

# 生物多様性学II ～生命・地球環境進化～ (第四回目)

-生命の化学進化とパンスペルミア-

東京大学総合文化研究科：  
小宮 剛 准教授  
2014/10/28

## (1) 生命の自然発生説とパストゥールの実験

① **プーシェ(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閉し、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

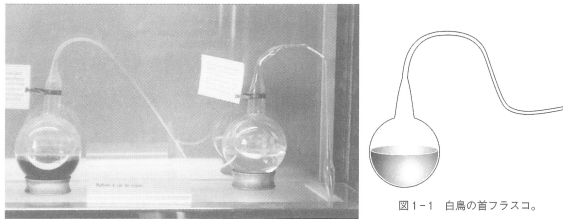


図1-1 白鳥の首フラスコ。

## (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』～動物植物を問わず親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。

## (1) 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？

## (1) 生命の起源(地球上)についての科学的考察

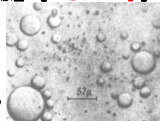
① **エンゲルス(1820-1895)**  
→1870年代～物質の進化的発展のみが生命起源を説明し得ると説く。

② **オーバーリン(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)

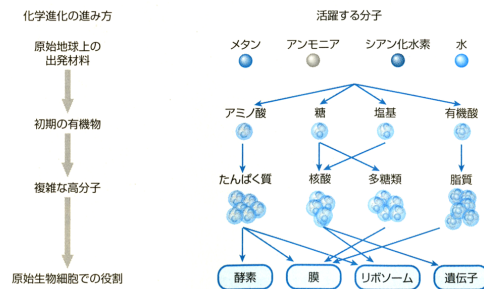
→①還元的な大気条件(メタン, アンモニア, 水素)で有機物が生じ、さらにそれが海洋に溶け込み、複雑化し、コアセルベートのような細胞状の構造体が生じる。

②その中に取り込まれた有機物は触媒能を獲得し、原始スープの中で、自己維持機能を、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)**  
オーバーリンと同時期にイギリスで同様の化学進化を提唱



## 生命の起源—化学進化—



メタン、アンモニア、シアン化水素、水から、アミノ酸、糖、塩基、有機酸が合成される。これらからたんぱく質、核酸、多糖類、脂質がつくられ、酵素、膜、リボソーム、遺伝子といった生命体をつくる物質になる。

無機物質→生命へ

## アミノ酸の合成

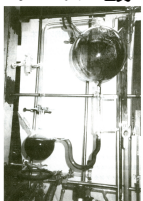
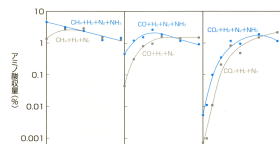
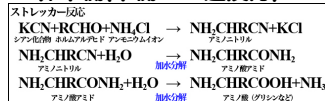


図1-2 ミラーの実験

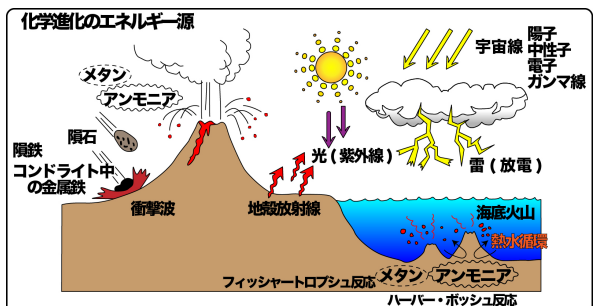


図表の1916年以前、メタン=還元性大気、あるいは還元性大気(0.1%の還元性)を混合した気体にて、さまざまな割合で水素を加えた気体を準備し、ミラーの行った実験で生成したアミノ酸の収量、縦軸は実験時の気体量に対するアミノ酸中の収量の割合、いずれの場合も水素の割合が低くなるほど収量が低くなる。Schonk "Major Events in the History of Life" (1952) に基づく。

①水素を含む様な還元的な条件下でアミノ酸が形成される  
②生成物を系から除く機構  
→非平衡(平衡だと逆反応)



## アミノ酸の合成



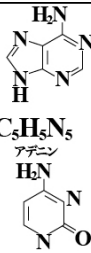
## その他の材料物質の合成の合成

### 核酸塩基の生成

#### プリン塩基 (アデニン, グアニン)



#### ピリミジン塩基 (シトシン, ウラシル, チミン)



### 糖の生成



## 生命の起源物質の合成は可能？問題点は

化学進化の進み方

原始地球上の  
出発材料

初期の有機物

複雑な高分子

原始生物細胞での役割

たんぱく質

核酸

酵素

膜

リボソーム

遺伝子

メタン、アンモニア、シアン化水素、水から、アミノ酸、糖、塩基、有機酸が合成される。これらからたんぱく質、核酸、多糖類、脂質がつくられ、酵素、膜、リボソーム、遺伝子といった生命体をつくる物質になる。

- ①初期大気の問題
- ②加水分解の問題
- ③高度の実験
- ④最適なpHなどの条件
- ⑤阻害分子の除去

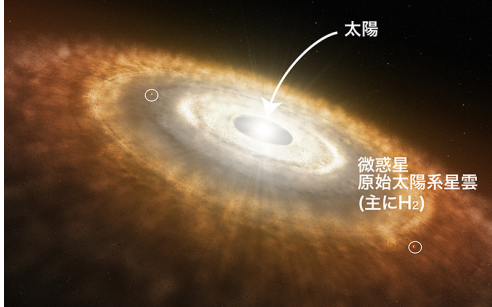
- ⑥ワンポット合成とステップワイス合成
- ⑦正しい結合を必要とする。異性体が多く生じる。
- ⑧光学異性体

## ①初期大気の問題

### 地球型惑星大気の形成過程

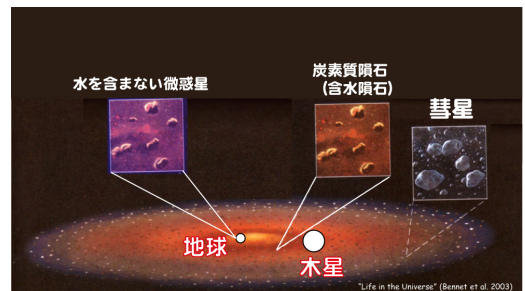
#### 一次大気モデル 1

太陽系形成時



## 水 (海) の起源

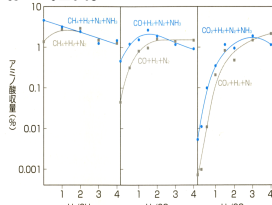
### 二次大気モデル(衝突脱ガス)



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

## ②他の地球型惑星の大気の組成

金星	成分	濃度 (bars)	存在比 (%)	
90 bar	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>	
	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	
	Ar	0.0094	0.93	
1 bar	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	



金星0.1316気圧に、メタン、一酸化炭素、あるいは二酸化炭素を0.1316気圧ずつ混合した気体に、さまざまな割合で水を添加した気体を準備し、ミラー効果で発生したアミノ酸の収量。収量は実験的な条件に依存するアミノ酸の割合の関数、いずれの場合も収量は増加する。収量は増加する。Schopf 'Major Events in the History of Life' (1982) に基づく。

他の惑星はCO<sub>2</sub>が多い。地球大気はO<sub>2</sub>が特徴的

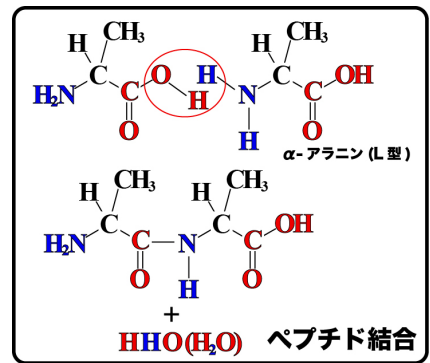
初期大気組成は弱還元的

CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>

CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, (H<sub>2</sub>)などの還元的成分は乏しい

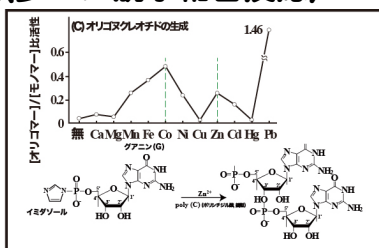
## ②高分子化(多くは脱水縮合反応)

①アミノ酸からタンパク質の合成: ペプチド結合による



## ②高分子化(多くは脱水縮合反応)

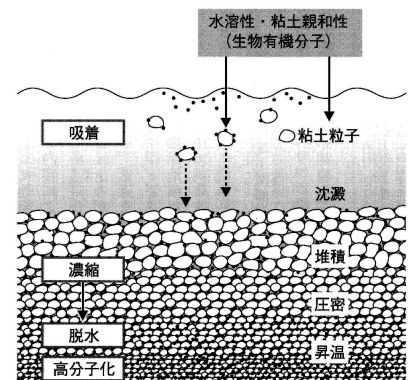
①金属イオンの効果



種類	イオン	濃度 [M]
陰イオン	HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.01
	Cl <sup>-</sup>	0.07
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.005
主要成分	Na <sup>+</sup>	0.015
	金属イオン K <sup>+</sup>	0.05
微量金属イオン	Zn <sup>2+</sup> , MoO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , Fe <sup>2+</sup> , Cu <sup>2+</sup> , Co <sup>2+</sup> , Mn <sup>2+</sup>	0.0001

## ②高分子化(多くは脱水縮合反応)

①地下(高温高圧下+粘土鉱物の役割)での合成





# ①宇宙線照射によるアンモニアと有機化合物合成

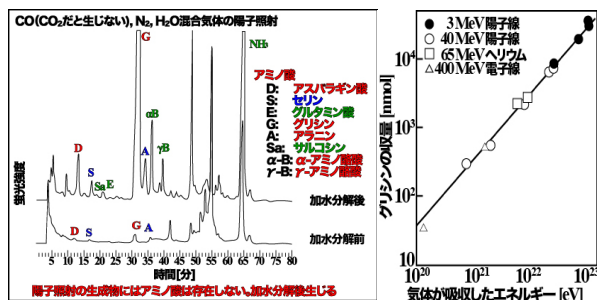
**窒素分子の解離**  
 $N_2 \rightarrow N+N$  945 (kJ/mol, 127 nm, 真空紫外～極端紫外)

**アンモニア分子の解離**  
 $NH_3 \rightarrow NH_2+H^+$  386 (kJ/mol, 310nm 紫外線)

**イオン化**  
 $N_2 \rightarrow N_2^++e^-$

**化学進化のエネルギー源**

# ①宇宙線照射によるアンモニアと有機化合物合成



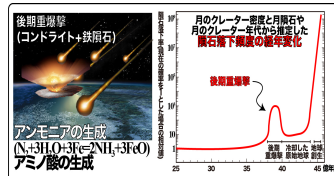
# ①宇宙線照射によるアンモニアと有機化合物合成

種々のエネルギーによる弱還元型原始大気(CO, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O大気)からのアミノ酸生成率

エネルギー源	エネルギー推定値 [eV/m <sup>2</sup> /yr]	グリシンのエネルギー収率 [分子/eV]	グリシンの生成率 [分子/m <sup>2</sup> /yr]
太陽からの輻射全体	6.8x10 <sup>28</sup>	0	0
λ<200nm(真空紫外線)	2.2x10 <sup>25</sup>	0	0
λ<150nm(真空紫外線)	9.1x10 <sup>23</sup>	0	0
λ<110nm(真空紫外線)	4.2x10 <sup>22</sup>	0	0
λ<10nm(X線)	4.2x10 <sup>22</sup>	8x10 <sup>-5</sup>	3x10 <sup>17</sup>
雷	1.8x10 <sup>22</sup> ~1.0x10 <sup>24</sup>	7x10 <sup>-9</sup>	1x10 <sup>13</sup> ~7x10 <sup>15</sup>
火山熱	3.4x10 <sup>22</sup>	0	0
宇宙線	2.9x10 <sup>21</sup>	2x10 <sup>-4</sup>	6x10 <sup>17</sup>
隕石衝突	1.0x10 <sup>22</sup>	2x10 <sup>-7</sup>	2x10 <sup>15</sup>

# ②隕石衝突モデル

- ①衝撃波によるアミノ酸合成
- ②還元物質(Fe)の供給によるアンモニア合成



試料名	実験試料(N <sub>2</sub> )	実験試料(H <sub>2</sub> )	
Fe (mg)	200	200	
Ni (mg)	20	20	
<sup>13</sup> C (mg)	30	30	
H <sub>2</sub> O (mg)	130	130	
NH <sub>4</sub> q (mmol)	0	1.95	
N <sub>2</sub> (μmol)	15	15	
衝突速度 (km/s)	0.9	0.9	
<sup>13</sup> C-エタン酸	1360	2200	
<sup>13</sup> C-プロピル酸	440	1020	
<sup>13</sup> C-ブタン酸	88	198	
<sup>13</sup> C-ペンタン酸	24	22	
<sup>13</sup> C-ヘキサン酸	ND	tr.	
<sup>13</sup> C-2-メチルプロピル酸	検出	検出	
<sup>13</sup> C-メチルアミン	7430	16700	
<sup>13</sup> C-エチルアミン	280	945	
アミン	<sup>13</sup> C-プロピルアミン	12	89
	<sup>13</sup> C-ブチルアミン	未検出	微量検出
アミノ酸	<sup>13</sup> C-グリシン	未検出	24

# ①核酸塩基の合成

混合気体からの核酸塩基の合成

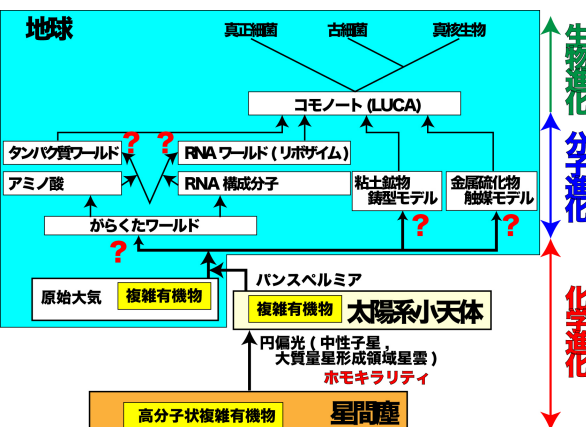
出発物質	エネルギー源	生成する主要核酸塩基
	電子線	アデニン
メタン+アンモニア+水(強還元)	火花放電	アデニン, グアニン
メタン+窒素+水(アンモニウムイオン)	火花放電	シトシン, チミン
一酸化炭素+アンモニア+水	陽子線照射	シトシン, ウラシル
一酸化炭素+メタン+アンモニア+水	陽子線照射	シトシン, グアニン
二酸化炭素+メタン+窒素+水(弱還元)	陽子線照射	ウラシル, チミン
一酸化炭素+窒素+水(弱還元)	高温プラズマ放電	ウラシル, シトシン, グアニン

# 生命原材料物質は宇宙起源? —パンスペルミア



マーチソン隕石

隕石の有機物と放電実験比較		
アミノ酸	マーチソン隕石	放電
グリシン	○○○○	○○○○
アラニン	○○○○	○○○○
α-アミノ-n-酸	○○	○○○○
α-アミノ酸	○○○○	○○
バリン	○○	○○
β-バリン	○○	○○
イソバリン	○○	○○
プロリン	○○○	○
ピペリン酸	○	x
アスパラギン酸	○○○	○○○
グルタミン酸	○○○	○○○
β-アラニン	○○○	○○○
β-アミノ-n-酸	○	○
β-アミノ酸	○	○
γ-アミノ酸	○	○○
サルコシン	○○	○○○
N-エチルグリシン	○○	○○○
N-メチルアラニン	○○	○○



# 生命出現の場所

- ① 深海・熱水環境 **脱水縮合反応**
- ①' 海底の粘土層 **紫外線**
- ② 干潟→prebiotic moleculeの形成(粘土鉱物, 脱水縮合)
- ③ 陸上の熱水環境 (Yellowstone)
- ③' 陸上の熱水環境 + 気液分離 & 気相濃集泥湖沼
- ④ 初期大陸(斜長岩+KREEP)

