

## 脳・神経系のファームウェアをひも解く2つのアプローチ

白井 支朗

豊橋技術科学大学 情報工学系

〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1

### 1. はじめに

脳科学・マルチメディアの時代を迎え、視覚系が行っている情報処理の仕組みに多くの注目が注がれている。数理モデルを通して脳・神経系を理解していく方法論には、大きく2つの流れがある。一つは、神経細胞のイオンチャンネルや細胞内機構、神経伝達・回路構造などに関する生理学的知見をボトムアップ的に統合・組み上げ、実体に即した神経回路モデルとして数理記述し、機能を理解して実験・構成的アプローチである。もう一つは、脳が解いている課題をトップダウン的に捉え直し、その計算課題を実現する数理モデルとして理解しようとする計算論的アプローチである。ここでは、こうした2つアプローチによる数理モデルの捉え方について、視覚系における情報表現を例に紹介するとともに、その背景や意義について述べる。

### 2. 脳・神経系のファームウェアをひも解く2つのアプローチ

脳・神経系は、初めから与えられた構造の下で出来上がっているものではなく、神経細胞など細胞生理の基本的素材と何らかの制約条件の下で機能を実現すべく、環境との相互作用を通してその構造を進化させ創り上げられてきたシステムと考えられる。つまり、機能を実現する戦略が、その構造の中に、ユニークな形で特化し埋め込まれファームウェアであると捉える事ができる。従って、機能というトップダウン的視点から得られる情報

表現は、もちろん、ボトムアップ的に導かれる構造表現の下で実現されており、数理モデルによって両者をつなぐファームウェアとしての情報表現を獲得、解析することが、脳神経系を理解するカギとなる。

#### 2.1 ボトムアップ的アプローチ

緻密な分析的手法を用いた脳・神経系の構造とその機能に関する研究は、神経生理学を中心に営々と積み上げられてきた。そして、分子レベルから高次中枢に至る詳細な構造と機能が次第に明らかにされ、そこで実現されている基本戦略が多少ながらも垣間見えるようになってきた。とくに近年、従来の電気生理学や解剖・形態学的な手法に加え、神経細胞の単離・培養技術、分子生物学的手法、光学的イメージング技術等が導入され、分子・細胞レベルから機能レベルに至る詳細な構造と機能が明らかにされつつある。その結果、遺伝情報、イオンチャンネル動態、セカンドメッセンジャーなど、神経系における刺激の受容、変換、伝達にかかわる分子機構に関する知見が蓄積され、神経系における情報伝達・処理の基本をマルチレベルで理解し得るようになってきた。その結果、1個の神経細胞ですら驚くほど複雑な分子機械であり、マイクロプロセッサをもはるかに越える優れた機能を備えた素子であることも分かってきた。

こうしたシステムを要素レベルからボトムアップ的に詳細に解析していくことは、後に述べる計算論的アプローチにおけるハードウェアの実体としても重要な課題である。しか

し、実験により得られた断片的な知見が、ファームウェア化されたシステムの中でどんな機能を果たしているかを理解することは極めて困難である。現時点で考えられる一つのアプローチは、工学の諸理論・手法を用いて実験データを多角・定量的に分析するとともに、得られた知見を数理モデルとして記述・統合し、シミュレーションを通して生理学的知見の確認・検証を進め、ファームウェアとしての機能的意義、本質的メカニズムを理解していくことである。こうした過程を通して、素子とシステムを結びつける原理やその適用限界も次第に明らかにされていくものと考えられる。

こうした観点から脳・神経系を理解していく上で、神経細胞における情報の受容、処理、伝達の基本であるイオンチャネル機構をベースにしたイオン電流モデル (ionic current model) が最も基本的な細胞モデルであると考えられる。例えば、網膜の視細胞やその直下に位置する外網状層のような末梢神経系では、神経スパイクでなくアナログ的緩電位 (graded potential) によって局所的に微妙な情報処理がなされており、その実体に即した機能の詳細を解析するにはイオン電流モデルが重要になる。こうした研究として、筆者等はこれまで網膜外網状層の数理モデルについて、その情報表現と変換様式を中心に研究を進めてきた<sup>2,4)</sup>。

## 2.2 トップダウン的アプローチ

トップダウン的捉え方は、脳・神経系を外部機能からマクロ的に捉え、脳がどんな戦略で問題を解いているかといった枠組みを数学的に明らかにし、その機能表現を数理モデルとして記述しようとするものである。こうした概念として、Marr<sup>5)</sup> の計算論的アプローチが重要である。彼はその著書「Vision」の中で、脳を理解するためには、1) 課題に対する計算理論、2) そのための表現とアルゴリズム、3) それを実現するハードウェア、という3つの異なる研究のレベルとその有機的

な視点・捉え方が重要であることを説いた。こうした、「脳を理解する理学」としての研究の枠組みは、その後、計算論的神経科学 (computational neuroscience) として発展し、従来の手法では不可能と思われる、多くの新しい理解やモデルの研究が、視覚系や運動制御系を中心になされている。第2のレベルである表現とアルゴリズムに対するアプローチとしては、ニューラルネットワークが学習や自己組織的に獲得した内部情報表現を手掛かりに、脳機能の情報处理的側面を探る研究がある。すなわち、ニューラルネットワークの学習や自己組織機能が、ある目的関数の最適化過程として記述できること、また、ニューラルネットワークの素子特性や構造が、情報の表現自由度の制約となることに着目しており、実験的に観察された脳・神経系における情報表現を、ある最適原理に基づいて統一的に理解する枠組みを与えるものである。

たとえば、ニューラルネットワークの学習則は、ある目的関数の最小化 (あるいは最大化) として定式化される。したがって、ネットワークを構成している多数のユニットの振る舞い (情報表現) も、こうした目的関数に従って学習・自己組織的に形成されたものと解釈できる。つまり、ニューラルネットワークがある学習目的の下で獲得した情報表現は、実験的に観察された実際の神経細胞の振る舞いを計算論的に解釈するための有力な示唆を与えるものと期待できる。こうしたアプローチは脳の合目的性を理解の軸とするものであり、そこにマクロ的な計算課題とミクロ的な神経活動の機能を結びつける手掛かりがある。以下ここでは、階層型ニューラルネットワークがその内部表現として学習的に獲得した色立体に関する研究を紹介する<sup>6)</sup>。

さて、脳における感覚出力について考えてみよう。主観評価を基にする心理物理実験はクオリア (感覚・質感) の定量化と考える事が出来る。したがって、心理物理実験という内観報告に基づく結果をニューラルネットに

学習・自己組織させれば、とりあえず入力からクオリアに至るプロセスを垣間見ることはできないだろうか？

こうした観点から、視覚系における色の情報変換過程について、色として知覚できる数100のマンセル色票の分光反射率データを、5層の砂時計型（中間層のユニット数が入出力層のユニット数より少ない）ニューラルネットにランダムに与え、恒等写像（入力データと同じ値を出力させること）を学習させた。学習後のネットワークに未学習の色票データを含め全てを入力し、圧縮された第3層の3つのユニットの活性値を座標軸にとってプロットしたところ、マンセル色立体に似た情報表現が得られた。ご存知のように、人間が色票を見ながら、明るさ、色み、鮮やかさの空間で、似た色を近くにという基準で配置したマンセル色立体は、ラグビーボールの長軸を鉛直から少し傾けて立てた形をしているが、獲得された表現はその様子を見事に写し取っている。すなわち、その空間は明度、彩度、色相からなる色の心理空間に相当し、分光反射率という物理量から感覚量への変換が比較的簡単な非線型写像によるものであることが分かった。こうした手法は、主成分分析など従来の線形手法では本質的に不可能な、非線形に歪んでいるパターン分布をパラメトライズする有効な方法であり、特に、色などの感覚情報は脳内表現として多重に広がった多様体を成していると考えられ、こうした手法によって、はじめて、ネットワークの内部表現として感覚情報の脳内表現を写し取ることが可能となった。すなわち、これま

で生理・心理物理実験では困難とされていた高次中枢における感覚情報の処理・表現を、モデルを通して理解するという計算論的スキームの一つである。

### 3. おわりに

計算論的アプローチと実験・構成的アプローチは、それぞれが脳を理解するためのトップダウンおよびボトムアップの方法論であるが、これらは独立ではなく、相補的な関係をもって研究を進めることが重要である。今後、こうした両アプローチが互いにフィードバックのループを回ることにより、脳の解明が進んでいく事を期待する。

### 文 献

- 1) 白井支朗（編著）：脳・神経システムの数理モデル：視覚系を中心に。共立出版，1997。
- 2) S. Usui, Y. Kamiyama, H. Ishii and H. Ikeno: Reconstruction of retinal horizontal cell responses by the ionic current model. *Vision Research*, 36, 1711-1719, 1996.
- 3) Y. Kamiyama, T. Ogura and S. Usui: Ionic current model of the vertebrate rod photoreceptor. *Vision Research*, 36, 4059-4068, 1996.
- 4) S. Usui, A. Ishihara, Y. Kamiyama and H. Ishii: Ionic current model of bipolar cells in the lower vertebrate retina. *Vision Research*, 36, 4069-4076, 1996.
- 5) D. Marr: *Vision*. Freeman, 1982 (乾 敏郎, 安藤 広志 (訳) : ビジョン, 視覚の計算理論と脳内表現. 産業図書, 1987) .
- 6) S. Usui, S. Nakauchi and M. Nakano: Reconstruction of Munsell color space by a five layer neural network. *Journal of the Optical Society of America A*, 9, 516-520, 1992.