

ミクロの光合成生物は地球を救えるか？ —海洋光合成研究から地球環境を考える—

白岩善博
生物科学系教授

1. はじめに

地球環境保全は21世紀における人類最大の課題であり、中でも、大気中二酸化炭素(CO₂)濃度上昇に伴う地球温暖化の回避が急務となっている。そもそも化石燃料の消費は太古に光合成生物が固定した炭素を大気へと再び戻す作業である。光合成生物は太古より太陽エネルギーを駆動力として、炭素、酸素、窒素および硫黄等の循環作用をとおして地球環境の変遷と成立に大きく関与してきた。それと同時に、その変化した環境に生物自身が適応し、種々の新たな能力や性質を獲得し進化して来た。とりわけ光合成生物は、約35億年前に誕生したシアノバクテリアが地球大気に分子状酸素をもたらし始めて以来、CO₂および酸素環境を積極的に変化させてきた。ここでは、約2億年前にこの世に誕生した、いわば“新参者”の海洋光合成生物の生理機能研究をとおして見えて来た、ミクロ

の光合成生物と地球環境との関連について紹介したい。

2. 新参者の海洋光合成生物

円石藻とよばれる黄色の海洋植物プランクトンがいる。クロロフィル *a* と *c*, 鞭毛やハプトネマという特殊な鞭状構造をもちハプト植物に分類される。現生種で200種、中生代の化石種では190種程が知られている。その中の代表種であるエミリアニア・ハックスレイ(通称エミリー)は直径3-5ミクロンの単細胞の光合成生物であり、炭酸カルシウム結晶からなる実に精巧にできたココリス(円石)と呼ばれる円盤状の構造体を形成し、それらを16個程細胞表面に配置している(図1)。このココリスは更に小さなセグメント結晶からなる構造体で、それらは全て細胞内のゴルジ体由来の特別な小胞の中で形成され、一個の完成されたココリスとなってから細胞外表面へと運ばれ

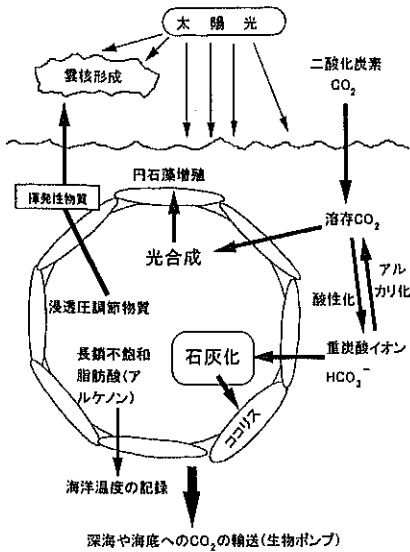


図1 円石藻のいろいろな生理機能と地球環境とのかかわり

る。形成される結晶は方解石に限定され、別の結晶型であるアラレ石は形成されない。コクリス形成には特異的な酸性多糖分子が関与するが、不思議なことに、この物質は炭酸カルシウムの結晶成長を促進するのではなく“阻害する”ものであり、生物が“かたちをつくる”ための巧妙なしくみが垣間見える。これらの機構はガラスを作る光合成生物“珪藻類”によるシリカ結晶の形成機構と共に、いわゆるナノテクノロジー分野においても最近注目され始めている。円石藻の写真は生物科学系井上研究室のホームページ

(<http://www.biol.tsukuba.ac.jp/~inouye/ino/contents.html>) で公開されているので、是非、神秘的な自然の造形美を堪能することをお勧めしたい。

円石藻は時として大量増殖（ブルーム形成）するなど海洋におけるバイオマス生産量が非常に大きいことでも知られる。最近では、北大西洋やベーリング海等でのブルームが衛星画像によって観測され、その範囲は7,200km²以上にも及び、炭酸カルシウムの生産量は年間72万トンであったとの見積りが有る。太古においては中生代白亜紀（1.5–0.65億年前）にドーバー海峡に面する“白い崖”（チョーク層石灰岩）が円石藻の堆積により形成されたことでも知られ、ミクロの生物ながらそのCO₂固定能力は膨大である。

3. 円石藻のもつ2種類のCO₂固定メカニズム

大気と平衡状態にある海水中には約2ミリモルの溶存無機炭素が含まれほぼ飽和状態にある。CO₂、HCO₃⁻およびCO₃²⁻の3種の分子種がありその存在比は1:158:19である。したがって、HCO₃⁻を利用する反応が最も有利であると考えられるが、円石藻の光合成反応の基質はHCO₃⁻ではなくCO₂であることを我々は

明らかにした(図1)。光合成反応により海水中の CO_2 が細胞内に吸収されると、細胞周辺の CO_2 濃度の低下が生じる。その分が海水中の HCO_3^- から供給されると、 OH^- の生成(H^+ の消費)がおこり、海水のアルカリ化が起こる。一方、細胞内石灰化反応の基質は CO_2 ではなく HCO_3^- であり、その結果海水の酸性化が促進される。したがって、石灰化反応が海洋中で進行すると炭酸の平衡の変化から海洋中に溶存する無機炭素が CO_2 として大気中へ放出され、大気中 CO_2 濃度の上昇を引き起こすとの考えが出された。そのため、円石藻の増殖は地球温暖化促進をもたらすという“円石藻悪玉論”が提唱された。しかしながら、我々を含めて詳細に石灰化機構の解明を試みた結果、円石藻の石灰化反応は光合成依存的事であることや CO_2 を固定する光合成速度が常に石灰化反応を上回ることが分かり、その悪玉論は否定された。ただし、夜間は呼吸反応によって放出される CO_2 が結果的に海水の酸性化を引き起こし、その速度は小さいが CO_2 放出のソースとなる。したがって、光合成速度、石灰化速度および呼吸速度のバランスの維持が、海洋における溶存無機炭素の保持、すなわち海洋の“ CO_2 シンク”機能の維持に重要な要因となっている。

では、円石藻はなぜこのような石灰化反応をもつようになったのだろうか? ココリスにはどのような生理的役割があるのだろうか? これまでいくつかの仮説が提唱されてはいるが実験的根拠に基づくものは僅かであった。我々は円石藻細胞からココリスを除去した細胞を用いて実験した結果、光合成活性はココリス除去の影響をまったく受けず、ココリス再生過程におけるその生育速度もココリスを有する細胞のそれと全く同じであることを見出した。更に、円石藻の細胞表面のココリスを放射性同位元素(^{14}C)ラベルした後、培養液中の無機炭素を枯渇させる条件を与えたところ、先にラベルされたココリスの ^{14}C が急激に減少し、それが光合成産物へと移行していくことを見出した。以上の結果から、細胞表面上のココリスの存在そのものは細胞の増殖速度の維持そのものに対しては積極的な意味をもたず、 CO_2 貯蔵体としての役割や海洋での生存にかかわるなんらかのストレス回避的な役割を果たすものと我々は考えている。

4. 地球環境との密接な関わり

円石藻のココリスは周囲の浸透圧変化に対するバリアーとはならず、ジメチルスルフォニオプロピオネート(DMSP)

という硫黄化合物を浸透圧調節物質として合成し、浸透圧バランスを保っている。細胞が破壊されこのDMSPが細胞外に放出されるとジメチルスルフィド(DMS)に変化し、大気中へ放出され、DMSおよびその酸化物が雲の凝結核となり雲の形成を促進する。その結果、太陽光線を遮蔽し気温上昇を防ぐことが報告されている。したがって、既に述べたCO₂固定能とあわせて、地球環境に与える影響が大きく、海洋における円石藻の増殖、石灰化および硫黄化合物生産の制御が現在重要な課題となっている。そのため、実験室レベル、海洋における中規模閉鎖系でのメゾコズム実験および広海域開放系での鉄散布実験（海洋版花咲爺さんプロジェクト）等が行われ、多くの知見が集積され始めている。海洋における植物プランクトンの増殖は確かに大気中CO₂濃度の低減に寄与することが明らかとなっているが、その定量的データや人為的制御の可能性に関する研究はその緒についたばかりである。この中で我々は、実験室レベルでの実験をとおして円石藻の増殖、光合成および石灰化の速度制御に関する基礎的知見を提供すべく研究を進めている。

一方、円石藻は地球環境変動の“記録者”でもある。円石藻は死滅した後海底

へと輸送される。その中に円石藻の中でもゲフィロカプサ属に特異的な有機バイオマーカー分子として37~39個の炭素分子をもつ長鎖不飽和脂肪酸であるアルケノンおよびアルケノエイトが含まれており、海底堆積物中に比較的安定に保持されている。それらの分子はトランス型の不飽和（二重）結合を有するが、その不飽和結合数が生育時の温度により正確に規定されるため、その分析によって、白亜紀以降の古海洋温度の復元が試みられている。我々は有機地球化学者と共同でその古海洋温度復元に不可欠な“アルケノン温度計”の作製とその精度に影響を及ぼす要因についての解析を行っている。これらの成果は、過去の海洋表面温度の変化の推定に用いられ、海洋環境変遷の解析やその将来予測に役立つことが期待される。

当分このミクロの光合成生物の特殊な生理機能と地球環境とのかかわりに注目しながら研究を進めていきたい。

（しらいわよしひろ 植物代謝生理学）