

第 1 章

序 論

1.1 はじめに

「21世紀は脳科学の世紀」と言われるように、最近、脳についての人々の関心は高まっており、あらゆる面で脳の話題を耳にすることが多くなって来ている。人間の脳は非常に優れており、コンピュータでは実現困難な高度かつ柔軟な情報処理能力を有している。

この脳が持つ優れた能力がどのような仕組みで行われているのかという疑問は科学的な興味を非常に惹かれるものである。脳のメカニズムを理解することができれば、当然、医学や薬学に対して大きな貢献が期待できるし、工学的にも、脳型コンピュータの構成など、非常に多くの応用が期待できる。

このように、脳のメカニズムを解明することは、科学的にも、医学的にも、工学的にも非常に大きな意義があると言える。

従来、脳研究は、生理学や心理学的なアプローチが中心となって進められ、数多くの重要な知見が得られてきた。しかしながら、これらの解析的手法だけで脳機能メカニズムを解明することには限界があることも次第に見えてきた。

なぜならば、心理学的アプローチでは、ある事象に関連した脳機能を推測することはできても、その内部メカニズムまでは見えてこないからであり、生理学のアプローチによって、脳の構造を調べたり、脳の神経細胞であるニューロンの活動を一つ一つ追いかけても、相互に結合したニューロン集団の複雑な動作を理解することは困難だからである。

これに対して、人工的な神経回路網を用いた構成的手法による理論的研究が、このような問題を解決するためには重要になってくる。

しかし、神経回路モデルを用いた研究と言っても、その目的やモデル構築の方法はさまざまである。従来の研究の多くは、生物学的な妥当性に欠け、脳とはほとんど無関係であり、脳機能の解明を目的としていても、現実の脳の神経回路構造をただ忠実にモデル化するか、数学的解析のために極端に理想化したモデルを用いているため、必然性や具体性に欠けているものがほとんどであった。

ここで、著者らが重要であると主張する構成的手法は、上記のような手法ではなく、計算論的なアプローチのことである。

これは、脳が持つ制約条件の中で目的の機能を実現するためにはどのような原理が必要かを検討する方法である。その上で、そのような原理に基づいた最も簡明な神経回路モデルを構成し、生理学的知見と比較検討する。このように構成したモデルは、必ずしも現実の脳の神経回路と同じではないが、脳の本質的な動作原理をとらえ、システム的な理解を深めることを可能にすると考えられる。

ただし、当然のことながら、心理学的・生理学的研究が必要でないと言っているのではない。理論的な研究成果が実証されるのは、実験的研究による知見があつてこそであり、生体を扱う研究である以上、今後も実験的研究、特に生理学が脳研究の中心であることは間違いない。脳研究をより進展させるためには、理論的研究と実験的研究が相互に理解し合い、協調することが最も大切なのであり、それを実現するためにも、計算論的アプローチのような手法が不可欠になってくるのである。

1.2 研究の背景

さて、前述したように脳の情報処理機構の解明がもたらす意義は大きいものの、脳の高次機能に関する理解はあまり進んでいない。その大きな理由の一つは、多くの高次機能の基礎となる記憶機能のメカニズムが良くわかっていないことにある。記憶は、脳の多くの情報処理の中心となる機能であり [1]、そのメカニズムは脳研究の最大の謎とも言われる [2]。

そもそも、記憶とはどこに存在するのか、と古くギリシャ時代に問われてから、現

在に至るまで、数多くの分野において多くの研究者が記憶という大きなテーマに取り組んできた。

ひと昔前までの記憶研究は、主に臨床神経心理学が中心となっていて行われていた。これは、脳損傷によって記憶障害を起こした患者から得られた知見を主な情報源として、その機能を探ろうとするものである。これによって、記憶は側頭連合野やその内側部に位置する海馬が関係しているだろうと推測されたが、そのメカニズムの理解にまでは繋がらなかった。

その後、微小電極やオシロスコープの発明もあり、脳の働きをニューロンの電気活動によって調べる神経生理学が発展したことによって、記憶研究は大幅に進展した。更に、サルが実験動物として広く使われるようになり、サルの脳に直接電極を刺し、いろいろな課題を行わせている際のニューロンの活動を一つ一つ計測することによって、記憶機能に関する重要な事実が一層明らかになってきた。

例えば、短期記憶はニューロンが持続的に興奮することで保たれていること、長期記憶はニューロン間のシナプス結合が変化することで蓄えられていること、また、視覚に関する記憶は側頭連合野に蓄えられることなどがわかっている。

しかしながら、まだ不明なことも多い。記憶内容がどのような形で表現されているのかという情報表現の問題、そして、その情報がどのように構造化され、長期記憶としてどのように蓄えられるのかという形成過程の問題、更に、蓄えられた記憶がどのようにして読み出されるかという想起過程の問題等が挙げられる。

最近、これらの問題を解く糸口ともなりうる興味深い知見が、宮下らが行ったサルを用いた一連の生理実験によって得られている。なかでも、遅延対連合課題を遂行中のサルの下側頭葉で観察された特徴的なニューロン活動は、記憶の形成と想起のメカニズムに対して重要な示唆を与えるものである [3]。しかしながら、得られたニューロン活動は従来の神経回路モデルでは説明がつかず、脳内でどのようにして実現されているかはほとんどわかっていない。

本研究の目的は、以上のような背景のもと、計算論的なアプローチによって、これらの実験データを説明する神経回路モデルを構成すること、また、それによって実験的に検証可能な予測を導きだし、実験的研究に対して多くの有益な示唆を与えることである。

当然のことながら、本研究によって記憶に関する謎が完全に解明できるわけではない。本研究が脳の記憶メカニズムの解明への基礎となり、更に、有効な形で理論と実験を結び、相互の発展に貢献することも目的の一つである。

1.3 本論文の構成

本論文の第2章以下の構成は、次の通りである。

第2章「対連合記憶の神経回路モデル」では、SakaiとMiyashita [3]の生理学的知見を基に、計算論的な観点から対連合記憶のモデルを構成する。ここで構築したモデルについて本研究全体で議論を行う。

この章では、まず遅延対連合課題を実行している際にサルの下側頭葉で観察された特徴的なニューロンの神経活動について説明し、計算論的な観点から検討を加える。次いで、その検討を基に遅延対連合課題を遂行する神経回路モデルを構成し、このモデルによって下側頭葉のニューロン活動がうまく説明できることを示す。そして、このモデルに基づいて側頭葉の構造と機能について考察すると共に、モデルから予測される現象を導出する。

第3章「対連合記憶モデルの検証」では、別の生理学的知見を基に、第2章で構成した対連合記憶モデルの妥当性を論じる。

この章では、モデルの提案とほぼ同時期にNayaら [4]によって報告された生理データに対する解析をモデルに対して適用する。これによって、第2章で提案した仮説や導出された予測を検証し、モデルの妥当性を示す。

第4章「文脈依存的記憶課題への応用」では、同じく構成した対連合記憶モデルを用いて、対連合課題より複雑な、文脈に依存して選択すべき対象が変化する記憶課題 [5]への応用を試みる。

この章では、まず取り上げた文脈依存的記憶課題において観察された側頭葉TE野の特徴的なニューロン活動を説明し、この課題を神経回路モデルで実行するために解決すべき計算論的問題について考える。そして、この解決手法として用いた選択不感化原理を概説し、それが脳で用いられていると考える根拠を論じる。次いで、対連合記憶モデルに選択的不感化原理を適用し、計算機シミュレーションを通じて、モデル

の妥当性をより検証するとともに、脳の文脈依存的連想のメカニズムについて考察を行う。

第5章では、本研究の結果をまとめるとともに、今後の課題と展望について述べる。