

複 雑 系 と し て の 認 知

—— 発達におけるダイナミック・システムズ・アプローチ ——

廣 瀬 直 哉

Cognition as a Complex System: A Dynamic Systems Approach to Development

HIROSE Naoya

は じ め に

近年、複雑系やカオスの研究が注目を集めている。こうした研究は、数学、物理学といったハードな科学の分野だけでなく、気象学、経済学など多くの分野で行われている (Gleick, 1987; Waldrop, 1992)。心理学においても、カオスや自己組織化の概念をもとにしたモデル化が提案されており (Barton, 1994)、学会なども組織されるに至っている¹⁾。こうした中で、本稿では、特に、Esther Thelen らによるダイナミック・システムズ・アプローチ (Thelen, 1989; Thelen & Smith, 1994) を取り上げ、複雑系ダイナミクスの研究が認知研究に与える影響について考える。

本稿では、初めに、ダイナミック・システムの基本的な概念を概観する²⁾。次に、ダイナミック・システムズ・アプローチと、これを乳児の歩行発達に適用した研究を紹介する。最後に、ダイナミック・システムズ・アプローチにおけるいくつかの問題点について検討する。

ダイナミック・システム

システム (系) とは要素からなる集合の全体である。システムに関して我々が関心を持つことの1つは、システムの状態である。システムは、ある時刻にある状態をとる。このシステムがとりうる状態の全体を位相空間 (phase space)³⁾ という。また、我々はシステムの時間的変化に関心を持つ。現在の状態に依存して状態変化を生じるシステム、つまり、状態変化が状態の関数で表されるようなシステムをダイナミック・システム (dynamic systems) という⁴⁾。ダイナミック・システムは、数学的には、可能な状態の集合 (位相空間) と状態変化の規則 (微分方程式や差分方程式) で表現される。また、状態変化の規則が非線形方程式で表される場合は、特に、非線形ダイナミック・システム (nonlinear dynamic systems) と呼ばれる⁵⁾。これらのダイナミック・システムの時間的変遷は、位相空間における軌跡として描かれる。

ダイナミック・システムは、複雑系 (complex systems) の一つと考えられる。複雑系とは、

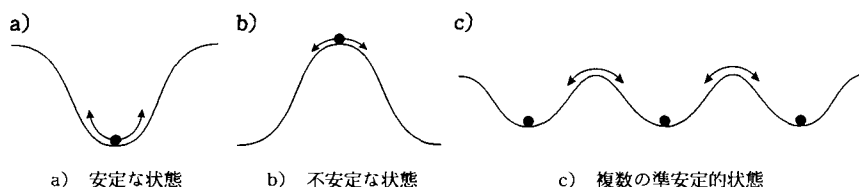


図1 アトラクターの安定性

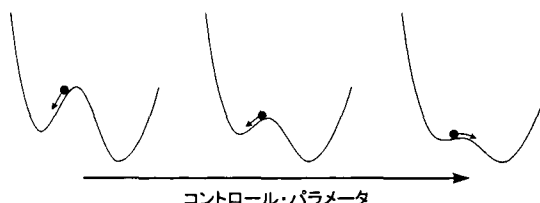


図2 コントロール・パラメータの変化にともなう相転移

数多くの要素からなるシステムであり、多数の要素が様々な方法で結合することが可能なため、全体として非常に大きな自由度 (degrees of freedom) を持っている。しかし、ある条件下⁶⁾では、これらの構成要素は自己組織化し、パターン化された振舞いを示す。このため、システムの自由度は減少し、少数の集合変数 (collective variables)⁷⁾ でシステムの状態が記述されるようになる。このようにシステムの自由度は減少するのであるが、システムの振舞いは必ずしも単純であるとは限らず、複雑なパターンを示すことがある⁸⁾。このようなシステムの時間的、空間的な振舞いは、個々の構成要素や文脈によって予め処方箋 (prescription) が与えられているわけではない。複雑系の振舞いは、ある文脈での構成要素の相互作用の結果として、ダイナミックに集約された (dynamically assembled) ものである。

こうして、システムはダイナミックに安定した状態にたどり着く。この安定した状態をアトラクター (attractors) という。アトラクターは、システムの位相空間における軌跡が、時間経過にともない、漸近的に接近する領域である。また、摂動 (perturbation) によりシステムの状態が乱されたとき、システムは元の状態に戻ろうとする傾向がある。アトラクターの概念は、システムの振舞いの安定性 (stability) を理解するのに役立つ (図1)。

複雑系は、複数の振舞いのパターンを示すことがある。このようなシステムの重要な性質は、不連続的な方法でパターン間の切り替えが起こることである。つまり、安定した中間状態を経ることなく、ある振舞いのモード (アトラクター) から、別の振舞いのモードへの移行が起こる。このような現象を相転移 (phase transition) という。また、複数の安定したモードへ相転移が起こることを分岐 (bifurcation) という。相転移や分岐の概念は、システムの発達や適応を説明するために用いられる。相転移によりシステムは新たな振舞いのパターンを獲得し、分岐によりシステムは様々な環境に適応できるようになる。

複雑系のパターン化された振舞いは、構成要素や下位システムの相互作用の結果ではあるが、相転移が起こるときに、それらのすべての要素がシステムの変化に関係しているわけではない。相転移において、システムの状態の移行にかかわる少数の変数をコントロール・パラメータ

(control parameters) という。コントロール・パラメータの変化によりシステムの状態は変化するのであるが、コントロール・パラメータ自身が変化を表象したり、パターンについての情報を予め持っているのではない。コントロール・パラメータがシステムを再組織化する結果、新たなパターンが発現するのである（図2）。

ダイナミック・システムズ・アプローチ

Thelen らによれば、従来の発達理論の枠組みでは、発達の複雑さ、乱雑さをうまく説明できないという（Thelen & Smith, 1994, Ch. 2）。例えば、Piaget（1970）に代表されるような発達の理論では、一定順序の発達段階が想定されている。大雑把にみれば、発達は Piaget がいったような順序性をもって現れてくる。しかし、詳細を見れば、発達に順序性はなく、複雑で混沌としている。発達には全体的な秩序と局所的な変動性（variability）が共存しているようにみえる。さらに、子どもはある場面では有能であるが、別の場面では有能でなかったりすることがある（Siegal, 1991）。このように、発達には、秩序性と無秩序性、安定性と変動性、有能さと非有能さが並存しており、発達の理論はこれらの両方を説明しなければならない。だが、従来の理論では有能さや安定性をもとにした説明が行われてきた。コンピテンス（competence）とパフォーマンス（performance）の区別が、そのよい例である。子どもがある認知的なコンピテンスを持っていても、ある課題場面では、内的要因（他の能力等）や外的要因（環境の影響等）により、コンピテンスが十分に発揮されず、課題ができないことがある。そのような内的、外的要因を取り除いてやると、子どもは真のコンピテンスを発揮する。この説明では、まず最初に安定した構造（コンピテンス）があり、実際にみられる変動（パフォーマンス）はノイズであるとみなされている。しかし、コンピテンスという概念は、パフォーマンスという窓を通してしかみることができないため、本当にそのような安定した認知構造の本質があるのかどうかは確かめることができない。

また、Thelen らは、従来の理論にみられる目的論（teleology）の危険性を指摘している。従来の理論では、あたかも初めから進むべき目標が決められており、その目標へ向かう道筋が発達だとみなされている。発達の目標が設定されることで、その目標が駆動力となり、目標と現実との差を埋めるように発達は進む。そこでは、目標自身が発達のメカニズムとなっている。しかし、そのような発達の目標や道筋はどこにあるのだろうか。遺伝子にそのような指示が書き込まれているのであろうか、それとも環境にそのような情報が存在するのであろうか。内的、または、外的に、そのようなプランが前もって存在すると仮定することは、論理的な困難をとまなう。プランを読み出す主体は誰なのか、それをいつどうやって読み出すのか、といった問いに答えることはできないからである。

我々は認知の安定性を説明するだけではなく、文脈依存的な変動の中でどのように認知が安定なのかを説明する必要がある。また、我々は目的論を排して発達を語らなければならない。従来の理論では、まず最初に安定性があり、変動性はそこからのノイズとして生じるとされている。これに対して、ダイナミック・システムズ・アプローチでは、初めに下位システムの局所的な変動性があり、そこからの相互作用を通して、全体的な安定性や秩序が生じるとされる。変動性はノイズでなく、実体である。秩序は構成要素の相互作用のプロセスから生じるのであって、教示

(instruction) が前もってあるわけではない。発達が進むべき道は初めから分かっているのではなく、発達は絶えず活動的に生きているシステムの自己組織化の過程である。行動は予めプログラムされているものでなく、生体の制約と文脈や課題の要請により柔軟に集約されるものである。また、このとき、生体と環境のいずれかが特権的であるのではない。

ダイナミック・システムズ・アプローチは、ダイナミック・システムの概念を行為と認知の研究に適用したものである⁹⁾。では、ダイナミック・システムの用語を使って、発達はどのように説明されるのであろうか。

発達において安定した秩序やパターンが見出されることがある。これは安定したアトラクターであると考えられる。しかし、発達するシステムの構成要素は常に変化しており、アトラクター自身がダイナミックな変遷をたどる。発達にともない、ある行動はより安定的になり、ある技能は向上する。これはアトラクターの状態がより安定化 (stabilization) することとして概念化される。また、発達にともない、消失する行動もある。これはアトラクターが不安定化 (destabilization) し、別のアトラクターに移行したものとみなすことができる。発達における新たな形態の出現は、現在の形態が安定性を失うことにともなう相転移であり、新たなアトラクターへの移行である。このように、ダイナミック・システムズ・アプローチでは、発達における漸進的な変化をアトラクターの安定化—不安定化として特徴づける。

このようなアトラクターの安定化—不安定化のプロセスは、カオスの遍歴 (chaotic itinerancy) と呼ばれる現象 (Tsuda, 1991) と同様のものと考えられる。カオスの遍歴は、光学や神経回路モデル等で見出されたアトラクターの時間依存的安定性に関する現象である。通常、ダイナミック・システムではある優越的なパターンに落ち込むと、そこからは簡単に抜け出せないのであるが、カオスの遍歴では、あるパターンの優越性は時間的に限られており、一定時間経過した後、不安定化し、別のパターンに移行する。しかし、そのパターンもしばらくすると崩壊し、別のパターンが生じる。こうして、パターンの生成と崩壊が繰り返される。このとき、どのパターンが新たに発現するかはシステムの履歴に依存している。カオスの遍歴では、遍歴するシステムの軌道全体を1つのアトラクターと考えるため、それぞれのパターンは擬似アトラクター (quasi-attractors)、または、アトラクター痕跡 (attracted ruins) と呼ばれる。したがって、カオスの遍歴は、過去の履歴に依存して擬似アトラクターの生成と崩壊を繰り返し、擬似アトラクター間を遍歴する現象である。発達に関しても、同様の (擬似) アトラクターの生成と崩壊のプロセスとみなせるであろう。

さらに、ダイナミック・システムズ・アプローチでは、2つの時間スケールに言及する。1つは、リアル・タイムの時間スケールで、もう1つは個体発生的時間スケール (ontogenetic time scale) である。今この場で (here and now) の課題は、リアル・タイムに下位システムを集約し、その結果として行為が生じる。また、生体の構成要素や環境の変化により、個体発生的な時間スケールで発達の変化が生じる。この2つの時間スケールは絡み合っており、両者に明確な区別を引くことはできない。リアル・タイムに行われる個々の行為は、発達のダイナミックな歴史の一部であると同時に、生体の歴史を構成し、将来の行為に貢献する。したがって、ダイナミック・システムズ・アプローチにおいては、学習と発達の区別はあいまいである。このことは、例えば、子どもによってある課題が解決されたとき、それが発達の結果なのか、それともその場で学習

(教示)された結果であるのかを明確にできないことを意味する。

ダイナミック・システムズ・アプローチが行為と認知の研究にとって有用なことの1つは、新たな実証的な方略を指し示してくれることである。以下、実際の研究方略を記す。

1. 集合変数を同定すること
2. アトラクターの状態を記述すること
3. 相転移の点を見つけること
4. コントロール・パラメータを同定し、操作すること

ダイナミック・システムでは、自由度を縮減した少数の集合変数によりシステムの状態を表すことができる。このため、まず第一に、集合変数を同定することが必要となる。しかし、変化するシステムの適切な集合変数を選択することは容易ではない。構成要素は非線形で、生体は絶えず変化しているため、変数の意味が一定でない場合があるからである。

第二にしなければならないことは、集合変数の安定的状態を理解すること、つまり、アトラクターを同定することである。アトラクターと考えられるものは、個人間においても、また個人内においても安定している行動であり、摂動が与えられても元に戻るような行動である。

第三に、システムがある安定したモードから新たなモードへ移行する相転移の点を特定しなければならない。ダイナミック・システムの理論によれば、そのような点で、システムはゆらぎ(fluctuation)が増大し、安定性を失う。したがって、相転移の点では、システムは摂動に対して敏感であり、安定したアトラクターに戻るにも時間がかかるようになる。そのため、この時間はシステムの安定性の指標として用いることができる。また、相転移の点では、システムは安定性を失うため、集合変数の変動(分散)が増加することが予想される。

最後に、システムの相転移にかかわるコントロール・パラメータを同定しなければならない。コントロール・パラメータを同定する手がかりの1つは、相転移の直前または進行中に急激に変化している変数を見つけることである。しかし、システムが持つ非線形性のため、小さな変化でも相転移が生じることがあるので、必ずしも確実な方法ではない。コントロール・パラメータの候補が見つかれば、実験的に操作し、検証することができる。システムが相転移の時期にあり、不安定性を示しているなら、コントロール・パラメータの変化がシステムを再組織化へと向かわせ、システムは新たなモードへと移行する。

乳児の歩行発達

これまでみてきたダイナミック・システムズ・アプローチは、実際の研究にどのように適用されるのであろうか。乳児の歩行発達に関する Thelen らの研究(Thelen, 1986; Thelen, Fisher, & Ridley-Johnson, 1984; Thelen & Smith, 1994, Ch. 1, 4)を以下に示す。

初期の運動発達の研究は、現象を記述し、段階に分け、カタログ化することから始まった。例えば、歩行の発達は、McGraw (1940)により、新生児足踏み(newborn stepping)¹⁰⁾から、統合された歩行(integrated walking)までの7つの段階に分けられた。そして、これらの初期の

発達の原因力は、神経系の成熟であると説明されてきた。乳児の歩行発達においてこれまで謎とされてきたことは、誕生時からみられる新生児足踏みが約2ヶ月で消失し、0歳代の後半に再び足踏みが出現し、その後、独立歩行（independent walking）へと至る変化の過程である。このような乳児の歩行発達の道筋は、いわゆるU字型発達（U-shaped development）の典型例と考えられてきた。この過程を神経系の成熟という立場から説明すれば、次のようになる。乳児は、生後しばらくの間、大脳皮質が未成熟であり、皮質下の中枢の働きが優位である。皮質下の働きは系統発生的に古く、多くは反射的であるとされている。そのため、反射的な新生児足踏みがみられる。しかし、皮質が徐々に複雑化、髄鞘化されるにともない、皮質下の反応が抑制されるようになる。そのため、反射的な足踏みがみられなくなる。その後、皮質による統制が増加し、今度は意図的な反応として足踏みが再出現し、最終的に独立歩行へと至るのである。最近まで、このような成熟説にもとづく運動発達の説明が支配的であった。しかし、Thelenらの一連の研究は、足踏みの消失と再出現が神経系の成熟だけでは説明できないことを示している。

まず、Thelenらが注目したのは、新生児の足踏みと蹴り（kicking）の類似性である。下肢の時空間的な軌跡やEMGによる分析から、乳児の足踏みは、仰向け姿勢での蹴りと、筋肉の活動パターンも運動学上も、ほぼ同じであることが明らかにされた。つまり、これまで別々の運動と考えられてきた仰向け姿勢での蹴りと立位での足踏みは、異なる姿勢において現れた同型のものであるといえる。しかし、両者には違いがあり、足踏みは生後2ヶ月以後消失するが、蹴りは生後一年以上継続して現れる。このことは神経系の成熟という観点からは説明できない。なぜなら、足踏みと蹴りが同じ運動なら、その一方だけに皮質による抑制が働くとは考えられないからである。では、なぜ新生児足踏みは消失するのだろうか。

乳児は、足踏みが減少する時期に、急激に体重が増え、特に、皮下脂肪が増加する。生後2～6週の縦断的な研究により、新生児足踏みの減少と体重の増加には相関があることが明らかにされた。また、足踏みをほとんど行わなくなった3ヶ月児の下半身を温水に浸し、足への負荷を減少させると、足踏みが活発になり、逆に、4週児の足に小さなおもりをつけると、足踏みが抑制されることが見出された。これらの結果から、新生児足踏みは消失したわけではなく、起こりにくくなっただけであることがわかる。筋肉でない皮下脂肪の増加が足を相対的に重くし、立位で足を持ち上げることを困難にしていたのである。

さらに、Thelenらは足踏みの再出現に対しても疑問を投げかける。通常、足踏みは8～10ヶ月にならないと再び現れない。しかし、足踏みを行わない7ヶ月児をトレッドミル（モーターで動くベルトの台）の上に体を支えて乗せてやると、交互の足踏み（alternate step）がみられる。また、トレッドミルの速さを変化させると、乳児は変化に足踏みを合わせ、さらに、左右のトレッドミルの速さを独立に変化させても、適応できることがわかった。つまり、トレッドミル上での足踏みは、単なる反射ではなく、適応的な運動の協応であると考えられる。また、縦断的な研究から、早ければ生後1ヶ月、遅くとも4ヶ月には、トレッドミル上で交互の足踏みを行うことが明らかにされた。

トレッドミル上での足踏みは、熟達した歩行にみられるようなパターン¹¹⁾を示し、他の場面での乳児の足踏みには見られない特徴を持っている。したがって、トレッドミルにより引き出された足踏みの発達に対するダイナミック・システムズ・アプローチの適用例をみることは有用であ

るように思われる。以下に、実際の方略の適用例を示す。

ダイナミック・システムの分析において、最初にしなければならないことは、集合変数をみつけることである。集合変数は、定義があいまいな構成概念でなく、システムの協応を示す指標として、厳密に観察可能なものでなければならない。Thelen らは、両足の位相差 (interlimb phasing) をトレッドミル上での足踏みの発達の集合変数とした。成熟した歩行では、一方の足が周期の半分に来たときに、もう一方の足を踏み出すので、両足の位相差は 180° になる。このため、両足の位相差は、両足の協応を測定するのに相応しい集合変数であると考えられる。

次に、行動のアトラクターを特定しなければならない。トレッドミル上で乳児がとる反応は、無反応 (no response)、一回片足を踏み出す (single step)、2 回続けて片足を踏み出す (double step)、両足を同時に踏み出す (parallel step)、交互に足を踏み出す (alternate step) のいずれかである。Thelen らは、このうち、交互の足踏みをアトラクターと考えた。7 ヶ月児は、トレッドミルの速度にかかわらず、交互に足踏みを行った。また、左右の速度が異なるトレッドミル上でも、交互に足踏みをした。さらに、交互に足を踏み出すことは、独立歩行の特徴でもある。これらの理由から、交互の足踏みを行動のアトラクターとみなすことは適切だと思われる。

その次にすべきことは、相転移の点を見つけることである。移行の点を同定するためには、集合変数のダイナミックな軌跡をたどり、アトラクターの安定性を評価しなければならない。これには、継時的なサンプリングが必要である。Thelen らは、1～8 ヶ月まで乳児の縦断的な観察を行った。その結果、どの被験児にも、交互の足踏みの頻度が急激に増加する時期がみられた。これが相転移の点と考えられる。しかし、その増加の傾きと現れる時期については被験児ごとに異なっていた。また、初めに見られた多様な反応は、月齢を重ねるにしたがって、交互の足踏みに置き換えられていった。これらの結果は、トレッドミル上での交互の足踏みがより安定したアトラクターの状態として発現してきたことを示している。

最後に、相転移に関連するコントロール・パラメータを同定しなければならない。つまり、どのような内的、外的変数が、足踏みをしない状態から交互の足踏みをする状態への移行にかかわっているかを特定しなければならない。Thelen らは、コントロール・パラメータとして可能性がありそうな 4 つの測度、(1) 一般的な運動の指標 (Bayley Motor Scales)、(2) 足の均整と構成の発達の変化、(3) 覚醒水準や気分の変化、(4) 足の姿勢 (posture) や動きの変化について測定を行った。その結果、足の姿勢や動きとトレッドミル上での交互の足踏みに相関がみられ、コントロール・パラメータであると推測された。では、なぜ足の姿勢や動きの変化が交互の足踏みへの移行に関連するのであろうか。足の姿勢や動きは、筋肉の相対的な強度の指標と考えられる。動いているトレッドミル上では、足は後ろに引っ張られ、筋肉が伸ばされる。すると、筋肉の弾力性により、元に戻ろうとし、足が前に動かされる。このことが、トレッドミル上での交互の足踏みを引き起こすと考えられる。トレッドミル上でうまく足踏みをするには、筋肉が伸ばされる必要があるのだが、乳児は基本的に四肢が硬く曲がっている。硬く曲がった姿勢を示す乳児ほど、十分に足を引っ張ることができないので、足踏みはうまく行かない。初めは硬く曲がっていた筋肉が、発達にともなって伸ばされることにより、トレッドミル上で交互の足踏みができるようになるのである。これらのことから、トレッドミル上での足踏みの発達のコントロール・パラメータは、足の筋肉の屈曲―伸展のバランスの変化であると考えられる。

以上、ダイナミック・システムズ・アプローチを乳児の歩行発達に適用した例をみてきたが、同様の方略は、乳児のリーチングの発達に関する Thelen らの研究にも用いられている (Corbetta & Thelen, 1996; Thelen, Corbetta, Kamm, Spencer, Schneider & Zernicke, 1993)。また、運動発達以外の分野においてもダイナミック・システムの原理にもとづく研究が行われている (Turvey & Carello, 1995; van Geert, 1991)。

お わ り に

最後に、ダイナミック・システムズ・アプローチに対するいくつかの問題点を検討しておきたい。まず第一に、物理学や化学の分野では、ダイナミック・システムの理論により、高度に数学的に洗練されたデータ処理、モデル化が行われているが、行為や認知の研究においては、そのような扱いが十分になされていない点である。厳密に数学的な処理をするには、数多くの時系列データが必要である。しかし、現在の心理学研究においては、ダイナミック・システム理論の数学的な適用にかなうだけ十分に綿密なデータを得ることが難しい。このため、心理学へのダイナミック・システム理論の適用は、メタファーのレベルにとどまってしまうことが多い。Thelen らは、数学的な扱いができなくても、ダイナミック・システムの概念が、発達の変化のプロセスを理解する上で、有用な概念的メタファーになりうることを強調している。ダイナミック・システムの概念は強力であるので、現在広く受け入れられている構成概念（スキーマ、処理能力、発達段階）では、説明できないことがダイナミック・システムの観点からは解釈できるとしている。しかし、ダイナミック・システムやカオスの理論に興味を持つ心理学者は、それらの理論をどうにか心理学に適用しようとするあまり、他の理論の仮説を検証しようとすることを怠る傾向がある。線形、または、確率論的な解釈では、どうしてもデータが説明できないため、非線形的な解釈が必要となる、という過程を経ていることがある (Pribram, 1995)。したがって、厳密な数学的な処理が可能でない場合、ダイナミック・システムの観点からメタファー的に解釈することは慎重にしなければならない。

次に、ダイナミック・システム理論は、運動発達に関しては有用であるかもしれないが、プランや意図などの高次の認知機能を説明するには不十分であるという議論がある (Smith & Thelen, 1993)。ダイナミック・システムの原理は運動や知覚—行為システムの研究に適用されたものが多いが、情動 (Wolff, 1993) や言語 (van Geert, 1991) など他の分野に適用された研究もある。Thelen らは、いわゆる高次の認知機能も、原則的には、知覚や運動などの心的機能と違いはなく、動機づけ、社会文化的認知、言語、思考なども、ダイナミック・システムの概念を使って説明できることを主張している (Thelen & Smith, 1994, Ch. 11)。しかし、これらの分野に関しては、ダイナミック・システムの観点から行われた実証的な研究がほとんどないため、今後の研究成果が期待される分野である。

最後に、ダイナミック・システムズ・アプローチの研究方略は、これまで行われてきた研究法と同じではないかという問題がある。例えば、相転移の点を見つけることは、発達の変化の時期をみつけることであり、これは今まで発達心理学者が行ってきたことである。また、コントロール・パラメータの操作は、これまで行われてきた発達の移行期における実験や介入と同じもので

ある。Thelen らが述べているように、多くの発達心理学者は、ダイナミック・システムズ・アプローチで用いられるような経験的な方略を暗にしていることがある。では、ダイナミック・システムズ・アプローチには、どのような意義があるのだろうか。それは、他の分野におけるシステムのダイナミクスと一貫するような理論的根拠を心理学に与えることである。これまでの心理学では、そうした根拠を持つことなしに研究が行われてきた。他の分野の科学と共通の基盤を持つことで、より強力な概念と方法を手に入れることが可能になるのである。

注

- 1) “Society for Chaos Theory in Psychology and the Life Sciences”という学会が1991年に設立された。また、心理学における複雑系の会議“1st Joint Conference on Complex Systems in Psychology”が1997年にスイスで開催予定である。
- 2) 詳細について、Briggs & Peat (1989), Thelen & Smith (1984) の3章などを参照されたい。
- 3) 状態空間 (state space) と呼ばれることもある。
- 4) 一般的には、力学系やダイナミカル・システム (dynamical systems) と呼ぶことが多い。
- 5) システムの多くは線形でないので、単にダイナミック・システムという場合も、非線形のことを指すことが多い。本稿でも、ダイナミック・システムとは非線形のことを指す。
- 6) 熱力学的に平衡から遠く離れた (far-from-equilibrium) 系において、自己組織化された秩序が生まれる (Prigogine & Stengers, 1984)。
- 7) 秩序パラメータ (order parameters) と呼ばれることもある。
- 8) いわゆるカオスとは、こうした少数自由度における複雑な振舞いの現象である。有名な例として、化学反応系における Belousov-Zhabotinskii 反応がある。
- 9) ダイナミック・システムズ・アプローチは、Haken (1978) のシナジェティクス (synergetics) の理論に依拠するところが大きい。詳細に関しては、Kelso, Ding, & Schöner (1993) を参照のこと。また、Thelen & Smith (1994) は、ダイナミック・システムの理論とともに、Edelman (1993) のニューロン群選択説 (Theory of Neuronal Group Selection) をダイナミック・システムズ・アプローチの基本原理の1つとして取り上げている。
- 10) 反射足踏み (reflex stepping) とも呼ばれ、体を支えて新生児の足を床につけるとみられる足踏み反応。
- 11) 初期の歩行では、爪先または足の裏全体が最初に地面に着くが、熟達した歩行では、踵が最初に地面に着く。

文 献

- Barton, S. (1994). Chaos, self-organization, and psychology. *American Psychologist*, 49, 5–14.
- Briggs, J., & Peat, F. D. (1989). *Turbulent mirror: An illustrated guide to chaos theory and the science of wholeness*. Harper & Row. 高安秀樹・高安美佐子 (訳) (1991). 鏡の伝説—カオス—フラクタル理論が自然を見る目を変えた. ダイアモンド社.
- Corbetta, D., & Thelen, E. (1996). The developmental origins of bimanual coordination: A dynamic perspective. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 22, 502–522.
- Edelman, G. M. (1993). Neural Darwinism: Selection and reentrant signaling in higher brain function. *Neuron*, 10, 115–125.
- Gleick, J. (1987). *Chaos: Making a new science*. Penguin Books. 大貫昌子 (訳) (1991). カオス—新しい科学をつくる. 新潮社.
- Haken, H. (1978). *Synergetics: An introduction*. 2nd ed. Springer-Verlag. 牧島邦夫・小森尚志 (訳)

- (1980). 協同現象の数理—物理, 生物, 化学系における自律形成. 東海大学出版会.
- Kelso, J. A. S., Ding, M., & Schöner, G. (1993). Dynamic pattern formation : A primer. In L. B. Smith & E. Thelen (Eds.), *A dynamic systems approach to development : Applications* (pp. 13–50). MIT Press.
- McGraw, M. B. (1940). Neuromuscular development of the human infant as exemplified in the achievement of erect locomotion. *Journal of Pediatrics*, 17, 747–771.
- Piaget, J. (1970). Piaget's theory. In P. H. Mussen (Ed.), *Carmichael's manual of child psychology. Vol. 1* (pp. 703–732). John Wiley & Sons.
- Pribram, K. H. (1995). Commentary. In F. D. Abraham & A. R. Gilgen (Eds.), *Chaos theory in psychology* (pp. 307–310). Praeger Publishers.
- Prigogine, I., & Stengers, I. (1984). *Order out of chaos : Man's new dialogue with nature*. Bantam Books. 伏見康治・伏見譲・松枝秀明 (訳) (1987). 混沌からの秩序. みすず書房.
- Siegal, M. (1991). *Knowing children : Experiments in conversation and cognition*. Lawrence Erlbaum Associates. 鈴木敦子・外山紀子・鈴木宏昭 (訳) (1993). 子どもは誤解されている—「発達」の神話に隠された能力. 新曜社.
- Smith, L. B., & Thelen, E. (1993). Can dynamic systems theory be usefully applied in areas other than motor development? (Part II introduction). In L. B. Smith & E. Thelen (Eds.), *A dynamic systems approach to development : Applications* (pp. 151–170). MIT Press.
- Thelen, E. (1986). Treadmill-elicited stepping in seven-month-old infants. *Child Development*, 57, 1498–1506.
- Thelen, E. (1989). Self-organization in developmental process : Can systems approach work? In M. Gunnar & E. Thelen (Eds.), *Systems in development : The Minnesota Symposia in Child Psychology Vol. 22* (pp. 77–117). Lawrence Erlbaum Associates.
- Thelen, E., Corbetta, D., Kamm, K., Spencer, J. P., Schneider, K., & Zernicke, R. F. (1993). The transition to reaching : Mapping intention and intrinsic dynamics. *Child Development*, 64, 1058–1098.
- Thelen, E., Fisher, D. M., & Ridley-Johnson, R. (1984). The relation between physical growth and a newborn reflex. *Infant Behavior and Development*, 7, 479–493.
- Thelen, E., & Smith, L. B. (1994). *A dynamic systems approach to the development of cognition and action*. MIT Press.
- Tsuda, I. (1991). Chaotic itinerancy as a dynamical basis of hermeneutics in brain and mind. *World Futures*, 32, 167–184.
- Turvey, M. T., & Carello, C. (1995). Some dynamical themes in perception and action. In R. F. Port & T. van Gelder (Eds.), *Mind as motion : Explorations in the dynamics of cognition*. (pp. 373–401). MIT Press.
- van Geert, P. (1991). A dynamic systems model of cognitive and language growth. *Psychological Review*, 98, 3–56.
- Waldrop, M. M. (1992). *Complexity : The emerging science at the edge of order and chaos*. Touchstone.
- Wolff, P. H. (1993). Behavioral and emotional states in infancy : A dynamic perspective. In L. B. Smith & E. Thelen (Eds.), *A dynamic systems approach to development : Applications* (pp. 189–208). MIT Press.