

令和 4 年 6 月 23 日現在

機関番号：18001

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K12310

研究課題名(和文) 島嶼特有の水循環とリン酸塩負荷がサンゴの石灰化機構に及ぼす影響

研究課題名(英文) Effects of water cycle and phosphorus load on coral calcification mechanisms in subtropical islands

研究代表者

安元 純 (Yasumoto, Jun)

琉球大学・農学部・助教

研究者番号：70432870

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、陸域から海域への日総リン負荷量と海底堆積物中の蓄積リンの対応関係から、サンゴの成長に許容可能な日総リン負荷量を推定することである。調査地域の沿岸海域における蓄積リンと幼生サンゴ数の関係から、蓄積リンの閾値は $3.0\mu\text{M}$ と推定された。調査地域における蓄積リンと日総リン負荷量の間には高い正の相関が見られた。サンゴの生育に許容可能な日総リン負荷量は約 $100\text{ g-P/m}^3/\text{day}$ と推定された。これらの結果は、陸域由来のリン酸塩が水循環によって海洋に輸送され、石灰質堆積物に吸着しサンゴの成長を阻害するという我々の仮説を裏付けるものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで過度の栄養塩が海に流れ込むと、その海域のサンゴが減少することは知られていたが、科学的なメカニズムはわかっておらず、具体的な対策も取られていなかった。本研究の成果は、世界規模で減少するサンゴ礁の保全に大きく貢献できると期待できる。また、CO₂の固定化技術の開発は国内外での重要な課題と位置付けられており、サンゴの石灰化を模したCO₂固定化技術の開発に繋げる予定である。

研究成果の概要(英文)：The objectives of this research are to estimate the acceptable daily phosphorus load (LD) for coral growth based on the correspondence between the total daily phosphate load (TDPL) and accumulated phosphorus in sea sediments. TDPL was estimated in conjunction with the results of field observations and integrated three-dimensional water cycle model. Based on the relationship between accumulated phosphorus and the number of juvenile corals in the study site, the threshold value of accumulated phosphorus was estimated to be $3.0\mu\text{M}$. A high positive correlation was observed between accumulated phosphorus and the total daily phosphorus load in the study site. The acceptable total daily phosphorus load for coral growth was estimated to be about $100\text{ g-P/m}^3/\text{day}$. These results confirm our hypothesis that terrestrial-derived phosphate is transported to the ocean through the water cycle and adsorbed on calcareous sediments, inhibiting coral growth.

研究分野：地下水文学

キーワード：島嶼特有の水循環 リン酸塩負荷 サンゴの石灰化機構 蓄積リン

1. 研究開始当初の背景

海水温上昇や海洋酸性化など地球規模のストレスの影響によってサンゴの減少が指摘されているが、沿岸域の土地利用の変化や諸開発にともなう陸域由来の物質がサンゴの生育環境を悪化させるなど地域に特有な影響も懸念されている。特に過剰な栄養塩が海域に流れ込むと生きたサンゴの被度が減少し、白化したサンゴの回復が遅れたりすることが指摘されており、科学的なメカニズム解明が望まれていた。通常、サンゴ礁海域の表層海水の栄養塩濃度は低く、表層海水の栄養塩濃度でサンゴに及ぼす影響を実験的に評価するのは困難だった。本研究グループは、サンゴの骨格形成である石灰化機構と栄養塩との関連性について着目し研究をしてきた。これまでもサンゴの石灰化は造骨細胞と骨格の間にある石灰化母液の中で進行し、その pH は周辺の海水より約 0.5~1.0 程度高いことが知られていたが、我々は生体内に普遍的に存在するポリアミンが CO₂ を捕捉して石灰化を促進することを明らかにし、サンゴの石灰化母液の pH 上昇にもポリアミンが関与しているのではないかと推定していた。また、代表的な栄養塩であるリン酸塩が、サンゴの石灰化を阻害することを稚サンゴの骨格形成を観察する室内実験で見いだしていた。リン酸塩がサンゴ骨格の素材でもある炭酸カルシウムに対して高い吸着性を持つ点を考慮すると、陸域から水循環を通じて供給されたリン酸塩は炭酸カルシウムで構成される海底の砂に蓄積されることでサンゴの生育環境を阻害していると推測していた。

2. 研究の目的

本研究では、「島嶼特有の水循環とリン酸塩負荷がサンゴの石灰化機構に及ぼす影響」を把握することを目的として、(1) サンゴ稚ポリプ石灰化機構の分子レベルでの検証、(2) 土壌・地下水及びサンゴ礁池内のリン酸塩の動態解析と蓄積リン酸塩の実態把握、(3) 実環境を想定したリン酸塩のサンゴ稚ポリプの石灰化阻害機構の解明の 3 項目を主に実施することとした。

3. 研究の方法

本研究では、上述した(1)の目的に対して、pH 蛍光指示薬を用いて *Acropora digitifera* 稚ポリプ石灰化母液内の pH をイメージングし、倒立型共焦点レーザー顕微鏡 (LSM 800, ZEISS) を使用することで、サンゴ着底部の石灰化母液の pH 測定を行った。さらに、蛍光高分子化合物を作成し、作成した蛍光化合物が飼育水から石灰化母液に到達する様子を観察した。(2)の目的に対して、沖縄島南部地域、石西礁湖、鹿児島県与論島の 3 地域を調査対象地域として、陸域の土壌・地下水及びサンゴ礁地内の海底底質、表層水を採取し分析に用いた。海底底質はスキューバやシュノーケリング、徒手採取で底質及び周辺海水を採取した。採取した海底底質は乾燥後、ふるい分けした粒径 0.5~1 mm を、50 ml チューブに底質 6 g とフィルター濾過した小笠原海水 15 ml を加え、72 時間振盪し海水に溶出させた。振盪後、遠心機を用いて 1500 rpm で 15 分の遠心分離を行い、上清を 0.2 µm のフィルターで濾過後、濾液をモリブデンブルー法でリン酸濃度を測定し、蓄積リンの値をした。表層水の測定は、採取した海水を 0.2 µm フィルターで濾過後、同様に比色法を用いてリン酸濃度を検出し、溶存態リンの値とした。(3)の目的に対して、沖縄島南部地域の市街地や農地に近い沿岸域の石灰質の砂を採取し、砂と共に *Acropora digitifera* の稚ポリプを飼育し観察した。

4. 研究成果

(1) 飼育実験の結果、*Acropora digitifera* のサンゴ稚ポリプ内の石灰化母液は、pH8.5~9.0 程度であり、周辺の海水と比べ 1 程度高くなっていた。さらに、蛍光高分子化合物を稚ポリプの飼育水に添加した結果、添加後、それぞれ数分および 30 分で骨格および石灰化母液の蛍光染色が確認できた。これらの観察により、かなり高分子量のタンパク質が細胞間隙を通り、石灰化母液に到達することが明らかになった。得られた成果から、サンゴの石灰化母液中での pH の上昇にはポリアミンが関与していることが示された。このことから、サンゴの石灰化は CO₂ の放出ではなく固定であることが証明できる可能性が出てきた。

(2) 海水や地下水中の溶存リンのほとんどがオルトリン酸の形態であったが、赤土等の懸濁物質が増加すると全リンも増加すること明らかとなった。懸濁物質を多く含んだ河水や地下水が海域に流れ込むことは、海域にリンが供給されることにもつながることが示された。陸域負荷としてリンに着目した場合、SS も重要なモニタリング項目であるといえる。一方、サンゴ礁池内の海底底質に蓄積したリン酸塩(蓄積リン)の比較と共に、稚サンゴの加入量との関係を検証した結果、地下水や河川の影響を受けやすい地点では蓄積リンの値が高い傾向がみられた。表層海水のリン酸塩濃度は検出限界外であっても、蓄積リンを調べることでこれまで見ることが出来なかった陸域負荷の実態把握が可能となった。蓄積リンと稚サンゴ加入量とも高い相関があることも分かった。調査地域の沿岸海域における

蓄積リンと幼生サンゴ数の関係から、サンゴの生育環境を保つための蓄積リンの閾値は $3.0\mu\text{M}$ と推定された。統合的 3 次元水循環シミュレーションモデルと現地観測を併用して推定した日総リン負荷量と蓄積リンの間には高い正の相関がみられた。サンゴの生育に許容可能な日総リン負荷量は約 $100\text{ g-P/m}^3/\text{day}$ と推定された。これらの結果は、陸域由来のリン酸塩が水循環によって海洋に輸送され、石灰質堆積物に吸着しサンゴの成長を阻害するという我々の仮説を裏付けるものである。

(3) 沖縄島南部地域の市街地や農地に近い沿岸域の石灰質の砂を採取し、砂と共に *Acropora digitifera* の稚サンゴを飼育したところ、砂から飼育海水に約 $20\mu\text{M}$ と高濃度のリン酸塩が溶出し、稚サンゴの骨格形成を妨げることを明らかにした。リン酸塩は炭酸カルシウムに高い吸着性を有するため、石灰質の砂に蓄積し一部溶出したリン酸塩が、サンゴの炭酸カルシウム骨格の形成を妨げるというメカニズムが明らかになった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Iijima Mariko, Yasumoto Jun, Iguchi Akira, Koiso Kiyomi, Ushigome Sayaka, Nakajima Natsuki, Kunieda Yuko, Nakamura Takashi, Sakai Kazuhiko, Yasumoto-Hirose Mina, Mori-Yasumoto Kanami, Mizusawa Nanami, Amano Haruna, Suzuki Atsushi, Jimbo Mitsuru, Watabe Shugo, Yasumoto Ko	4. 巻 8
2. 論文標題 Phosphate bound to calcareous sediments hampers skeletal development of juvenile coral	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Royal Society Open Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1098/rsos.201214	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

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 -
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 -
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 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 飯島真理子, 安元 剛, 井口 亮, 水澤奈々美, 安元 純, 酒井一彦, 鈴木 淳, 岩崎晋弥, 木元克典, 廣瀬美奈, 神保 充, 渡部 終五
2. 発表標題 蓄積型栄養塩のサンゴ骨格阻害メカニズムと影響評価法の構築
3. 学会等名 第23回日本サンゴ礁学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 飯島真理子, 安元 剛, 安元 純, 井口 亮, 中村 崇, 酒井一彦, 廣瀬美奈, 水澤奈々美, 神保 充, 渡部終五
2. 発表標題 蓄積型栄養塩が稚サンゴの骨格形成と生育に及ぼす影響
3. 学会等名 令和3年度日本水産学会春季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 飯島真理子、安元剛、安元純、井口亮、中村崇、酒井一彦、廣瀬美奈、水澤奈々美、鈴木淳、神保充、渡部終五
2. 発表標題 蓄積型栄養塩の地域間比較と稚サンゴの骨格形成への影響
3. 学会等名 第21回マリンバイオテクノロジー学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mariko Iijima, Jun Yasumoto, Akira Iguchi, Takashi Nakamura, Kazuhiko Sakai, Mina Yasumoto-Hirose, Kanami Mori-Yasumoto, Nanami Mizusawa, Atsushi Suzuki, Haruna Amano, Mitsuru Jimbo, Shugo Watabe, Ko Yasumoto
2. 発表標題 Phosphate bound to calcareous sediments in coastal area inhibit skeletal formation of juvenile coral
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会（国際学会）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安元 純、新城 竜一、Razafindrabe Bam、土岐 知弘、澤田 和子、細野 高啓、Hermawan Oktanius、中屋 眞司、高田 遼吾、中川 啓、利部 慎、田原 康博、村井 敦子、安元 剛、水澤 奈々美、丸山 莉緒、廣瀬 美奈、井口 亮、飯島 真理子、宋 科翰、相澤 正隆
2. 発表標題 亜熱帯島嶼の持続可能な水資源利用に向けた参画・合意に基づく流域ガバナンス - SDGsの達成への貢献-
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会（国際学会）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasumoto K , Kubota A , Yasumoto J , Mori-Yasumoto K , Iijima M , Hirose Yasumoto M , Iguchi A , Jimbo M , Watabe S
2. 発表標題 Effect of polyamine transporter inhibitor on the pH increase in calcifying fluids of juvenile coral polyps possibly involved in calcification processes
3. 学会等名 AGU Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Iijima M, Yasumoto K, Yasumoto J, Hirose Yasumoto M, Iguchi A, Jimbo M, Watabe S
2. 発表標題 Phosphorus enrichment hampers the development of juvenile coral by directly inhibiting biomineral skeleton elongation
3. 学会等名 AGU Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jun Yasumoto, Masashi Nozaki, Ko Yasumoto, Mina Hirose Yasumoto, Ryuichi Shinjo, Akira Iguchi, Mariko Iijima, Shinji Nakaya
2. 発表標題 Dynamics of phosphate species in soil and groundwater in coastal limestone area, Okinawa, Japan
3. 学会等名 AGU Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kunieda Y, Ushigome S, Koiso K, Nakajima N, Mizusawa N, Yasumoto K, Yasumoto J, Iijima M, Yasumoto-Hirose M, Jimbo M, Watabe S
2. 発表標題 Relationship between quality of calcareous sediments and juvenile corals growth
3. 学会等名 International Symposium on Aquatic Metagenomics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野崎真司, 安元純, 安元剛, 廣瀬美奈, 飯島真理子, 新城竜一, RAZAFINDRABE Bam H.N
2. 発表標題 琉球石灰岩地域における土壌・地下水中の各種リン酸塩の動態に関する研究
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2019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
研究 分担 者	安元 剛 (Yasumoto Ko) (00448200)	北里大学・海洋生命科学部・講師 (32607)	

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
---------	---------