

6. 地球上における生命の起源

前の数章では、初期地球の環境的様相と初期生命の性質についての議論に焦点を合わせてきた。これらは、生命の起源の境界条件として考えられうる物を提供してくれる。それらは生命の起源について我々に直接教えてはくれない。ここでは、生命が地球で生じたかもしれない過程を論じよう。

我々は重大な結論から始めることができる。それは明らかかなことに思えるかもしれないが、生命は地球上で生じた、ということである。生気の無い惑星から脱して生命が生じうる過程について論じたものの、まったく起こりそうにないので、それらが起こらなかった、と結論するのは魅力的かもしれない。生命の起源は起こりそうもないと考える人々もいる。あるいは、他の所から入植して、すぐに地球上に生命が急速に現れた、と考える人々がいる。しかし、この“パンスペルミア説 [panspermia]”は単に生命の起源を他の場所へ移しただけである。それは起源自体の問題を解決してはいない。

もう一つの重要な結論は、現在我々が生命の起源を理解していないことである。確かに、生命がどのように機能するのか、生命が生じる条件、および起こりうる生命の起源に付随する一連の出来事については多くの事を理解している。しかし、初期地球上の前生物化学 [prebiological chemistry] から、多くの遺伝的機能を果たす DNA と RNA 分子を用いるという、我々が既知の機能を持った生命までの一連の出来事は理解されていない。しかし、我々は、起こったに違いない過程、起こるであろう過程、および我々の目標を描くことができる。明らかに、我々の地球上の生命の起源に対する全くの理解不足は、生命がどこか別の起源に会うかどうか、どこか他に存在しているのだろうか、を判断する能力に影響する。しかし、幾つかの過程に対する理解の欠如のため、他の惑星の条件が地球と似ているか、そこに生命が存在するか、を結論できないままだろう。

我々は、生命の不在と存在の間の境界を理解することに注目しているので、生命を構成しているのが何なのかという議論から始めよう。それから、起こったであろう前生物化学過程、および生命が生じるに違いない仕組みを論じる。この種の議論を通して、我々は、地球以外で生命が存在していそうな探査すべき場所の条件を定義し始めることができるだろう。

生命とは？

生命の起源の議論を始めるために、我々は生命とは何かについて合意しておく必要がある。極端な場合、我々

は何が生きていて何が生きていないのかを認識することができると思う。例えば、動物は生きているが、岩石は生きていない。生命の最も基本的な定義は、栄養物 [nutrients] を摂取し、無駄な副産物 [byproducts] を放ち、成長し繁殖する能力を伴うことかもしれない。種によって利用できるエネルギー源が異なるため、何が栄養物で何が副産物かを定義するのは難しい。実際、5章である種の無駄な副産物が他種の栄養物になるかもしれないことを見た。

我々は成長の概念に関する問題も抱えている。地質学的タイムスケールであるけれども、山は成長する。単一の鉱物結晶 [mineral crystals] は成長する。実際、凍結/解凍 [freeze/thaw] による風化作用 [weathering] で、岩石あるいは結晶は壊れ、2つになり、各々がさらに成長しうる。けれども、これらが生きてはいないことを、我々は知っている。

火は、生命の単純な定義を満たす一例として持ち出されるが、我々は普通生命として考えない。火は、栄養物 (酸素と可燃性燃料) を取りこみ、無駄な副産物 (熱、二酸化炭素、および煙) を放つ。それは、新しく消費されていない地域へ、地理的範囲を拡げることにより成長する。しかし、我々は一般的に、火を非生物化学的反応 熱が放出されるような燃料の酸化であり、火それ自体がこの熱の明らかな現れ の副産物とみなす。

よく言及される紛らわしい例のもう一つにラバ [mule] がある。ラバは馬 [horse] とロバ [donkey] の交配から生まれた子孫 [offspring] である。それは生殖 [reproduce] できない不妊動物である。生殖できないということは、それが生きていないことを意味するのだろうか？ラバの各細胞は複製し代謝する。構成要素は生きているが、全体としては生きていないのか？

ウイルス [viruses] はどうか？彼らは DNA を持つけれども、彼ら自身は生殖することができない。彼らは細胞を侵略することで繁殖する。それは、原型 DNA を沢山複製し、細胞を分裂し子孫を新しい侵略者として送る、という細胞内の化学機構を用いる。明らかに、ウイルスは複製することができるが、彼ら自身がそうすることはできない。彼らは生命として考えられうる物の境界線上にいる。

明らかかな困難さにもかかわらず、我々は生命を構成する物に関して一般的な記述を作れる。生命は、化学反応を駆動力とする幾つかの源からエネルギーを利用でき、一般的に複製することが可能であり、進化を経験しうる。進化という概念は、地球上の生命史において中心的なものの一つである。地質学的時間にわたって、新種は既存種の変化によって生まれてきた。この過程は、1859年に *Charles Darwin* が種の起源 [the origin

of species] という著書で初めて記述したものであり、不正確な複製が関係している。もし生物が両親とは僅かに異なった子孫を生み出すことができるならば、どことなく有益な変化を持つそれらの子孫は、持たない子孫よりも効率的に生殖するだろう。彼らは資源競争と繁殖においてより成功するだろう。もし、その変化が次世代にも回れば、変化した生物は最終的に数で勝り原型生物に取って代わるだろう。

さらに、我々は定義の一端として進化する能力を含んでいることに気をつけなければならない。それはある一つの生物個体に適用することはできないが、むしろ種全体に適用できる。加えて、最古の生命として知られている単細胞細菌は、35億年前以来変化していないように見えるが、そのような種に関してはどうか？彼らは、その能力はあるけれども、35億年間著しく変化してきたようには見えない。

最後に、1963年に出版された生命の起源という本で、*A.I. Oparin* によって与えられた例についてはどうか？彼は新しいロボットを作ることができるロボット兵について問うた。これは生命なのか？あるいは、種の複製を認めるコンピュータプログラムは、変化の有無に関わらず、どうか？それは生命なのか？これらは現在の議論から外れる哲学的問いであるが、他方で、生命とは何かを理解する鍵である。

我々は、生命の定義が我々が知っている生物と我々が接触できる生きてない存在に基づいているおり、それは不明瞭であることを再認識する必要がある。生命特有の性質を説明しようと試みた幾つか定義は失敗する運命にある。常に意義や反論があるだろう。そして、そのような定義は常に、我々が今日地球で見る生命全体によって決定されるだろう。同様に、生命と非生命の境界において、たった一つの定義は失敗する。我々は、生命の起源を議論するとき、これを気に留めておくことが必要である。進化系列における非生命と生命との間の境界線は、現在における境界線と同様に、たいがい紛らわしい。

生命への必要条件

生命が生きるためには、有機分子の基本的成分を手に入れる状態が必要がある。これらの成分は生命活動に必須の元素として知られており、主に炭素 [carbon]、水素 [hydrogen]、酸素 [oxygen]、窒素 [nitrogen]、リン [phosphorous]、および硫黄 [sulfur] などである。炭素分子によってなされる重要な役割が鍵となる。炭素は、他の元素より多様な化学結合 [chemical bond] を形成し、生物学的化学物質 [biological chemicals] の全てにおいて主役として働く。生命は炭素以外の元素を基盤

にすることが可能だろうか？それは除外できないけれども、起こりそうにない (7章参照)。

生命活動に必須な元素を手に入れることは、ひどく難しい制約ではない。地球、金星、火星のような大きな岩石惑星で起こっている地質学的過程 [geological processes] の自然の成り行きとして、これらの元素は表層および固体惑星 [solid planets] の内部で容易に利用できる。

生命の起源は、実際に生命を構成しているプロテイン [proteins] のような、より複雑な有機分子の基盤として、有機分子の源を必要とした。これらの基盤は、メタン [methane] (CH_4) とエタン [ethane] (C_2H_6) のような単純な分子、あるいは (6つの炭素原子と他の元素が結合した鎖を含む) アミノ酸のようなより複雑な分子を含むかもしれない。生命は複製できる機構も必要であろう。これは一般的に、遺伝情報 [genetic information] を渡すために幾つかの手段を要求する、つまり、これらの単純な分子を取り込み、より複雑な分子の構築を要求する、と考えられている。DNA分子は数千の原子という長さになりうるけれども、そのような複雑な分子は、短い鎖から進化すると推定される。しかし、原始生命 [original life] は最も単純な有機分子よりは複雑な分子を含む必要があっただろう。

最後に、生命の起源はエネルギーを入手して利用する手法を要求した。現代の生命においては、エネルギーは (光合成 [photosynthesis] を通した) 太陽光、あるいは化学物質 (5章参照) のはずだ。最も初期の生命は、化学物質の方であったと思われる。なぜなら、太陽光を利用するのに必要な化学機構が相対的に複雑だからである。

我々はこれら各々の要求をより詳細に論じ、生命の起源の統一見解への集約を試みる。

初期生命の発生でおそらく要求されるのが、有機分子の源が既に存在していたことである。容易に想像できる最も単純な生命は、エネルギーと構成物質両方の源として存在する有機分子を入手できるようなものである。例えば、より複雑な分子を形成するために CO_2 内の炭素を用いることができる生命は、彼らが前から存在している有機分子を直接用いる場合より、もっと複雑である必要がある。有機分子はどのように形成されたのか？

最初であり、かつ未だに広く認められている答えは、1950年代に行われた実験における *Harold Urey* による提案と *Stanley Miller* による実証である。化学的な観点から有機分子の問題を取り上げることで、彼らは、生命の基盤であるアミノ酸 [amino acids] のような複雑な分子が、(現在は CO_2 として存在している) 完全に酸化

された炭素と (CH₄、あるいは極端な場合 C として存在している) 還元された炭素の間にある炭素原子で構成されている、と認識した。もしそれらが、(メタンのような) 還元された炭素を、他のものを還元することで、酸化させる化学反応を起こさせることができたなら、それらは副産物として有機分子を生み出せたかもしれない。

Miller は全生物的地球 [prebiotic Earth] における化学反応を模擬するための室内実験 [laboratory experiment] を行った (図 6.1 *¹)。1950 年代には、その環境は非常に還元的であり、メタン (CH₄) とアンモニア (NH₃) のような分子で構成されていると考えられていた。地球、惑星、および太陽を形成しているガスが水素に非常に富んでいるため、還元的な環境はもっともらしく思われた。多くの水素が得られることで、CO₂ あるいは N₂ のようなより酸化的な種は容易に水素と結合するだろう。加えて、木星大気が典型的な原始大気を表わしているとも考えられており、それは非常に還元的である。木星は基本的に水素で構成され、他の元素は僅かだけ存在している。

その実験は、液体の水および気体のメタンとアンモニアで部分的に満たされたフラスコ [flask] から成っていた。水蒸気は液体の水を熱して作られ、化学反応を誘引するエネルギー源としての稲妻を、気体中の電気の火花放電によって模擬した。化学反応の生成物は凝結によって液体の水へ戻り再利用される。その実験を数週間実行した後、フラスコの成分を分析した。それらは多種類の重要な有機分子を含んでいた。これらはヒドロキシ酸 [hydroxy acids]、脂肪族系酸 [aliphatic acids]、尿素 [urea]、そして特にアミノ酸が含まれていた。最初フラスコ内にあった炭素の 1/6 が有機分子に変わった。アミノ酸グリシンだけで炭素原子の約 2% を占めた。アミノ酸は最初の気体から直接には形成されなかったが、シアン化水素 [hydrogen cyanide](HCN) と CHO を含む化合物との反応によって形成された。これらの単純な有機物は最初の気体から直接作られた。

太陽紫外光 [solar ultraviolet light] あるいは宇宙線 [cosmic rays] のような他のエネルギー源は、同じ効果があることが分かった。しかし、大気が還元的でないとき、有機分子とアミノ酸の生成率は非常に低いだろう。窒素が NH₃ より N₂ として、炭素が CH₄ より CO₂ として存在しているとき、有機物の生成率は 1/1000 程度

であった。これは、酸化的な大気中で部分的に還元化された分子を作るという困難が与えられるが、驚くべき事ではない。有機物は容易に気体と反応し、炭素をより酸化された形態にする。

もし初期地球が還元的な環境であったとすると、Miller と Urey によって描かれた過程が海洋中で有機分子に富むスープを作る役割を果たすことは、非常にもっともらしい。そのようなスープは初期生命の燃料となる。しかし、このシナリオに伴う潜在的な課題は、過程全体で非常に重要である大気中のメタンとアンモニアが、初期地球環境で安定ではなかったかもしれないことである。それらは太陽紫外線による光解離 [photodissociation] にさらされる。その過程は分子が光子を吸収することであり、それで受け取るエネルギーは、分子を壊すのに十分である。時間とともに、メタンとアンモニアはバラバラになり、水素は大気から逃れうる。これは還元的な大気をより酸化的にする。

前生物的地球における有機分子源の二番目のものは、海洋底の熱水システム [hydrothermal system] に基づいていると、最近提案された (4 章および 5 章を参照)。これらの場所は、化学エネルギーによって多くの生物的活動を支える、非常に恵まれた生態学的環境である。しかし、重要なことは、そのような環境も有機分子を生み出すことができ、全生物的地球においてそれが起こったのかもしれない、ということである。

有機分子が熱水システムで生成される化学経路を理解するために、我々は水が地殻を通過して循環する物理的な経路を理解する必要がある。中央海嶺の拡大中心で、玄武岩マグマは上部マントルから地殻へと注入される。岩石が冷えて尾根から離れていくとき、水は割れ目を通して浸透しながら、海洋からこの地殻へ循環できる。その水は 1000°C ほどに熱せられ、海洋へと戻る。海洋へ入る水は、450°C 程であると測定されている。大部分の水はこの熱さではないが、いくぶん低温で海洋へ最入する (図 5.4 と図 5.5 を参照)。

最高温まで熱せられた水は、隣接した岩石と化学的に平衡になりうるだろう。岩石は上部マントルからくるので、その酸化状態はマントルの岩石と似ているだろうと考えれば、相対的に酸化的であるからである。マントルでは、酸化状態は、どれだけの酸素がケイ酸塩と結合しているか、を表わしている。厳密に言うと、反応可能な酸素量は、幾つかの鉱物との相互作用を通じた化学平衡によって決まる。最も重要な平衡は、鉱物石英 [mineral quartz]、鉄橄欖石 [fayalite]、および磁鉄鉱 [magnetite] の間の反応を含み、よく “qfm” パツ

*¹ [図 6.1] Miller-Urey が実験で用いた装置の概略図である。アンモニア [ammonia]、メタン、および水素ガスの存在下で液体の水を熱した。ガスの混合物に電極を用いて火花を散らし、生成された化学物質を凝結させ空気室に閉じ込めた。分析すると、液体中に有機分子が見つかった。

ファー [buffer]^{*2}と呼ばれる。これらの岩石と平衡状態にあるマンツルの炭素は、CO あるいは CH₄ よりも主に CO₂ だろう。窒素は主に N₂ だろう。これは炭素と窒素の源がマンツル内にある場合、あるいは地球外からの炭素と窒素の付加がある場合(後述)である。

地殻内を循環した後、水が海洋へ入るとき、それは周りの海水と混ざり冷える。低温では、qfm 鉱物との化学反応は他の方向へ進められ、メタンとして存在する炭素がある(図 6.2^{*3})。しかし、500°C を超える高温では、メタンを生成する反応は進行を抑制される。それどころか、中間種は部分的に還元された炭素を含んで形成するだろう。これらは、Miller-Urey の実験で生成されたものと同種の有機分子を含むだろう。これらの分子は不安定であるけれども、長く生きる過渡種でありうる。実際、いったん有機分子を形成すると、それらは大気中の反応によって生成される有機物と同じ寿命を持つだろう。有機分子は海洋へ集積し、生命形成のための分子源を提供するだろう。

有機分子源の最後の候補は、彗星 [comets]、小惑星 [asteroids]、および隕石 [meteorites] の到来に関係したものである。それらは有機分子源になりうる。なぜなら、それら自身有機物を含んでいるからである。加えて、それらは、大気の通過および表層への衝突に伴う極度の高温高压下では、有機物の化学的生成の引き金となりうる。生命の起源は地球集積による物質の集積率に密接に関連する。十分に大きな衝突は生命を支える温和な環境を破壊し(2章)、物質の集積率が減少してはじめて生命が存在しうるのかもしれない。

到来した破片に含まれている有機分子が衝突イベントによる高温に耐えることは、最初は奇妙に思われる。しかし、微小粒子は集積している地球の上層大気へ入ることができ、それらがあまり熱せられない程度まで

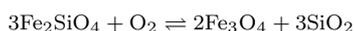
穏やかに減速されうる。有機分子は地球表層で採取された隕石から直接見つかった。例えば、成層圏から回収された惑星間塵である(図 6.3^{*4})。これらの物体は Miller-Urey の実験で生成された有機分子と同種のものを含み、アミノ酸のように複雑な分子も含まれていた。これらの分子は、初期太陽系において、惑星間物質と星間物質中で生成された。それらは惑星間物質中における生命の存在を表わしているわけではない。

さらに、大きな衝突物体は、大気中で有機物を作ることができる。それは、大気中を通過することによって生じる衝突加熱効果、大気中の空中爆発、あるいは衝突で生じる噴出物の超音速膨張によってである。突入時の衝撃波は、大気中を音速で移動することで生まれる。それは、衝突速度が音速より十分に大きく、空気分子が進路から容易に逃れられないときに起きる。数百メートルほどの大きな物体は、衝撃波の圧力によって破滅的な空中爆発を受け、地上の衝突を起こせないかもしれない。それらが爆発するとき、すべての運動エネルギーが大気へ加わり、衝撃波が引き起こされる。最終的に、大きな物体が地上へ衝突した後、衝突場所から放り出された噴出物は大気を押して別の衝撃波を生み出す。室内実験は、衝撃波が HCN のような有機物、C₂H₂ と C₂H₄ のような単純な炭化水素、および煤を生み出すことを実証している。アミノ酸も生成されている。

それでは、これらの過程 - 稲妻と紫外線によって引き起こされる大気形成、熱水システムでの形成、あるいは衝突に起因する形成 - が全生物学的地球における有力な有機分子源であったのであろうか? 明らかに正味の有機物生成率は不確かである。それらはよく理解されていない過程、よく知られていない大気組成に依存する。これにもかかわらず、我々は予備的な見積もりを作ることができる。

初期地球の還元的な大気では、稲妻による有機物の生成は 3×10^9 kg/yr、熱水システムによる生成は 2×10^8 kg/yr、衝突による大気中の衝撃波からの生成は 3×10^{10} kg/yr である。還元的でなく、より中性的な大気では、稲妻による生成は 3×10^7 kg/yr、熱水システムによる生成は 2×10^8 kg/yr(大気の酸化状態には依存しない)、衝突による生成は僅か 400 kg/yr である。ちなみに、集積によって惑星間塵からもたらされる有機物の供給は、およそ 6×10^7 kg/yr である。

^{*2} q は quartz(石英: SiO₂)、f は fayalite(鉄橄欖石: Fe₂SiO₄)、m は magnetite(磁鉄鉱: Fe₃O₄) であり、これらの間の化学平衡状態によって酸化還元状態が決定される。



ただし、厳密には、SiO₂ と Mg₂SiO₄ が同時に存在することは無く、QFM は仮想的な概念である。

^{*3} [図 6.2] マンツルから脱ガスするときの、温度の関数としての気体の酸化状態。fH₂(フガシテイ) は水素の分圧に相当し、鉱物との化学的相互作用によって決まる(厳密には fH₂O も分岐しなければならないが、これは海底の水圧を用いたと思われる)。結果は、fH₂ が鉱物石英/鉄橄欖石/磁鉄鉱バッファーに従い、“QFM” と記された実線に沿って落ちるだろう。破線は、特定の fH₂ と温度に対する、CH₄ 中の炭素と CO₂ 中の炭素との比を示している。QFM バッファーに沿って高温側に行くと、殆ど炭素は CO₂ を形成するだろう (fH₂/fCH₄ > 1)。しかし、低温では、炭素は CH₄ として存在しがちであるだろう。CO₂ から CH₄ に変わる化学反応は完了しないかもしれない。その場合、炭素は様々な有機分子のような中間状態の炭素として残る。(Shock, 1992 より)

^{*4} [図 6.3] 炭素質コンドライト隕石 [carbonaceous chondrite meteorite] Murray で、1950 年にケンタッキーに落ちた。明るい色の含有物はコンドラール [chondrules] であり、暗い微粒子のマトリックスに固定されている。この種の隕石は (H と He を別として) 太陽に良く似た組成を持ち、太陽系形成以来ほとんど作用を受けていない。この石はおよそ直径 4cm である。(写真は Brearley からの提供である。)

明らかに、各々の有機分子源は、全体の有機物生成において役割を果たすことが求められていたであろう。我々は、支配的な要因である初期地球の酸化状態および有機物生成の詳細について十分に分かっていない。当分、有機物を生成しうる複数の機構があること、および各々の機構が全体的な生成において機能したかもしれないこと、を我々は気に留めておかなければならない。しかし、有機物が初期地球で広まったこと、それらが生命の起源に使用できるものであったこと、は明らかである。

生命の起源

我々は、アミノ酸のような複雑な分子を含んだ有機分子を作る非生物的存在から、一般的に理解されている言葉で“生きている”と言われる存在へ、どのように進んだのか？生きている化学物質と最も単純な生命との隔たりは現在途方も無く大きい。現在最も単純な生命、すなわち、35億年以上生きてきたと暗示される生命でさえ、DNAとRNAの化学に基づいている。それらは非常に複雑な化学反応と、複雑なプロテインを作るためにある分子から他の分子への情報運搬を助ける触媒酵素 [catalytic enzymes] を含んでいる。この複雑な化学なくして生命は生存できるのか？究極的には、これらは、生命を構成しているものは何か、という問いへ我々を戻らせる。もし我々が前に議論した生命の条件を思い出ししてみると、エネルギーを取り込むことと、それを用いて成長し増殖すること、が基本的な2つの機能であると分かる。複製の機能は、ある生命から他の生命への遺伝情報の転移を必要とする。これは今日DNAとRNAを用いて行われている。

複製では、情報は、ヌクレオチド [nucleotides] と呼ばれる連鎖されたものによって、DNAの長い螺旋構造にコーディングされる (5章参照)。DNA分子は複製されRNAへ転写されて、RNAと同じ遺伝情報が入る。RNA分子は、この情報を使って、たんぱく質分子を作るために用いられる。最終的に、たんぱく質は新しい細胞を作るために使われ、それらはRNA分子の形成における触媒として機能する事で複製過程の機能を提供する。

我々は、DNAとRNAの両方が細胞複製に関連するよりも、より単純な世界を想像する事ができる。RNA分子はDNA分子ほど複雑ではない。なぜなら、それらはたいてい二重鎖よりも一本鎖だからである。RNAは、DNAの進化以前に、細胞からその子孫への遺伝情報を転移する手段であり、より有能なDNA分子が最終的にこの機能を受け継いで現れたのかもしれない、と想像できる。しかし、このアプローチには問題がある。

RNAは本来の遺伝情報を含む初期ヴァージョンであったことは考えられるが、RNA分子は、酵素の触媒活動無しでは、自身を複製することができない。酵素は、RNA分子中に含まれる遺伝情報を用いて生成されるたんぱく質で構成されており、RNA分子は酵素の触媒活動無しでは作ることができない。我々は、“鶏と卵”のジレンマ [‘chicken or egg’ dilemma] に直面している。

この矛盾は自己触媒RNA分子の発見によっていくぶんか解決された。それは、自身が新しいRNA分子の生成を促進する酵素として働くRNA分子である。そのような“リボザイム [ribozymes]” (リボ核酸 [ribonucleic acid] と酵素 [enzymes] を組み合わせた言葉) は、現代の生命よりも単純であった初期生命が進化に取り残されたものとして存在しているのだろう。しかし、最も単純なRNA分子でさえ、非常に複雑である。それは、全生物的スープ中でRNA分子のランダムな結合によって作られそうである。そのような (ランダムな分子結合によってDNAとRNAのどちらかの) ランダムな出来事が起こる可能性は、飛行機部品の倉庫をトルネードが通過し完全に組み立てられたジャンボジェットを残していくという、もっともらしくないことに例えられている。しかし、進化は、DNAが遺伝情報を含む分子として、RNAにとって変わることを許容する。現代のRNAが初期の自己触媒RNAに取って代わったとき、RNAの前駆物質は遺伝情報を含み複製できた実に単純な分子であったかもしれない、というのがもっともらしく思える。

したがって、我々は再び、遺伝情報を含む可能性を持った可能な限り単純な分子がどのように作られたのか、および、それらがどのように複製されたのか、という問題に戻る。有機分子源に関係なく、有機物が、複製して遺伝情報をその子孫に転移できる単純な分子を形成する状態に至らせる方法を、我々は考える必要がある。そのような分子は、単純な分子が連結されて構築されているポリマー [polymer] 程度に単純であるかもしれない。実際、これはRNAとDNAを作っているものである、と思えそう。

そのようなポリマーは幾つかの過程によって作られていたかもしれない。例えば、(酵素を含む) たんぱく質は、個々のアミノ酸が結合することで作られていたかもしれない。また、RNAの単純な前駆物質は、幾つかのヌクレオチドが一続きになって作られていたかもしれない。ヌクレオチドはRNAとDNA両方の基礎的要素である。最終的に、ポリマーは、初期から存在している分子を用いて作られる、すなわち、その生成のための鋳型としての機構であったかもしれない。

一つ目の可能性として、アミノ酸が一続きになること

は、脱水反応と呼ばれるもので実現される。二つのアミノ酸分子は、それらの内の一つが、一つのHと他のOH化合物がある場所で、結合することができる。その結果、ポリマーの生成と水分子の解放が起こる。水はポリマーから追いやられるので、ポリマーは脱水する。この種の反応は、必要最低限の水がある環境において起こる。なぜなら、水の存在は他方向への反応を促進しがちであるからである。水はポリマーと結合し二つの分離したアミノ酸を生む。もし我々が薄い有機物スープをから始めると、脱水反応は浅い水の潮溜まりで起こるかもしれない。そこでは、水が蒸発し有機分子が後に残される。それは、温暖で相対的に乾燥した環境でも起こりうる。この場合もやはり、水が蒸発しポリマーが残される機会がある。

2番目の事例として、初期RNA分子はその構成成分から直接構築されるかもしれない。RNA分子とDNA分子は糖とリン酸塩の集団を交互に並べて構成された基幹を含む。この基幹には他の分子が付着している。付着された塩基はプリン^{*5}(アデニンとグアニンで、省略表現はAとG)とピリミジン^{*6}(シトシンとチミンおよびウラシンで、省略表現はC、T、およびU)である。熱すると、リボースとプリンの混合物は互いに反応しヌクレオシドを形成するだろう。ヌクレオシドはRNAの構築物であるヌクレオチドに密接に関連している。しかし、リボースとピリミジンの混合物はそうならず、正確な構築物を作ることは不可能である。適当な条件下では、ある分子がプリンとピリミジン分子両方を作る触媒となりうるが、これらの条件は非常に限定されており、おそらく全生物地球に対して当てはまらなかっただろう。初期生命は遺伝情報を渡すためにプリンだけを使い、後にピリミジンが加えられたのだろうか？

結局、RNAに似た分子を作る鋳型として機能できる、生物ではない何かが存在したのだろうか？RNAがDNAから作られるとき、あるいはDNA分子が複製されるとき、DNA分子の半分は鋳型として働く。そこでは、より単純な分子が化学反応によって付着して新しい分子を作る。これは、分子を作るための最初の鋳型を必要とするので、我々を“卵と鶏”の問題に押し戻しそうだ。もちろん、初期鋳型はRNAに似た分子である必要はなかった。それは複雑な半反復的構造の鉱物のような無機物であったかもしれない。鉱物パイライト(FeS₂)は、粘土鉱物モンモリロナイト[montmorillonite]を持つため、初期鋳型の候補として示唆されている。

パイライトは生存に適した鋳型物質を作るかもしれ

ない。なぜなら、原子レベルで見ると、鉱物表面が有機分子を結合させることができる正電荷を含んでいるからである。パイライト表面に付着している一組の有機分子は、互いに結合して、RNAのようなより複雑な分子を作るかもしれない。加えて、パイライト分子の生成と、自由電子の形成でエネルギーが解放され(図6.4^{*7})、これらの電子は、単純な分子の結合を引き起こし、より複雑な分子に至るエネルギー源として用いられる。これは、生命の形成において進歩を誘引するような、複製に先立つ代謝の例かもしれない。

また、モンモリロナイト粘土の表面はRNAのような分子が最初に作られた場所なのかもしれない。粘土分子は典型的に分子構造の層から成り、その表面は原子の繰り返しのパターンを含んでいる。有機分子はこれらの場所に束縛しうる。考えようによっては有機分子同士が可能かもしれない。本質的に、粘土表面は付着分子の繰り返しパターンの形成を引き起こす触媒として働く。最近の実験で、RNAのような分子が溶液中でこの手法で作られる、ことを実証した。

この議論は、前のどんな議論よりも“~したかもしれない”と“~することもあり得た”と表現されている。実際、我々は、最初の生物学的存在が造られた過程が何であるかを、知らない。我々は、RNAが遺伝情報の転移のための主機構としてDNAの前にくることと、より単純で短い分子が遺伝情報を転移させる、あるいは新しい分子の構築を制御するものとしてRNAの前にくるかもしれないことを、想像する。これらの遺伝情報のキャリアー間の転移機構はおそらくDarwinの進化のようもの適者生存[survival of the fittest]に非常に似ていただろう。しかし、RNA以前に存在した分子と、それらの生成とRNA分子への進化に関する化学は、知られていない。同様に、我々は、DNAが初期RNAの機能複製される時、情報を転移するとき、およびより複雑な生物を複製するとき効果的であるものを受け継いだと、想像する。

“利き手”と膜

十分に理解されていない生命の起源に付随する意見が他に二つある。それらは、生物学的に関連した分子の“利き手[handedness]”と、細胞の内容物を閉じ込める役割をする膜[membranes]の起源と、に関係している。

^{*7} [図6.4] 溶液中の有機酸が、鉄を含む鉱物表面のパイライトの形成によって、どのように還元されるのかを示した概略図である。この過程は炭素を還元してより複雑な有機分子を作ることができるエネルギー源を与えるだろう。(Wächtershäuser, 1988より)

^{*5} ヘテロ環状化合物

^{*6} ヘテロ環状六員環

3次元構造をもつ分子は、右手型 [right-handed] にも左手型 [left-handed] にもなりうる。右手型の分子と左手型の分子は、人間の右手と左手と同様に、互いに鏡像 [mirror images] である (図 6.5^{*8})。分子内の原子によって作られる化学結合を支配する力はほとんど完全に左右対称であるため、右手型と左手型が同量存在することが期待される。しかし、生物においては、一般的に右手型と左手型が共存することはない。例えば、RNA 分子と DNA 分子の基幹は右手型のみで形成された糖を含んでおり、生命によって使われるアミノ酸は左手型のみ存在している。誤った利き手型の分子は生物学的システムにおいて機能しない。

生命のこの利き手はややこしい。なぜなら、生命の前駆体としての有機分子を作るために我々が論じる非生物学機構の全てが、右手型と左手型の分子を等量生成するからである。加えて、隕石や彗星によって地球にもたらされる有機物はたいてい左手型と右手型分子を等量含んでいる。地球上の生命の利き手はどこで生じたのだろうか？

重要なのは、右手型分子と左手型分子が同数存在していたとき、既存の分子から新しい RNA 分子と DNA 分子が形成されないことである。なぜなら、“誤った”利き手分子はそれらを正確に形成し続けるとされるためである。分子が新しい利き手を持っている場合のみ、それらは形成しうる。しかし、全ての分子が同じ配向性である限り、生命が反対の利き手分子を用いて存在できないと考える根拠はない。初期生命は左手型の有機物と右手型の有機物を含み、偶然要因 [random factors] で最終的に一方が他方を支持したのだろうか？あるいは、右手型と左手型分子の間の競争は、生命の起源以前に一方が他方を支持し、生命が形成されたとき、組み込む分子の利き手はどちらか一方のみだったのか？

二番目の意見は、細胞を囲む膜と関係する。そのような膜の目的は非常に単純である。それは細胞の内容物を外界から隔離し、酸化還元反応 [redox reactions] を起こすのに必須の電荷分離 [charge separation] を可能にする (5章参照)。これによって、細胞は、DNA と RNA を他の細胞のそれらと区別して共に維持し、生き残るために求められる栄養と化学物質の源を濃集し、それらを細胞外へ押し出すことで無駄な副産物を捨てることが可能となる。細胞膜は水中で溶解できない必要

があるかもしれないが、水と他の重要な分子を透過する必要はあるだろう。

現代の生物における細胞膜は主にリン脂質 [phospholipids] と呼ばれる二重層から成っており、層内にタンパク質が混じっている。リン脂質は脂質と似ている複雑な分子である。それらは、一端が、容易に水には溶けない炭化水素鎖 [hydrocarbon chain] から成っている。その他端は、部分的に帯電し水を引き付けるリン酸基 [phosphate group] である。二重層が存在することで、これら各々の分子が、二重層の内側で炭化水素鎖、外側でリン酸基で並ぶことを可能にする。その分子は互いに強くは結合していないので、例えば、栄養素は一方から他方へ通り抜けることが可能だ。二重膜内のたんぱく質の存在は、膜を越えて運ぶ手助けとなる。エネルギー源として ATP を用いることによって、タンパク質が膜を越えて分子を活発に送り込むことができる。また、タンパク質が化学物質に対する外部の結合形成場所として作用し、細胞内で化学反応を引き起こすことができる。

細胞膜が元々どのように形成されたのかは知られていないけれども、興味ある提案が2つある。一つ目は、小さな丸い膜の囲いが、水中でアミノ酸を熱することによって、自然に形成できることである。アミノ酸は、それら自身同士が化学結合を形成し、組織化して球状構造になる。これらの“プロテノイド・マイクロスフィア [proteinoid microspheres]”は一般的に直径1マイクロンであり、その内部に有機分子を囲むことができる。二つ目は、熱せられたとき、多様な有機ポリマーの混合物は、一定の体積を囲む有機化された集団も形成することができる。これらの“コアセルベート [coacervates]”は直径500マイクロンまで及び、有機分子を外界から分離することもできる。

これらタイプの構造は最初に分子が複製されるとほぼ同時に自然に生じたのかもしれない。それらは、有機分子の濃集と化学反応を促すための適切な手段を備えており、最終的にそれらが細胞になる時、分子の複製活動へと組み込まれたのかもしれない。しかし、現代の細胞膜はこれらのどちらかに似た物質で構成されてはならず、現代の膜への変化がどのように起こったのかを想像するのは困難である。

地球の初期の歴史と生命の起源

こんなに隔てられていると、先に論じた環境的制約を伴って、生命の起源に対して考えられうる機構の議論を統合することは可能だろうか？特に興味があるのは、巨大衝突による環境への影響 (2章) と、生命の共通祖先が超高温性 [hyperthermophilic] であり、今日の

*8 [図 6.5] アミノ酸アラニンの右利き ('L') と左利き ('D') の例である。“楔形 [wedge]”は CH₃ が平面より上にあることを示している。一方、“破”線は平面より下にある原子を示している。これらの分子は互いに鏡像である。生物学的有機体はアミノ酸の 'L' 型と糖の 'D' 型のみ利用する。

地球表層に比してとても暖かい水中で繁栄していたと示唆している証拠(5章)である。

地球初期における巨大衝突で最もダメージを与える効果の一つが、衝突による熱の能力であり、海洋の水の幾らかあるいは全てを蒸発させることを思い出そう。直径100kmほどの物体による小さな衝突は、海洋の上層部を蒸発させるだろう。直径500kmを越えるような大きな衝突は、基本的に海洋の全てを蒸発させるのに十分なエネルギーを与えるだろう。小さな物体はたいへい大きな物体よりも一般的なため、存在している原始生命にとって最も安全な場所は、海洋底であっただろう。そこで、彼らは大きくて稀な物体による影響から最も守られたであろう。存続するのに最も危険な場所は、潮溜まり [tidepools] や小池 [small ponds] のような浅海域 [shallow water] であっただろう。これは明らかに、我々が論じた可能性のある環境すべてにおいて生命が生じようとしたのなら、海洋底熱水システムの一部のような深海で生まれた生命は、生き残るのに絶好のチャンスを持っていただろう、と示唆する。

前章で論じた現代の種間の隔たりに関する情報は、地球生命の共通祖先が超高温性であり、おそらく60°Cを越す温度の水中に存在していたであろう、と示唆した。これは生命がそのような温泉で生じなければならなかったことを意味するわけではないことを、思い出そう。単純なシナリオは、生命は暖かい環境で生じて、その後そこから移動した、というものだろう。もちろん、生命が浅海域で生じ、その後海洋底の温泉を含む多様な環境に適するように進化した可能性もある。巨大衝突イベント時に、温泉に生存していた生物相 [biota] は生存の最大の機会を持っていたのだろう。

初期地球表層の全球的温度が85°Cであったかもしれないという事実は、おそらくこの議論を変更しないだろう。4章で論じたように、そのような高温は厚いCO₂の温室大気 [greenhouse atmospheres] の存在によってもたらされるかもしれない。有機分子の形成と生命の形成の機構に関する殆ど議論は、今日のような温和な温度には依存せず、高温であっても成立する。

結びのコメント

これは我々をどこへ放置しているのか？もし、地球上の生命の起源を理解するために、適当な化学環境を再現し、生命あるいは生命に似た振る舞いができる分子を作ること要求されるなら、我々はまだ生命の起源を理解していない。そのうえ、現代の(あるいは古代の)生命の前駆物質かもしれない分子の生成に最も近づいている化学反応の多くは、非常に特殊な条件を求められる。これらは実験室で満たされるが、おそらく前

生物的地球の汚い環境では達することができなかっただろう。

これは必ずしも、生命の創造が途方も無くありそうもない出来事であった、あるいは生命の地球外起源(パンスペルミアあるいは超自然的存在 [supernatural being] の介入)を用いなければならない、と意味するわけではない。それが意味している事は、我々が最初に生命が生じた段階をまだ明瞭に理解できていない、ということである。しかし、我々は生命の起源が存在した有望でもっともらしい境界条件を理解している。加えて、もっともらしい化学過程の理解における過去20~30年間の進歩は、生命の起源が非常に容易な方法で起こりそうだったことを示唆した。

我々は地球上の生命の起源を完全に理解することは、おこりそうにない。生きてない生物以前の化学から、情報の受け渡しを通しての複製、適者生存というダーウィンの進化論を通じての変化、エネルギーを代謝し、それを用いてこれらの機能を実行する能力がある存在への転移は、ほとんど確実に急な転移ではなかった。むしろ、それは長いステップを含めなければならなかった。長いステップとは、これまでにほんの僅かだけが定義され描かれたものと、さらに僅かではあるが実験的に証明されたものである。

だけれども、非常にはっきりしている一つ概念が、生命は瞬く間に生まれ瞬く間に進化した、ということである。おそらく39億年前頃には、地球の状況は生命が生存し続ける助けとはならなかった。化石記録 [fossil record] によって、35億年前頃に今日の生物と全く変わらないように見える生物が存在していたことが示されている。これらの生物はエネルギーを蓄えるために分子ATPを利用し、複製中に遺伝情報を渡すためにDNAとRNAを利用していたのでだろう。生命が急速に現れ、非常に洗練された状態へ急速に進化するためには、生命は非常に丈夫でなければならない。生命は適切な化学環境で容易に形成できなければならない。結局のところ、この見かけの丈夫さは、現在でも太陽系内の他の惑星あるいは他の恒星の周りの惑星において、生命が生まれ存在しているかもしれない、と我々を信じさせる駆動力となる。