

脳と行動の発達

多賀蔵太郎

(東京大学大学院教育学研究科 & JST さきがけ 2 1)

1 はじめに

ヒトの運動や知覚などの初期発達過程において、際立った特徴は2つある。第一に、生得的な脳や身体は自発的で複雑なダイナミクスを持つということである。新生児はすでに統合されたシステムであり、一般的に考えられているよりもはるかに様々な能力を示す。第二に、発達は質的な変化を伴い、連続かつ単調に進むとは限らない。例えば、多くの行動に関してU字型の変化などが見られる。このような特徴は、非線形力学系として理解しやすい側面を持っていると考えられる。一方、従来の力学系の研究を超えるためのヒントがある可能性もある。以下では、いくつかの具体例を示しながら、発達の原理を探ってみよう。

2 運動の発達

自発的な運動の生成は、胎児や新生児に見られる。特に、生後4～5ヶ月までの乳児は仰向けの姿勢で、外部からの入力なしに、自発的な全身運動を繰り返し行う。これはジェネラルムーブメント(GM: general movement)と呼ばれている。乳児の手足に反射マーカを貼り、カメラで撮影し、運動の軌跡を分析した結果から、GMの特徴が明らかになりつつある。運動の時系列が非線形力学系から作られたと仮定すると、「埋め込み」により、その時系列を作り出す変数の相空間を再構成できる。さらに、非線形予測法を用いて、相空間上での運動軌跡の予測可能性を定量化すると、運動の複雑さを評価できる。このとき、サロゲート法を用いて、オリジナルデータにFFTをかけたときの位相を、自己相関および相互相関を保存しながらライダマイズすることによって作った時系列データとの比較すると、生後1ヶ月齢児のGMは、時間相関を持ったノイズではなくカオス的であることがわかる。ただし、カオス的という言葉は、短時間では決定論に従うが、長時間では予測不能であるという意味で使っている。生後の発達過程に関しては、GMの複雑さが一時的に減少した後、再び複雑化するというU字型の変化が見られる。さらに、脳性麻痺等の障害があるとGMが単純になると経験的に言われてきたが、これを支持するデータも得られている。

3 視覚の発達

成人の脳皮質には機能に応じたモジュール構造がある。特に、視覚系では、物の形・色・動きなどの異なる特徴には、異なる部位のニューロン群が反応する。しかし、物の統一された知覚が成立するには、このようなモジュールどうしの統合が必要である。これは

バインディング問題と呼ばれている。小児の発達過程で、モジュール構造がどのように構築されるかわかっていない。特に、視覚系のバインディング問題はどのように解決されているだろうか。我々は、乳児にある形と色を持った2つの図形を被験児に繰り返し見せて馴化させた後、組み合わせだけを変化させた図形を識別できるかどうかを脱馴化の有無で判定した。生後1ヶ月児は、非常に良く識別できるが、生後2ヶ月になると、注視時間のゆらぎが大きくなって識別の有無が確認できなくなる。そして、3ヶ月になると、再び識別の成績が良くなる。眼球運動パターンの解析をしてみると、3ヶ月児だけが左右の図形の間のサッカードを繰り返す行うことがわかる。このように、成績が発達過程で一度落ちて再び上昇するU字型の変化が起きている。1ヶ月児は非モジュール的な知覚を持つが、2ヶ月にモジュールの分化が起きてバインディング問題が生じ、3ヶ月になると選択的注意機構を持った知覚が可能になるというシナリオが考えられる。

4 脳の発達

新しい脳計測手法による脳の発達過程の研究も進みつつある。睡眠中の新生児の後頭葉の光トポグラフィーによる計測によれば、酸素化・脱酸素化ヘモグロビンの濃度の相対的变化に、空間的に同期した15秒程度の周期的変化がある。ところが、生後1ヶ月になると、強い周期性や空間的な同期性は低下することもわかっている。さらに、2ヶ月以降にはまた異なる時空間パターンへと変化する。このような脳血行動態の時空間的变化は、大脳皮質における急激なシナプスの増加や機能的な回路の分化と深い関わりを持っていると考えられる。最近、覚醒して刺激を注視しているときの脳の状態の計測にも成功しつつあり、今後新しい事実が明らかになると期待される。

5 U字型変化のメカニズム

ここで、U字型変化の背景にはどのようなメカニズムがあり、どのような意味があるのかを議論したい。新生児では、脳や身体運動の大域的な活動は見られるものの、機能の特異性は低い。つまり、モジュールやモダリティーのような分化はあまり進んでいないと考えられる。あるいは、分化しているとしたら、モジュールやモダリティーどうしのコヒーレンシーは強いと考えられる。そうした性質から、モジュールのバインディングやクロスモーダルマッチングに相当するような行動を示すことがあると考えられる。生後2ヶ月ごろに、U字型変化がしばしば見られるが、脳や身体運動はより局所的な活動が可能になるように変化する。自由度の凍結のようなことが起きているように見える。特に、大脳皮質においては、個々のモジュールやモダリティーの特異性は高くなる。このとき、モジュールやモダリティーどうしの干渉を避け、独立性が強まると考えられる。この性質によって、特徴のバインディングやクロスモーダルな活動についてはパフォーマンスが一見低下すると考えられる。このような時期を過ぎてさらに発達が進むと、脳や身体運動の大域的または局所的な活動を制御できるようになり、自由度の解放が起こる。また、モジュールやモ

ダリティーどうしの関係の調節ができるになり、モジュールのバインディングやクロスモーターダルマッチングなどが再び可能になる。

6 おわりに

運動、視覚、脳活動に関して、それぞれ初期発達過程では動的な変化が見られることや、U字型の発達のシナリオに関する考察を述べた。U字型の発達のシナリオに関しては、今後よりすすんだ脳の計測などによる検証を行う予定である。また、U字型の変化の詳しいメカニズムはまだよくわかっていないので、モデルを構築するが必要である。そのときに、何がシステムを発達させるドライビングフォースになっているかということが問われるであろう。システムの要素に内在する不安定性とネットワーク全体の構造に、発達が進む方向に変化させる仕掛けを見い出すことができるのだろうか。それとも運動や知覚に直接関わる身体や脳などの力学系と独立に、論理的な推論のような認知過程を扱うモデルの仮定が必要なのだろうか。我々は、何かに意味を見い出したり、主体的に何かを意図したいといったことを常に行っている。新生児はこうしたことをすでにやっているようにも見えるし、そうでないようにも見える。主体的な認知や意図が発達によって獲得されるのか、初めから何らかの形で生体に埋め込まれているのか。こうした問題を扱うのに力学系モデリングは十分かどうか、検討と議論が必要である。