

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 31 日現在

機関番号：18001

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21570021

研究課題名（和文） サンゴ移植を手法としたサンゴ群集回復に関する野外実験

研究課題名（英文） Field experiments on recovery of coral communities using coral transplant technique.

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

研究成果の概要（和文）：サンゴ移植技術を用い、サンゴ群集の回復に影響を及ぼすサンゴ、藻類、藻食性魚類の関係と、サンゴへの魚類捕食の影響を検討した。ケージ内外に小サンゴ片を移植する実験によって、藻食性魚類が減少すれば芝状藻類が増加し、小サンゴの成長を阻害することが、サンゴが多い場所と少ない場所に小サンゴ片を移植する実験で、サンゴが少ないと、サンゴ食性魚類がサンゴの成長を阻害することが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：I conducted field experiments testing (1) relationship among corals, algae, and herbivorous fish, and (2) effects of corallivorous fish on growth of small corals, using coral transplant technique. In experiment (1), small fragments of *Acropora* were placed inside and outside cages; growth of the transplanted fragments inside the cage were negatively affected by turf algae. In experiment (2), small fragments of *Acropora* that were transplanted to low coral density and coverage were damaged more frequently than those at high density and coverage.

交付決定額

（金額単位：円）

|         | 直接経費      | 間接経費      | 合計        |
|---------|-----------|-----------|-----------|
| 2009 年度 | 1,500,000 | 450,000   | 1,950,000 |
| 2010 年度 | 1,100,000 | 330,000   | 1,430,000 |
| 2011 年度 | 1,000,000 | 300,000   | 1,300,000 |
| 総計      | 3,600,000 | 1,080,000 | 4,680,000 |

研究分野：生物学

科研費の分科・細目：基礎生物学・生態・環境

キーワード：造礁サンゴ、藻類、サンゴ礁、藻食性魚類、サンゴ食性魚類、サンゴ移植

## 1. 研究開始当初の背景

造礁サンゴ（以下「サンゴ」）は熱帯・亜熱帯に主に分布するが、高水温には脆弱である。地球温暖化の進行に伴い、1980年代より、世界各地のサンゴ礁で、高水温によりサンゴが共生する褐虫藻を失う白化現象がみられるようになってきた。特に1998年は、観測史上最強のエルニーニョ現象が起こり、世界のサンゴ礁で、サンゴの白化による大量死亡が起こった。沖縄島では1998年の高水温によるサンゴの大規模白化により、80～90%の

サンゴが死亡した。私は、高水温によるサンゴの大規模白化後のサンゴ群集の動態を追跡するため、沖縄県内のサンゴ礁において、サンゴ群集の維持、更新および回復に関する研究を展開している。沖縄島および慶良間列島では2002年から約100kmの広がり、サンゴ群集動態のモニタリングを行い、サンゴ群集の更新および回復の基礎となるサンゴ幼生加入量調査を継続している。

2002年には沖縄島各地で、2001年に加入したと考えられるミドリイシ属サンゴの幼

群体が多数みられたが、沖縄島ではサンゴの回復は極めて局所的にしか起こらなかった。例えば1998年以前には、生きたサンゴに覆われていた沖縄島西海岸中部恩納村の、25 kmにわたって広がるサンゴ礁では、2008年現在でサンゴの被度が50%に達している場所が4地点しかなく、しかもひとつのサンゴ高被度域の広がりには100 m程度である。沖縄島西海岸の他地域でも、現状は恩納村と類似している。この現状は、1998年以前はオニヒトデの大発生などによってサンゴ群集が大規模な攪乱を受けても、多くの場所でサンゴ群集が10年程度で回復してきたことと大きく異なる。

## 2. 研究の目的

(1) 藻食性魚類の減少がサンゴ群集の回復力に及ぼす影響を、サンゴ片を移植し、魚類を排除するためにケージングを施した野外実験で検証する。これまでの国外の研究によって、海水の富栄養化と藻食性魚類の過剰漁獲によって海藻が増えやすい環境条件となれば、加入してきた幼サンゴが海藻との競争に敗れ、サンゴ群集の回復力が低下し、サンゴ礁群集がサンゴ優占から藻類優占になることが示唆されている。

(2) 肉食性魚類が幼サンゴに及ぼす影響を、サンゴ片を、自然に存在するサンゴの量が異なる場所に移植し、検証する。これまでの潜水観察で、自然に見られる枝状ミドリイシ属のサンゴの枝先が頻繁に欠けていることが、予備的な野外移植実験では、サンゴがほとんどない場所に移植した枝状ミドリイシ属のサンゴ片が欠けていき、死亡に至る確率が高いことが示されてきた。サンゴの枝が欠けていくことは、肉食性魚類の捕食による可能性が高い。これらの事実から申請者は、大規模攪乱後にサンゴ群集が回復するためには、加入したサンゴの量的な閾値があり、サンゴの量が閾値を越えると、ひとつのサンゴ当たりの魚類の捕食圧が希釈されることによりサンゴの生存・成長が飛躍的に高まることで、サンゴ群集の回復が急速に進むという仮説を考えるに至った。現在の沖縄島のサンゴ群集回復の局所性は、1998年の高水温でのサンゴの死亡率が低く、沖縄島へのサンゴ幼生の供給源となっていた慶良間列島で、2002年以降のオニヒトデの大発生により親サンゴが減少することにより沖縄島へのサンゴ幼生供給量が減少したため、2001年の幼生大量加入時にサンゴの加入量が閾値を越えた地点でのみ群集が回復したことによると考えられる。

## 3. 研究の方法

目的(2)は研究期間終了時まで実験を継

続したため、現在データを解析中であるため、本報告では目的(1)のみの報告を行う。

(1) 藻食性魚類が幼サンゴに及ぼす影響

### ① 実験条件

藻食性魚類が藻類の現存量に及ぼす影響と、藻類がサンゴの生存と成長に及ぼす影響を検証するため、西表島のサンゴ礁礁原で、6月から10月の間、野外実験を行った。ケージありとなしの条件を設定した。塊状サンゴの死骨格で、小(12×8 cm、厚さ)と大(15×12×1.5 cm)の板を作成し、小を藻類現存量の測定、大をサンゴ片の生存・成長測定に用いた。大の板には、直径7 mm、深さ7 mmの穴をひとつが中心となるように5か所にあけ、長さ2 cmに切ったウスエダミドリイシの枝を穴に水中ボンドで固定した。ウスエダミドリイシの枝は5つの元群体から採取し、異なる元群体に由来する枝を1枚の板に1片ずつ、ランダムな位置に固定した。それぞれの処理で、ある群体に由来する枝が、1度は中央の穴となるよう配置した。小さい板20と、大きい板5をそれぞれの処理に割り振った。ケージ処理では、開口1.3 cmのプラスチックネットを、大きい板に巻き付け、高さ11 cmのケージとし、板ごと水中ボンドで海底に固定した。移植の影響を見るため、サンゴ片は板に固定後2週間観察し、その後実験を開始した。この期間に2本のサンゴ片が死亡したため、これらは実験結果から除外した。

### ② 藻類とサンゴ片の反応

実験開始後毎月、5つの小さい板から藻類を剥ぎ取り、質重量で藻類の現存量を評価した。サンゴ片の生存と成長は、実験開始後真上から大きい板の写真を撮影し、写真から平均直径を測定することと、直接高さを測定することで評価した。

### ③ 魚類の記録

魚類は、毎月大潮時に、満潮、満潮と干潮の間、干潮、干潮と満潮の間に、ケージなしの板をビデオで10分間撮影し、記録した。動画から、ニザダイ類とブダイ類を藻食性動物として計数し、それぞれの個体を小(全長<12 cm)、中(12 ≤ <18 cm)、大(≥18 cm)に分けた。

### ④ 統計解析

藻類の現存量は、反復のある分散分析で解析し、サンゴ片の成長は、最初のサイズを共変量とし、元群体と処理を主効果とし、3元配置の共分散分析で解析した。交互作用が有意でない場合は、ステップワイズ法で除外した。

## 3. 研究成果

目的(2)は研究期間終了時まで実験を継続したため、現在データを解析中であるため、本報告では目的(1)のみの報告を行う。

(1) 藻食性魚類が幼サンゴに及ぼす影響

① 藻類の変化

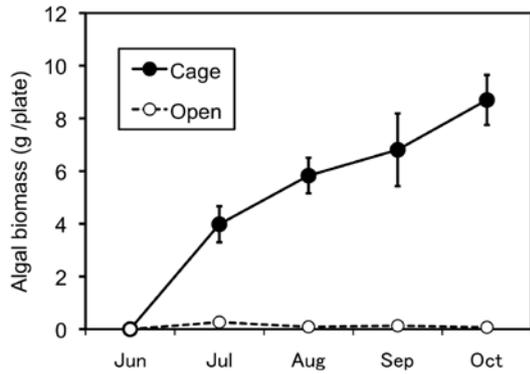


Fig. 1 Temporal changes in mean algal biomass for 5 plates from each cage and open treatment during experimental period. Error bars indicate  $\pm$ SE.

ケージなし処理における藻類の現存量は、最大でも小さい板当たり 0.2 g 以下だった (Fig. 1)。一方ケージ処理の藻類の現存量は実験期間中着実に増加し、プレート当たりの平均現存量は、実験開始後1か月で  $4.0 \pm 0.7$  g (N=5,  $\pm$ SE)、2か月で  $8.7 \pm 0.9$  g であった。その後もケージ処理では藻類の現存量は着実に増加したが、実験開始後3か月目(8月)に、藻類の種組成が大きく変化した (Fig. 2)。7月までは芝状藻類がケージ内で優占したが、8月~10月は大型藻類(ウスユキウチワ)が優占となった。このため、以下の解析では、実験期間を前半(6月~8月)と後半(8月~10月)に分ける。

実験期間前半には、藻類の現存量はケージ処理で、ケージなし処理よりも有意に大きかった ( $p < 0.01$ )。またこの期間には交互作用(処理 $\times$ 時間)も有意であり、藻類現存量の増加率もケージ処理で有意に大きかった。実験期間前半には、藻類の現存量はケージ処理で、ケージなし処理よりも有意に大きかった ( $p < 0.01$ ) が、交互作用は有意ではなかった。

② 魚類の個体数とサイズ

Fig. 3 に、実験期間前半および後半に、10分間のビデオ撮影によって記録された魚類の平均個体数を、種群ごとにサイズ別に示す。藻食性魚類は両期間ともに比較的多かったが、サンゴ食魚類による移植サンゴ片の捕食は見られなかった。ニザダイ類が最も多く、10分間に記録された平均個体数は両期間とも0.6であり、これは実験期間前半ではブダイ類の36倍、後半では3.6倍だった。ニザダイ類は自然の岩、実験に用いたサンゴ死骨格の板、プラスチックのケージなど様々なものについて藻類を摂食したが、ブダイ類は自然の岩について藻類のみを摂食した。

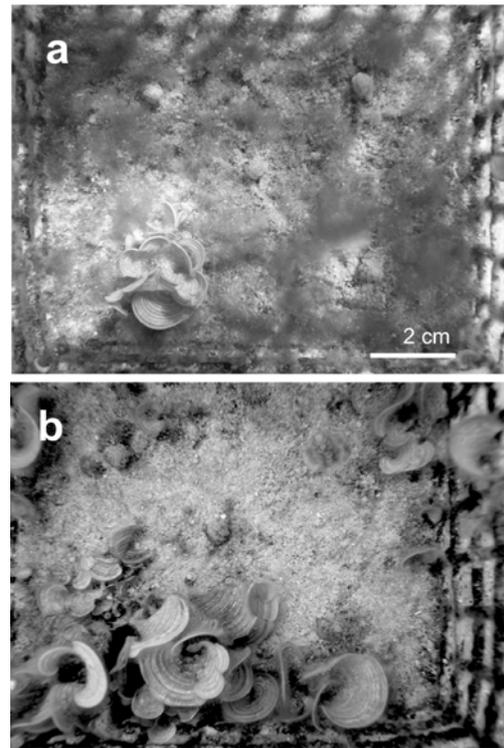


Fig. 2 Change in algal species composition in the cage treatment between August (a) and September (b). Turf algae (species unidentified) dominated in the cages until August, but they disappeared in August and *Padina minor* dominated until October.

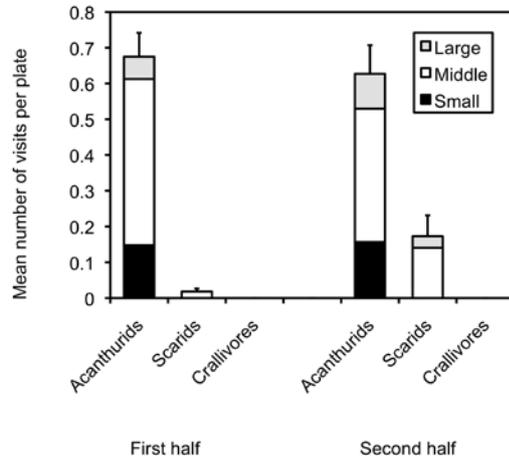


Fig. 3 Mean number ( $\pm$  SE) of visits by each group of fishes per plates in 10 minutes of in each period (N=3). Herbivorous fishes were grouped into 2 or 3 size classes: small ( $< 12$  cm TL), medium ( $12 \leq < 18$  cm TL), large ( $\geq 18$  cm TL) for acanthurids; medium ( $12 \leq < 18$  cm TL), large ( $\geq 18$  cm TL) for scarids. Mean number ( $\pm$  SE) of visits was calculated from averages of each month which include each 4 tide level for all open plates (from 15 to 45), for each size classes.

③ サンゴ片の生存と成長

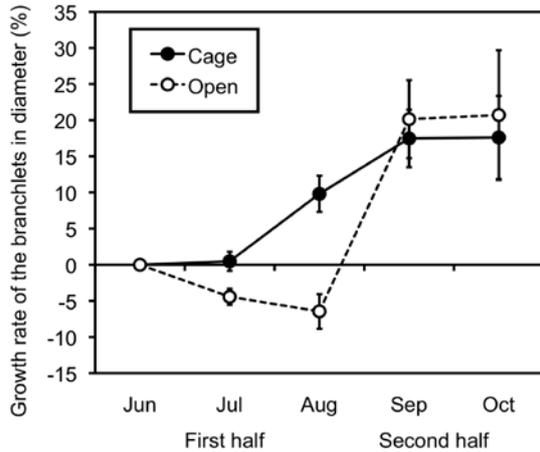


Fig. 4 Temporal change in mean growth rate ( $\pm$ SE) in mean diameter (mean of major and minor diameters in projected image) of branchlets. The growth rate was calculated as [value in each month - initial value] / [initial value] x 100 (%) for each month.

6か月の実験期間中、48の移植したサンゴ片のうち、ケージなし処理の6片が死亡または消失した。9月と10月の間に5片が消失し、これはこの期間調査場所に接近した台風の波浪によるものと思われる。なお、ケージは台風で壊れることも、消失することもなかった。

ケージなし処理でのサンゴ片の平均直径（投影画像上の長径と短径の平均）は、6月から10月にかけて着実に増加した（Fig. 4）。一方ケージ処理では、6月から8月の間平均直径は減少し、8月から9月にかけて著しく増加した。この期間のケージ処理の直径の増加率は、ケージなし処理の3倍であり、9月から10月にかけては両処理の平均直径はほぼ同じとなった。

実験前半および後半とも、移植したサンゴ片の初期サイズは、実験期間中の平均直径の増加量と正の相関を示したため、初期サイズの影響を排除するために、以下の解析では平均直径の調整平均値を用いる。

実験期間前半では、サンゴ片の平均直径で評価した成長は、ケージなし処理で、ケージ処理よりも有意に大きかった ( $p < 0.01$ , Fig. 5)。対照的に、実験期間後半では、サンゴ片の平均直径で評価した成長は、ケージ処理で、ケージなし処理よりも有意に大きかった ( $p < 0.01$ )。元群体の違いは、平均直径で評価した成長に影響を及ぼさなかった（実験前半および後半で、それぞれ  $p = 0.145$  と  $p = 0.07$ ）。

移植したサンゴ片の高さは、全実験期間を通じてほとんど増加せず、実験期間後半には両処理において有意に減少した ( $p < 0.01$ , Fig. 6)。しかし両処理間に、有意差はなかった。

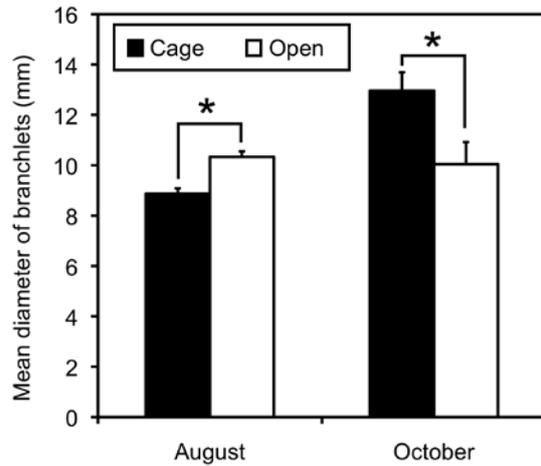


Fig. 5 Adjusted mean ( $\pm$ SE) of mean diameter (mean of major and minor diameters in projected image) of branchlets at the end of each half period. \* shows significant difference at  $p < 0.05$  level by 3 way ANCOVA.

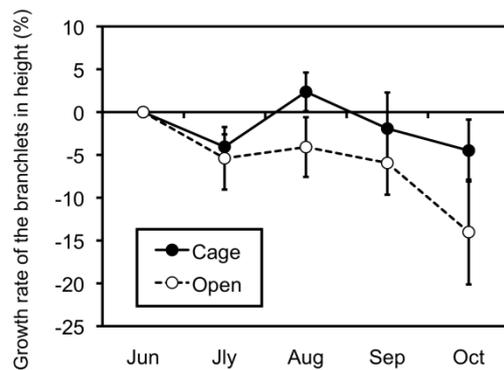


Fig. 6 Temporal change in mean growth ( $\pm$ SE) of the branchlets in height. The growth rate was calculated as [value in each month - initial value] / [initial value] x 100 (%) for each month.

④ 結論

本研究の結果は、芝状藻類が、ミドリイシ属サンゴの小群体の成長を阻害し、芝状藻類の繁茂も、サンゴ群集の回復を遅らせる可能性があることを意味する。これまでサンゴ礁では、大型藻類が繁茂することでサンゴの成長が阻害され、サンゴから大型藻類へとサンゴ礁の優占生物が変わることに注目が向けられてきた。今後はサンゴ礁の保全において、大型藻類のみならず、目につきにくい芝状藻類についても、注目することが必要であろう。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計10件)

1. Nakajima Y, Nishikawa A, Iguchi A, Sakai K (2012) The population genetic approach delineates the species boundary of reproductively isolated corymbose acroporid corals. *Molecular Phylogenetics and Evolution* 63:527-531 doi:10.1016/j.ympev.2012.01.006 査読あり
2. van Woesik R, Sakai K, Ganase A, Loya Y (2011) Revisiting the winners and the losers a decade after coral bleaching. *Marine Ecology Progress Series*. 434: 67-76, 2011, doi: 10.3354/meps09203 査読あり
3. Nakamura M, Ohki S, Suzuki A, Sakai K (2011) Coral larvae under ocean acidification: survival, metabolism, and metamorphosis. *PLoS ONE* 6 (1): e14521. doi:10.1371/journal.pone.0014521. January 査読あり
4. 岩田幸一・酒井一彦 (2010) 沖縄島西岸におけるミドリイシ科サンゴの幼生定着の年変動の要因. *沖縄生物学会誌* 48:1-10 (9月15日) 査読あり
5. Nakajima Y, Nishikawa A, Iguchi A, Sakai K. (2010) Gene flow and genetic diversity of a broadcast-spawning coral in northern peripheral populations. *PLoS ONE* 5(6): e11149. doi:10.1371/journal.pone.0011149 査読あり
6. Nakamura M, Sakai K (2010) Spatiotemporal variability in recruitment around Iriomote Island, Ryukyu Archipelago, Japan: implications for dispersal of spawning corals. *Marine Biology* 157(4):801-810 査読あり
7. Morimoto M, Furushima Y, Nagao M, Irie T, Iguchi A, Suzuki A, Sakai K. (2010) Water quality variables across Sekisei Reef, A large reef complex in southwestern Japan. *Pacific Science*. 64(1):113-123 査読あり
8. Nakajima Y, Nishikawa A, Iguchi A, Sakai K. (2009) Novel and cross-species amplifiable microsatellite markers in two *Acropora* species. *Plankton and Benthos Research* 4:38-41. 査読あり
9. Nakajima, Y, Nishikawa, A, Isomura, N, Iguchi, A, Sakai, K. (2009) Genetic connectivity of the broadcast-spawning coral *Acropora digitifera* analyzed by microsatellite markers in the Sekisei Reef, southwestern Japan. *Zoological Science* 26:209-215. 査読あり
10. Nishikawa, A, Kinzie III, R. A, & Sakai, K. (2009) Fragmentation and genotypic diversity of the scleractinian coral *Montipora capitata* in Kaneohe Bay, Hawaii. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 89: 101-107 査読あり

〔学会発表〕(計9件)

1. 2012年3月19日 日本生態学会第59回大会(大津) 酒井一彦, 中村雅子, 熊谷直樹, 御手洗哲司 サンゴ幼生の分散範囲は想像されていたより狭い?
2. 2011年5月29日 日本熱帯生態学会第21回大会(那覇) 公開シンポジウム「沖縄のヤンバルやサンゴ礁の自然を考えてみると」招待講演 酒井一彦 世界のサンゴ礁の現状のなかで、沖縄のサンゴ礁を考える
3. 2011年3月10日 日本生態学会第58回大会(札幌) 一般講演 ポスター発表 新垣誠司, 向草世香, 酒井一彦 造礁サンゴの生活史～群体系の違いに着目した解析～
4. 2011年3月9日 日本生態学会第58回大会(札幌) 一般講演 口頭発表 R. van Woesik, 酒井一彦, Y. Loya 高水温によるサンゴ大規模白化の短期的”勝者”は長期的にも”勝者”だったか?
5. 2011年3月9日 日本生態学会第58回大会(札幌) 一般講演 口頭発表 向草世香, 新垣誠司, 玉井玲子, 酒井一彦 トゲサンゴ個体群の存続可能性解析
6. 2010年3月17日 日本生態学会第57回大会(東京) シンポジウム 酒井一彦 南西諸島におけるサンゴ群集構造の地理的変異
7. 2009年11月28日 日本サンゴ礁学会第12回大会(沖縄県本部町) ポスター発表 玉井玲子・酒井一彦 小サンゴ群体系と小型海藻の基盤を巡る競争
8. 2009年11月27日 日本サンゴ礁学会第12回大会(沖縄県本部町) 口頭発表 中島祐一・西川昭・井口亮・酒井一彦 南西諸島のココビミドリイシにおける緯度と遺伝的多様性の相関、及び遺伝的分化の有無

〔図書〕(計1件)

1. 日本サンゴ礁学会編/鈴木款, 大葉英雄, 土屋誠責任編集「サンゴ礁学-未知なる世界への招待」(2011)362pp. 酒井一彦 「サンゴ礁におけるフェーズシフト」 p. 259-273. 東海大学出版会(神奈川)

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 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

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし