

# サンゴによる石灰化と二酸化炭素の固定 —サンゴ飼育水槽実験—

大森 保<sup>1)</sup>

## 1. はじめに

大気中の二酸化炭素濃度は毎年約1ppmずつ増加し、地球的規模での環境変動を引き起こす重要な要因と考えられている。この大気CO<sub>2</sub>の増加量は、化石燃料の消費など人間活動によって大気中に放出されるCO<sub>2</sub>量の約半分であり、残りの半分がどこに吸収されたのか、陸上植物、土壌、海洋など地球的規模での評価が要求されている。とくに大規模な二酸化炭素のリザーバーである海洋はCO<sub>2</sub>のシンクとして期待されているが、いかなるプロセスによって吸収されるのかよくわかっていない。炭酸塩堆積物の大部分は海洋で生物によって生成され、地球表層に分布する炭素の約70%を占めており、地球史的にみれば二酸化炭素のリザーバーとして機能したことは確かである。とくに炭酸塩形成の場であるサンゴ礁では、生物の活動が活発で生物生産が高く、光合成と石灰化によって効果的に二酸化炭素の固定が行われており、地球温暖化などのように100年のオーダーの問題に対してもサンゴ礁の寄与は無視できないように思われる。最近、大気中二酸化炭素濃度変動に対するサンゴ礁の役割について活発に議論されているが、サンゴ礁の寄与について評価できる観測は必ずしも充分には行われておらず、評価は定まっていない(Berger, 1982; 角皆, 1989; 茅根, 1990; Crossland et al., 1991)。

## 2. サンゴ礁における光合成と石灰化

サンゴ礁では、植物による光合成と炭酸殻をもつ生物による石灰化が盛んにおこなわれていることに特徴がある。サンゴ礁生物のうち、サンゴ礁の形成

に役立つサンゴを造礁サンゴ(hermatypic coral)という。その代表的なものは、イシサンゴ目に分類されるサンゴである。これらサンゴの細胞内には褐虫藻(zooxanthella)という単細胞の藻類が共生しており、炭酸塩骨格の成長速度が速い。

サンゴは刺胞動物に分類される動物であり、光合成をおこなう植物や生産物を分解するバクテリアとは異なるものであるが、造礁サンゴではこれらが共生することによって自立した栄養系を形成する。実際に、褐虫藻が抜け出した造礁サンゴは白化現象をおこし、やがて死亡する。それゆえ造礁サンゴは動物ではあるが、葉緑素をもつ褐虫藻を細胞内に共生していることから、光合成をする生産者とみなすことができる(山里 1991)。

大気中の二酸化炭素変動に関して、光合成は吸収過程として、また石灰化は反対に放出過程として機能する。サンゴ礁はこれら二つの過程が同時に進行する複合的な系であり単純ではない。二酸化炭素変動に対するサンゴおよびサンゴ礁の寄与について評価するためには、大気および海中の二酸化炭素変動と光合成過程と石灰化過程を同時にモニタリングし、二酸化炭素吸収過程を解明することが重要である。

研究の第一段階として、できるだけ自然に近い状態で造礁サンゴを飼育し、造礁サンゴによる光合成と石灰化の効果について観測した。短期間ではあるが、サンゴが生育中に効果的に二酸化炭素を吸収する結果を得た。

## 3. サンゴ飼育水槽実験

大気中の二酸化炭素濃度変動に対する造礁サンゴ

1) 琉球大学理学部化学科: 〒903-01 沖縄県中頭郡西原町千原1番地

キーワード: 二酸化炭素, サンゴ, 石灰化, 光合成, 有機炭素生産

の寄与について解明するために、水槽にサンゴを飼育し、pH-アルカリ度法によって炭酸物質の日周変化を測定した。

サンゴ飼育は、瀬底島にある琉球大学附属熱帯海洋科学センターの、常時サンゴを飼育している屋外水槽(サイズは2×4×1mで水深は約50cm)をもちいておこなった。使用したサンゴは、代表的な造礁サンゴである塊状キクメイソ科のサンゴであり、実際に長期間飼育し、水槽に馴染んだものである。実験をする数日前に、まずサンゴを一旦避難させ、水槽の壁面に付着している藻類を可能な限り取り除いた。一旦水槽を乾かしてから、再び参照水槽とサンゴ水槽に海水を満たしサンゴをもどした。サンゴを十分に海水に馴染ませた後、海水の流入と流出をとめて観測をおこなった。採水は水槽の中央部からビニール管を用いて、昼間は1時間おきに、夜は2時間おきにおこなった。比較のために海水のみを入れた参照水槽についても同様な観測をおこなった。

測定項目は、海水中の水温、pH、溶存酸素、アルカリ度、塩分、アンモニアなどである。アルカリ度の分析はグランプロット法でおこない、繰り返し精度は0.1%以下であった。

#### 4. 炭酸物質の計算方法

水溶液中の炭酸の溶解平衡は、基本的には炭酸の溶存化学種(CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>)とpHのうち2つの成分を測定することによって求められる。本研究では、pH、アルカリ度および塩分の測定値から、炭酸アルカリ度(CA)、二酸化炭素分圧(PCO<sub>2</sub>)、全炭酸(TCO<sub>2</sub>)、無機炭素生産(IP)および有機炭素生産(OP)を求めた。それぞれの炭酸成分を求める手順について第1図に示す。

炭酸アルカリ度(CA)

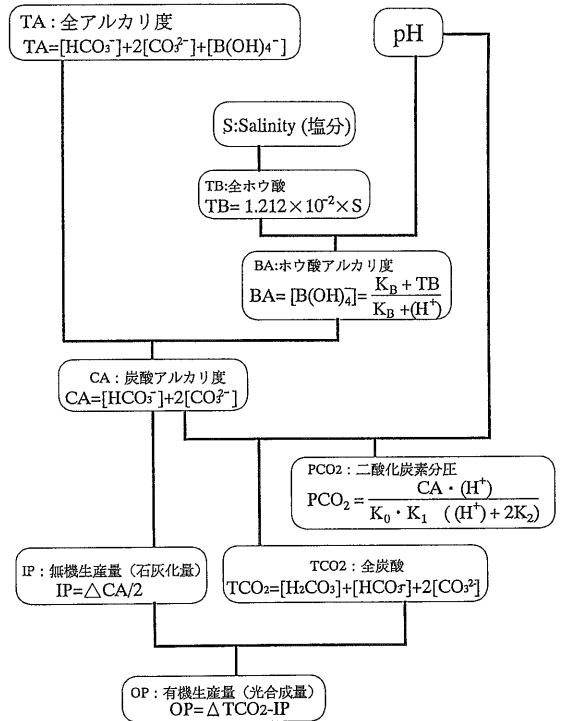
$$CA = TA - [B(OH)_4^-] \\ = TA - \frac{K_B \cdot (1.23 \times 10^{-5} \times S)}{K_B + (H^+)} \quad (1)$$

二酸化炭素分圧(PCO<sub>2</sub>)

$$PCO_2 = \frac{CA \cdot (H^+)^2}{K_0 \cdot K_1 \{ (H^+) + 2K_2 \}} \quad (2)$$

全炭酸(TCO<sub>2</sub>)

$$TCO_2 = [H_2CO_3] + [HCO_3^-] + [CO_3^{2-}] \quad (3)$$



第1図 pH-アルカリ度法による海水中の炭酸化学種の計算手順

実際には、それぞれの化学種について炭酸アルカリ度とpH値から求めた。ここで、TA、Sはそれぞれ全アルカリ度、塩分である。Kはそれぞれの添字で示される反応の平衡定数である。

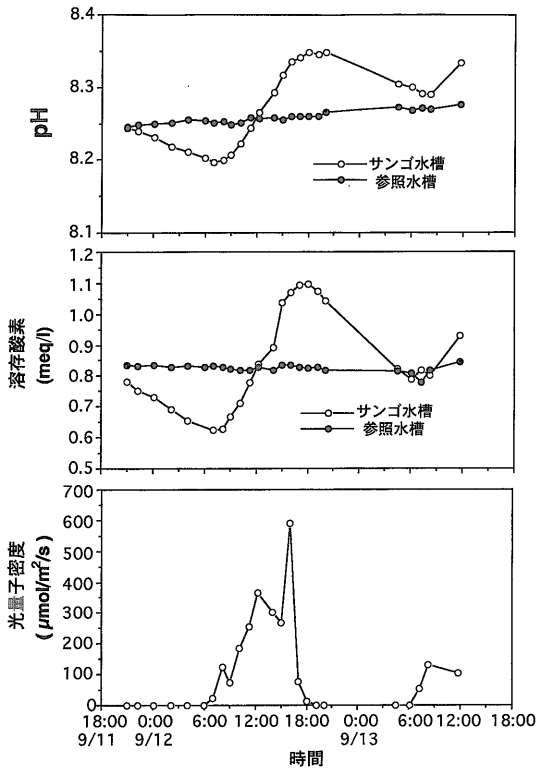
#### 5. 観測結果

1991年9月11日の夕方から13日の昼にかけておこなった結果について述べる。この時の天気は晴れで一時的に雲があった。気温は21.5度Cから31.6度Cまで約10度C変化したが、水温は25.4度Cから28.1度Cまでの約2.5度Cの変化であった。

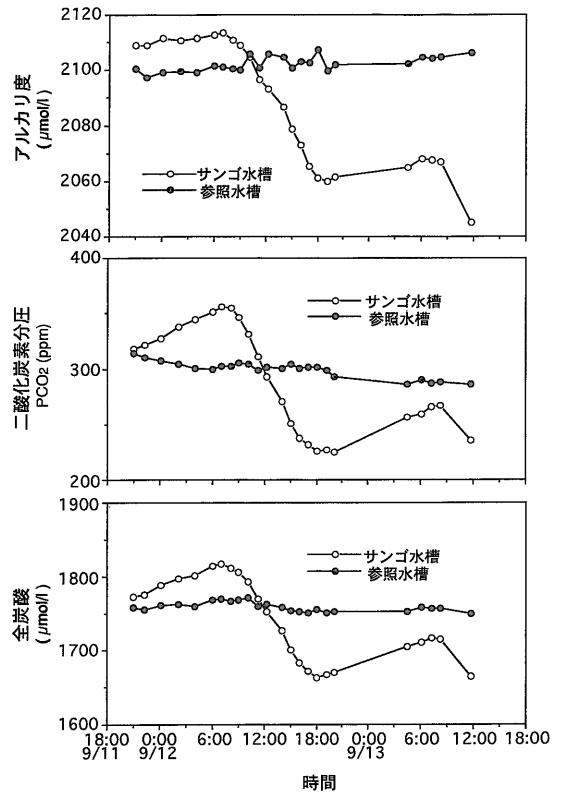
##### 5.1 炭酸物質の日変化

溶存酸素、pH、光量子密度の測定値を第2図に示す。

まず溶存酸素濃度は光量子密度の変化に対応して変化している。実験を始めた9月11日の20時から12日の朝7時までの夜間には、溶存酸素濃度が0.78 meq/lから0.63 meq/lまで減少した。その後日の出とともに増加し、18時には1.1 meq/lまで高くなった。9月13日の朝の溶存酸素の値は0.80



第2図 サンゴ飼育実験における pH, 溶存酸素および光量子密度の日周変化



第3図 サンゴ飼育実験におけるアルカリ度, 二酸化炭素分圧(PCO<sub>2</sub>)および全炭酸(TCO<sub>2</sub>)の日周変化

meq/lで前日の同じ時間よりも約0.15 meq/lだけ高くなっており, おもにサンゴに共生する共生藻による光合成により溶存酸素が蓄積されていることがわかる. 参照水槽の溶存酸素濃度は変化せず, 実験期間中はほぼ一定の値を示した.

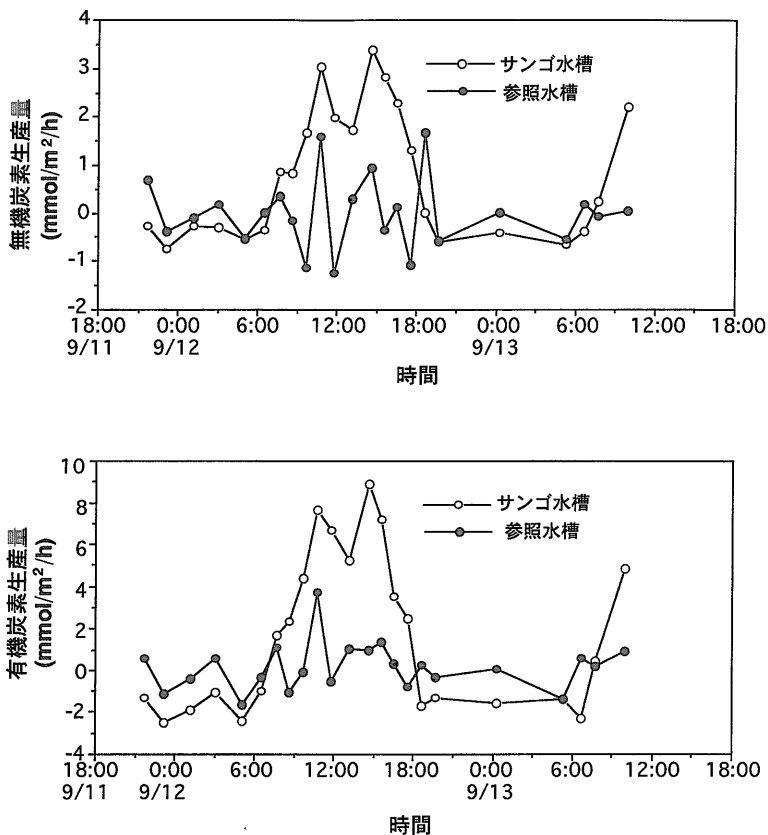
次に pH は, 実験を開始した夕方から翌日の明け方にかけて, 8.24から8.19まで徐々に下がった. その後朝7時から18時までは pH 値は8.35まで上昇した. 二日目も前日と同様に夕方から朝にかけて pH は低下するが, 8.28までしか下がらない. 朝8時に上昇しはじめた. 参照水槽中の海水の pH 値は, 若干の上昇が認められたがほぼ一様な値を示している. pH と溶存酸素の極大値は夕方5時頃であり, 極小は明け方の6時頃であった. これらの値は光量子密度の変化に対応しており, サンゴの生物活動(光合成-呼吸)によるものである.

アルカリ度, 二酸化炭素濃度と全炭酸の変化を第3図に示す. アルカリ度の変化は基本的には炭酸塩の生成と溶解に関係するものである. 夕方から朝に

かけて若干の上昇が認められるが, 2110  $\mu\text{mol}/\text{l}$ でほぼ一様な値である. 朝7時から夕方19時までは 2060  $\mu\text{mol}/\text{l}$ まで約50  $\mu\text{mol}/\text{l}$ だけ減少し, 1日目と2日目では明瞭なアルカリ度の減少が認められた. 2日目の夜間も前日と同様に10  $\mu\text{mol}/\text{l}$ 程度の上昇が認められる. 海水中の炭酸アルカリ度は昼間に溶存酸素の増加に伴って減少しており, 炭酸塩の生成が昼間に光合成と連動して行われていることがわかる. 夜間にわずかではあるがアルカリ度の上昇が認められ, 炭酸塩が溶解している可能性がある.

さて, 二酸化炭素分圧と全炭酸については重要な結果がえられた. これら成分の日周変化はアルカリ度変化とほぼ同じ挙動を示し, 夕方から朝にかけては上昇するが, 夜間での増加量をはるかに越えた量の二酸化炭素や全炭酸の減少が認められる. サンゴが生育することによって, 二酸化炭素分圧と全炭酸が減少することが確認された.

### 5.2 無機炭素生産(石灰化)と有機炭素生産(光合成)



第4図 サンゴ飼育実験における無機炭素生産と有機炭素生産の日周変化

海水中の炭酸アルカリ度は、1 mol の  $\text{CaCO}_3$  の生成について 2 当量の炭酸アルカリ度が減少するが、光合成—呼吸過程では変化しない。無機炭素生産は炭酸アルカリ度の変化量から求められる。

$$IP = -\Delta CA / 2 \quad (4)$$

無機炭素生産 炭酸アルカリ度の変化量/2

また、全炭酸の変化量は光合成による有機炭素生産量と無機炭素生産の合量であるので、(4)から得られた無機炭素生産量を(5)式に代入して得られる。

$$OP = \Delta TCO_2 - IP \quad (5)$$

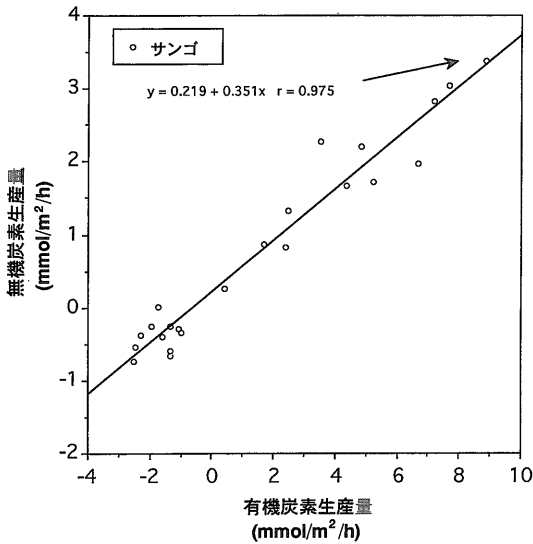
有機炭素生産 全炭酸の変化量 無機炭素生産

得られたサンゴの無機炭素生産(石灰化)速度と有機炭素生産速度を第4図に示す。

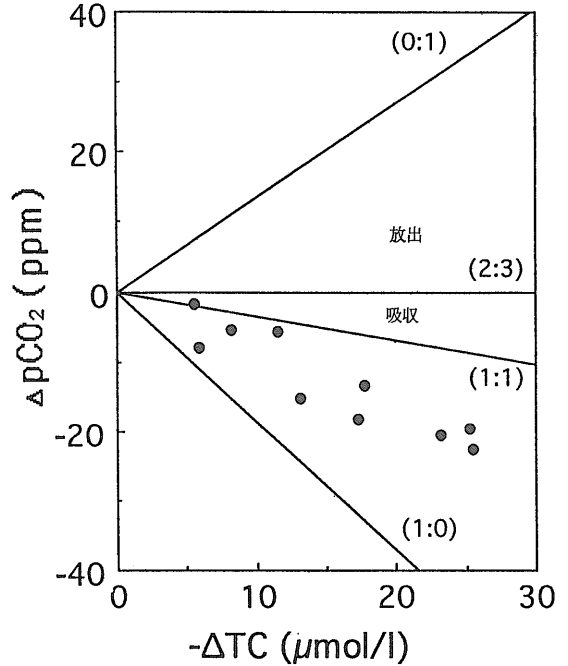
無機炭素および有機炭素の生産速度は、朝6時ころから大きくなり日中に極大となる。夕方には小さくなり、6時以降は生産速度はゼロ以下(負の値)を示す。これら無機炭素と有機炭素の生産速度は、昼間で大きく夜間では小さいこと、および、雲が発生し光量子密度が小さい午後1時ころに一旦速度

が小さくなることなど、光量子密度の変化と関連しており、これらの過程が別々に起こるのではなく、互いに連動して同時に進行するのがわかる。また夜間には若干無機生産が負になる。つまり脱石灰化が occurring している可能性がある。

参照水槽では無機炭素、有機炭素の生産速度はほとんどゼロにちかい値を示すが、昼間にはやや高い値を示すようにも見える。サンゴ礁からポンプで汲み上げている海水を使用しているため、わずかではあるが、海水中に存在する植物プランクトンなどの影響があるのかもしれない。サンゴ水槽と参照水槽の無機炭素生産速度の差を時間で積分して、サンゴによる無機炭素生産を求めた。サンゴ水槽のサイズを考慮して、昼間での無機炭素の生産量は  $7.6 \text{ mmol/m}^2/\text{day}$  となり、純生産量は  $6.0 \text{ mmol/m}^2/\text{day}$  となった。この値を年間に換算すると、 $2190 \text{ mmol/m}^2/\text{year}$  の値となった。これは炭酸カルシウムに換算すると  $219 \text{ g CaCO}_3/\text{m}^2/\text{year}$  となる。サンゴの被覆率がおよそ30%位であるとすれば、こ



第5図 無機炭素生産と有機炭素生産の関係



第6図 サンゴ飼育実験における二酸化炭素分圧と全炭酸の関係：無機炭素生産と有機炭素生産の割合への依存性

の値はサンゴの骨格の成長速度として数 mm/year に相当し、一般的な塊状サンゴの成長速度と矛盾しない妥当な値といえる。

無機炭素生産速度と有機炭素生産速度の関係を第5図に示す。両者の関係はほぼ直線的であり、有機炭素生産が3に対して無機炭素生産は1の割合であった。Hidaka and Minei(1993)はこの値が3.8:1という値を得ているので、一般にサンゴの有機・無機炭素生産の割合はこの程度の値である。今回の値はサンゴ水槽の海水を循環させずに実験を行っているので、サンゴの生育条件としては最適とは言えず、むしろ小さい値であるかもしれない。

### 5.3 有機・無機炭素生産と二酸化炭素の関係

さて、大気中の二酸化炭素濃度変動に対して、海洋における光合成過程と石灰化過程がどのように寄与しうるのであろうか。加納(1990)や Ware et al. (1992)は石灰化過程が二酸化炭素の放出反応であると考え、有機・無機炭素生産がどこでつりあうか、つまり大気中二酸化炭素濃度にたいして均衡するための理論的計算をおこなっている。それによれば、本来ならば、無機炭素と有機炭素の生産が1:1でバランスするはずであるが、海水中ではイオンの活量が小さくなるのでその分だけ炭酸化学種の化学平衡にずれを生じて、平均的な表面海水中では有機炭素生産2にたいして無機炭素生産3までは二酸化炭素が大気から吸収されうることを示した。第6図に本実験で得られた結果を、加納(1990)の方法

で二酸化炭素分圧と全炭酸の関係図にプロットして示す。本実験でえられた結果は、あきらかに大気から二酸化炭素を吸収する範囲にあることがわかる。これは基本的には本実験で得られた無機炭素生産と有機炭素との比が1:3であったことによる。つまり、数日というきわめて短期間では二酸化炭素が減少しており、二酸化炭素の放出過程である石灰化過程を含んではいるが、サンゴの生育によって二酸化炭素が放出されることはない。夜間における有機物の分解(呼吸)量を考慮してもその効果はそれほど大きいものではなく、サンゴの生育によって二酸化炭素が吸収されたことを示す。一次生産と呼吸との関係は Roffman (1968)などにより求められており、今回の実験はこれらとほぼ同じ結果であった。

## 6. ま と め

- 本実験で得られた結果は次のように要約できる。
- (1) サンゴを飼育中に海水中の二酸化炭素濃度は減少する。
  - (2) 昼間、光合成が行われているときに、同時に平行して石灰化がおこる。

- (3) 有機物生産と無機物生産の割合は3:1であり、有機物生産の方が卓越している。これにより二酸化炭素放出過程と考えられる石灰化の反応が進行しても、海水中の二酸化炭素濃度が増加することはない。
- (4) 短期的な観測ではあるが、サンゴの生育によって、海水中の二酸化炭素濃度は、増加せず、むしろ減少する傾向にあることが確認された。
- (5) それゆえに、一般的なサンゴ礁は直接的な二酸化炭素の供給源とはならないと思われる。もし、サンゴ礁が二酸化炭素の供給源であるならば、時間的、空間的に制約された有機物を集積・分解する場があるはずであり、そこから二酸化炭素は大気に放出されることになるであろう。
- (6) 今後、サンゴ礁で生産された大量の有機物がどこに運ばれ、堆積・貯蔵あるいは分解されるのかが重要な課題となる。サンゴ礁における二酸化炭素問題は、外洋における問題と基本的に共通した課題といえよう。

## 7. おわりに

地球規模での大気二酸化炭素濃度の変動にたいするサンゴ礁の寄与について明らかにするためには、長期的観測にもとずいて評価する必要がある。そこで鍵となるのは、サンゴやサンゴ礁で生産された有機物がどこへ運ばれ、どこで堆積し、どこで分解されるのかについて明らかにすることである。もしも、サンゴ礁がこれら有機物に関して閉鎖系を維持し、サンゴ礁内で有機物が消費分解されるのであれば、サンゴ礁は結局は二酸化炭素を大気中に放出す

るので放出源となるであろう。また、反対に有機物に関して開放系であるならば、有機物はサンゴ礁の外(外洋)にまで運ばれ、サンゴ礁の問題は基本的には外洋における光合成と石灰化過程の問題と共通の問題となることになる。

謝辞：原稿作成にご配慮頂いた工業技術院地質調査所茅根 創博士に感謝します。水槽実験を行うにあたり、大学院学生藤村弘行、4年次学生柳 義之、研究生金原五月君ほか分析講座の大学院生諸君の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

## 文 献

- Berger, W. H. (1982): Increase of carbon dioxide in the atmosphere during deglaciation: the coral reef hypothesis. *Naturwissenschaften*, **69**, 87-88.
- Crossland C. J., Hatcher, B. G. and Smith, S. V. (1991): Role of coral reefs in global ocean production. *Coral Reefs*, **10**, 55-64.
- Hidaka, M. and Minei, T. (1993): Effect of short-term irradiance on calcification of the coral *Galaxea fascicularis*. *Proceedings of VII Pacific Science Inter-congress (Okinawa)*, in press.
- 加納裕二(1990): サンゴの増殖と大気中の二酸化炭素濃度の関係. *海と空*, **65**, 259-265.
- 茅根 創(1990): 地球規模のCO<sub>2</sub>循環におけるサンゴ礁の役割. *地質ニュース*, 436, 6-16.
- Roffman, B. (1968): Patterns of oxygen exchange in some Pacific corals. *Comp. Biochem. Physiol.*, **27**, 405-418.
- 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.
- Ware, J. R., Smith, S. V. and Reaka-Kudla, M. L. (1992): Coral reefs: sources or sinks of atmospheric CO<sub>2</sub>? *Coral Reefs*, **11**, 127-130.
- 山里 清(1991): 『サンゴの生物学』. 東京大学出版会, 150 p.

---

OOMORI Tamotsu (1993): Coral calcification and the uptake of CO<sub>2</sub> from sea water.

---