

5 地球上の特色ある環境におけるエネルギーと生命

もし地球上の生命の起源に至る過程や、生命が最も古く、そして最も簡単な生命でさえ見せるような複雑で高レベルなものにどのように進化していったのかを理解しようとするなら、まず第一に生命がどのように活動しているかを理解する必要がある。とりわけ、生命がエネルギーを得る方法、そして地球上の厳しい環境と思われる場所で生命がどのように機能しているのかを理解したい。これらは初期の地球における生命のいくつかの考え得る制約を導くだろう。後半では、初期の地球環境が少なくとも現在の基準より非常に厳しいものであったことが明らかになっていく。

まず、生命に力を与える化学経路について簡単な議論を始める。多様な化学経路は地球外生命の可能性を考えるにあたり重要になるだろう。次に、地球におけるさまざまな厳しい環境における生命、そしてそれらの生命が使うエネルギー源に注目する。これは生命が生存でき得る限界を導く助けとなるだろう。さまざまな厳しい環境には、最も厳しい環境と考えられるいくつかの場所を含んでいる。例えば、約 400 度までもの水がある火山帯近くの熱水孔、地表の数 km 下、そして凍てついた南極の岩石の中などである。最後に、DNA, RNA 構造を含む、地球上におけるさまざまな生物形態間の系統関係に対する分子基盤を議論する。この遺伝情報は、厳しい環境においても機能することが可能な生命はおそらく最も初期の生命の歴史までさかのぼることを示す。

生命に力を与える化学エネルギー

まず、生命に対するエネルギーの供給に関与する化学過程について議論を始める。エネルギーの使用は分子レベルで理解する必要がある。エネルギーは光合成を通して太陽から得ようと、現存する分子から同化して得ようと、化学反応を利用して得ている。2つの分子が反応するとき、それらは反応の過程において、反応を進めるためにエネルギーを放出するか、エネルギーを吸収する。例えば細胞物質を作るとき、構築するためのエネルギーを必要とする。現存する分子を破壊すると成長を進めるのに必要なエネルギーを放出する。このエネルギーが有効な機能を働かせるために、どのように使われているかを理解したい。

生きている細胞がエネルギーをどのように使うかを理解するために、適切な反応の流れについて議論する必要がある。地球上の生命におけるエネルギー交換の中間物は ATP として知られる複雑な分子、アデノシン三リン酸である。ATP は酸素原子が結合するリン元素を含む。リンと酸素の間の高エネルギーリン酸結合は

大量のエネルギーを必要とする．化学エネルギーが必要となったとき，これらの結合は壊れ，エネルギーを放出する．これらの結合，そして新たな ATP 分子はエネルギーの注入を必要とする化学反応によって作られる．この方法において，エネルギーは細胞内に ATP の形で蓄えられ，必要なときに取り出される．

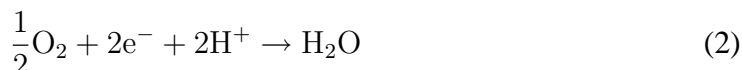
図 5.1: ATP 分子の構造．矢印は 2 つの高エネルギーリン酸結合を示す．

地球上において，生きている細胞はすべて ATP をエネルギーに変えるという同じ工程を使っている．この事実は，さまざまな種間の関連性について，何か基礎的なことを教えてくれる．つまり，異なる種が同じ工程を使うということは，これらの祖先は同じ種で，それ故，生命の起源は 1 つであるということか，または，多様な生命の起源はエネルギーを蓄えるという問題に対し，同じ生化学の答えに帰着したということである．後半の可能性は ATP が解決する可能性のある唯一の答えを表していなければなさそうに思える．

ATP を作るのに必要なエネルギーは簡単な分子の化学結合から得られる．例えば，水素と酸素が反応して水になり，かなりのエネルギーを放出する．酸素と水素で充満した部屋の中でマッチを点けると，この反応が引き起こされるが，このとき熱の放出があるのは明らかである．しかし，このエネルギーをどのように利用しているのだろうか？ 簡単な例を見てみよう．分子レベルにおいて，別々の 2 つの反応から酸素と水素が水を作る反応を考えることができる．その反応の 1 つは 1 元素と 1 電子の反応で



である．もう 1 つは



である．これら 2 つの反応式は半反応式と呼ばれ，この 2 つの半反応式を合わせると



となる．この場合，1 つめの半反応式は水素分子が 2 つの水素イオンと 2 つの電子に分解されることを意味する．ここで水素は酸化されたと言う．2 つめの半反応式は 2 つの水素イオンと 2 つの電子と酸素の合成である．ここで酸素は還元されたと言う．これらの酸化反応，還元反応の合成は酸化還元反応と呼ばれる．

分子または原子が還元する場合，還元したものは帯電する．例えば，酸素が電子を得ると負電荷をもち，全体の電荷としては還元される．水素は酸素と結合す

る際に 1 個の電子を放出し、その電荷は増える。酸素は電子を受け取る効果が強く、そして地球上に大量にある。よって、化学反応において酸素を得る効果を酸化と呼び、電子を放出するものは酸化されたと言う。H₂ は酸素と結合する際に電子を放出するので電子供与体と見なされる。同様に、O₂ は電子を受け取るので電子受容体と見なされる。酸化還元反応は電子供与体と電子受容体の 2 つが必要であり、他の化学反応を引き起こすために利用されるエネルギーを放出する化学反応において、ある分子または原子から他の分子または原子へ電子が移動することである。言い換えれば、化学反応の中でエネルギーを追うことは、電子を追うことであるといえる。

生体系において、このタイプの反応は、電子供与体として働くことができる分子または原子と、電子受容体として働くことができる分子または原子を伴って起こる。そのような分子の結合過程はエネルギーを放出する。広範囲にわたるさまざまな化学物質、例えば H₂, CO, Fe, Mn, CH₄, S, NO₂, H₂S, NH₃ (有機体炭素分子とともに存在する) などは電子供与体として働くことができる。同様に、O₂, CO₂, CO, S, NO₂, Mn, Fe などは電子受容体として働くことができる。ここで、電子供与体は酸素と結合し酸化され、電子受容体は水素と結合し還元されることに注意する。鉄やマンガンのような金属は環境中においてさまざまな鉱物の中から得られる。

いくつかの化学物質は電子供与体としても電子受容体としても働くことができることに注意する。この性質は環境に依存している (図 5.2)。例えば、CO 分子はエネルギーにおいて媒介物質であり、低いエネルギーで分子を作るときには最初の物質、また高いエネルギーで分子を作るときには最終生産物として働く。CO₂ は水素と反応し CO または水となる。さらに反応が進むと C または CH₄ と水になる。

図 5.2: 酸化還元反応のエネルギーのはしご図。酸化還元反応を引き起こすエネルギー (例えば、CO₂ 中の炭素をグルコースに変えるのに 0.43 ボルト必要) が示されている。いずれの場合にも、酸化された物質は左に示される。ある反応から供与された電子ははしごの下の方の反応で受け取られる。よって 2 つの酸化還元反応が与えられる。

鉄とマンガンは生物相と相互作用する無機鉱物の形をとることができる。例えば、Fe は FeO のとき +2, Fe₂O₃ のとき +3 で帯電する。酸化された物質は、生物が利用できるエネルギーを放出する。

電子供与体または電子受容体として働くことができる分子が多いという事実は、広範囲におよぶさまざまな化学系が生命に力を与える可能性を広げている。このことを理解しようとするのならば、地球上のさまざまな生命体は、自分が存在する場所で利用できる化学系に合わせ、これら多くのシステムを使うことができる。

2, 3 の特別な試験により, これらの化学反応の働きがどのように効果を上げるのか理解できる。そこで, 最も基本的な生化学的経路である光合成, 酸化, 発酵を示すことから始める。

光合成はエネルギーが生体に入的手段として一番知られている方法かもしれない。これは太陽光と有用な化学反応からエネルギーを得る方法である。光合成を使う生物相を構成する炭素は全て CO_2 ガスから得るので独立栄養生物 (文字どおり "自給式の") である。図 5.3 を参照) と呼ばれる。これらはエネルギー源 (太陽光) のみを必要とし, 生きるために化学物質を必要とする。

図 5.3: 生物に名前をつけるための, さまざまな接頭語の定義。その生物のエネルギー源や炭素源に基づいている。

光合成の過程は



という化学反応によって簡単にまとめられる。この反応では化学反応を引き起こす太陽光エネルギーを使い, 二酸化炭素と水が結合して有機物質となる。反応式の右側の 2 つの物質は CH_2O と O_2 である。 CH_2O は炭素から有機的に (新しい細胞構造, または細胞膜の内部の有機素材として) 作られる。そして O_2 はガスとして放出され大気中に戻る。

この 1 個の反応がさまざまな段階を含む一連の反応を書き留める略記であることは明らかである。この一連の反応の一部は植物の中にある太陽光からエネルギーを得る葉緑体の能力と, そのエネルギーを使い化学結合を分解する能力を含んでいる。葉緑体は植物に色を付けている化学物質である。この色は太陽光の発する, ある波長を吸収する能力に由来している。吸収されたエネルギーは水分子から水素と酸素を引き剥がすのに使われる。これは最初の方で述べた酸化還元反応とは逆の反応である, そしてここでは反応を進めるために太陽光からのエネルギーを必要とする。水の分解で得られた水素イオン (H^+) は ATP を生成する工程を駆動させるためのエネルギー源として使われる。ATP は生物の中で化学反応を起こすために使われる。基本的には, 水素の還元力は CO_2 ガス中の炭素を酸化度の低いものにする。 CH_2O の場合, 生物の構成物質として, またはエネルギーとして使うためにガスから炭素の溶存体へと変えられる。

ある程度, 酸化は今までみてきた化学反応と逆の反応である。空気中の酸素ガスは生物に吸われ, 還元性をもつ分子と結合してエネルギーを放出する。代表的な

好気呼吸(大気中の酸素を利用する)の化学反応は



と書くことができる。酸素と結合することによる炭素の酸化が ATP の生成を引き起こすために使われるエネルギーを放出する。ATP に蓄えられているエネルギーはさまざまな細胞活動に使われる。この過程で、有機物質は生物(例えば、草食動物、独立している有機物質を食べるバクテリア、エネルギーを得るために酸化された分子)に取り込まれ、分子はエネルギーを得るために酸化される。

電子受容体として働く酸素が欠乏している中で、発酵や嫌気呼吸はエネルギーの生成を引き起こす有機炭素を利用するメカニズムである。これらは、利用できる酸素がない環境で生きている生物が使っている。発酵の例として、

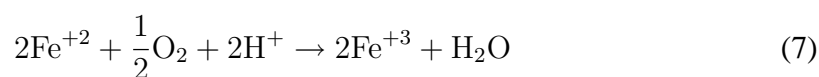


のようなグルコース、単糖などがエタノールと二酸化炭素を作る反応がある。グルコース中の有機炭素の一部は完全に CO_2 に酸化されているので、この基本的な反応は酸化が効果的に行われていない。つまり元のグルコース分子中の 6 個の炭素原子のうち 2 つは酸化され CO_2 になり、残りの 4 個の炭素原子は還元した状態でエタノール中にある。その結果、すべての有機炭素が CO_2 に酸化されている場合、発酵は酸化より少量のエネルギーしか得られない。エタノール中の炭素は発酵を使用せず、遠回りで CO_2 に酸化されることが可能である。発酵の場合、有機炭素は酸化剤、還元剤として使われる。その副生成物として炭素は酸化型 (CO_2) と還元型(エタノール)になる。

酸化と発酵を利用する生物は、現存する有機分子から炭素を得る。これらは従属栄養生物(heterotrophs)と呼ばれる('hetero'の意味は異なる,'troph'の意味は食料。つまり、これらは他の物を食料とする。図 5.3 を参照)。動物はこのカテゴリーに当てはまる。なぜならば動物は他の生物が作り出した有機炭素を摂取し、それを酸化しエネルギーを得るからである。

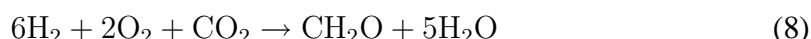
特色ある環境における化学反応と生命

普通からかけ離れているにもかかわらず、生命が存在できる環境を見ることができる。例えば、鉄の酸化によりエネルギーを得るバクテリアのような、無機分子の酸化からエネルギーを得ることができる生物が存在する。この場合、鉄は電子供与体として、酸素は電子受容体として機能を果たす。つまり鉄は酸化され、酸素は還元される。このような過程で示される化学反応は



と書くことができる． Fe^{+2} と Fe^{+3} は上記で示したような化学性をもつ．鉄を酸化することができるバクテリアは酸素が豊富にない初期の地球の歴史で重要だったかもしれない．そして，このバクテリアは縞状鉄鉱層 (4 章で見た) の生成に関わっていたかもしれない．中性において鉄の酸化は急速に起こるので，このバクテリアは効果的に鉄の酸化ができない．しかし，強酸性下においては鉄の酸化がゆっくり起こるので，このバクテリアは効果的に鉄の酸化を行える．その結果，鉄を酸化するバクテリアは尾鉱山のような強酸性下において繁栄する．このような鉄を酸化するバクテリアは鉄酸化細菌として知られている．

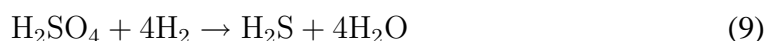
エネルギー消費が間接的に鉄の酸化と関わっているバクテリアは 1995 年にコロンビア川玄武岩帯深部で発見された．ここの岩石の構成は 1700 万年前から 600 万年前までの間にオレゴンとワシントンで表面に噴出した玄武岩質火山岩からなる．これらは深さ 3~5 km ，範囲 163000 km² より広い範囲を覆っている．このバクテリアは水素を電子供与体として使う．水素源は地下水と玄武岩中の鉄の化学反応である．玄武岩中の鉄の酸化が水素ガスを生成する．水素は無機炭素を還元された形であるメタンに変えるのに使われる．メタンは地下水中で大量に見つけることができる．水素を酸化させるバクテリアに利用されている化学反応は，



である．エネルギー源は水素だが，水素源は水による玄武岩中の鉱物に含まれる鉄の酸化である．

コロンビア川玄武岩中のバクテリアは地表から 1km 以上下に存在する．このバクテリアは研究室内の似せた環境で培養ができること，そして玄武岩を酸化させ水素を発生させることも証明されている．このバクテリアは既存の有機炭素を必要としない，そしてエネルギー源を光合成にも依存していないのが独立栄養生物の生態系に見える，この生態系は表面上，生物相から完全に独立して存在している．もちろん，このバクテリアが深遠部から発生したことを示すわけではない．過去のある時点において，このバクテリアが地下水を通して玄武岩の深遠部に移動し，その結果，表面から独立したと考えられるであろう．

生物相にエネルギーを与えるさまざまな酸化還元反応がある．これらの反応は多様な種類の電子供与体や電子受容体を大量に含んでいる．例えば，硫酸塩還元菌は



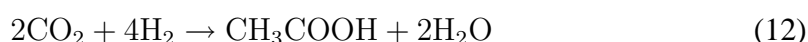
という反応からエネルギーを利用する．メタン菌は



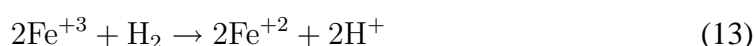
と



という 2 つの化学反応を行う。酢酸菌は



という化学反応を行う。鉄酸化細菌に加えて、鉄還元細菌も存在する。鉄還元細菌が行う化学反応は



である。この場合、水素は電子供与体となり、鉄の還元は他の化学反応を引き起こすために使われる。

比較的熱い環境でのみ生きることができ、そこで繁殖している水素細菌の分野はとても興味深い。これらの種は超好熱性細菌と呼ばれている。「好熱性」はこれらの種が熱水を好むことを、「超」はその中でも高い温度の熱水を好むということの意味する。超好熱性細菌は 80°C 以上の水の中で生きている。実験室内で 125°C の水の中で生存できることが確認された。このような温度においては、地球の地表では水は沸騰してしまうだろう。それ故、これらの種は高い圧力のために水が沸騰しない場所においてのみ存在できる。そのような場所の例として、水圧で水が沸騰しにくい海底の温泉や地表深部がある。

実際、超好熱性細菌は 2 つの注目すべき特殊な場所に存在する。それは海底にある中央海嶺と大陸上にある温泉である。両方とも熱せられた地表下を通り地表に出るような水の循環 (三章で見た) がある。これは、最近噴火した火山や現在の活火山に関連している。中央海嶺では海水の循環が急激に起こる。それは火口を通し、短い時間で地球の海全体と同等の量を循環させることができる。温泉では雨が降り、そしてその水が熱せられた地表下に浸透し、その後地表に戻る。

最近のロボットによる中央海嶺の探索により、海底は注目すべき生命の存在を示す。大量のバクテリアが熱水の噴出孔にいるだけでなく、肉眼で見える生物も存在する。海からの水は海底の下で循環している間に熱せられ、最大 380°C の水が海に還る。(海底では圧力が高いので 450 °C まで沸騰しない; 図 5.4 を参照)。周りの冷たい海水と混ぜると熱水に大量に溶けている鉱物と化学物質が凝結する。その結果、水は黒く見える。この海に戻る熱水の塊は「黒い煙」(図 5.5) として知られている。しかし H_2 , H_2S , CO , Mn^{+2} を含むいくつかの分子は凝結しない。熱水中の生成物が冷えた海水と混ぜる化学反応のために、これらの化学物質は還元された形になっている。つまり、これらの化学物質は電子供与体として働き、生命に力を与えるエネルギーを供給することができる。

図 5.4: 理想化された概略図．中央海嶺における水の循環を示す．地殻に浸透した海からの冷たい水は地表下のマグマにより熱せられ、再び海に戻される (矢印で示されている)．

図 5.5: 豊富な鉱物を含む熱水 (最大 400 度) は中央海嶺の熱水孔から排出される．この濁った雲は冷えた海水に混ざると固体化する鉱物を含む熱水を含んでいる．これらの鉱物は長い時間をかけて火口の周りに煙突状に積み重なってきた．

冷たい海水に混ざるその塊の中にバクテリアは存在する．このバクテリアは火口の水のような高い温度の熱水では生きることができないが、最大 125°C までの熱水ならば生きることができる．このバクテリアは海水の周囲から炭素を得る．つまり、大気から海に溶けた CO₂ をエネルギー源としている．無機物由来の CO₂ から炭素を得る．光合成を行わずにエネルギーを得ているので、これらのバクテリアは化学独立栄養生物 (図 5.3) と呼ばれる．

超好熱性細菌が見られる大陸の温泉の例として、ワイオミング州北西のイエローストーン国立公園がある．ここでは、マントル由来の熱い物質の塊が数千万年前の火山の噴火を引き起こした (三章を参照)．噴火の場所は北東に移ってゆき、最も最近の噴火は約二百万年前に起こった．この火山性カルデラはそれ以来噴火していない、しかし、熱を保ち、地表から数 km 下には溶岩が広がっている．表面の水は地殻に浸透し、熱い岩石と接触する．そこで温められた水が地表に戻り、間欠泉や温泉として吹き上がる．その水は地表に達した時点で、ほぼ沸点近くまで温められている．

イエローストーンの温泉にはバクテリアがたくさん存在する．ここでは鮮やかな青色、黄色、緑色などのさまざまな色の熱水のたまり (図 5.6) が見られる．これらの色は熱水の中で生きているバクテリアの巣によって作られている．このさまざまな色はさまざまな温度で生きているバクテリアによって構成されている．火口中心近くにある水はとても熱く、火口から離れていくにつれ冷えてゆく．さまざまな温度でさまざまなバクテリア生きているので、結局バクテリアは火口からの距離がさまざまな場所に棲んでおり、同心円上に色を作る．これらのバクテリアは光合成細菌で、太陽光を吸収するために緑色のクロロフィルを作ることができる．太陽光が豊富にあるとき、多くのクロロフィルは必要としない．この緑色はクロロフィル中の鮮やかな橙色、黄色、赤色などの緑色以外の色素によって隠される場合がある．

上記の議論の多くはそれぞれ異なるエネルギー源を持つ細菌を扱っている．南極大陸のドライバレー (図 5.7) のような生命が生きていくには厳しすぎるように思

図 5.6: イエローストーン国立公園の温泉．この温泉は縁までいっぱいに水が溜まっている．そこにあるさまざまな陰は温泉で育ったバクテリアのさまざまな色からできている．開口部の水の温度は沸点よりやや下ぐらいである．水溜りは直径およそ 2.5m である．

える環境を持つ場所がある．南極地帯は極めて厳しい環境である．通常的气温は凝固点温度を下回る．凝固点温度を上回るのは年に数日あるかないかである．このドライバレーでは，周囲の山脈が大気から水分を取り除く天候パターンを作る．その結果，渓谷は砂漠化し，降雨がほとんどない．そのため水，氷が少ない．だが，このような環境にもかかわらず生命は存在する．

図 5.7: 南極のドライバレー．この渓谷では降雨はないが，周囲から流出してくる水が真中に見える水で覆われた湖を作る．

具体的には，岩石 (図 5.8) の中にバクテリアがいる．これはそれほど難しいことではないように思える．岩石は太陽光をよく吸収するので，たとえ大気温度が氷点下だとしても岩石の温度を水の凝固点温度より上げることができる．その他に生命の活動に必要なものは水と太陽光との物理的接触だろう．この 2 つの条件は直径 1mm 以下である個々の石の粒子が押し固められたものから構成される水成岩の内部で得られるだろう．この粒子が押し固められたものは粒子の間が完全に埋まっているわけではなく，水を蓄えておく間隙が存在する．まれにある水を得る機会に，水は岩に染み込むことができる．そして，小さい間隙が水が発散するのを防ぎ保存する．また，多数の粒子は岩石の内部数 mm まで行き渡せるのに十分な量の太陽光を透過させる．

図 5.8: 南極の砂岩をスライスしたもの．岩石を構成している砂の個々の粒子が目に見える．平均気温は水の凝固点温度を下回っているにもかかわらず，目に見えるこの層は岩石の中で生存しているバクテリアを含んでいる．この写真は縦横 1.8cm である．(写真提供 E.I. Friedmann)

岩石の中に存在するバクテリアは「無機独立栄養細菌」と呼ばれる．「独立栄養細菌」は大気中の CO_2 を利用することから，そして「無機」は岩石 (図 5.3) の中で生きていることから由来する．(これらのバクテリアは岩石の中で生きていることから 'endolith' と呼ばれる)．ここでもまた，生命が過酷な環境の利用可能な鉱物源を使い，生存する方法を見つけたことを見る．

生命が存在する全ての環境において共通する 1 つの要因であり，そして生命に力を与える化学反応の全てにおいて水が基本的な役割を果たしている．第一に，水

は異なる化学物質を溶かすことができる溶解力を持っている．この点において水は万能溶媒と呼ばれる．これは水の分子構造が他の液体よりもさまざまな分子を溶かすことができるからである(7章を参照)．第二に，おそらくさらに重要なことであろうが，水は化学物質が移動することを可能にする媒介物として働く．このことにより，水は化学反応を起こすための場所を与え，反応する化学物質を引き合わせ，反応生成物を運び出す移動経路となる．もしこれらの反応が大気中で行われるとすれば，さまざまな化学物質の扱いが難しいものとなるだろう．地球上において，液体の水の存在は生命が存在するキーポイントである．

「標準的」な環境とは、「苛酷」な環境とは何だろうか？ 系統樹の重要性

これまでの過酷な環境における生命の議論はおそらく，最もよく知られている生命，つまり地球上の至る所にいる生命が全ての生命の「標準」であるという印象を与える．これに関連して，温泉の中，南極，塩または酸の環境などにおける生命はいささか奇妙，または場違いなように思える．しかし，このことが反対である厳密な証拠がある．超好熱性細菌が標準で，他の全ての生命はこれと異なるものに進化したかもしれない．この可能性を調べるには，まず DNA と RNA の生化学を議論する必要がある．

DNA はデオキシリボ核酸の略称である．DNA は生物が持っている分子で，自分自身を複製するために必要な遺伝情報を含んでいる．DNA 分子は二重らせん構造の分子(図 5.9) からなる．1 個のらせんはねじの上に巻きつけた糸のようになる，つまりコルク栓抜きのような構造をしている．二重らせんにおいて，これら 2 つのらせんは密接に結びつき，分子構造によって互いに結合している．炭素，水素，酸素，リンの元素から成るそれぞれのらせんの骨格は特殊な構造(デオキシリボース)で結合する．2 つのらせんを形作る骨格は塩基と呼ばれる分子構造によって結合される．

図 5.9: DNA 分子の構造．二重らせんは糖-リン酸骨格からなり，横棒は塩基対の構造を示す．一巻の二重らせんに十塩基対が含まれ，その長さは 3.4nm である．

4 個の塩基があり，それぞれに 2 重環の分子が含まれている．DNA 中の 4 個の塩基はシトシン，チミン，アデニン，グアニンである．これらはそれぞれの頭文字を取り C, T, A, G と称される．これら 4 個の塩基の構成はそれぞれ少しずつ異なっていて，大きさも少しずつ違う．しかし，これらの塩基は他の塩基や，DNA

の骨格に化学結合する。これらは G と C , T と A がそれぞれ結合する (図 5.10) . G と C の結合の構造は , T と A の結合の構造と大きさが同じであり , それぞれ , DNA 分子の 2 つのらせん状の骨格の間にはまるだろう . まっすぐなはしごが二重らせん (図 5.9) を形作るためにねじられていると考えることで全体の構造を想像することができる . G と C , T と A が結合した構造がはしごの段となる . これら 2 つの塩基対は同じ大きさで , どちらも DNA の骨格に結合でき , 塩基の順番はさまざまである . この塩基の順番が遺伝情報を含んでいる .

図 5.10: DNA 分子中の 4 つの塩基の構造 . 点線は 2 つの塩基が相補的に結合していることを示す . DNA 分子の骨格であるデオキシリボースははっきりと示されていないが , その位置は指し示される .

この構造が DNA 分子がどのように自分自身の複製と遺伝情報を利用するという 2 つの重要な働きを行うかを示す . もし二重らせん構造をなす 2 つのらせんを繋いでいる塩基結合を , まるでジッパーを開くように 2 つに割ると , それぞれのらせんはあらゆる点においてオリジナルと同じである完全な DNA 分子の構造に対する鋳型として働くことができる . 塩基と骨格の一部を含む構造は新しい二重らせんを作るために自身を骨格を構成するらせんとそれに付随する塩基に結合することが可能である . 物理的に整合する場合においてのみこれらの結合は起こる . つまり , G と C , A と T が結合する場合である . もし間違った塩基構造が元のらせんに結合しようとしても , スペースが合わず結合できないだろう . この結果 , それぞれのらせんは自身のオリジナルの複製である完全な DNA 分子に変えることができる . つまり , 1 個の DNA 分子はまったく同じ 2 個の DNA 分子になることができる .

DNA 分子中の遺伝情報はこの鎖に沿った塩基配列中にある . 遺伝情報はアルファベットの文字情報を含むドットとダッシュのパターンからなるモールス信号と同じである . この DNA 分子に含まれる遺伝情報は細胞の働きを引き起こし , その機能や行動を決める . これは RNA と相互作用し行われる .

RNA (リボ核酸) は DNA と対をなす分子である . 一般に RNA は二本鎖である DNA と違い一本鎖で , 塩基にチミン (T) ではなくウラシル (U) を使う . U の構成は T とはわずかに異なるが全体の大きさは同じである . RNA 分子の骨格は DNA 分子とわずかに異なる構成をもつ . これは骨格の構成に余分な酸素分子が存在するか否かの違いのみである (RNA はデオキシリボースの代わりにリボースを含む) . RNA は DNA の複製過程に似た方法で DNA から作られる . DNA 分子は 2 つに割ることができ , RNA 分子はその DNA の一本鎖の鋳型の上で作ることができる .

細胞内の機能によって決まるさまざまなタイプの RNA が存在する。メッセンジャー RNA (mRNA), トランスファー RNA (tRNA), リボソーム RNA (rRNA) は構築物へのアミノ酸の取り込みや, アミノ酸からたんぱく質を作ることに関わるさまざまな仕事を行う。DNA 分子は mRNA 分子にコピーまたは転写される。mRNA はオリジナルの DNA と同じ遺伝情報を持っている。mRNA 上の遺伝情報は tRNA がリボソームと呼ばれる細胞小器官を使うことによって転写され, 新しいたんぱく質を作ることを可能にする。リボソーム自身はリボソーム RNA (rRNA) とたんぱく質の組み合わせから構成される。

DNA と RNA の性質や構造は, 細胞がどのように増えるのか, 遺伝情報がどのように伝えられるのか, 転写する際の間違いや変異を通してどのように進化が起こるのか, などを理解するために重要である。しかしここで, 地球上の生命の進化に対する考察や, 地球上の生命において共通の最も古い祖先がもつ性質を知るために遺伝情報を使うことは興味深い。遺伝子配列の特定の部分はさまざまな生物がどのように進化してきたかを見る物差しとして使われる。

具体的に特定の rRNA 分子の塩基配列を調べてみる。細胞には持っている塩基の数が異なるいくつかの異なる rRNA 分子が存在する。原核生物の中の (16S) rRNA 分子 (図 5.11), 真核生物の中で発見されている (16S) rRNA 分子とほぼ同じである (18S) rRNA 分子は両者とも全領域で約 1500 塩基を含んでいる。細胞が新たに (16S) rRNA 分子を作ると, これらはすでに存在する (16S) rRNA と同一の複製物となる。しかし, 長い時間が経過すると, 複製過程にエラーが紛れ込み, 塩基配列は変わっていくだろう。

図 5.11: 大腸菌の 16S rRNA 分子の構造。この差し込み図は分子中のいくつかの個々の塩基を示す。これより, どのように塩基が繋ぎ合わさっているかがわかる。メインの図は複雑な形を見せる。

1 つの共通の祖先を起源とする名残りとして全ての生物が同じタイプの rRNA 分子を持っている。全ての生物の祖先は同一であったが, ランダムに起こる変異によって互いに分かれていった。しかし, 頻繁に起こる致命的なエラーと同時に, たんぱく質を正確に作るという要求は変異または進化による変化がゆっくりと起こるということを意味する。塩基配列に間違いがあったとき, その間違いは子孫に伝わってゆく。全生物間において (16S) rRNA 分子の中にはほぼ同一であるエリアが存在するだろう。それ故, さまざまな生物の (16S) rRNA 分子中の塩基配列を調べることができる。調べた生物間の塩基配列の差異は共通の祖先から分かれたさまざまな生物において系統の指標として使うことができる。この比較の中で, 細胞によって活発に使われていない塩基配列が調べられるべきであるが, もし活発な配列が使われていたら, 自然選択は配列中の変化を作る変異に影響を与えるか

もしれない。幸運にも、細胞機能の中で使われないたくさんの塩基配列が存在する。

ほぼ同一の (16S) rRNA 配列を持つ 2 つの生物はごく最近に互いに分岐したはずである。一方で、まったく違う配列を持つ 2 つの生物は大昔に分岐したはずだ。これより全ての動物の互いの (16S) rRNA に基づく遺伝距離は近いということがわかる。同様に全てのバクテリアの互いの (16S) rRNA に基づく遺伝距離は比較的近いが、動物とバクテリアの遺伝距離は比較的遠い。我々は動物とバクテリアが大昔に分岐したはずなのでかなり異なっているが、動物同士は最近分岐はずなのでとても似ていると想像する。地質記録 (4 章) に含まれる情報も植物と動物は比較的最近に現れたという同じ結論を導く。

互いの種がどれだけ離れているかを知るために、多くの生物の塩基配列を比較する。これを調べる過程において、生物の進化の位置を示す系統樹 (図 5.12) を作ることができる。系統樹は今日生存している生物間の遺伝子の差異に基づいているので、過去の生物の塩基配列は使えないが、生物間の遺伝距離を測るのに使うことはできる。系統樹により、生物の進化において共通の祖先から分岐した相対的年代を見積もることができる。進化のタイムスケールを見積もるために rRNA の複製における変異が起こる割合を知る必要がある。ちなみに、この割合は時間を通して一定である必要はない。

図 5.12: rRNA 分子内の遺伝配列に基づいた系統樹。線分は根元から分岐した互いの生物の遺伝距離を表している。生命は 3 つに分類されていることを示す。

系統樹は領域 (図 5.12) と呼ばれる 3 つの枝に分岐されている。これらの領域は真核生物 (例えば、核を含む細胞や植物や動物など)、バクテリア、そして新しく分類された古細菌と呼ばれる領域からなる。古細菌は細胞壁の構造に関して基本的な特性がバクテリアとは異なっている。これらは生物の種類が根本的に異なっていることを表している。分子遺伝学的に定義されたこれらの領域は 30 年前に考えられていた五界説 (植物、動物、菌類、バクテリア、原生生物または単細胞生物) とは全く違う。五界説は生物間の遺伝的違いよりも物質的な違いに基づいていた。形態学と外見に基づいた五界説の概念は生物間の遺伝的繋がりを直接決める方法を持つ現在では廃れている。

この方法では生物間の違いを示す系統樹を作ることができる一方で、系統樹の根元の位置 (現在生存している生物すべての分岐の元となる最古の共通の祖先を表す位置) を決めることができない。その理由は、初期の生物がどのような遺伝配列を持っていたか直接知るすべがないからである。これは生物がどちらの方向にも

進化し続けてきたことを意味する。しかし、根元の位置を特定する間接的な方法ならばある。3つの領域の全ての生物において重複した配列が見える。これはこの配列が最古の共通の祖先の時代以前にあったことを意味する。この重複した配列が存在するかしないかによって配列の相違を決めることができ、ただ1つのスタート地点を与える。

この方法は全ての生物の共通の祖先として1つの種を指し示さない。なぜならば、すべての既知の生物は進化して根元から離れているが、共通の祖先から少し進化した種、そしてその領域は根元に近すぎるからである。根元の位置は、共通の祖先から最初にバクテリア、古細菌に分岐し、その少し後に古細菌から真核生物への分岐があったことを示す。根元の位置真近に位置する現存の生物は存在しない。これは細胞内においてRNAが最初に使われて以来、全ての生物が確実に進化してきたことを意味する。

過酷な環境において発生した生命に対する系統樹がもつ意義は、系統樹の根元付近の全ての生物は熱水の中で生きる超好熱性細菌であるということである。これは生命が温泉を起源とすることを必ずしも求めるわけではなく、そういう可能性があるという程度である(6章参照)。今日の地球におけるすべての生物は温泉で生きている生物の子孫であることを示している。超好熱性細菌以前に存在していた生物の性質に関する証拠がない。よって地球上の生命の基準は超好熱性細菌かもしれない!

同じように、系統樹の根元近くの多くの生物はメタン細菌である。メタン細菌は電子受容体としてCO₂を利用する。これは驚くことではない、なぜならばこれらの生物はとても古く、初期の地球環境は利用できるCO₂が非常に多かったからである(4章参照)。

まとめ

地球上の生命は非常に多様性に恵まれていることを見てきた。生命活動に力を与えるエネルギーは驚くべきほど多様な源をもっている。太陽光による光合成や酸化還元反応による化学エネルギーなどによって、どこでもエネルギーが利用できる。そしてそのようにエネルギー作りを利用することができる生物が存在している。生命が利用できる化学物質は非常に広範囲にわたっている。生命にエネルギーを供給することができる化学非平衡は地球上のほぼ全てに存在する。まるで生命にエネルギーを供給できる化学反応が存在するすべての場所において生命が存在しているようである。その結果、地球上において最も豊富で広範囲にわたっている細菌は生態的地位を占めている。太陽光からエネルギー、そして大気中の

CO₂ から炭素を得る光合成無機栄養生物，他の生命が作った有機分子から炭素を得る従属栄養生物，岩石中の無機化学反応からエネルギーを得る無機独立栄養生物が存在する．共通の特徴は太陽，または平衡状態を崩す方向に向かわせる化学反応からのエネルギーの流入であるようだ．

これまでの議論から地球上の生命，そして地球外生命の可能性に関する重要な結論を 2 つ述べることができる．

地球上の生命に関して，さまざまなエネルギー源を利用できることが見られる．3.5 億年以上前(次の章)の生物形態を考えると，重要な考えの 1 つとして生命活動に力を与えるためのエネルギー利用がある．今日の生命がエネルギーを利用する方法は生命の起源よりずっと進化し続けてきたはずなので非常に複雑であり，利用できるエネルギー源が数多くあることは明らかである．最古の生命はこれらのうちどれかを利用することができた．そして，最古の生命について直接教えてくれる観察者はいないので，初期の生命に最もよく使われたと思われるものに注意する必要がある．

太陽系またはそれ以外に存在する地球外生命を扱うにあたり，もう一度さまざまなエネルギー源が生物相によって効果的に使われてきたことを見る．地球外生命が存在できる場所を探すとき，利用できるエネルギー源が存在できる場所を理解するために，基本的な物理，化学，地質学を使うであろう．地球上の生命を維持できるさまざまな場所が過酷な環境と考えられる場所で生命が存在できることを示す．最終的に，生命に力を与えるエネルギーを供給できる化学反応を使うことができ，生命を維持できる場所を見つけることができるだろうと想像することができる．この結論が示唆していることは明らかである．それは生命が宇宙に広がっているという可能性があるかもしれないということだ!