

「フロンティアセミナー・テキスト」 宇宙での生命の起源, 進化, 伝播および探査 第1回 地球科学からわかる有機化合物の起源

山岸明彦¹

2022年12月19日受領, 査読を経て2023年1月16日受理

(要旨) 地層には, 地球の歴史が記録されている. 46億年前に誕生した地球の, 38億年前の地層には炭素同位体化石として生命の痕跡が残っている. 35億年前の地層には最古の細胞微化石が残されている. この時期の海底熱水活動の証拠も残されている. 海底熱水地帯では, 海水が地下の高温の玄武岩と反応して還元型の成分を含む熱水となる. この熱水と低温海水との反応に依存した生態系が熱水地帯周辺に形成される. 35~30億年前の微化石がどのような生物かということが, 当時の環境との関連で検討されている. 地球生命を構成する元素は, 宇宙に由来する. それらが, どのような経路で生命に利用されるに至ったか, 有機化合物の起源とともに解説する. 有機化合物は宇宙空間で合成され, 地球にやってきた可能性が高い.

1. はじめに

本連載は, 2019年2月18日-19日北海道大学で開催された惑星科学フロンティアセミナー2018「生命の起源: 地球上の生き物はどこでどのように誕生したか」の聴講ノートを元に, その後の新しい知見も含めて加筆修正した. 聴講ノートを作成した, 千葉紗登子氏, オン碧氏に感謝する.

本稿は, 三回に分けて連載される予定である. 第一回目は, 地球に残されている生命の痕跡と, 地球化学や宇宙科学から明らかになりつつある有機化合物の起源を解説する. 第二回目では, 生命科学からわかる生命の起源と進化について解説する. 特にRNAワールドや, 遺伝子からわかる生命の進化, ダーウィン進化等に関して解説する. 第三回目では, 地球大気圏での微生物採集, 地球低軌道での微生物・有機化合物実験, 火星での生命探査について解説する.

本連載で解説する分野は極めて広いが, 周辺分野に関しては概略の記載で済まし, 関連する総説を紹介するようにした. ただし, 重要な文献に関しては書誌情報を載せるようにしている. また, 講演では質疑応答が

あったが, その記録も読者の理解を助ける可能性が高いと判断して残した.

2. 生命の進化: 地層に隠された証拠

46億年前に地球が誕生してから今日にいたるまで, 様々な地学的証拠が残されている. 地学的証拠が生命の進化を考えるうえでの重要な基準年代を与える. ただし, 地球形成初期に関する地学的証拠はそれほど多くない. 海の形成時期に関してはGenda [1], 生命初期の炭素同位体化石に関しては掛川 [2], 初期の細胞化石に関してはSugitani [3]が参考になる.

2.1 地殻形成の歴史: 岩石の物質解析

地球上に残された最古の鉱物は, ジャックヒルズ (オーストラリア) で発見されたジルコンである. ジルコン ($ZrSiO_4$) はジルコニウムのケイ酸塩で, 1mmにも満たない大きさのジルコン結晶が多数収集されている. それらの結晶の鉛同位体分析から, 最古の年代を示したジルコンは今から45~44億年前に形成されたと推定されている. ジルコンはマグマと水との相互作用で形成される. ジルコン中の酸素同位体比 $\delta^{18}O$ から, 45~44億年前に海と大陸地殻が存在していたのではないかと推定

1. 東京薬科大学, 生命科学部
yamagish@toyaku.ac.jp

表1: 世界に知られる古い岩石(文献[5]より改変)。

年代	産出地	岩石名
40億年	カナダ・北西部	アカスタ片麻岩
38億年	グリーンランド・イスア	イスア緑色岩
	イスア・ゴッドハブ	アミツォーク片麻岩
37億年	シベリア・アルダン盾状地	片麻岩
	中国・河北省	グラニユライト
36億年	カナダ・ラブラドアー	片麻岩
34億年	オーストラリア・北西部	ビルバラ緑色岩

表2: 各地の太古岩石中の炭素¹³C/¹²C比と産状[2].

地域名	年代 億年前	$\delta^{13}\text{C}$ (%)	炭素の産状	コメント	
ジャックヒルズ (オーストラリア)	41	-24	ジルコン結晶中 (電子顕微鏡で確認)	炭素の混入時期 が不明	Bell, E. A. et al. (2015)
アキリア島 (グリーンランド)	38	-49 ~ -21	未確認	炭素の存在 未確認状態で分析	Mojzsis, S. J. et al. (1996)
イスア(1) (グリーンランド)	38~37	-35 ~ -12	未確認	炭素の存在 未確認状態で分析	Mojzsis, S. J. et al. (1996)
イスア(2) (グリーンランド)	37	-12 ~ -8	地下温泉脈中 (顕微鏡で確認)	37億年前の 非生物炭素	Van Zuilen, M. A. et al. (2002)
イスア(3) (グリーンランド)	38~37	-20 ~ -14	38~37億年前の堆積 岩中(顕微鏡で確認)	38~37億年前の 炭素	Rosing, M. T. (1999)
イスア(4) (グリーンランド)	38~37	-24 ~ -12	38~37億年前の堆積 岩中(顕微鏡で確認)	38~37億年前の 炭素	Ohtomo, Y. et al. (2014)

されている[4].

岩塊としての岩石が残っているのは40億年以降に限定される(表1). 大陸地殻の形成は45~44億年前と推定されているので[4], 40億年前以前の岩石は浸食されたか、後期重爆撃で失われたか、理由は不明であるが、現時点では大きな岩塊としては残っていない。

38億年前の岩石の中には枕状溶岩および、堆積岩がある。これらの岩石は38億年前に海があった証拠となる[1].

2.2 最古の生命の証拠

炭素には¹³Cと¹²Cの安定同位体が存在し、炭素同位体比分析を行うことで、炭素の起源をある程度明らかにすることができる[6]. 光合成あるいは化学合成によって、二酸化炭素が同化される際の酵素反応では、¹³Cに比べて¹²Cを効率良く取り込むため、炭酸固定された有

機化合物の¹³C/¹²Cは環境中の二酸化炭素に比べて低くなる。¹³C/¹²Cは基準試料との差 $\delta^{13}\text{C}$ として測定される。 $\delta^{13}\text{C}$ の基準としてアメリカ・サウスカロライナ州のPee Dee 層から産出するベレムナイト(PDB: Pee Dee Belemnite)が用いられる。

植物によって炭酸固定に用いられる酵素が光合成の種類C3植物、C4植物、CAM植物によって異なる。その結果、植物の光合成形式によって $\delta^{13}\text{C}$ の値が多少異なるが、 $\delta^{13}\text{C}$ は-10‰(パーミル)から-35‰となる(図1)。化学合成細菌でも植物と同じRubiscoを用いるタイプはC3植物に似た $\delta^{13}\text{C}$ の値になる。数値はPDBに対する数値であるが、同じ時代の炭酸塩と比較することにより、測定された炭素が光合成等の二酸化炭素固定反応であるかどうかの判断材料とすることができる[2].

表2はこれまでに報告された、37億年前までの地層中の炭素同位体分析結果である[2]. ジャックヒルズの

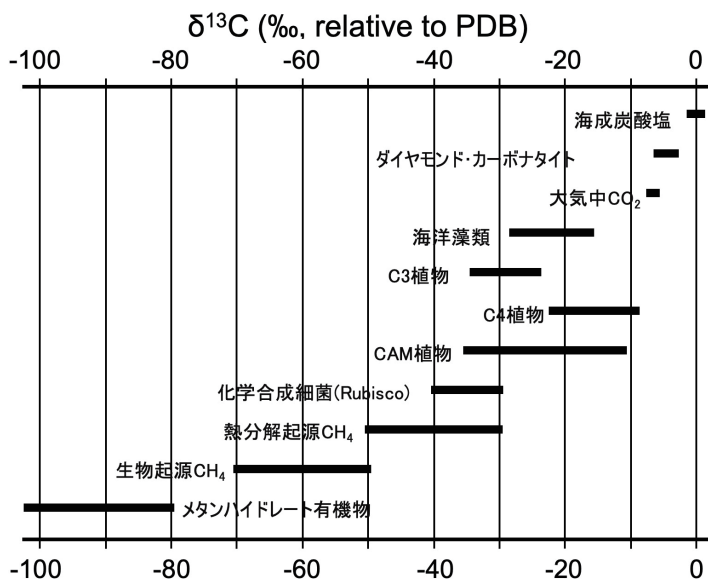


図1: 様々な起源の炭素の $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 同位体比. Naraoka [6].

表3: ガラパゴス海嶺周辺のATP, A_T , GTP : ATP [9].

Sample	ATP (ng/liter)	A_T (ng/liter)	GTP: ATP
Surface sea water ^a (50m)	130 ± 32	340 ± 112	0.16 ± 0.08
Deep seawater ^a (2400 m)	1.7 ± 0.3	3.4 ± 0.3	0.075
Garden of Eden vent ^a (2500m)	491 ± 151	1495 ± 553	0.86 ± 0.17
Garden of Eden vent ^b (2500m)	1943 ± 1143	4248 ± 2031	0.89 ± 0.35

Note: ^a ろ液. ^b 沈殿粒子.

41億年前のジルコン結晶中炭素の同位体比が報告されているが、炭素の混入年代が不明である[2]. Mojzsisら [7] によって、アキリア島、イスアの岩石中炭素の同位体分析が行われ、生命の痕跡を示すデータが得られていたがその産状は不明であった。その後、イスア堆積岩中炭素の同位体分析が行われ、その同位体比は生命の痕跡である可能性を示した(表1. イスア(3, 4)). 炭素の構造を顕微鏡で観察した結果、構造が不規則であることも炭素の起源が生命である可能性を支持している。すなわち、炭素同位体組成、炭素が堆積岩中にあること、さらに炭素の構造が不規則であることから、このイスア堆積岩中炭素は生命の痕跡である可能性が高い。つまり今から38~37億年前には生命が誕生していた可能性が高い [2].

2.3 最古の細胞化石

最古の細胞化石はオーストラリア、ビルバラ地方の35億年前の岩石中に発見された[8]. 微化石は細長い数珠状でその幅は5 μm 程度であった。通常、微生物細胞の直径は1 μm 以下の大きさなので、細胞の直径が一般の微生物としては大きい。この微化石付近には、ストロマトライトが発見されて、この微化石はシアノバクテリアではないかと推測された。ストロマトライトとはドーム状の縞状模様がある岩石で、シアノバクテリアの関与でできるものが知られている。水中でシアノバクテリアと他の微生物の共生体が粘液を出し、周りの砂を固めることでドーム状となる。夏に成長して冬に成長が停滞するため、縞模様ができる。またシアノバクテリアは光

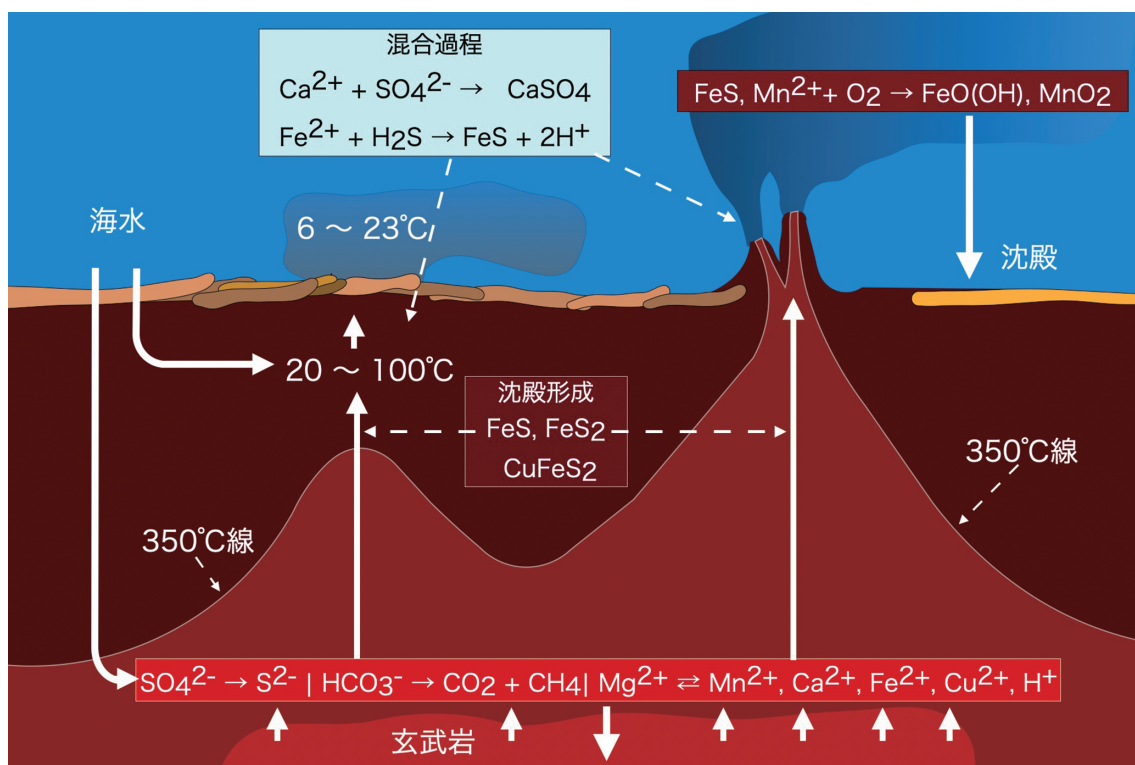


図2: 海底熱水噴出孔付近において推定されている化学反応モデル. Jannasch [11]より改変.

に向かって成長するため、ドーム状の形状となる。シアノバクテリアが最古の細胞化石生物なのだろうか。この最古の化石はシアノバクテリアでは無い可能性が高い。

2.4 深海熱水噴出孔付近の生物群集

最古の細胞化石がどのような生物なのか、初期生命に関して解説する前に、深海熱水噴出孔付近の生態系と化学合成細菌に関して解説する。

水深200m以下の深海にはほとんど生物は存在せず、砂漠同様のバイオマスである。動物、植物、微生物を含む全ての生物は、ATP(アデノシン三リン酸)をエネルギー利用に用いている。生物は有機化合物から取り出したエネルギーをATPに変換し、ATPの脱リン酸化で得られるエネルギーを生命活動に利用している。したがってATPは、生きている生物量を反映する。また A_T は、ATP、ADP(アデノシン二リン酸)とAMP(アデノシン一リン酸)の合計で、生育が盛んな生物と盛んでない生物、あるいは死んでからまもない状態の生物量の合計を反映している。GTPは増殖中の微生物細胞内に多

いことがわかっており、GTP:ATPは微生物の増殖を反映している。

表3はガラバゴス海嶺周辺のATP、 A_T 、GTP:ATPを測定した結果である[9]。深海200m以下は光が届かず生物がほとんどいない。表層海水と比べて、2400mの深海海水はATPおよび A_T が顕著に少ない。つまり深海には生物体がほとんど存在しない。Garden of Edenとよばれる熱水地帯では、周辺部の深海海水と比べてATPおよび A_T が顕著に増加していた。これは、この地点に熱水等のエネルギー源があり、微生物やその残骸があることを示している。なお、GTPは増殖中の微生物細胞内に多いことがわかっており、この数値が高いことから、熱水地帯で微生物が増殖していることもわかる。

深海底でも熱水地帯では、熱帯雨林に匹敵する $20\text{kg}/\text{m}^2$ のバイオマスがあることが報告された[10]。熱水地帯には、化学合成細菌による生態系があり、チューブワーム、シンカイヒバリガイ、甲殻類、ゴカイなどが生息している。この発見により、光合成生産がなく

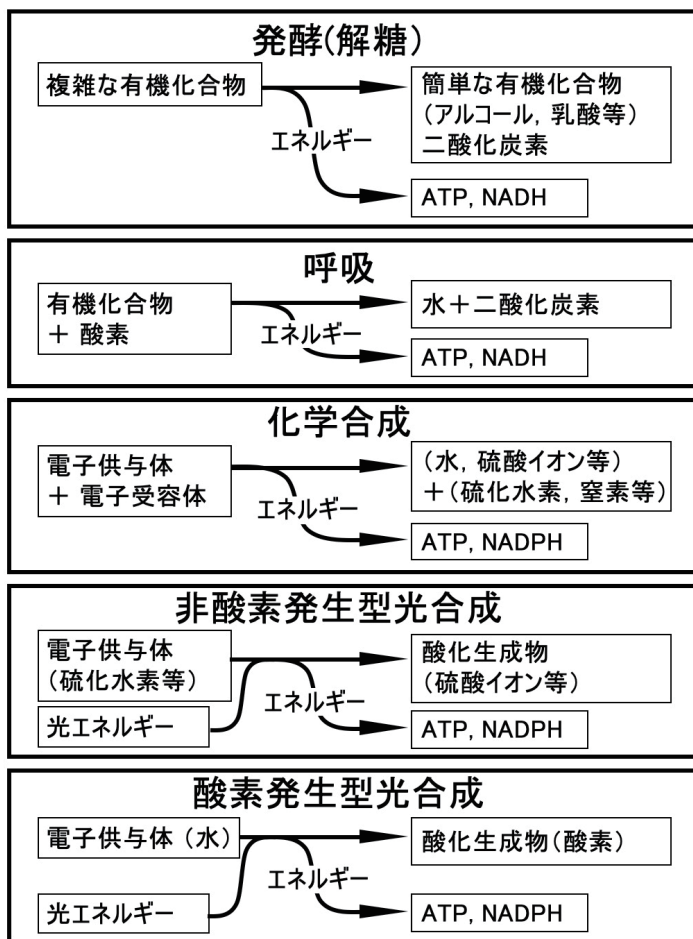


図3: 様々な代謝系の酸化還元反応とATP, NAD(P)H生産。発酵では有機化合物を、より低分子量の有機化合物(アルコールや乳酸など)や二酸化炭素に分解する時のエネルギーでATPとNADHを得る。呼吸では、有機化合物と酸素の反応によってATPとNADHを得る。化学合成では、電子供与体と電子受容体の酸化還元反応でATPとNADPHを得る。化学反応の種類に応じて、水や硫酸、硫化水素や窒素などの反応生成物を生じる。光合成では、光エネルギーを用いて、ATPを合成すると共に、電子供与体から電子と水素を取り出してNADPHを得る。酸素発生型光合成では水を、非酸素発生型光合成では硫化水素、水素あるいは低分子量の有機化合物を電子供与体として用いる。その結果、電子供与体から酸素や硫酸等が生成する。光合成や化学合成ではATPとNADPHを用いて二酸化炭素を還元して糖を合成する。

でも、熱水地帯で化学合成細菌による生態系が成立し得ることが明らかとなった[10]。これらの環境に生息している大型生物は、化学合成細菌と何らかの関係(共生、捕食等)を持って生育している。

2.5 海底熱水地帯地下および海中での化学反応

図2は海底熱水地帯地下でおきている反応を図示したものである[11]。海水中にはナトリウムイオンや塩素イオンの他、硫酸イオン、マグネシウムイオンが含まれて

いる。海底面下深部まで浸透した海水は高温の玄武岩と反応する。玄武岩との反応で、硫酸イオンは硫化物イオンに、マグネシウムイオンは、マンガン、カルシウム、鉄、銅、等の金属イオンや水素イオンと交換する。炭酸水素イオンは二酸化炭素やメタンに変換される。こうして、海水とは組成の変わった高温熱水が海底面に向かって上昇する。熱水が上昇する過程で温度が下がると、FeS、FeS₂、CuFeS₂等の沈殿を形成する。また、熱水が海底面下あるいはチムニー中で低温海水と混合する過程でCaSO₄やFeSの沈殿を形成する。熱水が海水

中に噴出して海水と混合すると、 $\text{FeO}(\text{OH})$ や MnO_2 が形成されて沈殿する。熱水が海底面下や海水中で混合する過程で希釈による温度の低下と沈殿形成が起きるが、それに加えて酸化還元反応が進行する。この酸化還元反応は化学的反応として進行するが、その一部は微生物の生育に利用される。

2.6 化学合成細菌

(1) 生物の代謝反応

海底熱水地帯の化学的非平衡状態から、微生物はどのようにエネルギーを取り出すのか。化学合成によるエネルギー獲得を、動物の呼吸や植物の光合成と比較しておく。なお、生化学反応での本質は反応前後でのギブス(自由)エネルギー差であるが、以下ではギブスエネルギー差を単にエネルギーと記述する。反応前後のギブスエネルギー差は、一般にエネルギーと言われる時の意味とほぼ同義である。必要があればエネルギーをギブスエネルギー差に読み替えて欲しい。

ヒトを含む動物(従属栄養生物)は、有機化合物からエネルギー(ATP)を取り出して、体の構成成分(有機化合物)を作り出している(図3)。酸素がある場合には従属栄養好気性生物は有機化合物と酸素の反応によってエネルギーを得る。まず、有機化合物から還元力として水素と電子をNADHに取り込む。NADHから電子伝達反応を介して酸素に電子を受け渡す反応過程でATPが合成される。NADHの水素は還元力が必要な生化学合成にも利用される。有機化合物と酸素との反応では、反応生成物として水と二酸化炭素が生成する。これは、呼吸と呼ばれる代謝過程である。

酸素が無い環境では、有機化合物を低分子量の有機化合物(アルコールや乳酸など)や二酸化炭素に分解することでATPとNADHを得る。この過程は発酵(あるいは解糖)と呼ばれる。

化学合成では、それぞれの生物種ごとに特定の化学物質の組み合わせからATPとNADHを得る(図3)。化学合成では還元型物質(H_2 , H_2S , Fe^{2+} 等:電子供与体)と酸化型物質(O_2 , SO_4^{2-} 等:電子受容体)の組み合わせが反応に使われる。この酸化還元反応の種類に応じて、水や硫酸、硫化水素や窒素などの反応生成物を生じる。化学合成ではそれらの酸化還元反応を行うことからATPとNADHを得る。得られたATPとNADHを用いて糖が合成される。なお、合成反応

に還元力を使う場合にはNADPHを、呼吸などの異化反応に還元力を使う場合にはNADHが使われる。NADPHとNADHは合成反応と異化反応で使い分けられている。

植物は、光エネルギーを用いてATPを合成すると共に、電子供与体である水から電子を引き抜くことで分解して O_2 を発生する(図3)。同時に水から引き抜いた電子と水素をNADPHとして受け取り還元力を得る。植物は、ATPとNADPHを用いて二酸化炭素を還元して糖を合成する。これは、酸素発生型の光合成と呼ばれる。

もう一つ別の光合成系として非酸素発生型の光合成がある(図3)。(光合成の詳細は第2回参照)。非酸素発生型光合成では、光エネルギーを用いてATPとNADPHを得るが、その時に電子供与体として水ではなく、硫化水素、水素あるいは低分子量の有機化合物を用いる。その結果、電子供与体は対応する酸化型の分子、硫酸や水等になる。非酸素発生型の光合成で、電子供与反応の結果できた化合物は化学合成の場合に似ているが、反応全体を見たときにエネルギーは低下せず、光エネルギーによって増加する。ATPとNADPHを用いて二酸化炭素を還元して糖を合成する点は、酸素発生型光合成や化学合成と同じである。

(2) 化学合成反応

化学合成反応でエネルギーを獲得する際には、電子供与体と電子受容体との間で進行する酸化還元反応を利用する。厳密には、電子供与体と電子受容体の反応後と、反応前のギブスエネルギーの差を利用する。様々な電子供与体と電子受容体の組み合わせを利用する様々な化学合成細菌および化学合成古細菌が知られている。個々の菌は細菌であったり古細菌であったりするが、化学合成細菌と化学合成古細菌の両方とも化学合成という観点では同じなので、区別をつけない場合には単に“菌”と記載しておく。その化学合成菌に利用される酸化還元反応の例は表4に、それらの反応を利用する化学合成菌が熱水地帯で見つかっているかどうか表5にまとめられている。主に電子受容体によって決まる反応の種類と電子供与体名で化学合成菌を名付けるが、メタンを生成する菌をメタン菌、酢酸を生成する菌を酢酸菌、窒素を生成する菌を脱窒菌とよぶ。

これらの細菌および古細菌は、電子伝達反応によってエネルギーを得ている。従属栄養微生物の酸素呼吸

表4: 化学合成菌が利用可能な反応の種類とその反応[11].

反応の種類	化学反応式
メタン生成	$4\text{H}_2 + \text{CO}_2 = \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$
硫酸還元	$4\text{H}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 = \text{H}_2\text{S} + 4\text{H}_2\text{O}$
メタン酸化鉄還元	$\text{CH}_4 + 4\text{FeO}_3 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{FeO}_2$
メタン酸化	$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$
硫黄酸化	$\text{H}_2\text{S} + 2\text{O}_2 = \text{H}_2\text{SO}_4$
水素酸化	$2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$

表5: 熱水噴出孔付近で発見された化学合成菌[11].

+: 存在が確認されている ++: 単離されている

電子供与体	電子受容体	化学合成菌	存在
$\text{S}^{2-}, \text{S}^0, \text{S}_2\text{O}_3^{2-}$	O_2	イオウ酸化菌	++
$\text{S}^{2-}, \text{S}^0, \text{S}_2\text{O}_3^{2-}$	NO_3^-	脱窒硫黄酸化菌	+
H_2	O_2	水素酸化菌	++
H_2	NO_3^-	脱窒水素酸化菌	-
H_2	$\text{S}^0, \text{SO}_4^{2-}$	イオウ硫酸還元菌	++
H_2	CO_2	メタン菌, 酢酸菌	++
$\text{NH}_4^+, \text{NO}_3^-$	O_2	硝化菌	+
$\text{Fe}^{2+}, \text{Mn}^{2+}$	O_2	鉄酸化菌, マンガン酸化菌	++
CH_4	O_2	メタン酸化菌,	++
CO	O_2	一酸化炭素酸化菌	++

では、有機化合物から得られた還元力NADHを用いてATP合成を行う。NADHを電子供与体として、細胞膜上の電子伝達系を通して電子を酸素に受け渡す。電子伝達過程で水素イオン濃度勾配を細胞膜内外に形成する。細胞膜内外の水素イオン濃度勾配を利用して、ATP合成酵素(プロトンATPアーゼ)がADPとリン酸からATPを合成する。多くの化学合成細菌や化学合成古細菌も、電子伝達反応でできる水素イオン濃度勾配を利用して、ADPとリン酸からATPを合成している。得られたATPとNADPHによって必要な有機化合物を合成している。

(3) 化学反応理論計算との比較

酸化還元反応のギブスエネルギー差は、標準ギブスエネルギー差と酸化還元に関わる基質の濃度によって決まる。熱水中の電子供与体濃度と周辺海水の電子受容体濃度を考慮して、酸化還元反応から得られるギ

ブスエネルギーの計算結果が表6にまとめられている。

350℃の熱水は海底面下で上昇する過程で、地下に浸透した低温海水と混合して徐々に温度を下げる。温度がまだ下がりきらない高温の段階で、二酸化炭素と水素からメタンを生成する反応と、硫酸イオンを水素で還元する硫酸還元反応が進行する。熱水が低温海水中に噴出されると、低温海水との混合過程で急速に温度が下がる。低温海水との混合過程で様々な電子供与体の酸化反応が進行する。様々な反応の中で硫化水素を電子供与体としたギブスエネルギーが、獲得可能なギブスエネルギーの大部分を占めている。

ただし、反応で得られるギブスエネルギーは熱水中の電子供与体濃度に依存している。通常、海底地殻を構成する玄武岩との熱水反応でできた熱水は、硫化水素を主成分として含んでいる。したがって反応で得られるギブスエネルギーの中で、硫化水素を電子供与体としたギブスエネルギーが大部分となる。一方、特殊な環

表6: 熱水地帯における反応から得られるギブスエネルギー(McCollom and Shock [12]より導出).

Electron donor	Conc. (mM)	Reaction	T (°C)	cal /kg vent fluid	Location
H ₂	1.7	methanogenesis	>40	<10	subsurface mixing zone
SO ₄ ²⁻	28	sulfate reduction	>40	<10	subsurface mixing zone
H ₂ S	7.3	oxidation	<40	760	plumes or diffuse mixing
Fe	1.7	oxidation	<40	<10	plumes or diffuse mixing
CH ₄	0.07	oxidation	<40	<10	plumes or diffuse mixing
Mn ²⁺	0.96	oxidation	<40	<10	plumes or diffuse mixing

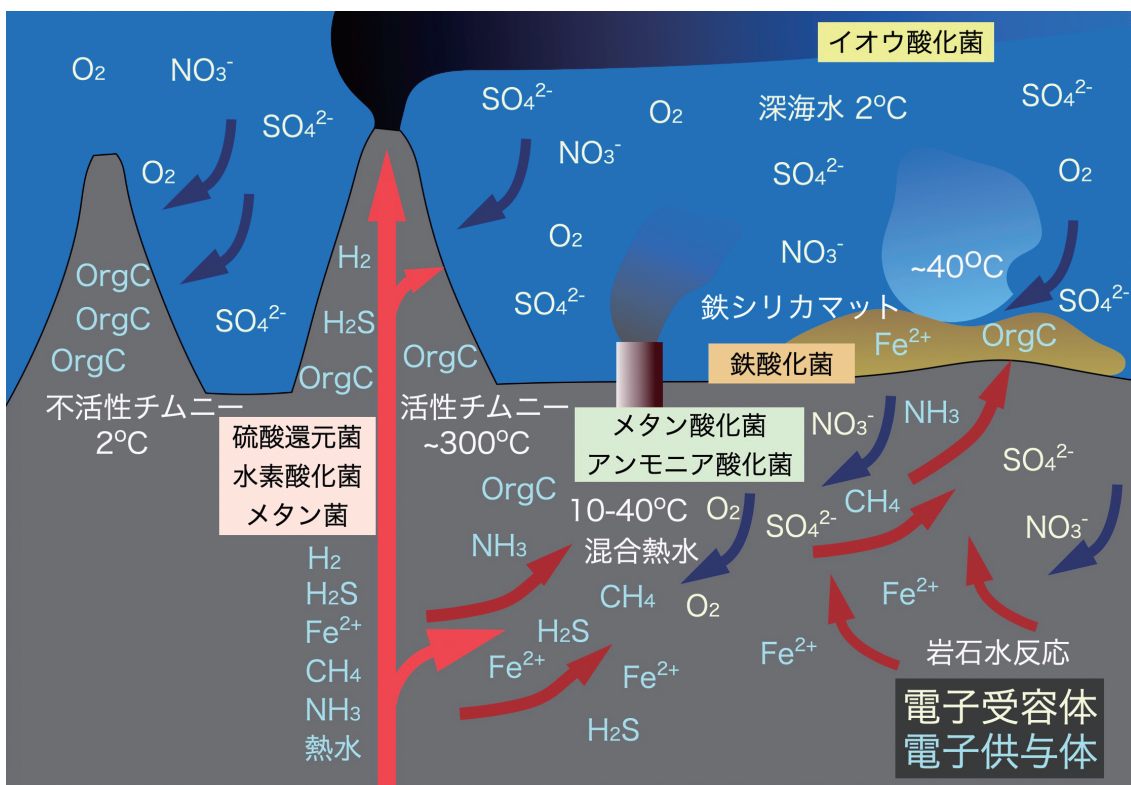


図4: 熱水系地下での電子受容体および電子供与体の流れと微生物群集. Kato ら [13]より作製.

境ではマントル構成成分であるかんらん岩が海底面近くに露出している。その環境では水素やメタン濃度の高い熱水となり、水素やメタンに依存した反応から得られるギブスエネルギーが大きくなる。

(4) 熱水系の微生物群集

それでは、海底熱水地帯にはどのような微生物がどこにいるのか。海底熱水地帯から様々な試料が採集さ

れた。試料はチムニーや、チムニーから噴出した熱水、周辺海水、および海底掘削を行った掘削孔からの流出水で、それらの分析から以下の様な微生物種が確認された(図4) [13]。海底面下から上昇する高温熱水中には超好熱性や好熱性の硫酸還元菌、水素酸化菌やメタン菌が、海底面下で低温海水と混合した低温熱水中では生育温度が低いメタン酸化菌やアンモニア酸化菌が、熱水噴出孔周辺の海水では硫黄酸化菌が卓越して

いた。さらに熱水噴出孔周辺の鉄を含む沈殿物中には鉄酸化菌が見られた[13]。すなわち表6から推定される、酸化還元反応から想定される菌が温度に依存して実際に確認された。

2.7 35億年前の生物(最古の化石)は一体何なのか。

35~30億年前には多くの微化石が報告されている[8, 14, 15]。多くの現存原核生物細胞は直径 $1\mu\text{m}$ 以下であるが、報告された微化石は数 μm を越える幅の細長い形状あるいは数珠状のものが多く、 $10\mu\text{m}$ を越える大型の細胞をもつ真核生物が出現するのは、分子系統樹からは20億年前以降と推定されているので(第2回参照)、35~30億年前の大型細胞の微化石が真核生物とは考えにくい。

原核生物の中では、シアノバクテリア、非酸素発生型光合成細菌、化学合成細菌には直径数 μm を越える細長い細胞形状のものがある。化学合成細菌やシアノバクテリア、光合成細菌は電子伝達反応をおこなう複雑な膜系を細胞内に持っており、細胞が大きい。一方で、こうした独立栄養原核生物以外の原核生物、従属栄養原核生物は細胞内の複雑な膜系を持たず、細胞直径は小さい。細胞が大きい独立栄養原核生物が35~30億年前の微化石の候補となっている。

また、その微化石の産状から当時の環境を推定して、微化石がどのような生物であるかの推定が行われている。例えば、オーストラリア北西部ノースポールの地層の解析が行われた。ノースポールの地層は、熱水地帯に特有の地層であることがわかった。そこには地層を貫くシリカ岩脈が観察された。この地層は当時の深い海であった可能性が考えられる。するとそこは光が届かない環境なので、シアノバクテリアが生息するには不適であり、そこで発見された微化石は海底熱水付近の生物ではないかと推測された[16]。西オーストラリア北部、ピルバラ緑色岩体のシリカ岩脈内に微化石が発見された。これは地層の特徴を考慮してシアノバクテリアではなく、化学合成細菌であろうと推定された[14]。

現存の大型細胞を持つ化学合成細菌として *Beggiatoa* という硫黄酸化細菌が発見され、*Beggiatoa* が太古代の微化石の候補と提案された。しかし、*Beggiatoa* は硫黄酸化細菌であるが、硫黄酸化細菌は酸素を電子受容体として必要とする。35~30億

年前の酸素濃度は極めて低いので、硫黄酸化細菌が生育できるとは考えにくい。

一方、細胞の幅が $5\mu\text{m}$ の数珠状細胞をもつ硫酸還元菌が熱水噴出地帯で活動を停止したチムニー表面で見いだされた[17]。硫酸還元菌は電子受容体として硫酸を用いるので酸素は不要である。硫酸還元菌が35~30億年前の微化石の候補となる。

また、非酸素発生型光合成細菌と推定される34億年前の微化石も報告された[15]。炭素同位体比は-35~-20‰で生物由来の炭素と推定された。この微化石は幅が $1\sim 1.5\mu\text{m}$ 程度の細長い形状で、同じ場所でバイオマツ(微生物が密集した微生物の固まり)が波によって変形したと推定される形状の化石も見つかった。つまり生育場所は比較的浅い波打ち際で、太陽光が当たる場所であろうと推定された。したがって、この化石は光合成生物の可能性がある。当時まだ地球に酸素はなかったことと、付近に菱鉄鉱(siderite: FeCO_3 (炭酸鉄(II)))の沈殿があったことを考慮して、この化石は非酸素発生型光合成細菌であろうと推定された[15]。非酸素発生型光合成細菌は、前述の様に水の代わりに硫化水素や水素、有機化合物を電子供与体とする光合成細菌である。

さらに、当時メタン菌がいた可能性も報告されている。熱水沈殿物中の液体包有物内にメタンが微量に含まれていることが発見された。同位体分析により、メタンが生物由来であることが確認でき、35億年前にメタン菌が存在していたことが推定された[18]。

2.8 第2節のまとめ

地球が46億年前に誕生してから45~38億年前に海ができていた可能性がある。38億年前には炭素同位体から炭酸固定を行う生物が誕生した可能性が高い。35~30億年前の地球には熱水活動があった。35~30億年前の生物細胞の微化石も見つかっている。ただし、微化石がどのような生物かという複数の可能性が提案されている。おそらく35~30億年前には化学合成細菌が存在していたと思われる。その種類として硫黄酸化菌や硫酸還元菌が提案されている。メタン菌や非酸素発生型光合成細菌もいた可能性が高い。

生物がエネルギーを得る手段として、発酵(解糖)、呼吸、化学合成、非酸素発生型光合成、酸素発生型光合成がある。光合成生物として、水素源および電子源とし

て水を使う酸素発生型光合成生物(植物とシアノバクテリア)と水以外(硫化水素、水素、簡単な有機化合物)を用いる非酸素発生型光合成細菌がいる。化学合成では電子供与体と電子受容体の組み合わせで炭酸固定を行う様々な化学合成細菌および化学合成古細菌がいる。

2.9 第2節への質疑応答

質問: 初期の海水量はどのくらいだっただろうか。

答え: 35億年前は現在と変わらないかあるいは2~3倍の量から減少している可能性があるが、まだ研究進行中であるとおもう。

質問: -25%は、光合成で作られる値であるが、化学エネルギーを食べる生物も同様なのか。

答え: 化学エネルギーを使う生物は、炭素の固定法が様々である。光合成と同じ酵素ルビスコ(Rubisco)を使う生物もいて、その場合には同様の値を示す(図1)。異なった代謝系をもつ細菌や古細菌は異なった値を持ち得る(参考: 金子と奈良岡 [19])。

質問: 酸素発生型光合成が始まったのはいつ頃か。

答え: まだ定まっていない。分子系統樹解析(次回参照)から30億年前くらいと推定されており、40億~30億年前頃は、まだ酸素発生型光合成生物は誕生していない。しかし、化学合成による炭酸固定は行われている可能性がある。その際、光合成と同様にルビスコ(Rubisco)を用いた炭酸固定をしている化学合成菌もいる(図1)。

質問: いつ頃の無機炭素を指標にしているのか? 当時か現在か?

答え: $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比測定の基準には標準化石(PDB)を用いるが、当時(40~35億年前)の無機炭素(炭酸カルシウム)を指標にして炭素微粒子中の $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ を判定している(Mojzsis ら [7])。

質問: 地球の磁場の形成期とそれ以前の紫外線による影響は?

答え: 磁場が無い事による放射線や、紫外線は水素同位体比に影響を与えた可能性はあるとおもうが、炭素の同位体比率が変わる可能性は少ないと思う。何れにせよ当時の無機炭素を指標にしているので問題無いと思う。

質問: もととのソースは CO_2 という前提になっているが、

非生物的なものから合成された有機化合物は?

答え: 考慮していない。地球形成時に集積した有機化合物は、マグマオーシャンで分解されたはずである。その後、飛来した有機化合物の寄与はあるはずだが、これまでの検討では考慮されていない。ただし、Naraoka ら [20]は南極氷上で採集された炭素質隕石30数試料について、炭素量とその同位体比を測定し、約1.3 wt%と加重平均で-5.8%(vs. PDB)を得ている。そういう意味では飛来した有機化合物は炭素同位体比にはあまり影響がないということかもしれない。

質問: 火星の土壤中に有機化合物が見つかった。

答え: 火星でCuriosityが発見した有機化合物は、宇宙からきたものか、過去の火星生命由来の両方の可能性がある(第3回参照)。

質問: 微化石の顕微鏡写真の黒い影は膜か?

答え: 炭素の痕跡である、おそらくグラファイトかケロジェンで膜構造は残っていない。

質問: カニとエビは何を食べているのか、チューブワームを食べているのか?

答え: 化学合成細菌もしくは、化学合成細菌を食べている何かを食べていると思われる。

質問: 深海熱水付近の化学合成細菌は、実験室に持ち帰り、培養可能か?

答え: 化学合成細菌で培養されているものは表5に示した。ただし、特定の種を培養しようというのは極めて困難で成功率は1%以下である。ただし、現在はゲノム解析でどの様な代謝を行っているか推定することは可能。また、近縁種が培養されていることも多い。小さいチューブワームは浅い場所にも生息しており、短期間培養可能。ただし、代謝反応等を調べる時には、間接的に調査している場合が多い。例えば、サンプルをすり潰して遺伝子を調べる。化学合成細菌と近縁かどうかをみる。その遺伝子がどの細胞の遺伝子かを特定するためには、細胞を蛍光染色して特定の遺伝子配列をもっているかどうかを調べる等を行う。現地で同位体標識した炭酸を使って生体内への取り込みを測定する場合もある。

質問: 海面よりもエネルギー量が大きいのか?

答え: 熱水噴出孔近傍での海水中では、熱水から離れた海底面直上あるいは海表面よりもはるかに

ATP量や A_T 量が大きい(表3)。

質問: 熱帯雨林でも同様のデータはでるのか?

答え: 熱帯雨林と深海とは調査方法が異なる。深海には微生物しかいないため、化学的方法となる。熱帯雨林では生体重量をはかる。海底熱水噴出孔周辺の化学合成細菌に依存した大型生物に関しては重量ではかられて、 $20\text{kg}/\text{m}^2$ という熱帯雨林なみの数値が得られている[10]。

質問: 全ての生き物はATPを使うのか?

答え: 全ての生物がATPを使う。リン酸結合は強すぎず弱すぎずちょうどよい結合の強さであるためと思われる。ATPはRNAの単量体なので、必ず細胞内にある。

質問: リンは比較的早い時期に作られるのか?

答え: 恒星の核融合反応では比較的最後にできた。リンは他の元素に比べて、宇宙での構成比率と比べて生体内での濃縮度が高い。リン酸を様々な反応や核酸で使っているためだが、その理由は現在不明である。

質問: 紅色細菌は化学合成細菌か?

答え: 紅色細菌といった場合には従属栄養細菌を主に含むプロテオバクテリアのグループのことを指す場合もある。今はあまり使われないが、かつてWoeseが命名した。プロテオバクテリアには従属栄養細菌のほか、非酸素発生型光合成細菌や化学合成細菌も含まれる。紅色光合成細菌は、非酸素発生型の光合成細菌である。

質問: 各化学反応において得られたエネルギーをATPにどのように換算するのか?

答え: 例えば、グルコース1分子あたり、32分子のATPが生成される。1分子のATPは約 $30\text{kJ}/\text{mol}$ なので、グルコース1分子あたり合計約 $960\text{kJ}/\text{mol}$ のATPができることになる。一方、グルコースの燃焼熱は $2800\text{kJ}/\text{mol}$ なので、グルコースのもつエネルギーの大部分は熱エネルギーとなる。グルコースを基質とした呼吸では電子伝達反応が行われ、電子伝達反応によって細胞膜内外で水素イオンの濃度勾配が形成される。水素イオンの濃度勾配にしたがって、 H^+ -ATPアーゼによってATPが合成される。これらの反応経路でできるATPの数を足し合わせる。

質問: ATPが1つ足りない(中途半端な)場合はどうなるか?

答え: 水素濃度勾配形成とそれを利用したATP合成では、きちんとした化学反応量論は成立していない。水素イオン濃度勾配を細胞膜内外で形成して、 H^+ -ATPアーゼでATPを生成する。これらの機構は、全生物ほぼ共通である。ATPもNADHも様々な代謝反応、呼吸、様々な生成反応で共通なので、それらを融通する。

質問: これらの化学反応は複雑系であり、生物が進化した結果、可能になった?

答え: そうである。化学合成菌の機能を発揮するためには複雑な電子伝達系、酵素系が必要で、さらにそれを維持する遺伝の仕組みが必要である。生命の起源で最初に誕生した生き物とは全く別の進化した生物と考えた方がよい(第2回参照)。

質問: 電子伝達の最初の反応は膜の上で行われる?

答え: 電子伝達反応は膜に存在するチトクロームとよばれる電子伝達タンパク質を介して行われる。熱エネルギーは生物のエネルギーとしては利用できない。そのため、化学エネルギーである必要がある。電子伝達反応では、細胞膜上の電子伝達反応によって細胞膜内外の水素イオン濃度勾配の形成を介してATPが合成される。

質問: 地点によって、ガスの組成に微生物種は対応している?

答え: 対応している。ガスの組成は地下で海水と反応する岩質に対応している。熱水の組成は地下の岩質に対応している。微生物種はガス成分の組成に対応している。

質問: 微生物はチムニーにしがみついている、ブルームの中にいる微生物は流されて行かないのか?

答え: ブルームに流出した微生物は死んでしまうが、チムニーに残った部分が増殖を続けている。

質問: 進化の速度は?

答え: 様々な遺伝子の解析を行うと原核生物の進化速度は一般に真核生物よりも遅い。原核生物細胞の分裂速度が速い(速い場合には20分に1回分裂する)ので、遺伝子がランダムに起こす変異速度は速いのだが、原核生物の系統樹上の遺伝子変化速度は真核生物より遅い。遺伝子の変異が起きても、大部分の変異はむしろ適応度を下げたためと思われる。つまり、進化速度の決定要因は、変異が起きる速度ではなく、適応変異が起きる

速度によっている。

質問: チムニー間を移動している証拠はあるのか?

答え: 様々な場所の熱水地域で見つかる同種の原核生物の間に大きな違いはみられない。原核生物の場合、進化を決めているのは場所ではない。という事は系統樹的な時間スケールでは同種で、同じ種が移動したと考えられる。

質問: 積極的な移動は確認できないが、移動している可能性はある?

答え: ある。原核生物は増殖できない環境では仮死状態で生きていられるので、その状態である確率で移動していると思われる。

質問: 化学合成細菌の食性は?

答え: さまざまである。酸化還元反応を行いうる電子供与体と電子受容体の組み合わせが環境にあればそれを利用する(表5)。

質問: すりつぶしてしまうとわからなくなる?

答え: 酵素の種類を調べれば反応基質がわかるが、遺伝子を調べる方が早い。遺伝子を調べることで、どの様な化学合成菌かは概ねわかる。

質問: バイオマットの化石が非酸素発生型光合成細菌であると推定した件について、当時酸素分圧が低かった以外の証拠はあるのか?

答え: 23億年以前のイオウ同位体比にバラツキが見られることから、当時は酸素が現在の10万分の一以下であった。付近に菱鉄鉱(siderite: FeCO_3) (炭酸鉄(II))の沈殿があり酸素濃度はこの環境でも低かった。化学合成細菌の内、鉄酸化菌、水素酸化菌は酸素が必要なのでこの環境では生育できない。バイオマッ化石は、当時の深度200mより浅いところだけで確認された。これは、光合成生物であることとつじつまがあう。非酸素発生型光合成細菌と調和的である(Tice & Lowe [15])。シアノバクテリアの誕生が系統樹からは30億年前なのでシアノバクテリアでは無いと思うが、論文では検討していない。

質問: 非酸素発生型光合成細菌の反応系はどのようにして解明されたか?

答え: 植物生理学、遺伝学、生化学の面から調べられた。研究初期には、光をあてて光合成反応が起きるときに必要な基質と反応によってできる分子を特定した。その後、酵素の種類や、電子伝達系を

構成するタンパク質(チトクローム)の種類や反応が調べられた。多数の実験によって反応系が明らかにされた。

質問: 水素に着目している理由?

答え: 化学合成と光合成いずれの場合でも有機化合物を合成するためには CO_2 を還元する必要がある。そのためには、電子だけでなく水素が必要。NADPHを介して水素が CO_2 還元のために利用される。呼吸から得られたATPのエネルギーで有機化合物合成を行うこともあるが、その際に還元反応が行われるためには水素が必要でNADPHを介して他の有機化合物から得た水素が利用される。

質問: どうして細胞は数珠状なのか?

答え: 細胞分裂後の方向によるため。細胞を特定の環境におくと、分裂後の細胞が分離しないで数珠状になる微生物は多くいる。数珠状の細胞を形成することは困難ではない。進化的なメリットとしては、絡み合ってまとまるため、固着しやすく、流れのある環境で流されにくくなるかもしれない。

質問: どうして分裂する際に面的にひろがらないのか、線なのか?

答え: 面的に細胞を形成するのは難しい。微生物細胞の有る一つの軸の中央では分裂できるが、それと直交する軸では分裂装置を持たない。したがって、分裂を複数回行った場合に長い線状にはなるが、面にはならない。面状の分裂を行う様になるのは、真核生物の藻類以降である。

質問: 膜表面での反応系が重要であるのに、数珠状に結合することで、表面積は減少しないのか?なぜ表面積を増加させるよりも、結合するのか?

答え: 微生物細胞はサイズが $1\mu\text{m}$ 程度なので、光を透過する。そのため、細胞の裏が影にならないため、細胞が束にもなってもあまり支障がない。光合成細菌や化学合成細菌は細胞内に非常に複雑に折りたたまれた内膜構造を持って膜面積を増やしており、細胞膜よりも効率よくはるかに面積が多くなっている。

表7: 大腸菌の分子組成 [21]

成分	重量(%)
水	70
タンパク質	15
核酸(DNA)	1
(RNA)	6
糖類	6
脂質	2
その他の有機分子	1
無機イオン	1

3. 生命構成元素の由来

この節では、生物を構成する分子と元素と、その由来を簡単に説明する。

3.1 生き物の組成

生き物はどんな分子、どんな元素でできているのか。表7は大腸菌の成分を重量%で示している。大腸菌は生物学で最も代表的な生物として、様々な分析が行われている。他の微生物、動物や植物等の多くの生物でも、細胞構成成分の比率はほぼ同じである。その成分構成は水が70%程度、有機化合物が30%程度である。その中でもタンパク質が最も構成比率が高い。タンパク質は機能性の高い成分である。

タンパク質は、アミノ酸の重合によってできる高分子化合物である。アミノ酸50~100個以上が、決まった配列で結合してタンパク質ができる。このアミノ酸配列は、遺伝子によって決まっている。

例えば図5はリゾチームという名前の触媒タンパク質、酵素の立体構造である。リゾチームは涙の成分である。リゾチームは細菌の細胞壁を分解する触媒活性をもち、殺菌作用をしめすことで細菌感染を防いでいる。リゾチームのアミノ酸配列は遺伝子によって決まっており、その配列はヒト個人ごとには変わらない。アミノ酸配列が決まると、疎水性のアミノ酸は内側へ、親水性のアミノ酸は外側へ移動する。アミノ酸の構造がジグソーパズルの様に組上がって、タンパク質の立体構造が形成される。立体構造が決まると、基質(図5上の矢印の紫)が結合する部位ができる。反応を触媒する残基が基質に対して適切な位置にくることで、触媒

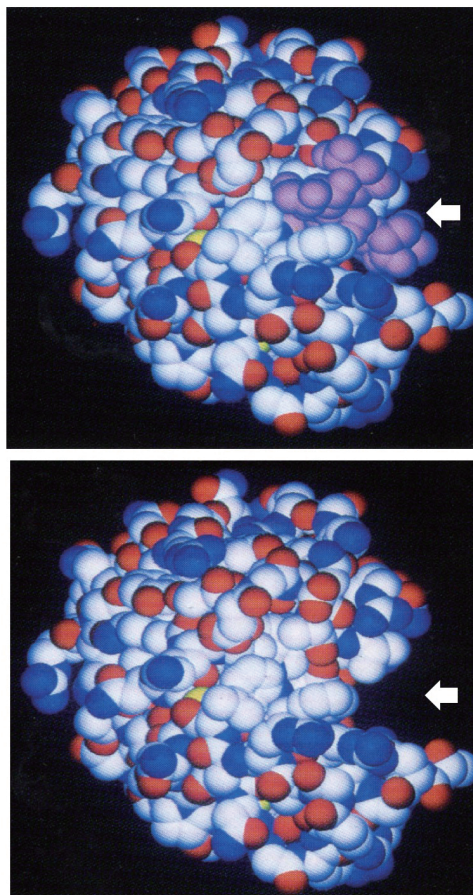


図5: リゾチームの立体構造。下図右の凹み矢印部分に上図では矢印の分子(反応基質:紫)がはまり込み、切断反応が触媒される。原子は、白:炭素(水素は省略されている)、青:窒素、赤:酸素、黄:イオウ。

機能を発揮する。つまり、図5の構造決定にはアミノ酸の疎水性と親水性が寄与しており、構造決定には溶媒として水が必要である。

こうして、水はタンパク質の構造維持に重要な役割をもっている。また、水は非常に優れた溶媒である。溶媒として体内の代謝系タンパク質や代謝産物を溶解し、その移動や拡散に大きく関与している。その他、脂質膜の形成にも膜脂質の疎水性と親水性部分が寄与している。したがって、水の存在が膜構造形成に必要である。水は分子間水素結合によって多量体性を持っている。水は水素結合の寄与によって、蒸発熱、凝固熱および比熱が高い。これが地球表面の温度の安定化にも寄与している。

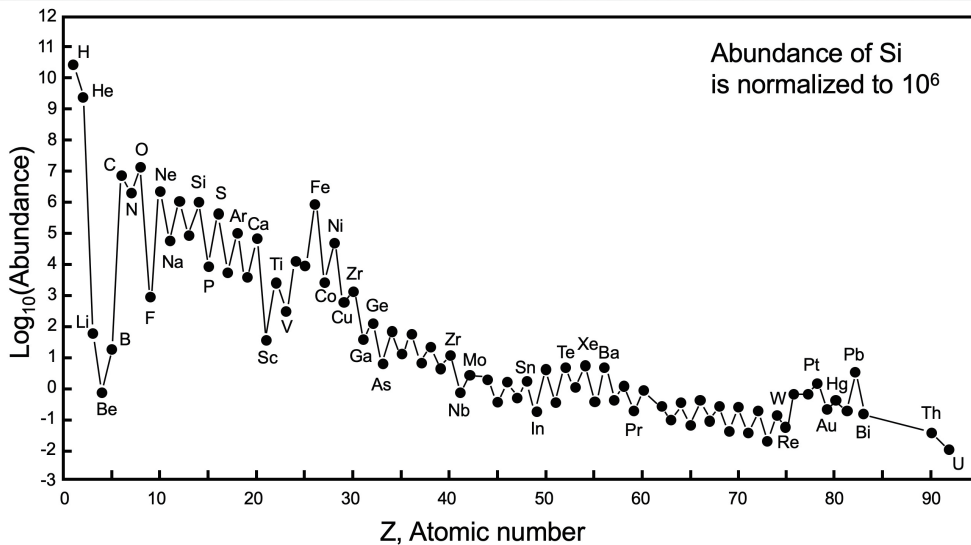


図6: 宇宙における元素存在量. Lodders [24]より作製.

表8: ヒトの元素組成 [22].

元素	乾燥重量(%)	元素	乾燥重量(%)
C	61.7	F	痕跡
N	11.0	Si	痕跡
O	9.3	V	痕跡
H	5.7	Cr	痕跡
Ca	5.0	Mn	痕跡
P	3.3	Fe	痕跡
K	1.3	Co	痕跡
S	1.0	Cu	痕跡
Cl	0.7	Zn	痕跡
Na	0.7	Se	痕跡
Mg	0.3	Sn	痕跡
B	痕跡	Mo	痕跡

表9: 海水の元素濃度[23].

海水	mg/kg
Cl	19350
Na	10780
Mg	1280
S	898
Ca	412
K	399
Br	67

3.2 ヒトの元素組成と宇宙における元素存在量比, 海水成分との比較

ヒトの身体を元素にまで分解して分析すると(表8), 主成分は炭素, 窒素, 酸素, 水素であるが, これらは宇宙に多い元素でもある(図6). 宇宙に多いから利用しているとは言えないが, 少なくとも利用可能であったとは言える. これらの元素は, 原始大気成分である二酸化炭素あるいは一酸化炭素, 窒素, 水蒸気にも含まれ

ていた。

ヒトを構成する元素の内、炭素、窒素、酸素、水素に次いで多い成分はカルシウム、カリウム、イオウ、塩素、ナトリウム、マグネシウムで(表8)、これらは海水の成分でもある(表9)。海水成分は地殻から溶け出した物であり、ヒトのこれらの成分は地殻由来と言っても良い。

3.3 生命構成元素に関するまとめ

生命を構成する分子は水が約70%で有機化合物が約30%、有機化合物の中でタンパク質が最も多くを占める機能的分子である。タンパク質を構成するアミノ酸残基の疎水性と親水性等の残基の性質によってタンパク質立体構造が決まっている。水は、タンパク質や膜構造を維持することと、種々の代謝関連分子の溶媒として機能している。

生体構成元素は、炭素、窒素、酸素、水素であるが、これらは宇宙に多い元素でもある。残りの生体構成元素として海水成分と同じ元素が含まれている。

3.4 生命構成元素の由来に関する質疑応答

質問: タンパク質の構造の決定方法は、乾燥させてX線解析するのだろうか?

回答: タンパク質を結晶化するが、その方法は単純に乾燥するわけではない。乾燥はさせず、徐々に吸湿させてタンパク質溶液の濃度をあげる。結晶のX線回折をおこない、分子構造を決定する。

質問: 得られたタンパク質の構造は正しいのか?

回答: X線解析を行う結晶内では、溶液中では存在しない隣接タンパク質分子同士の相互作用が発生している。その効果で接触箇所の構造が微妙に変わる可能性はある。しかし、その変化はそれほど大きくなく、タンパク質の全体構造が結晶化でかわることはない。

質問: 実験によって、生物の起源となるものを化学的に合成することは可能か?

回答: アミノ酸はMillerの気体中での放電によって合成可能である。RNAは水溶液中で合成可能。アミノ酸は乾燥状態で高温にすることで、脱水熱重合してプロテノイドになる。しかし、遺伝子で配列が決まっていなかったプロテノイドは、ペプチド鎖が溶媒中でランダムなブラウン運動をしている状態で、タンパク質の様な決まった構造をとるこ

とはない。RNAは乾燥することで、多量体を形成する。これも、リボザイム活性を持つ配列が偶然重合によってできる確率は極めて低い(第2回参照)。

質問: 宇宙の全物質の原子数を合わせてもタンパク質一つの合成を試すために足りない。しかし、生物は誕生した。なぜ?

回答: 1950年代、J. モノーによって指摘されている課題でもある。何らかのダーウィン進化が初期から働いたというのが可能性のひとつ。もう一つは、全宇宙がインフレーションの拡大によって現在見えている範囲よりはるかに大きい可能性がある。その場合には、生命誕生に必要な配列空間を試行錯誤するのに十分な原子があるという計算もある(Totani [25])。

質問: タイタンの表面には液体の有機化合物がある。ここでは、同じタンパク質をもつ生き物を探すことはできるか?

回答: タイタン表面の液体、エタン・メタンは疎水性である。エタン・メタンの液体中に、タンパク質のような多量体分子ができてダーウィン進化によって構造をとるようになったとする。すると、おそらく親水性が内側で疎水性が外側のタンパク質、つまり水溶液中とは裏表逆のタンパク質ができるのではないかと推定している(第2回参照)。

質問: 氷が浮くと、なぜ環境が安定化するのか?

回答: 氷は熱伝導度が低いので熱伝導が妨げられる。氷が浮いて下側の液体の水の上に保温性の蓋ができた構造になるので、液体の水が保温されて保持される効果がでてくる。

表10: Murchison隕石中に含まれる有機化合物量[33].

Compound class	Concentration (ppm)
Amino acids	17~60
Aliphatic hydrocarbons	>35
Aromatic hydrocarbons	3319
Fullerenes	>100
Carboxylic acids	>300
Hydrocarboxylic acids	15
Purines and pyrimidines	1.3
Alcohols	11
Sulphonic acids	68
Phosphonic acids	2

表11: Murchison隕石中に含まれるアミノ酸[34]. #は生物が使っているアミノ酸.

α	Glycine	#	α	D-allo-Threonine	γ	L-4-A-3-HBA
α	D-Alanine		α	L-allo-Threonine	γ	γ -ABA
α	L-Alanine	#	α	DL- α -Methylserine	α	D-Valine
α	Sarcosine		α	D-Homoserine	α	L-Valine #
α	D-Serine		α	L-Homoserine	α	D-Norvaline
α	L-Serine	#	β	D- β -ABA	α	L-Norvaline
β	D-Isoserine		β	L- β -ABA	α	DL-Isovaline #
β	L-Isoserine		β	D- β -AIBA	α	D-Glutamic acid
β	β -Alanine		β	L- β -AIBA	α	L-Glutamic acid #
α	α -AIBA		β	DL- β -Homoserine	β	D- β -(Aminomethyl)-succinic acid
α	D- α -ABA		β	DL-3-Amino-2-(hydroxy-methyl)propanoic acid	β	L- β -(Aminomethyl)-succinic acid
α	L- α -ABA		β	DL-Isothreonine	α	D- α -Aminoadipic acid
α	D-Aspartic acid		β	D-allo-Isothreonine	α	L- α -Aminoadipic acid
α	L-Aspartic acid	#	β	L-allo-Isothreonine	α	D-Leucine
α	D-Threonine		γ	DL-4-A-2-HBA	α	L-Leucine #
α	L-Threonin	#	γ	D-4-A-3-HBA	α	D-Isoleucine
					α	L-Isoleucine #

質問: ケイ素も多いけど、使われていないのか?

回答: 大多数の生物はケイ素を使っていない。珪藻がケイ酸の殻をもつこと、放散虫と呼ばれる生物種が放射状に突出する骨針や、外側を覆う殻としてケイ酸を使っているだけである。ケイ素も4本の腕を持つので、炭素同様の化合物をつくっても良い様にも見えるのだが、地球にはケイ酸とケイ酸塩しかケイ酸化合物は見当たらない。工業的にケイ酸化合物が合成されて使われているが、これも炭素を含む分子である。二酸化炭素にくらべてケイ酸(SiO₂)が安定すぎるためケイ酸以外の構造が採りにくいと思われる(第2回参照)。また、水に対する溶解度も炭酸より低い。

4. 化学進化:生命誕生前の有機合成

化学進化に関しては、Kobayashi [26]が詳しい。Millerは1953年、CH₄、NH₃、H₂、H₂Oの混合気体中で放電することにより、アミノ酸や有機酸などの種々の有機化合物が合成可能であることを示した[27]。その後、多くの実験が行われ、アミノ酸と核酸塩基は宇宙

線、紫外線、放電、粒子線などを用いて合成可能であることがわかってきた。しかし、窒素原子が気体成分に入っていると合成された分子にアミノ基が入ってしまうために糖を合成することは難しい。

またMillerの行った実験はタイタンの大気を想定した還元型大気での実験であったが、その後、初期地球の大気成分は火山ガスに近く、二酸化炭素や一酸化炭素を含むものの、メタンやアンモニア、水素を含んでいない可能性が高くなってきた。こうした大気は、弱還元型大気とよばれるが、弱還元型大気のもとでは、有機化合物合成の効率は極めて低い。そこで、有機化合物が宇宙起源であるという可能性が高まっている。

4.1 宇宙空間での有機化合物合成

宇宙空間での有機化合物探査に関しては、Ohishi [28]が詳しい。既に宇宙空間で、多くの有機化合物が見つかっている。分子雲中では200種類を越える有機化合物が検出されている。彗星からスターダスト計画で持ち帰られた惑星間塵中からはグリシンが検出されている[29]。

(1) 隕石中の有機化合物

隕石中有機化合物に関してはYabuta [30]が詳しい。隕石には多くの種類があるが、中でも炭素質コンドライトという炭素に富む隕石で有機化合物が多く検出されている。一般には、隕石を地球で採集する場合には、地球由来の有機化合物が混入する可能性があるが、Murchison隕石は、地球落下後に時間をおかずに採集されたため、地球由来の有機化合物混入の可能性は低い。この隕石の成分を調べたところ、たくさんの有機化合物が含まれていた(表10)。

Murchison隕石では数十種のアミノ酸が検出されている(表11)。アミノ酸にはカルボキシル基とアミノ基がある。生物が使っているアミノ酸は、カルボキシル基とアミノ基が一つの炭素(α 炭素とよぶ)に結合していて、これを α アミノ酸と呼ぶ。カルボキシル基とアミノ基が一つ隣の炭素(β 炭素)に結合している場合には、 β アミノ酸と呼ばれる。Murchison隕石中には、 α アミノ酸の他に、 β アミノ酸や γ アミノ酸が多数見つかっている。

また、 α アミノ酸の α 炭素の結合が鏡像異性のアミノ酸、D型アミノ酸とL型アミノ酸が存在するが、生物はそのうちL型アミノ酸を用いている。隕石中にはD型とL型が同程度の比率で含まれている。ただし、L型のほうが少し高い比率をもつアミノ酸もある[31]。生物はL型アミノ酸を利用してタンパク質を合成しているが、初期に地球にもたらされた隕石中アミノ酸のL型過剰がその起源である可能性もある。

この隕石には、生物が使っているアミノ酸よりも、はるかに多い種類のアミノ酸が含まれている(表11)。核酸塩基も、生物が使っているグアニンやアデニンを含む多数の塩基が見つかっている[32]。その中で、なぜ現存の生物が20種のアミノ酸を選択的に使っているのか、なぜ5種の核酸塩基を使っているのは不明である。

(2) 有機化合物のできかた

宇宙では、星間分子雲中で200を超える有機分子種が検出されている[28]。それらは、彗星、隕石として地球にやってきた可能性が高い[30]。

宇宙空間でどの用に有機化合物が合成されたのかということに関して、グリーンバークのモデルが提案されている[26, 30]。このモデルでは、 μm 以下のケイ酸塩粒子の周りに氷の層ができ、その中に取り込まれた一酸化炭素やアンモニア等が放射線によって重合して有

機化合物が合成された。合成された有機化合物は、酸や水不溶性の高分子化合物であるが、加水分解によってアミノ酸や有機酸を生じるような構造を持っている[26, 30]。

その後おそらく、有機化合物を含むケイ酸塩と氷の微粒子が集まって、だんだんと大きな天体となった。天体が十分に大きくなると微粒子成分の融解が起き、分画によって岩石惑星型の天体となった。つまり、天体が中心部の金属性の核、それを取り巻く岩石性のマントル構造に分化した。それらが再び破壊されたことによって、鉄隕石、エコンドライトと石鉄隕石となった。分画が起きない段階で微粒子成分の変質程度が低い物がコンドライトで、その化学組成でエンスタタイトコンドライト、普通コンドライト、炭素質コンドライト等に分類されている[30]。

4.2 第4節のまとめ:化学進化

Millerの実験以来、初期地球大気での有機化合物合成の実験が行われてきたが、初期地球大気は弱還元的で有機化合物合成には適していなかった可能性が高い。一方、宇宙での有機化合物の研究が進んでいる。炭素質隕石中には多種のアミノ酸や核酸塩基が検出されている。炭素質隕石に含まれる有機化合物は、宇宙空間で合成され、様々な過程を経て隕石となった。温度が充分低下したあとの初期地球表層に隕石中有機化合物がもたらされた可能性が高い。

4.3 第4節に関する質疑応答

質問: 芳香族アミノ酸の重要性はないのか?

回答: 芳香族分子そのものは、Murchison隕石中に大量に含まれているが(表10)、これまで芳香族アミノ酸に関してはフェニルアラニンとチロシンが報告されている[35]。タンパク質にはフェニルアラニン、チロシン、トリプトファンという3つの芳香族アミノ酸が含まれている。一方、生物が用いる20のアミノ酸種がなぜ、用いられているかは、まだはっきりわかっていない。ただし、生命誕生後ある時期までは、生物が20種よりも少ない種のアミノ酸種だけを用いていた可能性も提案されている。その場合、例えばアラニン、フェニルアラニン、イソロイシン、リシン、ロイシン、メチオニン、グルタミン、セリン、トレオニン、トリプトファンは無く

でも機能するタンパク質を構築できる(Shibue ら [36]). つまり, 初期生命は芳香族アミノ酸をあまり使っていない可能性もある.

質問: グリシンの次に見つかるべきアミノ酸は?

回答: 宇宙塵中に見つかってほしいアミノ酸という意味であれば特に指定はないが, アラニンがグリシンの次に簡単な構造を持っているので見つかりやすいのではないか.

質問: アミノ酸が隕石中などで重合していることは?

回答: 隕石の種類によっても異なるが, アミノ酸は抽出される量の半分程度が, 100℃の水で抽出される遊離のアミノ酸である. 残りの半分程度は, その残渣をさらに塩酸で抽出したときに抽出されるので, おそらく不溶性高分子として存在している. アミノ酸のダイマーも抽出されている[37].

質問: 隕石中でアミノ酸はどうできたのか?

回答: 星間空間の温度の低い部分で, シリカのサブ μm サイズのコアができ, コアの周りにできた氷に水素, 一酸化炭素, 窒素あるいはアンモニアが溶け込み, 放射線照射されたことによりアミノ酸ができた. その微粒子が重合してだんだん大きな塊となり, 途中の過程をへて隕石となって地球へやってきた.

質問: ラセミ体はできないのか.

回答: ラジカル反応でできる不溶性高分子中のアミノ酸は基本的にはラセミ体のはずである. ただし, L体とD体のどちらが選択的に合成されたかあるいはどちらが選択的に分解されたことによってL体過剰あるいはD体過剰になる可能性はある. そのプロセスはいくつか提案されて, 実験検証がおこなわれている.

質問: 糖はみつまっている?

回答: Murchison隕石中に糖リボースがみつまっているが, 塩基と縮合しないので, ヌクレオチドの合成過程が問題となっている(第2回参照).

質問: アミノ酸が宇宙由来であるとすると, 量的にはどのくらい必要であるか?

回答: わからない. 海に溶け出すと薄まってしまうので, 濃縮方法を考えないといけない. 波打ち際, 陸の池やクレーター等が生命の起源の場所として検討されている(第2回参照).

引用文献

- [1] Genda, H., 2019, in *Astrobiology: From the origins of life to the search for extraterrestrial intelligence* (Singapore: Springer Nature), 197.
- [2] 掛川 武, 2017, *生物の科学 遺伝* 71, 133.
- [3] Sugitani, K., 2019, in *Astrobiology: From the origins of life to the search for extraterrestrial intelligence* (Singapore: Springer Nature), 229.
- [4] Wilde, S. A. et al., 2001, *Nature* 409, 175.
- [5] 下山 晃, 1995, *月刊地球* 17, 440.
- [6] Naraoka, H., 2010, *Res. Org. Geochem.* 26, 13.
- [7] Mojzsis, S. J. et al., 1996, *Nature* 384, 55.
- [8] Schopf, J.W. and Packer, B. M., 1987, *Science* 237, 70.
- [9] Karl, D. M. et al., 1980, *Science* 207, 1345.
- [10] Grassle, J. F., 1985, *Science* 229, 713.
- [11] Jannasch, H. W., 1985, *Proc. R. Soc. Lond.* B225, 277.
- [12] McCollom, T. M. and Shock, E. L., 1997, *Geochim. Cosmochim. Acta* 61, 4375.
- [13] Kato, S. et al., 2010, *Environ. Microbiol.* 76, 2968.
- [14] Ueno, Y. et al., 2001, *Int. Geol. Rev.* 43, 196.
- [15] Tice, M. M. and Lowe, D. R., 2004, *Nature* 431, 549.
- [16] Isozaki, Y. et al., 1997, *EOS* 78, F 399.
- [17] Kato, S. and Yamagishi, A., 2016, *Deep-Sea Res. Part I* 110, 99.
- [18] Ueno, Y. et al., 2006, *Nature* 440, 516.
- [19] 金子雅紀, 奈良岡浩, 2011, *Res. Org. Geochem.* 27, 55.
- [20] Naraoka, H. et al., 1997, *Geochem. J.* 31, 155.
- [21] Watson, J.D., 1976, *Molecular Biology of the Gene*, 3rd ed. (New York: Benjamin).
- [22] ICRP, 1974, in *Report of the task group on reference man* ICRP Publication (Oxford: Pergamon Press), 23
- [23] DOE, 1994, in *Handbook of methods for the analysis of the various parameters of the carbon dioxide system in seawater. version 2* (Washington DC: USDOE), ORNL/CDI-

AC-74.

- [24] Lodders, K., 2003, *Astrophys. J.* 591, 1220.
- [25] Totani, T., 2020, *Sci. Rep.* 10, Article number: 1671.
- [26] Kobayashi, K., 2019, in *Astrobiology: From the origins of life to the search for extraterrestrial intelligence* (Singapore: Springer Nature), 43.
- [27] Miller, S. L., 1953, *Science* 117, 528.
- [28] Ohishi, M., 2019, in *Astrobiology: From the origins of life to the search for extraterrestrial intelligence* (Singapore: Springer Nature), 11.
- [29] Elsila, J. E., 2009, *Meteor. Planet. Sci.* 44, 1323.
- [30] Yabuta, H., 2019, in *Astrobiology: From the origins of life to the search for extraterrestrial intelligence* (Singapore: Springer Nature), 23.
- [31] Cronin, J. R. and Pizzarello, S., 1997, *Science* 275, 951.
- [32] Callahan, M. P. et al., 2011, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 108, 13995.
- [33] Ehrenfreund, P. et al., 2002, *Rep. Prog. Phys.* 65, 1427.
- [34] Koga, T. and Naraoka, H., 2017, *Sci. Rep.* 7, 636.
- [35] Burton, A. S. et al., 2012, *Chem. Soc. Rev.* 41, 5459.
- [36] Shibue, R. et al., 2018, *Sci. Rep.* 8, 1227.
- [37] Shimoyama, A. and Ogasawara, R., 2002, *Orig. Life. Evol. Biosph.* 32, 165.

著者紹介

山岸 明彦

東京薬科大学 生命科学部 名誉教授. 東京大学 大学院理学系研究科 相関理化学専攻 博士課程修了. 理学博士. 日本学術振興会 奨励研究員, カリフォルニア大学 バークレー校 博士研究員, カーネギー研究所 植物生理学部門 博士研究員, 東京工業大学 生命理工学研究科 助手, 東京薬科大学 助教授, 準教授, 教授を経て, 2018年4月に退職して名誉教授. 専門は分子生物学・微生物学. 日本惑星科学会, 極限環境生物学会, 宇宙生物科学会, 生命の起原および進化学会に所属.