

タイトル	自己組織化としての認知発達：発達的变化の連続性と不連続性を超えて
著者	小島，康次；KOJIMA, Yasuji
引用	開発論集(97)：1-23
発行日	2016-03-14

自己組織化としての認知発達

—— 発達的变化の連続性と不連続性を越えて ——

小 島 康 次*

1. 心的モジュール仮説再考

中尾（2015）は人間行動進化学の立場から、心的モジュール説（Fodor, 1983, 2000）について最近の知見を次のように論じる。

まず、そうした仮説の背景として進化心理学（Cosmides & Tooby, 1989）の寄与があることを指摘する。進化心理学は基本的に、われわれの心が進化的適応環境において形成された形質、モジュールから構成されていて、このようなモジュールの集合体がわれわれの心である、と考える。

進化的適応環境というのは、180 万年前から 1 万年前くらいまでの更新世と呼ばれる地質年代のことで、その時代にヒトが大きく進化したと考えられる。こうした変動の少ない時期には安定した適応課題が数多く存在し、そうした課題に特化した形質としての心理的メカニズム（心的モジュール）が進化したとされる。それに比べると農業が導入されて以降の 1 万年は、環境の変化が激しく、時間の長さとしても進化するには不十分な長さだとされ、更新世以降はそれほどの進化がなかったとされる。

こうした見方には批判もある。第一に、進化心理学が想定するほど更新世の環境は安定的でなかったという批判である。確かに気温の変化など、物理的な指標において変動がみられ、社会的にも不安定な状態が続いたというのも事実であるらしい。第二に、たとえ過去に複数の適応課題があったとしても、そこから直接的にモジュール集合体仮説が導かれるわけではないという批判がある。第一の批判についてみると、事実として環境の変動がどの程度かというのは地質学的な問題であり、それがどの程度であれば心的モジュール形成を妨げるかというのは直接的に検証困難な事柄であり、意見の分かれるところである。

第二の批判はどのようなものだろうか。進化心理学者のバレットとカーツバン（Barrett & Kurzban, 2006）は、進化心理学における機能的に特化したモジュールを次のように定義する。それは、形式化可能な情報入力を伴って、機能的に特化したメカニズムを認識の特徴としてもつモジュールでなければならないと言う。彼らは、その具体的な例としてグーグル（google）のような検索システムを挙げる。この検索システムは、入力されたある単語を含んだサイトを

*（こじま やすじ）開発研究所研究員，北海学園大学経営学部教授

ウェブ上から探し出すという形式的な作業を行っている。それは、ウェブ上で検索を行うという機能に特化している。すなわち、ここで形式化可能な情報入力とはモジュールの作動形式を指すことになる。

このように一定の作動形式と機能的特化を心的モジュールの性質と見なすならば、実践的推論システムのような高次の中央処理装置でさえも心的モジュールと見ることができる (Car-ruthers, 2006)。このような見方に立てば、進化心理学における心的モジュールとフォーダーの言う心的モジュールは同じものではないということがわかる。フォーダーの言う心的モジュールとは、視覚や聴覚のような周辺系であり、推論などの中央処理系に関してはモジュール性を想定していなかった。よく例として用いられるミューラー＝リヤーの錯視は、同じ長さの直線の端に付加された矢印の向きに応じて、直線の長さが異なって見えてしまうといものである。いくら長さが同じであるはずだと考えても、視覚モジュールはその情報を利用することができない(カプセル化されている)。それに対して、カラザースの実践的推論システムまで含む心的モジュールは、実際の世界をとらえるために進化したものであり、想定されていなかった対象でさえも入力とみなされることもあり得る。たとえば毒蛇検知モジュールのようなものを考えた場合、モジュールの形式が「音を出しながら近づいてくる動物に気をつけろ」というものであっても、場合によっては毒をもっていない蛇であっても入力と見なすかもしれない (Sperber, 1994)。すなわち、進化心理学ではフォーダーの定義した狭い意味のモジュールではなく、機能的に特化したさまざまな心理メカニズムを指すことになる。

2. 心的モジュールと発達

モジュール仮説は発達に関する証拠との整合性が高い。認知発達はすべての領域が歩調をそろえて進むわけではなく、異なる領域が独立に存在するからである。しかし、われわれはモジュール仮説にお墨付きを与えるわけではない。モジュール仮説は3つのうまく答えられない問題を抱えている。

第1の問題は、自律的なモジュールの境界線は何処にあるのかということである。フォーダーの考えでは、言語のように自律したモジュールとしての能力は情報的にカプセル化したサブシステムから成るのであるが、一方、一般問題解決はそうではない。しかし、言語理解は全体として、(すなわち、話された言葉の意味を含めて)フォーダー自身の見方によれば、カプセル化したサブシステム同士が一緒になって、広い意味の相互作用をすることになる。言語を構成するものとして提案された独立のモジュールは実際に言語を使用する際には、互いに強く相互作用するように見える (Kelly, 1992; Pinker, 1987, 1989; Tucker & Hirsh-Pasek, 1993 参照)。即時的な視覚経験に含まれる一般的知識 (Rock, 1973) と情報的にカプセル化された周辺的な知覚現象 (Stillings, 1987) にも似通ったことが見られる。実際の言語理解や実際の視覚経験が情報的にカプセル化された仕組みと一般的な目的のメカニズムとの混合したものだとすれば、

両者の間に厳密な境界線を引くこと以上にやるべきことがあるはずである。それらがどのように混合して全体を作り上げるかを説明しなければならない。

第2の問題は、モジュールすなわち情報的にカプセル化されたサブシステムはどこから来るのか、ということである。カミロフ＝スミス（1992）が論じたように、大人の認知構造の骨組は必ずしも子どもと同形である必要はない。ただし、発達の結果生じた能力は表面上同形であるかもしれない。「情報的にカプセル化された」構成単位は発達する。すなわち、ミューラー＝リヤーの錯視は発達する（Pick & Pick, 1970）。さらに、フォーダーが示唆したように、情報的にカプセル化されたモデルにおける発達の变化的の背後にある推進力は必ずしも成熟する必要がない。その代わり、「情報的にカプセル化された」構成単位は学習によって創発すると考えられる。大人にみられるストループ効果は情報的にカプセル化されていて、フォーダーが視覚モジュールの証拠として引用したミューラー＝リヤーの錯視にいく分似ている。インクの色（例、「あお」）の名前を質問された場合、どうしてもそのインクで書かれた単語（例「あか」）を読み取ることが抑えられない。この効果のトリックを知っていても、何とか避けようと努力しても無駄である。しかし、情報的にカプセル化（Shiffrin & Schneider（1977）が言うところの自動化）された読みのメカニズムは発達の結果生じたものである（Greenfield, 1991; Tucker & Hirsh-Pasek, 1993）。言語自体の発達から得られた証拠によって、次のような可能性が強く示唆される。すなわち、構文論（syntax）は意味論に依存する（あるいは意味論から自動的に生み出される）ように見える（Pinker, 1987, 1989; Tucker & Hirsh-Pasek, 1993）。しかしながら、実質的には、認知に関する実証研究も理論研究も、認知はモジュール性をもつシステムから構成されるとし、そこには必然的に大人の視覚や大人の言語も含まれるのである。この研究はわれわれの発達に関する問いに対しては不適切である。最終状態の構造に関して可能な事柄を全て検討したからといって、実際にその状態にどのようにして達したかは明らかにならない。完全な成熟へ向けた解剖学的探索は発生学ではない。

第3の問題は、異なるモジュールがどのようにして互いに関連し合うのか、また、そうした関係はいつ始まるのかということである。統一した心を成立させるには、異なるモジュール同士の間で高度な相互交通がなければならない。たとえ認知モジュールが心を構成する独立の「器官」だったとしても、少なくとも全体として機能する一つの統一体へと互いを適合させる必要がある。たとえば、食べるために首を長くして適応したキリンは、特殊な心臓血管のサポートを必要とする。各身体部分がそれぞれの仕事を上手くこなすだけでは十分でなく、それらが互いに適合して機能しなければならない。互いに適合するためには、各部分の性質が他の部分の性質を制約することになる。そのためには異なるシステム同士が相互作用しながら発達しなければならないだろう。そして、認知と行動が瞬間ごとに整合性をもち、適応的であるためには、その都度、相互作用がなければならない。

ここでも進化論のアナロジーが有益である。すなわち、種の進化と異なるサブシステムの発達との間のアナロジーである。進化の時間におけるある一定の期間でみると、種の形態は安定

しているが、それは限られた期間の現象である。進化の時間における一定期間を超えれば変化が生じる。同様に、発達においても一定の期間をみると、安定した、見かけ上、「カプセル化された」モジュールが観察されるかもしれない。しかし、生涯にわたる時間において、一定の期間を超える時間の経過を見れば、モジュールの内的構造や、その存在自体も、全体の中で起こる相互作用によって起こる変化の結果であることがわかるであろう。一定の期間を超える進化の時間においては、ある種の振る舞いが他の種に影響を及ぼす。同様に、発達の時間においては、一つの心的モジュールの変化が必然的に他の心的モジュールの変化を伴う。ダイナミカルシステムにあっては、完全なカプセル化はあり得ない。

また、モジュールシステムに関するフォーダーの研究プログラムも受け入れられない。フォーダーによれば、モジュールシステムは高度に制約されているために研究可能であるとされる。逆に、様々なモジュールが相互作用し、コミュニケーションするような「一般的認知プロセス」は、制約されていない（どの部分がどの部分に対しても影響を及ぼすことができる）ために研究不可能であるとされる。しかし、後者の見方こそダイナミカルシステムの真骨頂である。正に、たくさんの異なる種類の力が複雑に相互作用することによって、秩序、不連続性、新しい形態が創発するのである。この見方からすれば、人間の認知発達を推進する力の源は、個々バラバラのモジュールにではなく、それらが互いに相互作用するところにある。

3. 認知発達に対する情報処理論的アプローチ

認知発達に対する情報処理論的アプローチは発達の变化を一般的な目的のためのメカニズム、知識獲得、それらの相互作用に帰属させる。モジュール理論とは対照的に、汎用的認知（心の一般問題解決の部分）に重点を置くのである。一般的メカニズムを前提とする考え方は、大人の認知理論と心は機械であるというメタファーを最優先する見方から引き出されたものである。研究対象は、符号化、検索、干渉、注意、機能統合、方略、規則などの過程から構成される。こうした要素は心への継時的測定法によって得られたものであり、入力と出力の間に生じる過程を記述したものである（例、Posner, 1980）。大人を対象とした文献でも発達を対象とした文献でも、ここでの研究方略は特定の実行パターンの原因となる要素を分離することである。発達研究について言えば、主たる研究上の問いは、どの要素がある課題において年少児よりも年長児の方がより良い成績を示すかということである。

この枠組みで研究を進めデータを取ると、この研究法そのものが行き詰まることになる。一般的目的に供する認知というフォーダーが述べていることに一致させるようにすると、その結果、ほとんど境目のない知識の源泉同士の相互作用が示唆される。簡単に言うと、あらゆるものが重要であり、あらゆるものが発達する。たとえば、ピアジェの感覚運動期の第4段階と診断された乳児がA-not-B課題で成功するのは、符号化、記憶検索、注意、空間方略、課題固有の知識、等々に依存することになる（Wellman, Cross, and Bartsch, 1986 参照）。推移律を

理解すること、振り子運動の原理を理解すること (Siegler, 1978), クラスの包含関係を理解すること (Trabasso, 1977), その他, これまで研究されてきた様々な種類の課題において, 年長児が年少児よりもはるかに優れた成績を収める現象には複雑な認知メカニズムが絡んでいる。どの認知能力も発達にともなって改善されることは明らかである。そして, 心の機構モデルのどの処理段階においても, 発達にともなって有能さが増すことも明らかである。したがって, 何が発達するのかという問いを, 符号化 vs. 検索, 注意 vs. 知識, のように, 処理段階を区切ってみるのは不適切であることが分かってきた。何が発達するかを二者択一的見方で問うことはできない。あらゆる要素, 処理段階がすべて発達するのである。したがって, どのような課題を遂行する上でも, 多くのメカニズムとそこに含まれるプロセスが刻一刻と寄与することになる。

さらに言えば, そうしたメカニズムやプロセスの精密な組み合わせは, 解くべき課題に密着し, また, 課題に取り組む個人の能力と深く結びついた様相を見せる。それらの何かが分かっているのだろうか。また, そうした知識がどのように構造化され, 互いに結びつくことによって, 符号化, 検索, 注意, 適用方略が決まるのだろうか。例えば, 10 歳児でチェスのエキスパートの子どもは, チェスの課題についてならば, チェスの素人の大人や, 馴染みのない課題に取り組む同年齢の子どもよりも情報処理の色々な段階で「より習熟」した技能を示すであろう (Chi, 1978; Chi and Koeske, 1983)。どの課題一つとっても, 成績は多様に決定され, 決定因は課題に特有であるように見える。こうした事実の結果として, 認知発達の文献における情報処理モデルは数多くのプロセスとメカニズムを含んだうえで, 数多くの発達的变化に関する提案を行うことになる。ここでのモデルにおいて想定されているプロセスとメカニズムは, 彼らが説明しようとしている実験パラダイムと密接に結びついている。文献はこのように, 一見, 無関係なモデルによって満たされている。類推 (アナロジー) のモデル (Gentner, 1989) は素朴物理学のモデル (Siegler, 1978) とメカニズムの重なりはないが, 同様に, 知覚的分類のモデル (e. g., Smith, 1989) とも重ならない。

情報処理アプローチにおいて互いに別々に研究されモデル化される課題領域は, 「生得－理性」主義者の基礎となるモジュール (例, 文法) のようなものではない。課題領域は単なる実験の枠組みに過ぎない。われわれはこのような課題固有のモデルが生得的にあるいは経験的にもまちがっていると主張しているのではない。彼らの課題分析の極詳細な部分が, 本来の理論化のための有用な糧となると考えているのである。それにしても, そうした課題固有のモデルというものは, 経験的な事実のリストと同様, 理論的に不十分である。発達と認知に関するもっと包括的な真理には, 様々な課題を超えた抽象化と相互結合が必須である。

認知発達は次の 2 つの主要な問いとして概念化することができる。(1) 何が発達するのか? (2) どのように発達するのか? 情報処理アプローチは何が発達するのかという問いに集中してきた。われわれはその答えの細部については豊富な知識を見出したが, 大きな全体像を照らし出すことには失敗した。もっと問題なのは, 情報処理アプローチが発達のメカニズムに対して

まったく無関心だということである (Siegler, 1989 を参照のこと)。どのようにすればこのような未熟なフローチャートから成熟したフローチャートへと転換できるのか。発達を推し進めるものは何か？ 頭の中に新しいダイアログボックスを描いたり、新しいルールを書いたりする認知の理論家がいるわけではない。

4. 複雑系と情報処理を繋ぐアプローチ—コネクショニズム

生得—理性主義者のアプローチと人間の情報処理アプローチは、ともに認知を構造化された象徴的表象の操作と見る。そしてどちらも認知的世界を二つの部分に分割可能であるとする。一つは永続的な構造であり、もう一つはそうした構造において働くプロセスである。認知構造はシンボルとそれらの結合から構成される。認知の実体は表象であり、ルールであり、概念である。プロセスとは記憶、注意、活性化の拡散 (伝播) のようなメカニズムであり、理論によっては、構造に影響を及ぼすようなメカニズムの組み合わせと分析も対象となる。認知発達における理論の行き詰まりは多くの場合、この構造—プロセスの区別から直接的にもたらされたものである (Smith & Thelen, 1993)。この構造—プロセスの区別は、発達の小国分割主義 (バルカン半島化) から領域固有の能力とモジュールという見方を推進し、その結果、理性—生得主義者による発達の否定と情報処理主義者による課題に依存したモデル (領域固有性モデル) が導かれることになる。この理論の危険性は、データが連続性と不連続性の両方を示し、大局的な構造と局所的な変異の両方を示しているにもかかわらず、不変の知識構造が一方向的に認知を方向づけるという考え方を維持しようとするところから来る。

ここ 20 年にわたって、コネクショニスト・モデルという比較的新しいアプローチが注目されるようになってきた。従来の認知モデルと違って構造とプロセスの区別があいまいである。コネクショニスト・モデルは「脳のような」あるいは、「神経」ネットワークのようなモデル化として特徴づけられる。というのは、コネクショニスト・ネットワークは脳のように多くのユニットから成り立っているからである。各ユニットは、神経ニューロンのように、発火しているか、していないかの二値しか取らず、しかもニューロン同様、このネットワーク内の個々のユニットには予め意味が備わっているわけではない。つまり、個々のユニットは何も表象していないし、また、何も意味していない。知識や意味はユニットの活動パターン間にまたがって分散しているのである。また、コネクショニスト・モデルは脳と同様に可塑性がある。すなわち、環境との相互作用に反応する形でユニット間の結合 (コネクション) の強度を変えることによって自分自身を変化させる。こうした理論化の方向は、発達モデルとして可能性に満ちたものでありながら、これまでほとんど探究されてこなかったものであり、その意味で完全に新しいものであると言える。そうしたアプローチが 20 年前くらいから、現実の発達現象に本格的に適用され始めた (Gasser and Smith, 1991; Rumelhart and McClelland, 1986; L. B. Smith, 1993b)。コネクショニスト・モデルは、存在するのはプロセスのみという複雑系の理論と前提を共有し

ている。

コネクショニズムは、複雑系の理論が推奨するダイナミカルシステムと次の三つの点において共通の土台をもつ。

第一に、行動の構造を説明するのに脳内にその構造を表す表象を持ち出さないこと（非表象主義）。それは、あらかじめルールを設定することなく、あたかもルールが初めからあったかのように行動することを保証するシステムである。すなわち、デザインなしで、全体の秩序が立ち上がることを意味する。コネクショニスト・モデルとダイナミカルシステム理論は、両方とも知識を恒久的なルールや概念的構造とは見なさず、リアルタイムに組み立てられるものだと考えるのである。したがって、その構成単位（ユニット）は結果として生じる知識とは似ても似つかず、また、そうした知識を含んでもいないのである。

第二に、コネクショニズムもダイナミカルシステム理論もともに知識を固定したものと考えず、時間とともに生じる活動のパターンと見るのである。これは発達を考える上で強力なアイディアとなる。知識をそのような特性をもつものとするならば、何かを付け加えたり、差し引いたり、結合させたり、分離したりすることで知識は変化することになる。このような存在論においては、まったく新しい知識というものはありえないことになる。知識を特性ではなく、プロセスだと考えるならば、変化の説明に関する疑問の余地は小さくなる。プロセスは、ある時点においては安定した均衡状態にあってモノのように見えるからである。実際のプロセスはダイナミカルであり、一時的なものに過ぎず、また、変化し得るものなのである。

第三に、精神生活をプロセス、コネクショニズム、そして、ダイナミカルシステム理論と見ることにより、行動とその連続性と非連続性の同時的（時間的）あるいは全体的（空間的）な秩序の問題に対する潜在的解決方法を提示すること。この解決法は古典物理学と量子論との関係を彷彿とさせる（Smolensky, 1986）。量子力学のマイクロレベルの活動から、マクロレベルの古典物理学的現象が立ち上がる。古典物理学が量子力学に還元されるわけではない。量子力学は、マクロレベルの物体の振る舞いを説明しない。しかし、物体の変化と遷移を説明する。すなわち、量子の力動性と相互作用が物体のマクロレベルの変化がどのように起こるかを説明するのである。物体は言うまでもなく実在的である。なぜなら、物体はその要素間のプロセスによって構成されているからである。しかし、説明力はプロセス、すなわち上からの見方と下からの見方の力動性にある。つまり、それはマイクロレベルとマクロレベルが共同することの重要性を意味する。

5. 新しいシステム論としてのコネクショニズム

コネクショニズムは、一見、似てはいるが伝統的な還元主義とはまったく異なる。1975年出版の著書『思考の言語』において、フォーダーは、あるレベルの現象を、より低いレベルを参照することで説明しようとする試みを批判的に論じた。なぜなら、それが「満足のいく」還元

にはなっていないからだった。それよりむしろ、フォーダーはレベル間の還元、すなわち、認知と生物学のように一見無意味に思えるものの間の還元について論じた。それはたとえば、心の概念と脳の概念との間の非システムの関係のようなものである。ここで再び、われわれは現代理論の土台に隠された二元論を見出すに至る。

コネクショニズムは確かに有望であり、かつまた、ダイナミカルシステム理論と親密な関係をもつ点において正統なアプローチであると言える。したがって、ダイナミカルシステムを説明するコネクショニスト・モデルの具体例は枚挙に暇がないほど数多く存在する（たとえば、Jordan (1990), Hanson (1990), などがあるが残念ながら発達のダイナミックスを扱っている例はない）。コネクショニスト・モデルはダイナミカルシステムが実現された場合に考えられる一つの形式化のタイプである。しかし、発達の理論としてのコネクショニスト・モデルは今までのところすべて失敗に終わっている。なぜなら、それらのモデルは、第一に、前提となる脳の構造と生物学のプロセスをきちんと捉えることに失敗している、第二に、発達課題の複雑さをきちんと捉えることに失敗している、そして、第三に、発達データを正確に取ることに失敗しているからである。そうしたモデルは原理的に間違っているわけではない。むしろ、実行に移す際の構成力の不足だと考えられる。つまり、コネクショニズム自身の発想に根差すもっとも根本的な含意から後退しているように感じられることこそが問題なのである。

それでは、コネクショニズムを含むダイナミカルシステムはどのような性質をもっていると考えられるのだろうか。それは、多数の要素が非線形的な仕方で自由に結合し合う開放システムであり、伝統的なシステム論に比べて多くの新しい性質を持つことが知られている。このシステムに十分なエネルギーが与えられると、それまではっきりとは現れていなかった新しい秩序構造が、自発的に姿を現すのである。分子の集合あるいは何らか特定の（あるいは何らかの特権的な）関係を持たない個々の要素の集まりでしかなかったものが、突然、空間的なパターンと時間的な規則性を帯び始めるのである。そのシステムは、あるパターンから別パターンに移行し、周期を刻みながら摂動に抗し、やがて精緻な構造を生成するといったように、きわめて複雑な、しかし秩序ある仕方で振る舞うのである。こうして創発した組織は、システムを構成している要素とは全く異なる性質を持っており、その動作パターンは、単に個々の要素の特徴から予測できるようなものではないのである。

たとえば、レーザーは桿状のレーザー活性物質（光を放射する原子を持つ物質）から成っている。桿状の装置の両端で向かい合う2枚の鏡によって、レーザー光が放射される方向が選択的に決定される。レーザーの原子は、その外部、おそらくは他の光源によって活性化される。レーザーの最も興味深い特徴は、以下のような点である。レーザーの原子がごく弱くしか活性化されていない場合、各原子は、一般的な光源のように乱雑位相で個々の光波を放射するのみである。例えば、放電灯の光照射野は、まさに「スパゲッティ」のように見える。ところが、その原子が次第に活性化してくると、突然、完全に異種の光が放射される。それは、ほぼ際限なく続く正弦波である。その放射光の構造的な変化は、通常の光源の場合、個々の原子の電子

がそれぞれ独立して変化を起こすのに対して、レーザーの場合、各電子が協同して変化を起こすのである。こうしたプロセスを自己組織化に関連づけるとすれば、次のようになる。数名の人が水路の中に立っている。各人は水のなかに入れることのできる棒を持っている。この人々を個々の原子だとすれば、水は光照射野の状態を表すことになる。通常の光源に相当する状況は、各自が持っている棒を好き勝手に水の中に入れていている場合である。その結果、水面には全く規則性のない動きが生じることになる。一方、彼らがその棒を相互に協同して水の中に押し込み、かつそれを完全に規則正しく（つまり秩序立った仕方で行ったとしたら、彼らの行動は、レーザーの原子の活動に類似したものとなる。外部にいるリーダーが命令を下せば、そうした協同的な活動を惹き起こすのは簡単である。ところがレーザーには、リーダーに相当する人は存在しない。したがって、レーザーの原子にみられる規則性のある協同的なふるまいは、“自己組織化”の作用なのである。（Haken, 1987）

レーザーシステムでは、そのシステムを平衡状態から遠ざけていくような何らかの外部条件の変化（例えば光源の出力や化学物質の濃度の上昇など）が、システムの巨視的状态を急激に変える。変化が起こる前は各要素がそれぞれに独立して活動していたのに、変化が起こった後は個々の要素の配置あるいはそれらの集合的な活動が、システムの動作を支配・管理しているかのように増大するのである。ハーケン（1987）は、このような支配的な様態を“秩序パラメータ”と呼んだ。それは、そのシステムにおける他のあらゆる様態を“従属させる”ことができる。つまりそのシステムは、もはや個々の要素によってではなく、一つないしいくつかの秩序パラメータ、あるいは集合変数から説明されることになるのである。秩序パラメータは、構成要素の自由度を制約、圧縮するように作用しているである。

6. ダイナミカルシステム理論と「発達」

自然界に存在するシステムにおける自己組織化は、システムが複雑であり、かつ環境を含むエネルギーの流動に対して開放系である場合にのみ起こりうる。複雑で不均一でしょっちゅう変化が起こるシステムでは、潜在的動作の多様性および相互作用の数は膨大なものになる。これらのシステムは、安定ばかりでなく不安定な局所性をもった点を抱える。そうした点においては、隣接する要素が引きつけられ、時間経過とともに熱力学的平衡から大きく遠ざかっていくにつれて、それらの局所的な非対称性が増幅され、そこからやがて秩序パラメータとして作用する状態が立ち現れてくる。対称性があり、かつ安定したシステムでは、このような新しい形態を生み出す契機は見られない。自己組織化のプロセスにおいて、システムは、多数の変化可能な状態のなかからある一つの形態を選択する、あるいは（その選択する形態に）引きつけられていく。システムの動作に現れる多様性は、「混沌から秩序が生じる」前兆として重要な意味をもつのである。

これらの例で見られたパターンは、システムを構成する要素とシステムにかかる制約、エネ

ルギーの状態との相互作用から生じるものである。初期条件が決まると、一つの状態から、容易に別の状態へと変化していくのである。少し前には個々別々だった要素同士が繋がり、協同する。自己組織化は決して神秘的な現象ではない。むしろそれは、われわれの物理的および生物学的世界のほぼ全てに内在する非線形性ゆえに起こる日常的な事象なのである。

システムが、ある秩序パラメータの影響のもとで自己組織化するとき、その動作は、システムがあらゆる可能なモードから選択した一つないしいくつかのモード（それら自体は非常に複雑なものである）に落ち着いてゆく。ダイナミカルシステムの用語でいえば、こうした動作のモードは、“アトラクター”と呼ばれ、システムが、ある条件下でそのような状態に引き寄せられていくことをいう。もう一つダイナミカルシステムの用語から説明しておくと、システムはその“状態空間”において、ある位置を選択するようになるということである。

ダイナミカルシステムの状態空間とは、空間に関する抽象的な構成概念であり、その空間の座標がシステムの要素を規定するというものである。例えば振り子のような単純な機械的システムの動作は、位置と速度の座標をもつ2次元の状態空間において完全に記述することができる。その振り子が前後に揺れるとき、その運動は平面上にプロットすることができる。摩擦を想定しない理想状態の振り子の動きは、その位置と速度の規則的な変化を記録した軌道ないし経路を状態空間において表現できる。その振り子に摩擦を加えれば、やがて振動は静止に向かい、その軌道は渦巻状になることが知られている。

摩擦のない振り子の周期的軌道と摩擦が加わった振り子の静止点が、このシステムの“アトラクター”となる。その振り子にわずかな摂動を加えると、やがて周期的な動作を回復するか、あるいは静止点に戻っていくことになる。一旦、このようなエネルギーの流れが生じると、時空間的なパターンは、状態空間のなかで生成可能なすべての軌道を取り込み、その振り子のシステムが安定する秩序パラメータを復元するようになる。

ダイナミカルシステムを分類する方法は様々であるが、時間軸上で示す振る舞いによって、どのようなアトラクターをとるかを基準として区別するのが有効な分類法の一つである。この見方によると、一般に「不動点」「リミットサイクル」「カオス」の3種類のアトラクターによって区別することができる。不動点とは、初期値をどこから開始しても遅かれ早かれその位置で静止状態になる振り子の停止位置のような点であることから、大域的アトラクターとも呼ばれる。ある時点における振る舞いが、それ以前の状態に依存しているようなシステムとしてもっとも簡単な振り子の運動を例にとってみる。振り子は、ちょうど垂直になる一瞬しか目撃できないとすれば、それが静止しているのか、あるいは揺れ動いている途中の一瞬を見たのか区別ができない。その前後の瞬間を見ることにより初めて、振り子が静止していたのか、運動の途中であったのが明らかになる。この振り子の位置の変化は、振り子の長さ(L)、糸が垂直からずれている時の角度(θ)、速度(p)、摩擦係数(r)を用いた次のような方程式で表すことができる。

$$\frac{dp}{dt} = \frac{-g \sin \theta}{L} - r p$$

$$\frac{d\theta}{dt} = p$$

この振り子の運動は、摩擦により最終的には停止する。静止状態へ収束した地点を不動点、あるいは運動がその位置に引き寄せられるところから、アトラクターとも呼ばれる。

アトラクターのいくつかの特徴は、発達の構成概念として重要である。まず複雑なダイナミカルシステムは、内部の構成要素と外的条件に対する感度との相互作用を関数として、選択する動作のモードに向かっていく。アトラクター状態とは、システムがその秩序パラメータに従って集合することによってのみ決定されるのである。アトラクターの性質や軌道を構成する何らかのコードや命令、あるいはスキーマやプログラムなどは一切存在しない。われわれがこれから示すように、条件が変われば、構成要素はいくらでも別の安定した動作のモードに集合していくのである。このように、多要素システムにおける“柔らかに集合する”性質こそが、生物学的システムの途方もない柔軟性を生むのであり、発達に関するいくつかの最も厄介なパズルを解き明かしてくれるのである。

またアトラクターは、多様な範囲におよぶ安定性と不安定性を含んでいる可能性がある。アトラクターを、ポテンシャル谷のなかのボールとして図解することは一般的に知られている。ポテンシャルの“山”の頂点にあるボールは、多くのポテンシャル・エネルギーを蓄積しており、ほんのわずかに押されただけでも、その山を転げ落ちていくだろう。一方、ポテンシャル谷の深い底にあるボールは、ほとんどポテンシャル・エネルギーをもっておらず、その位置を変化させるためには大きなエネルギーの増大が必要となる。後者の場合は、非常に安定性の高いアトラクターということになる。これに対して、前者の場合はリペラーと呼ばれ、そのシステムは山の上に留まろうとはしない。谷のやや浅いくぼみに入っているボールは、適度に安定しているが、十分なエネルギーの増大があれば、それに反応して隣のくぼみに移動するだろう。

いくつかのアトラクター状態のなかには、ほとんど観察ができないほどに安定性を欠いているものもあるが、それら以外のアトラクター状態は、必然的であるかのように非常に安定している。そうした動作状態は、ある環境下では確実に現れるので、それらがシステム内に“強固に組み込まれた構造”ないし“プログラム”から生成されていると信じてしまうのも無理からぬことである。もし振り子の仕組みがそれほど単純明快なものではなかったとしたら、われわれはどこかに何らかの時計仕掛が隠されているのではないかと安易に考えてしまうのではないだろうか。非常に安定したアトラクターというのは、選択する位置から運動するために、かなり大きな圧力でも取り込んでしまうのだが、それにもかかわらず、ダイナミックで変化しやすいものである。ここでわれわれが主張するのは、行為や認知そして発達における数多くの形態が、あたかも永続的なプログラムないし構造のように見えるとしても、それらは安定したアトラクターであるということ、しかしその安定性は限定的なもので、適切な環境下では確か

に変化しようということなのである。つまり、多くの心的な構成概念（例えば『対象物の永続性』）や運動の形態（例えば『歩行』）というのはアトラクターであり、その強度と安定性により、よほど激しい摂動が加えられない限りは崩壊しないのである。それらはまるでワイヤーで堅く固定されているかのように見える。他にも、例えば推移的推論や錯視、そして様々なスポーツの技能などの能力も、それぞれにアトラクターを持っているが、その安定性は文脈の操作や練習不足、あるいは注意の欠如などによって容易にかき乱されてしまうのである。

さらに複雑系には、2つないしそれ以上のアトラクターが異なる引き込みの深さを共有しながら存在している場合がある。このような場合には、同一のシステムが複数の安定性の高いモードを持ち、それらが状態空間のなかで離散的に存在しているのかもしれない。次章では、行動に関する概念をさらに精査し、安定性を変動させる低次元のアトラクターとして描き出す。そしてまた、選択されたアトラクター状態が時間発展し、連続的に安定化と不安定化を繰り返すものとして「発達」という現象を特徴づけていく。

7. ダイナミカルシステムとしての「成熟」現象

ダイナミカルシステムとは非線形散逸複雑系（単に複雑系と呼ばれることが多い）の別名である。したがって、ダイナミカルシステムズアプローチとは、システムを開放系として、その要素を非線形の相互作用をするものとみる見方であり、ある時刻における振る舞いが、それ以前の状態に何らかの形で依存しているとする見方のことである。ダイナミカルシステムには一般に多くの独立した要素が存在し、それらの間に生じる複雑な相互作用を通して自発的な自己組織化が起こるという特性がみられる。そうした局所的な非線形相互作用だけによってマクロな秩序が立ち上がる（相転移が起こる）メカニズムはプリゴジンの散逸構造理論やハーケンのシナージェティクス理論によって、“ゆらぎ”の増幅による秩序形成、あるいは“ゆらぎ”を契機として要素同士が協力的に作用し合うことによる、巨視的パターンの形成として説明される。

自己組織化の過程は、物理学や化学では、秒・分あるいは長くても数時間の単位で起こる現象であるが、同様の過程がヒトの個体発生においても数時間、数日、数ヶ月、数年という時間単位で起きていると考えられる。認知科学においてダイナミカルシステムズアプローチをとる代表的研究者テーレンとフィッシャー（Thelen & Fisher, 1982）は、乳児のキック（足蹴り）の運動パターンを調べた結果、生後1～2ヶ月の間見られるよく協応したりズミカルなパターンが、循環系、神経系、筋系の構成要素が、特定の重力の場の中で相互作用的に働くことによって起こることを見出した。従来の発達心理学であれば、そうした運動パターンを制御する中枢の機構が仮定されるところであるが、テーレンとフィッシャー（1982）は、その運動に関与する部位（上腿、下腿、足首）の筋電位のパターンを運動パターンと比較したところ、屈曲時には屈曲筋と伸展筋が両方とも収縮している（しかし、屈曲筋の収縮の方が強い）のに対して、伸展時にはどちらの筋も収縮していないことから、そうした中枢機構の制御の可能性を否定し

た。つまり、両脚が周期的に屈伸するのは、「屈曲」「伸展」という中枢からの指令によるのではなく、脚がバネのような性質をもち、重力の力を借りて屈曲した際に、脚の筋や腱に弾性位置エネルギーが蓄えられ、その反動によって伸展するためであると考えたのである。テーレンやスミスは、このようなキックの軌道、運動のリズミカルな周期、内的制約による運動の位相転換をダイナミカルな自己組織化と見ることができるとし、そこに出現した時間－空間的なパラメータは神経、筋、骨格系が一定の場面・エネルギーの制約の中で相互作用した結果であると考えた。

自己組織化され、安定した周期的なキックが形成された状態をアトラクターと呼ぶ。ダイナミカルシステムズアプローチでは個体発達をこうしたアトラクターの生成と消失としてみることで、多くの新たな事実の発見にいたっている。例えば、生後すぐに安定したパターン（アトラクター）として見られるステッピングは、2ヶ月後、立位の時に限り消失する。ステッピングもキック同様、複雑な相互作用の結果、自己組織化されたアトラクターであるとするれば、これを反射回路の脳皮質による抑制としてきた従来の説明は誤りである。何故なら、仰臥位（体重が脚にかからない）ではキッキングは消失しないし、立位であっても下半身を水中に入れる（浮力によって体重が軽減される）とやはりステッピングが起こるからである。その原因を探る中で、テーレンとフィッシャー（Thelen & Fisher）は生後2ヶ月の体重の急激な増加とステッピングの消失とが劇的に交代することを発見した。つまり、脂肪の堆積による体重の増加が、筋肉の発育よりも早く起こるために、それが、ステッピングという安定したアトラクターから、不安定なアトラクターへの転換を促したと考えられる。これらのことは、ステップシステムの創発がダイナミックに組み立てられていること、そのためには、年長児や大人のステップシステムのアトラクターが歩行の訓練と筋力の強度によって深く安定している（体重の増減によって変化しない）のに対して、乳児のそれは、不安定で浅いアトラクターであることを示していると考えられる。

テーレンらは、ピアジェ（Piaget）が対象の永続性の獲得の過程で起こるとした「A not B」エラーと呼ばれる乳児に一般的にみられる誤りについても、単に「対象の永続性」概念ができたか否かという抽象的なレベルではなく、「見ること」「つかむこと」「運動のプラン」「記憶すること」などの相互作用のダイナミックスにより生成される運動計画の場によって説明するモデルを提案している。さらに、よりマクロな発達モデルをダイナミカルシステムの観点から構築する試みがヴァン・ギーアト（van Geert）によってなされている。これまで説明が困難とされてきたピアジェの発達段階の移行メカニズムについて、ヴァン・ギーアトは、認知システムの内部状態をさまざまな能力の変数からなる多次元空間とみなすことにより、発達の過程をこの多次元空間内の軌跡として表すモデルを提示した。ある時点における発達の状態は、縮約された一次元配列上の位置として同定できるとされる。発達レベルを表す一元配列上に配置されたセルの活性化が自動的にセルの移行、すなわち発達レベルの変化を引き起こすメカニズムとなる。やや抽象度は高くなるが、こうしたシミュレーションの手法を用いれば、外部入力を経

み付けすることによってヴィゴツキー (Vygotsky) の発達最近接領域説のモデル化も同様に可能となる。こうしたモデルは、マクロレベルでは一定の成功を収めているが、今後、モデルに含まれるパラメータを生活体内部や環境に対応させ、それらの相互作用によって発達現象の創発が説明されるような実体的モデルが必要となるであろう。

8. ダイナミカルシステム論による「発達段階」移行のメカニズム

カミロフ・スミス (Karmiloff-Smith, 1992) はピアジェのもとで長年研究を続けながら、その基本的な理論構成において批判の眼を失わなかった研究者である。彼女がピアジェ理論を継承しつつ提案した発達モデルは自己言及的メカニズムをその基本に据えるもので、表象書換えモデル (Representational Re-description model; RR モデルと略す) と呼ばれる。

カミロフ・スミス (Karmiloff-Smith, 1992 [1997]) は、乳児は生まれつき豊かな能力を持っているが、それは手続き的知識として行為に埋め込まれたもので、柔軟性を欠いたものにすぎず、そのままではごく限られた目的にしか使えないという。人間が高度の思考能力を有するようになったのは、他の動物と共通の手続き的知識を書き換えて、より抽象的で自省的な知識に変換 (表象書換え) したからだという。このプロセスは自己言及的で自省的な過程であり、まさに自己組織化パラダイムが適用可能なプロセスとして見ることができる (Elman, et. al., 1996 1998]; Gershkoff-stowe & Thelen, 2004)

さらにカミロフ・スミス (1992) は神経心理学的モデルに端を発する並列分散処理モデル (PDP モデルあるいはニューラル・ネットワークモデル) との関わりについても考察し、コネクショニスト・モデルが発生的認識論や構成主義の精神にもっとも近いものととらえる。ここで重要なのは、このモデルが、構造やメカニズムの質的变化を制御する特別なメカニズムを必要とせず、学習の量的増大のみによって行動のマクロな段階的变化を生じさせるということである。(McClelland, 1989)。これまでの人工知能プログラムのようにあらかじめ特殊化された独立的で継時的なステップに代わって、コネクショニスト・ネットワークは、各要素が入力に対して非線形の反応をする大規模な並列力動的なシステムで構成されている。マックレランド (1989) は、ネットワークが段階的な移行を示すのは、学習のアルゴリズムや構造そのものに質的な変化が起こるためではなく、表に現れないゆっくりとした量的な学習がやがて大きな変化として出力されるレベルに達することによるとする。言い換えれば、ぼう大な数の単純で局所的な相互作用が、複雑で大局的な効果をもたらすということである。

RR モデルは発達を3つの再帰的な相をもつものとする。これらの相を考える上で、行為水準と表象水準を分けてみるのが便利である。それによって非線形の発達の变化であるU字型曲線を説明しやすくなるからである。

第1の相は、外的な環境からの情報に注意を焦点化するもので、データ駆動型であり、カプセル化されていて、最終的には一貫してうまく行為を遂行できる状態に達する相である。この

後、子どもは外的なデータに注意を向ける必要がなくなり、内的に駆動される相が続いて生じる。これが第2の相で、入力データよりも内的な状態の方が優勢となり、一時的に外的な諸要因を無視することによる硬直した反応が新たなエラーを惹き起こすことから、前の相においてよりも行為の成功率が低くなり、U字型の発達曲線が描かれる原因となる。それは必ずしも表象レベルの低下を意味するものではなく、行動のレベルにおける低下に過ぎないのである。第3の相においては、内的表象と外的データが結びつき、ようやく内的表象の検索と外的手段の間の均衡が保たれるようになる。この時点における「行動の完全習得」は、表面上、第1の相の行為遂行水準と同じに見えても、表象の水準は高くなっている。

上記の事柄を、RRモデルの説明例としてよく知られたバランススケール課題(図8-1)について説明しよう。この課題は、さまざまな長方形の積木を台の上に釣り合うようにのせるという単純なものであるが、一部の積木の中に錘を仕込むことによって、通常対称性に基づく解決ができないようにしてあるところがポイントである。年少児(4・5歳児)は、外的な手がかりのみによってこの課題に取り組むために、試行数を重ねれば、正答率を高めることができる。また、年長児(8・9歳児)も、積木のバランスは、必ずしも対称性のみに依存するものではなく、積木の重心によるものであることを理解しているので、高い正答率を得ることができる。他方、年中児(6・7歳児)は対称性という内的な表象に強く依存し、外的な手がかりである積木そのものの重さの分布を無視するために、課題解決に失敗するケースが多くなる。つまり、この課題解決に関してU字型の曲線が得られるのである(図2)。

これを内的な表象のフォーマットについてみると、まず、ある積木でバランスを学習したとしても、それを他の積木に般化する能力が限られているために、積木課題を一般的に解決できない状態のとき、暗黙的水準(Implicit Phase)にあるという。次に子どもは規則を手続き的な知識のフォーマットとして完全にマスターするが意識的に接近できない、明示的水準1(Explicit-1)に達する。さらにそれを書き換えて明示的水準2, 3(Explicit-2, 3)、すなわち意識的に接近できる柔軟な表象へと変化する。E-2とE-3の違いは、意識化のみか、言語化まで可能かという点である。

ここで問題になるのは、どのようなメカニズムによって質的に異なる知識が生成され、どのようにしてある段階から次の段階に移行できるのかということである。この問題を、数学課題を用いて具体化した例が次に述べる時間的パリティ課題のシミュレーションである(Elman, et. al., 1996 [1998])。物理法則がある対称性をもっていると、それに対応する保存量の一つ導くことができる。素粒子の崩壊を含まない現象は空間反転に対する対称性を持ち、パリティ(偶奇性)とは、それに対する保存量のことである。ある現象に対する方程式が解をもつならば、その解を空間反転したものも元の方程式の解となる。したがって、元の解と反転後の解との和も差も元の方程式の解となる。和はそのまま、差は空間反転によって符号が逆転する解となる。前者を偶状態、後者を奇状態といい、こうした偶・奇の状態の性質をパリティ(偶奇性)と呼ぶ。

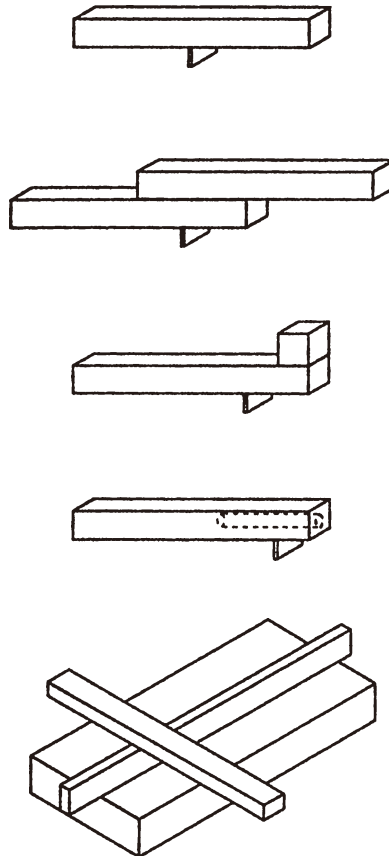


図1 バランス課題に用いられる積み木

この課題は、1と0からなる系列中、1の数が奇数か偶数かを決定する問題である。ネットワークに5つの数字を継続的に与え、各数字の後に、その時点での結果が奇数なら1を、偶数なら0を出力する、というルールを実行することにする。例えば、「10110」という入力があった場合、正しい出力は「11011」、つまり、「奇数、奇数、偶数、奇数、奇数」となる。この課題は時間系列を含んでいるので単純な再帰型ネットワーク構造を用いる（図3）。

ネットワークを2から5の長さの系列で訓練し、各系列提示後、ネットワークの文脈ユニットを0.5にリセットして次の系列を入力する。ネットワークを訓練した後の能力を評価するために、1を100回繰り返して与える系列を提示した結果を図4に示す。ネットワークが完全に般化を完成させると1010…、つまり「奇数、偶数、奇数、偶数…」の繰り返し系列となる。図4①は15,000系列の訓練後のテスト結果を示している。ネットワークは続けて4個の入力には正しく答えられる。しかし、それ以上になると、正しい出力が得られない。さらに訓練を続けて17,999回になるとネットワークは13個の入力に正しく答えられるようになる（図4②）。ここでは、2～5個という訓練の系列を超えて般化できるようになった（カミロフスミスの暗黙的水準）。

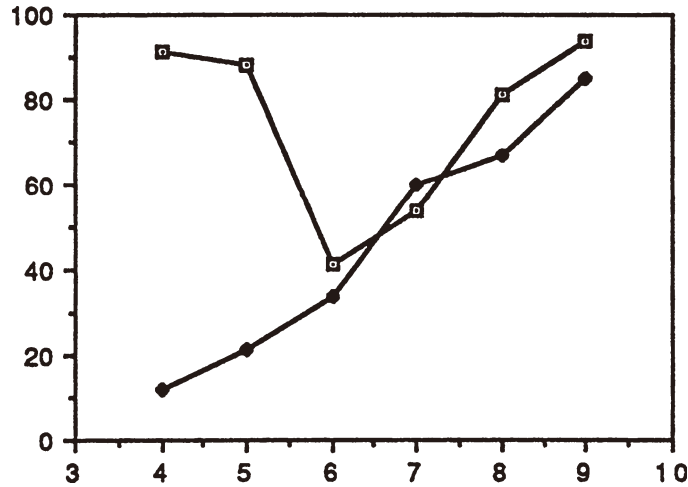


図2 行動レベルの変化 (◆)と表象レベルの変化 (◻)
(Karmiloff-Smith (1996) より引用)

ところが、次の1回の訓練、すなわち18,000回になるとネットワークは劇的に変化して、奇数、偶数の区別を長さにかかわらずできるようになる(図4③)。ただ、系列が長くなると出力が弱くなるので、ネットワークは答えに確信がないようにも見える。これは、カミロフスミスのE-1段階に相当すると考えられる。たった1試行増えるだけで、ネットワークが完全に奇数・偶数の区別をつけられるようになる点が興味深いところである。また、これ以後、回数をどれだけ増やしても、確信度が高まる(図4④)ことはあってもネットワークのふるまいそのものには何の変化も見られない。

こうした一見不連続な劇的变化を、内的な成熟のような不連続な要因ではなく、あくまで同じ学習手続きの連続的な適用のみで説明するモデルとしてダイナミカルシステム論が有力な道具立てを提供するのである。

9. 結語——変化を常態とするシステム論の未来

近代の自然科学が前提としてきた、自然を巨大な保存系かつ決定論的系であるとする見方に対して、非線形性と散逸(開放)性を有する複雑系であるとする考え方が20世紀半ばあたりから注目されるようになり、それまで科学で扱うのが困難とされた諸問題の解決に有効であると認められるようになってきた。ダイナミカルシステムとはこの非線形散逸複雑系(単に複雑系と呼ばれることが多い)の別名である。したがって、ダイナミカルシステムズアプローチとは、システムを開放系として、その要素を非線形の相互作用をするものとみる見方であり、ある時刻における振る舞いが、それ以前の状態に何らかの形で依存しているとする見方のことである。天体力学がすべて計算可能な天体運動の系であるならば、過去に遡ることも、未来を完

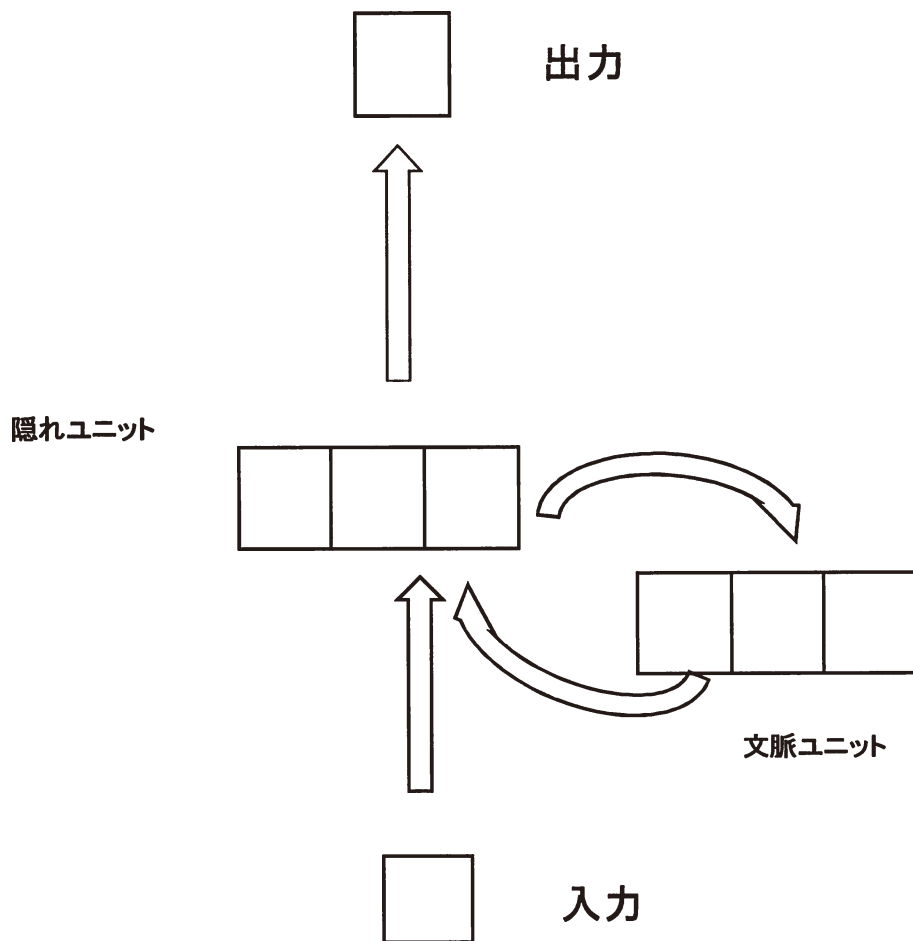


図3 「奇数/偶数」課題を学習するとき 사용되는単純な再帰型ネットワーク構造

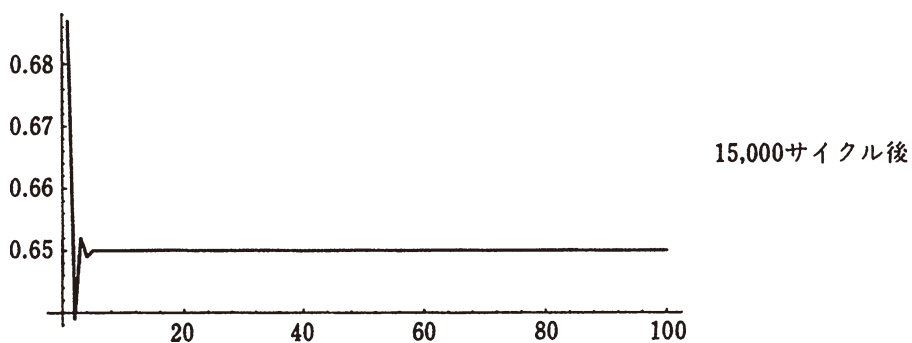


図4-① 15,000 系列後のテスト結果

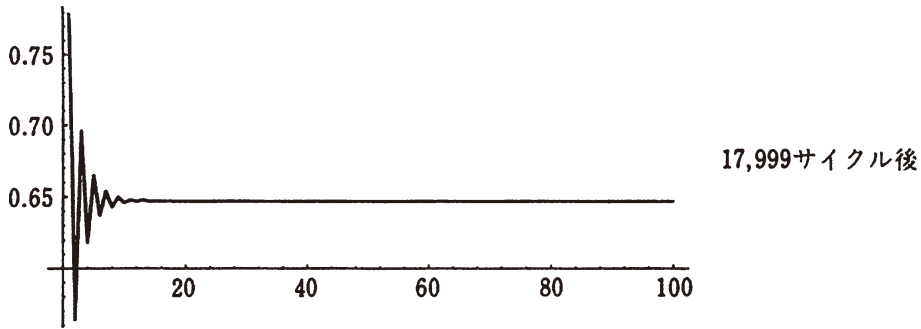


図4-② 17,999 回訓練後の結果

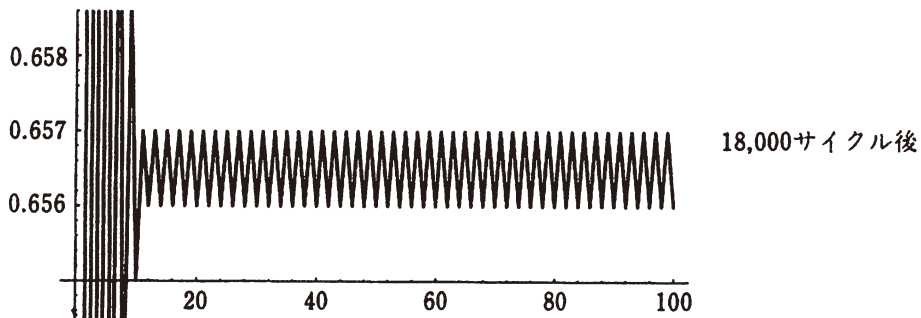


図4-③ 18,000 回訓練後の劇的变化

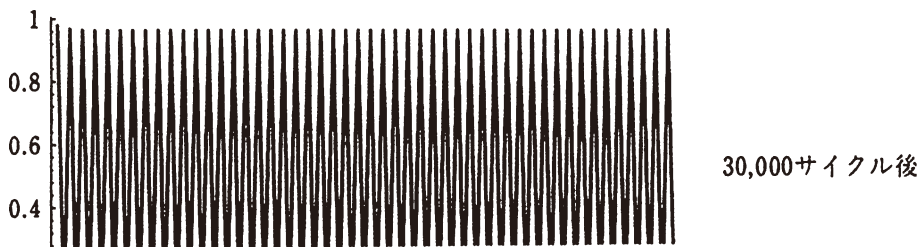


図4-④ 30,000 サイクル後の結果

全に予測することもできるはずであるが、それらの因果的相互作用が互いに影響し合った結果はカオス的な軌跡を描くこと（動力学系の不可積分性）がポアンカレ（Poincaré）によって初めて明らかにされた。その後、いわゆる KAM 定理が証明され、位相空間の軌跡は、完全に規則正しいものでも不規則なものでもなく、選択された初期の条件に敏感に依存すること、すなわち、わずかな“ゆらぎ”がカオス的な発展を引き起こすこと（バタフライ効果）が認められるようになった。

不可逆的な過程をエントロピーの増大過程とみて、それが分子的無秩序増大の表れであり、初期の非対称性を次第に忘却することの表現であると考えたのはボルツマン（Boltzmann）であった。彼は、不可逆的な熱力学的変化を、確率を増加させる方向の変化として、最大確率に

対応する巨視的状态をアトラクター状态と考えた。いったん、この状态に到達すれば、系はこの状态、すなわちアトラクター状态のまわりを“ゆらぎ”だけで、そこから近い距離を短時間だけしか離れることができないとされた。これによって、初期の状态がその後の運動の履歴として維持されるニュートン力学とは違って、それらが忘却されることを含んだ理論化が可能になったのである。

しかし、カオスは複雑系の重要な状态の一つではあるが、複雑系そのものではない。カオスだけでは、複雑系がもつもう一つの特性である自己組織化を説明できない。ダイナミカルシステムには共通して、おびただしい数の独立した要素が存在し、それらの間には複雑な相互作用を通して自発的な自己組織化が起こるという特性がみられる。例えば、無数のタンパク質、脂肪、核酸が作用し合って細胞を形成したり、何十億ものニューロンが連結して脳を形成したり、数十万、数百万の人間が相互に依存し合って社会を形成していくことなどが身近な現象としてみられる。これらに共通するメカニズムは、ミクロな非線形相互作用だけによってマクロな秩序が立ち上がる（相転移が起こる）ということである。どのようにして、熱力学の法則に反するとも見えるこうした秩序形成が可能となるのだろうか。このメカニズムについてはプリゴジン (Prigogine) の散逸構造理論とハーケン (Haken) のシナージェティクス理論が参考になる。

散逸構造理論では、自己組織性は“ゆらぎ”の増幅による秩序形成として、また、シナージェティクスでは、“ゆらぎ”を契機として要素同士が協力的に作用し合うことによる、巨視的パターンの形成として説明される。これまでの自然科学では、システムが平衡状态から外れると、それを打ち消すような方向の力が働き、システムは元の、あるいは新たな平衡状态を取り戻すと考えられてきた。ところが、散逸構造理論では、システムが平衡状态から遠く離れたとき、系が平衡へ復帰する振る舞いをせず、新たな秩序形成を行う場合がある。ここでシステムは、平衡の近くで形成される「平衡構造」と、非平衡の領域で形成される「散逸構造」の二タイプの構造に分けられる。前者は保存性をもつ可逆的な構造をもった系であるのに対して、後者は散逸性をもち不可逆的な構造をもった系となる。

ダイナミカルシステムを分類する方法は様々であるが、一つの有効な方法として時間軸上で示す振る舞いによって、どのようなアトラクターをとるかを基準とすることが考えられる。その場合、「固定点アトラクター」「周期的 (リミットサイクル) アトラクター」「カオス的アトラクター」の3種類のアトラクターによって相転移の異なったパターンが生まれる。例えば、固定点アトラクターは、初期値をどこから開始しても遅かれ早かれその位置で静止状態になる摩擦をもった振り子運動の停止位置のような点であることから、大域的アトラクターとも呼ばれる。また、周期的アトラクターは、同じく初期値が何であっても同じ2つ(あるいはそれ以上)の値を循環するような繰り返しのパターンに収束するアトラクターでリミットサイクルとも呼ばれる。さらにカオス的アトラクターの場合は、システムは元の状態には戻らず、決定論的カオスへと衰退していく。

パターン認知や思考のような心的状態が、大腦におけるマクロな秩序パラメータによって記

述され、それが神経細胞のミクロな非線形相互作用によって形成されたものだとすれば、心的状態を構成する細胞の集合体は、そうしたアトラクターの違いによるものとして理解できるかもしれない。こうした視点に立つと、たとえば脳はニューラルネットワークの非線形数学で表現される可能性があると考えられる。今後、益々、心的過程を複雑系として捉える視点の重要性は高まるものと考えられる。

参考文献

- Barrett, H.C. & Kurzban, R. 2006. Modularity in cognition: Framing the debate. *Psychological Review*, 113, 628-647.
- Carruthers, P. 2006. *The architecture of the mind: Massive modularity and the flexibility of thought*. New York: Oxford University Press.
- Chi, M.T.H. 1978. Knowledge structures and memory development. In R.S. Siegler (Ed.) *Children's thinking: What develops?* pp.73-95. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Chi, M.T.H. and Koeske, R.D. 1983 Networks representations of knowledge base: Exploring a child's knowledge and memory performance of dinosaurs. *Developmental Psychology*, 19, 29-39.
- Cosmides, L. and Tooby, J. 1989 Evolutionary psychology and the generation of culture, Part II. Case study: A computational theory of social exchange. *Ethology and Sociobiology*, 10, 51-97.
- Elman, J.L., Bates, E.A., Johnson, M.H., Karmiloff-Smith, A., Parisi, D., Plunkett, K. *Rethinking innateness: A connectionist perspective on development*. 1996 Cambridge MA: MIT Press. (乾敏郎・今井むつみ・山下博志 (訳) (1998) 認知発達と生得性——心はどこから来るのか—— 共立出版)
- Fodor, J.A. 1983 *The modularity of mind*. Cambridge, MA: The MIT Press. (伊藤笏康・信原幸弘 (訳) (1985) 精神のモジュール形式——人工知能と心の哲学—— 産業図書)
- Fodor, J.A. 2000 *The mind doesn't work that way: The scope and limits of computational psychology*. Cambridge, MA: The MIT Press.
- Gasser, M. and Smith, L.B. 1991. The development of the notion of sameness: A connectionist model. *Proceedings of the Thirteenth Annual Conference of the Cognitive Science Society*, 719-723.
- Gentner, D. 1989 The mechanisms of analogical learning. In S. Vosniadou and A. Ortony (Eds.) *Similarity and analogical reasoning*. pp, 199-241. Cambridge: Cambridge University Press.
- Gershkoff-stowe, L. and Thelen, E. 2004 U-shaped changes in behavior: A dynamic systems perspective. *Journal of Cognition and Development*, vol.5, No.1, 11-36.
- Greenfield, P.M. 1991 Language, tools and brain: The ontogeny and phylogeny of hierarchically organized sequential behavior. *Brain and Behavioral Sciences*, 14, 707-784.
- Haken, H. 1987 Synergetics: An approach to self-organization. In F. E. Yates (Ed.), *Self-organizing systems: The emergence of order* (pp.417-434). New York: Plenum Press.
- Hanson, S.J. 1990 Meiosis networks. In D.S. Touretsky (Ed.) *Advances in neural information processing systems II*. (pp.533-541). San Mateo, CA: Morgan Kaufman.
- Jordan, M.I. 1990 Motor learning and the degrees of freedom problem. In M. Jeannerod (Ed.) *Attention and performance VIII* (pp.796-836). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Karmiloff-Smith, A. 1992 *Beyond Modularity: A Developmental Perspective on Cognitive Science*.

- MIT Press. (小島康次・小林好和 (監訳) 1997 人間発達の認知科学 —— 精神のモジュール性を
超えて —— ミネルヴァ書房)
- Kelly, M. 1992 Using sound to solve syntactic problems. *Psychological Review*, 99, 349-364.
- McClelland, J.L. 1989 Parallel distributed processing: Implications for cognition and development.
In R.G.M. Morris (Ed.) *Parallel distributed processing: Implications for psychology and neuro-
biology* (pp.9-45) Oxford: Clarendon Press.
- 中尾央 2015. 人間進化の科学哲学 —— 行動・心・文化. 名古屋大学出版会.
- Pick, H.L., and Pick, A.D. 1970 Sensory and perceptual development. In P. Mussen (Ed.) *Carmi-
chael's manual of child psychology* (Vol.1, pp.773-847). New York: Wiley.
- Pinker, S. 1987 The bootstrapping problem in language acquisition. In W. Demopoulos and A.
Marrs (Eds.) *Language learning and concept acquisition*. Norwood, NJ: Ablex.
- Pinker, S. 1989 *Learnability and cognition: The acquisition of argument structure*. Cambridge, MA:
MIT.
- Posner, M.I. 1980 Mental chronometry and the problem of consciousness. In P.W. Jusczyk and R.
M. Klein (Eds.) *The nature of thought: Essays in honor of D. O. Hebb* (pp.95-114) Hillsdale, NJ:
Erlbaum.
- Rumelhart, D.E. and McClelland, J.L. (Eds.) 1986 *Parallel distributed processing: Explorations in
the microstructure of cognition. Vol.1: Foundations*. Cambridge, MA: Bradford Books/MIT
Press.
- Shiffrin, R.M. and Schneider, W. 1977 Controlled and automatic human information processing:
Perceptual learning, automatic attending, and a general theory. *Psychological Review*, 84, 127-
190.
- Siegler, R.S. 1978 The origins of scientific reasoning. In R.S. Siegler (Ed.) *Children's thinking:
What develops?* (pp.109-147). Hillsdale, NJ: Erlbaum. (無藤隆・日笠摩子 (訳) 1992 子ども
の思考 誠信書房)
- Siegler, R.S. 1989 Mechanisms of cognitive development. *Annual Review of Psychology*, 40, 353-
380.
- Smith, L.B. 1989 A model of perceptual classification in children and adults. *Psychological Review*,
96, 125-144.
- Smith, L.B. 1993 The concept of same. *Advances in Child Development and Behavior*, 24, 215-252.
- Smith, L.B. and Thelen, E. (Eds.) 1993 *A dynamic systems approach to development: Applications*.
Cambridge, MA: MIT Press.
- Smolensky, P. 1986 Information processing in dynamical systems: Foundations of harmony
theory. In D.E. Rumelhart, and J.D. McClelland (Eds.) *Parallel distributed processing* (Vol.1 pp.
194-281) Cambridge, MA: MIT Press.
- Sperber, D. 1994 The modularity of thought and the epidemiology of representations. In L.
Hirshfield and S. Gelman (Eds.) *Mapping the mind: Domain specificity in cognition and culture*.
New York: Cambridge University Press.
- Stillings, N. 1987 Modularity and naturalism in theories of vision. In J.L. Garfield (Ed.) *Modularity
in knowledge representation and natural language understanding* (pp.383-402). Cambridge, MA:
MIT Press.
- Thelen, E. and Fisher, D.M. 1982 New born stepping: An explanation for a “disappearing reflex”.
Developmental Psychology, 18, 760-775.

- Thelen, E. and Fisher, D.M. 1983 The organization of spontaneous leg movements in newborn infants. *Journal of Motor Behavior*, 15, 353-377.
- Trabasso, T. 1977 The role of memory as a system of making transitive inferences. In R.V. Kail and J.W. Hagen (Eds.) *Perspectives on the development of memory and cognition* (pp.333-365).
- Tucker, M. and Hirsh-Pasek, K. 1993 Systems and language: Implications for acquisition. In L.B. Smith and E. Thelen (Eds.) *A dynamic systems approach to development: Applications* (pp.359-384).
- Wellman, H.M., Cross, D., and Bartsch, K. 1986 Infant search and object permanence: A meta-analysis of the A-not-B error. *Monograph of the Society for Research in Child Development*, 54, No.214.