

【研究報告】

サンゴ礁生態系における藻食性魚類の生態的機能に関する研究 (サンゴ礁再生保全地域モデル事業)

秋田雄一*, 岩井憲司¹, 上原匡人²

Study of the ecological function of herbivorous fishes in coral reef ecosystems

Yuichi AKITA *, Kenji IWAI¹ and Masato UEHARA²

本研究では、サンゴ礁生態系において、藻食性魚類の生態的機能が堆積物の影響により低下している可能性を検証するため、沖縄県内の4海域で藻食性魚類相およびその摂餌頻度、堆積物の量や、海底の起伏度、水温といった環境要因ならびに、藻類の繁茂状況等を把握することを目的とした。本年度は、調査海域の選定と予備試験を実施した。

熱帯から亜熱帯にかけての沿岸域には、石灰質の骨格を持つ多種多様な造礁サンゴ（西平・Veron, 1995）が分布する。造礁サンゴは、多種多様なサンゴ礁性の水生生物を育む生産基盤となっているほか、波浪から陸域を保護する防波堤としての機能や、美しい水中景観を呈することから観光資源として機能している（日本サンゴ礁学会, 2011）。このためサンゴ礁域は、水産、防災、観光など多様な経済的価値を有している。

しかしながら造礁サンゴ類は、近年の気候変動に伴う海水温の上昇による白化や大型台風による物理的破壊、オニヒトデの大発生による被食、陸域からの環境負荷の増加、疾病の流行などによってその生息面積が大幅に減少している（Bellwood et al., 2004）。近年では、2016年の八重山海域（中村, 2017）や、グレートバリアリーフ（Hughes et al., 2017）における大規模白化現象とそれに続く大量死が確認されている。

このような状況から、分布域の各地でサンゴ礁の保全や再生に向けた研究がなされている。沖縄県においては、有性あるいは無性生殖によって人工的に育成したサンゴ種苗を植え付ける人工移植や（比嘉ほか, 2018）、親群体の集中的な保護・育成による卵・幼生の供給基地造成（沖縄県環境保全部自然保護課, 2017）といった方法が開発されている。しかしながら人為的な再生手法は、その適用面積が非常に限定的であることや、供給元の親群体を傷つける可能性、遺伝的多様性の確保の問題のほか、不要な開発の免罪符として利用される可能性があるなど、問題も指摘されている（日本サンゴ礁学会サンゴ礁保全委員会, 2008）。

本質的なサンゴ礁環境再生方法としては、陸域からの環境負荷を減らし、環境を改善することでサンゴの再生産が健全

な状態に維持されることが必要である。たとえば陸域から流入する微粒子や栄養塩の直接的な影響として、サンゴの再生産や着底、加入の成功率を低下させることが知られている（Rogers, 1990; Fabricius et al., 2003）。また、微粒子の堆積が多い海域では、樹枝状・糸状藻類が多い傾向があるとされている（Purcell, 2000）。さらに岩盤上に繁茂するマット状の微細藻類に微粒子が堆積することによる交互作用によって、サンゴの加入が阻害されることが示されている（Birrell et al., 2005）。本県においては、1995年に「沖縄県赤土等流出防止条例」を策定し、大規模な土木工事等に起因する赤土の流出が大幅に削減されたものの、農業に対しては根本的な対策がとれておらず、農地からの流出は8%減少したのみとなっている（沖縄県衛生環境研究所, 1998）。また近年では、農地からの赤土などの流出を抑制するためのグリーンベルトによる裸地の被覆や沈砂池・浸透枘造成、裸地期間が短くなるような営農方法への転換などが検討されているが、その効果は限定的である（仲地, 2002）。

一方、世界最大のサンゴ礁域を有し、サンゴ礁生態系の研究先進地であるオーストラリアでは、藻食性生物の持つ生態的な機能が生態系の健全な維持に重要な役割を果たしていることが明らかにされてきている（Bellwood et al., 2006; Hughes et al., 2007; Green and Bellwood, 2009）。具体的には、藻食性魚類が大型藻類（サンゴと日照や生息場所をめぐって競合関係にある）を食べることで、大型藻類優占環境へ遷移することを防ぐ機能や、基質上の付着藻類や有機物などを漉ぎ取ったり、そぎ落としたりして食べることで、サンゴ幼生が着底できる基質を作り出す機能、摂餌の際にサンゴ基質を削り取り、生物浸食をする機能などである（Green and Bellwood, 2009; Bobnaldo et al., 2014）。しかし、陸域の開

*E-mail : akitaych@pref.okinawa.lg.jp 本所（現所属：沖縄県水産海洋技術センター普及班）

¹現所属：沖縄県農林水産部宮古農林水産振興センター

²現所属：恩納村漁業協同組合

発などにより流出した赤土等の微粒子が着生藻類に堆積すると、これらを摂餌する藻食性魚類の嗜好性が低下し、附着藻類を除去する機能が低下することが明らかにされている

(Bellwood and Fulton, 2007; Goatley and Bellwood, 2012; Goatley et al., 2016; Tebbet et al., 2017b). このような状況が継続すると、サンゴの加入・着底が阻害され、サンゴ優占の環境から他の底質環境へ移行してしまう、いわゆるフェーズシフト (Done, 1992) が進行する可能性がある。

沖縄県において、藻食性魚類の生態的機能に着目した研究例はいくつか見られるものの (Nanami, 2018; Ohta et al. unpublished), 実際の海域における生態的機能の評価に着目した研究例はまだ見られない。

そこで本研究では、沖縄県内において藻食性魚類の生態的機能が堆積物の影響により低下している可能性を検証することを目的とした。それに向け本年度は、調査海域の選定と予備試験を実施した。

材料及び方法

(1) 調査海域

調査海域は、糸満市喜屋武、沖縄市泡瀬、恩納村前兼久および伊江村川平とした (図 1)。各調査海域の選定理由として、喜屋武は水産海洋技術センターの所在地であり、調査手法の予備的な試験や検討に利便性が高いこと、泡瀬は、中城湾奥部に位置し、他の調査海域と物理的・生物的な環境が異なること、前兼久は、サンゴの人工移植やオニヒトデ駆除など積極的な保全活動をおこなっていること、川平は、人為的に岩盤表面の藻類を除去することでサンゴの着底を促進させている可能性が示されていることが挙げられるため、これらの海域で得られたデータを比較することとした。

本年度は、これらの地域において、試験区を設ける海域の探索と、携帯型 GPS による座標の記録、試験区画の仮設置および、周辺海域に生息する藻食性魚類の分布密度を調査した。また調査に使用する水中ポンプや、魚類侵入防止ケージなどの機材を作成した。

はじめに、当該海域の地形や環境を把握し、試験区の設置適地を選定するため、各調査海域において潜水調査を実施した (表 1)。各海域で選定した調査地点では、魚類侵入防止試験用のケージ (後述)、堆積物除去試験 (後述、処理区・対象区) を設置するための方形枠 (50 cm 四方) の四隅にコンクリートネイルを打ち込んだ。これらの方形枠 3 つと、堆積物採集用のセディメントトラップ (後述) を 1 セットとし、各海域 3 セットの試験区を設置した。

(2) 海域ごとの岩盤起伏度の評価

各調査海域における試験区の設置にあたり、岩盤の起伏の均一性を評価するため、500 mm 四方の試験区内で起伏に合わせてテープメジャーないしロープを這わせ、表面上の距離を mm 単位で計測した。表面の計測は、各辺に平行になるよう 2 回ずつ、計 4 回実施し、測定距離を起伏度とした。起伏度は、各海域 12 カ所 (合計 48 カ所計測) 調査し、一元配置分散分析 (One-way ANOVA) により海域間の差異を検討し

た。

(3) 藻食性魚類の現存量調査

設定した試験区周辺の礁斜面 (水深約 5 m) において、アイゴ科、ニザダイ科、イスズミ科、ブダイ科を対象に現存量を調査した。具体的には、スキューバ潜水により、10 分間遊泳し、その間に確認した魚種の種と尾叉長 (以下、体長)、個体数を記録した。この際、対象魚種の体長は 5 cm 単位とし、遊泳者の両側 2.5 m (幅 5 m) の範囲内に分布するもののみを調査対象とした。なお、ニザダイ科の一部 (サザナミハギ *Ctenochaetus striatus*, ナガニザ *Acanthurus nigrofusus*) については、同科内でも食性が異なり生態的機能に差異があることが示唆されているが (Tebbet et al., 2017a,b), 外観が酷似しており短時間に大量の記録を取る必要がある本調査では、ニザダイ科複数種として記録した。この際、防水ケースに格納した携帯型 GPS (Garmin 社製 e-Trex10J) を曳航し、調査距離を記録した。観察した種別の体長と個体数から、体長・体重関係式 (太田, 2007) を用いて重量に変換し、食性に基づく生態的機能群別 (Functional Group; Green and Bellwood, 2009) の現存量を推定した。調査対象種の食性については、Sano et al. (1984) と Green and Bellwood (2009) を参照し、以下の生態的機能群、岩盤表面の藻類や有機物をかすり取るグループ (Grazers/ Detritivores)、大型藻類をついばむグループ (Browsers) および岩盤表面の藻類を基質ごと削り取るグループ (Scrapers/ Excavators) に分類した。なお推定した現存量は、移動距離から算出した調査面積で除し、単位面積当たりの現存量 (kg/ 500 m²) に換算した。

(4) 藻食性魚類の摂餌行動観察

岩盤上に生える藻類 (Epilithic algal mat: EAM) に堆積する微粒子が、藻食性魚類の摂餌行動に与える影響を評価するため、各海域において試験区の選定・各機器の試験的な設置と動作確認をした。

(5) 調査機器の開発とテスト

1) 行動観察用ビデオカメラ

藻食性魚類の摂餌行動を記録するために、水深 30m までの水中撮影に使用可能な防水ハウジング付きビデオカメラ (ELECOM 社製; ACAM-F01SBK, 図 2) を使用した。作動試験は喜屋武地先の海域で実施し、付属の固定マウントを用い、コンクリートブロックとステンレス製の寸切りボルトで作成した台座に固定した。設置水深 5~7 m で、完全充電時における FHD モード (画質 1,920×1,080 ピクセル) での連続撮影可能時間や、防水性能などを評価した。

2) セディメントトラップ

各海域における一定期間内の微粒子の堆積量を評価するため、セディメントトラップ (English et al., 1997) を用いた。トラップは、直径 5 cm・長さ 10 cm の塩化ビニール製パイプに、同素材のキャップを装着し、岩盤上に打ち込んだ鉄筋

にインシュロックタイで岩盤から 20 cm の高さに固定した (図 3)。本調査では、次年度に向けた予備的な試験として喜屋武と泡瀬でそれぞれ 1 基ずつ設置し、期間は、それぞれ 8 日と 14 日とした。トラップを回収する際には、塩化ビニール製のキャップを水中で装着し、堆積した内容物が逸散しないようにした。内容物は研究室に持ち帰った後、堆積物を含んだ海水ごとガラス繊維製フィルター (目合い 1.0 μm , 直径 47 mm) で吸引濾過し、105°C のオーブンで 90 分間乾燥させ、0.001 g 単位で検量した。この際、評価する堆積物は、Tebbet et al., (2017c) を参考に、粒径 2,000 μm 未満 (砂, シルト, 粘土; ISO 14688-1) とした。海域別の堆積量を評価するにあたっては、検量した堆積物重量をセディメントトラップの設置日数で除し、1 日あたりの堆積量に換算した。

3) 水温計

各調査海域における海水温を記録するため、水温ロガー (Onset 社製 Hobo water temp proV2) を設置した。

4) 堆積物除去用ポンプ

EAM に堆積する堆積物を除去するための水中ポンプを制作し、動作確認をした。ポンプ本体は、12 v の直流電源 (自動車用バッテリー) で作動する汎用の水中ポンプであり (株式会社工進 マリンペット BL-2512N), 本体近くの電源コード途中に、ビニールチューブとシリコン製シーリング材で防水したスイッチを組み込んだ。電源コードの長さは、20 m ないし 50 m (途中で仕様変更) とし、過電流防止のヒューズ (5 A) を組み込み、船上に設置したバッテリーにワニグチクリップで接続した (図 4)。なお、ポンプを制作した当初電源コードには、ある程度硬く、絡みにくいことから屋内配線用 2 芯平打ちコード (直径約 2 mm の銅線) を使用した。ポンプの動作確認は喜屋武で実施し、岩盤上の堆積物を吸引または吹き飛ばしにより除去する方法を試した。

5) 魚類侵入防止ケージ

一定区画の岩盤表面について、藻食性魚類が表面の藻類を摂餌できないようにするためのケージ (図 5; 目合い 2.5 cm, 白色トリカルネット。幅・奥行き 50 cm・高さ約 30 cm, 図 5) を岩盤に打ち込んだ鉄筋およびコンクリートネイルにより設置した。

結 果

(1) 選定した調査海域の評価

今回選定した調査海域の特徴を以下に述べる。なお、今年度は各海域の評価が可能な客観的データを収集していないため、著者による主観的な分析である。喜屋武は、沖縄島の南端付近に位置し、外海からの海水交換が大きく作用するため、岩盤上の堆積物は少なく、透視度が高かった。ハナヤサイサンゴ属 *Pocillopora* やミドリイシ属 *Acropora* の造礁サンゴ類は多く分布するものの、海流の影響から大きな群体は少なく、被覆状のものが多かった。藻食性魚類以外の魚類で

は、フエダイ科やハタ科、ベラ科が多くみられ、比較的分布量が多い様子であった。泡瀬は、中城湾奥部に位置することや、周辺海域での埋立や浚渫の影響と思われる濁りがあり、堆積物が非常に多く、透視度は低かった。分布する造礁サンゴ類は、多くがハマサンゴ属 *Porites* で、ミドリイシ属は、人工移植されたもの以外は少なかった。また、ウミウチワ属 *Pandina* (おそらく、ウスユキウチワ *P. minor*) やホンダワラ属 *Sargassum* などの大型褐藻が局所的に群落を形成していた。魚類では、シロクラベラ *Choerodon schoenleinii* が多くみられたほか、縄張り内で糸状藻類を栽培するクロソラスズメダイなどが多くみられた。前兼久は、近隣の河川の影響か、比較的透視度が低く、サンゴ被度は低く、小型のキクメイシ類、ハマサンゴ属、ハナヤサイサンゴ属やソフトコーラルの群体が散見された。魚類ではフエダイ科やハタ科などが比較的多く見られ、各個体の体長が大きい印象があった。川平は、外海に面しており潮通しが良く、透視度が高かった点で喜屋武と似ていたが、大型のミドリイシ属群体が多い点で大きく異なった。魚類ではスジアラ *Plectropomus leopardus* などのハタ科が多くみられた。

(2) 藻食性魚類の現存量調査

各海域で予備的に実施した魚類相調査の結果、5 科 27 種以上の藻食性魚類が確認された。すべての海域で最も多く出現した分類群は、ブダイ科で、合計 14 種が記録された (表 2)。観察された種数は喜屋武、伊江、前兼久で多く、泡瀬では少なかった。出現種数の多かったブダイ科の平均体長は、前兼久で大きく、泡瀬で小さい傾向が見られたが、今回は統計的な手法による検討はしなかった。観察された藻食性魚類を生態的機能群別に整理し、単位面積あたり重量に換算すると Excavator/Scraper は、泡瀬で顕著に低かった (図 6)。

(3) 調査海域の起伏度

各海域で調査した平均起伏度と標準偏差 (Mean $\pm$ SD) は、喜屋武で 575.9 $\pm$ 53.4 mm, 泡瀬で 557.1 $\pm$ 35.8 mm, 前兼久で 573.1 $\pm$ 61.7 mm, 伊江で 585.5 $\pm$ 76.4 mm であった。これらの数値について Bartlett 検定で等分散性を確認したところ、等分散性は確認できなかった (p < 0.001), Kruskal-Wallis の順位と検定で検定した結果、有意差は見られなかった (p = 0.3911)。

(4) 調査機器の開発とテスト

1) 行動観察用ビデオカメラ

喜屋武地先でテストした結果、連続撮影可能時間は約 2 時間 30 分から 3 時間であったが、カメラによりばらつきがあった。調査海域での最大水深は約 8 m であったが、この範囲での防水性能はおおむね良好で、水中でのボタン操作 (電源 on/off とモード切り替え) でも漏水しなかった。喜屋武で撮影した動画には、ナガニザ等が岩盤上の藻類を摂餌の様子が記録されており、試験区画から 2~4 m 程度の距離 (目測) であれば、種レベルでの判別が可能な画質であった (図 7)。

しかしながら、カメラに付属の固定マウントは、各部のボルト・ナットが鉄製であり、数回の使用で錆びて膠着した。

2) セディメントトラップ

喜屋武、泡瀬におけるセディメントトラップの設置期間は、それぞれ 8 日間と 14 日間であった。両海域で回収した堆積物の乾燥重量は、喜屋武、泡瀬でそれぞれ 0.1496 g, 0.2799 g であり、単位面積・期間あたり堆積量に換算すると 8.67 g/m²/day, 10.13 g/m²/day であった。

3) 水温計

各海域で記録した水温を図 9 に示す。泡瀬では設置時に、喜屋武では交換時に水温計を紛失したため記録ができなかった。

4) 堆積物除去用ポンプ

喜屋武において作動をテストした結果、堆積物を吸引して除去する方法（当初、一定面積の堆積物量を吸引してビニール袋に回収し、面積あたり堆積物量を評価する方法を検討していたため）では、サンゴ礫や小石を吸引してしまい、インペラを損傷する可能性が生じた。そこで、排水側から噴出される海水の勢いを利用して堆積物を除去する方法に変更した。また、当初は電源コードとして屋内用配線コードを使用していたが、芯が頻繁に折れ曲がるため金属疲労により断線する可能性があることから、屋外用複芯コードに変更した。以上の動作確認においては、漏水や作動不良もなく順調に堆積物の除去ができた。

5) 魚類侵入防止ケージ

喜屋武においてケージ 21 日間設置（2018 年 2 月 8 日～3 月 1 日）した結果、波浪や海流による損壊は無く、岩盤との隙間もふさがれた状態が維持されていたため、魚類の侵入はなかったと考えられた。

ケージの設置されていた岩盤上には、まわりの岩盤上と比較してもとりたてて変わった様子がなく、今回の設置期間では着生藻類や大型藻類が繁茂する様子は確認されなかった（図 8）。

考 察

今年度の予備調査では、次年度以降の調査や実験を実施する海域を選定した。海底の微小な地形は、サンゴ幼生の着底や、藻類の分布、堆積物の蓄積に影響を与えられられる。各海域において、海底の起伏度を比較した結果、統計的に有意な差はみられなかった。したがって、本年度調査した各海域を今後実施する調査・研究の定点として採用することとした。しかしながら、起伏度以外の海域ごとの環境特性は主観的な印象でしかなく、客観的なデータが得られていないため、今後は海域ごとの特徴を数値化できるよう、サンゴ被度、堆積物の量および藻食性魚類の現存量などのデータを収集していく予定である。また、沖縄県において藻食性魚類の多

くは水産対象種として漁獲されているため、漁獲統計データなども活用し、漁獲量の評価も試みたい。

各海域における藻食性魚類の分布量を調査した結果、生態的機能群によっては海域による分布量に大きな差異が見られた。今年度の調査では、各海域での調査が 2～3 回であり、調査で得られた単位面積あたり現存量の平均値に大きな誤差が見られたため、今後調査回数を増やして誤差範囲を小さくし、各海域の特徴を正しく評価できるようにしていく必要がある。

藻食性魚類の摂餌行動についての先行研究では、堆積物除去直後から 3 時間以内に摂餌頻度の向上が集中してみられることが分かっている（Bellwood and Fulton, 2008）。今回テストしたカメラの録画可能時間は、最大で 3 時間程度あったことから、堆積物除去操作後の摂餌頻度の変化について観察するには十分な録画時間を持っていると考えられた。また、撮影した動画の画質を確認したところ、予定している設置条件で映った魚種は、種レベルでの同定が可能な解像度であったため、本試験においても同機種を採用することとした。

海底に堆積した赤土の量を推定する方法として、沖縄県内では SPSS が広く利用されている（大見謝・満本, 2001；上原・仲盛, 2016）。SPSS は、赤土の粒子が非常に細かく、懸濁物質として水層に滞留する性質を利用し、透視度計を用いてその堆積量を推定する方法である（大見謝, 2003）。これに対して、セディメントトラップでは、赤土等の陸域由来のケイ酸質（silicate）を含め、有機物やサンゴ礁由来の炭酸塩（Carbonate）の砂もすべて堆積物として回収・評価することが可能である。本研究では、これにより海域ごとの堆積物の組成（サンゴ礁由来 vs 陸域由来）を分析する予定であるため、セディメントトラップによって堆積物を評価することとした。しかしながら、SPSS は赤土の評価手法として非常に簡便であるため、今後は先行知見を参考に目的に応じた手法を採用していきたい。

海底の堆積物を除去する操作実験をした先行研究では、エアリフト式のポンプで吸引して堆積物を除去する方法（Bellwood and Fulton, 2008）と圧縮空気の吹き付けで除去する方法がある（Goatley and Bellwood, 2012）。予備調査では、まず吸引する方法を試したが、小石などの巻き込みによるインペラの破損が懸念されたため、途中からポンプの排水を吹き付ける方法に変更した。いずれの方法でも、除去した堆積物が除去区以外に再堆積し、試験結果に影響を与える可能性を回避しなくてはならない。Goatley and Bellwood (2012) では、非処理区には透明塩ビ板で覆いをしたうえで処理区の堆積物をし、さらにエアリフト式ポンプで離れた場所（ホース長 5 m）に懸濁した海水を排水していた。今後の実験精度向上のためには、このような事例を参考に再堆積の回避について検討していく必要がある。

本研究では、今後ケージ内にタイルを設置し、藻食性魚類を排除した条件下で藻類の現存量が増加するかを調べる計画である。これまで、小型のケージにより藻食性魚類を排除する実験では、藻類の繁茂について、富栄養化と藻食性魚類の

減少の影響を評価するもの (Miller et al., 1999), 藻類の増加によるサンゴの死亡率 (Jompa and McCook, 2002) や成長率 (Lirman, 2001) への影響を評価するものなどが実施されてきた。このようなケージ設置下では, 藻食性魚類による底質への作用 (摂餌に伴う堆積物の移動) が抑制されるため, 藻類の間に多くの堆積物が蓄積する (Latrille et al., 2019)。したがって, 藻類の現存量を評価するには, 堆積物を除去した重量を測定し, 評価する必要がある。本研究では, 回収した藻類と堆積物の混合物について, いったん乾燥重量を計量後, 過酸化水素で有機物 (藻類) を分解除去し, 残った堆積物重量を計量することで, 藻類の乾燥重量を評価する予定である。

謝 辞

本研究の計画には, 酒井一彦教授 (琉球大学熱帯生物圏研究センター), 桑村哲生教授 (中京大学), 太田 格氏 (沖縄県水産課), 久保弘文氏, 鹿熊信一郎氏 (海洋深層水研究所), 長田智史氏, 佐川鉄平氏 (沖縄県環境科学センター), の各氏にご助言, 協力をいただきました。また, 野外調査に当たっては, 小堀端昭広氏 (糸満漁協), 柳田一平氏 (沖縄市漁協), 金城 勝氏, 金城 勉氏 (恩納村漁協), 八前隆一組合長, 大城康隆氏, 宮里和義氏, 島袋信夫氏 (伊江漁協) の各氏に便宜を図っていただきました。サンプルの分析, 調査機材の準備や管理には, 非常勤職員の豊里美智代氏, 平良和子氏にご協力をいただきました。この場を借りて, 深く感謝申し上げます。

文 献

Bellwood DR, Hughes TP, Folke C, Nyström M 2004: Confronting the coral reef crisis. *Nature*, 429: 827-833.

Bellwood DR, Hughes TP, Hoey AS 2006: Sleeping Functional Group Drives Coral-Reef Recovery. *Current Biology* 16, 2434-2439.

Bellwood DR, Fulton CJ 2008: Sediment-mediated suppression of herbivory on coral reefs: Decreasing resilience to rising sea levels and climate change? *Limnology and Oceanography* 53: 2695-2701.

Birrell CL, McCook LJ, Willis BL, 2005: Effects of algal turfs and sediment on coral settlement. *Marine Pollution Bulletin*, 51: 408-414.

Bonaldo RM, Hoey AS, Bellwood DR, 2014: The ecosystem roles of parrotfishes on tropical reefs. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*. 52: 81-132.

English S, Wilkinson C, Baker V, 1997: Survey Manual for Tropical Marine Resources 2nd Edition. Australian Institute of Marine Science, Townsville. pp390

Fabricius KE, Wolanski E, Wild C, Abele D 2003: Effects of transparent exopolymer Particles and muddy terrigenous sediments the survival of hard coral recruits. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 56: 1-9.

比嘉義規, 新里宙也, 座安佑奈, 長田智史, 中村良太, 横倉 厚, 謝名堂 聡, 大森 信, 2018: 沖縄県サンゴ礁保全再生事業における無性生殖を利用したサンゴの種苗生産と植込み技術の段階的進歩. *日本サンゴ礁学会誌*, 20: 21-37.

Goatley CHR, Bellwood DR 2012: Sediment suppresses herbivory a coral reef depth gradient. *Biological Letters*, 8: 1016-1018.

Goatley CHR, Bonaldo RM, Fox RJ, Bellwood DR 2016: Sediments and herbivory as sensitive indicators of coral reef degradation. *Ecology and Science* 21, 29.

Green AL, Bellwood DR 2009: Monitoring functional groups of herbivorous fishes as indicators of coral reef resilience – A practical guide for coral reef managers in the Asia Pacific region. IUCN working group on climate change and coral reefs. IUCN, Gland, Switzerland

Hughes TP, Rodrigues MJ, Bellwood DR, Ceccarelli D, Hoegh-Guldberg O, McCook L, Moltschaniwskyi N, Pratchett MS, Steneck RS, Willis B, 2007: Phase Shifts, Herbivory, and the Resilience of Coral Reefs to Climate Change. *Current Biology* 17: 360-365.

Hughes TP, Kerry JT, Simpson T, 2018: Large-scale bleaching of corals on the Great Barrier Reef. *Ecology* 99: 501.

Jompa J, McCook LJ 2002: Effects of competition and herbivory on interactions between a hard coral and a brown alga. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 271, 25-39.

Latrille FX, Tebbett SB, Bellwood DR 2019: Quantifying sediment dynamics on an inshore coral reef: Putting algal turfs in perspective. *Marine Pollution Bulletin* 141: 404-415.

Lirman D 2001: Competition between macroalgae and coral: effects of herbivore exclusion and increased algal biomass on coral survivorship and growth

Miller MW, Hay ME, Miller SL, Malone D, Sotka EE, Szmant AM 1999: Effects of nutrients versus herbivores on reef algae: A new method for manipulating nutrients on coral reefs. *Limnology and Oceanography* 44, 1847-1861.

仲地宗俊 2002: 沖縄県における農地からの赤土等流出防止に関する自治体の対策と農家の対応. *農村計画学会誌* 21: 232-239.

中村 崇 2017: 2016 年夏期に発生した石西礁湖での大規模白化. *日本サンゴ礁学会誌*, 19: 29-40.

日本サンゴ礁学会 (編) 2011: サンゴ礁学—未知なる世界への招待—, 東海大学出版会, pp. 362.

西平守孝, Veron JEN 1995: 日本の造礁サンゴ類. 海游舎, 東京, 439pp

大見謝辰男 2003: SPSS 簡易測定法とその解説. 沖縄県衛生環境研究所事業報告書 37: 99-104.

大見謝辰男, 満本裕彰: 2001 サンゴ礁における濁度・水平透明度・SPSS 測定値の関係について. 沖縄県衛生環境研究所事業報告書 35: 103-109.

太田 格, 工藤利洋, 山本以智人, 2007: 主要沿岸性魚類の体長-体重関係式 (八重山海域資源管理型漁業推進調査). 沖縄県水産海洋研究センター事業報告書 68, 184-188.

沖縄県衛生環境研究所 1998: 条例施行前後の赤土等年間流出量比較表の解説.

沖縄県環境保全全部自然保護課 2017: 沖縄県サンゴ礁保全再生事業総括報告書.

Purcell SW 2000: Association of epileptic algae with sediment distribution on a windward reef in the northern Great Barrier Reef, Australia. Bulletin of Marine Science 66: 199-214.

Rogers CS, 1990: Responses of coral reefs and reef organisms to sedimentation. Marine ecology progress series. 62: 185-202.

Sano M, Shimizu M, Nose Y, 1984: Food habits of Teleostean reef fishes in Okinawa Island, Southern Japan. The University Museum The University of Tokyo Bulletin 25

Tebbett SB, Goatley CHR, Bellwood DR, 2017a: The Effects of Algal Turf Sediments and Organic Loads on Feeding by Coral Reef Surgeonfishes. Plos one 12: 10.1371/journal.pone.0169479

Tebbett SB, Goatley CHR, Bellwood DR, 2017b: Clarifying functional roles: algal removal by the surgeonfishes *Ctenochaetus striatus* and *Acanthurus nigrofusus*. Coral Reefs 36: 803-813.

Tebbett SB, Goatley CHR, Bellwood DR, 2017c: The Effects of Algal Turf Sediments and Organic Loads on Feeding by Coral Reef Surgeonfishes. Plos one 12: 10.1371/journal.pone.0169479.

表1. 各調査海域における調査地選定のための予備調査の実施状況

調査海域	調査日時	調査内容等
喜屋武	2018年1月30日 2018年2月8日 2018年3月1日	センターの取水管沿いの、水深5~10 m程度の根を調査地に選定し、コンクリートネイルでケージを固定するテストをおこなった。
泡瀬	2018年2月15日	保護区になっている海域(100m ²)内を探索的に遊泳し、藻食性魚類が見られ、周辺にサンゴが散見される岩盤上を定点に選定した。
前兼久	2018年3月13日	水路部斜面の水深5~8 mの場所を探索的に遊泳し、試験区が設置できそうな場所を選定した。
川平	2018年3月16日	水深5~10 mの海域を探索的に遊泳し、サンゴ被度が極端に多くなく、試験区が設置できるような場所を選定した。

表2. 目視観察調査で出現した藻食性魚類の一覧. 出現した場合は、その平均体長、標準偏差を表示

科名	種名	学名	生態的機能群	喜屋武	泡瀬	前兼久	川平
イスズミ	イスズミ	<i>Kyphosus vaigiensis</i>	Browsers				25.0
イスズミ	テンジクイサキ	<i>K. cinerascens</i>	Browsers				15.0
イスズミ科計				0	0	0	2
ブダイ	オオモンハゲブダイ	<i>Chlorurus bowersi</i>	Scrapers/small excavators	20.0			
ブダイ	ハゲブダイ	<i>C. sordidus</i>	Scrapers/small excavators	9.3±0.34	10.0±0.25	24.3±0.16	19.1±0.14
ブダイ	ナンヨウブダイ	<i>C. microrhinos</i>	Scrapers/small excavators			15.0	15.0
ブダイ	オビブダイ	<i>Scarus schlegeli</i>	Scrapers/small excavators	19.7±0.14	10.0	21.8±0.37	20.0±0.54
ブダイ	ナガブダイ	<i>S. rubroviolaceus</i>	Scrapers/small excavators	30.0			
ブダイ	カメレオンブダイ	<i>S. chameleo</i>	Scrapers/small excavators			20.0	
ブダイ	イチモンジブダイ	<i>S. forsteni</i>	Scrapers/small excavators	19.5±0.49		30.0	19.5±0.28
ブダイ	アミメブダイ	<i>S. frenatus</i>	Scrapers/small excavators				15.0
ブダイ	レモンブダイ	<i>S. quoyi</i>	Scrapers/small excavators	15.0			
ブダイ	カワリブダイ	<i>S. dimidiatus</i>	Scrapers/small excavators				15.0
ブダイ	スジブダイ	<i>S. rivulatus</i>	Scrapers/small excavators	18.3±0.28		18.3±0.49	20.0
ブダイ	ヒブダイ	<i>S. ghobban</i>	Scrapers/small excavators		15.0		
ブダイ	キビレブダイ	<i>S. hypselopterus</i>	Scrapers/small excavators	15.0			
ブダイ	ブチブダイ	<i>S. niger</i>	Scrapers/small excavators			30.0	
ブダイ科計				8	3	7	7
マンジュウダイ	ミカヅキツバメウオ	<i>Platax boersii</i>	Browsers			30.0	
マンジュウダイ科計				0	0	1	0
アイゴ	ハナアイゴ	<i>Siganus argenteus</i>	Detritivores			20.0	
アイゴ	ゴマアイゴ	<i>S. guttatus</i>	Detritivores		25.5±0.10		
アイゴ	ヒメアイゴ	<i>S. virgatus</i>	Detritivores	25.0	8.2±0.16		16.7±0.35
アイゴ科計				1	2	1	1
ニザダイ	テングハギ	<i>Naso unicornis</i>	Browsers	15.0	25.0		
ニザダイ	ミヤコテングハギ	<i>N. lituratus</i>	Browsers	11.7±0.30		13.3±1.55	16.3±0.29
ニザダイ	ゴマニザ	<i>Acanthurus guttatus</i>	Grazers/detritivores	10.0			
ニザダイ	ニジハギ	<i>A. lineatus</i>	Grazers	15.0		15.0	15.0±0.26
ニザダイ	モンツキハギ	<i>A. olivaceus</i>	Grazers/detritivores	15.0			
ニザダイ	オスジクロハギ	<i>A. blochii</i>	Grazers/detritivores	5.0	17.1±0.31	21.7±0.21	
ニザダイ	クロハギ属+サザナミハギ属※	Surgeon fishes Spp.	Grazers/detritivores	9.3±0.09	8.0±0.28	13.3±0.11	10.3±0.11
ニザダイ科計				7	3	4	3
合計種数				16	8	13	13
平均調査距離(m/10分)				140.5	110.4	142.0	138.0

※多くはナガニザ *Acanthurus nigrofusus*

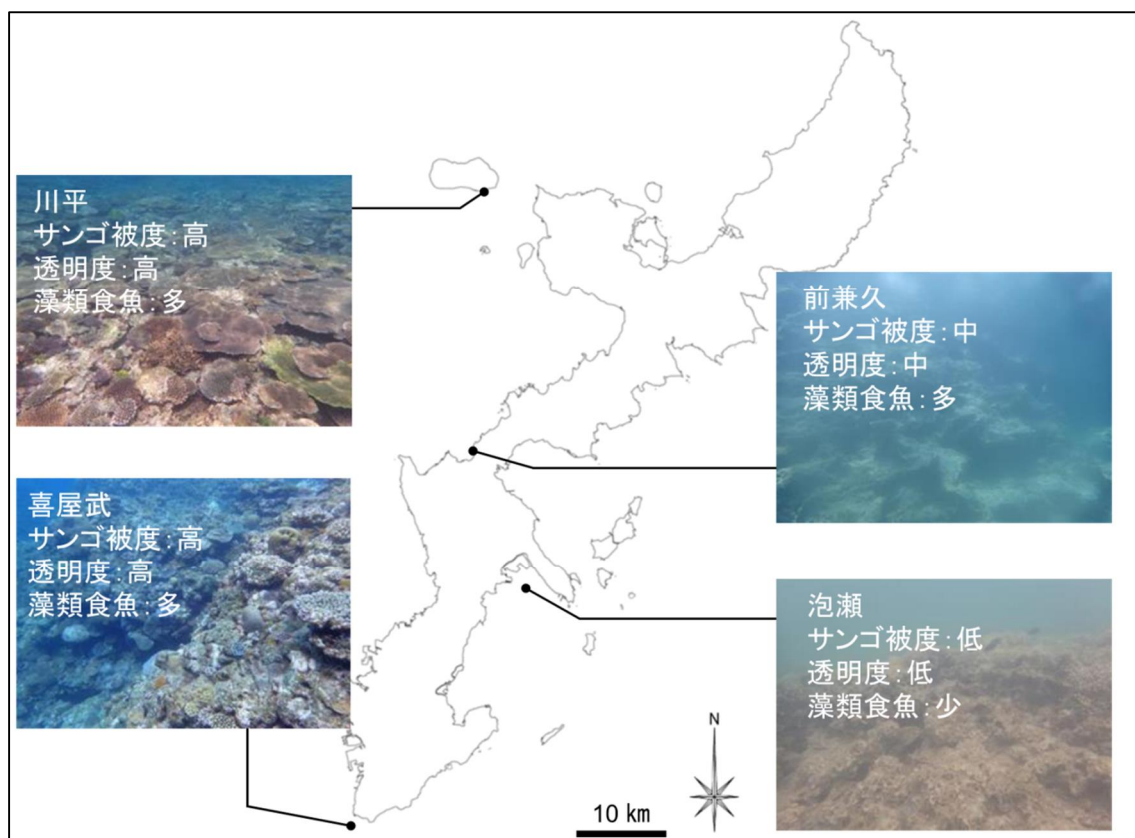


図 1. 調査海域の位置と、調査地周辺の写真および目視観察した環境概要.

(各環境指標に関しては、定量的なものではなく、目視による直感的なものである.)



図 2. 水中撮影カメラ.

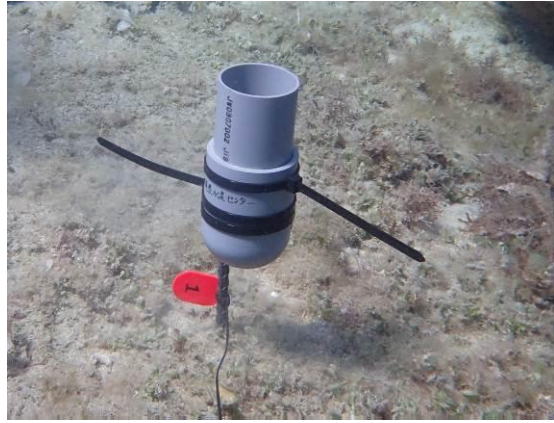


図 3. セディメントトラップ.

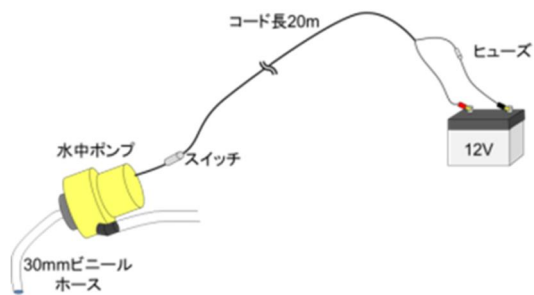


図 4. 堆積物除去用ポンプの模式図.



図 5. 魚類侵入防止ケージ.

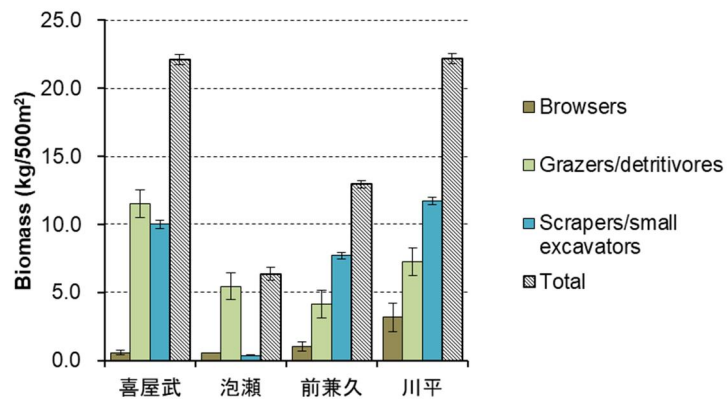


図 6. 各海域における機能群別の現存量.



図 7. ナガニザ (喜屋武)



図 8. ケージ除去後の岩盤表面.