

# 脳科学のシステム論的転回

茂木健一郎

ソニーコンピュータサイエンス研究所

## 1 脳科学のシステム論的転回

脳の情報処理メカニズムを理解するためには、脳全体をシステムとして理解する必要がある。このような認識に基づいて神経科学のデータを解釈し、脳に関する理論を構築する必要性がますます強くなっている。20世紀の科学がやり残したことの一つは、細胞というシステムを人工的につくることができなかつたことである。あるシステムを理解できたということは、そのシステムを人工的に構築できるということである。私たち人間の心を生み出す脳は、千億のニューロンとその十倍のグリア細胞が集まった巨大で複雑なシステムである。脳というシステムを理解したと言えるためには、人工的な方法で脳と等価なものをつくり出すことができなければならない。急速に蓄積されつつある脳科学のデータを、システム論的な視点から整理し、一つのモデルへと融合していく必要性は、ますます強まりつつある。いわば、脳科学は、「システム論的展回 (systematic turn)」の時代を迎えている。

## 2 ミラーニューロン

近年の脳科学におけるシステム論的転回の必要性を象徴するのが、1991年にイタリアのグループによって発見された「ミラーニューロン」である。ミラーニューロンは、自分がある行為をしても、他者が同じ行為をするのを見ても、同じように活動するニューロンである。ちょうど鏡に映したように、自分と他人の行為に伴って活動するので、「ミラーニューロン」と呼ばれる。研究者が休憩時間にジェラートを食べていて、ジェラートを口に運ぶ度に猿の脳に刺した電極がニューロンの活発な活動を記録するのに気が付いたのが、ミラーニューロン発見のきっかけであったという。ミラーニューロンが発見された猿の運動前野の近辺では、視覚で捉えられた物体に対して、どのようなアクションが起こせるか、言わば「運動のレパトリー」を表すと考えられるニューロンも見つかっている。例えば、コップを見た時に、そのコップをどのような手の形で掴むことができるか、そのような行為の可能性を表現していると思われるニューロンが見い出されている。ミラーニューロンや、運動のレパトリーを表すニューロンが成立するためには、目を通して入ってくる感覚情報と、運動のプログラミングを司る情報が、融合して処理されなければならない。このような融合処理が可能になるためには、本来性質が異なる感覚情報と運動情報の様々な要素が、共通の情報フォーマットで表現されなければならない。ミラー

ニューロンや、運動のレパートリーを表すニューロンは、視覚、聴覚、触覚などという感覚のモダリティや、感覚と運動の区別を超えて、脳全体のシステム論的な文脈の中に位置付けて始めてその意義が明らかになる。

### 3 システムの構築原理としての「使い回し」

脳に対する淘汰圧の一つは、頭蓋骨の中の限られたスペースの中で数多くの情報処理機能を実現するということである。自然が、このような淘汰圧の下で、脳というシステムを構築する上で生み出した工夫の一つが、例えば、単一の脳の領野を、様々な目的のために「使い回し」ということである。後頭部にある第一次視覚野は、網膜から入力した視覚情報が視床のLGNを通して初めて大脳皮質に投射するエリアであり、典型的な視覚野であると考えられて来た。しかし、TMS（コイルで脳に局所的に磁場をかけ、ニューロンの機能を阻害する）の方法を用いて、第一次視覚野の機能を阻害したところ、触覚を用いて格子の方向を判別するタスクができなくなったことが報告されている。同じ触覚でも、指に加えた電気刺激を検知することや、テクスチャを判別することは、影響を受けなかった。一方、触覚にかかわる体性感覚野のニューロンの活動をTMSによって阻害したところ、格子の方向の判別だけでなく、テクスチャの判別も阻害された。この実験から示唆されることは、第一次視覚野は、方向や距離、角度など、空間の中の正確な幾何学的情報を処理する際に、感覚のモダリティに関係なく使われているのではないかということである。このような、各領野のモダリティを超えた機能分担の見直しを進めることが、脳全体のシステム論的な構築原理を明らかにする上で是非とも必要であると考えられる。

### 4 感覚的クオリア、志向的クオリアを通した脳のシステム論的な理解

脳は、言う迄もなく、私たちの心を生み出している臓器である。私たちの心は、トマトの赤い色、水の冷たさ、フルーツの音色などの様々な感覚的クオリア、言葉の意味や、注意などの「志向的クオリア」（何かに向かっている心の状態）といった要素からなる様々な表象に満ちている。ニューロンの活動は、膜電位や、発火頻度など、数量化できる性質として捉えられる。このように数量化できる性質として捉えられるニューロンの活動と、数量化できない感覚的クオリアや志向的クオリアからなる私たちの心の中の表象をどのように結び付けるかという問いが、いわゆる心脳問題である。心脳問題を考える際には、心を物質と対立させるデカルト流のやり方をとらず、むしろ、我々の心も、数量的な法則で記述されるニューロンの活動と一連なりの「自然現象」なのだという見方が必要である。従来の自然科学が扱ってきたのが、数量化できる自然の性質の時間的変化を拘束する因果的必然性の表現だとすれば、そのような「第一性質」に伴って、必然的に生じてしまう私たちの心という「第二性質」の背後にある因果的必然性を記述する法則を見出すことが本質的課題なのである。感覚的クオリアや志向的クオリアといった表象の要素に対応する神経活動を明らかにすることは、脳の情報処理機構をシステム論的に明らかにしようとする際、重要なデータを提供すると考えられる。そのことは、いわゆる「結び付け

問題」(binding problem)の考察を通して明らかになる。視覚情報処理においては、色、形、動きなどの視覚特徴は、それぞれV4、IT、MTという脳の中で空間的に離れた場所で明示的に表現されていることが判っている。ところが、私たちが外界を見る時には、「赤い」(色)「花が」(形)「右に動いている」(動き)というように、一つに統合された視覚イメージが認識される。いかにして、脳の中の空間的に離れた領野で明示的な表現が得られている視覚特徴が「結び付けられて」単一の視覚イメージとして知覚されるのかという問題が、「結び付け問題」である。「結び付け問題」は、純粹に機能主義的な視点から議論されることがしばしばあるが、問題の定式化のされ方からも判るように、本質的に問われているのは、実は、感覚的クオリアや志向的クオリアといった私たち人間の表象を構成する要素が、いかに、脳の中の空間的にも時間的にも広がりを持ったニューロンの活動から生み出されてくるのかということである。脳は、空間的、時間的に分散したニューロンの活動が、コンパクトにまとめられた一つの情報処理の単位として扱えるように構築されたシステムであり、そのような情報のコーディングと操作の形式が、私たちの心の中の感覚的クオリアや志向的クオリアといった表象の要素が、物理的な時空の中で広がりを持ったニューロンの活動から生み出されるという事実によって示されている。このような視点からは、我々の心の中の表象の要素が、脳の中のニューロンの活動といかに対応して生まれてくるかを追究することが、脳というシステムの中で情報がいかにコードされているかという問題を明らかにする上で有力なアプローチであると考えられる。

## 5 発達過程を視野に入れたシステム論の必要性

人間の遺伝子は、数万程度と言われている。人間の脳を含む身体は、遺伝子という数万程度のコントロールパラメータによって設計され、その後は、発生、発達、学習といった過程を通して、成人の脳を含む身体が出来上がって来るということになる。言語を流暢に扱うことのできる成人の脳の中のシナプス結合を直接操作しようとするれば、千億個のニューロン x 数千個のシナプス = 数十兆のパラメータを制御しなければならない。このようなことは事実上不可能である。自然は、遺伝子だけを指定し、後は発生における形態形成や、発達における環境との相互作用といったプロセスにゆだねることにより、この「パラメータの爆発」の問題をクリアしている。私たちが、「システムとしての脳を理解するためには、脳そっくりの人工物をつくってみる必要がある」というスローガンをもし真摯に考えるならば、自然が採用しているような、比較的少数のコントロールパラメータと「自由放任」のプロセスの組み合わせで複雑なシステムをつくるという方針をとらざるを得ないだろう。脳という情報処理システムの複雑な挙動から、いかにして我々の心が生まれるか？そして、脳という複雑なシステムが、せいぜい数万程度の遺伝子から、いかに構成されるか？この二つの問いは密接に結びついており、脳を、システム論的な視点からとらえていくことを、強く促す。