

# 微弱電流を利用したサンゴ増殖に関する研究

## STUDIES ON THE GROWTH OF REEF BUILDING CORALS BY USING A FEEBLE ELECTROCHEMICAL METHOD

鯉淵 幸生<sup>1\*</sup>・木原 一禎<sup>2</sup>・近藤 康文<sup>3</sup>・山本 悟<sup>4</sup>  
 Yukio KOIBUCHI, Kazuyoshi KIHARA, Yasufumi KONDO,  
 Satoru YAMAMOTO

<sup>1</sup>正会員 博(工) 東京大学大学院新領域創成科学研究科

(〒277-8563 千葉県柏市柏の葉5-1-5 環境棟666)

<sup>2</sup>正会員 工修 三菱重工鉄構エンジニアリング株式会社 (〒108 - 8215 東京都港区港南2-16-5)

<sup>3</sup> 株式会社 シービーファーム (〒907 - 0332 沖縄県石垣市伊原間 2-724)

<sup>4</sup>正会員 日本防蝕工業株式会社 (〒144-8555 東京都大田区南蒲田1-21-12)

Coral reef has been decreasing all over the world, results from the loss of symbiotic zooxanthellae under high temperature or viruses in recent years. Effective countermeasures are strongly demanded to avoid the loss of coral reefs. At the pontoon which was installed in Taketomihigashi-port in 2004, we compared it with neighboring building a breakwater of natural coral growth. As a result, stimulation to the growth of reef-building coral on a pontoon surfaces which are protected by cathodic protection with feeble currents was observed. To enhance the coral growth, we developed an electrodeposition base construction system of corals to use a sacrificial anode without a current source such as the solar panel system. Experiment devices were installed in the Ishigaki Island offing and monitored about a change of feeble electric current, a growth effect of the coral larva and a growth rate in the zoogamy. In addition, Indoor experiments were conducted to examine photosynthesis, calcification of the coral and the mechanism of the feeble electric current. These results denote that the current densities must be lower-level than an article announced in the past might act on coral efficiently.

**Key Words :** reef-building coral, electrochemical calcification, zooxanthella photosynthesis, electro-deposition, coral growth

### 1. はじめに

サンゴ礁は、熱帯や亜熱帯沿岸域に形成される地形で、熱帯雨林並みの生産力を持つといわれ、その構造から様々な生物の住処として生物種多様性だけでなく、漁場やレクリエーションの場としても、極めて重要である。

近年、造礁サンゴ類の白化・死滅が世界的に進行しており、緊急の対策が求められている。そのためサンゴの生息分布に大きな影響を与える水温上昇やウイルス等について精力的な研究が行われているものの、具体的なサンゴ礁の再生にかかわる研究は少ないのが実情である<sup>1,2,3,4,5</sup>。一方、平成16年に竹富東港に設置した浮棧橋に、周囲の護岸と比較して自然のサンゴが多く着生していたことから、サンゴ分布とその生息環境を調査したところ、浮棧橋の防食電流(微弱電流)がサンゴの着生、成長に適するとの見解が得られた<sup>6</sup>。そこで、サンゴの基盤材として骨格をなす鉄部に外部からの電気の供給なしに微

弱電流を通電することが可能な流電陽極電着システムを考案し、基盤材の構築方法の検討を行い、石垣島沖合にサンゴ棚と称す増殖棚を設置してモニタリングを行うとともに、そのメカニズムを解明するため、微弱電流とサンゴ幼生の活着効率や有性生殖に

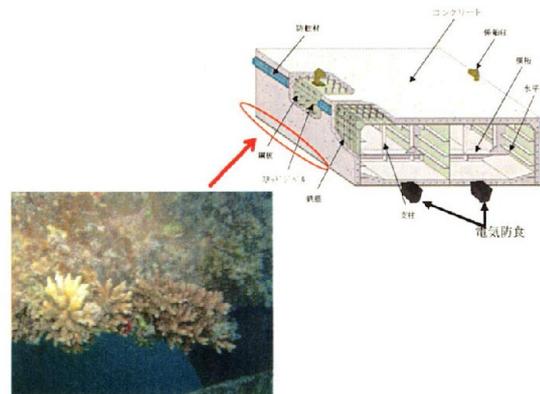


図-1 浮棧橋着生状況

おける活着効率の変化について実験を行った。

また、サンゴの電場影響を詳細に検討するために、室内実験によりクロロフィル蛍光を測定し微弱電流の有無による影響を比較することで、電流によるサンゴの活性を定量的に確認するとともに、サンゴの成長の指標となる石灰化速度、すなわち重量の増加率を測定して、サンゴの成長と電流の関連について検討を行った。

## 2. 浮棧橋におけるサンゴの生息状況

平成 16 年 3 月に沖縄県八重山郡竹富町に設置した浮棧橋に対して、サンゴ移植実験及び浮棧橋におけるサンゴの自然着生について検討を行った。

浮棧橋を設置して半年経過後、浮棧橋にサンゴの幼生の自然着生が見られ 3 年後の現在、側壁部に多数のサンゴが着生している (図-1)。

八重山諸島においては、夏季の高水温化によるサンゴの白化が問題となっているが、2005～2007 年の 7 月～8 月の浮棧橋付近の平均水温は 28.9～29.9℃と高く最高水温は 2 週間以上連続して 30℃を超えていた (図-2)。このような状況は、サンゴにとって良好な環境とは言えないがそれにも関わらず浮棧橋におけるサンゴには成長が見られた。同時に竹富東港構内の岸壁を含む施設でサンゴが生育している施設はこの浮棧橋のみであった。

本浮棧橋は、鋼とコンクリートの合成構造であり、底版部の鋼板の腐食対策として電気防食が施されている。電位は、鉄の自然電位が -600mV であるのに対し、アルミ合金を用い防食電位として -800mV～-1000mV に保っている。

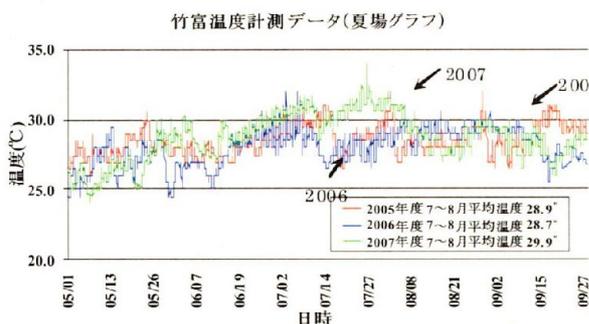


図-2 竹富東港温度分布

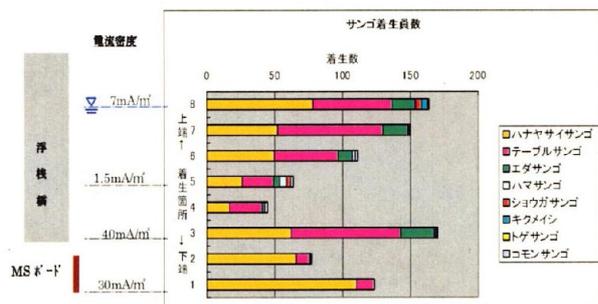


図-3 浮棧橋サンゴ着生状況

サンゴの着生状況調査の結果を図-3 に示す。サンゴは浮棧橋水線面と浮棧橋下部 (底版部) の隅角部に集中し、特に下部のコンクリートと鋼の境目と水面付近に多く着生していることがわかる。表の左側に平成 20 年 10 月時点での電場 (電流密度) の測定値を示す。防食電流密度は、浮棧橋設置直後より電着物質や海洋生物の鋼板への付着などで当初の電流値の 1/2～1/3 程度の安定期に入っているが、電流の強いところに多くのサンゴが着生している。

これらの状況はサンゴの種類によっても差が見られた。下記に考察を列記する。

- ① サンゴの活着・成長に微弱電流が寄与している可能性が示唆された。
- ② サンゴに適する微弱電流として、50mA/m<sup>2</sup>前後の電流密度が良いと思われる。
- ③ 棧橋の周囲は夏季の水温が高く、同時に棧橋周囲にはサンゴが認められないことから、微弱電流がサンゴの温度に対する耐力を強めている可能性がある。
- ④ ハナヤサイサンゴ、テーブル・枝状ミドリイシサンゴにおいて微弱電流が有効に作用していることが示唆された。

## 3. 電着を活用した基盤の構築

上述したように電気防食を施した浮き棧橋に自生したサンゴの活着・生育状況と微弱電流の間に相関関係があることが示唆された。

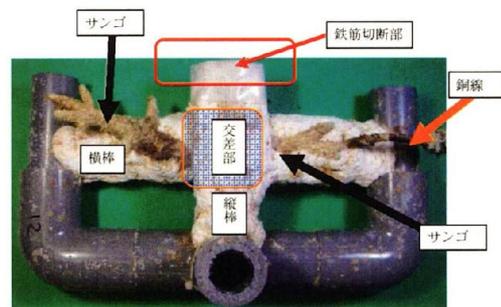


図-4 電着供試体概要

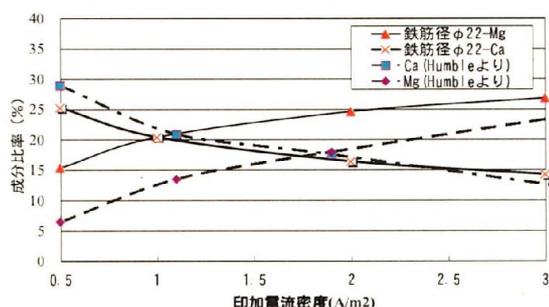


図-5 エレクトロコーティング組成 (φ22)

そこでこのような状況を積極的に利用してサンゴの増殖を促進するために、サンゴが活着する基盤材の開発に向けた検討を行った。具体的には、電着作用を活用した基盤材について電流密度を変化させて実験を行った。

### (1) 電流密度の違いによる析出物質の状況

通電によるサンゴの成長促進において成長促進に密接に関係すると考えられる電着物質（スケール）の諸性質を調べるため、スケールの付着状況及びスケール成分比（海水中のカルシウム及びマグネシウム比）を調査した<sup>7)</sup>。図-4に示すような構造の供試体を用い175日間通電を行った。

実験は、自然海水を海域からくみ上げ実験水槽にかけ流し循環させ、海水中と同じ条件で電着物質を析出させて行った。石垣島近海の海水での析出実験では、図-5にφ22鉄筋のスケール組成の結果を示す。この図からコーティング組成が変化し、特に500 mA/m<sup>2</sup>~3000 mA/m<sup>2</sup>の間で電流密度の増大とともにカルシウムの比率が減少すること、同時にマグネシウムの比率が増大する傾向が確認できる。また、この図から、電流密度の大きさとCaとMgの比率には差が見られ、電流密度が小さいほどCaの比率が高くなる傾向も確認できる。このような傾向は、他の鉄筋についても同様であった。

(独)森林総合研究所(2004)<sup>8)</sup>によるとサンゴの骨格成分は92%がCaCO<sub>3</sub>で組織されており、基盤構築においては、初期に3000~4000mA/m<sup>2</sup>の電流を通電させて基盤を構築し、サンゴの産卵前1ヶ月前を目処に50mA/m<sup>2</sup>以下の微弱電流に切り替えて基盤を構築するのが有用と考えられた。

### (2) 基盤材の構築方法

サンゴの骨格は90%以上が炭酸カルシウムであるため、サンゴの生育環境においては、カルシウム先行型となる電流密度を選択することが有効と考えられる。そこで、サンゴの増殖基盤の製作には、図-4より流電陽極法の最大3000 mA/m<sup>2</sup>（考案したシステムの効率を考慮した値）で電着を促進させた後、微弱電流に切り替えて通電する方法を用いた。

また、基盤材を鉄筋などで構築する場合、鉄筋は出来るだけ太い鉄筋を選定することが望ましい。

なお、図-4は電流密度3000mA/m<sup>2</sup>の実験供試体における試験例であるが、3000mA/m<sup>2</sup>では、サンゴの成長より電着速度が速くサンゴが電着物質に埋もれてしまいサンゴに悪影響がみられた。

以上を踏まえて、サンゴを電着で人工的に飼育する際には、電流密度の大きさに注意することが重要で強い電流を用いればよいというような単純なものではないことが確認できた。

## 4. 電着基盤を用いた有性生殖実験

### (1) 実験概要

先述した竹富の浮き桟橋の事例では、電気防食の浮き桟橋に、自然のサンゴが活着しそれが成長したが、そこでサンゴが優先的に増殖したメカニズムを明らかにする必要がある。そこで浮遊幼生後のサンゴの活着や成長に対する電気の影響を明らかにするための有性生殖による実験を行った。（写真-1）

実験は、阿嘉島臨海研究所室内、石垣島玉取崎沖実海域の2箇所において、着生前に電着基盤を前項で示す基盤材の方法に従い製作し、これを用いて実施した。製作した基盤材は1月程度海水に浸して表面に藻類等を付着させた後、プラヌラ幼生を着生させて経過の観測を実施した。

また、基盤材の比較として、事前に同じ処理を施した素焼きタイルを電場内に設置し、基盤材の比較実験も行った。実験ケースは、0 mA/m<sup>2</sup>, 10 mA/m<sup>2</sup>, 50 mA/m<sup>2</sup>, 100 mA/m<sup>2</sup>の4ケースで実施した。



写真-1 幼生着生治具

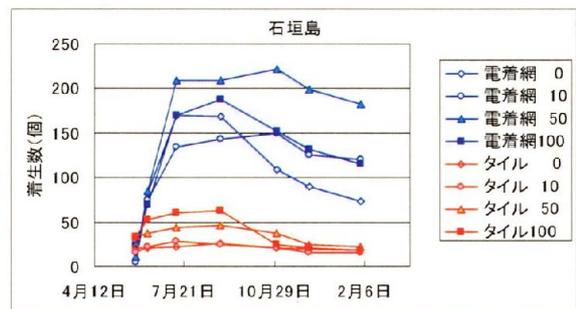


図-6 石垣島における着生数の時系列変化

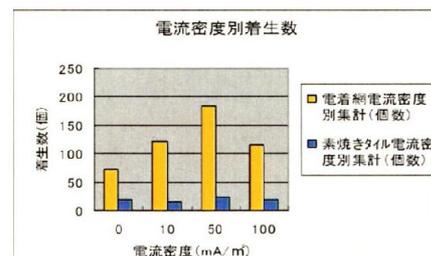


図-7 実験開始後約半年後の着生数

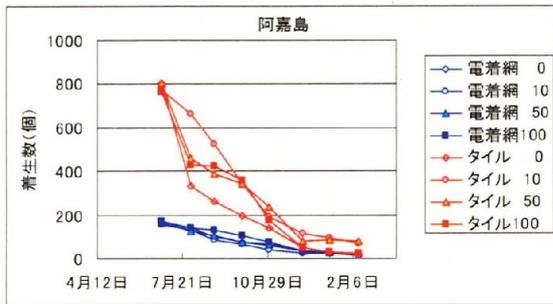


図-8 阿嘉島における着生数の時系列変化

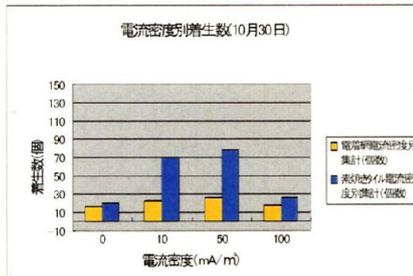


図-9 阿嘉島における経過（電流あるなしの経過）

## (2) 実験結果

図-6, 7 に石垣島の, 図-8, 9 には阿嘉島における着生数の時系列, および着生後 8 ヶ月経過した 2009 年 2 月における電流密度ごとの着床数を示す。

石垣島と阿嘉島では異なった方法で幼生を着生させたため, 着生時の条件が異なっているが, 微弱電流の効果が現れている。結果と考察を以下に列記する。

### ① 図-6 に石垣島における着生数の時系列を示す。

石垣島では, 自然海域で着床しているため, 着生直後の幼生数の確認が出来なかったが, 図-7 に示すように, 開始から 8 ヶ月後には  $50 \text{ mA/m}^2$  のケースで着床率が高かった。

### ② 同様に図-8 および 9 に阿嘉島での実験結果を示す。

図-8 に示すように, 初期に着床した数はタイルにおいて多いが, その後の減少も大きいことがわかる。一方, 電着網では初期に着床したサンゴは少ないものの, 減少率も小さいことが分かる。図-9 に着生後 8 ヶ月経過した状況を示す。阿嘉島では室内着生水槽養生である。幼生着床時の基盤設置方向が石垣島では鉛直, 阿嘉島では水平と異なっているため, 金網, 素焼きの形状の違いが着生に影響している。電着網（通電）の着生率が悪く差が見えにくいだが, グラフのレンジを変えると  $50 \text{ mA/m}^2$  の生残数が一番多い結果となっている。

また, 電流なし（素焼きタイル）の減少率が通電状態の電着網に比べて大きいことがわかる。

### ③ 通電中の網で見た場合, $50 \text{ mA/m}^2 > 10 \text{ mA/m}^2 > > 100 \text{ mA/m}^2 >$ 無しの順で生残率が高く浮棧橋の

事例（図-3）と同様の結果が得られた。

## 5. 光合成活性と電場に関する検討

電流や電場がサンゴの増殖を促進する理由として様々な要因が検討されているが, Goreau ら (2004)<sup>14)</sup> はその一要因として, 電流がサンゴに共生する褐虫藻の増殖促進を報告している。そこで電流によるサンゴの成長促進のメカニズムを理解するために, 電流とサンゴの光合成活性の関係を検討するための実験を実施した。

この際, 光合成量の変化は, たとえば密閉した容器において溶存酸素濃度の変化を計る方法や, 同位体を用いる方法など多種が提案されている<sup>9,10,11,12,13)</sup>。本研究ではサンゴの特性を多角的に長期にわたり検討するため, 非破壊で光合成活性を計測する必要があることから, クロロフィル蛍光による方法を用いた。

光合成はクロロフィルが光エネルギーを化学エネルギーに変換することによって進行するが, サンゴに入射した光エネルギーの内, 光合成の回路で使われなかった分は, 光合成回路の破壊を防ぐために, 蛍光か熱として発散される。このときに光合成回路から発散された蛍光がクロロフィル蛍光である。クロロフィル蛍光の強度は, 光合成の状態によって変化するため, 光合成についての情報を得るのに有用である (寺島;2002)<sup>15)</sup>。本研究では, クロロフィル蛍光を測定した上で, 光合成速度に比例する指標である  $\phi_{II}$  を用いて光合成活性の評価を行った。

実験は飼育条件を同一にした複数の水槽の電場条件を変えてサンゴを飼育し (図-10), 定期的に各水槽のサンゴのクロロフィル蛍光を測定し, 光合成速度に比例する  $\phi_{II}$  を比較した。

上記の実験は再現性を検討するために, 条件を変えて行った。それぞれの条件と結果の概要を表-1 に示す。実験結果の概要を表-1 に,  $50 \text{ mA/m}^2$  を作用させた実験ケース A の結果を図-11 に示す。電流密度が  $50 \text{ mA/m}^2$  の条件では, サンゴの光合成活性の指標である  $\phi_{II}$  は減少し, 電流がない場合の  $\phi_{II}$  が高かった。なお, 実験はサンゴの向きを変えても行ったが, この結果はサンゴの向きとは無関係であった。

一方, 図-12 に示すように, 電流密度が  $5 \text{ mA/m}^2$  と極めて低い条件においては, いずれの向きにおいても, 電流を作用させた場合の  $\phi_{II}$  が大きくなった。

以上の結果から, 光合成に対する電流の影響は, 電流密度によっても変化し, これまで Goreau らの研究で発表されているサンゴの成長促進に良好とされている電流密度よりもかなり低いレベルの電流密度でも悪影響となる可能性がある結果が得られた。

同時にサンゴの光合成活性を促進するような電流密度はきわめて小さく, 電気防食に用いられるようなレベルである可能性がある結果が得られた。

## 6. 骨格形成活性化試験

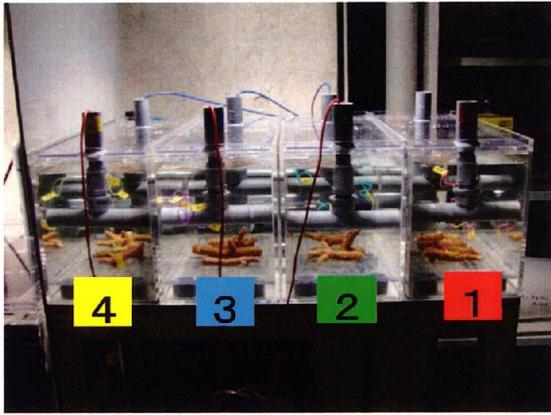


図-10 比較実験水槽

表-1 蛍光測定実験条件および結果の概要

Case	mA/m <sup>2</sup>		φ II の大小 電流の有無
	水槽1	水槽2	
A	50	0	あり<なし
B	0	5	あり>なし

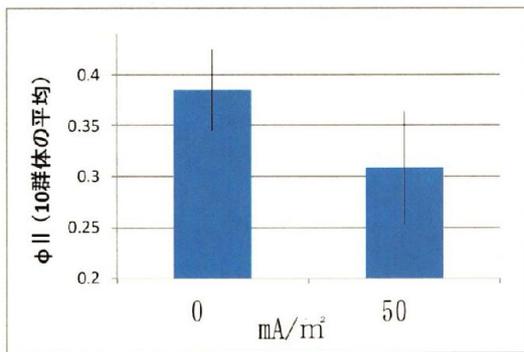


図-11 実験Aにおける光合成活性φ IIの比較

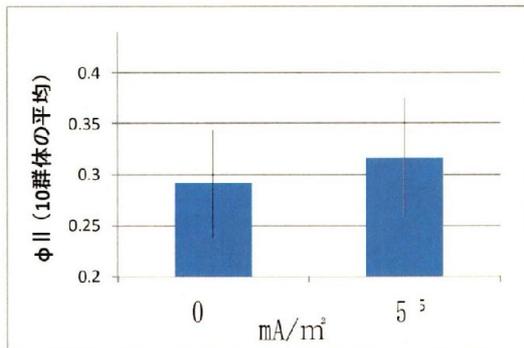


図-12 実験Bにおける光合成活性φ IIの比較

さらに、サンゴの骨格成長と電流密度の関係を明らかにするため、上述の光合成活性測定実験と同時に、サンゴの重量変化を計測し、その増加率を電流密度ごとに比較した。サンゴの重量測定には、水中重量法を用いた。この方法は、サンゴの重量を海水中で測り、その重量の変化からサンゴの骨格の成長を知る方法である。サンゴの構造は単純で、主にポリプと炭酸カルシウムの骨格によって構成される。

表-2 重量測定実験条件および結果の概要

Case	mA/m <sup>2</sup>		重量変化率の大小 電流の有無
	水槽1	水槽2	
A	50	0	あり<なし
B	0	5	あり>なし

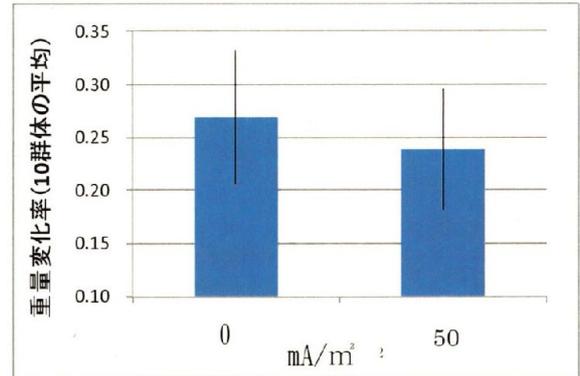


図-13 実験Aにおける重量変化率の比較

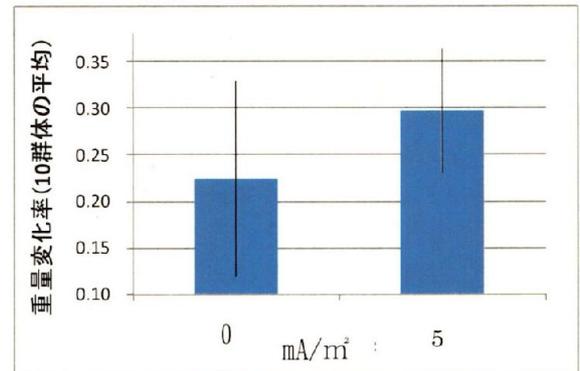


図-14 実験Bにおける重量変化率の比較

ポリプ部分は、海水を主成分としていて、比重は海水とほぼ同じである。また、サンゴの骨格（霰石）は比重が 2.94 で海水よりかなり重い。このため、サンゴを海水中に浮かべて重量を測定すると、ポリプ部分の重量は無視することができ、骨格部分の成長量だけが、水中重量の変化として測定される。そこで本研究では、水中重量を計測し、サンゴの骨格成長量を定量化した。

実験条件と共に結果の概要を表-2 に示す。図-13 に示すように、実験ケース A では電流をかけていないものより、50 mA/m<sup>2</sup> の電流を流した水槽のサンゴの方が重量変化率が小さく、サンゴの成長が小さかった。このことから、50 mA/m<sup>2</sup> 程度の電場は、本実験結果からは、必ずしもサンゴに良好ではない結果となった。

一方、図-14 に示す実験ケース B ではその 1/10 に当たる 5 mA/m<sup>2</sup> の電流を用いているが、この場合には、電流を作用させたサンゴ群の重量増加が大きかった。

このように電流の強さによってサンゴの骨格成長に異なる影響が見られ、単純に強い電流を作用させる方法は、サンゴの活性を弱める可能性があることが明らかになった。

また、サンゴに有効と見られる電流密度値はきわ

めて微弱であり、従来実験で用いられてきた値と比較すると極めて小さく、一般に電気防食に用いられるようなレベルとなった。

なお、実験にはいずれも10個体のサンゴを用いて統計処理をしたが、依然ばらつきも大きいため、今後さらに実験を繰り返す必要がある。

## 7. まとめ

本研究では、電流がサンゴ幼生の着生数、骨格成長、光合成に与える影響について検証するための様々な実験を実施し、電流がサンゴに与える影響について考察した。結果を列記する。

- ① 有性生殖の実験では、50 mA/m<sup>2</sup>程度の電流条件においてサンゴ着生数が増加した。
- ② 微弱電流がサンゴの生残率を高める効果があることが示唆された。
- ③ 海水中で電流が流れることによって析出する電着物質は、サンゴ幼生の着生数に正の影響を与える可能性があることが分かった。  
しかし、基盤材の形状の違い、着生方法の違いなどで石垣島、阿嘉島の結果にバラツキが見られるため、基盤材形状及び着生方法を統一して再度実験を行い、経過を確認する必要がある。
- ④ 骨格成長と光合成については、従来提案されてきた数値と比較して極めて微弱な50mA/m<sup>2</sup>でも、サンゴの骨格成長と光合成に対して負の影響を与える可能性があることが分かった。さらに、その1/10の5mA/m<sup>2</sup>では、逆に骨格成長と光合成に正の影響を与える可能性が示唆された。

以上のことから、電流がサンゴに与える影響はサンゴの部位や生活史によって異なり、単に強い電流に曝せば良いというようなものではないことが明らかになった。既往の研究では、本研究で用いた50 mA/m<sup>2</sup>よりもかなり強い電流で実験していた例もあり、今回の結果は今後のサンゴの成長促進を考える上で極めて有用である。更に、5mA/m<sup>2</sup>程度の微弱電流について、検証を行うことで有用な知見が得られると期待される。

**謝辞：**本研究を実施するにあたり、石垣海域へのサンゴ棚設置を許可して頂いた沖縄県八重山支庁、およびサンゴ棚を設置するにあたりご指導を頂いた八重山漁業協同組合上原亀一組合長他関係者および沖縄県水産課ならびにサンゴ棚へのサンゴの設置及び有性生殖実験に際し、ご助言、指導を頂いた阿嘉島

臨海研究所 大森信所長、谷口研究員に深く感謝するとともにこの場をお借りし、お礼を申し上げる。

また、本研究の一部は、科学研究費（課題番号：19686032、研究代表者：鯉淵幸生（東京大学大学院）により実施した。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 鈴木 款, カサレト ベアトリス他: 「サンゴ礁ミクロ生態系の研究の意義ーサンゴの白化の科学的解明と再生に向けて-」 第11回日本サンゴ礁学会講演要旨集, p.6-7 (2008)
- 2) Wolf H. Hilbertz: Solar-generated Building Material form Seawater as a Sink for Carbon. *Ambio* 21:126-129(1992)
- 3) Schuhmacher H, Schillak L: Integrated electrochemical and biogenic deposition of hard material – a nature-like colonization substrate, *Bull Mar Sci* 55:672-679
- 4) Goreau T, J, Hilbertz: Reef restoration using seawater electrolysis in Jamaica. *Proc 8th Int Coral Reef Symp* (1997)
- 5) Wolf H. Hilbertz: Growing and fading structures, experiments, applications, *idas, Mitt Sonderforschungsbereich 230' Naturliche Konstruktionen – Leichbau in Architektur und Natur* 2:107-114
- 6) 木原一禎, 鯉淵幸生他: 「電着効果を応用したサンゴ増殖に関する研究」 第20回沿岸域学会研究討論会 2007年7月5-7日
- 7) H.A. Humble: *Corrosion*, 4[7] 358 (1948)
- 8) (独)森林総合研究所: 森林, 「海洋等におけるCO<sub>2</sub>収支の評価の高度化」 2004.3 P133
- 9) 中村恵理子: 「温帯性サンゴの光合成ー温度特性とその測定法」 『藻類』 51(1) 2003.5
- 10) Marlowe G. Sabater, Helen T. Yap: Growth and survival of coral transplants with and without electrochemical deposition of CaCO<sub>3</sub>, *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 272:131-146(2002)
- 11) Marlowe G. Sabater, Helen T. Yap: Long-term effect of Induced mineral accretion on growth, survival and corallite properties of *Porites cylindrical* Dana. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 311:355-374(2004)
- 12) K.K. Yates, R.B. Halley: Measuring coral reef community metabolism using new benthic chamber technology. *Coral Reefs*. 22:247-255(2003)
- 13) R. Vago, Z. Dubinsky, A. Genin, M. Ben-Zion, Z. Kizner: Growth rates of three symbiotic corals in the Red Sea. *Limnol. Oceanogr.* 42(8):1814-1819(1997)
- 14) Goreau, T.J, M. CERVINO, and RACHAEL POLLINA: Increased Zooxanthellae Number and Mitotic Index in Electrically Stimulated Corals, *Symbiosis*, 37, 107-120 (2004)
- 15) 寺島一郎: 個葉および個体レベルにおける光合成, 植物生理学講座シリーズ第3巻 光合成, pp125-149 (2002)