

# 生命起源の探求における共通祖先の重要性

小出 良幸<sup>1</sup>

## 要旨

生命起源の探求を進めるために、生命の定義を整理し、その生化学的特徴とセントラルドグマ、共通祖先についてまとめた。生命の共通祖先とはどのようなもので、どのような概念があるかをまとめた。共通祖先には、プロゲノート、FUCA (first universal common ancestor)、コモノートがあり、それぞれ異なった概念があり、出現順序があることを示した。

キーワード：生命起源、共通祖先、セントラルドグマ、プロゲノート、FUCA、コモノート

## 1. はじめに：生命起源の探求

地球形成に関する探求として「地球最初の5億年 (A First 5 Ga of the Earth)」というテーマで、研究を進めている。小出 (2021) では、弁証法的に、地球最初の岩石がどのような姿であったのかを探求した。小出 (2022a) では、地球形成前の状態を太陽系の素材からアプローチを試みた。小出 (2022b) では地球の素材となった未分化隕石から、小出 (2023a) では分化した隕石から、地球最初の5億年を探ってきた。

地球誕生後の5億年間で、生命誕生は非常に重要な出来事である。太陽系形成以前の情報を前提条件として、小出 (2023b) では、地球生命の起源を、地球外から探っている研究分野からのアプローチに関する方法論をまとめた。小出 (2024) では、地球生命の起源への地質学的束縛条件を整理した。現在、生命起源に関する生物学的アプローチを中心に研究を進めている。生物学も多岐にわたった学問体系で、生命起源に関しても、現生生物の生化学的アプローチ、合成化学的アプローチ、古生物学的アプローチ、進化学的アプローチなどさまざまなものがある。

本論文では、まず生命起源に関して重要となる生命と生物の定義が、どのような現状になっているのかを概観していく。次に、生物を構成する化合物とそれぞれの役割を把握していく。生命誕生を探求する上で、

生命の共通祖先が存在する根拠とは何か、共通祖先にはどのような区分や種類があり、それぞれがどのような概念であるのかを整理し、どのような順序で誕生したかをみていく。

## 2. 生命とは

現生の生物学では、生物体が素材になるため、試料が豊富な研究分野となる。実物試料を自由に計測、分析ができ、多種多様なデータに基づいた、生物像を描くことが可能になる。豊富な情報による生物像には、生命や生物の定義が不可欠となるだろう。

### 2.1 生命の定義

生命起源を考えるに当たり、まずは、生命の定義を明らかにしておく。

ドーム・丸山 (2018) は、生物には、生命の体の内と外を隔てるための境界となる「膜」の存在、糖と栄養塩を消費する化学反応によってエネルギーをつくりだす「代謝」の機能、生命を後世に残すための「自己複製」の機能という3つの要素が必要で、なおかつ生命を維持するために「物質やエネルギー」の供給が「継続」している必要があるとした。

Kitadai & Maruyama (2018) は、これまでの研究をまとめ (例えば、Nakashima *et al.*, 2001; Ruiz-Mirazo *et al.*, 2004, 2014 など)、生命の機能として、区画化 (compartmentalization)、代謝 (metabolism)、複製 (replication) の3つを挙げた。また、小出 (2023b) で

<sup>1</sup> 札幌学院大学 人文学部こども発達学科;  
koide@sgu.ac.jp.

は、個体、代謝、複製、進化の4つを挙げた。

これらの「定義」は、「生命」としながらも、「生物」に関する共通した特徴や機能を抽出したもので、「生命」の本質に関する定義とはいえない。岩波生物学辞典（八杉他編，1998）で「生命」とは、「生物の本質的属性として抽象されるもの」とした。この項では、「生物」という用語を用いて、「生命」を定義している。だが同じ辞典にて「生物」の項は、「生命現象を営むもの」と記されている。同じ項目内で「両者の関係はトートロジー」となっているともしている。生物の「すべてを満足させる定義を与えることはできない」とし、生命の「必要十分条件を規定するのはむずかしい」とされている（鈴木，1998）。

生命・生物における必要十分条件が示せないため、厳密な定義はできない。だが、「個体」（individual）という属性は不可欠な十分条件になるだろう。また、「代謝」（metabolism）と「複製」（reproduction）は必要条件になっていると考えられる。「複製」から副次的に生じる「進化」（evolution）という機能（複製の十分条件）も満たすべき条件になるであろう。さらに、生命を維持するためには、外界と物質やエネルギーの供給と排出が「継続」し、「代謝」も「継続」していくことが必要条件になる。

生命の定義として、個体、代謝、複製、進化（後述）が概念と機能として必要となるだろう。

## 2.2 個体

生物の認識には、境界が必要である。なぜなら、生物自身と周囲（環境、外界）、あるいは内と外を区別するために、境界をもっていなければならない。内外を区分されたものが「個体」（細胞）となるため、境界は重要である（小出，2023b）。同様の概念を、Kitadai & Maruyama（2018）では「区画化」と呼び、「構成要素をまとめて保持し、環境から区別し「内と外の境界、生物の基本単位」として、周囲の環境から個体を識別するために必要なものとした。内外の認識や区分だけでなく、物質の出入りを判別するためにも個体は必要な概念となる。

境界は、「細胞膜」からなり、グリセロールリン酸分子にエステル化された2つの脂肪酸によるリン脂質の二重の層構造が、基本的構成となっている。

## 2.3 代謝（物質交換，エネルギー循環の継続）

「代謝」とは、外から物質を取り込み、個体内で化学反応（分解、合成）をおこない、反応後に不要になった物質を排出すること（小出，2023b）、あるいは「エネルギーおよび物質資源を捕捉し、熱力学的平衡から逃れる」ために生まれ、「物質交換，エネルギー循環の継続」をしている（Kitadai & Maruyama, 2018）とも捉えることもできるだろう。

細胞膜を通して物質を個体内に取り込んで利用し、不要になったものを外に排出する。入ってくる物質と出ていく物質は、その形状や状態が変化している。個体内では、物質の分解（異化）で生じるエネルギーを利用して、物質合成（同化）していく。リン酸から合成されたアデノシン三リン酸（ATP）として化学エネルギーとして個体内に保存し、異化する時に生じるエネルギーを代謝に利用される。これらの代謝の作用は、タンパク質が担っている。

物質交換の結果として代謝が起これ、エネルギー循環が継続することで、個体の機能（生命）を維持していくことになる。

## 2.4 複製（増加，分裂）

個体の情報の保存は、有機塩基、糖、リン酸から構成される核酸（nucleoside）のDNA（デオキシリボ核酸 deoxyribonucleic acid）が担っている。個体の特徴や、個体内でおこなわれている代謝も、すべて情報（遺伝情報）としてDNAに記録されている（小出，2023b）。複製とは「遺伝情報を処理し、子孫に伝達」するもので、個体の「増加，分裂」でもある（Kitadai & Maruyama, 2018）。

分裂は、細胞が2つになることだが、前提として代謝により個体が2つに分かれるほどの量や質を有していなければならない。そのような条件が整った後、同じ情報を持ったDNAが2つに分かれることで、同質の細胞が2つできることになる。

細胞の複製は、生物学において重要なプロセスで、個体が増えていくことで、種が保存され、維持されていくことになる。

## 3. 生物を構成するもの

次に、生物を構成する基本的な化合物と、それぞれの成分の役割をまとめていく。

表1 化合物による生命の判定

化合物の種類	地球生物内での形態	地球生物内での機能	地球生物起源	化石	無機的起源	隕石	地球外生命起源
炭化水素 脂肪族 芳香族	ワックス	組織表面の保護	構造異性体の存在 奇数炭素数優位	構造的特異性の有無 奇数炭素数優位の有無	構造異性体がない 炭素数選択性なし	多種発見	構造的特異性の存在
糖類	炭水化物	エネルギー貯蔵, 細胞壁	まれに直接生成 光学活性	有機物の二次的過程で形成 光学活性	形成可能 簡単なもの形成	多種発見 未発見	光学活性の存在
アミノ酸	タンパク質	触媒, 膜物質	20種, $\alpha$ アミノ酸, 光学活性 (L-体)		多数の種類, ラセ ミ体, 光学不活性	多種発見	光学活性の存在
核酸塩基 脂肪酸	核酸の材料 脂肪	自己複製, 遺伝 細胞膜形成	4(5)種 炭化水素鎖の炭素10~30, 直鎖, 偶数優位	4種全てかいずれか検出 鎖状部の構造的選択性, 光学活性	形成可能 形成可能, 炭素数 10以下, 構造的選 択性なし	一部発見 多種発見	数種だけから構成
脂質*	遊離または結合	細胞膜の機能維持	低エントロピー分子の存在	芳香族へ変化			

\* : 脂肪酸以外の脂質。データは池田 (1997) のコンパイルと Banin *et al.* (1992) による。

### 3.1 生物を構成する基本的な化合物

生物は多様な構成物からできている。単細胞の構成成分 (大腸菌の場合) を物質の重量比で見ると、水が70% (以下 wt% と表記する) となっている。その他の分子のほとんどは炭素を含む化合物である有機化合物で (表1), その大半は高分子である。主なものとして、タンパク質 (16.5 wt%), 核酸 (1.3 wt%), 脂質 (6.0 wt%), 炭水化物 (3.5 wt%), 無機塩類 (0.5 wt%), その他の成分 (Mo, Fe, Co, Cu, Zn, Mn, I, B など) を合わせて2.2 wt% となっている。

ヒトを元素組成で見ると、酸素 (O) が66.1 wt%, 炭素 (C) が16.9 wt%, 水素 (H) が9.5 wt%, 窒素 (N) が4.5 wt%, カルシウム (Ca) が1.2 wt%, 硫黄 (S) が0.65 wt%, リン (P) が0.55 wt%, ナトリウム (Na) が0.23 wt%, カリウム (K) が0.19 wt%, 塩素 (Cl) が0.16 wt%, マグネシウム (Mg) が0.04 wt% となる。一般に、生物の成分は、水 (酸素, 水素), 炭素, 窒素で96 wt% になり、残りの4 wt% はカルシウム, リン, カリウム, ナトリウムといった栄養塩となる (Guyton, 1976, 1991; Watson *et al.*, 1980)。

だが、生物の化学組成は、定まったものではない。それは、生命が自然界に対して開放系となり、生体内の成分が、水とともに内と外で移動し、変化し続けているためである (ドーム・丸山, 2018)。

### 3.2 成分の役割

生命を構成している物質は、有機化合物として、タンパク質 (アミノ酸, ポリペプチド), 脂質 (脂肪酸, グリセリン, ステロイド), 炭水化物 (単糖類, 二糖類, 多糖類), 核酸などがある。非有機化合物として、水、

無機塩類, 鉱物がある。それぞれの構成成分が、生物内で果たしている役割をみていく (表2)。

#### 3.2.1 水

生命体を構成する物質の中で、水 (H<sub>2</sub>O) が最も多いことは上述した。種により65~95 wt% とその含有量に幅がある。含有量もさることながら、水の持っている特徴が生物において大きな役割を果たしている。

酸素原子 (電気陰性度3.5) は水素原子 (2.1) よりも電気陰性度が高いため、ひとつの水分子内で、電荷に偏りが生じ、極性分子 (polar molecule) となる。水は、他の極性分子と混合しやすく、よい溶媒となる。水に溶けやすい性質を親水性、溶けにくいものを疎水性という。細胞は水が主成分なので、水に溶解しやすい親水性物質が重要になる。脂質を除く生体分子は、高分子化合物を含めて、多くは極性分子となっているため、水に溶けやすい。

水分子の水素結合は、凝集力としても働く。凝集力で水分子が連なり細い水の列状態になれば、水分子として移動できる。植物が根から高い木の葉まで水を吸い上げられるのも、凝縮力によるものである。

水は、酵素反応の場の提供、二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) と酸素 (O<sub>2</sub>) などの分子交換, pH などの化学的変化緩衝などの役割も果たす。さまざまな水の特性を、生物はうまく利用している。逆に、水がこのような特徴をもっているため、水の中で、生命が誕生し、生命維持ができるともいえるのだろう。

#### 3.2.2 タンパク質

タンパク質は、主に炭素 (C), 水素 (H), 酸素 (O)

表2 生命の構成成分

---

1	<p><b>水</b>          構成：<math>H_2O</math>, 65~95%          機能：酵素反応の場を提供, 比熱の大きいため温度の急変防止, <math>CO_2</math> と <math>O_2</math> のガス交換, 細胞内の pH を緩衝</p>
2	<p><b>タンパク質</b>          構成：C, H, O (N や S を含むこともある), 多数のアミノ酸がペプチド結合          機能：酵素の本体として代謝を推進, 脂質と結合して生体膜を構成, 核酸と結合して DNA, RNA を形成          分類          単純タンパク質：アミノ酸のみからなる；アルブミン, インシュリン, リゾチーム, ヒストン          複合タンパク質              核タンパク質：核酸と結合；デオキシリボ核タンパク質              糖タンパク質：糖と結合；ムチン              リンタンパク質：リン酸と結合；ペプシン, カゼイン          色素タンパク質：色素の結合；ヘモグロビン, シトクロム, カタラーゼ, ペルオキシダーゼ</p>
3	<p><b>脂質</b>          構成：C, H, O (P や N を含むこともある, 炭水化物より O が少ない)          機能：リン脂質は生体膜（細胞膜）の成分, エネルギー源, ビタミン, ホルモン, 光合成の補助色素          分類          単純脂肪              脂肪（油脂）：脂肪（固体）と油（液体）の総称, グリセリンと脂肪酸からなる；オリーブ油, 肝油, バター, ラード          複合脂質              リン脂質：脂肪酸の1つがリン酸化合物；生体膜の成分              糖脂質：構成成分として糖を含む；生体膜の成分              ステロイド：ステロイド核をもつ化合物；ビタミン D, コレステロール, 性ホルモン, 副腎皮質ホルモン              カロテノイド：色素；カロテン, キサントフィル</p>
4	<p><b>炭水化物</b>          構成：C, H, O (H と O は 2 : 1 の割合で結合)          機能：エネルギー源          分類              単糖類 <math>C_6H_{12}O_6</math>；五糖類：デオキシリボース, リボース. 六糖類：ブドウ糖, 果糖, ガラクトース              二糖類 <math>C_{12}H_{22}O_{11}</math> (2分子の単糖類に分解)；麦芽糖 (<math>\rightarrow</math>ブドウ糖<math>\times</math>2), ショ糖 (<math>\rightarrow</math>ブドウ糖+果糖),                  乳糖 (<math>\rightarrow</math>ブドウ糖+ガラクトース)              糖類 <math>(C_6H_{10}O_5)_n</math> (多数の単糖類に分解)；デンプン (<math>\rightarrow</math>多数のブドウ糖), グリコーゲン (<math>\rightarrow</math>多数のブドウ糖),                  セルロース (<math>\rightarrow</math>多数のブドウ糖)</p>
5	<p><b>核酸</b>          構成：塩基+糖+リン酸からなる5種類のヌクレオチド；アデニン (A), グアニン (G), シトシン (C), チミン (T),                  ウラシル (U)          機能：自己複製や遺伝, タンパク質合成を支配          分類              DNA デオキシリボ核酸：二重鎖（二重らせん）, 核内, 分子量6,000,000~16,000,000, A, T, G, C, 遺伝子本体,                  RNA を合成              RNA リボ核酸：一重鎖, 分子量150,000~500,000, A, U, G, C, タンパク質を合成              mRNA：伝令 (messenger) RNA, 細胞質              RNA：転移 (transfer) RNA, 細胞質              rRNA：リボソーム (libosomal) RNA, 核小体と細胞質, 全 RNA の85%</p>
6	<p><b>ATP アデノシン三リン酸</b>          構成：塩基(アデニン)+糖(リボース)+リン酸<math>\times</math>3          機能：1, 2個目のリン酸が高エネルギーで結合, エネルギーの貯蔵と発生</p>
7	<p><b>無機塩類</b>          構成：Na, K, Ca, Mg, Cl, Fe, S, P, Cu, Zn, Co, Mn, B など          機能：Na 動物体液の浸透圧調整；P, Ca リン酸カルシウムとして骨の成分；Mg 植物のクロロフィルの成分；              Fe ヘモグロビンやシトクロムの成分；Cu, Zn, Co, Mn, B 酵素の補助因子</p>

---

生命を構成している成分の特徴をまとめたもの。詳細は本文参照。小出 (1998) を修正。

(他にも、窒素 N や硫黄 S を含むこともある) からなる。多数のアミノ酸がペプチド結合したポリマーとなっているが、地球生物は20種のアミノ酸のみを利用している。タンパク質は、それぞれが特定の側鎖 (R 基) を持ち、アミノ酸の配列によって多様な三次元構造を持つ。

単純なタンパク質と、複合したタンパク質がある。単純タンパク質はアミノ酸のみからなり、複合タンパク質には他の有機物の結合したもので、核酸と結合した核タンパク質、糖と結合した糖タンパク質、リン酸と結合したリンタンパク質、色素の結合した色素タンパク質などがある。

タンパク質は、生化学的な反応 (例えば、食物の消化、代謝経路の制御、DNA 複製など) を促進したり媒介したりする酵素としての役割がある。また、脂質と結合して生体膜、筋肉組織、結合組織など、生体における重要な構造的要素となっている。他にも、グリコーゲンやタンパク質自体がエネルギーを貯蔵する役割がある。核酸と結合して DNA や RNA を形成し、また遺伝子の発現を制御する遺伝子制御の役割、細胞表面では、外部からの刺激を感知し、応答反応をする受容体としての役割、酸素の輸送 (ヘモグロビン) や脂質 (リポ蛋白) などの物質輸送の役割、病原体や異物に対する免疫 (免疫グロブリンなど) を調節して生体を守る役割など、多様な役割を果たしている。

### 3.2.3 炭水化物

炭水化物は、糖質とも呼ばれ、炭素、水素、酸素からなり、水素と酸素が 2 : 1 の割合で結合し、 $C_m(H_2O)_n$  という一般式で表される。ただし、窒素を含むアミノ糖のような例外もあり、化学的に修飾された糖質は、特別な官能基を備えている。

糖の数によって、単糖類、二糖類、多糖類に分類される。単糖類 ( $C_6H_{12}O_6$ ) は、炭素の数によって、五炭糖類 (デオキシリボース、リボースなど) と六炭糖類 (ブドウ糖、果糖、ガラクトースなど) に細分される。

二糖類 ( $C_{12}H_{22}O_{11}$ ) は、2つの単糖がグリコシド結合でつながったものをいう。麦芽糖 (maltose)、ショ糖 (sucrose)、乳糖 (lactose) がある。麦芽糖は2個のブドウ糖 (D-グルコース D-glucose) から、ショ糖はブドウ糖と果糖 (fructose) から、乳糖はブドウ糖とガラクトース (galactose) からなる。

多糖類とは、多数の単糖類がグリコシド結合したも

のをいう。多糖類は  $(C_6H_{10}O_5)_n$  という一般式で表される。デンプン (starch)、グリコーゲン (glycogen) やセルロース (cellulose) は、多数のブドウ糖からなる。

単糖 (例えばグルコース) は、代謝でエネルギーとして利用される。だが、多糖類 (デンプンやグリコーゲンなど) は、多くの生命体がエネルギーの貯蔵に利用される。また、細胞膜の糖質 (グリコシル化脂質) や、セルロース、キチン、ペクチンなどの細胞の構造成材、ヒアルロン酸やリポ多糖などは生体防御作用を担っている。

### 3.2.4 核酸

核酸は、塩基と糖、リン酸からなり、ヌクレオチドとして、アデニン (adenine は A と略される)、グアニン (guanine G)、シトシン (cytosine C)、チミン (thymine T)、ウラシル (uracil U) の5種類がある。自己複製や遺伝、タンパク質合成を担っている。核酸は、炭素原子の間がリン酸を介して強く共有結合 (ホスホジエステル結合) したデオキシリボ核酸 (DNA) とリボ核酸 (RNA) に分類される。

DNA は、二重鎖 (二重らせん) の構造をもち、原核生物では細胞内に分散して存在し、真核生物では核の中にある。分子量は600万~1600万ほどで、A, T, G と C からなる。遺伝子の担い手となる。DNA は、RNA の合成をする。

RNA は一重鎖で、分子量は15万~50万で、A, U, G と C からなる。RNA はタンパク質を合成する役割を持つ。RNA は、機能によって mRNA, tRNA と rRNA に区分できる。mRNA は伝令 (messenger) の意味で、tRNA は転移 (transfer) の意味で、細胞質に存在する。rRNA はリボソーム (ribosome) の意味で、全 RNA の85% を占める。核小体と細胞質に存在する。

DNA のヌクレオチドの塩基配列に暗号化 (コード) されている遺伝暗号は、三つのヌクレオチドの組み合わせ (コドン codon) からできている。遺伝情報は DNA から mRNA へと転写され、mRNA 上のコドンがタンパク質合成の際にアミノ酸に翻訳される。これが前述したように、DNA → (転写) → RNA → (翻訳) → タンパク質 (ポリペプチド) になる。転写と翻訳の一連の過程を「遺伝子の発現」といい、この流れを「セントラルドグマ」(central dogma) と呼ぶ。しかし、

RNA → (逆転写) → DNA という機能があることから、ポリペプチドの情報を核酸へ保存されることがある。この機能があることから、「RNA ワールド仮説」として生命起源で重要となってきた。

### 3.2.5 脂質

脂質は、主として炭素、水素、酸素（他にリンPや窒素Nを含むこともある）からなり、炭水化物より酸素のモル比が少なくなっている。多数の非極性共有結合からなるため有機溶媒（クロロホルム、エーテル、ベンゼンなど）には溶けるが、疎水性から水を避けて凝集しやすくなる。

脂質は、単純脂肪と複合脂質に分類される。単純脂肪はグリセリンと脂肪酸がエステル結合したものである。脂肪や油脂とも呼ばれ、固体の脂肪と液体の油（液体）の総称である。生体の単純脂肪はオリーブ油、肝油、バター、ラードなどがある。複合脂質は、脂肪酸が1つのリン酸化合物のリン脂質（phospholipid）、構成成分として糖を含む糖脂質（glycolipid、生体膜の成分）、ステロイド核をもつステロイド（ビタミンD、コレステロール、性ホルモン、副腎皮質ホルモンなど）、色素のカロテノイド（カロテン、キサントフィルなど）に区分される。

リン脂質やコレステロールは生体膜（細胞膜）の成分となり、構造的役割を果たしている。カロテノイドとクロロフィルは、植物が光エネルギーを捉える役割がある。高いエネルギー密度を持つ脂肪は、エネルギーを蓄える機能を担っている。ステロイドと修飾された脂肪酸はホルモン（性ホルモンや副腎皮質ホルモンなど）の合成に必要で、脂溶性ビタミン（A、D、E、Kなど）を吸収する。また、神経軸索を被覆する脂質は絶縁体の役割、動物の脂肪は断熱材や緩衝材の役割や、陸上生物の表面の油やワックスは水を弾き水の蒸散を防ぐ役割もある。

### 3.2.6 無機塩類

無機塩類は、ナトリウム（Na）、カリウム（K）、カルシウム（Ca）、マグネシウム（Mg）、塩素（Cl）、鉄（Fe）、硫黄（S）、リン（P）、銅（Cu）、亜鉛（Zn）、コバルト（Co）、マンガン（Mn）、ホウ素（B）などである。無機塩類は、含有量が少なくても、生体内で重要な役割を担っている。

ナトリウムイオン（Na<sup>+</sup>）と塩化物イオンは、細胞

外液の主たる成分で、細胞外と細胞内との間の浸透圧を調整し、浸透圧の調整によって水分量が調節される。ナトリウムイオン、カリウムイオン（K<sup>+</sup>）、カルシウムイオン（Ca<sup>2+</sup>）、塩素イオン（Cl<sup>-</sup>）などの電解質は、神経細胞に刺激を伝え、筋肉を収縮させる役割がある。リンとカルシウムはリン酸カルシウムとして骨や殻、歯などの成分となる。マグネシウムは植物のクロロフィルの成分である。鉄は血色素ヘモグロビンとして血液の重要成分となり、酸化還元酵素シトクロムの成分でもある。銅、亜鉛、コバルト、マンガンとホウ素は酵素の補助因子となる。

### 3.2.7 ATP アデノシン三リン酸

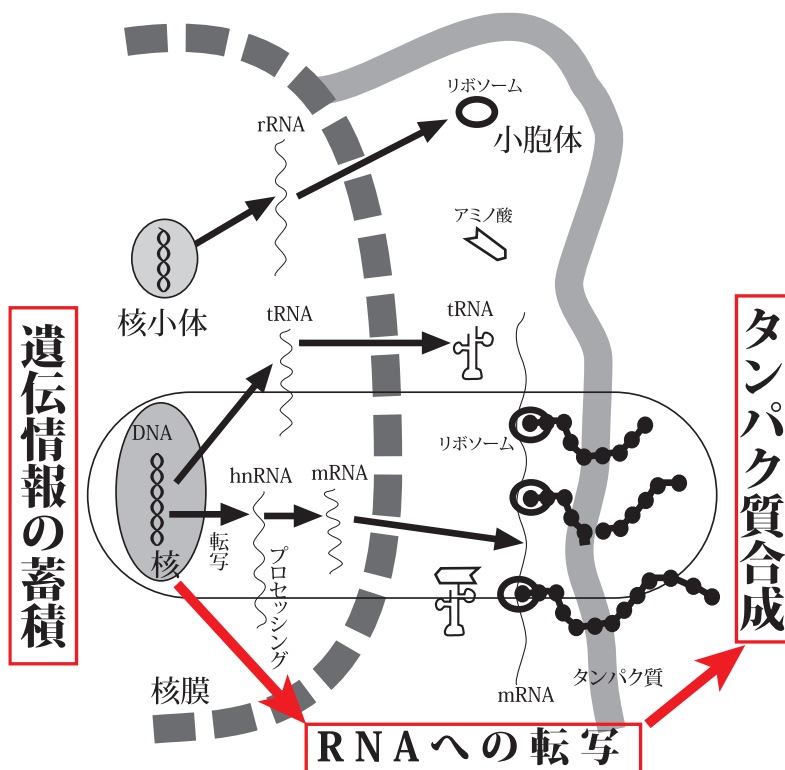
ATP（アデノシン三リン酸、adenosine triphosphate）は、核酸塩基のアデニンと糖（リボース）、3個のリン酸からできている。ATPは、細胞内のエネルギー代謝（貯蔵と発生）に利用されるため、生体には重要な化合物となる。エネルギーを貯蓄したり、発生したりする機能をもっているため「エネルギー通貨」とも呼ばれる。

ATPの合成には、ADP（アデノシン二リン酸 adenosine diphosphate）に、さらに無機リン酸基（H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>）がつくためには、リン酸同士の電気的発熱を抑えながらの脱水結合となるが、そこには高エネルギーが必要となる（高エネルギーリン酸結合と呼ばれる）。逆に、ATP内のリン酸同士の結合が切れる（異化する）時、多くのエネルギーが放出されることになる。細胞内に多くのATPを保存していれば、化合物としてエネルギーを蓄積することになる。

ATPは、ミトコンドリアが水素イオンの濃度勾配のエネルギーを使ってADPを酸化的リン酸化すること、光合成として光によって葉緑素の励起と水の分解で生じるエネルギーを使った光リン酸化すること、糖の分解（解糖）や好気呼吸によるクエン酸回路や、ATPが加水分解するときに放出されるエネルギーや、グルコースの分解（解糖）、筋収縮のときの運動エネルギーなどで合成される。

## 4. 進化の仕組み

次に、生物を構成する各種の物質が、どのような順序で形成されてきたかを考えていく。それは、現生生物の化学的仕組みから、生命起源を探求していくアプローチとなる。



## セントラルドグマ

図1 セントラルドグマ

セントラルドグマ (central dogma) の機能とそれを担う分子を模式的に示した。

### 4.1 セントラルドグマ

DNA が情報を保存している。DNA からタンパク質までの定まった流れは、セントラルドグマと呼ばれる (Crick, 1958)。セントラルドグマは、情報伝達の仕組みで、現生の生物のすべてに成立する基本的な原理と考えられている。

DNA がセントラルドグマにおける情報の流れのはじまりになる (図1)。DNA 内の遺伝情報が RNA ポリメラーゼによって読み取られ、メッセンジャー RNA (mRNA) が合成される。mRNA の情報は、tRNA によって核から細胞質へ運ばれていく。リボソーム (リボソーム RNA, rRNA) によってタンパク質へ翻訳されていく。

生命誕生時には、生命の情報伝達の仕組みも成立しておらず、DNA もタンパク質もなかったところから、化学合成が進んでいくことになる。生命誕生において、情報 (DNA) が先に成立したか、機能 (タンパク質) が先かは不明である。

### 4.2 タンパク質ワールド仮説と RNA ワールド仮説

情報は DNA が担い、その翻訳や転写は RNA が、細胞内の重要な機能はタンパク質が担っている。DNA の情報は、DNA ポリメラーゼと RNA ポリメラーゼによって読み取られていく。いずれもタンパク質であり、翻訳を担うリボソームにもタンパク質が含まれている。つまり、セントラルドグマの全てプロセスで、タンパク質が関与しなければ、遺伝情報の流れが機能しないことになる。

生物誕生へのプロセスにおいても、化学進化として、多様な有機物を含む溶液ができ、その中にアミノ酸と核酸塩基もあったはずである。アミノ酸が集まりタンパク質となり、やがて代謝能力を持つようになる。ある種のタンパク質には自己複製能力があったため、生命の前駆体 (リボヌクレオオプロテイン) といえる世界が出現しうる。そこから、生命起源には、事前にタンパク質がなければならぬと考えられ、「タンパク質ワールド仮説」が生まれた。

一方、RNA にも触媒機能を持つことが発見された (Cech *et al.*, 1981; Guerrier-Takada *et al.*, 1983)。生命

起源においても、核酸塩基がRNAとなり自己複製機能を持ち、そこに触媒反応を持つRNAが出現すれば、代謝機能が発生していく。RNAがあれば生命起源にたどり着けるという「RNAワールド仮説」も唱えられた (Gilbert, 1986)。

タンパク質が先というタンパク質ワールド仮説か、RNAが先というRNAワールド仮説かは、まだ決着を見ていない。いずれが先でも、タンパク質とRNAが形成された後は、当初一本鎖だったRNAが、二本鎖RNAとなって安定し、遺伝情報を蓄積するDNAへとようになっていく。

タンパク質とRNA、そしてDNAが一つの入れ物に入って個体として連携しはじめると、生物誕生となる。生物として連携しはじめると、DNAは情報を保存に特化し、RNAは遺伝情報を読みタンパク質を生成する機能を充実させ、タンパク質は代謝機能を充実させていくという、それぞれの機能が細分化、分業化、高度化できるようになる。やがて、自己複製に進化の機能が生まれることで、生物というシステムが誕生する。

## 5. 共通祖先

生命誕生を考えるに当たり、すべての生命における祖先 (共通祖先) は、どのような存在で、どのような概念であったのか、そこにはどのような根拠が存在するのかをまとめていく。共通祖先の概念はひとつではなく、形成過程ごとに異なった概念として捉えていく必要があるようだ。

### 5.1 共通祖先の存在の根拠

現生のすべての既知の生物には、共通する基本的な生物学的な仕組みを持っている。ひとつは上述の「セントラルドグマ」である。遺伝情報がDNAに記録されていること、DNAからRNAに必要な遺伝情報が伝えられ (転写)、RNAがタンパク質を合成していく (翻訳) という情報の流れが、すべての既知の生物に共通している。

DNAは、4つの塩基からなり、二重らせんの構造をもっている。塩基の選択や組み合わせや構造が共通している。タンパク質および酵素によってDNAからRNAへ遺伝情報が転写されるが、その時使用されるタンパク質が限定され、なおかつ中核機能を実行する酵素として、ひとセットだけが、すべての生物に存在

する。RNAからの翻訳では、タンパク質は20種類のアミノ酸で構成されていることも、すべての生物で共通している。

これらすべての生物に共通した特徴は、多数の祖先から発生したのでは達成できず、一つの祖先に端を発すると考えなければならない。

他にも、同じアミノ酸をコードするために、DNAの中に複数のコドンが存在しているが、このような冗長性は進化では説明できず、もともとの祖先がもっていた特徴が、重複して引き継がれたと考えられる。また、入手可能な遺伝データの統計分析から、系統樹を作成していくと、ひとつの祖先に収斂すること (Theobald, 2010) を示されてきた。

生物は自己複製時に変化することがあり、DNAに変化の情報が記録されると、変化が複製されていく。この仕組みが継続することで、単純なものから複雑なものへという進化が進んでいく。進化とセントラルドグマを受け入れると、一つの祖先からすべての現生生物が進化してきたことになる。そこからすべての生物の「共通祖先」という概念にたどり着く。

### 5.2 共通祖先の概念

1970年代の科学的アプローチとして、遺伝子による系統関係は示せたが、無根系統樹しか作成できなかった。無根系統樹とは、根を持たない系統樹で、分類群の相互の関係のみを示しており、進化的な関係は示せない。

かつては、動物界、植物界、菌界、原生生物界、モネラ界の5界分類がなされていた。古細菌の発見により、原核生物が古細菌と真正細菌からなること、古細菌が特異で、原核細胞と真核細胞も異なっていることから、Woese & Fox (1977b) は、真正細菌 (バクテリア)、古細菌、真核生物の3ドメイン (domain) に区分した。より原始的な古細菌と真核生物が似ているが、真正細菌とは全く異なっていた。そこから、古細菌と真正細菌が系統的に分かれる前の生物が、共通祖先だと考えた (Woese, 1979)。

このような分類体系の整理から、共通祖先という概念が導かれたが、研究のアプローチや考え方の違いにより、プロゲノートの他に、セナンセスター (cenancestor)、LUCA、LUA、コモノートなどいろいろな名称が提案されてきた (Yamagishi & Oshima, 1993; Yamagishi *et al.*, 1998)。



それぞれの名称には、意味や概念の異なったものが混在しているので、以下で整理していく。

### 5.2.1 プロゲノート

Woese & Fox (1977a) では、真正細菌、古細菌、真核生物の区分にドメインという概念を導入したとき、それぞれに異なった祖先としてプロゲノート (progenote) を持つと考えて提案した。プロゲノートは、細胞としての独立した形態と代謝機能をもっていたが、ゲノムがばらばらの状態で、自己複製ができて、遺伝の仕組みが成立しておらず、それぞれの種間で交換できるものを想定していた (Woese, 1998)。セントラルドグマが確立される前の段階で、遺伝の機構が確立されず、ゲノムとはなっていないものと考えた。

プロゲノートの段階の生物は、多種存在していて、個々の種がそれぞれ固有の遺伝の仕組みを試行錯誤しており、やがてそれらの仕組みを確立できたものが、3つのドメインのそれぞれの共通祖先となったと考えた (Woese, 1987)。

3つドメインすべての祖先としてプロゲノートを用いられたこともあった (Doolittle & Darnell, 1986) が、このような使用は混乱を招く。また、遺伝の仕組みをもったいくつかの祖先にあたる生物をセンアンセスター (cenancestor) という用語を用いた。だが、センアンセスターは、漠然とした概念になっているので、ここでは使わないことにする。

本論文で、プロゲノートとは、細胞膜とタンパク質による代謝機能、RNA による自己複製が可能な個体で、生物と呼べるものとする。RNA が中心となり、同じ個体をつくるための遺伝情報を DNA として保存する機構はないか、あっても DNA から一方向に遺伝情報が流れるセントラルドグマがまだ成立していないものに対して使うことにする。

### 5.2.2 FUCA

遺伝機能をもった最初の生物にあたるものが「初生共通祖先 (最初の普遍的共通祖先)」(first universal common ancestor : FUCA) と呼ばれている (Weiss *et al.*, 2018)。

FUCA は、細胞膜と代謝機能を持ち、DNA と RNA によるセントラルドグマも成立していたものをいう。多様な試行錯誤の結果、成立してきたものなので、代謝も DNA も RNA も、その構成分子、反応、仕組みも

いろいろな組み合わせが可能であった。生物として機能できるものでも、多様な構成分子による多様な代謝機能を持ち、遺伝の塩基も多様な組み合わせを持ち、そのメカニズムも多様であった。FUCA は、多種、同時に存在したと考えられる。

この状態は、種の誕生、種の確立を意味しているであろう。また、すべての FUCA は、DNA による自己複製をしていたことから、複製ミスが起こるメカニズムも組み込まれていたことから、進化の機能も内包していたはずである。その結果、種ごとの生存競争も起こっていたであろう。

### 5.2.3 コモノート

FUCA (初生共通祖先) のうち、現生生物につながる系統の共通祖先を「最終共通祖先 (最終普遍的共通祖先)」(last universal common ancestor : LUCA), 「最終普遍的祖先」(last universal ancestor : LUA), 「コモノート」(commonote) などと呼ぶ (Fox *et al.*, 1980)。LUCA, LUA, コモノートは、現生の生物の共通性から考えられた祖先となり、3ドメインの真正細菌と古細菌と真核生物のすべての最終共通祖先となる。最終共通祖先を、以下ではコモノートと呼ぶことにする。

コモノートは、すべての現生生物に共通した機能として、細胞膜と代謝の仕組み、セントラルドグマによる遺伝システムを持ち、それらの組織をつくっている化合物も、共通した組み合わせのものが使われている。現生生物のもっと最初の祖先で、たった一種の FUCA につながるものになる。

有根系統樹の作成の方法が確立されると、多くの遺伝子を用いた系統樹が作成された。そこから、もっとも根本に当たる生物が、共通祖先に近いものとなる。系統樹による方法は、現生の生物の遺伝子から探っていくものなので、コモノートの探求に当たる。

現生生物が、ひとつの共通祖先からはじまっていることは何度か述べてきた。だが、プロゲノートも FUCA も存在せず、複雑な過程をくぐり抜け、生命と呼べるものにたどり着いたのが、コモノートがたった一種という可能性があるのだろうか。それはあまりに低い確率ではないだろうか。

では、多数の FUCA から生存競争による唯一の勝者が、コモノートたった一種だったのだろうか。それも考えられない。なぜなら地球には多様な地球環境、類似の環境も多地域で存在したはずで、それぞれを

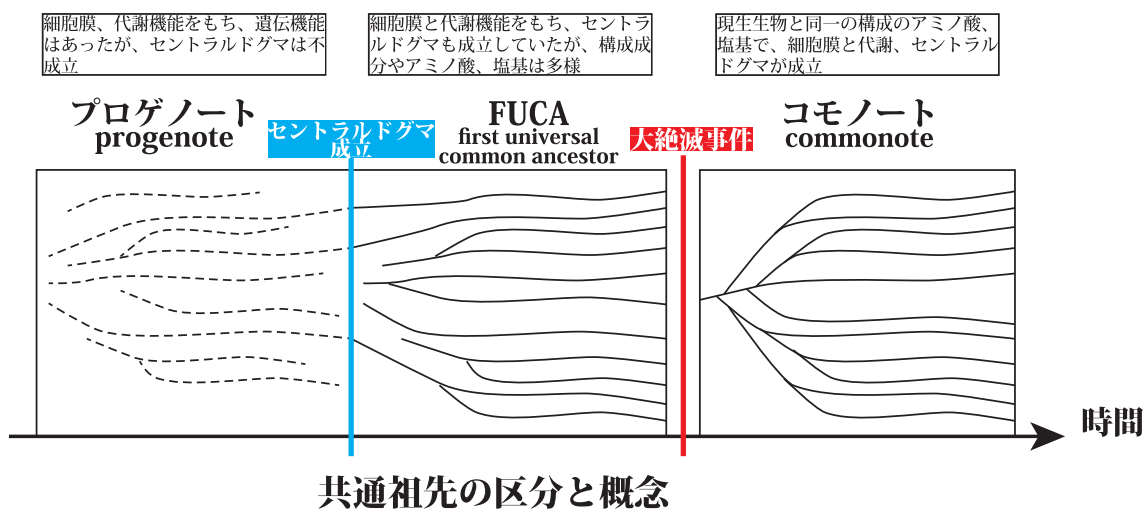


図2 共通祖先の概念と順序

現生生命の共通祖先として提唱されているプロゲノート、FUCA、コモノートを概念の特徴と出現順序、想定される事件を模式的に示した。

ニッチとし、適応していた生物群がいたはずである。生存競争では、すべての環境やニッチをたった一種で制覇することはできそうにない。

現在の生物の共通祖先として一種に絞られていなければ、コモノートは生まれえない。そのため、FUCAの段階で、たった一種のFUCA（コモノートになっていくもの）以外、全種が大絶滅していなければならない。一種のFUCAだけが生き残る原因、事件、現象とは何だったのか。そのような事件は、まだ見つかっていない。

遺伝子解析が進むにつれて、これまで同一系統とされていた真正細菌の中に、別系統が現れてきたことから、今後も多様な生物種が発見されていくはずである。もしかすると、コモノートにはたどり着かない共通祖先、FUCAの生き残りが発見されるかもしれない。そうなれば、ここまでの議論に修正を迫るであろう。

### 5.3 共通祖先の出現順序

「共通祖先」として、プロゲノート、FUCA、そしてコモノートという異なった概念があることを示してきた。いずれも生物進化の初期段階ではあったが、それぞれが概念の違いから、出現の順序も決まってくる。以下では出現順序をまとめていく（図2）。

もっとも初期の生物としてプロゲノートが出現した。プロゲノートは、細胞膜に囲まれた個体で、代謝機能、RNAの遺伝機能による自己複製のメカニズムをもっていたため、生物の定義を満たしていた。だが、DNAからはじまるセントラルドグマが成立していな

いため、安定した遺伝ができる生物とはいえない。遺伝子交換も頻繁に起こり、絶滅や新しいタイプの生物の出現など、盛衰の激しい状態であっただろう。そのため、多数のプロゲノートが存在していたはずである。

次に、細胞膜と代謝機能に加え、DNAによるセントラルドグマが成立したFUCAが出現する。DNAの誕生も試行錯誤の結果であるはずで、似た機能とシステムをもった生物が、何度も、多種、出現していたと考えられる。同じセントラルドグマというメカニズムであっても、いろいろな分子が、代謝やRNA、DNAなどには使用可能なので、多様な種が出現していたと考えられる。種の間では、生存競争もおこっていたはずである。

そして、ある時、大きな異変によって大絶滅が起こり、たった一種のFUCAのみが生き残り、それがコモノートとなる。

これらの順序は、あったとしても、それぞれのはじまった年代が不明である。だが、順序がわかっているので、それらは重要な束縛条件になっていくであろう。

## 6. さいごに：境界の不確かさ

生命起源へ、地球の初期から時間経過とともに辿っていく研究方法として生物合成学や生化学がある。そこからたどり着けるのは、プロゲノートやFUCAの化学的特徴や多様性の把握である。これらは、生命起源が異なる場所や時期にいくつもの種類が出現したという「多発説」として説明できるだろう。

現生生物の研究からたどり着けるのは、コモノート

である。現生生物を研究対象としているため、生命誕生における斉一説的アプローチが可能な学問体系となる。

いずれの探求手法も異なっており、それぞれメリットとデメリットがあり、最初の生命を探求していくとき、これらの相違点には注意が必要である。

プロゲノートや FUCA の間には、セントラルドグマの成立が違いとして存在するが、何度も試行錯誤があったはずなので、その境界は不明瞭になるであろう。FUCA とコモノートの間には、概念的に大きなギャップがあった。明瞭な境界が想定される。そこで起こっていたはずの大絶滅事件は、全く不明だが、一度の大きな異変であったのではないだろうか。

コモノート以前に存在したはずの多種多様なプロゲノートや FUCA から、コモノートだけが生き残ったことになる。その過程を実証的に探るすべは、今のところない。だが、両者の間をつなぐのは、地質学や古生物学アプローチによる束縛条件が重要となる。ただし、入手した試料に年代情報を付け加えることは可能だが、化学的証拠は少ないので、検証や整合性には注意が必要である。生命起源における共通祖先の探求は、まだまだ道は遠い。

## 参考文献

- [1] Banin, A., Clark, B. C. and Wanke, H., (1992). Surface chemistry and mineralogy. In Kieffer H. H. *et al.*, eds., Mars, 594-625, University of Arizona Press, Tucson.
- [2] Cech, T. R., Zaug, A. J. and Grabowski, P. J. (1981). In vitro splicing of the ribosomal RNA precursor of Tetrahymena: involvement of a guanosine nucleotide in the excision of the intervening sequence. *Cell*, 27, 487-496.
- [3] Crick, F. H. C. (1958). On Protein Synthesis. *Symp. Soc. Exp. Biol.* XII, 139-163.
- [4] ジェームズ・ドーム・丸山茂徳 (2018). ハビタブルトリニティモデルと太陽系におけるハビタブルプラネットの存否. *地学雑誌*, 127, 5, 609-618.
- [5] Doolittle, W. F. and Darnell, J. E. (1986). Speculations on the early course of evolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 83, 5, 1271-1275.
- [6] Fox, G., Stackebrandt, E., Hespell, R., Gibson, J., Maniloff, J., Dyer, T., Wolfe, R., Balch, W., Tanner, R., Magrum, L., Zablén, L., Blakemore, R., Gupta, R., Bonen, L., Lewis, B., Stahl, D., Luehrsén, K., Chen, K. and Woese, C. (1980). The phylogeny of prokaryotes. *Science*, 209, 457-463.
- [7] Gilbert, W. (1986). Origin of life: The RNA world. *Nature*, 319, 618.
- [8] Guerrier-Takada, C., Gardiner, K., Marsh, T., Pace, N. and Altman, S. (1983). The RNA moiety of ribonuclease P is the catalytic subunit of the enzyme. *Cell* 35, 849-857.
- [9] Guyton, A. C. (1976). *Textbook of Medical Physiology*, Fifth ed. W.B. Saunders, 1194 p.
- [10] Guyton, A. C. (1991). *Textbook of Medical Physiology*, Eighth ed. W.B. Saunders, 1014 p.
- [11] 池田幸雄 (1997). 火星隕石と火星生命. *月刊地球*, 19, 403-412.
- [12] Kitadai, N. and Maruyama, S. (2018). Origins of building blocks of life: A review. *Geoscience Frontiers*, 9, 4, 1117-1153.
- [13] 小出良幸 (1998). 生命の起源—宇宙生物学へのアプローチ—. *神奈川県立博物館研究報告 (自然科学)*, 27, 1-30.
- [14] 小出良幸 (2021). 地球最初の岩石への概念的弁証法的探求. *札幌学院大学人文学会紀要, 札幌学院大学総合研究所*, 110, 49-77.
- [15] 小出良幸 (2022a). 太陽系の素材からのアプローチ—地球創成 5 億年の解明への方法論—. *札幌学院大学人文学会紀要, 札幌学院大学総合研究所*, 111, 65-108.
- [16] 小出良幸 (2022b). 未分化隕石から地球最初の 5 億年へのアプローチ. *札幌学院大学人文学会紀要, 札幌学院大学総合研究所*, 112, 29-73.
- [17] 小出良幸, (2023a). 分化した隕石から探る地球最初の 5 億年. *札幌学院大学人文学会紀要, 札幌学院大学総合研究所*, 113, 29-78.
- [18] 小出良幸 (2023b). 地球生命起源へのアプローチの方法論：地球外からのアプローチ. *札幌学院大学人文学会紀要, 札幌学院大学総合研究所*, 114, 89-153.
- [19] 小出良幸 (2024). 地球生命の起源への地質学的束縛条件. *札幌学院大学人文学会紀要, 札幌学院大学総合研究所*, 115. (印刷中).
- [20] Nakashima, S., Brack, A., Maurel, M. C., Maruyama, S., Isozaki, Y. and Windely, B. F. (2001). Introduction to geochemistry and the origin of life. In: Nakashima S., Maruyama S., Brack A. and Windley B.F., eds., *Geochemistry and the Origin of Life*. Universal Academy Press, Inc., Tokyo, Japan, 1-13.
- [21] Ruiz-Mirazo, K., Briones, C. and de la Escosura, A. (2014). Prebiotic systems chemistry: new perspectives of the origins of life. *Chemical Reviews*, 114, 285-366.
- [22] Ruiz-Mirazo, K., Pereto, J. and Moreno, A. (2004). A universal definition of life: Autonomy and open-ended evolution. *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 34, 323-346.
- [23] 鈴木俊彦 (1998). スーパーニッポニカー日本大百科全書+国語大辞典 Windows 版. 小学館, CD-ROM 版.
- [24] Theobald, D. L. (2010). A formal test of the theory of universal common ancestry. *Nature*. 465, 7295,

- 219-222.
- [25] Watson, P. E., Watson, I. D. and Batt, R. D. (1980). Total-body water volumes for adult males and females estimated from simple anthropometric measurements. *American Journal of Clinical Nutrition*, 33, 27-39.
- [26] Weiss, M. C., Preiner, M., Xavier, J. C., Zimorski, V. and Martin, W. F. (2018). The last universal common ancestor between ancient Earth chemistry and the onset of genetics. *PLOS Genetics*, 14, 8, e1007518.
- [27] Woese, C. R. (1979). A proposal concerning the origin of life on the planet earth. *Journal of Molecular Evolution*, 13, 95-101.
- [28] Woese, C. R. (1987). Bacterial evolution. *Microbiological reviews*, 51, 2, 221-271.
- [29] Woese, C. R. (1998). The universal ancestor. *Proceedings of National Academy of Science USA*, 95, 6854-6859.
- [30] Woese, C. R. and Fox, G. E. (1977a). The concept of cellular evolution. *Journal of Molecular Evolution*, 10, 1, 1-6.
- [31] Woese, C. R. and Fox, G. E. (1977b). Phylogenetic structure of the prokaryotic domain: the primary kingdoms. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 74, 11, 5088-5090.
- [32] Yamagishi, A. and Oshima, T. (1993). Proposals on the group of Archaeobacteria and naming of the last common ancestor. In *International Workshop on Molecular Biology and Biotechnology of Extremophiles and Archaeobacteria*, 40-41.
- [33] Yamagishi, A., Kon, T., Takahashi, G. and Oshima, T. (1998). From the common ancestor of all living organisms to protoeukaryotic cell. In *Wiegel J. and Adams M., Eds., Thermophiles: The key to molecular evolution and the origin of life?* Taylor & Francis Ltd., London, 287-295.
- [34] 八杉龍一・小関治男・古谷雅樹・日高敏隆編 (1998). *岩波生物学辞典 第4版 CD-ROM版*.

## Importance of the Common Ancestors in the Search for Origin of the Earth's Life

Yoshiyuki KOIDE<sup>1</sup>

### Abstract

The search for the common ancestors plays an importance role in origin of the Earth's life. At first, the definitions of Earth's life checked. The biochemical features and central dogma of life summarized. The concepts of common ancestors of life; progenitors, FUCA (first universal common ancestor) and commonote, extracted and summarized.

**Keywords:** Origin of the Earth's Life, Definitions of Life, Common Ancestors, Progenote, FUCA, Commonote.

---

<sup>1</sup>Department of Child Development, Faculty of Humanities, Sapporo Gakuin University: koide@sgu.ac.jp.

