

地球生命の起源への束縛条件と生物学的新展開

小出 良幸¹

要 旨

本論文では、生命起源に関わるさまざまな束縛条件と新しい生物学展開をまとめた。生命起源には冥王代に成立したハビタブルトリニティが前提条件として不可欠であることが地質学的に示された。生命の構成物形成のための化学合成の条件が生物学的に明らかにされてきたが、すべての条件を満たすひとつの環境はなく、複雑な過程や場が想定しなければ合成されない。生命誕生までの地質学的時間の束縛条件も厳しいものとなっている。生命誕生への新たな展開（ゲノム解析技術の開発、CPR 生物群の発見）から、共通祖先を探れる可能性がでてきた。

キーワード：生命起源、束縛条件、メタゲノム解析、環境 DNA、CPR

1. はじめに：生命起源への束縛条件とその打開に向けて

これまで「地球最初の5億年（A First 5 Ga of the Earth）」として、地球形成前の「地球前史」から、地球形成直後の「冥王代」にかけて研究してきた。その中で、地球生命の誕生は、もっとも重要な出来事ののひとつになり、生命起源は古くから議論されているが、未だに解明されていない。

最初の生命は、「共通祖先」と呼ばれているが、そこには異なった特徴をもった概念で示されるプロゲノート（progenote）、FUCA（first universal common ancestor）、コモノート（commonote）がある。もっとも初期の生物はプロゲノートで、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もっていた。次が、FUCAで、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ていた。最後に、コモノートが出現する。すべての現生生物はコモノートから進化してきた。多数いたFUCAから、たったひとつのFUCA（コモノートになるもの）以外、全種の大絶滅が起こった。その実態は不明であるが、現生生物の特徴は、そのような異変を想定させる。

科学の各分野の進展に伴って、生命起源に関わる束

縛条件も明らかになってきた。生物学においては、ヒトゲノムの解読も終わり、DNAの各部分の役割や働きの解明、DNAや細胞内の構造体を用いた系統分類、生体物質の生化学的解析などが著しく進んできた。現生の地球生物の膨大な知見から、生物起源への束縛条件も明らかになってきた。

本論文では、生命起源に関わる束縛条件として、地球初期のハビタブルトリニティが前提条件となること、生命の前駆物質の合成条件について、時間的束縛条件について、また誕生場に関する条件についてまとめた。

いずれの束縛条件も厳しいものになり、打開するためのブレークスルーが必要になる。生命起源に関して、DNAの分析、ゲノム解析に関する画期的分析技術が進展してきた。また、特異な現生生物の発見（例えば、古細菌やCPR生物群）は、生命起源に関して重要な指針を与える可能性もでてきた。それらも本論文でまとめていく。

2. 束縛条件1：地球初期の状態

地球で生命が誕生する上で、地球の初期状態が前提条件となる。惑星形成のシナリオや天文学的事件も関与してくるので、以下では生命誕生に関わる初期地球の様子をみていく。

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

2.1 生命誕生の場の条件

これまで系外惑星の探査では、生命が誕生するための条件として、水の存在が重視され、ハビタブルゾーン (habitable zone 生命生存可能領域) という概念で検討されてきた。ハビタブルゾーンとは、惑星表層に水が長期間存在し、海洋が維持できる条件を意味する。だが、生命誕生のためには、海洋以外にも重要な条件がある。

生命体を構成する主要な元素として、炭素、酸素、水素、窒素、そして量は少ないが、リン、カリウム、アルミニウム、カルシウムやその他の元素 (硫黄、ナトリウム、塩素、マグネシウムなど) が必要不可欠となる。天体表層でそれらの元素は、海洋から水素、酸素、硫黄、ナトリウム、カリウム、塩素などが供給される。その他にも生命に必要な元素の供給源として、大気 (炭素と窒素など) や大陸 (リン、カリウム、アルミニウム、カルシウム、マグネシウムなど) が存在しなければならない。

つまり、海洋、大気、大陸が、天体表層で共存している必要がある。そのような状態はハビタブルトリニティ (habitable trinity) と呼ばれる。3つが接するトリプルポイント (triple point) の存在が、重要だと指摘された (Dohm & Maruyama, 2015)。トリプルポイント周辺が、生命誕生の場になっていくと考えられたからである。

2.2 裸でドライな初期地球：地球の材料物質からの制約

太陽系形成は、以下のシナリオが考えられている。

始原的隕石中のコンドリュールの存在から、すべての固体物質が気化する1700°C以上の高温状態になったことがわかる (永原, 1998)。その後、温度低下が起こり、気相から固相が形成されていく。そのプロセスは、隕石から復元され、始原的隕石の構成物から、その条件が推定されている。

小出 (2022) では、以下の条件が整理された。アルミナ (1400°C)、ペロプスカイト (1300°C)、メリライト (1200°C) などの高温凝縮物からなる CAI (Ca Al-rich inclusion) やアメーバー状のカンラン石包有物 (amoeboid olivine inclusion AOI) ができた。その後、カンラン石 (1100°C)、輝石 (1000°C)、斜長石 (900°C) などの珪酸塩成分からなるコンドリュールが形成された。さらに温度が低下して、鉄の酸化 (480°C)、硫化

鉄 (380°C)、含水鉱物 (30°C) ができ、隕石の基質 (matrix) となる。

始原的隕石は、小惑星帯から飛来して地球に落下したものである。落下年代は古くはなく、惑星形成時の小惑星帯の情報を見ているわけではない。惑星の材料は、太陽系形成時に、惑星の軌道内に存在していた固体物質が、主体になるはずである。太陽系形成時の地球軌道の条件を考慮し、そこに存在したであろう材料物質を推定して検討していく必要がある。

原始太陽系で固相ができる位置は固化線と呼ばれる。固化線は、内側から、粘土鉱物の固化線 (1.8~1.9 AU)、有機物の固化線 (2.1 AU)、水 (H₂O) が氷になるスノーライン (水の固化線のこと2.7 AU)、二酸化炭素 (CO₂) の固化線 (10 AU)、そして一酸化炭素 (CO) の固化線 (40 AU) の順に形成されていたと考えられる (小出, 2023a)。この条件では、地球軌道には含水鉱物や水、有機物は含まず、かつ還元的な環境だったと推定された。現在の隕石では、Eコンドライトのような特徴をもった固体物質が形成されたと考えられる (丸山他, 2018; Javoy, 1995; Javoy *et al.*, 2010)。

そのような材料物質から、原始地球は大気も海洋もない「裸」で (Maruyama *et al.*, 2013)、乾燥した「ドライ」 (丸山他, 2018) な状態で誕生したと想定された。これらは、新たな地球初期の束縛条件として重要となってきた。

2.3 ジャイアント・インパクトによるリセット

ジャイアント・インパクト説 (giant impact 巨大衝突説) は、太陽系初期のシミュレーションから明らかになってきた (Wetherill, 1985; Halliday, 2008)。ジャイアント・インパクトは45.2億~44.4億年前に起こったと推定され、衝突後1カ月~1年ほどの短期間で月が形成された (Ida *et al.*, 1997)。ジャイアント・インパクト説では、月と地球の化学的類似性と差異も説明され (Canup, 2004)、月でのマグマオーシャンの形成も説明できる。

ジャイアント・インパクト以前の地球は、Eコンドライト様物質から形成されたため、大気も海洋も存在しない「ドライで裸」の還元的な天体であった。衝突によって、それまでの原始地球で形成された地殻からマントル (もしくは地球の核) までが、完全に再構成されることになる。それまで、原始地球がどのような状態であっても、ジャイアント・インパクト以降、新

たな成分や条件で、地球表層の活動が再スタートしていく。

原始地球は、ジャイアント・インパクト以降、月とは異なった独自の変遷をたどっていくことになる。新たに、地球独自のマグマオーシャンが形成され、やがて固化し、始原的な地殻ができていくことになる（小出, 2024）。

2.4 冥王代の初期地殻：限定される表層環境

ジャイアント・インパクト以降、地球表層で形成されたマグマオーシャンは、無水の状態が維持される。なぜなら、衝突天体も無水の状態であったことが、現在の月から想定されている（Arai & Maruyama, 2017）。

Maruyama *et al.* (2018) は、初期地球の構成岩石を次のように考えた。上部地殻は、無水のマグマオーシャンがそのまま固化した超苦鉄質（komatiite コマチアイト）と、あまり分化しないで鉄が豊富な高密度の苦鉄質の岩石（KREEP 玄武岩・斑レイ岩）からなる。KREEP 玄武岩を伴ったコマチアイトは、海洋地殻になった。また、マグマオーシャンの冷却に伴い結晶分化作用が進み、密度が小さく浮遊した斜長石を多く含んだ斜長岩ができた。斜長岩は、液相に濃集しやすい元素を多く含んでおり、原始大陸（厚さ10~20 km）となった。

下部地殻は、厚さ100 km ほどの KREEP 斑レイ岩からなると考えられた。マントルは、最上部はマグマオーシャンから沈積したカンラン石からなるダナイト（dunite）、その下にはアルミニウムに富む輝石やガーネットからなるメジャライト（majorite）で（丸山, 2022）、下部マントルはレルズライト（lherzolite）が主要な構成岩石となる。

冥王代の地殻を構成していた（斜長岩やコマチアイト、KREEP 玄武岩）からは、生物の前駆物質をつくるために必要な成分が供給できる。斜長岩からはカルシウム、クロム、マグネシウム、鉄、マンガンが、コマチアイトからは鉄、硫黄、ニッケル、マグネシウムが、KREEP 玄武岩からは鉄、硫黄、リン、チタン、亜鉛、モリブデンが供給されていくと考えられた（Santosh *et al.*, 2017）。

だが、水や二酸化炭素、窒素など、生物に必要な成分は、表層には存在しなかったため、生命誕生のための化学進化の段階へは進めなかったであろう。

2.5 揮発成分の供給：後期重爆撃

かつての仮説では、地球の素材は炭素質コンドライトだと考えられていたため、形成初期から水があったと考えられた。それは炭素質コンドライトの年代が太陽系初期を示し、地球表層の大気、海洋、岩石、核などすべての構成物の成分を含んでいたためでもあった。

地球の水は、水素同位体比から炭素質コンドライト物質に由来している（Clayton *et al.*, 1984; Clayton & Mayeda, 1999; Javoy, 1995; Javoy *et al.*, 2010）と考えられた。他の揮発成分である二酸化炭素や窒素も、炭素質コンドライトから供給される。

ところが、上述したように、研究の進展により、地球軌道付近では炭素質コンドライトが材料としてなかったことが明らかになった。一方、水を含んだ揮発性物質は、炭素質コンドライト物質に由来すると考えられる。地球形成以降のある時期に、炭素質コンドライト様物質が揮発成分を運んできたことになる。炭素質コンドライトが、いつ、どのように地球に揮発成分をもたらしたのかが課題となる。

その課題に対して、レイトベニア（Late Veneer）説や ABEL（Advent of bio-elements 生命構成元素の降臨）爆撃（ABEL bombardment）説などの仮説が提唱されているが、その根拠は月の岩石の年代の頻度にある。

アポロ計画によって持ち帰られた月の岩石類の K-Ar 年代から、重爆撃（cataclysm）の痕跡が40~39億年前にピークがあり（Schaffer & Schaeffer, 1977）、激しい隕石の衝突があったと推定された（Cohen *et al.*, 2000）。その事件は後期重爆撃（late heavy bombardment : LHB）と呼ばれた。大量の年代測定により衝突年代が43.7~42.0億年前に90%集中している（Borg *et al.*, 2015; Hopkins & Mojzsis, 2015）ことから、後期重爆撃の時期と考えられた。後期重爆撃は、タングステン同位体組成（ $^{182}\text{W}/^{184}\text{W}$ 比）からも支持されている（Willbold *et al.*, 2011）。

地球形成時に、軌道上の固体物質は、すべて衝突合体していたはずである。後期重爆撃の材料は、地球より外側にある小惑星帯周辺の軌道から由来したことになる。その位置は、粘土鉱物や水の固化線より外に存在した固体物質が衝突したことになる。そこには炭素質コンドライトが含まれていた。

月で起こった後期重爆撃は、太陽系の広域での異変

となるので、同じ軌道にあった地球にも同じ頻度で重爆撃が起こったはずである。炭素質コンドライトの後期重爆撃で、地球へ揮発成分がもたらされたと考えられる。この後期重爆撃によって、地球に大気、海洋、大陸というハビタブルトリニティが整うことになる。

3. 束縛条件2：生命合成条件の困難さ

生命の素材の化学合成実験などから、無機分子から前駆物質が形成される条件が明らかにされてきた。それぞれの反応が明らかになるにしたがって、非常に多様で複雑な条件が必要になることがわかってきた。必要なすべての前駆物質を合成し、生命に至るには、困難が伴うことも明らかになってきた。以下ではその条件を整理していく。

3.1 生命合成の多様で矛盾する条件

生命の前駆物質の合成に至る化学進化には、Kitadai & Maruyama (2018) は8個の条件が、丸山他 (2019) では9個の条件が必要だとした。これらの条件は、共通するものや異なったものもあったので整理する。

条件は、環境条件と材料条件、合成条件の3つに大別できる (小出, 2024)。

環境条件として「高エネルギー反応での結合」、「多様化した地表環境」と「循環性」が挙げられた。「エネルギー源=高エネルギー反応での結合」は、これまで考えられていた合成場ではエネルギーが足りない可能性が指摘された。「多様化した地表環境」では、生命の前駆物質は、合成のためには非常に多くの条件 (pH や酸素分圧、温度や塩分濃度) で、複雑な多様で化学反応が起こらなければならないことがわかってきた。「循環性」とは、多様化した地表環境が周期的な環境変化を意味する。

材料条件として「リンやカリウムなどの栄養素の供給」、「生命の主要構成元素 (C, H, O, N) の供給」と「生命の構成要素と反応性栄養素の地球外から流入」がある。「リンやカリウムなどの栄養素の供給」は、生物の材料として、少なくとも29種類の栄養塩も不可欠なる。これらは地球の地殻を構成していた岩石に由来することになる。「生命の主要構成元素の供給」は、材料のEコンドライトから供給される成分は限られており、炭素質コンドライトなどの外来物質にも由来するため、後期重爆撃以降に生命合成がスタートしたことになる。「生命の構成要素と反応性栄養素の地球外

からの流入」は、隕石などから多様な有機化合物が見つかっており、原始地球にもたらされた可能性がある。地表では実現できない条件 (高真空下での宇宙線照射など) も考えられた (Kitadai & Maruyama, 2018)。

合成条件として「濃縮還元ガス」「乾湿循環」、「ナトリウムの乏しい水」、「淡水」、「アルカリ性 pH」、「凍結温度」と「水中での加熱-冷却サイクル」が必要となるとされた。「濃縮還元ガス=還元気相」や「アルカリ性 pH」は、いくつかの化合物の合成に還元ガス濃縮が必要となることで、「乾湿循環=乾燥/乾燥-湿性サイクル」は、アミノ酸の重合に必要となる。「ナトリウムの乏しい水」は、現生生物にナトリウムイオンをほとんど含まないため、ナトリウムイオンの少ない環境であったことを示唆する。「きれいな湖沼環境=淡水」は、無水の冥王代の表層においては特別な条件で、後期重爆撃以降に達成される。「凍結温度」の条件で、合成物の濃度を高めることができ生体分子がある。「水中での加熱-冷却サイクル」は、ヌクレオチドヌクレオチドが塩基対 (A と U, C と G) として重合されるための条件で、繰り返されることで RNA の複製システムが開始していく可能性がある。

物質合成のためには多様な条件が必要だが、その多くは冥王代の自然環境で実現可能なものである。だが、条件には相反するもの、共存しえないものもある (図1)。

3.2 生命合成のエネルギー源

生命合成には、ハビタブルトリニティでのトリプルポイントが存在しなければ、十分条件を満たせない。環境内、もしくは環境ごとに、物質循環しなければならないが (ドーム・丸山, 2018; Dohm *et al.*, 2018), 物質循環を駆動させるためのエネルギーが必要条件となる。

生命合成のためのエネルギー密度は、 10^{-2} W/cm² 付近に臨界値となり、これ以上のエネルギーが必要となると考えられている (Ebisuzaki & Maruyama, 2017)。もしこのエネルギー密度の臨界値以上の条件が必要ならば、現在の太陽のエネルギー密度 (10^{-11} W/cm²) でも、現在と比べて大きいと推定されている冥王代の太陽エネルギー密度 (Chyba & Sagan, 1992) でも、また現在も有力視されている中央海嶺熱水噴出孔 (mid-oceanic ridge hydrothermal system) のエネルギー密度 (10^{-3} ~ 10^{-4} W/cm²) でも足りないことにな

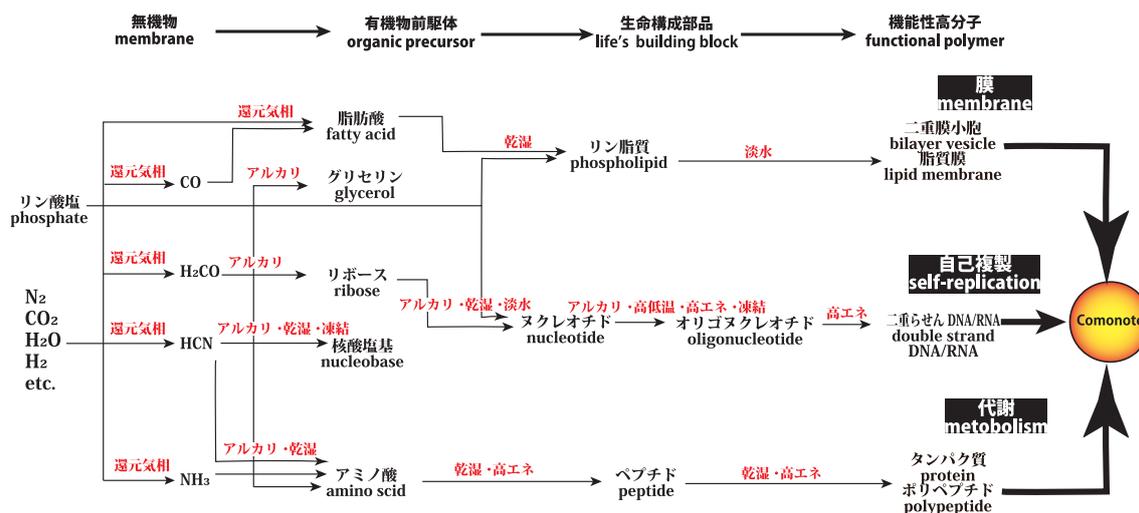


図1 生命の先駆物質の合成条件

Kitadai and Maruyama (2018) と丸山他 (2019) を参考に、小出 (2024) を修正加筆。

る。

さらに、熱エネルギーで化学反応を起こせたととしても、反応物に100℃以上の熱が加わると合成された有機物が分解されてしまう。そのため、必要な有機物が形成されたら、分解される前に、速やかに分解されない低温の環境に移動しなければならない。

冥王代に多くあったと考えられる天然の原子炉からの放射エネルギーが利用されたという提案がなされた (Ebisuzaki & Maruyama, 2017)。放射エネルギーであれば、放射線源が広げれば多様なエネルギー密度ができ、離れば100℃以下の領域もできる。天然原子炉の炉心部では1~10 W/cm²、周辺部では10⁻¹~1 W/cm²のエネルギーが供給される (Meshik *et al.*, 2004)。このモデルでは、周辺部では高温になることなく、有機物の破壊も起こりにくい環境も同時に提供されるという利点がある (Adam, 2016; Adam *et al.*, 2018)。

3.3 天然原子炉間欠泉モデル

生物が用いている物質を合成するために、戎崎他 (2020) は、天然の原子炉に間欠泉を加えた「天然原子炉間欠泉モデル」(nuclear geyser model) を提唱した。

3.3.1 オクロの発見と意義

アフリカのガボン共和国のオクロ (Oklo) で21億年前の天然の原子炉が発見された (Bodu *et al.*, 1971; Ndongo *et al.*, 2016)。天然の原子炉では放射性核種の²³⁵U (7 × 10⁸ 年) が駆動していた。この発見によっ

て、冥王代には天然原子炉が一般的な現象であったことを示唆する。

冥王代の地球には、放射性核種の²³⁵Uが現在より豊富に存在していたはずである (Adam, 2007)。なぜなら、太陽系の材料となった原子の多くは、一つ前の恒星の超新星爆発によって形成されたものである。²³⁵Uも同時に形成されたので、放射壊変していくため、太陽系初期ほど多かったことになる。半減期が7 × 10⁸ 年なので、太陽系初期には現在より30倍以上の²³⁵Uがあったと考えられる。

ウランは液相濃集元素なので、冥王代のマグマオーシャンから分化した斜長岩やKREEP玄武岩には、多く分配されていたはずである。また、後期重爆撃で飛来した鉄隕石には、ウランやトリウムなどの放射性元素の多い鉱物 (ジルコン、モナザイト、シュライバサイト) も含まれていたと考えられる (Maruyama *et al.*, 2013)。

以上の条件から、後期重爆撃後の冥王代には、天然の原子炉が、多数形成されていたと考えられた (澤山他, 2019)。

3.3.2 冥王代の環境と間欠泉

間欠泉は、現在では火山のマグマの熱によって、一定周期で熱水を噴出する活動である。天然の原子炉では、マグマではなく原子炉の放射エネルギーによって水が熱せられて、定期的に噴出されることになる。原子炉内で合成された物質が、間欠泉によって地表に放出されるというモデルとなる。

冥王代の陸地には大きな大陸はなく、島弧のサイズのものだけだったと考えられる(丸山他, 2019)。島弧では、激しい火山活動による噴火口、噴気口、火口湖、火山性碎屑物の堆積があり、険しい山地地形になっていた。流水による侵食、運搬、堆積作用も活発で、海岸には多数の河川の河口、沼や干潟など多様な地形もあったはずである。陸地の複雑で多様な地形に応じて、狭くて局所的だが、多様な環境があり、各種の合成条件があったことになる。そんな多様な環境で多様な条件に、間欠泉からの溶液が巡ることになる。

原子炉に地下水が入ってくることで、間欠泉ができ、噴出した溶液は、地表で新たに成分を含んだものになる。表層の溶液を含んだ流水の一部は、地下水になり、別の原子炉に入っていくこともあるだろう。そのような島弧環境下で多数存在する天然の原子炉から、間欠泉で繰り返し供給される溶液が、多様で複雑な環境で化学合成が繰り返されたと考える仮説である。

原子炉と間欠泉の組み合わせにより、安定した放射エネルギーの連続供給と、間欠泉による溶液の繰り返し供給、多様な環境条件での化学合成、地下水と間欠泉による化合物の循環などが起こり、複雑な化学反応も起こると考えるモデルである。

4. 束縛条件3：時間的束縛条件の厳しさ

上述したように太陽系初期の天体現象において、大きな事件の年代は推定されてきた。それに加えて、地球内の現象は、地質学的素材があれば年代測定が可能である(小出, 2023a)。化石を含む岩石においても、同様に年代決定が可能である。これらの年代値から地球内の時間的束縛条件が与えられていく(小出, 2023b)。

4.1 後期重爆撃からの時間的束縛条件

45.2~44.4億年前にジャイアント・インパクトが起こり、後期重爆撃で揮発成分が供給され、大気や海洋が地球表層に形成される。月の形成期間が短く、地球の表層が通常状態に落ち着くのも短い期間であったろう。地球には形成時とジャイアント・インパクト時に、マグマオーシャンが形成され、初期地殻も形成される。

次に、43.7~42.0億年前(39億年前頃まで継続)の後期重爆撃が起こり、大気と海洋が形成されたと考えられる。後期重爆撃中にも揮発成分が供給され、化学合成が進んでいた可能性はあるだろう。だが、水の存

在は重要だが、有機分子は一般に100℃を越えると不安定になり、多様な化学反応を進めるためには、多段階の過程を進む必要がある。多様な環境が、継続的に維持され、そこでさまざまな条件で化学反応が進まねれば、生命の前駆物質となる溶液ができない。そのため、42億年前までの後期重爆撃が落ち着くまで待たなくてはならないはずだ(Nisbet & Fowler, 1996; Nisbet & Sleep, 2001)。

ハビタブルトリニティは、早ければ43億年前、遅くても42億年前頃には整っていたと考えられる。ハビタブルトリニティが成立後、生命への化学進化が本格的にスタートする。

4.2 化石からの時間的束縛

化石の存在は、生命誕生の証拠の十分条件となる。「最古の化石」は、生命誕生の時代の上限を示す。

南アフリカの35億年前のオルフェルワクト層のチャートから細菌類の化石が発見されている(池谷・北里, 2004)。ほぼ同じ時期に、34億6000万年前以前の西オーストラリア、ビルバラ地域のチャート(ワラウーナチャートとエイバックスチャート)から、原核生物(Schopf, 1993)やメタン菌(Ueno *et al.*, 2006; 磯崎他, 1995)が報告された。

少なくとも35億年前には、化石として形態が残るような生物が存在していたことになる。また、メタン菌は古細菌の一種なので、この時期にすでに生物の種分化が進んでいた可能性がある(Battistuzzi & Hedges, 2009)。生命誕生は、35億年前より以前となる。

グリーンランドの37億年前以前のイスア地殻上帯の堆積岩に含まれる黒鉛から、浮遊生物が存在した可能性(Rosing, 1999)が指摘された。同じくグリーンランドのアキリア島の38億年前の堆積岩中の黒鉛質炭素の地球化学的証拠が示され、生物の存在が示唆されている(Mojzsis *et al.*, 1996; Rosing, 1999; Ohtomo *et al.*, 2013)。

カナダのラブラドル・ヌリアック(Nulliak)地域には、39.5億年前で最古の礫岩、泥質岩、炭酸塩岩、チャートなどの表層岩が分布している。その中にある炭質物の炭素同位体組成が生物由来のものだと示された(Tashiro *et al.*, 2017)。西オーストラリアのジャックヒルズの41億年前の碎屑性ジルコンの結晶内から石墨が見つかった。ジルコン内にあることから、この石墨は初成だと考えられ、その中の有機物の炭素同位体組

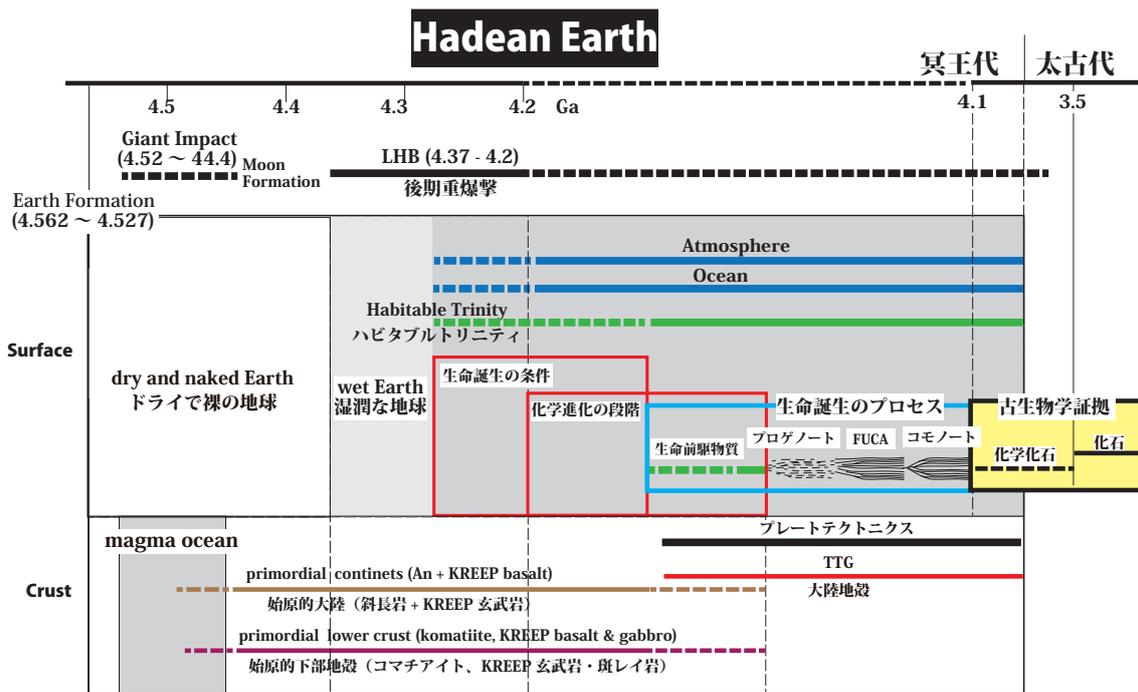


図2 冥王代における地質学的事件と生命誕生

冥王代に起こった地質学的事件と時間的束縛条件、生命誕生の条件、化学進化の段階、生命誕生のプロセス（生命前駆物質、プロゲノーム、FUCA、コモノート）、古生物学証拠として化石と化学化石の年代を、模式的に示した。小出（2024）を修正加筆。

成から、生物の可能性が指摘された (Bell, *et al.*, 2015)。いずれもかなり確実な生命存在の根拠が示されている。間接的ではあるが、41.1億年前以前に古細菌の最初の分岐が起こったという推定もある (Battistuzzi *et al.*, 2004)。

上述のようにいくつかの初期生命の年代が、41億年前ころになっていることは、その時期に生命誕生があったことを示唆している。

4.3 生命誕生への時間的束縛

後期重爆撃が落ち着くのは、42億年前である。化石から少なくとも35億年前には、形態が残るような化石が存在し、化学化石からは41億年前には生物存在の痕跡があったと推定される。以上のことから、コモノートは41億前より以前か、この時期に誕生したことになる (Kitadai & Maruyama, 2018)。

後期重爆撃の終盤が42億年前で、最古の生命の化学的痕跡が41億前とすれば、生命誕生のための化学合成に与えられた期間は、1億年間となる (図2)。ハビタブルトリニティが整って、1億年ほどで生命が誕生したことになる。

この時間間隔は、プロセスの複雑さを考えると、あまりにも短い。傍証だが、102種の化石記録と29の

共通のタンパク質コード遺伝子（ほとんどがリボソーム）への分子時計モデルから、生命合成は5000万年以内で形成可能だという見積りもある (Betts *et al.*, 2018)。

もし短期間で地球生命が誕生するのであれば、ハビタブルトリニティが整った惑星では、生命が簡単に誕生できると推定される。この生命誕生に至る化学合成の期間については、今後も検討を要するだろう。

5. 束縛条件4：誕生場の条件

これまで生命誕生の場として、いろいろな仮説が唱えられてきた。それらの誕生場を整理すると、現在にも存在する環境で形成されたとするもの、冥王代にだけあった固有の環境の特別な条件で生物誕生が起こったとする仮説もある。両者を交えたものもある。ここでは、前者を「斉一的環境条件」、後者を「冥王代固有条件」と呼ぶことにし、それぞれの条件別に概観していく。

5.1 斉一的環境条件

潮溜まり、暖かい海、粘土鉱物や特異な鉱物の表層、熱水噴出孔、地下深部など、さまざまな環境において、太陽光や雷、熱水などのエネルギー源とした誕生場が

提案されてきた。いずれも、現在も存在する斉一的環境条件となる。

5.1.1 潮だまり

Stueken *et al.* (2013) は、潮だまりでは反応物質の濃縮が可能であることから、化学進化の場、生命誕生の場として有効だと考えた。碎屑性重鉱物が利用でき、高い空隙率も有機合成には有効となり、蒸発と濃縮のサイクルや水の活性の勾配も有効だとした。

有機分子濃縮プロセスのために、潮だまり、水環境、鉱物表面 (Bada & Lazcano, 2002) や凍った海洋の一時的な融解帯 (Bada *et al.*, 1994) が、効果的だと考えられた。例えば、鉱物表面では、有機物のモノマーが重合を起こすことが知られている (Lambert, 2008; Cleaves *et al.*, 2012)。粘土鉱物表面が有機物に対して吸着するような界面プロセスが不可欠だとも考えられている (Cairns-Smith, 1985)。

5.1.2 地熱地帯や温泉

細胞内の K^+/Na^+ 比が大きいことが知られている (Mulkiđjanian *et al.*, 2012a)。一方、海水の比は低く、生命活動に必要な、リン酸、マンガン、亜鉛などの濃度も小さい。そのため、海水の化学的特徴が、現在の細胞のものとは異なっていることから、生命誕生の場が海ではないという考えがある。

陸上の地熱地帯の蒸気相では K^+/Na^+ 比が大きく、 H_2S や CO_2 の成分もあり、熱水池には ZnS が蓄積していたと考えられ、なおかつ紫外線が水や水蒸気で遮断された状態で光化学反応を進めることが可能であることから、地熱地帯が誕生場だと考えられた。

マグマの火山ガスから K が濃集してできる温泉として、弧状列島のカルクアルカリ岩系マグマによる火山の噴泉塔も考えられている (Mulkiđjanian *et al.*, 2012b; Stueken *et al.*, 2013; Wachtershauser, 2006)。地熱地帯では栄養元素 (カリウムやリンなど) が継続的に供給され、池の岸で熱水供給の状態によって湿潤乾燥サイクルが起これば、生体分子の重合につながる脱水反応を促進される。乾燥と湿潤の繰り返しは、核酸単量体 (AMP) とリボソームから RNA の重合が起きる (Deamer & Pashley, 1989)。

陸地の地熱地帯には、上述のような生命誕生のための利点がある。

5.1.3 地下深部

地表や熱水などの通常の条件では起こらない化学反応もある。各種の生体物質の原料となるアミノ酸 (例えば、グリシンなど) の重合化には、高温 (150~400°C) で高圧 (5 MPa~5.5 GPa) の条件が有利となる (Ohara *et al.*, 2007; Otake *et al.*, 2011; Furukawa *et al.*, 2012) ことから、地下深部が誕生場だと考えられた。また、地下深部の石灰岩帯で生命が誕生したと考える説もある (中沢他, 1993)。

5.1.4 中央海嶺の熱水噴出孔

1970年後半から深海の調査が進み、深度2500 mの中央海嶺で、130°Cを超える高温の熱水噴出孔が見つかり、そこで好熱性生物 (Corliss *et al.*, 1979; Baross & Hoffman, 1985) や、超好熱細菌が発見された (Jannasch & Mottl, 1985)。好熱性微生物を基盤とする貝やエビに至る生態系が構築されていることもわかってきた (Imai *et al.*, 1999; Smith, 1985; Nuckley *et al.*, 1996)。

現在の深海底は、熱水噴出孔からエネルギーや栄養供給がされているため、安定した環境となっている。冥王代の深海底においても、隕石の衝突や紫外線からも保護されていること、熱エネルギーと化学エネルギー、栄養成分の供給などもあることなどから、生命誕生の場になったという考えが主流になってきた (Takai *et al.*, 2006; Martin *et al.*, 2008; Sousa *et al.*, 2013)。

他にも、潜在的に触媒作用を持つ鉱物の存在 (Baross & Hoffman, 1985; Holm, 1992)、有機分子の無機的合成 (Shock, 1990, 1992; Shock & Schulte, 1998) などにも有利であることから、冥王代の熱水噴出孔で生命が誕生したと考えられた (Corliss *et al.*, 1981; Russell *et al.*, 1988, 1994; Russel & Hall, 1997; Kelley *et al.*, 2001, 2005; Martin & Russell, 2003)。

熱水噴出孔で誕生する生物は好熱性のはずで、系統樹の最も根本に位置する生物も好熱性になっている (Woese *et al.*, 1990; Reysenbach & Shock, 2002)。また、35億年前の熱水の沈殿物に含まれている流体包含物から、微生物によるメタン細菌の痕跡の検出 (Ueno *et al.*, 2006) されたことも傍証となる。

近年まで、もっと支持されてきた仮説となっている。

5.1.5 蛇紋岩化作用：ロストシティ熱水域

海嶺の熱水噴出孔がある海嶺軸から15 km 以上も離

れた熱水域（ロストシティ熱水域）があり、そこで生物群集が発見されている（Kelley *et al.*, 2001; 2005）。ここはマグマ活動がないのに、高温（約70~90°C）の熱水が噴出している特異な地域である。隆起したカンラン岩が海水と発熱反応を起こしている地域と考えられている（Martin & Fyfe, 1970; Lowell & Rona, 2002; Emmanuel & Berkowitz, 2006）。

熱水は、水素やメタンなどの低分子量炭化水素が豊富なアルカリ性（pH 9~11）で（Proskurowski *et al.*, 2008; Konn *et al.*, 2009）で、モリブデン（Mo）やタングステン（W）などの生物学的に重要な重金属を含み（Doring & Schulzke, 2010）、硫化物を溶解させ化学浸透ポテンシャルを提供でき（Helz *et al.*, 2014）、各種の代謝で重要となる成分や条件をもっている（Doring & Schulzke, 2010）。

このようなアルカリ性熱水噴出孔内は、カンラン岩質の地殻が広く分布していた冥王代には、多数存在していたと考えられる。そのため、生命の誕生の場になったとする説である（Russell, 2003, 2007; Martin & Russell, 2007; Russell *et al.*, 1994, 2010）。

他にも、隕石によって形成されたクレーターが、RNA 合成の場となったなどの提案もある（Patel *et al.*, 2015）。

いずれも環境であっても、ひとつの場で生命に必要なすべての化学反応を起こすのは困難である。

5.2 冥王代固有条件

Oparin（1957）が最初に生命誕生を唱えたのは前生物スープ仮説、あるいは初期の水圏仮説と呼ばれるものであった。これは、冥王代に存在した固有の条件を前提とした生命起源の仮説となる。Oparin の仮説には根拠が示されたわけではないが、近年になって科学的根拠が示されるようになってきた。

5.2.1 地球外起源

地球以外で生命が誕生し、地球に飛来したという説は、パンスペルミア説とも呼ばれ、以前からあった（Arrhenius, 1908）。その後も、パンスペルミア説を支持する説は、継続的に提示されてきた（Crick & Orgel, 1973; Hoyle & Wickramasinghe, 1999など）。

かつては根拠が少なかったが、証拠が提示されてきた。地球の材料物質である隕石、特に炭素質コンドライトには、多様な有機物が含まれていることが明らか

にされてきた（Pizzarello *et al.*, 2006; Zaia *et al.*, 2008; Burton *et al.*, 2012）。また、彗星や惑星間塵粒子（IDP: Interplanetary Dust Particle）、あるいは宇宙塵にも有機物が含まれることもわかってきた（Anders, 1989; Chyba *et al.*, 1990）。

現在でも宇宙空間から有機物が供給されており、有機炭素の供給量は 10^8 kg/年にもなると見積もられている（Chyba & Sagan, 1992）。現在の生物圏に有機物として約 6×10^{14} kg が存在しているが、宇宙空間から供給されている有機物が蓄積すれば、大きな役割を担っている可能性がある（Ruiz-Mirazo *et al.*, 2014）。

宇宙空間のどこかで生命に必要な化合物が合成され、隕石や宇宙塵として地球に飛来し、生命の材料となったと考える（Sharov, 2006; Price, 2010）。このような根拠をもったパンスペルミア仮説は、ネオパンスペルミア説と呼ばれている（丸山他, 2019）。

5.2.2 火星起源説

現在の火星は、生物が誕生したり、住んだりするには適さない環境であるが、かつては、栄養素が地球より多いこと（Adcock *et al.*, 2013; Pasek, 2013）、初期火星には水があり、酸化還元状態や温度（Sleep & Zahnle, 1998）が、化学進化には適していたと考えられた。そこから、火星での生命起源が提唱された（Kirschvink & Weiss, 2003）。

火星起源隕石が地球で発見されていることから、火星生命がいても、隕石とともに地球に飛来することが可能である（Weiss *et al.*, 2000）。さらに、火星起源の南極隕石（ALH84001）からは、微生物の形に似た痕跡があると報告された（McKay *et al.*, 1996; Thomas-Keptra *et al.*, 1998, 2000, 2001）。当時は真偽が激しく議論されたが、現在ではあまり支持されていない。

5.2.3 冥王代表層環境と天然の原子炉と間欠泉

冥王代の環境変化がかなり明らかにされてきた。冥王代は、現在の地球とは、明らかに異なった環境であった。冥王代初期には海洋も大気も存在せず、大陸の岩石は斜長岩、コマチアイトやKREEP玄武岩であった。そこに、後期重爆撃によって揮発成分がもたらされ、海洋と大気形成された。

形成当初の海洋はpHが0.1以下で、塩分濃度が現在の10倍であった。淡水は内陸湖と河川水にしかなかった。降雨が流水となり、水の循環がはじまった。

原初大陸地殻の表層に多く分布していた水溶性のウランが濃集して鉱床となり、天然の原子炉が形成された。冥王代の陸地は列島サイズの島弧地殻であったと考えられ（丸山他, 2019）、そこでは各地に多数の小規模な天然の原子炉があった。

地下水の流路にあった岩石から、化学合成に必要な無機栄養塩が原子炉に供給される。原子炉内ではさまざまなエネルギーの条件があり、それぞれで化学反応が進められる。蟻瑞他（2020）は、天然の原子炉での電離した塩素がラジカルとなって、シアン化ナトリウム（NaCN）、シアン化カリウム（KCN）、シアン化水素（HCN）やアセトニトリル（CH₃CN）の単純な分子が、RNAの合成反応を駆動する可能性を示した。原子炉内で、生命の前駆体を生成する多様な反応が起こったと考えられる。

ただし、原子炉内だけですべての前駆物質が合成されず、他の多様な条件が必要になる。天然の原子炉には、地下水が流入し間欠泉も形成された（Ebisuzaki & Maruyama, 2017）。各種の化合物を含んだ間欠泉が噴出される。化合物を含んだ熱水は、冥王代の多様な表層環境へもたらされて、条件の異なった化学合成が進むことになる。溶液の一部が地下水として、他の天然の原子炉へもたらされることもある。時には、複雑な化合物を含んだ地下水が、別の原子炉に入ることで、より複雑な化学反応へと進むだろう。

このような物質循環を通じて、化学反応が進んでいくというのが、天然の原子炉と間欠泉による生命誕生の仮説である。多数の原子炉の存在や多様な環境により、非常に多くの試行錯誤が進められる冥王代の固有の現象となる。

6. 生物学の新たな展開 1：分析手法

生物学では、新しい遺伝子解析の技術が進歩することにより、今まで知られていなかった生物種が大量に存在していることが明らかになってきた。

6.1 メタゲノム解析

生物の特徴や分類、種を認定するためには、DNAの解析は非常に重要な手段である。ただし、従来までの方法でDNA配列を解析するためには、細胞ひとつのDNAでは不可能で、多数のDNA、つまり多数の細胞がなければならなかった。単細胞であれば単一の生物だけを培養し、増殖させる必要があった。

だが、大半の微生物は培養することが困難であるため、DNA解析できる生物種は限定されたものになっていた。真正細菌と古細菌で培養されたものは、1%に満たない（Hugenholtz *et al.*, 1998a）。培養の困難さを克服するためには、少量のDNA、もしくは断片のゲノムを、混在したゲノムの中から分析する技術が不可欠であった。

これまで、DNAの代替として、遺伝子配列が短く種間で変化が大きい16S rRNAの遺伝子配列を、DNA増幅装置であるPCR（Polymerase Chain Reactionポリメラーゼ連鎖反応）を使用して網羅的に調べる試みが進められた（Lane *et al.*, 1985）。そこから新たな系統樹も作成されてきた（Hug *et al.*, 2016）。

しかし、あくまでも代替であり、少量のDNAを分析する手段が重要である。少量のDNA配列や、混在したDNAから個々のDNA配列を読む技術は、バイオインフォマティクス（bioinformatics）と呼ばれ、現在、技術進歩が著しい分野となってきた。

メタゲノム解析で多様な混在したDNAの網羅的な解析をしたり（Venter *et al.*, 2004）や、ひとつもしくは少数の細胞からゲノム配列を復元するシングルセルゲノム解析をしたり（Yoon *et al.*, 2011）、断片となったゲノムの配列をグループ化して元のゲノムの再構築するゲノムビニング技術（例えば、Albertsen *et al.*, 2013など）も確立されてきた。

16S rRNAの解析から、真正細菌の中には未知の遺伝子配列をもつものが多く含まれていることがわかり、未知の種が多数いることが明らかになってきた。

6.2 環境DNA解析

自然界には、実に多様な環境に生物が生息し、生物片（鱗や皮膚、体毛、葉、枝、死体など）や排泄物・老廃物（糞、汗、粘液、配偶子など）が至るところに存在している。ある場所から試料を採取して分析すると、意図せず細胞が混入していることがある。これらの細胞は、目標とする生物種を調べるには、汚染源となる。

だが、それら細胞のDNAで、分解される前のが採取されているのであれば、多種のDNAを検出できる可能性がある。自然界の海水、湖水、河川水、土壌、大気などの中から検出される多種のDNAは、環境DNA（eDNA environmental: DNA）と呼ばれる（Ficetola *et al.*, 2008）。環境DNAには、多種多様な生

物種の DNA が混在したメタゲノム (metagenome) の状態となっている。

環境 DNA から生物種を網羅的に読むことが可能となり、メタゲノミクス (metagenomics) として発展してきた (木暮, 2011)。ある環境に目的の種が存在するかという検出作業だけでなく、未培養の微生物も含めて網羅的に生物種を検出し、生物多様性を把握することができるようになってきた (Thomsen & Willerslev, 2015)。そこから、特異な微生物も多数発見されるようになってきた。

6.3 系統樹の課題

系統樹から生物の進化の道筋を読み取ることができる。また、DNA の塩基配列やタンパク質のアミノ酸配列などが、一定の割合で変異していると仮定することで、種間での配列の変化量から、分岐年代を推定する「分子時計」(molecular clock) という手法がある。分子時計を系統樹に適用することで、ある種に分岐が起こった年代を推定することができる。それを多数の種で積み重ねていくと、大進化の年代も推定可能となる。

分子時計には、どの種にもあるタンパク質を複数使う方法、保存性の高いリボソーム RNA (rRNA) の配列を使う方法などがある。rRNA をコードする遺伝子は生物間で高い保存性と変異しやすい部位もあるため、種レベルでの差異が認められ系統解析にもっとも適している。rRNA では、23 S rRNA や 5 S rRNA, 16 S rRNA などが利用されている。

化石の記録から、生物の進化において、生物種がある時期に大量に絶滅したり、爆発的な進化を起こしたりしていることが知られている。爆発的な進化の中には、大進化と呼ばれる生物の飛躍的な変化が起こっている。魚類から両生類では海から陸へ、両生類から爬虫類では水中産卵から陸地での産卵へ、爬虫類から鳥類では変温から恒温へ、鳥類から哺乳類では卵生から胎生へという変化が起こった。このような進化の時期には、塩基やアミノ酸配列の変異が激しく起こっていることになる。一方、環境が安定している深海のような環境では、分子進化時計の進みは遅いことも知られている。

分子時計は一定のスピードではなく、変化の激しい時期や遅い時期があったり、あるいは環境状態に依存して進むこともあったりすることを意味する。分子時

計は変異が一定のスピードで起こっているという前提が崩れる場合があることになる。分子時計の年代は、長期に及ぶもの、あるいは古い時代の年代については、厳密さは期待できないことになる。分子時計の数値には不確かさがあることも認識しておく必要があるだろう (鶴巻他, 2020)。

7. 生物学の新たな展開 2 : 新しいタイプの生物

特別な環境だけでなく、地球上の地上のありふれた環境であっても、新しいタイプの生物が発見されることがある。その中には、生命誕生につながるタイプの生物も含まれていた。

7.1 CPR

現在、生物は、真正細菌 (バクテリア)、古細菌、真核生物の 3 つのドメインがもっとも上位の分類となる。それぞれのドメインで遺伝子解析も進み、系統樹の精度も上がってきている。系統樹によれば、真核生物は古細菌と進化的な距離が近く、真正細菌とは系統的には離れていることがわかってきた。真正細菌の広い系統をもっており、その中にもこれまで知られていないタイプが見つかり、そこには多くの種があることもわかってきた (図 3)。

Yellowstone の Obsidian Pool 12 の湖底堆積物から、培養できない新しい系統群 (candidate division) が発見された。16 S rRNA の塩基配列から、12 群 (OP 1~12) に分類された (Hugenholtz *et al.*, 1998b)。OP 11 はさらに 5 つに細分化された。そのうちの 1 つが、OD 1 (OP 11-Derived 1 : OP 11 から派生した系統群その 1) と名づけた。OP 11 や OD 1 に属するバクテリアが数多く発見されることから、大きな系統群であると考えられた (Harris *et al.*, 2004)。

今ではゲノム解読がなされ、OD 1 はパークバクテリア (Parcubacteria)、また OP 11 はマイクロジェノメイト (Microgenomates) の 2 つのグループに分類された (Rinke *et al.*, 2013)。その 2 つのグループのいずれにも属さないバクテリアを、さらに区分 1 と区分 2 (Division 1 と Division 2) に仮に分けられている (鶴巻他, 2020)。

これらの未培養、未分類の生物群は、真正細菌ドメインに属しているが、その中でもかなりの比率 (15% 以上) を占めている。その生物群は、ドメインの下位区分として、35 の候補となる門 (Candidate phyla) が

真正細菌 (バクテリア)

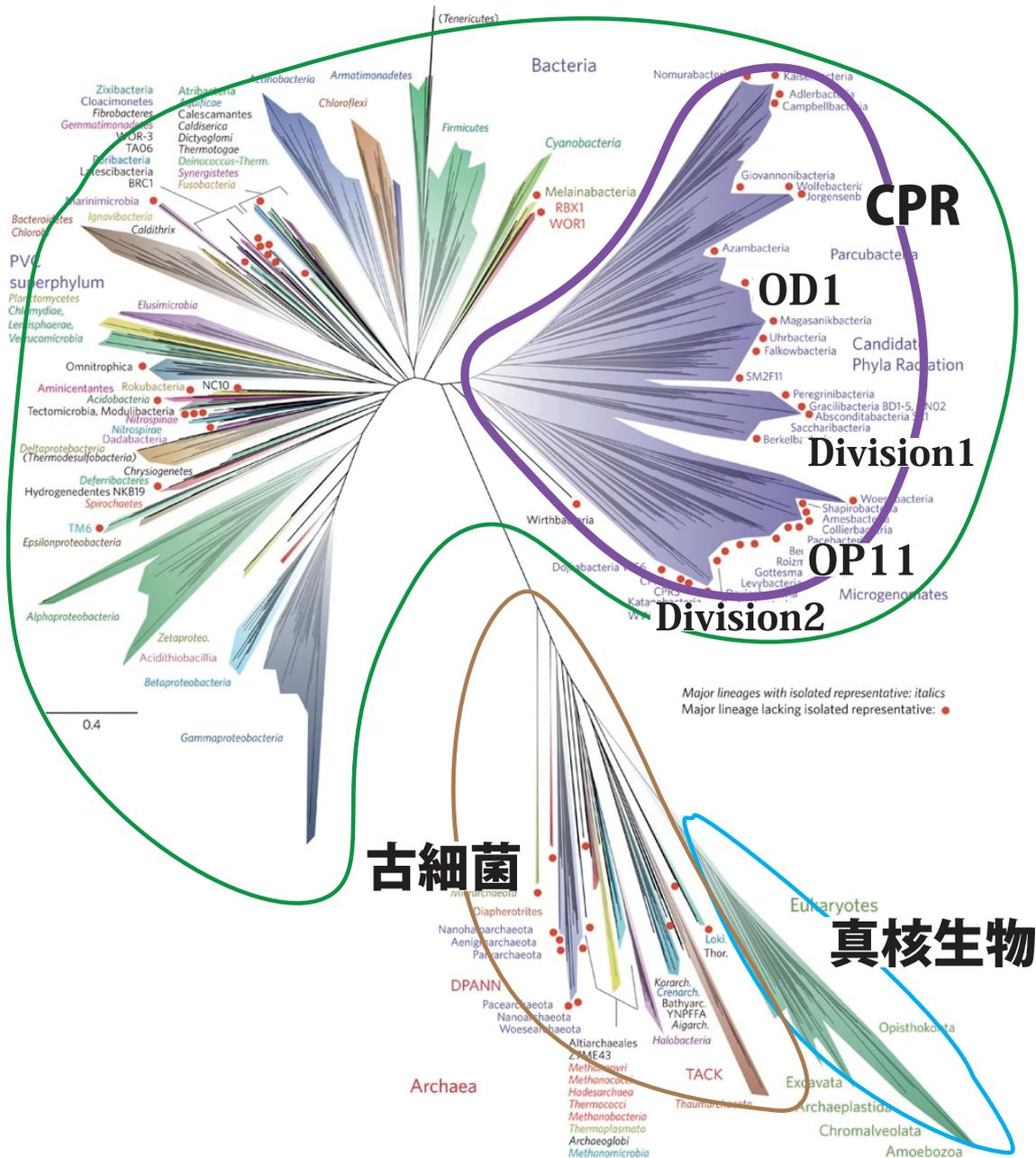


図3 系統分類と CPR の位置づけ

16 S rRNA による環境メタゲノム解析からえられた系統樹 (Hug *et al.*, 2016) に3つのドメイン、真正細菌に CPR と、Division 1, 2を区分した (鶴巻他, 2020)。

考えられ、系統樹上で放射状 (radiation) に広がっていることから CPR (Candidate Phyla radiation 放射状門候補群、または Patescibacteria) という名称でまとめ、新たな系統樹が提案された (Brown *et al.*, 2015; Hug *et al.*, 2016)。70を超える門になる可能性も指摘されている (Danczak *et al.*, 2017)。

真正細菌ドメインの中で、CPRは、他の種とは系統的に大きく分かれていることから、生命誕生の初期に

分岐し、ひとつの系統から進化してきた (単系統) ことがわかってきた (Parks *et al.*, 2018)。CPRは初期生命の進化を考える上で、重要な存在だと考えられるようになってきた。

7.2 CPR の特徴

CPRはさまざまな環境に存在し、河川水、湖水、海水、地下水、硫黄泉、熱水噴出孔、河川や海底の堆積



図4 CPRのサイズ

CPRはバクテリアだが小さい。CPRと一般的なバクテリアの大腸菌 (*Escherichia coli*)のサイズを比較したもの。鶴巻他 (2020), Blattner *et al.* (1997)を参照。

物、土壌、油田、浄水槽などからOD1が発見されている。以下でCPRの特徴をまとめておく。

7.2.1 小さい個体サイズ

一般的な真正細菌のサイズが $0.2\mu\text{m}$ 以上であるのに対し、CPRは $0.2\mu\text{m}$ 程度となっており(図4)、非常に小さい(Brown *et al.*, 2015; Luef *et al.*, 2015; Proctor *et al.*, 2018)。細菌類で小さいものは、共生しているタイプに見られる(Nelson & Stegen, 2015)。CPRは大型の細菌を除去していても、濃集されて検出されていくこと、また生物叢の70%以上をOD1が占めることから、寄生でも、単純な共生でもない可能性がある(Suzuki *et al.*, 2017)。

7.2.2 小さいゲノムサイズ

ゲノムサイズが、 $0.6\sim 1.3\text{Mbase}$ (Mはメガ、baseは塩基対のこと)と非常に小さく、数100から1000個強のタンパク質をコードしているにすぎない。最も小さいものは、約445 kbaseとなる(Suzuki *et al.*, 2017)。大腸菌の4.6 Mbase、約4500個のタンパク質コードと比べると、著しく小さい値となる。共生あるいは寄生の真正細菌のゲノムに近い値となっている。だが、CPRは共生関係が見つかっていない。一般に進化が進むと、複雑化していくことが多く、複雑さは遺伝情報の増大を伴い、ゲノムサイズは大きくなっていく。CPRのゲノムサイズが小さいということは、より祖先に近いことになるだろう。

7.2.3 代謝系の欠如

ゲノムサイズが小さいため、生物的な機能が不足している。膜と自己複製のための遺伝子はあるが、代謝のための遺伝子はない。トリカルボン酸(TCA)回路、電子伝達系といったエネルギーを生み出すための代謝

経路、アミノ酸やヌクレオチド、脂肪酸などの合成に関わる酵素などが欠けている。トリカルボン酸回路やアミノ酸合成などの代謝に必須の経路に関与する遺伝子も欠いている。代謝系の代わりに、環境から必須代謝産物を取得する生存機構をもっている可能性がある。このような仕組みは、初期生命に近いと考えられる(鶴巻他, 2020)。ただし、コモノートよりプロゲノートの概念に近い特徴といえる。

7.2.4 CPRも共通のrRNA遺伝子をもつ

真正細菌の16S rRNA遺伝子のサイズは、ゲノムサイズに関わらず約1500塩基となっている。CPRは、約1400~4400塩基とかなり幅がある。また、23S rRNA遺伝子のサイズは、真正細菌では約3000塩基、CPRでは約5000塩基にも及ぶものが存在している。CPRのRNAは不安定でイントロン除去がおこなわれなまま存在しているのかもしれない。時には、既知の真正細菌より小さなrRNAをもつものもあり、最低限のRNAはあることになる(鶴巻他, 2020)。

CPRは、非常に始原的な生物だと考えられる。そのため、CPRの研究は生物学だけでなく、生命起源の探求にとっても重要なテーマとなる。

7.3 OD1の特異性

OD1は、真正細菌に属するが、古細菌型のゲノムももっている。これは、古細菌由来の遺伝子の水平伝播(Leon-Zayas *et al.*, 2017)、もしくは真正細菌と古細菌の共通祖先に近い(戎崎他, 2020)と考えられる。また、高アルカリや超還元的な極限的環境になるほど、生物叢に占めるOD1の割合が大きくなる。このような特徴から、OD1は共通祖先に近い生物だと考えられている。

アメリカ合衆国カリフォルニアにあるシダーズ地区 (The Cedars) には地下深部に由来する湧水があり, OD 1 (Cedars OD 1) が群集の約60%を占める (Suzuki *et al.*, 2017). Cedars OD 1は強アルカリ性の地下水から見つかる. 栄養源が乏しいため嫌気発酵経路は使えない. 地下水中で鉱物 (カンラン石もしくは蛇紋石) 粒子の表面に局在していることから, 蛇紋岩化反応に依存したエネルギーの獲得が示唆される (Suzuki *et al.*, 2017).

また, 長野県白馬地域の蛇紋岩熱水系でも OD 1 (Hakuba OD 1) が発見された (佐藤他, 2019). 白馬地域には, 高アルカリ・高水素泉, 高塩分・炭酸泉, 低 pO_2 温泉, 酸性および硫黄温泉水の4種あるが, OD 1は高アルカリ・高水素泉からだけ発見されている. 高アルカリ・高水素泉は, 蛇紋岩地帯を通った熱水が, 蛇紋岩化反応によって水素に富む温泉水になったと考えられる (Suda *et al.*, 2014). Hakuba OD 1の生息する地域は, きわめて還元的な水素に富む温泉水からのみ見つかっている (佐藤他, 2019). Hakuba OD 1も蛇紋岩由来の水素をエネルギー源としていると考えられている (Suzuki *et al.*, 2017).

冥王代にはコマチアイト (カンラン岩) が多い地殻が広がっていた (丸山他, 2020). カンラン岩が水と反応すると, 蛇紋岩化作用 (カンラン石が蛇紋石に変化) で水素が発生する (上田・澤木, 2019). いたるところで蛇紋岩化作用が起きている冥王代は, OD 1のような生物には適した環境となる.

8. さいごに

生命起源に関する各種の束縛条件を見てきた. 束縛条件は多数で多様で, 生命誕生が困難なものに思える. 一方, 時間的束縛条件をみると, 生命誕生にかけられる時間は, 1億年ほどの短い時間しかなさそうだ.

厳しい束縛条件がついている化学反応を, 短い時間で進めるためには, 非常に莫大な試行錯誤を進めなければならない. 多くの試行錯誤があれば, 多種のプロゲノムも誕生したはずだ. その中からセントラルドグマをもち, FUCA へとたどり着いたものであろう. FUCA までは, 多数の試行錯誤が有効に働けば達することができる.

ところが, 現生生物から想定されたコモノートは, たったひとつ種の FUCA へとたどりつく. 多数の FUCA から, たった一種の FUCA だけが生き残るた

めには, 通常自然淘汰や生存競争では不可能であろう. また, 各種の束縛条件や時間的束縛条件から, 再度コモノートだけを生み出す過程を経ていくのも不可能であろう. コモノート以外のすべての種が絶滅しなければならない. その時, 何が起こったのか. 興味深いテーマだが, 未着手のテーマである.

ゲノム解析の技術の進歩から, これまで知られていた生物以外にも多様な生物がいることわかってきた. その中には, 生命の共通祖先のコモノートに近い生物として CPR というグループがいることが明らかになってきた. もしかすると, このような CPR の中にたったひとつのコモノートに至るヒントもあるのかもしれない.

参考文献

- [1] Adam, Z. R. (2007). Actinides and life's origins. *Astrobiology* 7, 852-872.
- [2] Adam, Z. R. (2016). Temperature oscillations near natural nuclear reactor cores and the potential for prebiotic oligomer synthesis. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 46, 171-187.
- [3] Adam, Z. R., Hongo, Y., Cleaves, H. J., Yi R., Fahrenbach, A. C., Yoda, I. and Aono, M. (2018). Estimating the capacity for production of formamide by radio active minerals on the prebiotic Earth. *Scientific Reports*, 8, 265.
- [4] Adcock, C. T., Hausrath, E. M. and Forster, P. M. (2013). Readily available phosphate from minerals in early aqueous environments on Mars. *Nature Geoscience*, 6, 824-827.
- [5] Albertsen, M., Hugenholtz, P., Skarszewski, A., Nielsen, K. L., Tyson, G. W. and Nielsen, P. H. (2013). Genome sequences of rare, uncultured bacteria obtained by differential coverage binning of multiple metagenomes. *Nature Biotechnology*, 31, 533-538.
- [6] Anders, E. (1989). Pre-biotic organic matter from comets and asteroids. *Nature*, 342, 255-257.
- [7] Arai, T. and Maruyama, S. (2017). Formation of anorthosite on the Moon through magma ocean fractional crystallization. *Geoscience Frontiers*, 8, 2, 299-308.
- [8] Arrhenius, S. A. (1908). *Worlds in the making*. Harper & Row, London. 100 p.
- [9] Bada, J. L. and Lazcano, A. (2002). Some like it hot, but not the first biomolecules. *Science*, 296, 1982-1983.
- [10] Bada, J. L., Bigham, C. and Miller, S. L. (1994). Impact melting of frozen oceans on the early Earth: implications for the origin of life. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 91, 1248-1250.

- [11] Baross, J. A. and Hoffman, S. E. (1985). Submarine hydrothermal vents and associated gradient environments as sites for the origin and evolution of life. *Origins Life*, 15, 327-345.
- [12] Battistuzzi, F. U., Feijao, A. and Hedges, S. B. (2004). A genomic timescale of prokaryote evolution: insights into the origin of methanogenesis, phototrophy, and the colonization of land. *BMC Evolutionary Biology*, 4, 44.
- [13] Battistuzzi, F. U. and Hedges, S. B. (2009). A major clade of prokaryotes with ancient adaptations to life on land. *Molecular Biology and Evolution* 26, 2, 335-43.
- [14] Bell, E.A., Boehnke, P., Harrison, T. M. and Mao, W. L. (2015). Potentially biogenic carbon preserved in a 4.1 billion-year-old zircon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112, 14518-14521.
- [15] Betts, H. C., Puttick, M. N., Clark J. W., Williams, T. A., Donoghue, P. C. J. and Pisani, D. (2018). Integrated genomic and fossil evidence illuminates life's early evolution and eukaryote origin. *Nature Ecology & Evolution*, 2, 10, 1556-1562.
- [16] Blattner, F. R., Plunkett, G., Bloch, C. A., Perna, N. T., Burland, V., Riley, M., Collado-Vides, J., Glasner, J. D., Rode, C. K., Mayhew, G. F., Gregor, J., Davis, N. W., Kirkpatrick, H. A., Goeden, M. A., Rose, D. J., Mau, B. and Shao, Y. (1997). The complete genome sequence of *Escherichia coli* K-12. *Science*, 277, 1453-1462.
- [17] Bodu, R., Bouzigues, N., Moin, N. and Pfiffelman, J. P. (1971). Sur l'existence d'anomalies isotopiques rencontrées dans l'uranium du Gabon. *Comptes Rendus De L Academie Des Sciences Paris*, 275, 1731-1731.
- [18] Borg, L. E., Gaffney, A. M. and Shearer, C. K. (2015). A review of lunar chronology revealing a preponderance of 4.34-4.37 Ga ages. *Meteoritics & Planetary Science*, 50, 715-732.
- [19] Brown, C. T., Hug, L. A., Thomas, B. C., Sharon, I., Castelle, C. J., Singh, A., Kelly, C. W., Kenneth, H. W. and Banfield, J. F. (2015). Unusual biology across a group comprising more than 15% of domain Bacteria. *Nature*, 523, 7559, 208-211.
- [20] Burton, A. S., Stern, J. C., Elsila, J. E., Glavin, D. P. and Dworkin, J. P. (2012). Understanding prebiotic chemistry through the analysis of extraterrestrial amino acids and nucleobases in meteorites. *Chemical Society Reviews*, 41, 5459-5472.
- [21] Cairns-Smith, A. G. (1985). The first organisms. *Scientific American*, 253, 90-98.
- [22] Canup, R. M. (2004). Simulations of a late lunar-forming impact. *Icarus*, 168, 433-456.
- [23] Chyba, C. F. and Sagan, C. (1992). Endogenous production, exogenous delivery and impact-shock synthesis of organic molecules: An inventory for the origin of life. *Nature*, 355, 125-132.
- [24] Chyba, C. F., Thomas, P. J., Brookshaw, L. and Sagan, C. (1990). Cometary delivery of organic molecules to the early Earth. *Science*, 249, 366-373.
- [25] Clayton, R. N. and Mayeda, T. K. (1999). Oxygen isotope studies of carbonaceous chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63, 2089-2104.
- [26] Clayton, R. N., Mayeda, T. K. and Rubin, A. E. (1984). Oxygen isotopic compositions of enstatite chondrites and aubrites. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89, C245-C249.
- [27] Cleaves, H. J., Scott, A. M., Hill, F. C., Leszczynski, J., Saha, N. and Hazen, R. (2012). Mineraleorganic interfacial processes: potential roles in the origins of life. *Chemical Society Reviews*, 41, 5502-5525.
- [28] Cohen, B. A., Swindle, D. T. and Kring, D. A. (2000). Support for the Lunar cataclysm hypothesis from Lunar meteorite impact melt ages. *Science*, 290, 5497, 1754-1756.
- [29] Corliss, J. B., Baross, J. A. and Hoffman, S. E., (1981). A hypothesis concerning the relationship between submarine hot springs and the origin of life on Earth. *Oceanologica Acta*, 4, 59-69.
- [30] Corliss, J. B., Dymond, J., Gordon, L. I., Edmond, J. M., von Herzen, R. P., Ballard, R. D., Green, K. K., William, D., Bainbridge, A., Crane, K. and van Andel, T. H. (1979). Submarine thermal springs on the Galapagos Rift. *Science*, 203, 1073-1083.
- [31] Crick, F. H. C. and Orgel L. E. (1973). Directed panspermia. *Icarus*, 19, 341-346.
- [32] Danczak, R. E., Johnston, M. D., Kenah, C., Slattery, M., Wrighton, K. C. and Wilkins, M. J. (2017). Members of the candidate phyla radiation are functionally differentiated by carbon- and nitrogen-cycling capabilities. *Microbiome*, 5, 1, 112.
- [33] Deamer, D. W. and Pashley, R. M. (1989). Amphiphilic components of the Murchison carbonaceous chondrite: surface properties and membrane formation. *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 19, 21-38.
- [34] Dohm J. M. and Maruyama S. (2015). Habitable trinity. *Geoscience Frontiers*, 6, 1, 95-101.
- [35] 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.
- [36] Dohm, J. M., Maruyama, S., Kido, M. and Baker, V. R. (2018). A possible anorthositic continent of early Mars and the role of planetary size for the inception of Earth-like life. *Geoscience Frontiers*, 9, 4, 1085-1098.
- [37] Doring, A. and Schulzke, C. (2010). Tungsten's redox potential is more temperature sensitive than that of molybdenum. *Dalton Transactions*, 39, 5623-5629.
- [38] 戎崎俊一・西原秀典・黒川顕・森宙史・鎌形洋一・玉木秀幸・中井亮佑・大島拓・原正彦・鈴木鉄兵・丸山茂徳 (2020). 原子炉間欠泉に駆動された冥王

- 代原初代謝経路. 地学雑誌, 129, 6, 779-804.
- [39] Ebisuzaki, T. and Maruyama, S. (2017). Nuclear geysers model of the origin of life: Driving force to promote the synthesis of building blocks of life. *Geoscience Frontiers*, 8, 2, 275-298.
- [40] Emmanuel, S. and Berkowitz, B. (2006). Suppression and stimulation of seafloor hydrothermal convection by exothermic mineral hydration. *Earth and Planetary Science Letters*, 243, 657-668.
- [41] Ficetola, G. F., Miaud, C., Pompanon, F. and Taberlet, P. (2008). Species detection using environmental DNA from water samples. *Biology Letters*, 4, 4, 423-425.
- [42] Furukawa, Y., Otake, T., Ishiguro, T., Nakazawa, H. and Kakegawa, T. (2012). Abiotic formation of valine peptides under conditions of high temperature and high pressure. *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 42, 519-531.
- [43] Halliday, A. N. (2008). A young Moon-forming giant impact at 70-110 million years accompanied by late-stage mixing, core formation and degassing of the Earth. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 366, 1883, 4163-4181.
- [44] Harris, J. K., Kelley, S. T. and Pace, N. R. (2004). New perspective on uncultured bacterial phylogenetic division OP11. *Applied and Environmental Microbiology*, 70, 845-849.
- [45] Helz, G. R., Erickson, B. E. and Vorliceck, T. P. (2014). Stabilities of thiomolybdate complexes of iron; implications for retention of essential trace elements (Fe, Cu, Mo) in sulfide waters. *Metallomics*, 6, 1131-1140.
- [46] Holm, N. G. (1992). Why are hydrothermal systems proposed as plausible environments for the origin of life? *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 22, 5-14.
- [47] Hopkins, M. D. and Mojzsis, S. J. (2015). A protracted timeline for lunar bombardment from mineral chemistry, Ti thermometry and U/Pb geochronology of Apollo 14 melt breccia zircons. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 169, 1-18.
- [48] Hoyle, F. and Wickramasinghe, N. C. (1999). Comets - A vehicle for panspermia. *Astrophysics and Space Science*, 268, 333-341.
- [49] Hug, L. A., Baker, B. J., Anantharaman, K., Brown, C. T., Probst, A. J., Castelle, C. J., Butterfield, C. N., HERNSDORF, A. W., AMANO, Y., ISE, K., SUZUKI, Y., DUDEK, N., RELMAN, D. A., FINSTAD, K. M., AMUNDSON, R., THOMAS, B. C. and BANFIELD, J. F. (2016). A new view of the tree of life. *Nature Microbiology*, 1, 5, 1-6.
- [50] Hugenholtz, P., Goebel, B. M. and Pace, N. R. (1998a). Impact of Culture-Independent Studies on the Emerging Phylogenetic View of Bacterial Diversity. *Journal of Bacteriology*, 180, 18, 4765-4774.
- [51] Hugenholtz, P., Pitulle, C., Hershberger, K. L. and Pace, N. R. (1998b). Novel division level bacterial diversity in a Yellowstone hot spring. *Journal of Bacteriology*, 180, 366-376.
- [52] Ida, S., Canup, R. M. and Stewart, G. R. (1997). Lunar accretion from an impact-generated disk. *Nature*, 389, 353.
- [53] 池谷仙之・北里洋 (2004). 地球生物学 —地球と生命の進化—. 東京大学出版会, 228p.
- [54] Imai, E., Honda, H., Hatori, K., Brack, A. and Matsuno, K. (1999). Elongation of oligopeptides in a simulated submarine hydrothermal system. *Science*, 283, 831-833.
- [55] 磯崎行雄・寺林優・椛島太郎・角田地文・恒松知樹・鈴木良剛・小宮剛・丸山茂徳・加藤泰浩 (1995). “35億年前最古ストロマトライト”の正体—西オーストラリア. ピルバラ産, 太古代中央海嶺の熱水性堆積物—. 月刊地球, 17, 476-489.
- [56] Jannasch, H. W. and Mottl M. J. (1985). Geomicrobiology of deep-sea hydrothermal vents. *Science*, 229, 717-725.
- [57] Javoy, M. (1995). The integral enstatite chondrite model of the Earth. *Geophysical Research Letters*, 22, 2219-2222.
- [58] Javoy, M., Kaminski, E., Guyot, F., Andrault, D., Sanloup, C., Moreira, M., Labrosse, S., Jambon, A., Agrinier, P., Davaille, A. and Jaupart, C. (2010). The chemical composition of the Earth: Enstatite chondrite models. *Earth and Planetary Science Letters*, 293, 259-268.
- [59] Kelley, D. S., Karson, J. A., Blackman, D. K., Fruh-Green, G. L., Butterfield, D. A., Lilley, M. D., Olson, E. J., Schrenk, M. O., Roe, K. K., Lebon, G. T., Rivizzigno, P. and the A. T. S. P. (2001). An off-axis hydrothermal vent field near the Mid-Atlantic Ridge at 30°N. *Nature*, 412, 145-149.
- [60] Kelley, D. S., Karson, J. A., Fruh-Green, G. L., Yoerger, D. R., Shank, T. M., Butterfield, D. A., Hayes, J. M., Schrenk, M. O., Olson, E. J., Proskurowski, G., Jakuba, M., Bradley, A., Larson, B., Ludwig, K., Glickson, D., Buckman, K., Bradley, A. S., Brazelton, W. J., Roe, K., Elend, M. J., Delacour, A., Bernasconi, S. M., Lilley, M. D., Baross, J. A., Summons, R. E. and Sylva, S. P. (2005). A serpentinite-hosted ecosystem: the lost city hydrothermal field. *Science*, 307, 1428-1434.
- [61] Kirschvink, J. L. and Weiss, B. P. (2003). Mars, panspermia, and origin of life: Where did it all begin? *Journal of Geography*, 112, 187-196.
- [62] Kitadai, N. and Maruyama, S. (2018). Origins of building blocks of life: A review. *Geoscience Frontiers*, 9, 4, 1117-1153.
- [63] 木暮一啓 (2011). 海洋における環境ゲノミクス. 地球環境, 16, 1, 71-79.
- [64] 小出良幸 (2022). 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.
- [65] 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.
- [66] 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.
- [67] 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)
- [68] Konn, C., Charlou, J. L., Donval, J. P., Holm, N. G., Dehairs, F. and Bouillon, S. (2009). Hydrocarbons and oxidized organic compounds in hydrothermal fluids from Rainbow and Lost City ultramafic-hosted vents. *Chemical Geology*, 258, 299-314.
- [69] Lambert, J. F. (2008). Adsorption and polymerization of amino acids on mineral surfaces: a review. *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 38, 211-242.
- [70] Lane, D. J., Pace, B., Olsen, G. J., Stahl, D. A., Sogin, M. L. and Pace, N. R. (1985). Rapid determination of 16S ribosomal RNA sequences for phylogenetic analyses. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 82, 20, 6955-6959.
- [71] Leon-Zayas, R., Peoples, L., Biddle, J. F., Podell, S., Novotny, M., Cameron, J., Lasken, R. S. and Bartlett, D. H. (2017). The metabolic potential of the single cell genomes obtained from the Challenger Deep, Mariana Trench within the candidate superphylum Parcubacteria (OD1). *Environmental Microbiology*, 19, 2769-2784.
- [72] Lowell, R. P. and Rona, P. A. (2002). Seafloor hydrothermal systems driven by the serpentinization of peridotite. *Geophysical Research Letters*, 29, 1531.
- [73] Luef, B., Frischkorn, K. R., Wrighton, K. C., Holman, H. Y., Birarda, G., Thomas, B. C., Singh, A., Williams, K. H., Siegerist, C. E., Tringe, S. G., Downing, K. H., Comolli, L. R. and Banfield, J. F. (2015). Diverse uncultivated ultra-small bacterial cells in groundwater. *Nature Communications*, 6, 6372.
- [74] 丸山茂徳 (2022). 冥王代地球表層環境—バイオスフェア誕生が地球の金星化を防いだ— 丸山茂徳・戎崎俊一・金井昭夫・黒川顕著, 冥王代生命学. 朝倉書店, 125-192.
- [75] 丸山茂徳・戎崎俊一・黒川顕 (2019). 地球生命誕生場に必要9条件と生命誕生場としての自然原子炉間欠泉モデルの再考—生命誕生場は冥王代の地球表層の1か所—. *地学雑誌*, 128, 4, 513-548.
- [76] 丸山茂徳・戎崎俊一・丹下慶範 (2018). ドライな還元地球の誕生と大気海洋成分の二次的付加で説明される ABEL モデルと, 生命惑星誕生における ABEL 爆撃の重要性. *地学雑誌*, 127, 5, 647-682.
- [77] Maruyama, S., Ikoma, M., Genda, H., Hirose, K., Yokoyama, T. and Santosh, M. (2013). The naked planet Earth: Most essential pre-requisite for the origin and evolution of life. *Geoscience Frontiers*, 4, 141-165.
- [78] Maruyama, S., Santosh, M. and Azuma, S. (2018). Initiation of plate tectonics in the Hadean: Eclogitization triggered by the ABEL Bombardment. *Geoscience Frontiers*, 9, 4, 1033-1048.
- [79] 丸山茂徳・佐藤友彦・澤木佑介・須田好 (2020). 最古型生命が生息する白馬地域の温泉水の分類と生命の起源の解明における冥王代疑似環境生態系の重要性. *地学雑誌*, 129, 6, 757-777.
- [80] Martin, W., Baross, J., Kelley, D. and Russell, M. J. (2008). Hydrothermal vents and the origin of life. *Microbiology*, 6, 805-814.
- [81] Martin, B. and Fyfe, W. S. (1970). Some experimental and theoretical observations on kinetics of hydration reactions with particular reference to serpentinization. *Chemical Geology*, 6, 185-202.
- [82] Martin, W. and Russell, M. J. (2003). On the origins of cells: A hypothesis for the evolutionary transitions from abiotic geochemistry to chemoautotrophic prokaryotes, and from prokaryotes to nucleated cells. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*, 358, 1429, 59-83.
- [83] Martin, W. and Russell, M. J. (2007). On the origin of biochemistry at an alkaline hydrothermal vent. *Philosophical Transactions of the Royal Society, B* 362, 1887-1925.
- [84] McKay, D. S., Gibson, E. K. Jr., Thomas-Keppta, K. L., Vali, H., Romanek, C. S., Clemet, S. J., Chillier, X. D. F., Maechling, C. R. and Zare, R. N. (1996). Search for past life on Mars: Possible relic biogenic activity in Martian meteorite ALH84001. *Science*, 273, 924-930.
- [85] Meshik, A. P., Hohenberg, C. M. and Pravdivsteva, Q. V. (2004). Record of cycling operation of the natural nuclear reactor in the Oklo/Okelobondo area in Gabon. *Physical Review Letters*, 93, 182302-1-4.
- [86] Mojzsis, S. J., Arrhenius, G., McKeegan, K. D., Harrison, T. M., Nutman, A. P. and Friend, C. R. L. (1996). Evidence for life on earth before 3,800 million years ago. *Nature*, 384, 55-59.
- [87] Mulkidjanian, A. Y., Bychkov, A. Y., Dibrova, D. V., Galperin, M. Y. and Koonin, E. V. (2012a). Origin of first cells at terrestrial, anoxic geothermal fields. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109, E821-E830.
- [88] Mulkidjanian, A. Y., Bychkov, A. Y., Dibrova, D. V., Galperin, M. Y., Koonin, E. V. (2012b). Open question on the origin of life at anoxic geothermal

- fields. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 42, 507-516.
- [89] 永原裕子 (1998). 原始太陽系星雲における蒸発過程と化学的および同位体分別. *鉱物学雑誌*, 27, 3, 147-156.
- [90] 中沢弘基・山田裕久・橋爪秀夫 (1993). 初期地球プレートテクトニクスに同期した化学進化—生命の地殻胚胎仮説—. *Viva Origino*, 21, 213-222.
- [91] Ndongo, A., Guiraud, M., Vennin, E., Mbina, M., Buoncristiani, J. -F., Thomazo, C. and Flotte, N. (2016). Control of fluid-pressure on early deformation structures in the Paleoproterozoic extensional Franceville Basin (SE Gabon). *Precambrian Research*, 277, 1-25.
- [92] Nelson, W. C. and Stegen, J. C. (2015). The reduced genomes of Parcubacteria (OD1) contain signatures of a symbiotic lifestyle. *Frontiers in Microbiology*, 6, 713.
- [93] Nisbet, E. G. and Fowler, C. M. R. (1996). Some like it hot. *Nature*, 382, 404-405.
- [94] Nisbet, E. G. and Sleep, N. H. (2001). The habitat and nature of early life. *Nature*, 409, 1083-1091.
- [95] Nuckley, D. J., Jinks, R. N., Battelle, B. A., Herzog, E. D., Kass, L., Renninger, G. H. and Chamberlain, S. C. (1996). Retinal anatomy of a new species of bresiliid shrimp: From a hydrothermal vent field on the Mid-Atlantic ridge. *Biological Bulletin*, 190, 98-110.
- [96] Ohara, S., Kakegawa, T. and Nakazawa, H. (2007). Pressure effects on the abiotic polymerization of glycine. *Origins of Life and Evolution of Biosphere*, 37, 215-223.
- [97] Ohtomo, Y., Kakegawa, T., Ishida, A., Nagase, T. and Rosing, M. T. (2013). Evidence for biogenic graphite in early Archaean Isua metasedimentary rocks. *Nature Geoscience*, 7, 25-28.
- [98] Oparin, A. I. (1957). *The Origin of Life on the Earth*. Oliver and Boyd, London, Chap V.
- [99] Otake, T., Taniguchi, T., Furukawa, Y., Kawamura, F., Nakazawa, H. and Kakegawa, T. (2011). Stability of amino acids and their oligomerization under high-pressure conditions: implications for prebiotic chemistry. *Astrobiology*, 11, 799-813.
- [100] Parks, D., Chuvochina, M., Waite, D., Rinke, C., Skarszewski, A., Chaumeil, P. -A. and Hugenholtz, P. (2018). A standardized bacterial taxonomy based on genome phylogeny substantially revises the tree of life. *Nature Biotechnology*, 36, 10, 996-1004.
- [101] Patel, B. H., Percivalle, C., Ritson, D. J., Duffy, C. D. and Sutherland, J. D. (2015). Common origins of RNA, protein and lipid precursors in a cyanosulfidic protometabolism. *Nature Chemistry*, 7, 301-307.
- [102] Pasek, M. (2013). Early Mars without phosphate limits. *Nature Geoscience*, 6, 806-807.
- [103] Pizzarello, S., Cooper, G. W. and Flynn, G. J. (2006). The nature and distribution of the organic material in carbonaceous chondrites and interplanetary dust particles. In Lauretta, D. S. and McSween, H. Y., Jr., eds., *Meteorites and the Early Solar System II*. Univ. of Arizona, USA, 628-651.
- [104] Price, P. B. (2010). Microbial life in martian ice: a biotic origin of methane on Mars? *Planetary and Space Science*, 58, 1199-1206.
- [105] Proctor, C. R., Besmer, M. D., Langenegger, T., Beck, K., Walser, J. C., Ackermann M., Burgmann H. and Hammes F. (2018). Phylogenetic clustering of small low nucleic acid-content bacteria across diverse freshwater ecosystems. *ISME Journal*, 12, 1344-1359.
- [106] Proskurowski, G., Lille, M. D., Seewald, J. S., Fruh-Green, G. L., Olson, E. J., Lupton, J. E., Sylva, S. P. and Kelley, D. S. (2008). Abiogenic hydrocarbon production at Lost City hydrothermal field. *Science*, 319, 604-607.
- [107] Reysenbach A. L. and Shock E. (2002). Merging genomes with geochemistry in hydrothermal ecosystems. *Science*, 296, 1077-1082.
- [108] Rinke, C., Schwientek, P., Sczyrba, A., Ivanova, N. N., Anderson, I. J., Cheng, J. F., Darling, A., Malfatti, S., Swan, B. K., Gies, E. A., Dodsworth, J. A., Hedlund, B. P., Tsiamis, G., Sievert, S. M., Liu, W. T., Eisen, J. A., Hallam, S. J., Kyrpides, N. C., Stepanauskas, R., Rubin, E. M., Hugenholtz, P. and Woyke, T. (2013). Insights into the phylogeny and coding potential of microbial dark matter. *Nature*, 499, 431-437.
- [109] Rosing, M. T. (1999). ¹³C-depleted carbon micro-particles in >3700-Ma sea-floor sedimentary rocks from west Greenland. *Science*, 283, 674-676.
- [110] 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.
- [111] Russell, M. J. (2003). The importance of being alkaline. *Science*, 302, 580-581.
- [112] Russell, M. J. (2007). The alkaline solution to the emergence of life: energy, entropy and early evolution. *Acta Biotheoretica*, 55, 133-179.
- [113] Russell, M. J., Daniel, R. M. Hall, A. J. and Sherringham, J. (1994). A hydrothermally precipitated catalytic iron sulphide membrane as a first step toward life. *Journal of Molecular Evolution*, 39, 231-243.
- [114] Russell, M. J. and Hall, A. J. (1997). The emergence of life from iron monosulphide bubbles at a submarine hydrothermal redox and pH front. *Journal of the Geological Society*, 154, 377-402.
- [115] Russell, M. J., Hall, A. J., Cairnsmith, A. G. and Braterman, P. S. (1988). Submarine hot springs and the origin of life. *Nature*, 336, 117.
- [116] Russell, M. J., Hall, A. J. and Martin, W. (2010).

- Serpentinization as a source of energy at the origin of life. *Geobiology*, 8, 355-371.
- [117] Santosh, M., Arai, T. and Maruyama, S. (2017). Hadean Earth and primordial continents: The cradle of prebiotic life. *Geoscience Frontiers*, 8, 2, 309-327
- [118] 佐藤友彦・吉屋一美・丸山茂徳 (2019). 冥王代の「生きた微化石」OD 1と超還元場の歴史. *地学雑誌*, 128, 4, 571-596.
- [119] 澤木佑介・佐藤友彦・藤崎渉・上田修裕・浅沼尚・丸山茂徳 (2019). 天然原子炉周囲の地質と真核生物誕生場. *地学雑誌*, 128, 4, 549-569.
- [120] Schaffer, G. A. and Schaeffer, O. A. (1977). ³⁹Ar-⁴⁰Ar ages of lunar rocks. *Proceedings of Lunar and Planetary Science Conference 8th*, 2253-2300.
- [121] Schopf, J. W. (1993). Microfossils of the Early Archean Apex Chert: New evidence of the antiquity of life. *Science*, 260, 640-646.
- [122] Sharov, A. A. (2006). Genome increases as a clock for the origin and evolution of life. *Biology Direct*, 1, 17.
- [123] Shock, E. L. (1990). Geochemical constraints on the origin of organic compounds in hydrothermal system. *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 20, 331-367.
- [124] Shock, E. L. (1992). Chemical environments of submarine hydrothermal systems. *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 22, 67-107
- [125] Shock, E. L. and Schulte, M. D. (1998). Organic synthesis during fluid mixing in hydrothermal systems. *Journal of Geophysical Research*, 103, 28513-28527.
- [126] Sleep, N. H. and Zahnle, K. (1998). Refugia from asteroid impacts on early Mars and the early Earth. *Journal of Geophysical Research*, 103, 28529-28544.
- [127] Smith, K. L. (1985). Deep-Sea hydrothermal vent mussels: Nutritional state and distribution at the Galapagos Rift. *Ecology*, 66, 1067-1080.
- [128] Sousa, F. L., Thiergart, T., Landan, G., Nelson-Sathi, S., Pereira, I. A. C., Allen, J. F., Lane, N. and Martin, W. F. (2013). Early bioenergetics evolution. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, B 368.
- [129] Stueken, E. E., Anderson, R. E., Bowman, J. S., Brazelton, W. J., Colangelo-Lillis, J., Goldman, A. D., Som, S. M. and Baross, J. A. (2013). Did life originate from a global chemical reactor? *Geobiology*, 11, 101-126.
- [130] Suda, K., Ueno, U., Yoshizaki, M., Nakamura, H., Kurokawa, K., Nishiyama, E., Yoshino, K., Hongoh, Y., Kawachi, K., Omori, S., Yamada, K., Yoshida, N. and Maruyama, S. (2014). Origin of methane in serpentinite-hosted hydrothermal systems: The CH₄-H₂-H₂O hydrogen isotope systematics of the Hakuba Happo hot spring. *Earth and Planetary Science Letters*, 386, 112-125.
- [131] Suzuki, S., Ishii, S., Hoshino, T., Rietze, A., Tenney, A., Morrill, P. L., Inagaki, F., Kuenen, J. G. and Nealson, K. H. (2017). Unusual metabolic diversity of hyperalkaliphilic microbial communities associated with subterranean serpentinization at The Cedars. *ISME Journal*, 11, 2584-2598.
- [132] Takai, K., Nakamura, K., Suzuki, K., Inogaki, F., Nealson, K. H. and Kumagai, H. (2006). Ultramafics-hydrothermalism-hydrogenesis-hyperSLiME (UltraH3) linkage: a key insight into early microbial ecosystem in the Archean deep-sea hydrothermal systems. *Paleontological Research*, 10, 269-282.
- [133] Tashiro, T., Ishida, A., Hori, M., Igisu, M., Koike, M., Mejean, P., Takahata, N., Sano, Y. and Komiya, T. (2017). Early trace of life from 3.95 Ga sedimentary rocks in Labrador, Canada. *Nature*, 549, 516.
- [134] Thomas-Keprta, K. L., McKay, D. S., Wentworth, S. J., Stevens, T. O., Taunton, A. E., Allen, C. C., Coleman, A., Gibson, E. K. and Romanek, C. S. (1998). Bacterial mineralization patterns in basaltic aquifers: Implications for possible life in martian meteorite ALH84001. *Geology*, 26, 1031-1034.
- [135] Thomas-Keprta, K. L., Bazylinksi, D. A., Wentworth, S. J., Vali, H., Gibson, E. K. and Romanek, C. S. (2000). Elongated prismatic magnetite crystals in ALH84001 carbonate globules: Potential Martian magnetofossils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64, 4049-4081.
- [136] Thomas-Keprta, K. L., Clemett, S. J., Bazylinksi, D. A., Kirschvink, J. L., McKay, D. S., Wentworth, S. J., Vali, H., Gibson, E. K., McKay, M. F. and Romanek, C. S. (2001). Truncated hexa-octahedral magnetite crystals in ALH84001: Presumptive biosignatures. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98, 2164-2169.
- [137] Thomsen, P. F. and Willerslev, E. (2015). Environmental DNA - An emerging tool in conservation for monitoring past and present biodiversity. *Biological conservation*, 183, 4-18.
- [138] 鶴巻萌・齋藤元文・丸山茂徳・金井昭夫 (2020). 生命の起源研究における CPR バクテリアの重要性. *地学雑誌*, 129, 6, 881-898.
- [139] 上田修裕・澤木佑介 (2019). 初期地球の蛇紋岩熱水系. *地学雑誌*, 128, 4, 491-511.
- [140] Ueno, Y., Yamada, K., Yoshida, N., Maruyama, S. and Isozaki, Y. (2006). Evidence from fluid inclusions for microbial methanogenesis in the early Archean era. *Nature*, 440, 516-519.
- [141] Venter, J. C., Remington, K., Heidelberg, J. F., Halpern, A. L., Rusch, D., Eisen, J. A., Wu, D., Paulsen, I., Nelson, K. E., Nelson, W., Fouts, D. E., Levy, S., Knap, A. H., Lomas, M. W., Nealson, K., White, O., Peterson, J., Hoffman, J., Parsons, R., Baden-Tillson, H., Pfannkoch, C., Rogers, Y. H. and

- Smith, H. O. (2004). Environmental genome shotgunsequencing of the Sargasso Sea. *Science*, 304, 66-74.
- [142] Wachtershauser, G. (2006). From volcanic origins of chemoautotrophic life to Bacteria, Archaea and Eukarya. *Philosophical Transactions of the Royal Society, B* 361, 1787-1808.
- [143] Weiss, B. P., Kirschvink, J. L., Baudenbacher, F. J., Vali, H., Peters, N. T., Macdonald, F. A. and Wikswo, J. P. (2000). A low temperature transfer of ALH84001 from Mars to Earth. *Science*, 290, 791-795.
- [144] Wetherill, G. W. (1985). Occurrence of giant impacts during the growth of the terrestrial planets. *Science*, 228, 877-879.
- [145] Willbold, M., Elliott, T. and Moorbath, S. (2011). The tungsten isotopic composition of the Earth's mantle before the terminal bombardment. *Nature*, 477, 191-195.
- [146] Woese, C. R., Kandler, O. and Wheelis, M. L. (1990). Towards a natural system of organisms: proposal for the domains Archaea, Bacteria, and Eucarya. *PNAS*, 87, 12, 4576-4579.
- [147] 蟻瑞欽・アルバート・ファーレンバック・本郷やよい (2020). 電離放射線が駆動する化学進化. *地学雑誌*, 129, 6, 837-851.
- [148] Yoon, H. S., Price, D. C., Stepanauskas, R., Rajah, V. D., Sieracki, M. E., Wilson, W. H., Yang, E. C., Duffy, S. and Bhattacharya, D. (2011). Single-cell genomics reveals organismal interactions in uncultivated marine protists. *Science*, 332, 714-717.
- [149] Zaia, D. A. M., Zaia, C. T. B. V. and De Santana, H. (2008). Which amino acids should be used in prebiotic chemistry studies? *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 38, 469-488.

Constraints and Biological New Developments to the Origin of Earth's Life

Yoshiyuki KOIDE¹

Abstract

From geological views, the habitable trinity should be established at Hadean. From biological views, the conditions for the chemosynthesis for building blocks of life have been revealed. The geological time constraints are severe. But no environment satisfied all conditions. The complex scenario should be supposed. New methods (genome analysis technology, discovery of CPR bacteria) could raise the possibility of searching for a common ancestor.

Keywords: Origin of Earth's Life, Constraints, Genome Analysis, Environmental DNA, CPR.

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

