

# 微生物が人類と地球を救う



森川正章\*, 今中忠行\*\*

Microbes can save the human race and the earth

**Key Words** : evolution of life, hyperthermophilic archaea, material circulation, global environment, petroleum production

## 1. はじめに

### (1) 微生物は地球の先住民

#### —進化と環境適応—

地球が惑星の一つとして誕生したのが約45億年前であり、その地球上に原始生命体が出現したのが約35億年前、酸素の蓄積はそれからさらに15億年程の時間が経過した20億年前頃であると言われている。その後、現在に至るまでに多くの生物が進化により出現した。地球の誕生を元日、現在を大晦日の24時とすると、3月に原始生命体が出現し、5月に原始藻類が、酵母のように核構造を示すいわゆる真核生物が9月に生まれ、その後11月から12月にかけて

種々の動・植物が出現した。人類の直接的な祖先と考えられる原人は約500万年前に出現したといわれており、これは大晦日の午後7時に相当することになる。こうみてくると、新しい生物が創られるためには想像を絶する天文的時間が必要であったことが容易に理解できる。また地球歴史上の大半が微生物によって占められており、まさに地球の先住民、人類の大先輩でもあるといえる。従ってセントラルドグマにも示されるように、微生物も人類も基本的に同じ遺伝暗号を使い同様の物質代謝・エネルギー代謝をおこなっているのも驚くほどのことではないであろう。

最近、我々は鹿児島県小宝島の硫気坑から典型的な超好熱始原菌(hyperthermophilic archaea)の一種である *Pyrococcus* 属 KOD1 株(生育最適温度が 95 %)を分離した<sup>1)</sup>。始原菌(archaea; 以前は古細菌[archaeabacteria]と呼ばれていた)は従来の生物界を構成する二つの原生物界(原核生物と真核生物)いずれとも異なり、特に細胞表層構造は圧倒的に違う。しかしその一方ではその生育環境(高温、無酸素、高塩濃度、メタンガス)が原始地球と似ていることなどから生命の進化(共通の祖先)を探るのに格好の素材と考えられ始めた。実際、KOD1 株の遺伝子構造(配列)を調べたところ原核生物と真核生物に共通する特徴や原核生物よりもむしろ真核生物と類似する特徴が次々に見いだされてきた<sup>2)</sup>。

原始の地球環境についてはさまざまな説があるが、高温でしかも大気の濃度が低いため生物

\* Masaaki MORIKAWA  
1960年10月13日生  
1985年大阪大学大学院工学研究科  
醸酵工学専攻博士前期課程修了  
現在、大阪大学大学院工学研究科、  
物質・生命工学専攻、極限生命工  
学講座、助教授、博士(工学)、極  
限生命工学  
TEL 06-879-7443  
FAX 06-879-7448  
E-Mail morikawa @ chem. eng.  
osaka-u. ac. jp

\*\* Tadayuki IMANAKA  
1945年3月25日生  
1969年大阪大学大学院工学研究科  
醸酵工学専攻修士課程修了  
現在、京都大学大学院工学研究科、  
合成・生物化学専攻、教授、工学  
博士、生物工学  
TEL 075-753-5568  
FAX 075-753-4703



は格段に強い紫外線にさらされていたことが予想できる。ダーウィンの進化論にせよ木村資生の中立説にせよ突然変異が蓄積することによって生物は進化適応してきたと考えられている。すなわち原始地球環境では多様な変異が起こっていたと同時にその中で生命が生きながらえるためには強力な遺伝子修復系が発達していたに違いない。そこで生物界に普遍的に存在して遺伝子(DNA)の相同性組換え反応を司るRecAタンパク質をKOD1株から取得し(Pk-REC)これを詳しく調べた<sup>3)</sup>。その結果、驚いたことにアミノ酸配列上大腸菌由来RecA、ヒト由来RAD51いずれともそれぞれ45.2%(62アミノ酸中)、36.3%(168アミノ酸中)の高い相同性が認められた。ちなみにRecAとRAD51の間の相同性は20%以下である。

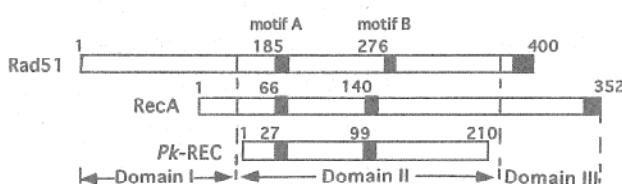


図1 RAD51, RecA, Pk-RECタンパク質の一次構造比較。

Domain IIが機能に必須の領域、Domain IやDomain IIIは進化の過程で後に付加されたと予想される。数字はアミノ酸残基の番号

すなわち、Pk-RECはこれらの共通の祖先に近いことが示唆された。また、それぞれのアミノ酸の類似性で整列するとPk-RECはタンパク質機能に必要最少限の部分だけを保持していることが明らかになった(図1)。これはそれ以外の部分が進化の過程で後になって付加された可能性を示唆する。また、Pk-REC遺伝子をRecA欠損大腸菌に導入したところ細胞種が全く異なるにもかかわらず紫外線に対する抵抗性がほぼ野生(RecA保持)株と同等レベルまで回復することも確認した。さらに興味深いことにPk-RECには他のRecAタンパク質には見られないDNA分解活性が検出された。DNA分解活性は遺伝子間の相同性組換え反応には必須であり、通常はRecA以外の酵素がその機能を担っているので、この結果はPk-RECが組換えタンパク質グループの元祖であ

ることを彷彿とさせる。1960年代後半になつて分子生物学者モノーが「大腸菌がわかればゾウもわかる」と樂観的な発言をしたが、その後大腸菌を代表とする原核生物群とゾウやヒトなど哺乳類を含む真核生物群とは遺伝子の構造も個々の細胞メカニズムもかなり異なることが分かつてきた。たとえば前者は単細胞であり常に環境に直接さらされているためによい環境に置かれたときに短時間で速やかに子孫を増やす。そのため遺伝子の構造も単純で必要最少限なものだけを残す「脱落型」進化経路を選んでいる。これに対して多細胞生物を代表とする後者は多種類の分化した細胞が集まって、お互いに巧みに制御し合しながら分業を営むことによって一つの個体として生活している。だから、外部の環境が少々変化しても一定の内部環境を保って生きて行ける(homeostasis: 恒常性)。従って遺伝子の構造も極めて複雑である。機能していない部分が機能している遺伝子の途中を分断するように点在し、その長さは実に遺伝子全体の95%にも及ぶ。たった5%の遺伝子しか生命維持に機能していないのは驚きに値する。それ以外の部分は過去に必要であったものかもしれないし、今後必要になるかも知れない遺伝子なのである。これらを捨てずにもっているすなわち、多細胞生物は「ため込み型」の遺伝子進化経路を辿ったように思われる<sup>4)</sup>。しかし、ここにまた始原菌という二つの原生物界を結びつける新しい役者が登場したことによって生命の進化に関する研究分野が急展開しそうな気配を感じる。一方、超好熱始原菌が生命の維持代謝に使っている酵素(生体触媒)は当然すべてが熱に対して安定である。これは、現在多大なエネルギーを消費している化学触媒の代用となる可能性を秘めている。さらに酵素はその役割を終えれば土に帰ることができる訳であり、地球環境保全の立場から極めて理想的な触媒として今後の研究開発が期待される。

## (2) 物質循環とリサイクルの思想

### —人類生存は微生物のおかげ—

現在の生命活動の根源は、植物が行う「光合成」すなわちCO<sub>2</sub>(二酸化炭素)ガスの有機物への変換と、微生物や動物による有機物の二酸

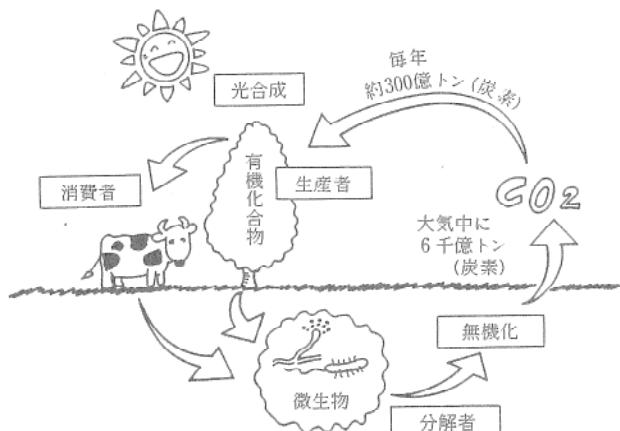


図2 地球上における炭素物質循環.

化炭素への変換、すなわち無機化の両反応による炭素を中心とした物質循環である(図2)。光合成により捕捉された太陽エネルギーが全ての生物に分かれあたえられていると言うこともできる。生物の身体を構成する主要元素には、炭素、水素、酸素、窒素、マグネシウムがあり、その他にもカルシウム、ナトリウム、鉄、銅、マンガン、コバルトなどが微量必要である。これらの元素も地球と生体で循環しており、その主役は各種微生物である。また我々の腸内にも多くの細菌が棲息(共生)しており、彼らのおかげで順調な消化吸収が可能になる。また、動物や植物細胞にはミトコンドリアという呼吸に重要な役割を果たす小器官があるが、いくつかの証拠からこれは過去に嫌気性細菌に共生した好気性細菌の名残といわれている。こうみると、人類生存は微生物のおかげであると言っても過言ではない。また今世紀に発達した科学技術のおかげで有用物質が多数生み出されたが、中には微生物が分解し難い物質もあり結果として環境汚染につながっている。それは地球上での合成と分解のバランスが崩れたためである。近頃、炭素税の導入が検討されはじめているが、その背景にあるのは炭酸ガス(産業廃棄物)の過剰放出が原因で起こる地球温暖化問題であり、地球上で快適な生活を送るためにあらゆる面でバランスのとれた物質循環が必要である。21世紀にはリサイクルの考え方方が基本になるであろう。

### (3) 地球を守る微生物

#### —環境改善に活躍する微生物の具体例—

広範囲な地球規模の人為的汚染状況に際して、もっと積極的に微生物の力を利用することにより滞っている物質循環を潤滑に回転させて地球環境を修復しようという機運が高まっている。これらの技術はバイオレメディエーションと呼ばれており、活性汚泥による下水処理などはかなり以前から既に実用化されている。ここでは石油代謝細菌に関する我々の研究を紹介する。石油分解菌も古くから研究されているもののひとつであり、オイルショック以前は石油分解菌をつかって石油から食糧タンパク質を生産することも考えられていた。

石油の主成分である炭化水素は最も還元された炭素であり、分子中に酸素原子を含まない。従って、この酸化分解反応では、通常の糖質発酵の約3倍の酸素を必要とすることが理論的にも実験的にも明らかにされ、好気的分解が世界の常識となっていた。このような状況の下で、我々は無酸素条件(嫌気条件)下で炭化水素を分解利用できる極めて興味深い細菌を静岡県相良油田から分解した<sup>5)</sup>。分離に用いた培地はCO<sub>2</sub>と石油を炭素源とする実に簡単な組成である。この培養条件で安定に生育する菌のうち石油を添加することによりその増殖が良くなる菌株を選択した。細胞の増殖は水溶液中よりも主に油滴の表面で認められた。本菌が利用する炭化水素は石油以外にデカン、ドデカン、テトラデカン、ヘキサデカン、ベンゼン、トルエン、シクロヘキサンなどであった。電子顕微鏡観察の結果、細胞表層は非常に凹凸が激しくかつ厚い構造を有していた。細胞質内には外部から取り込まれた油滴と思われる電子密度の低い部分

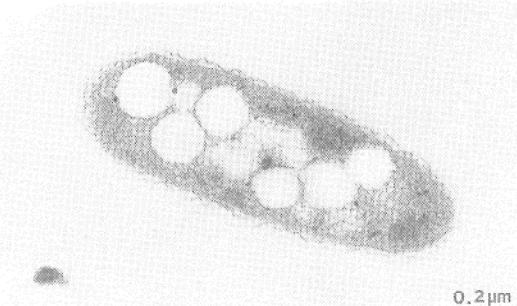


図3 HD-1株の透過型電子顕微鏡観察。凹凸の激しい細胞表層構造と細胞内の油滴が観察できる。

が多数観察された(図3)。最近、石油主成分のひとつである脂肪族炭化水素(アルカン)を嫌気的に分解させたところ分解産物として炭素鎖長の短くなったアルケンが検出できたことから酸素を使わないので水素を奪う酸化方法を使っていることが明らかになった。本菌は石油のクラッキングが可能なのであろうか<sup>6)</sup>。各種生理試験による同定の結果、*Pseudomonas*属に最も近いと判断されたが完全に合致する種がなかったために16S rRNA配列に基づく系統解析を行った。その結果、本菌は独立栄養細菌グループの新属新種であることが明らかとなっている。現在のところ仮にHD-1株と命名している。

一方においてHD-1株は基本的に石油がなくともCO<sub>2</sub>を单一炭素源として生育することが可能である。エネルギー源として光ではなく水素を利用する点が光合成生物とは異なる。また、HD-1株の菌体からクロロホルム/メタノール混合溶媒で抽出される疎水性画分を調べたところ乾燥菌体重量当たり20~40%に達することが分かった。さらに、CO<sub>2</sub>を单一炭素源とする培地で生育したHD-1細胞から調製した疎水性画分の中に膜脂質以外にさらに極性の低い物質、例えば炭化水素類(石油成分)などが含まれていることが示唆された。そこでクロロホルムに溶ける無極性成分について詳しく構造解析した。その結果、本菌を分離した原油の組成と似ていることが分かった(図4)<sup>7)</sup>。石油がどのようにしてできたかについては有機説、無

機説ともに決着していない<sup>8)</sup>。今回の結果は油田に生息している細菌が自身の代謝によってCO<sub>2</sub>を石油成分に変換していることを示しており、石油成因説に新しい視点を投じるものと言えよう。

以上の結果から、HD-1株は炭化水素化合物を分解するばかりではなく嫌気条件下においてCO<sub>2</sub>から逆にこれらを細胞内に固定する能力を有することが判明した。現在、本菌以外にこのような報告例はない。本菌は嫌気条件下で最酸化型の炭素化合物であるCO<sub>2</sub>と最還元型の炭化水素との間の変換を行っており、新しい炭素物質循環系を提示している。さらに本菌は窒素を固定しながら生育することも可能であった。すなわち、HD-1株は無酸素条件下において炭素源、窒素源、エネルギー源としてガス状物質(CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>)を利用しながら石油成分を細胞内に蓄積するわけであり、これはまさにHD-1株が原始地球で石油生成に貢献していた(あるいは現在もしている)姿を連想させる。今後、本菌の代謝経路を解明し、さらに個々の活性を増強すること(石油分解、CO<sub>2</sub>固定と石油生産)を通して地球環境の維持改善にわずかでも役立つことが我々のバラ色の夢である。

## 参考文献

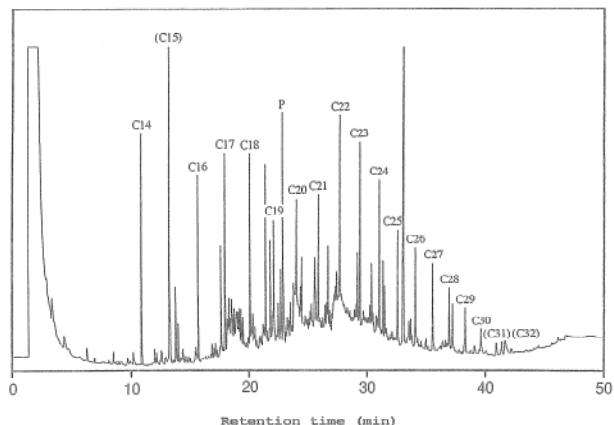


図4 HD-1株由来の無極性成分の分析。  
数字(C14~C32)はおのおのアルカンの炭素数、  
Pはパルミチン酸。

- 1) M. Morikawa, Y. Izawa, N. Rashid, T. Hoaki and T. Imanaka. : Appl. Environ. Microbiol., 60, 4559-4566 (1994).
- 2) N. Rashid, M. Morikawa and T. Imanaka. : Gene, 166, 139-143 (1995).
- 3) N. Rashid, M. Morikawa and T. Imanaka. Mol. Gen. Genet., in press.
- 4) 松原謙一, 中村桂子: 生命のストラテジー(岩波書店)(1990).
- 5) M. Morikawa and T. Imanaka. : J. Ferment. Bioeng., 76, 280-283 (1993).
- 6) M. Morikawa, M. Kanemoto and T. Imanaka. : J. Ferment. Bioeng. 82, 309-311 (1996).
- 7) 森川正章, 今中忠行. 蛋白質核酸酵素, 40, 52-60 (1995).
- 8) 手塚真知子: 素顔の石油(裳華房)(1991).