

円石藻(ハプト植物門)の石灰化が 海水のpHに及ぼす影響

岡崎 恵視¹⁾・江澤 千佳¹⁾・市村 宣幸¹⁾

円石藻はハプト植物門に属する単細胞藻類で、細胞表面にはコッコリスと呼ばれる石灰化した『鱗』を多数付着している(写真1)。1個のコッコリスは、直径約1~2 μm 程の円盤で、炭酸カルシウム(方解石)が約90%、Ca-結合多糖類などの有機物が約10%を占める(高野, 未発表)。この鱗は細胞内のゴルジ体由来の小胞中で完成された後、細胞外へ放出されコックスフェアーとなって細胞表面を覆う(第1図)(Westbroek et al., 1984; 岡崎・古谷, 1985)。コッコリスの形態は円石藻の種類によって異なり(写真1A, B参照)、種を同定する特徴となっている。方解石からなる、この精巧な構造をしたコッコリスの形成には、Ca-結合酸性多糖類が関与していると思われ(De Jong et al., 1976; 岡崎ら, 1992)、いわゆる『生物制御型石灰化』の典型的な例と言える。

円石藻は写真1に見られる様に、直径5~10 μm の単細胞の植物性プランクトンではあるが、地質時代を通じて今日まで、外洋性の炭酸カルシウム形成生物として重要な役割を果たしてきた(Pentecost, 1991)。例えば、現在白亜と呼ぶ石灰岩は、中生代白亜紀に円石藻が形成したコッコリスが海底に沈着・堆積して造られたものである。現在の海洋においても、莫大な量の炭酸カルシウムを形成していると考えられている。円石藻の中でも、エミリアニア・ハックスレー(写真1A)は世界の海洋に広く分布する種で、大西洋の北西ヨーロッパ大陸棚端で、春から夏にかけて大規模な赤潮を形成することでよく知られている。人工衛星からの観察によると、一つの赤潮の面積は数千平方キロメートルにも及ぶ。この海域での年間の炭酸カルシウム形成量は72万トン(CO₂量に換算して32万トン)と推定されている

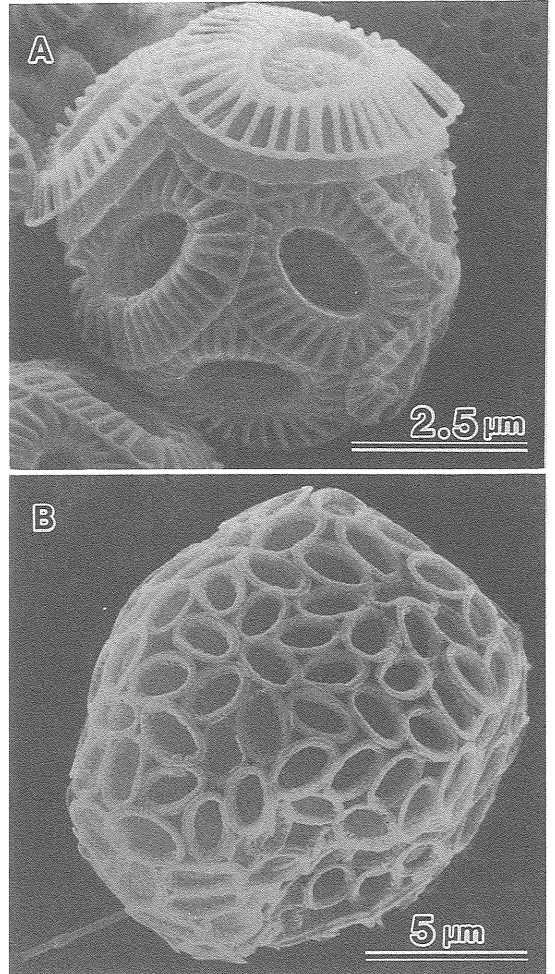
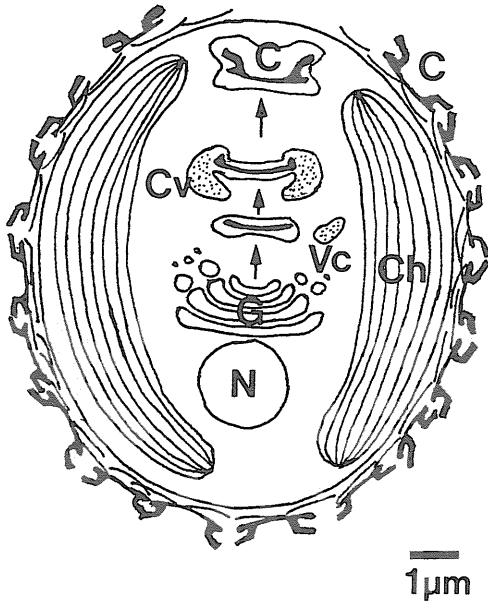


写真1 円石藻二種の走査電顕像(Okazaki, 1992による)
A, エミリアニア・ハックスレー(*Emiliania huxleyi*): 世界の海洋に広く分布し、外洋性炭酸塩を形成する。B, プリュウロクリシス・カルテレー(*Pleurochrysis carterae*): 沿岸種で、鞭毛により運動する。円石藻は、細胞表面にコッコリスと呼ばれるCaCO₃を主成分とする“鱗(スケール)”を付ける。コッコリスの形態は種に特徴的である。

1) 東京学芸大学教育学部生物学科: 〒184 東京都小金井市
貫井北町4-1-1

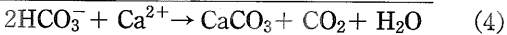
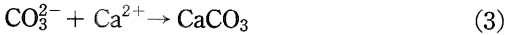
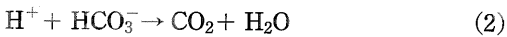
キーワード: 円石藻, 石灰化, 二酸化炭素



第1図 円石藻のコッコリス形成過程を示す模式図(岡崎・古谷, 1985による). コッコリスは細胞内の特殊な小胞(Cv)中で形成される. C, コッコリス; Ch, 葉緑体; Cv, コッコリス小胞; G, ゴルジ体; N, 核; Vc, コッコリスゾームを含む小胞.

(Holligan et al., 1983).

ところで、円石藻のコッコリス形成に伴う炭酸カルシウム沈着を炭酸代謝の面から考えると次の式が書ける(Okazaki, 1992).



微アルカリ(pH 8.2付近)の海水中には約2 mMの溶存無機炭素が存在し、その約90%が重炭酸イオン(HCO_3^-), 9%が炭酸イオン(CO_3^{2-})として存在し、 CO_2 はわずかに1%以下である。このような炭酸平衡のなかで炭酸カルシウムが沈着すると、 CO_3^{2-} イオンが使われるので上記(1)の反応が進み、 H^+ が形成される。即ち、海水が酸性化し、収支反応(4)に示されるように、溶存している HCO_3^- から CO_2 が発生することになる(角皆, 1989)。しかし、円石藻においては、炭酸カルシウムが形成されると同時に光合成が進行しているので、石灰化に伴って形成される CO_2 は光合成によって有機物中に固定される。また、円石藻の場合には、光合成で固定される CO_2 を、

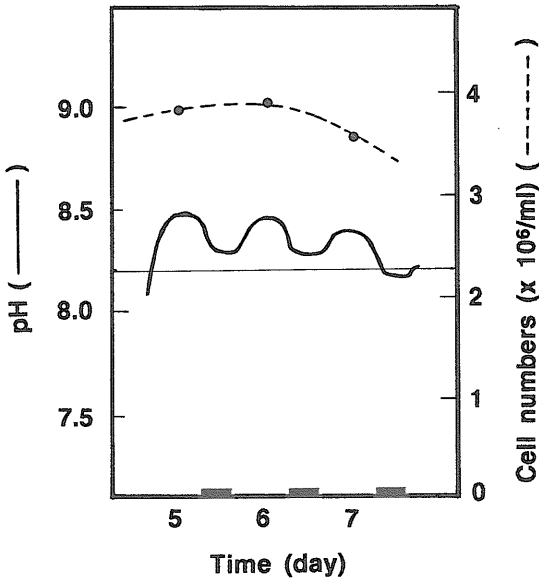


の反応で得ることができる。この場合には、 OH^- の形成を伴うので、海水はアルカリ側に傾く。従って、石灰化によって海水のpHが下降する(酸性化する)か否かは石灰化速度と光合成速度に依存することになる。

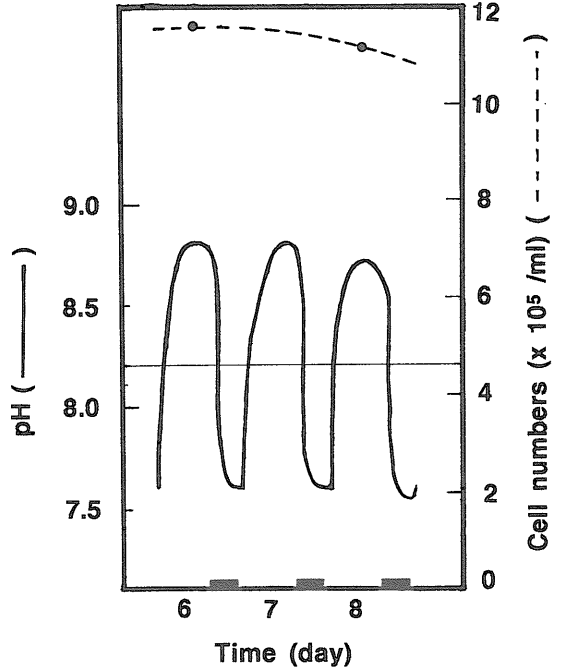
そこで、著者らは円石藻の二種、エミリアニア・ハックスレー(写真1A)とプリュウロクリシス・カルテレー(写真1B)を培養して、培養メediumのpHの変化を調べた。エミリアニア・ハックスレーは、約36%の炭酸カルシウムを含む(岡崎ら, 未発表)外洋性の種で、細胞の直径は約5 μmである(写真1A)。一方、プリュウロクリシス・カルテレーは、藻体乾燥重量当り約15%の炭酸カルシウムを含有する比較的石灰化量の少ない沿岸性の種で、細胞の直径は約10 μmである(写真1B)。

実験では、藻体を含む培養液1.0リットルに大気(350~400 ppm CO_2 を含む)を絶えず通気(1.3リットル/分)して、約10日間にわたって藻の増殖に伴うメediumのpHの変化を連続して追跡した。その際、水温は18°Cに保ち、光照度は約6000ルクスとし、光周期は18時間明期、6時間暗期とした。その結果を第2, 3図に示した。図には、培養5~6日目の定常期に達した直後の3日間のpHの変化のみを示した。

エミリアニア・ハックスレーでは、定常期の細胞密度は $3.8 \times 10^6/\text{ml}$ であったが、明期にはメediumのpHは8.5まで上昇し、暗期には8.3まで下降した(第2図)。7日以後は藻体の分解が起きた。藻体を含まない海水を通気した場合には、pH 8.2(図中の細い線)に一定に保たれた。明期でのpHの上昇は光合成による CO_2 の固定速度が石灰化速度を上回るためであり、暗期のpHの下降は呼吸による CO_2 の放出によるものである。一方、プリュウロクリシス・カルテレーの場合には、定常期の細胞密度は $11.7 \times 10^5/\text{ml}$ で、エミリアニア・ハックスレーより低い。この藻においても、メediumのpHは明期に著しくアルカリ側に傾き、pH 8.8にもなった(第3図)。また暗期にpHは7.6まで下降した。暗期の著しい酸性化は呼吸によるものであるが、この種はエミリアニア・ハックスレーと異なり、鞭毛により運動するので、このために呼吸速度が大きいと考えられる。



第2図 エミリアニア・ハックスレーの培養に伴うメディアウムのpHの変化
 培養条件：明期18時間，暗期6時間(図中の■)；光照度6000ルクス；温度18°C；1リットルの藻体液を連続通気(350~400 ppm CO₂を含む大気を1.3リットル/分で通気)。



第3図 プリュウロクリシス・カルテレーの培養に伴うメディアウムのpHの変化。
 培養条件は第2図参照。

いずれにせよ、両種ともに、石灰化が主に進行する明期にメディアウムのpHがアルカリ側に移行することは明かである。ここには示していないが、両種の対数期におけるpHの変化(培養開始後1~4日)の様子は、定常期のそれとほぼ同じであった。ただ、明期、暗期におけるpHの変動巾は細胞密度が低いために小さく、また明期におけるアルカリ側への移行が暗期の酸性側への移行より大きく現れた。これは、対数期の細胞は定常期の細胞に比べて、光合成速度が大きいためである。著者らの研究では、エミリアニア・ハックスレーの光合成速度は1×10⁶細胞/hr 当り320 ng Cで、プリウロクリシス・カルテレーの3400 ng Cと比べて、約10分の1である。一方、石灰化速度はエミリアニア・ハックスレーでは280 ng C、プリウロクリシス・カルテレーでは170 ng Cで、前者の方が石灰化速度が大きい。従って、対数期の細胞では光合成速度と石灰化速度の比は、エミリアニア・ハックスレーでは1.2 : 1、プリウロクリシス・カルテレーでは20 : 1という値を得ている。定常期の細胞においても、この様な両種の特性が第2, 3図に反映されていると思われる。

こうした実験から、両種とも石灰化が主に起きる明期に、海水のpHが大気と平衡化している海水のpHよりもアルカリ側に傾くことが明らかになった。この事実は、円石藻の赤潮の際にも、前述の式(4)に従って海水中より大気中にCO₂が放出されることがないことを示している。しかし、角皆(1989)が指摘するように、光合成によって固定されたCO₂が有機物の分解により放出されることを考慮しなければならない。この分解量とその速度を見積もることが今後の課題である。

今後は、地球規模の炭素循環における円石藻の役割を、実験とフィールドの両面から解明することが重要である。ヨーロッパでは、エミリアニア・ハックスレーが地球の気候に及ぼす影響を調べるプロジェクト(GEM)が、オランダのライデン大学地質生化学部門 Westbroek 博士らを中心にして、1990年から開始されている(Westbroek, 1992)。

引用文献

De Jong, E. W., Bosch, L. and Westbroek, J. P. (1976) : Isolation and characterization of a Ca²⁺-binding polysaccharide associated with coccoliths of *Emiliania huxleyi* (Lohmann) Kamptner. Eur. J. Biochem., 70, 611-621.

Holligan, P. M., Viollier, M., Harbour, D. S., Campus, P. and Champagne-Philippe, M. (1983) : Satellite and ship studies of coccolithophore production along a continental shelf edge. *Nature*, **304**, 339-342.

Okazaki, M. (1992) : Algal calcification: Its contribution to the "CO₂ problem". *Korean J. Phycol.*, **7**: 147-154.

岡崎恵視・古谷庫造(1985) : 藻類の石灰化機構. *藻類*, **33**, 328-344.

岡崎恵視・佐藤達也・松永 是・高野博幸(1992) : 円石藻 *Pleurochrysis carterae*(ハプト植物門)の細胞及び単離コッコリスから得たCa²⁺-結合酸性多糖について. p. 66, 第1回マリンバイオテクノロジー研究発表会講演要旨, 東海大学.

Pentecost, A. (1991) : Coccolith accumulation rates: Cretaceous to Recent. In: *Mechanisms and Phylogeny of Mineralization in Biological Systems* (ed. S. Suga and H. Nakahara),

Springer-Verlag, Tokyo, pp. 369-373.

角皆静夫(1989) : 炭素などの物質循環と大気循環, *科学*, **59**, 593-601.

Westbroek, P. (1992) : Climate and the coccolithophores. *Gaian Sci.*, **3**, 1-12.

Westbroek, P., De Jong, E. W., Van der Wal, P., Bormann, A. H., De Vrind, J. P. M., Kok, D., De Bruijn, W. C. and Parker, S. B. (1984) : Mechanisms of calcification in the marine alga *Emiliania huxleyi*. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, **304**, 435-444.

OKAZAKI Megumi, EZAWA Chika and ICHIMURA Nobuyuki (1993) : Effects of calcification by coccolithophorids (Haptophyta) on pH of seawater.

豆辞典

海洋の微細藻類

外洋域で光合成によって有機物を生産する植物は、海洋表層を浮遊する単細胞あるいは群体性の微細藻類(植物プランクトン)である。外洋域で多く見られる植物プランクトンは、珪藻とハプト藻に属する円石藻で、珪藻は珪酸質の、円石藻は石灰質の殻を持つ。渦鞭毛藻は、鞭のような鞭毛を持つ微細藻類で、硬質の殻を作らない。ほかに、ハプト藻、クリプト藻、プランノ藻も鞭毛を持ち、動物のように泳ぐことができる。

一方、サンゴ体内の共生藻も渦鞭毛藻の1種で

あるが、サンゴ体内では遊泳のための鞭毛を失っている。ラン藻は、核を持たない原核生物で、外洋域では浮遊性のものが、サンゴ礁の海岸ではマット状に固着したものが見られる。ラン藻の一部は、大気中の窒素を窒素源として利用する能力を持っている。

図は、1, 2が珪藻, 3が円石藻, 4がラン藻, 5, 6が渦鞭毛藻, 7がサンゴ体内の渦鞭毛藻。いずれも各藻類の一例で、種類と形態は様々である。

(茅根 創)

