

サンゴ礁における炭素循環研究の課題

山室真澄¹⁾

1. はじめに

地球規模の温暖化に関連して、炭素の収支に関する研究が数多く行なわれている。サンゴ礁には、光合成によって作られる有機物の形と炭酸カルシウム骨格という、2つの形で二酸化炭素を固定する特徴がある。この特徴を利用して、人類が化石燃料を使用することで排出してきた膨大な量の二酸化炭素を固定することは、環境に無理のない二酸化炭素固定化技術として望ましいと考えられる(Kayanne, 1993)。

サンゴ礁生態系は二酸化炭素の吸収源として重要であるばかりではなく、分類学的な多様性に富んでいることから、遺伝子資源としても有望である。また水産資源に依存する地域住民の生活や文化の基盤としても大きな意義を持っている。しかし近年は人為・自然双方の様々な原因から、危機に瀕しているサンゴ礁が国内外ともに多く、原因の究明と再生方法が模索されている。

サンゴ礁生態系を回復させ、さらには二酸化炭素固定能力を人為的に促進させるためには、現在その生態系を構成する諸要素の存在量と、諸要素間の物質・エネルギー収支、さらにその収支を維持しているメカニズムを解明することが不可欠である。さらに、その生態系を現在とは異なる状態にすることを目指すことから、サンゴ礁生態系の維持機構が過去にはどのように変化してきたのかという、地質学的な視点が要求される。

2. サンゴ礁と二酸化炭素の吸収・放出に関する最近の議論

前述のように、サンゴ礁では有機物と炭酸カルシウムの2つの形態で二酸化炭素を固定している。これについて、化学平衡論に従えば、海洋では炭酸

カルシウムの生成にともなって大気中に二酸化炭素が放出されるという指摘がある(角皆, 1989)。これに対して、光合成を伴う炭酸カルシウムの生成は二酸化炭素を放出しないという反論もあるが(Kayanne and Miyachi 1991)、双方とも実測値に基づいた議論ではない。従って、サンゴ礁生態系内外の海水での全炭酸濃度や二酸化炭素分圧の連続測定を行なって、観測値に基づいて議論されることが望まれる。

有機物としての炭素に関しては、サンゴ礁付近の海域では水深が小さいために、サンゴ礁の外に出た有機物が周辺海域の堆積物に埋没する可能性が高い。この有機物が堆積物として埋没することは、長期的な炭素の除去につながる。これに対し外洋では水深が大きく、埋没するまでに経る時間が長いことから海水中での分解が進み、最終的に除去される炭素は表層で固定された量の1%に満たないと考えられている。サンゴ礁から流出する有機物について、Erez (1990)は、光合成によって固定された有機物の5-10%が堆積物中に埋没すると見積っている。またAtkinson and Grigg (1984)は、光合成によって固定された有機物の10%が、サンゴ礁内部の堆積物に埋没するか外洋に流出すると報告している。

近年、炭酸塩岩に貯留されている石油について、その有機物自身も炭酸塩岩が起源である可能性が指摘されている(田口, 1982)。このことは、サンゴ礁における生産物が石油になった可能性を示唆している(濱田, 1991)。そうであるならば、人類が排出している二酸化炭素の大部分は石油起源であるから、サンゴ礁による二酸化炭素の固定は原料をもとに戻す意味でも重要になる。その検証には、現在サンゴ礁生態系で生産されている有機物に関する研究と、それが続成作用を経てどのように変化するのかという実験的な研究、さらに石油という生物化石を分析する研究などとの連係が求められよう。

1) 地質調査所 海洋地質部

3. サンゴ礁での炭素収支の定量化に関する問題

サンゴ礁は生産性が高い生態系と考えられている。しかし実際に生態系としてどれくらい生産されているかについては、定量化の段階から問題が残されている(鈴木, 1992)。ここでは鈴木(1992)に扱われていない問題点について述べる。

まず、サンゴの生産に骨格中の有機物を含めるかどうかという問題がある。石灰化を行なう生物の炭素収支を検討する際、従来は、炭酸カルシウム骨格の生産を代謝によらない化学反応とみなし、有機生産物として扱っていなかった。しかし石灰化はATPを用いて生物が能動的に行なう代謝であり、また骨格が形成される際にはその核に特殊な細胞が配置され、その細胞の死後にも有機物として残る。従って、炭酸カルシウム骨格中の有機物は生産物として扱うべきである。サンゴ骨格を肥料として畑にまいているという報告もあり(川口, 1942)、場合によってはかなりの有機物が存在することも予測される。このような視点から、炭素の収支に関する既存のデータの見直しを行なうべきである。

なお、炭素循環と直接の関わりはないが、炭酸カルシウム骨格中の有機物には、過去の生態系の仕組みの手掛かりが残されている点も注目したい。例えば二枚貝の貝殻中の有機物について、生息環境とアミノ酸組成との対応が研究されている。また安定同位体比を用いて生息環境との関係を検討できる可能性もあり、これまでに行なわれてきた年輪の研究とあわせて進められることが期待される。

次に、生態系から流出する有機物の評価に関連した問題がある。造礁サンゴは、内部に共生する藻類が光合成によって固定した有機物の40%相当を、粘液の形で放出している(荒井ほか, 1993)。この粘液の形で放出された有機物がどれくらいの速さで無機化するのかは、まだ十分に検討されていない。粘液を含めて溶存態の有機炭素については、測定方法や保存方法が標準化されていないという問題がある。しかし、一定の分析方法をとることで、ある程度比較可能なデータを得ることはできると考える。

また魚や流れ藻などの、常に移動し、不均一に分布する大きな生物が、サンゴ礁にどれくらい存在するのか、またサンゴ礁がそれらの生物に対してどの

ような機能を果たしているのかを評価することが、特にサンゴ礁生態系からの有機物の出入りを考えるうえで重要になると考えられる。サンゴ礁内の藻場は稚魚が幼少期を過ごす場所として知られている(Pollard, 1984)。

さらに粒子状有機物がサンゴ礁からどれくらい流出しているかに関する報告も数少ない。増田・丸山(1991)によるパラオ諸島堡礁の外洋側礁斜面の観測では、水深60~150 mに懸濁物食性底生動物の群生が認められた。このことは、それらの群集を維持するに足る粒子状有機物が、サンゴ礁から供給されていることを示唆している。しかしサンゴ礁から供給される粒子状有機物量を、セジメント・トラップなどで定量化した報告は極めて少ない。今後はより多くのサンゴ礁で測定が行なわれることが望まれる。同時に、サンゴ礁内外の表層堆積物の有機物や炭酸カルシウム含量を深度別に比較したり、表層だけでなく鉛直方向にも採掘することによって、有機物の供給もしくは貯留の場としてのサンゴ礁の役割が、過去10万年でどのように変化したのか、その変化が地球規模なのかローカルなのかを検証されることも期待したい。

4. サンゴ礁生態系での栄養塩に関する問題

一般に水界での植物による光合成の速度は、窒素やリンなどの水中に溶存している栄養塩が、どのように供給されるかに左右される。特にサンゴ礁の場合は、窒素やリンの濃度が極めて低い貧栄養海域に囲まれていることから、サンゴ礁内での栄養塩の循環に関心が寄せられてきた。ここでは山室(1991)で紹介できなかった問題について述べる。

4.1 サンゴが基盤を造ることの意義

温帯から冷帯の沿岸域では、藻場が生産性が高い水域になっている。熱帯域ではこのような藻場は、サンゴ骨格などの碎屑物である石灰質の砂地に発達している。堆積物中の間隙水には窒素やリンなどの栄養塩が高濃度で存在しており、海草の成長を賄っている(Yamamoto et al. in press a)。この堆積物に蓄積された栄養塩は、藻場で生産された有機物が、系内で無機化されたものと考えられる。しかしながら藻場が形成されるまでは、サンゴ礁が発達する間にサンゴ骨格内に取り込まれた栄養塩を使って成長



写真1 フィジー・Dravuni島のサンゴ礁に広がる *Syringodium isoetifolium* の藻場。植物の高さは30 cmほどで、陸上の草原そっくりの景観を呈する。

し、次第にリサイクル・システムを形成したと考えられる。実際、サンゴ礁のサンゴ骨格内の栄養塩濃度を測定した例では(Risk and Müller 1983), 現場の海水での正リン酸($0.3 \mu\text{M}$)と硝酸($0.5 \mu\text{M}$)の濃度よりも、骨格中の濃度(正リン酸 $1.7 \mu\text{M}$, 硝酸 $5.2 \mu\text{M}$)の方が高かった。このように、浅いところに基盤を造ることで、光合成を行なう生物に光量が豊富な場所を提供するという点だけでなく、栄養を蓄積する基盤という点からも、サンゴ骨格中の栄養塩類の濃度の測定と、その蓄積のメカニズムに関する知見の増加が望まれる。

さらに、サンゴ礁の堆積物では、間隙水中の栄養塩がほとんど直上に溶出しないことが、地質調査所によるチャンパーを用いた現場実験から明らかになった(Yamamuro et al. in press b)。このことはサンゴ礁堆積物の表面で、堆積物中の栄養塩を効率良く利用できるシステムが成立していることを予測させる。このような堆積物表面の境界層での物質循環は、サンゴ礁だけでなく、沿岸から外洋に至るあらゆる水域で注目されている、先端的な課題である。

4.2 光合成による有機物の生産は栄養塩で制限されているのか

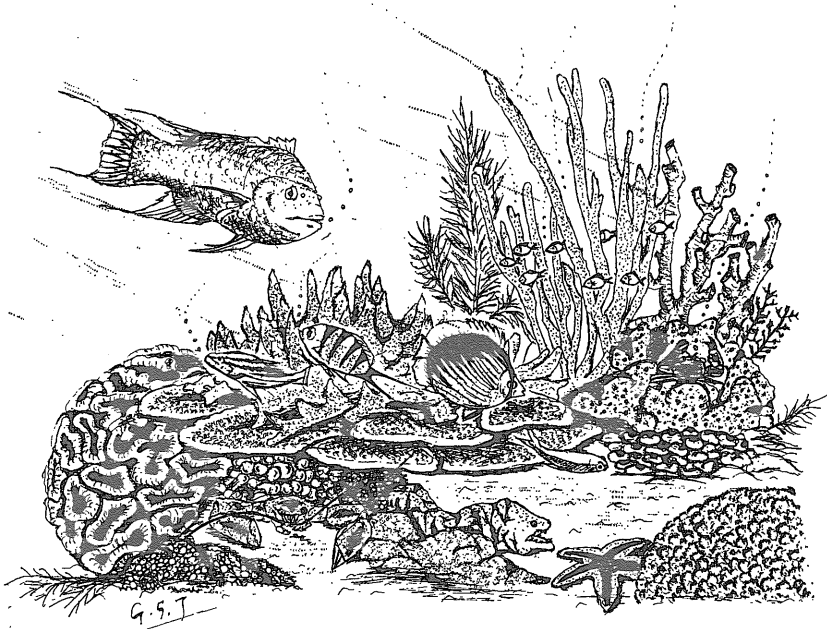
一般にサンゴ礁では周囲の貧栄養海域同様に、栄養塩、特に窒素とリンが、光合成による有機物の生産を律速しているとされている。リンに関しては、サンゴ礁生態系の大型植物の多くが高い窒素/リン比を示すことから、リンが不足しているという考え方があられる(Atkinson and Smith 1983)。しかし逆に、高い窒素/リン比であるからこそ、単位窒素当たり

に必要なリンの量が小さいとも言える。

また窒素に関しては、礁嶺に生息するラン藻マットで活発に窒素固定(注：生物が気体の窒素を取り込む現象)が行なわれ、それがサンゴ礁生態系全体に必要な窒素をまかなっているとの考え方があった(Webb et al. 1975)。これについて窒素の安定同位体をサンゴ礁生態系の種々の有機物について測定したところ、サンゴの骨格やラグーンの堆積物でも窒素固定が行なわれている可能性が示唆された(Yamamuro et al. in press b)。特に、生きているサンゴの骨格内部にも緑藻とラン藻が生息しており(Lukas 1974)、これらの藻類に気体の窒素を固定する能力があるのかどうか、検討が待たれている。

このようにサンゴ礁生態系では、サンゴ骨格や堆積物などの基盤に栄養を蓄積し、窒素は窒素固定によってまかない、リンは他の生態系と比べて相対的に少ない窒素/リン比を維持することで高い生産を維持していると考えられる。このような維持機構を無視して、現象的には生産を律速しているように見える栄養塩をサンゴ礁の海に添加したら、生産は増えるだろうか。Hallock and Schlager (1986)は、栄養塩が増えると水中の植物プランクトンが増えてサンゴに届く光量が減少し、また植物プランクトンを摂食する穿孔性の動物が増えてサンゴ礁の成長が鈍化することを、地質時代のサンゴの層相変化の観察に基づいて指摘している。またDubinsky et al. (1990)は、アンモニアとリンを添加した水槽でサンゴを飼育したところ、共生藻の密度が増加し、同時に総生産も増加するという結果を得た。しかしながら、そのような状態が続くと光合成産物のうち共生藻に回る部分が増えることで、群体としてのサンゴの成長は減少すると推測している。

このようにサンゴ礁の主役であるサンゴは、貧栄養水域という不利な条件を共生関係を成立させることで克服し、植物プランクトンが極めて少ない透明な海に、樹木のような複雑な形態の基盤を提供している。その結果、サンゴ礁では種々の大型動物が生息できるだけでなく、サンゴ以外の、やはり基盤に依存するタイプの藻類にも好ましい環境を提供している(第1図)。これらのサンゴ骨格に付着している藻類は、森林で陽樹と陰樹が層状構造を作って日光を効率良く利用しているように、様々な光量に適應して光合成を行なっている。もしこのようなサン



第1図 造礁サンゴには、サンゴの先端部のように常に光量の豊富な場所や、サンゴ骨格内部や基底部のように光量の少ない部分が、安定して存在する。一次生産者は、サンゴのポリプ内に共生するもの、ポリプの表面や基底部に付着するもの、サンゴ骨格内部に穿入するものなど様々で、それぞれの場所の光量に適応して生息している。動物も同様に、サンゴが提供する様々な場所を利用している。

ゴが無いと、水面での植物プランクトンの密度は風波などの混合により変化することから、堆積物に達する光量の変化は大きいと考えられる。また砂や泥などの堆積物自身も基盤として不安定であることから、一定の光量に適応した付着藻類が安定して生育するのは困難であろう。栄養塩と生産との関係を議論するときには、単に濃度を比較するだけでなく、生産者や消費者の生態系における機能までも考慮すべきであるが、特にサンゴ礁ではそのような観点が必要であることを強調したい。

5. おわりに

以上に述べたサンゴ礁における炭素循環研究における種々の問題を検討するためには、二酸化炭素分圧の連続測定や溶解有機炭素の測定などのように、海洋学の最先端の問題と共通している課題が多い。サンゴ礁の場合はさらに、外洋での観測と異なって大規模な観測船を用いることができないという、観測手段に関する困難が伴う(野崎, 1992)。この問題を解決するためには、ある程度の機能を持った観測施設を設置することが有効であろう。その場合、

ローカルな要因の影響が少ないという意味で単純な系を選び、物理的な場の記載を行なうことが、物質収支の定量化の前段階として不可欠である。またサンゴ礁生態系が遺伝子資源としても重要であることを考えると、基礎データとなるストックとフラックスの測定(生物量や、炭素や窒素などの化学量、サンゴ・大型植物・有孔虫などの代表的な生産者の生産速度など)以外にも、生物種を可能な限り記載することが必要である。またそれらの経時的な変化を何らかの手段で追跡できるようにすべきである。

地球環境問題は100年オーダーの議論が重要であるが、現在の生態系を取り扱った研究は長くて数年の経時変化しか追えていないのが実情である。一方、地質学である程度の精度でものが言えるのは1000年オーダーであり、100年というスケールは、どちらの手法にとっても未解決な部分である。サンゴ礁のように生物遺骸を基盤として形成されている生態系は化石情報が豊富であることから、10年スケールの観測を続け、これに基づいて化石情報を読み取ることによって、この未解決の100年スケールの環境変化に関する定量的な検討も可能になると考えられる。炭素固定や遺伝子資源といった観点に加

えて、そのような観点からも、サンゴ礁生態系に関する本格的な研究・調査が学際的に行なわれることを期待したい。

謝辞：北海道大学の向井 宏教授には原稿を読んでもいただき、御助言をいただいた。お礼申し上げます。

文 献

- 荒井孝之・池田 穰・丸山 正(1993)：サンゴの放出する有機物—サンゴ卵と粘液状物質について。地質ニュース, **465**, 32-37.
- Atkinson, M. J., and Grigg, R. W. (1984) : Model of a coral reef ecosystem. II. Gross and net benthic primary production at French Frigate Shoals, Hawaii. *Coral Reefs*, **3**, 13-22.
- Atkinson, M. J., and Smith, S. V. (1983) : C:N:P ratios of benthic marine plants. *Limnol. Oceanogr.*, **28**, 568-574.
- Dubinsky, Z., Stambler, N., Ben-Zion, M., McCloskey, L. R., Muscatine, L. and Falkowski, P. G. (1990) : The effect of external nutrient resources on the optical properties and photosynthetic efficiency of *Stylophora pistillata*. *Proc. R. Soc. Lond.*, B239, 231-246.
- Erez, J. (1990) : On the importance of food sources in coral-reef ecosystems. In Dubinsky, Z. ed. "Coral Reefs" Ecosystems of the World **25**, 411-418.
- Hallock, P. and Schlager, W. (1986) : Nutrient excess and the demise of coral reefs and carbonate. *Palaios*, **1**, 389-398.
- 濱田隆士(1991)：地史的物質循環におけるサンゴ礁の生態学的役割。月刊海洋, **23**, 779-784.
- 川口四郎(1942)：造礁珊瑚研究資料(Ⅲ)。科学南洋 **5** (1), 95-106.
- Kayanne, H. (1993) : Coral reef eco-factory for fixing CO₂. *Now and Future*, **8**, 1993-1, 11-15.
- Kayanne, H. and Miyachi, S. (1991) : The role of calcifying organisms in the global CO₂ cycle. *Biofutur*, no. **106**, 76-78.
- Lukas, K. J. (1974) : Two species of the Chlorophyte genus *Ostreobium* from skeletons of Atlantic and Caribbean reef corals. *J. Phycol.* **10**, 331-335.
- 増田和成・丸山 正(1991)：ROV (Remotely Operated Vehicle) を利用した生物分布調査の試み—パラオのサンゴ礁生物の場合—。1991年度日本海洋学会春季大会講演要旨集, 250-251.
- 野崎 健(1992)：海洋におけるCO₂計測システムとセンサー。月刊海洋, **24**, 671-677.
- Pollard, D. A. (1984) : A review of ecological studies on seagrass-fish communities, with particular reference to recent studies in Australia. *Aquatic Botany*, **18**, 3-42.
- Risk, M. J., and Müller, H. R. (1983) : Porewater in coral heads: Evidence for nutrient generation. *Limnol. Oceanogr.*, **28**, 1004-1008.
- 鈴木 淳(1992)：サンゴ礁生態系における物質生産。地質ニュース, 452号, 42-50.
- 田口一雄(1982)：炭酸塩石油根源岩に関する研究(2)根源岩としての石油地化学的問題。石油技術協会誌, **47**, 85-92.
- 角皆静男(1989)：炭素などの物質循環と大気環境—地球環境の変化における海洋の重要性。科学, **59**, 593-601.
- Webb, K. L., DuPaul, K. W., Wiebe, W., Sottille, W. and Johannes, R. E. (1975) : Enewetak (Eniwetok) Atoll: aspects of the nitrogen cycle on a coral reef. *Limnol. Oceanogr.*, **20**, 198-210.
- 山室真澄(1991)：サンゴ礁での物質循環, 特に栄養塩の収支に関する諸問題。月刊海洋, **23**, 785-793.
- Yamamuro, M., Koike, I. and Izumi, H.: Partitioning of nitrogen stock in the vicinity of *Syringodium isoetifolium* (Aschers.) Dandy dominated seagrass bed in Fiji. *Australian Journal of Marine and Freshwater Research* (in press a).
- Yamamuro, M., Minagawa, M. and Kayanne, H.: Preliminary observation on food webs in Shiraho coral reef as determined from carbon and nitrogen stable isotopes. *Proceedings of the 7th International Coral Reef Symposium* (in press b).

YAMAMURO Masumi (1993) : How to evaluate the carbon cycle in coral-reef ecosystems.
