

課題番号：4MF-2201

研究課題名：沿岸海洋生態系の保全・再生における緩衝植生帯の役割の評価と活用技術の開拓:サンゴ礁の再建に向けた事例研究

研究代表者名：宮島 利宏（東京大学）

体系的課題番号：JPMEERF20224M01

重点課題：（主）⑬生物多様性の保全に資する科学的知見の充実や対策手法の技術開発に向けた研究
（副）⑧気候変動への適応に係る研究・技術開発

行政ニーズ：（該当なし）

研究実施期間：2022年度～2024年度

【研究体制】

サブテーマ1

宮島 利宏（東京大学）
梅澤 有（東京農工大学）

サブテーマ2

栗原 晴子（琉球大学）

サブテーマ3

中村 隆志（東京工業大学）

1. 研究の背景、研究開発目的及び研究目標

【研究背景】

地球温暖化、海洋酸性化、汚染物質流入等の複合ストレスにより全世界的にサンゴ礁生態系の劣化が進行し、近い将来には存亡の危機に陥る可能性がある。サンゴ礁の永久的な喪失を防ぐために具体的な行動を今後10年以内に実行に移す必要性を訴える緊急文書が2021年に国際サンゴ礁学会から発表された。その文書では、サンゴ礁再建のために不可欠な3つの柱として、気候変動の緩和、及びサンゴ移植技術の高度化と並んで、生態系の復元力強化のための地域レベルでの実践、具体的には海洋保護区の活用と流域管理による負荷削減が強調されている。負荷源となる陸域とサンゴ礁の間に分布する海草藻場やマングローブ、大型藻類群落等の植生帯は流域からの負荷に対する緩和機能を有し、その機能評価と保全・有効活用を通して、保護区の設計と負荷削減の実践との双方のために効果的な手段を提供するポテンシャルがある。

【研究開発目的】

サンゴ礁とストレス負荷源となる人間活動領域（陸域）との間に成立する多年生植物群落（海草藻場・マングローブ・大型藻類群落等）を緩衝植生帯と定義する。「人間活動領域-緩衝植生帯-保全対象となる自然生態系」という沿岸配置を一般的なあり方としてとらえ、その中で人間活動領域から自然生態系への流入負荷を吸収削減する緩衝植生帯の生態系機能を包括的に評価し、実験的に立証する。こうした緩衝植生帯の機能の活用を前提とした、サンゴ礁生態系の保全・再建のための合理的な流域管理と海洋生物保護区の設計を実現するために、必要となる各種のシミュレーション・モデルを導入する。また緩衝植生帯そのものの維持再生を可能にするために、構成植物の生育制御因子の解明と、新たな健全性診断手法の提案を行う。

1. 研究の背景、研究開発目的及び研究目標

【研究目標（全体目標）】

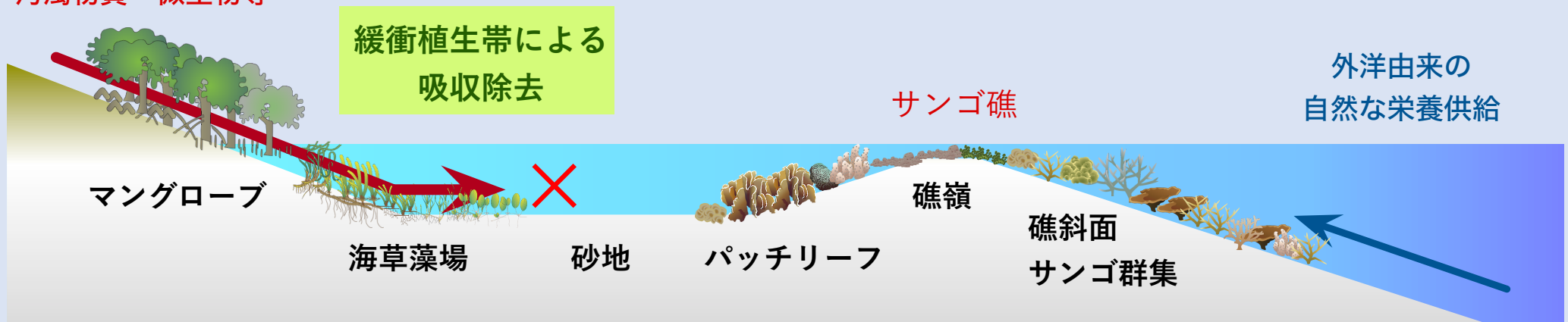
サンゴ礁複合生態系に含まれる緩衝植生帯（下図：サンゴ礁と陸域の間に発達する多年生大型植物群落）をサンゴ礁保全・再生のための施策に導入して活用するために、緩衝植生帯の環境改善機能とその環境収容力を定量的に評価するとともに、造礁サンゴに対する緩衝植生帯の生態学的意義を実験的に実証する。また具体的な環境政策への導入に当たって必要となる定量的な効用評価のためのシミュレーション・モデルを作成する。このことを通して生態系保全と管理のあり方に新しい考え方を提示し、その普及を目指す。

陸域起源の栄養塩・
汚濁物質・微生物等

緩衝植生帯による
吸収除去

サンゴ礁

外洋由来の
自然な栄養供給



マングローブ

海草藻場

砂地

パッチリーフ

礁嶺

礁斜面
サンゴ群集

2. 研究目標の進捗状況

(1) 進捗状況に対する自己評価 (サブテーマ1)

サブテーマ1：緩衝植生帯の機能とリスクの評価、ならびにその効果的な保全・再生・拡張策の追求

【サブテーマ1の研究目標】 流域からの人為起源負荷（栄養塩・濁質流入等）を抑制する緩衝植生帯の5つの主要な生態系機能について、それによるサンゴ礁生態系の環境収容力への寄与を実証する。負荷の異なる少なくとも3箇所のサンゴ礁における事例研究を実施し、また対照的な2つの季節に調査を実施して、季節変動と通年影響を明らかにする。

【令和4年度の研究計画】 流域負荷の高い国内の少なくとも2箇所のサンゴ礁において、夏冬の現地調査により緩衝植生帯の少なくとも3種類の生態系機能に関して、流域負荷に対する緩衝能のエビデンスを挙げてサンゴ礁に対する効果を評価する。また流域負荷の小さい1調査地（海外）において少なくとも1回の同様な調査を実施する。

【令和5年度の研究計画】 前年度に実施しなかった2種類を含む緩衝植生帯の主要生態系機能に関する現地調査による査定を完了する。国内の少なくとも2箇所で2季節における現地調査を実施し、海外サイトにおいて前年度とは異なる季節の現地調査を実施する。

【令和6年度の研究計画】 サブテーマ3によるモデル構築のために必要となるパラメータのうち、前年度までに取得できていない項目の実測データを取得するための追加の現地調査を実施するとともに、出来上がったモデルを利用して将来的な環境変動による緩衝生態系のリスク評価とそれに対する実装可能な対策の検討と提案を行う。

【自己評価】 計画通り進展している。

2. 研究目標の進捗状況

(2) 自己評価に対する具体的な理由・根拠と目標達成の見通し（サブテーマ1）

【具体的な理由・根拠】

2023年度前半までに、海外を含む4箇所のサンゴ礁サイトで現地調査を実施し、国内の2箇所では2季節に調査を行った。緩衝植生帯の5つの主要機能のうち4つを2022年度内に調査している。栄養塩負荷と赤土負荷の抑止機能、微生物群集の制御機能、堆積物の代謝活性に関しては目標通りの成果が得られているが、栄養塩フラックスに関しては気象条件等の理由により不十分なデータしか得られておらず、2023年度以降に追加調査を実施する必要がある。また当初計画には記載していなかった緩衝植生帯のモニタリングのための新しい非破壊診断手法の開発にも着手した。

このように、実施した調査項目数では研究目標を上回っているが、一部に関しては現地調査を終えたのみで分析やデータ整理が完了していないこと、冬季の調査が適切な時期に実施できていないこと、2022年度内は実質的に海草藻場のみを対象としていたことから、全般としては当初計画と同等の進捗状況と考えている。

【目標達成の見通し】

目標に掲げた5種類の生態系機能のうち4種類に関しては目標達成に向けて着実に進捗している。残り一つ（酸性化緩和機能の環境収容力への貢献）については再検討を行い、サブテーマ2と調整して実験系による検証も含めたアプローチにより目標達成を目指す。気候変動影響の予測と対応策の実装に関する提言という目標も期間内に達成可能と思われ、研究協力者の助言を受けつつ達成に向けて努力したい。

2. 研究目標の進捗状況

(1) 進捗状況に対する自己評価 (サブテーマ2)

サブテーマ2：サンゴ礁における環境変動応答と復元力に対して緩衝植生帯が及ぼす効果の解明

【サブテーマ2の研究目標】 緩衝植生帯による環境改善機構の有無がその下流域に生息する造礁サンゴ群集の復元力を高める効果がどの程度あるかを定量的に評価する。現場での移植実験に加えて植生帯が関与すると考えられる環境因子によるサンゴへの影響を水槽実験により評価することにより、植生帯による緩衝機能を評価する。

【令和4年度の研究計画】

沖縄本島と石垣島における生物分調査を実施する。さらに夏期にはサンゴの現場移植実験を実施する。またサンゴ着底タイルの設置による植生帯によるサンゴ幼生や稚サンゴへの影響を評価する。

【令和5年度の研究計画】

冬季のサンゴの現場移植実験を実施する。飼育実験による各種ストレス因子に対する海草などの植生によるサンゴ群集への緩衝能について評価する。

【令和6年度の研究計画】

飼育実験による各種ストレス因子に加え気候変動に対する海草などの植生によるサンゴ群集への緩衝能について評価する。これら結果から環境変動に対するサンゴ礁の復元力を最大化させることが期待される対策について評価する。

【自己評価】 いくつか計画の変更をおこなったが、概ね計画通りの進展がある。

2. 研究目標の進捗状況

(2) 自己評価に対する具体的な理由・根拠と目標達成の見通し（サブテーマ2）

【具体的な理由・根拠】

沖縄本島及び石垣での海草藻場における植生調査を計画通りに実施した。石垣ではウミガメの食害が原因で過去に比較して海草の生物量の大幅な減少が観察された。また2022年度は国内各地のサンゴ礁で大規模な白化現象が起こり、サンゴ母集団の状態が極めて悪化したため、当初計画されていた現場での移植実験と着底調査は当面見合わせることにした。

代替的に、植生帯によるサンゴに対する酸性化影響の緩和効果を評価するための水槽実験を実施した。実験により海草や大型藻類による酸性化緩和効果は確認されたものの、サンゴの成長に対しては負の影響が見られた。これは予想外の結果であり、他のサブテーマと対応を検討している。モズクを用いた水槽実験の成果は国際学会で発表され国際誌に投稿された。また別に、海草の健全度を評価することを目的にその遺伝的多様度の評価を二つのサイトで実施している。

このように生態系の実状に対応して計画内容を変更せざるを得なかったが、着実な成果は得られている。

【目標達成の見通し】

現場実験に関してはこれまでのところ実現できていないものの、次年度以降に実施を予定していた水槽実験による海草類のサンゴへの緩衝効果に関する評価を前倒しで実施した。加えて操作型の水槽実験をより効率的に実施可能とするため、海水の様々な環境因子を制御可能なシステムの確立を行っている。野外実験によるサンゴ幼生や稚サンゴへの影響の評価が仮に実施できなかったとしても、本システムを利用することによって水槽実験によって評価が可能となることが期待される。これらにより、当初意図されていたものと同等の成果を期間内に達成することが可能と考えられる。

2. 研究目標の進捗状況

(1) 進捗状況に対する自己評価 (サブテーマ3)

サブテーマ3：流動場生態系モデルと流域負荷モデルを用いたサンゴ礁保全・再生における緩衝植生帯の効果に関するシナリオ解析

【サブテーマ3の研究目標】 陸域からの人為起源負荷を記述する流域負荷モデルと、海域での物質循環と生態系相互作用を記述する流動場生態系モデルとを用いて、緩衝植生帯の役割に関するシミュレーションモデルを構築する。サンゴ礁生態系を維持・再生・拡大をサポートするための緩衝植生帯の面積と配置についてモデルに基づいて政策提言を行う。

【令和4年度の研究計画】 先行研究によりモデル開発が行われている石垣島において、緩衝植生帯の機能を陽に取り込むための現地調査を、サブテーマ1と共同で行う。またパラオと沖縄本島においても流動場生態系モデルと流域負荷モデルの開発を行うとともに、モデル開発に必要な現地調査を実施する。

【令和5年度の研究計画】 開発した流動場生態系モデルと流域負荷モデルに、想定される緩衝植生帯の機能を陽に取り込んだフレームワークを完成させ、サブテーマ1,2より得られたデータを基にモデルのチューニングを行う。

【令和6年度の研究計画】 開発した流動場生態系モデルと流域負荷モデルの精度向上を図り、緩衝生態系のサンゴ群集へ与える影響について定量的な評価を行う。必要に応じて追加調査を実施する。また想定される将来的な環境変動（海面上昇等）の条件下でシナリオ解析を行い、実装可能な効果の高い対策を提案する。

【自己評価】 概ね計画通りの進展がある。

2. 研究目標の進捗状況

(2) 自己評価に対する具体的な理由・根拠と目標達成の見通し（サブテーマ3）

【具体的な理由・根拠】

2022年度は計画を遂行するために主に5つのモデル開発と測定技術開発に取り組んだ（具体的内容は報告書を参照）。

流域負荷モデルの開発ではこれまでSWATを用いて行ってきたが、近年大幅に機能が向上したSWAT+がリリースされたため、開発のプラットフォームをSWAT+へと移行した。これによって流域負荷モデル開発に若干の遅れが見られる。濁質捕集効果を予測する植生抵抗モデルはマングローブについてはほぼ完成したが、海草藻場については改良途上である。植生動態モデルの基本構造は完成し、生態系モデルとのカップリングも完了しているが、植生の生育制御因子についての理解が十分でなく、今後この方面の基礎データの取得に力を入れるべく、必要な計測装置の開発を進めている。流動場モデルは一部のサイトについては完成しているが、他のサイトでは準備段階にある。このように進捗状況にはモデルごと、サイトごとに大きなばらつきがあるが、全体としてはほぼ計画通りの進捗と評価できる。

【目標達成の見通し】

計画より遅れのある流域負荷モデルについては、ネックとなっていた新機能やプログラムコードの理解、インプットデータの再整備はほぼ終了したため、今後の開発速度は加速する。最終的には、当初計画していたものより予測精度の高いモデルになることが期待される。同じく進捗に遅れのある流動モデルについても必要なデータが2022年度内に揃ったため、開発が今後加速される。その他の項目については概ね順調に進捗しており、全体として計画どおり目標を達成できる見通しである。

3. 研究成果のアウトカム（環境政策等への貢献）

【行政等が活用することが見込まれる成果】

本研究の成果は、人為起源負荷からのサンゴ礁等の沿岸生態系の保護を目的として、既存の緩衝植生帯の保全（劣化している場合は修復）を計画する場合、あるいは緩衝植生帯（またはそれと類似の機能を持つ海藻養殖場など）の新規造成を計画する場合に、植生帯による人為起源負荷の緩和能力を査定もしくは予測するという目的に活用することができる。特に、報告書で紹介した安定同位体比による環境負荷のマッピングや、非破壊分析による植生帯構成植物の診断手法は、現存する緩衝植生帯の機能と状態を簡便かつ正確に判別するスクリーニング技術として環境政策の中ですぐにでも活用することが可能である。

緩衝植生帯や養殖場の造成は、自然環境を利用した二酸化炭素吸収源の実現という観点からも近年注目を浴びており、その実現に国民の期待が向けられている。この目的にはサブテーマ3で開発されている一群のモデルが特に有用と考えられる。例えば緩衝植生帯のための候補地の選定と適性評価といった、政策の初期段階の意志決定には有意義な貢献が期待できると考えている。

【行政等が既に活用した成果】

（該当なし）

4. 研究成果の発表状況

【誌上発表（査読有）：2件】

1. M. YOSHIKAI, T. NAKAMURA, D.M. BAUTISTA, E.C. HERRERA, A. BALOLOY, R. SUWA, R. BASINA, Y.H. PRIMAVERA-TIROL, A.C. BLANCO, K. NADAOKA: Field measurement and prediction of drag in a planted Rhizophora mangrove forest. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 127, e2021JC018320 (2022)
2. 中村隆志, 小又寛也, 佐久間魁史, B.A. OUMOU KALSOM DIEGUI: ハインドキャスト シミュレーションによる過去のサンゴ礁域の環境復元. *月刊海洋*, 号外64, 468-475 (2023)

【口頭発表（学会等）：14件】

1. 栗原晴子：気候変動におけるサンゴ礁生態系. 日本海洋学会秋期大会 (2022)
2. S.L.G. SAYCO, H. KURIHARA：Bleaching and recovery in the giant clam *Tridacna crocea* from Okinawa Island.. 第25回日本サンゴ礁学会 (2022)
3. H. KURIHARA：Ocean acidification impacts on marine ecosystem and its potential mitigation solution. STACLIM 2022 (2022)
4. 伊佐春樹, 栗原晴子：礁地内外におけるミドリイシ属サンゴの水温耐性比較. 第25回日本サンゴ礁学会 (2022)
5. H. KURIHARA：Implication of ocean acidification impacts on marine organisms and coastal ecosystem services. China-Japan High Level Expert Symposium on Marine Environment (2022)
6. M. YOSHIKAI, T. NAKAMURA, K. HURUKAWA, K. NADAOKA: Numerical analysis of tidal flow and sedimentation in mangrove forests using a new drag model. 2nd National Blue Carbon Symposium (2022)

7. 吉開仁哉, 中村隆志, 古川恵太, 灘岡和夫: Numerical analysis of tidal flow in mangrove forests using a new drag parameterization accounting for three-dimensional root structures. 日本地球惑星科学連合2022年大会 (2022)
8. Y.A. TAKAGI, T. NAKAMURA, D.W. CHRISTIANA, F. AMRI, M. YOSHIKAI, N.S. Adi, K. NADAOKA: A coupled watershed-ocean-ecosystem model for assessing the turbidity and nutrient reduction ability of seagrass meadows. 日本地球惑星科学連合2022年大会 (2022)
9. 角美咲妃, 梅澤有, 宮田達, 鈴木健斗, 栗原晴子, 渡辺誠, 堀川祥生, 宮島利宏：海草藻場におけるセルラーゼの有機物分解活性の評価. 日本地球惑星科学連合2023年大会 (2023)
10. M. YOSHIKAI, T. NAKAMURA (ほか14名)：Modeling flow and sediment dynamics in an estuarine mangrove forest and adjacent areas: the impact of mangrove forest dynamics on landscape evolution. European Geoscience Union (2023)
11. 鈴木健斗, 梅澤有, 栗原晴子, 鈴木陽樹, ライラ笑太, 宮島利宏：亜熱帯海域における海草藻場の栄養塩吸収・放出特性の評価. 日本地球惑星科学連合2023年大会 (2023)
12. A. WATANABE, T. NAKAMURA, K. MONAY, Y.A. TAKAGI: Relationship between the number of yellow-color salt-excreting leaves on the trees and soil salinity to detect salinity stress on mangroves. 日本地球惑星科学連合2023年大会 (2023)
13. S.L.G. SAYCO, P. C. CABAITAN, A. A. POMARES, H. KURIHARA: Effects of bleaching on the reproduction of the giant clam *Tridacna crocea*. Asia Pacific Coral Reef Symposium (2023)
14. 栗原晴子: 海洋酸性化が及ぼす未来の海洋生物・生態系への影響. 日本生理学会 国立京都国際会館 (2023)

【知的財産権：0件】

【国民との科学・技術対話：0件】

5. 研究の効率性

当初研究計画を一部修正して、研究目標に掲げた緩衝植生帯による外来性有害微生物除去機能の評価のための実験と分析を計画よりも前倒しで実施し、また当初の計画には含まれていなかった赤外線分光法（ATR-FTIR）を利用した海草におけるストレス強度の非破壊的検出の試みに着手した。これらの変更のために一部の予算の組換えを行った。