

脳と機械学習 —学習則の「謎」を追う—

札幌市医師会
勤医協中央病院

伊古田俊夫

『標準生理学（第8版）』（医学書院2014）で調べ物をしていた時、大脳基底核に関する記述に困惑したことがあった。

「ドーパミン作動性ニューロンが実際の報酬と予測した報酬の差をコードしている可能性があり、これは学習理論の中の強化学習のモデルに合致するのではないかと注目されている」（p361）

強化学習？ 大脳基底核で？ 結局、理解できないまま本を閉じた。大脳基底核と強化学習という奇妙な組み合わせが「謎」として残った。

*

それから4年、自粛の春に『計算神経科学への招待—脳の学習機構の理解を目指して—』（銅谷賢治著、サイエンス社）を読んでいて、目を見張った。

「小脳は教師あり学習、大脳基底核は強化学習、大脳皮質は教師なし学習にそれぞれ専門化した組織である」（p10、略記）

『標準生理学』でぶつかった疑問が詳細に解き明かされているのではないか。人工的ニューラルネットワーク（端的に言えばAI）での機械学習の三手法（教師あり学習、強化学習、教師なし学習）を実際の脳の働きと対比・研究すると、上記のように当てはまるというのである。銅谷賢治（東大工学部卒の計算神経科学者、OIST教授）が38歳で提起した理論仮説だが、今では脳生理学分野でも認められ教科書に掲載されている。計算神経科学の鋭さに脱帽した。

*

＜小脳は「教師あり学習」＞

教師あり学習は、問題（入力）と答え（出力＝教師信号）が同時に示される学習法である。花を覚える時、画像と正解（バラ、ユリなど）が同時に示されて学習する。初めて自転車に乗る、スキーをするなどの運動学習を考えてみよう。初めは意識的でぎくしゃくとした動きだが、何度も練習を繰り返すうちに自然にできるようになる。この時、失敗した時の感覚を適切な運動情報に変換し、その誤差信号が教師信号となり、正しい方向に修正され学習が進んでいく。教師信号は脳の内部で生み出される必要があるが、下オリーブ核、赤核、小脳歯状核から成る三角ループがその役割を担うと推測される。

小脳皮質プルキンエ細胞には約20万本の平行線維と1本の登上線維が入力している。登上線維は下オリーブ核から誤差信号（失敗時と変換後の誤差の信号）を受け取り、プルキンエ細胞に伝達する。同時

に長期抑圧（LTD）が起き、平行線維シナプスは抑制され、新たな運動情報に転換される。登上線維からの誤差信号が教師信号となり、教師あり学習が成立している。

＜大脳基底核は「強化学習」＞

強化学習では、どこでどういう出力を出せという教師信号は与えられない、代わりにある行動を取った場合の結果の良し悪しの評価（報酬）が与えられ、報酬を最大にするよう試行錯誤を繰り返す学習である。

ランプの点灯を合図にレバーを押すとジュースがもらえる、という課題をサルに学習させる。学習前は、ジュースが実際に与えられた時点でドーパミンニューロン（黒質→線条体）は反応するが、学習後にはランプが点灯した時点で反応し、逆にジュースが与えられた時点では反応しない。ドーパミンニューロンは学習前には報酬に反応し、学習後には報酬を予測させる刺激が提示された時点での、報酬期待の立ち上がりの時間差（TD誤差）に反応している。ドーパミンニューロンの信号はTD誤差を表し、大脳基底核に強化学習が成立している。

以上、小脳と大脳基底核の学習則は理解された。

*

だが、大脳皮質は高度に複雑で一筋縄ではいかない。教師なし学習では、どういう出力を出すべきかを教えられず、入力信号の統計的な分布に着目し、データをクラス分けしたり（クラスタリング）、成分に分解したり（主成分分析、独立成分分析など）という形で学習・処理が行われる。ダイナミックな相互結合回路を持つ大脳皮質では教師なし学習が行われているという。確かに感覚情報処理などを行う頭頂連合野には銅谷の理論仮説が当てはまりそうだが、多様で複雑な大脳皮質の全体に適合できるのかどうか、よく分からない。『標準生理学』では大脳皮質についてのコメントは見当たらず、大脳皮質の情報処理機構の解明にはもう少し時間がかかりそうだ。

*

「謎」は解け、計算神経科学（数理脳科学）への関心はますます深まった。「心はすべて数学である」「脳のすべてを数理モデル化する」をモットーとするこの学問を今しばらく追いかけてみたい。