

## 7. 宇宙生物を形作る炭素化合物は二酸化炭素から

### 宇宙に存在する主な炭素化合物は二酸化炭素

宇宙生物が炭素を中心元素とする有機化合物で構成されており、水の海の中に誕生し進化するものと考えられることから、その素材は水に対する溶解度の高いアルコール類、アミン類、カルボン酸やりん酸やスルホン酸などの酸類の何れかであろうと考えられます。そこで、このような素材となる物質が、宇宙に大量に存在する簡単な物質からどのように出来てきたか考えることは大切なことと思われます。

表 2 - 5 に示す太陽系の惑星の大気の組成表から金星と火星の二酸化炭素の割合が非常に高く、その間に挟まった地球の大気だけに二酸化炭素の割合が極端に低くなっています。また、地殻を構成している火成岩と堆積岩の 2 種類の岩石の中に含まれる二酸化炭素を比較してみると、表 7 - 1 に示すように二酸化炭素は極端に堆積岩の中に偏在しています。本来、地殻を構成していた火成岩が風化して水に溶けたり砂のように細かく変化し、水とともに移動して別の場所に溜まり固まって堆積岩が出来てきます。火成岩の成分のこの移動の間に、水に溶けている二酸化炭素が炭酸としてカルシウムイオンと反応し、炭酸カルシウムとして沈殿しました。このとき、大気中の二酸化炭素は雨などで洗われるため、次々と水に溶けて炭酸を供給しますから、カルシウムイ

表 7 - 1 地球の地殻の組成成分

	火成岩	堆積岩	全地殻
SiO <sub>2</sub>	59.12	57.95	58.87
TiO <sub>2</sub>	1.05	0.57	0.95
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.34	13.39	14.92
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.08	3.47	3.16
FeO	3.80	2.08	3.43
MnO	0.12	0.00	0.10
MgO	3.49	2.65	3.31
CaO	5.08	5.89	5.26
Na <sub>2</sub> O	3.84	1.13	3.25
K <sub>2</sub> O	3.13	2.86	3.07
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.30	0.13	0.26
H <sub>2</sub> O	1.15	3.23	1.60
CO <sub>2</sub>	0.10	5.33	1.24

オンがほとんど水の中になくなるまで、炭酸カルシウムが沈殿してゆきます。この沈殿が堆積岩として地殻の一部を構成するため、地球の大気中からは二酸化炭素が極端に減り、堆積岩中に濃縮してしまったものと考えられています。現に、金星の大気中の二酸化炭素は  $4.0 \times 10^{20}$  kg と推定されていますが、地球の大気に含まれる二酸化炭素の総量は  $1.8 \times 10^{15}$  kg、堆積岩中に固定化されている二酸化炭素は約  $1.8 \times 10^{20}$  kg と見積もられています。この見積もりからも、生まれたての地球には金星と同じ程度の二酸化炭素が大気中に含まれていたと考えられ、地球を覆っている海の大量の水のために、大気中の二酸化炭素が堆積岩として固定化したものと思われる。太陽系のこれらの 3 つの惑星のことだけで遠い宇宙の天体の大気を類推することは非常に危険ですが、冷えて固まった多くの天体には多量の二酸化炭素が存在することが考えられます。さらに、その天体に存在する炭素の元素は二酸化炭素の形でも存在しているのではないかと思います。

#### 水の中への二酸化炭素と酸素の溶け方

宇宙の生物が誕生し進化できるような冷えて固まった天体に存在する炭素の元素は二酸化炭素の形でも存在しているのではないかと思います。宇宙生物を構成している物質が炭素を中心元素とする有機化合物であると考えられますから、二酸化炭素がどのくらい水に溶けるか少し詳しく調べることは大切なことと思われます。表 7-2 には純粋の水ばかりでなく、酸や塩基や塩など宇宙の彼方の天体の海に溶けているかもしれないような物質の水溶液に対する二酸化

表 7-2 無機化合物水溶液に対する二酸化炭素、酸素の溶解度(g/L, 15 )

無機化合物		二酸化炭素		酸素	
		0.5N	1N	0.5N	1N
(濃度)					
なし		1.992		0.049	
塩酸	HCl	1.943	1.913	0.047	0.044
硫酸	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1.896	1.821	0.046	0.043
硝酸	HNO <sub>3</sub>	2.008	2.021	0.047	0.046
水酸化ナトリウム	NaOH			0.039	0.031
水酸化カリウム	KOH			0.039	0.032
食塩	NaCl			0.042	0.035
塩化カリウム	KCl	1.817	1.670		
ヨウ化カリウム	KI	1.846	1.719		
硝酸カリウム	KNO <sub>3</sub>	1.872	1.762		
硫酸カリウム	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>			0.040	0.032

炭素の溶け方もまとめておきました。この表を見る限りでは、純粋の水に対する溶解度と比較して、水に溶けている物質が酸でも塩基でも塩でもあまり二酸化炭素の溶け方に大きな影響を与えているようには見えません。さらに、水に溶けている物質が多少濃くなっても影響が見られません。このことは生物が誕生し、進化する海に如何なる物質が既に溶け込んでいても、二酸化炭素が大切な炭素源として生体を構成する物質の原料になるものと考えられます。

### 酸化反応と還元反応

多くの天体で二酸化炭素が最も広く多量に存在する炭素化合物であろうと思われましたから、二酸化炭素が宇宙の生物を構成する種々の有機化合物の原料となるものと考えられます。この二酸化炭素は炭素の化合物の中で最も酸化反応が進んでいますから、これ以上には酸化され得ません。二酸化炭素から主に還元反応により種々の有機化合物へ変化してゆくものとおもわれます。そこで、還元反応とその逆反応の酸化反応について少し考えてみることにしました。酸化反応と還元反応には大切な基本的な2つのことがあります。基本的な第1点は、酸化反応は物質を構成する原子に電子が加わり増加する反応であり、還元反応は物質を構成する原子から電子を出して原子自体は電子の減る反応であることです。酸化される原子と酸化する原子が反応するとき、酸化する原子から酸化される原子へ電子の遣り取りが起こります。つまり、この反応系では酸化される原子の酸化反応と酸化する原子の還元反応が同時に起こることになります。この酸化還元反応の電子の遣り取りを電池という形で利用すれば、化学反応から電気エネルギーを生み出すことになります。また、系内に電気を通すことで強制的に電子の遣り取りを助けてやることにより、酸化還元反応を起こさせることが出来ます。このような反応を電気分解あるいは電気化学反応と呼んでいます。

金属が金属イオンに変化するときには金属元素は電子を放出するため、酸化・還元反応が電子の遣り取りと定義されていることから、金属元素は酸化されたこととなります。反対に金属イオンから金属になる変化は還元反応となります。さらに、鉄、ニッケル、コバルト、錫、銅などの遷移金属と呼ばれる金属では異なる価数をもつ複数のイオンが安定に存在します。これらのイオンで価数が変化することは、やはり電子の出入りが金属元素に起こりますから酸化あるいは還元反応になります。例えば2価の鉄のイオンは酸化されて3価の鉄のイオンへ変化しますし、還元されて金属の鉄に戻ります。基本的な第2点は、このように多くの物質には多段階の酸化の状態があり、酸化する性質と酸化される性質を兼ね備えた物質も存在することです。

このような多段階の酸化状態は炭素を中心とする物質にも存在します。二酸化炭素は1つの炭素原子からなる最も酸化された状態の物質であり、1段階還元されると蟻酸になります。この蟻酸はさらにホルムアルデヒドに還元されます。ホルムアルデヒドは酸化されれば蟻酸に戻りますが、還元されればメタノールを生成します。このメタノールは炭化水素のメタンまでもう1段階還元されます。つまり、炭素には二酸化炭素から炭化水素までの間に3種の酸化状態の違う中間の物質があります。これらの5段階の酸化状態の間は相互に酸化反応あるいは還元反応により変換されます。多段階の酸化状態は酸素、窒素、りん、硫黄などの非金属元素にも同じように存在しま

す。このような多段階の酸化状態を持つ2種類の物質が反応するときには、酸化される物質がどちらなのかきわめて複雑で判り難くなります。そのため、反応を実際にしなくても酸化反応の状態がわかるように酸化還元電位により酸化する強さを表すようにしています。酸化反応はその酸化還元電位よりも大きな酸化還元電位を持つ酸化剤で進行しますので、多くの酸化剤の酸化還元電位を表7-3にまとめました。

表 7 - 3 種々の物質の酸化還元電位(V)

酸化剤	生成物	酸化還元電位	酸化剤	生成物	酸化還元電位
Ca <sup>2+</sup>	Ca 金属	-2.76	FAD	FADH <sub>2</sub>	-0.22
Na <sup>+</sup>	Na 金属	-2.71	CO <sub>2</sub>	蟻酸	-0.20
Mg <sup>2+</sup>	Mg 金属	-2.38	ピルピン酸	乳酸	-0.19
K <sup>+</sup>	K 金属	-2.29	Fe <sup>3+</sup>	Fe 金属	-0.04
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	-0.92	H <sup>+</sup>	H <sub>2</sub>	0.00
SiO <sub>2</sub>	Si 金属	-0.84	ユビキノ	ユビキノール	0.05
Zn <sup>2+</sup>	Zn 金属	-0.76	シクロローム(Fe <sup>3+</sup> )	シクロローム(Fe <sup>2+</sup> )	0.29
酢酸	アセトアルデヒド	-0.58	Cu <sup>2+</sup>	Cu 金属	0.34
Cr <sup>2+</sup>	Cr 金属	-0.56	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0.42
S	S <sup>2-</sup>	-0.51	H <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	S	0.45
CO <sub>2</sub>	シュウ酸	-0.49	Fe <sup>3+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	0.77
Cr <sup>3+</sup>	Cr <sup>2+</sup>	-0.41	Ag <sup>+</sup>	Ag 金属	0.80
Fe <sup>2+</sup>	Fe 金属	-0.41	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO	0.96
シスチン	システイン	-0.34	Br <sub>2</sub>	Br <sup>-</sup>	1.07
NAD <sup>+</sup>	NADH	-0.32	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	1.23
Co <sup>2+</sup>	Co 金属	-0.28	Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> <sup>2-</sup>	Cr <sup>3+</sup>	1.33
Ni <sup>2+</sup>	Ni 金属	-0.23	Cl <sub>2</sub>	Cl <sup>-</sup>	1.36

#### 宇宙生物を構成する物質は二酸化炭素から水素で還元して作られる

多くの天体で二酸化炭素が最も広く多量に存在する炭素化合物であり、二酸化炭素が宇宙の生物を構成する種々の有機化合物の原料となるものと考えられます。この二酸化炭素は炭素の化合物の中で最も酸化反応が進んだ高い酸化状態ですから、二酸化炭素から主に還元反応により種々の有機化合物へ変化してゆくものとおもわれます。地球上の生物は植物と動物に大別されますが、植物は高い酸化状態の二酸化炭素を体内で還元して生体を構成する低い酸化状態の物質に自給自足しています。動物は生体を構成する低い酸化状態の物質を自給自足することなく、すでに植

物などが生産した低い酸化状態にある物質を食物として取り込みます。これらの生体を構成する低い酸化状態の物質は生命活動の維持に必要な不可欠ですが、宇宙生物が低い酸化状態の物質を自給自足することは必ずしも容易ではありません。すべての宇宙生物がこのような物質を生産するとは思われませんが、かなりの種類の宇宙生物は活力の源となる物質を自給自足していると考えられます。生体を構成する低い酸化状態の物質が二酸化炭素から生み出される経路としては、より還元状態にある物質が作用するか、逆反応に十分なエネルギーを加えることにより、高い酸化状態の物質を還元する経路があると思われます。

水素分子は宇宙に大量に存在し、より還元状態にある物質として、高い酸化状態の物質を還元する働きが期待できます。表 2 - 5 で示すように太陽系の中でも、木星、土星、天王星、海王星では大気の 80%以上は気体の水素です。このように大量の水素が存在する天体においては、気体の水素が宇宙生物を構成する低い酸化状態の物質を二酸化炭素から生産する反応に十分な還元剤となりうると考えられます。この水素を還元剤とする反応においては、鉄やニッケルを含む物質が有効な触媒として働くものと思われます。

#### 宇宙生物を構成する物質は光の働きで作られる

大量の水素が存在する天体においては、気体の水素が宇宙生物を構成する物質を二酸化炭素から生産する反応に十分な還元剤となりうると考えられます。しかし、水素分子は質量が小さいため拡散力が相対的に大きな気体です。表 7 - 4 に示すように質量の小さな天体ではその万有引力が弱く、その天体からの脱出速度が小さいため、水素分子をその天体の固有の気体として保持することが出来ません。太陽系の中でも、金星、地球、火星にはほとんど水素分子が大気中に含まれていません。このような水素の存在が少ない天体では、宇宙生物は外部からエネルギーを供給す

表 7 - 4 太陽系の星の形

	太陽から受けるエネルギー (地球=1)	有効温度 ( )	半径 km	体積 (地球=1)	質量 (地球=1)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	脱出速度 (km/s)
太陽			696000	1304000.000	332946.000	1.41	617.50
水星	6.6700		2439	0.056	0.055	5.43	4.25
金星	1.9100	462	6052	0.857	0.815	5.24	10.36
地球	1.0000	22	6378	1.000	1.000	5.52	11.18
火星	0.4300	-23	3397	0.151	0.107	3.93	5.02
木星	0.0370	-149	71398	1316.000	317.832	1.33	59.57
土星	0.0110	-179	60000	745.000	95.160	0.70	35.56
天王星	0.0027	<-214	25560	63.000	14.540	1.27	21.29
海王星	0.0011	-214	24760	58.000	17.150	1.64	23.49
冥王星	0.0006		1142	0.006	0.002	2.07	1.23
月	1.0000		1738	0.029	0.012	3.34	2.38

ることで高い酸化状態の物質の還元により構成する物質を供給すると思われます。

このような化学反応に利用できるエネルギー源としては熱エネルギーと光エネルギーと電気エネルギーが考えられます。フラスコの中の人工的な条件では、連続的に電気エネルギーを利用した電気化学反応が可能ですが、雷以外に天然に有効に利用できる電気エネルギーはほとんどありませんから、宇宙生物の利用できるエネルギー源は熱エネルギーと光エネルギーに限られます。さらに、熱エネルギーを利用する還元反応ではかなり過激な条件を必要としますから、このような水素の存在が少ない天体の宇宙生物は、光エネルギーを利用した還元により構成する物質を供給すると思われます。表 7 - 4 には太陽から受ける光エネルギーの量を示しておきましたが、地球より内側の軌道を持つ惑星は十分なエネルギーの供給を受けることが出来るように思われます。式 7 - 1 に示すように電磁波のエネルギーはその波長に反比例するため、短い波長の光ほど高いエネルギーを持っています。ただし、 $E$  はエネルギー(kcal/mol)、 $h$  はプランク定数、 $\lambda$  は波長 (cm)、 $c$  は光の速さ(cm/s)を表しています。X 線や  $\gamma$  線のようにきわめて短い波長の電磁波は宇宙生物を形作っている物質の共有結合を切断するに十分な高いエネルギーを持っています。短波長の紫外線でも共有結合を切断してしまいます。逆に波長の長い赤外線は物質を還元するには不十分なエネルギーしか与えません。250nm よりも長波長の紫外線と可視光線が 2 重結合のみを切断するため、多重結合を持つ物質を還元するのに適当なエネルギーを持つ光と考えられます。その波長の光を最も効率よく吸収する物質は補色の色をした物質ですから、還元反応に有効な波長の領域の光を最も効率よく吸収する物質は黄色から緑色をしています。ちなみに、地球上の植物はその生体を構成する糖類やでんぷんを生産するために葉緑素という緑色の物質を介して光エネルギーを利用しています。

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

式 7 - 1 光エネルギーと波長の関係式