



Title	身体運動研究における外部と内部の接合
Author(s)	山田, 憲政
Citation	北海道大學教育學部紀要, 75
Issue Date	1998-03
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/29555
Type	departmental bulletin paper
File Information	75_P83-111.pdf



身体運動研究における外部と内部の接合

山 田 憲 政

Connection between observable parameter and inner state of body in human movement science

Norimasa Yamada

目次

第1章. はじめに	84
1.1. 身体運動科学研究の前提とその問題点	84
1.2. 観察問題と心身問題の関係	85
1.3. 心から身体への検討—情報の発信者と受信者の区別は可能か	85
1.4. 研究目的	87
第2章. 人間研究における理論負荷観察の実態	88
2.1. 人間の運動を説明する2つのモデル	88
2.2. Motor Control の研究	88
2.3. 自己組織研究	90
2.3.1. 姿勢反射とシナジー	90
2.3.2. 最適化研究とシナジー	91
2.4. 理論と観察そして理論と理論負荷観察	93
第3章. 情報の発信者と受信者	93
中枢神経系と筋骨格系, そして個体間の情報伝達 (運動技術論)	93
3.1. 情報の発信者と中枢神経系	94
3.1.1. 運動野と筋の一对一対応	94
3.1.2. 情報の解明, 内部と外部の論理矛盾の問題提起	95
3.1.3. 情報の解明, 情報受信遮断実験と情報の送受信の問題提起	96
3.1.4. 問題の整理	98
3.2. 個体間の運動情報の流れ	98
3.2.1. 小林の運動技術論	98
3.2.2. 金子の運動技術論	100
3.2.3. 小林の運動技術論と金子の運動技術論の相違点	101
第4章. 観察者の特性, 観察者と観察対象の相互関係	101
4.1. 観察者の特性, 観察者のモデルを通してみた現象	102
4.2. 観察者の特性, 観察時間の有限性の考慮	104
第5章. 身体運動科学の新たな研究課題	106
5.1. 身体内部を探る身体運動科学	106
5.2. 生命と機械の定義, そして予測不可能性と身体運動科学	106

1. はじめに

1.1. 身体運動科学研究の前提とその問題点

われわれ人間は常に動いている。では、常に動いている最中の身体の内側では何が起きているのか。この運動する本人の筋活動や、ニューロン活動、そして心的状況と言った身体内部の状態を探るために、細胞レベルから骨格筋レベルまでの幅広い観察のレベルで研究が為されている。また、同じ運動中の身体内部を探るにしても、ミクロからマクロまでの観察のレベルで神経生理学、運動生理学などに分離されている。これら運動中の身体内部の状態をダイレクトに測定する研究方法に対してバイオメカニクスは、身体内部の状態を探るために特異な方法を用いる。バイオメカニクスでは外部に現れた骨格の運動や運動環境との間で生じる力を観測し、次に観測した系をモデル化して得られたデータをそのモデルの出力として系の内部状態を間接的に探る。

運動中のニューロン活動や筋活動の状態などの身体内部の状態を対象にする、あるいは外部に現れた骨格の運動を対象にするにしても、これらの研究方法で共通の前提とされていることは、研究対象の状態を特定するために運動を外部から観察する研究者の目を必ず通過する必要があることである。したがって、身体運動を研究するすべての研究分野（身体運動科学と省略）で共通の前提とされていることは、「観察する対象が実在し外部から観察することによってその対象が記述できる」ことであると言える。

この身体運動科学における「観察する対象が実在し外部から観察することによってその対象が記述できる」という前提は、まさしく近代科学（16世紀から17世紀に西ヨーロッパで出現した知識形態）の研究手法論の特徴そのものである（野家，1993）。この近代科学的世界像の根底には、全自然（宇宙）を貫く人間の意志からは独立な法則性があり、そしてこの法則性は数学的に把握可能であり、物理量を変数とする微分方程式の形に書き表しうるとまとめることができる。したがって身体運動科学は、この近代科学の前提である、1）観察対象の実在あるいは観察と理論の峻別、2）観察対象における法則・構造（あるいはルール）の実在ということを基盤として研究が為されていると言える。

このように近代科学研究方法は理論と観察を峻別することを前提とするが、「感覚与件+解釈」という二段階知覚説がそれに理論的根拠を与える。この二段階知覚説は感覚与件すなわち色や形や音等々のモザイク模様こそ初次的な生の観察事実であり、それ以外の要素はすべて感覚与件の集合体に後から付け加えられた解釈の所産にすぎないとするものである。たとえばわれわれが花を観察して花と解釈するまでの過程が、花からの光刺激が視覚系に入力され、それが中枢で処理され花の知覚像が得られると説明される。この二段階知覚説に対して1960年代に入ってHanson (1969)は根本的な批判を行い、理論付加的観察という一段階知覚説を提起した。この一段階知覚説は、観察の中には「として見る seeing as」という解釈が構造的に組み込まれているというもので、観察とは生の事実があるがままに受動的に検知することではなく、逆に理論的枠組に則して事実を解釈的に構成する能動的な行為であるとするものである。Hansonの問題提起に対して顕微鏡写真やレントゲン写真などから形を読み取る観察においては認めるが、測定器を経て対象からデータを読み取る実験の場合は誰が読み取っても同じ値が保証されているのではないかとし、その批判を退ける研究者もいるであろう。しかしながら問題はそれほど単純ではない。たとえば温度計を用いて体温を測定する場合を考えてみる。私たちは測定部位を腋窩部（わきの下）に特定し、決められた時間だけ測定するであろう。この行為には既に測定に先立ち身体のすべての部

位で温度は微妙に異なるが事前にある特定の部位の温度でその代表とすること、温度計はある決められた時間後は測定対象の温度を示すこと、といった測定器の使用に対する先行知識が含まれている。また、使用する温度計は事前にそれより高い精度の温度計によってキャリブレーションが為されている必要がある。さらに厳密にはこのキャリブレーションに用いた温度計もそれより精度の高い温度計によってキャリブレーションがなされている必要があり、このキャリブレーションという行為は無限に続くことが理解される。この無限のキャリブレーションをどの精度で打ち切るかは、その研究が為される研究分野で暗黙のうちに決定されているのである。無限を有限の精度で打ち切る行為は、測定器のキャリブレーションだけでなく、測定器からデータを読み取る時にも同様に必要となる。これは測定器の精度に依存するだけでなく、観察は瞬時に終わらなく有限の時間が必要となるという観察者側の根源的な問題を含む。例えば厳密には体温は常に変動しており、これに対して観察には有限の時間を必要とするので、ある時間の対象の状態を特定することは厳密には不可能であるとする問題である。このような問題に対しても、研究を遂行するうえで変動するデータのある時間間隔の平均値が得られれば十分であると主張する研究者もあるであろうが、近年の複雑系の研究は変動そのものの意義まで追及しており、もはやこの反論も退けられるであろう。以上のように測定器を用いる客観的な観察においても、使用に先立ちその使用に対する理論が含まれているのである。

1.2. 観察問題と心身問題の関係

Hanson が提起した問題は、観察対象と観察者との相互媒介関係あるいは解釈的循環関係であり、この問題はすべての研究分野に根源的な問題提起をするものであるが、特にデカルト以来の心身問題を再考させる契機になったといえる。なぜなら、心身問題は人間を心と身体という2つの実体に分離し、それぞれの実体の変化が異なる法則に支配されていると考えたことから生じた問題であるが、Hanson が提起した問題は対象と観察者の相互関係であるから、それは心身問題においては身体からの感覚情報とそれに対する心の側の先行知識の相互関係に対応させることができるからである。次に、身体内部において、身体からの感覚情報とそれに対する心の側の先行知識の相互関係を、運動中の関節トルクを分析することによって検討する。

1.3. 心から身体への検討—情報の発信者と受信者の区別は可能か—

一般に、自分の身体は自分の思い通りに動かせると考えられている。身体は筋収縮力によって運動すること、そしてその運動の原動力を発揮する筋は脳の運動野からの神経インパルスによって収縮し、さらに心的状況と中枢神経系のニューロン活動が対応付けられる、という研究報告がそのことを理論的に裏付けることができると考えられる。制御系の語を用いれば脳が制御器で身体が制御対象と言える。しかし、「自分の身体は自分が思い通りに動かせる」という言明には身体がもつ力学的性質が考慮されていない。身体は神経システムが情報を不断に伝えている媒体という性質と同時に質量をもつ物質であるという側面を持つ。したがって身体は重力下の力学空間にありニュートン力学法則に従い運動する。自分が思い通りに動かしていると感じている自己の身体は実は力学法則を満たしながら動いているのである。そのことを以下に詳しく検討する。

図1は、多関節運動中に関節に作用するトルクを検討するために用いた支点が運動する剛体振り子である。支点の運動は隣接セグメントの運動によって可能になるため、この剛体振り子モデルは身体のような多関節系の運動を最も単純に検討することができる力学モデルと言える(山田,

1991)。

剛体振り子は、並進と回転の運動方程式の基本式から、

$$m\ddot{x}_1 = F_x \quad (1)$$

$$m\ddot{y}_1 = F_y \quad (2)$$

$$I\ddot{\theta} = N + F_x l \sin \theta - F_y l \cos \theta \quad (3)$$

の3式が得られる。さらに、モデルの幾何的關係から以下の2つの式が得られる。

$$\ddot{x}_1 = \ddot{x}_0 - \ddot{\theta} l \sin \theta - \dot{\theta}^2 l \cos \theta \quad (4)$$

$$\ddot{y}_1 = \ddot{y}_0 + \dot{\theta} l \cos \theta - \dot{\theta}^2 l \sin \theta \quad (5)$$

(4), (5)式を(1), (2)式にそれぞれ代入して、 F_x , F_y を θ と (x_0, y_0) を用いて表わし、その結果を(3)式に代入すると、次式が得られる。

$$(I + ml^2) \ddot{\theta} = N + ml\ddot{x}_0 \sin \theta - ml\ddot{y}_0 \cos \theta - mgl \cos \theta \quad (6)$$

(6)式の左辺は軸まわりの振り子の慣性モーメントと角加速度を掛け合わせたもので、軸 P_0 まわりの振り子の角運動量の時間的変化を意味する。すなわち、軸 P_0 に作用するトルクを表わす。よって右辺はそのトルクが生じる原因を表わしており、 N は筋張力に起因するトルク(筋トルクと省略)、 $ml\ddot{x}_0 \sin \theta - ml\ddot{y}_0 \cos \theta$ は軸 P_0 の加速度に起因するその軸まわりのトルク(関節の加速度に起因するトルクと省略)、そして $mgl \cos \theta$ は重力に起因するトルクを表わしている。このように関節まわりに運動方程式を導出することによって、関節に作用するトルクを3つの異なる力に起因する成分に分離することができる。

図2は、上記で示したトルクの分離方法を用いて、走運動中の身体を高速度カメラで撮影し身体各関節位置をデジタル化すると同時に、足部に作用する外力を測定し、膝関節に作用するトルクの時間的変化を実際に算出したものである(山田, 1991)。図中の T_N が筋トルク、 T_A が膝関節の加速度に起因するトルク、 T_G が重力に起因するトルク、 T_{Σ} がそれらの総和で関節に作用するトルクを表している。この図から、遠心性のニューロン活動によって制御可能な筋トルク T_N と関節に作用するトルク T_{Σ} は一致しないことが分かる。特に、膝関節の加速度に起因するトルク T_A の成分が筋トルク T_N とほぼ同じ大きさで関節に作用している。このトルク T_A は、制御対象である身体を構成する部位間の相互作用および外界からの力(走運動であれば地面反力)によって生じるものである。また、大きさは相対的に小さいが重力に起因するトルク T_G も無視できない。このトルクも制御対象である身体の状態(位置)で決定する。このように多関節運動においては、遠心性のニューロン活動によって制御可能な筋トルクと関節運動に必要なトルクの値は一致せず、関節運動をある目的に従い行うためには、身体の運動状態や外界からの力学的影響といった制御対象からの情報が常に制御側に必要になる。つまりこのことは、中枢神経系を情報の発信者として身体から抽出することはできないことを示している。

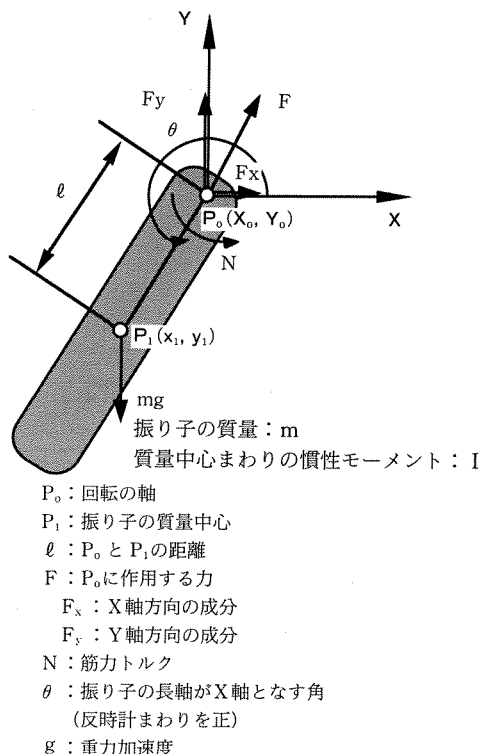


図1. 多関節運動中の関節に作用するトルクの成分を抽出するために用いた支点が運動する剛体振り子モデル

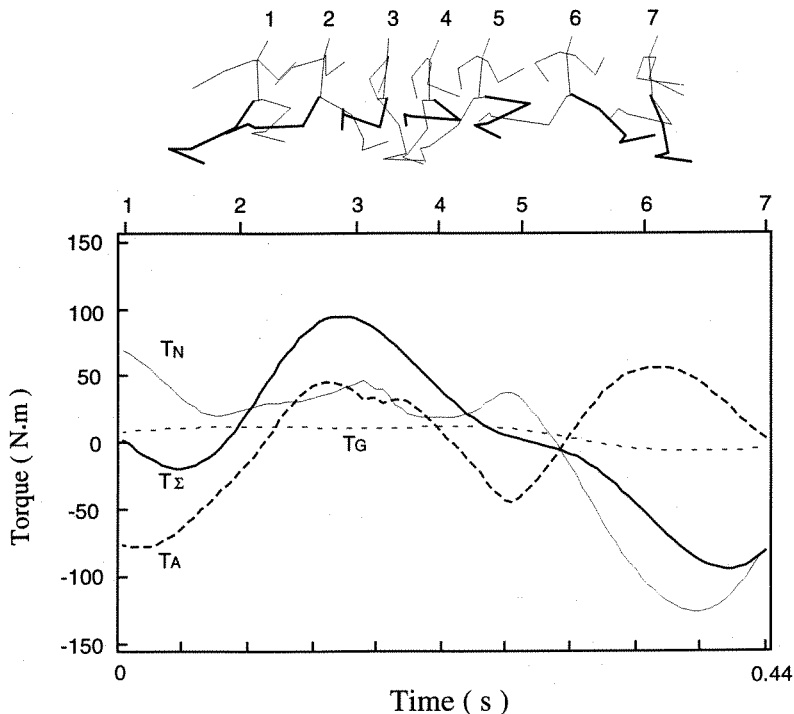


図2. 走運動中の膝関節に作用するトルクの時間的变化。
 正のトルクは関節の伸展、負のトルクは関節の屈曲に作用する。 T_{Σ} が関節に作用するトルクを表わし、 T_N が筋力トルク、 T_G が重力トルク、そして T_A が膝関節の加速度に起因するトルクを表わす。(山田, 1991)

1.4. 研究目的

身体運動科学は実験して得られた観測データから身体内部の状態を推論する。ここまで検討してきたようにこの方法には次に挙げる2つの問題点がある。

1) 身体運動科学の研究においては、観察には観察者の理論が入り込む余地はないと考えられてきた。しかし観察とは観察者と観察対象が相互媒介することである。すなわち、実験データの記述、解釈、そしてモデル化には既に観察者の理論が介入している。

2) 身体運動の研究においては運動情報を発する側と受信する側を明確に分離できると考えられてきた。この分離が可能であるからこそ、情報を受け取り運動する側を観察すれば、情報を発する側（すなわち中枢神経系）の状態が推論できると考えられてきた。また、外部に現れた骨格の運動データと内部のニューロン活動を対応づける研究が可能であると考えられてきた。しかし情報の発信者と受信者を明確に分離することは困難である。

本研究においてはこの2つの問題提起に対して、(1)まず身体運動科学における理論付加観察の実態を明らかにすることから始める。(2)次に、理論付加観察から導かれる情報の発信側と受信側の相互媒介関係を検討する。身体運動の研究において情報の発信者と受信者の二分化は2つのタイプで検討する必要がある。その一つが身体内部における情報の発信者と受信者の二分化である。これは言うまでもなく中枢神経系と筋骨格系に相当する。さらに、もう一つのタイプの情報の発信者と受信者の二分化は、個体間における運動情報の伝達に対してである。これは、子供が箸を

持つことを学習する、あるいはスポーツ選手が高度な技術を習得するなど、親から子あるいはコーチから選手へといった複数の個体間での運動情報の伝達が基盤となる。(3)そして最後に外部観察データから身体内部を探るための身体運動科学の課題を整理する。

2. 身体運動科学における理論的負荷観察の実態

本章では、身体運動科学における理論的負荷観察の実態を人間の運動制御を説明する複数の理論を検討することによって明らかにする。その方法として、人間の運動制御を説明する複数の理論を導いた重要な実験と科学史上の大きな理論的枠組との関係を検討する。そしてそれらの実験や実験結果の解釈は理論的枠組に支配されており、すなわち選択的に事実を解釈しようとしており、人間の運動制御を説明する複数の理論は観察事実から帰納的に法則を抽出し形成されたのではなく、科学史上の大きな理論的枠組に支配されて事実を積極的に選択し解釈することによって構成されてきたという側面を検討する。

2.1. 人間の運動を説明する2つのモデル

現在、運動制御の研究は大きくわけて2つに分けられると考えられる。一つは中枢神経系と筋骨格系を制御器と制御対象に分離してモデル化する Motor control の研究 (Motor control 研究と省略) の流れであり、もう一つは、明確な制御器を設定せず、身体運動に関与する自律性を持つ複数の要素の相互作用で身体全体の運動構造が自然発生的に生じるとしてモデル化する研究 (自己組織研究と省略) の流れである。

2.2. Motor control の研究

Motor control 研究は Schmidt によって一様の完成 (完全な身体運動のモデル化) が見られたと言われているが、Schmidt は Motor control 研究において身体運動をモデル化するために最も重要な基本原理は Fitts の法則であると述べている (Schmidt, 1988)。Motor control 研究の第一人者自らが最重要視する Fitts の法則とは、以下の式で表される運動距離、運動の正確性の要求水準、そして運動時間に関する関係である。

$$MT = a + b \log_2(2A/W) \quad (7)$$

ここで、MT は幅 A の 2 つのターゲットの距離 W を運動するために必要な時間である。したがってこの式は、運動距離、運動の正確性の要求水準、そして運動時間の三者が単純な法則にしたがって結びついていることを表している。この式の信頼性は、Fitts (1954) 以降最近まで多くの研究者によって実験的に確認されてきている (Kerr, 1973; Jagacinski and Monk, 1985; Kantowitz and Elvers, 1988)。

Fitts の法則は、運動時間は運動距離 (A) の増大あるいは要求される正確性 (W) の減少により延長することを表すが、運動距離の増大よりも要求される正確性の方が運動時間の延長に及ぼす影響が大きいこと、さらに、運動時間は要求される正確性 (W) に対する運動距離 (A) の比が同じであれば一定であることを表している。Schmidt が指摘するように、これらの経験則が、運動の誤差を検出しながら動作修正を行うフィードバック制御や急速な運動におけるフィードフォワード制御、そしてそれら 2 つの制御様式の種類による切り替えモデルや混在モデルなどの考案を促してきている。

それでは、Fitts が考案した運動距離・運動の正確性の要求水準・そして運動時間の三者を関係

付ける単純な式はどのようにして導きだされたのかを、Fittsがこの式を発表した1954年の論文から検討を始める。まずこの論文で用いられた実験方法であるが、被験者は椅子に座った状態で鉄製のペンを持ち、机上の2枚の金属製プレートをできるだけ早く交互にタッピングを行い、その時の運動時間が測定されている。さらに試技条件は、2枚のプレートの幅とプレート間の距離を増減させることによって、変化させている(図3)。

では、Fittsが運動距離・運動の正確性の要求水準・そして運動時間の三者の関係を導くデータを得ることになったこのシンプルであるが貴重な実験は、どのようにして考案されたのであろうか。実はこの実験方法の原形は、Fittsがこの論文で参考論文に挙げているように、Fittsが考案したものではなく、Fittsから遡ること約50年前に Woodworth (1899) によって考案されている。Woodworthの考案した実験では、被験者に鉛筆を持たせ目標点

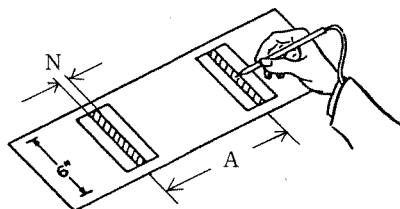


図3. Fittsが用いた実験の課題。被験者は距離Aだけ隔たった幅Wの2枚のプレートを交互にできるだけ早くタッピングする。(Fitts, 1954から改変)

まで様々な速度で線を書かせている。さらにこの実験で既に、運動距離や目標点における誤差そして運動時間の関係性が検討されているのである。ではなぜ、運動距離・運動の正確性の要求水準・そして運動時間の三者の関係を法則付ける式が50年後のFittsの論文まで待たなければならなかったのであろう。

第1章で問題提起したように、Woodworthの実験とFittsの実験の間、すなわち1899年から1958年の50年間でどう捉えるかが本研究の重要な目的である。Woodworthの実験データは、そこから法則を導くためには不十分であったのか、あるいはそれらのデータを法則化する理論が誕生しなかったと見るかである。後者の可能性を検討するには、この50年間にその後の身体運動の制御のモデル化に大きな影響を及ぼすことになる理論について検討する必要がある。

実は、Schmidt (1988) が身体運動の制御のモデル化に最も重要な影響を及ぼしてきた理論であると指摘するサイバネティクス理論は、Woodworthの実験とFittsの実験の間に Winer (1948) によって構築されている。サイバネティクス理論は通信と制御に関する問題を生物であろうと機械であろうと統一的にモデル化することを目論んだ理論であり、そこでの基本的な概念は Shannon (1949) によって定義された情報である。また、この情報を送信者から受信者に伝送することが通信である。実はFittsの論文においても、彼が実験データから導いた(7)式とShannonの情報理論における情報伝達速度を現す量として定義されている通信路の通信路容量との式の類似性が議論されている。この通信路の通信路容量Cは、以下の(8)式で表される。

$$C = W \log_2((P+N)/N) \quad (8)$$

ここで、Pが信号そしてNが通信路に付加されるノイズを表す。Fittsは、この(8)式のP+N(信号+ノイズ)が(7)式の2A(運動距離)に相当し、(8)式のN(ノイズ)が(7)式のW(運動の誤差)に相当するとして、彼が導いた式とShannon情報理論の類似性を検討している。

Fittsの法則は運動制御の研究者によく知られているが、これまでそれがどのようにして生まれたのかということは十分検討されてこなかった。それは、自然科学研究においてはその法則だけを知るだけで十分であり、それが何時あるいはなぜ生まれたかと問うことが必要なかったからである。しかし、本研究での理論と観察の相互関係の観点からFittsの法則の誕生を検討するとその背景は以下の3点にまとめられる。

1) 運動距離・運動の正確性・そして運動時間の三者が関係することは、Fittsの実験の50年前にWoodworthによって既に発見されている。

2) Woodworthの実験とFittsの実験の間にWiner(1948)によってサイバネティクス理論が、そしてShannon(1949)によって情報理論が構築されている。

3) Fittsの論文において、彼が実験データから導いた式とShannonの情報理論における情報伝達速度を表す量として定義されている通信路の通信路容量との式の類似性が議論されている。

これらのことから、Fittsの法則は観察事実から帰納的に法則を抽出し形成されたのではなく、科学史上の大きな理論的枠組すなわちShannonの情報理論に支配されてWoodworthの実験事実を積極的に解釈することによって構成されたと考えられる。すなわち、Woodworthが発掘した身体運動現象とFittsの法則は不連続であり、その不連続性を繋げたのがShannonの情報理論であるといえる。

2.3. 自己組織研究

自己組織化とは、一般的には「システムを構成する自律性を持つ多数の要素の相互作用で全体の秩序が自然発生すること」と定義されている。したがってそのようなシステムではシステムを構成する要素の挙動を監視あるいは制御する中枢を仮定する必要がなく、Motor control研究における制御器と制御対象の二分という前提と大きな隔たりが生じる。自己組織化するシステムの特徴はHaken(1985)やPrigogine(1977)らのパイオニア的研究によって化学反応や流体あるいはレーザー光などにおいて詳しく調べられているが、その一つにシステムを構成する要素のわずかな揺らぎをきっかけとして全体の新たな秩序が生成されることが挙げられる。

身体運動の自己組織研究における理論負荷観察を検討する前に、自己組織研究が問題にしたシステムを構成する要素間の相互関係を、Motor control研究においてはどのように解釈したかを検討することにする。なぜなら、身体運動の自己組織研究の起源は、この要素間のつながりの解釈を再検討することから始まったと考えられるからである。

Motor control研究においては要素の運動の原因を中枢に求めることから、要素の数が増加すると制御する自由度が膨大になるという問題が生じた。この自由度に関する問題は「Bernstein問題」と呼ばれているが、要素間の運動の関係を無視することから生じた問題と言えよう。この身体運動において各部位間の関係性を問題にした研究は、Bernsteinによって始められている。Bernstein(1967)は、歩行や走運動などの人の基礎的な運動を、画像と筋電図を用いて分析した。その結果、運動中の筋群間にはそれぞれの運動によって一時的で柔軟な結合があることを発見し、それをシナジー(Synergy)と呼んだ。このシナジーという概念は拮抗筋として機能する伸筋と屈筋の協調活動を基にFerrier(1876)によって提唱されたものである。Bernsteinがシナジーと呼んだ筋群間の協調は、Ferrierが単関節の運動において定義したシナジーを全身の運動に拡張したものと考えられるが、Motor control研究においてはシナジーとは筋群間の関係が運動の事前に既に学習されパターン化された運動として解釈されている。制御系と制御対象の縦の繋がりで身体運動を解釈する立場としては、事前に制御対象の各要素の横の繋がりがあろうという解釈は当然であろう。そこでパターン化された運動として解釈した2つの事例を以下に紹介する。

2.3.1. 姿勢反射とシナジー

福田(1957)は姿勢反射を詳しく解析し、猫・猿などの実験動物で観察される緊張性頸反射が、

ヒトでもある種の神経疾患では発現することを報告している。この緊張性頸反射とは、頭を右にまわすと顔の向いた側の上肢と下肢は伸展し反対側の上肢と下肢は屈曲する運動現象である。また頭を左にまわすと右にまわした場合とは反対の動きが左右側の上肢と下肢で発現する。このような頭の動きに伴う四肢の動きは正常児では観察できないことから頸反射は上位の機構からの抑制作用の脱落によって下位の機構が自動的に作動したことに基づく病的反射であると見なされてきた。しかし福田は一側上肢と下肢の伸展動作と反対側上肢と下肢の屈曲動作を伴う四肢の運動が正常人においても発現していることを見いだした。たとえば野球の選手が捕球しようとしてジャンプする際に、捕球側の上肢・下肢は伸展し、反対側の上肢・下肢は屈曲する。彼はこのような運動が純粋な随意運動と意識に上らない反射運動の2つの組み合わせで構成されると考えた。そして彼は次のような仮説を提出した。「骨格筋の活動様式は随意的に制御されるばかりでなく、パターン化された筋活動を伴う運動すなわちシナジーの形成からも推論できるように、ある種の自動的あるいは意識されない運動の実行信号によっても制御される。」このようにシナジーを学習の段階（野球の捕球の場合はこのような姿勢が最も効率的に筋力が発揮できると福田は考察している）でパターン化された筋活動であると捉え、随意運動のプログラムの中に事前に組み込まれていると考えたわけである。

2.3.2. 最適化研究とシナジー

Bernstein が提起した自由度の問題は、制御工学においては多自由度に加えて冗長性の問題を含めた問題として扱われている。冗長性とは制御できる自由度より制御対象の自由度が多い場合に生じる問題であり、このような冗長なシステムにおいては要素間の組み合わせで生じる運動が無限に存在することになる。たとえば手先を目標点まで達成させるための軌道は、肩関節と肘関節の屈伸運動の組み合わせで無数に存在する。しかし、事前には無数に存在する軌道も運動後には一つに確定されるわけであるから、Motor control 研究においてはこのような事態を、事前に軌道の選択が成されており、さらに選択された軌道はある評価において最適であるという解釈をした。すなわち無数に存在する要素間のつながりを、運動の事前に決定されていると考えたパターン化された筋活動の解釈と同じである。その後 Motor control 研究において、運動の評価関数を明らかにする実験が主に人間の手伸ばし運動において行われた。Abend et al (1982) は、初期位置から目標点までの手先の2点間の軌道を分析することによって、その軌道は運動中ほぼ直線となり、速度は運動開始から滑らかに増加してピークを迎えその後目標点まで滑らかに減少することを明らかにした。Flash and Hogan (1985) はこの実験結果に基づいて、作業空間で軌道が最も滑らかに行われるという評価関数を用いて最適化の方法を身体運動の制御の研究に導入した。その後、関節に作用するトルクの変化が最小 (Uno et al., 1989)、筋張力変化が最小 (宇野ら, 1988)、ニューロンの発火頻度が最小 (Kawato, 1992) というように、最適化の評価関数をより運動の中核で表そうという形で発展して考案されている。このように最適化の方法は、冗長なシステムにおける各要素の無数の組み合わせを、ある評価関数を用いて1つに決定することによって自由度の問題を回避しようとしたわけである。

さて、このように要素間のつながりを運動の事前に決定されたパターン化された筋活動と考えた研究に対して新しい解釈が行われ始めた。Kelso et al. (1980) と Kugler et al. (1980) は、シナジーを自己組織現象と類似する点を Prigogine らの散逸構造論を基に 1980 年に指摘した。そ

して彼らは、シナジーを協調構造 (Coordinative structures) と呼び直した。彼らの論文では緒言から自己組織化を新たなパラダイムとして紹介し、Bernstein 問題を解決する有力な方法であると主張している。したがって身体運動の自己組織研究は Bernstein が約 30 年前に見つけた運動現象を、自己組織化の理論の形成とともに新たに解釈し直したと言える。特に Kelso がその後展開した身体運動の自己組織研究においては、自己組織システムの典型的な特徴を身体運動からも確認することが中心に行われている。その第一段階として、自己組織化するシステムの典型的な特徴である相転移を身体運動においても確認することが行われた。その実験では、被験者に左右の腕または人差し指を初めに 180 度の位相差で動かさせ、その後動かす周波数を増加させるとある周波数時で突然 0 度の位相差となること、そしてこの実験を 0 度の位相差から周波数を下げても 180 度の位相差には戻らないことを示した (Kelso, 1984)。またこの実験の翌年には、Haken などのシナジェティクス理論 (自己組織現象を統一的に捉えようとする理論の一つ) 研究者との共同研究を行い、この指の運動をシナジェティクス理論を用いてモデル化している (Haken et al., 1985) (図 4)。Kelso が行った次の段階での自己組織システムと運動現象の類似性の検討は相転移を引き起こす原因となるゆらぎを確認することであった。その実験においては相転移を確認したときと同様の実験を行い、運動の周波数増加に伴う両指の周期運動を 180 度の位相差の局面と 0 度の位相差の 2 つの局面に分離し、それぞれの局面の位相差の時間的变化から標準偏差を計算した。その結果、180 度の位相差の局面の標準偏差が 0 度の位相差のそれより劇的に大きいことを報告している。そしてシナジェティクス理論におけるゆらぎの重要性を身体運動現象からも確認で

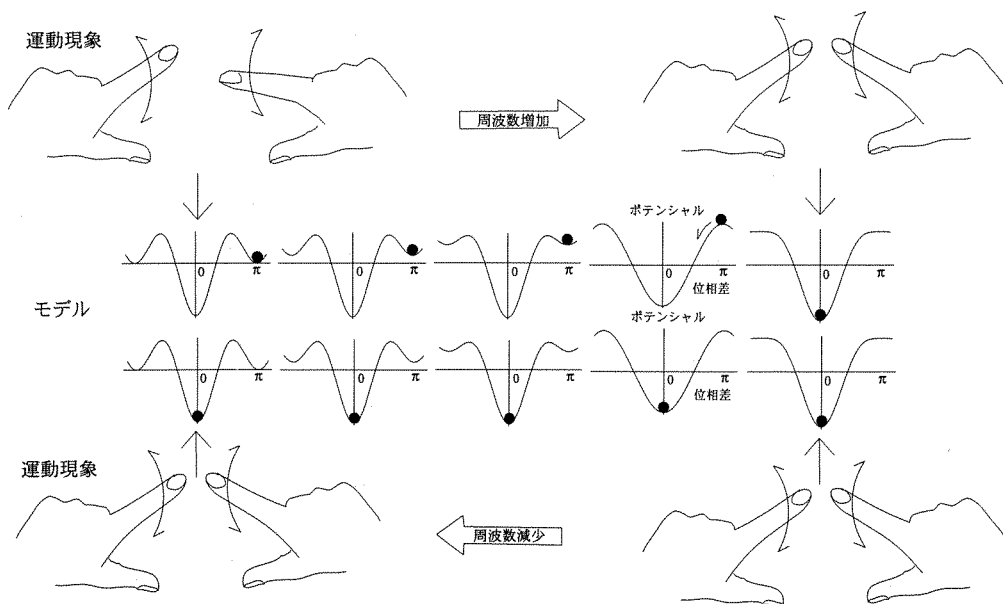


図 4. シナジェティクスを用いた両指の周期運動のモデル。

180度 (π) の位相差で動かし始めた両指は周波数の増加に伴いあるとき突然 0 度の位相差で動きだす。またその状態から周波数を減少させていても位相差は π へ戻らない。モデルはその運動現象に対応して示されており、周波数 (コントロールパラメーター) の増加に伴いポテンシャル関数の型が変化し両指の位相差を表すボールが π から突然 0 へ転移する。また、周波数を減少させることによってポテンシャル関数の型が変化しても 0 にあるボールは π へ戻らない。

きたと報告している (Kelso et al., 1986)。

理論が提起されてはるか後になってから観察が実行される事例 (1916 年アインシュタインの一般相対性理論, 1919 年エディントンによる日食観察での光線の屈曲の確認) は, 科学史上多々見られるところであるが, 身体運動の自己組織研究は, 物理システムで構築された自己組織理論を身体運動現象において観察するという形式で進められてきたといえる。これらのことから, 身体運動の自己組織研究は Bernstein 問題を近年の科学史上の大きな理論的枠組すなわち自己組織理論に支配されて解釈することによって展開されているといえる。

2.4. 理論と観察, そして理論と理論負荷観察

本章のまとめとして, ここまでの身体運動の研究を検討することによって明らかにされたことをまとめる。本章では, 身体運動研究において観察データの集積の中から一定の法則を帰納的に見だし理論が形成されるとする見方を検討した。このことは, 近代科学の成立基盤である理論と観察が独立でありお互い影響を及ぼさないという前提を身体運動研究において検討することと言い換えることができる。その方法として, 身体運動現象を理解する 2 つの理論の成立過程を検討した。その結果, 2 つの理論とも科学史上の大きな理論的枠組に支配され実験事実を積極的に解釈し構成されたと結論した。

このように本章においては, 身体運動研究における観察事実とは, 観察者の理論と観察対象が相互媒介 (理論負荷観察) しながら生じることを主張したが, ここで注意が必要なのは, 理論と観察は独立ではないが, 理論と理論負荷観察は区別可能であるということである。たとえば野球の審判がルールブック (理論) に則りボール等の観察を行う事を考える。この場合審判の行為全体 (理論+観察) を理論負荷実験と呼ぶことにする。まず, 審判に生じる球や選手の動きの知覚は生理学機構と審判を含む社会の生活様式や概念との相互作用によって生じるが, この知覚事実から理論にとって意味のある項目を選択して事実として再構成される (球が線上にあるか外にあるかなど)。したがって知覚はそれ自体で完結した意味を持つ具体的経験であり, また理論とは独立に生じる。たとえばフォークボールは実は手元で落ちないことが理論的に分かっても, 実際にはそのようには見えず手元で落ちるように知覚される。このように, 理論から知覚対象へのベクトルはあっても (知覚対象を理論によって選択するなど), 知覚対象から理論へ向かうのベクトルはない (知覚的事実は理論に対していかなる場合でも独立である)。これらの例のように, 理論と理論負荷実験とは独立に存在すると言える。したがって理論そのものは実験データを用いず数学的な方法などで検証可能であるといえる。

3. 情報の発信者と受信者

中枢神経系と筋骨格系, そして個体間の情報伝達 (運動技術論)

第 2 章において, 身体運動の研究における理論負荷的観察の側面を検討したが, それは身体運動の研究における観察者と観察対象の相互関係を明らかにしたものであると言える。この観察対象と観察者は情報を発する側とそれを観察する側といい直すことができることから, 観察対象と観察者の相互作用は Fitts の法則を基礎的理論とする Motor control 研究に重大な影響を及ぼした Shannon の情報理論においては, 情報の発信者と受信者の相互作用に相当すると言える。

情報の送信者と情報の発信者の相互関係というパラドックスを含む言明は, つまり Motor control 研究は Shannon の情報理論を基に構築されてきたのであるから, 情報の発信者と受信者が通信の

事前に決定される必要があり（それが Motor control 研究においては中枢神経系と筋骨格系に相当するわけであるが）、相互関係とは一方が他方に影響を及ぼすと同時に他方からの影響も受けることであるから、事前に決定された情報の発信者が受信者からも同時に情報を受けるという奇妙な状態が生じる事を表す。すなわち、Motor control 研究においては中枢神経系が筋骨格系へ情報を送ると同時に情報を受けるということに相当する。

そこで本章においては、身体運動の研究における2つのタイプの情報の発信者と受信者の二分化について観察者の理論と実在する現象という観点で検討する。その一つが身体内部における情報の発信者と受信者の二分化である。これは中枢神経系と筋骨格系に相当する。さらに、もう一つのタイプの情報の発信者と受信者の二分化は、個体間における運動情報の伝達に対してである。複数の個体間での運動情報の伝達は、運動技術論として複数の研究者によって構築されているので、その運動技術論の相違点を情報の発信者と受信者の二分化を基に検討する。

3.1. 情報の発信者としての中枢神経系

サイバネティクス理論あるいは Shannon の情報理論に強く影響され発展してきた Motor control 研究は、情報の発信者として中枢神経系を仮定する。これは第2章で考察したように、中枢神経系が情報の発信者として実在するという一般的な解釈だけでなく、観察者（研究者）が中枢神経系を情報の発信者とする身体運動のモデルを構成しようとして実験事実を積極的に理解してきたからであるという解釈も可能である。そこでまず発信者としての中枢神経系はどのように実験的に検証されてきたか、そしてそこにはどのような問題があるのかを以下に検討する。

3.1.1. 運動野と筋の一对一対応

運動野の研究は Fitsch and Hitzing (1870) がエーテル麻酔した犬の脳を露出して電気刺激したところ、刺激された脳と反対側の筋が動くことを示したことに始まる。しかも彼らは刺激して筋収縮が起こる部位は皮質の部位によって異なり、それは顔、首、手、胴、足の順に外側から内側へ配列していることを発見した。この研究は、大脳皮質は電気刺激に対する興奮性がないと生理学者の間で信じられていたそれまでの常識をうち破り、大脳のある一部分が運動の中枢であることを示したのである。（大脳への電気刺激と筋収縮の関係を調べる研究は 1700 年代中ごろから始まり、いずれの研究者とも電気刺激に対して筋収縮は発生しないと報告している）。彼らの研究以前は大脳半球は筋肉運動に対する直接の根源ではなく、ひとえに意志および感覚の座であると考えられていた。彼らの研究以後、サルや脳腫瘍のため死につくあるヒトにおいても電気刺激による筋収縮が確認され、大脳で体の運動に関与する部位は運動野と呼ばれるようになっていく。このような研究は現在でも盛んに行われている皮質の機能局在研究のきっかけとなったわけであるが、特に Penfield and Rasmussen (1950) によって発表されたヒトの運動野の体部位再現の図（ホムンクラス、脳の小人）は有名である。このようにして、運動情報の発信者が運動野であること、運動野と体部位が一对一対応していることは、疑う余地のない事実であると認められるようになってきたのである。

以上が運動野と筋を対応させる研究の教科書的な流れと言えるが、実は Penfield より約 10 年前にはほぼ Penfield と同様の運動野の体部位再現図が Foerster (1936) によって発表されている。しかしそれが現在ではほとんど評価されていないことに対して酒田と杉下 (1994) は、歴史上繰り返し議論されてきた局在論と全体論の優位がその当時どちらにあるかによると考察している。こ

の、局在論と全体論の流れを検討すると、Foerster が脳地図を発表した 1930 年代は Goldstein (1934) などの著名な脳病理学者が脳の全体論を展開していた時期であったと言える。Goldstein は、皮質の一定部位の反応は他の部位を刺激することにより変化すること、そして他の部位を刺激すれば皮質の一定点の興奮が変化し全く逆の反応が現れるときもあることから、すなわち、同じ刺激を与えてもそれがいかなる環境の下で与えられたかによって異なった効果を示すことから、脳の局在論を否定し全体論を展開した。酒田と杉下に拠れば、この脳の全体論によって Foerster の仕事は押し流されてしまったと言える。これに対して Penfield が脳地図を発表した 1950 年代では、てんかんの手術によって局在論が復活した時期であったと言える。てんかんは脳の神経細胞の異常な反復活動によって引き起こされる症候群であるが、この異常な活動の発生源はてんかんの焦点と呼ばれる。この焦点を見つけるために、大脳皮質の小領域を電気刺激することが行われるが、Penfield and Roberts (1959) は、実際にこの焦点の除去によって、てんかん発作はかなり減少するか完全になくなり、脳の小片を失うことによる影響は深刻な結果をもたらさないことを報告している。

このように運動野の脳地図に関する研究が行われた当時は、局在論と全体論のどちらがより確からしいかが常に議論されていた時期であり、その時の優位な理論によって電気刺激によって得られた現象が積極的に解釈されたと考えられる。

3.1.2. 情報の解明、内部と外部の論理矛盾の問題提起

体の運動の原因が運動野にあることを突き止めた脳研究は、外に現れる運動と遠心性ニューロンの活動を対応させることによって、ニューロンの発射頻度はどのような情報を符号化しているのかを問題にし始めた。この研究が可能になったのは、スキナーによって体形付けられたオペランド条件付けを実験に導入したことによる（この方法が用いられる以前は急性実験と呼ばれ麻酔をかけた動物で電気刺激実験が主に行われていた。急性実験に対して実際に動物が運動を行っているときの運動野のニューロン活動を測定する方法は慢性実験と呼ばれている。またオペランド条件付けとは、ある特定の刺激の提示をある特定の反応の生起と関係付けて行う手続きのことであり、たとえばサルが手を上げたときにジュースをそのサルに与えるなどという手続きのことである）。オペランド条件付けにより動物に運動することを学習させ、その運動を行っているときに運動野のニューロン活動を計測する実験は Jasper (1958) や Evarts (1968) によって始められた。その中でも Evarts (1968) によって行われた実験はその後の身体運動のモデル化に大きな影響を及ぼした。彼は、サルに荷重が加えられているレバーを握らせ、その手首を屈曲あるいは伸展させるとジュースを報酬として与える訓練（オペランド条件付け）を行って、手と対側の運動野から錐体路ニューロン活動を記録した。その結果、手首の屈伸に関係する錐体路ニューロンの発射は力に関係すると結論づけられた。その後、力と錐体路ニューロン活動の直線関係が多くの研究者によって確認され (Smith et al., 1975; Cheney and Fets, 1980), 運動野のニューロン活動は力を符号化するものであることが確立されていった。さらにこれらの符号化された情報が運動プログラムと一般的に呼ばれるようになっていった。

ところが、1980 年代に入って一連の Georgopoulos et al. (1982) の実験は、サルに様々な方向の手伸ばし運動を行わせ、それぞれの方向に関係した一つのニューロンがあることを明らかにした。さらにそのニューロン活動の時間的变化は手の速度の時間的变化によく一致することが確認された。したがって運動野のニューロン活動は手の方向と速度を符号化していることになる。こ

これらの結果はEvartsらのパイオニア的研究によって確立されてきた運動野における筋張力の表現に対して、真っ向から対立することになった。しかし最近では、これらの仲裁をするような研究がMussa-Ivaldi(1988)によって為されている。その研究においては、ニューロンが筋張力を符号化していても、手伸ばし運動においてその発火頻度は運動の方向と相関があることが示されている。

Mussa-Ivaldiの仕事は何らかの生理学的な特徴を示すニューロン活動と外部に現れる物理量との関連づけは、一対一対応にならないことを示している。これは3次元物体を2次元で表すときの観察方向による投影図の違いに似ている。しかしニューロン活動と物理量を関連付けることに對してさらに根源的な問題を提起する理論がある。それは、生命システムにおいて、外からの観察とシステム内部でのプロセスを徹底的に検討することによって構築されたMaturana and Varela(1980)のオートポイエーシス理論である。

Maturana and Varelaがオートポイエーシス理論を構想するきっかけとなったのは、Maturana et al.(1968)によるハトの網膜における外的な物理刺激の特徴と神経システムの活動の対応を調べる実験である。彼らはハトの眼前に様々な色紙をおいたときの、ハトの網膜における光の受容器である網膜神経節細胞の活動に着目した。彼ら是对立スペクトル選択性(Heringの反対色説は互いに拮抗的な白/黒の系統の他に、緑/赤および黄/青の反対色に関して拮抗的な神経処理過程が存在していると仮定している。)をもつ細胞を発見すると同時に、対立スペクトル選択制をもつ神経細胞の受容器の幾何学と外的な色彩世界は対応づけることができないと結論した。そして、問の立て方自体を変え、網膜の活動を有機体の外的な物理刺激に関係づけるかわりに主体の色彩経験に関連づける方法を取った。この独創的な方法によって、観察者の色彩空間全体を、細胞の内的幾何によって作り出せることを示した。そしてこの実験結果から、知覚と認知の現象を語るために新しい言語が必要になったとしている。すなわち、神経システムの活動の論理は、外部の観察者の論理では対応させることができないという、内部と外部の論理矛盾という重要な問題を提起した。これは例えば、運動野のニューロンの発火頻度が運動を制御する情報を符号化していると特定することは外部の観察者の理論であり、実際のニューロン活動がそれを符号化しているとは限らないということに対応させることができる。Varela(1979)は、次のような事例を用いてこの内部と外部の論理矛盾を分かりやすく説明している。「外界と孤立する飛行機内のパイロットが、あらかじめ決められた進路にしたがって様々な計器の数値を読みそれを操作する。パイロットが機外に下り立つと、彼の妻や友達から着陸の仕方を褒められて当惑する。というのもパイロットが行ったことといえば計器の読みを一定時間維持することであり、そこでの仕事は友人(観察者)が記述し表わそうとしている行為とはまるで異なっていたからである」。

3.1.3. 情報の解明、情報の送受信の問題提起

Bizzi et al.(1984)とHogan(1984)は、筋のバネ的な性質(Rack and Westbury, 1969)を利用して、仮想軌制御仮説という運動の制御方式を提案した。この仮説においては、関節の屈筋と伸筋の張力の釣り合い位置を初期状態から目標点の状態へ徐々に変化させることによって、関節運動が制御される。この制御方式においては、制御対象の力学的な特性を制御側が事前に完全に知らなくても、筋のバネ的な性質を利用して平衡点を目標点まで変化させるという簡単な命令で運動が制御できることから、フィードフォワード制御における一つの制御仮説として考えられている。彼らは、この仮説を検証するために、腕の求心性神経を脊髄で切断した猿が、自らの腕の位置を視覚情報によって確認できない状態で、あらかじめ学習された目標点までの手伸ばし

運動ができることを示した (Bizzi et al., 1984)。腕の位置に対する感覚系の情報が全くない状況でも、簡単な運動ができることが示された彼らの実験結果は、仮想軌道制御仮説ばかりではなくフィードフォワード制御の存在を裏付ける重要な実験データとして扱われている。さらに, Bizzi et al. (1984) の実験結果を用いて, 学習された運動中の制御には求心性の情報は必要がなく, フィードフォワードによって制御されていると結論づけている研究が多い (川人, 1992)。

Bizzi らの求心性神経切断実験は, 情報の発信者としての運動野を決定づけたと言えるが, 実はこれより以前に Bizzi らの研究グループによって求心性情報の役割を検討する興味深い実験が行われている。その実験は Polit and Bizzi (1978, 1989) によって行われており, 求心性神経を切断する前と切断後の猿の腕の初期位置の変化に対する腕の軌道が比較されている。その実験で猿は腕の求心性神経切断の前後共に手の位置の視覚フィードバックなしに目標点へ手を伸ばすことができたが, 腕の初期位置が受動的に動かされると, 切断前はそれが補正されて目標点に手が到達したが, 切断後は目標点からずれて手伸ばし運動が終了することが明らかにされた。彼らはこれらの実験結果をもとに, 求心性の情報は学習された運動プログラムの更新と調整の役割をはたすと考察している。

Polit and Bizzi による求心性神経切断実験の結果から, 求心性の情報は学習された運動プログラムの更新と調整の役割をはたすと考えられたが, その生理学的根拠はトランスコーティカルループと呼ばれる体性感覚野から運動野への入力である。情報の発信者として確立されつつあった運動野への感覚野を経た入力を調べる研究は Adrian and Moruzzi (1939), Woolsey and Chang (1948), Malis et al. (1953) によって始められ, Asanuma and Rosen (1972) によって確立されていった。Malis et al. が当時常識とも呼ばれる送信者としての運動野への入力を発見した時の驚きを共同研究者である Pribram (1971) は「……末梢神経の電気刺激によって運動皮質に電位変化を誘発するという一連の実験を行っているときに, 劇的な形で現れた。」と表現している。さらに「まったく偶然に, ある朝, 思いがけない電位変化が運動皮質に誘発されているのを観察した。こうした観察は, 最初は, あまりに根本に触れる問題なのでにわかに信じられなかった。事実, 他の研究者もそうした観察を行って同じ結果を得ていたが, 誰もその観察を報告しようなどとは考えず, せいぜいアーティファクトであろうと脚注に記載したに過ぎなかった。しかしわれわれの実験は入力が実際に抹消から運動皮質にやって来ること。……しかも, 筋を支配する神経繊維だけでなく, 純粹に皮膚とだけ結びついている神経繊維もその入力源なのである。」と常識的に考えられてきた従来の見方に対して自分たちの見た現象の本質的な相違点を述べている。その後, Asanuma (1981) は異なった動きの状況下において (たとえば座っている状態と空中につり下げられている状態における猫において) 抹消からの運動野への入力が同じでも, まったく異なる動きを生じることを示した。つまり, ある運動状態において膝関節の屈曲を引き起こす刺激が, 運動の状況が変わることによって伸展に作用することもあることを示したのである。Asanuma (1981) はこの現象を, トランスコーティカルループが負のフィードバックシステムとしての機能をもつという仮定 (Evarts, 1979) では説明できないとして, 多重のトランスコーティカルループを仮定し, それらをインパルスが循環しながらお互い相互作用を及ぼすと考えた。そのようにして同じ刺激でも身体の運動状態あるいは姿勢が変わることによって複雑な動きが生じると考えたのである。

Polit and Bizzi (1978, 1989) と Evarts (1979) は, 求心性情報が運動開始前の身体の初期姿勢の特定, そして運動後の目的の運動との誤差の修正に用いられると解釈した。つまり, これら

の解釈においては遠心性情報が身体へ送られる前に身体側からの求心性情報が必要となり、さらに身体側へ遠心性情報が送られた後に求心性情報が用いられることから、遠心性情報と求心性情報は同時に関係し合うことはない。しかし、Asanuma (1981) は、運動中においても常に求心性情報が必要であると解釈しており、これらの解釈の相違点は「遠心性情報と求心性情報の同時性の問題」として整理できると考えられる。

3.1.4. 身体内部における情報の発信者と受信者の二分化の問題点

ここまで検討してきたように、運動野が身体運動における情報の発信者であることが広く認識されていく過程で実は重要な議論がなされてきたことが明らかにされた。そしてその論点は、神経活動を外部観察者の論理で観察することによって生じた「内部と外部の論理矛盾の問題」、そして送信者である運動野への情報入力という事態を解釈することで生じた「情報の同時性の問題」の2つに整理できる。そしてその問題は引き続き議論されており、身体内部における情報の発信者と受信者の明確な二分化は優位な理論であるが唯一の理論ではないと言える。

3.2. 個体間の運動情報の流れ

ここまでは身体内部での運動情報の流れを検討してきたが、次に個体間の運動情報の流れの理論を検討する。運動情報の個体間の伝達は、特に体育学の分野におけるスポーツの指導場面の情報伝達において運動技術論として研究が為されている。この運動技術論においては、小林 (1973 a-e, 1974 a-i) と金子 (1968, 1987, 1995, 1997) が展開した運動技術論が著名でありその相違は体育学の分野で頻繁に議論されてきた。しかし、その相違点はそれほど明確にされているとは言い難い。その原因は、2つの運動技術論を明確に区別する観点があいまいなこと、そして2つの運動技術論の折衷案が可能なことを提案する研究が多々見うけられるためであると考えられる。そこで本章においては、情報の送信者と受信者そしてその間の情報の流れという観点からこの2つの技術論を明確に区別する。

3.2.1. 小林の運動技術論

まず最初に、繰り返し議論され比較されてきた金子と小林の運動技術論の相違点について本章が明らかにするであろう結論を述べる。それは、この2つの運動技術論の相違点は、ここまで議論してきた観察者と観察対象あるいは理論と観察が「分離可能であるのか、または相互作用するものであるか」という観点から明確に区別できる。そしてこの2つの技術論は共存することができると多くの研究者が主張するがそれは誤りである。この2つの結論を導くために小林の運動技術論を検討することから始めることにする。

小林が運動技術論（小林は当初「技術のこつ」を科学的な立場から解明する目的でスポーツ技術学を提唱した。そして次に運動技術の伝達を目的として運動技術指導学を展開している。本研究においては他の理論と共通の語で比較するために、運動技術の伝達を基に構築された理論を運動技術論、運動そのものの解析を目的にするものを運動学と統一の語で呼ぶことにする）を構築したのは1960年後半から1970年前半にかけてであり、その運動技術論は当時主流であったマイネルの運動学 (Meinel, 1960) を基に構築された金子の運動技術論を批判することから始められた。

小林はまずスポーツの指導場面や日常的にあいまいで区別することなく使われている運動と動

作を次のように区別することから運動技術論を展開した。「身体の運動とは身体の幾何学的形態が時間の経過に伴ってその位置を変えするという現象であり、身体の動作とは運動者が主観的に認知している運動である」。すなわち、運動記述における物理系には運動という語が、そして運動技術における現象系には動作という語が用いられたわけであるが、小林はこの運動と動作の定義によって、従来から運動技術の指導場面で起きていた主観的な運動知覚と客観的な運動記述の混乱は大分整理されるとしている。次に、従来の運動技術論とりわけ金子の運動技術論は動作を問題にしたものであり、科学的実在論の立場から運動技術論を展開する必要性を唱えた。その主張は次のようにまとめられる。「体育やスポーツの分野で運動技術の指導は最も重要な要素をなしており膨大な数の研究が蓄積されてきているが、その大部分は感覚的・比喩的な表現がほとんどであり、特に技術の急所とも言うべきところで感覚的な表現が使われているので、ある水準に達して初めて意味がわかる。これらを他者へ伝達可能な形で展開されなければならない」。この段階において小林の運動技術論は、技能と技術の違いを一般技術論を参考にしながら「技術とは人間実践における客観的法則性の意識的適用であり、技能とは人間実践における主観的法則性の意識的適用である」と定義した。そしてそこに、情報・記号の概念を導入することによって技術情報と技能情報を明確に区別することになる。すなわち技術情報は他者へ伝達可能な客観的な情報であり、技能情報は手に手をとって筋感覚を覚えさせるなどの方法により伝達可能な主観的な情報となる場合もあるが指導者自身の体内では意識されて捉えられている感覚であるが他者にどうしても伝えられない伝達不可能な主観的な情報も含むと定義した。さらに、従来の運動技術の概念があいまいであると批判し、その理由を物事を筋道立てて考えている論理学が運動技術論に存在しないからだとしている。そしてその当時武谷三男（1968）によって積極的に論じられていた自然認識の弁証法論理である「三段階論」を運動技術論に導入する必要性を唱えた。自然認識の三段階論とは、認識の論理的な発展は三つの段階に分かれるとするもので、それは第一段階に現象の記述を行う現象論的段階、第二段階に現象が起こるべき実体的な構造を知る実体論的段階、そして第三段階として任意の構造の実体が任意の条件の下にいかなる現象を起こすかということをつまやかにする本質的段階があるとするものである。また、金子の運動技術論はこのうちの第2段階に留まるもので、本質的段階には達することはできないと批判している。

小林はこのように運動の指導場面で用いられている語や概念を注意深く定義する作業を行った後に、人間は自然の一つの存在であり（ここではニュートン力学における物体）、人間が自然に働きかける際は物質としてその運動は自然法則性に基づいていることに基礎を置き、指導者から学習者へ技術を伝える彼独自の運動技術論を構築した。その要点を簡単にまとめると、情報の発信者である指導者は運動中意識的に捉えられる知覚情報を科学的に目的実現のために適用する状態でなければならない、すなわち指導者は小林の定義した技術を持たなければならない。たとえばボールを遠方に投げる際、45度の投射角度が最適であるという自然法則を意識しながら動作に適応している状態でなければならない（習慣的にいつでも45度で投げる人は運動技術をもつとは言わないことに注意する必要がある）。このような状態に指導者になるためには、目的を持って運動を行い、その現象を記述し、その運動が起こる実体的な構造を知り、その構造と現象間の法則性を認識する段階に達しなければならないとしている。小林が繰り返し注意するのは、最初からすぐできてしまう、あるいは、無意識で習慣的にできてしまう運動は、伝達可能な技術ではないということである。このようにして客観的に正確に伝達できるようになった運動技術は、誰にでも正確に伝達できる。しかし、誰にでも正確に伝達できるという意味は、誰にでもすぐに理解され

るあるいは運動ができるという意味ではないとして、情報の伝達に共通に認知可能な物理情報を媒介にする方法（たとえばある温度を伝達する際に、水の中へ両者が手を入れて主観的に認識する情報を用いる）などの指導技術が必要になるとしている。

ここで、ここまで検討してきた小林の運動技術論を整理する。それは科学的实在論（バイオメカニクス）を基礎にして展開されてきており、その特徴は次の2点にまとめられると言えよう。

1) 身体運動は対象化し記号として記述可能である。すなわち、行為者を離れて存在しうる。2) 記号化された運動は他者へ伝達可能であると同時に、自己運動に意識的適応できる。これらの特徴は次に明らかにする金子の運動技術論と全面的に対立しており、小林はその対立点を随所で批判しながら彼の理論を展開してきた。次にこれに対する金子の応酬を検討することから、金子の運動技術論の特徴を明らかにする。

3.2.2. 金子の運動技術論

金子の運動技術論がマイネルのモルフォロジー運動学を基盤として構築されてきたことはよく知られているところであるが、小林が運動技術論を展開する上でマイネル運動学や金子の運動技術論の問題点を随所で指摘するのに対して、金子はパラダイムを異にする方法論であり同一土俵では勝負しないという立場を一貫してとる。例えばそのことは次の文章に端的に表れている。「マイネルのモルフォロジー運動学が因果分析のバイオメカニクス運動学と混同してはならないし、この別種の科学方法論をもつモルフォロジーとバイオメカニクスという2つの運動学はその運動認識論の立場から明確に区別されるべきであり、二者択一ないし還元の問題ではない」(金子, 1995)。では、明確に区別されるべき運動認識の立場とは、その源流であるマイネル運動学から検討を始めることにする。

金子の運動技術論の基盤となるマイネル運動学はその出版から8年後に岸野(1968)によって日本に紹介された。金子は当時の小林らの反応を「実証主義的先入観にどっぷり浸っていた当時の運動研究者にはよく理解されていない」(金子, 1995)と述べている。しかしながらこのような反応に対して金子は、ゲーテに遡るモルフォロジー(形態学)思想を人間の運動理論に応用したマイネル運動学は自然の因果分析とは遠く離れており、自然科学教育を受けてきたわれわれには非常に理解しにくいことを認めている(金子, 1997)。金子も主張するように自然科学的な運動の見方は、「完了形としての運動を外部から科学的に記述する」とまとめることができよう。これに対してマイネル運動学は「動きつつある自己の身体あるいは他者の身体を自らの知覚を通して解釈する」と特徴づけることができる。特に他者の運動観察の場合は、観察者に運動共感能力が備わっている必要が在るとされている。ここでの小林の運動学との主な対立点は、運動を観察する人の視点の違い(身体の外部的か内部的か)、生きた身体運動(過去形)か生きている身体運動(現在形)かの違い、としてまとめることができよう。次にこの2点の相違点について検討するが、その前にマイネル運動学に含まれる最も大きな矛盾点を明らかにするところから始めなければならない。その矛盾点は金子によればマイネルが運動学を展開した際の旧ソビエトの思想的背景(共産主義からの思想的圧迫)によるとされているが、それは運動構造を外部から科学的手法で観察して得られた構造であったり、運動者自身によって捉えられる主観的構造であったりする点である。これは当然、金子(1995)が主張するように運動者自身によって捉えられる主観的構造として考えるべきである。では、二つの運動技術論の対立点の一つである観察する人の視点から考察しよう。

小林の運動学の場合は、観察する視点は外部に現れた運動を定量化することから運動する者の外部に位置すると言える。そしてマイネルの運動学の場合は運動主体の現在形の運動を問題にするので、運動する者の内部に位置すると言える。観察する視点が内部というのは、観察者が運動実施者と共通の主観的運動構造を持ち、その観察者がもつ主観的運動構造を用いて運動者と共感することを意味する。またその運動の記述方法であるが、小林の運動学は観察者が力学を用いて運動を記述するが、マイネル運動学においては運動経過を特徴づける言語で記述し、それを8つのカテゴリーに分類する。したがって、小林の運動学の場合は観察対象と観察者が分離されるという前提に立つが、マイネルの運動学の場合は、自己観察の場合は行為者と観察者が同一であり、他者観察の場合でも行為者を離れての観察は在りえないと言える。

次に、生きた身体運動か生きている身体運動かの違いの対立点であるが、小林の運動学の場合は、運動を客観的に記述するために運動を映画撮影器や力測定器などの測定器を介して得られたデータを用いて記述するので、そこでは運動の完了が前提となる。これに対してマイネル運動学の場合は、動きを起こしている主体と知覚している主体を同時に問題にしていることから、運動の現在形が前提となる。この前提は、運動と知覚の絡み合いを前提とするバイツゼッカーのゲシュタルトクライシス理論(Weizsaker, 1950)、求心性情報と遠心性情報のカップリングを前提とするギブソンのアフォーダンス理論(Gibson, 1979)と共通すると言えよう。

3.2.3. 小林の運動技術論と金子の運動技術論の相違点

マイネルの運動学の特徴を小林の運動学と比較することにより浮き彫りにしてきたが、金子の運動技術論は、マイネルが用いた知覚の言語への還元は意識されてないように思える。それは金子がキネステーズ(運動感覚)そのものの性質である構成するものと構成されるものの二重性を強調しており、その知覚の言語への還元を強調していないからである。キネステーズとは例えば自分の左手で自分の右手に触れたとき、触れられた右手もまた感じ取るという二重感覚であるが、金子はこの二重感覚を身体構成の原型的現象として、運動を教える者と教えられる者で生じる間主観性を強調している。すなわちここでの情報伝達媒介は言語だけでなく知覚情報と動きそのものがもつ情報が考慮されているからである。そこで、マイネルの運動学をより現象学視点に立つ運動技術論として金子の運動技術論が捉えられると考えられる。

以上、小林の運動技術論と金子の運動技術論を比較検討してきたが、その相違点を本研究の論点で斬ると、小林の運動技術論は「観察者と観察対象が分離可能」であり、金子の運動技術論は「観察者と観察対象が相互作用する」としてまとめることができる。したがって、これまで金子の運動技術論における観察の不備さをバイオメカニクスのデータによって補うなどの、2つの技術論の折衷案を提案する多くの研究者がいたが、バイオメカニクスデータは金子の運動技術論にとってなんの意味も持たない。その理由は行為者を離れ記号化された運動は運動共感も発生させないし知覚も発生させないからである。

4. 観察者の特性、観察者と観察対象の相互関係

ここまで検討してきた結果から、身体運動研究における観察データの多くは観察者の理論に影響されてきたと言える。その理由はこれまで繰り返して述べてきたように、観察あるいは実験とは観察者と観察対象が相互関係する行為であるからである。そこで本章では、観察者と観察対象の相互関係を回避する方法を探るのではなく、観察者の特性を検討して積極的に観察結果に観察者

が含まれる系を考察する。すなわち、観察者から見た観察対象の見え方という研究方法を検討する。そしてさらにその方法を身体運動研究に導入する試みを行う。

4.1. 観察者の特性、観察者のモデルを通してみた現象

ここでは理論負荷観察の実例を実験データを用いて検討する。そして、観察者の理論あるいはモデルを事前に決定することを回避するのではなく、そのモデルを観察に積極的に導入する試みを行う。自然科学研究においてこのように観察者の特性を考慮しようという試みは、Matsumoto and Tsuda (1987) によって試みられている。この試みは実験的研究にそのまま当てはめるにはやや単純な仮定ではあるが、彼らは観察とは対象にノイズを注入することであると仮定して、カオスを観察者が見た場合どのようにそのカオスに変化するかを、様々なカオスにノイズを付加することによって検討した。その結果、ノイズを付加することによってカオスから秩序が生成される場合があることを発見し、その現象を「Noise Induced Order」と名付けた。以下は、このような観点にヒントを受け、著者らが現在行っている研究の一つを紹介するものである。

自然科学研究では、観察して得られたデータをある定量的指標にしたがっていくつかのカテゴリーに分離することがしばしば行われる。たとえば、得られたデータの平均値より優れたデータと劣ったデータに分離し、それぞれのカテゴリーの特徴を考察するなどがその例に当たる。例として、生体データを観察して、その人が緊張しているか緊張していないかを決定するという実験を考える（緊張が例としてよくなければ、寝ているか寝ていないか、疲れているか疲れていないかなどでもよい）。我々は、その観察データとして心拍や体温あるいは下肢の振動の仕方などを選ぶであろう。そしてある値を境にして、その状態を二分するであろう。しかしこの場合、そのデータで二分するということを決定したのは観察者が事前にもつ理論であり、さらに2分する境界値を決めたのも観察者が事前にもつ理論である。すなわち、その観察対象から得られるデータは観察の仕方の違いで無限に存在するわけであり（緊張を決定する実験であれば、心拍や体温のほかに脈波や脳波など）、その観察の仕方を決定したのは観察者であり、またカテゴリーの数（その数は2ではなく3でも4でもよい）を決定したのも観察者である。したがって、もともと観察対象が2つのカテゴリーに分離されているわけではなく（2つのカテゴリーが実在するわけではなく）、観察者の恣意性（まったく無根拠ではなく、これは生体ものつ生理・知覚機序や、研究者集団の事前の解釈に根拠を求めることができると考えられる）でカテゴリー化が成されているのである。この例は、事前にモデルを設定して、そのモデルを用いて観察データを眺めることと同値であると言える。したがって、得られた現象データは誰が見ても同じであるが、モデルというデータの近似の仕方を設定した瞬間、その見え方が変化すると言える。そこで著者らは、このような特性が身体運動研究において応用できないかを工夫している。以下にその実験的研究を簡単に紹介する。

我々は両上肢を前後に振りながら立位姿勢を維持させる実験を複数の被験者に行わせた。その実験で上肢を前後に振る周波数を徐々に上げていくと腰を中心として体幹部が前後に振動するパターン（パターンA）と、足首を中心として腰を前後に移動させるパターン（パターンB）の2つのパターンがあること、そしてそのパターンが入れ替わる周波数の前後では、どちらのパターンとも分けられない複雑な動きが生じることを発見した（中間パターン）（阿部と山田, 1997）（図5）。これがこの実験の定性的な結論であるが、われわれは動きのパターンあるいは動きの複雑性を身体の動きの時系列データから無秩序性の一つの指標となるエントロピーを計算して定量化で

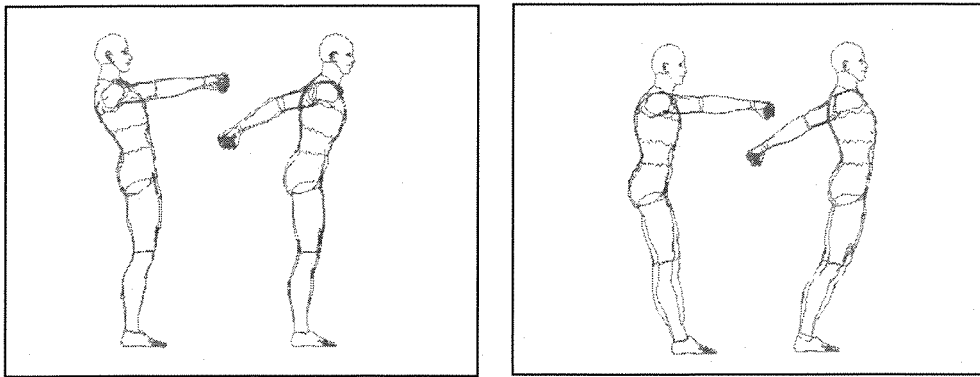


図5. 上肢を前後に振りながら姿勢を維持する実験で観察された2つの特徴的なパターン。
パターンA（左図）は腕と共に上半身が大きく振動する。また、パターンB（右図）は腕と共に下半身が大きく振動する。

きないかを試みた。時系列のエントロピー計算方法は非常に新しい手法であるが、エントロピーを有限のデータ数から推定しデータの複雑性を定量的に評価することができる（このように計算された時系列のエントロピーは Approximate Entropy と呼ばれている (Pincus, 1991)。以後、AP エントロピーと省略)。しかしこの方法を用いる際に、身体運動は多関節運動であり様々な部位が同時に協調して運動するので、どの部位の時系列データを評価対象とするかという問題が生じた。そこでまず、われわれ観察者が身体運動をパターンとしてみている状態を観察者側がどう捉えているかを明らかにすることから始めた。その方法として、複数の人に実験を観察してもらい、その身体運動の特徴を言語化してもらうという方法を用いた。その結果、すべての観察者において腕運動が主に捉えられており、腕運動と共に上体が大きく動くパターンと下半身が大きく動くパターンに言語化され分離された。そこで、股関節の関節角度変化と足関節の関節角度変化で身体運動の特徴が捉えられていると仮定し、それらの時系列データから AP エントロピーを計算した。その結果の一例を図6に示す。横軸は腕を前後に振る周波数を表わしており、縦軸が AP エントロピーの値である。この値が大きいほど複雑で逆に小さいほどパターン化された秩序性のある動きといえる。この図から、腕運動の周波数が低いときは股関節の AP エントロピーの値が低く、腕運動の周波数が増加するに従い足関節の AP エントロピーの値が低くなり、ある周波数後は一定の値を示すと言える。この結果は、われわれ観察者が捉えたパターン化された運動が、単純に前後に振動する腕運動との関係で抽出された股関節と足関節の動きによって定量化されたことを示唆している。

この実験データの分析例においては、運動パターンの定義を「観察者から見てその変動に秩序性のあるもの」として観察者を含んだ定義としたわけである。このようにこの分析例は、運動パターンと言語体系の関係、自己運動の規則性と外部観察者による規則性の関係など、まだまだ検討の余地はあるものの、身体運動研究のデータ解析に観察者の視点を導入する可能性を示唆していると考えられる。

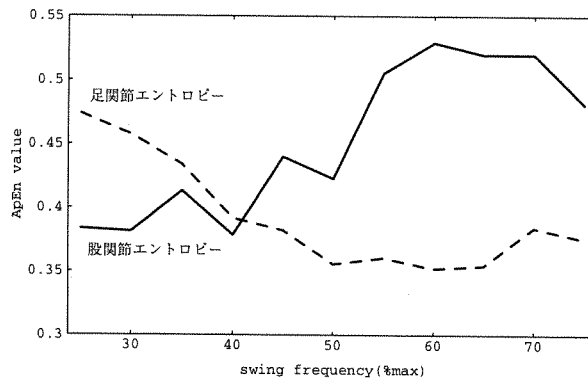


図6. 腕のスイング周波数増加に伴う股関節と足関節のAPエントロピーの値の変化。
パターンAが観察される腕のスイング周波数の時には股関節エントロピーが低く、パターンBが観察される場合は足関節エントロピーが低くなる。

4.2. 観察者の特性、観察時間の有限性の考慮

Matsuno (1989) は、システムを構成する要素間の相互作用を内部観察と定義し、その内部観察の性質に有限観測時間を設けることによって、プロトバイオロジーあるいは生成の物理という非常にユニークな理論を展開している。なお、この相互作用は実際に情報を検知しあう神経システムだけでなく、物質間の力学的相互作用に当てはめられる。したがって物質間の相互作用も情報の検知過程と言えるわけである。この有限観察時間は本研究の観点から考えると、身体内部の運動に関与する要素間の相互作用に時間を考慮することである。では、そのようなシステムは外部から見下ろすわれわれにはどのような性質を有するように観察されるのか、以下に検討することにする。

最初に分かりやすい例として内部観察時間が無限大と仮定するニュートン力学を次のような例を用いて考えてみる。まず孤立系の局所に外部からエネルギーを加えると仮定する。すると力学系においてはエネルギー保存則が成り立つように以前よりわずかに高いエネルギー状態のもとでシステムは瞬時に均衡する。つまり、初期のエネルギーが均衡化した状態から後の均衡化の状態にまで瞬時に移行する。このことは、局所エネルギー振動の効果が無限大の速度でシステム内を伝播することを意味する。これを要求するのはエネルギー保存側であるが、エネルギー保存側が成立する系では、同時に内部観察が無限大の速度で行われる、すなわち内部観察を考慮しないでよいと言える（本章ではこれ以上議論しないが、Matsuno (1989) は内部観察が光速を超えることに対するの矛盾点を議論している）。Matsuno (1989) は、ニュートン力学のように内部観察が無視でき外力によって次の瞬間のシステムを構成するすべての要素の運動を完全に定めることができる状態を一対一型写像の運動と定義した。

次に、内部観察に有限の時間を有すると仮定する。これは生物の体内のようにエネルギーあるいは情報が時間をかけて伝わるシステムである。このようなシステムにおいては、先ほどの孤立系に印加したエネルギーは時間をかけて全体に伝わっていき最終的にエネルギー保存則を満たす状態で均衡する。したがって、各局所すなわち各自由度の最終状態へのエネルギー量の変化過程

は完全に一義的には決定できない。すなわち外力が加えられた後の次の瞬間でのエネルギー状態は最終状態には達しておらず、様々な可能性を残しているわけである。このように内部観察速度に有限の時間が有することを仮定すると、外力を加えた後の次の瞬間の運動の軌道を完全に定めることができない。Matsuno (1989) はこのような状態を1対多型写像の運動と定義した。

Matsuno (1989) が提起した内部観察者の有限速度は、近年理論生物学の分野で郡司らによって意欲的にその性質が検討されている。Gunji and Nakamura (1991), Ito and Gunji (1992, 1994) は細胞がまわりの場を検知するのに有限の時間を必要とし (Matsuno, 1989), 各要素が検知する場と全体の場が一致しない状態 (この状態は細胞がまわりの場を検知するのに有限の時間を必要とするため場を検知している最中に当の要素の運動によって場自身に変化する) をセル・オートマトン¹⁾を用いてシミュレーションした。このシミュレーションの結果, システムの挙動はクラス IV (セル・オートマトンにおいて発見されている4つ目の型) と呼ばれる挙動と類似した時間発展を示し, それは過去の変動が現在の変動に影響を及ぼす時間的な相関のある変動であることを報告している。このように, 生命にとっての自己組織系は, 観察速度の有限性 (各要素が場の状態を検知するためにある時間を必要とする) という側面で物理システムとは決定的に異なる性質を有し, その性質が時間相関のある変動を生じさせているという仮説である。

郡司により明らかにされた時間相関のある変動が発生する原因の一つが, 内部観察時間が有限

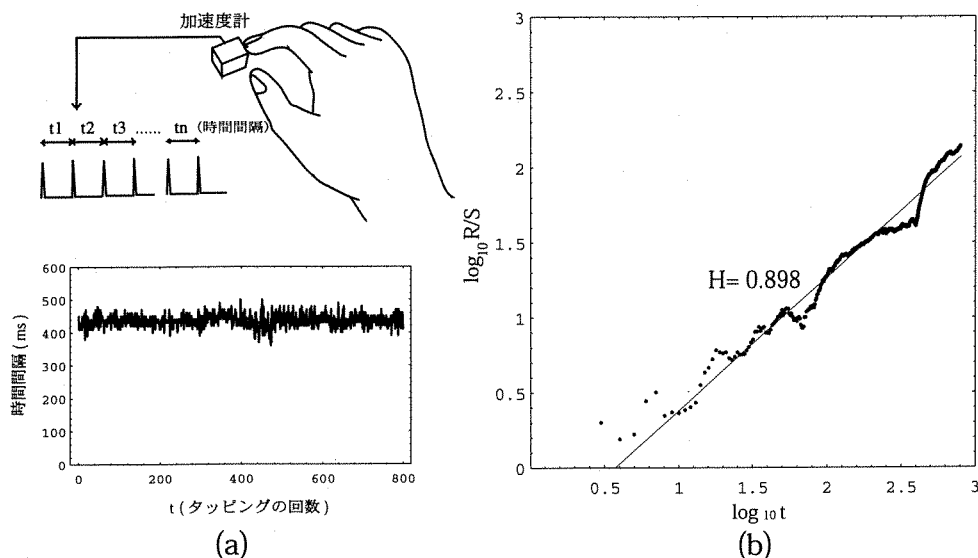


図7. タッピングの時間変動の分析

(a) 指のタッピング運動における時間間隔の毎回の変動

(b) タッピングの毎回の変動データからハースト指数を計算した結果。ハースト指数は1/2より大きな値を示し, 運動のマクロな秩序性は過去の変動の影響を受けながら毎回変動することを示している。

¹⁾ セル・オートマトンは細胞の発生や複製のプロセスをコンピューター上で模擬するもので, 人工生命の研究分野で頻繁に用いられている手法である。セル・オートマトンにおいては, 各々のセルはそれ自身の状態とその周辺のセルの状態に依存して, あるルールに従い自動的に状態推移を行う。その結果, 全体の挙動が非線形力学で得られた3つのアトラクターの状態 (不動点, 周期的, カオス的) と4つ目の型 (カオスの縁と呼ばれ周期的挙動とカオス的挙動の中間に属する) の状態を示すことが明らかにされている (Wolfram, 1983)。

であるということであった。近年、実際の人間の実験データを詳細に分析し、この時間相関のある変動について検討されている。Yamada (1995) は被験者に自らの一定のリズムでタッピングを行わせ、その時間間隔の変動の性質をハースト統計を用いて解析した。ハースト統計は Hurst et al. (1965) によって開発された新しい統計の手法であり、現象データの順番に相関があるかを分析することができる。ハースト統計を現象データに用いることによって計算される量 (ハースト指数) が $1/2$ の場合、現象はランダムである。しかし、ハースト指数 H が $1/2$ より大きい場合は、過去のある時刻に正の変位、つまり増加があると、未来においても平均として増加する。逆に、 H が $1/2$ より小さい場合は過去の増加傾向は未来の減少傾向を意味し、過去の減少傾向は未来には増加傾向に変わる。このように、ハースト指数 H が $1/2$ と異なる場合はフラクショナルブラウン運動と呼ばれ、毎回の変位は独立ではなく関係を持つことになる。さらにこの関係は短期間ではなく理論的には無限に続く。図7はタッピングの時間間隔の系列からハースト指数を計算した例である。ハースト指数は0.898を示し明らかに $1/2$ より大きい値を示した。この結果は、身体運動における内部観察時間の有限性を裏付ける一つの実験結果と考えられる。

5. 身体運動科学の新たな研究課題

5.1. 身体内部を探る身体運動科学

科学实在論を前提とする身体運動科学は、観察対象が観察に先立ち事前に実在する、あるいは観察対象に変動のルールが実在するという前提を疑問もなく受け入れて人間研究を行ってきた。しかし本研究では、観察者と観察対象の相互媒介関係を、歴史的にあるいは実験的・理論的に検討し、人間を研究するには、観察者側の特性が際立つことを明らかにした。

しかしながら、われわれ研究者は外部観察データから身体内部を探らなければならない。そして本研究で検討したように外部観察データと身体内部のインターフェースは容易ではない。外部観察データのモデル化、外部観察データと内部状態の対応付け (骨格の動きあるいは筋活動と中枢神経系のニューロン活動の対応付け、中枢神経系のニューロン活動と心的状況の対応付けなど)、これらにはいずれも観察者側の理論が介入する。そして、運動実施者側の内部変動の機序を外部観察者の理論で矛盾無く捉えられる保証はない。

本研究で稚拙ではあるがその一端を紹介したように、今後は観察者を系に導入した身体運動研究の方法が確立されていかねばならないと考えられる。

5.2. 生命と機械の定義、そして予測不可能性と身体運動科学

近年、身体運動科学の分野でも、身体運動の特性を適切に表わすために、「自律性」という語が頻繁に使われるようになってきている。この自律性という語はこれまで实在論の立場から、すなわち観察者を除外してシステムに実在する性質として定義されてきた。それは、「自らが自らを主体的に作り生産を行うもの」というのが一般的な定義と言えよう。しかし、このようにそのシステムに実在する性質として定義してよいものだろうか。この問いが本研究のテーマであった。そこで、自律性を観察者とともに生じる性質として以下に検討する。

観察対象を記述するとき、あるいはモデル化するとき、そのモデルは観察対象すべてを覆い尽くせないことに気づく。特に、身体内部のように膨大な要素 (自由度) を持ち、且つその要素間の関係が複雑な場合はモデル化の困難さが際立つ。したがってモデルとは対象の近似であるとも言える。さて、観察対象の近似であるモデルが規定する観察対象の運動の規則 (ルール、あるいは

は運動方程式)を観察対象の内部と考える(これは、全体集合に対する部分集合という比喻でもいいであろう)。この内部の外にいる観察者は、このルールで観察対象を見ることになる。次に、観察者がそのルールを介して観察対象をコントロールあるいは将来の状態を予測すると考える。すると内部と観察対象が一致するとき、あるいはそこに無視できるくらいの同一性が保証されたとき、完全に観察対象を外部からコントロールできる。このような状態を、外部から制御可能ということで対象に自律性が無いと呼ぶことにする。すなわち、生命に対する機械と定義する。したがって機械の研究にはこれまで身体運動科学で前提とされてきた観察者と観察対象の明確な分離が可能である。言い換えると、これまでの身体運動科学の研究は、自律性の無い機械に対しては問題なく用いることができる。これに対して、観察者がそのルールを介して観察対象をコントロールできない場合、そこに不可避的に予測不可能性が生じる。その予測不可能性が際立つときわれわれはそこに自律性を見ると考えられる。すなわち、生命としての特徴を抽出すると考えられる。この状態が、ここまでの議論(観察者と観察対象の相互作用)から見た生命の特徴である自律性の定義と言える。したがって、人間を観察するとそこには不可避的に平均値や既存のモデルでは説明できない予測不可能性が発生する。この予測不可能性は、自律性の定義で検討したように人間を人間が観察することから生じる原理的なものであり、それを平均値からのノイズであるとか、分散として切り捨ててはならない。この不可避的に混入する予測不可能性も、今後身体運動研究で検討していかなければならない新たなテーマであると考えられる。

文献

- 阿部匡樹, 山田憲政. (1997). 時系列データにおける規則性の定量化—運動解析への Approximate Entropy の適用—, バイオメカニクス研究 (投稿中).
- Abend, W., Bizzi, E., and Morasso, P. (1982). Human arm trajectory formation. *Brain*, 105, 331-348.
- Adrian, E. D., and Moruzzi, G. (1939). Impulses in the pyramidal tract. *Journal of Physiology, London*, 97, 153-199.
- Asanuma, H. and Rosen, I. (1972). Topographical organization of cortical effect zones projecting to distal forelimb muscles in the monkey. *Experimental Brain Research*, 14, 243-256.
- Asanuma, H. (1981). The functional role of sensory inputs to the motor cortex. *Progress in Neurobiology*, 16, 241-262.
- Bernstein, N. (1967). *The Co-ordination and Regulation of Movements*. London: Pergamon Press.
- Bizzi, E., Accornero, N., Chapple, W., and Hogan, N. (1984). Posture control and trajectory formation during arm movement. *The Journal of Neuroscience*, 4, 2738-2744.
- Cheney, P. D., Fetz, E. E. (1980). Functional classes of primate corticomotoneuronal cells and their relation to active force, *Journal of Neurophysiology*, 44, 773-791.
- Evarts, E. V. (1968). Relation of pyramidal tract activity to force exerted during voluntary movement. *Journal of Neurophysiology*, 31, 14-27.
- Evarts, E. V. (1979). Brain mechanisms of movement. *Scientific American*, 241, 164-179.
- Ferrier, D. (1876). *The Function of the Brain*. New York: Putnam's Sons.

- Fitts, P. M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, 47, 381-391.
- Flash, T., and Hogan, N. (1985). The coordination of arm movements: An experimentally confirmed mathematical model. *The Journal of Neuroscience*, 5, 1688-1703.
- Foerster, O. (1936). The motor cortex in man in the light of Hughlings Jackson's doctrines. *Brain*, 59, 135-159.
- Fritsch, G., and Hitzing, E. (1870). Über die elektrische Erregbarkeit des Grosshirns. *Arch. Anat. Physiol. Wiss. Med.*, 37, 300-332.
- 福田 精. (1957). 運動と平衡の反射生理. 医学書院.
- Georgopoulos, A. P., Kalaska, J. F., Caminiti, R., Massey, J. T. (1982). On the relations between the direction of two-dimensional arm movements and cell discharge in primate motor cortex. *The Journal of Neuroscience*, 2, 1527-1537.
- Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Boston: Houghton Mifflin.
- Goldstein, K. v. (1934). *Der Aufbau des Organismus*. Hagg: Martinus Nijhoff. (生体の機能. 村上仁, 黒丸正四郎 (訳). 1957. みすず書房.)
- Gunji, Y., and Nakamura, T. (1991). Time reverse automata patterns generated by Spencer-Brown's modulator: invertibility based on autopoiesis. *BioSystems*, 25, 151-177.
- Haken, H. (1978). *Synergetics, An introduction: Non-equilibrium phase transitions and self-organization in physics, chemistry and biology*. Berlin: Springer-Verlag.
- Haken, H., Kelso, J. A. S., and Bunz, H. (1985). A theoretical model of phase transitions in human hand movements. *Biological Cybernetics*, 51, 347-356.
- Hanson, N. R. (1969). *Perception and Discovery*. San Francisco: Freeman.
- Hogan, N. (1984). An organizing principle for a class of voluntary movements. *The Journal of Neuroscience*, 4, 2745-2754.
- Hurst, H. E., Black, R. P., and Simaika, Y. M. (1965). *Long-term storage: An experimental study*. London: Constable.
- Ito, K., and Gunji, Y-P. (1992). Self-organization toward criticality in the Game of Life. *BioSystems*, 26, 135-138.
- Ito, K., and Gunji, Y-P. (1994). Self-organization of living systems towards criticality at the edge of Chaos. *BioSystems*, 33, 17-24.
- Jagacinski, R. J., and Monk, D. L. (1985). Fitts' law in two dimensions with hand and head movements. *Journal of Motor Behavior*, 17, 77-95.
- Jasper, H. H. (1958). Recent advances in our understanding of ascending activities of the reticular system. In: H. H. Jasper, L. D. Proctor, R. S. Knighton, W. C. Noshay, and R. T. Costello (Eds.). *Reticular Formations of the Brain*. (pp. 423-434). Boston: Little Brown.
- 金子明友. (1968). 運動技術論. 岸野雄三 (編), 序説運動学 (pp.89-116). 大修館.
- 金子明友. (1995). マイネルが運動学に期待したもの. 体育の科学, 45, 95-98.
- 金子明友. (1987). 運動観察のモルフォロジー. 筑波大学体育科学系紀要, 10, 113-124.
- 金子明友. (1997). モルフォロジー. 宮本省三, 沖田一彦 (編), 運動制御と運動学習 (pp.365-384),

協同医書出版.

- Kantowitz, B. H., and Elvers, G. C. (1988). Fitts' law with an isometric controller: Effects of order of control and control-display gain. *Journal of Motor Behavior*, 20, 53-66.
- Kawato, M. (1992). Optimization and learning in neural networks for formation and control of coordinated movement. In D. Meyer, and S. Kornblum (Eds.), *Attention and Performance XIV* (pp. 821-849). Cambridge: MIT Press.
- 川人光男. (1992). 脳の仕組み. 読売科学選書 48, 読売新聞社.
- Kelso, J. A. S. (1984). Phase transitions and critical behavior in human bimanual coordination. *American Journal of Physiology: Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 15, R1000-R1004.
- Kelso, J. A. S., and Holt, K. G., Kugler, P. N., and Turvey, M. T. (1980). On the concept of coordinative structures as dissipative structures: II. Empirical lines of convergency. In G. E. Stelmach and J. Requin (Eds.), *Tutorials in Motor Behavior* (pp. 49-70). Amsterdam: North-Holland.
- Kelso, J. A. S., and Scholz, J. P., and Schöner, G. (1986). Nonequilibrium phase transitions in coordinated biological motion: Critical fluctuations. *Physics Letters A*, 118, 279-284.
- Kerr, R. (1973). Movement time in an underwater environment. *Journal of Motor Behavior*, 5, 175-178.
- 岸野雄三. (1968). 運動学の対象と研究領域. 岸野雄三 (編), 序説運動学 (pp. 1-47). 大修館.
- 小林一敏. (1973 a). 運動技術指導学とは何か, 体育科教育, 21 (5), 45-47.
- 小林一敏. (1973 b). 運動技術の疑念規定の吟味, 体育科教育, 21 (6), 58-60.
- 小林一敏. (1973 c). 運動技術の疑念規定の吟味(2), 体育科教育, 21 (9), 50-52.
- 小林一敏. (1973 d). 運動技術の疑念規定の吟味(3), 体育科教育, 21 (10), 64-66.
- 小林一敏. (1973 e). 運動技術の疑念規定の吟味(4), 体育科教育, 21 (12), 56-58.
- 小林一敏. (1974 a). 運動技術の疑念規定の吟味(5), 体育科教育, 22 (1), 66-68.
- 小林一敏. (1974 b). 運動技術の疑念規定の吟味(6), 体育科教育, 22 (2), 64-66.
- 小林一敏. (1974 c). 運動機構論(1), 体育科教育, 22 (3), 58-60.
- 小林一敏. (1974 d). 運動機構論(2), 体育科教育, 22 (4), 64-66.
- 小林一敏. (1974 e). 運動機構論(3), 体育科教育, 22 (5), 42-43.
- 小林一敏. (1974 f). 運動機構論(4), 体育科教育, 22 (6), 54-55.
- 小林一敏. (1974 g). 運動機構論(5), 体育科教育, 22 (7), 56-57.
- 小林一敏. (1974 h). 運動機構論(6), 体育科教育, 22 (8), 66-67.
- 小林一敏. (1974 i). 運動機構論(7), 体育科教育, 22 (9), 62-63.
- Kugler, P. N., Kelso, J. A. S., and Turvey, M. T. (1980). On the concept of coordinative structures as dissipative structures: I. Theoretical line. In G. E. Stelmach and J. Requin (Eds.), *Tutorials in Motor Behavior* (pp. 3-47). Amsterdam: North-Holland.
- Malis, L. I., Pribram, K. H., and Kruger, L. (1953). Action potentials in "motor" cortex evoked by peripheral nerve stimulation. *Journal Neurophysiology*, 16, 161-167.
- Matsumoto, K., and Tsuda, I. (1987). Noise-induced order. *Journal of statistical Physics*, 31, 87-106.

- Matsuno, K. (1989). *Protobiology : Physical basis of biology*. Boca Raton, FL : CRC Press.
- Maturana, H. R., Uribe, G., and Frenk, S. (1968). A Biological theory of relativistic colour coding in the primate retina. *Archivos de Biología Y Medicina Experimentales, Suplemento 1*, 1-30.
- Maturana, H. R., and Varela, F. J. (1980). *Autopoiesis and cognition : The realization of the living*. Boston : Reidel.
- Meinel, K. (1960). *Bewegungslehre*. Berlin : Volk und Wissen Volkseigener Verlag. (マイネルスポーツ運動学. 金子明友 (訳). 1981. 大修館書店.)
- Mussa-Ivaldi, F. A. (1988). Do neurons in the motor cortex encode movement direction? An alternative hypothesis. *Neuroscience Letters*, 91, 106-111.
- Nicolis, G., and Prigogine, I. (1977). *Self-organization in nonequilibrium systems : From dissipative structures to order through fluctuations*. New York : Wiley.
- 野家啓一. (1993). *科学の解釈学*. 光明社.
- Penfield, W. and Rasmussen, T. (1950). *The Cerebral Cortex of Man : A Clinical Study of Localization of Function*. New York : Macmillan.
- Penfield, W., and Roberts, L. (1959). *Speech and Brain mechanisms*. Princeton, NJ : Princeton University Press.
- Pincus, S. M. (1991). Approximate entropy as a measure of system complexity, *Proceedings of the Natural Academy of Sciences of USA*, 88, 2297-2301.
- Polit, A., and Bizzi, E. (1978). Processes controlling arm movements in monkeys. *Science*, 201, 1235-1237.
- Polit, A., and Bizzi, E. (1979). Characteristics of motor programs underlying arm movements in monkeys. *Journal of Neurophysiology*, 42, 183-194.
- Pribram, K. H. (1971). *Languages of the brain : Experimental paradoxes and principles in neuropsychology*. Englewood Cliffs, NJ : Prentice-Hall.
- Rack, P. M. H., and Westbury, D. R. (1969). The effects of length and stimulus rate on tension in the isometric cat soleus muscle. *Journal of Physiology*, 204, 443-460.
- 酒田英夫, 杉下守弘. (1994). 脳地図はどこまで分かったか. *Imago*, 12, 5-14. 44-65.
- Schmidt, R. A. (1988). *Motor control and learning : A behavioral emphasis (2nd rd.)*. Champaign : Human Kinetics.
- Shannon, C. E., and Weaver, W. (1949). *The mathematical theory of communication*. Urbana : University of Illinois Press.
- Smith A. M., M.-C. Hepp-Reymond, and Wyss, U. R. (1975). Relation of activity in precentral cortical neurons to force and rate of force change during isometric contractions of finger muscles, *Experimental Brain Research*, 23, 321-332, 1975.
- 武谷三男. (1968). *弁証法の諸問題*. 勁草書房.
- Uno, Y., Kawato, M., and Suzuki, R. (1989). Formation and control of optimal trajectory in human arm movement : Minimum torque-change model. *Biological Cybernetics*, 61, 89-101.
- 宇野洋二, 鈴木良次, 川人光男. (1988). 脳の運動軌道を再現する筋張力変化最小モデル. 第4回生

体生理工学シンポジウム集, 299-302.

- Varela, F. (1979). *Principles of Biological Autonomy*. Amsterdam: North-Holland.
- Weizsacker, V. v. (1950). *Der Gestaltkreis. Theorie der Einheit von Wahrnehmen und Bewegen*. 4. Aufl. Stuttgart: Georg Thieme Verlag. (ゲシュタルトクライシス. 木村敏, 浜中淑彦 (訳). 1975. みすず書房)
- Winer, N. (1948). *Cybernetics*. New York: Wiley.
- Wolfram, S. (1983). Statistical mechanics of cellular automata. *Reviews of Modern Physics*, 55, 601-644.
- Woodworth, R. S. (1899). The accuracy of voluntary movement. *Psychological Review* 3, 1-114.
- Woolsey, C. N., and Chang, H-T. (1948). Activation of the cerebral cortex by antidromic volleys in the pyramidal tract. *Research publications-Association for Research in Nervous and Mental Disease*, 27. 146-161.
- 山田憲政. (1991). 関節トルクに貢献する成分の定量化. *Japanese Journal of Sports Sciences*, 10, 162-172.
- Yamada, N. (1995). Nature of variability in rhythmical movement. *Human Movement Science*, 14, 371-384.