連商品の市場が期待したほどには拡大していない、
- ・ AI を利用しても期待したほど効果が上がらない、
- ・ AI 研究は、実用課題を取り上げていない、

などのマイナス評価の声がある。

今後の情報技術やシステムの高度化において、AI は研究開発とともに普及啓蒙が不可欠である。とするならば、研究、利用、供給のそれぞれの立場で何をなすべきであろうか。

以下は、このテーマについて、AI 動向調査委員会(委員長 大須賀節雄 東京大学先端科学技術研究センター教授)において、次の項目に沿って討議した内容をまとめたものである。

## (1) AI についての現状認識

それぞれの立場からの見解を整理する。

研究サイド：研究の現状、話題、実用化研究の現状など

利用サイド：利用の現状、課題、今後の見通しなど

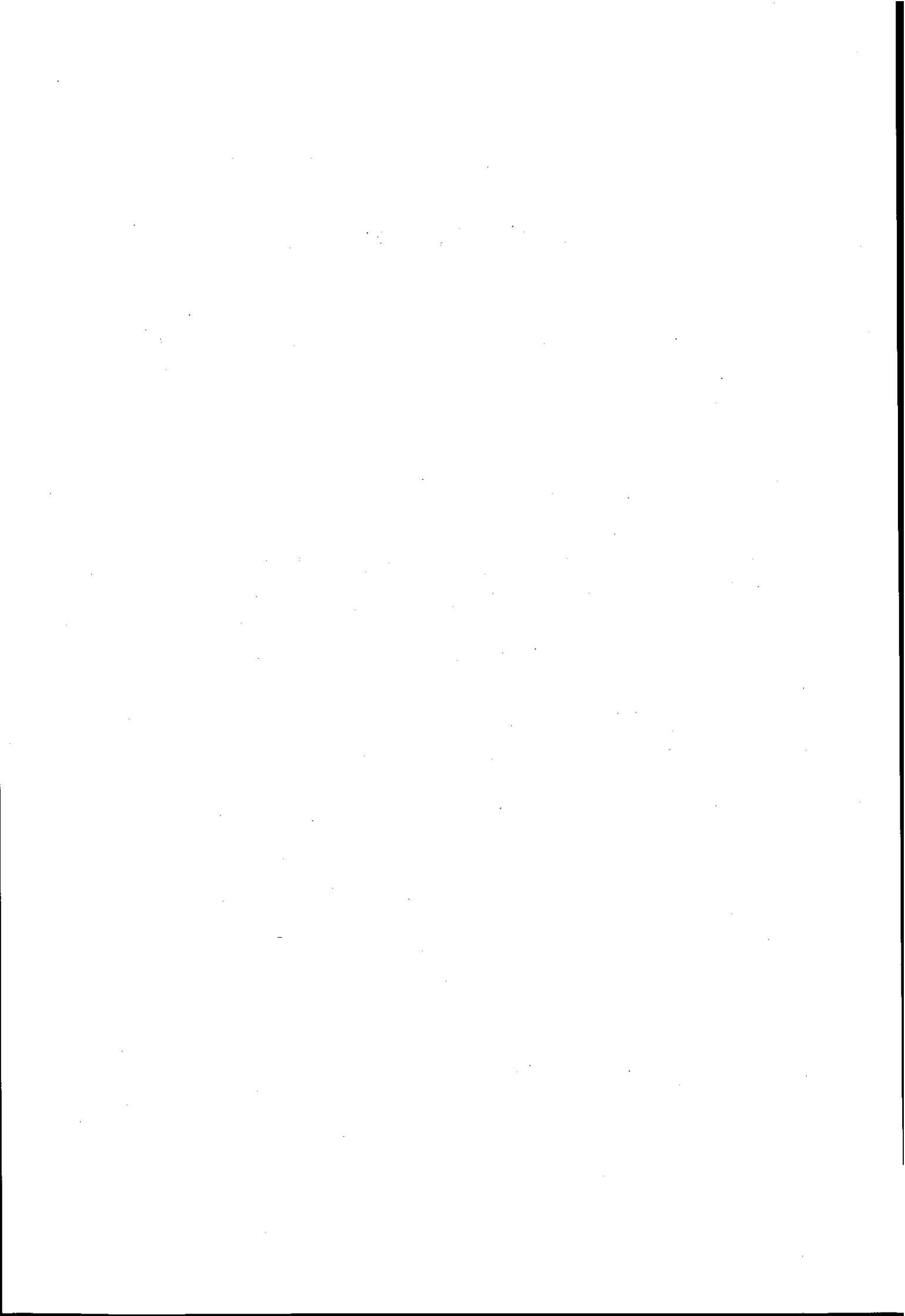
供給サイド：製品化の動向、AI への取り組みと変遷など

## (2) AI 技術の研究開発における課題 (要望)

## (3) AI 技術の利用・実用化における課題 (要望)

## (4) AI のハードおよびソフトの製品供給における課題 (要望)

## (5) 社会的な課題 (AI の教育など)



## 第2章 AI についての現状認識

AI について研究、利用、供給の各々の立場からどのような現状認識を持っているかをまとめた。

### 2.1 研究の立場

#### (1) AI 技術の枠組・輪郭を描き直す時期に来ている

「AI はその時代の情報技術のフロンティア」という立場に立つと、かつては AI の研究課題であったが、時代とともに独立の技術分野へ巣立って (?) いった技術もたくさんある (文字認識, コンピュータビジョン, 数式処理など)。したがって, 現時点においては Well-defined problem を対象としたエキスパートシステム技術などは, すでに AI 技術から巣立っていった技術とも言える。AI 技術への注目度が著しく下がったと言われる中で, 実働/計画中などのエキスパートシステムの数は増え続けていることもその証左となろう。(Edward A. Feigenbaum, et al: "Knowledge-Based Systems Research and Applications in Japan, 1992, "AI Magazine Vol. 15, No. 2 (1994).)

現在は, AI の新しいフロンティアとして, あるいは, 重要な分野として, 次のような分野を視野に入れて, AI 技術の枠組みを描き直す時期ではないか。

- ・ 認知科学や生理学により発展している脳研究の成果を取り入れる。
- ・ 生物における発生, 進化などの振る舞いをまねて, システムの機能を実現しようとする人工生命アプローチ。
- ・ 知識獲得に繋がる「学習」は引き続き AI の中心課題である。「知識」はそのオープンネス (対象として定義域の限界が明らかでないこと) から「大きさ」を感じ, その扱いは AI 技術の格好な対象である。
- ・ 現在普及しつつある世界規模のネットワークシステムの周りにも, そのオープンネスと大規模さから生じる課題を解決するために AI 的アプローチへの要請がある。

#### (2) パラダイム・シフトが起こっている

従来からの AI 研究の行き詰まりを見越して, 1985年頃から人工知能の新しい波が起こりはじめ, 伝統的な知識指向に替わる, 行動指向のパラダイムとして有力視されるようになっていく。行動指向アプローチも, 知的システムの計算論的な合成と知的現象 (目的指向的行動, 予測, 学習, 情報伝達, 協調) のモデル化を目指す点では, 知識指向と同じであるが, 知識指向がある問題領域について「知っている」システムのモデル化・構築を課題とするのに対して, 行動指向はある問題領域の中で「行動する」システムのそれを課題とする点で異なっている。

それぞれの特徴を対比すると、次の通りである。

知識指向	行動指向
1) 孤立的で、高度な能力を対象として、その専門性を「広さ」ではなく、「深さ」の方向で追求する。	1) 多種類の能力を統合化したかたちでもつが、その各能力のレベルは必ずしも高くない。
2) 問題領域と直接的な相互作用をもっていない点で「閉鎖的」である。環境との窓口はユーザのみ。	2) システムは「開放的」でかつ「状況依存的」である。センサと効果器を通じて動的な環境に直結している。
3) 複数の問題を並行的に扱うようにはなっていない。処理中の問題の動的変化は無視される。	3) 自律性に主眼があり、また、自己完結的なシステムになっている。互いに対立する多数の問題を同時に処理する。
4) 宣言的な「知識構造」をもち、内部構造はインタプリタを除いて静的である。質問や説明への対応を重視。	4) 重点は知識ではなく、どのような行動を生じうるかにある。内部構造は能動的なモジュールの集まり。質問等への対応は軽視。
5) 発達的な観点が極めて希薄 単一高水準能力 ユーザ駆動処理	5) 適応と発達論的アプローチを重視。 一群の低水準能力の集合体 自律システム

(3) AI研究自体は根付いており、基礎、基盤研究として継続されている。

研究者は一層の本格的AI研究の必要性を確信していて、開発担当も研究に携わるようになったなどAI研究者の数はむしろ増加している。しかし、解決していない業務上の問題がまずあり、それを解くための課題があり、これらをAIの観点から研究せねばならない。

ユーザの問題解決に当たっては、AIだけが特に必要とは認識されておらず、今までやったAIだけでは役立つものが少ない。AI技術についてさらに基礎/基盤研究を継続する必要がある。

## 2.2 利用の立場

(1) AI技術はユーザの要求するレベルまで到っていない。

ユーザの要求するレベルとその内容にマッチした形で、広義のソフトウェア技術の一つとしてAI技術が明確に位置づけられていないことに問題がある。

たとえば、AI技術を応用しているシステムは技術の適用範囲が限定されているため、システムと

しても利用範囲が狭く、コンピュータの応用分野と比較すると、AIの応用分野は限定されている。また、AIシステム構築のための方法は提案されたが、問題解決のためのAI技術が不明であるため期待に応えるものになっていない。解決したいのはあくまで問題であって、AI (How) ではない。

(2) エキスパートシステムを中心に、AI応用システム構築は、試行錯誤の段階を過ぎて、実用化の時代になっている。

実際にシステム（作業工程の段取りへの活用など）に組み込まれて活用するケースやツール（特に、ES）を開発の効率化のため活用するケースがある。それもAIシステムとして独立した応用システムでなく、システム全体の一部に組み入れられて利用される環境になってきている。

適用分野はブーム時代と変わらないが現実的な適用が図られつつあると考えられる。例えば、製造関係のスケジューリングへの活用や要員のワーク・スケジュールなど計画型の活用、また製品の検査作業への応用である。また、各種電気商品へのAI機能の組み込みなどの応用例が多くなり、使用者がAIを意識しないで利用している。

## 2.3 供給の立場

(1) AIをビジネスの立場から考えると現状はかなり苦しい。

ソフトウェアベンダーの立場からいうと、AI技術も他の技術と同様に「使えば役立つ」ことを示せばもっと使われるようになる。従来の情報技術をより良くするものとしてAIは必ず有用なものとなると考えられるが、肝心なのは、ニーズと基本技術の結び付け方だろう。たとえば、ソフトウェア開発、計画・設計問題、等々にニーズが強い。ASICの設計にAI的手法が意外に役立つように、AIの基礎理論を否定すべきでなく、その置き所が問題だ。

(2) ソフトウェア開発における知識・ノウハウの共通資産化は難しい。

ソフトウェアに関する知識は、構造化されていく雑多な状況である。したがって、現状ではソフトウェアの知識はエキスパートシステムに載せにくい。これはソフトウェア開発の体系化のコンセプトがないため個々のプログラマまかせになっているからであり、AI化にはこのコンセプトの確立が必要である。

ソフトウェアに関するノウハウの知識化といっても、まずは過去のソフトウェア資産を再利用したいというのがポイントである。現在のソフトウェア再利用に当たっては、当該ソフトウェアのドキュメントがあるが、開発担当となった者が疑問点などについて、関係者に電話をかけまくることから始まる。今はこのようにローレベルな段階だ。もし、ソフトウェア再利用に役立つものがあれば、ニーズは強い。

ソフトウェア業界における知識・ノウハウに共通の資産化が望ましいが、一方では各社のノウハウは企業機密に触れる恐れがある。これを前提としたAIが望まれる。

(3) 知識システムエンジニア（KE）が必要とは強くは意識されていない。

現在の日本では、AIをやっていく中でKEという職種は必ずしも必要とは感じられていない。米

国では、KEの試験があり、合格するとかなり優遇される資格となっている。米国などでは、スケジュールならスケジュールの専門家として企業を渡り歩いている人々もいる。人の流動性の大きいそのような土壌では、KEという職種に必要性が出てくるだろうが、日本では1つの会社の中でいろいろな人に聞いたりして仕事をやってしまえる。

日本ではKEという職種の定義がはっきりしていないことにも原因があるが、AIの活用度がどんどん広がれば、それに比例してKEの必要性は高まってくるだろう。

日本の現状では、KEが独立した職種として成り立つほどの「需要」がないため、必要性が乏しいと感じられるが、本来は、KEという専門職は必要なものである。

## 第3章 AIにおける課題

### 3.1 AI技術の研究開発における課題

#### (1) 新パラダイムによる技術の実現性

新しい技術が社会に広く受け入れられるためには、その技術が本質的にすぐれているというだけでは不十分で、その利用形態と実現形態がその時点での社会の枠組みに適合しうることが必要である。知識指向から行動指向へのシフトは、完全な置換わりではなく、適材適所の共存の方向に進むものと考えられるが、行動指向システムが普及するためにはシステムの具体化について新しい発想が必要である。このためAI技術にも、もう一段進んだ新しい展開が要求されるが、この準備は整いつつある。

#### (2) 今後の研究・開発の進め方

AI技術の今後の研究・開発の進め方とその課題については、立場や側面の捉え方により様々であるが、次のような提案があった。

- a) AI技術の応用範囲を拡大するため、現在利用されている分野を中心に必要とされる技術の研究開発を進める。
- b) AI技術の適用範囲は未だ限定されているため、AI技術を中心としたシステム構築を目指すよりは、従来技術とAI技術が相互に補完するような形態を念頭において、システムを構築する。
- c) AI技術の蓄積を行うため、ツール群の整備を進める。これには、知識表現言語の統一化あるいは各種辞書の整備など、研究者の研究基盤を同一にすることが必要であり、これにより全体としての技術向上あるいは技術の蓄積が可能となる。
- d) AI技術の評価基準を検討する。現在は研究者同士でもその結果が良いかどうかを定性的にしか評価できない。CADの研究分野ではアルゴリズムを評価するテストデータがいろいろ揃えられている。これでも実際に使う時には充分でないといわれている。コンピュータの性能評価のプログラムもいろいろ用意されている。AI技術がお互い利用出来ない理由の大きな部分はここから派生している。技術の蓄積が難しい所以である。
- e) AI技術の研究方針を、シーズ中心（何が出来るかの研究）からニーズ中心（応用分野から必要とされる技術、何が欲しいかの研究）に転換する。

ニーズを意識した研究開発のやり方への転換のためには、「目的指向」で「筋の良い」研究開

発、当該技術の「適切な応用領域」「実用性」などの観点からの評価、理論と実践（ツール化など）との緊密な連携などが必要である。

例えば、従来、政府プロジェクトはシーズオリエンテッド（先導性重視）だった。これからは、社会が産業界のニーズを生かしたプロジェクト立案をする必要があり、そのためのなんらかの仕組みを作っていかなければならない。実際に、ある政府系研究機関では、研究と動くシステム作りを平行して進める並行開発法を推進しようとしている。その開発法では、モノがあってそれから原理探求へ立ち戻ることもあれば、逆にシーズから出発してそれを検証するためにモノを作ることもある。両者が渾然一体とした状況の研究開発はどのサイドでやるべきかを見極めようとしている。

## 3.2 AI 技術の利用実用化における課題

### (1) 全般的課題

#### a) 企画段階

- ・ AI 利用効果を産む適用問題を見いだせない状況にある。
- ・ 専門家による属人的情報処理を戦略的なものにしたいが、AI 技術が未成熟である。
- ・ 経営者に対して費用対効果について説得しづらい。
- ・ 各技術の高度化と AI 技術の利用の区分が困難／無意味？
- ・ 現状の AI 技術で効用を発揮できる業務は極めて希？  
→ 既存技術の補完的位置づけになる。

#### b) システム開発段階

- ・ KE の不在。
- ・ ユーザーの過度な期待。
- ・ 知識の体系化、知識ベースの構築手法が確立されておらず、未熟な段階。

#### c) 実運用段階

- ・ エキスパートシステムがエキスパートの代替と成り得ない。  
データ入力時の問題。
- ・ アウトプットに対する信頼性。
- ・ 基礎データメンテナンス負担。
- ・ 知識ベースのフォローアップの難しさ

### (2) 問題領域（型）別の課題

#### a) 計画型

- ① 計画のパターンが多様で（ほとんど個人のレベルで違うケースもある）、それに対処するための知識の引出しとツールのカスタマイズに膨大な工数がかかることが計画型プロジェクトの挫折につながっている。これは AI 技術が知識の制御技術を確立できないでいることが大

きな原因である。

② 担当者はいるが専門家ではない。

制約条件が明示的になっていないだけで、問題解決のための専門知識といえるものは少ない。

③ 問題解決のスピードアップにはなる（担当者は楽になった）。

オペレーションは担当者。→条件設定、制約条件は担当しだい。

クローズドシステムでは効果がでるが、現実の運用はオープンシステムかつ広範囲に最適化（やりくり）している。

→結果がバランスシートに現れない。

→在庫、稼働率（一時的には効率化）

→開発費用 対 効果

多くの人と時間と金をかけたが担当が楽になっただけ。

④ 最適化（コストダウン）のためのポイントは枠組みの変更であって、現在のレベルでは AI 技術が寄与するところは少ない。

知識システム開発者→技術にこだわって目的を見失いがち

b) 制御型

1) 専門家（熟練者）の必要なシステムは多い

ターゲットは数多くある。効果も大きい。→AIシステムに向いている？

計測（記号化）をどうするか？

制御機器との連携などハードウェアが問題。

### 3.3 AI のハードウェアおよびソフトウェア製品供給における課題

(1) AI 技術を含む製品の提供

- ・現在の AI 技術のレベルは比較的小さな問題を処理することに留まっており、現実的な規模への適応は困難な状況である。
- ・現実の問題を解決するには AI 技術だけでは不十分であり、既存技術との融合が必要である。
- ・ハード、ソフトの製品を考えた場合、特定のアプリケーションをターゲットとして、製品を開発する。その製品を販売する時は、AI 技術を商品の核とせずアプリケーションそのものを中心に置く。

(2) AI 技術のコスト低減

- ・現在の AI 技術はハード、ソフトのコストが高い。たとえば AI の言語処理系の LISP や PRO LOG は処理系の値段が高いだけでなく、実際に処理系を動作させる環境を用意するためにコストがかかる。処理系が大規模であるため、主記憶の容量や I/O の容量が巨大となり、既存システムとの連携が困難である。

- ・現在の AI 技術はアプリケーションを記述する点から評価すれば、知識表現言語の導入など非常に生産性が向上した。しかし機能的なレベルアップは未だ不十分である。
- ・AI 技術で解決できる部分が小さいにもかかわらず、リソースを消費しすぎると AI 技術そのものが使われなくなる。

### (3) AI 技術の汎用化と高機能化

- ・現実問題を解決するための知識獲得は AI 技術特有の問題ではないが、AI 技術を使って問題解決する場合、対象分野の知識は人間のヒューリスティックそのものとなり、知識獲得がより困難となる。
- ・獲得した知識を他部門で活用するには、知識の汎用化が必要となる。これが実現できないと、獲得した知識は他部門で使用できず、無駄になる可能性がある。たとえば、コンカレントエンジニアリング（注1）やリーン生産方式（注2）などの導入に際しての知識の共有など。
- ・現在の AI 技術はインフラ技術になっておらず、C言語のように汎用的にすべての分野で使用できるわけではない。知識の汎用化はC言語の開発と違い、より上位のアプリケーション知識を包含することになる。したがって、このレベルで知識の抽象化が必要とされ、知識の汎用化の過程を困難としている。
- ・獲得した知識が高度でなければ、知識を汎用化することも困難である。
- ・AI 技術の汎用化と高度化を実現する手法が必要であり、特定のアプリケーションを対象に実験しつつ、技術の蓄積を行う必要がある。

## 3.4 社会的課題

### (1) 知識システムエンジニア (KE)

AI は一種の構築技術であり、知識としては必要な技術であるが、AI 技術を利用する企業としては必ずしも特定の要員を育成することに必要性は感じていない。(UNIX を知っても C/S システムは作れない。KJ 法だけ知っても業務分析はできない)

### (2) SE に対する AI 活用の教育

現実にシステム開発に携わる SE に対して、システム化の主要技術として AI のメリット (AI 的発想の利点も) を理解させると同時に、すでに定着した AI の利用スキルの修得を目的として教育コースを設定する。できれば、既存の同種教育コースにカリキュラムとして組み込んでもらう。

---

(注1) コンカレント・エンジニアリング：商品開発部門、設計部門、生産部門、部品メーカーなどが並行的、協動的に作業を遂行することにより開発期間の短縮、生産コストの削減、品質の向上を実現する手法である。(出典) 日本能率協会

(注2) リーン生産方式：人を中心にしたボトムアップ的な自律機能を核とし、工場あるいは特定グループ内での効率を追求したもの (東工大 圓川)

### (3) 大学での教育

コンピュータソフトウェア（以下、ソフトウェアと記す）のカリキュラムについては、大学でも問題となっている。従来はコンピュータハードウェアをベースとしてソフトウェアを考えたが、今はソフトウェアの範囲を超えて「まず情報ありき」という立場で物事が考えられている状況となっている。

このような状況に直面して、今までのようなコンピュータサイエンス的な考え方からはずれるものについて、どのような体系を考えたら良いかわからなくなっている。また、大多数の教師はAIに関しては教えた経験がない。

そこで「コンピュータサイエンス」を「知識」に置きかえて、「知識」を中心としてカリキュラムを体系化してみようという試みも出てきている。

### (4) 企画や標準などの知識ベースの構築

たとえば、エンジニアリング業においては規格などが多い。配管設計するエンジニア、電気をやるエンジニアで別々の規格を守らねばならない。これからは、なるべく配管設計エンジニアに電気など他のことも出来るようにしようする方向にある。その場合に、配管設計エンジニアは他分野の規格は知らないで、その部分を知識ベース化しておき利用すべきである。

### (5) 大規模ソフトウェア開発の危機

コンピュータソフトウェアは、ますます大規模化、複雑化していて、その安全性、信頼性が危ぶまれている。ISOなどでも対処法の検討がなされているが、ネットワーク化社会における危険性は増している。この危機への対処の一つとして、AI技術の活用可能性がありうるのではないか。

### (6) 情報流通、共有化をもっと進めるべき

ソフトメーカーへは研究レベルの情報ほとんど入ってこない。いまこの分野で何がホットなテーマになっているかも分からない。産業界へもう少し学界の方から歩み寄ってもらう必要がある。産業界にとって困るのは、その先端技術がどのように実用化され、どんなことに役に立つのかわからない学術論文が多いことである。

### (7) 社会科学系・人文科学系分野への適用

これまで、AIの応用が一応の成果を上げることができた分野を見てみると、それらの大部分が工学を中心とした自然科学系の分野に属するものであることに気付く。これは、もともとAIの研究者に自然科学系の人々が圧倒的に多かったことによるものとも考えられるが、果たしてそれだけの偶発的な原因によるものであろうか、もっと本質的な理由があるのではないだろうか。

そこで思い当たるのは、自然科学と社会科学・人文科学との間にある本質的な差異の存在である。すなわち、自然科学が自然現象を対象として、因果関係に基づく客観的な法則の成立を前提にしているのに対して、社会科学・人文科学は自由な意思をもつ人間の行為の軌跡である社会現象・心理現象を対象として、主観的な判断に基づいた選択の結果である目的-手段の連関を追及するものであり、そこには客観的な法則があるという保証はない。したがって、たとえばルールベース・シス

テムが自然科学系分野で有効であることが明らかになったとしても、同じことが社会科学系でもいうことができることにはならないのである。

このように考えると、社会科学・人文科学系分野への AI の適用に関しては、自然科学系への場合と異なる次元での研究が改めて必要であることが明らかになる。これまでの AI 研究においては、この点が自覚的に検討された例はまだないようである。しかし、自然言語の意味理解や法律分野への適用などで現在前進を妨げている最大のネックの本質は、この問題と深く関わっているのではないかと推測される。

この問題は、実は、社会科学や人文科学が自然科学と同じ意味での科学であるためには、どうしても解明されなければならないはずのものであり、自然科学分野の AI 研究者だけが頑張ってもどうしようもないことかもしれない。分野を超えた共同研究が是非とも望まれるところである。

## 第4章 提 言

### (1) 基礎研究、基盤研究の推進

AI技術の使いづらさが指摘されているが、その克服には基礎研究、基盤研究をさらに推進することが大切である。研究段階と研究すべき候補テーマを次に挙げる。

- ・長期にわたる基礎研究（20～30年）
  - サイエンスをベースに脳メカニズムの解明
    - 人工脳、各種 AI アルゴリズムの研究
- ・段階的応用が期待できる基盤研究（プロジェクト的に実施）
  - 工学をベースに社会が必要とする知的メカニズムの発明
    - 創造的機能を含む自律的問題解決
    - 大規模問題解決方式
    - 大規模知識ベースの構築（量的判断のための常識ベース）
    - アバウト推論（不十分な知識での推論）
    - 知識学習方式
    - 翻訳処理
    - 分散協調処理（複数エージェントの協調）
    - 並列処理アーキテクチャ

- ・パターン認識技術
- ・知的ヒューマンインタフェース技術

### (2) 創発的 (emergent) 研究活動

新しい AI の議論をするとき、必ず引合に出されるのが「創発」という概念である。この言葉の使い方は人によって多少異なることがあるが、もっとも一般的な使い方は、「単純な要素が多数集まって、局所的な相互作用を繰り返す中から、個々の要素のもつ能力の総和を超える能力が発現するという、自然界にしばしば認められる現象」を指すものである。生物の知能は、神経細胞による創発的現象として説明できるのではないかと期待されているのである。

わが国における AI 研究の現状をみると、かなりの研究人口を抱えているにもかかわらず、本当に独創性のある成果に乏しいという以前からの状況が続いている。その原因にはいろいろなことが考えられるが、もっとも根源的には、研究者間に創発現象が起きうるような集積的な相互交流が生まれていないところに問題があると推定される。これは何も AI 研究だけに限ったことではなく、学問

全体についてもいえることである。しかし、ここでとくに AI を問題にするのは、せっかく「創発」を研究対象とするのであれば、その現象が生ずるための条件を考察するためのモデルとして自分たち自身を取り上げるのが、どの場合よりも生産的であると考えられるからである。

インターネットの普及は、研究者間の相互作用をより緊密にするものである。これが、有効に活かされるためには、それを創発の生まれる場にする必要がある。そのための条件が明らかにできれば、それはあらゆる分野での参考になりうるはずであり、したがって、そのまま実用化にもつながることになると期待できる。

### (3) 教育の工夫と実施

AI はシステムを知的にするものとして、中心テーマが変遷しながらも、今後も重要性がなくなることはない。AI 技術をシステム化するのは人であるから、専門学校、大学、企業、等々における教育はますます重要になってくる。

AI 教育にあたっては、教員自身の養成、各レベルに適したカリキュラムの作成、現実の問題を意識したシステムの試作、等々の工夫と実施が肝要である。

### (4) ニーズに合った商品開発

AI 技術を実現する処理系の簡易化とコスト低減を実現すると現在の AI 技術の壁を突破できる可能性がある。このためには、既存技術とバランスがとれた AI 動作環境を実現する必要がある。その場合に、従来システムとのデータ互換性、従来システムからの拡張性を念頭に置いてシステム開発を行う必要がある。

以上の要件を満たした上で、AI 技術を包含した製品をいくつも開発して、AI 技術の普及を図るべきである。

### (5) AI 適用分野の見極めと拡大

どんな領域のどんな問題に AI を適用すれば効果的かの研究と成功事例（失敗事例も）を集めて体系化することが必要である。この研究、体系化を通して AI 適用分野の見極めが的確にできよう。さらには、AI 適用分野の拡大も図ることができる。

これまで、AI の応用が一応の成果を上げることができた分野は大部分が工学を中心とした自然科学系の分野であるが、これを社会科学や人文科学にまで広げるには、分野を超えた共同研究が是非とも望まれるところである。

### (6) 知識ベースに基づくソフトウェア開発

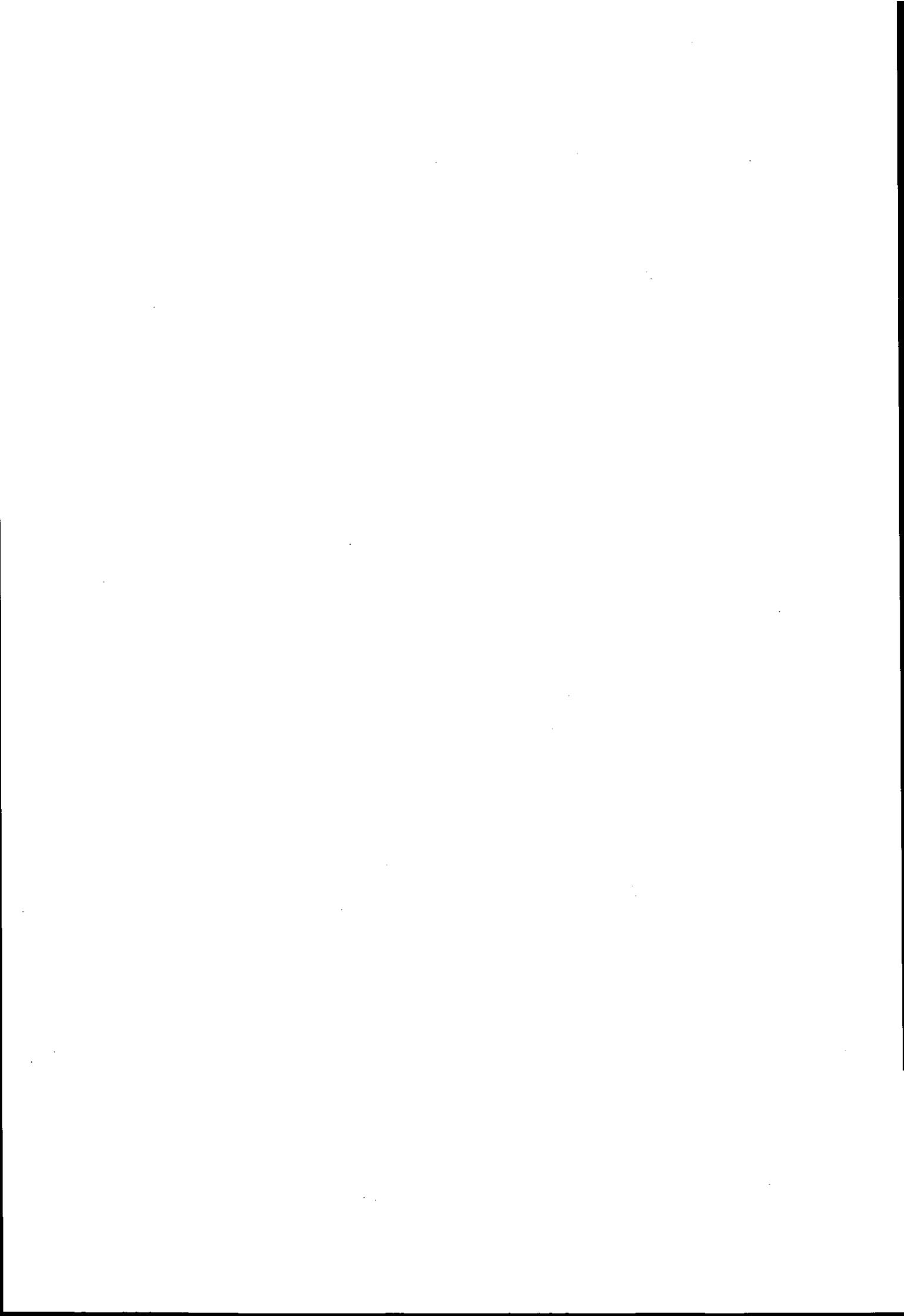
Software Automation に関する雑誌が発刊（クルーガーランド社）されるように、AI のソフトウェア開発への応用は欧米では関心が強い。日本でのこの分野をやる人がどれ位いるか頼りない。日本は AI についてもかなり遅れをとっているのではないかという潜在的不安がある。

米国は資金は不足しているが意欲は強い。この分野の研究開発で抜かれると、日本の情報処理技術は知的所有権等から太刀打ちできなくなってしまうので、早急に日本も取り組む必要がある。

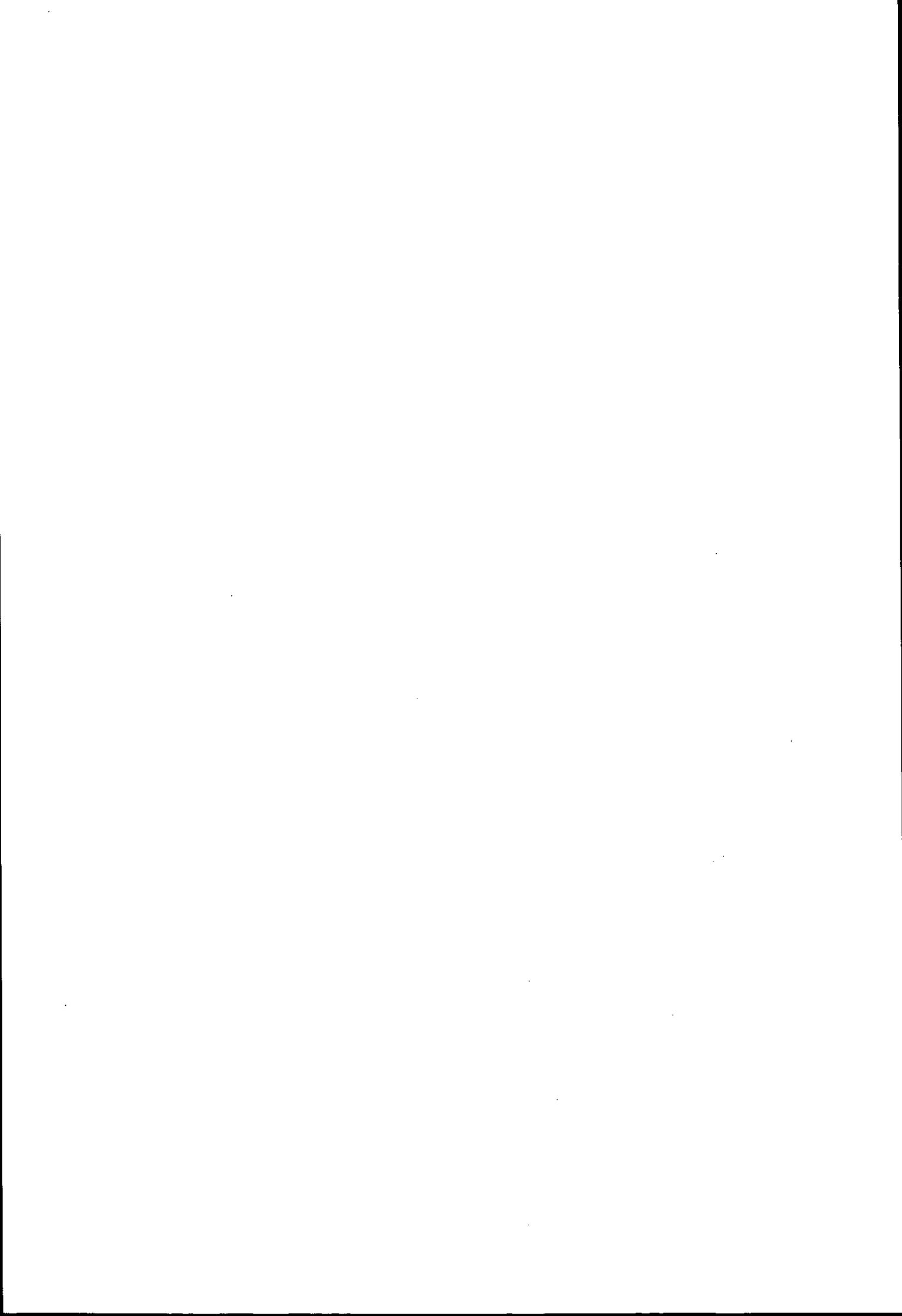
### (7) AI 関連情報の流通、共有の促進

研究、供給サイドの双方からキチンと情報発信をすることが大切である。つまり、お互いに有用な情報が実は存在していながらそれが知られていないのが現況であろう。ネットワーク化の進んでいる現在、インターネットのような仕組みでも使って情報流通、共有化をもっと進めることがAI普及促進のための原点ではないか。

AI 関連についても、公的機関が情報流通・共有化を推進する役割を果たすことが求められる。



## 第 2 部 人工生命



## 第1章 序論

人工生命 ALife (Artificial Life) は、古き良き人工知能 GOF AI (Good Old Fashioned AI) をブレイクスルーしようとする新しい科学である。

人工的な生命、あるいは生命の人工化といった言辭は古くから様々に述べられて来たが、人工生命という明確な表現で新しい科学として提唱したのは、米国サンタフェ研究所の Christopher G. Langton である。Langton は、1987年に Interdisciplinary Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems、後に第1回人工生命会議と呼ばれるようになったこの伝説的なワークショップを呼びかけたが、彼によれば、生命の概念は “life as we know it” から “life as it could be” へ拡張すべきであり、それにより生命の本質がより深く理解できるという。現在知られている生命の姿は偶然の所産であって、生命誕生の最初のシンセシスが少し違っていたとしたら、その後の進化を通して今とはかなり異なる生命系が現れていたとしても不思議ではないと主張する。カーボンではなくシリコンベースの生命が有り得たかもしれないというわけである。確かにこのような見方に立てば、長い間生物学者達を悩ませて着た制約、非可逆的な唯一の生命系しか対象にできないという就縛から逃れることができ、たとえば、進化のプロセスをコンピュータで再現することで、何が必然なのか偶然なのかといったことを明らかにできるかもしれない。

人工生命のキーコンセプトは「創発」である。生命に関する議論には古くから対立的な二つの立場、機械論と生氣論があるが、Langton は、このいずれにも依らない創発論に立とうとする。すなわち、全体は部分の線形的な和であるという単純機械論でも全体が部分を決定論的に支配するという素朴生氣論でもなく、創発とは「部分間の局所的な相互作用の結果全体が現れ、その全体が部分への環境となり、それによって新たな秩序が形成される現象」であるとする。そして創発現象が、発生、行動、進化、適応など、個体から社会、生態系に至る様々な生命の振舞いを司る本質であると言う。この創発を一般化し、既存の有機媒体にかかわらずに様々な媒体上に、たとえばコンピュータを用いて実現しようとするのが人工生命の基本的立場にほかならない。

そして、人工生命研究で概ね合意されている原理として、(1)問題をボトムアップ的に開始する、(2)個々の要素は局所的な環境で反応する定義を持っている、(3)自分以外の全ての要素に指示を出す要素や、全体の構造や行動を制御するルールはない、(4)全体の振舞いは明示的ではなく創発することがあげられる。だが、このことは実のところ簡単ではない。

第1回人工生命会議には、L システムの Lindenmayer、遺伝的アルゴリズムの Holland、利己的遺伝子の Dawkins、カオスの Farmer、ナノマシンの Drexler ら、各分野の創始者達が賛同し、後

にサブサンクションアーキテクチャの Brooks も加わった。それ以来、生物学、物理学、情報科学、工学、さらに芸術や哲学の研究者を巻き込み、Software Synthesis, Hardware Synthesis, Wetware Synthesis の3領域に Philosophy を加えて意欲的な研究が行われてきた。最近、Langton が当初目指した新しい生物学という意味合いが薄れ、特に94年の第4回会議は開催地がサンタフェから MIT へ移ったこともあり、工学的色彩が強まって来ている。

現在、人工生命は様々な分野へ拡がりを見せており、人工生命への関心と期待は批判を付随しながらも非常に高まっている。

次章以下では、まず人工生命の概念と歴史的背景が述べられ、ついで人工生命研究の計算モデルと手法、そして研究事例と最新の研究動向が示される。さらに人工生命研究の課題と展望が述べられる。とくに、第7章では「人工生命は新しいパラダイムとなりうるか」というテーマで開催したワークショップの活発な議論を抄録している。

人工生命に関する単行本は、国内でも1992年頃からいくつか出版されているが、本書は単なる解説にとどまらずに、研究に焦点をおいている。人工生命研究の起点、方法論、国内外の研究の最前線の情報などを簡潔ではあるが網羅している。本書が人工生命に関するこれまでの議論に新しい意味を加えることを確信するとともに、これから本格的に人工生命研究を始めようとする読者のガイドとなることを期待している。

## 第2章 人工生命パラダイム

人はいつも人の命令に従う人工システムを構築することを夢みてきた。人造人間ゴーレム (Golem) はそのよい例である。クリーチャ (創造物) が最後は創造主である人を攻撃する、古い映画「フランケンシュタイン」にもそれを見ることができる。その現代版がキャメロン (J. Cameron) の映画「ターミネーター」であり、そこでは機械が少なくともほとんどの部分で人間を凌駕している。ごく最近では、数千万年保存された遺伝コードから恐竜を再生する、マイケル・クライトン (Michael Crichton) の原作を映画化したスピルバーグの「ジュラシックパーク」もその好例である。それらは、もちろんすべてサイエンス・フィクションではあるが、人工生命 (ALife) というもののイメージに結びつけられる。しかし、ALife の現実はまだごくごく初歩的なものであり、脅威を抱かせるには至っていない。

ALife に関するそのような大衆的な見方は ALife の究極のゴールに関する議論を喚起する。つまるところ、ALife の究極のゴールとは“生命とは何か”という疑問に対する答えを見つけることである。生物的な生命を研究するために、ALife では、分析的なアプローチではなく、生命と呼べるような現象を創り出す合成的なアプローチをとる。すなわち、“シンセシス (合成) が、複雑系一般、とりわけ生命という複雑系の研究に対する最も適切なアプローチである [Bonabeau 94]”と主張する。我々が本当に合成に成功するような場合には、上で述べた SF 的な事例に関しても絶えず心を払わねばなるまい。

しかしながら、本書は、ALife のゴールをさらに教訓的に考えようとしているのではない。ここに至るまでの道のりと ALife がこれから何を目指そうとしているかを紹介する。そして、その結果として、生命の理解、とりわけ生命の知恵の理解にいかに関与できるかを考える。ある意味で工学の歴史すべてを ALife との関連で整理することもできようが、ここでは生命という視点に特化した研究事例のみを取り上げることとする。

本書では動物の模倣に関する初期の研究についても述べる。これらの研究がオートマトン (自動機械) さらには現在のコンピュータ技術の誕生をもたらした。そして今、コンピュータが人工生命モデルに‘生’を与えつつある。この流れはそれ自身を強化し、新しい計算モデルの創造、ひいては新しい人工生命モデルの創出を加速することであろう。したがって、人工生命研究はコンピュータ技術の進化の一部と捉えることができると同時に、将来の人工物 (計算機械、ロボット、あるいは我々が呼び名を持たない何か) の創造において重要な役割を果たすことであろう。我々はそこに ALife の実際的なゴールを見いだすことができる。すなわち、自動設計や人工物の創造に利用可能

な、生物から学んだメカニズムを発見することがゴールである。

パラダイム論の提唱者クーンによれば、新しいパラダイムの要件は、1) 古いパラダイムを危機に導いた問題を解くことができる、2) 古いパラダイムでは思いもよらなかった現象の予測ができる、3) 古いパラダイムより美しく要領よく簡潔である、4) 解けなかった問題に将来の解決方向を示すことができる、の4つである。

人工生命は従来のパラダイムを越える新しいパラダイムとして期待されている。もしそうだとしたらなによりゆえにか、その問いかけが本書を通して展開されている。特に第7章ではその議論が中心に述べられる。

この章では、人工生命パラダイムの基本思想について述べる。まず対象分野と方法論を示した後、科学、工学、アートとしての観点から人工生命とは何かを論じる。

## 2.1 基本思想

人工生命は「生物のような行動」を研究することを目的とする。分析的 (analytic) な方法に代わって、合成的 (synthetic) な研究の方法を用いて行動を創造するメカニズムを探求する。したがって、生命のような行動を創造するメカニズムの発見は、次に示すような目的に結び付く。

- 1) 既存の生命のより深い理解、特に、生命にとって基本的な属性の理解 (科学目的)。
- 2) 一般的な適応の能力を持った人工物の創造 (工学目的)。

### 2.1.1 対象分野

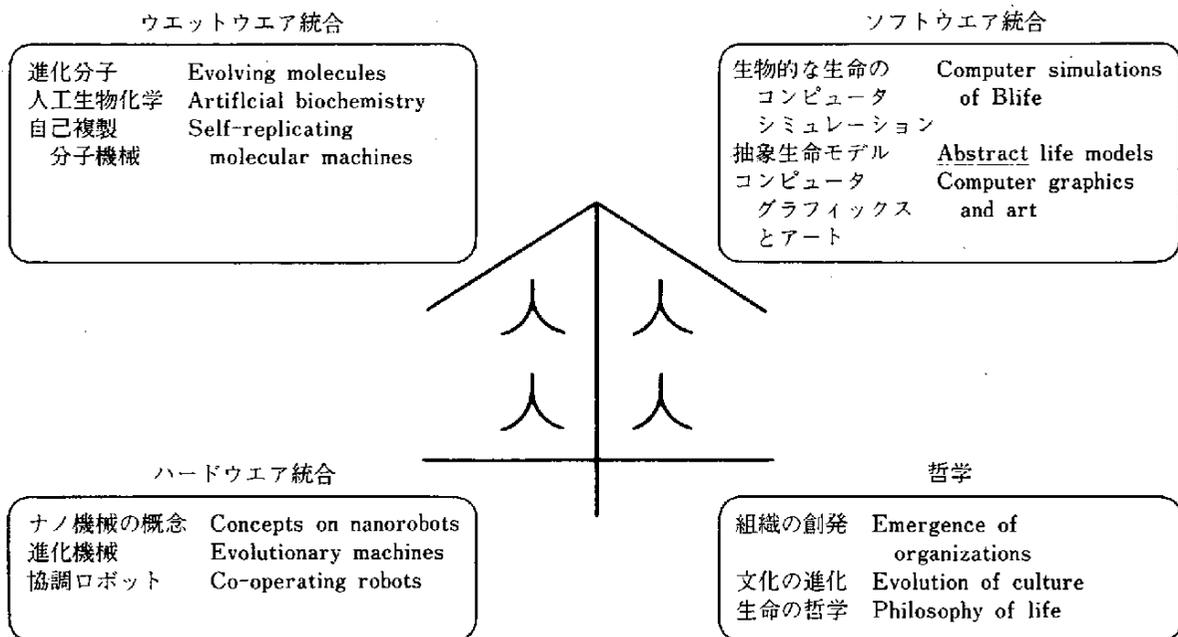
人工生命の基本的な目的は生物の行動の本質を理解することである。これは人工生命の「生命」に相当する部分である。「人工」の意味は生命のようなシステムを人工的な媒体の上に構築することである。人工生命が対象とする分野は人工的な媒体に応じて次のように分けられる。コンピュータ上での実現 (ソフトウェア)、シリコンやロボットなどでの実現 (ハードウェア)、化学分子での実現 (ウェットウェア)。媒体を考えず、人工生命を哲学的に捉えることも可能である。

このように、人工生命は学際的な研究を促進するという共通の目標の下で、様々な研究分野を統合する役割を果たしている (図表2.1.1)。

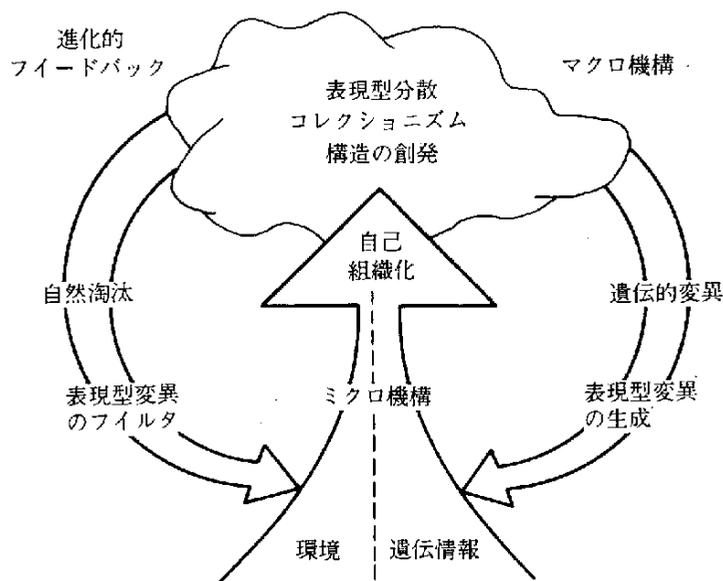
### 2.1.2 方法論

生命のようなシステムにとって必要かつ十分なメカニズムが何であるかという共通の認識はまだ得られていない。問題なのは、単一の方法で生命の示す非常に多様な行動を網羅することが困難だということである。ここでは、次の2つ基本的な方法を挙げる。それは、ある意味で双方が競合関係にある、「進化」と「自己組織化」という概念である。

「進化」の方法は、自然淘汰のみで生命システム構築にとって必要かつ十分なメカニズムを有しており、個体の発達は進化にとって重要ではないと主張する。生物学の分野ではこれに反する意見



図表2.1.1 人工生命研究の「傘」 [ワーリオ1994d]



図表2.1.2 人工生命の研究手法の一般的概念 [ワーリオ1994d]

も見られるが、人工生命の分野では依然として強固な考えとして存在している。この種の方法論の例は、遺伝的プログラミング、進化システムなどであり、主としてアメリカにおける研究がその典型である。

「自己組織化」の方法論では自己組織化が生物システムの起源であると考えられる。進化も自己組織化の結果であり、人工生命の研究も自己組織化から始めるべきである、との主張である。システムがその安定性を維持し、生物的な構造を創造することを意図した概念、オートポエシスはその例で

ある。また、環境の変化に対して優れた適応能力を持つ（たとえば、免疫ネットワークなどから発想を得た）様々なインタラクション・ネットワークはその他の例である。「進化」の方法論に比べて、こちらは主としてヨーロッパにおける研究がその典型である。

「自己組織化」の一番大きな課題は合目的な行動を創造することである。一方、「進化」（明示的に与えられた目標が目的を定める）は、創造性においては同程度の能力を有してはいない。この問題は「自己組織化」と「進化」という二つの方法論を組み合わせることにより解決される。そのようなシステムでは、「自己組織化」がマイクロ・ダイナミクスをもたらし、「進化」がマクロ・ダイナミクスをもたらす（図表2.1.2）。

#### 〈参考文献〉

[Bonabeau 94] Eric W. Bonabeau and G. Theraulaz : Why do we need Artificial Life, Artificial Life, 1(3) : pp303-325, 1994.

## 2.2 人工生命とは？——各々はALに何を期待しているか

### 2.2.1 生命科学として

Langton は人工生命の提唱に際して、「生物学は原則的には生命の学問であり、実際には炭素鎖の化学に基づく地球上の生命に関する学問である。しかし、研究対象となる生命が炭素ベースのものでしかなかったため、理論生物学は個々の例から一般原則を導きだすのは不可能であるという基本的障害に長い間直面してきた」と言っている。さらに、「生命に関する一般理論を導くためには、一般化できるだけの多くの具体例が必要で、そのために我々自ら別の生命（人工生命）を作り出すことである」と言っている[1]。

ここで20年あまり理論生物学、発生生物学等を研究してきた立場から、彼の主張を、生命科学として何が期待できるか、フェアに吟味してみよう。問題は彼のいう「生命に関する一般原理(理論)」とは何か、である。地球上の個々の生命の例も炭素ベースであるにしろ生きている。当然、個々の例において「生きていることに関する一般原理」は働いているはずであり、個々の例から十分その原理を見いだすことが可能なのではないだろうか。長さ3のオリゴヌクレオチドがコドンになっていて20種類のアミノ酸をコードしていることも、原理として大腸菌などのごく少数の生物種を用いて発見された。もし Langton の立場にたつて、この原理はまだ地球上の確認されていない生物についてコドン表が確認されていないから、一般原理ではないと言ってしまえば詭弁になってしまう。さらに炭素ベースではない、として生命は大きく2つの要素、すなわち「遺伝情報とそれによってエンコードされる機能実行単位からなっている」ことが生命の一般原理であるとしても、これも少数の生物種から分析的手法により十分導かれる。

Langton の主張をもう少しとりあげてみよう。「人工生命はコンピュータ内などで基本的法則から生物学的現象が再構築されることによって「自然」な生命を研究する新しい研究分野である。従

来の解析的手法に対して人工生命は合成的アプローチをとり、従来手法を補う」。そのためのキーコンセプトとして彼は「創発」を主張する。創発とは「部分間の局所的な相互作用の結果、全体が現われ、その全体が部分への環境となり、それによって新たな秩序が形成される現象」であるとする。

創発によって研究対象となるものに Langton によれば当然、個体発生のプロセスが入ってくる。発生生物学的立場から創発を吟味してみよう。多細胞生物の発生はたった1個の受精卵からそのプロセスを開始する。受精卵は次に最初の細胞分裂によって2個の細胞から構成される初期胚になる。ここで注意していただきたいのは、受精卵も1個の細胞でありながら個体として全体なのである。2細胞期の初期胚も個体として全体である。受精卵から2細胞期胚への移行をみると全体から2細胞期胚を構成している2個の細胞（部分）が作られ胚全体が構成される。部分間の局所的な相互作用の結果、全体が現われるのではない。全体から次の全体が現われるのである。卵形成時の細胞内の分子に注目してみても、部分が先か全体が先かではなく、部分と全体とは同時に初めから存在する。このように個体発生のプロセスはけっして創発とよばれるものには支配されていない。

部分と全体に注目したのは Langton が最初ではない。L. von Bertalanffy は機械論や生氣論とは異なる、部分と全体に注目した「有機体論」を提唱しているし[2]、W. Heitler は個体発生に関して「全体的計画」を提唱している[3]。またその後の多くの理論生物学研究者もこれらを念頭において研究してきた。「有機体論」と「全体的計画」をここで少し紹介しておく。

有機体論はつぎのように考える。生物体はそれ1個で複雑なシステムで全体であり、相互作用しあう諸構成要素が高度に秩序だって組織化、体制化されている。したがって生物体を構成する分子種をすべて知ったところで生命現象を解明したことになる。部分を知ると同時に部分間の関係も知らなければならない。生命体の諸構成要素は其中で耐えず破壊され、再製造されている。これは機械とは大きな相違点である。さらに、Langton が理論生物学は研究対象となる生命体が地球上だけのものだったために一般原理が導けなかったと言うのに対して、Bertalanffy は生物学において強力な理論が欠けている（一般原理が導けなかった）のは必要な抽象化と記号化の方法がまだ見つかっていないことによる、と言っている。

人工生命では部分をコンピュータに入れて創発によって全体をコンピュータ内で構成することを目指すが、Bertalanffy 的考え方をすれば、その前に部分と全体の抽象化と記号化の方法を発明することが必要なのである。またコンピュータにモデルとして組み込むために諸構成要素とそれらの間での関係を熟知している必要もあるのである。

Heitler の全体的計画とはどのようなものであろうか。彼は量子力学者であったが、物理学的な話から入っていこう。Newton の運動方程式は1個の質点の運動を記述する微分的因果法則である。ある時刻での質点の位置と速度（初期条件）さえ与えられれば、それ以降の任意の時刻での質点の位置と速度がこの方程式によって決定できる。一方、質点の始点と終点が与えられているとき、この質点のたどる軌跡と途中の速度は作用積分が極値となるようなものになっている。このとき作用積分が極値となることが全体的計画である。これは変分原理とよばれ、目的論的法則である。これら

微分的因果法則と目的論的法則が古典物理学において全く同等であることはよく知られている。この同等性に基づいて Heitler はつぎのように考える。物理学の法則は例外なく微分的なものであり、1点からすぐ近くの点まで、ある時刻からすぐ後の時刻までに対して有効である。それに対し、多くの生物はあらかじめ定められた形に達したとき成長が停止する。その大きさと形の情報は受精卵中にすでに含まれていて、その情報は受精からはるか遠い時点で有効である。この時点は全体的計画で決定されていて、ある段階からつぎの段階への因果律的發展はあまり重要な役割を演じていない。生物体の形は何らかの全体的計画を指示しており、個体発生 of 細かい過程において指導的役割を果たすのは（遺伝情報に裏打ちされた）全体的計画である。

Heitler の全体的計画の考え方は、「部分間の局所的な相互作用の結果、全体が現われ、その全体が部分への環境となり、それによって新たな秩序が形成される現象」である創発の考え方とは、部分と全体に対する捉え方が全く異なる。創発における部分間の局所的な相互作用は微分的なものである。

以上のように考察を重ねてくると、人工生命の考え方は少なくとも個体発生のプロセスを研究する上では有効ではなさそうである。それでは生命科学の分野として人工生命に期待する（あるいは期待できる）ことはあるであろうか。あるいは、生命科学において、より積極的にコンピュータを活用することを評価して、人工生命の考え方に捕われずに、より積極的にコンピュータを活用することにより期待されることはないであろうか。

まず、創発の考え方が成立すると考えられる分野への応用であろう。諸構成要素とそれらの関係が熟知されている分野であり、諸構成要素が最初は互いに独立であれば創発の考え方は有効になる。そのような分野として規模の小さい生態系のシミュレーションであろう。たとえば鳥が群れをなして飛行するさまなどにはすでに適用されている。しかし、それも個々の鳥の脳内部にまで立ち入ると人工生命はたちまちにして無力になってしまう。逆に言えば、複雑で巧妙な脳の機能も人工生命では単純な行動パターンとして理解されてしまう。ここがおもしろいところで、いかに脳が複雑で細胞レベル、分子レベルでみれば計算機科学ではまねのできない非常に高度なことをやっても、脳の機能実行の結果取り出されるものは単純なものである、あるいはヒトはそれを単純なものとして理解しようとしている。すなわち我々がいくら科学として脳を働かしていかに複雑なものを研究しようと、出てくる結果は単純なものなのである。したがっていくら人工生命で研究するといっても単純な世界から脱出することができないのではないだろうか。

そこで複雑なものはあくまで複雑なものとして理解しモデルを複雑に組立て、それをコンピュータ内で実現することが必要なのではないか。たとえば、エイズ患者の体内をエイズウイルスの増殖と遺伝子の変化、免疫細胞のポピュレーションの変化、免疫細胞の遺伝子の変化などを考慮にいれた複雑で大規模なモデルをコンピュータ内で実現するのである。そのためには多くのことを知らなければならぬ。これが諸構成要素を熟知するという意味である。これは、より積極的にコンピュータを活用することであり、実験研究とコンピュータシミュレーションの世界のインタラクティブ

な研究スタイルが求められる。このような研究スタイルが確立されることを、人工生命という考え方がでてきた現在、期待したい。

〈参考文献〉

- [1] C. G. Langton, 人工生命, 日本機械学会誌, Vol. 97, No. 906, pp403-407, 1994
- [2] L. von Bertalanffy, 生命—有機体論の考察, みすず書房
- [3] W. Heitler, 科学と人間, みすず書房

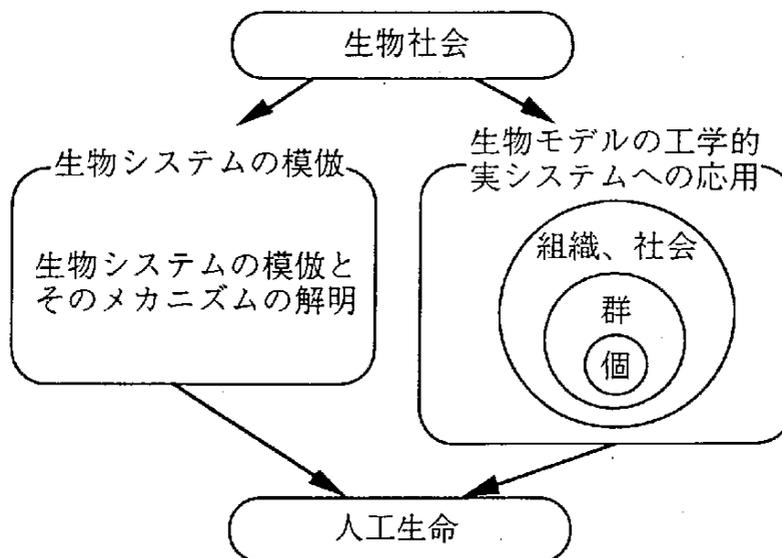
2.2.2 工学として

(1) 人工生命の応用分野

人工生命の研究目的は2つに大別することができる(図表2.2.1)。一つは生物を分析, 模倣することによって, 生命の本質を理解する, あるいは生物システムの挙動や進化のメカニズムを解明することである。もう一つは, 生物システムをモデル化し, そのモデルに基づいた工学的な実際のシステムを構築することである。ここでは人工生命が工学へどのように応用できるのかを予測する。

現在, 情報ハイウェイ計画が立案され, インターネットを介したマルチメディアの研究が盛んである。インターネットにぶら下がっている各ユーザを生物の個体とみなすと, インターネットは一つの生命系を構成していることになる。コミュニケーションによって, 新たな情報を進化的に生成したり, ネットワークを利用して無数のCPUを並列協調動作させることも可能になる。コンピュータウイルスの発生に対して, 免疫系を構成し, 対処することも可能になるであろう。逆に免疫系の新たな仮説が人工生命研究から得られ, エイズのような実際の免疫系の病気に対する新たな理論の展開もないとは言い切れない。

また金融においては, 世界中の膨大な情報を一瞬のうちに得られるようになるため, 現在デリバ



図表2.2.1 人工生命へのアプローチ

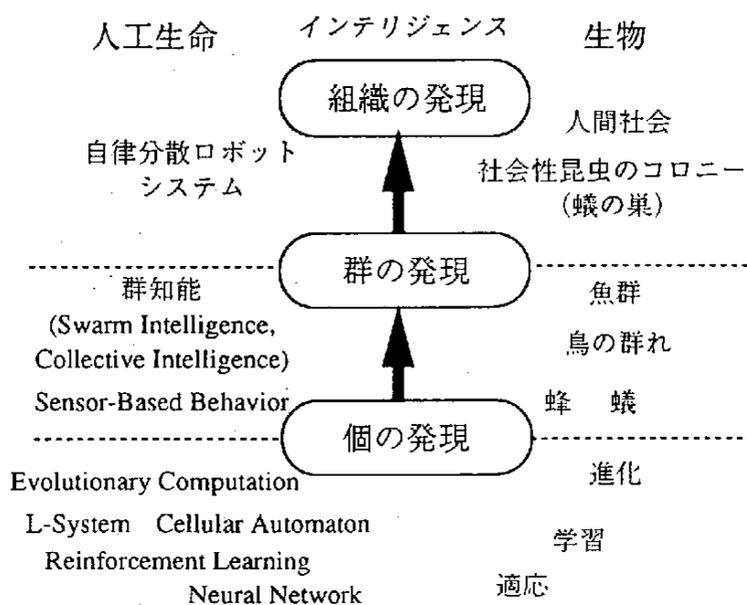
タイプ商品として扱われている金額(約1,700兆円)をはるかに上回る額が、マーケットという生命系の中で取り引きされるであろう。マーケットの予測には、カオスを考慮した複雑系のモデル化方法を適用することができ、意思決定アルゴリズムも適応と学習機能を持つ進化システムによって実現されるであろう。

製造業においては、マーケットの需要を的確に予測し、必要なものを必要な量だけ生産する多品種少量生産が必要になりつつある。また、企業の生産拠点が生産コストと物流コストなどのバランスから世界各地に移転し、動的に生産量や生産品目を変化させるようになる。このような状況に対応するために、知的生産システムの開発が必須である。また、技術者のもつ技能を遠隔地にネットワークを介して送ったり、バーチャルリアリティ技術を組み合わせて遠隔操作したりすることも必要であろう。次に述べるように知的生産システムは、まさに生物の組織や社会として考えることが可能である。

## (2) 生命科学から知的システムへの応用

複雑で多様な動作ができる知的なシステムには、センサとその情報処理、駆動制御系、環境に適合した制御戦略のための推論機構、そして人間とのインタフェースが必要である。さらに、可変で柔軟な耐故障性のあるシステムを構築するため、自律的なモジュール構造の分散型システムが必要である。たとえば、モジュールとしてはロボットがある。人間が与える知識、行動規範、構造には限界があるため、新たな知識の獲得や有効なシステム構造の決定には、

- 1) トップダウン的な人間の教示,
  - 2) ボトムアップ的なシステムの自律的動作、行動による適応と学習、そして自己組織化,
- を組み合わせることが知的システムに必要なものである。このような機能を持つシステムである生物や生



図表2.2.2 生物系と工学的人工生命とのアナロジー

物社会を模倣することによって、その優れた性質である、

- 1) 自己組織性,
- 2) 自己進化性,
- 3) 自己復元性,

を知的システムに与える。これにより、人間が与える以上の行動、動作パターンを生成することが可能になる。

図表2.2.2のように生物社会と人工生命とのアナロジーとしては、例えば、

- 個：1台のロボット,
- 群れ：グループとしての複数ロボット,
- 組織, 社会：グループが数多く集まった全体のシステム,

に対応させることができる。そして、

個のロボット：環境への適応動作やロボット間の競合と協調の相互関係から学習し、様々な目的に応じた行動の結果やロボット間の知識交換によって進化する。

ロボットの群れ：個の知能の高まりから競合と協調のバランスを保ちつつ、全体の目的に応じるように自己組織化する。

ロボットの社会：システムとしてより高度な知能を発現することが可能（期待）。

最近、ファジィ理論、ニューラルネットワーク、人工知能はめざましく進歩し、実用化の域に達したものが数多く現れている。また、遺伝的アルゴリズムのように生物の進化の過程をモデルにした最適化法の研究も盛んである。これらは、システムを構成する各個体が、人工生命として適応、学習、そして進化の能力を備えるために有効な技術である。これらの技術は特徴に応じて適用の仕方が異なるが、得意とする所へ個別に適用するだけでなく、融合化と統合化によりそれぞれの短所を相補い長所を生かし、新たにより高度な情報処理を行うことが期待できる。

### 2.2.3 アートとして

アートの題材として動植物や人間、あるいは森林といった「生命的なもの」を取り上げることは、ある意味で必然である。生命がもたらす感動や情報がアートを生んだとも言えるからである。人工生命研究は生命的なものを人工的に作り出す技法を提供する。つまり、アートの側からは、人工生命研究の成果の中に、技法と題材が豊富に発見されることが期待される。また、そこを出発点として、アート独自の方法へと発展させることもできよう。

コンピュータによる画像生成技術を利用したアートに、人工生命を取り入れることは容易である。実際に利用されている技法としては、L-Systemのような発達システム、セル構造オートマトン、遺伝的アルゴリズム、群れ行動、模擬育種法などがある。代表的な作家としては、河口洋一郎、Karl Sims、William Latham、Craig Reynolds、Lui Beck、Christa Sommerer、Laurent Mignonneau、などがいる。生物の形態や行動を視覚化するという意味からも今後も発展が期待される。

音楽に人工生命的なものを取り入れようとする試みも、平野砂峰旅、岩井政佳らによって行われてはいる。しかし、画像とは違って、音は1次元時系列であるという物理的制約から、それほど幅広い製作は試みられていない。

アートには、作者の意図の伝達、観賞者が参加するインタラクティブアートなどの形態があるが、模擬育種法は選択という新たな製作方法を提供したし、GA、CAなどは作者にも予測困難なオートマチックアートを出現させた。この意味で、人工生命は単なる材料や道具に留まらずアートの新たな形態をもたらしたということもできる。

模擬育種法は、R. Dawkins の Blind Watchmaker から始まったアイデアであり、自然選択の代わりに人間の主観的な選択を用いることにより、好みの表現型を得ようとする手法である。遺伝的プログラミングとの組合せによって、画像を生成するプログラムの品種改良を行なうシステムは K. Sims の提案以来、UNIX、DOS/V など複数のシステムに移植されており、CMU の Michael Witbrock は World Wide Web を使った、不特定多数の投票による選択を実現するシステムを公開し、インターネットを介した国際的なインタラクティブアートを実現している。URL は <http://porsche.boltz.cs.cmu.edu:8001/htbin/mjwgenform> である。

## 第3章 人工生命の歴史

本章では、生物的な生命をモデル化する初期の試みを簡単に紹介する。これらの試みは、クリストファー・ラングトン (Christopher Langton) が企画・主催し、細分化・個別化された学問分野の垣根を越えて人工生命 (ALife) という新しい科学分野を出現させた会議から集めたものである。

ALife との名の下で現在進められている多くの研究トピックスが ALife が誕生する以前から存在したことは周知の事実である。しかし、新たな創造のために、学問分野や領域を越え、あわよくばそれらを統合しようとする発想自体に意義があろう。

重要なひとつの側面は、“生命とは何か”という疑問に対する答えを見いだすという ALife 本来の主張から明らかなように、ALife が応用そのものをあまり意識していないのに反して、多くの研究が応用に根ざして進められていることである。

まさに今なぜ人工生命の研究が実際的なのかという問いに答えることもまた自明である。ひとつは、生命に関わる研究によって集積・蓄積された膨大な量の情報や知見が現代技術によって初めて統合されうるとの期待からである。特に、コンピュータ技術は生命体や生命系の抽象的な概念を操作し、可能なシナリオを開拓するためのツールを我々に提供してくれる。異なる分野の専門家が一緒に相互作用しあうという意味において、ALife はきわめて学際的な研究である。いわば、人工生命研究そのものがひとつのシンセシス、あるいは創発 (Emergence) なのである。

以下では、現代の人工生命研究へ至る道のりを、1987年の人工生命ワークショップ以前と以後との2つに分けて述べてみたい(図表3.1.1参照)。ワークショップ以前の画期的な研究事例は、「人工化」に関わるものと「生命」に関わるものとに分けてみた。ここで「人工化」とは、生命的なシステムを人工的な媒体の上に構築しようとする研究を意味し、「生命」とは生命や生物の理解へ向けた研究を意味する。

### 3.1 人工生命への道のり

#### 3.1.1 「人工化」研究の画期的な出来事

生命的な営みを物理的に具現化しようとする試みは技術の歴史の中に容易に見いだせる [Chapuis]。始まりは多分機械時計の発明(1326年)であろう。これは決定論的な機械化へ向けた研究の基礎となった。よく引合いに出される例がヴォカーソン (Jacque de Vaucanon: 1709-82) の自動アヒル(飲んだり、食べたり、ががああ鳴き、水をはねかけ、生きているアヒルのようにあたかも食べ物を消化することができる、金色に光る銅でできた人工アヒル) である [Arbib 66]。他の

The milestones of the  
Artificial

A mechanical clock	Richard of Wallingford	1326
An artificial duck	Jacques de Vaucanson	1735
A drawing automaton	Jaquet-Droz family	
エニアックコンピュータ	ノイマンら	1946
ゲーム理論	ノイマン	1947
オートマトン理論	ノイマン	1948
サイバネティクス	ウイナー	
情報理論	シャノン	
チューリング・テスト	チューリング	1950
ニューロコンピュータ	ローゼンブラッド	1957
生成文法理論	チョムスキー	
カオスの発見	ローレンツ	1963
ファジー理論	ザデー	1965
Lシステム	リンデンマイヤー	1968
人工の科学	サイモン	1969
ライフゲーム	コンウェイ	1970
オートポエシス	マツラナ&ヴァレラ	1973
フラクタル理論	マンデンプロ	1974
遺伝的アルゴリズム	ホーランド	1975
電子機械	ドレクスラー	1981
カオス・アトラクタ	ファーマー	1983
アダムループ	ラングトン	1984
ヴァーチャル・リアリティ	ラニアー	1985
サブサンプレション・アーキテクチャー	ブルックス	1985
ナノテクノロジー	シュネイカー	1986

The milestones of the  
Life research

1809	Jean Baptiste Lamarck	Behavioral Adaptability
1828	Karl Ernst von Baer	Embryology
1859	Charles Darwin	Origin of Species
1865	Gregor Mendel	Heredity
1897	Ernst Haeckel	Biogenetic law
1917	D'Arcy Thompson	On Growth and Form
1942	Ernst Mayr & Julian Huxley	Modern evolutionary synthesis
1953	Conrad H. Waddington	Genetic assimilation
1953	ワトソン、クリック	DNA二重螺旋モデル
1968	木村	分子進化の中立説
1970	マーギュリス	共進化細胞
1974	イエルメ	免疫ネットワーク
1976	ドーキンス	利己的遺伝子
1985	ゲーリング	ホメオボックス
1986	ドーキンス	バイオモーフ

The milestones of the  
Artificial Life

Foundation	第1回A-Life会議	1987
L-systems	第2回A-Life会議	1990
Movable Finite Automaton	第3回A-Life会議	1992
Tierra	第4回A-Life会議	1994
	第5回A-Life会議	1996
	第1回A-Life欧会議	1991
	第2回A-Life欧会議	1993
	第3回A-Life欧会議	1995

図表3.1.1 人工生命研究への道のりの概観

例としては、ドロスの字を書く自動人形があり、精巧なオートマトン機構を用いて字を書くことができた。

オートマトンの機構的な構造は汎用的なコンピュータへの道を切り開いた。コンピュータ開発の注目すべきポイントは、「生命の機構」から「生命の論理」への関心の変化である。「生命の論理」に関する研究は、現代のコンピュータ技術の発展をもたらし、論理操作を用いて知性を理解しようとする動きを導いた。フォン・ノイマンは、ゲームやオートマトン理論の基礎を構築したのみならず、最初のコンピュータを作ったパイオニアでもある。

「生命の機構」に関する研究はまたサイバネティクスの発展を導いた。サイバネティクスの提唱者としての名誉は通常ノバート・ウィナーに与えられる(1948)。彼は、当時既に人間的な情報処理をモデル化することを目標としていた。初期のコンピュータ ENIAC は並列処理に基づくものであり、最初のニューロコンピュータと考えてもよい。

その後、情報を論理的に表現する考え方が支配的になった。1948年、通信における情報理論がシャノンによって確立され、計算可能性に関するチューリング・テストがそれに続いた。それらはコンピュータ・サイエンスや人工知能の研究に大きな影響を与えた。

そこには、どこか生物の情報処理システムの直接的な模擬を越えた、抽象的な情報表現が採られていた。現在知られている計算理論(データとプログラムとを厳密に分離するフォン・ノイマン・アーキテクチャ)が確立され、ニューロコンピューティング(80年代後半再びブームとなる)はノイマン・アーキテクチャの方向とは幹を分かつこととなった。

現在のコンピュータ技術における中心的課題は、何かを表現する言語にある。リンデンマイヤ・システム(Lシステム)は、形式言語に基づいて生物システムを表現することに最も成功したもののひとつである。Lシステムは60年代後半にリンデンマイヤによって考案された。Lシステムは、簡単な書き換えシステム(言語)であり、たとえば植物など極めて生物的な複雑な構造を生成・表現することができる。

数学の世界においても、同じように自己相似を再帰的に繰り返すという考え方が70年代初期マンデルブローによって導入された。フラクタル理論と呼ばれ、生物のフラクタル構造に関する大きな関心呼び、80年代カオス理論とともに大きなブームとなった。

生物システムから現代の計算機科学への直接的なアイデアの最初の導入となったのが、1975年ホランドによって提案された遺伝的アルゴリズムの理論である。彼は生物的なコンセプトから進化の理論を取り入れ、それに最適化という工学的側面を与えた。ドイツ語で書かれていたという事実のために広く知られるには至らなかったが、同様なアイデアはレッチェンバーグによって60年代に進化戦略という名で既に提案されていた。80年代の後半から90年代の前半にかけて、この分野はそのブームを迎えた。

オートマトン理論は、元来フォン・ノイマンによって提案され、その後ウルマンによって体系化された(詳細は別の章にゆずる)。この分野の最も注目すべき成果はコンペイのライフゲームである(1970年)。1984年、ラングトン は、アダムループによる自己複製を研究する際、同様なアプローチを用いた。現在、セル・オートマトンは、人工生命システムのモデリングにおいて中心的な手法のひとつとしての立場を確立している。

「人工化」研究のより応用的なものとしては、各々独自の立場で進められている、ロボティクス(1985年のブルックスのサブサンクション・アーキテクチャ)、ナノテクノロジー(1981年のドレックスラーのナノマシン)、バーチャル・リアリティなども挙げられる。

### 3.1.2 「生命」研究の画期的な出来事

「生命」研究の歴史は17世紀にさかのぼる。ラマルクの行動適応力に関する研究、フォン・ベアの発生学、メンデルの遺伝学、ダーウィンの主著「種の起源」の発刊など、それらは、アーネスト・メイヤーやジュリアン・ハクスレーらによって1942年に出された現代進化理論への基礎を与えた。

50年代、ジェームス・ワトソンとフランシス・クリックらによるDNAやRNAなど、遺伝形質のキャリアである核酸の発見は、遺伝的な情報がどのように保持され伝搬されるかを物理的物質的に説明するものとして画期的なものとなった。これは、化学的な進化に関する議論を呼び起こし（たとえば、木村1968年）、地球上で観察できるすべての生命の基本が細胞機構にあるとの認識が出された。化学的な進化がどのようにして細胞機構を生ずるのかに関しては多くの理論があるが、この議論は未だ決着をみてない。また、生命の起源という基本的な疑問に関しても未だ答えは得られていない。

オートポエシス（自己創成）の理論では異なるアプローチが採られる。そこでは（細胞）構造が進化の概念なしに、いかに自己生成されるのかを説明しようとする。自己定義の考え方はシステム理論の分野で広く用いられるもののひとつである。システム理論は、その名が示すように、生命体もシステム的一种と捉えて、一般的なシステムがどのように機能するのかを説明しようとする。人工生命と異なり、システム理論はシステムを合成しようとはせず、システムそのものとその背後にあるメカニズムのみを説明しようとする。このようなアプローチは、それがあまりに一般的であり、かつ生物世界の現実とあまりにかけ離れているために、生物学者に広く受け入れられるには至っていない。

### 3.1.3 人工生命：「人工化」研究と「生命」研究の合成

人工生命という言葉は、1987年9月にロスアラモスで開催された人工生命ワークショップを通して広く知られるようになった[Langton 89]。これ以降、このワークショップは、1990年6月、1992年6月ともにサンタフェで開催され[Langton et al. 1992]、[Langton 94]、1994年7月にはケンブリッジのマサチューセッツ工科大学（MIT）において第4回が開催された[Brooks et al. 94]。第5回人工生命ワークショップは1996年5月に日本で開催される予定である。

人工生命に関連する国際会議は他にも企画・開催されている。人工生命に関するヨーロッパ会議（ECAL：European Conference on Artificial Life, 1991年パリ、1993年ブリュセル、1995年グラナダ）、適応行動シミュレーション会議（SAB：Simulation of Adaptive Behavior, 1990年パリ、1992年ホノルル、1992年ブライトン）、自然からの問題解決に関する会議（PPSN：Parallel Problem Solving from Nature, 1992年ブリュセル、1994年エルサレム）などが代表的なものである。また、進化的計算論、遺伝的アルゴリズム、遺伝的プログラミングなど、より対象を限定した多くの会議やワークショップが企画・開催されつつある。

#### (1) 人工生命の定義

人工生命に関して共通的に同意の得られた定義は未だない。しかし、人工生命をとりあえず定義しないとイケないとしたら、人工生命ワークショップの提唱者で第3回までのオーガナイザを務めた、クリス・ラングトンの定義を引用するのが最も適切であろう。

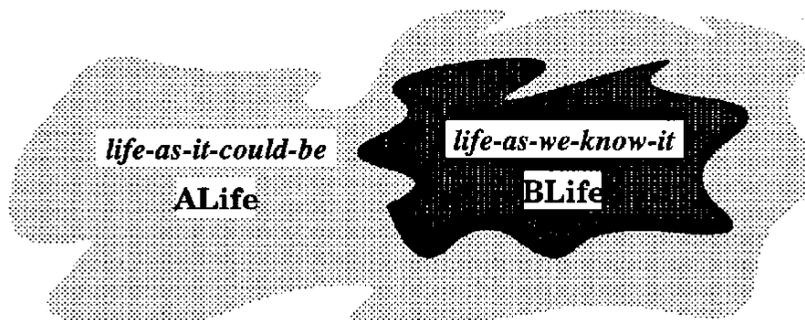
「人工生命 (ALife) とは自然の生命システムに特徴的な振る舞いを示す人工システムに関する研究である。生命的な振る舞いをコンピュータや他の人工メディアを用いて合成しようと試みることによって、生命体の分析に関わる伝統的な生物学を補完しようとする。地球上に進化してきた炭素鎖に基づく生命の枠組みを越え、生物学が基本とする経験的な基盤を拡大しよう。そして、“可能な生命”の大きな視野の中に“我々が知るものとしての生命”を捉え直すことによって、ALifeは理論的生物学へ貢献することができると主張する [Langton 89a]。」

彼は分析よりむしろ合成を強調する。現存する生命の振る舞いを分析するのみならず、生命を創造し、合成するためのメカニズムを見いだそうとする。現存する生命システムの振る舞いに関してのみ興味を限定すべきではなく、生物的生命システム (BLife) に見だされる振る舞いを越えて研究を拡大すべきであるとする (図表3.1.2, 図表3.1.3)。これは、ALifeの認識に対してパラドックスを生じる。なぜなら我々の生命やそのメカニズムに対する理解も生物的な文脈に縛られているからである。

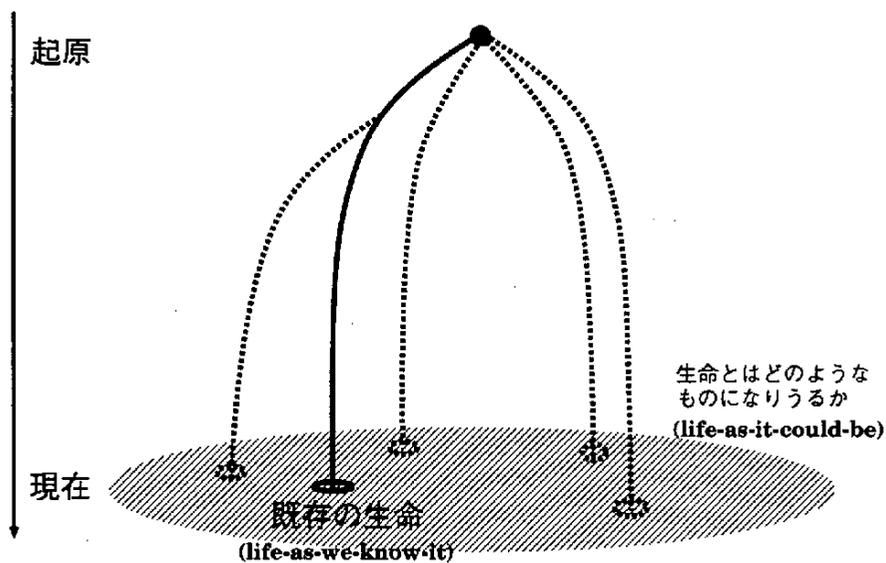
## (2) 生物的生命

我々にできる最善の方法は、生物的生命がどのように定義されているかを理解し、人工生命についても同じ定義を用いることである。しかしながら、不運にも、生命の一般的な定義を与えること自体が極めて難しい。我々にできることは次に示すように生命の特質をリストアップすることである。

- 生命とは、特殊な物質的な実体というよりは、むしろ時空間にわたるひとつのパターンである。
- 自己複製できること。生体自身でなくとも、少なくともそれに属する器官の自己複製も含む(ラバは生きているが再生成はできない)。
- 自己表現のための情報を蓄積できること。たとえば、自然生物は自らを記述する情報 (蛋白 / RNA 機械の文脈の中で解釈される) を DNA 分子の中に保持している。



図表3.1.2 “知るものとしての”生物的生命を越えて“可能な生命”を対象とする人工生命



図表3.1.3 現在の生命に至る道のりは、“可能な”生命の進化発展空間のどこかに位置づけられる。人工生命は、現生命がどこに位置づけられるかを問おうとする。それを見いだすため、生物的生命が用いたと同じ機構を利用して、もう一度進化発展の道のりを合成しようとする。

- 代謝する。環境からの物質とエネルギーを取り込み、器官のパターンと活動に変換する。ただし、ウィルスのようなある種の生物は、それ自身では代謝機構を持たないが、他の生物の代謝を利用する。
- 環境と機能的に相互作用する。生物は、環境の変化に反応し、変化を予見し、彼ら自身のローカルな環境を創造し制御できる。
- 部分の相互依存性。生物個体としてのアイデンティティを保存すべく、生物のコンポーネントは相互に依存している。
- 変動に対する安定性や小さな変化に対する不感応性。これは、生体が雑音の多い環境においてその形状を保持し、機能しつづけることを可能にする。
- 進化する能力。これは生物個体の特質ではなく、その世代交代による系列的なものである。したがって、ALifeは以上述べたような特質を少なくともいくつか所有する人工システムの研究である。このリストはどのようなシステムが生きているかという定義を提供してくれる。

### 3.2 カオスの縁の生命

セルオートマトン (CA) の研究を基に、ラングトンは「カオスの縁の生命 [Langton 92]」の理論を提案した。そこで彼は、周期解とカオスとの境界にある複雑系から生命の挙動が生ずることを主張している。

ウォルフラム (Stephen Wolfram) は、CA の動的な挙動に基づいて、CA を以下の4つのクラスに分類した。

- ・クラス1：時間が経つと安定平衡状態に落ち着く CA
- ・クラス2：時間が経つとお互いが分離された周期的な構造状態に落ち着く CA
- ・クラス3：カオス的、非周期的な構造パターンを生成する CA
- ・クラス4：局所的な構造をもつ複雑なパターンを生成する CA

さらに、それら4つのクラスと力学系とを以下のように対応づけた。

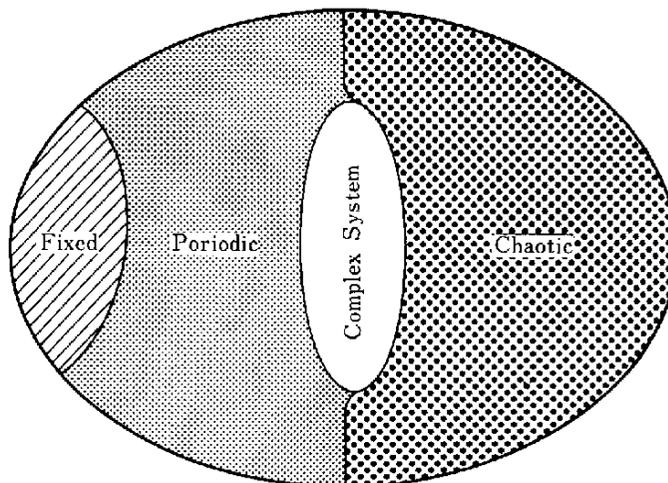
- ・クラス1：固定点に収束する力学系
- ・クラス2：リミットサイクルになる力学系
- ・クラス3：ストレンジ・アトラクタに関係づけられるカオス的な力学系
- ・クラス4：直接対応づけられる力学系はなく、振る舞いが非常に複雑で遷移が長時間に及ぶ

CA ルールの空間をパラメータ化することによって、これらのクラス間の関係を理解することができる。すなわち、我々は、あるパラメータの関数として、あるクラスから別のクラスへの転移を観察することができる。

ラングトンがラムダと称するあるパラメータを導入した。ラムダはK状態N近傍のCAにおいて定義されるパラメータで、このパラメータを用いてCAの種々のルール空間を連続的に探索でき、系の挙動を観察することができる。

理論的な詳細は参考文献に譲ることにして、彼がこの実験から得た結果は以下のように要約される(図表3.2.1参照)。

- 1) CAの動的な挙動のスペクトルにおいて、CAの挙動はラムダの関数として、固定点→周期解→複雑→カオスへと進む。ウォルフラムの分類と対応させれば、クラス1→2→4→3への変化に対応する。
- 2) 周期的な挙動とカオス的な挙動の間に明らかに相転移がある。



図表3.2.1 カオスの縁のコンセプト：複雑な挙動がカオスと周期的な挙動の縁に見いだされる [Redrawn after Langton 92, 76]

これらの実験から、ラングトンは以下のように結論する。「周期領域とカオス領域との間の狭い領域に、最大の計算可能性、言い換えれば、情報を操る能力が最も大きくなる領域が存在する。この力学系における秩序からカオス状態への転移を物理系における相転移に対応するものと捉えると、物理的な相転移と万能計算とは類似した現象とみることができる。カオスの縁、すなわち、臨界的な相転移の近傍から情報処理が自発的に創発し、情報がエネルギーより優勢となって物理システムのダイナミクスを支配するようになる。カオスの縁に位置することによって、情報処理が系のダイナミクスの重要な部分となりうる可能性も出てくる。」

<参考文献>

- [Chapuis] Alfred Chapuis and Edmond Droz, Automata: A Historical and technological Study, B.A. Batsford Ltd.
- [Arbib 66] M. A. Arbib, Simple Self-Reproducing Universal Automata, Information and Control, 9: pp177-189 (1966).
- [Langton 89] Christopher G. Langton (ed.), Artificial Life. Adision-Wesley (1989).
- [Langton 89a] Christopher G. Langton, Artificial Life. In C. Langton (ed.) Artificial Life. Adision-Wesley (1989).
- [Langton et al. 92] Christopher G. Langton, Charles Taylor, J. Doyne Farmer and Steen Rasmussen (eds.), Artificial Life II. Adision-Wesley (1992).
- [Langton 92] Christopher G. Langton, Life at Edge of Chaos. In C. Langton et al. (eds.) Artificial Life II, Adision-Wesley (1992).
- [Langton 94] Christopher G. Langton (ed.), Artificial Life III. Adision-Wesley (1994).
- [Brooks et al. 94] Brooks and Maes (eds.), Artificial Life IV. MIT Press (1994).

## 第4章 人工生命研究の計算モデルと手法

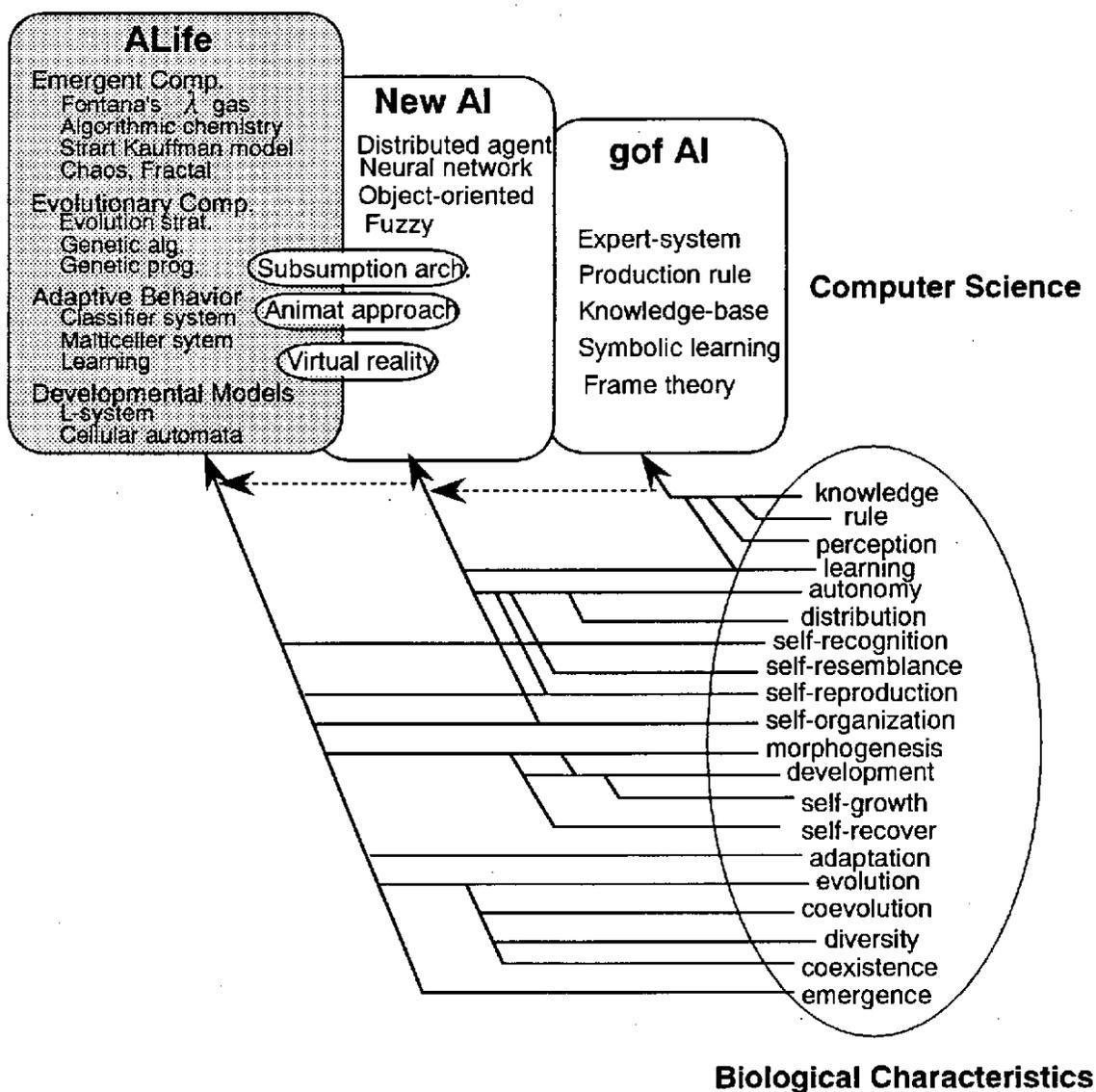
### 4.1 GOF AI から ALife へ

生物から発想を得ようとする試みは、レオナルド・ダヴィンチを呼び出すまでもなく特に新しいことではない。最近の関心は集中から分散へ、トップダウンからボトムアップへ、知識型から行動型へ、最適化から適応へ、さらには均質性から多様性へ、決定論的から創発型へといったキーワードにより特徴づけられる。その意図を明確にしているのが人工生命である。表象主義的人工知能の限界が認識されるにつれ、古き良き人工知能 GOF AI (Good Old Fashioned AI) から、New AI, ALife へのシフトが起こっている。

図表4.1.1は、生物の有する様々な特徴と、そこから発想を得たコンピュータサイエンスの展開との関連を示したものである。伝統的 AI ではエキスパートシステムやプロダクションルールのように、いわば閉じた世界の知識ベースの枠組みに依拠していたが、その限界を越えるべく分散エージェントやニューラルネット、オブジェクト指向、さらには、ファジー理論などが新たに生みだされた。人工知能は、これらの新しい概念や理論を取り入れることにより、いわゆる冬の時代を乗り越え、New AI へと展開してきている。生物機能との関連でいえば、知識や学習から、自律性、分散性、自己組織化などへ関心の中心が移行してきた。さらに、人工生命では、発生、形態形成、行動、適応、共生、進化といった生物の特徴を強く志向している。

人工生命の研究手法として多くのモデルや理論が提案されているが、それらは大きく4つに分けることができる。すなわち、Emergent Computation (創発計算論)、Evolutionary Computation (進化計算論)、Adaptive Behavior (適応行動)、Developmental Model (発達モデル) の4つのグループである。Brooks のサブサンクションアーキテクチャやMeyer のアニマットアプローチは、New AI から ALife への架橋に位置づけられよう。

Emergent Computation にはフォンタナの  $\lambda$  ガスやカオスなど、Evolutionary Computation には遺伝的アルゴリズムや遺伝的プログラミングなど、Adaptive Behavior にはクラシファイアシステムやマルチセラーシステムなど、さらに Developmental Model には L システムやセラーオートマタなどが含まれる。以下の節では、これらの計算モデルと手法を概説することにする。



図表4.1.1 生物の特徴とコンピュータサイエンスの展開の関連

## 4.2 創発計算論 (Emergent Computation)

Emergent Computation とは創発に基づく計算モデルのことであり、[Forrest 90]によると次の3条件により定義される。

- それぞれが明示的な命令に従うエージェント (agent) の集合からなる。
- 明示的な命令に従うエージェントが相互作用し、それがマクロレベルにおける非明示的な大域の現象を生成する。このマクロレベルでの現象を上位現象 (epiphenomena) と呼ぶ。
- 上位現象を、計算として自然に解釈することができる。

エージェントが従う明示的な命令 (explicit instruction) は基本レベルでの計算に相当し、これを通常「マイクロ構造」、「低レベル命令」、「局所的プログラム」、「部分要素システム」などと呼ん

でいる。例えば典型的な例はセルラ・オートマトンであり、この場合エージェントは遷移表に従う各セルに相当する。上の定義で重要な点は、明示的な命令は我々が興味を持っている現象とは違う（より低い）レベルにあるということである。つまり明示的な命令のマクロ（上位）のレベルに上位現象が創発することが、Emergent Computationの核心である。

本節では、Emergent Computationの例をいくつか説明する。

#### 4.2.1 Fontanaの $\lambda$ -gas

本節では、Fontanaの $\lambda$ -gasと呼ばれる創発計算モデルを紹介する。以下で説明する内容の詳細については、文献[Farmer-90, 94a, 94b]を参照されたい。

新しい物質を従来の物質から生成するには2つの方法がある。第一は、物質間の相互作用によるものであり、化学の反応がその例である。第二は、ノイズによって生じるランダムな作用であり、DNAやRNAの複製はその代表例である。Fontanaのモデルは、ランダムではない第一の場合を扱う。ここで考えているモデルの空間は多数の分子からなる。これらの分子は、実際には形式言語の関数として実現されている。具体的には以下で述べるChurchのラムダ関数( $\lambda$ -calculus)を分子として扱う。

分子間( $f, g$ )の相互作用は2つの関数の合成( $f(g)$ )として解釈される。但しこの合成は非対称的である(つまり $f(g) \neq g(f)$ )。分子間の相互作用を制御するために反応規則が定義される。2つの分子が相互作用する場合、この反応規則を満たすときに限り新しい物質が生成される。図表4.2.1はラムダ関数の例とその評価を示す。ここで $+$ 、 $-$ 、 $*$ はそれぞれLISPのcar(リストの第一要素を返す関数)、cdr(リストの第一要素を除いて返す関数)、cons(2つの要素を連結して返す関数)の意味であり、図では変数 $a$ が $((* aa)(+a))$ に割り当てられたときの関数の評価を示している。はじめにレベル0が評価され続いてレベル1、最後にレベル2が関数の合成 $f(g)$ として評価されている。

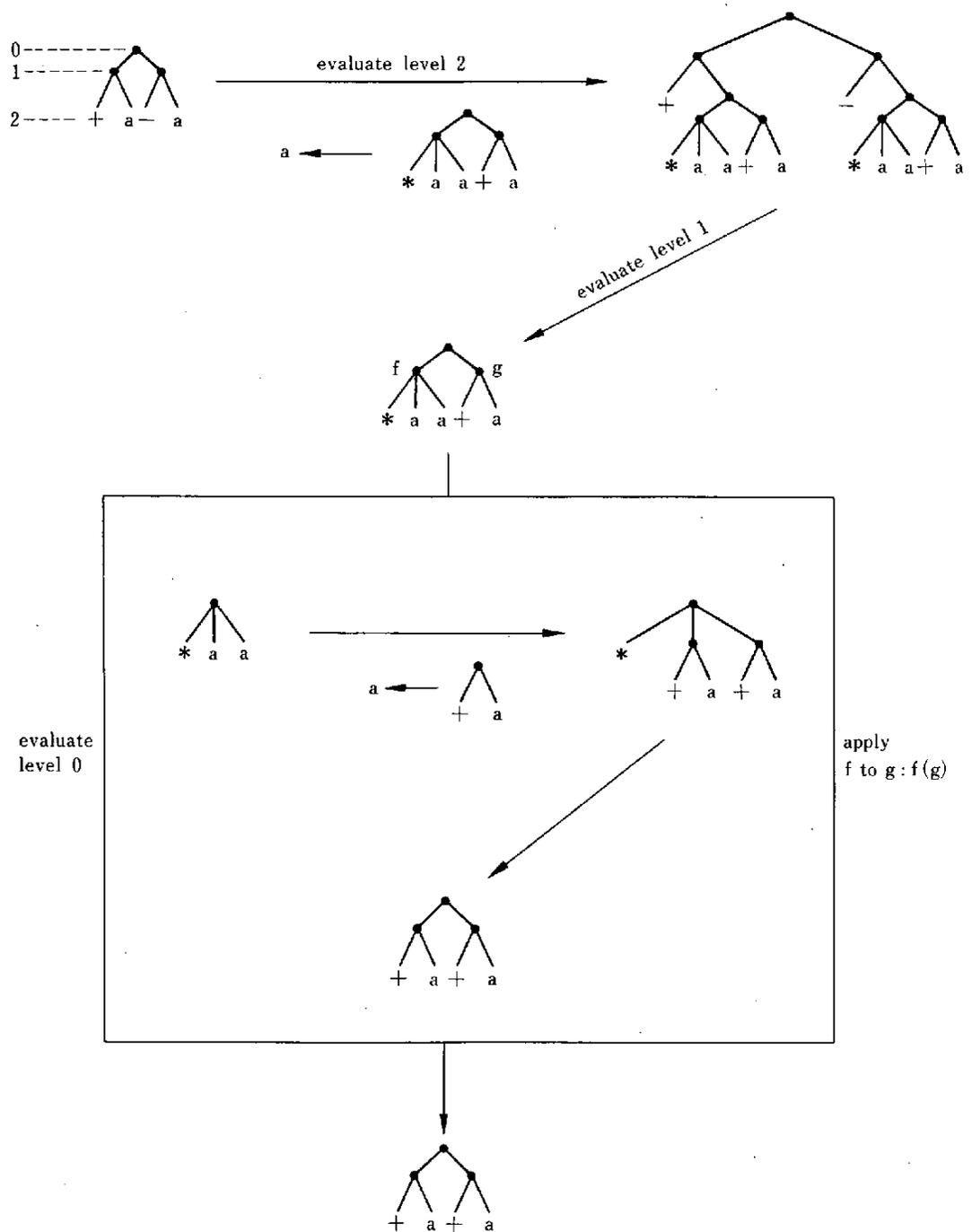
2つの分子(関数 $f, g$ )の間の反応は、LISPのquote記号(')を用いて

$((f)(g))$

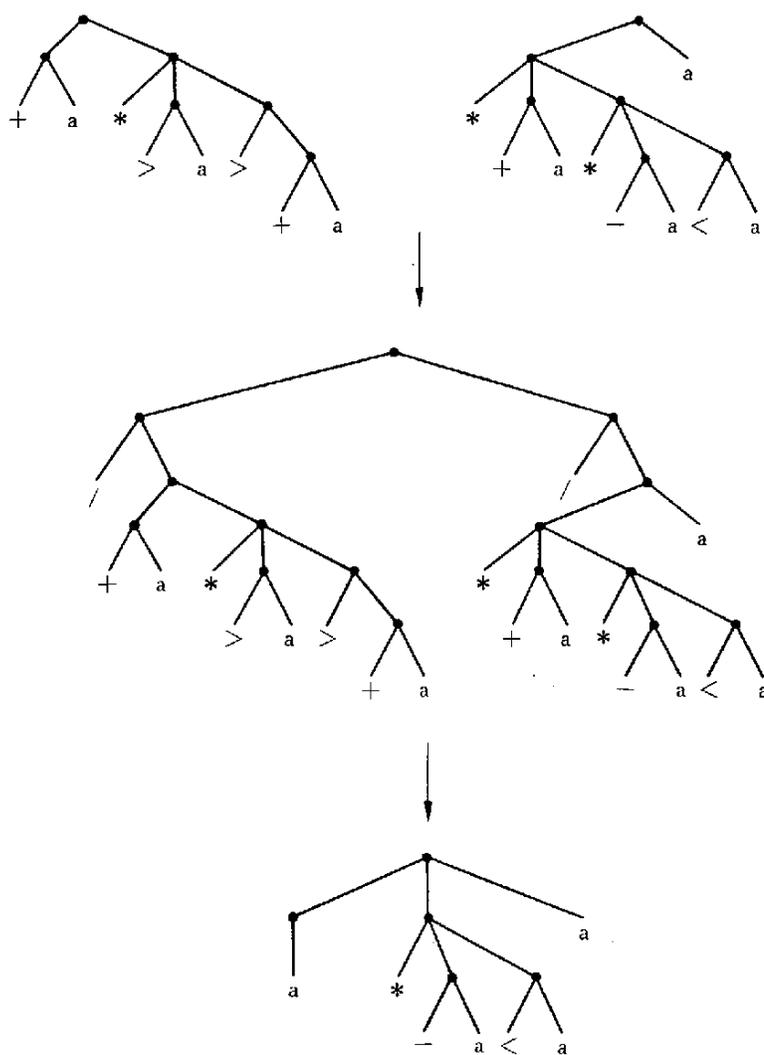
のように表現される。図表4.2.2は2つの分子の反応の様子を示している。

分子間の反応を記述するために、相互作用グラフ(関数間の相互作用を表現するグラフ、繰り返しマップとも呼ぶ)を用いる。相互作用グラフの不動点は、閉じていて自己保存的な集合である。相互作用グラフは、与えられた関数の集合上で定義される言語によって導かれる動的システムを記述している。分子の相互作用によってもとのグラフを生成し得る部分グラフを「種集合」と呼ぶ。従って、もとのグラフが相互作用による不動点であるならば、種集合はそのグラフにおける安定性を規定している。

一定数の関数(分子)の集合であり、これらの分子がランダムに選ばれて反応を起こすシステムのことを $\lambda$ -gas(またはTuring Gas)と呼ぶ。以下では様々な反応規則のもとでの $\lambda$ -gasの実験



图表4.2.1 Evaluation example. The expression  $((+ a) (- a))$  is evaluated using an association list that assigns the expression  $((+ a a))$  to the variable  $a$ . See text for details.

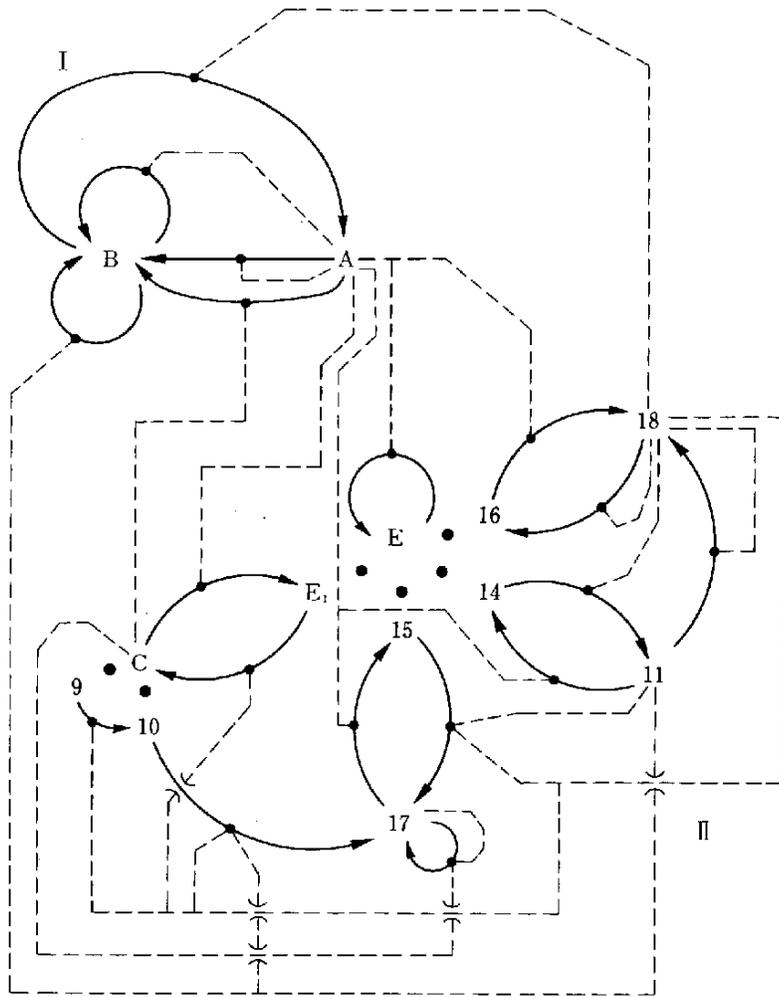


図表4.2.2 Interaction between algorithms. Two algorithmic strings (top) represented as trees interact by forming a new algorithmic string (middle) that corresponds to a function composition. The new root with its two branches and ' operators is the algorithmic notation for composing the functions. The interaction expression is evaluated according to the semantics of the language and produces an expression (bottom) that represents a new function. The evaluation of the interaction expression is derived in Appendix C.

の結果を述べる。ここでは  $\lambda$ -gas の分子数は1,000としている。

(1) ランダムに生成したガスで、反応規則に特別な制限がない場合 (L0と呼ぶ)

30,000反応後の相互作用グラフを図表4.2.3に示す。ここで実線は分子の遷移を、点線はその遷移の作用を示す。例えば、分子  $k$  を出発点として点線が、 $i$  から  $j$  への実線の矢印に接続されている場合、分子 (関数) の反応 (合成)  $j=k(i)$  を示している。図表4.2.3の分子のラムダ関数を図表4.2.4に示す。この表では、関数が次の20,000反応の後に消える場合に第2列に-の印をつけている。第3列はこの分子の集団における数を、第4列は関数の表現を示す。図表4.2.



図表4.2.3 Interaction graph. The interaction graph of the functions listed in「図表4.2.4」 is shown. The numbers denote the individual functions according to their ordering in「図表4.2.4」. Capital letters denote sets, where  $A = \{1, 2, 3, 4\}$ ,  $B = \{5, 6, 7, 8\}$ ,  $C = \{9, 10\}$ ,  $E = \{12, 13, 14, 15, 16\}$ , and  $E_1 = \{12, 13\} \in E$ . Solid arrows indicate transformations, dotted lines functional couplings. A dotted line originates in a function (or a set, see text), say,  $k$ , and connects (filled circle) to a solid arrow, whose head is  $j$  and whose tail is  $i$ . This is to be interpreted as  $j = k(i)$ . Large filled circles indicate membership in a particular set. Function 17 is an identity function. Note: all dotted lines and solid arrows that result from 17 copying everything else in addition to itself have been omitted. See text for details.

3から分かるように、第17番目の分子が恒等関数である。従って実際には各関数( $g$ )に自分自身に至る閉ループがあり、第17関数( $f$ )を起点とした点線がその閉ループに引かれている(つまり  $f(g) = g, \forall g$ ) はずであるが、簡単のために図では省略している。

自己複製、寄生、様々なコピー関数がこのシステムのダイナミックを形成する。新生率(反応によって新しい関数が生じる割合)は時間とともに減少し、相互作用により安定状態に至ることを示している。この確率過程は最終的には次のような状態になる。

図表4.2.4 State of an unperturbed Turing gas. The table lists the state of a Turing gas with  $N = 1000$  particles after  $3 \times 10^5$  collisions. First column: lexicographic order of the function. This number is the "name" used in the text to refer to a particular function. Second column: - marks indicate functions that disappear during the following  $2 \times 10^5$  collisions. Third column: number of copies. Fourth column: function expression. See 「図表4.2.3」 for the interaction graph and text for the details.

(# 1)	-	14	((('a)(a))('a)(a))
(# 2)		43	((('a)(a))('a)(a))((('a)(a))('a)(a))
(# 3)	-	16	(((((>'(>a)))(>'(>a))))(a)((>'(>a)))(>'(>a)))) (a)((>'(>a)))(>'(>a))))(a)((>'(>a)))(>'(>a)) ))))(a))
(# 4)		90	(((((>'(>a)))(>'(>a))))(a)((>'(>a)))(>'(>a))))(a))
(# 5)		33	((('a)(a))((('a)(a))('a)(a)))
(# 6)		133	((('a)(a))(((('a)(a))('a)(a))((('a)(a))('a)(a))))
(# 7)	-	36	((('a)(a))((((>'(>a)))(>'(>a))))(a)((>'(>a)))(>'(>a))) (('(>'(>a))))(a)((>'(>a)))(>'(>a))))(a)((>'(>a)) ))(>'(>a))))(a))
(# 8)		205	((('a)(a))((((>'(>a)))(>'(>a))))(a)((>'(>a)))(>'(>a))) (('(>'(>a))))(a))
(# 9)	-	10	(((*a)((*a)(*a)))
(# 10)		7	(((*a)(*a))
(# 11)		1	((>a)>a))
(# 12)	-	37	((a)((*a)((*a)(*a))))
(# 13)		5	((a)((*a)(*a)))
(# 14)		7	((a)((>a)>a))
(# 15)		40	((a)(*a))
(# 16)		220	((a)>a))
(# 17)		11	(*a)
(# 18)		92	(>a)

- 単一の複製関数
- 互いに反応しない種族の混合
- 各関数が種集合である自己複製集合

こうしたシステムは典型的には極めて長い過渡的状态を示し、互いに安定であるような反応によって特徴づけられる。そのため反応は自己保存的な集合同士の相互作用を含んでいる。

(2) コピー関数を許さない場合 (L1と呼ぶ)

反応においてコピー関数が生成された場合、その反応は実行されない。このとき図表4.2.5に示すような疑似的安定状態を形成する。これらは3つのポリマー（重合体）の族A, B, Cに分割される。それぞれのポリマーはA1, B1, C1というモノマーから形成される。A, B間の相互作用を図表4.2.6に示す。Aの中のすべてのポリマーはA1（モノマー）によって生成されることに注意されたい。例えばA1からA3, A3からA6というように分子が生成される。A6を図表4.2.7に示す。分子間の反応は、このように各A, B, Cの集合の内部の遷移で行われる。

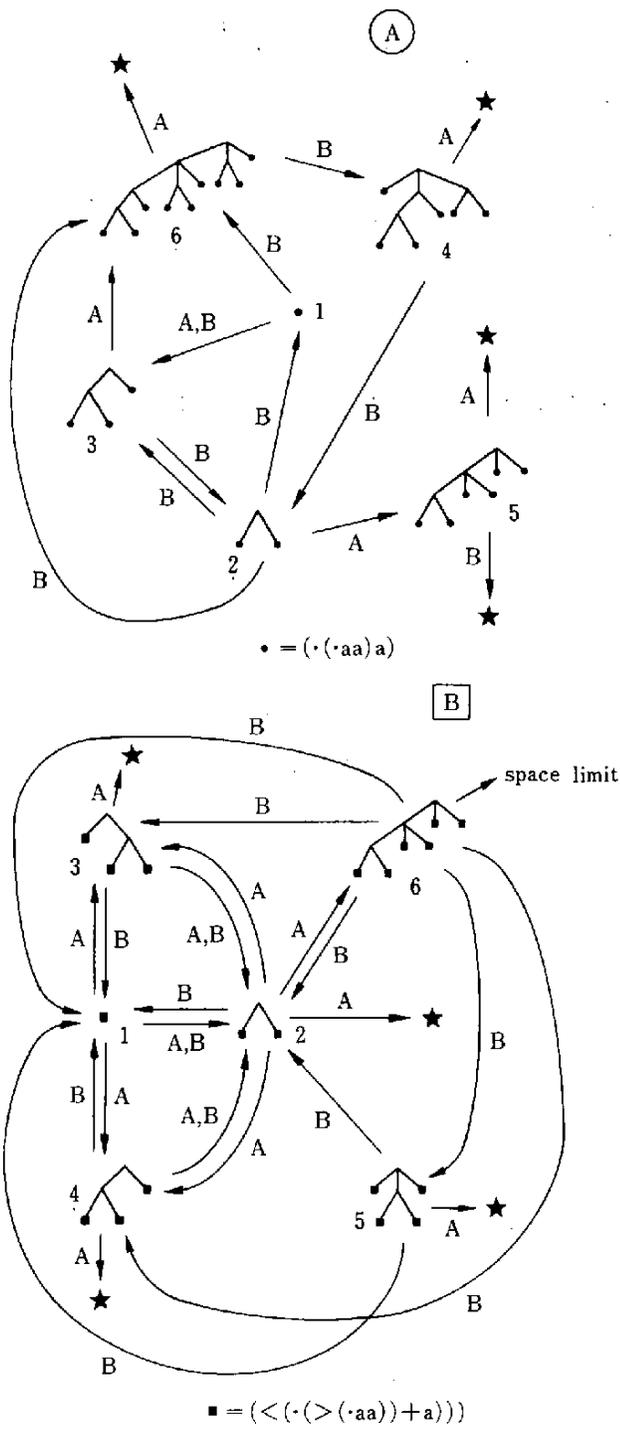
図表4.2.5 Turing gas without copy reactions. The table shows a quasi-stationary state of a Turing gas in which copy reactions were not allowed. The state consists of three polymer families A, B, and C, built from monomers A1, B1, and C1, respectively. The interaction graphs for subsets A and B are shown in 「図表4.2.6」 The ordering of the functions is not lexicographic. See text for details.

(# A1)	41	(*(*aa)a)
(# A2)	69	(((*(*aa)a)(*(*aa)a))
(# A3)	56	(((*(*aa)a)(*(*aa)a))(*(*aa)a))
(# A4)	20	(((*(*aa)a)(((*(*aa)a)(*(*aa)a))(*(*aa)a))(((*(*aa)a)(*(*aa)a)))
(# A5)	4	((((((*(*aa)a)(*(*aa)a))(*(*aa)a)(*(*aa)a))(*(*aa)a)(*(*aa)a))
(# A6)	19	((((((*(*aa)a)(*(*aa)a))(*(*aa)a))(((*(*aa)a)(*(*aa)a))(*(*aa)a))
(# B1)	183	(<(*(>(*aa))(+a)))
(# B2)	115	((<(*(>(*aa))(+a))(<(*(>(*aa))(+a))))
(# B3)	35	((<(*(>(*aa))(+a))((<(*(>(*aa))(+a))(<(*(>(*aa))
(# B4)	22	((((<(*(>(*aa))(+a))(<(*(>(*aa))(+a))((<(*(>(*aa))
(# B5)	9	((<(*(>(*aa))(+a))((<(*(>(*aa))(+a))(<(*(>(*aa))
(# B6)	13	((((<(*(>(*aa))(+a))(<(*(>(*aa))(+a))((<(*(>(*aa))
(# C1)	182	(*(<(*(>(*aa))(+a))))
(# C2)	108	(((*(<(*(>(*aa))(+a)))(*(<(*(>(*aa))(+a))))
(# C3)	27	(((*(<(*(>(*aa))(+a)))(*(<(*(>(*aa))(+a)))(*(<(*
(# C4)	28	(((*(<(*(>(*aa))(+a)))(*(<(*(>(*aa))(+a)))(*(<(*
(# C5)	3	(((*(<(*(>(*aa))(+a)))(*(<(*(>(*aa))(+a)))(*(<(*
(# C6)	8	((((((*(<(*(>(*aa))(+a)))(*(<(*(>(*aa))(+a)))(*(<(*

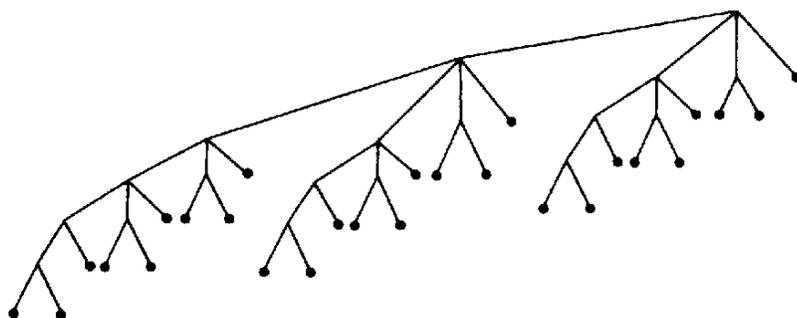
従って、コピー関数を禁止した場合は上で述べたのとは別の振舞いを示すようになる。つまりポリマーが相互作用において重要な役割を果たす。安定状態の分子集団は、通常異なるモノマーを有するポリマーの部分集合に分割される。このポリマーの構造によって多様性と安定性を獲得するのである。

### (3) 開放系のモデル。

このモデルは、安定した系をランダムな関数を導入して揺らすことで実現する。この場合、コピー関数がないとシステムはいくつかの疑似安定的な状態を遷移する。コピー関数がある場



图表4.2.6 Interaction graph of a state without copy reactions. The interaction graphs of the A-subset, 7(a), and of the B-subset, 7(b), of 「图表4.2.5」 are shown. The functions are displayed as trees whose leaves are monomers given by the functional group indicated at the bottom of each graph. Solid arrows indicate transformations operated by some function(s) belonging to the subset(s) indicated by the label(s) of the arrows. Numbers as in 「图表4.2.5」



図表4.2.7 Self-similar polymer. The function resulting from three-fold application of the  $A1 = (*(*a a) a)$  monomer (see「図表4.2.5」) to itself.

合には、この種の揺らぎには極めて弱く最終的にはその構造の多くを失ってしまう。

(4) L1の集団間の相互作用 (L2と呼ぶ)。

ここでは2つのL1集団  $A$ ,  $B$  を別々に生成し、安定状態にそれぞれなったところで  $A$ ,  $B$  を混合する。この場合、次のような反応が観察される。

- $A$  内部の相互作用  $\Rightarrow A$  内の分子が生成される。
- $B$  内部の相互作用  $\Rightarrow B$  内の分子が生成される。
- $A$ ,  $B$  間の相互作用  $\Rightarrow A$ ,  $B$  には存在しない分子が生成される場合がある。

ここで  $A$ ,  $B$  間の相互作用により生成された分子のうち、 $A$ ,  $B$  には存在しなかったものを「のり (glue)」と呼び  $G$  で表す。つまり、

$$G = A * B \cup B * A - A - B \quad (1)$$

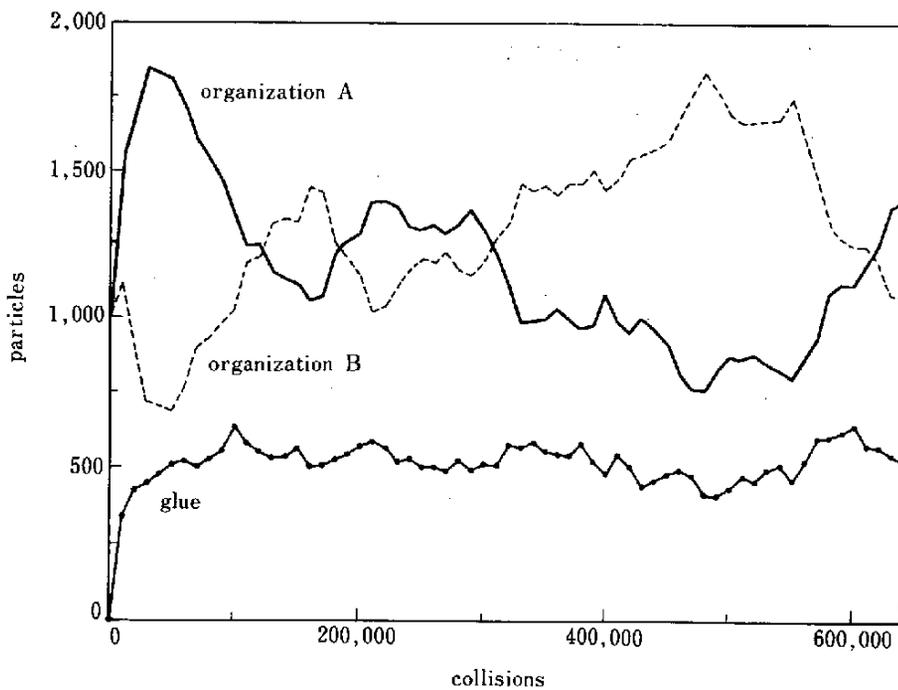
である。ここで  $A * B$  は  $\{f(g) \mid f \in A, g \in B\}$  を、 $B * A$  は  $\{g(f) \mid f \in A, g \in B\}$  を示す。 $G$  が空集合でない場合、2つのL1の混合により新しい分子の組織化が生じる。

図表4.2.8は、L1レベルの分子集団  $A$  (分子数1,000, 異なる分子の種類54) と  $B$  (分子数1,000, 異なる分子の種類41) を混合した後の様子を示す。図には  $A$ ,  $B$ , 及びのり (glue) の数が反応回数に応じてプロットされている。

この実験から、L1集合間の相互作用によってより高レベルの組織集団 (L2) が形成されることが分かる。L2集団はL1集団と多くの共通点を持つが、もとのL1集団の安定的な統合であることが大きな違いである。つまりL2集団は複数のL1集団の単なる共存ではなく、もとのL1集団には属さない分子 (のり) が存在する。この「のり」がL1集団間の変形 (反応) の触媒の役割を果たしているのである。

以上見てきたように、 $\lambda$ -gas は次の2つの科学的な抽象仮定に基づいている。

- 1) 化学の構成的な側面。分子の反応により新しい分子が生成されること。
- 2) 化学の多様性。多くの異なる反応により同じ安定物質が生成されること。



図表4.2.8 Dynamics of the interaction between two separately generated LI organizations. The size (number of particles) of each organization and the glue resulting from their interaction is plotted against time (number of collision events). Reactor capacity is 3000 particles. See text for details.

従って、 $\lambda$ -gas から得られて知見は、生物学的な組織の理論のモデルにつながるものであり、Emergent Computation の先駆的な研究の一つと考えられる。

〈参考文献〉

- [Fontana 90]Fontana, W., Algorithmic chemistry, in *Artificial Life II*, Addison Wesley, 1990.
- [Fontana et al. 94a]Fontana, W., Wagner, G., and Buss, L.W., Beyond Digital Naturalism, in *Artificial Life*, vol. 1, 1994.
- [Fontana et al. 94b]Fontana, W., and Buss, L.W., "The Arrival of the Fittest": Toward a Theory of Biological Organization, in *Bulletin of Mathematical Biology*, vol. 56, no. 1, 1994.
- [Forrest 90]Forrest, S., Emergent Computation: Self-Organizing, Collective, and Cooperative Phenomena in Natural and Artificial Computing Networks, in *Physica D*, 42, 1990.

### 4.3 進化計算論 (Evolutionary Computation)

本節では、進化論的な手法に基づく計算アルゴリズムを説明する。以下で扱うのは、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms, 以下 GA と略す)、進化論的戦略 (Evolutionary Strategy, 以下 ES)、進化論的プログラミング (Evolutionary Programming, 以下 EP)、遺伝的プログラミング (Genetic Programming, 以下 GP) である。これらの手法は、いずれも生物の遺伝子の複製、選択淘汰のメカニズムをモデルとしており、工学的にも幅広く応用されている。各手法の比較を以下の図表4.3.1に示す。表から分かるように、ほとんどの方法が1960年代から70年代に提案されている。また表に挙げた主な適用分野は初期の代表例であり、最近になって各々の手法は拡張され他の分野にも応用されている。また様々の手法を統合する研究もなされ、手法間の垣根はますます低くなりつつある。たとえば、1994年には第3回のEPの会議がアメリカで開催された。そのプログラムを見ると、EPのみではなくGA、ES、GPなどのセッションが存在する。したがって今後はGAとかES、EPなどといった流派にこだわらず、幅広い研究の交流、統合がなされるものと思われる。

#### 4.3.1 遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms)

GAは、John Hollandとその弟子たちがミシガン大学で行った研究にまでさかのぼる。その歴史はかなり長く、GAのバイブルともいえるべきHollandの“Adaptation in Natural and Artificial Systems”が出版されたのは1975年である。Hollandは、GAのオペレータによる効果を一種のスロットマシン (2-armed bandit) でモデル化して解析を行っている。Hollandらの研究の目的は、

- (1) 自然のシステムの適応プロセスを説明すること、
- (2) 自然の重要なメカニズムを有する人工的なシステムを設計すること、

にあった[Holland 75]。Hollandの弟子としてGAの関数最適化の研究を行ったのはDeJongである。彼はその後のGA研究の一つの指標となる標準関数を導入した。またGoldbergは、理論からガスパイプラインの配置計画などの応用に至るまで幅広く研究を行っている[Goldberg 89]。

GAで扱う情報は、PTYPEとGTYPEの二層構造からなる。GTYPE (遺伝子コードともいい、細胞内の染色体に相当する)は遺伝子型のアナロジーで、低レベルの局所規則の集合であり、GAのオペレータの操作対象となる。PTYPEは表現型 (発現型) であり、GTYPEの環境内での発達に

図表4.3.1 4手法の比較

	起源	主な適用分野
GA	Holland, J.H. (1975)	文字列 ビット列探索
ES	Rechenberg, I. (1963)	実数値探索
EP	Fogel, L.J. (1966)	オートマトン合成
GP	Koza, J. (1990)	プログラム生成

伴う大域的な行動や構造の発現を表す。環境に応じて PTYPE から適合度 (fitness value) が決まり、そのため適合選択は PTYPE に依存する。

図表4.3.2には、GA の基本的なイメージを示した。何匹かの虫がいて集団を構成する。これを世代  $t$  の虫とする。この虫はおのおの GTYPE として遺伝子コードを有し、それが発現した PTYPE に応じて適合度が決まっている。適合度は図では四角のなかの数値として示されている (ここでは大きいものほど良いとする)。これらの虫は生殖活動 (recombination, reproduction) を行い、次の世代  $t+1$  の子孫をつくり出す。生殖に際しては適合度の大きいものほど、よりたくさん子孫をつくりやすいように、そして適合度の小さいものほど死滅しやすいようにする (これを生物学用語で選択もしくは淘汰という)。図では生殖によって表現型が少し変わっていく様子が模式的に描かれている。この結果、次の世代  $t+1$  での各個体の適合度は前の世代よりも良いことが期待され、集団全体として見たときの適合度が上がっているであろう。同様に、 $t+1$  世代の虫たちが親となって  $t+2$  世代の子孫を生む。これを繰り返していくと世代が進むにつれ次第に集団全体が良くなっていく、というのが GA の基本的な仕組みである。

生殖の際には、GTYPE に対して図表4.3.3に示すオペレータが適用され、次の世代の GTYPE を生成する。ここでは簡単のために GTYPE を 1次元の配列として表現している。各オペレータは遺伝子の組換え、突然変異などのアナロジーである。これらのオペレータの適用頻度、適用部位は一般にランダムに決定される。

GA の基本的な流れをまとめると、次のようになる (図表4.3.4)。GTYPE の集合  $M(t) = \{g_t(m)\}$  をある世代  $t$  における個体群とする。おのおの  $g_t(m)$  の表現型  $p_t(m)$  に対して環境内における適合度 (fitness)  $u_t(m)$  が決定される。GA オペレータは、一般に適合度の大きな GTYPE に適用され、その結果生成された新たな GTYPE は適合度の小さな GTYPE と置き換えられる。以上によって適合度による選択を実現し、次の世代 ( $t+1$ ) の GTYPE の集合  $M(t+1) = \{g_{t+1}(i)\}$  が生成される。以下同様にしてこれらの過程は繰り返される。

なお GA を実装するには、

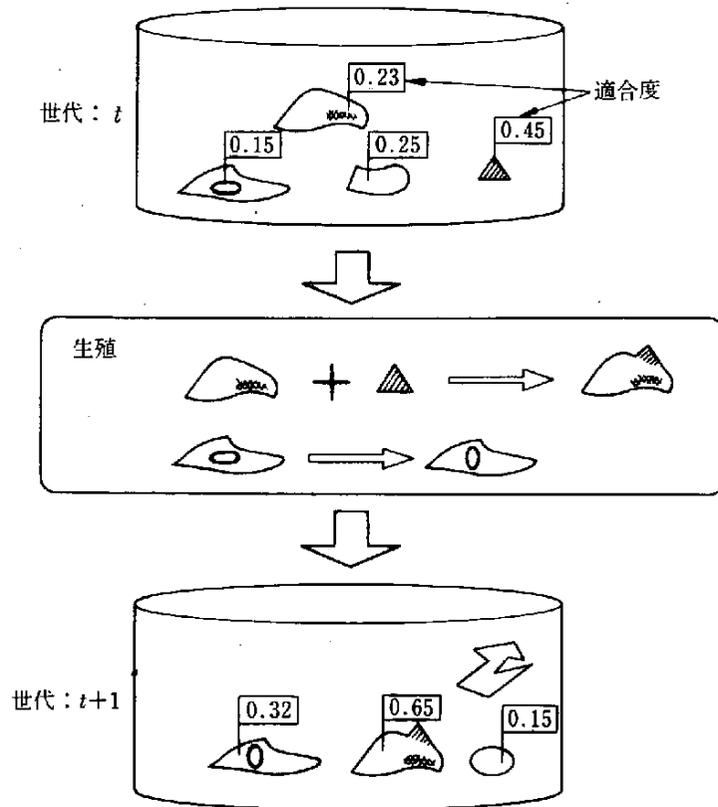
- (1) GTYPE から PTYPE への変換方法、
- (2) GA オペレータの実現、適用方法、
- (3) 選択方式、
- (4) 適合度の計算方法、

などに様々な方式が提案されている。GA についての詳細は [伊庭 94] を参照されたい。

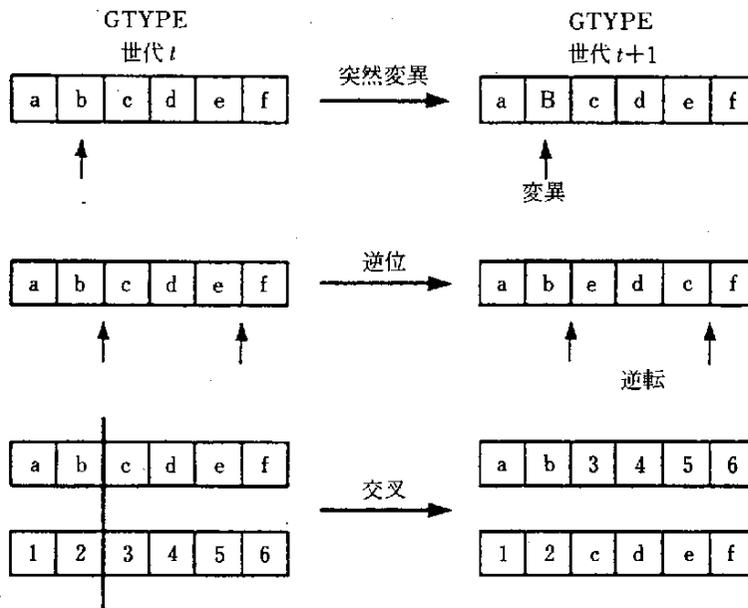
#### 4.3.2 進化論的戦略 (Evolutionary Strategy)

ヨーロッパ (特にドイツ) において、GA と同じような考え方の研究グループが占くから活動していた。この一派は Evolutionary Strategy (以下 ES と略す) と呼ばれ、Rechenberg を中心とする。初期の ES は、GA とは次の 2 点で異なっていた [Michalewicz 92]。

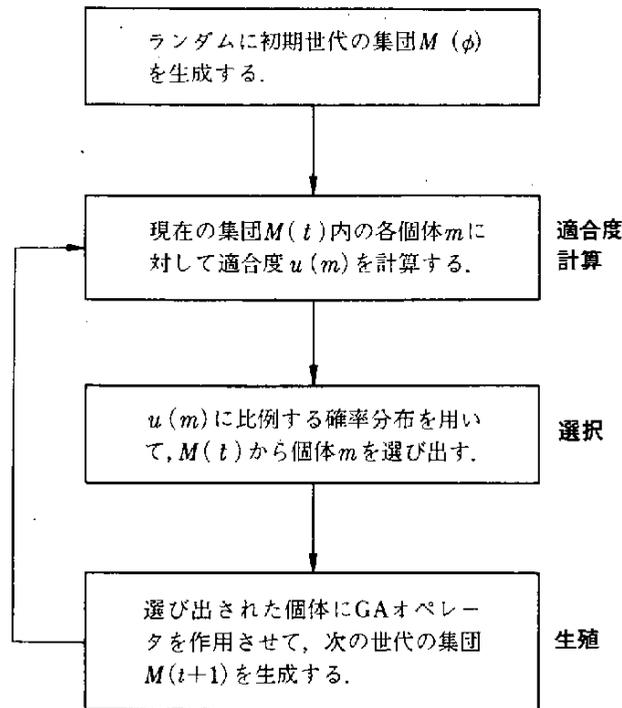
Genetic Algorithms



図表4.3.2 遺伝アルゴリズムのイメージ



図表4.3.3 GAオペレータ



図表4.3.4 遺伝アルゴリズムの基本的な仕組み

- (1) オペレータとして突然変異を主に用いる。
- (2) 実数値表現を扱う。

ES の各個体は、 $(\vec{x}, \vec{\sigma})$  のように 1 組の実数ベクトルとして表される。ここで  $\vec{x}$  は探索空間の位置ベクトルであり、 $\vec{\sigma}$  は標準偏差ベクトルである。このとき突然変異は次のように表される。

$$\vec{x}^{t+1} = \vec{x}^t + N(\vec{0}, \vec{\sigma}) \quad \textcircled{1}$$

ただし  $N(\vec{0}, \vec{\sigma})$  は平均  $\vec{0}$ 、標準偏差  $\vec{\sigma}$  のガウス分布に従う乱数である。

初期の ES では一個体からなる集団で探索を行う。この場合、突然変異によってできた子孫(上式の  $\vec{x}^{t+1}$ ) は、親 ( $\vec{x}^t$ ) よりも適合度が良くなっているときのみ新しい集団のメンバーとして採用する (つまり次の世代の親とする)。

ES は GA と異なり交叉の影響がないため定量的研究が困難ではなく、突然変異率の効果などが数学的に解析されている [Rechenberg 86, Schwefel 81]。たとえば、収束性に関する定理が証明されている [Bäck 91]。また、収束率を最適にするための「 $\frac{1}{5}$  規則」も提案された。ここで「 $\frac{1}{5}$  規則」とは、「成功する突然変異の割合を  $\frac{1}{5}$  にせよ。もしもこの割合が  $\frac{1}{5}$  より大きい (小さい) ならば、 $\vec{\sigma}$  を大きく (小さく) せよ。」というものである。実際には、過去  $k$  世代の成功する突然変異の割合  $\phi k$  を観測し、

$$\vec{\sigma}^{t+1} = \begin{cases} c_0 \times \vec{\sigma}^t, & \text{if } \phi(k) < 1/5, \\ c_1 \times \vec{\sigma}^t, & \text{if } \phi(k) > 1/5, \\ \vec{\sigma}^t, & \text{if } \phi(k) = 1/5, \end{cases} \quad \textcircled{2}$$

により突然変異を制御する。とくに [Schwefel 81] では  $c_d=0.82$ ,  $c_i=1/0.82$  を採用した。この規則の直観的な意味は、「もし成功するならば探索をより大きな歩幅で続けよ。さもなければ歩幅を縮めよ」というものである。

やがて ES は複数個体の集団による探索手法として拡張された。この場合、上述の突然変異オペレータの他に、交叉オペレータ、平均オペレータ（2つの親ベクトルの平均をとるオペレータ）などが導入された。さらに GA と異なり、ES では選択方式として次の2種類の方法を用いる。

(1)  $(\mu+\lambda)$ -ES

$\mu$  個体からなる親の集団が、 $\lambda$  個体の子を生成する。合計  $(\mu+\lambda)$  個体の集団の中から  $\mu$  個体を選択して次世代の親とする。

(2)  $(\mu, \lambda)$ -ES

$\mu$  個体からなる親の集団が、 $\lambda$  個体の子を生成する（但し  $\mu < \lambda$ ）。 $\lambda$  個体の集団の中から  $\mu$  個体を選択して次世代の親とする。

一般に、 $(\mu, \lambda)$ -ES の方が、時間により変化する環境や、ノイズのある問題に対してよい成績を与えるとされている。

ES は様々な最適化問題に応用され [Lohman 92]、また最近になって実数値以外の問題にも適用されるようになった [Herdy 90]。不幸にして Rechenberg が英語の論文を発表しなかったため、本家のドイツ以外ではこれらの研究が近年まで注目されなかったらしい。ES に関しての文献や GA との比較については [Michalewicz 92] [Bäck 93] を参照されたい。

#### 4.3.3 進化論的プログラミング (Evolutionary Programming)

EP は、オートマトンの適応的学習を中心とした進化論的なプログラミングを実現する研究グループである。この研究は、L.J. Fogel らによって1960年代に始められたもので、歴史は GA と同じように古い [Fogel 66]。現在は息子の B.D. Fogel が研究を引き継いでいる。彼らの扱うのは、文字列を観測しながら次に来るべき文字を予測する問題である。

L.J. Fogel の提案した手法は次のようなものである。いくつかのオートマトンからなる（親の）集団がある。各オートマトンには、文字の予測の成績に基づいて適応度が定義される。各親のオートマトンは、突然変異により子のオートマトンを生成する。ここで突然変異には次のものがある。

- (1) 出力記号（予測文字）の変更
- (2) 状態遷移の変更
- (3) 状態の追加
- (4) 状態の削除
- (5) 初期状態の変更

生成された子の選択方法は、GA と基本的に同じである。

EP は最近様々な問題に応用されている。たとえば、ニューラルネットワークの合成、巡回セール

スマン問題, 軌道生成, 自動制御, システム同定, ルールベースの構築など。EP に関しての詳細は [Fogel 93] とその参考文献を参照されたい。

#### 4.3.4 遺伝的プログラミング (Genetic Programming)

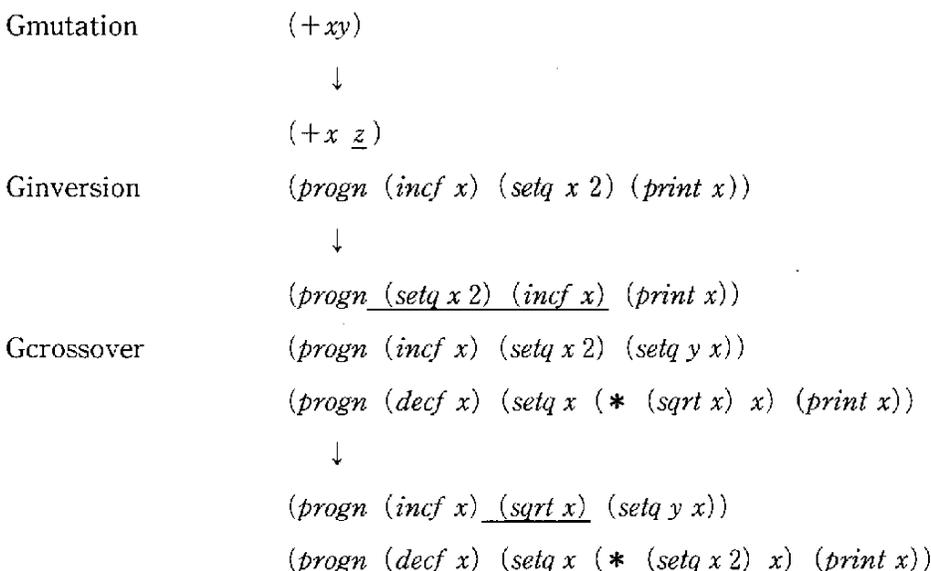
遺伝的プログラミング (genetic programming, 以下 GP と略す) は, 遺伝的アルゴリズム (GA) の遺伝子型を構造的な表現が扱えるように拡張し, プログラム生成や学習, 推論, 概念形成などに応用することを目指している。GP の基本的思想は Stanford 大学の John Koza らにより提案された [Koza92]。現在 Koza のもとには多数の GP 研究者が参集し, GP は GA において一分野を確立しつつある。GP の考えを AI に適用し学習, 推論, 問題解決を実現する試みを進化論的学習 (evolutionary learning) と呼ぶ。これは表現された知識を変換し, 選択淘汰により適切な解を残していくという適合的な学習手法である。進化論的学習はクラシファイア-システムなどに代表される GBML (genetic-based machine learning, GA による機械学習) と多くの共通点を有する。

GP では, グラフ構造 (特に木構造) を扱えるように GA の手法を拡張する。ここで一般に木構造は LISP の S 式で記述できるので, GP では遺伝子として LISP のプログラムを扱うことが多い。さらに木に対する GA のオペレータとして,

- (1) Gmutation ノードのラベルの変更,
- (2) Ginversion 兄弟の並べ換え,
- (3) Gcrossover 部分木の取り換え,

を導入する。これらはビット列を対象とする従来の GA オペレータの自然な拡張である。

これらのオペレータを LISP の表現木 (S 式) に適用した例を図表 4.3.5 に示す。ただしオペレータの適用部位には下線を付した。

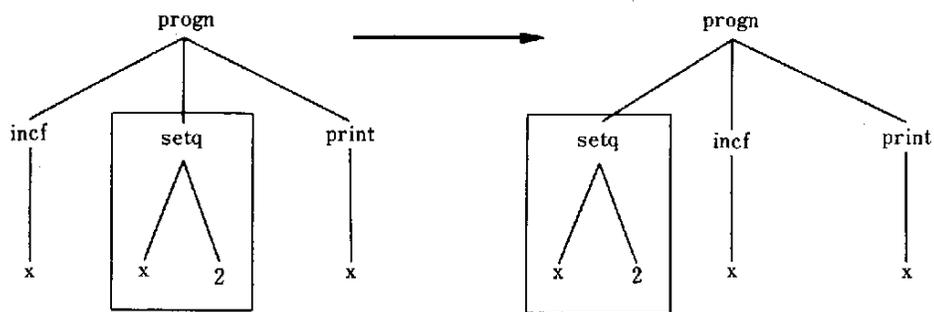


GP のアルゴリズムは, GA オペレータが構造的表現を操作するものであるという点を除いて通常の GA と同一である。上述のオペレータの作用によりもとのプログラム (構造表現) が少しずつ

### Gmutation



### Ginversion



図表4.3.5(1) GAオペレータのLISP表現木(S式)への適用例

変化する。そしてGAと同様の選択操作により、目的となるプログラムを探索するのである。

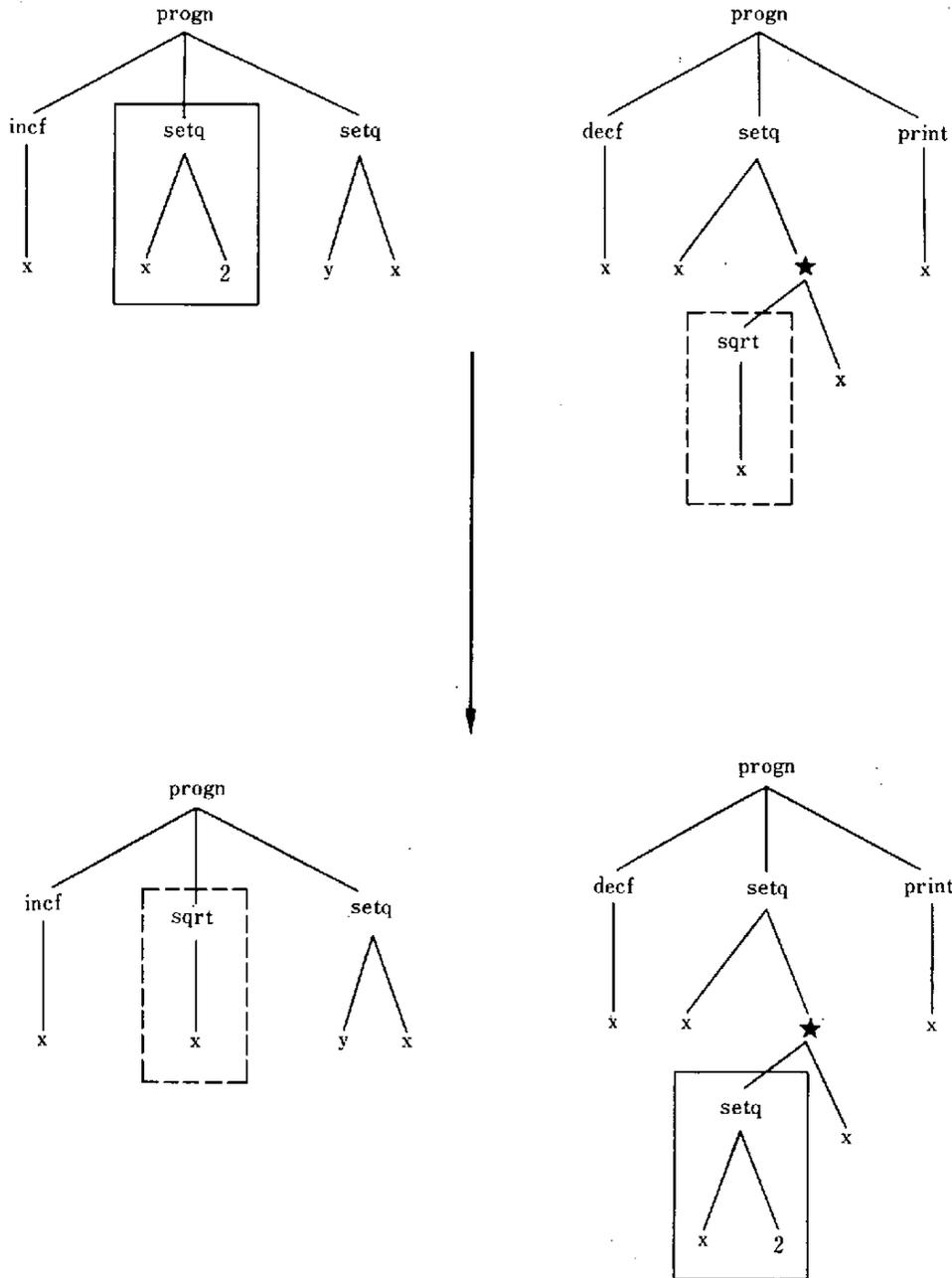
GPでは次の5つの基本要素を設計することで、様々な応用例題への適用が可能になる。つまり、

- (1) 非終端記号 (LISPのS式での関数),
- (2) 終端記号 (LISPのS式でのアトム),
- (3) 適合度,
- (4) パラメータ (交叉, 突然変異の起こる確率, 集団サイズなど),
- (5) 終了条件,

である。

GPは、ロボットのプログラム生成、ゲームのプログラム、画像理解、人工知能における様々な問題解決、学習、などに応用され探索の有効性が確かめられている[伊庭 94]。また最近では、関数を自分自身で定義して効率的に利用する手法 (自動的関数定義, Automatically Defined Function) が提案されている[Koza94]。これには、探索の過程で木 (LISPのS式) が莫大になり探索効率が劣化するのを防ぐという目的がある。この手法を用いることで、GPをより大規模で実際的な問題に適用できるようになり、たとえばタンパク質の2次元構造予測問題などにGPを応用する研究もなされている。

Crossover



図表4.3.5(2) GAオペレータのLISP表現木 (S式) への適用例

〈参考文献〉

[伊庭 94]伊庭斉志, 遺伝的アルゴリズムの基礎, オーム社, 1994

[Bäck *et al.* 91]Bäck, T., Hoffmeister, F., and Schwefel, H.-P., An Survey of Evolution Strategies, in *Proc. 4th International Conference on Genetic Algorithms (ICGA91)*, Morgan Kaufmann, 1991.

[Bäck 93]Bäck, T., An Overview of Evolutionary Algorithms for Parameter Optimization,

- Evolutionary Computation*, vol. 1, no. 1, 1993.
- [Fogel 66]Fogel, L.J., Owens, A.J. and Walsh, M.J., *Artificial Intelligence through Simulated Evolution*, Wiley, New York, 1966.
- [Fogel 93]Fogel, D.B., *Evolving Behaviors in the Iterated Prisoner's Dilemma*, *Evolutionary Computation*, vol. 1, no. 1, 1993.
- [Goldberg 89]Goldberg, D.E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison Wesley, 1989.
- [Herdy 90]Herdy, M. Application of the Evolution Strategy to Discrete Optimization Problems, in *Parallel Problem Solving from Nature (PPSN)*, Schwefel, H.-P. and Männer, R. (eds.), Springer-Verlag, 1990.
- [Holland 75]Holland, J.H., *Adaptation in natural and artificial systems*, University of Michigan Press, 1975.
- [Koza 92]Koza, J., *Genetic Programming, On the Programming of Computers by means of Natural Selection*, MIT Press, 1992.
- [Koza 94]Koza, J., *Genetic Programming II : Automatic Discovery of Reusable Subprograms*, MIT Press, 1994.
- [Lohmann 92]Lohmann, R., Structure evolution and incomplete induction, *Proc. 2nd Parallel Problem Solving from Nature*, North-Holland, 1992.
- [Michalewics 92]Michalewics, Z., *Genetic Algorithms+Data Structures=Evolution Programs*, Springer-Verlag, 1992.
- [Rechenberg 86]Rechenberg, I., Evolution strategy and human decision making, *Human decision making and manual control*, Willumeit, H.P. (ed.), pp. 349-359, North-Holland, 1986.
- [Schwefel 81]Schwefel, H., *Numerical optimization of computer models*, John Wiley & Sons, 1981.

#### 4.4 適応行動 (Adaptive behavior)

##### 4.4.1 分類子システム

分類子システムは John Holland[Holland 86]によって提案された一種の適応システムの枠組である。一種の前向きプロダクションシステムと考えることもできる。ルール実行の結果得られる報酬を、ルールの強さとして実行されたルールに割り当て、強さを適応度とみなして遺伝的アルゴリズムによりルールの変更を行う。GA を適用する際の個体の単位の相違から Michigan アプローチと Pittsa アプローチに大別される。

前向きプロダクションシステムと同様に、分類子システムは基本的には分類子集合とメッセージ

リストから構成される。プロダクションシステムの言葉で言い換えれば、分類子はルール、メッセージはワーキングメモリ要素、メッセージリストはワーキングメモリに相当する。個々のメッセージは、1または0を要素とするビット列である。個々の分類子は条件部と動作部の対である。条件部には複数のパターンをいれることができる。1つのパターンは1または0または#を要素とする列であり、#の部分はワーキングメモリ要素のビットが1でも0でも良いことを表す。条件部のすべてのパターンにマッチするメッセージがメッセージリスト中に存在すれば、その分類子は活性となる。動作部には、追加すべきメッセージと、あらかじめ予約された行為を入れることができる。プロダクションシステムと同様に、システムの実行は、照合、競合解消、実行、の3段階の繰り返しである。まず、メッセージと条件部パターンとの照合により活性化した分類子の集合を選び出す。各分類子には強さと呼ばれる実数が割り当てられ、最も強い分類子の動作部を実行する。分類子の強さは、つぎに述べる報酬割り当て法と条件部の特殊性を元に計算する。条件部に含まれる#の数が少ないほど特殊である。分類子を実行した結果として外部から得られる報酬をもとに分類子の強さを変更する。

代表的な報酬割り当て法であるバケツリレーアルゴリズムについて説明する。バケツリレーアルゴリズムでは、各ステップにおいて活性化した、つまり実行された分類子の強さを修正する。強さ修正のアルゴリズムは次のようになる。

- ①活性化した分類子について、その強さに比例した大きさだけ強さを減少させる。
- ②強さの減少分を、直前のステップで実行された分類子の強さに加える。
- ③分類子の実行結果として得られた報酬を、その分類子の強さに加える。

得られた報酬は、ただちに過去の分類子に伝播されずに、次の実行の際に1段階だけ伝播する。学習は遅いが、各ステップにおける計算コストは小さい。

利益共有法では、実行された分類子の履歴を保存しておき、報酬が得られる度に、報酬の値を減じながら過去にさかのぼって分類子の強さを修正する。過去に実行された分類子の強さも一時に修正するため学習は速い。報酬が稀にしか得られない場合には、それほど計算コストはかからないが、頻繁に得られる場合には高くつく。また、報酬の有無によって、そのステップの計算コストが大きく異なるため、ロボットの学習などに用いる場合には、実時間性の面で注意が必要となる。

分類子システムの認識一行動サイクルをある期間実行し、分類子の強さに行動の結果が十分繁栄された時点で、GAを応用したルールの変更を行なう。Michiganアプローチでは、個々の分類子を個体とみなし、その強さを適応度とみなしてGAの世代交代の手続きを適用する。すなわち、分類子自身を染色体とみなして、強さに比例した確率で親となる個体を選択し、交差および突然変異による変換を実施する。これにより有用なルールの発見が可能となる。

#### 4.4.2 ニューラルネット

動物の行動モデルには、状況から行動を決定するためのメカニズムが必要である。実際の動物の

生物学的モデルからヒントを得たシステムがニューラルネットである。ニューラルネットによる情報処理については人工生命とは独立に多くの研究がある。比較的機能の単純なニューロンが相互に結合したネットワークを形成し、結合されたニューロン間での信号伝播による相互作用により、ある種の情報処理機能を実現する。ネットワークは、1個のニューロンの機能、ネットワークのトポロジ、学習則などによって特徴づけられる。一般に1つのニューロンは多入力1出力である。ただし、出力信号の伝播先は複数のニューロンでもよい。入力を受ける部分は実際のニューロンに習ってシナプスと呼ばれ、入力信号に係数を掛けて重み付けする機能を有する。入力を受け取るニューロンに対して、係数が正の場合には活性化、負の場合は抑制することになる。さらに重みを変化させることで学習を行なう。入力から出力を算出する方法には、単なる重み和、あるいは、いき値関数やシグモイド関数で重み和を変換するものなどがある。

結合のトポロジーには、階層型ネット、相互結合型ネット、リカレントネット、およびそれらの組合せがある。学習則にはヘップ学習、誤差逆伝播学習などの方法がある。

人工生命では、ニューラルネットの結合の重みや結合のトポロジーを進化的に生成する試み、ネットワークを発達システムを用いて構築する試みなどが行われている。これまで、ニューラルネットの研究では、ネットワークの結合構造や結合の重みの初期値は設計者である人間が与えていた。しかし、問題によっては適切な構造を設計するためには設計者自身によるかなりの試行錯誤が必要な場合も少なくない。忘却による構造変化の研究なども行われてきたが、人工生命研究の中で行なわれているニューラルネットの発生と進化に関する研究は、そのような困難を克服する鍵となることが期待される。さらに、学習則のパラメータ、さらに学習則自身を進化的に獲得する研究も始まっており、今後の発展が期待される。

また、最適化への工学的応用の側面からは、多くのニューラルネットが、連続値ベクトル空間での局所最適解を見つけるのに適する性質を利用し、遺伝的アルゴリズムによる最適化を補間する試みもある[Belew 92]。これは、個体の獲得形質が遺伝するとするラマルク進化の一種とみなすこともできよう。

#### 4.4.3 強化学習

適応行動を実現するために実際の動物が用いている機能の1つが学習である。人工知能の分野でも帰納学習、演繹学習、概念形成など、学習の研究は盛んだが、動物学習のモデルとしては強化学習[Sutton 93][畝見 94]の枠組が適している。学習者は報酬と罰からその原因となったと考えられる自らの行動について何らかの評価を与え、報酬は多く罰は少なくなるよう行動規範を変更する。本来は強化信号である報酬と罰は、学習者の外部から、たとえば調教師によって与えられるものという意味合いがあるが、人工生命の立場では、むしろ入力刺激に関する学習者側の解釈として快不快を判断すると考えるほうが自然である。

機械学習の分野で行なわれている強化学習研究は離散時間での入力刺激のサンプリングと意思決

定と行動の繰り返しという枠組みに基づく物がほとんどである。これは、数理的にはマルコフ決定問題に相当する。

一般に動物やロボットの学習では、報酬や罰はある長さの行動系列の実行結果として得られる場合が多く、学習者の意思決定について、その直後に評価が得られるわけではない。教師付きのパターン分類学習など、その他の多くの枠組みでは、学習者の意思決定の直後にその評価、正解か誤りか、が与えられるが、強化学習で扱われる学習問題では、行動に対する評価はある程度の時間的遅れを伴う。

強化学習の代表的枠組みであるQ学習について説明する。Q学習では、ある状態  $x$  においてある行為  $a$  を行なったときの評価値を見積る関数を見いだそうとする。この関数をQ関数、その値をQ値と呼ぶ。すなわち、Q関数は状態と行為から実数への写像である。行為の評価は現在から未来永劫までの報酬の重み和である。遠い未来ほど重みが減るよう割引率とよばれる  $0$  以上  $1$  未満の係数の時刻に比例した累乗を重みとする。これにより、報酬の値が有限であれば、評価値も有限に抑えられる。学習者は状態  $x$  にあるとき、 $Q(x, a)$  の値を参考に行為を選ぶ。1つの有効な方法は、Q値を最大にするような行為を選択することである。これは貪欲な戦略と呼ばれる。しかし、この戦略では一度ある程度の評価見積りを獲得した行為が絶えず選択され、最適解からは程遠い行動しか学習されない場合が多い。

これを回避するための1つの方法として、Q値に比例した確率で行為を選択するという方法がある。Q値に係数を掛けた数の指数に比例した確率を用いると、係数の値によって行動のランダムさを調整できる。この係数の逆数はボルツマン分布の温度係数に相当し、温度が高ければ行動はランダムになり、温度が低いと絶えず貪欲な戦略を採用することになる。学習は次のように行なう。状態  $x$  において行為  $a$  を実行した結果、状態は  $y$  となり、得られた報酬が  $r$  であったとする。報酬がない場合は  $r=0$  である。このとき、 $Q(x, a)$  の値が  $r + \gamma \max_b Q(y, b)$  に近づきようQ関数を変更する。環境が安定ならばQ関数は評価の正しい見積りを算出するよう確実に変化させることができる。

Q関数の実現方法は、最も単純な表形式のものから、ニューラルネット、実例ベース、KD-木など問題領域の性質に合わせて様々な手法が試みられている。前述の分類システムも報酬割当法が遅れのある報酬にも対応できるような機構になっているので強化学習の問題にも適用できる。

人工生命研究の立場からは、学習能力の進化[Unemi 94]や学習能力が進化の過程におよぼす効果[French 94]について研究がなされている。また、強化信号についても進化的に繁殖に都合の良い評価基準を獲得できることがシミュレーションによって示されている[Ackley 92]。

#### 4.4.4 免疫ネットワーク

細菌など体外からの他の生物の侵入、あるいは癌細胞など体内の異状細胞から生体を防御するメカニズムとして免疫系がある。生体の免疫系は骨髄の幹細胞と呼ばれる細胞が分裂、分化してでき

るB細胞, T細胞, 白血球が血管やリンパ管を通過して体内を巡りながら, 互いに侵入した外敵の情報を交換し合い, 生体の維持に不都合な異物を殺傷あるいは無毒化する。免疫系の機能としては, 外敵を認識する機能, 一度排除した外敵の特徴を記憶する機能, 分散系として全体の調和を取る機能があると考えられる。以下, Jerne の免疫ネットワーク仮説に基づいたB細胞を中心とする適応モデルについて述べる。

B細胞は, その表面に自らが生成した抗体を付着させている。遺伝子の組み合わせ及び突然変異によって多様な抗体を作り出す。抗体が認識できる抗原の種類には抗体, あるいはB細胞毎に特異性がある。抗体にはパラトープとエピトープと呼ばれる部分がある。パラトープは周囲の特定の物質を見分ける機能をもっている。抗原を認識するとB細胞は増殖し, 抗体の分泌量を増やす。エピトープは, 他の抗体あるいは自己のパラトープによって認識される部分である。認識された側は増殖が抑制される。

Farmer らのイデオタイプ・ネットワーク・モデル[Farmer 86]は, このような抗原, 抗体, B細胞の相互作用をモデル化し多様な環境に対して適応可能なシステムの枠組みを提案している。パラトープとエピトープをそれぞれビット列で表現し, 部分列の照合により認識の度合いを計る。認識したパラトープをもつ抗体は増加させ, 認識されたエピトープをもつ抗体は減少させる。抗体の量は個数ではなく濃度で計る。つまり, ある型のパラトープとエピトープをもつ抗体の濃度を変数の値として型をあらわすビット列に対応させておく。濃度がある閾値を下回った時点で新たなB細胞を作る。その際, 遺伝的アルゴリズムで用いられるような遺伝子操作を行ない, 新たなB細胞の遺伝情報とする。これを繰り返すことで, 様々な形態の抗原に対応する抗体を生成することができる。

また, Bersini らは抗体同士の親和性を利用した最適化アルゴリズムを提案している[Bersini 91]。

#### 4.4.5 ブーリアン・ネットワーク

ランダム・ブーリアン・ネットワークは S. Kauffman[Kauffman 70]が遺伝のモデルとして提案した適応システムの1種である。ネットワークは, 相互に結合された複数のゲートから構成される。各ゲートは各時刻において0または1の状態にあり, 離散時間で全てのゲートが同期的に状態変化を起こす。次の時刻のゲートの状態は, そのゲートに接続された入力ゲートの状態を引き数としてゲートに割り当てられたブール関数を計算することにより求められる。複雑系のモデルとして扱うには, ランダムに結合された大規模なネットワークを考え, そのマクロな挙動を調べる。各ゲートの入力ゲート数の制限によって挙動が変化することがシミュレーションと数学的解析によって明らかされている。

#### 〈参考文献〉

- [畷見 94]畷見達夫：強化学習，人工知能学会誌，Vol. 9, No. 6, 830-836, 1994.
- [和田 93]和田健之介，田中真一，和田佳子：進化システム論 遺伝的アルゴリズムの基礎(6)，Computer Today, 1993/1 No. 53, 78-85, 1993.
- [Ackley 92]Ackley, D. and M. Littman: Interactions Between Learning and Evolution, in C. G. Langton et al (eds), Artificial Life II, 487-509, Addison-Wesley, 1992.
- [Belew 92]Belew, R. K., J. McInerney, and N. N. Schraudolph: Evolving Networks: Using the Genetic Algorithm with Connectionist Learning, in C. G. Langton et al (eds), Artificial Life II, 511-547, Addison-Wesley, 1992.
- [Bersini 91]Bersini, H and F.J. Varela: The Immune Recruitment Mechanism: A Selective Evolutionary Strategy, Proc. of th Fourth Int. Conf. on Genetic Algorithm, Morgan Kauffman, 1991.
- [Farmer 86]Farmer, J. D., N. H. Packerd, and A. S. Perelson : The Immune System, Adaptation, and Machine Learning, Physica 22D, 1986.
- [French 94]French, R. M. and A. Messinger : Genes, Phenotypes and the Baldwin Effect : Learning and Evolution in a Simulated Population, Artificial Life IV-Proc. of the Fourth Int. Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems, 277-282, MIT Press, 1994.
- [Holland 86]Holland, J. H., K. J. Holyoak, R. E. Nisbet, and P. R. Thagard: Induction, MIT Press, 1986. 市川伸一ほか (訳)，インダクション—推論・学習・発見の統合理論へ向けて，新曜社，1991.
- [Kauffman 70]Kauffman, S. A. : Behaviour of Randomly Constructed Genetic Nets: Binary Element Nets, C. H. Waddington (ed), Towards a Theoretical Biology, 18-37, Aldine Pub., 1970.
- [Sutton 93]Sutton, R. S. (ed.) : Reinforcement Learning, Kluwer Academic, 1993.
- [Unemi 94]Unemi, T., M. Nagayoshi, N. Hirayama, T. Nade, K. Yano, and Y. Masujima : Evolutionary Differentiation of Learning Abilities - a case study on optimizing parameter values in Q-learning by a genetic algorithm, Artificial Life IV-Proc. of the Fourth Int. Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems, 331-336, MIT Press, 1994.

#### 4.4.6 場を用いた計算モデル

人工生命の代表的な方法論としてネットワークアーキテクチャと遺伝アルゴリズムなどがあるが、もう一つの方法論として場を用いた方法が研究対象となりつつある。場の考え方はニューロネット情報処理や遺伝アルゴリズムなどとは異なり直接の計算手法を与えるものではないことから、方法論と呼ぶには一種の抵抗もあるが、ここでは次に挙げる4つの理由から方法論と称するものとする。

- a) 多体問題を二体問題に変換可能であること。
- b) 共有メモリーとして情報の統合が可能であること。
- c) 情報統合の結果から大域的情報が生成可能であること。
- d) 大域的情報を局所的に観測可能であること。

上記4つの理由は生命の生きている状態や生命のような解放系を記述する上で重要であり、人工生命の主張する創発原理に対する一つのアプローチ法となりうるなどの主張もある。

以下では(1)で場についての基本的な考え方を述べ、(2)で場を用いた人工生命的研究について順次紹介する。

#### (1) 場とは

場の考え方はもともと量子力学と相対性理論の融合領域から発展したものであり、そこでは物質間に作用する力の相互作用を「物質の存在する場の変動の伝播と各物質の位置における場と物質の相互作用」という形式で説明する立場がとられている[Alexander 71]。すなわち、ここで用いられる「場」は単なる場所の意味ではなく、相互作用の媒体であり、ある動力学を有する物質そのものを意味している。

ここでは場の考え方を生命体の記述法として用いた研究事例を主に紹介する。まず、場と生命の関係を端的に示す事例は、細胞の機能的な側面、例えば個々の細胞の変形や細胞群の機能分化などによく現われる。細胞は遠隔操作可能なセンサーを持たないため、すべての観測を細胞膜上のセンサー直近の物質濃度や化学反応に依存している。そして細胞周囲の物質濃度は細胞自身の調節作用によって変化を受け、同時に統計的な傾向にしたがって空間的散逸を受ける。この空間的散逸と細胞自身の調節機構により、細胞群の物質濃度分布には空間パターンが生成され、結果的に形態と機能の分化を誘発する機構を持つことが知られている[中井 84]。また、シュレーディンガーが What is a life? の講演の中で主張したように、エントロピーの増減すなわち熱力学的エネルギーの散逸現象に対する記述が生命維持現象の理解には不可欠であり、物質のみならずすべての状態量の空間的散逸現象が生命維持と深く関わっていることが示唆されている[神田 93]。このように生命活動の基本機能のいくつか(生命維持、分化、発現、調節)には場が介在し、生物の形態と機能の形成に対して重要な役割を持つことがわかる。

同時に生命を記述する上で重要な提言が清水により著書“生命と場所[清水 92]”の中で示されている。そこでは「関係子」と「場」なる言葉を用いて生命活動の相対的特性の論理的かつ統一的記述が試みられている。詳しくは原著を参考にされたいが、生命のモデル化へのアプローチとして場と関係子を用いて自己組織化される秩序について次のように記述されている。すなわち、生命を構成する要素(関係子)の間の相対的關係を場との相互作用により記述し、この相互作用から導出されるある制御ループ(ホロニックループ)群の競合関係から定常状態が導出され、このような定常状態が自己組織化された秩序であるとしている。清水の論によれば生命活動にとっての場は単なる量子力学的な相互作用力の伝播の場だけではなく、ホロニックループと呼ばれる新たな場(ここま

での言及は避けられているが) の生成を包含するものと考えられる。これは生物の生きている状態の記述という問題に対して物理学の提唱する還元論とは異なる合成的枠組みを与えることになる。

## (2) 人工生命における場の利用

工学では最近になって場の考え方を問題解決に応用することが検討されるようになってきた。場の考え方を問題解決に応用する方法についてはいまだ萌芽期にあり、統一的な名称も定まっていなため、ここでは仮に Field Method と呼ぶことにする。フィールドメソッドの特徴は生物の生化学的性質と物理的性質を場を媒体として融合することにあり、その利点は環境も含めた解放系の情報処理システムが構築されるところにある。ここで、解放系とは環境に対して物質と情報の入出力を絶えず必要とする様な系(生命を含む)を意味する。近年の機械工学、電子工学、情報工学などにおいて、未来の機械に対する高速性、高信頼性、柔軟性などの要請から“自律分散処理、群情報処理、機械のモジュール化”など処理系を要素分割し、問題を並行処理によって解決しようとするアプローチの中で、フィールドメソッドの有用性が主張されはじめている[伊藤 93], [石田 93], [金磯 94]。現在フィールドメソッドを扱う仕事には“場的制御[MIYAKE 94]”と“波動場[横井 93]”がある。

場的制御では場に励起された位相関係と処理主体の出力するリズムの相互引き込み現象をロボット群制御の協調動作として利用しようとする試みであり、細胞などの機能分化に代表されるようなエマージェントな制御方式が提案されている。

一方、波動場では複数の処理主体からの出力情報を場によって重ね合せ、同時に場に設定された動力学にしたがって拡散させることにより処理主体全体(システム)の状態を生成し、このシステムの状態を観測しながら分散的に問題解決可能な最適化手法やロボット制御などへ利用する試みである。また、波動場では工学応用のみならず、生命体モデルと称する生体機能のモデル化へのアプローチも提案されている。

すなわち、両者とも場を処理主体に対する大域的な制約として用いているところに共通特徴があるが、場的制御では引き込みという高次機能を有する生化学的な場であるのに対して、波動場は情報の伝播と散逸だけからなる物理的な場であるところが大きく異なる。

一方フィールドメソッドを経路探索などの問題解決に利用した仕事として[Arkin 91], [Brooks 86], [Payton 91]らの提唱する Reactive System と呼ばれる考え方がある。Arkin の提案する AuRA システムでは環境をポテンシャル関数として記述することにより、システムの情報源とし、システム内に定義された複数の行動(action)はポテンシャル関数により記述された環境知識(memory)からの評価にしたがって on/off が決定され、on 状態の行動がすべて選択実行される。

一方、Brooks らの SSA システムではシステム内に定義された複数の行動の中で環境から on 状態の評価を受けた行動集合から、あらかじめ定められた優先順位にしたがって一つの行動が選択実行される。また、Payton らの Sensor-based-reflective-behavior ではマップ(主にポテンシャル場)からの情報を用いて行動群を評価し、winner-take-all 規則にしたがって一つの行動が選択され、実

行される。

このようにこれらのシステムにおいて行動は離散的に記述される。また、環境(ポテンシャル場)は単なるメモリーとして利用されているだけである。しかしながら、環境はシステムの行動によって常に変化させられるものであり、環境情報は環境の動力学にしたがって伝播、重ね合せ、消滅、生成、共鳴、干渉、反射などの情報処理を受けるはずである。すなわち、環境はそのものが情報処理媒体であり、メモリーと情報処理の両機能を備えることにより環境が intelligence を提供すると考えられている。

### (3) まとめ

場を用いて構成された群システムは環境からの呼びかけに応じて動作するという意味で他律的であり、自ら環境に働きかけることにより能動的に環境を変えるといたった自律性を具備する。よって場を用いることにより自律性と他律性が表現され、結果としてシステムが群としてまとまりを持ちながら問題解決に向かう傾向が実現される。

人工生命の方法論としては場を用いることによって大域的な制約を容易に設定でき、システムと構成要素の再帰的な関係を記述できるなどという利点がある一方で、構成要素の普遍的な目的関数の設定法が明らかでない大量の計算容量を必要とするなどの問題点を残している。

### <参考文献>

- [Alexander 71] Alexander L. Fetter and John Dirk Walecka, "Quantum Theory of Many-Particle System", McGraw-Hill, Inc., 1971.
- [中井 84] 中井準之助: 形態形成と発生工学, 講談社サイエンティフィック, 1984
- [神田 93] 神田慶也: "負のエントロピーの世界", 九州大学出版, 1993
- [清水 92] 清水博: "生命と場所", NTT 出版, 1992
- [伊藤 93] 伊藤正美: 自律分散システム研究の課題と将来, SICE, 計測と制御, 第32巻, 第10号, pp. 789-796, 1993
- [石田 93] 石田好輝: 自律分散システムの情報処理の特徴, SICE, 計測と制御, 第32巻, 第10号, pp. 830-836, 1993
- [金磯 94] 金磯善博, 平野一路, 美馬のゆり, 広田光一, 里見充則: 仮想生物を利用したシミュレーションシステム, 第35回プログラミングシンポジウム, pp. 141-152, 1994
- [MIYAKE 94] Yoshihiro MIYAKE, Gentaro TAGA, Yasunori OHTO, Yoko YAMAGUTI, and Hiroshi SHIMIZU: "Mutual-Entrainment-Based Communication Field in Distributed Autonomous Robotics System (Autonomous coordinative control in unpredictable environment)", Distributed Autonomous Robotic Systems, Springer-Verlag, pp. 310-321, 1994.
- [横井 93] 横井浩史, 嘉数侑昇: 波動場を用いた情報処理に関する基礎研究(多重波動場モデルの構

築), 機論C編, 59巻, 560号, pp. 1115-1121, 1993

[Arkin 91]RONALD C. Arkin,: Integrating Behavioral, Perceptual, and World Knowledge in Reactive Navigation, Designing Autonomous Agents, MIT/Elsevier, pp. 105-122, 1991.

[Brooks 86]Rodney Brooks: A robust layered control system for a mobile robot, IEEE J. Robotics Automation RA-2(1), pp.-14-23, 1986.

[Payton 91]David W. Payton: Internalized Plans: A Representation for Action Resources, Designing Autonomous Agents, MIT/Elsevier, pp. 89-103 (1991).

#### 4.5 発生/発達モデル (Developmental Models)

1個の細胞から始まり, 細胞分裂, 細胞移動, 細胞分化を繰り返して徐々に成体を形成していく発生のプロセスは未だかなりの部分がミステリーである。このプロセスは形態発生とも呼ばれ, このプロセスを模擬し取り込んだ計算モデルがいくつかある。

以下では, ある種の自己組織的な生物的形状を生成・表現する手法としてよく用いられるセルオートマトンを取り上げよう。セルオートマトンにおける再生成の例として, ラングトンのアダム・ループ, そして, MFA (Movable Finite Automata) を用いたウィルスの自己組織化の例について述べる。さらに, 主に木構造のモデリングに利用されてきたLシステムについても紹介する。

生物に動機づけられた発生モデルは他にも多くあるが, 紙面の都合で省略する。それらの多くは理論生物学の分野で開発されたモデルなので, 興味のある読者はそちらに当たられることを勧める。

##### 4.5.1 セルオートマトン (CA: Cellular Automata)

自己複製を技術的に実現することは長い間技術者の夢であった。自己複製に関する最初の計算論的なアプローチはジョン・フォン・ノイマンによるものである。彼は, 自然システムの自己複製を遺伝学や生物化学のレベルで模擬しようとしたのではなく, 自然界の自己複製からその論理の形式を抽出することを考えていた。

セルオートマトン (CA) に関するフォン・ノイマンのアイデアはステフェン・ウォルフラムの示唆から展開されたものである。CAにおける基本的なアイデアは, セル自身の状態とその周辺のセルの状態に依存してセルが自律的に状態遷移を行うローカル・ルール群を考えることである。ウォルフラムによれば, CAは以下のように特徴づけられる[Wolfram 1986]。

- ・空間的に離散である: CAは空間的なセルの離散的な格子から成る。
- ・時間的に離散である: 各セルの値はある離散時間ステップのシーケンスによって更新される。
- ・離散状態をとる: 各セルは有限の状態数を持つ。
- ・セルの均一性: すべてのセルは同じ状態遷移則に従い, 規則正しく並べられている。
- ・同期的な状態更新: すべてのセルの状態は, 自身とその周辺のセルの状態に依存して, 同期的に更新される。

- ・決定論的な規則：各セル状態は決定論的な規則に基づいて更新される。
- ・空間的に局所的な規則の適用：各セルに適用される規則はその近傍セルの局所的な状態にのみ依存する。
- ・時間的に局所的な規則の適用：値あるいは状態更新のための規則は、ある固定数（通常は1ステップ前）先行する時間ステップ間の状態にのみ依存する。

#### アダム・ループ

アダム・ループは、CAが自己複製をモデル化する方法としてどのように利用できるかを示してくれる。アダム・ループの回りを伝搬するシグナル列は、短いアームの先を成長させ、それを巻き戻す動きを生成して子ループを生み出す。その後各ループはさらに子ループの生成を続け、その子ループもまた同じことを繰り返す。このプロセスは無限に続けられ、結果としてループから成る一種のコロニーを生じさせる。それは、ちょうど珊瑚の成長を見るかのように、中央部に死を残しながら、それを取り囲む縁が広がりながら再生を繰り返す（図表4.5.1）[Langton, 1989]。

#### 4.5.2 Movable Finite Automata[Goel and Thompson, 1989]

MFAは、セルオートマタと類似しているが、生物学的なマクロ分子、細胞など自然のサブユニットの相互作用を支配する基本的な生物物理的な原理を可能な限り模倣したルールを備えている。

このモデルは、時間の進展とともに逐次的に離散的な変化を行う、有限状態オートマタに基づいている。このモデルは、セルオートマタモデルの特徴を持つと同時に、セルオートマタをより数学的、計算論的に扱い易いやすくしたものである。

特徴的な点はオートマタがお互いに相互作用し、かつ、移動することを可能にしていることである。MFAモデルでは、各々の移動可能なオートマタはそのパラメータ上にいくつかの結合点 $x$ をもつことができる。すべてのパラメータは整数であり、結合点の位置座標とそのオートマタの大きさを含む。各結合点 $x$ に対して結合点番号 $b(x)$ が定義され、その結合点が他のオートマタのどの結合点とどのように相互作用するかを記述する。

単純なモデルでは、 $b(x)$ はL, VV, IIの3つの部分からなる。Lは固定長を表し、2つの分子間の結合の伸縮の強さを表現できるように、0と1の2値をもつことができる。VVは任意の伸張の尺度を表す。その値が高いと、その場所に形成された結合は強くなることを意味する。IIは結合点の構築のためのラベルを提供し、2つの場所が相補的な形状をもっているかどうかを決定するのに用いられる。結合点のラベルはその分子上の他の結合点の形状の変化に依存して変化する。

以下のような仮定が必要となる。1) 2つのオートマタはお互いオーバーラップできない。2) 異なるオートマタ上の2つの結合点はお互いが相補的なときのみ結合する。

それらの基本ルールを用いて、例えばウィルスの自己アセンブルが生ずるように（図表4.5.2）、結合点を設計することが可能である。

#### 4.5.3 L (リンデンマイヤ) システム[Prusinkiewicz and Lindenmayer, 1990]

細胞分割は書き換えシステムによって実現できる。ある与えられた条件において元の細胞は2つの細胞に置き換えられる(すなわち、分割が起きる)。まず、書き換えシステムから説明を始めよう。

書き換えシステムは、1905年フォン・コッホによって提案されたものであるが、リンデンマイヤは書き換えシステムについて以下のように述べている。

「書き換えシステムとは、ある対象を記述する単純な初期表現を書き換え規則やプロダクションを継続的に適用して、複雑な対象を定義するためのテクニックである」

書き換えシステムは文字列に対しても適用される。1950年代後半、形式文法に関するチョムスキーの研究は文字列書き換えに大きな関心を引き起こし、それらは計算機科学に広く適用された。

生物学者リンデンマイヤ (Aristd Lindenmayer) は、1968年、リンデンマイヤ・システム (Lシステム) と呼ばれる、新しい文字列書き換えを導入した。チョムスキー文法とLシステムとはは次のような違いがある: チョムスキー文法とLシステム間の本質的な違いはプロダクションの適用方法にある。チョムスキー文法ではプロダクションは時系列的に適用されるが、一方Lシステムではそれらは並列に適用され、かつある与えられた言葉のすべての文字を時系列的に置き換える。この違いはLシステムが生物的動機に基づいていることの現われである。すなわち、多細胞生物においては多くの分裂が同時におきるように、Lシステムではプロダクションが同時並列に適用できるよう意図されている。

Lシステムはこれまで主に植物をモデル化するコンピュータグラフィックスで多く利用されてきた。しかしながら、基本的な考え方はより広い応用可能性を有している。Lシステムは、生物的な再帰的な振る舞いを記述しようとする生物的モデリングの分野で成功を収めつつある。

Lシステムの基本要素は初期記述とプロダクションである。初期記述はそのモデル(データ)を表現し、プロダクションルールはそのモデルの変更規則(命令)を表現している。初期記述はシンボル列であり、文字あるいはシンボルの一次元配列である。各分裂ステップにおいてすべての文字あるいはシンボルはプロダクションルールに基づいて変化していく。

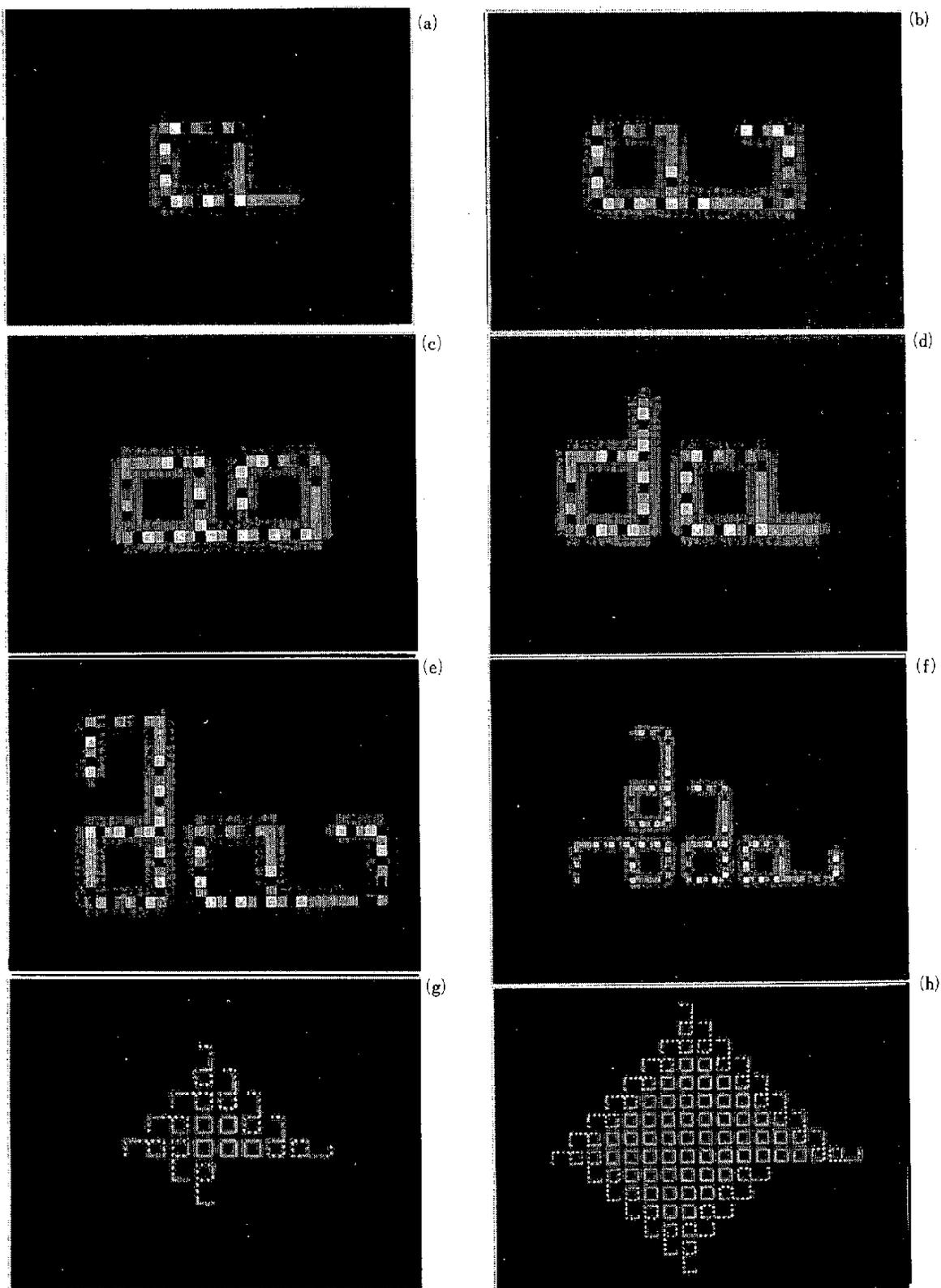
##### DOL システム

DOL (Deteministic and context-free L-system: 決定的文脈自由Lシステム) はLシステムの最も基本的なタイプである。ルールは、predecessor……>successor と表現され、ある与えられたシンボル列に対して、左辺の文字(前置)が右辺の文字(後置)に置き換えられると解釈する。

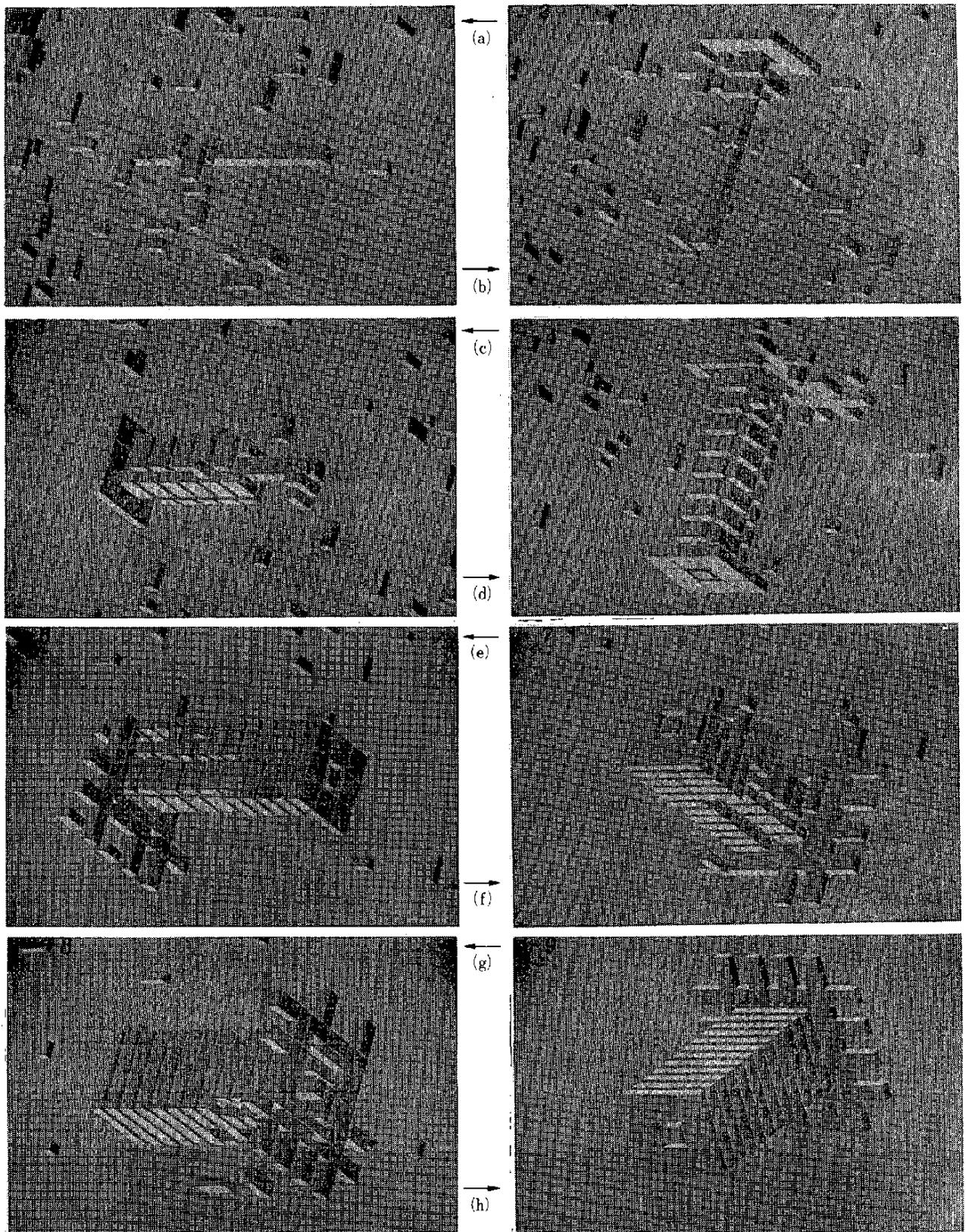
##### ツリー型 OL システム

ツリー型 OL システム(ツリー型文脈自由Lシステム)では、プロダクションルールはDOLシステムと似ているが、枝構造が要素として追加されている。枝構造は現実の枝の発達をモデル化するために導入されたものである。

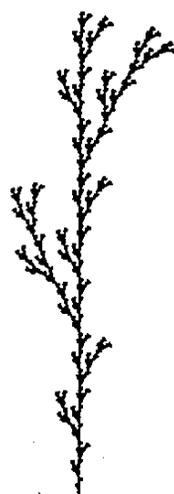
枝構造を指定するために特別なシンボルが定義される。枝のスタートは '[' で表現され枝の終わ



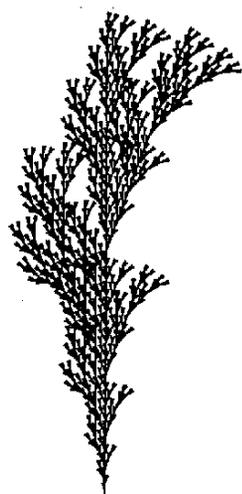
図表4.5.1 アダム・ループの周りを伝搬する信号は、(a)突き出た短い腕を成長させ、巻き戻しながら (b, c, d), 子のループを生成する (e)。各ループは子ループを、さらにその子ループも同様にループを生成する (f)。このプロセスは無限に続き、ループのコロニーを拡張していく (g, h)。そのコロニーは、あたたかも珊瑚の成長のように、もはや生成できずに“死”んだ中心部を取り囲みつつ、成長していく縁からなる [Langton 1989, color plates]



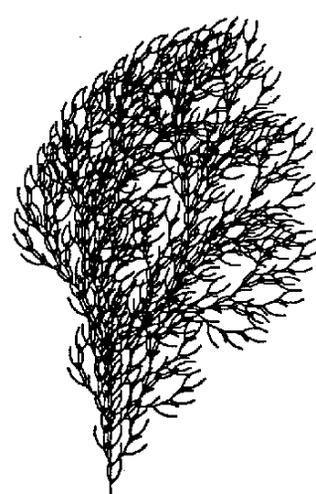
図表4.5.2 ウイルスのタイルの自己アセンブル [Langton 1989, color plates]



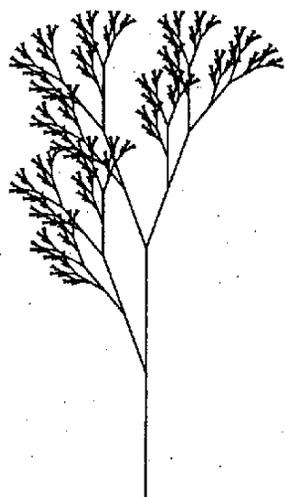
**a**  
 $n=5, \delta=25.7^\circ$   
 F  
 $F \rightarrow F[+F]F[-F]F$



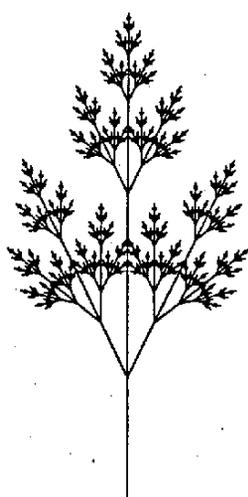
**b**  
 $n=5, \delta=20^\circ$   
 F  
 $F \rightarrow F[+F]F[-F][F]$



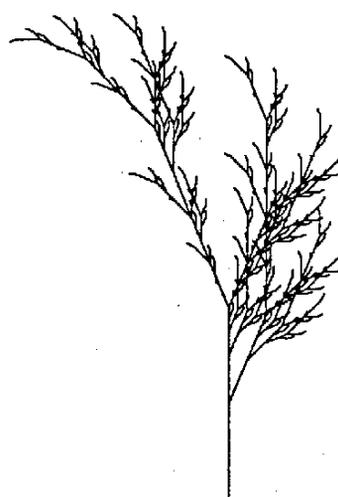
**c**  
 $n=4, \delta=22.5^\circ$   
 F  
 $F \rightarrow FF[-F+F+F]+$   
 $[+F-F-F]$



**d**  
 $n=7, \delta=20^\circ$   
 X  
 $X \rightarrow F[+X]F[-X]+X$   
 $F \rightarrow FF$



**e**  
 $n=7, \delta=25.7^\circ$   
 X  
 $X \rightarrow F[+X][-X]FX$   
 $F \rightarrow FF$



**f**  
 $n=5, \delta=22.5^\circ$   
 X  
 $X \rightarrow F-[[X]+X]+F[+FX]-X$   
 $F \rightarrow FF$

図表4.5.3 ツリー型OLシステム：初期ストリング、相互作用数、枝分かれ角度、プロダクションルールから成る。生成ルールにおけるわずかな変化が全く異なる最終構造をもたらす [Prusinkiewicz 1990, p.25]

りは「 $]$ 」で表現される。枝の記述の後に、主となる幹の記述が続く。枝別れの方向はデフォルトの歪角とともに+と-によって指示される(図表4.5.3)。

#### 確率的Lシステム

確率的Lシステムは、選択可能なプロダクションルールの中から、あるルールが確率に基づいて

選ばれるというものである。プロダクションの確率は矢印上に示される。すなわち、確率的Lシステムの一般的表記は以下のようになる。

predecessor.....0.10.....>successor

確率的Lシステムは、同じプロダクション・ルール群を用いて展開されるモデル（見本一見本）間の変形を実現するのに利用される。

パラメトリックLシステム

時間上での構造変化をシミュレートすることはLシステムの定義を複雑化する。この問題を解決するため、リンデンマイヤは数値パラメータをLシステムのシンボルと関係づけることを提案した。これは連続的な枝構造の発達や化学合成物の拡散に類似している。

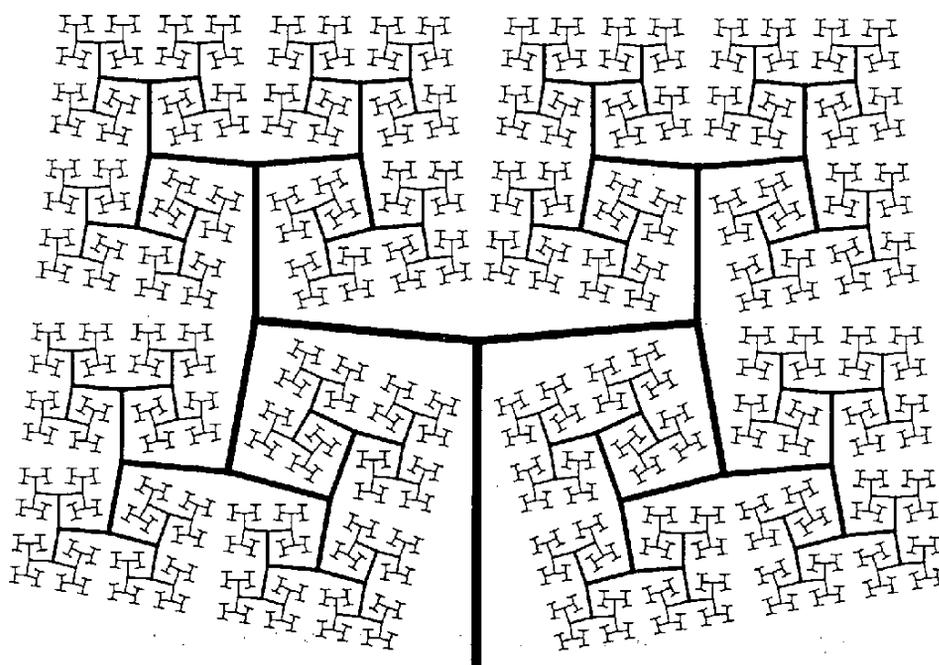
シンボル‘:’と‘.....>’はプロダクションルールの3つの部分、すなわち、前置、条件、そして後置を分離するのに用いられる。プロダクションルールの一般的な表記は以下のようになる。

predecessor (parameters) : condition.....>successor (logical or arithmetic expression)

シンボル列の中の実数値パラメータはプロダクション・ルールで用いられる形式的なパラメータに対応している。置き換えはパラメータ・リストの位置に基づいて行われる。置き換えられたパラメータは条件と後置のパラメータ計算に用いることができる。

条件が成立する場合は次のような場合とする：

- ・パラメータ列のシンボル文字とプロダクション・ルールの前置が同じ時、
- ・パラメータ列の実際のパラメータ数がプロダクション前置の形式的なパラメータ数と等しい時、



図表4.5.4 パラメトリックな足と腕を持つTの形状の発達結果  
[Prusinkiewicz 1990, p.49]

および、

- ・形式的なパラメータに置き換えられた実際のパラメータの条件が真と評価される場合。  
パラメトリックLシステムの例を図表4.5.4に示す。

#### 文脈依存Lシステム

文脈自由Lシステム (OLシステム) が、前置が現われる文脈に無関係にプロダクション・ルールが適用されるのに対して、文脈依存Lシステムでは、プロダクション・ルールの選択が前置の文脈に基づくという考え方を導入する。文脈依存Lシステムは近接のシンボル間での情報交換をモデル化する必要がある場合に利用される。

各前置は左あるいは右または左右の文脈をもつことができる。両方もつシステムは2Lシステムと呼ばれる。片方の文脈依存しか持たないシステムは1Lシステムと呼ばれる。文脈依存プロダクション・ルールは、同じ前置をもつ文脈自由プロダクション・ルールに対して優先される。2Lシステムの文脈依存プロダクションルールの一般形は以下のように表記される。

Left <predecessor> Right……> successor

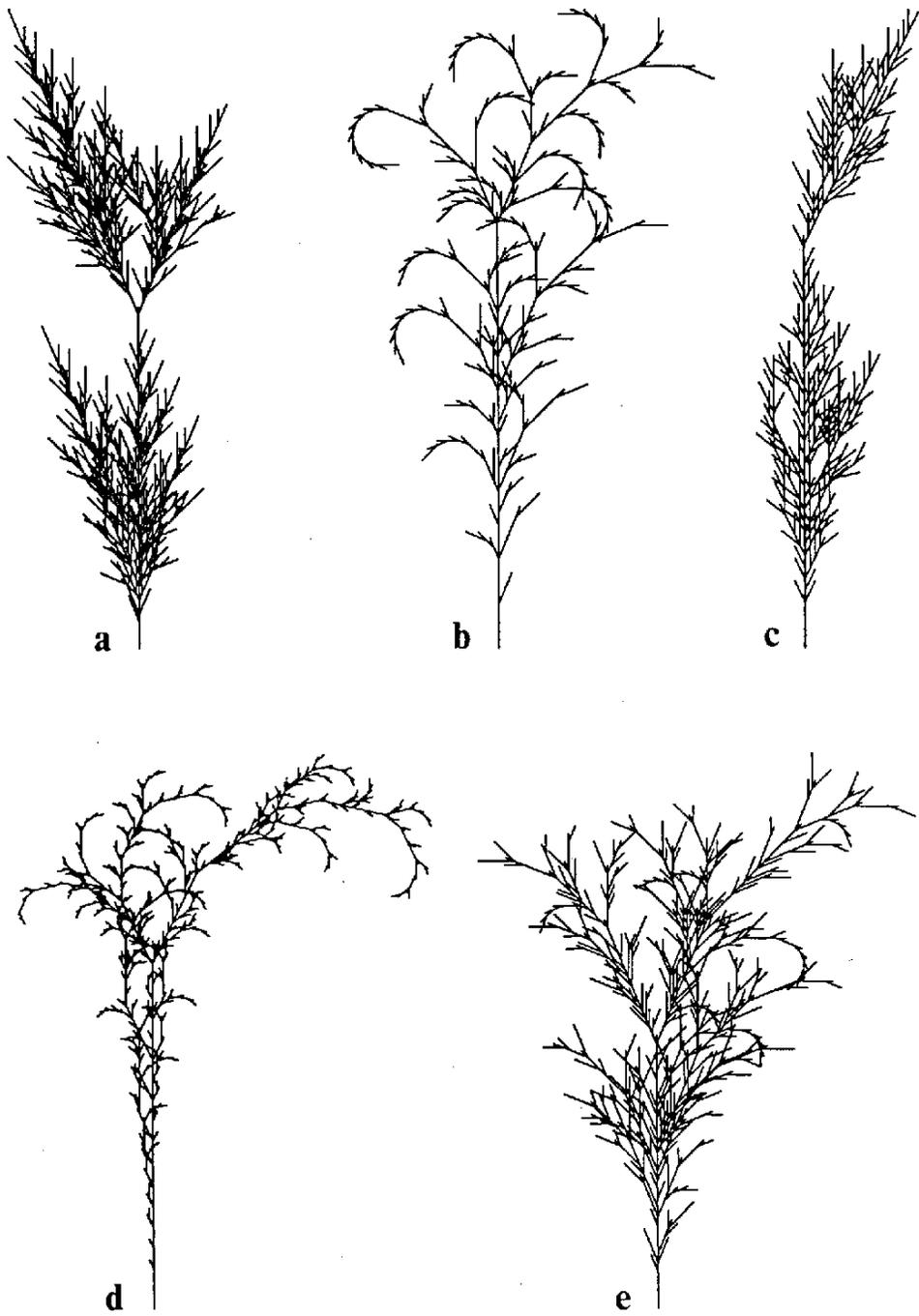
ここで、'Left' はシンボル列の前置の左側を表現しており、'Right' は右側を表現している。ルールは、左側と右側の文脈が一致するならば、あるいは一致するときのみ、前置は後置に置き換わりと解釈する。

たとえば、初期記述を  $baaaaaaa$ ,  $b <a \dots > b$ ,  $b \dots > a$  の2つのルールを用いると、 $baaaaaaa \Rightarrow abaaaaaa \Rightarrow aabaaaaaa \Rightarrow aaabaaaaaa \dots$  のように文字  $b$  を左から右に伝搬させることができる。

文脈依存Lシステムを用いた植物の生成例とプロダクション・ルールの例を図表4.5.5(a)(b)に示す。また、より進んだ例として、カラーと洗練されたグラフィクスを用いて、素晴らしい植物を生成した例を図表4.5.6に示す。

#### <参考文献>

- ・ N. Goel and R. Thompson: Movable Finite Automata (MFA): A New Tool for Computer Modeling of Living Systems, In Langton (ed.): Artificial Life, Addison-Wesley, pp. 317-340, 1989.
- ・ C. Langton: Artificial Life, Addison-Wesley, 1989.
- ・ C. Langton: Artificial Life, In Langton: Artificial Life, Addison-Wesley, 1989.
- ・ P. Prusinkiewicz and A. Lindenmayer: The Algorithmic Beauty of Plants, Springer-Verlag, 1990.
- ・ S. Wolfram: Theory and Application of Cellular Automata, World Scientific, Singapore, 1986.



図表4.5.5(a) ツリーの形が文脈依存ルールによって生成される例  
 [Prusinkiewicz 1990, p.35]

**a**  $n=30, \delta=22.5^\circ$

#ignore: +-F

F1F1F1

0 < 0 > 0 → 0  
0 < 0 > 1 → 1[+F1F1]  
0 < 1 > 0 → 1  
0 < 1 > 1 → 1  
1 < 0 > 0 → 0  
1 < 0 > 1 → 1F1  
1 < 1 > 0 → 0  
1 < 1 > 1 → 0  
\* < + > \* → -  
\* < - > \* → +

**b**  $n=30, \delta=22.5^\circ$

#ignore: +-F

F1F1F1

0 < 0 > 0 → 1  
0 < 0 > 1 → 1[-F1F1]  
0 < 1 > 0 → 1  
0 < 1 > 1 → 1  
1 < 0 > 0 → 0  
1 < 0 > 1 → 1F1  
1 < 1 > 0 → 1  
1 < 1 > 1 → 0  
\* < + > \* → -  
\* < - > \* → +

**c**  $n=26, \delta=25.75^\circ$

#ignore: +-F

F1F1F1

0 < 0 > 0 → 0  
0 < 0 > 1 → 1  
0 < 1 > 0 → 0  
0 < 1 > 1 → 1[+F1F1]  
1 < 0 > 0 → 0  
1 < 0 > 1 → 1F1  
1 < 1 > 0 → 0  
1 < 1 > 1 → 0  
\* < - > \* → +  
\* < + > \* → -

**d**  $n=24, \delta=25.75^\circ$

#ignore: +-F

FOF1F1

0 < 0 > 0 → 1  
0 < 0 > 1 → 0  
0 < 1 > 0 → 0  
0 < 1 > 1 → 1F1  
1 < 0 > 0 → 1  
1 < 0 > 1 → 1[+F1F1]  
1 < 1 > 0 → 1  
1 < 1 > 1 → 0  
\* < + > \* → -  
\* < - > \* → +

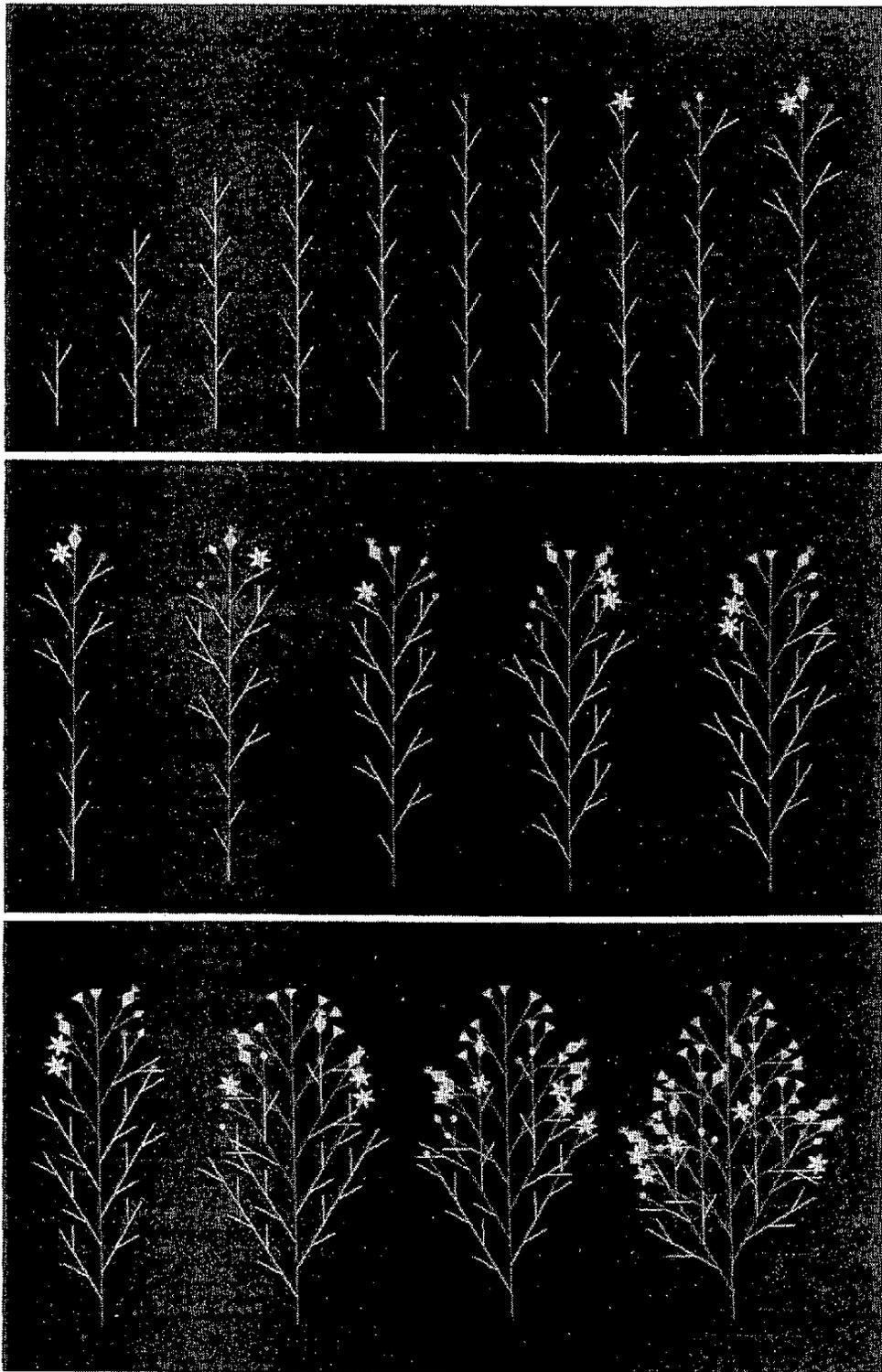
**e**  $n=26, \delta=22.5^\circ$

#ignore: +-F

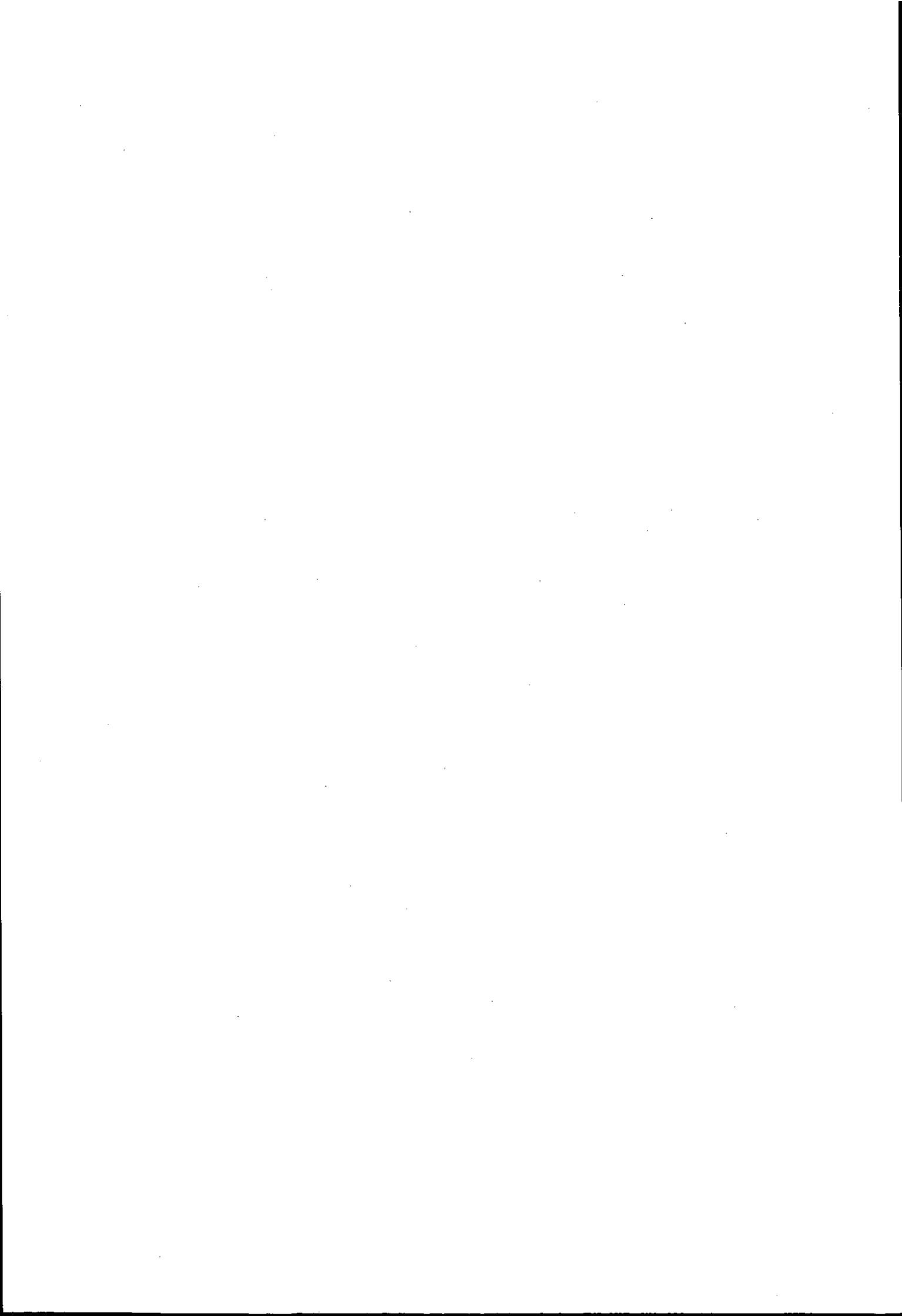
F1F1F1

0 < 0 > 0 → 0  
0 < 0 > 1 → 1[-F1F1]  
0 < 1 > 0 → 1  
0 < 1 > 1 → 1  
1 < 0 > 0 → 0  
1 < 0 > 1 → 1F1  
1 < 1 > 0 → 1  
1 < 1 > 1 → 0  
\* < + > \* → -  
\* < - > \* → +

図表4.5.5(b) ツリーの形が文脈依存ルールによって生成される例  
[Prusinkiewicz 1990, p.35]



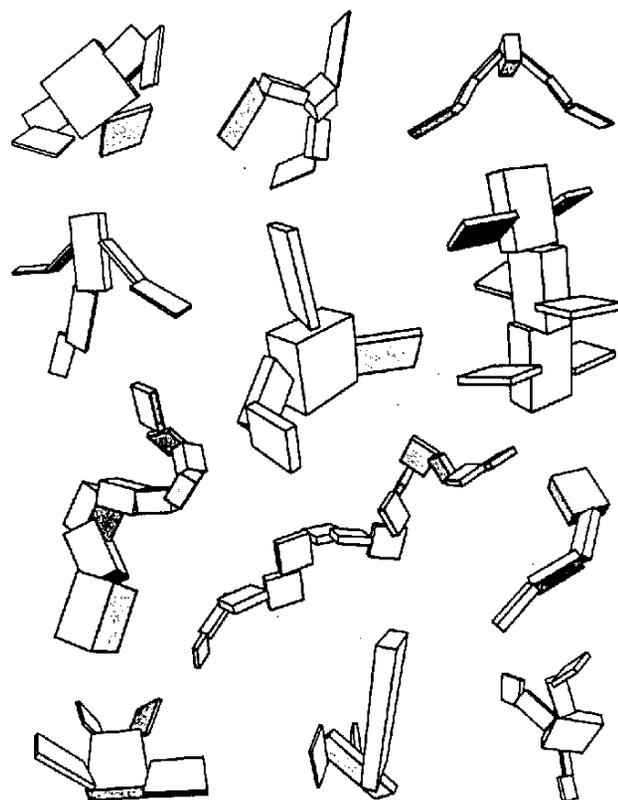
図表4.5.6 植物の生成例



## 第5章 人工生命の研究事例

### 5.1 カール・シムズの“Artificial Evolution”

カール・シムズ (Karl Sims) は、彼の“Artificial Evolution”という最近の研究において方向グラフを遺伝情報として、コンピュータ上の3次元世界に、複数のブロックから成る形状をもちセンサ入力に対して行動を生成する仮想生物を創りだした。方向グラフはブロック状の構成要素を表わすノードとノード間の接続情報から成り、複数のブロックから成る形状と同時にそれらを制御するための神経回路網を生成する。神経回路網はセンサ入力に応じた動きを生成する刺激反応系として機能する。「歩く」「泳ぐ」「ジャンプする」といった課題に対して進化的なプロセスを通して、カンブリア爆発を彷彿とさせる多種多様な形状デザインと行動をもった仮想生物が生み出された (図表5.1.1)。また、創りだされた生物同士がある共通のリソースを巡って闘い、勝者は生存と複製が許されるといった、仮想生物同士の共進化の例も紹介した。



図表5.1.1 「泳ぐ」仮想生物 (クリーチャー) の例

### 5.1.1 仮想生物の形態形成

遺伝型は方向グラフによってモデル化されている。各グラフは、仮想生物を成長させるための命令を含み、その命令を再帰的に利用して表現型が形成される。すなわち、このグラフは再帰的である。表現型は、定義されたルートノードから開始され、ノードはノード情報から部分を合成し接続していく。そのサイクルにおいて、再帰的あるいはフラクタル様の構造を形成できるようにノードはノード自身へも接続可能である。

各ノードはグラフにおけるブロック部品を記述する情報を含む。次元情報はそのブロックの物理的な形状を決定する。関節型は、関節の動きに対応する自由度数を定義することによって、このブロック間の相対的な動きへの制約を決定する。関節型には、固定、回転、ひねり、曲げ、球状などがある。関節限界はバネ力を保存する範囲を決める。再帰限界パラメータは、いつ何回表現型を生成するか再帰的なサイクル数を決める。

また、各ノードには、局所的なニューロン群を生成する情報および他のノードへの接続情報を有する。接続情報は、各々が独立に突然変異させられるように、位置と方向、大きさ、反射などに分解されている。ブロック間の取付け位置は表面に限られる。反射は対称なサブツリーを記述する。終端フラグは再帰限界に到達した時のみ適用され、その端がしっぽや手のようなコンポーネントになる。図表5.1.2は単純な方向グラフのトポロジーとその結果生まれる表現型の形態形状を示す。

### 5.1.2 クリーチャーの行動

仮想的な脳（ニューラルネット）は生物の行動を決定する。脳は、ニューロンとセンサ入力と効果器出力からなる動的なシステムである。センサ、ニューロン、効果器間の信号は、正あるいは負の連続的な変数によって表現される（図表5.1.3, 図表5.1.4参照）。

#### (1) センサ

センサは、各ブロックに含まれ、そのブロックと環境の状態を取り込む。3つの異なるタイプのセンサが用いられる。すなわち、関節角度センサ、接触センサ（接触していればアクティブになる）、そして光源に反応するフォトセンサである。

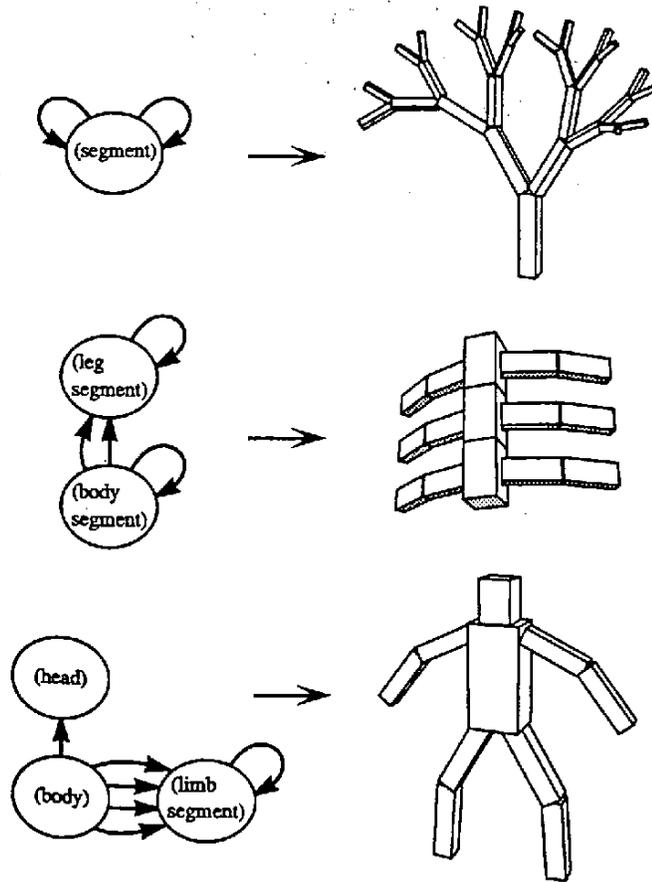
#### (2) ニューロン

内部のニューラルネットは仮想生物の任意の動きを生成することができる。ニューラルネットは内部状態を持つことができ、センサ情報のみならず過去の履歴の影響を受ける。

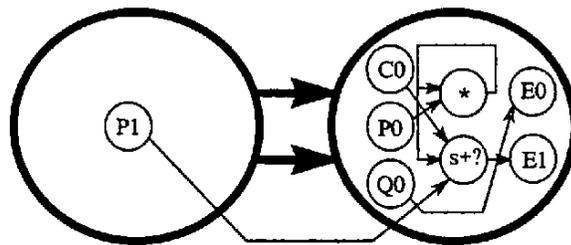
各ニューロンでは、通常の積和・いき値変換のみならず、積、商、比較、符号変換、最小/最大、絶対値化、条件分岐、内挿などいろいろな機能を実行する。内部発振状態をとることもでき、たとえ入力が一定であっても時間に応じて変化する出力をだすことができる。

ニューロンへの入力数は最大3で、接続される他のノードへの重み情報を含む。各入力はそれらの値によって重み付けられ、その和が関数変換される。重み情報を含めて、これらは遺伝的に定義される。

Genotype: directed graph.      Phenotype: hierarchy of 3D parts.



図表5.1.2 遺伝型（方向グラフ）と対応する表現型

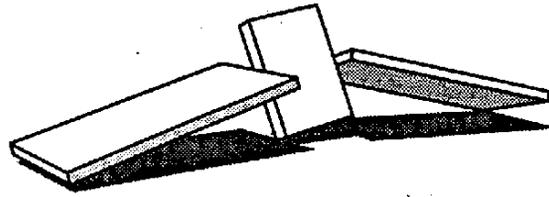


図表5.1.3 遺伝型の例。太線のグラフはクリーチャの形態形状を表わす。内部のグラフはニューラルネットを記述する；C0, P0, P1, Q0は接触およびフォトセンサ, E0, E1は効果器出力, \*, s+?は各々神経細胞での積と和/いき値変換を表わす。

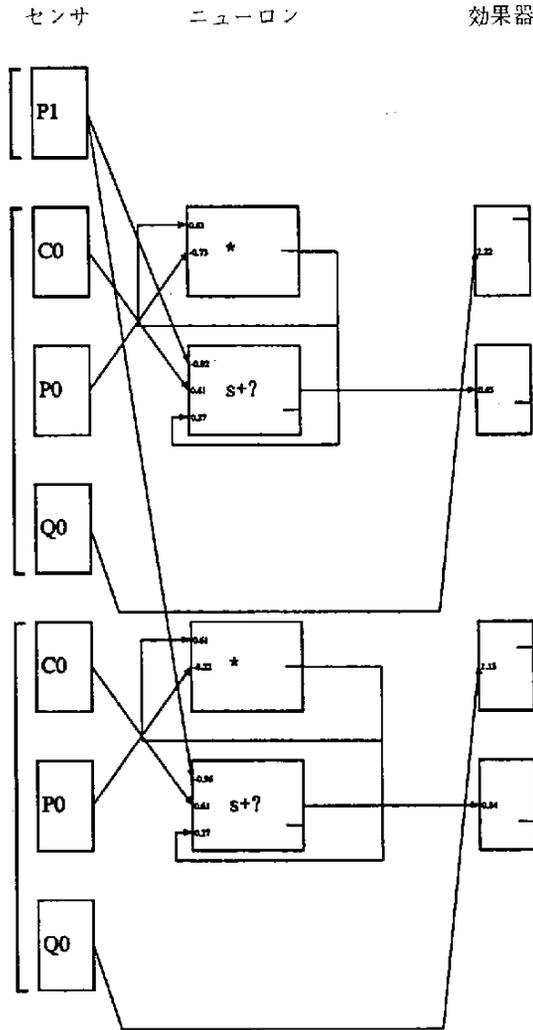
### (3) 効果器

効果器は、数値信号を動的なシミュレータに翻訳することにより、生物の動きを作りだす。各関節ごとに角度センサがあり、各効果器は関節部の自由度を制御する。

各効果器には、それがつなぐ2つのブロック間の最大の重なり部分に比例した最大強度が定義され、効果器出力は最大強度によってスケール化され、それを越えることはない。ただし、均一的なスケール化ではなく、自然と同様に必ずしも均一でない動きを生成する。



図表5.1.4(a) 図表5.1.3の遺伝型から生成される表現型の形態形状



図表5.1.4(b) 同様に図表5.1.3の遺伝型から生成されるニューラルネット制御系

### 5.1.3 物理シミュレーション

動的なシミュレータにおいては、身体の動き、数値積分、衝突検出、摩擦による衝突反応などが計算されねばならない。これらは標準的な仮想現実のテクニックを用いて実現される。仮想生物の進化は丸み誤差によって驚くほど影響を受けるので、再帰的な関節でつながれた身体のインパルス応答やペナルティなど、現実的かつ正確なシミュレーションをすることが重要である。

#### 5.1.4 仮想生物の進化

仮想生物の進化は、ランダム値に基づく初期の形状からでも、あるいは初期進化によってデザインされた結果からでも始めることができる。初期進化では、単純な有効性チェックがなされ、不適切な仮想生物は集団から排除できる。

適合度は集団中の他の仮想生物に対する競争によって評価される。競争は対面する両者の中間におかれたキューブによって定義される。適合度はそのキューブからの相対的な距離から計算される(図表5.1.5)。

仮想生物集団のうち、最適な適合度を得られた者は生存することができ、再生成が許される。再生成において遺伝型(方向グラフ)は突然変異と交配が施される。

##### (1) 突然変異

突然変異は以下のようにして実現される。

- ① ノード・パラメータへの突然変異、ブール値のフリップ、ランダムな値の追加、新しい値への変換など。
- ② 新しいノードのランダムな追加。ただし、新ノードは、他のノードへ接続ポイントが突然変異しない限りは表現型へは何の影響も及ぼさない。
- ③ 接続パラメータへの突然変異(ノード・パラメータと同様な方法で実現)
- ④ 新しい接続のランダムな追加、あるいは排除。
- ⑤ 接続のない各要素は取り除かれる。生物システムとは異なるが、グラフが余り大きく成長しすぎることを防がねばならない。

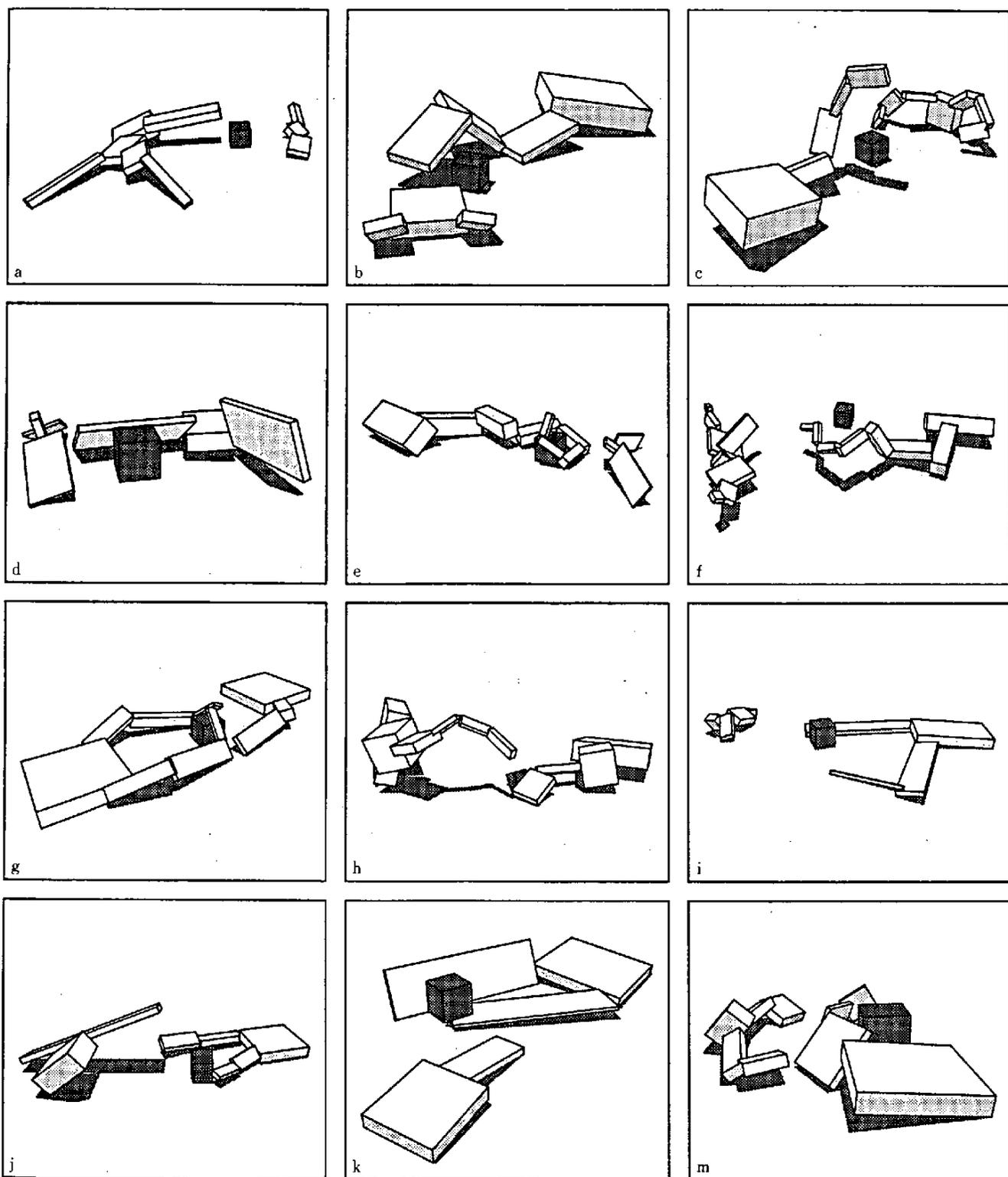
##### (2) 交尾

仮想生物は、交配(crossovers)と接ぎ木(grafting)という2つの操作によって交尾することができる(図表5.1.6)。

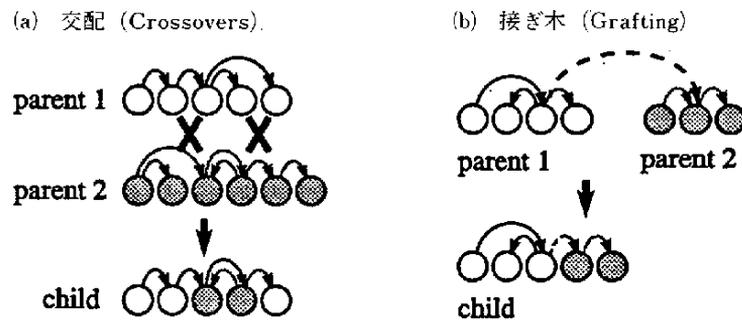
交配操作によって、親となるグラフ同士がある交配点によってお互い折衷される。接続ポイントは両親ノードの位置に再設定され、ある特別な位置にノードがない場合は、ポイントは新しいグラフの中でランダムに割付られる。

接ぎ木操作では、親となるグラフがそのポイントを別のグラフのノードに移動することによって実現される。

交配するパートナーは通常スーパーバイザによってランダムに選ばれる。この実験では、無性生殖40%、交配30%、接ぎ木30%の比率で再生成するものが選ばれた。



図表5.1.5 共通リソース（キューブ）をめぐって“闘う”仮想生物



図表5.1.6 交配と接ぎ木操作

## 5.2 Tierra : デジタル生命の進化

Thomas S. Ray は Tierra というシステムを作成して、デジタル生命の進化シミュレーションを実現した。Tierra におけるデジタル生命は自己複製する機械語からなる。デジタル生命は CPU 時間を用いて記憶内に生息し、CPU 時間とメモリ空間を競合し進化する。本節では、Tierra によるデジタル生命の進化を説明する。なお、以下の記述は [Ray 91] をもとにしている。

Tierra はスペイン語で「地球」を意味する。Tierra は各生物に1つのプロセッサを割り当てる MIMD (Multiple Instruction Multiple Data) 型のコンピュータである。各プロセッサは次のようなレジスタなどを有する。

- 2つのアドレスレジスタ ax, bx
- 2つの数値レジスタ cx, dx
- スタックポインタ sp
- 10語分のスタック st
- エラーを示すフラグ flag
- インストラクションポインタ ip

以下ではインストラクションポインタのことを IP と書く。CPU は通常のコンピュータと同じく、次のサイクルを繰り返す。

(1) fetch

IP で指された命令を取り出す。

(2) decode

命令を解釈する。

(3) execute

命令を実行する。

(4) increment IP

IP を更新する。通常は IP を次のアドレスに変えるが、JMP, CALL, RET 命令などでは IP

が直接書き換わることもある。

生物を情報システムとしてみなすという遺伝学の知見に留意して、Tierra の言語は設計されている。すなわち、Tierra の言語には次の2つの特色がある。

(1) 命令の種類は非常に少ない。

これは、生物では情報がDNA内にわずか64種類のコドン(mRNAの3ヌクレオチド)としてコード化され、それらが20通りのアミノ酸に翻訳されるということからくる。したがってTierraの言語では32通りの命令セットを用いる。この数は64にはほぼ匹敵する。これらはオペランドも含めて5ビットで表現される。なお、数値のオペランドは用いない。

(2) テンプレートによるアドレス方式

細胞質内でタンパク質分子Aがタンパク質分子Bと相互作用するために、AはBの座標を直接記述する必要はなく、代わりにBの表面に補完的な面を有する。拡散により2つのタンパク質分子が結合し相互作用がなされる。TierraではJMP(ジャンプ)命令をこの方式で行う。各JMP命令にはNOP命令(no-operation, 何の実行もしない命令)が続いている。NOP命令にはNOP\_0とNOP\_1の2種類がある。たとえば

```
JMP NOP_0 NOP_0 NOP_0 NOP_1
```

という命令に対しては、補完するアドレス、

```
NOP_1 NOP_1 NOP_1 NOP_0
```

を探す。この探索はJMP命令から両方向に一定の範囲だけ行う。このパターンが見つかり、IPはそのパターンの終りにセットされ実行を再開する。見つからない場合は、エラーのフラグ(flag)がセットされJMP命令は無視される。以下ではこのパターンのことをテンプレートと呼ぶ。

Tierraが操作するRAM(メモリ空間)をスープと呼ぶ。これは60,000バイトの大きさに各生物はこのスープのなかのあるメモリ領域を占める。デジタル生命の「サイズ」は、その生命の割り当てられているメモリ領域の大きさとする。たとえば80命令の生物はサイズ80ということになる。各生物は自分に割り当てられたメモリに対して排他的な書込みの特権を持つ。この特権が守られている場合は、ほかのデジタル生命はその場所を読んだり実行することはできるが、書込むことはできない。各生物は最大2つの領域に書込み特権を持つ。それらは、

- (1) 母細胞(自分が生まれたところ)
- (2) 娘細胞(成長もしくは生殖するところ)

である。したがって実際の生物とのアナロジーでは、Tierraの生物もメモリのなかで「半浸透性の膜(semi-permeable membrane)」で保護されるということになる。

TierraはMIMDであるが、実際には仮想CPUを各生物に割当て実行を時間分割している。各生物に対する実行の順番を管理するのが、スライス待ち行列(slicer queue)である。各生物は生まれると同時にこの待ち行列に加えられる。CPUの割当てはFIFO(First-in-first-out)で行い、実

行の割当てが終わると行列の最後尾に加えられる。実行の割当てに関しては、

- (1) 生物のサイズに関係ない平等方式、
- (2) 大きいサイズに有利に選ぶ方式、
- (3) 小さいサイズに有利に選ぶ方式、

の3通りがある。

リーパー (reaper) は生物を殺す「死に神」である。これも1つの待ち行列を管理している。生物は生まれるとこの行列の最後尾に加えられる。死に神が殺すのはこの行列の一番先頭にいる生物である。死に神はスープが一定のレベル (通常80%) 以上に生物でいっぱいになると活動を開始する。待ち行列内の順番は次の規則で決められる。

- (1) 生物がエラーとなる命令を1つ実行すると1つ行列の前に進む (誤る者は早死にしやすい)。
  - (2) 成功に終わる実行の終了によって行列内を1つ後ろに下がる (正しき者は長生きしやすい)。
- 進化を実現するために突然変異を導入する。これには次の2種類がある。

- (1) 全60,000命令 (合計300,000ビット) のスープのなかで一定の割合でビットを反転させる。

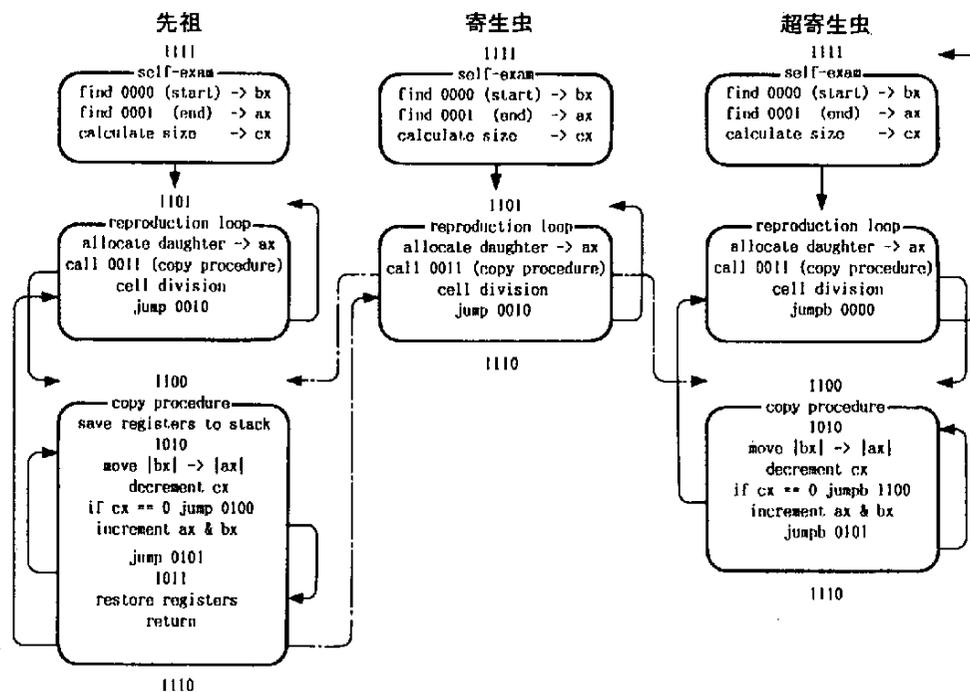
この割合は、Tierra の10,000命令ごとに約1ビットの変異率となっている。これは実際の生物のアナロジーでは、宇宙線による遺伝子の変異に相当する。このためすべてのデジタル生物は永遠に同じということはありません。

- (2) 複製時のコピー命令の実行の際に1,000~2,500命令ごとに1ビットの割合でビットを反転させる。

この変異のほかに Tierra では実行に不確定さを導入した。これは通常値より±1の範囲で間違えることである。たとえば通常のインクリメント命令ではレジスタに1を加えるのであるが、ときには2を加えたりまったく加えなかったりする。ほかの例として、あるビットを反転すべきときにその隣りのビットを反転する。

Tierra は図表5.2.1(左)に示すサイズ80の単純な自己複製プログラムを先祖としてシミュレーションを開始する。このプログラムを0080aaaと呼ぶ。これはサイズ80の命令の一番最初の生命体ということである。0080aaa は次の動作を行う。

- 〈Step1〉 自分自身の始まりを認識し bx レジスタにセットする。自分自身の終りを認識し ax レジスタにセットする。
- 〈Step2〉 サイズ (ax-bx) を cx レジスタにセットする。
- 〈Step3〉 娘細胞のメモリを割り当てる。
- 〈Step4〉 コピーの手続きを呼ぶ。
- 〈Step5〉 コピーが終わったら DIVIDE 命令を実行し、娘細胞への書込み特権を放棄し、娘細胞へ IP を渡す。これと同時に娘細胞はスライサ (slicer) と死に神 (reaper) の待ち行列に入る。
- 〈Step6〉 Step3へ戻る。



図表5.2.1 先祖と寄生虫

コピー手続きの始まりが1100というテンプレートで表されていることに注意されたい。したがって Step5では、

```
CALL NOP_0 NOP_0 NOP_1 NOP_1
```

でコピー手続きを呼んでいる。

次に Tierra での進化について説明する。0080aaa を先祖として実行を開始すると、次のような興味深いデジタル生命が観察される。

#### (1) 寄生虫 (parasite)

これは通常の複製者 (0080aaa) と一緒にいれば複製できる生命体である。しかも寄生虫は自らはコピー手続きを持たず宿主 (0080aaa) のコピー手続きを実行して自分 (寄生虫) 自身を増やす。これ以外には寄生虫は宿主に害を与えない。

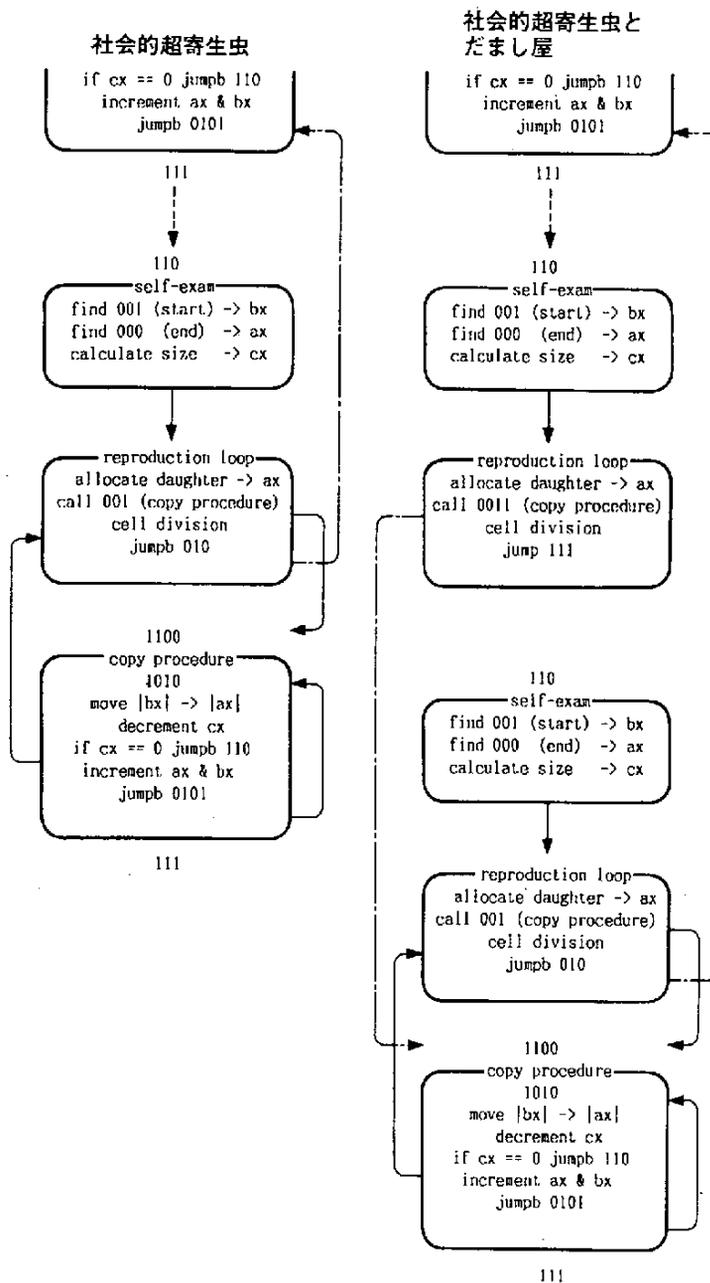
寄生虫のコードが図表5.2.1 (真中) に示されている。先祖 (0080aaa) の42番目の命令が突然変異して NOP\_0が NOP\_1となり、その結果テンプレートが1100から1110となっている。したがって、ここが寄生虫にとって自分の終りを示すマークとなり ax にその値が保持される。このコードのサイズは45であり、以下0045aaa と呼ぶ。0045aaa が複製に成功するのは、自分の近くに0080aaa が存在する場合である。このとき点線に示すように0080aaa のコピー手続きを呼んで複製を行い、その後実行は再び0045aaa に戻る。図では、自分自身内の JMP, CALL 命令を実線で、ほかの生物への JMP, CALL 命令を点線で示してある。

#### (2) 超寄生虫 (hyper-parasite)

これは寄生虫に冒されると、その寄生虫のエネルギー源を奪って自分の複製に使ってしまう

生命体である。このコードを図表5.2.1(右)に示す。超寄生虫は0080aaaとは19個の命令が異なる。以下これを0080gaiと呼ぶ。寄生虫を出し抜くのは次の2つの部分である。

- (a) コピーの手続きが寄生虫に戻らず自分の複製のループ内の適切な場所に戻る。これによって、寄生虫のインストラクションポインタを効果的にとらえてしまう。
- (b) 複製の後、超寄生虫は自分自身を再検査し、bx, ax, cxレジスタを超寄生虫の値に再セットする。このことにより寄生虫のCPUは超寄生虫の位置とサイズを保持することになり、今後寄生虫は自分ではなく超寄生虫を複製し続ける。これが寄生虫には致命的である。



図表5.2.2 社会的寄生虫とだまし屋

### (3) 社会的超寄生虫 (social hyper-parasite)

超寄生虫は寄生虫を絶滅に追い込む。一方、この社会的超寄生虫は集団でいるときのみ複製する。この虫はサイズ61であるので0061acgと呼ぶ。図表5.2.2 (左) に示されているように、0061acg は自己検査のためにジャンプするときには、自分自身の先頭ではなく最後に飛ぶ。したがってこの社会的超寄生虫が自分と似たコードと隣接する場合、この JMP 命令で隣人の終りにあるテンプレートを見つけだしてジャンプする。その後、上にいる隣人は何も実行せずに関自分の終りからさらに先に進み、実行は下の生物 (通常は隣人を呼んだ本人) へと移っていく。この方法は似たコードが自分の近くにないと失敗する。このように0061acg が集団でいると、近所の者同士がインストラクションポイントのジャンプを受け取り投げ合って協力するのである。

### (4) だまし屋 (cheater)

しかしながら社会的寄生虫 (0061acg) をだます者もある。これは27命令の cheater と呼ばれるコードである (0027aab と呼ぶ)。図表5.2.2 (右) に示すように、2つの社会的寄生虫 (0061acg) の間に0027aab がはさまっている場合を考えよう。0027aab は社会的寄生虫 (0061acg) の間で実行のやり取りがあると、IP を奪い取り、CPU のレジスタを自分自身のサイズと位置に設定してしまう。そして実行を下にいる社会的寄生虫 (0061acg) に返すとき自己検査プログラムを読み飛ばしてしまう。

Ray は Tierra のシミュレーションの結果からいくつかの興味深い知見を見いだしている。長いシミュレーションを行うと、進化における区切り (断続) 平衡説と同様の現象が見られた。これは古生物学者 S.J. グレードが提唱した理論で、進化は段階的な発展で起こるというものである。この説は、長く世界の進化学界を支配してきたネオダーウィニズムをゆるがすものとなった [Gould 87]。なお、この当否をめぐる議論はなおも続いている。

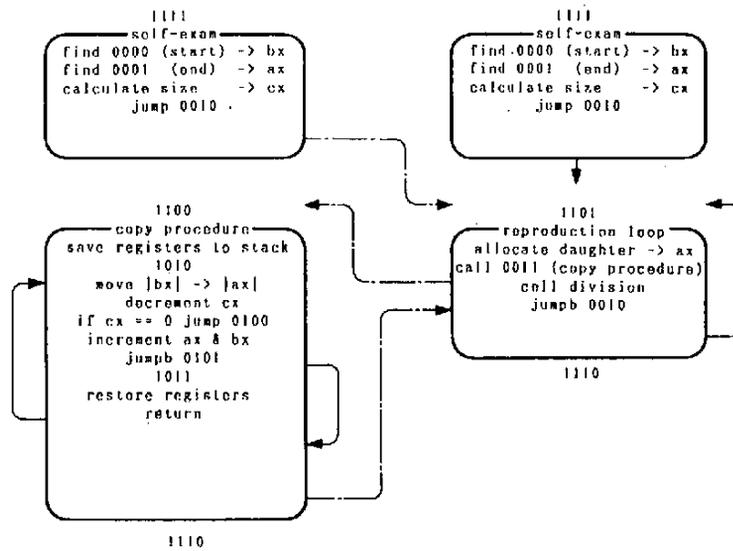
さらに共生関係も可能なことを指摘した。これは図表5.2.3に示すように、どちらの生物も単独では複製できないが、一緒になると他方を用いて複製ができる関係をいう。この2つの生物は、一方がサイズ46で自己検査と複製のみを含み、他方はサイズ64で自己検査とコピーのループのみを含んでいる。しかしながら、この関係が自然に発生したのかどうかは不明である。

これらの結果を踏まえて、Ray はデジタル生命における創発 (emergence) という知能の発生現象を考察した。そして、デジタル生命が Cariani のいう3つのレベルの創発 (記号的創発、意味論的創発、プラグマティックな創発 [Cariani 91]) を実現できると結論した (これについての詳細は [伊庭 94] を参照されたい)。

以上見てきたように、Tierra は単なるシミュレーションではなく、AL の今後を担う先駆的実験である。

### <参考文献>

[伊庭 94] 伊庭齊志, 遺伝的アルゴリズムの基礎, オーム社, 1994



図表5.2.3 共生関係

[Cariani 91]Cariani, P.: Emergence and Artificial Life, *Artificial Life II*, Langton, C.G. et al. (eds.), Addison Wesley, 1991.

[Gould 87]Gould, S.J.: An urchin in the Strom, *Essays about Books and Ideas*, 1987 (邦訳: 嵐の中のハリネズミ, 渡辺 政訳, 早川書房, 1991)

[Ray 91]Ray, T.S.: An Approach to the Synthesis of Life, *Artificial Life II*, Langton, C.G. et al. (eds.), Addison Wesley, 1991.

### 5.3 共進化

共進化とは、異なる種の生物が互いの自然選択に強い影響を持つときに、一方の進化が他方の適応度地形に変化をもたらし、進化を加速するという現象が相互に生じることである。典型的には被食者と捕食者の間でしばしば観察される。被食者は捕食されにくい個体の方が繁殖しやすいので、捕食者から逃れる能力、例えば足の早さ、擬態、ツノやコウラなどが発達する。捕食者は、被食者の防御戦略を打ち破る能力を身につけた個体が繁殖する。

これにヒントを得て、D. Hillis は、問題とそれを解くアルゴリズムの間での共進化を試み、並列計算機によるデータのソーティングのためのデータの比較と交換を行なうネットワークの最適化について共進化を導入することが有効であることを示した [Hillis 92]。マルチプロセッサ型の並列計算機でデータの並び換えを行なうには、データ間の比較と記憶場所の交換を複数のデータの組について並列に行なうことを繰り返す。この比較の回数によって計算時間が決まるので、できるだけ比較回数が少ないことが望ましい。これまでに、データ数が16個の場合について、何人かの研究者が効率のよい比較のネットワークを考案しており、60回の比較交換ですむ方法が最も効率的であるとされている。1つのソーティングネットを1つの個体と見なす。個体の遺伝情報は15組の2倍体染

色体からなり、個々の染色体は8個のコドンからなる。各コドンは4ビットであり接続する要素を表現する。2つのコドンの組が1組のデータ比較を表す。2倍体の染色体上で、対応するコドンの組を比較し、もし同じであれば、1つの接続のみとし、もし異なれば双方の接続を設ける。つまり、最小で $8/2 \times 15 = 60$ 、最大で $8 \times 15 = 120$ 個の接続を表現する。与えられた問題についてより多く正しい並びを生成できた個体ほど高い適応度を得たものとする。

与える問題をランダムに生成し通常の遺伝的アルゴリズムを用いて64,536個体、5,000世代まで計算したところ、65個の比較接続にまで落とすことができた。これは共進化を導入しない場合である。

問題と解法の共進化では、問題の適応度は解かれた度合いによって決まる。解かれなかった問題ほど捕食者から逃れたという意味で高い適応度を得るものとする。Hillisの実験では共進化の導入により比較交換の回数を61にまで下げることができ、人間が考えた最適と思われる結合にかなり近付けることができた。

## 5.4 ハードウェアシンセシス

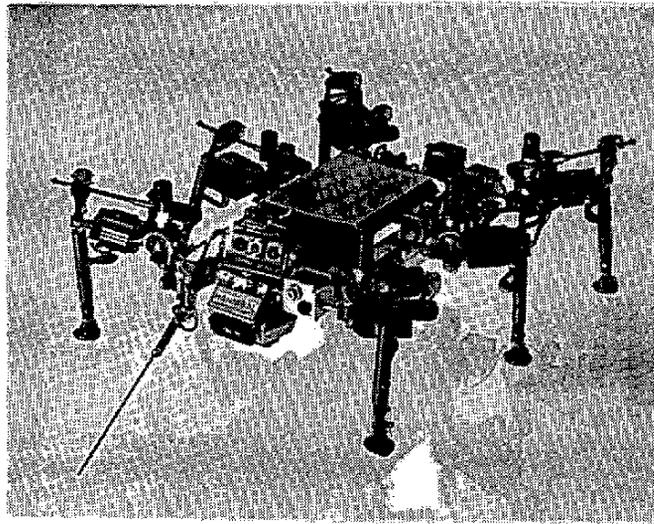
### 5.4.1 行動型ロボット

ロボットに膨大な知識を与え、複雑な行動、知的な行動を作り出そうとする従来の人工知能的手法では、環境の認識、知識を用いた行動の計画、そして実行と一連のプロセスを行うために膨大な計算量を必要とし、素早い行動が難しかったり、知識をあらかじめ与えることが困難であった。その反省から、行動を記述した複数のルールをあらかじめ与え、環境の状態に応じた行動を複数発生させ、それらの競合から行動を決定して実行する行動型ロボットが、MIT人工知能研究所のR.ブルックス教授によって提案された[1]。要素行動と呼ばれる基本的行動からより高度な行動を階層的に積み上げた、サブサンクションアーキテクチャ(SA)によって制御されたロボットは、環境の複雑さに応じた複雑な行動を示し、世界中のロボット研究者にショックを与えた。

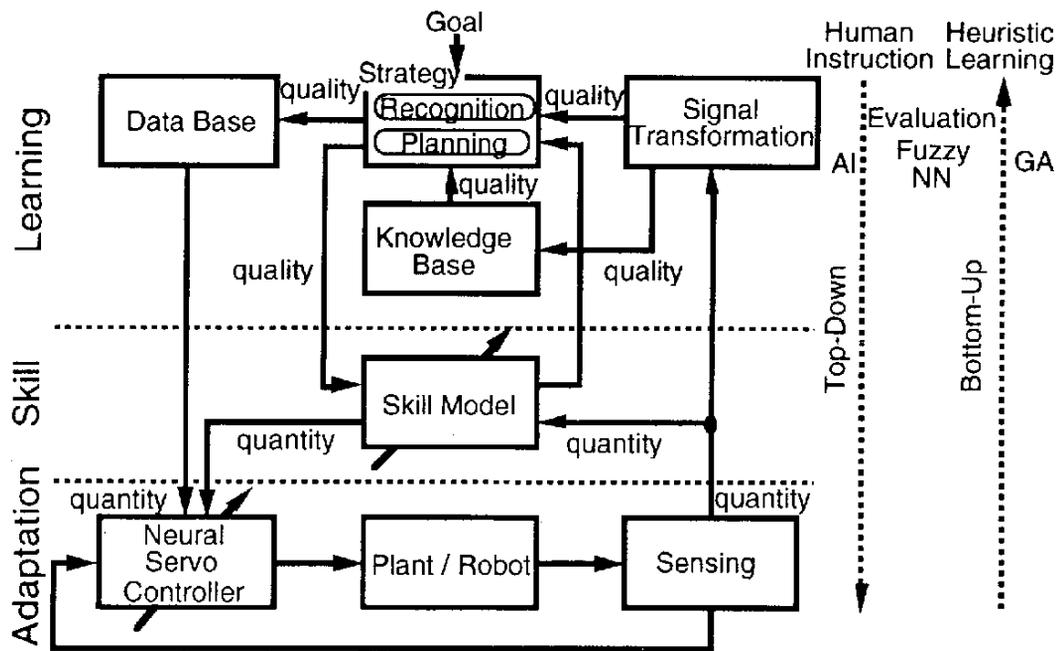
サイモンは、アリが動き回ることによってできる複雑なパターンは、アリの行動が複雑なのではなく、簡単な行動が環境と相互作用した結果として生じたことを述べている。同様にブルックスもロボットの知的な振る舞いは環境に依存しているとし、SAは図表5.4.1の6足歩行ロボットを始め、多くの移動ロボットに適用され、環境への適応能力が示された。しかし、昆虫レベルの知能しか表現できないという批判があり、それに答えるため、現在はヒューマノイド計画が進められている[2]。複数のセンサ情報を並列処理し、多くのアクチュエータを動作させることによって、人間の持つ情報処理系に近いロボットを作り、行動から得られる知能の本質を探ろうとするものである。

### 5.4.2 階層的知的制御

ロボットが人間社会において、役に立つ動作をするためには、知的であることは不可欠である。知能の本質ははまだ明確であるとは言えないが、人間を尺度とすることによって、実世界の中においても有効な知能は、知識として記述でき得る。人間は、知識として書物や人工のメディアから得



図表5.4.1 SAロボット, Attila-II

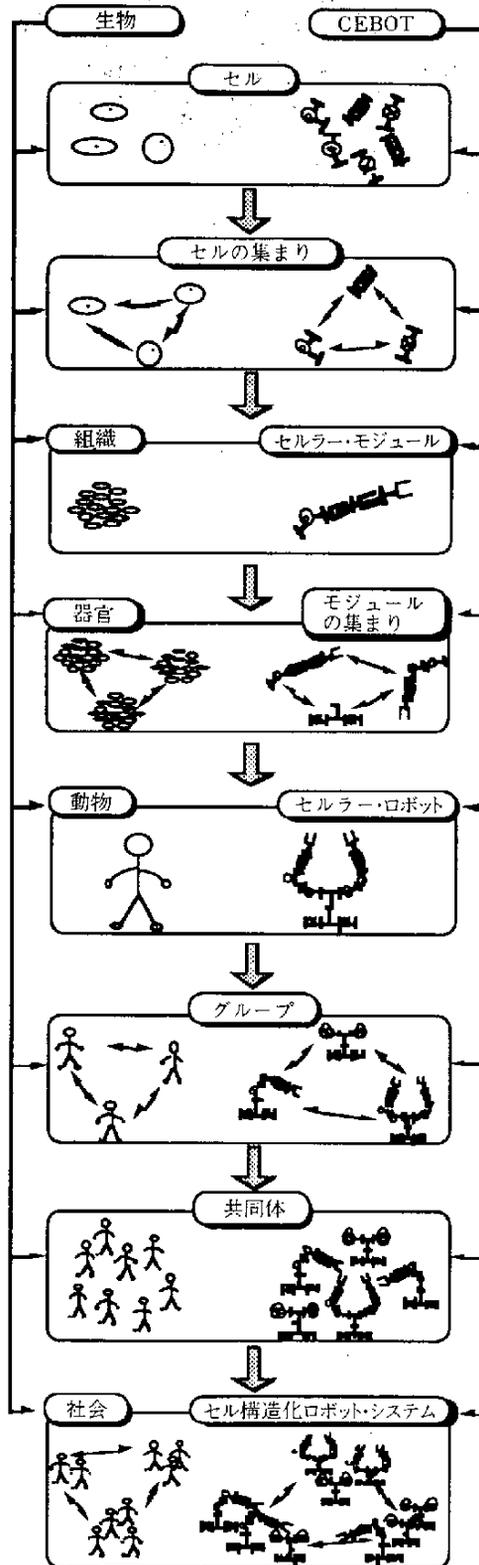


図表5.4.2 階層的知的制御アーキテクチャ

られる知能の他に、生命を持つものとして実世界に存在し始めてから現在まで、手や足の動きの他、道具の使い方など適応、学習によって獲得した知能を持つことによって、実世界の中を自由に活動することができる。

その人間の行動原理を模倣し、ロボットを知能化する方法として、階層的な制御の構造と人間があらかじめ与えられる知識、技能をロボットに移植した後、ロボット自身が環境への適応動作や学習プロセス、さらにはロボット間での競合や協調からよりよい行動知能を進化的に獲得する研究が、機械技術研究所等においてなされている[2-4]。図表5.4.2のように、設計者である人間がトップダ

ウンの的に、ロボットの構造や動作目的に依存する知識を与え、その後、ロボット自身の行動から、ボトムアップ的に知識を獲得してくるハイブリッドなシステムである。産業応用については、切断作業やアーク溶接などに用いられる冗長ロボットアームの自動制御への応用が試みられている[5]。



図表5.4.3 生物の構成とセル構造化ロボットシステム

熟練の作業者が教示を行うときの作業に対する評価規範をスキルとして抽出，モデル化し，それを評価関数として進化的計算法によって，冗長性を最適利用するものである。実験により，その有効性が確認されている。

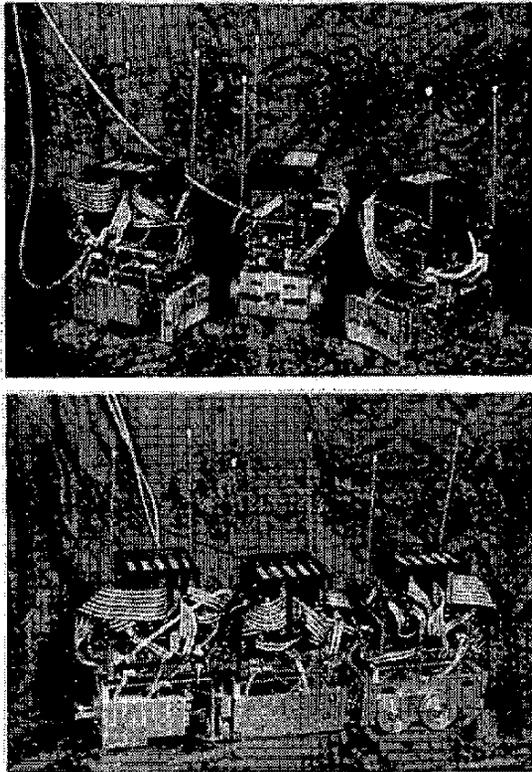
#### 5.4.3 自己組織化システム

図表5.4.3のように，生物は細胞，組織，器官が集まって構成されている。また，生物は複数集まることによって，群を成したり，社会を構成する。同様に，個体としてのロボットが複数集まることによって，群，社会を形成し，より高度な知能を発生させようとする研究が自己組織型ロボットシステムである[2, 6]。一つ一つのロボットはセルと呼ばれ，それぞれが独自の機能を持っている。単機能のロボットが複数合体することによって新たな機能を作り出している。発想は，まさに生物システムである。目的に応じてセルを準備することによって，様々な応用分野が考えられている。入り口が小さいタンクの中に，たくさん送り込んで中で合体して検査や修理を行わせる。小さくて軽いロボットを宇宙へ打ち上げ，宇宙空間で合体した後，大きなロボットとして宇宙開発を行う。手術を行う代わりに，超小型のマイクロロボットを口から飲み込み，お腹の中で合体したロボットが，薬を投与したり，細胞を切り取ったりする。知的生産システムにおいても，生産品目が変わる度に，生産ラインを自己組織化し，多品種少量生産に対応する，など様々な応用が考えられている。セル型ロボットの生みの親である名古屋大学の福田教授は，実現へ向けて着実に研究を進め，ソフトウェアだけでなく，ハードウェアの面でも成果を挙げている（図表5.4.4）。

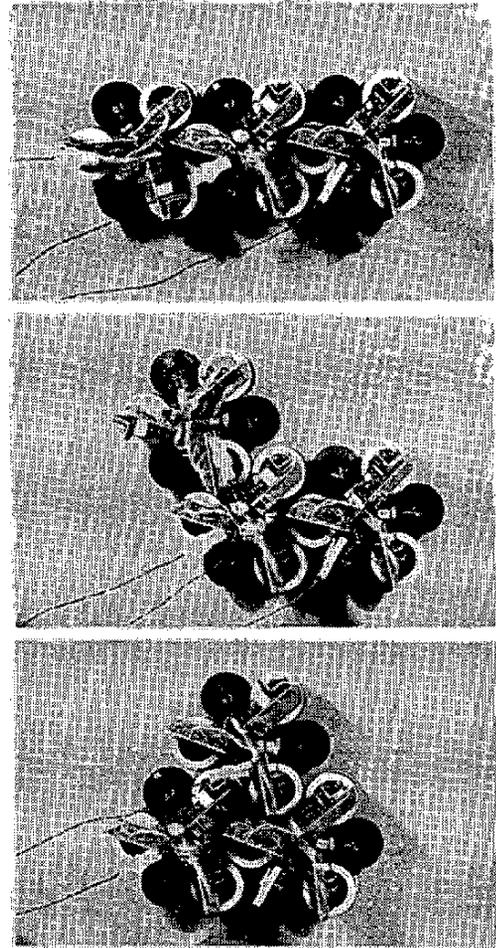
一方，機械技術研究所のグループは，図表5.4.5のように同一のユニットが複数集まり，複雑な機能を発現する「分散機械システム」の研究を進めている[7, 8]。このシステムは，形態を自由に变化させることができ，またどのユニットが故障しても残りのユニット群によって自己修復することができる。

#### 〈参考文献〉

- [1] R. Brooks, A Robust, Layered Control System for a Mobile Robot, IEEE Journal of Robotics and Automation, vol. RA-2, No. 1, pp. 14-23 (1986)
- [2] 柴田，福田，共編，人工生命の近未来—新たな生をつくるテクノロジー，時事通信社，(1994)
- [3] 柴田，福田，階層行動アーキテクチャ(適応と学習によるシステムの最適化)，日本ロボット学会誌，Vol. 11, No. 8, pp. 1111-1117 (1993)
- [4] T. Shibata and T. Fukuda, Hierarchical Intelligent Control for Robotic Motion, Transactions on Neural Networks, Vol. 5, No. 5, pp. 823-832 (1994).
- [5] Takanori Shibata, Tamotsu Abe, Kazuo Tanie, Matsuo Nose, Motion. Planning of a Redundant Manipulator—Criteria of Skilled Operators by Fuzzy-ID3 and GMDH and Optimization by GA—, Proc. of FUZZ-IEEE/IFES '95, vol. 5, pp. 99-102 (1995).



図表5.4.4 セル構造化ロボット (CEBOT) 試作機の外観



図表5.4.5 分散機械システム

- [6] T. Fukuda and S. Nakagawa, A Dynamically Reconfigurable robotic System (Concept of a System and Optimal Configurations), IEEE IECON '87, pp. 588-595 (1987).
- [7] S. Murata, H. Kurokawa, S. Kokaji, Self-Assembling Machine, Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation, vol. 1, pp. 441-448 (1994)
- [8] 柴田, 人類は「人工生命」を生み出せるか, 最新科学論シリーズ28「最新人類論」, 学習研究社, pp. 162-167 (1995)

## 5.5 ウェットウェアによる AL へのアプローチ (名古屋大学理学部宝谷研究室)

どちらかといえば私(宝谷紘一)も生物のほうをプロパーにしているものなので、最近わりと世の中をにぎやかしている人工生命の分野に時々引っ張り出されていますけれども、決して専門家ではないんです。古澤さんとか私は生物を研究しているなかではおそらく例外のほうの人間で、人工生命は生物学の人には印象が悪い。基本的に言い過ぎだという感じを、生物を研究している人は受けると思います。それは無理もないので、「人工生命」という名前が悪いと思います。

なぜかと言いますと、生物を研究している人は ALife ではなくて、BLife つまりバイオロジカルのほうをやっているわけですけど、BLife というのは基本的に1種類の生き物なわけです。表現型としてはたくさんあります。要するに DNA の先ほど言われたような35億年の歴史のなかで、いろいろな時代にいろいろな所から発生してきて、それが現在の生物界になっているのではなくて、おそらく1個のオリジンから出発して、いま地球上を支配しているのだと思っています。

BLife の人達は唯一のものだと思って研究しているにもかかわらず、ALife の立場の人は、Life というのは実はたくさんの可能なバラエティがあって、そのなかの一つの特殊なものとして BLife があると考える。だから ALife の人達は BLife を単なる一例としてしか理解していないのではないかというふうに、BLife を研究している人は思うわけです。

それと「人工」と付きますと合成できるという立場になります。だから、今ある非常に特殊な BLife を合成できるという立場を取っているのではないかというふうにだれも思うわけです。だからそのへんに ALife をやっている人と BLife をやっている人との間に大きな行き違いがいつでもあるのだと思います。

ただ私の立場から言いますと、ALife はほとんどコンピュータの専門家、あるいは計算、あるいは論理をやっておられる方がほとんどだと思いますけれども、それは BLife を研究するための大きな力になると私は思っているわけです。だから評価しているわけです。その一つの典型はいま古澤さんが話されたような遺伝的な問題、どういうふうに進化していくかということです。あるいはいまヒューマンゲノムの解析の仕事が進んでいますが、あれはすごいプロジェクトですけども、今のところではいくら解析してもあれは1本につながらない。あまりにも事が複雑すぎて問題の本質がどこにあるかわからない。

だから、それはおそらく現在 ALife を研究している人たちの助けを借りなければ解決しない問題だと思います。そういう問題は、BLife の中にいっぱいあります。たとえば免疫の問題、あるいは生体の恒常性を維持するかという問題というのはレギュレーションがあまりにも複雑に絡んでいて、典型的な複雑系の問題です。

私達は分子機械という立場から細胞を見ています。細胞がそうですが、生きものは分子の機械でできていると思う立場から見ても、あまりにも複雑なんです。複雑というのはエレメントが多いという意味だけではなくて、そのエレメントがそれぞれ個性を持っているわけです。たった1個しか

ないものもあるし、100万個あるエレメントもあるけれども、1つのシステムのなかでその1個が100万個と同じぐらいの重みを持った仕事をやっているわけです。だからこういう問題は普通に生化学的にやっている以上、解きようがないです。

だから BLife が本当にわかったと言うためには理論が構築されなければいけない。これから10年ほど先になったら、データはいやというほどありとあらゆるレベルでたまってくるとは思いますけれども、それを統一的に解釈するためには、理論なくしては……。だからおそらく多くの生物学は理論生物学になるのではないかと考えているんです。そのときにいま ALife をやろうとしている人たちの能力がおそらく花咲くのではないかと。

今日は、自分自身は何をやっているかということを少しお話しさせていただきたいと思います。さて、私は生き物のエッセンスは細胞だと思っています。細胞がどう生まれてきたか、どう進化しているかというのはおそらく情報の問題だろうと思いますけれども、現在ある BLife を見たとき、私にとっていちばんおもしろいのはダイナミックなストラクチャであるということです。

死に物と生き物が世の中にあるというのは誰でもなんとはなしに感じるわけですが、生き物の特徴は、休まない一つの反応系システムを組んでいることです。それをどういうふうにして組めるかということに興味があります。平衡系でも定常系でもない、常時スイッチオンの増殖系という一つの系があって、その系は開放系で外界とエネルギーと物質をやり取りしている一つのシステムです。そのなかで問題なのは、外界が変化した時に、それに適応する柔軟なシステムになっていることだと思います。だからシステム自体が固定化されていない。いつでも遺伝的に、あるいは機能的にも変わっていく。また、このシステムがあるインプットに対してアウトプットを出していくわけですが、そのインプット、アウトプットの関係が外部状態に応じて変わっていくというシステムになっているところが、35億年も生物が生きてきた理由ではないか。

それは分子レベルで言えばどういうところにあるかというのは興味がある。いまこのような細胞がある。よくご存じだと思いますが、この内部にはこういうふうになくさんのコンパートメントがあって、その一つのなかで複雑に生化学反応、生物・物理学的な反応を進めている系になっている。

細胞では1万種類以上の反応が常時起きている。この系の一つの特徴はレギュレーションがものすごくきくということです。それから死んでは困るのでたくさんのバイパスを持っている、安全装置を持っている。だからリダンダンシーがいっぱいあるというシステムになっています。そこでは同時的に狭い空間のなかでいろいろなことをやっているんです。だから普通の我々が持っているテクノロジーとはずいぶん違うというのが私の印象です。

その基本をもっともっと単純化したのがこういう考え方です。細胞の基本は常温で働く膜で仕切られた微小空間である。この空間は $10\mu\text{m}$ とか $100\mu\text{m}$ のオーダーですから、ほっておけばコンポーネントがいくらあっても熱運動によって均一濃厚溶液になってしまう。ところがこのなかで生体反応を進めていかなければならない。ということで、結局3次元の秩序構造が必要で、そのために細胞が取った戦略がコンパートメントと細胞骨格のネットワークです。そのネットワークによってコ

ンパートメントをダイナミックにしようという戦略だと思います。

実際にいろいろな形のコンパートメントが細胞のなかにはいっぱいあるわけです。そして、そのコンパートメントがいろいろなことをやるわけです。そのコンパートメントはたくさんあって、そのそれぞれが独自のファンクションを持っているところが複雑性の基だだと思います。それぞれのコンパートメントが分裂して小さなコンパートメントをたくさん作って、それらが別のコンパートメントと融合している。小さなコンパートメントが行ったり来たりしているわけです。さらに、今わかっていることは、特異的な化学反応がそれぞれのコンパートメントで行われている。たとえば小胞体とよばれるコンパートメントでは、膜上に蛋白をいっぱい作るようなマシンがあって蛋白を合成しています。作られたタンパク質はゴルジ体とよばれるコンパートメントのなかに入って仕分けされ、細胞内に残れ、あるいは外へ出せ、あるいはもう一度分解せよとか、ダイナミックな反応がダイナミックにしょっちゅう行なわれている。たとえば一つのコンパートメントを染めて可視化しますと、1分後には形も大きさも変わっているというぐらいダイナミックにできているわけです。そのメカニズムが解決されない以上、わかったというふうに感じないわけです。

また、ミトコンドリアというコンパートメントではエネルギーを作ります。ミトコンドリアでは膜の上にエネルギーを変換する酵素があって、このなかでどんどんプロトンをつめていく。このように膜といってもいろいろなバリエーションがある。この膜上には何十種類と機能するタンパク質が並んでいます。

細胞の超分子が動的だと言いました。それらが迅速に形成、解体するのですが、その基本には細胞骨格が働いているのです。細胞骨格はコンパートメントをどうレギュレートするためのマシンです。それは大きく分ければアクチン繊維、微小管と2つありますが、これらがエネルギーの消費構造になって、この構造自体を維持するのにエネルギーをどんどん常時使っています。アクチン繊維はATP、微小管はGTPを使っています。だからそれらの存在自体がものすごく高くつく。要するにエネルギーをしょっちゅうつぎ込んでいないとどんどんつぶれていって機能しなくなるという構造です。細胞とはそういうことが必要なシステムであるということです。

だから私は細胞内でコンパートメントが細胞骨格によってどういうふうに使われ、分裂、融合されていくかというメカニズムをとにかく知りたい、そういう系を組みたいんです。

コンパートメントをつくり上げている膜の基本は脂質とタンパク質です。その2つを何とかすれば生体膜の基本の性質が出てこないかということ、我々は考えているわけです。我々が取っているアプローチは、そんな複雑なものはなかなか扱えないので、できるだけ簡単なものということで、脂質分子を水のなかで溶かします。すると先ほどの細胞のコンパートメントのモデルを作ることができます。このモデル小胞をリポソームといいます。

リポソームは溶液のなかの形を見ても、決して丸いというものではなくて、わりに幾何学的な対称性のある構造を持っています。チューブ状だったりチューブが枝分かれしたようなものもありますし、あるいは赤血球を横から見たような形のものもあります。細胞のなかにあるコンパート

メントは機能と構造の間に非常に高いコリレーションがあるのですが、脂質自体がいろいろな形を取り得るキャパシティを持っているということです。だから生き物というのは、おそらくこういうまい物性を利用して、膜形態と機能をレギュレートするということで現在があるのではないかと。脂質はただのマテリアルではないわけです。いろいろな形態を変化することもできるし、その形態変化をレギュレートすることもできます。

一方、実験では、膜だけでもかなり高いキャパシティを持っていると言いましたけれども、その膜のなかに細胞骨格を入れていったらどうなるかという実験を今やっています。先ほどの膜だけのときの変化だったのですが、そのなかにたとえば骨格を入れるともっと複雑な形になります。細胞のモデルみたいなものを作りたいのですが、細胞骨格自体はいろいろな方向に伸長してゆくの素人に見せた時には、これは細胞だと言ってもわからないぐらい形は似ているわけです。これからは、こういうプリミティブなシステムをどんどん複雑にしていこうかなと思っています。

また、膜とアクチン繊維がインタラクションするためには、非常にたくさんの蛋白質が必要です。細胞の外からインフォメーションを細胞のなかに伝えるためにも複雑システムを使っています。生体構造でおもしろいところは超多体問題であると言いたい。

そして一つの蛋白質をみても超多体問題の一種です。また蛋白質が何ものかを識別するために立体的に相手を見分けるという方法を取っているわけです。だけど、立体的にと言ってもタンパク質にはほとんど幾何学的規則性がないわけです。タンパク質は1万個とかたくさんの原子の集まりですから、そのダイナミクスを調べてやろうとしたらなかなか大変だということです。

言いたいことは、このような超多体問題で、さらにそれぞれのレベルで超多体問題が入れる構造になっている。しかも1個自体が意味を持つようなシステムをどう記述するか。このような問題の解くカギを開発していただけると非常にありがたいと思っております。

## 5.6 虫型探索システム：BUGS（電子技術総合研究所）

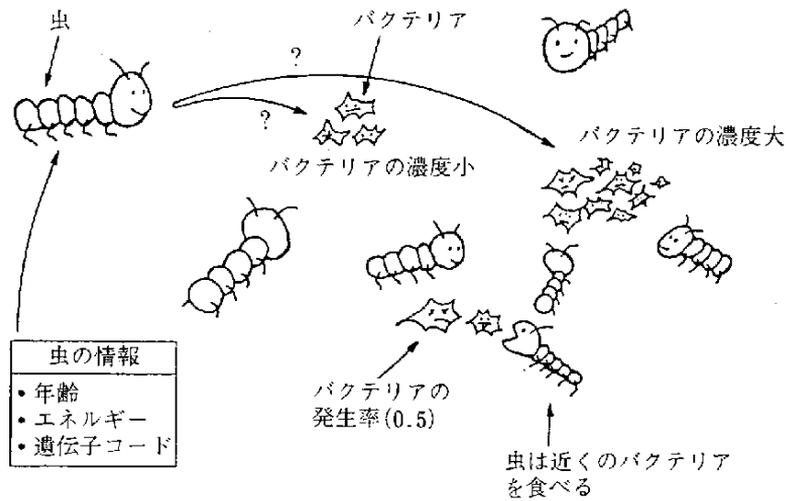
動物は栄養となるものを何でも食べているのではない。魚などの餌選択行動を観察すると、豊富に餌が手に入るときには特定の餌だけを選んで食べるが、餌が少なくなると選択の幅を広げて何でも狙うことがしばしばある。このように、餌の豊かさに応じて選び方を変えるのは、経済的に効率のよい行動と考えられる[Iba 92b]。

電総研推論研究室では、このような動物の捕食行動の最適化数理モデルを応用して虫型探索システムBUGS (A Bug-Based Search Strategy using Genetic Algorithms) を構築した。BUGSは、遺伝アルゴリズム (Genetic Algorithms, GA) を拡張した新しい探索手法であり、最適化すべき関数値と虫の餌となるバクテリアの濃度というアナロジーを用いて適応的な探索を実現する。その意味でBUGSは人工生命 (Artificial Life, 以下AL) の工学的応用を目的としている。

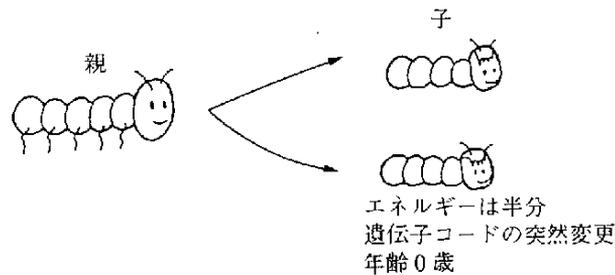
従来のGAでは、探索の際の様々な問題 (探索が極値に陥ることや高次元の探索の困難さなど) が指摘されていた。BUGSでは、生物のアナロジーを採り入れることでこうしたGAの問題点の克

図表5.6.1 BUGS と GA との比較

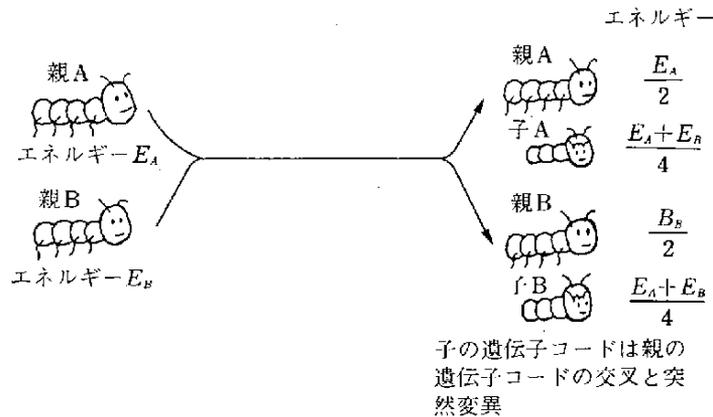
	BUGS	従来の GA
適合度の計算	探索空間の位置の関数	探索空間の位置の関数
GA の対象	探索空間の方向	探索空間の位置
選択の基準	エネルギー	適合度



(a) バクテリアを食べる虫たち



(b) 無性生殖

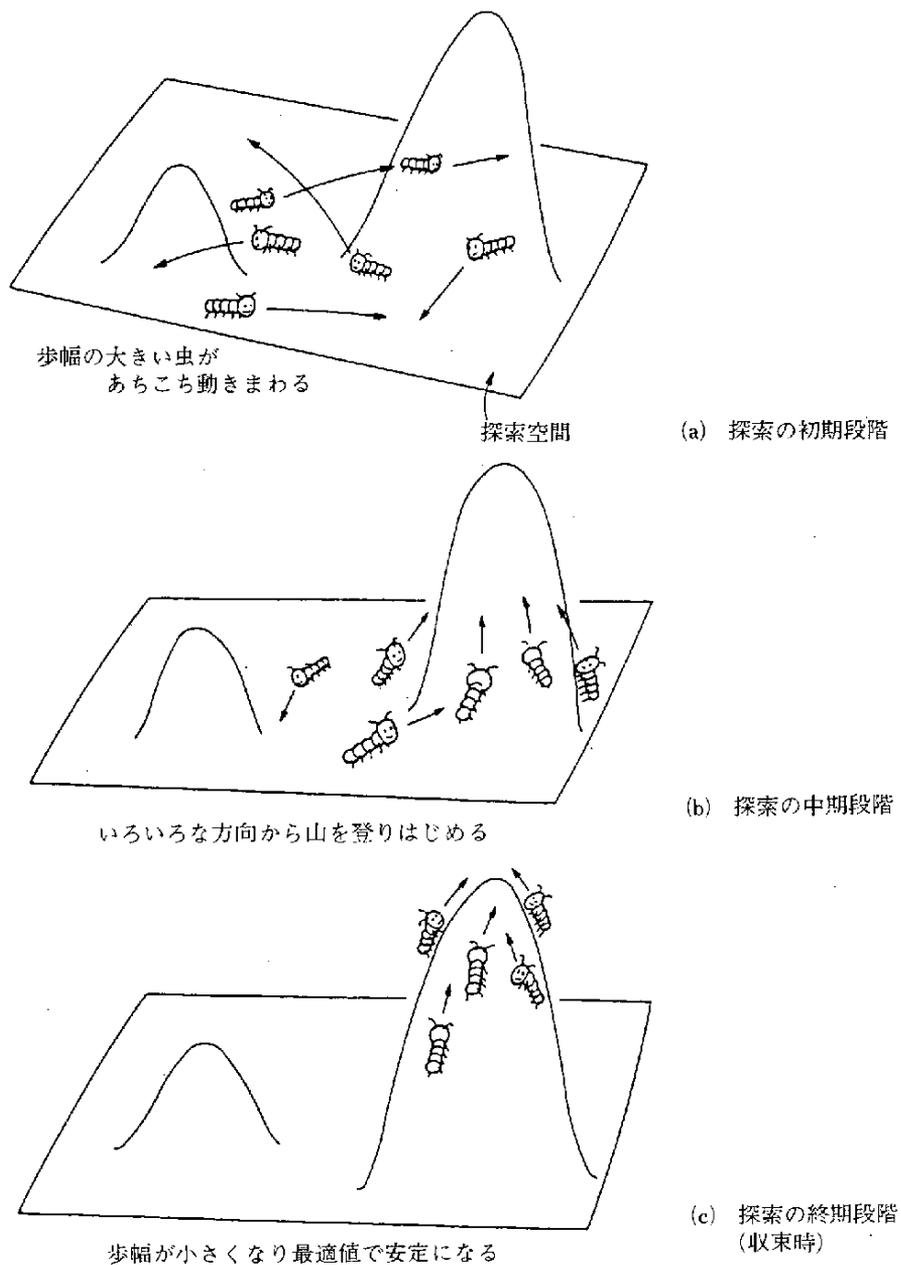


(c) 有性生殖

図表5.6.2 虫のイメージ

服を試みた。BUGS と従来の GA との違いを (図表5.6.1) に示す。主な違いは GA の目標と、選択基準 (energy v.s. fitness) にある。これらの違いは通常の適応的な GA 手法と局所探索を統合するために重要な役割を果たす。

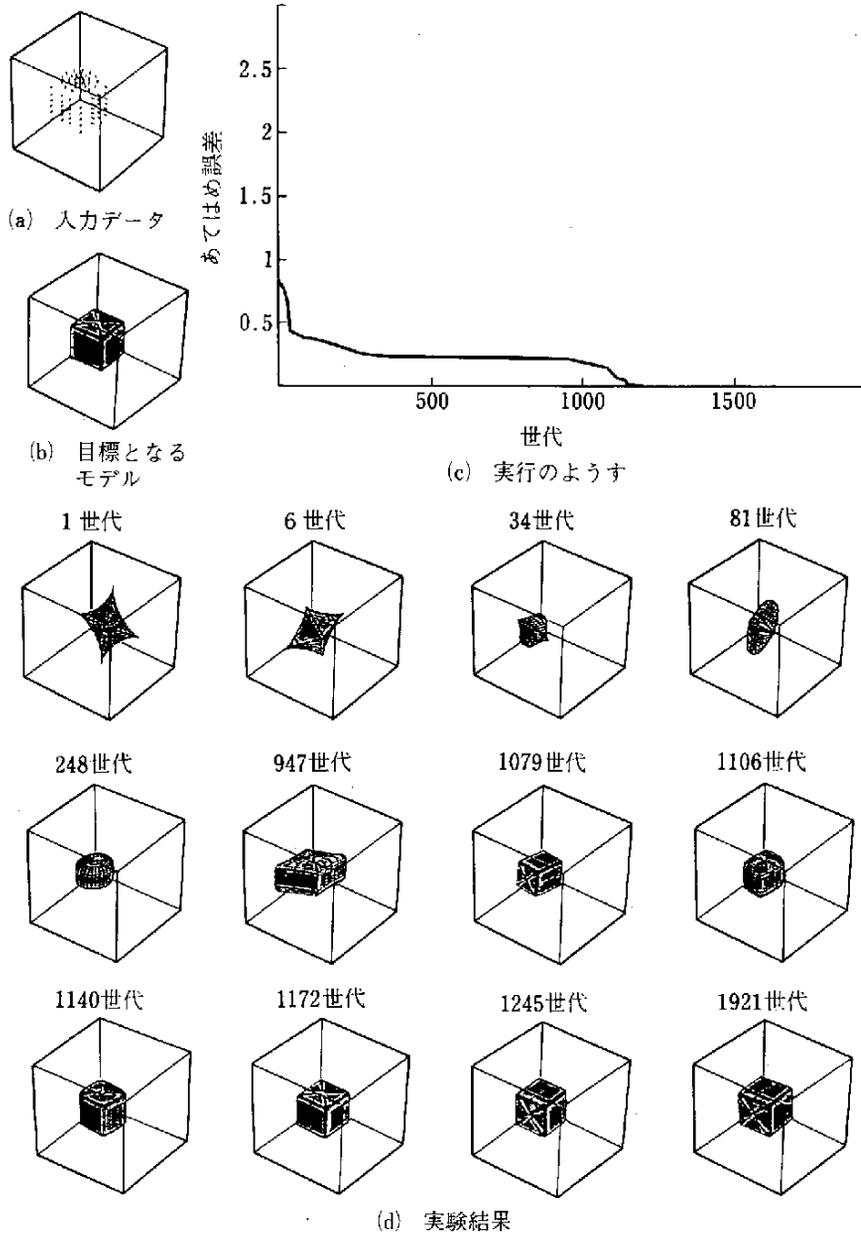
BUGS で扱う人工的な虫のイメージと生殖を図表5.6.2 に示す (詳細は [Iba 93] を参照されたい)。本システムで進化する虫は、餌のバクテリアの濃度が高い領域を探索し、このことを通して最適値探索を実現する (図表5.6.3)。この手法は適応的探索と山登り法を組み合わせたものであり、従来の GA 探索に伴う局所探索能力の欠如を補う。また資源の競合や棲み分けといった生物学的概念が自然な形で導入でき、実際的な応用に適用可能である。我々は、最適化問題やコンピュータ・ビジ



図表5.6.3 虫による探索の進行

ヨンの問題解決に適用することでBUGSの有効性を確認した(図表5.6.4)。さらに他の手法との比較を通して、BUGSの探索能力について明らかにした[Iba 92a, 伊庭 93]。また最近では、BUGSをTSP(巡回セールスマン問題)などの組合せ問題に応用する試みもなされている[嘉数 94]。

ALはややもすると趣味的で芸術的な分野としてとらえられがちであるので、工学的側面を強調することがALの学際的な面を生かしたより実りのある研究につながると考える。その意味で、BUGSはALの工学的応用の1つとして、自然の問題解決に近いシステム(Problem Solving from Nature)の構築を目指すものである。



図表5.6.4 立方体のモデルの獲得実験

## 〈参考文献〉

- [伊庭 93]伊庭齊志, 佐藤泰介: 遺伝アルゴリズムを拡張した虫型探索システム: BUGS, 人工知能学会誌, vol. 8, no. 6, 1993
- [嘉数 94]嘉数侑昇: 社会性生物に基づく探索, 人工知能学会誌, vol. 9, no. 4, 1994
- [Iba 92a]Iba, H., Akiba, S., Higuchi, T. and Sato, T.: BUGS: A bug-based search strategy using genetic algorithms, ETL-TR92-8, also *Proc. 2nd Workshop on Parallel Problem Solving from Nature (PPSN92)*, North-Holland. 1992.
- [Iba et al. 92b]Iba, H., and Higuchi, T.: Evolutionary Learning of Predatory Behaviors Based on Structured Classifiers, ETL-TR92-34, In *Proc. of 2nd International Conference on Simulation of Adaptive Behavior (SAB92)*, 1992.
- [Iba 93]Iba, H., Higuchi, T., deGaris, H. and Sato, T.: A bug-based search strategy for problem solving, ETL-TR92-24, also *Proc. 13th Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence (IJCAI93)*, 1993.

## 5.7 細胞もどき (電子技術総合研究所)

本節では、電総研の稲吉が取り組んでいる「細胞もどき」(文献[1], [2], [3])および、彼の提唱する“flowism”(文献[4])の2つを順に紹介する。

### 5.7.1 細胞もどき (“Cell-oid”) について

これは、多細胞生物に見られる現象である、細胞間の局所的相互作用を通じた細胞集団全体の大域的秩序が創発する現象の人工的再構成を口指した、現在進行中の研究である。すなわち、部品として細胞もどき (Cell-oid) を設計し、それらを集団として相互作用させることにより、有機体もどき (Organism-oid) の出現を目指す。この研究は “Celloid for Organismoid” と名付けられ、Reynoldsの「鳥もどき (“Bird-oid”）」(文献[5])に触発されたものである。ちなみに細胞もどき研究の最終目標は、「神経細胞もどき」による「脳もどき」構築である。すなわち、「生物脳の構造/機能がその部品である神経細胞の集団的相互作用を通じて創発する現象」であることの人工的再構築を口指す。

細胞集団で見られる「大域的秩序の創発する現象」として、

- ① 昆虫等の剛毛発現過程
- ② 細胞集団サイズの自己調節 (増殖制御)

の2つが選ばれ、前者に関しては人工的再構成に成功し、後者は現在、モデルの検証中である。以降でこの2つを順に紹介する。

(1) 昆虫等の剛毛発現過程にみられる秩序形成の人工的再構成 (文献[1], [2], [3])

再構成の目標とする現象は、図表5.7.1上のような現象である。すなわち、昆虫等の剛毛発生過程

では、剛毛の空間分布パターンに規則性を示す。この規則性は、まわりに剛毛が発現していないところに最新の剛毛が現れるものである。これに剛毛の新陳代謝（発毛&脱毛）を加えて、単純なパターンである剛毛の発毛分布パターン（Spacing Pattern）をコンピュータ上で人工的に再現させてみることを目標とした。

具体的には、図表5.7.1下に示すように、「細胞もどき」（以後「細胞」と略記）を2次元格子状に並べ、各細胞に、剛毛の{発毛中/脱毛中}の二者択一を行わせる。細胞集団をマクロレベルで見ると発毛中の細胞の分布が常に規則性を示す系を目指す。

これを実現させるための「細胞間相互作用のからくり」として導入されたのが、“Artificial Genetic Network (AGN)”である。(AGNの詳細は文献[1], [2]参照。)

図表5.7.2に実験結果の一例を示す。上段は対照実験(まわりとの相互作用なしに各細胞が自分勝手に{発毛中/脱毛中}の2状態間の確率的遷移を行った場合)に対応している。つまり、上段が「相互作用なしの場合」、下段が「AGNによる相互作用ありの場合」である。実験は縦100\*横100の1万細胞で行った。図表5.7.2は、各々は、「3通りの時刻での発毛分布のスナップショット」を示す。

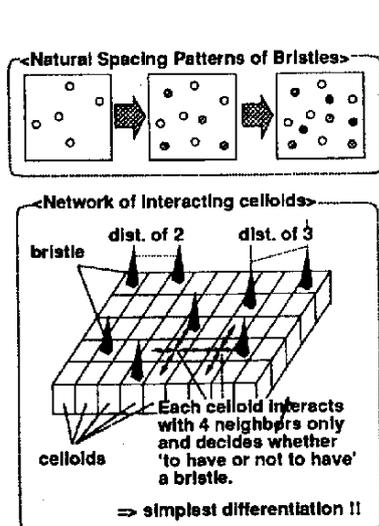
この図から、細胞もどきにAGNによる相互作用を導入することにより、この相互作用がない場合よりも高い秩序(剛毛の空間分布の規則性)が集団に“出現”したことが判る。

## (2) 細胞集団サイズの自己調節(増殖制御)(文献[4])

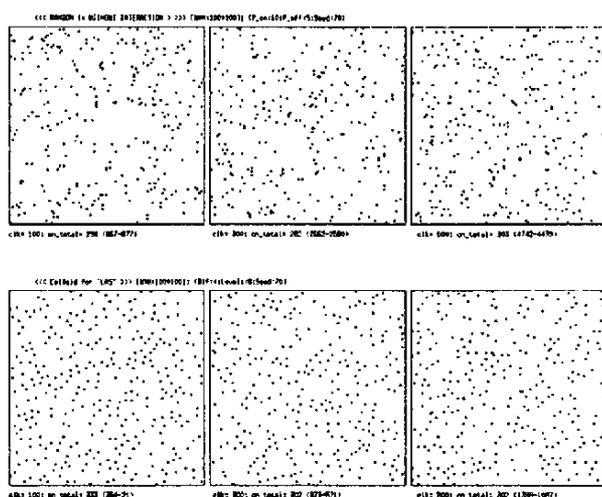
細胞の増殖と分化は個体維持の最も基本的な活動である。特に増殖に関しては、これが適切に制御されることなしには、細胞集団の調和がありえない(cf, ガン細胞)。

そこで細胞増殖に関して、図表5.7.3のような振舞いを示す系の構築を目標とする。すなわち、

- ① 細胞集団サイズがあるレベルに到達するまでは細胞増殖し、到達時以降は増殖停止する、および

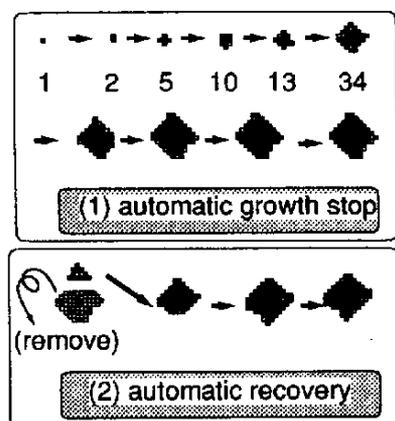


図表5.7.1 目標となる剛毛の空間分布の規則性(上)および、細胞もどき集団の概念図(下)



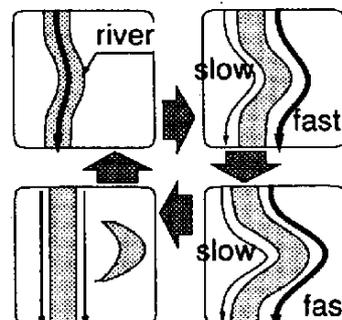
図表5.7.2 3つの時刻における発毛分布のスナップショット(上=相互作用なし, 下=相互作用あり) 剛毛の本数は左から順に、290, 282, 303(上) 333, 302, 302(下)

<Growth Control in growing cells:



図表5.7.3 目標となる増殖制御振舞い

<water flow vs. river shape:



図表5.7.4 「水の流れ」と「河川の形状」間の相互作用

② なんらかの外乱により細胞集団の一部が破壊／脱落しても、もとの細胞集団サイズまで再増殖により回復する、  
という振舞いを示す系である。

上記の振舞いを実現させるためのからくりとして「民主的制御」による「大統領制」を導入した。このモデルとして、「3スタックモデル」を考え、(詳細は文献[4]参照)、現在実験検証を行っている。

### 5.7.2 “flow-ism” の提唱

自然界では次のような現象が見られる。

- ・「水」が「河川」を流れる……「河川の形状」が「水の流れ」に影響を与え、同時に「水の流れ」が「河川の形状」を変化させる。(すなわち図表5.7.4に示すように、河川に蛇行した部分があると水流はそれに応じて流れるとともに、河川の形状を徐々に変化させる。)
- ・「物質」が「細胞集団」内を流れる……「各細胞の状態 (e.g. 発現中の遺伝子集合)」が「物質の流れ (=物質代謝)」に影響を与え、同時に「物質の流れ」が「各細胞の状態」を変化させる。
- ・「情報」が「神経細胞集団」内を流れる……

このような、「流れ物体=実際に移動する実体」と「流れ媒体=流れを通す実体」間の相互作用が重要でありこれに着目すべきである、という主張が“flow-ism”の提唱である。(前項の「3スタックモデル」および前前項の「昆虫等の剛毛発現過程に見られる大域的秩序の出現現象」でのAGNを通じた相互作用は、この点で共通している。つまり、各細胞もどきの内部状態に応じて、(遺伝子産物等の)細胞間相互作用物質の流れが形成されると同時に、細胞間相互作用物質の流れが各細胞もどきの内部状態を変化させる。

#### <参考文献>

- [1] Inayoshi H.: "Simulating Natural Spacing Patterns of Insect Bristles Using a Network of Interacting Celloids", 'Artificial Life IV' (MIT Press) pp. 295-300. (1994).
- [2] Inayoshi H.: "Artificial Spacing Patterns in a Network of Interacting Celloids", 'Parallel Problem Solving from Nature III' (Lect. Notes in C.S. No. 866. Springer-Verlag) pp. 365-374. (1994).
- [3] 電総研ニュース533号 (1994.6) pp. 8-13.
- [4] 稲吉宏明, 情報処理学会第50回全国大会 (1995)
- [5] Reynolds C.W., "Flocks, Herds, and Schools: a Distributed Behavior Model", in Computer Graphics 21(4), pp. 25-34, (1987).

### 5.8 進化するハードウェア (電子技術総合研究所)

電総研計算機構研究室では、進化するハードウェアの研究を進めている。これは人工生命の目標の一つである自律的なシステムを構築する上での基盤的技術となることを目的としている。具体的には、プログラム可能型論理素子 (Programmable Logic Device; PLD) のハードウェア技術と遺伝的アルゴリズム (GA) とを組み合わせたものである。

進化するハードウェア (Evolvable Hardware; EHW) は、環境に応じてハードウェア構造が自ら進化することを目的として、PLD上の論理回路を、GAを用いた学習で再構成していく。PLDは、ハードウェア構成を指定するビット列であるアーキテクチャビットをダウンロードすることによって様々な論理回路を構成できる。EHWでは、このアーキテクチャビットを染色体と見なしてGAにより、環境に最適なアーキテクチャビット、つまりハードウェア構成を見つけ、そのとおりに回路を再構成する。

EHWの特徴は、学習の結果がハードウェア構造自体で表現されるため実行時間が極めて速いと共に、再構成をダイナミックに (学習と回路動作が並行する) 行うための適応型アーキテクチャを構築するための基盤技術となりうる。

このようなEHWの特徴を生かした応用として現在取り組んでいるのは、ニューロ的なパターン認識器を目指す研究と、故障時にも回路を再構成できる適応的アーキテクチャの研究である。後者は、V溝トレーサと呼ぶ溶接ロボットの一部として実装されつつある。本稿では以下これら2つの応用システムについて述べる。

#### 5.8.1 ニューロ的なパターン認識器

パターン認識ではノイズが加わり不完全な入力パターンでも、学習済みのパターンとの類似性から正しく識別する機能が必要である。これは引き込みと呼ばれ、ニューラルネットワークの特徴的機能であるが、これをEHWによって実現したい。

図表5.8.1 学習パターン

X	Y	Z
000	000	0
000	111	1
111	000	1
111	111	0

$$Z = X\bar{Y} + \bar{X}Y$$

$$X : (X_2 X_1 X_0)$$

$$Y : (Y_2 Y_1 Y_0)$$

図表5.8.2

EHWのパラメータ

集団サイズ	50
染色体の長さ	104
交叉率	50%
交叉型	2点交叉
突然変異率	0.5%

図表5.8.5

CSのパラメータ

集団サイズ	400
交叉率	50%
交叉型	1点交叉
突然変異率	0.5%
報酬	1000
誤り減衰率	80%
ワイルドカード	
バイアス	4

図表5.8.3

ANNのパラメータ

学習率	0.5
モーメント	0.3
中間層数	1
中間ノード数	2

図表5.8.4 ALNのパラメータ

入力カード数	16
ノード型	AND, OR, LEFT, RIGHT

一般的なパターン認識問題を扱うためには、2次元特徴空間で非線形分離可能なパターンを識別できることが必要条件である。この非線形分離可能性を調べる典型的な問題は XOR 問題であり、以下では EHW による XOR の学習と引き込みのシミュレーション結果について述べる。

#### (1) 実験の概要

EHW に図表5.8.1の XOR 問題を学習させる。入力に加わるノイズを表現するため、入力値を3ビットで表わす。学習完了後、学習パターンから入力値を1刻みで変化させたときの EHW の出力値を調べるにより特徴分離面（決定表面）を求める。

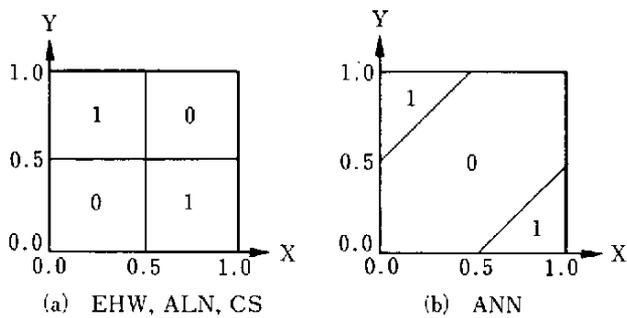
比較のため、他の学習アルゴリズムである ANN (Artificial Neural Network), ALN (Adaptive Logic Network), CS (Classifier System)についても同様の学習を行う。CSについては BOOLE を用いた。

#### (2) 実験結果

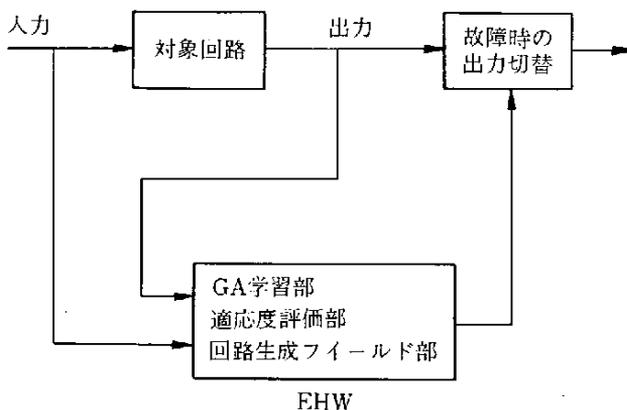
各学習アルゴリズムのパラメータを図表5.8.2~5.8.5に示す。学習完了後も理想的な決定表面が得られるまで学習を繰り返した。10回実験を行い、EHW, ALN, CSはそれぞれ平均1204,299,484世代で図表5.8.6(a)の決定表面を得た。ANNはBPで10,000回の学習で図表5.8.6(b)の決定表面が得られた。なお各アルゴリズムにおける1世代の処理量は異なるため、世代数の差は処理時間の差を示すわけではない。EHW, ALN, CSが同じ決定表面となったのはこれらが同一の論理関数を学習したためである。つまり  $Z = X_2\bar{Y}_2 + \bar{X}_2Y_2$  であり、この関数は入力の最上位ビット  $X_2, Y_2$  間の XOR であり、これらのビットのみがパターン認識に関係した場合に理想的な引込が行われることを示す。このことは図表5.8.6(a)の決定表面の境界が  $X_2, Y_2$  の値が変わる境界と一致することからもわかる。

### 5.8.2 適応型システムの構築

EHW を用いて故障や環境の変化にも対応できる適応型システムの構築を目的として、現在 V 溝



図表5.8.6 実験で得られた決定表面



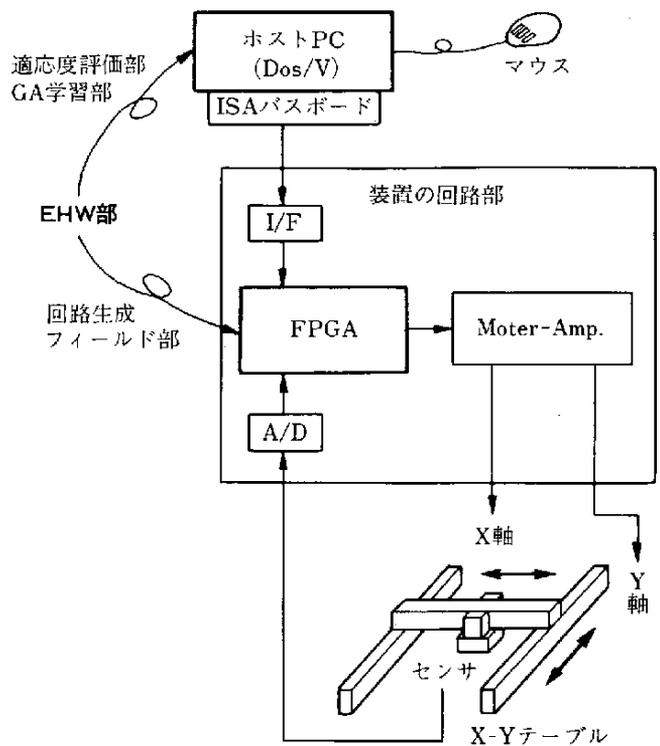
図表5.8.7 補償回路

トレーサと呼ぶ溶接ロボットの一部を作成している。目的は EHW によって故障時に動的な回路の置き換えが可能になることを示すことである。その基本となるのは EHW を用いた補償回路のアイデアである。これを図表5.8.7に示す。

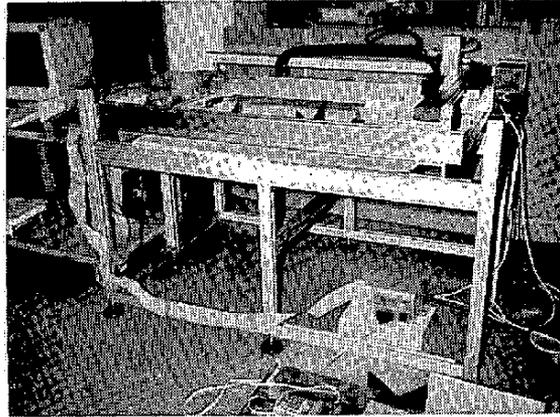
EHW は図表5.8.7に示すように GA 学習部、適応度評価部、回路生成フィールド部の3つから成っており、対象回路の入出力パターンを繰り返し学習することによって、回路生成フィールド上に、対象回路の入出力を満足する回路を構築する。もし対象回路が故障すると、対象回路の出力を EHW と置き換えることでシステムを正常な状態に保つことができる。このような動的な再構成能力をハードウェア自体に持たせることによって、宇宙や深海における計算機回路など、一度地上を離れたら手の届かない環境下での耐故障性を実現することが将来可能になるとと思われる。

図表5.8.8はV溝トレーサの概要を示すものである。これはV字状の断面を持つ対象物の底部を長さ方向にトレースするもので、自動溶接ロボットの開先制御に使われている溶接線検出法の原理を簡略化したものである。図表5.8.9は現在構築中のシステムの外観であり、1995年4月の完成を予定している。

EHW はこのシステム中で溝の中心部を見つけるためのコンパレータ回路のバックアップとして機能し、このシステムでは主回路を意図的に故障させ、EHW による動的な適応可能性を実験することができるように設計されている。EHW の実現は Xilinx 社の FPGA (Field Programmable Gate



図表5.8.8 V溝トレーサの全体構成



図表5.8.9 V溝トレーサの外観

Array) を用いている。

進化するハードウェアは、人工生命のみならず、機械学習、パターン認識、CADアルゴリズム、ロボット制御、VLSI技術など広範囲の領域にまたがる新しい研究分野である。進化するハードウェアという言葉の響きは、その実現性に関して誤解を招く可能性があるが、ハードウェア化を常に前提としている以上、実証的なアプローチをとらざるをえず、その点で、しばしば人工生命の弱点とされる工学的応用の見えにくさを克服するものとも言える。

### 5.9 適応行動の自己組織化と進化（奈良女子大学理学部 Jari Vaario 研究室）

本研究では、細胞構造の自己組織化モデルの構築を目指している。基本的な考え方は、自己組織化と進化を別々の適応戦略と捉え、両者が機能的かつ密接に関わることによって生物の適応行動が生ずるものとする考え方である。

その第一ステップは、適応行動の自己組織化実験のためのシミュレータを構築することである。このシミュレータは、ネットワーク化された複数のワークステーション上に構築され、2次元および3次元の環境モデルと細胞モデルから構成される。環境モデルは細胞モデルに対してある種の勾配系を提供する仮想環境である。細胞モデルは遺伝情報を翻訳し環境での表現（細胞膜）を制御する。すなわち、遺伝情報は、翻訳されることにより細胞の環境での表現特性を変化させ、さらに、攻撃・反撃など他の細胞との相互作用を作り出す。

細胞群は安定な形態をもたらす平衡状態に落ちつき、この状態において、ある細胞は神経細胞となり、他の細胞や感覚系（センサ）や筋肉系（エンドエフェクタ）へと接続を伸ばす。そのようにして、次第に生物の構造が形成され、他の生物と相互作用（すなわち、個体レベルの行動）するようになる。環境は生物の形態や行動に直接的に影響を与え、上記の進化的な選択／排除機構を合わせ持つ自己組織化のプロセスを通して、個体の機能適応や行動適応が実現される。

### 5.9.1 自己組織化の原理

生体システムにおける適応性とは、創発的な現象である。つまり、複数の単純な要素各々が局所的な行動規則を実行することによって、複雑なシステムの現象が自己組織化されるのである。このようなシステムの分析的な記述は困難である。そこで、計算論的シミュレーションが自己組織化プロセスのモデル構築に役立つ。

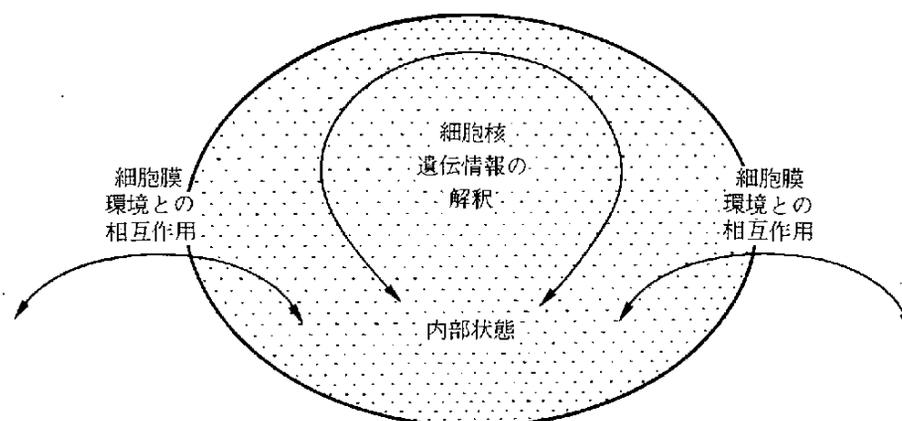
本研究では、最小単位の要素として細胞を選んだ。行動規則は、細胞核が扱う規則（遺伝情報の書換えのような内部的相互作用に関する規則）と細胞膜が扱う規則（機械的、化学的な現象に関する規則）に分けられる。行動規則は細胞の内部的状態を変化させる。この様子を図表5.9.1に示す。

発育過程での適応のメカニズムを見つけることは重要である。環境の変化に対する遺伝的变化は、適合した個体を見つけるために多くの不適合個体を無駄にするといった意味で、多くの資源を費やす。環境の変化に対する個体の適応能力が存在すれば、迅速な再生が可能になるであろう。本稿では、この種の適応性がどのようにモデル化できるかを示す。

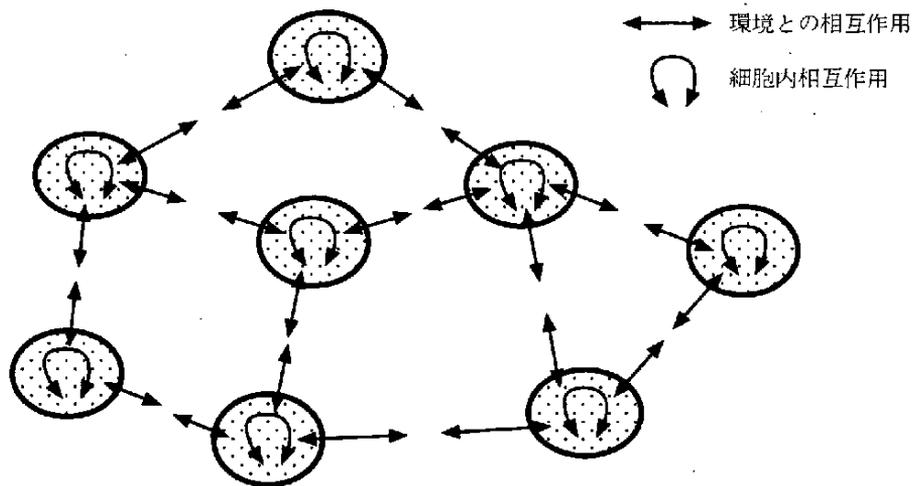
本研究では、多細胞生物が局所的な行動規則に基づいてどのように自己組織化を行なっているのか、どのようにして異なったレベルで大域的な行動が創発されるのかを説明する。すべての相互作用は環境の中でのものなので、得られたシステムは環境の変化に最も適応したものとなる。なお、適応の程度は遺伝情報によって制御され得る。

細胞分裂によって発生した細胞は類似した生成規則を持っているため、同一の環境変化に対して基本的に似たような相互作用を示す。したがって、複数の細胞は結合を持ち相互作用を持ったネットワークを構成する。図表5.9.2にその様子を示す。

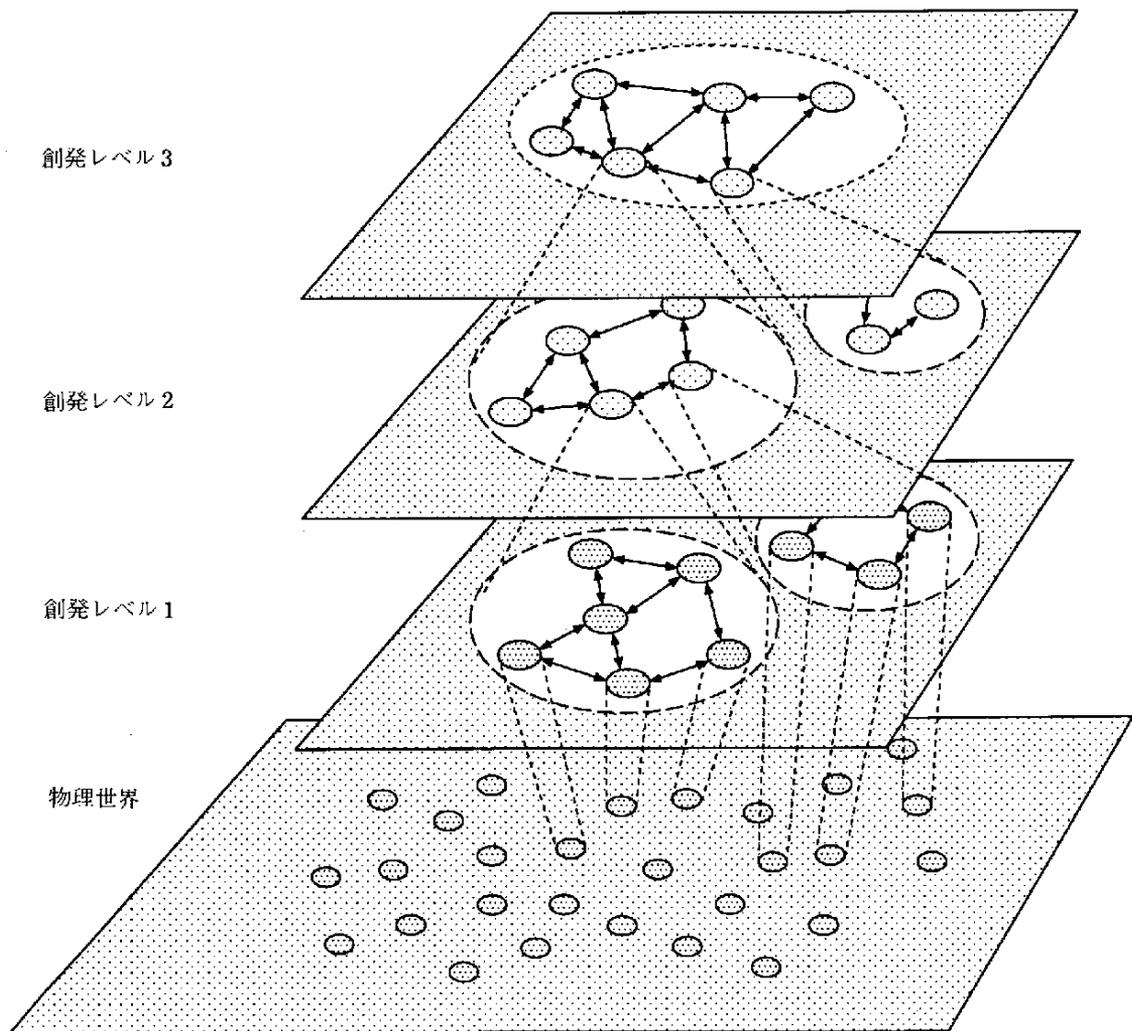
ネットワークを構成した細胞の中には、環境の変化を識別し反応を示すようになるものかもしれない。すると、いくつかのネットワークは互いに結合を持つようになってくる。このようにして、システムはさらに上位の階層を創発するようになる。その様子を図表5.9.3に示す。



図表5.9.1 基本的なモデル要素である細胞。生成規則は二つのタイプに分かれる。一つは細胞機械が処理する遺伝情報に関する規則で、もう一つは細胞膜が処理する環境との相互作用に関する規則である。これらは両方とも細胞の内部状態を変化させる。[ワーリオ1994a]



図表5.9.2 細胞は互いに結合を持ちネットワークを作る。細胞間の相互関係は直接定義されているのではなく、環境上の変化にともなって間接的に生じる。[ワーリオ1994a]



図表5.9.3 構造の創発。ある種的环境との相互作用の結果、ネットワークが構成される。これらのネットワークの要素である細胞が他の種類の相互作用を持つことによって、異なるネットワークが生じる。これは新たな階層での創発として観察される。[ワーリオ1994a]

このようなプロセスの結果、多層構造を持つ相互作用ネットワークが生じる。これらのネットワークは個体として認識され、さらには他のネットワーク（個体）との相互作用も見ることができであろう。

ここで見られる挙動はセルラ・オートマトン (CA) に似通っている。CA では構造を記述する CA のセルの状態によってパターンが形作られる。しかし、根本的に異なるのは、CA には環境と個々のセルをお互いに分離する原理がないことである。CA での環境は CA のセルの状態遷移ルールの一部としてモデル化される。このような分離を行なうことによってセルのルールを単純化するとともに、直接的な遺伝子コーディングが可能となる。

### 5.9.2 シミュレーション方法

上述のような構造の自己組織化をモデル化するためには、基本要素と環境をモデル化することになる。基本要素のモデルは内外部の状態を操作するプロダクション・ルールより構成される。環境のモデルは基本要素を動かす物理的な力をモデル化できるものでなくてはならない。したがって、基本要素のモデルでは計算能力はさほど要求されないが、環境のモデルでは非常に高い計算能力が求められる。

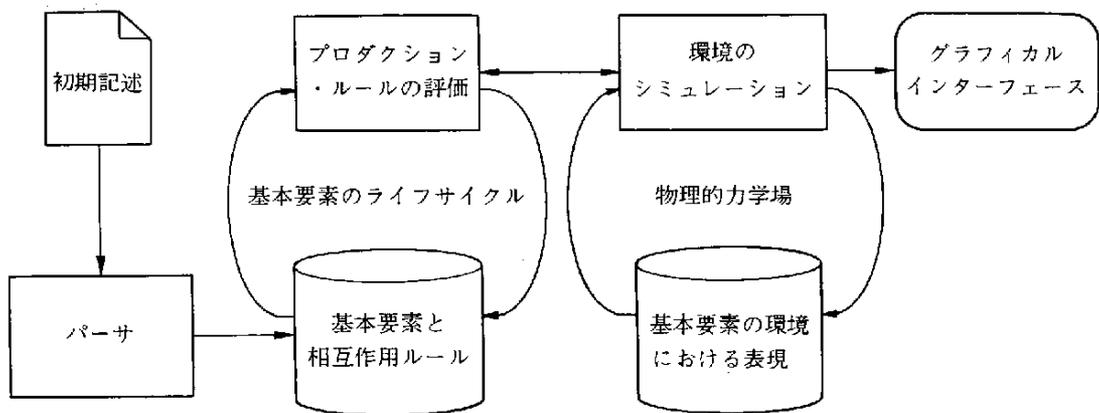
シミュレーション・システムはモデルの初期状態の生成のためのパーサより構成される。それぞれの基本要素のライフ・サイクルはプロダクション・ルールの評価により決定される。プロダクション・ルールを評価することにより、基本要素の内部状態は変更を受け、要素の分裂や死が発生する。環境のシミュレーションはモデル化した物理的な力学場（後ほど説明する）により構成される。グラフィカル・インタフェースはシミュレーションの可視化のために用いられる（図表5.9.4）。

### 5.9.3 環境のモデル

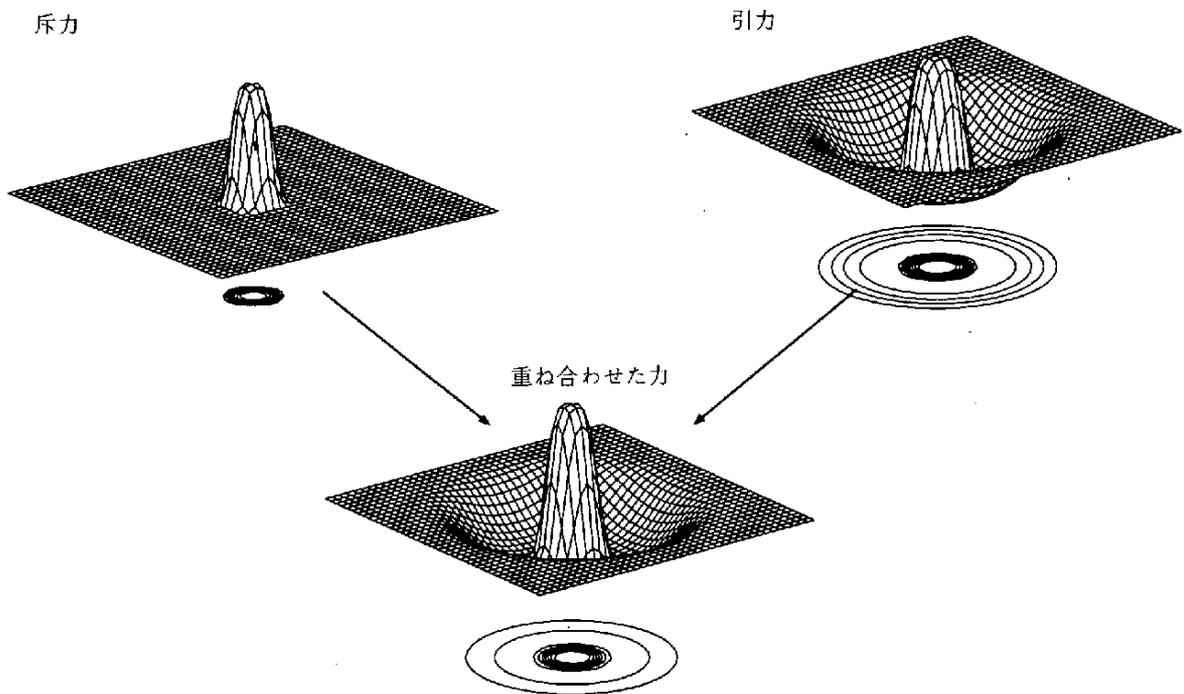
以下に述べる環境モデルは二次元で実現されたものであるが、同様にして、三次元にも拡張できる。しかし、ここでのモデル化の段階では、計算と可視化に費やす労力に見合うほどの効果を三次元モデルで得ることはできない。

環境モデルの役割は、基本要素をその特性に従って移動させる力をシミュレートすることである。基本要素の特性はそれ自身の状態や周りの環境に応じて自発的または相互依存的に変化する。そして、基本要素を移動させる力は勾配場の考え方にに基づき定義する。

この考え方は、Fleischer と Barr (1994) による類推的な手法よりも優れている。すなわち、物理的な力のモデル化に勾配場を利用することは解析的な試みよりもいくつかの利点がある。まず第一に、すべての力に対して基本的な考えを共通化でき、その実現も容易にすることができる。第二に、ある地点での勾配場の計算も容易でかつ高速である。第三に、複数の部分からなるオブジェクトに働いている力は各部の力の合計になる。この点は形が動的に変化する我々の研究にとっては特に重要なものである（図表5.9.5）。



図表5.9.4 環境がプロダクション・ルールから分離されているシミュレーション・システムの基本動作 [ワーリオ1994d]

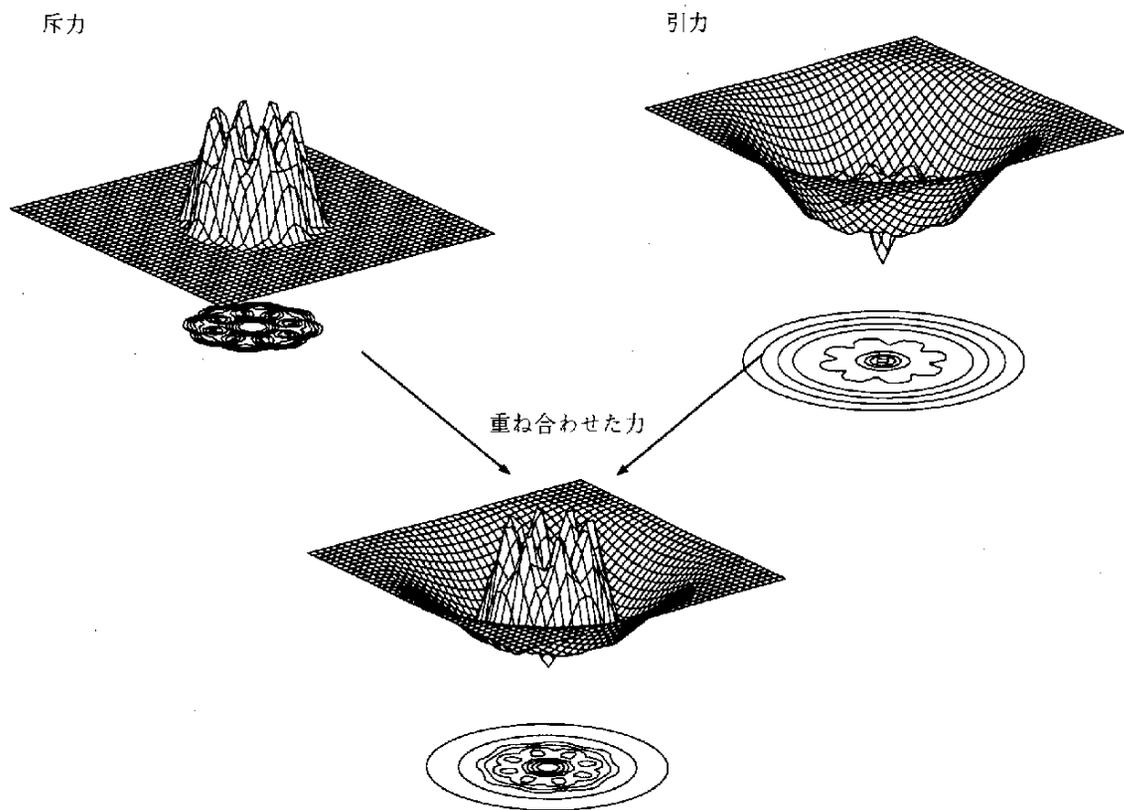


図表5.9.5 重ね合わされた斥力と引力

オブジェクトの結合は引力によって実現される。図表5.9.6には8個のオブジェクトの勾配場が示されている。それぞれがお互いに引き合い、その結果として形作られた構造が示されている。生成されたシステムに働く力はそれぞれの部分の力の重ね合わせとなる。

#### 5.9.4 生命的な行動

ここでは、いくつかのモデル化の可能性について簡単に説明する。それらの例はトップダウンとボトムアップの手法として分類できる。トップダウン的手法は、たとえば個体レベルでの相互作用を最初から与えるなど、初期状態の明示的な定義を暗に意味している。ボトムアップ的手法では、



図表5.9.6 8個の細胞の斥力と引力の重ね合わせ [ワーリオ1994d]

形態は基本要素レベルの相互作用に基づいて形成されると考える。この場合、個体レベルの相互作用は基本要素の相互作用の結果として創発的に現れてくる。ボトムアップ的手法の方がより生物学的であるが、生命のような行動を司ることは非常に難しくなる。

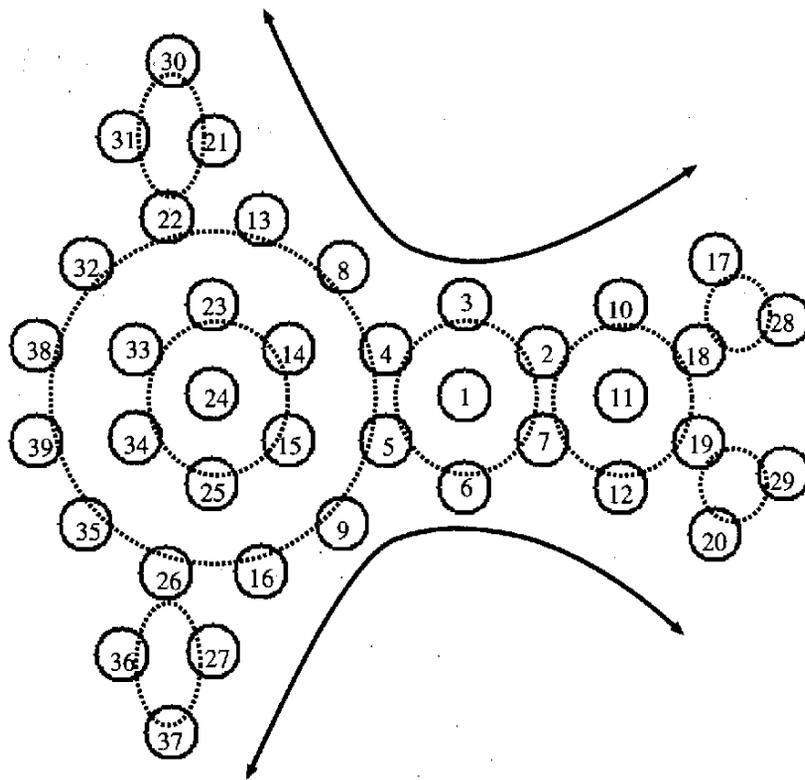
以下に例を説明するが、これらの詳細は[Vaario 1994b, c, ワーリオ1994d]に述べられている。基本要素は細胞であり、神経細胞（ニューロン）として分化し、最終的には環境での行動を司ることのできるニューラル・ネットワークを形成する。

(1) 構造の創発

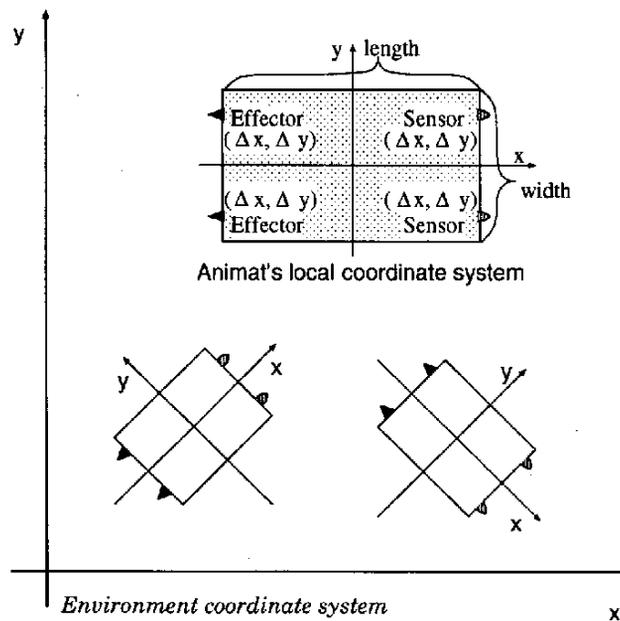
この例では多細胞の分割に基づいて個体がいかに形作られるかを示す。構造は分割の方向と細胞を遠ざけたり引き付けたりする環境の力学場によって決定される。分割の順序は遺伝情報として明確に与えられるが、進化によっても獲得することができるはずである。進化による獲得は今後の課題である。

図表5.9.7の例では、8個の粘着場が安定した形態を形成するために用いられている。この形態は連続的な分割と細胞分化の結果である（詳細は[Vaario 1994c]を参照）。粘着場は遺伝情報と細胞の系譜情報に従って細胞により生成される。

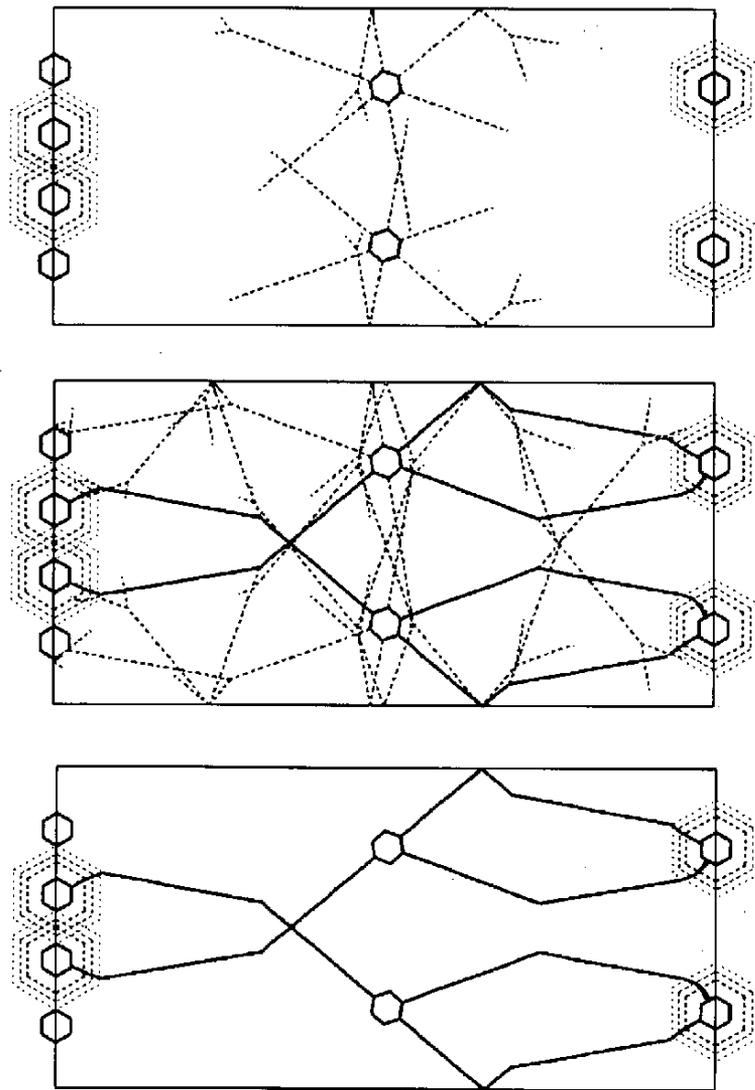
この例では信号の伝搬を含んでおらず、形態の形成を示しているだけである。結合ネットワークを形成するために、ある細胞（32, 35, 38, 39, 18, 19, 28, 29）は分化して受容器となり、ある



図表5.9.7 生成された構造。安定した粘着グループは楕円で示されている。筋肉の伸張と湾曲（一個の筋細胞の拡張と収縮によって起こると考えられる）は、二個の双方向の矢印で示される。[ワーリオ1994d]



図表5.9.8 各生物はそれぞれ自身の局所的な座標系を持つ。生物の長さや幅、センサや効果器の位置はこれに関連して与えられる。[Vaario 1994c]



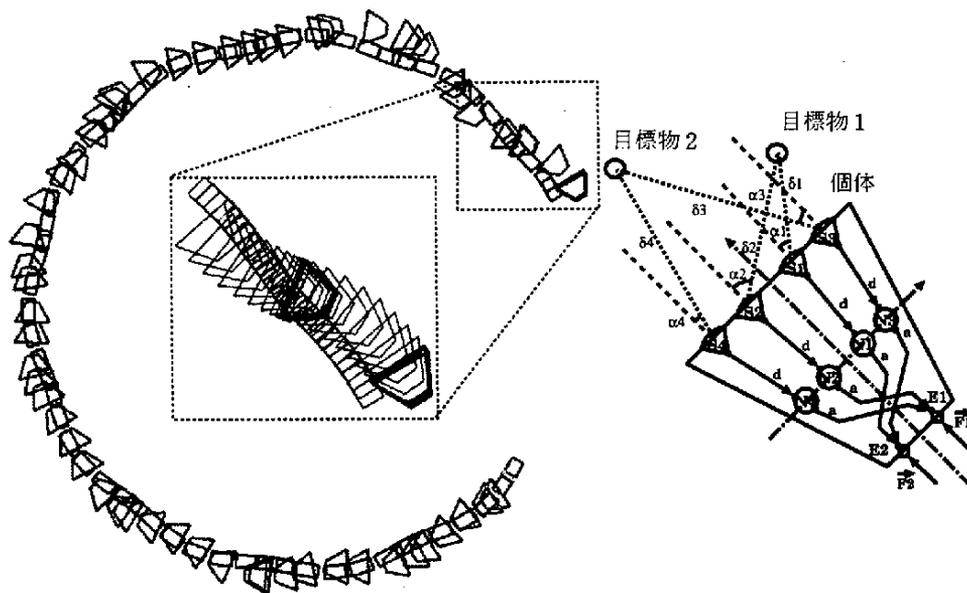
図表5.9.9 ニューロン細胞は他のニューロン、センサ、効果器を目標に接続を成長させる。枝分かれの角度は遺伝的なルールによって決定される（上）初期成長、（中）初期撤退、（下）未接続の排除など、各段階を示す [Vaario 1994c]

もの（2-4, 8, 10, 13, 17, 21, 30; 5-7, 9, 12, 16, 20, 27, 37）は筋細胞となり、あるもの（1, 11, 14, 15, 23-25, 33, 34）はニューロンとなる。意味のある行動を果たすネットワークを次節の例で示す。

## (2) ネットワークの成長

以下の例において、我々は単純化した生物モデルを用いる。どのニューロンがどのセンサ、どの効果器に接続されるかなど、細胞の位置は目標とするラベルとして明示的に与えられる。初期の記述は図表5.9.8に与えられる。未だモデル化していない計算論的な要求に依存するけれども、これらの値は上記の形態形成過程の結果である。

創りだされたネットワークの例を図表5.9.9に示す。構造的な衝突のシミュレーションや接続が仲



図表5.9.10 簡単なニューラル・ネット・システムによる目標物の追跡 [ワーリオ1994d]

びる化学的な勾配場を含む。

### (3) 行動の創発

本節の例では、追跡行動を生成するためのニューラル・ネットワークが形成される。目的とする人工物は別の人工物から感知される化学物質の場を作り出す。受容器はニューラル・ネットワーク中を伝わる信号を生成し、その信号を受けた作動器が感知された信号の強度に応じて追跡行動を行なう(図表5.9.10)。

初期記述には個体をモデル化するためのプロダクション・ルールが含まれている。ニューラル・ネットワークは細胞分裂とニューロンの成長を通してモデル化される[ワーリオ 1994a]。

### 〈参考文献〉

- ・ Kurt Fleischer and Alan H. Barr. A simulation testbed for the study of multicellular development. In C. Langton (ed.): Artificial Life III, Addison-Wesley, 1994.
- ・ ヤリ・ワーリオ, 大須賀節雄 (1994a): 知的人工物の自己組織化, Computer Today 5, 1994.
- ・ Jari Vaario (1994b) Modeling adaptive self-organization. In Brooks and Meas (eds.) Artificial Life IV, MIT Press, 1994.
- ・ Jari Vaario (1994c) From Evolutionary computation to computational evolution. Informatica, vol. 18, pp. 417-434.
- ・ ヤリ・ワーリオ, 溝口潤一, 下原勝憲 (1994d): 創発と進化, シミュレーション13, 4, pp. 302-310

## 5.10 場を用いた人工生命

本節では場を用いた方法の具体例として5.10.1で場の制御, 5.10.2で波動場を紹介し, 5.10.3では創発的学習について紹介する。

### 5.10.1 場的制御

三宅らにより場的制御の自律分散ロボットへの適用が検討されており, 引き込み現象による歩行ロボット群の協調制御の成功例が報告されている[三宅 94]。場的制御において協調動作を生成するために主要な役割を果たす性質は自己言及性と呼ばれており, 次のように定義されている。

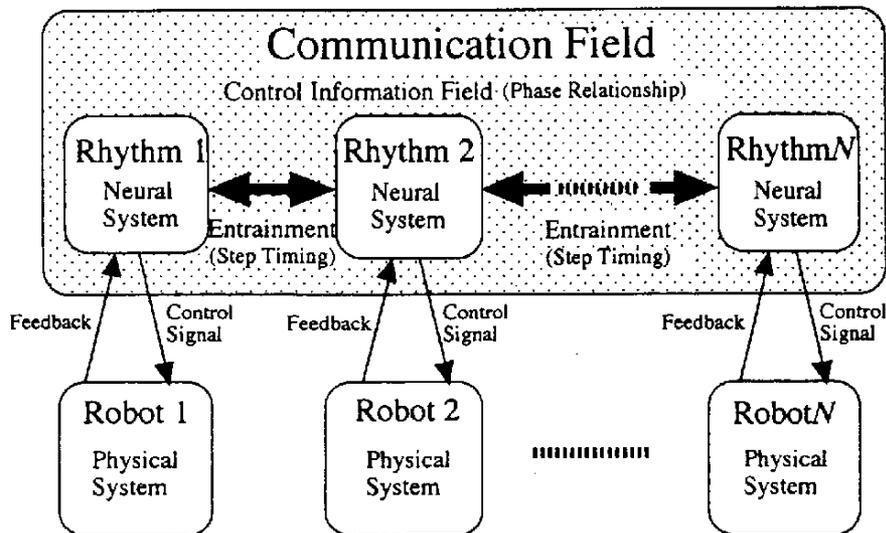
自己言及性（「場」と要素の間での情報循環）

- 1) 予め機能が規定されていない無限定な要素集団
- 2) 要素間での相互引き込みを通して「場」的信息（要素と全体の関係）の生成
- 3) 「場」的信息に基づく要素の自発的機能分化

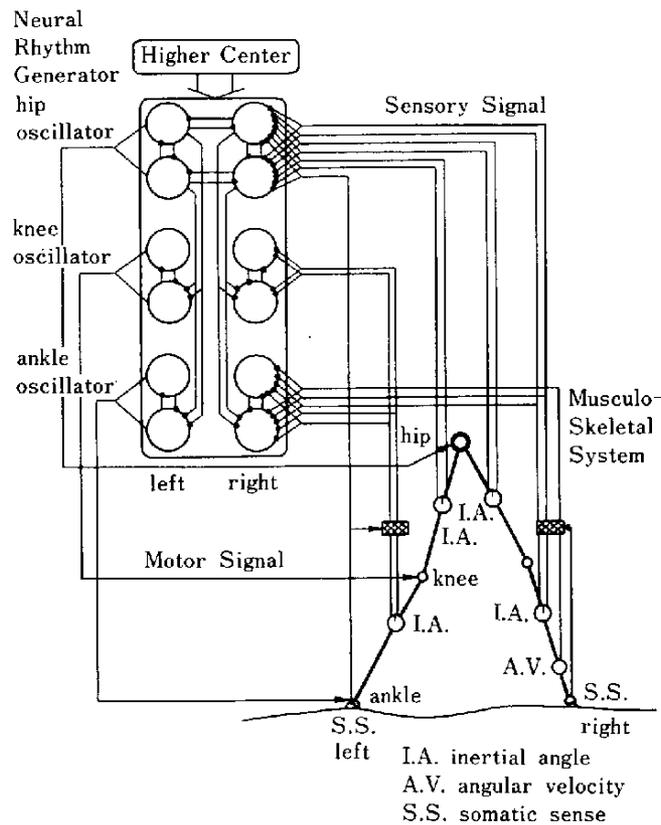
この自己言及性を有することにより場的制御は開放性と統合性を両立させる創発システムとして機能することが主張されている。ここで説明のために使用する図および数式は参考文献から抜粋した。提案されるロボットシステムは図表5.10.1のごとく2階層からなり, 一つはリズム生成系から構成されるコミュニケーション層であり, もう一方はマルチロボット層である。歩行ロボットモデルは図表5.10.2のような神経リズムジェネレータと筋骨格系の循環的相互作用を通して安定な歩行パターンを自律生成するモデルである。コミュニケーション層はロボットの足音を伝播する場として設定されており, ロボット同士はコミュニケーション層を通して相互作用することになる。

上記コミュニケーション層とマルチロボット層は以下に示す如く数理的定義されている。

神経リズムジェネレータはニューロン  $i$  の内部状態  $u_i$  をコミュニケーション層（音場）からの入力



図表5.10.1 システムの構成 [三宅94]



図表5.10.2 ロボットシステム [三宅94]

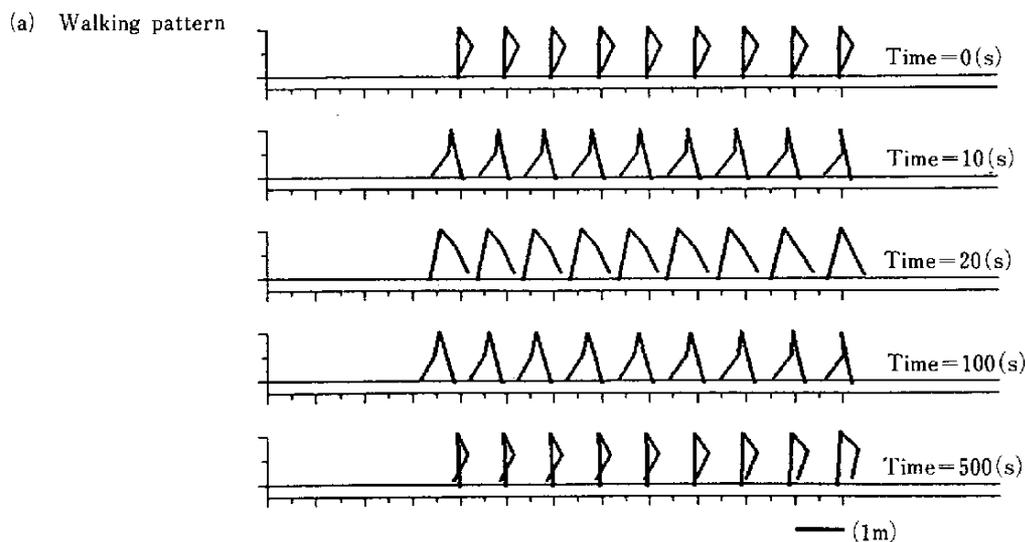
Feed<sub>i</sub> に依存して決定されるように設定されており、(1)式と記述される。

$$\left. \begin{aligned}
 t_i \dot{u}_i &= -u_i + \sum_{j=1}^{12} w_{ij} y_j - b v_i + \text{Feed}_i(x, \dot{x}, F_g(x, \dot{x})) \\
 t'_i \dot{v}_i &= -v_i + y_i \\
 y_i &= f(u_i) \quad (f(u_i) = \max(0, u_i))
 \end{aligned} \right\} (1)$$

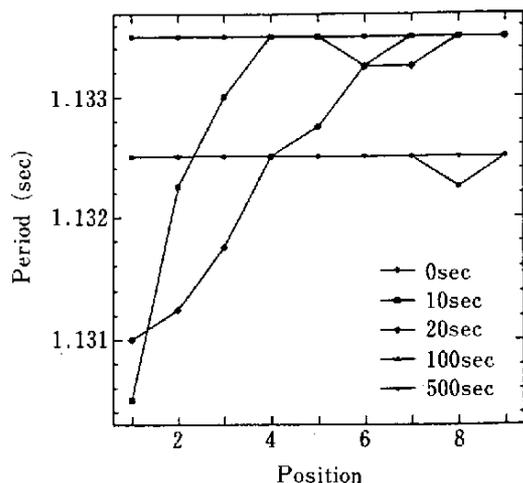
ここで、 $v_i$  は適応度変数、 $y_i$  はニューロン  $i$  の出力、 $u_{0i}$  は higher center からの入力、 $t_i, t'_i$  は内部状態と適応度変数の時定数をそれぞれ表わす。また、ロボットの物理モデルはニュートンオイラー法に基づいて導出され、リンク座標  $x$ 、足首にかかる力ベクトル  $F_g(x, \dot{x})$  がそれぞれ求められる。

つぎに、ロボット同士のコミュニケーションとして、各ロボットの足首の接地タイミングをパルス信号として隣り合うロボットの対応する神経リズムジェネレータに入力する。ロボット  $j$  の接地タイミング  $pu_{lj}$  は隣り合うロボットのパルス信号  $pu_{j+1}$ 、 $pu_{j-1}$  の関数として(2)のごとく設定される。

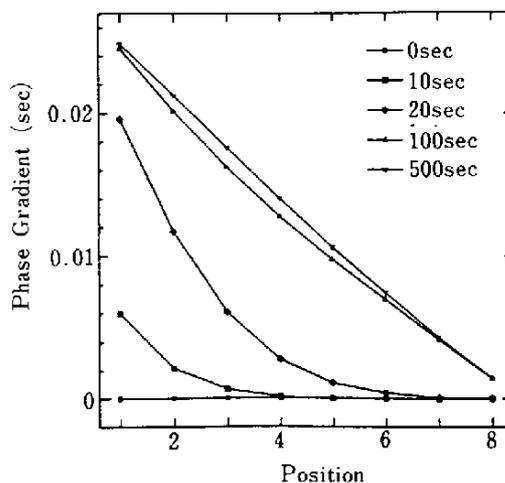
$$\begin{aligned}
 pu_{lj} &= pu_{j-1} + pu_{j+1}, \\
 pu_{lj} &= \begin{cases} -A & \text{for } z_{r,j} < Z_g \text{ and } T_{r,j} < B \\ A & \text{for } z_{l,j} < z_g \text{ and } T_{l,j} < B \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)
 \end{aligned}$$



(b) Period pattern



(c) Phase gradient pattern



図表5.10.3 制御情報場の自己組織化 [三宅94]

上記のごとく各ロボットに対して局所的に設定された動力学からロボット群全体の協調動作が実現されることが実験的に示されている。ロボット群の歩行パターンの時間変化は図表5.10.3となり、時間経過とともにロボットの固有周期が変調されて相互引き込みが起こり、位相勾配が自律形成されることがわかる。

この実験のほかにもロボット群に外乱を付与した場合やロボットの台数を突然変化させた場合、音場を介して人間とのロボット群を協調させる実験なども試みられており、いずれの場合も図表5.10.3に示されるような安定した位相勾配パターンが形成されることが示されている。

以上の実験より、ロボット群の制御情報がリズムの相互引き込みを通して生成される「場」として、ロボット群と環境との関係および構成要素間の関係に基づいて適切に自己組織されることが主張されている。

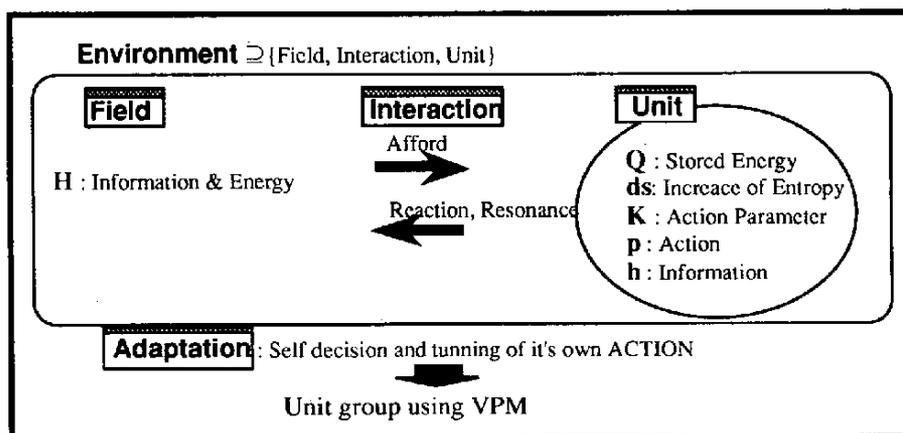
### 5.10.2 波動場を用いた生命体モデル

波動場ではシステムをユニット群によって構成し、ユニット同士を場を介して相互作用させることにより、システムとして自律性と他律性を有する行動の実現が試みられている。以降の説明で用いる図および実験データは参考文献からの抜粋であるが、紙面の都合上、変数についての詳しい記述を省き、場の考え方の使われ方と提案されたモデル(1)および問題解決(2)への適用結果のみを示す。システムは図表5.10.4のごとく4項目の要素から構成され、それら要素は情報伝播のための場(Field)、情報処理主体であるユニット(Unit)、情報の授受(Interaction)、情報処理の目的関数(Adaptation)の順に数理表現されている。

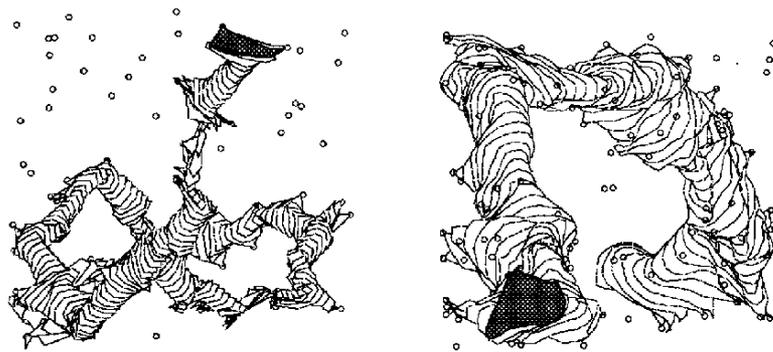
ここで、波動場を利用した個々のユニットの動作決定メカニズムは以下のようになっている。まず、場の関数Hはユニットの出力する波動情報と濃度情報の重ね合せにより構成されており、ユニットは場の観測結果H、ユニットに固有のパラメータK、ユニットのエネルギー状態Q、の3項目によって定まる行動pにしたがって動作する。また、ユニットに固有のパラメータKはユニット位置のエントロピーの増加量を最小化するように逐次決定される変数であり、Kによって適応的行動が実現されている。本メカニズムに基づいて生体機能のモデルと問題解決への応用が報告されている。

#### (1) 波動場を用いた生体機能のモデル

生体機能のモデル[YOKOI 92]は細胞運動モデルや細胞分裂モデルなどが提案されており、ここでは細胞運動モデルを紹介する。細胞運動モデルは複数の球形ユニットとユニット間に設定された引力-斥力ポテンシャル、各ユニットに設定された場の局所情報を観測するセンサからなり、これらポテンシャルとセンサの強度と指向性を提案された方法に基づいて調整するように構成されている。細胞運動モデルの環境探索特性は常にユニット間の相互拘束力が強まった状態でエネルギー源を巡回するような探索行動をすることが実験的に確かめられている。100個の餌を散在させた環境に対する探索様式を図表5.10.5(a), (b)と図表5.10.6に示す。図表5.10.5はユニット群の探索軌跡を表



図表5.10.4 波動場を用いたユニット群システム



(a) Trajectory of unit group Unit number = 8 (b) Trajectory of unit group Unit number = 25

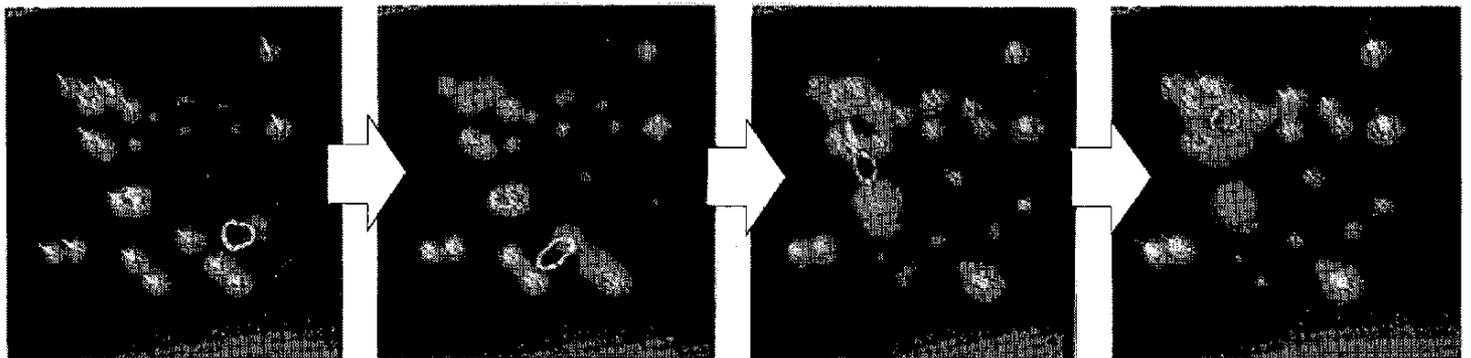
図表5.10.5 ユニット群による餌の散在する環境の探索的挙動

示しており、図表5.10.6はエネルギー源からの情報の伝播様式（青）とユニット群の発生する熱量による環境の温度変化（赤）で表示している。図表5.10.5の実験(a)はユニット数を8個とし、実験(b)は25個のユニットを用いた。(a)、(b)に示されるユニット群の軌跡から、ユニット数が多いほど大域的な情報にしたがって巡回することがわかる。また、図表5.10.6の結果より、環境の温度の高いところを避けながら、エネルギー源に接近する様子がわかる。このような特性はユニット群が局所最小に囚われることなく全空間を探索できる能力を有することを示している。すなわち、この場合ユニット数を制御変数として空間探索を実行すれば大域的な探索と局所的な最適化の両者を同時に合わせ持つ空間探索法を実現することができる。

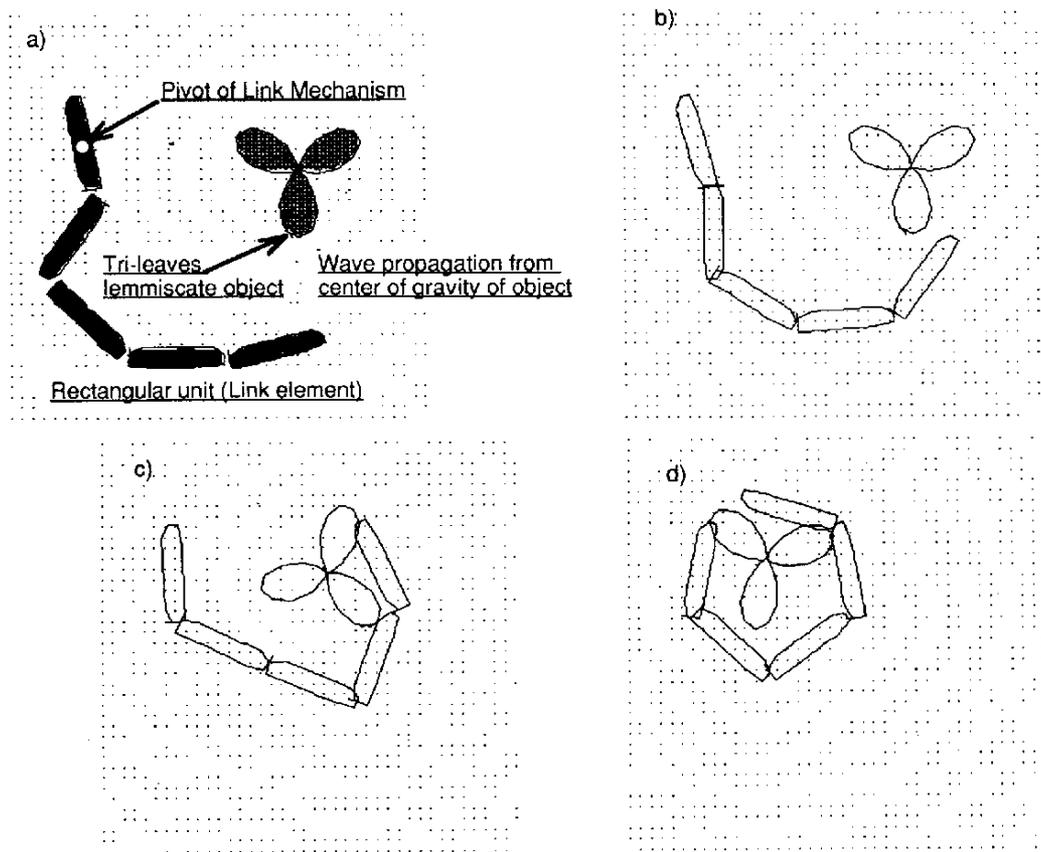
#### (2) 波動場を問題解決に適用した実験例

次に、本メカニズムに基づいて波動場を問題解決に適用した実験例を示す。問題は空間配置問題、障害物回避問題[横井 93a]、リンク機構による把持問題[YOKOI 94]、ギヤボックス設計問題、ジョブショップスケジューリング問題[横井 93b]、巡回セールスマン問題等々への適用が報告されているが、ここではリンク機構による把持問題への適用例を紹介する。

把持動作は、相互に連結されたユニットによって構成されたユニット群が波動情報を出力する物体に対して接近し包含する動作として実現されている。ここで、問題設定はリンクを構成するユニ



図表5.10.6 排熱を利用した自立的挙動



図表5.10.7 リンク機構による物体把持問題への波動場の応用例

ットの形状は長方形、被把持物の形状は三葉形とされている。各ユニットは最大波動強度を観測可能な方向に動作方向の決定を行いながら、同時に観測した波動強度に応じて近傍のユニットを活性化させる信号を出力する。この結果、物体の近傍に初めて到達したユニットが他のユニットを誘うようにして、全体が物体の周辺に到達することになり、物体周辺のユニット数の増加に伴って物体の把持力が増大する。実験（図表5.10.7）ではユニット群により構成されるリンク構造が自律的に被把持物体に巻きつくようにして把持していることが分かる。これらの結果は波動場の情報を処理することにより、各ユニットが自律的に動作し、全体としてある収束点に落ち着くことを示している。

以上、波動場を用いたモデルでは場を伝播する情報の並列分散処理法と熱力学的手法に基づいた制御法を用いることにより、情報処理系の自律性と問題依存的性質（他律性）が実現されている。本制御法を種々の最適化問題に適用することにより、大域的探索と局所的探索を両立する問題解決法の実現可能性が主張されている。

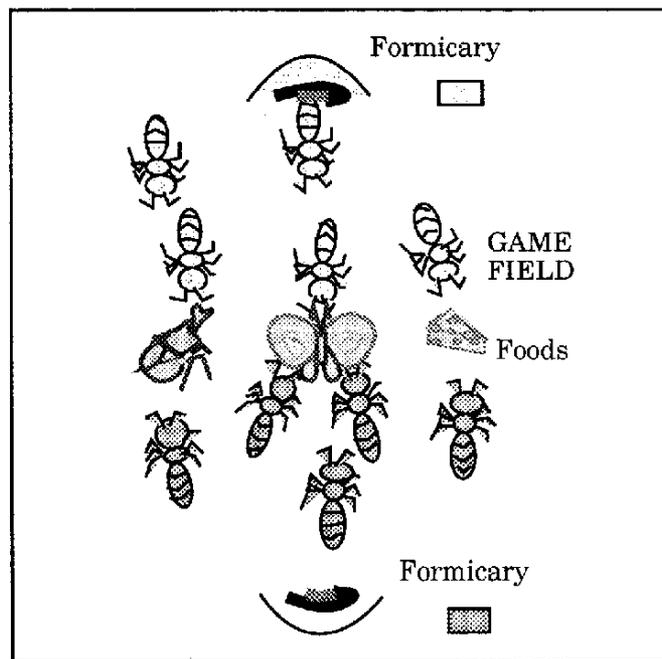
### 5.10.3 創発的学習

自律的情報処理システム構築のための方法論が創発的学習[嘉数 94]として提案されている。そこでは組み合わせ最適化問題、ロボット制御、プロセスプランニング、自動設計などの問題に対して、生物のボトムアップ的機能発現や機能分化、学習による動特性の最適化や汎化能力、自己組織性、適応能力、自己保存的性質などの生体の機能応用を模索を通して、自律性や自己組織性のアルゴリズム化と応用方法が模索されている。創発的学習では分散システムに対して適応的に大域的共通特性を創発させることにより、自律性と合目的性を獲得させるような方法論であり、分散システムの相互通信によって形成される情報の場とシステム固有の適応動作により問題解決へ向かう。そこで提案される方法論としては[Sakanashi 94]による Filtered Evaluation Function を用いた GA の動特性の制御法の開発、[久保 94]Classified learning automata を用いた Adaptive Sequencer、波動場を用いた生命体モデル構築、細胞分裂モデル(代謝系のシミュレーションモデル)、吉井らによるラマルク進化を応用した適応型情報処理モデルなどがある。

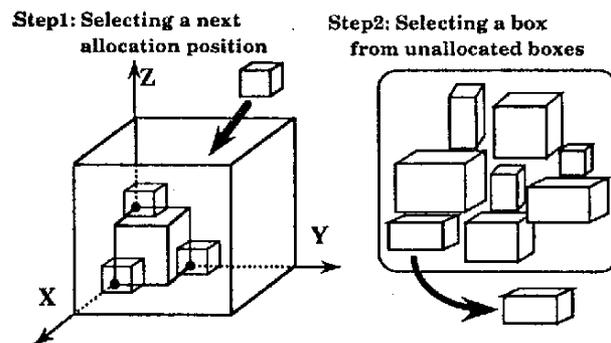
また、応用研究としては GA を利用した最適化問題の解法(箱詰め問題[川上 94]、積み木問題、スケジューリング問題、ラインバランシングなど)、GA とニューロを融合したシステムを用いて積み木問題の解法を与えるような Sequential Planning[Hama 94]へのアプローチや、確率的学習オートマトンと強化学習を用いて交通計画、ロボットの歩様生成[三上 94]、カートポール系の制御などへの応用が試みられている。さらに、Reactive planning の問題にたいして確率的学習オートマトンと classifier system を組み合わせた方法によりサッカーシミュレータの開発(協調学習システム[KUBO 94])などの開発研究も行われている。また、場を用いたアプローチとして振動ポテンシャル法の TSP、障害物回避問題(山田 94)、空間配置問題などへの適用や、高見らによりローカルミナマを脱出するように改良を加えた Advanced ant algorithm などもある。以降では具体的な研究例を紹介する。

#### (1) 蟻の餌争奪ゲーム

[久保 94]では蟻の餌獲得戦略を参考とすることによりマルチエージェントの協調動作を実行可能な制御法が提案されている。制御法は蟻群から構成される二つの蟻塚間における蟻争奪ゲーム(図表5.10.8)を対象例として、各蟻の自陣との状態に応じた協調機能をいかにして獲得させるか、また獲得した協調機能の定量的評価をいかに行うかという問題に対して確率的学習オートマトンをベースにした理論により構成される。提案された制御法によって駆動される各エージェントの特性は実験的に示されており、各エージェントが問題の持つ性質の推論を実行し、学習環境と獲得された協調動作との関係や微妙なエージェントの能力差によるシステム内での役割分担が発現することが報告されている。その結果、本学習マルチエージェントシステムが動的な環境変化に適応できることや各エージェントが自己の能力に応じたシステム寄与を獲得していることが主張されている。また、このほかに学習マルチエージェントシステム間の能力差や学習環境への考察なども言及されている。



図表5.10.8 蟻の餌争奪ゲーム



図表5.10.9 箱詰め戦略 [川上92]

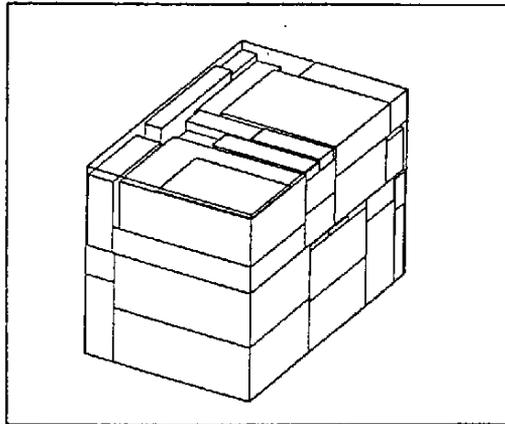
## (2) GAによる3次元箱詰め戦略

GAの応用研究の一例として工場などのコンテナ内の箱群の最適配置問題へのアプローチを紹介する。論文[川上 92], [川上 94]では Simple GA を用いた問題解決戦略の自動チューニングとルールベースの構築法が箱詰め戦略として提案されており、計算機実験により適応的に好ましい戦略が獲得されることが示されている。箱詰め戦略によると図表5.10.9に示される2つのステップにより構成される。

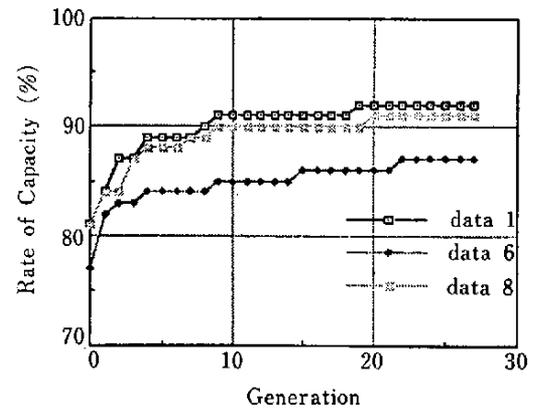
(Step 1) コンテナ内に割り当てられる最適配置の好ましさを評価関数を用いて定量化し、その値により次の配置位置を決定する。

(Step 2) 決定した配置位置にたいして、未配置の箱の集合から最も好ましい箱の選択を評価関数により決定する。

この2つのステップを再帰的に実行し、問題空間の状態が終了条件を満足するまで順に詰め込ん



図表5.10.10 箱詰め結果の3D出力例  
(データ8) [川上92]



図表5.10.12 箱詰め性能の成長 [川上92]

図表5.10.11 箱詰めシミュレーションの結果 [川上92]

	The dimension of a container (W, L, H)	$n_b$	Minimum ( $w_i, l_i, h_i$ )	Maximum ( $w_i, l_i, h_i$ )	Rate of capacity (%)	The number of packed boxes
data 1	(35, 40, 30)	50	(2, 3, 4)	(19, 20, 17)	92	37
data 2	(35, 40, 30)	50	(6, 7, 8)	(19, 20, 17)	86	28
data 3	(35, 40, 30)	50	(5, 5, 5)	(14, 15, 14)	84	45
data 4	(205, 240, 120)	200	(21, 22, 23)	(39, 40, 37)	82	169
data 5	(45, 50, 40)	120	(2, 3, 4)	(19, 20, 17)	94	60
data 6	(50, 50, 40)	100	(5, 6, 7)	(19, 20, 17)	87	34
data 7	(45, 50, 35)	100	(5, 5, 5)	(14, 15, 14)	85	92
data 8	(506, 316, 363)	3,000	(68, 29, 30)	(195, 105, 260)	91	53

で行く。さらにこれら2つのステップを構成する評価関数群やルール群をGAを用いて適応的に調整する。評価関数は評価項目(箱の大きさ、長さ、底面積)の重み付き和で表現され、GAのストリングは評価項目の重み係数の列として表現される。計算機実験(図表5.10.10~5.10.12)では各世代におけるストリングの集団数を50個体として、サンプルデータによって与えられた箱集団のコンテナへの詰め込み動作が試みられている。実験結果はすべて容積率80%以上が達成されていることから、提案された箱詰め戦略の有用性が主張されている。

<参考文献>

[三宅 94]三宅美博, 多賀巖太郎, 山口陽子, 清水博, : 自律分散ロボットにおけるリズム引き込みを用いた「場」的制御(予測できない環境下での協調的システム制御に向けて), 日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 477-478, 1994.

[YOKOI 92]Hiroshi YOKOI and Yukinori KAKAZU, "An Approach to the Traveling

- Salesman Problem by a Bionic Model," HEURISTICS, The Journal of Knowledge Engineering, pp. 13-27, 1992.
- [横井 93a]横井浩史, 嘉数侑昇, 波動場を用いた自律的情報処理に関する基礎研究 (障害物回避問題へのアプローチ), 機論C編59巻564号, pp. 2346-2352, 1993
- [YOKOI 94]Hiroshi YOKOI, and Yukinori KAKAZU., Autonomous Grasp Control of Link Mechanism by Vibrating Potential Method, Control Eng. Practice, Elsevier, pp. 1031-1038, 1994.
- [横井 93b]横井浩史, 嘉数侑昇, 皆川雅章, 波動場に於ける自律機械群に関する基礎研究 (ジョブショップスケジューリング問題へのアプローチ), 機論C編59巻564号, pp. 2584-2590, 1993
- [坂無 93]坂無英徳, 鈴木恵二, 嘉数侑昇: 遺伝的アルゴリズムにおける探索戦略の制御, 情報処理学会論文誌, 34-4: 755-763 (1993)
- [Sakanashi 94]H. Sakanashi, K. Suzuki, Y. Kakazu: Controlling Dynamics of GA through Filtered Evaluation Function., Proc. of Parallel Problem Solving form Nature 3: 239-248 (1994)
- [KUBO 94]Masao KUBO, Yukinori KAKAZU: Learning Coordinated Motions in a Competition for Food between Ant Colonies., From Animal to animats 3, 487-492, 1994.
- [久保 94]久保正男, 嘉数侑昇: 蟻の餌争奪ゲームによるマルチエージェントシステムの協調動作評価, 情報処理学会論文誌, Vol. 35, No.8, 1555-1566, 1994
- [川上 92]川上敬, 皆川雅章, 嘉数侑昇: GAによる3次元箱詰め戦略の自動チューニングとルールベースの構築, 情報処理学会論文誌, 第33巻, 第6号, pp. 761-768, 1992
- [川上 94]川上敬, 嘉数侑昇: マルチエージェント環境における3次元箱詰め戦略の獲得 (GAによる階層型チューニング), 日本機械学会論文集C編, 60巻577号: 3219-3225, 1994
- [三上 94]三上貞芳, 田野浩明, 嘉数侑昇: 強化学習による多足歩行ロボットの適応的歩様獲得に関する研究, 日本機械学会論文集 (C編), 60巻580号: 4252-4259, 1994
- [山田 94]山田孝治, 横井浩史, 嘉数侑昇: 波動表現に基づく情報処理モデルに関する基礎研究 (自律機械群の経路探索問題へのアプローチ), 日本機械学会論文集 (C編), 60巻580号: 4130-4135, 1994
- [Hama 94]K. Hama, M. Minagawa, Y. Kakazu: A Distributed Approach to Block Stacking Problem Based on Evolutionary Learning., Intelligent Engineering System Through Artificial Neural Network, Vol. 4: 321-326 (1994)
- [嘉数 94]嘉数侑昇, 鈴木恵二: 人工生命とシミュレーション, 日本シミュレーション学会論文誌, Vol. 13, No. 4: 292-300 (1994)

## 5.11 群行動

小数の単純な行動ルールの組合せで、ある程度の秩序だった群れ行動が実現できる。魚や鳥の群れはほとんど単純な行動規範だけで実現されている。個々の動作主体（エージェント）の行動規範が単純でも、群れになったときには意外なほど複雑な動きを示す。C. Reynolds は、これを CG アニメーションによって示した [Reynolds 90]。魚、鳥、コウモリ、などの群れのアニメーションを作成する場合、1つ1つの個体の動きを作成入力していたのでは大変な労力となる。しかし、動きを絶対座標系の中での移動という表現で捉えると、極めて複雑なものとなり、これを実現する計算手続きの実装はほとんど不可能に思える。実際の魚や鳥が持っていると考えられる個体の単純な行動規範をプログラムとして書くことで、全体として複雑な群れ行動をシミュレートできる。

基本的には、個々の最も近い他者あるいは障害物から離れようとする力、群の中心へ向かおうとする力、目標位置へ行こうとする力の合計3つのベクトルを合成し、1つ1つの個体の運動を決定する。合成するときの係数を適当に調整することで、動きに特徴を与えることができる。Reynolds は魚と鳥の群れ行動を背景においた短いビデオアニメーション作品を作成したが、最近では、映画の特殊効果や、アニメーション映画の作成にも応用されている。

### 〈参考文献〉

[Hillis 92] Hillis W. D.: Co-Evolving Parasites Improve Simulated Evolution as an Optimization Procedure, in C. G. Langton et al (eds), Artificial Life II, 313-324, Addison-Wesley, 1992.

[Reynolds 90] Reynolds, C.: ..., C.G. Langton, Artificial Life,, Addison-Wesley, 1990.

## 5.12 脳コミュニケーションのための進化システムの研究 (ATR 人間情報通信研究所)

人間を初めとする生物の遺伝や進化のメカニズムに学んだコミュニケーションの新しい原理の追究を目指して、人工生命や進化的計算論の考え方を導入した進化システムの研究を平成5年度より進めている [Shimohara 94] [下原 94] [下原 95]。

本研究では、人工生命の考え方や進化的計算論の方法論をコミュニケーション（情報理解・情報生成）の中核である脳内情報処理のモデル化に導入し、自律性と創造性に富む新しい情報処理系の創出を目指している。情報処理・情報生成の中核である脳の機能的な特長は、その柔軟性や適応性、自律性あるいは創造性などにある。そのような特長をコンピュータ・システムにおいて実現することによって、いわば人と人、脳と脳などと同様な、人-システム間のコミュニケーションを創出することを目標とする。

基本的な考え方として、脳神経系の構造に学んだこれまでのモデル化に加え、生命体的な考え方や社会的モデルとしての考え方を取り入れる。生命体的な考え方とは、細胞分裂を繰り返しながら

複雑な多細胞の個体をつくる生物と同様な発生機構／発展性をもったシステムとしてモデル化する考え方である。社会的モデルとしての考え方とは、個々人の自律的な振る舞い（マイクロ）から流行や社会的コンセンサスなどの大局的な構造や状態（マクロ）が形成され、と同時に、その大局的な構造／状態が個々人の振る舞いに影響を与えることによって、マイクロマクロ系が相互依存的に変化してゆく動的なプロセスとしてモデル化する考え方である。

すなわち、マイクロマクロの情報循環系を基本構造とし、系変化の可能性を生成する「進化」機構とそれらの変化を合目的な機能や構造に自己組織化する「自律生成」機構を核とする情報処理系、いわば進化するシステムとしての人工脳構築の可能性を明らかにすることが当面の目標である。

ここでは、そのような研究を代表して、ソフトウェア進化とハードウェア進化に関する研究を紹介する。

#### 5.12.1 機能進化モデル（ソフトウェア進化のモデル）

デジタル・コンピュータを媒体として、自然淘汰による進化を利用して複雑かつ知的なソフトウェアを生成する、ソフトウェア進化の研究を進めている。ソフトウェア進化とは、変化やエラーを利用してコンピュータ・プログラムがプログラム自身を書き換え、構造を変え、新しい機能を自律的に創りだすこと、すなわち機能するものとして（あるいはある機能を保持しつつ）複雑化・多様化するものとする。

進化とは基本的には遺伝的な変異を伴う自己複製のプロセスである。したがって、マシン言語から成る自己複製プログラムを、突然変異（エラーや誤り）を生ずる機構を持ったコンピュータ上の仮想世界で実行することで進化をモデル化できる（本モデルをティエラと呼ぶ）[Ray 92]。計算機実験により、自己複製プログラムが変化を取り込みながら機能するものとして急速に多様化・複雑化し、一個の祖先プログラムから生態系が自発的に形成されることを実証した。このことは、マクロ的な進化のプロセスを観察するのみならず、進化の研究への計算論的・実験的なアプローチが可能であることを意味する。さらに、自然淘汰が人工システムにおいても進化と生態系形成のための優れた原理として利用できること、すなわち、複雑なコンピュータ・ソフトウェア生成のための手段として利用可能であることを示唆している。ここで自然淘汰とは、人為的な適応度を用いる人工淘汰ではなく、競合、寄生、共生や協調などプログラム間の相互作用によって自己複製できるかどうかが決まるということである。他の特徴としては、

- （ティエラの場合は効率的な自己複製のための）解としてのプログラムの形や構造が変化する、
- 集団系を構成する要素（この場合はプログラム）同士に相互作用がある、
- 共通リソースとしての環境そのものも動的に変化する、

などの仕掛けをもつことが上げられる。

今後、本モデル（ティエラ）をネットワーク型に拡張しインターネットなど地球規模のネットワークを環境とするソフトウェア進化の実験を計画している[Ray 95]。多くの人々が関わる動的な環

境としてのインターネットは間接的にデジタル生物に自然でかつ変化と複雑性に富む環境を与えることができる。デジタル生物はインターネット内を移動することもでき、より豊かなCPU タイムとメモリ空間を求めて絶えず地球の裏側に向けて移動するであろう。このことはそれとは全く逆に絶えず地球の表側、すなわち、処理能力を必要とするところに集まってくる助人エージェントの可能性を示唆する。コンピュータ同士が光で結ばれる時代を想定すれば、夜間地球の裏側の処理をこちらのコンピュータが実行することなどむしろ当然とも言えるし、そのようなことが可能となることが地球規模の情報インフラの大きな意義であろう。世界規模での情報インフラの時代に向けて、全地球規模での動的かつ自律的な処理能力の配分を可能とするひとつの方法への展開が期待される。

### 5.12.2 構造進化モデル (ハードウェア進化のモデル)

自然界の種々の生物は進化の過程で環境に適応するようその形態や構造を進化させた。ある構造をいかに機能させるかというソフトウェアの進化だけでなく、形態や構造、すなわち、ハードウェアを進化させることも自律性・創造性に富む情報処理系の創出にとって重要な研究課題である。ソフトウェア進化と同様な表現をすれば、ハードウェア進化とは、変化やエラーを利用して電子回路としてのハードウェアがその構造を自律的に創り変えること、そして当然構造とともにその機能を複雑化・多様化することとなる。したがって、表現型がプログラムではなく電子回路である点を除けば、方法論的には基本的な差はない。ただし、回路素子やデバイスそのものは進化しないが、たとえば、セル・オートマトンやFPGA (Field Programmable Gate Array) など、それらの結線や組み合わせが再構築可能な構造を持つハードウェアを前提とする。

#### (1) CAM-Brain (セル・オートマタ・マシンに基づく人工脳)

再構成可能なデバイスとしてセル・オートマタ・マシン (CAM) を利用して、脳神経系の基本構造モデルであるニューラルネットをハードウェアとして発生・成長・進化させる研究を進めている [de Garis 94]。

これまで、セルオートマトンの状態遷移ルール(約11,000個)から成る、CAM-Brainの2次元モデルを構築しシミュレーション実験を行った。具体的には、本モデルの進化可能性を検証するため、シナプス数の最大化、一定値/波形出力の学習、網膜上での線分移動の速度ベクトルの検出などを例題に進化実験を行い、有効性を確認した。

また、3次元モデルの構築に着手し、より高速・効率的なシミュレーションが可能なMIT開発のCAM-8を利用して3次元モデルの構築を進めている。今後、本モデルを用いて、小規模モジュールの進化、そして、それらの統合化の検討など、蓄積的・段階的なハードウェア進化実験を行う予定である。

#### (2) AdAM (Adaptive Architecture Methodology) プロジェクト

未知の、あるいは、絶えず変動する環境に自律的に適応し、目的の機能を獲得する柔軟なハードウェア (デジタル電子回路) の構築を目指して、HDL (Hardware Description Language) を

用いたハードウェア進化システムの研究を行なっている[Hemmi 94]。

これまで、HDLプログラムの生成過程を操作することを可能とするため、新しい染色体表現や遺伝的操作を導入した、プロダクション遺伝的アルゴリズムを提案した[Mizoguchi 94]。さらに、ワークステーション上で稼働していた実験システムを超並列コンピュータ (CM5, nCUBE2) へ移植し、より大規模・長時間のシミュレーション実験を可能にした。

また、システムをより効果的に動作させるため2つの手法を新たに提案した。1つは、生物の胚発生時の機能分化に着目した決定因子モデルの導入と決定因子データの分配手法の提案である[邊見 95]。本手法によって、個体回路内の各レベルの部分ブロックの自律的な分業・相互協調メカニズムを実現することができる。2つめは、遺伝子発現スイッチのネットワークの調節を目的に、一段メタなレベルであるプロダクション・ルールそのものに対し遺伝操作を加える手法を提案した。本手法によって、大規模な応用問題への適用が可能となるものと期待している。

ハードウェア進化とは情報に依存してハードウェア構造を創り変えようということである。情報を種、ハードウェア構造を再構築できるデバイス基盤を畑に例えると、種に応じたハードウェア構造を畑に作りだし、目的に合うようにそれを繰り返しながら徐々に品種改良していくことに相当する。したがって、(1) 種は同じでも畑が違つとできあがるハードウェア構造が異なる。(2) (1)より、畑は均一性を要求されず、多少の違い(デバイスの構造欠陥やエラー)があつてもよい。(3) 逆に畑に適合する種を見つければよい、つまり、構造欠陥やエラーあるいは動的なノイズやエラーについても情報の変化で吸収できる、といった特徴を持つ。

現在、技術はハードウェア(物質)系とソフトウェア(情報)系とに明確に区分され、特にハード側からソフト側に対しては、品質と性能を保証するという大前提がある。ハード側の製造技術の進展は著しく、今世紀末には $10^{10}$ ~ $10^{11}$ の素子を1チップに集積することが可能となりつつある。しかし、製造技術にもましてテストビリティが大きな課題であると言われ、現状技術と同程度の歩留りで構造欠陥やエラーのないものを提供することが極めて難しい状況にある。

ハードウェア進化の考え方は、ハード(物質)系とソフト(情報)系との関係に発想の転換をもたらす。つまり、ハード側は構造欠陥やエラーを排除することに躍起になることはない。ソフト側はその代わりに冗長に使える大量のハードウェア資源を必要とする。そのような意味で、ハードウェアの構造欠陥や動的なエラーを許容し、さらに、進化に活用しようとさえする、生命論的な考え方は情報系と物質系を融合化・統合化する新しい方法論へと展開できるものと期待している。

### 5.12.3 進化システムとしての人工脳を目指して[Shimohara 94][下原 94]

生体の脳では、生誕前後から幼少期にかけて神経細胞が大量に発生する。不思議なことに、それらの大半が予めプログラム化されていたかのように死ぬ。それでも百数十億ともいわれる神経細胞が生き残る。残った神経細胞は樹状突起と軸索を伸ばし、軸索がシナプスを介して樹状突起に接続

されることで神経回路網が形成される。しかし、そのような発生と成長の後、神経細胞は減り続ける。幼児期の脳が柔軟性や創造性に富むのは、ハードウェア構造が成長過程にあり柔らかいからと考えることができよう。軸索と樹状突起とを結ぶシナプスの可塑性は学習や経験を可能にする。しかし、脳は生体とともに死に、脳（つまり人）がいくら学習や経験を積んでも子には遺伝子しか残せない。そのような発生・成長・学習を、遺伝を通して何万世代に亘って繰り返しながら脳は進化してきた。

ハードウェア進化とソフトウェア進化の考え方は進化システムとしての人工脳の創出を可能にするだろう。人工脳にはいろいろな利点が考えられる。一つは、柔軟性が要求される時には、全体でも部分的にでも何度でも幼児期に戻し、神経細胞を増やしてネットワークを張り替えることができる。生体の脳はその保持のために生体に見合った大きさ限定されるが、人工脳は限定されない。そして、最も大きな利点として、人工脳は死ななくてもよい！ したがって、学習や経験の結果を残したまま、新しい部分をつけ加えるように進化させることもできよう。つまり、脳の進化過程として説明されるように、魚の脳の外側に爬虫類の脳、その外側には哺乳類の脳、さらにその外側に大脳新皮質というように、蓄積的に情報処理系の重層化を進めることができる。しかも、そのような人工的な脳の進化を電子のスピードで、かつ異なる条件で並列にシミュレーションできる。多種多様な人工脳を増殖、進化させることができるということになる。

多種多様な人工脳を情報インフラによって相互にネットワーク化することによって人工脳の社会をつくることも可能となろう。ミンスキーの「心の社会 (Society of Mind)」[ミンスキー 90]のように、ネットワーク化された複数の人工脳によって、ひとつの社会脳が構築できるかもしれない。これらは未だお話過ぎないが、人工脳は、生体の脳が生体であるがために課されている限界を打ち破る、大きな可能性を秘めている。

#### <参考文献>

- [Shimohara 94] Evolutionary Systems for Brain Communications—Towards an artificial Brain—, Brooks and P. Maes (eds.), Artificial Life IV, MIT Press, pp.3-7, 1994.
- [下原 94] 下原勝憲：脳コミュニケーションの進化—進化システムとしての人工脳を目指して、柴田崇徳・福田敏男編著「人工生命の近未来」、時事通信社、pp. 43-68, 1994
- [下原 95] 下原勝憲：生命論パラダイムに基づく情報処理、情報処理学会誌、Vol. 36, No. 4, 1995.
- [Ray 92] T. Ray: An Approach to the Synthesis of Life. In C.G. Langton, C. Taylor, J. Doyne Farmer, Steen Rasmussen (eds.): Artificial Life II, Addison Wesley, pp. 371-408, 1992.
- [Ray 95] T. Ray: A Proposal to Create a Network-Wide Biodiversity Reserve For Digital Organisms, ATR Technical Report, TR-H-133, 1995.
- [de Garis 94] H. de Garis: An Artificial Brain—ATR's CAM-Brain Project Aims to Build/Evolve an Artificial Brain with a Million Neural Net Modules Inside a Trillion Cell Cellular

Automata Machine. New Generation Computing, OHMSHA. LTD and Springer-Verlag, 12, pp. 215-221, 1994.

[Hemmi 94] H. Hemmi, J. Mizoguchi and K. Shimohara: Development and evolution of hardware behavior, Brooks and P. Maes (eds.), Artificial Life IV, MIT Press, pp.371-376, 1994.

[Mizoguchi 94] J. Mizoguchi, H. Hemmi and K. Shimohara: Production genetic algorithms for automated hardware design through an evolutionary process, IEEE Conf. on Evolutionary Computation, Vol. II, pp. 661-664, 1994.

[邊見 95] 邊見 均, 溝口潤一, 下原勝憲: HDL プログラムの自動生成と生物のかたちづくり, 第 6 回自律分散システム・シンポジウム, 計測自動制御学会, pp. 201-204, 1995.

[ミンスキー 90] マーヴィン・ミンスキー (安西祐一郎訳): 心の社会, 産業図書, 574p., 1990

### 5.13 生物指向型生産システム (神戸大学工学部上田研究室)

自律分散, ボトムアップ, 局所決定の原理による生物指向型生産システム[1, 2, 3]の概念が 80年代の終わりに筆者により提案されたが, その中心は自己創発する人工物である。ほぼ同時期に提唱された Langton の人工生命とほとんど同じ原理に着目していたのは興味深い。創発性を備えた人工物とそれを生産するシステムの可能性を追究することは, 人工生命研究の工学的展開の一つといえる。

以下では, はじめに自己創発する人工物と生物指向型生産システムの概念について述べる。ついで, その簡単なモデルとして生態系とみなした人工物生産システムの理論構築を試みるとともに, コンピュータ・リアライゼーションによってシステムの生物的な振舞いを示すことにより, 人工生命研究との接点を論じてみたい。

#### 5.13.1 自己創発する人工物

生物指向型生産システム (Biological-oriented Manufacturing Systems, BMS と略す) は, “生物に学び生物と共生する人工物生産システム” である。生産システムが本来, 生産目的の多様性や生産設備の故障や更新といった変動性を避けられないものであり, むしろ変化を肯定的に捉えるべきであるにもかかわらず, 従来の集中管理型・トップダウン型のシステムでは様々な外的内的環境の変動に十分対応できないという認識から, その限界を生物指向の発想で克服しようとするものである。

自ら成長し, 環境の変化に適應し, 進化し, さらに生物と共生し, 自己分解できる人工物, もしこのような人工物を実現できれば, これまで直面してきた多くの難題を解決できるだろう。このような人工物は創発する人工物と呼べる。しかし伝統的人工物は, 発生や進化といった生物にみられる創発的な振舞いをするわけではもちろんない。

それでは何が生物に創発性をもたらしているのか、それは、人工物と生物のライフサイクルにおける情報の役割を比較すれば明らかである。生物では内在する遺伝子型情報と内在化した知識型情報が実体とともにあり人工物のように両者は乖離していない。このことが、生物の持つ自律性と多様性という相反する機能を発現しているのである。すなわち、(a)生物は、自己認識、自己成長、自己修復、自己組織化、進化、適応など自然物や人工物にない機能を持つ。(b)生物機能を発現する情報は、DNA（遺伝子型）とBN（知識型）情報に大別でき、両者は相補的であるが、優れた機能の多くは前者による。(c)自然物は情報を抽出すべき対象であり、また人工物は情報を付与すべき対象であるのに対し、生物は情報を発現する主体である。(d)生物では情報と実体が陽に一体化しており、両者の不可分性という人工物や自然物にない性質がある。このことが自己情報の発現を容易にし、創発をもたらす必要条件である。このような特性を人工物に持たせて、従来の生産システムの限界を越えようとするのがBMSである。

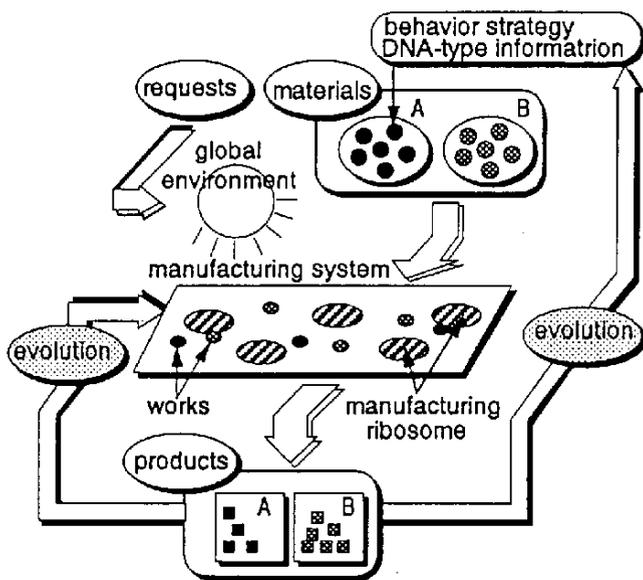
#### 5.13.2 BMSの簡単なモデルとその振る舞い

BMSは人工物の計画から最終廃棄までの全ライフサイクルを対象としている。ここで取り上げる製造フロアレベルのBMSでは、(a)システムを構成する工作物、工作機械、検査機器、搬送車、ロボットなど全ての要素を自律した生物に擬す、(b)生産対象はDNA型情報を持ち、工作物から部品、製品へ成長する、(c)生産設備要素は主にBN型情報により連携し協調して工作物を育てる、とする。

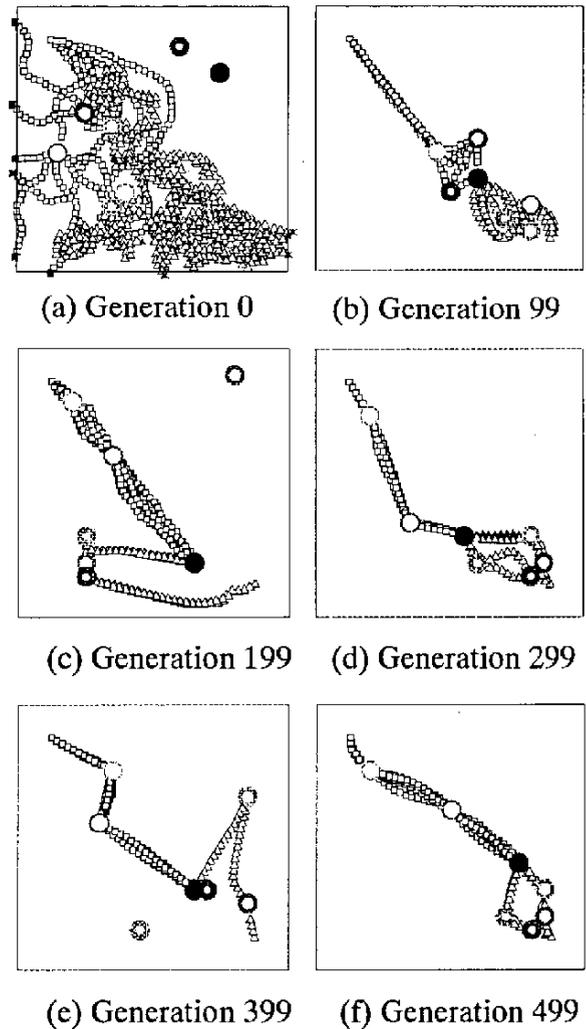
このようなBMSを具現化するには少なくとも2つの課題がある。第1は情報（およびその処理機構）と実体を一体化する新しい媒体素子の開発という技術的課題であり、第2に、そのような要素により構成されるシステムの挙動がどのようなものであるかを明らかにするという理論的課題である。第2の課題は人工生命研究でのソフトウェアシンセシスと方法論上の共通性がある。そこで、次節では、製造フロアのBMSの簡単なモデリングを行い、進化戦略の手法を用いてリアライゼーションを行った例を示す。

ここでは、図表5.13.1に示すように、製造フロアのBMSを自然生態系と対応づけたモデリングを示す。生産システムを環境として考え、工作物はそこで発生・成長する生物と考える。2種類の人工物集団、すなわち加工リボソームと呼ばれる生産設備要素と生産対象としての工作物から構成される単純なモデルを考える。工作物は、製品形態情報（DNA型情報）を持ち、それによって生産システム内の加工リボソームを順次たどりながら、製品へと成長する。

工作物は生産システムにどのようなタイミングで投入されるか不定であり、投入時のシステムの内部状態もまた不定である。生産システムもどんな工作物が投入されるか事前に知らない。言い換えれば、生産要求が変動してもかまわない。いつ新しい工作物が投入されてもかまわない。生産設備の変化（故障や更新）に適應するシステムである。BMSの環境には大域環境と局所環境があり、生産要求は大域環境であり、加工リボソームは局所環境である。すなわち生産システムの目的を大



図表5.13.1 生態系とみなしたBMSのモデル



図表5.13.2 BMSの振る舞いの例

域環境とし、要素の行動戦略を最適化問題として考えるのではなく、適応的な振舞い問題としてとらえる。生産システムの状態は予め定まっているのではなく、結果の秩序として創発される。

工作物はDNA型情報により自らの行動戦略に従って生産システム内にある目的の加工リボソームを探し回る。目的の加工リボソームに到着すると、形態変換要求を伝えて返事を待つ。加工リボソームは一定時間内に到着した工作物を調べて、大域環境である生産要求を反映するように、処理すべき工作物に应答する。すべての形態変換が終了すると工作物は最終リボソーム（ゴール）へ行く。ここで示す例では、製品の種類は2つであり、それぞれ3つの異なる処理を行う加工リボソームを経て製品となる。加工リボソームは、ゴールを含め7つある。処理A用に3つ、処理B用に3つ、及びゴールが1つある。ただし、処理A、Bはそれぞれ、処理速度が高速、中速、低速の3段階がある。製品の数は最初はWORK1が6個、WORK2が6個とするが、途中でそれぞれ18個と2個、さらに6個と6個というように100世代毎に変動させる。

図表5.13.2に示すように、WORK1（□で示す）とWORK2（△で示す）がフィールドの左上と



ったが、環境変化に対するシステムの適応的な振舞いを示すことができた。

生物指向の人工物は、図表5.13.3に示すように、生産システム内ではDNA型情報による発生と成長という振舞いを示すが、成長後はDNA型情報を持ち続けながらBN型情報による自己組織化や学習、自己修復を行いダイナミックな環境に適応し、他の人工物と協調して自らの機能を発揮する。そのような人工物は、消費や故障へも対処しやすく、リサイクルや廃棄も適切に行えるであろう。さらに、文化の成熟とともに進化し、人間を始めとする生物ともマクロ生態系の一員として共生し、やがて自然の連鎖と融合することを可能にするかもしれない。すなわち、マクロシステムで人工物は適応と進化の振舞いをする。

将来の人工物生産システムは人工生命や複雑適応系研究の発展と連動しながら、決定論的なものから創発型へと展開されるのではないかと[4]。ロボットやプログラムなどの人工物が決定論的でない限りならぬというのは、実は一種の思い込みであり、むしろ創発型アプローチへ転換すべきであって、そのことによって人工物をつくる行為とつくられる人工物の双方にかかわる様々な困難な問題に対して、解決の糸口を示すに違いない。

#### 〈参考文献〉

- [1]上田完次：“生物指向型生産システム”，工業調査会，(1994)。
- [2]K. Ueda：“An Approach to Bionic Manufacturing Systems Based on DNA-type Information”，Proc. of Inter. Conf. on Object-Oriented Manufacturing Systems, (1992), 303.
- [3]K. Ueda：“A Genetic Approach toward Future Manufacturing Systems”，Flexible Manufacturing Systems, Past-Present-Future, edited by J. Peklenik, CIRP, (1993), 211.
- [4]上田完次：“知能化生産システム—知識型知能化から創発型知能化へ—”，精密工学会誌，第59巻第11号 (1993), 1755.

### 5.14 発達システムの進化——進化する成長システムと生態系(創価大学畝見研究室)

高等生物の体は多くの細胞の集まりからなる。これは、1つの細胞である受精卵が分裂と膨張と死滅を繰り返した結果である。結果的にどのような体に成長するかは、細胞内に含まれる遺伝情報と周囲の環境条件によって決定される。体を構成するひとつひとつの細胞は、どれも同じ遺伝子を持っている。にもかかわらず、内臓、皮膚、骨、といったさまざまな組織が出来上がるのは、それぞれの細胞が自己の内部状態と周囲の状況から、次の成長の方法を決めているからである。

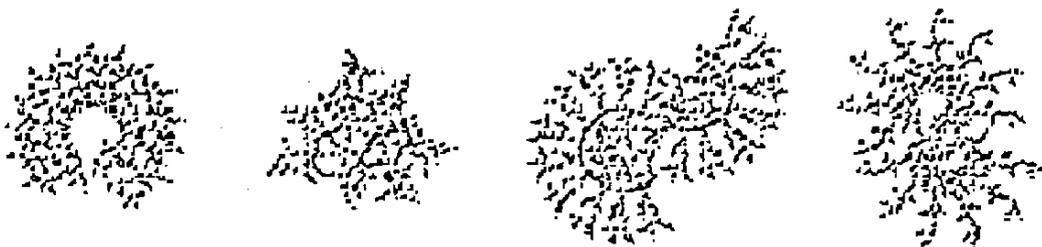
発達の形式モデル、つまり、生物個体の成長過程を数学的に記述する方法として拡張されたL-systemを導入する。発達の形式モデルにおける状態遷移規則、すなわち、どのように次の細胞分裂を行なうかを定めるルールを遺伝子に書き込み、成長の結果として出来上がる体の形、すなわち、発現形態に対して個体の適応度を定める。

ここでの個体の成長の場は2次元ユークリッド空間である。現実の生物は3次元の広がりをもつ

空間に存在するわけだが、まず、単純なモデルから出発するために、2次元の世界、つまり平面の世界を考える。ここで紹介するモデルの細胞はすべて一定の大きさの円であり他と重なることもないし、移動することもない。細胞は分裂と膨張により増えるのではなく、既存の細胞が隣接する子供細胞を作り出すことによって増殖する。1つの計算ステップに各々の細胞が1つの子供細胞を作ろうとする。

分裂によって新たに誕生する子供細胞の位置と状態は、(1)親細胞自身の状態、(2)隣接する領域に既に存在する他の細胞の配置、(3)遺伝子、の3つの情報から決定される。各計算ステップにおいて、個々の細胞は9通りの状態のうち1つを自身の状態とする。このうちの8状態は、増殖状態で、残りの1つは停止状態である。停止状態にある細胞は子供細胞も作らないし、自身の状態を変えることもない。増殖状態にある細胞は、周囲の領域を前後左右の4つの扇型に分割し、それぞれの領域に他の細胞の中心が含まれるかどうかを観察する。各細胞には向きがあり、前後左右は個々の細胞自身を中心とする相対的な位置である。1つでも含まれていれば1、1つも含まれていなければ0とし、4領域を合わせて4ビットの数とする。つまり、周囲の状態は $2^4=16$ とありある。遺伝子は、増殖状態8とありと周囲の状態16とありの組合せ、つまり $8 \times 16=128$ とありの場合について、子供細胞の位置と状態を決める整数を引き出す「表」の形式をとる。つまり、状態を表す整数値によって表の位置を決め、その項目に書いてある16ビットの数値を引き出す。この16ビットの内、位置を決める相対角度に8ビット、子供細胞の状態に4ビット、分裂後の親細胞の状態に4ビットを使う。つまり有効な情報は合計で $(8+4+4) \times 128=2048$ ビットである。状態は4ビットの整数0から15の内0から7までを増殖状態、8から15までを停止状態とする。このようなある種の無駄を含んだ遺伝子表現は、プログラミング上の都合もあるが、同時に、次に述べる遺伝操作に大きな影響を与える。子供細胞は親細胞にお尻を向けて接した状態になるものとする。ただし、作ろうとした子供細胞が、既に存在する他の細胞と領域的に重なる場合には、子供細胞は作らず、親細胞の内部状態を変更するだけである。このようなアルゴリズムに従うと、様々な形態を生成することができる。

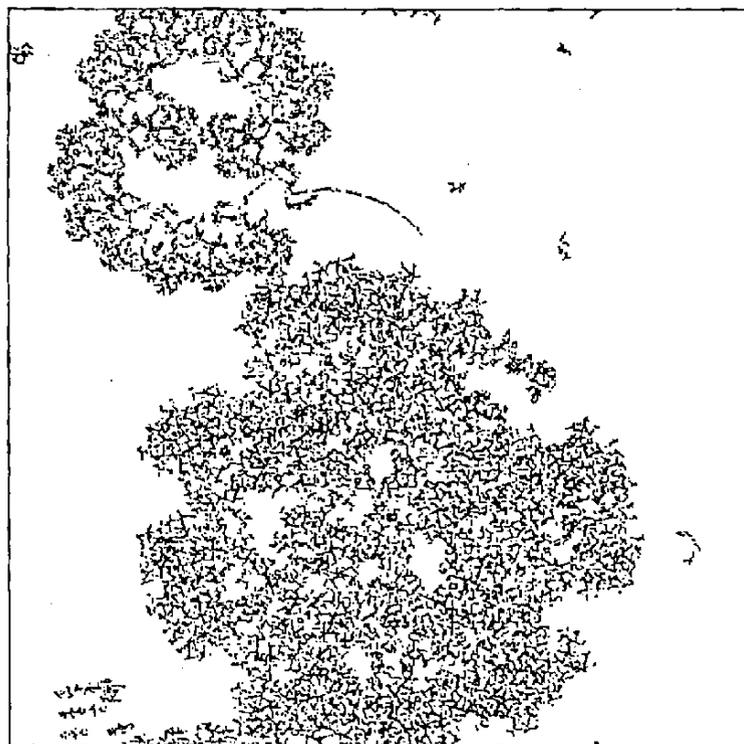
個体の形態の進化を見るため、成長過程での個体間の相互作用がない状況を設定した。つまり、それぞれの個体は1つの細胞から、他の個体からの干渉を一切受けずに成長する。進化は一般的な



図表5.14.1 2次元ユークリッド空間上の発達システム。進化の過程を経て発生した個体の例

遺伝的アルゴリズムと同様の手順に従う。ここで用いた適応度は「40ステップ以内に成長が停止した個体のうち、細胞数の多い方が適応度が高い」というものである。成長が停止しなかった個体には、全て一律に低い適応度を割り当てる。このような適応度評価を用いた結果、一般には巻き貝のような形が発生した。図表5.14.1に、いくつかのシミュレーション結果を示す。シミュレーションでは1世代に含まれる個体の数は36としている。体の成長を止めるには、1つには細胞を前節で説明した停止状態（状態を表す整数が8以上）にする。あるいは、既に存在する他の細胞によって分裂を阻止する必要がある。巻き貝風の形は、後者の方法によって成長を停止させるうまい方法なのである。

生物進化における適応度は、繁殖成功率によって決まる。つまり、いくつの子孫を残せたかによって適応度が決まるのであって、適応度によって子孫を残せる数が決まるのではない。適応度というのは、あくまでも、進化の結果を観察した後に説明を与えるための仮想的な概念に過ぎないのである。そこで一年生草本のような生物を考える。つまり、春、種から成長を始め、秋に種を残して枯れる。残された種は翌年の春に再び芽を出し成長をする。細胞の状態の種類として種状態を1つ追加し、種状態の細胞だけが冬を越すことができ、その他のすべての細胞は枯死することとする。ただし、個体の大きさ、すなわち、個体を構成する細胞の個数に比例して、残せる種の数に制約をつける。つまり、十分に成長できなかった個体は、いくら多くの種を作ったとしても、それら全てが発芽できるわけではない。また、突然変異は全ての細胞分裂ではなく種の生成のときにだけ起きる



図表5.14.2 種で越冬する発達システムの進化の例

可能性があるものとする。この設定は、繁殖成功率に基づく自然選択のモデルとしても不自然ではない。

図表5.14.2に実行例を示す。大きく成長できても、種が実らない個体は淘汰される。多数の同種の個体からなる群落の生成が観察できる。シミュレーション結果を観察して言えることは、繁殖力は、1個体が残せる種の数だけで決まるのではなく、いかに広い範囲に種を分散できるかという点にも強く依存するということである。いくら多くの種を残せても、それらが元の種の付近に密集していたのでは、次の世代の個体が成長するための空間的余裕がなくなり、結局、繁殖力は弱くなる。

#### 〈参考文献〉

- [1] Lindenmayer, A. and P. Prusinkiewicz: Developmental Models of Multicellular Organisms: A Computer Graphics Perspective, in C. G. Langton (ed.), Artificial Life, Addison-Wesley (1989).
- [2] Goldberg, D. E.: Genetic algorithms in search, optimization and machine learning, Addison-Wesley (1989).
- [3] 畝見達夫: 2次元ユークリッド空間上の単純な発達システムの進化, A-Life WORLD「人工生命の美学」展, 1993. 6. 23-8. 30, 東京国際美術館 T-BRAIN CLUB (1993).
- [4] Dawkins, R.: Blind Watchmaker, Longman (1986).
- [5] Sims, K.: Artificial Evolution for Computer Graphics, Computer Graphics, Vol. 25, No. 4, pp. 319-328 (July 1991).
- [6] Tood, S. and W. Latham: Evolutionary Art and Computers, Academic Press (1992).
- [7] 畝見達夫: 模擬育種法とその応用, セミナー「遺伝アルゴリズム/ニューラルネット/ファジィの新しい展開を探る」テキスト, システム制御情報学会, pp. 101-110 (September and October 1993).
- [8] Davis, H.: imogenë (private communication).

### 5.15 学習能力の進化 (創価大学畝見研究室)

進化とは種の単位で世代交替を繰り返しながら個体の設計を変化させることであり、学習とは個体の単位で経験の蓄積によって自らの行動形態を変化させることであるといえよう。進化は個体の生まれつきの性質を変化させる。学習は生まれつきの性質以上のものを環境から獲得する。人間の設計を完成させたのは進化である。つまり、学習機能を含む知能のメカニズムは進化の過程がつくり出したのである。学習機能の進化的な発生について研究することは、知能の理解にも継るものと考えられる。ここでは、動物学習の枠組みである強化学習法について、その学習パラメータを遺伝的アルゴリズムによって最適化することを考える。

学習の課題としては R. Sutton が Dyna アーキテクチャの実験に用いた単純な迷路探索問題

[Sutton 90]を考える。学習者は  $6 \times 9$  の格子世界を、障害物を避けながら固定された出発点から固定された目標点まで、1ステップにつき上下左右のいずれかの方向に1コマずつ移動を繰り返す。目標点に辿り着くと報酬を与え、再び出発点へ強制的に戻す。通常の強化学習と同様に、できるだけ頻繁に報酬を得ることが学習の目的である。各学習者の一生の長さは一定とし環境は出発点、目標点、および障害物の配置によって決まる。環境変化と学習能力の進化の関係を見るために、世代毎に環境が変化する場合と一定の場合について実験を行なった。図表5.15.1に環境が固定の場合に用いた迷路を示す。これは、Suttonの実験で用いられたものと同じであり、局所最適解を含んでいる。図表5.15.2にランダムに設定した迷路の例を示す。

各個体の遺伝子の中には、表形式に表現されたQ値の初期値と、5種類のパラメータを書き込む。Q値の表は迷路の各格子について可能な行為の数だけ用意する。表現型である学習者の仕様を決めるのに必要なパラメータはすべて実数である。そこで、遺伝型の表現としては、各パラメータについて符号なし8ビットの整数表現を用い、比例変換することによって各遺伝情報を実数に変換することとした。

学習者は寿命は一定のステップ数とする。学習者の一生の内、前半は学習段階とみなし、後半において目標点に到達した回数を用いて評価する。評価値をその個体の適応度として淘汰を行なう。

実験の結果としては、世代を経るに従って、変化する各個体の適応度をグラフに表わした。また、500世代における最良の個体の行動選択確率を表わす図も作成した。これによって各個体がどのような過程を経て進化、学習をしているか、また、最適解を得られたかが分かるようになっている。以下の4種類の設定のそれぞれについて10回ずつ、異なる乱数系列を用いてシミュレーションを行なった。

[設定1] 学習なし進化のみ。環境は不変。

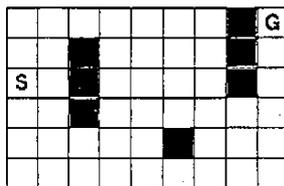
[設定2] 学習なし進化のみ。環境は世代毎にランダムに変わる。

[設定3] 学習あり。環境は不変。

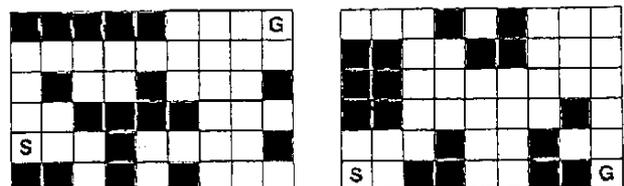
[設定4] 学習あり。環境は世代毎にランダムに変わる。

以下、それぞれの結果について典型的と思われる例を示しながら説明する。

(1) 学習なし環境は不変。比較的初期の段階で最適解が得られてる場合もあるが、局所最適解に捕らわれる場合もあった。冒険率は大きくなる。つまり、Q値の差が大きくなり繁殖することとなり、



図表5.15.1 固定された環境で用いた迷路。  
Sは出発点、Gは目標点、黒く塗りつぶされた方は障害物である



図表5.15.2 ランダムに設定した迷路の例

初期段階から固定された行動を取り続ける傾向があることが窺える。

(2) 学習なし環境は世代毎に変化適応度の値を見てみると、最適な解に収束しようとする傾向が見られない。冒険率の値は低くやや分布している。結果から見ると、適応の困難さは、否定できない。敢えて、適応の後が見られる所としては、最良個体行動選択確率の図表5.15.2の中で右から左へ行こうとする傾向が見られる（迷路中では、出発点は左隅に、目標点は右隅にそれぞれ設定されている）という事から、ランダムな迷路の傾向を発見していこうという働きがあるということぐらいだろう。

(3) 学習あり環境は不変。学習なし環境不変の実験の時と同様に環境に適した行動を生まれつき知っている個体が発生する場合もあるが、学習能力に優れると思われる個体が発生する場合もある。

学習能力に優れる個体が発生する場合、比較的初期の段階で最適解に到達する個体が発生するが、長い世代に渡って、局所最適解に到達する個体と共存する現象が観察される。これは、学習による局所最適解からの脱出が4000ステップでは十分でないことを示しているともとれる。冒険率と学習の傾向としては、共に初期値が比較的 low、逆に最終値が比較的高くなっている。この事は、学習前は比較的幅広い方向選択をしていて、学習するにつれて確実な選択をしていく傾向があるという予測をもたらす。割引率の値は常に最高値付近にある。最良個体の行動選択確率を見ると、各格子について方向による大きな差は見られない。ただし、目標点の直前で、目標点に向かう行動確率が大きくなっている点は、ごく一部ではあるが先天的に環境を知っていると見ることもできる。

先天的に環境を知っている個体が発生する場合に適応度の上昇は、前述の場合と比較して遅い。最終的に局所最適解に収束している。この理由としては、冒険率の値が全体的に高い事、初期の世代における割引率の値が低い事により、比較的短絡的な傾向がある事などがいえる。

(4) 学習あり環境は世代毎に変化。当然ながら適応度は環境の変動に伴って大きく変動するが、学習なしの場合と比較すると、適応度のその差は歴然である。冒険率の初期値は小さく、冒険率の最終値および学習率は0.5付近に比較的広く分布する。割引率は大きくなる。初期行動選択確率の分布はほぼ均質になり、学習によって適応をはかろうとする個体になっていることがわかる。

強化学習の概要、強化学習の能力を持つ個体の集団による集団行動発生、および、GAによる強化学習パラメータの最適化について紹介した。

人間社会も1つの複雑系である。一部の社会学者が人工生命に強い関心を示すのは、人間社会に生命現象の類似性を見ているからである。ただし、人間社会における文化の進化については、ダーウィンより、獲得形質の遺伝を説いたラマルクのほうが適切である。そこでは、それぞれの個体は学習を繰り返す、その結果得られた文化を次の世代に引き継いでいく。本研究が、そのような社会学的な文化の進化モデルの参考にもなれば幸いである。

#### <参考文献>

[Sutton 90] Sutton, R. S. : Integrated Architectures for Learning, Planning, and Reacting Based on Approximating Dynamic Programming. Proceedings of the Seventh International Conference on Machine Learning, 216-224, 1990.

### 5.16 不均衡進化論 (第一製薬(株)分子生物研究室長・古澤満)

本節は、平成7年1月10日に開催された「人工生命研究の課題と展望に関するワークショップ」セッション2(詳細は7.1を参照)での第一製薬(株)分子生物研究室長古澤満氏による研究紹介を記録しまとめたものです。

初めにおことわりしますが、ALと言われたときに、ALって何や? と聞いたぐらいで何もわかっていないことが一つです。わかっていないのに意見を言うのも何でございませうが、ALというのは、一つは生物のある種のロジックというか、事実に基づいてコンピュータシミュレーションをやるか、いかにアーティフィシャルであれ、その答えが生物の次の研究に役立つか、そのどちらかであってほしいと私は個人的には思っております。私が今日お話ししますのは前者のほうでございませう。

我々(古澤と土居)のセオリーはまだ若干新しくて、名前を英語で「Disparity Theory of Evolution」と言います。日本語では進化の不均衡説とよんでおります。

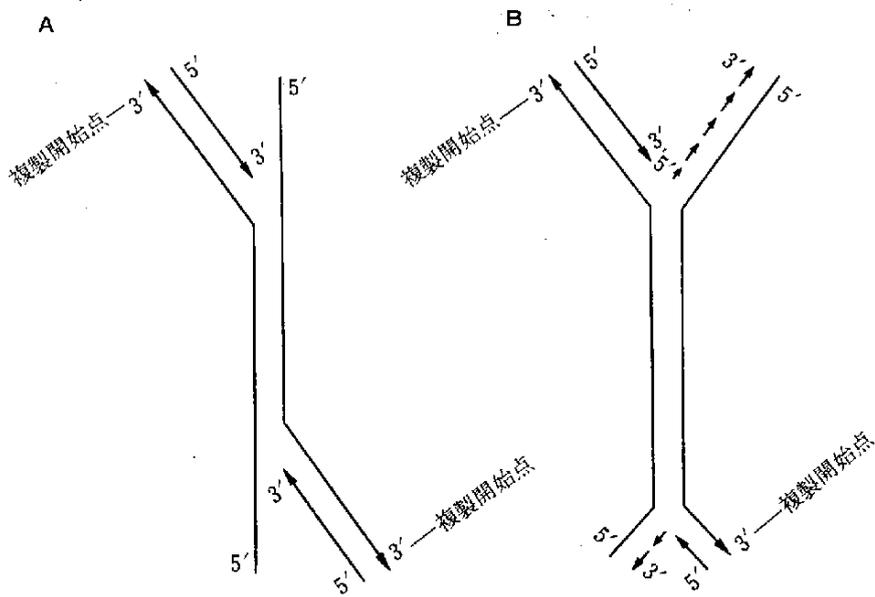
結論を申しますと、進化というものは受け身ではなくて、生物は進化のドライビングフォースを持っている。それはDNA合成の装置そのものにある。ですから決して受け身ではないということですよ。

生物学の難しいことはやめまして、DNAはダブルストランドで、これはA:T, G:Cの関係でペアになっているのはどなたもご存じだと思います。ではどうやって分裂するのかということになります。DNAというのは変なもので、合成の方向がアンチパラレルになっています。

では、互いに逆向きに上端からスッと読んで(合成して)、下端からもスッとこう読んだら一丁終わり、これでダブルストランドが2つできて、これでいいわけです(図表5.16.1-A)。たぶんだれでもこう考えますが、実はそうではなくて、片一方はスッと読むけど片一方は岡崎フラグメントとよばれる断片を作りながら読んでいく(図表5.16.1-B)。そして裂け目はだんだんひろがっていく。まことに変なことになっています。

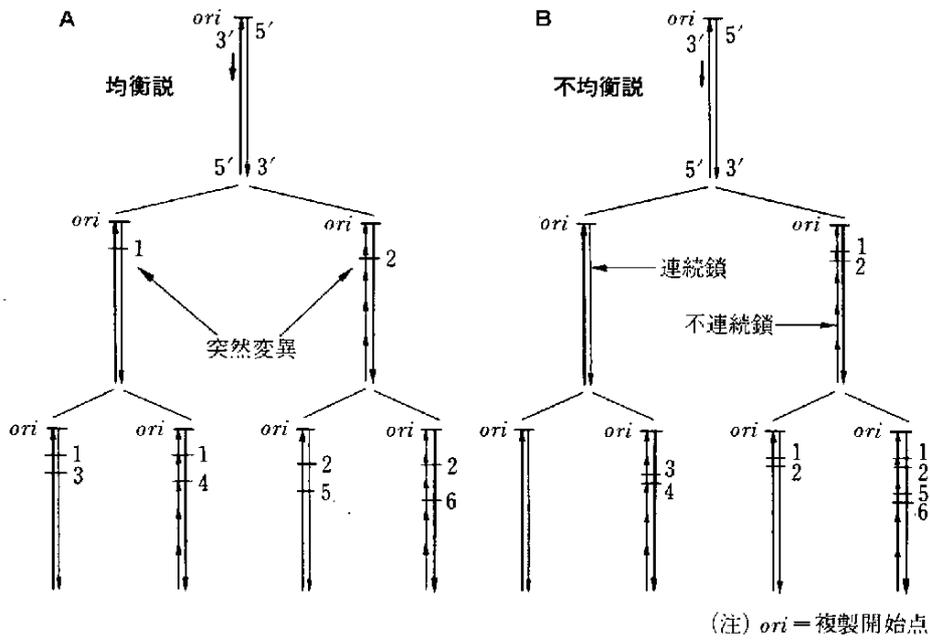
なぜこんな不経済なことになるのであろうかというのが私個人の単純な疑問でありました。実はウイルスはほとんど前者のタイプです。大腸菌から上は後者のタイプで、スッと読むほうを連続鎖、断片を作りながら読んでいくほうを不連続鎖と呼ばさせていただきます。

今までの考え方では、不連続鎖と連続鎖の両鎖に突然変異が確率的にイコールに入り、一つの染色体のなかに突然変異は同じ数だけ入るという考え方でした(均衡(パリティ)モデル、図表5.16.2-A)。ところが、連続鎖のほうは高級乗用車で走って(合成して)、こちら側の不連続鎖は低級と



(BIO INDUSTRY 11, No.9(1994)533~541の図1より改変)

図表5.16.1 DNAの合成



(注) ori = 複製開始点

図表5.16.2 突然変異率の考え方

は言いませんが、トラクターで実は逆を向いて走って（合成して）、前進後退を繰り返す。さらに、この不連続鎖の断片間を修繕しなければいけないというばかげたことをやって、東名を走ったらどっちがエラーが多いかということです（図表5.16.2-B）。だれが考えても直観的にトラクターの方がエラーが多い（不均衡（ディスパリティ）モデル）。そうすると最後の結論は単純で、いつまで

たっても間違わないもの（図表5.16.2-B左端）と無茶苦茶間違うのと（図表5.16.2-B右端）その中間が出てくることになります。それで従来の考え方と我々のとどちらが進化に得かという、明らかに我々のだと思えます。なぜかという、突然変異が入って現在いる生物が絶滅するのがいちばん怖いわけです。連続鎖を受け継ぐと何年たってもその集団は現存する。しかし不連続鎖から冒険野郎も出てくるというわけで具合がいい。すなわちレパートリーが広い。旧来の考え方でもある意味で、レパートリーはものすごく広いですが、実は元の野性型がないということです。

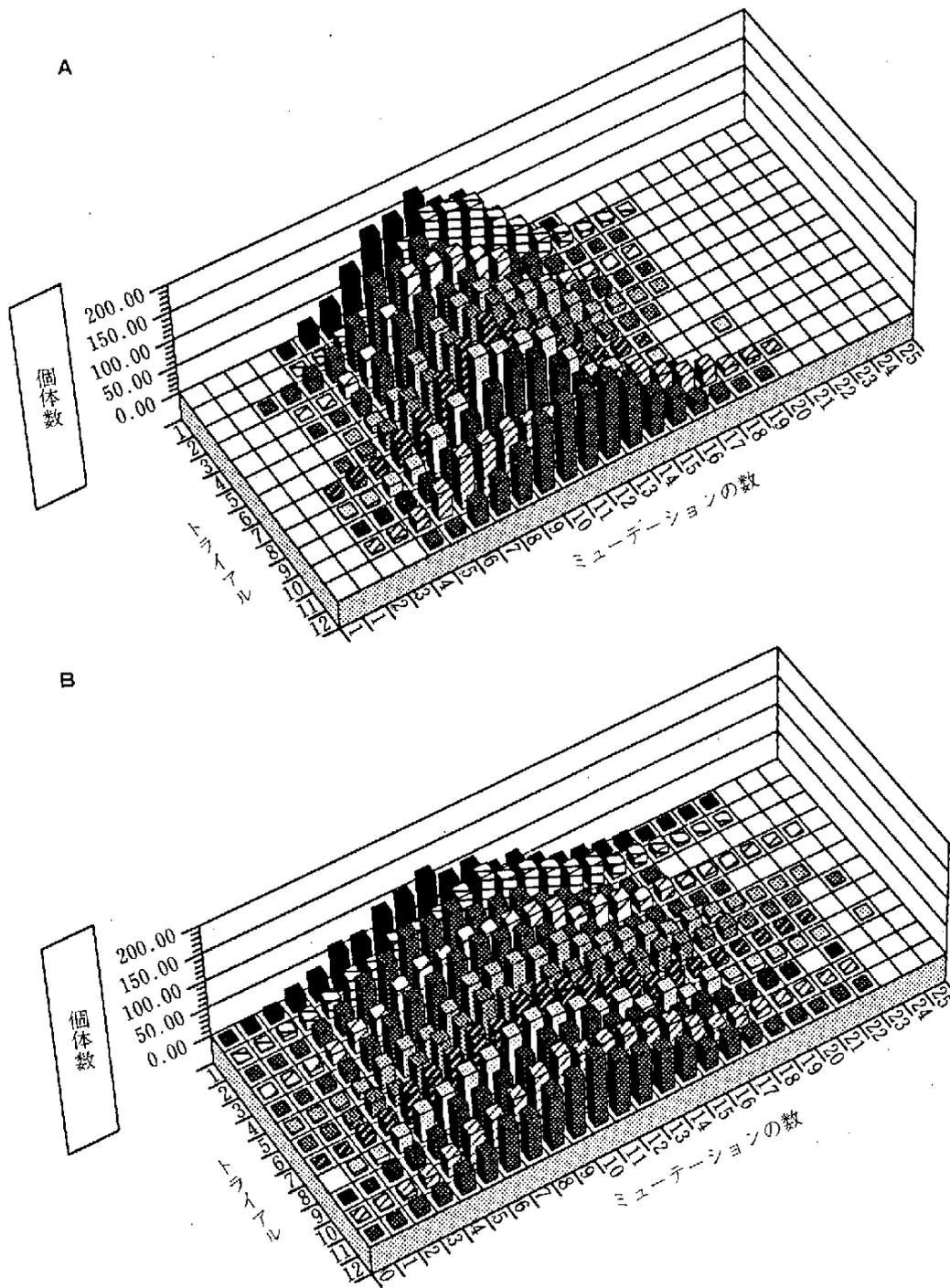
もう一つの特徴は、分裂した子どもを全部見ていただきますと、不均衡説では左側に書いた子どもはフィットネススコアで言えば全部親と同じスコアを持っています。右側は全部変わっているということをご承知ください。すなわち元本保証制度になっている。(笑)競馬で言うと1-3, 1-5と流して買っている感じで、絶対に損しないようになっているわけです。一方はランダムに変異が入るわけです。これがわれわれの説です。

もう一つ、皆様方に念頭に置いていただきたいのは、DNAは分裂した瞬間に親がなくなるということです。セミコンサーバティブに増えるために、親がないということは逆に言うと恐ろしいことです。要するに2匹しか子どもはできないということです。RNAはコピーを取りますから子の数を無限大にできるわけです。したがって親はいつでもいるけれども、DNAのように親がないときにどうやって原点を保証するかというのは、私は不均衡モデルしかないと思っております。これで今日のお話の80%が終わりました。

それじゃ、本当にそうかなというわけです。土居さんがそこで、計算をやってやろうじゃないかということになりまして、4年ほど前に計算をしてくれました。横軸が1匹当たりの突然変異の数、こちら側がシミュレーションのトライで12回、縦軸は個体数です(図表5.16.3)。1回分裂して平均1匹のエラーが入りますから、10世代ですと平均1個当たり10個入ります。ということでディストリビューションをみますと、パリティモデルですと両方とも連続鎖と不連続鎖が1-1だったらこういう鋭い山になります(図表5.16.3-A)。当たり前のことですが、元の野性株はありません。

ところが両鎖間のエラーの頻度を0.001, 1.999と100倍差をつけます。足したら2にしてありますから、トータルの山の面積は一緒ですが、平たくペタンとなってしまっ、先ほどの決定論的表示が合っているということです(図表5.16.3-B)。ですから1回の分裂で染色体に1個突然変異が入るという条件、たぶんこれは自然に近い条件ですが、それだと100倍のフィデリティの差があれば、元の野性株を保証します。1億年たっても今の人間は存在しますということになるわけです。

ではほんとうの生物で100倍あるのかということをお腹菌を使って調べてみました。大腸菌は同じDNA合成酵素 $\alpha$ を両鎖の合成に用います。DNA複製のマシナリーには $\alpha$ とは別にイプシロンというのがあります。これが大事で、トートメリックフォームと言って、A, T, G, CというのはふつうA:T, G:Cと合うんです、2本と3本の水素結合で。ところがpHによって変わるんです。Aの向かいにGが来たり平気です。それではいけないというので、これを直すブルーフリーディングの作用がイプシロンにあります。これでもものすごくフィデリティが上



(J. Theor. Biol. (1992) 157, 127~133の図1を一部改変)

図表5.16.3 均衡説と不均衡説のシミュレーション

がっていますので、イプシロンをつぶします。遺伝子工学でつぶせばいいわけです。

日本人の有名な先生で真木壽治先生と関口陸夫先生が作られた dnaQ49 という名前のミューターが、実は調べてみると我々の欲するところのディスパリティ・ミューターでした。約1万倍、ワイルドタイプよりフィデリティが下がっています。こういうのをを使って、とにかく一方の鎖

の分裂にコントリビュートしているファクターをつぶしていけばいいわけです。この場合は両方つぶしても不連続鎖のほうが突然変異率が実は高いのです。高等生物では、実はこれは非常にうまい具合に  $\alpha$  ではなくて両鎖で違う酵素を使っていますから、一方をつぶすのは簡単です。要するに左と右は違う機械で合成しているということです。まさにトラクターと高級自動車ということになります。

これは専門外の方には少しわかりにくいと思いますが、簡単に説明いたします。クロラムフェニコールを分解する酵素がありますが、クロマイを入れたときにこの酵素をコードする遺伝子をベクターに入れておきますと、クロマイのなかで大腸菌が生きていけるという系を使います。塩基 A を強引に遺伝子の中間に突っ込んでやると、フレームシフトが起こってこの遺伝子は不活になってしまいます。この A がはずれて活性が戻る確率が両鎖のうちどちらが高いかを見たわけです。

やった実験はプラスミドに遺伝子を複製と順方向に入れたのと逆向きに入れたのを使うわけです。詳しい説明はやめますが、これは実はトラクターで読んだほうのストランドがそのまま蛋白になる方向に向いています。こちら側は逆で、高級乗用車が読んだほうのメッセンジャーが読まれるようになっています。遺伝子の向きを引っ繰り返すだけでいいんです。そうするともの見事に前者のほうが変異率が高い。どういうことかということ、不連続鎖の方が変異率がばか高いということです。この研究は今本文男先生と石野良純博士のグループで行われました。

これは一つの例です。実際にどれだけ高いかということ、いろいろな計算をした結果、約50~100倍、この系では不連続鎖の方がエラー頻度が高いということです。ことほどさように生物の実験はそうになっていた。やっぱり両鎖でフィデリティは違っていた。

今度はコンピュータを使って荷物が100種類のナップザック問題を解いてみました。どんなアルゴリズムを作ったかということ、ダブルストランドなジェネティック・アルゴリズムを作りました。A : T, G : C の代わりに 0 : 0, 1 : 1 とやっちゃってベースペアを100個作りました。なぜかということ荷物は100種類あるからです。この人のダブルストランドのストラテジーでは、1 : 1 に当たるところの鉱石を取ってくる。そして分列させます。そのときこちら側は連続鎖で読ませますからほとんど間違わないようにします。不連続鎖で読み取れる側を間違えるようにして、もし後者がスコアが上げればそれを取るし、もし、スコアが上げなければ、連続鎖の方のスコアを使う（親と同じスコア）。

我々は生物屋ですから無性的に分裂したものと、胞子を作って相手側と受精してまた個体を作るというのをシミュレートしました。これは土居さんがやったのですが、いかにも生物学的なことをミミックしたわけです。

1 A の世界には、変異率がディスパリティですと8になっても1になっても0.1でも(1は染色体1本, A はアセクシャル(無性), セクシャリティなし, 8とか1というのは突然変異率で100個に8個とか100個に1個という意味), けっこう生きていますが, パリティだと0.1の変異率ではディスパリティに勝る成績を修めますが, 高変異の条件ではスコアは下がってまいります。ところが染

染色体が2本の場合にはパリティだと集団が消滅する場合があります。変異率が極めて低いとパリティで十分ですけれども、少し高い条件ではディスパリティでないといけない。突然変異がめちゃめちゃに低いということは、パリティもディスパリティも効果としては差はないわけです。ところが少しでも変異率が高いと(2をちょっと超えると)、パリティのスコアが無茶苦茶に悪くなり、突然変異があるスレッシュールドを超えると集団が消滅します。だから染色体が2本でセックスがあるような世界では、絶対にディスパリティでないと生きていけないということを物語っています。

いろいろやったシミュレーションの結果をまとめますと、ディスパリティに有利な条件はポピュレーションが小さくて強いセクションプレッシャーで、ミューテーションレートが高くてセックスがあって、2倍体でけんかの世界。これはまさに人間の世界です。人間の世界はディスパリティが向いている。これに反してパリティで向いているのは、大きなポピュレーションで、弱いセクションプレッシャーで、低いミューテーションレートで、セックスがなくて面白くも何ともない世界です。ノンコンペティティブなワールドです。どんな世界かという、豊栄養培地を使って大腸菌をペトリディッシュの上で飼っている世界だと思ってください。まったく面白くない世界ではパリティのほうが良いということです。



## 第6章 人工生命関連の研究機関

### 6.1 外国の研究機関

人工生命関連の国際会議の開催場所および研究機関の世界マップを図表6.1.1, 6.1.2に示す。

- (1) 米国サンタフェ研究所 (SFI) : (<http://www.santafe.edu/>)

The Santa Fe Institute, 1399 Hyde Park Road, Santa Fe, NM 87501-8943, U.S.A.

サンタフェ研究所は、ユニークな学際的研究機関および教育センターとして1984年に設立された。設立以来、科学における創発的な合成 (Syntheses) を追究する、新しいタイプの科学研究コミュニティの創造に努めてきた。分野の異なる研究者が短期間滞在しながら議論を深めることができる研究機関として運用している。SFIは、伝統的な学問分野の壁を打ち破り、新しい協調的学際的な研究の具現化を模索している。

SFIは人工生命発祥の地であり、人工生命研究のためのWWW (World Wide Web, 以下同様) ホームページを開いている (<http://alife.santafe.edu/>)。研究プロジェクトとしては「スウォーム (群れ)」プロジェクトがある。「スウォーム」とはコンカレントな分散システムのための汎用シミュレータ・パッケージである。そこでは、動的に環境を変えながら大量の自律エージェントがお互いに相互作用することができる。「スウォーム」は、そのようなマルチ・エージェント・システムのデザイン、具現化、実行、分析のための汎用ユティリティを提供する (<http://www.santafe.edu/~nelson/swarm/>)。また、人工生命に関連するものとして、進化型セルラー・オートマタ (EVCA) プロジェクトがある。単純な要素から成り、局所的な相互作用しかないシステムにおいて、どのようにして洗練された創発計算が生成されるのか？ このプロジェクトでは、そのようなプロセスに注目して、遺伝的アルゴリズムを用いて全体的に調和のとれた情報処理をセルオートマタ (CA) が実行できるように進化させるようとしている (<http://www.santafe.edu/project/evca/>)。

- (2) 米国マサチューセッツ工科大学人工知能研究所 : (<http://www.ai.mit.edu/>)

MIT Artificial Intelligence Laboratory

545 Technology Square #822, Cambridge, MA 02139, U.S.A.

MIT AI ラボの主たるゴールは、どのようにすれば知能を示すようなコンピュータを作れるかを理解することである。そこから引き出される2つのゴールは、知的なシステムを構築することと生



図表6.1.1 米国の人工生命関連研究機関マップ



図表6.1.2 欧州の人工生命関連研究機関マップ

物的な知能をいくつかの側面から理解することである。現在の研究には、ロボティクス、視覚、自然言語、現実強調、学習、推論と問題解決、深いエキスパートシステム、工学デザイン、スーパーコンピューティング、および基礎理論などが含まれている。主な新応用テーマとして、情報の伝達、アクセス、分析や現実強調技術、そして薬剤における人工知能の応用などが含まれる。人工生命に関連する研究グループは、ブルックス率いる移動ロボットグループである (<http://www.ai.mit.edu/aimr/mit.html>)。

(3) 米国マサチューセッツ工科大学メディア研究所： (<http://www.media.mit.edu/>)

MIT Media Laboratory, 20 Ames St. 305 B, Cambridge, MA 02139, U.S.A.

MIT メディア研究所は、1985年設立以来、デジタルテレビ、ホログラフィ画像、コンピュータ・ミュージック、コンピュータ・ビジョン、電子出版、人工知能、ヒューマン/マシンインタフェース設計、そして教育関係技術など、幅広く情報技術の先端的研究を進めている。人間の幸福のための新しいメディアを発明し、既存の制約に捕われることなく創造的な研究開拓を行うことを憲章とする。明日（将来）あたりまえになるであろうコンセプトを今日に実験するために、スーパーコンピュータを駆使し、奇抜な入出力デバイスを利用する。新しい展望と望まれる応用の可視化を通して、技術発明をドライブし工学的な行き詰まりを打ち破ろうとしている。人工生命に関連する研究グループとしては“自律エージェント”グループがある (<http://agents.www.media.mit.edu/group/agents/>)。

(4) 米国カリフォルニア大学ロスアンゼルス校： (<http://www.ucla.edu/>)

Department of Computer Science, Department of Biology

University of California-Los Angeles, Los Angeles, CA 90024, U.S.A.

UCLA では、数名の教授たちが直接人工生命の研究に関わっている。研究は、大きくは移動ロボットと、相互作用する生物をモデル化したコンピュータプロセスの相互作用とに分けられる。それらには、人工知能、ニューラルネット、移動自律ロボット、文化的進化や人工生命の生物学的応用などが含まれる。そのような研究と教育とに携わっている教授陣は、人類学、生物学、心理学など文系科学とコンピュータ科学、電気工学、機械工学などの工学系のスタッフである (<http://www.lifesci.ucla.edu/repository/alife/Introduction/>)。

(5) 米国カリフォルニア大学サンディエゴ校： (<http://www.cse.ucsd.edu/>)

Cognitive Computer Science Research Group, Computer Science & Engineering department,

University of California-San Diego, La Jolla, CA 92093, U.S.A.

リチャード・ベローの研究グループでは、自然現象を合成するための人工生命モデルから、関数

最適化など工学的応用に向けた人工的な帰納法としての利用まで、広い範囲で遺伝的アルゴリズムの応用を研究してきた。遺伝的アルゴリズムが、低レベルな生物的な制約から高次レベルのシンボル・コミュニケーションまでの基礎的課題に対して、認知的な適応という新たな視点を与えることができる」と主張している (<http://www-cse.ucsd.edu/usres/rik/>)。人工生命に関連したプロジェクトとしては、人工的環境の物理世界とその環境に住む人工生物の行動を結びつける潜在力エネルギー環境 (LEE) プロジェクトがある (<http://www-cse.ucsd.edu:80/users/fil/>)。

(6) 米国スタンフォード大学: (<http://www-cs.stanford.edu/>)

Computer Science Dept., Margaret Jacks Hall, Bldg 460,  
Stanford University, Stanford CA 94305, U.S.A.

人工生命との関連が深いのは、コンピュータ・サイエンス学部のジョン・コーザの遺伝的プログラミングに関する研究である。遺伝的プログラミングとは、コンピュータが問題解決のためのプログラムを遺伝的に改良することができるように、進化の方法を模擬した発見的手法である。

(7) 米国カリフォルニア工科大学: (<http://www.krl.caltech.edu/>)

W. K. Kellogg Radiation Lab., California Institute of Technology  
Pasadena, CA 91125, U.S.A.

ケロッグ放射線研究所は、物理学関連の研究プログラムとともにガンのX線治療に関する研究を行うため、1931年に設立された。1938年、ガン研究プログラムは解散され、ケロッグは物理研究のみにしぼり、現在理論的および実験核物理研究の広範囲にわたる資金援助を行っている。

人工生命関連の研究としては“*avida*”プロジェクトがある。“*avida*”グループは、核細胞レベルからの進化に関する定量的かつ定性的な説明を構築するために、自動適応遺伝システムを提案している。自動適応遺伝システム (AAGS) は、ティエラ (Tierra) のようなシステムであり、揮発性の遺伝基底と組み合わせられた自動再生システムである。彼らは、これらのシステムが最小の生物システムを表現すると信じている。このグループの目標は、他の多くのプロセスにおいて生物進化と同一視できる創発を示す進化的なシステムを構築することである。現在、AAGS システムのダイナミクスのみならず、直接的な適応学習、適合度ランドスケープの構築モデルなどの研究を進めている (<http://www.krl.caltech.edu/avida/Avida.html>)。

(8) 米国ケース・ウェスタン・リザーブ大学: (<http://www.cwru.edu/>)

Autonomous Agents Research Group, Computer Engineering and Science  
Case Western Reserve University, Cleveland, OH 44106, U.S.A.

ここでの研究には、進化的なアルゴリズムや移動ロボット、計算論的生物学の研究などが含まれる。彼らの狙いは、動物やロボットにおいて、適応行動を生成することができる機構を研究するこ

とである (<http://yuggoth.ces.edu/index.html/>)。

(9) カナダ国カルガリー大学: (<http://www.ucalgary.ca/>)

Department of Computer Science, University of Calgary,

MS 247, 2500 University Drive, NW Calgary, Alberta, Canada T2N 1N4

ここは、リンデンマイヤー・システム (Lシステム) の研究センターであり、形態形成、発達モデル、反応拡散、拡散制限成長、現実的イメージ合成など、生物的なモデリングと可視化に関わる研究を広範に進めている (<http://www.cpsc.ucalgary.ca/projects/bmv/index.html>)。

(10) オーストラリア国立大学: (<http://www.csu.edu.au/>)

Bioinformatics Facility, Australian National University, Canberra ACT 2601  
Australia.

“ここ数年来、複雑系への関心が異常な高まりを見せている。生態系から経済、或いは粒子物理から並列計算まで、それら広範かつ基礎的な現象に関する発見を記述するための新しい概念が出現しつつある。それらの多くは、人工生命、生物複雑、セルオートマタ、カオス、臨界、フラクタル、学習システム、ニューラルネット、非線形ダイナミクス、並列計算、自己組織化など、既に世の中でポピュラーになったものもある。それらは全て、伝統的な学問領域を越えて、複雑系を扱うための新しいパラダイムの出現を示唆している ([http://www.csu.edu.au/complex\\_systems/complex.html](http://www.csu.edu.au/complex_systems/complex.html))。”

(11) 英国サセックス大学: (<http://www.cogs.susx.ac.uk/>)

School of Cognitive and Computing Sciences, University of Sussex at Brighton,  
Falmer, Brighton, BN1 9QH, UK

ブライトンにあるサセックス大学の認知と計算機科学に関わる学部は、計算と認知科学の研究への学際的なアプローチを特徴とし、知的システム研究とそのメカニズムに関する超分野的なバイオニクス研究センターである。この学部は、言語学者、哲学者、心理学者、計算機科学者、および大規模な人工知能グループから構成されている。

人工生命関連のプロジェクトとして、適応行動と人工生命のシミュレーション・グループがあり、進化ロボット、並列遺伝的アルゴリズムの理論的研究とツール開発、ニューラルネットの進化などに関する研究を進めている。

(12) ドイツ国立情報大学: (<http://www.gmd.de/>)

FIT-the GMD Institute for Applied Information Technology

AI Research Division, GMD (German National Research Center for Computer Science),

Schloss Birlinghoven, 53754 Sankt Augustin, Germany

この研究テーマには、下水道用のロボットの設計と構築に特化した認知ロボティクス、都市計画プロセスにおける建築家支援ツールのための認知デザイン、および文化と技術、グローバル化の方法としてのニューメディアとの相互作用を探求する文化・メディア・技術などの研究がある (<http://nathan.gmd.de/ai-focus.html>)。

人工生命に関連するプロジェクトには、ALF (Artificial Life approaches with Mobile Fischer-technik Robots) と個別化されたロボットの社会における相互作用に関する研究がある (<http://nathan.gmd.de/projects/alf.html>)。

(13) ドイツ国ダートモンド大学: (<http://www.informatik.uni-dortmund.de>)

Department of Computer Science, University of Dortmund, D-44221 Dortmund, Germany

自然における並列問題解決に関する強力な研究グループがあり、人工生命に関連する研究も進めている。

(14) スイス国チューリッヒ大学: (<http://www.unizh.ch/>)

AI Lab., Institutes for Informatics, University of Zurich, Winterhurerstrasse 190, CH-8057, Zurich, Switzerland

この研究所では、脳とロボットシステムにおける両側制御、実世界タスクのための自律エージェントの設計原理、情動ロボット、実世界ドメインへの強化学習などの自律ロボットに関する研究、および進化的計算論や人工生命 (創発的知能のためのパラダイムとしての進化技術やセルオートマタ) の研究が進められている (<http://josef.ifi.unizh.ch/groups/ailab/ailab.html>)。

(15) スイス州立工科大学: (<http://www.epfi.ch/>)

Logic Systems Laboratory, The Swiss Federal Institute of Technology, CH-1015 Lausanne, Switzerland

この研究プロジェクトは、生物学と工学との橋渡し、より正確には発生学とFPGA (Field Programmable Gate Array) などのロジックシステム間を結ぶ方法論の確立を目指している。受精卵からの細胞の増殖分裂および機能分化をモデル化したハードウェアによる基本機構は、新しい細胞論理系のプログラミングに応用できることを期待している (<http://ls1sun5.epfl.ch/>)。

(16) Ecole Normale Supérieure: (<http://www.ens.fr/english.html>)

Groupe de Bioinformatique URA686 CNRS, Ecole Normale Supérieure, 46 rue d'Ulm, 75230 Paris Cedex 05, France

メイヤー (J. A. Meyer) が率いる適応計算グループは、フランスにおける適応計算に関する随一の研究センターである (ftp. ens. fr : /pub/reports/biologue)。

(17) フランス国パリ大学

The University of Paris, Universite Pari 6-C169, 75252 Paris cedex 05, France

人工生命研究プロジェクト「蟻の巣活動のモデリング (MANTA)」は、自律エージェントのシミュレーションを通して、物理世界の概念とエージェントとの統合を目指している。

(18) C.R.E.A. Ecole Polytechnique

C.R.E.A. Ecole Polytechnique, 1 rue Descartes, F-75005 Paris, France

免疫系と生物系の現象一般に関する理論的研究センターである。このセンターを率いるヴァレラの研究の興味はオートポイエシス系から知能の哲学的側面まで広範囲に及ぶ。

(19) ベルギー国ブリュセル自由大学 : (<http://www.vub.ac.be/>)

Artificial Intelligence Laboratory, Vrije Universiteit Brussel,

Pleinlaan 2, 1050 Brussels, Belgium

人工知能 (AI) に対する新しいアプローチのパイオニア的研究所である。“パラダイムは、内的なシンボル・モデルから知能の座へ、更にエージェントと環境間の相互作用プロセスに向けたエージェントの処理へとシフトしている。エージェントを、現実世界の動的なプロセスとの連続的な相互作用を特徴とする、複雑で動的なシステムと捉えることが重要である (<http://arti.vub.ac.be/www/brochure>)。”

(20) (19)と同

Center for Non-linear Phenomena and Complex Systems,

CP 231, Univesite Libre de Bruxelles, Bld. de Triomphe, 1050 Brussels, Belgium

この非線形現象と複雑系研究センターでは、人工生命的な考え方にに基づき、社会的昆虫における集団的な計算に関する理論的、実験的研究が進められている (<http://www.ulb.ac.be>)。

## 6.2 国内の研究機関 (順不同)

以下, 1) 部署名, 2) 連絡先, 3) テーマ名, 4) テーマ内容, 5) 研究者名, 6) 代表的な成果文献, である。(順不同)

### (1) 筑波大学 (University of Tsukuba)

住 所: 〒305 つくば市天王台1-1-1

#### 1) 構造工学系

2) (TEL)0298-53-5255, (FAX)0298-53-5207, (E-mail) hoshino@Kz.tsukuba.ac.jp

3) 人工生命の研究全般, 人工生命によるコミュニケーションの創発に関する研究など

4) 人工生命の手法を利用して, コミュニケーションの創発や協調行動のシミュレーションを行う。

5) 星野 力 (構造工学系), 徳永幸彦 (生物科学系), 葛岡英明 (構造工学系)

6) 星野 力「人工生命の夢と悩み」裳華房, 1994年

### (2) 筑波大学 (東京)

The University of Tsukuba, Tokyo (英語略称: GSSM Tsukuba Univ)

住 所: 〒112 東京都文京区大塚3-29-1

#### 1) 経営システム科学専攻

2) (TEL)03-3942-6855, (FAX)03-3942-6829,

(E-mail) terano@gssm.otsuka.tsukuba.ac.jp

3) GA, 模擬育種法の実問題への適用/動的環境における分類子システムの学習と知識獲得

5) 寺野隆雄

6) Terano, t., Muro, z.: On-the-Fly knowledge Base Refinement by a Classifier System, AI-Communications, Vol. 7, No.2, June, 1994, pp. 86-97.

### (3) 名古屋大学工学部 (School of Engineering, Nagoya University)

住 所: 〒464-01 名古屋市千種区不老町

#### 1) 電子情報工学科生体電子工学講座

2) (TEL)052-789-3167, (FAX)052-789-3166,

(E-mail) ishiguro@bioele.nuee.nagoya-u.ac.jp

3) 免疫情報処理機構の工学モデルならびにその自律移動ロボットへの適用に関する研究

4) 生体内情報処理機構の中でも免疫系は, 脳神経系・遺伝系等に比べて未だ工学的研究は皆無に等しい。本研究では, 工学的見地から免疫系を模擬し, それを用いた自律移動ロボットの新

しい制御法の構築を目指す。

- 5) 石黒章夫
- 6) 石黒章夫, 渡邊裕司, 内川嘉樹: 免疫ネットワークを用いた自律移動ロボットの行動制御の一手法, 第6回自律分散システム・シンポジウム資料, pp. 115-1, 20 (1995)

- 
- 1) 電子情報学科生体電子工学講座
  - 2) (TEL)052-789-2729, (FAX)052-789-3166,  
(E-mail) furu@bioele.nuee.nagoya-u.ac.jp
  - 3) 人工生命的アプローチによる発想支援
  - 4) 形態と行動の共進化を通して, エンジニアリングデザインのための発想支援を目指す。
  - 5) 古橋 武
  - 6) 国際会議2件 (WWW '94, ETFA '94), 3件 (ECAL '95, ICGA'95, BIES'95投稿中)

- 
- 1) 理学部分子生物学科
  - 2) (TEL)052-789-2585, (FAX)052-789-2989, (E-mail) 45564a@nucc.cc.nagoya-u.ac.jp
  - 3) 人工細胞構築
  - 4) 人工脂質二重層膜小胞 (リポソーム) に細胞骨格タンパク質を封入し, 自己組織化によって微小管やアクチン繊維を形成させ, 細胞モデルを構築する。
  - 5) 宝谷絃一, 伊藤知彦, 滝口金吾, 金子智行
  - 6) Morphological changes in liposomes caused by polymerization of encapsulated actin and spontaneous formation of actin bundles. H.Miyata and H.Hotani, Proc.Natl. Acad. Scie USA, 89, 11547 (1992)

- 
- 1) 大学院マイクロシステム工学専攻
  - 2) (TEL)052-789-4428, (FAX)052-789-3909, (E-mail) fukuda@mein.nagoya-u.ac.jp
  - 3) ①セルラーロボティクス・システム  
②免疫システムとそのロボット工学への応用
  - 4) ①要素として細胞 (セル) からなる非均質学ロボットシステムの構成方法と, その人工生命体としてのシステム制御アーキテクチャ  
②生体学の免疫システム (Immunity System) を用いたロボット群システムの制御システム
  - 5) 福田敏男
  - 6) "Cellular Robotics and Microbotic System" World Scientific (1994), by T.Fukuda, T.Ueyama

- 1) 大学院工学研究科, 電子機械工学専攻
- 2) (TEL)052-789-2741, (FAX)052-789-2738,  
(E-mail) yuasa@ishidalab.nuem.nagoya-u.ac.jp
- 3) パターン形成とカオスとコスモスのはざま
- 4) 発展方程式でモデル化される連続系のパターン形成理論はかなり整備されている。それに対し, セルラーオートマタに代表される離散系のパターン形成は, 複雑なことが起こることは実験されているが, 理論的な解析があまり進んでいない。そこを目指して研究している。
- 5) 湯浅秀男(理化学研究所バイオメテックコントロール研究センター非常勤), 山田剛史(95年3月で卒業), 伊藤正美(中部大学・理化学研究所バイオメテックコントロール研究センター長)
- 6) ルールの対称性を考慮した遺伝アルゴリズムによる T1/2-task の解の探索, 計測自動制御学会, 第6回自律分散システム・シンポジウム資料, p. 205-208, 1995

(4) 横浜国立大学 (Yokohama National University: YNU)

住 所: 〒231 横浜市保土ヶ谷区常盤台156

- 1) 経営学部経営学科
- 2) (TEL)045-335-1451, (FAX)045-335-2596, (E-mail) sakura@business.ynu.ac.jp
- 3) 人工生命の歴史と哲学
- 4) 人工生命の基礎論と歴史的背景を, 進化生物学・動物行動学との関連で位置づける。さらに, 複雑系のモデルとして, 人間組織や社会への適用の方法論を検討する。
- 5) 佐倉 統
- 6) 動き始めた人工生命 (同文書院, 1993)

(5) 電子技術総合研究所 (Electrotechnical Laboratory: ETL)

住 所: 〒305 茨城県つくば市梅園1-1-4

- 1) 情報アーキテクチャ部計算機構研究室
- 2) (TEL)0298-54-5377, (FAX)0298-58-5871, (E-mail) higuchi@etl.go.jp
- 3) 進化するハードウェア
- 4) FGA (Field Programmable Gate Array) 等の書き替え型 LSI と遺伝的学習を組み合わせることによって, ハードウェア自身が環境に応じて最適な性能をあげるために自らのハードウェア構成を変更し得る「進化するハードウェア」を構築する。
- 5) 樋口哲也, 岩田昌也, 田中敏雄, 大東栄夫, 伊庭齊志, B. Manderick
- 6) T. Higuchi, H. Iba, T. Niwa, T. Furuya, "A parallel architecture for genetic based evolvable hardware", 2nd Int. Workshop on Parallel Processing for AI (IJCAI 93

Workshop), Aug. 1993.

---

- 1) 情報アーキテクチャ部・計算機構研究室
  - 2) (TEL)0298-58-5865, (FAX)0298-58-5871, (E-mail) inayoshi@etl.go.jp
  - 3) 細胞もどき (celloid) 研究
  - 4) 多細胞生物で見られる、「細胞間の局所的相互作用を通じて細胞集団全体の大域的秩序が創発する現象」を人工的に再構成する。
  - 5) 稲吉宏明
  - 6) H. Inayoshi: "Simulating Natural Spacing Patterns of Insect Bristles Using a Network of Interacting Celloids", 'Artificial Life IV' MIT Press (1994).
- 

- 1) 知能情報部推論研究室
- 2) (TEL)0298-58-5195, (FAX)0298-58-5918, (E-mail) iba@etl.go.jp
- 3) 進化論的な学習手法
- 4) 人工生命の考え方に基づく探索, 問題解決。遺伝的プログラミングとその応用, 特に人工知能の従来手法との統合の研究。
- 5) 伊庭斉志, 佐藤泰介
- 6) "Evolutionary Learning Strategy using Bug-Based Search", Proc. of 13th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI93), 1993

(6) 京都大学 (Kyoto University)

住 所: 〒606-01 京都市左京区吉田本町

- 1) 工学部精密工学教室
- 2) (TEL)075-753-5201, (FAX)075-771-7286,  
(E-mail) d52754@sakura.kudpc.kyoto-u.ac.jp
- 3) 自己組織的計算による知的制御と問題解決
- 4) 制約指向の観点からのファジィ理論と自然システムのもつ階層性に着目することにより, 遺伝的アルゴリズム・強化学習・シナジェティクス・カオス理論などを導入した自己組織化・学習・適応機能を有する問題解決の枠組みとこれに基づいた知的制御システム・自律分散問題解決システムの構築。
- 5) 片井 修, 榎木哲夫, 堀内 匡 (博士後期課程)
- 6) 片井 修, 堀内 匡, 松原繁夫, 榎木哲夫, 岩井壯介: 連続変量・ファジィ制約を含む制約充足問題解決のための自律分散システム, 計測自動制御学会論文集, Vol. 31, No. 5, 1995 (掲載予定)

(7) 理化学研究所 (The Institute of Physical and Chemical Research: RIKEN)

住 所: 〒351-01 埼玉県和光市広沢 2-1

- 1) 化学工学研究室
- 2) (TEL)048-462-1111ext. 3144, (FAX)048-462-4658, (E-mail) asama@cel.riken.go.jp
- 3) 小型ロボット群による協調技術の開発
- 4) 小型自律ロボット群の開発, 自律ロボット群の協調行動のための群知能化技術の開発, 人間とロボット群との協調技術の開発などを行う。
- 5) 浅間 一, 嘉悦早人, 遠藤 勲, 鈴木昭二
- 6) Hajime Asama, Koichi Ozaki, Yoshiki Ishida, Kazutaka Yokota, Akihiro Matsumoto, Hayato Kaetsu, Isao Endo: Strategy for Cooperative Motion of Multiple Robots in a Decentralized Robotic System, SME Trans. on Robotics Research, in printing, 1995 (in printing)

(8) 中央大学 (Chuuou University)

住 所: 〒192-03 東京都八王子市東中野742-1

- 1) 商学部
- 2) (TEL)0426-74 3519, (FAX)0426-74-3516, (E-mail)しばらくは deguchi@glocom.ac.jp
- 3) 人工生命の社会経済的エージェントへの適応——Virtual Economy Gaming and Poly Agent System——
- 4) 環境の中で進化するマルチエージェントシステムの研究としての人工生命を, その対象を社会, 経済的なエージェントに拡大することで, エージェントの内部モデルの学習, 高次構造の形成などを含むモデルを具体的な経済系を事例として研究する。
- 5) 出口 弘
- 6) 出口弘, 国民経済のマルチエージェント・システムとしてのゲーミングシミュレーション, シミュレーション&ゲーミング, Vol. 4 No. 1, Sep., pp. 112-128, 1994 (日本シミュレーション&ゲーミング学会 (JASAG) 学会誌)

(9) ㈱ソニーコンピュータサイエンス研究所 (Sony Computer Science Laboratory Inc.)

住 所: 〒141 東京都品川区東五反田 3-14-15 高輪ミュージズビル 3 F

- 2) (TEL)03-5448-4380, (FAX)03-5448-4380
- 3) Emergence and Evolution of Collective Behavior of Autonomous Agents/Robots
- 4) 動的に変化する系において動作する自律エージェントの集団行動のダイナミクス, 集団行動の進化のダイナミクス, 及び進化方法に関する研究。
- 5) 沼岡千里 (Chisato Numaoka)

6) Chisato Numaoka, "Phase Transitions in Instigated Collective Decision Making", to appear in Adaptive Behavior Vol. 3, No. 2, 1995.

---

2) (TEL)03-5448-4380, (FAX)03-5448-4380

3) Evolution of Neurogenesis and Evolutionary Large Scale Chaos

4) i) Investigation of evolution of complex systems such as neural networks.

ii) Studies of evolutionary large scale chaos as a basic mathematical model of biological phenonema, such as morphogenesis, differentiation, neurogenesis.

5) 北野宏明 (Hiroaki Kitano)

6) Kitano, H., "A Simple Model of Neurogenesis and Cell Differentiation based on Evolutionary Large-Scale Chaos", Artificial Life, Vol. 2, No. 1, 1995.

(10) 埼玉大学工学部 (Saitama University)

住 所：〒338 浦和市下大久保255

1) 機能材料工学科

2) (TEL)048-858-3531, (FAX)048-855-2889, (E-mail) husumi@biomal.saitama-u.ac.jp

3) 進化分子工学手法の開発

4) (生体) 高分子が進化する条件を吟味して、種々の遺伝子型・表現型対応付け戦略を持つ進化実験系を構成している。

5) 伏見 謙 et al.

6) Selection and Evolution of Bacteriophages in Cellstat, Adv. Biophys. 25, 1-43 (1989)

(11) ㈱リコー情報通信研究所 (R&D Center, Ricoh Co., Ltd.)

住 所：〒222 横浜市港北区新横浜 3-2-3

1) ソフト工学研究センター

2) (TEL)045-477-1578, (FAX)045-477-1563, (E-mail) sawai@ic.rdc.ricoh.co.jp

3) 新しい情報処理原理に基づく研究

4) NN, GA, GP, ALife などの進化論的計算機構の基礎並びに応用研究を実施している。最近 は GA による画像復元, GP によるカオスの同定, NN による画像再構成などの実験に取り組んでいる。

5) 沢井秀文

6) 高津, 沢井他「画像のベイズ復元への遺伝的アルゴリズムの適用」信学論 D. II. vol. 77-D-II, No9, pp. 1768-1777, '94, 9月など。

(12) 慶応義塾大学 (Keio Univ)

住 所：〒223 横浜市港北区日吉3-14-1

- 1) 理工学部
- 2) (TEL)045-560-1153, (FAX)045-560-1151, (E-mail) mario@mt.cs.Keio.ac.jp
- 3) 人工生命モデル
- 4) 各種人工生命モデルについて検討し、開放型プログラミングやマルチエージェントシステムとの関連を研究している。
- 5) 所 真理雄
- 6) マルチエージェントシステム研究の目指すもの、ソフトウェア科学会誌 (コンピュータソフトウェア) Vol. 12, No. 1, 1995

(13) 慶応義塾大学環境情報学部

(Keio University, Department of Environmental Information)

住 所：〒252 藤沢市遠藤5322

- 1) 富田研究室
- 2) (TEL)0466-47-5111, (FAX)0466-47-5099, (E-mail) mt@sfc.keio.ac.jp
- 3) i) 進化シミュレーション, ii) ゲノム情報処理
- 4) i) 囚人のジレンマ等の非ゼロ和協力ゲームの戦略に関する淘汰/進化シミュレーションを行なう。  
ii) DNA 配列を言語ととらえ、様々な手法を用いてコンピュータ解析する。
- 5) i) 富田 勝, 神成 淳, 矢野周一, 斉藤輪太郎, 城戸 隆 ほか  
ii) 富田 勝, 原 淳子, 山平恵子, 上田 真, 清水反益, 内藤真由美 ほか
- 6) "Sacrificial Acts in Single Round Prisoner's Dilemma" M. Tomita & T.Kido, Informatica 18 (1994) pp 411-416

(14) 豊橋技術科学大学 (TOYOHASHI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY: TUT)

住 所：〒441 豊橋市天伯町字雲雀ヶ丘1-1

- 1) DEPARTMENT OF INFORMATION AND COMPUTER SCIENCES
- 2) (TEL)0532-47-0111, (FAX)0532-48-3472, (E-mail) koji@system.tutics.tut.ac.jp
- 3) 創発的機能形態のシステム理論
- 4) ①自体分数システムの機能と構造に関する研究, ②群ロボットの協調制御
- 5) 伊藤宏司

(15) 東京大学生産技術研究所

(Institute of Industrial Science, The University of Tokyo : IIS)

住 所：〒106 港区六本木7-22-1

- 1) 第三部 藤田 (博) 研究室
- 2) (E-mail) fujita@iis. u-tokyo. ac. jp
- 3) 免疫系に学ぶ工学システム
- 4) 免疫系は、脳神経や内分泌系とともに生体の情報処理を行う分散系である。遺伝子のかき混ぜ組み替えとクローン選択による学習戦略などを工学システムに応用したい。
- 5) 藤田博之
- 6) 藤田, 合原: 免疫系と記憶, 電子情報通信学会誌, 73巻4号 pp326-332 (1990)

(16) 九州大学理学部 (FACULTY OF SCIENCE, KYUSHU UNIV.)

住 所：〒812-81 福岡市東区箱崎6-10-1

- 1) 生物学教室 数理生物学講座
- 2) (TEL)092-641-1101(4439), (FAX)092-632-2742,  
(E-mail) yiwasscb@m. box. nc. kyushu-u. ac. jp
- 3) 生命現象の数理モデルの研究
- 4) 有性生殖の進化, 生活史スケジュールの進化, 食物網グラフ, 森林動態などのモデリング。  
発生プロセスにおける遺伝子ネットワークのニューロコンピューティングによる解析
- 5) 巖佐 庸 (教授), 松田裕之 (助教授), 佐々木 顕 (助手), 武田裕彦 (助手)

(17) 大阪大学 (OSAKA UNIVERSITY)

住 所：〒560 豊中市待兼山1-5

- 1) 文学部哲学哲学史
- 2) (TEL)06-850-5096, (FAX)06-850-5091
- 3) 人工生命に関する哲学的視点
- 4) AIと哲学以来の問題点を A-Life との関わりにおいても検討。
- 5) 伊東道生
- 6) 創成科学フォーラム第2号「かたち・機能・素材」

(18) 徳島大学 (University of Tokushima)

住 所：〒770 徳島市南常三島町2-1

- 1) 工学部知能情報工学科
- 2) (TEL)0886-56-7509/0886-23-2311, (FAX)0886-56-7511/0886-54-9632,  
(E-mail) ono@is. tokushima-u. ac. jp

- 3) 人工生物群による協調関係の組織化
- 4) 未知の環境で自律的に振る舞う人工生物群に試行錯誤的あるいは遺伝的に環境に適応させ、それらに適切な協調関係に組織化させることを目指している。
- 5) 小野典彦
- 6) N. Ono, T. Ohira, and A.T. Rahmani: Emergent Organization of Communication in Symbiotic Artificial Organisms, Proc. of 14th IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control, Innsbruck, February, 1995. (in press)

(19) 神戸大学 (Kobe University)

住 所: 〒657 兵庫県神戸市灘区六甲台町1

- 1) 工学部機械工学科知能機械講座 (工学部上田研究室)
- 2) (TEL)078-803-1123, (FAX)078-803-1131, (E-mail) ueda@mecb. Kobe-u. ac. jp
- 3) 生物指向型生産システム
- 4) 発生・成長・適応・進化の特徴を備えた人工物を創成するボトムアップ型・自律分散型・局所決定型の生産システムの理論構築を行っている。
- 5) 上田完次, 大倉和博
- 6) 著書“生物指向型生産システム”工業調査会 (1994)

- 
- 1) 工学部機械工学科知能機械講座 (工学部上田研究室)
  - 2) (TEL)078-803-1123, (FAX)078-803-1131, (E-mail) ueda@mecb. Kobe-u. ac. jp
  - 3) 適応同調機構による自律ロボットの行動学習
  - 4) 単体と群レベルにおける自律ロボットの行動学習アーキテクチャをカオスを応用して構築する。
  - 5) 上田完次, 中村陽一郎
  - 6) “カオス関係子ネットによる協調関係の創発機構に関する研究”日本機械学会講演論文集, No. 95-1, 77 (1995).

- 
- 1) 工学部機械工学科知能機械講座 (工学部上田研究室)
  - 2) (TEL)078-803-1119, (FAX)078-803-1131, (E-mail) ohkura@mecb. Kobe-u. ac. jp
  - 3) 中立突然変異型遺伝的アルゴリズム
  - 4) 冗長に表現されたストリングを使った遺伝的アルゴリズムでの集団の挙動制御に関する考察を行っている。
  - 5) 上田完次, 大倉和博
  - 6) “非定常関数最適化問題のための遺伝的アルゴリズム”システム制御情報学会論文誌, Vol. 39

- 1) 工学部情報知能工学科知的システム講座
  - 2) (TEL)078-881-1212内線5555, (FAX)078-803-1207, (E-mail) murao@kobe-u. ac. jp
  - 3) i) 遺伝的プログラミングの手法を用いたニューラルネットワークの学習則の獲得  
ii) 遺伝的アルゴリズムを用いた補食者-被食者生態系モデル
  - 4) i) ニューラルネットワークの学習則を遺伝的プログラミングの枠組みを用いて獲得する。  
すなわち、学習則を表す数式を乱数により変化させる突然変異と、遺伝子どうしの部分木を交換する交叉を用いて、学習則そのものを進化させる。  
ii) 補食者-被食者系において、個体間のルールに従って個体の行動を決定する。また GA を用いて進化させ、生態系の大域的な秩序を観測した。
  - 5) i) 村尾 元, 北村新三  
ii) 前田美和子, 村尾 元, 北村新三
  - 6) 計測自動制御学会第20回システムシンポジウム, 第20回知的システムシンポジウム, 第5回ニューラルネットワークシンポジウム, 第14回離散事象システム研究会——合同シンポジウム予稿集
- (20) ㈱エイ・ティ・アール人間情報通信研究所  
(ATR Human Information Processing Research Laboratories)  
住 所：〒619-02 京都府相楽郡精華町光台2-2
- 1) 進化システム研究室
  - 2) (TEL)0774-95-1070, (FAX)0774-95-1008, (E-mail) katsu@hip.atr.co.jp
  - 3) 脳コミュニケーションのための進化システムの研究
  - 4) 脳内情報処理のモデル化に人工生命の考え方を導入し、自律性と創造性に富む新しい情報処理系, すなわち、進化するシステムとしての人工脳の創出を目指した研究を進めている。
  - 5) 下原勝憲, トーマス・レイ, フーゴ・デガリス, 邊見 均, 和田健之介, スンバエ・チョーなど。
  - 6) K. Shimohara: Evolutionary Systems for Brain Communications——Towards an artificial Brain——, Brooks and P. Maes (eds.), Artificial Life IV, MIT Press, pp. 3-7 (1994) 等多数。
- (21) 工業技術院生命工学工業技術研究所  
(National Institute of Bioscience Human Technology: NIBH)  
住 所：〒305 つくば市東1-1

- 1) 人間環境システム部 情報伝達機能研究室
- 2) (TEL)0298-54-6760, (FAX)0298-54-6762, (E-mail)hyokoi@nibh. go. jp.
- 3) 波動場を用いた生命体モデル構築に関する基礎研究
- 4) 生物の柔軟性や適応的能力の工学的応用を目的として、波動場と呼ばれる波動情報を媒体とする情報交換のための場を用いた、アメーバ様の変形行動と探索行動のモデル化。
- 5) 横井浩史
- 6) 横井浩史, 嘉数侑昇, 波動場を用いた情報処理に関する基礎研究 (多重波動場モデルの構築), 機論C編, 59巻, 560号, pp. 1115-1121, 1993.

- 
- 1) 人間情報部 行動制御研究室
  - 2) (TEL)0298-54-6760, (FAX)0298-54-6762, (E-mail) rhashimoto@nibh. go. jp.
  - 3) 人工生命アルゴリズムによる動的システムの適合化手法の研究
  - 4) 動的システムの制御系の適合化問題として制御系の次数などの離散パラメータの最適化を学習と遺伝を複合化した方法論により, 6足歩行ロボットのエネルギー最小歩行モードの自己組織的生成問題を解決。
  - 5) 橋本亮一, 久場康良, 熊谷徹

(22) 北海道大学 (Hokkaido University)

住 所: 〒060 北海道札幌市北区北13条西8

- 1) 工学部嘉数研究室
- 2) (TEL)011-706-6443, (FAX)011-700-0507, (E-mail) kakazu@nibh. go. jp.
- 3) 創発的学習
- 4) 適応的に大域的共通特性を創発させることにより, 自律性と合目的性を獲得させるような方法論の開発と組み合わせ最適化やロボット制御などへの応用研究。
- 5) 嘉数侑昇, 三上貞芳, 鈴木恵二
- 6) 嘉数侑昇, 鈴木恵二: 人工生命とシミュレーション。日本シミュレーション学会論文誌, Vol. 13, No.4: pp292-300 (1994)

(23) 奈良女子大学 (Nara Women's University: NWU)

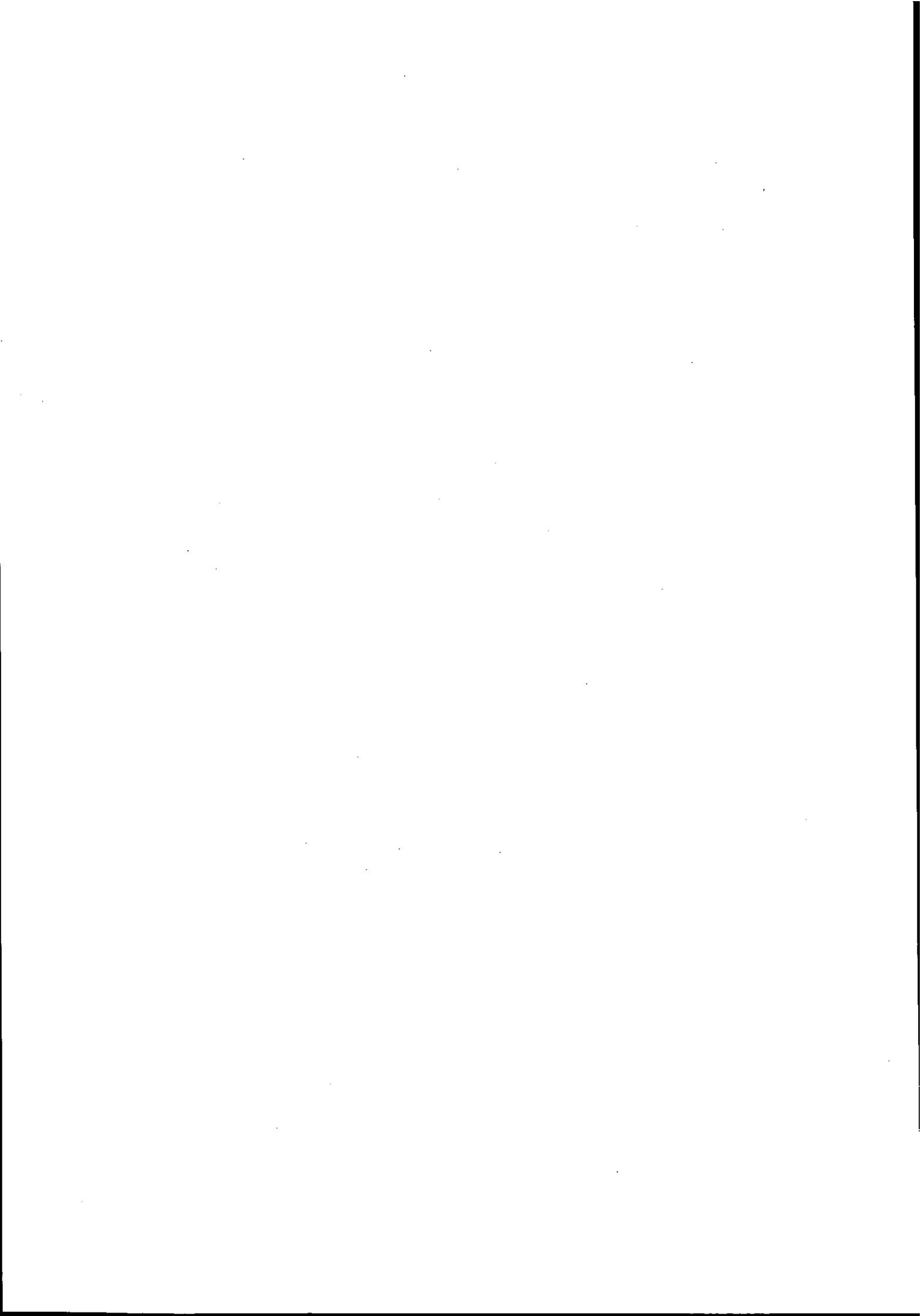
住 所: 〒630 奈良市北魚屋西町

- 1) 理学部情報科学科
- 2) (TEL)0742-20-3443, (FAX)0742-20-3443, (E-mail) jari@ics. nara-wu. ac. jp
- 3) Theory and Practice of Self-organization
- 4) The theoretical part of the research studies the entity (an explicitly defined atomic

unit— “a bottom line”) based self-organization. Especially, the sufficient and necessary initial information for producing a system under particular environmental perturbations is tried to formulate. The practical aspect includes applications in various fields: formation of structures, emergence of intelligence, neural network based control of autonomous systems, simulation of economical and social systems, emergence of software, etc. This work is highly contrast to the solely evolutionary based attempts to emerge systems by applying a self-organizational approach together with evolutionary ideas.

5) ヤリ・ワーリオ (Jari Vaario)

6) Jari Vaario: Modeling Adaptive Self-Organization, In R. Brooks and P. Maes (eds.): Artificial Life IV, The MIT Press, pp313-318, 1994



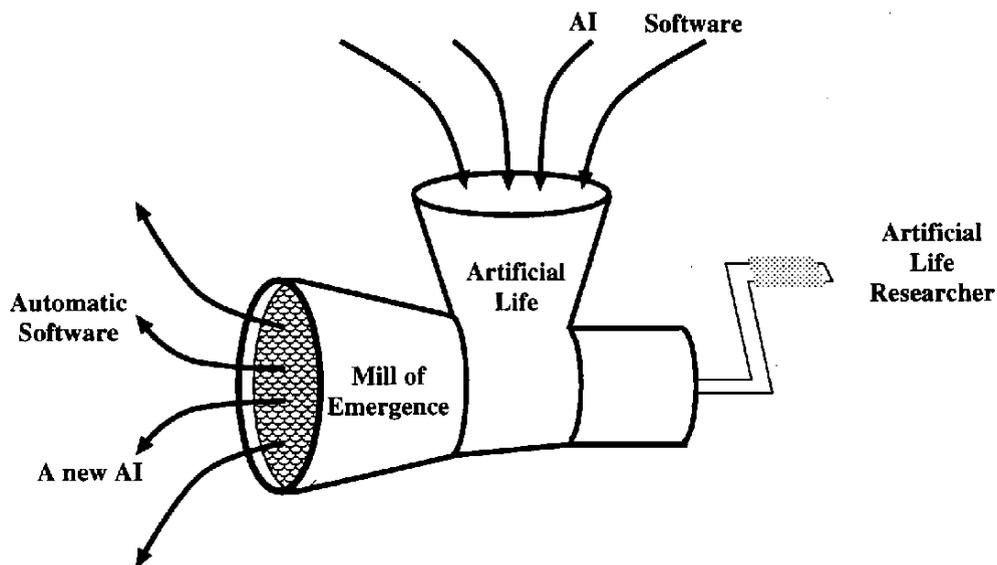
## 第7章 人工生命研究の課題と展望

### 7.1 人工生命 (AL) は新しいパラダイムとなりうるか？

人工生命という言葉も最近では市民権を得つつあるが、人工生命とは何か、創発とは何かなど、その捉え方や考え方は研究者によって異なる。既存の学問分野が研究の進展に伴いその境界を広げ、一方では融合しつつあることから、明確に定義すること自体人工生命にはそぐわないのかもしれない。人工生命が対象とする研究項目やその問題意識も、いろんな学問分野においてこれまで研究されてきた、言わば、古くて新しいものが多い。その意味では、人工生命的な考え方や方法論という強力な“ミル”を通して捉え直すことによって新たな調理が可能となるか、を問うものと例えることもできよう (図表7.1.1)。

そのような捉え方も含めて、人工生命の基本思想や関連学問分野との相互関係について共通認識を模索することは極めて意義深い。そこで、AI 技術専門委員会では、1995年1月10日に“人工生命は新しいパラダイムとなりうるか？”と題するワークショップを開催することとした。ワークショップは人工生命の予備知識が十分あると考えられる招待者だけによって行われた。

既に述べたが、パラダイム論の提唱者であるクーンによれば、新しいパラダイムの要件は、1) 古いパラダイムを危機に導いた問題を解くことができる、2) 古いパラダイムでは思いもよらなかつ



図表7.1.1 Mill of ALife

た現象の予測ができる、3) 古いパラダイムより美しく要領よく簡潔である、4) 解けなかった問題に将来の解決方向を示すことができる、の4つである。人工生命が果たしてこれらの要件に応えるだろうか。

それには人工生命をめぐる次のような論点について、議論を深める必要があるだろう。

- 1) 「生物とは何か」論争
- 2) 「部分と全体とは何か」論争
- 3) 「役に立つか」論争
- 4) 「自然と人間に新しい関係をつくるか」論争
- 5) 「創発とは何か」論争

まず、1) に関しては、人工生命は、(1)自然生命の定義が不明なのに人工生命の定義はできないという批判にどう答えるか?、(2)機械論と生氣論の対立に何を加えるか?、少なくとも、(3)単純機械論と素朴生氣論を説得できるか?、といったことが議論となる。

つぎに、2) は古くて新しい問題であるがこれには次のような点が論点となる。人工生命は、(1)部分と全体とは何かの問いに新しい意味を加えるか?、(2)人工生命そのものがひとつの個別科学ではないか?、(3)哲学、数学、物理学、生物学、社会学などで繰り返されてきた、要素還元論批判、決定論批判、自己言及問題、自己組織化問題などとどう関係するか?

また、3) の「役に立つか」論争では、(1)人工知能の発展に寄与できるか?、(2)生物学（少なくとも部分問題）に寄与できるか?、(3)工学システムの予測・制御に役立つか?、(4)役に立つどころか危険ではないのか?、このような点が争点となる。

さらに、4) 「自然と人間に新しい関係をつくるか」という問いには、次のような議論が関係する。(1)ヒトは何故人工物を創るか?、(2)これからの人工物はどうあるべきか?、(3)人工物をどう創るべきか?、(4)自然と人工物の共生は?、(5)人間／人工物の共進化は可能か?

そして、5) の「創発とは何か」論争は、以上の争点全体に深く関連している。創発は人工生命の中心概念であり、ワークショップでもこの議論が繰り返された。

以下の節では、ワークショップの3つのセッション、1) ALは人工知能の新しいパラダイムとなりうるか、2) ALは生物学の新しいパラダイムとなりうるか、3) ALは工学の新しいパラダイムとなりうるか、の抄録を示す。

### 7.1.1 人工生命 (AL) は人工知能 (AI) の新しいパラダイムとなりうるか？

(1)はじめに

司会 (伊庭) セッション1では人工知能 (AI) と人工生命 (AL または ALife) のかかわりについて、3人の人工知能研究者の方を招いてディスカッションしていこうと思います。3人の講師の方は、電子技術総合研究所の通信知能研究室及び協調アーキテクチャ計画室室長の中島秀之さん、同じく電子技術総合研究所推論研究室の松原仁さん、そしてソニーコンピュータサイエンス研究所の長尾確さんをお願いしております。

議論に入る前に、お三方の主張をまとめてみました。それから問題になりそうな点を抜き出してみましたのでご説明します。

3人の順でだんだん批判的になると思いましたが、話を聞いているとそうでもないようです。松原さんはALからAIに寄与するところはあるだろう。ただし、そのためにはある種の外からの進化の制約、それを松原さんは神の視点と呼んでいらしたわけですが、そういうものがもしあれば必要ということです。従ってALは発想支援などに使えるかもしれないという主張でした。

中島さんの場合、ALからAIに対しての寄与はあまりない。むしろ逆にAIからALのほうに寄与することがあるのではないかという主張です。それを創発のデフィニションといった形式で言及され、このことをALの考えを使っていろいろと明示的に研究していく方法は面白いのではないかということです。

長尾さんの立場は、棲み分けと最後におっしゃっていましたが、ALとAIはほぼ独立というか、あまり関係なくお互い棲めるというものです。それを長尾さんはエマージェンスと、もう一つはご自身のなさっていらっしゃるエージェントの研究の例を基に説明されたわけですが、その2つが違うというのは目的と手段が異なるからである。ただそれが手を取り合ってやっつけられる領域としてシンボルグラウンディングの研究がある。つまり、制約という形でエマージェントコンピューテーションを実現したらどうかということでした。

ALを基にしたAIを実現するときの問題点として、このお三方が繰り返し述べていたのは次のことです。まず一つ目は、AIのほうで明示的仕込みと言われているものを実はALでもぜんぜん解決していない。どこかにインチキがあるのではないかということです。もう一つは、ALはアーティフィシャル・インセクトと言われているAIと同じように昆虫の知能ぐらいしかできないのではないかということです。最後は、進化のためには非常に大きな時間がかかる。GAの学習の例にして、何百万年とか宇宙を超えるような時間がかかるような人間の知能の進化を持ってはられないのではないか、ということでした。

だいたいこういうようなお話だったと思いますが、まず皆さんのほうからこのお三方に対してのコメントをうかがいたいと思います。

## (2) AL で AI が出来るか？

北野 非常に知的なシステムを進化により作ることができるかというのが、まず一つの大きな問題だと思います。たとえば翻訳をするシステムとか名人に勝つ将棋システムをこれから5年以内にGAを使って作れといわれてもぼくはやらない。もちろんそんなことはできない。ただ将棋を指すような脳は進化の過程で作られたことも事実である。

大事な点は、一つにはエンジニアリングの立場でGAとか進化の過程をシミュレートしたものが知的システムを作るのに役に立つのかどうかということだと思います。松原さんも中島さんもタイムスパンであるとか、問題を転嫁しているだけだという議論だったわけです。たしかにそれはそうですが、エンジニアの立場でいくと、進化ではものすごく時間がかかるけれども、鳥を見て飛行機を造るようなことをエンジニアリング的にはやれるわけです。そうするとナチュラルエボリューションを見てそのままのメカニズムを作るのではなくて、エンジニアエボリューションのパラダイムができてくれば、かなり有用なものができる可能性があるのではないかというのが一つです。

それとAIの問題は計算量だけではなく、リプレゼンテーションの問題であるとか、評価関数をどう獲得するかという問題もある。これは計算量とはまた別の問題で、それに関しては何らかの寄与ができる可能性があるのではないかと思います。

たしかに全体の進化のコストを進化の計算量と考えるというのは、コストの問題を転嫁しているだけですが、ランタイム・パフォーマンスということを見ると、進化させた結果の最後のところだけ持ってくると計算量がランタイムでは非常に差があることはありうるのではないかと。そうするとその面では知的システムを作るのに寄与することもあるのではないのでしょうか。

ALifeをどう定義するかというのは、そこに終始するというのはあまりいい話にならないのですが、もっと生物学的にインスパイアードなモデルを知的システムに取り込んでいけば、今のAIでできないことができてくる可能性はあるのではないかと思います。

ということで進化とかエボリュショナルコンピューティングが知的なシステムにあまり寄与しないという話だったので、そうでもないのではないかとコメントです。

中島 今のジェネレート・アンド・テストの話ですけれども、たしかにジェネレートのほうを工学的に速くすることは可能だと思います。たとえば飛行機を造るときにゼロから始める必要はなくて、羽根があってエンジンがあってというところから飛行機のデザインをやれば、ジェネレートは非常に効率的にいくのは確かです。ただ、私が問題にしたいのはテストのほうで、テストは原理的に加速不可能だと思っているわけです。その理由の第1は、インテリジェンスというのは非常に複雑な構造ですから、インテリジェンスを見るのはどっちみちインテリジェンス度に見合っただけの時間がかかるだろうということです。

それからフィジカルなものはかかるけれども、コンピュータ内でシミュレートすれば速いかもし

れないという話がありましたけれども、もしインテリジェント度を高速にシミュレートするようなプログラムがあるとしたら、それはすでにインテリジェントであると思うわけです。

**北野** だからテストの部分が速くなるわけでしょう。

**中島** たとえば将棋に勝つかどうかというのがインテリジェントの一つだと思えば、そのテストする相手は同程度に将棋ができなければいけないというのと同じ意味です。自然言語の理解でも何でもいいけれども、テストする相手も同様のインテリジェンスが必要だと思うわけです。だとしたらコンピュータ内の加速は原則的に不可能だろう。要するにインテリジェンスができた後でないとシミュレートできないと私は思っています。この2点です。

**松原** 中島さんの意見とちょっと違うかもしれませんが、将棋の場合は対戦相手も同じプログラムのちょっとした変形だとすると、プログラム内のシミュレーションも今のレベルぐらいには相手も強いわけです。だからわずかの時間で終わる可能性はある。両方がお互いに強くなっていくことによってそれをどんどん進化させていけばいいのです。お互いに速くなっていくわけだから。

**北野** 相手が物理的なところにあるシステムではなくて、両方ともエレクトロニックのなかに入っている。

**松原** そうそう。両方とも、シミュレーションの相手もプログラムなのだから。

**長尾** 私のコメントは計算量の話ではないのですが、生物学的な知見に基づいて知的システムをデザインできるのではないかという話がありました。鳥を見て飛行機を造るというのがあります。ALifeをそういう工学的な側面にとらえるやり方はあるかなと思っていますが、私が考えるALifeはあくまで生命現象をシミュレートする、生命の本質を理解するという話であります。すると、デザインをしてしまうことはそういう目的には何も寄与しないのではないか。

**北野** いや、要するに知的なものを作りたいならばエンジニアードすればいいわけです。サイエンスとして理論生物学みたいなことをやりたいならばそんなことをやっても意味はないと思うんです。だからALifeとか何とか訳のわからない名前を付けてしまったから話が面倒臭いのですが、ALifeとくくられているなかでいくつかのまったく別の目的を持って研究している人がいるんです。

バイオロジカルの方は非常に難しく時間もかかるし、コンピュータサイエンティストがちょっと生物の本を読んだぐらいでわかるような話では到底ない。昔は(ALIFE IIIまでは)みんなが夢中でやっていたけれども、最近(ALIFE IV)になるととても歯が立たないことがわかったので、

みんなロボットを作ろうとかそういう話に基本的にはなっているわけです。

長尾 そういうやり方は間違っているような気がしてしまうんです。ですから ALife という分野を作ったわけですから、それだったら純粋に目的が何であるか……。

北野 それを私に言われても、この分野は私が作ったわけではないから困るけど。(笑)

長尾 あちこち寄り道をしながら、何かとりあえず辻褄を合わせようというのはあまりよくないのではないか。たとえば、AI どちらかという工学的な側面が強いので、インテリジェントのシステムを作るといような……。

北野 でも AI の最初の頃は認知科学と一緒にあって認知の解明をやろうと思ったけれども、それはそんなに簡単ではないということになって、工学的になったわけでしょう。

長尾 いや、諦めたわけではないと思いますよ。

北野 ぼくに言わせれば、やっぱり物理学的なところに行かなければいけないのに、ニューロサイエンスといったところに行っているわけです。認知心理というところはボコンと真ん中で落ちて、あの分野は死につつあると私は思うんです。

長尾 それは本当ですよ。(笑)

北野 ALife も同じ道をたどると思っているんです。

長尾 だから同じ道をたどらせないために、そういうところを……。

北野 いや、たどるのは健全だと思うわけです。

松原 私は AI に肯定的です。というのは長尾さんと違って、AL がべつにそんなに生物にコミットする必要はない。AI もほとんど数学をやっている連中もいるわけですけども、べつに数学のしもべではないと同様に、AL の人から見たら生物は利用すればいいと思う。私は AL も人間みたいなシステムをデザインするための一つの方法論だと思っているので、そのためだったら生物でも物理でも AI でもお好きに使えばいい。何でもありということです。

北野 私が言いたいのは、AIとかALとか分野を何かと定義をすれば始めるとあまり建設的な話にならないということです。そうではなくて何をやりたいのかという視点からすると、一つは知的なシステムを作りたいというのがあるわけでしょう。それにはいわゆる伝統的AIでやられていたようなこと以外でも、たとえば今度はALができてエボリューショナルなアプローチがある程度わかってきたから、それを使えるところは使えばいいということだと思いますけど、違いますか。

長尾 もちろんそういう意見もあると思います。これは私の考えですけれども、そういうふうによってエボリューショナルでインテリジェンスを作るという手法を考えてそれで役に立つシステムを作ろうというのであれば、そういうアプローチはAIそのものなわけです。

司会 今の話を聞いていると、ALifeとエボリューショナルリーコンピューテーションは分けて考えたほうがいいかなという気もしますが、このことについてはこれぐらいにして、何かほかにございせんか。

### (3)共進化について

寺野 生物側の方にもお聞きしたいのですが、コエボリューション（共進化）というのはほんとうにエボリューションになっているのかどうかです。変な袋小路に入っていくだけではないかという気もしています。先ほどから昆虫まではできて人間まではとても行き着かないという意見がありますけれども、一方で進化のスピードを見てみると、アメーバが出てくるまでの時間よりもサルからチンパンジーになったほうが時間がはるかに短いわけです。そういうことがある以上、突然よくなるということは期待できるのではないかというのが夢としてあるのですが、いかがでしょうか。

北野 袋小路になるのが進化ではないとおっしゃいましたけれども、そうではなく進化というのは環境適応で最適化ではないわけです。だから袋小路に入るのも進化なのではないですか。それは環境に適応しているだけだから。進化というのは基本的に方向性を持った現象ではないという理解のほうが正しいのではないかと思います。

寺野 ただコエボリューションというのは相手がいないと変化も起こらないわけですね。

北野 だから相手が環境を形成するわけです。

寺野 お互いにそうなるわけですね。

北野 ええ。だからそれに対して適応し、十分進化しているわけです、全体のパフォーマンスが上

がろうが上がるまいが。パフォーマンスが上がるということは人間が一方向を勝手に仮定しているだけであって、進化はべつにそれを保障しているメカニズムではないから。

寺野 ですからそれはエンジニアリングの立場になるのかな？

北野 それは最適化かどうかという質問なら正しいけれども、進化という質問ではないですよ。

寺野 ジェネレート・アンド・テストで何かやるというのは、何かいいものを作りたいというのがありますね。

北野 だからそれは最適化です。最適化にコエボリューションのメカニズムが使えるかという問いですね。それはどう作り込むかなんじゃないですか。(笑) うまく作りこめばいける。

司会 コエボリューションで同じものが出てくるわけだから、その部分は問題ないんじゃないでしょうか。つまり評価関数のテストの部分が時間がかかるのをコエボリューションで回避するという議論だったわけです。でも出てきたのは両方とも同程度の賢さで、同程度の時間がかかることが期待されます。結局ジェネレート・アンド・テストのテストの部分を短縮するにはそのままでは使えないと思います。

北野 だけど1個1個の時間を速くすることが考えられるでしょう、そのなかに全部ぶち込んでスピードアップする。プロセッサのなかでやった場合、プロセッサが十分速ければ。

司会 それはべつにコエボリューションを使わなくてもいいわけです。だからコエボリューションとはぜんぜん別の独立の議論ではないでしょうか。

北野 いや、なぜスピードアップできないかという(中島さんの)議論は、評価関数を決めるテスト環境がフィジカルにグラウンドされた現実世界と相互作用せざるを得ないからというのでした。それを回避するにはコエボリューションにより全部同時進化させていくのが1つの可能性です。

池上 共進化の場合の対象は、同じエージェントやプログラムでなくてもよくて、たとえばデータとプログラムの進化ということがあります。問題は計算量といった場合に、データは非一様になっていて、このデータに関しては非常に厳しくチェックしなければいけないけれども、このデータはそうではないというのがあるわけです。そういう非一様性は人間にはわからない場合もあるしプログラム特性もあるので、データ自身を進化させるとそのプログラムの弱いところをちゃんと突いて

くれるのです。たとえばバグということが大事なわけで、どんなプログラムも絶対完全ということはないわけだから、むしろバグを抱えつつ動いているシステムが世界なわけです。最適化ではなく、目的となるシステムにくせを持たせたいのであれば、共進化が大事なわけで、共進化以外にはできないわけです。

#### (4)古典的 AI と Alife

池上 AIの人たちはいいプログラムを作るための言語等を開発するためには役立ったかもしれないけれども、それ以外にはあまり役立っていないでしょう。それはなぜかというのは、自然にある非離散的な構造が大事であるということがあまりわかっていないのではないか。

もう一つは、ALifeを皆さんがどう捉えているのか、聞いていてもよくわからない。ALifeでは、たとえば連続系におけるダイナミクスがどういうふうに関係しているかとか、生物系はサクセス・ブリーズ・サクセス (success breeds success) だけではなくて、真似をすとか行動するということがどういうことか、ということの問題にしているわけです。そういうのはAIではぜんぜん取り扱えられなくて、ALifeで初めて導入されたと考えなければいけない概念です。私の視点から言うと、AIは非常にいいチューリングテストを考え続ける人たちだという感じがします。しかも記号処理系でやって、チューリングテストは、人間と一緒にいるときにそれを人間と思っただらいいかどうかという風にもとれます。そういう形でやっているのであれば非常に健全ですけども、(内部機構として)記号処理系以外のものはあまり考えないでしょう。それがすべてだと思っている節がある。

松原 そういう意味では今日来た3人は、いわゆる旧米から批判されているAIを研究しているつもりではないんです。私は数値だろうが記号だろうが知的なものになるのなら何でもありで、将棋のプログラムを作っていますが、数値計算だろうが遺伝的アルゴリズムであろうが何でも使います。それがAIだと思っています。批判するときは相手を小さくして自分を大きくして批判するわけです(笑)。いや、池上さんがそうだと言っているわけではないのですが、AIがブルックスなんかにてんばんに批判されているのは、あれはだれも痛んでないという話があって、だれも自分のことだと思っていないという説があるわけです。そういう意味では池上さんがおっしゃるのはそのとおりだと思います。だから北野さんが言っていたように、お互い新しいアイディアが出たら名前にかかわらず知的なシステムを作ろうということで、AIの人もほとんどそう思っていると思います。

北野 記号論理などはAIのなかでも反主流に追い込まれているという傾向が最近ではあります。たとえばニューラルネットみたいなものを使ってくるとか、記号はたしかに使うけれども、それにいろいろなダイナミクスを入れ込む努力をしている研究が最近のものすごく多いです。

中島 記号と言ったときに何を思い浮かべてるかというのが実は違ってたりするので問題かとも

思うのですが、今の話で言うと、記号とパターンに2つのものがあります。記号というのは典型的な意味で同一性だけが定義された操作しかできないものだし、パターンは数値的な構造を持っていてパターン間が近いとか遠いとか、距離の話があるわけです。そういう意味で両者があるということとは認識している。

私の疑問としては数値を使うとなぜうまくいく問題が非常に多いのかということですが。たとえば自然界で簡単に起こる現象でシンボリックには再現できないものがいっぱいあるわけです。いちばん簡単な例がビリヤードみたいなものをシミュレーションでコンピュータのなかでやろうと思うものすごく大変です。記号処理的にやると、たとえば球Aと球Bがぶつかっているかどうかの検証だけでもものすごく計算を食ってしまうわけです。そういう意味でずいぶん違う性質を持っていると認識していて、なおかつ自然界の持っている性質をできるだけ取り込んでいきたいと考えているわけです。

いろいろな人にいろいろなアプローチがあります。AIがシンボルにしか興味を持っていないということはまるっきりありません。むしろ実はパターンのほうにもものすごく興味を持っています。どうやったらそれがシンボル処理とうまくつないでいけるのか。シンボルグラウンディングの研究のターゲットはまさにそれです。

古川(康) 記号アプローチでいま批判されている中心人物かもしれませんが(笑)、私は今でも記号アプローチは非常に重要だという気がしています。たとえば創発のシステムみたいなものが解明されてデザインされたとすると、結局は記号システムでそれを記述できるような気がします。外界の情報、環境の情報を取り込んでそれを新しい解釈をしてやるメタ的なアルゴリズムがあるに違いないと思い、それは記号レベルで記述できるのではないかという気がしています。だからターゲットが違うだけのような気がします。記号レベルで扱うターゲットはシフトしていくという気がしていて、ALifeの研究でやっていることは非常にいいターゲットになるかもしれないという気がしています。

もちろん記号レベルで数値を画一的に導入するのは非常に難しいわけで、そういう試みはいまいろいろやられていますが、学問的に言うとかかなり原始的なところにとどまっている。だけどこれは将来発展するという気がします。

北野 記述できるという話ですけれども、これは近似的な記述なんだと思います。だから完全な非線形のダイナミクスを伝統的な記号で全部記述することは無理だと思います。AIの記号主義は非常にうまいレベルでのアブストラクションで記述することに成功したから、それに当てはまるドメインがわりと広くてもものすごく強力な手法であることは納得します。ただいろいろの創発が出てきたとか非線形なものをそれで記述しきれると言われると、違うと言わざるをえない。非常にスマートな近似の記述にはなるとは思います。

問題はどれだけ破綻を許すかです。1%ぐらいの破綻で記述できるならばできるでしょう。だけどたとえば自然言語や画像とかロボットになると、自然界の非線形性とか非平行性がもろに出て記号では破綻が隠せなくなってくるのではないかと思います。

司会 まだまだ議論はつきませんが、時間になりましたので第1セッションの「ALはAIの新しいパラダイムとなりうるか？」はこれで終了させていただきます。どうもありがとうございました。

(5)おわりに：コメント

ここではセッション1の中から、

- (1) ALでAIが出来るかという一般的な議論、
- (2) 共進化をめぐる話題、
- (3) AIにおける伝統的な「記号とパターン論争」とALの関係、

を抄録した。当日は議論の前に3人の講師の方の講演があったが頁の関係で省略し、司会の総括に換えさせて頂いた。

議論を聞いていると、ALとAIの問題は結局「記号とパターン論争」に帰着することが分かる。これはAIにおいて古くから問われ続けた難問であり、解答の出ない「不毛の哲学的論争」とも言われている。

ALがAIに対して持つインパクトは今後の研究成果を持たねば即断できない。議論の中でしばしば登場した、「創発」「Emergent Computation」「Evolutionary Computation」「共進化」などが今後の展開の鍵を握るであろう。こうした新しい考え方（但し必ずしも新奇ではなく、すでに同様の考えがAIや他の分野に散見されるものでもある）を従来のAIに有効に採り入れた「新しいAI」の枠組もいくつか提案されている。

いつの日か近い将来に、ALという新しいパラダイムがAIにおける「記号とパターン論争」に終止符を打つことを期待している。

### 7.1.2 人工生命 (AL) は生物学の新しいパラダイムとなりうるか?

司会 (池上) それでは午後の最初のセッションを始めたいと思います。セッションは「ALは生物学の新しいパラダイムになりうるか?」というテーマです。午前中の続きで言うと、ALife (またはAL) とされるものの目的がいくつかあるのですが、「非常に複雑なものは何か」というのが、まず一つの大きなスタンスの取り方としてあります。たしかに作るのは簡単だけれども、それを記述しようとするのが難しいことになるわけです。

生命は記述に専念すると非常に難しいのですが、作るのは簡単なものもあるかもしれない。そういうアプローチの一つの方向として、私のように計算機のなかでやってしまうと、あれは計算機のなかのやつだからなと言われてしまうので、宝谷先生のように実際に存在する分子とか有機的なものを使って構成的な立場を取るアプローチもあると思います。

もう一つのALifeのスタンスは、生物の可能なロジックをいろいろ考えようというものです。ところが、ALifeのロジックは実際の生物が取っているロジックとは一致しないことが多いわけです。なぜ一致しないかということを考えることが、ALifeの2番目の大きなポイントなわけです。実際、ALのロジックは完璧ではないかと思っているにもかかわらず、生物が使わない。その使わない理由をどこに求めるか。

それを見るためには生物の使っているダイナミクスとかアルゴリズムを見てやって、自分が持っている理論と比べて、どこがどうして違うのかということを考えなければいけない。たとえば突然変異という現象一つにしても、多くの人はほとんど考えを持っていない場合が多いのではないか。たとえば紫外線で塩基が変わるだけだろうと思うかもしれませんが、実は突然変異が高い生物がいたり低い生物がいたりとか、突然変異というのは受け身的なものではなくて、実は非常にアクティブに構成しうるものではないかという考え方もあって、それは私自身もやっています。

そういうことの一つの方向として、古澤先生に突然変異というものをどう考えて、実際に生物のなかでそれはどういうふうに使われているか、ないしは突然変異はほんとうに受け身的かどうかということ、より実験的なことから説明していただきたいと思います。また、宝谷先生からは実際に存在する分子とか有機的なものを使って構成的な立場を取るアプローチをご紹介いただきたいと思います。

(古澤、宝谷の講演内容は第5章を参照のこと。)

司会 古澤先生の講演に関して、精密な機械がミュレーションレートを高めるときの方法として、間違える。間違えるほうが複雑な読み手なんですか? つまり岡崎フラグメントを下げたほうが……。

古澤 具体的にどうやって片方だけ上げるかということですか。連続鎖と不連続鎖がありましたね。いちばん簡単なのはこれらを合成する酵素が違ってきますね。違って部分をつぶせばいい

いわけです。それはミューテーションでつぶせばいいわけです。ミューテーションというのは遺伝子が自分のゲノムのなかにありますから、その遺伝子が突然変異を起こしてちょっと欠点のある蛋白を作ってやればいいわけです。

逆に言いますと、今まで大腸菌のミューテーターというのは13種類あるわけです。多分、全部デイスパリティ・ミューテーターです。それはなぜかわかるでしょう。イコールになるようにつぶすことは不可能に近いんです。それはぼくが初めから予言したとおりだったです。DNAの場合パリティ・ミューテーターなんて存在しない。

司会 不連続鎖のほうのはどんどん悪い方向にドライブがかかるんですか。

古澤 いやいや、自分の目的に合わせてやればいいわけでしょう。連続鎖を落としても、結構両方ともフィデリティが高いですから、マクロには同じようなものですから、連続鎖を落とすことも可能です。自分の好きなほう、落としやすいほうを落とせばいいです。目的に合えばいいわけでしょう。どっちへ落としてもかまわないわけです。

司会 そうではなくて1個だけに関して、進化としては1個は非常に悪い方向に向かっていくんですか。

古澤 そうじゃないです。このロジックでいくと環境が調子が悪くなったらアクセルを踏むように、たとえば不連続鎖だけをグッと落としたら、それで解決できるんです。そして安定したらグッとアクセルの踏み方を弱めていって、その差をだんだんなくしていくと定常状態になると思います。そういうことは生物のメカとしてあるかもしれない。

司会 ということは進化的なパスを見ていると、読み手側のほうの進化はトラクターになったり高級乗用車になったりということがあるわけですか。

古澤 トラクターが調子が悪くなったりよくなったりという感じだと思います。そういうふうにやれば進化は非常にうまくいくはずですよ。過去のことを何言ってもしょうがないので、これからそういう実験は可能だと思います。ただ、dnaQ 49はtsミュータントです。ある温度をシフトさせるとミューテーションがあまり出なくなって、温度がある域に達すると欠陥が現われてくる。生物がそういうシステムを取っているかということです。アクセルを踏むかどうかというのはわかりません。

司会 わりといい間違い方、ある程度間違えなければいけないというのがあって、そういうコースを持ったやつが残るわけですか。

古澤 そういうことです。われわれもそうです。べつにどんなかっこうだっていけれども、これは調子がいいから残っているだけで、これ以外何をやっても、いわゆるカンブリアの爆発を見られたらわかりますけれども、目が5つあるような生物だったわけですから。それがなぜ生きていないかという、調子が悪かっただけで、それが死んだから悪いとは言えないと個人的には思います。

沢井 ナップザック問題の実験のところ、最後にまとめられたパリティとディスパリティの比較でディスパリティがいいという話がありましたけれども、あのときにちらっとおっしゃっていた1倍体と2倍体を比べると2倍体のほうがいい。それからセックスというか、雄と雌が生まれてきたこともそういうことに関係しているとおっしゃったのですが、そういうディスパリティ進化論から必然的に生物から雄と雌が出てきたというようなことも言えるのでしょうか。

古澤 言えます。非常に鋭い質問です。図では分裂の開始点(オリジン, ori)をゲノムの端へ書きました。そんな生物はほとんどいないです。実はオリジンは真ん中に複数あるんです。いま1個だけ書きます。中間のオリジンを境に連続鎖、不連続鎖の事象は逆になるわけです。そうすると結果は何世代もたつと、こういうオリジンを境に上に変異のたまった生物と、逆の生物ができてくる。これはセックスがないと生きていき難い。オリジンが染色体の中間にあるような生物は、セックスがないとワイルドタイプを保つことは非常に難しくなります。だから必然的にセックスはいる。2つあります。(笑)

上田 ダブルストランドのメカニズムを獲得したというのも進化の結果なんですか？

古澤 これはR. Dawkinsの本を読まれた人がいると思いますが、彼の考え方はたぶん正しいと思います。昔の地球は何かというと、情報の取り合いだけだったというわけです。だからRNAでも何でもいいんですが、ATGCが縦に並んでいた。それをスープのなかにある遊離したユニットを使って相手を見つけてきてコピーを取るわけです。それをやっているときに酵素を使い出した。酵素というのは当然フリーにいます。1個の酵素でこう読んでまた逆を読むという面倒臭いことをやらずに、酵素はどれを使ってもいいから、使ってみたら経済的には具合は悪いけれどもすごく調子のいいものができた。それだけのことだと思います。だからスープを作って実験をやってみたら必ずこうなると思います。非常に実現は難しいでしょうが、実際はコンプリケートなものでしょうけれども、スタートとしてはバイチャンスでいくらでも起こった。コピーを取ったときに必ずダブルストランドに1回なりますから、二重鎖構造は容易にできたものと考えられます。その次に分裂したときに両方とも同時に読んだらこの読み方しかないわけです。両端からこう読んでもちろんいいですけど、あとは不連続なDNA断片を繋ぐ酵素があればいい。

上田 そういうことなのですが、お聞きしたかったのは、先生のお答えでは生命の起源そのものがそうである。つまりシングルストランドのものからダブルストランドのものへ進化したという説明を必ずしもしなくてもいいということですね。

古澤 そうではなくて、もう少し詳しく言うと、シングルストランドというのは熱不安定なんです。しかも酵素不安定なんです。ダブルストランドは熱安定です。RNA ダブルストランドはDNA ダブルストランドより、なぜかはるかに熱安定性が高いんです。しかし RNA はこの進化を取らなかったんです。その理由はわかりません。でもダブルストランドは絶対に1回取らないと損なんです。シングルストランドはフラフラしますからやばいんです。それは間違いのないです。

今までは説明としてはそれで終わっていたんです。そこへフィデリティの差を入れるとここまで来たということです。

司会 それでは宝谷先生のお話に関するご質問をお願いしたいと思います。

古澤 印象だけ一つ。先ほどおっしゃいましたユニットそのものが持っているフレキシビリティがあって、それがいろいろなことをやるというのはものすごく正しいと思います。私の今までの経験ですけれども、ある酵素を持ってきます。教科書を見てみると自然のものは完璧でシェープアップされて、これ以上どうしようもないものだという印象を受けているわけですが、まったく嘘っぱちで、蛋白質のたぶん20%も酵素としての力すら持っていないというぐらいに考えた方がよいようです。こういう哲学的な問題は考えておかなければいけないのではないかと考えています。ファジーというよりも、個々の蛋白としては能力をちょっとしか使っていないからこそ、全体としての和を保てる。それは非常に大事なポイントだと個人的には思っています。

宝谷 仕掛け自体もそんな感じですね。蛋白の、たとえば抗原が抗体を見つけるとか、あるいは酵素があるものを分解するというのは、原子が何万もつながった大きな固まりのなかのほんの一部分があればいいわけです。その残りの部分が何をやっているかというのはよく分かっていない。でもその残りの部分がちゃんとないとそのタンパク質は生き残ってうまくファンクションしない。おっしゃるとおり、確かにそういう難しいが面白い問題があると思います。

司会 それに関してちょっと聞きたいのですが、蛋白の機能は3次構造ですね。その3次構造の精密さ加減というのはどのくらいのものでしょうか。つまりだいたい似ているということで同じ機能を獲得できるものなんですか、それともそういうわけにはいかないものですか。

宝谷 一般的に言えば、識別のための立体構造は非常に厳密です。しかしながら、酵素でもたとえ

ば糖の何種類かを分解する酵素もあります。抗原抗体みたいに親と子は見分けがつかないけれども、隣の人なんて全部見分けがつくぐらい識別能の高い方法もあります。だからアイデンティファイするところのメカニズムもかなりバラエティがある。

私がやっていたバクテリアのフラジェリンというものの自己形成をしているときに、相手をアイデンティファイする仕方は、初めは識別サイトの立体構造は目茶苦茶ですけれども、相手のところについて構造がゆらいでいるうちに、パチッとつくことができるかどうかということで、アイデンティファイしているという仕方もあります。だからインタラクションすることイコール識別ということではなくて、立体構造の厳密さにもバラエティはあるかもしれません。

司会 素人にはわからないとおっしゃっていますけれども、これで生きている細胞の形と同じようなものになるというクライテリアみたいなものはあるのかということ。それから物理、化学で蛋白のホールディングの問題があります。ホールディングは一つに固まらなければいけないのに、どうやったらホールディングするようにできるかという問題があります。その場合、コンピュータシミュレーションをやって、形がある程度似るとうまくいったというけれどもそれではいけなくて、同じ蛋白のホールディングがうまくいったかいかないかというのは、生物はもっと違うクライテリアを持っていることを言われることがあります。生物が同じ形になると同じ機能を持つということを考えておられるのではないかと思います。そのへんのことはどういうふうに考えていらっしゃいますか。

宝谷 機能のために形がきっちりしていることが必要なレベル、たとえば細胞の超分子の大きさのレベルになるとかなりきっちりしています。たとえばウイルスが形成されるウイルスのシェルなんていうのは、隣と隣のサブユニットが同じやり方でずっと組み上げるわけです。そしてそれ以外のものならそこに入らない。たとえばマイクロチューブのユニットを、細菌べん毛に入れることは不可能です。

でも細胞の、たとえばコンパートメントは同じ酵素が表面にあれば、大きくても小さくても千切れても全部同じようなファンクションをしていけるわけです。あるいは分裂装置、細胞が分裂するときに遺伝子を二つ娘細胞に分けていく装置でも、卵細胞を半分にしてやれば半分の小さなスケールのものを作りますし、大きくすれば大きいものを作ります。だから与えられた条件のなかで、機能を持っている構造をどのようにして大きいものや小さいものを作り上げるかという能力がすごく大切なわけです。だから形や大きさがきちっと決まっているレベルよりも決まっていないレベルのほうが融通がききます。どんどん高いレベルになればなるほどそういうふうになっているのではないのでしょうか。

三宅 一つおうかがいしたいことがあります。先ほどのリボソームの話は非常に面白いのですが、

もしこれが人工生命というか、生命の一種のシミュレーションとしてウェットウェアを使ってやっておられるのであれば、生命の一つのエッセンスとしまして、境界条件というものの自己決定性の問題があると思います。それはいま先生がやっておられる場合であれば膜構造という一種の境界条件だと思いますけれども、今のお話ですと、なかにチューブリンを入れて形態を決めたということになっています。これは膜の生成のプロセスと内部のチューブリンの重合のダイナミクスとがべつにカップルしているわけではないので、いわゆる自己決定というのが独立に進んだ結果として形態が形成されたということに近いのではないかと思います。

ですから境界条件を決めることは、細胞から言えば機能を決定する問題にエッセンシャルにつながっているわけだから、そこをうまくつなぐような反応系をなかに入れるというアイデアはどうでしょうか。

**宝谷** なかなかいいアイデアだと思います。次の段階として我々はいま運動系をリポソームに放り込んでいるんです。細胞骨格というのは骨格としての機能もありますけれども、本当は運動系がおもしろいわけです。その上にたとえばキネシンとかダイニンとか呼ばれるモーター蛋白質がいっぱいあって、レールの上を走り回っているわけです。そのレールがマイクロチューブであり、あるいはアクチンであり、そのレール自身が非常にダイナミクスでできたり壊れたりするわけです。だからいまいろいろなエレメントを放り込んでいます。そしてそのなかにエネルギーを入れて見ると、丸いやつが四角になってみたり、あるいは横からチューブをどんどん出してみたり、たしかにいろいろと変化してきます。

生体膜と細胞骨格はどうやって関連しているかという、膜の上に骨格結合する蛋白質がたくさんあるわけです。そして骨格系の上にも結合蛋白質がたくさんあって、それ同士がインタラクションしているので、それを放り込んで自由自在にいろいろな形をつくるということをいま試みています。

**司会** AIの人たちから何も質問が来ません。そういうのがいちばん問題で(笑)、午前中に話したことは何かというと、シンボル化は難しいという話です。シンボル化は難しいというのは膜とか溶液のなかで動いているような膜のなかに意味があったり、そのコーディングが問題で、それはコンピュータのなかでシンボル化してしまうとぜんぜん追えない。だけど細胞はある種そこで選んだりということが出来るし、ランダムネスという自由に操れるものがあるというのが最初の話でありました。そういうものをシンボル化した後で考えればいいという立場がもしも AI だとすると、そういうことは問題ではないと言っているのが生物なわけです。

だから最初のこういうふうに蛋白が曲がっているのか、ちょっとここに“くびれ”が入っているのかということが情報になっているということをシステムがわかっていることが大事で、そういうことはどういうふうにやるのかということがまず問題点で、それに対して質問がないということは、

そういうことに対する問題意識がまずないのではないかと思うんです。(笑)

北野 そうではなくて、それは問題のレベルが違うということです。膜のレベルとか蛋白プロテインの構造がどうのこうのというのと、インテリジェントシステムというところのシンボル化のところはぜんぜんレベルが違うわけですよ。

司会 でもそういうようなものがコーディングの問題なわけですよ。

北野 だからそれを記述するという技術をやるといふなら、それをどうシンボル化するかという問題になるけれども、いまバイオロジカルに膜の構造とかプロテインの構造がどうのこうのとやっている問題と、直接その生物のレベルの改造の問題とインテリジェントシステムの脳のなかの情報処理の問題は全然違うレベルの問題なわけですよ。

司会 いや、情報処理というのはそういうことが難しい問題なのであって、シンボル化してしまっただけならそうならないのではないかというところがあるわけです。

もう一つ言いたかったのは、何を情報と見るかということが生物では問題になっているのはよくわかるでしょう。つまり情報のインプットを与えたらコーディングするかどうかという問題とは別に、どれを情報と見ているかという問題があるわけです。つまり、インプットを与えてしまっただけそれをどうにかしてコーディングしようという問題は徹底できるけれども、そのインプットが何かすらわからないような状況で何かコーディングしなければいけないという問題があると思います。そういう問題を提起しているわけですが、そういうことがALifeとAIの非常に境目を分けているわけです。

ALifeの主要問題というのは実はそういう方向に向かっていて、そういう意味ではALifeとAIは同じようなものもあるのではないかと、境界がぼやけていますねという議論になる前に、問題意識の違いがあるのではないかということが見えるわけです。

中島 後でしゃべろうかなと思っていたのですが、いま話が向いてきたのでこのチャンスにやってみますが、むしろ私の興味は古澤さんの話のほうにすごくあったのですが、あれはものすごくよくできた構造だと思います。一つは生物が進化だけでああいうものをつくり出しているというのはものすごいことだと思うのですが、先ほど議論のときにちょっとありましたけれども、純粋に工学的に考えた場合にもああいうシステムを考えることができる。要するに遺伝的アルゴリズムをうまくやっていくにはどうするかということで、ミューテーションレートを変えるという発想がもし出てくるようなものだとしたら、遺伝子のミューテーションの話は純粋に情報の伝達だけでとらえられるものではないのかという気がするわけです。

古澤 先ほどの宝谷先生の話のときに言おうかなと思っていたのですが、今ここで全部まとめて言うと、私も言わなかったためにたぶん司会者の方はちょっと誤解されていたと思うけど、DNAは情報だけではないんです。DNAというのは1つの分子なんです。しかもロングロングモレキュールなんです。人間だったら1メートル5センチぐらいあるわけです。ぶつぶつに切ったとしても、1本の染色体はその40分の1ぐらいあるわけです。何が言いたいかというと、皆さん方が考えている遺伝子とDNAとはまったく別ものなんです。遺伝子というものは蛋白をコートしている部分をイメージされていると思うんですが、そうではなくて、DNA全体が簡単に言うとどこにミューテーションが入っても、各遺伝子の発現に影響する可能性を持っているということです。それは非常に大事なポイントだと思います。

ですから、遺伝情報がどうのこうのという議論は非常に短絡しすぎていると思っているし、データがそうなっています。もっと簡単に言うと、クロラムフェニコール抵抗性の実験を我々はやったんです。クロラムフェニコールというのは初めに使ったほうの遺伝子です。dna Q49の中で世代をどんどん増やしていくと、何と1500 $\mu\text{g}/\text{ml}$ のクロラムフェニコール存在下でも平気で生きている大腸菌がプラスミドとして採れてくるわけです。

しかし、ストラクチャルジーンはまったく変わっていない。でもどこか知らないけれどもベクターのどこかが変わって何か不明なことが起こって、先ほど先生がお見せになったような細胞のなかのもろもろのことが起こって、結論として1500 $\mu\text{g}/\text{ml}$ のクロラムフェニコールに耐性になるわけです。それはいみじくもこの場合、突然変異はストラクチャルジーンと関係ないということを示しています。だから、ゲノムDNAの単なる情報だけではないんです。ちょっとイメージはしにくいのですが、要するにDNAは物質だからです。

DNAはこんな棒ではないんです。ダブルヘリックスでもないんです。もっとこんなになっているんです。花魁のかんざしみたいになっているんです。

ところで、一つだけ聞きたいのは、AIとかコンピュータ何ととかあの手をものを人工頭脳と言ったときに、頭脳というのは頭脳だと思うでしょう。頭脳のメモリのメカもわからなければサーキットなのか分子なのかもわからないわけです。そのときにどうして人工頭脳という言葉が先走って、いかにも人間の脳をやっているような感じを世間に与えているのか。我々がそう思ってるのか知らないけれども、どうしてそういうことになったのか。アーティフィシャルライフもそうだと思います。土居さんも言っていたけれども、アーティフィシャルライフは人工的生活ではないのか。(笑) 本当はそう思っていちばん初めの人は作ったのではないか(笑)。日本人はえらく真面目に受けて「ライフ」とやってしまったから堅くなってしまったので、何でもいいじゃないかというのが私の意見なんです。

そのなかで生物に関係したライフならば、私がいちばん初めに言ったようなことが若干あってほしい。何をやられてもかまわないというのが私の意見です。

北野 頭脳と言うか知能と言うかで語感がずいぶん違って、頭脳と言うと並みの脳の雰囲気がすごくするじゃないですか。それはとてもやれないなというのがあって、頭脳というのはあまり言われていなくて知能と言いますね。

上田 いちばん最初は頭脳でした。

北野 最初は頭脳だったけれども、それはあまりにもおそれ多いなというのがあって……(笑)。それで知能と言ったときに最初は、いま ALife, ALife とやってみたり、バイロジカルな脳の機能がわかるのではないかという期待があったのですが、そんな単純な話ではないというので、すごく工学的な話になっている。知的というのをどう定義するかは別として、工学的に知的なシステムをどう作っていくかというエンジニアリングの分野にすごくシフトしている。それが主流です。

でもやはり脳がやっているような機能をさせたいとなると、そうでないという人もいますけれども、どうしてもメカニズムが近寄らなければいけなくなると私は思っています。そうするとわかっていないところだけでこれをバツと上のほうを持ってきてやっているから、入っていないところがたくさんあるわけです。

たとえば何が入っていないかという、情動系の脳内ホルモンが眠りにどう影響するかというモデルは、これも最近わかってきた話ですけれども、人工知能のなかには全然入っていないわけです。それによってどういうふうなメモリモジュレーションが起きるかというのは、たとえばラットでドーパミンのノックアウトマウスでやっても、ラーニングできるけれどもメモライゼーションが出来ないというのが最近あります。そういうのは今のモデルに全然入っていない。

それがどういうふうに影響するかというと、実は学習をさせるときに重要なことか重要でないことの判断は今は出来ない。ところがそういう情動的なドーパミンでやるとそれが出来るようになる。私は最近そういうのをやっているのですが、今まではそういうのはなかった。だからそういう下のことを無視したために出来なくなって困っているところがたくさんあるんです。それをバイロジカルなところがどんどんわかってきて取り込んできて、エンジニアリング的に何が意味があるかを判定して、それでもっとうまく出来るものを作っていこうという流れが一つあります。

古澤 それを聞いて若干安心しましたがけれども、一つだけ質問があります。ジェネティックアルゴリズムをやっている人にお聞きしたいのですが、私はアメリカのミシガンへ上居さんと行って専門家と話したときに彼らに質問したんです。あんたら分裂という概念を入れているの？ と聞いたんです。英語で言うとレプリケーションという概念です。そうしたら、ノーと言いました。入れたのは一つもないという。それがいまおっしゃるところの一つだと思えます。コピーを取ることと分裂とはまったく違います。そこを抜かすからおかしいとそのとき私は思いました。

北野 だからジェネティックアルゴリズムをやるときの問題点は、生物学的にいろいろある現象の一部しか使っていないですね。しかも本質的なところが落ちているところがたくさんあるんです。

古澤 そうそう。それは中学校の生物の教科書にみんな書いてあるわけです。だからそれは生物学者の責任であると同時にコンピュータ側の不勉強だと思います。ちゃんと読み取れなかったということだと思います。私は個人的にそう言ったら、そうしたら、そうだとっていました。

北野 それは同感です。たとえば D.E. Goldberg という人がいるのですが、ジェネティックアルゴリズムが工学的に使われる一つの理由は、あまり複雑なものをたくさん持ち込まなかったからとりあえずやれた。工学的にエッセンシャルだと思うところだけ持ち込んできた。だからまず最初の作物がある、ある程度やるとそれは簡単なメカニズムなので、それから先へ進まなくなってくるわけです。そうすると今度はもう少し複雑な現象をうまくエンジニアリング的にソフィストケートするという形で持ち込まないといけない。そろそろそのフェーズが始まっているのではないか。

大須賀 人工頭脳か人工知能かという言葉があって、人工頭脳というのはバイオロジカルなバックグラウンドもなしにできるはずがないというお話もありましたが、このご指摘は正しいと思います。ただこれも人工知能だからという話もありましたが、AI と AL との境目がどこにあるかという話で、AL にしろ AI にしろ、我々はいま我々が知らないところを発見している最中であって、すでに生物がどういうふうに出て上がっているか、そのうえに言語をレベルにして知能がどのように発達しているかということはすでに存在しているわけです。我々がそれを知らないだけで、それを一生懸命見つけているだけなんです。

我々はまだ見つけていないけれども体系としてはある。そしてその体系のなかの全部を我々はカバーすることはできないから、物理的なレベルから出発するバイオロジーの系統と、言葉というものを認めたいうで、それで何ができるかという体系を作ろうとしているいろいろな学問分野があります。人文系の分野はみなそうですけれども、心理学にしろ認知科学にしろ、それから言葉のレベルで作られたことに対してさまざまな判断を下す法律というのがあります。そういう意味で言葉の存在を仮定したうで作られてきた学問体系があります。AI も実はそれだと思います。

それに対して言葉のレベルだけで閉じてしまうと、今おっしゃったように、確かに AI は自然科学の分野も含むから不完全な部分が出てくるので、バイオロジカルな考え方も入れなければいけないという下方、この下のほうというのは、べつに上がよくて下が悪いという意味ではなくて、基礎的なところにまで発展をしなければいけないというのが、今の AI の現状だと思います。

その背景にあるのは、生物学にしろ情報学にしろ自然の原理があると思います。生物学というのは自然の原理に従ってものが作られてきた構造である。同じように記号から出発した記号の体系があって、それは考え方という学問です。ですからそれを発達させていたのが文化であります。たと

えば科学的方法論というものがある程度明確になった時点で、われわれは非常に多くの言葉のレベルのうえに学問体系を築いてきたわけです。いまはだれもバイオロジカルのレベルからいちばん上のレベルまでできる人はいないと思いますけれども、そういう意味で学問が分化するのはやむを得ない。そのうえで、それぞれがわかっているところをオーバーラップさせながら、協調の範囲を広げていくしかないのではないかという感じは受けます。そういう意味で今日の議論を非常におもしろく拝聴したわけです。

もう一つ今までの話とは別に、生物が進化によって言語というものをあるレベルで獲得できるようになった、そのレベルまで達したということと、それが出来上がってから言語によって何かものが作られるというのはフェーズがまったく違います。生物は何も言語が見つければどんどん知能が出来るかなんていうことは知らないで進化してきたわけです。それはたまたま出来たのだと思います。そういう意味ではもともと AI の議論と AL の議論は本質に分けられた議論だったんです。そういう意味では学問体系の分化はある程度認めるべきですし、それがオーバーラップ出来るものならオーバーラップした分を、統合できるものなら統合していくというのがいちばん大事ではないかと考えています。

古川 (康) AI と AL の関係ですけれども、池上さんがこういった話に AI の人が全然反応しないとおっしゃいました。私も AI の一員ですが、反論しづらい面があります。要するにギャップが大きすぎるところがあると思います。そうするとコミュニケーションするためにはどういふ話題を共通の話題として設定すればいいかということの問題にすればいいと思いますが、私が提案したいのは、感覚、センサは両方密接に関係していると思います。AI にとっても意味を考えるとときにインプットは大切です。それは感覚系だし、それ自身は生命的なところにも非常に密接に結びついていて、先ほどの膜の問題でも温度センサみたいな話がちょっと出てきたと思います。ですからセンシングあたりを共通のフィールドにしたらいいのではないかと。ちょっと感想ですけれども。

北野 センシングは確かにいいトピックだと思います。もう一ついつも感じているのは、最近バイオロジーとか特に分子生物をやっている人のところにミーティングに行ったりしますと、AI との議論とずいぶん違うんです。だから今日の午前中の議論と午後の議論の様相がぜんぜん違うというのはみんな感じたと思いますけれども、一つはバイオロジーというのはすごくサイエンティフィックでデータドリブンで実験をして、ファクトがこうあったというところで乗せてくるわけです。それに対して AI はこう信じるというところからへたをすると来たりするわけです。要するに記号はあるとかないとかということから来て、それで書ける、書けないで、AI では実証的な話は出てこない。全然ないとは言わないけれども、何かアーティファクトを作って、これで出来たからいいとか出来ていないとか、いや、これはシンボルグラウンディングだとか何かという話で終わって、それを決定づけるような実験はどうしたらいいのかという議論になかなかならない。だから AI は今の

段階では宗教論争に非常に近いレベルにしかになっていないのではないかと思います。

ワインバーグが最近、究極理論に関する本を出したのですが、私はあれを読んでいいことを言っているなと思ったのは、物理がすごいのは、たとえば建築でも何でも構造力学の理論がありますが、1個1個分解して、1個1個下のレベルに行くとき必ず素粒子とかいちばん下のところまでつながる。それが物理のパワーだというわけです。AIに関してはさっきのシンボルで切ってしまうと、それが出来ないんです。アーティファクトで設定したうえだけでやってしまうから、それはアキシオマティックなところであって、哲学かまたは数学にしかならない。その下まで全部つなげて、シンボルなら下はダイナミクスで、ダイナミクスならニューラルダイナミクス、ニューラルダイナミクスならモレキュラーがあって、モレキュラーがあればその下のメカニズムがあるというふうに全部つなげていく努力をしていかないとだめなわけです。トラディショナルにAIでシンボル前提でいいと言っている人は、それを放棄しているのではないか。それをやっている限りAIとバイオロジーの対話はないのではないかと思います。

だからサイエンティフィックな実証主義になって、そういうアプローチをちゃんと取るようにAI人は気をつけないと、いつまでたっても話はつながらないのではないかと思います。

司会 さっきデュプリケーションがまだ入っていないという議論があったのですが、それを入れないのは論理的にべつにいまやっているモデルで必要ないからです。たとえば自己複製という問題を考えますと、それを論理的に構成するために何が必要かということを考えていきます。そういう場合にデュプリケーションがバイオロジカルに入っていないと言われても困るんです。というのはそれはこの理論体系では必要ないものなんです。だからロジカルに考えることと生物がなぜ自己複製をやっているか、実際にこうやっているということと自己複製の理論ができることは別問題でしょう。というのがALifeの立場なんです。

それは生物ではないと言われれば、それはそうかもしれないけれども、われわれが知りたいのは自己複製がどういうふうにして行われるかというロジックであって、それがどういうふう to 実現していて、唯一のものがあるかということを知りたいわけではないんです。その立場はすごく違うわけです。だからそれは使えるということが大事で、理論が走るということと同じで、実証主義的なデュプリケーションがなくてもデュプリケーションが導けることが大事で、デュプリケーションがあるからデュプリケーションを入れることが大事ではないんです。だからAIもそういう意味で使えるということが大事なのであって、クォークに関係していることとは関係ないんです。

北野 私のAIに対する批判はシンボルがあるとかないとか議論しているけれども、それを実証しようとしないうところがAIに対する私の批判なんです。役に立つというのは工学的にはそうですけれども、ちゃんとグラウンディングされていない理論だから役に立つ範囲が狭まっていて、たとえばやりたいことができない。それをもっとできるためにするには、もう1段下まで理論の基

盤を作り直して、そこから上を作っていないとだめなのではないかということです。

上田 「人工生命は新しいパラダイムとなりうるか？」で私は最初にいくつかのキーワードを挙げました。「生物とは何か？」論争、「部分と全体とは何か？」論争、「役に立つか？」論争、「創発とは何か？」論争、「自然／人間の関係に新しい関係をつくるか」という5つのことを挙げたのですが、今までの議論は部分と全体か論争という古くて新しい問題にどうしても来てしまうのではないかと。あるいは内と外の問題です。たとえば役に立つか役に立たないかは二項対立のように、つまり何かをすればそれが役に立つと評価するものが、作者とそれを評価する者とが別にあるという前提でいま話が進んでいる。また領域の問題にして、工学は領域をある程度適当なところで切りだして、そのところで役に立てばいい。そういうことをやっているのが工学であるかのように思われています。

部分と全体の古くて新しい問題というのは、依然としてたぶんそれは課題であると思いますがもともとは哲学が……、哲学、数学、物理学、生物学、あるいは社会学、経済学の問題を、たとえば自己言及モデルを提案するという形で何とか乗り越えようとしているわけです。

人工知能は工学的な立場ということになっていますが、私は工学のなかの非常に工学的なことをやっている立場から言いますと、工学の問題も実は何か別のものと切り離して、それだけが有用性を持つことが、たぶん保証されないところに来ているわけです。つまり、人工物を作りだす行為と作りだされた結果としての人工物は、実は作る行為に戻ってくるという問題に来ているわけで、工学だけを切り離して、あるいは工学的な立場だけが独立にあるかのような議論は、たぶん出来なくなってくるのではないかと。そこに人工生命というものがまともに前面に対決しないと、たぶん人工生命の意味はないであろうというのが私の感想としてあります。

司会 それは次のAIと工学のほうでやると思います。司会者はまとめるのが下手なので上田先生がまとめられたところで……(笑)。そういうわけで人工生命の研究も多くの人がちゃんと参加して真面目に考えないと発展しないので、これを機にぜひ頑張ってください。

## 7.2 人工物工学, マルチメディアと人工生命

### 7.2.1 人工物工学と人工生命

#### (1) はじめに

経済活動の基本は「もの」すなわち人工物の創成である。しかし「もの」の大量生産の結果、我々の日常生活には「もの」が満ちあふれ、地球における資源の有限性は「もの」造りに対する制約条件として表面化しつつある。

現代の「もの」造りが抱える課題を、次の2点にまとめよう。

第1は、「もの」造り体系から、今後期待される人工物の姿が見え難くなっていることである。市場原理に基づいた企業活動は、マーケット調査や技術予測を活用して人工物の発展のプロセスを推進してきた。しかし、消費者の「嗜好の多様化」や「本物嗜好」に対応可能な製品の開発やそれに伴う生産方式の策定は未だ暗中模索の段階にある。また、急速な技術進歩は、製品開発の方向性を特定化することを困難にしている。したがって、大量生産の次の生産パラダイムにおいて、どのようなものを、どのように開発し、どのような組織でどのように生産していくかは重大な課題である。

第2は、環境問題である。地球に存在する人工物が量的に自然物に対して無視できなくなった現在では、資源の有限性を認識することが人類の重要な行動規範となっている。すなわち、人工物に対する新たな価値基準が求められている。しかし、現在では、人間、人工物、自然の相互関係を明示/理解する為のモデルが十分ではないために、人類が共通の問題認識をもつことが基本的に困難である。

#### (2) 生物/生命の視点

工学は「もの」をつくる活動に関わる過程を通じ、その体系を細分化させてきた。技術の専門化は、技術の自己増殖的な進歩の原因でもあり結果でもある。反面、それは顕在化した問題の解決に関して大きな限界を持つ。たとえば、有限の資源をいかに使いこなしていくかという課題に対しては非力である。そこで、人工物工学の研究では、今後どのような人工物をどのように生産/運用していけばよいのかという問いに適用可能な学問体系を構築することを目的とし研究が進められている[1]。とはいえ、具体的にどのように問題解決の為の学問を再構成していくかということは極めて困難な課題である。

そこで、人工物の抱える問題点に対するひとつのアプローチとして、生物/生命の視点に着目した研究が進められようとしている。

具体的には、次の2つの視点を通じて問題にアプローチしている。

第1は、生物学のレベルである。すなわち、「分類」を中心に学問化された生物学における進化論の持つ意味である。元来、生物の遺伝形質の時間的変化を対象とした「進化」の概念は、地球の進化、宇宙の進化、人類の進化というさまざまな対象の時間的変化の理解に採用されている。その際の意図は、互いに複雑に絡み合っているシステムの行動原理を生物の進化論に習って明示化したい

ということである。そこで、生物学における進化論を「もの」づくりを対象に明示化し、より一般化して理解することが試みられている。更に、そのフレームに自然を明示的に取り入れ、人工物と自然の共生の可能性をさぐる「人工物生態学」を考えている。

第2は、生命に固有のメカニズムのレベルである。生物には、成長、増殖、自己修復のメカニズムがあり、また、人間に対して優しさや慈しみを抱かせる性質がある。これらのメカニズムや性質は、今後の人工物の進化を考える上で必要不可欠である。

### (3) 生物/生命の視点からの人工物工学研究例

#### ① 人工物の進化に関する研究

人工物工学研究のひとつとして「人工物進化論」を考えている。これは、すなわち、人工物を「進化」という観点から理解しようとするものである。人工物の進化に対して、人工物への要求機能とそれを発現する内部構造の創造者としての人間(=設計者)の立場でとらえる工学に対し、人工物の要求機能とその外部環境との関係をそれとは異なった視点から、淘汰メカニズムとしての市場原理からとらえるのが経済学的アプローチである。このように考えると、人工物工学に「進化」の視点を持ち込むことで、今までは設計や市場原理などを切り口にばらばらの形で理解されてきた人工物の産出メカニズムを統合的に議論することが可能となる。

#### ② 人工物の生態に関する研究

生命システム論[2, 3]の観点に立てば、環境問題とは地球というエネルギー的な「開放系システム」において、「人間と人工物」から構成される有機構造がその境界をどのように設定すべきかを議論することである。人工物工学では、この研究アプローチを「人工物生態学」と名付ける。「人工物生態学」においては、現状の経済学や工学は「人間と人工物」から構成される有機構造として融合化されて扱われ、自然や生物との関係がモデル化され理解される。

#### ③ 人工物の設計支援に関する研究

人工物は設計行為としての人間の知の反映として実現される。設計者やデザイナーの発揮する創造的行為は、発想(アブダクション)と呼ばれる思考に属し、いわゆる3段論法的な思考過程とは異質なものであると言われているが、そのメカニズムはほとんど解明されていない。人工物設計支援の研究では、アブダクションプロセスのモデリングを基盤として、知識増幅を支援するエンジニアリング環境の構築を試みている。そこでは、設計者同士あるいは、設計者と設計支援環境との間の相互作用が設計における発想支援において重要な役割を演じると考え、人の知性や感性を刺激するような設計支援の有り方を研究している。たとえば、システムに人工生命のメカニズムを具備し、まず、そのシステムが人に対して解の候補を提示し、次にその候補を設計者が解釈するという過程を繰り返すことで、設計者が無意識に抱いていたイメージを顕在化するような仕組みの可能性を探っている。

### (4) 人工生命研究への期待

以上に述べたように、人工物工学の研究では生物/生命の視点に注目しており、人工生命の研究

にも期待している。しかし、その視点は、単に人工物との対比において生命現象を模倣するというだけでなく、生命現象との相互作用によってもたらされた人の知のダイナミズムを理解することに着目している。

#### 〈参考文献〉

- [1]吉川弘之：人工物工学一領域の否定，「テクノグローブ」，工業調査会，(1993)
- [2]H.R. Maturana, F.J. Varela：オートポイエーシス，国文社，(1991)
- [3]L.V. Bertalanffy：一般システム理論，みすず書房，(1973)

### 7.2.2 マルチメディアと人工生命

#### (1) はじめに

マルチメディアと人工生命の関連はCG (Computer graphics) によって提示される自然物体から始まった。自然物体は山，海，雲，砂，石，植物，動物などからなり，形状，テクスチャー，動作，挙動などの自然な提示方法が模索されていた[中嶋 94]。形状，テクスチャーに対しては従来のレンダリング手法では不自然さが解消しきれないなどの理由からフラクタル理論を応用した方法などが検討されている。また，生物の動作や挙動に対してはLシステム，セルラーオートマトン，ニューラルネットワーク，進化的手法の応用が盛んに行われており，人工生命の主流の一つにもなっている。このようにマルチメディアはコンピュータによって実現される能動的挙動に対して大きなニーズを持っている。本節ではマルチメディアと呼ばれる新しい情報環境に対して人工生命の技術がどのように適用される可能性を持つかを考える。まず，(2)項でマルチメディアについて概観し，(3)項でマルチメディアの中での人工生命の役割について考察する。最後に，(4)項で対象をマンマシンコミュニケーションにまで広げて人工生命の適用可能性を模索する。

#### (2) マルチメディア

マルチメディアと呼ばれる多重情報環境によって，テレビなどの一方向性の視覚／聴覚情報（電子メディア）だけでなく，双方向通信（インタラクティブメディア）や触覚情報提示（タクトイルディスプレイ）なども実現のものとなりつつある。今日では，コンピュータの作り出す世界（バーチャルリアリティ）によって現実では体験できない環境さえも作り出せるようになってきており，伝送できる情報量の増加とともに情報の精密さと質の転換期を迎えている。また，情報統合化技術はCAI (Computer aided instruction)，マイクロサージェリー，各種シミュレータ，ロールプレイなどを可能なものとしている[館 92]。現在のマルチメディアは情報のゲートウェイ的な役割や受動的な媒体として機能しているが，将来的にはヒューマンインタフェースとしての能動的な性格への要求が高まるであろう。すなわち，手間を省きたい，インスピレーションがほしい，話し相手になってほしい，メモリーやシステムの自己管理など，人工生命の課題とする創発，自律，自己修復，適応，学習などの技術の応用可能性が示唆される。

#### (3) マルチメディアの中の人工生命

将来の人工生命研究から派生する技術としては、生命現象を人工的に模擬可能でシステムパラメータを操作することによって、オペレータが自由に生命的な動作パターンや画像パターンを獲得できるような生命的パターン生成技術となりうる可能性がある。おそらくほとんどのパターンは生物学的には生命現象の部分とさえみなせないようなものばかりであろうが、この技術をヒューマンインターフェースやデザインツールとして見た場合にはいかがだろうか。この技術によって実現されるパターンは周期性と不連続性をまさに適当に配置したようなものとなり、オペレータの意外性をくすぐるような効果を生み出すかもしれない。学問的ではないが、生き生きとした状態を表わす言葉に「まるで生きているような」という言い回しがある。一方、従来の工学は精密性と高速性、連続運転性が最重要課題とされてきた。もちろんこれからも工学的システムに求められる要件ではあるが、これらのような性質を称して「機械（ロボット）のような」という言い方をされる。これら2つの言葉を融合させることができるとしたら機械の人間に対する親和性も高まりインスピレーションを得るためのツールが構築可能となろう。すなわち、生物のある部分的特性を有する機械は新しいデザインの支援ツールとなる可能性が示唆される。また、生物の適応的動作を有する機械はヒューマンフレンドリーなインターフェースや安全性の向上に寄与するであろう。

#### (4) マンマシンコミュニケーションと人工生命

人工生命の応用範囲はマルチメディアのみならず、自律性や自己組織性を有する機械は自動化のためのプログラミングの手間を省き、その結果としてメンテナンスフリーの工場や生産システム、家庭内では自動掃除機、運転手を必要としない自動車など、人間の生活環境の向上や生活空間の拡大にも寄与することが期待される。適応能力と自律性を高めるとかなり高度な情報処理能力を有することになるであろう。その結果問題解決ばかりではなく問題を見つけることのできる機械となり、砂漠など極限環境においても自己保存を行いながら同時に環境整備を実行する自動整備システムなども期待される。しかしながら生物は利己的であり、その制御性の悪さは大きな問題となって残るはずである。よって人工生命の将来の課題としては如何にして機械の制御性を残しつつ生命の特性と融合をはかるかにある。

#### <参考文献>

[中嶋 94] 中嶋正之：マルチメディア工学，昭晃堂，1994

[館 92] 館，廣瀬：バーチャル・テック・ラボ，工業調査会，1992

## 第8章 むすびにかえて

本書では、人工生命の概念、歴史、方法論、研究事例、将来の展望などを述べてきたが、その軸となったのは学問・研究の視点であった。そして、人工生命は新しいパラダイムとなりうるか、という問題意識を背景にしていた。

CA, Lシステム, GAなどを源流として誕生し、創発をキーワードにして、複雑適応系研究とも連動しながら展開されている人工生命には、大きな期待があると同時に批判もある。生物学者からは「生命現象はそんなに単純ではない」と、また工学者からは「創発の非明示性は最適化や予測に適さないのでは」と、さらに伝統的人工知能学者からは「決して新しいパラダイムではない」といったように。過度な期待は慎むべきであろうが、性急な批判も妥当ではない。人工生命が誕生した1987年のALife会議がMinskyやShannonらにより人工知能が宣言された1956年のダートマス会議に対比され、さらにGOFAIを越えた新しいパラダイムという評価を得るには、今後の歴史に待たねばならないだろう。

今回の調査ではヨーロッパにおける人工生命関連の主な研究機関を訪れ、HusbandsとHarvey (University of Sussex), Steels (Vrije Universiteit Brussel), Bersini (Université Libre de Bruxelles), VarelaとBourgine (Ecole Polytechnique), Meyer (Normale Supérieure), Mange (Swiss Federal Institute of Technology), Pfeifer (University of Zurich)らに会ったが、ほとんどの研究者が、LangtonやBrooks, Rayらと同じく1980年代の後半ごろにはほぼ独立に人工生命分野の研究を開始している。いずれも創始者の強い自覚があり、揺るぎない確信に満ちているのが非常に印象的であった。今後人工生命研究は、彼らに加え我国の研究者も含めて、大きく発展するものと思われる。

本書が人工生命あるいはその研究のもたらす意味についての一巡したこれまでの議論に、新しい地平を拓くものとなるとすれば、執筆者一同最大の喜びである。

なお、今回の人工生命研究調査は、財団法人日本情報処理開発協会のAI動向調査委員会の活動の一環として行われたものであり、委員長の大須賀節雄東京大学教授に深く感謝申し上げたい。

最後に、本書の執筆者の個人的なコメントを附記することにする。各執筆者により人工生命へのスタンスが異なっており、多様な見解を示すことに意味があるからである。

#### 〈上田完次〉

ワークショップ「人工生命は新しいパラダイムとなりうるか」で、筆者は、パラダイム論のクーンに従い新しいパラダイムの具備すべき4つの要件を紹介したあとで、人工生命をめぐる論争としては、(1)「生物とは何か?」、(2)「部分と全体とは何か?」、(3)「役に立つか?」、(4)「創発とは何か?」、(5)「自然/人間に新しい関係を創るか?」、といった議論があげられることを示した。このうち、筆者としては(2)と(5)に特に関心がある。

部分と全体の問題は実は、哲学、数学、物理学、生物学、社会学、あるいは文学の分野で要素還元論批判や自己言及モデルの提案などのかたちでこれまで議論が繰り返されてきた。そして、現在では工学においても避けられない問題になっている。かつて人間は自然を独立に認識できると信じていたが、それがそうではなくなったように、人工物を創る行為と創られた人工物の相互依存の複雑性は今日、工学における最も本質的な問題として浮かび上がって来ている。

創発をキーワードに掲げる人工生命が、部分と全体の問題に真正面に向かわなければ、単に目新しい要素技術が改良的方法論の提示に終わってしまうであろう。部分と全体の理論化、そしてそれによって自然と人間に新しい関係をもたらすことこそが、筆者が人工生命研究に期待する最大の理由である。

#### 〈下原 勝憲〉

人工生命あるいは進化的計算論とは、進化や創発をキーワードに新しい“かたち”の情報処理の創出を目指す、新しいパラダイムであると確信している。そこでは、これまで個別に提案された、脳の可塑性、個体の発生、適応や進化など生体や生物に学んだモデル化手法を組み合わせ、あるいは総動員して情報処理の新たな可能性を探ろうとする。

生命論的な情報処理によって一体何が新たに可能となるのだろうか。個人的には、情報処理系自らが自律的な内部処理を通して情報を生み出せるといった、自律性や創造性に富む機能の実現が可能となることを最も期待している。今やコンピュータは、私達の考えや文章を表現しコンピュータとの対話を通して文章や考えを練りまとめるために欠かせないものとなった。コンピュータは自己を表現し対話できる“第2の自己”的存在と言ってもよい。しかし、予めプログラム化された以外のことはできないし、コンピュータ自らが情報を生み出すこともないのも事実である。

自律性と創造性に富む情報処理系、すなわち、“情報を生み出すコンピュータ”や“生き物みたいなコンピュータ”の創出がひとつの目標である。具体的には、自発的/相互依存的な変化を生成する機構を利用して、プログラムを自ら書き換え新しい機能を創りだすソフトウェア進化や同様にハードウェアの構造も自律的に創り変えていくハードウェア進化の方法論の構築を目指したい。

<Jari Vaario>

I understand artificial life as a synthesizing research of the topics of various research fields. Each field could live alone, but being collected and connected together under a single research concept could contribute each field more than what otherwise could be achieved separately. Thus ALife is not only a research of emergence, but it is itself an emergence of research topics.

This interdisciplinary research approach is very attractive, but it has disadvantages as well. Among of others, the most dangerous thing is that ALife will be popularized too much, and the sharpness of the research will be lost. I wish ALife could avoid this and focus on the real problems, rather than oversimplifying difficult problems. It is very easy to produce nice computer graphics, but we must ask what is really behind of those graphics, and do they really serve the original scientific goal of ALife of broadening the understanding of the life phenomena.

After we understand better the concept of emergence, we can start to talk of various engineering applications. The concept of emergence in engineering applications could be summarized as "From Simple Rules to Complex Systems". The ultimate goal in all engineering is to create complex systems with zero (or as little as possible) design, and this is exactly why engineers should have a look for ALife research. There does not YET exist any single answer for this problem, but according to our current scientific understanding of the creation of the world, there has been no design, but only emergence. And the existing world has a complexity still unreachable by the current technology. What have been the premises of emergence, and how could we apply them (,or even a tiny partition of them, or an inspiration of them) in engineering tasks seem me to be not only science fiction, but a realistic research topic.

Thus, I see the most important advanced topics of artificial life research to be studies on 1) mechanisms providing the self-organization (emergence) of hierarchical systems, where the complexity increases, 2) self-definition of the border between system and environment (a kind of autopoiesis), 3) self-improvement of systems by reproduction with directed variations in genetic information (a kind of Lamarckism).

〈横井浩史〉

ラングトンの提唱する人工生命の“Edge of chaos”の考え方は、物理学において既に1943年に“負のエントロピー”という言葉で生命と秩序形成を捕えようとする試みとして始められており、新しい考え方とは言いにくい。ただし負のエントロピーという記述は物理学的な精密さや境界条件の設定の仕方に対して多くの困難を残している。また、“Emergence”の考え方は“部分と全体の相補性”なる言葉で生物学の常識でもある。よって人工生命が新しい分野を形成するという主張にはかなり無理がある。しかしながら、これら2つの考え方を融合し、さらに工学的有用性を探るといふ研究の方向性を与えたことには意義が見い出せるであろう。また、将来的には人工生命的研究により高度な自律性と適応能力を有するシステムに到達できる可能性は否定しきれない。しかし、現存する生命の一部にさえなりえていない現段階において「生物学的生命を包含する大きな領域の実現可能性」を主張するのは言い過ぎであり、今後改めるべき課題であると考えている。

〈池上高志〉

人工生命の研究は、物質科学（「もの」）としての生物学の研究（たとえば分子生物学）に対して、生物のもつソフトウェア（「こと」）としての研究を目指すものであると思う。「もの」的研究というのは、生物の自律性・認識や学習・進化性を物質的基盤で理解することを目指すものである。これに対し「こと」的研究とは、物質的基盤がなんであれ、そこに生まれる物語り、ロジック、あるいはモデルとしての面白さをみようとするものである。たとえばアラン・チューリングやフォン・ノイマンがやりたかったのはそういう「こと」的研究であり、人工生命の研究は歴史的にはその流れを継承する理論生物学だと考えている。

だからといって分子生物の詳細な機構を取り入れたモデルがいけないというわけではない。しかし爆発的な数の分子生物学の論文をフォローしても、その結果はいつひっくり返されるかわからない。Aという分子のせいで生じると思っていた現象が実はBだったということを問題にするのは「もの」としての生物学の研究である。そうではなく、カオスがあると分化が生じるとか、形式言語システムとしての階層を昇降すると多様性が増す、というような説明のロジックを「こと」的研究としての人工生命は問題にすべきなのである。抽象度のより高いところで考えることこそ必要であり、理論として解明すべき点はまだまだいっぱいあるのである。

「こと」的問題に関わっていく中で、なにが可能なストーリーかという以上に、不可能なストーリーを描いて見せること、つまり『……は起こらない』という否定型の提言ができることは、理論的研究としての価値をより人工生命にもたらすものだと信じている。

## 〈付録〉 人工生命関連出版物・文献リスト（日本語書籍）

■本リストは、横浜国立大学・佐倉統氏がまとめられたものである。

■資料的にもきわめて貴重かつ有益な情報をご提供頂いた佐倉氏のご好意に、この場を借りて深謝したい。

■なお、本リストは1994年12月現在までに出版された日本語書籍のうち、人工生命およびその周辺に関係するおもな文献を集めたものである。\*を付した文献は基準書として佐倉氏が推奨されるものである。

- 
- ・\*合原一幸（編）『カオス』サイエンス社，1990。  
カオスについて多方面から論じた総説集。入門者むけのものから専門的な各論までを網羅。
  - ・会津泉『進化するネットワーク』NTT出版，1994。  
インターネットの動向をわかりやすく詳細に述べている。ネットワーキング社会（とネットワークそのもの）を類生命体として捉え、自律・分散型こそ今後の中心パラダイムと主張。
  - ・甘利俊一『ニューラルネットの新展開』サイエンス社，1993。  
ニューラルネットの最近の動向を手軽に知るには良い本。人工生命的視点は少ない。
  - ・青木健一『利他行動の生物学』海鳴社，1983。  
動物の行動の進化に関する優れた教科書。小冊子だが内容は高度。
  - ・\*M.A. アービブ『ニューラルネットと脳理論』サイエンス社，1992，原著1989。  
ニューラルネット関係の本の中では一番面白い。
  - ・P.W. アトキンス『エントロピーと秩序』米沢富美子・森弘之訳，日経サイエンス社，1992。  
複雑系の物理学へのわかりやすい入門書。カオスから人工生命へと話は発展していく。
  - ・\*R. アクセルロッド『つきあい方の科学』HBJ出版局，松田裕之訳，1987，原著1984。  
さまざまな戦略を対決させるコンピュータ・トーナメントをめぐる考察。生き残ったのは、他人と協力していく戦略だった。
  - ・J.-P. シャンジュー『ニューロン人間』みすず書房，新谷昌宏訳，1989，原著1983。  
徹底して唯物論的な視点から脳の働きを考察。
  - ・J.-P. シャンジュー『分子と記憶』同文書院，山口知子・山口仁訳，1991，原著1988。  
上の内容の続編かつ一般むけ。もとは連続講演。
  - ・J.-P. シャンジュー& A. コンヌ『考える物質』産業図書，浜名優美訳，1991，原著1989。  
神経生理学者と数学者との対話。
  - ・C. ダーウィン『種の起原（上・下）』岩波書店，八杉龍一訳，1990。

「生命に関する参考文献目録なら何であれ、これを加えなければ完全ではない！」(クリス・ラングトン)

- ・\*L. デービス (編) 『遺伝アルゴリズム・ハンドブック』森北出版, 嘉数侑昇ほか訳, 1994, 原著1992.

GAの基礎から応用まで, みっちり学べる優れた教科書。とくにその適用に関しては, 飛行機の設計からスケジューリングまで幅広く扱っていて他に類を見ない。

- ・R. ドーキンス 『利己的な遺伝子』紀伊國屋書店, 日高敏隆・岸由二・羽田節子・垂水雄二訳, 1990, 原著1976/1989.

遺伝子から動物の行動と進化を読み解く古典。第2版は, 著者自身によるAL研究の成果も取り入れ, 進化生物学の新たな胎動を予感させる。

- ・R. ドーキンス 『延長された表現型』紀伊國屋書店, 日高敏隆・遠藤彰・遠藤知二訳, 1987, 原著1982.

上の続編。さらに徹底した視点が述べられる。

- ・R. ドーキンス 『ブラインド・ウォッチメイカー』早川書房, 中島康裕・遠藤彰・遠藤知二・疋田努訳, 1993, 原著1986.

単純な枝わかれ図形から出発して, 累積的な人為選択によってきわめて複雑な図形を進化させるバイオモルフ・モデルが最初に発表された本。

- ・A.K. デュードニー 『コンピューター・レクリエーション I : 遊びの発想』別冊サイエンス82, 日経サイエンス社, 山崎秀記監訳, 1987.

- ・A.K. デュードニー 『コンピューター・レクリエーション II : 遊びの探索』別冊サイエンス92, 日経サイエンス社, 山崎秀記監訳, 1989.

『(日経)サイエンス』(原本はScientific American)に連載されたコラム, 「コンピューター・レクリエーション」のうち主要なものを集めた別冊。コア戦争, 遺伝的アルゴリズム, 再帰式によるCG, セル・オートマトンなど, ALに関する話題が多い。

- ・\*土居洋文 『生物のかたちづくり』サイエンス社, 1988.

L-システムと場の理論を駆使して, 理論発生生物学の構築をめざす。優れた総説になっているだけでなく, 独創的な発想と展開に貫かれている。

- ・H.L. ドレイファス 『コンピュータには何ができないか』産業図書, 黒崎政男・村岩修訳, 1992, 原著1972/1979.

現象学の立場からの「強い」AIへの批判。

- ・\*K.E. ドレクスラー 『創造する機械』パーソナルメディア, 1991, 原著1986.

ナノテクノロジーが可能であることを立証し, 早期対応が必要と説く。

- ・G.M. エーデルマン 『トポバイオロジー』神沼二真訳, 岩波書店1992.

- ・M. アイゲン & R. ヴィンクラー 『自然と遊戯』東京化学同人, 寺本英ほか訳, 1981, 原著1975.

自己組織化・システム論の立場から、生物の合目的性を説明する古典。

- ・ 淵上季代絵『フラクタルCG コレクション』サイエンス社, 1990.

- ・ 淵上季代絵『CG・かたち・フラクタル』サイエンス社, 1992.

生き物の「かたち」を合理的にとらえようという姿勢がすばらしい。枝分かれの技法などL-システムと共通する発想もあり、芸術と科学がどうやら同じ領域に到達しつつあるという予感を抱かせる。

- ・ D.J. ツツイマ『進化生物学 (原書第2版)』蒼樹書房, 岸由二ほか訳, 1991, 原著1986.

現代進化生物学の(まちががなく)最良にして(おそらく)最大の教科書。

- ・ J. グリック『カオス』新潮文庫, 大貫昌子訳, 1991, 原著1987.

カオスに関する一般むけの良い入門書。

- ・ S.J. グールド『個体発生と系統発生』工作舎, 仁木帝都・渡辺政隆訳, 1987, 原著1977.

「個体発生は系統発生を繰り返すか?」という禁断のテーマに(当時は)気鋭のグールドが挑んだ野心作。個体の成長パターンの変化(幼形成熟など)が進化にどのような影響を及ぼすのかを論じる。科学史の著作としても秀逸。

- ・ H. ハーケン『自然の造形と社会の秩序』高木隆司訳, 東海大学出版会, 1985, 原著1981.

シナジェティクスの提唱者による入門書。

- ・ 服部桂『人工現実感の世界』工業調査会, 1991.

ヴァーチャル・リアリティ (VR) の最先端の動向の紹介。日本からアメリカまで精力的に取材しており, この一冊を読むことでVRの大家になったような気になる。

- ・ \*服部桂『人工生命の世界』オーム社, 1994.

一般向けの人工生命入門書として, もっとも優れたもののひとつ。一線の研究者に綿密な取材を行ってまとめてあり, 幅も掘り下げも深い。哲学的な考察には著者独特のひねりがあり, 専門家にも読みごたえのある内容。動きの激しいこの業界の最先端の動向までしっかりとフォローしてある。

- ・ D.R. ホフスタッター『ゲーデル・エッシャー・バッハ』白揚社, 野崎昭弘・はやしはじめ・柳瀬尚紀訳, 1985, 原著1979.

ゲーデルの不完全定理に依拠して, ボトム・アップ方式の強いAIを擁護する大作。部分と全体, 還元論と全体論の関係についての考察が素晴らしい。

- ・ D.R. ホフスタッター『メタマジック・ゲーム』白揚社, 竹内郁雄・斉藤康己・片桐恭弘訳, 1990, 原著1985.

『日経サイエンス』のコラムの集大成。アナロジーに関する分析が秀逸。

- ・ D.R. ホフスタッター&D.C. デネット (編)『マインズ・アイ』TBSブリタニカ, 坂本百大監訳, 1984, 原著1981.

多方面からAIに関する論考を集めたもの。今なお新鮮。

- ・本多久夫『シートからの身体づくり』中公新書, 1991.  
位相幾何学の立場からの, もうひとつの理論発生生物学の試み。
- ・\*J. ホップクロフト& J. ウルマン『オートマトン 言語理論 計算論 (I, II)』サイエンス社, 野崎昭弘ほか訳, 1985, 原著1979.  
オートマトンに関する標準的な教科書。
- ・\*星野力『はやわかりシステムの世界』共立出版, 1993.  
一般システム科学についての手際のよい(そして独特の)概説と, その応用。最終章でALについて, とくにAIとの比較を強調して扱う。ALを, システム論の流れの中で正統に位置付けるためには欠かせない本。
- ・\*星野力(編)『人工生命の夢と悩み』裳華房, 1994.  
筑波大学・星野研究室におけるここ数年間の仕事を中心に, 人工生命のさまざまな側面を紹介。個別研究例がわかりやすく述べられている点でも重要だが, 星野自身による総論部分は, あいかわらず突っ込みが鋭く, 一読に値する。
- ・井上晴樹『日本ロボット創世記 1920~1938』NTT出版, 1993.  
大正期から太平洋戦争前夜までの, 日本におけるロボットの受容史。
- ・巖佐庸『生物の適応戦略』サイエンス社, 1981.  
「現実の」生物がどのように適応しているかを, おもに行動・生態の分野で総覧。分子生物学や形態学にも適応論(+制御理論)が応用できることも指摘されている。
- ・人工生命研究会(編)『人工生命—情報と生命とCGの交差点』共立出版, 1994.  
1993年夏にATRで開催されたシンポジウムの会議録。日本の人工生命研究幕開けの熱気がヒシヒシと伝わってくる。
- ・川上博『カオスCGコレクション』サイエンス社, 1990.  
きれいな凶版がたくさん出てくる。
- ・木村資生『分子進化の中立説』紀伊國屋書店, 向井輝美・日下部真一訳, 1986, 原著1983.  
提唱者自身による中立説の集大成。
- ・\*北野宏明(編)『遺伝的アルゴリズム』産業図書, 1993.  
北野の編集による, GAの基本論文集。第1部:基本理論, 第2部:工学的応用, 第3部:人工生命の3部からなり, いずれも好論文ぞろい。ALの観点からは, 第1, 3部に興味がひかれる。GAについて学ぶには必修の教科書。まもなく続編が出る予定。
- ・\*北野宏明『進化するコンピュータ』ジャストシステム, 1993.  
GA, NN, それらの組み合わせなど, 人工生命に関する入門書。基礎的知識を習得するにはとても良いが, まったくの初心者には少々難しい。
- ・J. ラヴロック『地球生命圏—ガイアの科学—』工作舎, プラブツグ訳, 1984, 原著1979.  
地球全体をひとつの生命システムと見るガイア仮説の提唱。

- ・ J. ラヴロック『ガイアの時代』工作舎、プラブダ訳、1989、原著1988。  
上書の続編。反論にこたえつつ、より精緻なモデルをめざす。
- ・ J. ライバー『認知科学への招待』新曜社、今井邦彦訳、1994、原著1991。  
チューリングとヴィトゲンシュタインをさかんに、認知科学の見取り図を面白く提示する。ただし、訳文が超読みにくい。
- ・ R. リューイン『複雑性の科学—コンプレキシティへの招待』徳間書店、福田素子訳、1993、原著1992。  
アメリカの高名な科学ライターによる複雑系科学の一般書。生物学者から物理学者まで、広範な一線の研究者への取材を著者なりの視点で手際よくまとめてある、大変すぐれた入門書。邦訳版は各章のタイトルが原著と全然違うものになっているが、訳文は読みやすい。
- ・ 松沢哲郎『チンパンジーから見た世界』東京大学出版会、1990。  
天才チンパンジー「アイ」の認知世界を調べる。動物の認知の研究は、これからのAIに欠かせないものになると思う。
- ・ 松沢哲郎『チンパンジー・マインド』岩波書店、1991。  
野生チンパンジーの観察も含め、チンパンジーの「心」を探る。
- ・ H. マトゥラーナ&F. ヴァレラ『オートポイエーシス』国文社、河本英夫訳、1991、原著1980。  
オートポイエーシス理論の原論文。超難解！
- ・ H. マトゥラーナ&F. バレーラ『知恵の樹』朝日出版社、管啓次郎訳、1987、原著1984。  
一般むけ講演を起こして編集したもの。これはわかりやすい。但し、「内容的には骨抜きで見るとべきものがない」との指摘もあり。
- ・ J. メイナード・スミス『進化とゲーム理論』産業図書、寺本英・梯正之訳、1985、原著1982。  
ゲーム理論を動物行動の進化に応用することを考えた筆者による教科書。
- ・ J. メイナード・スミス『生物学のすすめ』紀伊國屋書店、木村武二訳、1990、原著1986。  
現代生物学全般に関する、たいへん優れた入門書。
- ・ M. ミンスキー『心の社会』産業図書、安西祐一郎訳、1990、原著1985。  
人間の心は、より単純なエージェントが集まって組織された〈社会〉との主張。AIの先駆者によるこの視点が、神経生理学からの到達点と驚くほど近いと感じられる。
- ・ J. モノー『偶然と必然』みすず書房、渡辺格訳、1972、原著1971。  
分子生物学の成果から、人間の存在はまったくの偶然によるもので「意義」というようなものはない、と主張。
- ・ H. モラヴェック『脳生物たち』岩波書店、野崎昭弘訳、1991、原著1989。  
文化の遺伝子「ミーム」が、生命の遺伝子を乗っ取る、やがては人間もコンピュータの中だけで生き延びる、という未来予測。SFとして見れば面白い。
- ・ 西垣通『AI—人工知能のコンセプト』講談社現代新書、1989。

哲学やビジネスなど、従来とは異なった視点から AI を捉えなおす。

- ・西垣通『秘術としての AI 思考』筑摩書房, 1990.  
続編。一段と主張はラジカルに。機械を人間の分泌物と見る視点が心地よい。
- ・西垣通『デジタル・ナルシス』岩波書店, 1991.  
フォン・ノイマンからウィーナー、チューリングまで、情報科学の巨人の列伝。単なる伝記ではなく、彼らの哲学の特徴を鋭くえぐり出す秀作。1992年度のサントリー学芸賞受賞。
- ・西山賢一『勝つためのゲーム理論』講談社ブルーバックス, 1986.  
ゲーム理論の一般向け解説書。具体例や比喻が多く、たいへん分かりやすく書かれている。
- ・R. ペンローズ『皇帝の新しい心』みすず書房, 林一訳, 1994, 原著1989.  
現在の物理学理論では意識については解明できない、と主張する話題の書。そのためには新しい量子力学体系が必要だというのが…。
- ・\*W. パウンドストーン『ライフゲームの宇宙』日本評論社, 有澤誠訳, 1990, 原著1985.  
ライフゲームの詳細かつ広範な解説。
- ・C. ピックオーバー『カオス, コンピュータ, フラクタル』白揚社, 1993.
- ・\*I. プリゴジン & I. スタンジュール『混沌からの秩序』みすず書房, 伏見康治訳, 1987, 原著1984.  
プリゴジンの仕事の一般向けの解説書。科学哲学的な側面にも目配りが行き届いていて便利。
- ・E. レジス『アインシュタインの部屋』工作舎, 大貫昌子訳, 1990, 原著1987.  
プリンストン高等研究院に去来した人々の光と影を浮き彫りにする。フォン・ノイマンがコンピュータを製作する場面が面白い。そのほか、ゲーデル, ダイソン, ウルフラムなどが登場。ルーレットでカオスの研究をしていたノーマン・パッカードの姿も描かれている。
- ・E. レジス『不死テクノロジー』工作舎, 大貫昌子訳, 1993, 原著1991.  
人工生命はもちろん, 宇宙植民から死体蘇生, 恒星間力旅行, はては太陽を搾ってエネルギーを得るという宇宙工学まで, 何でもありの最先端技術ルポ。しかし, そのサイケな技術の向こうに, 「人間とは?」という哲学的な問いかけが浮び上がってくる。
- ・R. ラッカー『ソフトウェア』早川文庫, 黒丸尚訳, 1989, 原著1982.  
論理学者でもある著者の, ヒット SF。遺伝的アルゴリズムを使って, 人間に反抗しうるロボットが登場した世界を描く。
- ・R. ラッカー『ウェットウェア』早川文庫, 黒丸尚訳, 1989, 原著1988.  
続編。一度は人間に敗れたロボットが, 自分たちの「配偶子」を人間の女性の胎内に埋め込む!
- ・佐倉統『現代思想としての環境問題』中公新書, 1992.  
環境問題の思想の整理。人工生命に活路を見いだす。
- ・佐倉統『動きはじめた人工生命』同文書院, 1993.  
関連の既発表論文に加筆・修正してまとめたもの。人工生命の倫理や哲学についての考察が多い。

- ・\*A. サローマ『計算論とオートマトン理論』サイエンス社，野崎昭弘ほか訳，1988，原著1985。  
オートマトンに関する，非常にわかりやすい教科書。
- ・澤口俊之『知性の脳構造と進化』海鳴社，1989。  
人間の脳はなぜこんなに大きくなったのか？ 中立的に重複するコラム，能動的な選択など，独創的な内容。自我意識の問題まで考察されている。
- ・柴田崇徳・福田敏男（編）『人工生命の近未来』時事通信社，1994。  
ハードウェア人工生命（ロボット）を中心に，さまざまな分野の動向を総覧する論文集。入門からかなり専門的な論議まで，幅広く楽しめる。
- ・柴谷篤弘（編）『構造主義をめぐる生物学論争』吉岡書店，1989。  
1987年に大阪で開かれた構造主義生物学の国際シンポジウムの記録。内容は玉石混交だが，さすがにヴァレラやトムの話は面白い。
- ・柴谷篤弘・法橋登・斎藤嘉文（編）『生物学にとって構造主義とは何か』吉岡書店，1991。  
構造主義生物学をめぐる日本の研究者による大座談会。池田清彦が若手からつるし上げられている。
- ・C. ストール『カッコウはコンピュータに卵を産む』草思社，1991，原著1989。  
コンピュータ・ネットワークへの侵入者を追跡，逮捕にいたるまでのスリリングな電腦活劇。
- ・\*I. スチュアート『カオス的世界像』白揚社，1992，原著1989。  
カオスの入門書としてはもっとも優れたもののひとつ。
- ・高橋英之『コンピュータの中の人類』御茶の水書房，1990。  
この宇宙はひとつの大きなコンピュータ，というフレドキン流のモデルをぶちあげる。
- ・立川昭二『からくり』法政大学出版局，1969。  
日本の江戸時代のからくり人形をめぐる調査行と，茶運び人形の復元過程の記録読物。西洋の自動人形（オートマトン）についての考察も充実している。さらに巻末には，18世紀末出版のからくり図解である『機巧図彙（からくりずい）』の解題が付いている。
- ・立川昭二『甦るからくり』NTT出版，1994。  
上の続編。ここ25年間の著者自身の研究成果と，からくりをめぐる最近の動向について手際よくまとめている。
- ・立川昭二・高柳篤『からくり』〈新版・遊びの百科全書1〉河出文庫，1987。  
手軽に自動人形の世界に触れられる。ビジュアルも豊富で，わかりやすい。遊びの百科全書シリーズ（全5冊）は，どれも面白い。
- ・T-BRAIN CLUB/HUMAN MEDIA（編）『人工生命の美学』羊泉社，1994。  
1992年に東京国際美術館で開催された人工生命展の関連出版書。おもにアートの分野から人工生命について語った論稿が多い。
- ・津田一郎『カオスの脳観』サイエンス社，1990。

カオス理論で脳の働きを解析する試み。刺激的に読める。

- ・和田健之介『デジタル生命の進化』岩波書店，1994.

不均衡進化論など，著者らの研究を軸にコンピュータ科学と生命科学の接点を考察したハンディな小冊子。

- ・C.H. ウォディントン『エチカル・アニマル』工作舎，1980，原著1960.

有機体論，サイバネティクス，ウィトゲンシュタイン，何でもあり。知的刺激満載，興奮間違いなし。

—禁無断転載—

平成7年3月発行

発行所 財団法人 日本情報処理開発協会  
東京都港区芝公園3丁目5番8号  
機械振興会館内  
電話(03)3432-9390

06-R 007

