

生物運動過程における不確定性原理の現れ方

長岡技術科学大学 生物系

松野孝一郎

生物過程の中で果して有限速度で伝播する内部測定、あるいは検知過程が実際に可能となるのか否かを見るために、運動性細胞の場合を例にとってみます。具体的には有核生物のべん毛であるヒトデの精子のべん毛屈曲運動を取り上げてみます。この連続写真[1]は 1/450秒毎、言い換えますと 2.2msec毎にとられたものです。この屈曲運動はここに見られる限りにおいて平面内の屈曲運動であります。ここではこの屈曲運動を実現可能とする力を測定することを考えてみます。但し、力学模型、すなわち状態と状態変化速度を一意に関係づける力学運動方程式を前提とはしていません。そうではありますが、ここに示した連続写真が明らかにしています様に、事後には運動体の状態、べん毛の屈曲変位を明らかにすることが可能であります。

事後の運動体の状態からそれを実現させた力を逆算することを試みます。そのための測定手段として構造安定性を用いてみます。例えば、二変数 x, y の間にその運動に関して拘束条件 $\dot{x}=f(x, y)$ があるものとします。これは力学で認める運動方程式そのものではありません。力学方程式にするためには変数 y の時間変化に関するもう一つの独立した拘束条件が必要となります。今仮に、変数 x に関する測定記録 $x_{r.o.}$ が与えられているとします。この時、もう一つの変数、あるいはパラメータ y の値は距離 $|\dot{x}_{r.o.}-f(x_{r.o.}, y)|$ を零とする y の値になります。すなわち、距離 $|\dot{x}_{r.o.}-f(x_{r.o.}, y)|$ を最小とする $y=y(t)$ が実現される y の値となるというのが構造安定性から明らかにされます。構造安定性が明らかにしているのは、対象としている運動系がその系の外部から僅か摂動を受けるとしてもその系が物理的に実現可能であるとする限り、安定に存在する、とすることです。これは力学模型だけには限りません。この構造安定性を用いてべん毛で作用する張力と周りの流体から働きかける抗力を求めてみます。測定データとしてはべん毛の屈曲変位を採用します。結果をまとめると次の様になります。

べん毛の屈曲変位の伝播速度は $1.7 \pm 0.1 \text{ mm/sec}$ と判明しました。同じく流体からべん毛に働く抗力の伝播速度も $1.7 \pm 0.1 \text{ mm/sec}$ となります。周りの流体は通常のナヴィエ・ストークス運動方程式に従う流体であり、そのため流体変位を与えればそれから直ちに流体に発生する力が判明します。今の場合、流体に変位を与えるのはべん毛そのものであり、べん毛の屈曲変位に対して流体から

べん毛に働きかける力、抗力は一意に定まることになります。べん毛の屈曲変位を通じて流体に作用する力に対して流体から働きかける反作用力が一意に定まります。このべん毛屈曲変位と流体からの抗力の一意性のため、屈曲変位に伝播する変位が認められるとしますと、流体からの抗力にも同じ同期した速度で伝播する変化が認められます。べん毛の屈曲変位の伝播速度と流体からの抗力の変化の伝播速度が同一であるのは、流体に対する作用力に対して流体からの反作用力が一意に定まることを確かに保障しています。力学第三法則が確かに成立していることを表しています。

しかし、べん毛に働く力は流体からの抗力ばかりではありません。べん毛内部でも微小管のすべり運動に基づく張力が発生しています。分子レベルでのこのすべり運動を見てみますと、それはチューブリンという蛋白分子がダイニンというもう一つの蛋白分子でのATP分解活性によってATPから放出されたエネルギーを受けて軸に沿ってすべる運動に対応します。更にこのチューブリン分子の一端が固定されていることによりすべり運動が軸に沿って屈曲運動に変換され、それが観測されるべん毛での屈曲運動となります。この屈曲運動は微小管、チューブリン相互のすべり運動に基づく内部張力によって引き起こされる、と見なすことが出来ます。この内部張力に発生する変化についての伝播速度は $0.69 \pm 0.02 \text{ mm/sec}$ であることが判明しました。

ここで注目されるのは同じ速度で伝播するべん毛の屈曲変位は認められなかったとする点であります。内部張力はべん毛それ自体に作用する力であるため、当然内部張力発生源への反作用力もありますが、この反作用を担うのはべん毛の屈曲変位そのものではありません。もし屈曲変位によって反作用力を発生させているのならば、内部張力の変化の伝播速度 $0.69 \pm 0.02 \text{ mm/sec}$ と同じ速度で伝播する屈曲変位が認められてよい筈であります。実際には認められませんでした。これよりべん毛に力が作用する時、それからの反作用力には2通りあるのが判ります。周りの流体からの作用力に対しては周りの流体そのものへ、ATP加水分解に基づく作用力に対してはATP加水分解反応そのものへ反作用力が働くことになります。周りの流体からの作用力については、これまで見て来ましたがべん毛からの反作用力が一意に定まり、力学第三法則は確かに任意時刻において成立しています。それでは次に、ATP加水分解によるべん毛への作用力がどのような形で産み出され、かつそれへの反作用力を定めて行くのか、どの様にして力学第三法則が実現されて行くのかをもう少し詳しく見てみることにします。

べん毛に作用する内部張力、あるいはすべり力の発生源はATPの加水分解にあります。これは比較的ゆっくりと進行する化学反応過程であることが知

研究会報告

られています。通常分子が化学反応を行う時、その分子間反応時間は 10^{-12} secよりも十分に短く、場合によっては 10^{-15} sec程度にもなりますが、ATP加水分解反応に限っては 10^{-2} sec程になっています。非常に長い時間をかけています。そのため反作用力に急な変化が認められましても、作用力すなわちATP加水分解によって発生する力が直ちに應じて変化することが出来ないことになります。逆に作用力に急激な変化が生じて、反作用力が直ちにそれに応じることは出来ません。実現可能となるのは力学第三法則を成り立たせる過程となります。たとえ、瞬時に作用、反作用力が定まらなくても、事後において第三法則を成り立たせるとするのがその過程であります。すなわち、力学第三法則を実現させる内部測定、検知過程がここで進行することになります。その進行の伝播速度がここで見いだされた 0.69 ± 0.02 mm/secとなります。

力学第三法則を成り立たせる過程、すなわち事前には不定であります。事前から事後に移る所で状態を確定するとする内部測定が、べん毛屈曲運動において示唆されることをここで見て来ましたが、それを検証するため同じ運動を全く別の観点から見てみることにします。このべん毛屈曲運動において内部測定、すなわち内部で進行する検知過程が現実には可能であると致しますと、その検知過程の伝播速度そのものを測定するという問題が浮かび上がって来ます。今、べん毛軸索に沿っての微小距離 Δl をへだてて相手を検知するのに要する時間を Δt としますと、検知過程の伝播速度は $\Delta l / \Delta t$ となります。仮にべん毛軸索に沿うある一点で、内部張力が何等かの理由で変化したとします。その内部張力によって引っ張られる長さ Δl の線素の運動はこの内部張力の変化の分に伴うだけの加速運動を行うか、あるいは一端の内部張力の変化が Δt 時間後にもう一端で検知され、それに應じてその端でも内部張力が変化することになります。すなわち、この微小線素の運動体に関して力学第三法則を成り立たせる様な仕方で定まることとなります。力学第三法則の成り立たせ方は事前には定まりませんが、事後には記録の上で定まり、固定されてしまいます。これは検知過程が伝播することに由来します。もし力学模型が要請する様にべん毛の屈曲変位に対応する状態と内部張力を与えることになる状態変位速度との間に一意の拘束条件があるとして、べん毛全体についての屈曲変位を与え、そのべん毛中の一点での内部張力を確定した時、同時に他の全ての点での内部張力も確定することとなります。 Δl 離れた所での内部張力の変化を検知するに要する時間 Δt は0となります。

それでは、実際のべん毛ではこの検知過程の伝播速度 $\Delta l / \Delta t$ がいくらになるかを測定することが必要になって来ます。その測定には、観測された屈曲変位を最も忠実に再現する伝播速度はいくらであるかを算定する、という方法を

採用します。仮に伝播速度を固定しますと、それに伴って力学第三法則を成り立たせる内部張力の範囲が限定され、力学第二法則を用いて記録されている屈曲変位を再現する様に内部張力を定めることが可能となります。また記録されている屈曲変位を再現する時に選ばれた伝播速度がたまたま現実の伝播速度と一致しているとしますと、たとえ記録通りの屈曲変位を再現するとしてもそれより小さい、あるいは大きい伝播速度を伴うものは当然排除されます。検知過程の伝播速度をパラメータに選び、それに対してべん毛屈曲運動の再現忠実度の最も高くなるものを選びますと、それは当然実際の伝播速度と異なる伝播速度で進行する検知過程を排除します。この様にして以前と同じべん毛屈曲運動に対して求めた内部測定、検知過程の伝播速度は $0.72 \pm 0.03 \text{ mm/sec}$ となりました。これは構造安定性から求めた伝播速度 $0.69 \pm 0.02 \text{ mm/sec}$ と測定誤差の範囲内で一致しています。しかも、この二つは全く別々の方法で求めたものであります。一つは、物質現象一般に共通する構造安定性から、べん毛屈曲運動には $0.69 \pm 0.02 \text{ mm/sec}$ で進行する検知過程、力学第三法則を成り立たせる過程があることが判明しました。一方、それとは独立に力学第三法則を成り立たせる検知過程が確かに伝播しているとして、同一のべん毛屈曲運動に対してその伝播速度を求めますとやはりほぼ同一の $0.72 \pm 0.03 \text{ mm/sec}$ となりました。

これよりべん毛屈曲運動を例とする細胞運動においては内部測定、検知過程が確かに出現していることが事実によって裏付けられることが判明します。同じことが筋肉の構成単位となるアクトミオシン系、アクトミオシン系からなる原形質流動、植物におけるアクトミオシン系、それに動物での筋肉組織においても確かめられました。力学第三法則を成り立たせる内部測定、検知過程の伝播速度は $3 \sim 5 \mu \text{ m/sec}$ から 0.1 m/sec の範囲にあることが判明しました。

内部測定、物質系内部で進行する検知過程は確かに生物運動性を示す過程で認められ、その定量指標の一つにこの検知過程の伝播速度があることは既に見て来た通りであります。ここにおいて、それ以上にこの内部測定の内容を掘り下げて行こうとしますと、過程としての測定の内容にもう少し踏み込む必要があります。量子力学はシュレーディンガー運動方程式に代表される力学モデルを提供し、そこから観測、測定の問題を排除していますが、この観測、測定の問題そのものを排除している訳では勿論ありません。量子力学は、そうすることが結果的に良いか悪いかは別として、物質の運動過程を力学過程と観測とに分離し、それぞれ独立に扱って来たがためにかえって無用な困乱を避けることが出来た、とする肯定的な評価が多く関係者によって為されているのも事実です。ここで内部測定の素性をもう少し明らかにするためには、量子力学において力学モデルから分離されることになった観測、測定に着目することは当然な成

研究会報告

り行きとなります。この観測の問題の中心にひかえているのは不確定性原理であります。

孤立した系のエネルギー E を外部から測定器を用意し、 Δt 時間を要してそのエネルギーを測定しても、 $\Delta E \cdot \Delta t \sim \hbar$ で与えられるエネルギー値 ΔE 程度の測定誤差はやむを得ない、とするのがこの不確定性原理の言い分であります。これは決して孤立系のエネルギー E の保存性を否定するものではありません。ただ単にその外部から測定器を持ち込み、測定するためにやむを得ずこの孤立系に測定器との相互作用を認め、孤立性をはからずも破ってしまったことによる結果が不確定性原理に明示されています。測定器を外部から持ち込む外部測定においては、測定されたエネルギーに ΔE なる誤差、不確定性が認められてもそれはエネルギー保存則を破ったのではなく、測定器を持ち込んだことによるやむを得ない副作用として了解されることとなります。しかし、この不確定性原理の意味する所を内部測定の観点から眺めますと、意味する内容は一変します。経験則としてのエネルギー保存則を認める限り、内部測定がどの様に進行してもエネルギー保存則は結果においては満足されていなければならないこととなります。外部測定においては測定されるエネルギー値に一見不確定性が認められるとしても、それは経験則としてのエネルギー保存則を破ることにならないとの言い訳を用意することが可能となりました。しかし、内部測定ではその言い訳は通用しません。

一方、内部測定を特徴づけるその基本は保存則を事後において成り立たせる、とする所に認められます。保存則としてエネルギー保存則を取り上げるならば、エネルギー保存を実現させる内生運動をこの内部測定が担うこととなります。今、内部測定において Δt 時間かけてエネルギー値を測定した時、この結果として内部測定を行った近傍に δe だけのエネルギー揺らぎを生じさせたとしますと、揺らぎ速度は $\delta \dot{e} \sim \delta e / \Delta t$ で与えられます。ここにおいて基準化揺らぎ速度 $\Delta i \equiv \delta \dot{e} / \delta e$ を定義致しますと、そこでの恒等関係により $\Delta i \cdot \Delta t \sim 1$ というひとつの不確定性関係式が得られます。この不確定性関係式 $\Delta i \cdot \Delta t \sim 1$ は内部測定において常時成立するものであり、基準化揺らぎ速度に関する不確定性関係式 $\Delta i \cdot \Delta t \sim 1$ はハイゼンベルグの不確定性原理 $\delta e \cdot \Delta t \sim \hbar$ を内に含むこととなります。

内部測定にあってはエネルギー保存則を事後に成り立たせるとする内生運動を間断なく継続させることになり、基準化揺らぎ速度に関する不確定性関係式 $\Delta i \cdot \Delta t \sim 1$ はその内生運動を特徴づけるものとなります。外部測定に基づく不確定性原理 $\Delta E \cdot \Delta t \sim \hbar$ においてその不確定性原理に基づく揺らぎを多体系において観測しようとしみますと、有限温度に基づく熱的揺らぎと区別するため

には絶対零度の極限に近づく必要があります。しかし、内部測定では不確定性関係式 $\Delta i \cdot \Delta t \sim 1$ そのものがこの内部測定を担うことになり、内部測定が進行している限り、この不確定性関係式は直接観測の対象となります。

それでは果して内部測定において基準化揺らぎ速度に関する不確定性関係式が成立するか否かを観測事実と照らし合わせてみます。ここではミミズの一次元伸縮運動を取りあげます。ミミズの伸縮運動は体環をマーカーとすることによりその一次元伸縮運動変位を記録することが可能です。揺らぎの対象として内部張力 δf を選び、内部測定過程の途中で認められるこの内部張力の変化速度 $\dot{\delta f}$ を観測し、それから求めた基準化揺らぎ速度 $\Delta i \equiv \dot{\delta f} / \delta f$ と内部測定において張力を測定するに要する時間間隔 Δt とから不確定性関係式 $\Delta i \cdot \Delta t \sim 1$ が成立するか否かを判定することが出来ます。その結果は不確定性関係式 $\Delta i \cdot \Delta t \sim 1$ が成立するとするものでした。

同じことをアクトミオシン系、アクトミオシン系から成る組織としての原形質流動、植物におけるアクトミオシン系においても確かめることが出来ました。

不確定性原理そのものは測定対象と測定器との関連に関しての基本となるものを規定しています。そのため不確定性原理に由来する揺らぎは測定器を持ち込むという人為的手段によって生じたかに見えますが、内部測定の観点から見ると、それは決して人為的でないことが判明します。しかも、他方に由来する相互作用の変化を検知することにより、結果的に保存則を満足させつつ、引き続き他方への相互作用の仕方を変えて行きます。保存則を満足させるという相互作用の均衡化運動が再び他方において均衡化運動を誘起させる原因としての不均衡を生じさせます。この不均衡とは相互作用がこのまま改変されないとしめすと保存則を破ることになる相互作用形態のことを言います。この均衡化運動を引き起こす不均衡が以前の均衡化運動を介して不断に生成されることになります。すなわち、不確定性原理を内部測定の観点から見る限り、均衡化運動がその揺らぎ発生の原因となります。言い換えるなら、不確定性原理は保存則と測定過程から導かれることになり、不確定性原理の根底には保存則と測定過程があることになります。ここで見て来ました生物運動過程は不確定性原理がそのまま現象として巨視的なレベルにおいて発現したものであると見なすことが出来る対象となります。物性物理学においては不確定性原理がそのまま巨視的なレベルにおいて発現する現象は確かに認められていますが、多体系で認められるのは零点振動が基底状態に対応する He^4 などのきわめて少数の系に限られ、しかも極低温の場合に限られています。生物運動過程が物性物理学において現れる運動過程に較べて奇妙、異質であるのは物性物理学において不確定性原理あるいは零点振動が巨視的になる場合が例外的であることに対応している

研究会報告

ことになります。

ここでもう一度力学模型に従う運動と内部測定に従う運動を対比してみます。力学模型においては状態と状態変化速度がそれぞれ一意に定義され、しかも両者間に一意の拘束関係が成り立つとします。これが力学運動方程式そのものであります。その結果、はからずも対象としている系内で進行する相互作用としての相手検知過程の伝播速度を無限大としなければならない羽目におちいります。しかし、この検知過程の伝播速度が有限に留まらざるを得ないことに留意するならば、状態と状態変化速度の双方を同時に確定するとする力学模型の根底がゆさぶられることになります。力学模型においては状態と状態変化速度が同時に確定しているため、時間の順方向、逆方向のいずれにおいても運動は一意に定まります。運動は可逆となります。

一方、本質的に可逆である力学模型から非可逆過程を導くトリックは統計力学においてなじみではありますが、この非可逆性は状態そのものの運動に認められるのではなく、状態の密度に関してであります。状態の運動と状態密度の運動は別物であるとして、状態密度の運動の中に人為的に非可逆性をもたらす作為を課することが理論的には可能であるとしたのが統計力学であります。確かに経験事実の内のある種の非可逆性、特に物性物理学で遭遇する非可逆性はこの状態密度の運動が非可逆であるとすることによってうまく説明されて来たのはその通りであります。

しかし、検知過程の伝播速度が有限であるとする内部測定での非可逆性は状態密度での非可逆性とは異質であります。内部測定においては先ず観測、測定と無関係に状態を定義することが出来ません。状態を定義することが出来るのはあくまでも事後においてであります。内部測定には事前には定義出来ないが、事後には定義出来る状態が伴うため、その成り立ちにおいては既に非可逆であります。逆に、運動を論じようとして一端運動体の状態を定義出来るものとしてしまいますと、運動はそのことによって可逆となってしまいます。これは実際の運動現象に不用意に、何の保障もない理論的作為を課したことによる心ならずももの結果であります。運動現象にある属性に名前をつけてしまいますと、名前はそれだけで一本立ちしてしまいます。そうしますとその名前でもって対象を呼ぶことがいつも可能となり、事前、事後の区別が心ならずも消失してしまいます。状態と状態変化速度を同時に定義する力学模型では状態を一度定義しますと事前、事後の区別をする必要がなくなり、その限りにおいては一貫しています。事前と事後の区別がないことは力学模型に従う運動が可逆であることにも見てとれます。しかし、ここでは相手検知過程の伝播速度を無限大としなければならない、不本意ながらの作為が入り込んで来てしまいます。

一方、事前と事後を区別し、定義可能でかつ確定され得るのは事後の対象のみであるとするのは控え目ではありますが、言っていることは正当であります。測定する以前に何を測定するかを確定することが出来ないとするのは否定し得ません。しかし、この非可逆性に立脚する内部測定において事後に確定する状態は一体どのような過程を経て定着して来るのか、を問うならば、また新たな困難に出会うことになります。原則的には、この問いそのものに確定した仕方で答えることが出来ません。それにも拘らず、今ここで内部測定の素性を出来るだけ明らかにしようとして”事後に確定する状態”という名付けられた対象を事前に、あるいは具体的な経験事象を参照することなく使っています。これは明らかに矛盾であります。”事後に確定する状態”をもたらす状態、と名付けられたものはまだ内容は確定していません。すなわち、内部測定を言い表そうとしますと矛盾した表現が不可避となります。同じ状態という言葉を用いながらその内容が事前には不定、事後には確定するという使い分けが求められます。

内部測定に固有な不確定性関係式はまさにこの言葉遣いにおけるやむを得ない矛盾の程度、あるいは名をつけられた対象の内容が不定となる程度を言い表しています。名前をつけられた対象の内容が不定であるならば、通常名前の付け方が悪かったと見なされます。これに対する一般的な対策は、この名付けられた対象を小分けにし、この小分けにしたそれぞれに名前をつけ、全体はこの名付けられた小分けしたものの関係の総体として見直す、とするものです。この時、小分けされたそれぞれはその名の示す通りに確定された内容を伴う、と見なされています。しかし、この流儀は内部測定には適用されません。内部測定の内容を事前に言い表そうとしますと、不定さを伴う対象の介入が不可避となります。このような言い回しをしますと、何か非常に深刻なことを言っているかに見えますが、せんじつめると実は極めて簡単なことであります。測定以前に測定内容を確定し得ないとする不定さが内部測定における不確定性の原因であり、これは確かにここで見て来ました様に生物運動過程において確認されるものであります。物性物理学では殆ど顧みられることのなかった内部測定という運動過程が生物運動においては主要な役を演じることになります。

補遺

－化学反応であるATP加水分解が内部測定、検知過程の物質基盤であるとするならば、それは反応拡散理論の守備範囲内の筈である。しかも反応拡散理論は明らかに力学模型の一つだ。それなのに、どうしてこのATP加水分解過程

が力学模型に従わないと言うのか？ -

A T P の化学結合エネルギーを力学エネルギーに変換する運動性細胞においてそれへの運動負荷が急に増加したとしますと、この運動性細胞の応答の仕方は大きく分けて二通りとなります。一つは、運動負荷に応じた減速運動であります。もう一つは、この新たな運動負荷に抗するため A T P からの力学エネルギー変換を更にうながすとするものです。この二つの内、A T P からの力学エネルギー変換ではその背後にある加水分解過程が比較的ゆっくりと進行する化学反応であるため、この運動性細胞はかつての運動負荷に抗するばかりでなく、周りの媒体にも新たな作用力を及ぼすことになります。そのことによって運動負荷に再び変化が生じ、運動性細胞の減加速運動と A T P 加水分解速度にまた新たな変化がもたらされ、この継起が持続することになります。このエネルギー変換過程の特徴は運動負荷の変化に対する応じ方において、運動性細胞の減加速運動と A T P 加水分解速度の変化との二通りが可能となることに認められます。運動そのものに任意性があることになります。

もし、運動体の変位とその変化速度とを一意に関係づけることが可能となるならば、運動体の変位とその変化速度とを一意に関係づけることが可能となり、力学模型に従うと言うことが出来ます。しかし、この力学模型を保証するためには運動体の減加速運動と A T P 加水分解速度との間に一意の関係があることを立証しなければなりません。元来この関係が一意でなければならないとする理由は何もありません。また、これを一意にしなければならない必然性もありません。この関係が一意であろうとなかろうと発生した力を測定するならば、事後においては力学第三法則を満足している筈であります。力学模型に従わない過程であっても力が測定されている限り、既に測定された力に関しては第三法則が成立している筈です。そうでなければ、力そのものが定義されないことになります。力を定義することと第三法則を要請することとは等価であります。力学模型では力学状態を指定する限り、その状態は力学第三法則を自明のものとしします。一方、力学模型に従わない系であってもそこで力が測定される限り、事後に力学第三法則を満足させること、すなわち、力学第三法則を事後に満足させるとする相互作用が進行することになります。加えて、内部測定、検知過程は相互作用の別名であるため、この力学第三法則を事後に満足させるとする相互作用も当然内部測定、検知過程に含まれることになります。

- 基準化揺らぎ速度を用いて表示した不確定性関係式 $\Delta i \cdot \Delta t \sim 1$ は量子力学

での不確定性原理 ($\Delta E \cdot \Delta t \sim \hbar$) そのものでなく、ひとつのメタファーに過ぎないのではないか? -

基準化揺らぎ速度による不確定性関係式 $\Delta i \cdot \Delta t \sim 1$ は量子力学での不確定性原理を内を含みますが、それより弱い表現であります。その意味において、この不確定性関係式は不確定性原理のひとつのメタファー以上のものではありません。

- 生物運動における力はより基本的な事象から派生したものに過ぎない。どうしてそれより基本的な事象に着目しないのか? -

たとえば、アクトミオシン系での化学・力学エネルギー変換ではそれに係わる個々の蛋白分子の配位が重要な役割を果たしていることが既に知られています。この分子配位とその変化を克明に解明することは確かに運動性細胞の構造、機能を究明する上で重要であることは御指摘の通りです。それと同時に、観測可能な物理量に着目するのも、もう一つの方法となります。力は確かに観測可能な物理量であります。しかも、相手が力学模型に従うか否かを問いません。ひるがえって、力に着目することにより、ここで示して来ました様に、相互作用の一般形としての内部測定がどの様に進行するかを見定めることが出来るとする利点が結果として得られることになります。

- 生物運動において測定された力は力学において定義されている。力学を前提として力を測定していながら、結果において生物運動は力学に従わないとするのは自己矛盾ではないのか? -

この御指摘は私の話の根底にかかわることであり、繰り返しになりますが、もう一度申し上げたいことを整理してみます。力学第一、二、三法則がそのまま力学模型になるのではないことを強調しておきます。そこでこの三法則の内容を今一度振り返って見ることにします。力学第二法則は力を定義していると同時に力の測定法も明示しています。質量を持った物体の加速運動を直接に測定することによりこの物体に働く力を間接的に確定出来ることが第二法則に含まれています。力学第一法則は、第三法則との関連で述べるならば、孤立した系を考えた時、その系に外部から働きかける力は定義により存在してはいない

研究会報告

ことを表しています。すなわち、慣性の法則そのものであります。第二、第一法則をこの様に理解しますと力学第三法則の意味する所は、孤立系内部で作用する力は反作用体からの力と互いに打ち消し合う、となります。作用体、反作用体に物体のみならず、場まで含めるとしますと、この第三法則は確かに成立しています。すなわち、力学第一、第二、第三法則は孤立系と力の双方を定義しているのであって、力の性質について込み入った性質を何規定している訳ではありません。所が、力学模型あるいは力学系を採用すると決心しますと、これは力学第一、二、三法則以上の立ち入った内容を伴うことになります。一言で言い表すとしますと、それは力を状態の関数として表現するのを是認する、との立場の採用であります。対象としての状態が先ず指定され、状態が指定されればそれに働く力は状態の関数として一意に定まる、とするのが力学模型の骨子であります。力がポテンシャル力である場合は確かにこの力学模型に従うことは自明であります。状態関数として作用力が定まるならば、状態関数としての反作用力も同時に定まり、当然この二つは力学第三法則を満足しています。

ここにおいて、私の取り上げました問題は、任意の生物運動体に力学模型を適用することは可能か、否か、であります。その判定のための手段は力学第二法則が提供する力の測定によってであります。もし力学模型が適用可能であるとするならば、生物運動体の状態が指定可能となり、その状態に応じてそこに働く力を一意に定めることが可能となります。状態が指定可能であるならば、状態が指定されることにより力学第三法則を満足する力も同時に定まります。力学第三法則を結果において成り立たせるとする過程の入り込む余地は全くありません。しかし、生物運動体に対して力学模型で言う状態が指定されていなくても、そこで作用する力は力学第二法則の助けを借りて測定することは可能であります。しかも、測定された力に関しては当然力学第三法則が成り立っています。但し、あくまでも測定後という事後においてであります。ここにおいて力学第三法則を事後に成り立たせるとする過程が許容される余地が発生して来ます。これは少なくとも相互作用過程であり、ここでの呼び名に従えばそれは内部測定、検知過程となりますが、対象とする生物運動体に力学模型で言う所の状態が指定され得るとするならば、状態を指定した時に既に力学第三法則が満足されていることになります。力学第三法則を成り立たせるとする内部測定の伝播速度は実効的に無限大となります。

この状況下で、力学第三法則を成り立たせる過程の伝播速度を実際に測定しよう、とするのが私の申し上げたかった一つの点であります。再度繰り返しますが、この測定に際しては力学模型を前提としていません。前提としたのは力学第二法則による力の測定であります。実際、この測定によって生物運動体

での力学第三法則を成り立たせる過程の伝播速度を求めてみますと、多くの場合 1m/sec 以下になることが判明しました。これから判明する一点は、生物運動体にそこで発生する力を一意に指定する状態を想定することは出来ないとするものです。これは生物運動体の状態を実際に測定する、しないに関係のないことです。生物運動体に力学模型で言う所の状態が指定可能ならば、力学第三法則を成り立たせる過程の伝播速度は発散している筈であり、そこでは力学第三法則を成り立たせる過程という言葉遣いすら不適切となります。

力学第三法則を成り立たせる過程としての内部測定の伝播速度が有限に留まるという事実は、少なくとも生物運動に対して力学系で慣れ親しんで来た状態という言葉を用意に使うことが出来なくなることの意味します。状態を用いないで運動を議論するとすることは今まで物理で蓄積された来た財産の一部使用を断念することに通じ、一步退却を認めることになるかにも見えます。事態がどの様に推移して行くかについては今後に俟たなければ、と考えます。

参考文献

- [1] Hiramoto, Y. and Baba, S. A. , 1978 J. Exp. Biol. 76, 85-104