

阿嘉島クシバルのさんご礁湖における 純生産速度の観測

立田 穰
財団法人 電力中央研究所
向江 奈穂
若林真知子
社団法人 東京医薬専門学校

Field observation of net productivity in Kushibaru reef lagoon at Akajima Island

Y. Tateda · N. Mukae · M. Wakabayashi

●はじめに

地球温暖化による気候変動が原因のひとつと疑われているサンゴの白化現象や、土地利用開発による陸上土の流入、およびオニヒトデが引き起こす食害などにより、近年さんご礁生態系の衰退が指摘されている。さんご礁生態系の衰退は、種の多様性の減少による遺伝子資源の枯渇や、生産力の低下による水産・観光資源の減少を引き起こす。特に、さんご礁の生産力は、さんご礁生態系の維持・回復のための重要な復元力であり、この生産力の測定法の開発と、さんご礁生態系の生産力の持続的モニタリング手法開発は、現在のさんご礁の健全性の評価と将来のさんご礁の状態予測のために必要な研究課題である。立田らはこれまでに、さんご礁湖内の生物群集について、停留時における水中酸素消費速度を用いた生産速度の推定や、水中チャンパー型酸素消費速度計を用いたさんご礁のベントスの生産速度の観測を行い、生産速度のモニタリングの方法を検討してきた(立田 1997; Tateda et al. 2005)。

本報では、これまでに阿嘉島クシバル地点で得られたさんご礁湖生物群集の生産力観測結果と、ベントスの生産力の観測結果をもとに、同さんご礁湖の生産力の特徴を考察する。

●方法

さんご礁生物群集の純生産速度の評価は、これまで以下の方法で行われてきた(鈴木1994)。第一の方法は、溶存酸素濃度測定用センサーを装備した水中チャンパー法で、さんご礁の様々な底生生物群集を

チャンパーで被うか、あるいはチャンパー内に生物を入れて、チャンパー内の水中溶存酸素濃度の変化速度から、光合成・呼吸速度を評価する方法である(Clavier and Garrigue 1999; Yates and Halley 2003; Chistolm 2003; Ralph et al. 1999; Gorbunov et al. 2001; Lesser and Gorbunov 2001; Levy et al. 2004)。この方法は、対象とする生物群集の生産速度を正確に測定できるが、さんご礁全体の純生産量評価のためには、様々な生物群集の生産速度を測定し、かつ各生物群集の被覆度を調査する必要がある。第二の方法は、干潮時に閉鎖水域となるさんご礁湖内の日中・夜間の水中酸素濃度の変化速度から、光合成・呼吸速度を評価する憩潮時(slack water)観測法である(Nakamori et al. 1992; Gattuso et al. 1995; Kayane et al. 1995; Krains et al. 1997; Suzuki and Kawahara 1999)。この方法は、当該さんご礁湖の生物群集全体の生産速度を評価しやすいが、風が弱く大気からの酸素供給が小さい条件での測定が求められる。

阿嘉島のクシバル地点のさんご礁湖は、干潮時に礁原により外海と遮断され、かつ、生息するベントスの大半がウミウチワ*Padina arborescens*を主とする底生藻類と数種のサンゴに限られ、全体の評価が比較的容易である。そこで、憩潮時における水中溶存酸素濃度の変化の測定と、*in situ*水中チャンパーによる礁湖内の主要な構成種であるオトメミドリイシ*Acropora pulchra*、エダコモンサンゴ*Montipora degitata*などのベントスの現場環境中酸素消費速度の計測により、生産速度を観測した。礁湖内海水憩潮時生産速度観測では、礁湖からの海

水流出口である北側リーフに多項目水質計(三洋測器MWQ-III, ガルバニ電池式)と電磁流速計(アレック電子ACM-8M)を設置し、憩潮時間中の水中溶存酸素濃度、水温(サーミスター)、塩分(電磁誘導型伝導度と水温より換算)を観測した。水中チャンパー法では、酸素消費速度計(三洋測器:水中溶存酸素・水中光量子・水温・塩分センサー、プログラム式換水ポンプ、攪拌ファン)を改良し、クシバル礁湖内での実験に用いた。同観測機器は、チャンパー内の水を定期的に、自動的に交換する機能を有し、現場環境水中で光合成・呼吸速度を測定することが可能である。陸上には、光量子計(LI-COR)、気象観測計を設置し、風速、光、水温、降水量などの環境条件を計測した。

●生物群集の純生産速度の観測結果

阿嘉島さんご礁クシバルリーフ北の観測地点における調査期間中の潮位、溶存酸素濃度の経時変化の例を図1に示す。観測地点における溶存酸素濃度は、昼間干潮時の礁湖内の海水停留時に上昇し、夜間干潮時の停留時に下降していた。観測地点における流速を図2に、北流速を図3に示す。観測地点における流れは、同観測例では、上げ潮時に短時間北から南に海水が流入していたが、その他の期間は概ね北へ流れていた。特に下げ潮時は流速が20cm/sまで増大していた。一方干潮時後半の停留時はおよそ5cm/sで海水が礁湖から流出していた。図2, 3に示されるように、当該さんご礁湖の干潮時後半は、礁湖内の海水が停留しておおむね閉鎖系水域とみなすことができた。この干潮時の憩潮による状態は、年間をと

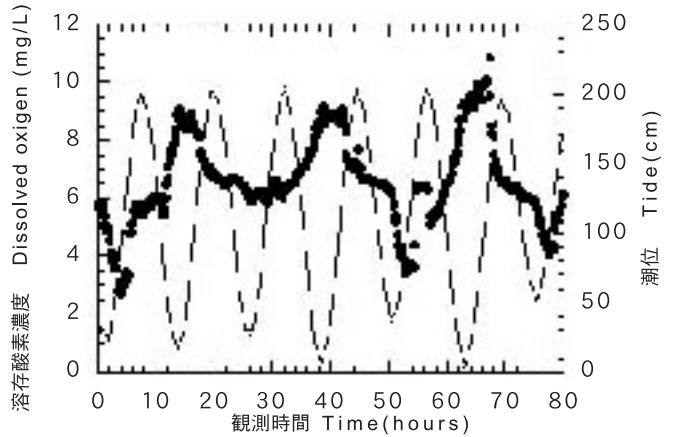


図1. 阿嘉島観測地点における潮位(実線), 溶存酸素濃度(●)の経時変化.

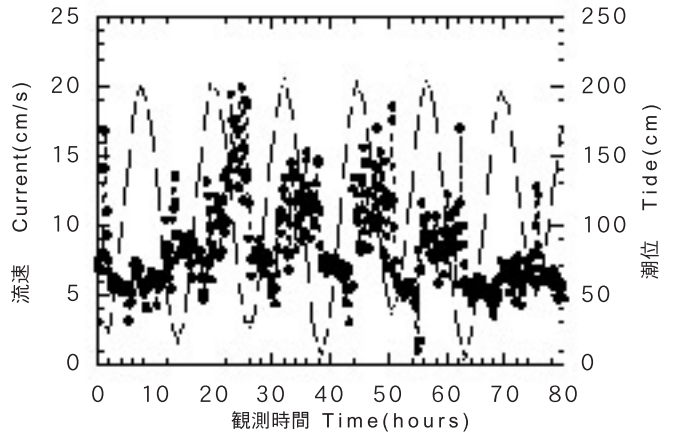


図2. 阿嘉島クシバル観測地点における潮位(実線), 流速(●)の経時変化.

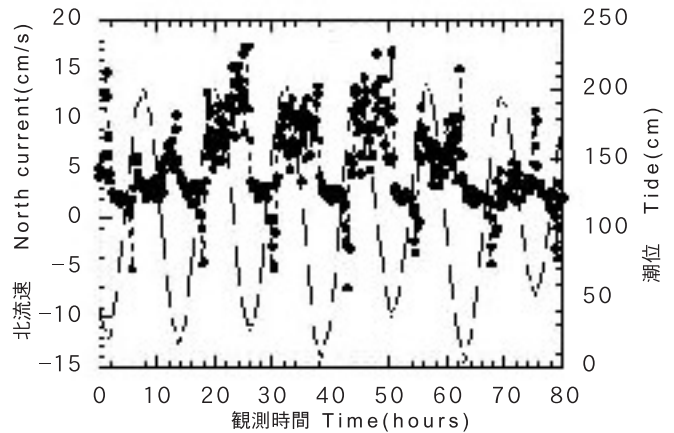


図3. 阿嘉島クシバル観測地点における潮位(実線) 北流速(●)の経時変化.

おして大潮時に観察される。そこで、干潮時後半の憩潮時における礁湖内海水の溶存酸素濃度の変化から、夜間の礁湖内生物群集の呼吸による酸素消費曲線の例を図4に、日中の礁湖内生物群集の光合成による酸素生成曲線の例を図5に示す。但し図5における酸素生成曲線は、光合成による酸素生成から呼吸による酸素消費を差し引いたみかけの酸素生成曲線である。

図4に示されるように、観測時における夜間の酸素消費曲線は、総ての観測例において相関係数0.95-1.00で、一定率で減少していた。これらを生物群集による呼吸消費として、以下の方法で群集呼吸速度を算出した。

すなわち、

群集酸素消費速度($\text{mmol}/\text{m}^2/\text{h}$) =

$$\text{酸素濃度減少速度}(\text{mg}/\text{l}/\text{h}) \times 20 / 0.1 / 16 \quad (1)$$

ここで、

0.1: 1リッター海水の m^2 あたり水深(cm)

20: 干潮時クシバル地点礁湖の干潮時平均水深(cm)

16: 酸素1モルの重量

また、図5に示される日中の酸素生成曲線は、総ての観測例において相関係数0.44-0.99で、一定速度で増加していた。これらの増加を、さんご礁湖内の生物群集の光合成による酸素生成から、生物群集呼吸による酸素消費を差し引いたみかけの群集光合成速度とみなし、以下の方法で光合成による粗生産速度(gross production rate)を算出した。

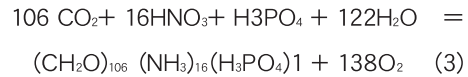
すなわち、

粗生産速度($\text{mmol}/\text{m}^2/\text{h}$) =

$$(\text{みかけの酸素生成速度}(\text{mg}/\text{l}/\text{h}) \times 20/0.1/16 + \text{群集呼吸速度}(\text{mmol}/\text{m}^2/\text{h})) \times 106/138 \quad (2)$$

ここで、群集呼吸速度は、同一潮汐周期の観測値を用い、106/138は以下の式であらわされるような、栄養塩による光合成速度制限をう

ける生物群集における有機物1分子と酸素1分子のモル比である。



調査期間中の阿嘉島クシバル地点のさんご礁湖の生物群集の生産速度を炭素モル比に換算した粗生産速度、呼吸速度、および算出された純生産速度を表1に示す。表1に示されるように、クシバルのさんご礁湖の生物群集では、冬季の生産速度と呼吸速度がほぼ同等で ($P/R \leq 1$) 純生産はほとんどないが、

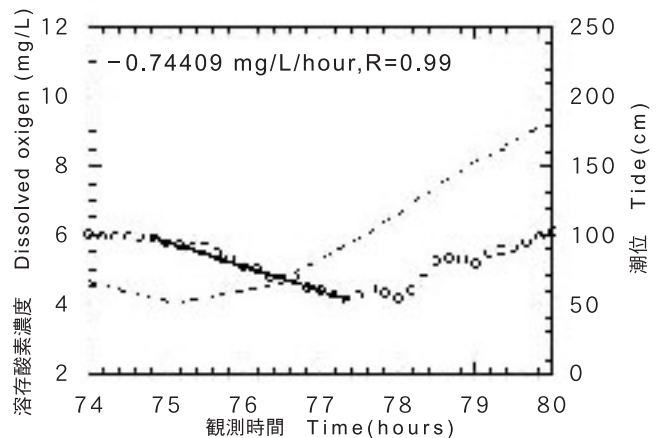


図4. 阿嘉島観測地点における夜間干潮時の潮位 (破線) 溶存酸素濃度 (○) 酸素消費曲線 (実線).

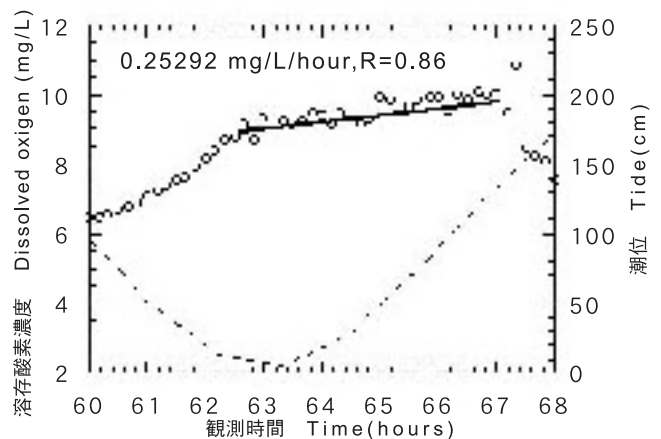


図5. 阿嘉島観測地点における昼間干潮時の潮位 (破線) 溶存酸素濃度 (○) 酸素生成曲線 (実線).

表1. 阿嘉島クシバル地点さんご礁湖における純生産速度の観測値。

季節	光合成速度	群集呼吸速度	光合成/呼吸速度比	純生産速度
	mmolC/m ² /h		P/R	gC/m ² /day
冬季	7.4 - 9.6	7.1 - 9.0	0.82 - 1.3	-1.2 - -0.5
夏季	19 - 34	4.6 - 12	1.1 - 4.6	1.2 - 4.3

夏季には生産速度が呼吸速度を上回り (P/R>1) 1-4 gC/m²/dayの純生産速度を示した。一般的にさんご礁湖については、生物群集による純生産速度は<0からおよそ数gC/m²/day程度であるとされている (Nakamori et al. 1992; Gattuso et al. 1995; Clavier and Garrigue 1999)。本報の結果は、クシバルのさんご礁湖の生物群集では、冬季の純生産はほぼ0であり、礁湖内で生産された有機物が礁湖内で消費されていることを示す。一方、夏季には生産された有機物は礁湖内に蓄積あるいは礁湖外の生産を支えているものと考えられる。

●ベントスの純生産速度の観測結果

クシバルのさんご礁湖に生息する主要なサンゴであるエダコモンサンゴの現場実験の結果を図6に示す。エダコモンサンゴの実験期間中の水中チャンパー内の溶存酸素濃度は、昼間の間は光合成により上昇し、夜間は呼吸により減少していた。図6で得られた酸素濃度変化速度と平衡式(3)をもとに算出したエダコモンサンゴの光一光合成曲線を図7に示す。図に示すように、エダコモンサンゴの最大光合成速度は、水温の差の影響から、同一光量子密度についても夏季で高く冬季で低かった。また、夏季は午後の光合成速度が低減していた。観察された夏季の午後の光合成能力の低下は、オトメミドリイシ、ウミウチワ等底生藻類でも同様であった。このような午後の光合成能力の低減については、1) 光合成サイクルに基づく生理的要因、あるいは 2)水温、塩分、強光、紫外線などのストレス要因によると報告されている (Ralph et al. 1999; Gorbunov et al. 2001; Lesser and Gorbunov 2001; Levy et al. 2004)。

クシバルのさんご礁湖における現場実験結果で得られた各ベントスの純生産速度を表2に示す。クシバルのさんご礁湖の大半はウミウチワなどの底生藻類に覆われているため、夏季の純生産はおおむねこれらの底生藻類によって担われていると考えられる。表2に示されるように、エダコモンサンゴとウミウチワなどの底生藻類では、冬季の純生産速度は夏季

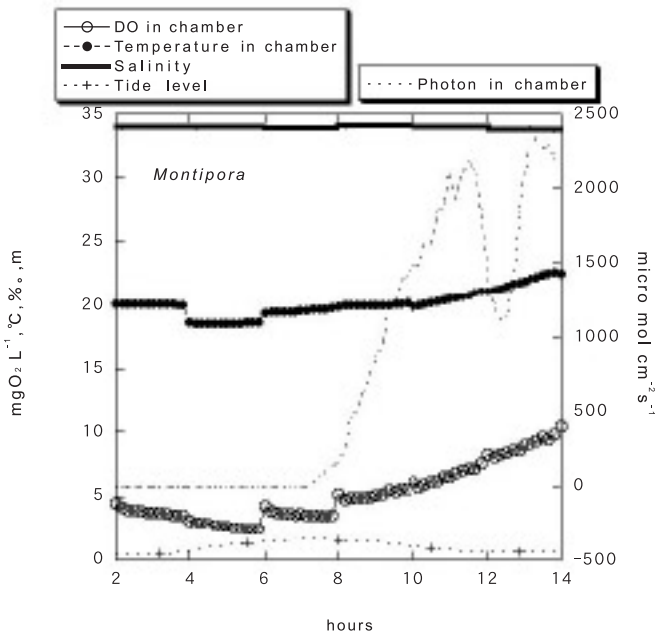


図6. エダコモンサンゴの水中チャンパー内の溶存酸素濃度、水温、塩分、光量子密度の変化と現場潮位。

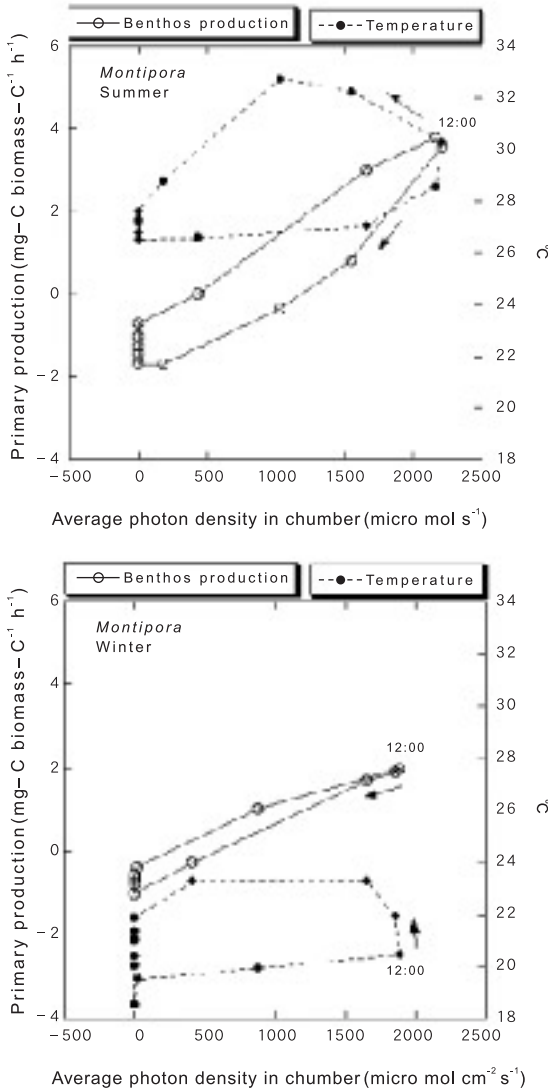


図7. 現場実験で得られたエダコモンサンゴ光一光合成曲線と水温の変化 (上: 夏季, 下: 冬季).

の18-28%に低下したが、オトメドリイシの純生産速度の低下は63%にとどまった。この結果は、冬季におけるオトメドリイシの純生産が群集生産力に占める割合が、夏季に比較して相対的に大きくなることを示しており、特に冬季の群集生産力の回復において重要なことが明らかとなった。また、憩潮時観測法で算出された冬季の群集純生産速度がほぼ0

表2. ベントスの純生産速度(mgC · gC · biomass⁻¹ · d⁻¹).

ベントス	夏季	冬季
オトメドリイシ	2.2	1.4
エダコモンサンゴ	3.1	0.57
ウミウチワ他	2.4	0.68

であったのに対して、冬季のベントス生産分が従属栄養生物群集を維持している(一次生産者現存量の約0.08%)と推定された。これは年間に換算すると同さんご礁湖の現存量の約60%にあたる(1+((2.2+3.1+2.4)/3+(1.4+0.57+0.68)/3)/2×365/1000=1.6)。夏季の純生産が大きい理由としては、冬季の低水温(20-23℃)に対する夏季の高水温(27-33℃)(図7)、および降雨による地表水・地下水の流れ込みが栄養塩を供給し生産を促進すること(Krains et al. 1997)が考えられるが、後者との関連については、さらに検討の必要がある。

● まとめ

沖縄県島尻郡阿嘉島クシバルのさんご礁湖において生産速度観測を行い、以下の結果を得た。1)礁湖の生物群集の純生産速度は、冬季はほぼ0であったが、夏季は1.2-4.3gC/m²/dayの範囲にあり、夏季における回復率が大きいことを示した。2)主要なベントスの夏季の純生産速度はほぼ同等であったが、最も被覆割合の大きい底生藻類の冬季の純生産速度が約1/5に減少したのに対して、オトメドリイシでは約1/2の減少であった。オトメドリイシは礁湖の生物群集の冬季の生産において、夏季よりも相対的により大きな回復力を担うと考えられる。

● 謝辞

本研究の現場調査における試料採取にあたっては、(財)熱帯海洋生態研究振興財団阿嘉島臨海研究所の協力を得た。ここに深甚の謝意を表す。

●引用文献

- Clavier, J. and C. Garrigue 1999. Annual sediment primary production and respiration in a large coral reef lagoon (SW New Caledonia). *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 191: 79-89.
- Chisholm, J. R. M. 2003. Primary productivity of reef-building crustose coralline algae. *Limnol. Oceanogr.*, 48(4): 1376-1387.
- Gattuso, J. P., M. Pichon and M. Frankignoulle 1995. Biological control of air-sea CO₂ fluxes: effect of photosynthetic and calcifying marine organisms and ecosystems. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 129: 307-312.
- Gorbunov, M. Y., Z. S. Kolber, M. P. Lesser and P. G. Falkowski 2001. Photosynthesis and photoprotection in symbiotic corals. *Limnol. Oceanogr.*, 46: 75-85.
- Lesser, M. P. and M. Y. Gorbunov 2001. Diurnal and bathymetric changes in chlorophyll fluorescence yields of reef corals measured in situ with a fast repetition rate fluorometer. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 212: 69-77.
- Kayane et al. 1995. Diurnal changes in the partial pressure of carbon dioxide in coral reef water. *Science*, 269: 214-216.
- Krains et al. 1997. Carbonate dynamics of the coral reef system at Bora Bay, Miyako Island. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 156: 1-16.
- Levy, O., Z. Dubinsky, K. Schneider, Y. Achituv, D. Zakai and M. Y. Gorbunov 2004. Diurnal hysteresis in coral photosynthesis. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 268: 105-117.
- Nakamori, T., T. Suzuki and Y. Iryu 1992. Water circulation and carbon flux on Shiraho coral reef of the Ryukyu Islands, Japan. *Continental Shelf Res.*, 12: 951-970.
- Ralph, P. J., R. Gademann, A. W. D. Larkum and U. Schreiber 1999. *In situ* underwater measurements of photosynthetic activity of coral zooxanthellae and other reef-dwelling dinoflagellate endosymbionts. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 180: 139-147.
- 鈴木淳 1994. 海水の炭酸系とサンゴ礁の光合成 石灰化によるその変化: 理論と代謝測定法. *地質調査所月報*. 45: 573-623.
- Suzuki, A. and H. Kawahata 1999. Partial pressure of carbon dioxide in coral reef lagoon water: comparative study of atolls and barrier reefs in the Indo-Pacific Oceans. *J. Oceanogr.*, 55: 731-745.
- 立田 穰 1997. 放射性同位体を用いたサンゴ礁生態系における炭素フラックスの測定; 石灰化と有機物固定によるCO₂放出・吸収量. U97075. pp.22.
- Tateda, Y., K. Iwao, H. Taniguchi, N. Mukae and M. Wakabayashi 2005. Preliminary estimation of community production and respiration in coral reef of Aka island by underwater *in-situ* respirometer. *Proc. Int. Coral Reef Symp.* (in press)
- Yates, K. K. and R. B. Halley 2003. Measuring coral reef community metabolism using new benthic chamber technology. *Coral Reefs*, 22: 247-255.