

上書きを繰り返す中枢神経系の構築 — 知能発現の基盤

Construction of the central nervous system with repetitive overwriting — foundation for the evolution of intelligence

竹森 重*¹
Shigeru Takemori

*¹ 東京慈恵会医科大学・分子生理学講座
Jikei University School of Medicine, Department of Molecular Physiology

All the organs are gradually remodeled without thorough rebuilding to de novo system optimal to confront environments. As a result, redundancy and diversity, that are common characteristics of the hotels of frequent extension with annex building, are generated. The apparent inefficiency of the redundancy has afforded animals flexibility necessary to adapt to various environmental changes. The central nervous system that accommodates intelligence should be viewed not as a special exception but a manifestation of such redundantly and diversely extended organs with repetitive annex building. Therefore, to understand intelligence of animals, hierarchically overwriting construction with annex building by the use of modularized parts at each stage would be fruitful.

1. 要約

動物界は進化の過程で、環境に最適化したシステムに一から作り直すことをせずに常に既存のものに建て増しするようにシステムを改変し続けている。この過程で、建て増し旅館にありがちな冗長性と多様性が、かなりの非効率を代償にしながらも時代の変化に適応する柔軟性を動物界に提供してきた。知能を宿す中枢神経系を特別視することなく、このような冗長で多様なシステムの現れとして、建て増し旅館の設計方針から統合的に観る視点を、各建て増し段階における要素単位とその接続の視点と合わせて捉えることは有効であろう。

2. 運動の制御機構

動物は自らに適した環境を感覚器を通して感知し、意思を持ってそちらに自発移動するところが特徴であり、「意思」あるいは「知能」は、感覚信号と運動出力を繋いでこの動物の特徴を実現する必須の要素である。高等動物になるほどに感覚器で感受したものに対する出力が「自発移動」のような物理的に観測できる単純な表出ではなくなってくることに「知能」を真に理解することのむずかしさがあることを承知した上で、動物の中枢の基本設計理念を運動の制御から探ることは有意義である。

2.1 小脳と大脳の連関

中枢神経系の中でも小脳は、皮質にみられる均一な要素単位とその活動、入出力のわかりやすさ、さらに主な制御対象とされる身体運動の客観表現のしやすさから、幅広く研究され注目されてきた。大脳の各部分との並列なやり取りの中で、小脳に形成される仮想的な(内部)モデル(イメージ)と現実の身体活動との誤差が検出され、身体活動にフィードフォワード・フィードバックされることが想像されている(cf.[Ito 1970])。脳幹と視床を介した大脳—小脳間の連絡システムが並列に作動して現実の運動を制御し、しかもそこで空間座標系と身体座標系(筋肉座標系)との座標変換が行われると期待される実験結果も得られ

ており[寛 2002]、筆者が一昨年から本会で知能の発達のカギとして提唱している「頭部に座標軸を置いた自覚的座標系の身体外への拡張的投射」([竹森 2012], [竹森 2013])を裏付ける機能的要素として小脳が重要な位置を占めることは疑いを入れない。

2.2 小脳が学習するもの

上記の小脳機能は、たとえば小脳と大脳との連携による予測(フィードフォワード)的な身体運動制御にしてもその獲得までに、比較的長い時間をかけた繰り返しトレーニングを要する点において、動物のあらゆる身体活動の中では特殊な状況で発現されるものである。「学習」という要素が知能の本質に重要な示唆を与えるが、運動の学習を開始した時点から既に存在していた身体運動の制御機構を前提にして作動していることにも注意が必要である。運動のトレーニングは、この練習前から作動している運動制御システムの指令をいかに上書きするかを小脳が学習する過程であると言っても良い。

2.3 大脳基底核と大脳の連関

小脳の障害が何かをしようとすると顕著に現れる(例:企図振戦)のに対して、大脳基底核の障害は静止時の異常な動き(例:静止時振戦)に顕著に表れる。上記の小脳本来の運動調節機能が獲得されるまでの学習期間においても、身体の運動制御が決してお留守になっているわけではなく、大脳基底核が視床を介して大脳と連携し、平時の運動を制御している。

実際、大脳基底核による運動制御は実験的にも短い潜時の予測制御に重要な役割を演じていることが示されており[Buhusi 2005]、小脳における身体運動学習という「知能」が大脳基底核を使った普段の運動制御「知能」を上書きするべく、時間と中枢活動のコストを払って発現されるものであることが了解される。

2.4 脊髄から脳幹の機能

大脳基底核よりもさらに即時的に働く運動制御機構が脊髄や脳幹に備わっている。感覚情報を意識が介入する余地なく運動出力につなげるこの中枢機能は反射として「知能」とは一線を画して位置づけられることが多い。しかし反射は大脳基底核や、その上の小脳に座す運動「知能」の前提を形成する重要な基盤であり、ここではこれをより上位の「知能」が必要に応じて上書きする下位の「知能」と位置付けよう。

連絡先: 竹森 重, 東京慈恵会医科大学・分子生理学講座,
〒105-8461 東京都港区西新橋 3 丁目 25 番 8 号, 電話:
03-5400-1200 内線 2215, Fax: 03-3431-3827 (電話共用
直通, E-mail: sml@jikei.ac.jp)

2.5 建て増し運動中枢の設計理念

動物の進化の過程を反映して、上記の様に脊髄-脳幹の基本的(反射的)な運動機能の上に、大脳基底核を介する平時の運動制御機能が上書きをするように存在していて、それをさらに上書きする形で小脳による運動「知能」の獲得がなされる。とりあえず動けるようにするシステムがあることが運動を学習するためのトレーニングを実現するためには必須であり、より上位の「知能」はより下位の「知能」を前提としてその機能を発現するようになっていることが如実に現れている。ヒトでいうならば、脊髄が伸張反射によってとりあえず姿勢を維持し、その姿勢を崩さずとも交差伸張反射で緊急避難が可能になるようになっている。その前提の上に、脳幹の機能が身体の体性感覚、前庭・視聴覚をもとに、重力に抗して立ち、歩くことを可能にしている。大脳基底核は大脳との連携のもとに短期的な予測制御を含めた運動制御で脳幹以下の反射的な運動制御を上書きし、巧緻とは言えなくてもとりあえず動けるようになる。さらに小脳の運動「知能」は、これらの階層的運動制御系の機能を利用しながら上書き制御をすることで、より長期的な高度の予測制御を実現し、より滑らかで文脈のある運動を実現し、環境に適応してきたものと想像できる。

3. 建て増し中枢の設計理念

3.1 知能と反応の境界

運動においては予測制御が高位の「知能」を下位の「知能」すなわち反射から区別する要素であろう。運動の制御を超えてこの考え方を敷衍すると「想像力」が高位の「知能」を下位の「知能」すなわち反応から区別する要素と言えそうである。将来を想像する力が予測力であり、反応としてひき起こされる行動が反射だからである。このような発想から、運動について小脳に蓄積される運動イメージ(内部モデル)に対応するイメージが、運動以外の対象についても中枢内に数多く形成・生成され、蓄積(記憶)されることが知能のもとであり、その形成・生成における重みづけ因子が快・不快の感情を引き起こす報酬系であるとする考え方が生まれる。ここで、運動系における制御の階層的な繰り返し上書き過程に対応する、知能一般における要素は、たとえばいわゆる本能を知的な意思判断で上書きしていく過程に相当するかと考えられるが、本能を知能が上書きするシステムにおける、進化に根差した階層性をどのように考えれば良いだろう。

3.2 脊髄から脳幹の知能

神経系が関わる運動制御「知能」の最下層には、脊髄・脳幹レベルの反射があった。この反射に対応する一般的な「知能」を求めるなら、延髄に中枢を置く生命維持機構、特に自律神経系であろう。体内環境を恒常に保とうとする自律神経系の合目的な働きに我々が往々にして知性を感じがちなのは、生命に対する過剰な擬人的思い入れというよりも、むしろ正当な知性の認知である。神経系に拘らなければ、「知能」の階層はさらに細胞や細胞内小器官のレベルにまで下ることができて、ここに知性と生命の区別は失われる。これらの下層の「知能」はほとんどの場合、個体レベルではより上位の知性で統合された形に上書きされるが、息苦しさや窒息感などは上位の知性の抑圧を押しつけて折に触れて最前面に現れる。

3.3 間脳のレベルの知能

運動の「知能」では大脳基底核のレベルでの制御に相当し、視床を介した大脳とのやり取りがここで明確になる。知能一般に

ついて間脳レベルをみると、視床下部に中枢を置くシステムが見出せる。運動の場合と同様に、視床を介した大脳とのやり取りが明確になっており、渇き、空腹、満腹などのより上位の「知能」がなかなか抑えがたい「知能」がここに生まれる。この間脳レベルの「知能」は、脊髄・脳幹を中心とする低位の「知能」を介した自律神経系を手繰る一方、内分泌系という作動は遅いが強固な制御システムを利用して独自の知性を力強く発揮する。脊髄から始まって間脳までのこれらの「知能」は、運動の制御の場合を含めてどれも個体が占める空間に閉じた自覚的座標系内で作動する。

3.4 大脳辺縁系の知能

一般的に本能と呼ばれるものがここまで上位に上った「知能」である。より下位に位置する「知能」が維持する個体の生命活動を前提としてこの「知能」が作動することは明らかである。新皮質によって大脳皮質の辺縁へと押しやられた辺縁系は運動における小脳とは発生を含めた解剖学的関係において相同とはいえないが、個体の身体から環境に投射される拡張された自覚的座標系で知性を発揮する点で共通している。シナプスの可塑性を利用したしばらくの「学習」と「記憶」がその知性の十全な発揮のために求められるところも対応が良い。小脳が運動以外の知的な活動でも大きな役割を担うとする報告(ex.[Allen 1997])も多くなされてきており、機能的には新皮質の辺縁を形成する皮質の一環として小脳を捉えることも許されるだろう。

3.5 新皮質の知能

運動制御の「知能」の階層ベクトルと並行させて見てきた、一般的「知能」の階層ベクトルの先に、最上位の「知能」がある。この最上位の知能は、あくまでもより下位の知能の働きを前提にして必要な時にだけその機能を上書きする形で知性を発揮する。したがって、最上位の「知能」を切り出し、孤立させてその動作原理を知ろうとする試みは成功しない。下位の「知能」をいかに上書きしながら作動するように設計されているかを探求する必要がある。筆者らは身体から環境に拡張投射された自覚的座標系に閉じた運動トレーニングを、空間に固定された客観的座標系と自覚的座標系を行き来するトレーニングと比較することで、運動制御の「知能」の階層間の干渉を調べている。その先に見たいのはもちろん同じベクトルに沿うと期待される一般知能の階層間の干渉特性であり、最上位の「知能」と、そのさらに先に来るべき「知能」である。

参考文献

- [Ito 1970] Ito M: Neurophysiological aspects of the cerebellar control system, *Int J Neurol*, 7, 162-76, 1970.
- [筧 2002] 筧 慎治: 運動野における運動指令の座標変換, *脳の科学*, 24, 381-4, 2002.
- [竹森 2012] 竹森 重、渡辺由陽、田中陽子、玉川奈津子: 身体から環境に拡張された自己の視点での身体技能トレーニングの試み 2012年度人工知能学会 3E2-OS-16-2.
- [竹森 2013] 竹森 重: ヒト中枢の構成経済と投射の拡張-知能の形成基盤 2013年度人工知能学会 3G4-OS-12b-4.
- [Buhusi 2005] Buhusi CV, Meck WH: What makes us tick? Functional and neural mechanisms of interval timing. *Nat Rev Neurosci*, 6, 755-65, 2005.
- [Allen 1997] Allen G, Buxton RB, Wong EC, Couchesne E: Attentional activation of the cerebellum independent of motor involvement. *Science*, 275, 1940-3, 1997.