

認知的機能の神経回路メカニズム

深井 朋樹

理化学研究所 脳科学総合研究センター 脳回路機能理論研究チーム

脳の情報処理の基盤は神経回路であるから、脳の情報処理原理を理解するためには、神経回路で行われている計算とそのメカニズムを明らかにしなければならない。私自身の脳研究における中心的興味も、認知的機能を生み出す神経回路メカニズムの解明にある。この10年間で、脳の情報処理の研究において多くの発展があった。大脳皮質などの神経回路の研究でも、現実的なモデルの構築に必要な実験的知見もある程度そろい、今後、大規模シミュレーションなどによる研究も盛んになることが予想される。そこで講義では、神経細胞やシナプスの数学的モデルや、神経回路のダイナミクスや情報処理に関する基礎的事項を解説するとともに、最新の話題なども含めながら、脳研究の現状と未来の課題についても議論したい。以下が予定している講義の概要である。

1. 基礎知識の導入
2. ニューロンとシナプスのモデル
3. シナプス可塑性と神経回路モデル
4. ワーキングメモリと時間積分の神経回路
5. バランスしたシナプス入力による情報処理
6. まとめ

前半では後半のトピックスを理解するために最低限必要な、脳に関する基礎知識を解説する。ごく簡単に脳とその神経回路、とくに大脳皮質の神経回路について概説し、脳の構造と機能について大雑把なイメージを伝えたい。つぎに神経回路の基本的構成要素であるニューロンとシナプスについて、生物学的にもある程度もっともらしいモデルを解説する。数学的に抽象化されたモデルから、電氣的応答だけでなく形態まで正確に模したモデルまで、さまざまなタイプのニューロン・モデルが存在する。脳の本質をとらえるために、どのくらい複雑なニューロンモデルが必要とされるかは自明ではないが、ここでは integrate-and-fire neuron や Hodgkin-Huxley type neuron、また最近提案された Izhikevich ニューロンなど、代表的なモデルを紹介する。また力学系の分岐理論の立場からのニューロンの分類であるタイプIおよびタイプIIのニューロンについても簡単に説明する。またシナプスについても、短期減衰や短期増強といった信号伝達の性質が、詳しく調べられている。そこでこのようなシナプスの数学的モデルにも言及する。

脳の情報処理の際立った特徴として、経験から学習する能力があげられる。学習の生物学的基盤は、シナプスがニューロンの活動度に依存して伝達効率を変化させる、シナプス可塑性という性質にあると考えられている。最近は興奮性ニューロンだけでなく抑制性ニューロンの可塑性についても実験的に調べられており、スパイク時間依存のシナプス可塑性 (STDP) として、神経活動依存的にシナプス・コンダクタンスが変化する際の規則が明らかになってきた。そこで大脳皮質に見られる多様な STDP の性質と、その神経回路における計算論的機能について、いくつかの例をとって解説する。

後半の講義では脳の神経回路が行っている情報処理や計算の仕組みを、ワーキングメモリや時間積分の神経回路を例にとって議論したい。ワーキングメモリとは、脳が行動を生成するために必要な情報を、一時的に（例えば数秒間）保持しておく機能を指し、ニューロンの持続的発火によって担われると考えられている。またヒトや動物が、識別が困難な刺激を識別して行動選択を行うような場合、あいまいな入力情報を時間積分して意思決定のための証拠集めをする必要がある。このような機能が回路のメカニズムによるのか、単一の神経細胞の性質によるのかはまだ明らかではないが、一般には前者の可能性が有力視されている。その考えに立つと、ワーキングメモリはニューロンが相互に結合した、リカレント・ネットワークによって生成される持続発火活動として説明される。またシナプスやニューロンの性質などを工夫することにより、リカレント・ネットワークに時間積分を行わせることもできる。さまざまなモデルが提案されているが、ここでは我々が提案した回路モデルも含め、いくつかの代表例を紹介する。

行動しているサルやラットの大脳皮質ニューロンは、ほとんどポアソン過程に近いような、きわめて不規則なスパイク時系列を生成することが知られている。また行動課題が同一であっても、同一ニューロンが試行毎に全く異なるスパイク時系列を生成することも知られている。ところが、大脳皮質ニューロンに同一の刺激入力を繰り返し与える場合、ステップ電流のような一定入力ではなく、ノイズ様の不規則に変化する入力電流を加える場合のほうが、スパイク応答が高い再現性を示すことが知られている。このようにスパイク発火の不規則性や変動性は、脳の情報処理において何らかの本質的役割を果たしている可能性がある。そのような可能性を示唆する実験的事実の中でも、大脳皮質ニューロンは常に興奮と抑制がバランスしたシナプス入力を受けているという最近の結果は、脳の情報処理原理を解明する上で大きな意味を持つ。そこで、バランスしたシナプス入力がニューロンの情報表現において果たす役割や、そのような入力が時間積分の神経メカニズムに与える恩恵について議論する。