

宇宙の生物を化学する

改訂版

鹿島 長次

(2005.3)

目次

1. まえがき	5
近年地球に來た宇宙生物	5
生物とは.....	6
2. 宇宙生物も化学反応で生きている	7
宇宙の元素は何種類か	7
高い温度で燃えている天体の元素.....	13
冷えて固まった天体の元素.....	15
宇宙生物は分子で出来ている	16
3. 宇宙生物を形作る元素の性質	20
元素の手の数	20
液体に溶けても切れない結合	21
単結合と多重結合	23
共有結合のイオン結合性	24
連続的な元素の鎖	28
4. 宇宙生物の生命活動を維持する化学反応	30
生命を維持するエネルギー	30
生命を維持する化学反応	31
生命を構成する元素	32
5. 生物を育む海	34
宇宙生物の生活温度	34
出会いの反応と別れの反応.....	34
物質は固体、液体、気体の3つの状態	35
生物誕生は溶液中で	36
生物が誕生し進化する溶液.....	37
生命が誕生し進化する海	42
生命活動と温度変化	43
生命活動に必要な物質を産み出す海	44
海の酸性度	45
6. 宇宙生物を構成する素材は水溶性	48
液状の水の構造.....	48

宇宙生物の生活環境は - 10 以上	49
液状の水の中での物質の挙動	50
炭素 - 酸素結合を持つ物質の水溶性	53
炭素 - 窒素結合を持つ物質の水溶性	54
炭素 - 酸素、炭素 - 窒素以外の結合を持つ物質の水溶性	55
水に溶ける部分と溶けない部分を持つ物質の挙動	56
長い分子の構造を持つ物質の挙動	56
イオン性の物質の水溶性	57
宇宙生物の素材となる物質の種類	58
7. 宇宙生物を形作る炭素化合物は二酸化炭素から	59
宇宙に存在する主な炭素化合物は二酸化炭素	59
水の中への二酸化炭素と酸素の溶け方	60
酸化反応と還元反応	61
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	62
宇宙生物を構成する物質は光の働きで作られる	63
8. 宇宙生物はフラスコの中で形作られる	65
宇宙生物を形作る反応は可逆平衡反応	65
宇宙生物を形作る反応は水の中のフラスコで	65
9. 水に溶ける素材から宇宙生物を形作る反応	68
炭素上で起こる化学反応	68
炭素=酸素 2 重結合の上の反応	69
炭素の鎖はアルドール型反応で	70
宇宙生物の主要素材は高分子物質	71
宇宙生物を構成する高分子物質の種類は何か	73
10. 宇宙生物の活力	76
活力となるエネルギーは酸化反応から	76
活力を生み出す酸化反応は酸素で	78
11. 宇宙生物の進化の情報伝達の仕組み	79
記憶情報の読み出しは水素結合で	79
進化の情報の記憶媒体は芳香族化合物	80
記憶媒体は芳香族複素環化合物	81
主な記憶素子はアデニン	83
12. 宇宙生物は左利き	85

左手と右手	85
自然の中の鏡像の関係	86
13. 宇宙生物と地球上生物の比較	88
宇宙生物の全体像	88
宇宙の生物と地球上の生物	89

1. まえがき

近年地球にきた宇宙生物

地球上では 38 億年前に生物が発生し、それから多くの生物に進化し、現在は人間が威張って我が物顔をして生活しています。近年になって、火星、ET、ヨーダ、デスラー総統、クラーク・ケントなどがその地球に宇宙からやって来ましたが、その例は少なく宇宙のかなたにはどんな生物が生活し、大きな顔をして繁栄しているのかあまり分っていません。火星人はインベーダー（侵略者）として地球にやってきた初の宇宙の生物で、H.G. Wells の紹介した姿が国立科学博物館に残っていますので、図 1-1 に示しておきます。火星の重力が小さいため足は細く、太陽光が弱くても物がよく見える



図1-1 H.G.ウェルズの紹介した火星

ように目が大きく、砂嵐から目を守るためその目はゴーグルのようなもので覆われています。火星の大気が 0.006 気圧ほどしかなく大変に薄いので大きな頭に見える肺を持ち、ほかの生き物から直接養分を吸い取るので、消化器を持っていません。

ET も頭でっかちで体は小さく、手の指の長いのが印象的でしたが、内気であまり運動能力に優れていなかったように思います。ヨーダも頭でっかちでしたが、体格には恵まれていたように記憶しています。マゼラン星雲の「ガミラス帝国」を一手に支えるデスラー総統は顔色が青色な点をのぞき、地球上の人間と大差はありませんでした。さらにクリプトン星から来たクラーク・ケントに至ってはデーリー・プラネット社に勤務する普通の新聞記者で、時々超人的な活躍をするのみでした。

はるか遠方から地球にきたこれらの生物が、皆偶然に地球人と似ていたのかもしれませんが。宇宙には生物がほとんどいないのかもしれませんが。宇宙に住むほとんどの生物は、地球上の生物とはまったく違った色や形や組織をしているのかもしれませんが。

現在、地球上で 2000 億個弱の天体が観測されています。しかし、これらの天体はそこから来る光などの電磁波を観測することによってのみ確認されてきましたから、惑星などのように温度が低い天体は 20 億個以上存在すると考えられていますが、自らはほとんど電磁波を出さないため、その大部分は存在すら確認できず現在までに 130 個ほどしか見つかっておりません。しかも、宇宙生物が太陽のような高温で燃えている天体に棲息しているとは考え難く、冷えて固まった温度の低い天体にのみ宇宙生物が誕生し進化できると考えられますから、宇宙生物に関する情報はまったく得られておりません。

本書では、天体からの直接的な知識や情報がないので、地球上で得られる極めて限られた物質に

関する物理学のおよび化学的情報を基に、著者の独善的な発想を織り交ぜて宇宙の生物を想像してみたいと思います。

生物とは

科学的な情報や知識を基に宇宙の生物を想像するに当たり、まず、生物とはどんなものが大まかに定義をしておかなければならないでしょう。小学館の国語大辞典によると、増殖・成長・物質代謝・刺激反応性・調節性などの生活現象を表すものの総称を生物と呼んでいます。このように高い再現性と発展性を持ち、極めて複雑で、繊細で、効率の良い組織を作り上げるためには、高い機能を持つ多くの構成要素を必要とするものと思われます。ちなみに地球上に住むある種の標準的な微生物の細胞を構成する物質の種類と重さの比を表 1 - 1 まとめました。この表でも分るように 4500 種以上の多種多様の複雑な物質がそれぞれの機能を担って生命活動を維持しています。宇宙においても、生物は増殖、成長のために高い再現性と発展性を持ち、高い機能を示す多くの構成要素を必要とするものと思われます。

表 1 - 1 生体内物質の組成

	重量(%)	種類
水	70	1
蛋白質	15	3000
DNA	1	1
RNA	6	1000
炭水化物	3	50
脂質	2	40
無機イオン	1	12
その他	2	500

2. 宇宙生物も化学反応で生きている

宇宙の元素は何種類か

地球上で知る限り、全ての物質は電子、中性子、陽子の 3 種の微粒子が組み合わされて出来ていると思われています。最も質量の小さな電子は 9.1×10^{-31} kg で負電荷を帯びています。電子の 1839 倍の質量を持つ中性子は電氣的に中性で、電子の 1836 倍の質量を持つ陽子は正電荷を帯びています。質量が格段に大きい陽子と中性子が結びついて原子核を形成し、その周囲に電子が分布する形で元素あるいはイオンが出来ています。元素は陽子と電子の数が等しく電氣的に中性であり、イオンは陽子と電子の数が異なるため正電荷あるいは負電荷を帯びています。元素やイオンの性質は原子核の周囲に広く分布する電子の数に大きく影響を受けています。種々の元素の陽子の数と中性子の数の和を質量数といい、陽子の数が同じでも質量数の異なる元素がいろいろとありますのでこれを同位元素と呼んでいます。水素原子は陽子と電子が 1 つずつで中性子を含んでいません。水素陽イオンは水素原子から 1 つの電子が失われたものですから、陽子だけとなります。そのため水素陽イオンと陽子は全く同じものです。ヘリウム原子は陽子 2、中性子 2、電子 2 で出来ています。他にも陽子、中性子、電子の数の異なる元素が無限に考えられますが、地球上には陽子の数の違う元素は 90 種類しか存在しませんし、陽子と中性子の数の割合は図 2 - 1 に示すように 1 から 1.5 で一定しています。原子核の中で陽子と中性子を結び付けている力が相対的に弱くなるため、表 2 - 1 に示すように安定な元素は陽子の数が 83 以下に限られており、陽子の数が 84 以上の元素では不安定で、如何なる環境でも放射能を出しながら一定の寿命を持って徐々に壊れてゆきます。また、陽子に対して中性子の割合が大きな元素も不安定で放射

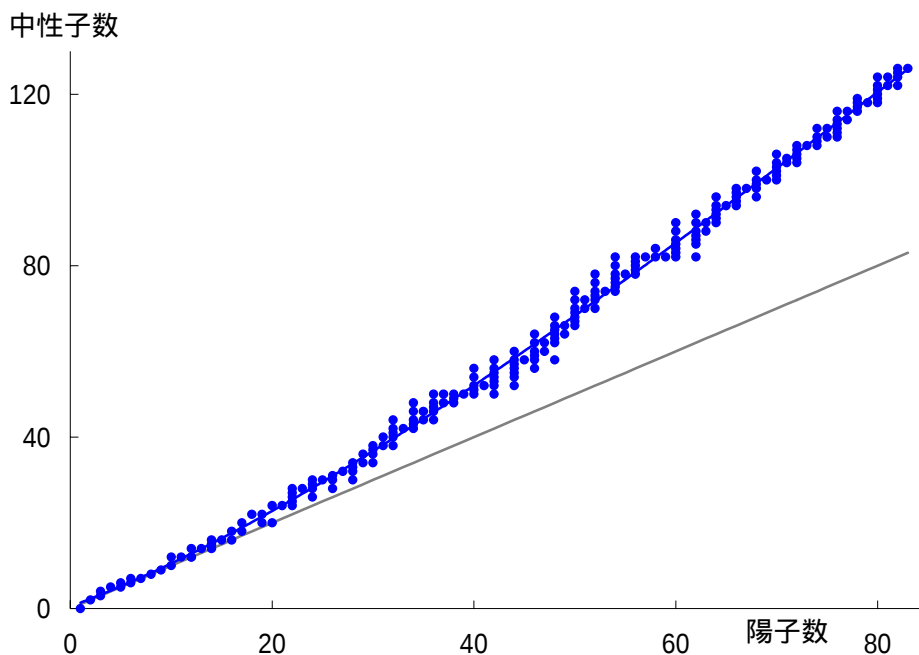


図 2 - 1 安定同位元素の陽子数と中性子数

表 2 - 1 天然に存在する安定元素（その 1）

	陽子数	中性子数	質量数	同位対比		陽子数	中性子数	質量数	同位対比
H	1	0	1	100.0	Ca	20	20	40	96.9
He	2	2	4	100.0	Ca	20	24	44	2.1
Li	3	3	6	7.5	Sc	21	24	45	100.0
Li	3	4	7	92.5	Ti	22	24	46	8.0
Be	4	5	9	100.0	Ti	22	25	47	7.3
B	5	5	10	19.9	Ti	22	26	48	73.8
B	5	6	11	80.1	Ti	22	27	49	5.5
C	6	6	12	98.9	Ti	22	28	50	5.4
C	6	7	13	1.1	V	23	28	51	99.8
N	7	7	14	99.6	Cr	24	26	50	4.3
O	8	8	16	99.8	Cr	24	28	52	83.8
F	9	9	19	100.0	Cr	24	29	53	9.5
Ne	10	10	20	90.5	Cr	24	30	54	2.4
Ne	10	12	22	9.2	Mn	25	30	55	100.0
Na	11	12	23	100.0	Fe	26	28	54	5.8
Mg	12	12	24	79.0	Fe	26	30	56	91.7
Mg	12	12	25	10.0	Fe	26	31	57	2.2
Mg	12	14	26	11.0	Co	27	32	59	100.0
Al	13	14	27	100.0	Ni	28	30	58	68.3
Si	14	14	28	92.2	Ni	28	32	60	26.1
Si	14	15	29	4.7	Ni	28	33	61	1.1
Si	14	16	30	3.1	Ni	28	34	62	3.6
P	15	16	31	100.0	Cu	29	34	63	69.2
S	16	16	32	95.0	Cu	29	36	65	30.8
S	16	18	34	4.2	Zn	30	34	64	48.6
Cl	17	18	35	75.8	Zn	30	36	66	27.9
Cl	17	20	37	24.2	Zn	30	37	67	4.1
Ar	18	22	40	99.6	Zn	30	38	68	18.8
K	19	20	39	93.3	Ga	31	38	69	60.1
K	19	22	41	6.7	Ga	31	40	71	39.9

表 2 - 1. 天然に存在する安定元素（その 2）

	陽子数	中性子数	質量数	同位対比		陽子数	中性子数	質量数	同位対比
Ge	32	38	70	20.5	Mo	42	50	92	14.8
Ge	32	40	72	27.4	Mo	42	52	94	9.3
Ge	32	41	73	7.8	Mo	42	53	95	15.9
Ge	32	42	74	36.5	Mo	42	54	96	16.7
Ge	32	44	76	7.8	Mo	42	55	97	9.6
As	33	42	75	100.0	Mo	42	56	98	24.1
Se	34	42	76	9.0	Mo	42	58	100	9.6
Se	34	43	77	7.6	Ru	44	52	96	5.5
Se	34	44	78	23.6	Ru	44	54	98	1.9
Se	34	46	80	49.7	Ru	44	55	99	12.7
Se	34	48	82	9.2	Ru	44	56	100	12.6
Br	35	44	79	50.7	Ru	44	57	101	17.0
Br	35	46	81	49.3	Ru	44	58	102	31.6
Kr	36	44	80	2.3	Ru	44	60	104	18.7
Kr	36	46	82	11.6	Rh	45	58	103	100.0
Kr	36	47	83	11.5	Pd	46	56	102	1.0
Kr	36	48	84	57.0	Pd	46	58	104	11.1
Kr	36	50	86	17.3	Pd	46	59	105	22.3
Rb	37	48	85	72.2	Pd	46	60	106	27.3
Rb	37	50	87	27.8	Pd	46	62	108	26.5
Sr	38	48	86	9.9	Pd	46	64	110	11.7
Sr	38	49	87	7.0	Ag	47	60	107	51.8
Sr	38	50	88	82.6	Ag	47	62	109	48.2
Y	39	50	89	100.0	Cd	48	58	106	1.3
Zr	40	50	90	51.5	Cd	48	62	110	12.5
Zr	40	51	91	11.2	Cd	48	63	111	12.8
Zr	40	52	92	17.2	Cd	48	64	112	24.1
Zr	40	54	94	17.4	Cd	48	65	113	12.2
Zr	40	56	96	2.8	Cd	48	66	114	28.7
Nb	41	52	93	100.0	Cd	48	68	116	7.5

表 2 - 1. 天然に存在する安定元素（その 3）

	陽子数	中性子数	質量数	同位対比		陽子数	中性子数	質量数	同位対比
In	49	64	113	4.3	Ba	56	82	138	71.7
In	49	66	115	95.7	La	57	82	139	99.9
Sn	50	66	116	14.5	Ce	58	82	140	88.5
Sn	50	67	117	7.7	Ce	58	84	142	11.1
Sn	50	68	118	24.2	Pr	59	82	141	100.0
Sn	50	69	119	8.6	Nd	60	82	142	27.1
Sn	50	70	120	32.6	Nd	60	83	143	12.2
Sn	50	72	122	4.6	Nd	60	84	144	23.8
Sn	50	74	124	5.8	Nd	60	85	145	8.3
Sb	51	70	121	57.3	Nd	60	86	146	17.2
Sb	51	72	123	42.7	Nd	60	88	148	5.8
Te	52	70	122	2.6	Nd	60	90	150	5.6
Te	52	72	124	4.8	Sm	62	82	144	3.1
Te	52	73	125	7.1	Sm	62	85	147	15.0
Te	52	74	126	19.0	Sm	62	86	148	11.3
Te	52	76	128	31.7	Sm	62	87	149	13.8
Te	52	78	130	33.8	Sm	62	88	150	7.4
I	53	74	127	100.0	Sm	62	90	152	26.7
Xe	54	74	128	1.9	Sm	62	92	154	22.7
Xe	54	75	129	26.4	Eu	63	88	151	47.8
Xe	54	76	130	4.1	Eu	63	90	153	52.2
Xe	54	77	131	21.2	Gd	64	90	154	2.2
Xe	54	78	132	26.9	Gd	64	91	155	14.8
Xe	54	80	134	10.4	Gd	64	92	156	20.5
Xe	54	82	136	8.9	Gd	64	93	157	15.7
Cs	55	78	133	100.0	Gd	64	94	158	24.8
Ba	56	78	134	2.4	Gd	64	96	160	21.9
Ba	56	79	135	6.6	Tb	65	94	159	100.0
Ba	56	80	136	7.9	Dy	66	94	160	2.3
Ba	56	81	137	11.2	Dy	66	95	161	18.9

表 2 - 1. 天然に存在する安定元素（その４）

	陽子数	中性子数	質量数	同位対比		陽子数	中性子数	質量数	同位対比
Dy	66	96	162	25.5	Re	75	110	185	37.4
Dy	66	97	163	24.9	Re	75	112	187	62.6
Dy	66	98	164	28.2	Os	76	110	186	1.6
Ho	67	98	165	100.0	Os	76	111	187	1.6
Er	68	96	164	1.6	Os	76	112	188	13.3
Er	68	98	166	33.6	Os	76	113	189	16.1
Er	68	99	167	23.0	Os	76	114	190	26.4
Er	68	100	168	26.8	Os	76	116	192	41.0
Er	68	102	170	14.9	Ir	77	114	191	37.3
Tm	69	100	169	100.0	Ir	77	116	193	62.7
Yb	70	100	170	3.1	Pt	78	116	194	32.9
Yb	70	101	171	14.3	Pt	78	117	195	33.8
Yb	70	102	172	21.9	Pt	78	118	196	25.3
Yb	70	103	173	16.1	Pt	78	119	198	7.2
Yb	70	104	174	31.8	Au	79	118	197	100.0
Yb	70	106	176	12.7	Hg	80	118	198	10.0
Lu	71	104	175	97.4	Hg	80	119	199	16.8
Lu	71	105	176	2.6	Hg	80	120	200	23.1
Hf	72	104	176	5.2	Hg	80	121	201	13.2
Hf	72	105	177	18.6	Hg	80	122	202	29.8
Hf	72	106	178	27.3	Hg	80	124	204	6.9
Hf	72	107	179	13.6	Tl	81	122	203	29.5
Hf	72	108	180	35.1	Tl	81	124	205	70.5
Ta	73	108	181	100.0	Pb	82	122	204	1.4
W	74	108	182	26.3	Pb	82	124	206	24.1
W	74	109	183	14.3	Pb	82	125	207	22.1
W	74	110	184	30.7	Pb	82	126	208	52.4
W	74	112	186	28.6	Bi	83	126	209	100.0

表 2 - 2 放射性元素の陽子数、中性子数、半減期

	陽子数	中性子数	質量数	半減期	壊変形式
Po	84	124	208	2.898y	α
Po	84	126	210	138.4d	α
Rn	86	136	222	3.824d	α
Ra	88	136	224	13.62d	α
Ra	88	138	226	$1.6 \times 10^3\text{y}$	α
Ra	88	140	228	5.75y	β
Ac	89	138	227	21.77y	α
Th	90	138	228	1.913y	α
Th	90	141	231	25.52h	β
Th	90	142	232	$1.41 \times 10^{10}\text{y}$	α
Th	90	143	233	22.3m	β
Pa	91	140	231	$3.28 \times 10^4\text{y}$	α
Pa	91	142	233	27.0d	β
U	92	140	232	68.9y	α
U	92	141	233	$1.592 \times 10^5\text{y}$	α
U	92	143	235	$7.038 \times 10^8\text{y}$	α
U	92	145	237	6.75d	β
U	92	146	238	$4.468 \times 10^9\text{y}$	α
U	92	147	239	23.50m	β
Np	93	146	239	2.355d	β
Pu	94	144	238	87.74y	α
Pu	94	145	239	$2.412 \times 10^4\text{y}$	α
Pu	94	146	240	$6.57 \times 10^3\text{y}$	α
Am	95	146	241	432.2y	α
Am	95	147	242	16.02h	β
Cm	96	146	242	162.9d	α
Cm	96	148	244	18.10y	σ
Bk	97	150	247	$1.4 \times 10\text{y}$	α
Cf	98	154	252	2.64y	α

能を出しながら分解します。一般にこの寿命は半分が壊れてゆくために要する時間（半減期）で表し、半減期の 10 倍の時間では $(0.5)^{10}$ となりますが、この値を計算すると約 0.1% しか残らないことになり、ほとんど壊れてしまいます。表 2 - 2 には現在知られている比較的半減期が長く陽子の数の多い元素の半減期を纏めておきます。地球上に自然に存在する最も陽子数の大きな元素はウラニウムですが、この元素の中で半減期の最も長い同位体でも 10 億年です。さらに陽子数が 93 以上の全ての元素は極めて寿命が短く、例えばどこかの天体で生成したとしても、生物の誕生から進化までに要する歳月に比べてきわめて短い 20 万年ほどで全て消滅してしまいます。このことから地球上で性質を知ることの出来る 90 種類の元素しか宇宙でも存在しないものと考えてよいという結論に達します。宇宙生物の存在が不可能と思われる中性子星などいくつかの例外を除けば、太陽を始めとする多くの天体から宇宙空間に存在するほとんどの星間物質までこの 90 種類の元素で出来ていることになります。

高い温度で燃えている天体の元素

地球上で 100 億個弱の天体が観測されていますが、これらの天体はそこから来る光などの電磁波を観測することによってのみ確認されてきました。太陽をはじめとして光り輝く天体では、石炭や石油が高温で燃える化学反応ではなく、4 個の水素原子が非常に高い温度で 1 個のヘリウム原子に変わる核反応が起こっています。このとき 4 個の陽子と 4 個の電子から 2 個の陽子、2 個の中性子、2 個の電子になりますが、合計 $3.32 \times 10^{-30} \text{ kg}$ の質量の変化が起こります。この質量の変化とともに大量のエネルギーと放射能を放出しますから、高い温度になり連鎖的にこの核反応が持続します。このような核反応により発生した膨大なエネルギーで多くの天体は高温に燃え続け、光を放っています。

核反応にはいろいろな原子核同士の反応のほかに原子核と中性子などいろいろの組み合わせの核反応があり、大量のエネルギーと放射能を放出します。太陽で起こっている水素の核反応により発生するエネルギーや放射能は太陽光線のほかに宇宙線となって地球の上空にまで到達しています。この宇宙線の中の中性子が大気に含まれる窒素原子と核反応を起こし、質量数 14 の炭素原子を定常的に生成しますから、質量数 14 の炭素と通常の質量数 12 の炭素との割合は一定しています。この質量数 14 の炭素は陽子に対して中性子の割合が高いため不安定で、半減期 5730 年で分解してゆきます。生物が活着している間は新陳代謝を続けていますから、質量数 14 の炭素と通常の質量数 12 の炭素との割合は一定していますが、生物は死とともに新陳代謝をしなくなりますから、10000 年前に棲息していた生物の死骸では質量数 14 の炭素原子は約 25% に減っています。この分解反応を利用して、古生物学や考古学の分野で興味のある化石や遺物の質量数 14 の炭素と通常の質量数 12 の炭素との割合を正確に測定しますと、そのものの歴史を明らかにすることが出来ます。

話が多少それますが、質量数 235 のウランと中性子の核反応では Sr と Xe に分解しますが、同時に 3 個の中性子を大量のエネルギーや放射能とともに放出します。ここで 2 次的に放出された中性子はまた近くにあるウランと核反応を連鎖的に起こしますから、一気に膨大なエネルギーと

表 2 - 3 宇宙における元素存在度 (Si 原子 = 1.00×10^6 を基準にして)

	Suess.Urey (1956)	Cameron (1966)	松井義人 (1967)		Suess.Urey (1956)	Cameron (1966)	松井義人 (1967)
^1H	4.00×10^{10}	3.2×10^{10}	3.2×10^{10}	^{42}Mo	2.42	2.42	2.8
^2He	3.08×10^9	2.6×10^9	5.1×10^9	^{44}Ru	1.49	1.58	1.6
^3Li	100	38	45	^{45}Rh	0.214	0.26	0.33
^4Be	20	7	0.69	^{46}Pd	0.675	1.00	1.6
^5B	24	6	6.2	^{47}Ag	0.26	0.26	0.64
^6C	3.5×10^6	1.66×10^7	1.23×10^7	^{48}Cd	0.89	0.89	2.3
^7N	6.6×10^6	3.0×10^6	3.65×10^6	^{49}In	0.11	0.11	0.26
^8O	2.15×10^7	2.9×10^7	2.8×10^7	^{50}Sn	1.33	1.33	3.6
^9F	1600	$\sim 10^3$	$\sim 3 \times 10^4$	^{51}Sb	0.246	0.15	0.40
^{10}Ne	8.6×10^6	2.9×10^6	1.59×10^7	^{52}Te	4.67	3.00	6.8
^{11}Na	4.38×10^4	4.18×10^4	6.4×10^4	^{53}I	0.80	0.46	1.16
^{12}Mg	9.12×10^5	1.046×10^6	1.05×10^6	^{54}Xe	4.0	3.15	4.7
^{13}Al	9.48×10^4	8.93×10^4	8.51×10^4	^{55}Cs	0.456	0.25	0.32
^{14}Si	1.00×10^6	1.00×10^6	1.00×10^6	^{56}Ba	3.66	4.0	4.7
^{15}P	1.00×10^4	9320	1.22×10^4	^{57}La	2.00	0.38	0.36
^{16}S	3.75×10^5	6.0×10^5	5×10^5	^{58}Ce	2.26	1.08	1.17
^{17}Cl	8850	1836	1750	^{59}Pr	0.40	0.16	0.17
^{18}Ar	1.5×10^5	2.4×10^5	2.4×10^5	^{60}Nd	1.44	0.69	0.77
^{19}K	3160	2970	3800	^{62}Sm	0.664	0.24	0.23
^{20}Ca	4.90×10^4	7.28×10^4	7.36×10^4	^{63}Eu	0.187	0.083	0.091
^{21}Sc	28	29	33	^{64}Gd	0.684	0.33	0.55
^{22}Ti	2440	3140	2300	^{65}Tb	0.0956	0.054	0.037
^{23}V	220	590	196	^{66}Dy	0.556	0.33	0.36
^{24}Cr	7800	1.20×10^4	1.17×10^4	^{67}Ho	0.118	0.076	0.090
^{25}Mn	6850	6320	9200	^{68}Er	0.316	0.21	0.22
^{26}Fe	6.00×10^5	8.42×10^5	8.9×10^5	^{69}Tm	0.0318	0.032	0.035
^{27}Co	1800	2290	2300	^{70}Yb	0.220	0.18	0.21
^{28}Ni	2.74×10^4	4.44×10^4	4.18×10^4	^{71}Lu	0.050	0.031	0.035
^{29}Cu	212	39	290	^{72}Hf	0.438	0.16	0.17
^{30}Zn	486	202	1170	^{73}Ta	0.065	0.021	0.021
^{31}Ga	11.4	9.05	51	^{74}W	0.49	0.11	0.13
^{32}Ge	50.5	134	135	^{75}Re	0.135	0.054	0.07
^{33}As	4.0	4.4	5.9	^{76}Os	1.00	0.73	0.79
^{34}Se	67.6	18.8	89	^{77}Ir	0.821	0.500	0.59
^{35}Br	13.4	3.95	16.1	^{78}Pt	1.625	1.157	1.05
^{36}Kr	51.3	20	58	^{79}Au	0.145	0.13	0.13
^{37}Rb	6.5	5.0	7.1	^{80}Hg	0.284	0.27	3.3
^{38}Sr	18.9	21	20	^{81}Tl	0.108	0.11	0.18
^{39}Y	8.9	3.6	4.8	^{82}Pb	0.47	2.2	1.6
^{40}Zr	54.5	23	32	^{83}Bi	0.144	0.14	0.17
^{41}Nb	1.00	0.81	1.5	^{90}Th		0.069	0.070
				^{92}U		0.042	0.026

放射能を放出します。1945 年に広島に投下された原子爆弾はこの核反応を兵器として利用したものでした。また、質量数 2 の水素原子を重水素と呼んでいますが、この重水素は天然に 0.02% ほど存在しています。この重水素同士からヘリウム原子を生成する核反応に成功しますと多量のエネルギーを生み出すことが出来ますから、エネルギー問題を世界的に解決するために多くの物理学者が研究を続けています。

炭火の上に醤油がたれたときに橙色の炎が上がります。また、水の入っていない銅の薬缶を間違えてガスコンロに架けてしまうと、炎が緑色に変わります。このように元素を極めて高温に熱すると、その元素固有の波長の光を出すことが知られており、これを炎色反応あるいは原子発光といいます。また、元素の気体はその元素固有の光を吸収する現象も知られており、この現象は非常に感度が高く再現性に優れているため、原子吸光分光分析および ICP 発光分光分析という化学的分析法としてほとんど全ての元素の組成を決めるときに広く利用されています。この分析法を応用すれば、高い温度で燃えている太陽から来る光を調べることにより太陽を形づくっている元素や、太陽の周りを取り巻いている気体の元素組成がわかります。また天体の運行の様子からその天体の重さも見積もることが出来ます。この方法で Clarke という学者が太陽系全体の元素組成を見積もっていますが、その後多くの学者が宇宙の元素組成を見積もりましたので、3 人の学者の見積もりした値を表 2 - 3 に示しておきます。

天空には赤い色の星や青白い光で輝く星などいろいろの星が観測できますが、これらの多くの星から来る光も高温に燃えた星における原子発光によるものです。太陽からの光と同じように望遠鏡を使って遠くの星から来る光を調べることも出来るため、高い温度で燃えている天体の平均的な元素組成を見積もることが出来ます。その結果は太陽系が一つの典型的な天体系であり、いずれの天体の元素組成もクラークの見積もりと大差のないものと考えてよいようです。

冷えて固まった天体の元素

核反応により高い温度で燃える星の元素組成は原子発光の現象により知ることが出来ますが、地球のように冷えて固まった天体では光の発生がありませんから地球上から直接調べる事が出来ません。地球の元素組成は種々の岩石や海水や大気元素組成を調べるにより地表近くの平均的な元素組成を見積もることが出来ます。また、火山の溶岩などの元素の分析から地表からある程度深い所の元素組成まで考慮することが出来ます。さらに、地球の外から飛んでくる隕石やアポロ宇宙船が持ち帰った月の石の分析の値を加味して、地殻の元素組成が表 2 - 4 のように見積もられています。さらに、表 2 - 4 には海の水の中に溶けている元素の組成と人間の身体を構成している元素の組成もまとめておきました。マリナー 2 号が金星に接近して以来、ベネラ 7 号、ベネラ 14 号などの宇宙船が金星に軟着陸して、金星表面の大気および地表の岩石の情報を送信してきました。また、1975 年にパイキング 1 号・2 号が火星への軟着陸に成功しましたが、近年になって米航空宇宙局(NASA)の無人探査機『スピリット』と『オポチュニティー』が火星着陸に成功し、水の湖の痕跡を始め火星表面の多くの情報が送信されてきています。現在までに得られた情報を総合すると、金星、地球、火星、小惑星などの地殻の元素組成はほとんど類似し

表 2 - 4 地殻の元素組成 (%)

元素	地殻中	海水中	人間体内
O	46.6		64.6
Si	27.7	0.012	trace
Al	8.1	0.005	trace
Fe	5	trace	trace
Ca	3.6	1.2	1.96
Na	2.8	32.4	0.11
K	2.6	1.2	0.37
Mg	2.1	3.9	0.04
Ti	0.44	trace	
C	0.18	0.095	18.1
H	0.14		9.98
P	0.12	trace	1.08
S	0.05	2.7	0.25
Cl	0.03	58.2	0.45
Sr	0.03	0.04	
F	0.03	0.004	trace
Rb	0.03	trace	
Ba	0.03	trace	
Zr	0.02	trace	
Cr	0.02	trace	trace
N	0.005	0.003	3.1

ているようです。金星、地球、火星、小惑星などのようなすでに冷えて固まった天体の平均の元素組成は表 2 - 4 に示す地球の地殻の元素組成と同じと考えてよいでしょう。木星、土星、天王星へはいまだ宇宙船の軟着陸に成功していませんが、米航空宇宙局(NASA)の宇宙船パイオニア 10 号、11 号、ボイジャー1 号、2 号がかなり近距離まで接近することに成功したため、それぞれの惑星の大気の分析に成功しています。それらの宇宙船からの情報や地球上からの観測により得られた太陽系の惑星の大気のデータは表 2 - 5 にまとめておきます。

宇宙生物は分子で出来ている

ほとんどの宇宙において、構成している元素は前にも述べたように約 90 種類しかありません。その上、地殻の元素組成も太陽系の元素組成も限られた元素が大部分を占めています。

表 2 - 5 惑星の大気の組成

		金星	地球	火星	木星	土星	天王星	海王星
大気圧(atm)		90	1	0.006				
水素	H ₂				89	96	85	81
ヘリウム	He				11	4	15	17
ネオン	Ne	4.4x10 ⁻⁴	1.8x10 ⁻³	2.5x10 ⁻⁴				
アルゴン	Ar	1.9x10 ⁻³	9.3x10 ⁻¹	1.6				
窒素	N ₂	3.4	78	2.7				
酸素	O ₂	6.9x10 ⁻³	21	1.3x10 ⁻¹				
二酸化炭素	CO ₂	96	3.2x10 ⁻²	95				
二酸化硫黄	SO ₂	1.9x10 ⁻²						
水	H ₂ O	1.4x10 ⁻¹	1 ~ 2.8	3x10 ⁻²	1x10 ⁻⁴			
一酸化炭素	CO	4x10 ⁻⁵	1.2x10 ⁻⁵	7x10 ⁻²	1x10 ⁻⁷			
オゾン	O ₃			3x10 ⁻⁶				
メタン	CH ₄				2x10 ⁻¹	5x10 ⁻¹	6x10 ⁻¹	2
アンモニア	NH ₃				2x10 ⁻²	2x10 ⁻²		3x10 ⁻⁴
アセチレン	C ₂ H ₂				1.0x10 ⁻⁵	3x10 ⁻⁵	2x10 ⁻²	1x10 ⁻⁴
エタン	C ₂ H ₆				5.5x10 ⁻⁴	7.0x10 ⁻⁴		2x10 ⁻⁶
りん化水素	PH ₃				1x10 ⁻⁴	1x10 ⁻⁴		

原子は質量の重い中性子と陽子が原子核となって中心に座り、その周囲に陽子とほぼ同じ数の軽い電子が広く分布しています。元素の性質は周囲に広く分布する電子の数に主に影響されますが、特に元素の外側に近い部分に分布する電子(外殻電子)の数が元素の性質を決定付けます。原子やイオンの電子は原子核に近い内側から 7 段階におおよそ順番に詰まっていきますが、その電子の入ることの出来る場所は一段階目から 1、4、9、16、25、36 あります。この電子の入ることの出来る場所を軌道と呼び、各軌道に 2 個の電子が入るとその軌道は充足し安定します。そのため、一段階目から 2、8、18、32、50、72 個の電子が入れるだけの許容量を持っています。一番外側に分布する電子が 1 段階目では 2 個それ以外では 8 個まで入ると次の外側の段階に電子は順次詰まってゆきます。そのため、外側の電子の数は 1 から 8 までしかありませんし、元素やイオンの性質も大まかには 8 種類しかありません。これは Mjendjeljejev が見出した元素の性質と陽子の数との間の周期表の規則性を表しています。表 2 - 6 には現在、化学の研究に使われている周期表を挙げ、陽子数、元素記号および 1 番外側に分布する電子の数を示しておきます。典型金属を淡赤色、遷移金属元素を褐色、非金属元素を黄色、希ガス元素を緑色であらわしました。さらにランタニド金属元素を赤褐色、アクチニド金属元素を赤色であらわしました。このように限

られた元素が類似の性質を持っていることから、元素そのものでは生物のような複雑な系を組織することは不可能と思われます。

表 2 - 6 周期表

族	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H 1																	2 He 2
2	3 Li 1	4 Be 2											5 B 3	6 C 4	7 N 5	8 O 6	9 F 7	10 Ne 8
3	11 Na 1	12 Mg 2											13 Al 3	14 Si 4	15 P 5	16 S 6	17 Cl 7	18 Ar 8
4	19 K 1	20 Ca 2	21 Sc 2	22 Yi 2	23 V 2	24 Cr 1	25 Mn 2	26 Fe 2	27 Co 2	28 Ni 2	29 Cu 1	30 Zn 2	31 Ga 3	32 Ge 4	33 As 5	34 Se 6	35 Br 7	36 Kr 8
5	37 Rb 1	38 Sr 2	39 Y 2	40 Zr 2	41 Nb 1	42 Mo 1	43 Tc 2	44 Ru 1	45 Rh 1	46 Pd 2	47 Ag 1	48 Cd 2	49 In 3	50 Sn 4	51 Sb 5	52 Te 6	53 I 7	54 Xe 8
6	55 Cs 1	56 Ba 2	*1	72 Hf 2	73 Ta 2	74 W 2	75 Re 2	76 Os 2	77 Ir 2	78 Pt 1	79 Au 1	80 Hg 2	81 Tl 3	82 Pb 4	83 Bi 5	84 Po 6	85 At 7	86 Rn 8
7	87 Fr 1	88 Ra 2	*2	104 Rf 2	105 Db 2	106 Sg 2	107 Bh 2	108 Hs 2	109 Mt 2	陽子数 元素記号 外郭電子数								

*1	57 La 2	58 Ce 2	59 Pr 2	60 Bd 2	61 Pm 2	62 Sm 2	63 Eu 2	64 Gd 2	65 Tb 2	66 Dy 2	67 Ho 2	68 ER 2	69 Tm 2	70 Yb 2	71 Lu 2
*2	89 Ac 2	90 Th 2	91 Pa 2	92 U 2	93 Np 2	94 Pu 2	95 Am 2	96 Am 2	97 Bk 2	98 Cf 2	99 Es 2	100 Fm 2	101 Md 2	102 No 2	103 Lr 2

高い再現性と発展性を持ち、極めて複雑で、繊細で、効率の良い系を組織するためには、これらの限られ種類の元素が数多く集合し、結びついた高い機能を持つ多くの構成要素の形成が必要になると思われます。一般に、いくつかの元素が結びついて一つの安定な集合体になるとき、この集合体を分子といいます。言い替えれば、生物が組織されるためには、高い機能を持つ多くの分子が必要であるといえるでしょう。

多種多様な分子が変化し、新に別の分子を形成する反応を化学反応といいます。つまり、このような原子の組み合わせにより多くの分子を構成し、その分子が化学反応することにより、複雑な系を組織することが可能と思われます。宇宙の生物も、地球上の生物と同じように多種多様な分子が化学反応をして、全ての生命活動を維持しているものと考えてよいことになります。

3. 宇宙生物を形作る元素の性質

元素の手の数

分子が化学反応で形成されるとき、元素が結びつくことを結合といい、現在までの化学的知識を集約すると、原子が集合体として結びつく結合の仕方は主に3通りあります。1つの結合の仕方は電子の遣り取りで2種類の元素が陽イオンと陰イオンになり、そのイオン同士が電気的な引力で結びつく結合で、イオン結合と呼ばれています。もう一つの結合の仕方は、それぞれの元素に属する電子が他の元素の原子核の陽子とのあいだに電気的な相互作用をして生まれる元素の間の引力で結びつく結合で共有結合と呼ばれています。さらに、一つの元素の2

の電子が他の元素の陽子と電気的な相互作用をして結びつく配位結合があります。

共有結合は1個しか充足していない軌道の電子が関与する結合であり、1段階目の軌道が2個の電子で既に充足されて安定化しているヘリウム原子は如何なる元素とも共有結合も配位結合も出来ません。水素原子は1段階目の軌道に1個しか電子が入っていませんから、他の1個の元素と共有結合して軌道を充足するため、水素原子の結合できる元素の数は1個に限られます。ホウ素原子では2段階目の4つの軌道に3個の電子しか入っていません。そのため、3個の元素と共有結合できますが、まだ1つの軌道が空のまま残ってしまいますから、さらに1個の元素と配位結合することが出来ます。炭素原子では2段階目の4つの軌道に4個の電子が入っていますから、4個の元素と同時に共有結合できます。窒素原子は2段階目の4つの軌道に5個の電子が入っていますので、1つの軌道は2個の電子で充足していますが、ほかに充足していない3

つの軌道が残りますから3個の元素と共有結合できます。充足した1つの軌道はさらに1個の元素と配位結合することが出来ます。このように元素が結合できる元素の数を原子価といいます。3通りの結合の仕方の組み合わせなどにより、原子価は元素により1つだけとは限らず複数の原子価を持つ元素もあります。元素の持つ原子価はそれぞれの元素によって決まっていますので、表3-1には宇宙に多く存在する元素の原子価をまとめました。

表 3 - 1 宇宙に多く存在する元素の原子価

元素	原子価	元素	原子価
H	1	Fe	3, 2
He	0	S	4, 3, 2
O	2, 1	Ar	0
C	4, 3, 2	Al	3
N	4, 3, 2	Ca	2
Ne	0	Na	1
Mg	2	Ni	3, 2
Si	4		

原子価が0のヘリウムやネオンやアルゴンは元素が他の元素と結合することが出来ず、複雑な分子を構成することは出来ませんから単原子分子として存在します。原子価が3ないし4のような元素では、沢山の元素と結合することが出来、多種多様な分子を構成することが出来ます。宇宙生物に必要な構成要素としての分子の中心となる元素は炭素、窒素、けい素、りん、硫黄、アルミニウム、鉄などの高い原子価を持つものの中のいずれかに限られてくるでしょう。

液体に溶けても切れない結合

これら 3 種の結合のうち、イオン結合は陰陽 2 種のイオンが電氣的に結びついているため、水やアンモニアなどのイオンを安定化する液体の中では結合を保つことが出来ず、2 つ以上のイオンに分かれその間に液体が入り込んでしまいます。ナトリウムと塩素からなる食塩は代表的なイオ

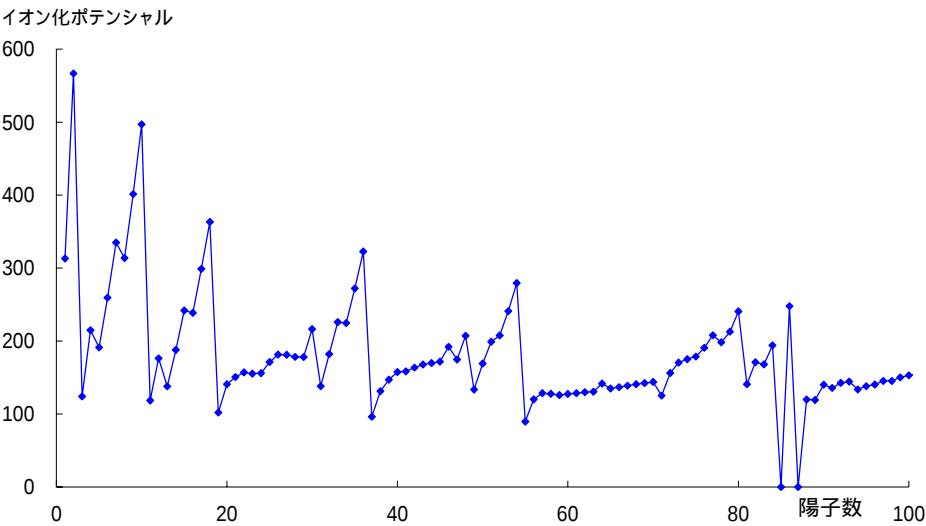


図 3 - 1 元素のイオン化ポテンシャル(kcal/mol)

表 3 - 2 元素のイオン化ポテンシャル(kcal/mol)

元素	イオン化ポテンシャル	元素	イオン化ポテンシャル
H	313.2	P	241.8
He	566.8	S	238.8
Li	124.2	Cl	298.9
Be	214.8	Ar	363.3
B	191.3	K	102.1
C	259.5	Ca	140.8
N	334.9	Ga	138.3
O	313.9	Ge	182.1
F	401.5	As	226.1
Ne	496.9	Se	224.7
Na	118.5	Br	272.2
Mg	176.3	Kr	322.7
Al	138.1	Rb	96.3
Si	187.9	I	240.9

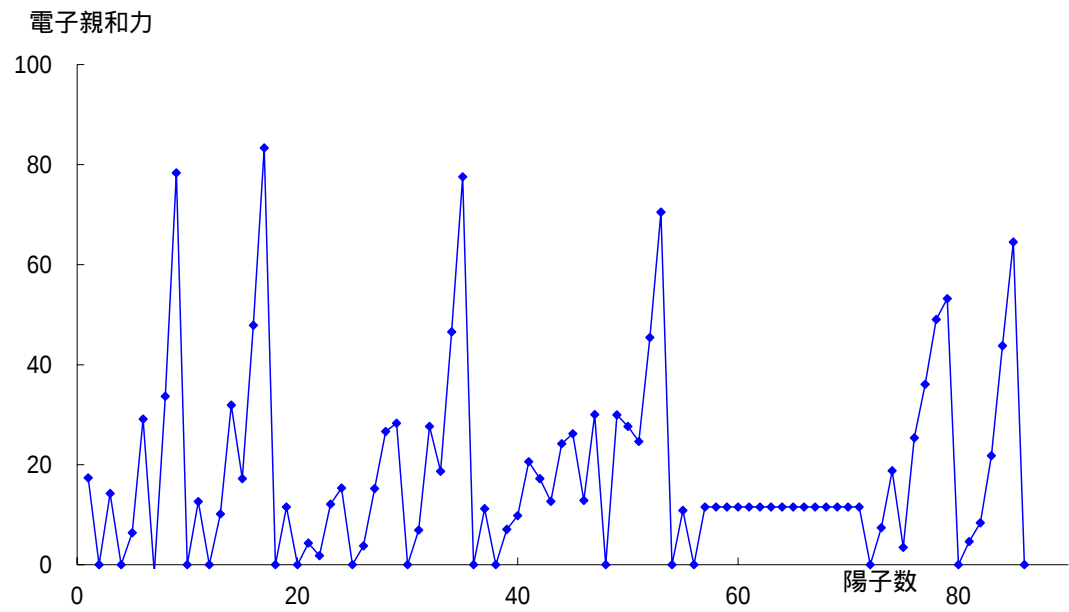


図3 - 2 元素の電子親和力(kcal/mol)

ン結合の化合物ですが、水に溶かしますとナトリウム陽イオンと塩素陰イオンにばらばらに分かれてしまいます。たとえ多くの元素で極めて複雑な分子が構成されていても、それらの元素がイ

表 3 - 3 元素の電子親和力(kcal/mol)

元素	電子親和力	元素	電子親和力
H	0.0	P	17.7
He	0.0	S	48.0
Li	14.3	Cl	83.1
Be	-57.6	Ar	-8.4
B	5.5	K	11.5
C	29.4	Ca	-37.3
N	0.0	Ga	8.6
O	33.7	Ge	27.7
F	78.4	As	18.4
Ne	-6.9	Se	46.6
Na	12.7	Br	77.4
Mg	-55.4	Kr	-9.3
Al	11.9	Rb	11.0
Si	28.7	I	70.5

オン結合で結ばれているならば、水などの液体に溶けたときにばらばらにイオンに壊れてしまい、その分子の持つ高い機能を失ってしまいます。イオン結合では高い再現性と発展性を持ち効率の良い系を維持することはできませんから、原子を結び付ける結合は共有結合あるいは配位結合に限られてくるでしょう。元素はイオンになり易ければイオン結合で結ばれることが多くなります。表 3 - 2 および図 3 - 1 に示すイオン化ポテンシャルの値が小さいほど元素は陽イオンへ成り易く、また表 3 - 3 および図 3 - 2 に示す電子親和力の値が大きいほど陰イオンへなり易い性質を持っています。イオン結合ではなく共有結合あるいは配位結合で結ばれた分子が宇宙生物を構成していると考え、高いイオン化ポテンシャルと低い電子親和力を持った炭素、窒素、けい素、りん、硫黄のいずれかの元素を中心とした分子でなければならないでしょう。

単結合と多重結合

イオン結合では高い再現性と発展性を持ち効率の良い系を維持することが出来ませんから、原子を結び付ける結合は共有結合あるいは配位結合でなければなりません。種々の元素の共有結合あるいは配位結合を形成している 1 対の電子には、 sp^3 と sp^2 と sp と呼ばれる 3 種類の結合電子の形があります。図 3 - 3 に示すように sp^3 型の電子は互いに正面で相互作用をして単結合を形成しますので、結合エネルギーが大きく丈夫な結合になります。 sp^2 型と sp 型の電子は図 3 -

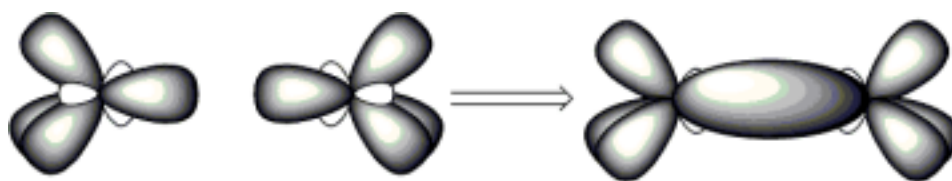


図3-3 sp^3 型炭素から炭素－炭素単結合

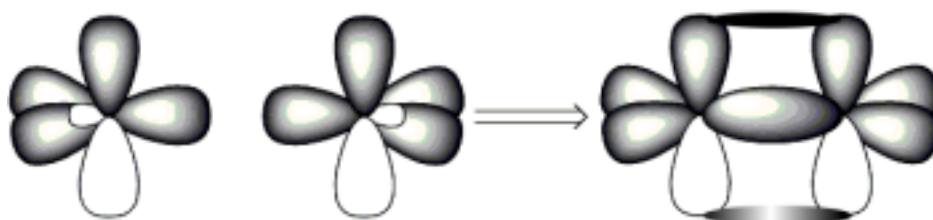


図3-4 sp^2 型炭素から炭素－炭素2重結合

4 に示すように正面で相互作用をして単結合を形成しますが、そのほかにその側面でも電子が相互作用します。この側面の相互作用による結合エネルギーは小さく原子間の距離が近いときに始めて結合が形成され、単独では結合を維持することが出来ません。単結合と組み合わせることにより、やっと結合が維持されます。この時、 sp^2 型と sp^2 型の結合が組み合わせるとき 2 重結合となり、 sp 型と sp 型の結合が組み合わせるとき 3 重結合となります。

そのため表 3 - 4 に示すように、2 重結合の結合エネルギーは単結合の 2 倍ほどは大きな結合エネルギーを持たず、単結合の 3 倍よりはるかに小さな結合エネルギーを 3 重結合は持っています。このように同じ結合でも単結合と 2 重結合や 3 重結合などの多重結合では、結合エネルギーの違

いによる化学反応性の違いを生むことから、宇宙生物の生命活動を維持するための多種多様な分子には多重結合の可能な元素の方が適していることになります。種々の元素の中で多重結合の可能な元素は原子価が 2 以上で無ければなりません。さらに、 sp^2 型と sp 型の電子は原子間の距離が近い時にだけ相互作用をして結合するため、けい素やゲルマニウムなどの共有結合半径の大きな元素では多重結合をすることは困難で通常の状態では存在しません。表 3 - 5 には共有結合をする種々の元素の共有結合半径をまとめておきますが、大部分の多重結合は共有結合半径の小さな炭素、窒素、酸素で形成されています。このことを考え合わせると、生物に適した中心元素は炭素、窒素、硫黄、りんであり、けい素、ゲルマニウムなどはむしろ適していないことになります。

表 3 - 4 単結合と多重結合の結合エネルギー

	炭素—炭素	炭素—窒素	炭素—酸素	窒素—窒素
単結合	83	73	86	59
2 重結合	146	147	179	100
3 重結合	200	224		225

表 3 - 5 種々の元素の共有結合半径 ()

H	Be	B	C	N	O	F
0.33	1.07	0.89	0.77	0.70	0.66	0.64
	Mg	Al	Si	P	S	Cl
	1.40	1.26	1.17	1.10	1.04	0.99
Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br
1.35	1.31	1.26	1.22	1.18	1.14	1.11
Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I
1.53	1.48	1.44	1.40	1.36	1.32	1.28
Au	Hg	Tl	Pb	Bi		
1.50	1.48	1.47	1.46	1.46		

共有結合のイオン結合性

2 つの元素が近づくときに、一方の元素に属する電子と他方の元素の原子核の陽子との間に電気

的な引力が生まれ、同時に一方の元素の原子核の陽子と他方の元素に属する電子の間にも電気的な引力が生まれます。このように2つの元素が近づくときに元素の間に相互に生まれる引力で結びつく結合を共有結合と呼んでいます。イオン結合では高い再現性と発展性を持ち効率の良い系を維持することが出来ませんから、宇宙生物を形作る物質は多くの原子を結び付ける結合が共有結合あるいは配位結合で結ばれていなければなりません。そこで少し共有結合の性質を調べてみましょう。

物理学で認められている静電引力と同じように、共有結合の基になる陽子と電子の間の引力も2つの中心の電荷の大きさと中心の間の距離に関係します。同じ種類の元素が共有結合するときには、それぞれの原子核に含まれる陽子の数も共有結合半径も等しくなりますから、2つの電気的な引力は等しくなります。しかし、異なる元素の場合にはそれぞれの元素の陽子数も共有結合半径も異なりますから、2つの電気的な引力の大きさは当然違ってきます。多くの陽子をもち共有結合半径の小さな元素と電子の間には大きな引力が働き軽い電子は引き付けられますが、陽子数が

表3 - 6 いろいろの物質の双極子モーメント

物質名		μ	物質名		μ
水素	H ₂	0.00	蟻酸	HCOOH	1.41
酸素	O ₂	0.00	ニトロメタン	CH ₃ NO ₂	3.46
オゾン	O ₃	0.53	アセチレン	HC≡CH	0.00
窒素	N ₂	0.00	エチレン	H ₂ C=CH ₂	0.00
二酸化硫黄	SO ₂	1.63	エタン	H ₃ CCH ₃	0.00
アンモニア	NH ₃	1.47	アセトニトリル	CH ₃ CN	3.92
水	H ₂ O	1.85	塩化エチル	CH ₃ CH ₂ Cl	2.05
一酸化窒素	NO	0.15	臭化エチル	CH ₃ CH ₂ Br	2.03
メタン	CH ₄	0.00	ヨウ化エチル	CH ₃ CH ₂ I	1.91
塩化メチル	CH ₃ Cl	1.87	アセトアルデヒド	CH ₃ CHO	2.69
塩化メチレン	CH ₂ Cl ₂	1.60	酢酸	CH ₃ COOH	1.74
クロロホルム	CHCl ₃	1.01	蟻酸メチル	HCOOCH ₃	1.77
四塩化炭素	CCl ₄	0.00	アセトアミド	CH ₃ CONH ₂	3.76
一酸化炭素	CO	0.11	エタノール	CH ₃ CH ₂ OH	1.69
二酸化炭素	CO ₂	0.00	ジメチルエーテル	CH ₃ OCH ₃	1.30
ホルムアルデヒド	CH ₂ O	2.33	ジメチルアミン	(CH ₃) ₂ NH	1.23
メタノール	CH ₃ OH	1.70	ジメチルスルフィド	CH ₃ SCH ₃	1.50
メタンチオール	CH ₃ SH	1.52	ピリジン	C ₅ H ₅ N	2.19
メチルアミン	CH ₃ NH ₂	1.31	ベンゼン	C ₆ H ₆	0.00
ホルムアミド	HCONH ₂	3.73	トルエン	C ₆ H ₅ CH ₃	0.36

少なく共有結合半径が比較的大きな元素と電子の間では引力が小さく電子をあまり近くには引き付けられません。結果として、多くの陽子をもち共有結合半径の小さな元素の近くに、共有結合に関与する電子がより引き付けられてしまいますから、この元素は相対的に少し電子が多くなってしまい陰イオン性を帯びてしまいます。同時に、陽子数が小さく共有結合半径が大きな元素は少し電子が少なくなってしまいますから、陽イオン性を帯びてしまいます。この電子の偏りを共有結合のイオン結合性といいますが、イオン結合性の陰陽は元素同士の相対的な関係に依存するものです。

表 3 - 7 結合の双極子モーメント (μ 、結合モーメント)

結合	μ	結合	μ	結合	μ	結合	μ
H-P	0.36	D-O	1.52	N-O	0.3	C=C	0.0
H-I	0.38	H-F	1.94	N-F	0.17	C=N	0.9
H-C(sp ³)	0.30	C-C	0.0	P-I	0.0	C=O	2.3
H-S	0.68	C-N	0.22	P-Br	0.36	C=S	2.6
H-Br	0.78	C-O	0.74	PCl	0.81	N=O	2.0
H-Cl	1.08	C-S	0.9	As-Cl	1.64	C $\equiv$ C	0.0
D-Cl	1.09	C-I	1.19	Sb-Cl	2.6	N $\equiv$ C-	3.5
H-N	1.31	C-Br	1.38	S-Cl	0.7	C=N-	3.0
D-N	1.30	C-F	1.41	Cl-O	0.7	Li-C	1.4
H-O	1.51	C-Cl	1.46	Cl-F	0.88	Sn-Cl	>3.0

あまり電気伝導性の良くない物質の両端に電圧を掛けると電気コンデンサーとなりますが、このコンデンサーの蓄電量から実験的に求められる分子双極子モーメントは各結合の双極子モーメントのベクトル和になっています。そのため多くの物質の分子双極子モーメントよりいろいろの結合の双極子モーメントが求められています。表 3 - 6 と表 3 - 7 には種々の化合物の分子双極子モーメントと代表的な結合の双極子モーメントを纏めておきました。ここで求められる結合の双極子モーメントは結合モーメントと呼ばれ、2つの元素の電荷と原子間距離に比例しますから、正確に原子間距離が測定できればそれぞれの原子の上にある電荷を算出することが出来ます。食塩のように完全なイオン結合であれば、 Na^+ と Cl^- のように各原子の上の電荷は電子の電荷と等しくなります。既に電子の電荷は測定されていますから、この値と比較すればいろいろの結合のイオン結合性を実験的に求めることが出来ます。例として、代表的な分子の結合モーメント(μ)、原子間距離(r)とともに共有結合のイオン結合性を表 3 - 8 に挙げておきます。塩化水素の2つの原子が共有結合 83.5%とイオン結合 16.5%で結ばれている例からも分かるように、異なる元素の間の共有結合では必ず多少のイオン結合性があります。Pauling は共有結合の結合エネルギー

ギーを基に式 3 - 1 の関係式を提案しました。

$$\chi_A - \chi_B = (E_{A-B} - \frac{E_{A-A} + E_{B-B}}{2})^{\frac{1}{2}} \quad \text{式 3 - 1}$$

この式で E_{A-B} は原子 A - B 間の結合エネルギー、 χ_A は原子 A の電気陰性度を表しています。

表 3 - 8 共有結合のイオン結合性

	HF	HCl	HBr	HI	CH ₃ O-H
μ ($\times 10^{-18}$ esu.cm)	1.94	1.08	0.78	0.38	0.30
r (Å)	0.92	1.27	1.41	1.61	0.96
イオン結合性 (%)	45	16.5	12	5	6.5

表 3 - 9 Pauling の電気陰性度

H																
2.1																
Li	Be											B	C	N	O	F
1.0	1.5											2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl
0.9	1.2											1.5	1.8	2.1	2.5	3.0
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br
0.8	1.0	1.3	1.5	1.6	1.6	1.5	1.8	1.8	1.8	1.9	1.6	1.6	1.8	2.0	2.4	2.8
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I
0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	1.9	2.2	2.2	2.2	1.9	1.7	1.7	1.8	1.9	2.1	2.5
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At
0.7	0.9	1.1	1.3	1.5	1.7	1.9	2.2	2.2	2.2	2.4	1.9	1.8	1.8	1.9	2.0	2.2
Ir	Ra	Ac	Th	Pa	U	Np										
0.7	0.9	1.1	1.3	1.5	1.7	1.3										

いろいろな結合の結合エネルギーから各元素の電気陰性度が算出されていますので、表 3 - 9 に挙げておきます。この電気陰性度が大きいほど陰イオン性が大きくなり、小さいほど陽イオン性が大きくなります。例えば、塩化メチルでは炭素は電気陰性度が 2.5、塩素が 3.0 ですから、炭素が僅かながら陽イオンに、塩素が僅かながら陰イオンの性質を帯びていることを示しています。

また、メタンでは水素は電気陰性度が 2.1 ですから若干陽イオン性を示し、炭素は陰イオン性を示していると思われます。言い換えれば、あらゆる共有結合におけるイオン結合性の向きがこの電気陰性度の値から容易に予想することが出来ます。しかも、この電気陰性度の値の差が大きいほどイオン結合性が大きくなることも定性的に表しています。

この電気陰性度の値があまり大きくも小さくもない元素は、結合する相手の元素により陽イオン性も陰イオン性も示すことを意味していますから、宇宙生物が生命活動を維持するために必要とする多種多様な分子の性質を生み出すためには大切なことと思われます。この考えに元素の存在量を加味すると、炭素、りん、硫黄は結合している元素により陽イオンの性質を示す場合と陰イオンの性質を示す場合がありますから、宇宙生物を構成する物質の中心となる元素として適していると思われます。これに対して、けい素の電気陰性度は 1.8 ですから共有結合をし易い元素の中では比較的小さいため、陰イオンの性質を示すことはほとんど無く、常に陽イオンの性質を示します。このことは宇宙生物を構成する物質の中心となる元素としてはむしろ適していないと思われる。

連続的な元素の鎖

材料となる宇宙の元素が約 90 種類に限られているにもかかわらず、宇宙生物も化学反応で生命活動を維持するためには多種多様な分子を必要とします。当然、多種多様な分子の中心となる元素は、数多くの元素を一つの分子に構成出来るもので無ければならず、繰り返し結合できる元素であれば、数多くの元素で構成される分子も可能になり、単結合や多重結合などその元素の結合の違いにより飛躍的に多くの分子が構成されます。例えば、4 価の原子価を持つ元素を W、3 価の原子価を持つ元素を X、2 価の原子価を持つ元素を Y、1 価の原子価を持つ元素を Z とするとき、それらの原子で構成できる共有結合化合物の種類を表 3 - 10 にまとめてみました。この表からも判るように、原子の数が少し増すだけで、構成できる分子の種類は飛躍的に増加します。たとえば、 $W_n Z_{2n+2} Y$ の例としてアルコールとエーテルが $C_n H_{2n+2} O$ の分子式を持っていますが、 $CH_4 O$ の分子式を持つ分子はメタノールしか存在しません。分子式 $C_2 H_6 O$ の化合物はエタノールとジメチルエーテルの 2 種類ですし、 $C_3 H_8 O$ の分子式の化合物には 1-プロパノール、2-プロパノール、メチルエチルエーテルの 3 種類が存在します。そして表 3 - 10 は $C_{12} H_{26} O$ の分子式を持つ化合物には合わせて 6123 種類のアルコール類とエーテル類が存在することを意味しています。宇宙に多く存在する高い原子価の元素の中で、酸素や窒素は 3 つまで繰り返し結合できますが、それ以上では不安定で分解してしまいます。炭素、けい素、硫黄はほとんど無限に結合を繰り返すことが出来ます。しかし、連続的に結合をする硫黄の原子価は 2 であり他の元素と結合することが出来ません。当然複雑な分子を構成することは出来ません。

さらに酸素原子を間に挟んでけい素、りん、硫黄は連続的に結合することが出来ます。酸素を挟んで連続的に結合したりんの化合物はポリりん酸あるいはピロりん酸と呼ばれ、水に溶けるとイオン性のりん酸に分解してしまいます。同じように硫黄と酸素が交互に結合した化合物は無水硫酸といい簡単に硫酸に分解してしまいます。けい素と酸素が交互に連続的に結合したものは無水

けい酸あるいはシリカと呼ばれ、非常に融点の高い剛直な固体となります。無水けい酸は石英や長石として岩石中に多く含まれ、非常に安定な物質です。このように元素の結合の仕方やその化合物の性質を考えてみると、炭素あるいはけい素の連続的に結合した鎖が骨格となった分子が、宇宙生物を構成しているのではないのでしょうか。

表 3 - 10 原子の数と異性体数

n	W_nZ_{2n+2}	W_nZ_{2n}	$W_nZ_{2n+2}Y$	$W_nZ_{2n}Y$	$W_nZ_{2n+3}X$	$W_nZ_{2n+1}XY_3$
類例	飽和炭化水素	2 重結合物質	アルコール類 メルカプタン類	ケトン類、 アルデヒド類	飽和アミン類	ニトロ化合物
1	1	0	1	1	1	3
2	1	1	2	1	2	17
3	1	1	3	4	4	130
4	2	3	7	11	8	751
5	3	5	14	33	17	3740
6	5	13	32	91	39	
7	9	27	72	254	89	
8	18	66	171	698	211	
9	35	153	405	1936	507	
10	75	377	989	5296	1238	
11	159	915	2460		3057	
12	355	2315	6123			

4. 宇宙生物の生命活動を維持する化学反応

生命を維持するエネルギー

いろいろな元素が互いに引き付けあって結合するときには、結合することにより安定化するために、結合エネルギーと呼ばれるエネルギーを放出して分子を形作ります。この時、原子間の距離は表 3 - 5 に挙げた共有結合半径の和になるときにもっとも大きな結合エネルギーを放出します。また、結合の方向は元素により大きく異なります。炭素やけい素のように原子価が 4 価の元素ではその結合の方向はお互いに 109.5 度の角度を持つときに最も安定しています。しかし、多くの元素で構成される分子においては、全ての元素を結ぶ結合の原子間距離と結合角を最適に保つことは出来ませんから、当然そこには歪みが生じてきます。そこで、すべての結合エネルギーと歪みのエネルギーの総和をエンタルピーと呼んで、元素が集合して分子を形作ったときに放出する総エネルギーと考えています。このエンタルピーの値が負に大きいほど安定な分子と考えることが出来ます。

次に、多くの小学生が学ぶ小学校の昼休みを考えてみてください。先生が何もしなくても給食が終わると、生徒は元気に運動場に飛び出してゆき遊び始めます。昼休みが終わると先生は始業のチャイムを鳴らして生徒を教室に呼び集めます。そして大きな声を張り上げて勉強が出来るように席に着かせます。それでもだめならば、先生は生徒の注意を引くような話や行動をとるでしょう。このようにして、生徒を教室という秩序の中に纏めて行きます。先生はチャイムを鳴らしたり、声を張り上げたり、注意を引くような行動をとりましたが、この時先生はかなりのエネルギーを使わなければなりません。

物質は分子がある秩序を持って集合して形作られますが、このように秩序を持って集合するときには、分子にも小学生にも同じようなエネルギーを必要とします。逆に、物質も小学校も放って置けば少しづつエネルギーを放出して次第に分子や小学生の秩序を乱して散り散りばらばらになってゆきます。このようなエネルギーをエントロピーと呼んでいます。このエンタルピーとエントロピーの 2 種類のエネルギーを足し合わせたものは自由エネルギーといい、その物質のもつエネルギーの総計と考えてよいでしょう。これらの 3 種のエネルギーには式 4 - 1 のような関係が成り立っていますから、エントロピーは温度の影響を受ける性質があり、温度が下がると次第に 0 に近づきます。冬の寒い日に小学生があまり運動場に出て行かないようになる事も何となく肯ける気がします。ただし、G は自由エネルギー、H はエンタルピー、S はエントロピー、T は絶対温度を意味しています。

$$G = H - TS$$

式 4 - 1

一般に、ある物質が新しい物質に化学反応をして変化してゆくとき、熱や光や電気などのエネルギーを出します。また、熱や光や電気のエネルギーを加えてやらないと化学変化が起こらないこ

ともあります。このような物質の化学変化において、その自由エネルギーは変化しますが、同時に余った一部のエネルギーは熱エネルギー、光エネルギー、電気エネルギーあるいは運動エネルギーとして放出されます。このときの全ての自由エネルギーと放出される各種のエネルギーの総和は反応の前後で変化がなく、エネルギーの保存則が成り立ちます。このエネルギー保存則は地球上だけでなく、あらゆる宇宙で成り立つ物理学の公理と考えられますから、宇宙の生物体内でも構成する物質が化学的に変化し、そのとき副生する熱エネルギーや運動エネルギーが利用されて全ての生命活動が維持されるものと考えられます。

生命を維持する化学反応

登山では、高い所へ登るよりも、高い所から下るほうが早く容易に歩くことが出来ます。同じように化学反応においても、大きな自由エネルギーを持つ物質が小さな自由エネルギーをもつ物質に変化するほうが容易で、そのとき各種のエネルギーを放出します。逆に小さな自由エネルギーしか持たない物質が、大きな自由エネルギーを持つ物質に変化するときには、外から熱エネルギー、光エネルギーあるいは電気エネルギーを貰い受けねばなりません。反応の前後での自由エネルギーの大小が反応の成り行きを決めていることになります。さらに、反応の前後で自由エネルギーの差が大きいほど反応は容易に進むと考えてよいでしょう。平衡反応における成分の割合と自由エネルギーの差をそれぞれ K と ΔG とすれば、比例定数 χ を含む式 4 - 2 で表されるような関係があり、25 のときの値をグラフに示すと図 4 - 1 のようになります。

$$K = \chi \cdot e^{\frac{\Delta G}{RT}} = \chi \cdot e^{\frac{\Delta H - T\Delta S}{RT}} \quad \text{式 4 - 2}$$

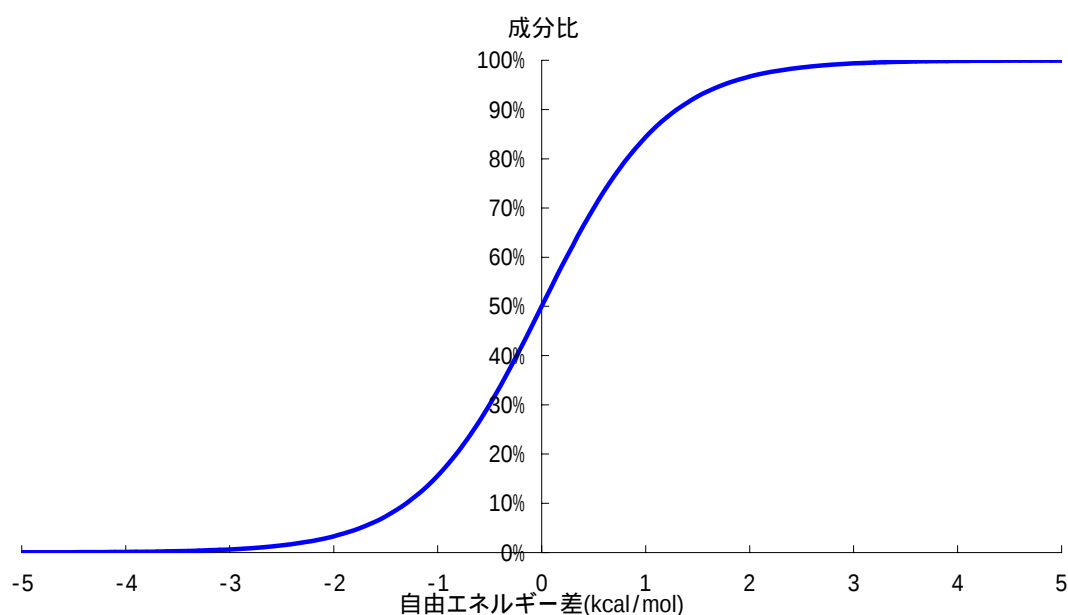


図4 - 1 平衡反応における自由エネルギーと成分比

たとえば、自由エネルギーの差が無いときには、平衡反応における 2 つの成分の割合は 50% ずつになります。反応の前後で自由エネルギーの差が 1kcal/mol のときは反応が 85% と 15% で平衡に達してしまい、それ以上には反応は進みません。2kcal/mol のときは反応が 97% で平衡に達しますが、3kcal/mol 以上では反応はほとんど完結してしまいます。通常の化学反応では、この数 kcal/mol の差は全体の自由エネルギーの 1% にも満たないほんの僅かの値に相当するものです。自由エネルギーが結合エネルギーを主体とするものであることを考えれば、反応の前後で結合エネルギーの総和が大きく変化するときには、反応は一方向的に進行してしまい結合エネルギーの大きな物質はもはや変化しなくなってしまいます。逆に、結合エネルギーがほんの僅かに違う物質の間の変化では、温度や濃度などの僅かな条件の違いにより、反応がいずれの方向にも可逆的に進行するようになります。

生命を構成する元素

宇宙に比較的多く存在する元素で出来た物質の原子間の結合エネルギーの平均値は地球上でも測定できます。とくに宇宙生物を構成している物質の骨格となる分子が炭素あるいはけい素を中心としたものと考えられますので、表 4 - 1 に炭素およびけい素と他の元素の間の結合エネルギーを中心に種々の原子間の結合エネルギーをまとめました。炭素は 80kcal/mol から 100kcal/mol 程度の結合エネルギーで水素、炭素、窒素、酸素、塩素、硫黄など多くの元素と共有結合することができます。このことは窒素と酸素が炭素の上で置き換わる反応が容易に起こり、しかもその

[illegible]

反対の反応も容易に進行することを意味しています。同じように水素と炭素の置き換えりや水素と酸素の置き換えりなど多種多様の反応が容易に出来ることを意味しています。さらに、炭素は2重結合、3重結合で炭素、窒素、酸素と結合することが出来ます。構造的変化が少なく結合エネルギーの減少も少ないため、このような多重結合から単結合への変化は容易に進行します。自由エネルギーの大部分は結合エネルギーの総和で占められており、エントロピーによる寄与は微々たる物ですから、炭素の上の代表的な化学反応とその反応の前後での結合エネルギーの総和の変化を考えることにより、いろいろの化学変化が宇宙生物の中で起こりうることを理解できると思います。他方、けい素も多くの元素と共有結合できますが、種々の元素とけい素の間の結合エネルギーと比較して、けい素と酸素の間の結合は極端に大きな結合エネルギーを持っています。けい素のこの性質はけい素と種々の元素の結合をもつ物

質が多種多様に存在しても、酸素を含む物質と反応すると酸素とけい素の結合を持つ物質を生じ反応は終結してしまい、それ以上の変化が進行しなくなることを意味しています。例えば図4-2に示すように、酢酸アミドを加水分解して酢酸とアンモニアの生成する反応では総結合エネルギーが1モルにつき5kcal減少するに過ぎませんが、トリメチルシリルアミンが水と反応してトリメチルシラノールとアンモニアを生成する反応では総結合エネルギーは1モルにつき63kcalも増加します。このため、酢酸アミドの反応では僅かに反応条件を変えることにより逆反応も起こりますが、シリルアミンと水の反応では生成物が格段に安定になり、かなり過激な反応条件にしても逆反応が全く起こらないものと思われます。その上、けい素は他の元素と多重結合することができませんから、反応の種類がかなり制限されてしまいます。

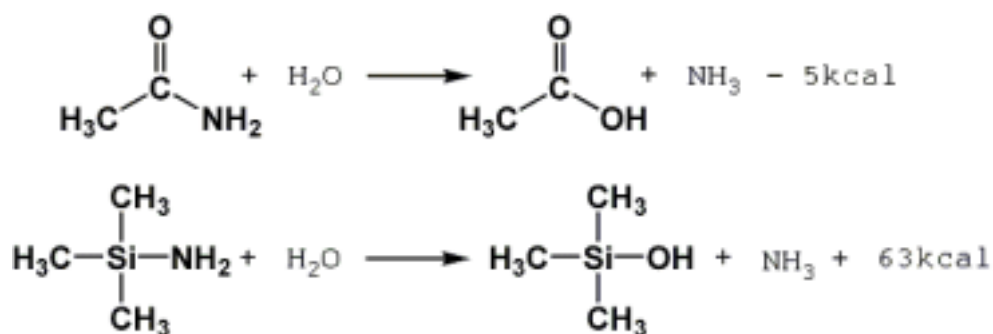


図4-2 けい素化合物と水の反応

生物が増殖・成長のために高い再現性と発展性を持ち、高い機能と高い効率を示すためには微妙な条件の違いで反応の成り行きが変化したり、反応が繰り返し起こる必要があるでしょう。さらに、効率よく反応が起こるためには多種多様な物質を再生利用することも必要と思われます。多種多様であり容易に可逆的に進行する化学反応が生命活動を維持するものと考えてよいでしょう。生命活動を維持するための化学反応をするには、偏った結合エネルギーを持つけい素を中心とする物質は不適当で、宇宙生物を構成する物質の中心となる元素は炭素以外にはありえないと考えてよいでしょう。

5. 生物を育む海

宇宙生物の生活温度

炭素を中心元素とする物質を有機化合物と呼んでいますが、宇宙生物が有機化合物で構成されていることを前章で考えました。そこで有機化合物の性質を考えてみましょう。大部分の有機化合物は全ての元素が共有結合で結ばれていますが、その共有結合が 200℃ 以上では切断して分解してしまいます。たとえ高い機能を持つ複雑な有機化合物であっても、200℃ 以上の温度では分解、変性してその機能を失ってしまいます。高い機能を完全に維持するためには 150℃ 以下の環境で無ければならないでしょう。他方、通常の有機化合物の反応は - 100℃ 以下ではほとんど進行しません。このような低い温度では、たとえ反応が進行しても極めて緩慢なものとなるに違いありません。宇宙生物が誕生し進化する天体は - 100℃ 以上の温度にかなりの期間保たれており、150℃ 以上の温度には決して上がらないと思われます。もしその天体が短期的に低温の状態になると、生命活動は凍結されてしまうでしょう。言い換えれば、宇宙生物の生活温度は - 100℃ から 150℃ の温度範囲ということになり、生物の棲息できる天体は冷えて固まった天体で極めて温暖な気象条件を持つものに限られます。

出会いの反応と別れの反応

多種多様な化学反応があるにもかかわらず、反応の形態は出会いの反応(2 分子反応)と別れの反応(1 分子反応)の 2 種類しかありません。出会いの反応は 2 種類の分子が衝突し反応するもので、別れの反応はある分子が別の分子に分解あるいは変性してゆくものです。

A 子さんと B 君はそれぞれ広い東京にわびしく住んでいましたが、二人は仕事の都合で毎日同じ電車に乗るようになり、いつの日からか B 君は A 子さんに惹かれるようになりました。B 君の情熱が通じて、ついに二人は幸せな恋人として結ばれることになりました。このハッピーエンドを振り返ってみると、A 子さんも B 君もわびしい生活をしていたためかなり精神的に不安定で恋人の欲しい状態にありました。また、偶然に二人が度々出会う機会に恵まれました。さらに、B 君の情熱的なエネルギーが A 子さんの心を動かし二人とも幸せになったのではないのでしょうか。化学反応における出会いの反応はこの恋愛物語と極めてよく似ています。反応する 2 種類の分子は反応性が高いほど容易に反応が進行しますし、反応の前後で安定性が増加する場合に反応が容易に進行します。さらに、2 種の分子が互いに衝突する機会が多いほど反応は速やかに進行します。

2 種の分子の衝突する機会はそれぞれの分子の数に比例しますし、それぞれ、分子の運動の速度にも比例します。ある器の中の分子数を濃度と呼んでいますが、出会いの反応の速度はそれぞれの分子の濃度の積に比例します。また、溶媒の粘度が大きいほど分子運動が制限されるため反応は遅くなりますが、温度が高くなると溶媒の粘度が小さくなり、分子の運動の速度も速くなりますから、出会いの反応の速度は温度が高くなれば飛躍的に速くなります。

A 子さんと B 君は仲の良い恋人同士でしたが、最近何かと気の合わないことが多くなってきまし

た。A 子さんは洒落たコーヒーパーラーで美味しいケーキを食べることが好きですが、B 君は赤提灯でいっぱい飲むことをこよなく好みます。以前はお互いに無理をしていましたが、だんだんと我慢の限界になって来ました。ある日のデートでこの限界を超してしまい、分かれることになってしまいました。この恋の破局の原因は A 子さんと B 君が互いに引き付けあっていた愛の力が弱まったためであり、外部の人の影響は無いと考えることが出来ます。化学反応における別れの反応もこの A 子さんと B 君の関係に良く似ています。二つの原子を結ぶ結合が不安定であればあるほど、別れの反応は容易に進行して行き、それ以外の物質はこの反応に影響を与えません。表 2 - 2 にまとめた元素の放射壊変は最も典型的な別れの反応であり、外界の影響を全く受けず、陽子と中性子を結び付けている力が相対的に小さいために起こります。

物質は固体、液体、気体の 3 つの状態

多種多様な化学反応があるにもかかわらず、反応の形態は別れの反応と出会いの反応(2 分子反応)の 2 種類しかありません。そのため、いろいろの物質の状態での分子の動きを考えることが、多くの元素の集合してゆく出会いの反応について考えるときには大切なことと思われます。

一般に、分子と分子の間には相互に働く分子間力と呼ばれる弱い引力が働いています。また、物質の中で分子は動き回りますが、そのときの運動エネルギーは低温では小さく温度が高くなるほど大きくなります。物質には固体、液体、気体の 3 態があり、この分子間力と運動エネルギーの大きさの大小により物質の状態は決まってきます。しかも、運動エネルギーは温度により変化しますから、物質の状態も温度により固体から液体へ、さらに液体から気体に変化します。また、分子間力は分子と分子の間の距離に反比例するように変化しますから、圧力が高くなり分子の密度が高くなると、分子の間の距離

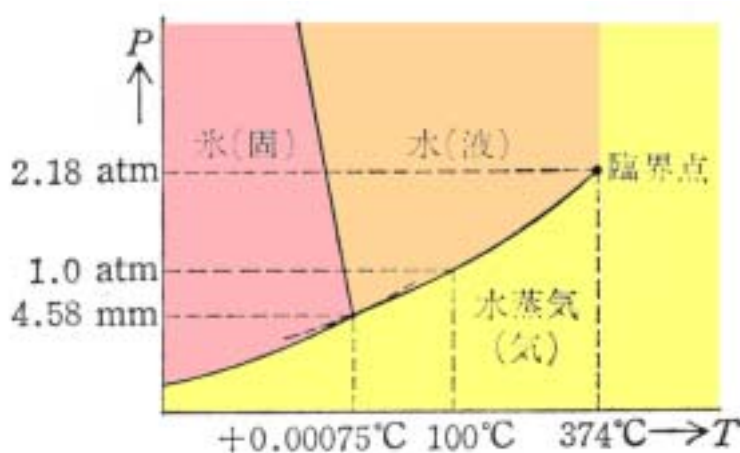


図 5-1 水の状態図

が小さくなるため分子間力が大きくなりますから、物質の 3 態も変化します。いろいろな物質の温度と圧力での状態は、図 5 - 1 に示す水の状態図と同じような関係にあります。

温度が低いために分子の運動エネルギーが分子間力よりはるかに小さいときには、固体の状態になり、分子は整然と規則的に並んでほとんど動くことが出来なくなります。この状態では分子はその配列を崩すほどには動くことが出来ません。温度が少し高くなり分子間力とほとんど同じ程度まで分子の運動エネルギーが大きくなると、分子は整然としたその配列を保つことが出来なくなり、液体となって物質の中を分子は自由に動き回るようになります。さらに温度が高くなり分

子間力よりも分子の運動エネルギーがはるかに大きくなると、分子は物質の中の分子間力のしがらみから開放されて、自由な世界に飛び出してゆきます。この飛び出す現象を気化といい、分子が分子間力の影響を受けずに自由に運動できる状態を気体の状態といいます。

テニスのボールが飛んできて身体にぶつかりと力を受けて痛みを感じます。同じように、質量を持った分子が気体の状態になって自由に動き回り、壁に衝突すると壁は何がしかの力を受けます。これを圧力といいます。地球の大気が地球の表面に衝突するときに生まれる圧力を大気圧といい、海拔 0m では 1cm^2 に約 1kg となります。気体の衝突で受ける力は分子の数が少なければ少なく、分子の数が多ければ受ける力も大きくなります。言い換えれば、圧力は自由に動き回る気体の分子の密度に比例するという事です。密度がある一定の体積中の分子の数を意味していることから、気体の圧力はその体積に反比例し、気体の分子の数に比例します。

また、ゆっくりしたテニスのボールにぶつかってもあまり痛くありませんが、強烈なスマッシュのボールにぶつかりと痣が出来るほど痛いものです。物質の衝突で生まれる力はその物質の速度が速ければ速いほど大きくなります。温度が高くなって分子の運動が激しくなると、壁に衝突する数も増加しますが同時に分子の速度も大きくなります。結果として温度が高くなれば気体の圧力が高くなります。体積 V の器の中に n 個の分子の気体を入れると、温度 T のときの器の中の気体の圧力 p は温度と分子の数に比例し器の体積に反比例します。比例定数を R とすれば式 5 - 1 のような関係式で表すことができ、これを理想気体の状態方程式と呼んでいます。

$$pV=nRT \qquad \text{式 5 - 1}$$

この関係式は理論的には自由に動き回る分子同士の相互作用が全くない理想的な気体に対する関係式ですが、現実存在する気体の関係を比較的良く表していますから、実際の化学の研究に便利に用いられています。この式を用いて計算すると、室温で 1g の水は 100°C まで加熱して完全に気化すると約 1700 倍の体積の水蒸気に膨張します。水を入れた容器を密閉して加熱すると、水が気化して内部の圧力が高くなります。この高い圧力を利用すれば蒸気機関を動かすことも出来ますが、容器の耐圧強度を越すと容器が壊れて爆発をすることもあります。

生物誕生は溶液中で

簡単な物質から生命活動の維持に必要な複雑な物質へ進化してゆくときには、多くの元素の集合してゆく出会いの反応が主体となります。出会いの反応は 2 種類の分子が衝突して進行する反応ですから、分子が互いに自由に動き回るときに 2 種類の分子は衝突することが出来ます。もし、一方の分子が動かない場合には衝突はかなり起こりにくくなります。さらに両者とも動かない場合には衝突は全く起こらないでしょう。固体は分子が整然と並んでいて、互いの分子の間には弱い分子間力が働いて安定化していますから、その配列を崩す程には分子は動きません。液体は自由に動き回れますが、分子同士の分子間力により分子の集合しているところから抜け出すことが出来ません。

そのため 2 種類の固体が在ってもその分子が衝突することはほとんどありません。固体と液体が在るときは固体の表面に液体の近づくことが出来ますが、その分子が衝突することは固体の表面に限られてしまいます。固体と気体が在るときも同様に分子の衝突は限られてしまいます。また液体と気体では、分子はそれぞれの中では自由に動き回ることができますが、それらの分子が液体と気体の境目を通り越すことはかなり難しいと思われます。2 種類の分子が容易に衝突して出会いの反応をすることが出来るのは 2 種類の物質が液体同士あるいは気体同士のときだけに限られます。しかし、宇宙生物の生活温度と考えられる - 100 から 150 の温度で液体や気体の状態であることのできる物質の種類はさほど多くはありません。たとえば、地球上で天然に在る気体は約 10 種類、液体は 30 種類程度と見積もることができます。宇宙では温度と圧力が必ずしも地球の環境に近いものとは思われませんが、物質の種類が飛躍的に増えるとは思われません。また圧力の低い環境では多くの物質が気体になりますが、そのときは気体となった物質は大変希薄で互いに衝突する機会は非常に少ないものと思われれます。このように考えてくると多種多様の物質が単なる液体分子同士あるいは気体分子同士の衝突で形作られてきたとは思われません。

これとは別に、物質が液体に溶け込んだときには、物質の分子はその液体の中を自由に動き回ることが出来ます。そのため液体に溶けた 2 種類の物質の分子は容易に衝突することができ、反応が進行します。このとき物質を溶かす母体となる液体を溶媒、溶けた物質を溶質、物質の溶けた液体を溶液といいます。多種多様な物質が生物の誕生、進化の段階でも寄与すると思われれますが、それらの物質は主に溶液中で分子の衝突による出会いの反応で生じてくると思われれます。

生物が誕生し進化する溶液

生物を構成する物質を作る出会いの反応は宇宙生物の生活温度である - 100 から 150 の温度範囲で多量にある液体の中で起こると思われなければなりません。固体の状態から液体の状態へは凝固点あるいは融点で変化しますが、固体と液体の 2 つの状態の分子間相互作用にはあまり大きな違いがありませんから、体積の変化もあまり大きくありません。そのため、図 5 - 1 でも分かるように、凝固点の値はほとんど圧力に影響されませんから、かなり高い大気圧でも低い大気圧でも地球上の凝固点とほぼ同じ凝固点を示します。このことから単体硫黄、黒鉛、酸化ケイ素、酸化アルミニウムなどの地球上で融点が 100 以上の固体の物質は圧力の異なる他の宇宙でも液体の状態では存在しないことを意味しています。

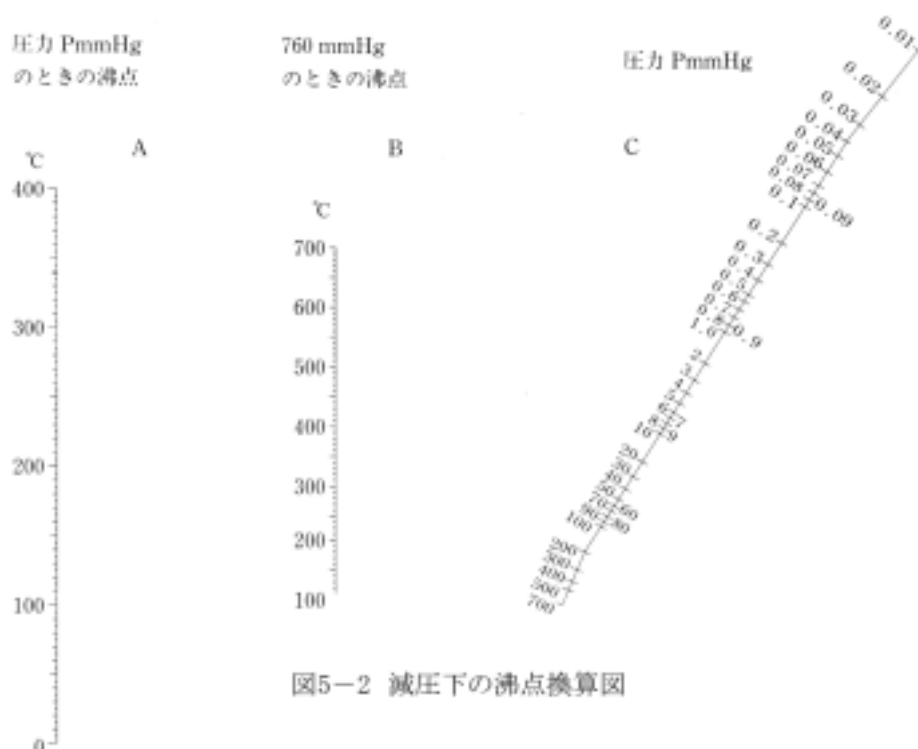


図5-2 減圧下の沸点換算図

さらに圧力が下がりますと、固体と液体と気体の3態が共存できる特殊な条件になります。この条件を3重点といい、この3重点よりも低い圧力の環境では物質が液体になることがありません。図5-1から分かるように水の3重点の圧力は0.006気圧で、ちょうど火星の大気圧と同じくらいです。このことから現在の火星には液体の水は全く存在し得ないのではないかと思います。固体あるいは液体の状態から気体の状態への変化は温度と圧力により大きく変化しますが、1気圧(760mmHg)よりも低い圧力の下で気化する温度は図5-2の換算図によりおよそ近似することが出来ます。この図で地球上における沸点をB尺に取り、宇宙の彼方の天体の大気圧をC尺にとって直線で結ぶときA尺と交わる点の温度から、その天体でどのような物質が液体として存在できるか類推できることになります。この図を用いた沸点の類推には、種々の物質の地球上の沸点が基準になります。水素分子、酸素分子、窒素分子などのように赤外線などの電磁波では観測が困難な星間物質も多くありますが、表5-1には地球上から電磁波で観測できた物質の名前を挙げておきました。ここに挙げてある物質の中には大気圧が高い地球上では極めて不安定で調べることの出来ない物質も含まれていますが、可能な限りここに挙げてある物質の地球上における融点と沸点を併せて挙げておきます。その上、物質固有の臨界温度を超えともはや液体の状態にはなれなくなってしまいます。表5-2には宇宙で多く存在する元素で構成されている融点の低い物質の臨界温度と臨界圧をまとめておきました。水素、ヘリウム、窒素、酸素、一酸化炭素などは生活温度の温度範囲では臨界温度を超えているために、液体の状態で存在できず気体の状態にあります。メタンも少し温度が上がると液体では存在できず、気体になってしまいます。このように考えてくると、炭素を中心の元素とする物質が反応できる温度で液体の状態にあり溶媒になりうる物質は水、アンモニア、二酸化炭素、硫化水素、二酸化硫黄などに限られます。さ

らに、ある天体で生物が誕生し進化してゆくためには、生命活動を維持する反応に適した多量の溶媒がその天体になければなりません。つまり、その天体に生物に適した海がなければならず、生物は海の中に誕生し進化してゆくのでしょう。

表 5 - 1 電磁波で観測された星間物質（その 1）

分子式	物質名	周波数 (GHz)	融点	沸点
CO	一酸化炭素	115.271	-199	-192
NO	一酸化窒素	150.547	-164	-152
CH ₂ CO	ケテン	100.095	-151	-56
OCS	硫化カルボニル	97.301	-138	-50
CH ₃ SH	メチルメルカプタン	101.139	-123	6
CH ₃ CHO	アセトアルデヒド	79.150	-121	21
C ₂ H ₅ OH	エチルアルコール	90.118	-117	79
CH ₃ OCH ₃	ジメチルエーテル	86.224	-116	35
HNCS	チオイソシアン酸	129.013	-110	-90
CH ₃ CCH	メチルアセチレン	102.548	-102	-23
HCOOCH ₃	ギ酸メチル	100.482	-99	32
CH ₃ NH ₂	メチルアミン	73.044	-94	-6
CH ₃ OH	メチルアルコール	36.169	-94	65
C ₂ H ₅ CN	シアン化エチル	105.469	-93	97
H ₂ CO	ホルムアルデヒド	4.830	-92	-21
H ₂ S	硫化水素	168.763	-86	-61
CH ₂ CHCN	シアン化ビニル	1.372	-84	79
NH ₃	アンモニア	23.694	-78	-33
SO ₂	二酸化硫黄	104.029	-73	-10
CH ₃ CN	シアン化メチル	110.381	-46	82
CH ₃ NC	イソシアン化メチル	80.418	-45	60
HCN	シアン化水素	88.632	-14	26
H ₂ O	水	22.235	0	100
NH ₂ CHO	ホルムアミド	1.539	3	
HCOOH	ギ酸	85.927	9	101
NH ₂ CN	シアナミド	80.505	42	
SO	一酸化硫黄	86.094	95	

表 5 - 1 電磁波で観測された星間物質 (その 2)

分子式	物質名	周波数 (GHz)	融点	沸点
NS	硫化窒素	115.572	178	
AlCl ₃	塩化アルミニウム	102.031	190	183
CS	一硫化炭素	48.991	200	
KCl	塩化カリウム	99.930	776	1500
NaCl	塩化ナトリウム	104.190	801	1413
SiS	硫化ケイ素	90.772	940	
SiO	一酸化ケイ素	86.243	1702	1880
CSi	炭化ケイ素	157.494	2700	
CH ₃ C ₄ H	メチルジアセチレン	20.357		56
HCCCHO	プロピナール	37.290		61
AlF ₃	フッ化アルミニウム	98.928		1291
C ₃ H	プロピニルラジカル	32.660		
C ₃ H ₂	シクロプロペニリジン	46.756		
C ₃ N	シアノエチニルラジカル	98.940		
C ₃ O	一酸化三炭素	48.108		
C ₃ S	一硫化三炭素	23.123		
C ₄ H	ブタジニルラジカル	28.532		
C ₄ Si	四炭化ケイ素	42.945		
C ₅ H ₄	1,2-ペンタジエン-4-イン-3-イル-1-イリデンラジカル	45.351		
C ₆ H ₄	3,5-ヘキサジン-1-エン-2-イル-1-イリデンラジカル	23.565		
c-C ₃ H	シクロプロピニルラジカル	91.494		
CCH	エチニルラジカル	87.317		
CCS	一硫化二炭素	45.379		
CH	メチリジン	3.335		
CH ₂ CN	CH ₂ CN ラジカル	40.240		
CH ₂ NH	メチレンイミン	5.290		
CH ₃ CCCN	メチルシアノアセチレン	20.657		
CN	シアンラジカル	113.491		
CP	炭化リン	238.857		
H ₂ CS	チオホルムアルデヒド	104.617		
HC ₁₁ N	シアノペンタアセチレン	23.698		
HC ₅ N	シアノジアセチレン	23.964		
HC ₇ N	シアノトリアセチレン	24.816		

表 5 - 1 電磁波で観測された星間物質（その 3）

分子式	物質名	周波数 (GHz)	融点	沸点
HC ₉ N	シアノテトラアセチレン	14.526		
HCCCN	シアノアセチレン	81.881		
HCO	ホルミルラジカル	86.671		
HCO ⁺	ホルミルイオン	89.189		
HCS ⁺	チオホルミルイオン	128.021		
HN ₂ ⁺	ジアジニルイオン	93.174		
HNC	イソシアン化水素	90.664		
HNCO	イソシアン酸	87.925		
HNO	ニトロキシル	81.447		
HOC ⁺	イソホルミルイオン	89.487		
HOCO ⁺	HOCO ⁺ イオン	85.531		
OH	ヒドロキシルラジカル	1.667		
PN	窒化リン	93.980		
SiC ₂	シラシクロプロピン	94.245		

表 5 - 2 種々の溶媒の臨界温度()と臨界圧(atom)

物質	臨界温度	臨界圧	物質	臨界温度	臨界圧
水	374.2	218.3	アンモニア	132.3	111.3
酢酸	321.6	57.1	硫化水素	100.4	88.9
ベンゼン	289.0	48.6	塩化水素	51.4	81.5
二硫化炭素	279.0	78.0	二酸化炭素	31.0	72.9
酢酸エチル	250.1	37.8	メタン	-82.1	45.8
メタノール	240.0	78.5	一酸化窒素	-93.0	64.0
シアン化水素	183.5	53.2	酸素	-118.4	50.1
二酸化硫黄	157.5	77.8	一酸化炭素	-140.0	34.5
メチルアミン	156.9	73.6	窒素	-147.0	33.5
ブタン	152.0	37.5	ネオン	-228.7	26.9
塩素	144.0	76.1	水素	-239.9	12.8
塩化メチル	143.1	65.9	ヘリウム	-267.9	2.3

生命が誕生し進化する海

簡単な物質から生命活動の維持に必要な複雑な物質へ進化してゆくときには、多くの元素の集合してゆく出会いの反応が主体となります。温度が高くなると溶液中の溶質の運動が激しくなるため、この出会いの反応は温度が20 高くなれば他のすべての条件がまったく同じでも約 10 倍早く進みます。そのうえ、一般に温度が高くなると物質は溶媒によく溶け濃度が高くなります。出会いの反応は溶質のそれぞれの濃度に比例しますから、生命の誕生、進化は温度の変化に大きく影響されると思われます。低い温度では反応が遅すぎ、高い温度では早すぎることもあるでしょう。また、低い温度で起こる反応と高い温度で起こる反応が異なってしまう、同じ反応でないこともあります。生物が増殖・成長し、高い機能と高い効率を示すためには生物を構成する出会いの反応は高い再現性を持って進行しなければなりませんから、大きな温度の変化や不規則な温度変化があってはなりません。

融解熱に相当するエネルギーが外部から加わるときに、融点にある固体物質は液体の状態に変化してゆき、完全に液体になるまでは温度が変化しません。また、気化熱に相当するエネルギーが外部から加わるときも、液体物質が完全に気体の状態に変化するまでは物質の温度は沸点で一定します。逆に、気体物質は気化熱に相当するエネルギーを放出して液化し、液体が固体に状態の変化をするときには融解熱に相当するエネルギーを放出します。大きな融解熱や気化熱を持つ物質は多少のエネルギーの増減ではその状態の変化は一部分に限られます。そして、液体の状態は沸点を上限に融点を下限に保たれ、容易に気体または固体に完全に変化することがありません。

表 5 - 3 種々の溶媒の融解熱と気化熱(kcal/g)

物質	融解熱	気化熱	物質	融解熱	気化熱
水	0.080	0.540	塩化水素	0.013	0.106
アンモニア	0.079	0.328	酢酸	0.047	0.097
メタノール	0.024	0.263	ベンゼン	0.030	0.097
シアン化水素	0.074	0.223	ブタン	0.019	0.088
メチルアミン	0.047	0.199	塩素	0.022	0.069
二酸化硫黄	0.095	0.156	一酸化炭素	0.007	0.052
二酸化炭素	0.045	0.137	酸素	0.003	0.051
硫化水素	0.017	0.131	窒素	0.006	0.048
メタン	0.014	0.122	硫黄	0.005	0.039
一酸化窒素	0.018	0.110	ネオン	0.004	0.022
水素	0.014	0.109	ヘリウム	0.000	0.005

このため、その天体の海が大きな融解熱や気化熱を持つ物質でできている場合には、その天体の気候を支配し、生物の誕生や進化に適した小さな温度の変化や規則的な温度変化をもたらします。表 5 - 3 には宇宙生物の生活温度である - 100 から 150 の温度範囲で液体と成り易い物質の融解熱と気化熱をまとめました。この表でわかるように、水とアンモニアの海は気候を温暖にするため、生物を育む海に特に適しており、二酸化炭素や二酸化硫黄や硫化水素も生物が誕生や進化するときの海の可能性を持っていることになります。

表 5 - 4 種々の溶媒の比熱

物質	温度	比熱	物質	温度	比熱
水素	-252	2.330	アセトン	20	0.514
アンモニア	40	1.160	窒素	-197	0.475
水	20	0.999	酢酸エチル	20	0.457
メタノール	20	0.601	酸素	-200	0.398
一酸化窒素	-156	0.580	塩化エチル	0	0.367
エタノール	20	0.577	ベンゼン	10	0.340
グリセリン	20	0.576	硫酸	20	0.335
ブタン	0	0.549	二酸化硫黄	20	0.328
二酸化炭素	-10	0.539	二硫化炭素	20	0.290
ヘキサン	20	0.536	塩素	-205	0.229
酢酸	30	0.522	一酸化炭素	-100	0.062

生命活動と温度変化

ある天体で生物が誕生し進化してゆくためには、その天体にどのような海が必要なのか考えて見ましょう。液体の温度は外部からエネルギーが加わることにより上昇し、放出することにより降下します。そのとき比熱の小さな液体では温度が急激に変化します。比熱の大きな液体ではその変化はゆるやかになり、外部から影響するエネルギーが大きくてもその温度の変化は小さくなります。このため、その天体の海が大きな比熱を持つ物質でできている場合には、その天体の気候を支配し、生物の誕生や進化に適した小さな温度の変化や規則的な温度変化をもたらしますから、生命活動を維持する反応は比熱の大きな溶媒の中の方が適していることになります。表 5 - 4 には宇宙生物の生活温度である - 100 から 150 の温度範囲で液体と成り易い物質の比熱をまとめました。この表でも、水とアンモニアが生命活動を維持する反応の溶媒に適していることになります。

生命活動に必要な物質を産み出す海

簡単な物質から生命活動の維持に必要な複雑な物質へ進化してゆくときには、多くの元素の集合してゆく出会いの反応が主体となりますが、この出会いの反応は反応に関与する溶質のそれぞれの濃度に比例します。そのため、生命の誕生や進化は海に溶けている種々の物質の濃度に大きく影響されると思われます。

表 5 - 5 種々の溶媒の誘電率

物質	温度	誘電率	物質	温度	誘電率
水	25	78.54	硫黄	118	3.52
メタノール	25	32.60	二硫化炭素	20	2.64
エタノール	25	24.30	ベンゼン	20	2.28
アセトン	25	20.70	塩素	14	1.91
アンモニア	25	16.90	メタン	-173	1.70
二酸化硫黄	20	14.10	プロパン	0	1.61
塩化メチル	-20	12.60	二酸化炭素	0	1.60
メチルアミン	25	9.40	アルゴン	-191	1.53
硫化水素	-79	9.05	酸素	-193	1.51
塩化水素	-15	6.35	窒素	-203	1.45
酢酸	20	6.15	水素	-253	1.23
酢酸エチル	25	6.02	ヘリウム	-269	1.05

一般に共有結合で結びついている物質は類似の性質を持つ溶媒に良く解けます。たとえば、炭素と水素のみで構成される炭化水素は炭化水素を主成分とする石油のような油の性質を持つ溶媒に良く溶けます。また、水酸基を持つアルコール類はエタノールや水のように水酸基を持つ溶媒に良く解けます。他方、元素がイオン結合で結びついている物質は、電氣的に解離した陽イオンと陰イオンに分かれて溶媒に溶けて溶液になります。電荷を持ったイオンの粒子が誘電率の大きな溶媒の中に存在すると、その電荷が粒子の周囲に分散するためイオンは安定化します。そのため、誘電率の小さな溶媒にイオン結合性の物質は溶け難く、誘電率の大きな溶媒にはイオン結合性の物質はよく溶けます。炭素、水素、酸素、窒素等のほかに、各種の金属元素を含むことにより物質の性質に多様性が増します。宇宙生物が化学反応で生命活動を維持するためには多種多様な物質を必要としますから、各種の金属元素を含むイオン結合性物質の溶けやすい溶媒が生物の誕生や進化の反応に適していると思われます。宇宙生物の生活温度である - 100 から 150 の温度範囲で液体と成り易い物質の誘電率を表 5 - 5 に挙げておきます。この表は、水あるいはアンモニアの海の中が生物の誕生、進化に適していることを示唆しています。

海の酸性度

酸性—塩基性の概念は物質の重要な化学的性質の一つで、多くの化学反応を支配する要素です。デンマークの化学者の Brønsted は水素の陽イオンを出す性質を酸性、水素の陽イオンを受け取る性質を塩基性と定義しています。この定義によると酸と塩基の反応は水素陽イオンの遣り取り

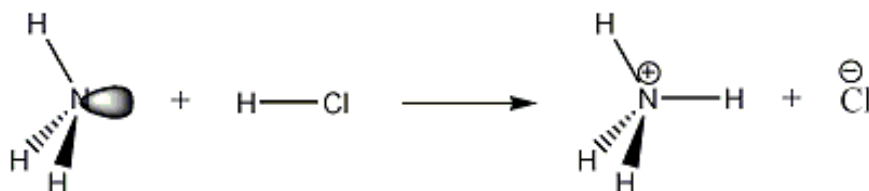
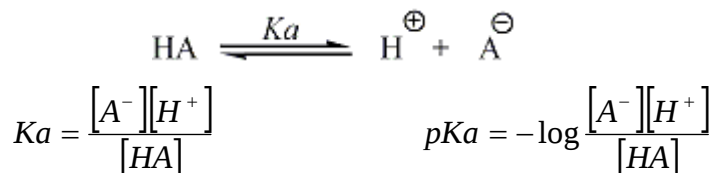


図5-3 アンモニアと塩化水素の酸塩基反応

と考えることが出来ます。例えば図 5 - 3 に示すように、代表的な酸として知られる塩化水素と塩基として知られるアンモニアは速やかに反応します。この時、塩化水素は水素陽イオンと塩素イオンに解離して、水素陽イオンを供給します。同時にアンモニアは水素陽イオンを受け取りアンモニウムイオンとなります。結果として塩化アンモニウムが生成します。ほとんどの酸は多かれ少なかれ水素陽イオンと対応する陰イオンに解離しますから、水素陽イオンはもっとも小さな化学物質としてあらゆる系において安定に存在しています。近くに水素陽イオンを受け取る塩基が存在すれば、水素陽イオンの遣り取りの活性化エネルギーは極めて小さく、速やかに水素陽イオンは移動して酸—塩基の反応が進行します。

さらに、Brønsted の定義によれば、酸と塩基の関係は相対的なものであり、ある物質が 2 種類の溶媒に溶けている場合に、一方の溶媒中では酸性を示し、他方の溶媒中では塩基性を示すこともあり得ることになります。そのため式 5 - 2 に示すように、物質の pK_a (解離定数) が酸性度を示す尺度として用いられています。ある溶媒の pK_a よりも小さな pK_a を持つ物質はその溶媒中で酸性を示し、大きな pK_a をもつ物質は塩基性を示します。生命活動を維持する反応に適した溶媒と考えられる水とアンモニアの pK_a は 15.7 および 33 と測定されています。宇宙の生物を構成すると思われる炭素を中心とする酸性物質の pK_a を表 5 - 6 にまとめました。表 5 - 6 によると水の中でもアンモニアの中でもはカルボン酸類、フェノール類、メルカプタン類等は酸性を示しています。そして、アルコール類は水の中では中性を示しますが、アンモニアの中では酸性を示します。



式 5 - 3 酸塩基平衡と pK_a の定義式

これに対して、水とアンモニアが塩基として働き、水素陽イオンと反応したオキソニウムおよびアンモニウムイオンの pK_a はそれぞれ - 1.7 および 9.25 と測定されています。宇宙の生物を構

表 5 - 6 酸の pKa

物質	酸	共役塩基	pKa
塩酸	HCl	Cl ⁻	-7.00
硫酸	H ₂ SO ₄	HSO ₄ ⁻	-5.20
硝酸	HNO ₃	NO ₃ ⁻	-1.40
硫酸	HSO ₄ ⁻	SO ₄ ²⁻	1.92
りん酸	H ₃ PO ₄	H ₂ PO ₄ ⁻	2.12
蟻酸	HCOOH	HCOO ⁻	3.75
安息香酸	C ₆ H ₅ COOH	C ₆ H ₅ COO ⁻	4.19
酢酸	CH ₃ COOH	CH ₃ COO ⁻	4.75
炭酸	H ₂ CO ₃	HCO ₃ ⁻	6.37
硫化水素	H ₂ S	HS ⁻	7.04
りん酸	H ₂ PO ₄ ⁻	HPO ₄ ²⁻	7.21
シアン化水素	HCN	CN ⁻	9.10
ホウ酸	H ₃ BO ₃	H ₂ BO ₃ ⁻	9.14
フェノール	C ₆ H ₅ OH	C ₆ H ₅ O ⁻	9.89
炭酸	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	10.25
硫化水素	HS ⁻	S ²⁻	11.96
りん酸	HPO ₄ ²⁻	PO ₄ ³⁻	12.67
ホウ酸	H ₂ BO ₃ ⁻	HBO ₃ ²⁻	12.74
ホウ酸	HBO ₃ ²⁻	BO ₃ ³⁻	13.80
メタノール	CH ₃ OH	CH ₃ O ⁻	15.00
水	H ₂ O	OH ⁻	15.70
アセトン	CH ₃ COCH ₃	CH ₃ COCH ₂ ⁻	20.00
アンモニア	NH ₃	NH ₂ ⁻	36.00
ベンゼン	C ₆ H ₆	C ₆ H ₅ ⁻	43.00
メタン	CH ₄	CH ₃ ⁻	49.00

成すると思われる炭素を中心とする塩基性物質の共役酸の pKa を表 5 - 7 にまとめました。表 5 - 7 によるとアンモニア中では、限られたアミン類を除きほとんどの物質の共役酸がアンモニウムイオンの pKa 9.25 よりも小さな pKa を示すため塩基性を示しませんが、オキソニウムイオンの pKa が - 1.7 であるため水の中ではアミン類、アニリン類等は塩基性を示します。また、ベンゼンや石油のような炭化水素は水にもアンモニアにもあまり溶けないので、ほとんど酸性も塩基

性も示しません。

温度、圧力、濃度等のいろいろな要素が反応に影響を与えますが、酸性—塩基性も反応に大きく影響を与えます。アンモニア中ではほとんどの物質が酸性を示すことから、限られた種類の反応のみが進行するものと思われます。これに対して、水の中では酸性の反応も塩基性の反応も進行することから、生物が増殖・成長のために高い再現性と発展性を持ち、高い機能と高い効率を示すための多種多様な反応が水の中では可能であろうと思われます。このように考えてくると、地球のように水でできた海が生命活動を維持する反応に最も適していることになります。

表 5 - 7 塩基の共役酸の pKa

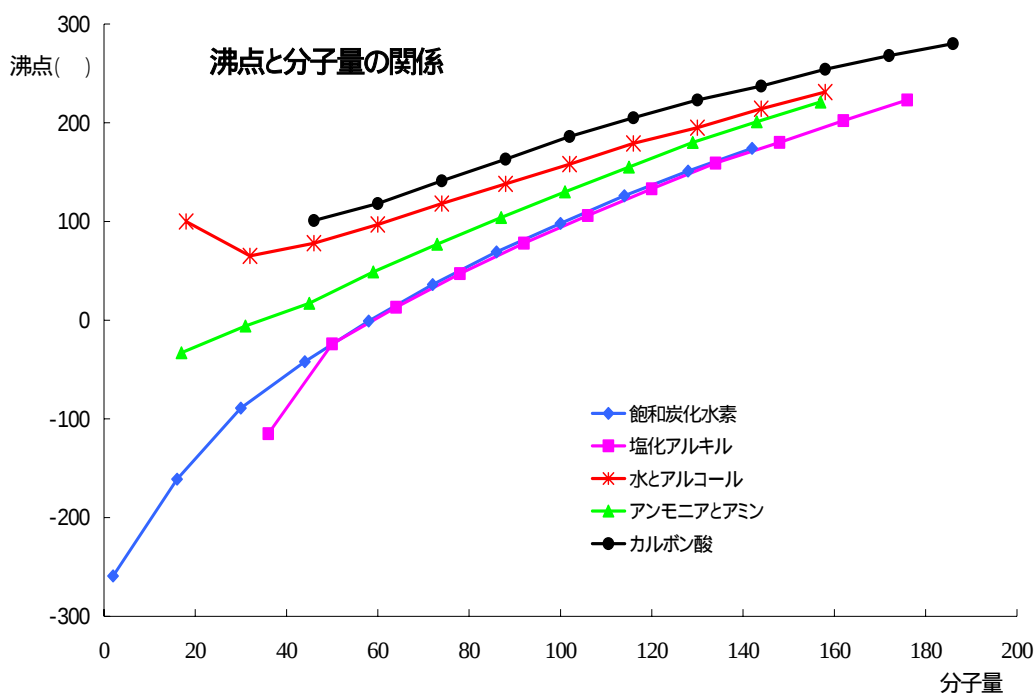
物質	共役酸	塩基	pKa
ピロール	$C_4H_6N^+$	C_4H_5N	-2.9
水	H_3O^+	H_2O	-1.7
尿素	$H_2NCONH_3^+$	H_2NCONH_2	0.1
アセトアミド	$CH_3CONH_3^+$	CH_3CONH_2	0.63
グルタミン酸	$HOOC(CH_2)_2CH(COOH)NH_3^+$	$HOOC(CH_2)_2CH(COO^-)NH_3^+$	2.13
プリン	$C_5H_6N_4^{2+}$	$C_5H_5N_4^+$	2.3
アラニン	$CH_3CH(COOH)NH_3^+$	$CH_3CH(COO^-)NH_3^+$	2.35
アデニン	$C_5H_4N_4NH_3^{2+}$	$C_5H_3N_4NH_3^+$	4.12
グルタミン酸	$HOOC(CH_2)_2CH(COO^-)NH_3^+$	$^-OOC(CH_2)_2CH(COO^-)NH_3^+$	4.31
アニリン	$C_6H_5NH_3^+$	$C_6H_5NH_2$	4.63
リジン	$H_3N^+(CH_2)_4CH(COOH)NH_3^+$	$H_2N(CH_2)_4CH(COO^-)NH_3^+$	5.05
ピリジン	$C_5H_6N^+$	C_5H_5N	5.25
イミダゾール	$C_3H_5N_2^+$	$C_3H_4N_2$	6.95
プリン	$C_5H_5N_4^+$	$C_5H_4N_4$	8.96
アンモニア	NH_4^+	NH_3	9.25
トリメチルアミン	$(CH_3)_3NH^+$	$(CH_3)_3N$	9.81
アデニン	$C_5H_3N_4NH_3^+$	$C_5H_3N_4NH_2$	9.83
リジン	$H_2N(CH_2)_4CH(COO^-)NH_3^+$	$H_2N(CH_2)_4CH(COO^-)NH_2$	10.53
メチルアミン	$CH_3NH_3^+$	CH_3NH_2	10.66
ジメチルアミン	$(CH_3)_2NH_2^+$	$(CH_3)_2NH$	10.73
イミダゾール	$C_3H_4N_2$	$C_3H_4N_2^-$	14.3

6. 宇宙生物を構成する素材は水溶性

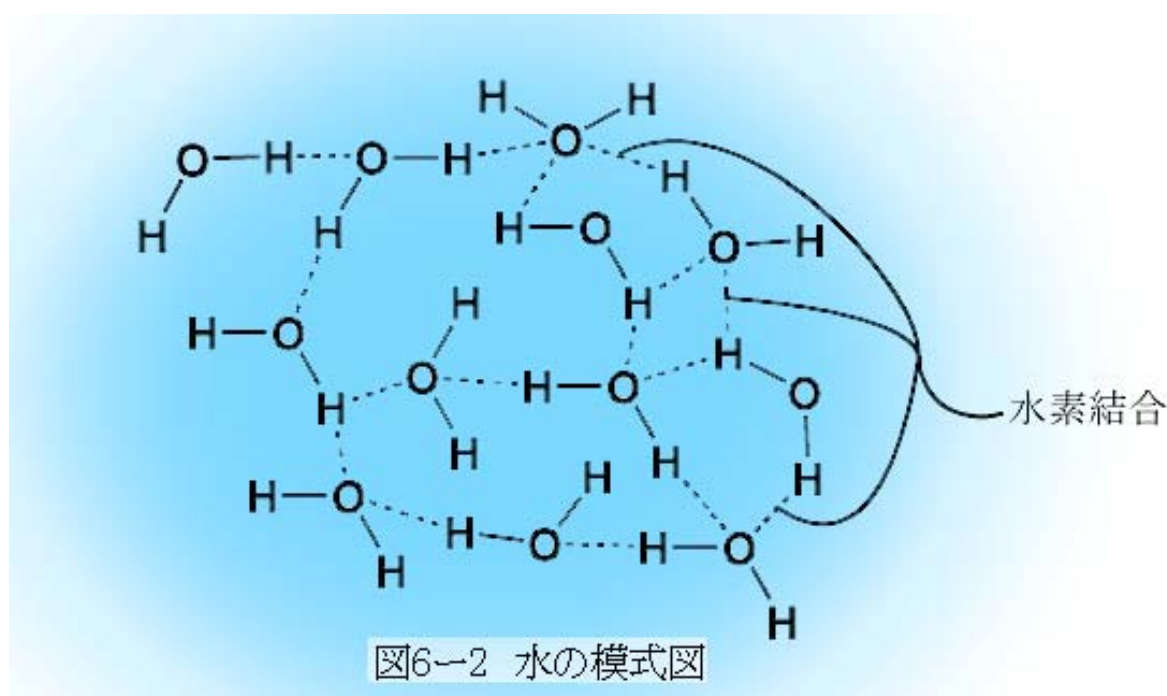
液状の水の構造

前の章で考えたように、宇宙生物を育む海はアンモニアや二酸化炭素や二酸化硫黄や硫化水素の海ではなく、地球上と同じように水の海が最も適していると思われました。簡単な物質から生命活動の維持に必要な複雑な物質へ進化してゆくときには、多くの元素の集合してゆく出会いの反応が主体となりますが、この出会いの反応は海に溶けている種々の物質の濃度に大きく影響されられると思われます。そこで、いろいろな物質がどのように水に溶けてゆくか知ることは、宇宙生物を構成する素材を考える上で極めて大切なことと思い、液状の水の構造から水の性質を調べることにしました。

水の分子は水素 2 原子が酸素 1 原子と結合して出来ている非常に簡単な構造を持っています。有機化合物のいくつかの同族系列の沸点と分子量の関係を図 6 - 1 のグラフに示しますが、一般に地球上では、分子量 100 程度の有機化合物は約 100 で沸騰します。しかし、同じように簡単な分子の構造をもつメタンやアンモニアと比較すると、分子の質量や嵩高さの違いがほとんど無いにもかかわらず、水の融点は 0 、沸点は地球上で約 100 と高温です。このような水の特異な性質は水の分子が単独の挙動を取らず、たくさんの水分子が絡み合っ一塊としての挙動をとるためと考えられます。pka 15.7 の水は弱いながらも酸性を示す物質であり、常に水素陽イオンと水酸イオンに若干解離しています。また、水の酸素は結合していない電子対を持っていますから水素陽イオンを受け取る塩基の性質を兼ね備えています。そのため、水から解離した水素陽イオンが隣の水分子と酸—塩基反応をして水分子上の水素の交換が起こります。このような水分子の水素原子が隣の水分子に結合を変更してゆく交換が瞬時に起こるため、水素原子は原子価が 1



でありながら、あたかも水素原子が2つの酸素原子に結合しているような性質を示します。このような結合を水素結合といい、水素原子の上に多少正電荷を帯びた状態となっており、水の場合にはこの水素結合の強さは約 6kcal/mol と見積もられています。模式的に考えれば、液状の水は図 6 - 2 に示すように、水の分子が水素結合により 3 次元の網目状に絡まった構造をとっていると思われます。液状の物質から気体分子として飛び出す状態を沸騰といいます。水の場合には水素結合で絡み合っているために飛び出し難くなってしまい、結果的に沸騰し難くなって高い沸点を示すことになります。また、液状の分子が整列して分子運動が止まることを凝固といいます。液状の水は分子が絡まっているために整列し難くなり高い凝固点を示す現象が現れます。しかも、この水素結合が固体から液体、液体から気体への状態の変化において、大きな融解熱および気化熱を必要とする原因にもなっています。



宇宙生物の生活環境は - 10 以上

生物が増殖・成長のために高い再現性と発展性を持ち、高い機能と高い効率を示すための多種多様な反応が水の中では可能であろうと思われ、地球のように水でできた海が生命活動を維持する反応の場として最も適していることになります。水は大きな融解熱、気化熱、比熱を持つ液体ですから、外からエネルギーが入るときもエネルギーが逃げるときもその温度変化は小さく、多種多様で繊細な反応をする条件が容易に整います。図 5 - 1 の水の状態図からも分かるように、水の凝固点は如何なる圧力においてもほとんど変化せず、約 0℃ 以下では氷になってしまいます。一般的に物質が溶けて溶液になるとき、溶質が溶媒中に拡散してエントロピー的に安定化します。このような溶液から溶媒が固化するときには溶媒は整然と配列し、溶質を分離しなければなりません。このとき溶質の拡散によるエントロピー的な安定を犠牲にしますから、その溶質の濃度に

応じて溶媒の固化する温度は下がります。この現象を凝固点降下と呼んでおり、一定の濃度の溶質が溶けたときの溶液における、いろいろの溶媒の凝固点降下の値を表 6 - 1 にまとめておきます。この現象を利用して、溶液の凝固点の降下の大きさからその溶液に溶けている溶質のモル数を計算することが出来ます。もし、その溶液に溶けている溶質の質量を知ることが出来れば、溶質の分子量が求まります。

地球の海のように食塩などいろいろな物質が溶け込んでいると、海の水の凝固点は降下すると思われませんが、表 6 - 1 の値から考えてその降下の値は僅かなものと考えてよく、 -10 以下では氷になりますから生物をはぐくむ溶媒の役目を果たすることが出来なくなります。言い換えれば、宇宙生物が誕生し、進化する生活温度は海の凍結温度と有機化合物の分解温度をもとに -10 から 150 の間に限られてしまうと考えてよいでしょう。

表 6 - 1 凝固点降下 ($^{\circ}\text{C}/(\text{mol}/1000\text{g})$)

溶媒名			溶媒名		
水	H_2O	1.86	酢酸	$\text{CH}_3\text{-CO}_2\text{H}$	3.90
硫酸	H_2SO_4	6.81	ステアリン酸	$\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{-CO}_2\text{H}$	4.50
臭化アルミニウム	AlBr_3	26.80	ベンゼン	C_6H_6	5.12
プロモホルム	CHBr_3	14.40	ナフタレン	C_{10}H_8	6.90
臭化エチレン	$\text{C}_2\text{H}_4\text{Br}_2$	13.50	アントラセン	$\text{C}_{14}\text{H}_{10}$	11.60
シクロヘキサン	C_6H_{12}	20.00	キシレン	$\text{C}_6\text{H}_4\text{-(CH}_3)_2$	4.30
t-ブタノール	$\text{C}_4\text{H}_9\text{-OH}$	0.38	フェノール	$\text{C}_6\text{H}_5\text{-OH}$	7.27
ショウノウ	$\text{C}_{10}\text{H}_{17}\text{-OH}$	40.00	安息香酸	$\text{C}_6\text{H}_5\text{-CO}_2\text{H}$	7.85
ジオキサン	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$	4.95	アニリン	$\text{C}_6\text{H}_5\text{-NH}_2$	5.87
蟻酸	$\text{H-CO}_2\text{H}$	2.77	ニトロベンゼン	$\text{C}_6\text{H}_5\text{-NO}_2$	6.90

液状の水の中での物質の挙動

簡単な物質から生命活動の維持に必要な複雑な物質へ進化してゆくときには、多くの元素の集合してゆく出会いの反応が主体となりますが、この出会いの反応は海に溶けている種々の物質の濃度に大きく影響されると思われます。宇宙生物を育む海は地球上と同じように水の海が最も適していると思われましたので、生物の素材となる物質が水の中でどのような挙動を取るか重要な問題と思われます。

一般に、物質が溶媒に溶ける現象は溶質の溶ける前後における平衡の変化ですから、式 4 - 2 の K の値が物質の溶け易さを意味します。物質が溶媒の液体の中に入り込んで拡散するときには、物質のエントロピー変化 (ΔS) が増大して安定化するため物質は溶媒に溶けてゆきます。アイスコーヒーに砂糖を溶かすことが難しいために、しばしば液状のシロップを用意しますが、温度

表 6 - 2 水に対する溶解度

	0	20	40	60	80	100
NaCl	35.7	36.0	36.6	37.3	38.4	39.8
NaHCO ₃	6.9	9.6	12.7	16.4		
カリ明礬	3.0	6.0	13.6	35.3		154.0
グリシン	141.8	225.2	331.6	452.6		671.7
コハク酸	2.8	6.9	16.2	35.8	70.8	120.9
ブドウ糖	9.2	20.6	43.3	78.3	125.0	185.0
尿素	40.0	51.9	62.3	71.8		88.0

(T) が高くなれば、安定化が大きくなりますから溶解度は大きくなります。当然、ホットコーヒーには砂糖を入れても簡単に溶けてくれます。表 6 - 2 には代表的ないくつかの物質の水に対する溶解度の温度変化を纏めておきます。

表 6 - 3 水に対する気体の溶解度 (mg/L, 20)

気体		1 気圧	2 気圧	5 気圧	10 気圧
水素	H ₂	0.17	0.35	0.88	1.76
ヘリウム	He	0.15	0.31	0.77	1.55
アンモニア	NH ₃	526000.00			
ネオン	Ne	0.98	1.98	4.99	10.01
アセチレン	C ₂ H ₂	119.31	241.45	607.87	1218.58
窒素	N ₂	2.37	4.80	12.09	24.23
エチレン	C ₂ H ₄	15.36	31.09	78.27	156.91
酸素	O ₂	4.47	9.05	22.79	45.69
硫化水素	H ₂ S	3846.00			
アルゴン	Ar	6.39	12.92	32.54	65.22
二酸化炭素	CO ₂	168.06	340.12	856.28	1716.56
酸化窒素	NO ₂	117.11	237.00	596.68	1196.13
二酸化硫黄	SO ₂	112800.00			
クリプトン	Kr	28.80	58.29	146.74	294.17
キセノン	Xe	72.97	147.68	371.81	745.35

しかし、液状の水では水素結合により、水分子が絡み合っ一塊としての挙動をとると考えられますので、その 3 次元的な網目の中にほかの物質が入り込むためには、網目の隙間を見つけて入り込むか水素結合を切って入り込まなくてはなりません。3 次元的な水素結合の網目を切れば、安定化を犠牲にしなければなりませんから、エンタルピー変化 (ΔH) が増大してしまいます。当然、エントロピーの増大による安定化はあるものの、 K の値は小さくなり物質が溶けにくくなります。

物質が非常に小さな分子で出来ている場合には、その分子は網目の隙間に入り込める可能性があると考えられます。そのような場合には、水素結合によるエネルギーの安定化を犠牲にすることなく、エントロピーの増大による安定化があるものと思われますから水に溶け込んでゆくと思われます。一般に原子の数が少なく分子量の小さな分子は図 6-1 で示すように気体で存在することが多いため、はじめに水に対する気体の溶解度を調べてみましょう。気体は圧力が高くなるほど液体に対して多く溶け込んでいきますから、表 6 - 3 にはいろいろな圧力における気体の溶解度をまとめておきました。小さな元素の水素やヘリウムで出来た水素やヘリウムの分子は宇宙の中で最も小さな分子と考えられますが、そのような小さな分子でもこの表から分かるように水に対してほとんど溶けませんから、如何なる分子を取り込むためにも水の水素結合の隙間は充分な大きさを持っていないことになり、水素結合の網目を切ることなく物質が水の中に入り込むことは出来ないこととなります。

水素結合が本質的に酸からの解離による水素陽イオンの供給と受け取る塩基との間の水素陽イオンの遣り取りにより、酸の水素原子が塩基分子に結合を瞬時にしてゆく交換反応であるため、塩基として働くことの出来る 1 対の電子を持つ分子は水と水素結合をすることが出来ます。特に、酸素原子は塩基として有効に働き、水と水素結合をし易いため、窒素分子と比較して酸素分子が高い水溶性を示しています。後の章で説明しますが、この比較的高い酸素分子の水溶性が、水の中に誕生し進化してゆく生物の活力を生み出す酸化反応において有効な酸化剤となるものと思われます。

液状の水では水素結合により、水分子が絡み合っ一塊としての挙動をとると考えられますので、その 3 次元的な網目の中にほかの物質が入り込むためには、水素結合を切らねばなりません。当然、エントロピーの増大による安定化はあるものの、水素結合によるエネルギーの安定化を犠牲にしなければなりません。

水と水素結合を作らない物質は水の水素結合の網目の中に入り込んでも、その水素結合を切ってしまうだけで不安定になってしまいます。このような物質は水の中に入っても、馴染むことが出来ず溶けることが出来ません。水の網目状の水素結合の切断が最小になるように水から遊離して、仕方なく最も表面積の小さな球状の油滴となります。炭素と水素からなる炭化水素は地球上にも石炭や石油として多量に存在しており、宇宙にはかなり存在することが考えられます。しかし、水素結合が本質的に水素陽イオンの酸からの解離による供給と受け取る塩基との間の水素陽イオンの遣り取りにより、酸の水素原子が塩基分子に結合を瞬時に変更してゆく交換反応であるため、酸性も塩基性もほとんど示さない炭化水素は水と水素結合をほとんどすることが出来ません。

表 6-1 に挙げた気体のアセチレンやエチレンのほかにも、液体の状態のベンゼンやその部分構造を持つものも、炭素—炭素 2 重結合、炭素—炭素 3 重結合を持つ多くの液体の化合物も、多重結合を持たないパラフィン類も全く水素結合をすることが出来ません。また、イオンに解離することも極めて困難ですから、水にはほとんど溶けず油滴となるかあるいは 2 相に分離してしまいます。

液状の水は水素結合をしているために、水を構成している水素原子は若干ながら正電荷を帯び、酸素原子は同じく僅かに負電荷を帯びています。一方、イオン結合性の物質は水の中で陽イオンと陰イオンに解離し、両イオンはそれぞれ電荷を帯びます。この電荷を帯びたイオンが正負に若干電荷を帯びた網目の中に入り込んでも、そのイオンの電荷が適当に分散できるために安定化し、水素結合を切ることによるエネルギーの損失を打ち消します。このため、水酸化ナトリウム、塩化水素、硫酸、食塩、塩化マグネシウムなどのイオン結合性の物質は水によく溶けます。さらに、鉄やコバルトなどの金属のイオンも水に溶けます。また表 6-1 に挙げた、二酸化炭素、酸化窒素、アンモニア、二酸化硫黄は水と反応して炭酸、硝酸、水酸化アンモニウム、亜硫酸などの酸や塩基に変化するため、水の中でイオン化して非常に高い水溶性を示します。

炭素 - 酸素結合を持つ物質の水溶性

小さなエネルギーの損失で水の水素結合の網目の中に入り込める物質は、水素結合をすることの出来る物質とイオン結合性の物質に限られます。炭素原子を中心に共有結合で結ばれた物質が宇宙生物を構成すると思われませんが、炭素原子は種々の元素と共有結合できますから、その組み合わせにより多種類の物質が安定に存在すると考えられます。そこで、考えられる代表的な有機化合物の水に対する溶解度を明らかにすべきであろうと思われま。

水素結合が本来的に酸と塩基間の水素陽イオンの遣り取りに由来するものであり、あたかも水素原子が酸と塩基の両者に結合し

ているような性質を示すもので、酸素と水素の結合を持つ物質は弱いながらも酸性を示すため水と同じように水素結合をすることができます。このような物質が水の水素結合の網目の中に入り込んでも水と水素結合を作るため、水の水素結合の切断によるエネルギーの損失を埋め合わせます。そのため、このような水素結合をすることの出来る物質は水に非常によく溶けます。表 6 - 4 には炭素、窒素、酸素、フッ素間の水素結合エネルギーの大きさを挙げました。

表 6 - 5 に示すように炭素 - 酸素結合を持つ化合物のうち、アルコール類は分子の中に酸素 - 水

表 6 - 4 水素結合エネルギーの大きさ
(kcal/mol)

水素結合の種類	結合エネルギー
O-H...N	7
O-H...O	6
C-H...O	2.6
N-H...O	2.3
N-H...N	4
N-H...F	5
F-H...F	7

素結合（水酸基といいます）を持っているために、水と水素結合をすることが出来ますから、多くのアルコール類は水に溶けます。特に、分子の中に水酸基の占める割合の大きなメタノール、エタノール、エチレングリコール、グリセリンなどの物質のほか、ブドウ糖、ショ糖をはじめとする種々の糖類は水に非常によく溶けます。さらに、ホルムアルデヒドなどのある種のアルデヒド類では、容易に水が付加して同じ炭素に2つの水酸基を持つジオール体となり、水によく溶けるようになります。また、ベンゼンの環上に水酸基を持つフェノール類やカルボン酸類は水の中では酸性を示すため、塩基性の水の中ではイオンに解離します。そのため水に溶けるようになります。特に分子量の小さな蟻酸、シュウ酸、酢酸などは非常によく水に溶けます。

酸素に2つの炭素が結合したエーテル類は分子の中に水酸基を持たないため、ほとんど水素結合することが出来ず、水にはあまり溶けません。2種のアルコールのそれぞれの水酸基から水の取

表 6 - 5 炭素 - 酸素結合を持つ物質の水に対する溶解度(g/100g)

物質	溶解度	物質	溶解度
メタノール	∞	蟻酸	14.4
エタノール	∞	酢酸	71
ブタノール	9.1	安息香酸	0.29
ヘプタノール	0.1	シュウ酸	8.69
グリセリン	∞	コハク酸	6.9
ブドウ糖	20.6	乳酸	16
ショ糖	87.5	酢酸エチル	2.26
フェノール	8.5	アセトン	∞
ホルムアルデヒド	∞	3-ペンタノン	4.6
アセトアルデヒド	∞		

れる反応が進めばエーテルが生成します。このことから、水に溶けるアルコールは水に溶け難いエーテルに変化することがわかります。また、カルボン酸類とアルコール類が反応して容易に生成する酢酸エチルなどのエステル類は水素結合することも、イオンに解離することも簡単には出来ませんから、水にあまり溶けません。このエステルの生成反応においても、水によく溶ける材料から水に溶け難い物質に変化することがわかります。

炭素 - 窒素結合を持つ物質の水溶性

水素結合は結合に関与していない電子対を持つ酸素のような2つの原子が水素原子を中心にあたかも結合しているような性質を示すもので、水素—酸素結合を持つ物質と同じように、水素—窒素結合を持つ物質も水と水素結合をすることができます。アンモニアと類似の構造を持つアミン類は水素—窒素結合を持つ物質で、容易に水と水素結合をすることが出来るため表 6 - 6 に示

すように水に溶ける性質を示します。

また、アンモニウムと同じようにアミン類は水中では塩基性を示すため、酸性条件ではイオンとなってアンモニウム塩を作ります。そのため、アミン類は極めてよく酸性の水に溶けます。一つの分子の中にアミンの部分とカルボン酸の部分を持つアミノ酸では、水素結合によるアミンの水溶性のほかに、カルボン酸の酸性によりアミンの部分はアンモニウムイオンに、アミンの塩基性によりカルボン酸の部分はカルボキシリオンになるため、さらに水に溶け易くなります。一つの分子の中にアミン部分とスルホン酸部分、あるいはアミン部分とリン酸部分を持つ物質も同じように極めて水に溶け易い物質と思われます。この他に、中心となる炭素に2つの窒素が結合した尿素やグアニジンやイミダゾールも水によく溶けます。

表 6 - 6 炭素 - 窒素結合を持つ物質など代表的な物質の水に対する溶解度(g/100g)

物質	溶解度	物質	溶解度
アラニン	157.8	アニリン	5
グルタミン酸	7.17	アセトアミド	250.9
ベンゼンスルホン酸ナトリウム	49.4	ウレタン	153.3
メチルアミン	40	ベンゼン	0.05
		二硫化炭素	0.01

他方、アミン類とカルボン酸類が反応して生成するアミド類は水素—窒素結合を持つ物質にもかかわらず窒素の水素結合がかなり弱いため、蟻酸アミドや酢酸アミドのように分子量の小さなアミド類のみ水に可溶です。大きな分子量を持つアミド類は十分な水素結合が出来ず、しかもアミド類の窒素は塩基性をほとんど示さないためにイオンになることも出来ません。そのため、あまり水に溶けません。このアミド類を生成する反応においては、水によく溶けるアミン類とカルボン酸類から水に溶け難い物質に変化することがわかります。

炭素 - 酸素、炭素 - 窒素以外の結合を持つ物質の水溶性

塩素、臭素、よう素などのハロゲン原子を含む炭素化合物はハロゲン原子が結合しない電子対を持っているにもかかわらず、ほとんど水と水素結合をすることが出来ません。そのため、炭化水素と同じようにほとんど水に溶けません。

硫黄は酸素と同じ族の元素ですが、水素結合の強さは酸素のものと比べてかなり弱くなります。そのため、水素—硫黄—炭素結合を持つメルカブタン類は同族のアルコール類よりはかなり水に溶け難くなっています。水素—りん—炭素結合を持つ化合物は比較的に不安定で、容易に変化してしまいます。そのほかの炭素—りん結合を持つ物質は水素結合をすることがほとんど出来ず、

水にはほとんど溶けません。

硫黄原子が酸化されたスルホン酸類とりん原子が酸化されたりん酸類は酸性が強くイオンとなり水に溶けます。その上、これらの酸類はアルコール類と反応してスルホン酸エステル、りん酸エステルをそれぞれ生成しますが、これらのエステル類も水によく溶けます。炭素—けい素結合を持つ物質は全く水素結合をすることが出来ず、水には全く溶けません。その上、けい素の化合物は水とかなり反応しやすく、けい素—酸素結合を作って変化してゆきます。

水に溶ける部分と溶けない部分を持つ物質の挙動

多くの炭素を中心とする物質の中で、アルコール類、アミン類、若干のメルカプタン類は水と水素結合の出来る物質であり、水によく溶けると考えられました。また、イオン性の物質として、多くの金属イオン、食塩などの塩類、カルボン酸、スルホン酸、りん酸などの酸類、アミンなどの塩基のほかにアミノ酸などの酸と塩基を同一分子の中に持つものは水によく溶けることがわかってきました。これとは反対に、炭素と水素だけで構成されている炭化水素やけい素化合物はまったく水に溶けず、石油などの油によく溶けることがわかってきました。

ここで、アルコールやカルボン酸のように水によく溶ける部分構造と炭化水素のような水に溶け難い部分構造を同一の分子の中に持つ物質は水に対して如何なる挙動をとるか興味が生まれてきます。

水に溶け難い部分は水の水素結合の網目に入り込むことが出来ず、水から分離しようとし、これに対し水によく溶ける部分は水の網目の中に入り込もうとします。結果として水の塊の端で、水に溶ける部分が水の方へ向くようにし、水に溶け難い部分が外側に向くように並び、膜を作ります。もし、水と油が2層に分離しているときは、この層の境目に膜となって並び安定な状態になります。また、大きな水の中では、水によく溶ける部分を外側に膜を作り、内側は油に馴染み深い球形の世界の油滴となります。このとき、水の網目の中に入り込むことの出来ない物質は、この油滴の中に逃げ込んで安定な状態になります。このように水に溶け易い部分と溶けにくい部分の両方を分子の中に持つ物質を界面活性剤と呼んでいます。余談になりますが、長い炭化水素鎖の端にカルボン酸の結合した石鹸の油滴は、水に入り込めずに周囲に浮遊している油分の汚れを取り込みます。結果として汚れを取り去るため、洗濯に利用されることとなります。さらに、水に溶け難い部分が背中合わせに並んで2重膜が作られると、両面とも水と馴染み深い膜となります。このような背中合わせの膜の風船が大きな水の中に出ると、あたかも小さな水の別世界が生まれることとなります。地球上の生物は長い炭化水素鎖を持つりん酸エステルで出来た膜を細胞膜としたフラスコを作り、その中で生命活動を維持する化学反応を行っています。宇宙生物はりん酸エステルのほかに、スルホン酸、アルコールなどを水によく溶ける部分として持つ物質の膜が生命活動を維持する化学反応のフラスコを作っているかもしれません。

長い分子の構造を持つ物質の挙動

短い系はほとんど絡まることはありませんが、長い系は絡まり易くすぐにこんがらかります。分

子量 200 程度の短い分子の構造の物質ではほとんど固体結晶の状態で存在しますが、長い分子の構造を持つ物質では短い分子の構造の物質には見られない特有の性質が糸のこんがらかるような現象として観測されています。特に、分子量 5000 以上の鎖状の構造を持つ物質にこの特有の性質が見られます。

短い構造を持つ分子では簡単に整列するために結晶化します。これに対し、長い構造を持つ分子は長い糸と同じように絡まりこんがらかり易いために、整列することが困難で簡単には結晶化しません。このような物質は高い温度では軟化し、低い温度ではガラス状に固化しますが、明確な融点も沸点も示しません。このような物質に外から力を加えると、分子が壊れることは無く、こんがらかった分子同士が解けるために容易に変形します。そのため、プラスチックあるいは高分子物質と呼ばれています。この高分子物質が水の水素結合の網目の中に入り込むと、たとえ部分的に水と水素結合をすることが出来ても、多くの水の網目を切ってしまうために水には溶け難くなってしまいます。

イオン性の物質の水溶性

先に述べたように電荷を帯びたイオンは水の中でその電荷を分散することが出来るために、安定化し水に溶けます。多くの金属元素を含む物質がイオンとして水に溶けます。しかし、金属イオンとその相手となる陰イオンの性質により、表 6 - 7 に示すように水に対する溶け易さは異なります。一般に、金属イオンと硝酸あるいは塩酸で生成する硝酸塩や塩酸塩は非常によく水に溶け

表 6 - 7 イオン性の物質の水に対する溶解度(g/100g)

	Cl ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	OH ⁻	CN ⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	HPO ₄ ²⁻	S ²⁻	SO ₄ ²⁻
Na ⁺	36	47.5	88	63.5	37	21.5	9.6	7.7	15.8	19.8
K ⁺	34	65.2	31.6	112	71.5	52.5	24.9	159		107
Mg ²⁺	54.5	96.5	42.1							26.2
Ca ²⁺	74.5	143	56.39	0.17		3.5x10 ⁻³	0.17	2.0x10 ⁻²		0.208
Ba ²⁺	35.7	104	9.2	3.89		2.2x10 ⁻³				2.0x10 ⁻²
Al ³⁺	47.3		73	9x10 ⁻⁴						26.7
Fe ²⁺	37.6	53.5	45.6	7x10 ⁻⁶					7.0x10 ⁻⁵	26.5
Fe ³⁺	91.9		46.6							
Co ²⁺	34.6		50	3.2x10 ⁻⁴	4.2x10 ⁻³				3.8x10 ⁻⁴	26.5
Ni ²⁺	39.6	56.7	48.5	1.3x10 ⁻³		9.3x10 ⁻³				37.8
Cu ²⁺	41.5	55.9	55.58	3.0x10 ⁻⁵					3.3x10 ⁻⁵	20.7
Zn ²⁺	367	81.7	117.5	4.2x10 ⁻⁴	4.9x10 ⁻⁵					53.8

ますが、硫酸やりん酸や炭酸の塩類はあまり溶けません。また、ほとんどのカリウム (K)、ナトリウム (Na) などのアルカリ金属の塩類はよく水に溶けますが、マグネシウム (Mg) やカルシウム (Ca) やバリウム (Ba) などのアルカリ土類金属の塩は若干溶解性が悪くなります。さらに、鉄 (Fe) やアルミニウム (Al) の塩類はかなり溶け難くなります。これらの各種の金属の塩類は石油などの油にはほとんど溶けませんから、金属のイオンの相手となる陰イオンの組み合わせが替わることにより、金属の塩類が水溶液から結晶として沈殿してきます。

例えば、塩化カルシウムの水溶液に硫酸あるいはりん酸が加わると白色の沈殿が起こります。生じた沈殿は時として石のように固い物質に成長してゆきます。

生物は高い再現性と発展性を持ち、極めて複雑で、繊細で、効率の良い組織を作り上げるためには、高い機能を持つ多くの構成要素を必要とします。重力に逆らって生物の身体を維持したり、外界の影響から身体を守るためには、石のように固い物質も当然必要になってきます。宇宙における存在量が多く、相手となる陰イオンの組み合わせが替わることにより、水溶液から容易に結晶として沈殿してくる性質から、マグネシウムとカルシウムがこのような役目を担う金属元素として最も適していると思われます。

宇宙生物の素材となる物質の種類

宇宙生物を育む海は地球上と同じように水の海が最も適していると思われましたので、宇宙生物を構成する素材は液状の水に溶けるものでなくてはならないことになります。しかし、宇宙生物が海の水に溶けてしまえば、形も組織もが無くなってしまうため不適当と考えられます。つまり、容易に進行する化学反応により宇宙生物は海に溶けている材料から、水に溶けない形のあるものに組織化し進化してゆかねばなりません。これまでいろいろの物質の水溶性の違いを考えてきましたが、その結果、宇宙生物本体を形作る物質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。また、宇宙生物はりん酸エステルのほかに、スルホン酸、アルコールなどを水によく溶ける部分構造とし、炭化水素のような水に溶け難い部分構造として持つ物質の膜が生命活動を維持する化学反応のフラスコを作っているに違いないと考えられます。さらに、宇宙における存在量が多く、相手となる陰イオンの組み合わせが替わることにより、水溶液から容易に結晶として沈殿してくる性質を持つマグネシウムとカルシウムが石のように固い物質の役目を担う金属元素として考えられます。

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 ₂	59.12	57.95	58.87
TiO ₂	1.05	0.57	0.95
Al ₂ O ₃	15.34	13.39	14.92
Fe ₂ O ₃	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 ₂ O	3.84	1.13	3.25
K ₂ O	3.13	2.86	3.07
P ₂ O ₅	0.30	0.13	0.26
H ₂ O	1.15	3.23	1.60
CO ₂	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 4.0×10^{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 1.8×10^{15} kg、堆積岩中に固定化されている二酸化炭素は約 1.8×10^{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ます。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おもに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おもに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	
(濃度)		0.5N	1N	0.5N	1N
なし		1.992		0.049	
塩酸	HCl	1.943	1.913	0.047	0.044
硫酸	H ₂ SO ₄	1.896	1.821	0.046	0.043
硝酸	HNO ₃	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 ₃	1.872	1.762		
硫酸カリウム	K ₂ SO ₄			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になります。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 ²⁺	Ca 金属	-2.76	FAD	FADH ₂	-0.22
Na ⁺	Na 金属	-2.71	CO ₂	蟻酸	-0.20
Mg ²⁺	Mg 金属	-2.38	ピルピン酸	乳酸	-0.19
K ⁺	K 金属	-2.29	Fe ³⁺	Fe 金属	-0.04
SO ₄ ²⁻	SO ₃ ²⁻	-0.92	H ⁺	H ₂	0.00
SiO ₂	Si 金属	-0.84	ユビキノ	ユビキノール	0.05
Zn ²⁺	Zn 金属	-0.76	シトクローム(Fe ³⁺)	シトクローム(Fe ²⁺)	0.29
酢酸	アセトアルデヒド	-0.58	Cu ²⁺	Cu 金属	0.34
Cr ²⁺	Cr 金属	-0.56	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	0.42
S	S ²⁻	-0.51	H ₂ SO ₃	S	0.45
CO ₂	シュウ酸	-0.49	Fe ³⁺	Fe ²⁺	0.77
Cr ³⁺	Cr ²⁺	-0.41	Ag ⁺	Ag 金属	0.80
Fe ²⁺	Fe 金属	-0.41	NO ₃ ⁻	NO	0.96
シスチン	システイン	-0.34	Br ₂	Br ⁻	1.07
NAD ⁺	NADH	-0.32	O ₂	H ₂ O	1.23
Co ²⁺	Co 金属	-0.28	Cr ₂ O ₇ ²⁻	Cr ³⁺	1.33
Ni ²⁺	Ni 金属	-0.23	Cl ₂	Cl ⁻	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 ³)	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。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、 λ は波長 (cm)、 c は光の速さ(cm/s)を表しています。X 線や γ 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

8. 宇宙生物はフラスコの中で形作られる

宇宙生物を形作る反応は可逆平衡反応

宇宙生物を育む海は地球上と同じように水の海が最も適していると思われました。化学反応には、反応の前後の自由エネルギーの大小が反応の成り行きを決めている可逆平衡反応と、反応の途中の活性化エネルギーの大小が反応の成り行きを決めている非可逆反応があります。化学的に安定な物質の非可逆反応では、一般にかなり高い活性化エネルギーを乗り越えるため、反応条件が過激になります。その上、溶媒となる水がかなり反応性をもっているため、望ましい反応のみが進行するように制御することが難しく思われます。これに対して、可逆平衡反応では、反応の前後で自由エネルギーの差が 1kcal/mol のときは反応が 75% で止まりますが、 2kcal/mol のときは反応が 95% まで進行します。さらに 3kcal/mol 以上では反応はほとんど完結してしまいます。通常の化学反応では、この数 kcal/mol の差は全体の自由エネルギーの 1% にも満たないほんの僅かの値に相当するものです。可逆平衡反応は平衡に達するまで長い反応時間を要することもあります。反応条件にかかわらず生成物にはあまり影響を与えません。平衡に達するまでの反応時間の短縮には酸や塩基の触媒による反応の加速や、反応する素材の濃度の高くなるのが効果的です。総合的に考えてみると、宇宙生物を形作る反応は水の中で非常に温和な条件で進行する可逆平衡反応であろうと思われます。

宇宙生物を形作る反応は水の中のフラスコで

宇宙生物が増殖・成長のために高い再現性と発展性を持ち、高い機能と高い効率を示すためには微妙な条件の違いで反応の成り行きが変化したり、反応が繰り返し起こる必要があるでしょう。さらに、効率よく反応が起こるためには多種多様な物質を再生利用することも必要と思われます。多種多様であり容易に可逆的に進行する化学反応が生命活動を維持するものと考えてよいでしょう。その反応の場が一樣で温度や素材の濃度が一定でなければ、このように緻密で繊細な反応が再現性よく進行しないと思われます。海のように大きな水の世界では深度の違いからでも大きな温度や濃度の差が生じてしまいます。その上、攪拌も容易では無くなり濃度が一定しなくなってしまう。

反応の種類や素材により反応の速さにはかなり違いがあります。表 8 - 1 にかなり濃い濃度の条件での代表的な反応の速さを半減期の形で纏めたデータを挙げておきます。一般にコレステロールはブドウ糖と結合していますが、その結合の半分が分解するのに約 1 千万年掛かります。これに対して、蛋白質は 3 分ほどで完全に変性してしまいます。近年 NASA (アメリカ航空宇宙局) が中心となって進めている WMAP 衛星プロジェクトチームは、宇宙年齢が 137 億歳と非常に精度よく決めることができたと発表しました。宇宙の誕生が 137 億年前であり、反応の速さが素材の濃度に比例することを考えるときに、宇宙生物を形作る素材の濃度はかなり高く無ければなりません。素材が海に溶けてそのような高い濃度になるためには、海に溶ける素材の量は膨大な

ものになってしまいます。このように高い濃度で素材が溶けた溶液の元素組成と、太陽系あるいは地球の元素組成とを考え合わせると、このように海の中で一元的に反応が進行すると単純に考えることには矛盾があるように思われます。

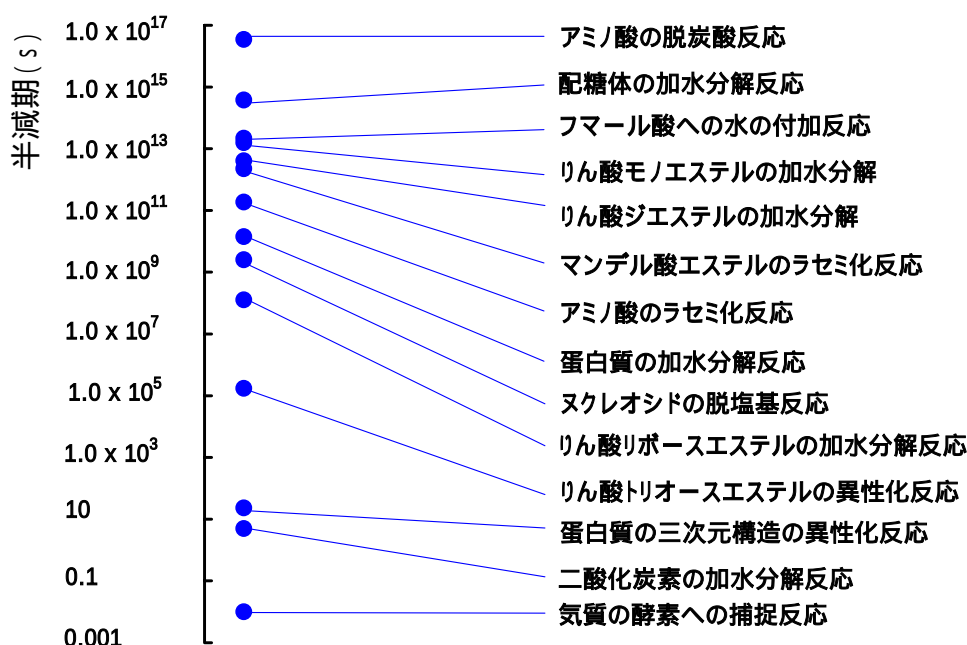


表 8 - 1 代表的な反応の速さ (半減期、s)

海の中に水の入った小さなフラスコを考え、そのフラスコの中で素材の濃度が高くなると考えればこの矛盾が解決できるものと思われる。しかし、化学の実験で使うようなガラスのフラスコが海の中に浮いていると考えることは出来ませんから、このフラスコの素材を考えなければこの仮説は成り立ちません。前章で、アルコールやカルボン酸のように水によく溶ける部分構造と炭化水素のような水に溶け難い部分構造を同一の分子の中に持つ界面活性剤の水に対する挙動を考えました。

水の中にこのような物質を混ぜ込むとき図 8 - 1 に示すように、一重の膜の別世界(II)を作るか背中合わせの 2 重膜(I)を作るかはこのような物質の水の中の濃度とそのときの温度によります。多量の水の中にこのような物質を混ぜ込むと、水に溶け易い部分が外側に並んで膜が作られ、内側が油と馴染み深く、外側が水と馴染み深い膜となります。このような 1 重膜の風船が大きな水の塊の中に出来ると、あたかもフラスコのような小さな油の別世界が生まれることになります。水に溶け難い物質は水の中では居心地が悪くこのような油の世界に逃げ込む性質がありますから、この油のフラスコは水に溶け難い物質の格好の反応の場になると思われます。ちなみに地球上の生物は酵素の一部に油のフラスコを造りフラスコの口を水の世界に開けていますから、物質が酵素に容易に取り込まれます。その取り込まれる反応は 100 分の 1 秒程しか掛かりません。

また、多量の水の中に界面活性の性質を持つ物質を混ぜ込むと、水に溶け難い部分が背中合わせに並んで2重膜が作られ、両面とも水と馴染み深い膜になります。このような背中合わせの膜の風船が大きな水の塊の中に出来ると、あたかもフラスコのような小さな水の別世界が生まれることになります。水はこの2重膜をゆっくりと通過しますが、分子の大きさがある程度大きな物質は通過することが出来ません。この2重膜の内側と外側の水に溶けた溶質の濃度が違う場合には、2つの水溶液の濃

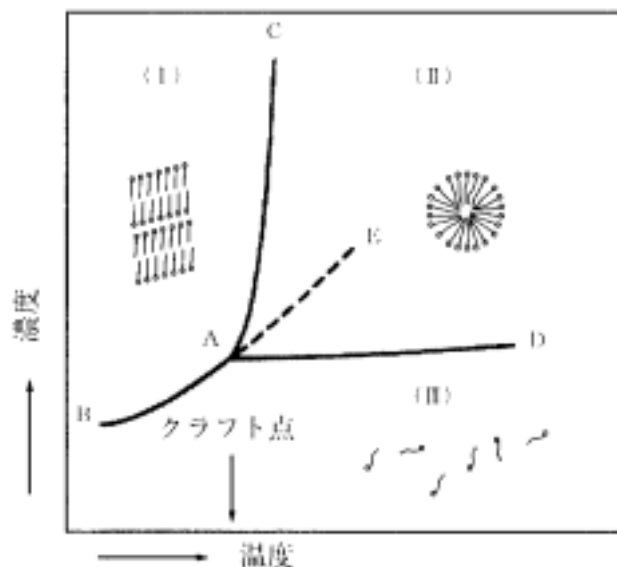


図8-1 界面活性剤の濃度と膜の性状

度が等しくなるように水が膜を通過して移動します。しかも水に溶けた溶質は1種類とは限らず、溶質の濃度の合計により、水の移動の方向は決まります。2重膜で出来たフラスコ内の溶質の濃度はフラスコの外側の海に溶けている溶質の濃度により調節されることになり、この現象を浸透圧と呼んでいます。この2重膜で出来た小さなフラスコの中では、素材の量がさほど大量でなくとも素材の濃度が高くなり、短時間で生物の誕生から進化まで生命活動を維持する化学反応が進行すると思われます。新鮮な梅の実を塩漬けにして梅の中の水を外部にしみ出させて、梅干しを作りますが、この操作はこの浸透圧の現象を利用したもので、結果として梅の実は皺だらけに萎んでしまいます。

地球の生物はりん酸エステルの2重膜で細胞と呼ばれるフラスコを作り生命の活動を行っています。宇宙生物はりん酸エステルのほかに、スルホン酸、アルコール、カルボン酸などを水によく溶ける部分として持つ物質の膜が生命活動を維持する化学反応のフラスコを作っているかもしれません。特に、長い炭化水素の鎖を持つアルコール類あるいはそのりん酸エステルは中性の水の中でこのような膜を作ることから宇宙生物の利用できるフラスコに適していると思われます。

9. 水に溶ける素材から宇宙生物を形作る反応

炭素上で起こる化学反応

前の章までに、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、その誕生から進化まで水の中で進行する化学反応により為されている事を考えてきました。宇宙生物を形作る反応が可逆平衡反応で進むと考えられることから、宇宙生物の中の化学反応では自由エネルギーの変化を考えることが重要と思われます。自由エネルギーの大部分は結合エネルギーの総和で占められており、エントロピーによる寄与は微々たる物ですから、炭素の上の代表的な化学反応とその反応の前後での結合エネルギーの総和の変化を考えることにより、いろいろの化学変化が宇宙生物の中で起こりうることを理解できると思います。多種多様な炭素上の反応には大まかに分類すると置換反応、付加反応、脱離反応の3つの代表的な反応があります。

置換反応は炭素に結合している元素が他の元素と置き換わる反応です。例えば、図9-1に示すように炭素—ハロゲン結合が切れて、その代わりに水酸基が結合してアルコールが生成する反応や、ベンゼンの水素原子がニトロ基で置き換わるニトロ化反応などがあります。これらの反応は途中で不安定な状態を経るため活性化エネルギーが高く、厳しい反応条件を必要とします。そのため、宇宙生物の生命活動を維持するための化学反応としてはあまり起こらないのではないかと

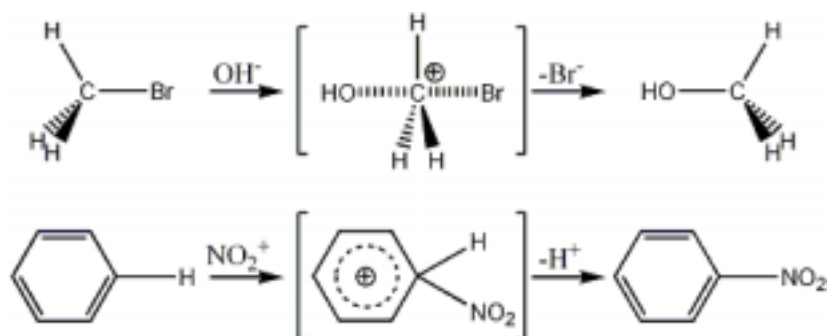


図9-1 置換反応とその中間体

思われます。

炭素=炭素2重結合の結合エネルギーは146kcal/molと見積もられていますが、これは炭素—炭素単結合の結合エネルギーとして見積もられている83kcal/molの2倍にははるかに及ばないものです。このことから2重結合の2本目の結合エネルギーは1本目の結合エネルギーよりもはるかに小さく、2本目の結合は容易に反応することを意味します。付加反応は図9-2に示すように、2重結合のこの2本目の結合が切断して代わりに他の分子が付く反応です。この反応では、

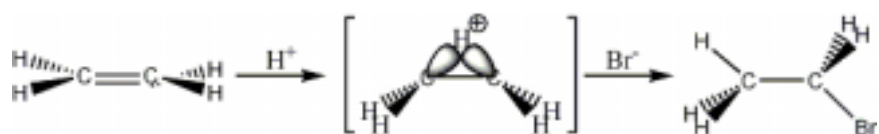


図9-2 付加反応とその中間体

反応の前後で自由エネルギーの変化が小さく、2重結合に水素、水、アンモニア、塩化水素、酢酸、塩素、臭素など種々の分子が容易に付加します。

脱離反応は図9-3に示すように付加反応の逆反応と考えることが出来ます。当然、付加反応のときの自由エネルギー変化と同じように、脱離反応の自由エネルギー変化も小さなものです。付加反応と脱離反応はしばしば平衡状態にあり、反応条件の僅かな違いにより生成物が付加生成物に偏る場合と、脱離生成物に偏る場合があります。このように反応を大まかに見てみると、宇宙生物の誕生や進化において、炭素上の付加反応と脱離反応が主に起こっているものと思われます。しかし、宇宙生物の誕生から進化まで水の中で進行する化学反応によりなされ、素材となる物質



図9-3 脱離反応とその中間体

は水によく溶ける物質に限られているにもかかわらず、単なる炭素=炭素2重結合の化合物は水にあまり溶けません。そのため、単なる炭素=炭素2重結合の化合物の付加反応は宇宙生物の生命活動を維持するための化学反応としてはあまり起こらないのではないかと思います。

炭素=酸素2重結合の上の反応

炭素=酸素2重結合も炭素=炭素2重結合と同じように容易に付加反応をしますが、ほとんどの場合にかえって自由エネルギーの高い付加生成物になります。そのため、逆反応の脱離反応が速やかに進行する可逆平衡反応となり、脱離生成物が主成分となります。図9-4に示すように、反応基質の炭素=酸素2重結合化合物としてのカルボン酸にアンモニアが付加する反応では、中心の炭素に水酸基が2つとアミノ基の1つ付いた付加物が生成します。この付加生成物は比較的不安定なため速やかに脱離反応が進行します。この時、アンモニアが脱離反応すれば元のカルボ

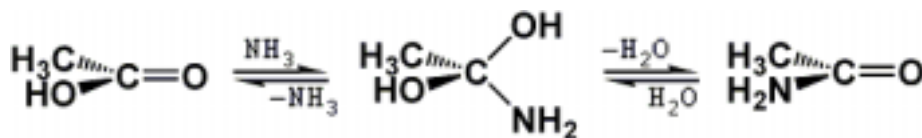


図9-4 炭素=酸素2重結合上の付加脱離反応とその中間体

ン酸に戻りますから、見かけの上で反応が進行しなかったことになります。しかし、水が脱離すればアミドの生成が進行します。また、アミドに水が付加する反応でも、全く同じ付加物が生成します。この付加物からアンモニアが脱離すればカルボン酸に加水分解が進行したことになります。水が脱離すればアミドの戻り反応が進行しなかったことになります。結果として、カルボン酸とアンモニアからアミドを生成する反応とアミドの加水分解は小さな自由エネルギー変化をもつ可逆平衡反応で、僅かな反応条件の違いによりどちらへの反応も進行します。

水に溶ける宇宙生物の素材であり炭素=酸素2重結合を持つカルボン酸は同じく水に溶けるアルコール類やアミン類の付加・脱離反応が進行すれば、あまり水に溶けないエステル類やアミド類を生成します。また、水に溶けないエステル類やアミド類は水に作用して逆の反応が進行し、水

に溶けるカルボン酸とアルコール類やアミン類に加水分解します。

りん酸とアルコール類の反応においても同じような付加・脱離反応が進行し、りん酸エステルが生成します。また、若干の熱エネルギーを加えると、りん酸同士が付加・脱離反応をすればピロりん酸が生成します。逆にピロりん酸が加水分解するときには若干の発熱反応になります。このピロりん酸の熱エネルギーの遣り取りは地球上の生物のエネルギー伝達のための ATP から ADP への変化において見る事が出来ます。

炭素の鎖はアルドール型反応で

お酒は全く酸っぱくありませんが、お酢はかなり酸っぱく感じます。分子の構造を調べてみると、お酒の中のエタノールもお酢の中の酢酸も炭素原子に水酸基が結合していますが、酸味の物差しとなる酸性度には大きな違いがあります。Brønsted の定義によれば酸の解離反応は可逆平衡ですから、極く小さな自由エネルギー差の違いで酸の強さが影響します。酸が解離して生成する陰イオンが安定であればあるほど解離しやすくなり、強い酸性を示します。

2 重結合を構成する sp^2 型の電子は正面で相互作用をして単結合を形成しますが、そのほかにその側面でも電子が相互作用して結合しています。この 2 重結合の隣に結合に関与していない電子対を持った原子や 2 重結合が結合しているときには、図 9 - 5 に示すように 2 重結合と電子対あ

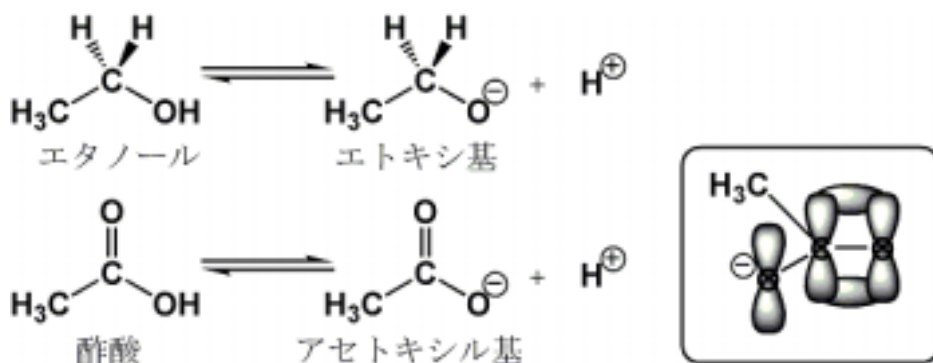


図9-5 酢酸の解離とアセトキシ陰イオンの安定化

るいは 2 重結合同士で側面の相互作用をします。このような相互作用を共鳴といい、僅かながらも結合エネルギーに安定化が起こります。カルボン酸が解離して生成するカルボキシル基は、炭素 = 酸素 2 重結合と陰イオンになった酸素の電子対との間の共鳴により大きく安定化します。そのため、酢酸などのカルボン酸類は比較的解離し易く、小さな pK_a を示します。それに対して、アルコールが解離して生成するアルコキシ基ではこのような安定化の要因はほとんどありませんから、エタノールなどのアルコール類では弱い酸性しか示しません。つまり、この共鳴による安定化がお酒とお酢の味の違いを引き起こしていることになります。

炭素 = 酸素 2 重結合と陰イオンになった酸素の電子対との間の共鳴により大きく安定化しているために、カルボン酸は解離し易く比較的強い酸性を示しています。炭素 = 酸素 2 重結合の隣の炭素に水素が結合している場合にも、共鳴による安定化が同じように起こりますから、僅かなが

ら水素陽イオンを解離します。結果として2重結合の隣の炭素は陰イオンとなりますから、近くにうろろうしている炭素＝酸素の2重結合に付加反応が起こり、2分子の炭素＝酸素2重結合化合物から炭素－炭素結合が新たに結ばれ2量化します。炭素＝酸素2重結合を持つアセトアルデヒドにこの反応が進行しますと、図9-6のようにアルドールが生成しますので、このような炭素－炭素結合の形成反応をアルドール反応と呼んでいます。水素を持った炭素が隣接して結合する炭素＝酸素2重結合化合物であれば、アルドール反応は酸性条件でも、塩基性条件でも容易に進行します。

宇宙生物が生命活動を維持するために必要とする多種多様な物質を考えると、多くの炭素原子が繰り返し結合した骨格の分子が宇宙生物を構成していると思われます。アルドール反応がいろいろな反応の条件で容易に進行して、炭素－炭素結合を形成しますから、二酸化炭素などの簡単な物質から宇宙生物を組織する複雑な物質を生産してゆく最も重要な反応と思われます。ちなみに、地球上の生物を構成している多種多様な物質のうちで、ステアリン酸などの脂肪酸類、薄荷や樟脳などのテルペン類、コレステロールなどのステロイド類は何れも酢酸からアルドール型反応により生物体内で生産されています。また、現在生息している植物が二酸化炭素からブドウ糖やセルロースを生産する反応にもアルドール反応と類似の反応が含まれていると考えられています。

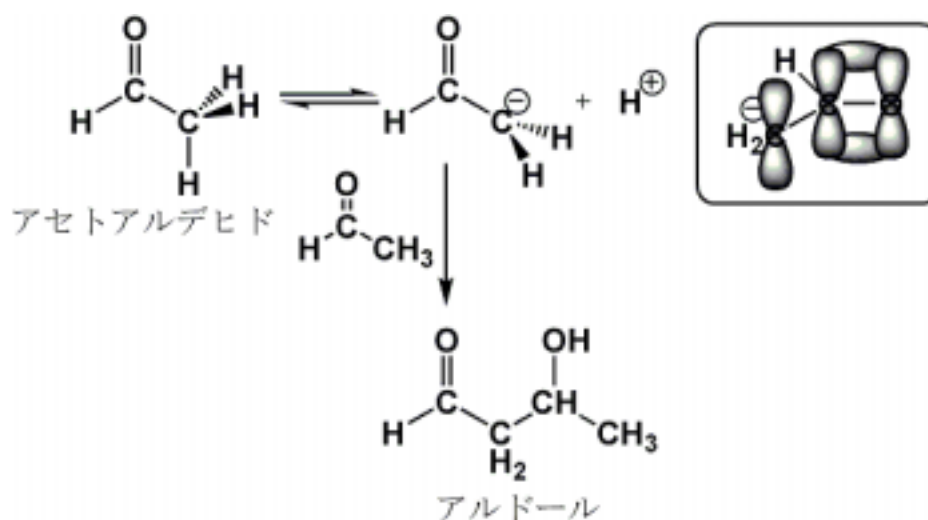


図9-6 アルドール反応の機構

宇宙生物の主要素材は高分子物質

宇宙生物を育む海は地球上と同じように水の海が最も適していると思われましたので、宇宙生物を構成する素材は液状の水に溶けるものでなくてはならないことになります。しかし、宇宙生物が海の水に溶けてしまっては、張子の虎のように形も組織もが無くなってしまうため不適当と考えられます。つまり、柔軟性に富み、多種多様な役割を担う宇宙生物の材質が水には不溶で、しかも水によく溶ける素材から生み出されると考えられます。

分子量の小さな物質は分子間の相互作用が小さいため、物質固有の融点で液体の状態と固体の状態がはっきりと分かれていますから、柔軟性に富んだ固体で存在する物質は極めて稀にしかあり

ません。少し長い分子では、絡まるような相互作用が大きくなり、分子固有の性質のほかに、分子同士の絡まった集合体としての性質が現れ粘性が高くなってきます。分子量が 5000 以上の鎖状の物質では鎖が長いためにさらに絡まるような相互作用が大きくなり、こんがらがって解けなくなってしまいます。そのためもはや分子固有の性質よりも絡み合った集合体としての性質を示すようになります。このようにこんがらがって集合体としての性質を持つ物質を高分子物質と呼んでいますが、分子間の相互作用によりきちんと整列することが出来ず、高い温度では軟化し、低い温度ではガラス状に固化します。そして、広い温度範囲で柔軟性に富む性質を示します。前節で考えたように、高分子物質は素材が水と水素結合できる部分を持っていても水に溶け難い性質を示しますので、宇宙生物の材質に最も適していると思われます。

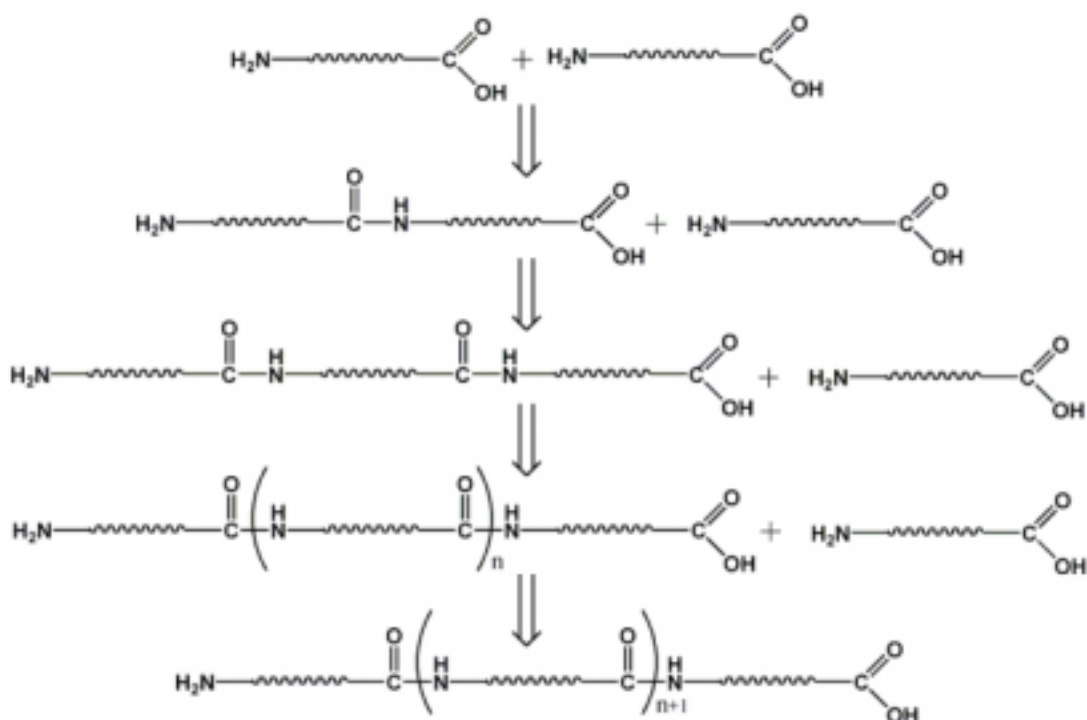


図9-7 アミド結合の繰り返しのポリペプチドの生成

ここで、この高分子物質がどのようにして生成してくるのか考えて見ましょう。図 9 - 7 の例に示すように、アミンとカルボン酸の 2 種の結合できる部分構造を持つ分子量 200 程度の小さな分子の単位が 2 単位結合した分子に成長してもアミンとカルボン酸の 2 種の結合できる部分構造が両末端に残ります。このような分子の単位は次々に結合して成長しても、同じくアミンとカルボン酸の 2 種の結合できる部分構造が両末端に残りますから、無限に長い鎖状のポリペプチド分子に連鎖的に成長してゆくことができます。つまり、高分子物質は 2 種の結合できる部分構造を持つ小さな分子の単位が無限に結合したものと考えられます。

1940 年頃に米国の Carothers という化学者はこの考えに基づいて、アジピン酸とヘキサメチレンジアミンという 2 種類の化合物からアミン部分とカルボン酸部分を両末端に持つ単位分子を調製し、この 2 つの結合できる部分を次々に反応させて、アミドを合成しました。この場合、常

に分子の両末端にはアミン部分とカルボン酸部分が残し、非常に長い大きな分子の物質を合成することに成功しました。これはナイロンという商品名で繊維に加工され、靴下をはじめ多くの繊維製品として市場に売られるようになりました。

また図 9 - 8 に示すように、Ziegler と Natta はこの連鎖的な付加反応が AlCl_3 あるいは TiCl_4 により始まることを発明し、ポリエチレンやポリスチレンを工業的に作ることが出来るようになりました。

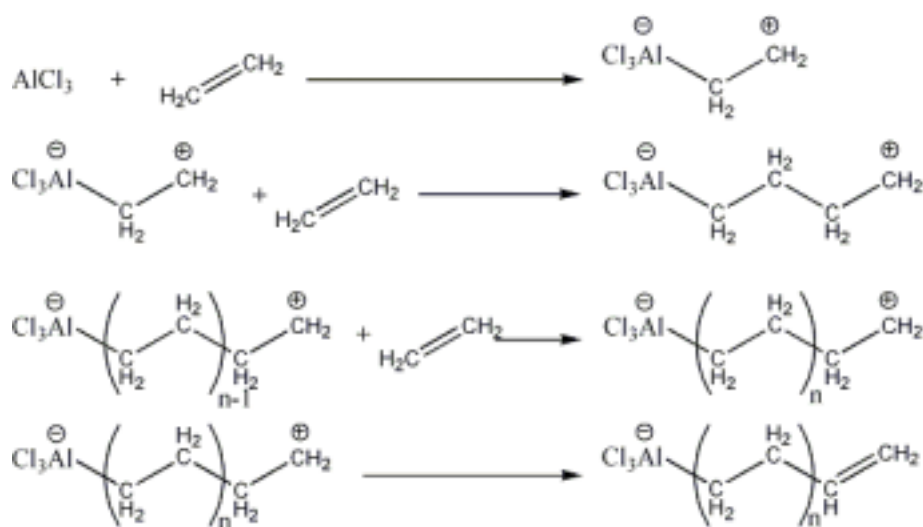


図9-8 イオン重合によるポリエチレンの生成

宇宙生物を構成する高分子物質の種類は何か

前章では宇宙生物を構成する素材が水によく溶けることから、アルコール類、アミン類や、カルボン酸、りん酸、スルホン酸などの酸類の何れかであろうと考えてきました。これらの素材から水の中で生成する高分子化合物を図 9 - 9 にまとめましたが、反応条件の温和な可逆平衡反応により生成する高分子物質はかなり限られてきます。アルコール類同士が反応するとエーテル結合を持つポリエーテル型の高分子物質となりますが、反応が可逆平衡反応でないため宇宙生物が利用するとは考えられません。アミン類同士が結合したポリアミン型の高分子物質も、生成する反応が厳しい反応条件を必要とする非可逆反応のため、宇宙生物が利用する可能性はあまりありません。しかし、ホルムアルデヒドやブドウ糖などのある種のアルデヒドに水やアルコールが付加反応してアセタールを生成しますので、分子の中にアルコールとアルデヒドの部分構造を持つ物質では、連鎖的にアセタールの結合を持つポリアセタール型の高分子化合物となり、宇宙生物を構成する素材として可能性があります。カルボン酸類やそのほかの酸類同士が反応すると、酸無水物の結合を持つため水の中ではあまり安定ではなく、そのような高分子物質は宇宙生物を構成する素材として可能性はあまり高くないと思われます。カルボン酸類やそのほかの酸類とアルコール類が付加・脱離反応すると、エステル結合を持つポリエステル型の高分子物質となり、宇宙

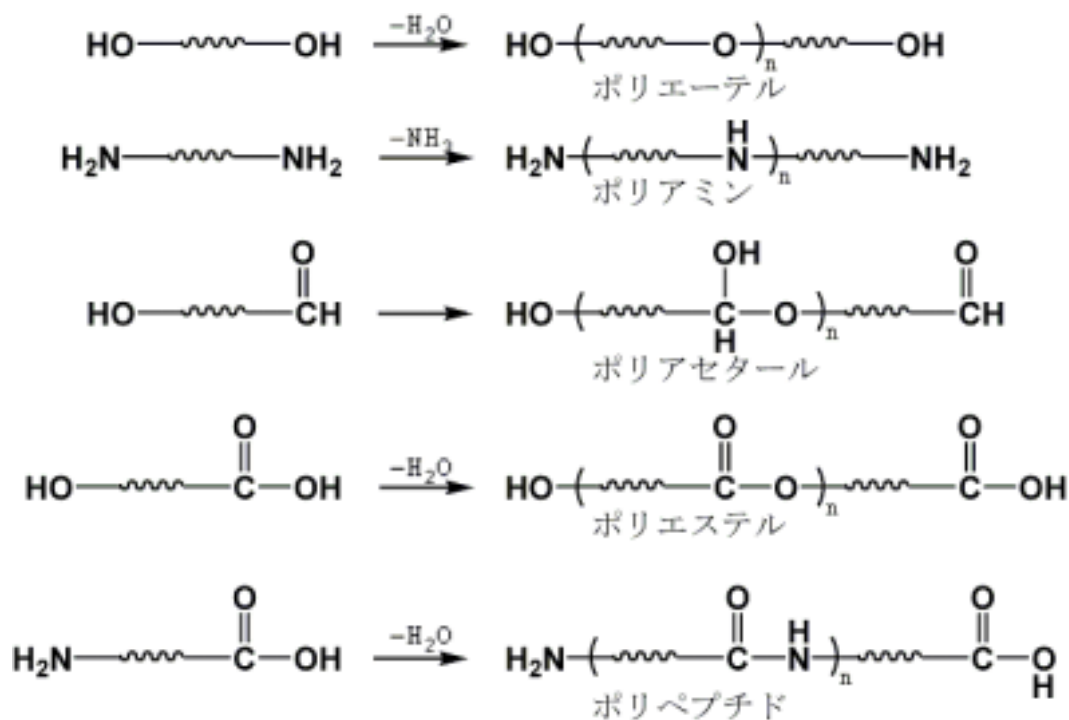


図9-9 水溶性物質から予想される高分子化合物

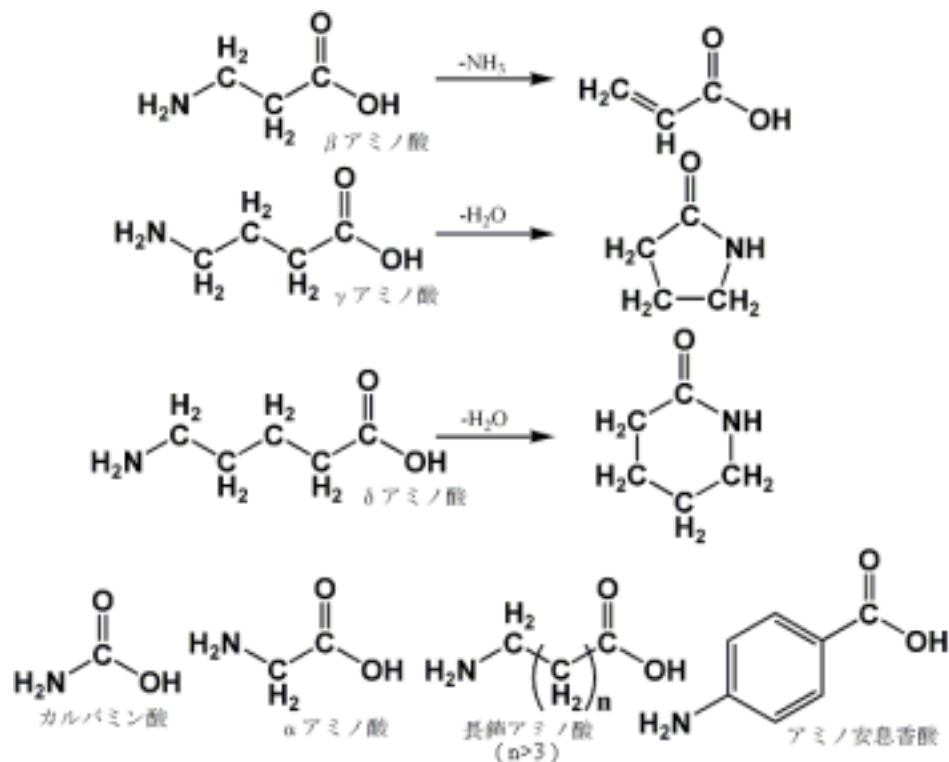


図9-10 各種アミノ酸類の構造

生物を構成する素材として極めて高い可能性を持っているように思われます。また、カルボン酸類やその他の酸類とアミン類が付加・脱離反応すると、アミド結合を持つポリペプチド型の高

分子物質となり同じように宇宙生物を構成する素材として極めて高い可能性を持っているように思われます。

分子の中にアルコール部分とカルボン酸部分を持つヒドロキシ酸やアミン部分とカルボン酸部分を持つアミノ酸はその単位物質同士で反応して高分子物質を構成することが出来るために、高分子物質の素材となる単位物質として可能性の高い素材と考えられます。特に、アミノ酸は単位物質の中に塩基性のアミン部分と酸性のカルボン酸部分を持つことから、酸性中性塩基性のいずれの条件においても水によく溶けるため、高分子物質の素材となる単位物質として可能性の極めて高い素材と考えられます。

アミン部分とカルボン酸部分を繋ぐ炭素の鎖の部分の長さの短いものからカルバミン酸、 α -アミノ酸、 β -アミノ酸、 γ -アミノ酸、 δ -アミノ酸などの鎖状アミノ酸のほかに、2つの部分をベンゼンで繋いだアミノ安息香酸もアミノ酸として図 9 - 10 に掲げたように考えられます。この中で β -アミノ酸は素材としても高分子物質としても比較的に不安定で宇宙生物が利用するとは考えられません。素材となる γ -アミノ酸、 δ -アミノ酸は高分子物質よりも環状の別の物質に容易に変化してしまい、高分子物質への変化には困難が伴います。2つの部分を繋ぐ炭素鎖の長さがさらに長い鎖状アミノ酸ではあまり水溶性が期待できないため、宇宙生物を構成する高分子物質の素材として適当とは思えません。カルバミン酸は反応するとポリウレタンとなりますが、その構造や性質は単純で多種多様性に欠けます。アミノ安息香酸を単位とする高分子物質は剛直になり柔軟性に欠けます。結局、いろいろのアミノ酸の中で宇宙生物を構成する高分子物質の素材となるアミノ酸は α -アミノ酸を置いて他には無いことになります。

因みに、地球上の植物は構成している素材としてポリアセタール型高分子物質のセルロースを、動物は α -アミノ酸を素材とするポリペプチド型高分子物質の蛋白質を利用しています。

10. 宇宙生物の活力

活力となるエネルギーは酸化反応から

第4章で考えたように、宇宙生物の生命維持活動が化学反応でなされていることから、活力となるエネルギーも化学反応で供給されていると思われます。ある物質が新しい物質に化学反応をして変化してゆくとき、熱エネルギーや光エネルギーや電気エネルギーなどを出します。また、熱エネルギーや光エネルギーや電気エネルギーを加えてやらないと化学変化が起こらないこともあります。このように物質の化学変化において、その自由エネルギーは変化しますが、同時に余った一部のエネルギーは熱エネルギー、光エネルギー、電気エネルギーあるいは運動エネルギーとして放出されます。宇宙の生物体内でも構成する物質が化学的に変化し、そのとき副生する熱エ

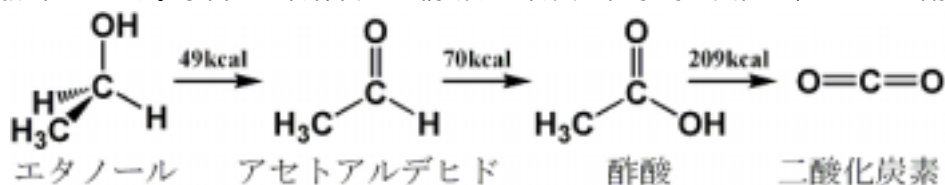


図10-1 エタノールの酸化反応と発熱量

ネルギーや運動エネルギーが利用されて全ての生命活動が維持されるものと考えられます。

石炭や石油が燃焼するときに多量の光エネルギーと熱エネルギーを放出しますが、このとき石油や石炭の炭化水素は二酸化炭素と水まで一気に酸化してしまいます。この燃焼という化学変化は少量の物質が酸化して発生する熱エネルギーにより、近くにある他の物質の酸化反応を引き起こして行く連鎖的な反応です。石油や石炭の燃焼反応でなくても、宇宙生物を構成すると考えられる炭素を中心元素とする物質は酸化するときに同じようにエネルギーを放出します。これとは反対に還元反応では、熱エネルギーや光エネルギーや電気エネルギーを加えてやらなければ一般に進行しません。

燃焼のように反応が早ければ多量のエネルギーが急激に放出されますが、ゆっくり酸化反応が進行すればエネルギーも少量ずつ長時間に発生します。必要なときに少量ずつエネルギーを発生させるためには、炭素を中心元素とする物質から二酸化炭素への一段階による酸化反応ではなく、種々の中間の物質への変化を含む多段階の酸化反応により制御する必要があると思われます。例えば図10-1に示すように、水に溶けるアルコール類は酸化されてアルデヒド類に変化し、さらに、カルボン酸への酸化を経て二酸化炭素へと酸化されてゆきますが、そのとき段階的に反応熱が発生します。この3段階の酸化反応を制御することによりエネルギーの発生を制御できます。お酒やお酢を醸造するときに活躍する麹菌は、アルコール類の一種のでんぷんを二酸化炭素へ酸化するときに発生するエネルギーを利用して生きています。この多段階の酸化過程の中間に生成してくるアルコールや酢酸を、人間はお酒やお酢として横取りしています。同じように、宇宙生物も食物や栄養を多段階の反応により酸化して、発生するエネルギーを活力として利用するもの

と思われます。燃焼熱が有機化合物から二酸化炭素まで酸化されるときに放出するエネルギーを表していますので、宇宙生物が食物や栄養として利用できると思われる種々の有機化合物の燃焼熱を表 10 - 1 にまとめました。

炭化水素の燃焼では中間の 3 段階の酸化状態を一気に通り過ぎて二酸化炭素まで酸化されてしまうために、熱が多量に発生してしまい反応の制御が難しくなります。これに対して、酸化反応を制御することにより、5 段階の酸化状態を徐々に二酸化炭素へ変換して行くことが出来れば、熱エネルギーの発生は抑えられ長時間持続することが可能になり、宇宙生物の活力に利用可能になるとと思われます。つまり、宇宙生物の活力の源は炭素を中心元素とし、かなり低い酸化状態の物質でなければならないと思われます。しかも、これらの酸化反応も水の中の反応と考えられますから、水に溶ける物質でなければならないと、宇宙生物の活力の源となる食物や栄養はアルコール類、アミン類あるいはカルボン酸類に限られてきます。

表 10 - 1 種々の有機化合物の燃焼熱(kcal/mol)

物質名	分子式	燃焼熱	物質名	分子式	燃焼熱
ホルムアルデヒド	CH ₂ O	134.1	アラニン	C ₃ H ₇ NO ₂	387.7
蟻酸	CH ₂ O ₂	62.8	ウレタン	C ₃ H ₇ NO ₃	397.2
メタン	CH ₄	210.8	プロパン	C ₃ H ₈	526.3
尿素	CH ₄ N ₂ O	151.6	グリセリン	C ₃ H ₈ O ₃	397.0
メタノール	CH ₄ O	170.9	酢酸エチル	C ₄ H ₈ O ₂	536.9
メチルアミン	CH ₅ N	256.1	ベンゼン	C ₆ H ₆	782.3
アセチレン	C ₂ H ₂	312.0	フェノール	C ₆ H ₆ O	732.2
シュウ酸	C ₂ H ₂ O ₄	60.2	アニリン	C ₆ H ₇ N	811.7
エチレン	C ₂ H ₄	331.6	ヘキサン	C ₆ H ₁₄	989.8
アセトアルデヒド	C ₂ H ₄ O	279.0	シクロヘキサジエン	C ₆ H ₈	847.8
酢酸	C ₂ H ₄ O ₂	209.4	シクロヘキセン	C ₆ H ₁₀	891.9
アセトアミド	C ₂ H ₅ NO	282.6	シクロヘキサン	C ₆ H ₁₂	937.8
グリシン	C ₂ H ₅ NO ₂	234.5	ブドウ糖	C ₆ H ₁₂ O ₆	673.0
エタン	C ₂ H ₆	368.4	ベンズアルデヒド	C ₇ H ₆ O	841.3
エタノール	C ₂ H ₆ O	327.6	安息香酸	C ₇ H ₆ O ₂	771.2
ジメチルアミン	C ₂ H ₇ N	416.7	ベンジルアルコール	C ₇ H ₈ O	894.3
エチルアミン	C ₂ H ₇ N	408.5	安息香酸メチル	C ₈ H ₈ O ₂	943.5
アセトン	C ₃ H ₆ O	426.8	オクタン	C ₈ H ₁₈	1302.7
蟻酸エチル	C ₃ H ₆ O ₂	391.7	ステアリン酸	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	2711.8

活力を生み出す酸化反応は酸素で

宇宙生物を構成すると考えられる炭素を中心元素とする物質は酸化するときエネルギーを放出することから、宇宙生物の活力の源となる食物や栄養はアルコール類やアミン類のようなかなり低い酸化状態の物質でなければなりませんし、このような有機化合物の酸化反応を宇宙生物は制御していると思われました。宇宙生物を構成している物質はいろいろな酸化状態にある有機化合物ですから、その酸化反応は大きな酸化還元電位を持ち、しかも宇宙生物が生活できるような冷えて固まった天体に多量に存在する酸化剤を必要とします。多くの酸化剤の酸化還元電位を表 7-3 にまとめましたが、多種多様な食物や栄養を酸化し得る高い酸化還元電位を示す物質としては塩素分子と重クロム酸と酸素分子が考えられます。

表 2-3 と表 2-4 には宇宙および地殻中の元素の存在比を挙げておきましたが、酸素の存在が塩素やクロムよりも約 1000 倍も多く存在していることが読み取れます。また、太陽系の惑星の大気中では塩素分子が全く観測できていませんから、多種多様な食物や栄養を酸化し得る高い酸化還元電位を示す物質としては酸素分子が最も適当と思われれます。これらの酸化反応も水の中の反応と考えられますから、酸化剤となる酸素分子の水に対する溶解度を調べることは大切なことと思います。

先に 8 章で調べましたが、水素結合が本質的に酸からの解離による水素陽イオンの供給と受け取る塩基との間の水素陽イオンの遣り取りにより、酸の水素原子が塩基分子に結合を瞬時にしてゆく交換反応であるため、塩基として働くことの出来る 1 対の電子を持つ分子は水と水素結合をすることが出来ます。特に、酸素原子は塩基として有効に働き、水と水素結合をし易いため、窒素分子と比較して酸素分子が高い水溶性を示しています。さらに、表 7-2 には純粋な水ばかりでなく、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酸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、純粋な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酸素分子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。また、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。この比較的高い酸素分子の水溶性は生物が誕生し、進化する海に如何なる物質が既に溶け込んでいても、宇宙生物の活力を生み出す酸化反応において酸素が大切な酸化剤として働くものと考えられます。

11. 宇宙生物の進化の情報伝達の仕組み

記憶情報の読み出しは水素結合で

生物は増殖・成長・物質代謝・刺激反応性・調節性などの生活現象のために、高い再現性と発展性を持ち、極めて複雑で、繊細で、効率の良い組織と考えられています。このような特徴を具現するためには過去の経歴や性格の情報を記憶し伝達することが大切と思われます。このための情報の記憶と伝達の組織は、情報の記憶容量が多いこと、情報の伝達が早くて正確なこと、記憶情報が外界の刺激や変化に対して安定で影響されにくいこと、必要に応じて記憶情報が容易に更新できること、記憶情報が度々伝達できること、宇宙生物がすべて化学反応で生命活動を維持しているため化学反応で情報が記憶伝達されることなどの特徴を持っていると思われます。

高い再現性と発展性を持って過去の経歴や性格の情報を記憶し伝達するためには、何回でも記憶情報の読み出しと伝達を可能にし、情報の伝達において記憶媒体が化学変化を起こさないで安定でなければなりません。記憶媒体が化学変化を起こさない程度の温和な反応条件下でのこのような情報の伝達は、その前後で自由エネルギーの差の小さな化学反応でなければならないでしょう。その上、記憶媒体を温存したままで短時間に情報の伝達を可能にするためには、その情報伝達の化学反応は結合の切断や再結合のような反応ではなく、活性化エネルギーの小さな平衡反応であろうと思われます。

Brønsted は水素陽イオンを供給するものを酸、水素陽イオンを受け取るものを塩基と定義しています。この定義によると酸と塩基の反応は水素陽イオンの遣り取りと考えることが出来ます。ほとんどの酸は多かれ少なかれ水素陽イオンと対応する陰イオンに解離しますから、水素陽イオンはもっとも小さな化学物質としてあらゆる酸の系において安定に存在しています。近くに水素陽イオンを受け取る塩基が存在すれば、水素陽イオンの遣り取りの活性化エネルギーは極めて小さく、速やかに水素陽イオンは移動して酸—塩基の平衡反応が進行します。しかし、単なる酸—塩基の反応ではある種の酸が記憶素子の場合に、塩基性さえ充分であれば対応する塩基の種類を選びません。当然、1つの記憶情報に対して多くの異なった情報として伝達される可能性が生じてしまい、正確な情報伝達や読み出しが出来ません。

水素結合が本質的に水素陽イオンの酸からの解離による供給と受け取る塩基との間の水素陽イオンの遣り取りにより、酸の水素原子が塩基分子に結合を瞬時に変更してゆく交換反応であるため、水素結合の形成も極めて小さな活性化エネルギーの反応と思われます。水素結合が本来的に酸と塩基の間の水素陽イオンの遣り取りに由来するものであり、あたかも水素原子が酸と塩基の両者に結合しているような性質を示す結合ですから、あまり解離度の大きくない弱い酸と塩基の間には強い水素結合が期待できます。特に、1つの水素原子を介して酸素と窒素あるいは2つの酸素の間の距離が3Å程度に固定されるときに強い水素結合による安定化が起こります。例えば、カルボン酸は弱い酸としての酸素—水素結合と結合していない電子対を持つ酸素を持っているため、2分子のカルボン酸が図 11 - 1 のように2つの水素結合で結ばれて安定化します。この

時、水素を介して2つの酸素の間の距離は3Åと観測されています。

記憶素子となる分子が堅牢な骨格の上に水素結合に適した複数の酸あるいは塩基の部分を持つ構造であれば、その酸あるいは塩基の種類と空間的な原子間距離が規定されます。当然その記憶素子の分子と複数の水素結合を同時にすることの出来る物質はある1種類に一義的に規定され、その素子が持つ記憶情報を正確に読み出し伝達することが出来ます。

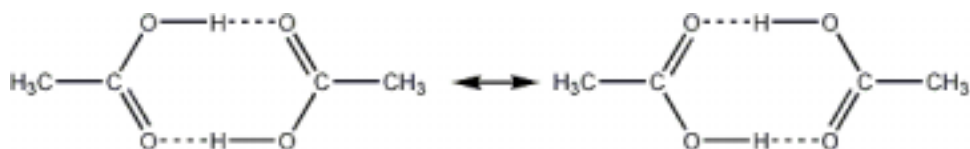


図11-1 2分子の酢酸を結ぶ水素結合

進化の情報の記憶媒体は芳香族化合物

化学反応で情報が記憶伝達されるためには、記憶媒体は化学物質でなければなりません。その上、記憶媒体が外界の刺激や変化に対して安定で、記憶情報が外界の影響を受け難く保存されるためには、媒体となる物質の分子構造が3次的に堅牢で変化し難くなければなりません。

ベンゼンは19世紀に石炭から取り出された物質で6個の炭素と水素から成る分子式を持っているため、その分子の中には少なくとも3本の多重結合を持っていることが考えられました。炭素6個からなる環状の化合物の燃焼熱を表11-1にまとめましたが、シクロヘキサンとシクロヘキセンを比較すると約45kcal/molほど発熱量の減少がシクロヘキセンに見られます。これは炭素—炭素間が単結合から2重結合に変わり、炭素—水素結合が2本減ったことによるものと思われます。同じようにシクロヘキセンとシクロヘキサジエンを比較してもシクロヘキサジエンに約

表 11 - 1 6員環炭化水素化合物の燃焼熱(kcal/mol)

物質名	シクロヘキサン	シクロヘキセン	シクロヘキサジエン	ベンゼン
構造式				
分子式	C ₆ H ₁₂	C ₆ H ₁₀	C ₆ H ₈	C ₆ H ₆
2重結合数	0	1	2	3
炭素—水素結合数	12	10	8	6
燃焼熱	937.8	891.9	847.8	782.3
燃焼熱の差		45.9	44.1	65.5

45kcal/mol の発熱量の減少が見られます。これに対し、シクロヘキサジエンとベンゼンではその発熱量の減少は 65kcal/mol となり、20kcal/mol ほどの違いが見られます。このことはベンゼンが特異的に安定化していることを意味しています。一般に、多重結合を持つ物質は水やアンモニアや臭素などの反応資材と容易に付加反応することが知られていますが、ベンゼンはこの非常に大きな安定化により反応資材とほとんど付加反応しません。その後、ベンゼンの分子構造は炭素と炭素の間の結合距離が多重結合の結合距離より長い平面正 6 角形をしていることが明らかになってきました。このような極めて安定で堅牢な構造を持つベンゼンの特異的な性質を芳香族性といい、ナフタレン、アントラセンなどの同じ仲間の物質も堅牢な平面構造を持つ安定な芳香族の物質です。これらの芳香族化合物に共通の構造的特徴は元素

が同じ平面の上に位置し、隣り合った $(2n+1)$ 本の 2 重結合で結ばれた環の構造を持っていることです。元素が鎖のように長く繋がった分子はグニャグニャとしなやかで、構造が変化し易いのに対して、芳香族の化合物は自由度の少ない堅牢な平面構造を維持します。

宇宙生物が増殖・成長・物質代謝・刺激反応性・調節性などの生活現象のために、安定で堅牢な平面構造を持つ芳香族の化学物質は過去の経歴や性格の情報を記憶し伝達する記憶素子として最も適当であろうと思われます。

記憶媒体は芳香族複素環化合物

記憶素子として、安定で堅牢な平面構造を持つ芳香族の化学物質が最も適当であろうと思われましたが、代表的な芳香族化合物のベンゼンやナフタレンには酸性の部分も塩基性の部分も無く、水素結合をすることが出来ません。複数の水素結合を同時にすることの出来る記憶素子は堅牢な骨格の上に水素結合に適した複数の酸あるいは塩基の部分を持つ構造でなければならないと思われます。ベンゼン環に水酸基の付いたフェノールは pKa が約 10 を示す弱い酸性の物質で、水素結合のための酸の部分として適当と思われます。また、ベンゼン環にアミノ基の付いたアニリンは弱い塩基性の物質で、水素結合のための塩基の部分として適当と思われます。

ベンゼンの正六角形の環を構成している 1 つの炭素が 1 つの窒素で置き換えられたピリジンという化合物は図 11 - 2 に示すように環の中に 3 本の多重結合が隣り合った構造を持っています。そのため、ベンゼンと同じように安定で堅牢な平面構造を持ち芳香族性を示します。しかも、窒素原子の非結合性の電子対は環平面上で外側を向いて出ているから、水素結合に適した塩基の部分となることが出来ます。このように炭素が窒素で置き換わった化合物は芳香族複素環化合物



図11-2 ピリジンの構造

と呼ばれています。ベンゼンの2つの炭素が2つの窒素で置き換わった芳香族複素環化合物は図11-3に示すように3種類存在しますが、2つの窒素の間に1つの炭素が挟まった構造のピリミジンは比較的安定で水素結合に適した塩基の部分を2つ持っています。

ベンゼンの隣り合った2つの炭素が1つの窒素で置き換わった5角形の構造を持つピロールは図11-4に示すように窒素の非結合性の電子対と2本の多重結合が環の中で相互作用をして、ベンゼンやピリジンと同じように安定で堅牢な平面構造を持つ芳香族の性質を示します。このピロールの窒素の電子対は芳香族の安定化に寄与しているためほとんど塩基性を示しませんが、炭素などと結合出来る1本の結合を環の外に持っています。同様に、ベンゼンの隣り合った2つの炭素が1つの酸素および硫黄で置き換わった5角形の構造を持つフランおよびチオフェンも芳香族の性質を示します。さらに、ピロールの炭素がピリジンのように窒素で置き換わったピラゾールおよびイミダゾールも図11-5に示すように安定で堅牢な平面構造を持つ芳香族の性質を示

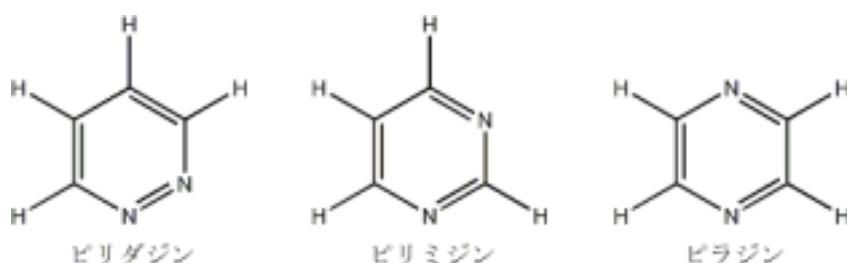


図11-3 3種のジアジン類の構造

します。これらの2つの窒素を含む化合物は水素結合に適した塩基の部分を持っています。これらの5角形の構造を持つ一連の化合物も芳香族複素環化合物と呼ばれています。

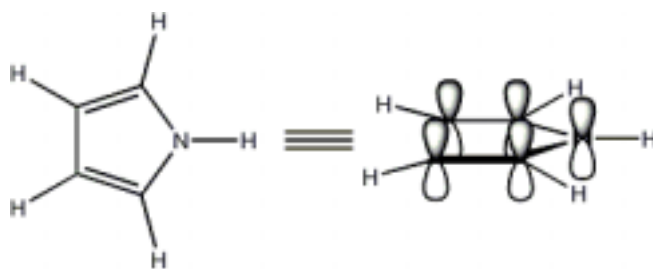


図11-4 ピロールの構造

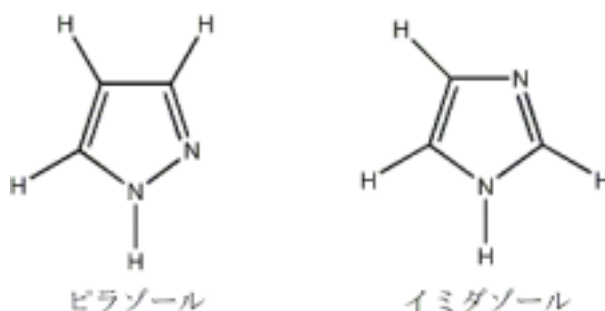


図11-5 2種のジアゾール類の構造

このような芳香族複素環化合物にフェノール性の水酸基あるいはアニリン性のアミノ基が付いた物質は堅牢な骨格の上に水素結合に適した複数の酸あるいは塩基の部分を持つ構造で、複数の水素結合を同時にすることの出来る記憶素子として適していると思われます。

主な記憶素子はアデニン

宇宙において種々の分子量の小さな化学物質の存在が確認されていますが、中でも炭素と窒素と水素から成るシアン化水素が高い存在比を示すことが確認されています。このシアン化水素 5 分子はある種の触媒で容易に縮合してアデニンに変化します。図 11 - 6 に示すようにアデニンはピリミジン環とイミダゾール環が繋がった芳香族複素環にアニリン性のアミノ基が付いた構造をしており、水素結合に適した 2 つないし 3 つの塩基部分を持っています。このように宇宙において非常に生成し易く、如何なる天体においてもその存在が期待できるアデニンが記憶素子として極めて優れた物質であり、宇宙生物も過去の経歴や性格の情報を記憶し伝達する記憶素子として採用するに違いありません。

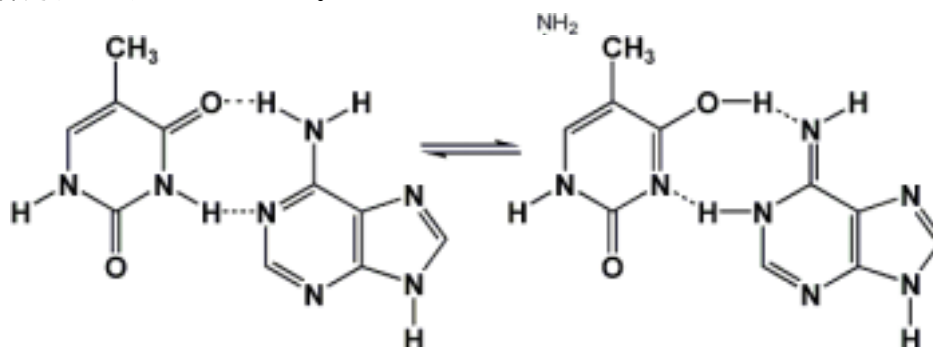


図11-8 チミン-アデニン間の水素結合

近年飛躍的に進歩してきたPCやコンピューターは記憶素子上の+と-の2種類の組み合わせで情報の記憶を行っています。記憶素子がアデニンだけでは記憶素子になり得ませんから、アデニンと最も相性のよいチミンあるいはウラシルを記憶素子として宇宙生物も利用するに違いありません。図 11 - 7 に示すようにチミンおよびウラシルはいずれもピリミジン環に 2 つのフェノール性水酸基がついた構造の芳香族複素環化合物ですから、図 11 - 8 のようにアデニンと一義的に 2 本の水素結合で容易に結ばれ情報伝達をすることが出来ます。さらにアデニンとチミンのほかに、記憶素子となりうる物質の種類が多くなれば、記憶容量は飛躍的に増大します。

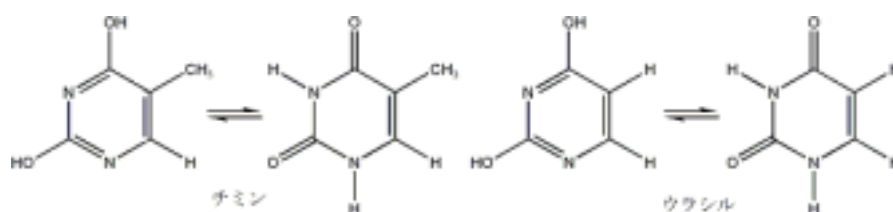


図11-7 チミンとウラシルの平衡

記憶媒体の基盤となる高分子物質の鎖に、これらの記憶素子が数多く結びついた物質が宇宙生物の記憶媒体として宇宙生物も過去の経歴や性格の情報を記憶し伝達してゆくものと思われます。

この記憶素子を入れ替えることにより記憶情報の書き換えや更新も可能と思われます。

ちなみに地球上の生物が持つ遺伝子などの記憶媒体の主要構成物質はアデニンとチミンです。他にグアニンとシトシンを加えて4種の記憶素子をりん酸のデオキシリボースエステルの長い鎖の基盤に結合した記憶媒体により、地球上の生物は過去の経歴や性格の情報を記憶し伝達しています。

12. 宇宙生物は左利き

左手と右手

人間は左右2つの手を持っていますが、それぞれ裏表と左右があります。手のひらを手前にすると、左手の親指は左に来ますし、右手の親指は反対に右に行ってしまう。一方の手を鏡に映すと反対の手と同じ側に親指が来ます。このように前後と左右が異なるものは性質の極めて似た1対のものが存在します。このように前後と左右が異なるときに不斉中心があるといい、そのとき発生する1対のものの関係を鏡像あるいはエナンチオマーの関係といいます。風車やサイコロや文字やねじ釘も不斉中心を持ち鏡像の関係にある1対のものがああります。鏡像の関係はものだけではなく、社会の習慣や抽象的な概念にもあります。例えば、日本の国内では車は左、人は右側通行と決められています。狭い道で人が他の人と出会ったときには右によけてすれ違います。握手をするときには右手を出します。

時計にも裏表があり、図12-1(時計A)に示すように左側にIX、右側にIIIが表示されています。この時計には文字盤のほかに文字にも右と左がありますから、文字盤だけが鏡像の関係にあるもの(時計C)、文字だけが鏡像の関係にあるもの(時計D)、すべてが鏡像の関係にあるもの(時

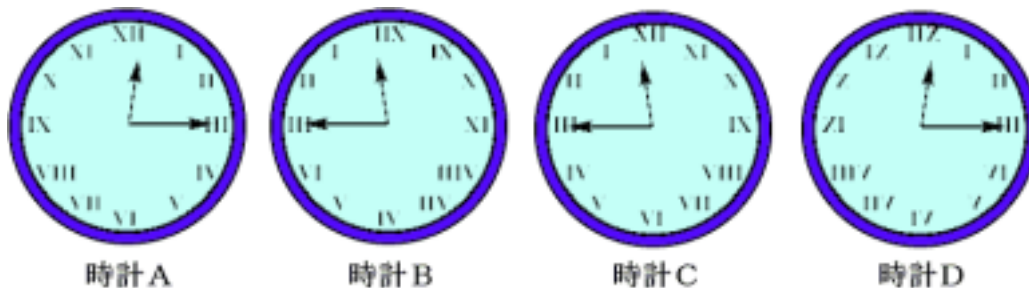


図12-1 時計とその鏡像

計B)が時計に類似したものとして考えられます。その上、時計の針は上から右に回り、下から左に回って1周しますから、時計の針の運動にも鏡像の関係が存在します。このように不斉中心が複数あるときには不斉中心の数 n に対して 2^n だけ類似のものが存在します。この時一部分だけ鏡像の関係にある時計Cや時計Dのようなものをジアステレオマーの関係にあるといいます。我々は時計の文字盤も文字も時計の針も鏡像関係の類似したものの中で右仕様のものしか使用しません。

鏡像の関係にある1対のものは不斉中心を持たないものと出会っても、それぞれ全く同じ相互作用をしますから、それらの両者は全く同じ性質や性能を示します。しかし、不斉中心を持つもの同士が相互作用をするときには、その組み合わせによりジアステレオマーの関係にある場合には異なった結果をもたらします。例えば、鋏やゴルフクラブには鏡像の関係にある2種類のものが、右利きの人は右仕様のものが使い易く、一般には右仕様のみが販売されています。左利きの人にとっては右仕様のものは使い勝手が悪く、左仕様のほうが使いよく来ています。日本の国内の

ように左側通行の道路を走るときは右にハンドルの付いた自動車の方が運転し易く、ヨーロッパ大陸や米国のように右側通行の国では左にハンドルのついた自動車が好まれます。靴や手袋は左には左仕様しか身体に合わず、右には右仕様しか上手く入りません。人間の身体が不斉中心を持っているために人間社会には多くの不斉中心を持った道具や慣習が生まれてきました。

宇宙の中にも多くの不斉中心を持つ物質や現象を見ることが出来ます。北半球では太陽は左から右に移動してゆきますが、南半球では右から左に移動します。台風やハリケーンやサイクロンは北半球では左巻きに南半球では右巻きの渦を巻きます。さらに、太平洋や大西洋の潮流も南と北では反対に回っています。これはみな不斉中心を持つ地球の自転の方向が一定なために由来する現象と思われます。不斉中心を持つ人間が不斉中心を持つ地球上に生活しているのですから、日の出から日の入りまでの太陽の動きに対して、北半球に住む人間と南半球に住む人間は異なった印象や思い込みを持っているかもしれません。

自然の中の鏡像の関係

炭素を中心とする分子にも不斉中心を持つものが多く見出されています。炭素は4つの元素と結合することが出来ますが、図12-2のメタンの

立体構造でわかるように炭素を中心に置くときの正4面体の頂点の方向にその結合は出ています。そのため、炭素に結合している4つの基がみな異なるときには3次的に前後と左右が異なってきますから、不斉中心を持つことになります。宇宙生物を構成する素材として最も適していると考えられる α -アミノ酸類には α の炭素に種々のグループが結合した α -アミノ酸類が考えられます。代表的な α -アミノ酸を図12-3に

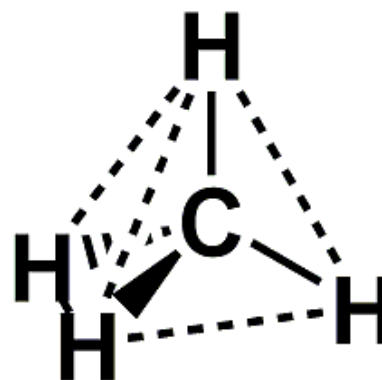


図12-2 メタンの立体構造(正四面体構造)

示しましたが、この α -炭素にはカルボン酸、アミン、水素が結合していますから、ほとんどの α -アミノ酸類は不斉中心を持っています。この α -アミノ酸が繋がって高分子になる場合には、当然多くの不斉中心が相互作用をすることになります。もし、鏡像の関係にある α -アミノ酸の一方のみを宇宙生物が取り込んでいるとすれば、 α -アミノ酸からなる高分子物質は一方の方向

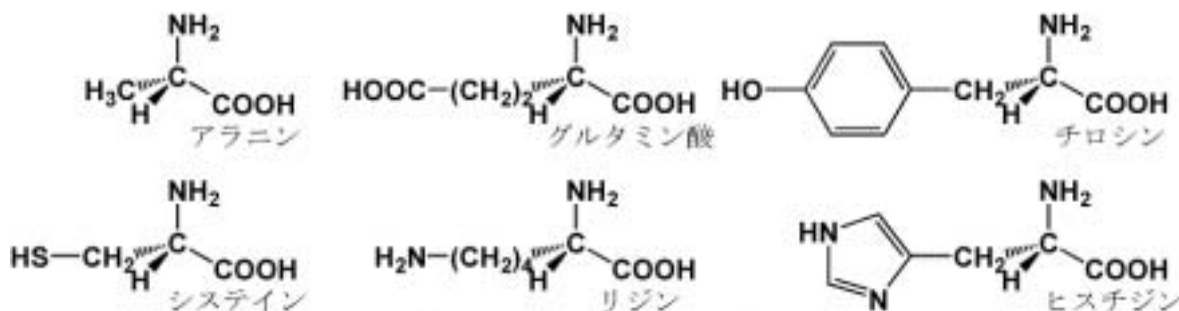


図12-3 代表的な α -アミノ酸

に拵じれてくるはずでず。このような現象は地球上でも観察されている酸のみで構成されていますが、何故そのように左回りが採用されているか未だに原因が明らかになっておりません。したがって、宇宙生物がどのようなアミノ酸を取り込んでいるか予想することは出来ません。右回りの α -アミノ酸のみを取り込んでいるかもしれません。結果として、心臓が右にあり、左利きの動物のようなものが宇宙には棲息しているのかもしれない。

13. 宇宙生物と地球上生物の比較

宇宙生物の全体像

18 グラムの水の分子の数は 6×10^{23} 個と考えられていますが、光を発している星がそれとほぼ同じ数だけ宇宙にはあると考えられています。主だった 9 つの惑星が太陽の周りを回っていますが、そのほかに数多くの衛星や無数の小惑星も太陽系に属しています。このように沢山の天体が 1 つの光る星に従属しているのですから、全宇宙には自ら光を発しない天体が想像できないほど沢山あるに違いありません。その中には生物が棲息している天体も数多くあると思われます。

137 億年前に宇宙が誕生し、40 億年前に地球が誕生し、さらに 38 億年前に生物が地球上に誕生しました。もっと昔に生物が誕生し、地球上の生物よりはるかに進化発達した生物の棲息している天体もあるでしょう。また、近年になって生物が誕生した天体もあると思います。宇宙には多くの生物が彼方此方の天体に種々の発達段階で棲息しているに違いないのですが、火星人、ET、ヨーダ、デスラー総統、クラーク・ケントなど限られた宇宙生物を除いては、現在のわれわれの能力ではその痕跡すら見ることも知ることも聞くことも出来ていません。

そこで本書では、地球上で得た物理学的知識、化学的知識を基にして宇宙に棲息している生物を独断について交えて想像してきました。その想像を最後に纏めてみましょう。無限に続く宇宙には多くの元素があるように思えますが、実際には地球上に無い元素は宇宙にも存在せず、約 90 種類に限られています。この 90 種類の元素の性質と存在量を考え合わせると、生物を構成している中心となる元素は炭素以外にはありえないのではないのでしょうか。炭素を中心にして、水素、窒素、酸素、りん、硫黄などの元素が共有結合で結ばれた有機化合物で宇宙生物は構成されると帰結されてしまいます。さらに、有機化合物の化学的性質から、生物の誕生し進化、棲息できる天体は大まかに - 100 から 150 の温度範囲と見積もることが出来ます。生物を構成している物質が有機化合物であることから生命の誕生は、液体に溶けた素材の溶液の反応で為されたものと思われます。しかも急激な温度変化は生物の棲息を困難にしますから、素材を溶かす溶媒は比熱の大きな水以外にはありえないと思われます。水に溶ける素材から水に溶けない生物の身体を考えると、 α -アミノ酸あるいは水酸基を多く含むアルコール類が連続して結合した高分子物質が最も可能性が高いと思われます。さらに生命活動を維持するためにはかなり速い反応速度が要求されますが、そのためには水の中に界面活性剤で出来たシャボン玉のようなフラスコを考えなければならないでしょう。さらに、宇宙生物の過去の経歴や性格の情報はアデニンを中心とする芳香族複素環化合物を記憶素子として、水素結合の反応により記憶の読み出しや伝達が為されるでしょう。これらの宇宙の生物は有機化合物の酸化反応で生じるエネルギーを活力として生命を維持していると思われます。木星のように大きな天体では、大気中に多量の水素ガスを含んでいますから、その活力の源になる還元された有機化合物は水素ガスによる還元反応で簡単に調達されると思います。地球や火星のように大気中に水素ガスをほとんど含まない天体では、外部からの光などのエネルギーの吸収による還元反応で活力の源が調達されているものと思わ

れ、ある適当な距離のところに高い温度で燃えている星があり多量のエネルギーを発散していなければならぬでしょう。

宇宙の生物と地球上の生物

地球上の生物も炭素を中心元素とする有機化合物で出来ており、海の中に誕生し、水の中の化学反応により生命を維持し、有機化合物を酸化することにより生命を維持する活力にしています。アデニンを中心とする芳香族複素環化合物で遺伝情報を記憶し伝達しています。このように、地球上で得られる物理学的情報、化学的情報を基にして想像してきた宇宙の生物は地球上に棲息している生物と比較してもほとんど差異がありません。残念ながら、夢のような宇宙生物は物理学的知識や化学的知識からは考えられません。天体の誕生からの歴史、天体の大きさ、自転や公転などの運動の仕方、天体の温度や圧力、太陽のような近くの星から供給されるエネルギーの量などいろいろな環境の違いにより、誕生し進化する生物の種類や形態は変化すると思われませんが、物質の性質や形態から考えるときに、宇宙生物と地球上の生物の間には沢山の共通することのあることが判ると思います。視点を変えれば、地球上の生物は宇宙的には極めて常識的で、宇宙の摂理にかなった組織体であると云えるでしょう。地球上の生物も宇宙生物の一員に過ぎないということです。クラーク・ケントのように人間社会に完全に溶け込んでしまう宇宙人がいても不思議ではありません。宇宙の生物を化学した結果、全く夢の無い結論になってしまったことを心から申し訳無く思っています。

索引

1

1 重膜 66

2

2 重結合 23, 33, 53, 64, 68, 69, 80

2 重膜 66, 67

2 量化 71

3

3 重結合 23, 33, 53

P

pKa 45, 81

S

sp²

sp² 23

sp³ 23

あ

圧力 35, 36, 37, 38, 47, 49, 52, 89

アデニン 83, 84, 88, 89

油滴 52, 56

アミド 55, 69, 72, 74

アミノ酸 55, 56, 75, 86, 88

アミン 46, 54, 55, 56, 58, 59, 69, 72, 73, 75, 77, 78, 86

アルカリ金属 58

アルカリ土類金属 58

アルコール 44, 45, 53, 54, 55, 56, 58, 59, 66, 67, 68, 69, 70, 73, 75, 76, 77, 78, 88

アルコキシ基 70

アルドール反応 71

アンモニア 21, 38, 43, 44, 45, 47, 48, 54, 55, 69, 81

い

硫黄 20, 23, 28, 32, 37, 38, 43, 48, 55, 56, 61, 82, 88

イオン 7, 17, 20, 21, 23, 25, 28, 44, 45, 48, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 61, 78, 79

イオン化ポテンシャル.....	23
イオン結合.....	20, 22, 23, 44, 53
イミダゾール.....	55, 82, 83
陰イオン.....	20, 22, 23, 44, 45, 53, 57, 79
う	
海の凍結.....	50
運動エネルギー.....	31, 76
え	
エーテル.....	54, 73, 75
エステル.....	54, 56, 58, 67, 69, 70, 73, 84
エネルギー保存則.....	31
塩基性.....	45, 46, 47, 52, 54, 55, 75, 79, 81, 82
エンタルピー.....	30
エントロピー.....	30, 33, 49, 50, 52, 68
か	
界面活性剤.....	56, 66, 88
可逆平衡反応.....	65, 69
核反応.....	13
火成岩.....	59
活性化エネルギー.....	45, 65, 68, 79
カルボキシル基.....	70
カルボン酸.....	45, 54, 55, 56, 58, 59, 66, 67, 69, 72, 73, 75, 76, 77, 79, 86
還元反応.....	61, 64, 76, 88
き	
記憶情報.....	79, 80, 84
記憶媒体.....	79, 80, 81, 83, 84
気化熱.....	42, 49
気体の溶解度.....	51, 52
軌道.....	17, 64
凝固点降下.....	50
鏡像.....	85, 86
共鳴.....	70
共有結合.....	20, 23, 25, 28, 32, 33, 34, 44, 53, 64, 88
共有結合のイオン結合性.....	24, 26, 27

共有結合半径	24, 30
金属イオン	56, 57, 61

く

配位結合	20, 23, 25
繰り返し結合	28
グリセリン	54

け

けい素	20, 23, 24, 28, 32, 33, 56
結合エネルギー	23, 32, 33, 53, 68
結合角	30
結合モーメント	26
原子価	20, 24, 28
原子核	7, 17, 20, 24
原子間距離	30, 80
原子発光	15
元素記号	17
元素組成	15, 16, 66

こ

酵素	66
高分子物質	57, 72, 73, 75, 86

さ

酸化還元電位	62
酸化反応	61, 76, 77, 78, 88
酸性	45, 46, 47, 48, 52, 53, 54, 55, 56, 75, 81
酸性度	45, 70
酸素	24, 28, 32, 33, 38, 44, 48, 53, 54, 55, 56, 61, 69, 79, 82, 88
酸素分子	38, 52, 78

し

ジアステレオマー	85
質量数	7, 8, 9, 10, 11, 12
脂肪酸	71
自由エネルギー	30, 31, 33, 65, 68, 69, 70, 76, 79
周期表	17

重水素	15
状態方程式	36
情報伝達	79, 83
触媒	63, 65, 83
浸透圧	67

す

水酸基	44, 54, 81, 88
水素結合	49, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 79, 80, 81, 82, 83, 88
水素陽イオン	7, 45, 48, 79
水溶性	55, 58
ステロイド	71

せ

生活温度	34, 37, 38, 43, 44
正電荷	7, 49, 53

た

堆積岩	59
多重結合	23, 28, 33, 53, 64, 80, 81, 82
脱出速度	63
脱離反応	68, 69, 70, 73
炭化水素	44, 46, 52, 55, 56, 58, 61, 66, 67
単結合	23, 28, 33, 68, 80
炭酸カルシウム	59
炭素	43
炭素 - 炭素結合を形成	71
蛋白質	65, 75

ち

置換反応	68
窒素	20, 23, 24, 28, 32, 33, 38, 44, 53, 54, 55, 61, 79, 81, 82, 83, 88
中性子	7, 13, 17

て

出会いの反応	34, 35, 37, 42, 44, 48, 50
テルペン	71
電気陰性度	27, 28

電気エネルギー	31, 61, 64, 76
電子	7, 17, 20, 23, 54, 55, 61, 79, 81, 82
電子親和力	23
電池	61
と	
同位元素	7
に	
二酸化炭素	17, 38, 41, 42, 43, 44, 48, 51, 53, 59, 60, 61, 62, 63, 76, 77
ね	
熱エネルギー	31, 64, 70, 76, 77
燃焼	76, 77, 80
燃焼熱	77
は	
反応熱	76
ひ	
非可逆反応	65
光エネルギー	31, 64, 76
比熱	43, 88
ふ	
フェノール	45, 54, 81, 83
付加・脱離反応	70, 74
付加反応	68, 69, 81
不斉中心	85, 86
沸点	38, 48, 57
負電荷	7, 53
フラスコ	56, 58, 64, 65, 66, 67, 88
分解温度	50
分子	71
分子間力	35, 36
分子双極子モーメント	26
分子は衝突	36
分子量	48, 50, 52, 54, 55, 57, 71, 72, 83

へ

平衡反応	32, 65, 68, 69, 73, 79
平面構造	81, 82
ベンゼン	46, 53, 54, 68, 75, 80, 81, 82

ほ

芳香族	80, 81, 82, 83, 88, 89
ポリエステル	73
ポリペプチド	72, 74, 75

ま

膜 56, 58, 67

ゆ

融解熱	42, 49
有機化合物	34, 48, 53, 68, 77, 78, 88, 89
融点	29, 37, 38, 42, 48, 57
誘電率	44

よ

陽イオン	7, 22, 23, 44, 45, 48, 52, 53, 78, 79
溶液	36, 37, 42, 44, 58, 66, 88
陽子	7, 17, 20, 24
陽子数	13, 17
溶質	37, 42, 44
溶媒	37, 38, 42, 43, 44, 45, 50, 65, 88

り

理想気体	36
りん	20, 23, 28, 55, 56, 58, 59, 61, 67, 70, 73, 84, 88
臨界温度	38

わ

別れの反応	34, 35
-------------	--------