

共生の科学

地球生命誌を重ね綴った構造体： 縞状鉄鉱床・ストロマトライト・サンゴ礁

前編



サイエンスプロデューサー 川口伸明

写真：縞状鉄鉱床とストロマトライトの壁（神奈川県立生命の星・地球博物館）

今日の技術開発においては、環境低負荷なエネルギーや産業技術が当然のものとして求められている。技術の改良進歩がめざましいエコテクノロジーにおいては、技術開発のスパンは短く、新技術の平均寿命は7年未満、場合によっては5年未満で、より優位性のある技術にバトンタッチされてゆく。

一方、自然の環境、とりわけ地殻や地質は、数千万年～数十億年という長い年月を経て形成され、ゆっくりと変化してゆく。環境技術を考える上でも、この長いスパンの視座に立ち、共生のビジョンを描き出すことは重要である。

今回、地球上での共生の歴史を、生物が形作った3つの構造体に焦点を当てて論じたい。

■生物が作った地質構造

神奈川県立生命の星・地球博物館では、地球上で最古の岩石である39億6000万年前のトーナラル岩質片麻岩（写真1）や、35億年前の生命化石（写真2）を見ることができる。



カナダ北西準州アカスタ地方で見つかった39億6000万年前の片麻岩。現在地球上で知られている最古の岩石の一つである。（神奈川県立生命の星・地球博物館 所蔵）

写真1 【トーナラル岩質片麻岩】



写真2 【世界最古の生命化石】

オーストラリア北西部ノースポール付近の約35億年前の地層（チャート）。細長い糸状のバクテリア、枝分かれした構造を持つ糸状のバクテリア、壁で仕切られた細長いバクテリアなどの微化石が確認された。（神奈川県立生命の星・地球博物館 所蔵）

この35億年前の生命化石を電子顕微鏡で見ると、細胞の構造から光合成細菌の一種だと考えられる。光合成というすぐ酸素を思い浮かべてしまうが、その当時は、酸素を発生するタイプの光合成生物は未だ現れておらず、二酸化炭素と硫化水素から有機物を合成し、硫黄を産生する（ $\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{S} \rightarrow [\text{CH}_2\text{O}] + \text{H}_2\text{O} + 2\text{S}$ ）嫌氣的な光合成だったと考えられている。このような嫌氣的な光合成生物としては、現在の緑色硫黄細菌や紅色硫黄細菌が知られており、これらの微化石はその祖先に当たるのではないかと考えられる。

地球最初の生命は、38億～40億年前の深海

底熱水噴出孔付近に現れたという説が有力である。35 億年前、最初の生命誕生から非常に短い時間のうちに、光合成生物、つまり独立栄養型生物が現れていた証拠が見つかったのだから、これは地球上での生命の進化を考える上で非常に重要な発見であった。

■酸素革命：シアノバクテリアがもたらした原始地球環境の大転換

嫌気的な原始海洋中で、初めて酸素が放出されたときの様子を知る重要な手がかりとなるものが、ストロマトライト (stromatolite) と縞状鉄鉱層 (BIF : banded iron formation) である。独特のドーム状の形態で知られるストロマトライトは西オーストラリアのシャークベイに今でも生きた化石として特異な姿を見せている。観光ルートにもなっていて、多くの観光客が訪れるが、採集は禁止されている (写真 3)。



写真 3 【現生ストロマトライト】

西オーストラリア北部、ユネスコの世界遺産にも登録されているシャークベイのハメルンプール (Hamelin Pool)。世界中でここだけに、現生ストロマトライトが存在する。ストロマトライトの表面に棲んでいるシアノバクテリアの大きさは $1\sim 10\mu\text{m}$ (マイクロメータ)。現在も 1 年間に 0.3mm 前後という非常にゆっくりとした速度で成長を続けている。

写真: (C) 生命の星・地球博物館

生物による造形物という点でサンゴ礁と似ているが、ストロマトライト自体は生物体ではな

く、酸素発生型光合成細菌であるシアノバクテリア (cyanobacteria : 藍藻類) のコロニーが水中で砂粒などの微粒子の層を堆積させ構築したドーム状あるいは柱状の構造体の総称である。分裂増殖するシアノバクテリアの細胞から出る粘液が海水中に浮遊する微細な粒子を捕らえ、その粒子と海水中の炭酸カルシウムが結合し、岩のような塊を形成するのである。サンゴ礁の石灰岩質の骨格はサンゴの体の一部 (後形質) と言えるが、ストロマトライトはシアノバクテリアのライフスタイルの痕跡、謂わば住居跡とでも言うべきものである。

石の塊のように見えるが、酸素を発生する光合成細菌である藍藻 (ランソウ)、つまり、シアノバクテリアが増殖して粘液を出しながら作った薄いフィルム (バイオマット) と海中の砂やミネラル粒子が交互に積み重なった層状構造になっている (写真 4)。



写真 4 【ストロマトライト断面に見られる層構造】

ストロマトライトは引き潮時には頭が水面より上に出るので大部分のシアノバクテリアは死んでしまうが、一部生き残った菌が水が満ちたときに増殖し、再びバイオマットを形成し、このような層状構造ができたと考えられる (図 1)。

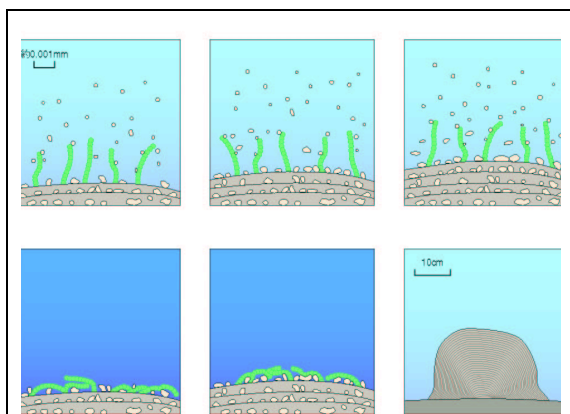


図1【ストロマトライトの形成】

シアノバクテリアが分泌する粘液に細かい砂など堆積物が海水中の炭酸カルシウムとともに沈着されて薄い層(バイオマット)ができる。シアノバクテリアは、日中は光合成をし、運動性もあるので光を求めて沈着物の表面に出てくるのだが、夜間は活動を休止するため、その上にまた薄い砂の層が重なる。この繰り返しによって炭酸カルシウムを含む固い重層構造が形成されてきたのがストロマトライト。層構造の年間の成長率は0.3~0.4mm程度。

シアノバクテリアは、藍藻（ランソウ）あるいは藍色植物（門）と呼ばれることも多いが、系統的には藻類（クロレラ、珪藻、ワカメなど）ではなく、大腸菌などと同じ細菌類である。生物は大きく二つ（真核生物と原核生物）のグループに分かれるが、シアノバクテリアなどの細菌類は原核生物に属する。光合成細菌の中でも、シアノバクテリアは酸素を発生するが、他の光合成細菌（緑色硫黄細菌や紅色細菌など）は酸素を発生しない。cyano- は「藍（あい）色」を意味するが、これはシアノバクテリアが光合成色素としてクロロフィルaに加え、藍色のフィコビルリン系色素（フィコエリスリンやフィコシアニン等）を持っていることに由来する。

■酸素の放出と縞状鉄鉱層の形成

最初のストロマトライトは 32 億年前ぐらいにでき始め、26 億年前には大繁殖して酸素をどんどん放出した。それまで分子状酸素（O₂）が

存在しなかった原始地球を、今の酸素に富んだ地球環境へと転換する出発点になったのである。

ストロマトライトが出した酸素は、最初のうちは大気中には殆んど広がらず、まずは海中に大量に含まれていた鉄イオンを酸化するのに使われた。2価の鉄が酸化されて3価の鉄になると水への溶解度が減る為に、海底に酸化鉄がどんどん沈殿していった。急激に沈殿が進んで鉄の層を作った後、海中の鉄濃度が一時的に減るので少し沈殿の速度は衰え、しかし、数億年後、また急激に沈殿を始めるといった繰り返しが見られた。こうして、およそ 15 億年くらいの間、鉄の沈殿が断続的に続いてできたのが、縞状鉄鉱層である。なぜ「縞」ができるかといえば、光合成で酸素が盛んに放出されている昼間、鉄の沈殿が起こる一方、夜間は呼吸による酸素の吸収が進むため、鉄の沈殿が抑えられ、寧ろ、砂粒や海中のミネラル分の粒子が昼間でできた鉄の層の上に重なっていくからである。鉄が多く含まれた層は黒く、鉄が少ない部分は赤～茶色に見えるので、昼夜の数だけ縞ができる。



写真5【西オーストラリア・ハマーズレイの縞状鉄鉱層】

黒い縞が鉄を多く含んだ層。白～赤茶色に見える部分は、無水ケイ酸(SiO₂)。(神奈川県立生命の星・地球博物館 所蔵)

■ストロマトライトと鉱物資源の濃縮

縞状鉄鉱層もまた「層を成す石」という点で、

ストロマトライトの一種として捉えることもできる。鉄を含んだ層状構造は西オーストラリアに一番多く、その他にもマンガン、リン酸、無水珪酸(SiO₂)を含んだストロマトライトがあり、色もグレー・黒・褐色と様々である。北米大陸の五大湖や中国、紅海などに多くのストロマトライト化石が見つかっており、化学的組成の違いから、それができた当時の地球の様子を読み解くことができるのである。

このようにして、ストロマトライトの出現は、酸素の発生にとどまらず、鉱物資源の濃縮という成果をもたらした。西オーストラリアや北米大陸、中国はじめ、世界各地に見られる縞状鉄鉱層が、微細な細菌の地球規模での活動を物語っている。そして、その鉄を資源として利用することから、人類は文明を発展させてきたのである。人類最初の鉄器として知られるのは紀元前 2300 年ごろの短剣で、鉱物資源の豊富だったアナトリア地方（現在のトルコの辺り）で作られたものである。後にこの地を征服したヒッタイト人が、紀元前 1500 年ごろ、錬鉄を木炭と混ぜて真っ赤に熱しハンマーで叩くことを繰返せば（侵炭法）、強固な鋼（はがね）ができることを見出し、青銅に替わる鋼の武器を手にし、強大な帝国を築いたという歴史がある。

■生命多様化の陰で消えるストロマトライト

日本には「ストロマトライト」の構造体は存在しないものの、沖縄・石垣島の川平（カビラ）の浜辺では、ストロマトライトの元になるバイオマット、つまりシアノバクテリアの薄いシート（バイオマット）ができるのが認められるという。しかし、潮が引くとすぐにカニなどが出てきて、それを食べてしまう、いわゆる生物擾乱（bioturbation）が起こり、層状構造に成長していかないのである。

おそらく原始の海では、いたるところにスト

ロマトライトがあったと考えられる。海中の鉄を酸化して縞状鉄鉱層を形成した後、大気中酸素も増加を始め、地球の大気組成に大きな変化を与えた。そして、上空にオゾン層が形成され、紫外線から地上の生物が守られるようになったことで、生物は地上に進出し、環境に適応した生命の多様化がおこり、生物によって多様な環境ができてきたわけである。

ところが、生物が多様化することで、その元を作ったストロマトライト自体は次第に姿を消してしまった。せっかくバイオマットができて、様々に進化・分化をした底生生物に食い崩され擾乱されてしまうため、ストロマトライトができなくなってしまったのである。

原始の環境はとてもシンプルで決して「豊かな環境」ではなかった。シンプルな生命が豊かな環境の元を作ったわけである。今日、我々が「豊かな環境」というのは、非常に人間寄りの表現で、本来は「複雑な環境」というべきだろう。複雑な環境だから多様な生物が分化していくのである。そしてカンブリア大爆発で地球上はまさに豊かな生命環境へと進化していくのであるが、その元を作ったストロマトライト自体は消滅してしまった。

しかし、今なお、西オーストラリアのシャークベイのハメルンプールには多数の現生ストロマトライトが見られ、成長を続けている。これはハメルンプールの海水の塩分濃度が高すぎる極限環境で他の生物が棲めないために、途中で他の生物に捕食されることなく、層状構造を積み重ねていくことができるためである。

（次号・後編へ続く）

執筆者：川口伸明

サイエンスプロデューサー、薬学博士（分子生物学・発生細胞化学）。東京大学大学院修了。元・株式会社アイ・ピー・ビー取締役。知財戦略コンサルティングやバイオベンチャーの起ち上げ、国際シンポジウムの開催などに尽力。