

微弱電流がサンゴの着床や成長に及ぼす影響

Experiments on Settlement of Coral Polyps and Coral Growth Promotion Using a Feeble Electrochemical Method

鯉淵幸生¹・木原一禎²・山本 悟³・近藤康文⁴

Yukio KOIBUCHI, Kazuyoshi KIHARA, Satoru YAMAMOTO and Hirofumi KONDO

This study aims to investigate experimentally the effects of an electrochemical method on growth promotion and settlement of corals. Naturally growing colonies of the pier in Taketomi Higashi port showed significant increase in density of corals corresponding with electricity of the cathodic protection. To know the reason of these effects on settlement and growth promotion, field experiments and laboratory experiments were carried out. As a result, the settlement rate of electrochemically deposited bases was 5 times larger than that of ceramic bases. The growth rate of the treated nubbins was relatively high in the field and its effect depended on species. The laboratory experiment results indicated that positive effects on the growth of corals by the feeble electric current densities in the range from 50mA/m² to 100mA/m².

1. はじめに

サンゴ礁は海の熱帯雨林といわれ高い生産力と生物多様性を有する。同時に造礁サンゴは、リーフ特有の浅海域を形成し、砕波により波浪のエネルギーを減衰させ島嶼の維持・保全に供する機能も果たしている。サンゴ礁を構成する造礁サンゴには、褐虫藻が体内に共生し、栄養塩濃度が低い海域でも褐虫藻による一次生産を利用して、効率的にエネルギーを得て成長することができる。サンゴは有性生殖と無性生殖の両方で増殖し、有性生殖では、受精後幼生になったものが海底や岩、構造物の壁に着床しポリプとなる。その後、無性生殖によってポリプが分裂し、炭酸カルシウム骨格を中心にもつ群体へと成長する (図-1)。

近年、造礁サンゴ類の白化・死滅が世界的に進行して問題となっており (Bruno and Selig, 2007)、国内でも有数のサンゴ礁である石西礁湖や沖縄周辺のサンゴ礁で衰退傾向が著しく、緊急の対策が求められている。

このような造礁サンゴの死滅原因として、オニヒトデの大量発生や、赤土流出、水温上昇による褐虫藻の放出などがあげられ、その再生のために、枝折り法のような無性生殖による分裂を用いた方法や、有性生殖により幼生を着床させたセラミックブロックを利用する方法など、既に様々な試みが行われている (大森, 2009)。これらはいずれもサンゴの自然の成長速度に依存しており時間がかかるため、新しい技術の開発が望まれている。

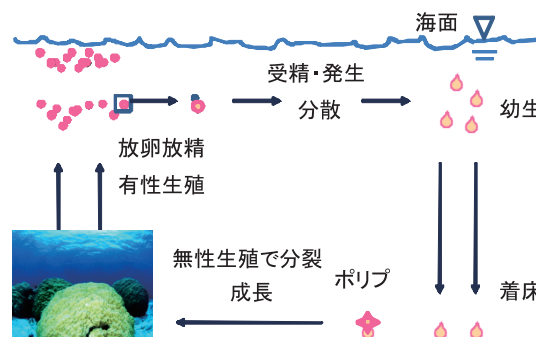


図-1 一般的な造礁サンゴの生活史

既往のサンゴ礁修復技術の1つである微弱電流を活用したサンゴの成長促進技術については、Goreauら (2004)、Sabaterら (2002) などによるものがあるが、その効果については十分に定量化されておらず、適切な電流値などが不明であるため、効果的な運用が出来ていない。そこで本研究では、微弱電流によるサンゴの成長促進に関して、現地の事例の定量化、電着基盤の開発、サンゴの種苗の大量増殖が可能な有性生殖増殖法を用いた幼生の着床や、群体成長に関する野外実験、成長促進や光合成の定量化を目的とした現地実験や室内実験によって、その効果を定量化することを目的とした。

2. 既設の微弱電流構造物におけるサンゴと電場の関係調査

近年、石垣島対岸の竹富島竹富東港において、(図-2) 同じ港内の岸壁などには全くサンゴが認められないにも関わらず、浮桟橋側面にのみ、自然着床した多量のサンゴが認められることが知られる (木原ら, 2008)。この浮桟橋は、鋼材の保護のため、電気防食がなされており、

1 正会員 博(工) 東京大学大学院講師 新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻
2 正会員 修(工) 三菱重工鉄構エンジニアリング(株)
3 正会員 日本防蝕工業(株)
4 (株)シービーファーム

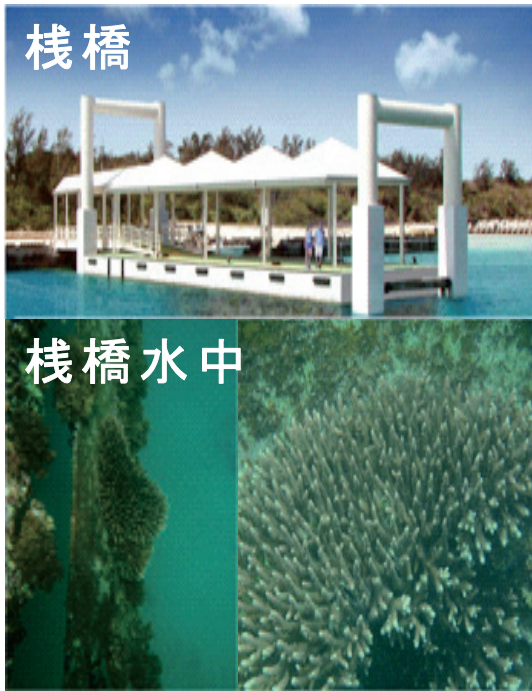


図-2 竹富島浮桟橋の外観と桟橋壁面の様子

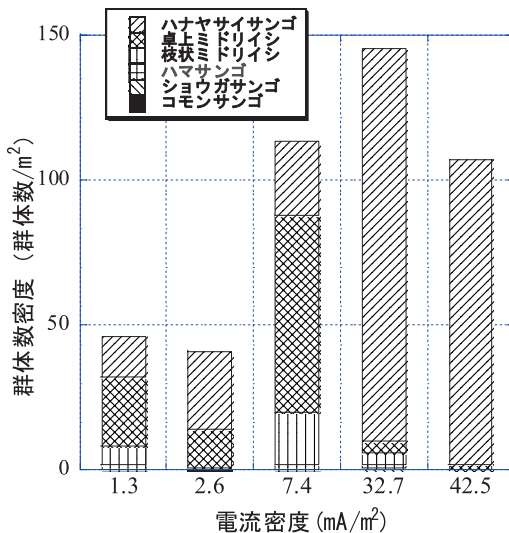


図-3 桟橋の電流密度とサンゴの個体数の関係

常時微弱ながら通電している。微弱電流の影響把握を目的に、電流密度の計測とサンゴの群体数のモニタリングを行った。モニタリングにおいては、桟橋を50cm毎のメッシュで分割して目視で群体数と種類を判定した。同時に照合電極により分割したメッシュの中央における電流密度を測定した。これらの結果を電流密度とサンゴ群体数との関係に整理したものを図-3に示す。この図から、活着したサンゴの群体密度が電流密度の増加と伴に増加

し、電流密度が 32.7mA/m^2 で最も多く、 42.5mA/m^2 で再び減少していることがわかる。この結果は、室内実験と異なり、現存する桟橋の電流密度と群体数密度であるため、最適な電流密度等は不明であるが、電流密度とサンゴの間になんらかの関係があることが示された。ただし浮き桟橋での測定では、図-1で示したようなサンゴの生活史のどの場面で電流が有利に働いたかについては不明である。同時に図-3より、サンゴの種類によっても電流の影響が変化すると考えられるが、その原因を特定することは困難である。そこで幼生の着床やサンゴの成長と電流密度の関係についてさらに野外実験による検討を行った。

3. 電流が幼生の着生数や成長に与える影響

(1) 幼生着床実験

電流がサンゴの幼生に与える影響を明らかにするために、2009年に石垣島および阿嘉島で幼生着床に関する野外実験を行った。

野外実験ではサンゴのプラヌラ幼生の着床基盤として、予め電着物質を析出させた電着網と、一般に使用される素焼きタイルを用意し、電流が作用しない塩ビ製架台に、素焼きプレート2枚と電着網2枚を固定し、これを石垣島の海域と阿嘉島にそれぞれ8式を設置した。基盤の寸法はいずれも $100 \times 100\text{mm}$ とした。基盤の作製には、電着物質の析出を促進するために初期に強い電流を作用させ($1000 \sim 2000\text{mA/m}^2$)、電着を促進した後、炭酸カルシウムで基盤表面を被覆させる目的で微弱電流に切り替え、その後、海中に養生した。それぞれの電着網には、電流なし、 10mA/m^2 、 50mA/m^2 、 100mA/m^2 と異なる電流密度を設定し、一つの電場条件について2つの基盤で実験を行った。基盤設置後、プラヌラ幼生を投入して、その後、一月ごとに定期的に着床数を測定した。測

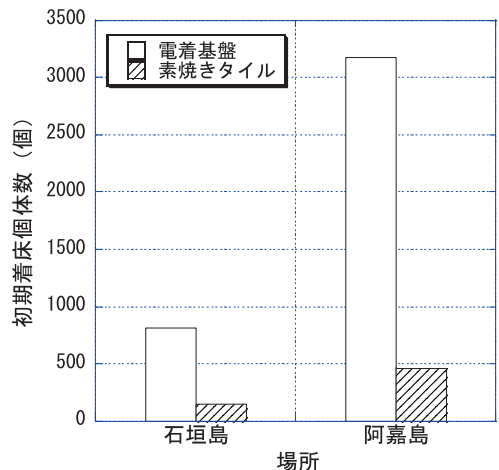


図-4 電着基盤と素焼きタイルの着床数の比較

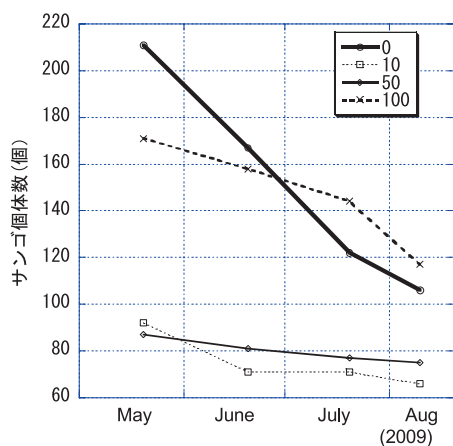


図-5 石垣島での電着基盤への電流密度 (mA/m^2) ごとの着床数 (5月) と着床後の生残数の時間変化

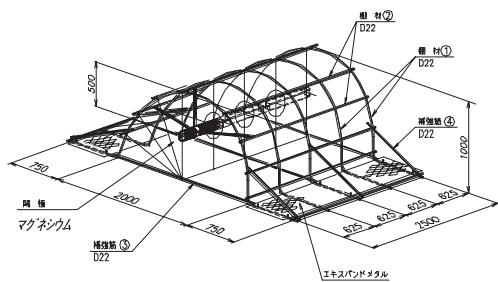


図-6 石垣島に設置したサンゴ増殖柵の構造

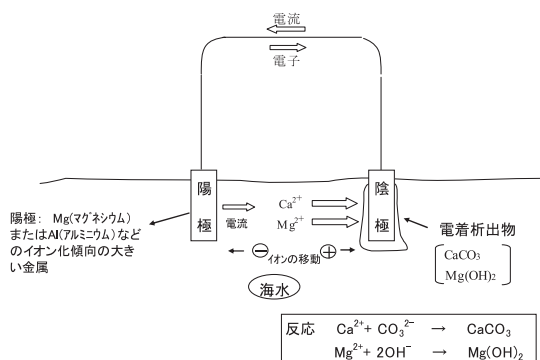


図-7 流電陽極法による電流発生 の模式図

定には光学式顕微鏡を用いた。

基盤ごとの着床数を図-4に示す。電流密度と着床数の間には、明確な相関は見られなかったが、電着物質を析出させた電着網の着床数の平均値は、素焼きタイルの平均値の5倍程度であった。この傾向は石垣島でも阿嘉島でも同様であった。この結果から、電場は幼生着床数に影響しないがサンゴ幼生は電着物質を好むことが明らかになった。図-5に実験を開始してから約3ヶ月間の石垣島での着床数とその後の生残数の時系列を示す。当初の

着床数は $0\text{mA}/\text{m}^2$ が最も多かったが、時間経過と共に急激に減少した。一方通電した基盤における生残数の減少は小さく、 $100\text{mA}/\text{m}^2$ では再び減少率が増加した。このことから電場の強弱はサンゴの着床数に影響しないが、電着で作成した基盤のサンゴが好むこと、さらに着床後のサンゴの生残率に対して適切な電流密度が存在することがわかった。

(2) 電場がサンゴの骨格成長に与える影響に関する現地実験

次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に、石垣島の海域に、図-6の鋼製の柵（以降ではサンゴ増殖柵と呼ぶ）を4個設置した。柵の中央部には、マグネシウム合金陽極を配し、イオン化傾向の差から、構造体である鉄筋が陰極となって電流が流入するようにした（図-7）。これまでにGoreauら（2004）は、陸上にソーラーパネルを配置し、そこから電力を供給して、サンゴの成長を促す方法を提案しているが、この方法では波浪による送電ケーブルの損傷、設置可能海域が岸近くに限定されるなどの制約が発生する。本手法では設置海域で電力が供給されるために、従来の方法にあった問題点が克服され、設置が容易になり、その適応性が大きく広がると期待される。今回は電流密度の差を小さくするため、アーチ型としたが、潜堤として利用する場合など、自由に整形することが可能である。

サンゴ増殖柵には水中作業で長さ5cmのスギノキミドリイシ、ハナヤサイサンゴ、ウスエダミドリイシを付け、電場条件を、電流なし、 $100\text{mA}/\text{m}^2$ 、 $300\text{mA}/\text{m}^2$ 、 $500\text{mA}/\text{m}^2$ に設定して、定期的にサンゴ群体の大きさと群体の対応箇所での電流密度を測定した。サンゴ増殖柵の鉄筋は、マグネシウム合金が台形であり陽極との距離が位置関係によって微妙に異なる。また析出したカルシウムの密度の

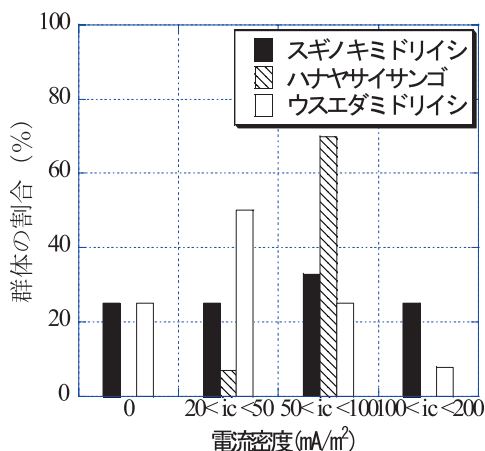
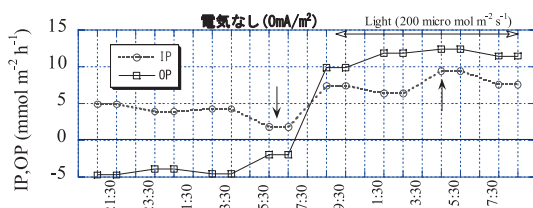


図-8 各電場の範囲において有意な成長率増大を示した群体の割合



写真-1 室内実験水槽の様子

図-9 50mA/m²の条件におけるIP, OPの日周変動

違いによっても電流密度が若干異なるため、サンゴを設置した位置での電流密度 i_c を水中で測定し、0mA/m²（電流なし）の場合の平均成長率に比べて統計的に有意な成長率の増大を示した群体の割合で整理した。

同じ場所での電流なしと比較して大きな成長率を示した群体数の割合をスギノキミドリイシ、ハナヤサイサンゴ、ウスエダミドリイシにおいて図-8に示す。ハナヤサイサンゴでは、電流密度 i_c が20～100mA/m²の範囲で成長率が高かった。特に50～100mA/m²では70%のハナヤサイサンゴで効果が認められた。このように、図-3に示す浮桟橋の結果と一致する傾向が現地実験でも示された。同様に、ウスエダミドリイシでは、20～50mA/m²で成長率が高いサンゴの割合が高く、およそ50%のサンゴ群体でその効果が認められ、ハナヤサイサンゴよりも、弱い電流密度で効果があった。最後にスギノキミドリイシについては、サンゴ成長に及ぼす電場の影響は小さく、電流密度0～200mA/m²まであまりかわらず、わずかに50～100mA/m²で大きくなった。この結果は図-3の桟橋で

の測定結果においても、スギノキミドリイシの生息が顕著には認められなかったことと一致した。以上の結果からサンゴの種類によって電場の影響が異なり、最適となる電流値も異なることが分かった。

4. サンゴの成長促進に関する電流影響の室内実験

(1) サンゴの日周変動に関する基礎実験

実海域においては、様々な環境因子が同時に複雑に作用するため、環境因子ごとの影響を知ることは困難である。また現地においては日スケールのサンゴの変動を捉えることは困難で、活性が向上するメカニズムに迫ることも難しい。そこでこれらを明らかにするために、さらに室内実験による検討を行った。実験では、水槽で2年以上飼育し、その環境に十分適応したスギノキミドリイシを用いた。実験のためにサンゴに触れたり、移動させたりするとムユース（粘液）を放出し、サンゴ活性が落ちるので、実験には写真-1のようなメイン水槽から隔離可能な、長さ40cm、幅20cm、高さ20cmの水槽を4つ配置し、通常の生育環境下で実験ができるよう工夫した装置を作成して実施した。

サンゴの成長量や光合成量・呼吸量は水槽を密閉して測定した全アルカリ度、全炭酸、pH、塩分、水温の時間変化から算出した無機炭素生産速度（IP; mmol/m²/h）と有機炭素生産速度（OP; mmol/m²/h）により評価した。全アルカリ度、全炭酸、pHの測定には紀本電子工業製ATT-05を、塩分、水温の測定にはYSI製EC300を用いた。上記の測定から炭酸カルシウムの時間の減少量を算出し、それを用いて石灰化速度に対応する無機生産量IPを算定した、さらに全炭酸と全アルカリ度の時間変化から、光合成や呼吸に伴うCO₂の吸収を計算して、有機生産量OPを算出した（鈴木、1994）。図-9にその結果を示す。IPは日中と夜間いずれも正の値を示しており、昼夜を問わずサンゴが石灰化を行っていることがわかる。また夜間は昼間の半分となり、昼間に蓄積したエネルギーで夜間もサンゴが成長していることが分かった。一方OPは日中におこる光合成により増加し、12mmol/m²/h程度となること、逆に夜間は-4mmol/m²/h程度となって、呼吸が卓越していることが分かる。

同様の実験を異なる光量子量で行い、IPとOPの光量子量による変化を整理した結果を図-10に示す。この図から、光量子の増加に伴って光合成（OP）と石灰化（IP）が増加すること、その傾きはIP, OPで大きく異なり、特にOPはIPと比べて、光量子の増加と対応がよいが、IPは5～8mmol/m²/h程度で大きく変化しないことがわかる。また、光量子が60μmol・m⁻²・s⁻¹程度においてOPが0mmol/m²/hとなったことから、CO₂の生産と消費が等しくなったと考えられる。

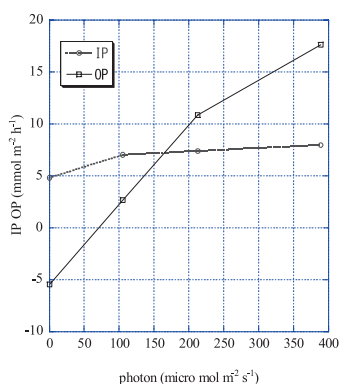


図-10 光量子量とIP, OPの関係

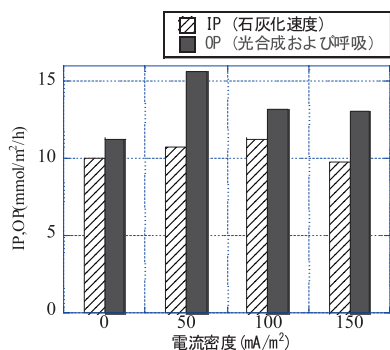


図-11 日中の電流密度と石灰化・光合成量の関係

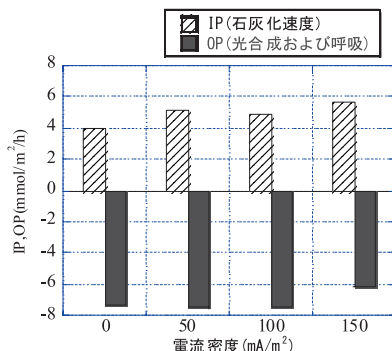


図-12 夜間の電流密度と石灰化・光合成量の関係

(2) サンゴの成長速度と電流密度の関係

図-9のようなサンゴの日周変動を踏まえ、同一の電場条件を数日間続けた上で、ライトのみを12時間周期で操作し日中および夜間の測定を12時と0時に3日間行い、その平均を電場条件によって比較した。図-11および図-12は、電流密度毎の日中および夜間の石灰化 (IP) と光合成および呼吸 (OP) 量の3日間の平均である。まず日中の石灰化 (IP) を見ると、電場を作用させた方が1割ほど大きい値になっていることが分かる。次に日中のOPの変化 (すなわち光合成によるCO₂の吸収または呼

吸による放出) を見ると、50mA/m²において最も大きいことがわかる。同様に夜間についても、石灰化 (IP) は電場を作用させた場合に2割ほど大きくなった。以上のように、室内実験でも電場の効果が現れ、現地と同じ傾向が室内実験でも再現された。この際、IPやOPの変化が電流密度 (電場) に単純に相関しないのは、電流が作用する部位が石灰化を行う部分や光合成を行う部分、代謝を行う部分など複数有り、全ての部位について同じ電流値で最適となる訳ではないことを意味していると考えられる。今後は他の種類でも実験を行い、石灰化、光合成、呼吸などの変化を比較検討することで、電場の影響メカニズムが解明できると期待される。

5. まとめ

本研究では、電流がサンゴの幼生の着生数、骨格成長、光合成に与える影響について検証するため、既設の栈橋において電流密度とサンゴ生息密度の測定を行った。また現地および室内で様々な実験を実施し、電場がサンゴに与える影響について考察した。その結果、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より影響をもたらし、またその残存率に電場が関係することがわかった。骨格成長と光合成についても電気の有用性が示された。同時に電場がサンゴに与える影響が、サンゴの種類はもちろん、石灰化や光合成をはじめ、着床や成長などの生活史によっても異なり、単に強い電場に曝せば良いというものではないことが明らかになった。今後は、種毎に石灰化、光合成、呼吸への影響の違いを検討して、電着がサンゴに作用するメカニズムの解明を進めることで、サンゴ礁の再生に有用な知見が得られると期待される。

参考文献

- 大森 信 (2009) : サンゴ礁の劣化と保全・再生, 環境情報科学, 38-2, pp. 31-36.
- 木原一禎, 鯉淵幸生, 三浦ゆきこ, 近藤康文, 後藤 大, 石川光男 (2008) : 電着を利用したサンゴ成長促進技術, 第16回地球環境シンポジウム, pp. 67-72.
- 鈴木 淳 (1994) : 海水の炭酸系とサンゴ礁の光合成・石灰化によるその変化-理論と代謝量測定法-, 地質調査所月報, 45巻, 10号, pp. 573-623.
- Bruno J. F., E. R. Selig (2007) : Regional decline of coral cover in the Indo-Pacific: timing, extent, and subregional comparisons, Plos ONE, Vol.2, e711.
- Goreau J. T., J. M. Cervino, R. Pollina (2004) : Increased Zooxanthellae Number and Mitotic Index in Electrically Stimulated Corals, Symbiosis, 37, 107-120.
- Sabater M.G., H. T. Yap (2002) : Growth and survival of coral transplants with and without electrochemical deposition of CaCO₃, Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 272, pp. 131-146.