

脳を創る、脳を見る

脳とは複雑系そのものである。カオスから見た脳と認知脳科学から見た脳、接点はどこにあるだろうか。対話の中から新しい視点が生まれる。

合原 一幸

◎

酒井 邦嘉

非線形理論と 脳研究の相互作用

合原 僕は二一世紀は脳の世紀であるとともに、非線形科学の世紀でもあると言っているんです。二〇世紀の科学技術の根底を支えてきた線形の理論にたいして、その後半になってカオス、フラクタルなどの非線形理論が大きく進歩してきた。この非線形理論は二一世紀には産業領域にまで広く影響を及ぼすようになると思います。他方で、脳の研究が著しく進む脳の

世紀でもあると思うんですよ。

非線形理論は脳の研究にももちろん寄与しますが、逆に、脳のモデルを作りたいというモチベーションで非線形理論、複雑系の科学は進歩していけるという可能性があります。複雑系で良い仕事をしている人の多くは脳に興味があって、どうやって脳のモデルを作るかという研究自体が、見方を変えたと複雑系研究のコアになってきているという側面がある。この二つは二一世紀にかけて、非常に重要な相互作用をすると思います。

私はあえて複雑系の科学とは呼ばなくて非線形科学と呼んでいます。現在の表面的な複雑系のブームと一緒にされるのが嫌なんです。今の一部のブームの何が悪いかというと、複雑系の科学でなんでもかんでも説明できるかのように喧伝しているところなのです。そんなことはないわけで、昔のカタストロフィー理論が出て来たときとよく似ています。カタストロフィー理論というのは世の中の全ての不連続現象を説明できるといふふれこみでしたよね。なんでも説明できる理論というのは実はなんにも説明



していません。複雑系の科学もそうになって
しまう恐れがあつて、複雑系の科学が健全に伸
びていくためには地道に研究する人が増えない
といけないですね。

酒井 複雑系の科学にも限界があるということ
ですね。

合原 ええ、例えば、非線形なシステムとい
うのは解析的に解を求めることがほとんどの場合
できない。コンピュータが発達したから非線形
システムを研究できるようになったわけですけ
れども、コンピュータで非線形システムを解析
するということは、実は非線形システムの本当
の振る舞いではなくて、その影、近似を見て
るんですよ。その問題が常について回るんです
ね。カオスに関しては特にそれが深刻な問題にな
るのです。そういった非線形特有の難しさがある
ということをお忘れはいけません。

ただ、非線形科学が現在の学問分野のあらゆ
るものと関連するのは間違いない。僕は昔「カ
オス大学」を作るときだと騒いだことがありま
した(笑)。カオスは工学的な応用も可能です。
カオス工学と呼んでいるのですが、実はカオス
理論が工学の基礎理論に大きなインパクトを与
えています。例えば、予測、制御、計算、情
報理論などですね。こういったものがカオスに
よって大きく変わろうとしているんです。そう
すると、これらは産業や工学のベースとなる基
礎理論ですから、ベースが変われば応用は山ほ
ど出てくる。そういう意味では、カオス、複雑
系のような非線形科学を、工学の立場できち
んと体系づけて、既存の理論体系に対するイン
パクトを整理しておくことによって、いろい
ろな応用ができると思います。



合原 一幸

東京大学大学院 工学系研究科計数工学専攻 助教授

1954年生まれ

■著書

「カオス—まったく新しい創造の波」(講談社)

「カオスの数理と技術—カオス、そしてフラクタル、複雑系への序章」

(放送大学教育振興会)

「複雑系がひらく世界—科学、技術、社会へのインパクト」

(別冊日経サイエンス 日経サイエンス社)

■現在の研究テーマ

脳のダイナミカル数理モデルの構築に関する研究

カオスを用いた並列分散情報処理に関する研究

カオス工学の産業応用に関する研究

実際、具体的に始まっているんですね。例え
ば今まで予測できなかったことができるようにな
ってきています。電力需要予測もあります
し、また溶鉱炉は何百年も使われてきているの
ですが、いまだにモデルがない。そういったも
のをどう制御するか、どう挙動を予測するかと
いう問題に実際カオス理論が使われています。
いくつか具体的な応用例が実用段階に近づい
てきてます。

異分野の科学から 認知脳科学が生まれる

酒井 私は複雑系の科学がもたらした一つの功

績というのは、サイエンスとしての総合力だと
思うんですね。一つの学問分野だけで解こうと
するのではなく、いろいろなアイデアや手法を
持ち込んで、問題を掘り下げるといやり方
を、複雑系は非常に分かり易く提示してい
ると思います。私はこれからの脳研究は、今まで
のさまざまな脳研究の学問が統合された、新し
い学問体系を作らねばと考えています。それ
を、認知脳科学と呼んでいます。それを構成
する今までの学問分野として、物理学、人工
知能を含めた情報科学、それから生理学、神
経科学、そして心理学から哲学ももちろんそう
ですし、言語学も入る。そこで、複雑系の科
学のアプローチの豊かさは非常に参考になるわ

シリーズ対談

第1回

けです。複雑系の方法論が直接的に使えないということもありますが、それ以外にも波及効果として、サイエンスとして活性化させる鍵を複雑系が提示するとすれば、非常に面白いですね。

合原 ささまざまな分野の人を集めて大きな問題に挑戦する。脳なんか正にそうですね。そういうチームで初めてわかることが多い。

「アナログ非同期の新しい脳型コンピュータ」

合原 私自身も脳には強い関心があります。脳を知りたいというのはもちろんあるんですけども、どうしてもわれわれは工学者なので、やはり脳を創りたくなる。脳を創るという観点で脳を見た時に、その一方の対極にあるのが今のデジタルコンピュータです。その特徴は何かというと、一つはデジタル。もう一つは、同期式だということ。クロックがあつて、全てがそれに同期して動いている。ところが脳を見てみると、脳の中の活動電位というのは非同期です。しかもそこで使われるニューロンというデバイスは極めて強い非線形性を持ったアナログデバイスなんです。僕自身、今理化学研究所にいる松本元さんとイカの神経の実験を昔やって、実際の神経からカオスを観測しました。そういう非線形アナログ性と非同期性が脳の情報処理を本質的に支えていると思うのです。

脳を見ることによって、現在のデジタル同期コンピュータと相補的なアナログ非同期の新しい脳型コンピュータができるのではないかと、というのがわれわれの最大の期待です。そこを意識して、これまでのコンピュータとは違う原理

に立った脳のようなコンピュータを作りたいという立場で、脳のモデルを作っているというのがわれわれの研究なんです。

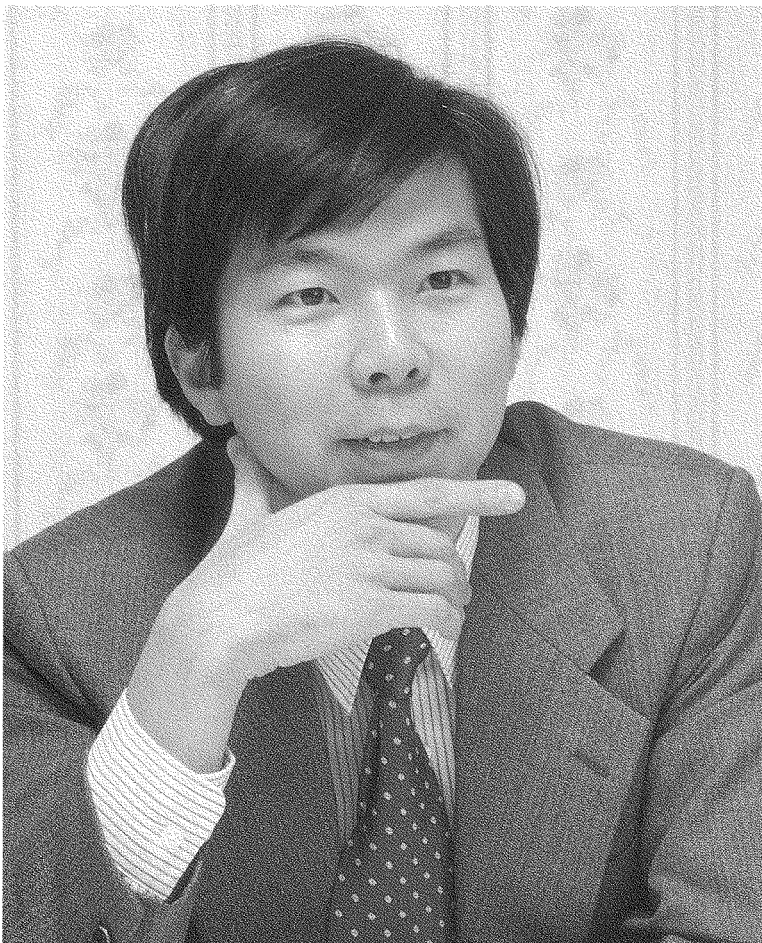
酒井 ニューロンレベルではカオスが見つかっているのですね。

合原 ええ、自分達で神経の実験をしましたから、そこには絶対の自信があります。脳は神経細胞が一四〇億個くらい集まったシステムだとすると、カオスを出し得るような素子が一四〇億集まっている複雑系であるという見方ができるわけです。そこでカオスが相互に結合しているようなネットワークの解析が重要だというのがわれわれの主張なんです。その際、酒井さんが進めてらっしゃるような脳研究の成果が大

いに参考になるわけです。

「ニューロンから脳全体へ至る道はあるか」

酒井 脳にしても心にしても、どうしたら、それを見ることができるとかというのが一番大きな問題になっています。理論的に一番、時間的・空間的分解能が高い方法というのは、一つ一つのニューロンの近くで、電極で見るといって、単一ニューロン記録という方法です。そうすると要素的なものはよくわかってきますが、全体としての振る舞いをどの程度説明できるかという問題は常に生理学者の頭に残るわけ



酒井 邦嘉

東京大学大学院 総合文化研究科助教授

1964年生まれ

■著書

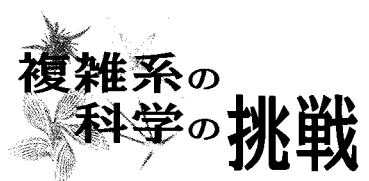
「心にいどむ認知脳科学—記憶と意識の統一論」(岩波書店)

「記憶と学習」(岩波講座『認知科学』第五巻、共著、岩波書店)

■現在の研究テーマ

機能イメージングによる言語の認知脳科学

脳における知覚・記憶・意識および言語のメカニズム



す。そこでたくさん電極を一本に挿したら何が見えるかとか、逆に電気刺激したら何が起るかとか、さまざまな手法が開発されましたが、まだまだ限界がある。それで本当に心のところまで駆け上がれるかと、今悩んでる所だと思っただけです。それでは、もっとマクロな構造を見ようということになります。これがもう一つの脳科学の流れで、これから非常に大事になってくると思いますね。

一方において心という大きな問題に駆け上がって行こうとすると、やはり人間の脳を調べたくなる。当然のことですがニューロンを調べたのは大半が動物実験ですから。頭蓋骨を開けない方法では古典的には脳波がありますが、脳の一体どこで何が起っているのかということ

はほとんどわからない。そうするとPETとかフランクショナルMRIなどの機能画像でなんとか迫れないかということ。今、分解能でいくと、空間的には大体ミリメートルくらいまで、時間的には秒くらいまでできています。それくらいの窓でもおそろくこれからいろいろ見えてくるものはたくさんあると思っただけです。それで何か心の現象のかけらになるものが見えてくれば手掛かりになるかなというのが現状ということでしょう。

合原 例えば、どういうものが見えればいいんですかね。

酒井 そうですね。期待しているものとしては、脳のどこがどういう時に活動するかというマクロなマップですね。

合原 心の座みたいなの…。

酒井 それがつと正確にわかるだろうということですね。例えば言語に関して、文字を見

て、声を聞いて、視覚や聴覚から両方入ってきたもので判断して、そして意味のある言葉を受けられるというメカニズムは、言語野だけでなく、おそらく脳のいろいろな場所がいろいろな意味に使われているはず。それぞれの場所について脳損傷の患者さんが出てくるのを待っているだけでは、多分百年、二百年経つても、偶然出てくる以外には解けないということになります。そうすると、ある言葉の中でもこうい

う側面は脳がこういうふうにくまなく、もしくは何度か繰り返すうちに脳の活動は上がるのか下がるのかという非常に基礎的な所からスタートして、脳のもつとマクロな、全体としての活動を見るということが、これからはますます大事になるということでしょうか。

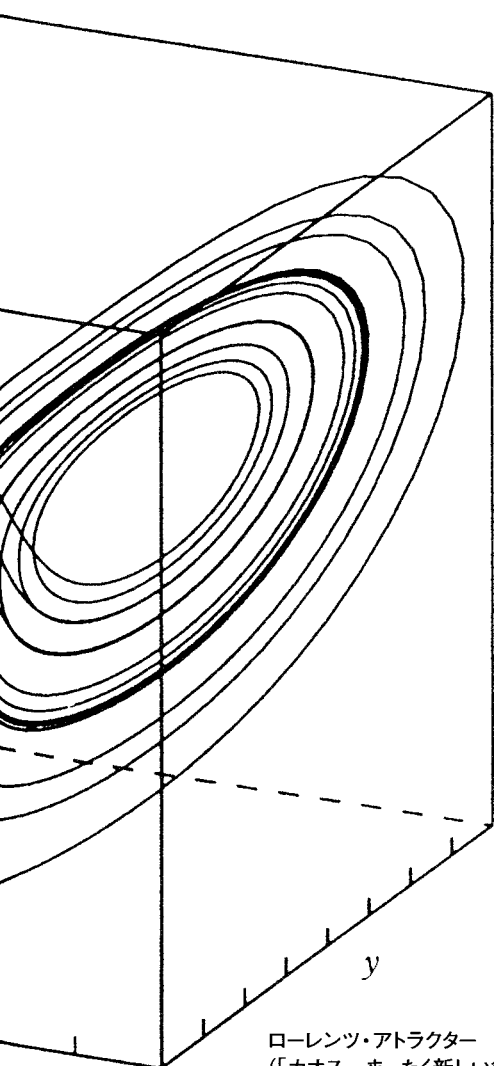
もう一つの切り口としては、複雑系という本質ですね。例えば脳の中でも大脳というのは非常に複雑に入り組んでいて細胞のパターンや種類も違う。それと比較すると小脳というのは非

常にきれいな構造をとっています。ほんとに結晶パターンのような形で、意味のある回路のように見えるんですね。

合原 設計して作ったみたいで感じですね。

酒井 そうですね。記憶にとつて非常に大事な場所である海馬というの美しい構造をとっているんですね。縦長の構造のどこを切ってもほぼ似たような断面になっている。海馬のような場所というのは、大脳皮質の豊かさとは別の意味で非常に大事な回路を作っているんですね。その関係が少しづつほぐされてくると全体が見えてくる。だから、単に大脳だけじゃなくて海馬とか視床とか、大脳基底核とか、小脳とか、それぞれがどういう相互作用をして最終的に大脳を豊かにしているのかという問題が少しづつわかりつつあるということでしょうか。そういう意味で脳はまさにシステム、複雑系そのものなんです。

合原 今の話で面白いのは、人間や高等動物

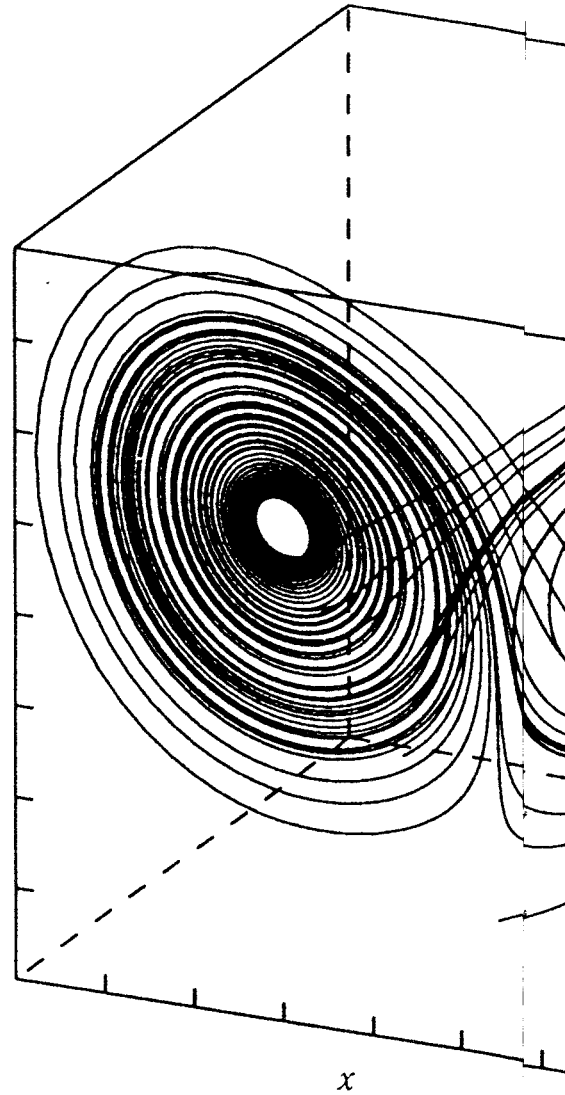


ローレンツ・アトラクター
〔カオス まったく新しい創造の波〕合原 一幸著 講談社より

は大腦が極めて複雑で、一方で小脳や海馬のような非常にきれいな構造の所もあるという、その混在ですね。

脳とは直接関係しないんですが、以前黒川紀章さんとお話した時に、面白いことをおっしゃったんですよ。街並みには分かり易い分りにくさと、分かりにくい分り易さと二種類あるんですよ。前者は何かというと、郊外に新しい街を作るとしたら碁盤の目のようにも作れるわけです。そうすると座標をふれて大変わかりやすい。でもそんな街を作ってしまうと、どこを見ても同じような風景なので、どこを歩いてもその通りの特徴が出ない。それが分かり易い分りにくさと。一方の分りにくい分り易さというのは、ヨーロッパの古い街並みのように、ごちゃごちゃになってる。ところが、そういう街は、通りごとに独自の香りのようなものがあって、一見分かりにくいけれども実は分かり易いんだと。そういう二つの側面を考えるのが都市の設計にとって非常に重要な視点を与えるというんですね。

脳というの今のお話を聞いてると、アナログーとしては非常に似ている感じがします。分かり易い分りにくさと、分かりにくい分り易さを混在させることによって高度な機能を実現しうるようになってくるのかも知れないですね。カオスや複雑系というのは、いろいろな二項対立、決定論と確率論、偶然と必然、全体と部分、そういう対立をアウフヘーベンすることによって、より高いレベルに上がるような、そういう概念になっているように思えます。だからそういう所に脳と複雑系の接点があるのかも知れないですね。



脳の中にある文法を創る

酒井 もう一つ、複雑系という意味では、私

が関心があるのは言語の問題です。われわれの言葉というのは非常に多種多様であるにもかかわらず、人間であればだれでも言葉を扱えるという点に關しては全く変わりがないわけですね。話すということ自体は、恐らく脳の中にプログラムされた言葉を操るとい能力に基づいていると思われま。それだけ人間の脳に密着した能力であるならば、そこに当然脳が持つような規則性なり、論理が出てきてもおかしくないだろうという予想ですね。

そういうことを最初に言ったのが言語学者のチョムスキーです。文法自身が最初にあつて、そこからどんな言葉ができたという発想ですね。帰納的ではなくて、演繹的な文法を作ろうという発想なんです。抽象的な、数学みた

いな文法から何語でも出てくる。そういう文法を作れば、おそらく人間の言語というものを記述するのに一番重要な手掛かりになるだろうということを考えてたんですね。

合原 それと脳の機能が対応してるんじゃないかと。

酒井 ええ。なぜそういう演繹的な普遍文法があるのか。それは脳にあるからだ、というわけですね。

合原 理論的にその問題が面白いのは、言語というのは時系列ですよ。その時系列を生成するニューラルネットワークという観点でたぶん見れると思うんです。脳みたいなダイナミカル・システムにおいて、時系列を生成するメカニズムの基本原理みたいなものが何かという問題に位置づけられると思うんです。そこが実際の脳のデータと、理論研究が繋がってくるための一つの重要な接点ですね。特に、最近の脳の理論研究で重要なのは、非線形ダイナミク

スがどういふ役割を果たしているのか、その
の解明が問題になつてゐるわけで、そういう意
味では言語というのはいまにダイナミカルだか
らこそ発生するものですから、これから脳を
研究して行く上で非常に大切なポイントにな
るんですね。

酒井 もう一つの、チョムスキーが脳科学に与
えたインパクトというのは、子供がなぜしゃべ
れるようになるかという問題です。幼児が接す
る言葉は、基本的には親のしゃべる不完全な
言葉だけです。親が子供に対して明示的
に文法を教えることは有り得ないわけです。に
もかわらず、子供が学校に上がる頃には、文
法を身に付けるのはなぜかという問題ですね。
それに対して初めてもつともらしい答えを出し
たのはチョムスキーで、元々脳にあるから、と
いう答えなんです。たとえ不完全な情報が来て
もパラメータをセットするだけで、あとは元々
あるプリンスプルを使って、最終的な言語を作
ることができるということなんです。その過程
はまさにカオスであつたり複雑系であるかも知
れないわけです。

合原 元々あるというのは説得力がある程度あ
りますが、言語の学習過程を考えると、逆に
そこで帰納してるといふ可能性もありますよ
ね。いろんなサンプルを聞きながら、帰納的な
法則を脳の中に構成する。

酒井 また、同時に脳ができていく過程ですか
ら、元々なかったものが付け加わつて、機能と
してシェイプアップされたといふ可能性もち
ろんあるわけです。ただ、おそらくかなり大き
な所としては決まつてゐるだろうといふ決定論が
あるんですね。

合原 逆に言うと、その辺のニューラルネット
の構造がもしわかれば、理論的にはかなりいろ
いろなことができると思ふんですね。そうい
う構造で可能なダイナミクスは何かという問
題です。結局文法が、システムのダイナミク
ス、もしくはアトラクターと表現していますが、
有り得る安定した振る舞いに担われていると
すれば、その構造に関する情報が得られる
と、理論モデルもいろいろ作れるかもしれな
いんですね。

酒井 そうですね。だから今私がこれからの研
究として目指しているのは、そういうモデルを
作るということ、それは一方において脳の機
能イメージングのデータも必要ですが、やはり
概念的に言語を獲得できる装置を作るとい
ふ所ですかね。

合原 理論モデルでこういうことができるん
ですよ。カオスニューラルネットというモデ
ルがあるんですが、そのニューラルネットワ
ークに、普通のニューラルネットワークの記憶のよ
うに、いろいろなスタティックなパターン、
これは文字だと思つて良いんですが、覚えさ
せませす。そうやって覚えたニューラルネット
ワークをカオス的に動かすと、覚えた文字か
ら成る時系列を出すんですよ。そうすると、
いくつかの断片的な言葉の要素を覚えると、
後はネットワークのカオス的なダイナミクス
として、一種の言語のように覚えた文字から
なる系列を生み出すのです。その時にまさに
カオスダイナミクスが言語を生み出す文法に
なる。単純なオモチャモデルなんですけれど
も、そういうアプローチが、言語の生成に関
しては使える感じはありますね。

脳を解明するトップダウンと ボトムアップの戦略

合原 お話をお伺いして、今酒井さんはトップ
ダウンで脳を研究されてらっしゃる。僕らはボ
トムアップで、下層階級の方からきて（笑）、
酒井さんは上からくる。それがどこかでぶつ
ければ、かなり全体が見えてくる可能性はあるわ
けです。

酒井 お互いにそれほどコミュニケーションが
なかつた分野ですから。お互い、何が欠けてい
て、何が必要なのかを提供しあうことがこれか
ら大事になってきますね。

合原 アプローチもかなり違うから、そういう意
味では議論して頂く楽しいと思ふんです。

酒井 合原先生のボトムアップというところから
言えば、ニューロンレベルのカオスはわかつた。次は
カオスのネットワークというところなんです。

合原 そうです。カオスのネットワーク性の問
題と非同期性の問題。その上で、例えば情報
の表現、情報処理の原理としてどういうものが
有り得るかというのが、今われわれがやってい
る研究です。

酒井 カオスのネットワークというのはどう理
解すればいいのですか。

合原 そこはまさに複雑系科学の理論的な中
核になつてゐるんです。つまり複雑系の科学に
ついてはいろいろな人がいろいろのことを言つ
ているのですが、その中で理論的にしつかりし
ている分野というのが、低次元カオスから高次
元カオスへと流れなんです。この分野では
一九七五年くらいから一次元写像や二次元写

像、三変数の微分方程式のような低い次元のカオスについてはかなり理解が進みました。ところがそういうものがネットワークを組んで、次元が上がると、その振る舞いがもの凄く複雑になるのです。複雑なんです、そこはきちんとこれまでの理論をベースにして進んでいける分野なので、複雑系の科学の中で最も理論的に地に足がついて研究されている分野です。低次元カオスから高次元カオスへとという流れで、要素のカオスがわかったときに、それを構成して高次元にした時に何が起るかという問題です。酒井 それは脳や心に置き換えるほどのレベルなんですか。

合原 われわれが一番興味を持っているのは脳の中での情報表現の問題です。脳神経科学にとっても重要な問題だと思えますが、例えばバインディング問題―結び付け問題というものがあります。これまでの脳研究の進歩で、脳は局所的に機能が分かっているということがわかってきている。色はここ、形はここ、と。ところがわれわれはあるオブジェクトを見た時に、それを一つのものとしてとらえることができます。そのカラクリが実はよく分かっておらず、大きな問題になっています。ただ、われわれの観点から言うと、その問題自体が生理学研究の歴史に基づいて人為的なものであるという気がしてきます。

生理学者のこれまでの多大な努力によって、線分の方向とか、手とか顔とかに敏感に反応する細胞が発見されてきています。ところがそういう発見のされ方故に、今度は逆にバインディングが難しくなる。しかしここで、これらは元々一つのダイナミクスの総体として応答しているも

のと仮定すると、実はバインディング問題自体が存在していないんです。局所局所断片を見ているから結び付けるのは大変なんだけれども、元々一つのダイナミカルなものだと思えば良いわけです。その辺を、本当にわれわれの考え方での良いのかということをもっと理論的にはつきりさせる必要があります。他方でそういうものは工学的には簡単に創れますから、バインディング問題を解くようなコンピュータが簡単に創れるわけです。われわれはどうしても、最後は創るということに興味がありますので、その両方ですね。バインディング問題、脳の情報表現のあり方と、その工学的な実現という…その辺りの研究をこの五年くらいでやっていきたいと思っています。

複雑系の科学の立場は 還元論を否定しない

合原 今日の意味での複雑系の問題意識で重要なのは、全体と部分の関係だと思えます。全体は部分から構成され、一方で部分は全体の影響を受けている。そういう相互のフィードバック系を扱うわけです。その時に重要なのは、フィードバック系が線形であればかなり簡単に、既にある理論で解けるわけです。ところが、脳みたいなおもしろい複雑系というのは一般に非線形で、大規模でかつ要素の数が多くて、かつ一様でない、非一様性を持っているという性質があるので、そういう全体と部分の間の循環と

いうのは非常に難しい問題となります。従来からの科学の方法論の一つである要素還元論というのは、複雑なものを要素に分けて行っ

て、要素を調べてそれを重ね合わせることによって全体を把握するものですから、重ね合わせが成立する線形理論とは非常に相性が良い。ところが多くの複雑系というものは非線形なので線形の重ね合わせが成り立たないわけです。よくある誤解なんです、複雑系というのは非線形なので要素還元論が否定されるという

ような論調がしばしばあるんですね。でもこれは違います。実は複雑系の研究においても要素還元論は未だに重要なんです。つまり要素の解明が全体の理解のための前提になるわけで、ただ今までと違う所は、線形系であれば要素還元で要素がわかれば重ね合わせとしてダイレクトに全体がわかる。ところが複雑系…より広く非線形システムは、要素はもろくろく解明するんですが、要素を解明するだけでは全体はわからない。それらが非線形に相互作用してきますから。そうすると、要素を解明した後で、非線形なシステムとしての全体を構成してみても、その振る舞いを解析するというプロセスがどうしても必要になってくるわけです。つまりそこで構成法という工学の手法が出てくるわけです。工学というのはいろいろな部品を非線形に組み合わせさせて全体を作るわけです。この工学の世界では当たり前に使ってきた方法が今の複雑系に対する一番有力なアプローチなのです。複雑系の科学の方法論を理解するのは難しいのですが、そう理解してもらえばある程度イメージがわくと思うのです。当たり前なことなのですが、複雑系の科学も従来からの学問の成果の上に立っているのです。

(あいはら かずゆき さかい くによし)

