

1 宇宙に生命を探す

宇宙に生命を探す

太陽系のどこか、あるいは宇宙のどこかに生命が存在するかもしれないということは非常に興味深い問題である。その答えがどうであろうと、つまりよそに生命が存在しようとしてまいと、我々の世界観は大きく影響を受けるだろう。例えごく単純な形態であっても他の世界に生命が発見されたら、それは生命の起源が地球に特有なものではないことを示すのである。我々より発達し、洗練された知的生命体が存在するか否か思いをめぐらせずにはいられないし、人類が選んだ社会という形態が最良の形態かどうか考えることになるだろう。また、自分たちの存在が唯一のものではないと知るとは人類を謙虚にさせるできごとになるだろう。一方、他の生命を示す証拠がまったく得られなかった場合には、地球と地球上の生物を広い宇宙に唯一の特異なものとして注目するのかもしれない。この考えは哲学者バートランド・ラッセルやSF作家アイザック・アシモフによって上手く表されている。「可能性は二つ。我々は唯一のものかもしれないし、そうでないかもしれない。どちらも同じくらいにおそろしい。」

いまの世代は地球上の生命の起源や宇宙のどこかに生命が存在する可能性について科学的方法を用いて考え始めた最初の世代である。地球の生命起源について詳細はわかっていないが、初期生命をとりまいていた状態については多くの知識を得た。さらに、太陽系の他の惑星や系外惑星の探査を始めた。太陽系のほとんどの惑星には探査機が訪れているし、人間は月面を歩いた。他惑星の気候やそこでの居住性についてはだいぶ明らかになってきており、他の生命の探査が始められるようになった。1970年代後半には宇宙探査機パイキングが火星の生命を探すのに使われたが、何もみつけれなかった。しかしいまでは、パイキングは探し場所を間違えたか方法を誤ったのではないかとされている。

1995, 1996年に他の恒星のもつ惑星が発見されたことは他の惑星系における生命に関する疑問へと発展する。生命が存在する惑星の存在が予想されているが、こういった予測は観測ではなく理論に基いたものである。実際の発見は非常に重要なものなのである。新しく発見された惑星の大部分が地球型ではなく木星型であっても、その発見はすべての惑星に適用できる理論を構築するのに利用できる¹。もちろん、固体表面と大気、液体の水が表面に存在する地球型惑星が系外に存在することが期待されている。しかしまだみつからない。しかし、木星型惑星が存在することは、地球型惑星を探す意欲をかきたてる。

生化学の理解における近年の発展もまた地球外生命体の探査に火をつけるものである。生物が我々が今まで考えていたよりもゆるい環境条件で、より多様なエネルギー源をもとに存在できることを示すからである。また、地球上の生命の起源となりうる場所をいくつも示してもいる。地球の生命が誕生した場所は特定できていないが、別の場所で誕生した生命をもつ惑星が他にもあることが考えられるのである。地球上での調査から得た知識

¹木星型と天王星型がみつまっている。

に見られるほど生命が柔軟なものならば、太陽系内外の多様な惑星で生命が誕生し、存続しているかもしれない。天文学と惑星科学が太陽系と宇宙に対する見方を広げたように、生物学の発展は宇宙における生命の可能性を広げてきた。

この本の目的は、地球外生命の探査で得られる科学的事実を大きくとらえる方法を伝えることである。今日では惑星がどのような性質をもっていれば生命を維持しうるかについて過去のどの時代よりも知られている。まずは地球以外に生命が存在することを示す決定的な証拠はまだ得られていないというところから始めなければならない。これは、よそに生命が存在しないことを意味するのではなく、探査がまだ始まったばかりであるというだけである。科学探査の手法は、これらの疑問をきちんと扱うだけの域に達しつつある。生命の証拠が得られていないことは、生命が存在しない、あるいは他には生存しえないことを示唆するものではなく、情報の不足と捉えるべきである。

地球外生物を扱う宇宙生物学(生物天文学)の分野は広い観点からの知見を必要とする。宇宙生物学では他惑星における生命活動を扱うばかりでなく、非生物学的あるいは生物発生以前の化学過程の発生、宇宙での惑星の分布、全惑星の居住性についても考察する。そうして、伝統的な地学、天文学、惑星科学、化学、生物学の分野を網羅している。宇宙生物学は科学の全側面に関わる学際的な分野である。さらに、地球外生命体の探査結果が示すところによると、宇宙生物学は哲学、神学などといった従来は自然科学の分野とはみなされなかった問題にも関わる。

もちろん、他の世界に生物が存在するかもしれないという概念はいまの世代にとって目新しいものではない。数千年前の古代ギリシャ時代に遡っても、他の世界の存在可能性は激しく議論されていた。どちらの側の主張も大いに発展した。賛成側からみれば、地球と地球上の生物は小さな要素の集合であり、よそでもこれらの要素は同じように集まりうるように感じられる。反対意見によれば、地球は宇宙の中の特殊な場所、「中心」であり、そこに生きる生物は唯一のものであるはずだという。千年ほど後の十六世紀、コペルニクスが地球が宇宙の中心でないことを主張するに至った。そして、星は太陽のような物体だという発見により、それらのまわりに多くの惑星があるのではないかと、そうでなければ星の存在する意味がないのではないかと考えることになった。二十世紀初頭から、火星に発達した生物が存在するという考えが世間に広く受け入れられた。オーソン・ウェルズのラジオ番組「宇宙戦争」でこの発想が脚光を浴び、現在ではよく知られている宇宙人の侵略という概念に火をつけた。

今日では、宇宙に他の生物がいるという見方は広まっている。この見方に関して、一部の人は宇宙には知的生命体が多く存在し、地球は定期的に外部から宇宙人の訪問を受けている、宇宙人はUFOに乗って現れるが存在を誇示することはなく、人間や動物を実験材料として定期的に採取している、と考えている。反対に、地球は生物が存在する唯一のものであり、宇宙のどこにも生命は存在しえないと考える人もいる。多くの科学者を含む大部分の人は両者の間で、地球の生命は物理・化学過程の自然産物であり、宇宙で何回も繰り返されれば生命は生じうると考えている。

他の世界に生命が存在するとしたらバクテリアの形をしている可能性が高いだろうというのが科学者たちの共通認識である。地球上では、まずバクテリアのような単細胞有機物が地球形成後に誕生し、それらが文字通り数十億年にわたって生物圏を支配していた。実際、単細胞より大きな生物の形跡が残っているのは地球生命の生成の二十億年後、今から二十五億年ほど前からであり、より複雑な形態の生物が現れるのは六億年前、地球史の七分の六を過ぎたあたりからである。現在でもバクテリアは様々な形態で地球上にもっとも広く分布している。この本の議論の大部分はこの単純な生命が発生・存続する可能性について着目している。知能が生まれる確率が低いことを考えると、宇宙探査で知的生命体や発達した生物に出会うとは考えにくい。しかし、これは他の生命を見つける意義を否定するものではない。哲学的な観点からも、どんな形態の生物であれその発見は知的生命体の発見と同じくらいの価値がある。生命が一つの世界に集中しているのではなく、宇宙に広く存在することを実証するからである。

この太陽系で生物を発見する可能性が最も高いのは火星である。火星の表面は今日では寒冷で乾燥しているが、過去においてはそうではなかった。地質学的な証拠によれば火星にはかつて液体の水が存在していた。液体の水は生命に不可欠な環境条件とされている。水が豊富にあれば、初期火星の環境条件は同時期の地球の条件と似ている。地球に生命が誕生したこの時期に、火星でも独自に生命が形成されたかもしれないのである。さらに、地球表面への小惑星衝突や、バクテリアを含む岩石の放出によって生命が火星に運ばれたということもありうる。現在火星には生命はみつかっていないが、地球外生命体の探査は依然として重要な目標である。火星に生命がおらず、過去にもいなかったとしても、地球と火星が大きく異なることを理解するためには重要である。

もっとも、太陽系には他にも生命の存在が考えられる候補がある。木星の衛星、エウロパ・イオに生命が存在すると考えられる。イオには水が存在するという明確な証拠はないが、活発な火山活動によりエネルギー源がある。一方エウロパには、表面には氷で、そしてもしかすると地下数キロメートルには液状で、大量の水が存在する。実際には、木星にも大気中に生物がいて、有機物を栄養源として生息しているかもしれないのである。²

もちろん、他の恒星のまわりの惑星にも生命が存在する可能性はある。理論的には(そして今や観測的には)、他の恒星にも惑星を見つけることが予想され、その中に生命の発生と保持に適した条件を持つものをみつけることも予想されている。

この本ではこれから、地球外生命の存在可能性に関する問題を系統的に考察する。もちろん、このような議論は唯一の例としての地球の生命の特性についての知識なしには不可能である。地球上の生命誕生条件についての議論から始めよう。地球形成後の環境条件はどのようなものだろうか。ごく初期の生命とはどのようなもので、地質学的証拠によると誕生当時どのような形状をしていたのだろうか。どのような機能をもっていたのだろうか。当時の環境からどのようにエネルギーを得、どのように代謝や生殖に利用していたのだろうか。どのような環境下なら生物は存在できるのだろうか。これらの問題は生命の起源を

²その他の候補：タイタン、エンケラドスなど。

議論するうえで条件を与える。生命がどのように誕生したかについて明確にはわかっていないが、どのような過程が起こったかについては理解が進んでいる。

地球に生命が誕生する条件がわかってはじめて他の場所の生命についての疑問を扱うことが可能になる。太陽系のどこかに生命は存在するだろうか。まずは各々の惑星について云々せず、もっとも可能性が高くもっとも興味深い地域に注目することにする。火星では生命が誕生しうるだろうか、誕生していたとしたら現在まで生存しうるだろうか。火星起源とされている隕石の近年の解析で火星生物についてなんらかの結論に達しうるだろうか。金星は今でこそ表面が非常に高温で生物には適さない場所であるが、過去のある時点には適していたのではないかと。イオやエウロパはどうだろうか。エネルギー源や水の存在が考えられているし、生命が生息しうるのではないだろうか。生物発生以前の地球大気に似た、有機物に富む大気を持つ土星の衛星、タイタンはどうだろうか。宇宙生物学の一分野にとどまらず、火星の環境を地球の植物や動物が生存できるような地球環境に似せる火星の「地球化」の実現可能性についても簡単な議論を展開することにする。さらには道徳的、倫理的な問題を扱う。

最後に、太陽系の外の宇宙に目を向けることにする。恒星と惑星の形成についての知識をもってしても惑星、特に地球型惑星は一般的なものと言えるだろうか。これまでに発見された惑星の特徴はどういう点にあるのか、その特徴から惑星形成過程について何が言えるのか。他の恒星に惑星、特に地球型惑星を発見する見込みはどの程度のものだろうか。生命に必要とされる条件から、他の惑星を生存可能にするためにはどのような条件が必要なのだろうか。居住可能惑星は多く存在しそうか、まれな存在なのだろうか。宇宙のどこかに知的生命体がいる可能性はどの程度のものだろうか。知的生命体は存在しそうか。知的生命体が他に存在したとして、どうやって意思疎通を図ればよいだろうか。

宇宙における生命

宇宙のどこかで生命が存在しうるかどうかの議論に入り、関連する多くの問題を大きくとらえるために、宇宙を描写するごく簡単な枠組から入るのが近道だろう。そうすれば生命にまつわる詳細な問題の位置付けができるようになる。この章では、宇宙や銀河、太陽系の起源と進化について簡単にまとめる。これから扱う物理スケールや時間スケールについての感覚を得るためである。

宇宙は約 150 億年前に誕生したと見積もられている³。この概算は宇宙の現在の膨張速度から計算された。宇宙空間では銀河は離れていっている。時間を遡って推定すると 150 億年前が全宇宙が一点に集まる時期に相当する。当時の宇宙は現在より高密度であるため、高温であったと思われる。すべてが理論上一点に存在した時刻ゼロにおいては温度は無限大であったろう。この点が現れる前には何が存在したのだろうか。それを知る方法はない。その時点においては時間は意味をなさなかつたろうから、現在の宇宙が存在する前

³より正確には約 137 億年前。(おぼえ方: $45.67 \times 3 = 137$)

の時代など存在しなかったのかもしれない。宇宙がある一点から広がったように考えられることから、宇宙の起源についての理論はビッグ・バン理論へと向かう。宇宙の正確な年齢と膨張速度についてはまだ議論中であるが、不正確であるからといって、膨張や銀河・恒星・惑星の歴史についての大まかな結論には影響しない。

宇宙は膨張しながら質量によって重力を受け、膨張速度は落ちる。膨張速度が遅くなっていくといつかは止まってしまうのだろうか。そうだとすれば今度は崩壊に向かい、誕生当時のような無限に濃集した一点に至るだろう。そういったことが起こるかどうかはわからない。宇宙の総質量と膨張速度によるだろう。銀河・星・ダスト雲・ガスから得た質量は膨張を止め、宇宙を「閉じた」ものにするには不十分である。しかし、まだ知らない形で、たとえば未発見の惑星や暗くて見えない恒星や物体、ブラックホール、検出不可能な素粒子といった形で大きな質量が存在しているのかもしれない、宇宙が「開いている」か「閉じている」かについての結論は得られていない⁴。

ビッグ・バン当時は我々が考えるような原子からなる物質は存在しておらず、宇宙は純粋にエネルギーで構成されていただろう。膨張し、当初の高温からの冷却によってエネルギーは物質に変換され、まずは素粒子に、そして陽子、中性子、電子へと変換されたと考えられる。質量がエネルギーから生成される間、質量の90%は水素、10%はヘリウムとして存在しており、もっと重い元素は実質的にはなく、後になって現れただろう。初期のエネルギーのうちのいくらかは放射という形で残る。宇宙の膨張が進むにつれて放射はおさまり、今日では宇宙の全方向に観測される「3K 背景放射」として観測されている。

宇宙が膨張し続ければ大小様々な物質の渦が自己重力で崩壊し始めるような濃い領域を生み出す。これらの雲が崩壊し、初期銀河を形成し、その中に一代目の恒星が生まれる。恒星の内部は十分高密度・高温で核反応が起こり、水素原子からヘリウム原子、そしてより重い元素を生成する。これらの核反応は恒星から光エネルギーを放出する。場合によっては数億年ほどで最初の恒星は核燃料を使い果たして生涯を終え、崩壊する。恒星の一部は崩壊の反動で超新星爆発を起こす。このとき水素やヘリウムより重い新しい元素はすべて宇宙空間に放出され、次世代の恒星の原料となる。地球と地球上の生命を構成する元素は恒星で作られたものである。つまり我々は恒星の材料から作られたものなのである。

こういった恒星の物質循環はすぐに起こる。恒星は劇的あるいは静的に死を迎える。最初に恒星が現れてからおよそ10億年後、太陽が天の川銀河周辺のガスやダストの雲の濃集から誕生し、地球や他の惑星ができた。これが約45億年前のことである。

原始太陽のまわりのダストやガスの雲は収縮すると、飛び込み選手や体操選手が両足を抱え込んだときのように回転を速める。回転が速くなるとダストやガスが収縮から取り残され、新しくできた太陽のまわりを回る。回転によってダストは太陽のまわりに円盤状の雲を形成する。しかしダストは円盤内では不安定であり、キロメートルサイズのダスト塊やデブリになる。これらの塊は微惑星(文字通り「小さな惑星」と呼ばれる。微惑星は太陽の回りを公転するにつれて衝突と合体を繰り返す。サイズや質量が大きくなるとほかの

⁴「開いているだろう」と言われている。

物体を重力で引き寄せて「原始惑星」は成長し、その数は少なくなる。これらは徐々に少数の巨大な物体となるのである。

この集積過程が落ち着くと残されたデブリや物体は太陽系の惑星に幕き集められる。集積末期には大型の微惑星の一部は数千キロメートルサイズにもなるが、激しい衝突によって惑星になる。集積過程が続くのは数億年未満である。太陽系惑星の大部分はおよそ 45 億年前に形成された、残ったデブリのほとんどは 40 億年前までに惑星に取り込まれた。もちろんいまでも太陽系にはデブリがあり、惑星に衝突している。量は少なく、質量増加はあまりない。(もちろん生命にとって地球への小惑星衝突が脅威でないというわけではない。)

太陽や太陽系を形成した物質は、重い元素をわずかに含むが主に水素とヘリウムからなる。木星や巨大惑星は質量が大きいため水素とヘリウムを他の物質のように引き寄せられるし、保持できる。しかし、地球のように内側にある岩石惑星は軽量で、円盤から水素やヘリウムをとらえられない。その結果、これらの惑星は重い元素で構成される。地球は主に酸素、鉄、シリコン、マグネシウムできている。ほかにも、(太陽ほど豊富ではないが)水素、炭素、窒素、硫黄、燐⁵といった重要な元素がある。

地球から遠ざかりながら宇宙の大きさを考えることにする。地球は半径約 6378 km の球形である。(ちなみに合衆国大陸部の両岸の間隔は約 4500 km である。)月は、軌道が地球から 384 000 km であり、半径 1735 km、質量は地球の 1/81 である⁶。太陽は地球から 150 000 000 km ($= 1.5 \times 10^8$ km; 1 天文単位, A.U.) の位置にある。金星は太陽・地球間の 0.72 倍、火星は 1.54 倍の位置にある。木星は太陽から 5.2 A.U., 土星は 9.5 A.U. にある。惑星のなかで太陽から最も遠い冥王星は 39.5 A.U. の位置にあるが、軌道が円ではなく、時刻によって近づいたり遠ざかったりする。

太陽から地球に光が到達するのに 8 分かかる。最も近くにある恒星までは地球から太陽までの 250 000 倍の距離である。このアルファケンタウリからの光が地球に到達するのにかかる時間は 4 年である。(これを、4 光年の距離と言う。)太陽が属する銀河の大きさは 100 000 光年であり、太陽は 2 億年かけて公転する。一番近くにある銀河までの距離は数万年光年である。そして、宇宙の大きさは 150 億光年である。地球は宇宙の片隅にある平凡な銀河の中の平凡な恒星を回る小さな惑星にすぎない。

宇宙での生命

宇宙での生命出現に関わる問題を考えることにする。2 章から 6 章にかけて地球生命の誕生と進化、生命をとりまく環境条件を扱う。地球外での生命を議論するのに必要な背景知識を得たところで、7 章では生命が必要とする条件を議論する。8 章から 13 章にかけては太陽系のどこかの惑星や衛星に生命がいる可能性を考える。14 章から 17 章では他の恒星のまわりの惑星の存在や性質、そこでの生存可能性、生命の可能性、知的生命の存在可能

⁵核酸の材料。

⁶ $1/81 = 0.01234\dots$

性に着目する。最後の章では宇宙での生命発見(あるいは発見しないこと)が提起する哲学的な問題にふれ、これからの太陽系・宇宙探査計画を簡単に紹介する。

この本での議論は宇宙での生命誕生について現在理解されていることである。地球や太陽系、宇宙の様子についての現在の知識が基準となる。しかし、多くの関連分野における発展は急速であり、宇宙観を変えるほどの新発見がされることも考えなければならない。そのような発見は現在行われている議論を無駄にするものではなく、知識の欠如を埋めるものである。この本は事実を単に集めたものではないのである。宇宙探査は世界に対する視野をひろげるものである。もっともわかりやすい目的は現状をこえることである。この本は目標ではなく出発点として読んでほしい。地球から離れ、宇宙という枠組のなかで個人として、社会として我々がどう位置づけられるかを考えるための第一歩である。ここで扱われる問題は新しい世界を開くものである。