

# 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

2019年2月18日(月)・19日(火)

講演者：山岸明彦氏

(東京薬科大学 名誉教授)

ノート作成者(1日目)：千葉紗登子(筑波大学大学院)

## 目次

cf. 文献の紹介 .....	3
* 宇宙の歴史(概略) .....	3
1. 地学の証拠：地層に隠された証拠 .....	4
1-1. 地殻形成の歴史：岩石の物質解析 .....	4
1-2. 深海熱水噴出孔付近の生物群集 .....	9
1-3. 化学合成細菌 .....	12
1-4. 35億年前の生物(最古の化石)は一体何なのか。 .....	15
◇まとめ1：様々な反応系 .....	16
◇まとめ2：30~35億年前の地球環境 .....	16
【質問1】 .....	17
2. 生命構成元素の由来 .....	21
【質問2】 .....	23
3. 化学進化：生命誕生前の有機合成 .....	24
3-1. 宇宙空間での有機物合成 .....	24
◇まとめ3：化学進化 .....	25
3-2. 核酸の成り立ち .....	26
◇まとめ4：核酸合成 .....	28
【質問3】 .....	28
4. 生化学的研究：RNAワールド .....	29
◇まとめ5：DNAとタンパク質の合成 .....	30

【質問 4】 .....	32
5. 生命の始まり .....	34
5-1. 生命の起源説 .....	34
5-2. 生命誕生の場 .....	36
◇まとめ 6：生命誕生の場 .....	37
5-3. 完全祖先型酵素：祖先酵素完全合成 .....	37
◇まとめ 7：祖先型酵素完全合成によりわかったこと .....	39
◇まとめ 8：生命の起源 .....	39
【質問 5】 .....	39
6. 地球上で生命はどのように進化したか .....	42
6-1. 進化 .....	43
6-2. 絶滅の証拠 .....	44
◇まとめ 9：進化 .....	46
◇まとめ 10：ダーウィン型進化 .....	46
【質問 6】 .....	46
7. 遺伝子・生命の歴史 .....	49
7-1. 分岐年代（化石） .....	50
7-2. 光合成の進化 .....	51
7-3. 真核生物の成り立ち .....	53
◇まとめ 11：繁栄した種と絶滅した種の違い .....	54
◇まとめ 12：陸上植物の進化 .....	54
【質問 7】 .....	55
参考文献 .....	57

\* 講師紹介 <山岸明彦先生>

東京薬科大学 名誉教授

学生時代は光合成について研究（生物学、生物物理学、生物化学）を行う。

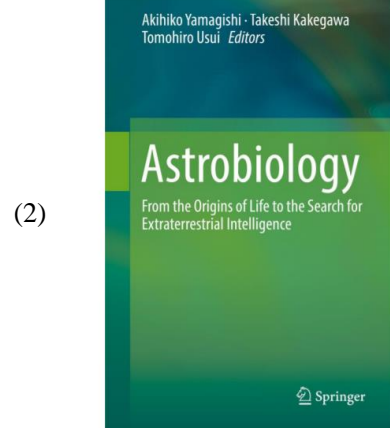
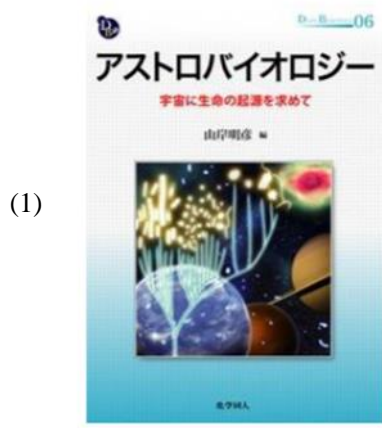
その後、アメリカに留学。

帰国後、主に好熱菌について研究。

現在は、JAXA で宇宙実験や委員会への出席等を行う。

cf. 文献の紹介

- (1) アストロバイオロジー 山岸明彦編 化学同人 (2013)
- (2) Astrobiology Yamagishi, Kakegawa and Usui eds. Springer-Nature, Singapore (2019)



\* 宇宙の歴史 (概略)

宇宙は 138 億年前に誕生した。インフレーション後のビッグバンによって誕生したとされている。ビッグバンの 3 分後には原子核が誕生し、この時、原子核誕生と共に水素とヘリウムが誕生した。その後、様々な元素が恒星中の核融合反応により進行し誕生した。また、鉄より質量の重い元素は超新星爆発により誕生した。

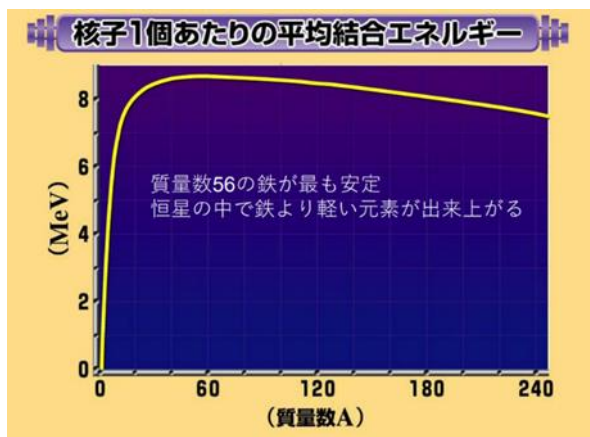


Fig. 1 各元素の質量数における核子1個あたりの平均結合エネルギー

様々な元素が誕生し、銀河中に拡散した様々な元素が集まり、星が誕生した。その星を中心として惑星が形成され、惑星系が誕生した。同様に、地球は 46 億年前に誕生した。私たちの住む太陽系の誕生の際にできた有機物が生命誕生に寄与しているのではないか。

# 1. 地学の証拠：地層に隠された証拠

## 1-1. 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化石は、ジャックヒルズ（オーストラリア）で発見された。その化石は、岩石中のジルコン結晶の解析から、44~45 億年前であると推定されている。また花崗岩中にジルコンが含まれていたことから、ジルコン形成時には既に、大陸地殻と海があったのではないかと考えられている<sup>(1)</sup>。また、ジルコンは岩石と低温状態の水との間で形成される。ジルコン中の酸素同位体比 ( $O^{16}/O^{18}$ ) から、39~42 億年前に海と陸が存在していたのではないかと考えられている<sup>(2)</sup>。

\* ジルコン ( $ZrSiO_4$ ) : ジルコニウムのケイ酸塩

他に、世界各地で多くの古い岩石が、塊の石の化石（40 億年以降）で発見されている。

Table 1 世界に知られる古い岩石<sup>(3)</sup>

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 イスアーゴッドハブ	イスア緑色岩 アミツオーク片麻岩
37 億年	シベリア、アルダン盾状地 中国、河北省	片麻岩 グラニュライト
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	ピルバラ緑色岩

枕状溶岩も、その時代に堆積岩のあった証拠であり、海が存在を示す証拠のひとつである<sup>(4)</sup>。また、炭素の粒の同位体 ( $^{13}C/^{12}C$ ) 分析から、最古の同位体化石は約 38 億年前と推定されている（グリーンランド）。

### ・初期地球環境

未だほとんどが不明である。

大気組成	: 酸化型、もしくは還元型
温度	: 現在よりも高い
海の組成	: 現在とあまり変化なし
大陸の存在	: 海水面の高さなど、未だ不明
酸素の有無	: 原子生物の酸化型化学合成が関与

(1) 最古の生命の証拠

安定同位体が存在している元素は、その同位体比から有機化合物の起源を明らかにすることができる。炭素は  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  の安定同位体が存在し、有機化合物の同位体比分析を行うことにより、自然界に存在する炭素の起源が明らかになる。

$^{13}\text{C}$  を含む有機化合物は、地球上に広く分布している。これは生物の様々な酵素反応によるためである。一方で、生物は代謝（光合成・化学合成）によって  $\text{CO}_2$  を取り込む際、 $^{12}\text{C}$  を早く取り込むため、 $^{13}\text{C}$  比が小さくなる。岩石中に含まれる炭素微粒子中の  $^{13}\text{C}$  比を測定し、当時の炭酸塩（無機炭素）と比較することにより、生命の有無を推定する。

下の図にて、一定の数値(20~30)より低い値は、生命の痕跡を示すのではないかと考えられる<sup>(5)</sup>。

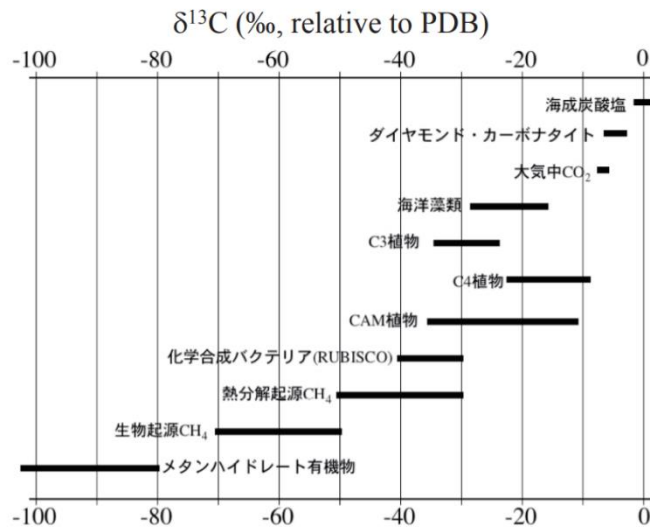


Fig. 2 各サンプルの有機化合物及び非有機化合物がもつ  $^{13}\text{C}$  比<sup>(5)</sup>

・イスア（オーストラリア）・ビルバラ・アキリア島（グリーンランド）にて、生命の痕跡を示すデータが得られていた。

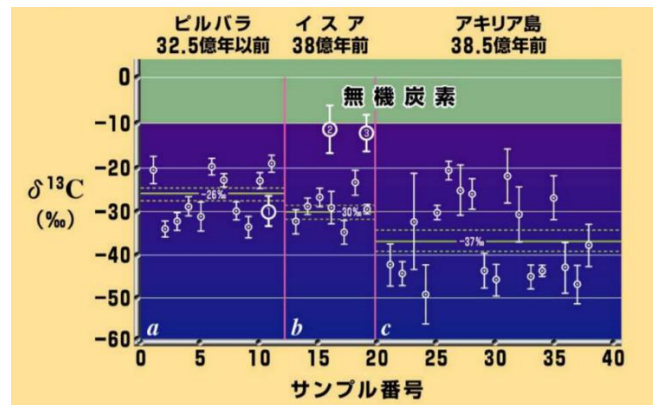


Fig. 3 炭素微粒子中の  $^{13}\text{C}$  の  $^{12}\text{C}$  に対する量<sup>(6)</sup>

Table 2 各地の太古岩石中石墨から分析した  $^{12}\text{C}$  と  $^{13}\text{C}$  の量比<sup>(7)</sup>

	地域名	年代 億年前	$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比	炭素の産状	コメント
1.	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 変性温度が花崗岩と不一致 Bell E.A., et al. (2015)
2.	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 Mojzsis S.J., et al. (1996)
3.	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 Mojzsis S.J., et al. (1996)
4.	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)	$\text{FeCO}_3\text{-CO}_2\text{-C}$ 37億年前の非生物炭素 Van Zuilen, M. A. et al. (2002)
5.	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)	明確な海底堆積物, 38~37億年前の炭素 Rosing, M. T. (1999)
6.	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)	明確な泥岩由来の変成岩, 38~37億年前の炭素 Ohtomo Y. et al. (2014)

1. 炭素の混入時期が不明、変性温度（低い）が花崗岩（高温）と不一致
- 2,3. 炭素の産状が不明
4. 非生物の可能性が高い
5. 堆積岩である、炭素の構造が不規則である → 最古の生命である可能性が高い
- 6.



Fig. 4 太古の地層の分布

グリーンランドのイスア地域には世界最古の 38 億年前の地層が分布している<sup>(8)</sup>

・ 35 億年前の最古の微化石

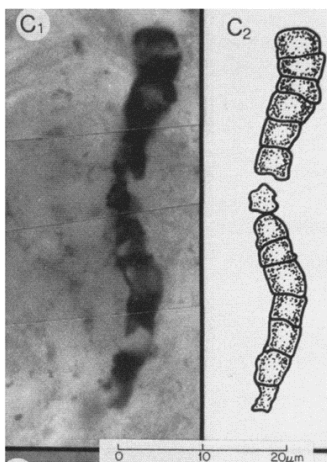


Fig. 5 Pilbara 緑色岩中の最古の微化石<sup>(9)</sup>

オーストラリアで発見された。幅は 5 $\mu\text{m}$  程度で数珠状をなしている。通常、微生物は 1 $\mu\text{m}$  以下の大きさなので、比較的大きい。この微化石付近には、ストロマトライト\*が発見されている。そのため、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

ドーム状の縞々の模様がある石。

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石となる。夏によく成長し冬に停滞するため、縞々の模様ができる。またシアノバクテリアは、光によって成長するためボール状の形状をなしている。



Fig. 6 ストロマトライト  
(オーストラリア)

シアノバクテリアが最古の生物なのだろうか。

(2) 世界各地の海底熱水地帯の化石

ノースポールのシリカ岩脈\*にて地質の解析を行ったところ、熱水地帯に特有の構造であることがわかった。この岩脈は当時の海底面から、約 1000m 深度まで分布しており、深い海であった可能性が考えられる。そのため、シアノバクテリアが侵入及び生息するには不適であり、海底熱水付近の生物ではないかと推測した<sup>(10)</sup>。

\* ノースポールのシリカ岩脈

西オーストラリア北部、ピルバラ花崗岩緑色岩体の中央部に位置している。同地域のチャート層には、現在知られる最古の細菌化石が見つかった。

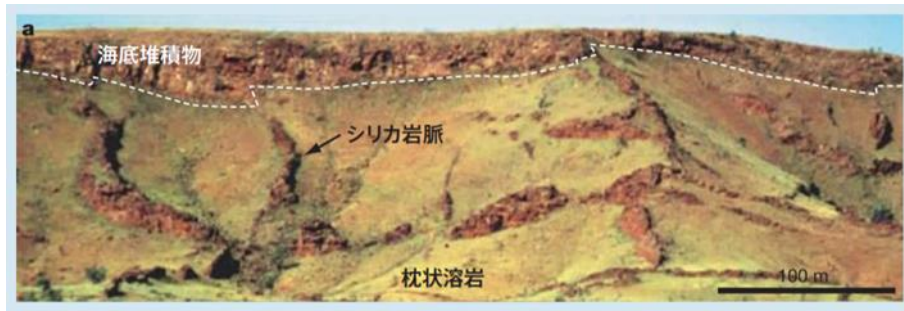


Fig. 7 ノースポールのシリカ岩脈付近<sup>(11)</sup>

1997 年に、熱水噴出孔は初めて発見された。以来、海底プレート付近に海底熱水噴出孔が多く見つかっている。

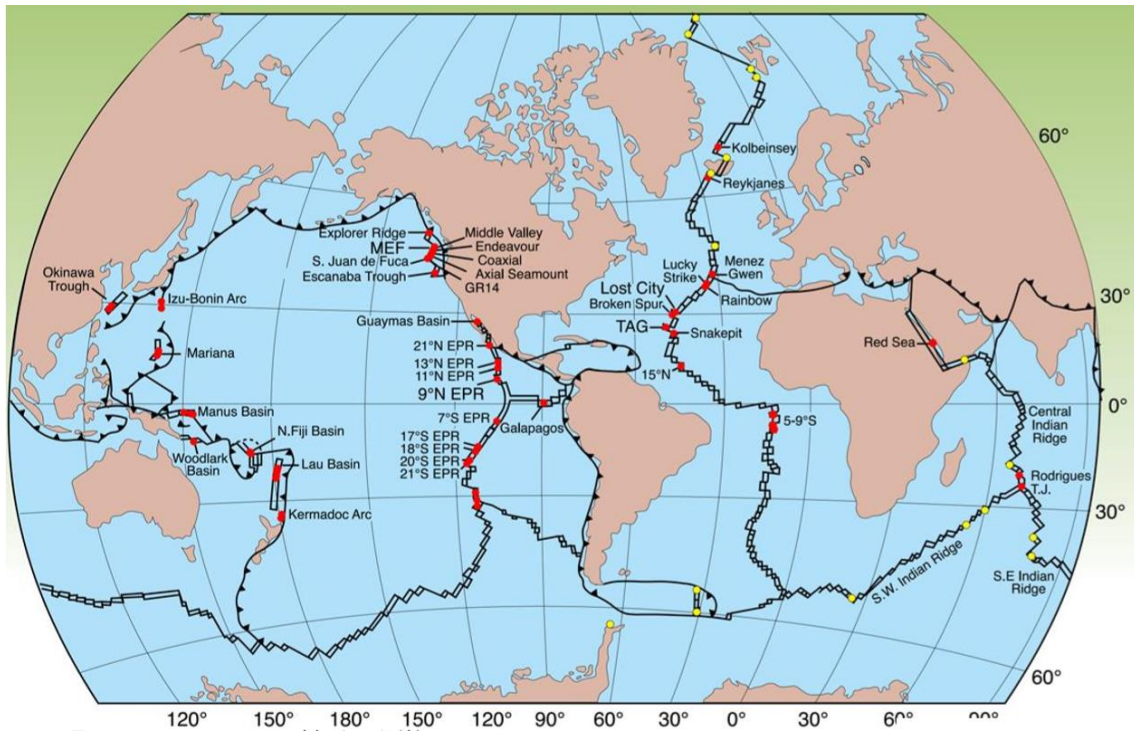


Fig. 8 世界各地の海底熱水地帯<sup>(12)</sup>



・ノースポール（35 億年前）の微小化石

シリカ岩脈内の微小化石から生命の痕跡を発見。シアノバクテリアではなく、化学合成細菌ではないかと考えられた<sup>(11,13)</sup>。

## 1-2. 深海熱水噴出孔付近の生物群集

深海（水深 200m 以下）という環境は、ほとんど生物は存在しない、砂漠同様のバイオマス量である。しかし、その中でも生体重量が  $20\text{kg}/\text{m}^2$ （熱帯雨林に匹敵するバイオマス量）にもなる環境がある。熱水噴出孔周辺である。この環境周辺には、化学合成細菌による生態系が存在しており、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、光合成細菌がいなくとも、熱水周辺で化学合成細菌によって生態系が形成し得ることが証明された<sup>(14)</sup>。

熱水周辺で生息している生物は、化学合成細菌と何らかの関係（共生、捕食、付近に生息）を持っている。

例：(1) チューブワーム（リフティリア）

体内で大量の硫黄酸化細菌と共生。口や食道を持たず、エラからとった  $\text{H}_2\text{S}$  や  $\text{O}_2$  を体内に取り込み、化学合成細菌によって養分を得ている。

(2) シンカイヒバリガイ

エラを含む体内で細菌（硫化水素、メタン、水素からエネルギーを取り出せる）と共生。



(1) (JAMSTEC)



(2) (JAMSTEC：藤原義弘)

(1) 海水中細胞量 (ATP・ATP+ADP+AMP) の深度依存性

{ A : ATP  
 { At : ATP+ADP+AMP

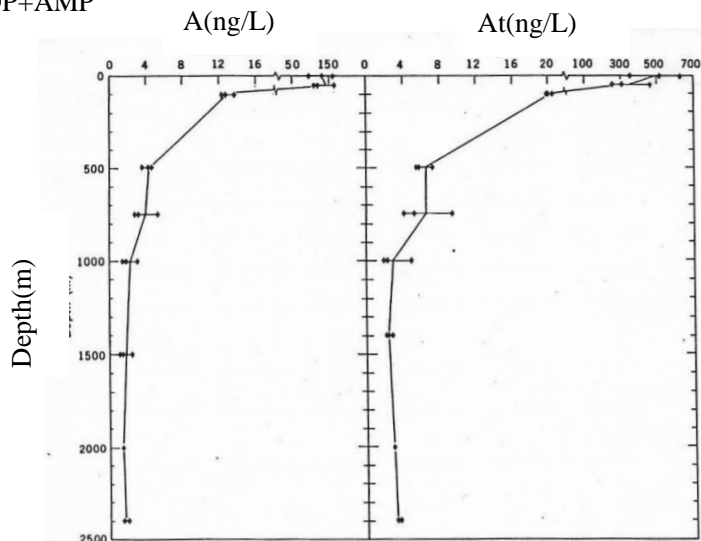
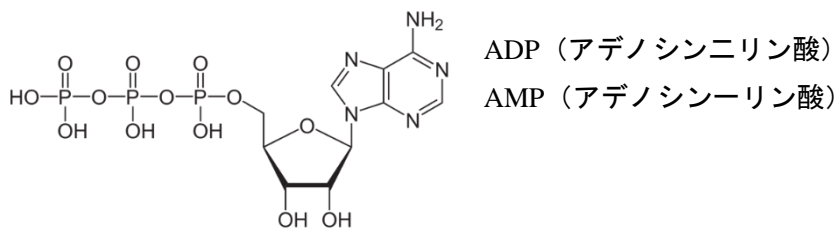


Fig. 9 Profiles of adenosine 5'-triphosphate(ATP) and total adenylates(At) in the water column near the Galapagos Rift vents.

A(ATP)は、生きている生物重量を反映する。At(ATP+ADP+AMP)は、生物関連物質の総重量を示す。上のグラフから深海 500m 以下は光が届かず、生物がほとんどいないため、顕著に減少しているのがわかる<sup>(15)</sup>。

\* AMP・ADP・ATP

ATP (アデノシン三リン酸) は、動物、植物、微生物を含む全ての生物が利用しているエネルギー分子。これら生物は有機物から取り出したエネルギーを ATP として体内に保管し、これを分解して得られる (高リン酸化結合) エネルギーを生命活動に利用している。



ATP (Wikipedia)

Table 3 熱水噴出孔付近の微生物由来ヌクレオチド (Galapagos rift)

sample	ATP	$A_T$	GTP:ATP
surface seawater† (50 m)	130 ± 32 ng l <sup>-1</sup>	340 ± 112 ng l <sup>-1</sup>	0.16 ± 0.08
deep seawater† (2400 m)	1.7 ± 0.3 ng l <sup>-1</sup>	3.4 ± 0.3 ng l <sup>-1</sup>	0.075
'Garden of Eden' vent‡ (2500 m)	491 ± 151 ng l <sup>-1</sup>	1494 ± 553 ng l <sup>-1</sup>	0.86 ± 0.17
'Garden of Eden' vent§ (2500 m)	1943 ± 1143 ng g <sup>-1</sup>	4248 ± 2031 ng g <sup>-1</sup>	0.89 ± 0.35

† Data from Karl *et al.* 1980 (ATP, adenosine 5'-triphosphate;  $A_T$ , total adenylates; GTP:ATP, ratio of guanosine 5'-triphosphate to adenosine 5'-triphosphate).

‡ Filtered.

§ Settled particles.

海水をサンプリングし、海水中細胞量 (ATP、ATP+ADP+AMP) を調べた結果<sup>(16)</sup>、水深 2500m 以下の地点 (Garden of Eden) にて顕著に増加していた。これは、この地点にエネルギー源 (熱水等) があり、微生物やその残骸があることを示している。

(2) 熱水と低温熱水の化学組成

Table 4 熱水と低温熱水の化学組成の比較

Table 2. Comparison of the compositions of actual warm vent water at several vent fields with those calculated as mixtures of hot (350°C) vent water with seawater (concentrations in micromoles per kilogram of solution). Vent fields: Ocean Bottom Seismograph (OBS), Southwest (SW), and Hanging Gardens (HG), all on the East Pacific Rise near 21°N; Clambake (CB), Garden of Eden (GE), Dandelions (DL), and Oyster Bed (OB) sampled in 1977, plus Mussel Bed (MB), East of Eden (EE), and Rose Garden (RG) sampled in 1979 on the Galápagos Rift near 86°W.

Component	End-members			Mixtures at 12.6°C													Reference
	350°C waters			Calculated composition: conservative			Calculated composition: reacted*			Measured (extrapolated or interpolated to 12.6°C = 800 μM Si)							
	OBS	SW	HG	OBS	SW	HG	OBS	SW	HG	CB	GE	DL	OB	MB	EE	RG	
<i>Vent waters</i>																	
ΣH <sub>2</sub> S	7300	7450	8370	219	224	251	105	127	102	20	120	260	50	500	180	(10, 11, 17)	
H <sub>2</sub>	1700	380		51	11		0	0	0				0.12		0.03	(17, 19)	
CH <sub>4</sub>	45	53		1.4	1.6								3.1	8.8	2.4	(17, 19)	
CO	0.31	0.67		0.0009	0.02								0.06	0.39	0.06	(17)	
NH <sub>3</sub>	<10	<10	<10	<0.3	<0.3	<0.3	4	4	4	2.8	0.0	2.8	0.0			(11, 17)	
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>		<0.1			<0.003		2	2	1.3				8.2			(11, 17)	
N <sub>2</sub> O	<0.02	0.06		<0.0006	0.0002								0.13	0.00	0.03	(17)	
Fe <sup>2+</sup>	1664	750	2429	50	23	73	0	0	0	30	0.5	~3	<1			(10, 11)	
Mn <sup>2+</sup>	960	699	878	29	21	26				42	11	16	15			(10, 11)	
ΣCO <sub>2</sub>		5720			2400								2510		2580	(13)	
<i>Ambient seawater</i>																	
O <sub>2</sub>		107			104		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(10, 17)
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		39			38		0	0	0	0	1.0	0	0	0		11.5	(10, 17)
ΣCO <sub>2</sub>		2300															(11)
<i>Temperature† (°C)</i>																	
	2.2						9.3	12.1	6.6	9.1	10.0	5.6	16.4				(10, 17)

\*The reaction sequence used is: 2H<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> → 2H<sub>2</sub>O; Fe<sup>3+</sup> + H<sub>2</sub>S → FeS + 2H<sup>+</sup>; 49H<sub>2</sub>S + 76NO<sub>3</sub><sup>-</sup> + 8H<sub>2</sub>O → 32N<sub>2</sub> + 8NH<sub>4</sub><sup>+</sup> + 4NO<sub>2</sub><sup>-</sup> + 49SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> + 18H<sup>+</sup> + 32H<sub>2</sub>O; H<sub>2</sub>S + 2O<sub>2</sub> → SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> + 2H<sup>+</sup>. †Temperatures are for ambient seawater and for the highest temperature sample used in this data compilation.

深海熱水噴出孔付近の海水成分の化学組成を示したグラフ<sup>(17)</sup>である。350°Cの熱水には、還元型物質 (H<sub>2</sub>S、H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、Fe<sup>2+</sup>、Mn<sup>2+</sup>) や酸素が多く含まれていた。これは海底で、海水が熱い玄武岩と反応し、酸化還元反応やイオン置換反応が起きていることを示している。これら反応により熱水が噴き出て、生物のエネルギー源となっていると考えられる。

(例) 海水中の硫酸→硫化水素

炭酸塩→メタン

マグネシウム→マンガン、カルシウム、鉄、銅、水素

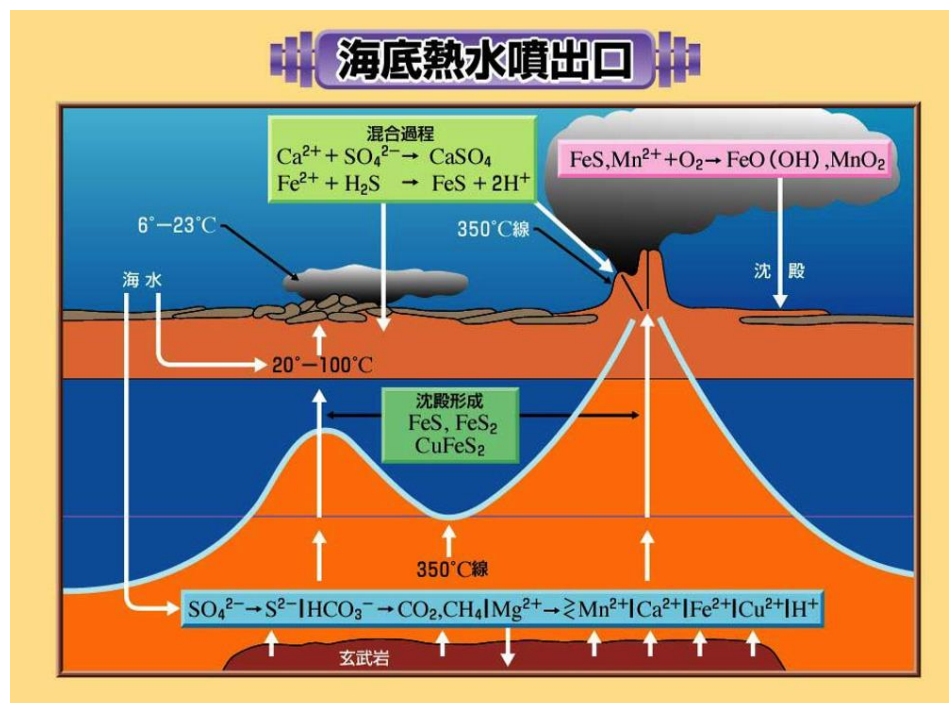


Fig. 10 海底熱水噴出口付近にて起こる化学反応

これらエネルギーから、どのようにしてタンパク質を作るのか。

ヒトを含む動物（従属栄養生物）は、有機化合物よりエネルギー（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。

化学合成細菌を含む微生物等は、生物毎に特定の物質（酸化型物質： $\text{O}_2 \cdot \text{SO}_4^{2-}$ 、還元型物質： $\text{H}_2 \cdot \text{H}_2\text{S} \cdot \text{Fe}^{2-}$ ）と  $\text{CO}_2$  から、有機化合物を作り出している。

植物（独立栄養生物）は、光合成（光・ $\text{CO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ）により有機化合物と  $\text{O}_2$  を作り出している。

炭酸固定できるのは、光合成だけではない。

### 1-3. 化学合成細菌

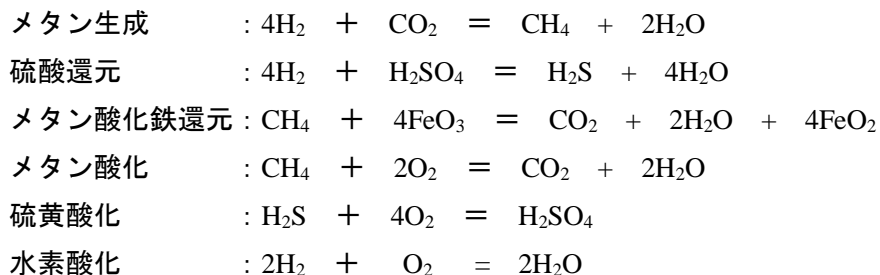
化学反応でエネルギーを獲得する。

化学合成細菌	電子供与体	電子受容体
硫黄酸化	還元型硫黄	酸素
硫酸還元	水素分子	硫黄
メタン生成	水素分子	二酸化炭素

(1) 化学合成反応

自由エネルギーを獲得できる反応系があれば、生物は利用している。

(例) 反応系



(2) 熱水噴出孔付近で発見された化学合成細菌

・熱水噴出孔周辺で発見された化学合成細菌<sup>(17)</sup>

〔+ : 存在が確認されている  
 ++ : 単離されている

これら細菌は、主に電子伝達によりエネルギーを得ている。

\* 電子伝達系

主に細胞膜上で起きる。

電子の移動→水素の移動→濃度勾配→ATP 生成

Table 5 熱水噴出孔付近の化学合成細菌

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

(3) 化学反応理論計算との比較

熱水噴出孔付近の環境において、実際にどのくらい化学反応によりエネルギーが得られるのかを示した表である。

Table 6 熱水噴出孔付近における潜在的な代謝エネルギー

Metabolic energy potentially available  
T. M. McCollom and E. L. Shock (1997) *Geochim. Cosmochim. Acta*, 61: 4375-4391

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

熱水（高温）と海水（低温）が混合していく中で、約 40°C前後で利用できる反応系が変化した。

約 40°C以上：メタン、硫酸還元（水素を使った反応）

約 40°C以下：メタン、硫化水素、鉄（酸素を使った反応）

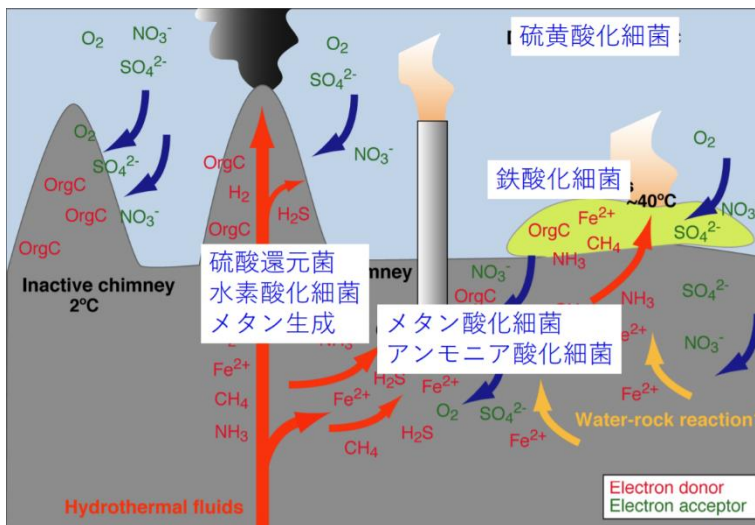
では、実際にはどのような反応が起こっているのか（どのような微生物がいるのか）。

(4) 熱水系の微生物群集

海底熱水付近（チムニー・熱水噴出後の海水等）でサンプルを採取し、遺伝子を調べることで確認したところ、主に以下の微生物が確認された<sup>(18,19)</sup>。

硫酸還元菌・水素酸化細菌・メタン生成菌

これにより、熱平衡反応から推定される化学反応で想定される菌が実際に確認された。



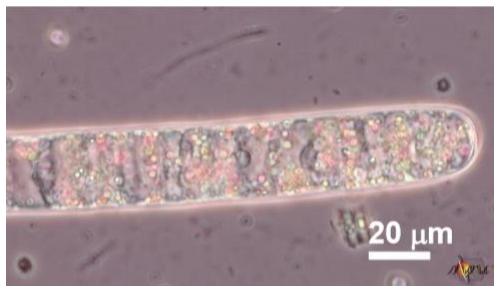
- 温度が高い地点
  - 硫酸還元菌・水素酸化細菌・メタン生成菌
- 温度が低い地点
  - 硫酸酸化細菌・メタン酸化細菌・アンモニア酸化細菌

起きる反応系に応じて、その反応系を利用できる生物がいた。

Fig. 11 熱水系微生物群集による化学反応系

#### 1-4. 35 億年前の生物（最古の化石）は一体何なのか。

- ・ 化学合成細菌： *Beggiatoa*（硫黄酸化細菌）



*Beggiatoa* (硫黄酸化細菌) (Kalanetra *et al.*, 2004)

しかし、当時酸素は存在していなかった。

そのため *Beggiatoa*（硫黄酸化細菌）ではないだろう。

##### \* 膜系と細胞の大きさ

シアノバクテリアや光合成細菌も同様に膜系を持ち、その他複雑な構造を持つため、細胞が大きい。膜系を持っていると、膜間で物質の受け渡しが可能となる。一方で原核生物は、膜系を持たないため、細胞は小さいものが多い（化学合成細菌以外）。

そこで死んだチムニーの周辺に付着していたカビのような構造体を調べてみたところ、硫酸還元菌であるだろうことがわかった。細胞の幅は 10 $\mu\text{m}$  と大きく、数珠状をなしていた。さらに遺伝子を調べてみたところ、硫酸還元菌だった（Yamagishi, Kato, 2016）。  
最古の化石は硫酸還元菌なのか。

- ・ メタン生成菌

微小化石内の流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 億年前にメタン生成菌が存在していたことが推定された<sup>(20)</sup>。

- ・ 非酸素発生型光合成細菌

堆積物の断面を見たところ、炭素の化石が確認された。

地層や化石の様子から、比較的浅い波打ち際（太陽光があたる）で、バイオマット（膜状）が波によって変形したのではないかと考えられ、光合成細菌と推定された。しかし、35 億年前は、まだ地球に酸素はなかったため、酸素発生型でない光合成細菌ではないか<sup>(21)</sup>。

##### \* バイオマット

微生物がつくる固まり。何かの表面に微生物が密集している。

\* 酸素を発生しない光合成細菌とは？

水の代わりに、硫化水素や水素、有機化合物から水素を供給する。

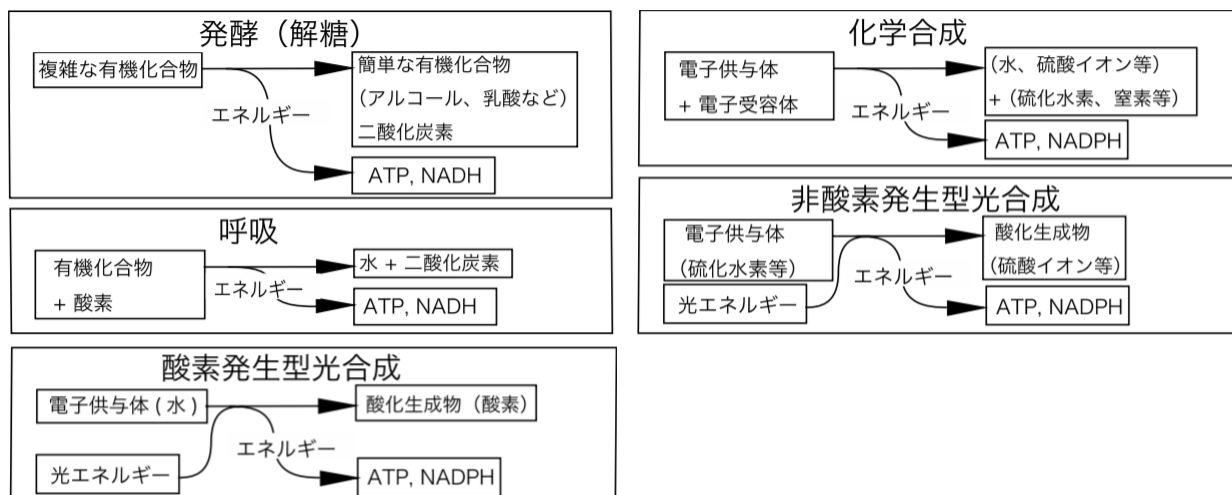
そのため、酸素が発生しない。

\* 光合成

生物の種類	水素（電子）供与体	酸化生成物
植物	水	酸素分子
シアノバクテリア	水	酸素分子
光合成細菌	硫化水素	硫酸

### ◇まとめ 1：様々な反応系

発酵（解糖系）・呼吸・化学合成・非酸素発生型光合成・酸素発生型光合成



### ◇まとめ 2：30~35 億年前の地球環境

- ・ 熱水活動があった。
- ・ 温度は定まっていない。液体の水はあり海があった。
- ・ 生物はいた。シアノバクテリアはわからない。
- ・ 化学合成細菌はいた。(硫黄酸化菌、硫酸還元菌、メタン生成菌)
- ・ 光合成細菌はおそらくいた。
- ・ いろいろな微生物がいた可能性がある。
- ・ 大きな細胞をもつ生物がいた（真核生物か原核生物か不明）<sup>(22)</sup>。



## 【質問 1】

### ・初期の海水量はどのくらいだっただろうか。

35 億年前は現在と変わらない。もしくは 2~3 倍の量から減少している。

cf. 大陸地殻と海洋地殻の密度差によって標高差ができる。昔はその密度差が大きかった。そのため、水の量が多かった分、大陸地殻が浮いていたと考えられる。

### ・-25‰（パーミル）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。

→化学エネルギーを使う生物は、炭素の固定法が様々。

光合成と同じ酵素を使う生物もいるため、同様の値を示す。

メタン菌は全く異なる酵素を使っており、もう少し低い値（-30~ -40 くらい）を示す。

しかし、この測定値からは、生物かどうかの言及に留めている。

### ・光合成が始まったのはいつ頃か。

→まだ定まっていない。おそらく 27 億年前くらい??

40~30 億年前頃はまだ、光合成生物は誕生していない。

しかし、炭酸固定は行われていて、化学合成が行われている可能性がある。

その際、働く酵素はルビスコで光合成と同様。

### ・いつ頃（当時から現在か）の無機炭素を指標にしているのか？

→炭素微粒子中の  $^{13}\text{C}$  の  $^{12}\text{C}$  に対する量（Mojzsis、 S. J. *et al.* 1996）

40 億年前の無機炭素（炭酸カルシウム?）を指標にしている。

### ・地球の磁場の形成期とそれ以前の紫外線による影響は？

→そうした話は聞いたことがない。

直接的な化学反応で同位体比率が変わる可能性は少ない?  $\text{CO}_2$  は変わらない。

### ・もともとのソースは $\text{CO}_2$ 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物は？

→あまり考慮していない。

化学的な反応により  $^{13}\text{C}$  は減る（熱水反応で確認されている）。

宇宙由来のものは、マグマオーシャンで分解されていることになっている。

その後は.....?

\* 火星の土壌中に有機物が見つかった。

フォトケミストリー、宇宙からきたもの?

・写真の黒い影は膜？

→炭素の痕跡、ほとんどない。膜構造ではない。

・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？

→化学合成細菌もしくは、化学合成細菌を食べている何か。

・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？

→難しい、可能なものもある

小さいチューブワーム（浅い場所にも生息している）は短期間培養可能。

基本的には、間接的に調査していく（以下実験方法）。

- ・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。
- ・遺伝子の移動を考慮し、細胞を染色する（遺伝子配列を特異的に調べる）。
- ・現地で同位体標識した炭酸塩を使う場合もある。

・海面よりもエネルギー量が大きいのか？

→海底直上よりも大きい。

・熱帯雨林でも同様のデータはでるのか？

→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、落ち葉や木などで生体重量をはかる。

化学合成細菌の生態系も同様に重量ではかることもある。

・全ての生き物は ATP を使うのか？

→使う、リン酸結合はとてもちょうどよい結合の強さであるため。

・リンは比較的早い時期に作られるのか？

→比較的最後にできた。（2型超新星）

リンの特徴は、濃縮度が高い。

それは、鉱物に含まれるため地表面に濃縮されるからである。

・紅色細菌は化学合成細菌か？

→光合成細菌である。

・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？

→グルコース 1 分子あたり、32 分子の ATP が生成される。

そのため、大部分は熱エネルギーとなる。

ATPが1つ足りない(中途半端な)場合はどうなるか?

→水素をいくらかため込んで(ATPアーゼ)生成する。

これらの機能は、全生物共通である。

・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?

→そうである。

熱水系にはたくさんのエネルギー源がある。

ペプチドの重合、電気、全生物の起源である可能性がある。

しかしこれは、RNAワールドの考え方とは別。

・最初の反応は膜の上で行われる?

→多くの生物はそうである。

熱エネルギーは電子を生まないため、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。

・地点によって、ガスの組成に微生物種は対応している?

→対応している。また、岩質にも対応している。

・微生物はチムニーにしがみついている、

プルームの中にいる人は、流されて行かないのか?

→流されて死んでしまうけれど、僅かに残って生育している

どうやって移動しているのかは明らかでない。

・進化の速度は?

→微生物の進化速度は遅い。真核生物の方が速い。

進化のスピードの決定要因は、選択圧が大きいのではないか。

・チムニー間を移動している証拠はあるのか?

→大きな違いはみられない。

微生物の場合、進化を決めているのは場所ではない。

・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?

→ある。微生物は仮眠状態で生きていられる。

・化学合成細菌の食性は?

→さまざまである。

・すりつぶしてしまうとわからなくなる？

→生物の所有している酵素による。(酵素によって食性が変わる)  
有機物は多くの生物が食べる。

・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？

→ない。そのため、シアノバクテリアである可能性もあるのではないか  
しかし、付近に炭酸鉄の沈殿があり、非酸素発生型光合成細菌と共役的である。そのため、  
付近に酸素がないのではないか。(Tice and Lowe (2004) *Nature* 431, 543-552)

・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？

→植物生理学、遺伝学、生化学の面から調べている  
特異的に反応する酵素があるかどうか  
電子伝達系では、ほぼ生物共通の酵素(チトクローム)を持つかどうか  
実際に反応系が再現できるか  
複数の実験によって明らかにされた

・水素に着目している理由？

→化学合成と光合成：有機物を合成するために、CO<sub>2</sub>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  
呼吸：生体内では呼吸から得られたATPのエネルギーで有機物合成を行うが、その際に  
還元反応が行われるためには水素が必要

・どうして細胞は数珠状なのか？

→原因：細胞分裂後の形状によるため  
特定の環境におくと、数珠状になる生物は多くいるため、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：まとまって絡み合うため、固着しやすい

・どうして面的にひろがらないのか、線なのか？(なぜ面でないのか？)

→面的に細胞を形成するのは難しい  
大部分の生物は、2通りに分裂するのが難しいから

・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？）

→平面上の生物の誕生は、真核生物以降。

その原因は、サイズが  $1\mu\text{m}$  程度だと、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いる

膜面積は、細胞内構造にて増やしており、細胞膜よりも効率よく面積が多い

## 2. 生命構成元素の由来

### (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。

・大腸菌

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

大腸菌にみられるように、ほとんどの生物は、主に有機物と水から成り立っている。その中でもタンパク質が最も機能性の高い成分である。

・タンパク質

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、決まった順に配列し結合している。この配列は、遺伝子によって決定される。

(例) リゾチウム

涙の主成分である。このタンパク質の構造により、反応（加水分解）が起こり、ヒトの目が微生物によって感染せずに済んでいる。このリゾチウムの構造はヒトによって変わることはない。

また、タンパク質は立体構造（内側：疎水性、外側：親水性）を持つことで、その機能を発揮している<sup>(23)</sup>。そのため地球上の生物は、溶媒として水が必要である。

・水

タンパク質の構造と膜の構造維持に重要な役割をもつ。

溶媒としての機能するため、体内の反応系や代謝産物の移動時に大きく関与している。

その他特徴

疎水膜の形成・タンパク質構造形成・水素結合による多量体性・蒸発熱・凝固熱・比熱など  
 ・ヒト

Table 7 ヒトの元素組成<sup>(24)</sup>

元素	乾燥重量(%)	元素	乾燥重量(%)	海水	mg/kg
C	61.7	F	痕跡	Cl	19350
N	11.0	Si	痕跡	Na	10780
O	9.3	V	痕跡	Mg	1280
H	5.7	Cr	痕跡	S	898
Ca	5.0	Mn	痕跡	Ca	412
P	3.3	Fe	痕跡	K	399
K	1.3	Co	痕跡	Br	67
S	1.0	Cu	痕跡		
Cl	0.7	Zn	痕跡		
Na	0.7	Se	痕跡		
Mg	0.3	Se	痕跡		
B	痕跡	Mo	痕跡		

山岸 宇宙生命論  
 2015  
 東京大学出版会

(2) 宇宙における元素存在量

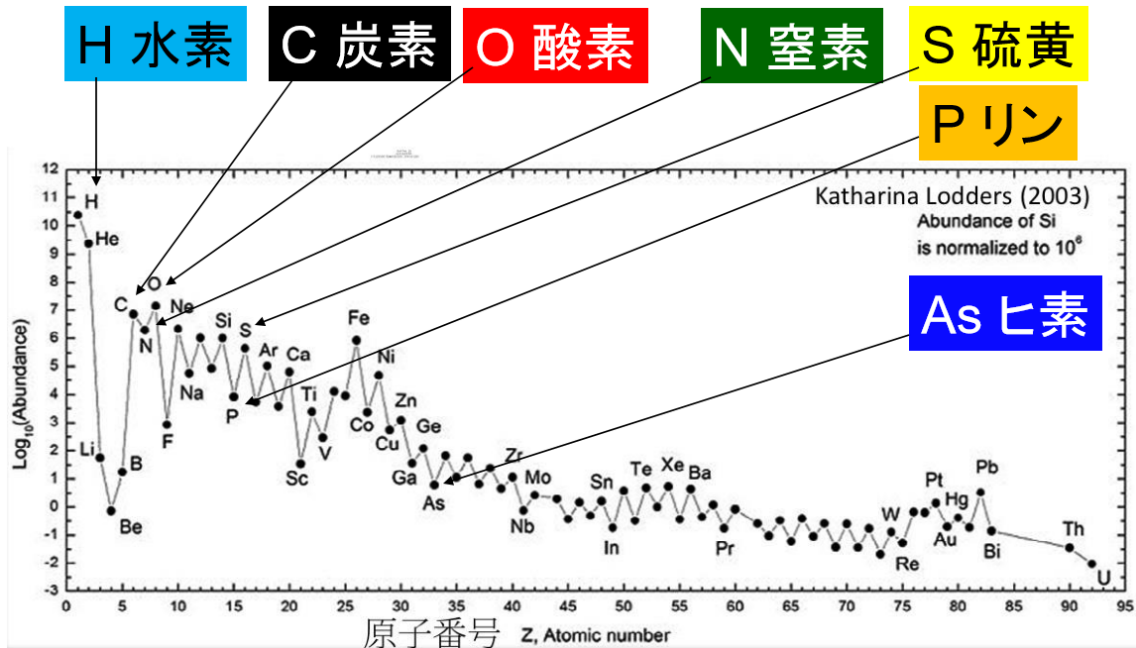


Fig. 12 宇宙における元素存在量

上の表及びグラフを比較すると、ヒトの身体の元素は宇宙由来の可能性はある

(宇宙に多い元素 (H・C・O・N) を主に使っている)。

・大気

主成分 N、その他 O・H

有機化合物の大気元素より合成された可能性もある。

生命誕生前の有機化合物の誕生の場は、宇宙なのか、地球なのか。

## 【質問 2】

・タンパク質の構造の決定方法 (乾燥→X線解析、正しいのだろうか?)

→結晶化：構造解析手段

結晶化方法：タンパク質の溶解度を下げる物質を添加する。

完全に乾燥はさせず、徐々に吸湿させてタンパク質溶液の濃度をあげる。

得られたタンパク質の構造は正しいのか→現在でも怪しいが、おおむね正しい

・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?

→アミノ酸を重合させることは可能だが、できない

生物に作らせることによって可能 (大腸菌を用いて合成)

→宇宙の全物質の原子数を合わせても足りない。

しかし、生物は誕生した。なぜ? 後に説明

・タイタンの表面には液体の有機物がながれている

そこでは、タンパク質が同じ生き物を探すことはできる?

→裏表逆のタンパク質 (親水性は内側) ができるのではないか

・氷が浮くと、なぜ環境の安定化?

→氷によって熱伝導が妨げられるため、下側の液体の水が保持できる

液体の水がある環境が保持される

・ケイ素も多いけど、使われていないのか?

→炭素と比べて、ケイ酸塩 ( $\text{SiO}_2$ ) が安定すぎるため。

溶解度が比較的低い。

### 3. 化学進化：生命誕生前の有機合成

#### \* 有機物合成に関わる実験

- ・ ミラーの実験 (1953)

還元的な気体 ( $\text{CH}_4 \cdot \text{CH}_2\text{O} \cdot \text{H}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) の混合気体から、放電により、生体を構成している有機物 (アミノ酸) が合成可能であることが証明された。

- ・ ワトソン・クリック (1953)

DNA の二重らせん構造を発見した。これにより、遺伝に関わる科学が急速に進歩した。アミノ酸と核塩基は、宇宙線・紫外線・放電・粒子線などを用いて、窒素化合物から容易に合成可能であることがわかった。しかし、糖を合成することは難しい。

#### 3-1. 宇宙空間での有機物合成

既に宇宙空間で、いくつかの有機物が見つかっている。

場所	見つかった有機物
分子雲	有機化合物中 200 種程度
彗星	特にグリシン
惑星間塵	有機化合物らしきもの

#### (1) 隕石中の有機物

Murchison という炭素を多く含んでいる隕石が発見された (Ehrenfreund *et al.* 2002)。この隕石の成分を調べたところ、たくさんの有機化合物やアミノ酸を多く含んでいた。これには、ヒトが有している成分よりも多くの成分が含まれていた。

Table 8 隕石 Murchison 中に含まれる有機物量

Compound class <sup>[13]</sup>	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



・隕石 Murchison 中のアミノ酸<sup>(24)</sup>

$\alpha$  が主に、ヒトが使っているアミノ酸である。D 型 L 型は同程度の比率で含まれているが、 $\alpha$  を除く  $\beta$  や  $\gamma$  においては L 型のほうが高い比率をもつことがある。D 型 L 型のアミノ酸のうち、ヒトは L 型アミノ酸を利用しタンパク質を合成している。そのためこの比率の違いが、タンパク質合成に L 型アミノ酸を利用している理由ではないかと考える説がある。またこの隕石には、ヒト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ことがわかった。核酸塩基（グアニン・アデニンなど）も見つかっている。

Table 9 隕石中に含まれるアミノ酸<sup>(26)</sup>

$\alpha$ Glycine	$\beta$ D- $\beta$ -ABA	$\alpha$ D-Norvaline
$\alpha$ D-Alanine	$\beta$ L- $\beta$ -ABA	$\alpha$ L-Norvaline
$\alpha$ L-Alanine	$\beta$ D- $\beta$ -AIBA	$\alpha$ DL-Isovaline
$\alpha$ Sarcosine	$\beta$ L- $\beta$ -AIBA	$\alpha$ D-Glutamic acid
$\alpha$ D-Serine	$\beta$ DL- $\beta$ -Homoserine <sup>#</sup>	$\alpha$ L-Glutamic acid
$\alpha$ L-Serine	DL-3-Amino-2-	D- $\beta$ -
$\beta$ D-Isoserine <sup>#</sup>	$\beta$ (hydroxy-methyl)	$\beta$ (Aminomethyl)-
$\beta$ L-Isoserine <sup>#</sup>	propanoic acid <sup>#</sup>	succinic acid <sup>#</sup>
$\beta$ $\beta$ -Alanine	$\beta$ DL-Isothreonine <sup>#</sup>	L- $\beta$ -
$\alpha$ $\alpha$ -AIBA	D-allo-	$\beta$ (Aminomethyl)-
$\alpha$ D- $\alpha$ -ABA	$\beta$ Isothreonine <sup>#</sup>	succinic acid <sup>#</sup>
$\alpha$ L- $\alpha$ -ABA	L-allo-	D- $\alpha$ -Aminoadipic
$\alpha$ D-Aspartic acid	$\beta$ Isothreonine <sup>#</sup>	acid
$\alpha$ L-Aspartic acid	$\gamma$ DL-4-A-2-HBA <sup>#</sup>	$\alpha$ L- $\alpha$ -Aminoadipic
$\alpha$ D-Threonine	$\gamma$ D-4-A-3-HBA <sup>#</sup>	acid
$\alpha$ L-Threonine	$\gamma$ L-4-A-3-HBA <sup>#</sup>	$\alpha$ D-Leucine
$\alpha$ D-allo-Threonine	$\gamma$ $\gamma$ -ABA	$\alpha$ L-Leucine
$\alpha$ L-allo-Threonine	$\alpha$ D-Valine	$\alpha$ D-Isoleucine
$\alpha$ DL- $\alpha$ -Methylserine <sup>#</sup>	$\alpha$ L-Valine	$\alpha$ L-Isoleucine
$\alpha$ D-Homoserine <sup>#</sup>		
$\alpha$ L-Homoserine <sup>#</sup>		

80

(2) 有機化合物のできかた

宇宙では、星間分子雲中でできる。星形成時に微惑星となり、地球にやってくるのではないかと（彗星、隕石）

海底熱水付近でもできるかもしれない

cf. グリーンバーグのモデル<sup>(25)</sup>

・タンパク質合成の可能性<sup>(26)</sup>

アミノ酸のモノマーを乾燥すると重合し、プロティノイドを形成する

これを水に溶かすと、ミクロスフェア（直径数  $\mu\text{m}$ ）ができる。

プロティノイド：タンパク質（の構造）とは異なる複雑化合物

ミクロスフェア：微生物に大きさが似ている。

◇まとめ 3：化学進化

アミノ酸は合成可能だった。

アミノ酸生成の可能性はある（プロティノイド・ミクロスフェア）。

核酸は糖の合成が難しいことや糖と塩基が重合しないため合成できない。

アミノ酸及び核酸塩基は、隕石中に確認されている。  
 合成量、宇宙塵、微隕石の寄与が重要になるだろう。

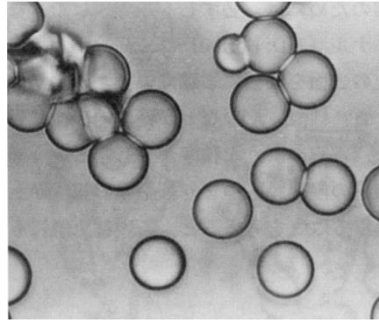


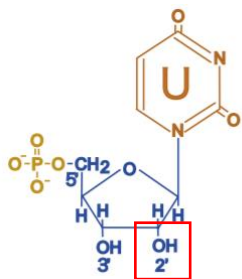
Fig. 13 プロティノイド・ミクロスフェア

### 3-2. 核酸の成り立ち

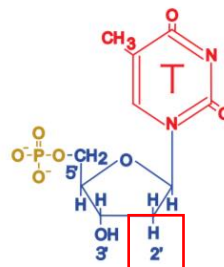
・ RNA と DNA の違い

	RNA	DNA
糖	リボース	デオキシリボース
構造	一本鎖	二重らせん

側鎖 OH 基の位置が異なる→RNA の脱酸素により DNA が合成される



ウラシル (RNA)



チミン (DNA)

・ 核酸の名称

→塩基：アデニン

X がリボース：アデノシン

X がリボースリン酸：

アデニル酸

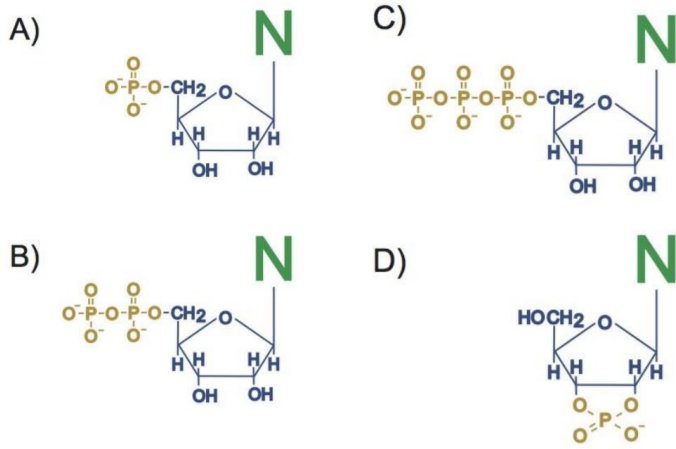
塩基の構造	塩基 (X=H)	ヌクレオシド (X=リボース)	ヌクレオチド (X=リボースリン酸)
	アデニン Ade A	アデノシン Ado A	アデニル酸 アデノシンーリン酸 AMP

・ 核酸の重合

核酸の重合体に水を加えると、分解する (核酸単量体)。

活性型核酸は、リンと結合しているため (エネルギーを持つため) 重合する。

・活性化ヌクレオチド



A)一リン酸 B)二リン酸 C)三リン酸；最も活性が高い

D)サイクリック RNA；RNA ワールドの根拠となる

・核酸（活性型 RNA；シトシン）合成

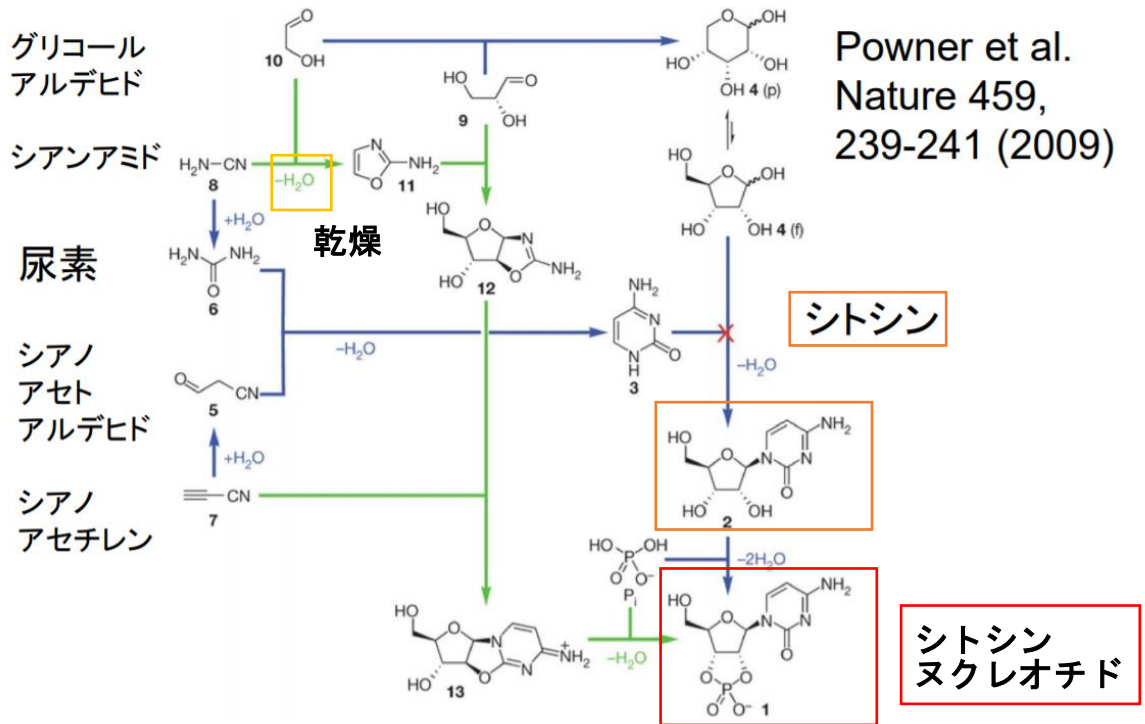


Fig. 14 核酸合成反応経路

緑の反応経路を使うと、核酸が合成可能であることがわかった。これは、還元型の地球上のリン酸溶液中で起こり得る反応で、反応効率も非常に高かった（約70%）。また、脱水素反応が含まれるため、乾燥が必要であるため、陸上の池などで起こり得る可能性がある<sup>(27)</sup>。

#### ◇まとめ 4：核酸合成

核酸塩基は合成可能だが、核酸は容易に合成できない。

タンパク質合成可能となる合成量は議論中である。

環境の問題（陸の有無が重要・還元的である必要がある）がある。

#### 【質問 3】

・芳香族の重要性は？

→ほとんど利用していない

・グリシンの次に見つかるべきアミノ酸は？

→宇宙塵中に見つかってほしい

特に指定はないが、アラニンが見つかりやすいのではないか

・アミノ酸が隕石中などで重合していることは？

→テクニクの面からも確認はされていない

すでに見つかっているアミノ酸はモノマーでもポリマーでもなく

複雑有機化合物である。加水分解すると、アミノ酸になるだろう化合物である。

隕石中でアミノ酸はどうできたのか？

星間雲内の温度の低い部分で、中心にシリカのコアができ、そこにできた氷に放射線照射されたことによりできる。

・ラセミ体はできないのか。

→熱をかけた際起きているかもしれないが、立体構造に関係はないのではないか。

・糖はみつまっている？

→みつまっているが、塩基と縮合しない。

・アミノ酸が宇宙由来であるとする、量的にはどのくらい必要であるか？

→わからない

海に拡散してしまう場合、濃縮方法を考えないといけない

#### 4. 生化学的研究：RNA ワールド

\* 生物の遺伝のしくみ：複製→転写→翻訳（東京化学同人、遺伝子工学 I、山岸明彦著）  
セントラルドグマ

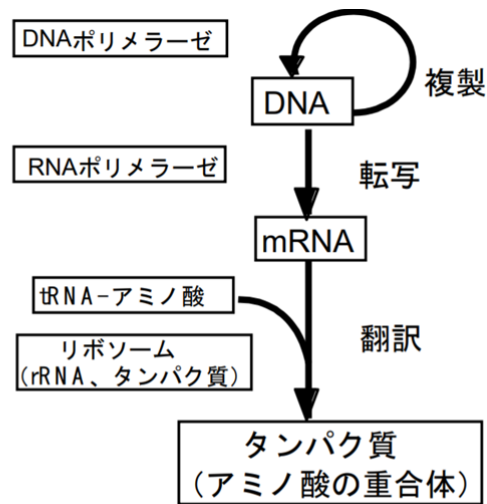
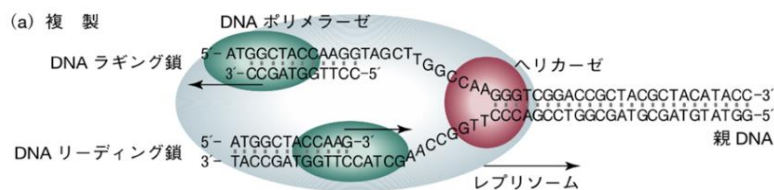


Fig. 15 セントラルドグマ

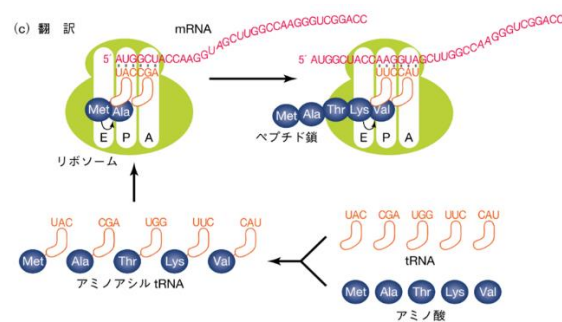
・ DNA とタンパク質の合成過程



DNA ポリメラーゼ (DNA 合成酵素) により DNA は複製 (半保存的複製) されていく。



DNA にある遺伝情報を RNA ポリメラーゼ (転写酵素) により mRNA に転写していく。



転写して得られた遺伝配列に対応して tRNA 及びアミノ酸が結合しタンパク質が合成される。tRNA は、特定のアミノ酸と結合し、運搬する。(下図：コドン表)

		二文字目				
		U	C	A	G	
一文字目	U	UUU } Phe(F) UUC } UUA } Leu(L) UUG }	UCU } UCC } Ser(S) UCA } UCG }	UAU } Tyr(Y) UAC } UAA } 終止 UAG } 終止	UGU } Cys(C) UGC } UGA } 終止 UGG } Trp(W)	U C A G
	C	CUU } CUC } Leu(L) CUA } CUG }	CCU } CCC } Pro(P) CCA } CCG }	CAU } His(H) CAC } CAA } Gln(Q) CAG }	CGU } CGC } Arg(R) CGA } CGG }	U C A G
	A	AUU } AUC } Ile(I) AUA } AUG } Met(M)	ACU } ACC } Thr(T) ACA } ACG }	A AU } Asn(N) A AC } A AA } Lys(K) A AG }	AGU } Ser(S) AGC } AGA } Arg(R) AGG }	U C A G
	G	GUU } GUC } Val(V) GUA } GUG }	GCU } GCC } Ala(A) GCA } GCG }	GAU } Asp(D) GAC } GAA } Glu(E) GAG }	GGU } GGC } Gly(G) GGA } GGG }	U C A G

Ala (A) アラニン      Gly (G) グリシン      Pro (P) プロリン  
 Arg (R) アルギニン    His (H) ヒスチジン    Ser (S) セリン  
 Asn (N) アスパラギン   Ile (I) イソロイシン   Thr (T) トレオニン  
 Asp (D) アスパラギン酸   Leu (L) ロイシン      Trp (W) トリプトファン  
 Cys (C) システイン      Lys (K) リシン        Tyr (Y) チロシン  
 Gln (Q) グルタミン      Met (M) メチオニン    Val (V) バリン  
 Glu (E) グルタミン酸    Phe (F) フェニルアラニン

東京化学同人 遺伝子工学 I 山岸明彦著

## ◇まとめ 5 : DNA とタンパク質の合成

DNA の複製・転写・翻訳を通じて、タンパク質は合成される。タンパク質は、この遺伝の仕組みがなければ合成されない。一方で、タンパク質がなければ、遺伝の仕組み (DNA 及び RNA 等) は成立しない。

### (1) RNA ワールド

RNA が DNA の代替りの役割をもっていたと考える説を現在多くの人が支持している。その理由は、

- ・ RNA が対合可能であり、遺伝情報を保持できること。
- ・ 核酸合成の際、RNA を作り脱酸素により DNA を合成していること。
- ・ タンパク質合成時には DNA ではなく RNA を利用していること。

以上の理由などから、RNA を DNA の代わりに用いていたに違いないと考えられている。

また、RNA がタンパク質の代替りの役割をもっていた可能性も考えられる。

その理由として、以下のことが考えられる。

- ・ リボザイムは RNA でありながら、触媒活性をもつこと。
- ・ 現在使われている補酵素には RNA やその誘導体が現在も含まれていること (ATP・CTP・NAD・FAD)。
- ・ タンパク質合成は RNA (mRNA・tRNA) が行っていること。
- ・ リボソーム内でのタンパク質合成も RNA (rRNA) が行っていること。

1980年代 リボザイムが発見された (Thomas Cech)。

(以下、その発見の過程)

当時、スプライシングのプロセスを研究していた。

RNAをよく精製していたが、反応が進行してしまう。

この原因は、RNA自体が反応していたことによるものだった。

これにより、タンパク質がなくても触媒反応が起こりうることがわかった。

しかし、まだ多くの問題点が残されている。

・ RNAワールドの問題点

RNAがどうやってできたのか。

活性化できたのか。

反応系を閉じ込める方法。

タンパク質を用いるようになってから、できた反応系はあるかもしれない。

(2) 太古の RNA 合成の場

・ 隕石のクレーター<sup>(28)</sup>

衝撃とその反応により、シアンアミド (鉄のシアン化合物) ができる。

破片が散らばることで、環境の非均一性ができ、

そこに、水たまりができ乾燥すると物質の濃度勾配ができ、

核酸の活性型が合成されるのではないか。

その他の隕石中に見つかりにくいアミノ酸も合成可能だろう。

→ RNA 合成環境のモデルを提示

・ リン酸化<sup>(29)</sup>

リン酸を含む鉱物と Urea (尿素) を混ぜてできたものとホウ素を混ぜると、

リン酸が縮合し、ヌクレオチドが合成される。

・ 実際に地球上にて可能性はあるのか。

リン酸を含む鉱物から溶け出したホウ素は浅瀬に沈殿する。

→ そうした場所が RNA 合成の場になる可能性はある。

・ RNA の重合<sup>(30)</sup>

核酸の単量体 (AMP) をリボソームと混ぜ、乾燥と湿潤を7日間繰り返すと、RNAの重合 (100塩基) が起きた。

・ サイクリック GMP を乾燥させると核酸が40個くらい重合した<sup>(31)</sup>。

これにより、複製可能なリボザイムが合成可能になる。

\* RNA と RNA をくっつける方法 (Ligation)

→ DNA ポリメラーゼ反応と同じ反応

これにより、RNA ポリメラーゼが RNA によって出来上がった。

200 塩基あると、複製可能なリボザイムを合成できる。

#### 【質問 4】

・ラディング鎖はすべて反応が進行すると、きちんと複製できるのか？

→ できなくなるため、初めの位置に戻って再度複製をする。

それは、DNA の 2 本鎖が逆方向であるため起こる。

・同じタンパク質に戻るのか？

→ 同じタンパク質が DNA 鎖を手繰り寄せて反応していく。

・どうしてコドンは 3 なのか？

→ 人工的には 4 も可能。

アミノ酸 20 種必要だったから。

塩基の対合が 2 だと不安定のため。

まだよくわかっていない部分が多い。

・開始コドンは？

→ タンパク質合成は必ずメチオニンから始まる。

・コドンの仕組みは、生物の進化とともにできたのか、

既にこの仕組みがあって進化したのか？

→ まだわかっていない。

・各アミノ酸の使い道は決まっているのか？

→ 大まかには決まっている。

炭化水素鎖のものはタンパク質構造の内側に入る。

マイナス基とプラス基は表面に存在か、構造の内側でイオン結合している。

アミノ酸の順番によって形状が決定する。

機能性をもつアミノ酸は、反応しやすい側鎖の位置にくる。

・これら一連の反応 (DNA の複製、RNA の転写、タンパク質の合成)

は生物体内のみで起きるのか、



それとも、材料があれば自然に起こるものなのか？

→自然に起こりうる。

実験の場合は、酵素が必要。

・DNA を作ることは難しい？

→DNA を作ることは大変、自然界ではできない。

\* タンパク質、DNA 及び RNA、どちらが先に誕生したのか。

遺伝の仕組みはタンパク質によりどのように作られたのか。

→この解決策の一つが、RNA ワールド説

・現在もタンパク質合成時に、RNA を使っている理由は？

→反応性が高いから。進化的に、既に使っていたため。

・これらの反応系を RNA が行っていたということは、いつ明らかになったのか？

→生化学者は既に知っていた。しかし、あくまで補酵素としての認識だった。

\* リボソーム（タンパク質合成装置）は RNA とタンパク質で構成されている。

アミノ酸転移反応付近には存在していたのは RNA だったことから、アミノ酸転移反応も RNA が行っていたと考えられる。

・RNA だけで生きている生物は現在いるのか？

→現在はいない。

・どうしていなくなってしまったのか？

→タンパク質は RNA よりも残基が多いため、種類が豊富だから。

RNA は側鎖が 4 種類しかなく、官能基は OH 基のみになるため。

RNA のみの場合、競争力が低い。

・膜がないことを想定していた場合、どのような状況下になるのか。

→膜の素材は外から供給する必要がある。

遺伝子複製のみを目的とした細胞が、RNA の 3 リン酸をエネルギー源として反応していた。

・200 塩基つながる必要がある？

→ある、乾燥によって可能。

・なぜ塩基数が必要なのか？

→あまり短いと固まりにならないと機能しないため。

・乾燥が必要なプロセスでは陸地が必要？

→空気があれば良いが、湿潤も必要であり拡散も必要のため、おそらく陸地が必要である。

・試験管内の（複製させる）実験で膜は必要か？

→複製のみであれば膜は必要でない。

## 5. 生命の始まり

### 5-1. 生命の起源説

#### (1) ベシクル（リポソーム）を重視する説

膜の誕生が生命誕生をもたらすのではないか。

・コアセルベート説（オパーリン）

初めて提唱した。コロイド粒子（タンパク質を含む）の集合体をコアセルベートという。物質の取り込み等の性質をもつことから、これらが、やがて脂質膜を形成し、外液と隔離した構造を持ち、生命が誕生したとする説。

物質の取り込み等の性質を持つ。

・プロティノイドミクロスフェア（Harada, Fox）

アミノ酸を熱重合し水に溶かすと、球体になる。また、これが触媒機能をもつこともある。これより、これが生命誕生の起源ではないかとする説。

・マリグラニュール（柳川、江上）

熱水環境を模擬して、アミノ酸を重合させると、プロティノイドミクロスフェア同様に球体を作る。これが生命誕生の起源ではないか。

・高分子態構造体（小林）

隕石中の複雑化合物が初期のベシクルなのではないか。

・隕石抽出脂肪酸（Deamer）

隕石中にベシクルの材料がある。

#### (2) 反応を重視する説（メタボリズム）

－鉄硫黄（Wechtershuser, *et al.*）

鉄硫黄のメタボリズムが重要なのではないか。

－GADV 仮説（池原）

タンパク質のみで複製したのではないか。しかし疑似複製だろう。

### (3) 遺伝情報を重視する説

—RNA ワールド

- ・鉄硫黄ワールド説
- ・鉄硫黄のベクシルができて増える
- ・鉄硫黄を含む酵素が生物酵素に多数ある
- ・生化学的基本反応を鉄硫黄でできる
- ・熱水環境に多い

(問題点)

遺伝の仕組みとのつながりが言及されていない。

- ・セントラルドグマの進化

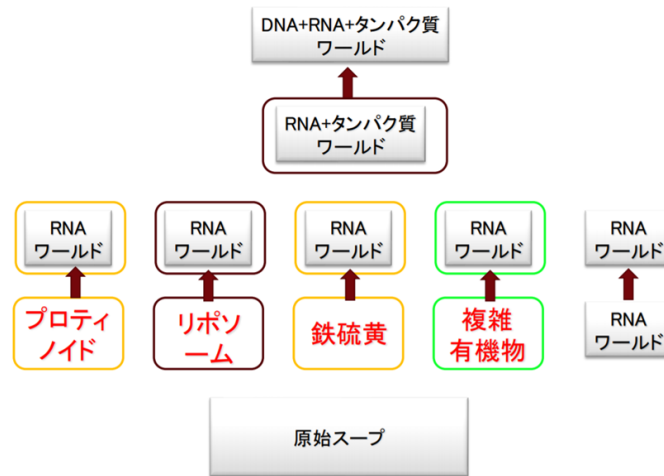
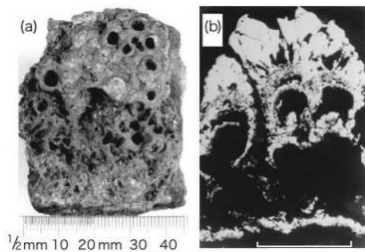


Fig. 16 RNA ワールド説

現在の生物がDNA、RNA、タンパク質で構成されている。

どのようにしてタンパク質ができるようになったのか？

- ・RNA ワールド 原理主義<sup>(32)</sup>
  - ダーウィン進化説が適用しづらい。
- ・鉄硫黄 RNA ワールド<sup>(33)</sup>
  - 鉱物が泡構造をつくっている場所が生命起源ではないか。 鉄硫黄環境＝熱水環境。



しかし、実験的に明らかにされていない。

Fig. 17 鉱物の泡構造

- ・リポソーム RNA ワールド<sup>(34)</sup>
  - 北極海の温泉などを想定している。
  - RNA と膜の原料は外から供給される。

## 5-2. 生命誕生の場

- ・暖かい海（池）
  - ダーウィン “地上で生命が誕生したのならば、暖かい池のなかだろう”
- ・粘土
  - 吸着能が高いため、反応の推進に寄与したのではないか。
- ・熱水噴出孔（先述）
- ・地下
  - 地上の圧力が高い場所で、アミノ酸を圧縮すると重合した（実験）。
- ・火星
  - ホウ素が地球上に比較的少ないが火星には多いこと。
  - 当時地球に十分な陸地がない場合、陸地のある火星のほうが生命誕生に有利だろう。
- ・クレーター
  - RNA 合成の場と考えられるため。
- ・陸地（山岸先生）
  - RNA ワールドから始まるとすると、
  - 脱水反応の場が必要となり、陸地が必要であるため。
- ・陸上温泉
  - 初期の海は、ナトリウムが多かった。
  - しかし現在の細胞は、カリウムが濃く、ナトリウムが薄い。
  - その理由：熱水の中にはカリウムの多い場所がある。
  - 熱水→蒸気（カリウム濃縮）
  - そのため、熱水地帯ではないか<sup>(35)</sup>

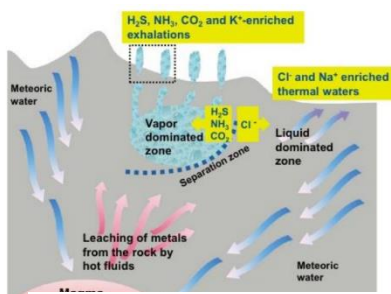


Fig. 18 生命誕生の場モデル  
(熱水付近)

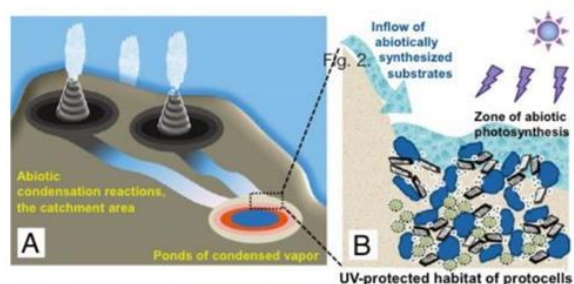


Fig. 19 生命誕生の場モデル  
(陸上温泉)

## ◇まとめ 6 : 生命誕生の場

陸上で RNA ができる。

陸上でヌクレオチドは重合する。

200 塩基 RNA で 200 塩基 RNA を複製できる。

ベシクルをつくる脂質の量が問題である。

生命誕生の場は陸上だろう。

RNA 生物は、その後進化して DNA 生物となった。

## 5-3. 完全祖先型酵素：祖先酵素完全合成

遺伝子のアミノ酸配列を調べることで、系統樹を作成できる。これより、全生物の進化系統樹 (Woese, *et al.* 1990) を逆算することで、全生物の共通の祖先 (コモノート) を推定し、合成することができるのではないか。

### ・ 祖先タンパク質の復元法

アミノ酸配列の収集

↓

アライメント (遺伝配列を並べる) の作製

↓

系統樹の構築

↓

祖先型配列の推定

↓

PCR 法による祖先型遺伝子の復元

—コドンを逆翻訳し、遺伝子を合成

↓

祖先型タンパク質の合成

—大腸菌内にその遺伝子を導入し、発現する

・NDK（核酸合成に関与する酵素）

ATP から AGP を合成する酵素。このタンパク質の安定性と生物の生育温度は相関関係にあるため、指標として利用できる。

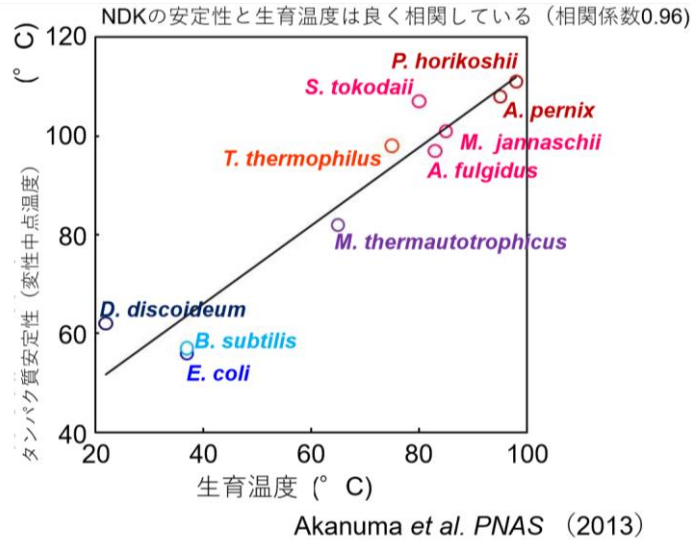


Fig. 20 NDK 安定性と微生物生育温度の関係

・アミノ酸組成変動モデルでの推定

推定した DNA 配列から遺伝子を作り、それらを発現及び精製し、得られたタンパク質がどれくらい熱安定性を持っているかを調べることで、各生物の生育温度を推定した。その結果、大腸菌、真正細菌の祖先：100°C

古細菌の祖先：110°C くらい

コモノート：110°C 前後

→全生物の共通の祖先は 80°C 以上に生息していただろうことがわかった。

また、酵素活性は 80°C 前後で高い活性を示した(現在と変わらない)。

黒：現存している超好熱菌の酵素 灰色：常温菌の酵素

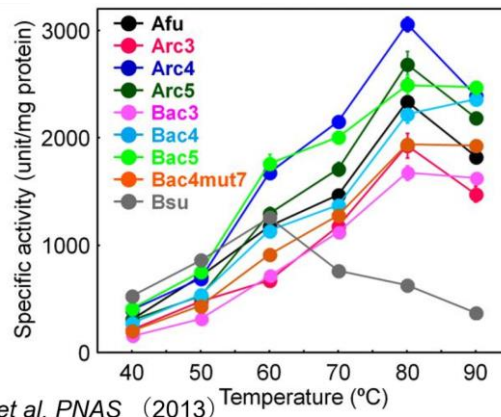


Fig. 21 各生物がもつ酵素の最適温度活性

しかし、これほどまでに発達した生物が、生命の起源生物であるはずがない...

\* 古細菌と真正細菌の違い

—膜脂質構成分子の構造が大きく異なるが、その理由はわかっていない。

\* コモノートは古細菌か、真正細菌か？

—おそらく、分子系統解析から真正細菌型。

◇まとめ7：祖先型酵素完全合成によりわかったこと

- ・古細菌、真正細菌の共通祖先、コモノートともに高温環境で生育していた
- ・コモノートは中性環境に生育していた可能性が高い
- ・コモノートは炭酸固定できる水素を利用できる化学合成細菌  
脂質は、ほとんど現在の細菌と変わらず、真正細菌型

◇まとめ8：生命の起源

- ・元素は宇宙ででき、地球上の元素は宇宙からきた
- ・アミノ酸は宇宙からきた
- ・核酸は陸でできた
- ・RNAは陸で重合した
- ・最初の生命は膜で囲まれたリボザイムであり、  
そこから多くの進化をへて全生物の共通の祖先（コモノート）が誕生した
- ・生命の起源とコモノートは全く別
- ・コモノートは超好熱性、独立栄養性、現存生物とほぼ同様の代謝系をもつ
- ・コモノートの前にタンパク質合成系が誕生していた

【質問5】

・ どうして複製時に熱はいらないのか？

→3リン酸のエネルギーを用いるため

詳しく実験では実証されてはいない。

・ 膜を積極的に形成する必要がある？

→特に必要はなく、積極的に形成しなくともできる。

・ 生死の判断は？

→リボザイムが複製を始めたら、生きていると判断。

・ 生き物の定義は？

→個が識別されていること

自己複製していること

代謝していること

・ 生命の誕生は現在も起こりうるのか？

→現在起こったとしても、それらの生命は淘汰されてしまうため。

・ 寿命はあるのか？

→ない。

微生物にも寿命はない。有性生殖ができてから寿命ができた。

・ 膜はいつできたのか？

→膜のない状態で複製を続けると、複製される能力が高い RNA が残ってしまう。

そのため、膜もほぼ同時期に形成されているだろうと考えられる。

・ 生命誕生時の、細胞内の Na / K が維持されている根拠は？

→まだ明らかになっていない

情報伝達の働きの役割もある

・ Na が濃い場所よりも、K が濃い場所よりも生命が誕生しやすい理由は？

→明らかになっていない

誕生時がカリウムであったから、そのまま使われているのだろう

・ 生命誕生は1回だけ？

→何度もあったとしても、現在に繋がっているのは1度だけだろう

・ K に特異的に誕生できる生物は、淘汰されそうだが？

→温泉環境は、RNA の誕生や濃縮ができる可能性があるだろう

しかしよくわかっていない

・ コモノートは既に NDK をもっていた？

→全生物が持っているため、この遺伝子をもって進化したと考えられる

・ コモノートは、現在とほとんど変わらないタンパク質の組み合わせを有していた？

→まだわからない

遺伝子を比較し分類すると、286,514 のタンパク質の種類に分けられた



各遺伝子の系統樹を作成し、最低 2 種類の真正細菌がその遺伝子持ち、最低 2 種類を古細菌が有していれば、全生物の共通の祖先として判定する基準を設けた  
その結果、全生物の共通の祖先は、  
嫌気性、炭酸固定、 $H_2$  に依存、窒素固定、FeS クラスターを持つといえる  
しかし、これほどまでに発達した生物が、生命の起源生命であるはずがない...  
違うのではないか

・コモノートはいつ頃発生したのか？

→40 億年前後

系統樹に化石からわかる分岐年代を組み込んでいく

・コモノート以前は？

→系統樹は、現存している生物の遺伝配列を指標にしているため、コモノート以前を調べることはできない

しかし、方法はある...後ほど

・地上でアミノ酸は合成できない？

→還元型であれば合成可能だが、利用できるものは宇宙から来たのだろう

核酸は地上で合成されたはず

## 6. 地球上で生命はどのように進化したか

### \* 生命の分類（分類ランク：界門綱目科属種）

分類方法に関わる様々な基準

#### ・動物の分類方法

##### —脊椎動物と無脊椎動物

###### 脊椎動物

人間の直感、外見、色、大きさ、形、表皮、肢、あご、化石など

###### 無脊椎動物

上記の分類方法の他に、解剖学（脊索、脊椎、内臓、器官）、発生学など

##### —前口動物と後口動物

前口（旧口）動物（哺乳類・爬虫類・両生類・鳥類・脊椎動物）

口→肛門の順にできる

後口（新口）動物（節足動物・環型動物・軟体動物）

肛門→口の順にできる

腔腸動物（イソギンチャク、クラゲ）

口と肛門が一緒（1つ）

#### ・植物の分類方法

生理学（栄養の取り方）でも分類できる

\* 藻類は植物だろうか。（答え）藻類は、植物でも動物でもない。

#### ・細菌の分類方法

形態分類は難しい...、そのため代謝や遺伝子によって分類する。

以上より、

分類学の問題点は、何を重要と思うかで分類法が変わってしまう、ということ。

（基準となるもの）

- ・人間の直感
- ・外見、色、大きさ、形、表皮、骨格
- ・解剖学（内臓、器官）
- ・発生学
- ・単細胞か多細胞か
- ・細胞の構造（核の有無）

## 6-1. 進化

どのようにして生物は多様に進化したのか。

### (1) ダーウィン「種の起源」

「生存可能な数よりも多くの子孫がそれぞれの種から生まれる。そのため、生存のための競争が頻りに繰り返される。その結果、複雑な時々変化する生存条件の中で、もしほんの少しでも何らかの点で有利であるような個体があると、その個体にはより大きな生存の機会が生じ、その結果、その個体は自然によって選択されることになる。強力な遺伝のしくみにより、選択された個体のもつ変化した新しい性質は広がっていくことになる。」<sup>(36)</sup>

自然選択説：限られた資源、生物の多産、変異の存在、最適者の生存、自然による選択。

生物は多くの子をつくり、それらの個体間には差異がある。(変異)

個体間には、植物や空間をめぐる競争が起こる。(生存競争)

個体のうち、環境に適応したものがより多く生き残る。(適者生存)

有利な変異が子孫に伝えられ、長い間変異が積み重ねられ、新しい種になる。

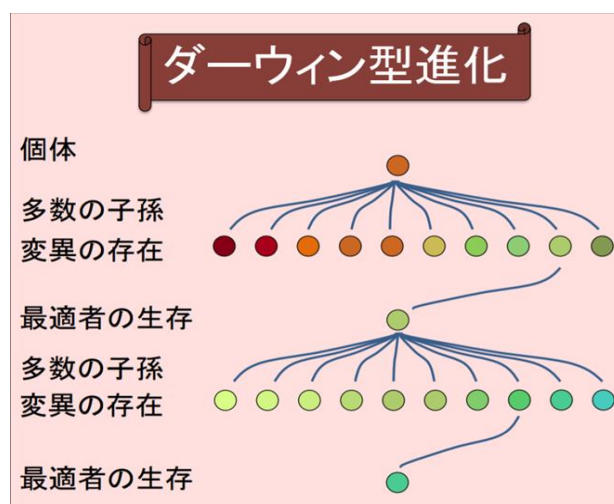


Fig. 22 ダーウィン型進化 (自然選択説)

生じる変化は必ずランダムに起きる。

結果的に、適応進化が起きる。

それぞれの環境の中で最適者が選定される。

これを繰り返すことによって、進化がおきる。(例：ウマの進化)

収斂進化：違う生物が似た環境で生息していると似た形態になる。(例：有袋類)

適応放散：様々な環境への適応 (例：ダーウィンのフィンチ)

→カンブリアの大爆発

## (2) 形状進化

どうやって形が進化したのか。

一つの遺伝子が一つの細胞を支配する訳ではない。

→スイッチで制御する

- ・スイッチ（ホメオティック遺伝子）のカスケード（連鎖）

受精卵形成後、前後を決まり、節ができる。

節の数が決定する。

節ごとに遺伝子が発現され、これが連鎖（カスケード）されて形状ができていく。

- ・繁栄した種と絶滅した種はなにが違うのか

- ・環境に適応している

哺乳類：かみ砕ける臼歯をもつ

両生類：粘膜で呼吸、肺の表面積は小さい

卵；水中に限られる

爬虫類、鳥類：うろこ、肺胞ができる。横隔膜がない。口蓋が不完全

卵；腸膜が発達し、殻ができた

哺乳類：毛皮がある。肺胞が発達。横隔膜がある。二次口蓋

胎子を自由に運べるようになった

## 6-2. 絶滅の証拠

6500 万年前（中生代末期）：恐竜の絶滅

- ・地層

黒色の層が、欧州では薄く、メキシコ周辺では濃く、煤を含んでいた。

またこの層には、イリジウムが高濃度に含まれていた。

花粉が減少していたことから、火山爆発が起きたのか、隕石衝突したのか、と推測された。

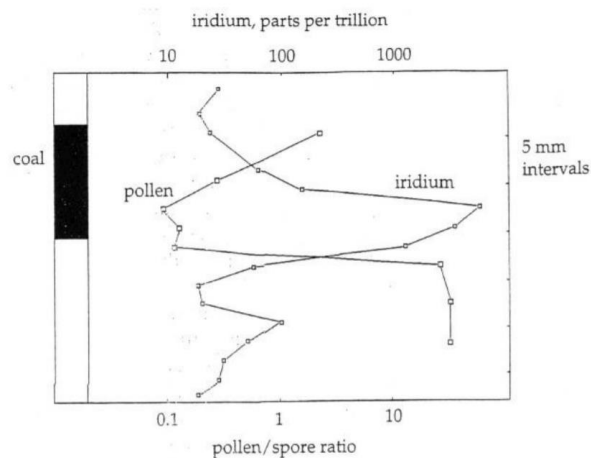


Fig. 23 6500 万年前の地層が示す花粉の減少

・隕石衝突

隕石衝突を裏付ける理由として、石英（非常に硬い）にひびが入っていたこと。大量の煤が含まれていたことがある。隕石衝突の証拠は、北アメリカ大陸やユカタン半島の北部でも確認されており、北アメリカ大陸から津波堆積物が確認されていたり、隕石衝突の跡（ユカタン半島の北部）ではクレーター跡がみつかったりしている。

しかしこれにより、どうやって恐竜が絶滅に至ったのかは、未だ明らかではない。

その他の推測

全球的に山火事が起きたのか？（木炭がない）

酸性雨はあったらう...（有力な説）

生き延びたものは？

- ・ 海底プランクトン
- ・ 鳥類
- ・ 植物の種子
- ・ 25kg 以下の爬虫類と両生類

→変化に適応できないと生き残れないだろう。

・ 大量絶滅の歴史

これまでに何度も大量絶滅が起きている。各時代において原因はそれぞれであるが、中生代末期は隕石衝突によるものだろうと考えられている。その他の時期は、未だ原因がよくわかっていない<sup>(37)</sup>。

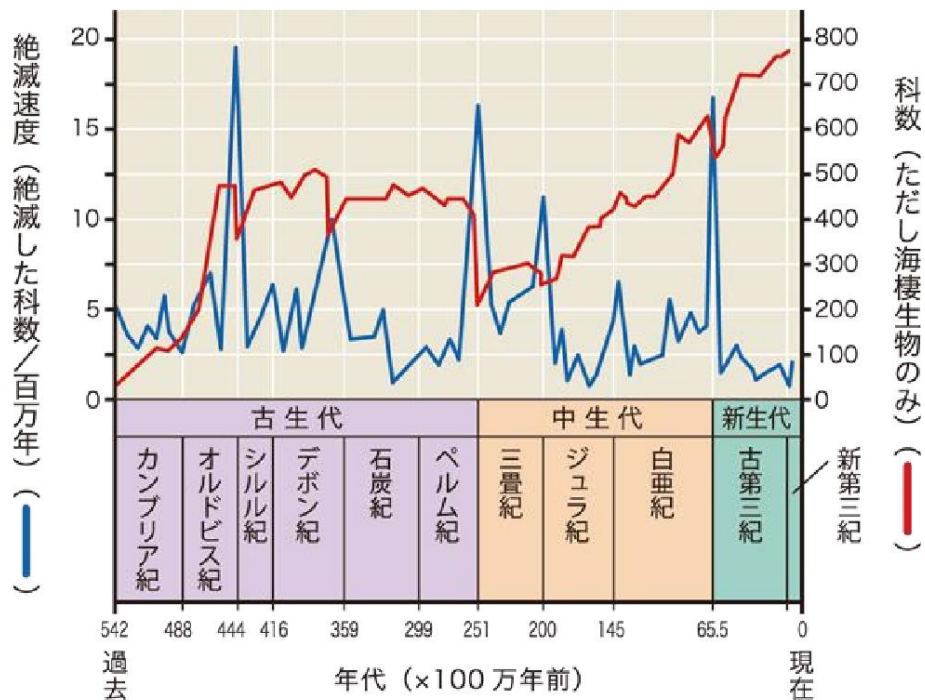


Fig. 24 各時代における生物の絶滅速度及び絶滅科数

## ◇まとめ 9 : 進化

- ・ 環境・環境変動への適応が重要である
  - ・ 特殊化した生物は環境変動に弱い
  - ・ 一般化した生物は環境変動に強い
  - ・ 動けるものは強い
- ・ 胞子や種は強い
- ・ 大量絶滅の後に適応放散が起きて、様々なパターンが試されただろう

## ◇まとめ 10 : ダーウィン型進化

- ・ 1 回には有限個をテスト比較する（最適解ではない）
- ・ テストを繰り返す
- ・ 局所的最適解を得る
- ・ グローバルな最適解ではない
- ・ 進化に行き詰まる（例：恐竜）
- ・ 時々リセットする（大量絶滅→適応放散）

### 【質問 6】

・ どうしてこの分類（前口・後口）が重要なのか？

→生物を分類する上で、根幹となっている。

\* 試行錯誤して進化している（ダーウィン進化論）

\* 神経系

後口動物：背側にあるため、脳を大きくできた

前口動物：腹側にあるため、口と拮抗して大きくできなかった

・ 脳はなぜ頭にある？

→眼が一番の情報源であるため、眼に近い場所が良い。

・ 後口と前口動物はどちらが先に出現した？

→ほぼ同時期、エディアカラ期くらいだろう。

多細胞化の時期からまもなく（1~2 億年後くらい）。

・有袋類と有胎盤類は遺伝的にどのくらい離れているか？

→哺乳類誕生初期に分かれている。

\* 適応放散：様々な環境への適応し、同じ種であっても多様な特徴をもつこと  
(例：ダーウィンのフィンチ)。

これは、カンブリアの大爆発にもいえる。哺乳類は古生代に誕生しているが、恐竜絶滅後に適応放散した。

・タンパク質にも同様にいえるのか？

→酵素一つ一つは、全生物の共通の祖先にまでたどれる。

しかし、単体に構成されているものばかりでなく、単純にひとつの遺伝子の進化に限らないこともある。そのため、確認しづらい。

・収斂進化によって、別々に同じものができる可能性はある？

→可能性はある。 同じ遺伝子があっても、配列を確認する必要がある。

・配列が同じものは一度しか発生しないのか？

→確率的に、かなり似た配列が独立に誕生することは、ほぼありえない。

論証は難しそうだが、その前提のもとで系統樹が作成されている。

・ミドリムシが多細胞化しなかった理由は？

→ミドリムシは単細胞生物として十分であった(細胞内器官の発達)ために進化しなかった。

しかし、他の微生物には、多細胞化し植物となったものもいる。

(多細胞化と多機能化)

・発現するのは効果が表れるということ？

→遺伝情報はもともともっている、スイッチによって制御される。

(発現というのは遺伝子からタンパク質が作られること)

・卵の時点では、どうスイッチが入れられるのか？

→配列を発現するための遺伝子がある。(連鎖)

最初は、発生の段階から連鎖してきている。

\* カンブリアの大爆発時期にはこのスイッチが試行錯誤されていたのではないか。

・両生類の卵の排出物は？

→外に出している。 養分は卵内から。

\* 様々な生殖機構

- ・ コケ植物：精子が単体で増殖し、存在している（造精器  $n$  体）。
- ・ シダ植物：2 世代ある。  $n \rightarrow 2n$ （前葉体  $n$ ）
- ・ 種子植物：花粉は核を複数もっている。 種子は既に発生が始まっている。（胚の形成）

・ 哺乳類の進化は保守的な進化であるのはなぜか？

→ 保守的なわけではない。

原生生物の段階で一番試行錯誤している。

多細胞化してからの生殖方法は限られてくるため。

・ グラフから、中生代末期から生物種がふえているが、その理由は？

→ わからない。

比較的新しい時期なので、化石が多く残っているため。

研究者が多いと分類項目（種数）が増えるのではないか。

・ 恐竜は進化に行き詰まっていたのだろうか？

→ その後の哺乳類の繁栄から、必ずしも最適解ではなかつただろう。



## 7. 遺伝子・生命の歴史

### \* 分類方法

現在も形態による分類は行われているが、  
遺伝子からわかる情報が有力である。

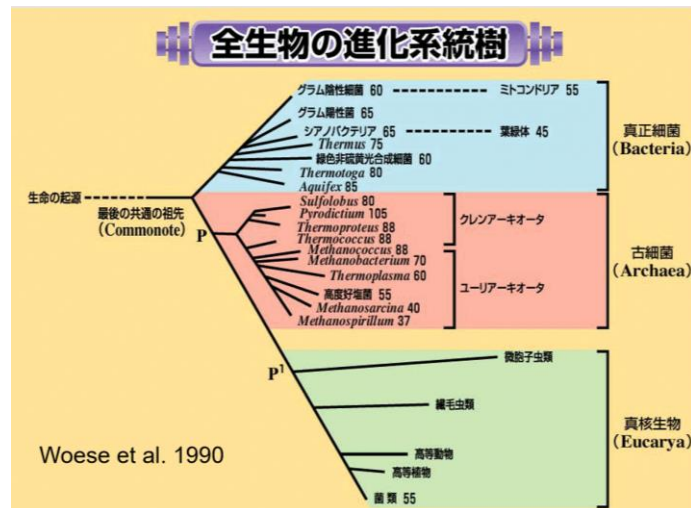
真正細菌と古細菌

### \* 真正細菌（例）

- ・ グラム陰性細菌：大腸菌
- ・ グラム陽性菌：枯草菌
- ・ シアノバクテリア
- ・ 緑色非硫黄光合成細菌：非酸素発生型光合成細菌

### \* 古細菌（例）

- ・ メタン菌など



### ・ 古細菌（アーキア）

古細菌のなかま。形態分類は難しい。

遺伝子をみると、比較的初期に分岐している。

## 7-1. 分岐年代（化石）

いつ頃わかれたのか？

進化速度は一定として、分岐年代を推測する。

分岐年代の推定に用いられた化石に基づく分岐年代<sup>(38)</sup>

比較	遺伝子の数	化石に基づく最後の共通の祖先（億年）
哺乳類／哺乳類	48	1.00
有胎盤類／有袋類	3	1.30
哺乳類／鳥類・は虫類	16	3.00
羊膜類／両生類	11	3.65
4足類／魚類	15	4.05
有顎類／ヤツメウナギ	1	4.50

生物の分岐年代の推定値<sup>(38)</sup>

生物群	推定年代（億年）
棘皮動物／脊索動物	8.4
後口動物／前口動物	9.1
襟鞭毛虫／後生動物	10.2
菌類／動物	13.7
植物／動物	15.9
古細菌／真確生物	20~38
古細菌／真正細菌	37.8 (33~40) ←コモノート

系統樹から、

様々な時点の生物の祖先の遺伝子を推測することができる。

- \* シアノバクテリアの様々な時点における共通の祖先を作り、  
どれくらいの耐熱性をもつかを調べることで、  
その生物が生存していた環境の温度を推定する（同位体比で比較）ことができた。

灰色箇所：<sup>30</sup>Si

灰色の実線：<sup>18</sup>O

ケイ素と酸素は地球の温度と相関するといわれている。

その結果、かつての地球は気温が高かった（現在よりも+5~10°C）と推定できた。

また、その後次第に温度が下がったであろうことがわかった。

## 7-2. 光合成の進化

### (1) 光合成について

光合成（光化学系）Ⅰ：補酵素を介し水素（ $\text{NADPH}_2$ ）を取り出す。水素（ $\text{NADPH}_2$ ）を運ぶことでエネルギーを獲得。

光合成（光化学系）Ⅱ： $\text{H}_2\text{O}$  から電子を受け取り光合成Ⅰに受け渡す。

・葉緑体内部

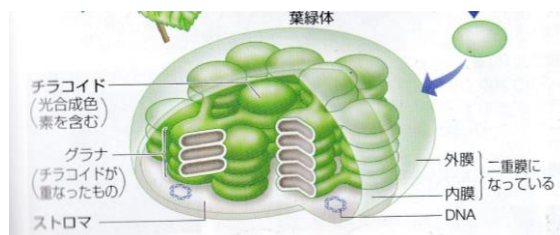


Fig. 25 葉緑体内部構造<sup>(39)</sup>

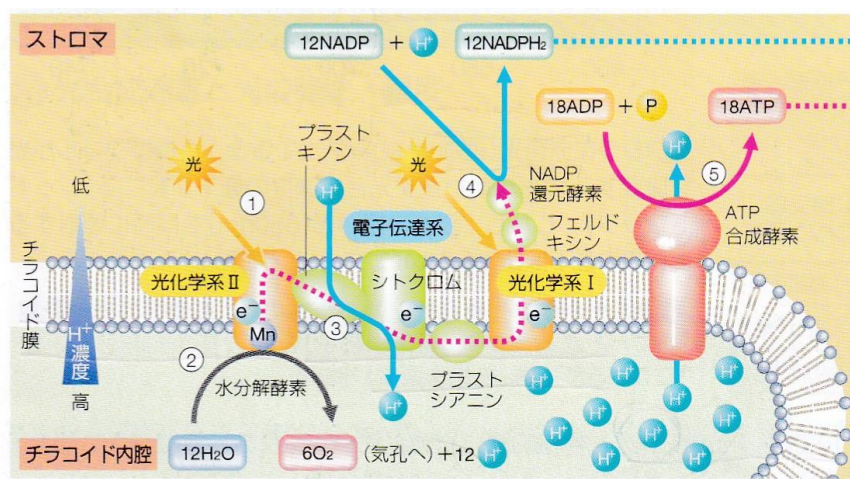


Fig. 26 光合成経路<sup>(39)</sup>

非酸素型光合成細菌は光合成Ⅰ型とⅡ型に分けられている。

非酸素発生型光合成細菌（バクテリオクロロフィル ab）は、緑色植物（クロロフィル a b c d）よりも吸収波長が長い。

- ・クロロフィル a, b : 400~500nm
- ・バクテリオクロロフィル : 700~800nm

既にクロロフィル→バクテリアクロロフィルの順で合成されていることがわかっているが、その理由は明らかになっていない。

(2) 光合成モデル<sup>(40)</sup>

もともと原始光合成細菌が存在していた。

→光合成系 I 型、II 型が生まれ、融合した。

系 I と系 II の両方を持つプロトシアノバクテリアがまず誕生

→そのままシアノバクテリアとなり、後に I 型のみ、II 型のみになった。

クロロフィル合成過程を考慮すると、つじつまは合う。

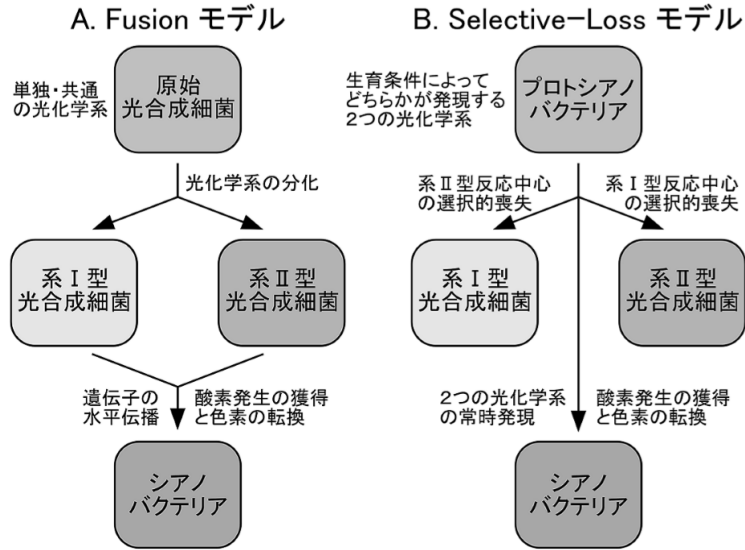


Fig. 27 シアノバクテリアの進化の過程を示すモデル

原核光合成細菌一覧（非酸素発生型を含む）<sup>(41)</sup>

Table 10 原核光合成細菌一覧

Table 10.1 The phylogeny of all oxygenic and anoxygenic photosynthetic bacteria and their photosystems.							
Photosynthetic group	Cyanobacteria	Purple Bacteria	Filamentous Anoxygenic Phototrophic Bacteria	Green Sulfur Bacteria	Heliobacteria	Chloracidobacterium thermophilum	Gemmatimonas phototrophica
Phylogeny (Phyla)	Cyanobacteria	Proteobacteria	Chloroflexi	Chlorobi	Ferrocetes	Acidobacteria	Gemmatimonadetes
Phototrophy	Oxygenic	Anoxygenic	Anoxygenic	Anoxygenic	Anoxygenic	Anoxygenic	Anoxygenic
Photosystem(s)	PS I + PS II	PS II	PS II	PS I	PS I	PS I	PS II
Subunit structure of core complex	Heterodimer + Heterodimer	Heterodimer	Heterodimer	Homodimer	Homodimer	Homodimer	Heterodimer

黄色い囲い：酸素発生型

### (3) 生き物の系統樹

光合成系（光化学系）からみた、生命起源の仮説

光合成系（光合成細菌）はどのように伝播（進化）したのか。

- ・ 垂直伝播：最初、始めから持っていて順々に進化した。
- ・ 水平伝播：途中で遺伝子がとんだのではないか。

（遺伝子重複はよく起きることではある）

光合成系Ⅱを中心とする光合成細菌が誕生したことにより、

→シアノバクテリア、非酸素発生型光合成細菌

→光合成系Ⅰをもつ光合成細菌の誕生へとつながった。

## 7-3. 真核生物の成り立ち

真核生物は、原核生物と体積、ゲノムが1000倍違う。

### (1) マグリスの細胞内共生説

古細菌 → +スピロヘイター → +シアノバクテリア、プロテオバクテリア

スピロヘイター：鞭毛、細胞体、膜構造をもつ。

プロテオバクテリア：ミトコンドリアの起源であるといわれている。

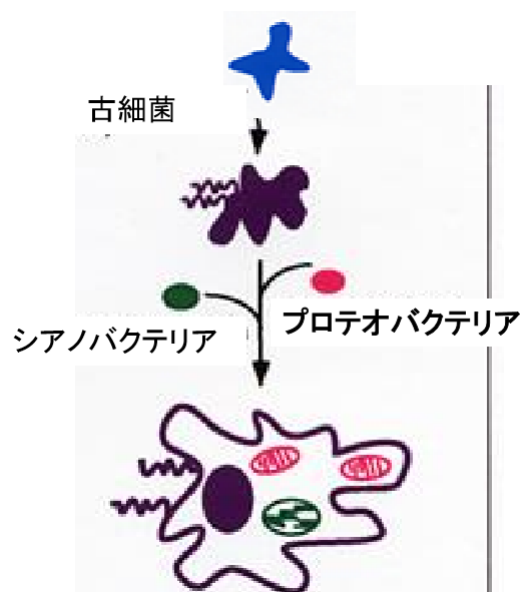


Fig. 28 マグリスの細胞内共生説

ウーズの系統樹が正しいとすれば、古細菌は現存の真核生物の祖先ではなく、古細菌と真核生物は共通祖先から分岐後にそれぞれ進化。

現在は、古細菌の中で真核生物の祖先となった古細菌がわかっている。

(2) 藻類の進化

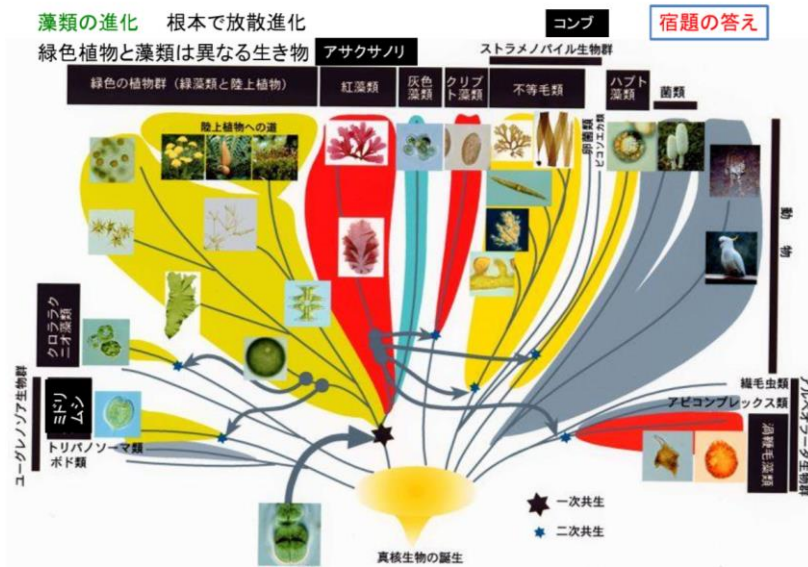


Fig. 29 藻類の系統分化

単細胞が進化し、世代交代を試行錯誤している。

トリパノゾーマ+葉緑体をもった生物→ミドリムシ

- ・ 緑色植物と藻類は、初期に適応放散した様々な原生生物に、別の宿主に対して葉緑体をもった生き物が二次共生をして、現在の生物に至る。
- ・ 緑色植物と藻類と動物は、別の異なる原生生物に由来する生き物。

◇まとめ 11： 繁栄した種と絶滅した種の違い

環境への適応、特に環境変動への対応。

→特殊化した生物は環境変動に弱い、逆に一般化した生物は環境変動に強い。

動物は強い（移動できると生存率は高まる）。

胞子や種子は生き残り易い。

◇まとめ 12： 陸上植物の進化

ダーウィン進化はランダムな試行錯誤の結果である。

大量絶滅後に適応放散が起き、生き残ったものが現在の生物であるだろう。

## 【質問 7】

### ・多細胞化後の動物、植物は何か？

→最初、植物と動物が分岐した時点では、多細胞ではない。

襟鞭毛虫は、現在の海綿動物の祖先である。

### ・植物と動物が分岐する前は？

→植物も動物もない。 原生動物に似た単細胞生物。

### ・古細菌と真正細菌が分岐する前は？

→真正細菌に近い生物だろう。

### ・同時期に分岐していた？

→適応放散によって偶然、同時期に分岐している。

化学合成→世代交代→葉緑体→植物、動物、菌類→多細胞化 (試行錯誤してきた)

### ・多細胞化はそれぞれの系統で独立に起きた？

→どんな生物にでも起こりうるだろう。

### ・部分的なのではないか？

→生息地を推定する必要がある。

緑、青：海水性のシアノバクテリア→海水表面だろう

### ・シアノバクテリアの耐寒性は？

→多くの場合死ぬことはないため、調べるのが難しい。

### ・こんなに気温が高かった生物は死んでしまうだろうとよく言われるが、問題はないのか？

→好熱菌は 120℃くらい耐えられる。シアノバクテリアも 70~80℃は耐えられる。

熱水噴出孔ではない。

### ・植物が光合成能を得た時期とシアノバクテリア出現期について？

→シアノバクテリアは既に最初から光合成をしていた (原核生物)

シアノバクテリアを取り込み進化したのが植物 (真核生物)

### ・遺伝子の水平伝播は具体的には？

→プロセスはあまりわかっていない。

現在も起きる

- ・ ウィルス感染
- ・ 細胞間の DNA 移動により遺伝子を移動
- ・ 遺伝子自体を食べて自身のゲノムに取り込む場合

・ 水平伝播を知る系統樹以外の他の根拠は？

→対立している各系統樹を作成し、一般的な微生物の系統樹に重ね合わせる必要がある。

・ ウィルスの宿主特異性は？

→確かに、媒介したのがウィルスなのかどうかはわからない。

・ 紅藻類は真核生物で、真核生物が共生した？

→原核生物でなく、真核生物が共生した。

もとの DNA が残存している生き物もある（クリプト藻）

現存している原生動物の中にも、藻類を食べて、葉緑体を獲得しているものもいる。

・ 試行錯誤は結果論なのではないか？

→いつでも一定の頻度で試行錯誤は起きているが、

ニッチが開いている時だけ、多様な試行錯誤を行っても生き物は生き残れる。

・ 孢子や種子が繁殖できたときに有力であるのではないか？

→そうであるが、孢子や種子自体も適応放散に近い。

耐えることができたのは結果論であり、しばらくは環境に耐えられる能力をもつ。環境変動時には、有利に働く。



## 参考文献

- (1) Teresa Mark Harrison, *et al.* (2005) *Science* **308**, 841-844.
- (2) Stephen J. Mojzsis, *et al.* (2001) *Nature* **409**, 178-181.  
Simon A. Wilde *et al.* (2001) *Nature* **409**, 175-178.
- (3) Shimoyama Akira. (1997) *月刊地球 原子地球と化学進化*, **17**, 441.
- (4) Genda Hidenori. (2019) *Springer*, *Astrobiology* in press.
- (5) Naraoka Hiroshi. (2010) *Research in Organic Geochemistry*, **26**, 13-20.
- (6) Stephen J. Mojzsis *et al.* (1996) *Nature* **384**, 55-59.
- (7) Kakegawa Takeshi (2017) *生物の科学 遺伝* 2 月号
- (8) Kakegawa Takeshi (2014) *Isotope News* 7 月号, **723**, 12-15.
- (9) James William Schopf, *et al.* (1987) *Science*, **237**, 70-73.
- (10) Isozaki Yukio, *et al.* (1997) *EOS*, **78**, F 399.
- (11) Ueno Yuichiro, *et al.* (2001a) *International Geology Review*, **43**, 196-212.
- (12) Margaret K. Tivey *et al.* (2008) *Oceanogr. magazine*, **20**, No.1.  
Margaret K. Tivey, *et al.* (2008) *Environmental Microbiology*, **10**(4), 874-884.
- (13) Ueno Yuichiro (2003) *Journal of Geography*, **112**(2), 208-217.
- (14) Holger W. Jannasch (1987). *Academic Press*. In H. W. Jannasch, R. E. Marquis, and A. M. Zimmerman (ed.), *Current perspectives in high pressure biology*. 1-15.
- (15) Holger W. Jannasch, *et al.* (1973) *Science*, **180**, **64** 1-643.
- (16) Holger W. Jannasch, *et al.* (1985) *Proc. R. Lound.* **B 225**, 277-297.
- (17) Holger W. Jannasch, *et al.* (1985) *Science*, **229**, 717-725.
- (18) Kato Shingo, *et al.* (2010) *Viva Origino* **38**, 46-55.
- (19) Kato Shingo, *et al.* (2010) *Environmental Microbiology*, **76**, 2968-2979.
- (20) Ueno Yuichiro, *et al.* (2006) *Nature*, **440**, 516-519.
- (21) Michael M. Tice, *et al.* (2004) *Nature* **431**, 543-552
- (22) Sugitani Kenichiro, *et al.* (2019) *Springer Astrobiology*
- (23) Koga Toshiki, *et al.* (2017) *Scientific Reports* **7**.
- (24) Yamagishi Akihiko. (2015) *東京大学出版*, *宇宙生命論*
- (25) Jerome M. Greenberg, *et al.* (1998) *Biological science in space*. **12-2**. 96-101.
- (26) Sidney W. Fox, *et al.* (1958) *Science*, **129**, No.3357
- (27) Matthew Powner, *et al.* (2009) *Nature* **459**. 239-241.
- (28) Bhavesh H. Patel, *et al.* (2015) *Nature Chemistry*, **7**, 301-307.

- (29) Furukawa Ryutaro (2019) *Springer Astrobiology*
- (30) David W. Deamer, *et al.* (1989) *Orig. Life Evol. Biosph.* **19**, 21-33.
- (31) Matthias Morasch *et al.* (2014) *ChemBioChem.* **15**. 879-883.
- (32) Gerald Joyce. (2002) *Nature* **418**. 214-221.
- (33) Martin William, *et al.* (2003) *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* **B358**, 59-85.
- (34) Ricardo Alonso, *et al.* (2009) *Scientific American*, September, **301**(3): 54-61.
- (35) Armen Mulkidjanian, *et al.* (2012) *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, April, 3;**109**(14) E821-E830.
- (36) Charles Darwin. (1859) *On the origin of species*, 1<sup>st</sup> ed, p.5.
- (37) Neil A. Campbell (2008) *BIOLOGY* 8<sup>th</sup> ed.
- (38) Da-Fei Feng, *et al.* (1997) *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* **94**: 13028-13033
- (39) Nagano Kei, *et al.* (2009) 増補四訂版 サイエンスビュー 生物総合資料
- (40) Sonoike Kintake (2018) *生物工学*, **96**, 11, 626-629.
- Martin F. Hohmann-Marriott, *et al.* (2011) *R. E.: Annu. Rev. Plant Biol.*, **62**, 515.
- (41) Hanada Satoshi. (2019) *Springer Astrobiology*