

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

研 究 区 分 : 環境問題対応型研究（ミディアムファンディング枠）

研 究 実 施 期 間 : 2022（令和4）年度～2024（令和6）年度

課 題 番 号 : 4MF-2201

体 系 的 番 号 : JPMEERF20224M01

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

Project Title : Evaluation of Ecosystem Functions of Vegetated Coastal Habitats and Their Use for Environmental Restoration of the Coastal Ecosystem and Reconstruction of Coral Reefs

研 究 代 表 者 : 宮島 利宏

研 究 代 表 機 関 : 東京大学

研 究 分 担 機 関 : 東京農工大学、琉球大学、東京科学大学

キ ー ワ ー ド : サンゴ礁、環境ストレス、緩衝植生帯、流域管理、復元力

2025（令和7）年11月



環境研究総合推進費
Environment Research and Technology Development Fund



独立行政法人
環境再生保全機構
ERCA Environmental Restoration and Conservation Agency

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書	1
研究課題情報	3
<基本情報>	3
<研究体制>	3
<研究経費>	4
<研究の全体概要図>	5
1. 研究成果	6
1. 1. 研究背景	6
1. 2. 研究目的	6
1. 3. 研究目標	7
1. 4. 研究内容・研究結果	8
1. 4. 1. 研究内容	8
1. 4. 2. 研究結果及び考察	13
1. 5. 研究成果及び自己評価	33
1. 5. 1. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献	33
1. 5. 2. 研究成果に基づく研究目標の達成状況及び自己評価	34
1. 6. 研究成果発表状況の概要	38
1. 6. 1. 研究成果発表の件数	38
1. 6. 2. 主要な研究成果発表	38
1. 6. 3. 主要な研究成果普及活動	38
1. 7. 国際共同研究等の状況	39
1. 8. 研究者略歴	39
2. 研究成果発表の一覧	40
(1) 産業財産権	40
(2) 論文	40
(3) 著書	41
(4) 口頭発表・ポスター発表	41
(5) 「国民との科学・技術対話」の実施	44
(6) マスメディア等への公表・報道等	44
(7) 研究成果による受賞	44
(8) その他の成果発表	44
権利表示・義務記載	45

Abstract

研究課題情報

<基本情報>

研 究 区 分 :	環境問題対応型研究（ミディアムファンディング枠）
研 究 実 施 期 間 :	2022（令和4）年度～2024（令和6）年度
研 究 領 域 :	自然共生領域
重 点 課 題 :	【重点課題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
行 政 ニ ー ズ :	非該当
課 題 番 号 :	4MF-2201
体 系 的 番 号 :	JPMEERF20224M01
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 :	宮島 利宏
研 究 代 表 機 関 :	東京大学
研 究 分 担 機 関 :	東京農工大学、琉球大学、東京科学大学
研 究 協 力 機 関 :	水産研究・教育機構、笹川平和財団海洋政策研究所

<研究体制>

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」

<サブテーマリーダー（STL）、研究分担者、及び研究協力者>

役割	機関名	部署名	役職名	氏名	一時参画期間
リーダー	東京大学	大気海洋研究所	助教	宮島 利宏	
分担者	東京農工大学	農学研究院	教授	梅澤 有	
協力者	水産研究・教育機構	水産技術研究所	主任研究員	佐藤 允昭	

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」

<サブテーマリーダー（STL）、研究分担者、及び研究協力者>

役割	機関名	部署名	役職名	氏名	一時参画期間
----	-----	-----	-----	----	--------

リーダー	琉球大学	理学部	教授	栗原 晴子	
協力者	琉球大学	理学部	特別研究員	谷中 絢貴	

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」

＜サブテーマリーダー（STL）、研究分担者、及び研究協力者＞

役割	機関名	部署名	役職名	氏名	一時参画期間
リーダー	東京科学大学	環境・社会理工学院	准教授	中村 隆志	
協力者	海洋政策研究所	海洋政策実現部	部長(特任研究員)	渡邊 敦	
協力者	東京工業大学	環境・社会理工学院	特別研究員	吉開 仁哉	2022年4月～ 2023年3月

＜研究経費＞

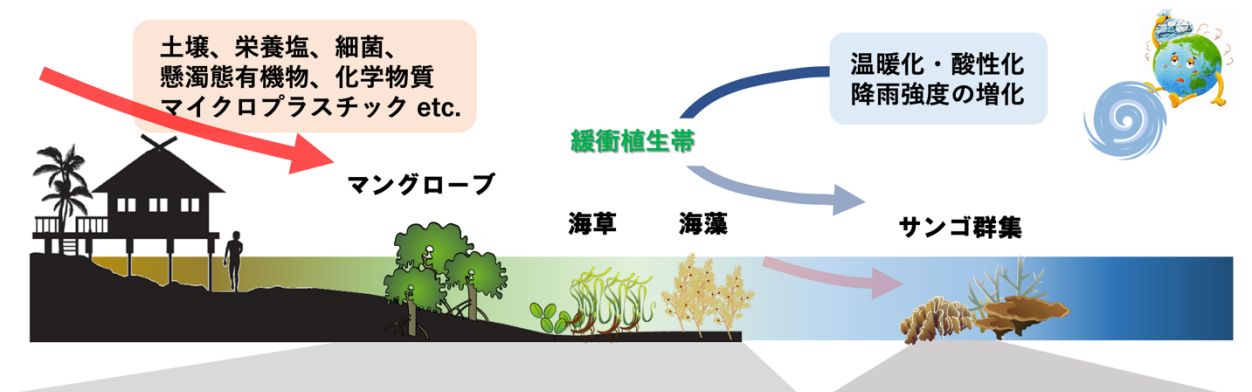
＜研究課題全体の研究経費（円）＞

年度	直接経費	間接経費	経費合計	契約上限額
2022	15,300,000	4,590,000	19,890,000	19890000
2023	15,300,000	4,590,000	19,890,000	19890000
2024	15,300,000	4,590,000	19,890,000	19890000
全期間	45,900,000	13,770,000	59,670,000	59670000

<研究の全体概要図>

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
ーサンゴ礁の再建に向けた事例研究ー

衰退の進むサンゴ群集の保全と再建に向けて、緩衝植生帯の生態系機能を利用した
一体化した生態系管理手法を創案し低減する。



ST1 東京大学（代表機関）

- 堆積物への炭素貯留と生元素ストックの保持・堆積促進による濁質除去、外来性有害微生物の除去機能の評価

ST1 東京農工大学

- 過剰栄養塩の除去、CO₂吸収による酸性化緩和機能の評価
- 緩衝植生帯の分布密度と生産量を持続的に増加させる

ST2 琉球大学

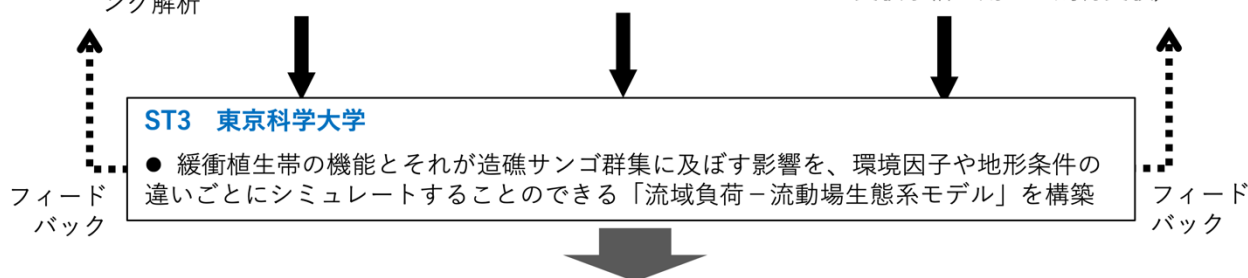
- 緩衝植生帯の機能が造礁サンゴの生理状態に影響を与え、その成長や復元力を促進することを検証

【研究手法】

- ✓ 植生帯とその近傍における定点採水、流れ法採水、堆積物柱状試料採取、セディメントトラップ調査
- ✓ 栄養塩自動分析、炭酸系の自動滴定、質量分析による軽元素安定同位体比測定、微生物DNAのメタバーコーディング解析

【研究手法】

- ✓ 現地調査（サンゴの分布、加入量と生育状態の目視観察）と現場実験（緩衝植生帯の相対影響が異なる場所間での相互移植実験および実験水槽を用いた飼育実験）



達成目標

保全対象となるサンゴ礁そのものではなく周辺地域の自然植生がもつ環境改善力を最適化することを通して、サンゴ礁の劣化を食い止めて自然な加入と回復の流れを助けることで再建を促すという、新しい政策オプションを提供。海洋保護区による保全活動と流域管理とを一体化してその効用を最大化させる。

1. 研究成果

1. 1. 研究背景

20世紀後半以降、地球規模気候変動・海洋酸性化・汚染物質流入等の複合ストレスの増大のために全世界的にサンゴ礁生態系の深刻な劣化が進んだことを受けて、国際サンゴ礁学会とFuture Earth Coastsは2021年に、サンゴ礁の永久的な喪失を防ぐために、サンゴ礁の再建に向けた具体的な行動を10年以内に世界的に実行に移す必要があると訴える緊急文書を連名で発表した(Knowlton et al. 2021)。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、サンゴ移植技術の高度化（生物工学的介入を含む）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。

一方、サンゴ礁と並んで沿岸海洋生態系を特徴付けている海草藻場・マングローブ・塩性湿地等の沿岸植生帯は、その際立って高い一次生産能力と有機炭素の保持能力から、大気中二酸化炭素の隔離と長期貯留によって地球温暖化の緩和に貢献する可能性が注目され、一括してブルーカーボン生態系と概念化されてその適切な保全と管理の必要性が提唱されてきた(Nellemann et al. 2009)。沿岸植生帯の生態系はその旺盛な生産力を背景として、炭素の隔離貯留に限らず、強力で多様な生態系サービスを提供する。その中で、本研究では特に、環境水中の過剰な栄養塩や濁質、細菌類等のストレス因子を捕集することによって水質を浄化し健全度を高めるストレス緩和機能が、サンゴ礁を含む周辺生態系に正の影響を与えている可能性に着目した。サンゴ礁海域では、海草藻場やマングローブは、ローカルなストレス負荷源である陸域とサンゴ礁との間に典型的に分布することから、このような植生帯を適切に管理して、ストレス因子に対する緩衝帯として活用することによって、前述の3つの柱のうちの地域レベルでのサンゴ礁復元力強化に貢献できるのではないかと考えたのである。本研究はこのような発想のもとに、次項に述べる研究目標を設定し、達成するために企画された。

沿岸植生帯はサンゴ礁域に限定されるものではなく、温帯域・寒帯域の浅海域にも分布している。したがって沿岸植生帯による緩衝機能は一般的な沿岸域の環境管理の観点からも検討される価値があり、特に養魚場、二枚貝養殖、海藻養殖等の養殖施設の環境改善と持続可能性の維持のために、沿岸植生帯の保全・造成を通して積極的に活用できる可能性を有している。本研究の成果はこのような応用へのインセンティブとなることも期待されている。

1. 2. 研究目的

本研究の目的は、人間の支配する陸域と自然の支配する海域との境界領域に立地する沿岸植生帯を、サンゴ礁の保全と復元力強化のためのNature-based Solutionとして活用する方策を切り拓くことである。保全目標となるサンゴ礁と、ストレス負荷源となる人間活動領域との間に成立する沿岸植物群落（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して、その独自の生態系機能、特に各種のストレス緩衝機能(stress-mitigating functions)を活用することにより、緩衝植生帯自身も含むサンゴ礁複合生態系の総体的な復元力向上を図り、従来個別に行われてきた海洋保護区による保全活動と流域管理とを一体化してその効用を最大化させるための足がかりを提供する。

この目的のために、第一に（サブテーマ1）、実在のサンゴ礁生態系における事例研究を実施し、緩衝植生帯が有する栄養塩制御、濁質除去（堆積促進）、CO₂吸収による酸性化緩和、生元素貯留（ブルーカーボンを含む）・外来性有害微生物の除去という5種類の緩衝機能を実証するとともに、その実効性を査定するための信頼できる方法を提案する。富栄養化・赤土流入等の人為起源負荷に対する除去能力（環境収容力）を評価するための指針を策定し、政策決定者に利用できるようにする。

第二に（サブテーマ2）、緩衝植生帯が造礁サンゴの健全性・復元力に対して及ぼす効果（副次的効果を含む）を実験的に解明し、定量化する。このために適した飼育実験施設と実験手法を定式化する。また、実験的移植を伴う現場実験の可能性を追求する。

さらに第三に（サブテーマ3）、実際のサンゴ礁生態系における緩衝植生帯の環境維持・改善機能をその時空間変動を含めて予測できるモデルを構築する。このモデルは一方において実際の生態系における観測データとの比較により緩衝植生帯の機能を立証することに用いられるが、また他方において持続可能な生態系の実現のために「人間活動領域-緩衝植生帯-保全対象となる自然生態系」という沿岸配置のあり方をシミュレーションにより創案するために利用することが期待されるものである。

以上を通して、新しい沿岸生態系管理のデザインを環境政策のオプションとして提案することを目指す。

なお本研究では研究対象とする緩衝植生帯として、海草藻場を主とし、マングローブと大型藻類を副として扱う。海草藻場はサンゴ礁に近接した場所に分布しながら、多くの場合に造礁サンゴ種との明確な棲み分けが成立している点において、緩衝植生帯としての典型的な特徴を備えているためである。

1. 3. 研究目標

<全体の研究目標>

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
全体目標	サンゴ礁複合生態系に含まれる緩衝植生帯（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現場で実証する。また具体的な施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。

<サブテーマ1の研究目標>

サブテーマ1名	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実施機関	東京大学・東京農工大学
サブテーマ1目標	サンゴ礁と陸域の間に自然分布する緩衝植生帯（海草藻場・ガラモ場・マングローブ）を利用して、それが有する環境改善機能を定量的に評価する。評価対象となる機能は、①過剰栄養塩除去機能（脱窒と不動態）、②酸性化緩和（CO₂削減）機能、③堆積物への有機物貯留機能、④濁質粒子に対する捕集除去機能、⑤生活排水等に由来する外来性有害微生物の除去機能の5つとする。陸域からの異なる種類の人為起源負荷を受けている少なくとも2箇所のサンゴ礁と、人為起源負荷の低い対照区となる少なくとも1箇所のサンゴ礁において、対照的な2期（夏季/冬季または雨季/乾季）に上記5項目の評価を行い、緩衝植生帯の環境収容力（単位面積の緩衝植生帯が1年間に除去または緩和できる人為起源負荷の量）とその季節変化を査定する。 また、各サイトにおいて緩衝植生帯の分布状況と地形因子・波浪条件との関係を調査して、地球温暖化に起因する将来の海水準上昇が現存の緩衝植生帯に与えるリスクを見積もるとともに、そのリスクを回避して現存量の維持または増大を実現するための実装可能なオプションについて検討する。

<サブテーマ2の研究目標>

サブテーマ2名	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実施機関	琉球大学
サブテーマ2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。サンゴの復元力の評価には主にサンゴ分布や多様性に加え、サンゴの加入率やサンゴの生理状態などを指標に評価する。 評価に際してはサブテーマ1で示された同調査海域において、緩衝植生帯の有る場所と無い場所でのサンゴ被度や群集組成の評価に加えて、サンゴの相互移植実験により緩衝植生帯の有無によるサンゴへの効果を2季節で評価す

	る。 また現場実験に加えて、サブテーマ2において特に顕著な改善が見られた環境因子については各研究施設にて水槽での操作実験を組み合わせることによって、植生による緩衝能と、それに伴うサンゴへの影響を評価する。
--	--

<サブテーマ3の研究目標>

サブテーマ3名	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実施機関	東京科学大学
サブテーマ3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。サブテーマ1から得られる植生帯の環境収容力と、サブテーマ2から得られるサンゴ礁への効果をモデルに組み込む。 こうして得られるモデルを用いて、まず現存する緩衝植生帯が現生のサンゴ礁の維持にどの程度貢献しているのかを定量的に評価できるようにする。さらに、ある量の流域負荷と、それに対して保全すべきサンゴ礁が与えられた時に、サンゴ礁生態系を維持・再生・拡大をサポートするために必要となる緩衝植生帯の面積と配置についてプランニングして、それに基づき政策提言が行えるようにする。

1. 4. 研究内容・研究結果

1. 4. 1. 研究内容

※ 本節（1.4節）において引用されている引用成果（「成果**」）は、次章の「研究成果発表の一覧」に掲載されている成果番号に対応している。

サブテーマ1では、陸域の人間活動が引き起こすサンゴ礁へのストレス負荷を緩和する緩衝植生帯の機能を実証することを試みた。植生帯に期待される重要なストレス緩和機能として、①栄養塩吸収による過剰な栄養塩の除去と富栄養化の抑制、②陸域から流入する赤土等の濁質の捕集と堆積促進ならびに堆積物の安定化（再懸濁の抑制）、③堆積物への炭素と生元素の貯留、④CO₂吸収による局所的な海洋酸性化の緩和と炭酸塩溶解等によるアルカリ度の付加、⑤病原菌や食中毒菌のような外来性の有害微生物に対する除去と抑制、という5種類の緩衝機能を探り上げた。それぞれの緩和機能を現場で評価するための実験的方法を研究し、事例研究を通してその実効性を検証した。

海草藻場に関しては①～⑤の各項目について定量的な実証データを得ることができた。①に関しては沖縄島備瀬のサンゴ礁礁池（中型・小型海草種が生育；26.71°N 127.88°E；図1, 2）を事例として、現場流れ法（図3）、現場チャンバー法（図4）、屋外水槽チャンバー法（図5）の3通りの方法を比較併用して栄養塩除去効果の実証と定量を行った。②に関しては石垣島白保（主に中型海草種；24.36°N 124.25°E；図6）及びパラオ共和国オギワル（主に大型海草種；7.54°N 134.63°E）のサンゴ礁礁池海草藻場においてセディメントトラップを用いた事例研究（図7）を実施し、赤土捕集効果と再懸濁抑制効果の実証とその変動性の評価を行った。③に関しては上記の各海草藻場において堆積物コアを採取して分析を実施すること、および分解にかかわる酵素活性の評価により実証した（図8）。④に関しては備瀬とオギワルの海草藻場におけるアルカリ度の経時変化の実測を行ったほか、別事業との共同研究として実施された観測（成果27）を通して、海草藻場における酸性化緩和効果とマングローブにおけるアルカリ度生成を実証した。⑤に関しては白保礁池の海草藻場で採集された海草を用いた室内飼育実験（図9）を複数回実施して、海草による微生物相制御効果を実証するとともにそのメカニズムについて検討した。

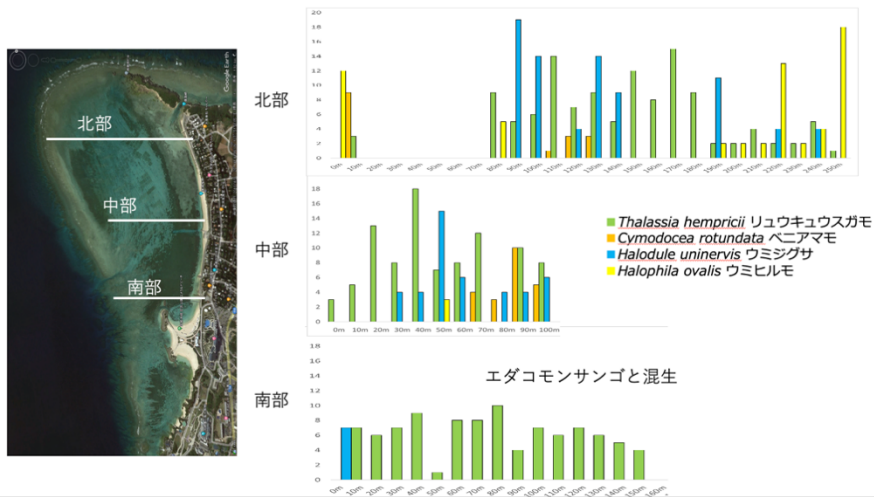


図1. 沖縄島中部の備瀬礁池の航空写真（左）、及び礁池内に設定した3測線における海草藻場の種組成と被度（右）。礁池は南北に約1 km である。

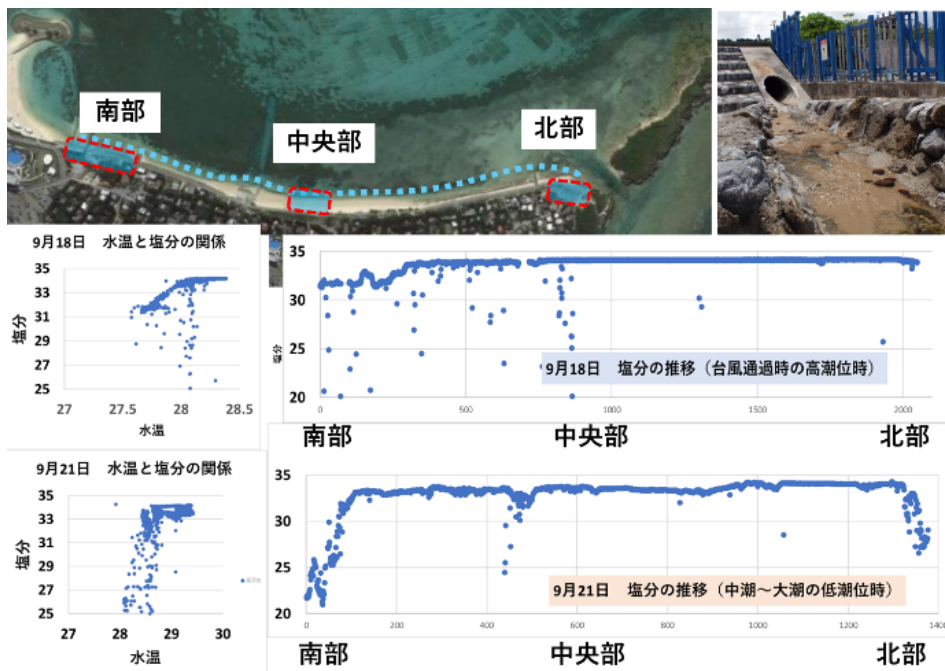


図2. 備瀬礁池海岸部の拡大図（左上）、及び礁池南端に存在する排水流出口の写真（右上）。中及び下のプロットは汀線沿いの海水中の塩分の分布を示し、中段は高潮位時、下段は低潮位時の典型的分布を示す。

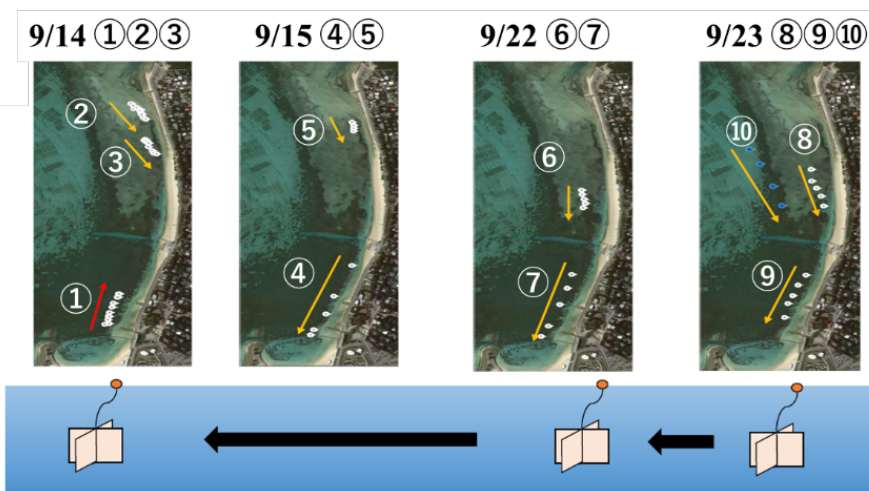


図3. 2022年9月に実施した備瀬サンゴ礁での流れ法による底面植生－水柱の物質フラックス観測時の始点～終点の位置図。下は流れ法の概念図。

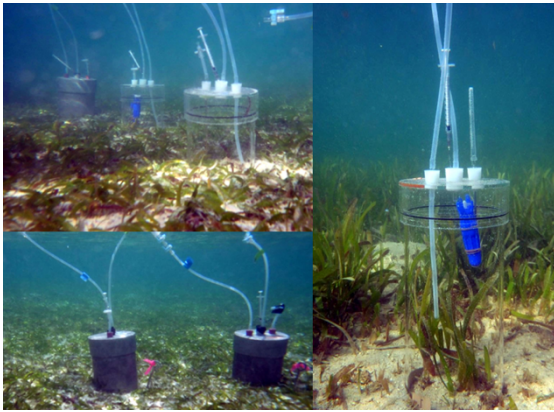


図4. (左) 明暗チャンバーを用いた、備瀬礁池の海草藻場における現場チャンバー法による栄養塩・炭酸系フラックス観測。

図5. (下) 流水実験水槽でのチャンバー法による栄養塩・炭酸系フラックス観測。琉球大学瀬底実験施設の流水水槽で上部開放系チャンバーによる培養実験を実施。

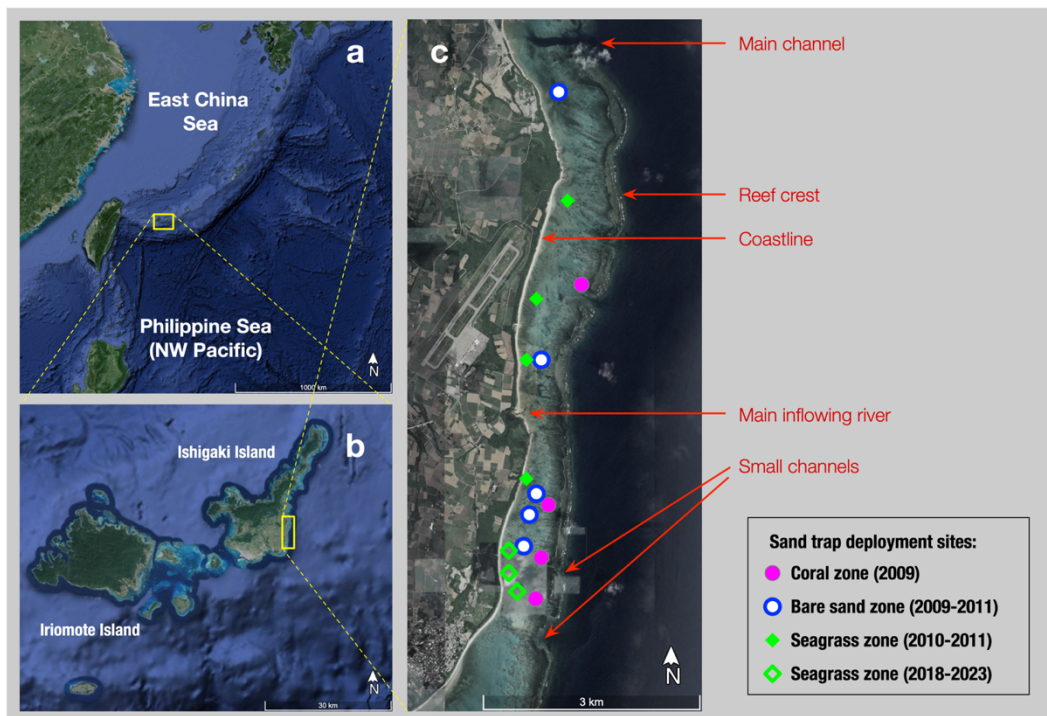
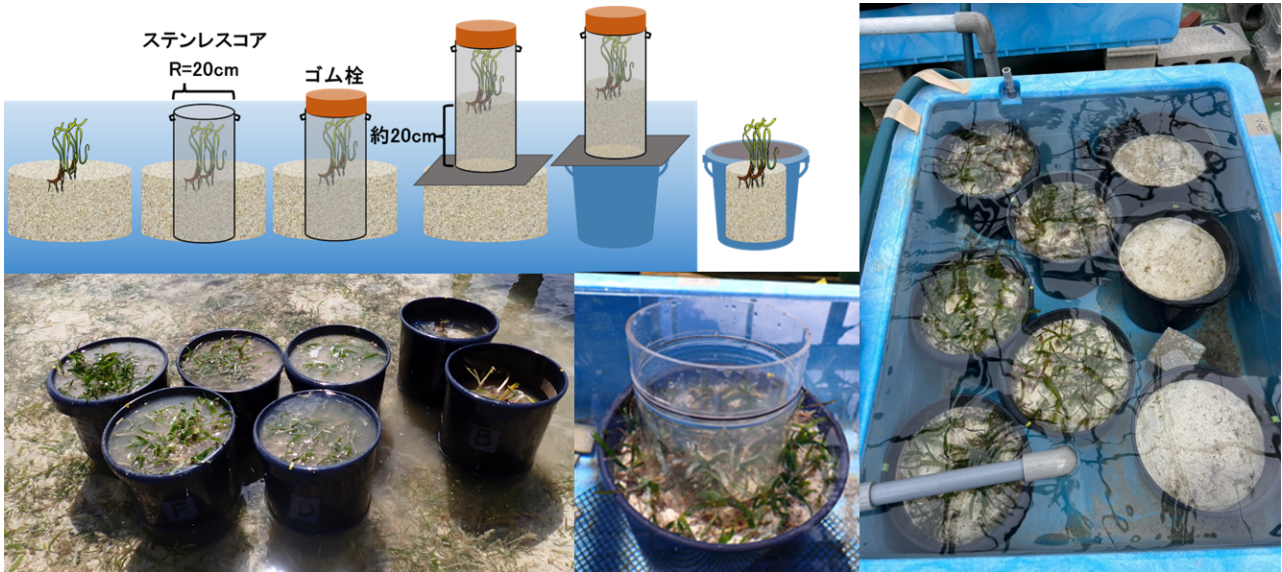


図6. 石垣島・白保礁池。サンゴは礁縁付近を中心に、海草藻場は陸域寄りの部分に、それぞれ集中して分布し、両者の間は砂地になっている。礁池の中ほどの陸側から轟川という小河川が流入しており、大雨による出水時には陸域の農地に由来する細粒土砂（赤土と呼ばれる）が流入する。cの図のマークされている地点はセディメントトラップの設置地点。

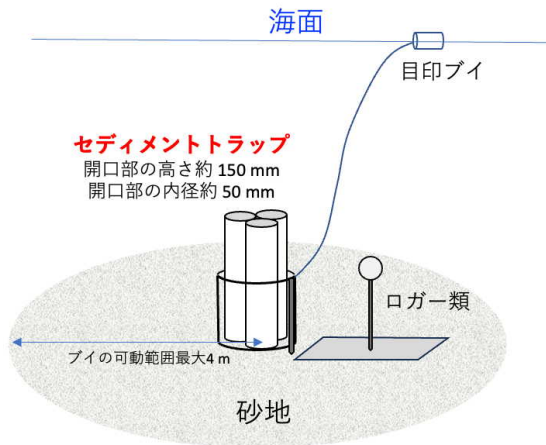


図7. (左) セディメントトラップの設置方法。海草藻場内外の水深0～3メートルの海底に直置きし、1～3日間設置して沈降物を捕集した。

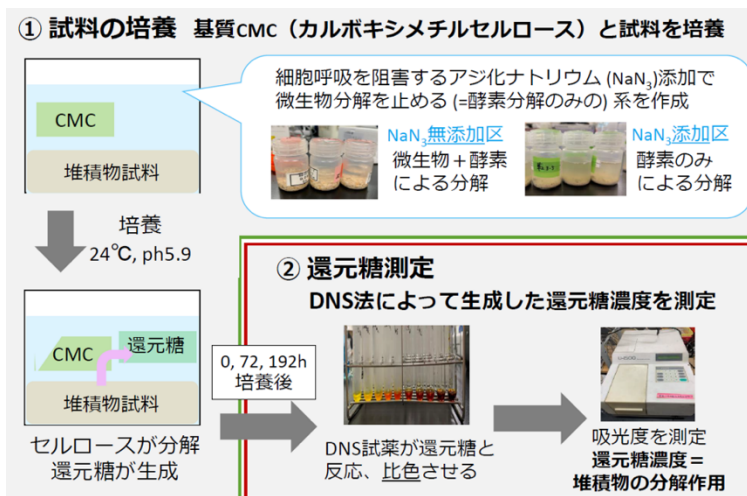


図8. 底泥のセルラーゼ活性の評価方法の模式図（左）とその実施地点（上；備瀬池）。

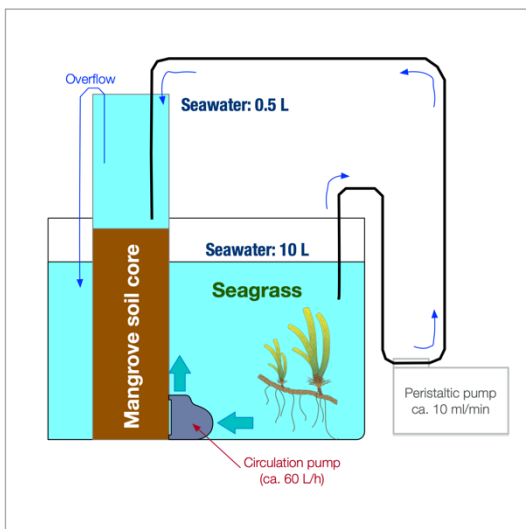


図9. 海草が海水中の微生物群集構造に与える効果を検証するための海草とマングローブ土壌コアを組み合わせた飼育実験系。石垣島の環境省国際サンゴ礁モニタリングセンターの施設を利用して実施した。

石垣島の調査地では、研究開始時点の前後からウミガメによる大規模な食害が顕在化して海草藻場が著しく衰退したため（図10）、実験計画を一部変更するとともに、食害被害状況に関する調査を実施して結果を報告した。ウミガメの食害による海草藻場の衰退は、世界全体としては20年あまり前から確認されて問題になっている事象であって、その背後には地球温暖化による海洋動物群集の行動範囲の変化が深く関与していると言われている。したがってこの問題もサンゴ礁を含む沿岸生態系に対する地球規模環境変動の波及的なリスクの一つと捉え、対応策に関する検討を行った（政策決定者向けサマリーの中に記載）。

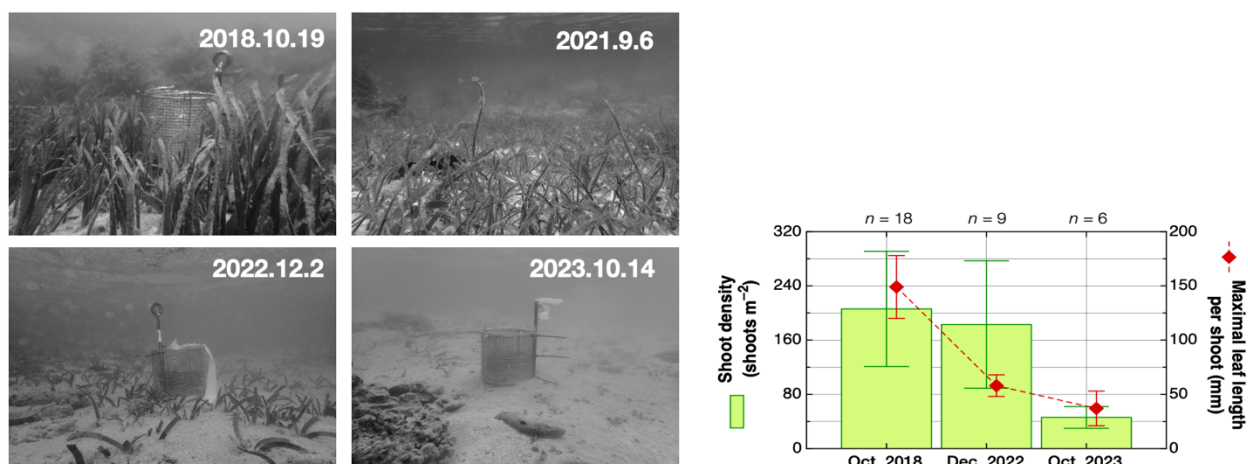


図10. 2018年から2023年までの間の白保礁池海草藻場の変化。ウミガメの食害を受けて海草が激減していることを示す。写真はほぼ同じ地点で撮影された藻場の状況。グラフは写真付近の藻場の平均株密度（棒グラフ）と株ごとの最大葉長の平均値（折れ線グラフ）の経年変化を示す。

マングローブに関しては、③④⑤に関して石垣島伊土名地区（吹通川河口；24.49°N 124.23°E）及びパラオ共和国バベルダオブ島（7.54°N 134.63°E；成果9参照）沿岸のマングローブにおいて記載的な情報を得たのに加え、②に関して本事業以前に取得されていたデータ（伊土名地区及びフィリピン・パナイ島のマングローブにおけるもの）をもとに緩衝効果を植生抵抗モデルとして提示した。ところでマングローブは、本研究で言う意味での緩衝植生帯であると同時に、マングローブ自身からも二酸化炭素や溶存態・懸濁態有機物が海水中に多量に流出するため、サンゴ礁に対する潜在的な脅威ともなっている。通常の立地条件では、マングローブとサンゴ礁の間に濃密な海草藻場が分布していることが多く、海草藻場がマングローブからサンゴ礁への各種の影響に対する緩衝地帯となっている可能性がある。本研究では、このような観点から見た海草藻場の特に③④⑤の機能について光を当てる研究も実施した。

サブテーマ2では、緩衝植生帯の植物（特に海草と大型藻類）がサンゴの生理状態と成長速度に与える効果を直接的に検証するための室内実験と現場移植実験を計画した。いずれも沖縄島備瀬のサンゴ礁池で得られる試料を材料として用い、琉球大学瀬底研究施設の実験水槽設備（その一部は本研究プロジェクトで構築されたもの）を利用して研究が行われた。室内実験では、飼育水槽をタンデムに連結した実験装置（図11）を開発し、上流側に植生帯植物（海草・褐藻類）を、下流側にサンゴを飼育してサンゴの光合成・呼吸・成長を経時的に観察した。また水槽に流す海水にCO₂を吹き込んで人為的に酸性化を起させ、植生帯植物による酸性化緩和効果を実証することを試みた。その結果、海草や褐藻類には酸性化緩和効果が明瞭に認められたが、それがサンゴの成長速度に及ぼす影響に関しては必ずしも明確な結果が得られなかった。一方、海草や褐藻の存在がサンゴの生理状態を劣化させたり死滅させたりするといった副次効果は認められなかった。

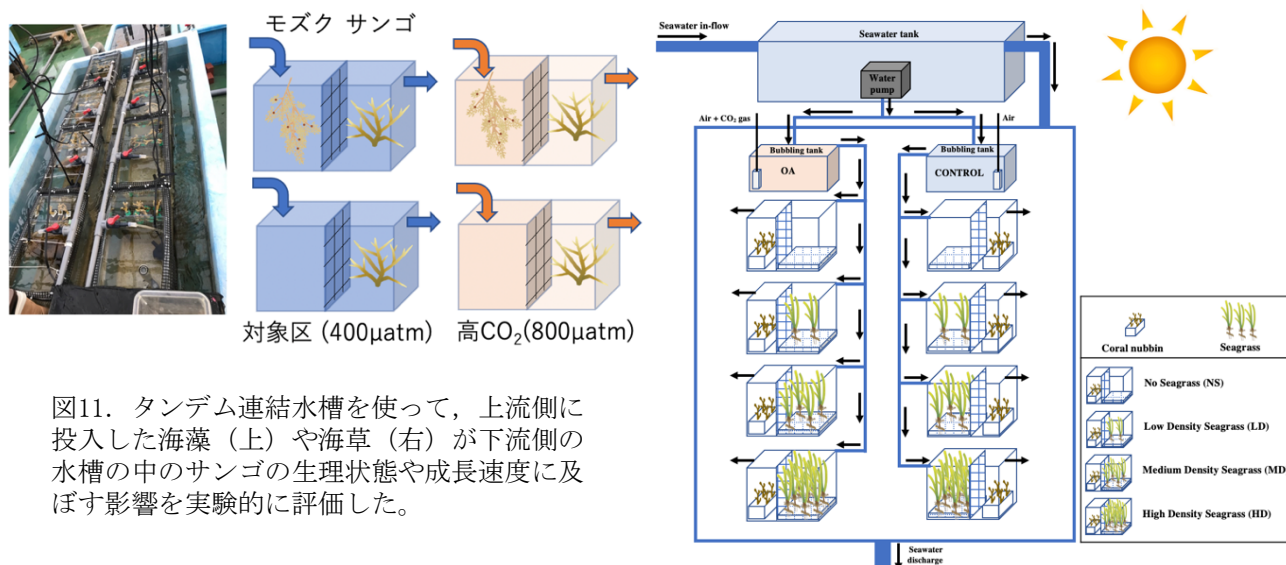


図11. タンデム連結水槽を使って、上流側に投入した海藻（上）や海草（右）が下流側の水槽の中のサンゴの生理状態や成長速度に及ぼす影響を実験的に評価した。

一方、現場移植実験においては、①海草藻場の近傍と離れた場所との間で生息しているサンゴを相互移植して、移植サンゴの成長速度を継続調査することによって植生帯がサンゴの成長に及ぼす効果を検証すること、及び②海草藻場の近傍と離れた場所とにサンゴ幼生付着基盤を設置して経過観察することで、植生帯がサンゴの加入と定着率に及ぼす効果を検証することを試みた。しかしながら本研究の実施期間中はいずれも夏場に強い海洋熱波に襲われ、移植又は加入したサンゴがほとんど死滅するという事態に至ったため、有意な結果を得ることができなかった。このため、代替的に室内実験施設を強化して、サブテーマ3とも協力して、海草による栄養塩取込能力を精密に評価する実験、ならびに富栄養化がサンゴの生理に及ぼす効果を直接的に実証する実験を追加的に実施した。この実験の結果はサブテーマ3で作成されたモデルのパラメータ決定のために使用された。

サブテーマ3では、調査対象サンゴ礁域における海水流動と波浪を再現する3次元流動場モデルを構築した。さらに一部の海域に対して、底生生物群集（サンゴ・植生帯植物）と浮遊生物群集（プランクトン）の代謝が炭素・窒素・リンの導体に及ぼす影響を記述する低次生態系モデルMarine CoMET（次頁の図12）を構築するとともに、降水量や土地利用データに基づいて流域からの炭素・栄養塩・赤土の負荷を予測する流域負荷モデルをカップリングさせて、様々なストレス負荷に対する植生帯の緩衝効果だけでなく、食害による緩衝植生帯の喪失といった事態を再現するシナリオ解析も可能な、統合生態系モデルを完成させた。次頁の図13に作成したモデル群の全体構想を示す。

石垣島白保海域では海水流動に関するモデル予測値をサブテーマ1に提供することにより、堆積物安定性に対する海草藻場の効果を実証することに貢献した。さらに石垣島白保礁池と名蔵湾・石西礁湖海域のモデルに関しては、陸域から流入する物質をトレーサーとして経時的・定量的に追跡できる機能を追加し、それによって陸域起源ストレスの伝播状況とそれに対する緩衝植生帯による緩和効果との両方をシミュレートできるようになった。このモデルは緩衝植生帯による生産物がサンゴ礁の外に流出してから後の行方を追跡して、外洋域へのブルーカーボン貯留という緩衝植生帯のもう一つの重要な機能をシミュレートするためにも使用することができる。このような機能を持つモデルは、政策決定者がサンゴ礁へのストレス緩和のために植生帯の保全・再生・造成をプランニングするために特に効果的なツールとなることが期待される。

これらのサンゴ礁礁池のモデルとは別に、サブテーマ3ではマングローブによる②の緩衝機能に直接関係する土砂流入制御を記述するモデルを作成した。またMarine CoMETの構成要素としても使用される、③の生元素貯留機能の基盤となる堆積物中の続成作用を記述する一次元鉛直モデル、およびサンゴと海草の生元素代謝と生理応答を記述する内部モデルをそれぞれ独立のモデルとして構築し、そのために必要となる各種のパラメータを決定するための室内実験をサブテーマ2と協力して実施した。

1. 4. 2. 研究結果及び考察

サブテーマ1

研究内容(1.4.1)で挙げた5種類の植生帯機能のうち、①栄養塩吸収による過剰な栄養塩の除去機能の実証のためには、はじめに2022年度は、現場海域の海草藻場上を流れる海水に漂流ブイを流し、同じ水塊を追跡しながら、その水塊中の栄養塩の濃度変化をモニタリングすること(Miyajima et al. (2007) ; 図3, 14)により、現場水深を加味して藻場単位面積あたりでの代謝量を定量化することを試みた(成果19)。調査は沖縄島備瀬礁池内の海草藻場周辺で実施された。ここは中型海草種のリュウキュウスガモ(*Tharassia hemprichii*)が優占しているが、ベニアマモ(*Cymodocea rotundata*)、ウミヒルモ(*Halophila ovalis*)、ウミジグサ(*Halodule uninervis*)なども混在する典型的な熱帯性混合藻場であり(図1)、礁池南端より排水由来の人為起源栄養塩が流入している(図2, 15)。人為起源栄養塩を海草が実際に吸収していることは、海草の安定同位体比を分析することによって定性的には証明されている(図15; また後述のようにサブテーマ2でも調査している)。この漂流ブイ法では、しかしながら厳密に単一の水塊を追跡することは容易ではなく、海草藻場と水塊との間のフラックスだけでなく、陸域や沖側との間の水平的なフラックスが或る程度影響してしまうため、藻場の機能のみを定量的に抽出することが困難である場合が多いことが判明した。そこで手法を変更して、海草藻場の一部を閉鎖チャンバー内に隔離してチャンバー内部の栄養塩濃度変化をモニタリングするフラックス・チャンバー法による評価手法を採用することとして、2023年度は現場の海草藻場にチャンバーを直接設置する方法(図4)、2024年度にはさらに精緻化するために、海草藻場を堆積物ごと採集して屋外実験水槽に運び、環境制御された実験水槽内にチャンバーを設置して計測する方法(図5)を実施した(成果23, 42)。その結果、栄養塩のうちで $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ と PO_4^{3-} に関しては昼夜を問わず吸収が卓越するのに対して、 NH_4^+ に関してはフラックスが明確でなく、むしろ放出される場合が多かった(図16, 17)。なお海草の伸長速度にその元素含量を乗じることで海草による元素別の捕集量を推定することも可能だが、これは正味の吸収量ではなく、植生帯の緩衝能力評価には適さないと考えられるため、今回は比較対象に含めなかった。

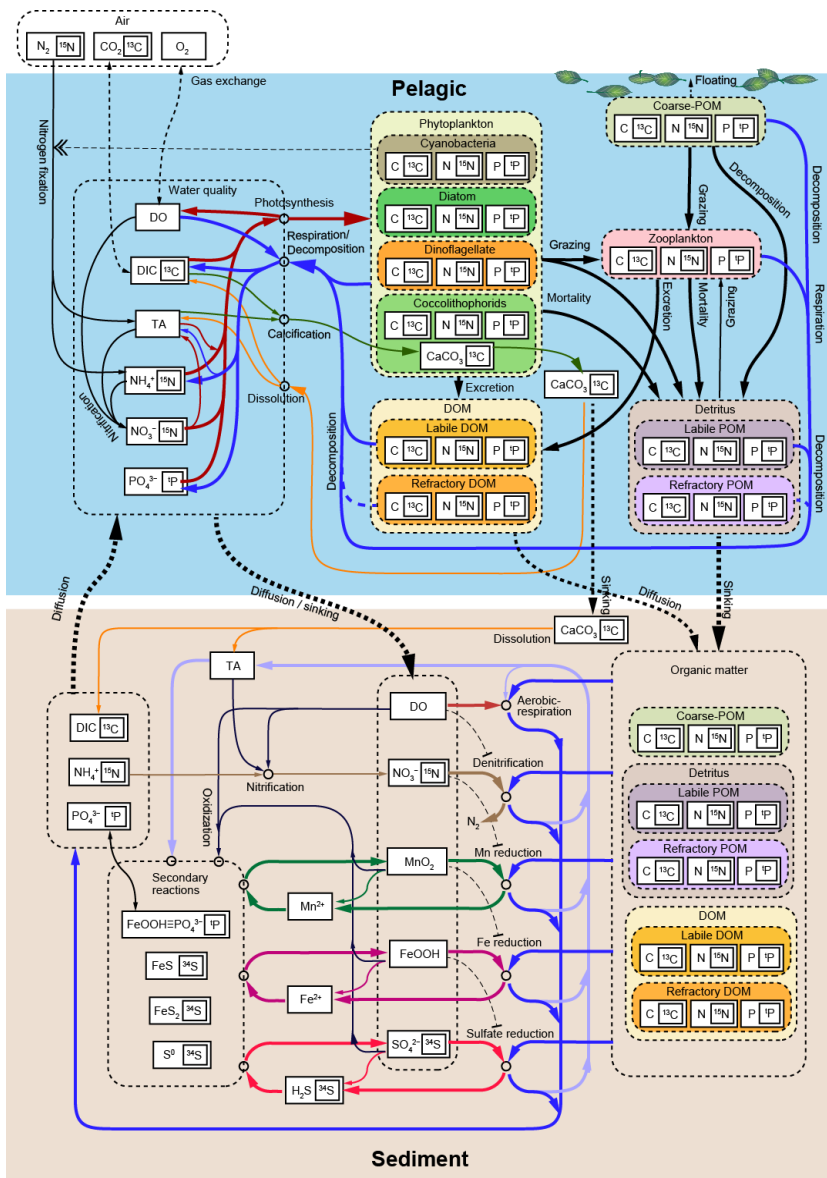
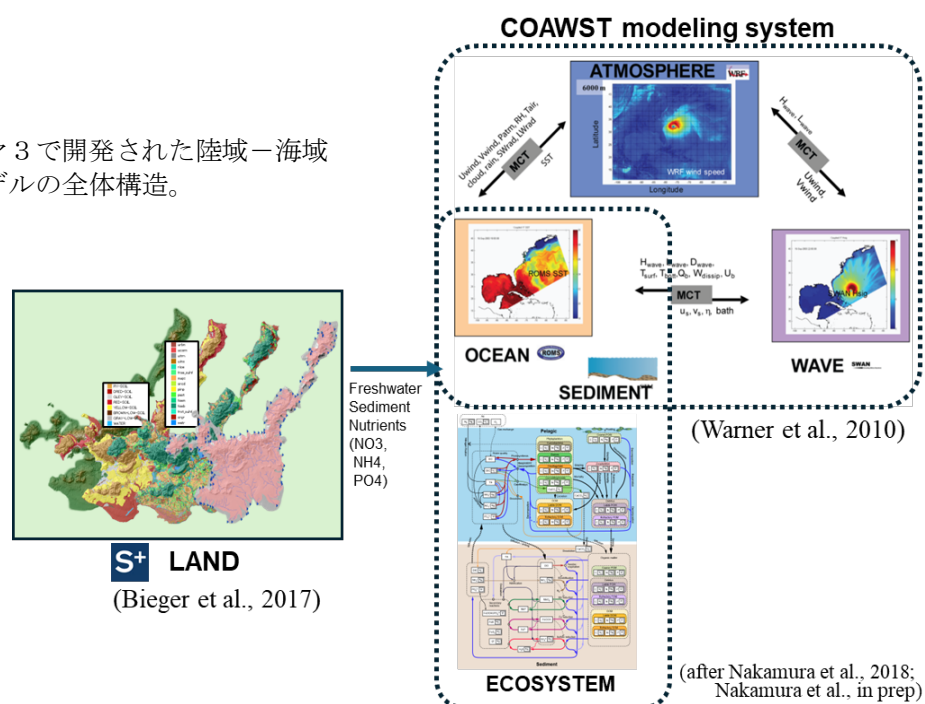


図12. サブテーマ3で新たに開発された浮遊系ー底生系結合低次生態系モデルの概念図。

図13. サブテーマ3で開発された陸域ー海域ー生態系統合モデルの全体構造。



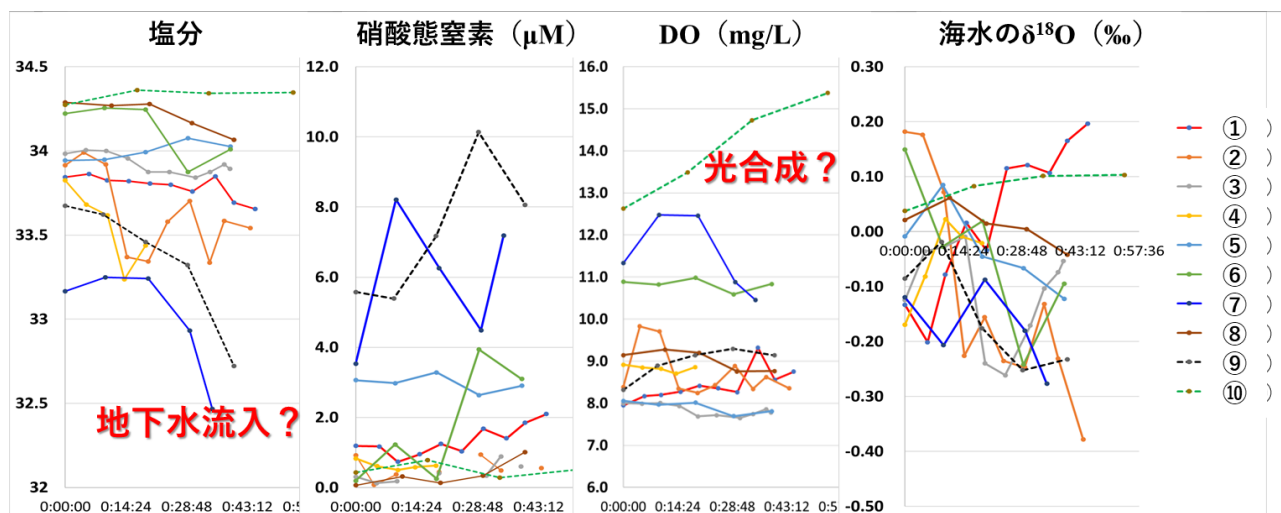


図14. (上) 2022年9月に実施した備瀬サンゴ礁での流れ法での代表的な観測成分の変動。凡例の番号は図3に示した流れの経路に対応している。

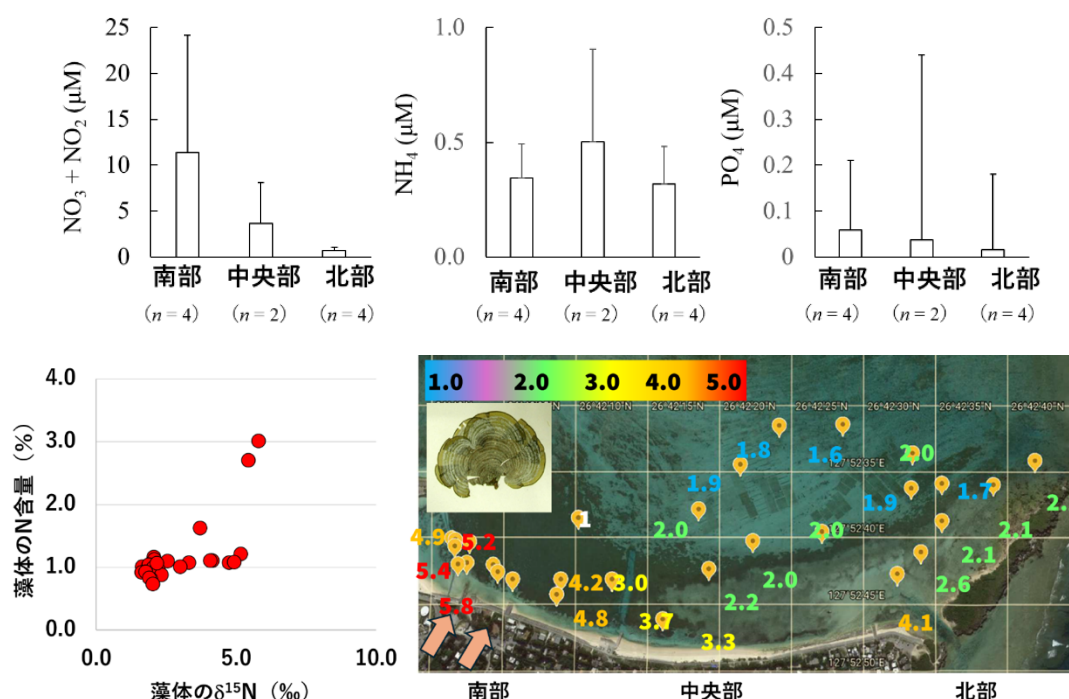


図15. (上) 備瀬礁池内の各地点での栄養塩濃度（低潮位時）。(下) 備瀬礁池に生育する褐藻類 (*Padina* spp.) の窒素安定同位体比 ($\delta^{15}\text{N}$ 値) の面的分布 (下右) とその藻体窒素含量 (N%) との関係 (下左)。

この結果を海草1株あたりの栄養塩除去速度に変換した上で、後述のサブテーマ2, 3によって実施された海草のみ（堆積物なし）の水槽実験による栄養塩吸収速度の計測結果と比較すると、 $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ と PO_4^{3-} に関してはチャンバー実験では堆積物による吸収（脱窒反応等）も含まれるため海草単独の場合よりも吸収速度が大きくなる傾向があったのに対し、 NH_4^+ に関しては海草単独の水槽実験では明瞭に吸収されていた。 NH_4^+ は先行研究から堆積物中の分解無機化により回帰していることが示されており（Miyajima et al. 2001）、チャンバー実験ではこの堆積物からの回帰と海草自体による吸収とが相殺するために明瞭な傾向が認められなかったものと推定される。結論的には、海草藻場全体としては、過剰な $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ と PO_4^{3-} を海水から除去しつつ、吸収した窒素の一部を NH_4^+ として海水中に回帰させている可能性がある。これまでの研究によると、栄養塩の中では特に過剰な NO_3^- と PO_4^{3-} がサンゴにとって有害であると考えられているのに対して、 NH_4^+ は低濃度であればサンゴにとって栄養塩として好んで利用されることから、上記のような海草藻場の機能は全体としてサンゴにとってのメリットがあると考えられる。

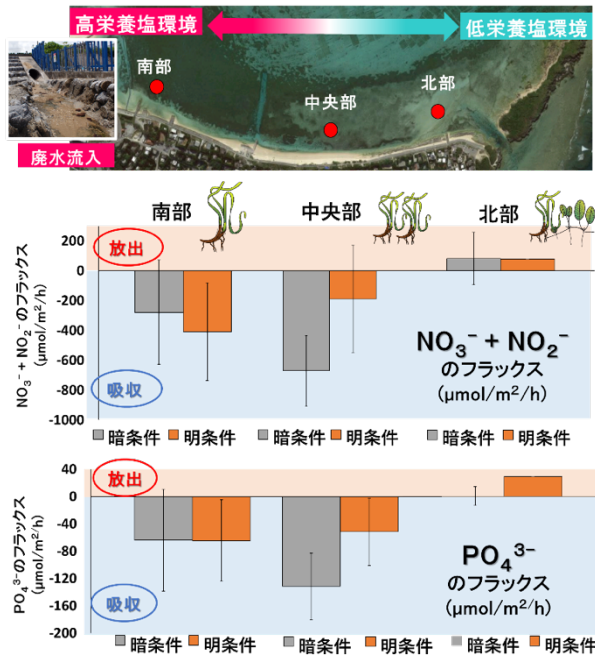


図16. (左) 備瀬礁池における現場チャンバー実験の各地点のチャンバー底面積当たりの $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ および PO_4^{3-} フラックス (T=0~60分、n=3、正の値は栄養塩放出、負の値は栄養塩吸収を示す。)

T=60分の採水終了後に、数時間の閉鎖系状態と高濃度の栄養塩添加状態の継続による海草や堆積物への生理条件の変化を考慮し、1回の実験終了後、付近の別の海草を対象としてチャンバーを設置して新たに実験を行った。また、海草の単位重量・表面積当たりの栄養塩フラックスを算出・標準化するために、チャンバー内部にあった海草の地上部を回収した。回収した海草は堆積物を海水で洗い流した後-20℃で冷凍保存した。なおチャンバー内の海草密度はほぼ同じになるように調整されている。

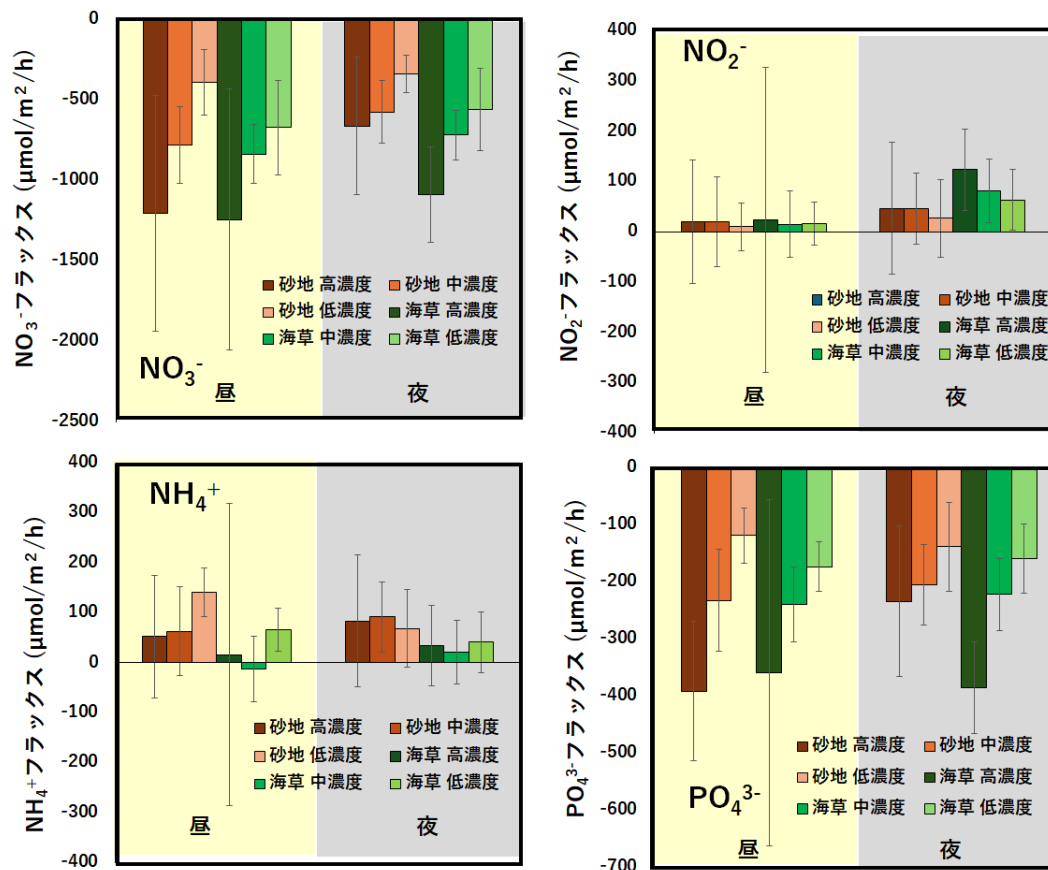


図17. 備瀬礁池で堆積物ごと採集した海草生体を琉球大学瀬底実験室の屋外水槽に設置してフラックス測定を実施した。屋外水槽チャンバー実験の各条件のチャンバー底面積当たりの NO_3^- 、 NO_2^- 、 NH_4^+ 、 PO_4^{3-} の平均フラックス (T=0~120分)。正の値が草体や堆積物からの水柱への栄養塩放出、負の値が草体や堆積物への栄養塩吸収を示す) NO_3^- と PO_4^{3-} は、栄養塩を水柱に添加しており、その初期濃度と間隙水中濃度に応じた拡散フラックス (Fickの第一法則) と、文献値による脱窒速度を考慮してあらかじめ除いたうえでの算出値。 NO_2^- と NH_4^+ は栄養塩を水柱に添加しておらず、チャンバー内の濃度変化から、間隙水中濃度に応じた拡散フラックス計算値を除いた算出値。

なお、マングローブによる栄養塩動態に対する効果に関しては、本研究期間中に得られているデータをまだ解析中の段階であり結論が得られていないが、以前に研究代表者が石垣島・伊土名地区及び名蔵湾のマングローブで実施した調査の結果からの考察としては、マングローブは $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ と PO_4^{3-} の動態に対しては海草藻場で見られたような除去効果は及ぼしていなかった。しかし海草藻場と同様、 NH_4^+ を生成して流出させていることが分かっており、この NH_4^+ は、潮が満ちる時に外洋から流入する懸濁態有機窒素がマングローブ内で分解無機化されることによって生成したものである可能性が示唆されている。

次に、②濁質の捕集と堆積物の安定化の機能の実証は、海草藻場においては、海草藻場内外にセディメントトラップ（図7）を設置して粒子沈降速度と捕集粒子の特性を比較するという方法で行われた。まず石垣島白保礁池の海草藻場（図6）における事例研究を実施した（成果11）。白保海域の海草藻場は備瀬礁池のものと類似していて、中型種を中心とした混生海草藻場であるが、備瀬と異なって河川からの赤土流入が見られる。得られたデータを見ると、まずセディメントトラップ法によって礁池内で捕集される沈降粒子の90%（重量比）以上が炭酸塩か河川から流入した赤土粒子であることから、捕集粒子の大半は堆積物の再懸濁に由来するものであると結論される。このことを前提として沈降粒子束の観測結果を解釈すると、堆積物の再懸濁が海草藻場の存在によって著しく抑制されていたこと、河川から流入する赤土は河口前面に広がる海草藻場ではほぼトラップされていて、河口から1 km以上離れたサンゴ生息地まではほとんど到達していなかったことが実証された（図18）。また偶発的ながら、本研究期間にウミガメによる海草藻場の激しい食害が起こり、その経過をモニタリングすることができた。その結果をもとに考察すると、食害等によって海草藻場が失われると、海草が存在する場合に比べて年間平均3 mmほど堆積物が浸食されてしまうこと（その結果、堆積物に貯留されているブルーカーボンも失われること）も明らかになった（成果11, 25）。

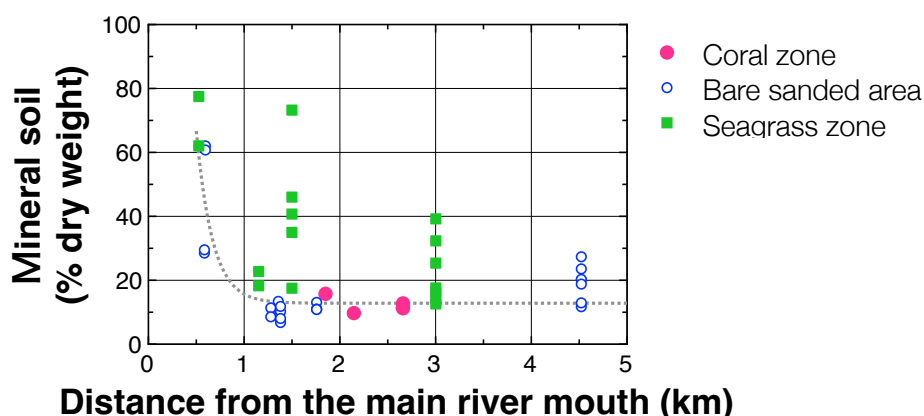


図18. （上）白保礁池におけるセディメントトラップにより捕集された沈降物中に占める赤土（mineral soil）の比率は、流入河川（轟川）の河口からの距離に逆相関して減少していた。サンゴ生息地域と何も生えていない砂地では、河口から1 km離れると20%未満に減少していたが、海草藻場内では減少速度が明らかに低かった。

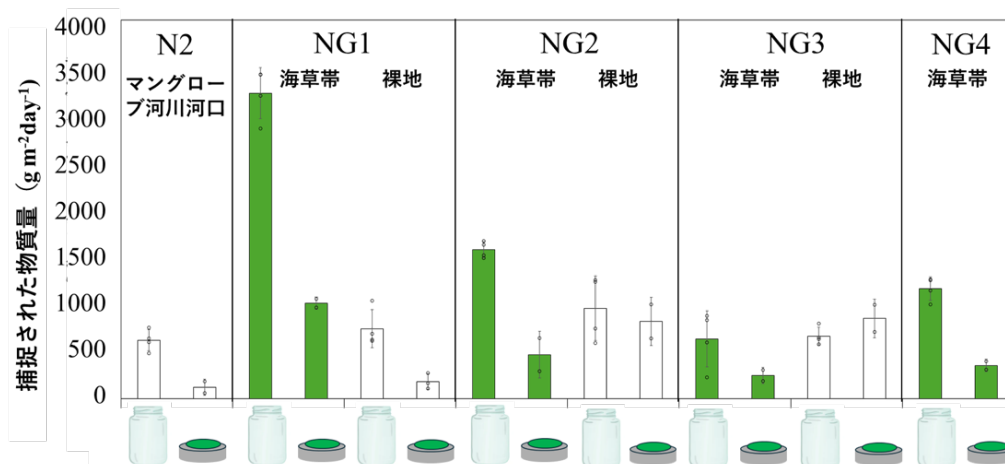


図19. 2023年12月の荒天海況時のオギワルサンゴ礁の海草帯、裸地におけるセディメントトラップ（ガラスビンのシンボル）およびTurfpod（付着藻類を模した人工芝を敷いたディスク；円形板のシンボル）での沈降粒子捕捉量。NG3では干潮時、一定時間トラップが干出している。

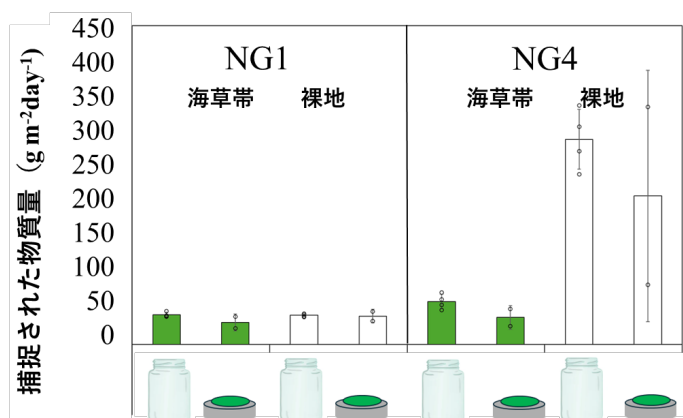


図20. (左) 2024年9月の静穏海況時のオギワルサンゴ礁の海草帯、裸地における、セディメントトラップおよびTurfpodでの沈降粒子捕捉量。シンボルは図19と同じ。

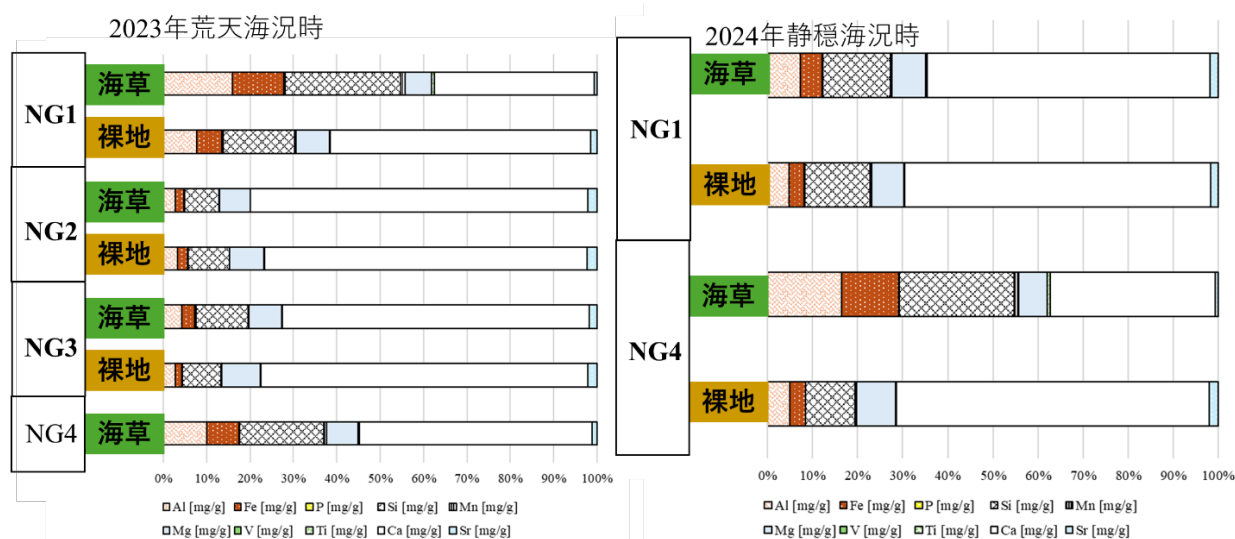


図21. (上) 2023年12月の荒天海況時と2024年9月の静穏海況時において、パラオ共和国のオギワルサンゴ礁に設置されたセディメントトラップに捕捉された粒子の元素組成。茶色の部分が鉄分を示し、海草藻場内の捕集物の方が鉄分が多いことが分かる。

同様のセディメントトラップを利用した現場実験は、パラオ共和国オギワル地区の大型海草藻場（ウミショウブ *Enhalus acoroides* 群落）においても2023、24年度に実施された（成果24, 26, 39, 41）。その結果、大型海草藻場は、特に気象条件のために海況が荒れている場合でも堆積物を安定化させる効果が顕著に現れるという特徴があることが判明した（図19, 20）。またオギワルの事例において、海草によって捕集される土砂粒子には鉄分が多く含まれていたことから、土砂捕集機能は海草自身にとっても必須元素である鉄や他の微量元素の供給源として役に立っていることが示唆された（図21）。

以上の結果からは、海草藻場は堆積物を捕集し安定化させることによって、沖合に生息するサンゴ群落への赤土の流入を防ぐ効果、藻場内の堆積地形を安定化させる効果、および藻場堆積物中に貯留されているブルーカーボンを保持し続ける効果があることが実証された。

マングローブにおいては、本研究に先立つ事業の中で計測されたマングローブ内での水流動に関するモニタリング結果に基づき、マングローブの物理的な乱流抑制効果による堆積促進機能に関する一般的なモデル化がサブテーマ3によって実施されている（成果3, 8, 47；図22）。上記のオギワル地区では海草藻場の陸側に大規模なマングローブが発達しており、陸域から流入する土砂の大部分はマングローブで捕集されていると推定される。マングローブから二次的に流出する粒径の細かい土壌粒子がさらに海草藻場に捕集されていることが明らかになったが（図23）、時間的制約から、マングローブ自体による土砂捕集機能を実証するデータをオギワルの現場で取得することはできず、今後の課題として残された。

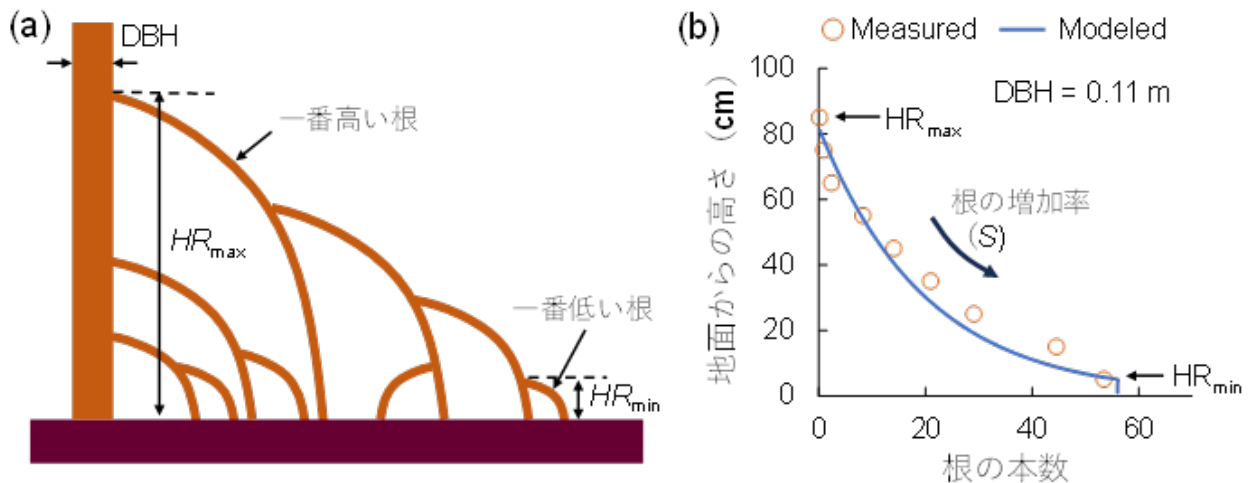


図22. (a) マングローブ支柱根系の模式図、(b) 支柱根本数の鉛直分布のモデル予測値と実測値の比較。ここでは吹通川マングローブの胸高直径0.11mの個体を例として挙げている。(成果8)

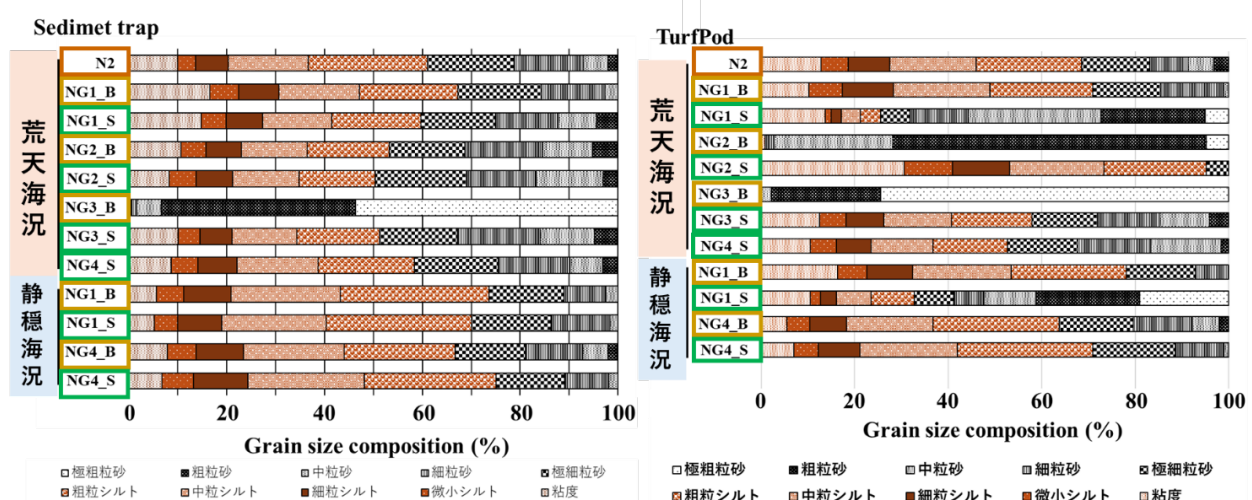


図23. 2023年12月の荒天海況時と2024年9月の静穏海況時において、パラオ共和国のオギワルサンゴ礁に設置されたセディメントトラップ (a) およびTurfPod (b) に捕捉された粒子の粒度組成。図中のSが海草藻場内、Bが同一地点の藻場外の裸地を示す。

③堆積物への炭素と生元素の貯留機能の実証に関しては、研究代表者は一般的なブルーカーボン貯留機能については本研究の開始直前に概括的な実証研究を発表しており (Miyajima et al. 2021)、またサンゴ礁の海草藻場堆積物が窒素やリン等の生元素のストックとして機能していることもより早い段階で示唆している (Miyajima et al. 1998, 2001)。このため本研究では、堆積物中への生元素貯留に関係するより詳細なメカニズム、特にその動態を支配する加水分解酵素の活性分布特性に関する現地調査を備瀬の海草藻場において実施した (成果18；図8)。この研究の成果は、デトリタス性有機物を選択的に分解することによってサンゴや海草に再生栄養塩を供給する場としての海草藻場堆積物の機能に新たな光を当てている (図24)。

また当初計画には含まれていなかったことであるが、研究開始時点頃から石垣島の調査地において中型海草種に対するウミガメの食害が活発化し、研究期間中に海草藻場が消失するという事態に至ったことから、食害による急速な海草藻場の消失が堆積物の組成に及ぼす影響、また食害後の海草の回復過程についても簡単な調査を開始している。本報告書の執筆時点ではまだ試料分析中の段階であるため具体的な結果を示せないが、堆積物の粒度組成に関しては、食害によって藻場がほぼ消失してから1年程度が経過した堆積物では粒子の粗粒化が進む傾向にあることが示唆されている。一般にほかの条件が同一の堆積物であれば粒径分布が粗粒化するほど有機炭素含有量が低くなるため、上記の結果は食害後の時間の経過とともに堆積物中に貯留されていたブルーカーボンが失われていくことを示唆している。また地上部のみが食害を受けた場合に残された地下部から地上部が再成長する速度を模擬的な食害実験により調べたところ、周辺からの栄養塩供給の多い地域の方が回復が速い可能性があることが示唆された (図25)。

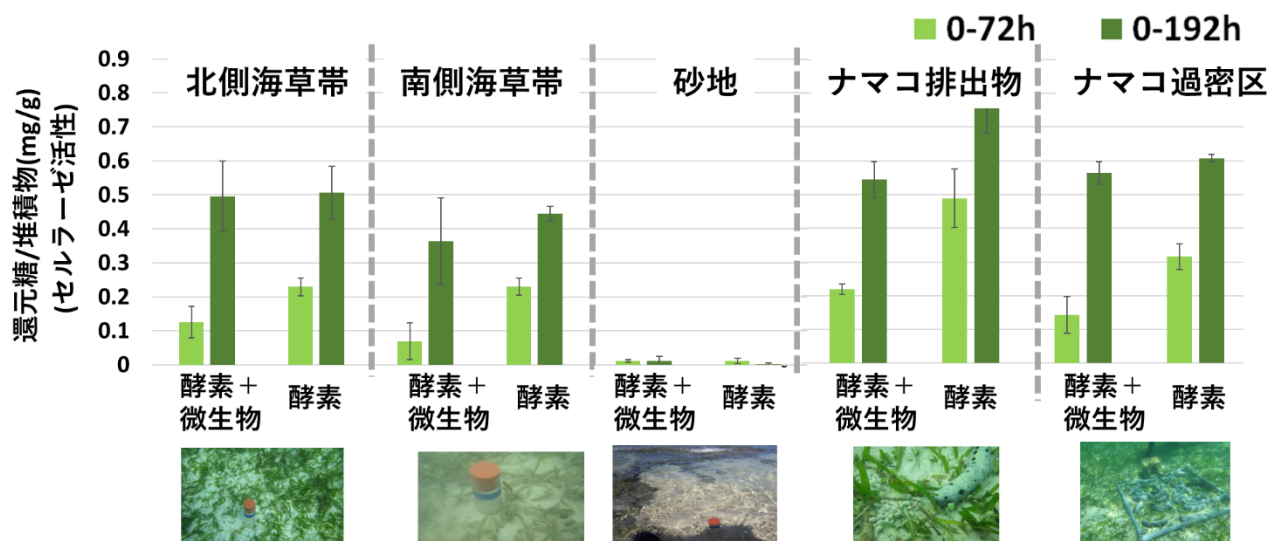


図24. (上) 沖縄島備瀬礁池内の各地点 (図8参照) の堆積物に基質 (カルボキシメチルセルロース) を添加した時の還元糖生成量として算出した堆積物での細胞外セルラーゼ活性。

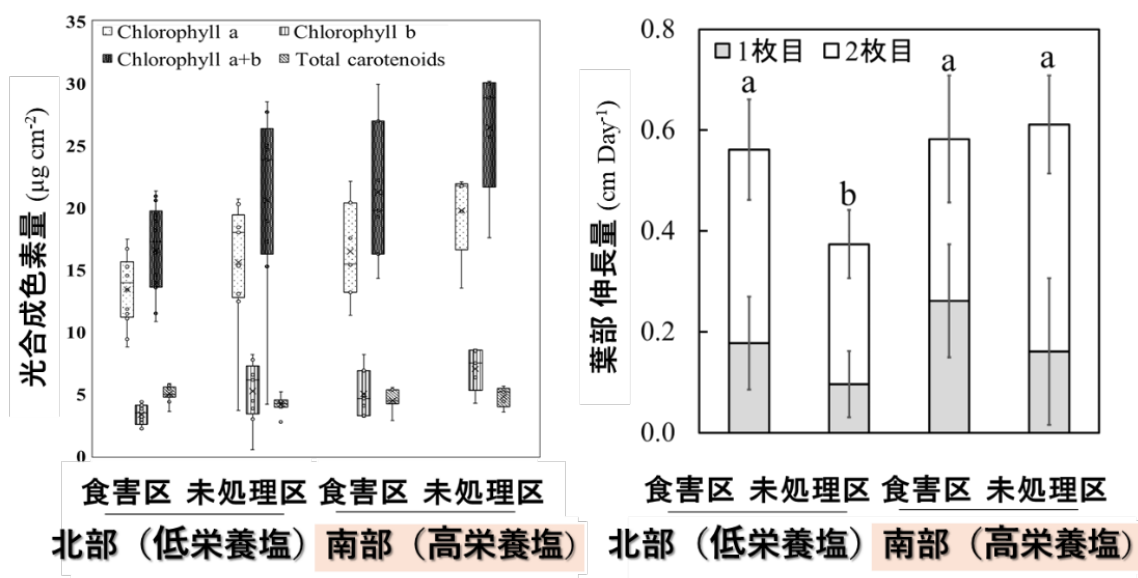


図25. 備瀬サンゴ礁の北部・南部に生息するリュウキュウスガモの窒素含量およびクロロフィルa濃度の比較。伸長量は、1枚の葉あたりの伸長量。食害区とは、アオウミガメの採餌を模して葉を切り取った試験区で、未処理とは、操作を行っていない自然の海草株を示す。

④局所的な海洋酸性化の緩和とアルカリ度の付加機能の実証に関しては、本研究ではサブテーマ2において実験水槽を利用した方法による検証が行われている (成果2)。サブテーマ1では、備瀬礁池やパラオなどの現場の海水、および①で述べた屋外水槽でのフラックス・チャンバー実験のチャンバー内海水に対して、アルカリ度の変動を実測した。一般に海草藻場では、地下部 (根と根茎、及び堆積物中の従属栄養生物) の呼吸活性のために堆積物に多量に含まれている炭酸カルシウムの溶解が進み、その結果として海水中のアルカリ度が上昇する場合が多い。フラックス・チャンバー実験では、少なくとも夜間の実験ではこの傾向は明確に実証されている。昼間の実験では海草に付着した生物による石灰化反応も或る程度進行するため、実験系によってはアルカリ度が低下する場合もあったが、平均としてアルカリ度は上昇傾向にあった (図26, 27)。アルカリ度が上昇すると、サンゴは石灰化による成長が促進される結果になる。したがって上記の実験結果は、海草藻場はアルカリ度生成を通してポテンシャルとしてはサンゴの健康状態の改善に貢献していることを示している。ただし現場での観測においては、地下水経由でのアルカリ度の供給もあるため、それと切り分けて海草藻場の生態系機能を定量的に評価することは困難であった。

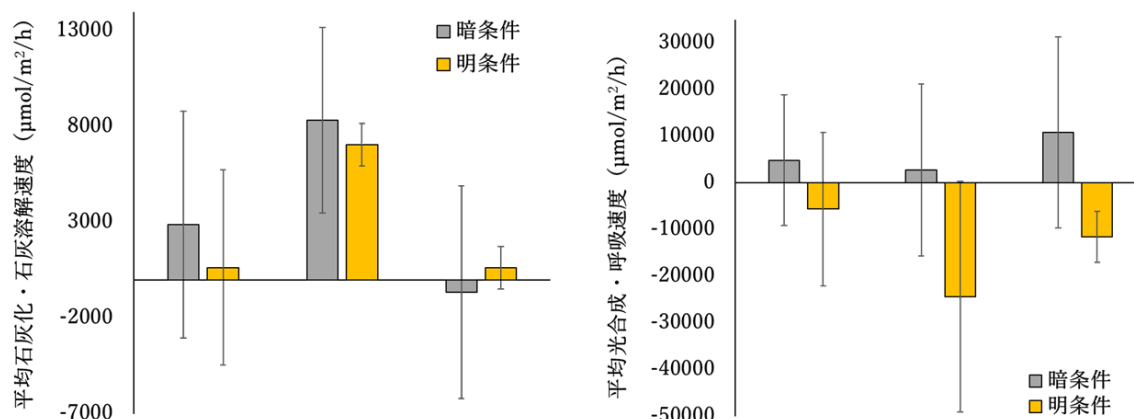


図26. 沖縄島備瀬礁池において行われた現場チャンバー実験（図4参照）において観測されたチャンバー底面積当たりの平均石灰化・炭酸溶解速度（左；正の値は溶解、負の値は石灰化を示す）および平均光合成・呼吸速度（右；正の値は呼吸、負の値は光合成を示す）。それぞれのグラフにおいて左が南部、中が中央部、右が北部の海草藻場の観測結果を示す。

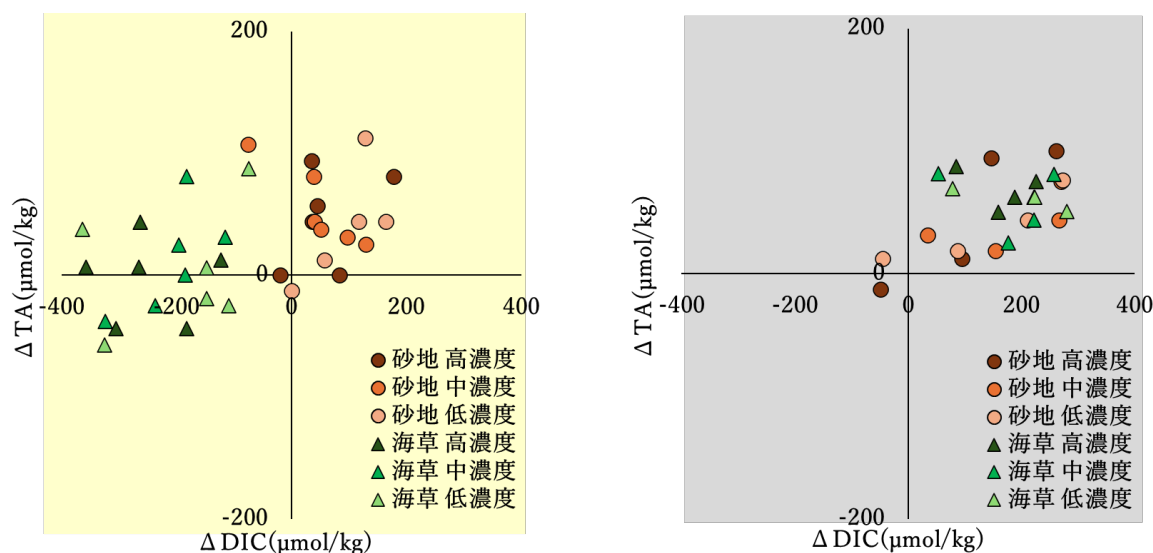


図27. 琉球大学瀬底実験所に設置された屋外水槽チャンバー（図5；備瀬礁池から採集された海草と堆積物を使用）を用いた、図中に示した各条件での実験における水柱のTAとDICのフラックス計測値。左は昼間、右は夜間のデータで、6時間の実験期間中の濃度変化幅をプロットしている。

一方、別プロジェクトに携わる研究者との連携研究として、石垣島伊土名地区のマングローブ-海草藻場-サンゴ礁複合生態系において海水中的アルカリ度と二酸化炭素分圧の動態が調査された（成果10, 27）。その結果は、マングローブは土壌中の呼吸と有機物分解のために二酸化炭素を常時放出しており、周辺の海水を酸性化する作用があることを示していた。これは、先行研究からも予想される結果であった。それに対して海草藻場は少なくとも昼間の間は二酸化炭素を活発に吸収することによって、マングローブから負荷される海洋酸性化を局所的に緩和し、その影響はサンゴの生息域にまで及ぶことが、海水中二酸化炭素分圧（ pCO_2 ）のデータから示されている。アルカリ度に関しては、マングローブ土壌中での硫酸還元反応の結果として、マングローブから周辺海域に多量のアルカリ度が溶出する結果となっており（成果27）、これはマングローブによる局所的な海洋酸性化（ pCO_2 の上昇）によるサンゴへのダメージを相殺している可能性がある。

このようにマングローブからの二酸化炭素とアルカリ度の流出の結果、正味としてサンゴ礁の生育環境を悪化させているのか改善させているのかの判断には議論の余地がある。マングローブからの二酸化炭素と

懸濁物の流出のため、少なくともマングローブとサンゴが同所的に共存することは難しいと考えられる。しかし沖合に生息するサンゴにまでマングローブによる海洋酸性化の悪影響が及んでいるという明確な証拠はなく、むしろ両者の間に介在する海草藻場の効果により酸性化影響は少なくとも部分的に相殺されている。また並行する別事業において行われた堆積物中の環境DNAに着目した研究によれば、海草藻場はマングローブから流出する粒子状有機物を効果的に捕獲して堆積物中に貯留する機能があることが分かっており、このこともまた海草藻場の緩衝効果の一つの形態とみなすことができる（環境DNAの利用に関する技術的評価については成果7参照）。

最後に⑤外来性の有害微生物に対する除去抑制機能に関しては、上記の各サイトにおいて海草藻場・マングローブ内外の海水を採水してDNAメタバーコーディング法により微生物群集の組成比較を行っている。またサブテーマ2ではパラオのサイトにおいて海草藻場内外の表層堆積物を採集してその微生物群集比較を試みている。

より直接的な実証として、室内実験系において石垣島白保の海草藻場から採集された海草を飼育して、海水中の微生物相に現れる変化を1週間程度にわたって経時的に観察する実験を実施した（成果43）。少しずつ方法を変えて4回行った実験の結果によると、海草の存在によって海水中的のバクテリア群集組成は日単位で大きく変化すること、バクテリア群集は、海草の存在によって急速に消失する種と増殖が促進される種とに分けられること、その分類には再現性があること、増殖が促進される種は使用する海草の種類に依存するが、急速に消失する種は海草の種類によらないことが判明している。特に、マングローブ土壌と海草の水槽を連結した実験系（図28）における観察結果からは、マングローブ土壌から溶出するバクテリアが海草の存在によって効果的に除去されることが観察された（図29、30）。またこのようなバクテリア群集の急速な交代には、繊毛虫のような従属栄養性原生生物による捕食が寄与していることが示唆された（図31）。海草の組織や海草が放出する溶存有機物を利用して増殖することができない外来性のバクテリアは、このメカニズムにより速やかに海水中から消失してしまうものと推測される。このように、海草藻場には海水中的の微生物群集を、海草藻場の環境に適応している群集に数日間のうちに変換してしまう効果があることが示唆され、結果的に病原菌や食中毒菌のような有害微生物が除去されるものと予想される。ただ海草藻場による微生物群集の交代が完了するには日単位の時間がかかることから、この機能が現場においてどの程度顕在化しているかは、現場における海水の交換時間等の物理因子によって規定されているものと考えられる。

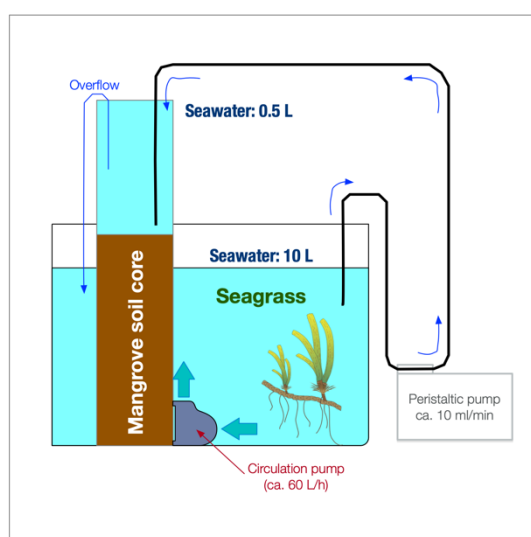
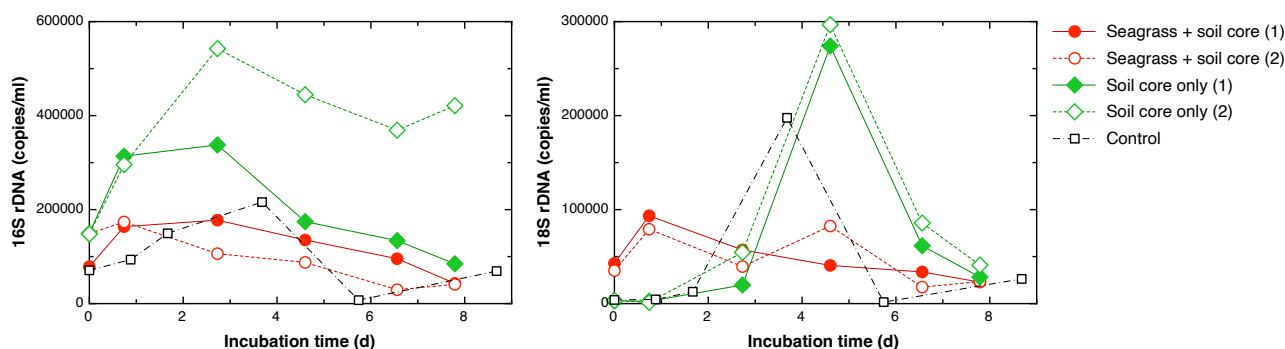


図28. （左）海草とマングローブ土壌コアを組み合わせた飼育実験系。マングローブ土壌内で生育する土壌微生物が外側の水槽に絶えず流入している。外側の水槽に海草を入れるかどうかで、水槽内の微生物相がどのような影響を受けるかを経時的にモニタリングした。

図29. （下）実験期間中の飼育海水中の16S rDNA（a：原核生物に対応）、18S rDNA（b：真核生物に対応）の総コピー濃度の日変化。赤色が海草+マングローブ土壌コアの系、緑色がマングローブ土壌コアのみの系、黒はどちらも含まない対照区。



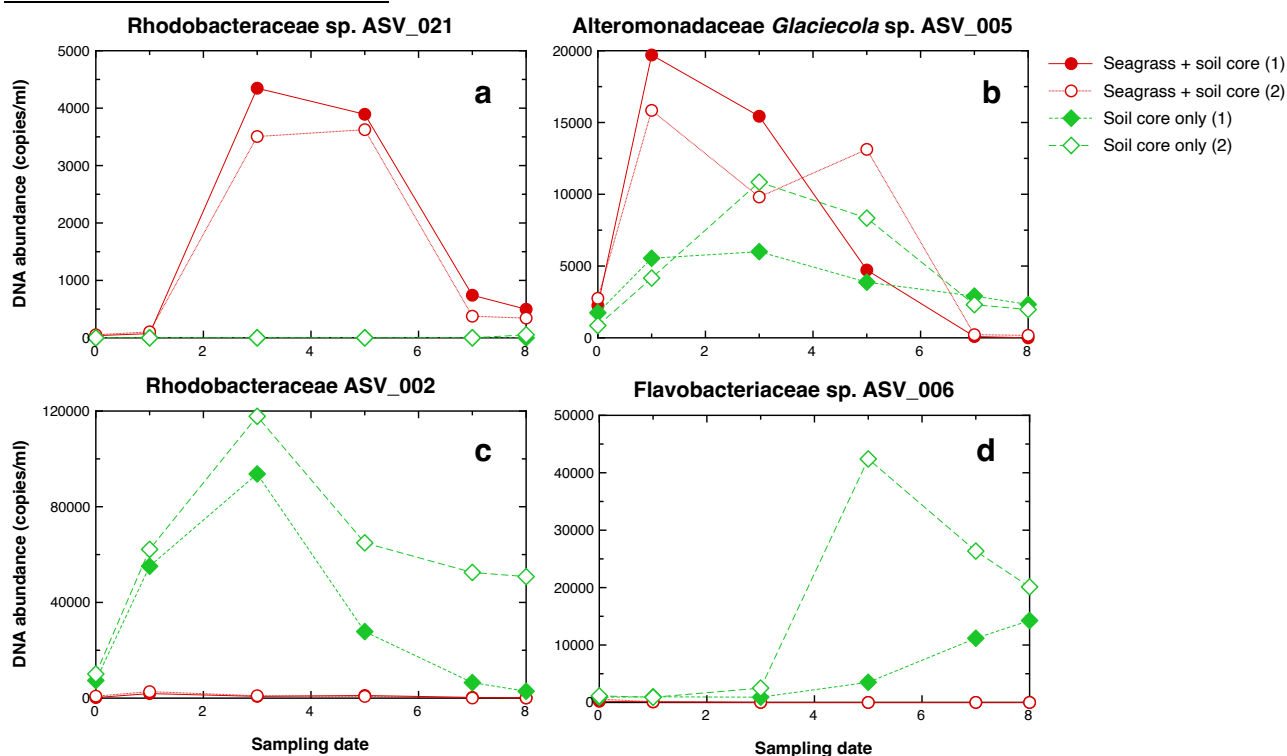


図30. (上)スクリーニングされた主要なバクテリア種のうち4種に帰属するDNAの濃度の経時変化を実験系別に示したもの（ただし対照区は省略した）。

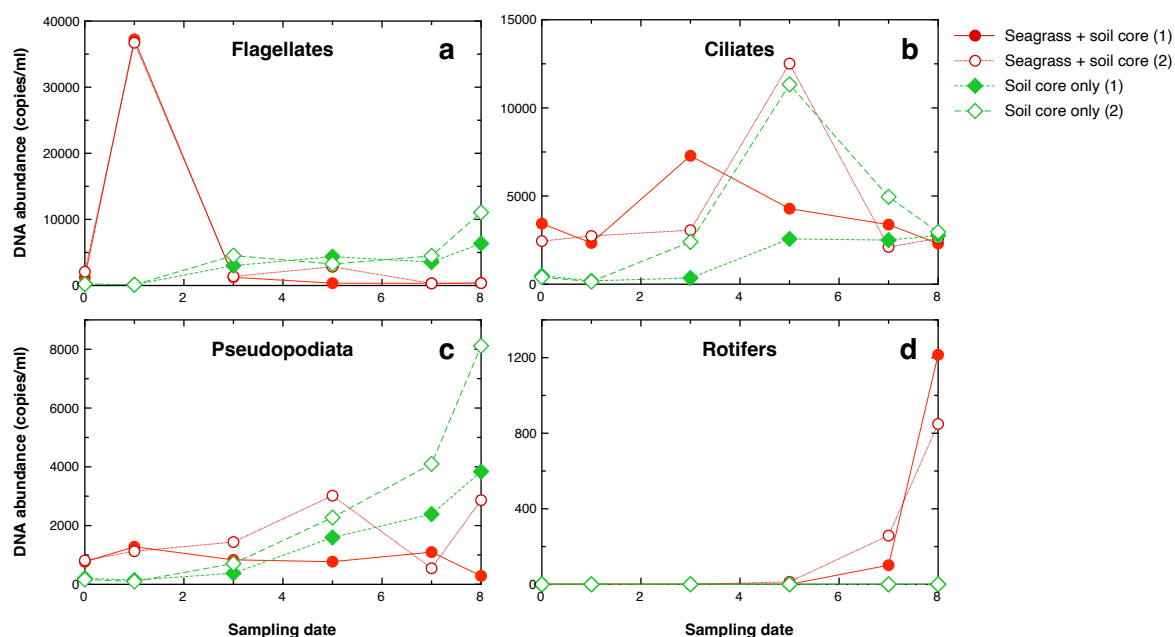


図31. 18S rRNAアンプリコンシーケンシングによるDNA配列のうち、従属栄養性の鞭毛虫(a)、繊毛虫(b)、仮足虫類（アメーバ類、c）に属すると推定されるものの出現濃度の日変化。またdにはこれらの原生生物の捕食者となるワムシ類の出現状況を示した。

サブテーマ 2

緩衝植生帯構成植物とサンゴとの影響関係を直接的に解明するため、**室内流水水槽を用いた飼育実験**を実施した。流水水槽の内部を二つの区画に仕切ったタンデム連結水槽を構築した（図11）。このような飼育システムを2組用意し、一方には通常の海水（平均pH 8.3）を、他方には二酸化炭素を通気して酸性化した海水（平均pH 7.9）を常時流すようにした。この実験の目的は、直接的には、植生帯植物が光合成によって海水中の二酸化炭素分圧を下げることによってpHを高め、サンゴの骨格生長速度が高まることを検証することであるが、また同時に、植生帯植物とサンゴとが近接して存在することによるサンゴに対する副次的な負の影響が現れないかどうかを検証する目的もあった。このため、連結水槽の上流側には植生帯植物を、下流側にはサンゴを入れて飼育を継続し、サンゴ水槽内の海水の水質とサンゴの生理状態及び成長速度を精密にモニタリングした（成果2）。サンゴとしては沖縄島の備瀬サンゴ礁から採集されたエダコモンサンゴ

（*Montipora digitata*）を使用し、植生帯植物の水槽には褐藻のモズク（*Nemacystus decipiens*）または海草のリウキュウスガモ（*Thalassia hemprichii*）を入れた場合と何も入れない場合とを用意した。

モズクとリウキュウスガモのいずれを用いた場合でも、植物を入れた場合では何も入れない場合に比べてサンゴ水槽中のpHの日変動幅が大きく増大したが（図32：モズクの場合の例）、日平均値としては植物を入れた場合の方がpHは高くなった。通常海水の場合でも酸性化海水の場合でも同様の効果が見られた。したがってサンゴの骨格成長速度も植物を入れた場合の方が高くなると期待されたが、実際にはそれほど単純ではなかった。モズクの実験では、モズクを入れた場合よりも何も入れない場合の方がサンゴの成長がむしろわずかに高くなった（成果2；図33）。またリウキュウスガモの実験では投入した海草の密度に依存していたものの、海草を入れると何も入れない場合よりも成長がわずかに悪くなる場合が見られた（図34）。この結果は、植生帯植物には海洋酸性化を緩和する作用は明確に認められるものの、何らかのメカニズムにより植物がサンゴの成長を制約する効果があるために、両者が近接して生育する連結水槽のような条件下では酸性化緩和によるサンゴの成長促進効果が必ずしも現れないことを意味している。考えられる要因としては、植物もサンゴも共に光合成を行う生物であるため、光合成基質となる溶存無機炭素に関して両者は競合関係にあるという事実を考慮する必要がある。ただし連結水槽実験では、植物の存在によりサンゴの成長速度は若干抑制されることがあるとしても、なお正に保たれており、サンゴが成長阻害を受けるほどの植物の悪影響は認められない。また備瀬礁池の場合では実際にサンゴと海草が混生している海域もある（図1）。

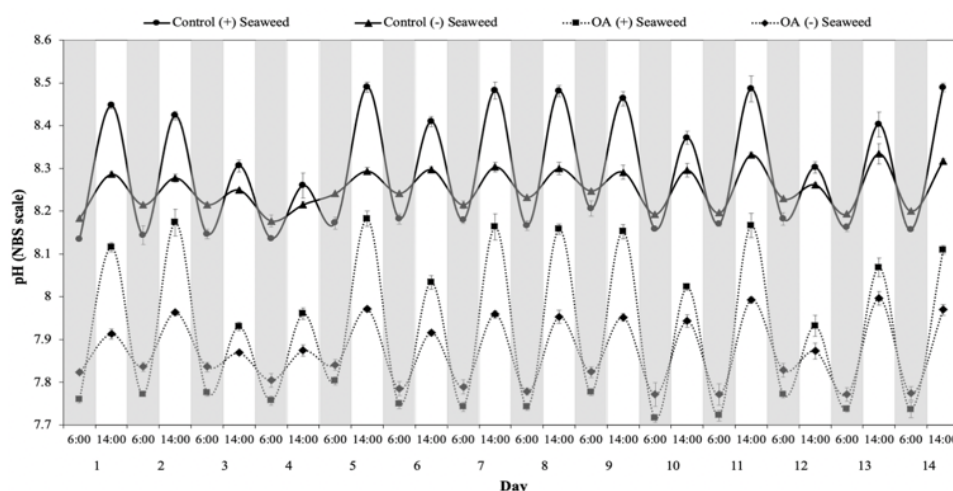


図32. モズクを使用した連結水槽実験におけるサンゴ居住区の実験期間中のpH変動。濃いラインは対照区、薄いラインは酸性化区でデータで、いずれも振幅の大きな変動を示しているのがモズクを入れた場合の例。

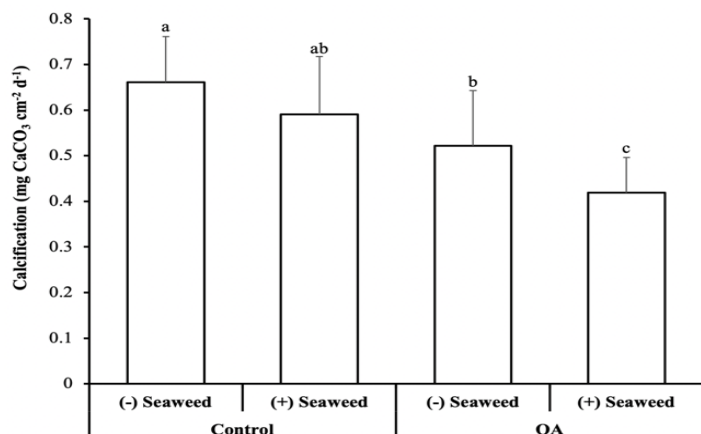


図33. サンゴをモズク有り（+ Seaweed）と無し（- Seaweed）かつ対象（Control）および酸性化（OA）環境下で飼育した際のサンゴの石灰化速度。

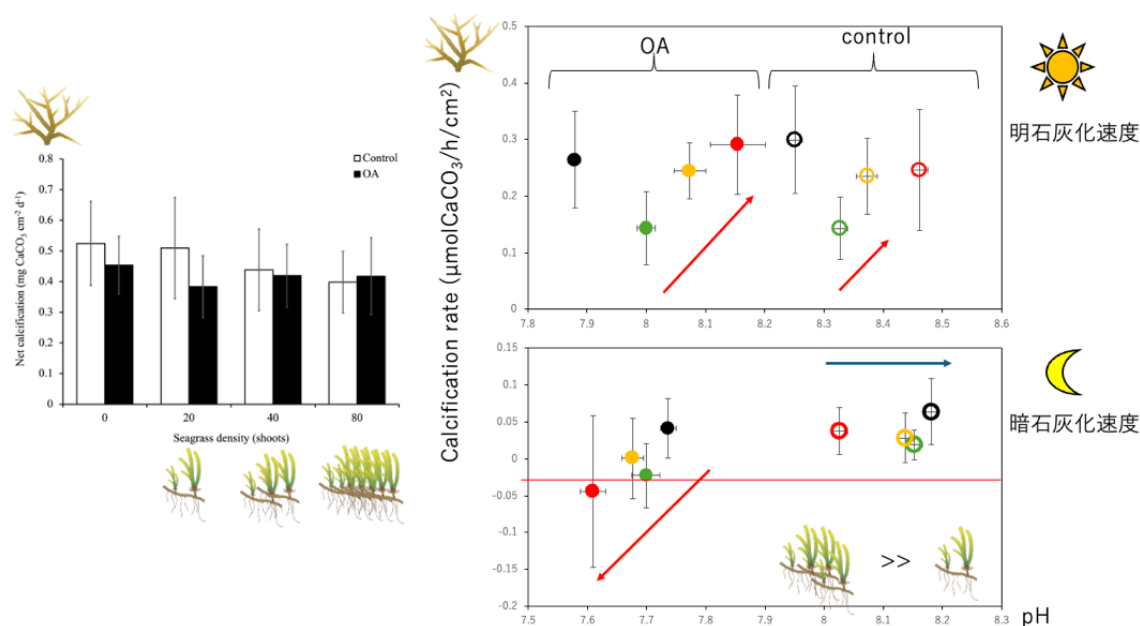


図34. リュウキュウスガモを用いた連結水槽実験の結果。(a) 対象区および酸性化区での異なる4つの海草密度水槽(赤:40株, 黄色:20株, 緑:10株, 黒:0株)の下流におけるサンゴの石灰化速度。(b) 対象区および酸性化区での異なる4つの海草密度水槽の下流におけるサンゴの明石灰化速度および暗石灰化速度。

次に、植生帯植物とサンゴとの影響関係を現場で直接検証することを目的とする**現場移植実験**を企画した。実験方法は、備瀬礁池内で採集されたエダコモンサンゴの生体断片を基盤上に接着したものを多数用意し、二つのグループに分け、一方を密生したリュウキュウスガモの藻場内に、他方を藻場の外に設置して、成長量(水中重量変化)を継続的に記録し、藻場内に設置したサンゴ断片の方が高い成長速度を示すかどうかを確認するというものである。しかしながら実験開始後に調査地が強い海洋熱波に見舞われ、移植したサンゴ断片が全て白化してしまったため、目的の結果を得ることができなかった。

このように現場実験ではその経過が偶発的な気象条件等に左右されて明瞭な結果が得られないリスクが高いことから、研究開始時点での計画にはなかったことであるが、**多重環境制御システムを備えた室内飼育装置**を新たに構築して植生帯植物による環境制御効果とサンゴに対する環境影響評価とを室内計測により独立に検証するという作業を追加した(サブテーマ3との共同作業)。研究期間の途中から新たに企画された実験であるため、まだ装置の性能を確認しながら試験的に実験を進めている段階ではあるが、これまでに以下の2種類の実験を行っている。

第一の実験は、海草が海水中の栄養塩を吸収することで海水中の栄養塩環境を制御する効果を定量的に評価することを目的としており、このために**海草の地上部と地下部の栄養塩吸収/放出速度を別々に計測できるように上下に二分割された飼育瓶**を設計した(Hasegawa et al. 2005; 図35)。このような飼育瓶に、備瀬の海草藻場で採集されたリュウキュウスガモまたはウミジグサ(*Halodule uninervis*)を1株ずつ入れ、さらに栄養塩濃度を目的の値に調整した海水を詰めて、恒温の明暗両条件で一定期間飼育し、飼育期間中の飼育瓶中の栄養塩濃度の変化量を記録した。記録された濃度変化と飼育瓶の容積とから地上部と地下部のそれぞれの1株あたりの栄養塩吸収速度を計算して、初期濃度に対してプロットした。吸収速度と濃度との関係からMichaelis-Menten型の近似式を導き、**栄養塩の種類ごとに地上部・地下部それぞれに対して半飽和濃度と1株あたりの最大吸収速度を算出した**(成果46; 図36; サブテーマ3の項も参照)。得られた結果は、海草藻場を含むサンゴ礁池の生態系モデルを構築するためのパラメータとして用いられ(成果44)、また別途提出されている政策決定者向けサマリーの作成にも利用されている。

第二の実験は、**高水温条件に対するサンゴの耐性が環境水中の栄養塩濃度の影響を受けるかどうか**、具体的には、高い栄養塩濃度が高水温時のサンゴの白化現象を誘発・促進するかどうかを検証するために企画された。対照区の外にNO₃⁻やPO₄³⁻を添加して富栄養化させた水槽を用意し、サンゴを投入して高水温(32℃)に維持した状態で様々な強度の光を照射して光合成系の応答をPAMにより観察している。サンゴとしてはコユビミドリイシ(*Acropora digitifera*)とユビエダハマサンゴ(*Porites cylindrica*)を用いた。これまでに比較的短時間(3時間)の光照射に対する応答を観察したが、このような条件においては光阻害の強度についても回復過程についても栄養塩添加の影響は有意には認められなかった。

サブテーマ2では以上のような実験的研究とは別に、現地調査による海草分布に関する基礎情報の収集

を行っている。第一に、本研究課題における主要調査サイトである沖縄島の備瀬と石垣島の白保において、調査時点における**海草の種別分布密度を決定するためのトランセクト調査**を実施した（図1, 37）。また備瀬では地下水流入による栄養塩負荷状況を把握するため、**海水中の栄養塩濃度分布調査と安定同位体比指標解析のための海草の面的サンプリング**を実施している（図15）。特に備瀬におけるデータはこの礁池生態系の栄養塩負荷に対する環境収容力を向上させるために海草藻場がどの程度貢献しているかを解明する、事例研究のための基礎資料として用いられた。また白保における分布調査は、この海域の海草藻場がウミガメによる激しい食害によって失われていく初期段階で行われており、食害に対する海草側の応答、特に成長の速いパイオニア種の分布拡大の様相を記載した貴重な記録となっている（図37）。またパラオ共和国においては、健全な海草藻場が広域に分布していることを利用して、**海草の遺伝的多様性と生育状態（被度、種組成、安定同位体比等）の地域性を評価するための全国レベルのサンプリング調査**を実施した（図38）。対象とした海草はリュウキュウスガモとウミシヨウブである。得られた結果は、**海草藻場の重点保護区を設定するに当たっては、地域ごとの遺伝的多様度を考慮する必要があることを示唆している**。ちなみにパラオにおいてはウミガメの食害によって著しい損害を受けた海草藻場は見られない。

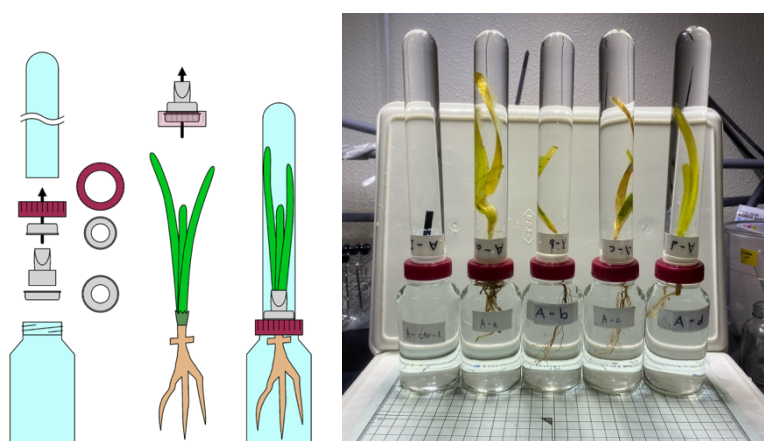


図35. 海草の葉および根がそれぞれ海水中から栄養塩を取り込む速度を評価するための培養実験装置。サブテーマ3により設計・作成された。

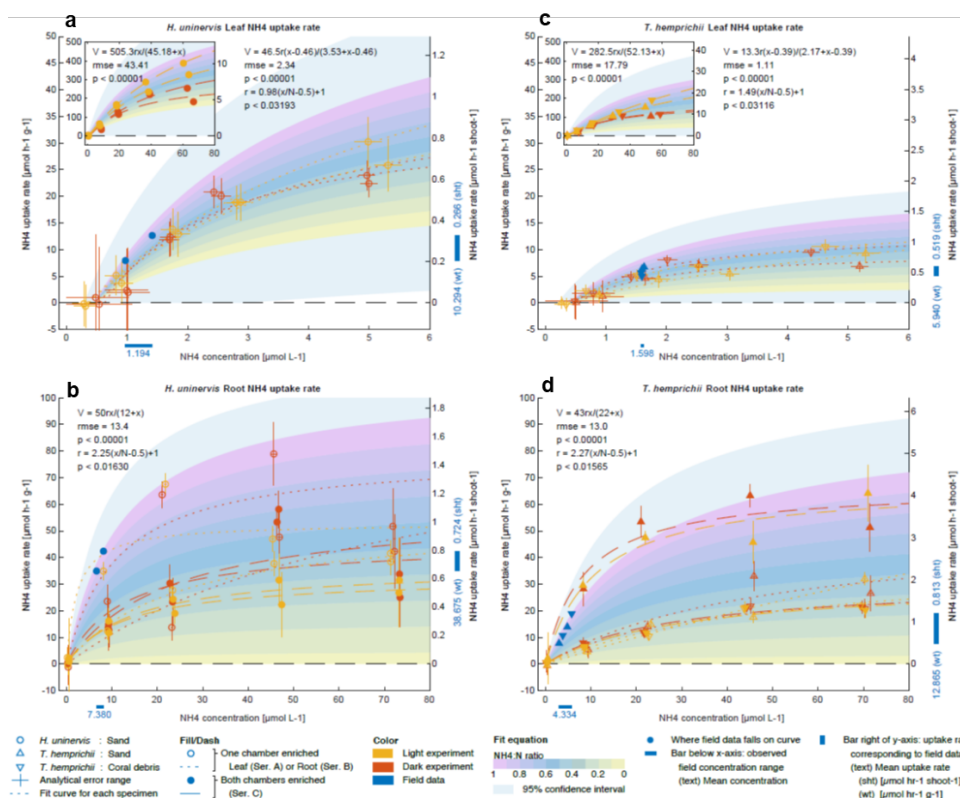


図36. 海草の NH_4 取り込み速度と NH_4 濃度との関係。*Halodule uninervis* の (a) 葉からの取り込み速度および (b) 根からの取り込み速度、*Thalassia hemprichii* の (c) 葉からの取り込み速度および (d) 根からの取り込み速度。同様の実験を NO_3^- および PO_4^{3-} の取込に関しても実施した。

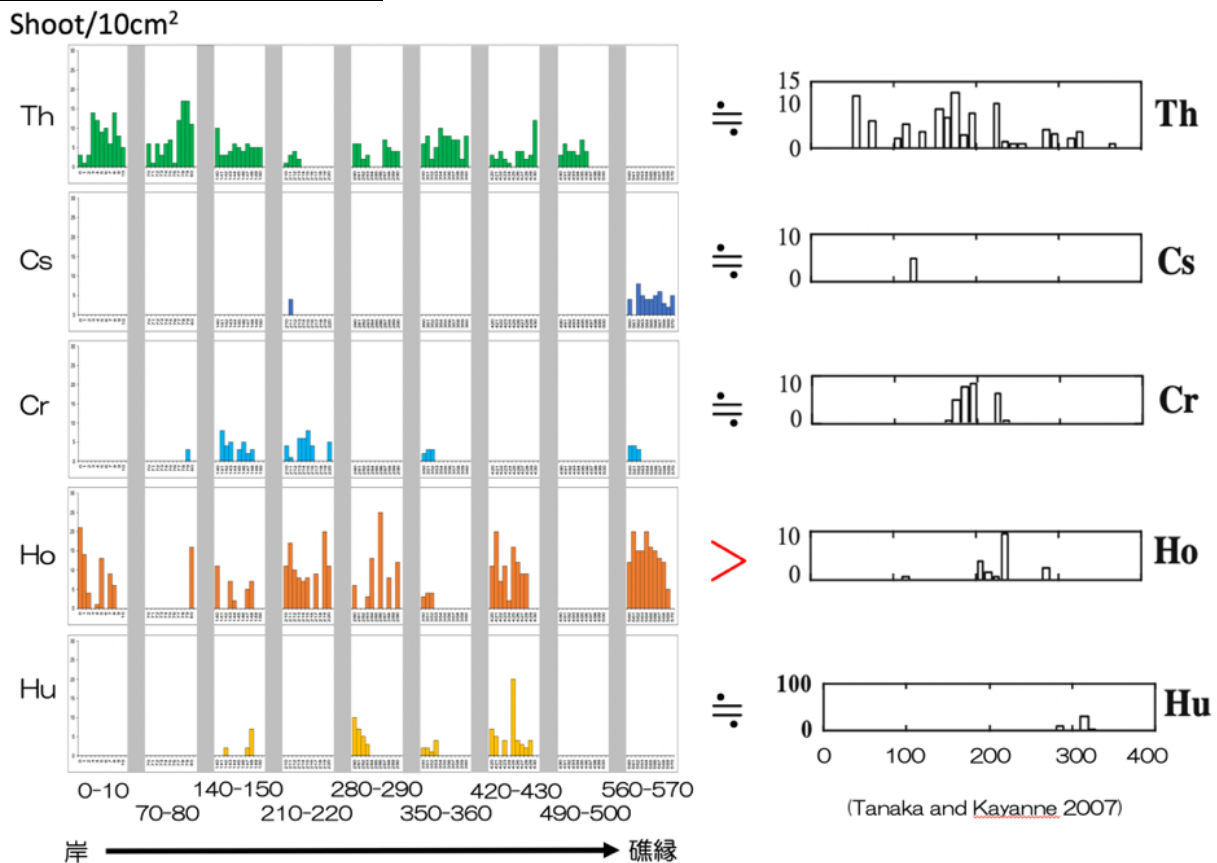


図37. 石垣島白保礁池における岸-沖方向トランセクトに沿った海草藻場の種組成および被度。トランセクトの設定は先行研究であるTanaka and Kayanne (2007) (右) に合わせた。両者を比較すると、中型種 (*Thalassia hemprichii* (Th), *Cymodocea serrulata* (Cs), *C. rotundata* (Cr)) に比べて小型種 (*Halophila ovalis* (Ho), *Halodule uninervis* (Hu)) が著しく増加しているが、これは最近のウミガメによる被害によって生じたギャップに小型種が侵入したためと推定される。

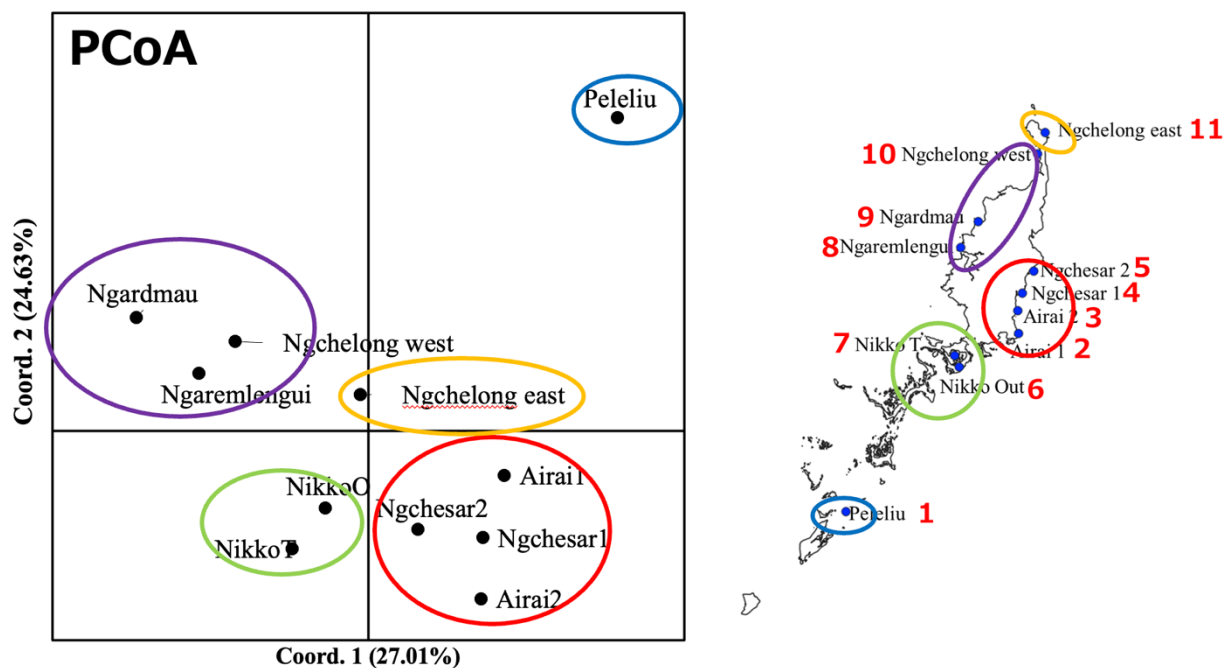
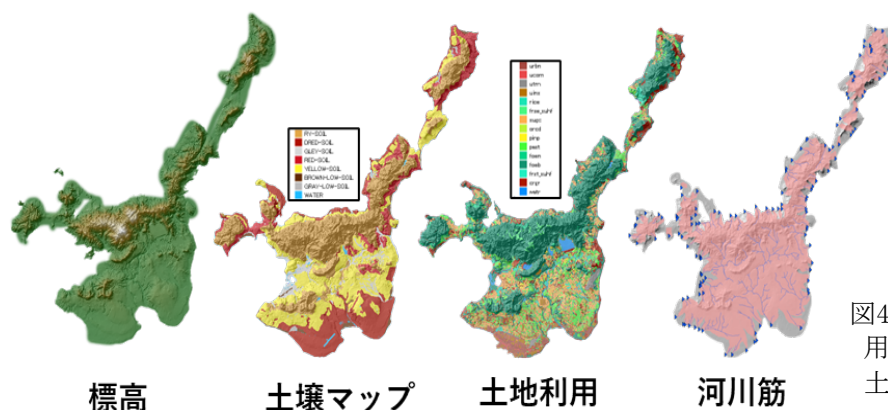
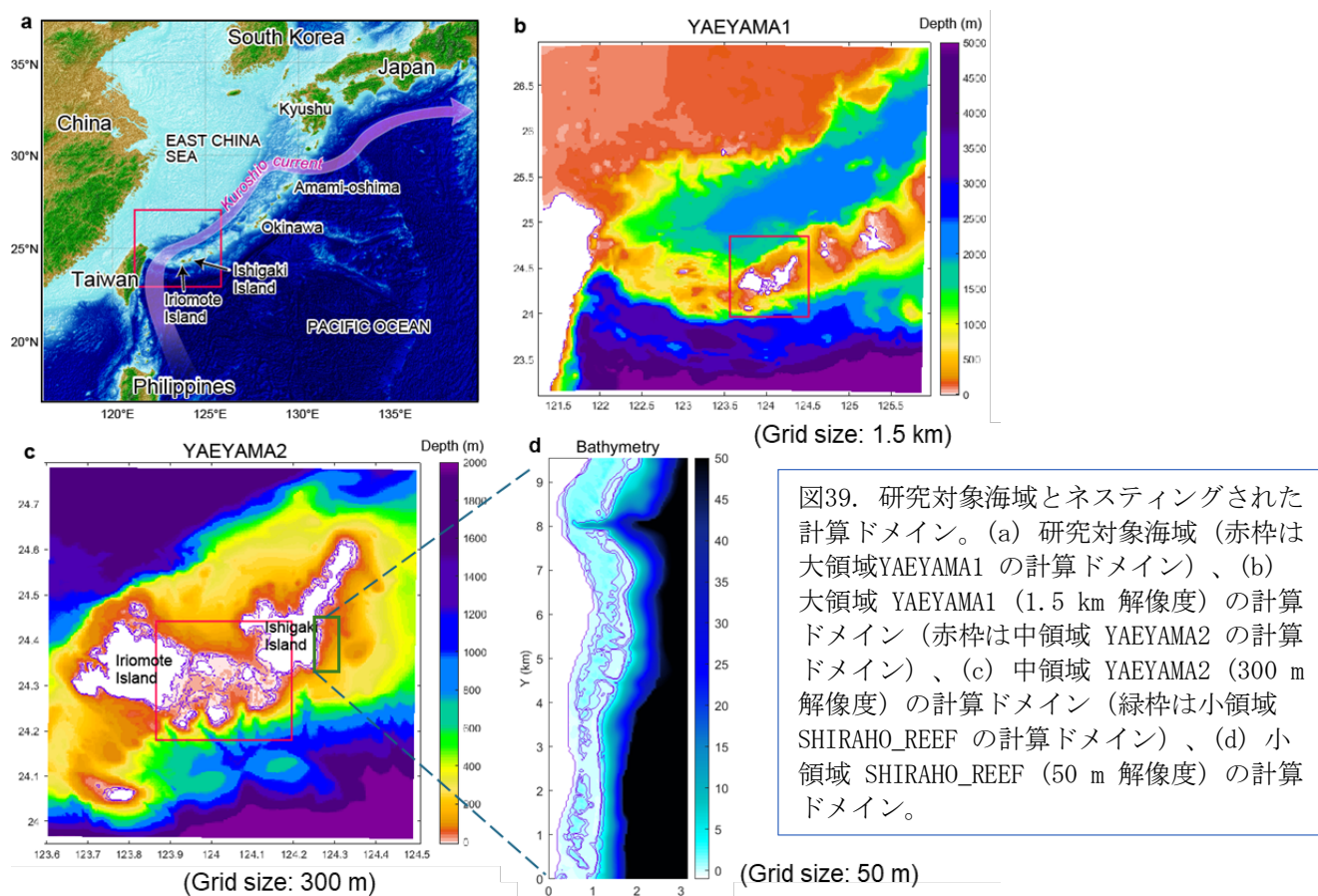


図38. パラオ沿岸の11地点の海草藻場にわたる種内遺伝的変異の地理的分布の解析。*Enhalus acoroides* の場合、PCoA解析 (左) により5種類の異なる遺伝集団があることが分かった (右は地理的分布)。同様の解析を*Thalassia hemprichii* についても実施している。

サブテーマ 3

現存するサンゴ礁生態系における緩衝植生帯（特に海草藻場と大型藻類群落）がサンゴ礁の維持にどの程度貢献しているかを時空間的に可視化するために、サンゴ礁域の流動場生態系モデルをベースとした3次元シミュレーション・モデルの構築を進めた（図13）。構想されていたモデルは複合的なものであり、礁池内の底生生物群集と浮遊生物群集の両方の代謝を記述する生態系物質循環モデルを中心とし、気象条件や外部からの海水流動・波浪の影響を記述するCOAWSTベースの物理環境モデル（図39）、及び陸域側からの人為起源を含む物質負荷を記述する流域負荷モデル（図40）をカップリングしたものが基体となっている（成果33, 44）。特に、浮遊生物群集の代謝モデルに関しては、本研究期間中に浮遊生物のサイズ分画別の現場培養実験を実施して新規にデータを取得するなどして大幅な精緻化を行った（成果35, 36；図12）。さらに、河川や地下水から負荷された栄養塩や懸濁物のサンゴ礁内での動きを時空間的に追跡できるように元素にラベルを付した追跡子を導入する機能を追加した。これにより、礁池内で陸域起源負荷物質を捕集又は除去している緩衝生態系の機能とその時空間分布を詳細に可視化できるようになった。この機能のため、このモデル（Marine CoMETと呼ばれる）は与えられたサンゴ礁生態系の保全・再生・再建のために、それをサポートする緩衝植生帯の配置をシミュレートし、緩衝植生帯の再生・拡大策を支援する政策提言を行うための有意義なツールとなる。



本研究課題における主要な事例研究対象サイト（沖縄島備瀬、石垣島白保および伊土名地区、パラオ共和国バベルダオブ島周辺の礁池群など）においてこのようなシミュレーション・モデルを整備する構想であったが、これまでにほぼ完成に近いレベルまで進んでいるのは石垣島白保地区のみである（図41, 42）。また石垣島伊土名地区とその外洋側にあたる名蔵湾・石西礁湖海域に関してもほぼ同等のモデルが作られており、石垣島周辺の気象・物理環境に関しては過去にさかのぼって正確な再現ができるようになっている（この機能はサブテーマ1において堆積物の動態を規定する物理営力を再現するために活用された：成果11）。しかし、これら以外のサイトに関しては、パラオの一部海域においては初期段階のモデル（成果45）ができているものの、流動場モデルの精緻化に必要な詳細な水深分布のデータの取得がまだ完了していない等の理由により、モデルの最終的な完成には至っていない。

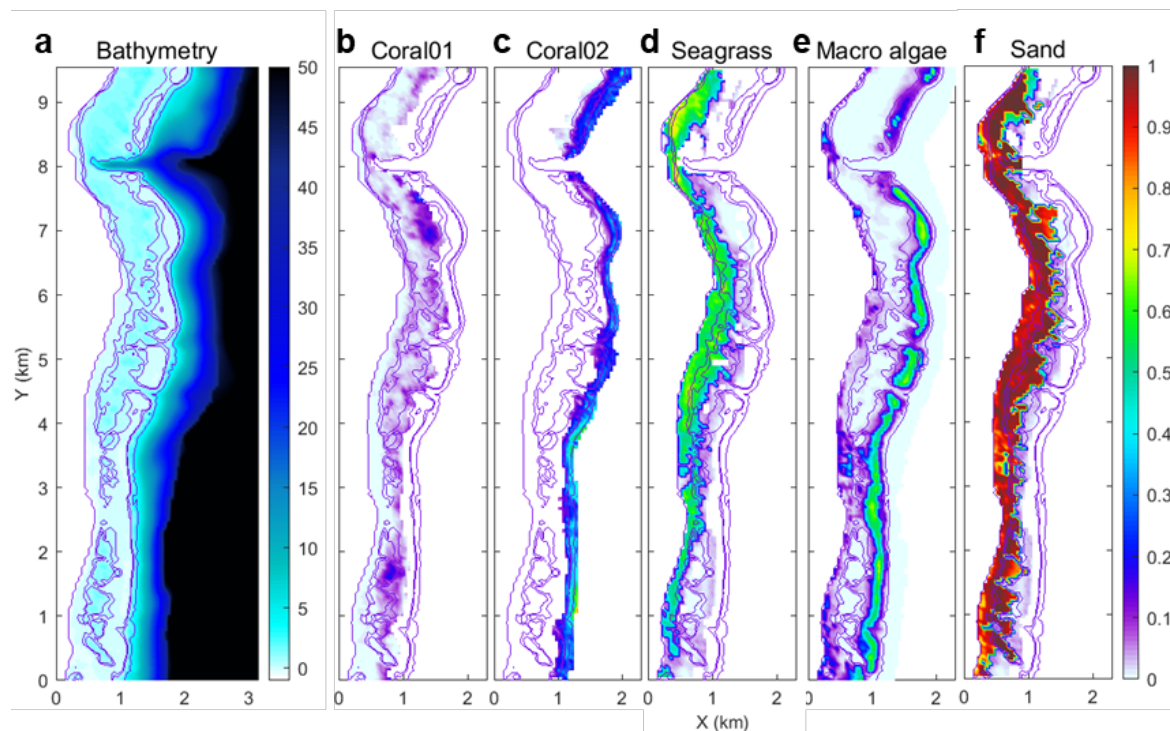


図41. (上) 計算に使用した SHIRAOH_REEF 計算領域（白保サンゴ礁域を含む石垣島東海岸で、図6と同一領域）の海底地形と海底被覆率マップ。(a) 海底地形、(b) 礁池内サンゴ群集被度、(c) 礁斜面サンゴ群集被度、(d) 海草被度、(e) 大型藻類被度、(f) 砂地。

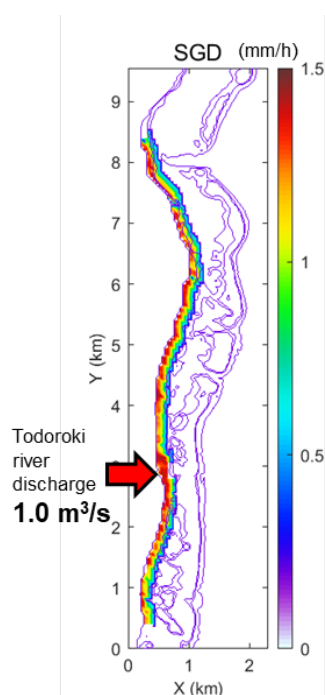


図42. (左) 淡水のポイントソースとしてインプットした河川の位置と海底湧水のマップ。表は使用した水質パラメーター一覧。

	Todoroki River	SGD
NO ₃ (μmol/L)	150	260
NH ₄ (μmol/L)	1.5	0.1
PO ₄ (μmol/L)	1.6	0.25
SS (kg/m ³)	0.1	0
DIC (μmol/kg)	3000	3400
TA (μmol/kg)	3000	3400

次に緩衝植生帯による個別の緩衝機能を可視化するモデル開発の試みについて述べる。これらは上記の複合生態系モデルの要素モデルとしても用いられている。

サブテーマ1の研究内容で述べた緩衝植生帯の5種類の緩衝効果のうち、①**栄養塩吸収による過剰な栄養塩の除去機能**をモデルに組み込むためには、植生帯構成植物の個体レベルでの栄養塩吸収特性をモデル化する必要がある。また緩衝植生帯の機能による水質の改善がサンゴの生理や成長に及ぼす効果をモデル化するために、サンゴの個体（群体）レベルでの生理特性のモデル化が必要になる。これらの要請に応えるために、サブテーマ3では内部モデルと呼ばれる、海草やサンゴの個体レベルでの物質代謝モデルの構築を進めた（図43a）。またこれらのモデルに必要な代謝パラメータを決定するため、サブテーマ2の研究結果として既に紹介したように、新規に開発された環境制御システムを備えた室内飼育設備を利用して、海草やサンゴの代謝測定と環境応答評価を目的とする飼育実験を実施した（図35、36）。

緩衝植生帯、特に海草藻場とマングローブによる②**濁質の捕集と堆積物の安定化の機能**をモデル化するために、3次元流動場モデルに植生抵抗の要素を導入する作業を行った。このうちマングローブに関しては、本研究開始以前に実施された別の研究プロジェクトの中で取得されている、石垣島伊土名地区とフィリピン・パナイ島のマングローブにおいて得られている植生分布と流動場の観測データ（Yoshikai et al. 2022）をベースとして、支持根型のマングローブ（*Rhizophora* spp.）の植生抵抗による堆積促進・再懸濁抑制効果を数値モデル化するとともに、パナイ島東部における植林されたマングローブによる河川由来土砂の捕集効果をモデルによって再現することに成功した（成果3, 8, 47；図22, 44）。一方、海草藻場の植生抵抗による堆積促進・再懸濁抑制効果のモデルに関しては既に多くの先行研究があるが、本研究では特に石垣島白保海域に流入する轟川（図6参照）からの土砂（赤土）流入を礁池の海草藻場が捕集する過程を時空間的に精密に再現できるモデルの構築を目指した（図45）。これは、沖縄県各地のサンゴ礁において、土地開発に起因する赤土の流入によるサンゴ礁の衰退が大きな社会問題となっているためである。このモデル化にあたっては、サブテーマ1によって白保海域で取得されている沈降粒子束のデータが校正のために使用されている。

緩衝植生帯における③**堆積物への炭素と生元素の貯留機能**を記述するために、堆積物表層20 cmを鉛直20層に分けた続成作用モデルを作成した（成果34；図43b）。このモデル構築は別の外部資金事業との共同作業として進められており、堆積物中における炭素・窒素・リンのほか、鉄やマンガン、そして特に硫黄の動態を再現することに重点が置かれている。硫黄の動態は本研究の主目的とあまり関係がないと思われるかもしれないが、実際にはサブテーマ1の研究結果の中で述べたように硫酸還元反応の結果としてアルカリ度を生成することでサンゴに対する海洋酸性化の影響を緩和するという、緩衝植生帯に特異的な機能を実現することに貢献している（Reithmaier et al. 2021）ほか、堆積した有機物を加硫反応によって難分解化することを通してブルーカーボンの貯留促進にも寄与していると考えられている（Raven et al. 2019）など、たいへん重要なプロセスである。現時点ではモデルの基本骨格は完成しているが、個別の事例の生態系モデルの中に組み込むまでには至っておらず、今後の研究に期待される。

緩衝植生帯の機能④と⑤に関しては、モデル構築に進むためにはその動態を支配する要因の概念化が十分にできておらず、また一般性のあるデータがまだ十分に得られていない。

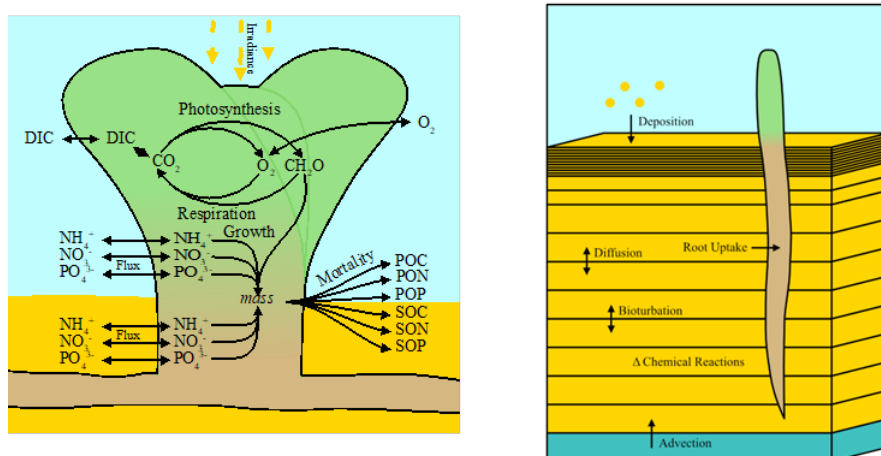


図43. 新たに開発した海草動態モデル (a) と海草の根と堆積物間隙水との物質交換 (b) の概念図。

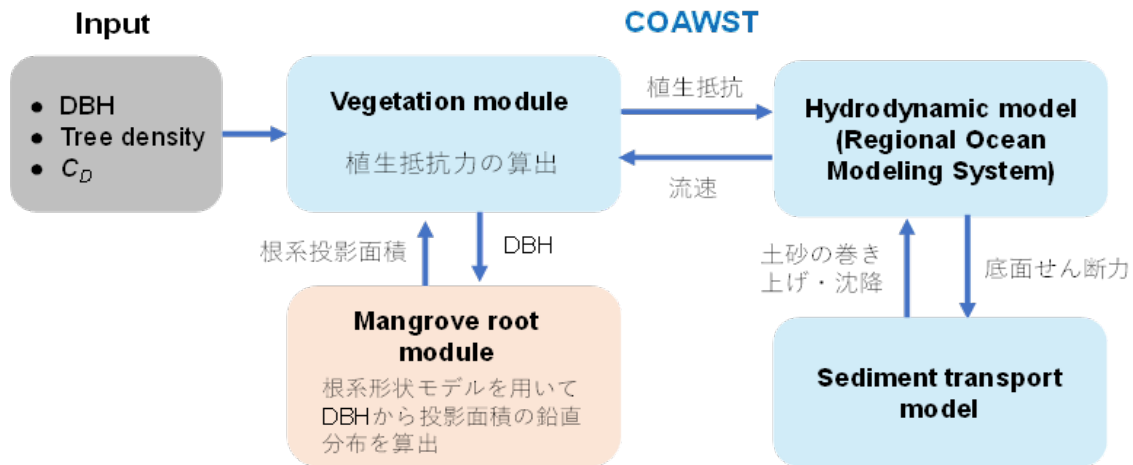


図44. COAWST (Coupled Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport) モデルへのマングローブ林の植生抵抗の組み込み模式図 (成果3, 8)。

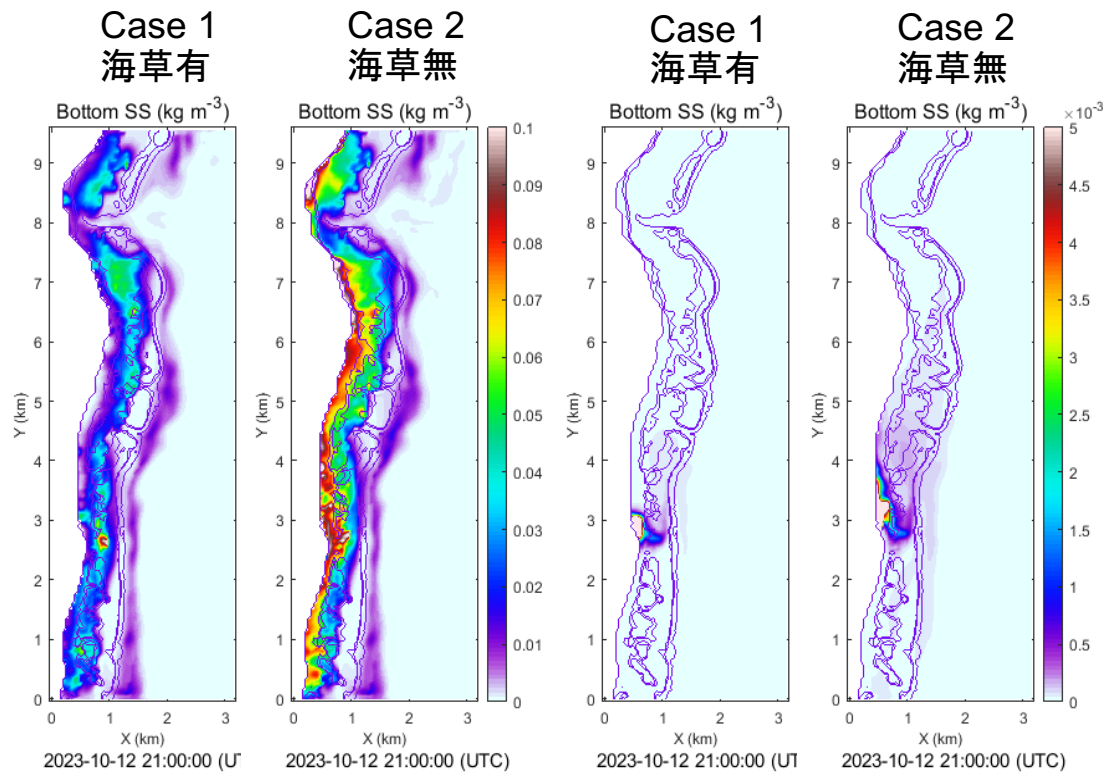


図45. SHIRAH0_REEF 計算領域のシナリオ解析結果のスナップショット。左の2つは海草有り、海草無しのシナリオにおける再懸濁による底層SS濃度、右の2つは海草有り、海草無しのシナリオにおける轟川から流入した底層SS濃度のスナップショット。

全 体

サブテーマ間の連携した活動とそれによる研究結果に関してはこれまでに個別的に紹介してきたので、ここでは研究計画書に全体目標として記載されている事項に関連する研究結果について述べる。

まず、緩衝植生帯をサンゴ礁保全・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いう全体目標に関しては、実装上最も重要な緩衝植生帯の機能と考えられる過剰栄養塩の除去（富栄養化の防止）のための施策に導入することを念頭に置いて、排水等による栄養塩負荷に対する緩衝植生帯の環境収容力を算定することを試みた。

はじめに事例研究として備瀬礁池を採り上げると、その礁池面積はほぼ1 km²である。海草分布調査の結果（図1）から、濃密な藻場の分布域としてリュウキュウスガモ（株密度500 shoots m⁻²）が100 m×1200 mの約12 haの区域、ウミジグサ（株密度300 shoots m⁻²）が70 m×800 mの約5.6 haの区域を想定できる。以

下ではリュウキュウスガモの藻場による硝酸(NO_3^-)の除去効果を例として取り上げる。サブテーマ2+3による栄養塩取込実験の結果(図36; NO_3^- の場合)を参照すると、 NO_3^- が10 μM 以下の場合、その実際の濃度をC (μM)とすると、リュウキュウスガモ1株あたりの NO_3^- の取込速度はおよそ0.25C ($\mu\text{mol h}^{-1}$)で与えられる。一方、サブテーマ2によって実施された栄養塩濃度分布の調査結果を参照すると、藻場分布域内における NO_3^- の濃度はおよそ0.5 μM のオーダーである。すると株密度が上記のような藻場では、底面1 m^2 あたりで62.5 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 、礁池全体ではリュウキュウスガモだけで7.5 $\text{mol NO}_3^- \text{h}^{-1}$ の除去能力があることになる。これをリュウキュウスガモによる礁池全体の環境収容力の増加分とみなすことができる。同様にウミジグサによる NO_3^- の除去能力(環境収容力の増加分)はおよそ1.1 mol h^{-1} 、また両種によるリン(PO_4^{3-})の除去能力は合計およそ0.62 mol h^{-1} と評価された。すなわちこの量に対応する NO_3^- と PO_4^{3-} の外部負荷を海草藻場が除去できることになる。

一般の藻場に適用する場合、厳密には1株あたりの吸収速度は場所に依存して異なる可能性があるが、第一次近似として備瀬の海草に対して評価された本研究での値が当てはまると仮定すると、任意の藻場の藻場面積をA (ha)、平均株密度をD (shoots m^{-2})、藻場内の平均 NO_3^- 濃度をC (μM)として、その藻場による NO_3^- 除去能力(環境収容力への寄与)は $0.25C \times D \times A / 100$ (mol N h^{-1})で与えられることになる。 NO_3^- 以外の栄養塩に対しても同様の計算式を作成することができる。このうち、藻場面積Aはサンゴ礁礁池のような浅場であれば衛星写真を用いて推定可能である。平均株密度の計測には、例えば環境省生物多様性センターが実施しているモニタリングサイト1000における調査マニュアルに記載されている標準的な方法を適用することができる。したがって藻場内における NO_3^- の平均濃度Cが実測によって与えられれば、海草藻場による環境収容力を推定できることになる。

ただし、ここで算定される栄養塩除去能力は海草単体による能力であって、実際の海草藻場ではこの他に堆積物中の微生物の脱窒反応による除去や、底生微細藻類による取込も加わる。したがって上記の手法による環境収容力の見積りは下限見積であると解釈すべきである。実際、サブテーマ1によって実施された現場フラックス・チャンバー実験で評価された単位底面積あたりの NO_3^- 吸収速度(脱窒による寄与が含まれる)を用いると、海草藻場に隣接する裸地でも有意な吸収が観測されている(図17)。また、海草による栄養塩吸収プロセスには下限濃度の閾値が存在する可能性があり、取込速度の濃度依存式には改善の余地がある。今後、これら知見を取り入れてモデルの信頼性を高めることが課題となる。

次に、造礁サンゴに対する緩衝植生帯の生態学的意義を現場で実証するという全体目標に関しては、研究計画上ではこの問いに最も直接的な答えを与えるものとして想定されていたサンゴの現場移植実験が、海洋熱波によるサンゴ白化現象が大規模に発生したために中止に追い込まれたため、目標を修正せざるを得なくなった。しかし造礁サンゴに与える効果を直接的に計測することはできなかったものの、少なくとも過剰栄養塩の除去とそれによる富栄養化防止、堆積促進効果と再懸濁抑制効果による堆積物の安定化、ならびに堆積物への有機炭素ストックの形成という、三つの主要な緩衝植生帯の生態学的意義に関しては、現場で定量的に実証することができている。植生帯の緩衝効果がサンゴの生理状態や成長速度に与える直接的な効果を実生態系で評価することは、今後の研究に残された重要な課題であるが、そのためには短期的な気象変化の影響を区別するために、長期的なモニタリングが必要になる可能性がある。

最後に、具体的な施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という全体目標に関しては、サブテーマ3の研究結果の最初に紹介した、陸域からの負荷物質の動態を追跡する機能を付加した流動場生態系モデル(Marine CoMET)がその答えになる。このようなモデルによって、負荷物質を捕集又は除去する植生帯の機能を定量的に可視化することができるため、植生帯を利用した環境管理に向けて具体的な施策をデザインすることが容易になる。

【引用文献】

- Hasegawa, N., H. Iizumi, and H. Mukai. 2005. Nitrogen dynamics of the surfgrass *Phyllospadix iwatensis*. Mar. Ecol. Prog. Ser. **293**: 59–68. doi:10.3354/meps293059
- Knowlton, N. and others. 2021. Rebuilding coral reefs: A decadal grand challenge. pp.56
- Miyajima, T., I. Koike, H. Yamano, and H. Iizumi. 1998. Accumulation and transport of seagrass-derived organic matter in reef flat sediment of Green Island, Great Barrier Reef. Mar. Ecol. Prog. Ser. **175**: 251–59. doi:10.3354/meps175251
- Miyajima, T., M. Suzumura, Y. Umezawa, and I. Koike. 2001. Microbiological nitrogen transformation in carbonate sediments of a coral-reef lagoon and associated seagrass beds. Mar. Ecol. Prog. Ser. **217**: 273–86. doi:10.3354/meps217273
- Miyajima, T., Y. Tanaka, I. Koike, H. Yamano, and H. Kayanne. 2007. Evaluation of spatial correlation between nutrient exchange rates and benthic biota in a reef-flat ecosystem by GIS-assisted flow-tracking. J. Oceanogr. **63**: 643–59. doi:10.1007/s10872-007-0057-y
- Miyajima, T., M. Hamaguchi, and M. Hori. 2021. Evaluation of the baseline carbon sequestration rates of Indo-Pacific temperate and tropical seagrass meadow sediments. Ecol. Res. doi:10.1111/1440-

1703.12263

- Nellemann, C., E. Corcoran, C. M. Duarte, L. Valdés, C. de Young, L. Fonseca, and G. Grimsditch. 2009. Blue Carbon: The Role of Healthy Oceans in Binding Carbon. UNEP.
- Raven, M. R., D. A. Fike, M. L. Gomes, and S. M. Webb. 2019. Chemical and isotopic evidence for organic matter sulfurization in redox gradients around mangrove roots. *Front. Earth Sci.* **7**: 98. doi:10.3389/feart.2019.00098
- Reithmaier, G. M. S., S. G. Johnston, T. Junginger, M. M. Goddard, C. J. Sanders, L. B. Hutley, D. T. Ho, and D. T. Maher. 2021. Alkalinity production coupled to pyrite formation represents an unaccounted blue carbon sink. *Global Biogeochem. Cycles* **35**: 18. doi:10.1029/2020gb006785
- Tanaka, Y., and H. Kayanne. 2007. Relationship of species composition of tropical seagrass meadows to multiple physical environmental factors. *Ecol. Res.* **22**: 87–96. doi:10.1007/s11284-006-0189-3
- Yoshikai, M. and others. 2022. Field measurement and prediction of drag in a planted *Rhizophora* mangrove forest. *J. Geophys. Res.: Oceans* **127**: 10.1029/2021jc018320

1. 5. 研究成果及び自己評価

1. 5. 1. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献

<得られた研究成果の学術的意義>

石垣島の白保サンゴ礁域において実施された、海草藻場における陸起源土砂（赤土）の流動分配状況に関する実証的研究（成果11, 25）では、サブテーマ3によって開発された50 mグリッドの極めて高精度な物理環境モデルによって同海域に作用する物理営力（海水流動、波浪、及び底面せん断応力）を過去にさかのぼって正確に再現した上で、サブテーマ1によって実施された現場での再懸濁量及び沈降粒子の組成の実測データを直接比較するという研究方法論を採用している。本研究は、このような方法が物理営力に対抗する海草藻場の赤土捕集能力と再懸濁抑制能力を定量的に査定するために決定的な手法となり得ることを初めて証明した。この点だけでも革新的であるが、この調査を行っている期間中に偶発的に、ウミガメによる大規模食害とそれによる海草藻場の急速な衰退という歴史的な事象が発生したことから、食害が海草藻場の喪失を通して堆積物の再懸濁を活発化させ、それにより堆積面の浸食が起り、ブルーカーボンの喪失につながることを、現場で実証した最初の研究例となった。

サブテーマ2とサブテーマ3は協力して、特殊に設計された飼育容器を用いて、沖縄島備瀬で採集された2種類の海草による栄養塩吸収能力を、海草の地上部と地下部とで別々に測定する試みに成功している（成果46）。海草の地上部と地下部の栄養塩吸収を独立に測定した例は過去にもあるものの、高度な実験手技を求められることから成功例は稀であり、本研究で利用したものとは異なる冷温帯性の海草種を材料とした先行研究例があるのみであった。海草は陸上植物と同様に根を持っていること、海草藻場の堆積物中には高濃度の栄養塩が含まれることから、一般には海草は葉よりも根から主に栄養塩を吸収して利用しているという固定観念がある。しかし本実験の結果は、栄養塩濃度が同等であれば地下部よりも地上部の方がはるかに効率よく栄養塩を吸収することができることを明快に示しており、従来の認識に大幅な修正を迫るだけでなく、海草藻場が葉からの栄養塩吸収によって過剰栄養塩を海水中から除去する機能を持っていることを明確に立証している。この意味でこの実験結果は極めて貴重なデータを提供するものである。

海草藻場が海水中から病原菌や食中毒菌などの有害な微生物を除去するという環境衛生能力をもっていることは従来から示唆されていたが、本研究ではその効果を実証するために、海草を屋内水槽で飼育して海草による海水中微生物相の改変効果を時系列で追跡するという新しいアプローチによる実験がサブテーマ1によって行われた（成果43）。従来の研究では海草藻場の有無による周辺微生物相の違いが静的に比較されるだけの場合がほとんどであったが、本研究によって海草の存在が周囲の微生物相を変えていく時間スケールが初めて明らかになった。これにより、海草藻場の衛生能力が実際に発現されるための海水流動条件等について、具体的な考察が可能となった。また、従来の研究では、海草による有害微生物除去効果は海草による物理的な微生物のフィルタリングや沈澱促進作用に帰せられることが多かったが、本研究ではメタバーコーディング解析により、従属栄養性原生生物が駆動する微生物食物網が海草藻場の微生物相の交代に中心的な役割を果たしている可能性を初めて提示した。

サブテーマ3によって開発されたモデルの中では、海洋モデルCOAWST modeling systemに新たに開発した炭素・窒素・リンのトレース機能を有した浮遊系－底生系結合低次生態系モデルMarine CoMETによって、河川や地下水経由で流入するストレス負荷に対する緩衝植生帯の効果を定量的に評価できるようになったことの学術的な意義が特に大きい（成果44）。このモデルは例えば、外洋流出した植生帯由来有機物の行方を追

跡することなどにも利用でき、外洋流出も含めたブルーカーボンの生産性の評価などにも応用可能である。また、本研究で開発した陸域—海域—生態系統合モデルは、1994年から現在までの任意の期間の流動や波浪等の物理環境や栄養塩等の水質環境を数値シミュレーションによって再現できる機能があり、初めに述べた海藻藻場による堆積物安定化効果の実証のための物理営力の復元（成果11）にも用いられているなど、過去環境の復元を必要とする研究用途のために強力なツールとなっている。

サンゴ礁や緩衝植生帯を含む浅海域の生態学的プロセスは、海水を媒体とするプロセスと底質（堆積物）に依存するプロセスとが重畳して作用しているところに研究方法論的な困難があるため、従来の研究では意識的であれ無意識的であれ、堆積物系を考慮から除外して生物と海水の間の相互作用だけを採り上げて解釈された観測的・実験的研究や、作成されたシミュレーション・モデルも少なくない。しかし特に人為起源物質負荷とその伝播・貯留・緩和過程の解明が研究の主目的である場合は、堆積物系を除外してしまうと本質的なプロセスを見失うことになる。このため本研究ではどのサブテーマにおいても一貫して、堆積物と海水との間の相互作用や堆積物内部でのプロセスに意識的に焦点を当てた研究を取り入れている（成果3, 7-11, 18, 19, 23-27, 34, 39-44, 47）、この点にも独自の学術的意義がある。

<環境政策等へ既に貢献した研究成果>

特に記載する事項はない。

<環境政策等へ貢献することが見込まれる研究成果>

藻場のような自然に存在する生態系の機能を人間の便益のために利用することは、自然破壊を伴わないこと、比較的低コストであること、有害な副次作用がほとんどないなど、多くの利点がある。本研究課題から環境行政への提言は、サンゴ礁生態系の保全・再生のために、緩衝植生帯の保全（また必要な場合はその再生もしくは新規造成）をこのようなNature-based Solutionの一つとして利用することである。本研究ではこの目的の実装に向けた道筋を付けるため、この方法を採用することによって得られる効用（緩衝植生帯の機能）を実地において予測し評価するための多様な観測・実験方法論を実例として提示した。現在、地球温暖化対策の観点から、温室効果ガスインベントリの整備と炭素クレジットの算定のために、自然生態系の二酸化炭素隔離・貯留機能を実測または予測する技術的指針が標準化されてきているが、それと同じように、本研究で提案されている実例を参照することによって、沿岸植生帯の水質保全機能を実測または予測する技術的指針を標準化していくことが可能になるし、そうすべきであると考ええる。

特に本研究において作成された、配置された植生帯の緩衝効果を時空間的に予測することができるシミュレーションモデル（Marine CoMET）は、現段階ではまだプロトタイプではあるが、保全すべき植生帯の特定や植生帯の新規造成計画の立案等のために説得力のある判断基準を提供することができる。

本研究において実証された緩衝植生帯の機能は、サンゴ礁のような天然の生態系だけでなく、人工的な養魚場や海藻養殖施設等の環境管理・衛生管理をになう環境産業においても技術オプションの一つとして活用できる可能性がある。緩衝植生帯は、それ自体を保全することが最終目的というわけではないので、従来の自然保護区としてではなく、OECM（保護区とは別に効果的な保全手段として設定される地域）として管理するのが相応しいと考えられる。これらを含め、本研究からの発展的な提案内容に関しては政策決定者向けサマリーに具体的に記載した。

なお、サブテーマ3によって開発されたモデルのコードはすべてオープンソースとして公開されているため、研究者のみならず、行政の政策担当者や現場で保全活動に携わっている方などが直接本モデルを活用して保全案の策定等に活用できる。

1. 5. 2. 研究成果に基づく研究目標の達成状況及び自己評価

<全体達成状況の自己評価>

2. 目標を上回る成果をあげた

「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」（東京大学、宮島 利宏）

全体目標	全体達成状況
------	--------

サンゴ礁複合生態系に含まれる緩衝植生帯（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現場で実証する。また具体的な施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。	1. 4. 2節に列記したように、本研究では新規開発した設備による各種飼育実験、現場実験、シミュレーション・モデルと組み合わせた現地観測などの多様な手法を投入することにより、<u>緩衝植生帯の環境改善機能と環境収容力に対する貢献、生態学的意義を多面的・定量的に実証すること</u>に成功した。また流動場生態系モデルに元素レベルのトレーサー機能を組み込むことにより、陸域由来の環境ストレスを阻止する緩衝植生帯の効用を、時空間変動を含めてシミュレートすることを可能にした。 1. 5. 1節の学術的意義の項に記したように、斬新な実験手法を採用した項目では当初に想定された以上の研究成果が得られていることから、「目標を上回る成果をあげた」と判断した。 また同節に具体的に挙げたこと以外でも、サブテーマごとの成果報告（非公開）に見られるとおり、当初想定していた範囲をはるかに上回る多岐にわたる貴重なデータが得られている。これにはプロジェクトに参加してくれた多くの学生たちと研究協力者による研究成果が大きく寄与している。「目標を上回る成果を挙げた」ことの背景には特に学生の研究面での大きな貢献があったことを付記しておく。
---	--

<サブテーマ1 達成状況の自己評価>・・・・・・・・ 2. 目標を上回る成果をあげた

「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」（東京大学、宮島利宏）

サブテーマ1 目標	サブテーマ1 達成状況
サンゴ礁と陸域の間に自然分布する緩衝植生帯（海草藻場・ガラモ場・マングローブ）を利用して、それが有する環境改善機能を定量的に評価する。評価対象となる機能は、①過剰栄養塩除去機能（脱窒と不動態）、②酸性化緩和（CO₂削減）機能、③堆積物への有機物貯留機能、④濁質粒子に対する捕集除去機能、⑤生活排水等による外来性有害微生物の除去機能の5つとする。陸域からの異なる種類の人為起源負荷を受けている少なくとも2箇所のサンゴ礁と、人為起源負荷の低い対照区となる少なくとも1箇所のサンゴ礁において、対照的な2期（夏季/冬季または雨季/乾季）に上記5項目の評価を行い、緩衝植生帯の環境収容力（単位面積の緩衝植生帯が1年間に除去または緩和できる人為起源負荷の量）とその季節変化を査定する。 また、各サイトにおいて緩衝植生帯の分布状況と地形因子・波浪条件との関係を調査して、地球温暖化に起因する将来の海水準上昇が現存の緩衝植生帯に与えるリスクを見積もるとともに、そのリスクを回避して現存量の維持または増大を実現するための実装可能なオプションについて検討する。	1. 4. 2節のサブテーマ1の項に記載したように、現地調査、水槽実験、シミュレーション・モデルと組み合わせた観測手法等を投入することにより、<u>左記の5項目から成る植生帯の環境改善機能を全て調査し実証した。</u> 事例研究サイトとして、<u>人為起源負荷の形態の異なる2サイト（沖縄島備瀬、石垣島白保）及び負荷の軽微な1サイト（パラオ・バベルダオブ島）を設定して比較調査を行った。</u>このうちパラオでは雨季・乾季の調査をともに実施できたが、国内の2サイトでは主に夏季の調査に重点に取り組む一方、冬季の調査には十分な日程を確保できなかったため、<u>季節変化については十分な検討ができなかった。</u>このため環境収容力の評価は行ったものの、それは主に夏季に採取されたデータに基づいている。この点はやや遺憾なところではあるが、一般に環境ストレスの影響は冬季よりも夏季に強くなるため、夏季に包括的な調査が実施できたことで、少なくとも最低限の目標は達せられたと考えている。 将来予測されている<u>海水面上昇が緩衝植生帯の機能に与える影響</u>として、外洋から進入する波浪の営力が増大することがモデルから予測されている。この影響として、海草藻場による堆積物安定化機能の減損、海水交換の活発化の結果としての酸性化緩和機能と衛生機能（微生物制御機能）の劣化が懸念された。ただしサンゴ礁への影響に関しても、海水交換の活発化による水質改善が見込まれるため、緩

	衝植生帯の機能劣化の影響が相殺される可能性がある。一方、研究期間中に偶発的に起きたウミガメ食害による被害は、<u>外乱による藻場の急激な喪失の影響（特に堆積物の浸食）とそこからの初期回復過程をシミュレートする機会を提供した。</u> 全体としては、計画通りには実施できなかった項目がある一方で、1.5.1節に挙げたように実験方法に新しい工夫を導入することによって当初には予想されていなかったような様々な新知見が得られることとなったことから、<u>基礎研究としては想定を上回る成果があったと判断している。</u>
--	---

<サブテーマ2達成状況の自己評価>…………… 2. 目標を上回る成果をあげた

「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」（琉球大学、栗原晴子）

サブテーマ2目標	サブテーマ2達成状況
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。サンゴの復元力の評価には主にサンゴ分布や多様度に加え、サンゴの加入率やサンゴの生理状態などを指標に評価する。 評価に際してはサブテーマ1で示された同調査海域において、緩衝植生帯の有る場所と無い場所でのサンゴ被度や群集組成の評価に加えて、サンゴの相互移植実験により緩衝植生帯の有無によるサンゴへの効果を2季節で評価する。 また現場実験に加えて、サブテーマ2において特に顕著な改善が見られた環境因子については各研究施設にて水槽での操作実験を組み合わせることによって、植生による緩衝能と、それに伴うサンゴへの影響を評価する。	1.4.2節のサブテーマ2の項に記載したように、現地調査および水槽実験と組む併せることにより、植生の存在による造礁サンゴ群集への緩衝効果について評価を実施できた。 植生については海草に加えて、沖縄県の基幹産業ともなっている「モズク」による酸性化などによるサンゴへの影響の緩和効果の可能性について水槽実験によって<u>初めて評価に成功し、それら成果は複数の学会で発表したことに加えて海外の学術雑誌にて報告をした。</u> これら水槽実験に加えて現場でのサンゴ移植実験も実施をしたが、昨年度琉球列島を襲った海洋熱波により移植サンゴも含め野外のサンゴのほとんどが白化により死滅してしまったことによりデータを得ることができなかった。 一方で、沖縄（沖縄島備瀬、石垣白保）海域での植生帯やサンゴの被度や多様度、またサブテーマ1および3の研究者らと協力しながら環境データを得ることができた。またサブテーマ3と協力し、新たに構築した特殊な飼育装置により海草の地上部と地下部の栄養塩吸収能の実測値を得ることで、モデルによって<u>個体レベルからフィールドスケールへと展開するための基礎的データを得ることに成功したことは特筆すべき点である。</u> さらに、当初の予定にはなかったが、植生帯の健全度を評価する方法として被度や種の多様度に加えて、<u>同位体分析やさらに遺伝的多様度や集団間での遺伝的交流の度合いを評価する集団遺伝子解析をパラオ海域で実施した。</u>これら結果から各集団間の遺伝的交流が極めて限られておりそれぞれの集団の保全の重要性が明らかとなるなど、当初の予定以上の成果を得ることができた。

<サブテーマ3達成状況の自己評価>…………… 2. 目標を上回る成果をあげた

「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」（東京科学大学、中村隆志）

サブテーマ3目標	サブテーマ3達成状況
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。サブテーマ1から得られる植生帯の環境収容力と、サブテーマ2から得られるサンゴ礁への効果をモデルに組み込む。 こうして得られるモデルを用いて、まず現存する緩衝植生帯が現生のサンゴ礁の維持にどの程度貢献しているのかを定量的に評価できるようにする。さらに、ある量の流域負荷と、それに対して保全すべきサンゴ礁が与えられた時に、サンゴ礁生態系を維持・再生・拡大をサポートするために必要となる緩衝植生帯の面積と配置についてプランニングして、それに基づき政策提言が行えるようにする。	1. 4. 2節のサブテーマ3の項に記載したように、陸域からの人為起源の栄養塩や赤土流出を計算できるモデルの開発に成功した。また、サブテーマ1, 2と共同で、海草による栄養塩の取り込み速度やその他の物質循環に関するパラメータを詳細にモニタリングし、それを海草の内部応答を記述した海草動態モデルの開発にも成功した。これによって海草の根と葉からの栄養塩の取り込みを別々に精度良く計算できるようになり、①<u>栄養塩吸収による過剰な栄養塩の除去機能を定量的に評価できるようになった。</u>また、海草およびマングローブによる植生抵抗のモデル化にも成功した。これによって、②<u>陸域から流入する赤土等の濁質の捕集と堆積促進ならびに堆積物の安定化についても定量的に評価できるようになった。</u>さらに、新たに炭素・窒素・リンのトレース機能を有した浮遊系ー底生系結合低次生態系モデル Marine CoMET を開発した。これによって、③<u>堆積物への炭素と生元素の貯留量も評価できるようになった。</u>また、この底生系モデルでは堆積物中での脱窒、Mn還元、Fe還元、硫酸還元といった還元反応や炭酸カルシウム溶解を詳細に記述しており、これらの反応に伴うアルカリ度の付加も定量的に計算可能となっている。そのため、④<u>CO₂吸収による局所的な海洋酸性化の緩和と炭酸塩溶解等によるアルカリ度の付加についても、定量的に評価できるツール開発に成功した。</u>③、④の機能においては、サブテーマ1で実証を行っていたが、当初はサブテーマ3で扱うことを予定していなかったため、目標を上回る成果を挙げたと言える。 これらのモデルを石垣島の東海岸のサンゴ礁域に適用して、実海域において海草帯が存在するケースと存在しないケースとを数値実験によって比較した。それによって、陸域からの栄養塩がどの程度除去されるかを定量的に評価することに成功した。また、堆積物の再懸濁抑制機能や赤土のトラップ機能においても定量的に評価できるようになった。 本研究で開発を行ったすべてのモデルのソースコードはオープンソースとして公開しており、だれでも無償で利用することができる。それにより、<u>サンゴ礁生態系を維持・再生・拡大をサポートするために必要となる緩衝植生帯の面積と配置についてプランニングを行うための有用なツールを開発、提供することができた。</u> これらの結果から、特にトレーサー機能を持った浮遊系ー底生系結合低次生態系モデル (Marine CoMET) や、根や葉からの栄養塩の取り込みを詳細に記述した海草動態モデル、海草・マングローブの植生動態モデルなど、<u>これまでになく数々のユニークなモデル開発を達成できたため、当初の目標を上回る成果をあげたと言える。</u>

1. 6. 研究成果発表状況の概要

1. 6. 1. 研究成果発表の件数

成果発表の種別	件数
産業財産権	0
査読付き論文	9
査読無し論文	3
著書	0
「国民との科学・技術対話」の実施	6
口頭発表・ポスター発表	35
マスコミ等への公表・報道等	2
成果による受賞	0
その他の成果発表	2

1. 6. 2. 主要な研究成果発表

成果番号	主要な研究成果発表 (「研究成果発表の一覧」の査読付き論文又は著書から10件まで抜粋)
2	Listiawati V, Kurihara H (2023): Brown seaweed <i>Nemacystus decipiens</i> intensifies the effects of ocean acidification on coral <i>Montipora digitata</i> . Mar. Environ. Res. 191:106150. https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2023.106150
3	Yoshikai M, Nakamura T, Herrera EC, Suwa R, Rollon R, Ray R, Furukawa K, Nadaoka K (2023): Representing the impact of <i>Rhizophora</i> mangroves on flow in a hydrodynamic model (COAWST_rh v1.0): the importance of three-dimensional root system structures. Geosci. Model Dev. 16:5847-5863. https://doi.org/10.5194/gmd-16-5847-2023
11	Miyajima, T., T. Nakamura, A. Watanabe, N. Morimoto, and K. Nadaoka. 2025. The grazing impact of megaherbivores on sediment accumulation and stabilization functions of seagrass meadows in a subtropical coral reef lagoon. Limnol. Oceanogr. 70 : 1835-48. doi:10.1002/lno.70088

注：この欄の成果番号は「研究成果発表の一覧」と共通です。

1. 6. 3. 主要な研究成果普及活動

特に記載する事項はない。

1. 7. 国際共同研究等の状況

<国際共同研究の概要>

本研究では3箇所の事例研究サイトの一つをパラオ共和国バベルダオブ島沿岸部に設定しており、現地での調査活動は同国パラオ国際サンゴ礁研究センター（PICRC）との協力の下に必要な許可を得て実施している。またその活動の一部は、アメリカ合衆国PEW財団の支援を受けたPICRC、The Nature Conservancy（TNC）、スタンフォード大学、琉球大学の共同研究プロジェクト「Molecular and ecological analysis for seagrass conservation and management at Palau」との連携により行われている。

<相手機関・国・地域名>

機関名（正式名称）	（本部所在地等の）国・地域名
Palau International Coral Research Center	パラオ共和国

注：国・地域名は公的な表記に準じます。

1. 8. 研究者略歴

<研究者（研究代表者及びサブテーマリーダー）略歴>

研究者氏名	略歴（学歴、学位、経歴、現職、研究テーマ等）
宮島利宏	研究代表者及びサブテーマ1リーダー 京都大学理学研究科博士後期課程修了 博士（理学） 日本学術振興会特別研究員等を経て、 現在、東京大学大気海洋研究所助教 専門は海洋生物地球化学、研究テーマは海洋沿岸生態系の動態と機能の解析
栗原晴子	サブテーマ2リーダー 京都大学理学研究科博士後期課程修了 博士（理学） 長崎大学ポスドク研究員を経て、 現在、琉球大学理学部海洋自然学科教授 専門は海洋生物学、研究テーマはサンゴ礁生態系の環境影響評価
中村隆志	サブテーマ3リーダー 東北大学大学院理学研究科博士後期課程修了 博士（理学） 東北大学、北海道大学、東京工業大学ポスドク研究員を経て、 現在、東京科学大学環境・社会理工学院准教授 専門は生態系モデリング、研究テーマは沿岸生態系のモデリングと数値シミュレーションによる動態解析

2. 研究成果発表の一覧

注：この項目の成果番号は通し番号です。

(1) 産業財産権

成果番号	出願年月日	発明者	出願者	名称	出願以降の番号
	特に記載する事項はない。				

(2) 論文

<論文>

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ	査読の有無
1	2023	Sayco SLG, Cabaitain PC, Kurihara H: Bleaching reduces reproduction in the giant clam <i>Tridacna giga</i> . Mar. Ecol. Prog. Ser. 706:47-56	2	有
2	2023	Listiawati V, Kurihara H: Brown seaweed <i>Nemacystus decipiens</i> intensifies the effects of ocean acidification on coral <i>Montipora digitata</i> . Mar. Environ. Res. 191:106150	2	有
3	2023	Yoshikai M, Nakamura T, Herrera EC, Suwa R, Rollon R, Ray R, Furukawa K, Nadaoka K: Representing the impact of <i>Rhizophora</i> mangroves on flow in a hydrodynamic model (COAWST_rh v1.0): the importance of three-dimensional root system structures. Geosci. Model Dev. 16:5847-5863	3	有
4	2024	Sayco SLG, Pomares AA, Cabaitain PC, Kurihara H: Reproductive consequences of thermal stress-induced bleaching in the giant clam <i>Tridacna crocea</i> . Mar. Environ. Res. 193:106280	2	有
5	2024	Inoha K, Isomura N, Morita M, Kurihara H: Combination of hermaphroditic and gonochoric sexual models in the coral <i>Porites cylindrica</i> . Coral Reefs 43:1831-1842	2	有
6	2025	Yasunaka S, Kurihara H, Doi T: Spatiotemporal variation of high-temperature events and its relation to coral bleaching in the Ryukyu Islands, Japan. Prog. Earth Planet. Sci. 12: 7	2	有
7	2025	宮島利宏・浜口昌巳：ブルーカーボン貯留の実証のための環境DNA技術の利用と問題点. 月刊海洋 57(4): 153-161	1	無
8	2025	吉開仁哉, 中村隆志, 諏訪鍊平, 灘岡和夫: マングローブ林における海水流動のモデル化とその適用. 月刊海洋 57(4): 162-168	3	無
9	2025	梅澤有・宮島利宏・茅根創・小池勲夫: パラオ堡礁サンゴ礁ラグーンにおける栄養塩動態と基礎生産. 月刊海洋 57(4): 185-193	1	無
10	2025	Nakamura, W., and others: Radiocarbon analysis reveals decomposition of old soil organic	1	有

		carbon into dissolved inorganic carbon in a subtropical mangrove ecosystem. Limnol. Oceanogr. 70: 1740-1754		
11	2025	Miyajima, T., T. Nakamura, A. Watanabe, N. Morimoto, and K. Nadaoka: The grazing impact of megaherbivores on sediment accumulation and stabilization functions of seagrass meadows in a subtropical coral reef lagoon. Limnol. Oceanogr. 70: 1835-1848	1	有
12	2025	Kurihara H, Sayco SLG, Suzuki H: High thermally variable reef can enhance bleaching tolerance in coral <i>Acropora digitifera</i> from subtropical Okinawa reefs. Mar. Biol. (accepted)	2	有

(3) 著書

<著書>

成果 番号	発表 年度	成果 情報	主たる サブテーマ
		特に記載する事項はない。	

(4) 口頭発表・ポスター発表

<口頭発表・ポスター発表>

成果 番号	発表 年度	成果 情報	主たる サブテーマ	査読 の有無
13	2022	Kurihara H: Implication of ocean acidification impacts on marine organisms and coastal ecosystem services. China-Japan High level expert symposium on Marine Environment 2022 (invited)	2	無
14	2022	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	2	無
15	2022	Sayco SLG, Kurihara H: Bleaching and recovery in the giant clam <i>Tridacna crocea</i> from Okinawa Island. 第25回日本サンゴ礁学会	2	無
16	2022	Kurihara H: Ocean acidification impacts on marine ecosystem and its potential mitigation solution. STACLIM 2022 (invited)	2	無
17	2022	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2022年度秋期大会	2	無
18	2023	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	1	無
19	2023	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	1	無
20	2023	Sayco SLG, Cabaitan PC, Pomares AA, Kurihara H: Effects of bleaching on the reproduction of the giant clam <i>Tridacna crocea</i> . Asia Pacific Coral Reef Symposium 2023	2	無

21	2023	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	2	無
22	2023	Heitzman J, Iijima L, Mitsuhashi G, Spatafora D, Wada S, Harvey B, Kurihara H, Agostini S: Coral skeleton dissolution is accelerated by turf algal settlement under ocean acidification. 第26回日本サンゴ礁学会	2	無
23	2024	鈴木健斗, 梅澤有, 上羽遼太郎, 梅林奎輔, 宮田達, 栗原晴子, 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2024年大会	1	無
24	2024	梅林奎輔, 梅澤有, 佐藤允昭, 宮田達, 上羽涼太郎, 鈴木健斗, 呂晗, 杉原創, 宮島利宏: サンゴ礁生態系の海草藻場における鉱物・有機物粒子の捕集・保持力の評価. 日本地球惑星科学連合2024年大会	1	無
25	2024	宮島利宏, 中村隆志, 渡邊敦, 森本直子, 灘岡和夫: サンゴ礁礁池に発達する海草藻場の堆積促進作用とそれに対するウミガメ食害の影響について. 日本地球惑星科学連合2024年大会	1	無
26	2024	梅林奎輔, 梅澤有, 佐藤允昭, 宮田達, 上羽涼太郎, 呂晗, 杉原創, 木村匡, 宮島利宏: サンゴ礁海草藻帯における陸起源物質の捕捉機能とその生態系影響. 第26回日本サンゴ礁学会	1	無
27	2024	中村航, 渡辺謙太, 宮島利宏, 宮入陽介, 横山祐典, 桑江朝比呂, 佐々木淳: マングローブ生態系内における土壌から海洋への炭素プール移行の重要性. 第30回日本マングローブ学会年次大会	1	無
28	2024	Miyata T., Umezawa Y, Horikawa Y., Watanabe M., Wada S., Nakaoka M., Kuwae T. The effect of different nitrogen loading on the chemical composition and decomposition characteristics of seagrass (<i>Zostera marina</i>), AOGS 2024, Pyeongchang, Korea.	1	無
29	2024	Iijima L, Heitzman J, Mitushasi G, Wada S, Harvey B, Houlbreque F, Kurihara H, Rengil G, Rodolfo-Metalpa R, Agostini S: Energetic pathways of hermatypic corals exposed to ocean acidification under different light environment. ECRS Napoli Italy	2	無
30	2024	Baquiran JIP, Kurihara H: Rubbing salt into the wound: Cold stress impedes recovery of injured coral <i>Acropora digitifera</i> . Asian Marine Biology Symposium 2024	2	無
31	2024	栗原晴子: 気候変動下におけるサンゴ礁生態系. 日本海洋学会 海洋生物シンポジウム (invited)	2	無
32	2024	Kurihara H: Ocean acidification and ocean warming and its potential impacts on coastal ecosystem and human society. Marine Biology Symposium 2024 (invited)	2	無
33	2024	中村隆志, 奥村練, Suarez-Caballero JL, 武藤正剛: 石垣島白保裾礁域における陸源負荷影響評価のための陸域-海域-底生・浮遊生態系統合モデル. 日本地球惑星科学連合2024年大会	3	無
34	2024	武藤正剛, 中村隆志, 宮島利宏: 沿岸海底堆積物	3	無

		における酸化還元特性を考慮した有機物分解過程のモデル化. 日本地球惑星科学連合2024年大会		
35	2024	Suarez-Caballero JL, Nakamura T: Linking land and sea: Modeling the effect of terrestrial nutrients on phytoplankton communities in coral reefs from field-based incubation experiments. 日本地球惑星科学連合2024年大会	3	無
36	2024	Suarez-Caballero JL, Okumura R, Muto M, Nakamura T: Developing an integrated land-ocean-ecosystem model to assess terrestrial anthropogenic impacts on coral reef areas. Marine Socio-Ecological Systems Symposium 2024	3	無
37	2024	Wannawilai P, Nakamura T: Estimation of benthic fractional cover using nonlinear unmixing of multispectral data for shallow coral reef analysis. 12th AKWOC/21st KJWOC Ocean Color Workshop, Bali, Indonesia	3	無
38	2024	Monay KR, Nakamura T, El-Adawy A: Development of a forward bio-optical model for the diffuse attenuation coefficient of downward irradiance and its implementation in the COAWST modeling system. 12th AKWOC/21st KJWOC Ocean Color Workshop in Bali, Indonesia	3	無
39	2025	梅林奎輔, 梅澤有, 佐藤允昭, 宮田達, 上羽涼太郎, 呂晗, 杉原創, 大津直子, 中村友里, 宮島利宏: 陸域起源物質に対する海草の環境応答. 日本生態学会2024年大会	1	無
40	2025	佐藤允昭, E. Ikelau Otto, Asap Bukurrou, Yimnang Golbuu, 栗原晴子, 宮島利宏, 梅澤有 環境DNA分析によるパラオ共和国の海洋保護区の魚類相の検出. 令和7年度日本水産学会春季大会	1	無
41	2025	梅林奎輔, 梅澤有, 佐藤允昭, 宮田達, 上羽涼太郎, Lyu Han, 杉原創, 中村友里, 大津直子, 宮島利宏: 河口域海草藻場による陸源物質の捕捉機能とその利用可能性. 日本地球惑星科学連合2025年大会	1	無
42	2025	鈴木健斗, 梅澤有, 梅林奎輔, 栗原晴子, 中村隆志, 宮島利宏 亜熱帯浅海域の海草藻場における栄養塩・炭酸系フラックスの評価. 日本地球惑星科学連合2025年大会	1	無
43	2025	宮島利宏: 海草の存在が引き起こす海水中細菌群集の急速な遷移過程とその環境管理における意義. 日本地球惑星科学連合2025年大会	1	無
44	2025	中村隆志, Yuta A. Takagi, 武藤正剛, Jorge Luis SUAREZ CABALLERO, 梅澤有, 栗原晴子, 宮島利宏: 炭素・窒素・リンの同位体/トレーサーを組み込んだ浮遊系ー底生系結合モデルを用いたサンゴ礁域における海草による陸源負荷の緩衝効果の可視化. 日本地球惑星科学連合2025年大会	3	無
45	2025	坂直樹, 中村隆志: パラオ共和国における陸域ー海域統合モデル開発に向けた流域モデル実装. 日本地球惑星科学連合2025年大会	3	無
46	2025	Yuta A. Takagi, Takashi Nakamura, Yuichi Kawakami: Determination of tropical seagrass nutrient uptake rates and application in	3	無

		ocean-ecosystem numerical modelling. 日本地球惑星科学連合2025年大会		
47	2025	吉開仁哉, 中村隆志, 灘岡和夫, Julia Mullarney: Hydrodynamics and sediment transport in mangrove forests: field measurement and modelling. 日本地球惑星科学連合2025年大会 (招待講演)	3	無

(5) 「国民との科学・技術対話」の実施

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ
48	2023	東京大学柏キャンパス一般公開における活動内容紹介 (ポスター展示、2023年10月27, 28日、千葉県柏市)	1
49	2024	東京大学柏キャンパス一般公開における活動内容紹介 (ポスター展示、2024年10月25, 26日、千葉県柏市)	1
50	2024	温暖化と同時にサンゴ礁に迫る危機. 酸性化 サンゴの物語～温暖化の中に生きる～ 名護市博物館 一般向け講演 2024年7月27日	2
51	2024	気候変動が及ぼす海洋生物への影響～海洋酸性化と生物資源～ 南紀熊野ジオパーク 一般向け講演 2024年10月4日	2
52	2025	海の温暖化と生態系の変化～真鶴の海のいまとこれから～ サイエンスカフェ 真鶴ピザ食堂KENNY 2025年3月1日	2
53	2025	東京科学大学 第10回 超スマート社会推進フォーラム「海とテクノロジーの融合が創る超スマート社会 ～地球課題解決への新たな挑戦～」 (口頭発表、2025年3月19日、東京都目黒区)	3

(6) マスメディア等への公表・報道等

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ
54	2024	テレ朝タモリステーション 日本の魚が変だ 2024年4月19日放送	2
55	2024	紀伊民報「生き物に大きな影響～海洋酸性化～」 2024年10月8日付	2

(7) 研究成果による受賞

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ
		特に記載する事項はない。	

(8) その他の成果発表

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ
56	2025	日本サンゴ礁学会監修『図説・サンゴ礁の世界』 (朝倉書店・刊行予定) ——梅澤・栗原 (編著)、中村・宮島 (寄稿)	全
57	2025	『海洋科学の事典』 (朝倉書店・刊行予定) ——栗原 (寄稿)	2

権利表示・義務記載

特に記載する事項は無い。

この研究成果報告書の文責は、研究課題に参画した研究者にあります。
この研究成果報告書の著作権は、引用部分及びERCAのロゴマークを除いて、原則的に著作者に属します。
独立行政法人環境再生保全機構（ERCA）は、この文書の複製及び公衆送信について許諾されています。

Abstract**[Project Information]**

Project Title : Evaluation of Ecosystem Functions of Vegetated Coastal Habitats and Their Use for Environmental Restoration of the Coastal Ecosystem and Reconstruction of Coral Reefs

Project Number : JPMEERF20224M01

Project Period (FY) : 2022-2024

Principal Investigator : Miyajima, Toshihiro

PI ORCID : 0000-0001-8562-6704

Principal Institution : Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo
Kashiwanoha 5-1-5, Kashiwa 277-8564, JAPAN
Tel: +81 4 7136 6086
E-mail: miyajima@aori.u-tokyo.ac.jp

Cooperated by : Tokyo University of Agriculture and Technology, University of the Ryukyus, Institute of Science Tokyo

Keywords : Coral reef; Environmental stress; Vegetated coastal habitat; Watershed management; Resilience

[Abstract]

Coral reefs often harbor characteristic vegetated habitats, such as seagrass/macroalgal beds and mangroves, within the lagoons they enclose. The objective of this study was to demonstrate the role of such vegetated coastal habitats in protecting corals from anthropogenic stressors imposed from land and to explore ways in which those habitats could be used to conserve and reconstruct coral reefs. Using field observations at some fringe reefs and aquarium experiments with naturally occurring model organisms, we demonstrated the importance of habitat-forming plants in mitigating anthropogenic nutrient and sediment loading from land and local ocean acidification due to elevated CO₂, which deteriorates corals. In case studies conducted at reef sites in Japan and Palau, the capacity of seagrass beds to remove excess nutrients from the water column and suppress sediment resuspension was determined quantitatively. Additionally, the potential consequences of seagrass loss, which is an ongoing worldwide problem, on the sediment-stabilizing and carbon-sequestering capacity was evaluated (Miyajima et al. 2025). A tandem-aquarium experimental system was constructed and used to examine the potential metabolic effects of seagrasses and macroalgae on the health and growth of corals (Listiawati and Kurihara 2023). We also demonstrated by incubation experiments the high capacity of seagrasses to change and regulate the microbial community in surrounding seawater, which was presumably attributable to the rapid turnover of the microbial loop driven by seagrass-derived organic matter. This intervening function of seagrasses in the seawater microflora contributes to sanitizing the reef

environment by removing potential pathogens. Furthermore, we successfully developed a three-dimensional hydrodynamic-ecosystem model of an actual fringing coral reef, with the capacity to quantitatively track the fate of terrestrially loaded nutrients and sediments and to visualize the spatiotemporal distribution of the stress-mitigating effects of the vegetated habitats and associated benthic systems. This model will help organize ecosystem management plans to enhance the resilience of coral reefs by manipulating associated vegetated habitats as an environmental buffer. Such a strategy will be useful for conserving natural sanctuaries, such as coral reefs, and can be applied as a nature-friendly and cost-effective way to environmentally manage aquaculture facilities, such as fish farms, toward sustainable operation.

[References]

Listiawati V, Kurihara H (2023): Brown seaweed *Nemacystus decipiens* intensifies the effects of ocean acidification on coral *Montipora digitata*. Mar. Environ. Res. 191:106150. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2023.106150>

Miyajima T, Nakamura T, Watanabe A, Morimoto N, Nadaoka K (2025): The grazing impact of megaherbivores on sediment accumulation and stabilization functions of seagrass meadows in a subtropical coral reef lagoon. Limnol. Oceanogr. 70: 1835-1848. <https://doi.org/10.1002/lno.70088> (accepted)

This study was supported by the Environment Research and Technology Development Fund of the ERCA (JPMEERF20224M01) funded by the Ministry of the Environment.