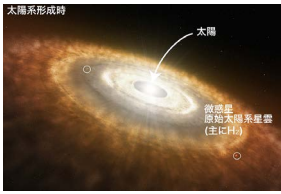


# 惑星地球科学 II (第七回目)

## 生命地球史2：表層環境と生命進化

東京大学総合文化研究科：  
小宮 剛 准教授  
2015/11/6

### 地球型惑星大気の形成過程 一次大気モデル

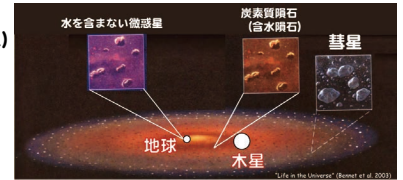


CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>を主体とした大気(ガス惑星)



太陽系星雲ガス(H<sub>2</sub>)とマグマオーシャン(O)が反応してH<sub>2</sub>Oを生じる。  
H<sub>2</sub>+O<sub>(rock)</sub>=H<sub>2</sub>O

### 水(海)の起源 二次大気モデル(衝突脱ガス)

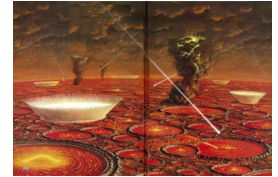


太陽-地球(1AU) 太陽-火星(1.5AU)  
太陽-含水隕石(>2AU) 太陽-木星(5AU)

微惑星の衝突による成長(0.4地球半径で大気の形成)

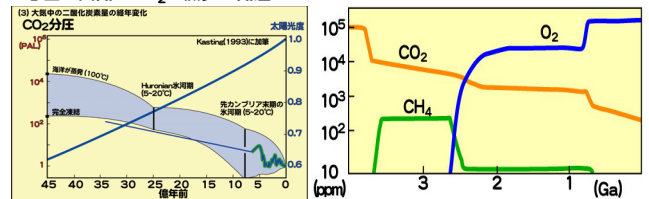


衝突した微惑星から大気成分が揮発性物質(大気成分)が放出され、大気・海洋が形成

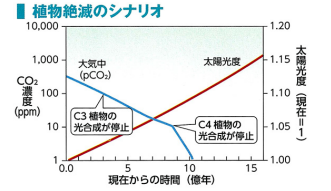


CO<sub>2</sub>(CO), H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>を主体とした大気

### 惑星の大気-CO<sub>2</sub>の減少と気温- CO<sub>2</sub>分圧



成分	濃度 (bars)	存在比 (%)
金星 (Venus)	CO <sub>2</sub> 86.4	96
	N <sub>2</sub> 3.2	3.5
	H <sub>2</sub> O 0.009	1×10 <sup>-2</sup>
90 bar	Ar 0.0063	7×10 <sup>-3</sup>
地球 (Earth)	N <sub>2</sub> 78	77
	O <sub>2</sub> 21	21
	H <sub>2</sub> O 0.01	1
1 bar	Ar 0.0094	0.93
	CO <sub>2</sub> 3.55×10 <sup>-4</sup>	3.5×10 <sup>-4</sup>
火星 (Mars)	CO <sub>2</sub> 0.0062	95
	N <sub>2</sub> 0.00018	2.7
	Ar 0.00010	1.6
6-8×10 <sup>-3</sup> bar	H <sub>2</sub> O 3.9×10 <sup>-7</sup>	6×10 <sup>-3</sup>
	CO, O <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub>	<1



温室効果ガス(CO<sub>2</sub>)と太陽光度の上昇が相補的

### 生命が生まれる為の三つの条件

- (1) 表面温度が適当であること  
c.f. 金星: 470°C, 火星(現在): 最低温度-139°C
- (2) 液体の水が存在すること
- (3) 利用できるエネルギー源があること

### 系外惑星と生命探査

ハビタブルゾーン  
~液体の水が存在する領域~

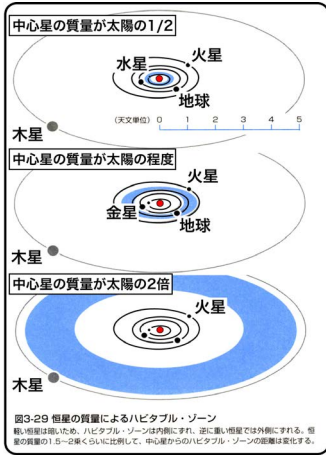
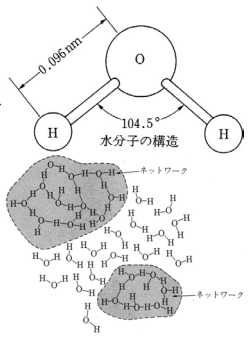


図3-29 恒星の質量によるハビタブル・ゾーン  
種々の恒星の質量、ハビタブル・ゾーンは異なる。遠く離れた恒星では外側にずれ、恒星の質量の1.5~2倍くらいに比べて、中心星からのハビタブル・ゾーンの距離は変化する。

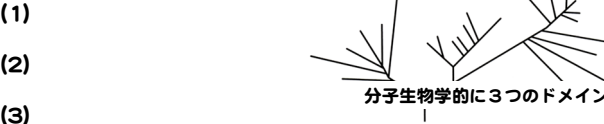
### なぜ水

(1)水分子の構造  
→極端な電荷の偏り→水素結合, 結合水



- ①水素結合  
→軽分子なのに常温で液体で存在：著しく高い沸点(c.f.H<sub>2</sub>S: -60.7°C)  
→比熱が大きく、大きな潜熱  
外界の温度が変わっても細胞内は急激に変化しない
- ②結合水の形成  
→水分子は帯電しているため、溶質と静電的に結合し易い  
→融点が高い
- (2)いろいろなものを溶かす→物質を拡散で移動させる媒体に。
- (3)粘性があまり高くない：ものを運ぶのに好都合
- (4)生命の高温限界:約120°C(疎水性相互作用がなくなる)
- (5)解離し、水素イオンを生成: pHの変化と膜内外で電位を生む

### 生命とは



- (1) 生命は無機物から、生じるのか?~生命の自然発生説~  
① 古代ギリシア時代: アリストテレス(384-322BC)  
→『動物誌』~動物植物を問わず類から誕生するもの他に、自然発生するものが存在する(昆虫やネズミ等)  
② 17世紀: レディ(1626-1698), イタリア  
→『昆虫の発生に関する実験』  
→蓋をしたフラスコからはウジは発生せず、蓋の空いたフラスコからのみウジが生じた(ハエの出入りがあった)  
→昆虫も自然発生しない  
c.f. 微生物の発見~1674年  
③ スパランツァーニ(イタリア)  
→フラスコにスープをいれ煮沸、密封。→微生物は発生せず(1768)。⇨空気(や生気)が入らないためとの反論  
④ 19世紀:  
全ての生物に自然発生はない。Vs 微生物ならある。

### (2) 生命の自然発生説とパストゥールの実験

- ① フーシェ(ルーアン自然史博物館(仏)館長)  
→枯れ草を入れたフラスコを密封し、放置した後に枯草菌が発生する。  
② パストゥール(1822-1895)  
→パストゥールの自然発生説の否定の論文(1860年)  
→微生物であっても自然発生することはない



- (3) ダーウィンと生物進化+生命の起源  
① **ダーウィン(1809-1882)**  
→『種の起源』(1859年11月)  
→生物は単純なものから高等なものへと進化した。  
→最も、単純なものにはなに? その先は(生命の起源)?  
② **アレニウス(1859-1927)**  
→『パンスペルミア説(1908年, 『宇宙の始まり』)  
→宇宙空間に微生物の微小な萌芽が広く分散していて、それが宇宙空間を移動して地球にやってきた  
問題点  
① その宇宙に広がっている生命はどのようにして生じたのか?  
② 微生物が宇宙空間で生き続けられるのか?

(4) 生命の起源(地球上)についての科学的考察

① エングルス(1820-1895)

→1870年代~物質の進化的発展のみが生命起源を説明し得ると説く

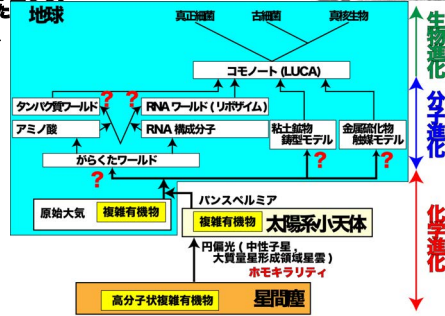
② オパーリン(1894-1980, ロシア, 化学者)

→化学的に生命の起源を考察『生命の起源』(1924年)

→①還元的大気条件(メタン, アンモニア, 水素)で有機物が生じ、さらにそれが海洋に溶け込み、複雑化し、コアセルベートのような細胞状の構造体が生じる。

②その中に取り込まれた

有機物は触媒を獲得し、原始スープの中で、自己維持機構を、さらに成長する能力を獲得するようになる(プロトビオント)。プロトビオントが生命へと進化する。

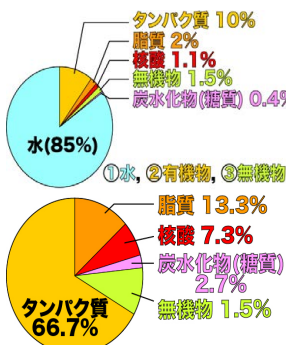


③ ホールデン(1892-1965, イギリス)

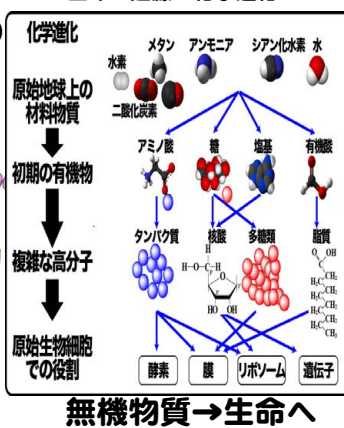
オパーリンと同様にイギリスで有機物の化学進化を提唱

生物の組成を作る組成

- ①水 ②タンパク質(アミノ酸)
- ③脂質(細胞膜) ④核酸(DNA, RNA)
- ⑤炭水化物(糖質, DNA, RNA, エネルギー) ⑥無機物



生命の起源—化学進化—



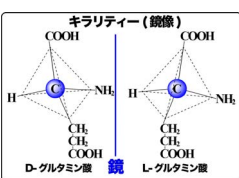
② タンパク質(←アミノ酸)

- ①生体の乾燥重量の6~7割 ②生体を構成する材料
- ③多機能性(多様な立体構造+アミノ酸配列の組み合わせが無限)

- 酵素(生体内で起こる化学反応の触媒)
- 伝達物質, 受容体(細胞同士が情報交換する際)としても重要な機能を担う

複合タンパク質:アミノ酸以外のものが複合しているタンパク質  
単純タンパク質:アミノ酸のみで構成されたタンパク質  
糖タンパク質:糖を結合したタンパク質  
リポタンパク質:脂質を結合したタンパク質

② タンパク質アミノ酸 (20種しかない) + L型 + 全てαアミノ酸



アミノ酸の機能による分類

分類	主な機能	例
構造タンパク質	からだの構造を支える	コラーゲン, α-ケラチン, エラスチン
酵素	化学反応の触媒	種々の酵素タンパク質
調節タンパク質	細胞増殖, 分化, 恒常性維持など	成長因子, ホルモンなど
収縮性タンパク質	筋肉の収縮	アクチン, ミオシンなど
輸送タンパク質	物質の輸送	トランスフェリン, Na-Kポンプなど
防御タンパク質	外傷因子から生体の防御	免疫グロブリン, 補体成分など
栄養タンパク質	生体の栄養分	ガゼインなど

α-アラニン (L型) アミノ基とカルボキシル基が同じ炭素に結合  
β-アラニン アミノ基とカルボキシル基が異なる炭素に結合

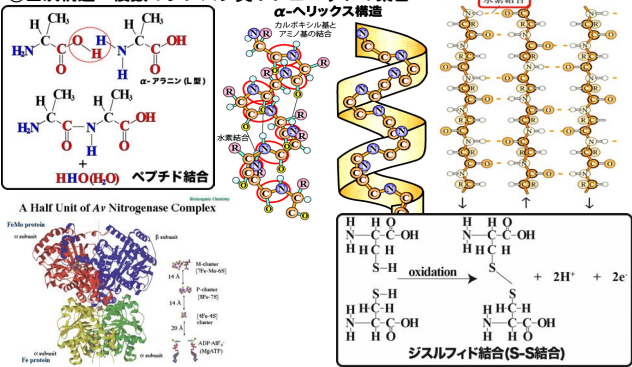
側鎖の炭素数	脂質炭化水素を側鎖とするアミノ酸	アミノ酸の種類	タンパク質中の割合
0	NH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -COOH	グリシン	全1種類 1種類
1	CH <sub>3</sub> -CH <sub>2</sub> -COOH	β-アラニン	全2種類 1種類
2	CH <sub>3</sub> -CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -COOH	α-アラニン	全5種類 0種類
3	CH <sub>3</sub> -CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -COOH	γ-アラニン	全9種類 1種類
4	CH <sub>3</sub> -CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -COOH	δ-アラニン	全12種類 2種類

タンパク質を構成するアミノ酸

側鎖の炭素数	アミノ酸	側鎖の炭素数	アミノ酸
0	グリシン(Gly)	0	プロリン(Pro)
1	アラニン(Ala)	1	セリン(Ser)
2	β-アラニン	1	チロニン(Thr)
2	α-アラニン	2	アスパラギン(Asp)
3	γ-アラニン	2	アスパラギン(Asn)
4	δ-アラニン	3	グルタミン(Glu)
		3	グルタミン(Asp)
		4	グルタミン(Gln)
		4	システイン(Cys)
		5	メチオニン(Met)
		6	フェニルアラニン(Phe)
		7	トリプトファン(Trp)
		8	ヒスチジン(His)
		9	リシン(Lys)
		10	アルギニン(Arg)
		11	チロニン(Tyr)

② タンパク質の構造(アミノ酸の結合)

- ペプチド結合による
- ①一次構造:直鎖状のアミノ酸残基
- ②二次構造:α-ヘリックス構造, β-シート
- ③三次構造:ジスルフィド結合(S-S結合), 疎水性相互作用, イオン結合
- ④四次構造:複数のタンパク質サブユニットの集合

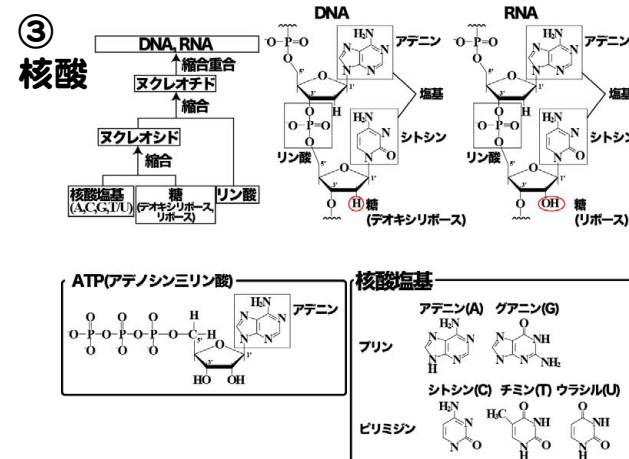
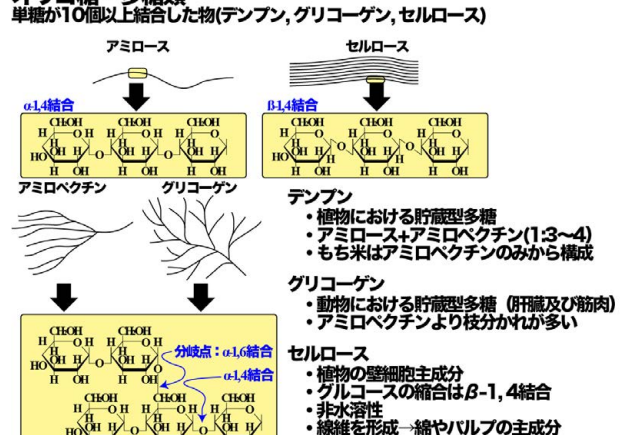


<糖質とは>

- ①C<sub>6</sub>(H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>), であらわされる構造を持つ化合物
- ②単糖:五炭糖(ペントース)



オリゴ糖・多糖類









**有機物の微生物による分解**

**好氧的分解**  
 $(\text{C}_2\text{H}_5\text{O}_2)(\text{NH}_4)_2\text{H}_2\text{PO}_4 + 294\text{O}_2 \Rightarrow 106\text{CO}_2 + 16\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{PO}_4 + 106\text{H}_2\text{O}$

**嫌氧的分解**

**マンガン還元**  
 $(\text{C}_2\text{H}_5\text{O}_2)(\text{NH}_4)_2\text{H}_2\text{PO}_4 + 2\text{Mn}^{2+} + 33\text{CO}_2 + 129\text{H}_2\text{O} \Rightarrow 48\text{HCO}_3^- + 16\text{NH}_3 + \text{HPO}_4^{2-} + 212\text{Mn}^{2+}$

**硫酸還元**  
 $(\text{C}_2\text{H}_5\text{O}_2)(\text{NH}_4)_2\text{H}_2\text{PO}_4 + 2\text{S}^{2-} + 8\text{CO}_2 \Rightarrow 7.2\text{CO}_2 + 98.8\text{HCO}_3^- + 16\text{NH}_3 + 42.4\text{N}_2 + \text{HPO}_4^{2-} + 49\text{H}_2\text{O}$

**鉄還元**  
 $(\text{C}_2\text{H}_5\text{O}_2)(\text{NH}_4)_2\text{H}_2\text{PO}_4 + 424\text{Fe}(\text{OH})_2 + 756\text{CO}_2 \Rightarrow 862\text{HCO}_3^- + 16\text{NH}_3 + \text{HPO}_4^{2-} + 424\text{Fe}^{2+} + 304\text{H}_2\text{O}$

**硝酸還元**  
 $(\text{C}_2\text{H}_5\text{O}_2)(\text{NH}_4)_2\text{H}_2\text{PO}_4 + 2\text{NO}_3^- \Rightarrow 39\text{CO}_2 + 67\text{HCO}_3^- + 67\text{HCO}_2^- + 16\text{NH}_3 + 42.4\text{N}_2 + 53\text{HS}^- + 39\text{H}_2\text{O}$

**メタン生成 (嫌酸還元)**  
 $(\text{C}_2\text{H}_5\text{O}_2)(\text{NH}_4)_2\text{H}_2\text{PO}_4 + 14\text{H}_2\text{O} \Rightarrow 39\text{CO}_2 + 14\text{HCO}_3^- + 3\text{CH}_4 + 16\text{NH}_3 + \text{HPO}_4^{2-}$

**発酵**  
 $(\text{C}_2\text{H}_5\text{O}_2)(\text{NH}_4)_2\text{H}_2\text{PO}_4 \Rightarrow 106\text{CH}_3\text{COOH} + 106\text{CH}_3\text{COOH} + 212\text{CH}_3\text{COOH} + 318\text{CO}_2 + 102\text{H}_2 + 192\text{NH}_3 + 12\text{H}_2\text{PO}_4$

**イオウを含む代謝**

$>2\text{S}^{2-} + 2\text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{H}_2\text{S} + 2\text{HCO}_3^-$	<b>硫酸還元</b>
$>2\text{S}^{2-} + 3\text{H}_2\text{O} + 2\text{H}^+ \Rightarrow 3\text{HS}^- + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}^+$	<b>硫酸還元</b>
$>2\text{S}^{2-} + 2\text{H}^+ \Rightarrow \text{HS}^- + \text{HS}^-$	<b>イオウ不活化反応</b>
$>2\text{S}^{2-} + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{HS}^- + \text{SO}_4^{2-}$	<b>硫酸還元不活化反応</b>
$>2\text{S}^{2-} + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{HS}^- + \text{SO}_4^{2-}$	<b>イオウ硫酸不活化反応</b>

**メタンを含む代謝**

$\text{CH}_4 + \text{CO}_2 \Rightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2\text{O}$	<b>メタン酸化 (好氧的メタン酸化)</b>
$\text{CH}_3\text{COOH} + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{CH}_4 + \text{HCO}_3^-$	<b>メタン生成 (嫌酸還元型メタン生成)</b>

**微生物による有機物の固定**

**窒素固定**  
 $\text{N}_2 + 5\text{H}_2\text{O} \Rightarrow 2\text{NH}_3 + 2\text{OH}^- + 1.5\text{O}_2$

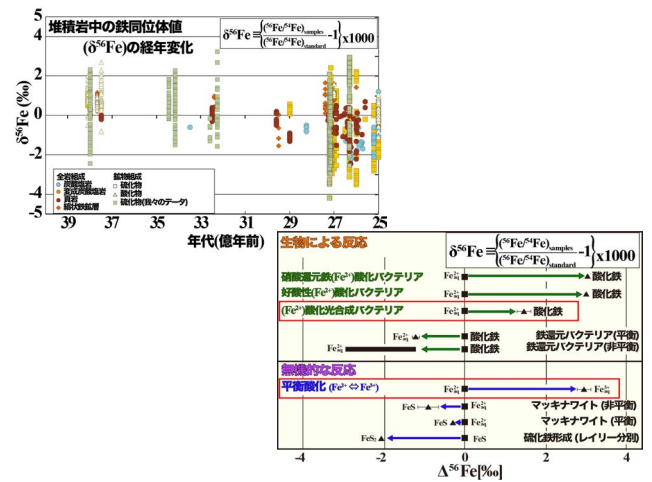
**炭素固定**

$4\text{H}^+ + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow 4\text{H}(\text{OH}) + (\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_2 + 2\text{H}^+$	<b>嫌氧的光合成-鉄酸化</b>
$4\text{H}^+ + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{CH}_2\text{O} + 4\text{H}(\text{OH}) + 8\text{H}^+$	<b>嫌氧的光合成-鉄酸化</b>
$4\text{H}^+ + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow 4\text{H}(\text{OH}) + \text{N}_2 + 18\text{H}^+$	<b>嫌氧的光合成-鉄酸化</b>

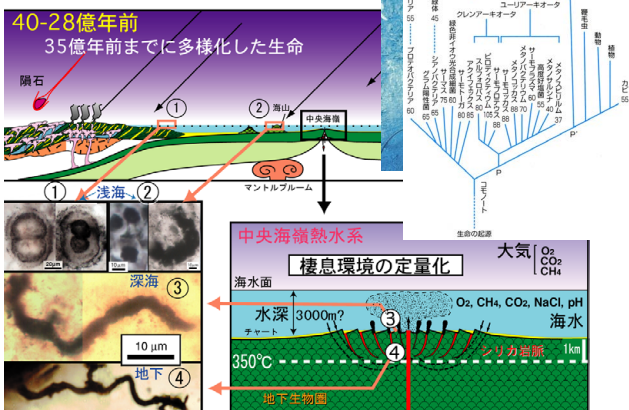
**光合成**  
 $106\text{CO}_2 + 122\text{H}_2\text{O} + 104\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow (\text{C}_2\text{H}_5\text{O}_2)(\text{NH}_4)_2\text{H}_2\text{PO}_4 + 138\text{O}_2$  **酸素発生型光合成**

**イオウを含む代謝**

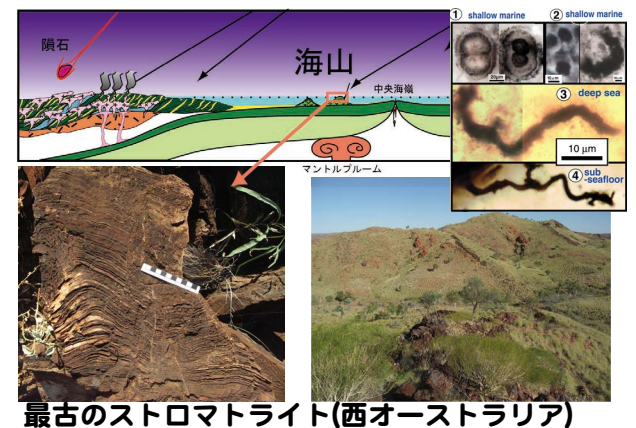
$\text{CH}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} + 2\text{S} \Rightarrow \text{HS}^- + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{S}$	<b>嫌氧的光合成-硫酸還元</b>
$\text{HS}^- + 2\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow 3\text{CH}_2\text{O} + 2\text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}^+$	<b>嫌氧的光合成-イオウ酸化</b>
$\text{HS}^- + 3\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{HCO}_3^- + \text{HS}^- + \text{H}_2\text{O}$	<b>メタン酸化 (嫌氧的メタン酸化)</b>
$\text{HS}^- + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{H}_2\text{S} + \text{H}^+$	<b>メタン生成 (炭酸還元型メタン生成)</b>
$\text{CO}_2 + 4\text{H}^+ \Rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	<b>メタン生成 (炭酸還元型メタン生成)</b>
$4\text{H}^+ + \text{CO}_2 + 2\text{H}^+ \Rightarrow 2\text{H}_2 + \text{H}_2\text{O}$	<b>化学合成-鉄酸化</b>
$\text{Mn}^{2+} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{HCO}_3^- + \text{HS}^- + \text{H}_2\text{O}$	<b>メタン酸化 (嫌氧的メタン酸化)</b>
$\text{CH}_4 + \text{SO}_4^{2-} \Rightarrow \text{HCO}_3^- + \text{HS}^- + \text{H}_2\text{O}$	<b>メタン酸化 (嫌氧的メタン酸化)</b>



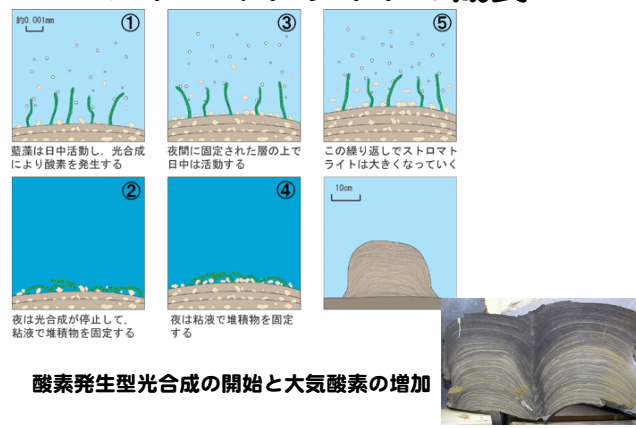
**40~35億年前ー深海からー**



**35億年前ー生命の多様化, 光合成の開始ー**



**ストロマトライトの成長**



**27億年前頃の地球磁場の発達**  
浅海に大規模に光合成生物(シアノバクテリア) → 海水/大気中の酸素の増加

