

2019年2月18日

生命の起原:

地球上の生き物はどこでどの
ように誕生したか

山岸明彦

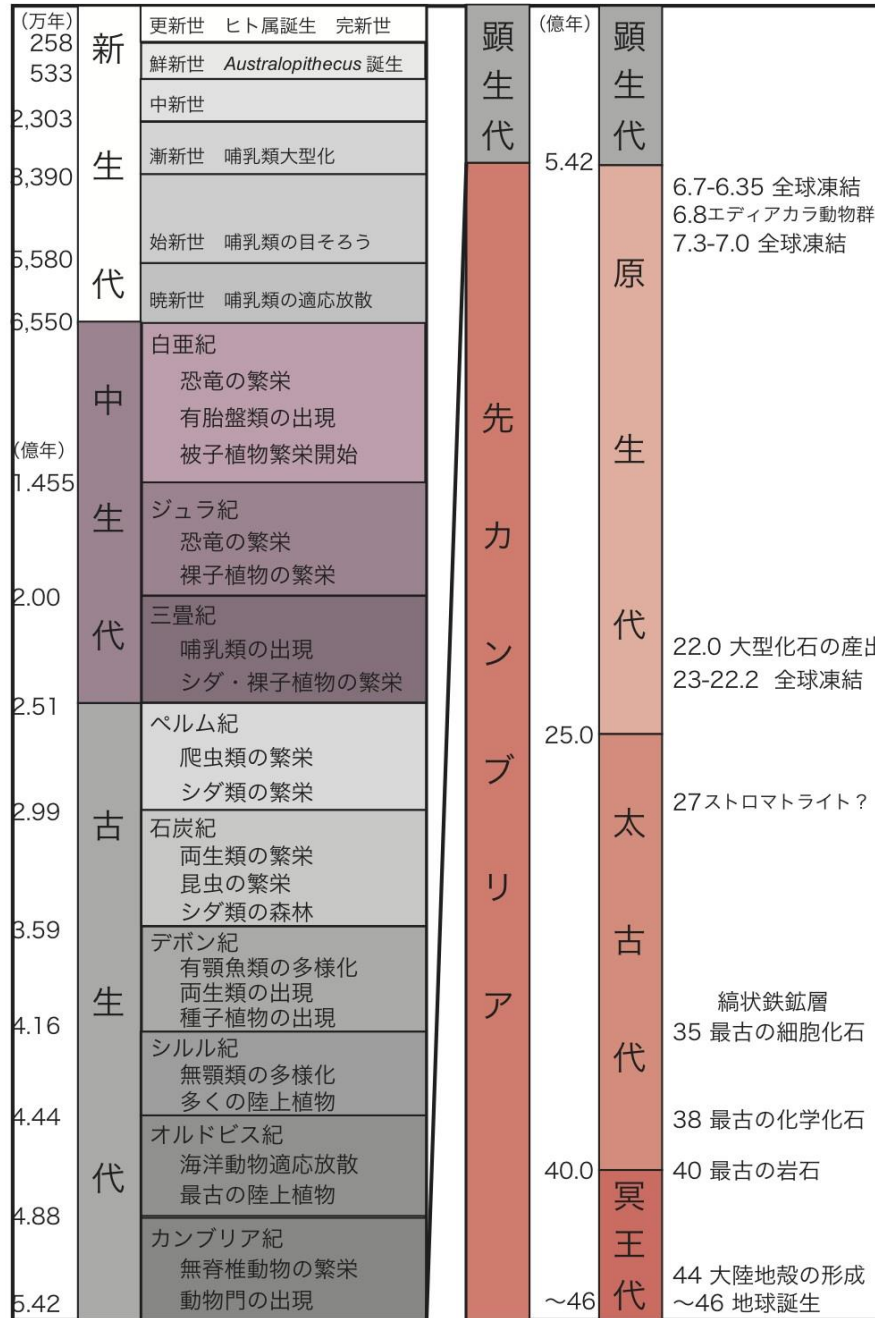
東京薬科大学

生命科学部

生命の起源と進化の研究

- ・ 天文学
- ・ 惑星科学、地球物理学
- ・ 地球化学、化学進化
- ・ 地学的証拠
- ・ 生化学的研究
- ・ 熱水地帯の微生物生態
- ・ 遺伝子の証拠、分子進化学
- ・ 宇宙での微生物探査
- ・ 知的生命体探査

地質年表



化学同人 山岸明彦編



Part I アストロバイオロジーの基礎

1章 アストロバイオロジーとは (山岸明彦)

2章 宇宙の起源と物質の起源 (佐藤勝彦)

3章 地球上の生命の起源 (山岸明彦)

4章 地球上の生命の進化 (山岸明彦)

Part II 地球における生命の起源

5章 太陽系・地球の誕生と初期地球環境 (田近英一)

6章 宇宙における有機物:太陽系と生命の原材料物質 (藪田ひかる)

7章 地球における有機物合成 (小林憲正)

8章 RNAワールド (木賀大介・鮎川翔太郎)

9章 全生物の共通祖先 (赤沼哲史・山岸明彦)

Part III 地球における生命の進化

10章 生命の痕跡を記録した太古の岩石 (掛川 武)

11章 光合成の誕生 (皆川 純)

12章 真核生物(真核細胞)の誕生 (横堀伸一・山岸明彦)

13章 全球凍結と生命の進化 (田近英一)

14章 大量絶滅と生命の進化 (丸岡照幸)

15章 人類と生命の進化 (星 元紀)

Part IV 太陽系における生命探査

16章 地球生命の極限 (高井 研)

17章 火星における生命探査 (山岸明彦)

18章 木星衛星エウロパの生命探査 (木村 淳・長沼 毅)

19章 衛星エンセラダスと宇宙物質科学 (高野淑識・関根康人)

20章 タイタンにおける生命探査 (小林憲正)

21章 パンスペルミア仮説 (楊 印杰・横堀伸一)

Part V 太陽系外生命探査

22章 宇宙における有機物探査 (大石雅寿)

23章 太陽系外惑星探査・生命探査 (田村元秀)

24章 地球外文明の探査 (平林 久)

Part VI 人類の未来

25章 宇宙の生命・文明探査とドレイク方程式 (海部宣男)

26章 宇宙の未来 (佐藤勝彦)

27章 われわれはどこから来てどこへいくのか (山岸明彦)

Astrobiology Yamagishi, Kakegawa, and Usui eds. Springer in press 2019

Part I Introduction to Astrobiology

1 What Is Astrobiology?
Akihiko Yamagishi

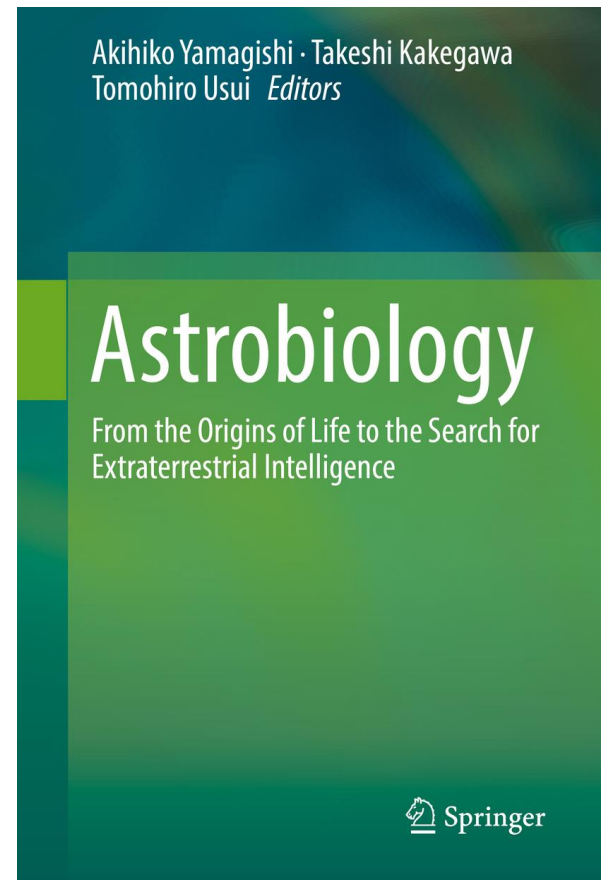
Part II Physics and Chemistry from Space to Life

2 Prebiotic Complex Organic Molecules in Space
Masatoshi Ohishi

3 Chemical Interactions Among Organics, Water,
and Minerals in the Early Solar System
Hikaru Yabuta

4 Prebiotic Synthesis of Bioorganic Compounds
by Simulation Experiments
Kensei Kobayashi

5 RNA Synthesis Before the Origin of Life
Yoshihiro Furukawa



Part III History of Life Revealed from Biology

6 RNA World

Shotaro Ayukawa, Toshihiko Enomoto, Daisuke Kiga

7 The Common Ancestor of All Modern Life

Satoshi Akanuma

8 Eukaryotes Appearing

Shin-ichi Yokobori, Ryutaro Furukawa

9 Color of Photosynthetic Systems: Importance of Atmospheric Spectral Segregation Between Direct and Diffuse Radiation

Atsushi Kume

10 Evolution of Photosynthetic System

Satoshi Hanada

11 Cosmolinguistics: Necessary Components for the Emergence of a Language-Like Communication System in a Habitable Planet

Kazuo Okanoya

12 Evolution of Intelligence on the Earth

Mariko Hiraiwa-Hasegawa

Part IV History of the Earth Reveiled from Geology

13 Formation of Planetary Systems

Shigeru Ida

14 Evolution of Early Atmosphere

Hidenori Genda

15 Biogenic and Abiogenic Graphite in Minerals and Rocks of the Early Earth

Takeshi Kakegawa

16 Cellular Microfossils and Possible Microfossils in the Paleo- and Mesoarchean

Kenichiro Sugitani

17 Great Oxidation Event and Snowball Earth

Eiichi Tajika, Mariko Harada

18 End-Paleozoic Mass Extinction: Hierarchy of Causes and a New Cosmoclimateological Perspective for the Largest Crisis

Yukio Isozaki

19 Mass Extinction at the Cretaceous–Paleogene (K–Pg) Boundary

Teruyuki Maruoka

Part V Search for Life in Solar System and Extra Solar System

20 Limits of Terrestrial Life and Biosphere

Ken Takai

21 What Geology and Mineralogy Tell Us About Water on Mars

Tomohiro Usui

22 Atmosphere of Mars

Hiromu Nakagawa

23 The Search for Life on Mars

Yoshitaka Yoshimura

24 Active Surface and Interior of Europa as a Potential Deep Habitat

Jun Kimura

25 Enceladus: Evidence and Unsolved Questions for an Ice-Covered Habitable World

Yasuhito Sekine, Takazo Shibuya, Shunichi Kamata

26 Astrobiology on Titan: Geophysics to Organic Chemistry

Hiroshi Imanaka

27 Panspermia Hypothesis: History of a Hypothesis and a Review of the Past, Present, and Future Planned Missions to Test This Hypothesis

Yuko Kawaguchi

28 Extrasolar Planetary Systems

Motohide Tamura

29 How to Search for Possible Bio-signatures on Earth-Like Planets: Beyond a Pale Blue Dot

Yasushi Suto

30 SETI (Search for Extraterrestrial Intelligence)

Hisashi Hirabayashi

31 Possible Cultural Impact of Extraterrestrial Life, if It Were to Be Found

Junichi Watanabe

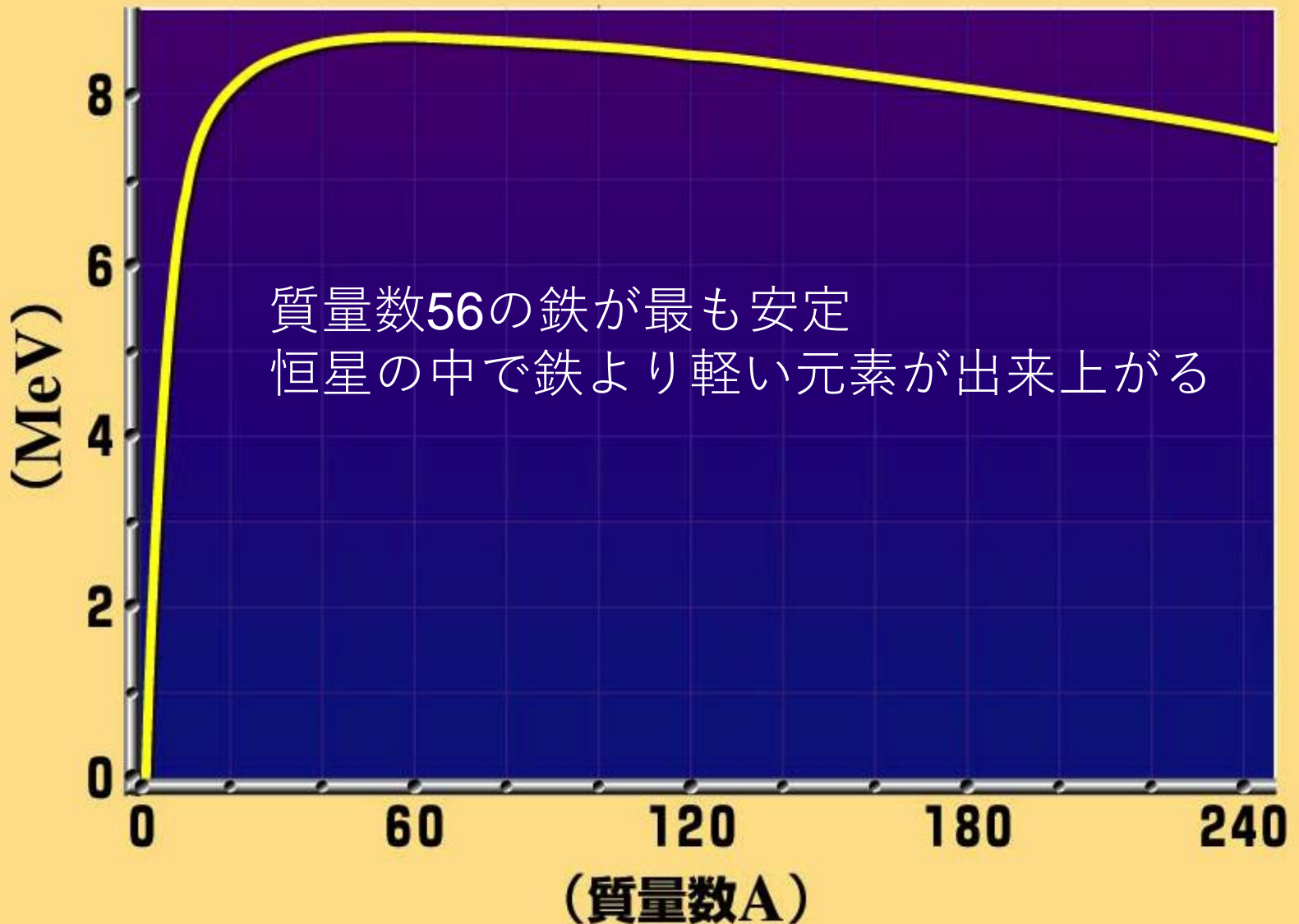
宇宙と物質の進化

- ・ 137億年前 宇宙の誕生
- ・ 宇宙の膨張
- ・ ビックバン
- ・ 3分後 原子核の誕生(水素、ヘリウム)
- ・ 星(恒星)の誕生 多種の原子核の誕生
- ・ 恒星中で核融合反応が進行する

今から約138億年前宇宙は誕生しました。
水素原子が誕生しました。



核子1個あたりの平均結合エネルギー



超新星爆発：重原子の合成



宇宙と物質の進化

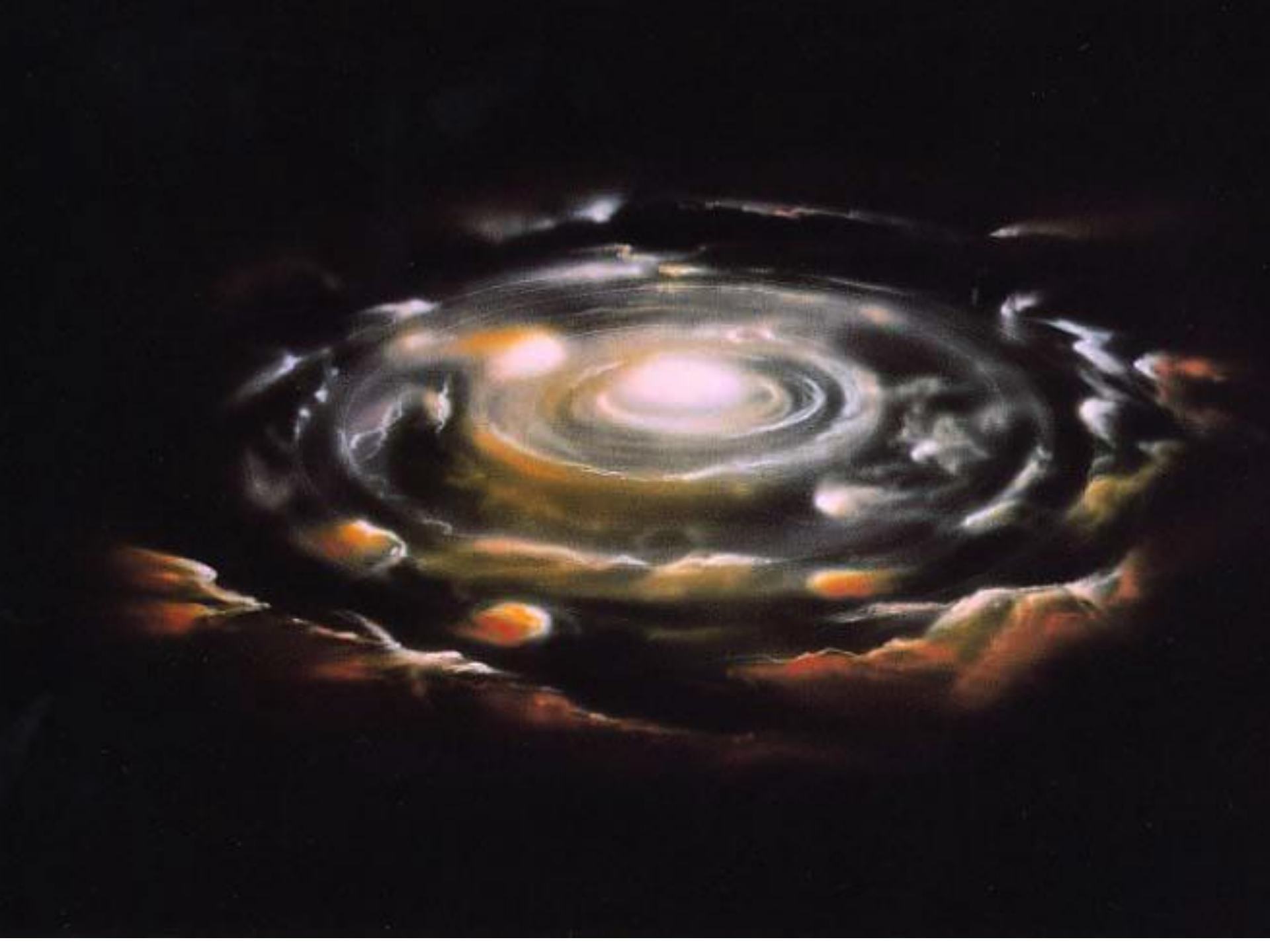
- ・ 137億年前 宇宙の誕生
- ・ 宇宙の膨張
- ・ ビックバン
- ・ 3分後 原子核の誕生(水素、ヘリウム)
- ・ 星(恒星)の誕生 多種の原子核の誕生
- ・ 超新星爆発と重原子の誕生
- ・ 太陽系と惑星系の誕生

暗黒星雲の中で太陽が誕生



惑星系の誕生





惑星の形成



地球の誕生：46億年前

マグマオーシャン

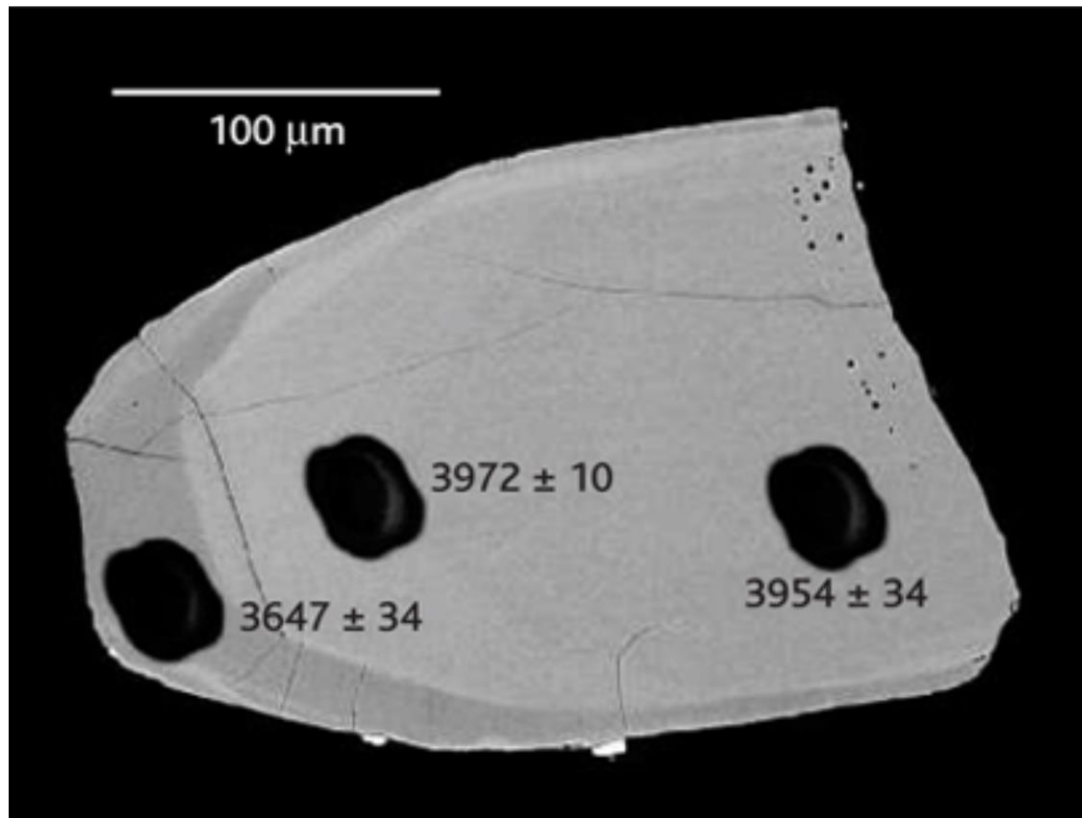


地学の証拠

地層に残された証拠

大陸地殻の形成：44－45億年前 岩石中ジルコンの解析から。

T. M. Harrison et al. (2005) Science 310, 1947-1950



A part of Hadean zircon grains has high oxygen isotope ($\delta^{18}\text{O}$) values (Wilde et al. 2001), indicating that the Earth's oceans existed during the Hadean era. High $\delta^{18}\text{O}$ values of zircon grains compared with the mantle are produced by low-temperature interactions between rocks and liquid water. Zircon grains with the ages of 3.91–4.28 Ga have high $\delta^{18}\text{O}$ values, suggesting interactions between the continental crust and oceans (Wilde et al. 2001; Mojzsis et al. 2001).

世界に知られる古い岩石（下山晃、月刊地球 17: 44 1 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 イスアーゴットハブ	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

Fig. 14.1 Genda, 2019 Astrobiology in press
Pillow lava basalt (left) and sedimentary rock (right) in Isua, Greenland. The pillow lava basalt erupted underwater at 3.8 Ga. The gray-green portion is the core of the pillow and is mantled by a dark green portion, which in turn is rimmed by pale-colored chilled margins, together with the matrix. The sedimentary rock is a conglomerate interlayered with mafic terrigenous sediments. The scales are given by a hammer at the top of the left photo and a pencil in the middle of the right photo. (Courtesy of Museum of Evolving Earth, Tokyo Institute of Technology)

原始海洋の形成：40-44億年前

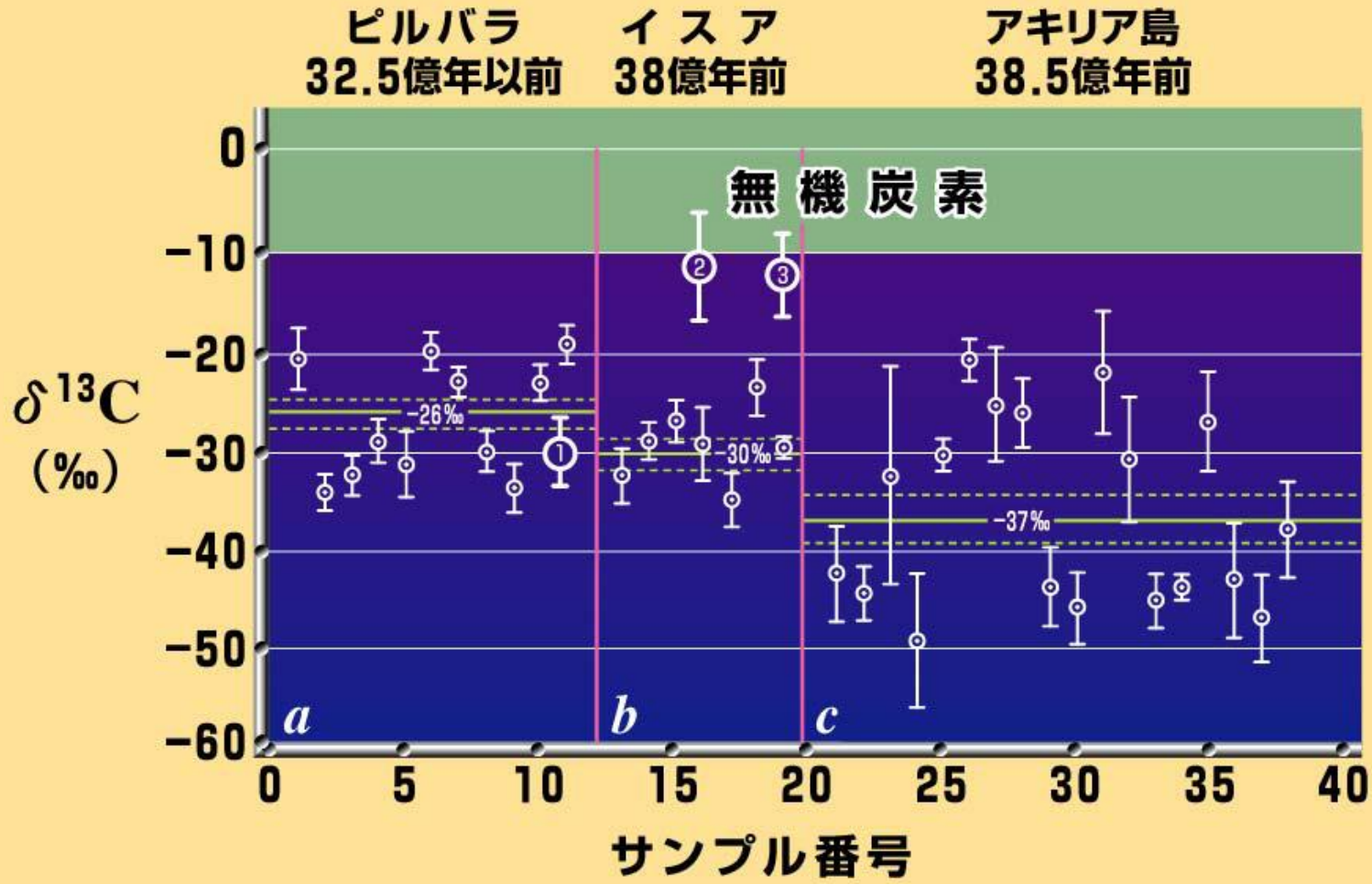


初期地球環境は不明

- 初期地球の大気組成：CO₂, CO, H₂, CH₄
- 初期地球の温度？
- 初期大洋の組成？
- 初期地球の大陸？
- 40億年前まで隕石重爆撃？
- 酸素は？

最古の生命の証拠

炭素微粒子中の ^{13}C の ^{12}C に対する量



Takegawa (2019) Springer in press

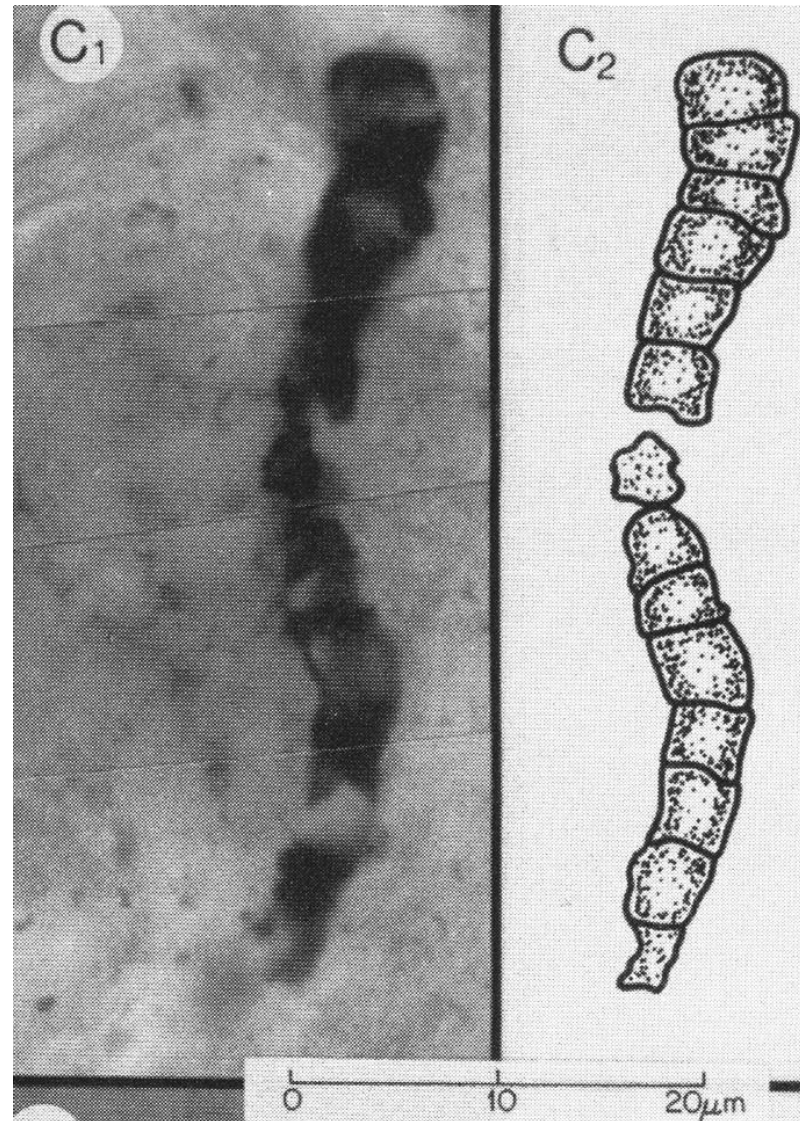
太古の岩石中石墨の ^{12}C と ^{13}C の量比(世界標準物質で規格化された値) 掛川、生物の科学遺伝、2月号2017年

地域名	年代 億年前	$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比	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 変性温度が花崗岩と不一致 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)	$\text{FeCO}_3\text{-CO}_2\text{-C}$ 37億年前の非生物炭素 Van Zuilen, M. A. et al. (2002)
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)
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)

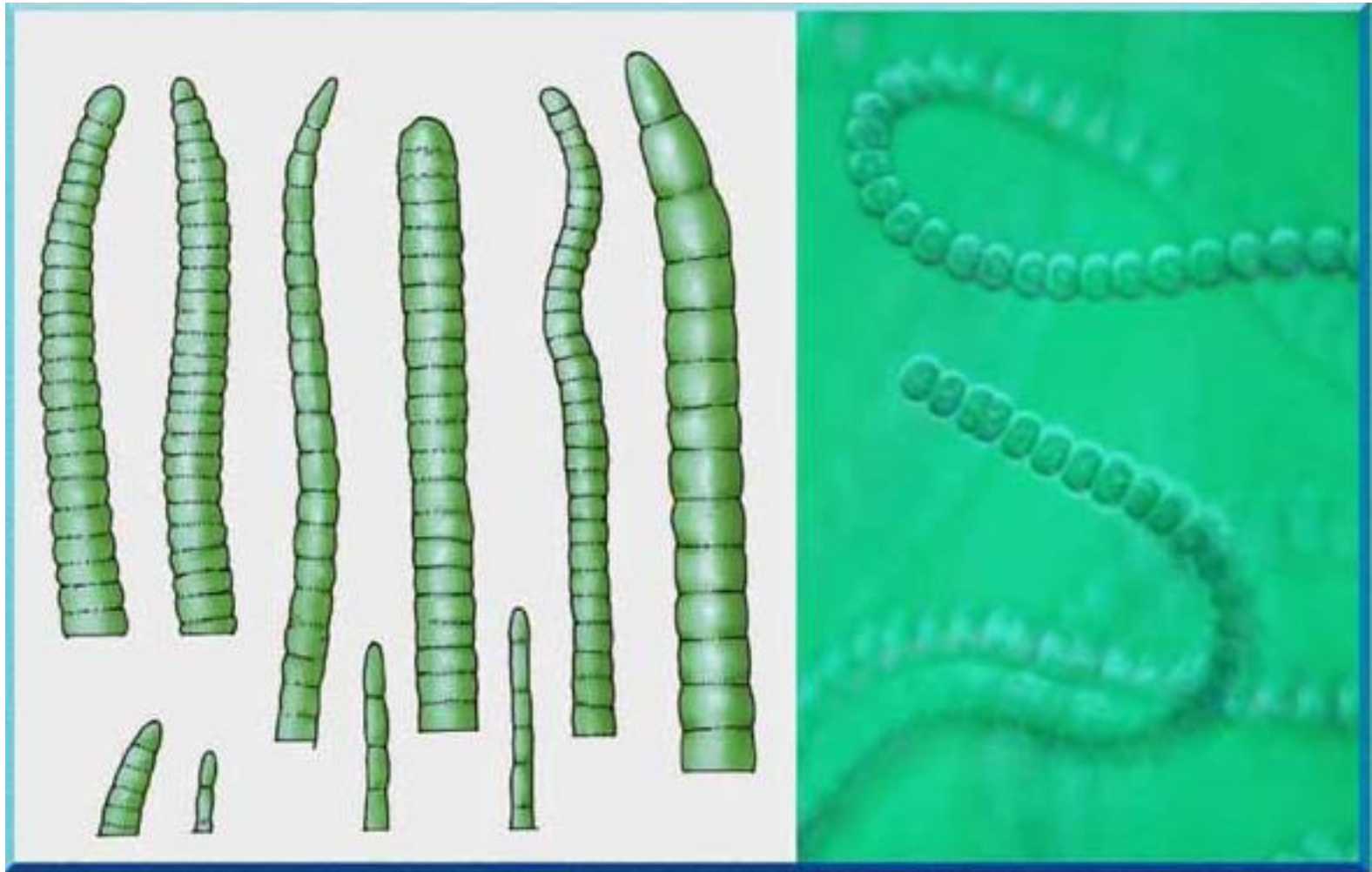
Takegawa, T.
Springer
In press (2019)

Figure 9: Contrasting morphologies of graphite grains. A is from schist (meta-black shale) and B is from a carbonate vein. A shows various forms of graphite grains including tubular (1 in figure), polygonal (2 in figure) or intermediate (3 in figure) forms. Such variation is a typical characteristic of biogenic graphite. B shows uniform sheet-like textures. Individual thin sheets (or films) are aggregated. Such uniformity is a characteristic of abiogenic graphite.

Pilbara緑色岩中(35億年前)の最古の微化石 (J. W. Schopf)



現存するシアノバクテリアの細胞構造



ストロマトライト



ストロマトライト

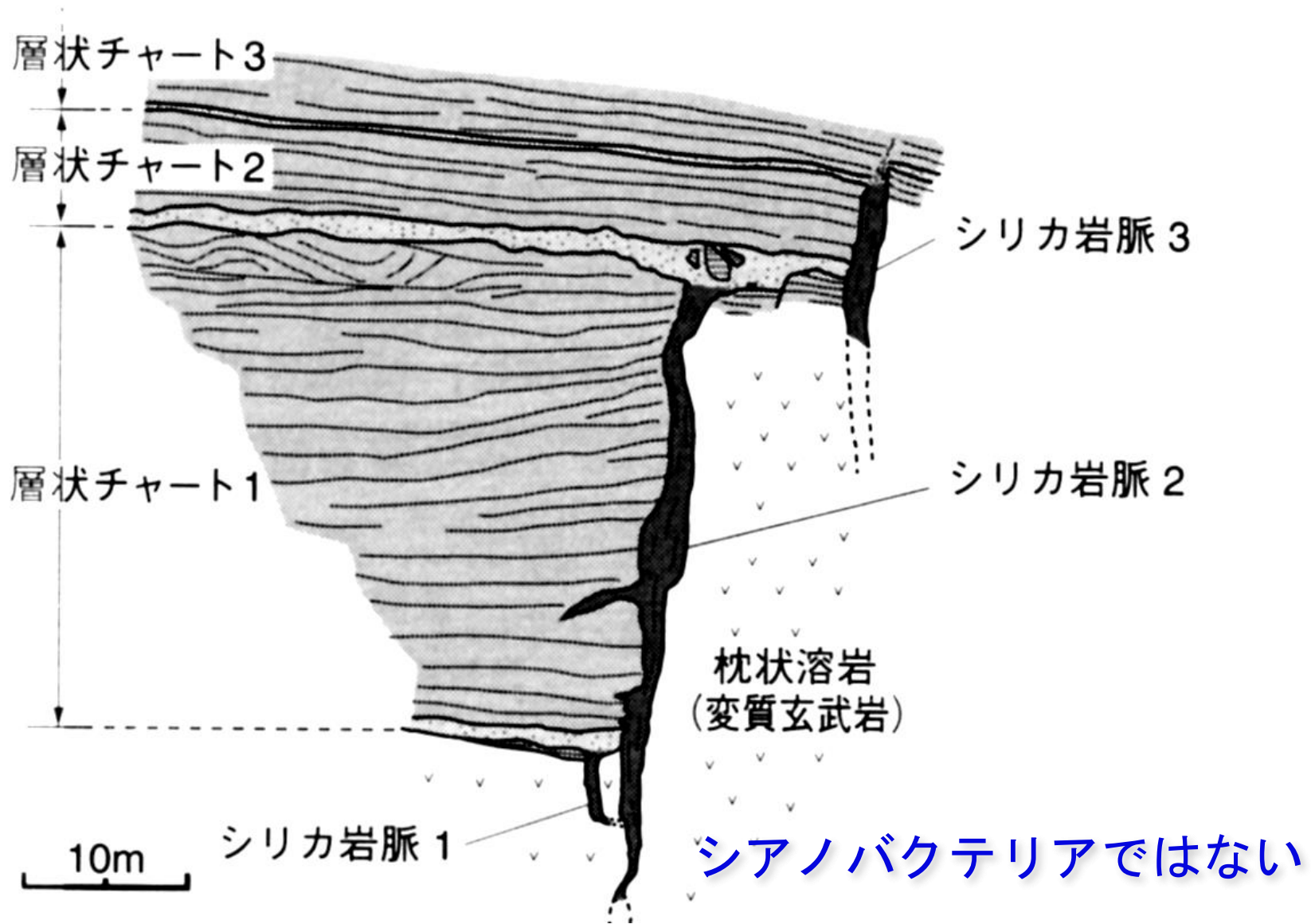


現在ストロマトライトのできている場所

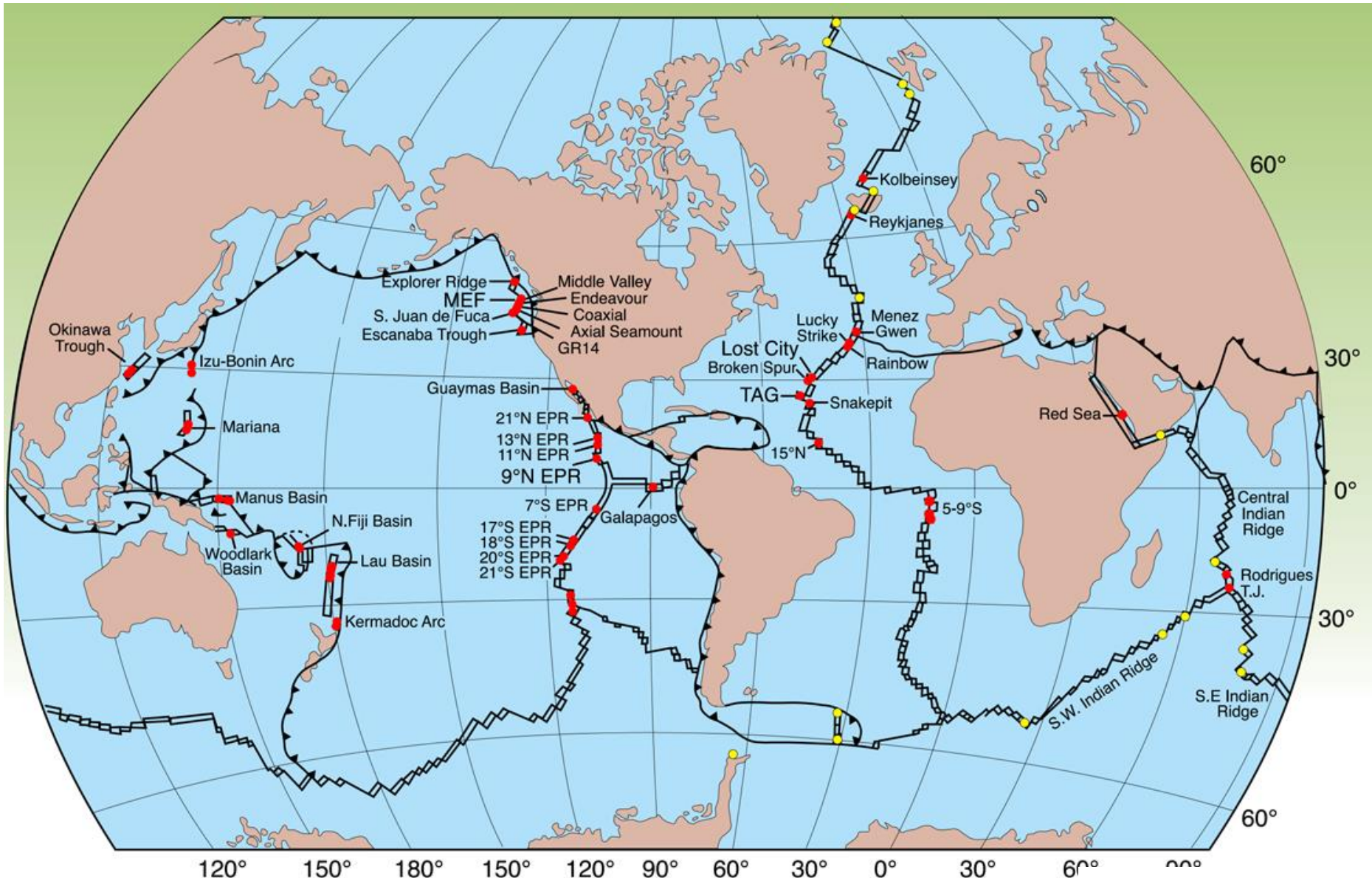


オーストラリア、ハメリンプール

ノースポールのシリカ岩脈 Isozaki et al. (1997)



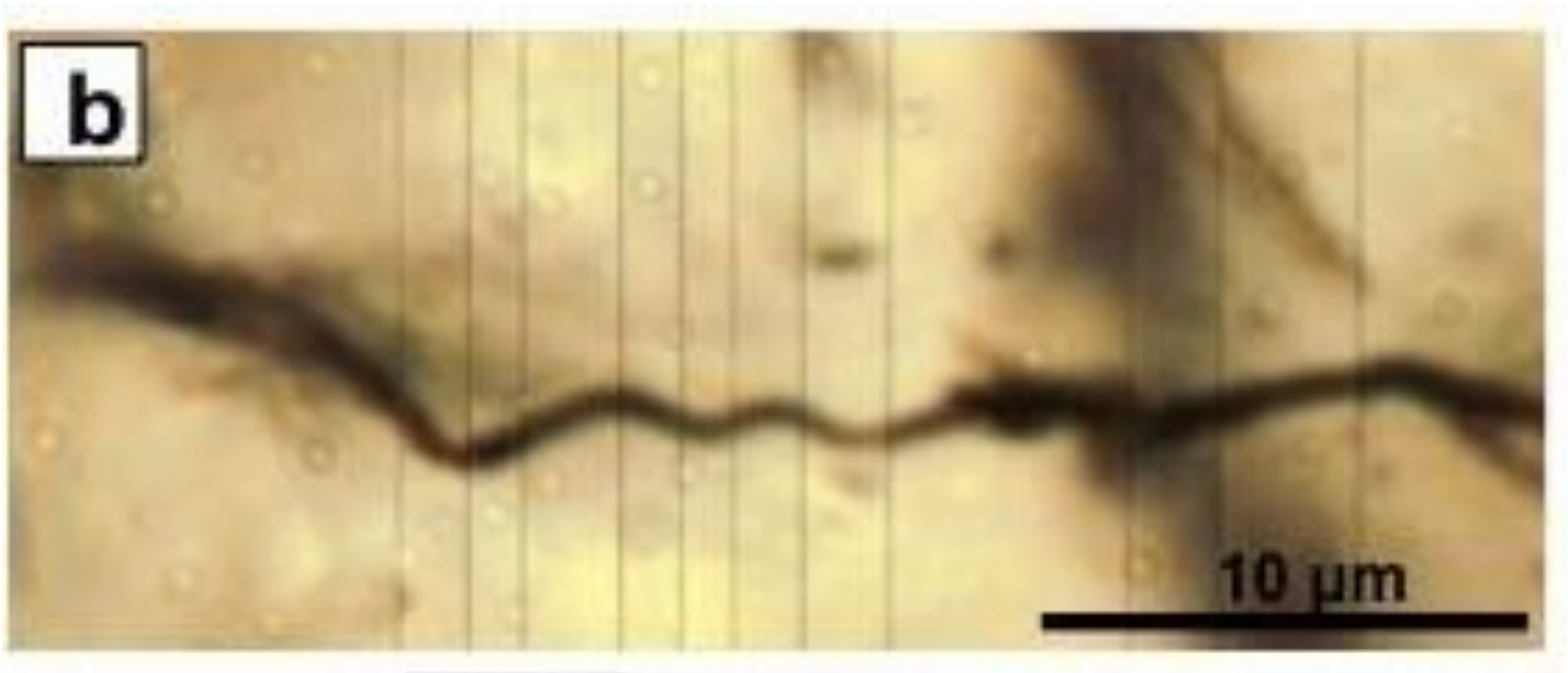
世界各地の海底熱水地帯



● 発見されている熱水地帯

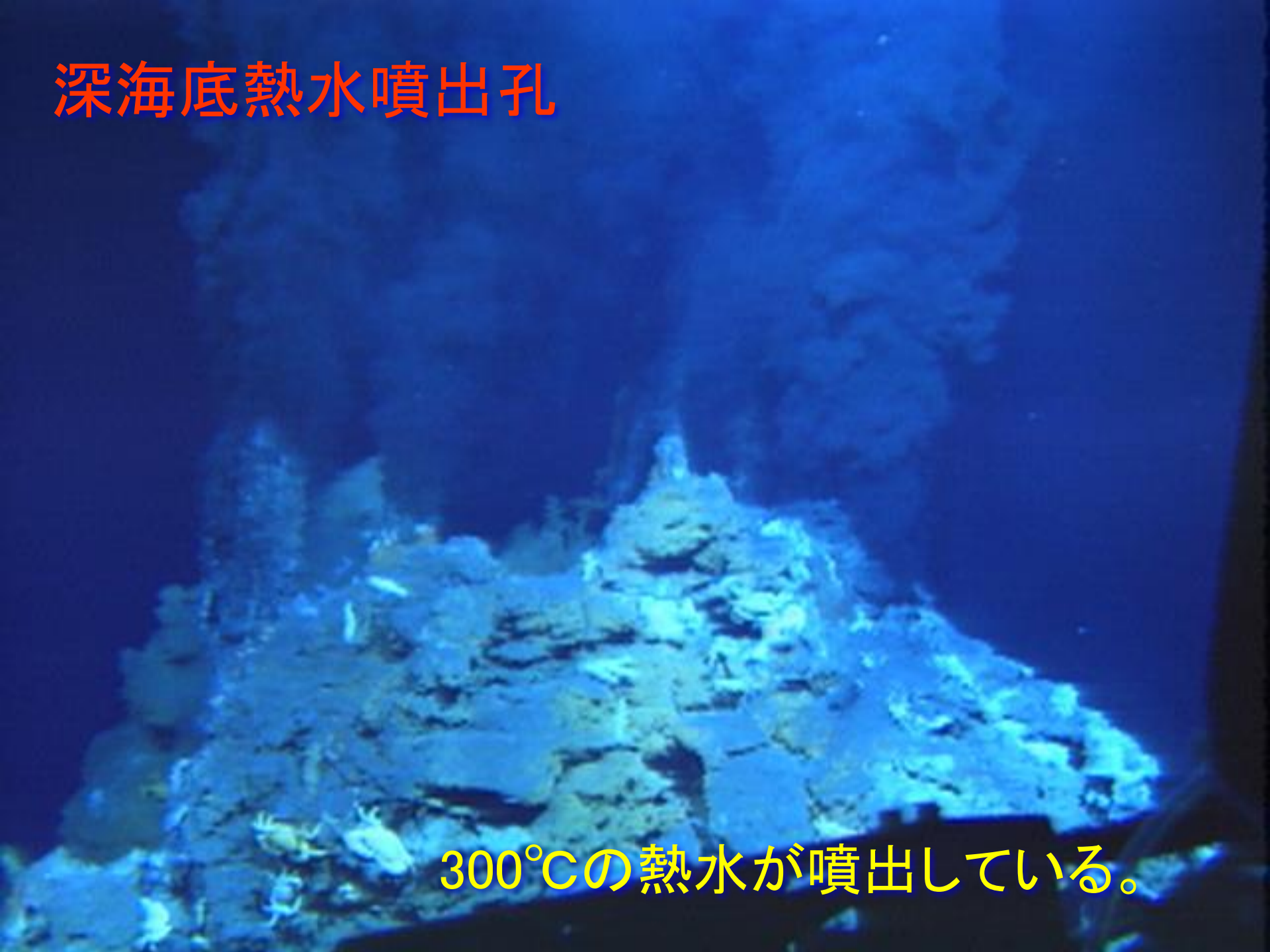
Tivey et al., 2008

ノースポール（35億年前）の微小化石
Ueno et al. (2001a, b) ($\delta^{13}\text{C} < -30$ per mil)

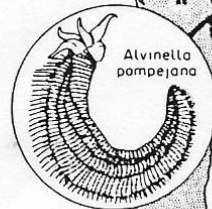


深海底熱水噴出孔

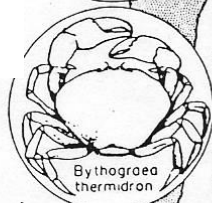
300°Cの熱水が噴出している。



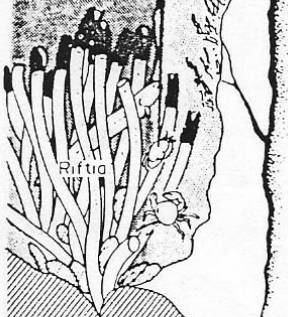
アルビネラ



ユノハナガニ



チューブワーム



Cyanograea

black smokers

Zoarcidae

Riftia

white smokers

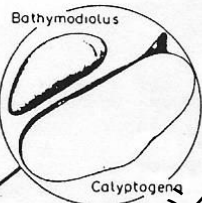
Serpulidae

graveyard

Serpulidae

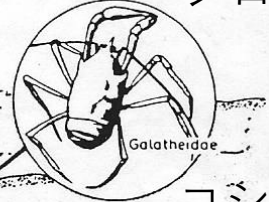
Calyptogena

シロウリガイ



Galathea

ヨシオリエビ



basalt

water circulation

海水中細胞量 (ATP, ATP+ADP+AMP) の深度依存性

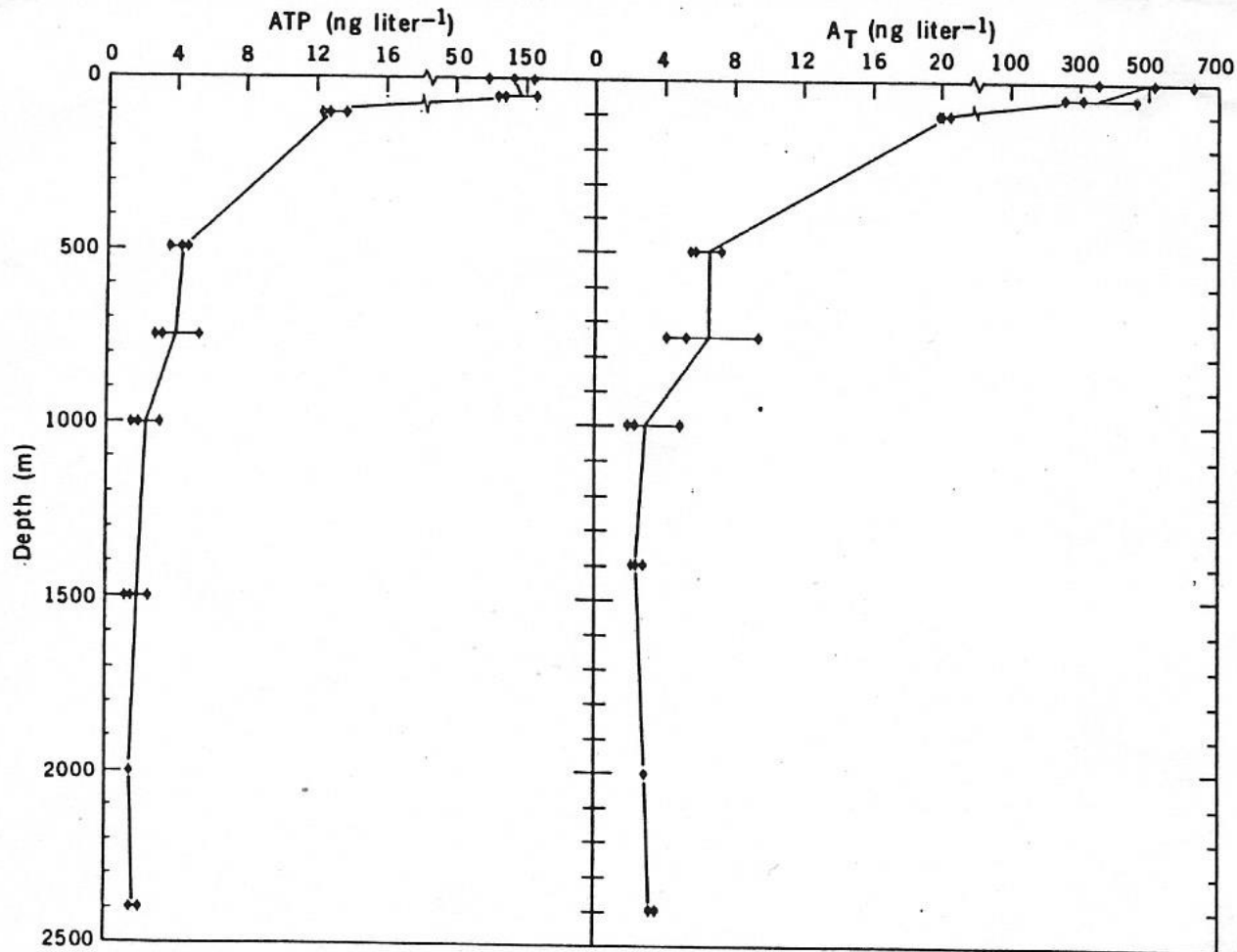


Fig. 2. Profiles of adenosine 5'-triphosphate (ATP) and total adenylates (A_T) in the water column near the Galápagos Rift vents.

海水中細胞量 (ATP, ATP+ADP+AMP) の深度依存性と熱水噴出地域

TABLE 2. MICROBIAL NUCLEOTIDES AT A HYDROTHERMAL VENT SITE
(GALAPAGOS RIFT)†

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

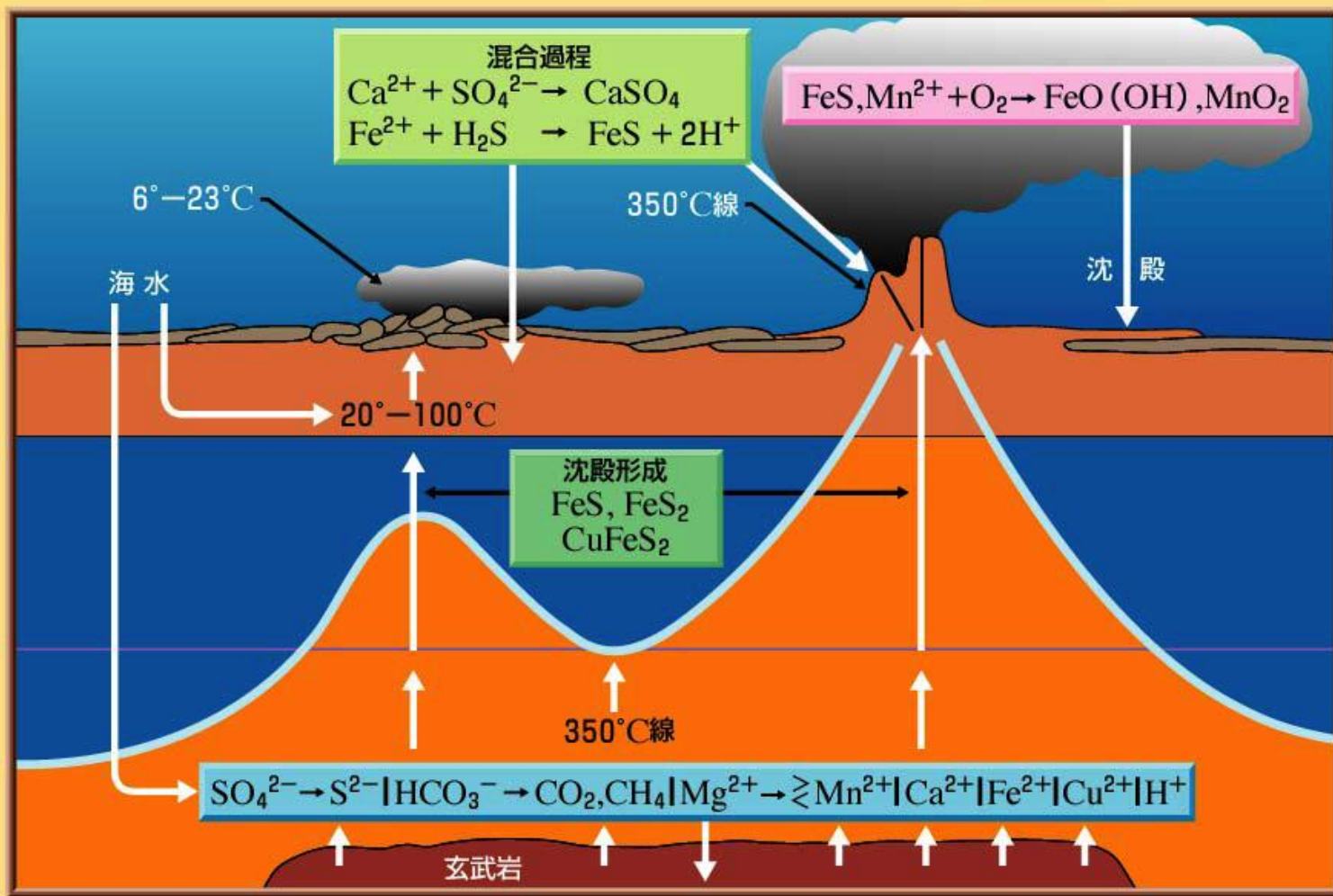
熱水と低温熱水の化学組成

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 ₂ S	7300	7450	8370	219	224	251	105	127	102	20	120		260	50	500	180	(10, 11, 17)	
H ₂	1700	380		51	11		0	0	0					0.12		0.03	(17, 19)	
CH ₄	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 ₃	<10	<10	<10	<0.3	<0.3	<0.3	4	4	4	2.8	0.0	2.8	0.0				(11, 17)	
NO ₂ ⁻		<0.1			<0.003		2	2	2	1.3			8.2				(11, 17)	
N ₂ O	<0.02	0.06		<0.0006	0.0002								0.13	0.00	0.03		(17)	
Fe ²⁺	1664	750	2429	50	23	73	0	0	0	30	0.5	~3	<1				(10, 11)	
Mn ²⁺	960	699	878	29	21	26				42	11	16	15				(10, 11)	
ΣCO ₂		5720			2400									2510		2580	(13)	
	<i>Ambient seawater</i>																	
O ₂		107			104		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(10, 17)
NO ₃ ⁻		39			38		0	0	0	0	1.0	0	0	0		11.5	(10, 17)	
ΣCO ₂		2300															(11)	
	<i>Temperature† (°C)</i>																	
	2.2										9.3	12.1	6.6	9.1	10.0	5.6	16.4	(10, 17)

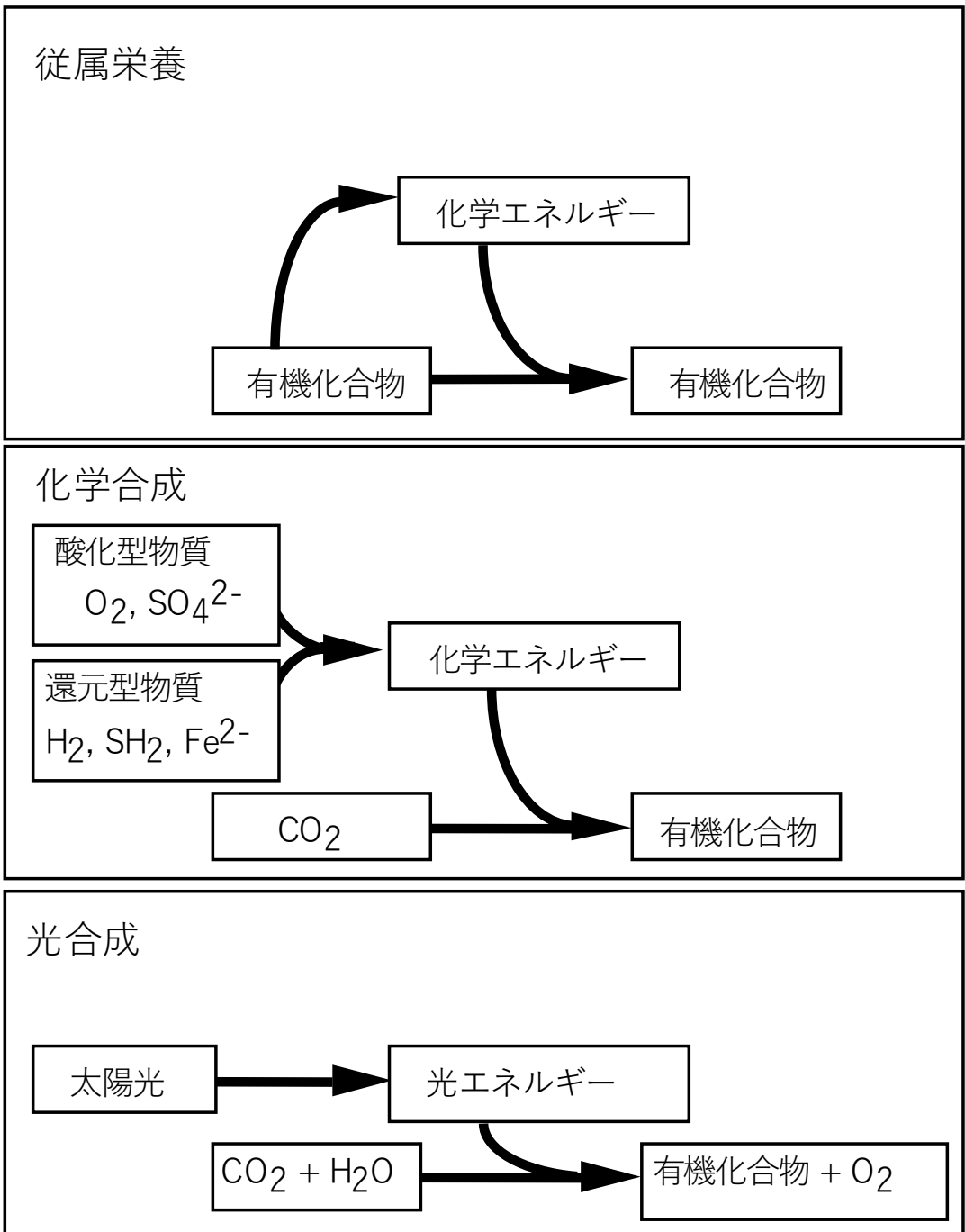
*The reaction sequence used is: $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$; $\text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{FeS} + 2\text{H}^+$; $49\text{H}_2\text{S} + 76\text{NO}_3^- + 8\text{H}_2\text{O} \rightarrow 32\text{N}_2 + 8\text{NH}_4^+ + 4\text{NO}_2^- + 49\text{SO}_4^{2-} + 18\text{H}^+ + 32\text{H}_2\text{O}$; $\text{H}_2\text{S} + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}^+$. †Temperatures are for ambient seawater and for the highest temperature sample used in this data compilation.

海底熱水噴出口



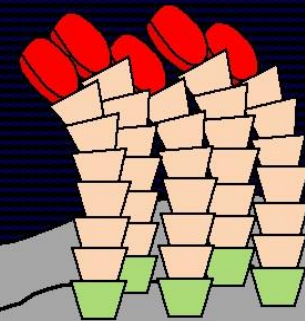
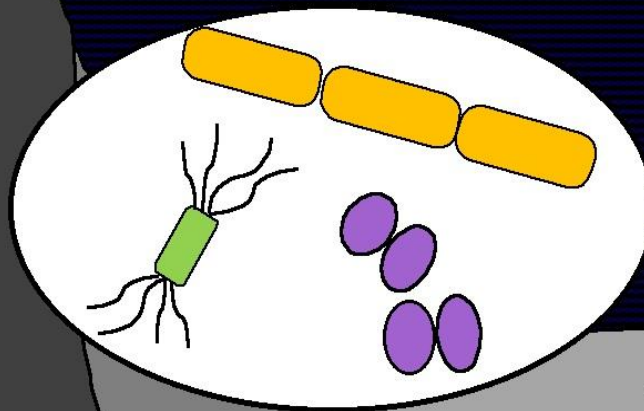
タンパク質 (有機化合物) をどう作るか

エネルギーを 獲得する



H_2, H_2S, CO_2

地球を食べる生物もいる



化学合成細菌

酸化型の物質（電子供与体）と
還元型の物質（電子受容体）
の化学反応でエネルギーを獲得している生物

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	硫酸
メタン生成	水素分子	二酸化炭素

熱水噴出孔周辺で発見された化学合成細菌

電子供与体	電子受容体	化学合成細菌	存在
S^{2-} , S^0 , $S_2O_3^{2-}$	O_2	イオウ酸化細菌	++
S^{2-} , S^0 , $S_2O_3^{2-}$	NO_3^-	脱窒硫黄酸化細菌	+
H_2	O_2	水素酸化細菌	++
H_2	NO_3^-	脱窒水素酸化細菌	-
H_2	S^0 , SO_4^{2-}	イオウ硫酸還元菌	++
H_2	CO_2	メタン菌、酢酸菌	++
NH_4^+ , NO_3^-	O_2	硝化細菌	+
Fe^{2+} , Mn^{2+}	O_2	鉄酸化細菌、マンガン酸化細菌	++
CH_4 , CO	O_2	メタン酸化細菌、 一酸化炭素酸化細菌	++

H.W. Jannasch

化学反応理論計算との比較

Metabolic energy potentially available

T. M. McCollom and E. L. Shock (1997) *Giochim. Cosmochem. Acta*, 61: 4375-4391

	Conc(mM)		T(°C)	cal /kg vent fluid	
H ₂	1.7	methanogenesis	>40	10	subsurface mixing zone
SO ₄	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

APSK04: Methanococcales, Archaeoglobales

APSK10: Thiomicrospira

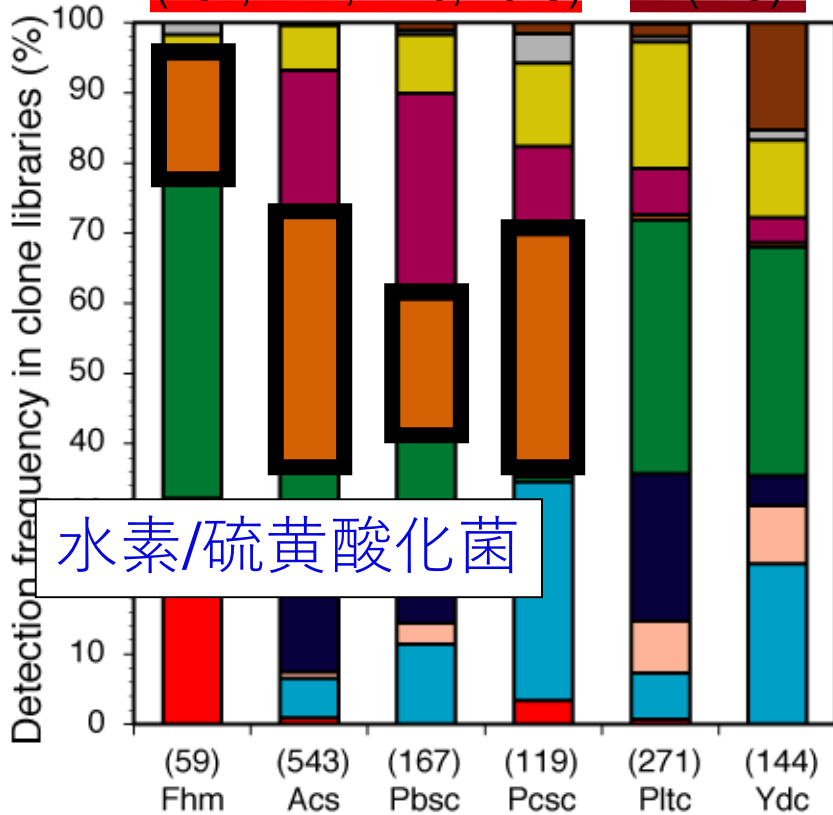
APSK07: Methylobacterium

マリアナ深海熱水噴出孔 3000m



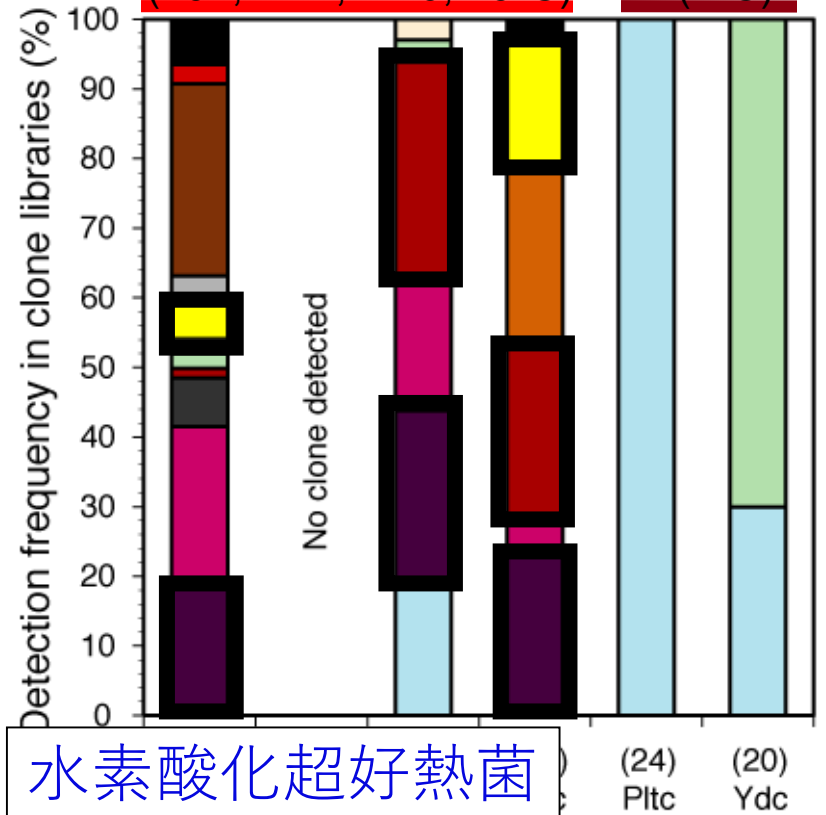
遺伝子を調べると、色々な菌が見つかる

アクティブチムニー デッドチムニー
 (107, 117, 270, 190°C) (2°C)

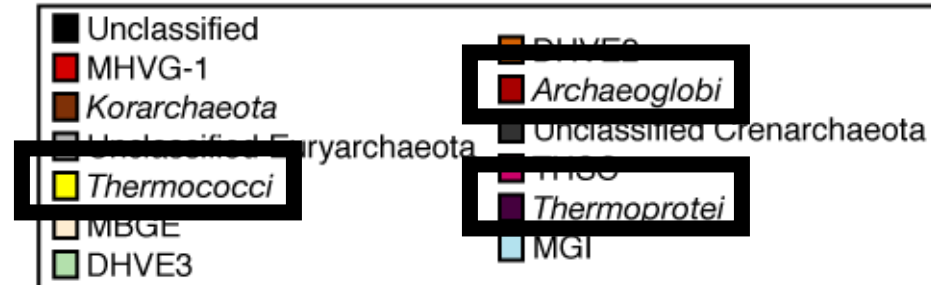
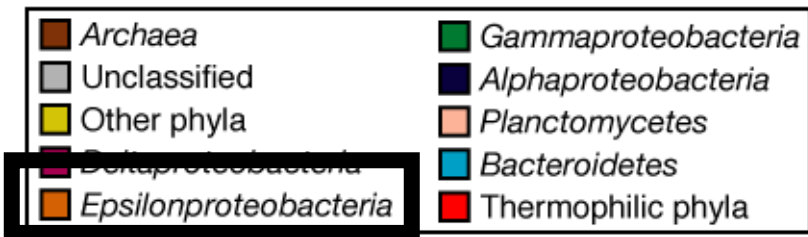


水素/硫黄酸化菌

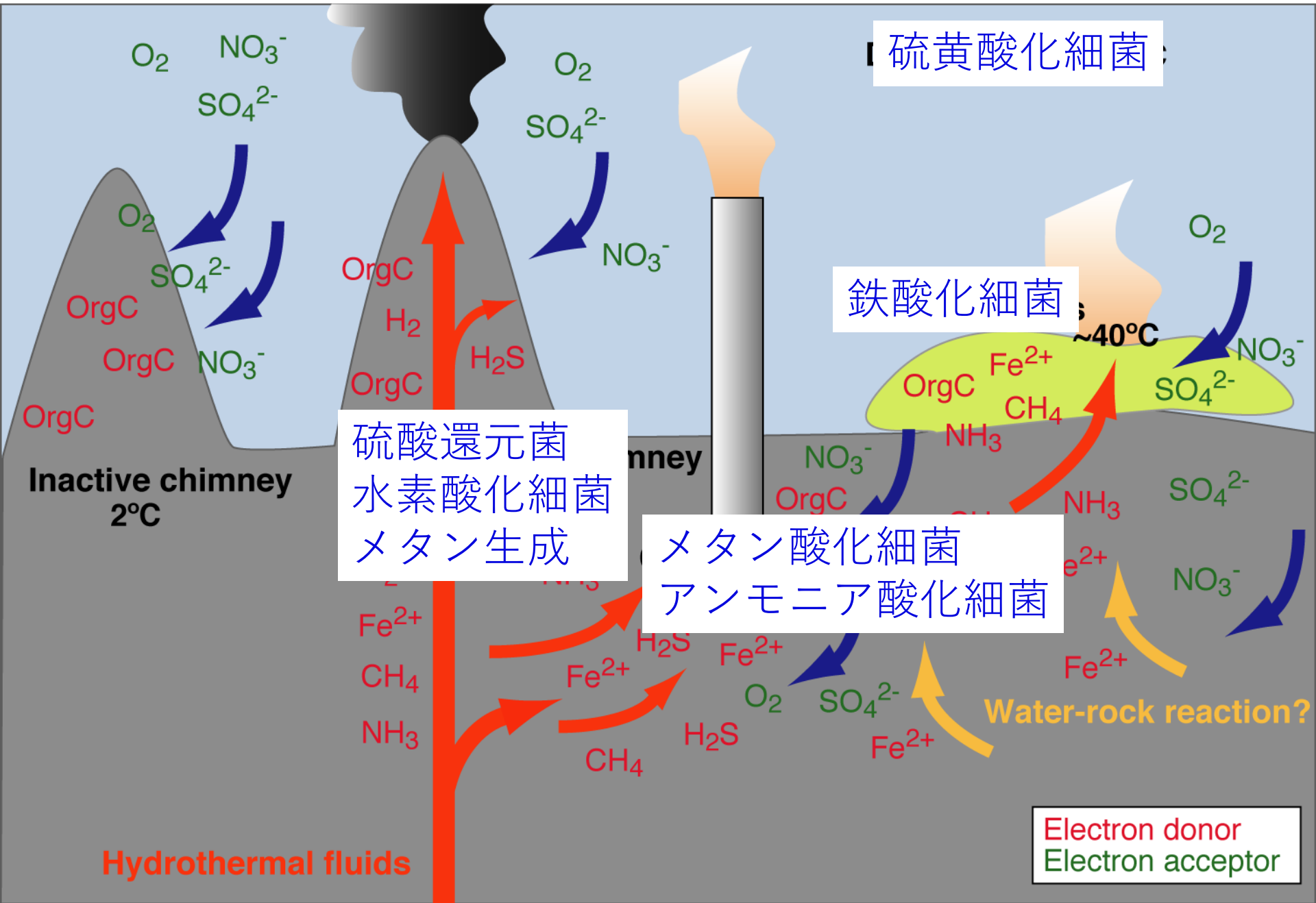
アクティブチムニー デッドチムニー
 (107, 117, 270, 190°C) (2°C)



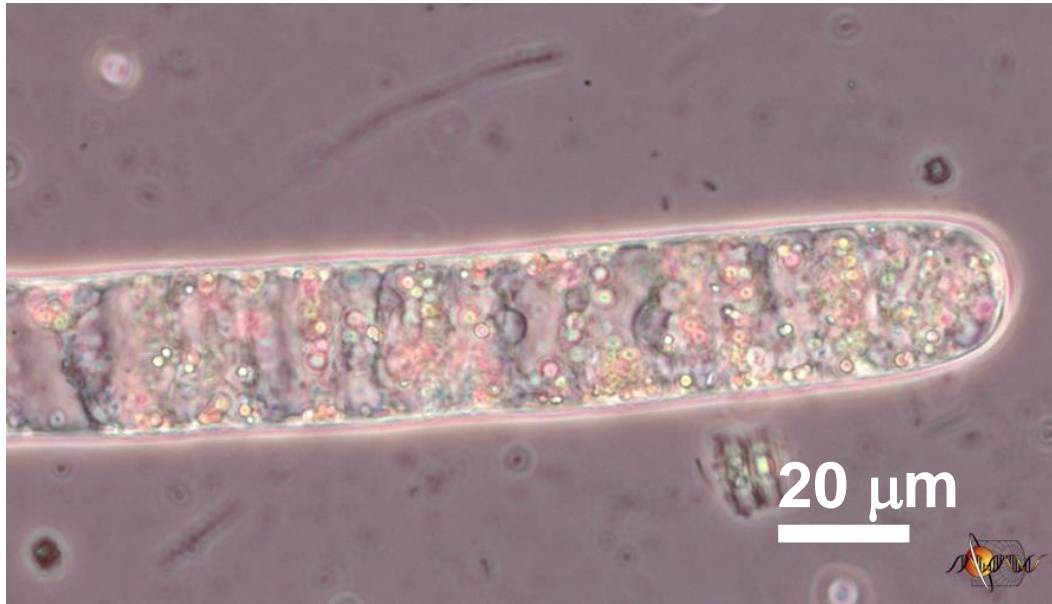
水素酸化超好熱菌



熱水系の微生物群集 Katoh et al. 2010

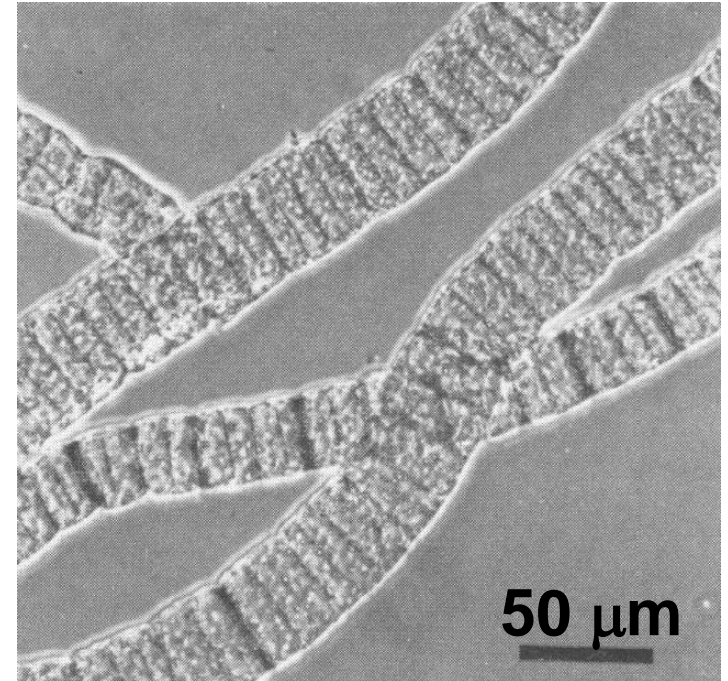


さてそれでは35億年前の生物は？



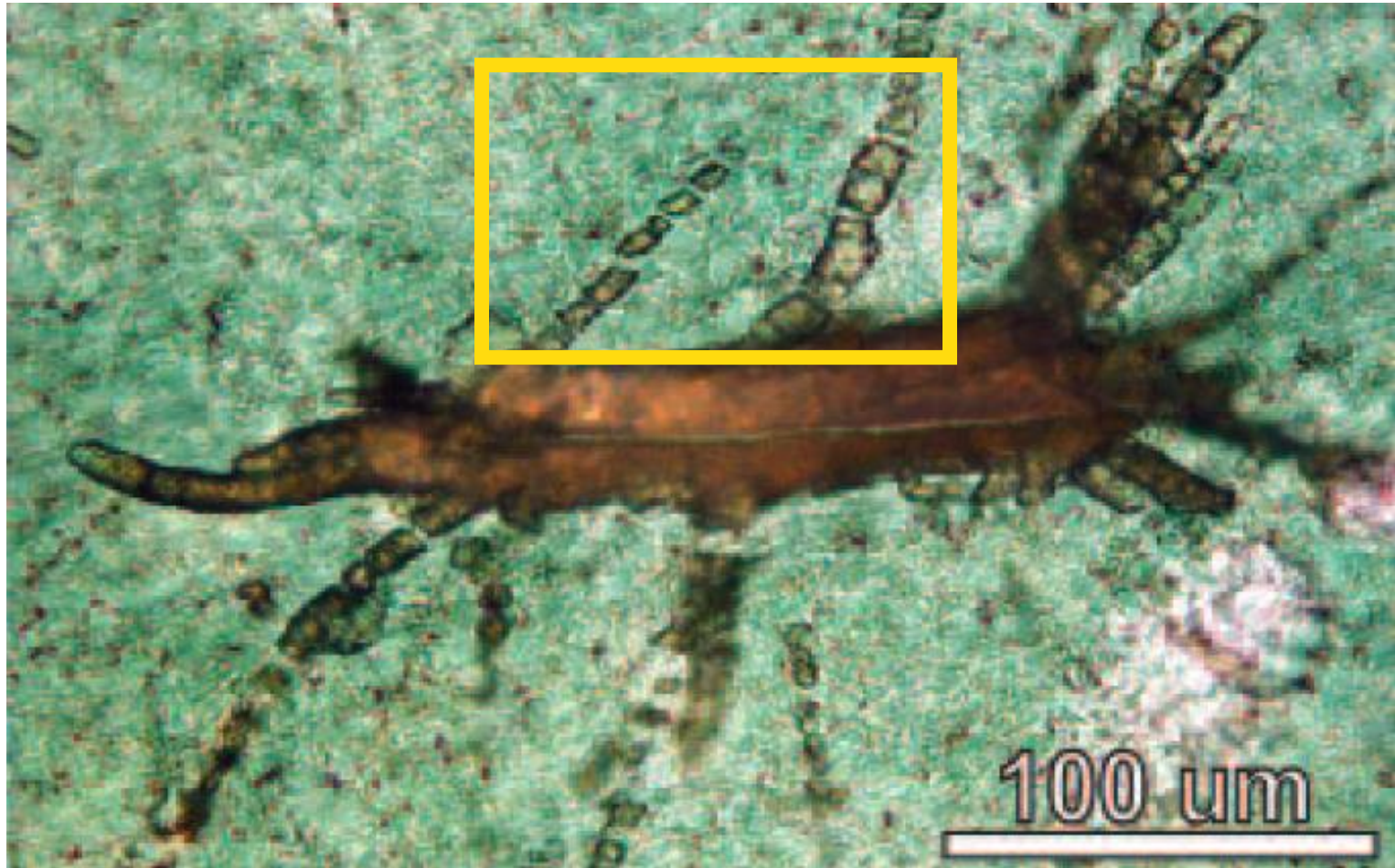
Beggiatoa (硫黄酸化菌) (Kalanetra *et al.*, 2004)

- ・ *Beggiatoa*
- ・ 硫黄酸化細菌
- ・ 海底熱水噴出地帯にも形状の似た生物が確認されている(右図)



海底熱水地帯で発見された*Beggiatoa-like*纖維状生物 (Nelson *et al.*, 1989)

35億年前の枕状溶岩から 発見された化石 *Beggiatoa*?

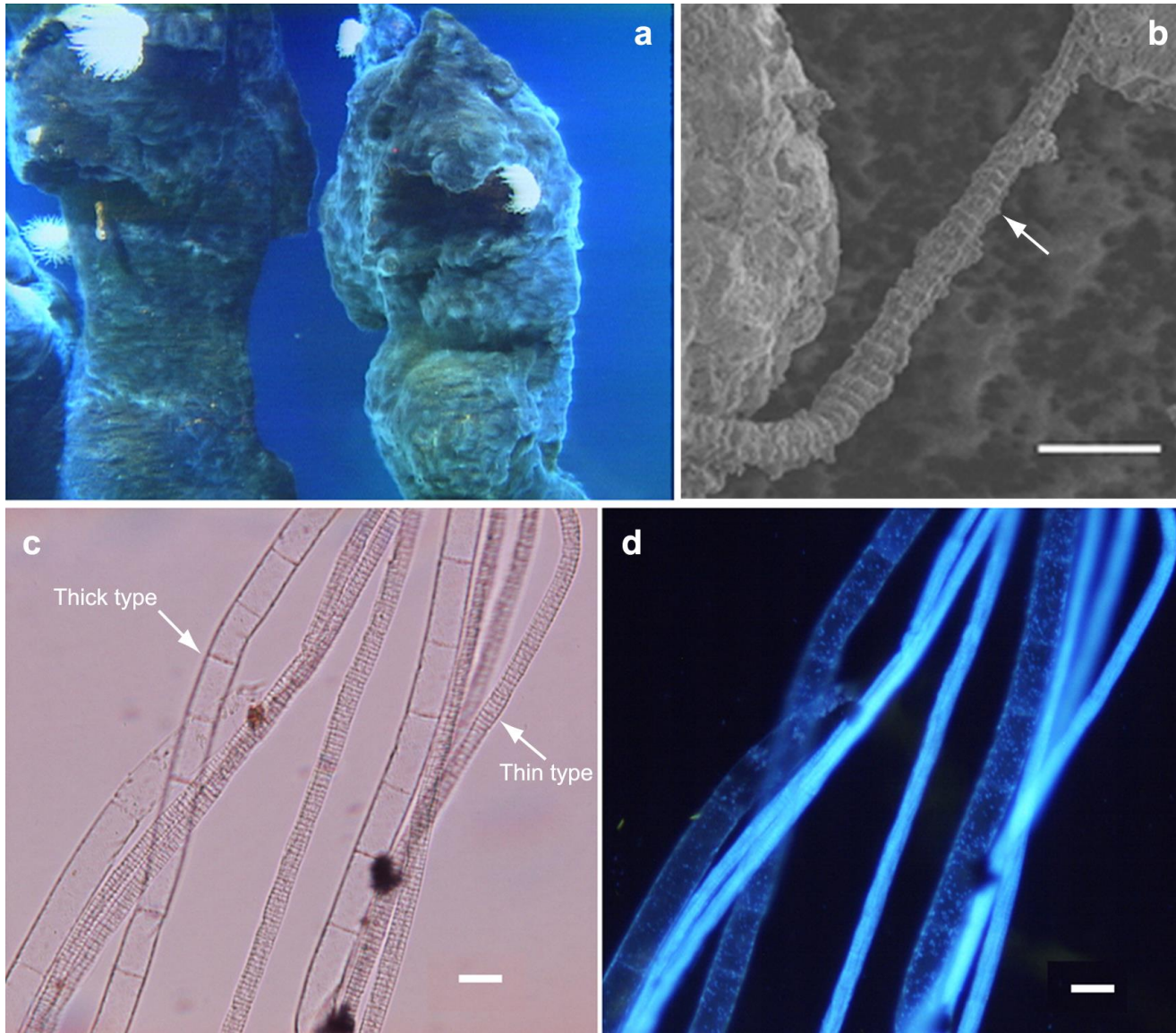


(Furnes et al. 2004)

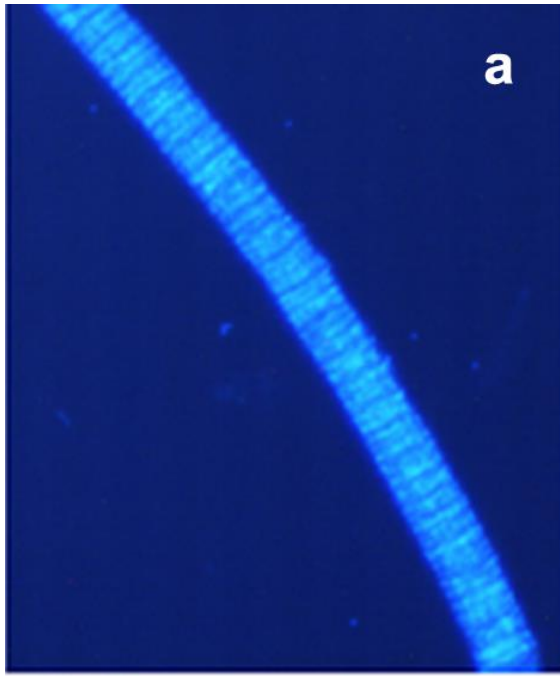
当時、酸素があったか？

・*Beggiatoa*ではなく、硫酸還元菌:

Kato, Yamagishi 2016

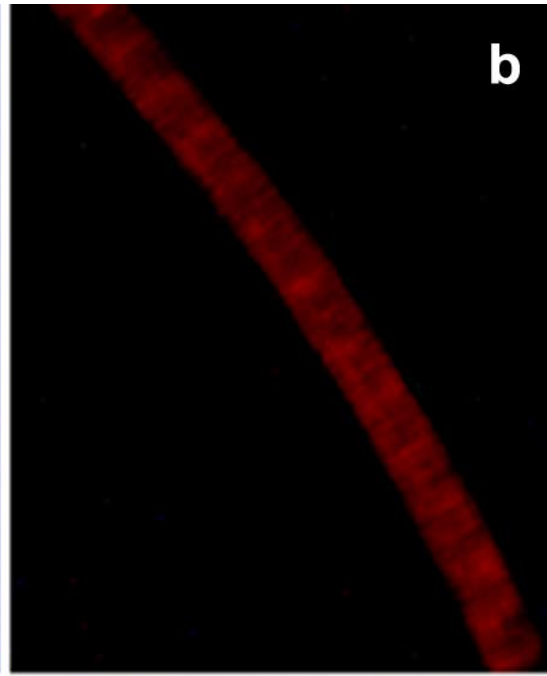


特異的
色素
DNAが
ある



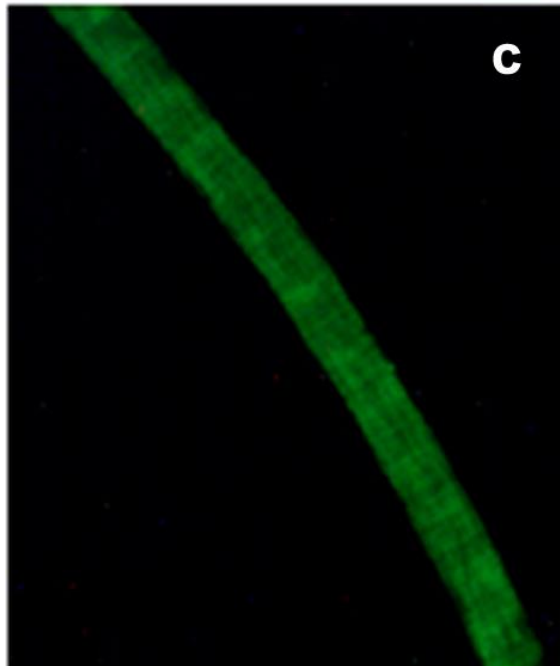
a

プローブ
硫酸還元菌



b

プローブ
真正細菌



c

明視野

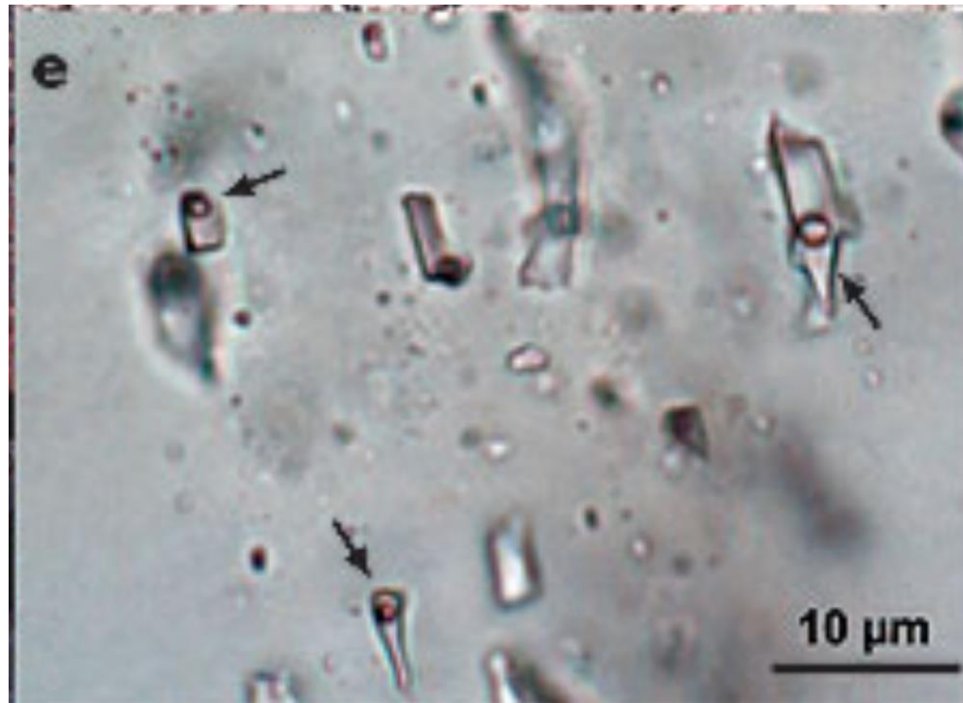


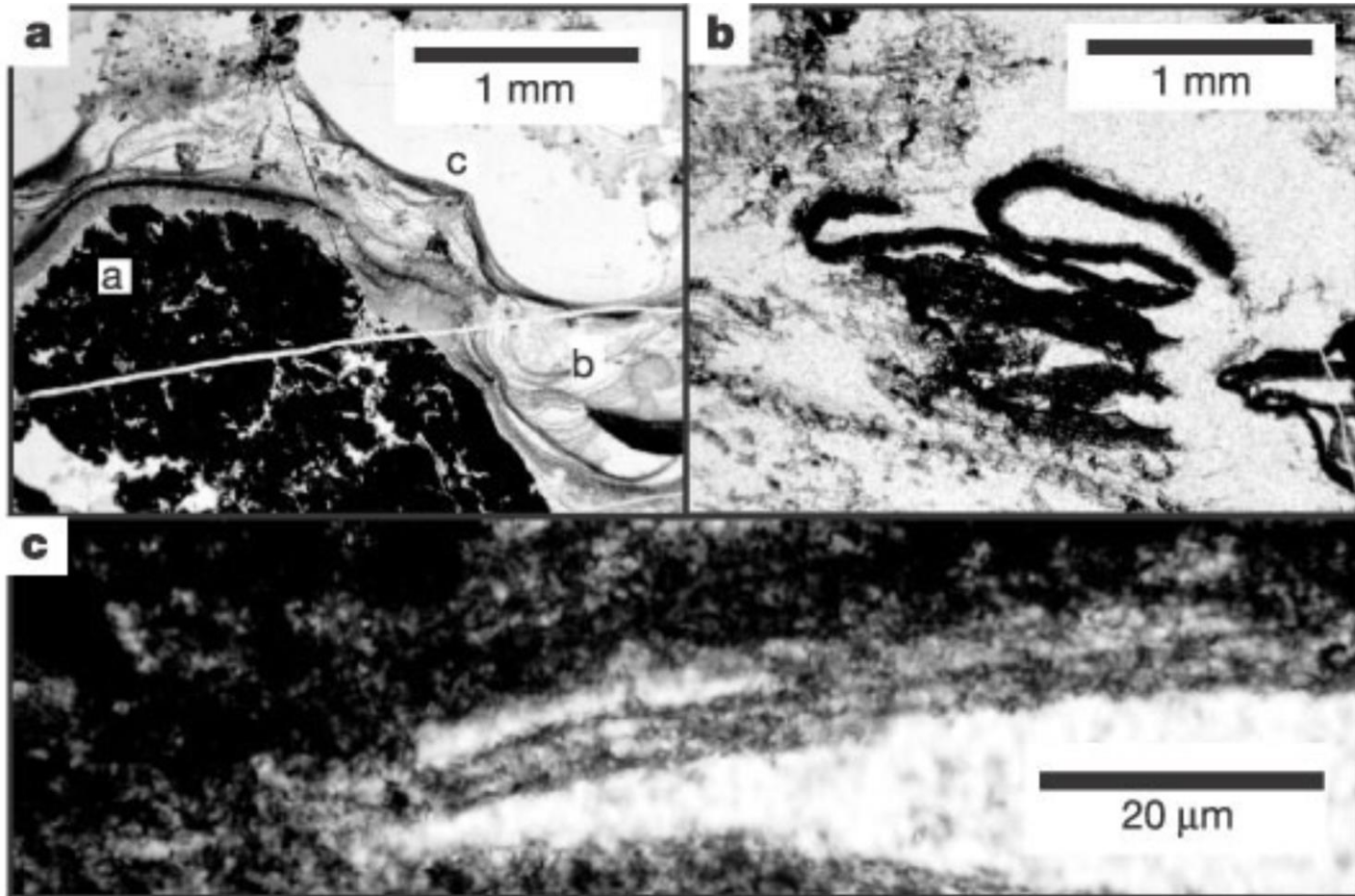
d

Kato, Yamagishi
2016

メタン生成菌の存在：35億年前

Y. Ueno et al. (2006) Nature 440, 516–519
岩石中のあわのメタンの同位体解析。

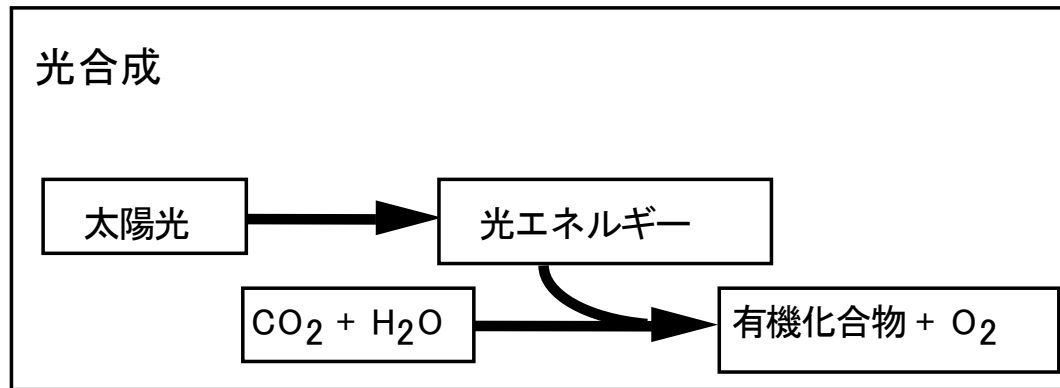




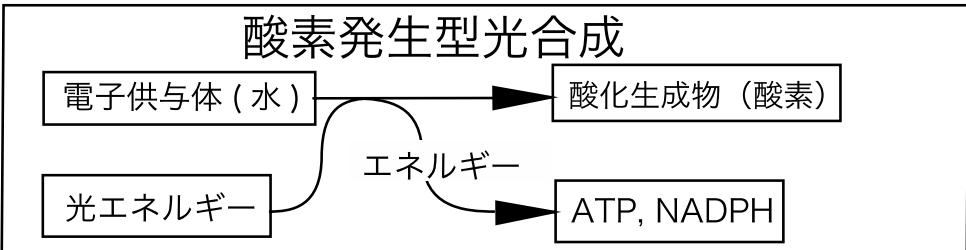
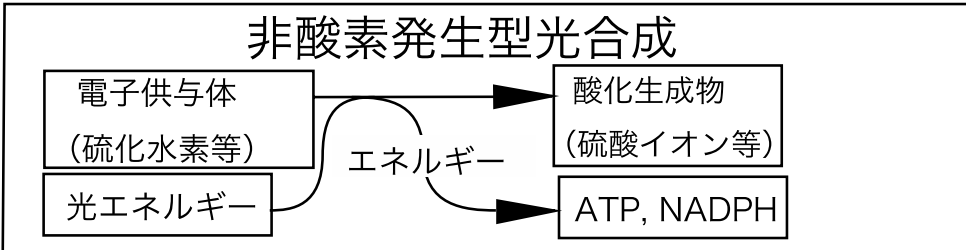
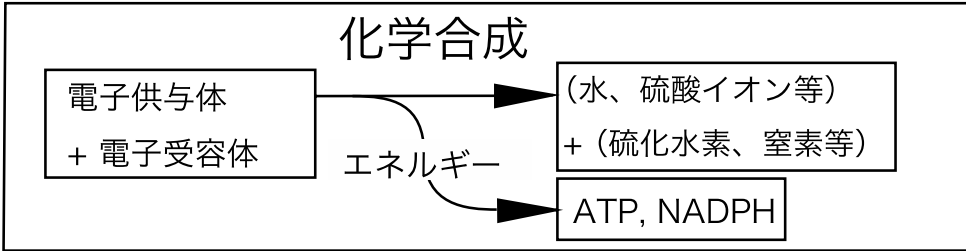
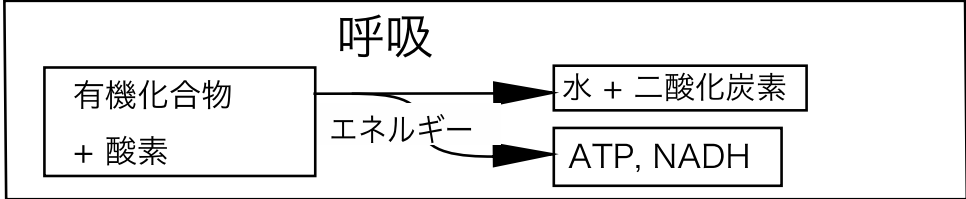
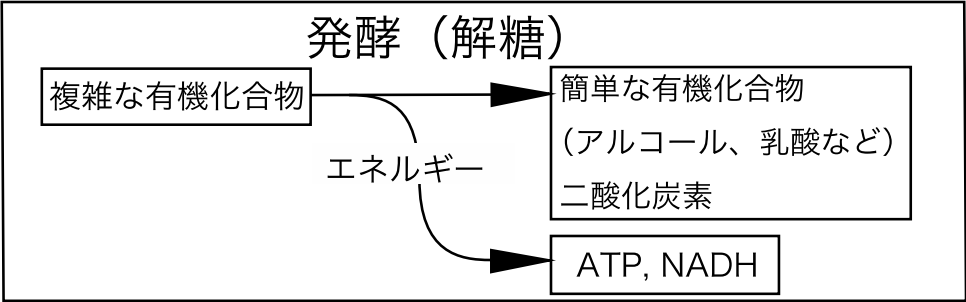
非酸素発生光合成細菌

Tice and Lowe (2004) Nature 431, 549-552

光合成にも色々ある



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



30-35億年前

- 熱水活動はあった。
- 温度は。液体の水はあった。
- 生物はいた。
 - シアノバクテリアはまだよくわからない
 - 化学合成細菌（硫黄酸化菌、硫酸還元菌、メタン生成菌）
 - 光合成細菌？
- いろいろな微生物がいたかもしれない。
- 大きな細胞20 to 300 μm 真核か原核かわからない（Sugitani 2019 Springer）

生き物は何でできているか

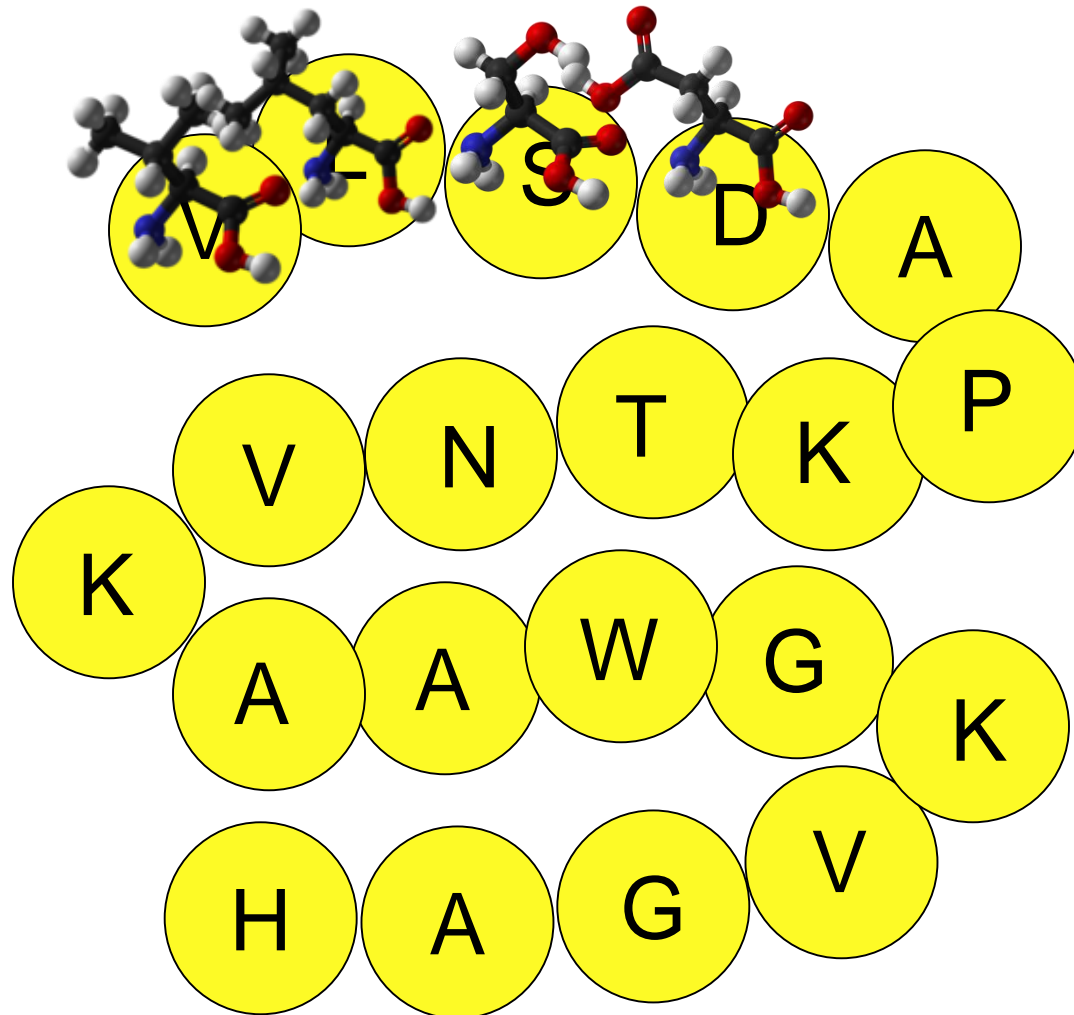
- ・ どんな分子でできているか
- ・ どんな元素でできているか

大腸菌の分子組成

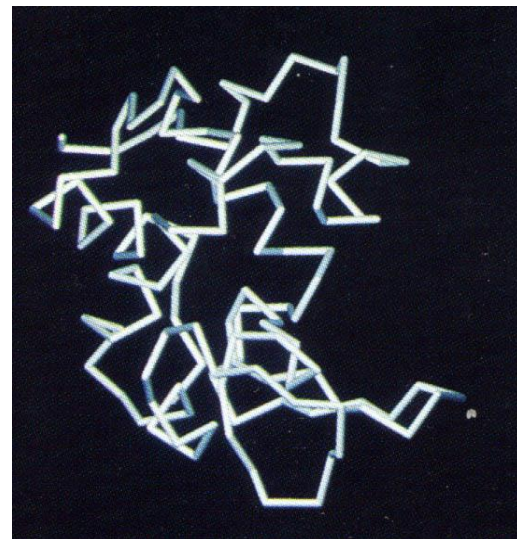
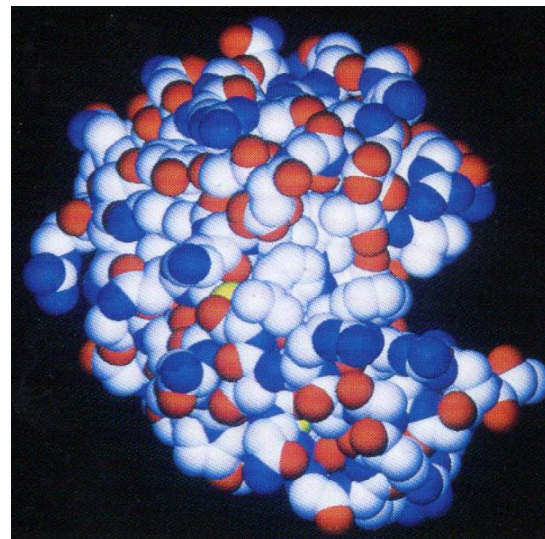
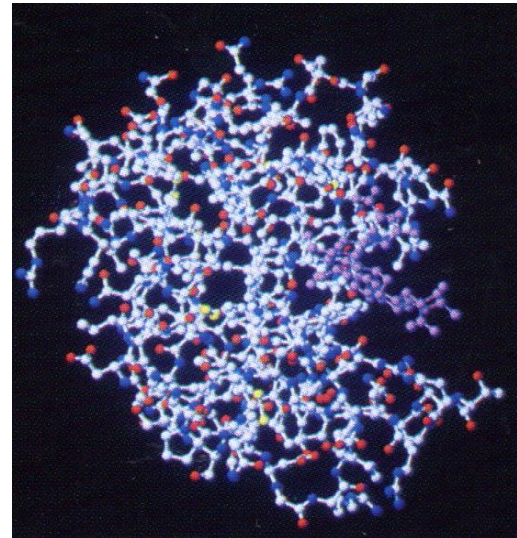
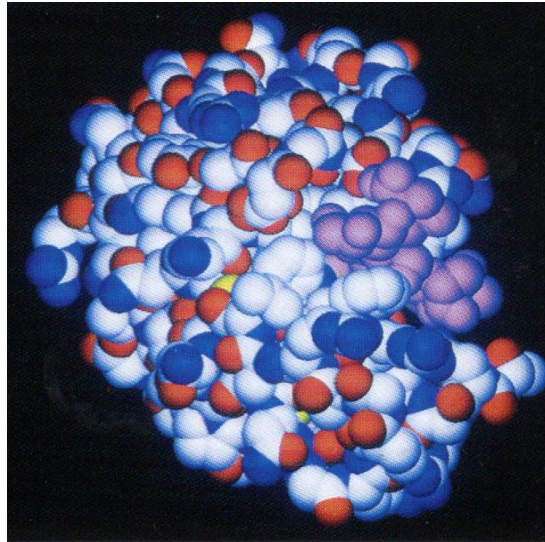
成分	重量%
水	70
タンパク質	15
核酸	
DNA	1
RNA	6
糖類	6
脂質	2
その他の有機分子	1
無機イオン	1

生き物にとって高分子が重要

タンパク質：アミノ酸が決まった順で並んでいる



タンパク質: 立体構造を取って機能を発揮する 内側が疎水性、外側が親水性



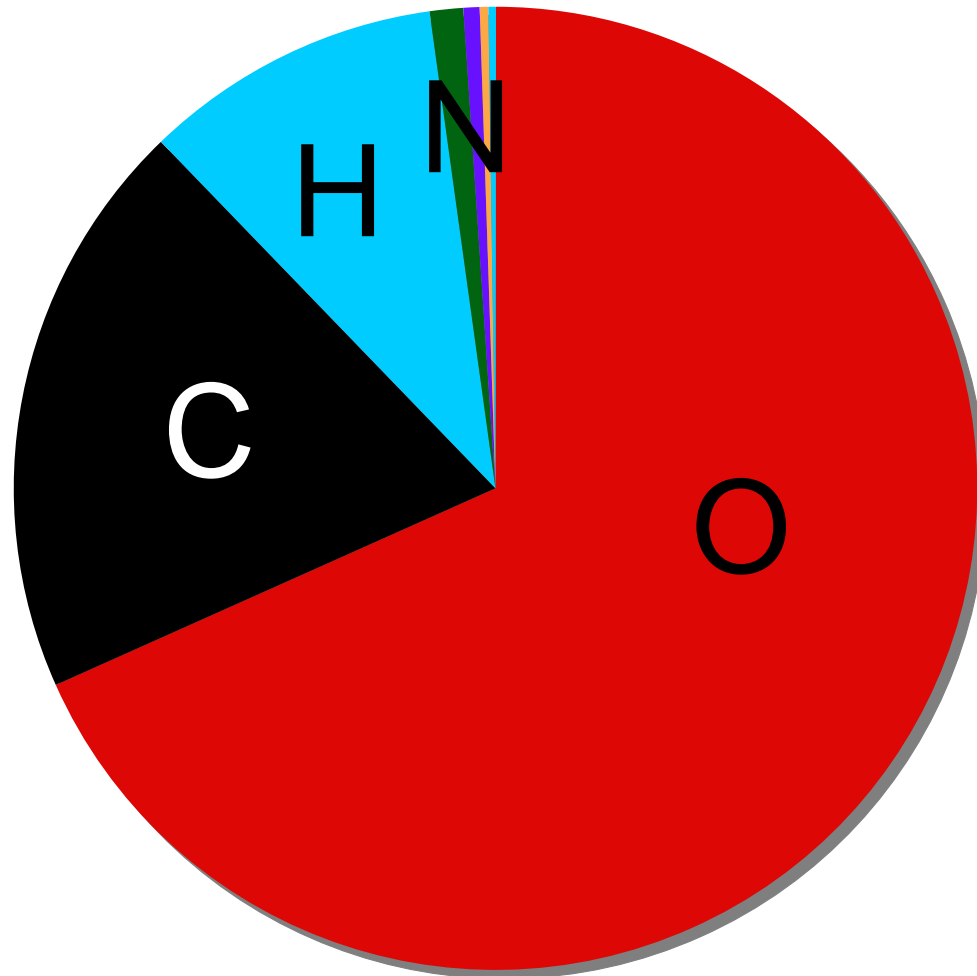
山岸
宇宙生命論
2015
東京大学出版会

水の役割

- ・ タンパク質の構造維持に重要
- ・ 非常に良い溶媒
- ・ 反応への関与:加水分解、官能基の供与
- ・ 疎水膜形成
- ・ 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、
水に氷が浮く、液体存在条件
- ・ 宇宙に普遍的

- ・ 液体は代謝産物の移動に必要。

水を含むヒトの元素組成



ヒトの元素組成

ヒトの身体は海水

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

宇宙における元素存在量

H 水素

C 炭素

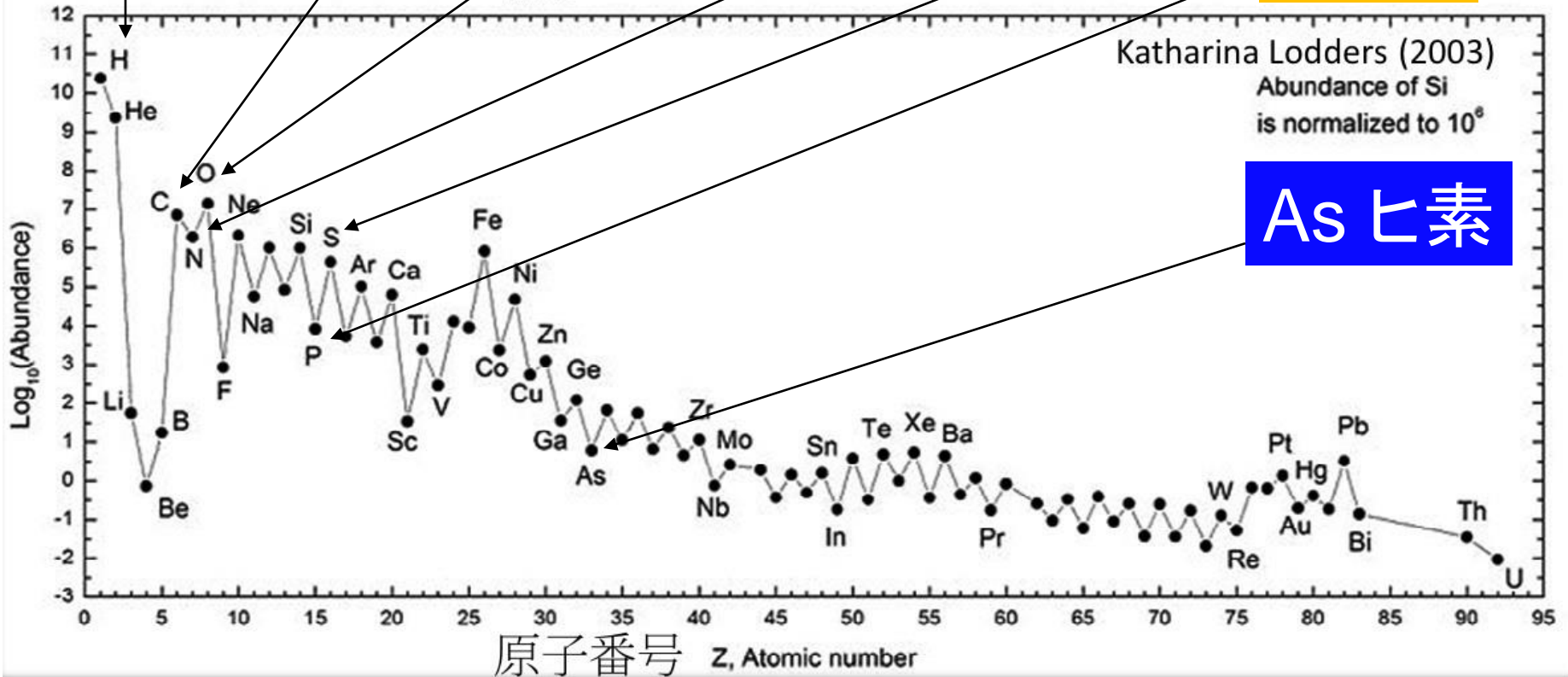
O 酸素

N 窒素

S 硫黄

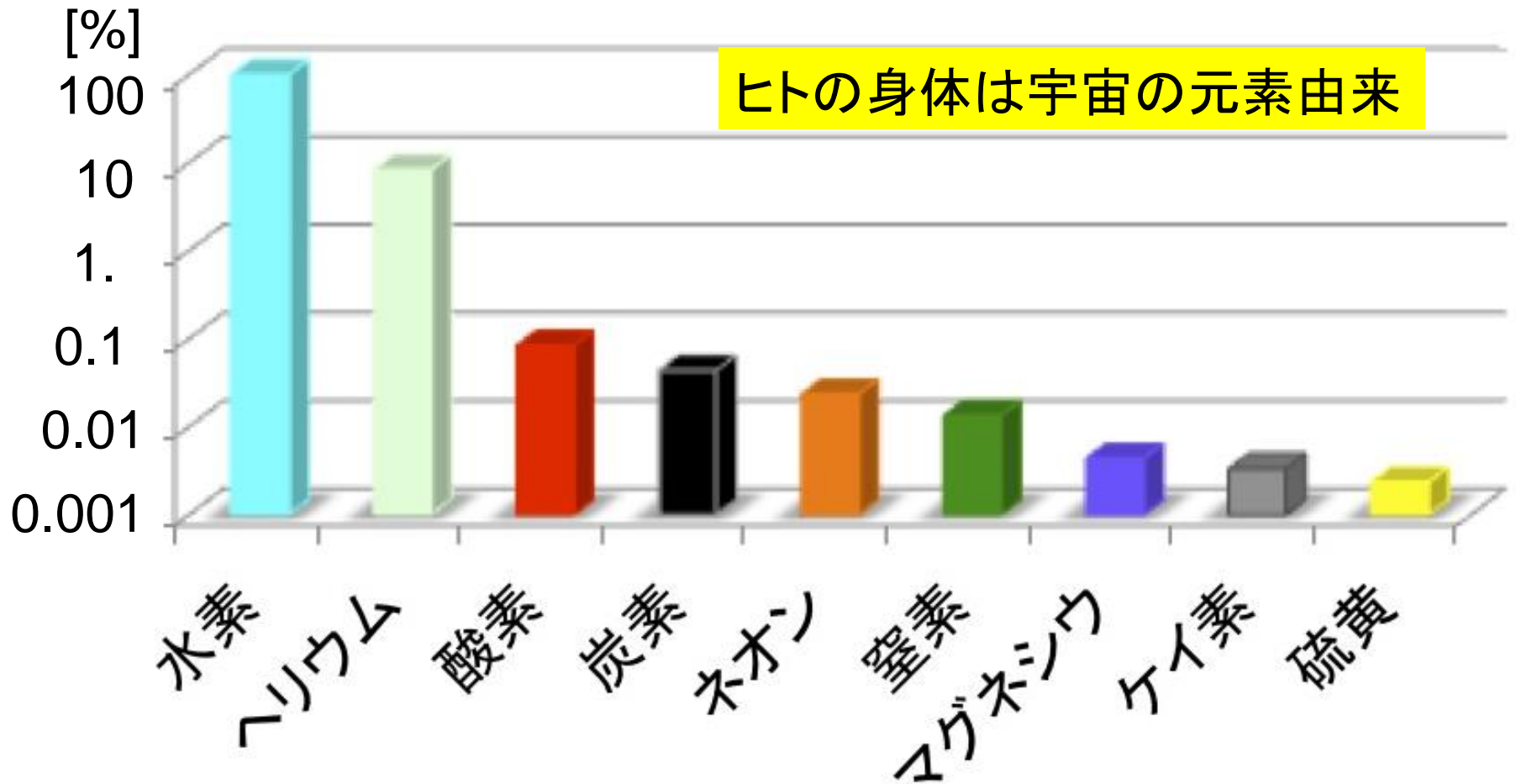
P リン

As ヒ素



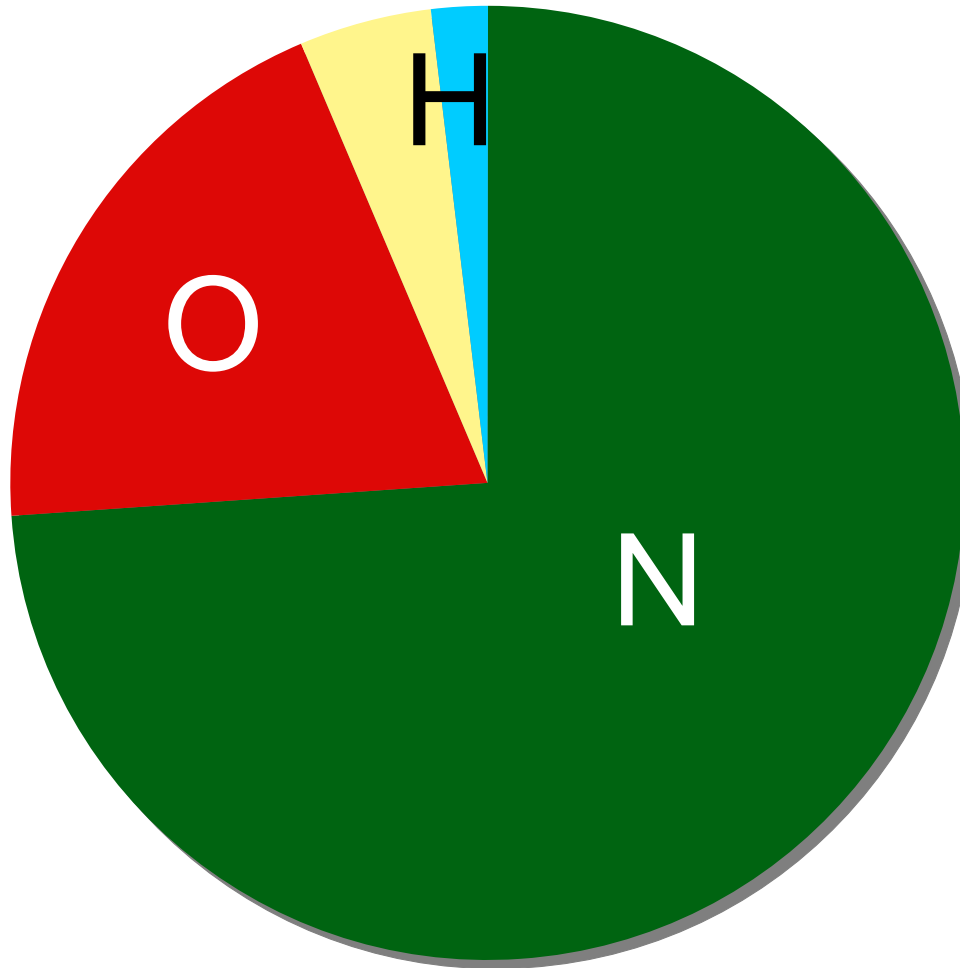
ヒの身体の元素は宇宙由来

宇宙における元素存在量



大気中の元素存在量

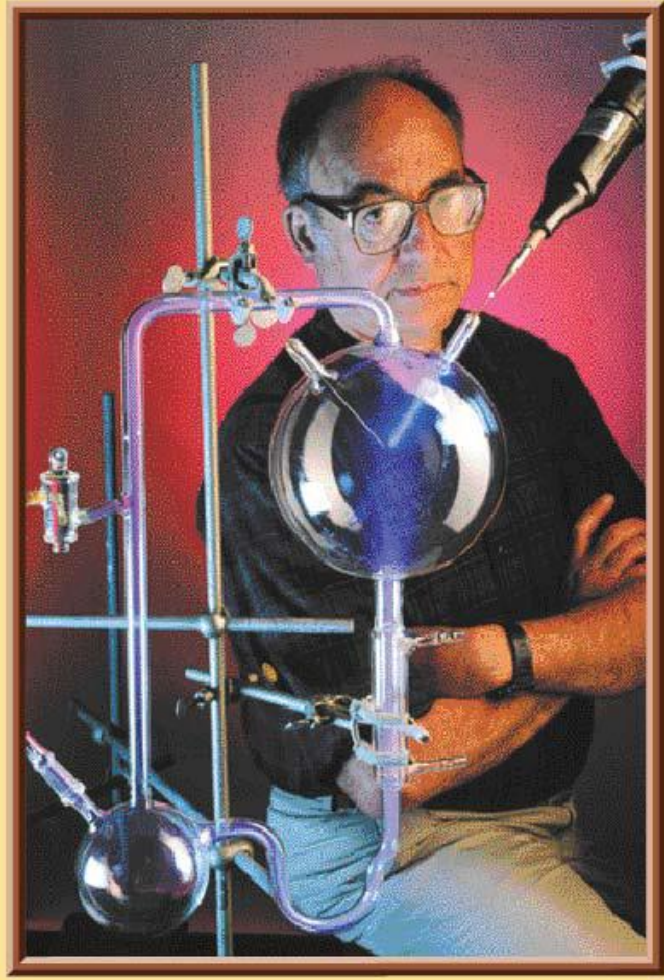
あるいはヒトの身体の元素は大気由来



化学進化

生命誕生前の
有機物合成

ミラーの実験装置



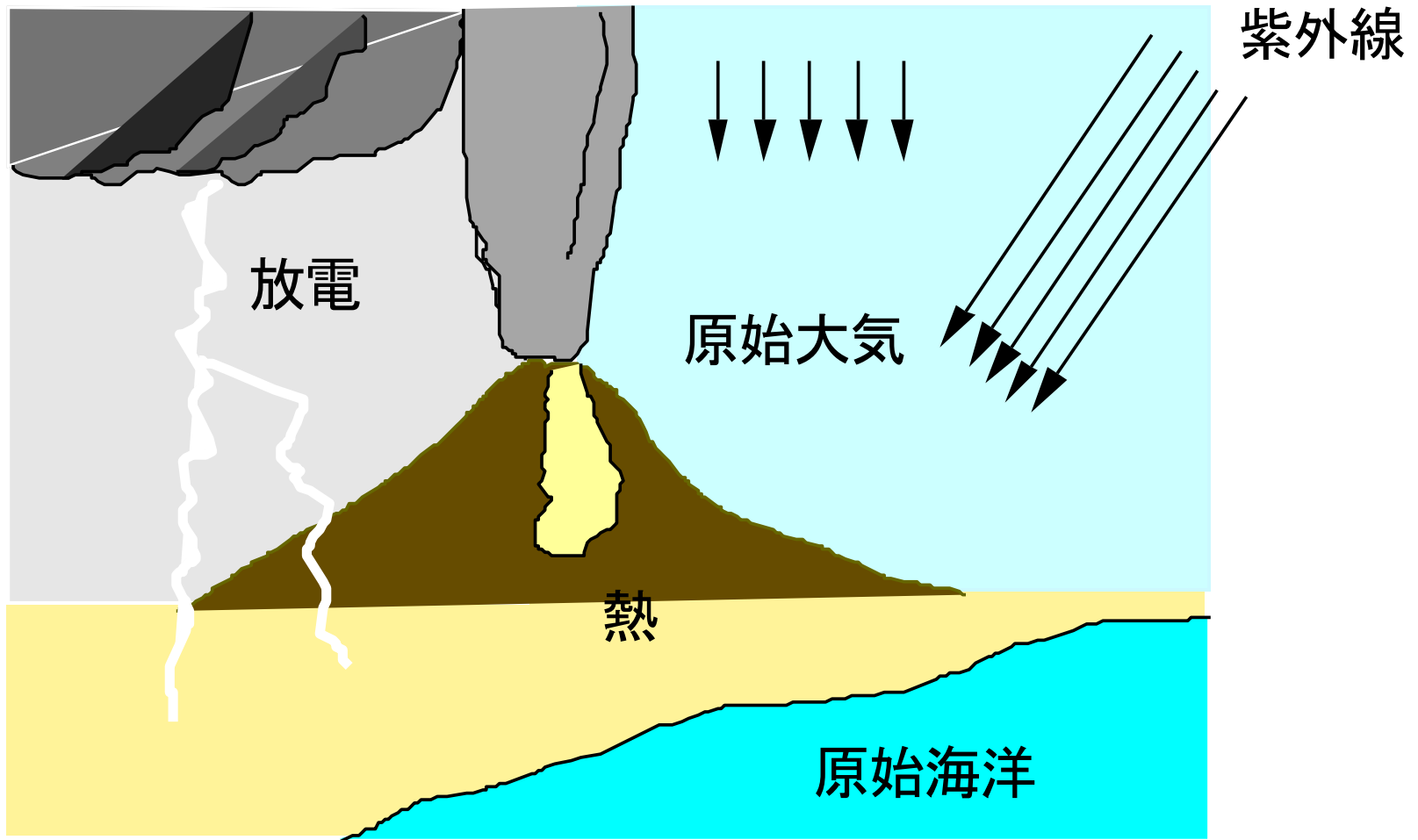
1953年
アンモニア
メタン
水素
水
の混合気体
で放電

放電により生じる有機化合物

化合物	収量 (%)
グリシン†	2.1
グリコール酸	1.9
サルコシン	0.25
アラニン†	1.7
乳酸	1.6
N-メチルアラニン	0.07
β -アラニン	0.76
コハク酸	0.27
アスパラギン酸†	0.024
グルタミン酸†	0.051
ギ酸	4.0
酢酸	0.51
プロピオン酸	0.66

タンパク質の材料となるアミノ酸は無生物的に合成される

有機化合物の無生物的合成 宇宙線



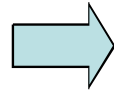
いろいろな材料ができた。

アミノ酸
核酸塩基
糖？

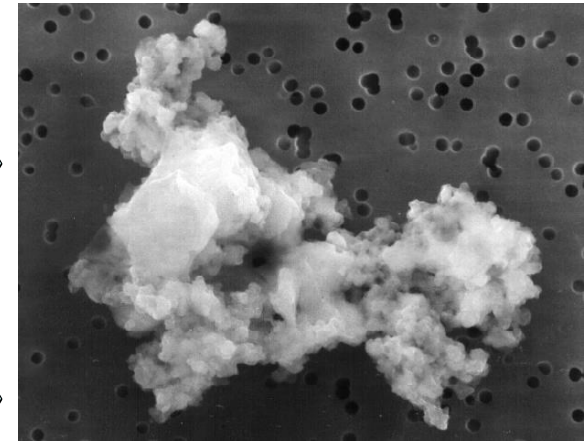
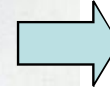
宇宙空間での有機物の生成



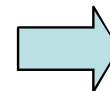
分子雲有機物



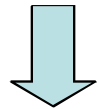
隕石有機物



惑星間塵有機物



彗星有機物



地球へ

Abundances of organic matter from Murchinson meteorite and few chondrites,

Compound class ^[13]	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

Ehrenfreund et al. (2002)

Table 1. Amino acids in the Murchison meteorite.

T. Koga & H. Naraoka *Scientific Reports* 7, (2017)

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

隕石中核酸塩基

Michael P. et al. PNAS 2011

purine,
2,6-diaminopurine
6,8-diaminopurin

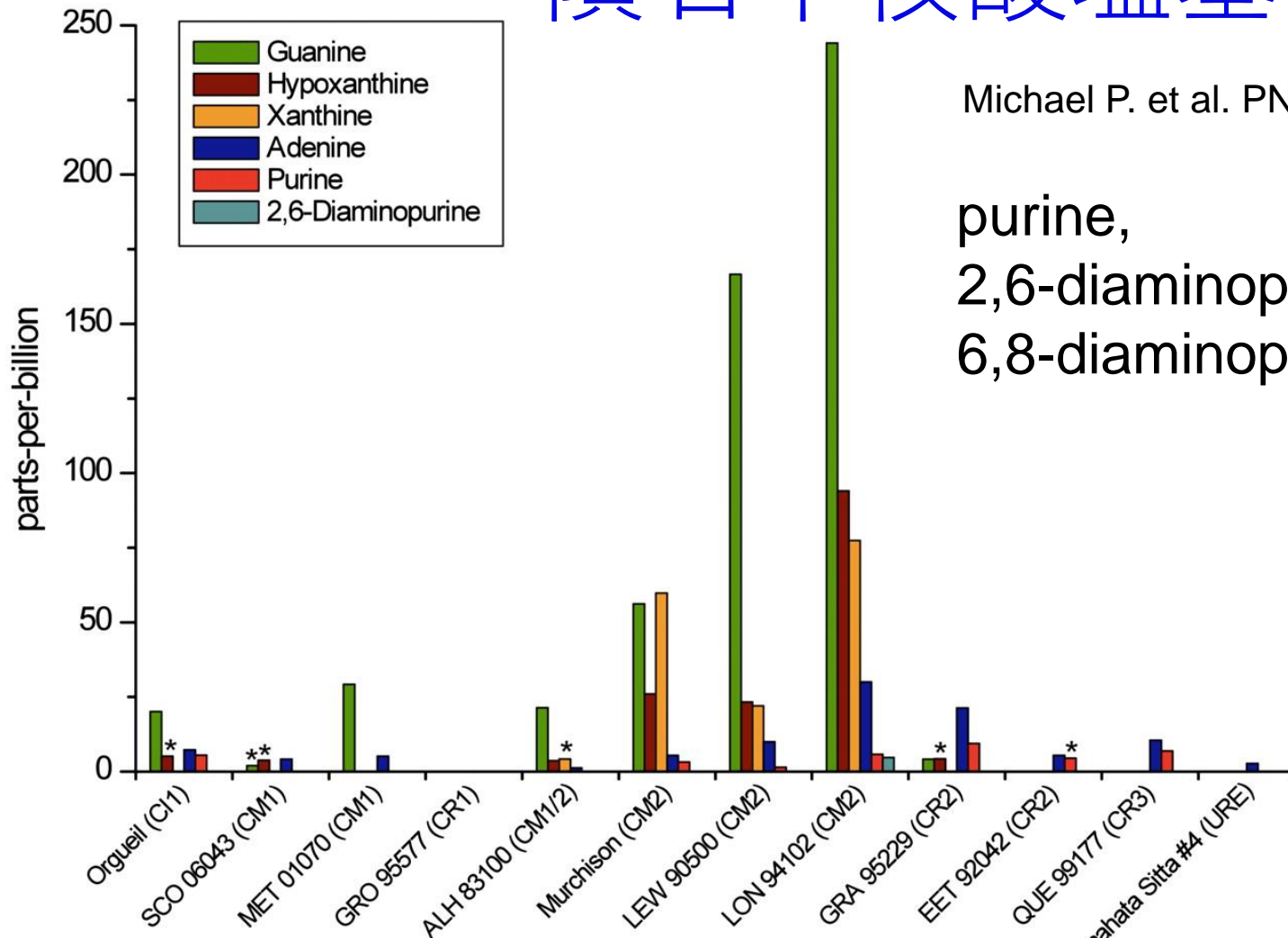
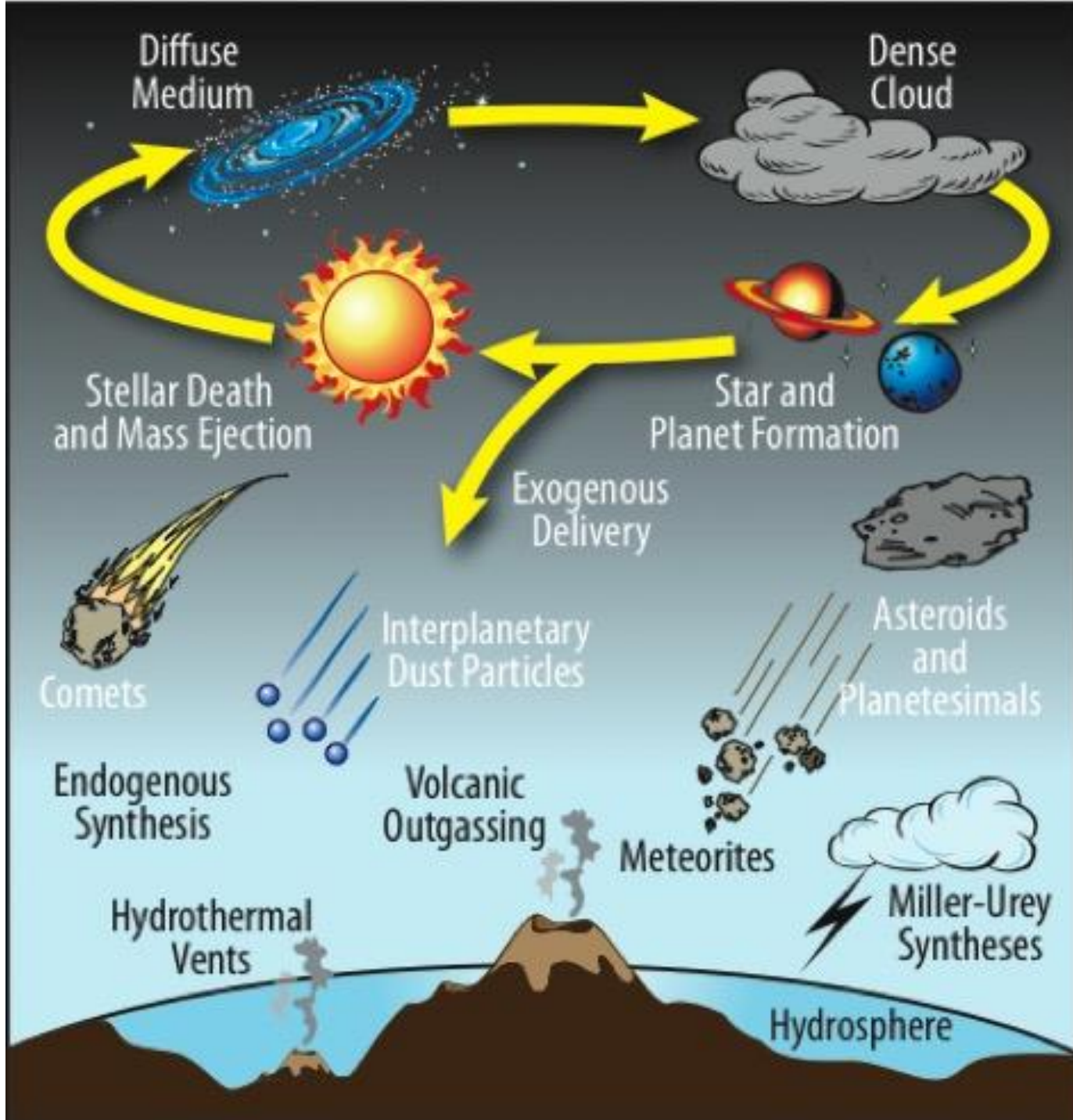


Fig. 1. Distribution of guanine, hypoxanthine, xanthine, adenine, purine, and 2,6-diaminopurine in 11 carbonaceous chondrites and one ureilite. The three CM2 carbonaceous chondrites in this study (Murchison, LEW90500, and LON 94102) contained significantly higher (approximately 4 × to 12 ×) abundances of purine nucleobases as well as greater structural diversity.

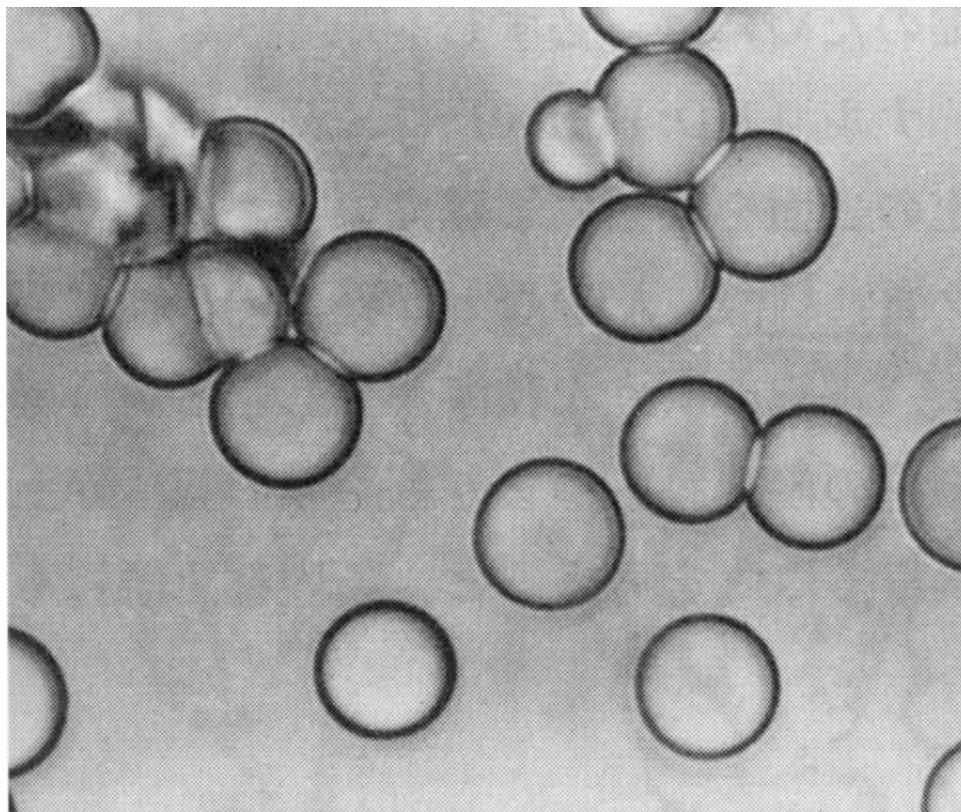
(Fig. 1, Yabuta et al. Springer 2019)

(Fig. 1, Yabuta et al. Springer 2019)



Courtesy by
Dr. Amie Elsila
(Deamer et al.
2002)

アミノ酸を熱するとプロテノイド(タンパク質モドキ)ができる。水に溶かすとミクロスフェアができる。



プロテノイド・ミクロスフェア

タンパク質モドキでできた、球状の構造 (K. Harada)

化学進化のまとめ

- ・ アミノ酸はできる。
- ・ プロティノイド・ミクروسフェア
- ・ 核酸は？核酸塩基はできる。
- ・ これらは隕石中に見つかっている。
- ・ 核酸はできない。
- ・ 合成の量は？
- ・ 化学進化の環境は？

実際にできた分子は複雑高分子
加水分解するとアミノ酸ができる。

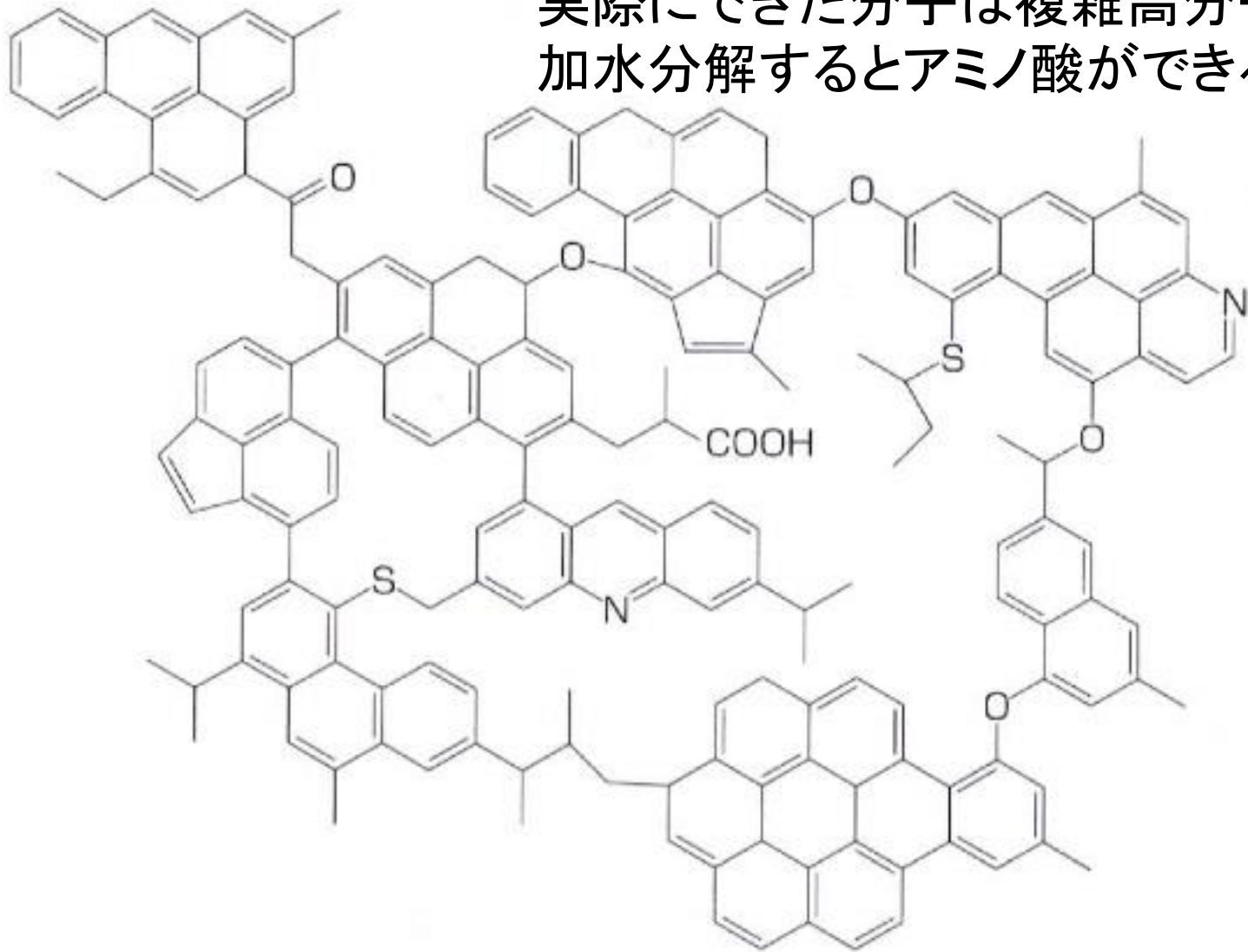
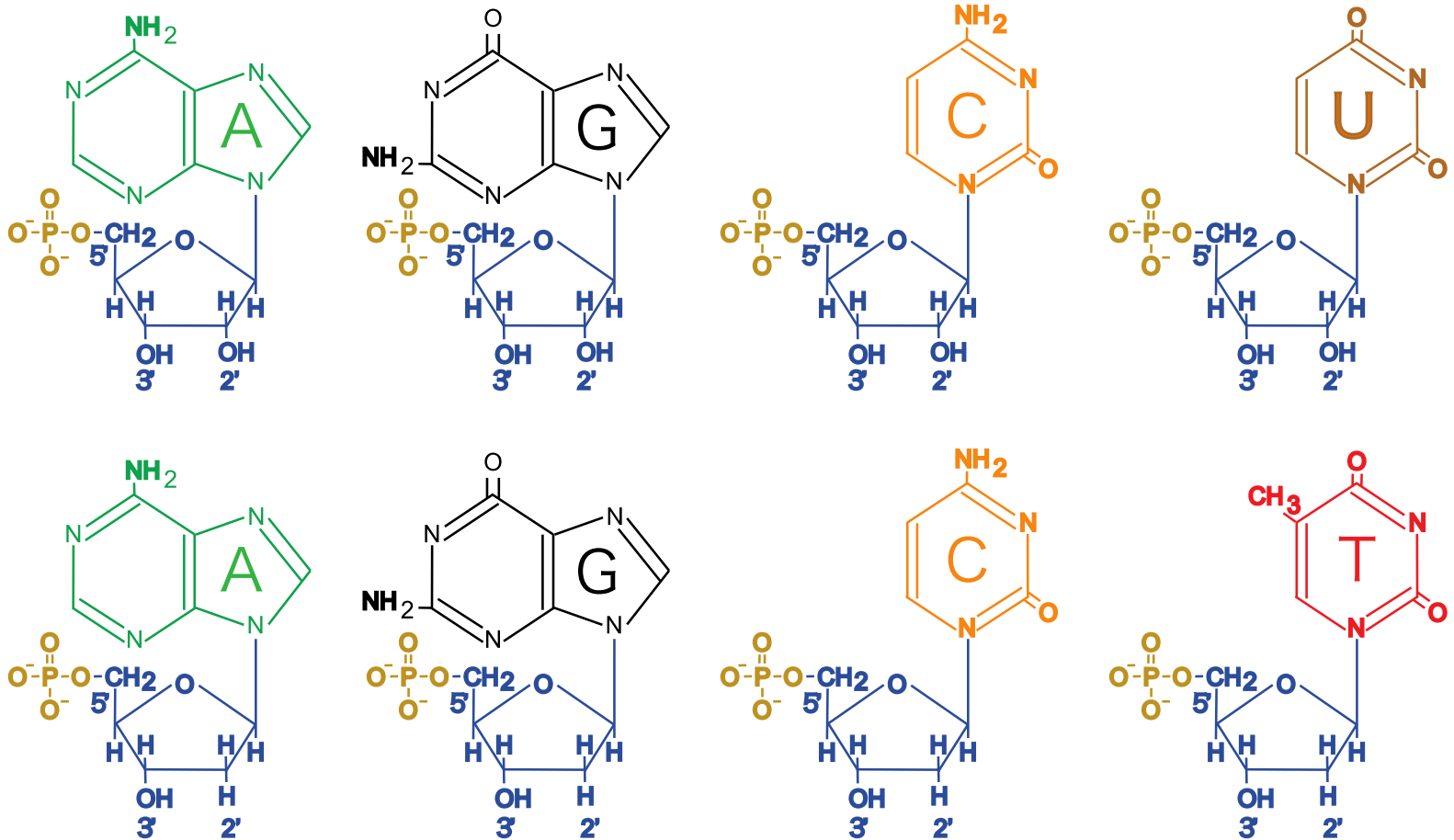
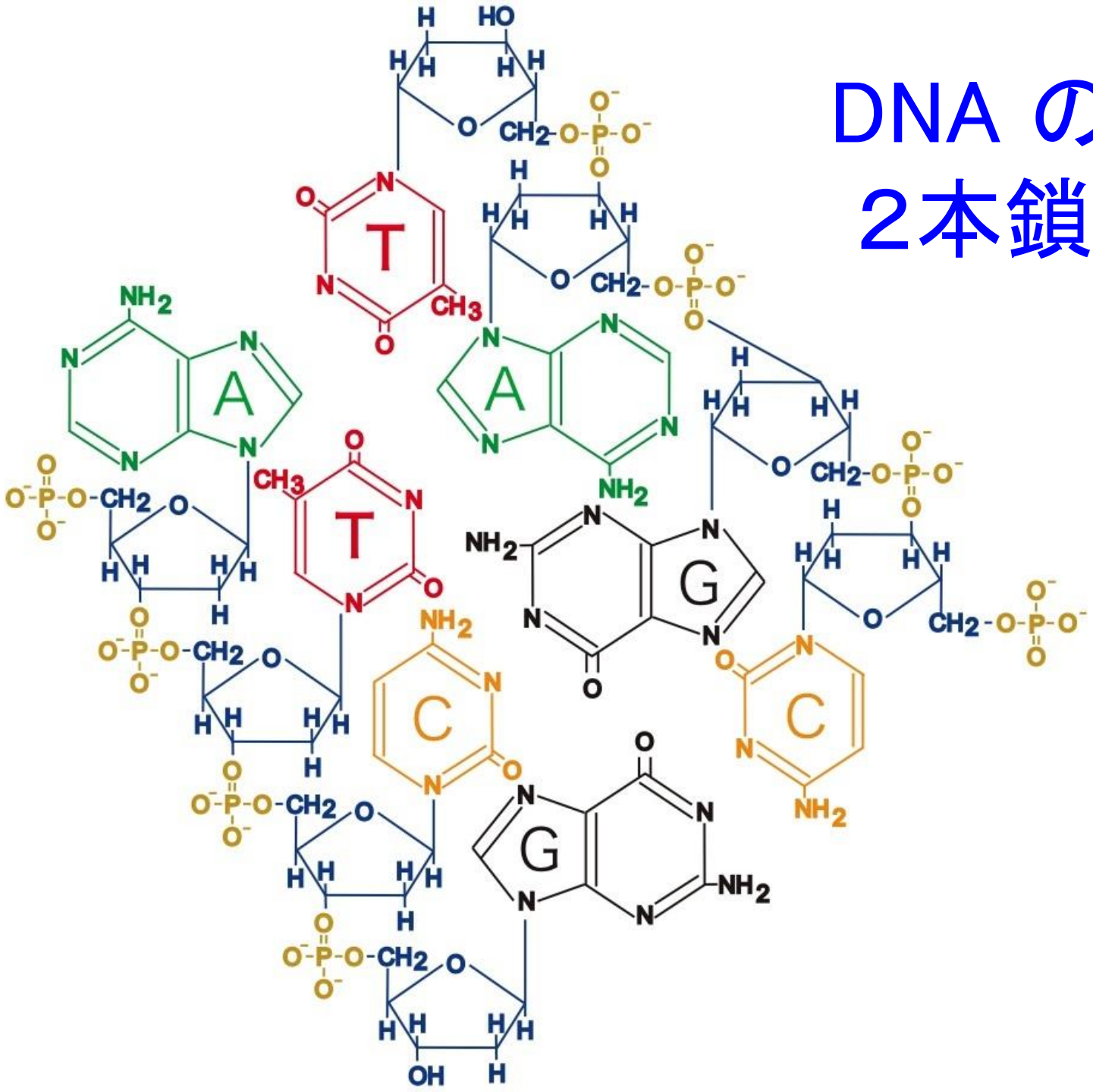


図 6.2 これまでの諸研究知見に基づき推測された、酸不溶性固体有機物の分子構造モデル¹⁹⁾

核酸がどうできたか RNA(上)とDNA(下)



DNA の 2本鎖

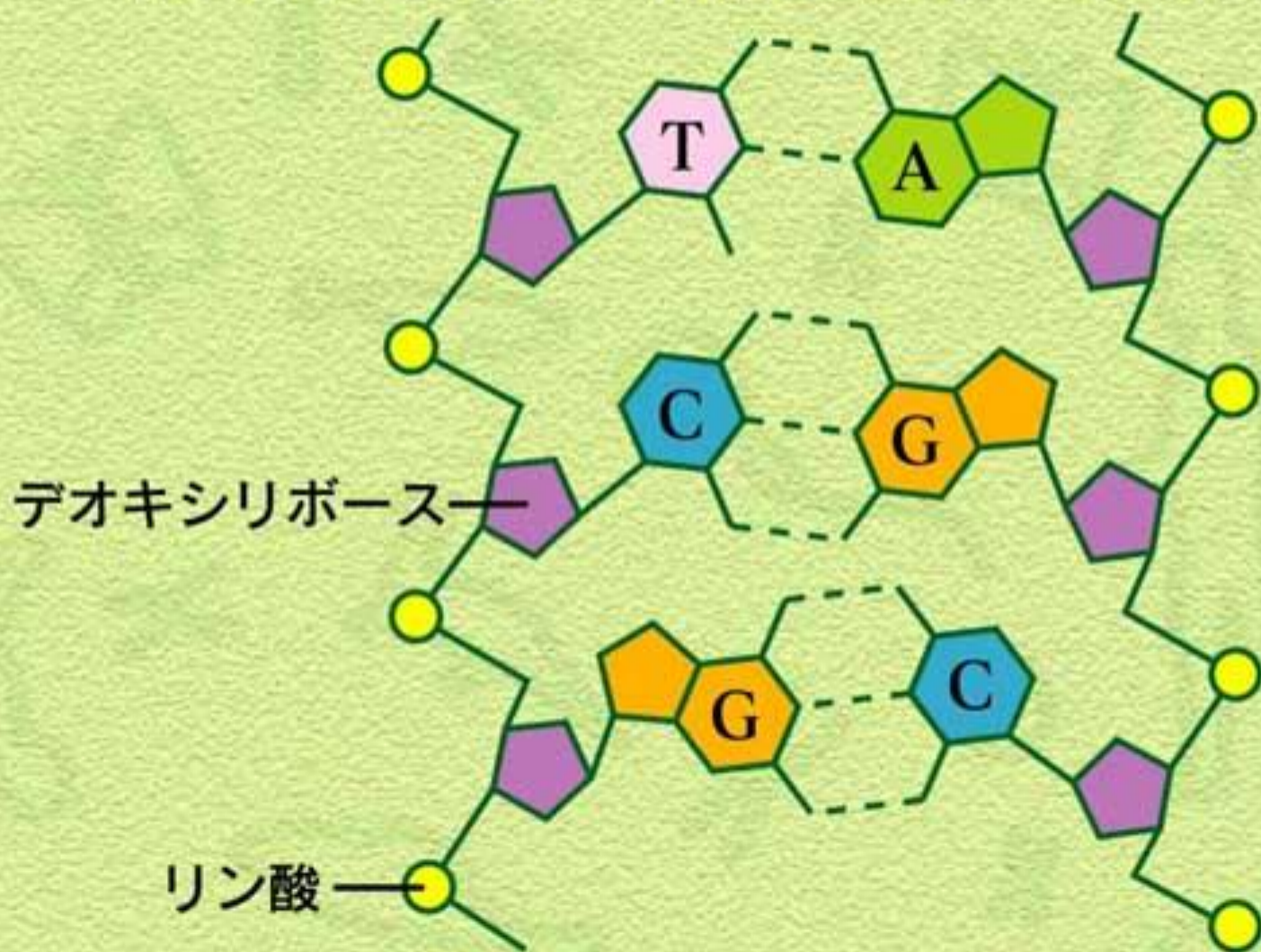


DNAの構造

糖-リン酸の主鎖

相補的塩基対

糖-リン酸の主鎖



核酸重合には単量体活性化

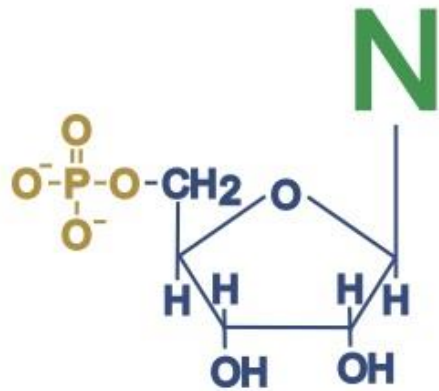
核酸重合体 + 水 \rightarrow 核酸単量体

活性化型核酸(リン酸化核酸)

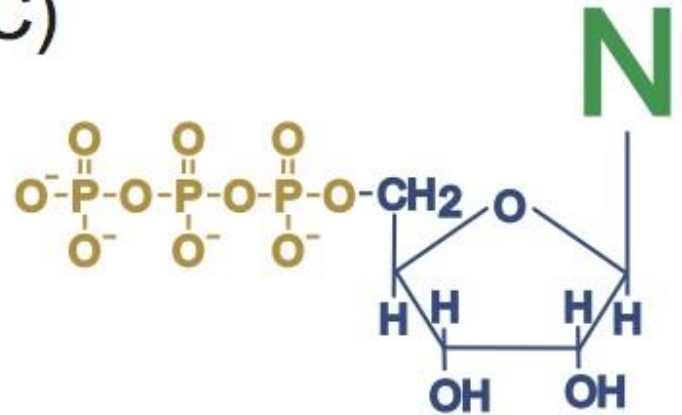
\rightarrow 核酸重合体

活性化ヌクレオチド

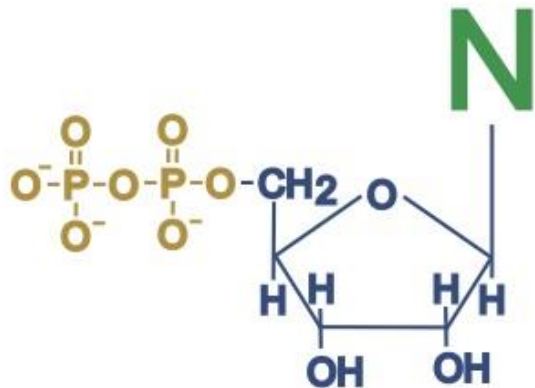
A)



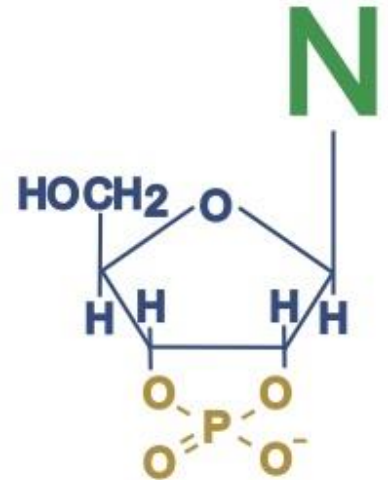
C)



B)



D)



核酸はリン酸溶液の中で合成された

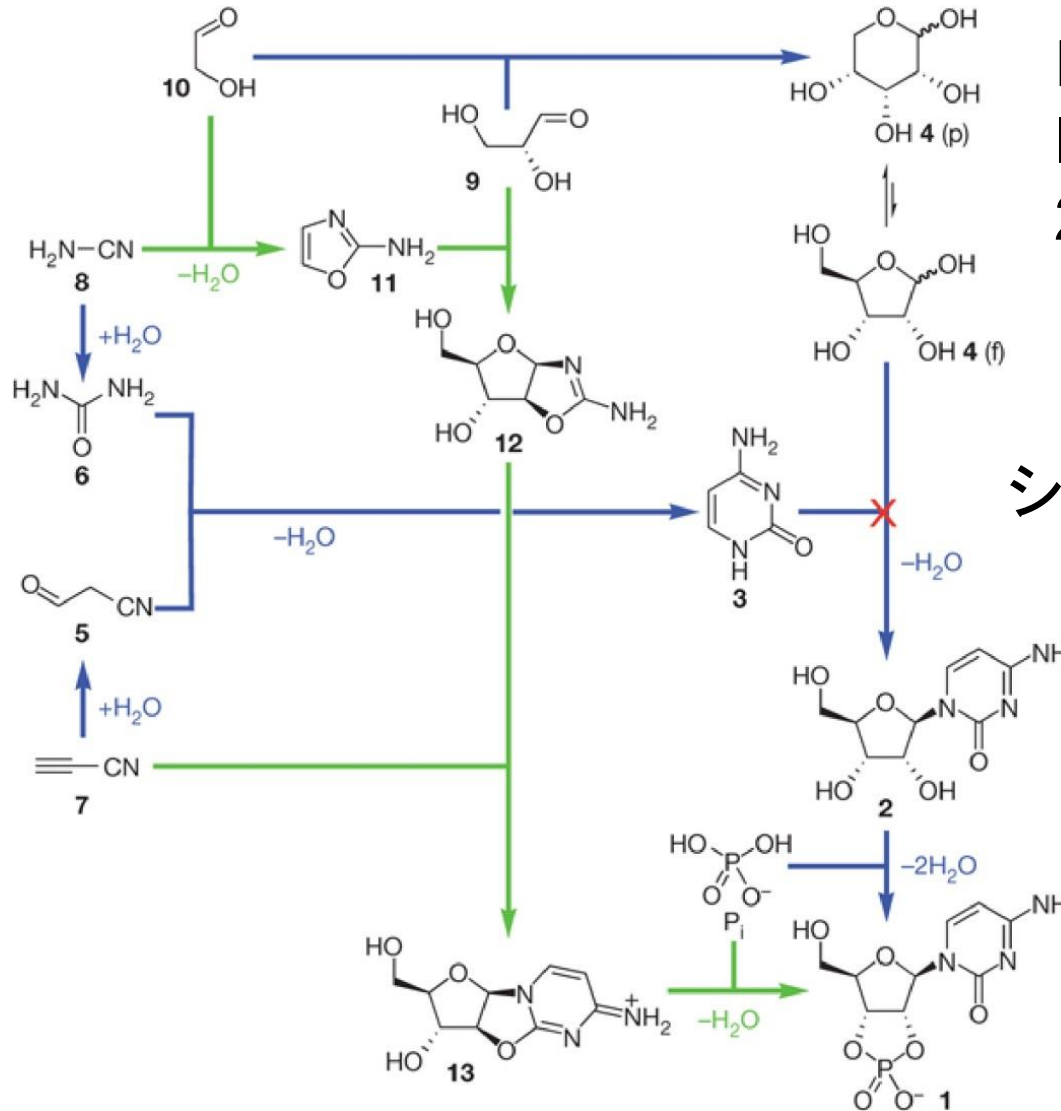
グリコール
アルデヒド

シアンアミド

尿素

シアノ
アセト
アルデヒド

シアノ
アセチレン



Powner et al.
Nature 459,
239-241 (2009)

シトシン

化学進化のまとめ

- ・ アミノ酸はできる。
- ・ プロテノイド・マイクロスフェア
- ・ 核酸は？核酸塩基はできる。
- ・ これらは隕石中に見つかっている。
- ・ 核酸はできない。
- ・ 合成の量は？
- ・ 化学進化の環境は？
- ・ 陸上で核酸(ヌクレオチド)もできる。

生化学的研究

RNAワールド

第2章

遺伝子工学の遺伝学的基礎

1. DNAの構造の特徴と重要な名称を説明できる.
2. dNTPの構造とDNA二本鎖の構造を描ける.
3. DNAの複製, 転写, 翻訳について説明できる.
4. 遺伝子の塩基配列を翻訳できる.

図2・1 DNAの立体構造

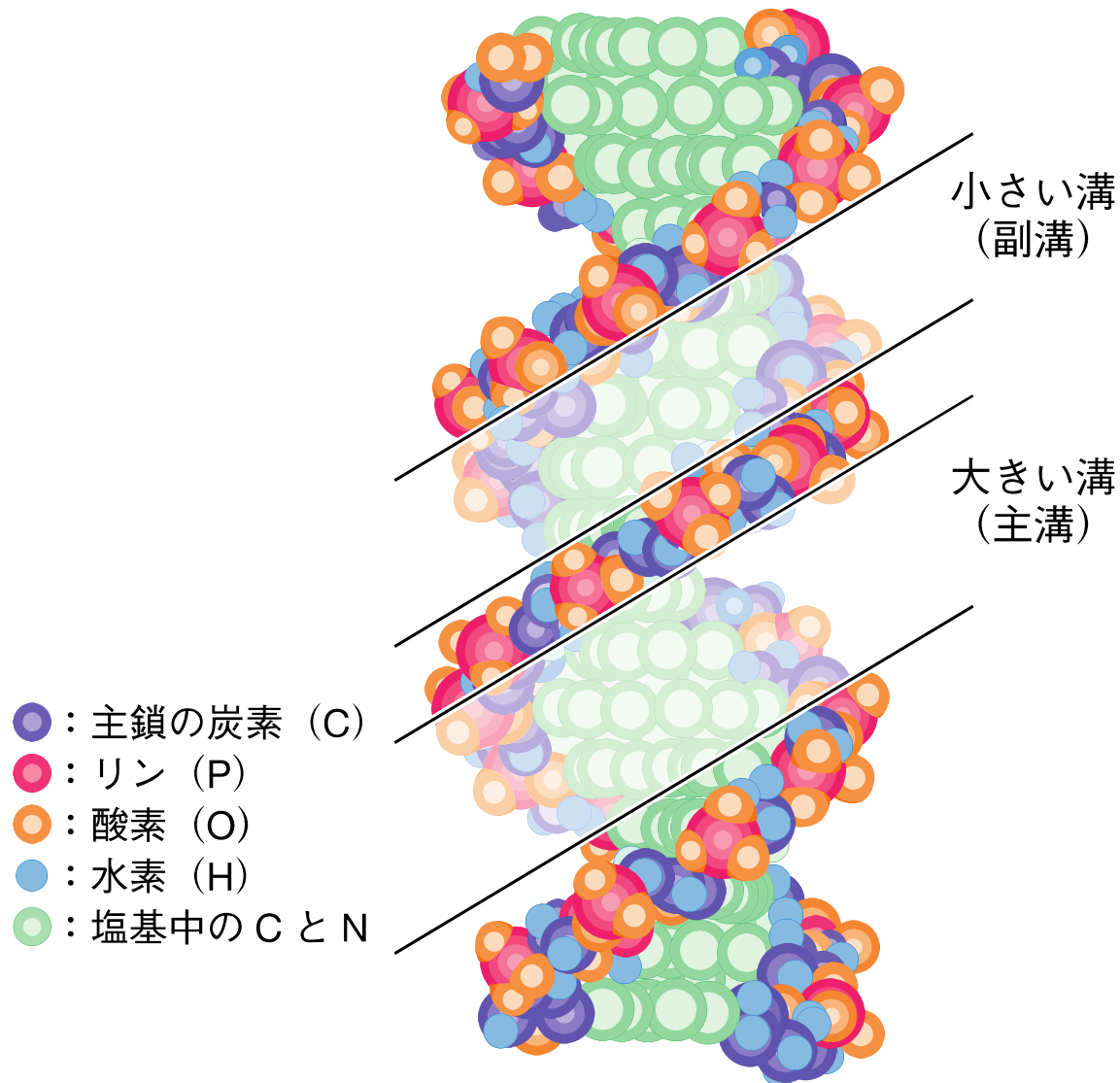


図2・2 塩基対

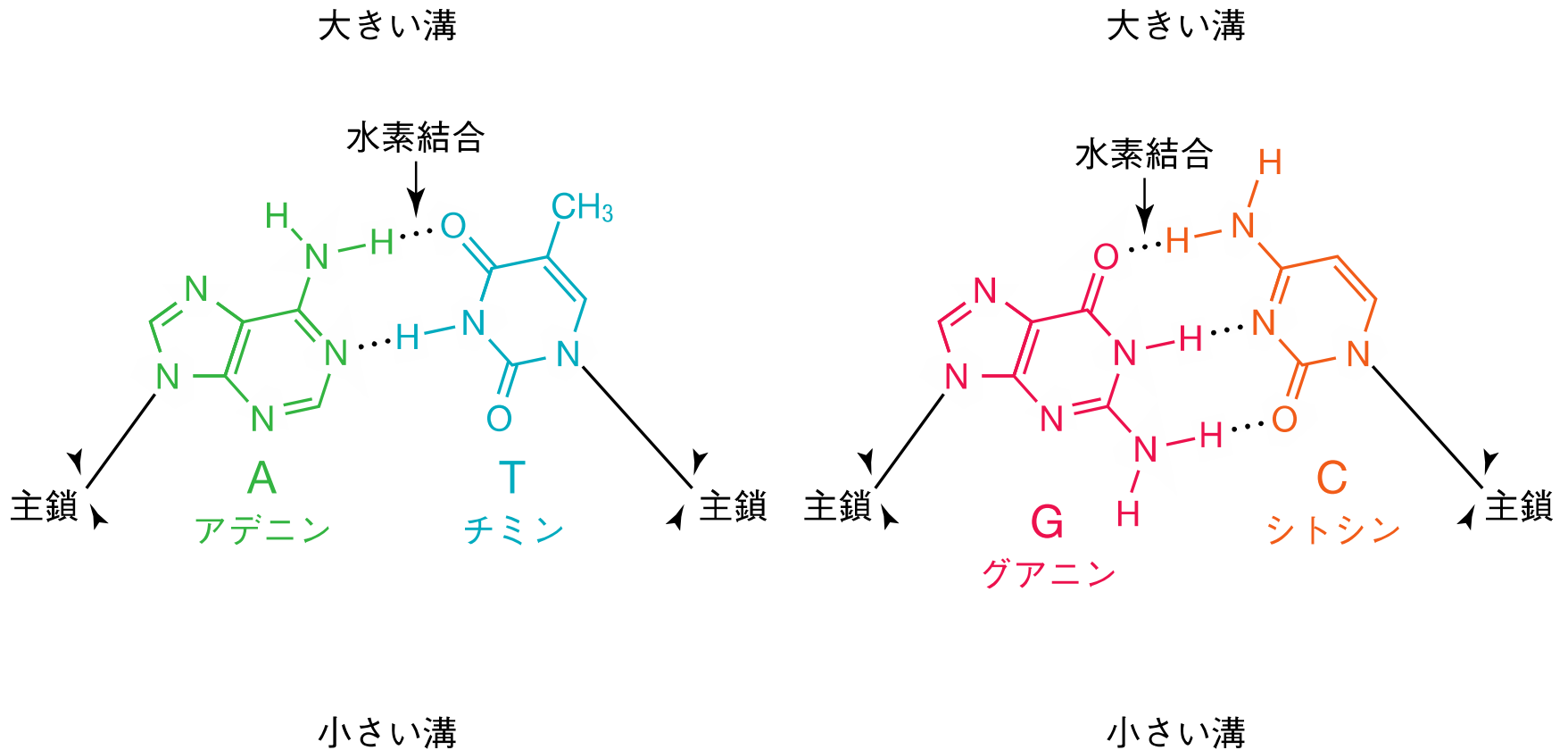


図2・3 プリンとピリミジンの構造

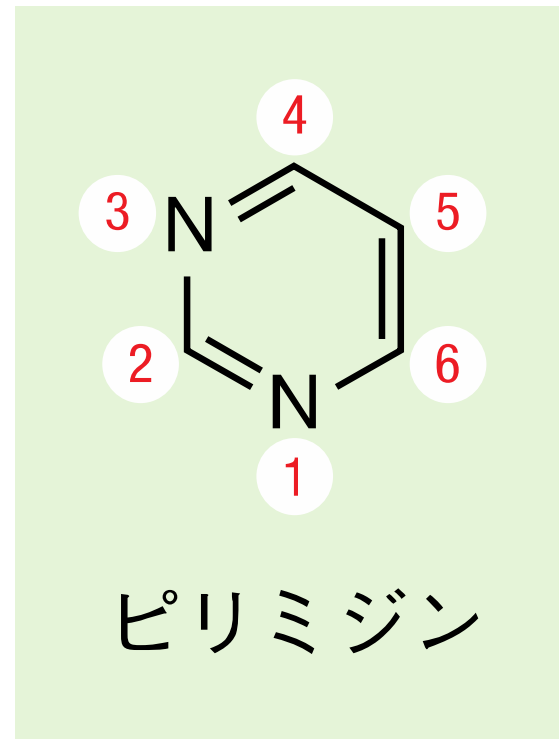
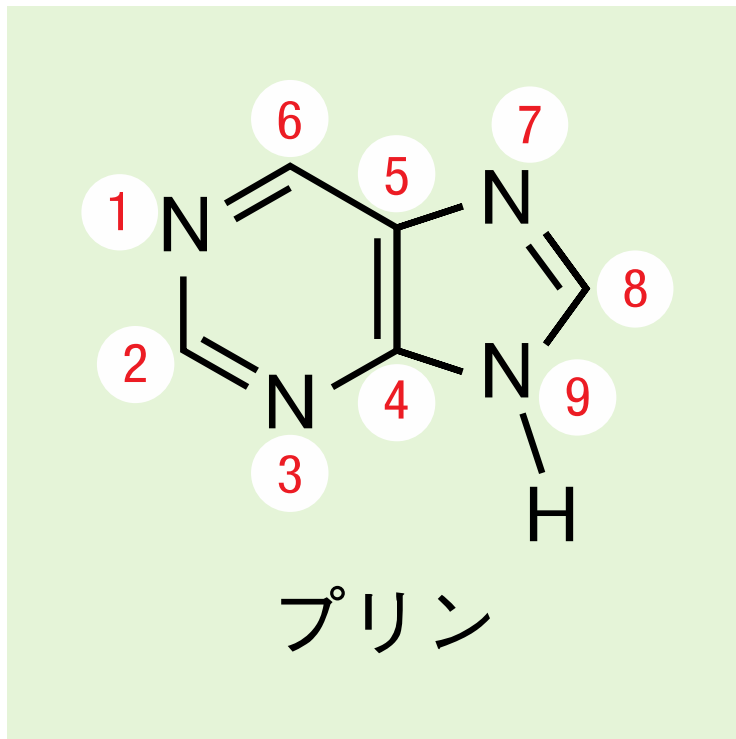


図2・4 リボヌクレオチドと デオキシリボヌクレオチド

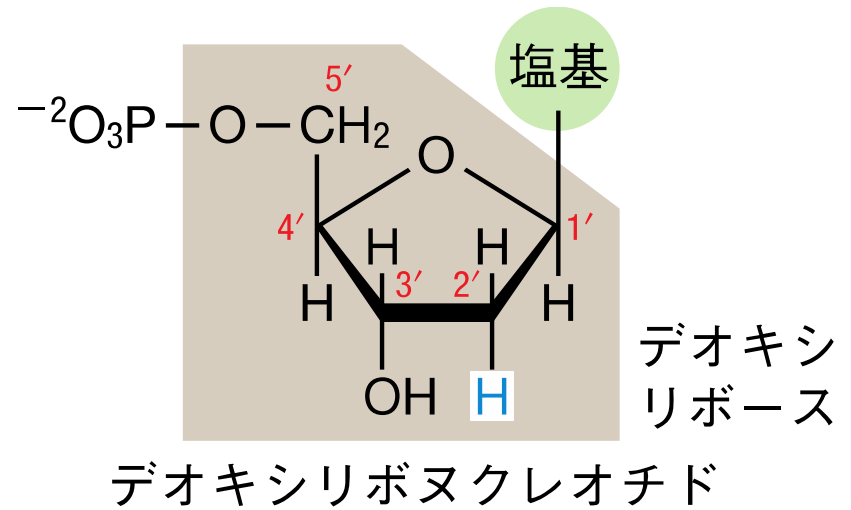
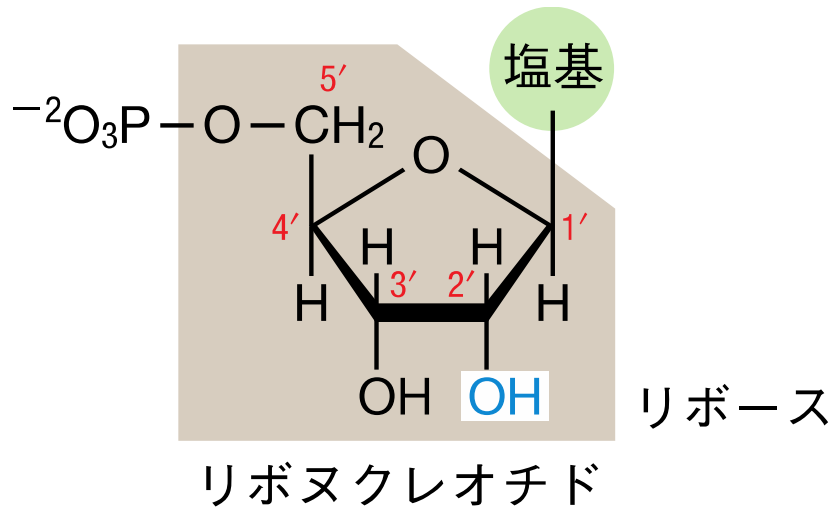
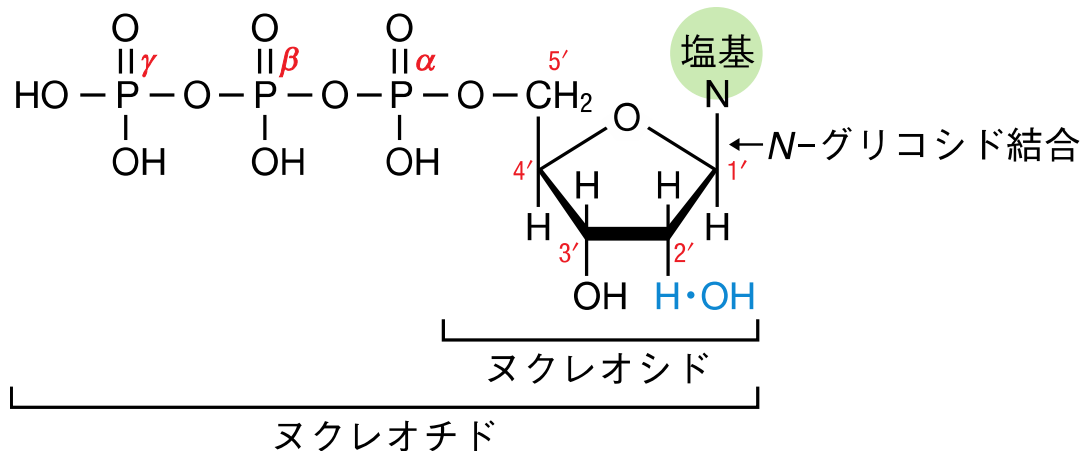


図2・5 モノヌクレオチドと ポリヌクレオチド

(a) モノヌクレオチド



ギリシャ文字の読み方

α (アルファ)	θ (シータ)
β (ベータ)	λ (ラムダ)
γ (ガンマ)	ω (オメガ)

(b) ポリヌクレオチド

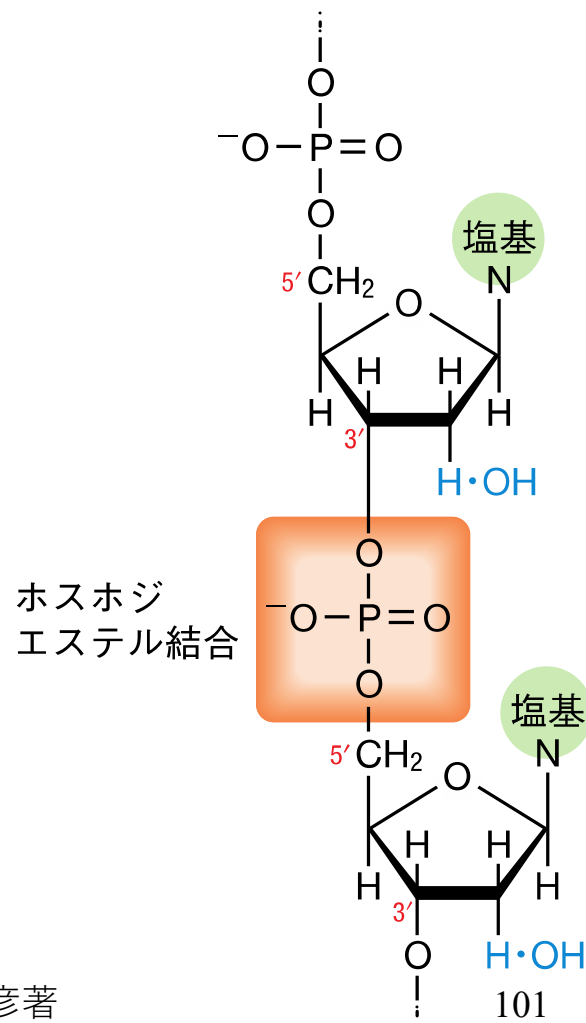


表2・1 塩基とヌクレオシド、ヌクレオチドの名称

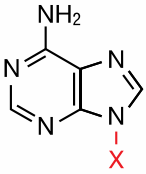
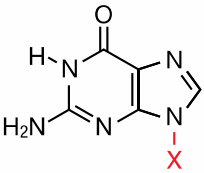
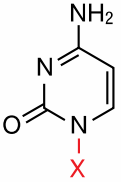
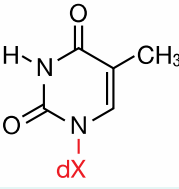
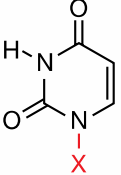
塩基の構造	塩基 (X=H)	ヌクレオシド (X=リボース)	ヌクレオチド (X=リボースリン酸)
	アデニン Ade A	アデノシン Ado A	アデニル酸 アデノシンーリン酸 AMP
	グアニン Gua G	グアノシン Guo G	グアニル酸 グアノシンーリン酸 GMP
	シトシン Cyt C	シチジン Cyd C	シチジル酸 シチジンーリン酸 CMP
	チミン Thy T	デオキシチミジン dThd T	デオキシチミジル酸 デオキシチミジンーリン酸 dTMP
	ウラシル Ura U	ウリジン Urd U	ウリジル酸 ウリジンーリン酸 UMP

表2・2 塩基の略号

略号	意味	略号	意味
A	A (Adenine アデニン)	W	A or T (Weak 弱い塩基対)
G	G (Guanine グアニン)	S	C or G (Strong 強い塩基対)
C	C (Cytosine シトシン)	B	C or G or T (A ではないので次の B)
T	T (Thymine チミン)	D	A or G or T (C ではないので次の D)
U	U (Uracil ウラシル)	H	A or C or T (G ではないので次の H)
I	I (Inosine イノシン)	V	A or C or G (T ではない U はあるので次の V)
R	A or G (puRine プリン)	N	A or C or G or T (aNy どの塩基でもよい)
Y	C or T (pYrimidine ピリミジン)		
M	A or C (aMino アミノ基が特徴)		
K	G or T (Keto ケト基が特徴)		

図2・7 遺伝の仕組み

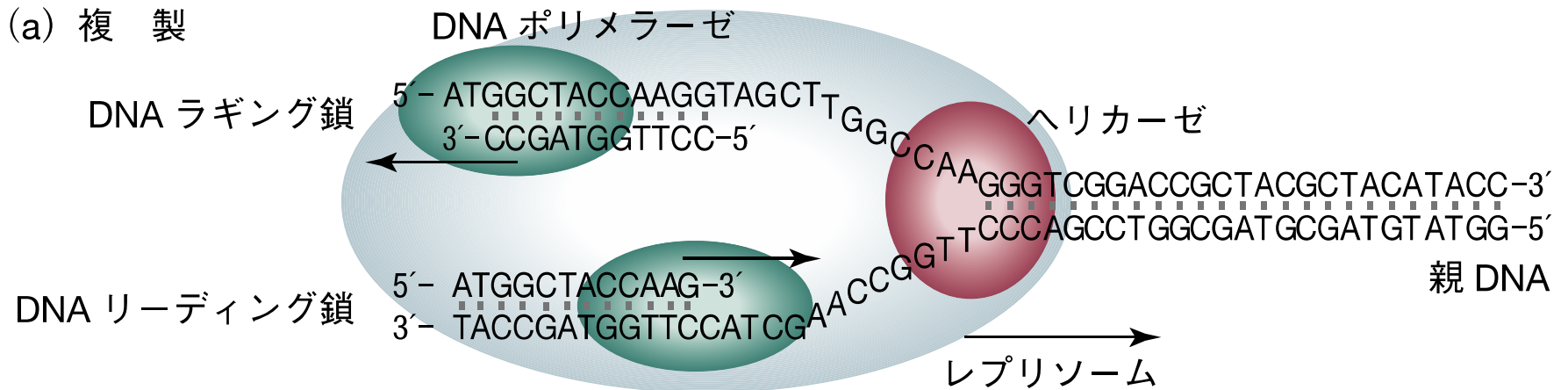


図2・7 遺伝の仕組み

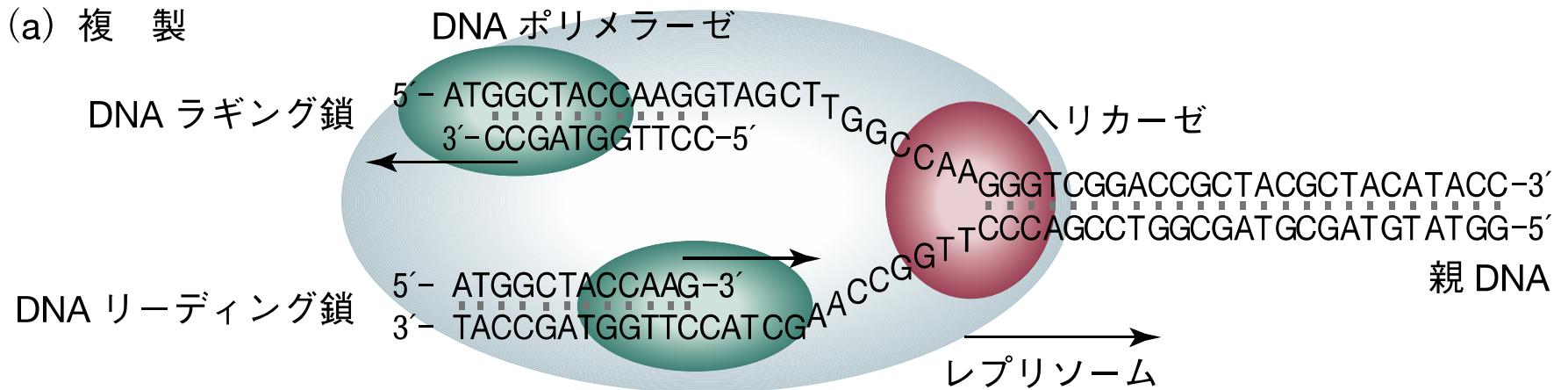


図2・7 遺伝の仕組み

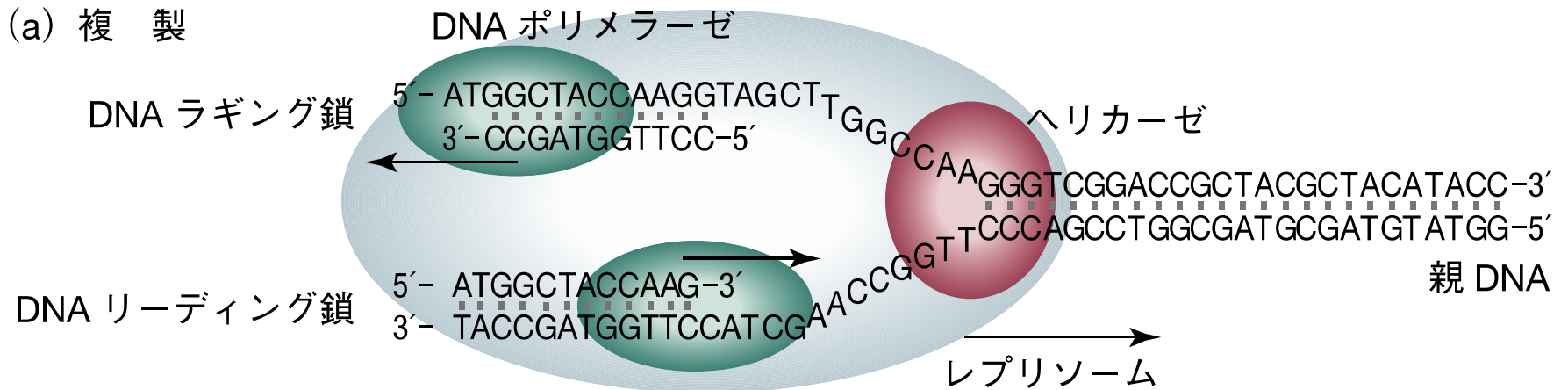


図2・7 遺伝の仕組み

(b) 転写

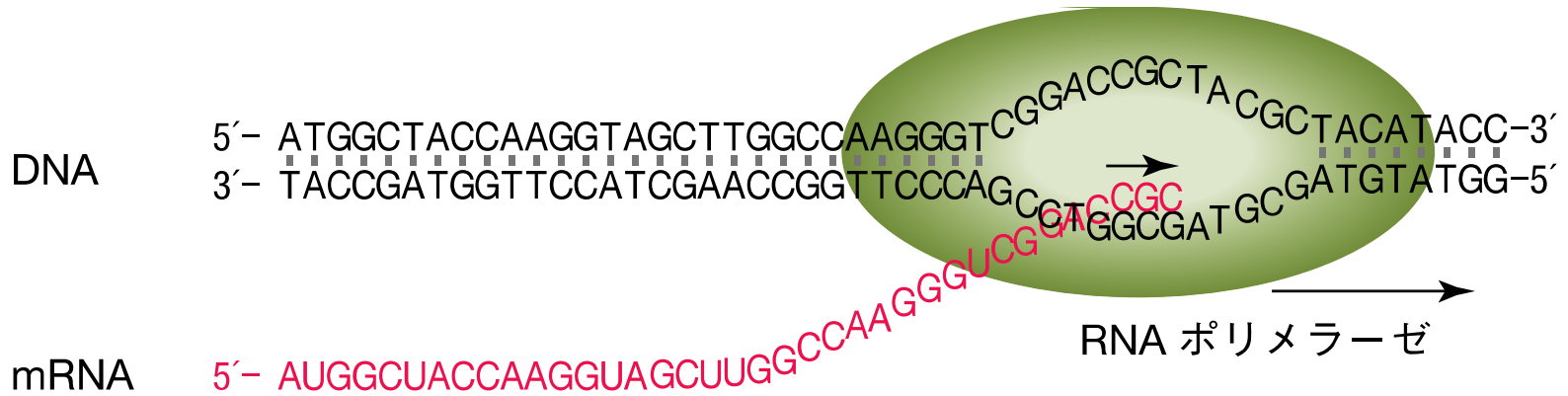


図2・7 遺伝の仕組み

(b) 転写

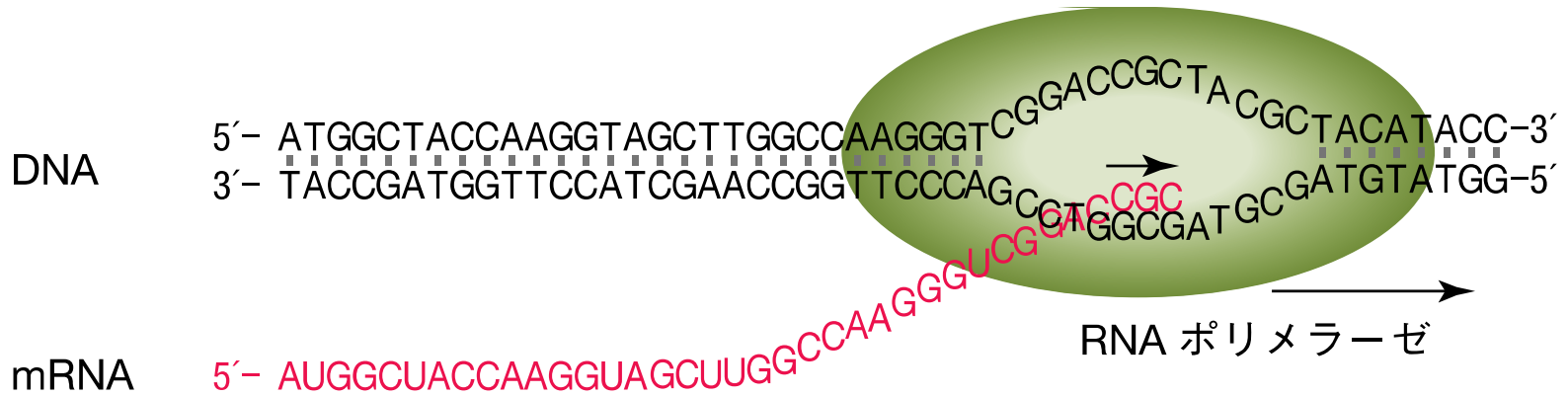


図2・7 遺伝の仕組み

(b) 転写

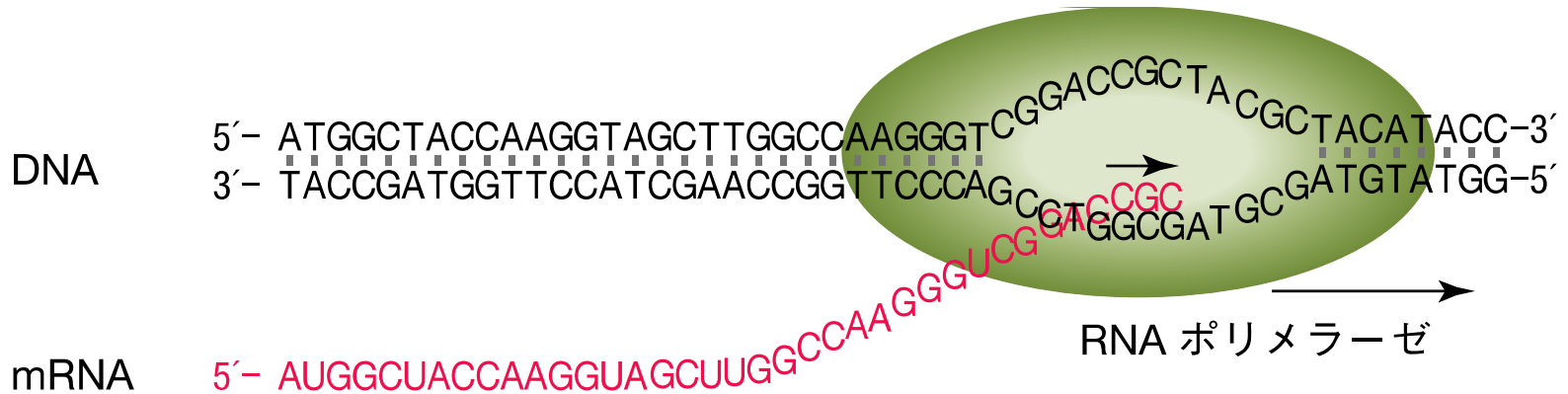


図2・7 遺伝の仕組み

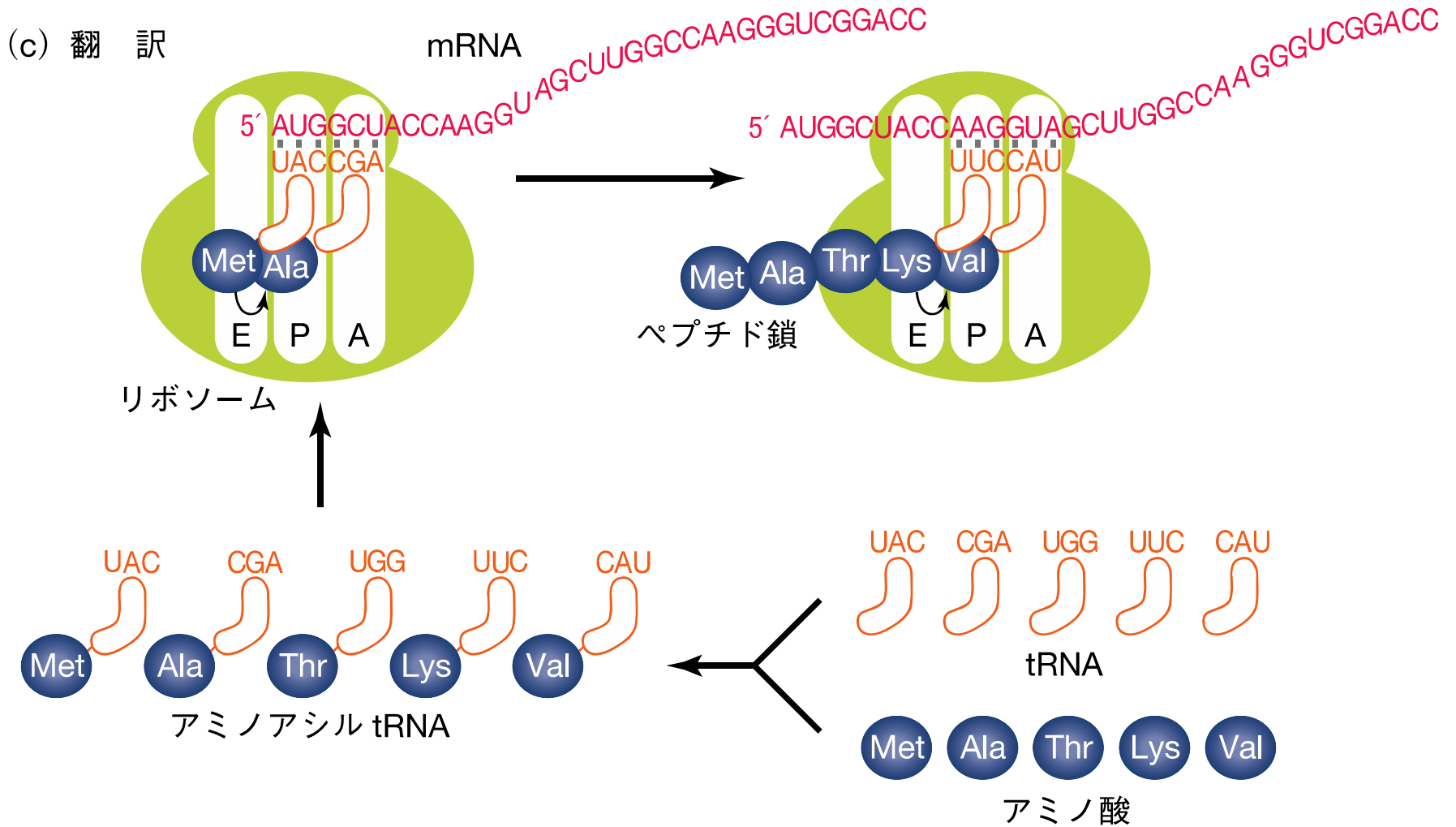


図2・7 遺伝の仕組み

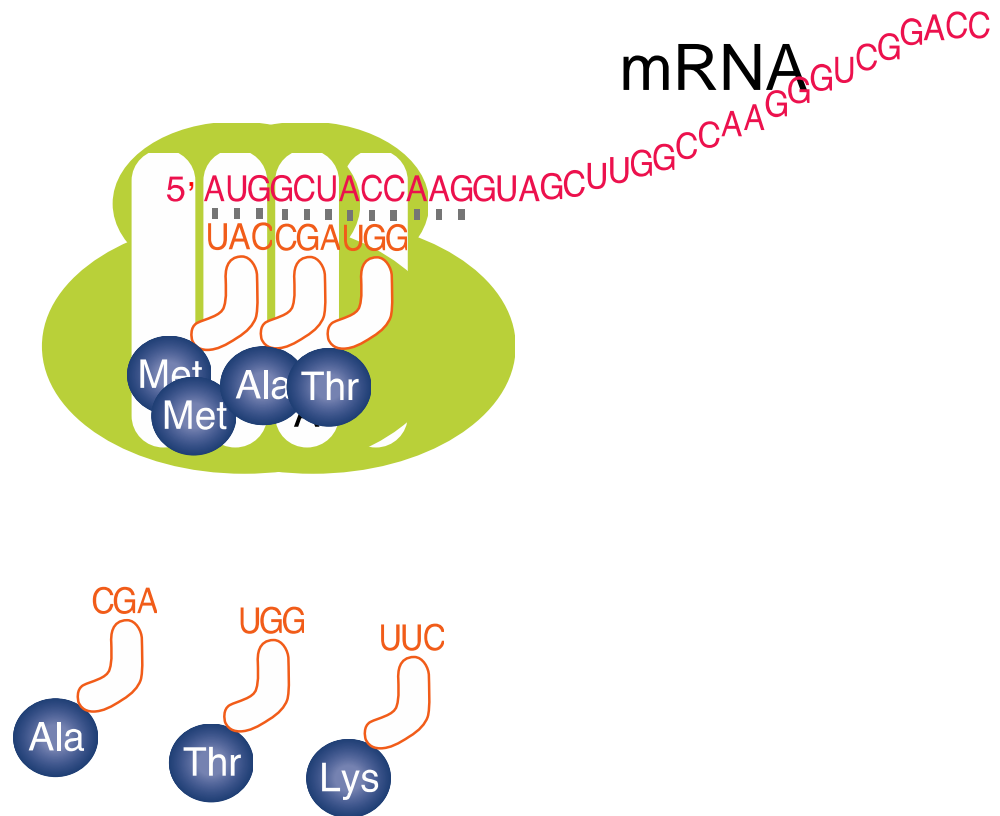


図2・8 コドン表

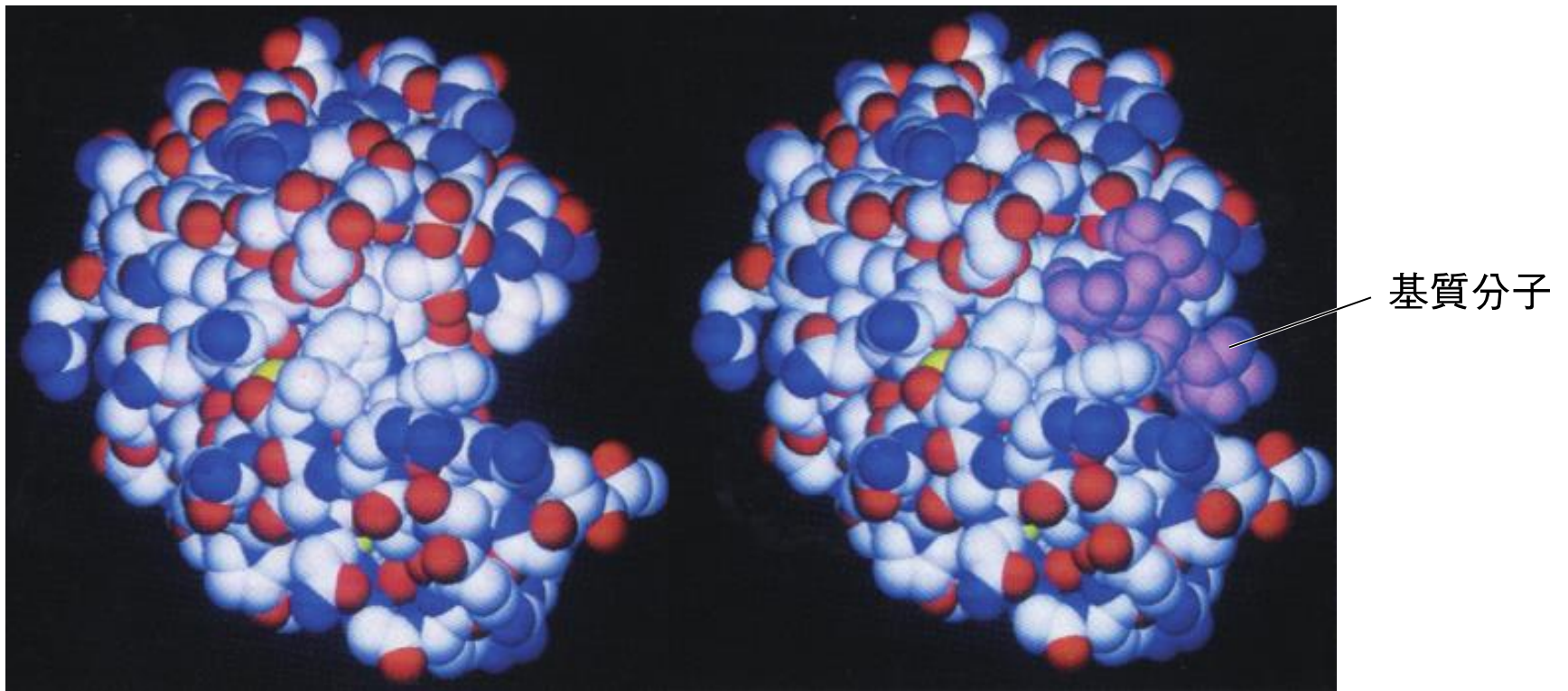
二文字目

	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)	三 文 字 目
	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 }	
	A	AUU } AUC } Ile(I) AUA } AUG Met(M)	ACU } ACC } Thr(T) ACA } ACG }	AAU } Asn(N) AAC } AAA } Lys(K) AAG }	AGU } Ser(S) AGC } AGA } Arg(R) AGG }	
	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 }	

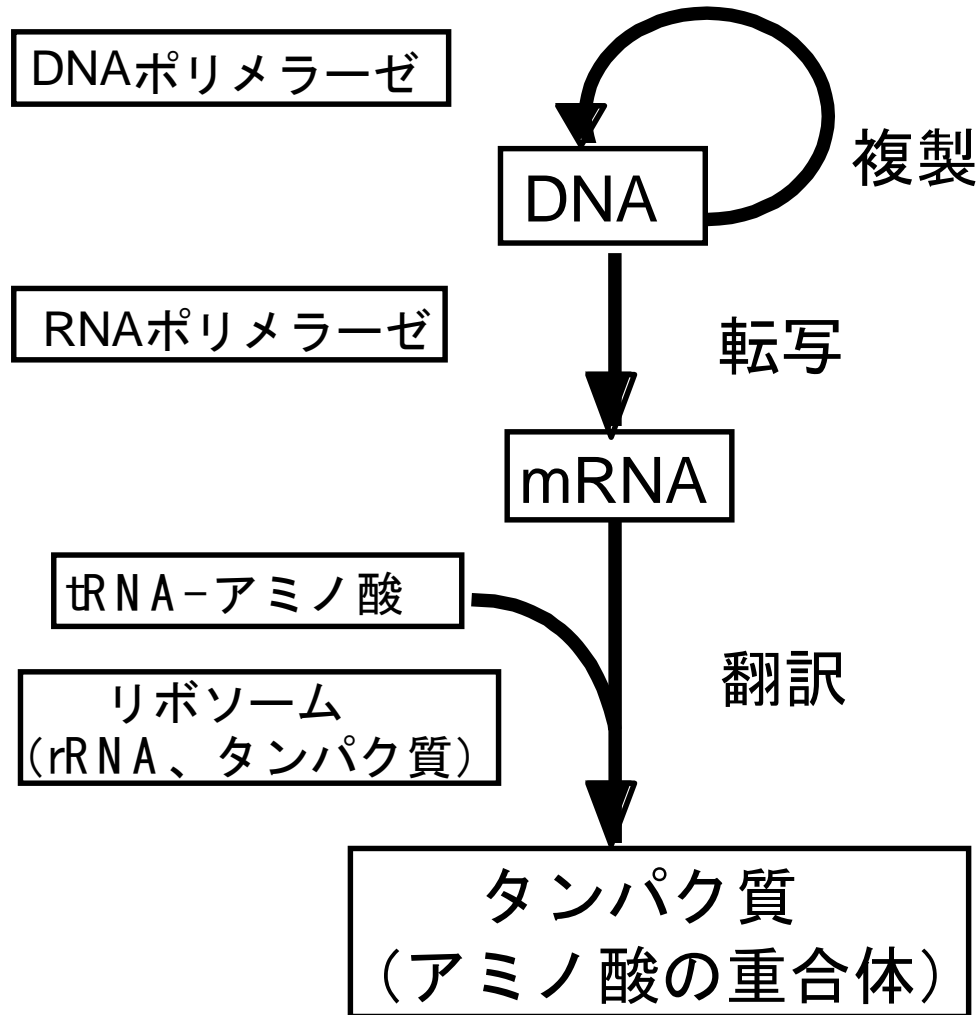
- | | | |
|-----------------|------------------|-----------------|
| Ala (A) アラニン | Gly (G) グリシン | Pro (P) プロリン |
| Arg (R) アルギニン | His (H) ヒスチジン | Ser (S) セリン |
| Asn (N) アスパラギン | Ile (I) イソロイシン | Thr (T) トレオニン |
| Asp (D) アスパラギン酸 | Leu (L) ロイシン | Trp (W) トリプトファン |
| Cys (C) システイン | Lys (K) リシン | Tyr (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

図2・9 タンパク質(リゾチーム)の立体構造



生物の遺伝の仕組み



自己複製系形成過程の矛盾

- ・ DNAからDNAへの複製
- ・ DNAからRNAへの転写
- ・ RNAからタンパク質への翻訳
- ・ 反応や代謝の触媒はタンパク質

RNAはDNAの代わり？

- ・ RNAをゲノムとして持つウイルス
- ・ 核酸単量体の合成はRNAからDNA
- ・ 現在もRNAからタンパク質ができる
(mRNA, tRNA, rRNA)

RNAがタンパク質の代わり？

- ・ リボザイムの発見
 - イントロンが自己触媒的に除去される (Cech, T. R.)
- ・ 酵素の補酵素にRNAやその誘導体
 - ATP, CTP, NAD, FAD
- ・ タンパク質合成はRNAが行っている
- ・ リボソームの中でタンパク質合成はRNAが行っている。

Fig 6.2. Molecular fossils from the RNA world

Coenzymes often contain ribonucleotide moieties. RNA components in the coenzymes are colored in black. (a) adenosine triphosphate (ATP), (b) flavin adenine dinucleotide (FAD), (c) nicotinamide adenine dinucleotide (NAD⁺), and (d) S - adenosylmethionine (SAM).

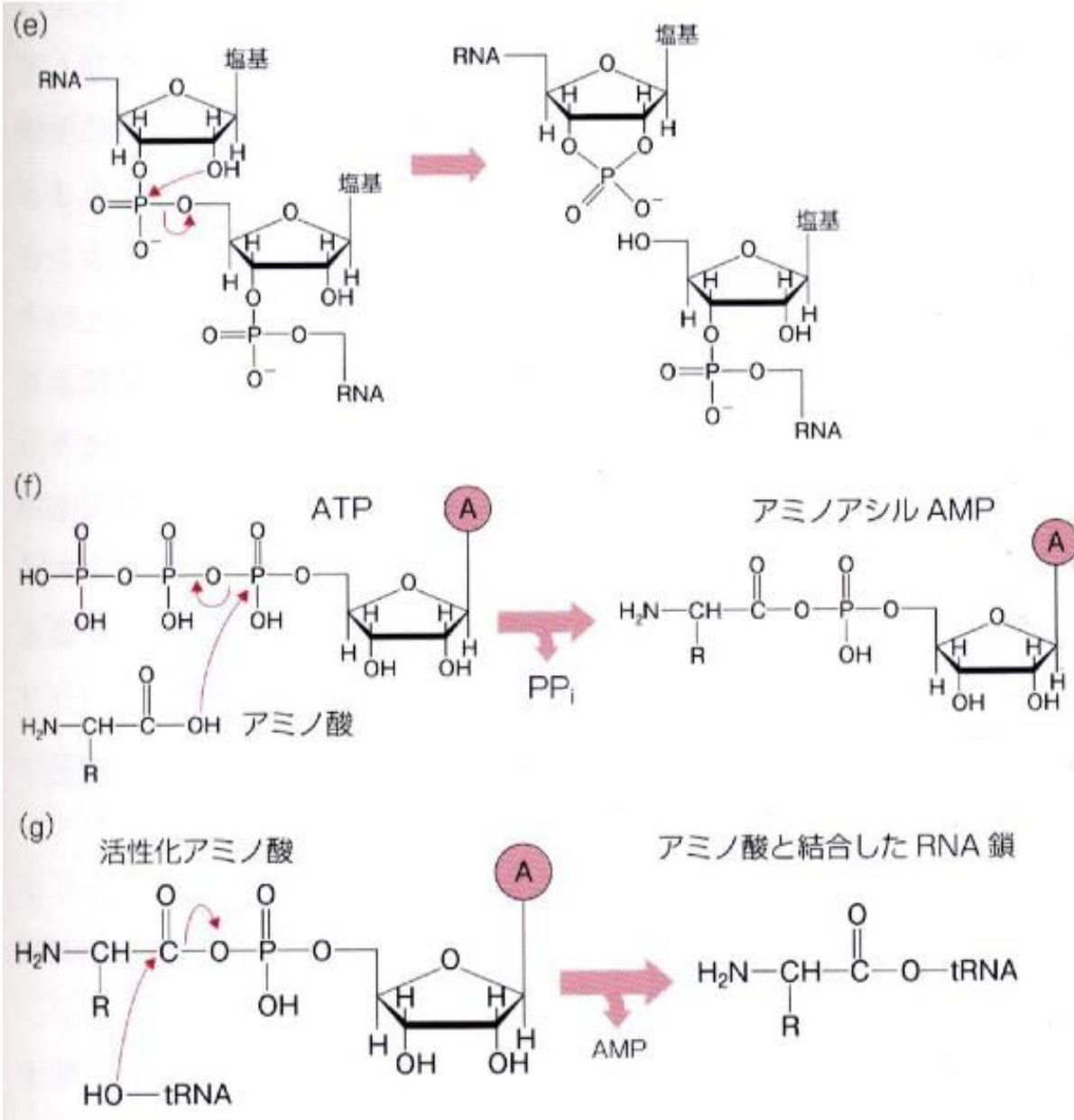
Ayukawa, S. et al. (2019) Springer in press.

a

b

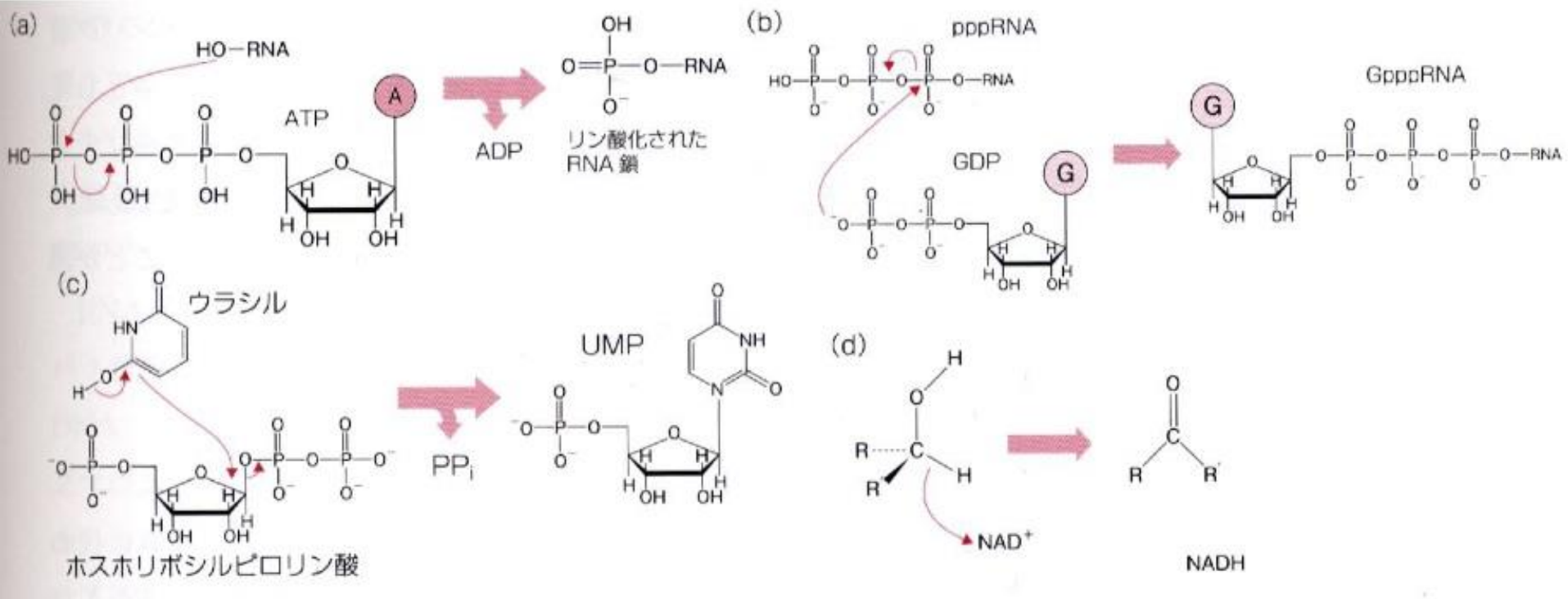
c

d



木賀
2013
化学同人

- (e) ホスホジエステル結合の開裂：ヌクレオチド残基間のホスホジエステル結合を切断する反応を触媒する。
 (f) アミノ酸の活性化：ATP のエネルギーを用いてアミノ酸を活性化したアミノアシル AMP を作製する反応を触媒する。
 (g) 活性化アミノ酸と RNA の結合：活性化されたアミノ酸を tRNA の末端のリボースの水酸基へ転移する反応を触媒する。



- (a) キナーゼ活性：ATP のリン酸基を RNA の末端のリボースの水酸基へと転移する反応を触媒する。
- (b) キャッピング活性：RNA の 5' 末端にヌクレオチドを付加する反応を触媒する。
- (c) ウラシルホスホリボシルトランスフェラーゼ活性：ホスホリボシルピロリン酸にウラシルを付加し，UMP をつくる反応を触媒する。
- (d) 酸化還元活性：アルコールを酸化してアルデヒドにする反応を触媒する。

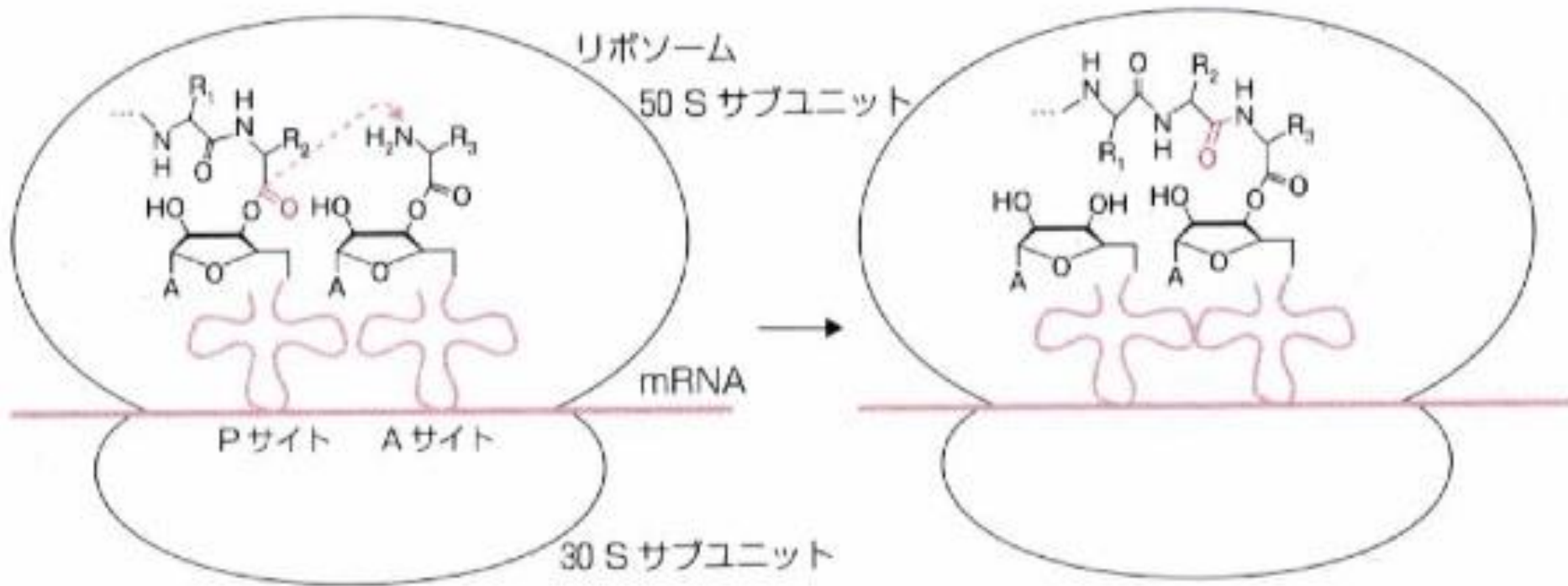
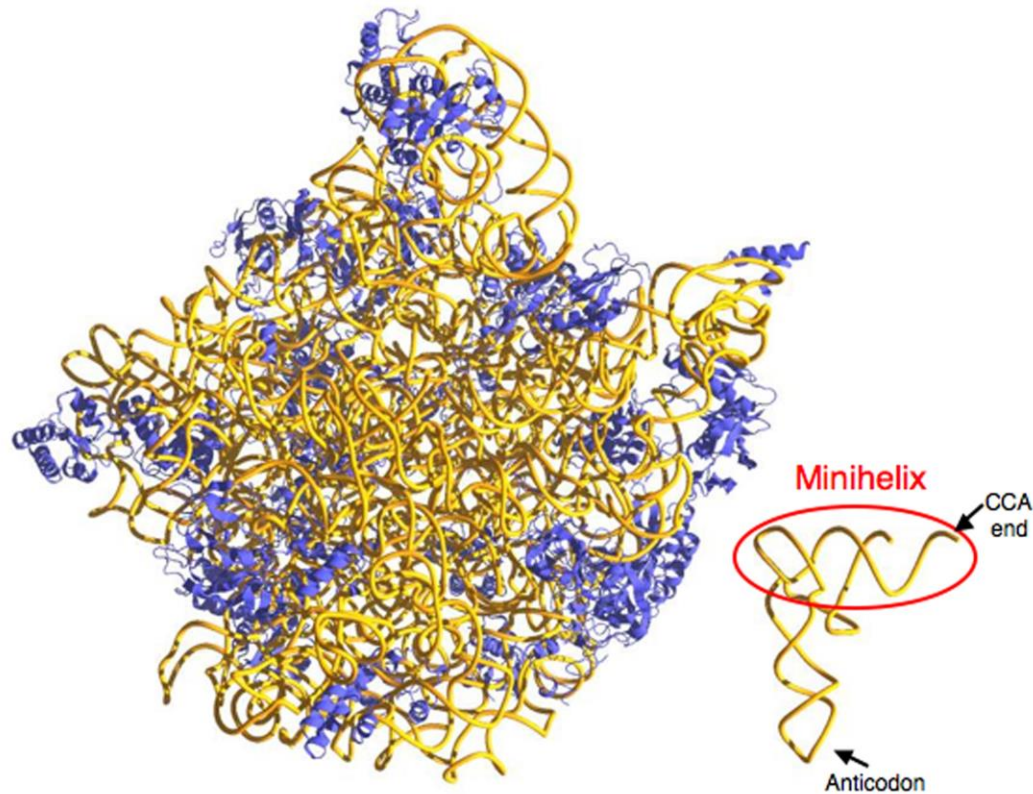


図 8.3 リボソーム上でのペプチド結合の形成

木賀 2013化学同人

リボソーム（蛋白合成装置）
RNAと蛋白でできているが、
アミノ酸転移反応中心の周辺はRNA



木賀 2013化学同人

RNAワールドで残された問題

- ・ RNAができたか
- ・ 活性化されたか
- ・ ベシクルはいらないか
- ・ すべての反応はできない

- ・ 生命誕生の場は

陸上での核酸の活性型合成

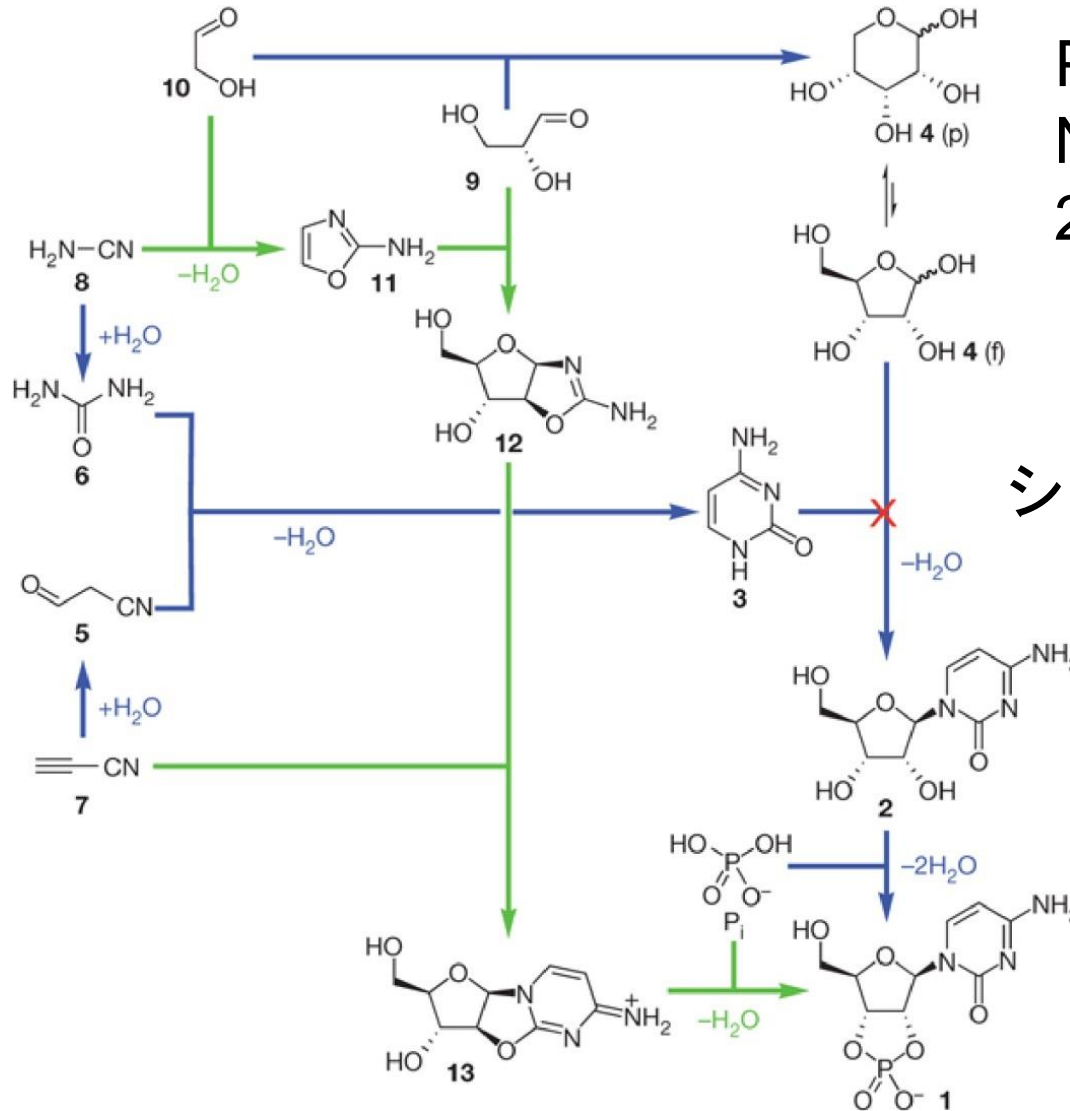
グリコール
アルデヒド

シアンアミド

尿素

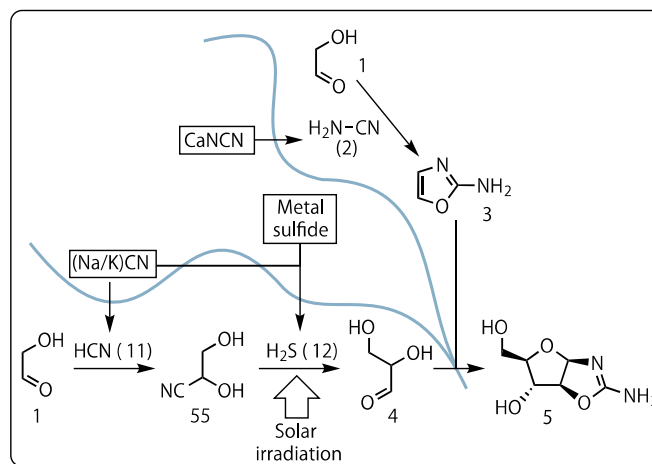
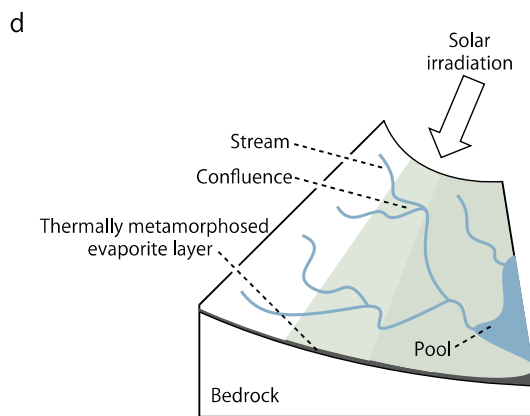
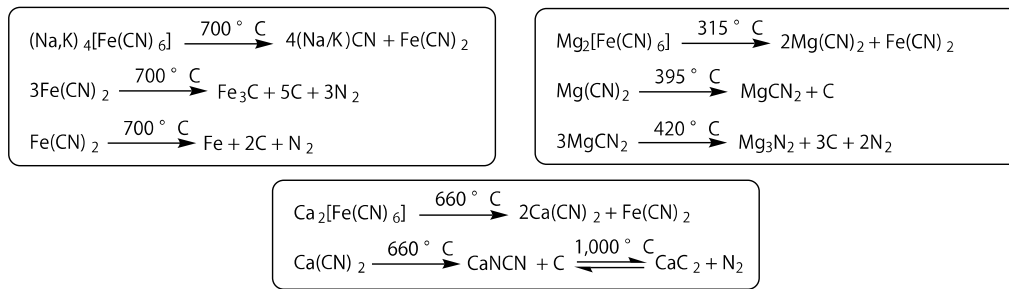
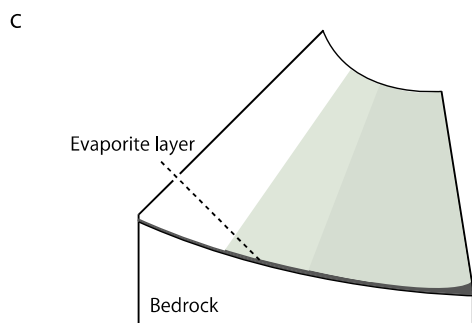
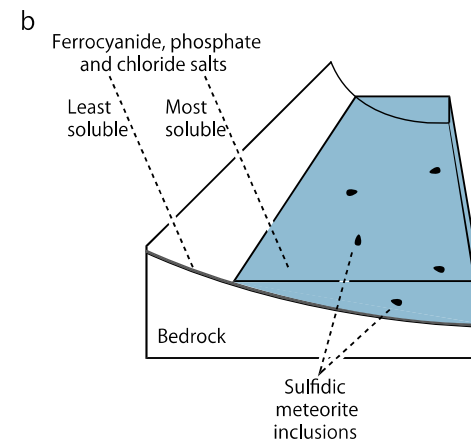
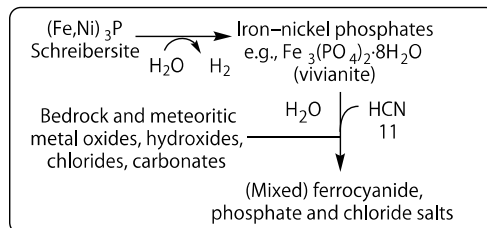
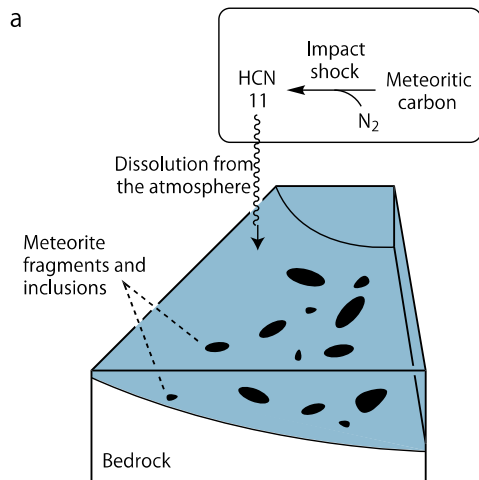
シアノ
アセト
アルデヒド

シアノ
アセチレン



Powner et al.
Nature 459,
239-241 (2009)

シトシン



Bhuvavesh,
 H.P. et al.
 Nature
 Chemistry,
 7, 301- 307
 (2015)

鉍物と尿素の存在でリン酸化される

。

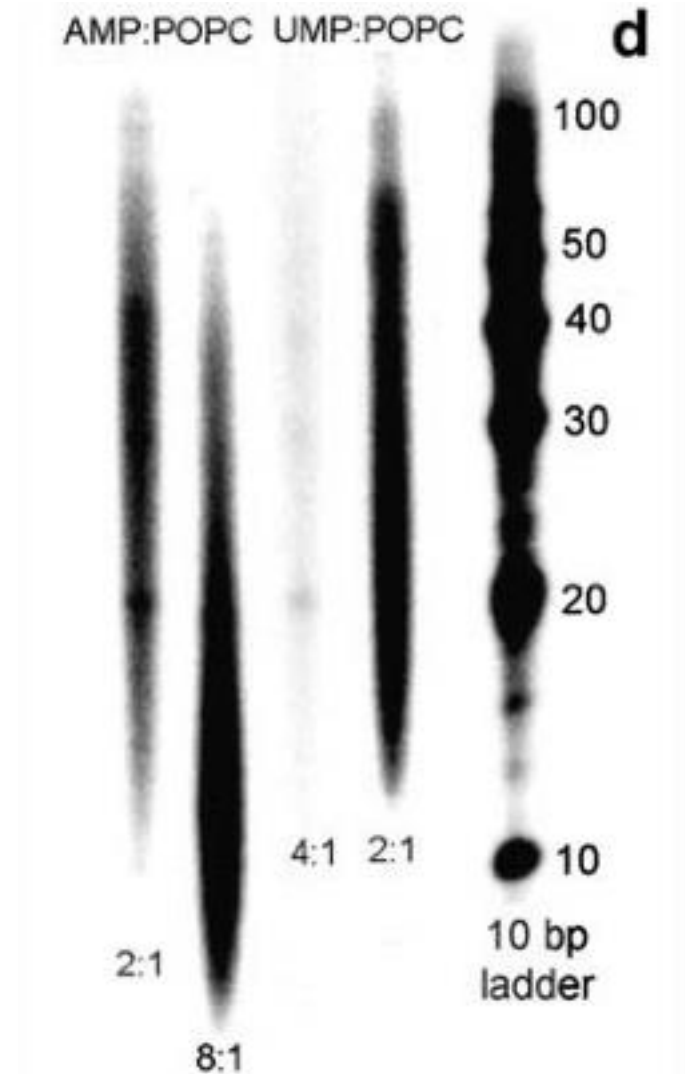
Furukawa, 2019 Springer in press

ホウ素は浅瀬に沈殿する。

Furukawa, 2019 Springer in press

Deamer, D. W. and Pashley, R. M., *Orig. Life Evol. Biosph.* **19**, 21-33 (1989)

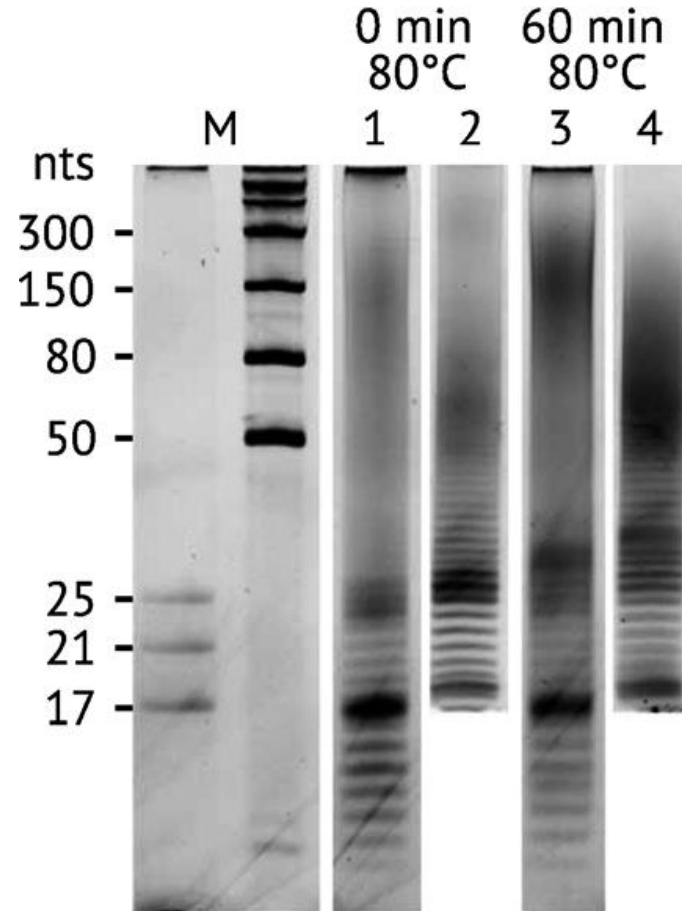
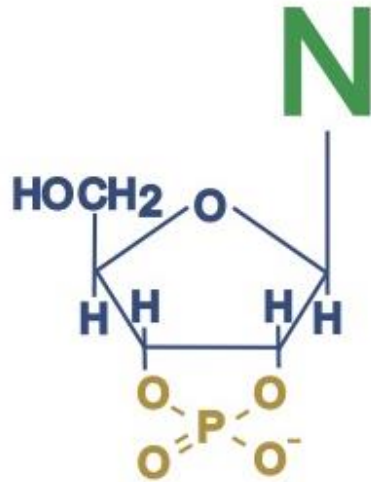
核酸単量体 (AMP) をリポソームと一緒に、乾燥と湿潤を繰り返すと RNA の重合が起きた



Dry Polymerization of 3',5'-Cyclic GMP to Long Strands of RNA

Matthias Morasch et al. ChemBioChem 2014, 15, 879 – 883

D)



cGMPを乾燥させると300塩基くらい重合する

Figure 4. Dried cGMP shows 3'–5'-linked oligomers without further treatment. Gel electrophoresis of dried cGMP before (lanes 1, 2) and after (lanes 3, 4) 1 h incubation at 80 °C. Size markers ("M", 17–300 bases) at the left show sizes for all four lanes. For each pair, the right-hand lane is a longer run of the same sample giving a better resolution of longer strands.

Fig. 6.4 Kiga et al. 2019 Springer
Evolution of RNA replication system

Fig. 6.4 Kiga et al. 2019 Springer
Chemistry shared in ligation and polymerization

Table 6.1. Abilities of RNA polymerase ribozymes

Name	Extension length [nt]	Length of Ribozyme [nt]	Error rate	Condition	Ref
b1-233t (Table 1-1)	6	96	15×10^{-2}	60 mM MgCl ₂ , 22°C, 6Days	Ekland & Bartel, 1996
Round-18 ribozyme (Table 1-2)	14	189	3.3×10^{-2}	200 mM MgCl ₂ , 22°C, 24h	Johnston, Unrau, Lawrence, Glasner, & Bartel, 2001
tC19 (Table 1-3)	95	198	2.7×10^{-2}	200 mM MgCl ₂ , 17°C, 7Days	Wochner, Attwater, Coulson, & Holliger, 2011
tC9Y (Table 1-4)	206	202	2.3×10^{-2}	200 mM MgCl ₂ , 17°C, 7Days	Attwater, Wochner, & Holliger, 2013
tC9-4M (Table 1-5)	195	177	2.2×10^{-2}	10 mM MgCl ₂ + 6 μM K ₁₀ , 17°C, 21Days K ₁₀ : Lysine decapeptide	S Tagami, et al., April 2017 Nature Chem.

200塩基のリボザイムは200塩基のRNAを複製できる

各種生命の起源説

- ・ ベシクルを重視する説
 - コアセルベート(オパーリン)
 - プロティノイドミクロスフェア(Harada, Fox)
 - マリグラニュール(柳川、江上)
 - 高分子態構造体(小林)
 - 隕石抽出脂肪酸(Deamer)
- ・ 反応を重視する説(メタボリズム)
 - 鉄硫黄(Weichtershauser、他)
 - GADV仮説(池原)
- ・ 遺伝情報を重視する説
 - RNAワールド

鉄硫黄ワールド説

- ・ 鉄硫黄のベシクルができて増える
 - ・ 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は？

各種生命の起源説

- ・ ベシクルを重視する説
 - コアセルベート(オパーリン)
 - プロティノイドミクロスフェア(Harada, Fox)
 - マリグラニュール(柳川、江上)
 - 高分子態構造体(小林)
 - 隕石抽出脂肪酸(Deamer)
- ・ 反応を重視する説(メタボリズム)
 - 鉄硫黄(Weichtershauser、他)
 - GADV仮説(池原)
- ・ 遺伝情報を重視する説
 - RNAワールド

原理主義 RNAワールド

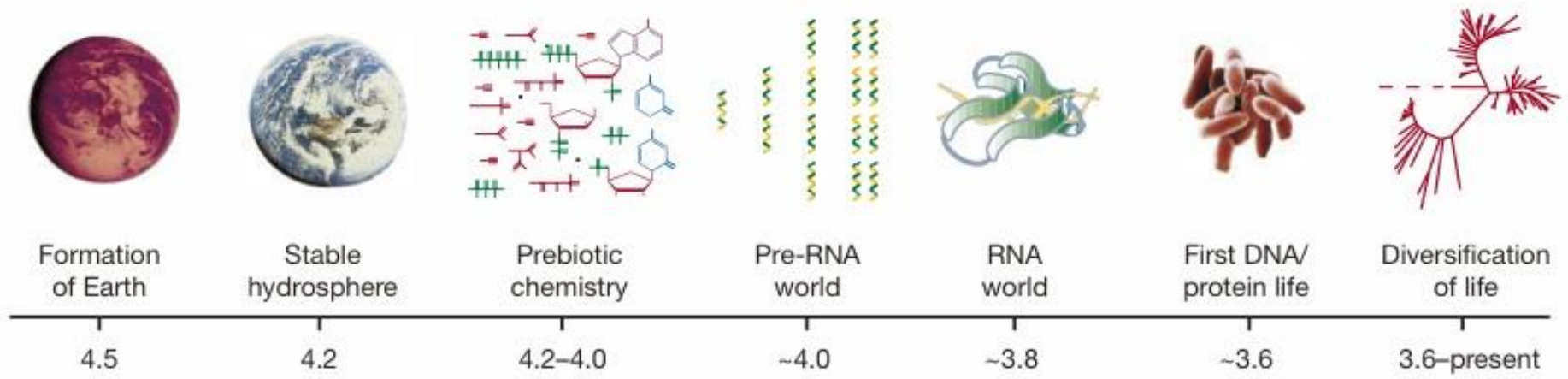
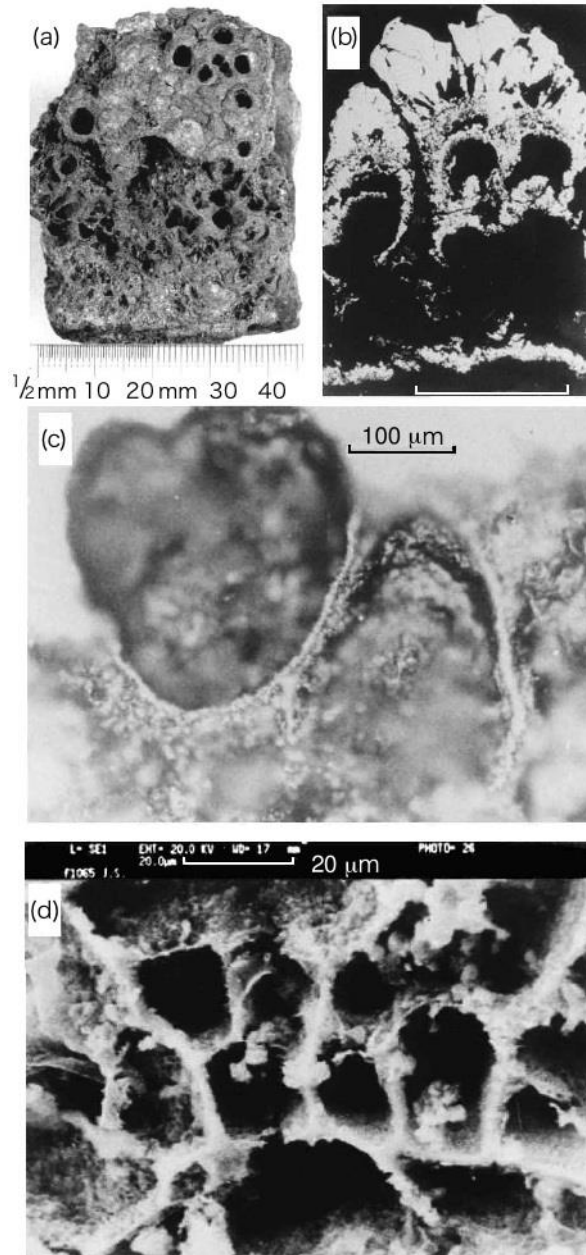


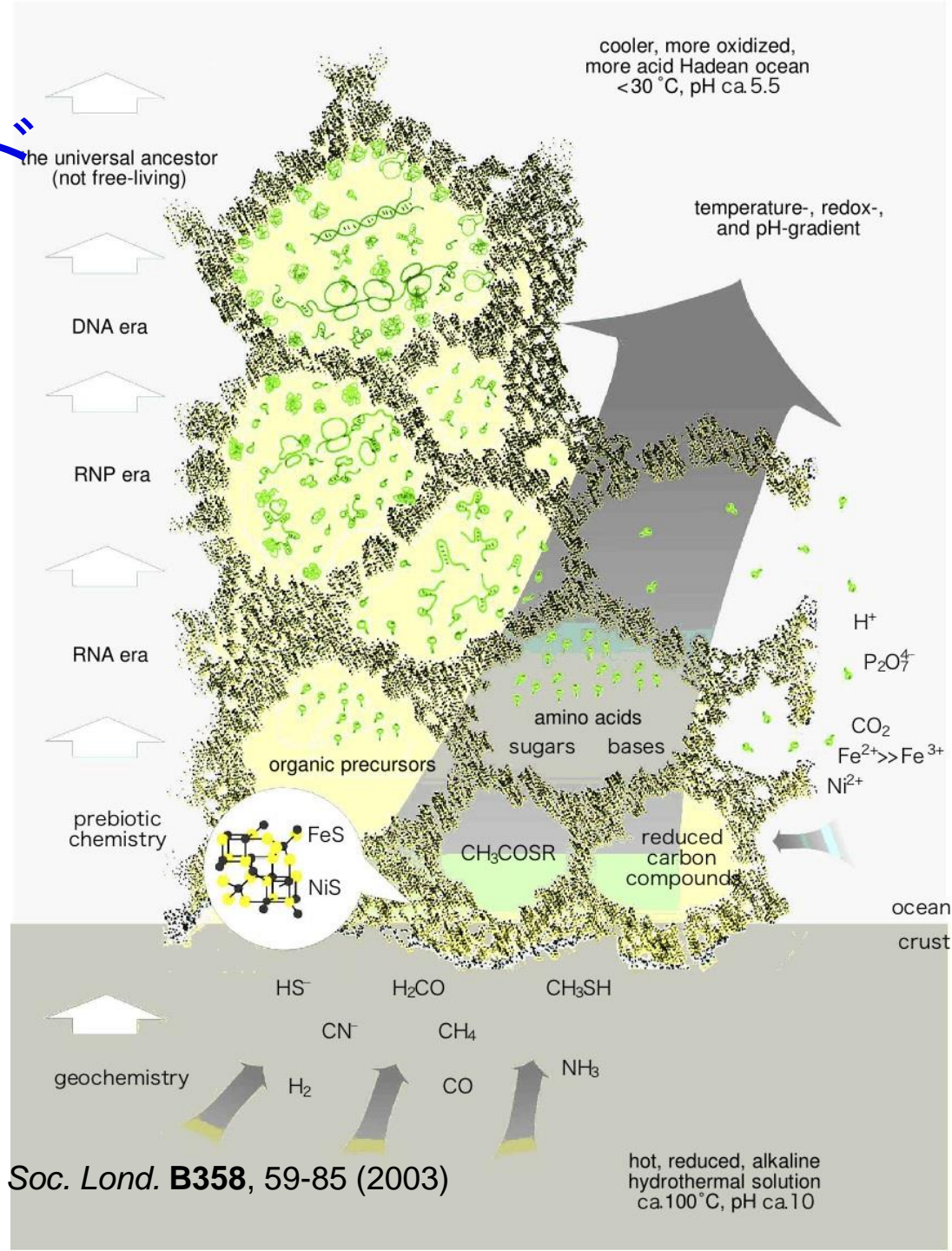
Figure 1 Timeline of events pertaining to the early history of life on Earth, with approximate dates in billions of years ago. Source: Joyce, G. F., *Nature* 418, 214-221 (2002)

Joyce, G. F., *Nature* **418**, 214-221 (2002)

鉄硫黄 RNAワールド

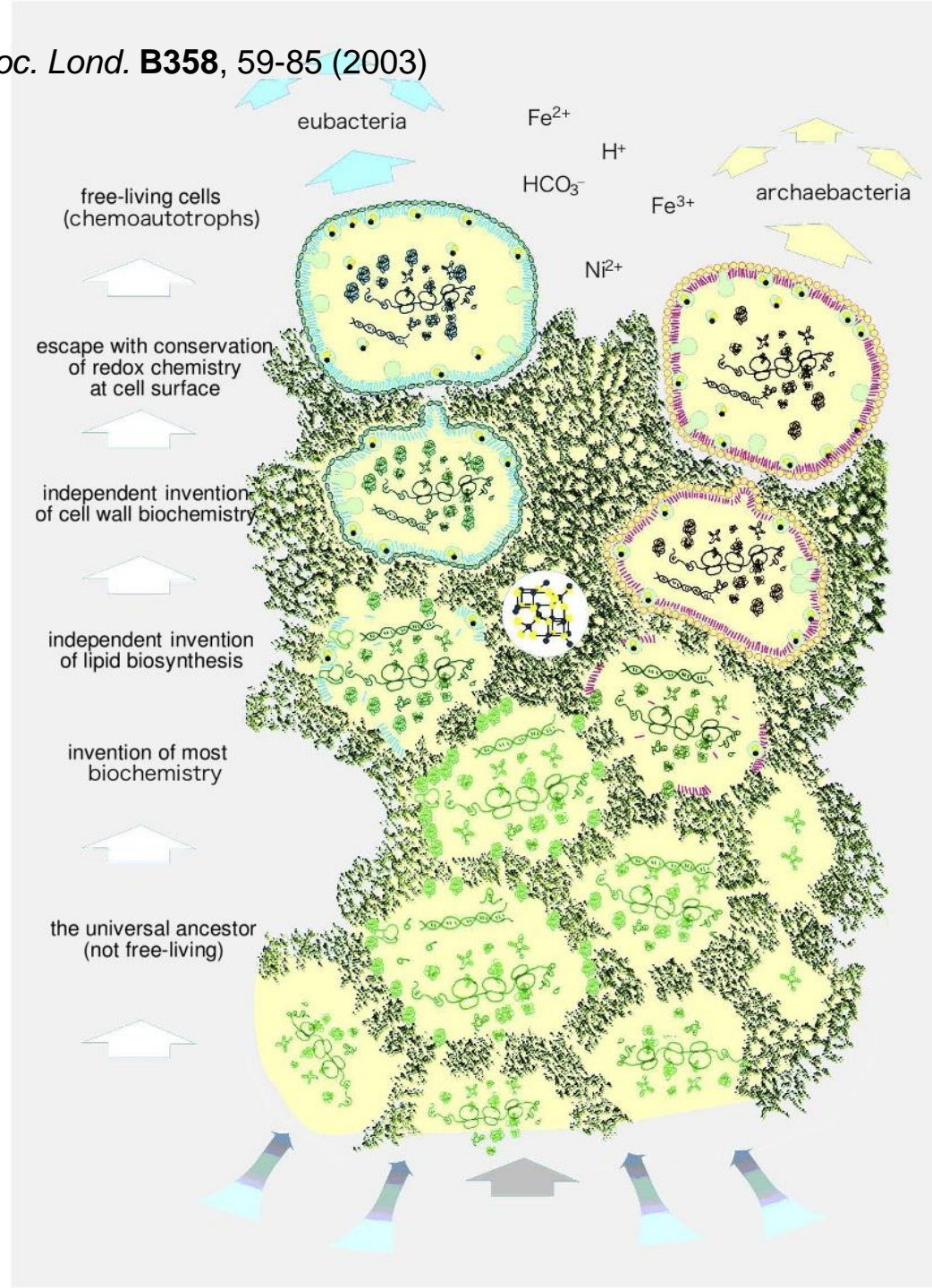


鉄硫黄 RNAワールド



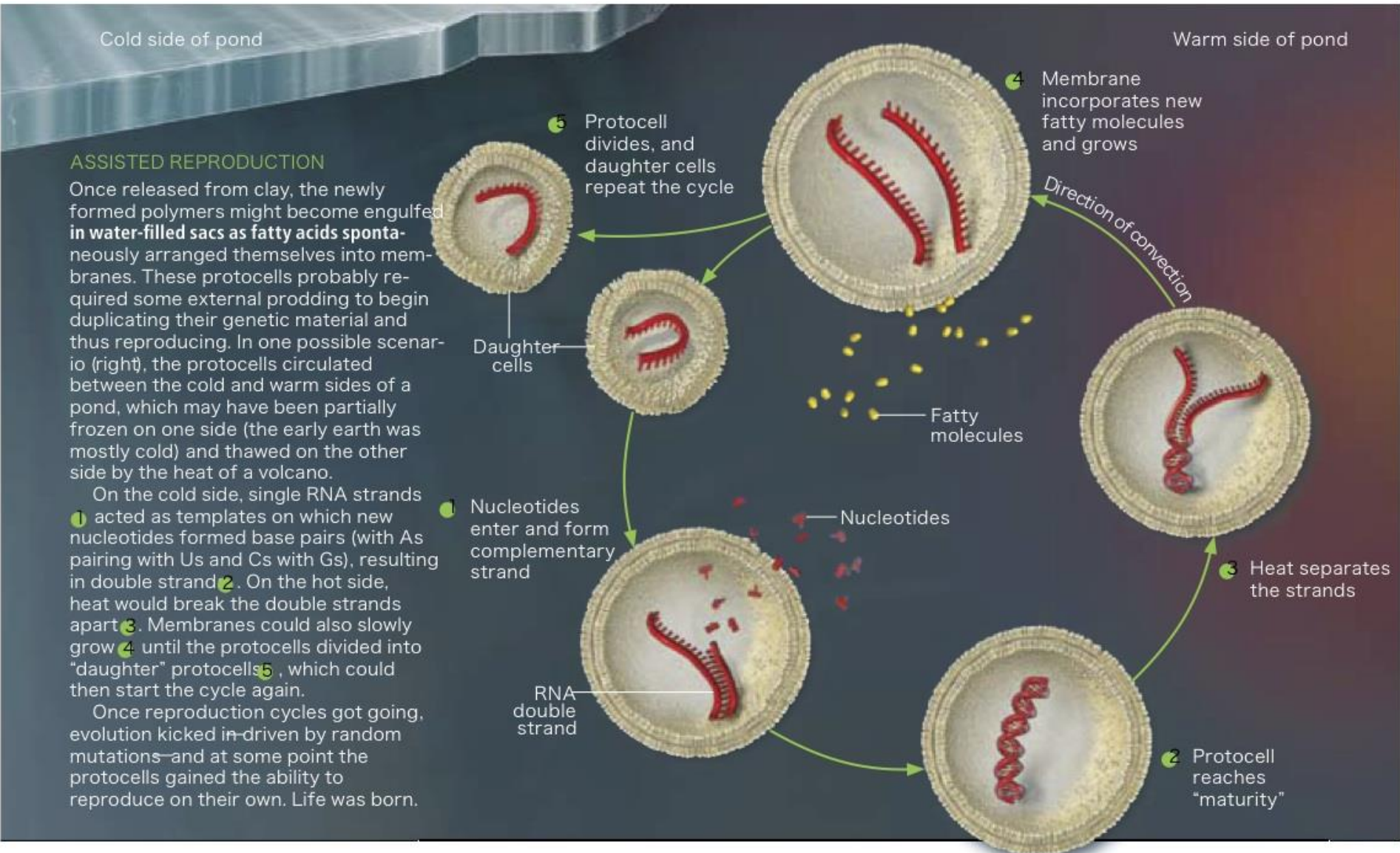
Martin, W. and Russell, M. J., *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* **B358**, 59-85 (2003)

鉄硫黄 RNAワールド



リポソーム RNAワールド

Ricardo, A. and J. W. Szostak, Scientific American 2009, Sep. 54



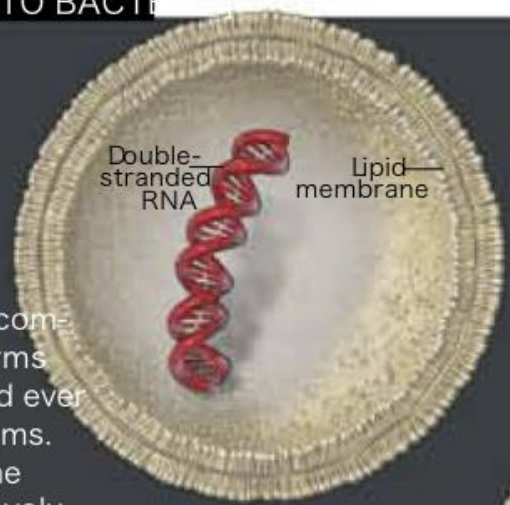
リポソーム RNAワールド

Ricardo, A. and J. W. Szostak, Scientific American 2009, Sep. 54

[FROM RNA WORLD TO BACTERIA]

Journey to the Modern Cell

After life got started, competition among life-forms fueled the drive toward ever more complex organisms. We may never know the exact details of early evolution, but here is a plausible sequence of some of the major events that led from the first protocell to DNA-based cells such as bacteria.

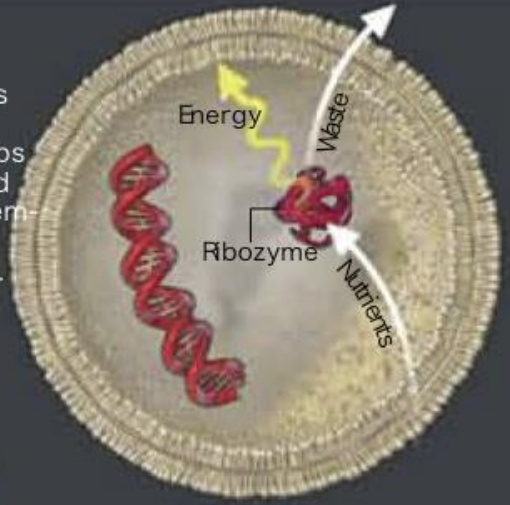
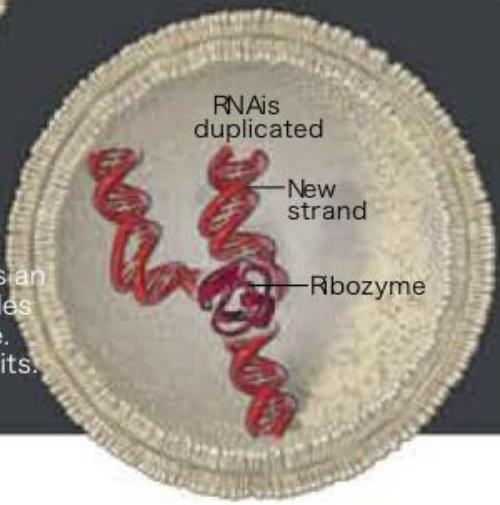


1 EVOLUTION STARTS

The first protocell is just a sac of water and RNA and requires an external stimulus (such as cycles of heat and cold) to reproduce. But it will soon acquire new traits.

2 RNA CATALYZES

Ribozymes folded RNA molecules analogous to protein-based enzymes arise and take on such jobs as speeding up reproduction and strengthening the protocell's membrane. Consequently, protocells begin to reproduce on their own.

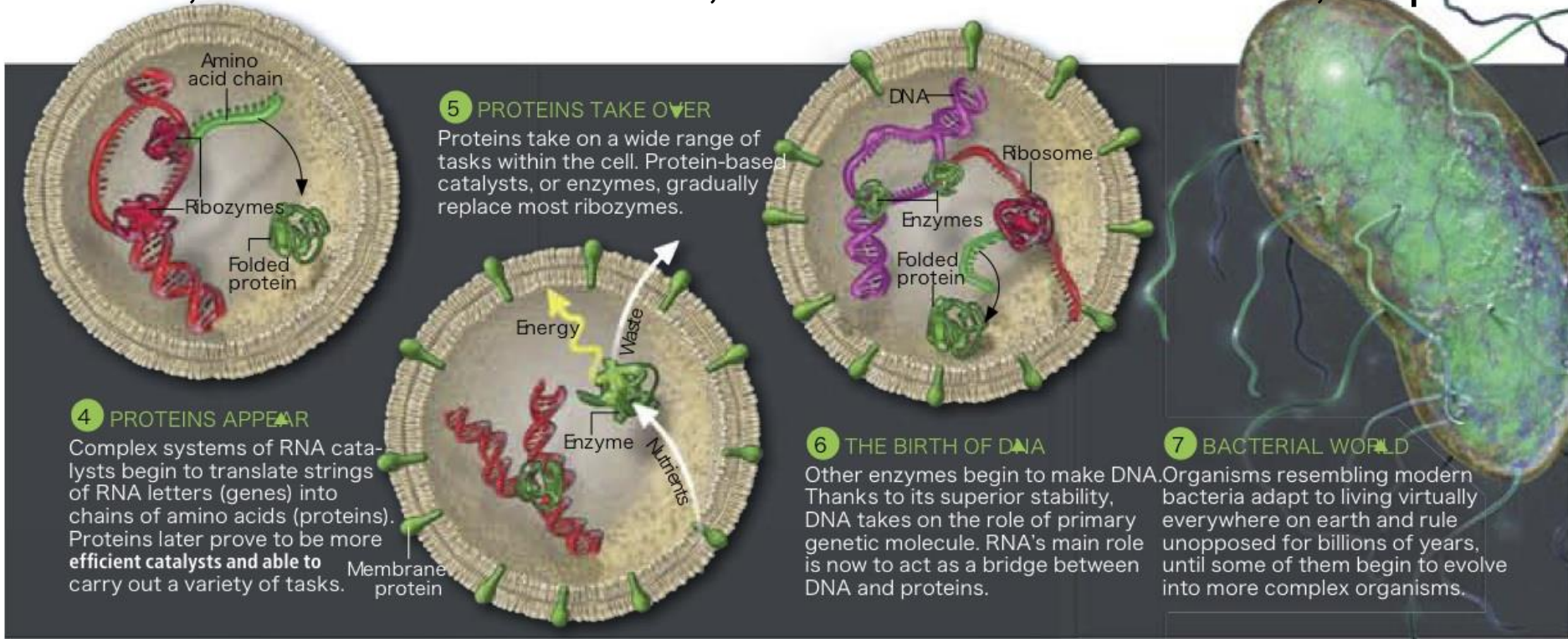


3 METABOLISM BEGINS

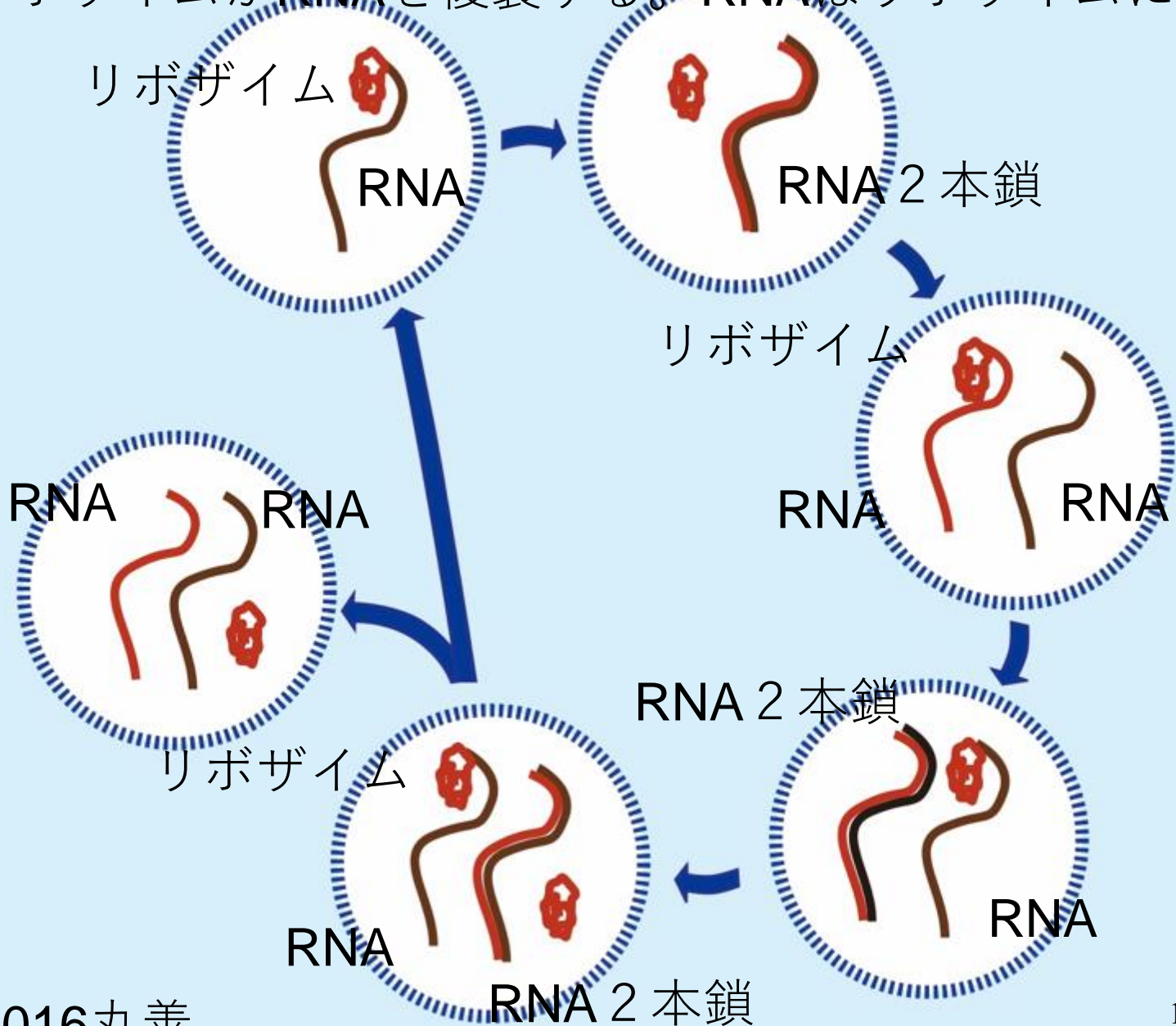
Other ribozymes catalyze metabolism—chains of chemical reactions that enable protocells to tap into nutrients from the environment.

リポソーム RNAワールド

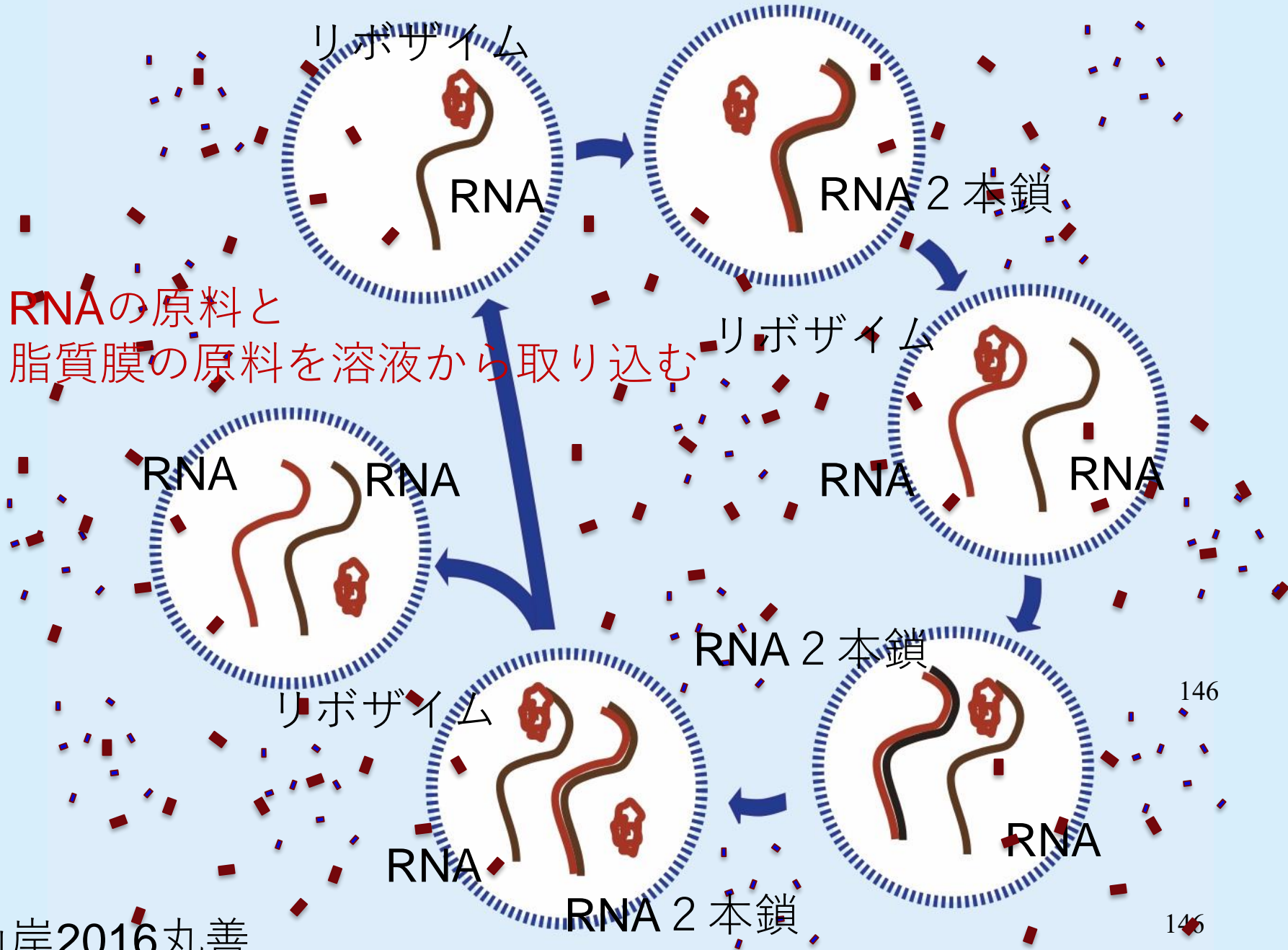
Ricardo, A. and J. W. Szostak, Scientific American 2009, Sep. 54



複製リボザイムがRNAを複製する。RNAはリボザイムになる



RNAの原料と
脂質膜の原料を溶液から取り込む



生命の誕生

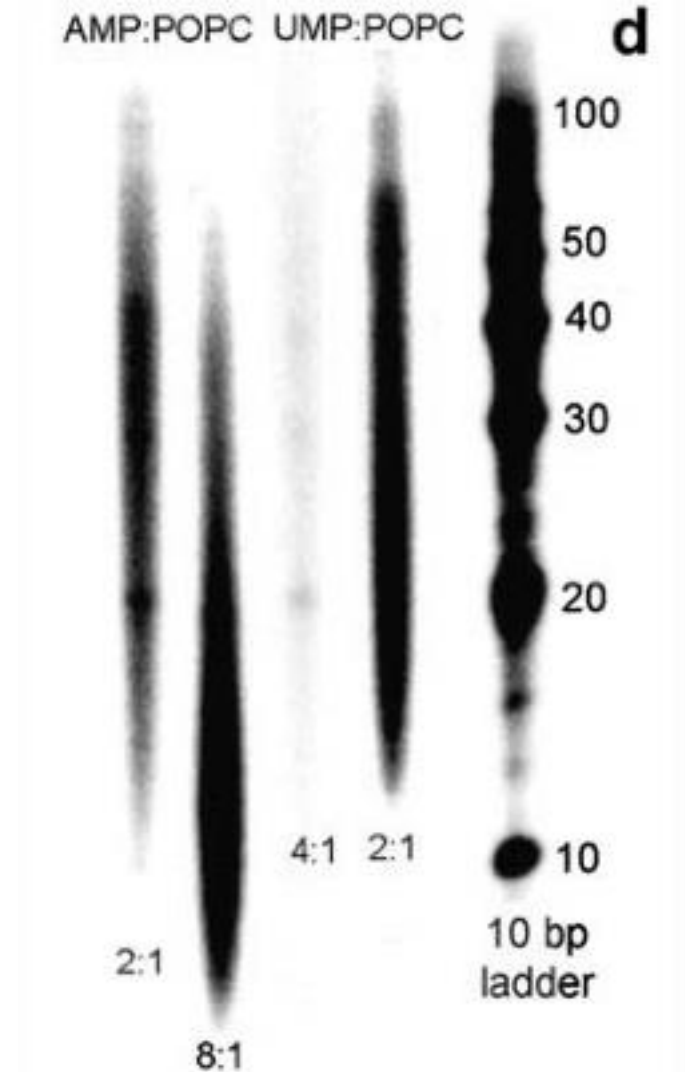
- 脂質膜中で、リボザイムがRNAを複製する。

生命誕生の場：諸説

- ・ 重要な点：濃縮、反応の推進
- ・ 暖かい海
- ・ 粘土
- ・ 熱水噴出孔：鉄硫黄
- ・ 地下
- ・ 火星
- ・ 個人的には五色沼
- ・ 結論：陸上温泉

Deamer, D. W. and Pashley, R. M., *Orig. Life Evol. Biosph.* **19**, 21-33 (1989)

核酸単量体 (AMP) をリポソームと一緒に、乾燥と湿潤を繰り返すと RNA の重合が起きた



Mulkiđjanian, A. Y . Et al., *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, (2012)

Table 1 .Approximate concentrations of key ions in various environments

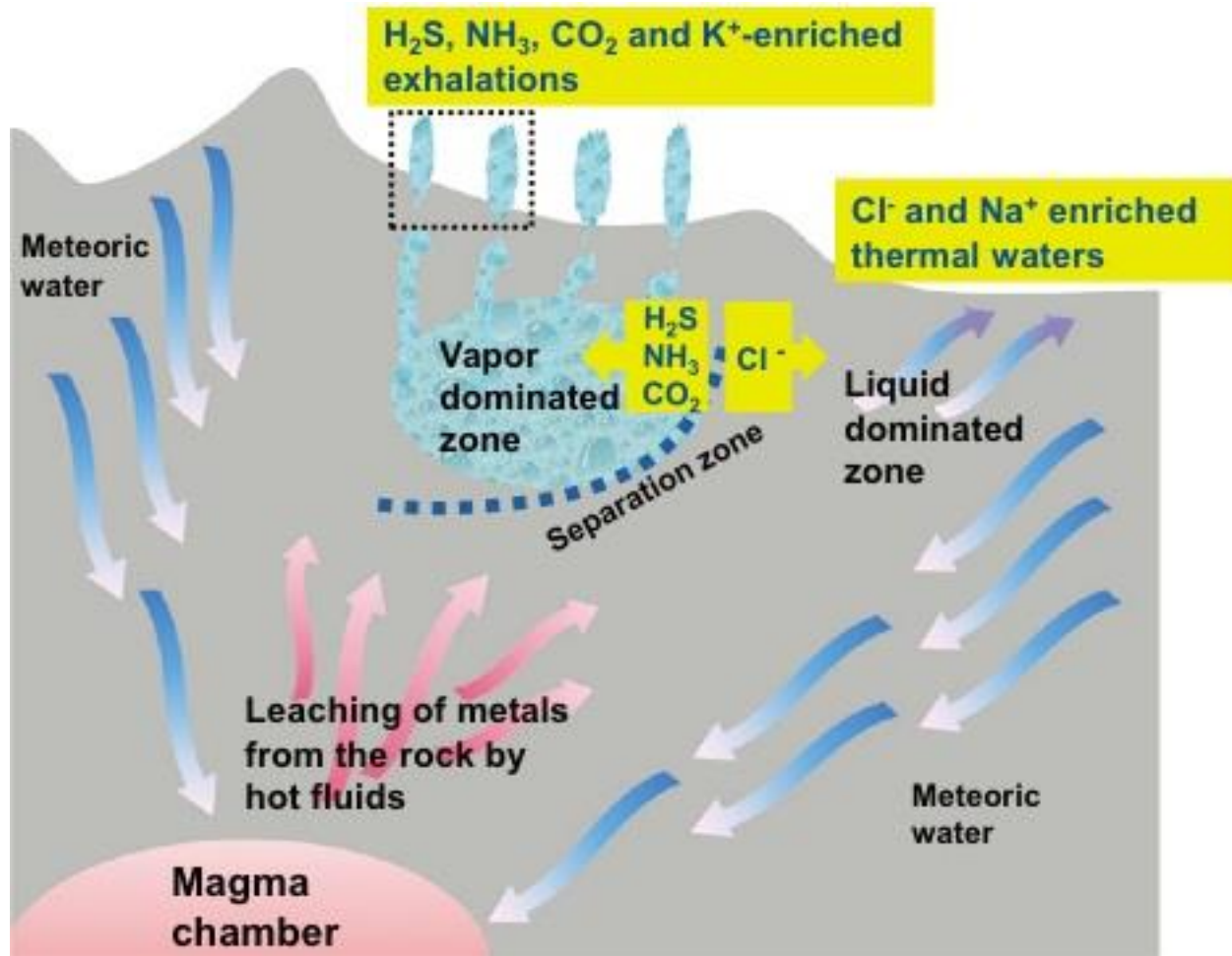
Ion, mol/L	Modern seawater	Anoxic water of primordial ocean	Cell cytoplasm
Na	0.4	>0.4	0.01
K ⁺	0.01	~0.01	0.1
Ca ²⁺	0.01	~0.01	0.001
Mg ²⁺	0.05	~0.01	0.01
Fe	10 ⁻⁶ (mostly Fe ³⁺)	10 ⁻³	10 ⁻³ to 10 ⁻⁴
Mn ²⁺	10 ⁻³	10 ⁻⁶ to 10 ⁻⁸	10 ⁻⁶
Zn ²⁺	10 ⁻⁹	<10 ⁻¹²	10 ⁻³ to 10 ⁻⁴
Cu	10 ⁻⁵ (Cu ²⁺)	<10 ⁻²⁰ (Cu ⁺)	10 ⁻⁵
Cl	0.5	>0.1	0.1
PO ₄ ³⁻	10 ⁻⁶ to 10 ⁻⁴	<10 ⁻⁵	~10 ⁻² (mostly bound)

The intracellular concentration is defined here as the total content of a particular element divided by the cell volume and should be discriminated from the much lower free ion concentration, which does not account for the ions that are bound to biological molecules. The reconstructed chemical composition of the anoxic ocean includes data from refs. 14, 15, 58, 141. The data on intracellular concentrations of different chemical elements are based on refs. 14, 142-45.

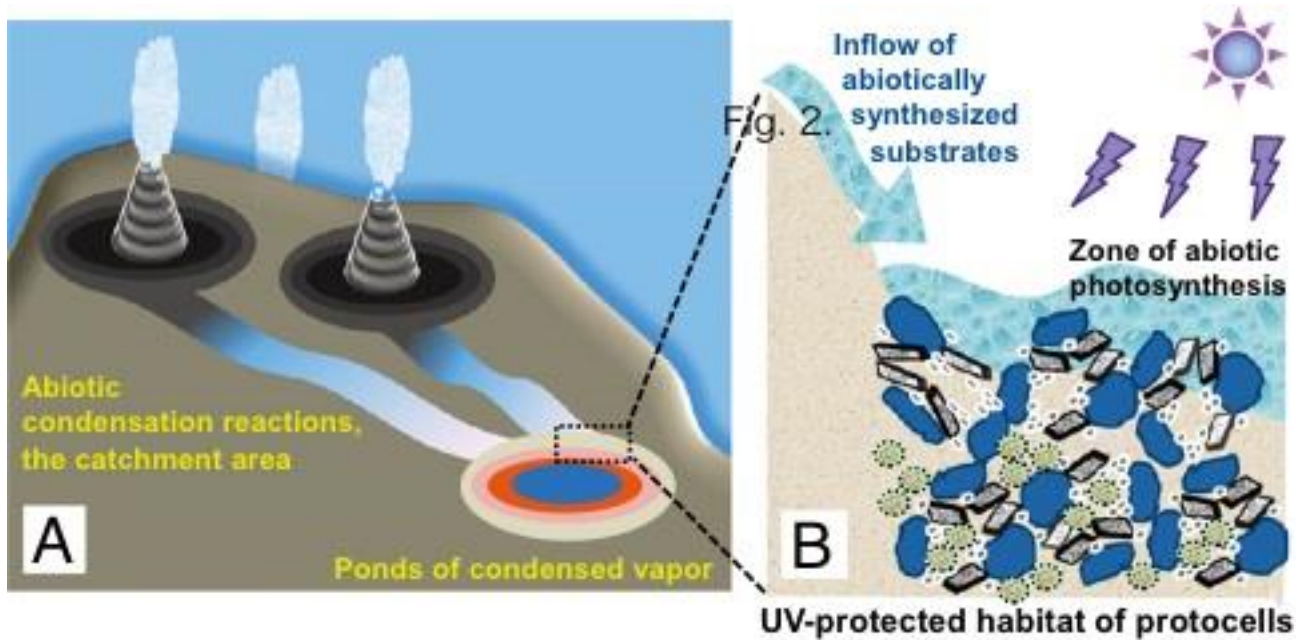
Mulkidjanian et al. Proc.Natl.Acad.Scie. Early ed.

- ・ 細胞内 K^+/Na^+ 高い
- ・ Chemistry conservation principle
- ・ 海水は K^+/Na^+ 低い、リン酸、Mn, Zn薄い
- ・ 陸上地熱地帯、蒸気相
 - K^+/Na^+ 高い
 - H_2S , CO_2 ,
- ・ 池に ZnS が蓄積、光化学反応、UVシールド

Mulkiđjanian, A. Y . Et al., *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, (2012)



Mulkidjanian, A. Y. Et al., *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, (2012)

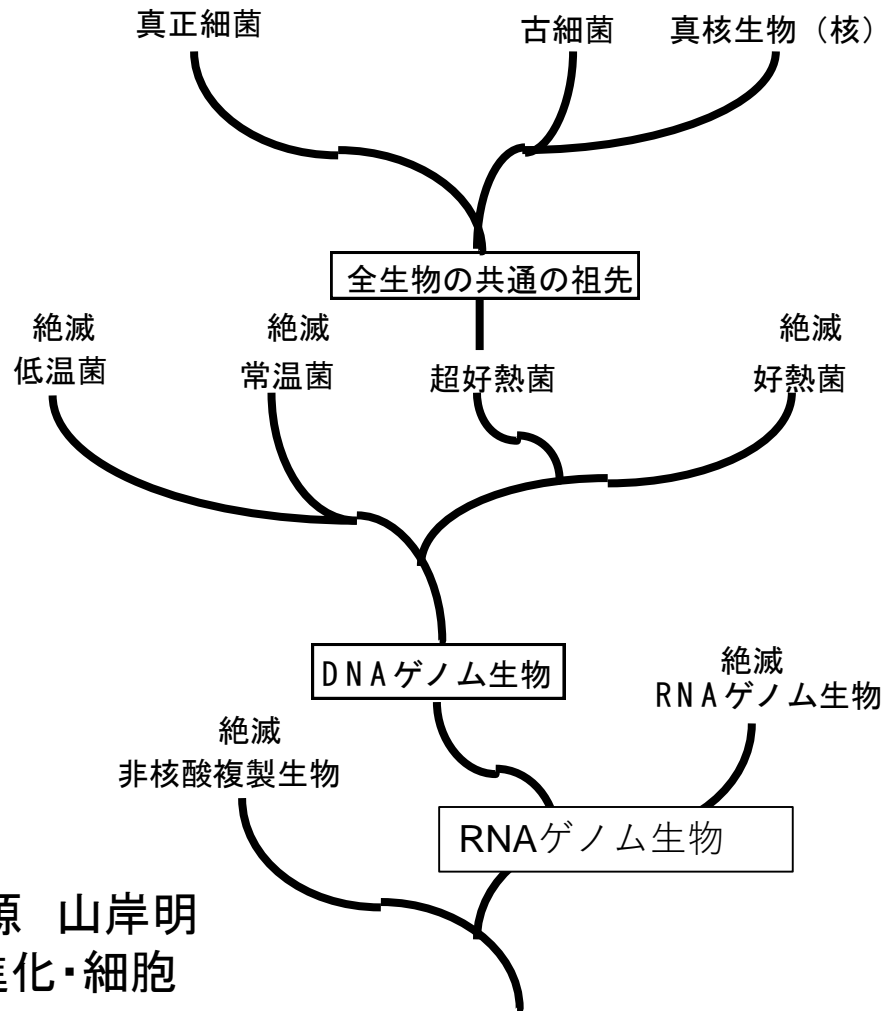


RNAワールド

- ・ 陸上でRNA(ヌクレオチド)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は問題。

- ・ 生命誕生の場はおそらく陸上
- ・ RNA生物はその後進化してDNA生物となった。

RNAゲノム生物から
タンパク質、DNAを
作るようになり、
DNAゲノム生物へ
様々な温度に適応後
全生物の共通の祖先
コモノートが残った。



第一章 地球上における細胞の起源 山岸明彦 シリーズ進化学 第3巻「化学進化・細胞進化」岩波書店 (2004)より改変

3. 完全祖先型酵素

祖先酵素完全合成

S. Akanuma, Y.Nakajima, S.Yokobori, M. Kimura, N. Nemoto, T. Mase, K.Miyazono, M. Tanokura, A. Yamagishi (2013) Proc. Natl. Acad. Scie. USA. 110, 11067-11072

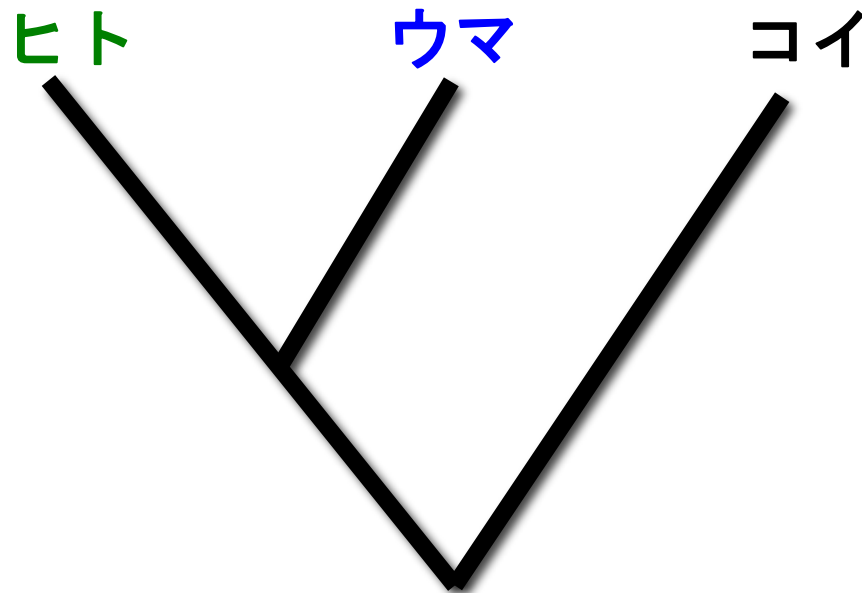
1. 系統樹解析

生命の歴史を遺伝子から調べる

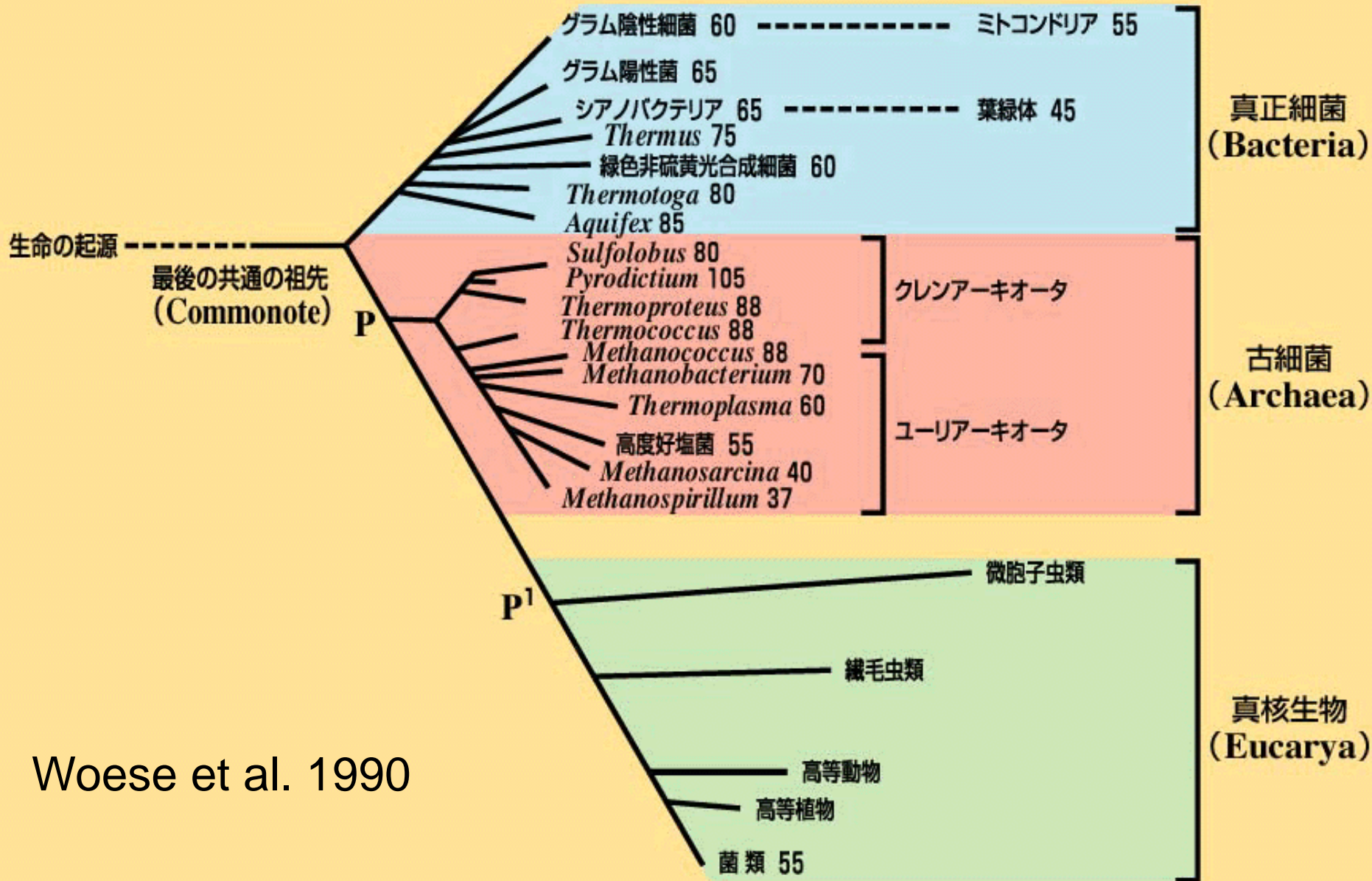
ヘモグロビン遺伝子のアミノ酸配列

ヒト	VLS P ADKTNVKA A W G KV G A H AGEYGA E AL E RM F L A FP T TKTY F PH F
ウマ	VLS A ADKTNVKA A W S KV G G H AGEYGA E AL E RM F L G FP T TKTY F PH F
コイ	S LS D K S KA A V K I A W A K I S P K A D D I G A E AL G R M L T V Y P Q T K T Y F A H W

遺伝子のアミノ酸配列をしらべることから、系統樹を作成できる。

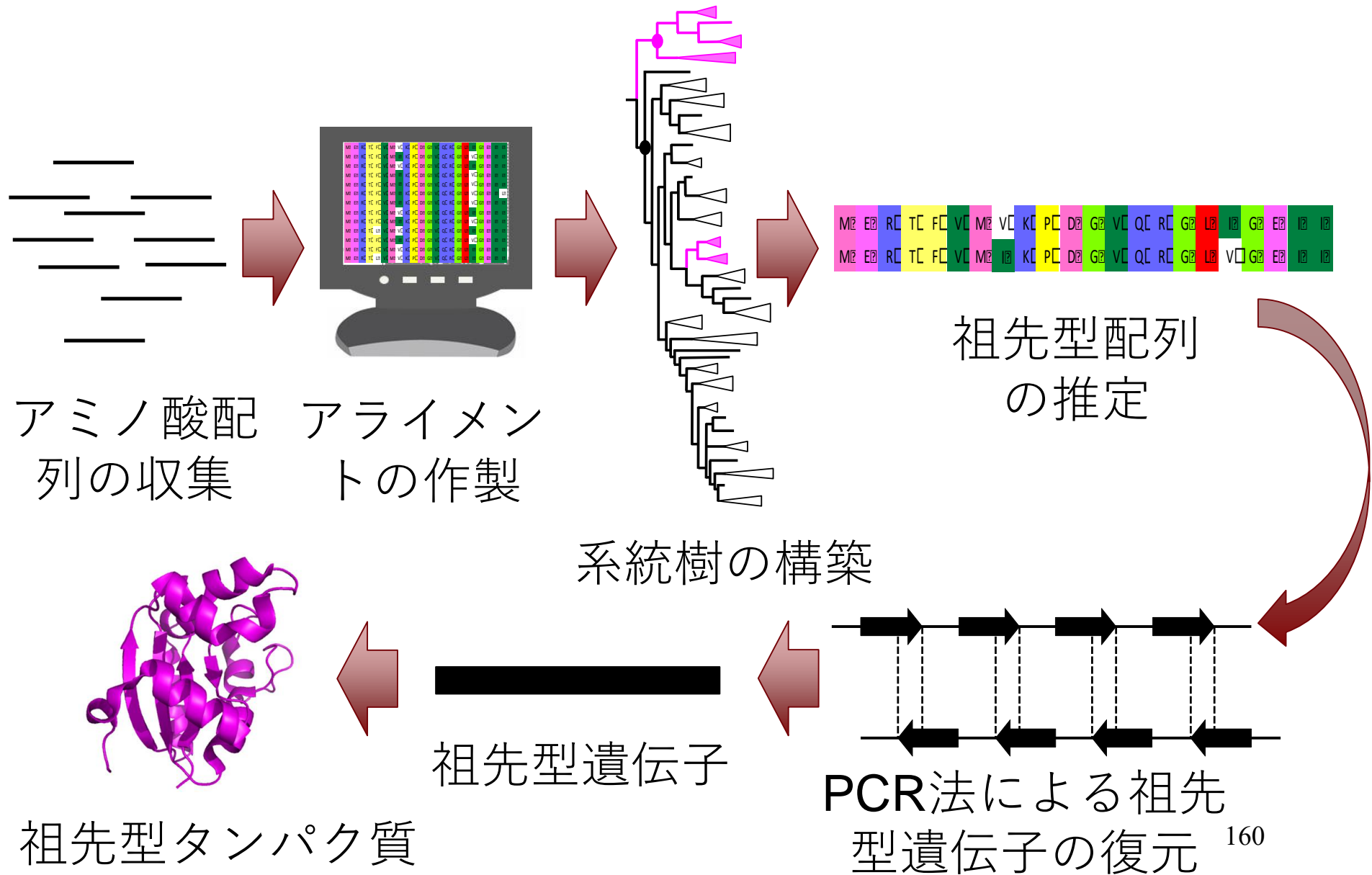


全生物の進化系統樹



Woese et al. 1990

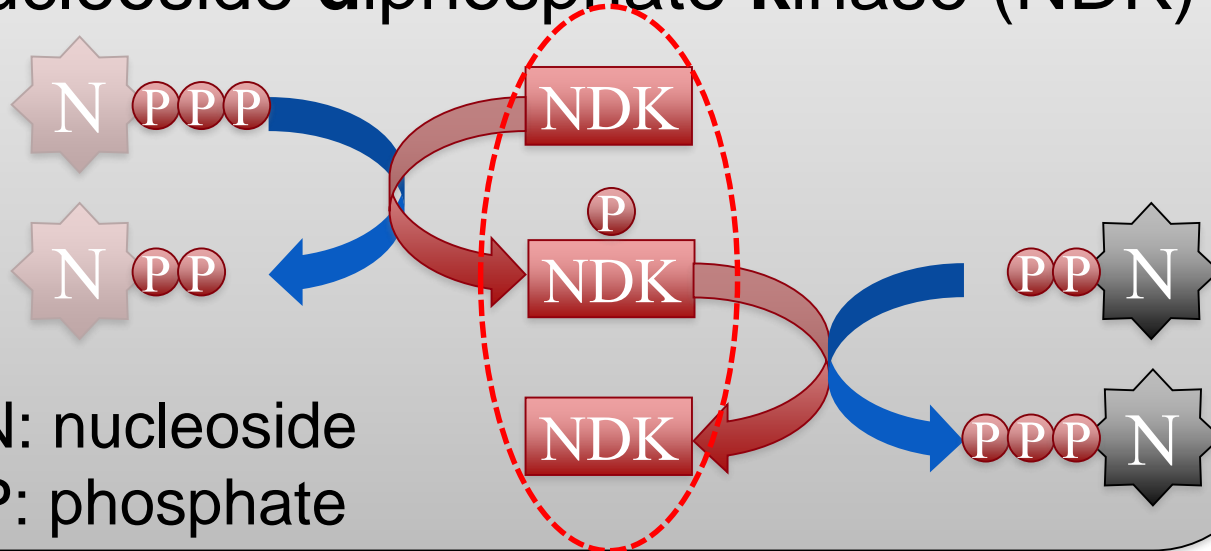
祖先タンパク質の復元法



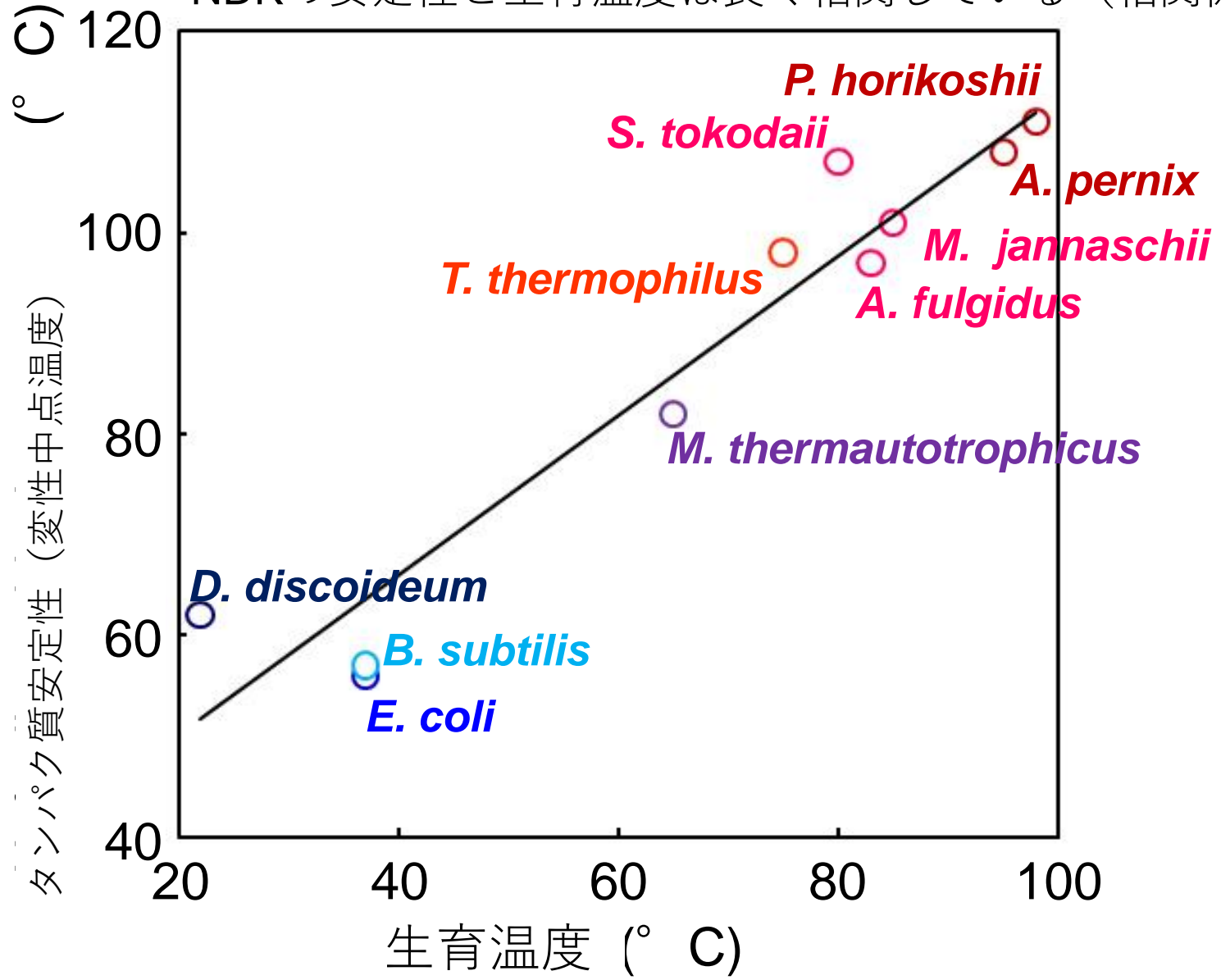
NDK (核酸合成に関与)

Material

Nucleoside diphosphate kinase (NDK)

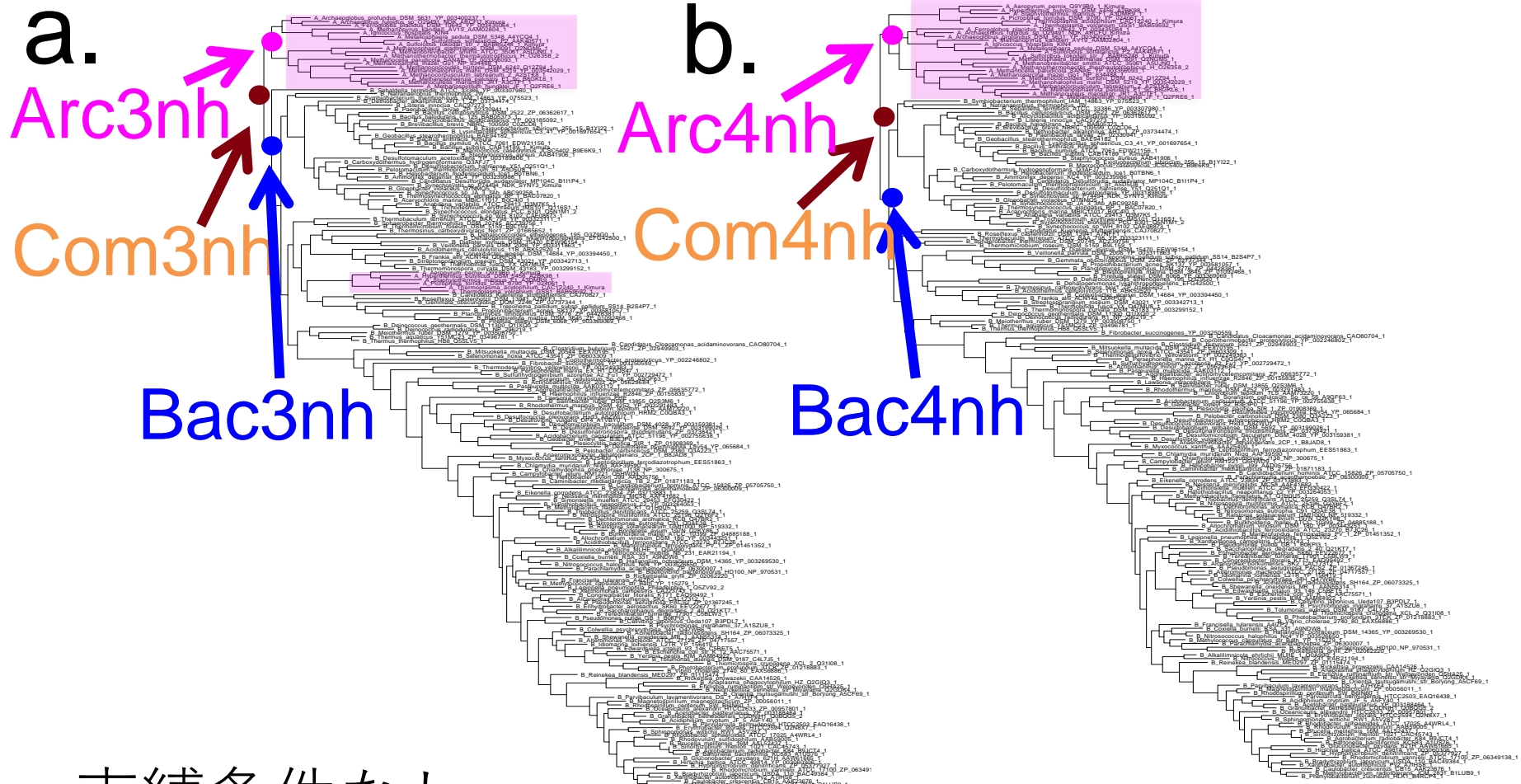


NDKの安定性と生育温度は良く相関している (相関係数0.96)



Akanuma *et al.* PNAS (2013)

アミノ酸組成変動モデルでの推定



a: 束縛条件なし

b: 古細菌と真正細菌が独立した系統群になるよう束縛

Arc3nh, Arc4nh: 古細菌共通祖先、Bac3nh, Bac4nh: 真正細菌共通祖先、Com3nh, Com4nh: コモノート

推定した配列 (DNA)を合成して大腸菌の なかでタンパク質発現する

```

****: :****.*:*.*:***:.*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*:*
Afu MERTFVMVKPDGVRGLVGEVIGRLERKGLKIVAMKMLWIAREMAENHYAEHREKPPFSALVDYIITSGPVVAMVVEGKNAIKVVRTLPGA 90
Arc1 MERTFVMIKPDGVRGLIGEIIISRFERKGLKIVAMKMMRISREMAEKHYAEHREKPPFSALVDYIITSGPVVAMVVEGKNAVEVVRKMVGA 90
Arc2 MERTFVMIKPDGVRGLIGEIIISRFERKGLKIVAMKMMWIDREMAEKHYAEHREKPPFSALVDYIITSGPVVAMVVEGKNAVKVVRKMIGA 90
Arc3 MERTFVMIKPDGVRGLVGEIISRFERKGLKIVAMKMMQISRELAEKHYAEHKGKPPFDDLVDYIITSGPVVAMVVEGKNAISVVRKMVGA 90
Arc4 MERTFVMIKPDGVRGLVGEIISRFERKGLKIVALKMMQISRELAEKHYAEHKDKPPFDDLVDYIITSGPVVAMVVEGENAIAVVRKMVGA 90
Arc5 MERTFVMIKPDGVRGLVGEIISRFERKGLKIVAMKMMQISRELAEKHYAEHREKPPFDDLVDYIITSGPVVAMVVEGENAISVVRKMVGA 90
Tth MERTFVMIKPDGVRRLVGEILARFERKGFRIAAALKMQISQELAERHYAEHREKPPFPGLVRFITSGPVVAMVLEGGVVAEVRKMMGA 90
Bac1 MERTFVMIKPDGVRGLIGEIIISRFERKGFKIVAMKLMRISQELAERHYAEHREKPPFSGLVDFITSGPVVAMVLEGNVVEVVRKMIGA 90
Bac2 MERTFVMIKPDGVRGLVGEIISRFERKGLKIAALKMQISQELAERHYAEHREKPPFPGLVEFITSGPVVAMVWEGPNVVAVVRKMIGA 90
Bac3 MERTFVMIKPDGVRGLVGEIISRFERKGLKIVAMKMMQISRELAEKHYAEHKGKPPFDDLVDYIITSGPVVAMVVEGENAISVVRKMVGA 90
Bac4 MERTFVMIKPDGVRGLVGEIISRFERKGLKIVALKMMQISRELAEKHYAEHKDKPPFDDLVDYIITSGPVVAMVLEGENAIAVVRKMMGA 90
Bac5 MERTFVMIKPDGVRGLVGEIISRFERKGLKIVAMKMMQISRELAEKHYAEHKEKPPFDDLVDYIITSGPVVAMVLEGENAISVVRKMMGA 90
ConsNDK MERTLSIIKPDVQRNLIGEIIISRFEKGLKIVALKMMQLSREQAEGFYAEHKERPPFGELVEFMTSGPVVVMVLEGENAIAKNRELMGA 90

```

```

*:* .* *****. :...*:.* : :.* ***:*** :*::
Afu TNPAEAPGTIRGDFGLDVGRNVVHASDSPQSAEREISLFFSDDEIVNWEKADEDWIYEER 151
Arc1 TNPKEAAPGTIRGDFGLDVGRNVIHASDSPESAEREISLFFKDEELVEW 139
Arc2 TNPKEAAPGTIRGDFGLDVGRNVIHASDSPESAEREISLFFKPEELVEW 139
Arc3 TNPAEAPGTIRGDFALDIGRNVVIHASDSPESAEREISLFFKDEEIVDY 139
Arc4 TNPAKAAPGTIRGDFALDIGRNVVHASDSPESAEREISLFFNEDEIVNY 139
Arc5 TNPAEAPGTIRGDFALSIGRNVVHASDSPESAEREISLFFSDDEIVDY 139
Tth THPKDALPGTIRGDFATTIDENVIHGSATLEDAQREIALFFRPEELL 137
Bac1 TNPKEAAPGTIRGDFGMSVGNVIHGSDSLESAEREISLFFKDEELVEW 139
Bac2 TNPKDALPGTIRGDFGLTVGRNVIHGSDSLESAEREISLFFKPEELVEW 139
Bac3 TNPAEAPGTIRGDFALDIGRNVVIHASDSPESAEREISLFFKDEEIVDY 139
Bac4 TNPAKAAPGTIRGDFALDIGRNVVHGSDSPESAEREISLFFREDELVNY 139
Bac5 TNPAEAPGTIRGDFALSIGRNVVHGSDSPESAEREISLFFSPDEIVDY 139
ConsNDK TNPAEAPGTIRGDFALSIGENAVHGSDSPESAAREIALFFSEEEIVGR 139

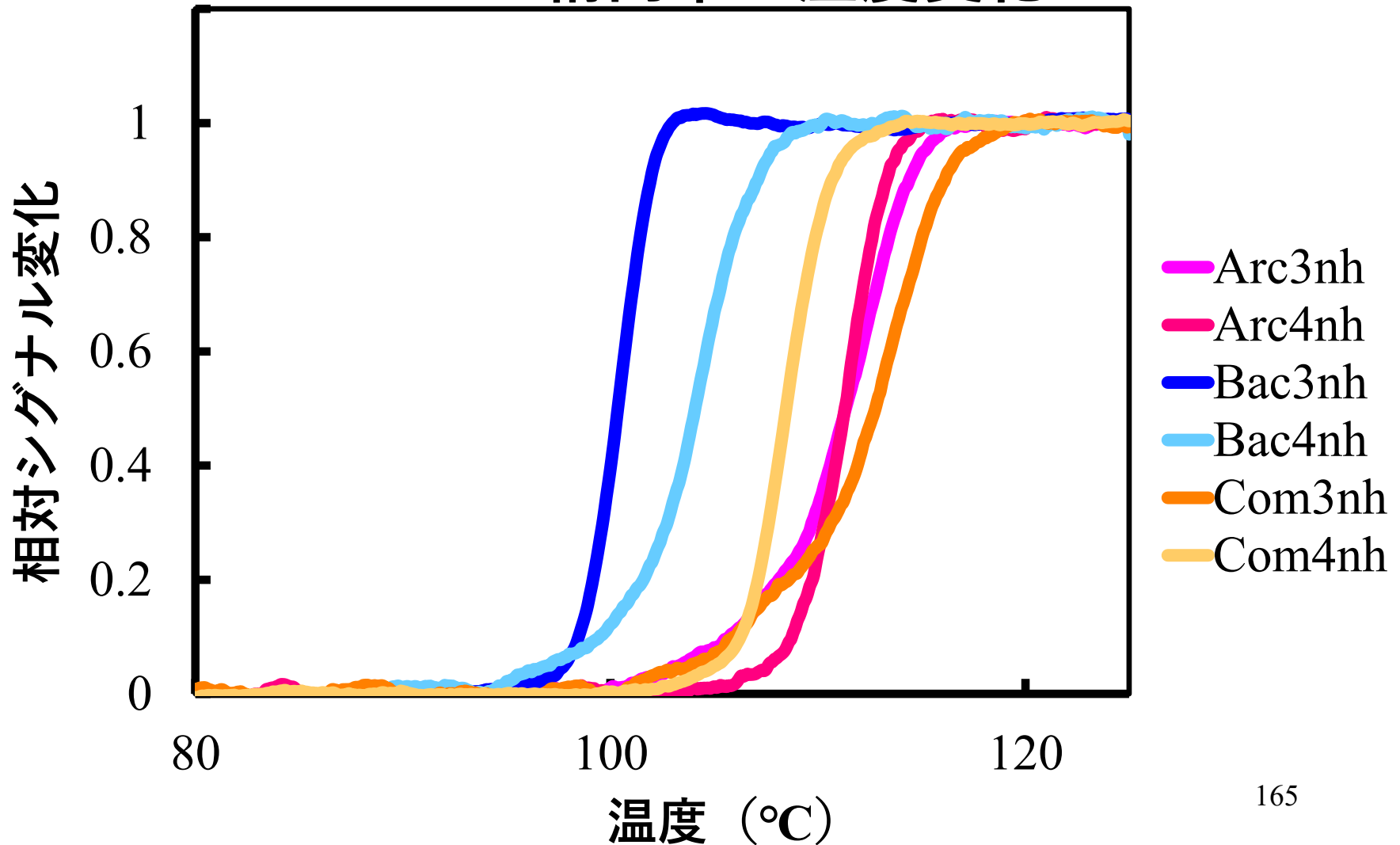
```

Akanuma et al. PNAS (2013)

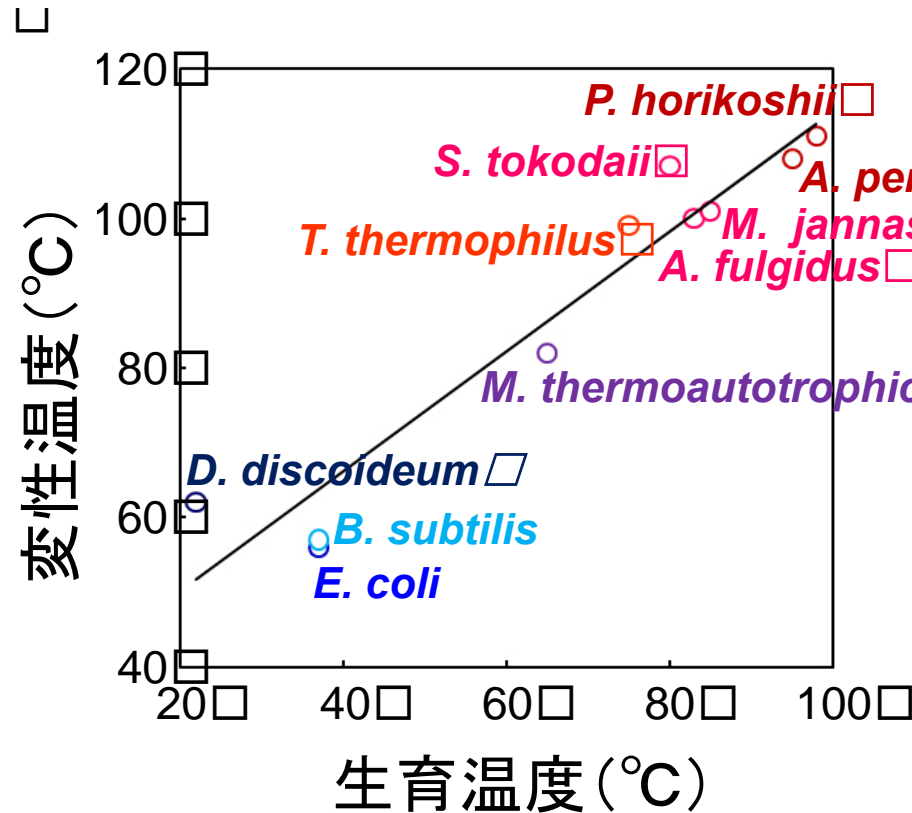
熱変性解析

Akanuma *et al.* PNAS (2013)

222nmの楕円率の温度変化



タンパク質が壊れる温度(変性温度) から生育温度を推定

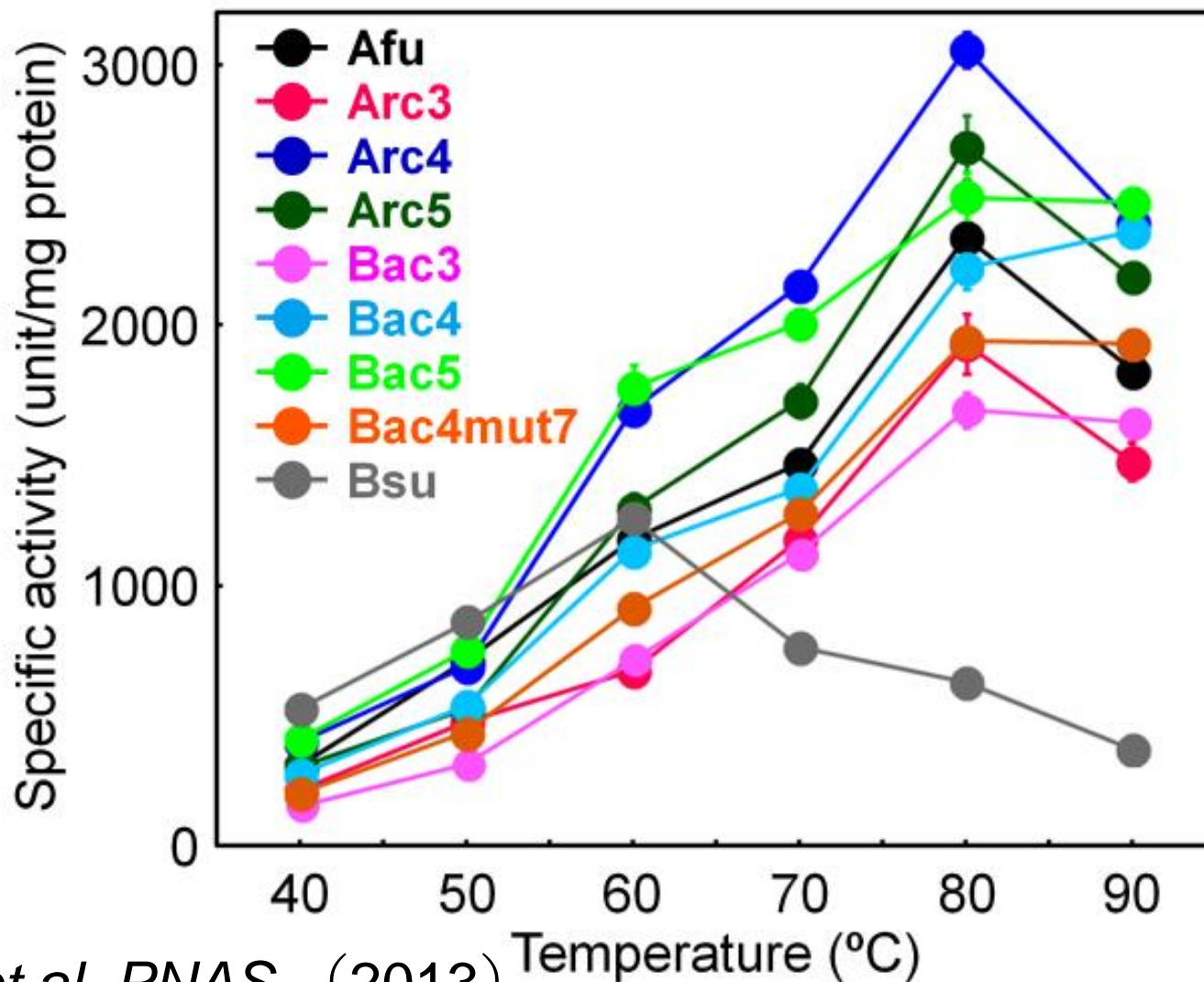


	变性温度 (°C)	生育温度(°C)
Arc3nh	111	96
Arc4nh	111	96
Bac3nh	100	82
Bac4nh	104	87
Com3nh	113	99
Com4nh	109	94

Akanuma *et al.* PNAS (2013) Akanuma *et al.* Evolution (2016)

3. 完全祖先型酵素

高温で高い活性を保持していた



現存生物NDKの耐熱性のpH依存性

Sasamoto et al. unpublished

好酸性

中性

Tac: *T. acidophilum*, Tth: *T. thermophilus*

Sto: *S. tokodaii*, Afu: *A. furiosus*

コモノートNDKの耐熱性のpH依存性

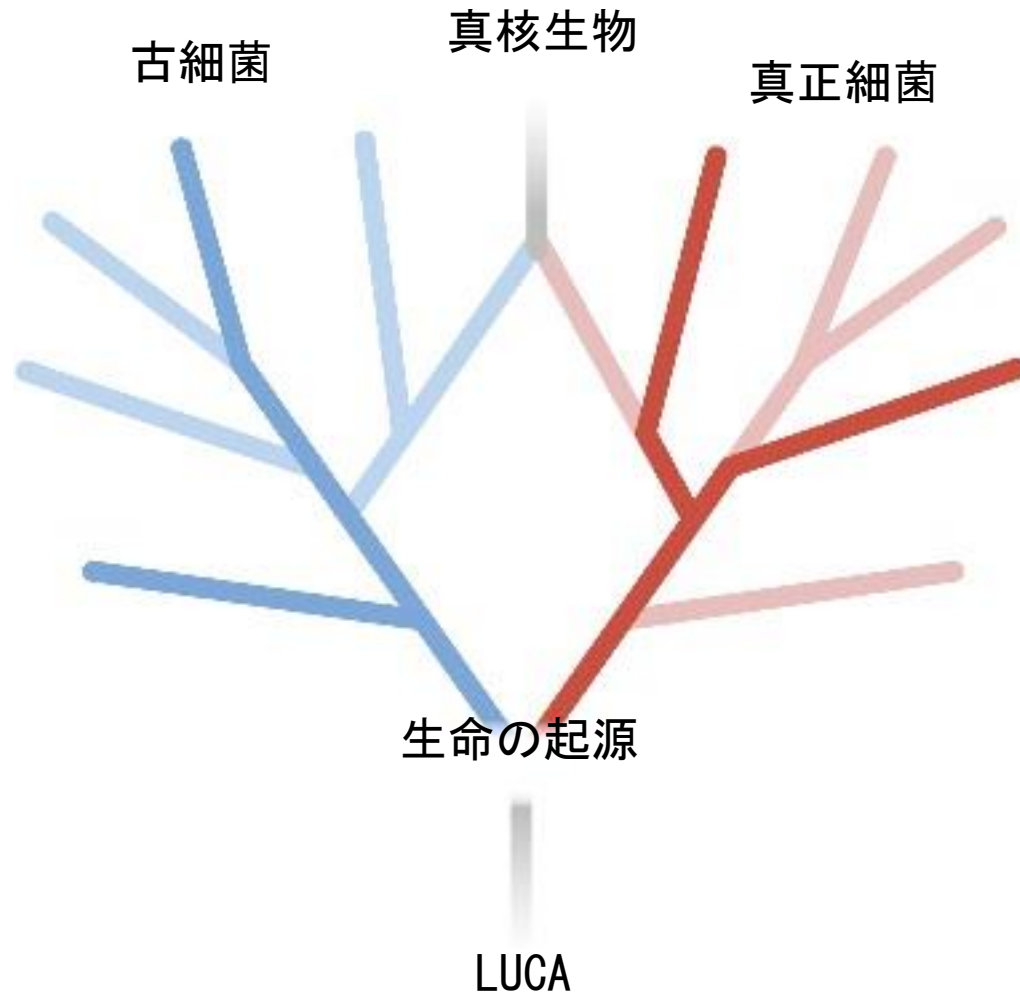
コモノートは中性で生育

結論

- 1) 古細菌共通祖先、真正細菌共通祖先、
コモノート共に高温環境で生育していた
(超)好熱菌であったという結論になる。
- 2) コモノートは中性環境に生育していた
可能性が高い
- 3)

M. C. Weiss et al. *Nature Microbiol.* **1**,
Article number: 16116, 2016)

- ・ 1, 847種の真正細菌のゲノム
- ・ 134種の古細菌のゲノム
- ・ 6, 103, 411のタンパク質遺伝子
- ・ 286, 514のタンパク質ファミリー
- ・ その中でLUCAは355タンパク質を持っていた



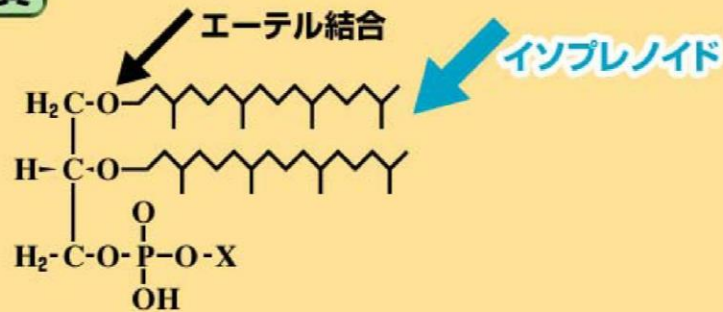
M. C. Weiss et al. *Nature Microbiol.* **1**,
Article number: 16116, 2016)

M. C. Weiss et al. *Nature Microbiol.* **1**,
Article number: 16116, 2016)

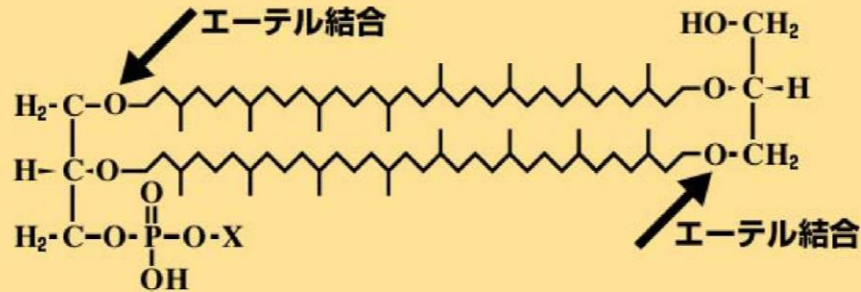
- ・ LUCAは嫌気性
 - ・ CO₂固定
 - ・ H₂に依存
 - ・ 窒素固定
 - ・ FeSクラスターを持つタンパク
- 補酵素
- ・ フラビン
 - ・ S-アデノシルメチオニン、
 - ・ コエンザイ補酵素ムA
 - ・ フェレドキシン
 - ・ モリブドプテリン
 - ・ コリン
 - ・ セレン
 - ・ 遷移金属

脂質構成分子の構造

ジエーテル脂質

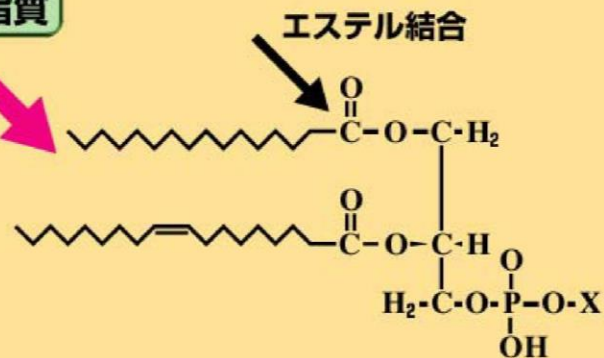


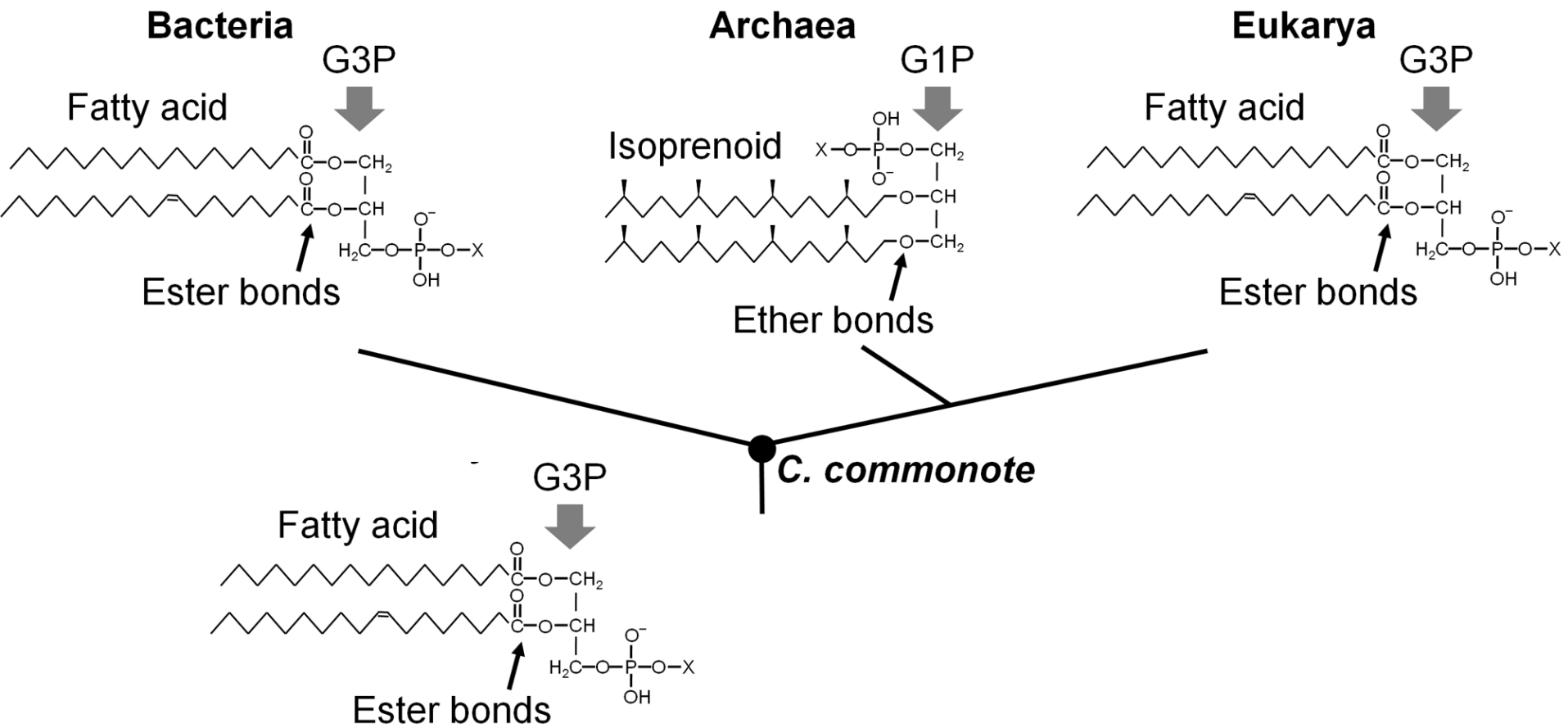
テトラエーテル脂質



エステル脂質

脂肪酸

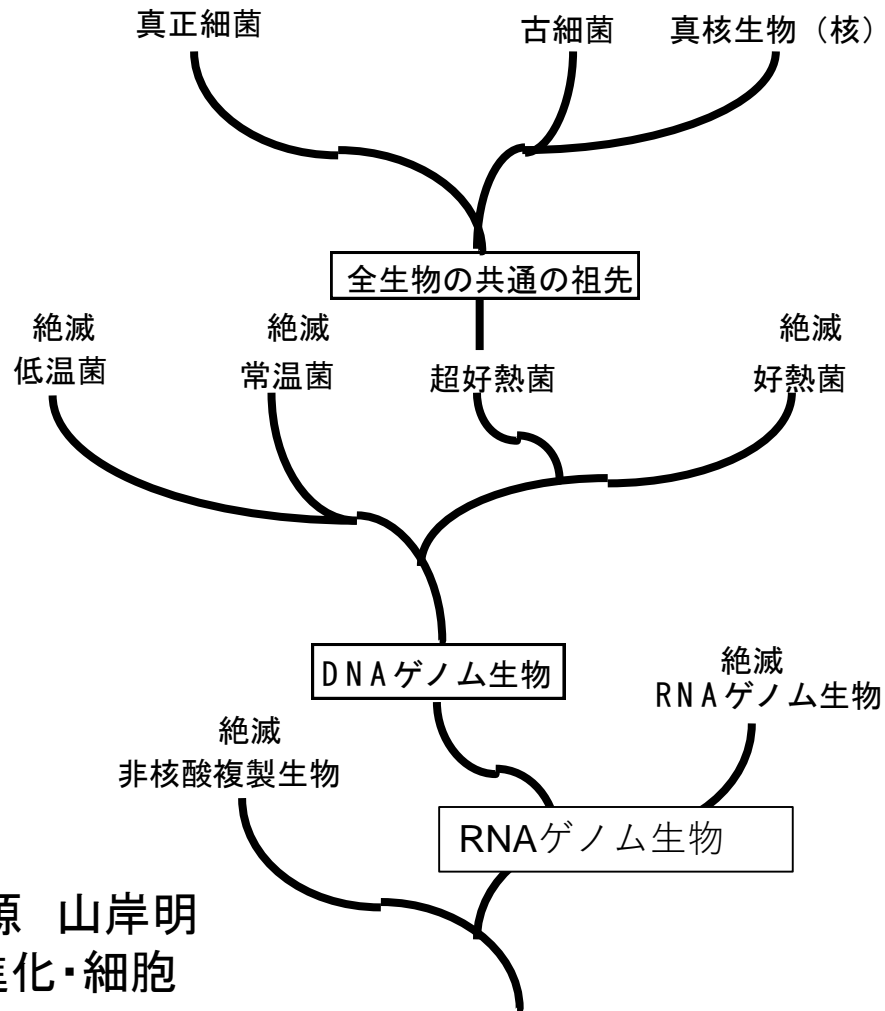




結論

- 1) 古細菌共通祖先、真正細菌共通祖先、
コモノート共に高温環境で生育していた
(超)好熱菌であったという結論になる。
- 2) コモノートは中性環境に生育してい
た可能性が高い
- 3) 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だった。
- 4) 脂質は真正細菌型だった。
- 5) ほとんど現在の細菌と変わらない。

RNAゲノム生物から
タンパク質、DNAを
作るようになり、
DNAゲノム生物へ
様々な温度に適応後
全生物の共通の祖先
コモノートが残った。



第一章 地球上における細胞の起源 山岸明彦 シリーズ進化学 第3巻「化学進化・細胞進化」岩波書店 (2004)より改変

生命の起源のまとめ

元素は宇宙でできた

元素は宇宙からきた

アミノ酸は宇宙からきた

核酸（ヌクレオチド）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（**RNA**）

そこから多くの進化をへて

全生物の共通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、独立栄養

コモノートは現存生物とほとんど同じ代謝

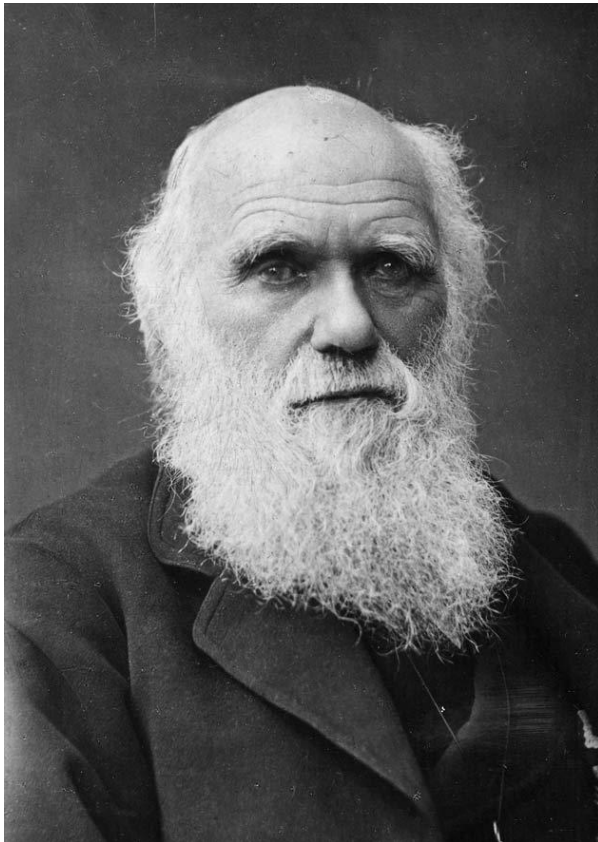
コモノートの前にタンパク質合成系が誕生

惑星科学フロンティア
2019年2月18日

地球上で生命はどのように進化したか

東京薬科大学
生命科学部
山岸明彦

ほ乳類



<http://2.bp.blogspot.com>



昆虫と植物、他の生物、 本質的に何が違うのか？ 生き物を分ける：分類学

- どう分けるか
- 人間の直観で区別がつく
- 訓練するとできるようになる。
- 外見、色、大きさ、形
- 表皮、骨格

は虫類



兩生類 Amphibia



鳥類



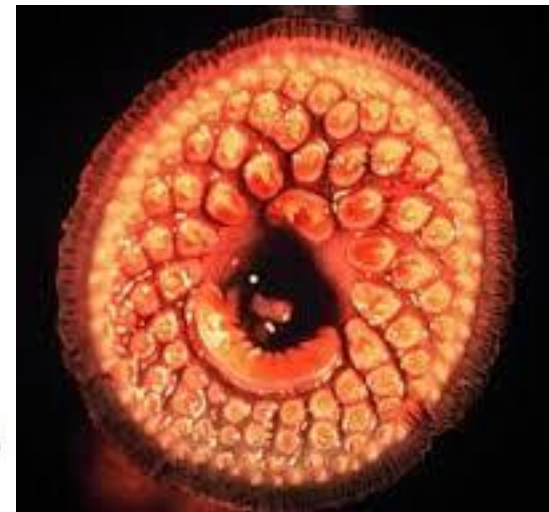
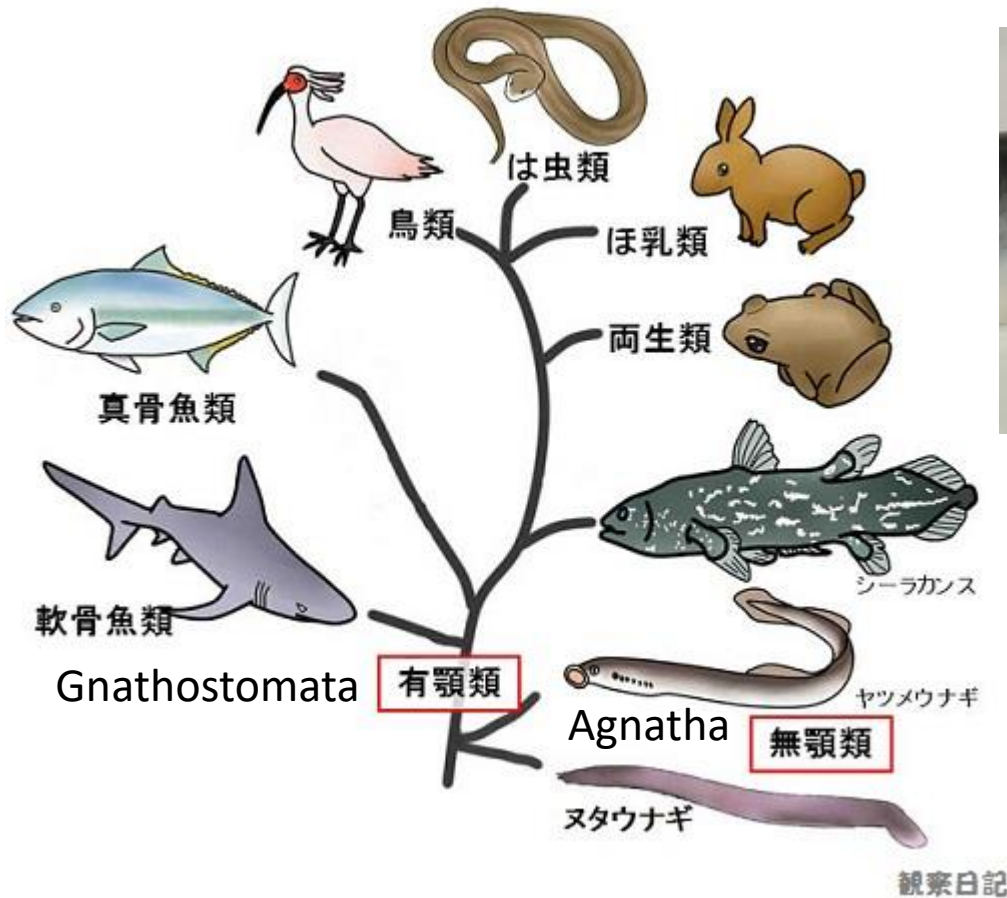
四肢動物

- どう分けるか
- 人間の直観で区別がつく
- 訓練するとできるようになる。
- 外見、色、大きさ、形、
- 表皮(粘液、鱗、羽、毛)
- 肢

脊椎動物 魚類



脊椎動物の進化

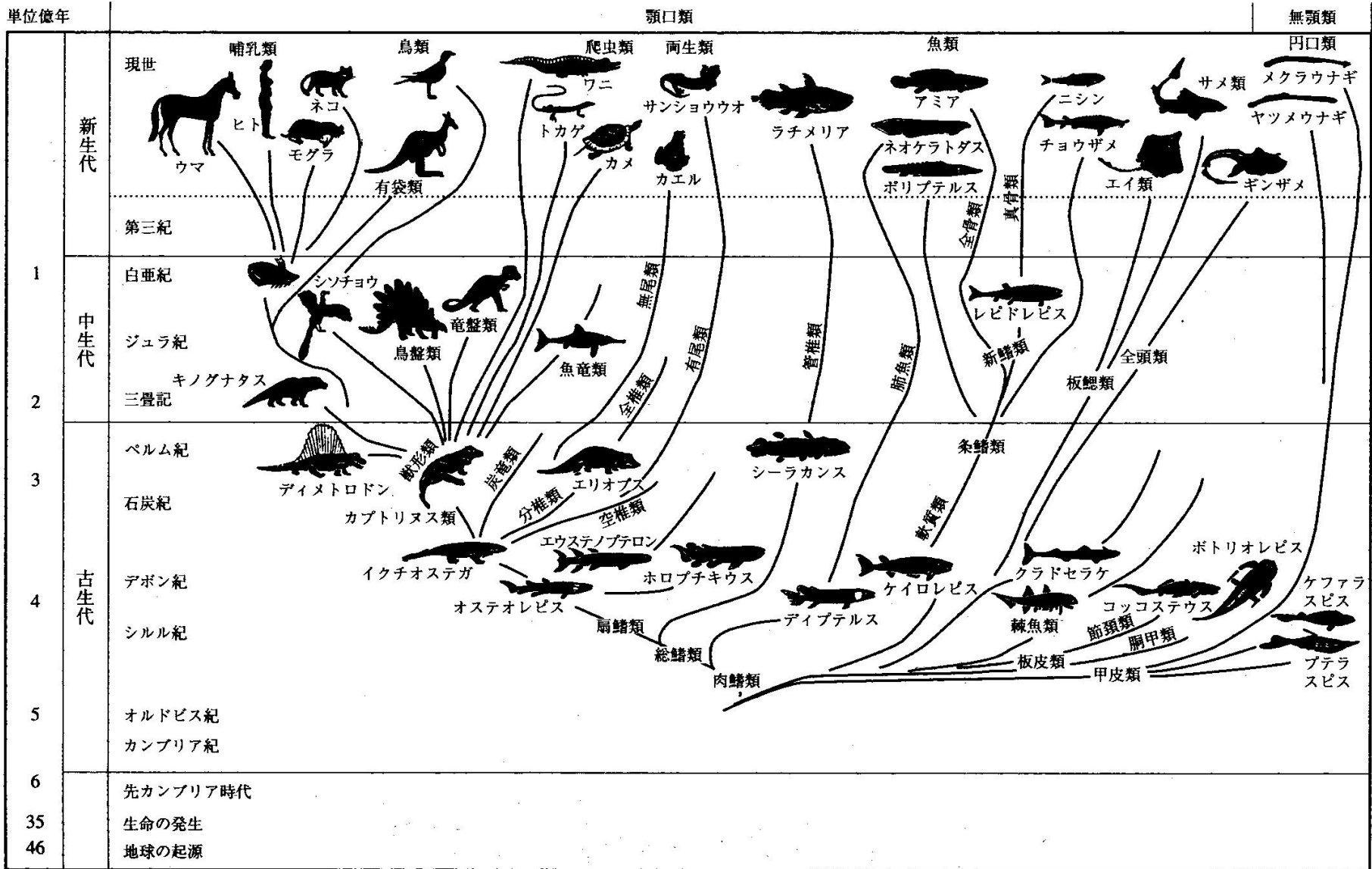


adomarine.web.fc2.com/gallery/gallery15.html

脊椎動物動物

- どう分けるか
- 人間の直観で区別がつく
- 訓練するとできるようになる。
- 外見、色、大きさ、形、
- 表皮(粘膜、鱗、羽、毛)
- 肢
- あご
- 化石から進化の様子がわかっている

脊椎動物の進化



(Jarvik, E., Basic Structure and Evolution of Vertebrates, Academic Press, 1980)

分類ランク

	<u>ドメイン: 真核生物 Eukaryota, Domain</u>
界	<u>界: 動物界 Animalia, Kingdom</u>
門	<u>門: 脊索動物門 Chordata, Phylum</u>
綱	<u>綱: 哺乳綱 Mammalia, Class</u>
目	<u>目: 霊長目 Primate, Order</u>
科	<u>科: ヒト科 Hominidae, Family</u>
族	<u>族: ヒト族 Hominini, Tribe</u>
属	<u>属: ヒト属 <i>Homo</i>, Genus</u>
種	<u>種: ヒト <i>H. sapiens</i>, Species</u>

無脊椎動物、invertebrate



腔腸(刺胞)動物 coelenterate



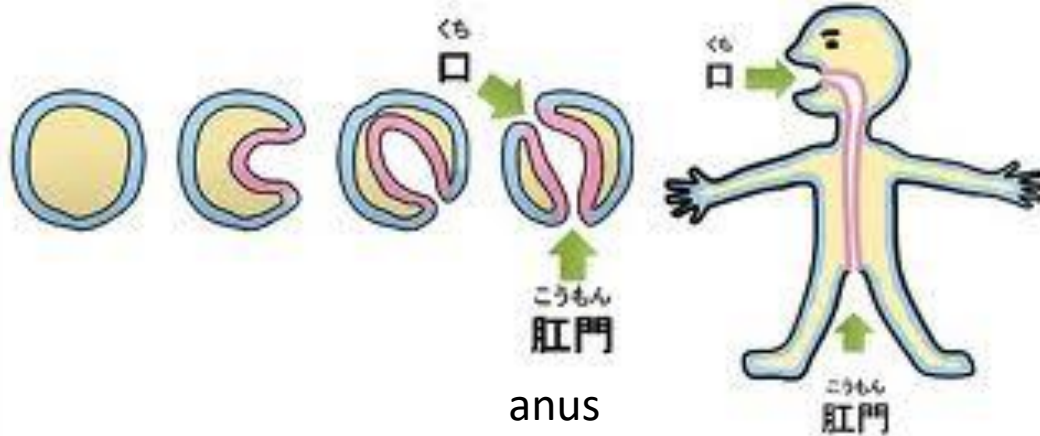
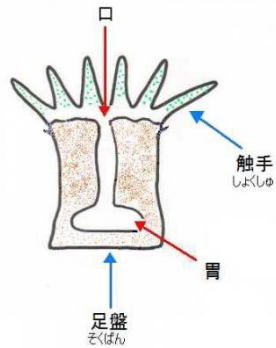
昆虫と植物、他の生物、本質的に何が違うのか？
生き物を分ける：分類学

- どう分けるか
- 人間の直観で区別がつく
- 訓練するとできるようになる。
- 外見、色、大きさ、形
- 表皮(粘膜、鱗、羽、毛)
- 肢、骨格、あご
- 解剖学(脊索、脊椎、内臓、器官)
- 発生学

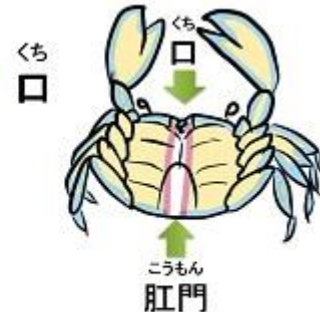
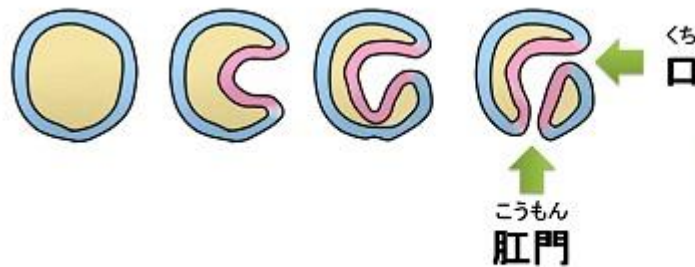
前口(旧口)動物 後口(新口)動物

protostemes, deuterostomes

腔腸動物



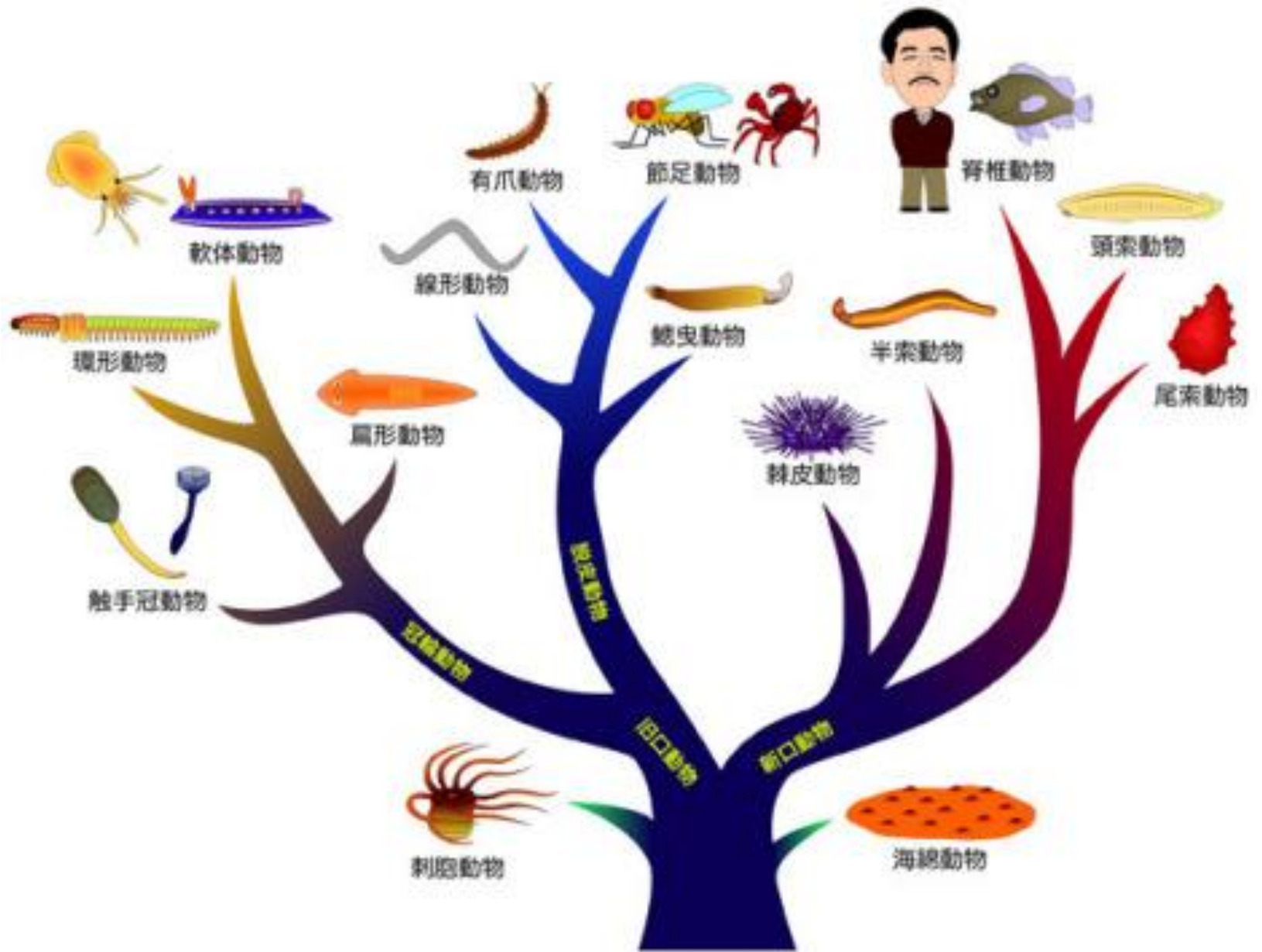
ほ乳類
は虫類
両生類
鳥類
脊椎動物



観察日記

観察日記

節足動物
環型動物
軟体動物



後口動物

頭索動物 [Cephalochordata](#)

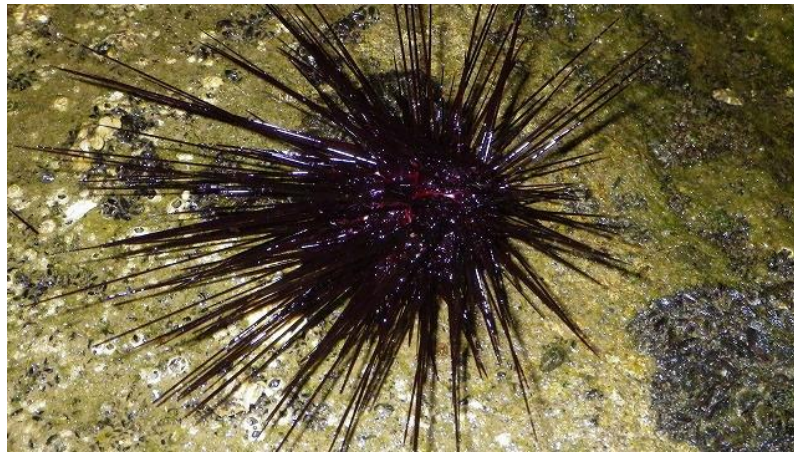
尾索動物 [Urochordata](#)



棘皮動物 [Echinodermata](#)



半索動物 Hemichordata



前口動物

扁形動物 プラナリア



有爪動物



触手腕動物 シャミセンガイ



鰓曳動物



昆虫と植物、他の生物、本質的に何が違うのか？
生き物を分ける：分類学

- どう分けるか
- 人間の直観で区別がつく
- 訓練するとできるようになる。
- 外見、色、大きさ、形
- 表皮(粘膜、鱗、羽、毛)
- 肢、骨格
- 解剖学(内臓、器官)
- 発生学(口が先か、口が後か)

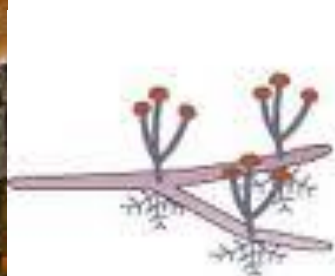
植物



しだ類

こけ類

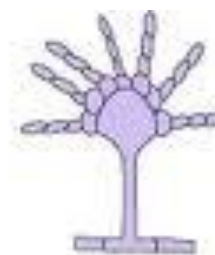
キノコ、カビ、酵母



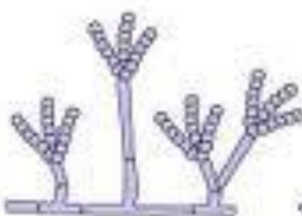
クモノスカビ



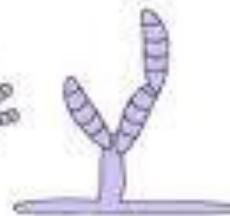
ケカビ



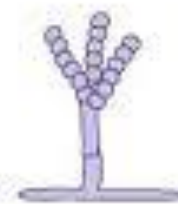
コウジカビ



アオカビ



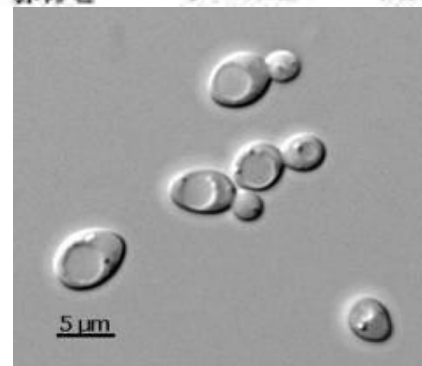
赤カビ



クロカビ



ススカビ

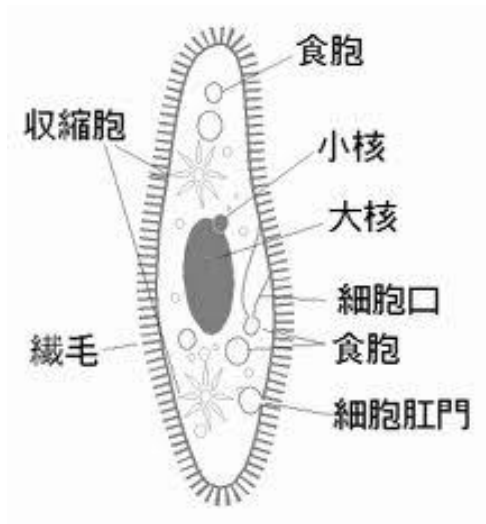


酵母

昆虫と植物、他の生物、本質的に何が違うのか？
生き物を分ける：分類学

- どう分けるか
- 人間の直観で区別がつく
- 訓練するとできるようになる。
- 外見、色、大きさ、形、肢、骨格
- 表皮(粘膜、鱗、羽、毛)
- 解剖学(内臓、器官)
- 発生学(前口、後口)
- 生理学(栄養の取り方)

原生生物



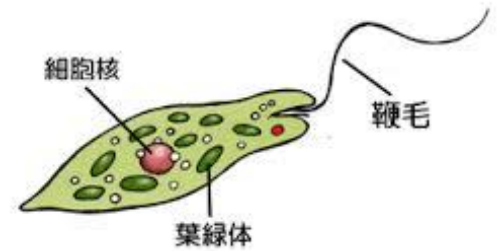
昆虫と植物、他の生物、本質的に何が違うのか？

生き物を分ける：分類学

- どう分けるか
- 人間の直観で区別がつく
- 訓練するとできるようになる。
- 外見、色、大きさ、形、表皮、骨格
- 何を重要と思うか
- 肢、骨格
- 表皮(粘膜、鱗、羽、毛) 何を重要とおもうかで
- 解剖学(内臓、器官) 分類法はかわる
- 発生学
- 単細胞か多細胞か

藻類 植物でしょうか？ 宿題

結構厄介で今でも解決していない。



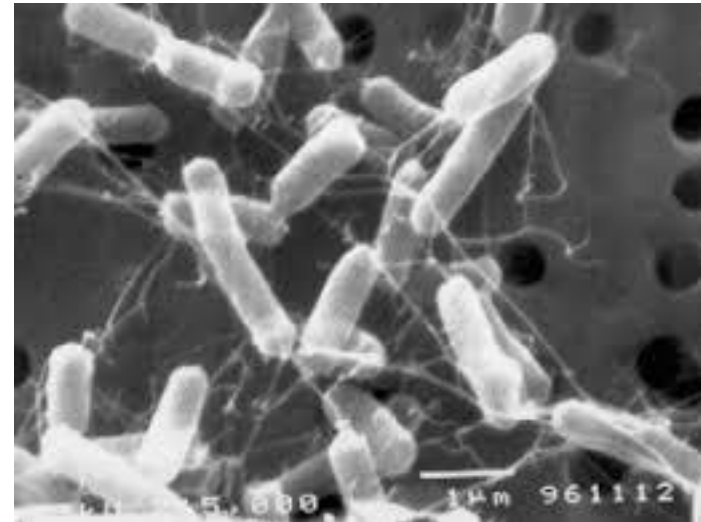
細菌

何の菌かわかりますか？
大変厄介です。

宿題



納豆菌



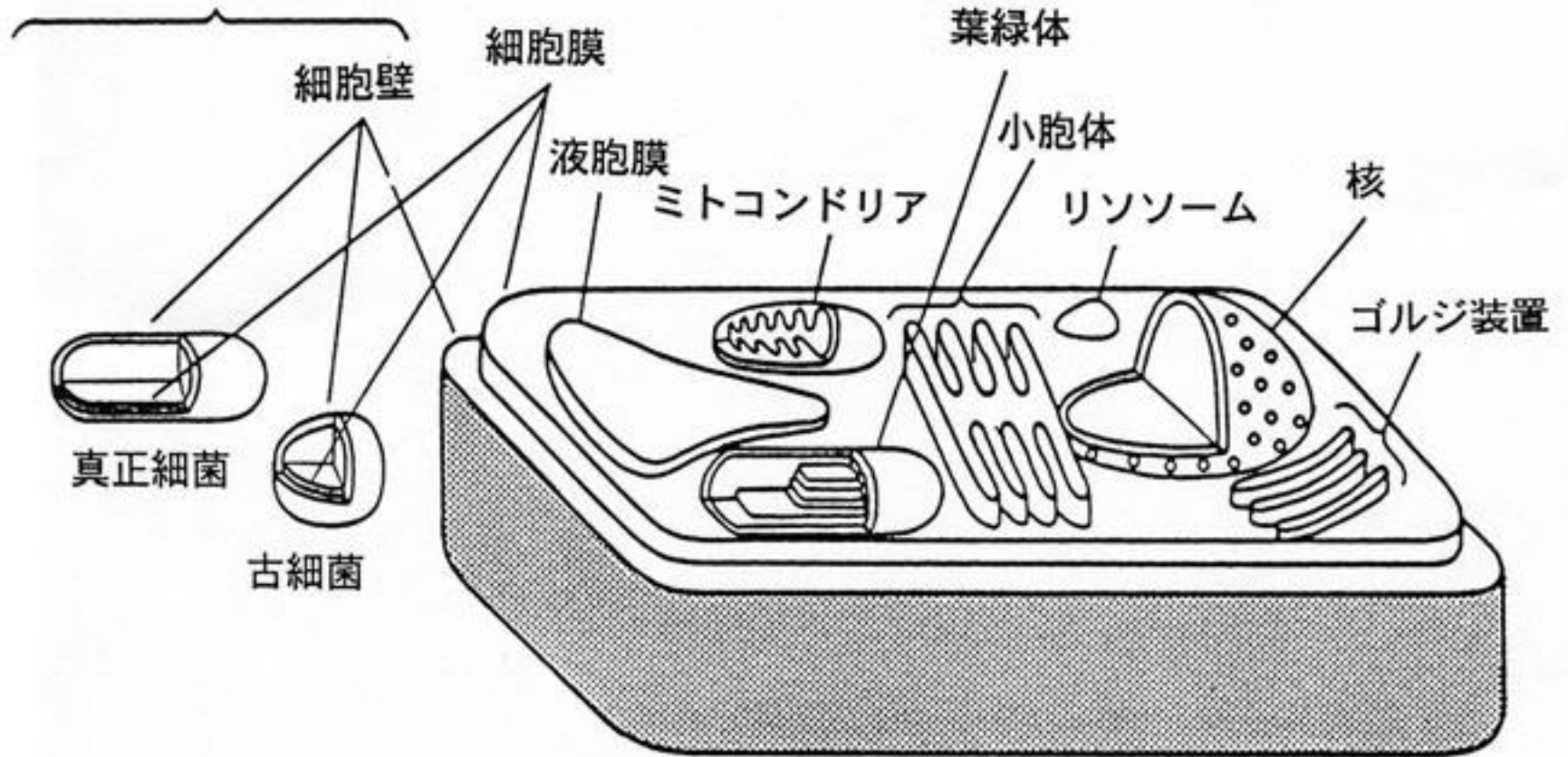
大腸菌

乳酸菌



原核生物細胞

真核生物細胞（植物細胞）



山岸1996科学(岩波)

昆虫と植物、他の生物、本質的に何が違うのか？

生き物を分ける：分類学

- どう分けるか
 - 人間の直観で区別がつく
 - 訓練するとできるようになる。
 - 外見、色、大きさ、形、表皮、骨格
 - 何を重要と思うか
 - 肢、骨格
 - 表皮(粘膜、鱗、羽、毛)
 - 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)
- 何を重要とおもうかで
分類法はかわる

どうやって、植物、ほ乳類、は虫類など、多様に進化したのでしょうか？

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うまれる。そのため、生存のための競争が頻繁に繰り返される。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。[Darwin, C. 1859, p. 5, On the origin of species, 1st ed.]」

Darwin, C. 1859, p. 5, On the origin of species, 1st ed.

- As many more individuals of each species are born than can possibly survive; and as, consequently, there is a frequently recurring struggle for existence, it follows that any being, if it vary however slightly in any manner profitable to itself, under the complex and sometimes varying conditions of life, will have a better chance of surviving, and thus be *naturally selected*. From the strong principle of inheritance, any selected variety will tend to propagate its new and modified form.

自然選択説

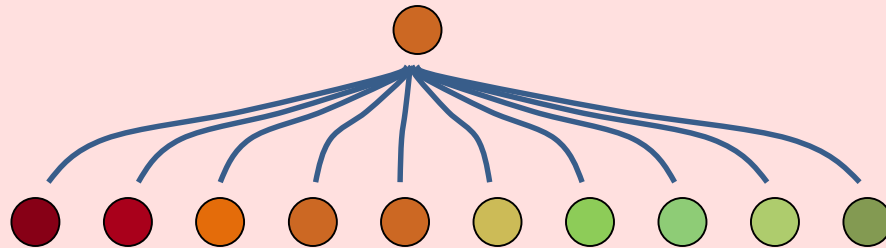
- 限られた資源
- 生物の多産
- 変異の存在
- 最適者の生存
- 自然による選択

ダーウィン型進化

個体

多数の子孫

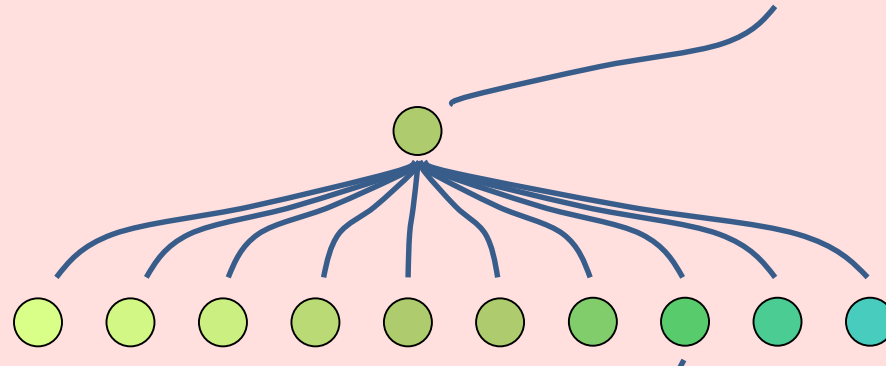
変異の存在



最適者の生存

多数の子孫

変異の存在

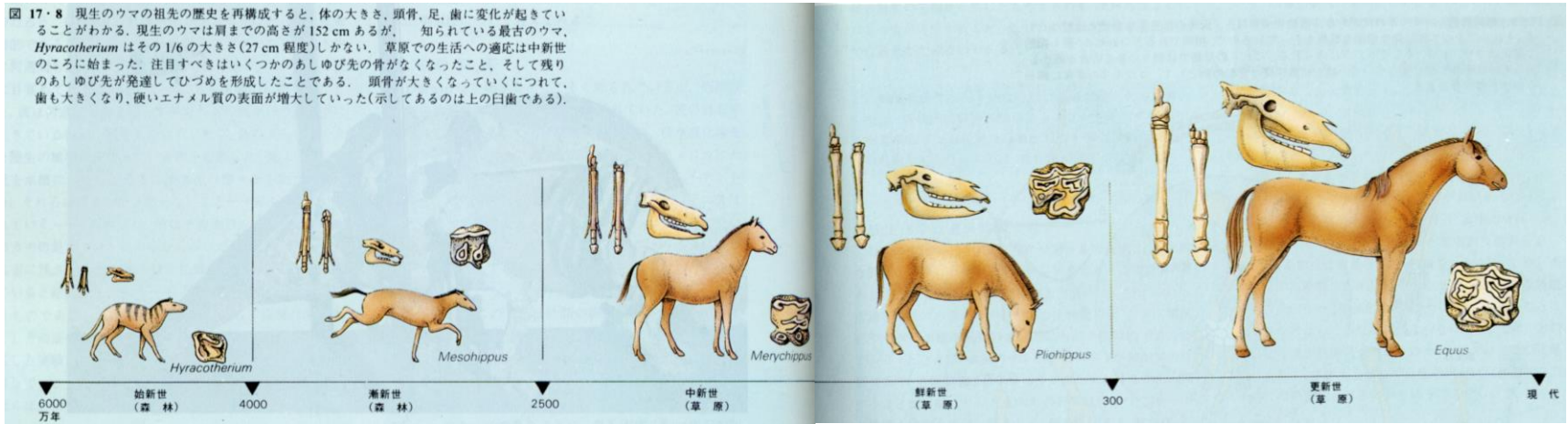


最適者の生存



ウマの進化

図 17・8 現生のウマの祖先の歴史を再構成すると、体の大きさ、頭骨、足、歯に変化が起きていることがわかる。現生のウマは肩までの高さが152 cm あるが、知られている最古のウマ、*Hyracotherium* はその1/6の大きさ(27 cm程度)しかない。草原での生活への適応は中新世のころに始まった。注目すべきはいくつかのあしゆび先の骨がなくなったこと、そして残りのあしゆび先が発達してひづめを形成したことである。頭骨が大きくなっていくにつれて、歯も大きくなり、硬いエナメル質の表面が増大していった(示してあるのは上の臼歯である)。



ウォーレス生物学 東京化学同人

適応進化：環境への適応

適応進化

収斂進化: 違う生物が似た環境で似てくる事



有袋類のクスス(左)と有胎盤類のナマケモノ(上)



有袋類のフクロモモンガ(上)
と有胎盤類のモモンガ(下)

有袋類のタスマニアデビル(上)
と有胎盤類のクズリ(下)

有袋類のフクロアライクイ(上)
と有胎盤類のオオアライクイ(下)



有袋類のウサギバンディークト(左)と
有胎盤類のホッキョクノウサギ(上)



有袋類の短い鼻と長い鼻の2種のバンディークト(左、中央)と有胎盤類のノルウエーネズミ(右)



有袋類

有胎盤類

フクロモグラ



モグラ



アンテキヌス



トガリネズミ



フクロトビネズミ



ハネシネズミ



フクロミツスイ



ヒメアリクイ



フクロアリクイ



コアリクイ



ウサギ



パンテイクート



ナマケモノ



クスクス



ジャコウネコ



有袋類

有胎盤類

フクロモモンガ



モモンガ



ヤマネ



フクロヤマネ



フクロシマリス



リス



オポッサム



ハネオツバイ



ミスオポッサム



ポタモガール



テン



フクロネコ



クズリ



タスマニアデビル



有袋類

有胎盤類

コアラ



スローロリス



タルバサン



ワオンバット



フクロオオカミ

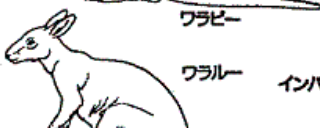


オオカミ

スプリングボック



フラビー



ワラルー

インバラ



オオカンガルー



イランド



ダーウィンのフィンチ

図 17・5 今では別々の種と考えられているが、多くの研究による証拠は、様々な種類のガラパゴスフィンチが共通の祖先のフィンチより進化してきたことを明らかに示している。



ウォーレス生物学 東京化学同人

適応放散：様々な環境への適応

どうやって、植物、ほ乳類、は虫類など、多様に進化したのでしょうか？

自然選択：最適者の生存
適応進化
適応放散

どうやって形が進化したか

ヒトは38兆個の細胞からできている。
ヒトの遺伝子は約3万個
一つの遺伝子が一つの細胞を担当
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)

前と後ろを決める
節を作れ
頭、胸、腹に分ける
口、目、触覚、羽、足、生殖
腺を作れ
前足、中足、後足にしろ

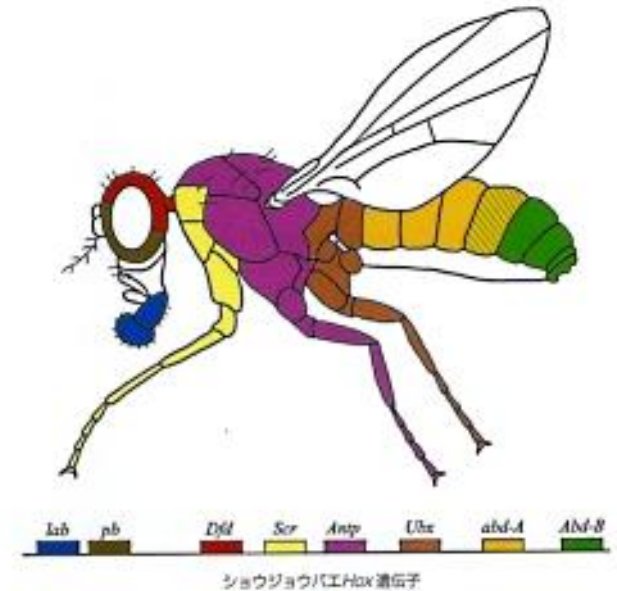
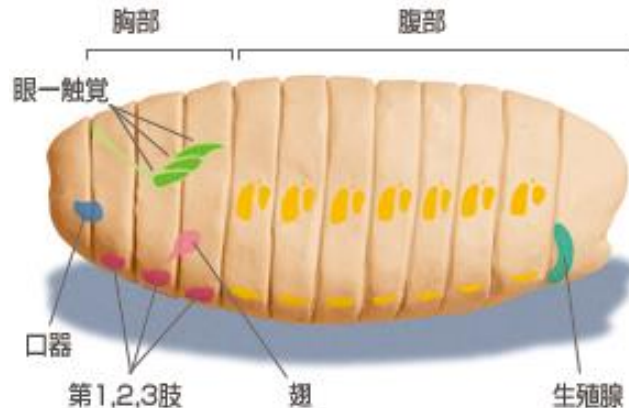


図2.5 ショウジョウバエのHox遺伝子

8つのHox遺伝子は、成体(上)と胚(下)において領域のアイデンティティを調節する。各遺伝子は、さまざまなHox遺伝子の突然変異によって影響を受ける体節と構造に対応している。

出典: Carroll SB. Nature 1995; 378: 479-485より改変

どうやって、植物、ほ乳類、は虫類など、多様に進化したのでしょうか？

自然選択：最適者の生存
適応進化
適応放散
ホメオティック遺伝子

繁栄した種と絶滅した種は
なにが違うのか。

は虫類、ほ乳類



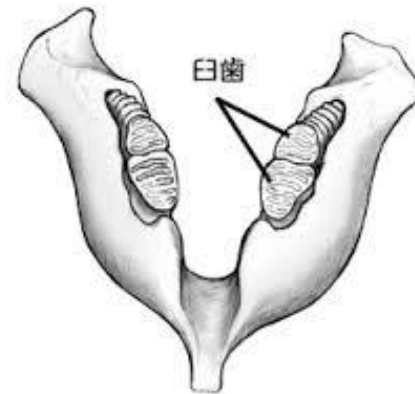
恐竜の歯



ヒトの臼歯



ソウの下顎の骨



両生類、は虫類(鳥類)、ほ乳類



粘膜での呼吸
肺はただの袋

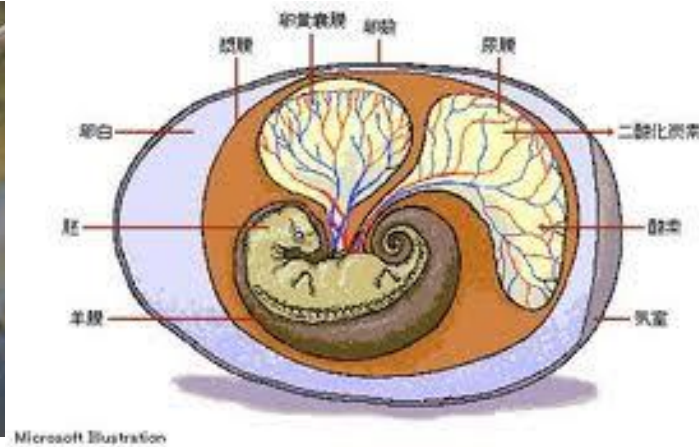
うろこ
肺胞ができる

毛皮
肺胞が発達

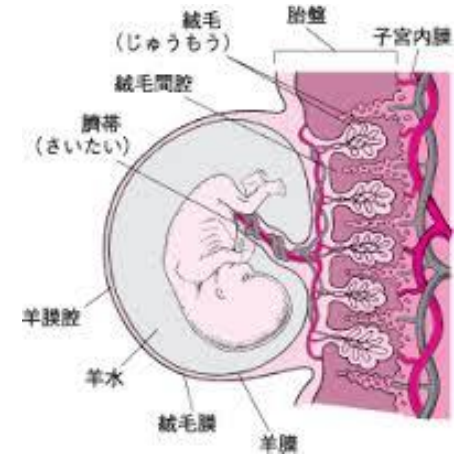
横隔膜が無い
口蓋が不完全

横隔膜がある
二次口蓋

両生類、は虫類(鳥類)、ほ乳類



胚を乾燥から保護



胚を外敵から保護

植物 こけ

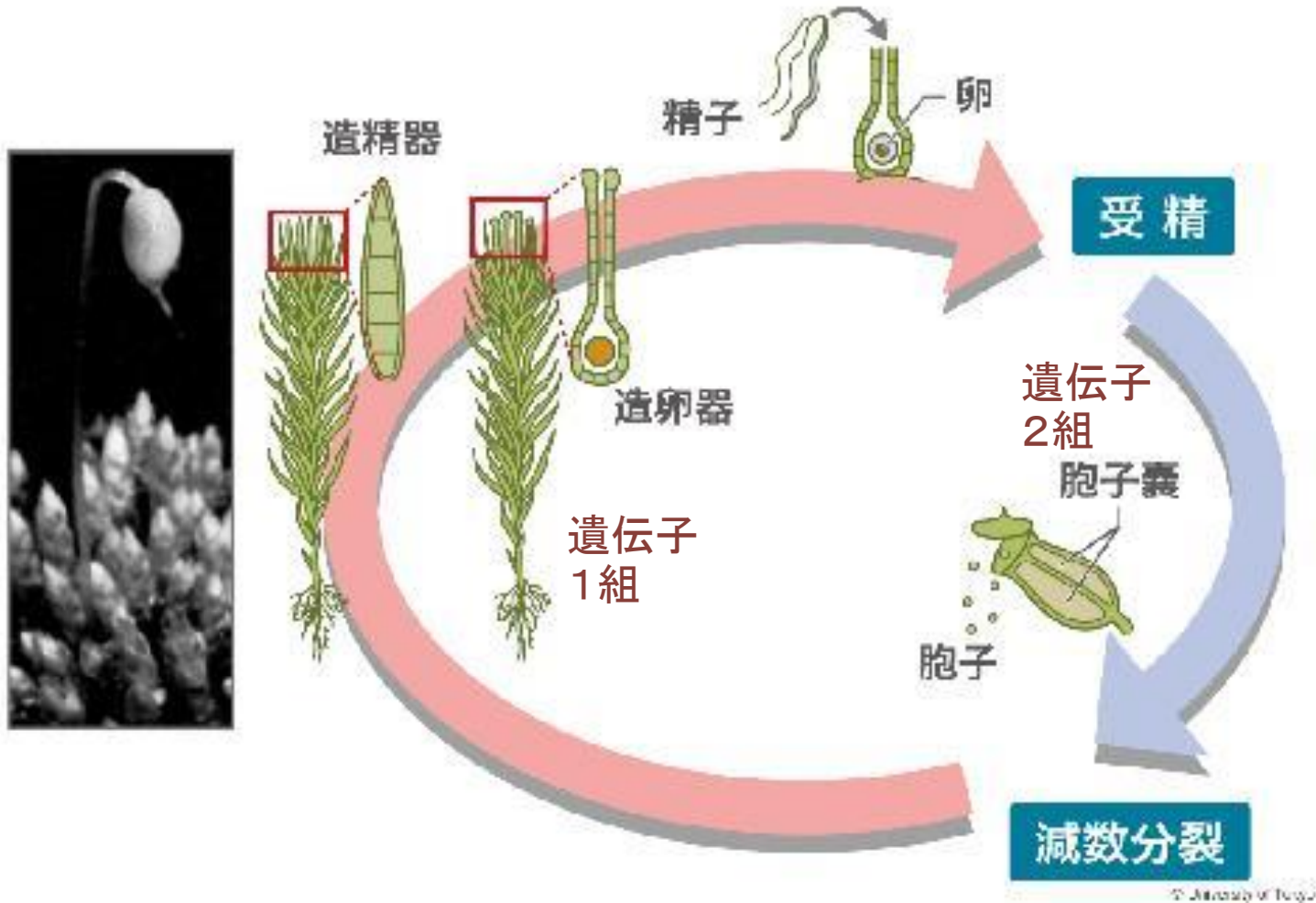


ゼニゴケ



スギゴケ

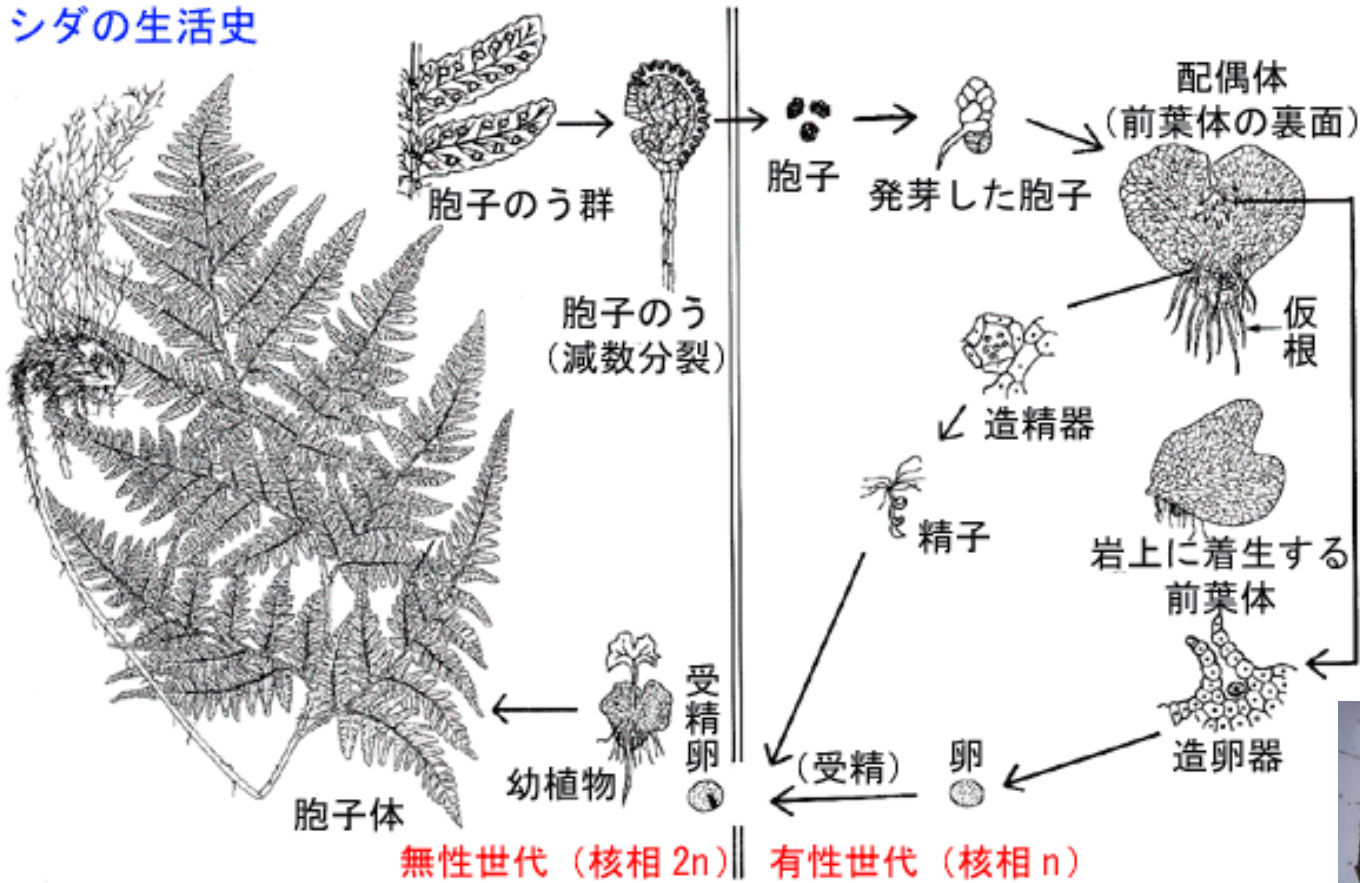
コケ植物の生活環



http://csis-db.c.u-tokyo.ac.jp/search/detail?image_repository_id=566

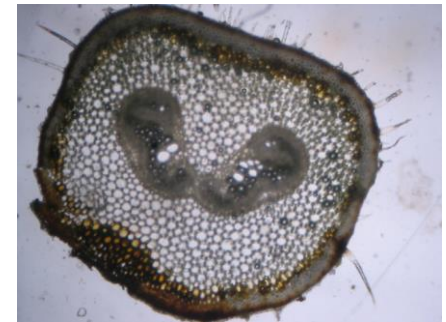
植物 シダ

シダの生活史



遺伝子
2組

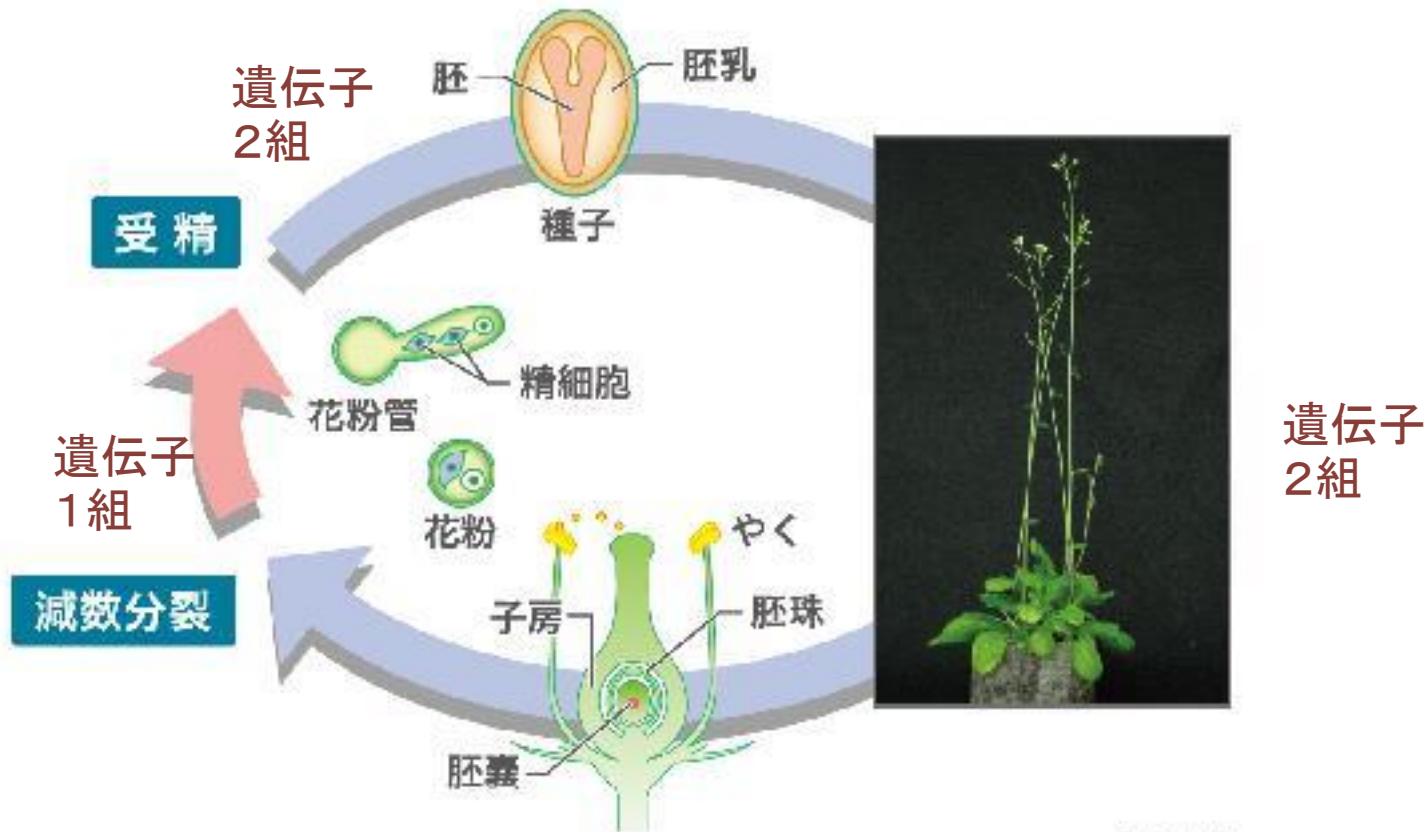
遺伝子
1組



種子植物の生活環

花粉(乾燥に強くなる)

胚珠(めしべの中で守られる)



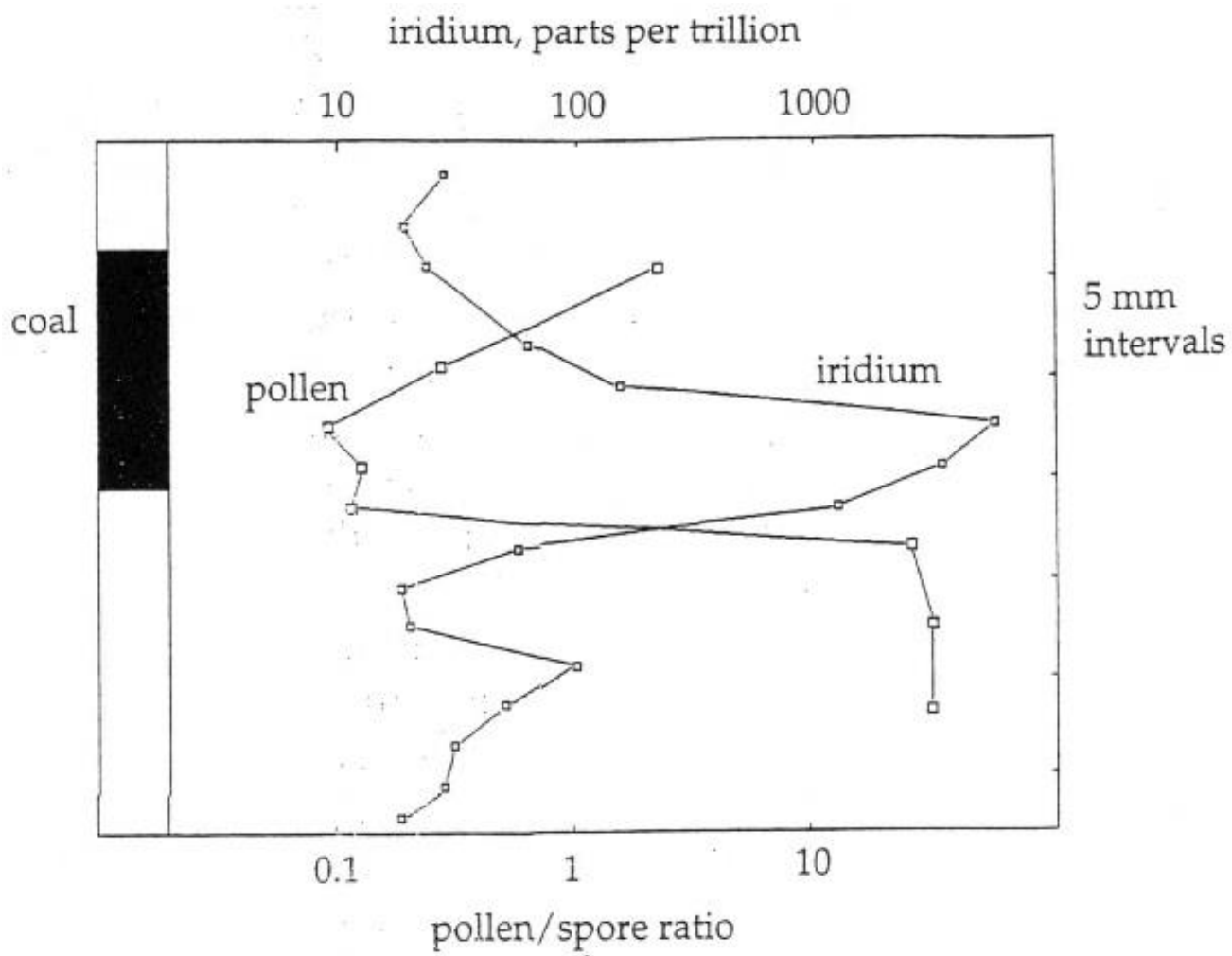
http://csis-db.c.u-tokyo.ac.jp/search/detail?image_repository_id=568

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。

今から6500万年前中生代末期

- 黒色の層：欧州で薄い、メキシコ周辺で濃い
- 煤を含む



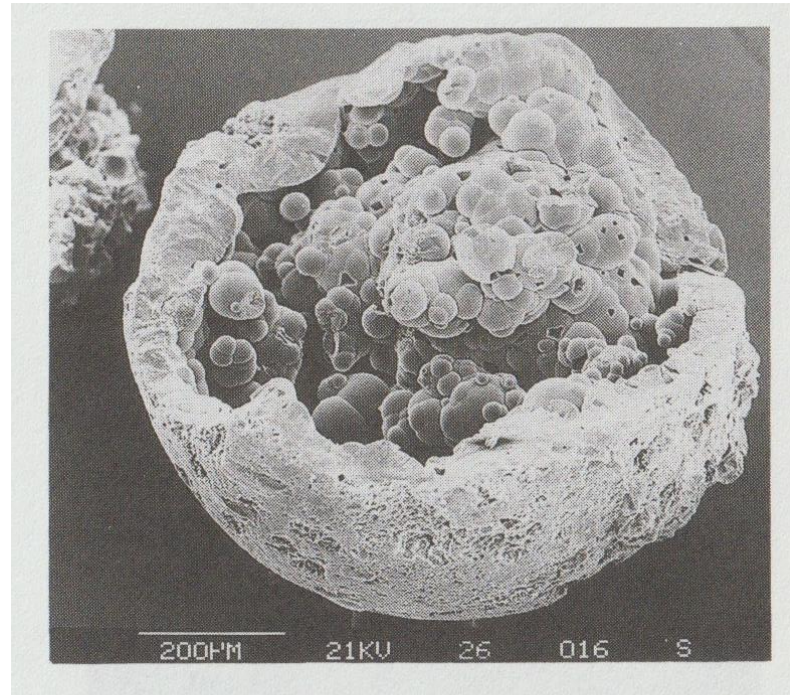
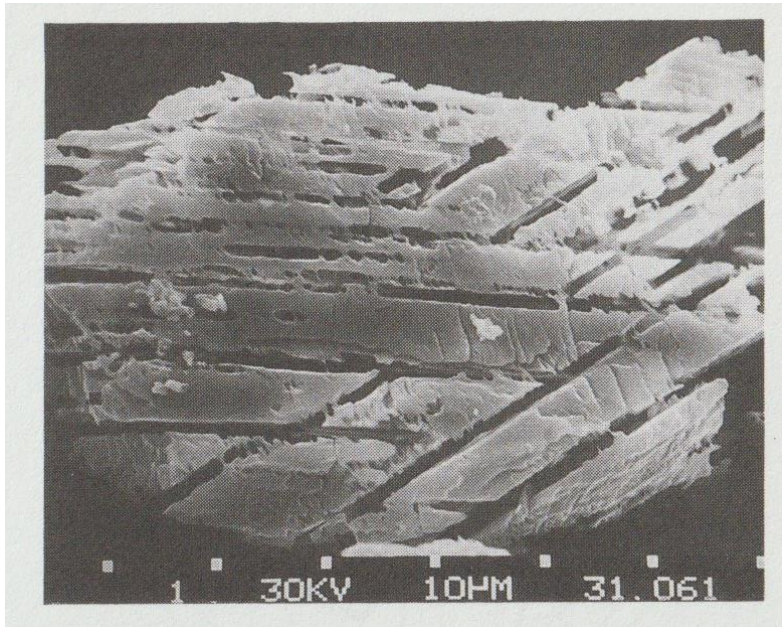


Figure 17.2 Top: A fragment of quartz from the K–T boundary in Montana, showing two sets of intersecting parallel lamellae characteristic of quartz crystals that have undergone severe shock. Bottom: A tiny spherule from the K–T boundary clay in Wyoming, comparable with a spherule of fly ash from a coal-burning power plant. (Photographs courtesy of Bruce Bohor, U. S. Geological Survey, Denver.)

津波堆積物



Radar image from the Space Shuttle Endeavour (Courtesy NASA/JPL-Caltech)



恐竜の絶滅 中生代末期6,500万年前

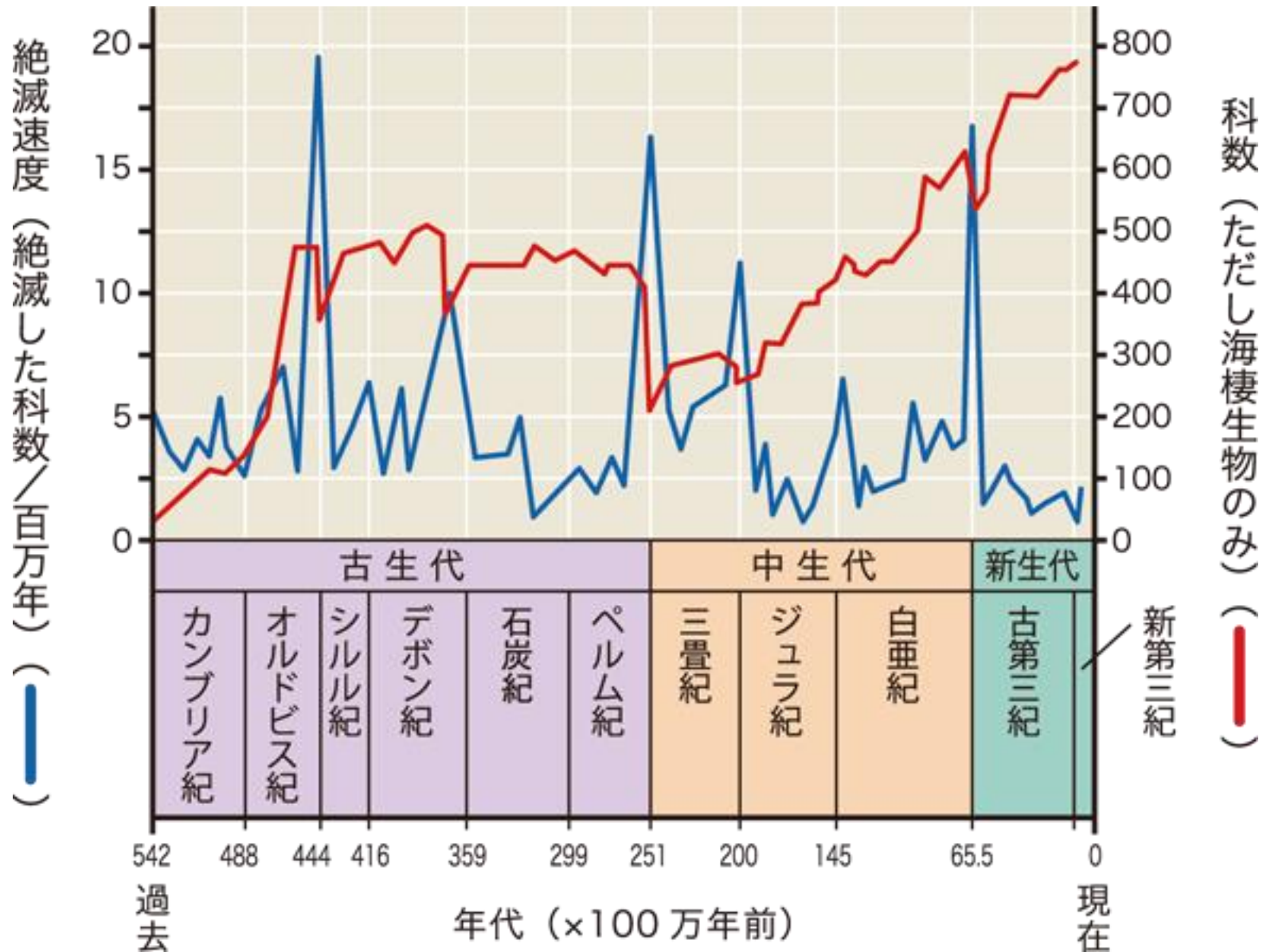


直径10kmの小惑星が衝突
津波
山火事
粉塵により、数ヶ月間暗闇
酸性雨
光合成の停止

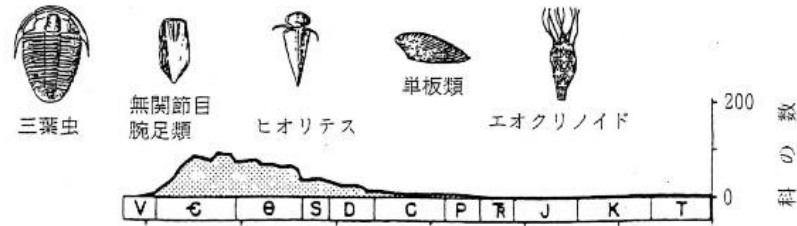
黒色のすすを含む地層
イリジウムが高濃度

生き延びたもの
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

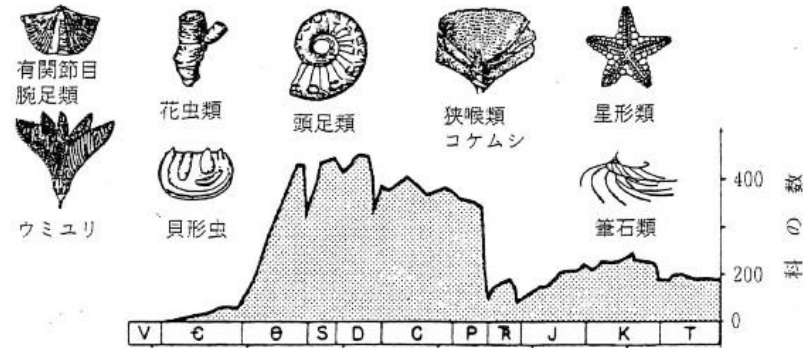
これまでに何度も大量絶滅



カンブリア紀型動物群



古生代型動物群



現代型動物群

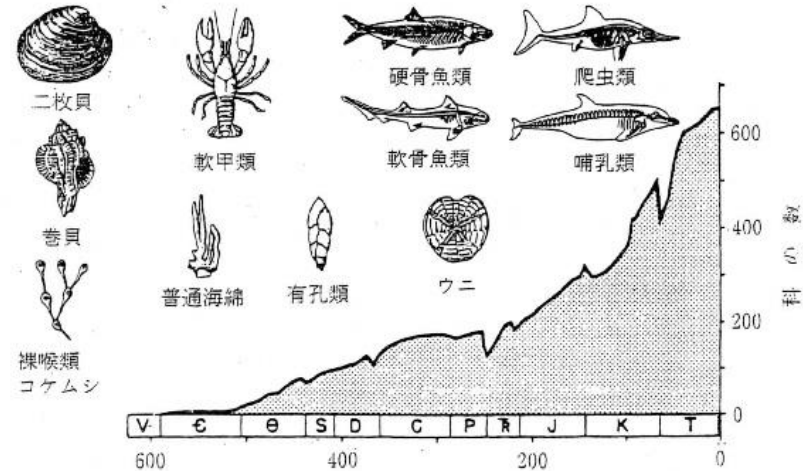


図2 カンブリア紀型動物群, 古生代型動物群, 現代型動物群の多様度変遷とその

繁栄した種と絶滅した種は なにが違うのか。

環境への適応

環境変動への対応

特殊化した生物は変動に弱い

一般化した生物は変動に強い

動けるものは強い

胞子や種は強い

大量絶滅の後に

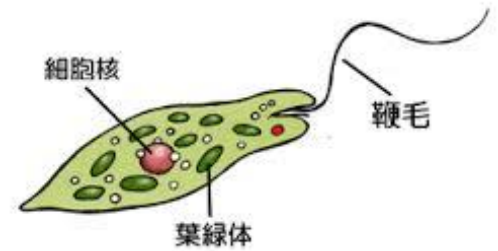
適応放散が起きる

ダーウィン型進化

1. 1回には有限個をテスト比較する
2. テストを繰り返す
3. 局所的最適解を得る
4. グローバルな最適解ではない
5. 進化に生き詰まる
6. 時々リセットする(大量絶滅)

藻類 植物でしょうか？ 宿題

結構厄介で今でも解決していない。



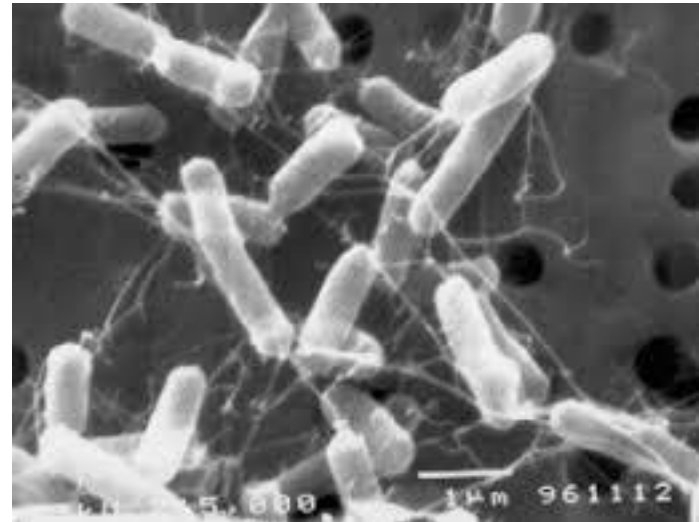
細菌

何の菌かわかりますか？
大変厄介です。

宿題



納豆菌



大腸菌

乳酸菌



昆虫と植物、他の生物、本質的に何が違うのか？

生き物を分ける：分類学

- どう分けるか
- 人間の直観で区別がつく
- 訓練するとできるようになる。
- 外見、色、大きさ、形、表皮、骨格
- 何を重要と思うか
- 肢、骨格
- 表皮(粘膜、鱗、羽、毛)
- 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)

何を重要とおもうかで
分類法はかわる

進化、分岐で分ける
系統分類

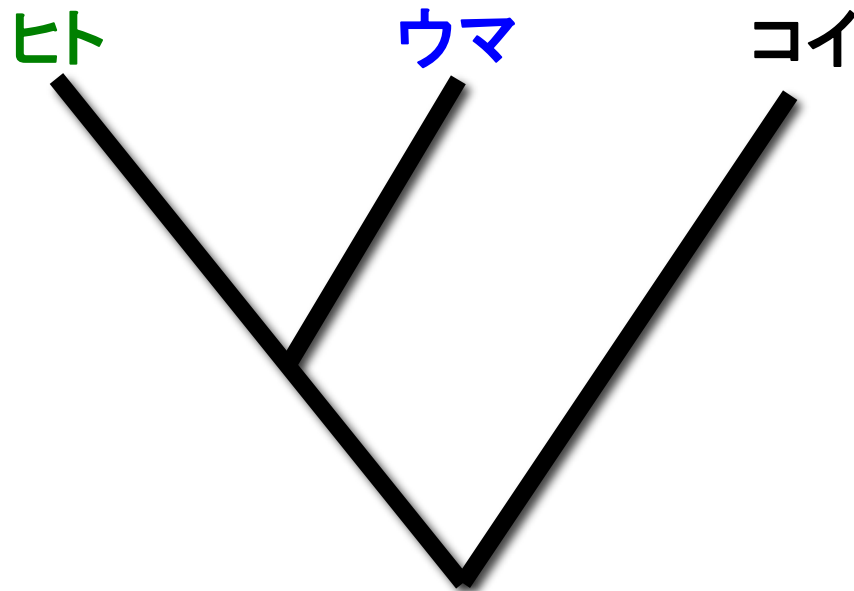
遺伝子で調べる
分子系統分類

生命の歴史を遺伝子から調べる

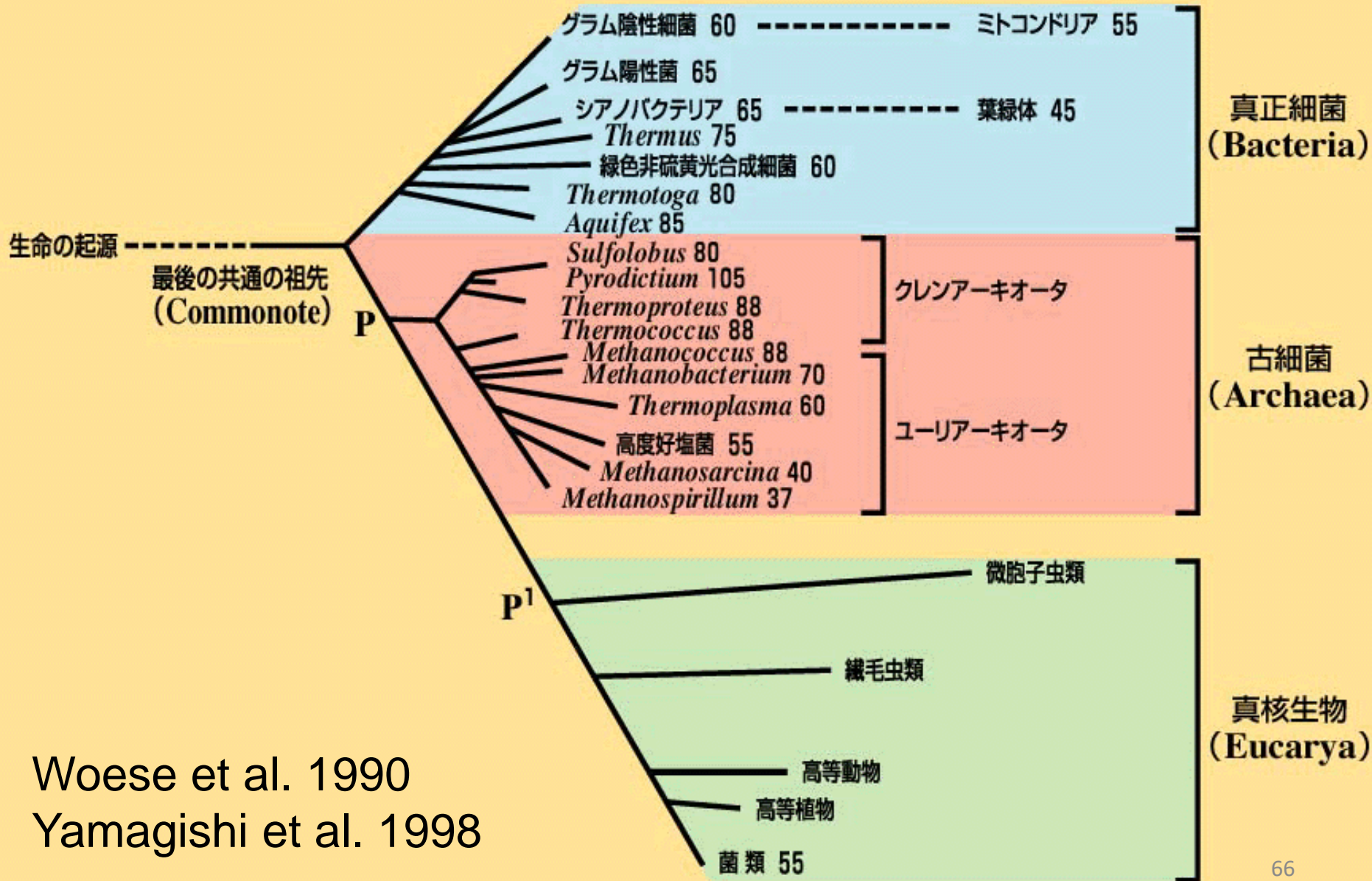
ヘモグロビン遺伝子のアミノ酸配列

ヒト	VLS P ADKTNVKA A W G KV G AHAGEYGA E ALERMFL A FP T TKTYF P HF
ウマ	VLS A ADKTNVKA A W S KV G GHAGEYGA E ALERMFL G FP T TKTYF P HF
コイ	S LS D K S KA A V K I A W A K I SP K ADD I GA E AL G R M L T V Y P Q TKTY F A H W

遺伝子のアミノ酸配列をしらべることから、系統樹を作成できる。



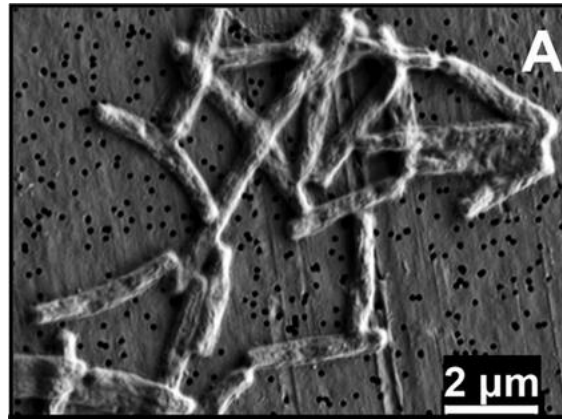
全生物の進化系統樹



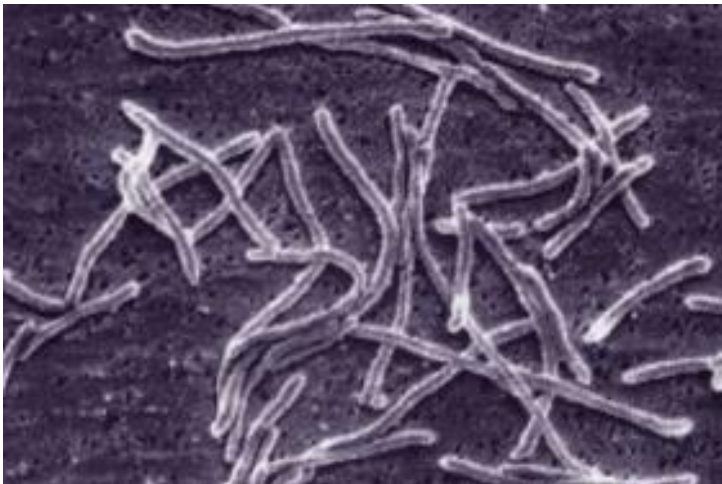
Woese et al. 1990
Yamagishi et al. 1998

古細菌 (アーキア)

ピロバキュラム



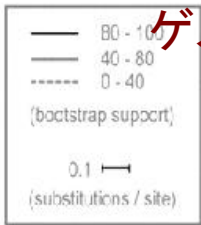
メタノバクテリウム



ハロバクテリウム



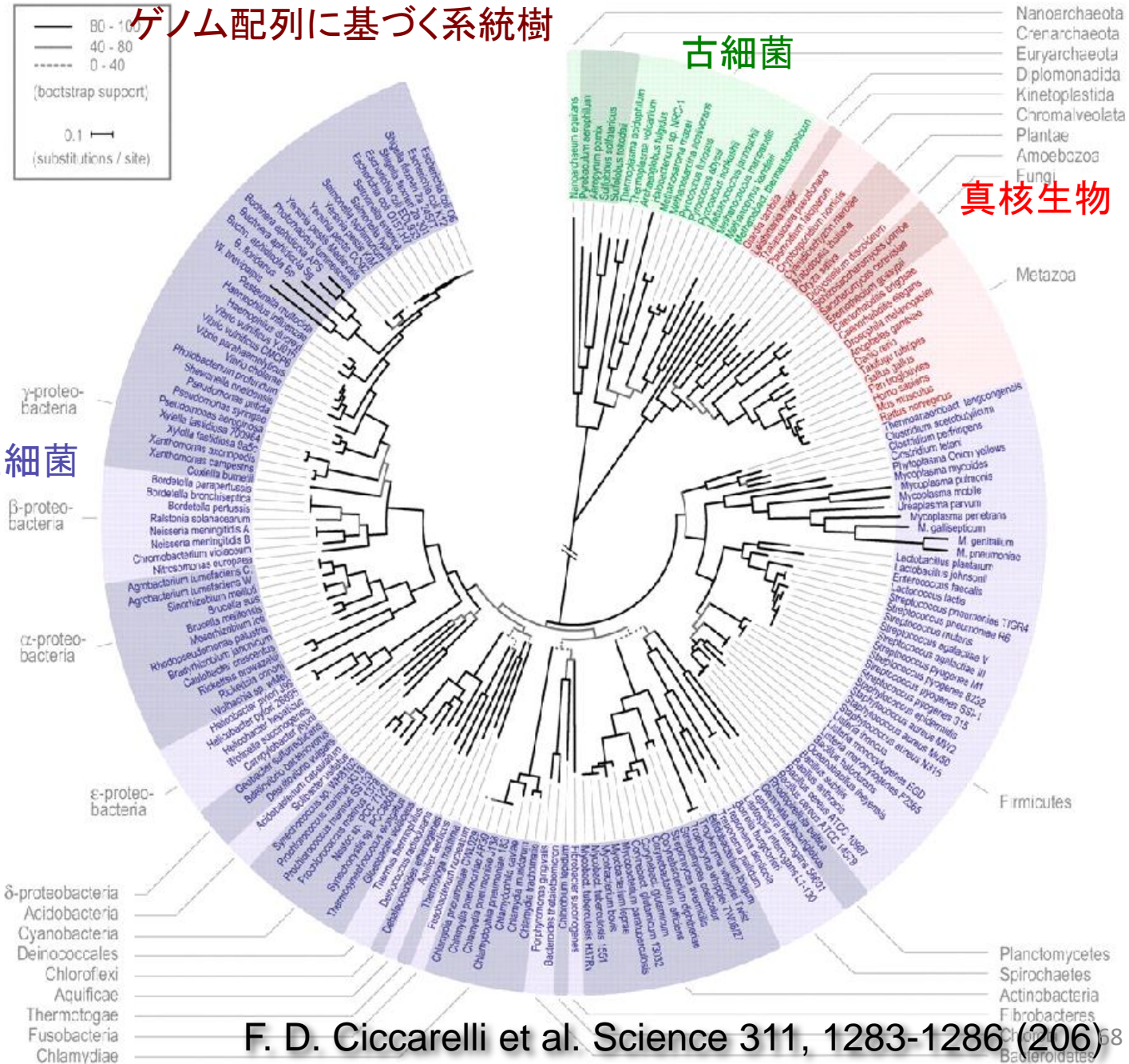
ゲノム配列に基づく系統樹



真正細菌

古細菌

真核生物



分岐年代の推定に用いられた化石に基づく 分岐年代 (Feng et al. 1997)

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-爬虫類	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

(Feng et al. 1997, Hodges & Kumar 2009))

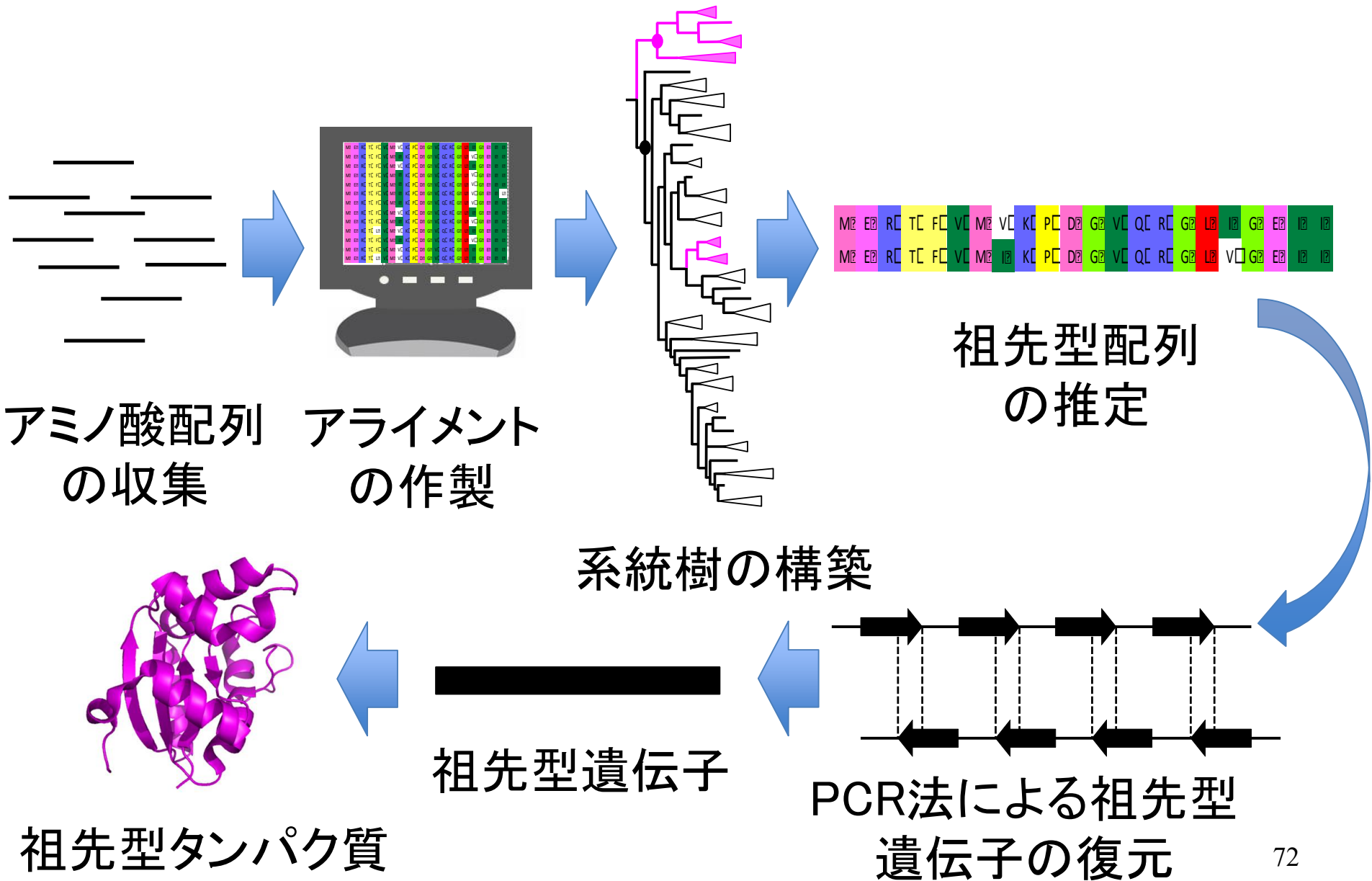
生物群	推定分岐年代(億年)
棘皮動物/脊索動物	8.4
後口動物/前口動物	9.1
襟鞭毛虫/後生動物	10.2
菌類/動物	13.7
植物/動物	15.9
古細菌/真核生物	20-38
古細菌/真正細菌	37.8 (33-40)

昆虫と植物、他の生物、本質的に何が違うのか？

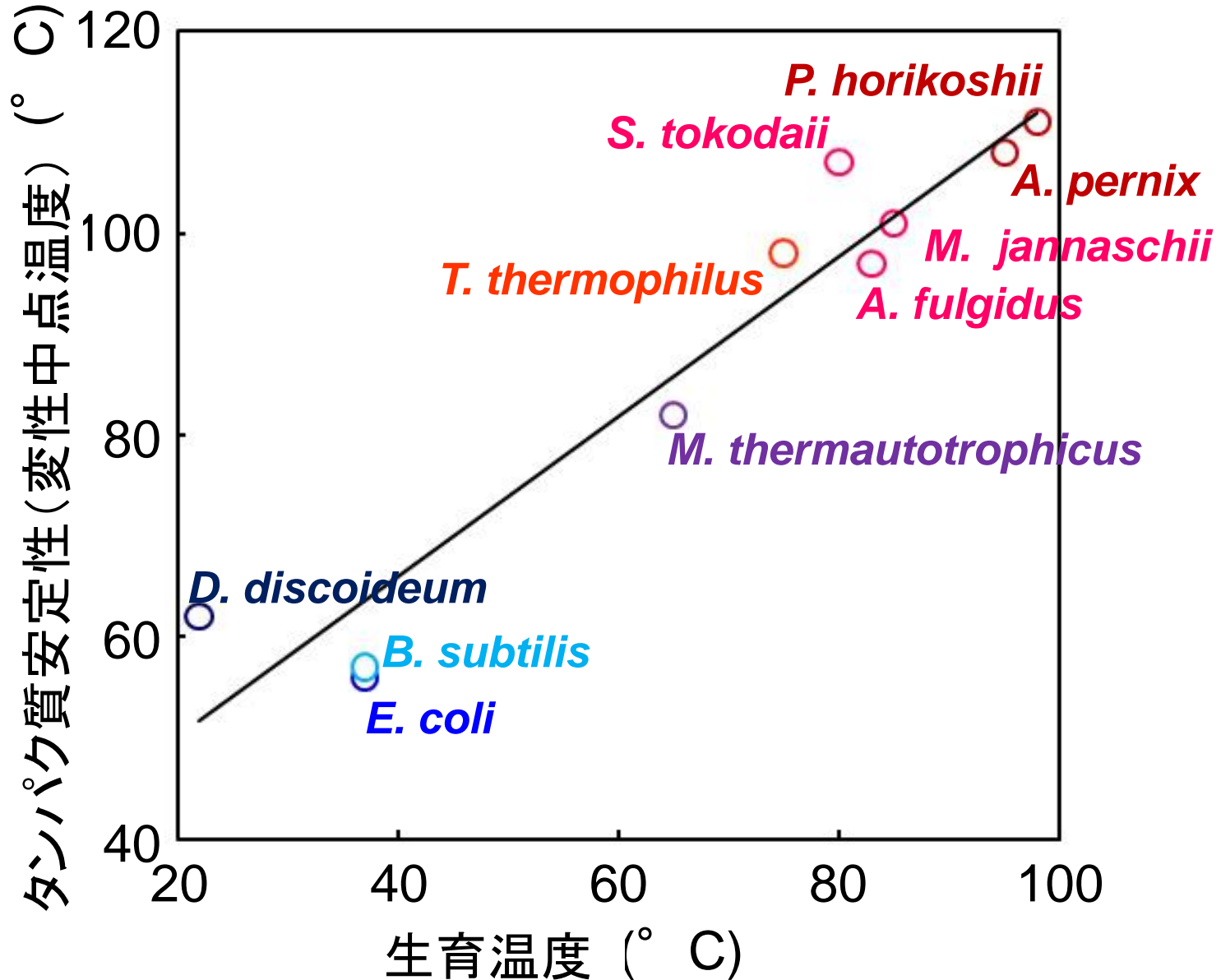
生き物を分ける：分類学

- どう分けるか
- 人間の直観で区別がつく
- 訓練するとできるようになる。
- 外見、色、大きさ、形、表皮、骨格
- 何を重要と思うか
 - 肢、骨格
 - 何を重要とおもうかで分類法はかわる
 - 表皮(粘膜、鱗、羽、毛)
 - 進化、分岐で分ける
 - 解剖学(内臓、器官)
 - 系統分類
 - 発生学
 - 遺伝子で調べる
 - 単細胞か多細胞か
 - 分子系統分類
 - 細胞の構造(核の有無)
 - 遺伝子から昔の生物がわかる

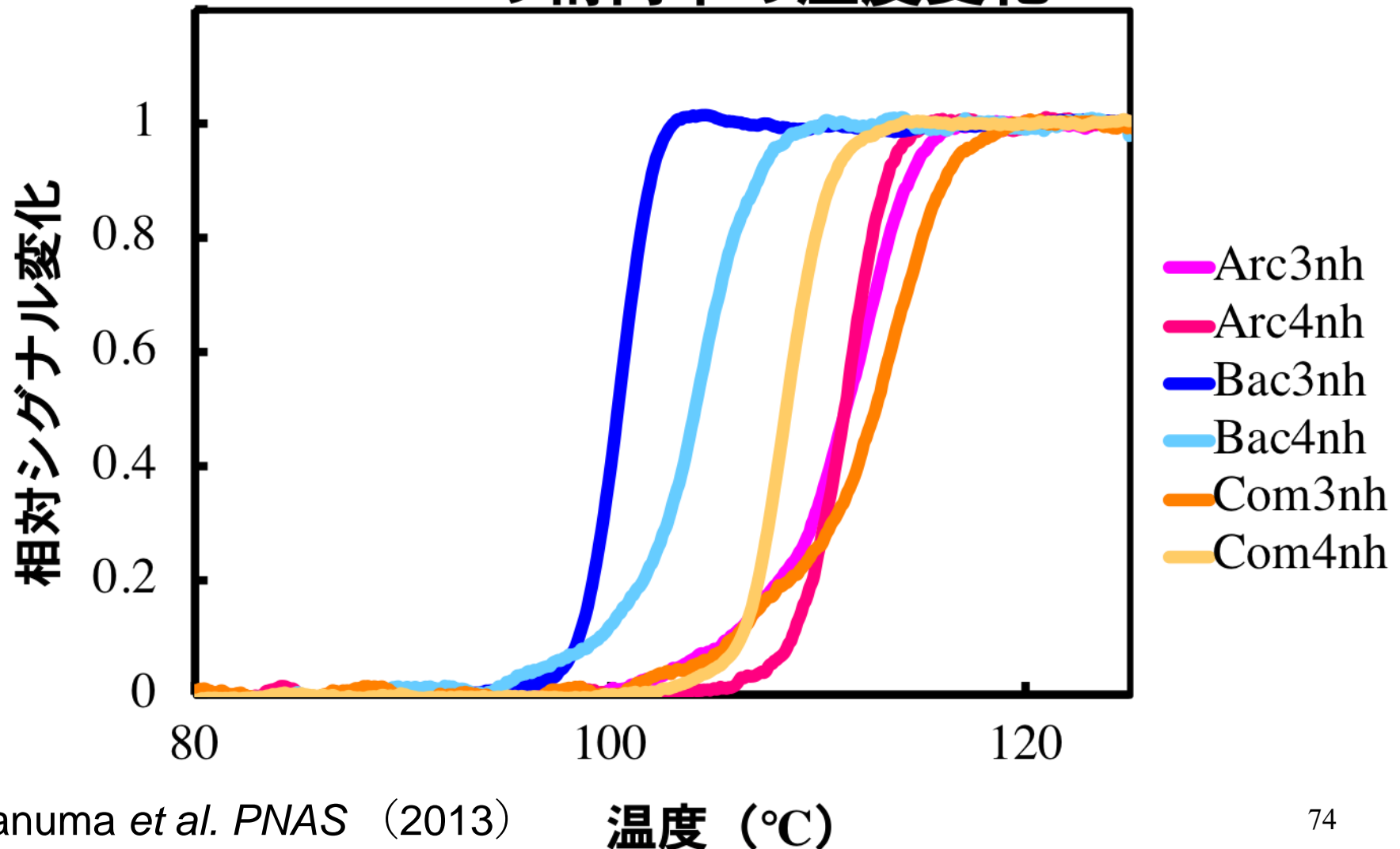
祖先タンパク質の復元法



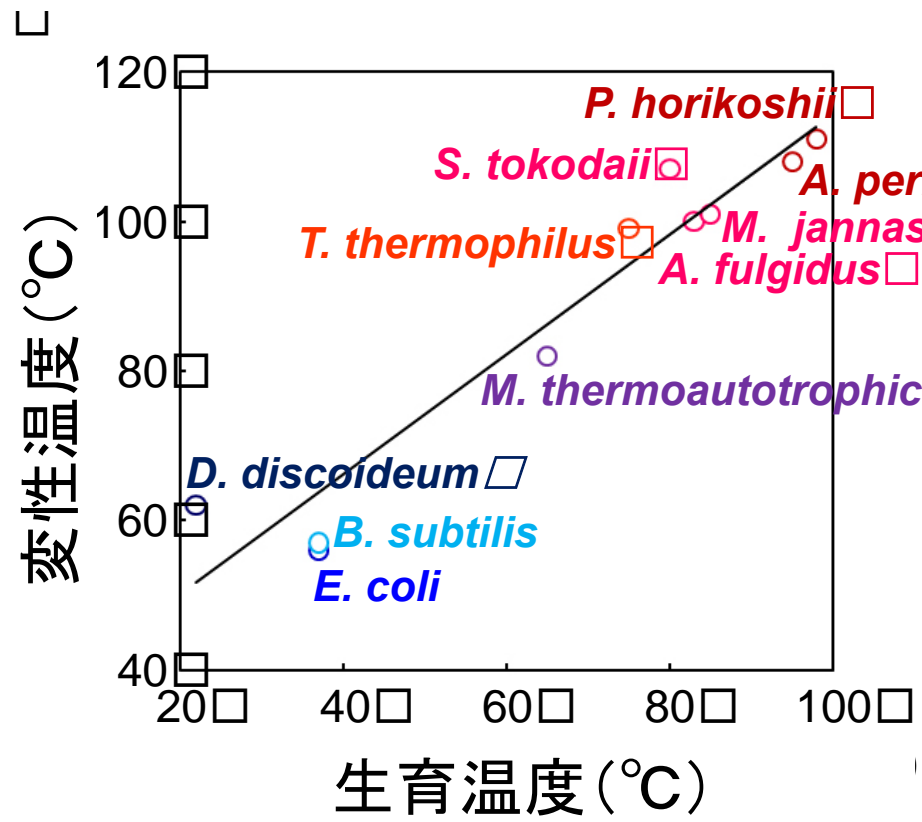
NDKの安定性と生育温度は良く相関している(相関係数0.96)



祖先生物(全生物の共通祖先)のタンパク質 (NDK)が壊れる温度を調べる 222nmの楕円率の温度変化

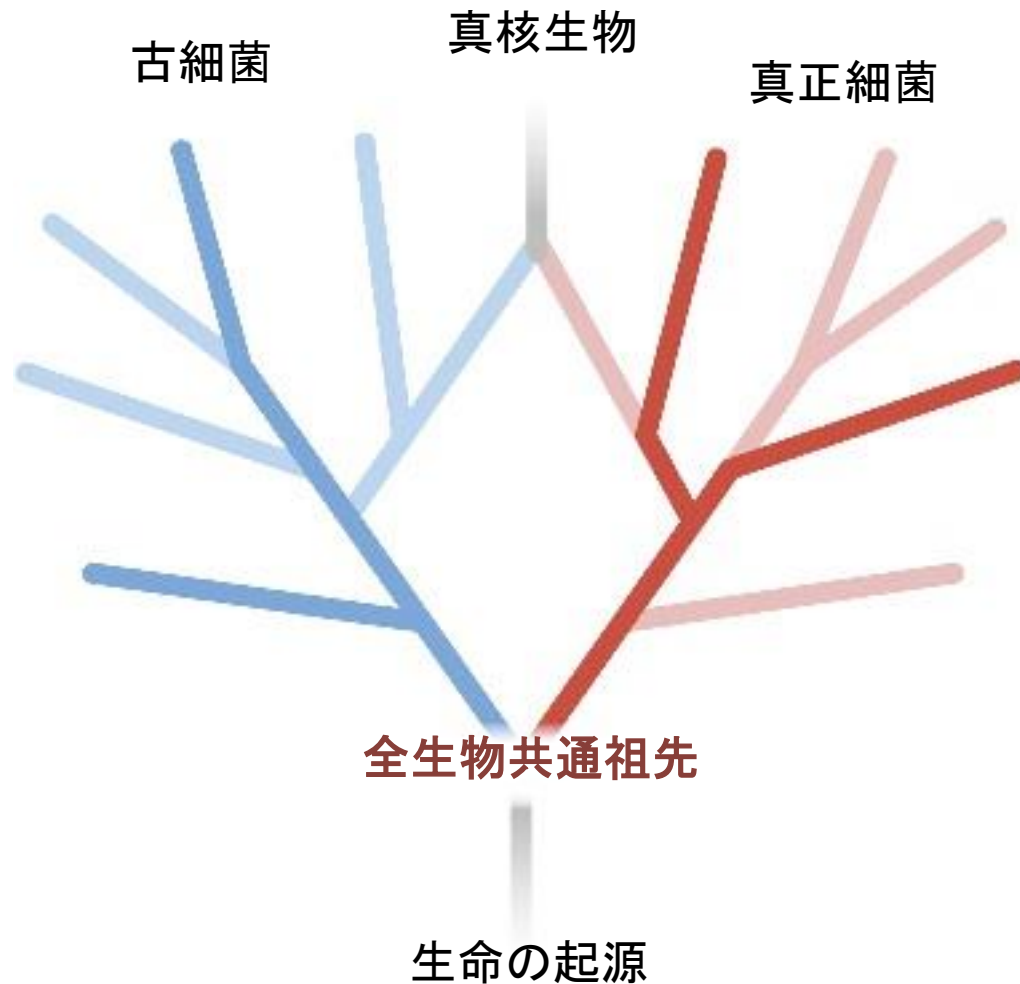


タンパク質が壊れる温度(変性温度) から生育温度を推定
 全生物の共通祖先は90°C以上の熱水に住んでいた



	变性温度 (°C)	生育温度 (°C)
Arc3nh	111	96
Arc4nh	111	96
Bac3nh	100	82
Bac4nh	104	87
Com3nh	113	99
Com4nh	109	94

Akanuma *et al.* PNAS (2013) Akanuma *et al.* Evolution (2016)



M. C. Weiss et al. *Nature Microbiol.* **1**,
Article number: 16116, 2016)

たくさんの生物のゲノムを調べる

- 1, 847種の真正細菌のゲノム
- 134種の古細菌のゲノム
- 6, 103, 411のタンパク質遺伝子
- 286, 514のタンパク質ファミリー
- その中で全生物共通祖先は355タンパク質を持っていた

M. C. Weiss et al. *Nature Microbiol.* **1**,
Article number: 16116, 2016)

全生物の共通祖先

- 嫌気性
- CO₂固定
- H₂に依存
- 窒素固定

M. C. Weiss et al. *Nature Microbiol.* **1**,
Article number: 16116, 2016)

結論

- 1) 全生物の共通祖先は熱水に住んでいた。
- 2) 全生物の共通祖先は炭酸固定をしていた。

昆虫と植物、他の生物、本質的に何が違うのか？

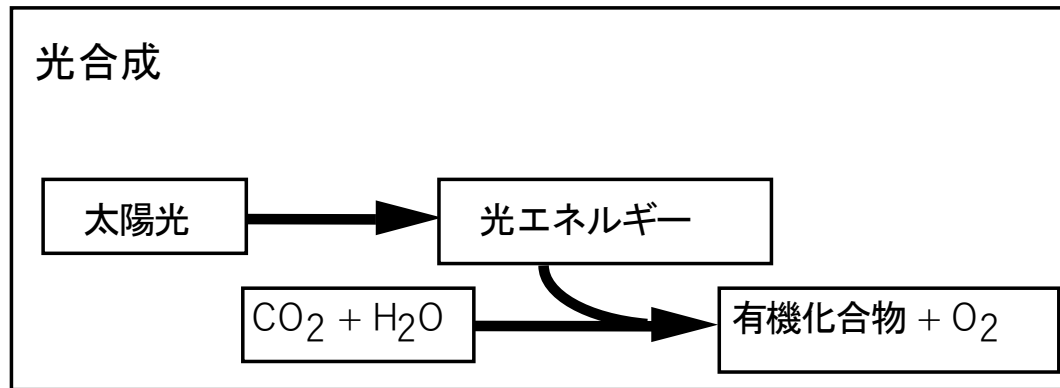
生き物を分ける：分類学

- どう分けるか
- 人間の直観で区別がつく
- 訓練するとできるようになる。
- 外見、色、大きさ、形、表皮、骨格
- 何を重要と思うか
 - 肢、骨格
 - 何を重要とおもうかで分類法はかわる
 - 表皮(粘膜、鱗、羽、毛)
 - 進化、分岐で分ける
 - 解剖学(内臓、器官)
 - 系統分類
 - 発生学
 - 遺伝子で調べる
 - 単細胞か多細胞か
 - 分子系統分類
 - 細胞の構造(核の有無)
 - 遺伝子から昔の生物がわかる

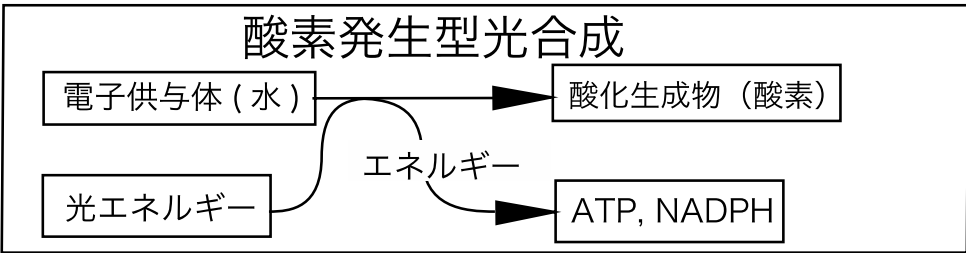
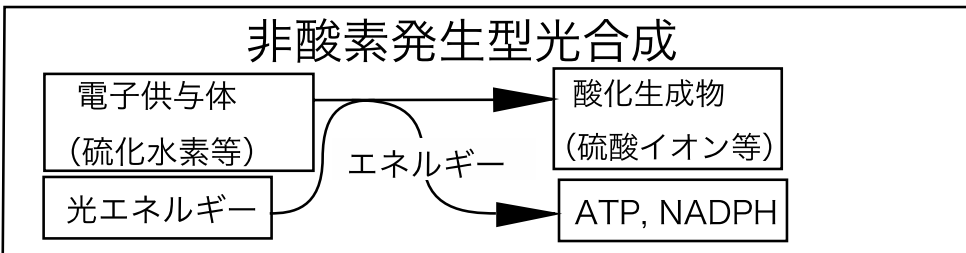
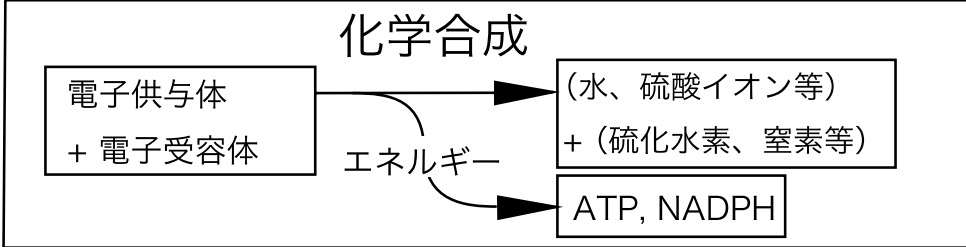
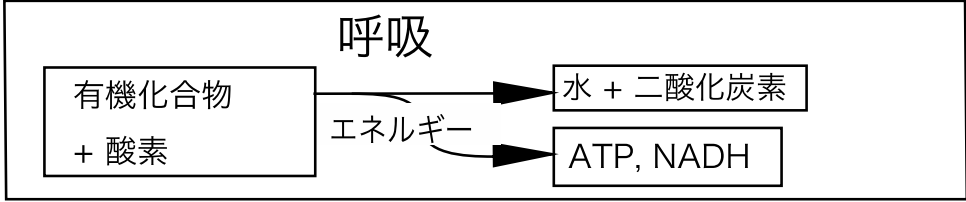
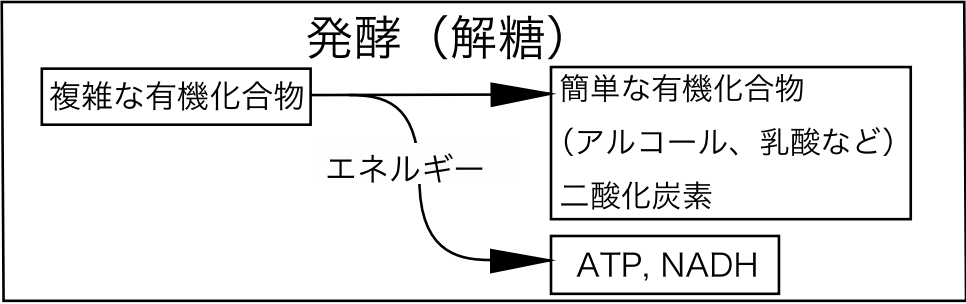
シアノバクテリア祖先型から推定した地球の温度

光合成の進化

光合成にも色々ある



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

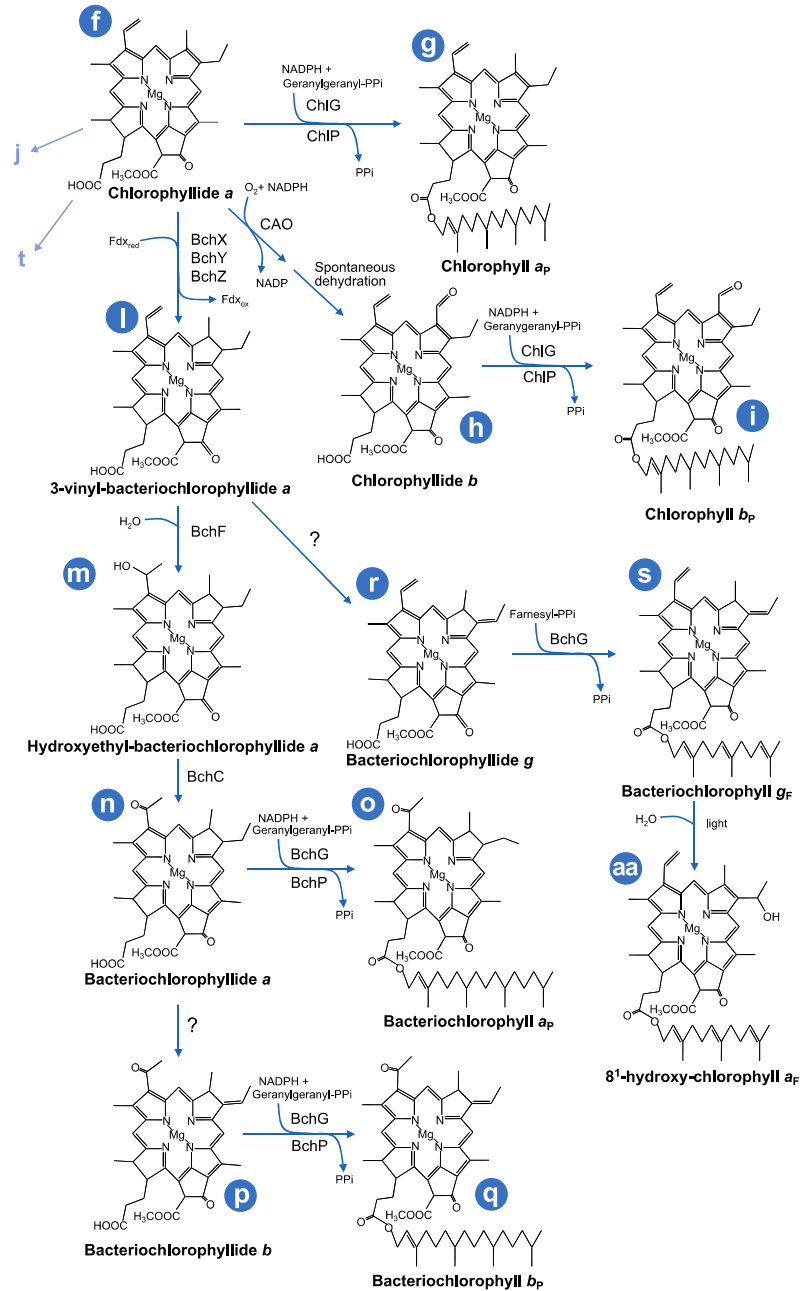


Hanada 2019 Springer

Hanada 2019 Springer

Kume2019 Springer

Chlorophyllide a

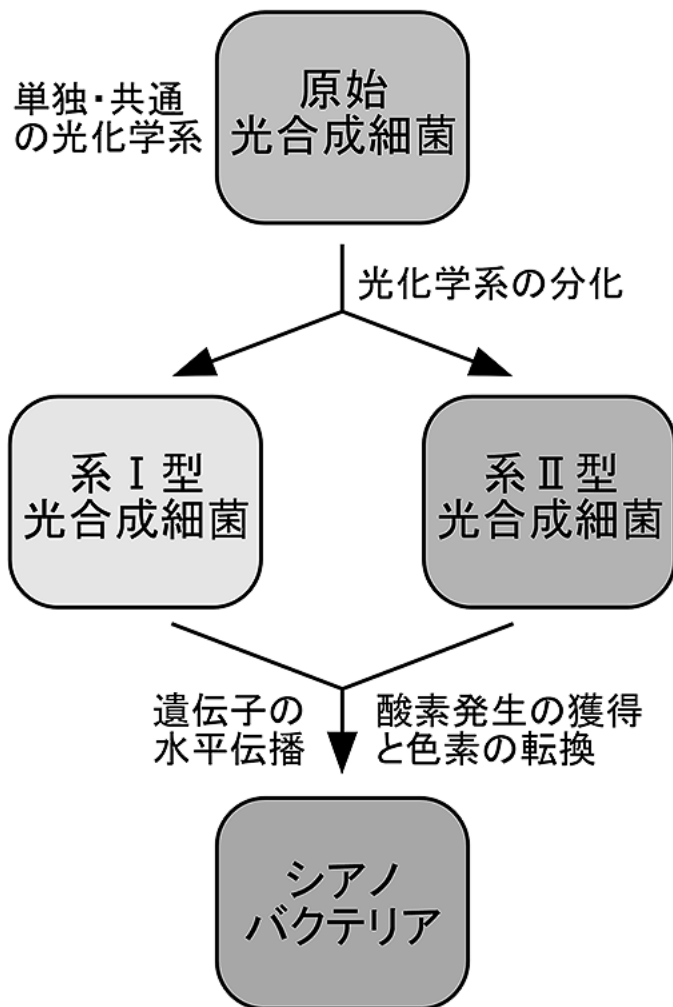


Bacteriochlorophyllide a

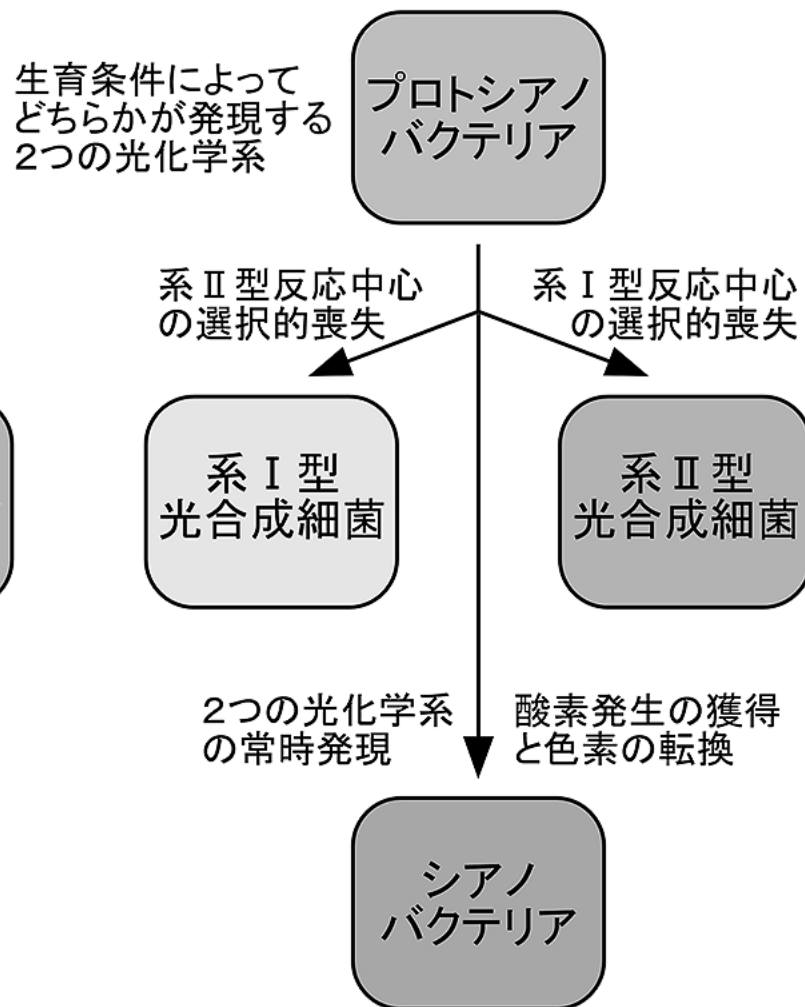
Gomez, A. et al. 2007

Figure 2
(Continued)

A. Fusion モデル



B. Selective-Loss モデル



園池 2018

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	Ferrocitales	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

Hanada 2019 Springer

Hanada 2019 Springer

Hanada 2019 Springer

結論と示唆

熱水噴出孔周辺には化学合成細菌に依存した生態系が存在した。

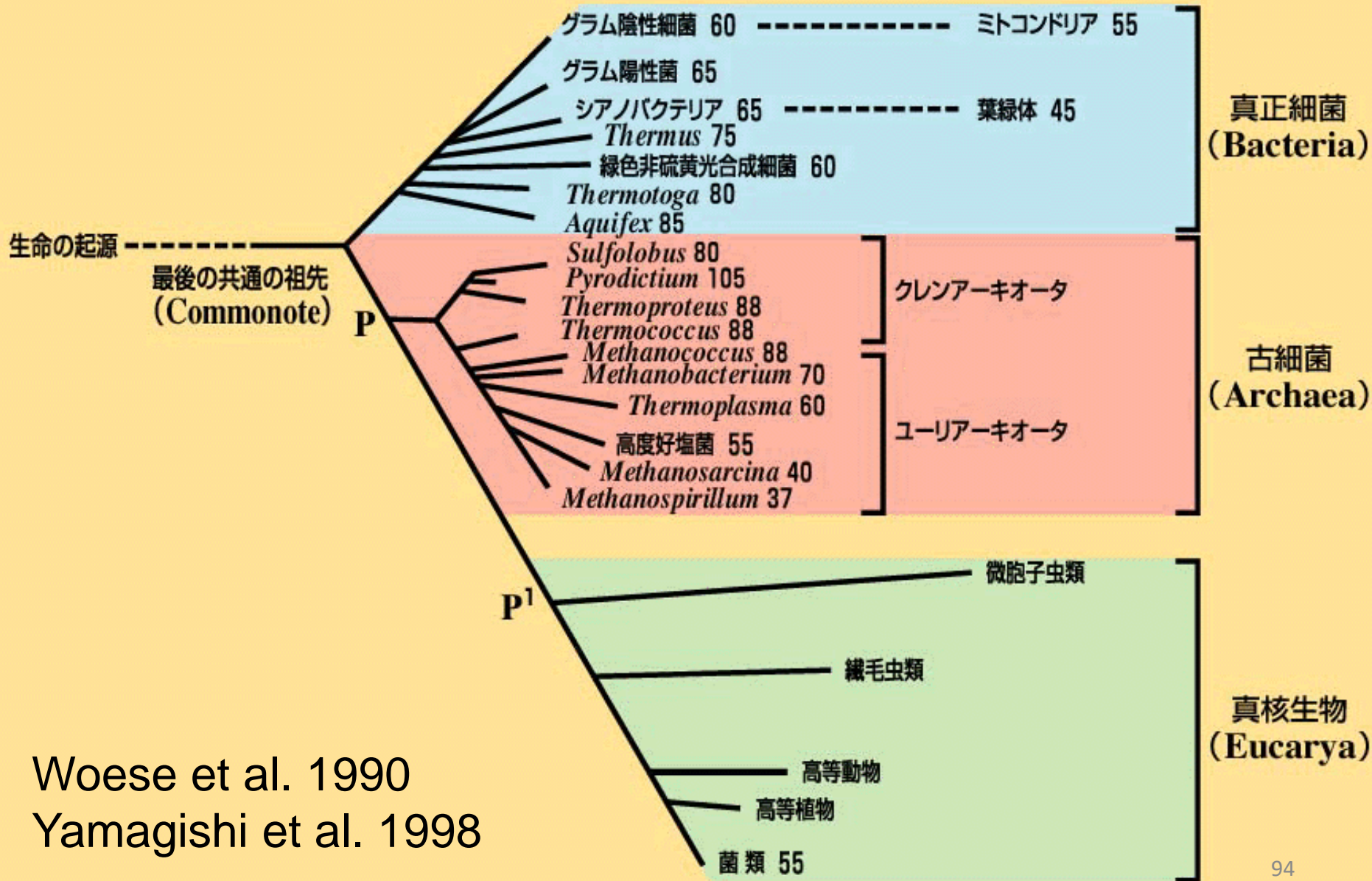
同様の生態系が光合成が誕生する以前の地球にあった可能性がある。

生物にとって最も重要なもの

自由エネルギー

= 食べ物 (還元型) + 酸素 (酸化型)

全生物の進化系統樹

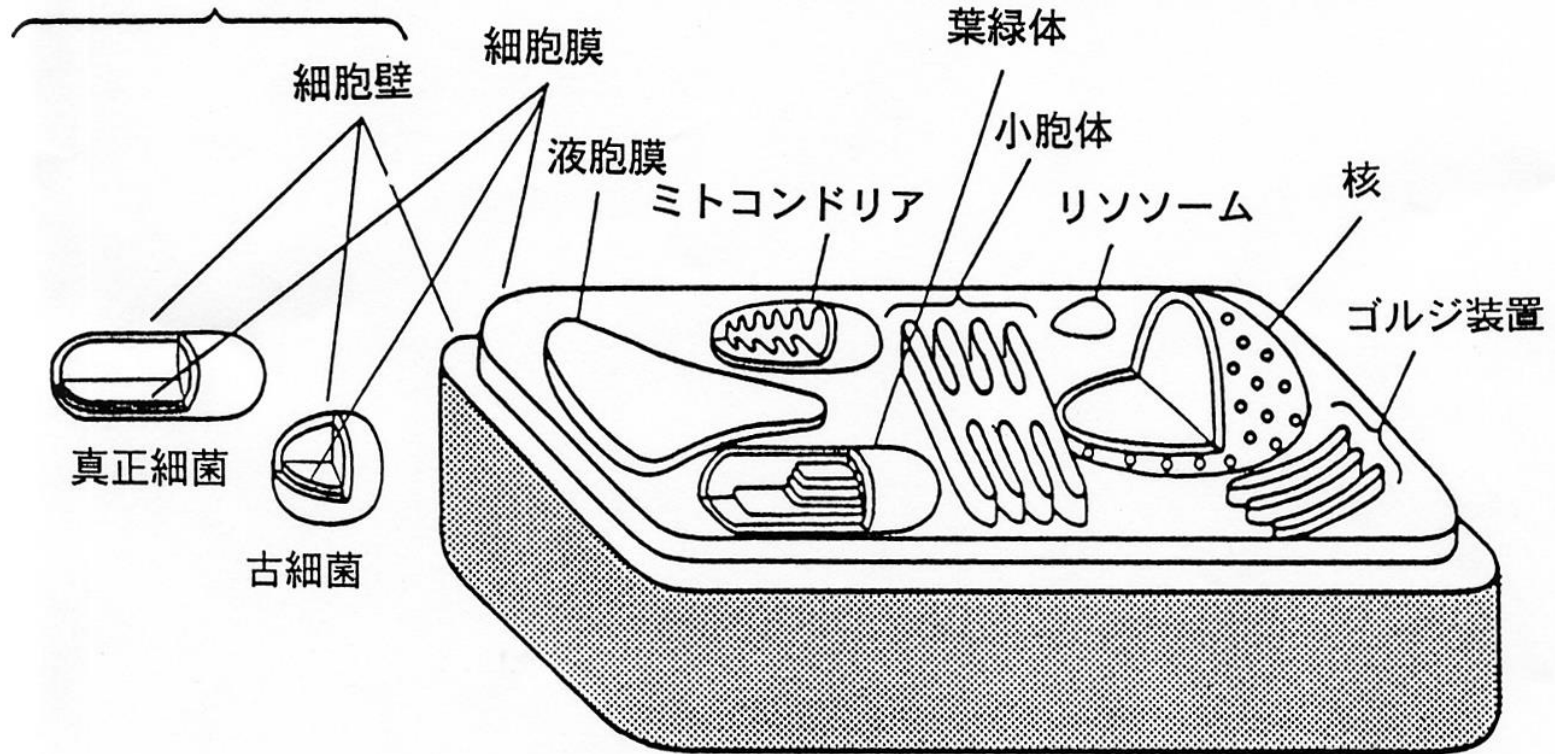


Woese et al. 1990
Yamagishi et al. 1998

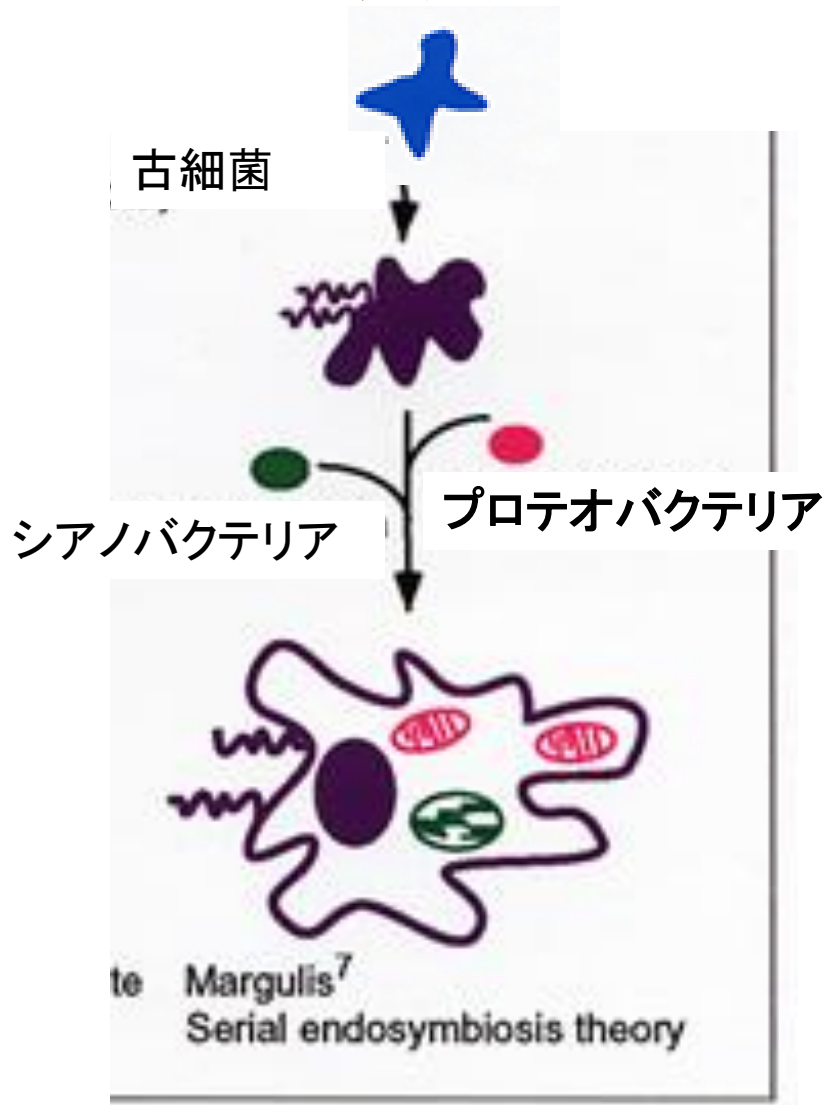
真核生物はどのように誕生したのか

原核生物細胞

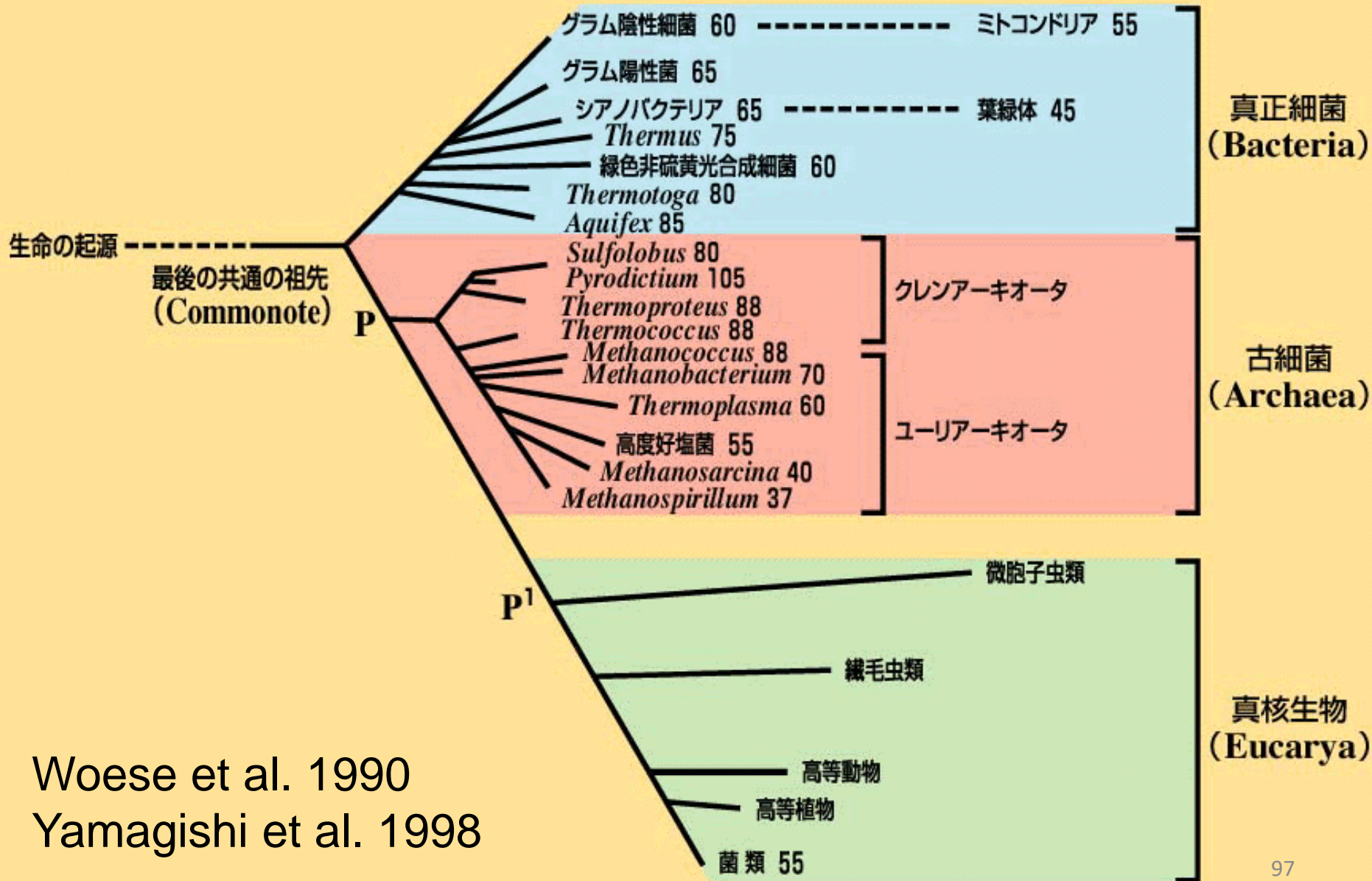
真核生物細胞（植物細胞）



細胞内共生によって真核生物が誕生した



全生物の進化系統樹



Woese et al. 1990
Yamagishi et al. 1998

藻類の進化 根本で放散進化

コンブ

宿題の答え

緑色植物と藻類は異なる生き物

アサクサリ

ストラメノパイル生物群

緑色の植物群 (緑藻類と陸上植物)

紅藻類

灰色藻類

クリプト藻類

不等毛類

ハプト藻類

菌類

陸上植物への道

ユーグレノゾア生物群

クロララクニオ藻類

ミドリムシ

トリパノソーマ類
ポド類

ランソウ類
(原核生物)

真核生物の誕生

★ 一次共生

★ 二次共生

繊毛虫類

アピコンプレックス類

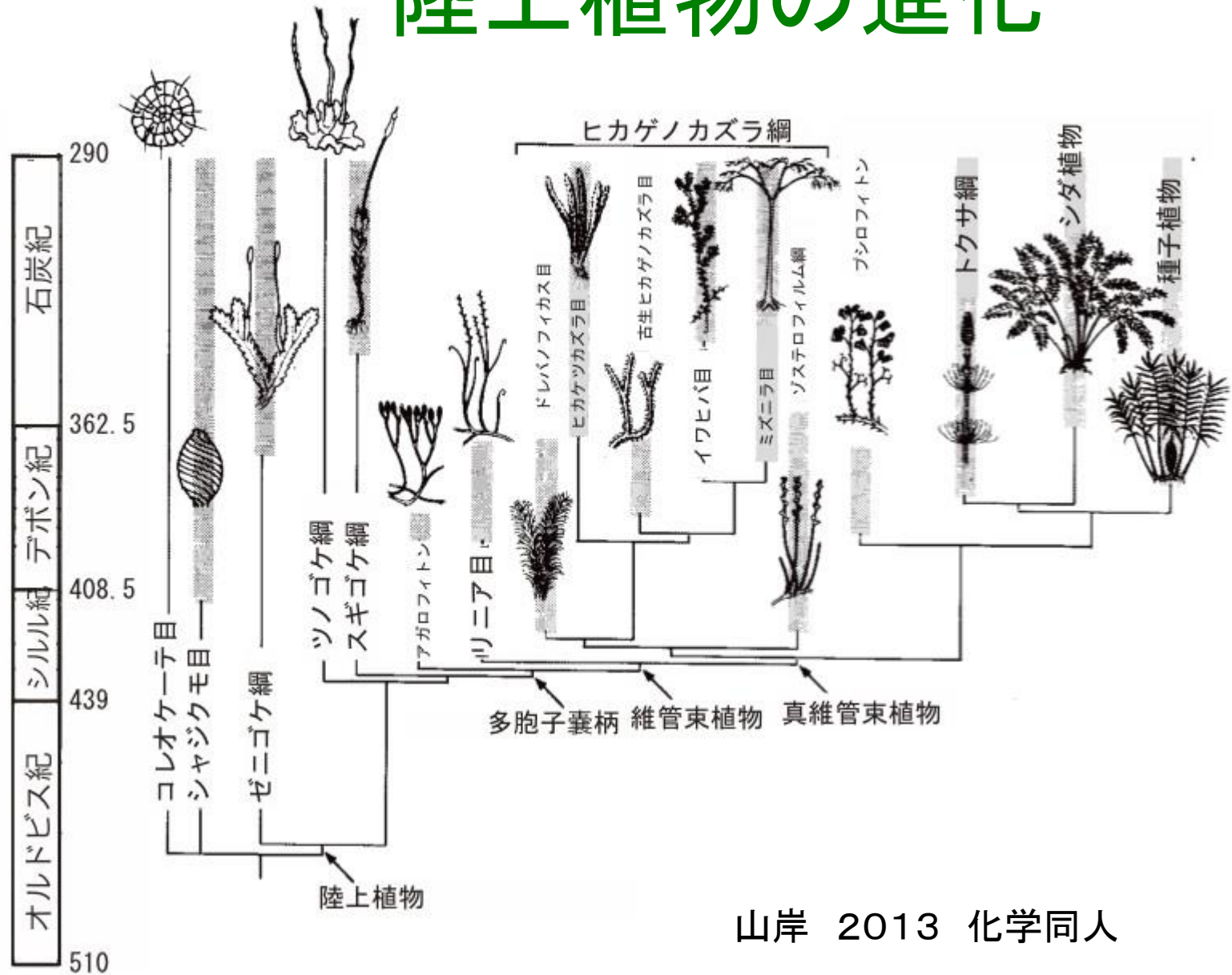
洞鞭毛藻類

アルベオラータ生物群

動物



陸上植物の進化



山岸 2013 化学同人

植物



種子植物



しだ類

こけ



ゼニゴケ



スギゴケ



シャジクモ

ミズニラ



ツノゴケ

イワヒバ



コレオケーテ 0.1mm

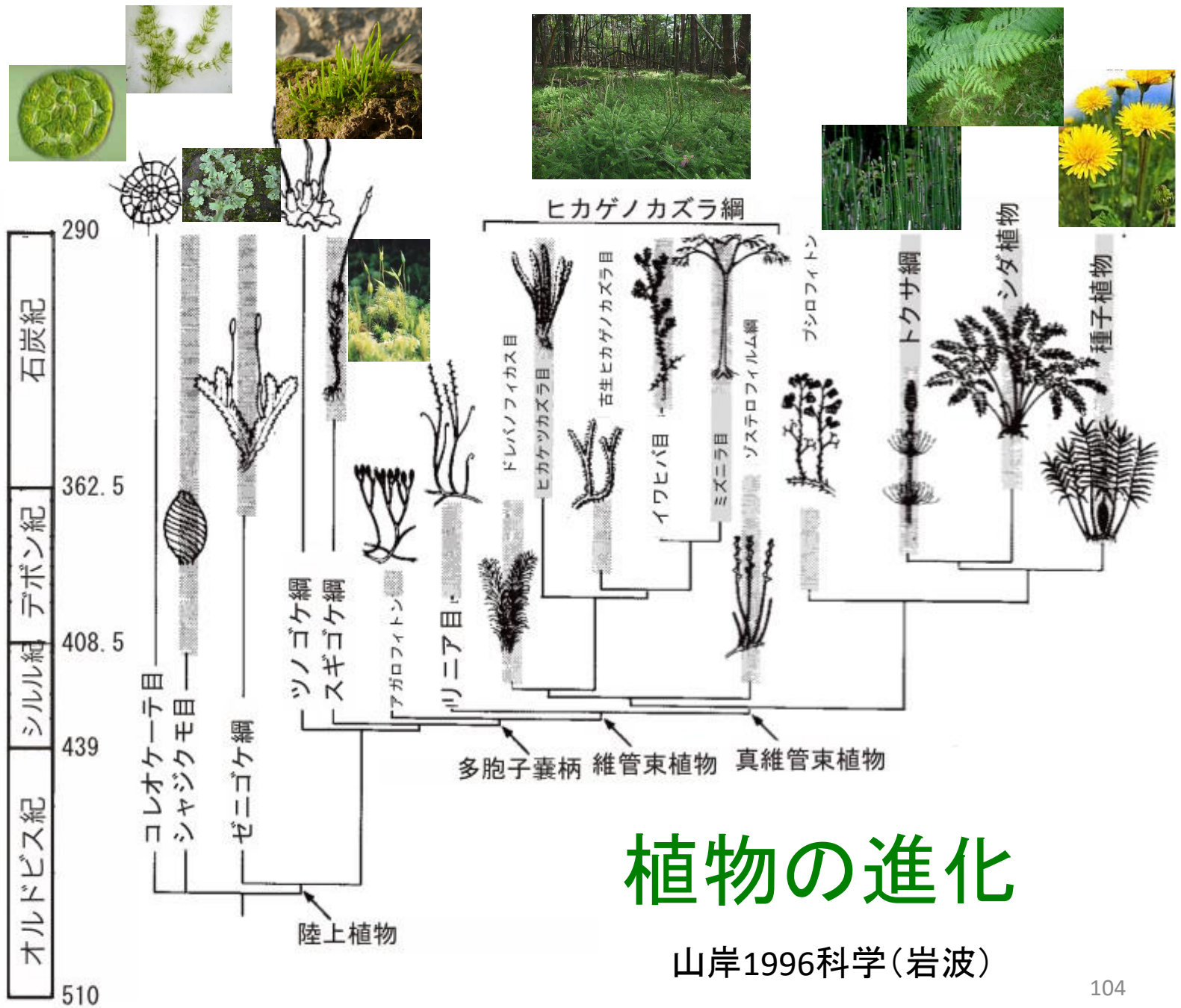


トクサ



ヒカゲノカズラ





繁栄した種と絶滅した種は なにが違うのか。

環境への適応

環境変動への対応

特殊化した生物は変動に弱い

一般化した生物は変動に強い

動けるものは強い

胞子や種は強い

大量絶滅の後に

適応放散が起きる

いろいろ試す

うまくいったものが反映する