

# 第1章：人類の祖先は微生物か

## 1.1 微生物の誕生

私たちが生活しているこの地球に、いつ、どのようにして微生物が出現したのか、そこから話をはじめることになります。

アメリカの航空宇宙局（NASA）の中村らの研究チームが、2000年カナダ北西部の凍結湖に落ちた隕石から、約46億年前の太陽系誕生期に形成された有機物を電子顕微鏡で観察したところ、水素（H）、炭素（C）、酸素（O）、窒素（N）で構成される直径数100nmの中空の球状有機物を26個見つけています。その球状有機物の窒素の同位体が1.2から2倍多く含まれていることにより、宇宙の温度が絶対零度に近い原始太陽系星雲の最も外側で形成され、保存されたものと考えられています。今回、見つかった有機物は、細胞などにみられる袋のような球状で、大きさ成分ともに生命の起源に何らかの関係があるだろうと中村らは2006年12月、米科学誌「サイエンス」に報告しています。

微生物は、太古から地球に棲んでいたことが微生物の化石（微化石）から知られています。南アフリカのスワジランドにあるフィグトリー地層の下のオンバーワクト層から、球状の藍藻類または細菌と思われる微化石が発見されました。この地層は32億年前とされており、現在のところ地球上で最も古い生物であると考えられています。フィグトリー地層で見つけられた微化石は種類が少ないことから、30億年前の地球には限られた種類のバクテリアや藻類だけが棲んでいたのではないかと考えられます。しかし、最近、名古屋大学大学院の杉谷らのグループは、オーストラリア西部の約30億年前の地層から微化石群を発見し、その化石の研究を重ねてきた結果、化石群は細胞核を持つ真核生物の可能性があり、約20億年前以降とされてきた真核生物の生存時期が塗り変わる可能性がでてきたと報告しています。

地球に生命が誕生した時の状況は、宇宙塵説では、宇宙の塵が約1億年を

## 第1章 人類の祖先は微生物か

かけて集まり、固着・圧縮によって熱エネルギーが発生し、そのエネルギーで地球を温め、約15億年の間に地球の中心部は約2,500℃にもなり、鉄 (Fe) やニッケル (Ni) のような重い物質が集積し、軽い珪酸物は地球の表面に集まったとされています。その後、約35億年前には、核・マントル・地殻の3層に区分され、現在の大陸の原型が出来上がったとされています。地球内部から徐々に気体が発生しはじめ、火山地域では、水蒸気 ( $\text{H}_2\text{O}$ )、炭酸ガス ( $\text{CO}_2$ )、窒素 ( $\text{N}_2$ )、水素 ( $\text{H}_2$ )、硫化水素 ( $\text{H}_2\text{S}$ )、アンモニア ( $\text{NH}_3$ )、メタン ( $\text{CH}_4$ )、塩素 ( $\text{Cl}_2$ )、リン化水素 ( $\text{PH}_3$ ) 等が発生、太陽からのエネルギーを受けて空中放電し、無機化合物から有機化合物へ変換したと推定されています。

1953年に、ミラーは、密閉容器中に水蒸気 ( $\text{H}_2\text{O}$ )、アンモニア ( $\text{NH}_3$ )、メタン ( $\text{CH}_4$ )、水素 ( $\text{H}_2$ ) の混合気体を封入し、自然界で起こる雷の代わりの放電によって混合ガスを反応させた結果、数種類のアミノ酸が合成されていることを確認し、生命誕生の素材ができることを証明しています。その素材ができるまでの過程は、まず、最初に混合ガスからホルムアルデヒド ( $\text{HCHO}$ ) やシアン化水素 ( $\text{HCN}$ ) が合成され、そのホルムアルデヒドはシアン化水素やアンモニアと反応して、アミノニトリル ( $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CN}$ ) になり、水蒸気と反応してタンパク質の一成分であるグリシン ( $\text{H}_2\text{NCH}_2\text{COOH}$ ) というアミノ酸 ( $\text{H}_2\text{NRCOOH}$ ) が合成されます。また、核酸の中に含まれる一成分であるアデニン (プリン系核酸塩基) は、5つのシアン化水素の熱重合で合成されたものと考えられています。しかし、原始時代の地球表面は非常に高温で、アミノ酸や核酸が合成されてもすぐ分解され、生命の誕生につながることは困難であるという科学者も多くなりました。

1970年代になって、ガラパゴス諸島、ペルー沖の海底山脈、カルフォルニア沖等で熱水噴水孔の周辺には、熱に強い好熱細菌 (55℃以上で増殖できる細菌) やエビ、カニ、フジツボ等がたくさん寄生していることがわかりました。そこには、原始細胞の形成に必要な有機物質があり、その周辺が原始生命誕生の場所ではないかとされています。そのモデル実験を柳川らが、熱水噴水孔周辺の海水を用いて実験した結果、ポリペプチドが合成され、タン

パク質の微小球体が得られたという結果を出しています。この結果より、熱水噴水孔の周辺で最初の生命が誕生したのではないかという説を発表しています。熱水噴水孔の一種、ブラックスモーカーを口絵4(A)に示しました。

原始生命は、地球上で合成された化学物質から誕生したという考え方が一般的ですが、現在、見つけられている化石の中で最古の細菌は35億年前のものであり、原始生命は35億年前から40億年前の間に誕生したと考えられます。

その細菌の生命の特徴は、次の2点です。

- (1) 物質を代謝する。
- (2) 自己を複製し増殖する。

この2大機能がどのようにして出現したのか、まだはっきりした学説はないようですが、細胞が自然にできたとは思われないことから、多くの科学者は細胞が地球のどこかで化学反応の積み重ねによって誕生したものと考えています。

1999年にロージングは、枕状溶岩の地層に炭素の塊の黒いシミから軽い炭素 ( $^{12}\text{C}$ ) が濃縮されていることを発見しています。生物が炭酸ガスなどを取り込むときには、重い炭素 ( $^{13}\text{C}$ ) よりも軽い炭素 ( $^{12}\text{C}$ ) を早く取り込むことがわかっています。このことから炭素の塊の黒いシミは、生物の活動によるものだろうと言われており、生命の誕生は約38億年前にどこかでおきたと考えられます。

それでは、原始生命体を構成している色々な元素や分子はどのようにしてできたのでしょうか。まず、誕生当時の宇宙は、温度が徐々に低下するにしたがっていろいろな粒子（陽子、中性子、中間子など）が誕生し、それらの粒子から自然界で最初にできた元素が水素原子です。

ホイルは、生命体を構成している元素は、核融合反応（軽い原子核同士の発熱型の核反応）が水素やヘリウム密度の高いガス星雲や恒星の内部で起きて、水素 ( $\text{H}_2$ ) やヘリウム ( $\text{He}$ ) よりも重い元素がつけられると報告しています。

最初にできた元素は水素（軽水素、重水素、3重水素）であり、水素の原

## 第1章 人類の祖先は微生物か

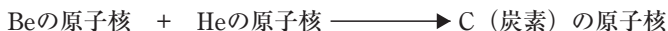
水素の原子核が核融合するとヘリウムの原子核ができます。ビッグバン宇宙理論によれば、宇宙誕生初期の宇宙の大気は、水素とヘリウムのような軽元素からなっていました。

### 核融合



水素の原子核が核融合してヘリウムの原子核をつくり、さらに核融合してベリリウムの原子核をつくります。そのベリリウムの原子核とヘリウムの原子核とが融合して炭素の原子核になり、その炭素の原子核とヘリウムの原子核とが融合して酸素の原子核ができ、炭素の原子核同士が融合するとマグネシウム (Mg) の原子核ができるというように、核融合により無機物質はつくられます。ヘリウムが不安定なベリリウムを経て炭素になる反応は確率的に低いにもかかわらず、微妙なエネルギー状態に左右されて、炭素への反応が進んだ結果、太陽系に比較的重い岩石の地球という惑星が生まれました。地表付近に存在する元素は約90種あり、その中でも炭素は全体量の約50%近くを占めています。そのことから、宇宙で偶然合成した炭素は、生命誕生に不可欠な生体材料としていかに重要であるかがわかります。炭素は結合する手が4本あり、他の元素と容易に結合して高分子化合物をつくることができます。また、分解されると炭酸ガスなどの気体や水に溶けて炭酸イオンとなりますので、生物物質の循環にとって適した元素といえます。地球上の生物は、炭素を中心として、酸素、水素、窒素等が結合した炭素骨格からできています。

### 核融合



### 核融合



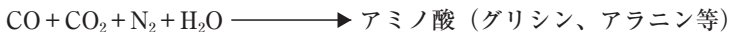
核融合してできた無機物は、化学反応の触媒となるため、生命の誕生に有利に作用したものと考えられます。

1980年、ケルは雑誌「サイエンス」に酸化型大気説を提唱しています。誕生当時の地球は高い温度で、窒素、水素、塩化水素（HCl）、硫化水素（H<sub>2</sub>S）、二酸化硫黄（SO<sub>2</sub>）などの気体で覆われていましたが、徐々に冷えて、地表では降雨と蒸発を繰り返し、海が形成されたと考えられています。

また、柳川らは、一酸化炭素（CO）、二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）、窒素ガス（N<sub>2</sub>）、水蒸気（H<sub>2</sub>O）を主体とした酸化型大気をつくり、陽子線が照射されると、生命素材になるアミノ酸（グリシン、アラニン等）が合成され、大気中でつくられたアミノ酸が雨水に溶けた水溜りで、化学進化して生命が誕生したのではないかと考えています。

アミノ酸以外のリン脂質、糖、ヌクレオチド（糖に塩基とリン酸とが結合したもの）などは、原始地球に存在していた無機物（CO、CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O）が紫外線、熱、高圧などの影響を受けて、無機物から分子量の小さい有機物などが合成され、その有機物は原始海洋に多量に蓄積し、さらに紫外線、熱、高圧などの影響を受けて、核酸、糖類などの分子量の大きい有機物に変化していったものと思われます。

### 陽子線



宇宙から隕石や彗星で色々な分子や原始生命体が運ばれて来たのではないかと宇宙播種説について考えてみます。

1969年、マーチン隕石をクローニンが分析した結果、マーチン隕石には今まで知られていた約20種以外のアミノ酸も含まれていることを明らかにしています。また、1986年、地球に近づいたハレー彗星の組成を探査機が調べた結果、そこには複雑な有機物（シアン化水素、芳香族化合物など）が存在していることも確認しています。

宇宙空間には、様々な有機物が存在しており、生命誕生の素材としては、宇宙から持ち込まれる豊富な有機物と地球表面でできた有機物の両方が生命

## 第1章 人類の祖先は微生物か

誕生の素材になったと考えてもおかしくないと思われます。しかし、38億年前の地層から真正細菌のような微化石が見つけられていますので、それが地球上で誕生したものであれば、地球が誕生してからわずか8億年で化学進化して生物が誕生したことになり、化学進化の方が早いように思います。また微化石は、他の惑星から来たのではないかと思われますが、地球に到達するまでにはかなり高い温度にさらされますので、生きたままでは地球に定着したとは考えにくいと思われますが、地上に落下した隕石からアミノ酸や糖類が検出されていること、さらに隕石に微生物のような化石が見つけれられたという報告もあり、現状ではまだ、結論は出ておりません。

他の惑星上の環境を模擬する条件で、地球にいる微生物が生存することができるかどうかを調べました。例えば、金星大気圏上層部を想定して、二酸化炭素を満した気相の下でいくつかの細菌を加熱する実験（二酸化炭素、10.1気圧、19時間、110℃）を行った結果、大腸菌が36%、納豆菌の仲間では、（二酸化炭素、9.5気圧、24時間、125℃）64%の生存が確認されました。また、木星大気圏上層部を想定して、水素、ヘリウム、メタン、アンモニアガス等の混合ガスを用いて高圧下（50気圧）、低温（-3℃）で24時間放置した後の生存率を調べた結果、大腸菌は、33%の生存率を示しました。紫外線を用いての細菌の生存率は星雲などの中に保護されれば、かなりの期間生きながらえると結論付けています。太陽系内で一番多く存在する放射線である陽子線照射実験（照射量、100マイクロクローン）では、枯草菌の胞子と黒カビの胞子は、52%、59%の相対生存率を示し、物理的ショックには強いと思われます。以上のことから考えると、微生物は他の惑星から来たのではないかとも思われます。

1924年、ロシアのオパーリンは、水素化合物からなる還元型の大気中では、タンパク質、核酸、糖類等が合成され、それらの分子が集まって分子群をつくり、コアセルベート（原始細胞のモデルとしての親水性コロイドの小液滴）の液滴となり、長時間かけて化学進化して原始細胞ができたのではないかという還元型大気説を提唱しています。

1980年にチェックとアルトマンは、DNA（デオキシリボ核酸）とよく似

た分子であるRNA「転写RNA；（遺伝情報を伝達しタンパク質合成の鋳型となるアダプター分子）と伝令RNA；（タンパク質合成の介在をするアダプター分子）」は、DNAと同様に遺伝子情報を持つことができ、さらに酵素のように、化学反応を促進させる作用をもつリボザイム（RNA酵素）があることを見つけています。ある種のウイルスは、RNAを遺伝子として保有するという事実が「RNAワールド仮説」（図1-1）の概念につながり、生命は遺伝子情報と触媒機能の両方を兼ね備えたRNA分子から誕生したという仮説です。現在は、この仮説が多くの科学者らに支持されています。

1986年、ギルバートは、原始地球では、まずRNAが誕生し、続いて自己複製できるリボザイムが誕生、現在の生命へと進化したのではないかと報告しています。その後、菅らは、リン脂質の合成に必要な酸化還元反応を促進するリボザイムが誕生し、最初の細胞膜ができたのかもしれないと考えています。しかし、「RNAワールド仮説」に疑問をもっている研究者もいます。

地球上で見つけられた隕石や彗星にもすでに4種のアミノ酸（グリシン、アラニン、バリン、アスパラギン酸）が含まれていることから、奈良女子大の池原は、古くからある「タンパク質ワールド仮説」（図1-1）とは区別して、「GADV仮説」を唱えています。それは4種のアミノ酸を含む水溶液を還流させると、4種類のアミノ酸が結合したタンパク質が合成され、わずかながらタンパク質の分解反応を触媒できる酵素作用があることを確かめています。

### 水で還流

グリシン+アラニン+バリン+アスパラギン酸 → タンパク質（酵素作用）

さらに、疎水性の高いバリンと親水性の高いアスパラギン酸からタンパク質が合成され、リン脂質と同様の細胞膜をつくる材料になると考えられますが、タンパク質に複製する能力がないという大きな欠点もあります。

また「GADV仮説」と関連して、遺伝子暗号の起源を説明しています。1番目の塩基がG（グアニン）で、3番目の塩基がC（シトシン）である遺伝子暗号には、GUC、GCC、GAC、GGCの4通りがあり、これらの遺伝子暗号

## 第1章 人類の祖先は微生物か

は、バリン、アラニン、アスパラギン酸、グリシンの4種類に対応しています。この遺伝子暗号が最も原始的な暗号ではないかという考えで、最初に4種類のアミノ酸を指定する4通りの遺伝子暗号が誕生し、その後、新規のアミノ酸を利用することにより、遺伝子暗号は16通りに、最終的には64通りに増えるというのが、池原が唱えるGNC-SNS原始遺伝暗号仮説（ただし、S=G、C、N=A、T、G、Cとする）」（GNC仮説とも呼ばれている）です。現在、生命の起源と遺伝子暗号文字とを関連づけた説明は、GNC仮説以外見あたりません。また、GADV仮説の代謝経路は、アミノ酸の生成経路を起原とし、糖の生成経路、核酸の生成経路へと広がっていったと考えられ、このことは、RNAワールドよりも「GADV仮説」－「タンパク質ワールド」の方が先に出現したという考えと矛盾しないと、2001年に池原らは報告しています。

しかし、最初の生命は、タンパク質から生まれたのか、またRNAから生まれたのか、それとも別の化合物から誕生したのか、まだ、結論は出ていません。結論を出すためには試験管の中で「人工生命」をつくり出す実験条件を探ることです。近い将来、試験管の中で「細菌」が誕生する日がくると思われれます。もう一つ考えられることは、火星、木星、土星等に新しい生命を見つけることができれば、さらに生命の起源を知る手掛かりができるように思います。微生物誕生モデルを図1-1に示しました。



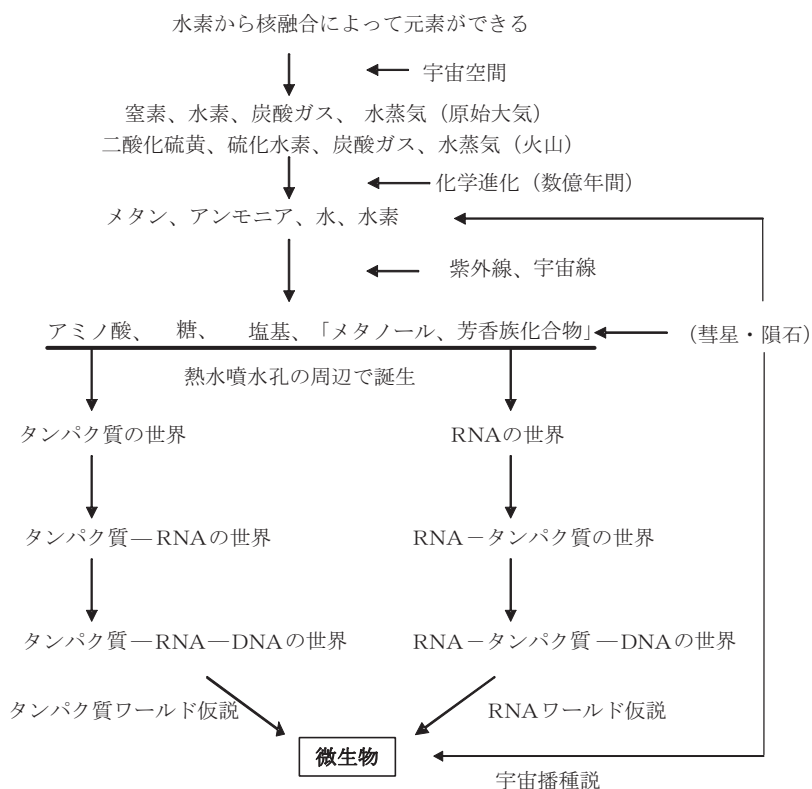


図1-1. 微生物誕生モデル

生命現象は、水が必要な化学反応の組み合わせです。ほとんどの科学者は、海水の成分と細胞成分が類似していることから最初に生命が誕生した場所は「海の中」とであるという考えです。それでは、海のどこで生命が誕生したのでしょうか。生命の誕生には、材料分子を濃縮して高濃度にする場所が必要になります。

地球は、46億年前に誕生しましたが、その数億年後には、水が生成され、大気はメタン、水素、アンモニアなどで、その他に窒素や硫化水素なども少しは存在しました。空は赤く、オレンジ色で、そこに降りそそぐように雷雨

## 第1章 人類の祖先は微生物か

の時の放電や太陽からの強い紫外線が届き、そのために、原始の大気ガスから電気化学的、光化学的に有機化合物が合成され、海水にうすく溶けていました。それが地球に生命が誕生するすぐ前の状態であったと思われます。当時は月も出来たばかりで、地球との距離は今の半分もないほどに近かったため、月の引力による潮の満ち引きは大きく、そのために、海は常に大きな波で泡立ち、潮だまりに集まった泡の中に生命の源になった有機物が集まり、濃縮され、そういう原始有機物同士がくっついたり、海と岩の境界面で濃縮されたりして原始の生物が出現したものと考えられます。それは、現在の生物に比べると、単純な生合成機能しか持たない「原始従属栄養微生物」で、これは酸素なしでも有機物を分解し、それによって出来るエネルギーで成長していました。まだ、その頃は全く酸素のない地球で、酸素は最初の生命にとっては猛毒でした。

紫外線は、相変わらず地球上に強く照射していたので、突然変異が容易に起り、生合成能力のすぐれたものが次第に優勢になり、周囲のはげしい化学変化の中で自然淘汰されながら、自分と同じ子孫をつくることのできる生命体が進化し、独自に有機物を合成する真の「独立栄養微生物」がはじめて出現しました。その最初の独立栄養微生物は、太陽光を利用できる光合成のプロセスを持つものがもっとも効率よく生きることができました。そういう嫌気性の生物が、ずっと後になって緑色植物になりました。

独立栄養生物（シアノバクテリア）は、他のバクテリアとちがって緑色植物と同様に葉緑素（クロロフィル）を有し、原始地球での物質を質的にも、量的にも変えることに大きな役割を果たしました。大気は主にメタン、アンモニア、水素でできていたのですが、太陽の紫外線による光化学反応で水から酸素ができてメタンを酸化することで二酸化炭素を、あるいはアンモニアと化合して大気中に窒素ガスがつくられました。その二酸化炭素を同化することで自身の体をつくり出すことができたのが、最初の独立栄養生物であると言われるシアノバクテリアです。細胞が数珠つなぎになった原始的な藻類で、最近までは藍藻と言われていたものです。真核生物の他の藻類と呼び名がまざらわしいため、現在ではシアノバクテリアと呼ばれています。シアノ

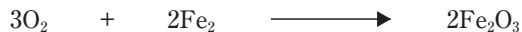
バクテリアの電子顕微鏡の写真は口絵3(E)に示しました。

地球上では海から陸地があらわれるようになって、陸からカルシウムやナトリウムが海水に溶け込み、それが大気中の二酸化炭素と反応、太陽の光も海に射し込むようになり、オレンジ色の地球は今の青い地球へと変わりはじめました。現在でも、当時の地球をうかがわせてくれる場所があちこちにあります。

西オーストラリアのピルバラ地方には、34億6千年前、当時の海に生きた生命の痕を刻み込んだ化石が存在しています。そこには、光合成能をもったシアノバクテリアの死骸が有機炭素の黒い固まりとなって、40mもの高さの地層をつくっています。これは最古の石油源といえるものです。このシアノバクテリアは光合成で二酸化炭素を取り込んで酸素を吐きつけ、海水中の鉄と結合して赤い酸化鉄をつくりました。その地方の大地が赤いのは、海に沈殿した酸化鉄が隆起したからです。縞状鉄銅層のシアノバクテリア化石は口絵3(F)に示しました。

しかし、微生物の進化によってシアノバクテが光合成を行うことにより、海洋や大気には酸素が徐々に多くなり、海洋中の鉄がなくなることと合わせて、縞状鉄銅層が形成されなくなったのが18億年以降であると考えられます。

#### シアノバクテリア



初期の嫌気性細菌にとって、酸素があると生育することが困難でした。しかし、酸素はエネルギー効率から考えると優れた分子ですので、エネルギーを多く消費するような動物にとっては非常に有用でありました。そのため、酸素を利用する好気性細菌が徐々に増えはじめ、その後、多細胞生物が誕生したものと考えられます。

酸素を利用する細菌が現れはじめた頃の独立栄養生物は、太陽エネルギーを使いながら海水中の硫化水素から硫黄や硫酸をつくる硫黄細菌や、硫酸塩で水素から水と硫化物をつくる硫酸塩還元細菌など、硫黄にかかわりのある細菌がたくさん活動していたものと思われます。

## 第1章 人類の祖先は微生物か

ニュージーランド北部の火山地帯の小さな島、ホワイトアイランドでは火口から亜硫酸ガスの蒸気が噴き出し、岩肌に硫黄がこびりついています。生命誕生の頃の地球は、至る所がホワイトアイランドの岩肌のように硫黄や硫化水素に覆われていたと思われます。ホワイトアイランドの90℃を越える熱水中で硫化水素を分解して生きる細菌が見つかり、その細菌が最初の生命にもっとも近いものだとも言われています。

さらに、今から5年前にメキシコの西800kmの海底で火山が噴火し、そのあたりは生き物がいない死の世界と思われていましたが、その近くの2,600mの深海を探査艇で調べたところ、硫化水素の黒い煙を吐き出す煙突状の岩がたくさん見つかり、太古の生命誕生の頃の海に似ていると考えられました。その場所に板を1週間置いたところ、その板に細菌がたくさん付き、硫化水素を利用して生きる細菌がいることがわかりました。このように、地球の最初の生命は、有機物を分解する原始従属栄養生物だけだったのが、進化をかさねながら、硫化水素で生きる能力を持ったものになっていきました。それが今の生物の遠い祖先です。

その証拠として、近年、発見された化石の中の微生物や硫黄の同位元素の研究から、20～28億年前までの間に地球の硫黄代謝が進行し、その当時にもっとも優勢だった生物が現在の硫黄細菌の祖先であって、当時の地球の主な生化学的な過程は「硫黄循環系」だったという証拠がいくつも見つかっています。

先に述べたように、光合成作用で水から酸素をつくりだす微生物が出現して、酸素を好む微生物が多くなり、好氣的微生物が優勢になってきますと、それまでの硫黄循環が止ってしまうことになりました。硫黄循環にかかわっていた生物の繁殖にも陰りが出はじめ、それまでの生物種のほとんどが絶滅し、酸素を利用する生物の栄える地球に変わっていきました。その後、大気にオゾン層が形成されると、地球の光化学反応に貢献した宇宙からの紫外線もオゾン層でさえぎられることになり、その結果、生物の突然変異率もかなり小さくなったことから、生物の遺伝的な性質も安定して、生物種はもはや原始の時ほどの大きな変化を受けることなく、長い年月を経て、現在の呼吸

生物が発生することになりました。

酸素の出現によって、大気から徐々にアンモニアや硫化水素などが除かれ、それに替わって酸素と窒素と二酸化炭素、そして残留したメタンで構成されるという、まさに今につながる時代になりました。そういう地史的な時代にできた硫黄鉱床から取り出された硫黄が現代の主要産業に需要の多い硫酸をつくる原料になっています。

資源として、硫黄に次いで重要なソーダ（炭酸ナトリウム）鉱床も細菌の作用でつくられたものです。硫酸塩還元細菌は、硫黄鉱床をつくるだけでなく、硫酸ナトリウムのあるところでは、硫化ナトリウムをつくり、これが二酸化炭素と結合してソーダの鉱床ができました。エジプトのワジバトルンのソーダ鉱床は有名ですが、そこには硫酸塩還元細菌がたくさん生息しています。このように地史以前に微生物の行った活動が、現在の経済活動に大きく役に立っていることに改めて感心させられます。

また現在の重要なエネルギー資源である石炭や石油、天然ガスなどは、もっと後でつくられることになりますが、やはり原始の時に微生物の働きでつくられたものであることを後で述べます。主な生物誕生の歴史を表1-1に示しました。

表1-1. 主な生物誕生の歴史

年代	事項
46億年前	地球誕生（有機化合物が合成される）
38億年前	細菌のような原始生命体の誕生
33億年前	細菌と古細菌が分岐
24億年前	シアノバクテリアの大発生
21億年前	放線菌、グラム陽性菌の出現
15億年前	酵母の出現
9億年前	動物、植物、菌類が分岐
6億年前	海生動物の大進化、植物が海から陸へ進出、三葉虫の出現
2億年前	哺乳類の誕生、恐竜の全盛期、顕花植物の出現
1億年前	超大陸分裂、寒冷化が起こる、生物種の激減、隕石衝突
6500万年前	恐竜、アンモナイト絶滅、哺乳類繁栄、霊長類の進化

## 第1章 人類の祖先は微生物か

500万年前	人とサルが分岐
170万年前	人類が進化、世界へ広がる
6万年前	アフリカ人の一部がアジア大陸に移動
	その後、アラスカ、カナダ、アメリカ、南米へ移動

近年、微生物の遺伝子解析が進み、その遺伝子解析に基づく分類法では、普通の環境に棲む「細菌」、極端な環境に棲む「古細菌」と「真核生物」の3つに大きく分類されています。遺伝子解析による生物の進化系統分類を図1-2に示しました。細菌の細胞膜の脂質は、エステル結合を持つものに対して、古細菌では、エーテル結合を持つなど、多くの差異が認められています。

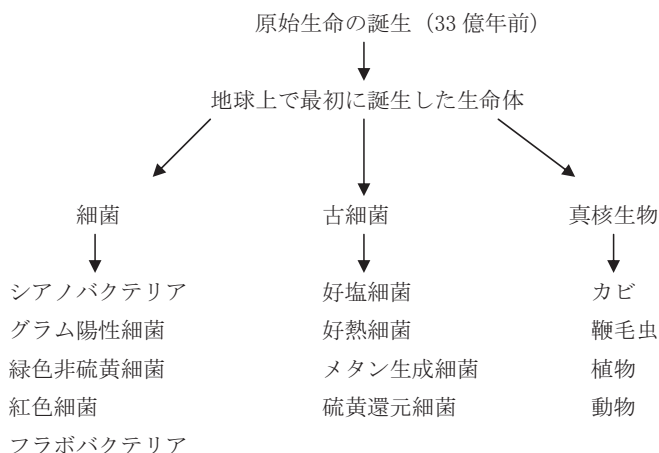


図1-2. 遺伝子解析による生物の進化系統図による分類

地球上で最古の微生物である古細菌は、酸素があると生きられず、また、細胞内には様々な物質を合成する代謝の仕組みが全く異なると考えられていて、古細菌（メタンやメタノールなどを炭素源として分解する細菌）だけが持っていると思われていた酵素や補酵素を古細菌以外の一部の細菌も持っていることをワシントン大学とドイツのマックスプランク研究所が突き止めています。この発見は、従来の微生物進化説を覆す可能性がある発見でした。

## 1.2 微生物は何処に

生物が生息している範囲を生物圏と呼びますが、微生物は、大型の生物が住む場所だけでなく、長く生きていられないような環境にさえ生息しています。つまり、地球上で生命の存在するところには必ず微生物が棲んでいて、逆に言えば、微生物が耐えて生きることのできる環境が生命の存在する限界だということになります。50年あまり前に気球で成層圏を調べ、微生物は数km上空でも検出したとポストゲートが報告しています。また、最近のアメリカ航空宇宙局（NASA）の調査では、30km上空が微生物の生育限界で、そのあたりでは40m<sup>3</sup>に一個体の微生物がいる程度だったそうですが、ジェット機が飛んでいる10kmくらいの上空では、1m<sup>3</sup>あたり1~2個の密度で生息しており、海洋微生物は、水深約10kmの太平洋海溝の海底でも検出されています。極限に近いあたりでわずかながら見つかる微生物は、休眠状態にあるのが普通で、活発に活動し、盛んに生育したりしているのは、大型生物の活動の盛んな私たちの近辺です。それは、微生物も適度の湿度や温度や圧力のあるところを好んで生育するのが普通だからです。しかし、それらの諸条件が無く、通常大型生物が生育できない極限の環境条件でも生きていける特性をもった微生物もいます。また、胞子をつくらないものも多くいますが、厚くて硬い皮を被った胞子をつくることで、数十年もの間、休眠状態で乾燥に耐えるなど、より厳しい環境を生き抜いている微生物もいます。そのことは、極悪な環境にさらされた時に生命を保持する大事な特性で、そういう休眠状態の微生物がいろいろな場所に拡散していると考えておく必要があります。しかし、無害な菌がほとんどですので、休眠状態の微生物については、一応は楽観的に考えておいてもいいでしょう。

一方、胞子をつくらない多くの微生物は、極端な乾燥状態では比較的容易に死滅し、殺菌も消毒もかなり簡単にできます。しかし、胞子をつくらない微生物が生きたままで空中を浮遊したり、食べ物に付着したりしていることも当然考えておかねばなりません。私たちが日頃、石鹸で手を洗う、アルコールで消毒する、紫外線を照射して清潔にする、塩漬けや酢漬けで食品を保存するなど、殺菌に心がけるのは、その微生物がどこにでも浮遊した

## 第1章 人類の祖先は微生物か

り、付着したりしているものと考えられるからです。それを少しでも取り除くには、手洗いが効果をあらわれすことと思います。手洗いの効果を表1-2に示しました。

表1-2. 手洗いの効果

(手についた細菌を100個として、3分間手を洗ったときに残留する細菌数)

水道水を洗面器にとって洗うと	37個
水道水を流しながら洗うと	25個
普通の石鹸で洗うと	16個
逆性石鹸で洗うと	0個

私たちの身体にも微生物がたくさん生息しています。身体の詳細部の微生物数を表1-3に示しました。表から明らかなように歯石付近に微生物が多く、次に唾液、結腸の順に多く生息していることがわかります。

人間の体の中や皮膚の近くで見つかる微生物は、最適といってよい環境条件にいるわけですから、種類もたいへん多く、また生息している数もとても多いことは言うまでもありません。

表1-3. 体の細部の微生物数

唾液	$10^{8-9}$ (細胞/ml)
鼻汁	$10^{1-4}$ (細胞/ml)
歯石	$10^{11-12}$ (細胞/ml)
皮膚	$10^{3-4}$ (細胞/ml)
胃	$10^{2-5}$ (細胞/ml)
結腸	$10^{8-9}$ (細胞/ml)
小腸	$10^{4-6}$ (細胞/ml)
外尿道	$10^{3-5}$ (細胞/ml)

私たちの腸内には、乳酸菌のように整腸作用に働いたり、ビタミンをつくらったりする好ましい細菌もありますが、ときには有害な働きをする細菌もいます。病気の時には、その原因である病原菌が生息しているため、皮膚などに



傷口があると化膿性の細菌が繁殖して、炎症をおこすこともよく経験するところです。

しかし、私たちの体には、微生物を容易には受け入れられないような仕組みが備わっています。皮膚は、傷口がなければ外からの微生物を受け入れない防護壁となり、目や口、鼻などの粘膜が空気に触れているようなところには、涙とか唾液、あるいはリンパ液が絶えず分泌されていて、それらの中に含まれているリゾチームという酵素が侵入した微生物を殺す役割を果たしています。そのような物理的、あるいは生化学的な防護機能がありますので、空気中に微生物が浮遊してはいるものの、私たちはそう簡単には病気にかからないのです。また私たちの体の中に入った病原菌に対しても免疫という仕組みもあります。

多くの腸内細菌は、人や動物の腸管内に寄生しています。特に大腸菌は、土壌や食品を汚染する腐敗菌で普通は病原性を示しませんが、この菌が食品や海水や飲料水などにいることは、人または動物の便などによって汚染されたことの証拠になります。そのことから、衛生上、病原菌汚染の指標になっています。病原大腸菌の中には、毒素を出し、出血を伴う腸炎や溶血性尿毒症症候群を起こす腸管出血性と呼ばれている大腸菌（O157）もいます。O157菌とは、O抗原として157番目に発現されたという意味を表していて、冷蔵庫内でも胃酸の中でも生きていますが、熱には弱く、75℃では1分間の加熱で死滅します。

また、サルモネラ属（チフス菌、パラチフス菌等）は、感染型の食中毒細菌およびグラム陰性菌で人と動物に病原性を示し、赤痢菌は鞭毛を持たないのが特徴で志賀毒素をつくります。

### 1.3 微生物の利用

私たちの食卓に縁の深い微生物には、ビール、ワイン、清酒、それにパンをつくる酵母菌、納豆やヨーグルト、食酢などをつくる細菌、そして、醤油や味噌をつくるカビなどがいます。これらはどれも大変小さくて、1つの細胞だけなら肉眼では見えません。微生物の仲間では私たちの目に見えるものには、シイタケやマッシュルームなどのキノコがあります。普通に微生物とし

## 第1章 人類の祖先は微生物か

で考えるときには、細菌、酵母、カビだけでなく、キノコやそれに下等な原生動物とか藻類も含まれますが、この著書では、主として酵母と細菌とカビについて取り上げることにします。

微生物には色々なタイプの発酵機構がありますが、発酵現象が微生物によって起こるものであるということがはっきりと認識されたのは、19世紀後半にパスツールが糖の乳酸発酵を見つけた時からです。微生物は食品面、化学工業面など私たちの生活にとって大変役に立っています。そこでいろいろな発酵について少し説明します。

アルコール発酵に限らずほとんどの発酵形式は、基質から生産物へ1段階の反応ではなく、非常に複雑な過程を酵素の助けを経てくるだけに、発酵機構に関して、明らかにされているような結果を得るまでには多くの研究者の努力の蓄積があります。最近、色々な機器分析が開発され、この方面の研究は飛躍的に発展しています。

アルコール発酵は、グルコースからエチルアルコールに至るまでの過程で、多くの反応からなり、それぞれの反応に関与する酵素・補酵素も明らかにされています。このうちグルコース→6-リン酸からピルビン酸に至るまでの過程は、我々の筋肉組織での解糖作用と全く同じです。アルコール発酵では酵素によって、まず、ピルビン酸が脱炭酸されてアセトアルデヒドと炭酸ガスになり、そのアセトアルデヒドは酵素の作用によってエタノールとなります。このようにアルコール発酵及び筋肉の解糖では酸素を必要とせず、従って嫌氣的に反応が進行することになります。アルコール発酵に際してはアルコールと炭酸ガスの外に微量ながら種々の副産物を生産します。副産物としてはグリセリン、フーゼル油、コハク酸等があります。次にいくつかの発酵の型を説明します。

アセトン・ブタノール発酵は、ワイズマンによって*Clostridium*細菌を使用して工業化されています。アセトンやブタノールは溶媒として工業的に重要なものであり、現在は石油化学工業によって生産されています。しかし、石油の値段が上昇してくますと、従来のアセトン・ブタノール発酵が行われるのではないかと思います。発酵原料としてはトウモロコシが多く用いら

れています。トウモロコシの粉末を7%の濃度で、120℃、30分間蒸煮したものに*Clostridium*細菌を植菌して、30℃、43時間培養すると、ブタノール、アセトン、エタノールが約6：3：1の割合で生産されます。

**酪酸発酵**は、酪酸菌によって糖類の他にタンパク質、脂質、グリセロールなどを栄養源として、嫌氣的発酵で行われます。副産物としてはプロピールアルコール、ブチルアルコール、プロピオン酸、乳酸、酢酸等が生産されます。主生産物の酪酸はほとんどが皮革工業に、酪酸のエステルは溶剤に使用されています。

**酢酸発酵**は、エタノールを含む液に酢酸菌を作用させて、酢酸に変化する現象が昔から知られており、調味料の食酢の製造に利用されています。酢酸菌は糖分を直接酢酸に変えることは出来ず、まず糖分を酵母で発酵してアルコールに変えた後、そのアルコールを酵素で酢酸に変換します。

**乳酸発酵**は、乳製品、乳酸飲料、清酒、漬物など、広い発酵食品製造に利用されています。乳酸菌は、糖の発酵形式からホモ型乳酸発酵とヘテロ型乳酸発酵に区別されています。

前者は、乳酸のみを生産しますが、後者では、乳酸のほかにエタノール、炭酸ガスを、また酢酸などをつくる場合もあります。従って工業的にはホモ型乳酸発酵を用います。

**クエン酸発酵**は、主として酸味料関係に利用されていますが、最近では可塑剤、塗料、キレート剤、医薬品等にも利用されています。この製造には、カビ類（主として、*Aspergillus niger*）を使用して糖類からクエン酸が生産されています。また、n-アルカンを原料として、酵母の*Candida lipolytica*菌を用いて、その酸が生産されることも知られています。

**アミノ酸発酵**は、栄養源として炭素源（主にグルコース）や窒素源（主に尿素）を用いて、微生物によりいろいろなアミノ酸を生産する方法です。最初に工業化されたアミノ酸は、旨味の調味料として利用されているグルタミン酸です。協和発酵研究所の木下らが*Corynebacterium*細菌に糖と無機窒素を添加し、培養することによってグルタミン酸を生産することを見つけ、日本で工業生産が開始されました。その後、多くの細菌を用いて糖以外の炭素

源（デンプン、酢酸、アルコール、n-アルカン等）からもグルタミン酸を生産することが知られています。グルタミン酸を生産する菌株は、グラム陽性菌、球または桿菌であり、運動性はなく、生育にはビオチンを要求します。微生物の主な発酵機構を図1-3に示しました。

