

研究課題番号	4-1907
研究課題名	「高CO2時代に対応したサンゴ礁保全に資するローカルな環境負荷の閾値設定に向けた技術開発と適応策の提案」
研究実施期間	令和元年度～令和3年度
研究機関名	国立研究開発法人 産業技術総合研究所
研究代表者名	井口 亮

1. 研究開発目的

人為的活動の影響が顕著に異なるサンゴ礁域（与論島・沖縄島・慶良間諸島・石西礁湖等）において、サンゴ及び栄養塩等の野外調査を実施し、島嶼特有の水循環とローカルな環境負荷の実態を明らかにする。また、遺伝子解析によるバクテリア負荷等の詳細解明も検討する。2100年までの現実的なCO₂増加シナリオに沿って、栄養塩等のローカルなストレス負荷を加えた複合ストレス条件におけるサンゴ石灰化応答パターンを室内飼育実験によって明らかにし、環境負荷に対するサンゴの応答メカニズムの解明と、サンゴ石灰化限界の閾値を浮き彫りにする。主な対象としては、サンゴの中でも最も種数の多いミドリイシ属サンゴに焦点を当てる。構築したサンゴ石灰化-環境パラメータモデルを踏まえて、海水温、炭酸カルシウム飽和度（酸性化海水の指標）、クロロフィル量（栄養塩の指標）等を用いて、主に琉球列島沿岸サンゴ礁域における複合ストレスによる石灰化影響を地理的に可視化し、各地域で求められるローカルな環境負荷の閾値を提案する。

2. 研究目標

【全体目標】

人為的活動の影響が顕著に異なる場所での地下水及び沿岸海域の栄養塩・バクテリア負荷等の調査を実施する。IPCCによって提案されているCO₂増加シナリオでの高水温・酸性化海水を想定した実験区に、野外調査で明らかとなった陸域起源の負荷（栄養塩等）を考慮した複合ストレスによるサンゴへの影響評価を行う。

実験系を確立し、サンゴの健全な生育を保証する環境要因の閾値を明らかにする。飼育実験で明らかとなったサンゴ石灰化-環境パラメータモデルと、全球的なデータが利用可能な海水温・炭酸カルシウム飽和度（酸性化海水の指標）に、ローカルなストレス負荷も加味して、複合ストレスによる石灰化影響を地理的に可視化し、各地域で求められるローカルな環境負荷の閾値（基準値）を提案する。

【サブテーマ1】

サンゴ飼育実験で得られたサンプルを用いて網羅的遺伝子発現解析を実施し、環境応答のメカニズムの把握を進める。また、環境要因との相関分析を実施することで環境応答マーカーの絞り込みを進める。得られたマーカーを用いて詳細な遺伝子発現解析を実施し、環境負荷の影響が見られる閾値を把握する。また、飼育実験・野外サンプルの微生物類の遺伝子解析を進め、バクテリア負荷等の実態解明を進める。

【サブテーマ2】

与論島・沖縄島・慶良間諸島・石西礁湖・多良間島等での海水・海底堆積物、陸域の地下水等の水循環特性及び栄養塩、特に、各種リン酸塩の動態解析を実施する。また、サンゴ礁池内外の海水・海底堆積物の栄養塩集積調査及びサンゴの被度及び藻類や微生物相の分布調査を実施する。加えて、サンゴ産卵期に採取した配偶子や成体サンゴを用いた複合ストレス実験を実施し、環境負荷の影響が見られる閾値を把握する。また、複合影響の1つの因子である底質微粒子による影響評価も進める。

【サブテーマ3】

野外調査で得た各地点の底質サンプルを用いて蓄積型栄養塩測定法の開発を行う。そして野外調査で得た各地点のサンプルの蓄積型栄養塩測定を網羅的に行う。成体サンゴ及び稚ポリプの石灰化評価

法を構築し、各種栄養塩の複合ストレス実験を実施し、石灰化影響を定量的に評価する方法を構築する。また、飼育実験サンプルの微生物類の遺伝子解析を進め、バクテリア負荷等の実態解明を進める。

【サブテーマ4】

モデリングに必要となる環境要因データ（特に栄養塩類・クロロフィル量）の収集・整理を進める。飼育実験で得られたサンゴ石灰化と環境要因のデータを解析してモデル式の構築を進める。環境要因については、海水温、炭酸カルシウム飽和度、クロロフィル量、地形等の陸域に関する特徴量等を説明変数として加え、各地域の環境要因の類似性・異質性評価につなげる。作成された統合モデルにより、複合ストレスによる石灰化能を琉球列島中心部について推定し、地図上に投影・可視化する。また、変数をIPCCシナリオに沿って変化させることで、今後の変化予測を行う。

3. 研究の進捗状況

サブテーマ1では、上記目標のうち、網羅的遺伝子発現解析の実施と詳細な解析により、リン酸塩のサンゴポリプへの影響は、石灰化だけでなく他の生理的機構にも及ぶことが示され、サンゴの環境応答のメカニズム解明が進んだ。また、リン酸塩影響を評価可能なマーカーの絞り込みにも成功した。また、各地点から得られた底質・水サンプルを対象としたメタゲノム解析を行うことで、特徴的な微生物の把握や地点間での群集構造の差異の検出に成功した。以上のことから、初年度の目標は十分に達成したと自己評価できる。

サブテーマ2では、上記目標のうち、新型コロナウイルス感染拡大のため、年度末に実施できなかった多良間島を除く琉球列島の広範囲において、サンゴ礁池内外の海水・海底堆積物の栄養塩蓄積調査及びサンゴの被度及び藻類等の分布調査を実施し、各項目の地理的変異の把握に成功した。また、沖縄島での地下水等の水循環特性及び栄養塩、特に、各種リン酸塩の動態解析を実施し、その詳細を明らかにした。加えて、サンゴ産卵期に採取したサンゴ幼生及び成体サンゴを用いた飼育実験を実施し、複合ストレス実験を予備的に実施する条件設定を詰めた。以上のことから、初年度の目標は十分に達成したと自己評価できる。

サブテーマ3では、上記目標のうち、野外調査で得られた底質サンプルを用いて蓄積型栄養塩の分析手法を確立した。また、同手法を用いて栄養塩負荷が想定された沿岸域の底質を調査したところ、実際のサンゴの分布と栄養塩の蓄積具合がリンクしていることが示唆された。また栄養塩が蓄積した底質はサンゴ石灰化を顕著に阻害することが明らかとなった。また、高CO₂条件下でのサンゴ稚ポリプの石灰化評価法や飼育実験でのサンゴサンプルを用いた微生物群集解析を確立することができ、今後実施予定の複合ストレス実験の準備が整った。そして成果の一部の論文投稿も進んでいることから、初年度の目標は十分に達成したと自己評価でき、次年度以降の研究をより発展させることにつなげられる。

サブテーマ4では、上記目標のうち、まず国内のサンゴ白化の記録を収集・整備し、時間・地理情報を付加してデータベース化した。次に、リモートセンシング観測値を取得し、海表面水温とその季節・年変動、積算過剰水温指標Degree Heating Weeks (DHW)、栄養塩に関連するクロロフィル濃度と濁度、その年最小値～最大値、長期平均、変動、陸域関連指標などを、サンゴ白化記録がある年・場所に対応して算出・整備した。また、解析にはSparse modeling という指標選択と関係式の推定を同時に行うことによって多重共線性を回避する統計手法を採用し、DHWと濁度の長期平均の値が大きいほどサンゴの白化が起りやすく、水温の年変動やクロロフィル濃度の変動が大きいほど白化が起りにくいといった傾向が明らかとなった。以上のことから、初年度の目標は十分に達成したと自己評価できる。

4. 環境政策への貢献(研究代表者による記述)

本研究は、2019年度行政ニーズ「(4-1) サンゴ礁生態系への陸源負荷の複合的な影響メカニズムの解明及び包括的な対策手法の提案」に直結する内容である。安元純助教、安元剛講師、熊谷直喜研

究員は、環境省が事務局として運営している石西礁湖自然再生協議会のメンバーとして昨年度から参画し、従来からメンバーであった中村崇准教授（学術調査部会・部会長）とともに石西礁湖でのサンゴ礁保全・回復に向けた議論に参画している。酒井教授は、沖縄県が行っており、県庁環境保護課が毎回参加している「沖縄県サンゴ礁保全再生地域モデル事業調査研究等推進会議」の議長を務めており、中村崇准教授もメンバーの一人である。安元純助教は、八重瀬町地下水審議会の委員を務めている。これらの場においても、各メンバーに本研究での成果の情報共有と活用を進めてもらっている。井口亮主任研究員、安元剛講師は、日本サンゴ礁学会保全委員会から、サンゴ礁域の栄養塩に関するガイドライン作成への協力依頼を受け、関連情報の提供を行った。今後本課題で得られた成果も、ガイドライン作成に向けて活用してもらえるように準備を進めている。

5. 評価者の指摘及び提言概要

サンゴ礁生態系の劣化に対して、これまでの海水酸性化や水温の上昇原因説とは異なる切り口として、陸域からのリン酸負荷の影響が提示され、フィールド調査、遺伝子解析、ラボ実験、モデリングを効率的に組み合わせた研究が進行している。特にリン酸塩負荷に対するサンゴ稚ポリプの遺伝子発現の研究など、サンゴ応答の生理的なメカニズムについての新知見が期待される。一方、タイトルで「高CO₂時代」の言葉を使っていながらpCO₂やPH等についての言及がなく、また、陸域からの負荷としては農業、畜産、生活排水の影響の可能性も示唆されるがこれらの点の説明が十分とはいえず、環境対策へのアウトカムに関して今後の充実が望まれる。

6. 評点

評価ランク：A