

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。

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

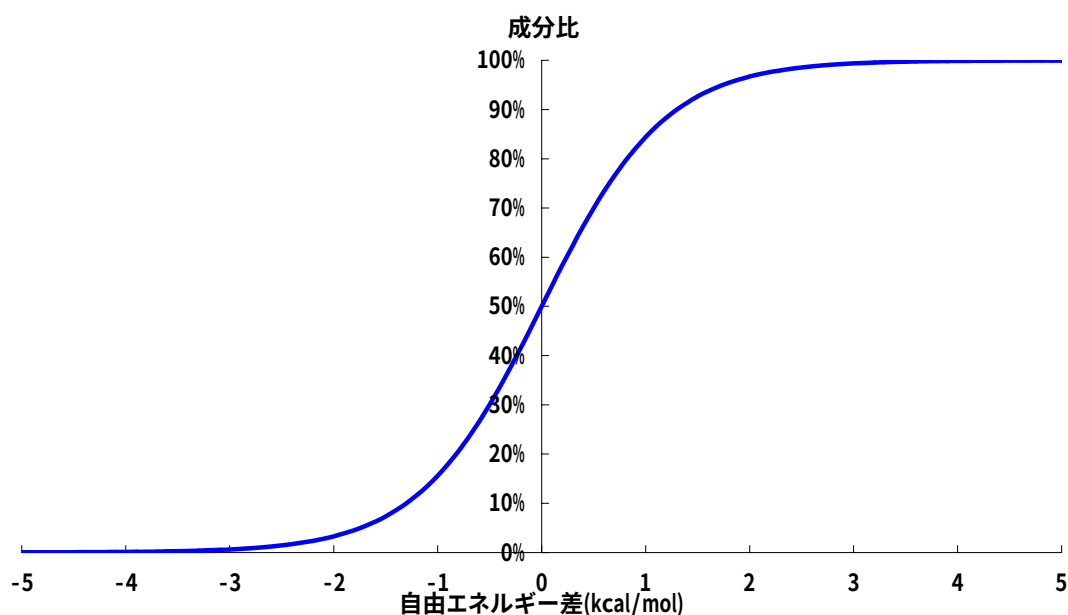


図4-1 平衡反応における自由エネルギーと成分比

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うです。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

表 4-1 種々の原子間の結合エネルギー
(kcal/mol)

[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。

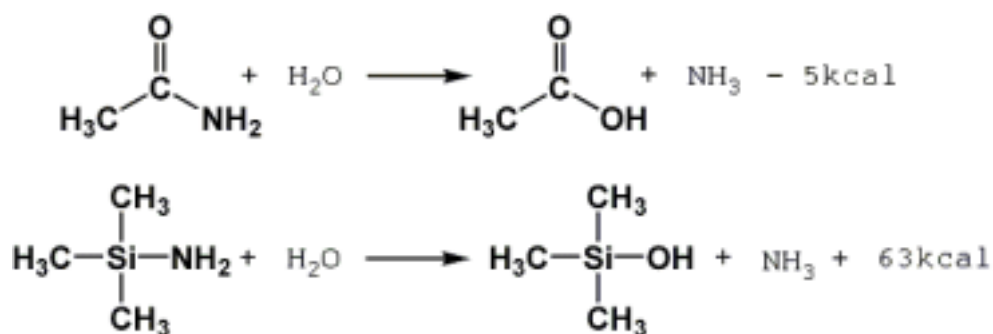


図4-2 けい素化合物と水の反応

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當で、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。