

脳とはどのようなシステムなのか

30年前に磁性体研究から脳研究に転じた理研 脳科学総合研究センター (BSI) の松本 元・脳型デバイス・ブレインウェイ研究グループ・グループディレクター兼脳創成表現研究チーム・チームリーダーは、最初の10年をヤリイカの飼育から始めてその巨大神経細胞の分子機構の解明に費やした。次の10年は神経細胞のネットワークに焦点を当て、リアルタイムでネットワークの活動を観察できる光計測システムを開発、海馬の機能研究などを行った。そしてこの10年は脳型コンピュータ開発を目指して、「脳とはどういうものか」のモデル作りを行い、これを動物や神経細胞型素子を使った実験で確かめてきた。いったいどんなモデルが打ち出されているのだろうか？

情報の流れを作る非線形非平衡系

「私たちは、BSIの『脳を創る領域』の研究を行っているのですが、脳がいったいどういうものかを描くことができなければ、脳のモデルを作ることはできません」と松本チームリーダーは話の口火を切った。飛行機開発にたとえれば、鳥そのものを理解するというのではなく、揚力と推進力が飛行の原理であることを、まず明確に描き出すことに相当するという。つまり「脳システムとは何か」という総合的なモデル化が必要なのである。モデル化とその検証を根本手法とする物理学出身の松本チームリーダーにとっては、大変ではあるが馴染み深い仕事でもあった。

まず松本チームリーダーがモデル化の

根底においたのは非線形非平衡システムという概念だ。1970年代のはじめにI・プリゴジンとP・グランドヌルフ共著の非線形非平衡系の本を読んで衝撃を受け、「どのページに何が書いてあるかが即座に思い浮かぶくらい何度も読み返し、また原書の誤りも訂正し、他の人にも知ってもらいたいと1976年に翻訳・出版までしました」

非線形非平衡系とは生物のようなシステムで、物質を選択的に取り入れて出すという流れを作り、この流れによって空間的・時間的秩序を作り出していく（自己組織化）というものだ。プリゴジンはこの新しい概念により1977年のノーベル化学賞を受賞している。

松本チームリーダーは、「脳というシステムは情報に対してオープンな非線形非平衡システムではないか、脳は選択的に情報を取り入れ、取り出していくことで自己発展を行うシステムではないか」と考えたのだ。

「情報を選択的に取り入れ、自分なりの流れをつくるのが非線形非平衡系の要ですから、選択の基準つまり脳システムの目標とすることが何なのかを次に考える必要がありました」

ひとつは当然のことながら生存欲求の充足、つまりサバイバルに向かって物質

エネルギーの選択的な流れの充足ということだ。

もうひとつを松本チームリーダーたちは「関係欲求」と名づけている。

「トリの刷り込み現象が有名ですが、最初に遭遇した他の物との係わりが非常に大事、生存欲求と同程度あるいはそれ以上に重要だと考えられます」

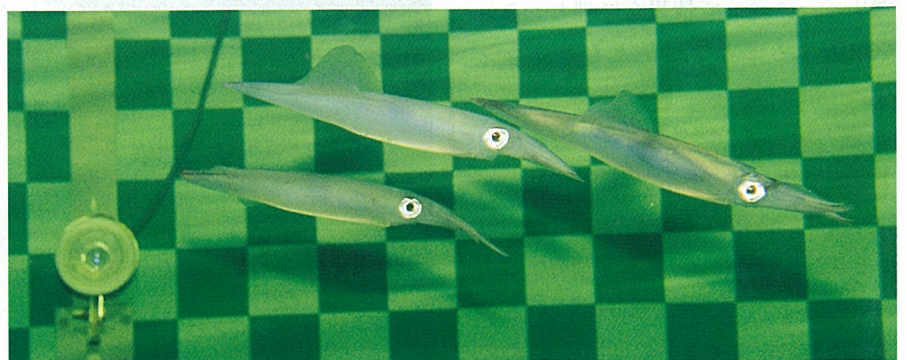
特に胎生期間の長い人間ではお腹の中で外部環境としての人間存在の刷り込みを受けていると思われる。

「人間の赤ちゃんだけはお乳を一気飲みしないで、途中で時々やめます。その時にお母さんは語りかけたり、愛撫したりします。これは母親との関係欲求の充足を図っていると考えられます」

生存欲求性や関係欲求性は遺伝子レベルでコードされており、非線形非平衡系脳システムの情報選択の基本となると松本チームリーダーたちは考えた。

「関係欲求性は人間ではいわば『愛』の問題と考えられますから、人間の脳活動の原点は愛にあるといえますね」

生存欲求性のほうは従来から生理学の分野で調べられている。そこで松本チームリーダーたちは関係欲求性が遺伝子レベルでどのようにコードされているかをトリ、ラット、イカなどを使って調べている。



大水槽内で泳ぐヤリイカ (写真提供：読売新聞社)



松本チームリーダー

「いくなれば、『愛の遺伝子探し』の旅です」

出力依存型アルゴリズム獲得マシン

非線形非平衡系で、生存欲求と関係欲求の充足を目的に情報を選択し、情報フローを作っている脳システムでは、どのような秩序が形成されているのだろうか？

「目標があらかじめセットされて、その目標を達成するための仕組みが形成されるというシステムになっています。いくなれば、目標を自ら設定し、それを達成するアルゴリズムを自律的に学習獲得していく仮説立証型のシステムだと考えています」

コンピュータは人間の用意したアルゴリズムに従って情報を処理し、これを出力することを目的としたマシンだ。

「脳の場合は、情動や行動などの出力が目的ではないのです。条件や環境が変わった時に情報処理するための仕組み、つまり新しいアルゴリズムを獲得することが目的です。ただし、出力がないと学習獲得もできませんので、出力依存型のアルゴリズム獲得マシンといえます」

アルゴリズムを獲得するという本質、「超アルゴリズム」ともいべきものは遺伝子にコードされていると考えている。「プロセッサベースではなくメモリベースであるという点も、コンピュータとは違います」

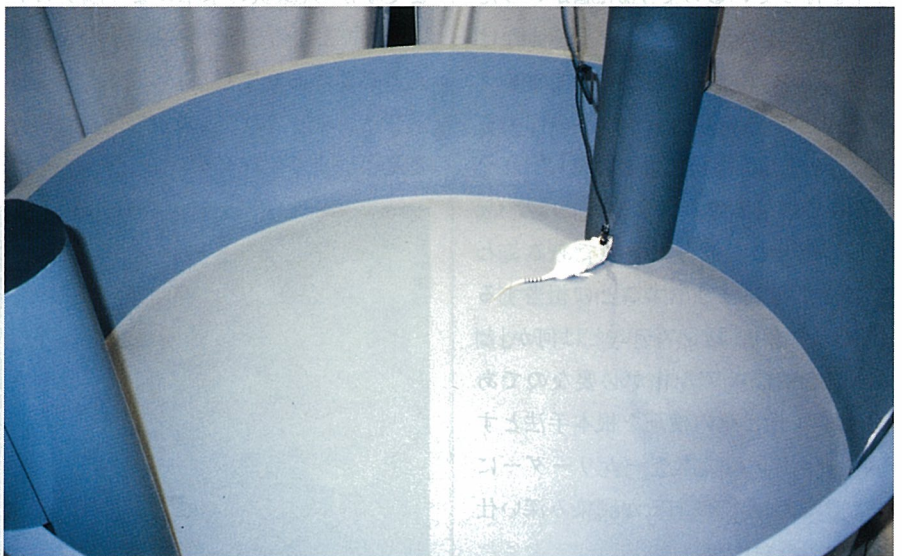
獲得したアルゴリズムは一種のルックアップテーブル(表引きテーブル)に蓄えられたメモリとして存在する。そして入力情報は検索情報となり、この表から該当するアルゴリズムを選択し、これに従って「認知する・感情表現する・行動する・言語化する」といった出力が生じる。出力されると、用いられたアルゴリズムはその時の外部条件に沿って自動的に書き換えられ、新たなアルゴリズムが獲得される。ただし一度獲得されたアルゴリズムは生涯消えることなく、新たなアルゴリズムは古いアルゴリズムをもとに追加学習的に階層構造化されて存在する。

「出力依存性については神経細胞レベルでは、もはや我々は証明したと考えています」

神経細胞でインパルスの出力が起こると、必ず出力と逆方向にもインパルスが伝播し、化学物質として残っているシナプスでの入力情報の痕跡を探り、その量によって神経細胞同士の結合の強さを変えていることが実験で明らかになっている。

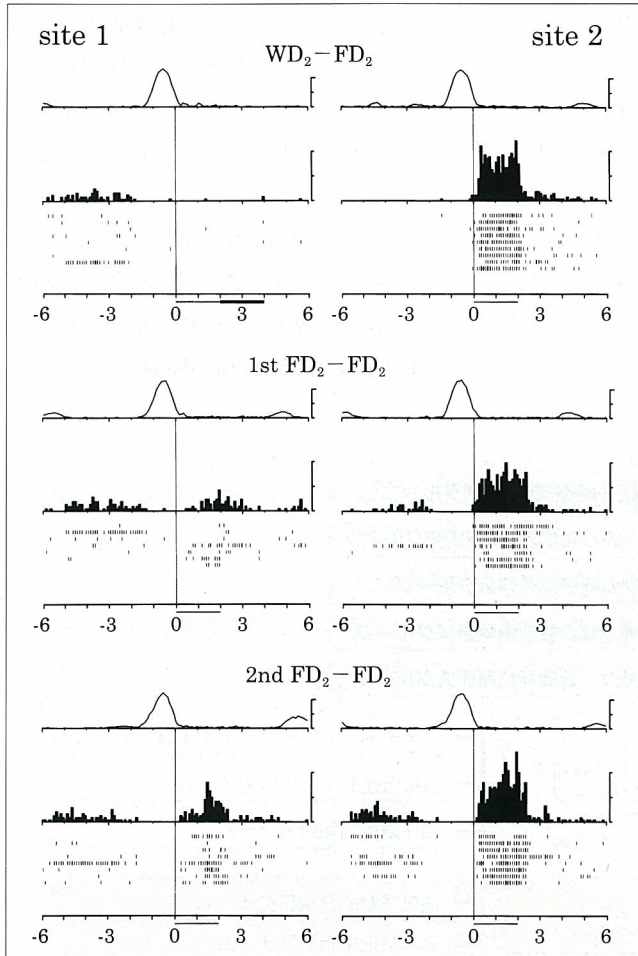
現在は光計測システムを使い、ネットワークレベルでの出力依存性を確かめているところだ。

過去の経験で得たアルゴリズムに基づき出力するというのは、あらかじめ答え(アルゴリズム)を用意しておき、これによって先読みすることと同じだ。最初にサルで予測ニューロンが見つかったが、松本チームリーダーたちはラットで見つけている。1.5メートル径のフィールドの端と端に餌のユニットと水のユニットを置き、ラットが餌と水を交互に食す場合にのみ餌がでる仕組みとマルチ電極システムを使い、餌ユニットに首を突っ込んで餌を予期している時のみ発火するニューロンのあることを見出したのだ。



報酬獲得課題遂行中のラット

餌報酬前の遅延時間に発火頻度が増大するニューロン。WD₂-FD₂はsite 1が水、site 2が餌で、両siteの報酬提示に先立って遅延時間を2秒設けたタスクを示す。図の左列には、site 1のシリンダーの窓にラットが頭部を挿入し光電管を横切った時を0secとした時の平均発火頻度ヒストグラムとラスターストグラムを示す。図の右列には、site 2のデータを示す。平均発火頻度ヒストグラムの上には、報酬獲得課題中の平均移動速度を示す。時間軸下の太線は水報酬が与えられている時間。平均移動速度と平均発火頻度ヒストグラムの検量線の全長はそれぞれ60cm/sと30spikers/sである。WD₂-FD₂の次にFD₂-FD₂を2回連続して行った。WD₂-FD₂ではsite 1の遅延期においてニューロンの発火が見られなかったが、2回のFD₂-FD₂によりsite 1の遅延期で発火するようになった。2nd FD₂-FD₂ではsite 2の遅延期で発火頻度は、site 1の遅延期で発火頻度に比べて有意に大きい。タスク間の時間間隔は3分。



決断する古皮質、調査する新皮質

たいていの入力情報に対して出力は起こらず、アルゴリズムの獲得も無い。出力があるのは、生存欲求と関係欲求に関連する入力情報に対してだが、これをどこが判断しているのだろうか。

「大脳古皮質だと考えています」と松本チームリーダー。

古皮質が感覚器を通して入ってくる入力情報の意味の粗い解釈を素早く行い、出力の価値があるかどうか判断される。例えば、長くて細いものが動いたとすれば、古皮質は「へびではないか」と判

断し、飛びのくという行動出力と、恐いなどの情動出力を生じる。古皮質で解釈された情報は次に新皮質で詳細に調べられ、「へびなのか、長いヒモが風に揺らいているのか」が確かめられる。

「古皮質の情動出力が快であれば、脳活性が上がるような物質が放出されたりします。脳の仕組み上、『好きこそもの上手なれ』というのは真なのです。押し付け教育は学習効果を下げただけです」

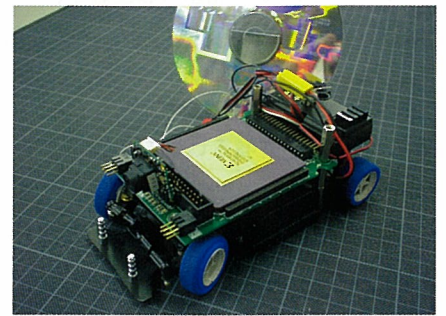
現在、古皮質での入力情報の直感的な意味解釈が、どのような回路として表現され

ているのかを調べるラットの実験が開始されたところだ。

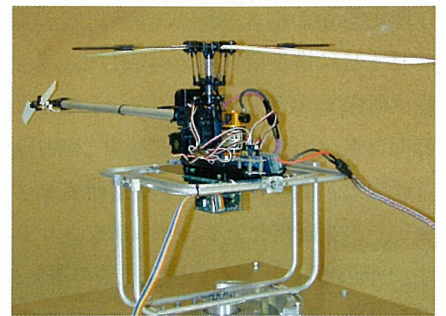
脳型コンピュータの開発へ

動物実験だけでなく、神経細胞型の素子開発も行っており、これは脳創成デバイス研究チームの市川道教チームリーダーが担当している。この素子は複数の入力を受け取り、1つだけ出力を発することのできる素子で、これを使ってメモリーベースの出力依存型アルゴリズム獲得システムを作ることが、すなわち『脳を創る』ことになる。

「10年かけて脳のモデルを作ってきた



脳型コンピュータで自動走行する自動車。



開発中の自立平行ヘリコプター。脳型コンピュータの学習機構を搭載する。

ので、次は実際にこれを実現する人工システムの開発だと思っています。『脳とは何か』というモデルを作ることは、脳研究分野においては非常に抵抗の強いことで、なかなかスムーズには認められません。ですから、とにかくこれが脳型コンピュータだと実際に作って、その機能を示すところまでもっていかないと駄目だと思っています」

脳は確かに複雑なシステムだが、その中に飛行機の揚力や推進力に相当するような原理を見出せば、工学的な実現は決して不可能ではないと松本チームリーダーは言う。分子生物学の創世期においてはボーアやシュレーディンガーなどの物理学者の存在が大きな影響を及ぼしている。脳研究においても物理学の手法は大きなインパクトをきつと与えるだろう。

文責：広報室

監修：脳科学総合研究センター

脳型デバイス・ブレインウェイ研究グループ

グループディレクター

脳創成表現研究チーム

チームリーダー 松本 元

取材・構成：由利伸子