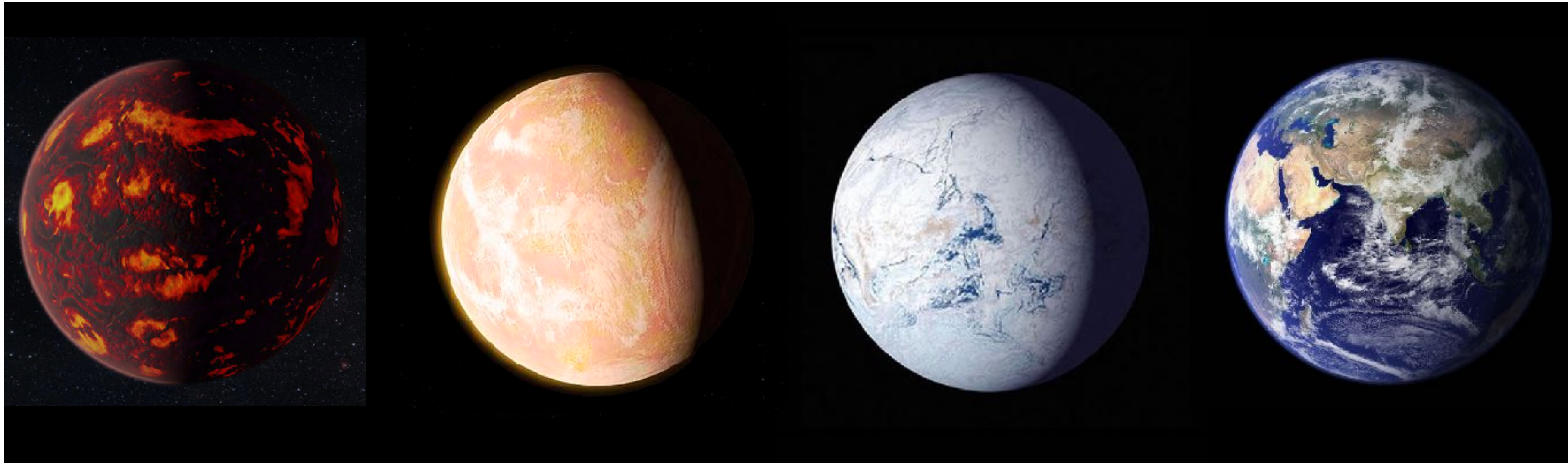


# 地球惑星圏物理学

## 第14回：地球生命の起源・宇宙における生命



黒川 宏之

東京工業大学 地球生命研究所

hiro.kurokawa@elsi.jp

# レポート課題 解答

現在の火星の極冠にある氷の量は、全球平均した水深にすると約 20 m に対応する。現在のD/H比を初期値の6倍とし、火星からの水素散逸の同位体分別係数を  $f = 0.1$  (Krasnopolsky, 2002) とする時、レイリー分別の式(1)から初期水量 (全球平均水深)を計算せよ。

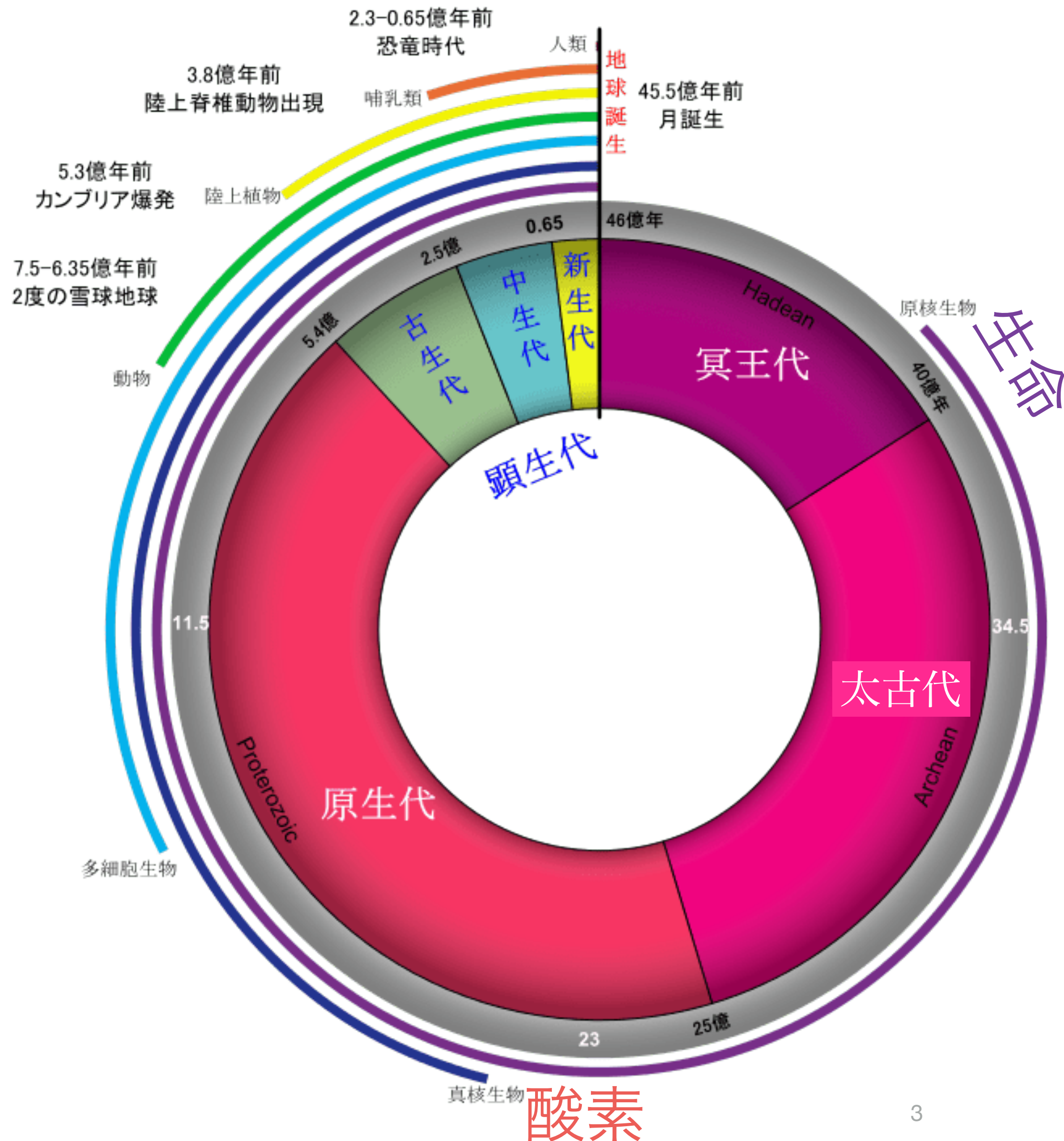
$N_1, N_2$ : 2つの同位体の総量。上付き0は初期値を示す。  $L$ : 初期水深 とする。

レイリー分別の式より、
$$\left(\frac{N_2}{N_1}\right) \left(\frac{N_2^0}{N_1^0}\right)^{-1} = \left(\frac{N_1}{N_1^0}\right)^{f-1} \quad \text{— (1) より}$$

$$6 = \left(\frac{N_1}{N_1^0}\right)^{f-1} \simeq \left(\frac{20 \text{ m}}{L \text{ m}}\right)^{f-1} \quad \text{— (2)} \quad \therefore L = \frac{20}{6^{\frac{1}{f-1}}} \simeq 150 \text{ m}$$



# 生命誕生と地球との共進化



## 最古の生命の痕跡

約40億年前 (冥王代)

生命活動を記録する炭素同位体

## 生命による環境変動

約23億年前 (原生代)

光合成による酸素濃度上昇  
(大酸化イベント)

# 生体機能にもとづく生命の定義

- 代謝(エネルギー、体をつくる)：タンパク質
- 自己複製(子孫を残す)：DNA(デオキシリボ核酸), RNA(リボ核酸)
- 膜(外界と自己を隔てる)：リン脂質

生命の起源 ≡ 高分子有機物と生体機能の起源

生物の分子組成(大腸菌の例)

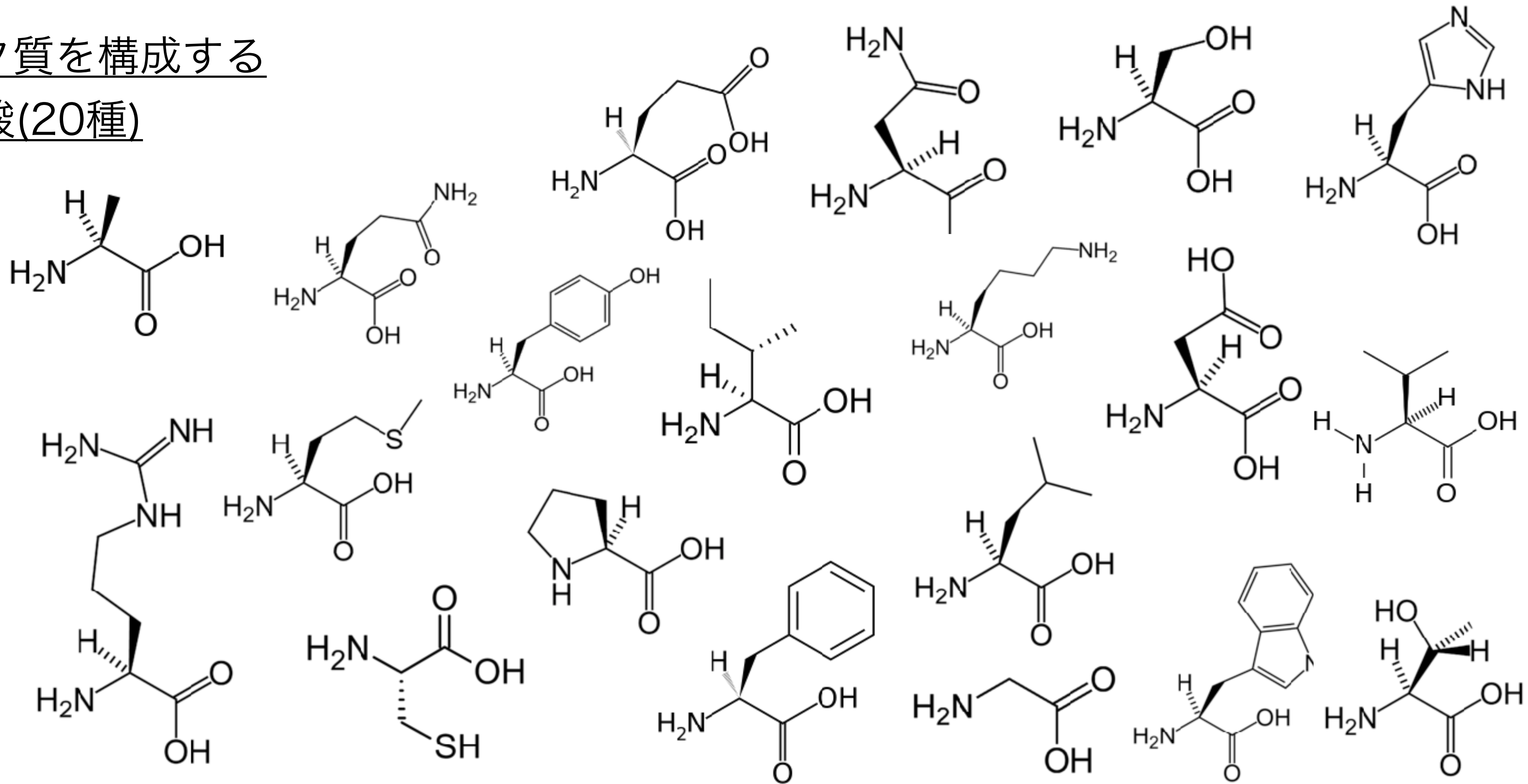
成分 (%)	大腸菌
水	70
タンパク質	15
核酸	7
脂質	3
炭水化物	4
無機物	1



# 代謝

- 外界から取り入れた無機物・有機化合物 → エネルギー(異化), 生体分子(同化)
- タンパク質(重合アミノ酸)が酵素として触媒反応を起こす

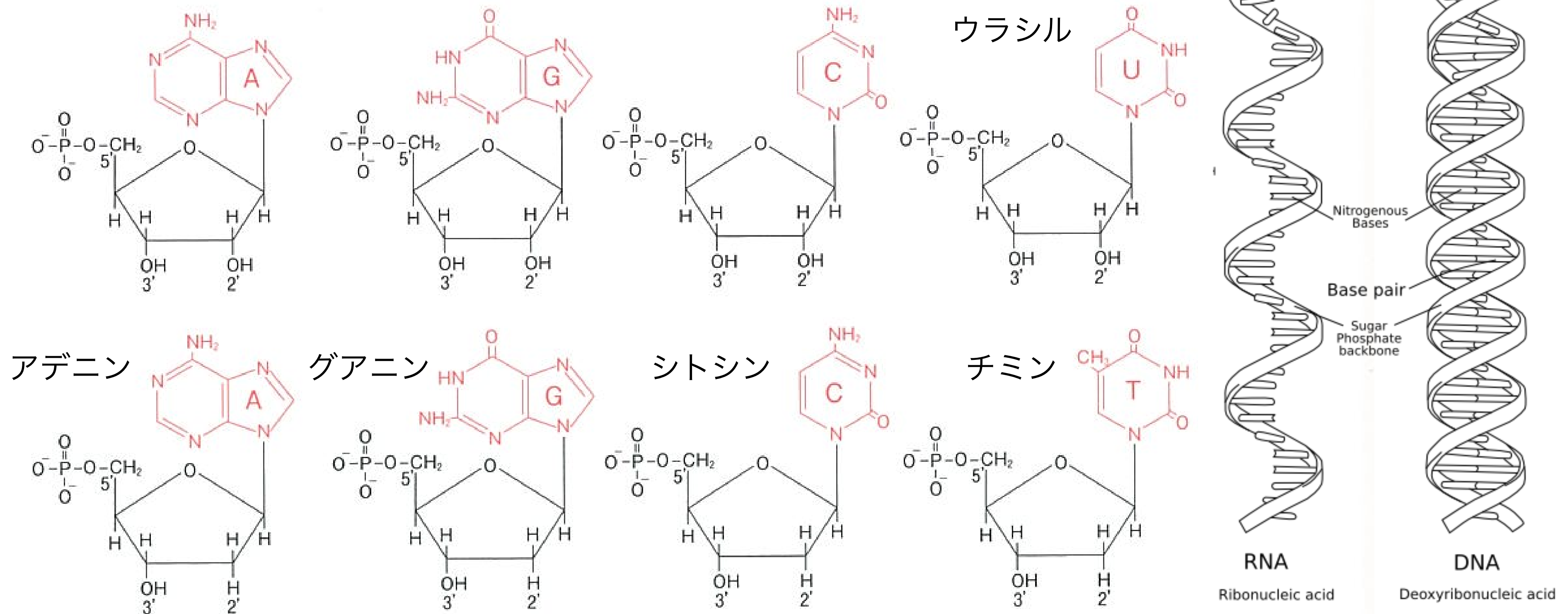
タンパク質を構成する  
アミノ酸(20種)



# 自己複製

- 遺伝情報を記録し，翻訳してタンパク質をつくる
- DNAは遺伝情報を記録し，複製される
- 遺伝情報はmRNAに転写・翻訳されることでタンパク質を生成

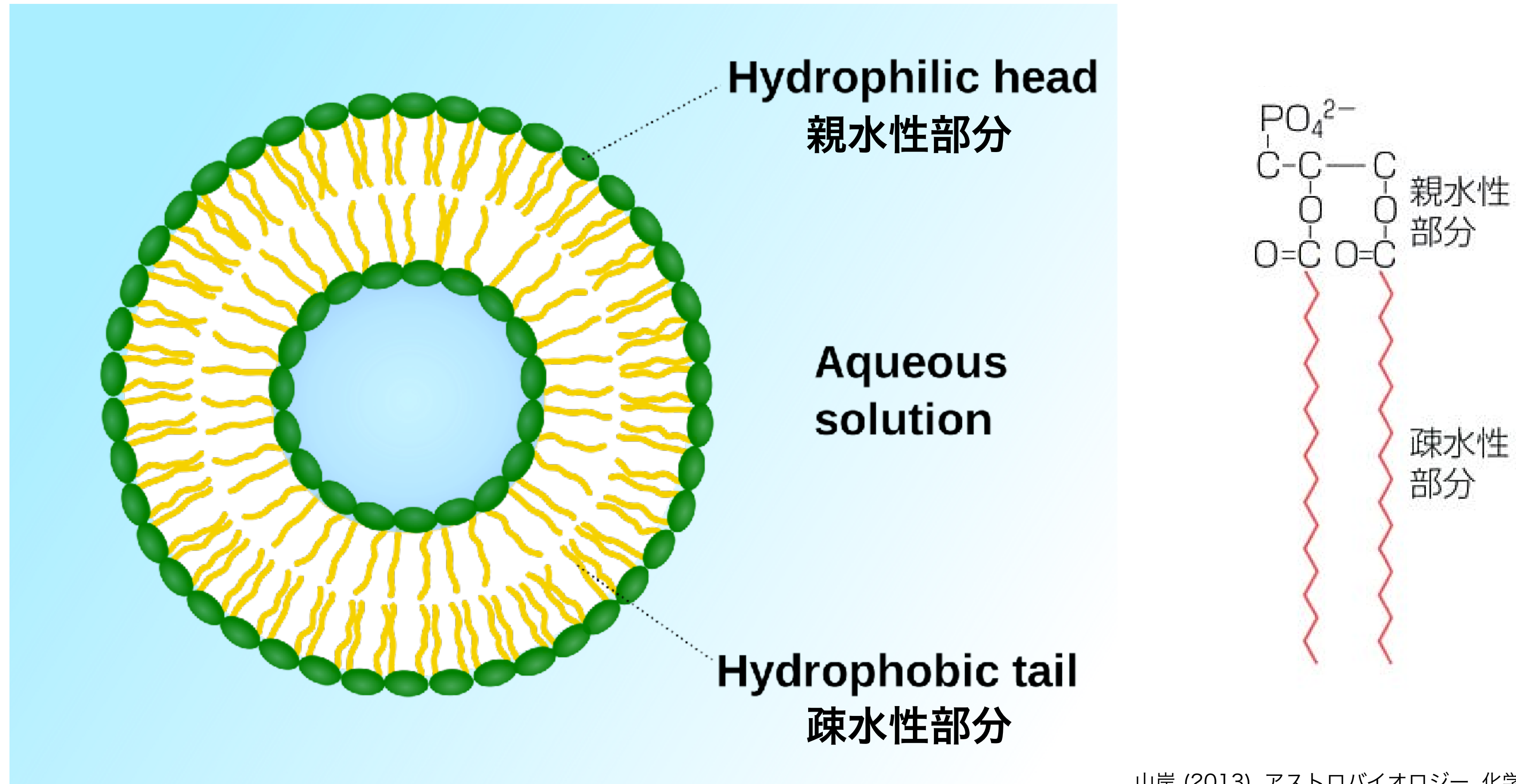
## RNA単量体(上段)とDNA単量体(下段)





# 自己と外界を隔てる膜

疎水基をもつ長鎖脂肪酸が親水基を持つグリセリンと化合，球状構造(リポソーム)を形成



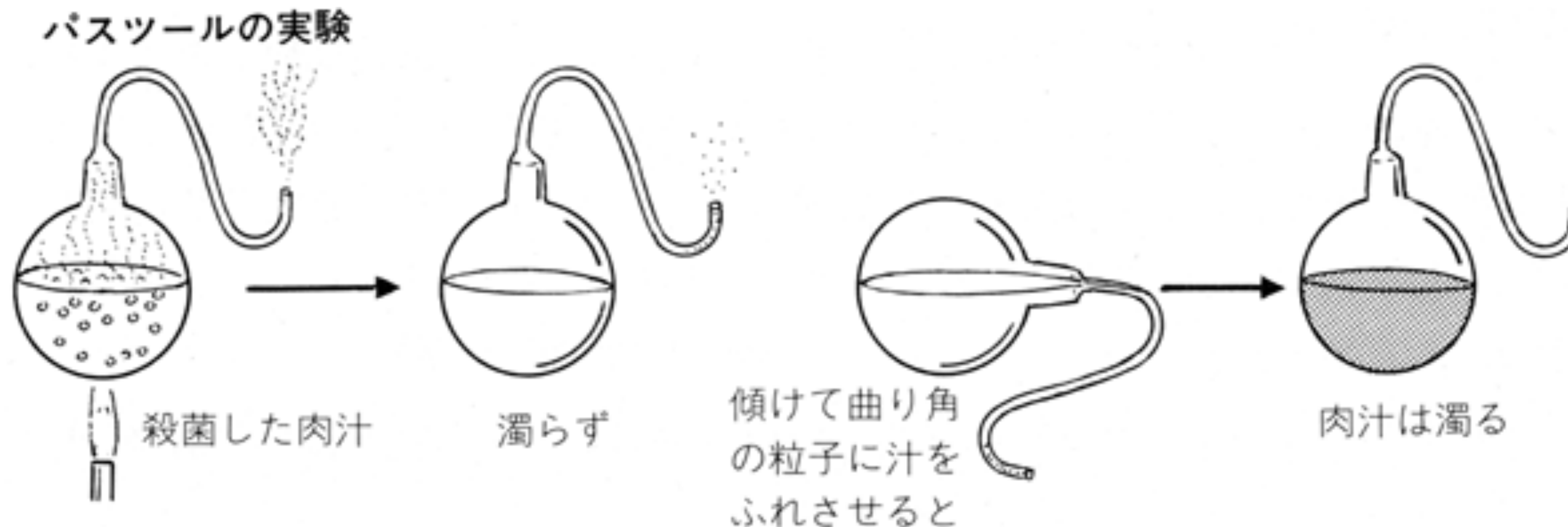
# 生命の起源と化学進化

## 白鳥の首フラスコ実験 (Pasteur, 1861)

- 生命の自然発生の否定

## 化学進化による生命誕生説の提唱 (Oparin, 1924)

- 物質が単純なものから複雑なものへと“進化”
- 最終的に生命誕生に至る



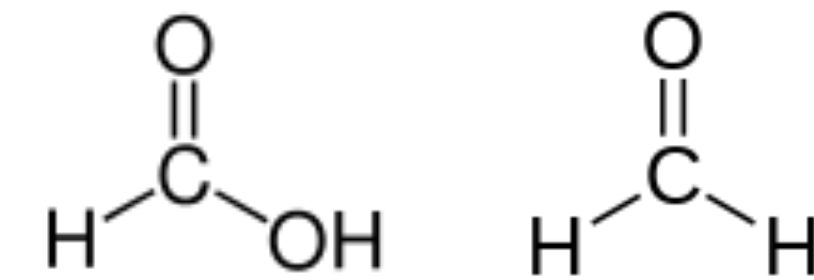
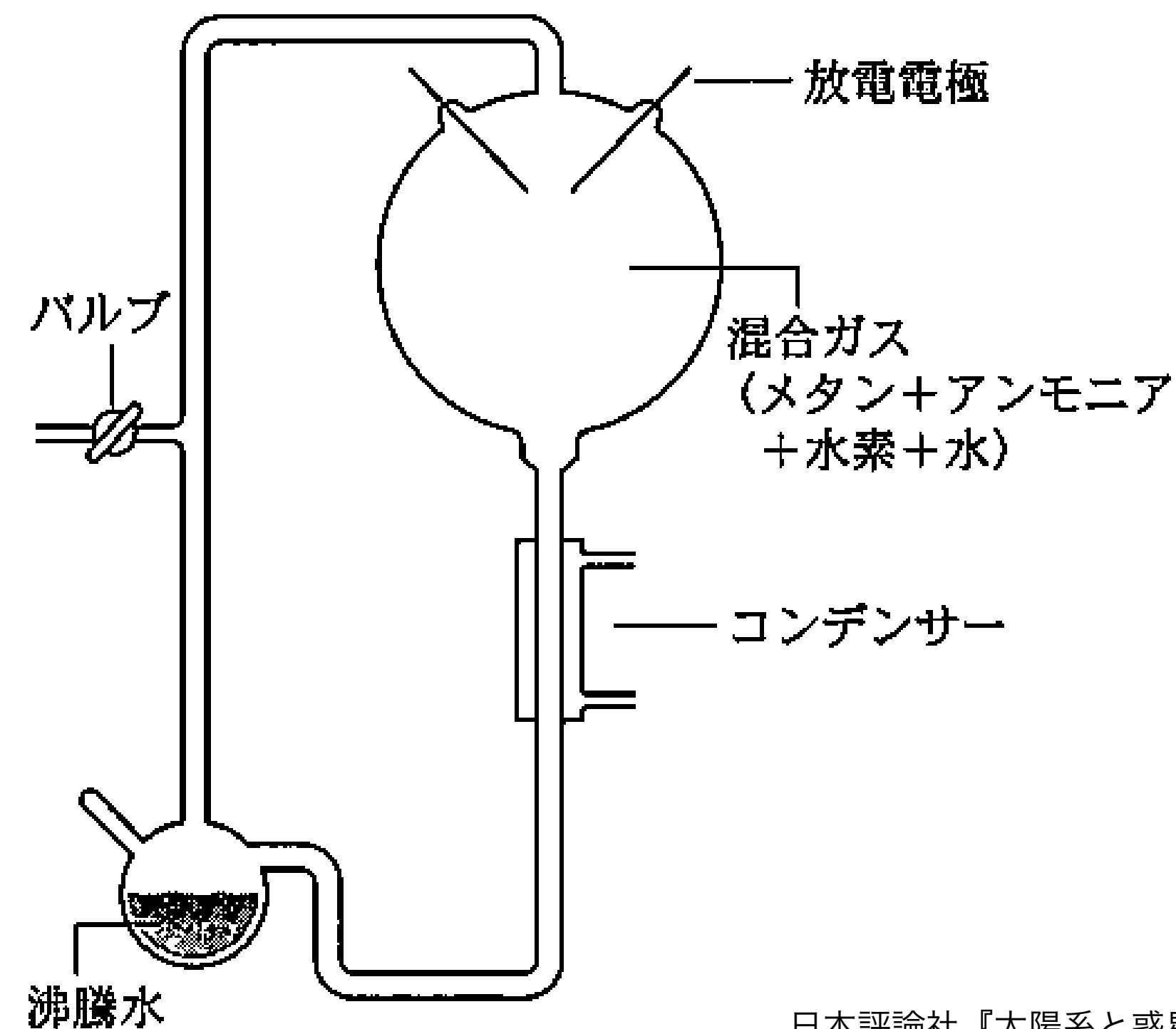
[http://keirinkan.com/kori/kori\\_biology/kori\\_biology\\_2/contents/bi-2/3-bu/3-2-1.htm](http://keirinkan.com/kori/kori_biology/kori_biology_2/contents/bi-2/3-bu/3-2-1.htm)



# 初期地球大気中での有機物合成

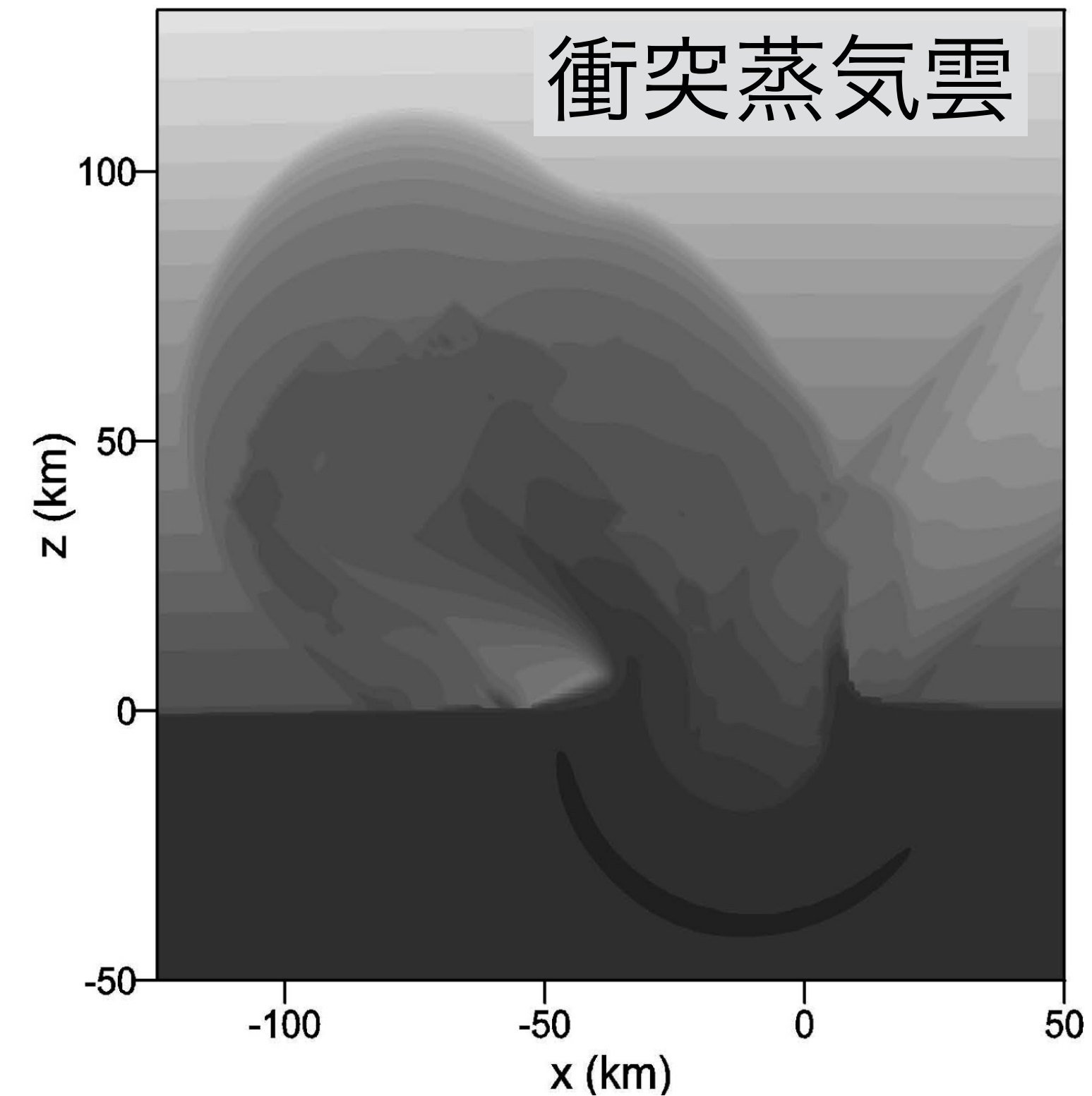
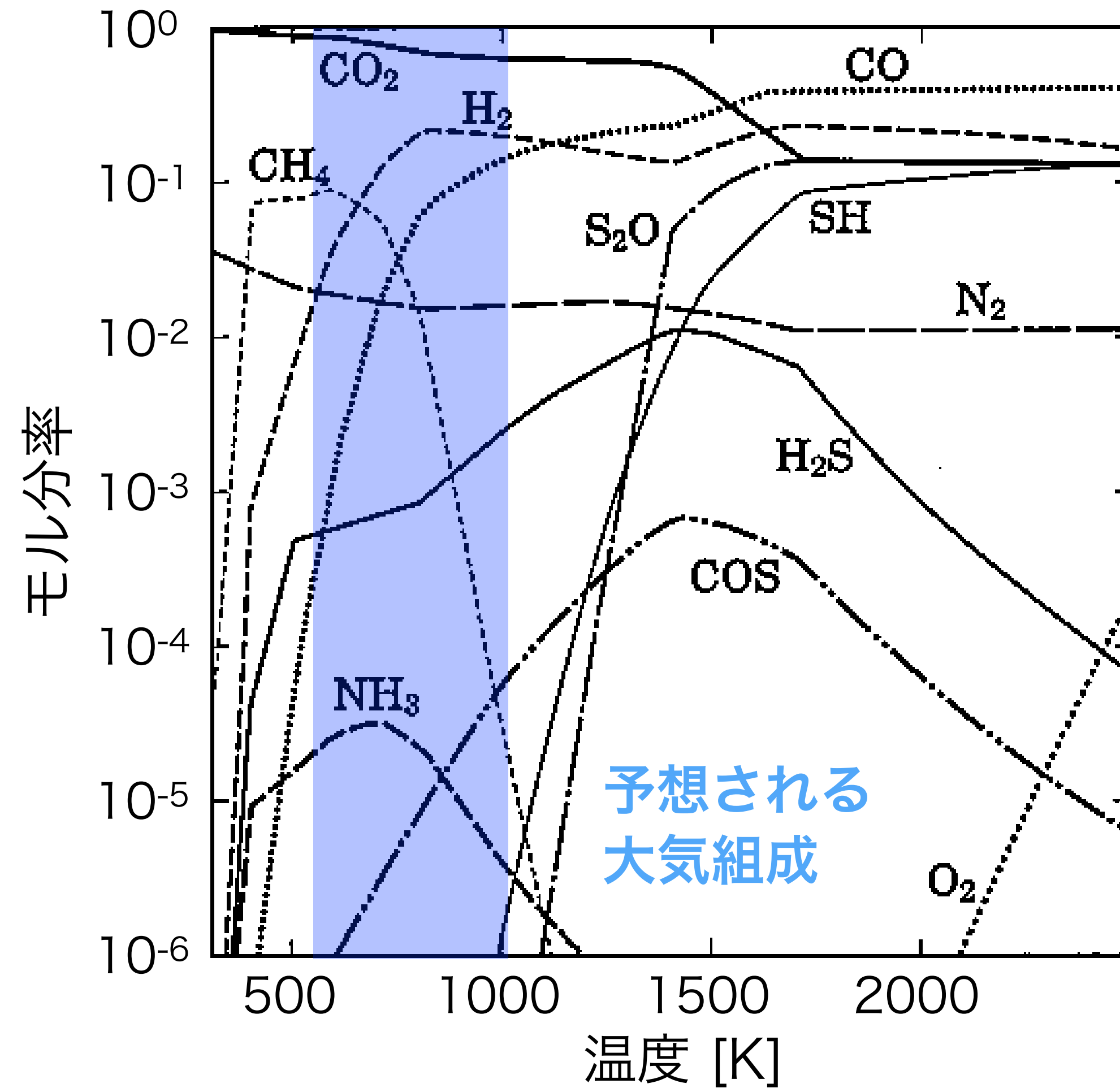
## 放電実験 (Miller, 1953)

- 強還元的ガス ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{NH}_3$ ) から有機物 (ギ酸, ホルムアルデヒドなど) ・アミノ酸前駆物質 (加水分解でアミノ酸になる) の合成
- 化学進化の実験的検証



日本評論社『太陽系と惑星』より

# 天体衝突起源の大気組成



Shuvalov (2009) MPS,  
Hashimoto et al. (2007) JGR

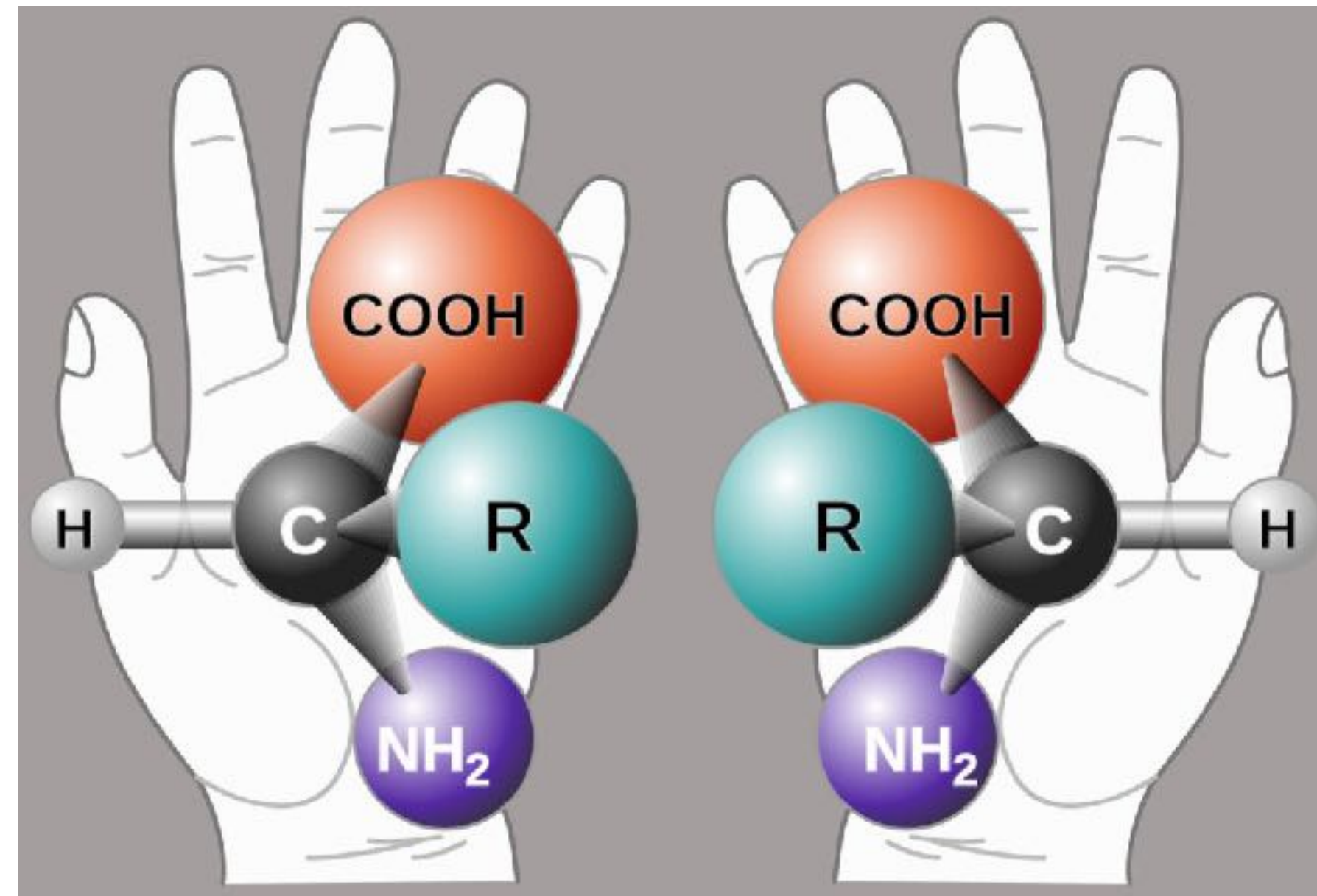
初期大気は弱還元的大気 (CO<sub>2</sub>主成分)

⇔ 強還元的大気(CH<sub>4</sub>主成分)中での有機物合成



# 小天体による有機物の供給

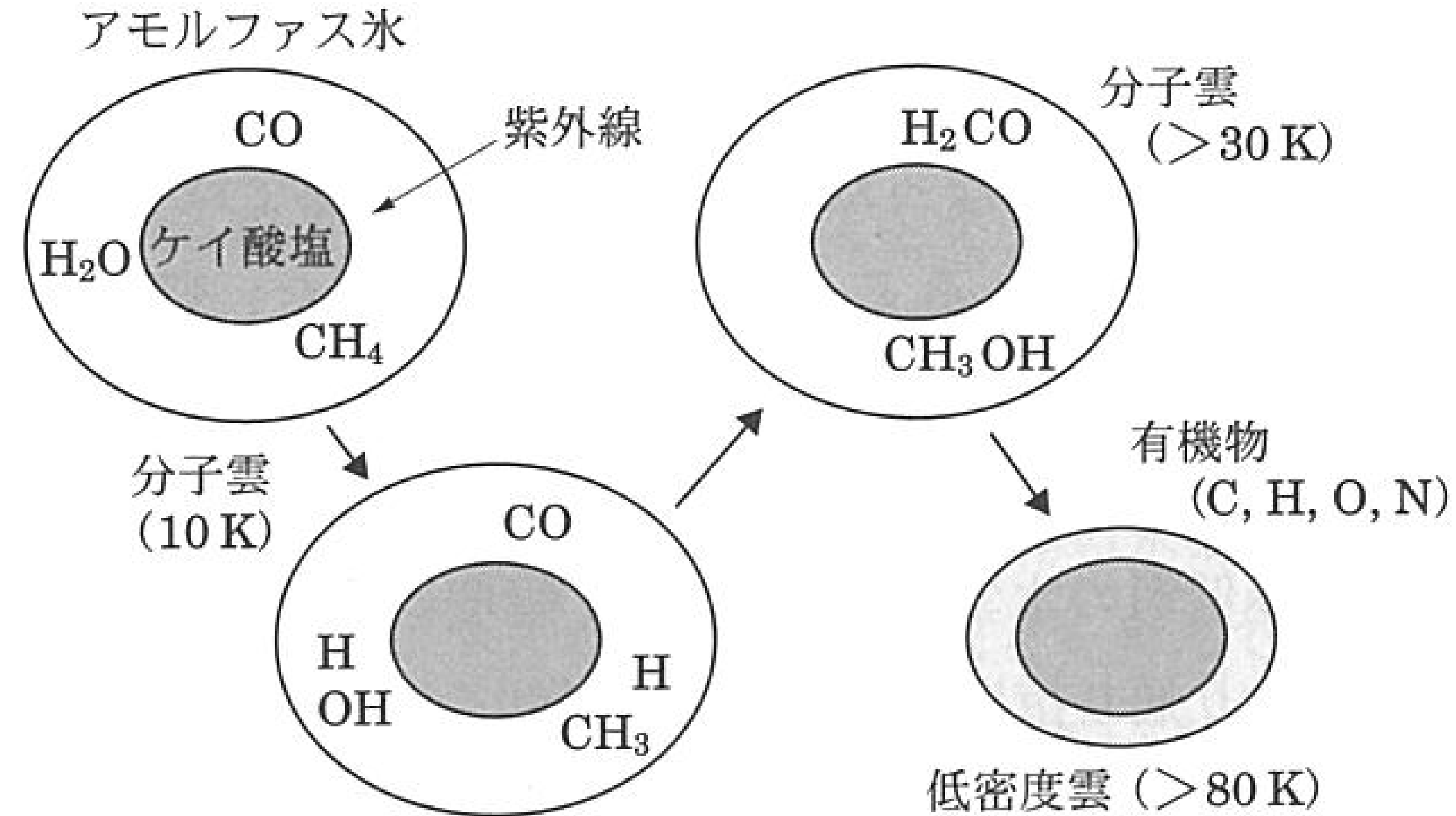
- 地球に水をもたらした小惑星・彗星は、アミノ酸前駆体を含む
- 地球上の生命は主にL-アミノ酸を用いるが、  
マーチソン隕石(炭素質コンドライト隕石)もL体に富んでいた  
⇔ Millerの実験で生成するアミノ酸前駆体は L体 : D体 = 1 : 1



左手型(L体)と右手型(D体)のアミノ酸

# 小天体中の有機物の起源

光化学反応による有機物の生成過程 (日本評論社『太陽系と惑星』)

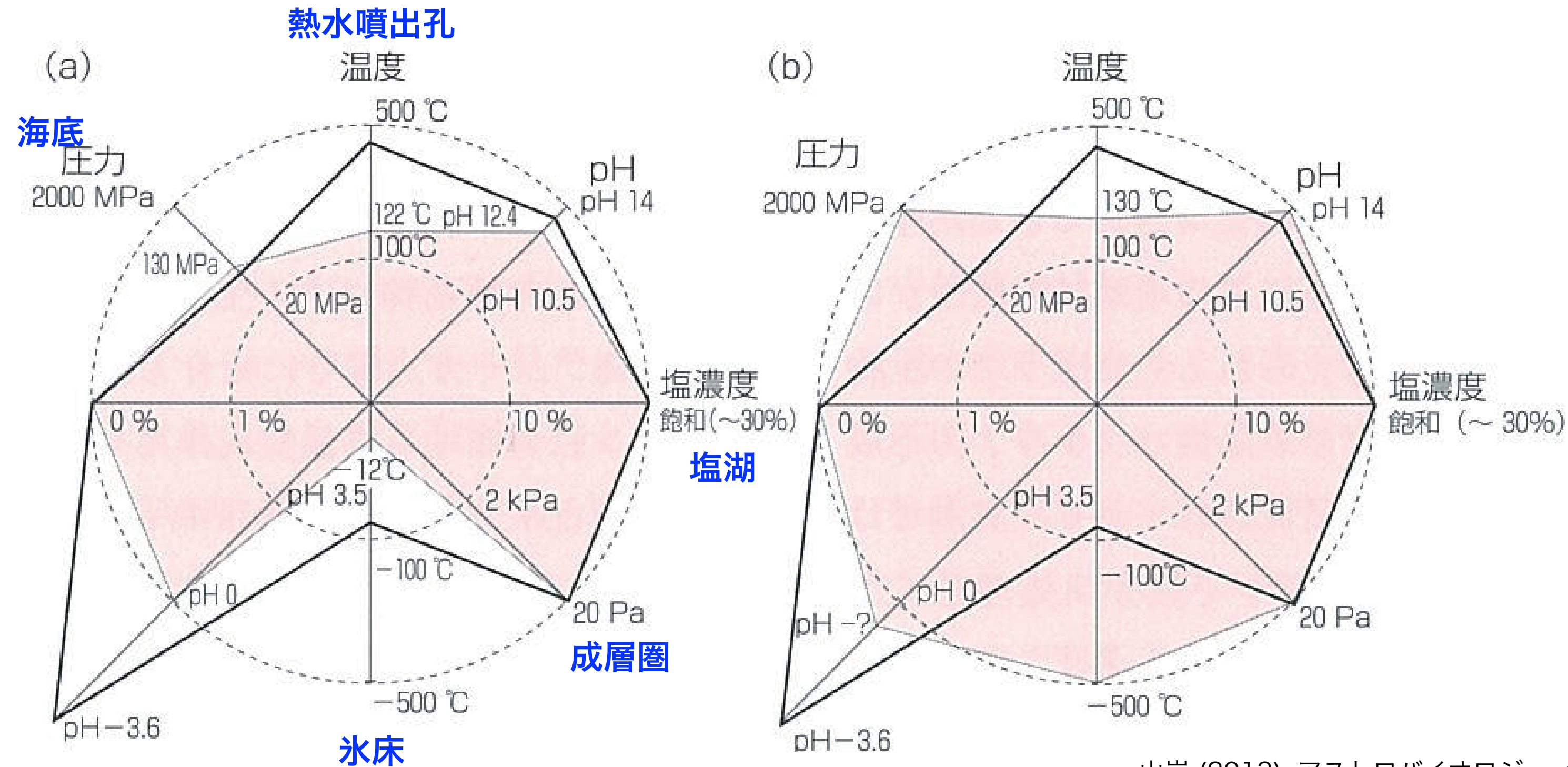


- 分子雲の低温下ではダスト表面に氷(H<sub>2</sub>O, CO, CH<sub>4</sub>)が付着
- 紫外線照射によってイオン・ラジカルが生成
- 温度が上昇すると、イオン・ラジカルが反応しやすくなり、有機物を生成

# 生命の存在条件：水

- 生化学反応の材料
- 生化学反応の**溶媒(液体の水)**
- 生化学反応を起こす自由エネルギー

地球における液体の水が存在する極限環境と生物の(a)生育限界・(b)生存限界



山岸 (2013), アストロバイオロジー, 化学同人社



# 生命誕生の場：原始海洋

## 有機物から生命が誕生した場はどこか

- 生化学反応の溶媒として水が不可欠
- 生体中の元素組成が海洋に酷似
- “生命のスープ”：温かく有機物に富んだ海水中で生命が誕生した？

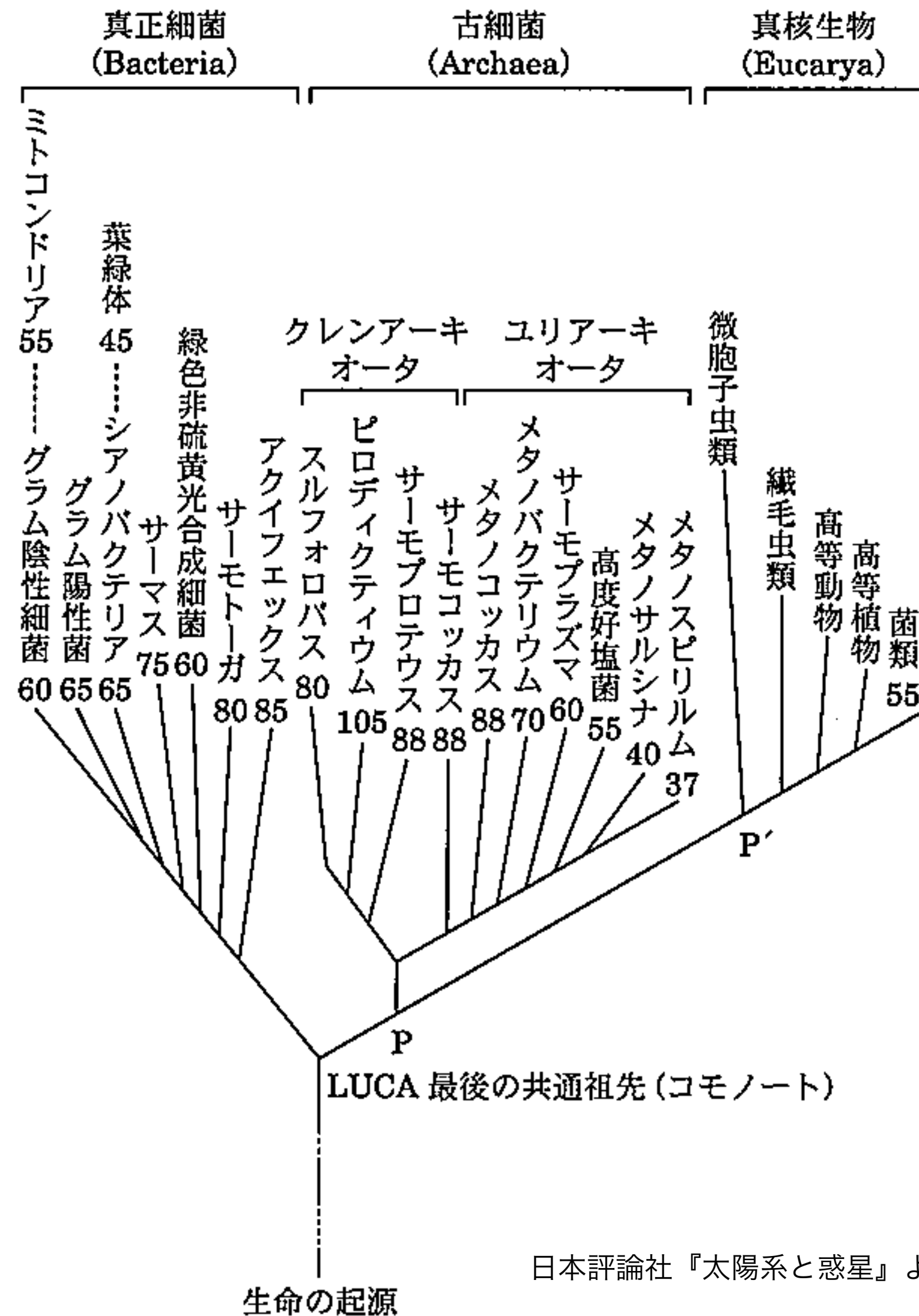
ヒトと様々な環境の元素組成の比較

ヒト (%)	海水 (%)	地殻 (%)	大気 (%)	宇宙 (%)
O 65	Cl 58.20	O 46.6	N 78	H 92.5
C 18.5	Na 32.42	Si 27.7	O 21	He 7.35
H 9.49	Mg 3.85	Al 8.1	Ar 0.47	O 0.07
N 0.99	S 2.70	Fe 5.0	C 0.02	C 0.03
Ca 0.45	Ca 1.24	Ca 3.6	Ne 0.001	Ne 0.01
P 0.3	K 1.20	Na 2.8	He 0.0003	N 0.01
K 0.12	Br 0.20	K 2.6		Mg 0.003
S 0.09	C 0.08	Mg 2.1		Si 0.003
Cl 0.06	N 0.03	Ti 0.4		Fe 0.003
Na 0.06	Sr 0.02	P 0.1		S 0.002
Mg 0.03	B 0.01			

海水は水を除いた組成, 宇宙は太陽の組成.

山岸 (2013), アストロバイオロジー, 化学同人社

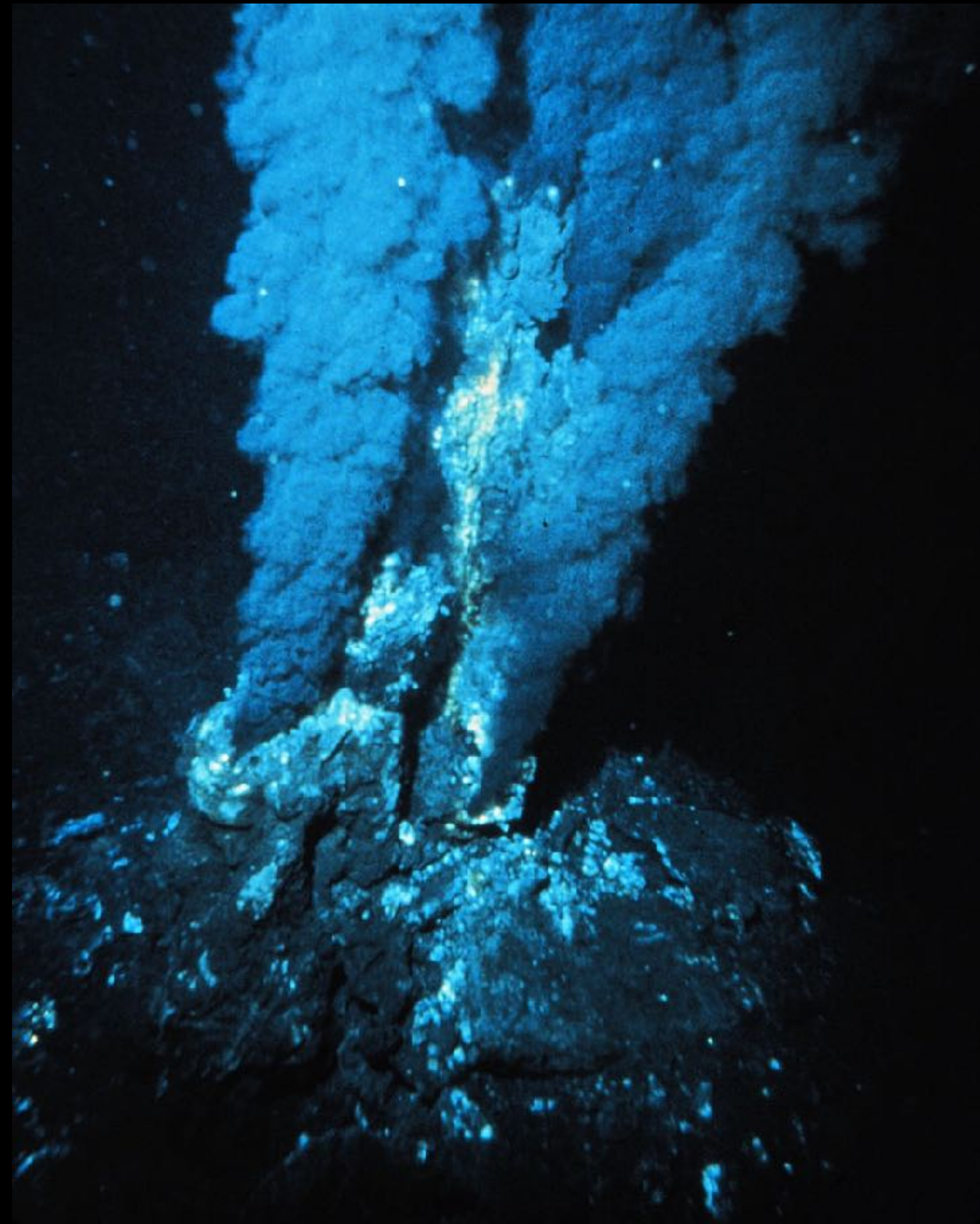
# 生物の共通祖先(コモノート)



- 分子系統樹(Woose, 1980年代)：現存する生物のタンパク質中のアミノ酸配列やDNA中の核酸の配列から生物間の祖先関係を作成
- 遺伝子の進化速度を外挿すると、最後の共通祖先(コモノート)は  $37 \pm 5$  億年前に存在
- **系統樹の根本付近の生物は高温環境下でのみ生息できる高度好熱菌**
- 生命は38億年より前に熱い海の中で誕生した？



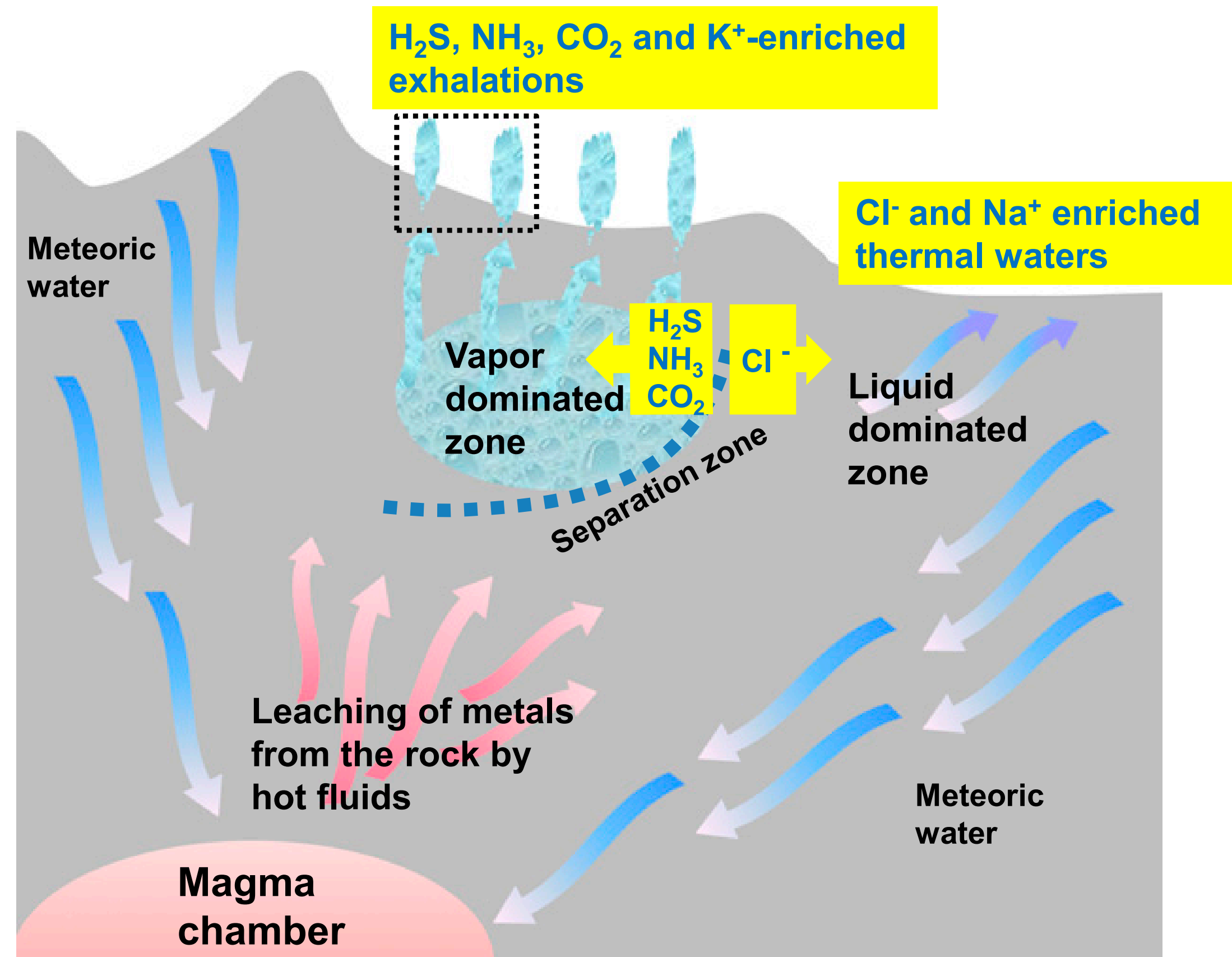
# 生命誕生の場：海底熱水噴出孔？



- 火山性の地熱活動によって300°Cを超える熱水が湧き出している
  - 多様な生物群(化学合成微生物含む)
    - 熱水の組成と微生物の種類に対応関係
  - 初期地球は形成時の熱によってより多くの熱水噴出孔が存在したはず
- **生命誕生の場？**



# 生命誕生の場：陸上温泉？



Mulkiđjanian et al. (2012) PNAS

## 海底熱水噴出孔起源説への反論

- 海水のK/Na比は非常に小さいが、細胞内のK/Na比は1より大きい
- 濃縮/乾燥による高分子有機物生成が困難

## 陸上温泉起源説

- 陸水は海水と比較してNaがはるかに少ない
- 乾燥/湿潤の循環が容易
- ただし、初期地球においてはオゾン層が存在しないため、紫外線による有機物分解が問題

# 生命誕生の過程

---

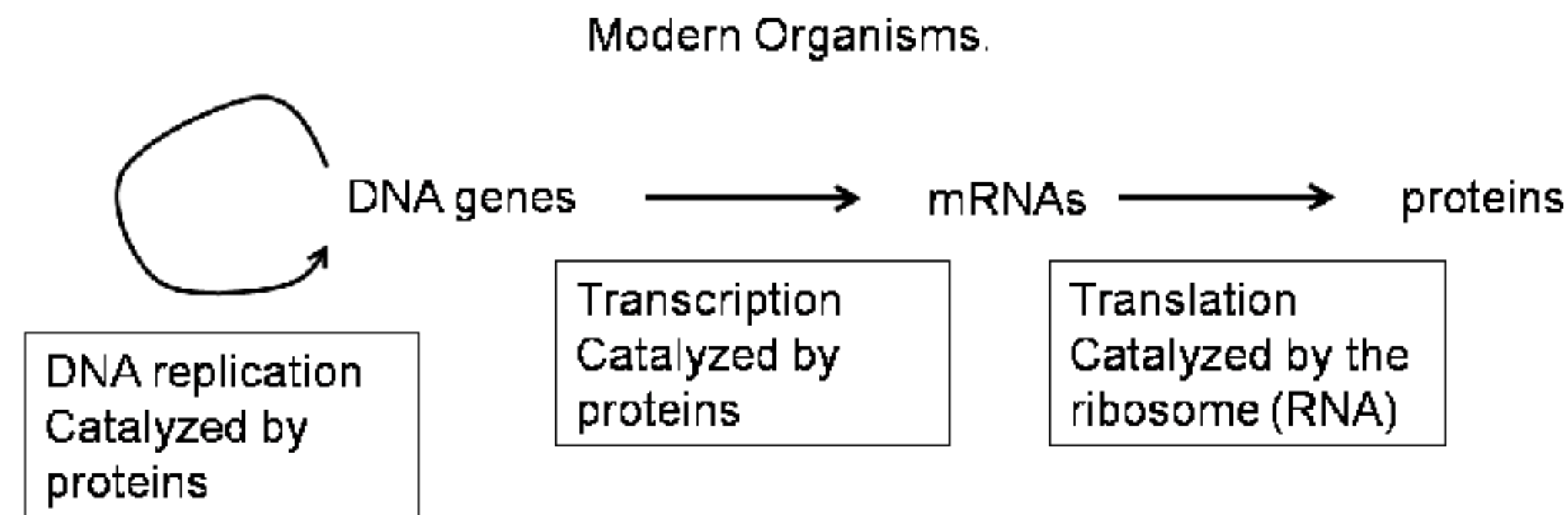
## 生体機能

- **代謝**(エネルギー、体をつくる)：**タンパク質**(アミノ酸が重合)
- **自己複製**(子孫を残す)：DNA(デオキシリボ核酸), RNA(リボ核酸)
- **膜**(外界と自己を隔てる)：リン脂質

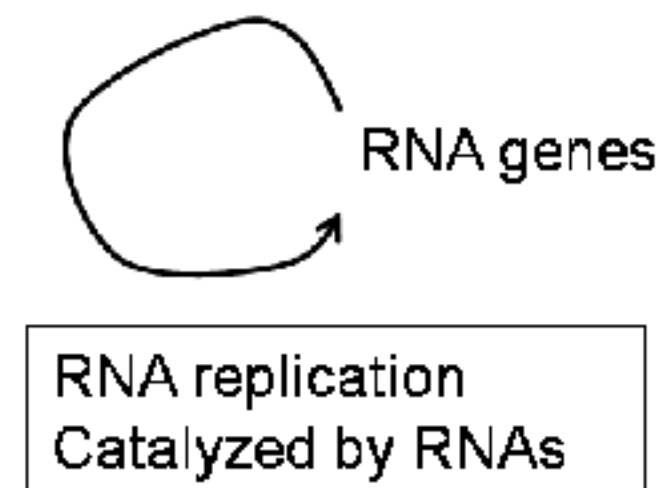
特に、タンパク質と核酸は互いに助け合いながら生命活動の根幹を担う代謝と自己複製、どちらの機能が先に誕生したのか？

# RNAワールド仮説（自己複製）

- 1980年代、触媒活性を持つRNA(リボザイム)の発見
- **RNAワールド説**：RNA遺伝子を持ち、RNAが触媒として働くシステムが生命の始まり。やがてその他の機能を獲得・進化していった



Hypothetical RNA World Organisms.

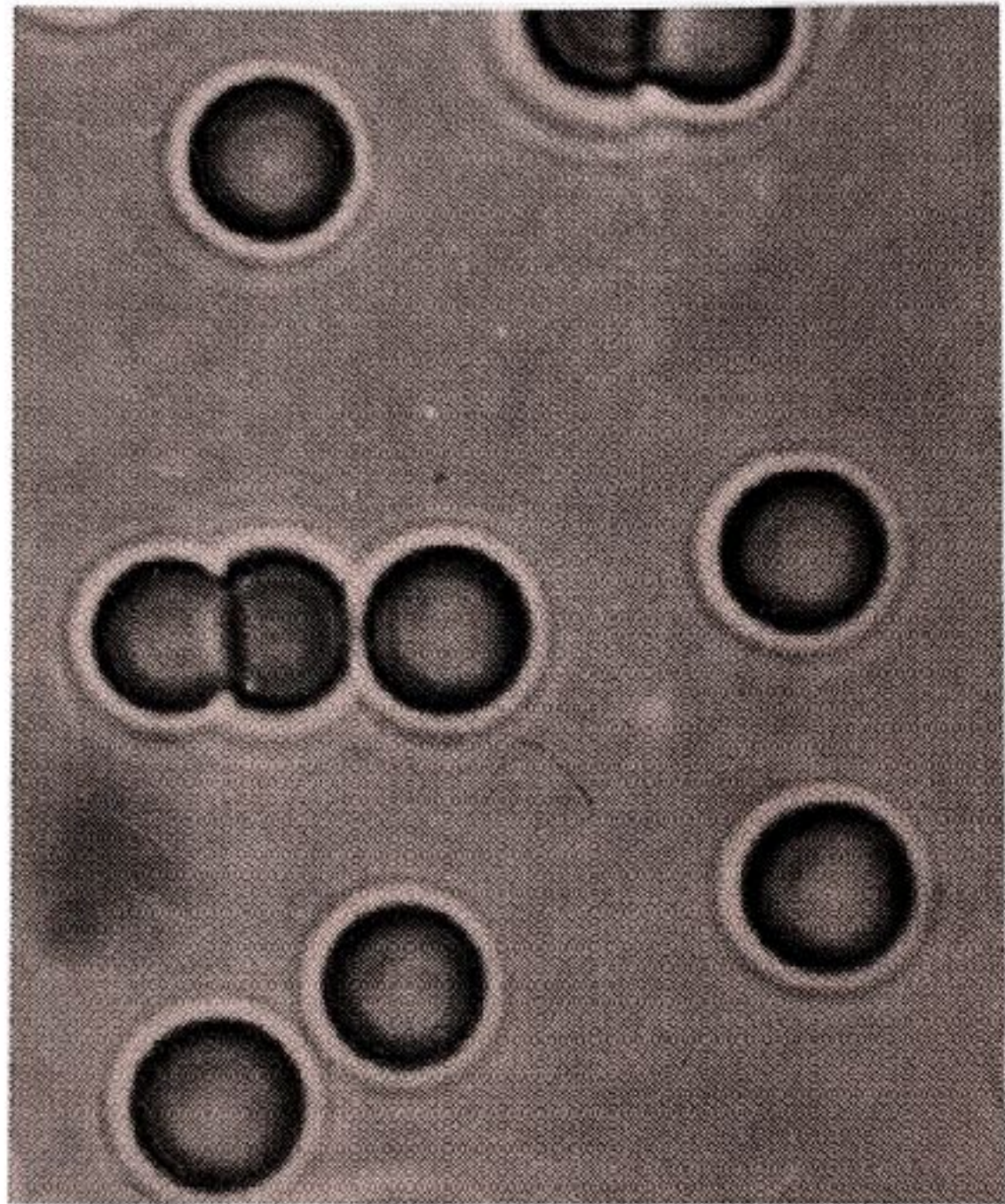


<http://physwww.mcmaster.ca/~higgsp/HiggsImages/CentralDogma.png>



# ミク羅斯フェア・隕石由来脂肪酸リポソーム仮説 (膜)

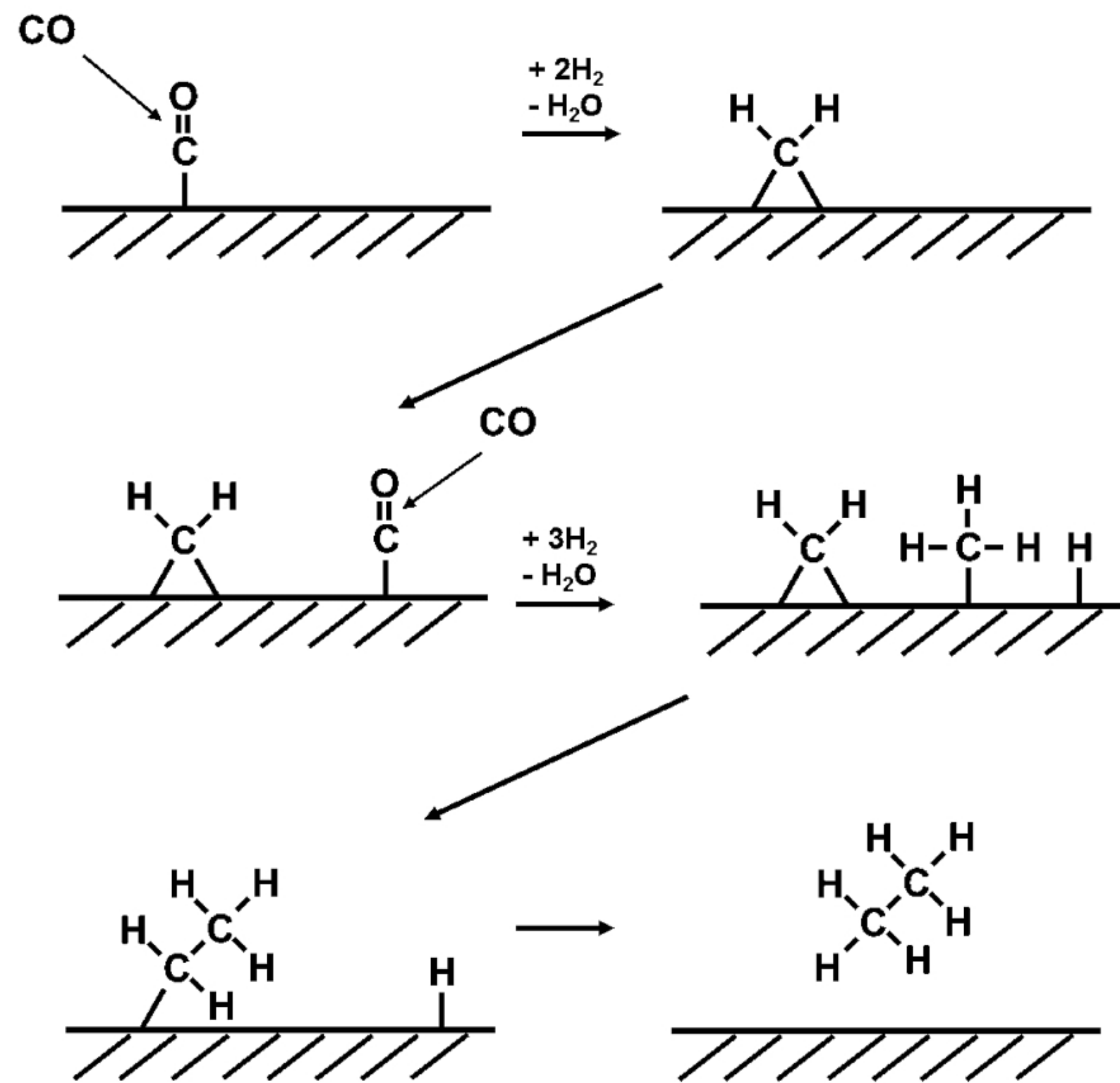
アミノ酸粉末を加熱してつくられた  
プロテノイド・ミク羅斯フェア



山岸 (2013), アストロバイオロジー, 化学同人社

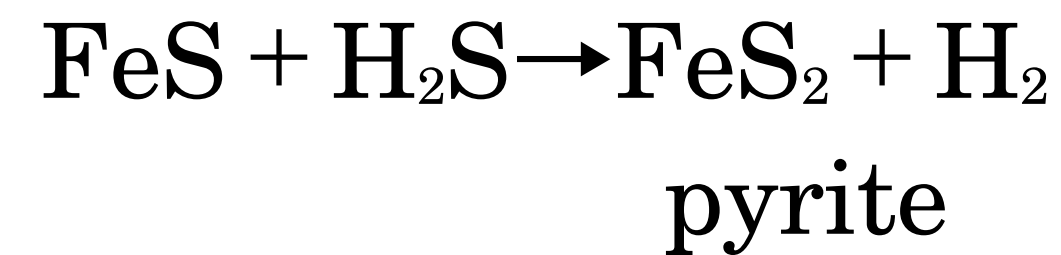
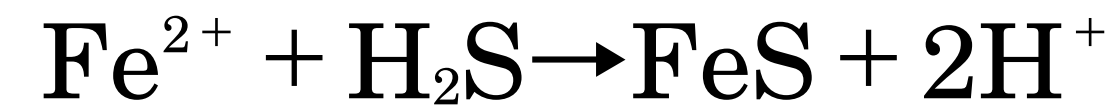
- 個体を隔てる膜がダーウィン型進化(変異と適者生存)に不可欠  
↔化学進化による長鎖脂肪酸の合成は困難
- 熱重合したアミノ酸がつくる球状構造(プロテノイド・ミク羅斯フェア)や隕石由来の脂肪酸がつくるリポソームが生命誕生のはじまり？

# 鉄-硫黄ワールド仮説 (代謝)



大原 (2011) 地球化学

- 海底熱水噴出孔周辺に豊富に存在するパイライト (FeS<sub>2</sub>) の生成に伴う自由エネルギーによって生体有機物が作られたとする説
- パイライトは膜構造をつくることができるという利点もある

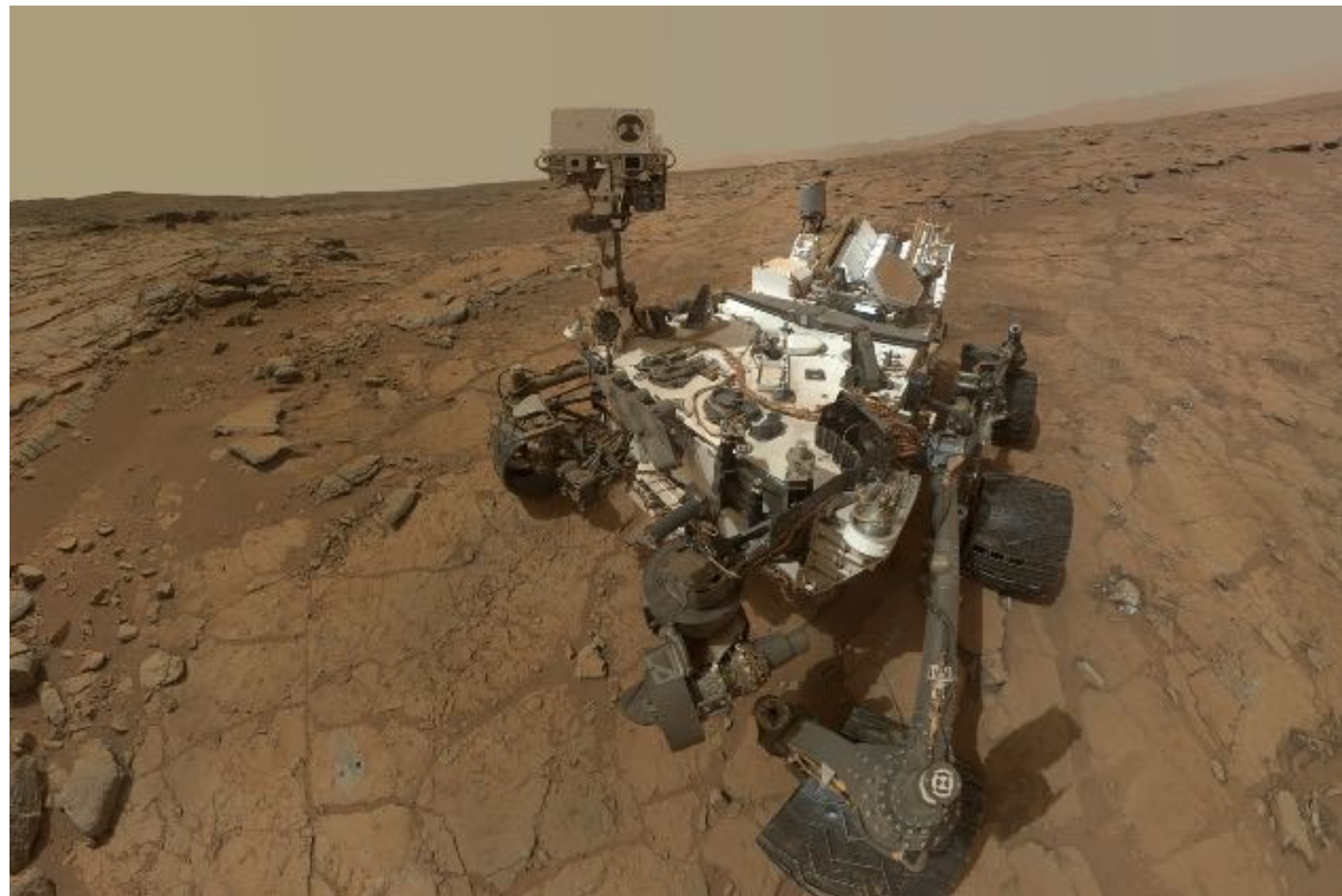




# 火星

---

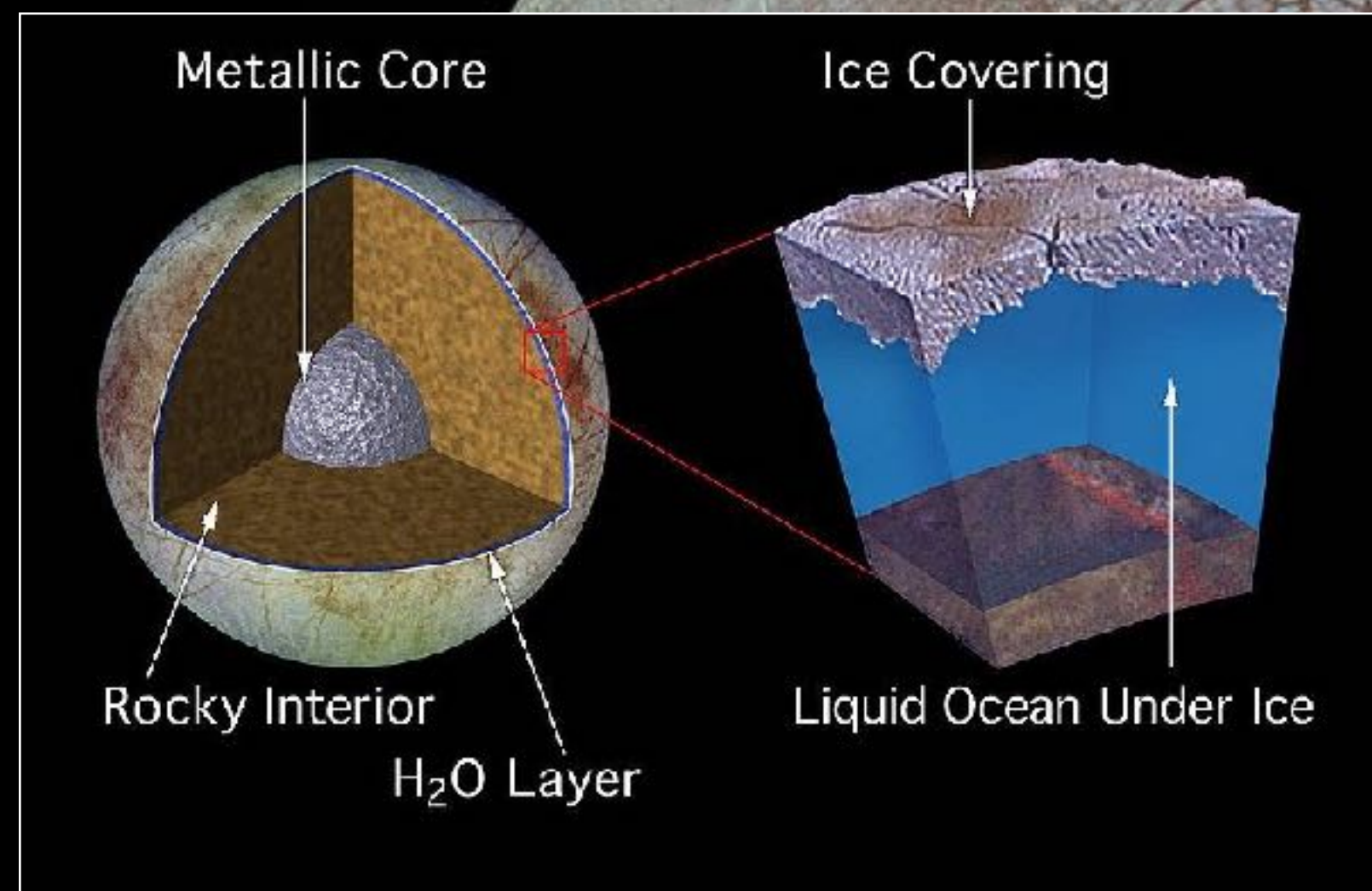
- 約40億年前に海が存在し，地下熱水活動があった可能性も  
→ 生命が誕生した or 現在でも地下に生存している可能
- Viking探査機による探査(土壌への栄養供給によるCO<sub>2</sub>発生の有無など)  
→ 生命存在の兆候なし (ただし、検出限界は 10<sup>7</sup>細胞/g)
- Curiosityによるメタンガスの検出 → メタン生成菌か非生物起源かは不明





# 氷衛星エウロパ

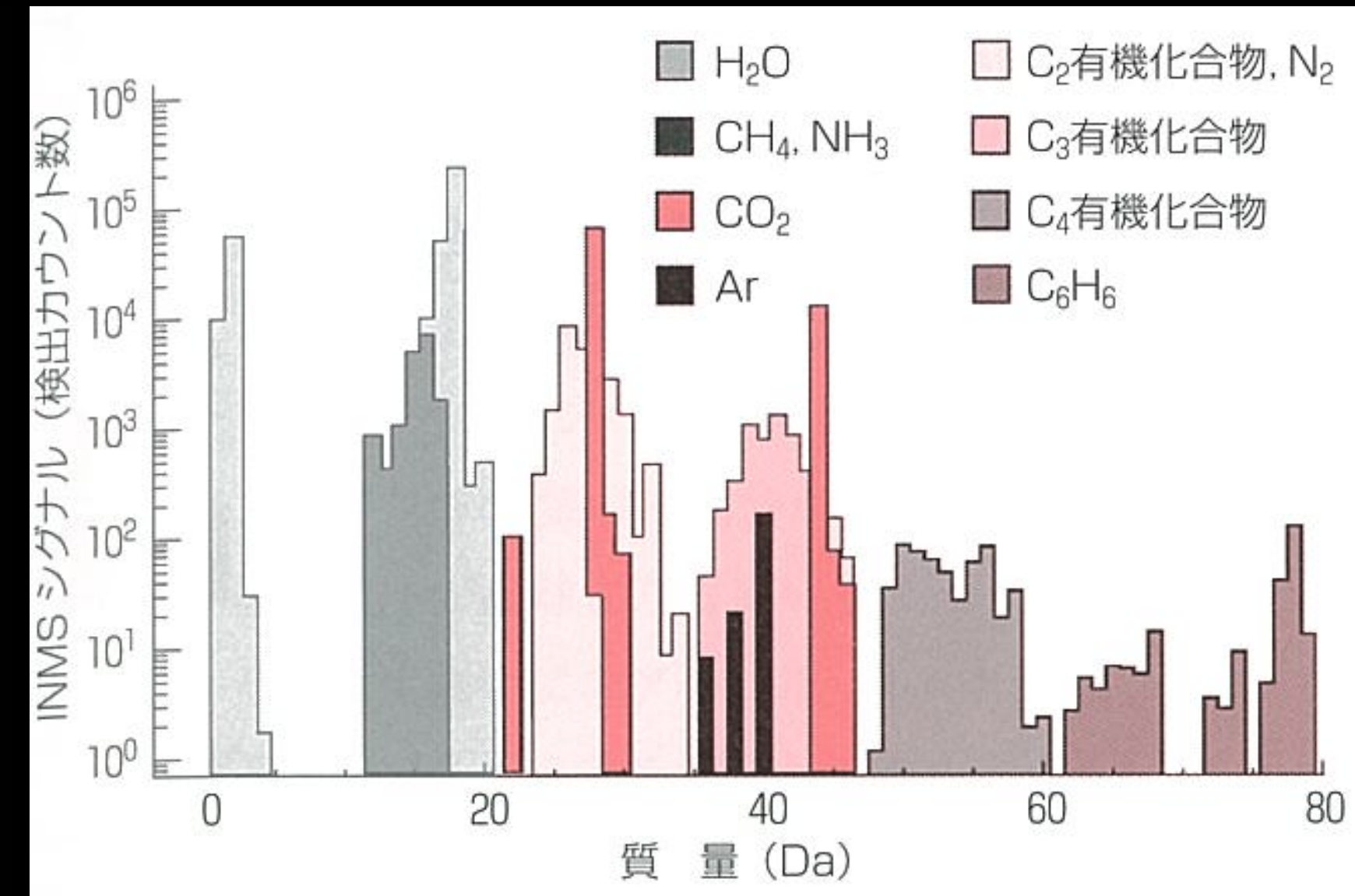
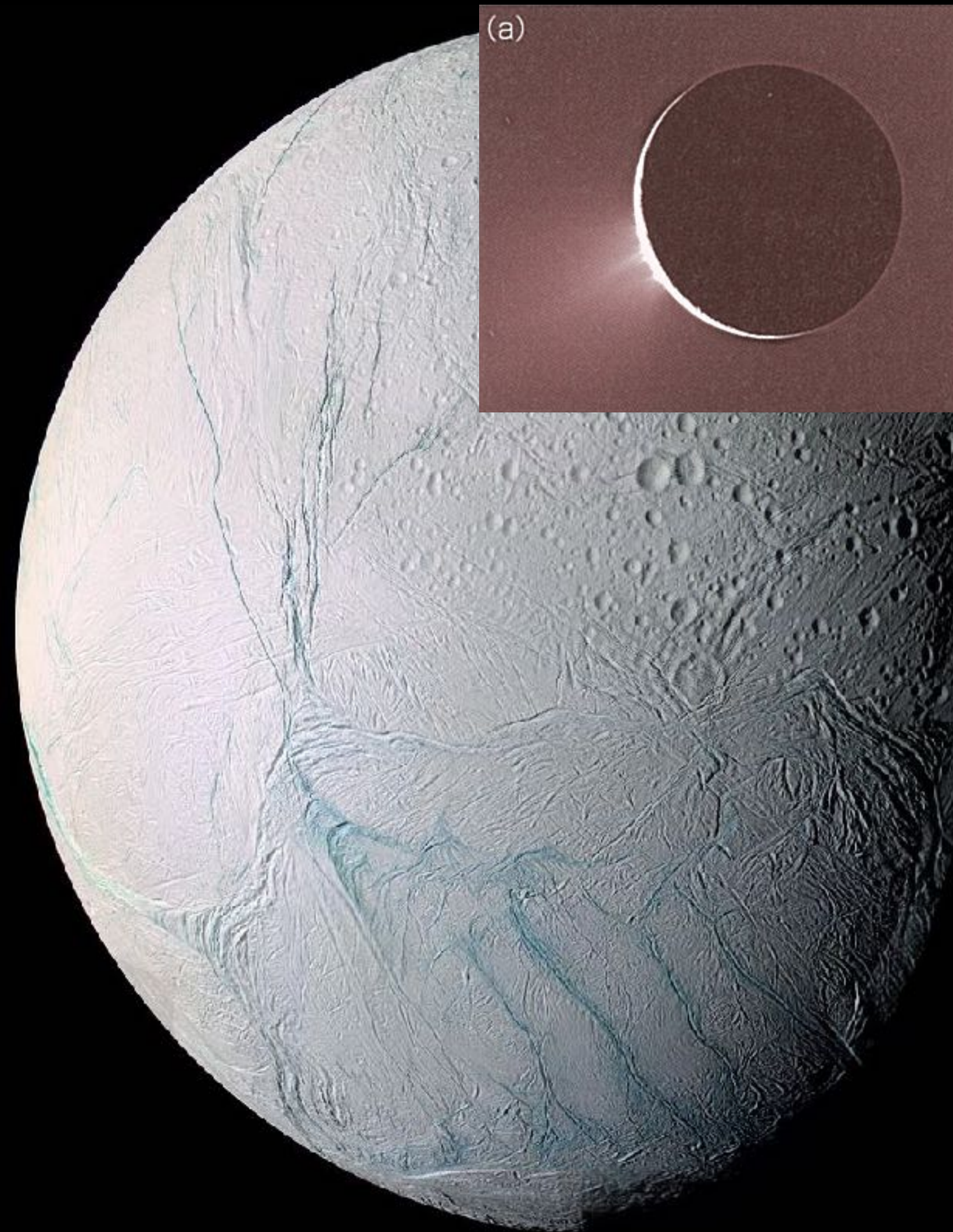
- 磁場観測・表面地形は内部海の存在を示唆
- 木星の潮汐力によって海底熱水噴出口が存在している可能性がある





# 氷衛星エンセラダス

化学同人『アストロバイオロジー』より



- Cassini探査機がプルーム(噴泉)を発見
- プルーム中には, ナトリウム塩や高分子有機物が含まれている
- 内部海での海底熱水活動を示唆
- さらなる高分子有機物検出に期待



# 氷衛星タイタン

---

- $N_2$ を主成分とし、数%の $CH_4$ を含む弱還元的大気 → 原始地球大気と類似
- 原始地球大気類似大気への紫外線・宇宙線照射の天然の実験場
- 多様な有機物、高分子有機物と思われるエアロゾルの検出
- 液体メタン・エタンの湖、アンモニア水の内部海で生命は誕生するか？

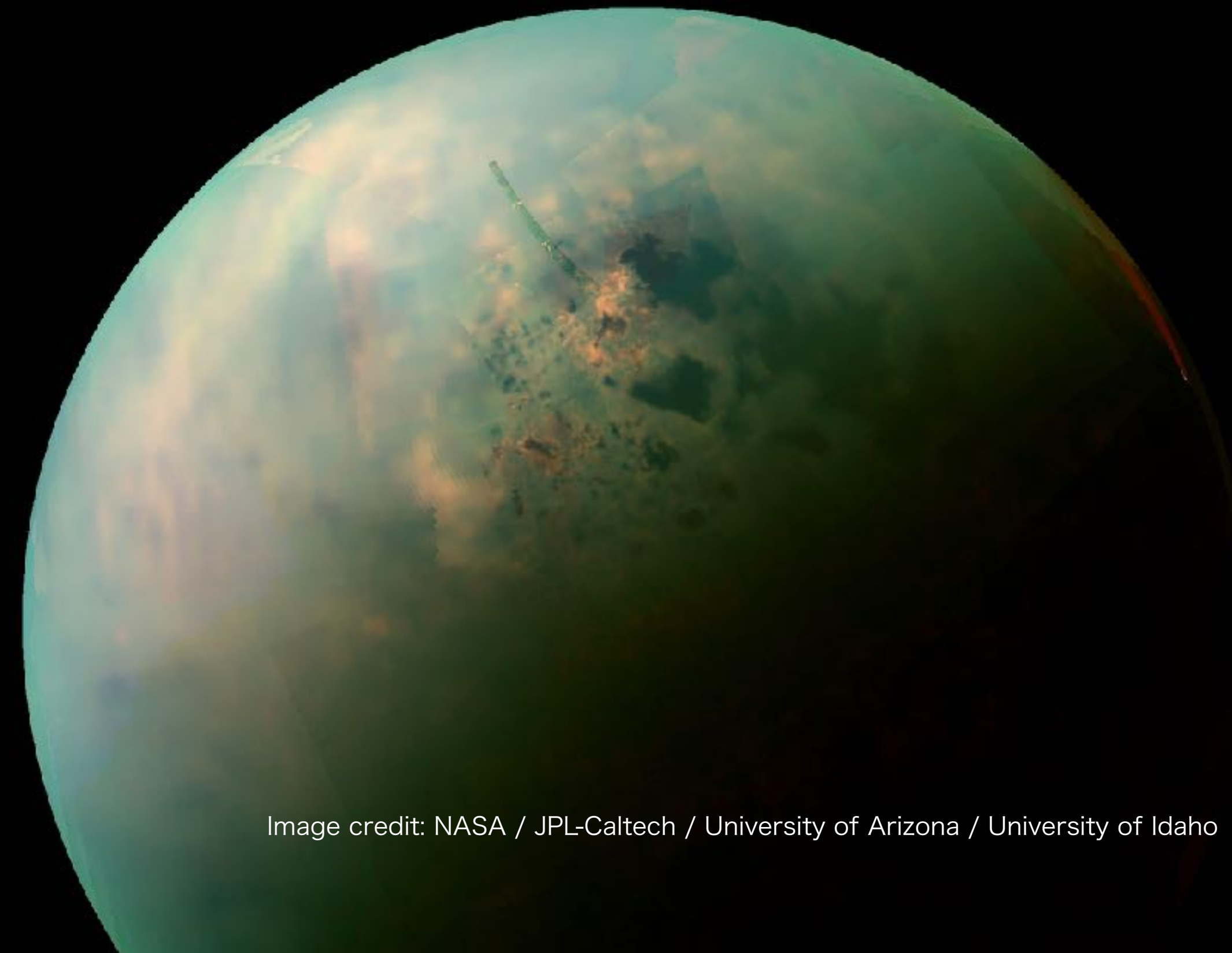
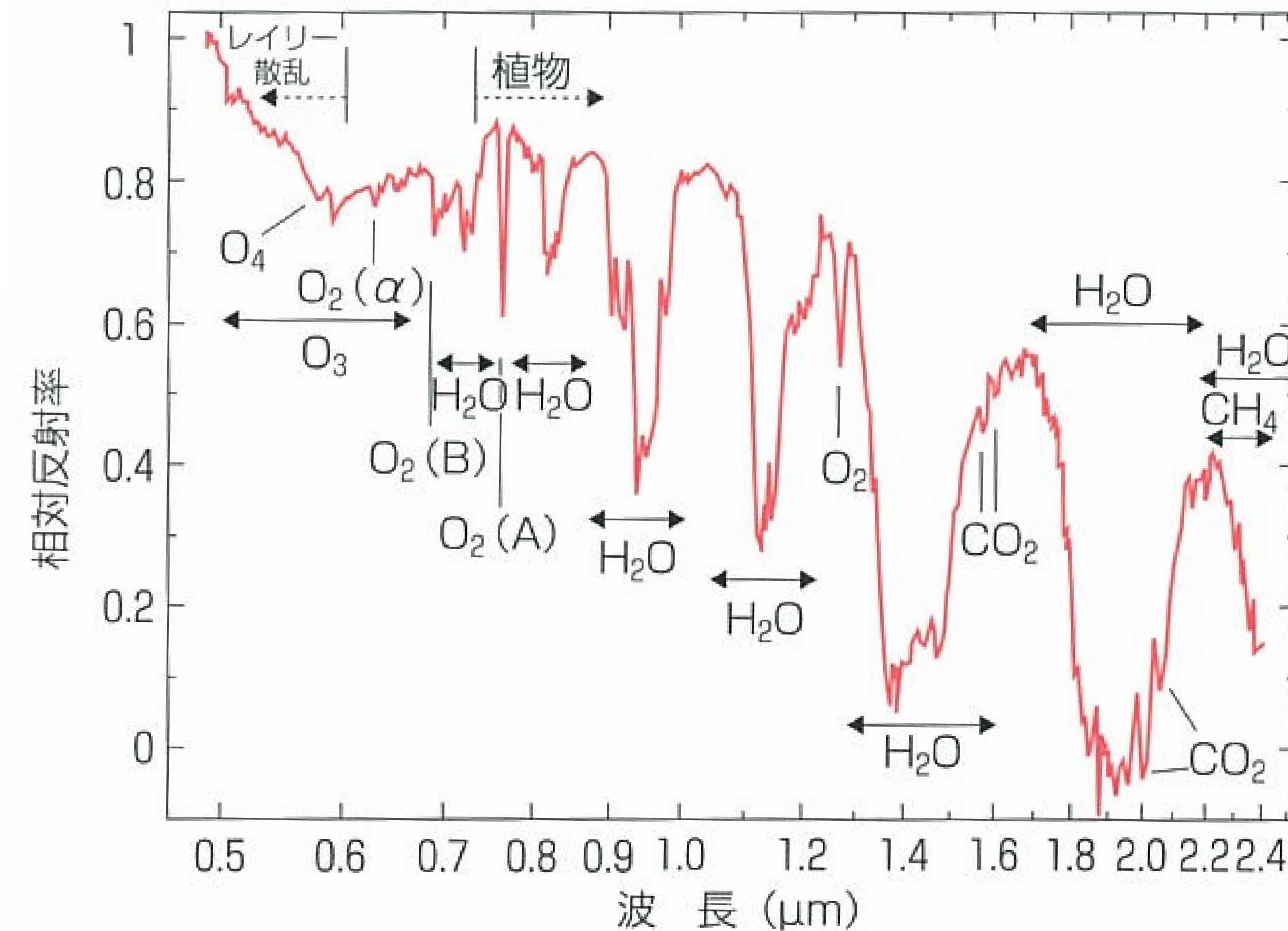


Image credit: NASA / JPL-Caltech / University of Arizona / University of Idaho

# 系外地球型惑星

地球照の可視光・近赤外スペクトル (化学同人社『アストロバイオロジー』より)



- 近い将来、ハビタブル惑星候補天体のスペクトルから生命活動の兆候(バイオシグネチャー)を読み取れると期待されている
- 酸素やオゾンの吸収線、植物による近赤外線反射(レッドエッジ)



# まとめ

---

## 生命の起源に関する仮説

- 生命の材料：原始大気中で生成された有機物，小惑星や彗星が持ち込んだ有機物が生命の材料
- 生命誕生の場：熱水噴出孔，陸上温泉？
- 生命誕生の過程：最初の生命はRNA(核酸)のみで自己複製と代謝を行っていたとするRNAワールド仮説をはじめ，様々な説が提案されている

## 惑星・衛星探査 (火星・氷衛星・系外惑星)

- 地球外生命の探索
- 初期地球類似環境での化学進化