

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K14943

研究課題名（和文）多重ストレスを視野に入れたサンゴへの陸域負荷研究の新展開

研究課題名（英文）New Developments in Research on Land-Based Stressors Affecting Corals Considering Multiple Stress Factors

研究代表者

飯島 真理子 (Iijima, Mariko)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・研究員

研究者番号：20915483

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本課題は、サンゴ稚ポリプの骨格形成がリン酸塩により直接阻害されることや、リン酸塩が石灰質の底質に蓄積することを明らかにした知見に基づき、「陸域負荷がサンゴの生育に及ぼす影響の実態解明」を目的とし、1) 蓄積型栄養塩を含む陸域負荷の詳細な実態解明、2) 底質に含まれる急性毒性物質の探索、3) リン酸塩が骨格形成に与える分子機構の解明を行った。調査の結果、石西礁湖などで、高濃度のリン酸塩が吸着していることが確認され、これらの地点ではサンゴ稚ポリプの骨格形成や生存率が低下した。重金属がサンゴの生存率に悪影響を与えることが示され、遺伝子実験でもリン酸塩負荷による遺伝子発現量の低下が確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題により陸域から海域への栄養塩や重金属の流入がサンゴ礁に与える影響を把握することで、陸域から海域への排出制限の閾値設定に貢献できるほか、石灰質の底質に吸着している蓄積型栄養塩においては陸域負荷の指標として用いることで環境保全政策の策定に貢献できることが期待される。このように沿岸域の陸域負荷のサンゴ礁生態系への実態を解明しサンゴ礁を保全するとともに、亜熱帯島嶼域における持続可能な地下水利用法を構築する上で欠かせない知見をもたらし、持続可能な社会システム構築の一助となるであろう。

研究成果の概要（英文）：Based on findings that phosphate directly inhibits the skeletal formation of coral polyps and accumulates in calcareous substrates, this study aimed to elucidate the impact of land-based stressors on coral growth. Specifically, the study focused on: 1) detailed analysis of land-based nutrient loads, including accumulated nutrients, 2) identification of acutely toxic substances in the substrate, and 3) elucidation of the molecular mechanisms by which phosphate affects skeletal formation. The research revealed high concentrations of adsorbed phosphate in areas like Sekisei Lagoon, where coral polyp skeletal formation and survival rates were found to decrease. Additionally, heavy metals were shown to negatively impact coral survival rates, and gene experiments confirmed a decrease in gene expression levels due to phosphate load.

研究分野：環境化学，環境生態学

キーワード：サンゴ 蓄積型栄養塩 底質

1. 研究開始当初の背景

現在、沿岸域から 100 km 以内に世界人口の 40% が居住し、その割合は未だに上昇を続けているため、サンゴ礁など沿岸生態系へのローカルストレスは今後も更に上昇すると推定されている (Syvitski et al., 2005, Science 308: 376-380)。日本国内では、最南端の琉球列島に多くのサンゴが生息しているが、人口密度が高い沖縄本島では、人間活動の影響によって礁縁のサンゴは大きく減少したことが指摘されている (Iguchi A. 2018, Springer Nature, pp 1-16, Omija T. 2004, pp 64-68. The Japanese Coral Society and Ministry of the Environment)。しかし、陸域負荷がサンゴ礁生態系に悪影響を与える具体的なメカニズムや定量的な因果関係が解明されていないため、包括的な陸域対策は進展していない。申請書は、サンゴの骨格形成 (CaCO₃ 形成反応) に着目し、実験室で飼育が可能な稚サンゴを用いて、栄養塩類がサンゴの骨格形成に及ぼす影響を検証することを目的に研究を進めた。

日本国内のサンゴの主な分布域である亜熱帯島嶼域では、河川が未発達であることが多く、陸域に降った雨の約 4 割が地下水を通じて海底湧水として沿岸域に流出している。しかし、石灰岩地域の地下水は流路が複雑なため経路や流量などは殆ど明らかにされておらず、地下水を介した陸と海の繋がりと沿岸生物の生育環境については殆ど検証されていない。

2. 研究の目的

本研究では「陸域負荷がサンゴの生育に及ぼす影響の実態解明」を目的とし、1) 蓄積型栄養塩をはじめとする陸域負荷のより詳細な実態解明、2) 底質に含まれる稚サンゴに対して急性毒性を有する物質の探索、3) リン酸塩が稚サンゴの骨格形成に及ぼす影響の分子機構の解明などの分析の 3 課題を実施した。

申請者は稚サンゴを用いた先行実験で、栄養塩のうち 5 μM 以上のリン酸塩はサンゴの骨格形成を阻害することを明確に証明した (Iijima, et. al. 2019, Mar. Biotechnol. 21, 291-300. 図 2)。新たに考案した蛍光誘導化したリン酸塩試薬 (FITC-AA) を用いてこの阻害メカニズムが骨格表面への化学吸着であることを明らかにした (図 3、投稿準備中)。つまり、カルシウムイオン (Ca²⁺) が多く含まれる海水中でもリン酸塩は CaCO₃ に素早く吸着するという化学的性質を有している。このリン酸塩の化学的性質を考慮すると、サンゴの CaCO₃ 骨格形成への阻害の程度は、濃度だけでなく総モル量 (負荷量) が重要となるはずである。先行研究では実際に飼育海水量を増やすと同じ濃度でも阻害の程度が大きくなった。また、実環境中では陸域由来のリン酸塩は、その化学的性質から、石灰質の底質に蓄積していることを初めて明らかにし、蓄積型栄養塩という概念を初めて提唱した (Iijima et al. 2021, Royal Society Open Science, 8(3), 201214.)。

上記のように本研究は、リン酸塩の化学的性質に着目し得られた新知見をもとにサンゴ礁生態系に対する陸域負荷の実態解明を可能にする。また、熱帯亜熱帯域の石灰岩地帯独特の水循環にも着目し、河川のみならず地下水、海底湧水を調査対象としている。石灰岩で構成される島嶼域では水資源の多くを地下水に依存しているが、近年その水質悪化が問題視されている。沖縄県南部では北部ダムの水の一部地下水を混ぜて飲料水としている。しかし、畜産施設が近くにある場所の地下水から大腸菌が検出され問題となっている。沖縄県南部には水源確保の目的で地下ダムが整備され農業用水などに用いられているが、地上にある市街地や農地の影響を受け水質が悪化している。島嶼特有の水循環の特徴として、地下水の滞水時間が短い (流速が早い) こと、サンゴ礁のリーフ内の海水は一定時間滞留することが挙げられ、陸地の影響を受けやすいと考えることができる。本研究の目的は、沿岸域の陸域負荷のサンゴ礁生態系への実態を解明しサンゴ礁を保全することであるが、同時に持続可能な地下水利用法を構築する上で欠かせない知見をもたらす、持続可能な社会システム構築にも資する研究である。

3. 研究の方法

本課題は、申請者がこれまでに明らかにしたリン酸塩がサンゴ稚ポリプの骨格形成を直接的に阻害すること、陸域由来のリン酸塩が石灰質の底質に蓄積している蓄積型栄養塩から、以下の 3 課題を実施した。

1) 蓄積型栄養塩をはじめとする陸域負荷のより詳細な実態解明

先行実験で明らかになった蓄積型栄養塩をより多くの地点で調査した。市街地や農地が比較的多い、沖縄県南部沿岸域、国立公園に指定されている

石垣島近海の石西礁湖を重点的に調査した (図 1)。採取した底質共存下での稚サンゴの飼育実験を行い、走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて骨格形成に及ぼす影響のより詳細な評価を行った。

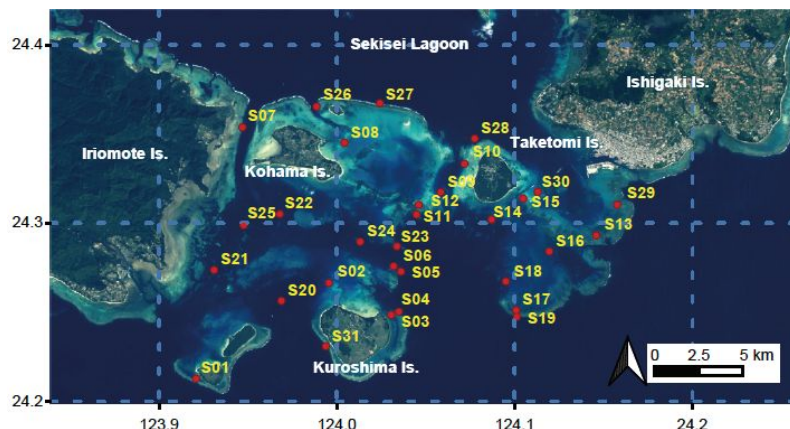


図 1 石西礁湖におけるサンプリング地点

先行実験では、陸水の流入が多い地点は顕著に蓄積型栄養塩が高い傾向がある。調査地点の沿岸域への河川、地下水などの陸水の流入量を数値シミュレーションによって可視化することで、陸域負荷の域値設定へと繋げるために多くの地点でサンプリングを行った。

2) 底質に含まれる稚サンゴに対して急性毒性を有する物質の探索

底質共存下での飼育実験によって、底質から脱着したリン酸塩が稚サンゴの骨格形成を阻害することが明らかになった。しかし、採取地点によっては底質から飼育海水中に脱着するリン酸塩は少ないが致死率が高かった。この底質中には稚サンゴの生育に悪影響を及ぼす物質が含まれていることが考えられる。先行実験で ICP-MS による実験を行ったところ、この底質には Cu などの重金属が多く含まれる傾向が明らかになった。リン酸塩同様に Cu や Zn などは CaCO₃ に対して高い吸着性を有するため、本課題では、水生生物に高い毒性を有する重金属が底質に吸着・蓄積しているかを検証した。

3) リン酸塩が稚サンゴの骨格形成に及ぼす影響の分子機構解明

先行実験では、実体顕微鏡や SEM、骨格重量のような既存のサンゴ石灰化評価手法を用いてリン酸塩による影響の評価を行ってきた。しかし、リン酸塩が遺伝子発現に影響している可能性は大いにある。そこで、ゲノム情報の拡大に伴い利用可能となってきた、各種石灰化関連遺伝子に着目して新規の遺伝子マーカー開発と適用を検討した。発現遺伝子を解析することで、骨格の形態観察だけでは確認できなかったリン酸塩による影響を検証した。野外調査及び室内飼育実験で得られたサンプルの RNA を抽出、網羅的遺伝子解析 (RNA-seq) を実施しマーカーの絞り込みを行った。

4. 研究成果

本課題は、申請者がこれまでに明らかにしたサンゴ稚ポリプの骨格形成をリン酸塩が直接阻害すること、石灰質の底質にリン酸塩が吸着し、蓄積している蓄積型栄養塩という知見を元に、「陸域負荷がサンゴの生育に及ぼす影響の実態解明」を目的とし、1) 蓄積型栄養塩をはじめとする陸域負荷のより詳細な実態解明、2) 底質に含まれる稚サンゴに対して急性毒性を有する物質の探索、3) リン酸塩が稚サンゴの骨格形成に及ぼす影響の分子機構の解明などの分析の3課題を実施した。

沖縄県の南部沿岸域や石垣島近海の石西礁湖等さまざまな沿岸域で採取した石灰質の底質の蓄積型栄養塩の測定を行い、地下水や河川など陸域負荷の大きい地点で非常に高濃度のリン酸塩が吸着していることが明らかになった(図2)。陸域負荷の大きいこれらの地点の底質共存下でサンゴ稚ポリプを飼育すると、骨格形成が阻害されるだけでなく生残率も低下した。生残率が大きく低下した地点の底質には重金属が多く吸着しており、これらがサンゴの生残率に影響を及ぼしたと推定される。また蓄積型栄養塩は藻類には正の相関係数が、サンゴの密度とは負の相関が見られた。また飼育実験により、これまでの形態観察では影響が確認できなかった低濃度リン酸塩の影響を RNA-seq 解析で評価したところ、石灰化遺伝子においてリン酸塩負荷による発現量が低下する傾向が見られた(図3)。いくつかの石灰化遺伝子ではリン酸塩濃度の上昇により発現量が減少し、負の相関が見られた。リン酸塩によるサンゴの石灰化への負の影響は、リン酸塩が炭酸カルシウムに吸着することによって無機的な石灰化の阻害が起るため、石灰化に直接関わる遺伝子以外はあまり影響がないと想定していたが、実際には多くの遺伝子で変化が見られた。

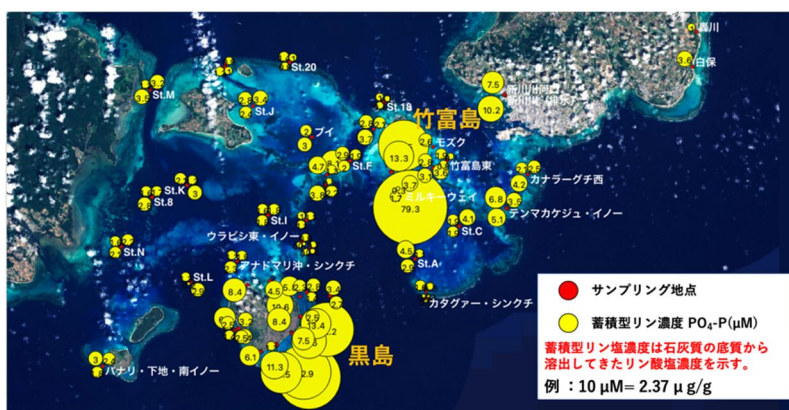


図2 石西礁湖における蓄積型栄養塩分布

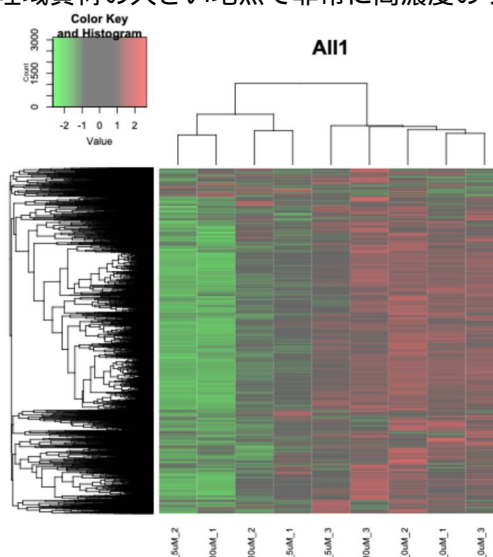


図3 3段階のリン酸塩濃度で飼育したサンゴ稚ポリプにおける遺伝子発現のヒートマップ図

本課題においてリン酸塩によるサンゴ稚ポリプへの影響として形態的な影響と遺伝子レベルでの影響が確認された。リン酸塩や重金属等の陸域負荷物質が影響を及ぼす閾値の算出により陸域からの流入許容量の把握につながる。

本課題は沿岸域の陸域負荷のサンゴ礁生態系への実態を解明しサンゴ礁を保全するとともに、亜熱帯島嶼域における持続可能な地下水利用法を構築する上で欠かせない知見をもたらし、持続可能な社会システム構築の一助となるであろう。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Iijima Mariko, Yasumoto Jun, Mori-Yasumoto Kanami, Yasumoto-Hirose Mina, Iguchi Akira, Suzuki Atsushi, Mizusawa Nanami, Jimbo Mitsuru, Watabe Shugo, Yasumoto Ko	4. 巻 24
2. 論文標題 Visualisation of Phosphate in Subcalicoblastic Extracellular Calcifying Medium and on a Skeleton of Coral by Using a Novel Probe, Fluorescein-4-Isothiocyanate-Labelled Alendronic Acid	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Marine Biotechnology	6. 最初と最後の頁 524 ~ 530
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10126-022-10115-1	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 2件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 飯島真理子
2. 発表標題 Effects of the pumice pebbles on the survival rate of juvenile corals especially focusing on pH and concentrations of metal ions dissolved into seawater.
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 飯島真理子
2. 発表標題 陸域由来のリン酸塩がサンゴに及ぼす影響の解明
3. 学会等名 第39回地質調査総合センターシンポジウム「美ら海の産業と環境の調和を科学の力でー陸 沿岸 海洋研究の最前線ー」
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 飯島真理子
2. 発表標題 Land-originated phosphates adsorbed to coastal calcareous sediments on coral reef ecosystem in Sekisei Lagoon, Japan
3. 学会等名 AGU Fall meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 飯島真理子
2. 発表標題 Impact of Phosphate on Coral Skeletons and Introduction of Accumulated Phosphate as a Land-Based Stress Indicator
3. 学会等名 13th Asia Pacific Marine Biotechnology Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 飯島真理子
2. 発表標題 リン酸塩のサンゴ骨格阻害機構の解明と新たな陸域負荷指標となる蓄積型リンの提唱
3. 学会等名 第23回マリンバイオテクノロジー学会大会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関