

論文の内容の要旨

論文題目 Community production and carbon dynamics in the coral reef ecosystem
サンゴ礁生態系における群集生産と炭素循環

氏名 秦 浩司

1. はじめに

サンゴ礁は、サンゴの石灰化により形成される石灰岩の地形上に展開する生態系であり、光合成による有機炭素生産と、石灰化による無機炭素生産の両過程を通じて地球上の炭素循環に関わっている。サンゴ礁は単位面積あたりの一次生産量が最も大きな生態系のひとつであり (Whittaker, 1975)、その群集生産の研究は 1950 年代から始まった。初期の研究では、群集レベルの光合成量が非常に大きいものの、呼吸による消費もほぼ等しく、群集総生産量 (P_g) と群集呼吸量 (R) の比、 P_g/R 比がほぼ 1 になるという結果が報告された (Odum and Odum, 1955) ことから、サンゴ礁は極相状態にあり、物質循環が閉じているとの考え方が広まった。一方、1970 年代以降の研究では、群集総生産量は呼吸を上回り、正味の炭素固定 (群集純生産量: E) がプラスになっているという結果も多く報告されるようになった。しかし群集純生産量の見積もりは未だ精度が十分ではなく、誤差の評価を含めたより高精度の見積もりが必要である。また、炭酸系変動の測定による群集生産量の見積もりと共に、生産された有機物の挙動に伴う炭素循環についての情報が必要であるが、研究例はまだ少ない。特に有機物の外洋への流出の直接測定についての研究はなかった。これらの測定結果を元に、サンゴ礁の炭素循環を閉じた系ではなく開いた系として捉えることが必要であると考えられる。

近年、大気中の CO_2 の増大による地球温暖化への懸念から、陸上・海洋の生態系の群集生産に伴う炭素循環への関心が高まっている。光合成は CO_2 吸収反応であるが、石灰化は CO_2 放出反応であり (Ware et al., 1991)、サンゴ礁の群集生産による海水中 CO_2 分圧の挙動は群集純生産量 (E) と石灰化量 (G) の比 E/G 比によって判定されている。しかし、 E の見積もり精度が十分でないこと、サンゴ礁上海水中 CO_2 分圧の長期測定が行われていないことから、その変動や、

群集生産の影響についての知見は未だ十分ではない。

このような背景から、本研究ではサンゴ礁の群集生産と、それに伴う炭素循環を明らかにすることを目的に、西太平洋のパラオ諸島サンゴ礁と沖縄県石垣島白保サンゴ礁において、

- ・炭酸系の精密測定による群集生産の見積もり
- ・日生産量の誤差の評価法の導入
- ・有機物フラックス測定による純生産量の確認
- ・有機物の系外への流出の直接測定
- ・海水中 CO_2 分圧の長期連続測定

を行った。長期観測によって、1998年に起こった全球規模のサンゴ礁の白化（高水温によるサンゴ共生藻の離脱現象）の時期を捉えることができ、白化の影響による群集生産と炭素循環の変化から、健全なサンゴ礁の機能が明らかとなった。これらの結果から、サンゴ礁の群集生産の特徴と地球上の炭素循環に対する寄与を考察した。

2. 結果

群集生産と石灰化速度の見積もりは、最も高精度と考えられる全アルカリ度と全炭酸の直接測定を元に行った。海水中の炭酸系成分の変動の測定（図1）から光-光合成・石灰化曲線を作成し、光の実測値を用いて各時間の生産量を積分することにより日生産量を算出した。白化前は、パラオ、白保の両調査域において、 P_g と G は礁原の標準的な値（Kinsey, 1985）の範囲にあり、 E は $100\text{-}130 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ と見積もられた。本研究では、データのばらつきに由来する群集純生産量（ E ）の誤差を算出する方法を初めて導入した結果、有意にプラスであることが示された（表1）。 P_g/R 比は $1.2\text{-}1.3$ 、 E/G 比は $0.7\text{-}1.4$ の値を示した。一方、白化後は、パラオ、白保の両調査域で E が $1/4$ 程度にまで低下し、それに伴って P_g/R 比は 1.1 に、 E/G 比は 0.3 に低下した。

サンゴ礁海水中の有機物濃度は外洋海水よりも高くなっていた（図1）。健全なサンゴ礁礁原では、生産された E の $66\text{-}83\%$ が、主に溶存態の有機物（DOC）として海水中に放出され、潮汐に伴う海水の交換によって系外に流出することが分かった。堡礁型のパラオサンゴ礁では、礁原からラグーンに流入した有機物は、滞留時間 $16\text{-}35$ 日の間に分解が進むが、礁原とラグーンのサンゴ礁全体としては P_g の 4% が主に懸濁態の有機物（POC）として外洋に流出している。一方、裾礁型の白保サンゴ礁では海水の滞留時間は $4\text{-}8$ 時間と短く、 P_g の 17% が外洋に流出している見積もりになった。また、サンゴの白化時には、 E の低下に伴って有機物のフラックスが小さくなった（表1）。

外洋側に設置したセジメントトラップによる外洋の有機物鉛直フラックスの測定では、サンゴ礁に近いほど、また、サンゴ礁内の群集純生産量が高いほどフラックスが大きくなる傾向が認められ、サンゴ礁からの有機物の流出が、外洋の有機物フラックスに影響を与えていることが示された（表1）。

サンゴ礁上海水中の CO_2 分圧は、日中は $150\text{-}200 \mu\text{atm}$ まで低下し、夜間は $500\text{-}700 \mu\text{atm}$

まで上昇する日周変動を示す(図1)。季節変動は、夏に高く冬に低い傾向が明瞭で、主に海水温の変動に規定されている。サンゴ礁上に流入した海水 CO_2 分圧の変動は、主にサンゴ礁の群集生産の影響に因り、サンゴの白化時には E/G 比の低下に伴い、海水中 CO_2 分圧が上昇することが認められた。

3. 考察

本研究では、従来よりも高精度な炭酸系パラメータの計測と、新しいデータ処理法の導入によって、健全なサンゴ礁では定常状態において $P_g/R > 1$ を維持していることが確認された。また、群集生産の測定と同時に、有機物のフラックスを直接測定することにより、礁内で生産された有機物の大部分が系外に流出していることが示された。

サンゴ礁における群集生産と炭素循環では、外洋との海水交換の過程で栄養塩を取り入れて海水中の溶存無機炭素を有機物に変換し、外洋に放出しているという機構が考えられる。このように、サンゴ礁における炭素循環は、従来考えられてきたように系内で閉じているのではなく、開いた系として外界との交換を行っていることが示された。健全なサンゴ礁は固定した炭素を外洋に放出することによって炭素固定能力を維持している。また、サンゴの白化により、群集生産と有機物フラックスのポテンシャルが劣化し、海水 CO_2 分圧が上昇することが認められたことから、サンゴ礁の群集生産と炭素循環の機能に対し、造礁サンゴが重要な役割を果たしていることが明らかとなった。

本研究で得られたサンゴ礁礁原の群集純生産量と、礁原の面積 $284,300\text{km}^2$ (Spalding et al., 2001)から、サンゴ礁礁原の有機生産による炭素固定量は約 $0.12\text{-}0.16 \text{ Gt/年}$ と概算され、全球の炭素循環の中でも無視できない値であることが示された。

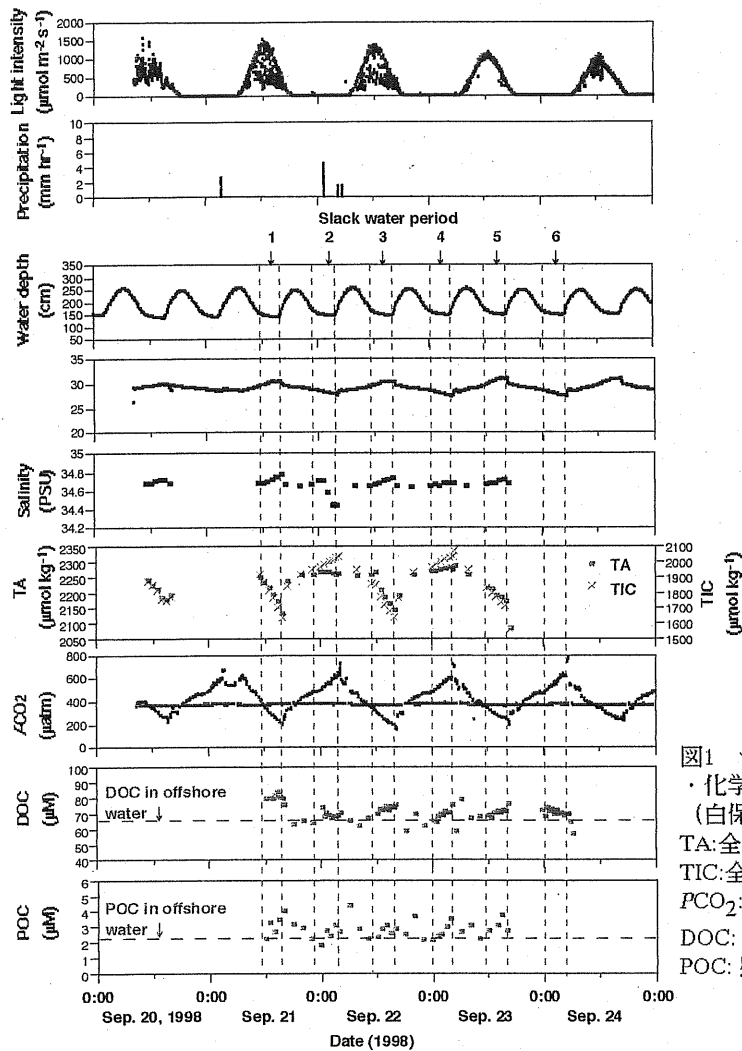


図1 サンゴ礁上海水中の物理・化学成分の変動の一例 (白保サンゴ礁1998年9月)
 TA: 全アルカリ度
 TIC: 全炭酸
 PCO₂: 二酸化炭素分圧
 DOC: 溶存態有機炭素
 POC: 懸濁態有機炭素

表1 パラオおよび白保サンゴ礁の群集生産と有機物フラックス

Period	SST (°C)	Status of corals		Community production and calcification				Organic C flux		POC flux outside the reef		
		Coverage (Average (Maximum)) (%)	Bleached (%)	<i>P_g</i>	<i>R</i>	<i>E</i> ±SE	<i>G</i>	DOC	POC	(Mean ± SE)	(Mean ± SE)	
Palau												
July 1994	28.8	8.1 (28.7)	0	Living	613	516	97 ± 52	130	64	2.5km	1.1 ± 0.3	
										20km	0.5 ± 0.01	
September 2000	29.5	1.4 (15)	0	Dead	263	238	25 ± 17	74	ND	ND		
Shiraho												
September 1998	29.0	7.1 (30)	50.7	Bleaching	632	596	36 ± 12	127	36	6	1km	1.0 ± 0.1
December 1998	25.5	5.8 (25)	0	Degraded	464	368	96 ± 40	121				
March 1999	25.2	5.9 (25)	0	Recovering	395	298	97 ± 18	70				
June-July 1999	29.8		0	Recovering	653	525	128 ± 48	121	96	10	1km	2.4 ± 0.4
September 1999	27.9	6.7 (35)	0	Recovering	525	394	131 ± 24	112				

SST: 水温 *P_g*: 群集総生産量 *R*: 群集呼吸量 *E*: 群集純生産量 *G*: 群集石灰化量 ND: Not detected