

地球外生命の必要条件

生物は地球で生物が継続的に存在できるようになった後、とても早く発生したにちがいない。地球ができてから生物が存在するまでの期間は、1億年ぐらいの誤差があるが、せいぜい10億年以下だろう。地球での生物の起源の一連の過程は明確には分かっておらず、いまだに実験室で生物の起源を実証することはできていない、しかし、関連したプロセスの基礎の理解はしていると考えている。生物の起源には適切な環境下での簡単な化学反応が伴われることを、あらゆる点が示している。原始地球の生命を作り出した性質が、地球に特別だったり独自のものであったと考える理由はない。実際、もし私たちの銀河の星の周りに惑星が普通にあったならば、地球で起きた生物を発生させる過程が、いくつかの惑星で同様に起きているだろう。太陽系や宇宙に生物を探しに出かけようとするときに、生物を発生させた地球の性質を簡潔に考えることや、他の生物がいる世界には何が重要になるのだろうか、ということを一歩一般化しようとするのは有益である。これは地球外生命を探すためには、どのような種類の環境を探すべきかという知識を与えるだろう。

生命が存在できるだろう惑星には、それを満たすためのいくつかの条件がある。それらの多くは、1964年に全米科学アカデミーの100周年を記念して発行された、George Waldの古典的な論文の中で議論されている。それには液体の水の存在、生物が代謝や繁殖を行うときに必要な成分の存在、生物相が得られるエネルギー源、それに生物相が継続的に存在できる十分安定な環境などが含まれている。

液体の水無しに生物を考えることは難しい。確かに、液体の水の存在は地球の生命の存在にとって最も厳格な条件の一つであるように見える、それは生物にとってなくてはならないものである。多くの宇宙生物学者は生物を探すことは液体の水を探すことと大方等しいと信じている。水は栄養に富むものや廃物を溶解することができる媒体として、化学物質を運ぶ媒体として、そして化学反応物そのものとして働く。

液体の水が他の液体と一線を画す特別なものは何だろうか。2つの性質が特に観察されている。1つ目、水は広い範囲の温度で液体であり、その沸点が複雑な有機分子が存在できる最高温度に近い。液体の水が存在できる温度の範囲は、地球表面では0 から100 である、範囲の高いほうの端（理論的には、水蒸気と大気圧がつりあう温度）で水は沸騰し、低いほうの端で氷になる。適当な状況下では、水は端よりさらに低い温度（例えば塩が溶けている海水）や、高い温度（圧力で閉じ込められる場所、深い地殻の間や海の底）でも液体でいることができる。

生物を安定させる液体の、もっともらしい候補は他にもある。例えばアンモニア (NH_3) やメタン (CH_4)、それにエタン (C_2H_6) がある。しかし、これらは液体でいられる温度の範囲がとても狭く、またその温度はとても低い（図 7.1）。エタンはだいたい100 の範囲で液体でいられるが、アンモニアとメタンはかなり狭い範囲でしか液体でいられない。これらのどれもが -33 （標準的な大気圧のもとでは）を超えると、液体として存在できない。アンモニア、メタンそれにエタンはみな水より低い温度で液体である。これぐらい低い温度では、考えられる生物相間の化学反応がずっと遅いペースで進む。一般に10 下がるごとに、化学反応の速度は2分の1倍になる。これから、アンモニアが液体である -40 では、室温と比べ化学反応がおよそ64倍遅くなることを見積もられるだろう。このような遅い反応速度では、地球の生物を発生させる化学的な過程が、地球の年齢に匹敵する時間で完了できるかどうか明らかではない。もちろん、液体の温度がいつ

そう低いメタンやエタンの温度では、反応にさらに時間がかかる。

図 7.1 : 生物の出現に媒体として働くかもしれない液体の沸点と融点。

2つ目の水の性質は氷の密度が水の密度より小さいということである。つまり氷は水に沈まず浮くのである。この振る舞いの理由は水分子に特有の性質による。水分子は融点のほんの少し上の温度で、隣接した分子と水素結合をする。水素結合は化学的に弱い結合で、ある分子中の水素原子が他の分子中の酸素原子に付着したときに起こる。その結果水分子は大きな規模の格子に、特定の方向性を持って共にはめ込まれはじめ、そして効果的に密集することができなくなる。この隙間の多い構造のため密度が低くなり、氷は水に浮く。これから、氷は極域の海に浮きながら存在することができ、広い範囲の表面温度で安定でいられる。もし惑星が冷えた場合、それへの反応として少量の氷しか作られないだろう。もし惑星が暖かくなったら、ある程度の氷が溶け始めるだろう。もし、氷が水に浮かばず沈むとしたら、冷えている惑星では氷が作られそれが沈んでいくだろう。それが多量の水を表面にさらすことになり、より多くの水が冷やされ氷になり沈んでいき、その結果世界の海全体がすぐに凍りつくだろう。

水は3相 - 固相、液相、気相 - すべてが、様々な気候の状態で共存でき、その領域では特徴的な物質になる(図 7.2)。アンモニアや、メタン、エタンはこの性質を持たない - 固体が液体に沈むので、3相が共存するという筋書きを想像するのは難しいだろう。そしてこれらの液体の海や湖が存在するだろうが(例えば、土星の衛星のタイタンなどで)、これらは広範囲の温度で安定ではないだろう。

図 7.2 : 水の相図。固体、液体、気体が安定的な領域を示している。火星の典型的な温度では液体の水は存在できない

水には他にも性質がある。それは他の場所ではどうか分からないが、地球の生物にとって大変重要な性質である。水は極性分子である、これは分子内の電化(負の電荷の電子と正の電荷の陽子)が対称的に分布していないことを意味する。他の極性分子は水に溶けるが、無極性分子(電荷が対称的に分布しているもの)は溶けない。例えば、油や多くの長い鎖を持った生物的炭化水素などは決して溶けない。地球の生物にとってこの事実はものすごく重要である - もし細胞の周りがある膜や壁に極性があれば、水はそれらを壊してばらばらにすることができるだろう。これらの膜が細胞の外側と内側を分けるように働くので、細胞が元のままでいられ、その機能を果たすにちがいない。地球上の生物の細胞壁などは、長い鎖状の無極性の炭化水素で作られるには、水中で細胞が安定でいられるようにしている。

他の惑星で、液体の水が存在したとしても、生物が無極性分子で作られた膜か細胞壁を持たなければ発展できないだろう。では、他の惑星が無極性分子のメタンやエタンの海を持っている場合はどうだろうか。細胞が地球のような無極性分子の膜をもつならば、それらに溶けてしまい、生態の機能を果たすことを妨害されるだろう。しかしながら、無極性の炭化水素の鎖に、単にHやOH錯体を適切な場所に付加させれば、極性分子にすることができるだろう。このような極性をもつ炭化水素の鎖で、生態の他の機能を排除するかもしれないものはない。そういうわけで、無極性の液体の存在が生命を否定することはない、しかし、無極性の液体が存在するなかで発展する生物は、地球の生物とは根本的に違う化学的な構造を持つだろう。

生物はメタンやエタンのような液体中でも存在できる能力を持つ、しかし、それでも他の要素は水のほうが

生物を助けるのにより適していることを示している。他の惑星中の水は多様な場所で存在できるだろう。水は海だったり（地球のような）、孤立した湖や池、地下水として存在できるだろう。水が表面に存在するためには、その場所の環境がいくつかの条件を満たす必要がある - 惑星は水が液体でいられるほど温かくなくてはならないが、全てが蒸発して大気になってしまうほど熱くてもならない。水が表面の下に存在している可能性もある、それは水が火山活動で熱せられる熱水系に含まれているということである。水は惑星を構成する一般的な成分であり、火山活動によって少しずつ解放されている。この火山水は地表への道をあがってこなくとも、地表面下に存在し、内部の火山活動によって熱せられる；生物相はこれを使うことができる。もちろん、地表面下の水とその生物圏は、宇宙探査機や望遠鏡を用いたとしても、容易には観察できないだろう。

生物には、水も含めて、生化学的な反応に関係することに使われる全ての成分の存在が必要である。驚くべきことに、宇宙に自然に存在する 92 の元素のうち、21 の元素だけが、地球の生物に対して主要な役割を果たしている。主要な親生物元素は炭素 (C)、水素 (H)、酸素 (O)、窒素 (N)、硫黄 (S)、それにリン (P) である。他の重要な元素にはナトリウム (Na)、カリウム (K)、マグネシウム (Mg)、カルシウム (Ca) それに塩素 (Cl) がある。生体中の微量元素にはマンガン (Mn)、鉄 (Fe)、コバルト (Co)、銅 (Cu)、亜鉛 (Zn) があり、またいくらかの生物はホウ素 (B) やアルミニウム (Al)、バナジウム (V)、モリブデン (Mo)、ヨウ素 (I) を使う。重要性は低いが、生物には他の元素も含まれる。例えば珪素 (Si) は珪藻や放散虫のような単細胞生物の多くに豊富に含まれ、ニッケル (Ni) は様々な生物で触媒として働く、さらに臭素 (Br) は多数の海の生物に使われている。

ちなみに宇宙で豊富な元素は、多い順から H、He、O、C、N、Ne、Si、Mg、Fe、S、Ar、Al、Ca、Ni、Na となっている。地球地殻に多く含まれる元素は同様の順に O、Si、Al、Fe、Ca、Na、K である。生物がこれらの豊富であるという利点をもった元素を選んだのではなく、むしろ、有利な化学的特性を持つ使いやすい元素を選んでいることは明らかである。最も重要な四つの親生物元素 H、O、N、C はそれぞれ電子 1、2、3、4 個を得るまたは失う化学反応によって、電気的安定を得られることが分かっている。その上、どれもこのようなことが可能な原子の中で、もっとも小さい原子である。大きさが小さいと強い化学結合を作れる。他の元素でこの化学結合が作れたとしても、その大きさのために安定度が低くなるだろう。また C と N と O には 2 重か 3 重結合を作れる性質があり、そのため多様な分子をつくることができる。

珪素は炭素のような長い鎖を作る能力から、生物の基礎の中心をなしている炭素のもっともらしい代わりになるのではないかとたびたび提案されている。宇宙全体では珪素は炭素ほど豊富にはないが、地球の地殻にはとても豊富に存在する。珪素はこの役割を果たせるのだろうか。おそらく無理だろう。珪素は炭素が作る方法で二重結合を作ることができない。炭素の二重結合を作る能力によって、二つの酸素原子と結合し二酸化炭素をなすことができる。この形だと炭素は気体として存在でき、水に溶けることもできる。この大気や海洋を動ける能力がなければ、生物に容易に使われることはなかつただろう。一方 Si-O 結合は単結合である。その結果、珪素と酸素は結合できるが、三次元鉱物水晶のような、広がった構造になる。珪素は他の元素と、地表に存在できる化合物をなすような結合をしない。実際、シリコンが気体として相当な量存在できるような状況で、同時に生物が存在できるような状況はない。さらに、珪素は水に溶けられるがとても量が少ないので、役に立つ量になることは決してない。

珪素には他にも問題がある。珪素は炭素と同様の様式で鎖を作るが、珪素原子同士の結合が炭素原子同士に比べ緩く弱い。そして、他の原子と結合可能な場所があるため、珪素原子が基盤になっている鎖状の分子は酸素や、アンモニア、水との化学的作用の影響をより受けやすく、分解してしまうだろう。こういった理由か

ら、珪素は生物の基盤として炭素よりまったく安定しない。

珪素は地球だけでなく隕石中や、星間空間、他の星でも見られる。宇宙にとっても広く分布しているので、どこかでは生物の基盤として適しているかもしれない。

エネルギーは、生物が生化学反応を行うのに使える形で、手に入れられなくてはならない。もし、地球で生物が発生したり、今日地球の生物が生息することが可能な場所を調査すると、使われている、または使えるかもしれないエネルギーの様々な形が分かるだろう。それには以下のものがある、太陽光、光合成をすることで；稲妻や放電、稲妻によって作られた生体分子の代謝をすることで；熱水系の熱、化学的相互作用によってできた有機物や還元種の使用を通して；化学的エネルギー、地殻や水素ガス中の多くの成分、または地殻の相互作用によって作られるメタンなどを含く、環境の酸化を通して。

こういった種類の惑星環境が、これらの使うのに便利な形のエネルギーを生物に与えるのだろうか。多種多様な可能な環境でそのなかの一つは著しく働いていただろう。地熱のエネルギーは固体惑星に広範囲に存在するに違いない。このエネルギーの根本的な供給源は惑星が形成されたときに発生した熱と、地球内部の放射性元素の崩壊による熱である。(木星の衛星イオには、潮汐エネルギーの散逸による熱源がある、このことは13章で議論する。)地球だとこのエネルギーは、主に地殻中の水の移動を介し、異なる温度領域で循環する。温度変化による不均衡は化学反応を駆り立てる。

私たちは、多くの惑星が経験する地質学的過程の活動が地熱のエネルギーをつくるだろう、と考えるだろう。ここでは熱がすぐに宇宙へ伝導して冷却するのではなく、長い期間熱を保っていられるほどに十分大きな惑星を考える。どれだけ大きければ十分だろうか。地球の月でさえ、形成してからの10億年かそこらの間は地表で火山活動をするほどの大きさである(もちろん月は、大気や水圏を保つにはあまりに小さい)。しかしながら、月の大きさだと、すでに熱の大半を失っていて、そのうえ表面では30億年近く火山活動をしていない(図7.3)。火星ぐらいの大きさの惑星は、45億年間火山活動を続け、十分な大気を保つと考えられる。火星と同程度かそれより大きい惑星は、生まれつき生物を支える能力を明らかに持っている、実際どうなるかは気候史しだいである。

図7.3：地球型惑星の火山噴火率と時間の関係。全噴火率は貫入と噴出の噴火を合わせたもので、全体を噴出率の8.5倍と仮定している。地球の過去の噴出率は現在の噴出率の最もよい推量値に、火山噴火率は地球内部にある放射性物質の熱の生産率に比例するという仮定を用いて、計算されている。今日では、金星の噴火率は上限である、なので実際の値は図に比べて数倍下を行くだろう；過去の金星噴火率は地球と同じ方法で推量している。点線を用いたのは、断続的で大規模な火山の金星の表面を覆う活動が無活動な時期を間に挟みながらあったということが、不確かだと考えているためである。火星の過去の噴火率は、調査された時間の関数としての噴火率を元としている、これには全体の量と地質的単位年代の最もよい見積もりを用いている；35億年前より古い噴出率は火山性物質の表面の理解が難しいために不確かである。月の噴出率は平均値を描いている、その平均値は38億年から31億年前の間に噴火が起こったと仮定して、火山性成分の総量から決定されている；これより若い火山性物質は無視されている。

稲妻や紫外光を伴う過程では、大気と水圏の存在も同様に重要である。このエネルギー源は共に惑星大気における化学反応の要因となることができる。

化学エネルギーは初期の地球生物に、環境中に存在していただろう生体分子の代謝だけに利用されていたであろう。生体分子は大気や熱水系で作られたり、星間空間からの供給されたりして（6章）使いやすかったに違いない。硫化水素や水素のような他の還元分子の代謝もまた可能である。これらの分子は火山中心や熱水系と関連していて、地殻が取り巻く環境では水と鉱物の化学的相互作用によってさえ作ることができただろう。

最後に、何度かほのめかしたが、明確には書かなかった環境の安定性という問題が残っている。ここで言及することは、地質の安定性や、気候の安定性、それに破壊的な影響がないことである。私たちはこの重要性を、起こりうる巨大衝突の話（2章）のところで見た。これは温度や、水の利用、日光の利用に突然で劇的な変化を起こす原因となる。明らかに、隕石の衝突率が最初の値からある程度下がらない間は、地球の生物は継続的に生きていられなかった。地質年代でも巨大な衝突はときどき起こったが、その時でさえ、環境に重大なインパクトを与えた。私たちの太陽系での隕石の衝突率は、外惑星の重力の影響を受け、ほどよくなっている（2章を見よ）。木星や土星を持たない他の恒星系では、地球のような惑星はあまりに砲撃されすぎて、生物を持続させることはできないだろう。

生命に対する壊滅的な影響のもう一つは、太陽からの紫外光によるものである。波長が0.3ミクロン以下の光は生体分子の分子結合を破壊することができる（可視光の波長は約0.4 - 0.7ミクロン）。実際、全太陽紫外フラックスを照射するならば、すぐに多くの生物を殺し、表面を不毛にすることができる。これは以下から示される、例えば NASA の長期宇宙環境暴露試験施設（Long Duration Exposure Facility）、地球軌道の宇宙船が宇宙での照射の効果を考慮して設計されていること；宇宙で長い間座っていると、外側の表面はかなり効果的に消毒される。身近なところで、私たちは皆太陽の紫外光を照射したときのダメージ効果をよく知っている - 肌の生体分子を破壊し、癌への変異の引き金となる。

太陽から来るエネルギーの総量は、その昔現在より30%少なかったにもかかわらず、そのときの紫外光の出力は桁違いに大きかった。現在の地球大気では、成層圏にあるガス状のオゾン（ O_3 ）がほんの少量の紫外光は通過させるけれども、光のダメージの大部分を吸収し、表面を守っている。初期地球上で、生物はオゾンがなかったとしても、とても厚い大気に部分的に守られていたに違いない。しかしながら、泥や水のごく浅い層の下に住んでいる生物が、かなり効果的に守られていただろう。（興味深いことに、大気中の酸素量が増加するまで、地球の生物は陸上に移住しなかった。有り余るほどの酸素の存在が、オゾン層を作ったのだらう。）液体の水を表面に持っていた、または地表の下に生物が住んでいたいくつかの惑星は、紫外光のエネルギーから守られていただろう。もちろん、完全に表面の下に住んでいる生物は、繰り返しになるが、大変発見しづらい。

結びの言葉

上記で考えた問題は、地球で見られる条件が生物にもっとも安定で適しているように見える。これは特に液体の水があることと、生物の基礎に、他の物質例えばシリコンを使うのではなく、炭素を使っていることにあるだろう。これらを単に十分な条件ではなく、必要不可欠な条件だと考えるのには正当な理由がある、とはいえ、これらを過剰に考えてはならないことに注意しなくてはならない。なぜなら、私たちは宇宙

の中のたった一つ、地球上でしか生物の例を持っていない、つまり生物に必要な条件を一般化することは極めて危険である。それに地球の生物の中でも、様々な問題の簡単な解決策が常に選ばれるとは限らない。どこかにいる生物は地球のものとは違うかもしれないという可能性を、私たちは持ち続けるべきである。重要なことは、偏りのない考え方を持ち続け、どこか他の場所の生物に起こりうることを決して制限するのではなく、偏りのない考え方を伸ばしていくことである。例えば、水は宇宙で最も豊富で最も揮発性だが、水の変わりに他の液体が存在する場所もある（例えば土星の衛星のタイタン表面）。このように、他の液体や化学が存在できるのだから、生物が存在しているかもしれない、と想像できる場所の数は簡単に増える。しかしながら、私たちは、たいてい、保守的な方法を用いて、私たちが知っている条件にあった、存在するだろう生物を生み出す場所を探すのだろう。

私たちは今、生物が要求する条件に関する私たちの結論をどういった場所で生物が生まれそうか、またどういった場所で現在まで生物が生きていられるか、という議論に適用し始めることができる。私たちはまず私たち自身の太陽系に焦点を当て、液体の水が現在存在する、または過去には存在したであろう場所と、生物の発生を招けそうな条件の場所を探すだろう。当然、間違いなく見られるだろう場所は火星である、火星は地質年代において時々だったにせよ液体の水が表面に存在していた。しかし、私たちの太陽系には他にも同様に興味深い惑星がある。私たちは、私たちの太陽系の外で、他の恒星を回る惑星を探し、それらがどれだけ大量にあるか、どういった性質を持つのか、生命を支える能力を持つかどうか、を議論するだろう。