

## 人間分子論 2 —生物相におけるマクロな循環

“ブラジルの 1 匹の蝶の羽ばたきはテキサスで竜巻を引き起こすか？（エドワード・ローレンツ）”

我々の生活している舞台を大気や水のような流体（マクロ）に、そこで生活している人間を分子（ミクロ）に例える人間分子論の概念を前節で提案しました。我々は全体＝流体（マクロ）であると同時に、その一部＝分子（ミクロ）でもあります。また、人間分子は、毎日毎日 1 つの生を営みながら、実は、自然＝生物相と、人工＝文明相という、2 つの世界（相＝フェイズ）、2 つの相の中で、一人二役を同時並行的にこなしていると考えれば、見通しが良くなります（図 4）。

		生物相	文明相
マクロ (流体)	本質	自然	人工
	機構	自己組織的	要素還元的
	循環・代謝	自然循環	人工代謝
ミクロ (分子)	本質	ヒト	人間
	属性	個性	クローン
	遺伝	ジーン	ミーム

図4 生物相・文明相およびマクロ的視点・ミクロ的視点のまとめ

生物相の本質は、自然であり、自然を維持し駆動している源は、太陽からの放射エネルギーです。太陽エネルギーを起点として、エネルギー・水・大気・物質（炭素・窒素・リンなどの元素）が、絶え間なくグルグルと循環しています。循環しながら、しかも保存されています（注 1）。保存されているという意味は、プラス・マイナスを計算すると、収支決算が取れていて、地球全体としての総量は、増えも、減りもしない、ということです。それらの循環を、「空間的に見える化」したものが渦です。大きな渦から小さな渦まで存在しています。エネルギー・水・大気・物質は、それらの様々な渦に乗り換えながら、時には、水が水蒸気になるなど見かけ上の姿を大きく変えながらも、その本質は何一つ変えず、同じ総量を維持しながら、循環しています。循環を、「時間的に見える化」したものがリズム運動です。リズム運動とは周期運動のことです。高校で、空間における円運動（＝渦運動）が、時間における周期運動（サイン・コサイン）となることを学んだはず（図 5）。

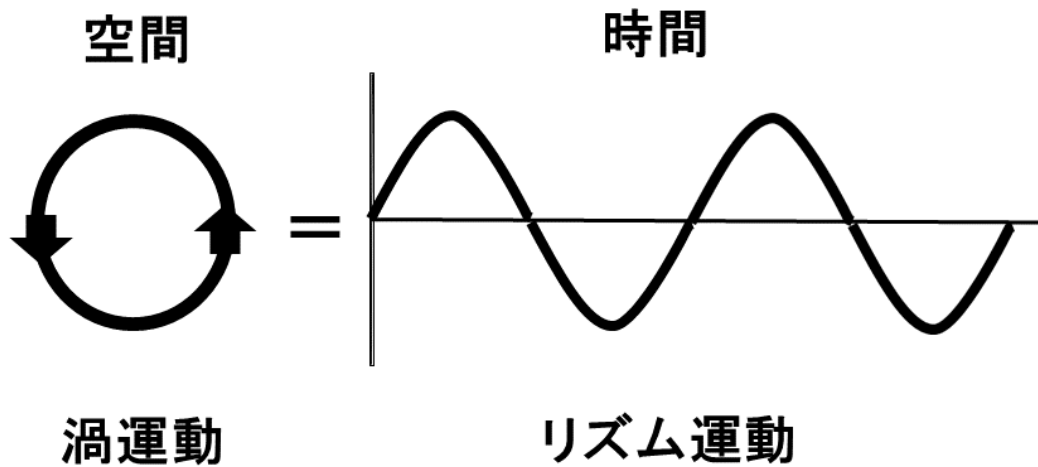


図5 渦運動(空間)とリズム運動(時間)の関係

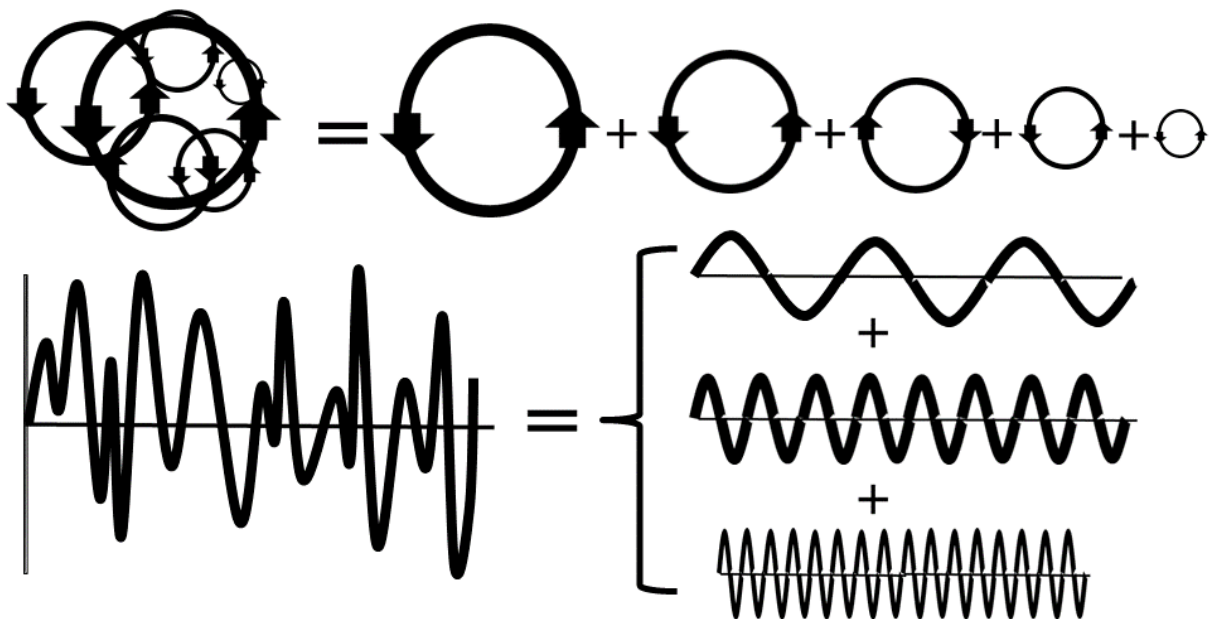
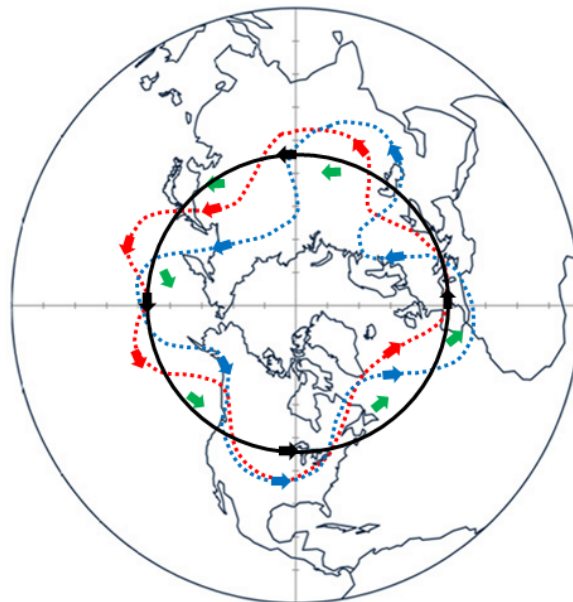


図6 空間における様々な渦と時間における様々なリズム運動の概念図

上図:空間上で複雑に見える運動は、異なる大きさの渦運動の重ね合わせでできている  
 下図:時間上で複雑に見える運動は、異なる周期のリズム運動の重ね合わせでできている

空間スケールの異なる様々な渦が共存しているという事実は、短いものから長いものまで、時間スケールの異なる様々な周期運動が共存している、ということと等価です(図6、注2)。地球の公転や自転による影響として、年周期・季節周期・日周期、などがあります。自然循環の駆動力である太陽エネルギーの地上への降り注ぎ方が変わるため、それに応じたリズム運動あるいは渦運動が生じます。しかし、そのような太陽や月と言った外力が生み出す渦、あるいはリズム運動は、驚くに値しません。自然の神秘は、その自己組織化のメカニズムに内在します。自己組織化とは、自然がその内部の相互作用によって生み出すリズム運動(=渦運動)とその揺らぎ(リズム運動からのずれ)のことで(1-2 生物とはなにか、で解説した「散逸系」を参照してください)。1つだけ例を挙げましょう。地球全体を西から東に巡る大きな大気の循環があります。この大気の渦は、完全な円運動というわけではなく、ゆらゆらと円がゆらぎ、あるところでは、出っ張ったり、別の場所では、引っ込んだりしています(図7、注3)。



**図7 偏西風は、揺らぎながら地球を巡る(赤・青・緑)**  
それらを平均すると円運動に近くなる

その出っ張りや、引っ込みの数は、2つになったり、3つになったりと、まちまちです。長い年月の平均を取れば、ゆらぎが均されて円運動になるので、統計的には、予測可能と思われるかもしれませんが、それでは、ほとんど意味がないのです。なぜなら、冷夏・猛暑などの異常気象は、この円運動のゆらぎが大きく影響しているからです。また、毎年毎年、それぞれの気象は異なり、1つとして同じ気象の年は存在しません。このような自然のもつ多様性・非再現性・非定常性は、まさに、このゆらぎにこそ内在しているのです。ゆらいでいる循環の変化を、時々刻々と完全に予測することは、如何に科学が進歩しても、人間の英知では困難であり、このような現象は「カオス」と呼ばれています(注4)。人間が作り上げた文明のように「ああすれば、こうな

る(養老孟司)<sup>[1]</sup>という要素還元的で予測可能なメカニズムとは根本的に違い、このような自然の内部相互作用による自己組織化とゆらぎ、それによる予測不可能性、それこそが自然の本質なのです。

生物の話にスケールダウンしていきましょう。生物が、自然の構成要素であることは「1-1 人間(ヒト)は特別な存在か」で、詳しく述べました。生物という生命現象も、また、渦であり、リズム運動である、という点では、自然そのものです。生物は、寿命という1つの大きなリズム運動を実践しています。ゾウの時間・ネズミの時間(本川達雄)<sup>[2]</sup>では、大きな生物ほど寿命が長いことを指摘しています。大きな渦(空間)が、長い寿命(時間)をもつことは、生命ならずとも自然界におけるあらゆる循環の基本中の基本です。例えば、大気中の渦を見てみよう。夏の晴天の午後生じる積乱雲セルは、十キロ程度で1時間程度の寿命です。地面が熱せられて生じる上昇気流の渦(プルーム)は、数百mで数分の命です(考察2参照)。ヒトも生物ですから、時間的には、寿命というリズム運動を実践していることとなります。空間的には、生命の渦です。人間分子論では、人間は分子であるというメタファーを使用しますが、人間は渦である、というメタファーを使用することもできます。よく歳を取ってくると、趣向や振る舞いが、幼児に戻り、赤ん坊に帰るといいますが、人生がリズム運動であることを考えれば、納得できます。我々の生命には、寿命という大きなリズム運動以外にも、階層的に多くのスケールでのリズム運動(=渦運動)が埋め込まれています。女性の月経のように周期性が明確なものもありますが、数年から数日のものまで、いわゆるバイオリズムには多くの波があり、予測困難です。我々も、また、様々なリズム運動(=渦運動)の集合体であり、そのゆらぎはカオスであることを思い出しましょう。統計的(平均的)には、ある種のリズム性や法則性を自分自身の中に漠然と見出すことができたとしても、それを予測可能だ、などとは、ゆめゆめ考えない方が良いでしょう。生物の営みも、また、カオスであるという例を1つだけお見せしましょう。まずは、有名な捕食者(食べるもの)と被食者(食べられるもの)の個体数の関係を見てみましょう<sup>[3][5]</sup>(注5)。キツネ(捕食者)とウサギ(被食者)が良く例として取り上げられます。捕食者が増えすぎると、餌である被食者が減って、やがては捕食者も減ってしましますが、ある程度、捕食者が減ると今度は被食者が増え始めます(図8)。

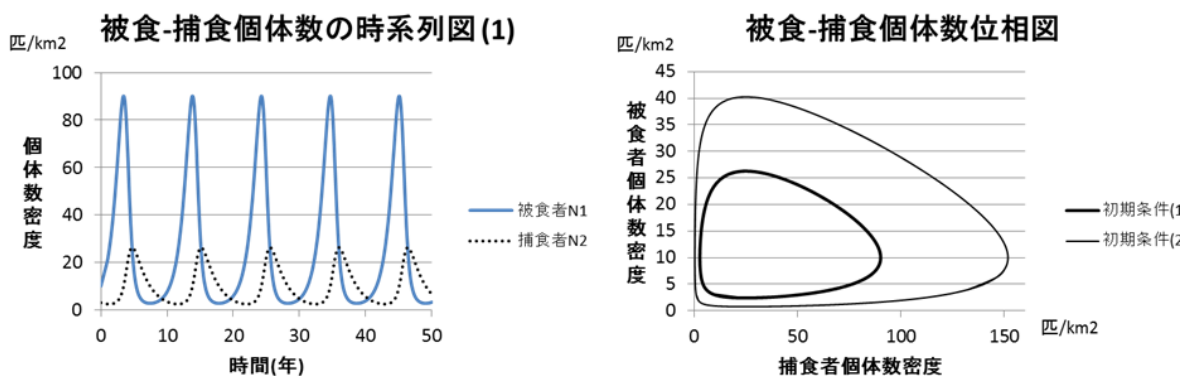


図8 被食者と捕食者の個体数の時間変化(左図)、被食者と捕食者の個体数の対応関係:位相図(右図) 神田学、常微分方程式と物理現象、朝倉書店<sup>[5]</sup>より引用

このように被食者と捕食者の個体数は、タイミングをずらしながらリズム運動を繰り返しているのです。2者の個体数を縦軸と横軸にとってみましょう。これを、位相図（相関図）といいます。位相図は、ひしゃげた円運動＝渦運動となります。2生物のはじめの個体数に依存して渦運動の大きさは異なりますが、気候変化などの環境変化は一切なく、2生物の内部相互作用だけで、自己組織的にこのようなリズム運動が生じるのです。今度は、3種の生物ピラミッドについて見てみましょう<sup>[4][5]</sup>。この場合も、環境変化は一切なく、上位生物（中位を捕食する）、中位生物（上位に捕食され、下位を捕食する）、下位生物（中位生物に捕食される）の3種類の相互作用だけを考えます。経年変化を見ると、単純なリズム運動ではなく、絶滅に近い「近絶滅期」と3者とも繁栄する「繁栄期」を繰り返しながら、2つと同じ年はなく、揺らぎながらリズム運動を繰り返しています（図9）。

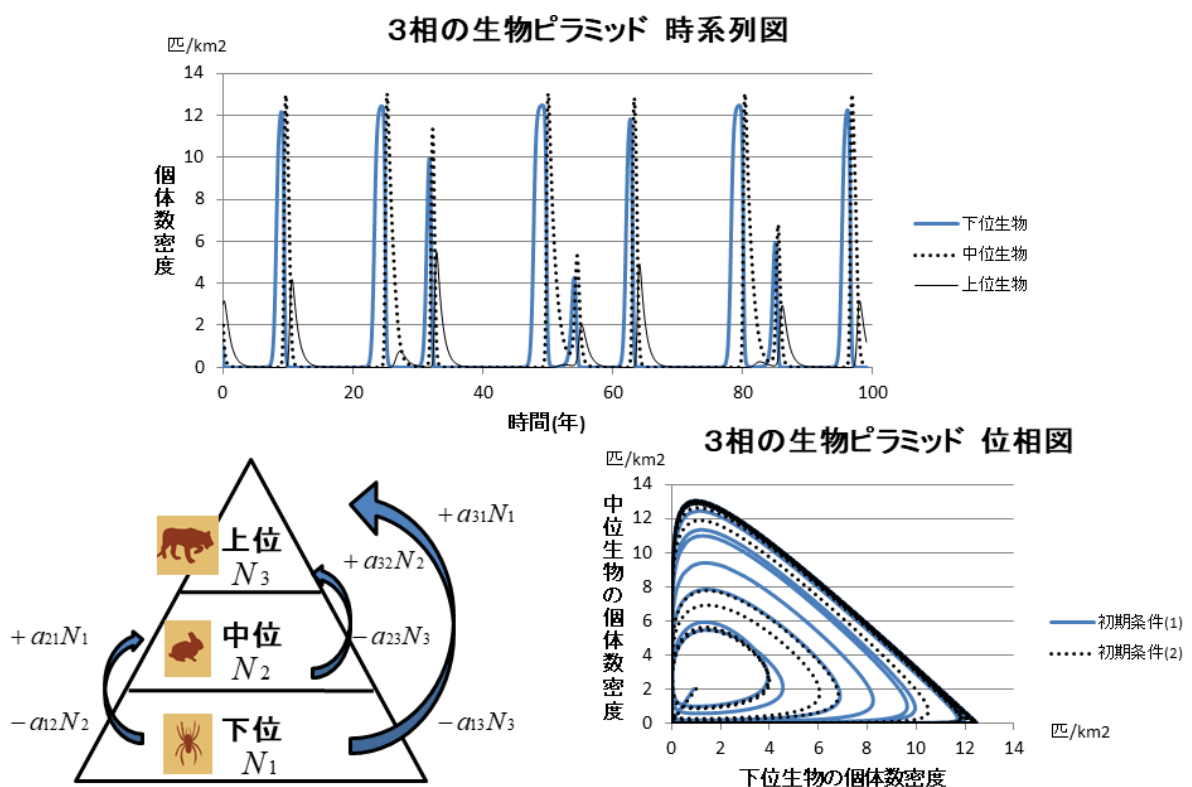


図9 上位、中位、下位の3種の生物ピラミッドからなる単純な生態系  
3種の個体数の時間変化(上図)、3種の生物ピラミッド(下左図)、中位と下位の生物の個体数の対応関係:位相図 神田学、常微分方程式と物理現象、朝倉書店<sup>[5]</sup>より引用

2者の個体数の位相図（相関図）を見てみましょう。ひしゃげた円運動のように、大体同じような軌跡を描いていますが、全く同じ軌道に乗ることはありません。現象がゆらいでいるからである。カオスです。この場合も、3者の内部相互作用だけで、自己組織的にこのようなリズム運動と、ゆらぎとしてのカオスが生じている、ことに注意してください。マグロの漁獲高が減ったりすると、つい短絡的に、温暖化などの外部要因に原因を求めがちですが、自然に内在する複雑系、自己組織化のメカニズムに、もっと注意を払うべきなのです。

この例では、生物群の個体数の変化が、統計的には、渦運動あるいはリズム運動であり、その

予測が難しいカオスであることを示しました。2つの異種生物個体数の位相図（相関図）としての渦運動は、大気中に実際に存在している目に見える台風のような「渦運動」と違い、直感的に理解しがたいかもしれません。特に群の中にあるある特定の生物は、自分が生物群としてそのような渦運動の渦中にあることを夢にも思わないことでしょう。これは人間（ヒト）についてもあてはまります。我々は単に物理的な渦のみならず、様々な集団として、あるいは個人として、ほとんど知らず知らずのうちに、多様な、渦運動、リズム運動の中に埋め込まれているのです。

（注1）数十億年のスケールで見ると、地球全体ではエネルギーを宇宙空間に失っており、赤字決算になっています。

（注2）フーリエは、全ての時間変動（時間運動）が、短いものから、長いものまでの、周期関数の和で表せることを発見しました。

（注3）ロズビー波動と呼ばれています。

（注4）ほんの少しの現状の違いだけで、将来のゆらぎの状況が大きく変わってしまうのがカオスです。そのため、直接予測することは断念し、スーパーコンピューターを用いて、現状の状況をわずかに変えた天気予報を非常に数多く実行し、どのようなゆらぎが生じやすいか、確率で予測する手法が取られています。カオスは、理論的には、完全に同じ初期条件ならば、将来的な揺らぎを含めて、解が決定論的（一意的）に決まります。ですので、カオスを予測不可能である、というのは言い過ぎに思われるかもしれません。しかし、實際上、厳密な初期値などは手に入るものではありません。冒頭の言葉は、気象学者エドワード・ローレンツが、カオスの予測困難性に関して行った有名な講演のタイトルから取ったものです。バタフライ効果、と呼ばれています。

（注5）ロトカとボルテラという数理生態学者が、1970年代に唱えた学説で、図もロトカーボルテラ方程式という理論を、コンピューターで解いた結果です[3][5]。

## <考察2>リズム運動・渦運動としての生命現象と気象現象

図10は、生命現象と気象現象のリズム運動・渦運動の1サイクルにおける時間スケール（縦軸：秒s）と空間スケール（横軸：メートルm）の対応を示したものです。両軸ともスケールが大きく変化するので、対数軸で表記しました。生命現象として、様々な哺乳類の心拍を取り上げ、心周期  $T(s)$  = 時間スケールと、体の大きさ  $L(m)$  = 空間スケール、の対応関係を記しました (Jason Kottke<sup>[6]</sup>)。元データは体重  $W(kg)$  なので、哺乳類の体の密度  $\rho$  をすべて  $1 (g\ cm^{-3})$  と仮定し、 $W = \rho L^3$  の関係から、体の大きさ  $L$  を逆算しました。哺乳類の体を立方体の空間とみなしていることになります。取り上げた哺乳類は、ネズミ、猫、小型犬、中型犬、サル、大型犬、ウサギ、人間、豚、牛、馬、ゾウ、クジラ、です。心拍は、哺乳類の体に、血液を一回送り出す、生物対流の時間・空間スケールと解釈することができます。気象現象として、地表面の加熱によって生じる対流現象を取り上げました。具体的には、境界層乱流、サーマル、積雲、積乱雲、集中豪雨であ



す。鍋に入れた水をガスで加熱する場合を想像してください。しばらくすると、鍋底から小さな泡がブクブクと立ってきますが、これがサーマルです。大きなサーマルは、水面にまで達して盛り上がり、その後、下降流として鍋底に戻っていきます。大気においては、鍋の水は、大気境界層とよばれる層（1km程度）に相当します。地面から出た熱や汚染物質は、この大気境界層の中でよく混ざります。鳥やグライダーは、サーマルの上昇流に乗って空高く舞い上がるのです。大気境界層の上端が水面に相当し、大気中のサーマルは、そこを突き破ることができず、盛り上がった際に、積雲（いわゆる羊雲）を作りますが、下降流となって地面に戻る際に、羊雲も消滅してしまいます。大気が不安定な際は、サーマルが大気境界層を突き破って、その上の自由大気にまで発達することがあります。その場合、雲・雨を生成しながら、潜熱を放出するので、上昇流は、さらなる浮力を得て、積乱雲となり、対流圏の上端（10km程度）にまで達することもあります。鍋の水のように全体として水平方向には動かない場合と異なり、大気中では、対流と風の相互作用などによって、がん細胞のように積乱雲が次々と生じたり、それらが合体してクラスター（塊）を形成したりすることがあります。その場合、積乱雲は、スーパーセルやスコールラインとなって巨大化し、集中豪雨をもたらします。大気中には、海陸風、台風、前線などの渦運動も存在しますが、それらは、鉛直方向に比べて水平方向に長い2次元的な渦運動であり、ここで取り上げた加熱による3次元的・等方的な循環とはメカニズムが少し異なるので、区別して考察から除外しました。

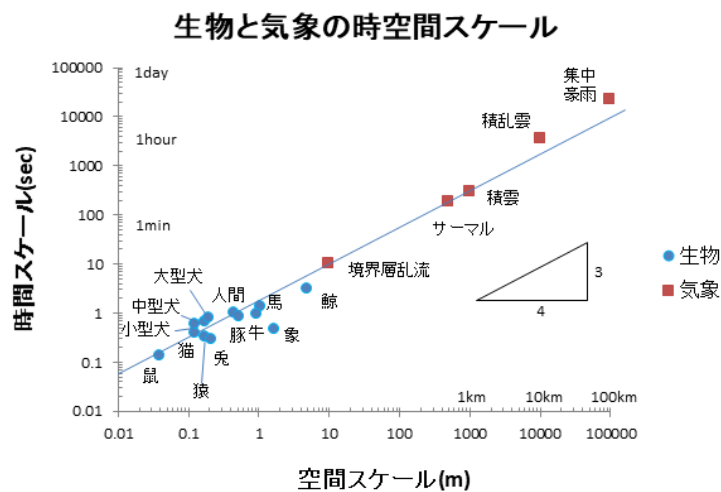


図10 生物と気象の時空間スケール  
 青は、哺乳類の心拍(時間スケール)と体重から逆算した空間スケール、赤は大気中におけるいくつかの対流現象

ちなみに、図10の両対数軸で、時空間スケールの対応は直線となり、その勾配は3/4になるので、時間スケールTは、空間スケールLの3/4乗に比例することになります。生命現象としての心拍という鼓動と、気象現象としての大気対流が、同じ時間・空間スケールの延長線上にプロットにされるのは不思議に思われるかもしれません。しかし、いずれも、「散逸系」あるいは「開

開放系における熱力学的非平衡状態」であることを思い出してください (1-2 生物とはなにか)。開放系に、エネルギー（熱）が出入りしている状態において、自己組織的運動が生じている、と見なせば、それほど驚くべきことではありません。哺乳類の体、および大気境界層・対流圏など、一応空間が緩やかに規定されていますが、エネルギー（熱）は、境界面を介して外界とやり取りされているのです。哺乳類は代謝による自己熱エネルギー生産によって、大気は地表面からの顕熱・潜熱供給によって、系（システム）にエネルギーが供給されているという点で共通しているのです。

我々の細胞中で、エネルギー代謝を行うミトコンドリアは、 $1\mu\text{m}$  くらいの大きさです。図中の時空間スケールの直線を、 $1\mu\text{m}$  まで延長すると、その時間スケールは、 $100\mu\text{s}$  くらいになります（図は示しません）。現代の最先端の顕微鏡技術は、 $1\mu\text{m}$  程度のミトコンドリアよりも細かい空間構造を観察することはできますが、残念ながら、 $100\mu\text{s}$  という超時間解像度でその動きを観察することはできません。ミトコンドリアが、どのような渦運動・リズム運動を行っているのか、いずれは解明されるでしょう。興味のあるところです。

#### 参考文献

- [1] 養老孟司、養老孟司の人間科学講義、ちくま学芸文庫
- [2] 本川達雄、ゾウの時間 ネズミの時間—サイズの生物学（中公新書）新書
- [3] E.C.ピール、南雲仁一監訳、数理生態学、産業図書
- [4] Tanabe K and Namba T, 2005: Omnivory creates chaos in simple food web models, Ecology 86(12) 3411-3414.
- [5] 神田学、常微分方程式と物理現象、朝倉書店
- [6] Jason Kottke, Does every species get a billion heartbeats per lifetime?  
(<https://kottke.org/13/02/does-every-species-get-a-billion-heartbeats-per-lifetime>)