



Title	エネルギー代謝のリズムとそのシンクロナイズ
Author(s)	矢野, 徳郎
Citation	北海道大学大学院教育学研究院紀要, 123, 81-89
Issue Date	2015-12-25
DOI	10.14943/b.edu.123.81
Doc URL	<a href="http://hdl.handle.net/2115/60566">http://hdl.handle.net/2115/60566</a>
Type	bulletin (article)
File Information	AA12219452-123 (8).pdf



[Instructions for use](#)

# エネルギー代謝のリズムとそのシンクロナイズ

矢野 徳 郎\*

**【要旨】** イースト菌ではパルス状のグルコースを与えるとNADHやATPが振動するが、これは、グルコースの減少とともに減衰します。人では、生体外から、まず、栄養素を取り込む、それを利用して、生体内のエネルギー源の恒常性を維持します。そうすることによって、生体のリズムや構造が動的に維持されます。ただし、栄養素は生体内の物質と入れ替わって、老廃物として捨てられます。これは、所謂、動的平衡です。これらが生体の「生きている」状態を作っています。しかし、「よりよく生きる」ためには、人の活動を考える必要があります。ここでは、この問題には立ち入らないようにしました。

**【キーワード】** リズム、シンクロ、散逸構造、生命、エネルギー代謝、周波数分析

## 1. はじめに

河口先生から、退官記念号に何か論文に限らず、文書を書いて欲しい旨の依頼がありました。これに、私は「いのち」に関する自然科学的なアプローチの初歩的な記述をしたく考えました。ただし、「いのち」論は広範な話なので、私には全体像を書けないし、複雑なので、従来の「死」の反対概念で捉える、あるいは、人との関わり、つまり、他者に関わることによって主観的に育まれる「いのち」観で捉える方向性はとらないこととした。しかし、自然科学的に「いのち」論の入り口を捉えるというと、生命科学を考えてしまいますが、この方向性も考えない。清水博の「生命を捉えなおす」を紹介する形で、熱力学第2法則のエントロピーの増大法則に矛盾しない、説明をしたいと考えています。また、以下の説明は、私のところの卒業生へメールで説明したものを、載せています。説明の折に、矛盾点やわかりにくい点を指摘してくださいと卒業生にはお願いして判明した、わかりにくい点は、メールの文とは異なった説明をつけて、作り変えました。したがって、本論は論文ではありません。リズム、シンクロナイズ、散逸構造の理解への私の解説文です。

河口先生の「医学哲学序論：いのちの定義」が教育学研究院紀要2004年95巻にあります。これは、先に言った広範な議論だと思えます。今回紹介しようとする論は、これとは、かなり異なった方向性を持った「いのち」論です。これが多少なりとも、河口先生の「いのち」論へ貢献できれば、幸いです。

## 2. シンクロナイズ I

最初にリズムの説明に先駆けて、シンクロ現象を見てみたいと思います。シンクロは、リズムを持った2個以上のものが同期化する現象です。これは言葉でいうより、現象を映像で見るとよくわかります。以下のネット上にメトロノームのシンクロ、人の歩行リズムと橋とのシンクロ、および蛍の光の点滅のシンクロをYouTubeで見ることができます。以下のアドレスで見れない場合は、キーワードを入れて動画を探してみてください。

メトロノーム

<http://www.youtube.com/watch?v=JWToUATLGzs>

ミレミアムブリッジ

<http://www.youtube.com/watch?v=ZqjG5pae2CY>

ホテル

<http://www.youtube.com/watch?v=HQ2YLLH6S1Co>

## 3. シンクロナイズ II

先のシンクロの映像を見られたでしょうか。これの解説を少しします。

- 1) 橋の例では、人々が歩行するリズムが初期では異なっています。これが、橋という場所を通じて、個体間で相互作用して、リズムが統一されます。このリズムの統一が場の性質であると考えられます。これは、メトロノームでも同じです。注意深く見るとメトロノームは釣り板の上に載っています。この釣り板が場所です。場所を通じて、メトロノーム間に相互作用が生じて、場のリズムが一致します。蛍の例では、場所は確たるものとして見えませんが、知覚の境界領域が場所です。
- 2) 次に大切なことは、人と蛍の例は、生物です。メトロノームは物です。生物と物の世界は一般には分けられてきました。しかし、シンクロの世界では、同じ構造、機構が働いているように見えます。つまり、物の世界を含めて、生きていることが説明できそうだということです。

これらのことは、清水博「生命を捉えなおす。生きている状態とは何か」増補版、中央公論社や蔵本由紀「非線形科学 同期する世界」(集英社新書) [新書] に詳しく乗っています。日頃、生理学になじんでいますので、私はこれらの発想はできませんでした。また、生理とは生きていることの理を追及すると学びました。しかし、生き物を含めた物の世界の捉え方、散逸構造(後述)については知りませんでした。それがやっと理解できるようになってきたので、研究を始めました。皆さんも少し、余裕があれば新しい世界観を学んでください。

#### 4. 場の形成

シンクロの構造について説明しましたが、これを生体でとらえるとどうなるかを具体的に考えねば、生理学を含む研究になりませので、ここのあたりを考えます。

- 1) 橋の例では、人と橋を場所と考えました。生体では、器官、我々の研究では、肺、心臓、骨格筋が橋のシンクロの人に当たります。シンクロで橋と人の相互作用を前提としました。これは、血液中の伝達物質（ホルモンなど）と神経網のインパルスが相互作用因子あるいはコミュニケーション因子（相互作用因子）です。
- 2) 肺、心臓、骨格筋がコミュニケーションすると場ができます。一番、単純なのはシンクロというリズムの関係性です。この関係性ができるのが、場の形成です。運動をすると肺や心臓や骨格筋のリズムが変わります。一見して、肺と心臓のリズムは異なっているようですが（心臓は2 Hz、肺は0.5 Hz、骨格筋は1 Hzと異なります）、単純な波ではなく、複合的な波と考えると両器官でのリズムの同期化はあると考えられます。
- 3) 私が見つけている波は、2分ぐらいのエネルギー代謝に関係した波です。この周波数は、呼吸循環系や骨格筋内のエネルギー代謝にもあると考えています。ただし、橋の例やメトロノームの例のように単純ではないリズムを考えています。
- 4) 用語を整理しますと生体を場所と呼び、身体を場と呼んでいます。相互作用は液性伝達と神経性伝達に分けられます。知覚と運動は、生体外の外界との相互作用を考えるということだと思います。つまり、個体と周辺環境からとらえることです。したがって、まず橋の例のように場所や場の形成や相互作用ということを考えて、その後、生理的で知られているような知覚運動に関する機構を捉えるという手続きが必要のように考えます。

#### 5. 認識論と創出論

ある人から前回の場の形成に対する質問（外界とは何を示しているのか）が来ました。本質にかかわる問題なので、一般論として回答します。

- 1) 回答は、認識論ではなく創出論へ現代科学は向かっているということです。
- 2) 具体的に、家族で、まず考えます。家族の外から家族の行動を観察して、家族の構造を認識するという事は、家族研究上で一般的に行われていることです。しかし、当の家族では認識論が大切なのではなく、どんな家族になるかです。これには、家族の中での相互作用が欠かせません。相互作用があるから、家庭という場所での自己組織化が起きるということです。家族を認識することではなく、家族を形成することが大切なので、その方向性に研究も向かうべきです。確かに、家族認識も家族形成にかかわりますが、家族の内部での形成が意味ある自己組織化で、そのカニズムが、あるいはあり方が問題の中心事項です。つまり、現在では家族の創出ということが、家族の認識より、現代的な万台となっていると思います。
- 3) 人を例にすると目的とか方向性とかが意識されますので、人為的と考えられますが、これに対してシロアリが巣を作る場合の例がよく出てきます。シロアリは巣の設計図を持って

いないのですが、ある一定の法則に従って、行動すると巣ができるという話が有名です。この場合には、当のシロアリには全体像としての巣の認識はありません。しかし、巣の創出ということが行われています。この創出過程は、三嶋 博之「エコロジカル・マインドー知性と環境をつなぐ心理学」NHKブック、に詳しく記述されていますので、もし、興味があれば、そちらを読んでください。

- 4) もう一つの例は、ビーカーに入れた水をビーカーの下から熱すると対流が起きるといものです。水分子は普通はランダムに移動していますが、熱を加えると対流という水分子の秩序が生まれます。水分子は何も認識していませんが、ビーカーの中で一定の運動を創出します。
- 5) 知覚ー運動による外界の認識となると人と外界が分かれます。創出論では、大雑把にいうとある系の中での出来事です。ただし、ビーカーの例では、熱は系の外から与えられていて、その熱が上部から系の外へ逃げるシステムになっています。つまり、開かれた系ではありますが、系の中での自己組織化が起きるといことです。家族の例でも、家族の中での相互作用ですが、同時に家族の外へも開かれた系を前提としています。知覚ー運動では、系が特定されていません。全体としての外界であって、開かれた系を問題としていません。したがって、知覚ー運動に限定を加える系という概念が必要です。
- 6) 系の特定は、フレーム問題として、難解な事柄です。現在のコンピューターでは、枠組みを人為的に決めれば、有用なのですが、コンピューター自身は枠組みを決めることができないので、一般化して、人と対話させるといことは困難です。人がどのようにして枠組みを決めているかは現在のところ分かっていないと思います。たとえば、人は家庭という枠組みと職場という枠組みは難なく分けられます。しかし、コンピューターにこの枠組みの違いをあらかじめ教えておくとこれに対してはある程度、理解できるのですが、規定した内容と違った状況が生まれるとコンピューターは混乱してしまいます。現実の生物や人では、系を無自覚的に決定しています。この決定が大切なのですが、理論的にこの系の決定がどのようになされているかは、今のところ分かっていません。

## 6. リズム

シンクロナイズドのためにはリズムが必要でした。このリズムはどのように生じるかを今回は議論したいと思います。

- 1) 生理学では、リズムは、例えば、歩行のリズムはリズムマーによって作られていると考えています。呼吸では、延髄レベルでの吸気と呼気の調節によって、呼吸のリズムが生まれると考えています。心臓のリズムは洞結節によって、作られます。
- 2) これらのリズム形成とは異なった、代謝のリズムがあることが知られています。解糖系はリズムを持っています。このことは、一般には知られていません。イースト菌での実験では、イーストにパルス状のグルコースを飢餓状態で与えるとNADHが振動することが知られています。この振動（リズム）が菌集団で異なっているときに、その集団を混合するとリズムが同期することも実験的に証明されています。代謝がリズム（生化学的反応）を

持っていて、かつ同期化が起きるということは不思議な現象です。

- 3) このリズムの形成を直接的に説明しても、たぶんイメージできないと思いますので、間接的に代謝過程を他に置き換えて、まず、説明します。草原で草が豊富な場合を考えます。草食動物は草を食べて、増殖します。このままだと草食動物の数が急速に増加します。これはポジティブフィードバックです。ここに肉食動物が草食動物を餌にすると考えます。そうすると草食動物の数が増加するので、エサが増えて、肉食動物も増加します。この肉食動物の増加は草食動物の数を減らします。これは、肉食動物の草食動物に対するネガティブフィードバックです。そうすると草食動物の数は減少します。草食動物の数が減少すると肉食動物も減少します。この過程で、草食動物と肉食動物の振動が起きています。振動だけではなく、初期のポジティブフィードバックの量に依存して、振動するレベルの上昇量が決まります。つまり、餌が豊富であると草食動物の量が高いレベルで振動します。
- 4) 解糖過程では、草に相当するものが、グルコースです。グルコースを投与すると解糖過程が促進されます。これは、ポジティブフィードバックに相当します。この時、ATPが多く形成されます。このATPの増加は、PFKの酵素を阻害します。そうするとATPの形成が鈍化します。この鈍化は肉食動物のネガティブフィードバックと等価です。こう言った過程を通してATPやNADHの振動が起きると考えています。また、代謝のレベルの高低もグルコース投与レベルで決定されます。
- 5) このリズムの波長は、解糖過程では、イースト菌では2分ぐらいであるとされています。呼吸（有酸素的代謝）でも2分ぐらいの波長であろうと思われます。私の結果では酸素化動態が2分ぐらいの振動をしていることを見出しています。これは、安静時や運動時や運動回復期に見られる現象です。イースト菌ではグルコースを与えた時に振動しているのですが、人では常に振動しているようです。この相違は、人には内部環境を維持する恒常性維持機構があるからではないかと考えています。つまり、人の血液中のグルコース等はほぼ一定に保たれていて、そのために、常に代謝が高進されていて、その結果、振動が起き続けていると考えています。
- 6) 代謝のレベルが生きているレベルであるので、上記のような例が「いのち」の初期的レベルでの理解に当たります。もちろん、生命の理解にとってタンパクを作る遺伝子は大切ですし、遺伝子情報が各器官や場所によって、発現が異なるようになる場所情報も大切です。これらに関わった場所論を一般化した「いのち」の詳細については、清水博「新版 生命と場所 創造する生命の原理」NTT出版に委ねます。この議論に入るのは私には荷が大きすぎます。

## 7. 高速フーリエ変換

リズムの話をしました。このリズムの解析法を今日は紹介します。私は数学的な理解をしているのではないので、多少間違っているかもしれません。

- 1) 波は複数の周波数の波の合成として考えられます。例えば、1 Hz, 5 Hz, 10 Hzの波を足し合わせて、かつ波の位相をずらして（時間遅れを作る）合成波を作ることができます。

この作業の逆が数学的に可能です。つまり、合成波を分離するという事です。分離すると周波数ごとの振幅を求めることができます。これは、市販のプログラムによって (FFT: 高速フーリエ変換) できますので、その解析の数学を特に知らなくても、プログラムさえ操作できれば、解析可能です。つまり、複雑な波を各周波数ごとに分離するのがFFTです。

- 2) 時系列のデータが二つあるときには、両者の関係性を求めることができます。私が使うのは相互相関、クロスパワースペクトロ、コヒーレンスです。
- 3) 相互相関は、二つの時系列の相関を求めるのですが、時間遅れがゼロの場合から、プラスやマイナスの場合の複数の相関が求められます。その時の相関のピーク値が例えば、マイナス5秒時に現れると二つの時系列データが5秒ずれた時に関係があるということになります。例えば終末呼気CO<sub>2</sub>分圧と換気との相互相関をとる場合を考えます。この場合には終末呼気のCO<sub>2</sub>が頸動脈体を刺激して換気が変化します。これにはCO<sub>2</sub>が肺から頸動脈体までの輸送時間の後に起きますので、その遅れ時間が生じます。これは、相互相関をとると見ることができます。
- 4) クロスパワースペクトロでは二つの複合波の時系列中の各波の関係性が決定できます。互いに関係のある波では、横軸に周波数を取り、縦軸にパワー値 (振幅に相当) をとると両者に関係性がある周波数にピーク値が出ます。これによって、どんな周波数で両者の関係性があるかが想定できます。
- 5) コヒーレンスはクロスパワースペクトロの縦軸を相関にしたものと考えるとわかりやすいと思います。つまり、ある周波数時にピークがあるとそのピークが相関係数に相当するものとなります。ただし、私の経験では、データ数が少ないとうまく求められないようです。さらに、複数の窓関数やオーバーラップをつけないと求められないので、求められた値は平均的なものとなります。

## 8. フィルター

FFTについて説明しましたが、私のソフトでは、フィルターの機能も付いています。この事について、今回は説明します。

- 1) 30数年前は、測定器にフィルターがついていました。フィルターというより、入力に対して出力の時定数を選択するという事で、反応性を調節していました。例えば、筋電図では出力が遅いと筋電図の正確な情報が得られないので、時定数を速くしていました。心電図では、反応が速いとT波などがゆがむので、筋電図より遅い時定数を選んでいました。
- 2) 私のソフトでは、生データのある周波数帯域のみを取り出すという解析がついています。私が追いかけている周波数帯は、遅いものなので、この場合にはローパスフィルターを使います。例えば、1秒ごとのデータを0.05Hz以下の周波数帯を取り出すように、ローパスフィルターをかけると0.05Hz以下の波のみの波形が得られます。このようにすると2分ぐらいの周期の波が視覚的に観察できます。オムロンで得た酸素化動態 (deoxygenation) を見ると細かい変動が出るのですが、このフィルターをかけると細かい振動 (心拍による振動は1 - 2 Hzで、筋収縮により振動は2 Hzです) は消えて、緩や

かな振動があることが観察できます。

- 3) この緩やかな振動があるということは、たぶん以前説明した代謝の振動に関係していると考えています。

## 9. 散逸構造

今回の課題は「散逸構造」です。この言葉はあまり聞かない言葉ですが、生命や自己組織化を考えるうえで大切な概念です。

- 1) イアン、プリゴジンがこの概念を作りました。その成果によって、氏は1977年にノーベル賞が与えられています。ずいぶん前なので、研究内容が一般に知られていてもよいはずなのですが、あまり、概要が知られてないのが、実情です。
- 2) ベナールセルという現象をご存知でしょうか。これは、ネット上で、この語句を入れると見ることができます。<http://homepage3.nifty.com/kuebiko/biology/jyosyo/benard.htm> を参照してください。六角形の多数のセルが見えます。これは、このセルの上下で温度差を与えると見られるというものです。内容物はパラフィン油を入れています。以前にビーカーの中の水をビーカーの下から熱すると対流が起きるといいましたが、これと同じ現象がそこら中で起きるといことです。この対流が水分子の様な秩序状態です。私には簡単にしか説明できませんが、ビーカーの下から、エネルギーを加えて、上から、エントロピーが逃げ出すとビーカーの中では秩序ができるということでした。
- 3) もっと大きい系では、地球の空気層を考えてください。空気層には太陽からのエネルギーが注入されています。宇宙にはエントロピーが逃げっていきます。その中間層の空気層では、生命などの秩序が生まれるということでした。
- 4) ベロウソフ、ジャボチンスキー (BZ反応) <https://www.youtube.com/watch?v=BZWEoImOBSA> を見てください。色が2色交互に現れます。これは、化学反応が振動(リズム)を持っているということでした。この反応をシャーレの中で起こさせると模様が見えます。これは、化学反応で形態が生じるということでした。<https://www.youtube.com/watch?v=3JAqrRnKFHo>
- 5) 解糖過程ではグルコースが入力になって、過程がシステムです。出力は乳酸(イースト菌ではアルコール)です。この反応の中でNADHやATPが振動します。また、化学反応がばらばらに起きているのではなく、秩序だって、連鎖反応をおこなっていると考えられます。
- 6) 人では、イオットーという人が2010年にクレアチンリン酸が運動後の回復するときに振動しているとしています。この周波数は、pHによって異なりますが、0.002-0.025Hzだそうです。これは、8分から40秒の周期です。ただし、なぜ回復期だけに振動しているのかは、私には疑問におもいます。
- 7) エントロピー増大の法則では、この世は混とんとした方向へ向かっているのです。生物が持っている、秩序は不思議な存在でした。しかし、系を限定して、その系が非平衡熱力学的状態(ビーカーの例)になると振動や形態が生じるということでした。これは、物理学に矛盾なく生命の初歩的な理解につながると考えられます。



## 10. さいごに

最後に私のデータを示します。初期のころはオムロンを使って酸素化動態を測定していました。この場合は、MBL法で測定していたので、リズムはフィルターをかけないと視覚的には見ることができませんでした。SRS法で測定したTissue Oxygen Index (TOI) では視覚的にもリズムが観察できます。図1を見てください。安静時にも波が見られます。インパルス運動をかけるとTOIはいったん低下しますが、その後回復して、振動を示します。両者の振動をクロススペクトロをかけると

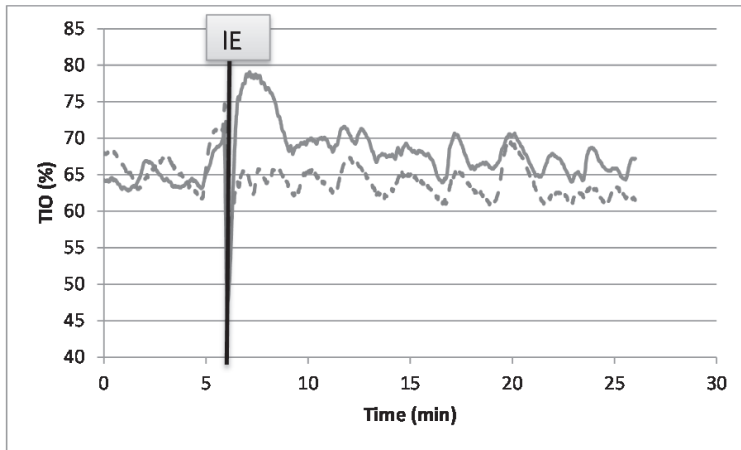


図1 IE(太い実践)はインパルス運動を行った時を表す。その前後は安静状態と回復期である。  
点線は腓腹筋の組織酸素化指数を実線は外側広筋の組織酸素化指数を表す。

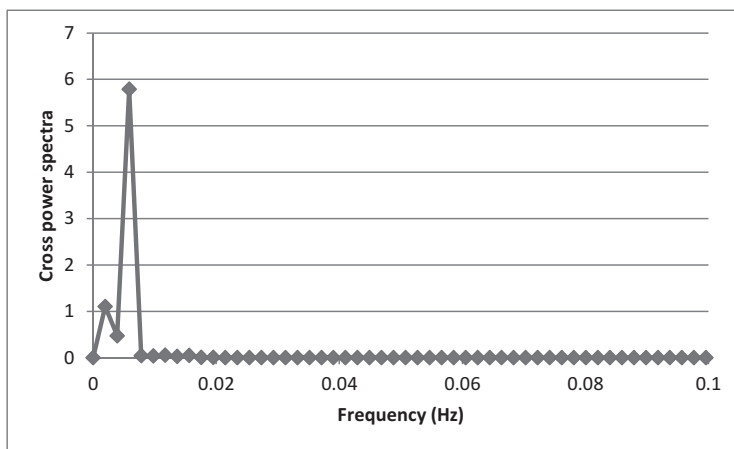


図2 図1の被験者の回復期の外側広筋と腓腹筋のクロスパワースペクトロを表す。  
周波数のピークは0.0059Hzである。2.8分の周期である。

周期が2.8分ごろになります。この周期で外側広筋と腓腹筋が同期していると考えられます。一般的に運動負荷後が振動を観察しやすいようです。また、大きな筋ほど振動の振幅が大きいうように思います。

今までの説明で、この振動の意味の見え方が異なってきたのではないかと思います。従来のには、酸素供給のみが呼吸や心臓の振動で振動していると考えてしまいがちですが、前述の説明を考慮すると酸素消費も振動していると考えられます。つまり、肺呼吸と骨格筋内での呼吸が相互作用して、TOIの振動が起きていると考えるのが妥当であろうと思います。

このことを生命論へ発展させると次のようになります。即ち、エネルギー代謝のリズムが生命の本質である（剣邦夫「生物とは何か」(PHPパブリッシング)）とされています。散逸構造とは非平衡熱力学系で、系へのエネルギー供給と系からのエントロピーの放出によって、系の自由エネルギーが増し、その結果、系の中で秩序が創出されます。これが生命現象に通じます。また、それがリズムとして観察されます。この生命現象は物の現象と矛盾しないという、画期的な構想でもあります。これが新たな生命論です。