

動的脳観

津田一郎
北海道大学大学院理学研究科数学専攻

今回この研究会の中で「力学系」の部分に割り当てられたので、その観点から特に脳の情報に関して考えてきたことを簡単に話した。

1. 動的脳観と静的脳観

静的脳観と動的脳観を生理学、認知科学からの実験データを参考にしながら概観した。

脳の静的な見方は静力学、並びに古典的システム理論から影響を受けたのであろうと思われる。オーケストラのようにそれぞれが独立した機能を持つ各パーツからなり、それらが相互作用することで全体として新しい機能が生じるとする考え方だ。バイオリンは、オーケストラの部分でなくともそれ自体で意味を持つ（機能する）。こういったシステム観はシステムはモジュールから構成されるという考えに基づいているように思われる。この考えを、脳に当てはめると次のように表わされるだろう。要するにモジュール説だ。

(1) 脳を一つのシステムとみなす（上の意味で）。このとき、システムを構成する個々の要素には一定の機能が割り当てられている。さらに、それらが統合される形でシステム全体の機能が実現される。

このようなモジュールによる機能の階層化が考えられた。実際、脳では階層的な情報処理がなされていると言われてきた。特に視覚情報処理に関してはそう言われてきた。そこでは、まず外界のパターンの最も単純な特徴（線分やエッジなど）を抽出し、それらを統合することでより複雑な特徴を抽出し、それらがまた統合されて最後にはそのパターンを認識する、とされている。それぞれの段階でそれら进行处理する神経細胞があると言われ、ある特徴に特異的に反応する細胞も多数見つかった。

(2) 脳というシステムは要素としての神経細胞あるいは細胞群が機能上階層化されたものである。学習を通して、脳内に機能モジュールが生じ、それらは階層的に構造化される。

しかし、最近、神経細胞レベルの活動が〈注意〉の在り方に依存するという実験結果が多数報告されている。感覚情報処理の過程が単純な階層処理ではない可能性が出てきたと考えてよいだろう。さらに、個々のニューロンの応答はあらかじめ定まっているわけではないという考え方を指示する実験事実も積み重なってきている。一例をあげておこう。

ラットの聴覚野と大脳基底核の同時刺激によって、聴覚野の周波数応答細胞群の短期間での大幅な組織替えが観測されている。これは、脳の再組織化、再モデル化の機構を考えるのに重要な知見を与えるだろう。関連して、神経細胞と神経細胞のつなぎめであるシナプスがレセプターレベルで変化し得るいわゆるシナプス可塑性は、幼少期の神経細胞では起こりやすいが老年期のそれでは起こらない、あるいはきわめて起こりにくいと永らく信じられてきたが、実際は老年期の神経細胞でも可塑性があるという実験結果も報告されている。上のラットの実験は予想以上に劇的な構造変化が短時間で起こることを示している。

もう一つ例をあげよう。神経幹細胞が脳室の隔壁に発見され、それらから海馬の神経細胞や嗅球の神経細胞、さらには大脳新皮質頭頂葉の神経細胞が分化することが分かってきた。これは一昔前の常識、「脳内では神経細胞は二度と再生されない」を覆すものであり、画期的な発見である。これらは、アルツハイマー病やパーキンソン病などの治療にとって本質的な知見を与えうる研究の端緒となるものである。脳は不断に大幅な構造変化を繰り返しているという想像を禁じえない。これらの発見は静的な脳観を否定するものであり、むしろ次のような動的脳観を支持するものである。

巨視的カオスの出現や、細胞のスパイクコインシデンスなどによる情報の時間コーディングによる動的な細胞集成体が構成されると、系はしばしば(1)、

(2)のような古典的システムとは異なる様相を呈する。それは次のように言い表されるだろう。

(3)脳を一つのシステムとみなす。このとき、システムの機能がうまく発現されるように個々の要素の機能が動的に決定される。脳というシステム全体の機能は(仮に学習がなくとも、外界の影響で)変化し得るので、その一時的な文脈に応じて個々の要素の機能は変化する。何が要素になるかということが、システムの機能に応じて一時的に決まっていく。

(4)要素間の関係が変化することで、仮に機能モジュールが一時的に構成されたとしても、個々のモジュールを表現する神経細胞の集成体の間の境界が変化することにより、“モジュール”間にはっきりとした階層構造は認められなくなる。

また情報論的には、従来の脳の理解は、古典的な情報理論に則った静的な観点からのものであった。それは次のようにまとめられる。

(a) 外界の環境情報の各部分が個々のニューロンの活動に写像され、それを組み合わせることで情報処理がなされる。

他方、システム概念(3),(4)と脳の動的側面を考えると、異なるレベル間の相互作用は異なる情報の統合を達成するとは限らない。このとき、脳内にカオスが発生していれば、時間空間のスケールが異なる事象間に情報が流れ、階層的秩序以外にも多様で動的な秩序が形成されるだろう。これによって、脳内には柔軟で大規模な組織変化に伴う機能変化が短時間のうちに形成されると期待される。つまり、動的脳観を次のように表現する。

(b) 脳においては情報が組み合わせによって表現されるのではなく、動的なニューロン活動（大規模な時空カオスによる）によって動的な細胞集成体が構成されることで、常に変化しつづけるようなダイナミックな様相を通じて表現される。

もしも、脳が(a)や(1),(2)の観点で記述されるなら、おそらく力学系のアトラクターという概念は、状態を表現するのに悪くない。ひとつのアトラクターで非線形系の安定な状態が定義できる。情報処理の目的がある決まった機能の実現（獲得、学習）にあるなら、それはアトラクターで表現される。複数のモジュールによる階層的な情報処理、またそれらの組み合わせによる情報処理は、アトラクター間の相互作用で現れる安定な構造で記述されるだろう。あるいは、1モジュール-1アトラクターなら、アトラクターの組み合わせで記述されるだろう。

我々は(b)と(3),(4)の観点から脳のダイナミックな側面、特に知覚・記憶に関するダイナミックなモデルを作り、脳活動を解釈してきた。

もう一つ例をあげておく。

ブローカ野は永らく書字や発話の分節にのみ関係していると考えられてきたが、内発話（声に出さないで発音する内的な発話）だけでもブローカ野は活動することが観測されている。乾敏郎は今村らの実験にもとずいて、ブローカ野の一部である45野が音声の列の予測ばかりではなく運動の系列の学習や予測までも行っているということを指摘した。乾は、ブローカ野で発見されたこれらの複合機能発現はブローカ野と近傍の領野との動的な相互作用によると考えている。

以上のように、動的脳観はより現実味のある見方になっていると思われる。

2. 動的脳観を支える力学系の諸概念

2-1. 安定性概念

構造安定性の概念では現象のモデルとしては不十分であることは古来多くの数学者の指摘がある。これらをふまえ、「記述不安定性」という概念が有効ではないかという指摘を行った。観測や記述をすることで、システムの本質的な性質がゆがめられてしまう様態を表現したいと思って考えた言葉なのだが、数学的な定式化にまではいたっていない。しかし、よく知られているように、同じ構造安定なクラスでアトラクターが（微分という意味で）似ても似つかないものがある（ディフェオの空間をディフェオで分類しても一点一点に分かれるだけだから分類として意味はない。だから、構造安定性はホメオで定義されている。その意味で、微分構造が違うものが同じクラスに入るのは仕方ないことだが、ここが気に入らない）。また、異なるクラスも数値的に見ればアトラクターとしては違っているとは思えないようなものがある（異なるパラメーターでのローレンツアトラクターを比較するとこういう感じをもつ）。もともと構造安定性は自然現象の良いモデルが持つべき性質として規定されたはずだが、そういう感じがしない。このあたりを何とかしたいという問題意識である。

2-2. アトラクター概念

低次元のアトラクターから高次元の遍歴へと解釈言語を変更すべきだという指摘を行った。ミクロな追跡性としての擬軌道追跡性の問題、マクロな追跡性としてのアトラクター全体の追跡性の問題を指摘した。Noise-induced order ではともに破れているのだが、カオスの遍歴もそうだという T. サウアーの指摘もある。ほんとうだろうか？

2-3. モジュール概念

モジュールを基盤にした階層構造ではなく、アメーバ状構造を基盤にしたヘテラルキーによる組織化の重要性を指摘した。

2-4. フィードバックとフィードフォワードの概念

構造と情報に関して対称性は必ずしも成立しないことを前提に、非対称結合の意味を考察した。斜積変換系の意味、また、フィードバックが符号である可能性に言及した。

2-5. デバイス概念

脳は解釈デバイスであり、これによる解釈過程が脳の基本機能であることを再度指摘した。