

平成 30 年度後期 生物学の世界---生命の起源と進化---
まとめと考察
(平成 30 年 12 月 14 日 (金))

番号_____ 氏名_____

1. ニックレーンは何故、生命の始まりにエネルギー的な考察が必要と考えたのか。その経緯について考える。空欄に適切な語句を記入せよ。

ニックレーンが生命の始まりにエネルギー的な考察が必要だと考えたのは、純粋に現存生物の仕組みを観察し、全生物で行われている仕組みが、進化の当初から存在したに違いないと考えたからである。すなわち、全ての現在生物は食べ物を摂取し、それを絶えず代謝することにより自由エネルギーを得て生きている。これは動的な流れであり、1 方向性である（つまり (A 自由エネルギー変化 (ΔG) がマイナスの反応である)。講義の中では、このように生物が絶えず動的なエネルギーの流れの中で生存していることを (B 散逸構造)、英語で言うと dissipative structure という概念で捉えた。地球上で生命が誕生した時にもこのような動的なエネルギーの流れは必要であったと考えられ、これが (C 熱水噴出口) で生命が誕生したのではないかという考えに結びついている。

2. 何故、生命が誕生した場としてアルカリ熱水噴出口がふさわしいのかを議論する。空欄に適切な語句を記入せよ。

全ての現存生物が同一祖先（本講義における LUCA）から進化した、という考えの大きな根拠の 1 つとして全ての現存生物の遺伝物質が共通であることが挙げられる。この物質は (A DNA) である。驚いたことに、全ての現存生物は共通の方法により、エネルギーを産生している。すなわち全ての生物が (B プロトン) の濃度勾配を利用してエネルギーを産生している。これは、全ての生物が (B) の化学浸透によりエネルギーを産生しているということである。注目すべきことに、アルカリ熱水噴出口ではこの (B) の濃度勾配が天然で存在する。したがって、最初の生命はこの天然の濃度勾配から得られるエネルギーを利用してアルカリ熱水噴出口で誕生した可能性が高い。

3. 細菌は 40 億年の間、何故細菌のままなのか、について考える。空欄に適切な語句を記入せよ。

細胞が複雑になるためには、ある程度細胞を大きくすることが必要である。細菌の場合、化学浸透によってエネルギーを産生する経路は、(A 細胞膜) に存在する。したがって、例えば細菌の半径を今の 2.5 倍大きくしたとすると、(A) の表面積は 6.25 倍になり、エネルギー産生も 6.25 倍になる。しかしながら、その体積は 15、6.25 倍になっている。もし、体積あたりのエネルギー消費量がサイズを変える前後で変化しないと仮定すると、エネルギー供給は需要に追いつけないことになり細胞は死滅する。基本的には、体積を大きくするためにはその空間を充填するための (B タンパク質) が必要であり、(B) 合成には多くのエネルギーを必要とするため、体積あたりのエネルギー消費量はある一定値以上小さくすることはできない。(B) 合成の鋳型になるのは DNA であり、結局ある DNA からどれほどの (B) を作っているのかを測る目安としてニックレーンは (C Energy per gene) という概念を導入した。(C) を原核生物と真核生物で比べると真核生物で約 3 ケタ大きい。これはわかりやすく言うと、真核生物は 1 遺伝子あたり多くの (B) を作ることが可能になった生物であると言い換えることができ、これを達成できたために真核細胞は大きくあり得るのである。

番号_____ 氏名_____

細胞を大きくしても、体積あたりのエネルギー消費量を変えないためには、細胞膜を内部に折りたたんで表面積を増やすか、内部に細胞内小器官を作りその膜において ATP を産生するかのいずれかである。

次に細胞膜におけるエネルギー産生を制御する場合のことを考える。現在の真核生物にみられるように、核で DNA から mRNA を転写し、細胞質で mRNA からタンパク質に翻訳した後で細胞膜にタンパク質を輸送するシステムを考える。もし、エネルギーを産生している細胞膜で何か異変が生じ、エネルギーを産生するタンパク質の量を瞬時に増やさなくてはならないような場合が生じたと仮定する。遠く離れた細胞核に DNA がある場合にはこのような急な事態には対応できない。しかしながら、エネルギーを産生している膜の直下に DNA がある場合にはこのような事態にも迅速に対応できる。

以上、細胞内表面積を単純な球体よりも大きくする、および膜の近くにエネルギー産生に重要な DNA を位置させる、という 2 つの条件を満たすには、細胞がある細胞を自分の中に取り込むという (D 細胞内共生 (endosymbiosis)) しか方法がないことがわかる。したがって、上記で論じたようなエネルギー的な制約が細菌を単純な小さな細胞のまま長期間封じ込めたということであり、(D) だけが、上記で論じたエネルギー的な制約から細菌を解き放った。

4. 細胞内共生から何故、イントロン、核膜が進化することが必然だったのか、を考える。空欄に適切な語句を記入せよ。

細胞内共生というのは、ある細胞の中に違う細胞が侵入するということであり、細胞にとっては非常事態である。おそらく、細胞の中の細胞も、宿主細胞の中で増殖しようとするわけであるが、そのような場合、複製する DNA が短いほど複製するための時間が少なくてすみ増殖に有利である。したがって、細胞の中で増殖する細胞の DNA はどんどん縮小する。

ところで、細菌の中には転写された後に自分自身を切り出し、その後逆転写して自らの DNA を周囲に拡散する能力のある (A Group II self-splicing intron) という DNA が存在する。この自分自身を切り出すための分子機構は、現在真核細胞が pre-mRNA に存在する intron を切り出すスプライソソームという複合体の分子機構に似ている。仮にこれらが共通祖先だとするならば、細菌に存在した (A) が、DNA が失われる過程の中で古細菌のゲノムに移動し、これが拡散したものである可能性がある。侵入してきた細菌の DNA が失われる過程の中で、これらの DNA が古細菌のゲノムに移動しイントロンが誕生したという説には説得力がある。

現在、真核細胞の遺伝子が何故、イントロンで分断されているのかは不明であり、遺伝子が分断されることに何らかの利点があるとは思えない。しかし、上記のように細胞内共生の過程の中で不可避免的に生まれたのであれば納得がいく。ところでこのような余分な部分が遺伝子に加わってしまったために、真核生物の遺伝子はイントロンが切断される前に翻訳されてしまうと全く出来損ないのタンパク質が生じてしまう。役立つタンパク質を合成するためには、翻訳が始まる前にイントロンの切断 (スプライシング) が完了されなくてはならない。もし、ゲノムとリボソームの間に膜を作って、ゲノムとリボソームの接触を回避することができれば、スプライシングが終わって成熟した mRNA ができるまでの時間を稼ぐことができる。これが核膜のできた進化論的理由ではないかと考えられる。

5. 細胞内共生から何故、性、2つの性、生殖系列の分化、個体の死が必然的な結果となるのか、を考える。空欄に適切な語句を記入せよ。

生物が性を持つということは、子孫を増やすことにおいて両親が持つ遺伝子の相補的でゲノム全体にわたる遺伝子組換えが起こるということである。体細胞分裂のみで増殖する細菌ではこれがおこらない。性の利点が最大となるのは、変異の速度が早い時、選択圧が強い時、集団の中に variation が多い時であり、細胞内共生が始まった時にまさにこの3つの条件が最大となった。このように、細胞内共生において性の進化のための選択圧が最大となったために性は進化したものと考えられる。それでは“2つの性”の問題はどうであろうか。2つの性の特徴は、ミトコンドリアが必ず片方の親から伝わるという(A ミトコンドリアの片親遺伝)である。(A)は、受精し生まれてくる個体群において、ミトコンドリアの多様性を増すことに役立っている。

サンゴや海綿、植物などの生物は発生の早期の段階で生殖系列を発生早期に分化しない。すなわち、これらの生物では体細胞分裂を繰り返した末梢組織において、生殖細胞が分化する。このように生殖細胞の分化を発生の後期まで遅らせるということは、生殖細胞の中でミトコンドリアの多様性を増加することに役立っている。つまり、生殖だけを考えるならば末梢組織のミトコンドリアの多様性は進化にとって有利に働く。

ところで今、多細胞生物がさらに複雑化して、ヒトのような多臓器を持つ多細胞生物に進化した時のことを考える。このような生物にとって、細胞分裂を繰り返すごとに末梢の臓器でミトコンドリアの多様性が増すことはその臓器にとって大きな害となりえる。出来の悪いミトコンドリアを持つ細胞をもとにしてある臓器が発生したとすると、その生物は生存できないからである。生物の死は最も出来の悪い臓器に依存することは注意を要する。このような脅威を解決するためには、ミトコンドリアを持つ生殖細胞のサイズを大きくし受精卵のミトコンドリアの数を多くすればいい。これにより anisogamy、日本語では(B 異型配偶子)が進化したと考えられる。これにより、末梢の臓器不全の可能性は小さくなる一方で、逆に欠点として生殖細胞のミトコンドリアの多様性を減少させた。おそらくこれを補足する機構として(A)は進化したのだろう。

そして進化上のある時点(パストール点)において、大気中の酸素濃度は急激に上昇した。動物はこれを利用して飛躍的に個体としての複雑性を増した(カンブリアの大爆発)。

しかしながら、大気中の酸素濃度の上昇により哺乳動物における DNA の変異率は格段に高まった。こうなると、サンゴや海綿、植物などのように発生の遅い時期に生殖系列が分化するのでは、異常変異が蓄積し過ぎて子孫を残すのには危険度が高くなる。このような状況では発生段階の早い時期に生殖系列を分化させることが進化に有利に働く。このような過程により、生殖系列の発生早期における分化が進化したと思われる。生殖系列の早期分化が完成すると、生殖系列以外の組織(すなわち体細胞で構成される部分)は生殖年齢を過ぎてしまうと進化論的には必要のないものになってしまう。これにより、個体の老化は必然となり、ヒトを含む動物は生殖年齢をすぎると死ぬことが運命づけられた。