

身体運動研究における“Synergy”概念とその射程

The concept of Synergy in human body movement study and its implication

児玉 謙太郎*¹
Kentaro Kodama

園田 耕平*²
Kohei Sonoda

*¹ 総合研究大学院大学・日本学術振興会
The Graduate University for Advanced Studies,
Japan Society for the Promotion of Science

*² 滋賀大学・日本学術振興会
Shiga University,
Japan Society for the Promotion of Science

The present paper introduces the concept of *Synergy*. It was proposed by Bernstein to solve the degree of freedom problem in motor control. After that in one way of developments of this concept, the self-organized process was considered as synergic process and its pattern formation process was formulated as *Synergetics* by Haken and his colleagues. Recently it is focused on in cognitive science of not only motor control or robotics but also higher-order cognition and interpersonal coordination. Particularly in the field of complex systems study, its characteristics, 1) dimensional compression (how systems of many non-linearly interacting micro-scale components exhibit low-dimensional spatio-temporal patterns) and 2) reciprocal compensation (the ability of one component of a synergy to react to changes in others) are considered as hopeful ideas. The present study aims to indicate its issues and possibilities, and discusses the connection to the theory of *internal measurement*.

1. はじめに

本稿では、身体運動研究分野で構想されている Synergy の概念と、その現代的な解釈・展開について解説することを目的とする。さらに、Synergy という概念に基づくシステム論的構想を、複雑系科学、特に内部観測理論のアイデアと関連づけながら論じることで、その問題や可能性について考察を加える。

ベルンシュタインは、伝統的な運動制御理論が抱える問題を指摘した[1, 2]。ベルンシュタイン問題と呼ばれる自由度問題、文脈の問題である。これらを解決するために考案されたのがシナジー¹⁾というアイデアである。これらは、システム論や、複雑系の概念、あるいはコンピュータ技術が確立される前に指摘された問題である。しかし、そこで提起された問題は、現代の心理学・神経科学・人工知能・ロボティクスなどの認知科学分野でも、依然として残っている古くて新しい問題である。そこで、本稿では、Synergy に関する研究の展開を、複雑系科学や内部観測で議論されているテーマと関連づけて解説することで、各分野が抱えるテーマの関連性や共通性を見出し、本研究が相互の発展の契機となることを目標とする。

以下、2章でベルンシュタイン問題とそれへの解決策としてのシナジー概念を説明し、3章でベルンシュタイン以降の Synergy 概念の受容と拡張を概観し、4章では Synergy 概念のもつ含意について捉え直し、複雑系科学、内部観測の観点から再考する。

2. ベルンシュタイン問題とシナジー

身体運動の生成を説明するにあたって、伝統的な運動制御理論では、中枢からの指令が、神経系を介して、末梢の効果器の筋群を活性化することで身体運動が実現する、というトップダウン型モデルを採用している。しかし、この方法では身体という対象を制御するために決定すべき変数の数(自由度)は膨大になる。身体運動の自由度は、それを観測し、解析するレベルによって様々だが、例えば、人間の場合、関節のレベルで約 10^2 個のオーダー、筋のレベルで約 10^3 個のオーダー、細胞のレベルでは約 10^{14} 個のオーダーの自由度が存在するとされている

[3]。ベルンシュタインが指摘した自由度問題とは、トップダウン型モデルを身体運動の制御モデルとして採用すると、単純な動作についても身体を動かす前に中枢は膨大な量の変数を決定しなくてはならないため現実的とは言えない、という問題である。この問題は、制御工学の観点からすると、制御すべき変数のほうが、状態を記述するために必要な変数より多く、解が一意に決定できないという冗長性に起因する不良設定問題だと言える[4]。

次に指摘されたのは運動の文脈の問題である。伝統的な運動制御理論では、各時刻における身体運動の姿勢を映像のコマのように互いに独立した要素と仮定したため、解剖学的・力学的・生理学的レベルにおける多義性の問題が生じる。ここでいう多義性とは、ある時刻における要素(姿勢や神経筋骨格レベルでの状態を表す変数)が与えられたとしても、その前後のシステムの状態が一意に決定できないことを指す。これは、身体運動を、先行する運動、後続する運動といった一連の流れ(文脈)から切り離された要素として捉え、その要素の足し合わせによって記述しようとする要素還元主義に起因する問題だと言える。文脈の問題も、多義性があるため不良設定問題と言えよう。さらに、文脈の問題は、運動が実行される前に解決されるべき“事前”の文脈だけではない。実際の身体運動は、動的で多様な環境のなかで実現されねばならないため、運動が実行されている“最中”、実行後に生じる“事後”の文脈の問題も存在する。なぜなら、身体システム、及び、その環境では、常に変動やゆらぎが存在するからである。身体運動の実現という場面では、常にシステムと環境の間で生じる変動・ゆらぎが吸収され、特定の課題を達成するかたちで、ひとつの解が選択されている。この冗長な自由度により生じる不確定性は、身体や環境、前後の文脈からの制約(拘束条件)によって解消されるとみるならば、身体運動は文脈に依存して組織化されると考えた方が妥当であろう。

自由度問題、文脈の問題に対し、ベルンシュタイン自身が提案した考えがシナジーというアイデアである[1, 2]。シナジーとは、ある運動課題を達成する際に、身体各部位(要素)が連携し、協調することによって、運動の自由度を減らすような機能的な構

連絡先: 児玉謙太郎, 総合研究大学院大学複合科学研究科情報学専攻, 東京都千代田区一ツ橋 2-1-2, 03-4212-2000, kodamakentaro@nii.ac.jp

1) 本稿では Synergy という用語を、ベルンシュタインが筋-関節レベルの要素間の関係に対して用いた意味で使用する場合“シナジー”と表記し、筋-関節レベルに限定せず、拡張的に解釈して用いる場合“Synergy”と表記する。

造・単位のことである。ベルンシュタイン自身は、運動の目的によって組織化される筋群の間、あるいは筋-関節の間の一時的で柔軟な結合をシナジーと呼んだ[1, 2]。つまり、この筋群間、筋-関節リンクのレベルでシナジーを想定し、要素が個別に制御されるのではなく、要素間の協調関係を考慮することで、自由度が減ることを指摘し、自由度問題の解決を図ったのである。また、シナジーの一時的で柔軟な組織化は、無方向に要素間が協調し、組織化すればいいということではなく、直面した課題に特定の、文脈に依存するかたちで組織化されることを意味する。ベルンシュタインは、このように課題特定の・文脈依存的な要素間の結合を考慮すれば、文脈の問題は解決すると考えた。

3. Synergy 概念の受容と拡張

次に、本章では、ベルンシュタイン以降、Synergy のアイデアを展開してきた代表的な試みとして Coordination Dynamics [6]、Uncontrolled Manifold 仮説 [7, 8]の考え方を概説し、両者の関係について述べ、Synergy の特徴をまとめる。

3.1 Coordination Dynamics

ベルンシュタインの自由度問題に対し、Kelso らは、両手の指のリズミカルな協調運動実験を行い、身体運動におけるミクロレベル(筋神経系)での要素間の相互作用により、自律的にマクロレベルでシステム全体としての秩序が創発することを実験的に示した[9]。具体的には、両手の人差し指を周期的に運動させる課題で実験を行った。その結果、2つのパターン(同位相・逆位相)でのみ運動が安定すること、運動周波数を増加させると逆位相から同位相へのみ変化が起こること、その状態から周波数を下げていっても逆位相には戻らないこと、など物理現象で観察される自己組織化と類似する結果が得られた。その後、Haken らはこれらの結果に対し、シナジェティクス [5]の観点から、マクロレベルで記述される秩序変数を指同士の間隔差、その変化をもたらし制御変数を運動周波数として、運動の質的变化を説明するモデルを提案した(HKB モデル[10])。その際、Kelso らは、相転移現象が被験者の意図とは独立に、制御変数(指振り実験の場合はメトロノーム音で刻まれる運動のテンポ)の変化によって起こるため、必ずしも中枢指令型のモデルでは説明できないとしている。CD の枠組みによる研究は、その後、脳活動と行動の同時計測により、脳レベルでの現象と行動レベルでの現象を関係づける試みへと展開している[6]。

3.2 Uncontrolled Manifold 仮説

Uncontrolled Manifold (以下 UCM と略す) 仮説に基づく UCM アプローチでは、中枢神経系は全ての変数を制御しているのではなく、課題の結果に影響する変数(タスク変数)のみを制御しており、課題の結果に影響しない変数(エレメンタル変数)は制御しない(Uncontrolled)という仮説[7]に基づいている。ここでいう変数の制御とは、変数を安定化し、一定に維持することを意味する[7]。すると、タスク変数は、試行を繰り返しても毎回一定の結果が安定して実現されるよう正確に制御されるが、エレメンタル変数は、課題の達成に影響しない範囲内²⁾であれば、分散は許容され、冗長性が担保される。

例えば、2本の指 A・B で机表面に圧力 $F_a \cdot F_b$ を加える動作を1試行とし、これを繰り返し行う実験を考える[12]。この実験の課題は、A・B の圧力の合計 F_t を一定の値(例えば 40N)に維持すること $F_t = F_a + F_b = 40$ である。被験者は、それぞれの指に圧力センサを装着し、 F_t の値しか表示されないモニターを見ながら課題を行う。計測されるデータは、 F_t のピーク時刻の $F_a \cdot F_b$ と

する。得られたデータを、横軸 F_a 、縦軸 F_b として平面上にプロットすると図1のような2種類の試行間分散がみられたとする。

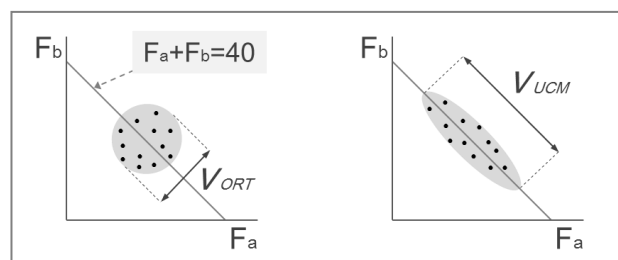


図1. UCMと試行間分散のプロット例

(左: Non-synergy、右: Synergy、Latash (2008) を参考に作成)

このとき、課題は F_t が 40N にすることであったため、課題を達成し、 $F_a + F_b = 40$ を満たす解 (F_a, F_b) は、図1の実線(UCM)に沿って無数にプロットされる。すなわち、この課題では、システムは冗長な自由度をもつ。システムが制御可能な変数は2本の指の圧力であるが、もしシステムが課題特定の組織化し、要素間で協調し Synergy を形成するならば、試行を繰り返した際、個々の指の圧力は毎回同じである必要はなく、2本の指の合計圧力が一定であればよい。別の言い方をすると、このシステムにて Synergy が形成されてなければ、試行間の分散は、各エレメント変数の確率分布の総和として、例えば図1左のような円形の分布(Non-synergy)となる。しかし、もし Synergy が形成され、 $F_t = 40N$ という課題を達成するように要素間の協調が実現しているならば、仮に F_a が何らかのゆらぎにより相対的に小さい値となった場合でも、それを補うかたちで F_b は相対的に大きな値となれば、 F_t は一定に維持され、図1右のような分布となる。UCM アプローチでは、この要素間の相互補償関係により、試行間の分散が課題特定の構造化されている場合、Synergy が形成されていると操作的に定義する[7]。UCM 解析では、UCM に平行な分散成分 V_{UCM} と、UCM に垂直な分散成分 V_{ORT} の2つの値の比 $R = V_{UCM} / V_{ORT}$ を計算し、 $R > 1$ のとき Synergy が存在すると定義することで、Synergy の存在やその強度を定量的に評価できる [7, 8]。これまで UCM 解析により、姿勢制御、リーチング、歩行、書字行為など様々な課題における Synergy の評価が行われている ([12, 13, 14, 15] など)。また、近年、中枢神経系の直接的な結合が存在しない個人間での Synergy について、UCM 解析を応用した研究も行われており [16]、Synergy 概念がその実体の別を問わず拡張され、受容されていると言えよう。

3.3 CDとUCMアプローチ: Synergy の特徴

CD では、自由度問題に対し、身体運動を自己組織化する多自由度複雑系とみなし、シナジェティクスの隷属原理が当てはまることを実験的に示し、モデル化を行った。CD では、Synergy について、如何にしてミクロレベルでの冗長な自由度(次元)が縮減され、マクロレベルでの低自由度の行動パターンが実現されるか、というかたちで定式化し、冗長な自由度を克服すべき問題として位置づけたと言えよう。

UCM アプローチでは、システムの冗長性は、克服すべき問題というより、むしろシステムの柔軟な振る舞いを支える積極的な意味合いをもつ。正確に反復する機械の動作と異なり、生物の動きには常に変動、ゆらぎが伴われる。UCM アプローチでは、

2) この範囲のことを、エレメンタル変数の座標系からなる状態空間にてタスク変数が一定に保たれる領域・多様体(そのなかでは制御されない)という意味で Uncontrolled Manifold と呼ぶ[6]。

この運動の変動性に着目し、それが単に確率的なノイズなのか、システムが直面する課題に対し特定の組織化された結果生じる方向性をもった構造かを定量的に評価し、Synergyの強度の指標としている。UCMアプローチでは、Synergyについて、その課題特定性・文脈依存性に着目し、それらが要素間の即時的で柔軟な相互補償によって実現することを示したと言えよう。

このように整理すると、CDとUCMの2つのアプローチは、ベルンシュタインの構想したシナジーというアイデアを、現代的な概念や解析手法によって捉え直し、より抽象的で拡張性の高いSynergy概念へと展開させてきた相互補完的なアプローチであると関係づけることができる。このことを踏まえ、Rileyら(2011)は、Synergyの特徴を、次元圧縮 Dimensional Compressionと相互補償 Reciprocal Compensation だとしている[19]。次元圧縮では、要素間の“結合”関係が強調されたのに対し、相互補償では、要素間の相互作用による“調整”関係に着目したと言える。

4. Synergy 再考

ベルンシュタインが先験的に予見した多自由度で複雑なシステムの振る舞いを記述することの難しさは、その後、現代的な数学・物理学の概念や解析手法によって、部分的に明らかにされたと言えるかもしれない。しかし、本章では、近年複雑系科学の分野で議論されているヘテラルキー、安定性-頑健性[17]、記述不能性[18, 23]の問題と関連づけ、Synergyについて再考する。

4.1 Ultrafast 現象

身体システムは、細胞レベルから筋骨格レベル、そして、身体を包囲する環境との間で、入れ子的な階層をなしたシステムであると考えられる。ここで、あるシステムを構成する要素のことを当該システムに対し、部分システムと呼ぶ。相互補償とは、Synergyを形成するシステムの部分システム間で、一方に対しノイズやエラーが生じた際、他方がそれを素早く補償することで、特定の運動課題が実現される機能のことであった。相互補償については、外乱を加える実験パラダイムにおいて、発話システム[19]や姿勢制御システム[20]において実証されている。しかし、これらの実験において注目すべきは、外乱が加えられてから相互補償が開始されるまでの“時間”である。例えば、Kelsoら(1984)の発話実験では、/bab/という単語の最後の/b/の発音をするために下顎が上昇しているとき、外乱として予測できないタイミングで下顎に負荷が加えられると、上唇は下顎と機械的には結合していないにもかかわらず、上下の唇の15~30ミリの素早い補償運動により、見事に外乱が補償され課題が達成された[19]。この速さは、反応時間や反射など、情報処理モデルに基づく生理学的な説明が困難なレベルという意味で、Ultrafastと呼ばれる[21, 22]。Ultrafast現象は、発話や姿勢制御だけでなく、画像識別課題における眼球運動、単語識別課題における全身の筋活動などの認知課題でも確認されている([22]参照)。また、トップレベルの卓球選手のスマッシュも、接近するボールに対して神経伝達速度では説明できない速さで調整されている[23]。

Ultrafast現象を説明するために、Turvey(2007)の導入したBiotensegrityという概念[24]を採用することは有効である。Tensegrityとは、引張材と圧縮材から構成される構造体である。Biotensegrityとは、Tensegrityのような構造を、身体の要素である細胞や、筋(引張材)と骨格(圧縮材)からなる筋膜網に想定したものである[24]。これにより、構造体に生じた変化(知覚)とそれに対する反応(行為)の間の統合について、神経科学が想定するような電気的・化学的な信号伝達経路を前提としなくとも説明できる。すなわち、機械的な結合をもつTensegrityにおいて、知覚と行為は別個のプロセスというより、構造の変化というひ

とつの事象の異なる側面として理解されるため、Ultrafast現象を説明できると考えられる。

4.2 観測由来ヘテラルキー

しかし、知覚と行為、あるいは、神経系における求心性と遠心性の関係は、果たして常にメビウスの輪のように同じコトの異なる側面[24]として捉えられるべきなのだろうか。相互補償における部分システム間の関係に戻ってこれについて考えてみる。

ここで、相互補償しあう部分システム間に、何らかの情報流³⁾が存在する場合を考えてみる。すると、それぞれの部分システムがその環境を観測するのに有限の時間が必要とされ[25]、各部分システムが観測する環境が厳密には一致しない事態が起こる。これは、部分システムがその環境を観測している間に、環境自体が変動することに由来する。この部分システムの境界における観測由来のゆらぎの存在を考慮するということは、階層的なシステムの階層間の相互作用に積極的な意味を見出すことである。部分システムの境界が変動的であるような動的階層性(ヘテラルキー)を考えることは、従来の力学系で想定されてきた“安定性”を超える“頑健性”の概念[17]について考えることになる。ヘテラルキーという概念を、階層構造をもつ対象に限定せず一般化したのが観測由来ヘテラルキーである[18]。

4.3 安定性-頑健性

力学系理論で議論されてきた安定性概念は、力学系として記述されるシステムの状態の時間発展の軌道に対して定義される。システムに摂動を加えたとき、その軌道からの逸脱が時間発展のプロセスで収束するか発散するかによって安定性が評価される。身体運動研究におけるCDなどの力学系アプローチでも、この安定性概念を前提に、身体運動を自己組織化するシステムの振る舞いとして捉えている。しかし、上記の観測速度の有限性・階層間相互作用を考慮せず、身体運動現象を自己組織化する物理システムのメタファーとして捉えると、身体運動に現れる時間相関のある変動[26]や、認知運動課題におけるスケールフリー相関[27]が説明できない。

これに対し、頑健性は、システム(力学系)自体が不断に変化し続けることを前提とし、軌道それ自体の絶えざる変化にもかかわらず、結果的に出現する軌道に同一性が維持される事態を指す。そのシステム自体の不断の変化は、システムを構成する部分システムによる部分システム相互の観測に伴うゆらぎ(部分システム間の変換写像に不連続部分が生じること)によって駆動される[28]。いわば、システムの頑健性は、部分システムの相互観測に由来しているのである。

この意味で、身体運動研究におけるUCMアプローチは、Synergyの2つの特徴であった要素間の相互補償に着目することで、CDがアプローチした安定性とは異なる頑健性に迫ろうとしたと言えるかもしれない。とすれば、冗長性・変動性を担保し、課題特定のSynergyを形成するシステムにおいては、予測しがたいノイズに対し、部分システム間でのUltrafastな相互補償によってそれらを吸収し、頑健に振る舞うことが可能であると考えられる。

近年、力学系アプローチによる身体運動の研究において、CDで提案されたモデルから予測される結果と異なる実験結果が報告されており([29]など)、これらの結果を理解する上でも、頑健性や観測由来ヘテラルキーの概念はヒントを与えてくれるかもしれない。Turvey(2007)も、ベルンシュタインの動作構築に関する階層的レベルの説明[2]は、ヒエラルキーというよりヘテラ

3) ここでいう情報流とは、ある地点Aから離れた別の地点Bへ物理的な作用が伝搬し、AからBへと変位が生じるプロセスを指す。

ルキーに近いとし、Synergy とその要素の循環的な依存関係を指摘し、Synergy 概念は、記述不能な非述語的問題を提起するものであり、複雑性の指標だと論じている[23]。

5. まとめ

1960年代に身体運動研究の分野でベルンシュタインが指摘した問題と、その解決のために考案されたシナジーの概念は、多自由度複雑系の記述や理解に関わる重要なものであった。その後、1970年代以降に展開した自己組織化理論を身体運動に応用した Coordination Dynamics、運動の冗長性・変動性に着目した UCM アプローチは、複雑系科学で議論されている安定性から頑健性への挑戦であると捉えることにより、内部観測の観測由来へテラルキーの概念などが、今後、身体運動の現象を理解する上で、有効な手掛かりを提供してくれるのではないかと考察された。また、Synergy の特徴であった相互補償の背景にある Ultrafast 現象は、古典的な計算主義・情報処理アプローチによるモデルに対して問題を提起するものであった。また同時に、生態学的アプローチ・力学系アプローチで想定されている知覚と行為の関係についても、部分システムの境界で観測に伴って生じるゆらぎ⁴⁾、階層間相互作用を積極的に認めることで、新たな知見が得られる可能性が示唆された。

Synergy 概念の含意⁵⁾については、今後、生物の認知・行動を理解する枠組みとして、運動・知覚・認知の研究、人工知能・ロボティクスなどの認知科学分野に複雑系科学の概念やツールを導入することで、ますます拡張され、深まってくると考えられる。

参考文献

- [1] Bernstein, N.A.: The co-ordination and regulation of movements, Pergamon Press Ltd., 1967.
- [2] Bernstein, N.A.: Dexterity and its development, Lawrence Erlbaum Associates, Inc., 1996.
- [3] Turvey, M.T.: Coordination, American Psychologist, 45(8), 938-953, 1990.
- [4] 川人光男: 脳の計算理論, 産業図書, 1996.
- [5] Haken, H.: Synergetics: An Introduction, Springer, 1977.
- [6] Kelso, J.A.S.: Dynamic patterns: The self-organization of brain and behavior, MIT Press, 1995.
- [7] Scholz, J.P. & Schönner, G.: The uncontrolled manifold concept: identifying control variables for a functional task, Experimental Brain Research, 126, 289-306, 1999.
- [8] Latash et al.: Motor control strategies revealed in the structure of motor variability, Exercise and Sport Sciences Reviews, 2002.
- [9] Kelso, J.A.S.: Phase transitions and critical behavior in human bimanual coordination, American Journal of Physiology: Regulatory, Integrative and Comparative, 246, R1000-R1004, 1984.
- [10] Haken et al.: A theoretical model of phase transitions in human hand movements, Biological Cybernetics, 51, 347-356, 1985.
- [11] Latash, M.L.: Synergy, Oxford University Press, 2008.
- [12] Scholz et al.: Motor equivalent control of the center of mass in response to support surface perturbations, Experimental Brain Research, 180(1), 163-179, 2007.
- [13] Yang et al.: The role of kinematic redundancy in adaptation of reaching, Experimental Brain Research, 176(1), 54-69, 2007.
- [14] Black et al.: Uncontrolled manifold analysis of segmental angle variability during walking: preadolescents with and without Down syndrome, Experimental Brain Research, 183(4), 511-521, 2007.
- [15] Nonaka, T.: Motor variability but functional specificity: The case of a C4 tetraplegic mouth calligrapher, Ecological Psychology, 25(2), doi:10.1080/10407413.2013.780492, 2012.
- [16] Riley et al.: Interpersonal synergies, Frontiers in Psychology, 2, 38, 2011.
- [17] Jen, E.: Stable or robust? What's the difference?, Complexity 8, 12-18, 2003.
- [18] Gunji, Y-P. & Kamiura, M.: Observational heterarchy enhancing active coupling, Physica D: Nonlinear Phenomena, 198 (1-2), 74-105, 2004.
- [19] Kelso et al.: Functionally specific articulatory cooperation following jaw perturbations during speech: evidence for coordinative structures, Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 10, 812-832, 1984.
- [20] Marsden et al.: Rapid postural reactions to mechanical displacement of the hand in man, Motor control mechanisms in health and disease, Raven, 645-659, 1983.
- [21] Thorpe, S.J.: Ultra-rapid scene categorization with a wave of spikes, Lecture Notes in Computer Science, 2525 (1), 1-15, 2002.
- [22] Wallot, S. & van Orden, G.: Ultrafast Cognition, Journal of Consciousness Studies, 19, No. 5-6, 141-160, 2012.
- [23] Bootsma, R.J. & van Wieringen, P.C.W.: Timing an attacking forehand drive in table tennis, Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 16, 21-29, 1990.
- [24] Turvey, M.T.: Action and perception at the level of synergies, Human Movement Science, 26, 657-697, 2007.
- [25] Matsuno, K.: Protobiology: Physical basis of biology, CRC Press, 1989.
- [26] Yamada, N. : Nature of variability in rhythmical movement, Human Movement Science, 14, 371-384, 1995.
- [27] Riley et al.: Learning from the body about the mind, Topics in Cognitive Science, 4, 21-34., 2012.
- [28] 郡司ベギオ幸夫・上浦基: 複雑性の本質: 観測由来へテラルキー, 複雑系叢書 7 複雑さへの関心, 共立出版, 2006.
- [29] Kodama, K. & Furuyama, N.: The Effect of the number of oscillators on the stability of finger-tapping movement: A comparison between intra- and inter-personal coordination systems, Proceedings of the 12th European Workshop on Ecological Psychology, 2012.
- [30] Reed et al.: On the nature and significance of microsliaps in everyday activities, Journal of Ecological Psychology, 4, 51-66, 2009.

4) 生態心理学で身体-環境間の絶えざる調整過程の断片として議論されているマイクロスリップ ([30]など) は、本稿で考察した身体の部分システムの境界で見出された観測由来のゆらぎと同種の現象、その個別的な事象と解釈することもできるかもしれない。

5) 本稿で考察できなかったテーマやトピック、アプローチも多々ある。それらについての検討は今後の課題としたい。