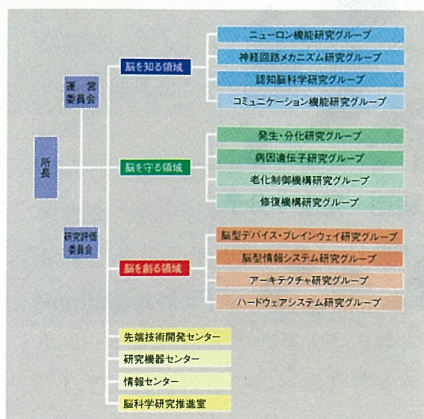


情報幾何学と神経回路網で 脳型コンピュータを創る

10月1日に「脳科学総合研究センター」が理研に開設された。このセンターは、「脳を知る」「脳を守る」「脳を創る」という三本柱からなり、日本で初めての総合的な脳研究機関として、脳研究の世界的な中核となることを目指している。

「脳を創る」という工学的な領域に属する「脳型情報システム研究」グループの甘利俊一ディレクターは、3年前に東大工学部計数工学科教授と兼務で理研の国際フロンティア研究システムのディレクターとなり、現在に至っている。「1年半前に東大を退官し、現在は理研専任ですが、実はこの研究センターにはパーマネントな研究員は一人もいないんです。ぼくはもちろん、所長の伊藤正男さんでさえ1年ごとの契約更新です。いわば日雇いですね」と笑う甘利ディレクターは、柔軟で風通しのよい組織がすっかり気に入っているようだ。

このような環境下、新しい脳型コンピュータの創成に挑戦する甘利ディレクターの野心的な試みを覗いてみよう。



脳科学総合研究センターの構成

二つの脳型コンピュータ

1945年11月、18000本の真空管を使ったデジタル計算機「ENIAC」が米国で完成した。しかし、これはプログラムを内蔵しておらず、コンピュータ第一号とはいいがたい面もある。一方、同年6月にフォン・ノイマンは、EDVACという別のコンピュータの開発企画に関するレポートに、「記憶、演算、制御、入出力の四つのユニットからなり、プログラム内蔵でかつ逐次処理を行う」というデジタル・コンピュータの基本定義を初めて著わし、今日のコンピュータの基を刻んだ。「しかしながら現在のコンピュータは、人間の脳を『情報を記号（言語）で表現し、これを論理的に処理する機械』と考えるモデルに基づいているといえるでしょう。人工知能もこの延長線にあります」と甘利ディレクターは言う。

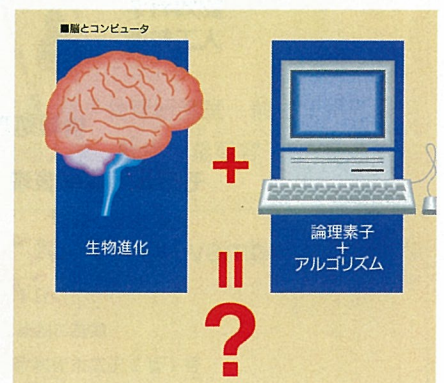
こういう記号論理的な脳モデル（思考モデル）の有効性と限界について徹底的に考えたのがイギリス人のチューリングで、1936年に発表した『計算可能性の理論』においてこれを詳しく論じている。

一方で、脳は記号処理ばかりをやっているのではない、他の方法もとっているのではないか、という考えの人たちも当初からいた。「私たちが人の顔を見て、一目で『〇〇さん』とわかるのはなぜか？ こういったパターン認識の問題から脳のモデルをつくらう、学習機能をもつニューラルネットワーク（神経回路網）のようなものを考えよう、というのはずいぶん早い時期からありました。60年代にアメリカのローゼンブラットが提唱したパーセプトロンはその一例ですね。」

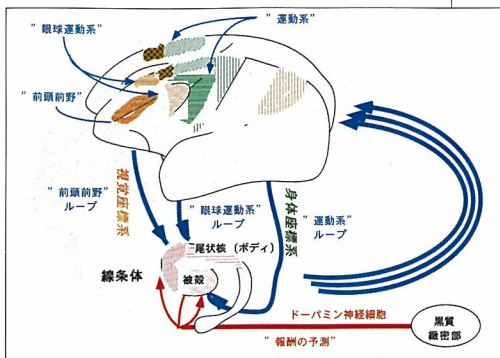
パーセプトロンは情報を処理する三つの層からなるニューラルネットワークで、学習能力のあるパターン認識機械であった。「発想はよかったです、いかんせん当時の技術では実現不可能でした。そうこうしている内に、このような脳のモデルの研究は下火になってしまいました。たしかに研究にも流行がありますね。」

70年代に入ると、記号処理型のコンピュータは飛躍的に進歩し、人工知能の研究も盛んになった。しかし70年代も後半になると「やはり記号処理だけではまずいのではないか。もっと違う原理も必要なのではないか」という考えが再び出てきた。

そして80年代になるとLSI技術も成熟し、ハード的にもかなりのことができるようになってきた。そこでニューラルネットワークのような情報処理を、もう一度きちんと研究すべきだという風潮が高まり、やがて現在に至るニューラルネットワークの一大ブームが起こったのである。「ニューラルネットワークで扱う脳の情報処理モデルでは、情報が脳全体に分散して表現されており、それらの情報同士、さらに外からの情報との相互作用によって、新しい情報がつくられま



脳とコンピュータの融合



大脳基底核のループでの、異なる表現系を用いた逐次の運動の学習・制御

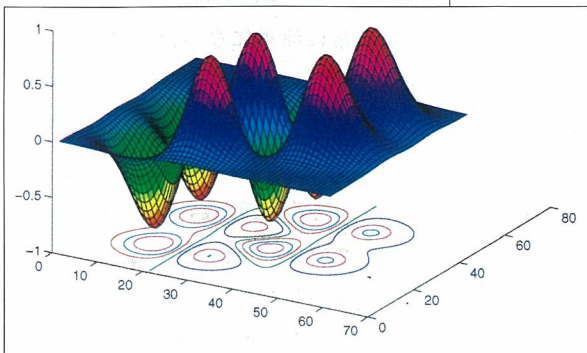
す。相互作用は並列的で、この作用から学習効果も生じるというものです。」

このようなシステムの構築こそが「脳を創る」ことになるのだろう。

新しい脳型コンピュータの基本原理は？

分散表現・並列処理・学習機能をもつ新しいコンピュータを実現するために、甘利ディレクターが目標としているのは、このようなシステムの基本原理の確立だ。「並列処理を可能にし、学習能力を支え、情報が時間とともに発展していくというダイナミクスを引き起こす原理は何か、ということですね。」

ただし、物理空間におけるニュートン力学のような、何かオールマイティな第一原理が発見できるとは、まったく考えていない。「こういう複雑なシステムでは、同等の資格をもつ原理がいろいろ存在し、問題に応じてその組合せを変えて万能性のある本格的なものになる…、私はそんなイメージをもってます。従って、原理の発見にはいろんな学問分野の



神経場における興奮の時空間パターン

方法論が必要でしょう。」

実際、情報工学はもちろん統計理論や制御理論を始め、さまざまな分野の研究者がニューラ

ルネットワークに興味をもち研究を進めている。その非線形性のダイナミクスが研究者を引きつけるチャームポイントらしい。

そんな中で甘利ディレクターの戦略は、情報幾何学の方法論を使ってニューラルネットワークを攻略するところにある。「私がニューラルネットワークの研究に一生懸命取り組んだのは1970年代の10年間で、世の流行には反していたわけです。ランダムに結合したニューロンのネットワークを考え、統計的手法を取り入れて解析したりしました。」

その他にも、学習や自己組織化などの仕組みをニューラルネットワークのモデルを作って追究したりしていた。「その成果を『神経回路網の数理』として出版した後、脳にばかりしがみついているとマンネリになってしまうのではなかろうか…。視野を広げるために、専門の数理工学の手法をもっと他のテーマに使って、新しく発展させてみようと思ったのが情報幾何学です。」

以前から情報の研究には、何か基本的な方法論が欠けているような思いを抱い

ていた甘利ディレクターは、情報要素間の関係を重視した幾何学的方法論の導入をはかることにした。「コンピュータのデジタル主義によって、情報が自然にもっている繋がりや距離、位相などが無視され、とにかく腕力で計算できればいいといった状況で



脳型情報システム研究グループの中の情報創成システム研究チームのメンバー

した。これを何とかしたいと…。」

シャノンは情報を確率分布として扱って情報理論の構築に成功しているが、甘利ディレクターは多数の確率分布からなる空間を対象とし、ある確率分布ともう一つの確率分布がどれくらい近いかなどの空間の幾何学的構造に関する理論をつくった。「わかりにくい話でしょうが、この情報幾何学を使えばニューラルネットワークの有効性を考えるときも、1個1個のニューラルネットワークの特徴を調べるだけでなく、ある構造のニューラルネットワーク全体のつくる空間の構造を考えることによって全体に大きな網をかけ、その情報処理能力がどれくらいのものかを調べていくことができます。ですから、情報幾何学を使えば、チューリングが記号処理に関して行なったような仕事をニューラルネットワークに対しても行なうことができ、ニューラルネットワークの基礎理論の一つが、この方向でできるのではないかと考えています。」

本年7月に甘利ディレクターは、米国電気電子技術者協会 (IEEE) の「エマニエル・R・ピオレ賞」を受賞しているが、これはニューラルネットワークの基礎原



研究室風景

理を数学的に解析する手法の確立が評価されてのことである。

情報幾何は統計学の基礎理論ともなり、情報理論にも制御理論にも役に立ち、世界的にも研究者の数が増えているようだ。

ニューラルネットワークと情報幾何学で、メカ聖徳太子を創出する

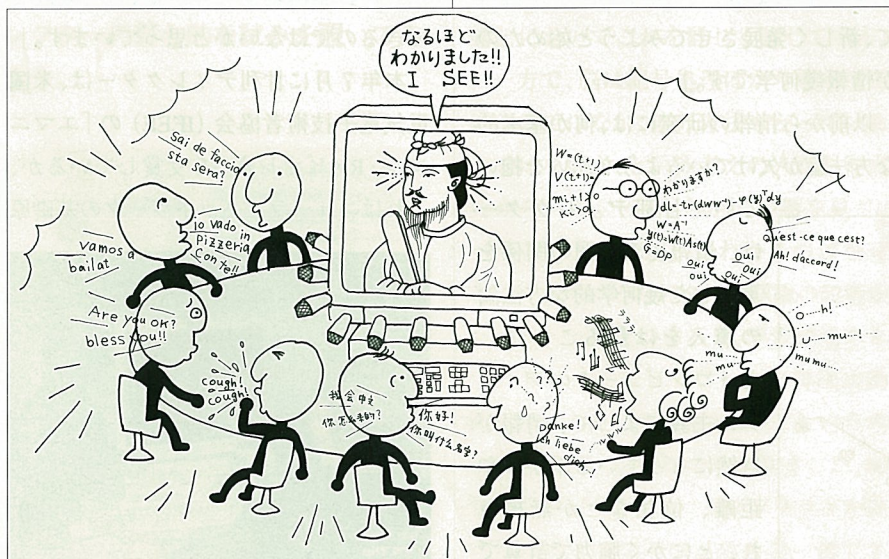
現実には情報幾何とニューラルネットワークの組合せで、聖徳太子のように複数の人が同時に訴える言葉を短時間で聞き分ける技術を甘利ディレクターたちは開発している。

カクテルパーティ効果ともよばれるもので、私たちはパーティ会場で大勢の人の話し声の中から瞬時に特定の人の話だけを聞き分けることができる。特に自分に関することなら、どんなひそひそ話も逃さない。「人間が聞き分ける場合には、話の内容、意味の理解が重要なのは明らかですが、これを機械的に行なうのは難

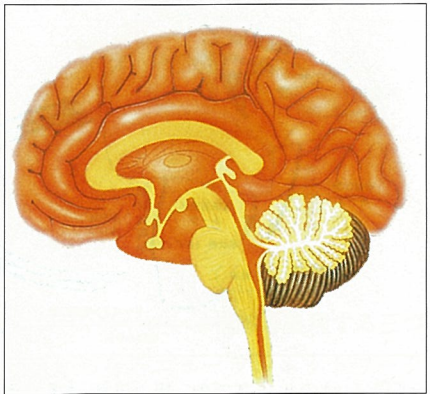
しい。そこで音声の強弱が確率的に変化する信号とみなして、その確率的な仕組みにだけ着目し、強弱変化を短時間のうちに学習して特定の声だけを抜き出すシステムをつくったのです。」

いわば10人の人が勝手に話している部屋に複数個のマイクロホンを仕掛けて録音し、10人の声の入り混じったその測定データから各々の話を再現する技術である。しかも10人は定位置にいるわけではなく、パーティ会場と同じように話をしながら少しずつ動いていく。「この問題では、各人の声つまり発生信号の確率分布もわからない。混ぜ合わさり方もわからない。また、人が移動して混ざり方が時間的に変化するので、学習の能力をシステムに持たせねばならない。わかっているのは、違う話を各人が勝手にしゃべっているので、発生信号が確率的に独立だということだけです。統計学ではセミパラメトリックな問題とよばれるもので、解法が非常に難しい。」

そもそも甘利ディレクターをカクテルパーティ効果問題に引き込んだのは、隣



脳における独立情報成分解析



脳内情報の分析と表現

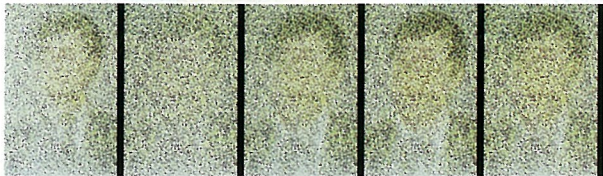
りの研究室でニューラルネットワークの応用研究を行なっているポーランド人のチホツキ博士だ。信号処理の専門家であり、ワルシャワ工科大学の教授でもある。「面白い論文があるから読んでみると、ベルとセジノスキという人の論文をわたされたのです。たまたまスキーに行く列車の中で読んだら、これが本当に面白かった。同時に、彼らのやり方では2人が3人になると分離が無理だ。しかし、私のやり方なら5人ぐらいまではうまくいくと思ったのが事始めです」「10年以上前に純粋な統計分野でのセミパラメトリック問題について、ちょっとしたアイデアを得ていたのですが、これを東大を退官した時によりやと論文にまとめたのです。これがカクテルパーティ効果問題と頭の中でスーッと結びついたわけです。」

学習の関数を情報幾何学的に捉えていくと統一的に考えることができる。また混ぜ合わせの係数自体が行列空間と結びついており、この空間を真つぐなユークリッド空間ではなく、リー群の作る曲がったリーマン空間として扱うと計算法が非常に簡単になった。この理論には、統計学、情報理論、システム理論、学習理論、リー群、微分幾何学など、以前からずっと真剣に考えたものがすべて関係してくるので、驚いたり喜んだりしたという。

さてこの甘利ディレクターの解法をニューラルネットワークでチホツキ博士がシミュレーションしたところ、音声分



5枚の未知の画像



これらを未知の混合率で混ぜ合わせたもの



混合画像から原画を復元したもの

混合画像からの独立成分の抽出

離は短時間で非常にうまくいった。

甘利ディレクターはこの解法をナチュラルグラディエントと名付けている。それは、この方法がリーマン空間の構造から自然に導かれる確立降下法だからである。そしてチホツキ博士だけでなく、「どうしてこんな簡単なことを思いつかなかったのか」と悔しがったというベル博士も今やナチュラルグラディエントの広報マンとなっているようだ。

このような複数音声の分離技術は雑音や混信の除去をはかれるので、携帯電話などの移動体通信分野でも注目を集めている。また、この分離技術は音声だけでなく画像の分離などにも使える。

甘利ディレクターたちは、これを脳磁図に応用することを計画している。脳の磁場をいろいろな部位で測定しても、それは複数ある磁場の発生源の重ね合わせとして出てくる。分離技術を用いれば、脳のどの辺にどのような強さの磁場の発生源があるかを明らかにすることができよう。この研究は東京大学や筑波にある通産省の生命工学工業技術研究所と共同で進められる予定だ。

脳科学総合研究センターの役割

脳科学総合研究センターの「脳を創る」領域は四つに分かれている。①ブレインウェイ研究、②アーキテクチャ研究、③脳型情報システム研究、④脳型ロボットシステムの4本である。

①はまさにデバイスの研究グループで学習機能をもつチップの開発などを目指す。

③のグループディレクターを務めるのが甘利博士で、脳の情報原理の解明を目指して、数理工学的な脳のモデルからもう少し脳の実体に近いモデルの研究まで行ない、ニューラルネットワークの実用化も取り扱っている。②は脳のシステム構成に学び、階層的なモジュラー構造とフィードバックループを含むアーキテクチャの上で、機能分化した超並列のコンピュータとしての脳を研究する。④は出力として運動機能を備えたロボットの開発研究である。「わたしがディレクターを務める脳型情報システム研究のグループも中はさらに三つの研究チームに分かれており、私が直接担当するチームは『情報創成システム研究』と呼ばれています。たいいてい各グループの下に3~4のチームがありますね。」

情報創成システム研究チームは現在のところ総勢14名。ドイツ人2名、インド人とフランス人とポルトガル人と韓国人が各1名、日本人7名と国際色豊か。さらに、近々サンタフェから中国人が1カ月の客員研究員としてやってくるそう



甘利グループディレクター

だ。「このセンターが脳研究の場を提供する内外に開かれた組織であることは、非常に重要です。脳の総合的な研究機関は日本では初めてですし、世界的にも決して多くはない。特に脳を創るという分野はまだ始まったばかりで、まず学問分野としての確立をはからねばならない」「そのためには人材の養成から始めなくてはならず、これも私たちの重要な仕事だと考えています。将来、ここを巣だった内外の研究者たちが世界各地で『研究者としての揺籃期を理研で過ごしたことが、今日の自分を生み出した』と思ってくれるようになればと…」「このセンターにはパーマネントなポジションはなく、若い研究者たちも何年か後には出ていかねばならない。その時にちゃんと研究を続けられる受け皿が国内にもほしいのです。」

そのためにも、日本の大学に「脳を創る」に相当する部門が設置されればと考えている。

甘利ディレクターの頭の中、本物の脳の中では、脳科学総合研究センターが国内外の脳研究の中心になり、若くて優秀な研究者たちが次々と席を替えながら軽やかにロンドを踊っていくという青写真がしっかり焼き付けられているのかもしれない。

文責：広報室

監修：脳科学総合研究センター

脳型情報システム研究グループ
グループディレクター 甘利俊一

取材・構成 由利伸子