

## サンゴ礁によるCO<sub>2</sub>固定バイオリアクター構築技術の開発

研究代表者 東京大学大学院理学系研究科 茅根 創

Ecotechnology for Design of Coral Reef Bioreactor to Fix CO<sub>2</sub>: Coral Reef Eco-Symbiosis Technology Hajime Kayanne, *Research Director of CREST*

Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo

### 1. 研究の概要

サンゴ礁はサンゴ体内の共生藻によって、単位面積あたりでは海洋で最大、陸上の森林と同等かそれ以上の光合成生産力を持つと言われている。光合成産物はサンゴを經由してサンゴ礁にもたらされ、これによって海洋でもっとも多様な生物が維持されている。同時にサンゴ礁では石灰化によってサンゴ礁地形が構築され、生物に棲み家を提供するとともに、光合成のための受光面積を拡大する。しかしながらこのサンゴ礁は、急激な海岸開発と地球環境変動とによって、今世紀中にほとんど破壊される危機にある。海岸環境と地球環境におけるサンゴ礁の機能を評価し、その維持メカニズムに基づいてサンゴ礁の保全・活用・修復を進めることが急務である。

地球規模の炭素循環との関係では、サンゴ礁の高い光合成生産はCO<sub>2</sub>吸収に働く。しかしながら、光合成によって生産された有機物の分解と石灰化とがCO<sub>2</sub>放出であることから、サンゴ礁は一般にCO<sub>2</sub>放出の場であると考えられてきた。この考えに基づいて、サンゴの多い健全なサンゴ礁はCO<sub>2</sub>放出だが、サンゴ礁が破壊されて大型藻類が卓越すれば、石灰化が減少・光合成が増加しCO<sub>2</sub>吸収になるとされた。この考えによれば、サンゴ礁の保全とCO<sub>2</sub>固定とは相容れないことになる。研究代表者らは以前、サンゴ礁で光合成が石灰化を上回りCO<sub>2</sub>吸収となっている例を示したが、これについて様々な議論が起こっている。サンゴ礁の多様な機能と重要性を認めた上で現在必要な視点は、そもそもサンゴ礁が吸収か放出かを決定することではない。サンゴ礁におけるCO<sub>2</sub>循環のメカニズムと、それがサンゴ礁生態系と地形の維持にどのように関わっているかを明らかにして、CO<sub>2</sub>吸収ポテンシャルを評価し、これに基づいてサンゴ礁における大きなCO<sub>2</sub>フラックスをCO<sub>2</sub>固定のために活用する方策を提案することが必要である。

こうした視点から本研究は、サンゴ礁におけるCO<sub>2</sub>循環メカニズムを解明し吸収ポテンシャルを評価するとともに、CO<sub>2</sub>固定を促進する方策を提案し、望ましいサンゴ礁のデザインを提案することを目標とした。従来の議論は一部、測定が少数・短期間であることによっていた。そこで最初に、サンゴ礁に適した測定システムの開発を行なった。開発したシステムによって、異なる2つの型のサンゴ礁、石垣島の裾礁とパラオ諸島の堡礁とにおいて、それぞれ1年間の通年観測を実施した。こうして得られたぼう大なデータの解析によって、サンゴ礁の生物群集代謝とCO<sub>2</sub>変動との関係を明らかにした。とくに調査期間中起こった大規模な白化によって、劣化したサンゴ群集では光合成機能が低下し、CO<sub>2</sub>放出になることが示された。さらに、生産された有機物の特性と分解・保存過程、栄養塩循環、海水流動モデル、地形形成プロセス、サンゴ群集の維持機構に関する成果に基づいて、CO<sub>2</sub>固定に資するとともにサンゴ礁生態系・地形を維持できるサンゴ礁のデザインを提案する。

## 2. 現在までの成果報告

### 2.1 成果内容の要約

#### 1) 測定システムの開発

サンゴ礁のような沿岸域に適当な CO<sub>2</sub>測定システムとして、平衡器として従来のシャワー方式でなく気体透過膜を用いた小電力の測定システムを開発した。これを、CO<sub>2</sub>変化に関わる他の物理量の測定と組み合わせた統合型観測システムとして構成し、石垣島において1年間の連続通年観測に成功した(発表論文1, 写真1)。石垣島の観測では、従来型のCO<sub>2</sub>測定システムを並列し、両者を比較して評価を行なった。評価結果に基づいて、パラオ諸島においては、海底設置型の観測システムを開発して、通年観測に成功した(発表論文4, 写真2)。

海洋におけるCO<sub>2</sub>循環、大気との交換の実態を把握するためには、海水の炭酸系(全炭酸、アルカリ度)の計測が必須である。しかしながらこの2つの量はこれまで採水試料のバッチ測定でしか計測ができなかった。本研究では、海水の炭酸系をフローで高精度自動連続計測するシステムを開発した(発表論文2, 特許1)。本研究で開発したCO<sub>2</sub>計測システムと連続炭酸系測定システムによって、サンゴ礁におけるCO<sub>2</sub>と生物群集代謝の通年観測に、世界で始めて成功した。これらCO<sub>2</sub>と炭酸系計測システムは、海洋におけるCO<sub>2</sub>変動の観測に広く適用可能である。



写真1 統合型CO<sub>2</sub>計測システム「クレスト号」。石垣島白保サンゴ礁において、1998年9月から1999年9月まで1年間の通年観測を行なった。電源は発電機で、日常のメンテナンスは地元の漁民に依頼した。



写真2 水没型CO<sub>2</sub>計測システム。パラオ諸島サンゴ礁において、1999年11月から2000年11月まで1年間の通年観測を行なった。測定機本体は左端のもので、他の3つは電池ボックス。電源は市販の電池を1419個収納した。消費電力は15W。

## 2) CO<sub>2</sub>吸収ポテンシャル評価と循環メカニズムの解明

上記測定システムによって、石垣島とパラオ諸島のサンゴ礁において、CO<sub>2</sub>とサンゴ礁群集代謝、物理量の通年観測を行なった。本研究期間中の1998年夏に、エルニーニョによってもたらされた高水温による地球規模のサンゴ礁の白化が起こった（発表論文3）。これによって石垣島では白化によるサンゴ群集の劣化から回復過程の、パラオ諸島では白化後の劣化時のCO<sub>2</sub>変動と群集代謝を観測することができた。これによって逆に、健全な状態のサンゴ礁のCO<sub>2</sub>吸収ポテンシャルを評価することができた（発表論文4）。石垣島、パラオ諸島ともに、サンゴ群集が卓越する状態での礁原の群集純生産は100-130 mmolC m<sup>-2</sup> 日<sup>-1</sup>であった。しかしながら白化によってサンゴ群集が劣化した際には、群集光合成純生産は30 mmolC m<sup>-2</sup> 日<sup>-1</sup>に低下した。この低下量は石灰化の低下量を上回り、CO<sub>2</sub>濃度も劣化時には上昇したことが確認された（図1）。

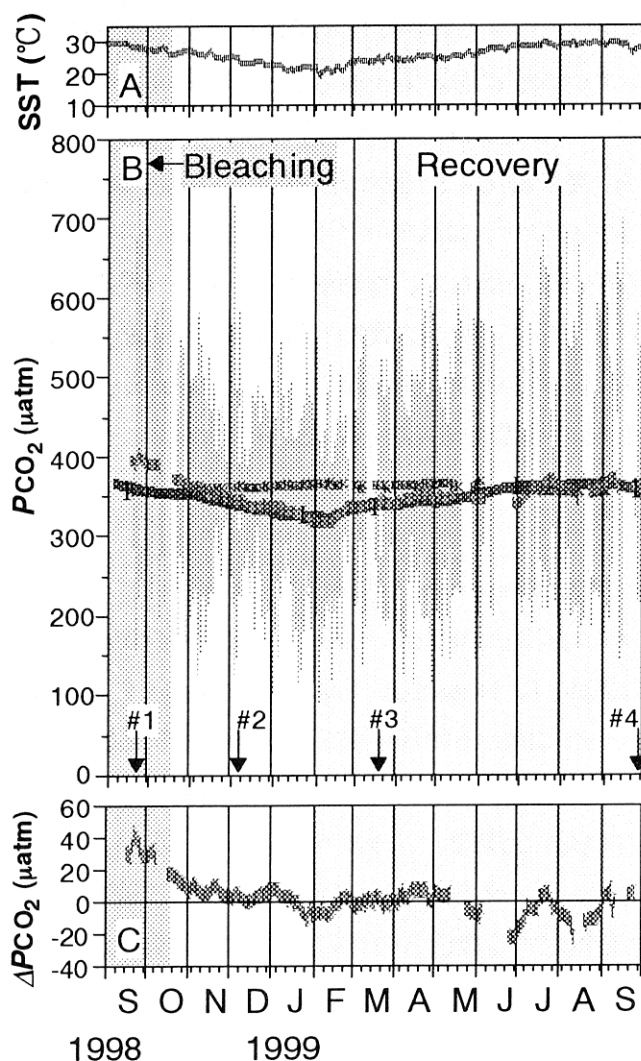


図1 石垣島白保サンゴ礁における1998年9月・1999年9月の、水温とCO<sub>2</sub>変化。A: 外洋の水温変化。B: サンゴ礁海水のCO<sub>2</sub>変化。C: サンゴ礁海水のCO<sub>2</sub>（日平均）と外洋のCO<sub>2</sub>との差。サンゴ礁の方が高ければ正。サンゴ礁海水のCO<sub>2</sub>は外洋の水温変化に伴って夏高く、冬低くなるが、白化時の1998年9月には水温から予測される値より最大50 μatm高かった。これは白化によって光合成生産が健全時の3分の1から4分の1に低下したという観測結果と整合的である。

サンゴ礁礁原の群集純生産は、基本的には光によって規定されることが示された。炭酸系の計測から代謝量を見積もる方法を確立した（特許2）。またサンゴ礁のCO<sub>2</sub>変動は、光合成と呼吸とに規定されて変動し、正味の吸収・放出は群集純生産量に対応する。さらに年間のCO<sub>2</sub>変動は水温と対応し、これに群集代謝が重なってサンゴ礁海水のCO<sub>2</sub>変動が決定することが明らかになった。

## 3) CO<sub>2</sub>固定促進とサンゴ礁のデザイン

サンゴ群集の劣化による光合成の劣化量は、 $400\text{--}500\text{ gC m}^{-2}\text{ 年}^{-1}$  にあたる。本研究で観測した群集純生産量は、礁原生態系のすべての消費を差し引いた値であるから、陸上生態系でいう純生産 (Net Primary Production) ではなく、生態系純生産 (Net Ecosystem Production) に相当する。生態系純生産は、成長期の森林の最大値でも  $500\text{ gC m}^{-2}\text{ 年}^{-1}$  程度 (極相林では 0) であるから、サンゴ礁はすべての生態系の中で最大規模の光合成速度を持つ。サンゴ礁の劣化による生態系純生産の正味のロスは、 $0.1\text{ GtonC 年}^{-1}$  にあたる。劣化によるロスが森林の消失のようにストックのロス (消失時だけのもの) でなく、フラックスのロス (毎年の吸収フラックスの消失) であることから、地球規模の炭素循環に与える影響はきわめて大きい。本研究によって、健全なサンゴ礁の維持は  $\text{CO}_2$  吸収にあたることが示された。

森林では生産物を主に系内に植物体の形で蓄積するが、サンゴ礁では主に溶存有機炭素の形で系外に移行する (発表論文 5)。生産された有機物は、炭酸塩堆積物中で効率的に保存されることも示された (発表論文 6)。有機物の分解実験から、溶存有機物には易分解性と難分解性のものがあることもわかった。こうした成果に基づいて、サンゴ礁において生産された有機物を炭酸塩などの微粒子に吸着・沈降させて効率的に深海に隔離する手法を提案した (特許 3)。

群集代謝を規定する要因と栄養塩循環 (発表論文 7)、海水流動モデル (発表論文 8) に基づいて、光合成による  $\text{CO}_2$  固定機能を最適化するためのサンゴ礁デザインを提案した。さらに、サンゴ礁地形がサンゴ礁生態系の維持に果たしている役割を評価して、地形形成プロセス (発表論文 9) に基づいて将来の環境変動 (海面上昇, 温暖化) に対して、サンゴ礁地形維持のために必要な石灰化量を見積もった。最後に、サンゴ群集の維持機構に関する成果 (発表論文 3, 4, 5, 8, 9, 10 など) に基づいて、サンゴ礁を作る保全・修復のための基礎的知見を示した。

## 2.2 発表論文等

### 1) *Proceedings of the 9th International Coral Reef Symposium* (印刷中)

Integrated monitoring system for coral reef water  $p\text{CO}_2$ , carbonate system and physical parameters. (Kayanne, H., Kudo, S., Hata, H., Yamano, H., Nozaki, K., Kato, K., Negishi, A., Saito, H., Akimoto, F. and Kimoto, H.)

サンゴ礁における  $\text{CO}_2$  変動と群集代謝, それに関わる物理環境の変動を観測する統合型観測システムを開発し, 1 年間の連続観測に成功した。本システムは小型のボートに搭載し, 発電機によって駆動される。海水を連続的に汲み上げ, その  $\text{CO}_2$ , 全炭酸, アルカリ度, pH, 水温, 溶存酸素と気象・海象 (気温, 光, 風向風速, 流れ) を計測, データを記録し, 定期的に東京に送信する。本システムによって, サンゴ礁の  $\text{CO}_2$  変動とそれを規定する要因, 白化による影響が明らかにされた。

### 2) *Analytical Science* (印刷中)

Achieving higher time-resolution with a new flow-through type analyzer for total inorganic carbon in seawater (Kimoto, H., Nozaki, K., Kudo, S., Kato, K. Negishi, A., and Kayanne, H.)

サンゴ礁における急激な全炭酸の変化を観測するために, 完全自動連続フロースルー型の測定システムを開発し, その分析化学的検討を行なった。流量を精密に制御された試料海水とリン酸は, 連続気体抽出器 (特許出願中) で混合, 海水中の  $\text{CO}_2$  が抽出され, その濃度が非分散型赤外線測定装置で測定され海水中の全炭酸が求められる。現場テストによれば, 測定の時間分解能は 1 分, 精密分析との比較による精度は  $2\text{ }\mu\text{mol kg}^{-1}$  であった。全炭酸の連続測定は世界で始めてであり, 本システムは海洋

の全炭酸測定一般に適用することができる。

3) *Marine Ecology Progress Ser* (受理)

Recovery of coral reef populations after the 1998 bleaching on a coral reef flat of Shiraho, Ishigaki Island. (Kayanne, H., Harii, S., Ide, Y. and Akimoto, F.)

サンゴ群集の外部じょう乱に対する応答と回復プロセスを明らかにするために、1998年の大規模な白化をはさむ1998年5月から2000年8月までの計8回、同一の測線(800m×5本)においてサンゴ群集の被度変化を観測した。種によって白化による死亡率が異なり、死亡率が大きかった種は回復力が高く白化後2年で白化前の被度まで回復した。しかし群集のパッチサイズが10m以下のものは回復しなかった。以上から、サンゴ群集の多様性がじょう乱に対する抵抗力を高めること、維持のためにはある程度のパッチサイズが必要なことが明らかになった。

4) *Science* (投稿中)

Degradation of coral reef community metabolisms and CO<sub>2</sub> exchange by bleaching. (Kayanne, H., Hata, H., Kudo, S., Yamano, H., Watanabe, A., Ikeda, Y., Nozaki, K., Kato, K., Negishi, A. and Saito, H.)

サンゴ礁生物群集の劣化は、石灰化による放出を抑制し、CO<sub>2</sub>吸収側にシフトさせると考えられてきた。石垣島とバラオ諸島サンゴ礁における海水のCO<sub>2</sub>濃度変化と群集代謝の長期的な観測結果によって、白化によって光合成が大きく劣化し、その劣化は石灰化の劣化を上回るために、サンゴ礁群集はCO<sub>2</sub>放出にシフトすることが明らかになった。このことは、温暖化によって白化がより頻繁に起これば、サンゴ礁生態系を支える一次生産が量的に劣化するとともに、サンゴ礁がCO<sub>2</sub>放出にシフトすることを示している。

5) *Marine Ecology Progress Series* (印刷中)

Organic carbon flux in Shiraho coral reef. (Hata, H., Kudo, S., Yamano, H., Kurano, Kimoto, H., Kayanne, H., Kudo, S., Nozaki, K., Negishi, A., and Kato, K.)

サンゴ礁で生産された有機炭素の行方を明らかにするために、石垣島白保サンゴ礁においてサンゴ礁内と外洋の懸濁態・溶存態有機炭素のフラックスを調べ、サンゴ礁で同時に観測された生産量と比較した。サンゴ礁から外洋への懸濁態・溶存態有機炭素のフラックスは、それぞれ2-8, 19-33 mmolC m<sup>-2</sup> 日<sup>-1</sup>で、溶存態が多い。懸濁態の13-50%が沈降する。サンゴ礁によるCO<sub>2</sub>固定を考える上で、溶存態有機炭素の処理が重要である。

6) *Geochemical Journal* (印刷中)

Characteristics of organic matter in lagoonal sediments from the Great Barrier Reef. (Yamamoto, M., Kayanne, H. and Yamamuro, M.)

サンゴ礁堆積物中の有機物の特性を明らかにするために、グレートバリアリーフのラグーン底堆積物のガスクロマトグラフ質量分析計などによる分析を行なった。有機物の中では脂質が多く、陸から離れるに従って脂肪酸とフィトールが増加する。脂質とリグニンフェノールの保存度が高いことは、炭酸塩堆積物がこれらの保存に効率的であることを示唆している。

7) *Marine Ecology Progress Series*, **217** (2001), 273-286.

Microbial nitrogen transformation in carbonate sediments of a coral reef lagoon and associated seagrass beds. (Miyajima, T., Suzumura, M., Umezawa, Y. and Koike, I.)

サンゴ礁における栄養塩循環のダイナミクスを明らかにするために、サンゴ礁砂底と海水の間の窒素

固定、脱窒素、微細藻類による取り込みフラックスを現場において測定した。サンゴ礁砂底では、微細藻類と堆積物の間での内部循環が大きい。砂底表面の微細藻類は堆積物からの窒素の拡散をおさえ、ネットでは堆積物中に窒素が取り込まれている。取り込まれた窒素は、微細藻類の被食や堆積物・デトリタスの再懸濁によって、系外に運搬される。

8) *Coral Reefs*, 17 (1998), 89-99.

Water circulation in a fringing reef located in a monsoon area: Kabira Reef, Ishigaki Island, Southwest Japan. (Yamano, H., Kayanne, H., Yonekura, N., Nakamura, H. and Kudo, K.)

サンゴ礁における海水流動を規定する要因を明らかにするために、裾礁の礁原上で連続観測を行なった。礁原の海水流動は、無風時の基本パターンに風による流動が重なって作られる。これは、海水流動が風と潮汐、外洋の波による碎波によって決定されるためである。サンゴ礁においては、風向きとサンゴ礁の方向との関係が、礁原の海水流動パターンを決定する上で重要な要因である。

9) *Sedimentary Geology* (印刷中)

Holocene sea level changes and barrier reef formation on an oceanic island, Palau Islands, western Pacific. (Kayanne, H., Yamano, H. and Randall, R. H.)

サンゴ礁地形の形成過程とそれを規定する要因を明らかにするために、パラオ諸島堡礁において掘削調査を行ない、内部構造と形成年代を明らかにして海面変動と比較した。サンゴ礁は、後氷期の急激な海面上昇によって水没した更新世の石灰岩の高まりの上に、8300年前以降15mの厚さでミドリイシ類の骨格が積み重なって形成された。海面上昇速度が小さくなった7200年前以降、厚い板状のミドリイシが上方成長速度2.2m/1000年で、外洋とラグーンとを隔てる礁嶺の高まりを海側に作った。海面上昇に対するサンゴ礁の応答を予測する上で、礁嶺の形成がもっとも重要である。

10) *Marine Biology* (受理)

Larval survivorship, competency periods and settlement of two brooding corals, *Heliopora coerulea* and *Pocillopora damicornis*. (Harii, S., Kayanne, H., Takigawa, H., Hayashibara, T. and Yamamoto, M.)

サンゴ群集は、サンゴ幼生の分散と加入によって維持されている。異なる特性を持つ幼生の分散特性を実験室と現場において明らかにすることによって、幼生の加入を規定する要因が、幼生の定着期間と行動パターン、幼生を運ぶ流れの特性に規定されることを明らかにした。

公表論文 11 件、印刷中・受理論文 11 件、投稿中論文 24 件 (いずれも査読付き国際誌)

口頭発表：国内学会 60 件以上、国際学会・シンポジウム 30 件

特許出願 3 件

1) 「連続気体抽出器ならびにそれを用いた水中遊離炭酸および水中溶存無機炭酸連続分析計」  
(1999.5.10 特許出願中 特開 2000-317208)

2) 「海洋生物の炭酸ガス固定量の測定方法」(2001.6.26 特許出願中 特願 2001-192471)

3) 「易分解性有機物からの二酸化炭素放出抑制方法」(2001.10.16 特許出願中 特願 2001-317899)