

動作の進化

多久泰夫 Taku Yasuo

多久範子 Taku Noriko

生命進化の中で、動物に課された「解決すべき運動課題」は、情け容赦ない“生存をめぐる競争と闘争”により、ますます複雑になっていった。ベルンシュタインは自著の啓蒙書（文献1）の中で、魚類に始まって人間に至る動物の動作構築の推移を4つの階層（レベル）に分類した。生命進化に対する深い洞察、「動作それ自体……明

らかであり十分に調べ尽くすことができる」(p123)という確信、そして彼の“天才”がそれを可能にした。今回もベルンシュタインの啓蒙書を中心に話を進めていく。

進化の階層（図1）

生命進化（系統発生）は、樹木の枝葉のように、横へ縦へと広がっていく。古い構

造を土台として新しい構造が誕生する。個体発生も同様である。「固体発生は系統発生をくり返す」（ヘッケルの生物発生原則）という2つの“発生”の間に認められる興味深い共通性は、生命現象の階層性に依拠することは間違いない。

脳の階層（図2）

生命進化の中でとくに中枢神経系の進化は重要である。脳の発達の歴史は“大脳化（p143）”と呼ばれ、新しく生まれた構造は古い構造を拒否したり排除したりしようとせず、むしろ制御下に置こうとした（p297）。古い構造もまた、全体の中で基礎的かつ重要な役割を任された。単なる積み重ねではない。低次から高次に至る多層構造、「階層」の出現である。ベルンシュタインは2階建ての建物にたとえた。新たな機能を持った構造が脳の中につくられるとき、それは古い脳構造の中に昔からある機能を引き継いで2階に引越し先導レベル（注1）としての役割を担う。古い脳機能は1階に止まるが非常に重要で責任の重い背景レベルの役割を担う。

注1 先導レベルと背景レベル（p125）

1つの「動作のリスト」（一連の動作のまとまり）を獲得していたある動物がいて、何世紀もの時を経て進化した子孫が、祖先から受け継いでいた動作を改良して、「より高い動作リスト」を獲得したとする。この場合、新しいリストは単純な足し算で元のリストの隣に並んでつけ加わるわけではない。また古いリストもそっくりそのまま残るわけではない。新旧のリストの間に上下関係、すなわち動作の「階層」が形成されるのだ。新たなリストは、階層の上方に位置し表舞台で動作全体の制御の根幹に関わるような重

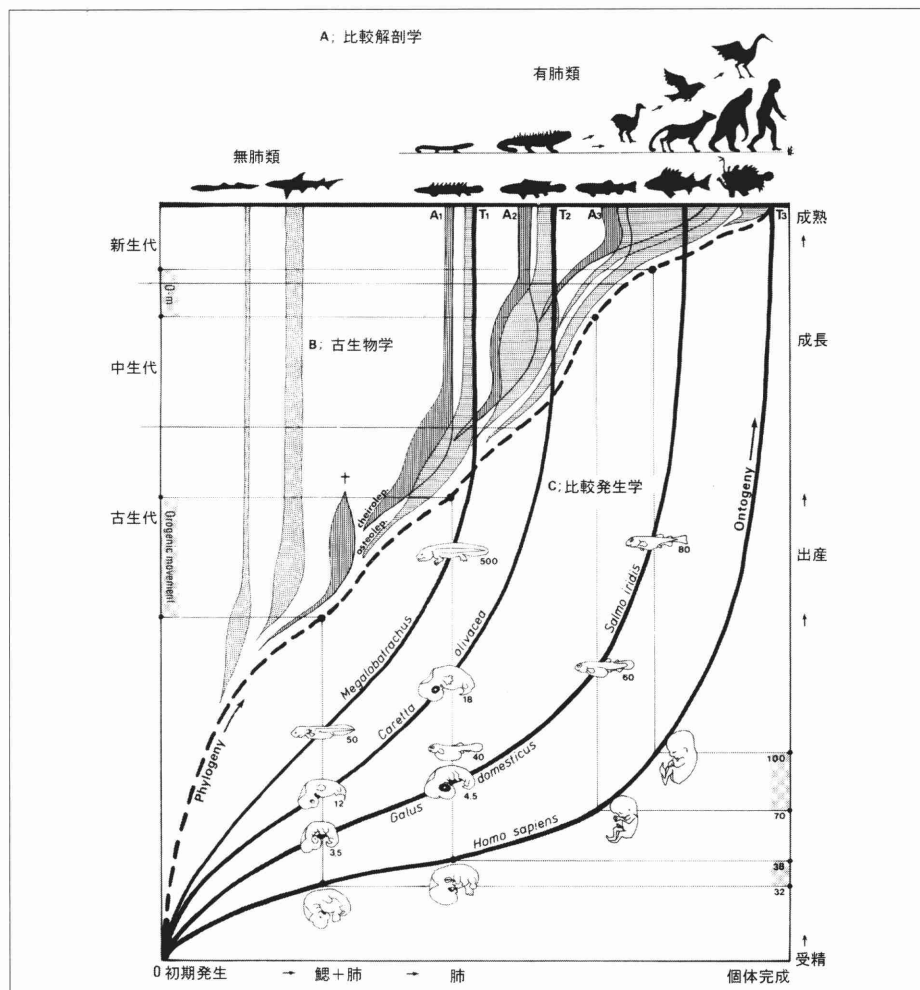


図1 系統発生と個体発生（文献2より改変）

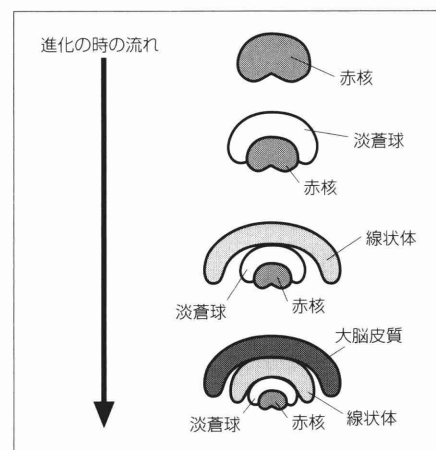


図2 脳の階層

大な調整を担当することになり、これを「先導レベル」と呼ぶ。古いリストは、階層の下で動作のおおもとを支える裏方の役割を演じることにになり、これを「背景レベル」と呼ぶ (p187)。
先導レベルと背景レベルの関係は、騎手と馬の関係にたとえられる。上下関係はあるもののどちらも運動動作には欠かせない存在である。

神経路の階層 (図3)

運動制御の下行神経路 (運動中枢から脊髄の運動細胞まで伸びる神経路) として錐体外路系と錐体路系の2つがある。ペルンシュタインが指摘していることであるが、名称がまったくその本質を表していない。「神経科学の黎明期に、脳にもともとあった運動系のほうは、迂闊にも錐体路の外にある経路であるとして錐体外路と名づけられてしまった (p106)」。

重要なことは、錐体外路系が古い神経路であること (レベルC 1の鳥類で黄金期を迎える)、錐体路系が新しい神経路であること、そしてこの両者の間にも階層構造が認められるということである。



図3 神経路の階層 (0:小脳、1:錐体外路、2:錐体路) (文献1より改変)

豊かになる動作 (p90)

原始的な魚類として体幹を制御することから出発した脊椎動物 (ペルンシュタインの動作構築レベル、レベルAに相当) は、次いで体肢を獲得し (レバーシステム、レベルBに相当)、いよいよ「水中」から「陸上」、あるいは「空」への進出を開始する。無限に続く均一な水中とは異なり、地面あるいは大気という環境は刺激に満ち溢れ、そこから提出される運動課題もまたきわめて難解であり、脊椎動物たちに多様な運動を呼び起こすこととなる。そして両生類、爬虫類、鳥類が誕生、ここに至って動物は3つの身体能力、力強さ、すばやさ、

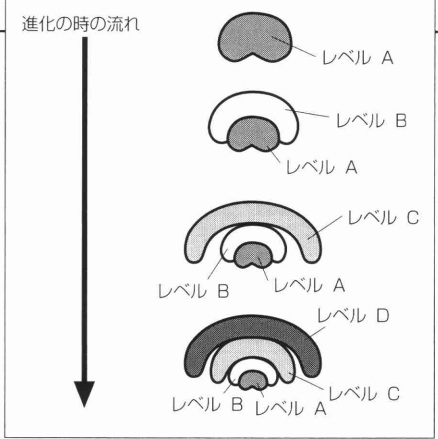


図4 動作構築レベルの階層

持久性を獲得することになる。しかし進化のダイナミクスは止まることを知らない。さらに新たな「感覚による調整」、新たな「神経伝達路」、新たな「中枢による情報統合」、新たな「運動リスト」を創造し、これらを密接に関連させながら、さらなる身体能力、身体の巧みさを獲得する。レベルCの誕生 (厳密にはC 2)、哺乳類の誕生である (表1)。
“動作の制御” もまた「階層構造」であることを看破したのがペルンシュタインの

表1 動作構築レベルの4段階

動作構築レベル	動物	基本的特徴	脳の命令中枢	神経路	人間における役割
レベルA 筋緊張のレベル	魚	・筋緊張と呼ばれる平滑筋に似た “なめらかでゆっくりした収縮” を横紋筋に生じさせる唯一のレベル ・体幹と首の制御が主な役割	赤核		・人間にとって最も原始的なレベルであるが、いかなる動作も背景レベル (注1) として決定的に重要な役割を担う (注2)
レベルB 筋-関節リンクのレベル	両生類 爬虫類	・シナジー (注3) のレベル ・体肢の制御 ・一貫して調和のとれた同一性の動き (犬の尻尾ふり動作、のこぎり引きなどの連続的なサイクル)	淡蒼球:両生類 線条体:爬虫類	錐体外路	・背景レベルが主 (レベルC、レベルDの土台作り)
レベルC 空間のレベル	C1 低次 鳥	・空間に対してなめらかで連続的な調整を行う ・先導レベルの運動セットがはじめて出現	線条体	錐体外路	・歩行、ランニングなどの周期的な低次の運動行為、すなわち行為リンク (注4) を組み立てる
	C2 高次 大部分の哺乳類	・「 身体 の巧みさ」 (カコミ参照) が現れるレベル (目標位置に対して正確に動作の終点が決まる)	線条体が主 大脳皮質も一部関与	錐体路	・正確に投げたり、打ったり、当てたり、指を差したりする高次の動作を組み立てる
レベルD 行為のレベル	人間	・「 手 の巧みさ」—「手」がしばしば参加 ・「 対象 操作の巧みさ」—「対象」をしばしば伴う ・行為 (注5) に関わるレベル ・連鎖構造がある ・適応的な変動がある (レベルBの同一性の動きとは対照的) ・対象物の意味や連鎖問題の意味を把握できる	大脳皮質が主 線条体も一部関与	錐体路	・人間の人間たるゆえん—「人間のレベル」とも呼ばれる

注2 レベルAの決定的重要性
もしレベルAが機能不全に陥ったとすると、腰の折れた身体、たるんだ筋、ローブにかかった洗濯物のように身体の横にぶら下がった両腕、容易に起こるめまい、以上のような症状が現れる。このような身体で「巧みさ」は実現できるわけがない。レベルAは「巧みさ」すなわち人間にとって決定的に重要である (p139)。

注3 シナジー
イギリスの生理学者シェリントン (Sherrington, 1906) は、同時に共同して活動する筋の動きをシナジーと名づけた。ペルンシュタインは、多数の筋が活動して動くレベルをシナジーのレベル (レベルB) に位置づけた。

注4 行為リンク (動作リンク)
行為の構成要素。低次の背景レベルにあるおおむね独立した運動行為である (p183)。

注5 行為
行為は単なる動作ではない。行為の多くは、単体の行為リンクが複数集合し順序立った一連の繋がりが (連鎖構造) の中で協同してある運動課題の解決にあたる、動作系列の全体である。行為リンクはすべて、運動課題の意味によって互いに結びついている。連鎖の結び目を切ってしまうと、順序を入れ替えたりすると、運動課題を解決できなくなってしまう (p171)。

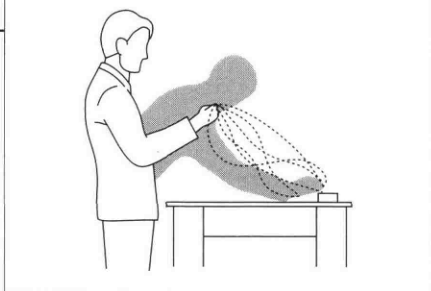


図5 テーブルからマッチ箱を取り上げる動作（文献1より）

天才である（図4）。

空間のレベル—レベルC

レベルCは低次レベルC1、高次レベルC2に細分される。脳の運動中枢（図2）と運動制御の下行神経路（図3）が完全に異なるためである。しかしながら全体としてレベルCは、“空間場”の中で背景調整としてではなく大規模できわめて多様な独立した運動のセット（すなわち先導レベル）として働く最初のレベルであるため、1つの階層にくくられることになる。

レベルBとレベルCの感覚調整のあいだの本質的な差（p160）

筋—関節リンクのレベルであるレベルBは、通常、主として身体自体に注意を払っている。レベルBの感覚系は、身体各部の位置や、個々の筋が発揮している力や、関節角度などに関する幅広い情報を絶え間なく供給し続けている。レベルBが動作を組み立てるときには、はじめに動作のバイオメカニクスの側面を構成し、次に最も効率的で都合よく筋を動かせる順序を決定する。膨大な自由度のおかげで無数の動作が可能になるが、しかる後に、選んだ動作が最もなめらかで流れるように進んだかどうか確かめる。そのためすべての動作は、なめらかで調和がとれており、優雅でさえある。

それに対して典型的な空間レベルC2の運動は、狙いを定めて対象を移動させる運動である。たとえばテーブルからマッチ箱を取り上げる動作がある（図5）。動作の中で最も重要で意味があるのは最後の部分、つまりマッチをつかむことであり、動作の途中がどうであろうと結果には関係ないので、先導レベルはこの部分に関心がな

■巧みさ

巧みさは騎手だけでも馬だけでも実現できない。巧みさの域には、工夫家で機転の利く騎手と従順で正確に仕事をこなす馬とが一体になってはじめて到達することができるのだ（p187）。

ベルンシュタインは啓蒙書の中で、巧みさをまず2種類に分けて説明をはじめた。1つは、空間のレベルCで遂行されレベルBの背景活動で支えられる動作、すなわち「身体の巧みさ」である（例：船乗りの少年は、サルのように巧みにマストを駆け上がった）。

もう一つが、行為のレベルDで遂行される行為の中に現れる、「手の巧みさ」である。このとき空間のレベルCおよびときに応じてレベルBが背景でその活動を支えている（例：時計職人は正確で巧みなピンセットさばきで、小さな腕時計に歯車を取りつけた）。

い。運動のバイオメカニクスの側面にはあまり注意を払わない。つまり、関節角がどのように変わろうが、動作途中の姿勢が楽であろうがなかろうが気にしない。というのは、腕には十分な自由度（注6）があるため（ありすぎるため）、手の届く範囲ならばどの点であろうが多くの軌道によって到達可能であるということをレベルCはちゃんと心得ているからだ。

注6 自由度

自由度（degrees of freedom）という用語は、物体や座標系の位置を完全に特定するのに必要な、独立した座標のことを指す。1度の自由度は、物体が動きうる独立した経路として定義される。空中に吊るされた剛体は6度の自由度を持つ。それは3つの独立した軸（縦軸、垂直軸、前額軸）に沿って並進し回転できる。自由度が1度しかない運動連鎖は、メカニズム（mechanism）と呼ばれる（文献3）。

動作レベルの最終章—レベルD

レベルDは、人類だけが到達した最高位のレベルである。決定的な一歩は“手”が自由になったことである。その“手”が参加者となる運動課題はますます複雑化した（注7）。レベルCまでの“動作”単独では解決困難な超難問である。多数の“動作”が協同して運動の連鎖を形成して運動課題の解決にあたる必要が出てくる。運動課題の意味を認識できる高度な脳中枢、すなわち大脳皮質も欠かせない。人間の手とともに出現したのは、大脳皮質、行為（注5）の出現である。したがってレベルDは“行為のレベル”とも呼ばれる。レベルC以下

論理を展開する中、著書の最終章で巧みさの定義を以下のように拡大して指し示す。

「手の巧みさ」とは、いかなる外的状況においても解決となる運動を見出す能力、つまり生じた運動の問題を、以下の条件を満たして十分に解決する能力である。

- 正しいこと（適切で正確）
- すばやいこと（意思決定においても、結果の達成においても）
- 合理的であること（適宜性を備え、経済的）
- 資源を利用していること（咄嗟の機転が利いて、先見的）

ここにきてベルンシュタインは運動科学の末路の領域に踏み入った。運動について考えを進めたベルンシュタインは、誰もが知らなかったレベルの環境、環境の「もっと先」にある意味、「行為の周囲にある世界」を発見することになったのである（p315、佐々木正人先生による解説より）。

では対象物の意味や連鎖問題の意味を把握できない。だからこそ人間の行為のレベル、レベルDが発達したのである。人間の人間たるゆえんである。“人間のレベル”と呼ぶこともできよう。

ついに人間は前述の4つの身体能力、すなわち力強さ、すばやさ、持久性、身体の巧みさに加えて、「手の巧みさ」を備えることになる。「手の巧みさ」（カコミ参照）はさまざまな点で他の4つの能力と異なる。より柔軟でより汎用的である。ベルンシュタインは「（手の）巧みさはトランプで言えば切り札のジョーカー（p6）」と表現し、“運動について懂れている”人々のために著した自著の啓蒙書の題名にもそれを採用した（p317）。（多久泰夫）

注7 “運動課題の複雑化” 三つの方向性（p297）

- 意味の複雑さの増大
- 必要となる運動の複雑さと正確さの増大
- 予期せぬ習慣的でない新奇な運動課題の数の増大

【引用・参考文献】

1. ベルンシュタイン、デクステリティ 巧みさとその発達、金子書房、2004
2. 三木成夫、生命形態学序説、うぶすな書院、p159、2004
3. Vladimir M. Zatsiorsky、鳥居俊 監訳、身体動作の運動学、ナッパ、p95、2003

たく やすお、たく のりこ・たく整形外科医院（〒971-8172 福島県いわき市泉玉露2-14-24）、TEL & FAX：0246-56-8833、E-mail: takuball@2.dion.ne.jp