

6. 多くの偶然の上に生まれた水の惑星

地球から逃げ去った小さな分子

色とりどりの風船は風糸を通して引く力と風船の中に詰められた水素ガスの揚力が釣り合った状態を保ちますが、風糸が切れまると風船の揚力が優りますから、風船は大空高く飛び去ってゆきます。これと同じように、万有引力に優る力を持つ物質はすべてのしがらみから開放されて地球の影響の及ばない宇宙へ飛び出してゆきます。地球の半径を r 、地球の質量を M 、物質の質量を m とするとき地球上の全ての物質を地球に捕らえている万有引力 U は式 6 - 1 により算出できます。ただし万有引力定数 G は $6.67 \times 10^{-11} \text{m}^3/\text{kg s}^2$ と見積もられています。物質の質量と速度に比例する運動エネルギー F が式 6 - 2 のように地球の持つ万有引力に優るときには物質は地球の外に飛び去ってゆきますから、地球外へ物質が飛び去るために要する地球からの脱出速度 v_2 (第 2 宇宙速度) を 11.2km/s と算出できます。マリナー 2 号が金星へ、パイキング 2 号が火星へ、パイオニア 11 号やボイジャー 2 号が木星や土星へ飛んでゆきましたが、これらの人工衛星は 11.2km/s 以上の猛烈な速度で地球の重力圏から脱出しました。

太陽系には 9 個の惑星が太陽を中心に公転しており、我々の地球は内から 3 番目の軌道を公転しています。この 9 個の惑星のうち、最も外側の軌道を公転している惑星は近年その存在を発表されたばかりで、その真偽のほどは確かではありません。また、体積が極端に小さく非常に太陽に近い軌道を周回しているため、水星も余り性質がはっきりしていません。表 6 - 1 に示すように、地球に近い金星と火星は大きさも密度も地球と類似していますが、それらの外側に公転している木星と土星と天王星と海王星の 4 つの惑星は体積が大きく、太陽と同じようになりかなり小さな密度を持っています。このことから、内側の軌道を公転している金星と地球と火星の 3 個の惑星は、45 億年前に同じように誕生したものと考えられます。これらの惑星に対して、外側の軌道を公転している木星と土星と天王星と海王星の 4 個の惑星は別の経過で誕生したものと考えられます。地球の脱出速度と同じ算出法により算出した太陽系の惑星の脱出速度を表 6 - 1 に掲げておきますが、木星や土星や天王星や海王星は比較的大きな脱出速度を持っています。これに対して金星と地球と火星は軽く小さい惑星のために脱出速度も小さく、比較的に遅く運動している物質でも惑星外に飛び去ってゆきます。

$$U = -\frac{GMm}{r} \quad \text{式 6 - 1}$$

$$F = \frac{1}{2}mv^2 > \frac{GMm}{r} \quad \text{式 6 - 2}$$

$$v_2 > \sqrt{\frac{2GM}{r}} = 11.2$$

第 4 章で考えましたように、気体の分子は式 4 - 5 で表されるような運動エネルギーを

持って自由に動き回っています。この式を変形して導かれる式 6 - 3 から分かるように、気体の分子の数を N_a 、分子の質量を m 、理想気体定数を R 、分子量を M_w とするとき、運動している分子の速度 v は温度に比例し、分子量に反比例します。分子量の大きな分子ではたとえ温度が高くなってもゆっくりした速度で運動し、分子量の小さな分子は低温においても非常に早く運動します。例えば、独立行政法人海洋研究開発機構による「シートピア計画」は水深 60m の海底居住施設で生活する実験ですが、潜水病を避けるために通常の空気ではなくヘリウムを主体とする大気が用いられています。ヘリウムと窒素分子の分子量はそれぞれ 4 と 28 ですから、ヘリウムと窒素分子が同じ運動エネルギーを受けた時にヘリウムは窒素分子の 2.6 倍ほど早く動き回ります。そのためこの施設内では大気が早く振動しますから、すべての音程が 1 オクターブと完全 4 度だけ甲高い音になり、空気中でハ

$$v = \sqrt{\frac{3RT}{N_a m}} = \sqrt{\frac{3RT}{M_w}} \quad \text{式 6 - 3}$$

表 6 - 1 惑星の性質と大気組成 (%)

大気成分	分子式	分子量	金星	地球	火星	木星	土星	天王星	海王星
水素	H ₂	2				89	96	85	81
ヘリウム	He	4				11	4	15	17
メタン	CH ₄	16				0.2	0.5	0.6	2
アンモニア	NH ₃	17				0.02	0.02		0.0003
水	H ₂ O	18	0.14	2.8	0.03	0.0001			
窒素	N ₂	28	3.4	78	2.7				
酸素	O ₂	32	0.0069	21	0.13				
アルゴン	Ar	40	0.0019	0.93	1.6				
二酸化炭素	CO ₂	44	96	0.032	95				
二酸化硫黄	SO ₂	64	0.019						
惑星半径 (km)			6052	6378	3397	71398	60000	25560	24760
惑星質量 (x10 ²³ kg)			48.7	59.7	6.39	19000	5680	868	1020
密度(g/cm ³)			5.24	5.52	3.93	1.33	0.70	1.27	1.64
脱出速度 (km/ s)			10.36	11.18	5.02	59.57	35.56	21.29	23.49
大気圧(atom)			90	1	0.006				
太陽からの輻射量			1.91	1.00	0.43	0.037	0.011	0.0027	0.0011
大気温度 (K)			735	295	250	124	94	59	59
脱出分子量			0.1729	0.0596	0.2505	0.0009	0.0019	0.0033	0.0027

長調のドの音（振動数 264Hz）も 1 オクターブ上のファの音（振動数 686Hz）になります。

1966 年に Cameron が見積もった宇宙に存在する元素の割合を表 6 - 2 に抜粋しましたが、最も多い元素は水素で次に多いヘリウムと合わせて 99%以上に達し、それ以外の 90 種類の元素は合計 1%にも届きません。当然太陽系の惑星も例外ではありませんから太陽系惑星が誕生した時には、この表に示される元素組成で出来ていたと思われます。水素もヘリウムも気体になり易い元素ですから、それぞれの惑星の大気の主成分は水素とヘリウムで構成されていたと考えられます。

太陽はほぼ一定のエネルギーを放射し続けていますが、各惑星により太陽からの距離が異なりますから、各惑星で受ける放射エネルギーの量は異なります。表 6 - 1 には地球で受ける放射エネルギーの量を 1 としたときに、それぞれの惑星が同じ面積当たり受け取れる放射エネルギーの量を掲げました。当然この値の小さな惑星では大気は温められませんから温度が低くなってゆきます。近年になり人工衛星などで太陽系の惑星の大気の温度と成分比がかなり詳細に調べられましたので表 6 - 1 に掲げます。ここに掲げた大気の温度と脱出速度を式 6 - 3 に代入しますと脱出速度を持つ分子の分子量を算出することができますから、脱出分子量として表 6 - 1 にあわせて掲げておきます。式 6 - 3 で算出される分子の運動の速度はあらゆる分子の平均値で、非常にわずかながらその平均値から大きく異なり非常に早く運動する分子も非常に遅く運動する分子も含まれています。脱出速度を超えるほどに早く運動する分子は大きな偏差値を示しますから、極めて少量しか含まれていませんが、惑星の誕生以来 45 億年の間には大気中から宇宙の彼方に飛び去ってゆきます。

大きな脱出速度を持ちしかも大気の温度が低い木星や土星や天王星や海王星では脱出分子量が極めて小さな値ですから、分子量の最も小さな水素やヘリウムの分子でもほとんど惑星から脱出することがなく、宇宙の元素組成をほぼ維持してきました。結果として現在でもそれぞれの惑星の大気は少量のヘリウムと共に主成分として水素を約 90%含んでいます。これらの惑星に対して、脱出速度が小さく大気の温度の高い金星と火星では脱出分子量が比較的大きいために、水素やヘリウムばかりでなくメタンやアンモニアや水まで惑星外に飛び去ってゆきました。そのため、現在では分子量の大きな二酸化炭素が大気の主成分として残りました。

金星と同じ程度の脱出速度を持っている地球は、わずかに大きな半径の軌道を周回していますから、太陽から受ける熱や光などの放射エネルギーが半分ほどしかなく、大気の温

表 6 - 2 宇宙における元素存在比

元素		存在比(%)
水素	H	92.2190
ヘリウム	He	7.4928
炭素	C	0.0478
窒素	N	0.0086
酸素	O	0.0836
ネオン	Ne	0.0084
マグネシウム	Mg	0.0030
けい素	Si	0.0029
硫黄	S	0.0017
アルゴン	Ar	0.0007
鉄	Fe	0.0024

度が低いために、金星や火星より小さな脱出分子量を示しています。地球が太陽からの適当な距離と惑星質量を持っていることから、水素やヘリウムなどの小さな分子量の分子は宇宙の彼方に飛び去ってしまいましたが、酸素や窒素は宇宙に脱出することなく地球に残存して大気の主成分を構成しました。さらに、水もほとんど脱出することなく地球に残りましたが、地表の環境では水は液体の状態で存在しますから、海が地球の 70% を覆う豊かな水の惑星になったと思われます。ちなみに、月の脱出速度は 2.38km/s に過ぎませんし、太陽に面するときにはかなり高温に達しますので、全ての気体が脱出してしまい現在では全く気体を検知できなくなっています。

二酸化炭素の固定化を援ける水

太陽系の 10 個の惑星のうちで地球に近い金星と火星は大きさも密度も地球と類似していますが、それらの外側に公転している木星と土星と天王星と海王星の 4 つの惑星は体積が大きく、太陽と同じようにかかなり小さな密度を持っています。このことから、内側の軌道を公転している金星と地球と火星の 3 個の惑星は、45 億年前に同じように誕生し、地殻の元素組成もほとんど類似しているものと考えられます。当然、これらの惑星は類似した大気を持っていたものと考えることが出来ますが、表 6 - 1 に掲げた太陽系の惑星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は主に窒素と酸素で構成されており、二酸化炭素はわずかに 0.03% しか含まれていません。二酸化炭素は地球の大気を構成する気体の中では最も重い質量を持っていますから、45 億年の間に脱出速度を超えて散逸していったとは考えられません。地球の大気の成分変化は金星や火星の大気の変化とは異なった過程を経たものと考えねばなりません。

金星は太陽に近いために地球の 2 倍近い輻射エネルギーを受け続けていますから大気の温度が高く、火星は質量が小さいため脱出速度が小さくなりますから、金星も火星も地球より脱出分子量をかなり大きく見積もることができます。そのためこれらの惑星では液状の水は存在できませんし、水蒸気の分子量が小さいためにほとんど水は散逸してしまい、結果的に 45 億年の間に太陽系の中で地球だけが水の惑星になってしまいました。近年、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、スピリット、オポチュニティーなどの無人探査機が金星や火星に着陸し、多くの情報を直接送信してきています。現在までに得られた情報を総合すると、火星に過去の水の痕跡が確認されたのみで、液状の水は現在ではほとんど存在していません。これに対して、大きな海が地球を覆っていますから、地球の大気が金星や火星のものと大きく異なる成分になった原因は多量の水の存在にあると思われます。太陽系の惑星が誕生してからの 45 億年の間に、地球だけが水の影響を受けながら独自の変化を続けてきたものと考えられます。

地球の誕生からまもなく固化して地殻が出来上がりましたが、その後も内部に液状で残ったマグマが世界各地の火山から噴出してきます。本来の地球の成分が固化してできた岩

表 6 - 3 地殻中の主な化合物組成 (%)

		火成岩	堆積岩	全地殻
酸化けい素	SiO ₂	59.12	57.95	58.87
二酸化チタン	TiO ₂	1.05	0.57	0.95
酸化アルミニウム	Al ₂ O ₃	15.34	13.39	14.92
酸化第二鉄	Fe ₂ O ₃	3.08	3.47	3.16
酸化第一鉄	FeO	3.80	2.08	3.43
酸化マンガン	MnO	0.12	0.00	0.10
酸化マグネシウム	MgO	3.49	2.65	3.31
酸化カルシウム	CaO	5.08	5.89	5.26
酸化ナトリウム	Na ₂ O	3.84	1.13	3.25
酸化カリウム	K ₂ O	3.13	2.86	3.07
五酸化燐	P ₂ O ₅	0.30	0.13	0.26
水	H ₂ O	1.15	3.23	1.60
二酸化炭素	CO ₂	0.10	5.33	1.24

石は火成岩と呼ばれ、表 6 - 3 に示すような成分を含んでいます。この火成岩は機械的風化により礫や砂に破碎され、土にまで微細化されて、水や風に流されて移動してゆきますが、そのとき、水に溶解しやすいナトリウムやカリウムやマグネシウムやカルシウムの塩類は水に洗い流されてゆき、酸化ケイ素や酸化アルミニウムなどを多く含む砂礫は水に溶けずに残って層をなして積もり、種々の変性を受けて堆積岩に固化してゆきます。このように火成岩は次第に堆積岩に変化してゆきますが、そのときに水によく溶ける成分が溶出してしまうため、若干岩石の組成が変化します。また、溶け出した種々のイオンが海に流れ込み、表 6 - 4 に掲げたように世界中の海はナトリウムやマグネシウムやカルシウムやカリウムの陽イオンと塩素や臭素や硫酸の陰イオンを多く含

表 6 - 4 海水中の元素組成

元素名	元素記号	組成 (%)
塩素	Cl	1.8980
ナトリウム	Na	1.0560
マグネシウム	Mg	0.1272
硫黄	S	0.0884
カルシウム	Ca	0.0400
カリウム	K	0.0380
臭素	Br	0.0065
炭素	C	0.0032
ストロンチウム	Sr	0.0013
珪酸	Si	0.0011
ホウ素	B	0.0005
アルミニウム	Al	0.0002
フッ素	F	0.0001

み塩辛くなってしまいました。

地球に大量にある液状の水は大気を構成する全ての気体を溶かしますが、その溶け易さは表 5 - 1 に示すように種類により大きく異なります。現在の大气成分のうちで、アンモニアや硫化水素や二酸化硫黄は極めてよく溶けます。酸素は窒素よりも若干多く溶けますが、それでも 1 L の水に 0.003 L しか溶けません。これに対して、二酸化炭素は酸素の 30 倍に相当する 0.086 L 溶けますから、かなり良く溶ける気体と考えることが出来ます。水に溶けた二酸化炭素は式 6 - 4 のように水と反応して炭酸となり、水素陽イオン、炭酸水素イオン、炭酸イオンに一部解離して酸性を示します。一般に水に溶ける気体の量はその圧力に比例しますから、圧力が高いときには水に大量の二酸化炭素が溶け込み、炭酸の濃度が高くなります。この水と二酸化炭素の反応は完全な可逆平衡反応ですから、溶け込む二酸化炭素が増大すれば、炭酸の濃度は高くなり、炭酸の濃度が低くなれば二酸化炭素を溶かし込むようになります。また、溶け込む二酸化炭素が減少すれば、炭酸の濃度は低くなり、炭酸の濃度が高くなれば二酸化炭素として水から発泡して行きます。ビールやシャンパンのような発泡酒は高い圧力で二酸化炭素を溶かし込んで高い濃度の炭酸として存在していますから、栓を開けて圧力を下げますと二酸化炭素が一気に気体になり泡となって逃げてゆき炭酸の濃度が低下します。しかし、栓を開けて数時間を経過したビールでも僅かづつは発泡を続けることから分かるように、この可逆反応はゆっくりした変化で、平衡に達するまでに時間がかかります。

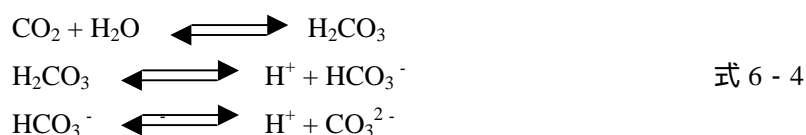
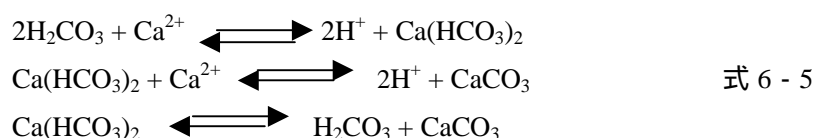


表 5 - 2 に示すように、種々の金属の塩化物や硝酸塩は水によく溶けますが、炭酸水素塩はかなり溶け難く、炭酸塩はさらに溶解度の低いことが明らかです。特に、カルシウムイオンと炭酸が反応して生成する炭酸水素カルシウムは 0.2% しか溶けませんし、炭酸カルシウムは 0.004% しか溶けません。塩化カルシウムは水によく溶けますから、カルシウムイオンのかなり濃い溶液を調整することが出来ます。この溶液に二酸化炭素を吹き込むと、式 6 - 4 に従い炭酸水素イオンと炭酸イオンが生成しますが、カルシウムイオンが溶液中に存在するため、式 6 - 5 の反応により水に対する溶解度の低い炭酸水素カルシウムと炭酸カルシウムが白濁して沈殿を始めます。この白濁する反応は鋭敏ですから、二酸化炭素の存在を確かめる呈色反応としてしばしば利用されています。



火成岩の風化により溶け出したイオンは海に流れ込み、世界中の海はナトリウムやカリウムやマグネシウムやカルシウムの陽イオンと塩素や臭素や硫酸の陰イオンを多く含み塩辛くなっていました。金星や火星の大気と同じように、生まれたての地球の大気中に多量に含まれていたと考えられる二酸化炭素がカルシウムイオンを含む海に溶け込んでくれば、溶解度の低い炭酸水素カルシウムと炭酸カルシウムが沈殿します。炭酸よりカルシウムイオンが過剰に存在するときはより溶解度の低い炭酸カルシウムが沈殿しますから、炭酸の濃度が低下し、式 6 - 5 の平衡は右に偏りさらなる二酸化炭素の水に対する溶解が進みます。結果として、カルシウムイオンが海に溶けて存在する間は、海は二酸化炭素を吸収し、炭酸カルシウムを沈殿し続けます。沈殿した炭酸カルシウムは種々の変性を受けて石灰石や大理石などの堆積岩に成長します。火成岩が風化して堆積岩に進化する間に、海の中ではカルシウムイオンが二酸化炭素を吸収して、石灰石や大理石として堆積岩に進化してゆきました。この化学反応により堆積岩の平均的な成分として、酸化カルシウムと二酸化炭素の増加したことが合理的に説明できますが、同時に地球の大気中における二酸化炭素の割合が低いことも説明できます。

大理石や石灰石の主成分である炭酸カルシウムは水に極めて溶け難い物質ですが、ごく一部炭酸イオンとカルシウムイオンに解離して水に溶けます。二酸化炭素の溶けた水溶液に炭酸カルシウムを加えると、水の中ではカルシウムイオン、炭酸イオン、炭酸水素イオン、水素イオンの 4 種のイオンが平衡状態で共存します。炭酸カルシウムより炭酸水素カルシウムの方が水に溶けやすいため、炭酸カルシウムは少しずつ水に溶け出してゆきます。すなわち、二酸化炭素が存在するときには炭酸カルシウムの溶け出す反応が進行します。小川は森の中を流れる間に、二酸化炭素を水の中に溶かし込み、二酸化炭素を溶かし込んだ水が大理石などの石灰石の上を流れるとき、主成分の炭酸カルシウムを溶かしてゆき、長年の間には石灰岩の塊に大きな穴が開いてしまいます。この穴を鍾乳洞と呼んでいます。この鍾乳洞の中には穴を開けていった川が必ず流れています。大理石の多い地中海に面した国々や山口県秋吉台には大きな鍾乳洞が点在しています。

太陽系の内側の軌道を公転している金星と地球と火星の 3 個の惑星は、45 億年前に同じように誕生しましたから、地殻の元素組成も大気の組成もほとんど類似していたものと考えられます。しかし、地球は潤沢なエネルギーを常に供給してくれる太陽から適当に離れた距離を周回する適度の大きさを持つ天体であったために、水素とヘリウムだけを宇宙の彼方に失いましたが多量の水や窒素や酸素を保持することができました。さらに、海に覆われた地球では水を介して、二酸化炭素が火成岩中に多量に含まれている酸化カルシウムと結合して炭酸カルシウムとして沈殿したため、長い年月の間に地球の大気中の二酸化炭素濃度が減少していったと考えることが出来ます。このような極めて多くの偶然が重なって、地球という水の惑星が生まれたことを神に感謝すべきではないでしょうか。

水に支配される地球の気候と自然

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が、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。その上、融解熱に相当するエネルギーが外部へ放出されるときに、融点にある液体の物質は固体の状態に変化してゆき、完全に固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、固体が液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必要とします。そのため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から、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。種々の物質の融解熱と気化熱を表 4 - 1 に、比熱を表 4 - 2 にまとめて掲げましたが、水の持つ値の非常に大きいことが分かります。このことは外部から受けるエネルギーの影響による水温の変化が緩やかで、しかも水を凍結させることも蒸発させることも非常に困難で 0 ~ 100 の水温の水の状態を維持します。

多くの偶然が重なって地球上には $1.4 \times 10^{18} \text{t}$ の水が残りましたので、地球の 70.8% は海で覆われています。他方、地球は毎日 1 回の周期で自転していますから、昼間は太陽エネルギーを受けられますが、夜間は全く太陽エネルギーが供給されません。当然、昼間は温度が上昇し、夜間は放熱しますから温度が低下します。表 6 - 5 には地表を覆っている種々の物質の 1cm^3 当たりの比熱をまとめておきました。陸地を構成している土や種々の岩石の比熱は水の比熱と比較して約半分しかありませんから、海よりも陸地は 2 倍の速さで温度が変化します。昼間の太陽のエネルギーを受けて陸地は海上よりも高い温度まで暖められますから、陸地に接する空気も暖められて膨張します。膨張した空気は軽くなり対流を起こして上空に浮き上がりますから、そこに生じた空間を埋めるように海上の空気が流れ込んできます。反対に、夜間は海上と比較して陸地の温度が大きく降下しますから、陸地では上空の空気が沈むように逆方向の対流が起こり、海の方へ吹出します。結果として昼間は海から陸地に向かって海風が吹き、夜間は陸地から海に向かって陸風が吹きます。そして、朝夕にそれぞれ

表 6 - 5 種々の物質の比熱

物質	比熱 (cal/cc)
アルミニウム	0.5863
銅	0.8260
鉄	0.8725
コンクリート	0.5208
アスファルト	0.2860
花崗岩	0.5400
砂岩	0.4500
石灰石	0.5902
土	0.4928
水	1.0000
ガソリン	0.3434
エタノール	0.4564
空気	0.0003

陸地と海上で温度変化の逆転が起こりますから、そのときは風が止まる風となります。余談ながら、アスファルトの比熱は水の 30% にも満たない物と見積もられていますから、都会の舗装道路の表面の温度変化はさらに速いものと思われます。

地球は地軸が 23.44° 傾いたままで太陽の周りを公転していますから、太陽から送られてくるエネルギーの量が時間によっても季節によっても地域によっても大きく変化します。東京において夏至の太陽エネルギーが冬至の太陽エネルギーの 1.9 倍まで強くなるように、北半球では冬は太陽から供給されるエネルギーが小さく、夏は大きなエネルギーが供給されます。そのため、昼夜で海風と陸風が交互に吹くように、夏は太平洋からユーラシア大陸へ海風の吹く夏型の気圧配置となり、冬は大陸から太平洋の方向に陸風が吹く状況の西高東低の気圧配置になります。

太陽から地球に送られてくるエネルギーは毎秒 $1 \times 10^{13} \text{kcal}$ と見積もられていますが、誕生以来 45 億年の間に地球は熱的に平衡の状態に達しましたから、現在では全く同量のエネルギーを輻射熱として地球の外に放出するようになっています。しかし、太陽も生きていますから、多くの黒点が発生したりして短期的には活発に活動し、多くのエネルギーが太陽から地球に送られてくることもあります。そこで、太陽の活動が急に活発になり 2 倍のエネルギーが 1 年間地球に送られてきて海の水を暖めたと仮定しますと、海の水が約 0.2 上昇すると計算されます。水の気化熱と融解熱は非常に大きいため、この仮定に基づく計算では海の水が完全に蒸発するためには約 2800 年を要します。反対に太陽からのエネルギーが全く供給されなくなっても、完全に海が凍結するためには約 450 年を要します。

太陽の活発な活動による太陽から供給されるエネルギーの変化は多く見積もっても 10% 程度しか増減しませんから、太陽から送られてくる毎秒 $1 \times 10^{13} \text{kcal}$ のエネルギーが 1 年間海の水を温め続けるということは極めて乱暴な仮定ですが、それでも海の水の温度は 0.2 しか変化しないことになります。さらに、海の水が全て水蒸気になって蒸発すること、氷になって凍結することも全く考えられません。当然、海の水は 0°C 以下に下がることも 100°C より高温になることも有りませんから、地球は温暖な気候を保つことができます。水が大きな比熱と融解熱と気化熱を持つ液体ですから、大量の水で地球を覆っている海は気候に大きな影響を与えているばかりでなく、地球上の気温を一定に保つように調節する緩衝効果を持っています。

生物の誕生は海の中で

普遍的に棲息している大腸菌が 4500 種以上の多種多様の複雑な物質で構成されているように、地球上の全ての生物は非常に多くの種類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。簡単な物質から生命活動の維持に必要な複雑な物質へ変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。A 子さんと B 君が電車の中で出会ったように、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。分子が互いに自由に動き回るときには容易に衝突することが出来ますが、一方の分子が動かない

場合には衝突はかなり起こり難くなります。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付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じよう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出来ますが、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、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。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。純物質の分子の動きはこのように限られていますが、溶質が溶媒に溶け込んだときには、溶質の分子はその溶液の中を自由に動き回ることが出来ます。そのため溶媒に溶けた 2 種類の溶質の分子は容易に衝突することができ、出会いの反応が進行します。このとき、溶質の濃度が高ければ高いほど衝突する確率が高くなりますから、出会いの反応が早くなります。

多くの偶然が重なって地球上には大量の水が液体の状態で残りましたので、地球の 70.8% は海で覆われています。最も豊富に地球上に存在するこの水が溶媒となって、生物の誕生や進化の段階で寄与すると思われる多種多様な物質が海の中で分子の衝突による出会いの反応で生じてきたと思われます。当然、水に溶解易い物質同士は水の中で出会いの反応をしますが、水に溶解難い物質は反応しませんから、生物の生命の維持に必要な物質の原料は水に溶解する物質でなければならないと考えることができます。

第 5 章で考えてきたように、アルコールなどの溶質が水の 3 次元的な網目の中に入り込むときには、水の水素結合の切断により不安定化しますが、アルコールなどの溶質と水の間に新しい水素結合をすることによりエネルギーの安定化が起こります。このため、水の水素結合による安定化をあまり犠牲にせず、エントロピーの増大による安定化が支配的になり、3 次元的な網目の中に水素結合できるアルコールなどの溶質の分子は入り込むことができます。結果として水素結合しやすい水素 - 酸素結合、水素 - 窒素結合を持つ物質は水に溶解易い性質を示します。また、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、そのイオンの電荷が水の水素原子と酸素原子上に帯電したわずかな電荷により打ち消されるように分散されるために安定化し、水素結合を切ることによるエネルギーの損失を

補います。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、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安定化し水に溶けます。

生物は主に蛋白質と脂肪と炭水化物で構成されていますが、蛋白質はアミノ酸が鎖上に長く結合した物質ですし、脂肪は脂肪酸のグリセリンエステルですし、炭水化物はブドウ糖が集合して生成した物質と考えることができます。蛋白質の原料となるアミノ酸は分子の中に水素 - 酸素結合を持つカルボン酸の部分と水素 - 窒素結合を持つ塩基性のアミン部分を持つ分子ですから、水との水素結合で安定化すると共にイオンとしての性質も示すために、極めて良く水に溶けます。脂肪の原料となる脂肪酸はカルボン酸の部分を持つ酸性物質ですから、塩基性では陰イオンとなり水によく溶けますし、グリセリンは多くの水素 - 酸素結合を持つアルコール類ですから水と水素結合して水に溶けます。さらに、炭水化物とその原料のブドウ糖も多くの水素 - 酸素結合を持つアルコール類ですから水と水素結合して水に溶けます。このように生物の生命の維持に必要な種々の物質は水によく溶ける物質を原料として、海の水の中で出会いの反応により生じてきたと考えることができます。生物の誕生や進化の過程においても水は欠かすことの出来ない溶媒の働きをしています。

細胞は界面活性剤でできたフラスコ

第 5 章で考えたように化学反応では、反応の起こる前の系 A から活性化エネルギーを使って不安定な中間の峠を乗り越えて系 B への反応が進行してゆくと考えられます。この活性化エネルギーを要する中間の峠が高ければ高いほど系 A から系 B への変化は遅くなり反応は進行し難くなりますが、峠を越えた後は安定な系 B に反応が進行して行きます。この峠が低い場合には系 A から系 B への変化も系 B から系 A への変化も速やかに進行しますから、反応は可逆平衡反応となり、わずかに 3 kcal/mol ほどの自由エネルギーの差により平衡は完全に偏り反応が完結してしまいます。あたかもわずかな重さの違いで大きく傾く天秤のように極めてわずかな自由エネルギーの差により系の平衡の割合は鋭敏に大きく変化します。通常の溶液中の反応ではその反応の種類や素材により、中間の峠を越すために要する活性化エネルギーの大きさが異なりますから、反応の速さにはかなり違いがあります。表 6 - 6 には生命活動に関係深い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、その結合の半減期が水により分解するのに約 1 千万年掛かります。これに対して、3 次元的な構造の変化による蛋白質の変性は 3 分ほどで完結してしまいます。これらの反応はいずれも別れの反応あるいは溶媒として周囲に大過剰に存在する水との反応ですから、2 種の物質の衝突する機会が影響する出会いの反応では有りません。

簡単な物質から生命活動の維持に必要な複雑な物質へ変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溶液中で進行してきたと考えられます。A 子さんと B 君が電車の中で出会って結ばれていったように、2 種の物質がそれぞれ多ければ多いほどその

衝突する機会は多くなりますから、出会いの反応の速度はそれぞれ分子の濃度の積に比例します。地球上は多くの液状の水が海となって覆っていますから、水によく溶ける物質を原料として、海の水の中で出会いの反応によりこのような複雑な物質が生じてきたと考えることができます。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、非常に精度よく宇宙年齢が 137 億歳と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、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た場合、このように海の中で一元的に出会いの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。

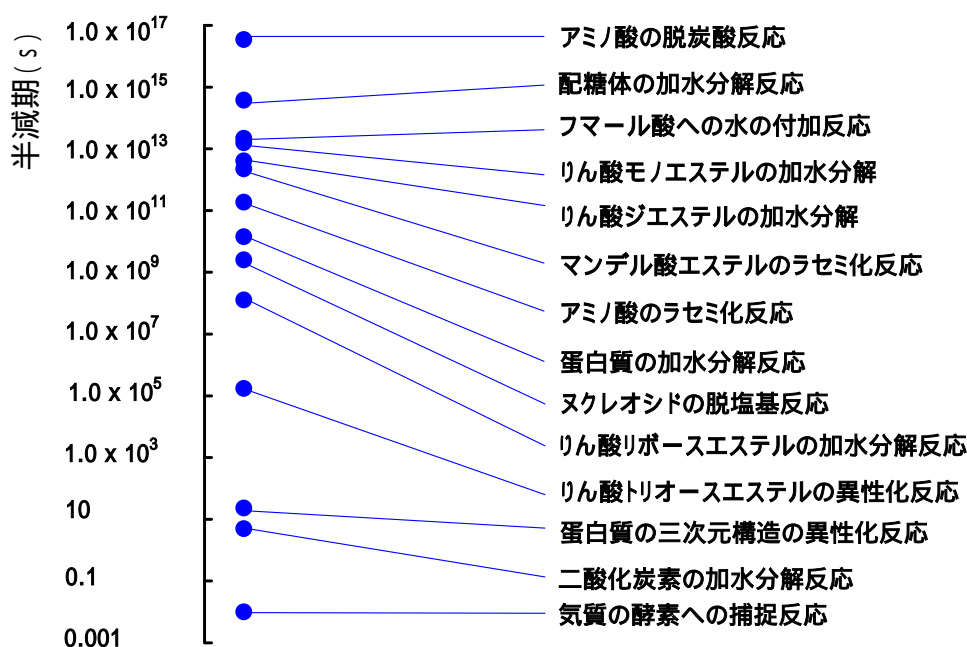


表 6 - 6 代表的な反応の速さ（半減期、s）

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。第 5 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 6 - 1 に示すように、界面活性剤の濃度が低い時 (C) には膜を形成しませんが、一重の膜の別世界(B)を作るか背中合わせの 2 重膜 (A)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、水に溶解易い部分(印)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中に出てくると、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。水に溶解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解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、100分の1秒程の極めて短時間に物質が酵素の中に完全にに取り込まれます。

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、水に溶解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中に出てくると、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。この2重膜は半透膜の性質を持っていますから、浸透圧により水はゆっくりと通過しますが、ある程度大きな分子は通過することが出来ません。こ

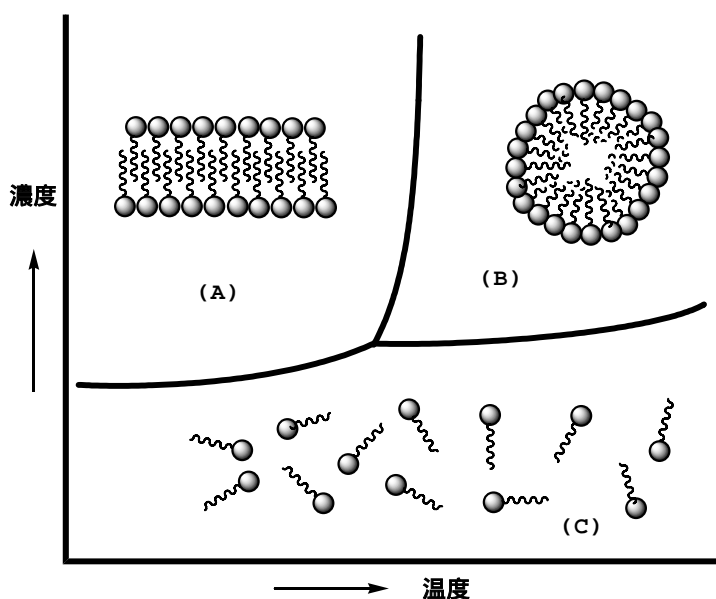


図6-1 界面活性剤の濃度と膜の性状

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ます。

このような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ますから、簡単な物質から生命活動の維持に必要な複雑な物質を生じる化学反応が短時間に容易に進行すると思われます。また、フラスコの中の素材の濃度を容易に調節できますから、生命活動に関連する化学反応を制御することができます。実際、生物は細胞膜と呼ばれるリン酸エステルの2重膜でフラスコを作り、この中で生命の活動の誕生や進化や維持に関係する化学反応を加速したり制御して、必要となる種々の複雑な物質の生成を適宜行っています。

水の分解で作られるブドウ糖

日常生活で口にする食物の中でパンやご飯などのでんぷんや糖類のもとになるブドウ糖は $C_6H_{12}O_6$ の分子式を持つアルコール類で、ほとんど全ての生物にとって生命を維持するエネルギーの源になる物質です。多くの植物は太陽からの光エネルギーを吸収して、6 分子の二酸化炭素を還元し、6 分子の水を酸化分解する光合成反応により、1 分子のブドウ糖と 6 分子の酸素を生産しています。

一般に、水を分解して酸素を発生させる反応は試験管の中では熱エネルギーや電気エネルギーで進行しますが、かなり過激な条件を必要とします。植物の組織にとってはそのような過激な条件は余り適しませんので、植物の中では主に光エネルギーで進行します。式 3 - 2 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。X 線や γ 線のようにきわめて短い波長の電磁波は生物を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。種々の原子間の結合エネルギーは $50 \sim 200 \text{ kcal/mol}$ ですから、短波長の紫外線でもそれらの結合を切断してしまいます。逆に、赤外線やマイクロ波などの長波長の電磁波は物質を変化させるには不十分なエネルギーしか与えません。地球表面には太陽から 250 nm よりも長波長の電磁波が到達しますが、中でも赤色の光を多く含んでいますから、生命活動に必要な物質を生産するために生物は赤色の可視光線のエネルギーを有効に利用して水を酸素まで酸化分解すると考えられます。その波長の光を最も効率よく吸収する物質は RGB 3 原色系の補色にあたる緑色の物質ですから、水の分解反応に有効な波長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、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。植物の組織の中では図 6 - 2 に示すように、葉緑素が太陽の光を吸収して得た 68 kcal/mol のエネルギーで水を酸素まで酸化分解し、 NADP^+ (別名ビタミン B_3) を NADPH まで還元し

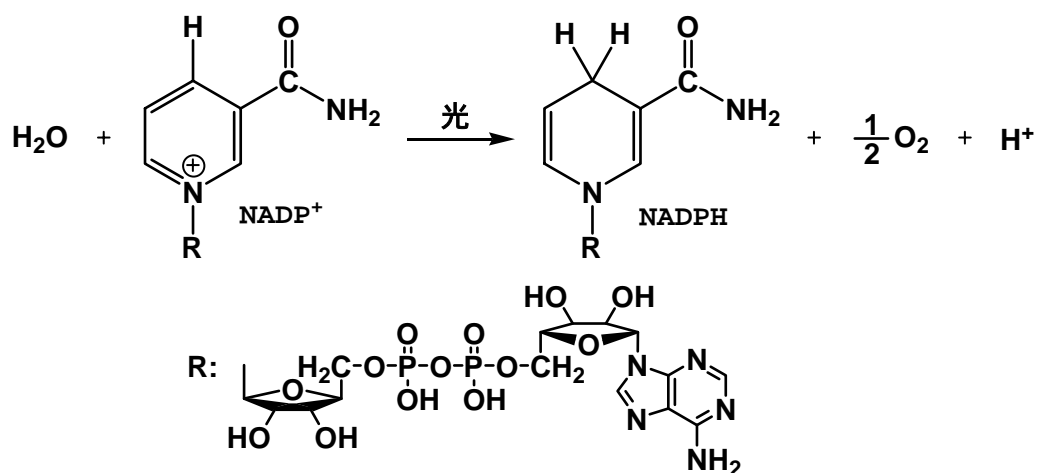


図6 - 2 太陽光による水の酸化反応

The diagram illustrates the C₃ pathway (Calvin cycle) and its associated chemical reactions. On the left, a flowchart shows the cycle: 六炭糖 (Hexose) is converted to 三炭糖 (Triose), which can be used for 二炭糖 (Dihydroxyacetone) or 四炭糖 (Tetrose). Triose is also converted back to 六炭糖. The chemical reactions on the right show the conversion of 3-phosphoglycerate to pyruvate and then to oxaloacetate, and the subsequent conversion of oxaloacetate to malate and then to aspartate. The reactions are as follows:

$$\begin{array}{c}
 \text{CH}_2\text{OPH}_2\text{O}_3 \\
 | \\
 \text{O}=\text{C} \\
 | \\
 \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\
 | \\
 \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\
 | \\
 \text{CH}_2\text{OPH}_2\text{O}_3
 \end{array}
 \rightleftharpoons
 \begin{array}{c}
 \text{CH}_2\text{OPH}_2\text{O}_3 \\
 | \\
 \text{HO}-\text{C} \\
 || \\
 \text{C}-\text{OH} \\
 | \\
 \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\
 | \\
 \text{CH}_2\text{OPH}_2\text{O}_3
 \end{array}
 \rightleftharpoons
 \begin{array}{c}
 \text{CH}_2\text{OPH}_2\text{O}_3 \\
 | \\
 \text{HO}-\text{C}-\text{H} \\
 || \\
 \text{C}=\text{O} \\
 | \\
 \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\
 | \\
 \text{CH}_2\text{OPH}_2\text{O}_3
 \end{array}
 \xrightarrow{\text{CO}_2}
 \begin{array}{c}
 \text{CH}_2\text{OPH}_2\text{O}_3 \\
 | \\
 \text{HO}-\text{C}-\text{COOH} \\
 || \\
 \text{C}=\text{O} \\
 | \\
 \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\
 | \\
 \text{CH}_2\text{OPH}_2\text{O}_3
 \end{array}
 \xrightarrow{\text{OH}^-}
 \begin{array}{c}
 \text{CH}_2\text{OPH}_2\text{O}_3 \\
 | \\
 \text{HO}-\text{C}-\text{COOH} \\
 | \\
 \text{HO}-\text{C}-\text{O}^- \\
 | \\
 \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\
 | \\
 \text{CH}_2\text{OPH}_2\text{O}_3
 \end{array}
 \leftarrow
 \begin{array}{c}
 \text{CH}_2\text{OPH}_2\text{O}_3 \\
 | \\
 \text{HO}-\text{C}-\text{CHO} \\
 | \\
 \text{H}
 \end{array}
 \xleftarrow{\text{NADPH}}
 \begin{array}{c}
 \text{CH}_2\text{OPH}_2\text{O}_3 \\
 | \\
 \text{HO}-\text{C}-\text{COOH} \\
 | \\
 \text{H}
 \end{array}
 \leftarrow
 \begin{array}{c}
 \text{CH}_2\text{OPH}_2\text{O}_3 \\
 | \\
 \text{H}-\text{C}=\text{O} \\
 | \\
 \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\
 | \\
 \text{CH}_2\text{OPH}_2\text{O}_3
 \end{array}
 \xleftarrow{\text{NADPH}}
 \begin{array}{c}
 \text{CH}_2\text{OPH}_2\text{O}_3 \\
 | \\
 \text{HO}-\text{C}=\text{O} \\
 | \\
 \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\
 | \\
 \text{CH}_2\text{OPH}_2\text{O}_3
 \end{array}$$

図6-4 光合成反応の一部の機構

$$\begin{array}{lcl}
 12\text{H}_2\text{O} + 12\text{NADP}^+ \longrightarrow 12\text{NADPH} + 6\text{O}_2 + 12\text{H}^+ \\
 6\text{CO}_2 + 12\text{NADPH} + 12\text{H}^+ \longrightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{H}_2\text{O} + 12\text{NADP}^+ \\
 \hline
 6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2
 \end{array}
 \quad \text{式6-6}$$

92

まれた還元する能力を二酸化炭素の還元反応に伝達する役目を担っています。この変化により二酸化炭素は還元度の高いブドウ糖に変換され、多くの太陽からの光エネルギーが蓄えられます。このようにして生合成されたブドウ糖を栄養にして、全ての生物は生命活動を維持しています。人間をはじめとする動物にとっては、光エネルギーで水を分解してブドウ糖を生合成してくれる植物が唯一の頼りなのです。

生物の活力はブドウ糖が持つ化学エネルギー

生物の進化の過程で、簡単な物質から生命活動の維持に必要な複雑な物質へ変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。A 子さんと B 君が電車の中で出会ったように、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。多くの偶然が重なって地球上には大量の水が液体の状態で残りましたので、最も豊富に地球上に存在するこの水が溶媒となって、生物の誕生や進化の段階で寄与すると思われる多種多様な物質が海の中で分子の衝突による出会いの反応で生じてきたと思われます。当然、水に溶け易い物質同士は水の中で出会いの反応をしますが、水に溶け難い物質は出会いの反応が遅くなりますから、生物の生命の維持に必要な物質の原料は水に溶ける性質を必要としていましたが、生物の素材となる物質は水に溶けては役に立ちません。もし、生物が水に溶ける素材で出来ているとすれば、魚や海草は水の中で溶けてなくなってしまいますし、人間は海水浴もお風呂も諦めなければなりません。そのため、水に溶ける原料から水に溶けない物質に化学変化させて生物は素材として利用してきました。例えば、水に溶け易い - アミノ酸を繋ぎ合わせて水に溶け難い蛋白質として動物の身体を作り上げています。

植物の中では吸収された太陽の光エネルギーで水が酸化分解され、二酸化炭素がブドウ糖に変換されて、光エネルギーが蓄えられます。このようにして生合成されたブドウ糖を鎖状に長く繋げてゆくことによりセルロースの形で植物は幹や葉を作り、でんぷんとして栄養を芋や種などの形で貯蔵しています。これらのセルロースやでんぷんを栄養にして、人間をはじめとする全ての生物は生命活動を維持しています。人間はセルロースを栄養として利用することができませんが、穀類や豆類や芋類などのでんぷんを体内で水と反応させてブドウ糖に分解し、栄養として吸収されたブドウ糖は脳や筋肉などのエネルギーを必要とする部位まで蛋白質が関与しながら血管中を通して運ばれます。そこで種々の反応により酸化されて、還元能力を持つ NADPH や高い化学エネルギーを内蔵する ATP を生成します。

ブドウ糖は図 6 - 5 に示すように異性化反応、分解反応、酸化反応などの反応経路でピルビン酸に変化しますが、この過程で 2 分子の ADP とりん酸から 2 分子の ATP が生成します。同時に 2 分子の NADP^+ が NADPH まで還元されます。酸化能力を持つ NADP^+ が充分に供給される場合には、ピルビン酸は図 6 - 6 に示すような複雑な構造を持つ補酵素 A (HS-CoA) と酵素の働きで二酸化炭素を生成しながら、チオエステル結合を持つアセチル補酵素 A (アセチル-S-CoA) に変換されます。ピルビン酸が二酸化炭素を失ってアセチル

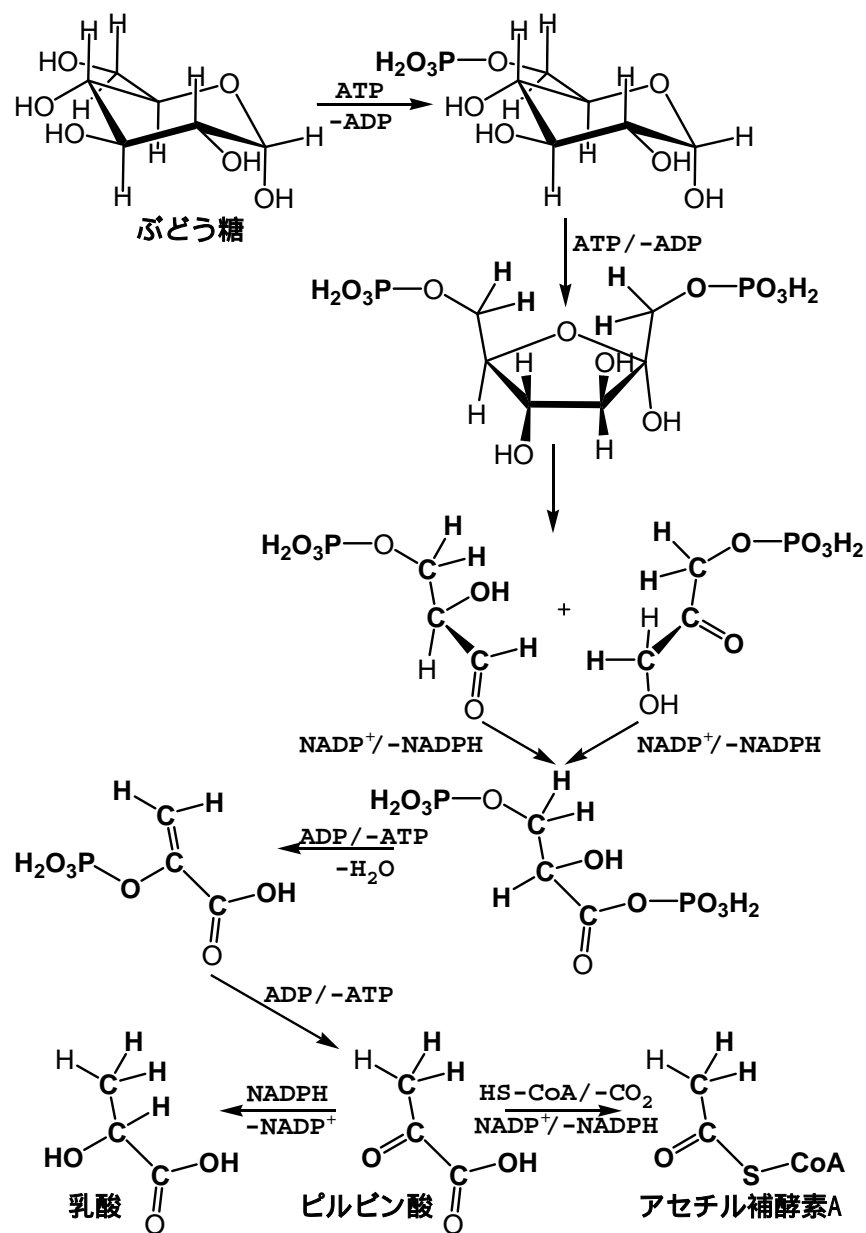


図6 - 5 解糖反応の機構

補酵素 A に変化する反応においても NADP^+ とりん酸から 1 モルの NADPH が作られます。ピルビン酸は酸素など酸化剤の供給のない還元状態では、酸化剤の NADP^+ が十分に供給できませんから、ピルビン酸から二酸化炭素とアセチル補酵素 A に変化する反応が進行せず、 NADPH により炭素=酸素 2 重結合が還元されて乳酸に変化します。急激な運動などで十分な酸素の供給がないまま ATP を必要とする場合には、酸化能力を持つ NADP^+ が十分に供給できませんから、ブドウ糖が消費されて生成するピルビン酸は還元され、筋肉の中に乳酸が溜まります。そのため筋肉は疲労します。

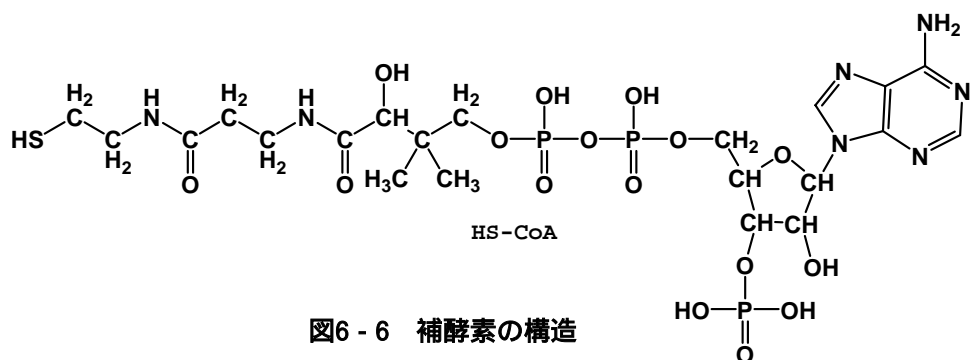


図6 - 6 補酵素の構造

酸化状態で生成するアセチル補酵素Aはアルドール型の縮合反応を加速する効果を持っていますから、オキザロ酢酸と縮合反応をしてクエン酸を生成します。このクエン酸は脱水反応、水の付加反応、酸化反応、脱炭酸反応などを経てオキザロ酢酸に戻ります。クエン酸サイクルと呼ばれるこの一連の反応では図 6 - 7 に示すように、本質的にはオキザロ酢酸に酢酸が反応しますが、加えられた酢酸は度重なる酸化反応により二酸化炭素まで変化してゆき、オキザロ酢酸が触媒として回収されます。

この一連の反応で酢酸が分解して 2 分子の二酸化炭素を生成しますが、同時に 3 分子の NADP^+ と 1 分子のビタミン B_2 がそれぞれ NADPH と還元型ビタミン B_2 まで還元され、発生するエネルギーは 1 分子の ADP とりん酸を縮合させて ATP として蓄えられます。ここで生成する NADPH と還元型ビタミン B_2 は還元能力を持つ物質で生体内の物質を還元しますが、 NADPH と還元型ビタミン B_2 はその還元反応に必要なエネルギーをそれぞれ 3 分子と 2 分子の ATP の形で含んでいます。ブドウ糖の解糖による

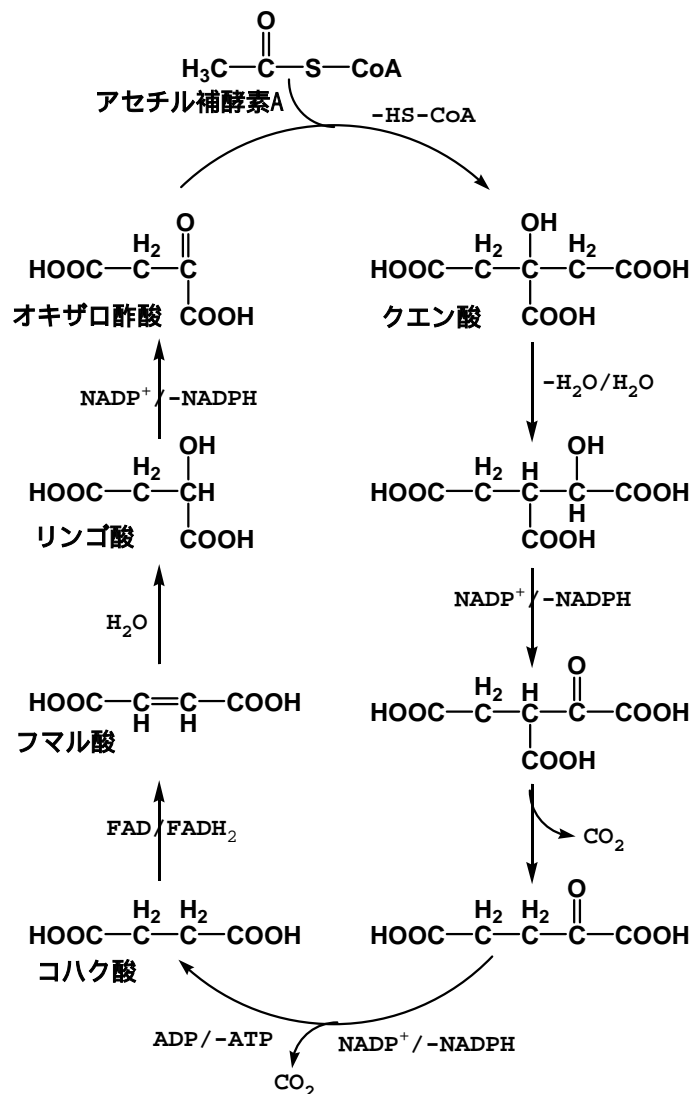


図6 - 7 クエン酸サイクル

ピルビン酸への変化、アセチル補酵素 A への脱炭酸反応、クエン酸サイクルを経由する二酸化炭素まで分解過程を総括しますと、1 モルのブドウ糖から 6 モルの二酸化炭素に酸化される過程で、4 モルの ATP と 10 モルの NADPH と 2 モルの還元型ビタミン B₂ を生成します。結局、ブドウ糖の二酸化炭素への酸化で発生するエネルギーは 38 モルの ATP を生成することに費やされます。

ADP とりん酸から ATP を生成するために要するエネルギーは 7.29kcal/mol と見積もられていますから、38 モルの ATP を生成するためには 277.0kcal が必要になると考えられます。1 モルのブドウ糖を燃焼して 6 モルの二酸化炭素と 6 モルの水に分解するときが発生する燃焼熱は 673.0kcal と見積もられていますから、約 41% の熱効率ということになります。ちなみに、現在使用されているガソリンエンジン、ディーゼルエンジン、火力発電、軽水炉型原子力発電の熱効率はそれぞれ 20~30、28~34、41.8、34% と報告されています。火力発電の熱効率が発電機の出力部での値であり、長い送電の間の熱効率の低下や、エネルギーの需要に応じた出力制御などを考えると、この生物体内のエネルギー変換は驚異的な機構と考えられます。

栄養として吸収されたブドウ糖は赤血球に結合した蛋白質に包み込まれ、脳や筋肉などのエネルギーを必要とする部位まで赤血球と共に移送されます。移送先でブドウ糖は解糖、脱炭酸反応、クエン酸サイクルの反応により酸化されて、還元能力を持つ NADPH や高い化学エネルギーを内蔵する ATP を生成します。病気や怪我などにより十分に栄養としてブドウ糖を吸収できない場合には、病院では静脈から直接ブドウ糖を点滴の形で血管の中に注入して活力の供給を維持しています。このように人間は植物が貯蔵したでんぷんを食物として摂取し、体内で水と反応させてブドウ糖に加水分解します。さらに、解糖反応やクエン酸サイクルなどの変化を通して、ブドウ糖を酸化することにより二酸化炭素と水に分解してゆく段階で、NADPH と ATP を生み出し、生命活動の維持に必要な活力にしています。この一連の反応はでんぷんと水が反応してブドウ糖へ分解する加水分解反応と、ブドウ糖から二酸化炭素と水に分解してゆく酸化反応ですから、いずれも水の関与する反応であり水が欠かすことの出来ない重要な働きをしています。

牛を食べると豚になる

人間の食べ物は肉や豆類などの蛋白質、パンやご飯などのでんぷんや糖類、バターやオリーブ油などの脂質の 3 種類に大別されます。この 3 種類は人間の生命維持のためのエネルギー源になるばかりでなく、筋肉や種々の機能を持つ臓器などの身体を作る材料にもなる最も大切な栄養です。蛋白質はエネルギーの源になるばかりでなく、筋肉や皮膚や血管や軟骨や五臓六腑と呼ばれる臓器など種々の器官を形作る材料として極めて重要な物質です。でんぷんや糖類などの糖質が人間をはじめとするあらゆる生物にとって最も重要なエネルギーの源になっています。脂質は生物が生命維持のために必要とする親油性の物質の総称で、石油や石炭から作られる炭化水素などは含まれません。脂質にはバターやオリ-

ブ油のように加水分解することの出来る油脂とコレステロールや薄荷腦のように加水分解のし難い不けん化性脂質があります。

これらの食べ物は人間の生命維持に必要な素材の原料ですから、水に溶けなければ栄養として役に立ちませんが蛋白質もでんぷんも油脂も水にあまり溶けやすくありません。そのため、人間は蛋白質を摂取した後に、全てばらばらに加水分解して栄養として吸収して、再度人間に適合した蛋白質に作り直しています。

蛋白質はあまり水に溶けない物質で長時間にわたり水中で煮ていますと、次第に分解して計 22 種類の水に溶ける α -アミノ酸に変化してゆきますから、蛋白質は多くの α -アミノ酸が鎖状に結ばれた物質であると考えられます。このときの反応は図 6-8 に示すように水が関与しますから加水分解と呼んでいます。しかし、表 6-6 から分かるように室温の純粋な水の中では蛋白質が半分まで加水分解するためには 300 年以上も掛かります。温度を上げてぐらぐら煮れば多少は反応の時間が短縮されますが、それでも実際のでないほど長時間を要します。酸性あるいは塩基性の水溶液の中では、水素イオンあるいは水酸イオンが触媒になって図 6-8 のような経路を通り、蛋白質の加水分解は飛躍的に加速されます。

胃の中はかなり強い酸性になっていますから、蛋白質を食べますとある程度は加水分解しやすい条件になっています。しかし、人間は蛋白質を食べて半日ほどの間に完全に加水分解して α -アミノ酸として体内に取り込まなければなりませんから、酸性条件だけでは間に合いません。実際、人間は十二指腸でキモトリプシンなどの種々の加水分解酵素やペプチダーゼを出して、蛋白質の α -アミノ酸への消化を早めています。キモトリプシンは α -

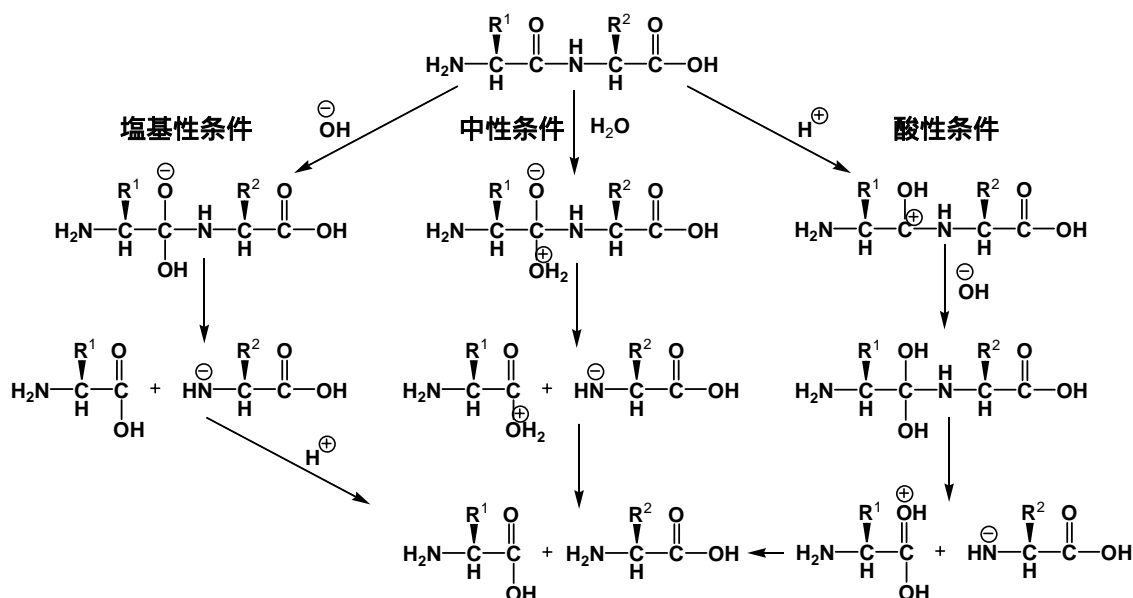


図6-8 ペプチド結合の加水分解

α -アミノ酸の並び方や分子の大きさやその絡まり方などの 3 次元的な構造が最もよく研究されている消化酵素で、食物の蛋白質を加水分解する機構までかなり明らかになっています。

X線結晶構造解析により明らかにされたキモトリプシンを構成する約240のアミノ酸が結合した蛋白質の鎖の絡まりあった形を図6-9にリボンの塊のように示しましたが、これによると蛋白質の鎖により大きな口を開けた分子になっています。このキモトリプシンの口の中には、セリンの CH_2OH の原子団とアスパラギン酸の CH_2COOH の原子団とヒスチジンのイミダゾール環が歯や舌のように突き出しています。蛋白質がキモトリプシンの口の中に首を入れますと、丁度そこには歯や舌のようにセリンとアスパラギン酸とヒスチジンの側鎖が待ち構えています。この歯や舌のような3つのアミノ酸の側鎖部分は連携して水素イオンをペプチド結合の酸素原子に与えますから、図6-8の酸性条件のように反応が加速され加水分解が進行してゆきます。キモトリプシンの口の中に水素イオンが待ち構えていますから、この加水分解の反応は蛋白質が口に入る速さに依存し非常に早く進行します。

このようにキモトリプシンの小さな口の中では、決まった位置に歯や舌のようにセリンとアスパラギン酸とヒスチジンの側鎖が待ち構えていますから、 α -アミノ酸だけしか口の中に入ることができませんし、加水分解反応を加速することもできません。キモトリプシンばかりでなく種々の加水分解酵素やペプチダーゼも同じような口付きをしています。このようにキモトリプシンをはじめとする消化酵素と蛋白質の関係はあたかも精巧にできた鍵と鍵穴のような関係にあります。

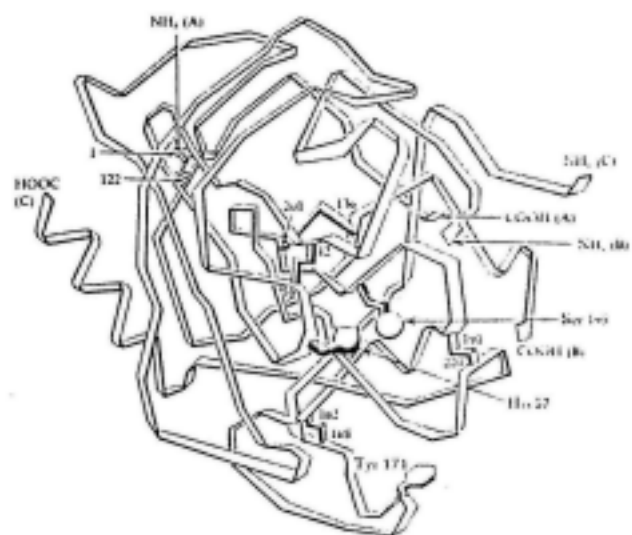


図6-9 キモトリプシンの構造

牛肉の蛋白質も豚肉の蛋白質も大豆の蛋白質も全て α -アミノ酸がペプチド結合で鎖状に結ばれた構造をしています。しかし、それぞれの蛋白質を構成している α -アミノ酸の種類や並び方はその蛋白質の機能により異なります。牛肉は牛の筋肉ですから強い繊維の性質を持っており、多くのグリシンやアラニンで構成されています。牛乳にふくまれる蛋白質のカゼインは構成アミノ酸としてセリンを比較的多く含み、その水酸基のりん酸エステルが界面活性剤の性質を示し、乳化剤の働きをしています。また、キモトリプシンの構成アミノ酸の中にはセリンとヒスチジンがなければその機能を示すことができません。同じように、人間の身体を作っている蛋白質にも筋肉や内臓や毛髪などそれぞれの機能に応じて、構成する α -アミノ酸の種類も並び方も違います。そのため、人間は種々の蛋白質を食べ物として摂取し、消化器の中でキモトリプシンなどの消化酵素の助けを借りて全て α -アミノ酸に分解します。 α -アミノ酸は水によく溶ける性質を持っていますから腸で吸収された後、血管を通して各部に配達され、そこで人間の身体に必要な蛋白質として組み直され

ます。蛋白質の加水分解と α -アミノ酸の縮合反応による蛋白質の形成は平衡反応で、加水分解酵素やペプチダーゼなどの酵素はこの両方向の反応を触媒する働きを持っています。例えば、血管を通して配達された α -アミノ酸は筋肉にあるペプチダーゼの触媒作用により、速やかに縮合して蛋白質を形成して筋肉になります。逆に、栄養不足により体内の α -アミノ酸が不足すると、筋肉などの蛋白質が α -アミノ酸に加水分解され、より α -アミノ酸を必要とする部位に供給されます。結果として筋肉が少なくなって痩せていきます。

軟骨や腱や靭帯や皮膚や血管などを形作っている張力に優れた繊維状の蛋白質はコラーゲンと呼ばれ、プロリンとヒドロキシプロリンとグリシンが鎖状に結合したものです。プロリンやグリシンは牛肉などの蛋白質にも含まれている α -アミノ酸ですが、ヒドロキシプロリンは他の蛋白質にはあまり含まれていません。骨と骨の間で衝撃を和らげる役目をする軟骨は、人間にとっては極めて大切な部品です。また、肌を若々しく保つためには、皮膚の新陳代謝を活発にすることが大切です。当然、コラーゲンは大切な蛋白質ですが、その原料となるヒドロキシプロリンを通常の蛋白質から摂取することは容易ではありません。蛋白質が消化されて α -アミノ酸に加水分解されるように、牛のすじ肉や鶏の皮や軟骨などに多く含まれるコラーゲンもヒドロキシプロリンなどに分解してゆきます。このヒドロキシプロリンなどが体内で、コラーゲンに再生されて、軟骨や腱や靭帯や皮膚や血管などを形作ってゆきます。コラーゲンからはコラーゲンを再生しますが、栄養不足になればコラーゲンも筋肉など通常の蛋白質の原料にもなります。

蛋白質のペプチド結合が加水分解され、 α -アミノ酸として腸で吸収され、身体の各部で再びアミンとカルボン酸の原子団が縮合してペプチド結合を結んで蛋白質となります。このように牛肉を食べても、大豆を食べても結局筋肉になりますが、このとき非常に精巧な鍵と鍵穴の関係のように α -アミノ酸が関与しています。この一連の反応は蛋白質と水が反応して α -アミノ酸へ分解する加水分解反応と、多くの α -アミノ酸から水が失われて蛋白質になる縮合反応ですから、いずれも水の関与する反応であり水が欠かすことの出来ない重要な働きをしています。人間の身体の中で起こる蛋白質の変化を総括すると、非常に精巧な機構により牛肉を食べ過ぎると豚のように太ってしまうことになります。我が家の格言では「牛を食べると豚になる」となります。

水に溶け難い油を溶かす水

人間の食べ物は肉や豆類などの蛋白質、パンやご飯などのでんぷんや糖類、バターやオリーブ油などの脂質の 3 種類に大別されますが、この 3 種類の中の脂質は生物が生命維持のために必要とする親油性の物質の総称で、石油や石炭から作られる炭化水素などは含まれません。脂質にはバターやオリーブ油のように加水分解することの出来る油脂とコレステロールや薄荷腦のように加水分解のし難い不けん化性脂質があります。油脂はグリセリンの 3 つの水酸基に種々の脂肪酸がエステル結合で結ばれた混合物ですから、あまり明確な融点のない柔軟性のある物質です。しかし、一般に液状の油脂を油、固体になりやすい

油脂を脂肪と呼んでいますから、オリーブから獲れる油脂はオリーブ油、すき焼きの始めに鍋に塗りつける白い油脂は牛脂と言い慣わしています。

油脂を水酸化ナトリウム水溶液と煮ると、油脂はグリセリンと脂肪酸に加水分解され、水酸化ナトリウムの塩基性により脂肪酸が中和されてナトリウム塩の形で固まってきます。この脂肪酸のナトリウム塩を石鹼として洗剤に用いています。加水分解されて生成するグリセリンは分子の中に多くのアルコール性水酸基を持っていますから、どのような割合でも水に混ざり溶けてゆきます。脂肪酸もそのカルボン酸部分が塩基性ではイオン化するために水に溶け込む性質を持ちます。アルコール性の水酸基とカルボン酸から脱水して縮合するときにエステル結合ができ、生成してくる化合物をエステルあるいはカルボン酸エステルといいます。エステル結合の部分は弱い塩基性の酸素原子を持っていますが、陽イオンになりやすい水素原子を持っていませんから、水素結合をすることも出来ませんし、イオン性も示しません。水に溶け易いアルコールとカルボン酸が縮合してエステル結合を形成すると、生成物は水に溶け難くなります。

最も分子量の小さな油脂と思われるトリ酪酸グリセリンエステルの燃焼熱は 1941.1 kcal/mol と見積もられていますが、その油脂の加水分解生成物と考えられる酪酸とグリセリンの燃焼熱はそれぞれ 524.3kcal/mol、397.4 kcal/mol と見積もられています。グリセリンと 3 モルの酪酸の燃焼熱の総和は 1970.3kcal と計算できますから、油脂を加水分解するとその燃焼熱の差に相当する 29.2kcal/mol のエネルギーを発熱すると計算できます。逆にわずか 10kcal/mol ほどのエネルギーでエステル結合を形成することができると見積もることができます。反応が水や触媒の量などの影響も受けることから、グリセリンとカルボン酸が縮合して油脂を形成する反応は生体内で容易に進行する平衡反応と考えることが出来ます。原料は水に溶け、生成物は水に溶け難いという点およびエステル結合が比較的小さなエネルギーで進行する平衡反応である点から、油脂が生物の素材として適していることを示しています。

人間は油脂を食べるとキモトリブシンと同じようなりパーゼなどの加水分解酵素を分泌して、グリセリンと種々

の脂肪酸に分解して腸で吸収します。体内に吸収されたグリセリンと脂肪酸は再び酵素の助けを借りてエステル結合を形成して人間に必要な油脂に組み直されます。人間の脂肪は各部により構成する脂肪酸の割合は変わりますが、その平均値は表 6 - 7 に示すようにパ

表 6 - 7 人間の脂肪の組成

脂肪酸名	炭素数	不飽和数	重量%
ミリスチン酸	14	0	2.7
パルミチン酸	16	0	24.0
ステアリン酸	18	0	8.4
パルミトオレイン酸	16	1	5.0
オレイン酸	18	1	46.9
リノール酸	19	2	10.2
その他の不飽和酸			2.5

ルミチン酸とオレイン酸を多く含んでいます。このようにして人間の体内に合成された脂肪は効率的なエネルギーの源となりますが、同時に比較的熱伝導度が悪いために、体内の温度を保温する効果を持ちます。

油脂は大きな炭化水素部分を 3 つも持っていますから、水に溶け難い性質を示します。3 つの脂肪酸の部分の内の 1 つが加水分解されて代わりにりん酸で置き換わったりん酸エステルは水に溶け難い脂肪酸の部分と水に溶け易いりん酸の部分構造を持っていますから、界面活性の性質を示し、細胞膜を形成するリン脂質と呼ばれています。さらに、このリン脂質のアミノエタノールエステルはより強力な界面活性の性質を示すため、血液中に種々の脂質を混ぜ込む乳化剤として体内で重要な働きをしています。例えば、卵黄の中にはフォスファチジルコリン（レシチン）が含まれていますが、このフォスファチジルコリンは図 6 - 10 に示すように、水に溶け難い脂肪酸の部分構造と陽イオン性のコリン部分を持つりん酸陰イオンをグリセリンでエステル結合した構造を持っています。ただし、R は直鎖の炭素数 11 ~ 17 の炭化水素鎖をあらわしています。脂肪酸部分は水と仲の悪い性質を示し、陽イオンと陰イオンを両方持った両性イオンの構造は水と仲良しの性質を示しますから、フォスファチジルコリンは界面活性剤の働きをするために、乳化させる働きをしています。

油脂は人間の身体にとって極めて重要な働きをする細胞膜や脂質乳化剤のリン脂質の原料になっています。フォスファチジルコリンなどはりん脂質と呼ばれる界面活性剤の一種で、卵黄だけでなく多くの生物体に含まれ、二重膜の形で細胞膜などの生体膜を構成しています。このように水に溶け易い脂肪酸とグリセリンと水に溶け難い油脂の間には、油脂と水が反応して脂肪酸とグリセリンへ加水分解反応による分解と、逆に脂肪酸とグリセリンから水が失われてエステル結合を形成することによる油脂の形成が容易に進行し、いずれも水の関与する反応であり水が欠かすことの出来ない重要な働きをしています。

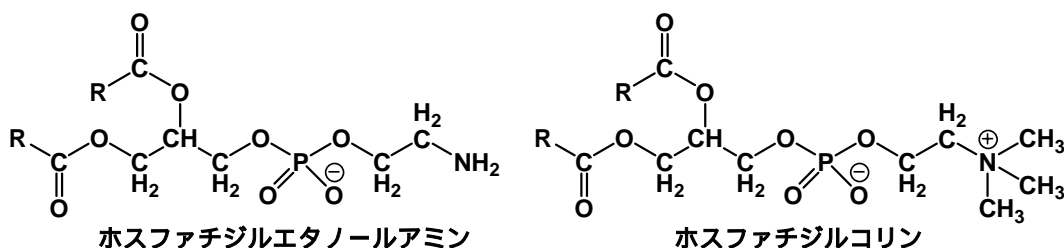


図6 - 10 生体膜を構成する主なリン脂質

カルシウム濃度で変わる水の硬さ

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水の水素原子と酸素原子上に帯電したわずかな電荷により打ち消されるように分散されるために安定化し、水素結合を切ることによるエネルギーの損失を補いますから、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。

地球の大気は窒素と酸素だけで構成されていますが、その窒素と酸素は全くイオン性を持たない気体で表 5 - 1 に示すように水にほとんど溶けませんから、上空の雲から大気中を通過してきた雨水は通常わずかに大気中に浮遊している塵や二酸化炭素を溶かしこんでくるに過ぎません。しかし、1970 年代にはイギリス、フランス、ドイツなどの西ヨーロッパの工業地帯では、脱硫することなく多量の石油が消費されていたので、多量の二酸化硫黄が大気中に放出されていました。この二酸化硫黄は風に乗って東に流れ、雲の中の水滴に溶け込んで希硫酸を含む酸性の雨となり、ドイツ南部地方に降り注ぎました。黒い森を意味するシュヴァルツバルトと呼ばれるドイツ南部地方は古くから深い森に覆われていましたが、硫酸を含む酸性雨により森の荒廃が急激に進み、国境を越えたヨーロッパの大問題に発展しました。その後、工業設備の改善と排出ガスの規制により、現在の雨水中には余り多くの不純物が溶け込んでいないと思われます。このように比較的不純物の少ない水を軟水と呼んでおり、比較的生活用水として適しています。

地殻中には種々のイオン結合性の岩石が多量に含まれており、その地中を流れてきた地下水は不純物を含まない雨水と異なり、ナトリウム、カリウム、カルシウムなどの金属の陽イオン、塩素イオン、硫酸イオン、炭酸イオンなどの陰イオンを溶かし込んで地上に湧き出してきました。堆積岩は石灰石や大理石の形で炭酸カルシウムを約 4% 含んでいますから、多量の炭酸カルシウムや炭酸水素カルシウムを溶かし込んだ地下水が各地に湧き出しています。特にイタリアやギリシャなどの地中海の周辺地方は大理石に覆われていますから、その地方に湧き出している地下水は非常に高い濃度で炭酸カルシウムや炭酸水素カルシウムを溶かし込んでいます。炭酸カルシウムは塩基性を示す化合物で酸を中和します。式 6 - 5 には炭酸カルシウムと酸の反応を示しましたが、はじめに炭酸カルシウムは一部中和されて炭酸水素カルシウムとカルシウムイオンになり、さらに中和されて炭酸とカルシウムイオンに変化しますが、炭酸は式 6 - 4 のように水と二酸化炭素に分解してゆきます。結局、炭酸カルシウムは酸で中和して二酸化炭素を発生しながら中性のカルシウム塩を生成します。

人間の胃の中はかなり強い酸性に整えられていますから、炭酸カルシウムを多く含む水を飲むと酸の中和反応が起こり、酸性度は下がってしまいます。当然胃の機能が低下して多くの人は消化不良を起こしてしまいます。日本は火山国ですから、あまり炭酸カルシウムの溶け込んだ地下水が湧き出しておりませんが、石灰石を主体とした地殻に覆われているヨーロッパでは炭酸カルシウムを多量に含む地下水が各地に湧き出しています。ヨーロッパの旅行中に多くの日本人が消化不良を起こしますが、高い濃度で炭酸カルシウムの溶けた生水を飲んでしまったことがしばしば原因となっています。反対に、胃酸過多の症状を持つ人にとっては胃の機能を向上させる働きを持ちますから、炭酸カルシウムの多く溶けた水をクスリのように飲用します。また、多少炭酸カルシウムを含む水はお茶の味を引き立たせると云われて昔から日本でも珍重されています。このように炭酸カルシウムの濃

度が飲み水の品質に大きく影響を与えていますから、水中に含まれる炭酸カルシウムの濃度（ppm または mg/L）を硬度として表しています。日本では水の硬度が 100ppm 以下を軟水、220ppm 以上を硬水として定義しています。私は永年軟水に慣れ親しんできたこともあって、余り硬度の高い水を好みませんが、ヨーロッパの人は硬度が高く二酸化炭素を多く含む水をミネラルウォーターと呼んで珍重しています。ちなみに、泡が出るほどに二酸化炭素を含んでいる水を炭酸水（英語では Carbonated Water）と呼んでいます。