

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

(万年)	新	更新世 ヒト属誕生 完新世	顕生代	(億年)	顕生代	
258	生	鮮新世 <i>Australopithecus</i> 誕生	先	5.42	原	6.7-6.35 全球凍結 6.8エディアカラ動物群 7.3-7.0 全球凍結
533		中新世				
2,303		漸新世 哺乳類大型化				
3,390		始新世 哺乳類の目そろう				
5,580		暁新世 哺乳類の適応放散				
6,550	中	白亜紀 恐竜の繁栄 有胎盤類の出現 被子植物繁栄開始	カ	25.0	生	
(億年)		ジュラ紀 恐竜の繁栄 裸子植物の繁栄				
1.455		三畳紀 哺乳類の出現 シダ・裸子植物の繁栄				22.0 大型化石の産出 23-22.2 全球凍結
2.00	古	ペルム紀 爬虫類の繁栄 シダ類の繁栄			太	27ストロマトライト?
2.51		石炭紀 両生類の繁栄 昆虫の繁栄 シダ類の森林				
2.99		デボン紀 有顎魚類の多様化 両生類の出現 種子植物の出現				縞状鉄鉱層 35 最古の細胞化石
3.59		シルル紀 無顎類の多様化 多くの陸上植物				38 最古の化学化石
4.16		オルドビス紀 海洋動物適応放散 最古の陸上植物				40 最古の岩石
4.44	代	カンブリア紀 無脊椎動物の繁栄 動物門の出現		40.0	冥王代	44 大陸地殻の形成 ~46 地球誕生
4.88						
5.42			ア	~46		

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

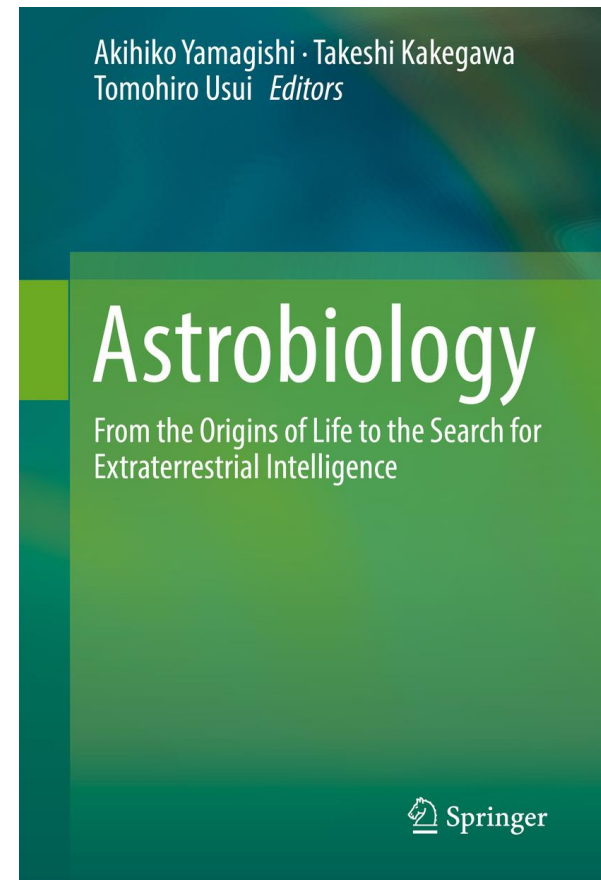
Hikaru Yabuta

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 Reveiled from Bilology

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 Cosmoclimatological 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

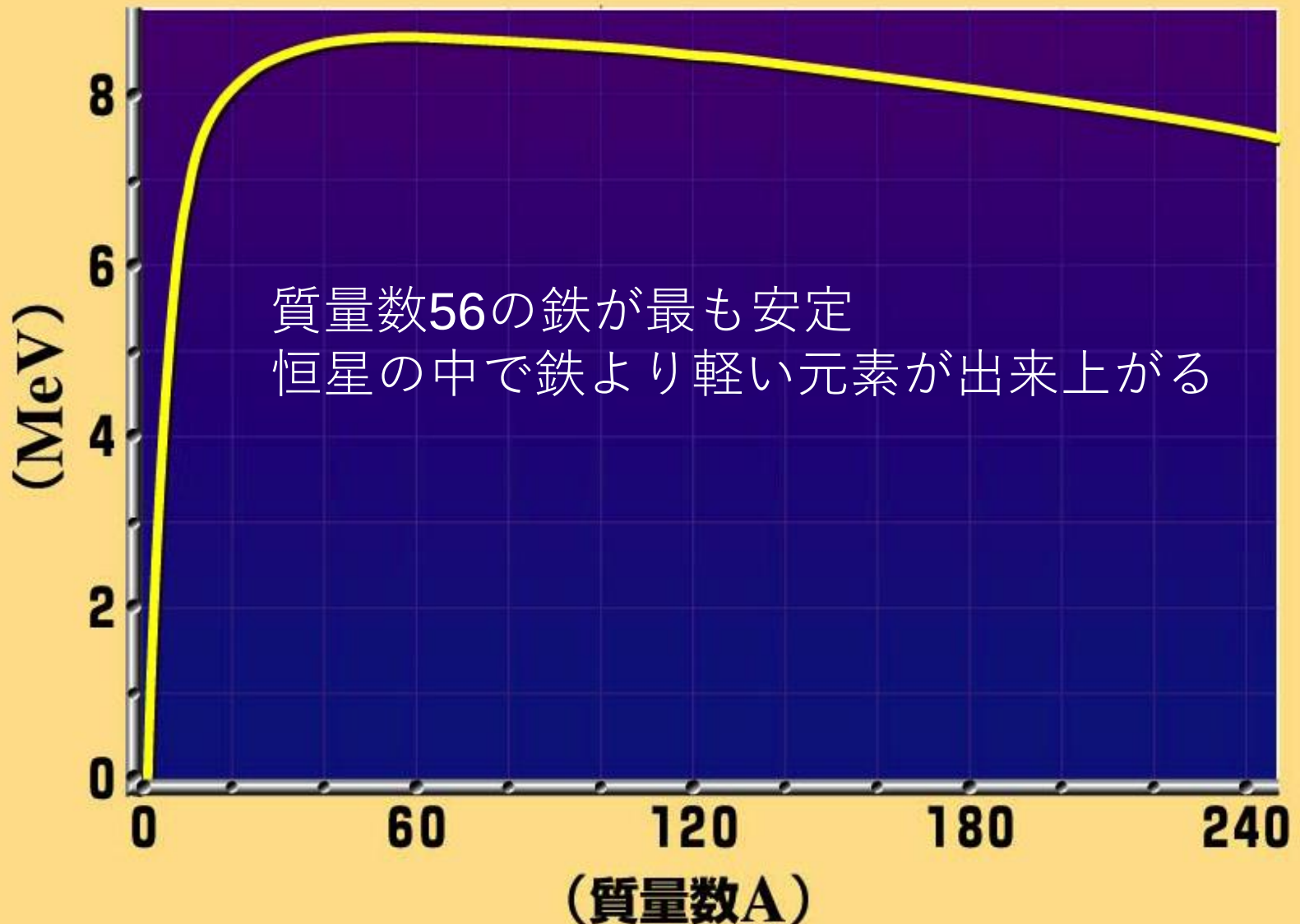
宇宙と物質の進化

- 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 1 3 8 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

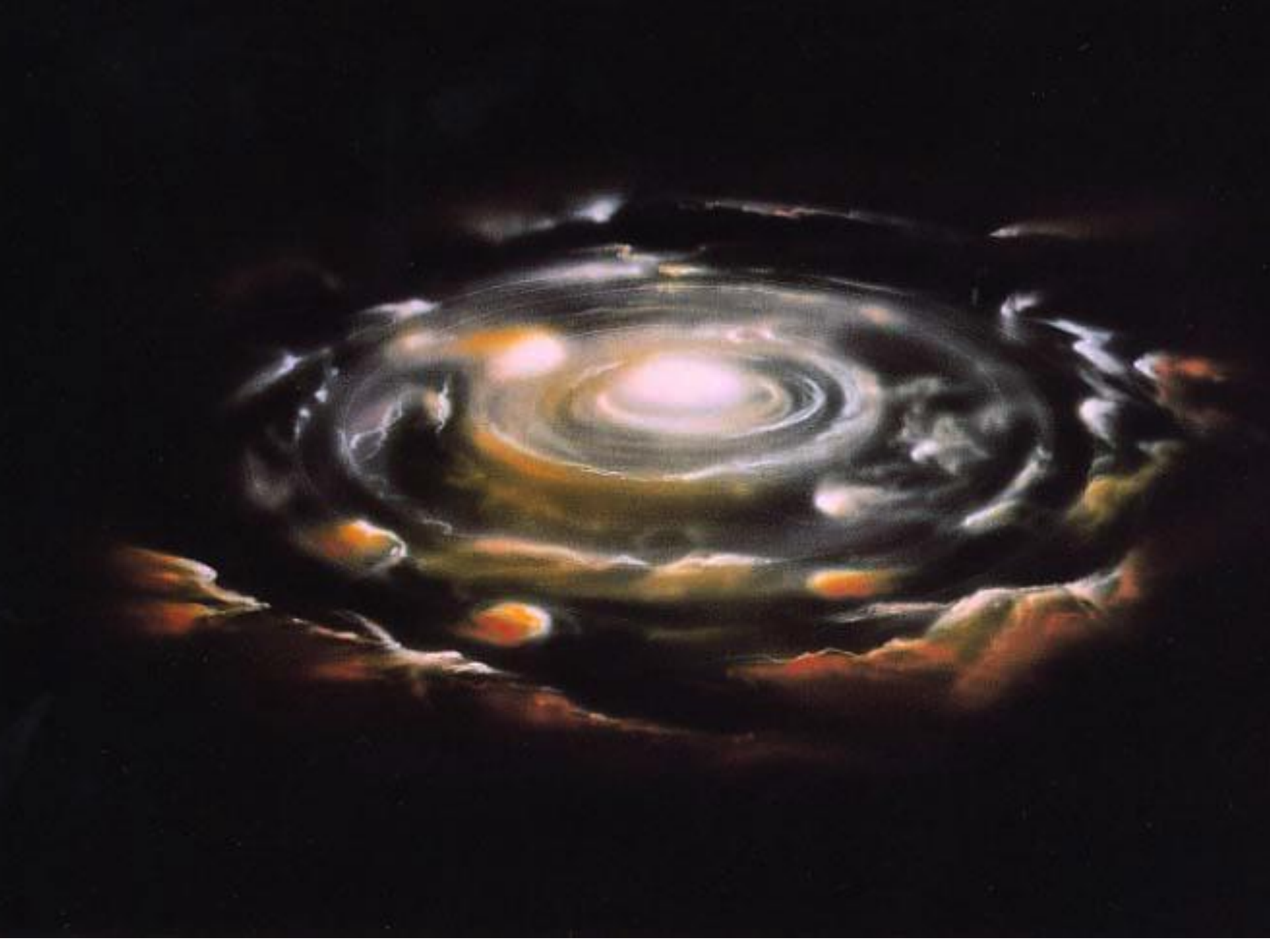
- 137億年前 宇宙の誕生
- 宇宙の膨張
- ビックバン
- 3分後 原子核の誕生(水素、ヘリウム)
- 星(恒星)の誕生 多種の原子核の誕生
- 超新星爆発と重原子の誕生
- 太陽系と惑星系の誕生

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

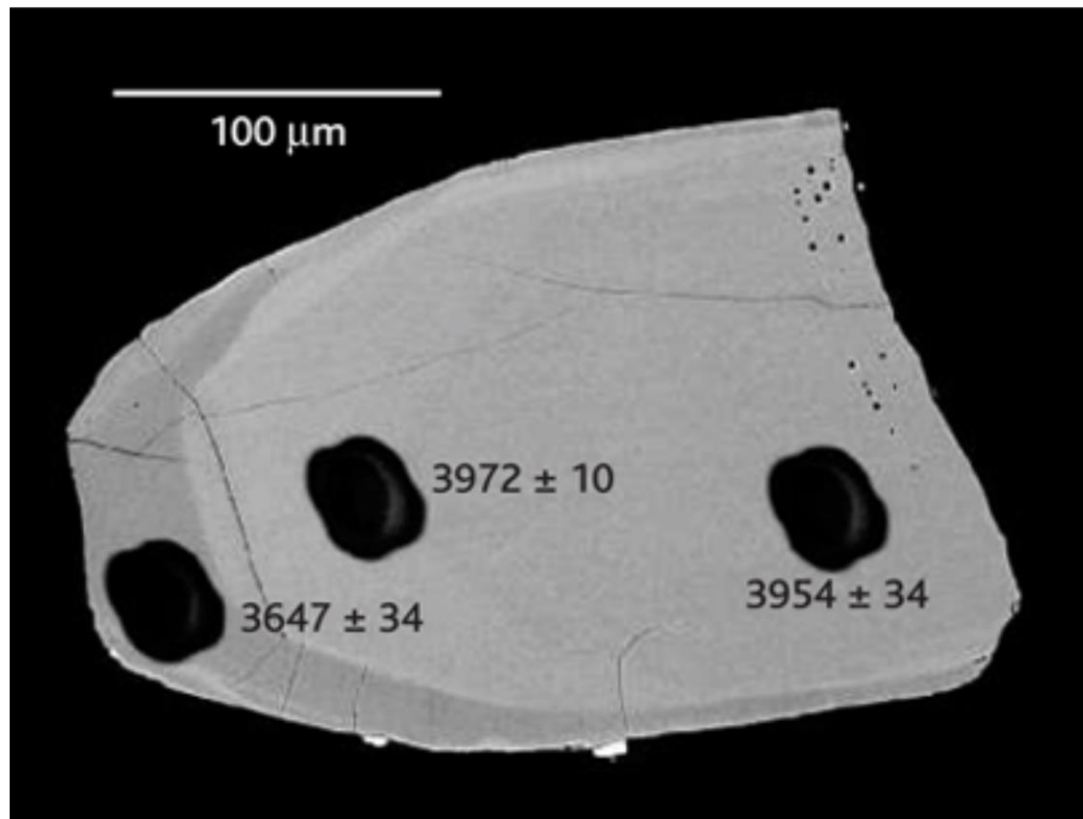


地学の証拠

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

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

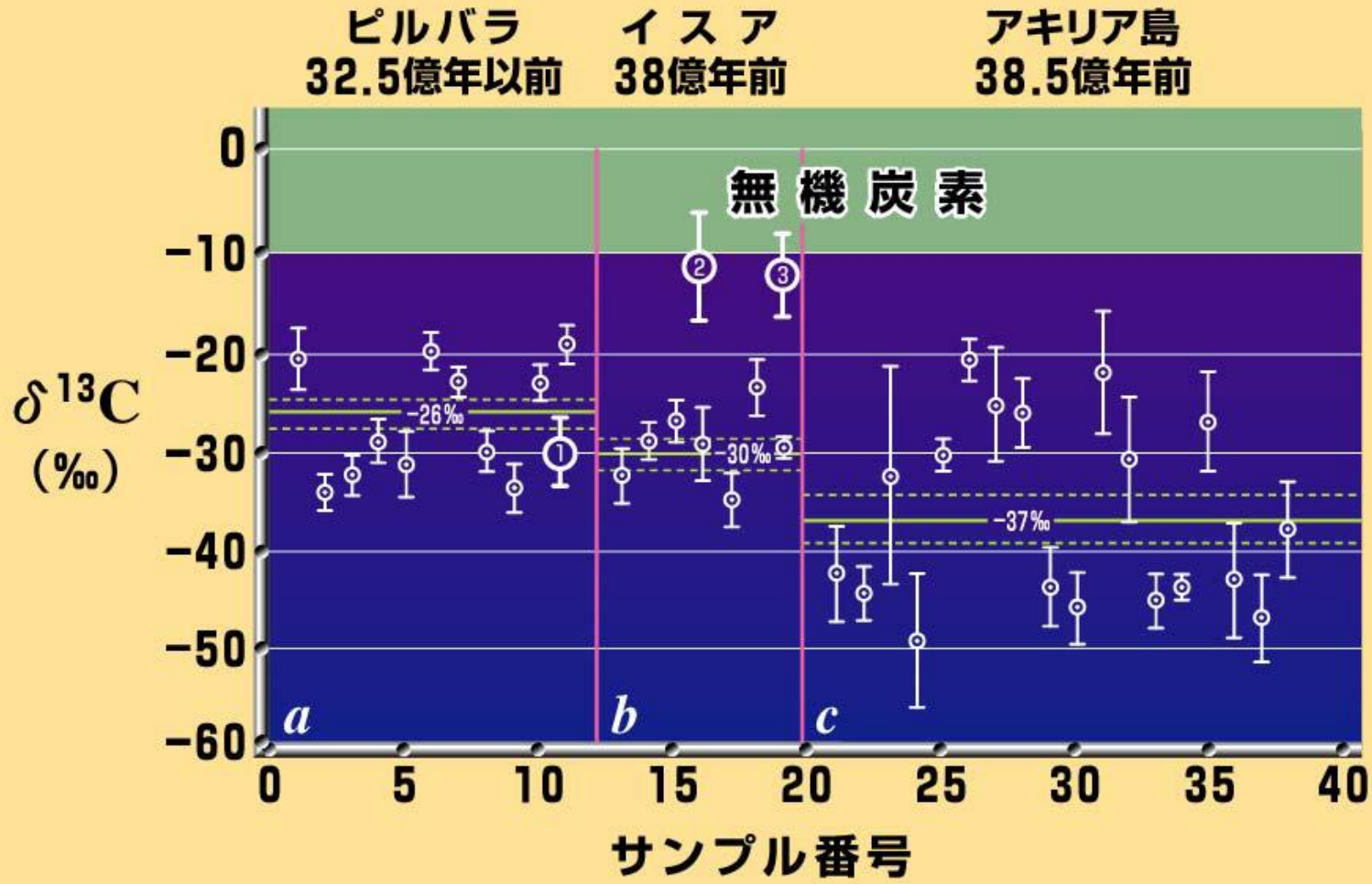


初期地球環境は不明

- 初期地球の大気組成： CO_2 , CO , H_2 , CH_4
- 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



Kakegawa (2019) Springer in press

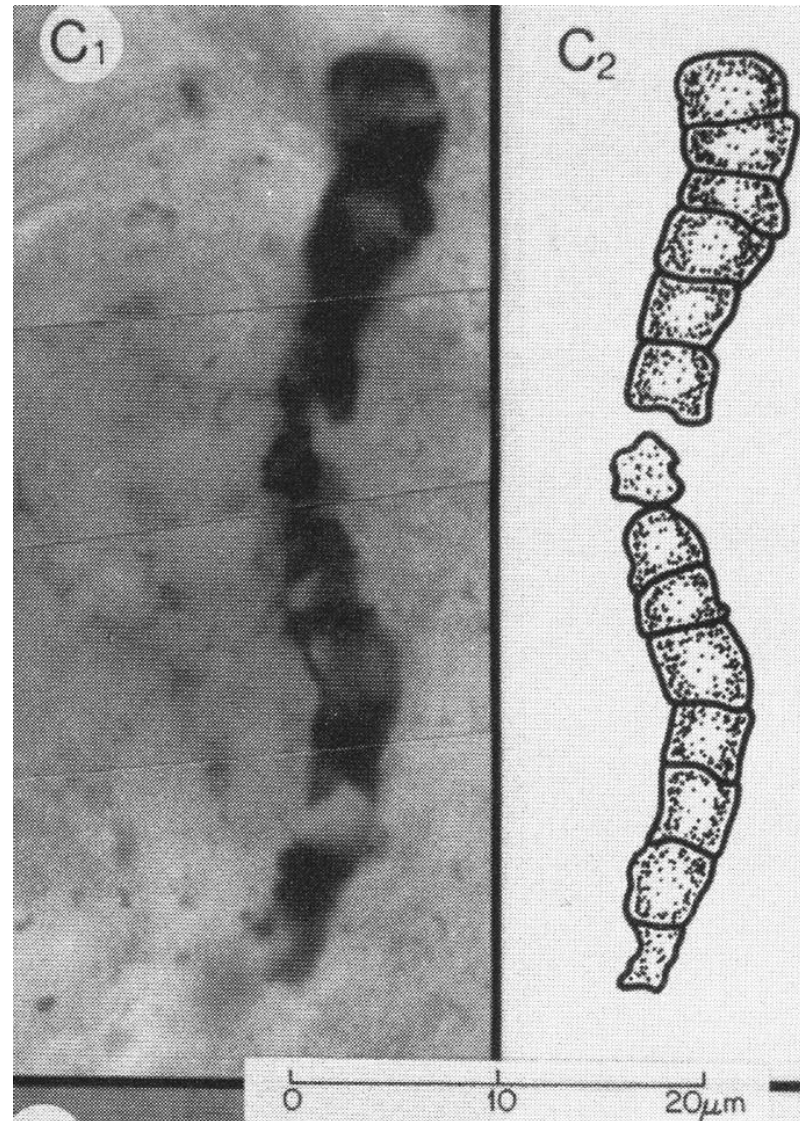
太古の岩石中石墨の ^{12}C と ^{13}C の量比(世界標準物質で規格化された値) 掛川、生物の科学遺産、2月号2017年

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)

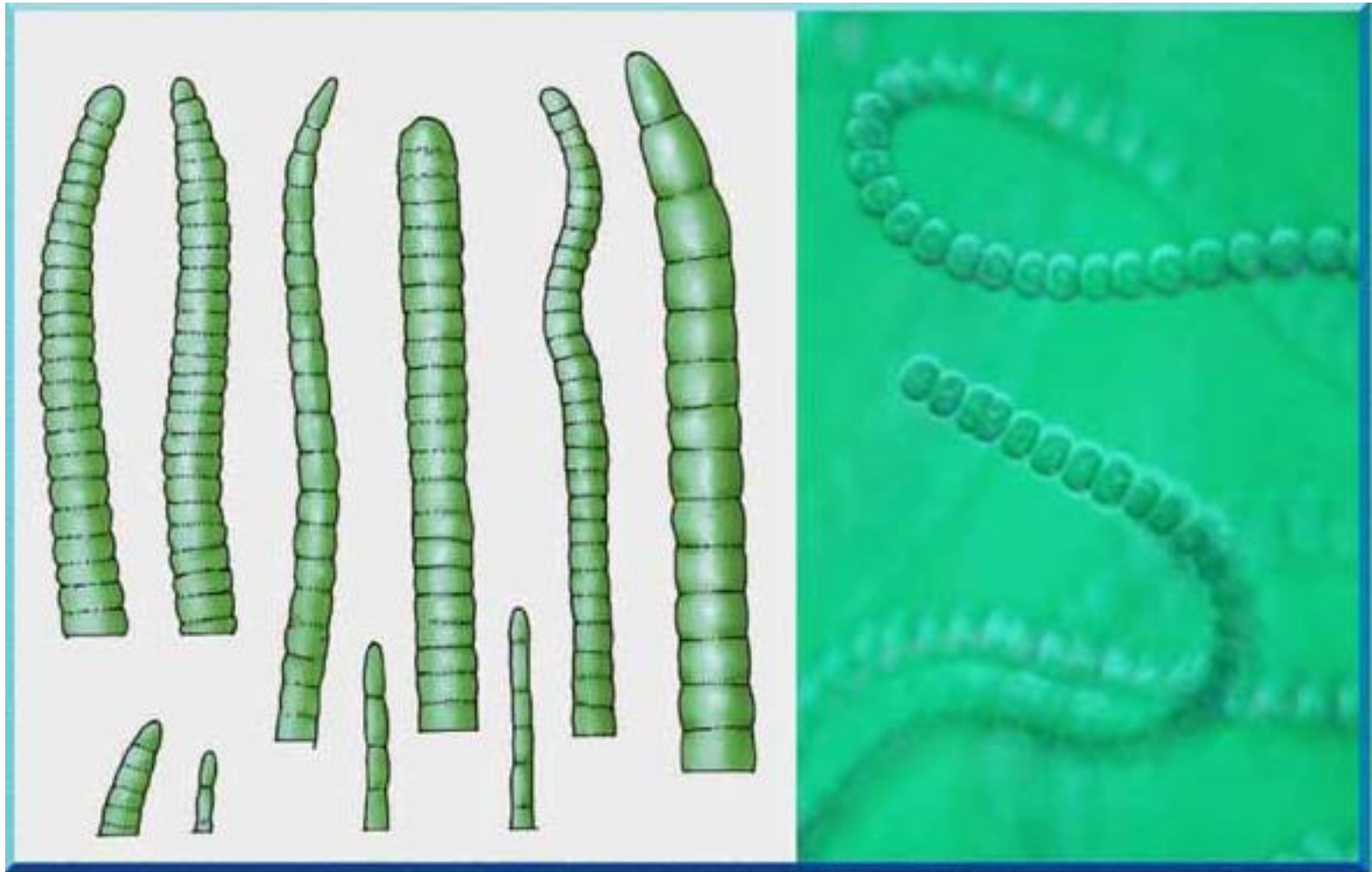
Kakegawa, T.
Springer
In press (2019)

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

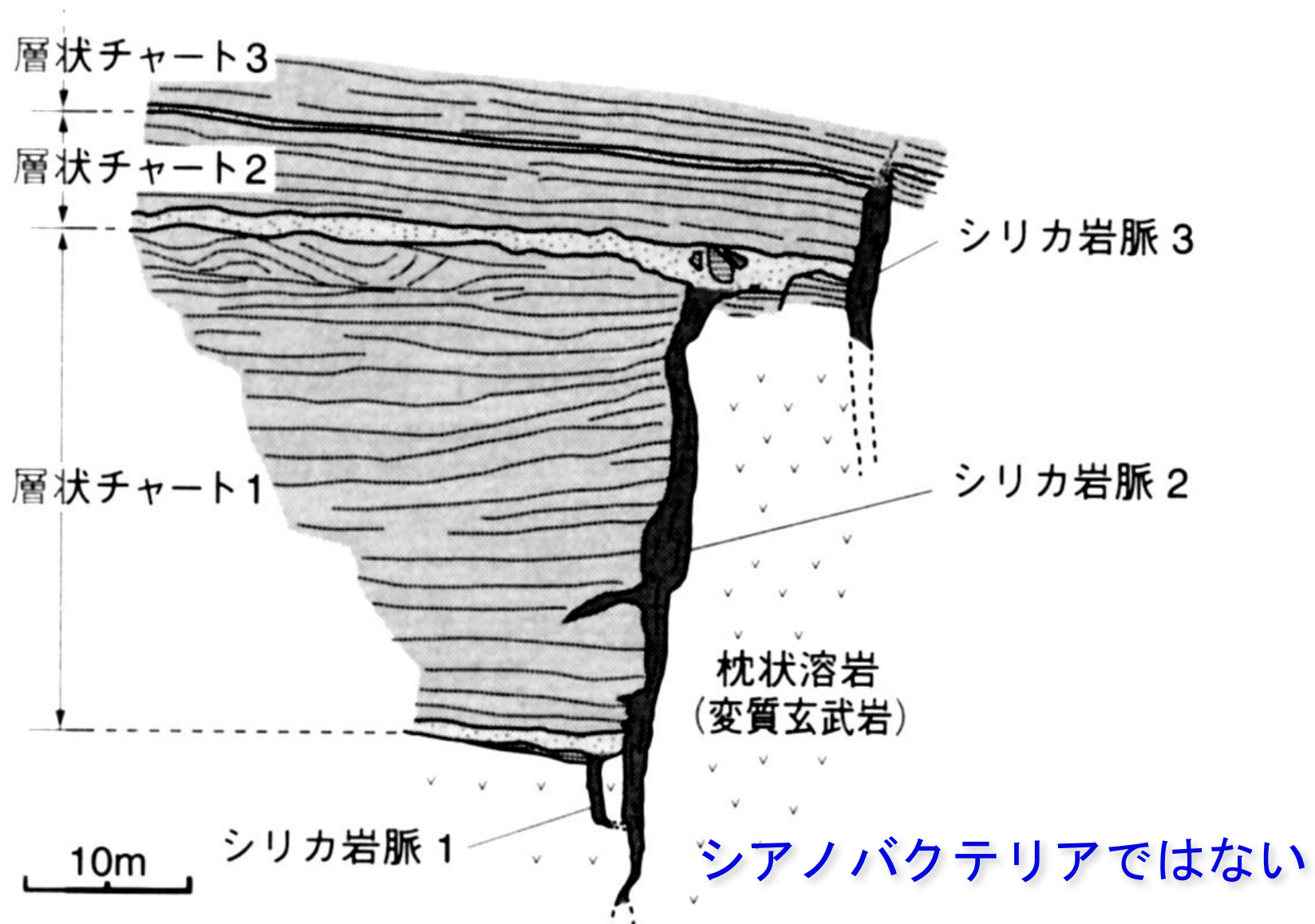


現在ストロマトライトのできている場所

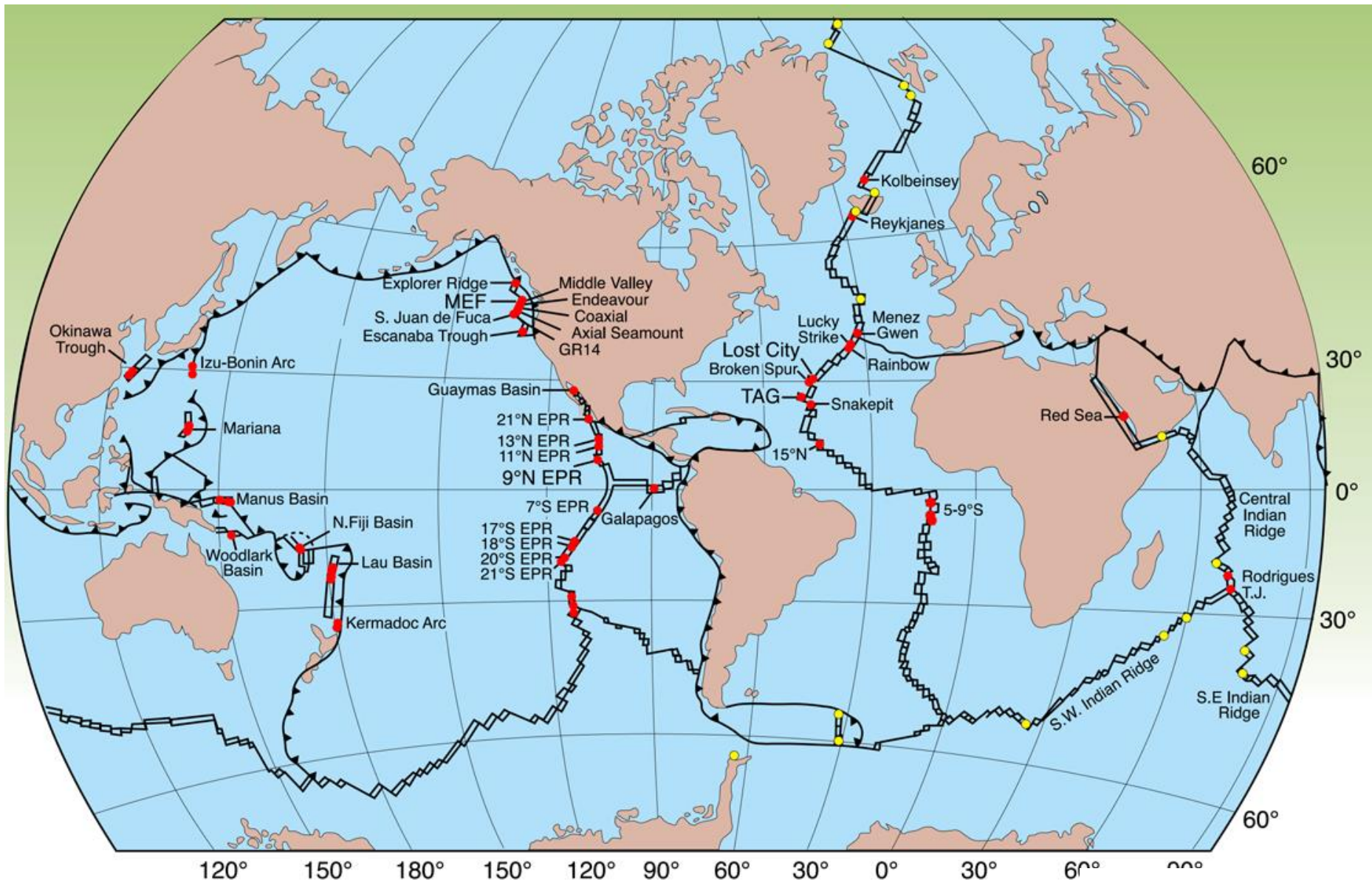


オーストラリア、ハメルンプール

ノースポールのシリカ岩脈 Isozaki et al. (1997)



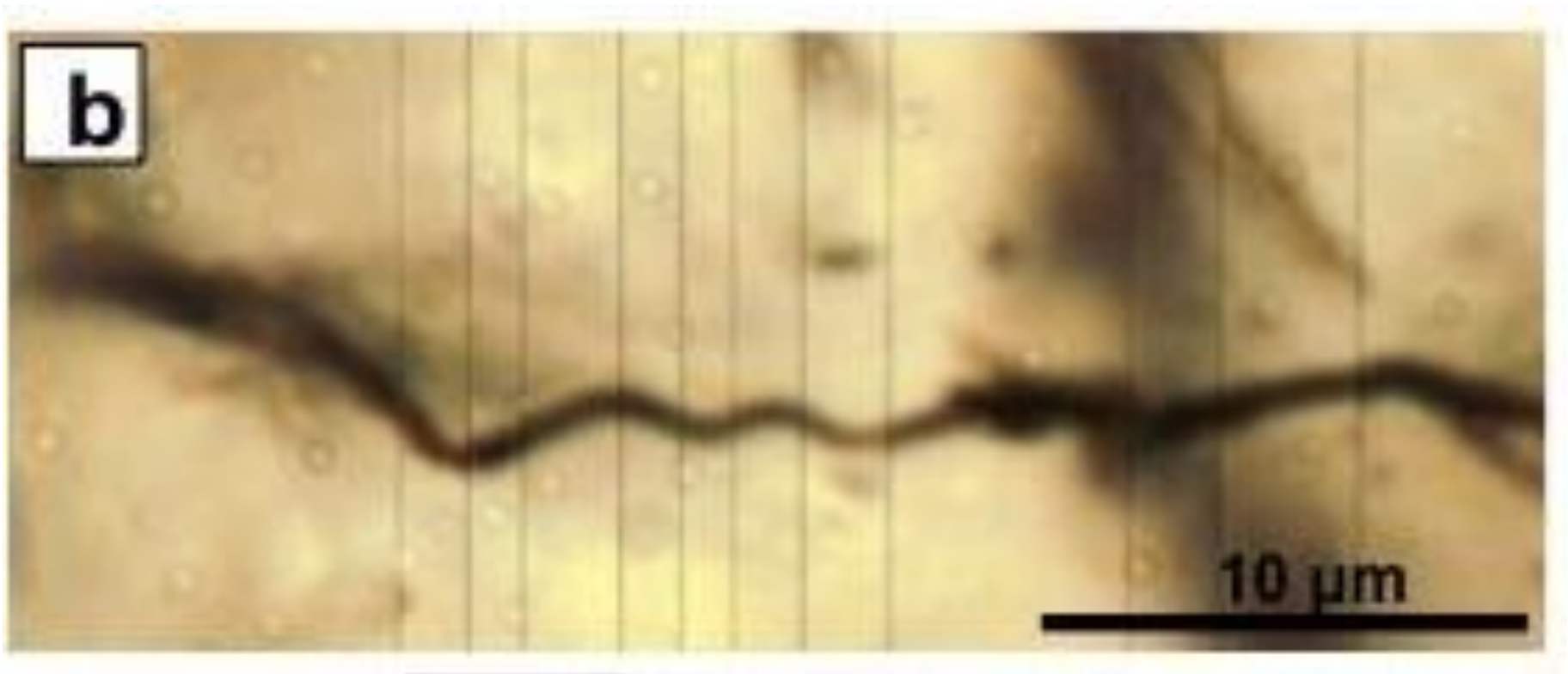
世界各地の海底熱水地帯



● 発見されている熱水地帯

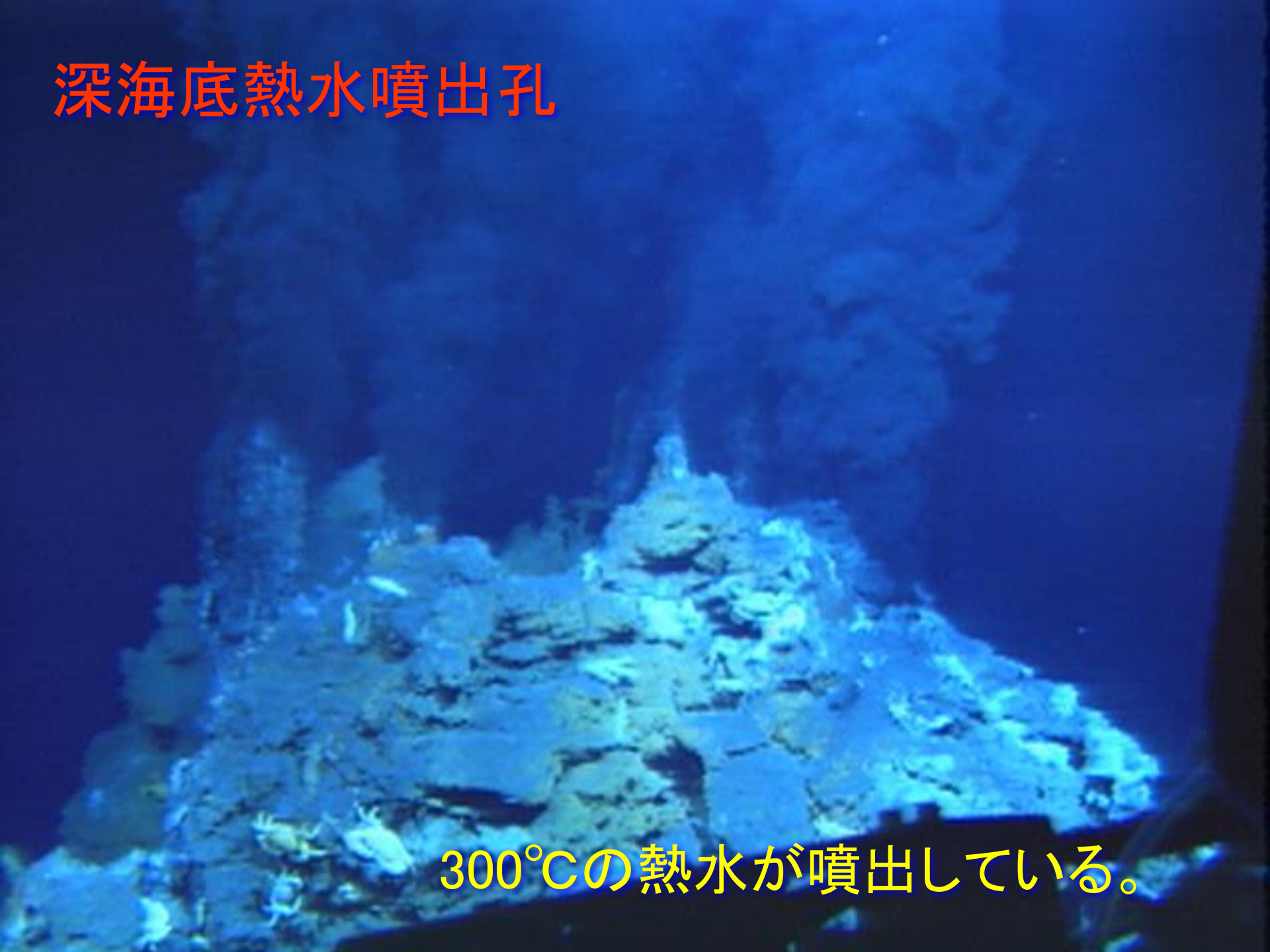
Tivey et al., 2008

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)

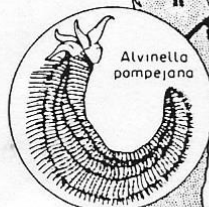


深海底熱水噴出孔

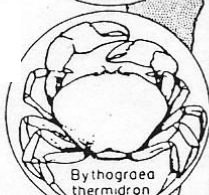
300°Cの熱水が噴出している。



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

Serpulidae

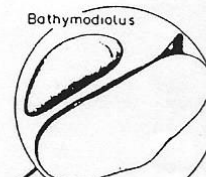
graveyard

anemones

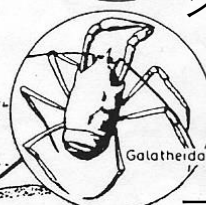
basalt

water circulation

シンカイヒバリガイ



シロウリガイ



ヨシオリエビ

海水中細胞量 (ATP, ATP+ADP+AMP) の深度依存性

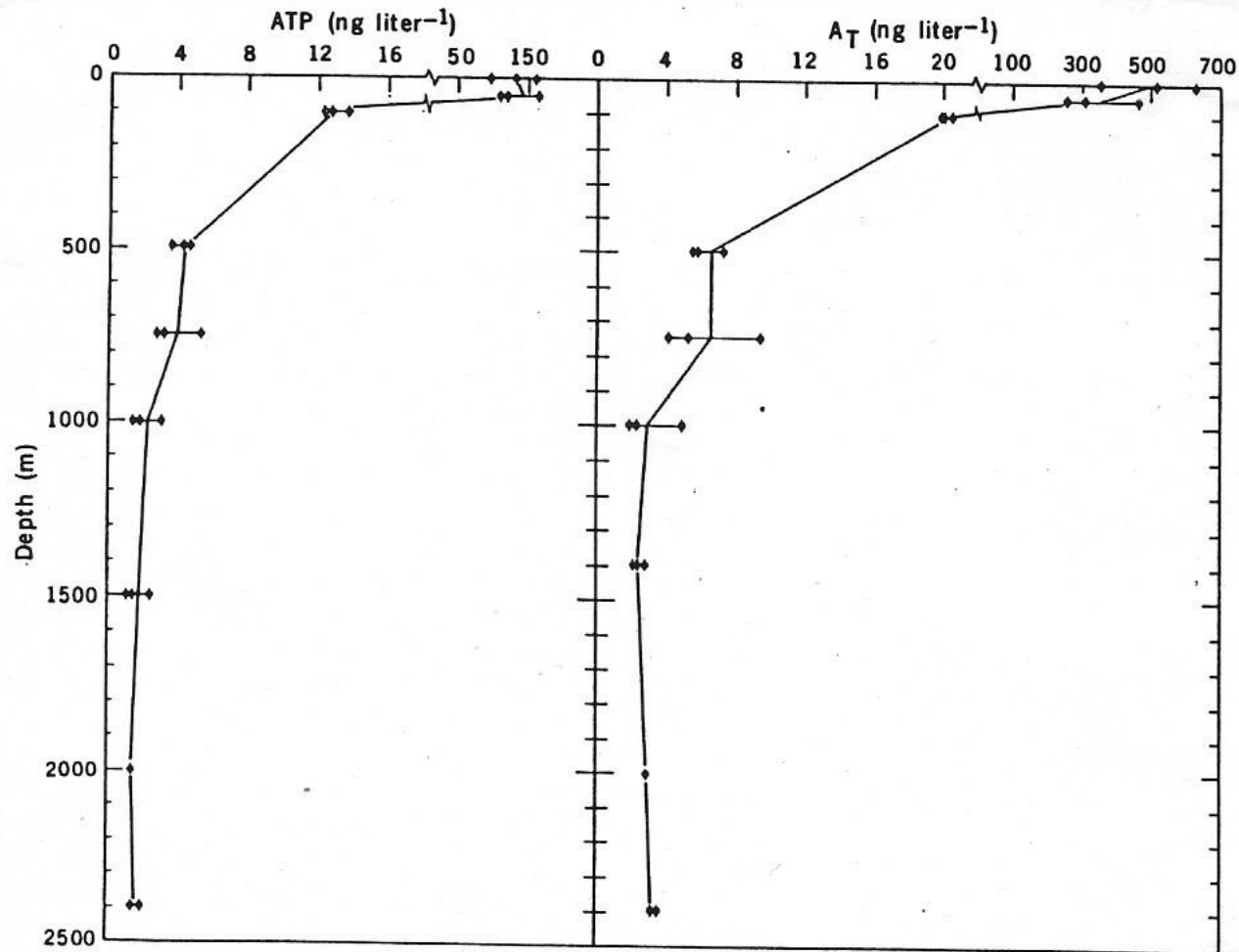


Fig. 2. Profiles of adenosine 5'-triphosphate (ATP) and total adenylates (A_T) in the water column near the Galápagos Rift vents.

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.

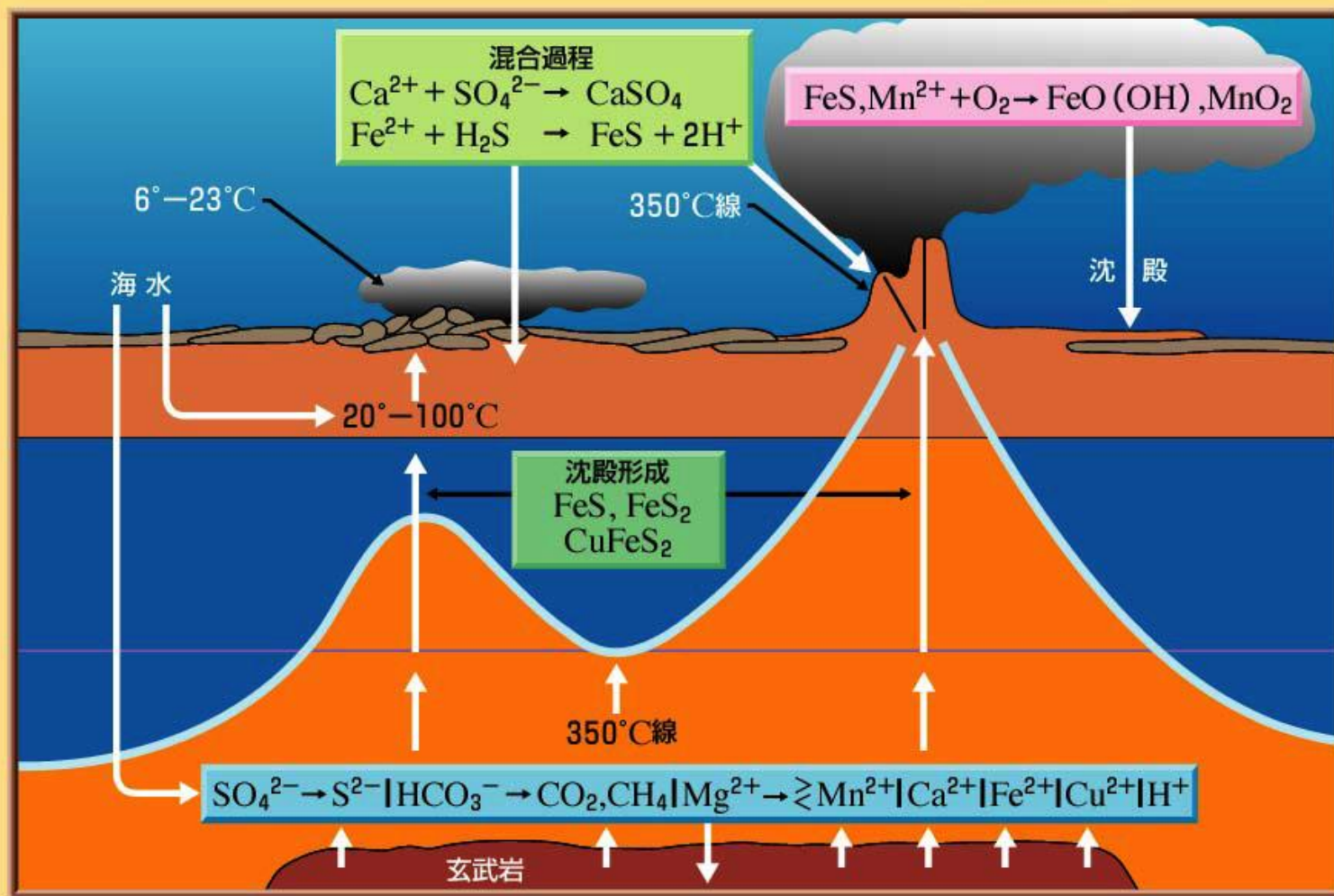
熱水と低温熱水の化学組成

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		
Vent waters																		
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)	
Ambient seawater																		
O ₂		107			104		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)	
Temperature† (°C)																		
	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.

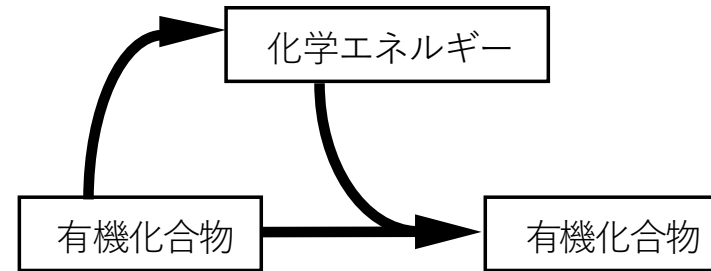
海底熱水噴出口



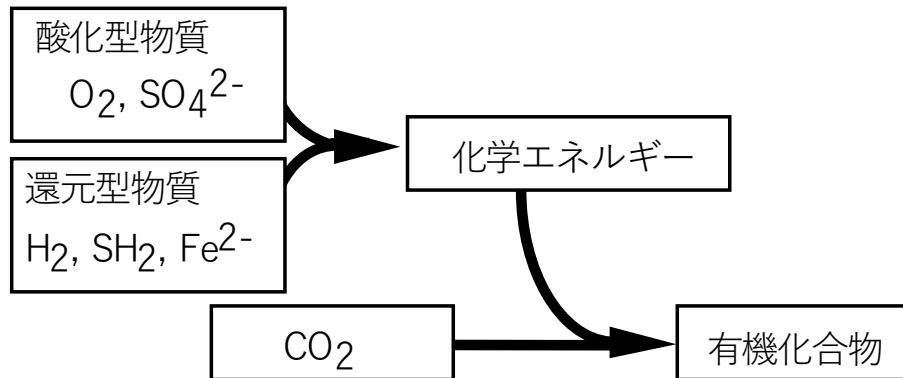
タンパク質
(有機化合物)
をどう作るか

エネルギーを
獲得する

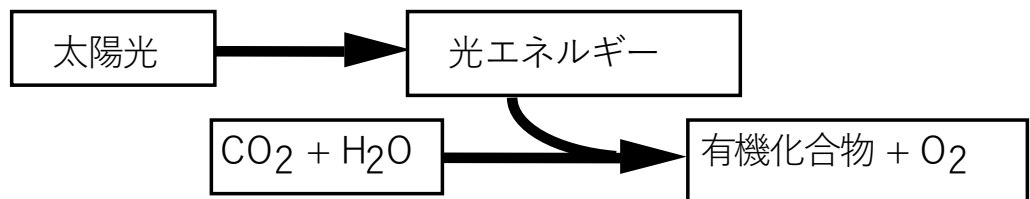
従属栄養



化学合成

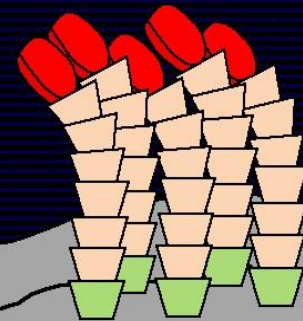
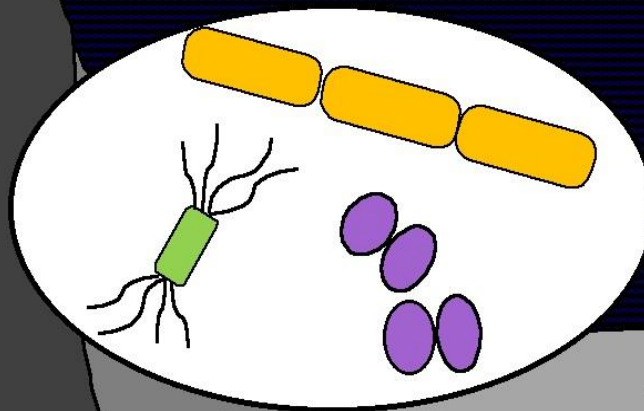


光合成



$\text{H}_2, \text{H}_2\text{S}, \text{CO}_2$

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

自由エネルギーは化学反応で良い(非平衡)

- ・ $4\text{H}_2 + \text{CO}_2 = \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ メタン生成
- ・ $4\text{H}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 = \text{H}_2\text{S} + 4\text{H}_2\text{O}$ 硫酸還元
- ・ $\text{CH}_4 + 4\text{FeO}_3 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{FeO}_2$
メタン酸化鉄還元
- ・ $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ メタン酸化
- ・ $\text{H}_2\text{S} + 4\text{O}_2 = \text{H}_2\text{SO}_4$ 硫黄酸化
- ・ $2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$ 水素酸化

自由エネルギーを獲得して、ATP合成
二酸化炭素を還元して糖を作る(化学合成)

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

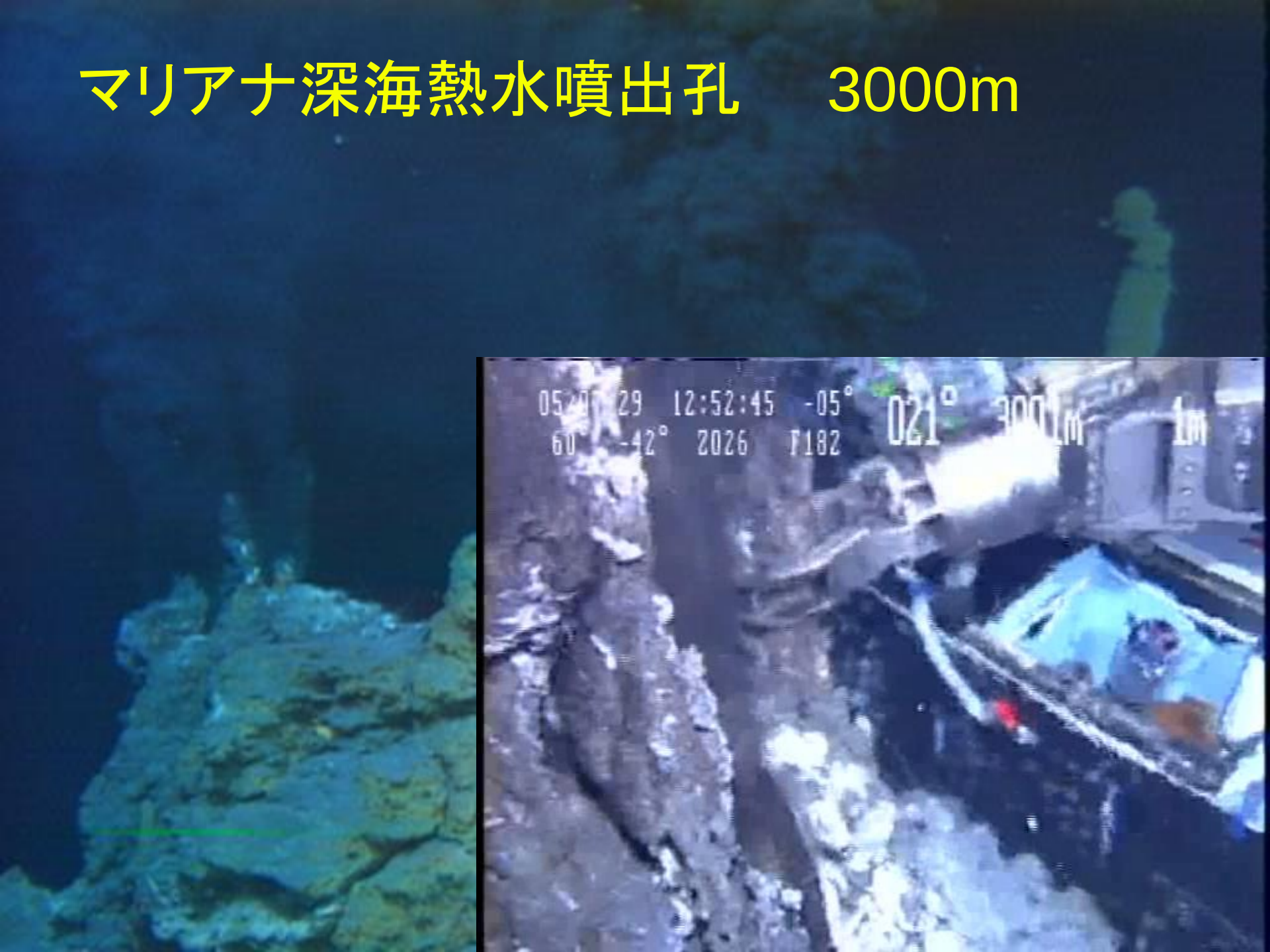
	Conc(mM)		T(°C)	cal /kg vent fluid	
H ₂	1.7	methanogenesis	>40	10	subsurface mixing zone
SO ₄	28	sulfate reduction	>40	10	subsurface mixing zone
H ₂ S	7.3	oxidation	<40	760	plumes or diffuse mixing
Fe	1.7	oxidation	<40	10	plumes or diffuse mixing
CH ₄	0.07	oxidation	<40	10	plumes or diffuse mixing
Mn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

APSK04: *Methanococcales*, *Archaeoglobales*

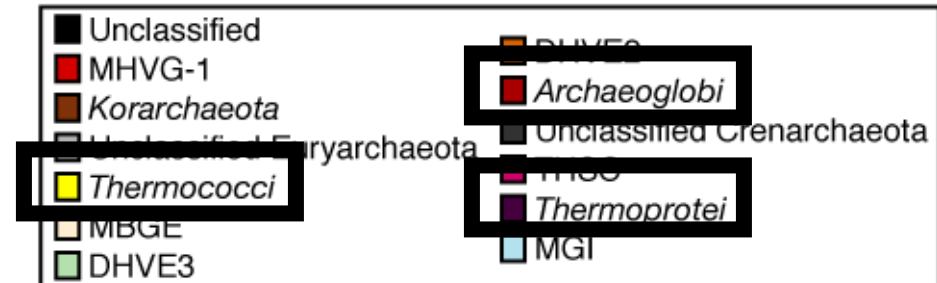
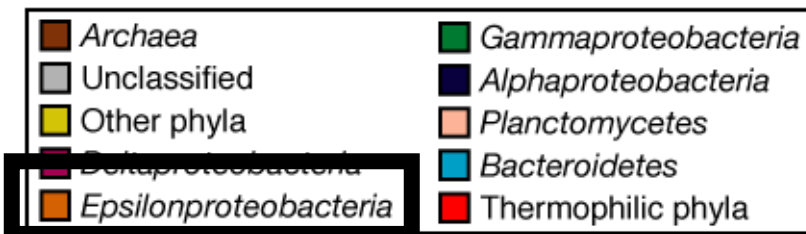
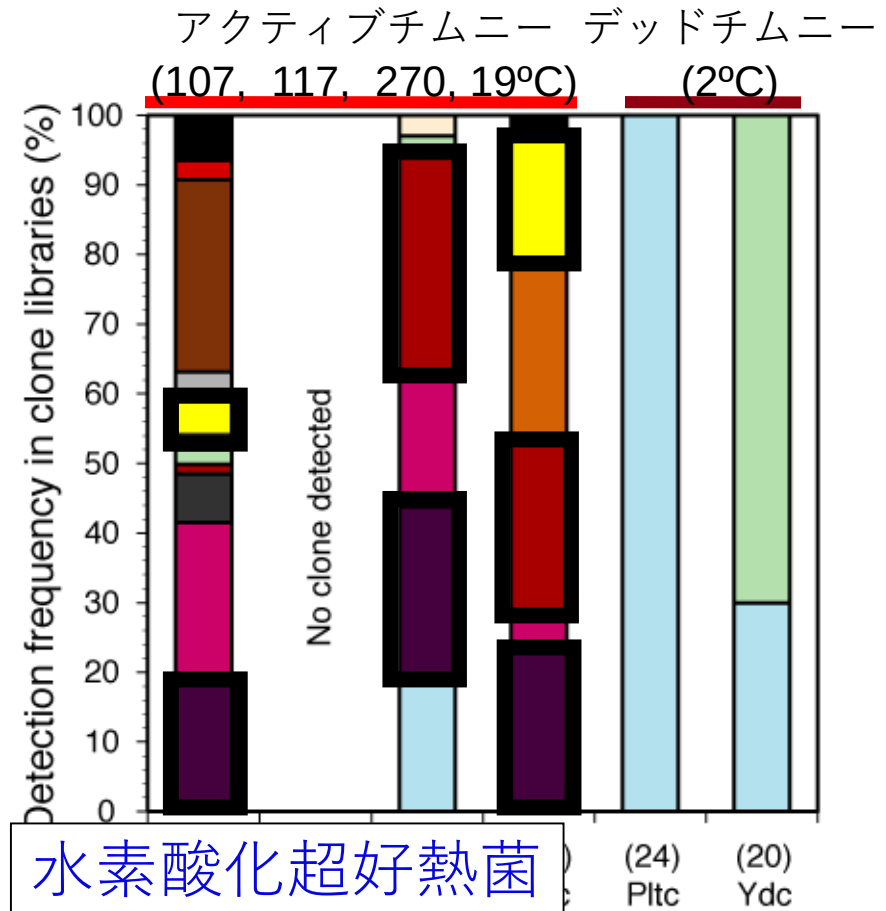
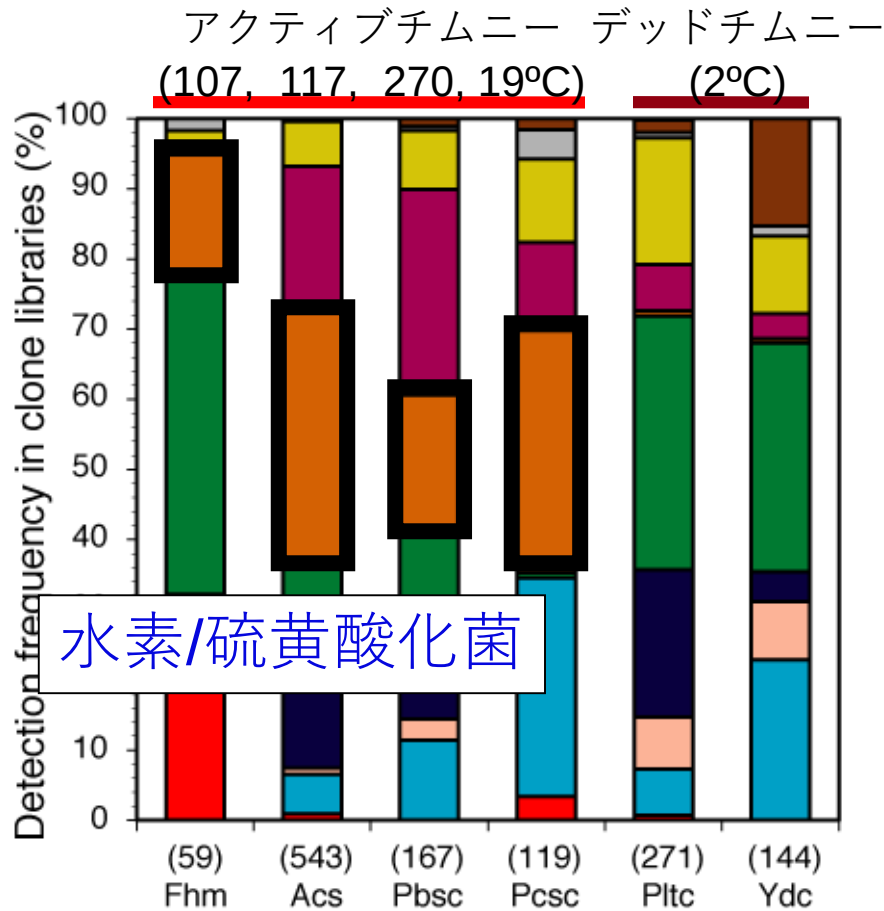
APSK10: *Thiomicrospira*

APSK07: *Methylobacterium*

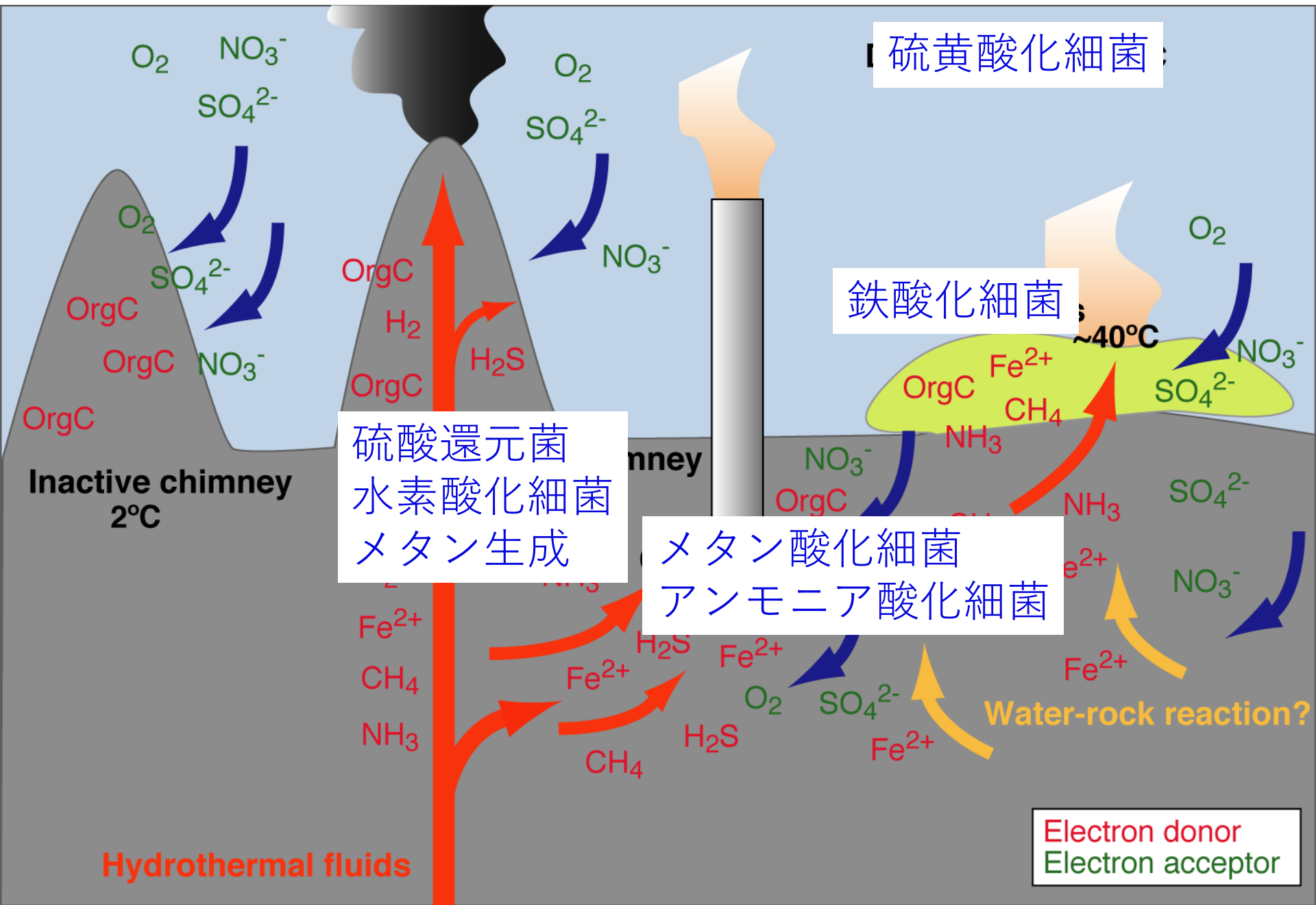
マリアナ深海熱水噴出孔 3000m



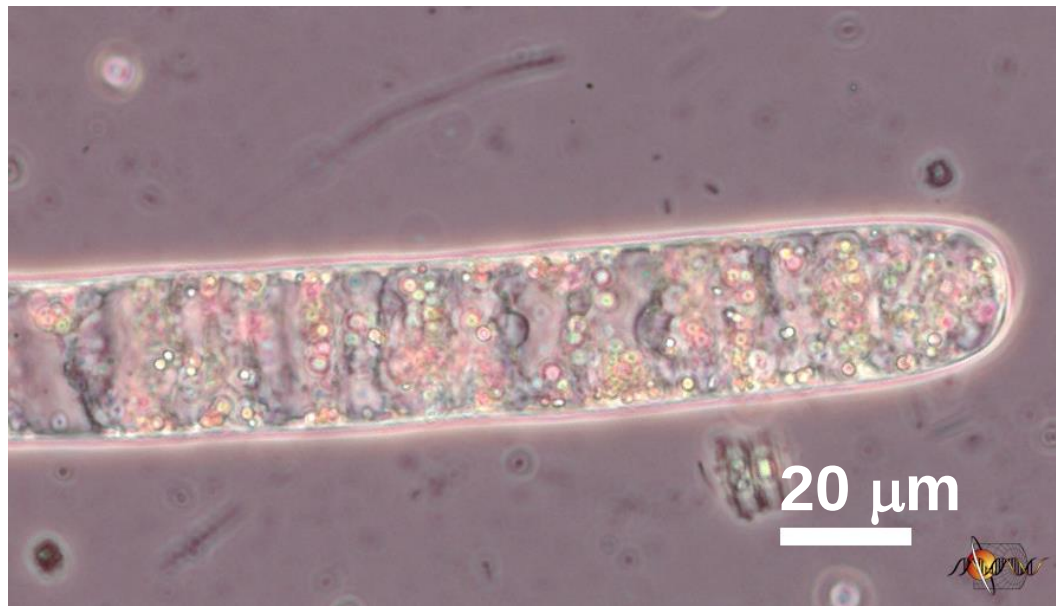
遺伝子を調べると、色々な菌が見つかる



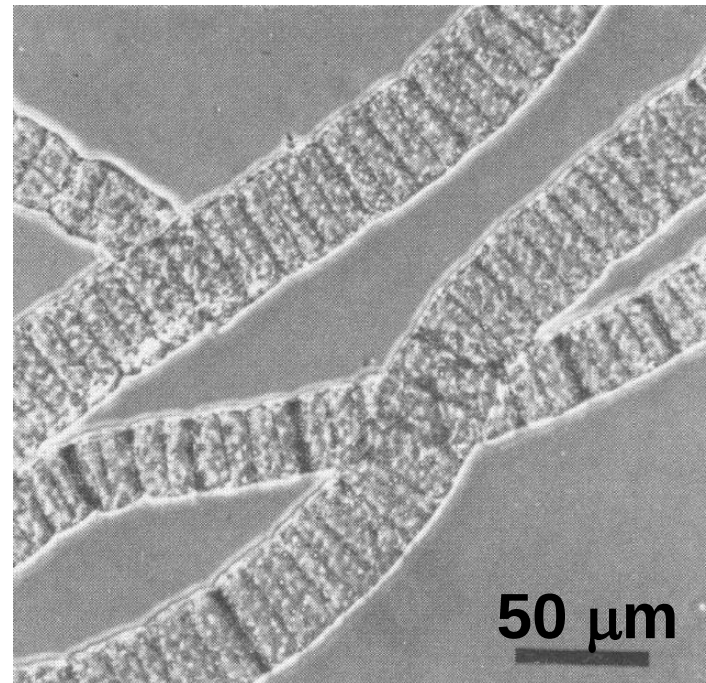
熱水系の微生物群集 Katoh et al. 2010



さてそれでは35億年前の生物は？



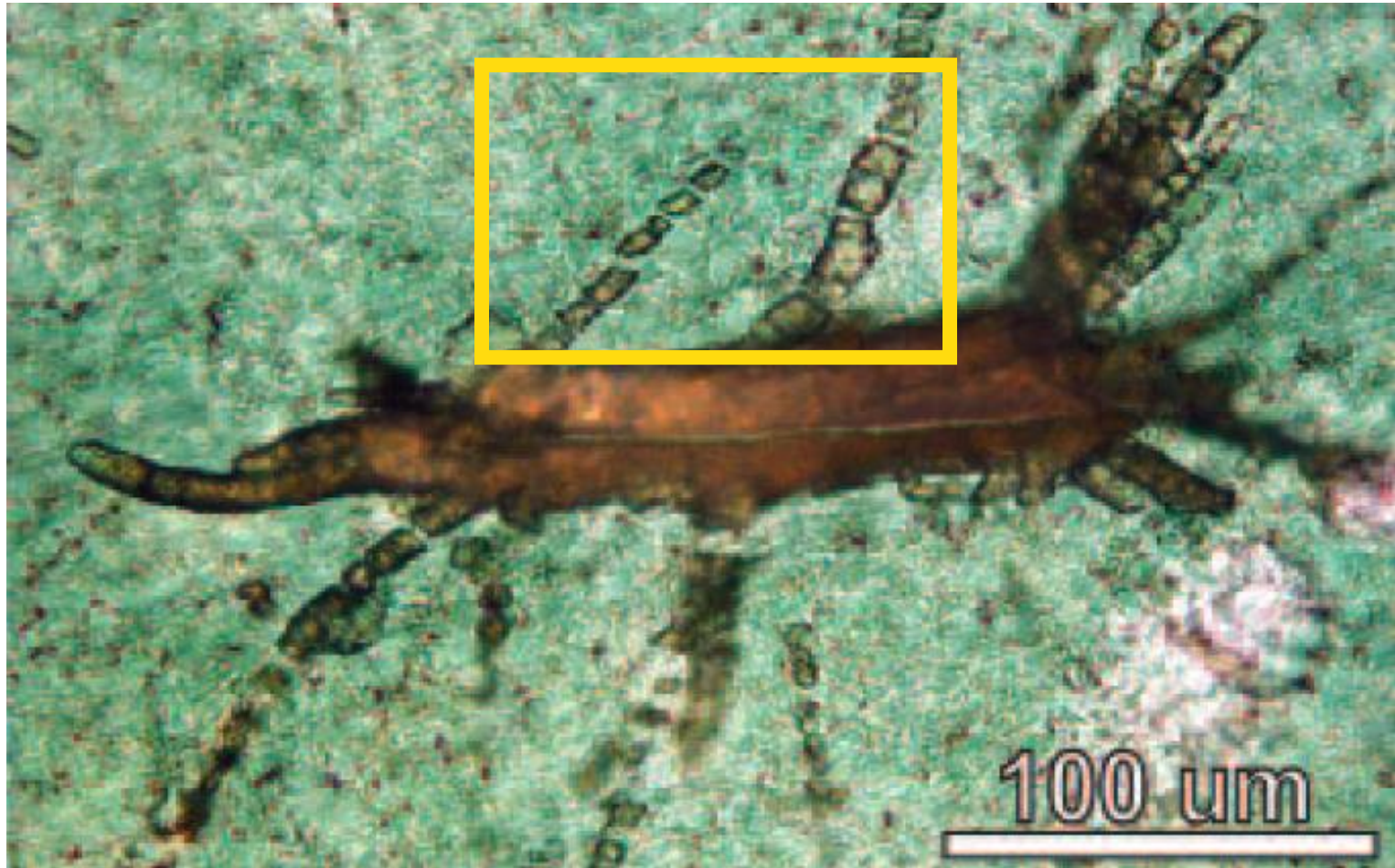
Beggiatoa (硫黄酸化菌) (Kalanetra *et al.*, 2004)



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

- ・ *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)

35億年前の枕状溶岩から 発見された化石 *Beggiatoa*?

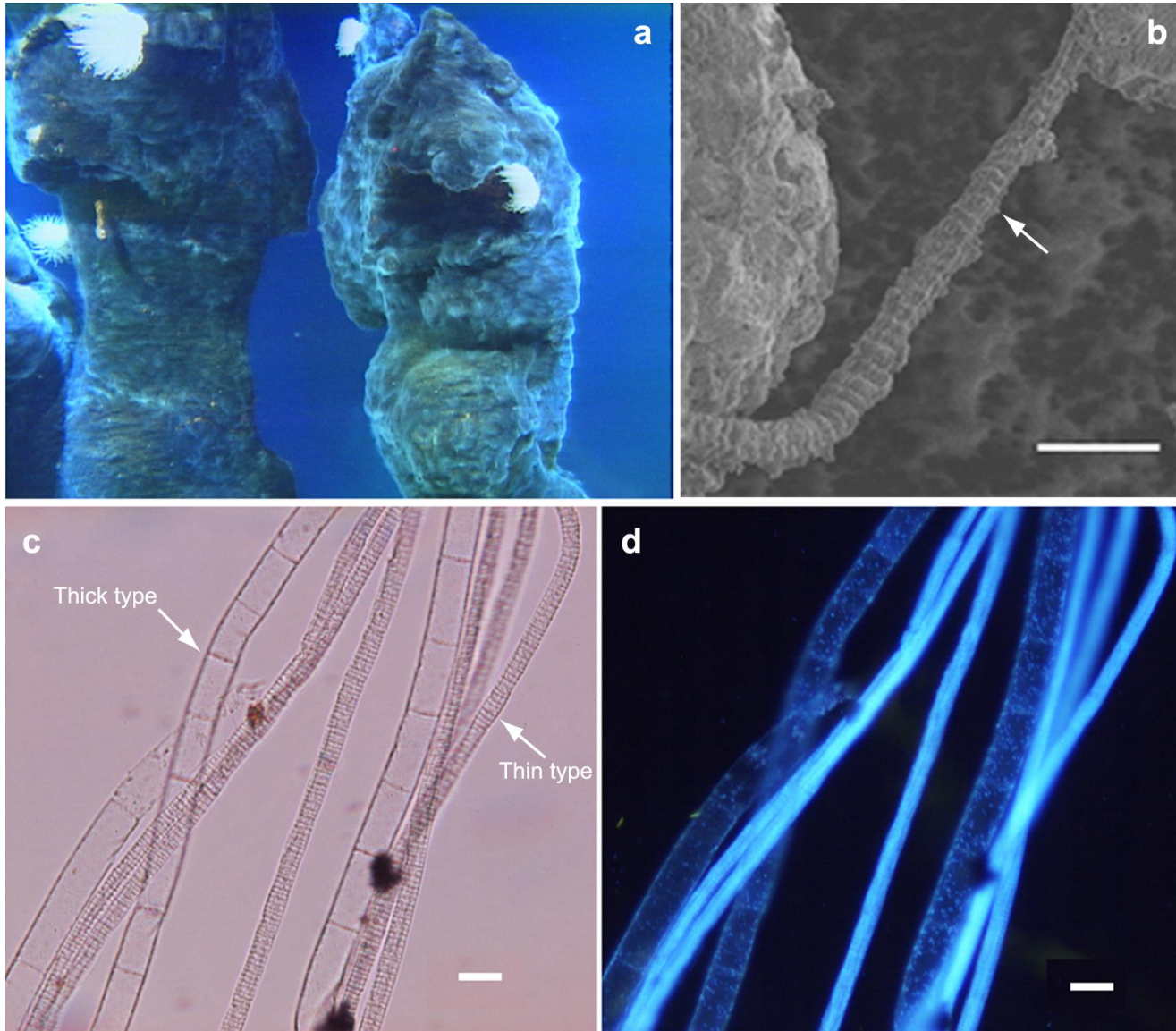


(Furnes et al. 2004)

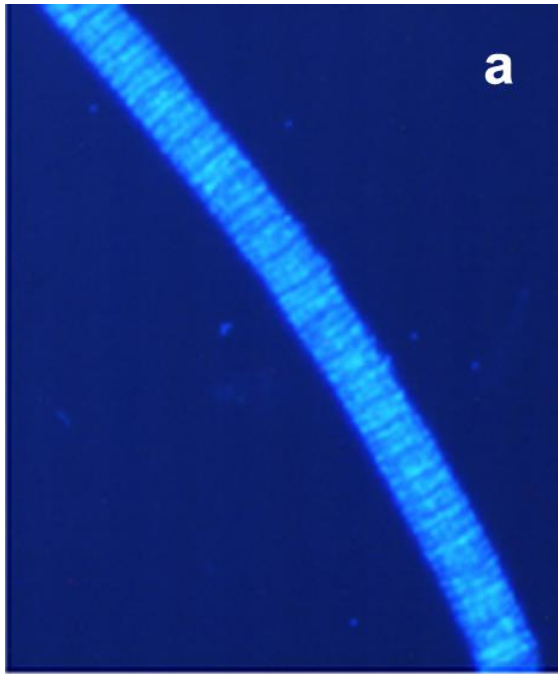
当時、酸素があったか？

・*Beggiatoa*ではなく、硫酸還元菌:

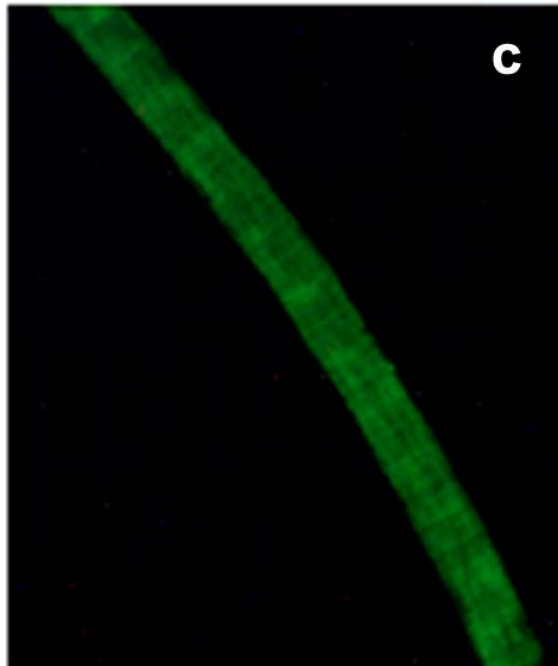
Kato, Yamagishi 2016



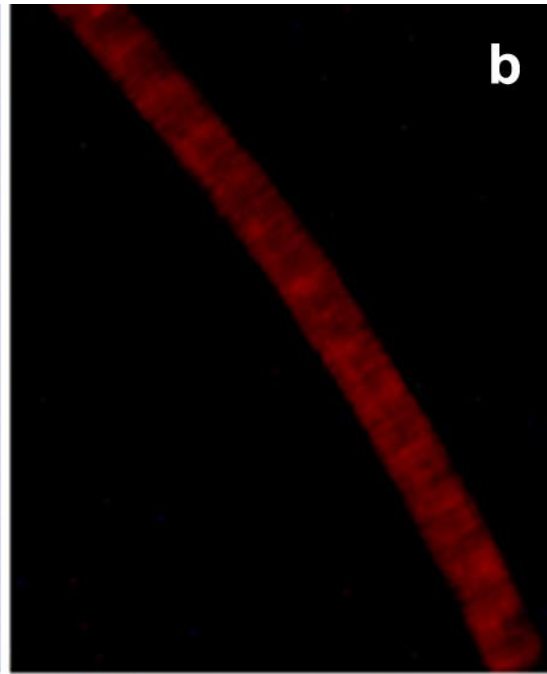
特異的
色素
DNAが
ある



プローブ
真正細菌



プローブ
硫酸還元菌



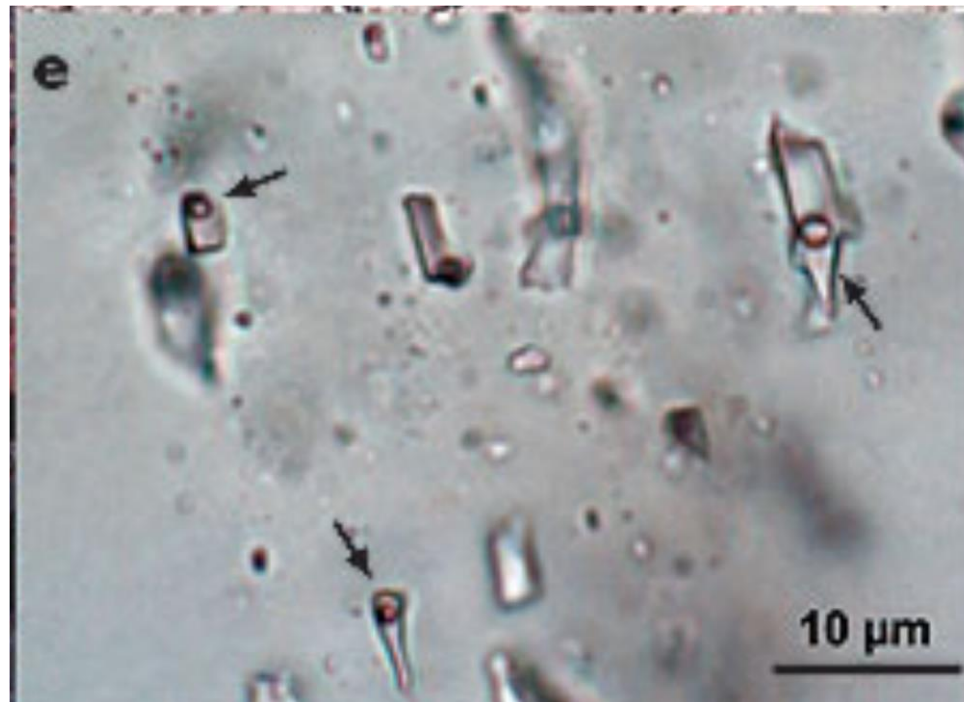
明視野

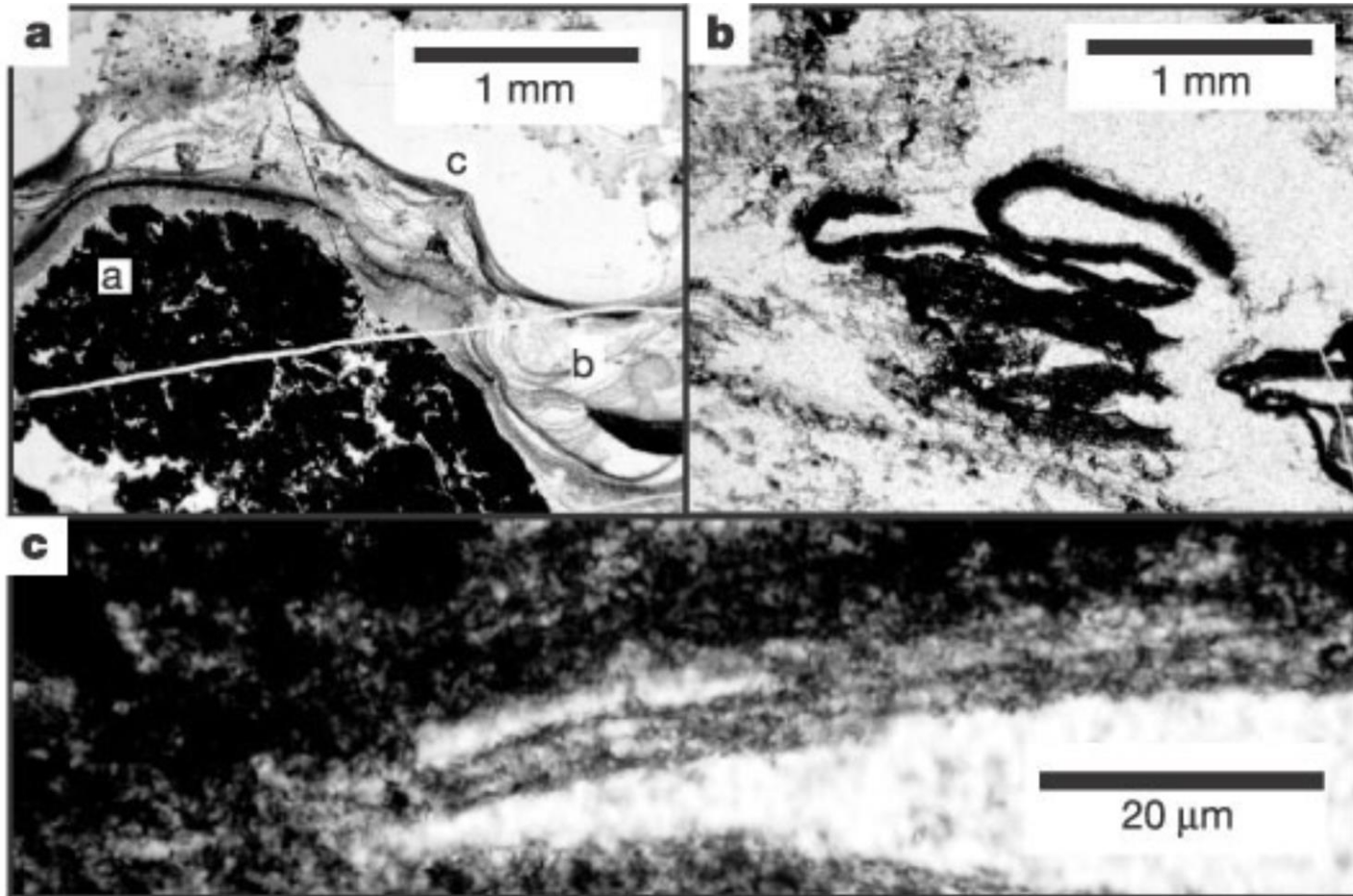


Kato, Yamagishi
2016

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。

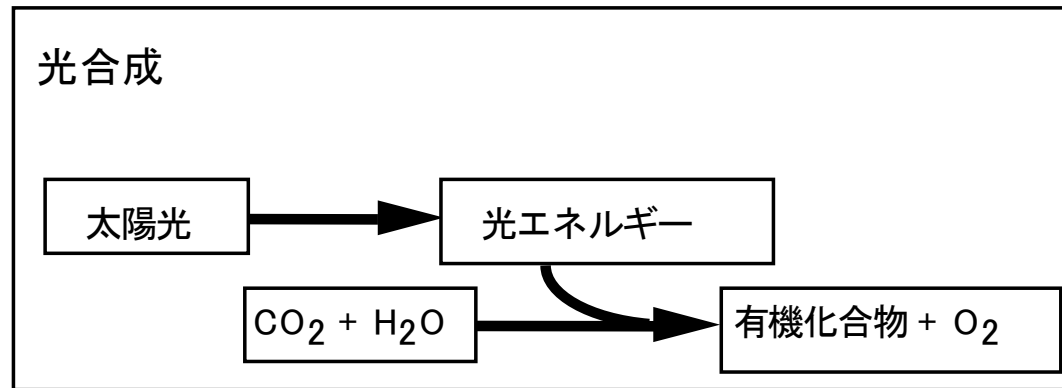




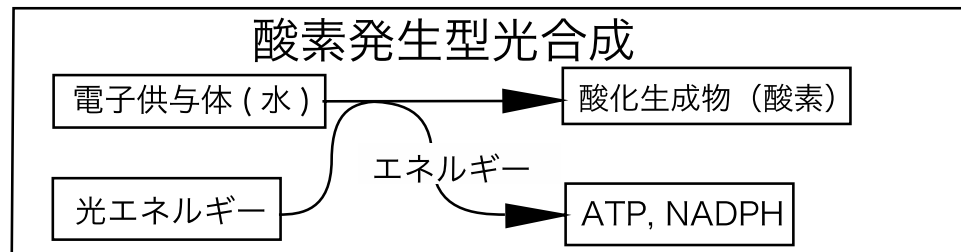
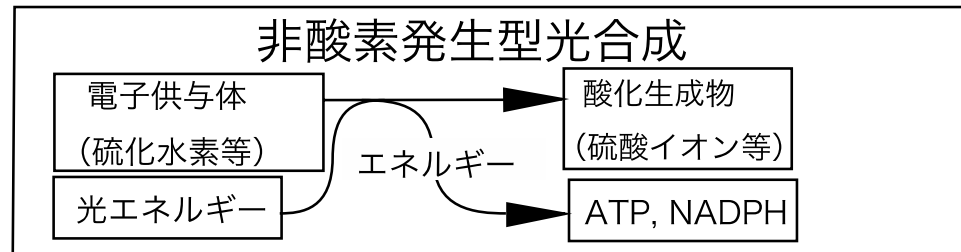
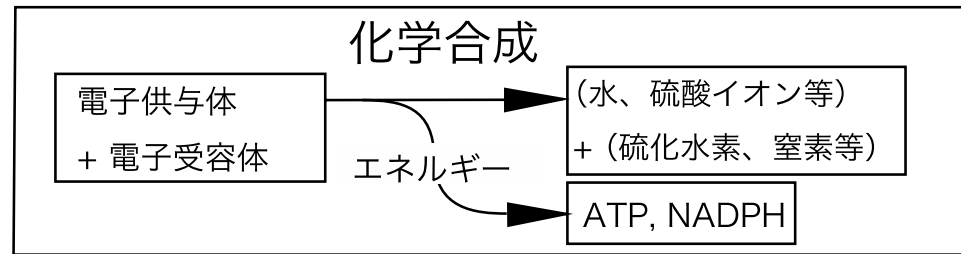
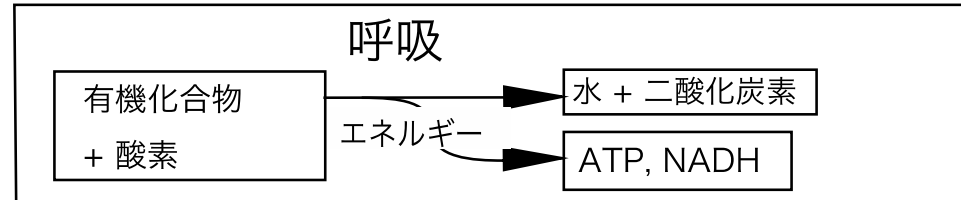
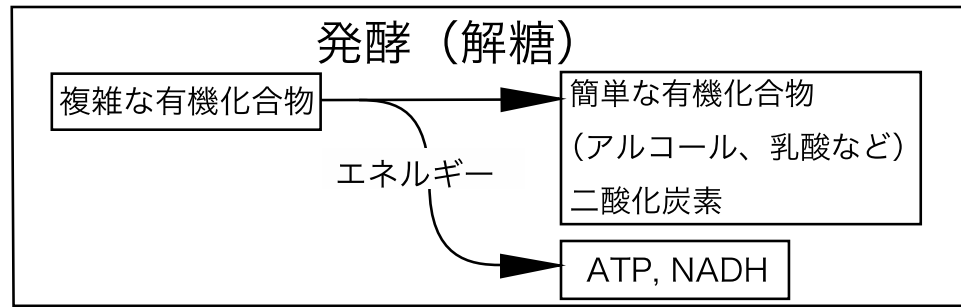
非酸素発生光合成細菌

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

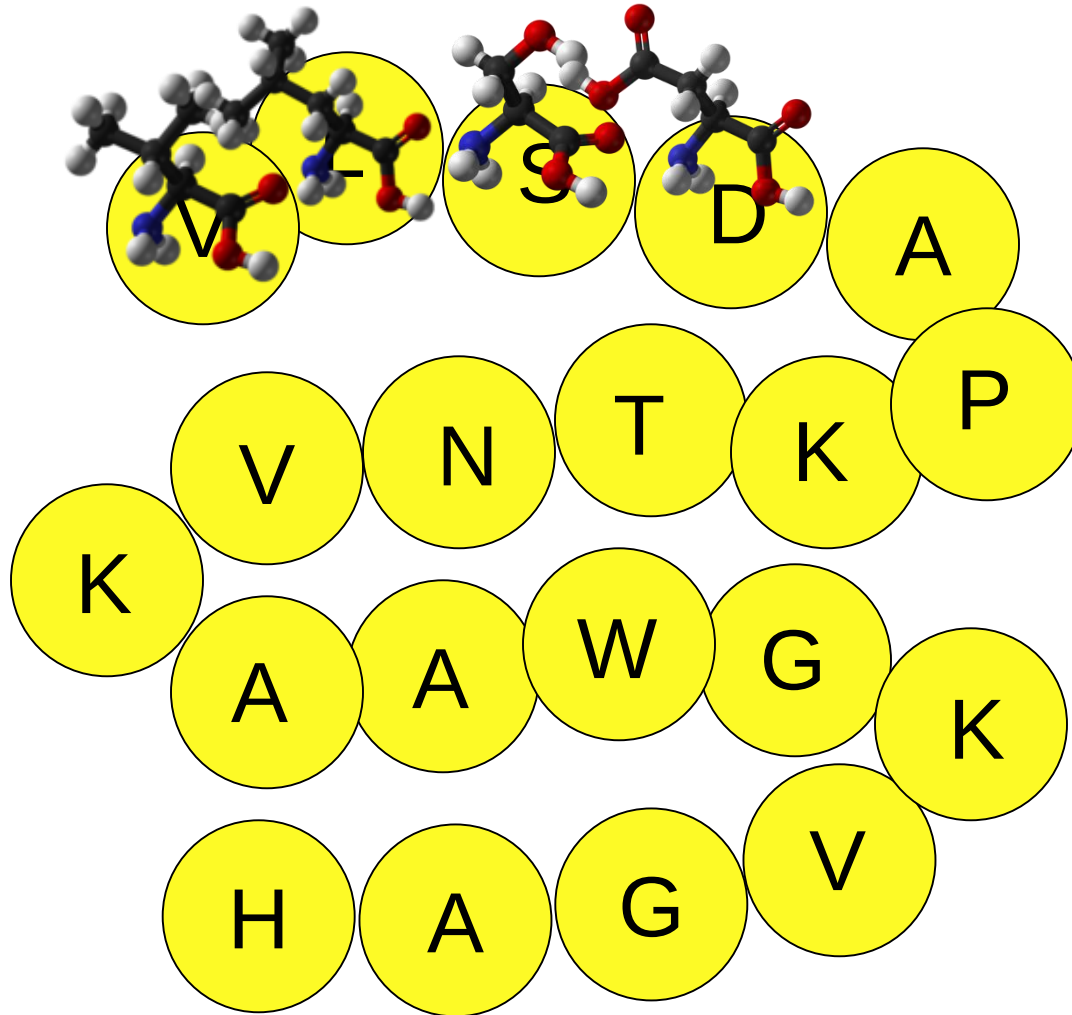
- ・ どんな分子でできているか
- ・ どんな元素でできているか

大腸菌の分子組成

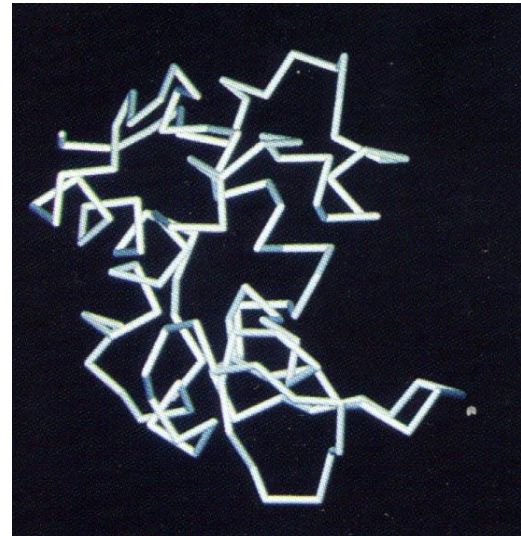
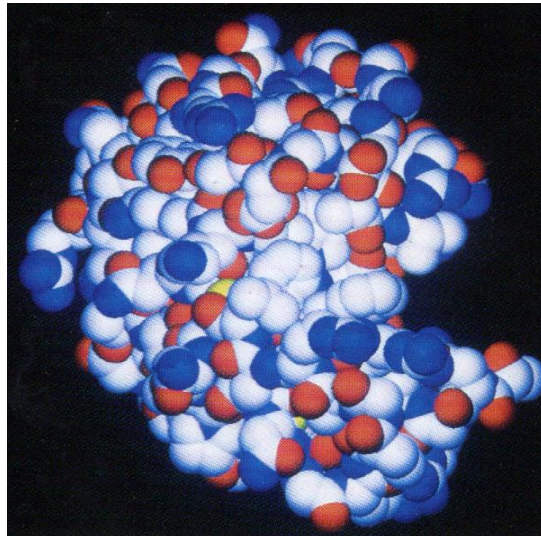
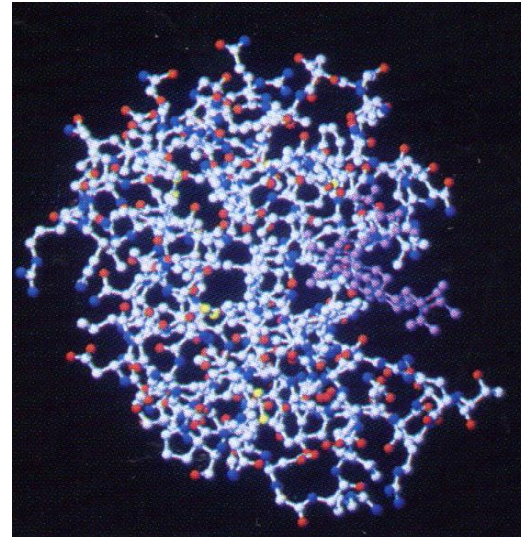
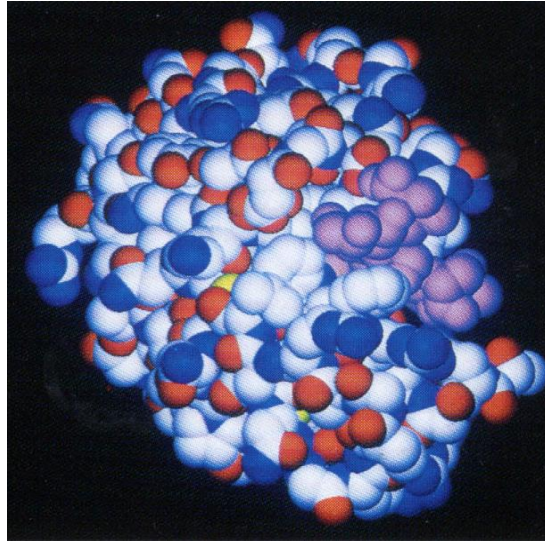
成分	重量%
水	70
タンパク質	15
核酸	
DNA	1
RNA	6
糖類	6
脂質	2
その他の有機分子	1
無機イオン	1

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

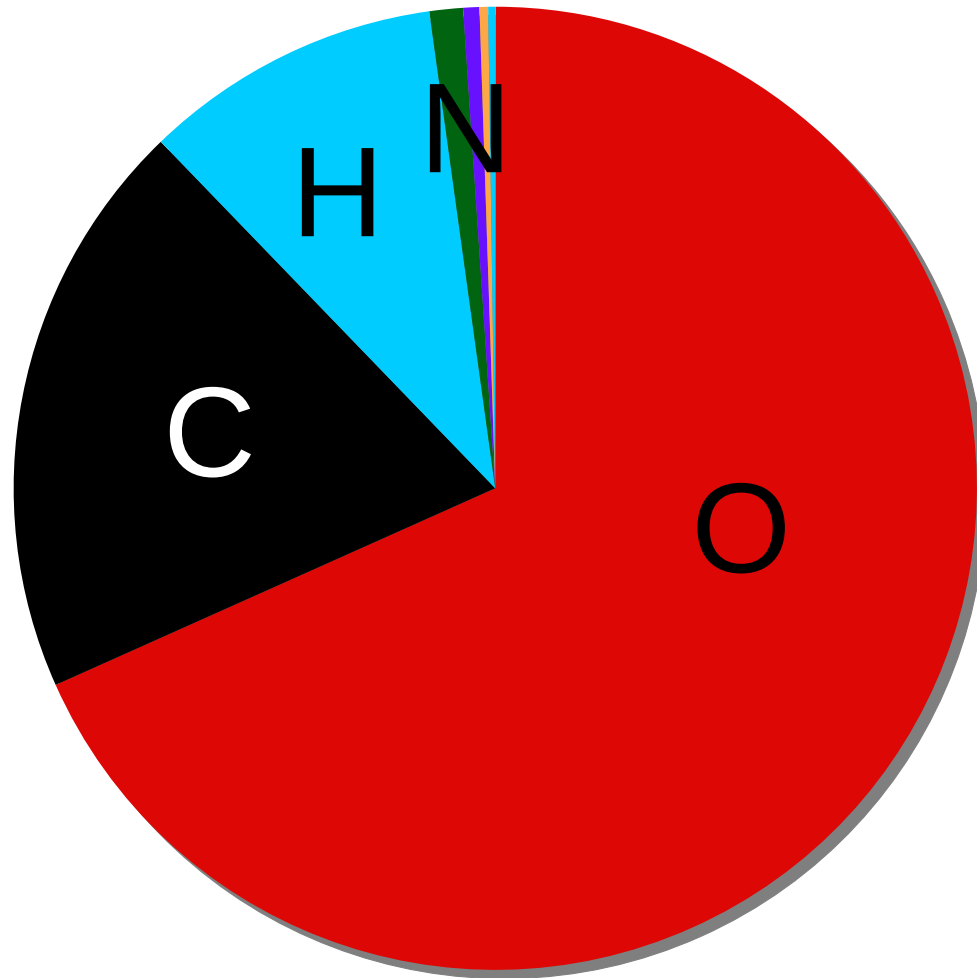


山岸
宇宙生命論
2015
東京大学出版会

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

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

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

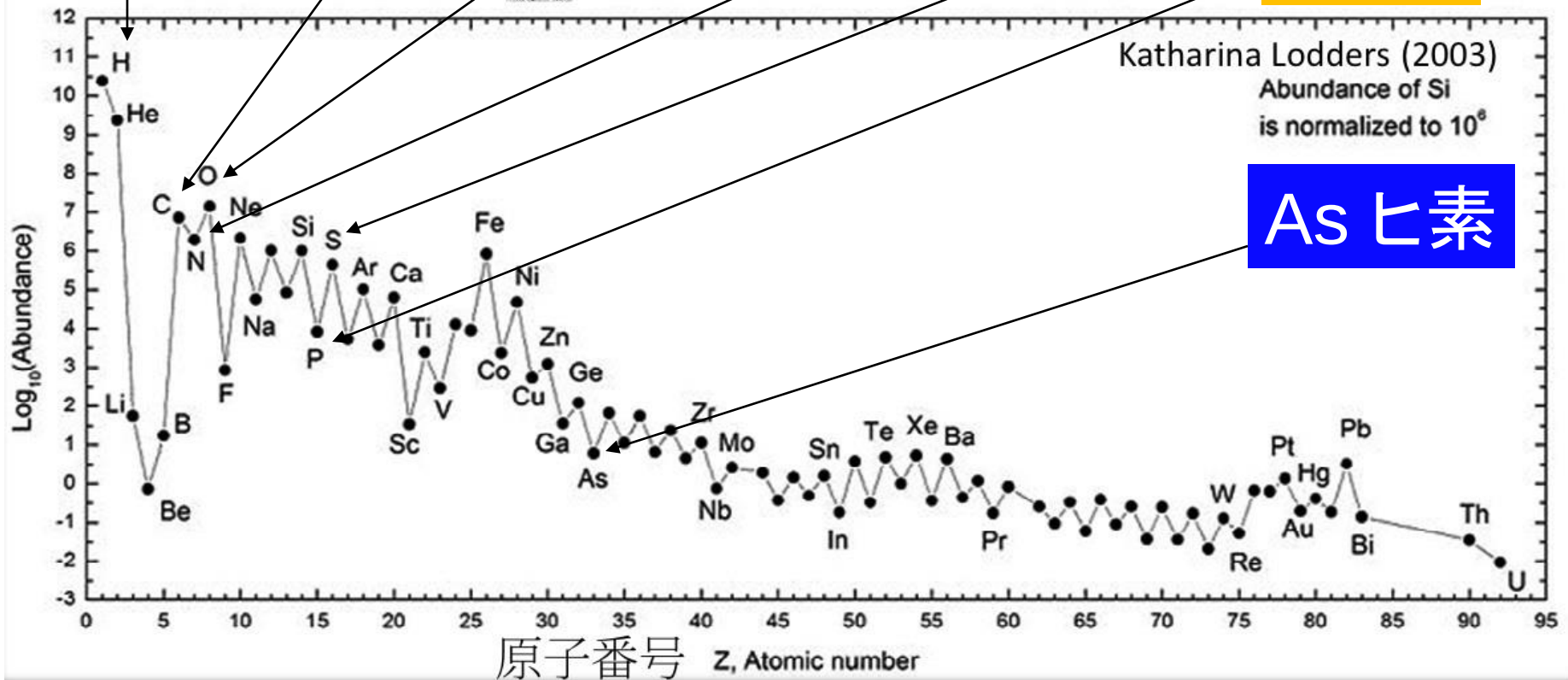
O 酸素

N 窒素

S 硫黄

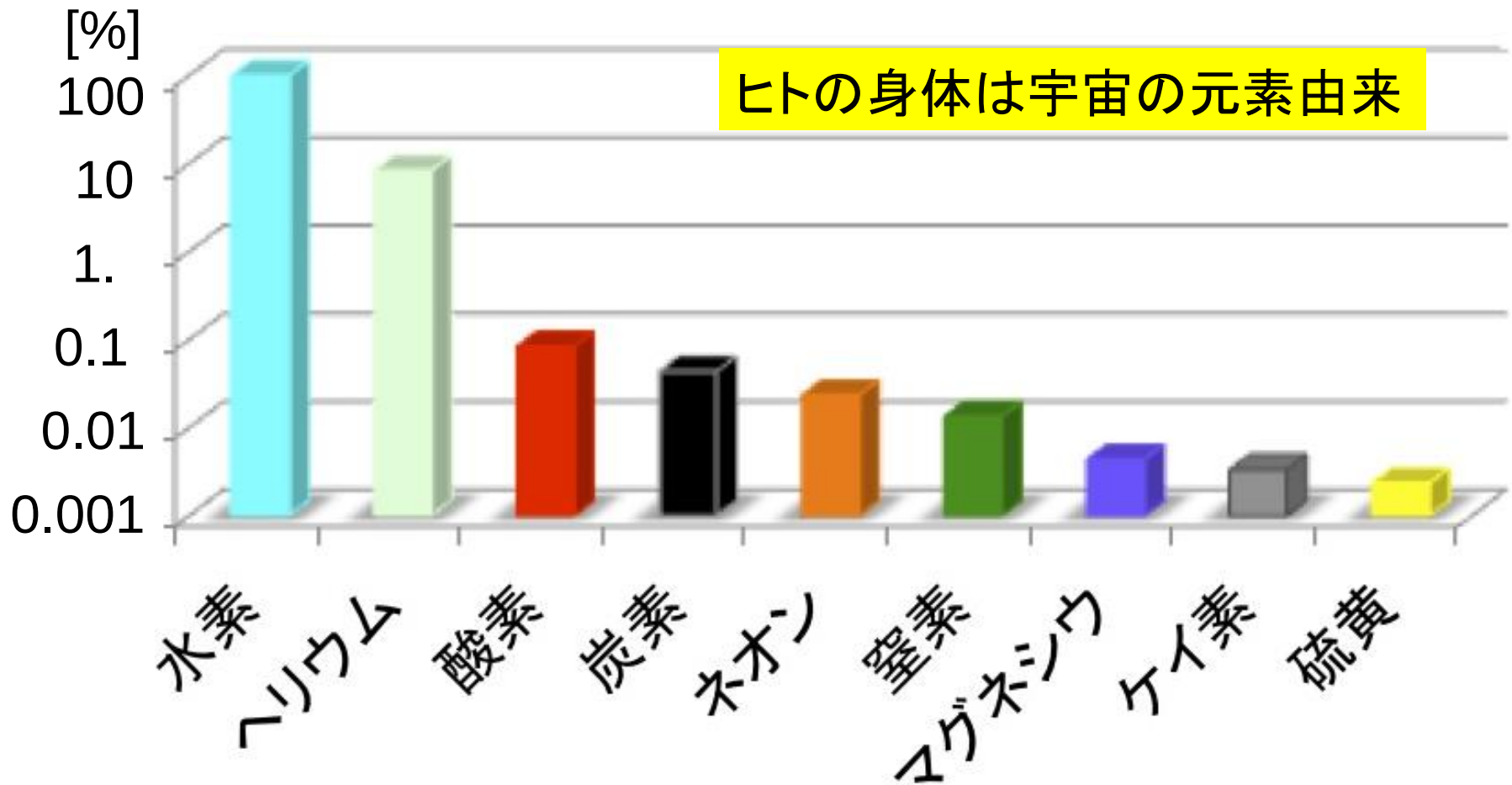
P リン

As ヒ素



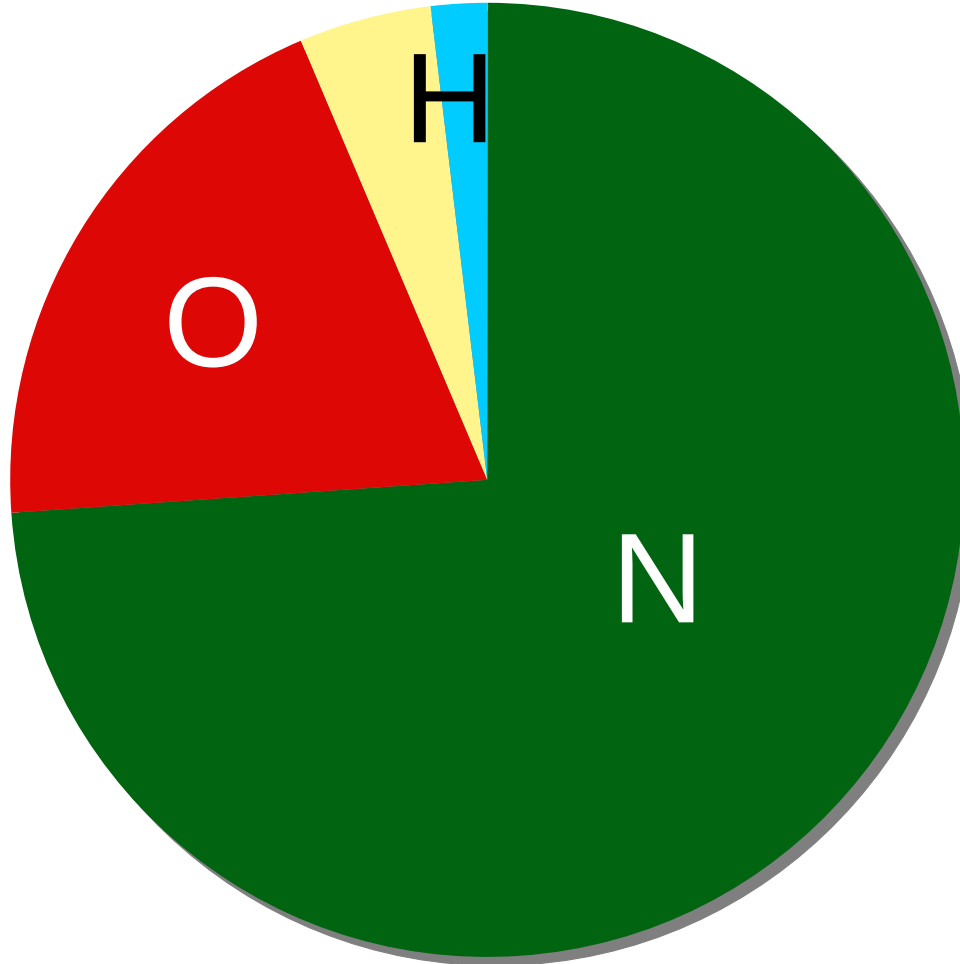
ヒトの身体の元素は宇宙由来

宇宙における元素存在量



大気中の元素存在量

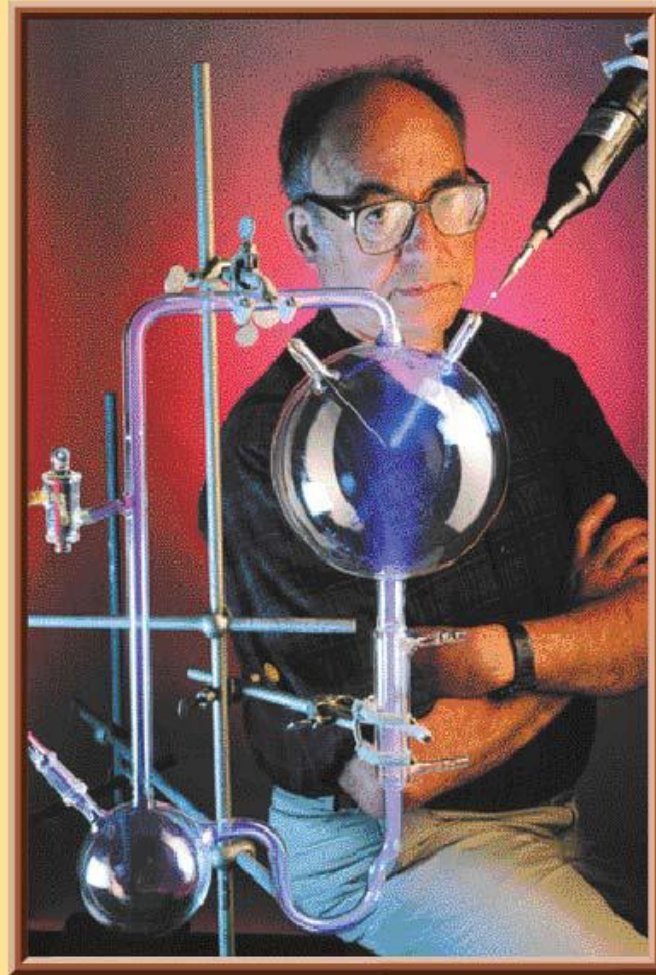
あるいはヒトの身体の元素は大気由来



化学進化

生命誕生前の
有機物合成

ミラーの実験装置



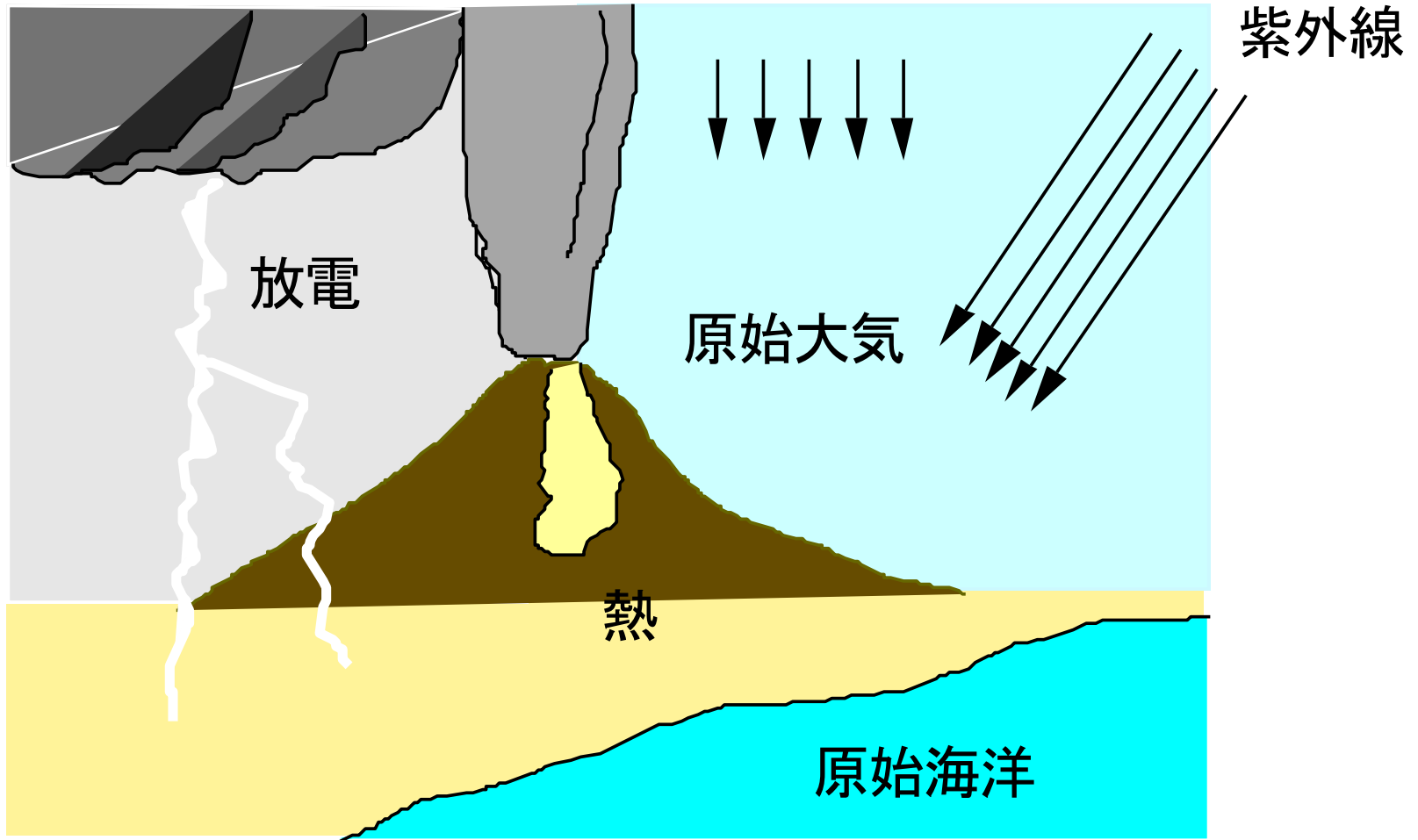
1953年
アンモニア
メタン
水素
水
の混合気体
で放電

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



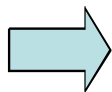
いろいろな材料ができた。

アミノ酸
核酸塩基
糖？

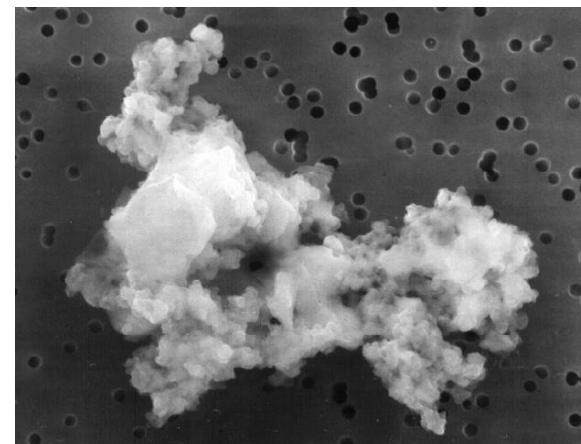
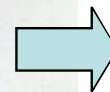
宇宙空間での有機物の生成



分子雲有機物



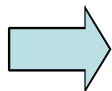
隕石有機物



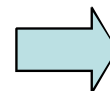
惑星間塵有機物



地球へ



彗星有機物



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 -Aminoadipic
α D-Aspartic acid	Isothreonine [#]	acid
α L-Aspartic acid	γ DL-4-A-2-HBA [#]	α L- α -Aminoadipic
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

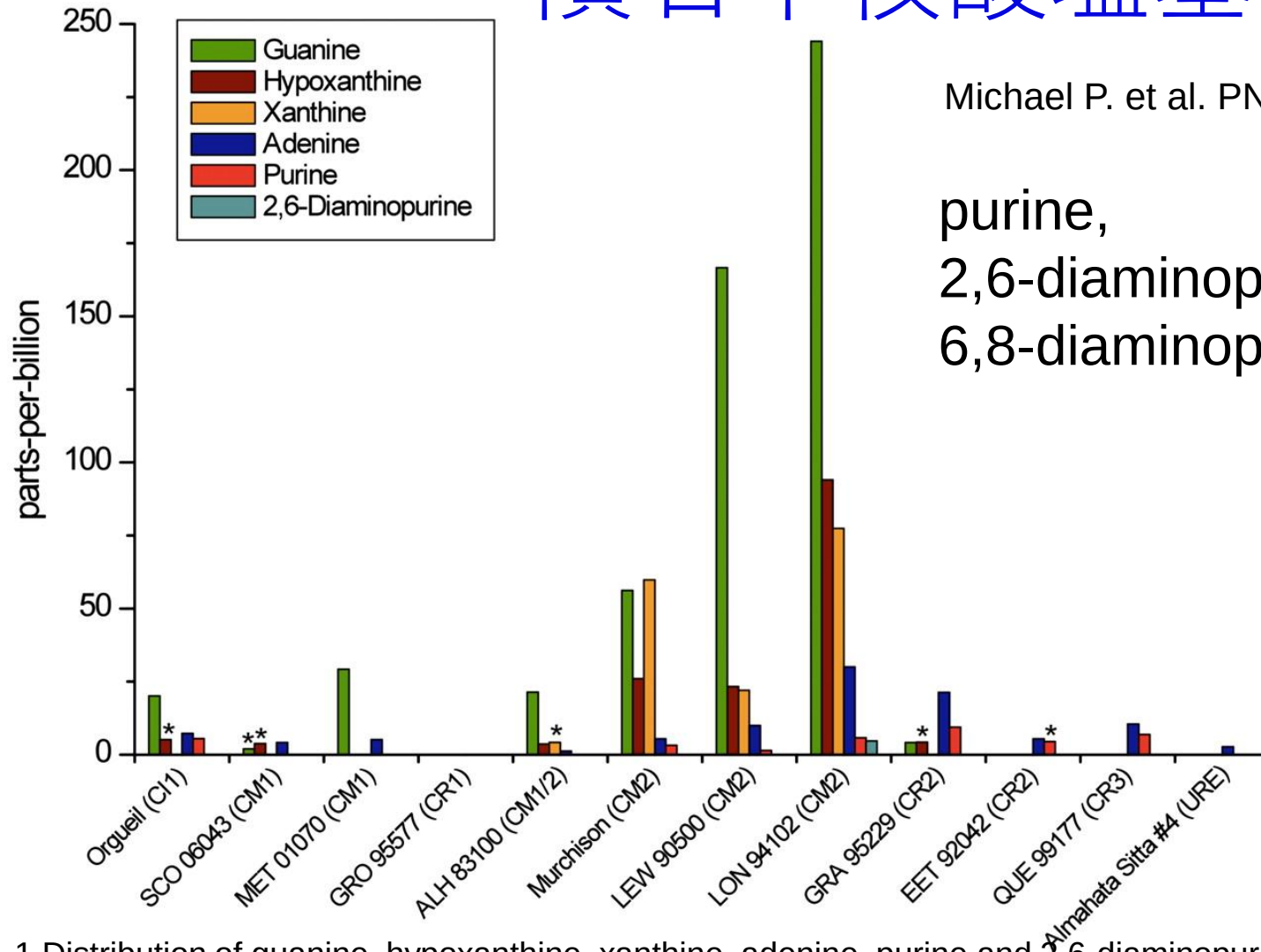
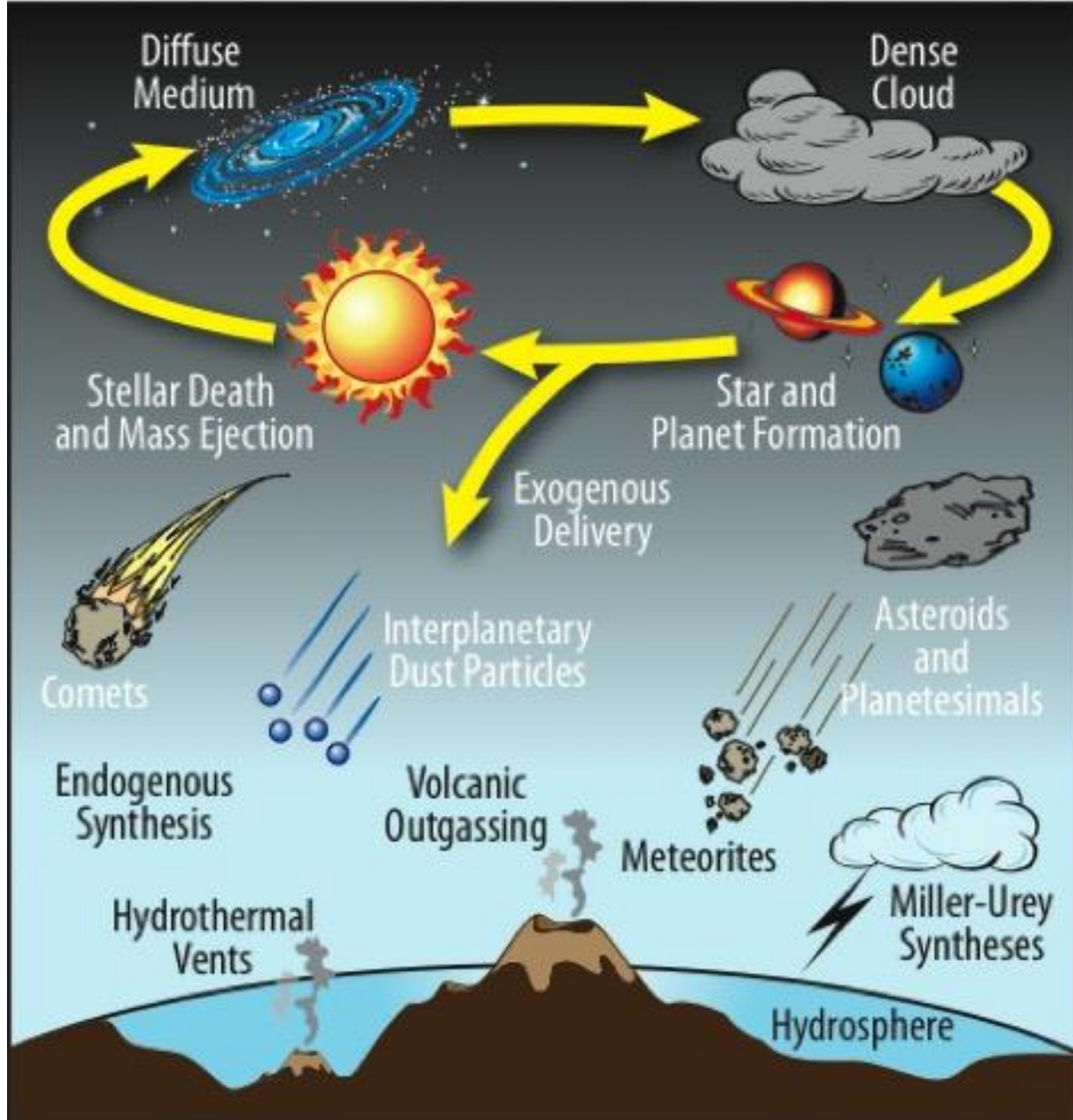


Fig. 1. Distribution of guanine, hypoxanthine, xanthine, adenine, purine, and 2,6-diaminopurine in 11 carbonaceous chondrites and one ureilite. The three CM2 carbonaceous chondrites in this study (Murchison, LEW90500, and LON 94102) contained significantly higher (approximately $4 \times$ to $12 \times$)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

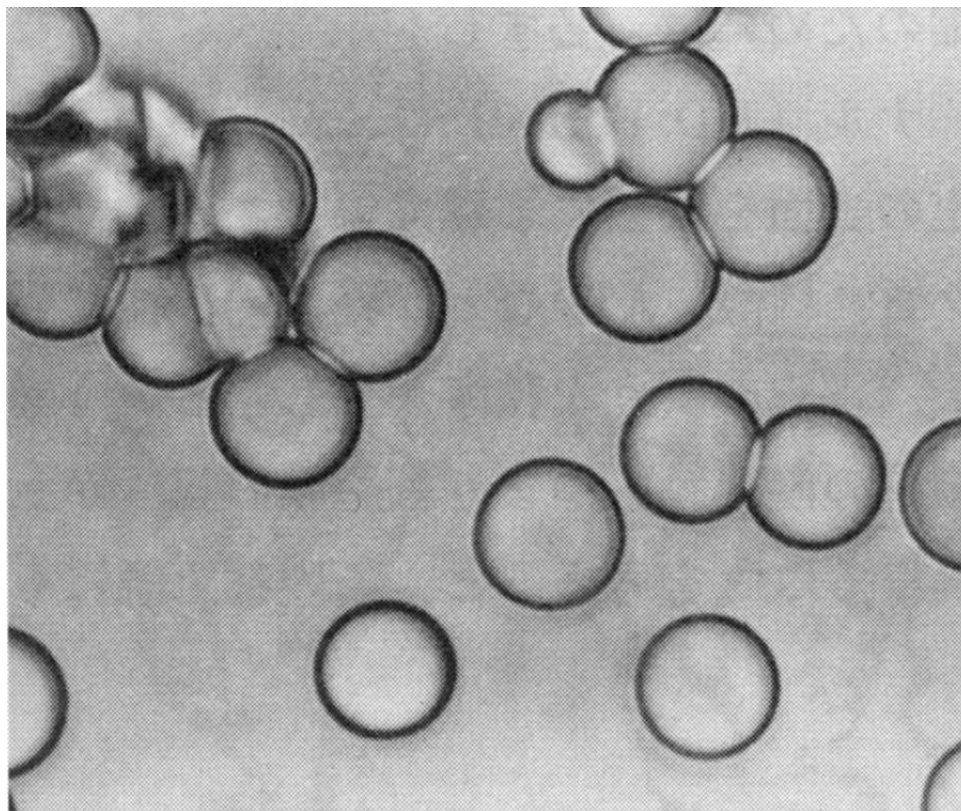
(Fig. 1, Yabuta et al. Springer 2019)

(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？

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。

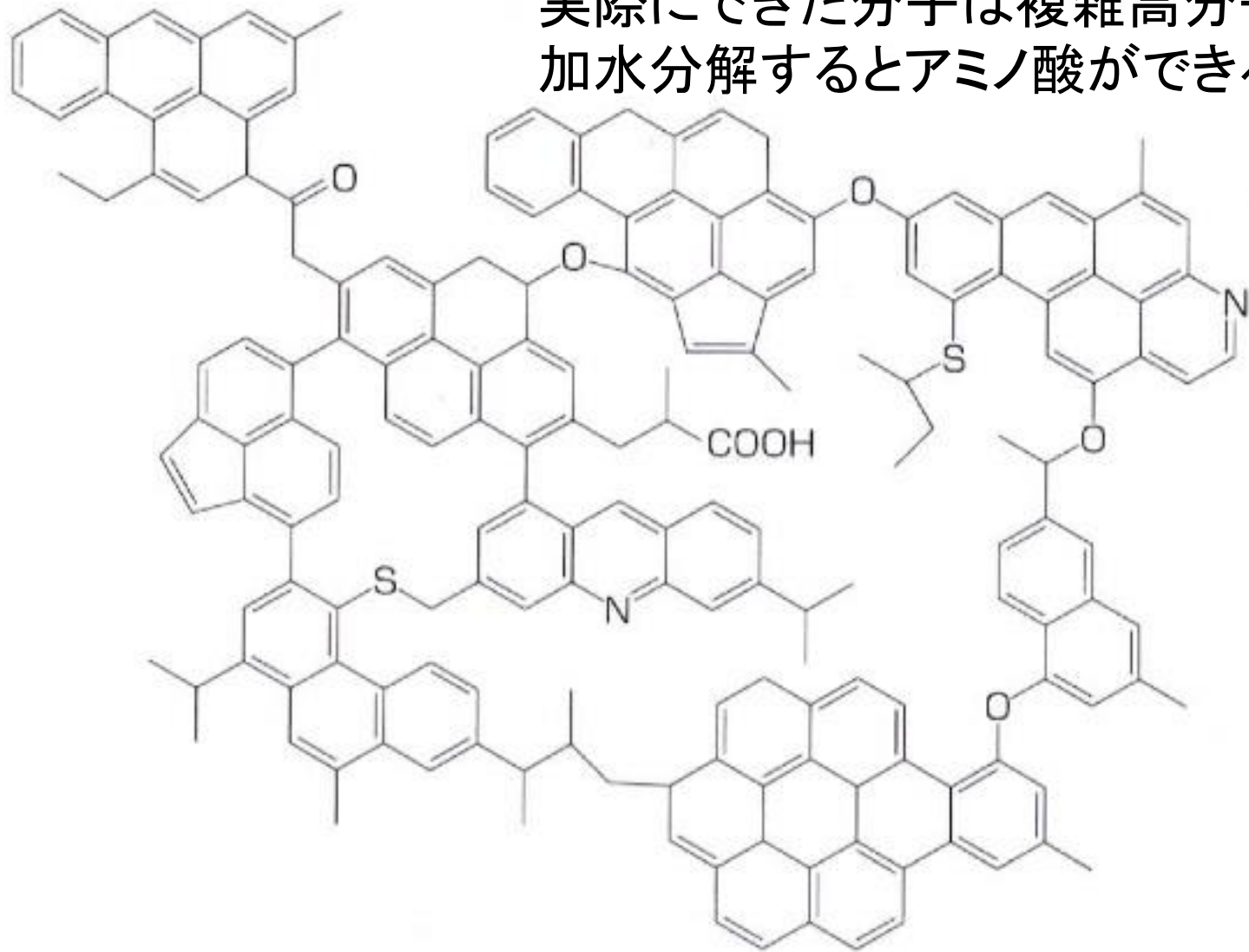
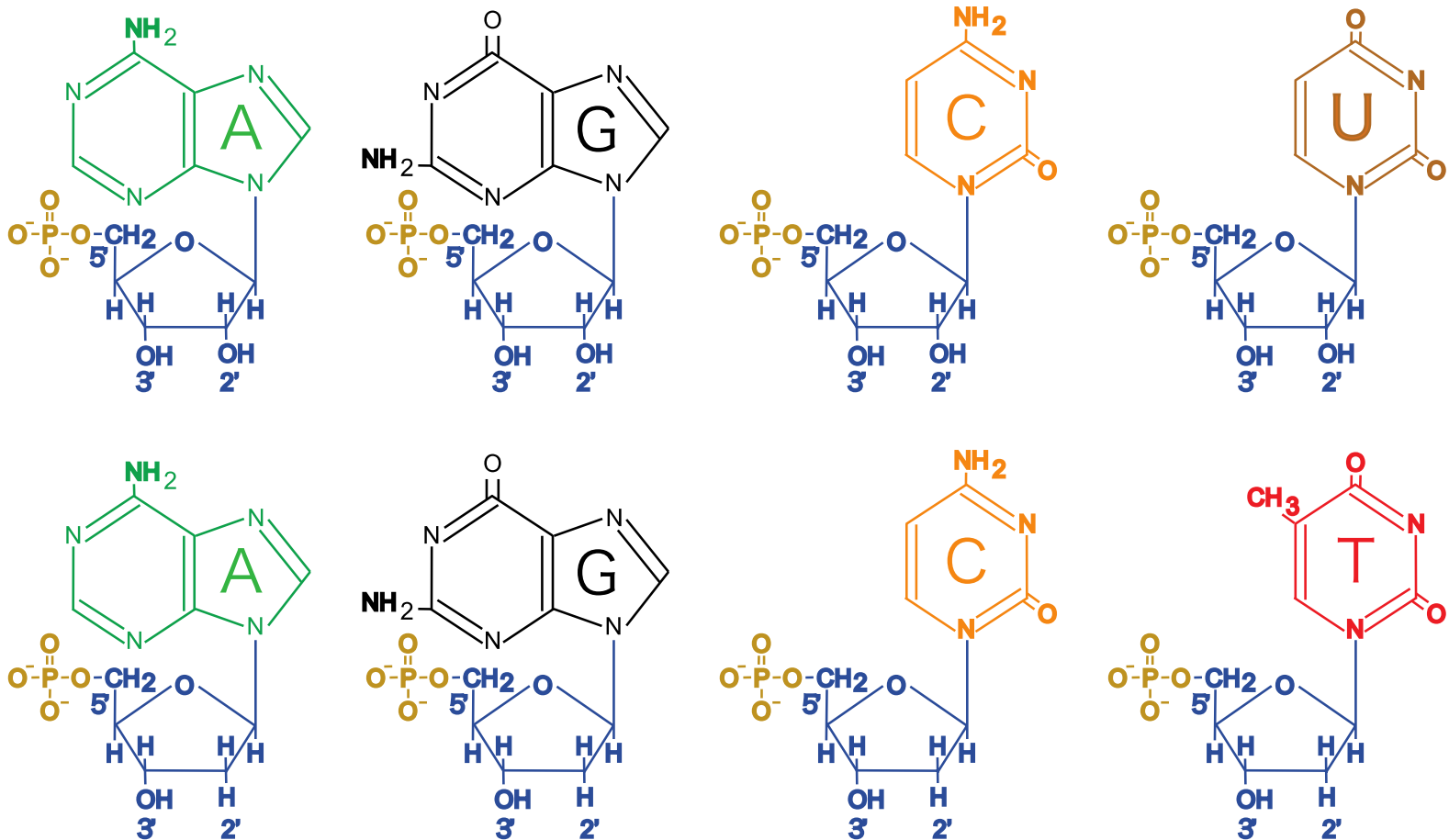


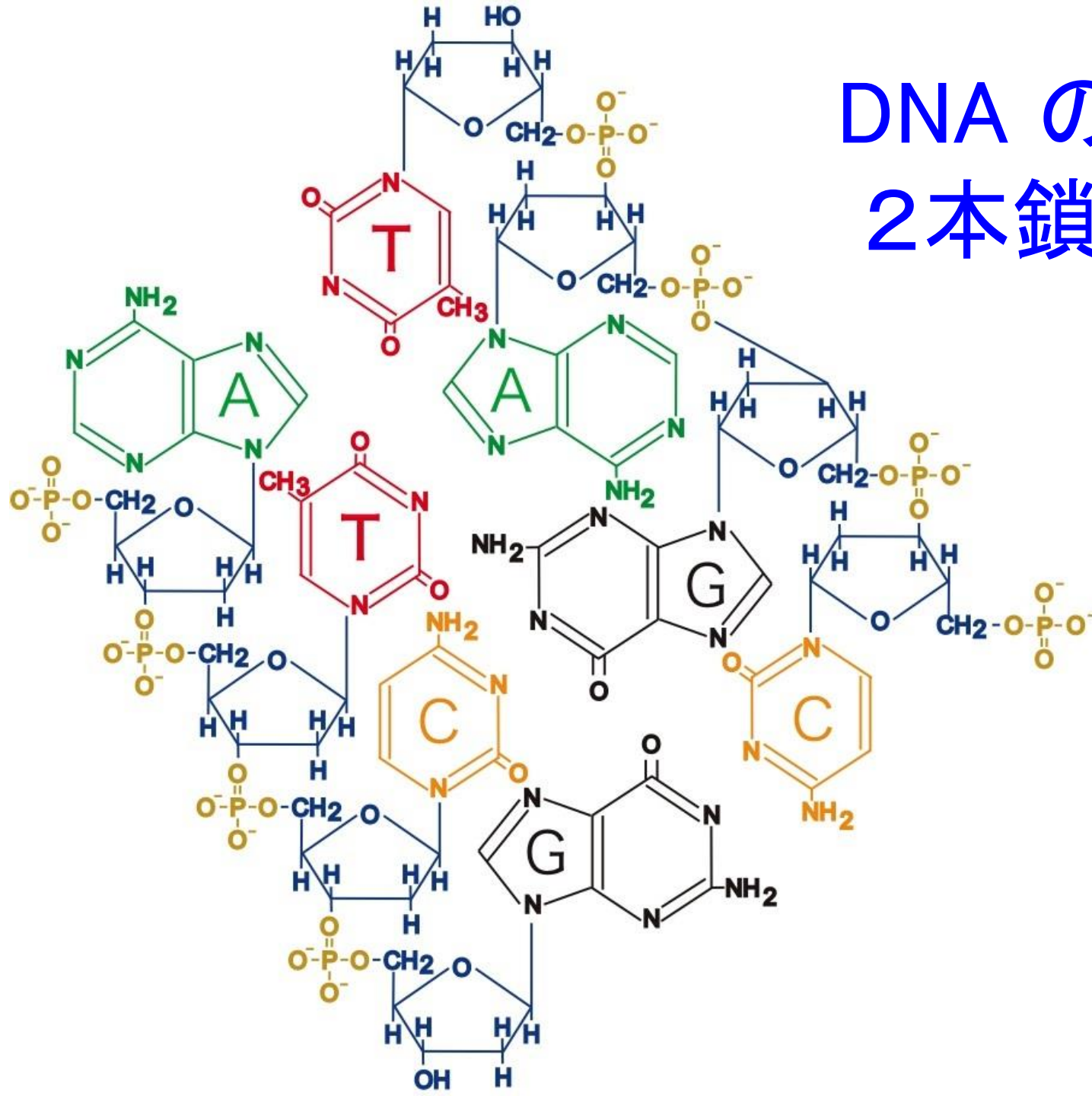
図 6.2 これまでの諸研究知見に基づき推測された、酸不溶性固体
有機物の分子構造モデル¹⁹⁾

核酸がどうできたか

RNA(上)とDNA(下)



DNA の 2本鎖

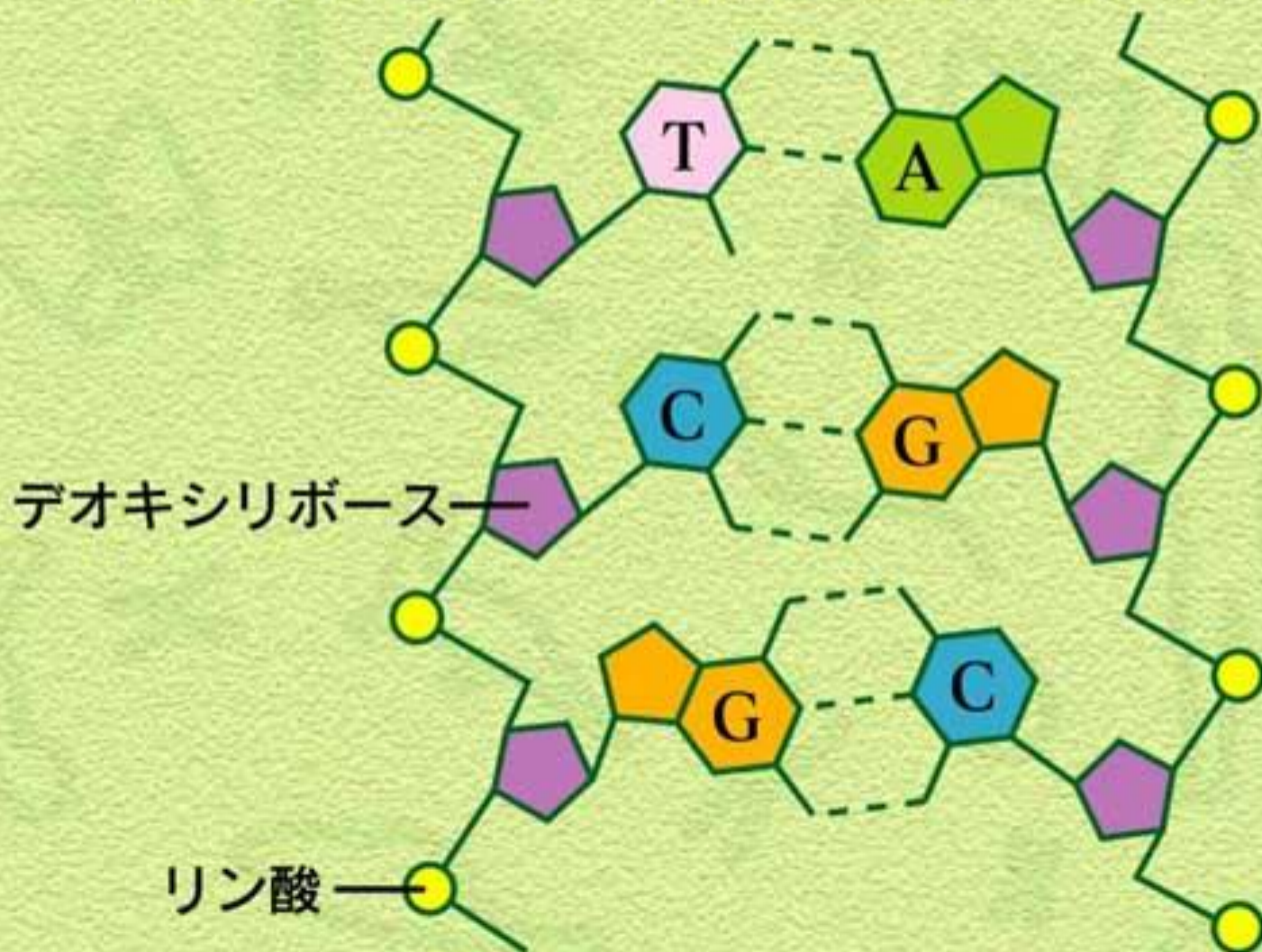


DNAの構造

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

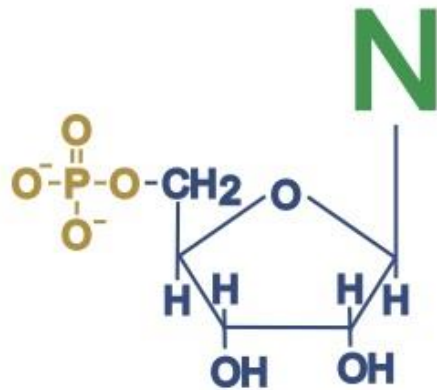
核酸重合体 + 水 $\rightarrow$ 核酸単量体

活性型核酸(リン酸化核酸)

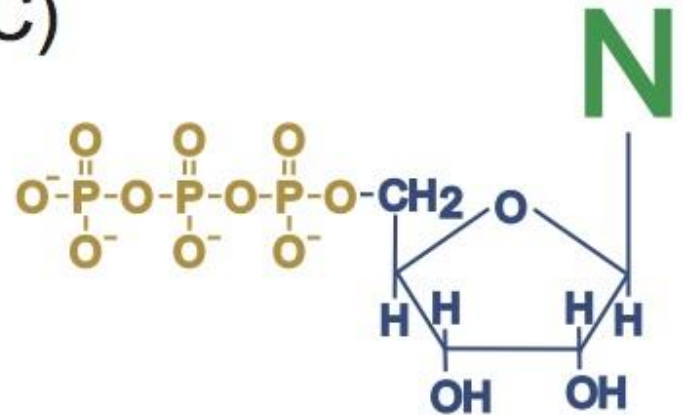
$\rightarrow$ 核酸重合体

活性化ヌクレオチド

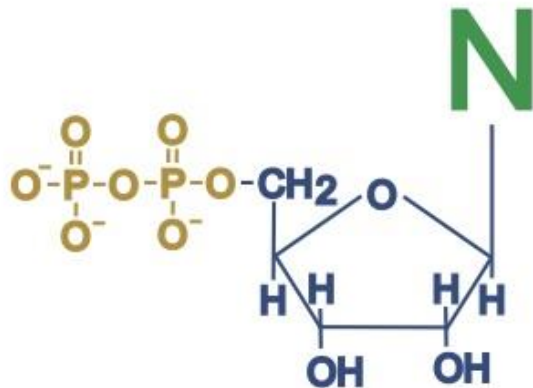
A)



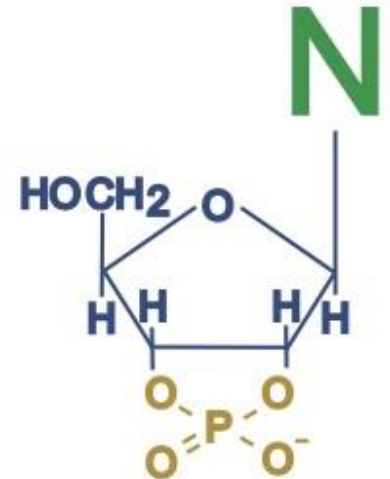
C)



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

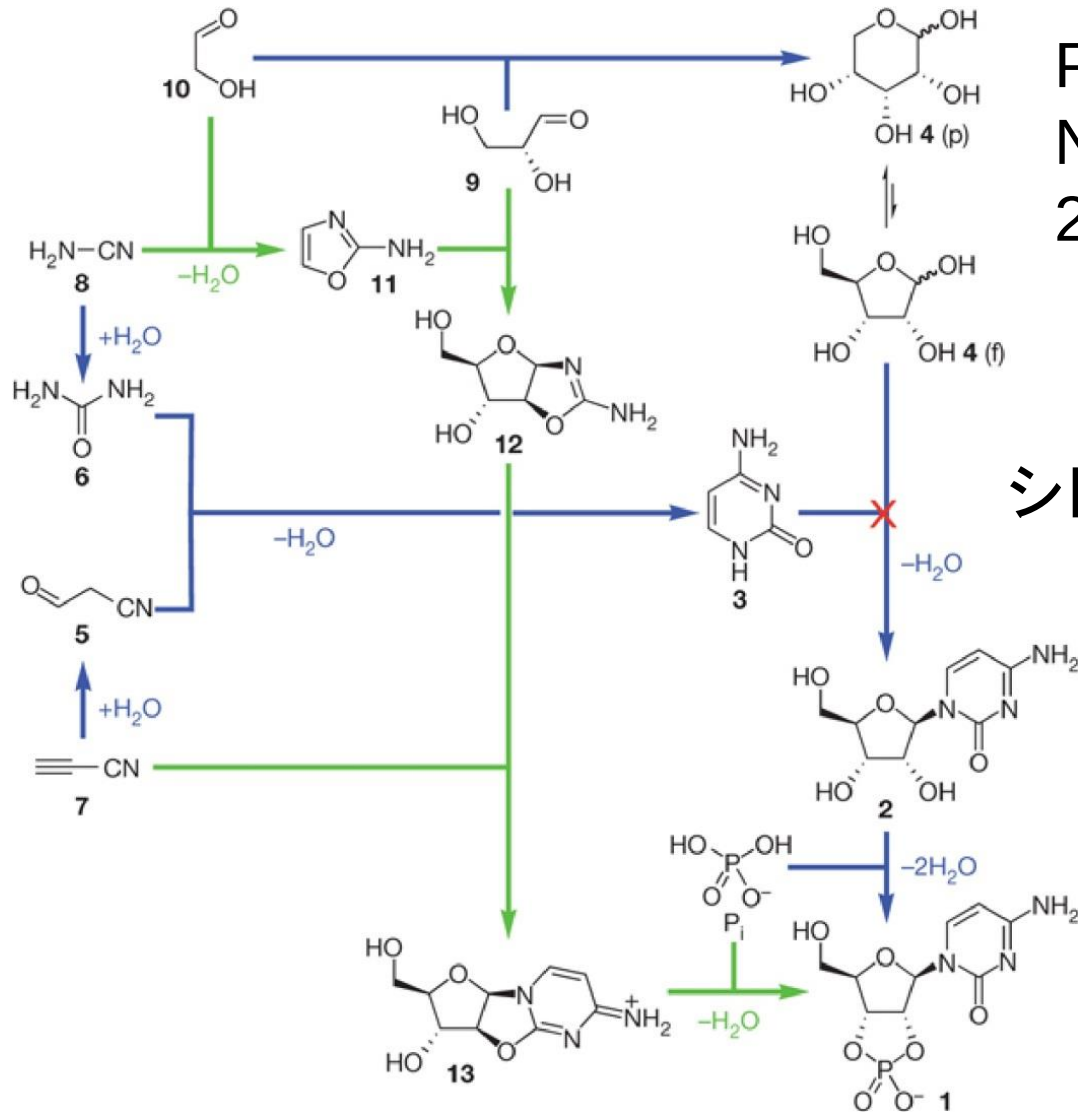
シアンアミド

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。
- ・ プロティノイド・ミクロスフェア
- ・ 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

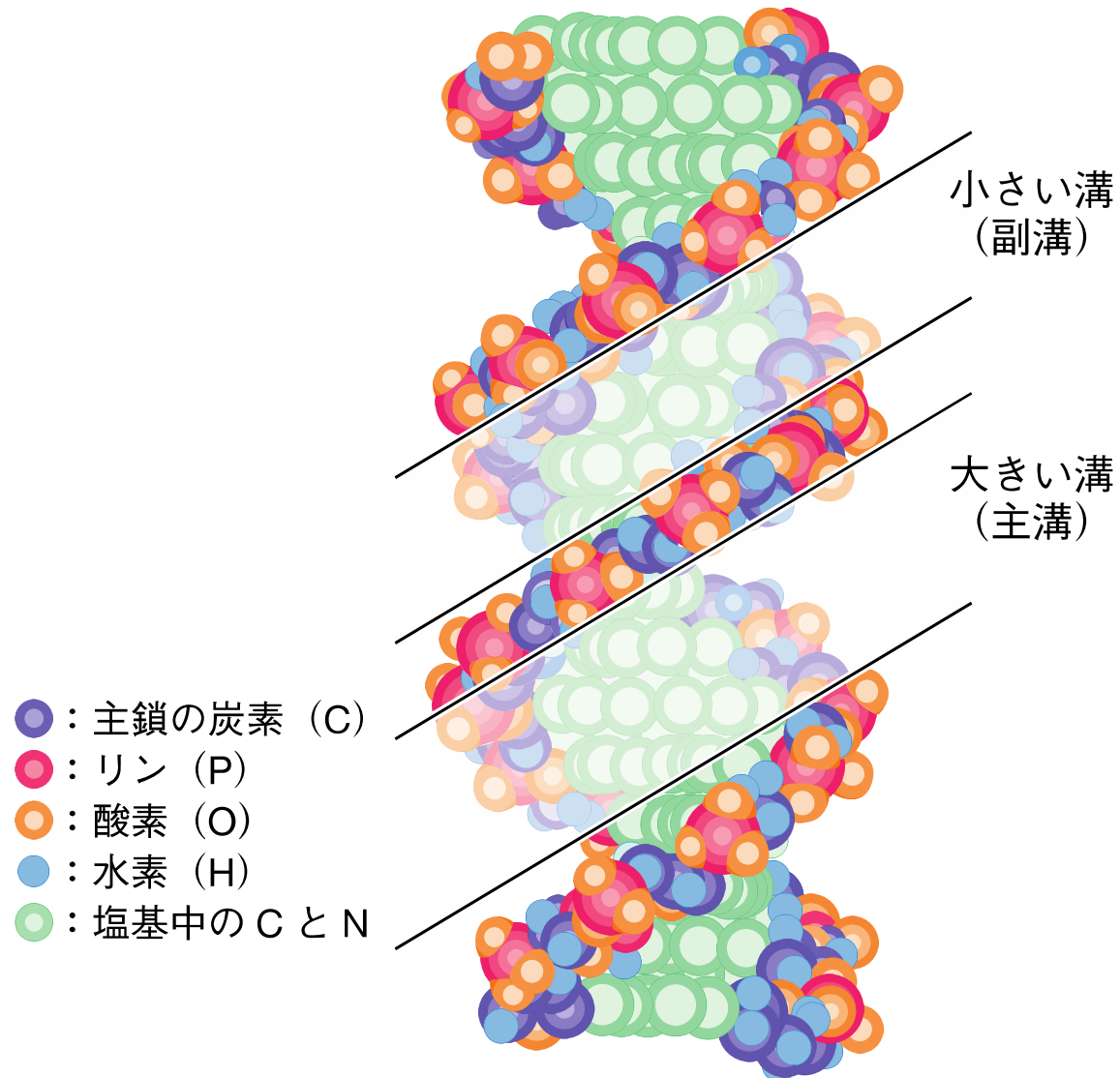


図2・2 塩基対

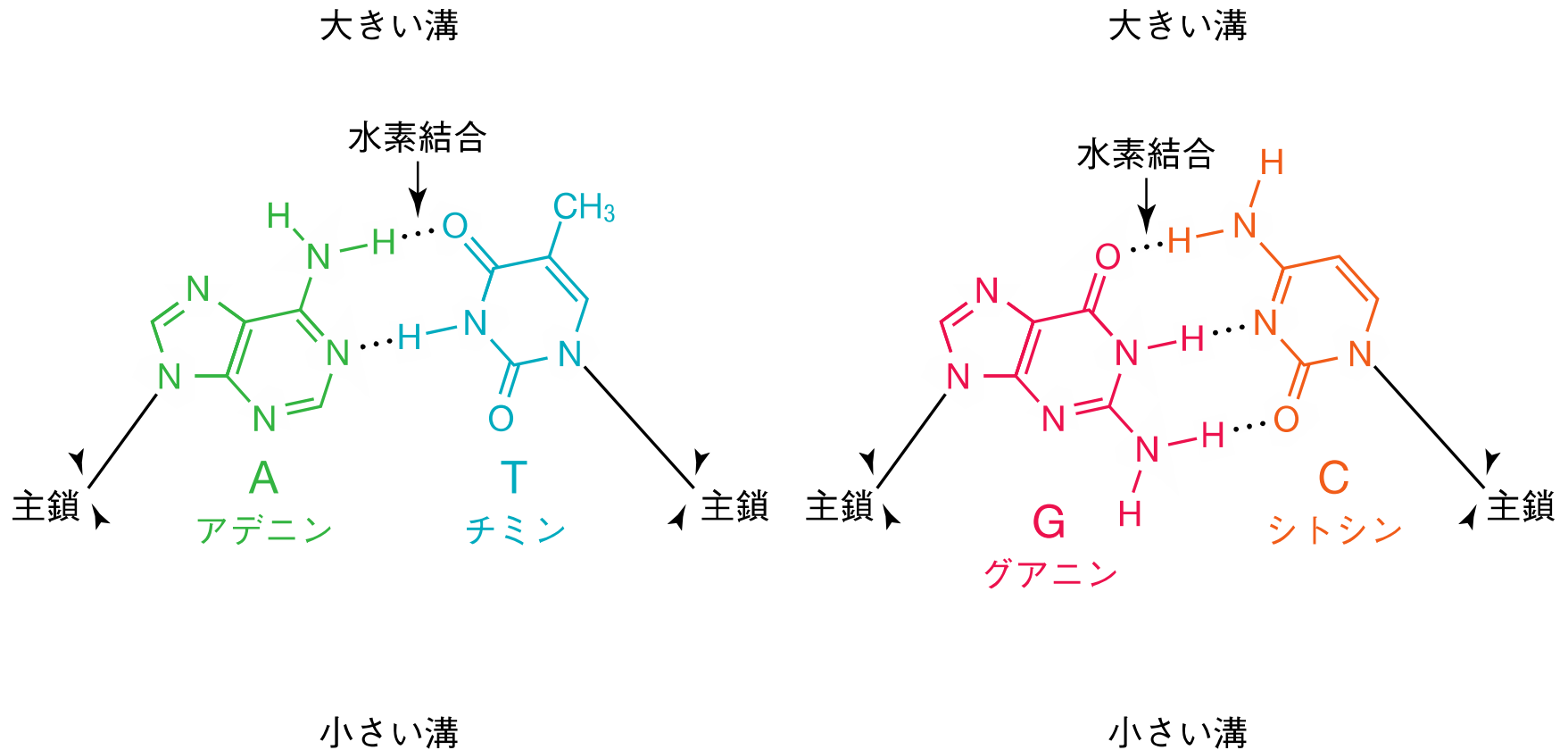


図2・3 プリンとピリミジンの構造

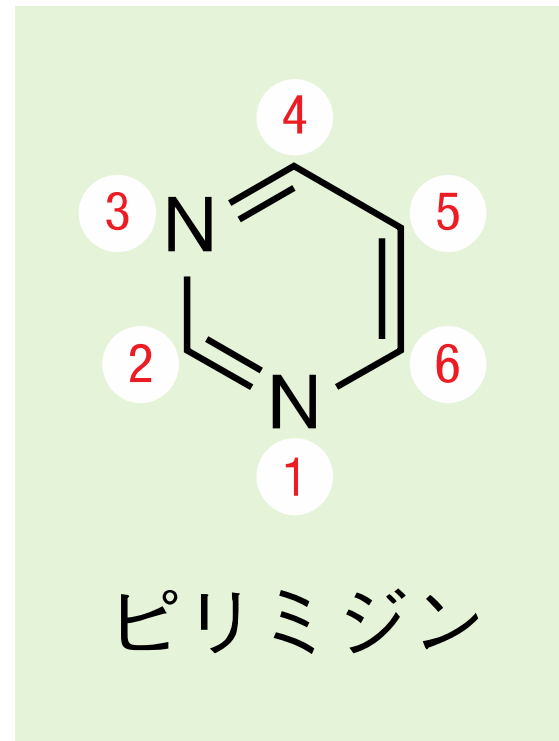
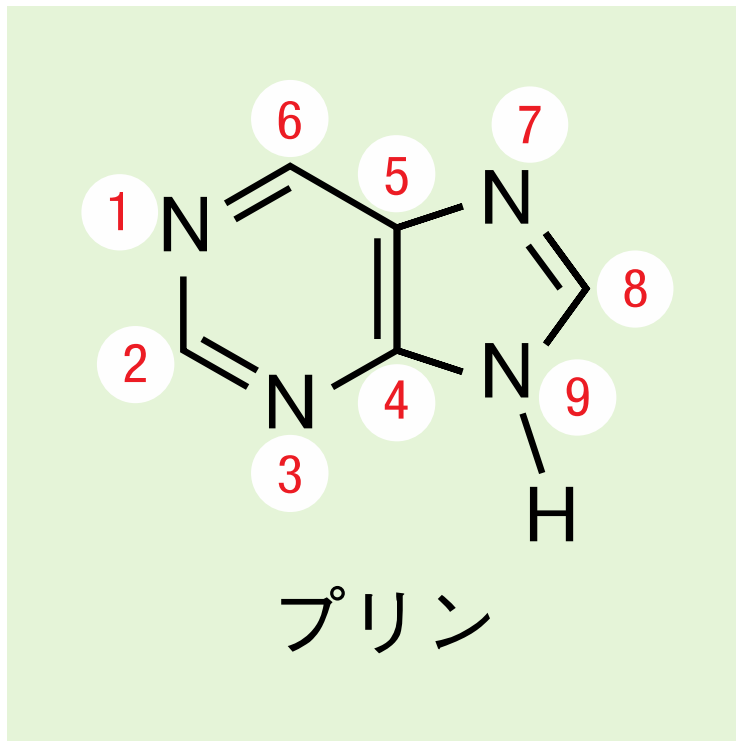


図2・4 リボヌクレオチドと デオキシリボヌクレオチド

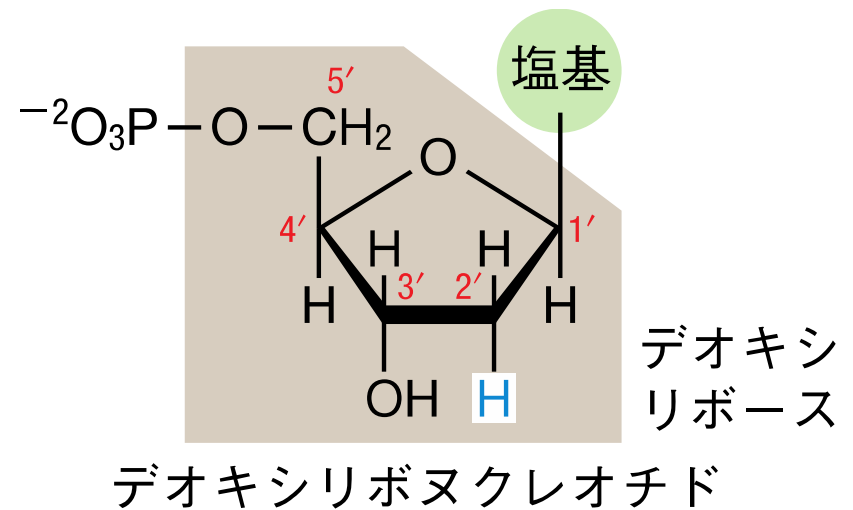
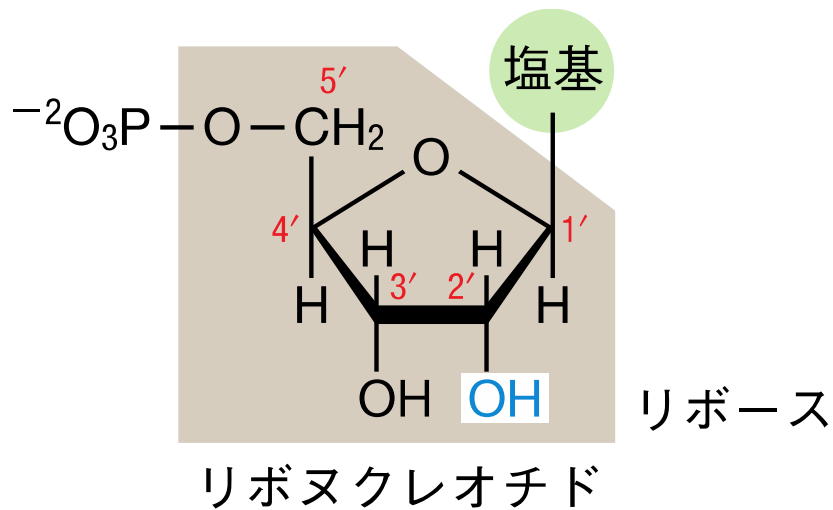
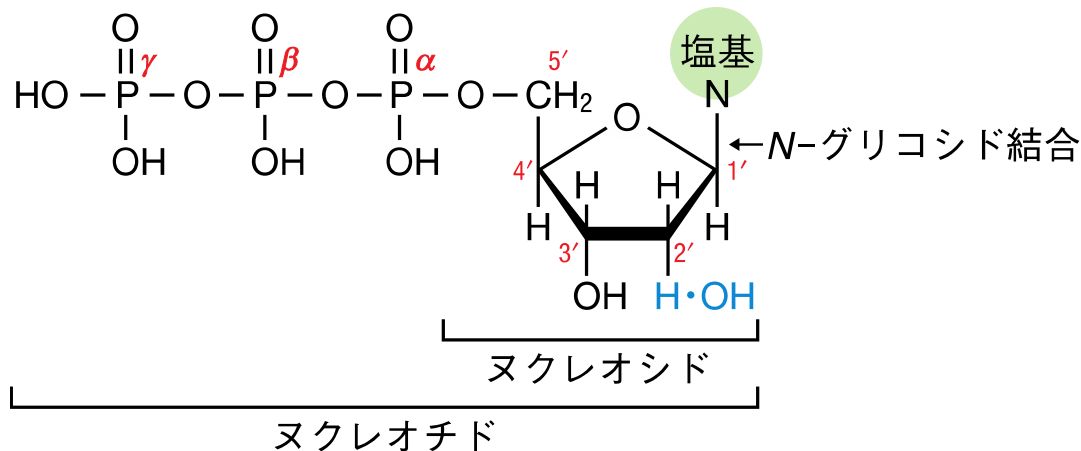


図2・5 モノヌクレオチドと ポリヌクレオチド

(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

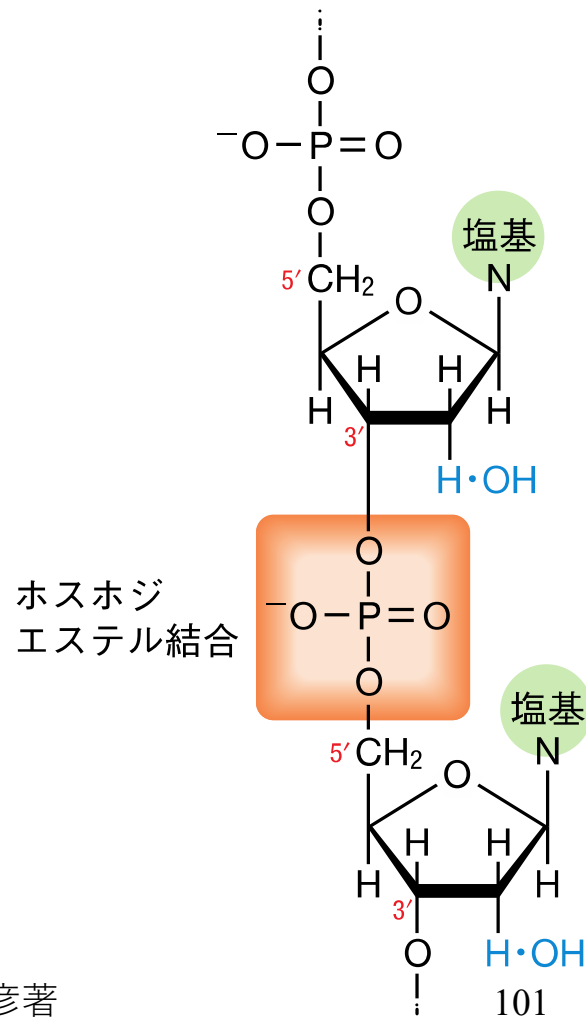


図2・6 DNA二本鎖

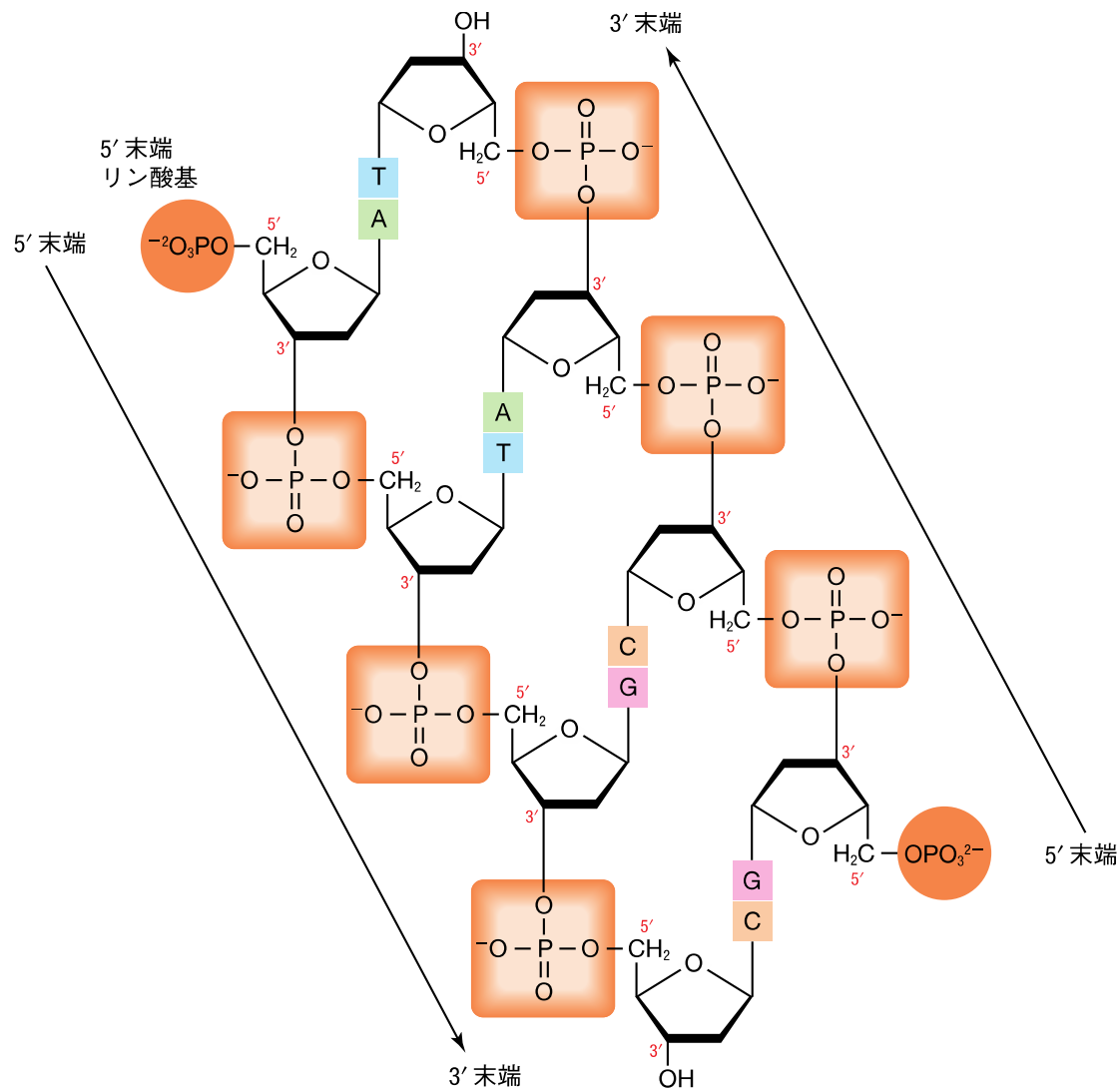


表2・1 塩基とヌクレオシド、ヌクレオチドの名称

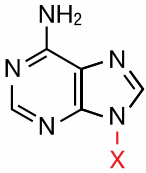
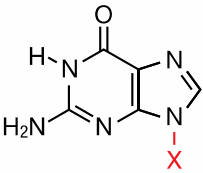
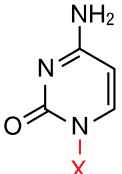
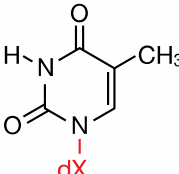
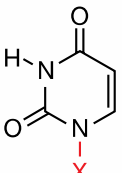
塩基の構造	塩基 (X=H)	ヌクレオシド (X=リボース)	ヌクレオチド (X=リボースリン酸)
	アデニン Ade A	アデノシン Ado A	アデニル酸 アデノシンーリン酸 AMP
	グアニン Gua G	グアノシン Guo G	グアニル酸 グアノシンーリン酸 GMP
	シトシン Cyt C	シチジン Cyd C	シチジル酸 シチジンーリン酸 CMP
	チミン Thy T	デオキシチミジン dThd T	デオキシチミジル酸 デオキシチミジンーリン酸 dTMP
	ウラシル Ura U	ウリジン Urd U	ウリジル酸 ウリジンーリン酸 UMP

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 (Week 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

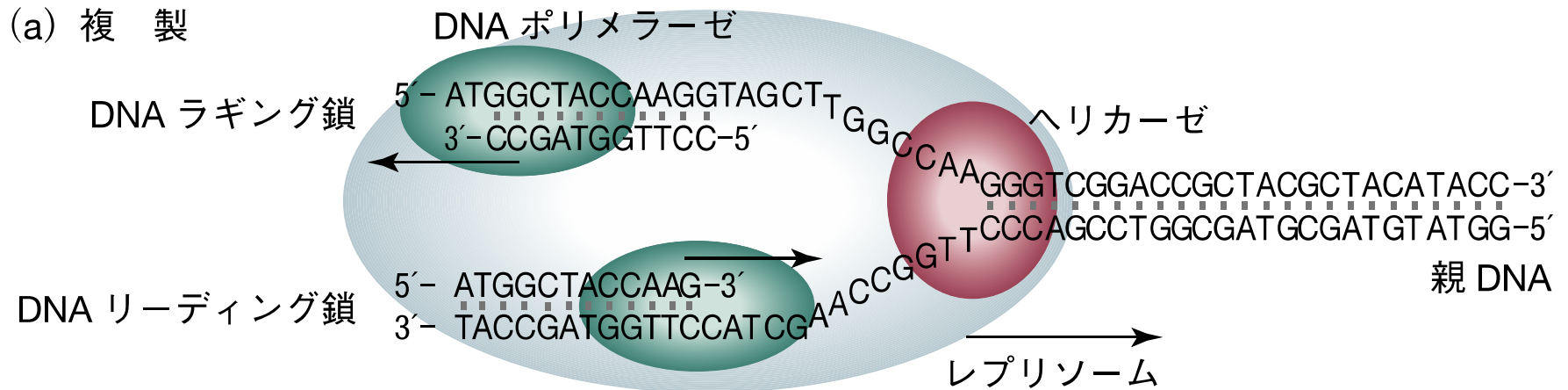


図2・7 遺伝の仕組み

(a) 複製

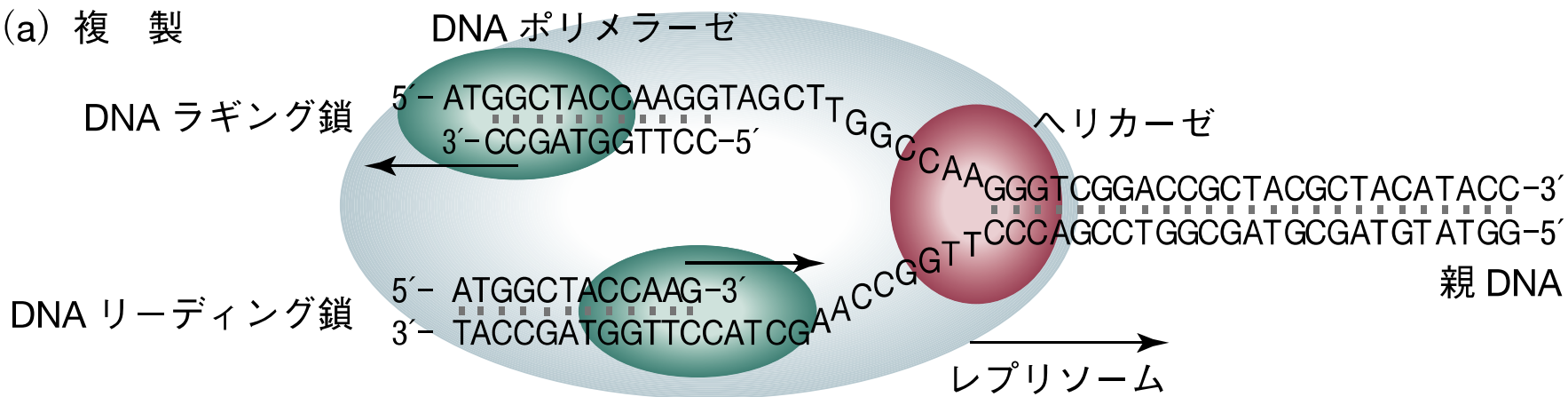


図2・7 遺伝の仕組み

(a) 複製

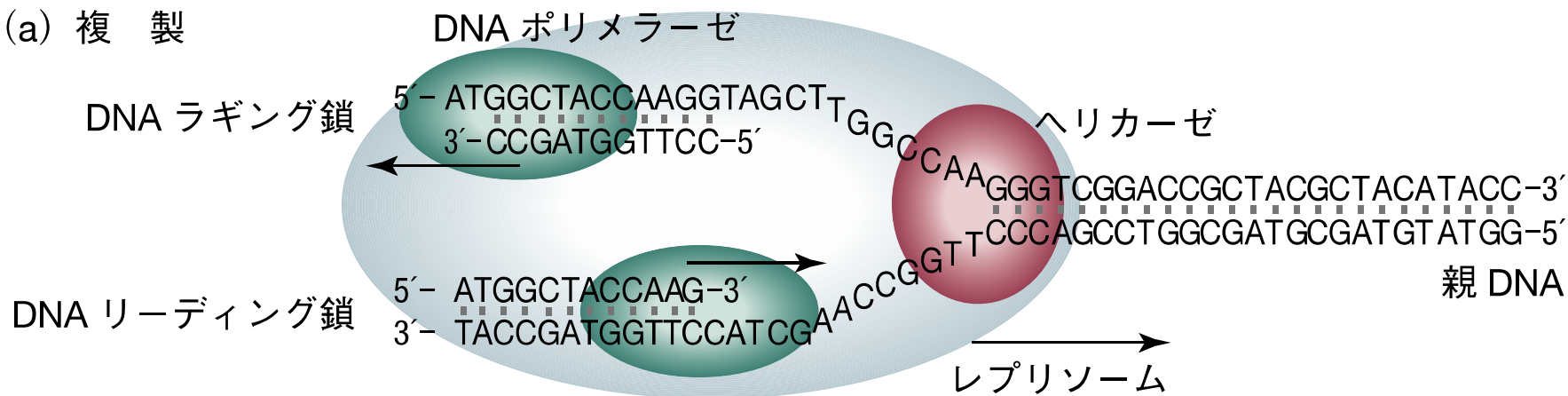


図2・7 遺伝の仕組み

(b) 転写

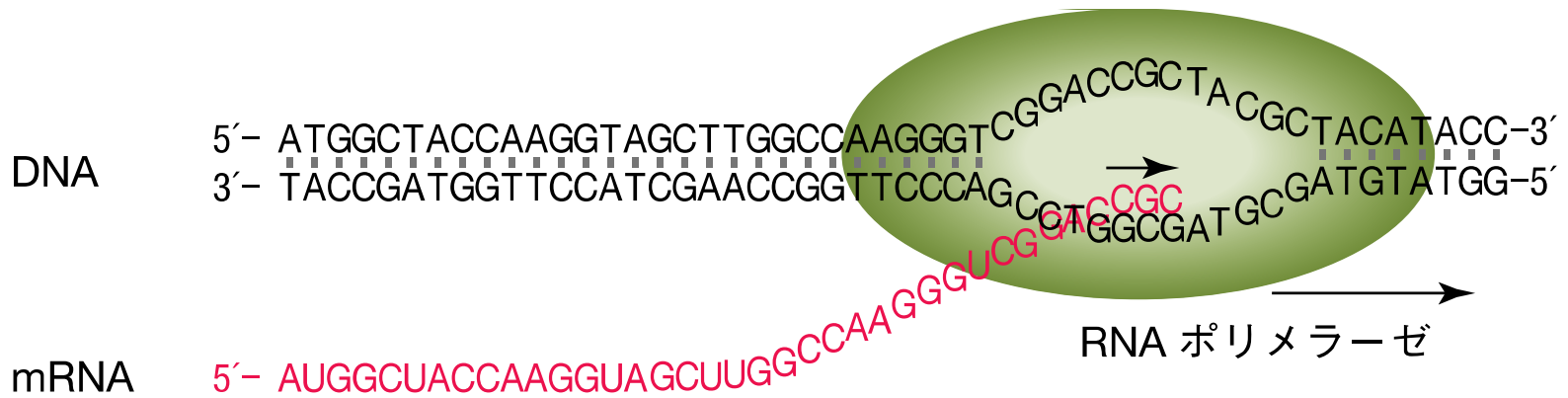


図2・7 遺伝の仕組み

(b) 転写

DNA

5'- ATGGCTACCAAGGTAGCTTGGCCAAAGGGT ^{CGA}
 3'- TACCGATGGTTCCATCGAACCGGTTCCCA _{GCG}

 5'- ^{CGC}TACATACC-3'
 3'- _{CC}GATGTATGG-5'

mRNA

5'- AUGGCUACCAAGGUAGCUUGGCCAAGGUGCGUAGGCGATGG

RNA ポリメラーゼ

図2・7 遺伝の仕組み

(b) 転写

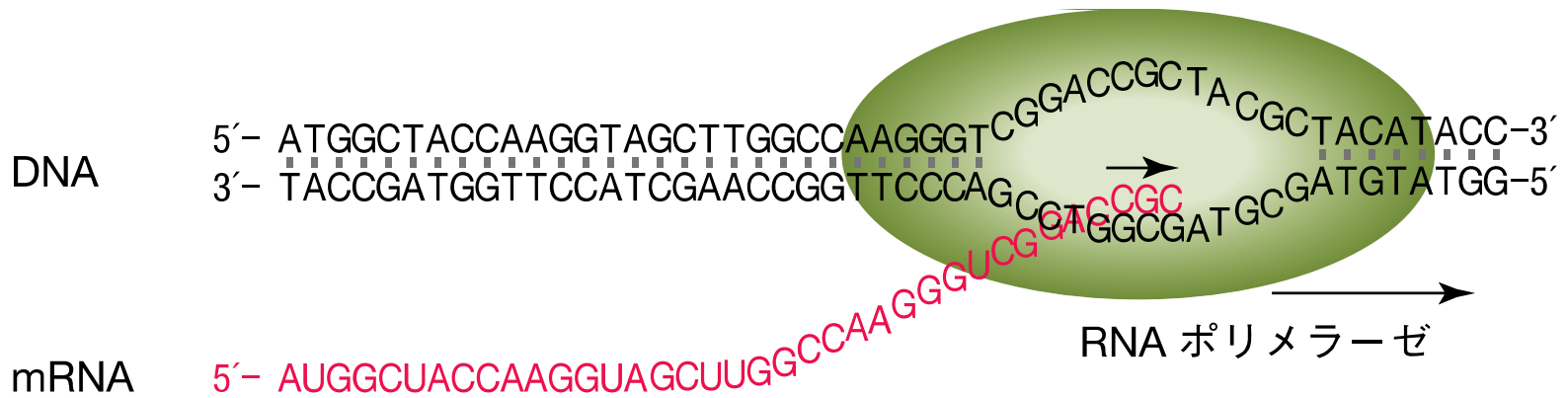


図2・7 遺伝の仕組み

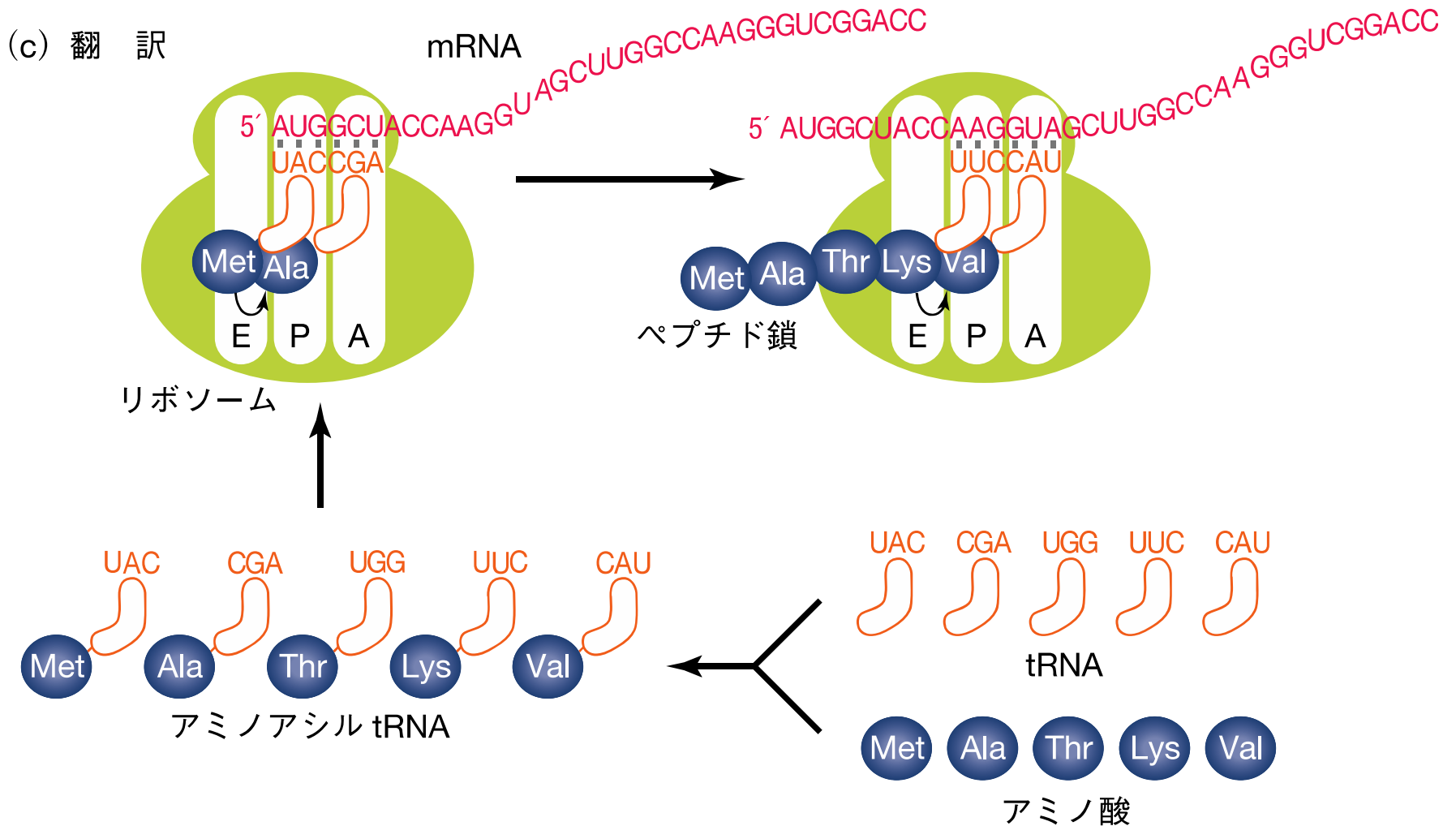


図2・7 遺伝の仕組み

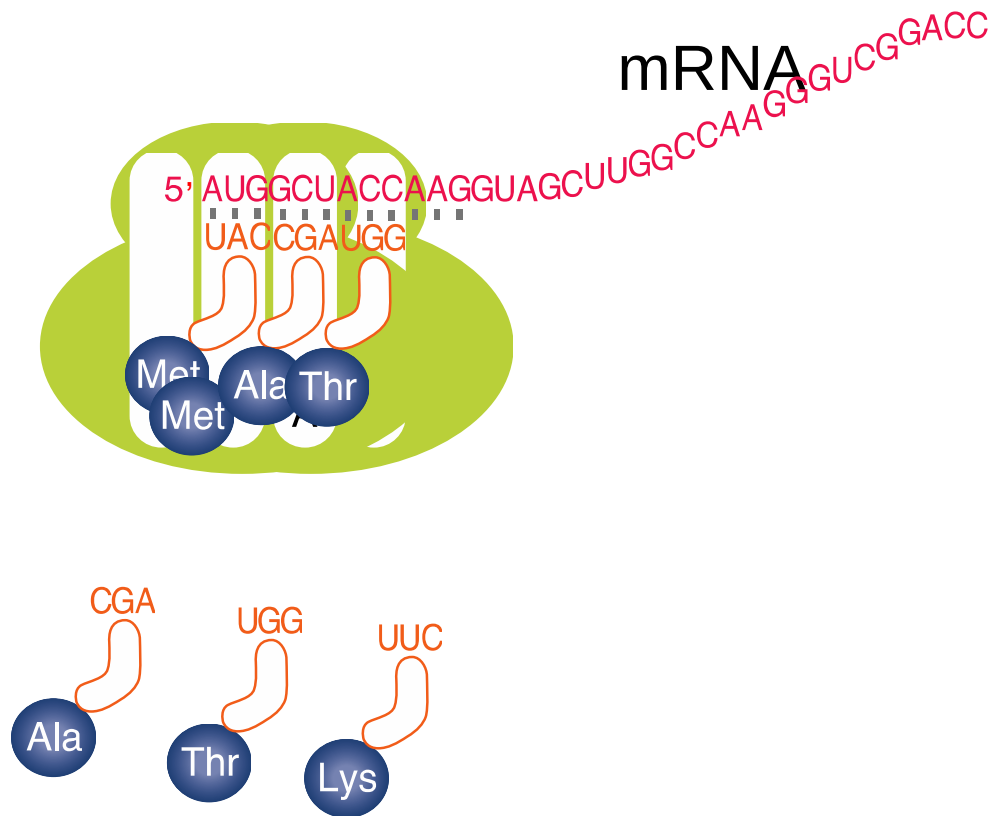


図2・8 コドン表

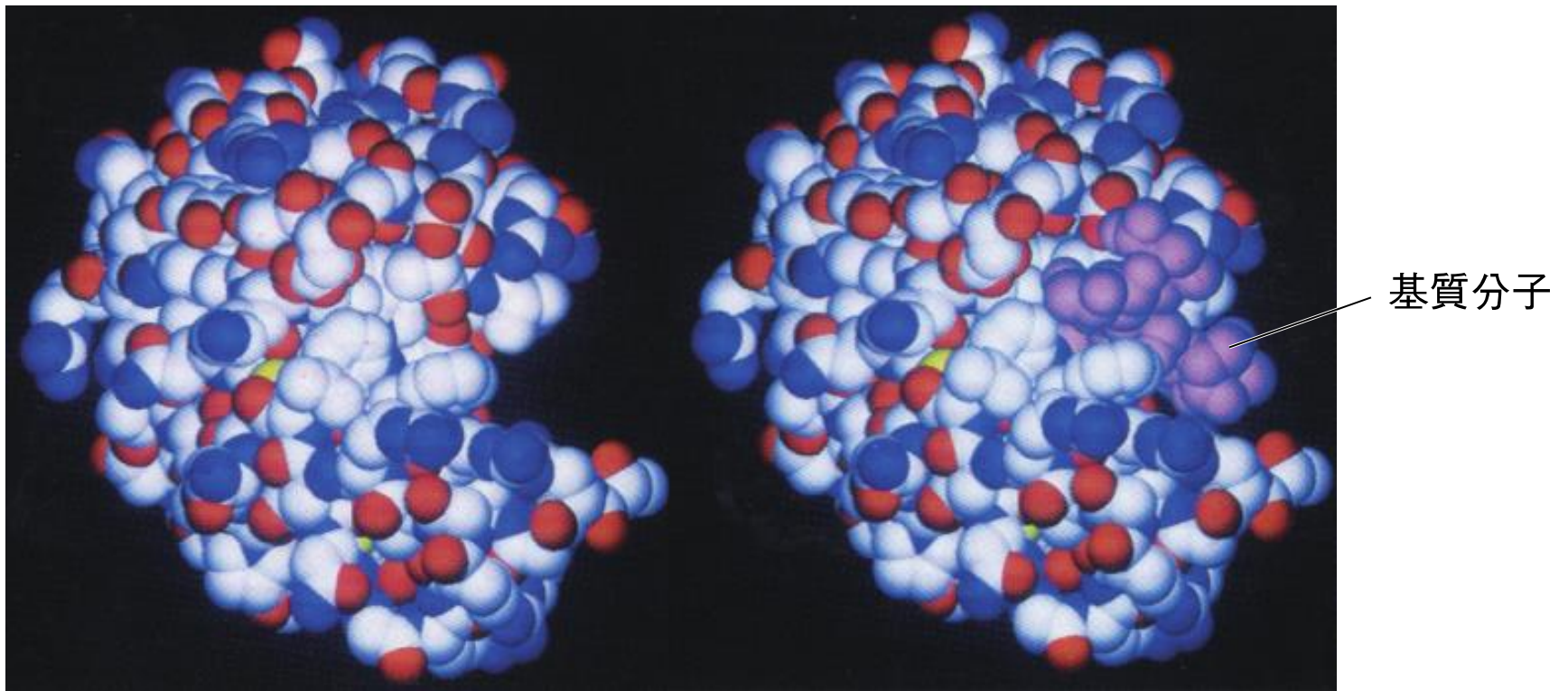
二 文 字 目

一 文 字 目	二 文 字 目				三 文 字 目
	U	C	A	G	
	U UU } 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)	
	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 }	
	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 }	
	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 }	

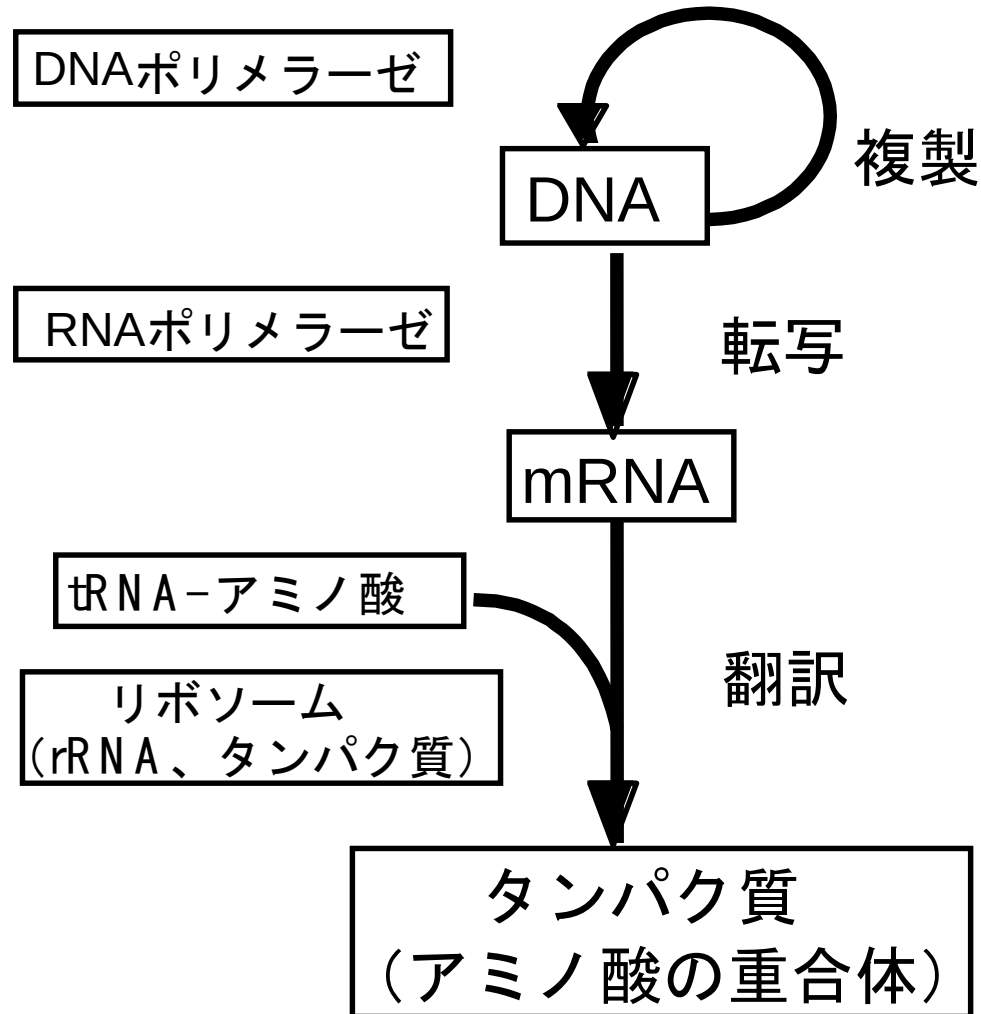
Ala (A) アラニン	Gly (G) グリシン	Pro (P) プロリン
Arg (R) アルギニン	His (H) ヒスチジン	Ser (S) セリン
Asn (N) アスパラギン	Ile (I) イソロイシン	Thr (T) トレオニン
Asp (D) アスパラギン酸	Leu (L) ロイシン	Trp (W) トリプトファン
Cys (C) システイン	Lys (K) リシン	Tyr (Y) チロシン
Gln (Q) グルタミン	Met (M) メチオニン	Val (V) バリン
Glu (E) グルタミン酸	Phe (F) フェニルアラニン	

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ィルス
- ・ 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.

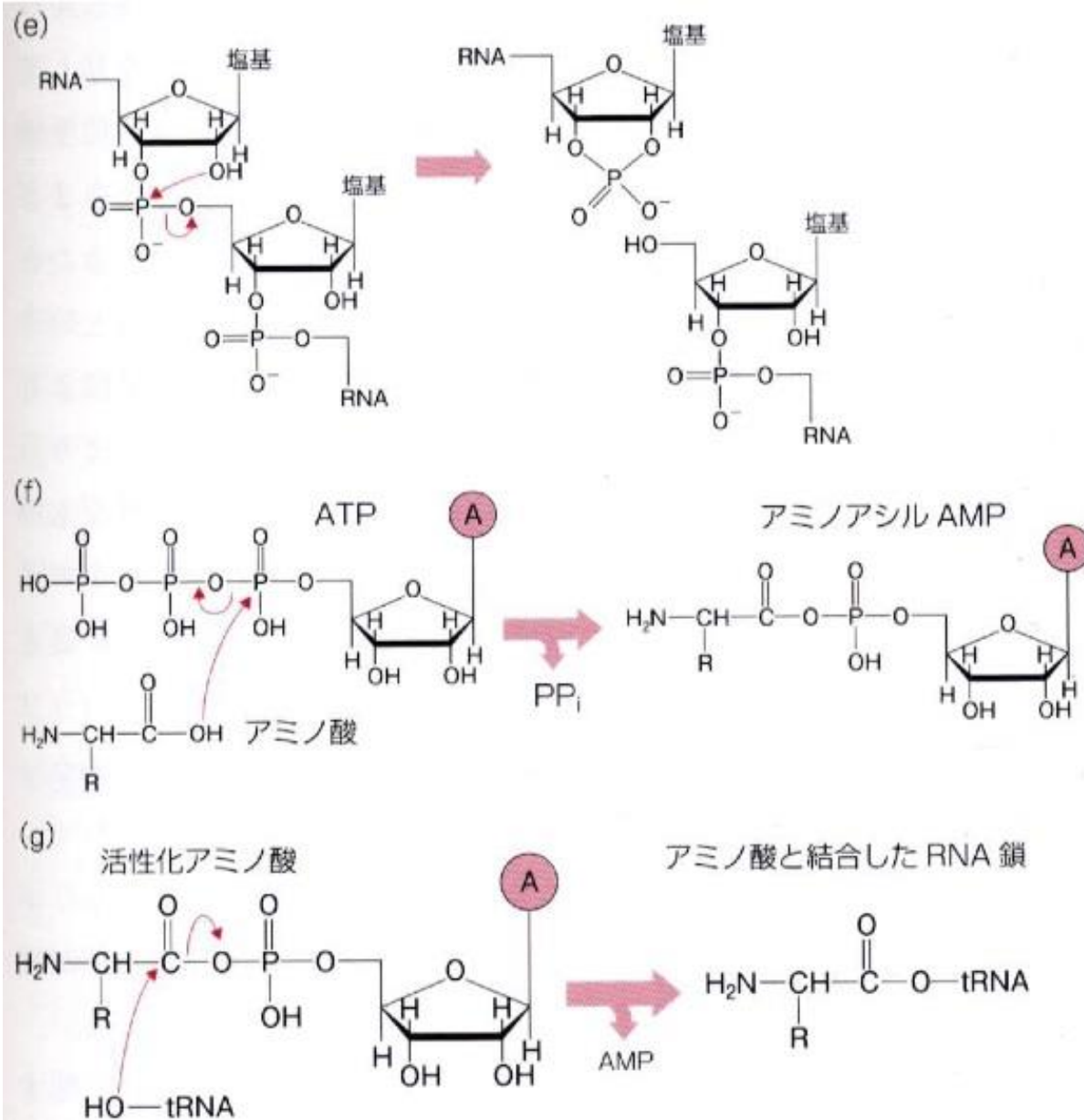
a

b

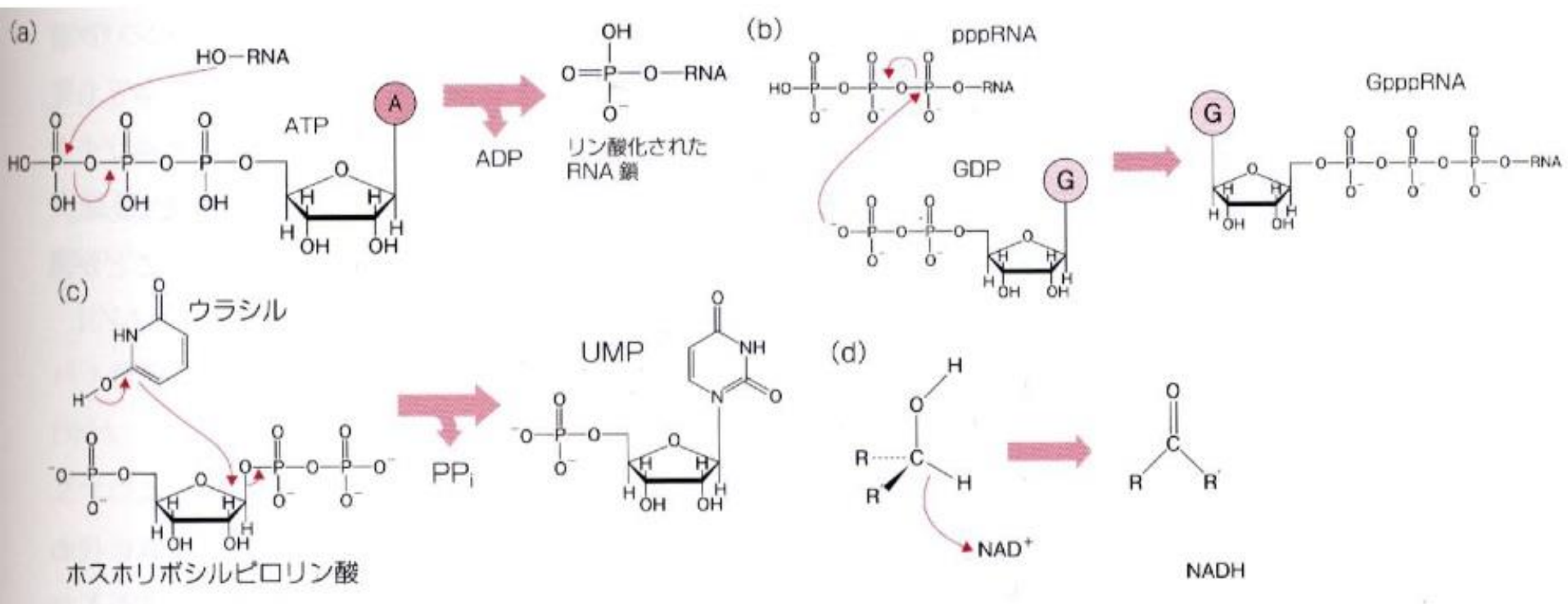
c

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。

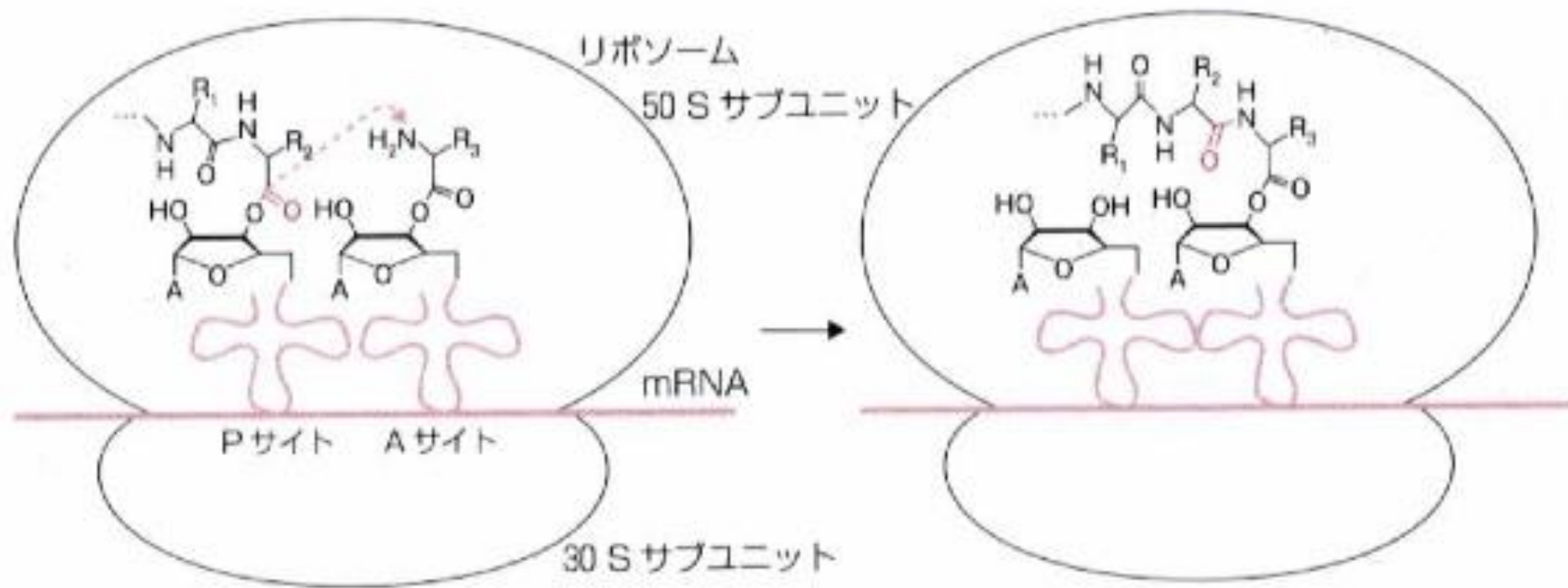
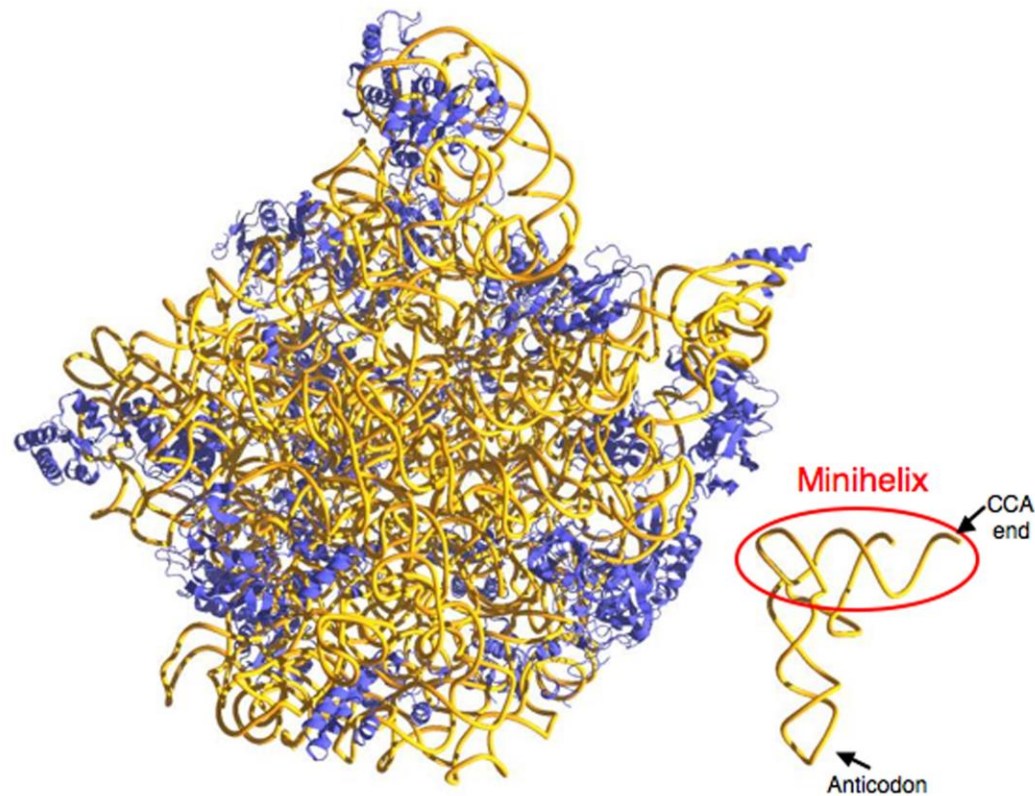


図 8.3 リボソーム上でのペプチド結合の形成

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



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

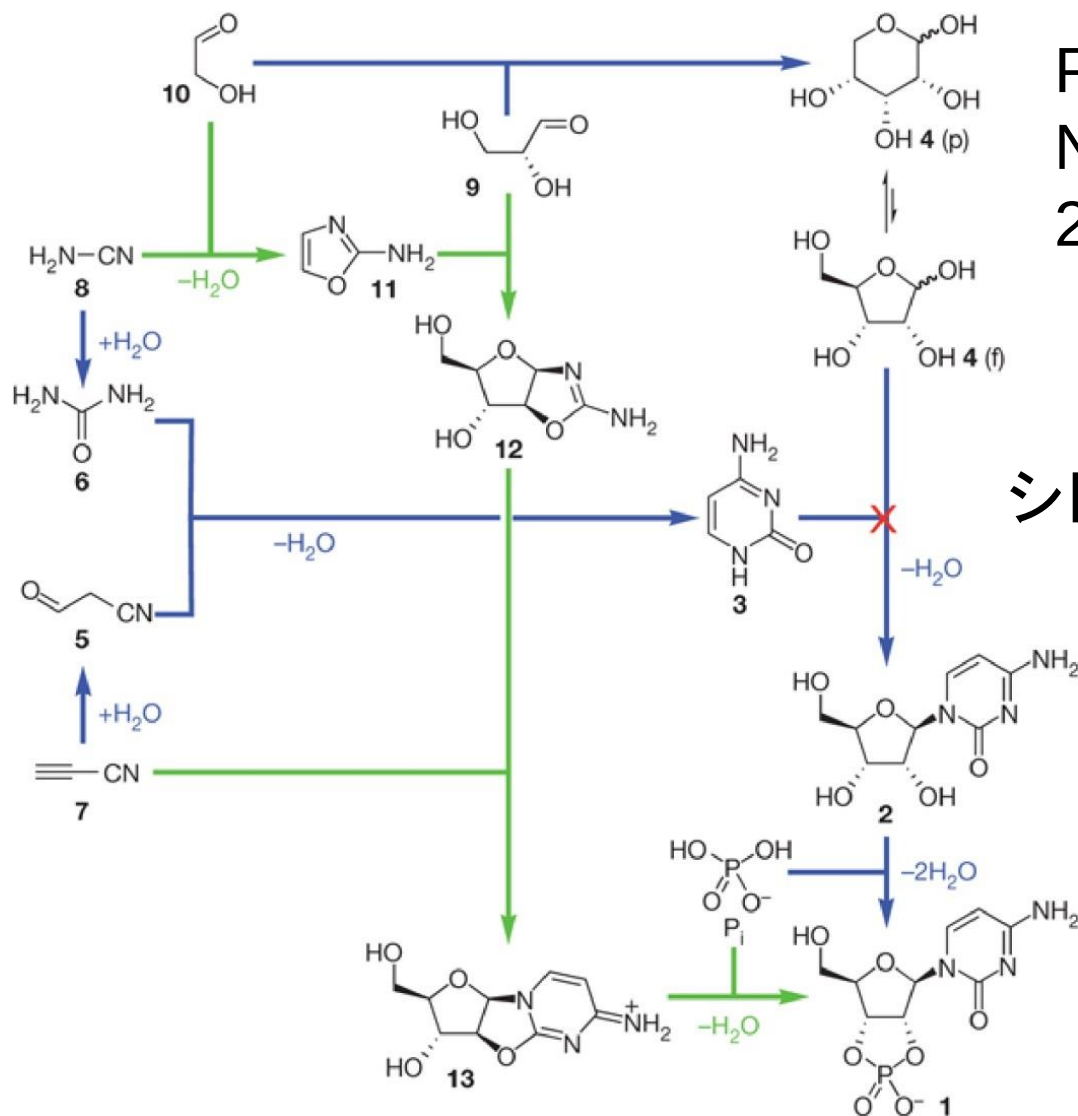
シアンアミド

尿素

シアノ
アセト
アルデヒド

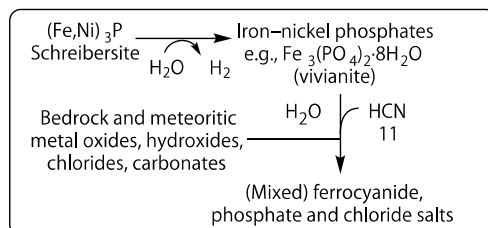
シアノ
アセチレン

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



シトシン

The diagram shows a cross-section of the Earth's crust. At the top, a box labeled 'Impact shock' contains 'HCN 11' and 'N₂'. An arrow points from 'N₂' to 'HCN 11'. Below this, a wavy arrow labeled 'Dissolution from the atmosphere' points down to a blue wedge-shaped area representing the crust. This area contains several black oval shapes labeled 'Meteorite fragments and inclusions'. At the bottom of the wedge is a label 'Bedrock'.



Ferrocyanide, phosphate and chloride salts

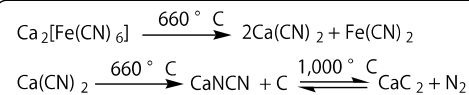
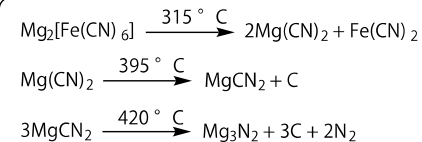
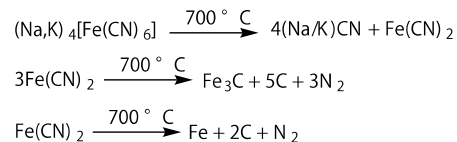
Least soluble

Most soluble

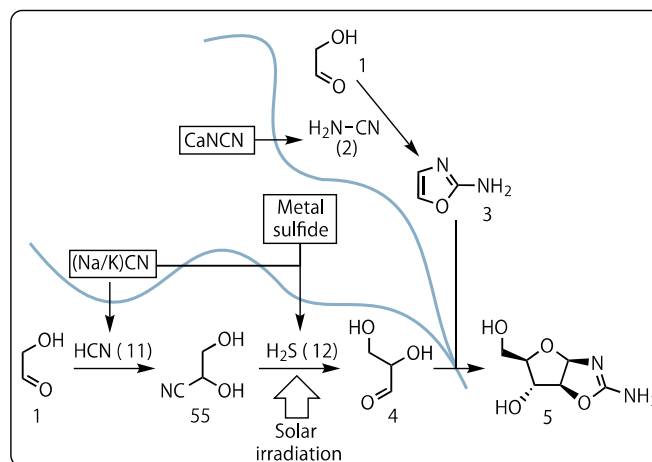
Bedrock

Sulfidic meteorite inclusions

A diagram illustrating a subsurface cross-section. It shows a wedge-shaped structure with a curved base. The base is labeled "Bedrock". Above the bedrock, there is a layer labeled "Evaporite layer". A dashed line indicates the boundary between the bedrock and the evaporite layer. The evaporite layer is shaded in light green, and the area above it is white.



A diagram illustrating a hydrothermal system on a planetary surface. The system is shown in a cross-section of a rocky terrain. At the top right, an arrow labeled "Solar irradiation" points towards the surface. A "Stream" flows from the top left towards the center. It joins a larger body of water labeled "Pool" at a "Confluence". Below the surface, a "Thermally metamorphosed evaporite layer" is shown, which is a light green, irregularly shaped region. Below this layer is the "Bedrock", which is a darker, solid-colored region. Dashed lines connect the labels to their corresponding features in the diagram.



Bhvavesh,
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

。

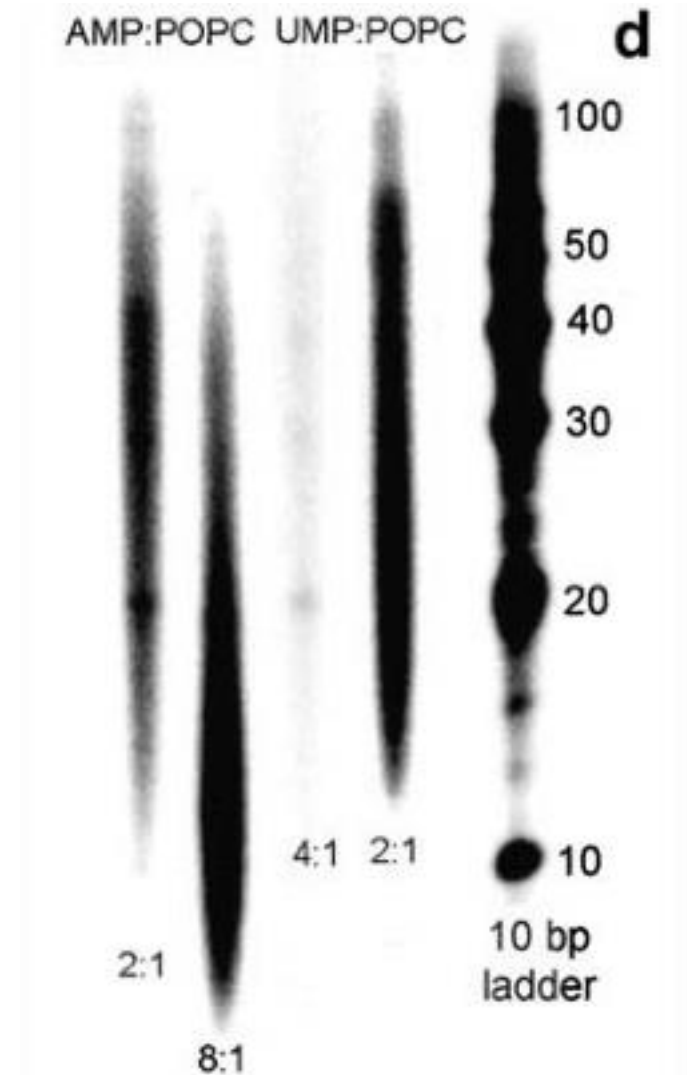
Furukawa, 2019 Springer in press

ホウ素は浅瀬に沈殿する。

Furukawa, 2019 Springer in press

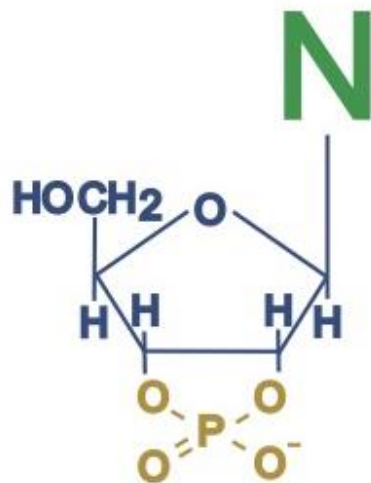
Deamer, D. W. and Pashley, R. M., *Orig. Life Evol. Biosph.*
19, 21-33 (1989)

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

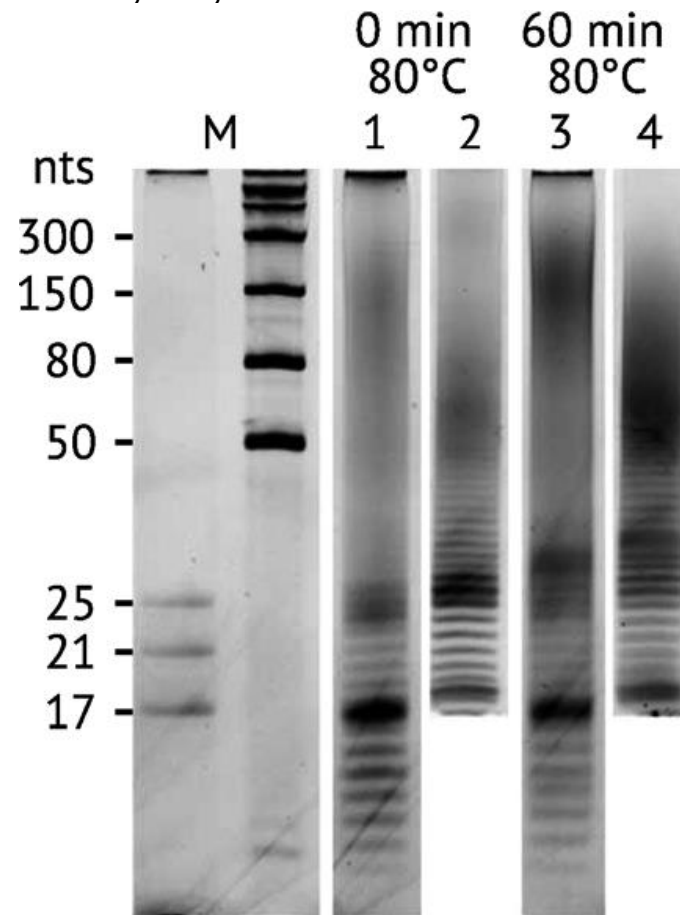


Figure 4. Dried cGMP shows 3'–5'-linked oligomers without further treatment. Gel electrophoresis of dried cGMP before (lanes 1, 2) and after (lanes 3, 4) 1 h incubation at 80 °C. Size markers ("M", 17–300 bases) at the left show sizes for all four lanes. For each pair, the right-hand lane is a longer 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(Wechtershauser、他)
 - GADV仮説(池原)
- ・ 遺伝情報を重視する説
 - RNAワールド

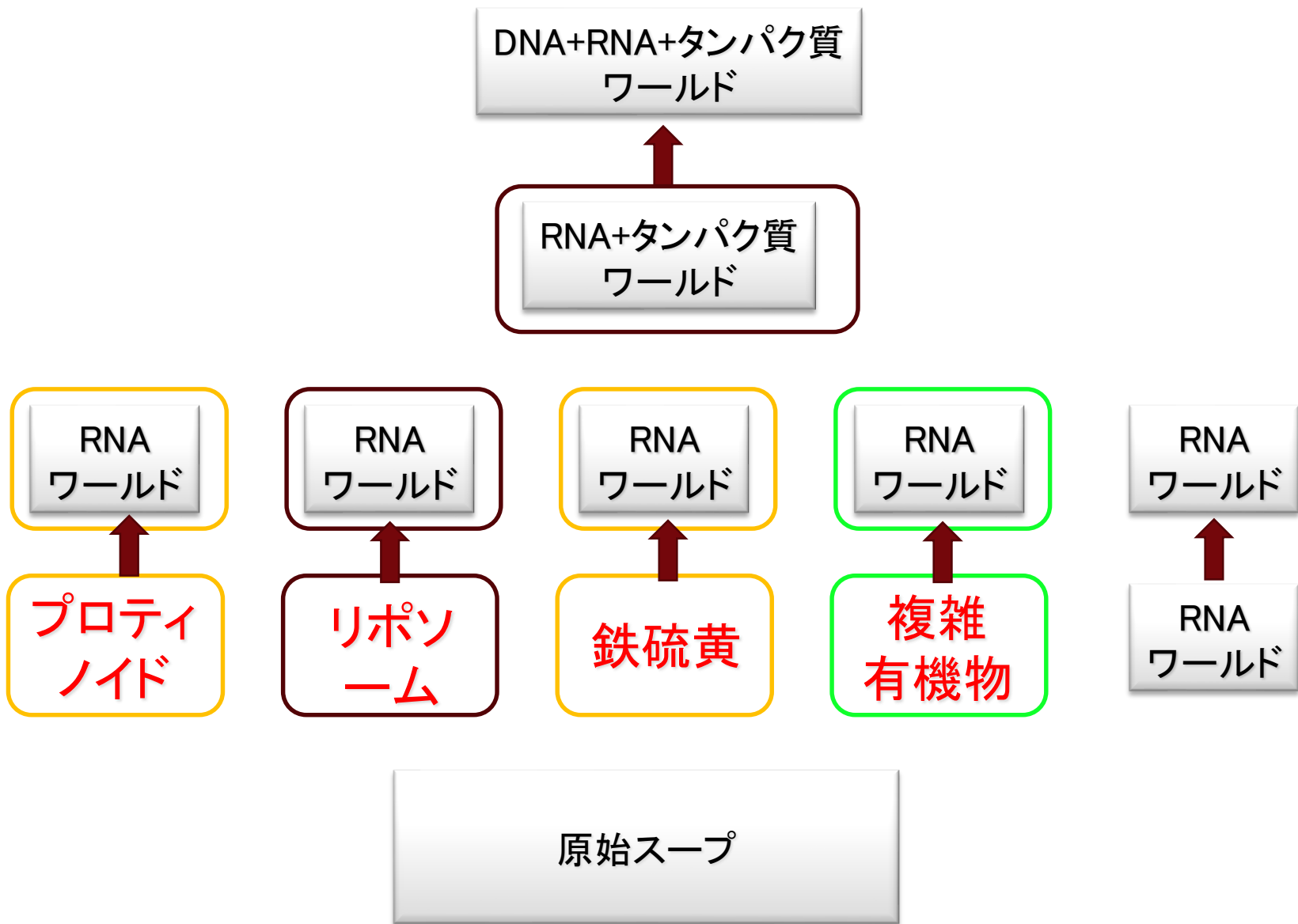
鉄硫黄ワールド説

- ・ 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(Wechtershauser、他)
 - GADV仮説(池原)
- ・ 遺伝情報を重視する説
 - RNAワールド

セントラルドグマの進化



原理主義 RNAワールド

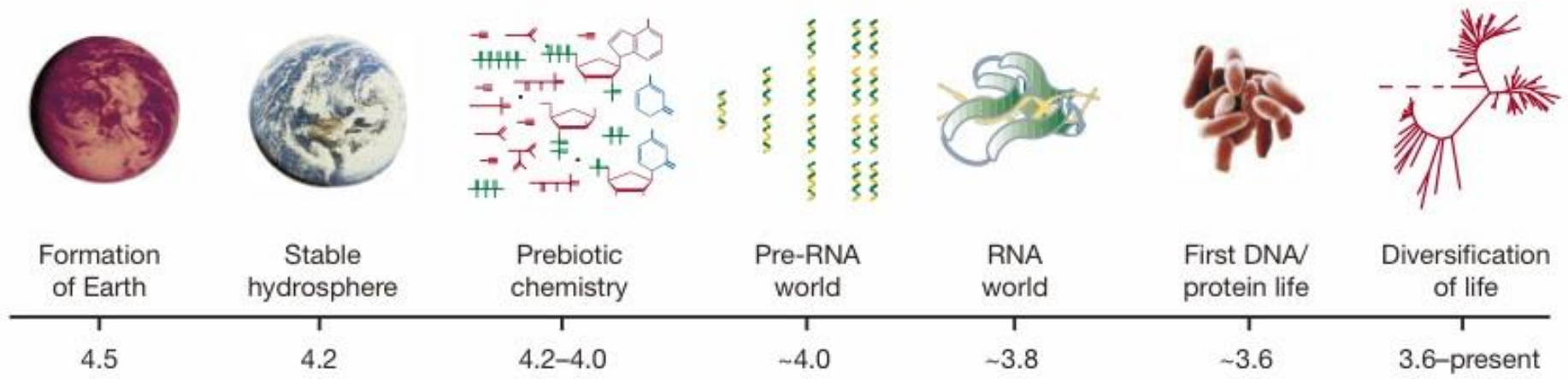
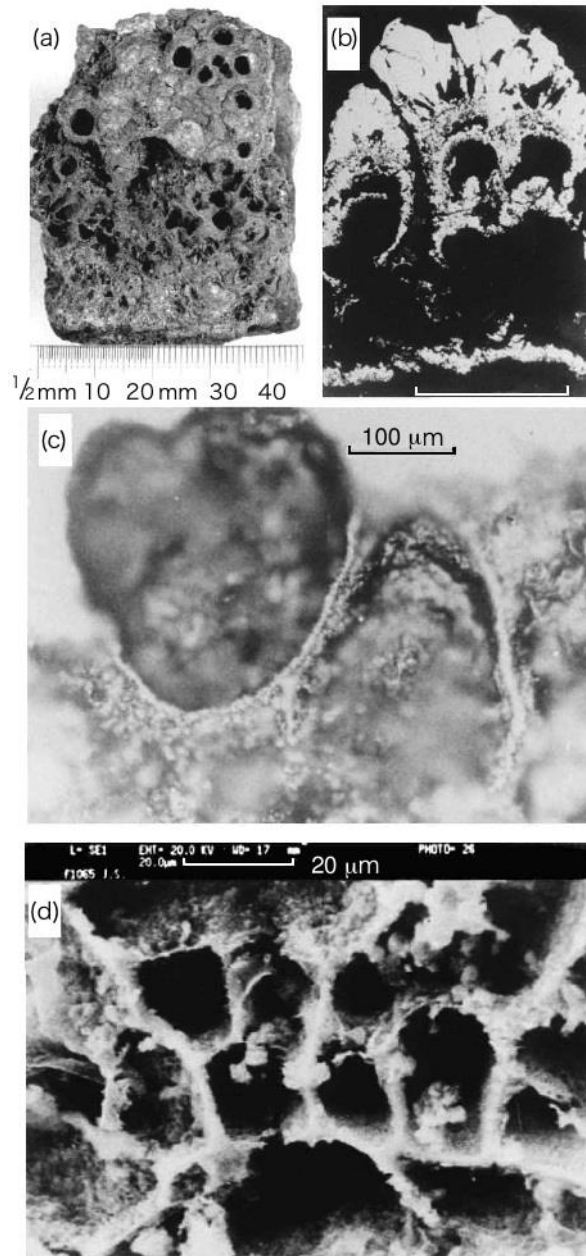


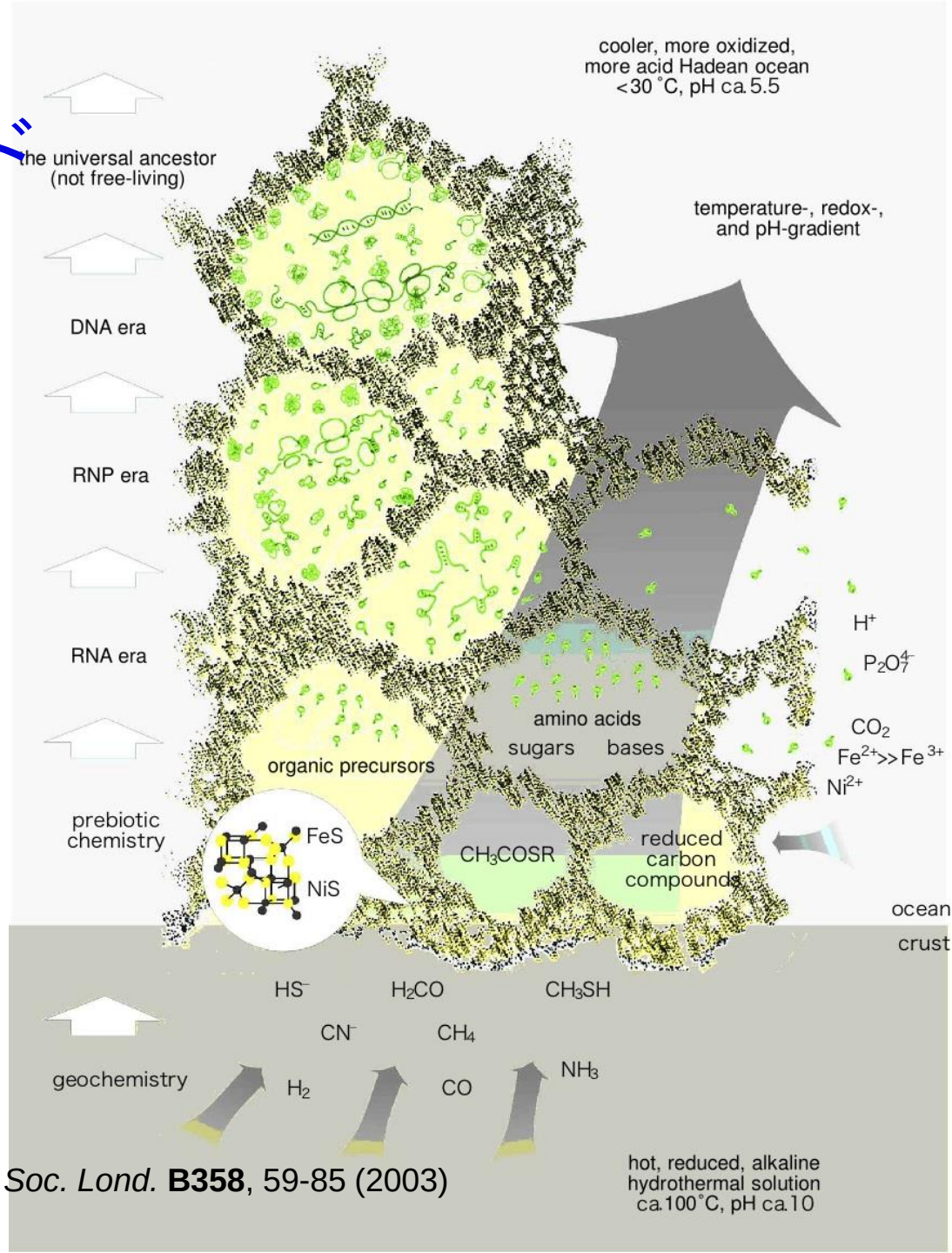
Figure 1 Timeline of events pertaining to the early history of life on Earth, with approximate dates in billions of years. ~~Source: the pre~~

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

鉄硫黄 RNAワールド

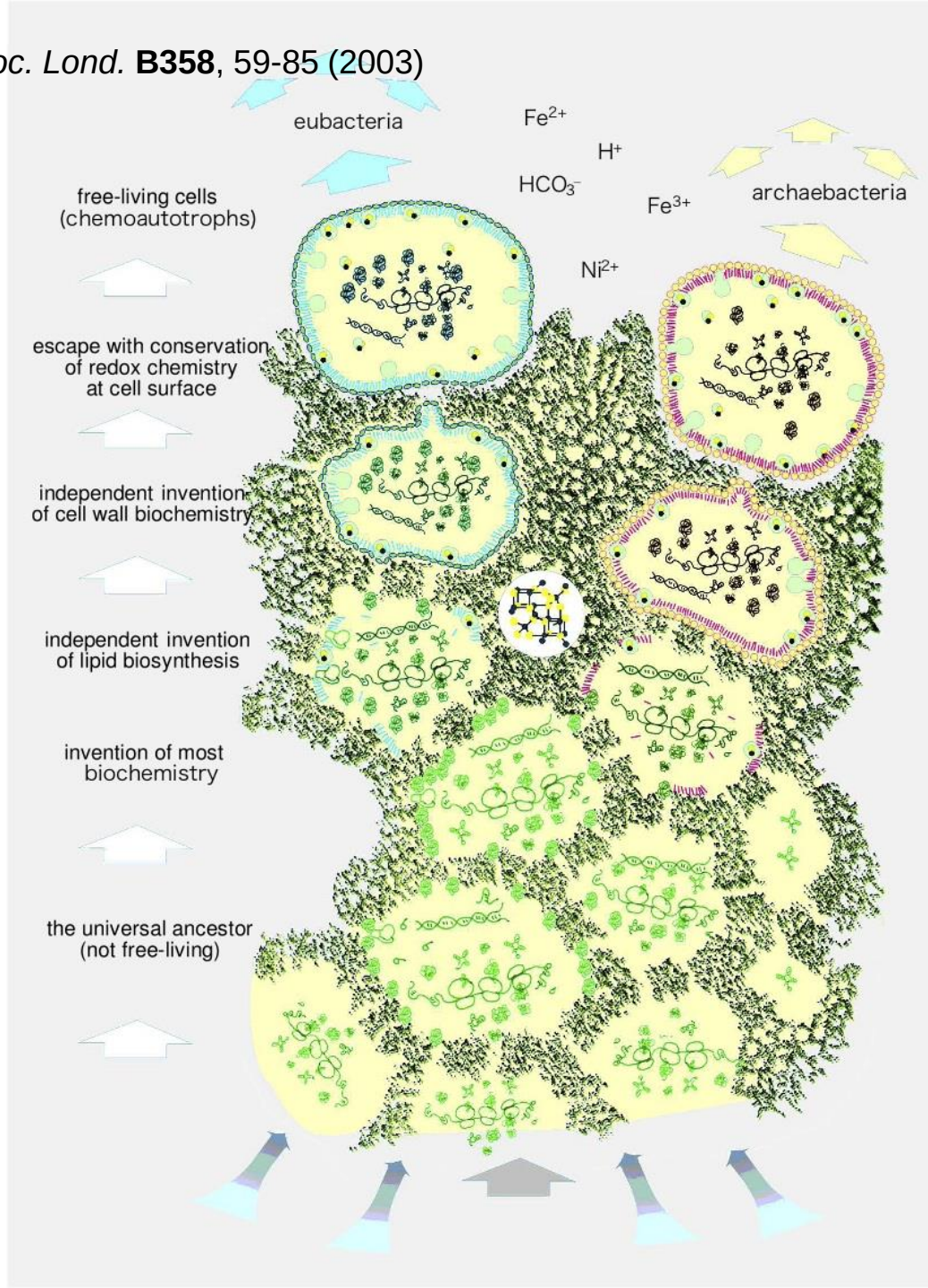


鉄硫黄 RNAワールド



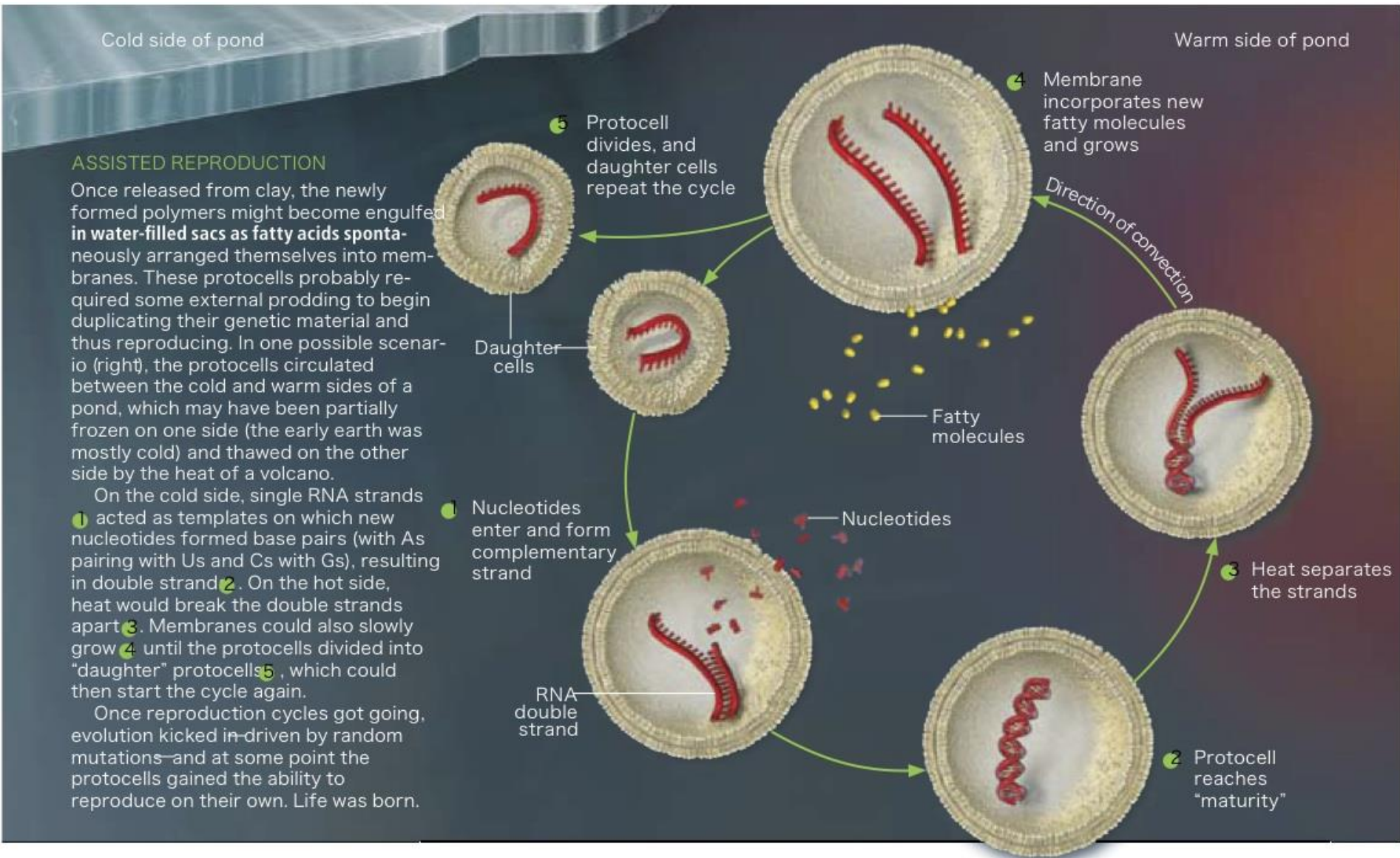
Martin, W. and Russell, M. J., *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* **B358**, 59-85 (2003)

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



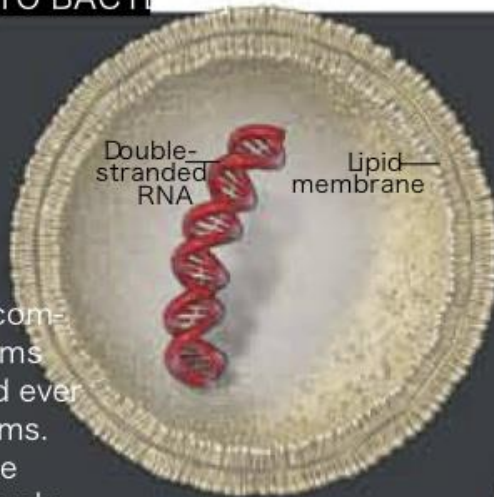
リポソーム RNAワールド

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.

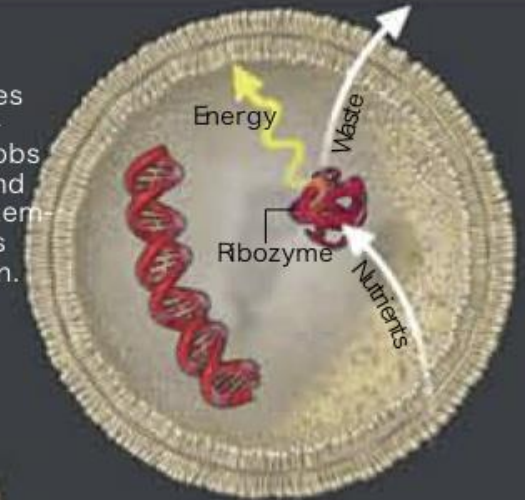
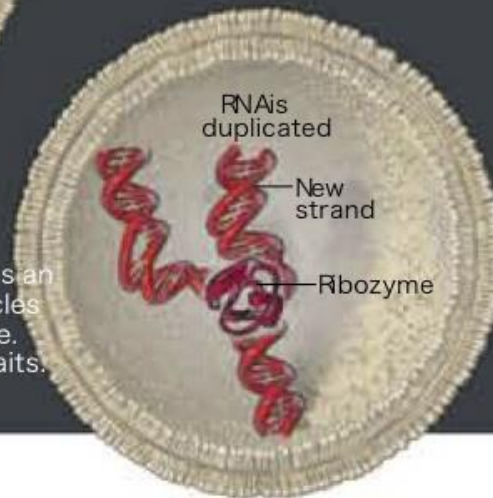


1 EVOLUTION STARTS

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.

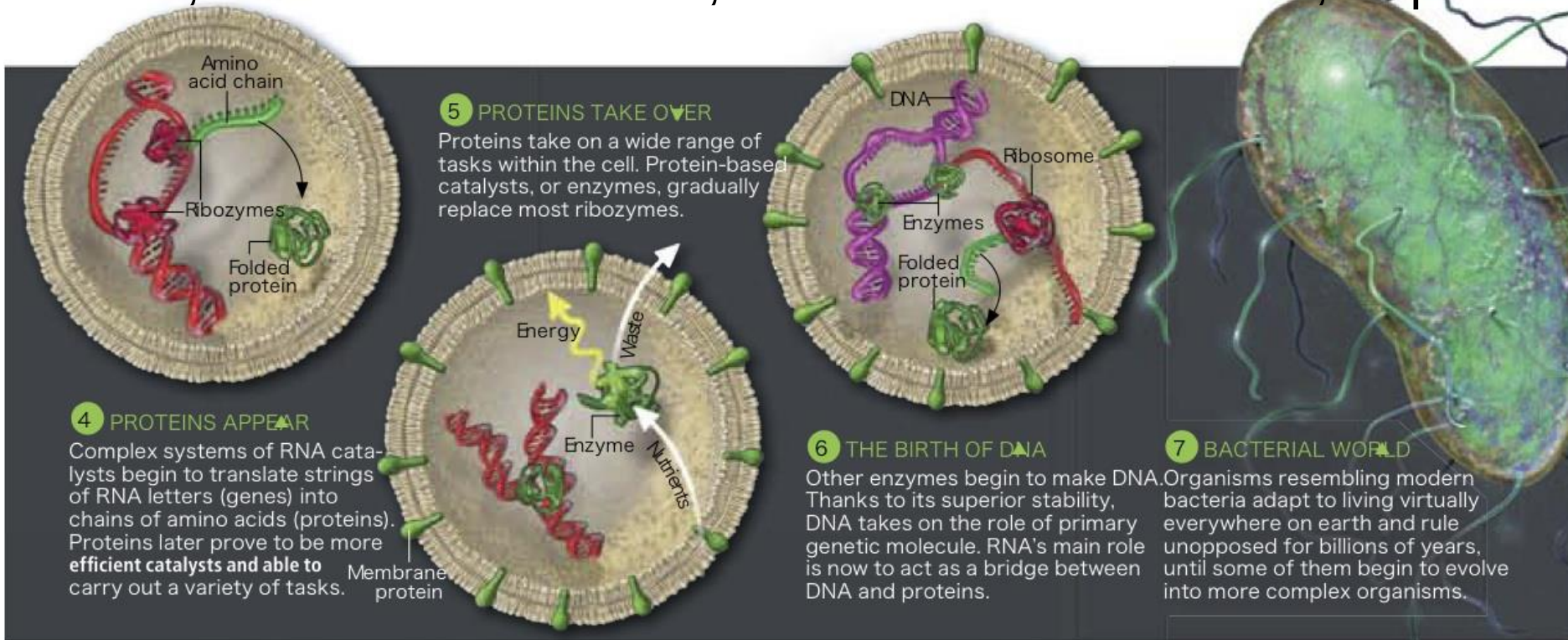


3 METABOLISM BEGINS

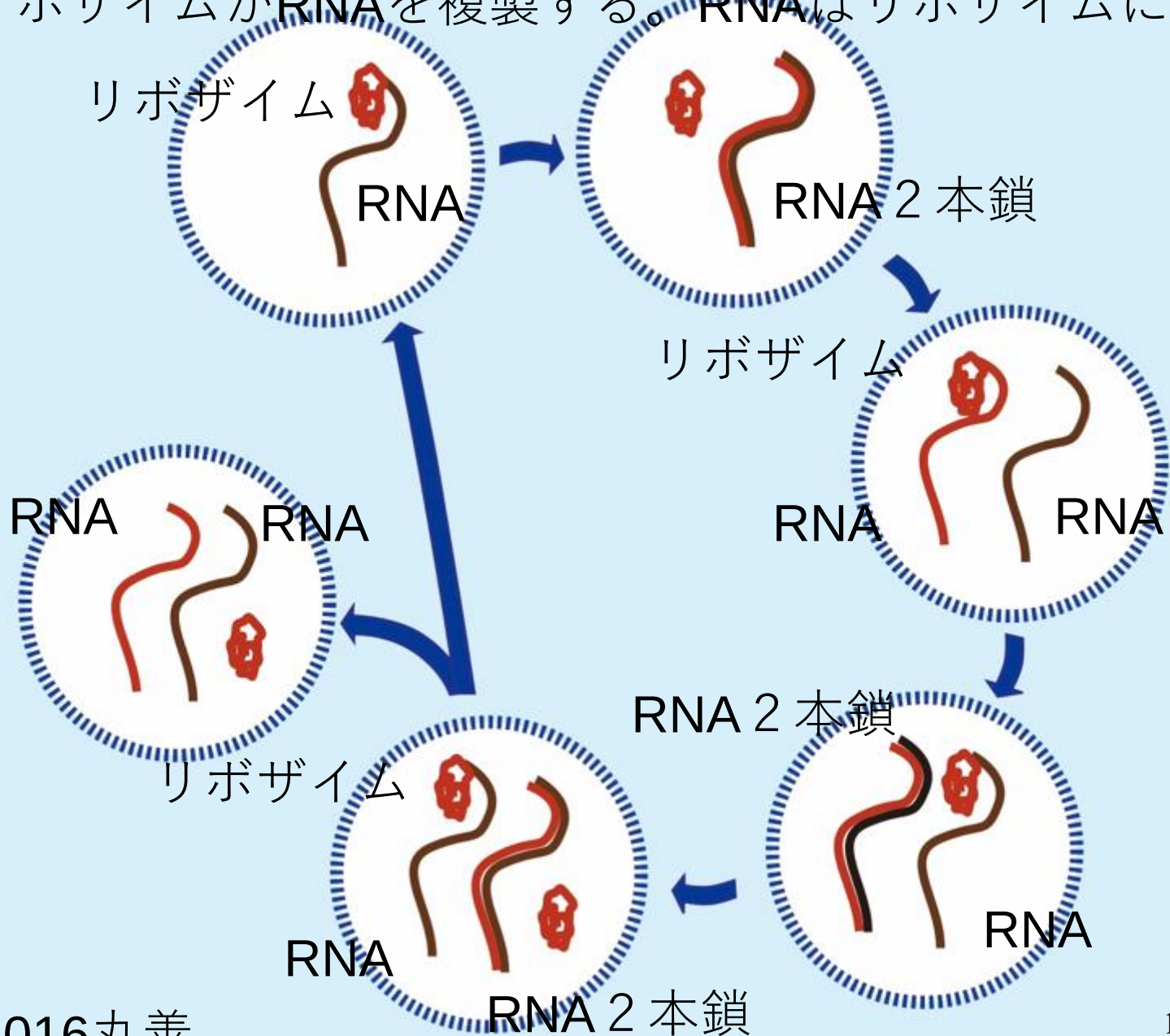
Other ribozymes catalyze metabolism—chains of chemical reactions that enable protocells to tap into nutrients from the environment.

リポソーム RNAワールド

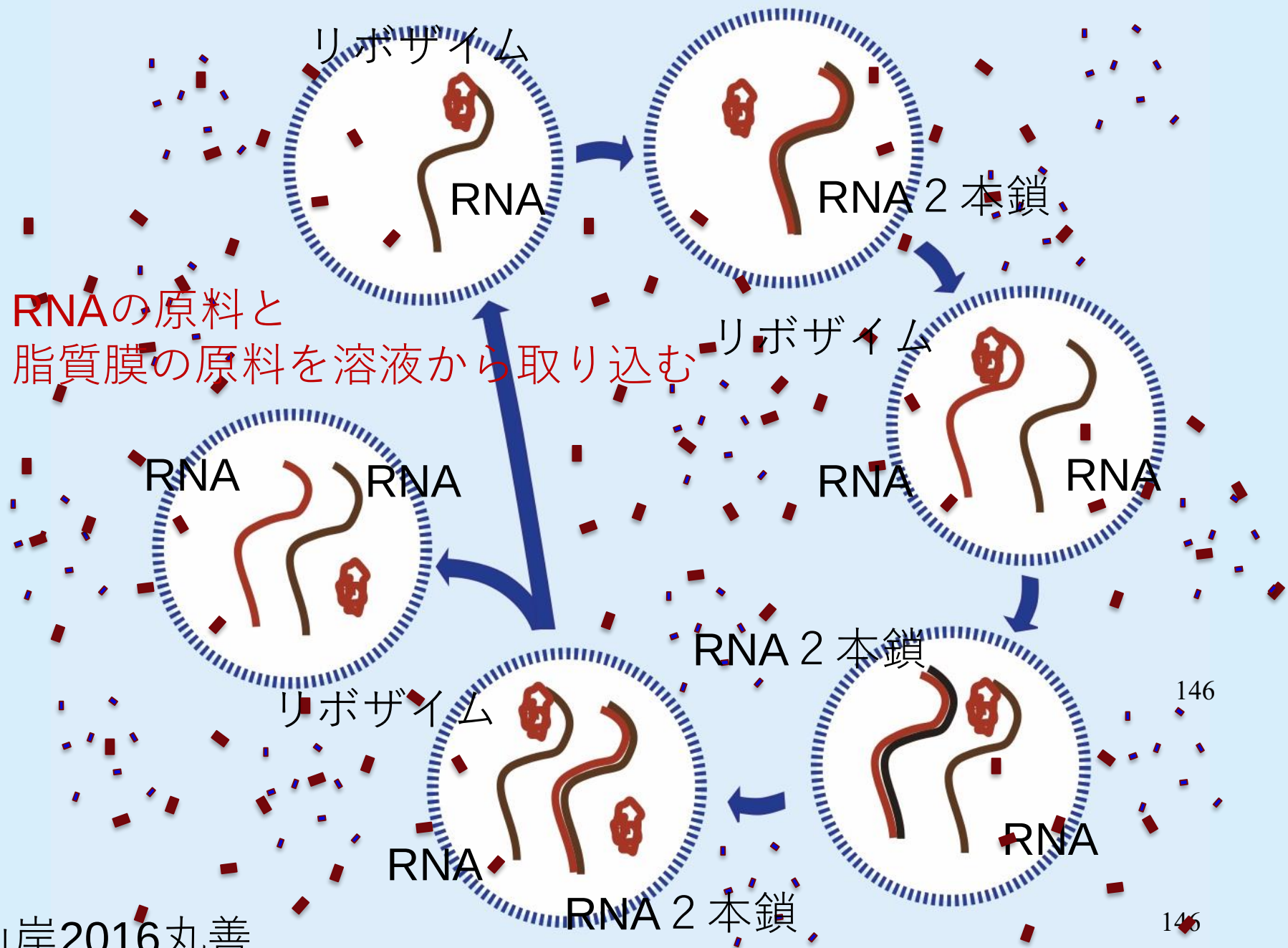
Ricardo, A. and J. W. Szostak, Scientific American 2009, Sep. 54



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

陸上での核酸の活性型合成

グリコール
アルデヒド

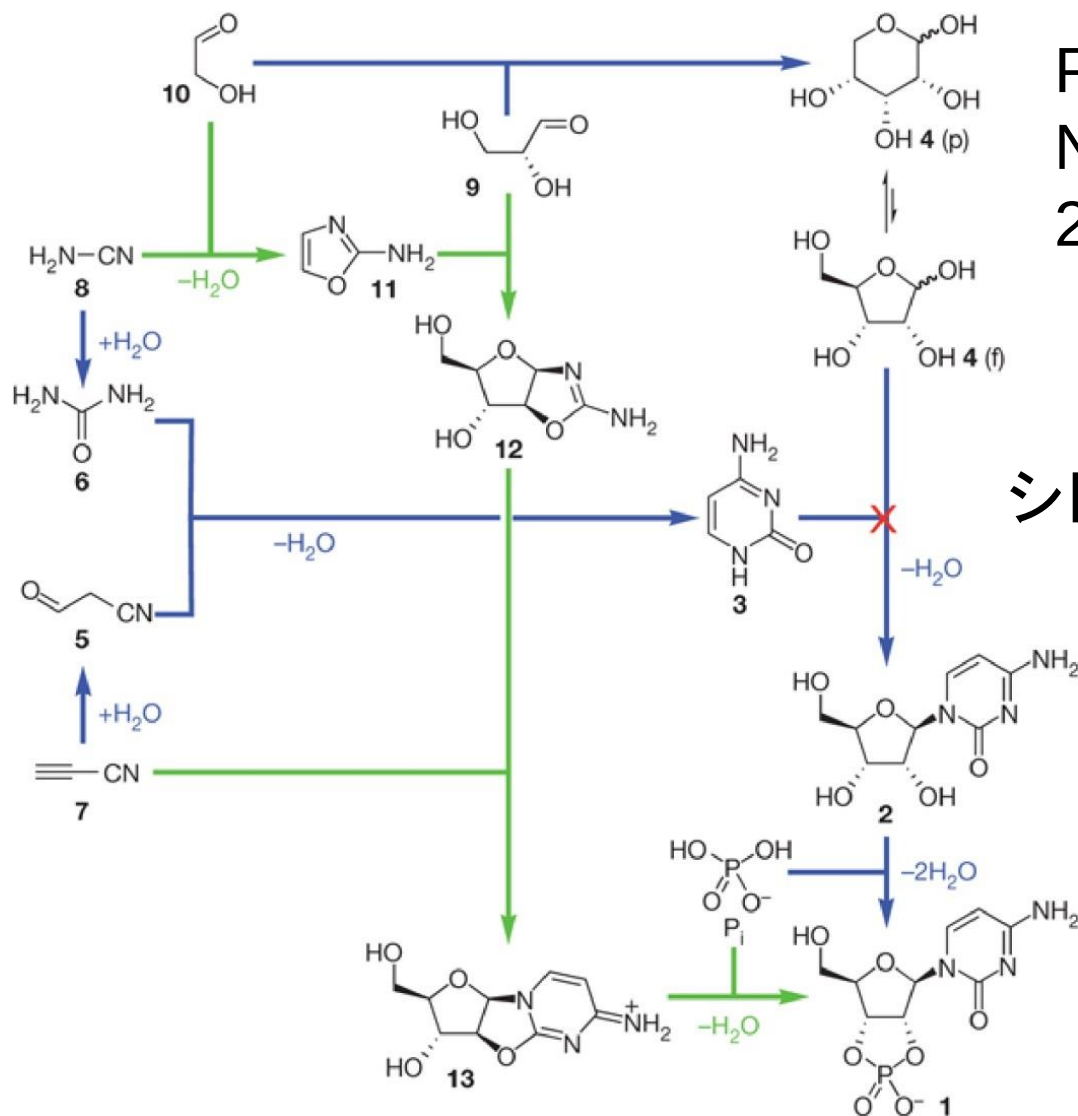
シアンアミド

尿素

シアノ
アセト
アルデヒド

シアノ
アセチレン

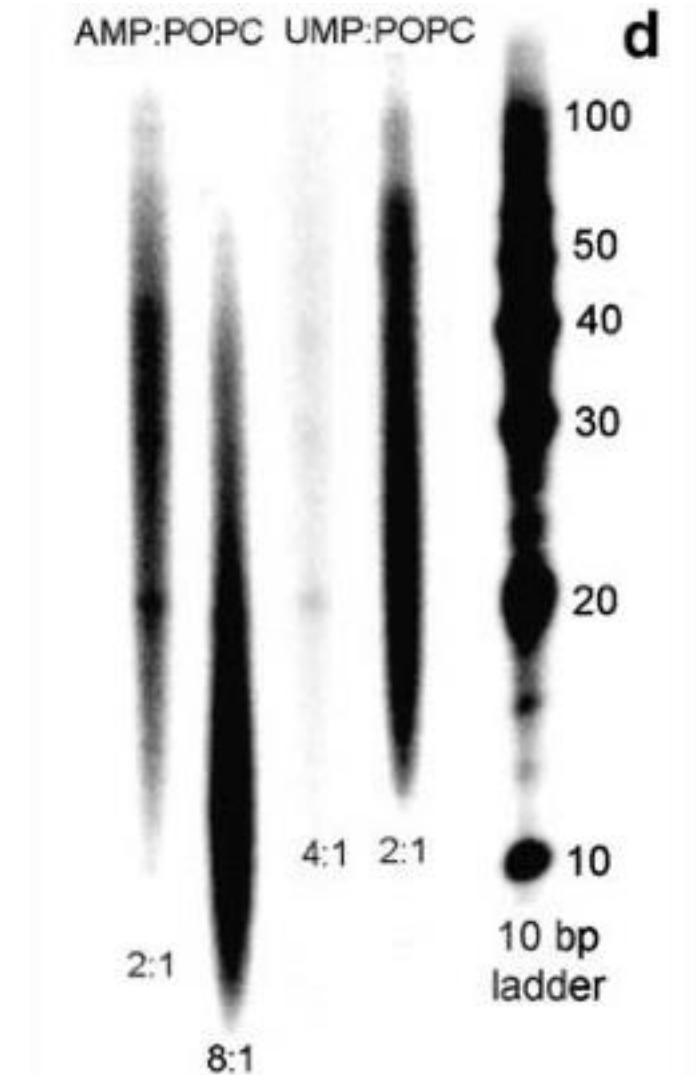
Powner et al.
Nature 459,
239-241 (2009)



シトシン

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



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

Table 1 .Approximate concentrations of key ions in various environments

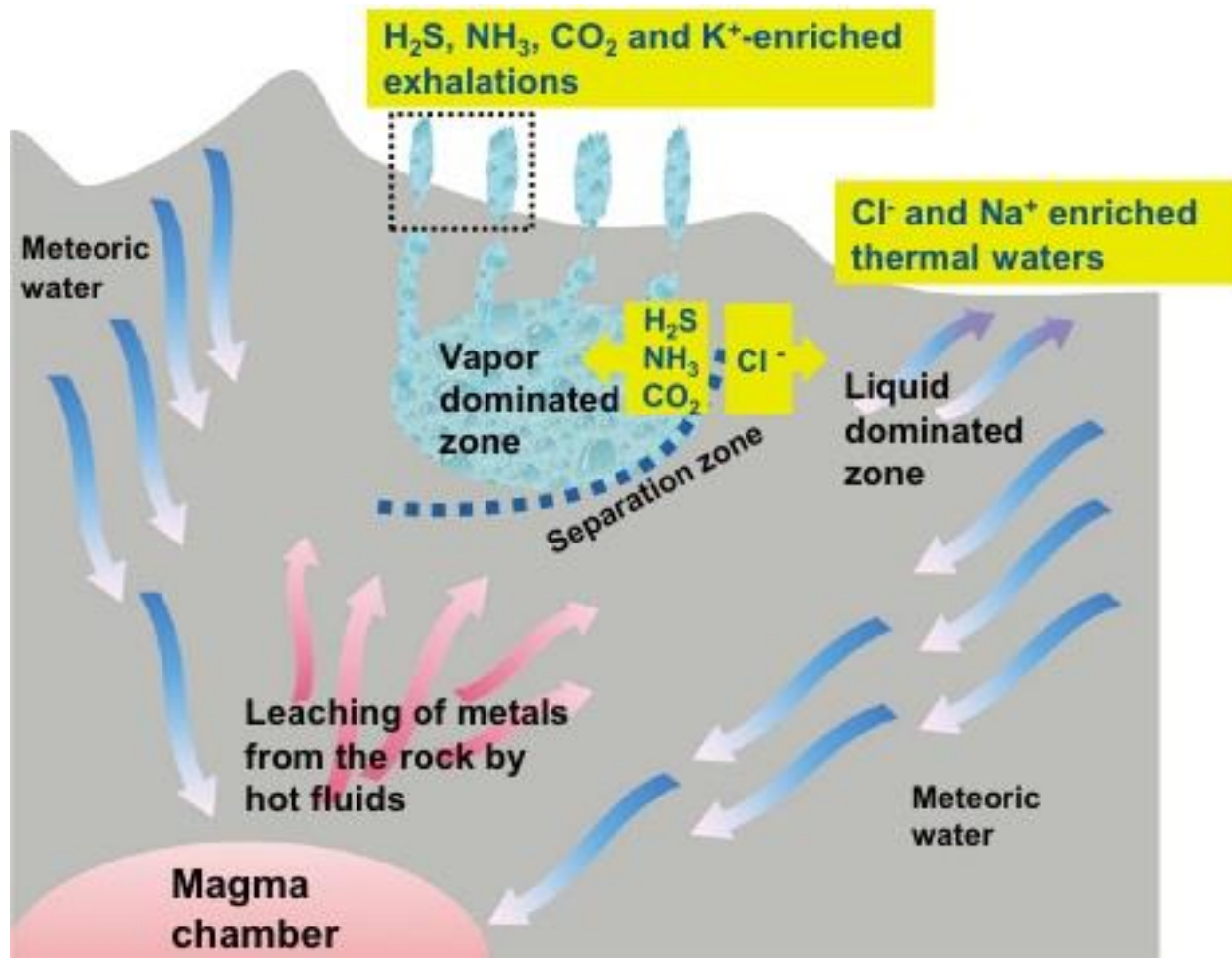
Ion, mol/L	Modern seawater	Anoxic water of primordial ocean	Cell cytoplasm
Na	0.4	>0.4	0.01
K ⁺	0.01	~0.01	0.1
Ca ²⁺	0.01	~0.01	0.001
Mg ²⁺	0.05	~0.01	0.01
Fe	10 ⁻⁶ (mostly Fe ³⁺)	10 ⁻³	10 ⁻³ to 10 ⁻⁴
Mn ²⁺	10 ⁻³	10 ⁻⁶ to 10 ⁻⁸	10 ⁻⁶
Zn ²⁺	10 ⁻⁹	<10 ⁻¹²	10 ⁻³ to 10 ⁻⁴
Cu	10 ⁻⁹ (Cu ²⁺)	<10 ⁻¹² (Cu ²⁺)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

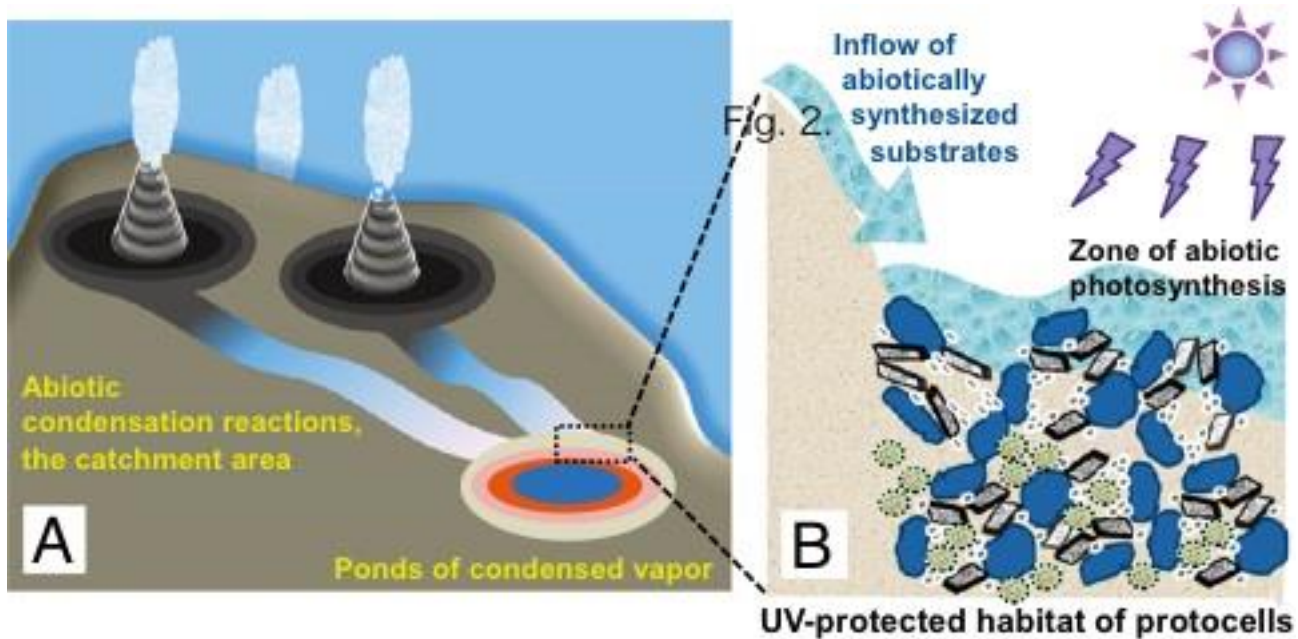
Mulkidjanian et al. Proc.Natl.Acad.Scie. Early ed.

- ・ 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)



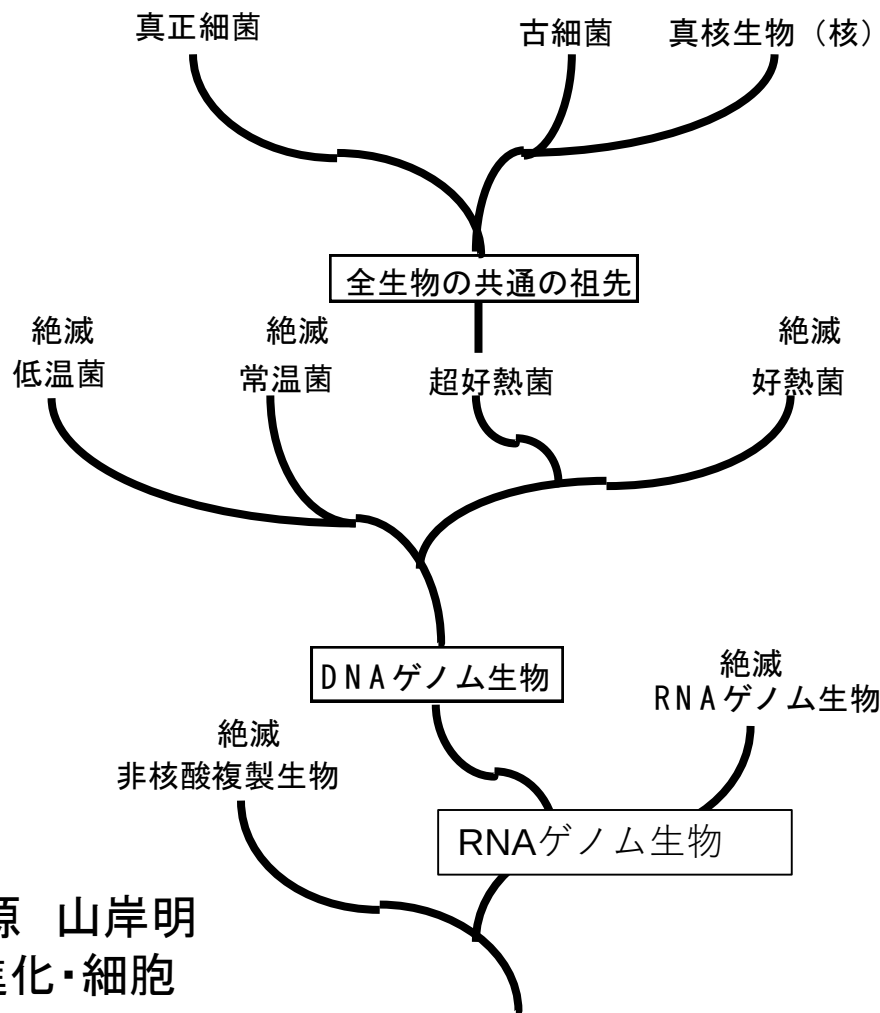
Mulkidjanian, A. Y . Et al., *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*,
(2012)



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

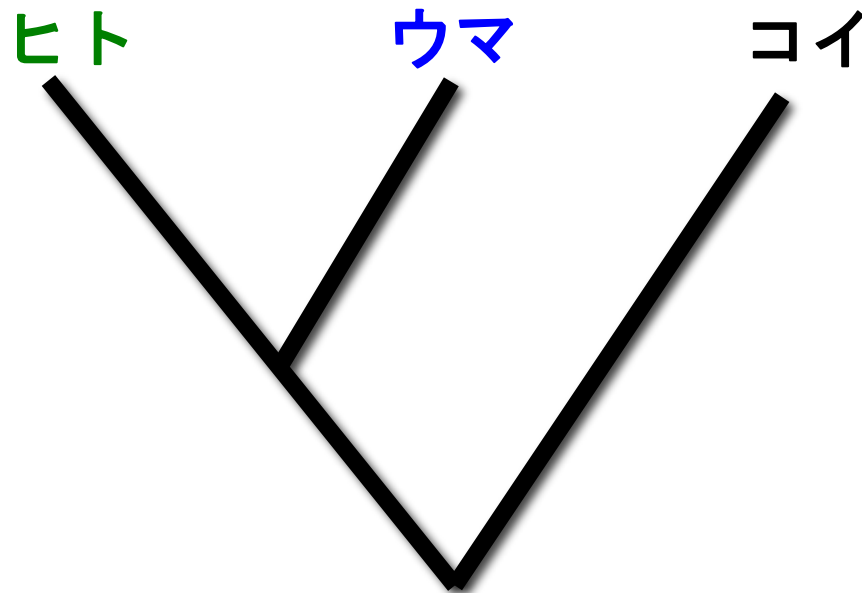
1. 系統樹解析

生命の歴史を遺伝子から調べる

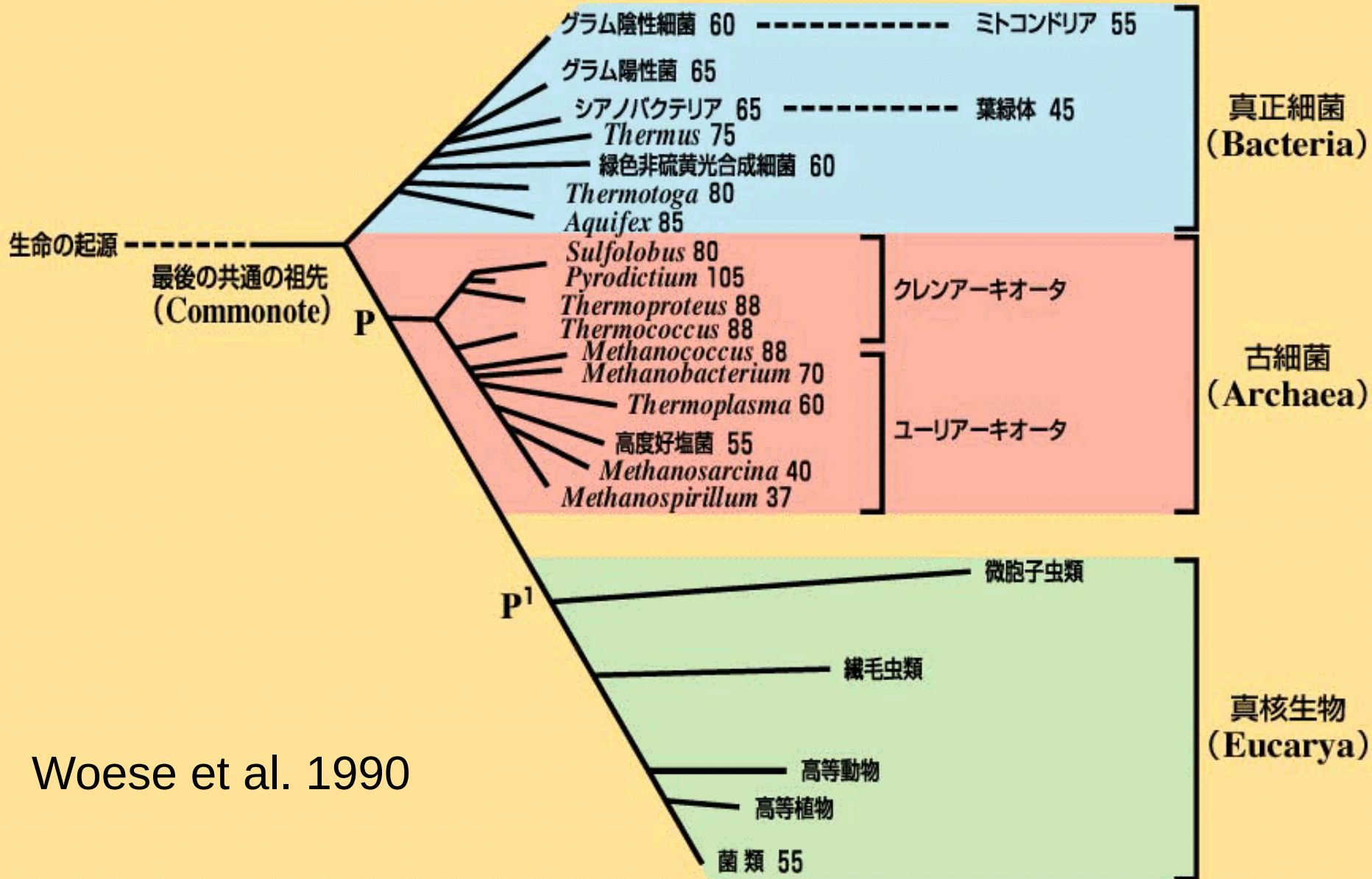
ヘモグロビン遺伝子のアミノ酸配列

ヒト	VLSPADKTNVKAAWGKVGAHAGEYGAEALERMFLAFPTTKTYFPHF
ウマ	VLSAADKTNVKAAWSKVGGHAGEYGAEALERMFLGFPTTKTYFPHF
コイ	SLSDKSKAAVKIAWAKISPKADDIGAEALGRMLTVYPQTKTYFAHW

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。.

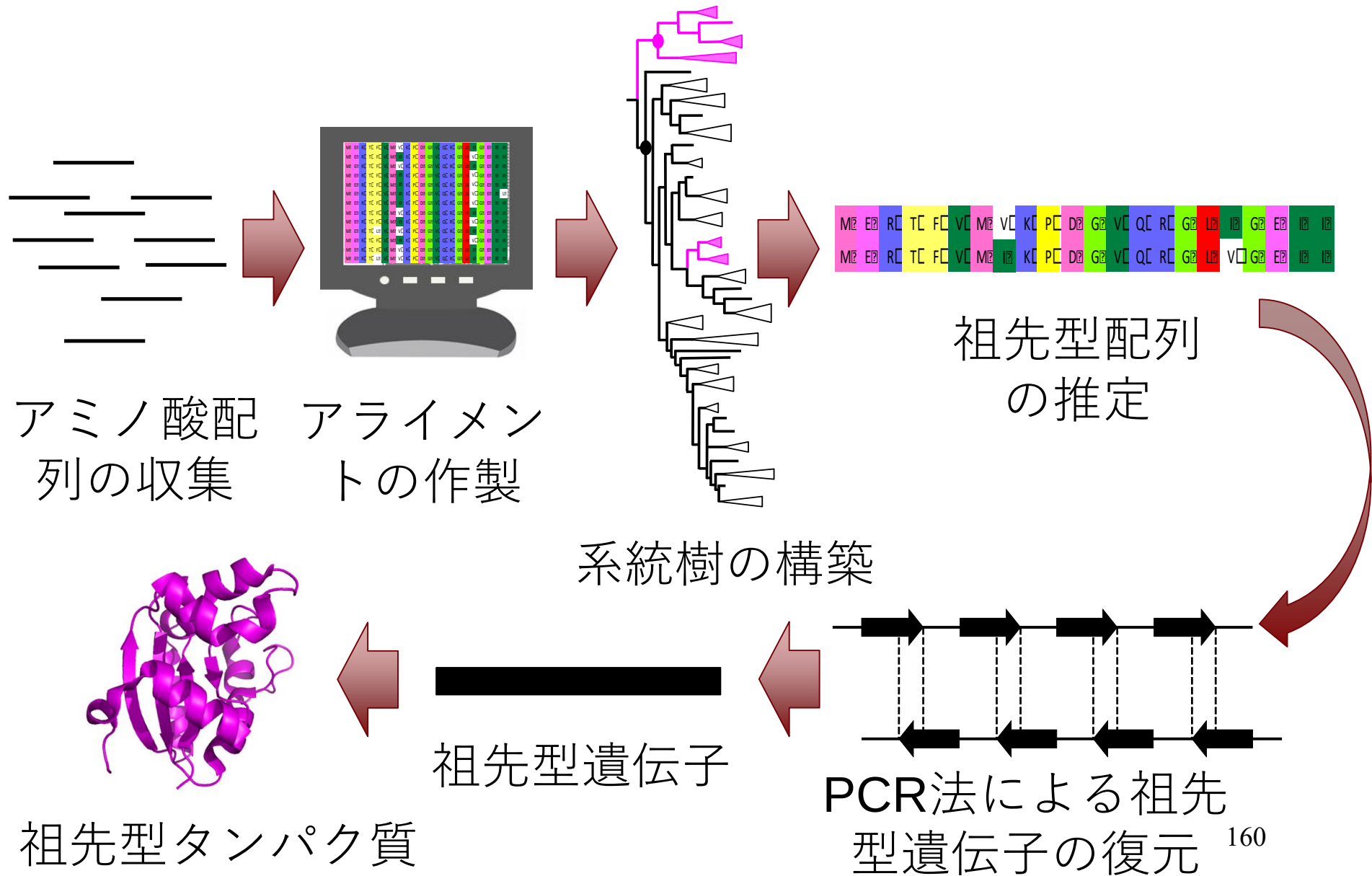


全生物の進化系統樹



Woese et al. 1990

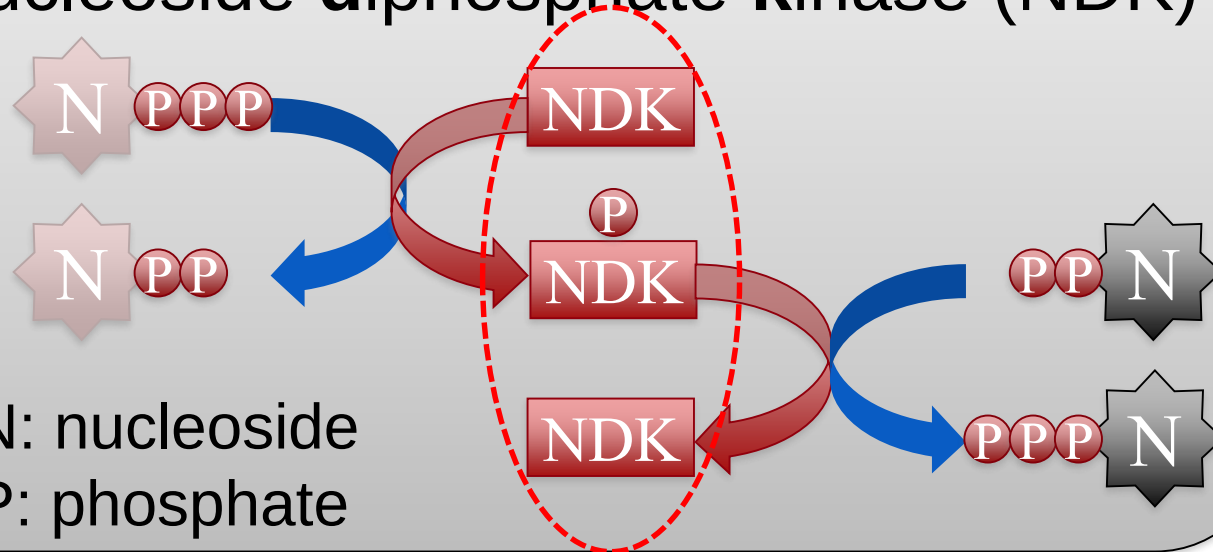
祖先タンパク質の復元法



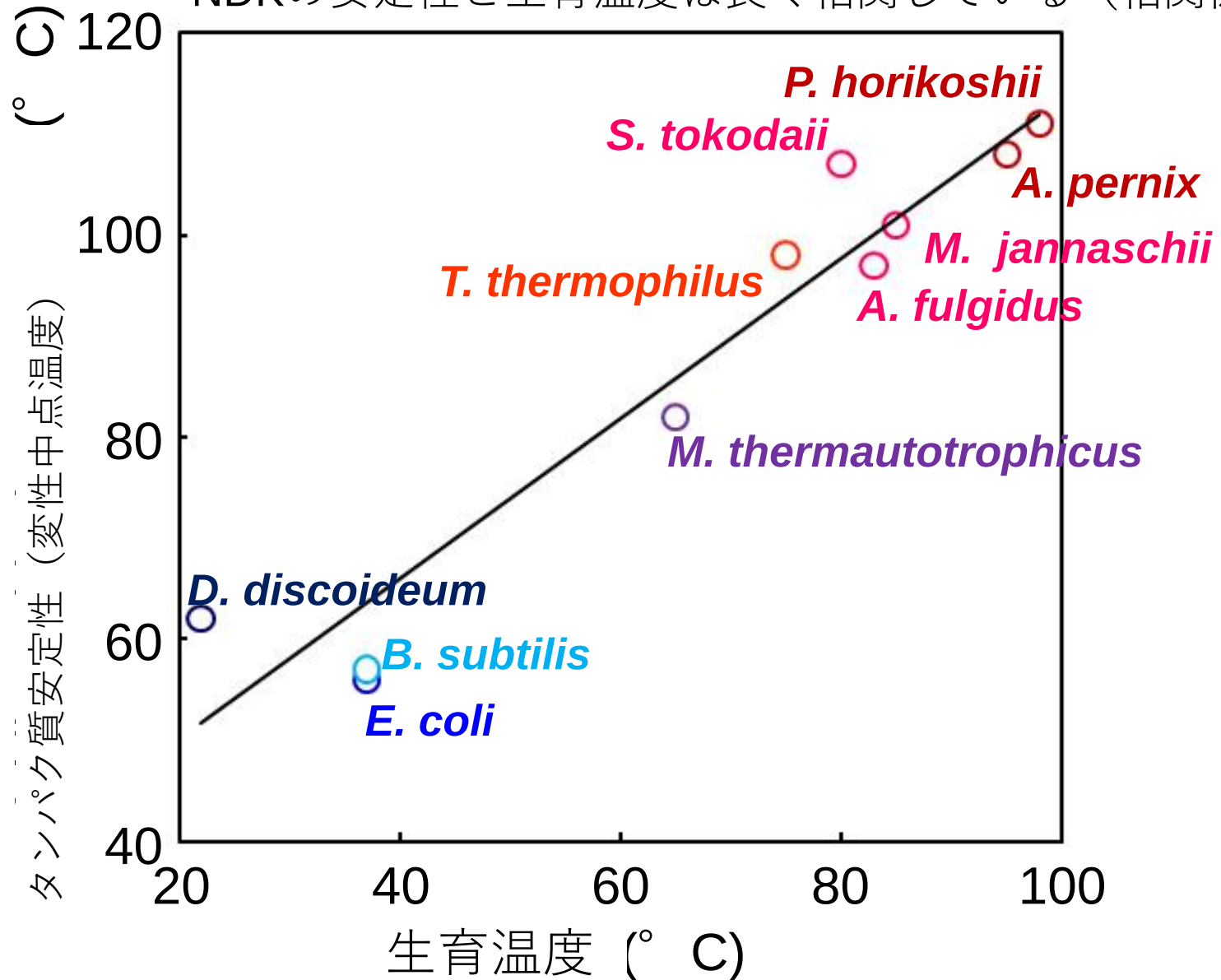
NDK（核酸合成に関与）

Material

Nucleoside diphosphate kinase (NDK)

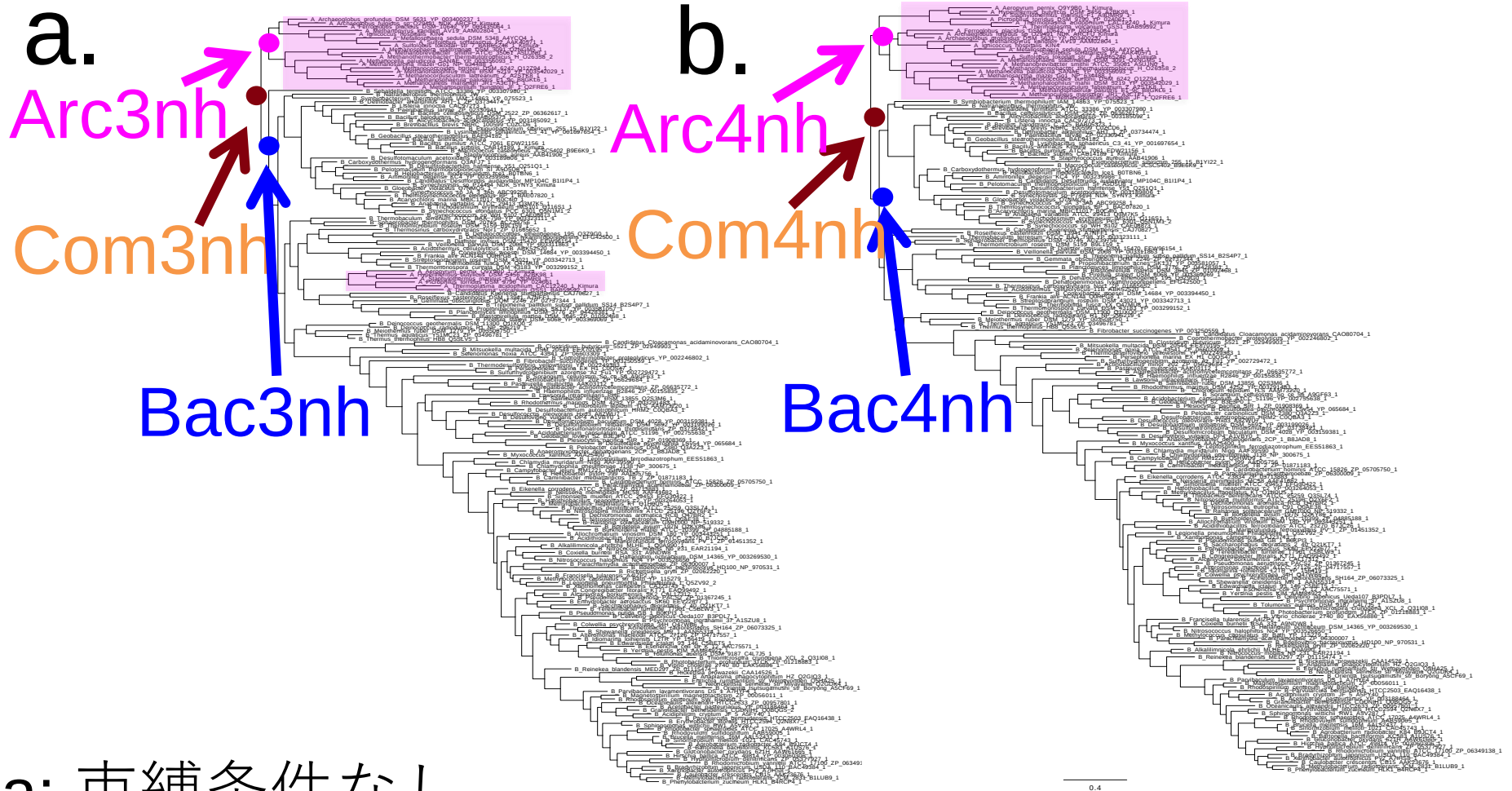


NDKの安定性と生育温度は良く相関している（相関係数0.96）



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

Akanuma et al. PNAS (2013)

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  MERTFVMVKPDGVRGLVGEVIGRLERKGLKIVAMKMLWIAREMAENHYAEHREKPPFFSALVDYITS GPVVAMVVEGKNAIKVVRTLPGA  90
Arc1  MERTFVMIKPDGVRGLIGEIIISRFERKGLKIVAMKMMRISREMAEKHYAEHREKPPFFSALVDYITS GPVVAMVVEGKNAVEVVRKMGVA  90
Arc2  MERTFVMIKPDGVRGLIGEIIISRFERKGLKIVAMKMMWIDREMAEKHYAEHREKPPFFSALVDYITS GPVVAMVVEGKNAVKVVRKMIGA  90
Arc3  MERTFVMIKPDGVRGLVGEIIISRFERKGLKIVAMKMMQISRELAEKHYAEHKGKPPFDDLVDYITS GPVVAMVVEGKNAISVVRKMGVA  90
Arc4  MERTFVMIKPDGVRGLVGEIIISRFERKGLKIVALKMMQISRELAEKHYAEHKDKPPFDDLVDYITS GPVVAMVVEGENAIAVVRKMGVA  90
Arc5  MERTFVMIKPDGVRGLVGEIIISRFERKGLKIVAMKMMQISRELAEKHYAEHREKPPFDDLVDYITS GPVVAMVVEGENAISVVRKMGVA  90
Tth  MERTFVMIKPDGVRRLVGEILARFERKGFRIAAKLKMQISQELAERHYAEHREKPPFPGLVRFITS GPVVAMVLEGPGVVAEVRKMMGA  90
Bac1  MERTFVMIKPDGVRGLIGEIIISRFERKGFKIVAMKLMRISQELAERHYAEHREKPPFSGLVDFITS GPVVAMVLEGKNVVEVVRKMIGA  90
Bac2  MERTFVMIKPDGVRGLVGEIISRFERKGLKIAALKLMQISQELAERHYAEHREKPPFPGLVEFITS GPVVAMVWEGPNVAVVRKMIGA  90
Bac3  MERTFVMIKPDGVRGLVGEIISRFERKGLKIVAMKMMQISRELAEKHYAEHKGKPPFDDLVDYITS GPVVAMVVEGENAISVVRKMGVA  90
Bac4  MERTFVMIKPDGVRGLVGEIIISRFERKGLKIVALKMMQISRELAEKHYAEHKDKPPFDDLVDYITS GPVVAMVVEGENAIAVVRKMMGA  90
Bac5  MERTFVMIKPDGVRGLVGEIIISRFERKGLKIVAMKMMQISRELAEKHYAEHKEKPPFDDLVDYITS GPVVAMVVEGENAISVVRKMMGA  90
ConsNDK MERTLSIIKPDVQRNLIGEIIISRFERKGLKIVALKMMQLSREQAEGFYAEHKERPPFGELVEFMTSGPVVVMVVEGENAIAKNRELMGA  90

```

```

*: * . * ***** . :...*:.* : :.* ***:*** :*::
Afu  TNPAEAAAGTIRGDFGLDVGRNVVHASDSPQSAEREISLFFSDDEIVNWEKADEDWIYEER  151
Arc1  TNPKEAAGTIRGDFGLDVGNVIHASDSPESAEREISLFFKDEELVEW  139
Arc2  TNPKEAAGTIRGDFGLDVGRNVVHASDSPESAEREISLFFKPEELVEW  139
Arc3  TNPAEAAAGTIRGDFALDIGRNVVHASDSPESAEREISLFFKDEIDVDY  139
Arc4  TNPAKAAGTIRGDFALDIGRNVVHASDSPESAEREISLFFNEIDVNY  139
Arc5  TNPAEAAAGTIRGDFALSIGRNVVHASDSPESAEREISLFFSDDEIDVDY  139
Tth  THPKDALPGTIRGDFATTIDENVIHGSATLEDAQREIALFFRPEELL  137
Bac1  TNPKEAAGTIRGDFGMSVGKNVIHGSDSLESAEREISLFFKDEELVEW  139
Bac2  TNPKDALPGTIRGDFGLTVGRNVVHASDSLESAEREISLFFKPEELVEW  139
Bac3  TNPAEAAAGTIRGDFALDIGRNVVHASDSPESAEREISLFFKDEIDVDY  139
Bac4  TNPAKAAGTIRGDFALDIGRNVVHGSDSPESAEREISLFFREDELVNY  139
Bac5  TNPAEAAAGTIRGDFALSIGRNVVHGSDSPESAEREISLFFSPDEIDVDY  139
ConsNDK TNPAEAAAGTIRGDFALSIGENAVHGSDSPESAAREIALFFSEEEIVGR  139

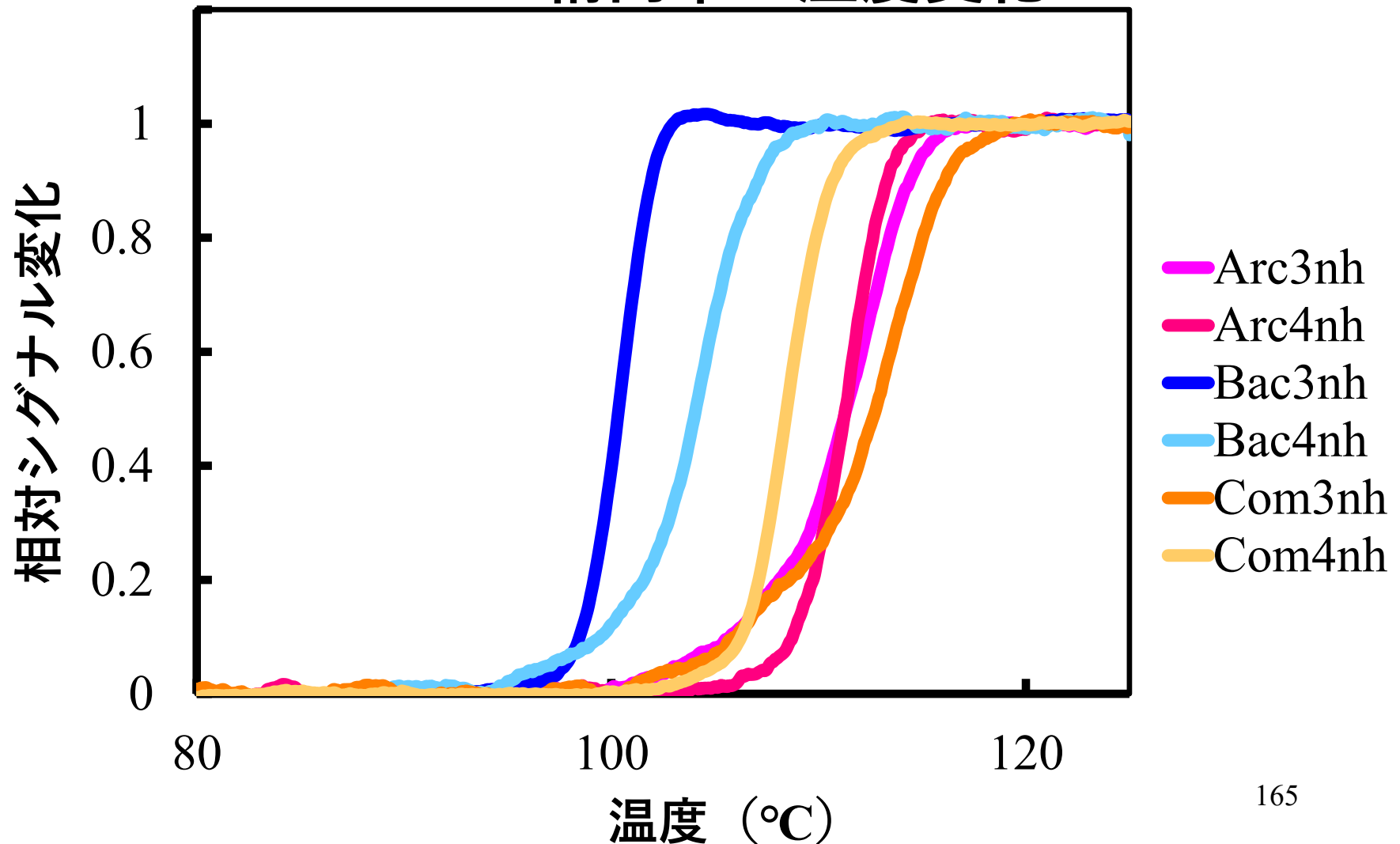
```

Akanuma et al. PNAS (2013)

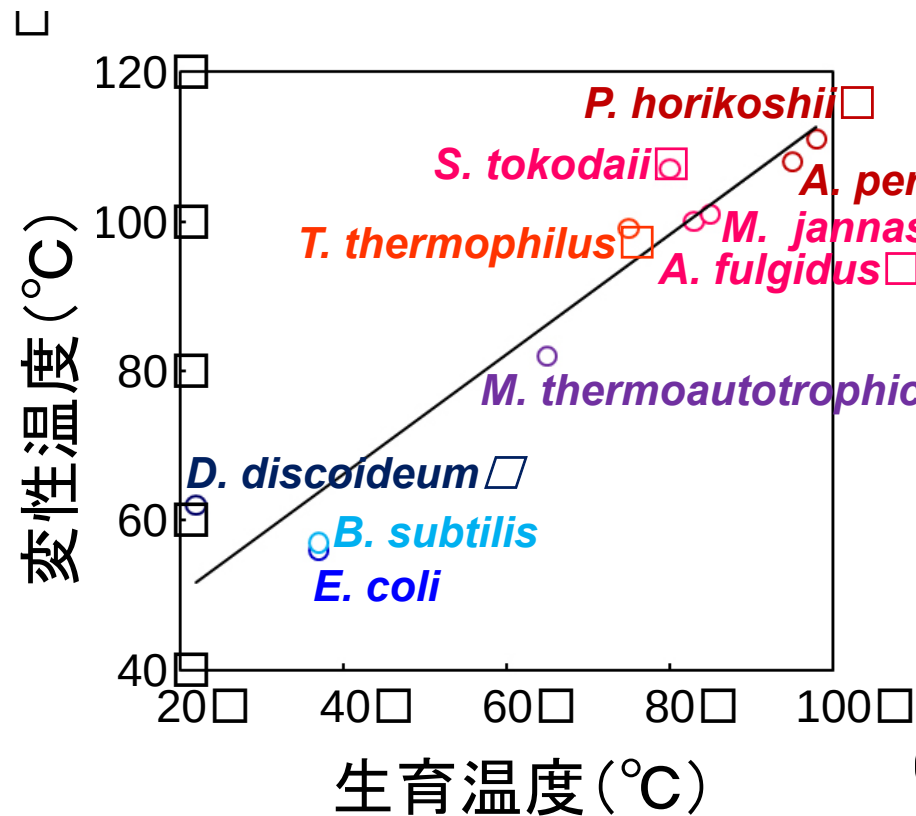
熱変性解析

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

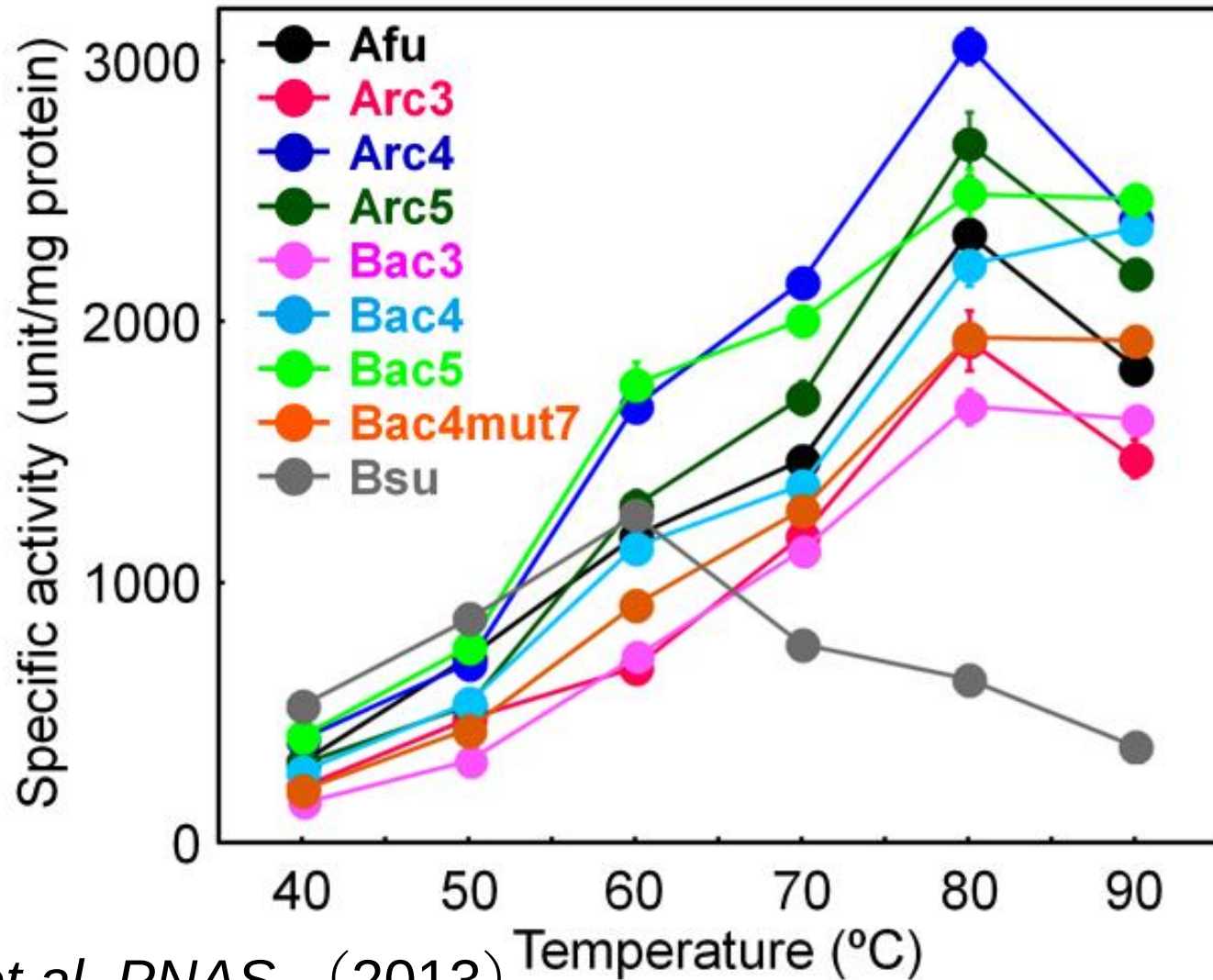


	变性温度 (°C)	生育温度(°C)
Arc3nh	111	96
Arc4nh	111	96
Bac3nh	100	82
Bac4nh	104	87
Com3nh	113	99
Com4nh	109	94

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

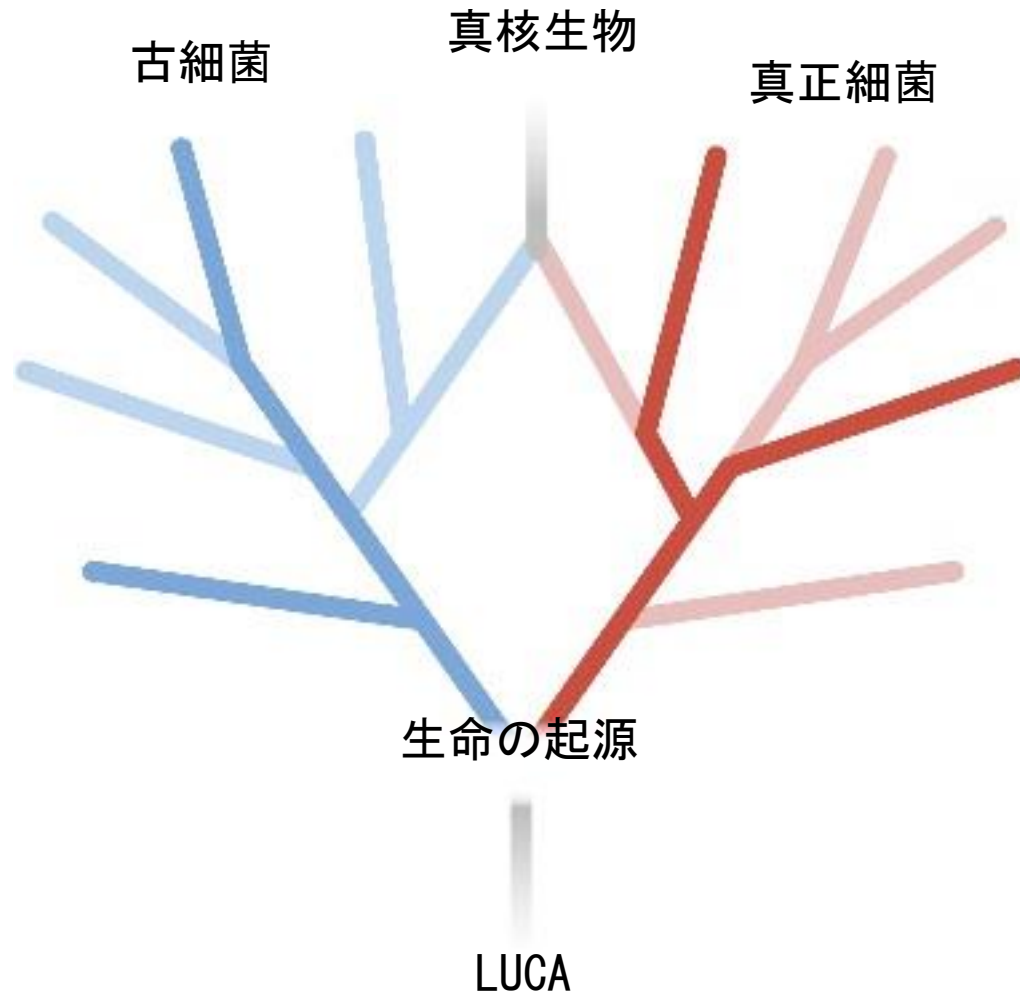
コモノートは中性で生育

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



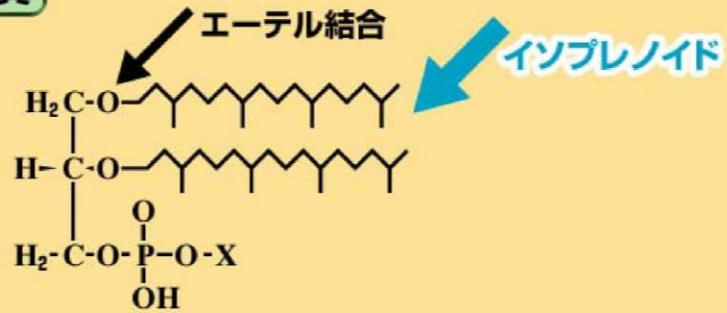
M. C. Weiss et al. *Nature Microbiol.* 1,
Article number: 16116, 2016)

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

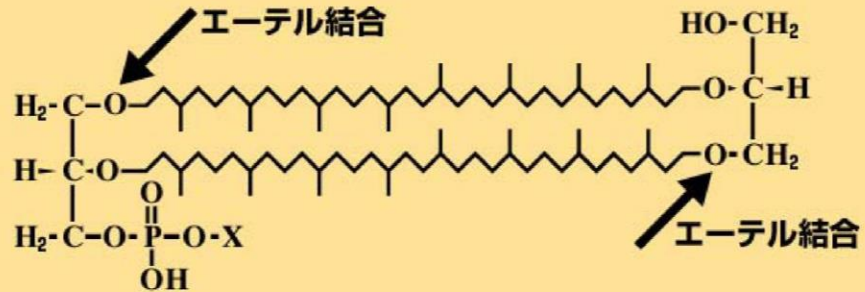
- ・ LUCAは嫌気性
 - ・ CO₂固定
 - ・ H₂に依存
 - ・ 窒素固定
 - ・ FeSクラスターを持つタンパク
- 補酵素
 - ・ フラビン
 - ・ S-アデノシルメチオニン、
 - ・ コエンザイ補酵素ムA
 - ・ フェレドキシン
 - ・ モリブドプテリン
 - ・ コリン
 - ・ セレン
 - ・ 遷移金属

脂質構成分子の構造

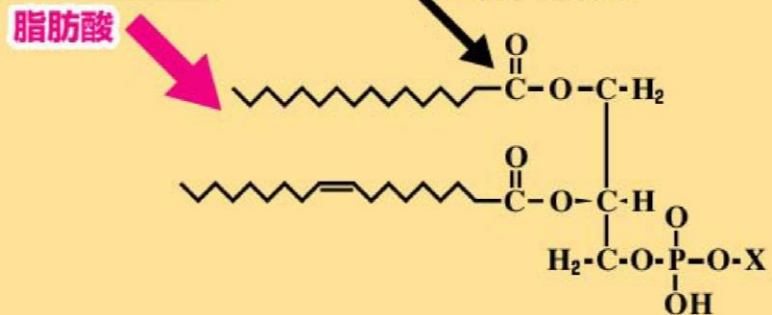
ジエーテル脂質

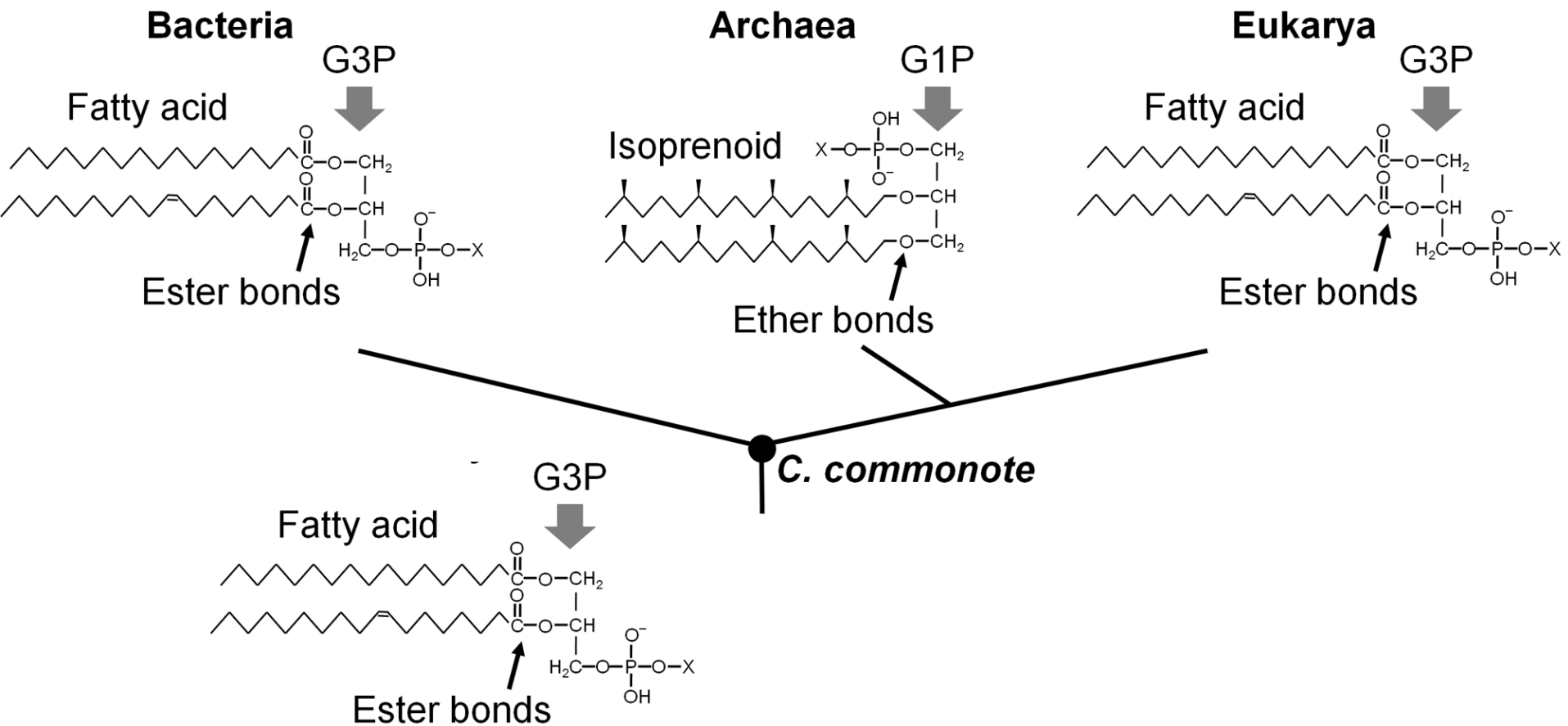


テトラエーテル脂質



エステル脂質

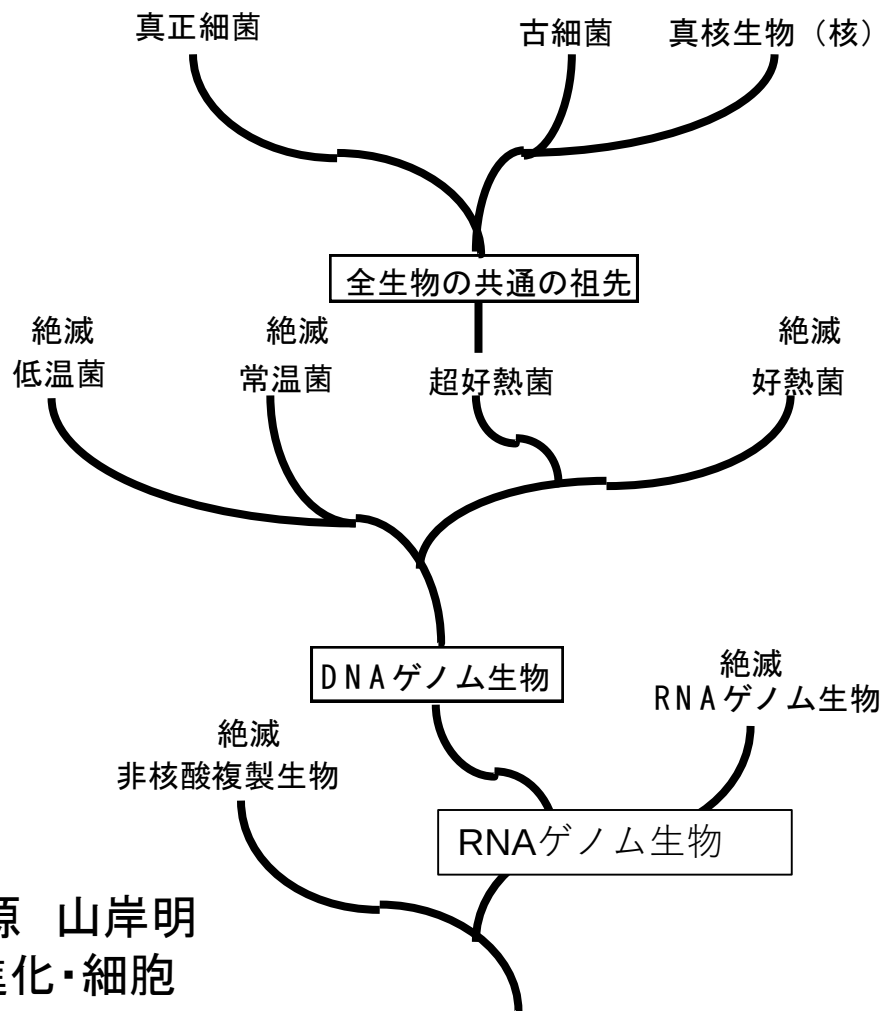




結論

- 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