

東京大学大学院 理学系研究科 助教授

茅根 創

「サンゴ礁におけるCO₂固定バイオリクター構築技術の開発」

1. 研究実施の概要

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の、陸上の森林と比較しても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経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。地球規模の炭素循環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、CO₂固定を進めるとともに健全なサンゴ礁の保全・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CO₂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CO₂放出であることから、サンゴ礁は一般にCO₂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CO₂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CO₂吸収になるとされた。この考えに基づくならば、サンゴ礁の保全とCO₂固定とは相容れないことになる。しかしながら、これまでの研究ではサンゴ礁群集の代謝を炭酸系の変化から見積もって吸収・放出を議論したものがほとんどで、群集代謝に伴うCO₂変動を直接測定した例もほとんどなかった。また、炭酸系計測の精度と時間分解能は十分ではなかった。さらに、サンゴ礁の群集代謝とCO₂変化は季節による変動が大きい、これまでの調査は数日程度のものが多かった。

こうした視点から本研究は、裾礁と堡礁の代表的なサンゴ礁において、サンゴ礁の群集代謝とCO₂変動とを通年で観測し、CO₂循環における健全なサンゴ礁の役割を評価することを目標とした。そのためにまず、サンゴ礁に適した測定システムの開発を行なった。さらに測定結果に基づいて、サンゴ礁におけるCO₂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、CO₂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。本研究では、調査期間中起こった大規模な白化によって、劣化したサンゴ礁と健全なサンゴ礁の群集代謝とCO₂変動を比較することができた。その結果、劣化したサンゴ群集では光合成機能が低下し、CO₂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、CO₂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を設計するための基礎的な維持機構をまとめることができた。

1) 測定システムの開発（総括、システムサブグループ）

サンゴ礁のような沿岸域に適当なCO₂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、CO₂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（写真1）。石垣島の観測では、従来型の CO_2 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（写真2）。

海洋における CO_2 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。本研究で開発した CO_2 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_2 と生物群集代謝の通年観測に、世界で初めて成功した。これら CO_2 と炭酸系計測システムは、海洋における CO_2 変動の観測に広く適用可能である。



写真1 統合型 CO_2 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。

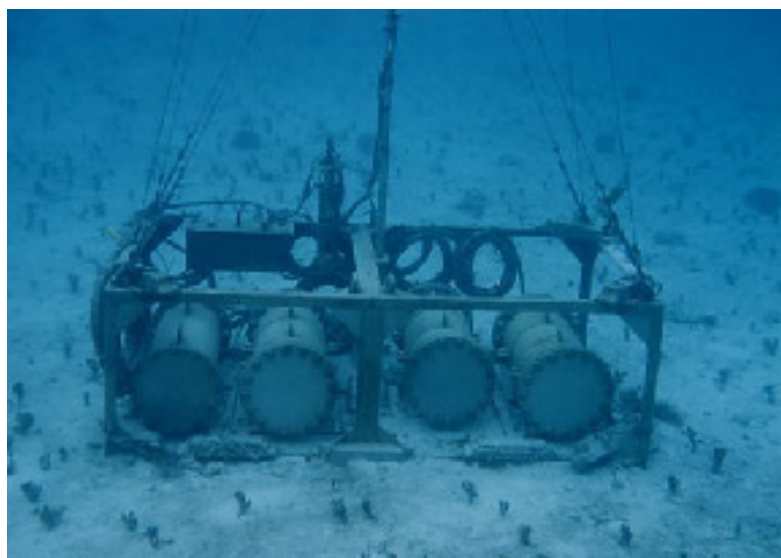


写真2 水没型 CO_2 計測システム。パラオ諸島サンゴ礁において、1999年11月から2000年11月まで1年間の通年観測を行なった。測定機本体は左端のもので、他の3つは電池ボックス。電源は市販の電池を1419個収納した。消費電力は15W。

2) CO₂ 吸収ポテンシャル評価と循環メカニズムの解明（総括、炭酸系サブグループ、栄養塩サブグループ）

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、CO₂ 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。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 CO₂ 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 CO₂ 吸収ポテンシャルを評価することができた。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 100-130mmolCm⁻² 日⁻¹ 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 30mmolCm⁻² 日⁻¹ に低下した。この低下量は石灰化の低下量を上回り、CO₂ 濃度も劣化時には上昇したことが確認された（図 1）。

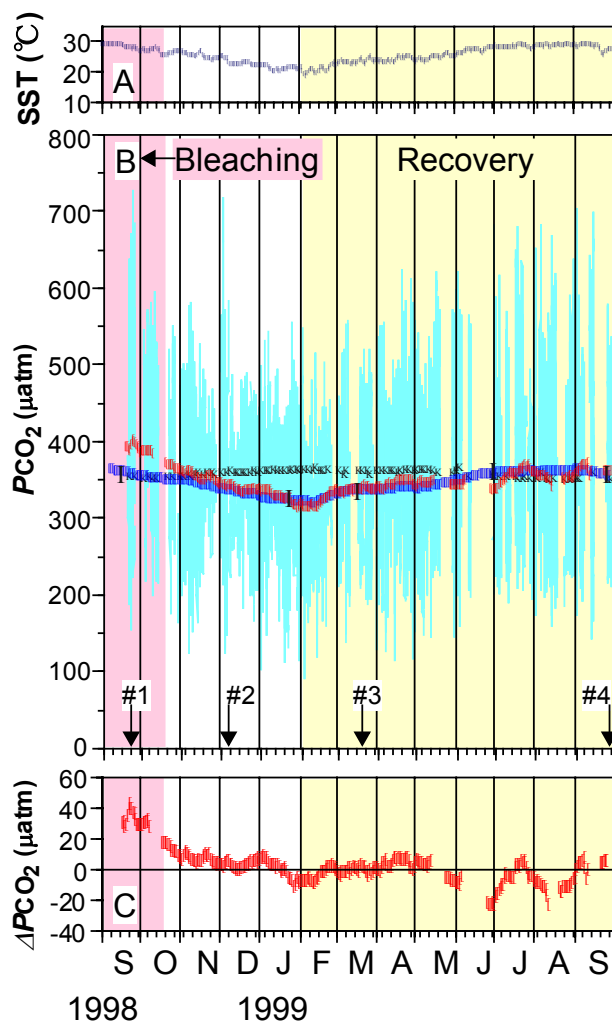


図 1 石垣島白保サンゴ礁における 1998 年 9 月から 1999 年 9 月の、水温と CO₂ 変化。A: 外洋の水温変化。B: サンゴ礁海水の CO₂ 変化。C: サンゴ礁海水の CO₂ (日平均) と外洋の CO₂ との差。サンゴ礁の方が高ければ正。サンゴ礁海水の CO₂ は外洋の水温変化に伴って夏高く、冬低くなるが、白化時の 1998 年 9 月には水温から予測される値より最大 50 μatm 高かった。これは白化によって光合成生産が健全時の 3 分の 1 から 4 分の 1 に低下したという観測結果と整合的である。

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認した。またサンゴ礁の CO_2 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_2 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_2 変動が決定することが明らかになった。

3) CO_2 固定促進とサンゴ礁のデザイン（総括、有機物サブグループ、栄養塩サブグループ、制御サブグループ）

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、陸上生態系という純生産（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 $500\text{gCm}^{-2}\text{年}^{-1}$ 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、 0.1GtonC 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 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。生産された有機物は、炭酸塩粒子に効率的に保存されることも示された。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。

群集代謝を規定する要因と栄養塩循環、海水流動モデルに基づいて、光合成による 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。

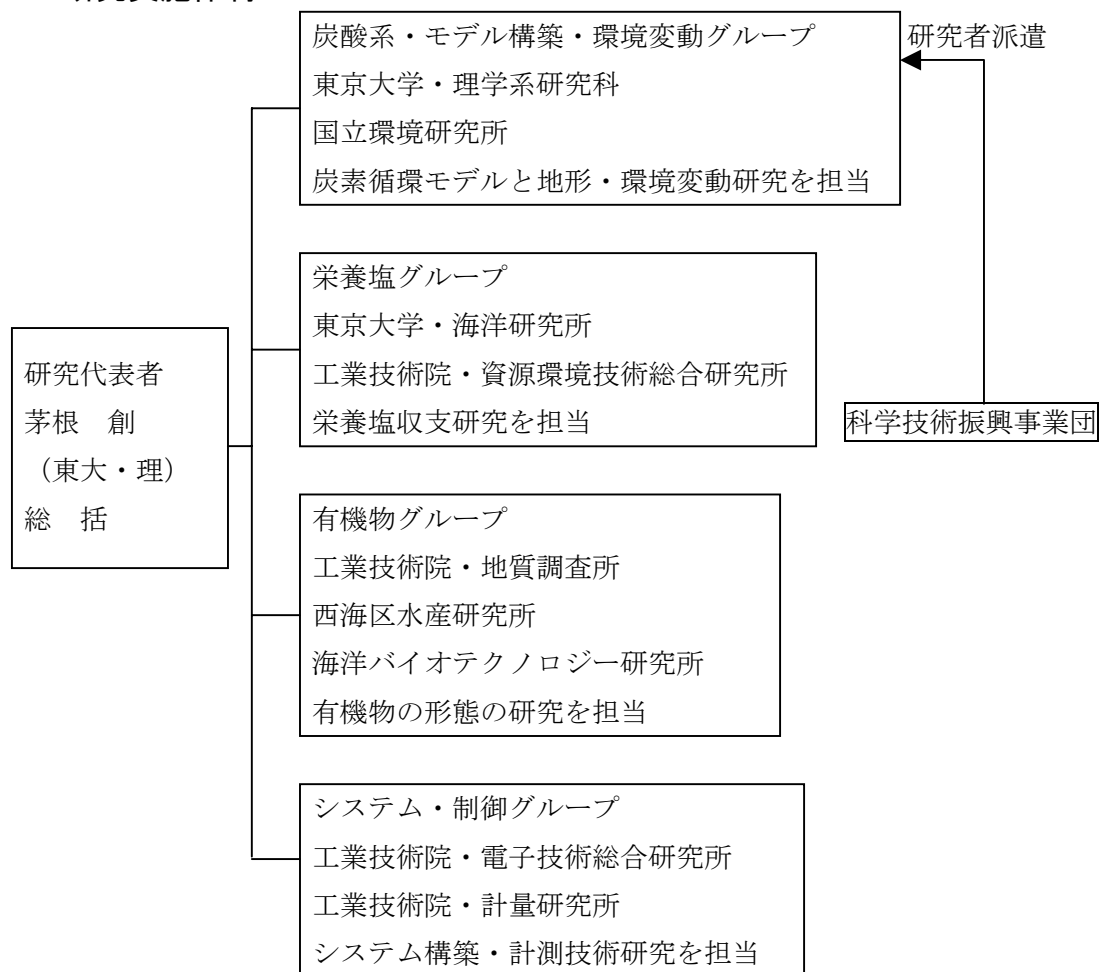
2. 研究構想

サンゴ礁は、海洋の生態系ではもっとも高い光合成生産を持つにも関わらず、原理的にCO₂放出源であると考えられてきた。これは、サンゴ礁では光合成の総生産は高いがすべてサンゴ礁の系内で消費され生態系の過剰生産は0である、一方石灰化によって海水が酸性化してCO₂が放出されると考えられていたからである。この考えに基づいて、サンゴの多いサンゴ礁はCO₂放出源で、サンゴが劣化して藻類が増えると石灰化の効果がなくなり、CO₂吸収源になるという極論も出された。この考えによれば、健全なサンゴ礁の維持・保全とCO₂吸収は相容れないことになる。しかしながら、これまでの研究においては、時間的・空間的に変動の激しいサンゴ礁の生物群集代謝（光合成、呼吸、石灰化）とこれに伴うCO₂変動とを、長期にわたって高精度・連続で計測する適切なシステムがなかった。そのため、限られた地点における数日程度の計測しかなかった。また同じ地点において健全なサンゴ礁と劣化したサンゴ礁との比較もされたいなかった。

こうした点をふまえて本研究では、サンゴ礁におけるCO₂変化とサンゴ礁群集代謝を見積もる適切な測定システムを開発し、これに基づいてサンゴ礁における吸収ポテンシャルを評価し、その大きなCO₂フラックスを吸収のために活用する方策を提案することを目標として、研究計画を構築した。少なくとも季節変化を把握するために、2つの代表的なタイプのサンゴ礁において、それぞれ1年間のCO₂通年連続観測をするためのシステムを開発した。さらにこれまで実験室で1つ1つ測定しなければならなかった炭酸系（全炭酸、アルカリ度）を、現場で連続で計測するシステムの開発に成功した。連続観測の期間中、ちょうど地球規模のサンゴの白化が起り、白化によって劣化したサンゴ礁と健全なサンゴ礁とのCO₂変化とサンゴ礁群集代謝を比較することができた。これによって逆に、健全なサンゴ礁が高いCO₂吸収ポテンシャルを持つことを明らかにすることができた。

研究チームは、測定システムの開発と、その計測に基づく生物群集代謝量を炭素によって求める研究者を核として、サンゴ礁における窒素・リンなどの栄養塩代謝、生産によって生成する有機物の形態と行方について調査・研究するサブグループによって構成した。調査の結果、サンゴ礁で生産される有機物のC/N比が高く（少ない栄養塩でより多くの炭素を固定している）、主に溶存態の形で系外に放出されることを明らかにした。さらに溶存態有機物が、サンゴ礁の石灰質粒子に効率的に吸着保存されていることも明らかにした。そのメカニズムの解明は、実際にサンゴ礁のCO₂固定を進める上で、さらに海洋のCO₂吸収機構を理解する上でも重要なテーマであるが、課題として残された。さらに本研究では、サンゴ礁地形の形成過程、サンゴ礁における物理環境とその変動の歴史、サンゴ幼生の分散・定着機構などについても明らかにすることができた。このようにサンゴ礁に関する幅広い成果に基づいて、サンゴ礁のCO₂固定を進めるとともに、サンゴ礁がもっている他の様々な機能（生物の多様性、サンゴ礁地形の構築）を維持・保全するための研究に展開することがのぞまれる。

3. 研究実施体制



4. ワークショップ・シンポジウム等

年月日	名 称	場 所	参加人数	概 要
1996.11.30	CREST 全体会合	東京大学	10 名	立ち上げ打ち合わせ
1996.12.25	CREST 連続観測打ち合わせ	東京大学	8 名	観測方法検討
1997. 1.29	CREST 全体会合	東京大学	10 名	研究方針検討
1997. 3.18	石垣現地検討会	石垣島	8 名	現地調査に伴う検討会
1997. 4.26	CREST 全体会合	東京大学	10 名	現地調査内容の検討
1997. 6.11	CREST 全体会合	東京大学	12 名	現地調査内容の検討
1997. 7.22	CREST 全体会合	東京大学	15 名	現地調査内容の確認
1997. 9. 6	石垣現地検討会	石垣島	10 名	予備調査結果の検討
1997.10.21	CREST 全体会合	東京大学	13 名	石垣調査まとめ
1998. 1.13	パラオ現地検討会	パラオ	4 名	パラオ調査内容の検討
1998. 2. 4	CREST 全体会合	東京大学	15 名	全体計画の再検討
1998. 3.13	石垣現地検討会	石垣島	10 名	調査方針の確認
1998. 4.27	CREST 全体会合	電子技術 総合研究所	16 名	全体計画のまとめ
1998. 7. 1	CREST 全体会合	東京大学	10 名	観測機器開発の進捗状況
1998. 7. 7	CREST 全体会合	東京大学	18 名	石垣調査準備
1998. 9.25	石垣現地検討会	石垣島	25 名	調査結果の検討
1998.11.10	CREST 全体会合	東京大学	20 名	調査結果のまとめ
1998.12. 5	石垣現地検討会	石垣島	10 名	調査結果の検討

年月日	名 称	場 所	参加人数	概 要
1999. 2.17	CREST 全体会合	東京大学	17 名	石垣調査中間評価
1999. 3.21	石垣現地検討会	石垣島	10 名	調査結果の検討
1999. 6. 2	CREST 全体会合	東京大学	20 名	結果のつきあわせ
1999. 7.27	石垣現地検討会	石垣島	10 名	調査結果の検討
1999. 8.25	パラオ現地検討会	パラオ	8 名	調査方針の確認
1999. 9. 9	CREST 全体会合	東京大学	25 名	パラオ調査計画検討
1999. 9.28	石垣現地検討会	石垣島	14 名	調査終了の確認
1999.12. 7	パラオ現地検討会	パラオ	10 名	パラオ調査開始の確認
2000. 1.14	CREST 全体会合	東京大学	24 名	パラオ調査内容の検討
2000. 3.13	CREST 全体会合	東京大学	12 名	パラオデータの検討
2000. 4. 5	CREST 全体会合	東京大学	20 名	パラオデータの検討
2000. 4.21	パラオ現地検討会	パラオ	12 名	パラオ調査まとめ
2000. 6. 7- 8	CREST 全体会合	東京大学	25 名	石垣データまとめ、パラオ調査検討
2000. 8.11	CREST 全体会合	東京大学	10 名	炭酸系データ解析
2000. 9.19	パラオ現地検討会	パラオ	14 名	パラオ調査結果の中間まとめ
2000.12. 5	パラオ現地検討会	パラオ	8 名	パラオ調査終了の確認
2001. 1.11	CREST 全体会合	東京大学	25 名	まとめの方針
2001. 3. 7	CREST 全体会合	東京大学	20 名	最終年度の方針

年月日	名 称	場 所	参加人数	概 要
2001.11.30	CREST 最終全体会合	東京大学	25 名	まとめの進捗状況
2002. 1.24	CREST CO ₂ 計測システムワーク ショップ	東京大学	20 名	海洋の炭酸系計測システムに 関するワークショップ
2002. 1.25	CREST 国際シンポジウムサンゴ 礁と沿岸における CO ₂ ダイナミ クス	日本科学未来 館	120 名	研究成果のまとめと評価、沿 岸における CO ₂ 変動における 意義の検討
2002. 1.26	CREST サンゴ礁と沿岸における CO ₂ ダイナミクス今後の研究課 題	東京大学	12 名	今後の研究課題のまとめ

5. 主な研究成果（2002 年 1 月 24 日現在）

(1) 論文発表

- 1) Umezawa, Y., Miyajima, T., Yamamuro, M., Kayanne, H. and Koike, I.: Fine scale mapping of land-derived nitrogen in coral reefs by d¹⁵N in macroalgae. *Limnol. Oceanogr.*
- 2) Hata, H., Kudo, S., Muramoto, A., Nozaki, K., Kato, K., Negishi, A., Saito, H., Yamano, H., Watanabe, A. and Kayanne, H.: Estimating coral reef community metabolism by continuous monitoring for pH and pCO₂. *Jour. Experiment. Mar. Biol. Ecol.*
- 3) Adachi, H., Yamano, H., Kayanne, H., Matsuda, F., and Tsuji, Y.: A new, portable sand coring system for use in deep water. *J. Sedimentary Research.*
- 4) Harii, S. and Kayanne, H.: Larval dispersal, recruitment and adult distribution of brooding coral *Heliopora coerulea* at Ishigaki Island, southwest Japan. *Coral Reefs.*
- 5) Kayanne, H., Hata, H., Kudo, S., Yamano, H., Watanabe, A., Ikeda, Y., Nozaki, K., Kato, K., Negishi, A. and Saito, H.: Degradation of coral reef community metabolisms and CO₂ exchange by bleaching. *Science.*
- 6) Yamano, H., Abe, O., and Matsumoto, E.: Influence of wave energy on coral reef evolution: an example of windward-leeward contrast at Ishigaki Island, Southwest Japan. *Sedimentary Geology.*
- 7) Kayanne, H., Hirota, M., Yamamuro, M. and Koike, I.: Comparison among methods of nitrogen fixation measurement for filamentous cyanobacteria in coral reef. *Coral Reefs.*
- 8) Yamano, H., Tamura, M., Kunii, Y., and Hidaka, M.: Detection of coral reef bleaching by satellite remote sensing: simulation and data analysis. *Limnol. Oceanogr.*
- 9) Yamano, H., Tamura, M., Kunii, Y., and Hidaka, M.: Hyperspectral remote sensing and radiative transfer models as a tool for monitoring coral reef status. *Marine Technology Society Journal.*
- 10) Yamano, H., Hori, K., and Kayanne, H.: Postglacial coral reef evolution in the Ryukyu Islands, Japan: a review. *Sedimentary Geology.*
- 11) Tanaka, Y. and Kayanne, H.: Species distribution of subtropical mixed seagrass beds on Ishigaki Island, southwest Japan. *Ecol. Res.*

準備中論文

- 1) Hata, H., Kudo, S., Yamano, H., Muramoto A. and Kayanne, H.: Seasonality in community productivity and calcification in Shiraho coral reef (Ishigaki Island, Japan). *Marine Ecology Progress Ser.*
- 2) Yamano, H., Hata, H., Miyajima, T., Nozaki, K., Kato, K., Negishi, A., Tamura, M. and Kayanne, H.: Ocean swells, reef topography, and water circulation in a fringing reef: a case study at Shiraho Reef, Ishigaki Island, Southwest Japan. *Pacific Science.*
- 3) Watanabe, A., Hata, H., Yamano, H., Kudo, S., Nozaki, K., Kato, K., Negishi, A. and Kayanne H.: Lowered carbon and carbonate fluxes of a coral reef after the decrease of coral coverage caused by the mass bleaching event in 1998. *Marine Ecology Progress Ser.*
- 4) Kudo, S., Nozaki, K., Saito, H., Kato, K., Negishi, A., Watanabe, A., Hata, H., and Kayanne, H.: Potentiometric determination of total alkalinity and total inorganic carbon in seawater using a fully automated analyzer with a closed cell, *Anal. Chim. Acta.*
- 5) Saito, H., Nozaki, K., Kato, K., Negishi, A., Kimoto, H. and Kayanne, H.: Performance of a modified pCO₂ measuring instrument with use of a membrane equilibration method. *Continental Shelf Res.*
- 6) Kato, K., Nozaki, K., Negishi, A. and Kayanne, H.: Rapid capacity measurement for alkaline manganese cells by quilo-galvanometry. *J. Power Sources.*
- 7) Watanabe, A., Nozaki, K., Kato, K., Negishi, A., Kudo, S., Kimoto, H., Tsuda, M., Kayanne, H. and Dickson, A.: A rapid, precise potentiometric determination of total alkalinity in seawater by a newly-developed flow through analyzer. *Marine Chemistry.*
- 8) 紀本英志、加藤 健、根岸 明、野崎 健、工藤節子、茅根 創：白保サンゴ礁における全炭酸、全アルカリ度、pHの連続測定技術、分析化学。
- 9) Kayanne, H., Hata, H., Kudo, S., Muramoto, A., Yamano, H., Nozaki, K., Kato, K., Negishi A. and Saito, H.: Diurnal, day-to-day and seasonal variations of the partial pressure of CO₂ in seawater on a coral reef in Shiraho (Ishigaki Island, Japan). *Marine Chemistry.*
- 10) Kayanne, H. and Harii, S.: Present and past community structure change in a reef flat of Shiraho, Ishigaki Island. *Coral Reefs.*
- 11) 工藤節子、茅根 創、紀本英志、斉藤紘史、野崎 健、加藤 健、根岸 明：白保サンゴ礁における炭酸系連続測定データの整合性、分析化学。
- 12) Yamamuro, M., Kayanne, H. and Yamano, H. Macrophytes stable isotopes as possible indicators of CO₂aq and nutrient in tropical ocean. *Hydrobiologia.*
- 13) Yamamoto, M., Arinobu, T. and Kayanne, H.: Sources of lipids and sugars in lagoonal sediments and waters from the Shiraho Reef, Ishigaki Island. *Geochem. J.*
- 14) Ikeda, Y., Hata, H., Fukami, K. and Kayanne, H.: Degradation of organic carbon in coral reef seawater.

(2) 特許

- 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)

(3) 受賞、報道等

美しいサンゴ守りたい (毎日新聞 97.12.13)

サンゴ礁 温暖化の防波堤か (朝日新聞 98.4.1)

サンゴが語る過去と未来 (朝日新聞 98.7.8)

サンゴ礁のメカニズム探る (八重山毎日 98.9.5)

サンゴ礁 温暖化の防波堤? (日本経済新聞 98.10.4)

サンゴの白化現象 (朝日新聞 98.11.12)

サンゴ礁白化最悪規模 (日本経済新聞 98.11.14)

サンゴ白化世界で拡大 (朝日新聞 98.11.18)

サンゴの白化現象をニュースレターで紹介 (朝日新聞 98.11.24)

White coral may be a warning sign (The Daily Yomiuri 98.12)

さんご礁は海の熱帯雨林 (東京新聞 99.2.23)

さんご礁研究に資金協力 パラオに施設建設 (高知新聞など 99.2.17)

CO₂がサンゴを駆逐? (読売新聞 99.4.8)

サンゴが温暖化防止 (琉球新報 99.10.5)

石垣島さんご礁通年観測 CO₂吸収を確認 (日刊工業新聞 99.10.29)

サンゴ礁の CO₂出し入れ (日本経済新聞 99.10.30)

サンゴ礁 CO₂収支 夏に放出、冬は吸収 (日経産業新聞 99.11.1)

サンゴ礁の CO₂吸収・放出 東大が通年観測に成功 (日本工業新聞 99.11.2)

サンゴ礁を初めて通年観測 (読売新聞 99.11.4)

DMR-University of Tokyo joint research set to monitor CO₂ emissions. (Palau Horizon, 99.1.7)

サンゴ礁 住む人の問題、研究してこそ (朝日新聞 00.2.8)

サンゴの白化 異なる被害 とけぬナゾ (朝日新聞 00.5.9)

沖縄で悲願のサンゴシンポ (毎日新聞 00.11.24)

サンゴ礁 海水温上昇で「白化現象」(信濃毎日新聞 01.6.25)