

第6回市民科学者国際会議 (2016) 講演

**ダーウィン主義が信用をなくしているが  
そもそもダーウィンは正しかったのか？**

キース・ベーパーストック

はじめに

科学理論の中には「世界秩序」の原形になっているものがいくつかあるが、ダーウィンの進化論はその最たるものと言えよう。ダーウィンは、彼の著作の題名『種の起源』のなかに「生存のための苦闘（生存競争）」という言葉を入れており、同著の第3章の題名は「存在のための苦闘」である。自然は赤い血に染まった牙と爪（弱肉強食の世界）と見なされており、多くの生きものにとって生とは、大部分、天敵がもたらす死を免れることにほかならない。競争が跋扈する世界である。

自然の選択による進化というダーウィンの理論は、「現代進化論」あるいは「ネオ・ダーウィニズム」を通してわれわれの自然観を支配している。ダーウィン思想のこうした解釈は1930年代に築かれたものであり、いくつかの強い科学的信念に支配されている。そのなかで特に重要なものは3つある：ひとつは、進化の過程は漸進的（ゆっくり）であり、生物は受動的であるという信念。次に、細胞核の中にある遺伝子はメンデルが発見した遺伝単位の構成要素であるという信念。そして、われわれヒトなどの生物が表出する表現型や行動特性を決めているのは遺伝子であるという信念である。

これら3つの基礎的信念の信憑性は、過去数十年間に得られたエビデンスによって疑義を呈されてきた。以下では、進化論的（evolutionary）なものの方見方に本気で革命（revolution）を起こすべき時に来ているのではないかという点を議論したい。

王立学会特別研究員  
チャールズ・ロバート・ダー  
ウィン 1809-1882

博物学者、実験学者、『自然選択による種の起源、あるいは生存のための苦闘の中での好適品種の保存について』の著者



この本が偉大な著作であることに疑いの余地はなく、この世界の秩序を見る見方に真に深甚な影響を与えた、わずか2冊か3冊の本のひとつと見る人もいる。

「原初、神によって、幾多の力とともに、僅かな数の、あるいは唯一の種に吹き込まれた生命に対するこの考察には荘厳さがある。しかも、決められた重力の法則に従ってこの地球が周軌道を巡る間に、斯くも単純な始まりから、途方もなく美しく、途方もなく驚嘆に満ちた、終わりのなき諸々の種が進化してきたのであり、いまも進化しつつあるのである。」

## グレゴール・ヨハン・メンデル 1822-1884

チェコの修道士、司祭、実験学者。ブルノ市の聖トマス修道院の庭で、有名なエンドウ豆の栽培と養蜂による実験を行い、ひとつの世代から次の世代への「遺伝形質単位」を発見。彼の著作は長い間知られることなく埋もれていたため、ダーウィンもこれを知らなかった。



「[細胞の形成による生物の]この発達は、一定の法則に従って進行し、その法則は細胞内で活性結合を達成した**物質的な**構成と配置にもとづいている。」

ダーウィンとメンデルは、「総合説」の樹立に中心的な役割を果たした人物だが、ダーウィンもメンデルも、私たちが今日遺伝子について持っているような概念は持っていなかった。メンデルが「物質」と呼んだものがDNAとして同定されるまでに50年以上掛かった。

ダーウィンは、彼の言う自然選択の中身もきちんと分かっていたわけではなかった。品種改良業者は、人為選択により固有の性質を持った生物を生産することが出来ていたが、ダーウィンは自然界にも同じような自然のプロセスがあって、それによって今日私たちが見たり、化石で知っているような多様な種が生まれたと考えていた。彼は、どの自然集団のなかにも特性のばらつきがあり、品種改良業者が特定の特性を組み合わせることで新しい品種を作り出していることを理解していた。

1930年、数学者のロナルド・A・フィッシャーは、その自然のばらつき（「分散」と呼ばれる）の統計的測定に基づいて、自然淘汰の理論を発展させた。

フィッシャーの自然選択（自然淘汰）論は「総合説」の土台をなすものだが、私はこれが現在の主要な問題のひとつになっていると考える。

フィッシャーは統計学者であり、彼の言う「遺伝子の分散」の物理的な意味については何も分かっていなかった。

しかし、フィッシャーが見落としていたのか、あるいは故意に無視したのかは分からないが、その代わりになるものはあった。非生物的な「物」から決定的に生物を区別する特徴とは、こうした生物が、環境中の栄養素を摂取し、代謝することによってエネルギーを得ており、そのエネルギーを絶えず放出しているということである。こうした生物は、自分でそうしているのであり、外部からの介入は必要ない。

1930年までに、エネルギー拡散の物理学は長足の進歩を遂げたが、私には、それが生物学に大きな影響を及ぼすことをフィッシャーが考えなかったことが異常なことと思える。

# 最小作用の原理



## ピエール・ルイ・モロー・ド・モーペルチュイ

1698-1759

フランスの数学者。ひとつのシステムの変化の経路を数式化した最小作用の原理を定式化した。

この原理の骨子は、一般的な条件の下では、システムは最小抵抗経路によって（そして最短時間で）変化していくというもの。



「この〔最小作用の〕原理から演繹される**運動**の法則とそれ以外の法則は、自然の中で観察される諸法則と全く同じであることから、我々は感嘆を以てこの法則をすべての現象に適用することができる。動物の動き、植物の成長...これらはその帰結にすぎない。そして、これらすべての運動が極めて賢明に確立された少数の法則だけで成り立っていることを想うとき、宇宙の壮大な光景は、はるかに偉大で、はるかに美しくなり、その創造主を価値あるものにするのである。」

この最小作用の原理のなかには、ニュートンの運動の第2法則と熱力学第2法則という、物理学の基礎を成す2つの最も偉大な法則を見ることができ

以下では、熱力学第2法則に焦点を絞ることにする。「あの」第2法則にである。熱は熱いものから冷たいものへ流れ、その逆には流れない。氷のブロックには水の入ったやかんを沸騰させるのに十分な熱が含まれているが、それが自然に起こることはない。だが、沸騰したお湯の入ったやかんを氷のブロックの上に置くと、氷は溶ける。





この最小作用の原理のなかには、ニュートンの運動の第2法則と熱力学第2法則という、物理学の基礎を成す2つの最も偉大な法則を見ることができる。

以下では、熱力学第2法則に焦点を絞ることにする。「あの」第2法則にである。熱は熱いものから冷たいものへ流れ、その逆には流れない。氷のブロックには水の入ったやかんを沸騰させるのに十分な熱が含まれているが、それが自然に起こることはない。だが、沸騰したお湯の入ったやかんを氷のブロックの上に置くと、氷は溶ける。

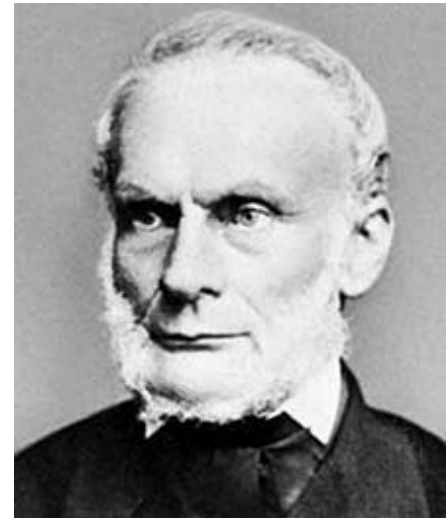
エネルギーには2つの形がある。ひとつは仕事をする（氷を溶かす）ことができる**自由エネルギー**と呼ばれるもの。もうひとつは、氷の中にあるけれども、仕事ができない**エントロピー**と呼ばれるものだ。

生物は、栄養素を消費することによって自由エネルギーをエントロピーに変換することを生業にしている。

## ルドルフ・ユリウス・エマヌエル・クラウジウス 1822-1888

熱力学第2法則を唱えたドイツの物理学者。

彼は、エンジンが自由エネルギーを仕事に変換するさいの効率に限界があるのはなぜかを説明しようとした。



「宇宙のエネルギーは一定（エネルギーがなくなったり、生まれたりすることはない）だが、宇宙のエントロピーは最大値に向かう。」

つまり、自由エネルギーを消費したり拡散させる作用はすべて、エントロピーを生成する —— 有用なエネルギーは仕事や成長を生み出すが、仕事を生み出すことができないエントロピーも生み出すということ。

生命はエントロピーを生みだす。

エントロピーは謎めいている。例えば、エントロピーが実際に生み出されている状況では、温度のようにそれを直接測ることはできない。やかんを加熱するためにエネルギーを使用する場合、使用されるエネルギーと温度上昇を測ることはできるが、生み出されるエントロピーを測ることはできない。他の測定値からその形を推測する他ないのである。

クラウジウスが第2法則をエントロピーの極大化として構築した後、物理学者がエネルギーのこの奇妙な形態の性質が何なのかを調べはじめ、1875年、ルートヴィッヒ・ボルツマンがその答えを提出した。

## ルートヴィヒ・エドゥアルド・ボルツマン

1844-1906

オーストリアの物理学者・数学者。分子によるエントロピーの解釈を考え出した。ボルツマンは原子論者（物質は目に見えない原子で構成されていると考えた）だったが、当時の科学者仲間のほとんどはこの見方を捨てていた。



ボルツマン方程式:

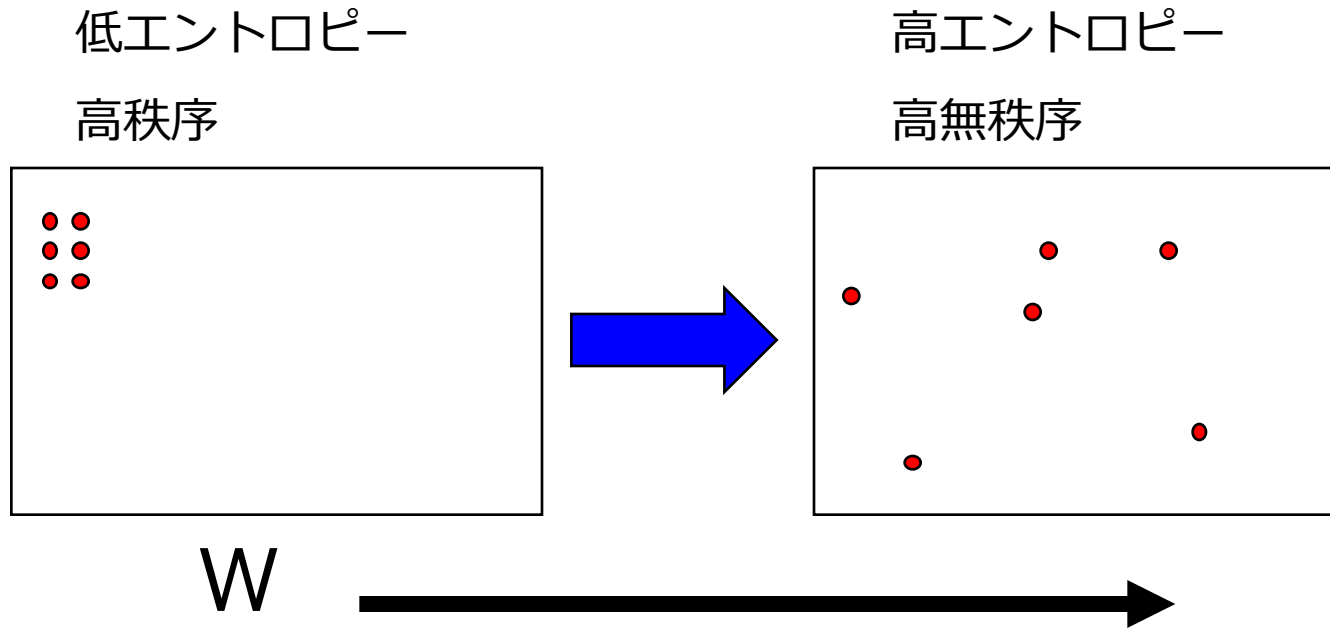
$$S = k_B \ln W$$

ただし  $S$  = エントロピー;  $k$  = ボルツマン定数;  $W$  = 特定の状態の確率（この方程式はウィーンにある彼の墓石に刻まれている）。

この方程式では、 $W$ が増加するにつれて $S$ も増加し、分子系で最も可能性の高い状態は、完全な無秩序状態のひとつとなる。



閉じた箱の中のボルツマンの分子  
(エネルギーは箱の中に入出入りできない)



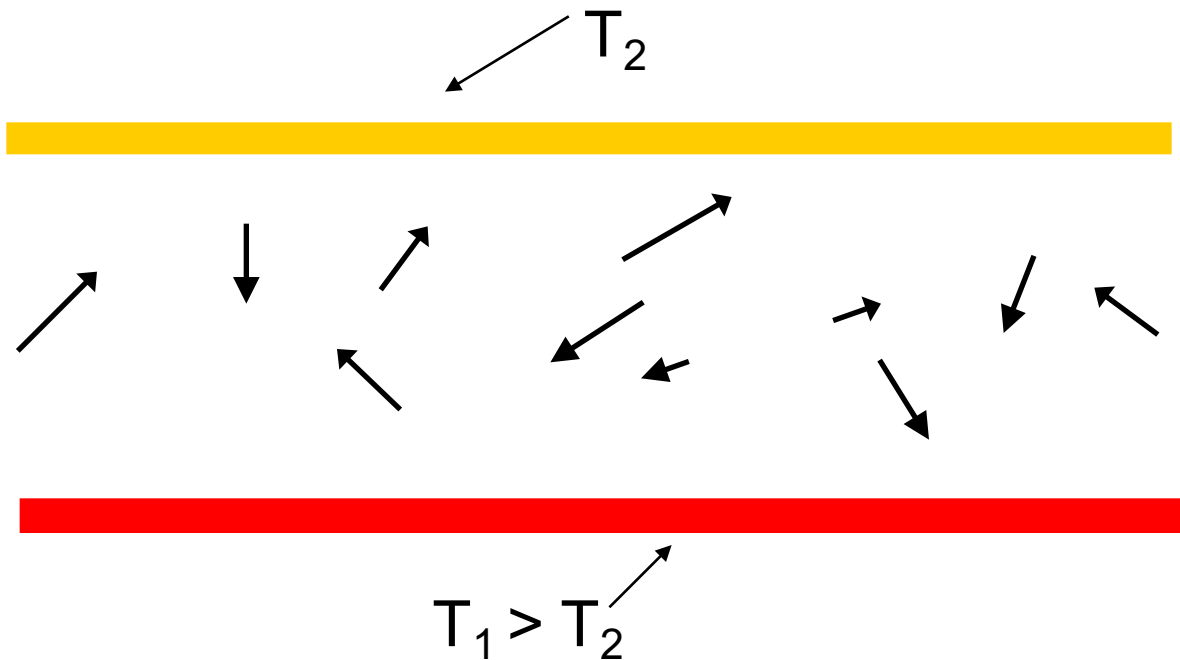
このことの意味は、システムは**自然に**高秩序・低エントロピー状態から高無秩序・高エントロピー状態へ移動するということ。

しかし、この結果にはボルツマン自身も不安になった。生きているシステムはエントロピーを生み出し、それにより無秩序を生成するはずだった。ダーウィンの著作は、進化とは秩序が増大するプロセスであることを示した。ボルツマンは、自分が得た結果と、現実世界で自分が明確に見、ダーウィンから理解したものとを合理的に説明することができなかった。彼はイタリアで自殺し、生涯を終えた。

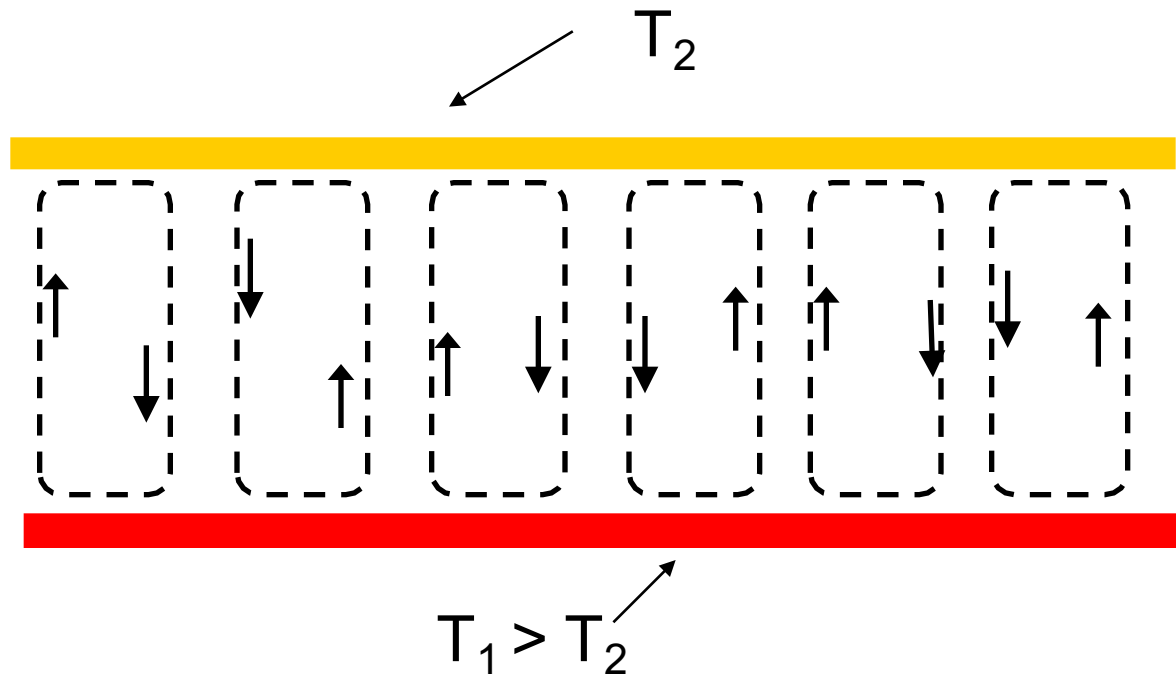
ボルツマンのエントロピー解釈に立てば、物理学の至高の法則である「あの」第2法則は、非常に現実的な進化の現象と対立しているように見える。

**少なくとも、ダーウィンの理論かボルツマンの理論のどちらかが間違っていることになる。**

下から均等に加熱して、下面が上面よりも暖かくなるようにした流体層を考えてみよう。流体中の分子はランダムに分布し、伝導作用によって熱を伝達している。分子のランダムな衝突により熱が伝達される。



1900年にフランスの化学者アンリ・ベナールが行った実験では、臨界面温度勾配で、ランダムな配列の分子が秩序状態になり、**対流**作用によって流体を通り抜ける熱の伝達率を増大させた。



秩序ある対流状態では、（エネルギーの拡散が増大しているために）対流がなかった以前の状態よりも高エントロピーになるのである。

**結論**：エントロピーの増大は、そのシステムに応じて秩序を増大させることもあれば、無秩序を増大させることもある。エントロピーは、必ずしもシステム内部の無秩序を意味するものではない。

2007年にフィンランドの物理学者のアルト・アニーラは、環境との間でエネルギーのやり取りをしている開放系のシステムでは、エントロピーが増大するにつれて、無秩序と同じぐらい秩序に向かう可能性があることを明確に示した。アニーラは、125年以上におよんだ科学的信念を覆した。ボルツマンは間違っていたのだ。

トウモロコシを餌にしている鶏を考えてみよう。エントロピーの一部は、鶏の排泄物という、トウモロコシよりもはるかに「秩序」の少ないものの中にある。それは低品位の熱（体熱）を放出する。仕事は生み出されている（鶏は走り回っている）。しかし、我々は昼食に鶏肉を食べることができる：これも、**蓄積エネルギー**という形のエントロピーである。このように、トウモロコシの中のエネルギーは、複数の経路でエントロピーに変換されているのである。

**生命は自由エネルギー（最終的には太陽エネルギー）を消費し、それを蓄積エネルギーに変換する。この蓄積エネルギーは生態系の中で他の生物によって使用される。**

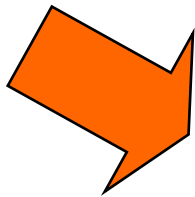
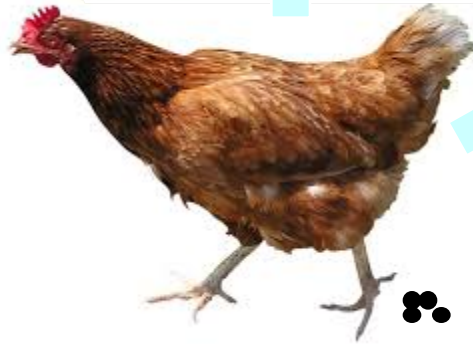
体熱 = エントロピー

蓄積エネルギー  
= エントロピー

廃棄物 = エントロピー

トウモロコシ =  
自由エネルギー

鶏は「仕事」を生み出す



熱力学第2法則と生命の進化の間に衝突があるわけではない：生命は最小作用原理に対する反応なのだ。生命が登場する以前には、地球の表面に当たる太陽光からの自由エネルギーが拡散できる唯一の道は、気候の生成と、宇宙空間への低品位熱の放射だった。

生命は、化学作用を介して太陽エネルギーを拡散させる。単なる分子から化学作用によりまずバクテリアが生まれ、そこから単純な単細胞生物が、さらに植物が、さらに魚が、そして最終的に動物が現れた。これらの分子は、星の内部で続いている化学作用から生まれた彗星や隕石に乗って地球に到着した。これは自然発生と呼ばれるプロセスである。これらの生命体は自然発生のエントロピーなのである。

生命をこのように見ると、自然選択のプロセスは遺伝子を基に行われているというよりも（ここまでは、遺伝子の概念を持ち出す必要がない）、生物が栄養を得ることができるかに依存していることがわかる。

**つまり、フィッシャーも間違っていたのだ。**

英国の博物学者エドワード・ブライスは、ダーウィンが『種の起源』を発表する約20年前に次のように述べている：

「..... 敏捷さや強靭さ、感覚の繊細さによって食糧を得る諸動物の中では、最良の能力をもった一匹の動物が常に最大の量を取得するはずであり、したがって肉体的に最強になるはずであり、それにより敵対する者を蹴散らすことで、その優れた資質をより多くの子孫に伝えることができるようになる。」

最小作用の原理は、進化の過程を牽引してきた。だが、栄養源もまた同じ進化の過程（他の生物の蓄積エネルギー）に依存しているため、生物がどのように進化するかはその生物が生きている生態系に依存することになる。私の同僚のアルト・アニーラの言葉を借りると、すべてのものは他のすべてのものに依存しているのだ。

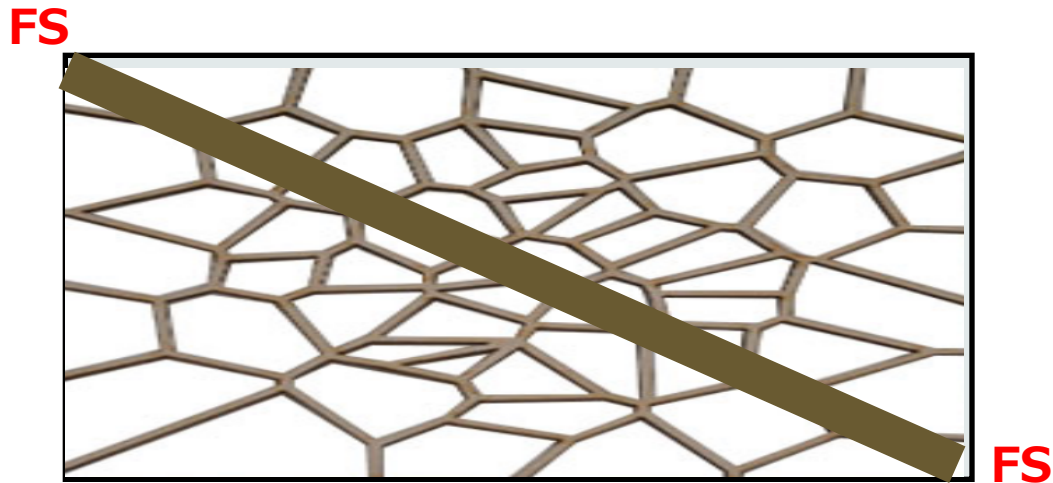
**私たちが今ここに居るのは、37億年の間、生態系が存在し、私たちの祖先がそこから栄養を得てきたからなのである。**



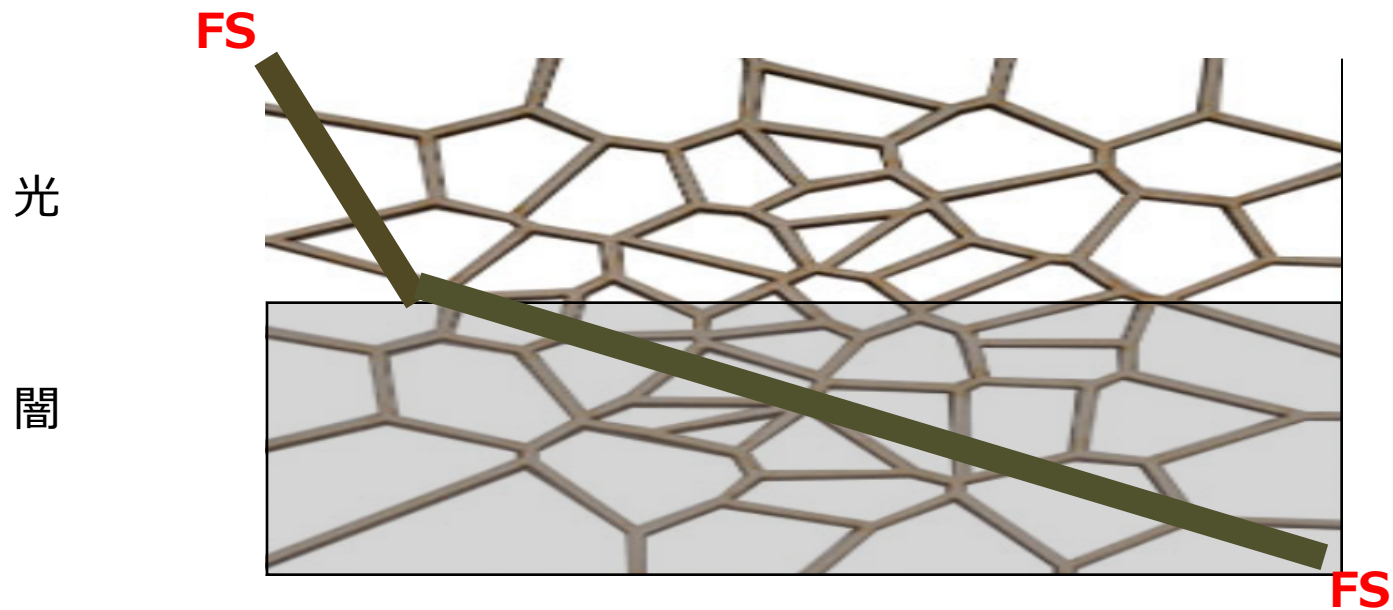
## “繊細な感覚”：ブライスはこの言葉で何を言おうとしたのか？

ここ日本で、最も原始的な生物のひとつである粘菌を使った実験がいくつか行われている。粘菌は、かなり特異な性質をもつ単細胞生物で、無栄養の矩形寒天プレート上に置くと、広がり、微小管の網の目で表面を覆い尽くす。これは食べ物を見つけるための戦略だ。

栄養素（FS）をプレートの対角線上の隅に対置した場合、粘菌はプレートを横断してふたつの食料源につながる対角線上の太い管に変形する。これは最小作用原則がそのまま表れたものと見るができる。この生物は栄養をできる限り効率的に消費しているのである。



光は粘菌に有毒なので、この実験は通常薄暗がりの中で行われる。プレートの半分に光を当てた場合、この生物はやはり両方の食料源につながろうとするが、光に当たる部分の露光量を最小限に抑えようとする。



プレートの光を当てた部分で採用された経路は、効率が悪いように見える（前の例よりも長くなるから）。だが、この生物は栄養面での利益と光にさらされることの毒性リスクとをトレードオフできているのである。このような原始的な生物にこんなことができるのは驚くべきことだ。

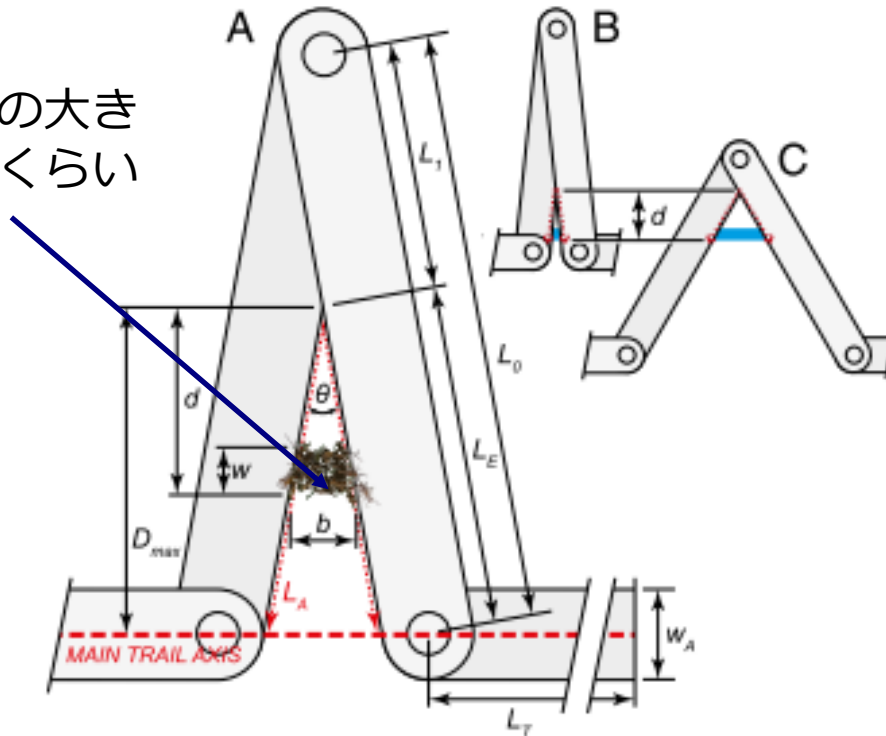
**この例はさまざまな生物システムに普遍的な特徴を示している。それは、生物システムが特定の形態の自覚や意識を持っており、みずからの生存を助ける簡単な決定を行う能力を持っているということだ。**

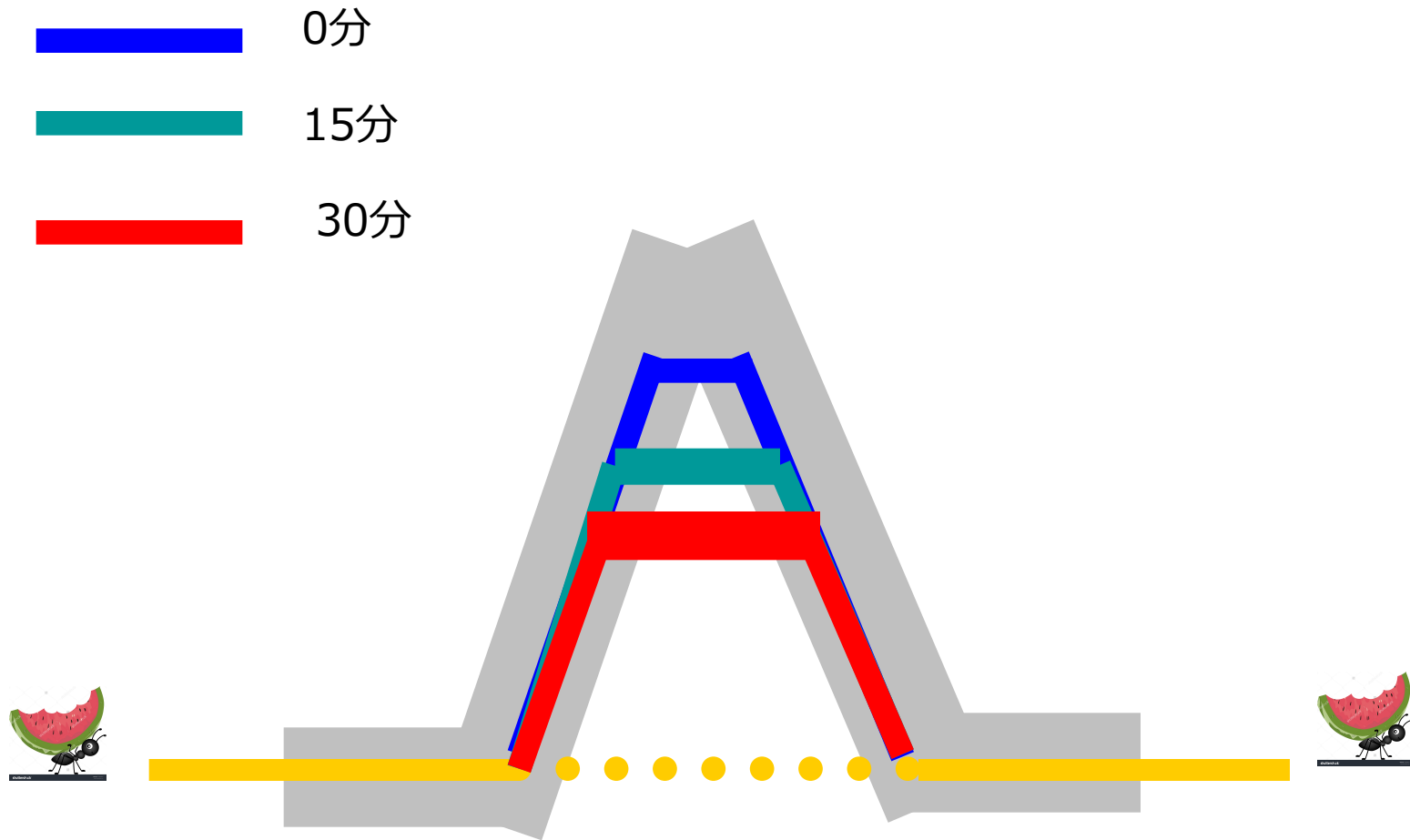
この機能なしに生命は進化できなかつただろう：意識のない生物は、敵対的な環境の中ではなすすべもない。2009年にフランティシェク・バルスースカは「神経生物学の深い進化の起源」と題する論文を発表した。彼は、微生物や植物のような我々が一般に脳をもっていないと思っている生命体にも脳の活動のように見えるものを多くの例で示している。

**最も原始的な生物でも、生きるか死ぬかという場では受け身ではないのである。**

軍隊アリ（グンタイアリ属）には、障害物の上に蟻の橋をつくって採餌アリが巣に食糧を持ってこられるようにする能力がある。研究者が、採餌アリの通路に大きさの異なる障害物を配置するフィールド実験を行った。

アリの橋の大きさはこのくらい





**この研究者の結論は、このアリたちは、アリの橋を作るために、採餌アリを使うか、橋作りアリを使うかをめぐって最適なバランスを採用したというものだった。**

個々のアリは独自の遺伝子型を持っており、従来の理論であれば、遺伝子型の表現によってアリの行動、つまり採餌をするか橋を作るかが決まるとするところだろう。ある程度交換可能な異なるカーストのアリでも可塑性が観察されており、場合によっては女王アリになるアリさえいる。

**この行動の受益者はコロニー全体だが、それでも個々の蟻はどうすれば採餌プロセスを最適化できるかについて意思決定をしていると思われる。**

私たちが目の前に見ているのは、複雑な認知行動なのだろうか、それとも最小作用の原理をみているのだろうか？ 私は後者だろうと思っている。

粘菌の例では、プレート全体が暗いときにこの原理が明確に見られた。半分光を当てた場合は、光への曝露を最小限に抑えながら、食品への最適なアクセスを見つけるためにある「決断」が行われた。アリコロニーの例では、栄養供給を最適化するためのアリの最適な配置が見られた——ひとつの法則を見る思いがするのである。

次ぎに、植物、とくにその根が取るいくつかの興味深い行動を検討しよう。バルスカらは、根が水平管に沿って成長する他ないような実験室条件の下に置かれた場合、根は定期的に下方方向に向きを変えようとする（探索行動）ことを示した。根の先端を1, 2ミリ除去すると、この行動は観察されなくなった。

ダーウィンは、実際にはこのことを知っており、息子フランシスとの共著で書いた彼の最後から2番目の植物をめぐる著作『植物の運動力』の中で次のように述べている：

「幼根の先端は、このように [感受性を] 具えており、隣接する部分の動きを方向づける力を持っており、ひとつの下等動物の脳のように行動すると言っても過言ではない。脳は本体の前端内に位置していて、感覚器官からの印象を受けて、いくつもの動きを方向づける。」

ダーウィンは最小作用の原則を見ていたのだろうか？

これらの例や、能を持たない生物を同じように観察した他の多くの例を見ると、意識的な認知行動は我々が脳と呼んでいる臓器に限定されるものではないという結論に至らざるを得ない。この経験的エビデンスには説得力があり、無視することはできない。

生き残るための助けになる意味ある意思決定を行うことを可能にしたこの能力なしに、生物は敵対的な環境の中で生き残ることはできなかつただろう。生物にはさまざまな「認知」能力があり、進化の過程でこれらが少なくともいくばくかの役割を果たしたことを認めざるを得ない。

ダーウィン主義者は、より良い遺伝子が生き残りを拡大し、そうした遺伝子を将来世代に伝え広めやすくするのであり、それこそが進化の原動力であると確信している。

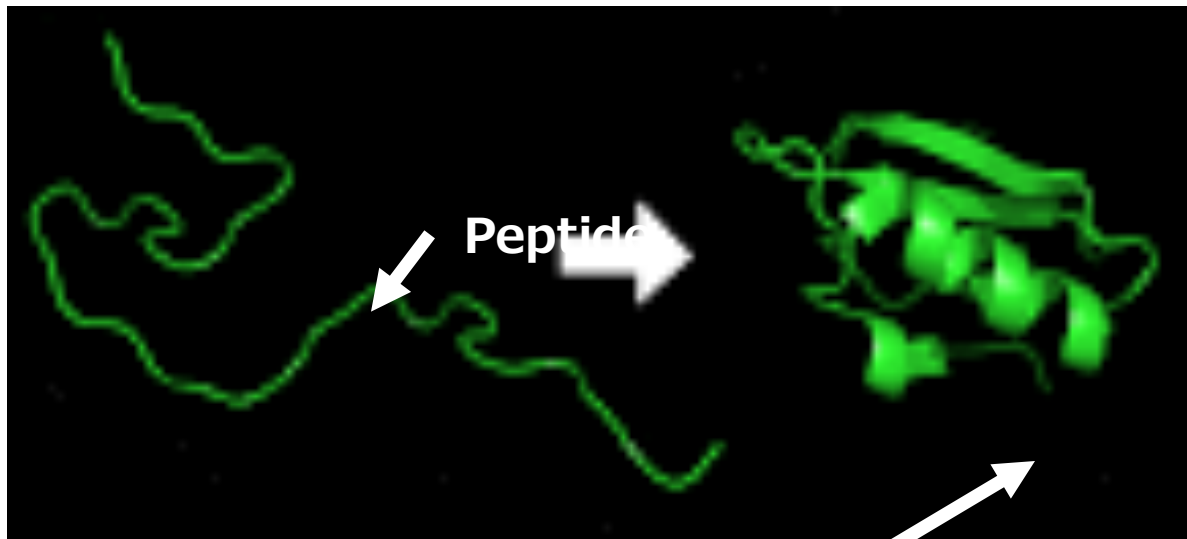
だが、生物には認知能力があり、それによって生物は敵対的な環境で生き残ることができたのであり、そうした生物が進化の原動力となったと考えたとしても、上記の確信と同程度に正しいと言えないだろうか？

**受動的ではなく、能動的なプロセス**



しかし、これについては疑問が生じる。脳でないとすれば、この能力は生物のどこにあるのか、またそれはどのように将来世代に受け渡されるのか？ 確かにそれはDNAの中になければならず、そのDNAはメンデルの遺伝の単位でなければならない。

そうとも限らない。DNAは活動分子ではない：それは核の中で、細胞が特定の組み合わせのペプチドを生成できるようにするデータベースとして、受動的な役割を果たしているだけだ。これらのペプチドは、その後折り畳まれてタンパク質になる。



**そして、このタンパク質が働くことで、表現型が生成される。**

140億年前に宇宙が形成されてから経過した秒数よりも多くのタンパク質がある。これらは、相互に、そして他の分子と多数の反応を起こす。そして、この化学作用の中から生物界が生まれたと私は信じている。

細胞は、この化学作用の環境を提供することで化学作用を支えている。生命の性質は、この両方によって偶発的に決まる。なかでも意識と認知という2つの特性は、生物と非生物を分けるものだ。

我々の知る限り、タンパク質は、生命を生み出すことができるという点で我々が知っている化学物質の中でもユニークな存在だ。

その生命は、37億年前から、自由エネルギーがアクセスできる地球のほとんどすべての環境に隅々まで定着することに成功し、はびこっている。

これは、どうみても成功であり、我々はそのことを尊重する必要がある。

で、ダーウィン主義が信用をなくしているが、そもそもダーウィンは正しかったのか？

私は生命のための闘争を彼が強調したことは間違っていたと思う。進化論者は常に利他主義に困らされてきた。事実、利他主義は自然界でも珍しいことではないが、従来のダーウィン理論の中では「解決しにくいやっかいな問題」となった。

しかも、競争に劣らず協力（共生）も数多い。長期的に考えれば、協力、さらには利他主義が必要なのは誰でもわかる。だが、短期的に見ると、これらの妥当性はあやしくなる。

ダーウィンは、ひとつの生態系の中での種の「比例数」について語っている。ひとつの種が無くなると生態系が崩壊し、そのうちに新しい別の生態系が置き換わる場合もある。多くの種は追い出されてしまう。だが、その生態系に生息するさまざまな生物は、比例数を維持する必要性も認識しており、協力と競争のバランスをとることによってそれを行うように進化してきたと私には思えるのである。

**したがって結論を言えば、母なる自然とは、  
ダーウィンが我々に信じ込ませたよりも優しく、  
もっと「賢い」存在であると私は考える。**

ご協力いただいた次の方々に深くお礼申し上げます:

Professor Arto Annala, Helsinki University

Professor František Baluska, University of Bonn

Dr Mauno Rönkko, University of Eastern Finland

**ご清聴ありがとうございました**

詳しい情報はこちら: [www.kbaverstock.org](http://www.kbaverstock.org)

とくに“Genes without prominence”  
というタイトルのエッセー