

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：18001

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H00953

研究課題名(和文) 造礁サンゴの高水温耐性向上可能性に関する総合的研究

研究課題名(英文) Comprehensive studies on improvement of heat tolerance in reef corals.

研究代表者

酒井 一彦 (SAKAI, Kazuhiko)

琉球大学・熱帯生物圏研究センター・教授

研究者番号：50153838

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では地球温暖化進行により影響を強く受けている高温に脆弱な造礁サンゴが、高温耐性を向上できるかを野外調査、水槽実験、遺伝子解析により総合的に検討した。その結果、自然に生育するサンゴが1年で高温耐性を向上させたこと、生育するサンゴ礁の温度環境により、同種サンゴのメチル化に関わる遺伝子組成が異なること、琉球列島の低緯度海域での異常高水温による白化によって、ミドリイシ属のサンゴの存在比が低下していること、温度と褐虫藻との共生の有無が、サンゴ-褐虫藻共生体のメチル化率を変化させること、サンゴと共存する微生物がサンゴの高温耐性に影響する可能性があること等が明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球温暖化にともなう最近の急速な温度上昇によって、世界の多くのサンゴ礁で造礁サンゴが減少している。本研究は、サンゴの高温耐性向上の可能性を総合的に検討し、サンゴが様々な方法によって高温耐性を向上させる可能性があることと、実際に自然に生育しているサンゴが短期間で高温耐性を向上させたことを明らかとした。本研究は学術的には、サンゴが短期間で温度上昇への応答潜在力を有することを示し、また褐虫藻を含むサンゴと共存する微生物が高温耐性の向上に寄与する可能性を見出した意義がある。社会的には地球温暖化の進行を緩やかにすればサンゴが存続し、生物多様性の高いサンゴ礁生態系が維持される可能性を示した意義がある。

研究成果の概要(英文)：In this study, we comprehensively examined whether reef-building corals vulnerable to high temperatures, which are strongly affected by the progression of global warming, can improve their high-temperature tolerance through field surveys, aquarium experiments, and genetic analyses. The results showed that (1) high-temperature tolerance was improved in one year of naturally growing corals, (2) the gene composition related to methylation differed in the same coral species depending on the temperature environment of the reef where they grew, (3) bleaching caused by abnormally high water temperatures in low latitude islands of the Ryukyu Archipelago reduced the abundance ratio of corals in the genus *Acropora*, (4) temperature and zooxanthellae alter methylation of coral-zooxanthella holobiont, and (5) microorganisms coexisting with corals might affect the high-temperature tolerance of corals.

研究分野：サンゴ礁生態学

キーワード：造礁サンゴ 温暖化 サンゴ白化 高温耐性向上 エピジェネティクス 細菌叢 ミドリイシ属 遺伝子組成

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 造礁サンゴ(以下「サンゴ」)は熱帯および亜熱帯の暖かい海に分布の中心があるが高温に対して脆弱であり、水温が平年の最高より2以上となればサンゴと褐虫藻の共生関係が崩壊し、褐虫藻を失い白化する。白化した状態が1ヶ月以上続けばエネルギー不足となり、サンゴは死亡する。今世紀初頭までは、強いエルニーニョ現象が生じた際に世界の多くのサンゴ礁で水温が上昇し、白化現象が起こってきた。しかし近年地球温暖化の進行にともない、エルニーニョ現象でない年でも世界的規模でサンゴの大規模白化現象が起こるようになってきている。サンゴは過去には現在より高い水温環境でも絶滅することはなかったが(例えば鮮新世温暖期)、最近の急速な温度変化によって衰退していることを多くの研究が示している。本研究開始当初は「地球規模で急速に進行している温暖化に対して、サンゴが高温耐性を向上させる可能性があるか」が問われ始めていたが、高温を向上させる可能性のあるいくつかの要因を総合的に検討した研究はほとんどなかった。

(2) 南北に広がる琉球列島は、その地理的背景からも、環境変動、海域間の連結性、生物群集の回復力、気候変動が海洋生物の多様性に及ぼす影響などを明らかにしつつ、適応に関する相互作用を研究するために適した独特の環境勾配を有すると言える。2000年代以降琉球列島南部のサンゴ礁域を中心に、気候変動影響や人為的影響による劇的な変化が進行していることが示されつつあるが、列島全体をとらえた科学的調査はなかった。

(3) サモアの高温ストレスの強い地点に生息するサンゴの細菌叢は、高温ストレスの弱い地点の同種サンゴの細菌叢に比べ、高温下で変化が小さいと報告された(Ziegler et al., 2017)。細菌叢が高温下で安定的であった理由として、細菌叢と宿主サンゴの一方または両方の高温耐性が高かったことが考えられるが、この点は先行研究では明らかにされていなかった。他の海域や他のサンゴ種において本現象が同様にみられるかも不明であった。

(4) 近年、造礁サンゴ類は地球温暖化に伴う水温上昇による白化現象や捕食者であるオニヒトデの大量発生による食害によって甚大な負の影響を受けている。捕食者の分泌物や視覚的なシグナルが被食者の行動や生理状態を変化させる非消費型効果がよく知られている。しかし造礁サンゴ類の浮遊幼生に対する捕食者の非消費型効果に対する影響は、ほとんど分かっていなかった。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、地球温暖化進行下においてサンゴが高温耐性を高めることができるかを、以下の研究立案時に考えられた要因全てについて、総合的に検討することとした。宿主サンゴの進化的変化、宿主サンゴと共生藻(褐虫藻)のエピジェネティクスによる表現型の可塑性、褐虫藻種の入替わり、褐虫藻以外のサンゴ共存微生物の変化。これら要因野外調査、水槽実験、遺伝子解析によりを総合的に検討することを研究の目的とした。また過去20年以上の野外におけるデータ蓄積のある沖縄県本部町に位置する琉球大学瀬底研究施設前のサンゴ礁において、中程度に強い高温ストレスが2年連続で見られたので、中程度の高温ストレスがサンゴの高温耐性に及ぼす影響を、野外調査で検討することも可能となった。さらにサンゴ礁において、大気中の二酸化炭素濃度の増加により温暖化と同時に進行する可能性がある海洋酸性化と温暖化のサンゴへの影響についても、気候変動に対するサンゴの応答のベースラインを知るために検討した。

(2) 琉球諸島南北の島々を含む島嶼のサンゴ群集における、詳細なサンゴ群集ベースラインデータ取得とその解析と、得られたデータから、変化影響をより強く受けると考えられるサンゴ群の抽出とともに、それらのサンゴ種が温暖化等の影響をいかに受けつつあるかを解析し、さらにその適応可能性を探るための基礎データの提供も目的とした。

(3) 多くのミドリイシ属サンゴの産卵時期とは異なる時期に産卵するミドリイシ属の一種の全ゲノム塩基配列を決定することを目的とした。

(4) 高温ストレスの強い地点のサンゴ細菌叢が高温下で安定的であるのかを検証することと、高温耐性の高いサンゴ群体の細菌叢の特徴を見出すことの2点を目的とした。また、サンゴへの高温耐性付与を目指したサンゴ由来細菌株の利用技術の開発を見据え、サンゴ共存細菌株の分離・同定・保存と機能解析を実施することを目的とした。

(5) 海産無脊椎動物の浮遊幼生は鉛直分布を変化させることで、海流を使い分けて海流分散と生息地への回帰を行なっていることがよく知られている。本研究では、オニヒトデの分泌物によるストレスと高水温がサンゴのプラナラ幼生の鉛直分布と行動、及び遺伝子発現に与える影響を評価することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 野外調査

20年以上のサンゴ白化調査実績のある瀬底研究施設前のサンゴ礁において、本研究実施前に設定した固定プロットのデジタル画像を撮影することで追跡観察し、群体密度、被度および種数で優占するミドリイシ属の自然に成育するサンゴ群体が、高温耐性を短期間で向上させられる

かを検討した。また沖縄県恩納村で複数のサンゴ礁を探索し、同種サンゴがともに分布するが温度環境が大きく異なる地点を見出し、低温と高温地点でデジタル画像撮影によりサンゴ群集構造を明らかにし、両地点に出現したココビミドリイシの夏季の白化率を調査し、群体片を遺伝子解析のために採取した。

琉球列島の6海域で地域的特徴に重点を置いた合計69箇所のサンゴ礁の調査点を設定し、ポイントインターセプトトランセクト調査を実施し、それらの底質組成・底生生物組成およびサンゴ群集を比較することで、緯度勾配影響を明らかにすることを旨とした。

(2) 水槽実験

瀬底研究施設前のサンゴ礁に多く出現するココビミドリイシとエダコモンサンゴの群体片を採取し、夏季の通常水温(28℃)と現在の二酸化炭素分圧(400 ppm)、夏季の通常水温より3℃高く現在の二酸化炭素分圧、夏季の通常水温と今世紀末に到達すると予想されている二酸化炭素分圧(1,000 ppm)および夏季の通常水温より3℃高く今世紀末に到達すると予想されている二酸化炭素分圧の条件を設定した室内水槽で飼育し、高温と高二酸化炭素分圧がこれら2種のサンゴの生存と成長、褐虫の密度や光合成に及ぼす影響を検討した。

ココビミドリイシの放卵放精時期に成熟した群体を採取し、放卵放精後他殖により幼生を得て1µmのフィルターでろ過した海水中で飼育し、幼生を定着させて初期ポリプとした。ココビミドリイシ卵と幼生は褐虫藻を持たないので、ろ過海水中で飼育すると初期ポリプも褐虫藻を持たない。初期ポリプを褐虫藻との共生なしとありの群に分け、ココビミドリイシの放卵放精時の水温(27℃)とそれよりも5℃高い水温で飼育し、メチル化測定キットを用いて宿主サンゴと褐虫藻全体のメチル化率を測定した。

瀬底島周辺の高温ストレスの比較的高い地点と比較的低い地点それぞれでココビミドリイシ4群体から群体片を採取し、夏季の通常水温(28℃)とそれより3℃高い条件を設定した室内水槽で飼育し、各群体の高温耐性と、飼育期間中の細菌叢の動態を解析した。この水槽実験を二度実施した。

ココビミドリイシの飼育下で得た受精卵をプラヌラ幼生まで発生させ、実験に使用するまで水槽で飼育維持した。また和歌山県立自然博物館の水槽で飼育されていたオニヒトデ1個体もしくはイトマキヒトデ5個体と海水8Lをバケツに入れて1時間静置し、処理海水を実験に使用するまで1日冷蔵保存した。その後48wellプラスチックプレートの各wellに処理海水もしくはコントロール海水とプラヌラ幼生1個体を入れ、27℃もしくは30℃・暗条件で静置した。24時間後に顕微鏡カメラで1分間動画撮影をし、動画解析によってプラヌラ幼生個体の総移動量を算出した。また試験管(13mm×100mm)に8mLの処理海水もしくはコントロール海水とプラヌラ幼生10個体を入れ、27℃もしくは30℃・暗条件で静置した。18時間後に各試験管の上半分・下半分に分布するプラヌラ幼生の数を計数した。

(3) 遺伝子解析

高温ストレスを経験したサンゴ集団において、エピジェネティック変異の概要を把握するために、過去の野外調査で明らかとなっている、恩納村の高温ストレスを受けた地点とストレスをあまり受けなかった地点から、優占するサンゴ種であるココビミドリイシの枝片を採取し、DNA抽出を行った。得られたDNAサンプルを用いて、中立な遺伝的変異とエピジェネティクスな変異を同時に評価できるEpiRAD-seqによるショートリード配列取得を行った。得られたショートリードデータを、ココビミドリイシのゲノム配列にマッピングしてSNPsデータを抽出し、集団構造解析を行った。

多くのミドリイシ属サンゴの産卵時期とは異なる時期に産卵するミドリイシ属の一種より精子を採取した。精子より、高品質のゲノムDNAを抽出した。抽出したゲノムDNAより先進ゲノム支援を受け、塩基配列を決定し全ゲノム塩基配列を決定した。

細菌叢については、各水温処理の実験用枝片を経時的に飼育水槽から採取し、16S rRNAのV1-V2領域をターゲットとしたアンプリコンシーケンスに供した。高品質の細菌由来16S rRNA部分配列を抽出後、97%の類似度を基準としてOperational Taxonomic Unit (OTU) にクラスタリングした。実験用サンゴ枝片からの細菌株の分離にあたっては、当該枝片の組織や飼育水槽の環境水を好気環境において寒天培地に塗布して単コロニー分離を行った。分離株の一部はサンゴの白化を助長することが知られている好気性細菌*Vibrio coralliilyticus*に対する抗菌活性を検討するとともに、16S rRNA遺伝子の全長配列を用いた分子同定に供した。

4. 研究成果

(1) 中程度の高温ストレスが、自然に生育するミドリイシ属サンゴの高温耐性に及ぼす影響(Singh et al., 2023)

2016年夏季に瀬底研究施設前のサンゴ礁で中程度の高温ストレスがあり、ミドリイシ属サンゴが全て白化したが死亡率は低かった(Sakai et al., 2019)。2017年にも同サンゴ礁で2016年と同程度の高温ストレスがあり、前年に白化したが生存したミドリイシ属サンゴの白化率および死亡率は前年より低かった(図1)。このことから、自然に成育するミドリイシ属サンゴが中程度の高温ストレスを経験し生存することで、1年後に高温耐性が向上することが明らかとなった。

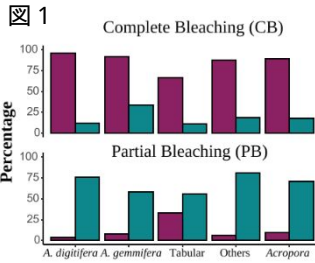


図 1. 瀬底研究施設前のサンゴ礁における 2016 年（えんじ色）と 17 年（緑色）の、種群別および属全体のミドリイシ属サンゴの全白化率（上）と部分白化率（下）。両年とも蓄積高温ストレスの程度は同程度だったが、中程度の高温ストレスを経験し、白化しながらも生存したサンゴの次年度の全白化率が、有意に低かった。

(2) 高温と高二酸化炭素分圧がサンゴ石灰化率に及ぼす影響 (Manullang et al., 2023)。
 コクビミドリイシとエダコモンサンゴを対象とした、高温と高二酸化炭素分圧がサンゴに及ぼす影響の水槽実験から、両種サンゴは高温と高二酸化炭素分圧両方の影響を受けるものの、高温が高二酸化炭素分圧よりも生存や成長に及ぼす影響が強いこと、高温と高二酸化炭素分圧の複合影響は、相加的であることが明らかとなった。

(3) コクビミドリイシの、温度環境が異なる海域での高温耐性と遺伝子組成。
 沖縄県恩納村において、夏季の水温が最高 30 と 36 となる地点を見出し、両地点でサンゴ群集組成と、コクビミドリイシの夏季の白化率と宿主サンゴのメチル化に関わる/関わらない遺伝子組成を解析した。その結果、低水温と高水温地点でサンゴ群集の組成は大きく異なった。また両地点に成育するコクビミドリイシの夏季白化率には有意差がなく、地点間で EpiRAD-seq で得られたコクビミドリイシの SNPs データを元に集団間の遺伝的分化パターンを比較した結果、エピジェネティック変異の方でより顕著な分化が確認された。DNA メタバーコーディング解析の結果褐虫藻及び細菌叢いずれにおいても、地点間で組成に特徴的な違いが検出された。また、サンゴ白化前後の微生物叢解析も実施した結果、上記の地点間と比べると顕著な差異は見られなかったものの、夏季前後で有意な組成変化の違いが検出された。また、ストレス耐性が高い群体では、成長率も高い傾向が確認された。ストレス耐性が異なるサンゴ群体間で、有意に発現量が異なる遺伝子群を抽出し、ストレス耐性に関与すると想定される遺伝子リストを作成した。

(4) 琉球列島の 6 海域におけるサンゴ礁底質組成・底生生物組成およびサンゴ群集の比較 (Afzal et al., 2023)。
 潜水調査の結果、琉球列島全体での生きたサンゴの平均被覆率は $22.4\% \pm 8.0$ (±標準偏差) であることが示された (図 2)。一方、琉球列島のサンゴ礁域で最も出現頻度が高かった底生生物タイプは「芝状藻類 ($39.7\% \pm 7.2$)」であり、奄美大島海域以外の全海域において 40% 以上の平均被覆率を示していた。琉球列島全体でのサンゴ被覆率は、 $22.4\% \pm 7.9$ (平均 ± SD) であり、17 科 55 属のサンゴが記録され、相対的被覆率は、ミドリイシ科 (32.2%) が最も多く、次いでククメイシ科 (27.7%)、ハマサンゴ科 (14.4%) であることが確認された。一方、南琉球でのミドリイシ属の存在比は低い状態であり、これまでに確認されている異常高水温による大規模白化の被害を最も受けている種群であることが示唆された。

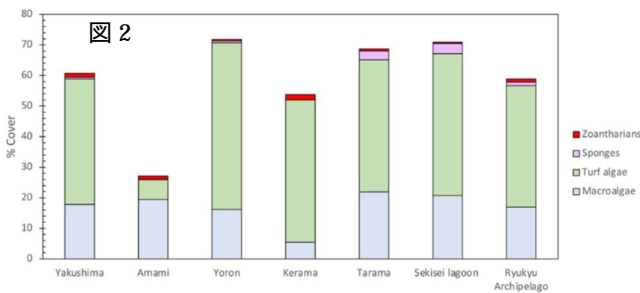


図 2. 琉球列島の各海域(屋久島、奄美、与論、慶良間、屋久島、多良間、石西礁湖(八重山))における底生生物区分毎の被度。

(5) コクビミドリイシ初期ポリプの高温と褐虫藻共生の有無とメチル化率 (Ishida-Castañeda et al., 2023)。
 コクビミドリイシ幼生を定着させ初期ポリプとし、褐虫藻との共生有と無の群に分け、それらを常温 (27) と高温 (32) で飼育し、メチル化測定キット (ELISA Easy Kit, EpigeneTek, USA) を用いて宿主サンゴと褐虫藻を合わせたメチル化率を測定した。その結果、褐虫藻共生がない場合とは逆に共生がある場合は常温でメチル化率が低く、高温でメチル化率が高くなり、褐虫藻との共生が、サンゴ-褐虫藻共生体の高温に対するメチル化に影響することが明らかとなった。

(6) 恩納村の水温環境が異なるサンゴ礁間での、コクビミドリイシの遺伝子組成。
 恩納村の、夏季最高水温が 6 異なる地点でコクビミドリイシの群体片を採取し、地点間で EpiRAD-seq で得られたコクビミドリイシの SNPs データを元に集団間の遺伝的分化パターンを比較した。その結果、エピジェネティック変異の方でより顕著な分化が確認された。DNA メタバーコーディング解析の結果、褐虫藻及び細菌叢いずれにおいても、地点間で組成に特徴的な違いが

検出された。また、サンゴ白化前後の微生物叢解析も実施した結果、上記の地点間と比べると顕著な差異は見られなかったものの、白化前後で有意な組成変化の違いが検出された。また、ストレス耐性が高い群体では、成長率も高い傾向が確認された。ストレス耐性が異なるサンゴ群体間で、有意に発現量が異なる遺伝子群を抽出し、ストレス耐性に関与すると想定される遺伝子リストを作成した。

(7) ヒトデの分泌物を含む海水がココビミドリイシの行動に及ぼす影響。

ココビミドリイシのプラヌラ幼生をオニヒトデ処理海水に入れると幼生が底の方に移動し、鉛直分布に大きく影響する一方で、鉛直分布に対する温度の効果は検出されなかった。またプラヌラ幼生の行動量ではヒトデ類及び高水温処理によって有意な変化は検出されなかった。幼生の鉛直分布が変化するメカニズムは不明だが、下方への移動によって海流分散が抑制され、結果としてオニヒトデの周囲にサンゴの幼生が着底してしまう可能性が見出された。

(8) ミドリイシ属の一種の全ゲノム塩基配列。

多くのミドリイシ属サンゴの産卵時期とは異なる時期に産卵するミドリイシ属の一種の全ゲノム塩基配列を決定した。該当種のゲノム塩基配列が参照できるようになることで、ミドリイシ属のサンゴの幼生を用いた研究を実施できる期間の延長に貢献できる。

(9) ココビミドリイシの温度環境と共存細菌叢

ココビミドリイシの高温耐性が生息地の高温ストレスの強弱で異なるのかを検証する目的で、高温ストレスの強弱の異なる2地点由来のサンゴ枝片の水槽実験中の成長率を比較したところ、常温区・高温区ともに地点間で有意差はなかった。一方で、成長率が高温区のみならず、常温区においても群体ごとに異なっており、高温区の成長率だけをサンゴの高温耐性の指標とするのは不十分と考えられた。そのため、高温区の成長率を常温区の成長率で補正するHSI(常温区の成長率に対する高温区の成長率の比の値)を考案し、各群体の高温耐性の指標に用いた。結果として、どちらの地点由来のココビミドリイシにもHSIの高い群体と低い群体があり、地点間ではHSIに有意差はみられなかった。以上の結果が2度の水槽実験で再現された。

本研究の室内水槽実験におけるサンゴ細菌叢の群集構造の変化の観測からは、「高温ストレスの強い地点のサンゴ細菌叢は高温下で変化しにくい」という事象は見出されなかった。本研究で着目した2地点のサンゴにおいては、サンゴの高温耐性およびサンゴ細菌叢の安定性は、地点ごとに異なるのではなく、むしろ群体ごとに異なる可能性が考えられた。

引用文献

- Afzal, M.S., Takeuchi, K., Iguchi, A., Sakai, K., Dirgantara, D., Nakamura, T., 2023. An assessment of Ryukyu Archipelago's coral communities over a wide latitudinal range. *Deep Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* 208, 105270. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2023.105270>
- Ishida-Castañeda J., Iguchi A., Sakai K., 2023. Changes in DNA methylation in response to heat stress and symbiotic conditions in coral primary polyps. *Marine Ecology Progress Series* (in press).
- Manullang, C., Singh, T., Sakai, K., Miyagi, A., Iwasaki, A., Nojiri, Y., Iguchi, A., 2023. Separate and combined effects of elevated pCO₂ and temperature on the branching reef corals *Acropora digitifera* and *Montipora digitata*. *Mar. Environ. Res.* 188, 106030. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2023.106030>
- Sakai, K., Singh, T., Iguchi, A., 2019. Bleaching and post-bleaching mortality of *Acropora* corals on a heat-susceptible reef in 2016. *PeerJ* 7, e8138. <https://doi.org/10.7717/peerj.8138>
- Singh, T., Sakai, K., Ishida-Castañeda, J., Iguchi, A., 2023. Short-term improvement of heat tolerance in naturally growing *Acropora* corals in Okinawa. *PeerJ* 11, e14629. <https://doi.org/10.7717/peerj.14629>
- Ziegler, M., Seneca, F.O., Yum, L.K., Palumbi, S.R., Voolstra, C.R., 2017. Bacterial community dynamics are linked to patterns of coral heat tolerance. *Nat. Commun.* 8, 14213. <https://doi.org/10.1038/ncomms14213>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Ishida-Castaeda Jun, Iguchi Akira, Sakai Kazuhiko	4. 巻 -
2. 論文標題 Changes in DNA methylation in response to heat stress and symbiotic conditions in coral primary polyps.	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Marine Ecology Progress Series	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） なし	査読の有無 有
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 -
1. 著者名 Singh Tanya, Sakai Kazuhiko, Ishida-Castaeda Jun, Iguchi Akira	4. 巻 11
2. 論文標題 Short-term improvement of heat tolerance in naturally growing Acropora corals in Okinawa	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 PeerJ	6. 最初と最後の頁 e14629 ~ e14629
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7717/peerj.14629	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 該当する
1. 著者名 Afzal Mariyam Shidha, Takeuchi Konomi, Iguchi Akira, Sakai Kazuhiko, Dirgantara Dio, Nakamura Takashi	4. 巻 208
2. 論文標題 An assessment of Ryukyu Archipelago's coral communities over a wide latitudinal range	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography	6. 最初と最後の頁 105270 ~ 105270
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.dsr2.2023.105270	査読の有無 有
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 該当する
1. 著者名 Manullang C, Millyaningrum IH, Iguchi A, Miyagi A, Tanaka Y, Nojiri Y, Sakai K.	4. 巻 8
2. 論文標題 Responses of branching reef corals Acropora digitifera and Montipora digitata to elevated temperature and pCO2	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 PeerJ	6. 最初と最後の頁 e10562 ~ e10562
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7717/peerj.10562	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 該当する

1. 著者名 Kazuhiko Sakai, Tanya Singh, Akira Iguchi	4. 巻 7
2. 論文標題 Bleaching and post-bleaching mortality of Acropora corals on a heat-susceptible reef in 2016	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 PeerJ	6. 最初と最後の頁 e8138 ~ e8138
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7717/peerj.8138	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 該当する

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 頼末武史, Jun Ishida, 伊勢優史, 國島大河, 井口亮, 酒井一彦
2. 発表標題 オニヒトデがサンゴ幼生の行動・鉛直分布パターンへ与える影響
3. 学会等名 日本付着生物学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中村 崇, 上野光弘, Mariyam Shidha Afzal, 小島 (池田) 香奈, 塚本陸, 徳田侑大
2. 発表標題 ミドリイシ属サンゴにおける大規模白化の影響とその後の回復傾向
3. 学会等名 2020年度ブランクトン学会・ベントス学会合同大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村 崇, 塚本 陸, 徳田 侑大, 石田 潤一郎, 池田 香菜, Mariam Shidha Afzal, 井口 亮
2. 発表標題 琉球列島海域での造礁サンゴ群集比較
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 中村 崇, Mariyam Shidha Afzal, 小島(池田) 香奈
2. 発表標題 八重山海域での異常高水温攪乱とサンゴ群集の変化
3. 学会等名 2020年度海洋学会・水産海洋学会・海洋気象学会 九州沖縄地区合同シンポジウム「南西諸島近海における大気・海洋・生態系」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takashi Nakamura
2. 発表標題 Mass coral bleaching impacts and recovery in the Anthropocene Epoch
3. 学会等名 Tohoku Forum for Creativity Emerging Perspectives Program OIST-TOHOKU Joint Workshop on Marine Science: Ocean-Collapse and Regeneration (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 酒井 一彦
2. 発表標題 フィールドベースの長期サンゴ研究の実例と提案
3. 学会等名 日本サンゴ礁学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tanya Singh, Kazuhiko Sakai
2. 発表標題 Recovery of Acropora corals growth after moderate heat stress
3. 学会等名 日本サンゴ礁学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Cristiana Manullang, Akira Iguchi, Yukihiro Nojiri, Kazuhiko
2. 発表標題 Ocean acidification and warming decrease calcification rate and increase mortality of <i>Acropora digitifera</i>
3. 学会等名 日本サンゴ礁学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Nakamura, Kana Kojima Mariyam Shidha Afzal, Mizuki Ishimochi, Yujin Kodama, Yudai Tokuda
2. 発表標題 Post-Mass bleaching impacts on potential reproductive recovery in Sekisei Lagoon, Okinawa
3. 学会等名 East Asia Coral Reef Monitoring Network meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 児玉 悠仁、中村 崇
2. 発表標題 チリメンハナヤサイサンゴ (<i>Pocillopora meandrina</i>) における色彩型間の生態的差異
3. 学会等名 日本サンゴ礁学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mariyam Shidha Afzal, Akira Iguchi, Takashi Nakamura
2. 発表標題 Correlation between pigmentation intensity and mortality rates in larvae of <i>Acropora digitifera</i>
3. 学会等名 日本サンゴ礁学会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 中村崇、山城秀之	4. 発行年 2020年
2. 出版社 成山堂書店	5. 総ページ数 178
3. 書名 サンゴの白化－砂漠化する海と、そのメカニズム	

〔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	中村 崇 (Nakamura Takashi) (40404553)	琉球大学・理学部・准教授 (18001)	
研究分担者	伊藤 通浩 (Ito Michihiro) (80711473)	琉球大学・熱帯生物圏研究センター・助教 (18001)	
研究分担者	井口 亮 (Iguchi Akira) (50547502)	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・主任研究員 (82626)	
研究分担者	頼末 武史 (Yorisue Takefumi) (50766722)	兵庫県立大学・自然・環境科学研究所・准教授 (24506)	
研究分担者	飯屋園 志帆 (Kariyazono Shiho) (00815334)	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・学振特別研究員 (82626)	

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		
米国	カリフォルニア州立大学	グアム大学	