

生物におけるエントロピー時間

宇宙が始まって以来、時間は一様均一に流れているわけではありません。宇宙はニュートン力学が想定する絶対時間と絶対空間の下にあるものではありません。時間は物質の相対的運動の中からはじめて生まれてくるものです。質点系においては、物体は可逆な相対論的固有時間で運動します。タイムマシンのアイデアもここから生まれます。

一方、生物に代表される複雑系は、エントロピー時間に支配されています。エントロピー時間は不可逆なので、生物における時間の流れは一方向です。したがって、残念なことに、老人は決して若者に戻ることはできないのです。

エントロピー時間を理解するために、Feynman の分子ラチェットが役に立ちます。もともと、このモデルは第 2 種の永久機関の例として示されました。適当に減圧された容器の中に、この装置を入れてやると、回転軸に付けられた羽に時々気体分子が衝突し、これによって装置は回転軸の回りの揺らぎ運動をしようとします。しかし、ラチェットがあるために、回転は一方向となり、結果として、気体分子の熱運動から回転の仕事を取り出せるというものです。もちろん、この装置は熱力学第 2 法則に反しているので、このままでは決して働くことはありません。

しかし、Fig. 1 に示すように、ラチェット部分を水槽（冷却装置）に浸けてやれば、分子ラチェットは、高温と低温の 2 つの熱源をもつ普通の熱機関になります。つまり、この装置が働くかどうかは、ラチェットで発生した熱を取り除く速度（熱緩和時間）によって決まることになります。この装置で時計をつくろうとすると、時間の最小の刻みは、この熱緩和時間と同程度になります。また、高温熱源からの熱流入速度と冷却速度を一定に保ってやれば、非平衡定常状態になるので、普遍的発展基準によってエントロピー生成速度は最小となり、時計は一定速度で時間を刻み始めます。

生物は原理的にこの分子ラチェットが生み出すものと同じ、エントロピー時間の下で生きています。したがって、生物のもつ時計の時間は温度に依存することになります。多細胞生物の発生は、初期卵割の細胞周期を単位とする生物学的時間で記述されることが知られています。実際に、本熱学レポート No. 32 でも報告されたように、アフリカツメガエルの初期発生の速度は、温度によって著しく異なりますが、それぞれの温度における卵割周期 (τ) を時間の単位としてスケーリングすると、熱発生速度（エントロピー生成速度）は、見事に一致することが確かめられます (Fig. 2)。

さらに、生物学的時間は温度だけでなく、個体ごとに異なります。つまり、私の時間は、あなたの時間と異なります。実は、このことが工場で生産された均質な性質をもつロボットと生物との能力の重要な差異をもたらしています。アリの社会では、働きアリの内いつも 7 割は働いておらず、1 割は一生働くことはありません（長谷川英祐）。これは、個体ごとに生物学的時間が微妙に異なることによっていると考えてよいでしょう。働かないアリは決して怠けているのではなく、ちょっと速い時計をもつ仲間に仕事を取られてしまうのです。しかし、アリの社会は、このおかげで、必要に応じて労働力量が自動調整され、日々の環境変動に対するロバストネスを獲得しています。すべての個体が最大効率で働いている社会は小さな環境変動でも破たんしてしまいます。

複雑系は、秩序状態からカオス状態への臨界付近（カオスの縁）にあるので、もともと非常に幅広い緩和時間のスペクトルを持つガラクタの集まりです。系がある定常状態に置かれ代謝を始めたときに、その代謝機構は固有のエントロピー時間を刻む時計を形成します。この時計のリズムに合わせて同調するものがガラクタの中から拾い出され、増幅されてゆくメカニズムこそが、生物発生における自己組織化において重要な役割を果たしているのではないかと思います。

（長野八久）

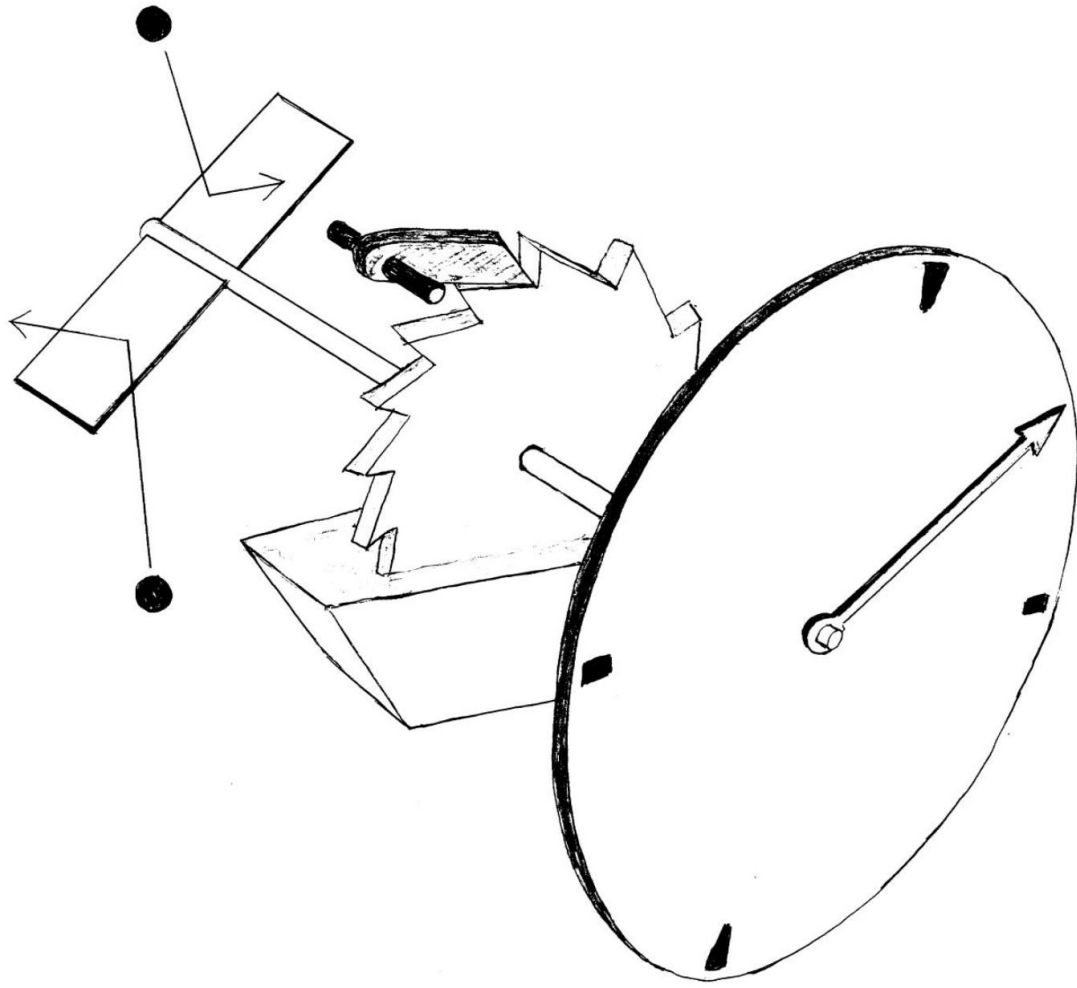


Fig. 1. Adding a cooling bath, Feynman's molecular ratchet works as a normal heat engine, which can give an entropic time.

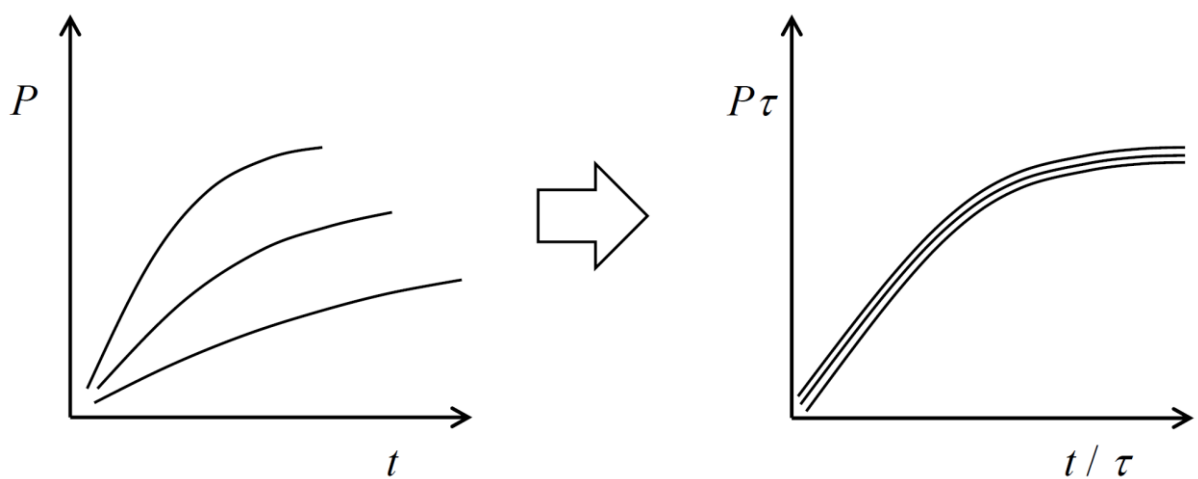


Fig. 2. Early development of frog strongly depends on temperature. However, by scaling with the biological time, the time-variations of the entropy production at different temperatures show a complete agreement.