

〔研究ノート〕

生命の起源

石川 輝海

序文

1950年代の生命起源に関する実験はH. UreyとS. Millerによっておこなわれた。彼らの実験は大きなフラスコの底に水を満たし、原始大気（二次大気）に模した水蒸気（ H_2O ）、メタン（ CH_4 ）、二酸化炭素（ CO_2 ）、窒素（ N_2 ）からなる混合気体を入れて、稲妻に模した電気放電をフラスコ内で行った。そしてそのまま放置した。二・三か月後に、この実験で複雑な有機物が合成された。これは原始地球の原始スープである。数種のアミノ酸からなる有機分子はグリシン、ホルムアルデヒド、アデニンなどの核酸塩基で、生命体に必要な物質である。これらは自分自身を再生産する能力のあるDNAにやがて発達した。これらの分子による化学進化の最初のステージは生命体の誕生前に始まった。これが起きた時、最初の物は保存されないし、どのような岩石にも記録されていない。

西オーストラリア、ピルバラ、ノースポールに産出する35.5億年前の始生代の堆積岩は同心円状の層状物体を含む。それは明らかに堆積層の表面に成長したシアノバクテリアの集合体からできている。この構造物は黒色の有機質を示し、層状に成長した証拠を示す。その構造物は現在知られている物で最も古い有機物となる。また、これと同じ構造物は34億年前と年代測定された南アフリカの岩石中にも含まれている。

現在、最も古いシアノバクテリア層は27億年前と確認されている。これらの層状の部分はストロマトライトと言われ、西オーストラリア Shark Bayにある現代の藻類のストロマトライトに似ていると考えられている。その層は細胞の周りに粘着性のある軟泥からなり、堆積物の粒子が表面に付着している。層は徐々に成長し、さらに多くの堆積物が付着する、そして層状の構造を形成する。

原始シアノバクテリア（緑藻類）は直径 $25\mu m$ 以下の無核の小さい細胞である。現在は乾燥地の湖あるいは熱水の泉のような極限の温度や塩分濃度の高い、過酷な環境で生きている。先カンブリア時代の競争から逃れて、太古代と比べて極めて普通の環境の中に広大な粘着性の層を形成して繁殖した。それは化学進化の結果である。

Shark Bayの奥のHamelin Poolにストロマトライトが現在、浅い海岸に多数見られる（Figure 1）。

Shark Bayは西オーストラリアの首都パースから北へ800 kmで、南緯26度付近に位置し、半乾燥気候の地域である。年中、熱帯気団に覆われ、年降水量は500 mmと極めて低い、そのため



Figure 1 Stromatolites in Hamelin Pool, Shark Bay, Western Australia.

蒸発量が大きく、湾内の水は高濃度塩水であり、河川による淡水および陸源碎屑物の流入はほとんどない。この地域は遠浅の海域で干潮時には広い海岸が広がる。ストロマトライトは満潮時には水没し、干潮時には水面上に露出する。

Hamelin Poolは西オーストラリア西岸のShark Bayの奥にあり、奥行50 km、幅25~35 km、水深最大8 mの潟である。この潟はShark Bayと浅い狭い水路で通じている。そのため外海から海水の流入は極めて少ない。ストロマトライトは潮流の強い地域では水底から突出した孤立した背の高い(50~100 cm)茸状を示す(Figure 1)。ストロマトライトは潮間帯に最も発達し、潮下帯の水深5 mぐらまで分布している。波浪の弱い湾岸では背の低いうね状の長い列をつくる。これらの列は波の伝播方向に並行に延びる。波浪や潮流の弱い入江では平らなマット状になる。ランソウは繊細な植物であるから、外界の影響を受けやすい。

今日、藻類やシアノバクテリアはどこでも潮間帯に薄い層をつくる。そして時々、特に乾燥地では潮が引いた時の堆積物の粒子が緑色あるいは褐色の層に着色される。この有機物質は堆積層の表面の物を食べる小魚、カニ、虫、貝類の食べ物になる。そのため常に食べられてしまう。しかし先カンブリア時代には藻類を食べる動物がいなかったため、厚い層ができた。乾燥地では炭酸カルシウムが層の中の水から沈殿したため、所によっては藻類が炭酸塩をつくった。この炭酸カルシウムは化石としてストロマトライトを保存した。

現在、ストロマトライトはどうしてShark Bayにあるのか。Shark Bayの南奥のHamelin Poolは海洋から部分的に孤立している。暑い気候、淡水の流入の欠如、限られた海洋との交わりが海水の蒸発、塩分の増加を意味している。一部の場所では海水の塩分濃度が通常の2倍になる。こ

の濃縮では多くの通常の海洋生物は生きることができない。つまり塩漬けになってしまう。結果としてカニ、魚、貝類は欠如してしまい。シアノバクテリアは大繁殖する。Hamelin Poolの潮間帯の岸に立ちストロマトライトを見ると、地球史の25億年前にもどるようである。大型の動物が出現する前の堆積層を見ていることになる。

酸素の増加

地球の初期の化石を求めることは難しい。古い物ほど変成を受けやすく、浸食も受けやすいため、微細な化石は存在したとしても破壊されてしまう。西オーストラリアのピルバラ地域では35億年前の地層から微細な細胞様構造が発見される。シアノバクテリアからなるストロマトライトである。これはランソウ類で、光合成をおこなう原核生物である。光合成の時に酸素を発生させる。

酸素を発生させる光合成をおこなうランソウ類は地球環境を極めて大きく変えた。ランソウ類は水中の生物であるため、ランソウの光合成により発生した酸素は海水中の2価の鉄イオンを酸化させ、その酸化物は海底に沈殿し、堆積層を形成し、海水中から鉄分が除かれた。酸化鉄の沈殿物は鉄鉱床となり、縞状鉄鉱床として25～18億年前の地層中に見られる。

ランソウ類が増殖し、酸素の放出が増すと、海洋中の2価の鉄が酸化され、酸化鉄として海底に沈殿した。その時期は22億年前から始まるストロマトライトの種の多様性と分布量の増加の時期と一致している。縞状鉄鉱床は厚さ数100 mあり、世界の鉄需要を1万年以上にわたって賄うことができる。

海中の鉄イオンが全て酸化されると、ランソウから発生した酸素は大気中に放出され、徐々に大気中の酸素濃度を高めた。しかし陸上でも還元状態であるため、海から放出された酸素は陸上の物質を全て酸化状態になるまで、大気中の酸素量は上昇しなかったと考えられる。酸素が大気中に増加したことで4億年前にオゾン層が形成され、生物が陸上で生存できる条件ができた。これは4億年前の生物の上陸が酸素濃度増加の証拠となる。地上で生物が生存できるのはオゾン層が有害な紫外線をカットするからである。ランソウ出現による酸素の発生が陸上生物の繁栄の原因をつくったことになる。

シアノバクテリアは原核生物であり、核膜を持たない単細胞生物である。しかし真核生物は全く異なり、細胞内に必要な物が全てそろった細胞器官で、特殊な機能を持っている。核は生命物質を持ち、ミトコンドリアが酸素と物質の酸化によるエネルギーを得る呼吸作用をおこなう機能を持つ。故にエネルギーの流れの源である葉緑体は光合成をおこなう。

真核生物の進化は生命体の基本的な発達である。ミトコンドリア内の炭水化物と葉緑素を持つ緑色植物が反応して酸素を発生させ、酸素の化学反応は大量のエネルギーを発生させる。炭素の同位体による研究は17-15億年前にMt. Isa地域の岩石に真核生物が存在していたことを示した。ピルバラ地域の研究は27億年前まで真核生物の存在を拡大した。太古代初期のストロマトライトはほとんど無酸素の大気圏に生存するシアノバクテリアからできている可能性がある。嫌気状

態（無酸素）で生存する細菌の多くはメタンをつくる。しかしながら、ストロマトライトは25億年前に極めて大量に生存した。そしておそらく、この豊富さが大気圏の組成を大きく変えた証拠と考えられる。

地球の原始大気は酸素を含まなかったと考えられている。シアノ細菌の群生が酸素をつくると、ほとんどの酸素は他の元素と結合した。しかしながら、24-22億年前までに大気圏はかなりの酸素を含んでいたことは明らかである。例えば、26億年前の主要な縞状鉄鉱床の鉄床は大気圏と海洋が極めて酸化していたことを強く示している。ストロマトライトの著しい増加が強い証拠である。

酸素濃度の上昇はどのような影響があるだろうか。一つの意見は酸素を発生させる細菌や藻類の大量増加である。特に27億年前の真核生物の出現後に起きている。もう一つは水素が大気圏から宇宙空間へ逃げることである。メタンは紫外線で破壊され、水素原子を放出し、水素原子は上部大気圏から簡単に宇宙へ逃げる。大古代でも水素の段階的な喪失はおこなわれた。地球上の大部分の水素は酸素と結合して水分子になっている。そのため水素が失われると酸素は分離し、近くの岩石や大気圏内の酸素濃度は高くなる。大気圏中の増加酸素の一部はオゾンに変換し、危険な紫外線を吸収する。高い酸素濃度と紫外線からの保護が呼吸作用を基本とする生物に広範囲の進化を可能にした。呼吸作用は酸素の吸入により、体内で反応してエネルギーを得る、そして二酸化炭素の放出である。

酸素を保有しない原始大気は多量の二酸化炭素と少量のメタンからなる。現在の大気圏の高酸素濃度は動物や植物によってつくられる多くのメタンを酸素と反応して二酸化炭素と水に変換させる。しかし、太古代では無酸素であったため、メタンは残留し変化しなかった。メタンの残留が生命体発生の源の可能性がある。メタンに富む大気は光合成反応によってホルムアルデヒドやシアン化水素などが合成される。このホルムアルデヒドとシアン化水素はアミノ酸や核酸などの合成に必要な物質である。

まとめ

生命の起源にはアミノ酸、核酸などの合成に必要な初期物質はホルムアルデヒドとシアン化水素である。メタンに富む大気が存在すれば、ホルムアルデヒドは光化学反応で合成される。シアン化水素の合成は大気圏の上空でメタンの光化学反応と太陽からの紫外線によって窒素のラジカルが生成されると合成される。だから原始地球における生命の起源には原始大気に含まれるメタンの量が大きな問題になる。

謝辞

この小論を勤続42年の清水克正教授にささげます。清水教授は外国語学部の設立と国際文化協力学科の設立に多大な貢献をしました。

参考文献

- 石川輝海 (1997); 西オーストラリア北部のピルバラ岩体の地質学的考察。名学大論集, 人文・自然科学篇, 34-1, 37-44.
- 石川輝海 (2002); オーストラリア大陸の構造発達史。名学大論集, 人文・自然科学篇, 39-1, 9-17.
- 石川輝海 (2012); オーストラリア, シドニー盆地における地質構造—不整合—について。名学大論集, 言語・文化篇, 24-1, 189-193.
- Johnson, D. (2002); *The Geology of Australia*. Second edition. Cambridge Press.
- Solomon, M., Groves, D. I. and Jaques, A. J. (1994); *The Geology and Origin of Australia's Mineral Deposits*. Clarendon Press, Oxford.