

生物運動と量子エンタングルメント：アクトミオシン系の場合

長岡技術科学大学生物系 松野 孝一郎 (Koichiro Matsuno)

1 はじめに

生物におけるマクロスコピック、あるいはメソスコピックな運動と量子コヒーレンスとは一見した所、何も関係がないかに見えます。しかし、この二つの間に何も関係がないとしますと、それこそ大きな問題が発生することになります。生物体を構成する蛋白分子、核酸分子それ自体の安定性は量子力学によって保証されています。この高分子が寄り集まり、組織体を作ることにより、一つの生物体が実現するに至ることになりますが、これらの高分子がバラバラにならずに相互に組織性を発揮しているのは、構成する個々の高分子が量子力学的に相互に関連しているためです。その関連が何であるのかがここで問われることになります。個々の高分子の安定性が量子力学によって保証されながらも、それだけで孤立するのではなく、他の同様の高分子との間に親和力を働かせて組織体を作り上げています。この親和力も元をただせば、構成する高分子に起因します。そうでないとしますと、それこそ物質起源でない組織親和性を想定しなければならなくなりますが、その当ては目下の所、何もありません。組織親和性もその起源を個々の構成分子に求めなければならなくなります。

生物体を構成する高分子間に、静電相互作用による親和力が発生するのはよく知られている事実であります。この静電相互作用だけで生物体組織が維持されるとするのは、少々早計です。人工的に合成した高分子相互の静電相互作用から生物体を作り上げることが出来ないことから、この警句に意味するところは明らかになります。このことに留意しながらも、生物体に認められる高分子組織性をもたらすものに何かないかと思いを巡らしてみますと、一つの候補があることに気がつきます。量子凝縮がその候補です。量子凝縮では、ある量子状態に巨視的な凝縮が生じると、結果として巨視的な組織性をもたらします。通常、物理の分野でこの量子凝縮を生じさせるための条件は極低温の実現です。巨視的な凝縮を起こすことになる量子準位とそれより僅か高エネルギー側に位置している励起準位との間に熱揺動による混合が起きない程に温度が十分に低ければ、確かに巨視的な量子凝縮は生じます。

一方、われわれが物性物理で獲得した経験による限り、この量子凝縮を生じさせる温度は地球上で生物が生息する環境の温度に比べて、あまりにも低すぎます。このままでは、巨視的な量子凝縮は生物体での組織親和性を担えないかに見えてきます。しかし、ここで思い切って、生物体の組織親和性の維持に巨視的な量子凝縮は無関係であると断定してしましますと、やはり言い過ぎであるのが分かります。極低温は巨視的な量子凝縮のための十分条件ではありますが、必要条件にはなっていません。巨視的な量子凝縮を実現するのに、他に方法があるかも知れません。それを探すととなりますと、頼りになるのはやはり経験、観測事実です。

生物現象にはこの量子凝縮を局所に限ってではありますが、実現する方法があるように見えます。その一例としてATPの酵素による加水分解を取り上げてみます。この加水分解を司る最も代表的なものは筋収縮の背後にあるアクトミオシン系です^{1, 2}。ATPを一分子分解することによって解放されるエネルギーは大略 5×10^{-13} erg (あるいは7 kcal/mol) です。しかもこのエネルギー解放に要する時間が凡そ 10^{-2} secであることが知られています。もし、ここで解放されるエネルギーが一量子によって運ばれるとしますと、それに要する時間は凡そ 2×10^{-15} sec (あるいは、2 フェムト秒) となります。これは不確定性原理から逆算されるものです。しかしこのままでは、ATP一分子からエネルギー 5×10^{-13} ergを解放するのに時間 10^{-2} secを要するとする事実に合いません。 10^{-2} secの時間をかけて 5×10^{-13} ergのエネルギーが連続的に解放されて行くとしみますと、一量子当たりのエネルギーは凡そ 10^{-19} ergでその放出時間は 10^{-8} secとなります。放出される量子のエネルギーと放出に要する時間(その最小値)は不確定性原理によって関連づけられていますので、ここに放出される量子のエネルギーはその大略値を定めることが出来ます。更にこのエネルギー量子を黒体輻射の温度に換算してみますと、1.6 mKとなることが直ぐにわかります。ATPを加水分解するアクトミオシン系は実効的に、かつ局所的ではありますが、極低温を実現することになります。ここにマクロスコピック、あるいはメソスコピックでの量子凝縮の可能性が生じてきます。

2 局所極低温の実現と熱浴からの反作用

まず、アクトミオシン系が生物体内で実現しており、生物体は常温、約300 K温度環境に生息していることに留意しますと、アクトミオシン系でのATP加水分解は300 Kの熱浴中に急に1.6 mKの極低温の局所域が出現したことに相当します。高温熱浴から極低温局所域には当然のことながら熱エネルギーが流れて行きますが、この熱エネルギーの流れを司るのは熱力学第一法則です。エネルギーの流量は同じであっても、質の変換が可能になります。その一番極端な場合はエネルギー変換が準静的になされるときです。高温熱浴からの熱エネルギーの殆ど全てが仕事エネルギーに変換されてしまいます。このエネルギー変換は少なくとも観測レベルでは妥当なものとして受け入れられています。アクトミオシン系での化学力学エネルギー変換の効率が極めて高いことが既に知られています。アクトミオシン系は生物体内でATPを加水分解するとき、極めて効率の高い熱機関として作動することになります。

それでは、どのようにしてこのエネルギー変換を具体的に実現しているのかが次に問題となってきます。これに関わる観測事実にはアクチン繊維のミオシン分子頭部上を滑るときの速度、アクチン繊維滑り速度の測定値があります。この滑り運動速度は凡そ $10 \mu\text{m/sec}$ 位です³。ここで仮にアクチン繊維全体が一つの量子状態であって、それが平面波で近似されるとしてみます。アクチン繊維の繊維長の平均値は凡そ $10 \mu\text{m}$ でありますので、そこにはアクチン単量体が約4000個含まれています。アクチン単量体の分子量は42000ダルトンです。これより、アクチン繊維の質量は凡そ 1.7×10^8 ダルトン相当になります。この

質量を持った物体が $10 \mu\text{m}/\text{sec}$ の速度で等速運動しているときのドブロイ波長は凡そ 0.03 nm ($0.3 \text{ \AA}$) となります。このままではとても $10 \mu\text{m}$ のアクチン繊維が一つの量子状態にあるとすることができません。ある物体の特徴的な長さに比べてそのドブロイ波長が十分に小さいとなりますと、その物体の運動は古典近似で十分となるか、あるいは当の物体それ自体がそれより十分に小さい部分量子状態からの線形重畳となるかのいずれかになるはずです。ここでアクトミオシン系が量子力学を前提とした高分子から出来上がっていることに留意しますと、考えられる候補は十分に小さい量子状態からの線形重畳のほうになってきます⁴。果たしてこのことが実際に可能となるか否か、をしてみることにします。

ある物質の量子状態を表す波動関数が別の波動関数の線形重畳で表すことは常に可能であります、その逆が常に成立するとは限りません。ある波動関数群の線形重畳がある物質の量子状態を表す波動関数になるとは限りません。波動関数はそれを実現可能とする特定の境界条件と一体になって現われます。そこで異なる波動関数間で線形重畳が生起するとしますと、境界条件の変更が実時間上で起きることになります。それに引き換え、物質の量子状態は微視的、巨視的に拘わらず、ある定まった境界条件を前提とします。波動関数の線形重畳が実時間上で境界条件の実現、改変をもたらす得るとき、通常これを量子エンタングルメントと呼んでいます⁴。

この量子エンタングルメントに立脚しますと、 $10 \mu\text{m}$ のアクチン繊維のミオシン分子頭部上を滑る運動は、このアクチン繊維全体が一つの量子状態にならなくとも、量子力学に従う運動である、とする道が開けてきます。アクチン繊維を微小繊維素に分割し、個々の微小繊維素はそれに固有な量子状態にあると見なしますと、隣接する微小繊維素波動関数は互いに線形重畳を可能とします。微小繊維素波動関数の線形重畳から、繊維長全体に及んで量子エンタングルメントを引き起こし、その全体におよぶ量子コヒーレンスを可能とします。しかも、この全体を一つの量子状態に押し込む必要はなくなります。アクチン繊維のミオシン頭部上の滑り運動はこの微小繊維素波動関数間の量子エンタングルメントとしてここに現われてくることになります。

孤立したアクチン単量体一個が単に速度 $10 \mu\text{m}/\text{sec}$ で運動するときのドブロイ波長は凡そ 130 nm ($1300 \text{ \AA}$) となります。これはアクチン単量体の直径 2.5 nm より十分大きくなります。ドブロイ波長がアクチン単量体の直径より大きければ、繊維長全体におよんで量子エンタングルメントが生じてくる可能性が出てきます。一方、単位としての量子状態を担う微小繊維素の長さは凡そ 100 nm ($1000 \text{ \AA}$) となります。これはATP分子を一個分解する間にアクチン繊維が移動する距離に対応します。これは、その間ATP分子が一量子単位であることを維持していることに由来します。この微小繊維素の質量は 1.7×10^6 ダルトンとなり、速度 $10 \mu\text{m}/\text{sec}$ で運動するときのドブロイ波長は 3 nm ($30 \text{ \AA}$) となります。これはアクチン単量体の直径よりも長くなり、隣接するアクチン単量体にまたがって波動関数の線形重畳、量子エンタングルメントを可能として行きます。

ATP分子がアクトミオシン系で加水分解されるとき、局所的にはありますが、 1.6 mK 程度の極低温領域が発生します。この極低温領域に向かって 300 K に

ある周りの熱浴から反作用が印加されることになります。それがミオシン分子上を滑るアクチン繊維の滑り運動エネルギーという仕事エネルギーとして現われてきます。熱浴からの熱エネルギーが滑り運動エネルギーに変換されることになります。その運動がここでの量子エンタングルメントです。この量子エンタングルメントとしてのアクチン繊維滑り運動を可能とするエネルギー変換の具体的な過程を次に見て行くことにします。

3 熱力学、量子力学を自家薬籠とする揺らぎ⁵⁻⁸

ミオシン頭部上を滑るアクチン繊維の滑り速度が他の変化を一切伴わずに僅か増大したとしますと、結果として運動エネルギーの増加をもたらします。この増加を相殺させるためには、全体として熱エネルギーから運動エネルギーに変換する割合を増やすか、それが出来なければ、滑り運動速度は減少しなければならなくなります。また、この滑り速度が他の変化を一切伴わずに僅か減少したとしますと、結果として運動エネルギーの減少をもたらします。この減少を相殺させるためには、熱エネルギーから運動エネルギーに変換させる割合を減少させるか、それが出来なければ、滑り速度が増大しなければならなくなります。このことはアクトミオシン系が滑り速度の変動に対して自己復帰性、恒常性、あるいはホメオスタシスをともなっていることを明示します。この自己復帰性は、ある系に対して外部から制約を加えながら、その制約によってその系の全ての自由度を一意に拘束できないとき、例外なく発生します。そのよく知られている例は熱平衡系でのルシャトリエの原理です。

一方、熱力学、量子力学はそのいずれもが過少決定の理論です。熱力学は少なくとも平衡系に関する限り、状態方程式を与えますが、個々の状態が何であるかを決定するまでには至っていません。状態を決めるには熱力学の枠外にある観測に訴える必要があります。量子力学についても同様です。境界条件を指定すれば実現する量子状態は定まりますが、境界条件を指定するという観測は量子力学理論の枠外にあります。アクトミオシン系を熱力学と量子力学の枠組みの内に位置づけようとしてみると、当然のことながらそれだけでは過少決定になってしまいます。そうではありながら、アクトミオシン系がATPを分解しながらアクチン繊維の滑り運動を実時間の内で実現して行きます。これは、熱力学、量子力学の枠組みで眺める限り、その過少決定性の部分を自ら補完して、自律決定していることを表しています。煎じ詰めれば、アクトミオシン系がその内部で観測、測定を行い、過少決定の部分を補っている、ということです。ただし、これはあくまでも熱力学、量子力学の枠組みを採用した上での話です。また、熱力学、量子力学に依らないでアクトミオシン系を論ずることは、出来ない相談であることも確かです。この限りにおいて、アクトミオシン系は内部観測に関わり、それが滑り運動のホメオスタシスになって現われることになります。

ホメオスタシスを示すルシャトリエの原理を熱平衡系に適用しますと、これは熱平衡のまわりでの揺らぎを与えるだけになりますが、熱平衡からずれた系、ATPからのエネルギー解放が常時行われている系では、揺らぎそのものがエネルギーを供給する側へも直接に働きかけることになります。解放されるエネルギーの多

寡を直接に加減しながら、ホメオスタシスを実現しています。このホメオスタシスの特徴は、あらかじめ定められた安定状態のまわりからその安定状態を目指す運動として実現するのではなく、あくまでも自己復帰性、恒常性に基づき、オーバーシュート、アンダーシュートを繰り返しながら落ち着く先を自ら求めて行くとする運動に認められます。この内には、当然のことながら、熱浴からの反作用、それに局所量子凝縮状態が含まれています。このホメオスタシスを通して安定したアクトミオシン系とそこでのATP加水分解が実現されることになります。そのとき、この安定性を巨視的に特徴づけるのは長波長、低周波極限の揺らぎです。逆に、ホメオスタシスによって安定性を実現するには長時間に及び持続する揺らぎが不可欠となります。

ホメオスタシスは極めて一般的であって、過少決定性を伴う系にはどれにも等しく適用されますが、ATPに貯えられている化学結合エネルギーを解放するアクトミオシン系でのホメオスタシスにはその独自性が認められます。アクトミオシン系はATPに向かってエネルギー解放を行うべく、それに働きかけることを可能としますが、余剰運動エネルギーがあるからといって、ATPの分解産物であるADPと無機リン酸からATPを再構成することはしません。アクトミオシン系はATPに対して一方的に、エネルギー消費者としてのみ作用します。この一方向性がホメオスタシスに伴って発生する揺らぎに対して常につきまといます。この一方向性、非可逆性がそこで発生する熱力学的、量子力学的構造の特異性を逆に保証することになります。それこそ、アクトミオシン系でのホメオスタシスを介して発生する揺らぎは熱力学、量子力学のあたえるものを自家薬籠とすることにより、その中から自己復帰性、恒常性の維持に利するものなら何でも手当たり次第に活用するようになります。

4 おわりに

アクトミオシン系はATPを分解し、そこに貯えられている化学結合エネルギーを、熱浴を介して運動エネルギーに変換します。しかも、そこでのホメオスタシス、恒常性の維持を、量子エンタングルメントを通して行うことになります。このことは当然、量子エンタングルメントからその恒常性がもたらされること意味します。言い換えるならば、局所量子凝縮状態が相互に、実時間軸上で進行する過程としてその線形重畳を行う際、恒常性を伴う組織性がそれに賦与されることになります。アクトミオシン系での滑り運動は少なくともメソスコピックなレベルでの組織性が維持されていることの例証になりますが、局所量子凝縮状態がその間の量子エンタングルメントを介してメソスコピック、あるいはマクロスコピックな組織性を発揮する可能性は何もATPを分解するアクトミオシン系には限りません。生物に広く認められる物質代謝現象も、局所量子凝縮状態が相互に分子交換相互作用を介して相互に線形重畳を実現し、長距離、長時間におよび組織性を発揮して行く現象である、とする可能性も開けてきます。ここでの組織性を担うのが量子エンタングルメントです。

参考文献

1. Matsuno, K., 1993. Being Free from Ceteris Paribus – A Vehicle for Founding Physics upon Biology Rather Than the Other Way Around, *Appl. Math. Comp.* 56, 261–279.
2. Matsuno, K., 1997. Biodynamics for the Emergence of Energy Consumers, *BioSystems* 42, 119–127.
3. Hatori, K., Honda, H. & Matsuno, K., 1996. ATP-Dependent Fluctuations of Single Actin Filaments In Vitro, *Biophys. Chem.* 58, 267–272.
4. Matsuno, K., 1999. Cell Motility: An Entangled Quantum Coherence, *BioSystems* 51, 15–19.
5. Hatori, K., Honda, H. & Matsuno, K., 1996. Communicative Interaction of Myosins along an Actin Filament in the Presence of ATP, *Biophys. Chem.* 60, 149–152.
6. Hatori, K., Honda, H., Shimada, K. & Matsuno, K., 1998. Staggered Movement of an Actin Filament Sliding on Myosin Molecules in the Presence of ATP, *Biophys. Chem.* 70, 241–245.
7. Hatori, K., Honda, H., Shimada, K. & Matsuno, K., 1998. Propagation of a Signal Coordinating Force Generation along an Actin Filament in Actomyosin Complexes, *Biophys. Chem.* 75, 81–85.
8. Honda, H., Hatori, K., Igarashi, Y., Shimada, K. & Matsuno, K., 1999. Contractile and Protractile Coordination within an Actin Filament Sliding on Myosin Molecules, *Biophys. Chem.*, in press.