

内部測定としての検知過程：物理と生物との接点

長岡技術科学大学 生物系

松野孝一郎

内部測定、それに検知過程という表題はいずれもこのままでは未定義ではありますが、今日ここで話をさせていただきたいと思っておりますのは、生物とは一体如何なる物理現象なのか、どのような物理過程に従う現象なのか、についてであります。もちろん、この種の問題は生物物理学にとってなじみとなっているものであり、日本のみならず各国での生物物理学学会において大きな関心の対象となっています。この関心の向け方は、簡単に分類するならば、大きく二つに分けられます。一つは生物由来の分子または分子現象を物理学、特に物性物理学において開発された手法を用いて分析して行くとするものであります。もう一つは、生物由来の分子現象は確かに物質現象ではありますが従来の物性物理学の枠内では重要ではないと無視されて来たものがたまたま主役となる物質現象ではないのか、とするものであります。この二つの流儀の内、今現在支配的なのは物性物理学が重要と判断した分析方法をそのまま生物由来の分子現象の分析にとっても重要であると見なすものであります。たとえば分子間相互作用として認められて来たファンデルワース力、水素結合、共有結合は確かに生物由来の分子現象、特にDNAに基づく蛋白合成過程において重要な役割を果たすことが既に確認されて来ています。そうではあります、今日話題にさせていただきたいのは、物性物理学での主役が生物由来の分子現象でも主役を演じるとする物性・生物主役続投ではなく、これまでの物性物理学では舞台に出るチャンスが殆ど与えられていなかった端役が生物では主役を演ずることになるのではないかとする主役交替説の方であります[1]。表題にあります内部測定、それに検知過程は実は物性物理学というチームのメンバーとして既に登録されてはいるのですが、これまでの試合には殆ど出場のチャンスが与えられていなかった、しかし試合の舞台が生物由来の分子現象となりますと常時出場する主要なメンバーになるのではないかとするのがここで申し上げたいことであります。それでは、もう少し具体的に話を進めさせていただきます。

物性物理学の特徴を最も端的に表しているのは力学過程でありますので、それに関連した所から始めます。今、独立変数 t によって定められる従属変数 $x(t)$ のテーラー展開を考えてみます。

$$x(t+h) = x(t) + \frac{h}{1!} x'(t) + \frac{h^2}{2!} x''(t) + \dots + \frac{h^n}{n!} x^{(n)}(t) + O(h^{n+1})$$

この級数展開は高等学校での解析学でなじみのものであり、従属変数 x が独立変数 t の解析関数であるならば、この h の値が収束半径内にある限り、右辺は最初の有限項の和でもって十分に収束が得られることは高校生にとっても周知であります。ここでは同じ級数展開を別の観点から見ることにします。あらかじめ $x(t)$ の関数形は判明していません。今独立変数 t を時刻 t と読み替えることとしますと、テーラー展開を示す右辺は全て時刻 t でのデータ $x(t), x'(t), x''(t), \dots$ で記述されています。テーラー展開が収束する限り、この展開に関する等式は変数 x の時刻 t に関するデータが判明するならば、それに基づいて変数 x の時刻 $t+h$ での値を確定することが出来ることを言い表しています。現在でのデータが完備しているならば、未来を確定することが出来る、とするのがこのテーラー展開の言い分であります。この言い分だけを取り上げてみますと実に奇妙であります。現在のデータでもって何故未来を確定することが出来るかを問答無用としたままで、未来を確定するのがこのテーラー展開であります。経験事実に照らし合わせまして、現在のデータでもって未来を確定とするテーラー展開はそれ自体不思議な内容を備えていることになりましたが、力学はその不思議さを更に先鋭なものに化しています。

力学の基本は、対象を環境から分離し、環境から影響がないとする時、上のテーラー展開において変数の2階微分が0、すなわち $x''(t)=0$ を要請することにあります。慣性の法則がこれです。しかも、対象は時々刻々のデータ $x(t), x'(t), \dots$ でもって指定され、このデータの組でもって対象の状態が指定されるとするのが力学の前提となっています。この前提と対になっているのは、環境に状態は付与されていないとする観点であります。環境を指定するデータは元来あり得なく、環境と対象との関係は新たに定義した力によって指定される他なく、その力は対象を指定する状態に依存して定まるとする力学第2法則を持ち込むならば、上のテーラー展開は

$$x(t+h) = x(t) + \frac{h}{1!} x'(t) + \frac{h^2}{2!} F(x(t), x'(t))$$

という形にまで変換されます。これはとりも直さず、古典力学にしろ量子力学にしろ力学に固有な運動方程式そのものであります。現在のデータでもって未来を確定とするテーラー展開の基本特性がそのまま温存されています。それに加えて、時々刻々対象に関するデータ $(x(t), x'(t))$ 、すなわち対象に関する状態を確定し得ることが併せて要請されています。

この力学模型が多大の成功を納めて来たのはその通りであり、それに異論をはさむ余地はないのですが、力学を成功に導いた基本要請が正当であると証明されている訳ではありません。この基本要請は三点あります。すなわち、対象に対し

て状態を指定し得ること、環境の状態は指定し得ないこと、それに対象に働く力は対象の状態のみに依存して定まること、の三点であります。この内、二番目の環境の状態を指定し得ないとする事は、環境と対象との分離が任意であることに留意するならば、かつての環境の一部を新たに対象の中に組み入れることによって状態を指定し得なかったものの状態が指定されることになるという自己矛盾を導き出します。また三番目の環境から対象に働く力は対象の状態にのみ依存して定まるとするならば、対象は環境からの力を受動的に受けるだけの対象となり、能動的に働きかけることは除外されます。ここに示した環境と対象の分離の任意さに基づく状態の不安定さ、それに対象に働く力を受動力に限定することの二点は確かに力学模型の固有な欠点をついているのですが、問題領域を適度に分離することによりこの内部矛盾に由来する後遺症をたくみに避けて来たという実績が物理の分野では蓄積されて来ました。端的に言うならば素粒子論と物性論を分離して扱うとするのがそれであります。だからと言って力学模型に固有な内部矛盾が霧散霧消した訳ではありません。

力学模型の核心にあるのは状態なるものが定義され得るとする要請であります。一端、状態なるものは定義され得るとして、実験的あるいは理論的に扱い得る状態に何かがあるかとの問題をたてるならば、この問題の建て方は極めて生産的であり得た、かつ今後もそうであり得る、とするのはまことにその通りであります。この状況下で一度立ち止まって果して状態なるものは定義され得るのかと問うならば、見掛上生産的な問題解決の流儀とは一線を画すことになり、問題として果して考慮に値するのか、あるいは、問題にはなり得ても瑣末なものでしかあり得ないのではないのか、とする疑問が出て来る可能性が十分にあります。この状態の定義可能性の是非に関する問題そのものは私が先き程申し上げた意味において物理の内に許容される問題であっても、脚光を浴びることのない端役の問題でしかなかったのは経験上事実であります。しかし生物にまで物理現象を拡張した時も、この状態定義可能性是非の問題がつまらない瑣末な問題でしかないのか、否かはまだ不明です。うまく行けば、重要な問題に化する、という好運も期待されなくもありません。この楽観的見通しの背後にあるのは、生物現象に力学模型をあてはめようとした時に多くの関係者が経験し、かつ表明する失望感、それに不満感であります。他の人の失望、不満を当方の楽観の種にするのは穏当を欠く言い回しではありますが、ここでは倫理上のことは一切関係致しておりませんので気にせず、当分の間楽観路線をとることと致します。

力学で定義される状態はハミルトン形式の表現からも明らかになる様に、状態に加えて状態変化速度も併せて定義可能としてしまいます。この状態と状態変化速度とを結びつけるのが力学でいう運動方程式であります。力学は一つの大き

な「トリック、手品の様なことをしています。状態およびそれに付随する状態変化速度は理論家による極めて思弁的な思考の産物であるにも拘らず、対象そのものに固有な属性であるとして話をすりかえてしまいます。思弁的な産物ではない状態をそれを産み出した理論家、観察者から切り離し、対象そのものにはりつけてしまうこと強引に行ってしまいます。そのため、思弁的であることからの副産物がはからずも対象に無理矢理つけられてしまう羽目に至ります。これは観測、あるいは測定に由来する難問であります。

理論家は本来、外部から対象を観察する観察者の役を担っています。ある時刻での対象の状態を指定することはその時刻の状態を観察すること、あるいはその時刻での状態を観察することが出来ることまで含むことになります。状態を指定することは外部観察者による時々刻々での状態確定までも含むことになります。これを端的に示す例は理論家による思考実験でありあります。たとえば、初期時刻 $t=0$ における三ヶの粒子それぞれの位置と速度がカクカクシカジカであるとせよ、との言明はこの三粒子系の初期状態を指定することと同時に時刻 $t=0$ において瞬時にこの三粒子系の状態を確定する観察を為し得ることまでも併せて表明したことになります。瞬時に全体を観察する、瞬時に全体を観察し得るとすることが結果として含まれていることになります。もちろん、この瞬時に全体を観察し得るとしたのは思弁的であるとされる理論家ではあるのですが、力学は理論家が現場で実際に見ていなくとも理論家の構成した力学模型の通りに従って物質そのものの運動が進行する、すなわち理論家が目を閉じていても力学運動は進行するのを要請することによって、対象それ自体に思弁による副産物をはからずも一方的にはりつけることになります。この意図していなかった副産物とは、本来は理論家にのみに固有であった、瞬時の内に全体の状態を観察、検知するという過程であります。

力学模型に従いますと、時々刻々での状態を指定し得るとすることによって、その状態を構成する空間内部で無限大の速度で進行する検知の過程、あるいは測定過程を是認したのと等価になってしまいます。もう少し具体的に言い換えてみます。先き程の三粒子系でそれぞれの粒子の任意時刻 t での位置、速度を (x_1, v_1) (x_2, v_2) , (x_3, v_3) としてみます。この時刻 t での三粒子系の状態はそれぞれ粒子の位置、速度を指定することによって確定しますが、この状態と状態変化速度を結び付ける力学運動方程式を参照しますと、粒子1は粒子2、3がそれぞれ (x_2, v_2) (x_3, v_3) の位置、速度を占めているとの拘束下で (x_1, v_1) を維持していることになります。個々の粒子はその運動座標を瞬時瞬時に他の全ての粒子の運動座標と一意に関係する仕方で定めています。これを保証しているのが運動方程式であるのですが、この運動方程式は、はからずも、個々の粒子が他の全ての粒子の運動

座標を瞬時に検知するとの等価な内容を含むことになります。運動方程式中の個々の粒子は瞬時瞬時の内に自らを拘束する運動方程式が何であるかを検知しています。運動方程式中に現れる個々の粒子は全体の状態を瞬時に検知することになりますが、これは実は何も取り立てて新しいことを言ったことになっている訳ではありません。粒子系に対する運動方程式が確定しているとする事の単なる言い換えに過ぎません。

しかしこの言い換えに個々の粒子が他の粒子の運動座標を検知するという検知過程を持ち込みますと、力学運動方程式中に現れる粒子ははからずも無限大の速度で伝播する検知の過程を備えることになります。これは力学模型に固有なことであって、実際に空間内で運動する粒子が相互に相手は何であるかを検知する過程の速度が無限大であると言っている訳ではありません。力学模型を採用すると一度決めてしまいますと状態と状態変化速度とを一意に関係づける仕組みを手に入れるという得がたい利点を確保しますが、無限大の速度で進行する相手検知過程を容認しなければならないとする羽目におちいります。相手検知過程という相互作用を含め如何なる物理過程も光速を越えないことに留意するならば、力学模型は一つの仮想極限での運動模型であります。その意味において力学模型はこれまでに多大の成功を納めて来た代表な運動模型であるにも拘らず、運動模型としては特異な模型となっています。相手を検知するという運動を正当にみとめていながら、その検知伝播速度を物理としては容認し難い無限大に留めおいています。言い換えるならば、これまでの物性物理学に限定する限り、力学運動模型は極めて満足すべき模型であって、検知伝播速度を無限大と見なしても何等不都合は発生しなかった、逆に検知伝播速度の有限性に留意することは瑣末な重箱のすみをほじくることになりかねない、ということになります。本当に瑣末なことなのか否かを見定めるためにもう少し検知過程の内容を見てみることにします。

検知とは別名測定のことではありますが、測定は物理においていわくつきの難問であります。その難問であることの所以は問題そのものの素性を明確にし得ないとするところにあります。その一例は Einstein-Podolsky-Rosen 非局所性、即ち EPR 非局所性に見ることが出来ます。測定とは少なくとも測定器での固有状態、固有波動関数に従って対象を分節することであるとする点に留意しますと、測定器にとっての固有波動関数が空間的な拡がりを伴っていることになるため、何が測定されようともこの固有波動関数の空間的な拡がりに応じた非局所性が測定対象物に課されることになります。測定器の素性に依じて測定されるものの内容が変わり得る、とするのがこの EPR 非局所性より判明する一点であります。即ち、測定とは何か、を問う時、測定の結果は測定器を指定すれば判明しますが、それでは一体如何なる測定器を用意したらよいかはこの問いだけでは判明しません。

この困難が測定過程にいつもつきまといまいます。

もう一つの例は Wheelerによる遅延選択実験というのがあります。これも EPR 非局所性の場合と同じく、測定内容は用意する測定器によって支配されることを示します。同じ現象を二つの相異なる測定器で交互に切り替えながら測定する時、同じ現象でありながら用いられる測定器の固有状態に応じてそれぞれ異なった量子状態にあるものとして測定されることになります。しかもこの現象が生じた直後に測定器の切り替えを行ってもそれぞれの測定器に応じた異なった量子状態が測定されることになり、あたかも現象が生じた後に測定されるべき現象の量子状態が選択され、決定されたかに見えます。しかし、これはあくまで見掛上のことであって、測定対象物そのものではありません。しかも測定器に固有な分節の仕方を定める基準は何もありません。任意であります。

多体粒子系で検知過程の伝播速度が有限であるといえますと、この測定に固有な難問が粒子そのものにも付きまとうことになります。ある粒子が他の粒子を検出するとは、その相手に発生した変化を相互作用を通じて被験し、自らも変化することの意であります。力学模型ではこの検知過程の伝播速度をいつも無限大としていますので、検知、測定を新たに問題にしなければならない必要性はありません。全系の状態と状態変化速度をいつも確定出来るとする限り、物質過程としての検知、測定の出る幕は強制的に排除されてしまいます。しかし、物質過程としての検知過程を否定去り得ないことに留意するならば、全系の状態と状態変化速度を同時に確定し得るとすることを断念しなければならないことになります。残された道は、状態か状態変化速度の内の一方しか確定出来ないか、あるいは、状態も状態変化速度のいずれも確定出来ない、のいずれかになります。これは、多体粒子系の内部で進行する測定過程、即ち内部測定としての検知過程を是認することに伴うやむを得ない代償であります。

それでは、多粒子系内で進行する検知過程をどの様に理解したらよいかとの問題が発生して参ります。そのためには、何か不動の基準となるものが要用になります。その候補には経験則として既に確立されている保存則、たとえばエネルギー保存則があります。このエネルギー保存則を力学模型の観点から眺めてみますと、状態と状態変化速度が同時に確定出来、かつ内部での検知過程の伝播速度を無限大としたため、エネルギーは運動の恒量となってしまう、測定の有無とは無関係になってしまいます。これは力学模型を採用したことによる結果であって、経験則としてのエネルギー保存則に矛盾していない点においては満足すべきものでありますが、力学模型で言う運動の恒量としてのエネルギーが経験則としてのエネルギー保存則の内容と一致している訳では決してありません。エネルギー保存則の内容を力学模型とは異なる流儀で表現する試みは既に幾つか為されて来て

いますが、その代表例に熱力学があります。

熱力学の特徴は力学の場合と異なり、状態ではなく状態関数に着目します。何故状態関数なるものが可能になるのか、との問いはそれ自体解明されなければならない問題であることはその通りであります。熱力学を前提としますと状態関数の存在を自明とします。力学が状態の存在を自明とするのと状況は似ています。熱力学が明らかにしているのは、幾つかの熱力学状態関数を定義し、かつその熱力学状態関数は全て独立してはいないとする事柄であります。すなわち、熱力学が明らかにする特徴は全て熱力学状態関数で張られた空間内でのある限られた曲面の性質に帰せられることになり、熱力学は一つの曲面幾何学にまで蒸留され、高められています。熱力学第一法則はこの曲面を定める幾何学条件そのものであります。ちなみにこの曲面の曲率が熱力学安定性に関連して来ます。熱力学第一法則は熱と仕事との間のエネルギーとしての交換性を保障するという具体的な内容を含んでいますが、これは熱力学と名づけられた曲面幾何学の基本構成要素であって、観測、測定操作とは直接の係わりを持っていません。幾何学は力学とは異なり、観測とは無関係に成立します。熱力学状態関数の間の一つの不変拘束関係としての熱力学第一法則は歴史的には観測、測定に基づいて導き出されてきたとはいえ、完備した熱力学の枠内ではその熱力学をい可能とする曲面の幾何学的性質を明示しているだけであり、測定操作の介入を排除しています。

力学にしろ熱力学にしろ、そこでのエネルギー保存則の意味する所は理論的、思弁的でしかないことになります。しかも、熱力学での状態関数を定めるためには先ずもって状態を定める必要があります。が、そうなりますと力学に再び戻ってしまいます。状態から熱力学状態関数に移行する途中段階に状態の密度関数を取り上げるという統計力学の段階がありますが、熱力学から統計力学、統計力学から力学へという逆戻りを認めましても状態が定義されるところの枠内に留まり続けることになります。しかし、力学で定義する状態と操作、過程としての測定とは両立し難いことはこの両者間の関係を見れば容易にうかがい知ることが出来ます。ある時刻での全系の状態が定義出来るとしますと、測定そのものは不要になります。測定は測定する以前に何かが測定されるかを確定することは出来ないとする非可逆性を固有なものとしています。ここにおいて経験則としてのエネルギー保存則が測定に固有なことであるとするならば、測定を不要としてしまう状態、あるいは状態の存在を前提とする力学に立脚する限り、よくてエネルギー保存則の一側面にしか触れていないことになります。

状態と測定は両立しないとしますと、確かに論理的には明解であります。その言い分ははなはだ否定的であります。それに基づいて何かポジティブな言い分を導き出すことが出来ないとするれば、まさに重箱の隅をほじくり返すことにし

かならないことになります。その非難を避けるための一工夫は、状態は事後においては測定することによって定まるのを認める、とするものであります。事後に確定する状態は状態変化速度を何等規定することはありません。すなわち、事後に確定した状態にのみ基づいて如何なる状態が実現されるかを事前に確定することは出来ないことを認めることになります。これは、系の内部で進行する検知過程の伝播速度を無限大とする力学模型の場合とは異なって、現在のデータでもって未来の状態を確定し得ない場合に対応します。状態の確定を事後にのみ是認する内部測定にあつては、事前に可能となる多様な状態の中からその過程の進行と共に事後に状態を確定し、固定して行くという1対多型写像の運動が実現されることになります。この1対多型写像の運動は事後にエネルギー保存則を満足させるとするのをその特徴としています。それに引き換え、現在のデータでもって未来の状態を確定とする力学模型では1対1型写像の運動となり、エネルギー保存則の意味する所はこの1対1型写像を特徴づける運動の恒量を指定するに留まり、測定とは無縁となります。内部測定に固有な1対多型写像はそれだけで既に非可逆性を示していますが、これの意味する所はせんじつめますと、測定という操作、過程を認める限り、測定する以前に何が測定されるかを確定し得ないとする非可逆性そのものであります。

測定が参照すべき基準にこれまでエネルギー保存則に着目して来ましたが、それと同等と位置づけられるのものに力学第三法則があります。これは元来力学において認められたものであり、作用力と反作用力との間の閉鎖関係、すなわち作用力とそれに由来する反作用力とを合成するならば力として零となることを表明しています。ここにおいて内部で進行する検知過程の伝播速度が無限大であるとしますと、作用力を及ぼす作用体は反作用体からの反作用力を瞬時に検知し、しかも検知した内容は当然第三法則を満足しています。しかし、この内部測定としての検知過程の伝播速度が有限に留まることに留意するならば、作用体の変化を検知した後にそれに従って反作用体からの反作用力が変化することになりますが、これは時間の経過を要する過程となります。この過程の特徴は力学第三法則を成立させるとする点に認められます。エネルギー保存則を結果において成り立たせるとする運動過程の場合と同じく、力学第三法則を成り立たせるとする運動過程も1対多型写像に従うことになります。本質的に非可逆となります。事後に状態を確定するとしても、それから事前に力、あるいは力に対応する状態変化速度を定めることを可能としていません。事後に確定する力、あるいは状態変化速度は事前に可能となるものの内の一つでしかないことになります。

以上まとめますと次の様になります。物性物理学をはじめ他の多くの物理において圧倒的に支配的になっている運動模型は力学模型として知られているもので

あります。この模型の最大の特徴は観測、測定を運動過程から分離独立させてしまったことに認められます。状態と状態変化速度を同時に関係づける仕組みを要請することにより、観測、測定を運動過程から分離独立させることは実はこの運動過程の内部において進行する内部測定、あるいは検知過程が無限大の伝播速度を伴うことと等価になります。この運動模型が圧倒的に支配的であるのは我々の全てが知る所ではありますが、ここには検知過程の伝播速度を無限大とする作為がいつもつきまといます。状態と状態変化速度を同時に関係づける仕組みとしての力学運動方程式を是認することは検知過程の伝播速度を無限大とすることと対になります。しかし、物質過程である検知過程の伝播速度を無限大とすることは容認出来ず、それが有限に留まることに留意するならば、瞬時に全系の状態を指定、確定することと過程としての測定、検知とは両立し得ません。有限速度で進行する内部測定、検知過程と両立する状態をかりに認めるとしても、それはあくまでも事後に確定した状態、測定によって確定された状態でしかありません。この時、事後に確定した状態を用いて、いかなる状態が今後実現されるかを事前に確定することは出来ません。内部測定に基づく運動過程は1対多型写像となり、事前の未決と事後の既決の橋渡しをする点において非可逆となります。この力学模型に従わない運動模型としての内部測定、検知過程がただ単に重箱のスミをほじくことに過ぎないのか、あるいは力学模型では不十分とされる生物過程にとって主要な役を担うことになるかは、ひとえに事実との対比において判明するものと考えられます。

補遺

この報告につき、公開、非公開の場での指摘された批判、質問とそれへの回答を示す。

－力学は最も精緻な物理理論の典型である。それを生物に適用した時、破綻とするならば、その破綻の仕方をもう少し論理的に説得力のある仕方で明瞭に示すことは出来ないのか？－

力学系理論に従うならば、まず状態と物理量（あるいは、観測量）が定義されることになります。併せて状態の遷移法則、すなわち運動法則も与えられます。古典力学と量子力学との違いは相異なる物理量が可換か、非可換になるかに認められますが、それ以外の点においては理論構成は同じですので、取り合えずこの

二つを区別しないことにします。そこで力学系の核心はどこにあるかと改めて見直してしますと、それが位相空間での位相点であれヒルベルト空間でのベクトルであれ、状態が確定するとする点に認められます。しかも、力学系の指定する状態遷移則がこの状態の時間発展を一意に定めます。状態の時間発展が一意に定まるのが力学系の特徴であります。ここでこの一意に定まるべき状態を具体的に実際に定めようとしてしますと、力学系そのものだけでは不十分となるのが判ります。初期条件を含む境界条件が別途補完されない限り、状態を確定することが出来ません。境界条件を指定し、それを力学系に課し、かつ指定された通りに境界条件が課されていることを確認することが別途求められます。

例えば、初期時刻において初期状態が指定されていないとしますと、力学系はそれ自体として機能しません。宝の持ち腐れとなります。力学系が機能するためには、力学系そのものだけでは決めることの出来ない初期状態を前提とせざるを得なくなります。そのことによって、初期状態を指定し、それをそれとして確認する操作が心ならずも力学系に付きまといまいます。初期状態を確認するという操作、すなわち状態同定という操作が力学系に付随することになります。同定という操作は観測、あるいは測定を前提とします。一方、力学系は先に示しました様に状態に加えて物理量も定義します。物理量はそれに固有な観測、測定を前提としています。ここに至って、一つの問題が発生することになります。状態同定という測定と物理量の確定という測定の二種類の測定が力学系に持ち込まれますが、果して二種類の測定は互いに干渉することなく進行するか否か、というのがそれです。力学系理論そのものは状態同定と物理量確定という二種類の測定が互いに干渉することなく独立に進行することを前提としますが、これはあくまで前提です。保障されている訳ではありません。

生物を対象とする時種々の取り組み方があると思いますが、私がここで申し上げたいのは、力学系理論を用いて生物を扱うことの是非についてであります。もし力学系理論が生物に適用可能であるとするならば、状態同定と物理量確定の双方が互いに干渉することはないことになりますが、果してそうであるか否かを今一度検討してみよう、というのが私の申し分であります。

但し、ここでお断りしておきたいことがあります。力学系理論をメタファーとして生物現象に適用する限り、何も不都合は発生しないとする点です。状態を定める多数の状態変数間の非線形運動を通じて出現する状態変数間のある種のパターンを物理量（あるいは、観測量）とする時、非常に多くの部分生物現象（例えば反応拡散系でのパターン形成）がこの種の力学系理論によって説明可能となって来たのはその通りです。しかし、だからといって、これらの現象が力学過程に従うか即断することは出来ません。応答の仕方が同じであっても、そのことから

中味も同じだ、ということにはなりません。力学系理論が生物に適用可能であるか否かを見るためには、状態同定と物理量確定という二種類の測定が互いに干渉することなく進行するか否かを調べるのが先ずもって必要となって来ます。

－ 内部測定をもう少し明確に定義出来ないか？ －

内部測定とは相互作用の別名です。但し、条件があります。それは相互作用を力学系理論の枠内で認められる相互作用だけに限定しない、とするものです。力学理論では極めて特殊な相互作用が要請されています。相手に変化を生じさせはしますが、自らは変化しないとする相互作用が持ち込まれます。境界条件を可能とする相互作用がそれです。他に変化を生じさせはしますが、自らは変化しないとする相互作用が境界条件という名の下に許容されています。しかし、これはあくまでも理論的作為でしかありません。相互作用を認める限り変化は両方向に及びます。例えば、相互作用する二個の分子A、Bが与えられていたとする時、Aに何等かの理由で変化が生じるならば、その変化はいずれBに伝達され、それに応じてBも変化することになります。同じことがBからAへの方角にも起こります。さらに、Aに生じた変化がBに伝達されるには零でない有限時間を要します。BからAへの伝達、伝播についても同様です。この相互作用のことを内部測定と呼んでいます。

－ 内部測定は量子論での観測理論とどの様に関連するのか？ －

量子力学での観測の理論は頭脳明析な物理学者が互いに議論、論争しながらも、今だ一致点に到達していない難問でありますので、ここで観測理論の何であるかを明らかにしてから話を進めるなどという大それたことをする積もりは毛頭ありません。非常に弱いことを申し上げます。先ず、どの観測理論であっても測定器を前提としています。測定器がどれ程マクロであるか、ミクロであるかはここでは問いません。しかも、測定器は一つの量子系であるためそれに固有な固有量子状態（固有関数）を伴っています。すなわち、測定器は対象を測定器の固有状態に従って分節することになります。観測理論の中心課題は、測定器とは無関係に用意された対象が測定器を通すことによって、どうして測定器の固有状態に従って分節されて来るのか、に答えることになりますが、ここではこの結果を鵜呑みにすることにします。一方、相互作用し合う任意の分子はそれ以外の分子を

測定する測定器として機能することになります。多数の分子が相互作用することは、任意の測定器が絶えず他の測定器によって測定され続ける、との意であります。この時、個々の測定器はその固有状態に基づいて他を分節し、しかも当の測定器は他の測定器によって分節され、測定されるという連鎖の中に置かれてしまいます。内部測定での中心課題は、相互に測定し合う測定器系において、個々の測定器の固有状態、あるいは被測定対象の分節の仕方がどの様にして定まて行くのか、と言ひ表されることになります[2]。観測理論においては何故測定という操作、過程が可能となるのかとの問いが中心の課題となっていますが、内部測定では測定器を測定する測定器の連鎖から何が出て来るかを問いかけています。

—生物現象に統計力学で開発されて来た概念、技法が有効であることは既に知られている。スピングラスモデルはその代表例である。生物への力学、統計力学の適用を批判することはつじつまの合わないこと、自縄自縛になりはせぬか? —

確かにスピングラスモデルを用いて自己複製するRNAの出現、進化を解析した事例は良く知られています。この例が何故成功したかを考えてみますと、種々の好都合が背後にあることが判明して来ます。このことを見るために少し一般的に問題を眺めてみることにします。

統計力学は力学と同じく物理量（または、観測量）に加えて状態を定義可能としますが、ここで使われる状態は力学でのそれとは意味合いが少し異なります。統計力学では純粋状態と混合状態の二種類の状態を区別して用い、統計力学で威力を発揮して来たのは混合状態とそこでの観測量についてであります。純粋状態が個物であるのに対して、混合状態は個物の集団となります。一方、生物現象で関心を引くのは個物における現象です。個物の集団が関心の対象となるのは限られた場合でしかなく、その限られた数少ない中で代表的なものが集団遺伝学が対象とする系であります。そのため、集団遺伝学の対象とする系に混合状態を専らとする統計力学を適用することはまことに理に叶うこととなります。RNA分子の集団に統計力学でのスピングラスモデルが適用可能となるのももっともな話となります。しかし、個物の集団が自明でなくなりますと、話は全く逆転して来ます。生物での発生であれ、行動であれ個物が関心の対象となって来ますと、混合状態を旨とする統計力学では方法論の上からも不適切となって来ます。それならば、純粋状態、個物を扱い得る力学系に戻ればよい、ということになるかも知れませんが、力学系には既に見て来ました様に、状態同定と物理量確定という二種類の測定操作が入り込むことになります。この二つがどの様に相互干渉を引

き起こすかが判明する以前に力学系に頼りきるとすることは堅明な選択とは言えません。

－内部測定、検知過程を仮に認めるとした時、その物質基盤は何か？－

内部測定は相互作用の別名と申し上げて来ましたが、相互作用一般に共通する仕方ではこの物質基盤を明らかにすることが出来ないことを先ずお断りしておきます。相互作用一般に共通する事象として良く知られているのは経験則としてのエネルギー保存則です。経験則と敢えて断わっているのは、測定によって確立した事後の事実限定している、とすることによります。すなわち、内部測定がどのような形で進行しようとも、少なくとも事後にエネルギー保存則を満足する仕方で行う、とするのがこの内部測定の背後にある一つの物質基盤であります。同じエネルギー保存則を力学系の観点から眺めてみますと、内容は全く異なって来ます。力学系の状態を同定した時、それと同時に運動の恒量としてのエネルギーも一意に定まってしまう。しかもこの力学系が量子系であるとし、物理量あるいは観測量としての全系のエネルギーは不確定性原理に由来する不確定さを伴うことになります。状態同定と同時に定まるエネルギーは運動の恒量として留まるのに対し、観測されるべき物理量としてのエネルギーには不確定さが伴うことになります。このことは状態同定と物理量確定という二種類の測定操作が同じ対象に対して一見異なる測定結果を出しているかに見えますが、力学系の枠内では状態同定は実時間軸上で進行する実際の測定ではないとすることによって皮相的ながら矛盾を解消しています。

内部測定が事後にもたらすエネルギー保存則は力学系で定義される状態、物理量のいずれも前提としていません。状態が定義されなくとも事後においてエネルギー保存則を満足させるのが内部測定となります。そのため、状態に頼らないとすること、あるいはそれを放棄することは運動の議論において力学系に準拠しないという意味において大きな退歩、後退を甘受したかに見えるかも知れませんが、この後退によって状態と物理量を改めて再び見直すのを可能とする利点を確保することが出来ます。果してそれが現実に利点となるか否かの判定は、目下の関心の対象である生物においてこの後退がどれ程有効に作用するか否かを調査するまでまたなければならない、とするのはその通りであります。

参考文献

- [1] Matsuno, K., 1989, Protobiology : Physical Basis of Biology
(CRC Press, Boca Raton, Florida).
- [2] 松野孝一郎, 1991, 生物科学 43, 30-40.