

サンゴ礁による 二酸化炭素固定

Carbon dioxide fixation by coral reefs

Y. Ikeda

はじめに

地球環境問題の一つとして大気中の二酸化炭素濃度の増大に伴う温室効果が、懸念されている。これは化石燃料の大量消費により、地球規模での炭素循環のバランスがくずれたことに起因する。この対策として第一に検討されるべきことは、省エネルギーや代替エネルギーにより石油、石炭などの消費を抑制することである。だが同時に二酸化炭素を固定化することにより人為的な炭素のリサイクルルートをつくることも重要である。ここではサンゴ礁による二酸化炭素の固定化に焦点をあててこの問題を考えてみたい。

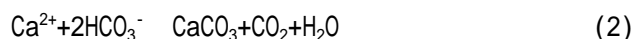
光合成と石灰化

生物は光合成あるいは石灰化により炭素固定を行う。光合成では二酸化炭素と水により有機物がつくられる。石灰化ではカルシウムと炭酸から炭酸カルシウムの結晶ができる。しかし、一般に石灰化の過程においては二酸化炭素が発生するため、石灰化のみでは大気中の二酸化炭素を固定することはできない。石灰化と光合成が同時に行われ、石灰化で発生する二酸化炭素より多くの二酸化炭素が、光合成で利用される場合に二酸化炭素は固定されることとなる。サンゴ礁には様々な生物が棲息し、サンゴや石灰藻は光合成も石灰化も行う。また藻類は光合成を行い、貝類は石灰化を行う。これら生物のトータルの営みの結果としてサンゴ礁での二酸化炭素の収支が決まる。

光合成は次式のように二酸化炭素と水から有機物と酸素ができる過程である。

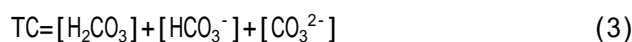


一方、石灰化は次式のようにまとめられる。



淡水においては上式のように 1 当量の炭酸カルシウムの生成により 1 当量の二酸化炭素が発生する。しかし表層海水では炭酸物質による緩衝効果により 1 当量の炭酸カルシウムの生成によりおよそ 0.6 当量の二酸化炭素しか発生しないことが知られている。

光合成と石灰化に共通して必要なものは炭酸物質である。海水中の炭酸物質は分子状の炭酸 ($\text{H}_2\text{CO}_3 = \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$)、炭酸水素イオン (HCO_3^-) および炭酸イオン (CO_3^{2-}) の形で存在する。海水中の炭酸濃度という場合は、この 3 つの炭酸種の濃度の総和である全炭酸 (TC) を指すことが多い。



pH8.2 付近の表層海水の全炭酸は 2.2m mol/l ほどで、その 9 割以上が炭酸水素イオンの形で存在している。

サンゴ礁の光合成速度、石灰化速度の測定

サンゴ礁での二酸化炭素の収支をみるためにはサンゴ礁の光合成速度と石灰化速度を比較すればよい。それらの測定には pH-アルカリ度法と呼ばれる方法がよく使われる。これは海水の pH とアルカリ度(TA)の変化から正味の光合成速度と石灰化速度を見積もる方法である。アルカリ度は、海水中の陽イオンの総和と陰イオンの総和が等しいという電気的中性原理から定義される値である。実際には海水を酸で滴定することによりもとめられ、海水中では以下のように表されると考えてよい。

$$TA=[HCO_3^-]+2[CO_3^{2-}]+[B(OH)_4^-]+[OH^-]-[H^+] \quad (4)$$

石灰化により 1 当量の炭酸カルシウムが生成された場合、アルカリ度は 1/2 当量減少するが、分子状の炭酸が有機物となる光合成においてアルカリ度は変化しない。従って石灰化速度 (IC) は以下のように表される。

$$IC=1/2 TA \quad (5)$$

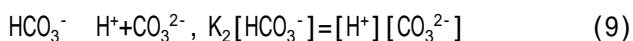
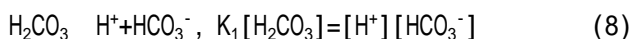
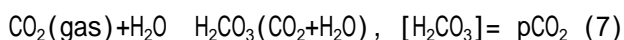
一方、全炭酸 (TC) は光合成、石灰化の両者により変化する。従って光合成速度 (OC) は全炭酸の変化量 (TC) から石灰化速度を差し引くことにより求められる。すなわち

$$OC= TC-IC= TC-1/2 TA \quad (6)$$

ここで TC は pH とアルカリ度から以下に示す炭酸平衡計算により求められる。

海水中の炭酸平衡

海水中の炭酸平衡に係わる基本的な反応は以下の 3 式で示される。



ここで, K_1, K_2 は水温、圧力、塩分により定まる定数で、 pCO_2 は大気中の二酸化炭素分圧である。これら 3 式の中の未知数は $[H_2CO_3]$ 、 $[HCO_3^-]$ 、 $[CO_3^{2-}]$ 、 pCO_2 および $pH (= -\log[H^+])$ の 5 つである。式が 3 つで未知数が 5 の条件では 5 つの未知数のうち任意の 2 つが決まれば、残りの未知数も一意的に定まる。実際には測定の便のため、さらに (3) 式的全炭酸 (TC)、(4) 式のアルカリ度 (TA) という概念を加えて式を 5 つ、未知数を 7 つにしている。この場合でも 7 つの未知数のうち、任意の 2 つが決まれば残りが一意的に決まるという関係は変わらない。なお (4) 式のアルカリ度にあられる $[B(OH)_4^-]$ は水温、圧力、塩分により定まる定数であり、 $[OH^-]$ は $[H^+]$ で決まる。7 つの未知数の中で測定可能なものは pH 、 TA 、 TC 、 pCO_2 の 4 つである。 pH -アルカリ度法ではこの 4 つのうち pH と TA の 2 つを測定し、前節で述

べたように光合成速度と石灰化速度を計算する。

サンゴ礁は二酸化炭素の吸収源か発生源か?

サンゴ礁が二酸化炭素を固定するためには光合成による正味の有機炭素生産がまずなければならない。従来、サンゴ礁では光合成による総有機炭素生産量は総消費量に等しく、正味の有機炭素生産はないと考えられていた。これは光合成に必要な窒素、リンなどの栄養塩の供給の面から推測された。すなわちサンゴ礁を取り囲む熱帯、亜熱帯の外洋は窒素、リンなどの栄養塩に乏しい貧栄養状態であるため、そこからサンゴ礁へ新たに供給される栄養塩はほとんどない。よってサンゴ礁内の栄養塩は有機物の中に取り込まれるが、比較的短期間のうちに分解されて再び栄養塩になるといった循環を繰り返しているのみである。従ってサンゴ礁内の正味の有機炭素生産はないと考えられる。しかし実際のサンゴ礁における測定の結果、サンゴ礁内で正味の有機炭素生産が存在する可能性も指摘されている。また栄養塩としての窒素もサンゴ礁内のラン藻類の窒素固定により供給されることが明らかとなった。すなわち窒素は、サンゴ礁内で循環しているばかりでなく、大気という外部からも供給される部分も多いことが示唆されている。

サンゴ礁生態系が二酸化炭素を固定するためにはさらに正味の有機炭素生産速度が、石灰化による正味の無機炭素生産速度のおよそ 0.6 倍より大きくななければならない。

現在のところ、こうした観点から直接サンゴ礁で正味の光合成速度や石灰化速度を測定した事例は日本やフランスで数例行われたのみで、データも少なく断定的な知見は得られていない。最近、サンゴ礁域で直接二酸化炭素分圧を測定する試みもいくつかなされており、今後データが蓄積されていくにつれ明らかになる部分もでてくるだろう。

地球規模での炭素循環

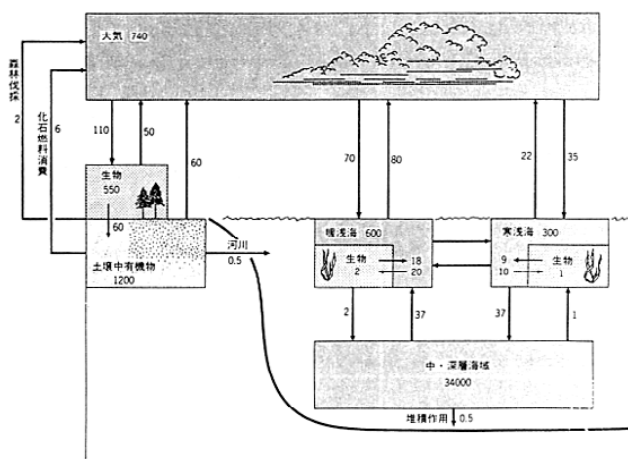


図 1: 地球表層の炭素循環、数字は 10⁶Cton、矢印は 1 年間の炭素の動き (高橋, 1992)

サンゴ礁内で石灰化により正味固定された無機炭素はサンゴ礁地形の一部となる。炭酸カルシウムは一度できてしまえば浅海ではほとんど溶解しない。一方、光合成由来の正味固定された有機炭素はサンゴ礁から外洋へ有機物粒子、溶存態有機炭素あるいは生物体の一部などとして移動する部分も多い。これらは炭酸カルシウムと比較して分解されやすい。有機炭素がすばやく分解してしまい二酸化炭素となるのならば二酸化炭素が固定されたことにはならない。二酸化炭素が固定されるためにはこれらの有機物が堆積物となるか、深層海域に移動すればよい。深層水は海洋循環により再び表層に浮上するのに数百～数千年かかり、その期間大気から隔離される。

「サンゴ礁は二酸化炭素の吸収源か発生源か?」という問題は詰まるところこの有機炭素の行く末の問題に帰着している。しかし有機炭素がどこでどのくらいの速度で分解するのか、堆積物となるのか、あるいは中深層海域に移動するのかはよくわかっていない。海水の時間的、空間的な不均一性が大きいことも測定されたデータの評価を難しくしている。

二酸化炭素の吸収源か発生源かを判断する場合、どれほどの時間スケールで炭素収支をとらえるのかということも重要な問題である。堆積した有機炭素も長い時間をかければ石油などの化石燃料となる部分もあり、これが燃えてしまえば再び大気中に二酸

化炭素が発生する。石灰化によりできた炭酸カルシウムも深層海域に移動すれば溶解し、それが海洋循環により再び浅海に浮上すれば二酸化炭素が発生する。地圏に移動した石灰岩も鍾乳洞にみられるように大気中の二酸化炭素と雨水により溶解し、このとき石灰化の場合とは逆に二酸化炭素は吸収される。このように長い時間でみれば地球表層で炭素は図 1 のように有機炭素、無機炭素の形をとりながら大気、地圏および海洋の間を循環している。従って二酸化炭素の吸収源、発生源といっても大きな時間スケールでみれば相対的なものにすぎない。

サンゴ礁による二酸化炭素固定技術

自然のサンゴ礁が人為的な温室効果を緩和するように二酸化炭素を固定しているか否かは明らかになっていない。しかし既存のサンゴ礁を改良したり、あるいは新たにサンゴ礁を創造したりすることにより二酸化炭素を固定化し有効利用することは可能であろう。

こうした試みのひとつに「サンゴ礁エコファクトリー」がある。これは通商産業省工業技術院地質調査所、電子技術総合研究所を中心とした国立研究所や大学および民間の研究者、技術者からなるサンゴ礁システム研究会が提唱している構想である。この構想ではまずサンゴ礁の有機炭素、無機炭素の生産速度を規定する環境要因を明らかにし、二酸化炭素を効率よく固定するようにサンゴ礁地形の改良を行う。光合成由来の有機物は、水産資源として有効利用し、余剰の有機物は深層海域に移動させることにより二酸化炭素を固定する。地形の改良や水産資源の採取および余剰の有機物の移動に必要なエネルギーは海洋温度差発電、太陽電池により供給する。サンゴ礁海域は表層水と深層水の水温差が大きく、光量も豊富でこれらの利用に適している。

また筆者の属するハザマでもスーパーリーフ構想を掲げている (図 2)。これは海洋バイオテクノロジー技術と海洋エンジニアリング技術を駆使し南洋に

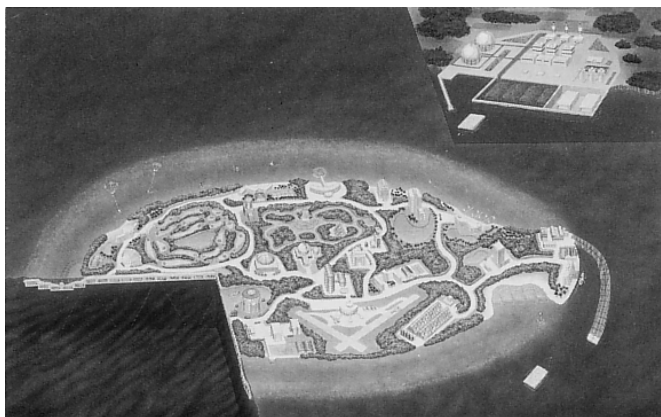


図2: スーパーリーフ (人工サンゴ礁) 構想

浮遊式の人工サンゴ礁を構築するという構想である。サンゴ礁を利用して二酸化炭素を固定するとともに、島には研究施設、コンベンションセンター、ホテルなどを設置して付加価値を高め、研究や会議の場、あるいはリゾート地として多目的に利用する。現在、サンゴの種苗生産技術をはじめ、二酸化炭素を利用したサンゴの成長促進技術などの基礎的な研究を行っている。

このようなことを書くと逆に自然破壊につながるのではとの危惧を抱くむきもあろう。確かにサンゴ礁生態系は、大気、海洋などの環境要因と生物群集との相互作用により維持されておりそのメカニズムは複雑である。人為的な制御によりもたらされる影響にはわからない面も多い。しかしだからといってサンゴ礁の保護、保全あるいは再生といったミチゲーション（自然環境復元）に徹するだけでは受動的な対処療法にすぎない。

生態系エンジニアリング

二酸化炭素濃度の増大に伴う温室効果問題などの地球環境問題は、地球という物質的には閉じている有限な生態系への配慮が足りないことから生じている。このことは生態学への関心の低さとも無関係ではあるまい。生態学とは簡単にいえば生物と環境との相互関係を論ずる学問である。経済学と同じ語源をもち重要な学問と考えられるが、人気は今一つである。おそらくそれは分子生物学などと比較して直接金に結びつく薬などの有用物質の生産に結びつか

ないことにも起因するだろう。またどんどん細分化して分析する近代科学の還元主義的思考法からはずれた、少々扱いにくいものといった印象があるためかも知れない。しかし時代は変化しており全体を部分に分割して考える西欧合理主義の限界が問われはじめている。地球環境問題もこのような息詰まり状態の反映ともいえる。部分を集めても全体は見えてこない。複雑な全体をそのまま捉えるホロンの思考が今後の風潮となるかもしれない。こう考えると生態学こそ次の時代のパラダイムを代表する学問のひとつとなるかもしれない。

近年、自然と共生する持続可能な社会の構築のために建設省などの官庁においても多自然型河川やエコロードなどの技術が提唱されている。このような生態学を応用した生態系エンジニアリングとでも言うべき技術が今後重要性を増してくるだろう。スーパーリーフ、サンゴ礁エコファクトリーもそうした技術の一環と考える。

おわりに

サンゴ礁は熱帯、亜熱帯の海域に特異的に存在しており、先進国の位置する中緯度地帯からも離れているため、それに関連する研究者も比較的少ない。しかも研究内容は生物学、古生物学、地質学、地理学、海洋学、化学、地球化学、海洋土木など多岐にわたり、各分野の研究はそれぞれ独立して行われているのが現状である。しかしサンゴ礁による二酸化炭素固定というような地球環境問題に関連する課題を考える場合には学際的な協力が不可欠である。このような状態の中で各分野の研究者、技術者の相互交流は今後ますます重要なものになるだろう。

参考文献

- 池田 穣・宮地重遠 1993. サンゴ礁の石灰化と二酸化炭素固定. 月刊海洋, 280, p.667-675.
- 茅根 創ほか 1993. 特集: サンゴ礁と炭素循環. 地質ニュース, 465, 72pp.
- 高橋正征 1992. 海を介した炭素の循環. 科学, 62, p. 665-668.