

第 212 回地質調査所研究発表会講演要旨*

特集 海域における物質循環と生態系の維持機構 —サンゴ礁研究の課題と展望—**

シンポジウム開催の主旨

サンゴ礁ではサンゴと藻類との共生関係をはじめとする効率の良い物質循環が成立していることによって、陸上の熱帯雨林と並ぶ高い生産性と多様な生物群集が維持されている。また近年はサンゴ礁に対する人間活動の影響が急増したことから、その保全と管理が世界的な関心事となっている。さらにサンゴ礁における物質循環の収支が、地球規模での物質循環にも影響を与えている可能性も指摘されている。しかしながら日本では、サンゴ礁における物質循環に関する定量的な研究はほとんど行われていなかった。

本シンポジウムでは、サンゴ礁における物質循環と生態系の維持機構の研究を進めるに当たり、既に多くの知見が得られている干潟・藻場・外洋の生態系における研究成果を比較すると共に、サンゴ礁における物質循環の研究をいかに進めるべきかについて指針を得ることを目的とする。

地球物質循環の 1 経路としてのサンゴ礁

濱田隆士

サンゴ礁を、地理ダイナミクスの観点から特徴づけると、

1. 歴史的産物としての海中構築物
2. 浅海で最も多様性の高い生態系をつくり、海陸インターフェイスの 1 典型をなす
3. 海水・大気・太陽光を利用したバイオエフェクトによる CaCO_3 沈着工場
4. 温度・塩分条件等に厳しく律せられる環境示標的存在
5. オープン-セミオープンシステムであるため、有機総生産量の把握が困難であることが多い

等となる。

地史的には、カンブリア紀の古杯礁（アーケオシアタス礁）を除くと、造礁性サンゴ類が出現するオルドビス紀中期以降、サンゴ礁は、海中生態系の多様化に貢献してきた。その結果は主として礁性石灰岩ないしはそれに関連した炭酸塩岩体として地層中に固定されている。大気中の CO_2 問題を過去に遡って調べるには、こうした

カーボネイト・ボディの量的把握が必須である。

デボンオイルの名で知られる極圏カナダ-シベリアのデボン紀層油田の貯溜層は、バグに富むデボン紀後期の礁性石灰岩であり、源岩はその周辺の黒色腐泥岩である。造礁生物からの排泄物は、礁間盆地の停留水域に移ると、適度の還元環境下で石油となる。中東のパキプリッド礁（厚歯二枚貝礁）に胚胎するオイルも類似の過程を示している。外洋水中に孤立する海山型リーフでは、有機生産物は拡散してしまうから、陸源碎屑物もないのでむしろピュアカーボネイトとなり、物質量の推定は困難となる。

サンゴ礁における物質循環の研究は、グロスに捉えられることが肝要であろう。（東京大学教養学部）

Keywords: coral reef, petroleum, carbonate rock

サンゴ礁における物質循環と地球環境

茅根 創

1. サンゴ礁生態系の特徴

サンゴ礁生態系は、地球上の他の様々な生態系と比べてきわめて特徴的であるが、それは次の 3 点においてである。

- ① 熱帯の貧栄養海域にあって、きわめて高い一次生

* 平成 3 年 6 月 28 日工業技術院共用講堂において開催

** 講演と総合討論の内容は、月刊海洋 1991 年 12 月号に掲載予定

産力(光合成による有機物の生産)をもつこと

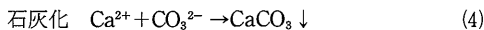
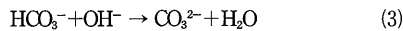
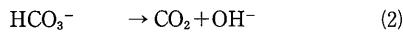
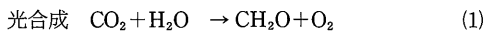
- ② 炭酸カルシウム骨格の形成によってサンゴ礁地形を構築すること
- ③ 海域でもっとも多様で膨大な生物群集を産すること

2. サンゴ礁における有機・無機炭素生産と CO₂ 循環 (①, ②)

サンゴ礁における一次生産量は 5-20 gC/m²/日で、熱帯の外洋の生産量 0.05-0.3 gC/m²/日の 10-100 倍以上になる。単位面積当りの一次生産量は、陸上でもっとも生産量の大きな熱帯雨林以上であるとされる。こうした高い生産性はサンゴとサンゴ体内の褐虫藻との共生関係に基づいている。また炭酸カルシウムの沈澱速度は 2-20 kgCaCO₃/m²/年である。世界のサンゴ礁における CaCO₃ としての CO₂ 固定量は、人類が放出する量 (200 億トン CO₂/年) の 3-30% (茅根, 1990), 2% (Kinsey and Hopley, 1991) と試算されている。このようにサンゴ礁は熱帯沿岸域において CO₂ の強力な生物学的ポンプとして働いている。また、地球温暖化問題の対策技術としてサンゴ礁を活用することは、サンゴ礁が沿岸域にあって管理し易く、同時に自然のメカニズムにも逆らわないという点で、きわめて有効な道である。

3. 各特徴間の関係 (①-②→③)

サンゴ体内の共生藻の光合成による有機物の生成は、サンゴの炭酸カルシウム骨格の形成を下記の式に従って駆動している。



すなわち、(1)(2)において、光合成に伴い海水の HCO₃⁻ から CO₂ が用いられ pH が上がると、これを打ち消すように石灰化が進行する。これはサンゴ個体のレベルで提唱されているメカニズムであるが、サンゴ礁生態系レベルでもこのメカニズムが働いていることを本シンポジウムで中森・鈴木が提案している。

また、サンゴ礁の構築によって極浅海に幅広い平坦面が作られる結果、受光面積が拡大し生産性がある。さらに、サンゴ礁地形は栄養塩の貯溜の場になっている。つまり、サンゴ礁は生産性を最大限にあげるために生物自らが作りあげた地形である。

生物群集の多様性は、高い生産性とサンゴ礁地形の形成による棲家の提供とニッチの分化によって説明できる。

4. なぜサンゴ礁は生産性が高いのか (①)

貧栄養の海域でサンゴ礁が異例なほど高い生産性をもつ理由として、Odum はサンゴ礁が成熟した生態系で閉じており、同じ栄養塩を効率よく回し逃さないためであると考えた (Odum and Odum, 1955; Odum, 1971)。しかし、有機物についてサンゴ礁全体として net の loss があるとする研究もある。また、ちっ素については、サンゴ礁ではらん藻によって活発に固定が行われており、多量のちっ素が外洋へもれ出していることも指摘されている。こうした点から、サンゴ礁はこれまで考えられていたように“closed”な系ではなく、“open”な系として外洋との物質循環を明らかにしなければならない。確かにサンゴ礁を取り囲む海洋の栄養塩濃度は薄い(貧栄養)が、サンゴ礁における水塊の混合は激しく、サンゴ礁は巨大なバイオフィルターとして機能している。また、生産された莫大な量の有機物のうちどの程度が外洋にもれ出して深海に移行するのかを定量化することは、CO₂ の吸収源としてのサンゴ礁を評価する上からも重要である。

(海洋地質部)

Keywords: coral reef, CO₂ cycle, primary production

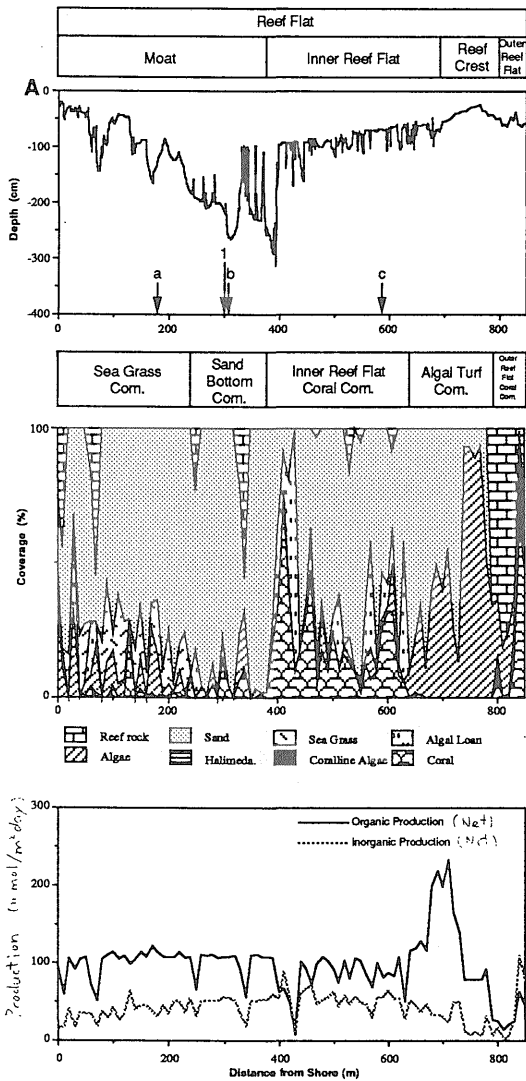
石垣島のサンゴ礁生態系における無機および有機炭素の生産

井龍康文*・中森 亨*・鈴木 淳*・阿部 理**

サンゴ礁生態系では多様な生物によって活発な有機炭素・炭酸塩の生産が行われている。われわれは、地球表層の炭素循環におけるサンゴ礁の機能を評価するために、炭素生産量を見積もった。

石垣島の白保海岸のサンゴ礁で海岸から礁縁までの 850 m に、10 m 間隔で 1×1 m の方形区を設置し、底生生物及び底質の現存量 (=被覆量) を測定した。その結果白保の礁内に Reef Rock, Sand Bottom, Inner Reef Flat Coral, Algal Turf, Outer Reef Flat Coral の 5 群集を識別した。各群集の純生産量は、(1)群集を構成する個々の生物の純生産量に関する既存データと被覆量からの算出、(2)海水の溶存成分測定による群集の生産量の直接測定、の 2 通りの手法で決定した。各群集の分布面積はサンゴ礁の空中写真の画像処理によって求めた。その結果、白保のサンゴ礁(面積約 1.3 km²)炭素の純生産量は(1)の方法で 358 トン/年、(2)の方法で 784 トン/年と見積もられる。炭酸塩の純生産量はそれぞれ、216, 730 トン/年と算出された。

また、白保のサンゴ礁の flushing time は約 15 時間で、この間に外洋から流入した海水中の二酸化炭素の約



第1図 サンゴ礁の環境区分と生産量分布

8%が有機炭素及び無機炭素として礁内で固定され、一次総生産の38%が系外へ排出されていることが明らかとなった。(* 東北大学理学部 ** 名古屋大学水圏研)

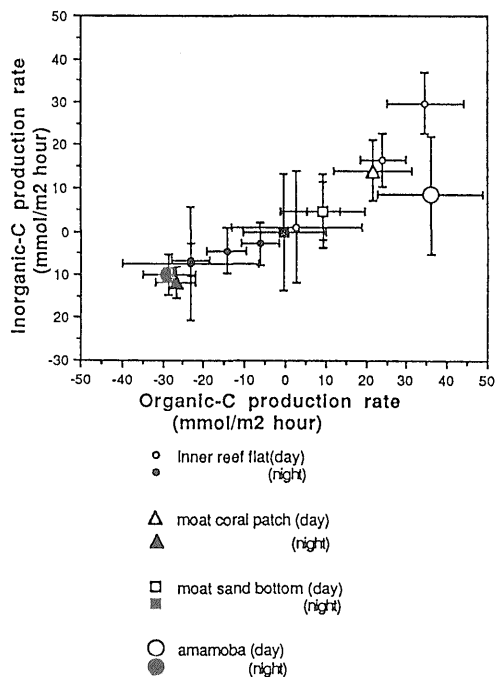
Keywords: coral reef, calcification, primary production

サンゴ礁における有機・無機炭素の生産とその共役モデル

中森 亨・鈴木 淳

生態系を物質生産の観点から検討すると、サンゴ礁生態系にはいくつかの顕著な特徴が認められる。ひとつは、サンゴ礁が栄養塩や有機物の少ない外洋に囲まれているが、他の生態系よりも速い速度で有機炭素を生産していることである。また、もうひとつの大きな特徴は、他の生態系ではそれほど重要でない無機炭素生産(石灰化)が有機炭素生産に匹敵するほどの大きな量となっている点である。これらの特徴は石灰藻や共生藻類をもつ造礁サンゴの体内で報告されている光合成と石灰化の共存による炭酸系の平衡反応を介した生産の促進効果 (Bolowitzka and Larkum, 1976) に類似し、生態系・群集のスケールでも同様の効果が生じている可能性が考えられる。

群集レベルにおける有機・無機炭素生産の共存効果を確認するため、サンゴ礁の各群集について、pH 1点法による Alkalinity anomaly method (Smith and Kinsey, 1978) を用い、有機・無機炭素生産を測定した。内側礁



第1図 サンゴ礁の各群集の昼夜の有機炭素と無機炭素の生産速度の対応図 (誤差棒は1σ)

原サンゴ群集では、光合成により海水の pH が高くなるのにもなって石灰化が増進する現象が認められた。また、藻場・礁池砂底・礁池サンゴパッチ・内側礁原サンゴ群集では、光合成・石灰化速度は強い正の相関を示し(第 1 図), 互いの生産を促し合っている可能性が明らかになった。

サンゴ礁生態系における共存効果を検証するため、炭酸系平衡反応をもとにモデルを作成し、数値実験を行った。その結果、有機・無機炭素生産がそれぞれ単独で進行する場合は反応自身を抑制することが示された。一方、両反応が共存する場合には、有機炭素生産は変化しないが、無機炭素生産は単独の場合よりも促進されることが示された。また、生産量の材料物質の現存量に対する割合(生産効率)は、いずれの場合も増加していることが明らかになった。

(東北大学理学部)

Keywords: coral reef, calcification, primary production

サンゴ礁における栄養塩循環に関する研究の現状

山室真澄

サンゴ礁は、周囲を砂漠にたとえられている外洋に囲まれているにも関わらず、生産性の高い生態系として知られている(Odum and Odum 1955; Yonge, 1963)。その生産の大部分はサンゴの共生藻によるものであり、植物プランクトンによる生産は通常は $\leq 0.5 \text{ gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ で、外洋の平均値 $0.07\text{-}0.2 \text{ gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ と、それほど変わらない。

共生藻による一次生産はサンゴとの分離が困難であるため、生産量の測定の大部分は動物の呼吸込みで為されている。第 1 表で総生産を呼吸で割った値の大部分が 1

に近いことは、純生産の大部分が動物の呼吸によって速やかに分解されている可能性を示している。このようにサンゴ礁では共生藻による一次生産がサンゴによって速やかに消費されるだけでなく、共生藻による一次生産が、サンゴ骨格の成長も促進させることが知られている(Hinde, 1988)。従って、共生藻による一次生産速度がどれくらいで、どのようなメカニズムで規制されているのかを明らかにすることは、一次生産者も二次生産者も含めたサンゴ礁での有機物循環のメカニズムを解明するうえでも重要な課題である。

サンゴ礁での一次生産を規定する栄養塩については、礁内の水柱における無機態窒素とリンの濃度が他の貧栄養海域同様に低いので(Entsch *et al.*, 1983), この両者がサンゴ礁生態系において一次生産を規定している可能性が指摘されている。

しかし栄養塩供給のメカニズムやその制限性については、生態系や時空間のどのレベルで検討するかによって異なった見解が得られている。例えば窒素についてみると、サンゴに共生する藻類やサンゴのレベルでは、窒素が不足しているという報告が多い。しかしサンゴ礁生態系全体では、窒素は生産を制限していないとする見解が支配的である。

本報告では、サンゴ礁生態系での栄養塩、特に窒素を中心とした物質循環に関するこのような現状を紹介し、今後の調査方法に関する提案を行う。

(海洋地質部)

Keywords: coral reef, limiting factor, nutrient

Carbon-Nitrogen Balance Model for the Development of Coral-Reef Ecosystems

Masahiko HIGASHI

Coral reefs are "oases" in nutrient-poor tropical waters, where nutrients and biomass are concentrated. How can this biological concentration take place? Here I present a model that explains the mechanisms for determining (controlling) the dynamic process of coral-reef ecosystems development. The key idea of the model is the notion of carbon-nitrogen balance (C/N balance). The positive feedback by amplifying C/N imbalance and the negative feedback due to C/N balancing constitute a pair of counteracting two "forces", which appear to be the major control

第 1 表 サンゴ礁における生産速度と P/R 比

Coral reef system	Production (gross) ($\text{gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$)	P/R (Mean)	Number of locations
Complete reef systems	2-6	1(1.0)	6
High activity areas of near total cover by hard substratum	8-23	0.6-2(1.1)	6
Reef-flat coral/algal zones	4-19	0.7-3(1.2)	17
Shallow lagoonal environment (1-4m)	3-13	0.7-1.4(1.0)	7

from Kinsey (1985)

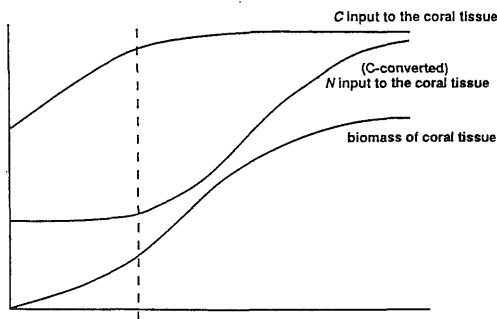
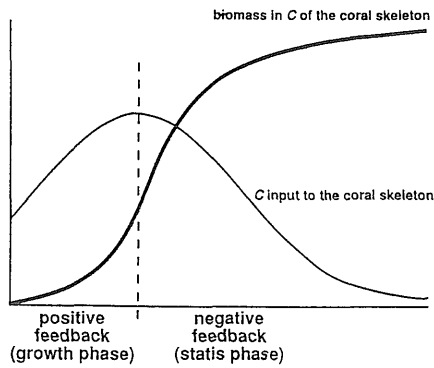


Fig. 1 Time series change of C, N input and biomass in the coral skeleton and tissue.

mechanisms for the formation process of coral-reef ecosystems. For these mechanisms to work, however, two processes are found to be crucial: i) the effect of the physical structure created by coral skeletons in concentrating biological organisms and activities, and ii) the network of interspecific interactions, including feeding and other nutrition-supplying relationships. Specifically, the model generates several theoretical predictions (hypotheses) on the factors that determine how big specific hermatypic (reef-building) corals can grow, and the temporal pattern of their growth.

1. The carbon-nitrogen balance idea
2. The problem: how the self-organizing of coral reef ecosystems proceeds
3. A conceptual model (framework) of coral-reef ecosystems: a synthesis of empirical facts
4. The dynamic process of coral-reef ecosystems development
5. Theoretical implications: predictions, hypotheses, speculations
6. Toward a new paradigm of ecosystems theory: multi-commodity trophic dynamics

(東 正彦: 龍谷大学理工学部)

Keywords: coral reef, C/N balance, modelling, ecosystem.

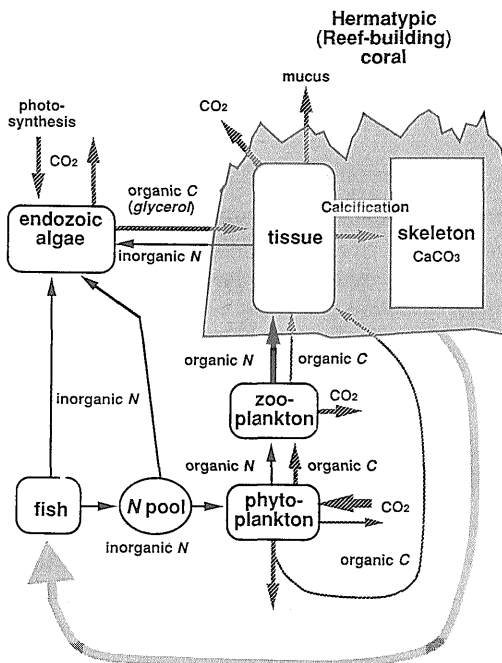


Fig. 2 A conceptual model of coral-reef ecosystems.

沿岸生態系における物質循環

大嶋和雄

大都市圏の閉鎖性沿岸海域における富栄養化問題は、未だに解決を見ない公害問題の一つである。この問題に対しては、海水交換によって水質改善を図ろうとするもの、下水処理によって汚染物質負荷削減を図ろうとする等、人為的な環境管理を基本方針としてきた。しかし、この20年来の努力によっても、目立って改養されたようには見えない。そこで、沿岸水質環境改善に、自然の浄化機能である堆積作用及び生物生産が注目されてきた。富栄養化物質とは、もともと、人間が消費した動植物の不完全分解物である。この不完全分解物は、本来、自然の生態系における有機物循環過程に取り込まれ、利用されるものであった。しかし、正常な循環系の処理能力以上の有機物負荷及び循環系である沿岸環境の破壊によ

て、富栄養化問題を象徴する青潮・赤潮被害が頻発するようになってきた。この沿岸生態系を環境資源として活用するためには、沿岸生態系の実態把握が先決課題である。今回の研究発表では、第 1 に沿岸生態系を海域環境の生産量から評価され、次いで熱帯多雨林の一次生産量にも匹敵すると云われる、河口干潟及び熱帯藻場での生産システムについて講演して頂くが、これらの講演は、地球圏-生物圏国際協同研究計画 (IGBP) の沿岸海域における諸過程研究 (Coastal Ocean Fluxes and Resources) を先導するものと期待される。地球環境問題への実効ある取り組みは、地球的規模での問題認識と地域における具体的な行動からなる。これを機会に、海域環境のごく一部分として見過ごされがちであった陸と海とのインターフェースとして、多様な機能を持つ沿岸生態系について理解を深めていきたい。(首席研究員)

Keywords: coastal ecosystem, material cycle, environmental resource

海洋生態系の特徴

高橋正征

海洋生態系としてのポテンシャルを、生態系の一次生産者の生物量と、その一次生産力に注目して検討する。その際に、光合成生物がもっている基本的な性質と海洋環境を考慮する。まず最初に環境律速が全く無い状態を仮定し、ある強度の太陽光が海洋表層から水中に透過する場合を想定すると、植物プラクトンだけが光吸収体であれば、植物プランクトンの光吸収係数と光合成で生活に必要な最低の光強度の情報から、存在可能な植物プランクトンの生物量の推定が可能である。また、単位生物量あたりの光合成活性を使えば、さらに最大の一次生産力を推定することができる。こうして得られた、いわゆるポテンシャルの一次生産者の生産量と生産力に比べて現実の海洋での状態がどのようになっているかを考察する。

実際の海洋では様々な律速要因が働いており、それらによっていわゆる生物としてのポテンシャルのでない状態が起こっていると考えられる。そうした海洋の律速環境下で発達する生態系の構造と機能の特徴を整理して紹介したい。

話の順序は以下のようである。

1. 海洋生態系の構造と機能
2. 海洋生態系の収入とそのポテンシャル

3. 海洋生態系の実際の収入
4. 海洋生態系内での栄養物質の供給
5. 浮遊海洋生態系の特徴

(東京大学理学部)

Keywords: production, productivity, marine ecology

干潟における物質循環

松川康夫

1. 三河湾一色干潟

この干潟は矢作古川(旧矢作川)と矢崎川が運んだ土砂が堆積したもので、自然状態が比較的良好に保たれた、典型的な前浜干潟である。巾は 1-1.5 km、長さは 10 km 足らず、面積は 9 km² 余りである。後背地は農業地帯で、一色町には養鰻池が多い。従って、栄養負荷源はこれらの河川と排水、さらに干潟前面の富栄養化した海域である。この干潟は砂質ないしは細砂質で、アサリ漁業が営まれている。また、アマモやアオサが繁茂し、夏季にはアオサが採りあげられ、冬季には一面ノリ漁場となる。干潟には船外機付きの漁船が通る濠が縦横に掘られている。

2. 海水交換と拡散係数

この干潟の海水交換は潮汐、後背地からの淡水流入、風などによって起こる。この海水交換を定量するために二つの方法を採用した。

第一には、乱流拡散の式

$$U'S' = -KdS/dn$$

を用いる方法である。干潟周辺に流速計を複数配置し、流速 U と塩分 S の連続記録を取って、干潟の法線方向の塩分分散 $U'S'$ を求め、それを法線方向の塩分勾配 dS/dn で除して、拡散係数 K として評価する。

第二には、干潟における塩分の釣合の式

$$QS = -AKdS/dn$$

を用いる方法である。降雨、河川流量、農業用水、上水、養鰻用水(地下水)などから干潟への淡水流入量 Q を、また塩分分布調査から干潟の縁辺 A における平均塩分濃度 S と法線方向の平均塩分勾配 dS/dn をそれぞれ求めて、 K を得ることができる。

いずれの場合も

$$K = 5 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{sec}$$

に近い値となった。なお、別に行った海流クラゲの分散実験によれば、潮汐による海水交換はせいぜい $10^6 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 程度と推定されたので、この干潟における海水交換

熱帯藻場における物質循環

小池勲夫

熱帯海域に広く分布する珊瑚礁は、環礁あるいは裾礁を問わず、比較的外海の影響を受けにくい浅海部を、その礁の内側に発達させている。このような環境は(1)物理的攪乱が少ないこと、(2)堆積環境であること、(3)光合成に必要な光が海底まで到達することなどの顕花植物である海草群落が分布するのに適した場を構成している。このような海草藻場は、高緯度地方に特に発達する海藻藻場と並んで、貧栄養である熱帯外洋域の中で底生動物を含む生産性の高い生態系を保持しており、その維持機構について多くの関心が持たれている。

物質循環の立場からの熱帯海草藻場を解析した研究例は、これまでにほとんどなく、又有ったとしてもその多くはリンや窒素などの栄養塩がどのように海草に供給されるかについての議論に留まっている。演者らはこの約10年来、パプアニューギニアやフィジーをフィールドにして、このような熱帯海草藻場における生物群集構造と生元素の循環のリンクについての研究を行ってきた。そこで得られた知見は、物質循環との関連で以下のようにまとめることができる。

- (1) 熱帯海草藻場は堆積物中に多くの有機窒素などの

栄養源を持っており、また藻場になることによって有機窒素等のストックを増加させているなど、栄養源を水中にそれほど依存しなくても良い系となっている(第1表)。

- (2) 一方、地上部は成長・枯死を比較的早く繰り返し、例えば熱帯藻場の代表的な海草である *Thalassia hemprichii* の葉部の平均寿命は約1ヶ月であり、地下茎の寿命が約44ヶ月と推定されているのに対して極めて短い。又枯死した地上部は、底生動物や葉上生物などによって速やかにデトリタス化されている。
- (3) 海草の種組成は、分布の中心域(パプアニューギニア)と周辺域(フィジー)で大きく変化し、それにもなつて葉上及び底生動物群集も変化する。しかしこれらの動物群集は、いずれも海草及び葉上・底生藻類によりもたらされる有機物に依存している。
- (4) 海草藻場と珊瑚礁との比較では、比較的有機物に富んだ海草藻場の堆積がアンモニアの供給源として機能しているのに対し、珊瑚礁デブリは硝酸イオンの供給源となっている。(東京大学海洋研究所)

Keywords: seagrass bed, nitrogen budget, nitrogen conservation

海洋と地圏の相互作用と物質循環 —外洋域の炭酸塩に伴う物質循環 における問題点—

川幡穂高

1. はじめに

近年、二酸化炭素等のいわゆる温室効果ガスが原因と考えられる温室効果により地球の平均気温が上昇しているのではないかといった地球的規模での環境変化が問題となっている。そして、地球表層の約70%を占める海洋が、人間活動による大気への二酸化炭素放出のバッファーとして機能しているといわれている。

しかし、こうした炭素循環等に関して私達が有する知識は決して十分なものではない。そこで、海洋に関係した炭素循環の仕組みと流量の把握をその目的として、地質調査所、工業技術院、新エネルギー・産業技術総合開発機構、関西総合環境センター、公害資源研究所では現在「海洋中の炭素循環メカニズム調査・研究」を進めている。今日はその中から炭素輸送物質として重要な炭酸塩の挙動について問題点を指摘する。

第1表 フィジーの海藻場における各態窒素の分布
とC/N比

Sampling site	DIN (mg atom N)	DON (mg atom N)	PON (mg atom N)	C/N (atom/atom)
〈Water column〉				
Bare area	1.2	57	6.0	16
Seagrass bed	2.4	70	232	—
Seagrass				
leaf			141	27
sheath			57	67
flower			28	21
Suspended material			6.5	13
〈Sediment〉				
Bare area	1.4	0.4	590	11
Seagrass bed	0.6	0.4	1900	
Seagrass			204	—
rhizome			70	62
root			134	64
Seagrass detritus			380	34-54
Sedimental organic material			1300	9.8

2. 炭酸塩はなぜ炭素除去物質として重要か?

地球表層の炭素リザーバーとして重要なものには、大気圏、陸上生物(動物・植物含む)、土壌、海洋、地殻(海底堆積物を含む)がある。それぞれの炭素の蓄積量は、7,600億tC, 5,600億tC, 14,000億tC, 40,000億tC, 655,000,000億tCで、大気圏に存在する量を1とすると各々の比は1:2:53:86,000となる。このように地球表層では、ほとんどの炭素が地殻に存在しており、もし、これらの炭素がすべて大気中に二酸化炭素の形で放出されたとすると、二酸化炭素分圧はかなり高くなってしまおうと考えられている。現在の金星はこのような状況になっており、金星大気の96%は二酸化炭素で、金星表面での大気圧はほぼ20気圧である。その二酸化炭素量は、地球の地殻と上部マントル(深度120kmまで)に含まれる炭素の全量に匹敵している。

岩石の総量 24×10^{24} gに対して、現在の海底堆積物は、 1.20×10^{24} g (5.0%)、大陸堆積岩は 2.0×10^{24} g (8.3%)存在している。炭酸塩及び有機物を含めた全炭素について見ると、総量 65.5×10^{24} gC (650,000,000億tC)に対して、海底堆積物には 20.16×10^{24} gC (30.8%)、大陸堆積岩には 35.64×10^{24} gC (54.4%)が存在している。このことは、炭素の85%以上は地球表層の堆積作用の結果、地殻に戻ったということが出来る。

地殻に含まれる炭素は、炭酸塩と非炭酸塩に分類できる。炭素の大きなリザーバーである海底堆積物では、炭酸塩の形で蓄えられている炭素は全炭素の70%を越えている。

3. 堆積物として除去される炭素量の推定値

炭酸カルシウムの堆積速度は $0.2-0.5 \text{ mg/cm}^2\text{yr}$ 程度で、毎年0.9-2.2億tCが堆積物として除去されていると推定されている。一方、炭酸塩と共に重要な炭素除去物質である有機物については、0.03億-0.4tC/年 (Garrels and Perry, 1974), 0.4億tC/年 (Seibold, 1974), 0.03億tC/年 (半田・田上, 1980)位であろうと推定されている。そこで、両者を足し合わせても、3億tC/年程度となり、堆積物に固定されている流量と、化石燃料の燃焼や森林破壊等によって大気中に放出された二酸化炭素の中から、海洋に吸収されているとされている約30億tC/年とはかなりのギャップがある。

4. 現在の炭素流量の把握

一般に、カルサイト(炭酸カルシウム鉱物)に対して水深1km以浅では過飽和、それより以深では不飽和という場合が多いが、不飽和度が1より少し小さくなるとすぐに炭酸カルシウムの溶解が始まるわけではない。実際、現場の炭酸カルシウム溶解実験によると、3.5km位

までは、溶解していないことが確かめられている。炭酸カルシウムの溶解は水深4km位から急激に増加しており、このラインはリソクライン(Lysocline)と呼ばれている。これより深くなると、表面からの炭酸塩の供給速度と炭酸塩の溶解速度がバランスする深度に達する。これは、炭酸塩補償深度((CCD) Carbonate Compensation Depth)と呼ばれている。現在の海底におけるCCDの分布に関する調査はかなり進んでおり、カルサイトについては、大西洋で約4,500m、太平洋で約3,000m-3,500mにその境界が存在している。

炭酸塩の供給速度と溶解速度を支配する重要な因子としては、①有光層における炭酸カルシウムの生産速度、②鉱物の接する海水の飽和度、③有機物による鉱物表面の被覆度、④粒子の大きさ、⑤粒子の形、⑥堆積物の鉱物組成、⑦底層水の流速、⑧底棲生物の活動等を指摘することができ、これらが炭酸カルシウムの沈降・堆積に影響を与えることになる。私達が知りたい炭素流量を求めるためには、これらの因子と流量の関係を定性的ではなく、定量的、悪くても半定量的に結び付ける努力が行われなければならない。また、炭素循環を解明するためには、現状を正確に把握することも必要であるが、時間に対する変化をとらえることも行われなければならない。そこで、調査・研究においては、時間のパラメータを持った量の把握と定量的議論を行うことが必要である。

(海洋地質部)

Keywords: open ocean, carbon cycle, calcium carbonate

外洋域における物質循環

和田英太郎

地球表層域における生物地球化学的物質循環は太陽エネルギーによって駆動される大気と水の循環によって担われている。地球の各種生態系ではこれに生物の代謝特性が絡み複雑な物質循環系を形成していることになる。

海洋における物質循環系の主たる因子は以下のように整理される。

1. 海水の大循環及び海水の鉛直方向への運動
2. 有光層から中深層への粒子の沈降
3. 植物プラクトンの代謝特異性

本講演では海洋中の窒素サイクルに視点を絞り、以下の点について考察を進めた。

- (i) 栄養塩の分布と海洋の大循環
- (ii) 堆積過程と地質学的物質循環

- (iii) 太平洋の特質と¹⁵Nの分布
 - (iv) 貧栄養海域の窒素供給系 (第 1 図)
 - (v) N₂固定系の海
 - (vi) δ¹⁵N-δ¹³C マップから見た生態系の構造
- (三菱化成生命科学研究所, 現京都大学生態学研究センター)

Keywords: open ocean, nitrogen budget, nitrogen isotope

第 1 図 黒潮周辺海域における窒素供給系の多様性を示す模式図

白ぬきの矢印は黒潮を示す。点描は藍藻 *Trichodesmium* の出現海域を示し、実線上の数値はその藻係数/1 をあらわす。A: 黒潮が作るフロント B: *Trichodesmium* の赤潮 C: 四国沖暖水渦 (Sugimoto *et al.*, 1986; 和田, 1984) D: 伊豆周辺の局地性湧昇 (Takahashi *et al.*, 1980, 1981, 1984) E,F: 暖水塊, 冷水塊, ストリーマー (海洋科学 vol. 19, no.5 参照) ○印の中の数値は各海域のネットプランクトン (xx13) の δ¹⁵Nair 値を示す。

