

電着技術を用いたサンゴ基盤の構築と 微弱電流によるサンゴの活性効果

GROWTH PROMOTION OF CORAL REEF USING A FREEBLE
ELECTROCHEMICAL METHOD AND THE CONSTRUCTION OF AN
ELECTRODEPOSITION BASES FOR SETTLEMENT OF CORAL POLYPS

鯉渕 幸生¹・木原 一禎²・山本 悟³・谷口洋基⁴・近藤 康文⁵

Yukio KOIBUCHI, Kazuyoshi KIHARA, Satoru YAMAMOTO,
Hiroki TANIGUCHI, Yasufumi KONDO

¹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)

²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)

³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)

⁴工修 阿嘉島臨海研究所 (〒901-3311 沖縄県島尻郡座間味村阿嘉179)

⁵理修 株式会社 シーピーファーム (〒907-0332 沖縄県石垣市伊原間 2-724)

Previous studies argue that an electric current running through the attached iron base, which was coated by accretion minerals through electrochemical processes under the sea promote the growth and a survival rate of coral polyps and transplanted coral fragments. To enhance the restoration of coral reefs by electrochemical growth promotion methods, further investigations are required to examine the detailed conditions and promotion processes. In some studies, the *in situ* cultivation phase as well as the accretion phase on the base is conducted under about tens amperes. Our experiment results of *in situ* and in the laboratory suggest that the excessive rapid accretion or extreme high alkalinity at the cathode under strong electric current may cause adverse effects to coral growth. More feeble electric current should be applied for the growth promotion of corals.

Key Words : reef-building coral, electrochemical calcification, zooxanthella photosynthesis, electro-field

1. はじめに

近年, 日本有数のサンゴ礁である石西礁湖のサンゴ礁の7割が消失したとの報道¹⁾ など, 造礁サンゴ類の白化・死滅が世界的に進行しており, 緊急の対策が強く求められている. サンゴ礁を構成するサンゴは, 刺胞動物花虫綱のサンゴ虫(ポリプ)が, 炭酸カルシウムの骨格を発達させて集まった動物で, 渦鞭毛藻類の褐虫藻が体内に共生している. 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, 構造物の壁に着生しポリプとなる. その後, 無性生殖によってポリプが分裂し, 骨格を育てながら群体へと成長する.

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, 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基盤を用いる方法など, 既に様々な試みが行われているが, 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. 一方で, 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, 微弱電流の効果が示唆されているが^{2)~3)}, 微弱電流のサンゴへの寄与については, 定量的な検証が難しく, そのメカニズムについても不明であった.

ところが近年, 石垣島対岸の竹富島竹富東港において, 近隣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, 自然着生した多量のサンゴが認められた. 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, 常時微弱な電流が通電している. この微弱電流に着目して, 竹富東港浮桟橋のサンゴ着床の事例分析や, 新たに考案したサンゴ増殖柵での電場解析結果から微弱な電場(電流密度)が, サンゴの成長を促進することが示されつつある^{4)~9)}.

そこで本研究では, 電気によるサンゴの成長促進に関して, その電流条件も含めて明らかにすること, さらに, 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電着基盤材の開発を行うことを目的に, 幼生の着床や群体成長に関する野外実験と光合成や石灰化に関する室内試験を実施した.

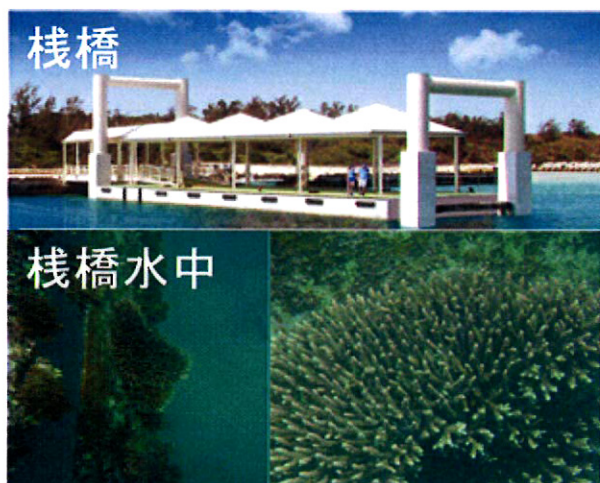


図-2 沖縄県竹富島浮き棧橋の様子

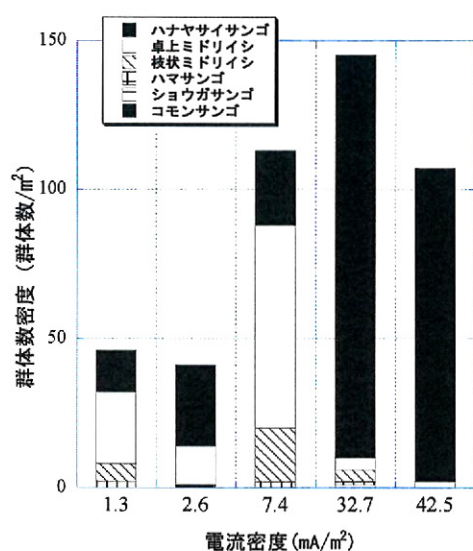


図-2 サンゴが自然活着した竹富島浮き棧橋の電流密度とサンゴの活着数の関係

2. 現地実験

(1) 既設の微弱電流構造物におけるサンゴと電場の関係

棧橋に自然活着したサンゴと電流密度との関係を明らかにするため、2007年7月および8月に竹富島浮き棧橋(図-2)において、サンゴの活着数のモニタリング調査および電場の計測を行った。活着数については、棧橋を50cm毎のメッシュで分割して実施した。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-2に示す。この図から、サンゴの活着数と電流密度の間に明確な相関が見られ、電流密度とサンゴの間に関係があることが示された。ただし浮き棧橋での測定では、電流が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。またサンゴの種類による影響の違いについてもその原因を特定することは困

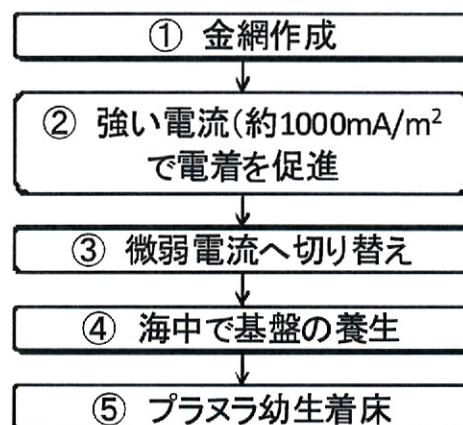


図-3 サンゴ着床基盤の作成フロー

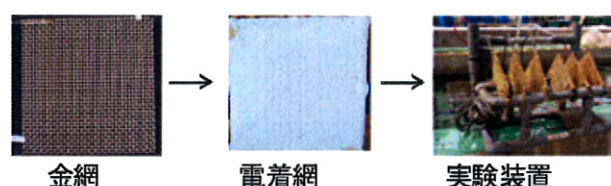


写真-1 実験装置(電着装置構築)

難である。そこで幼生の着床と電流密度の関係やサンゴの石灰化と電流密度の関係についての検討を行った。

(2) 幼生の着床数に与える影響の検証

電流密度がサンゴの幼生に与える影響を明らかにするために、幼生着床と電場の関係について実験による検討を行った。

a) 着床基盤の構築

着床基盤の構築は、図-3に示すフローに沿って実施した。また基盤作成の様子を写真-1に示す。

b) 実験結果

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した電着網(写真-1)と、一般に使用される素焼きタイルを用意し、塩ビ製架台に、素焼きプレート2枚と電着網2枚を固定したものを石垣島の海域と阿嘉島に8式を設置した(写真-2)。それぞれの電着網には、電流なし、10mA/m²、50mA/m²、100mA/m²と異なる電流密度を設定し、一つの電流条件について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、定期的に着床数を測定した。

実験の結果を着床数ごとに整理した結果を図-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は、素焼きタイルの平均の5倍以上の値を示した。このことは、電着物質が幼生の着生基盤

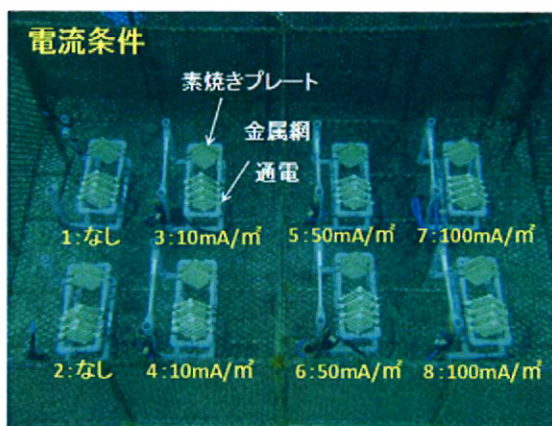


写真-2 着床試験の様子

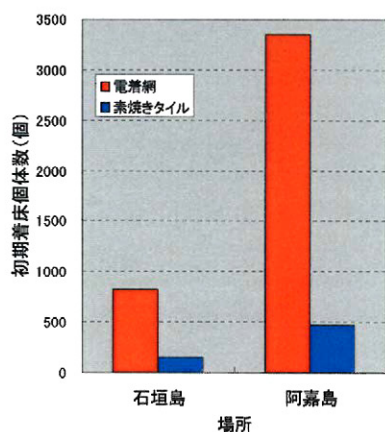


図-3 基盤の着床

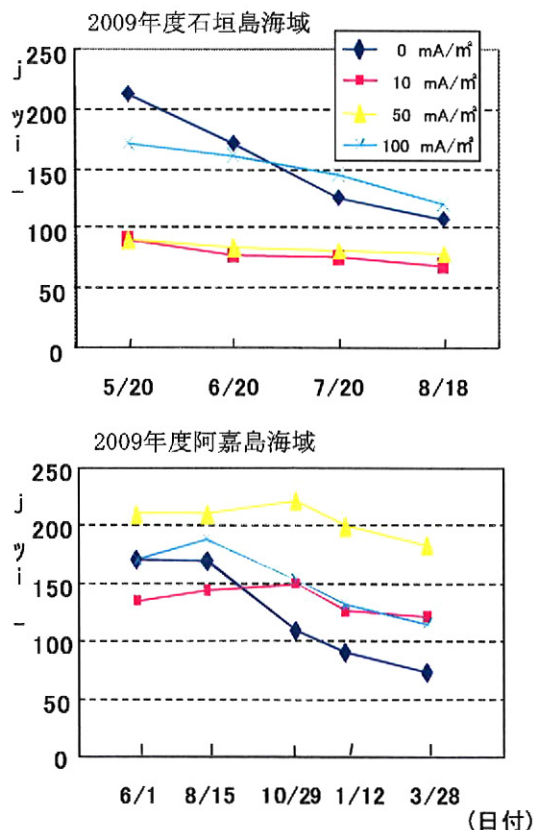


図-5 電流密度の違いによるサンゴ生残数の経過

として適することを示唆している。図-5に実験を開始してから約3ヶ月間の着床数の経時変化を示す。

電場の強弱はサンゴの着床密度に影響せず、サンゴの着床後の生残率を高めていることが分かった。またその効果は、石垣島でも阿嘉島でも同様であった。

(3) 電場がサンゴの骨格成長に与える影響

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、写真-3の様な鉄製の棚（サンゴ棚）を4個設置した。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、鉄棚が陰極となって電流が流入するようにした。

次に棚上にスギノキミドリイシ等を付け、電流条件を、電流なし、100mA/m²、300mA/m²、500mA/m²に設定して、定期的にサンゴ群体の大きさを測定した。

サンゴに対する電場 i_c と成長率 G の関係を例と図-6に示す。ここで電流密度は、析出した炭酸カルシウムの厚さにより、同じ棚でも微妙に異なることから¹⁰⁾、電流密度を実験開始後各棚に取り付けたサンゴ毎に測定して、成長量を算定した期間の平均値で整理した。この図からハナヤサイサンゴでは、電場 i_c が20～100mA/m²の範囲で成長率 G が有意になっ



写真-3 サンゴ棚の様子

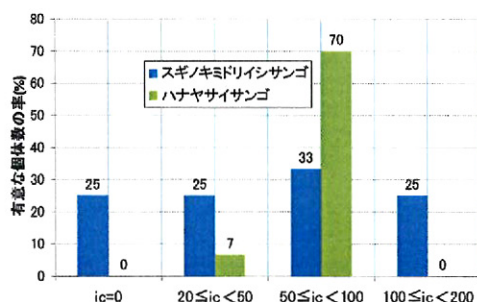


図-6 各電場の範囲における有意な個体数の割合

た。特に50~100mA/m²で顕著な促進効果が認められ、図-2に示した浮棧橋の結果と同様な傾向が認められた。スギノキミドリイシサンゴでは、サンゴ成長に及ぼす電場の影響は少ないが、同様に100mA/m²程度で促進する傾向が認められた。このように種類によって電場の影響が異なることが分かった。

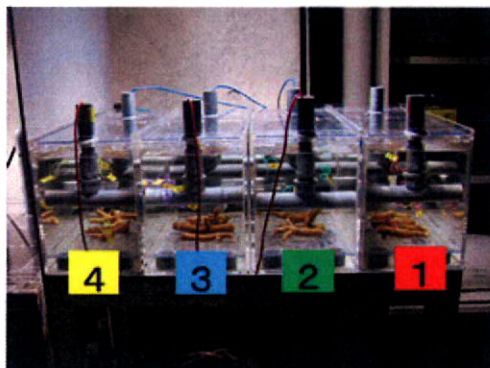


写真-4 実験に使用した水槽

3. 室内試験による検討

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見るのは困難である。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、室内実験を行った。

実験では、飼育条件を同一にした水槽（図-4）の電流条件のみを変えて、サンゴを飼育し、各水槽におけるアルカリ度や全炭酸の変化を比較した。

図-7は、電場なしの全アルカリ度・全炭酸の測定結果から算出した無機炭素生産速度(IP; mmol/m²/h⁻¹)と有機炭素生産速度(OP; mmol/m²/h⁻¹)の光量子量による変化を示している。IPは石灰化速度を、OPは光合成速度とみなすことができる^{9), 10)}。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5~8 mmol/m²/h⁻¹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⁻²s⁻¹程度の光条件で、呼吸と光合成がバランスすることもわかる。

図-8および図-9は、図-7に示したような石灰化(IP)や光合成(OP)が、一日のうちにどのように変化するかを検討するために行った実験の結果の例である。図-7の結果を踏まえて、実験中は8:00~20:00まで200μmol・m⁻²s⁻¹の光量を照射した。この結果から、日中におこる光合成によりOPが増加し、12 mmol/m²/h⁻¹程度となること、逆に夜間は-4 mmol/m²/h⁻¹程度となって、呼吸が卓越していることが分かる。一方、石灰化量を示すIPは昼間に増加し、

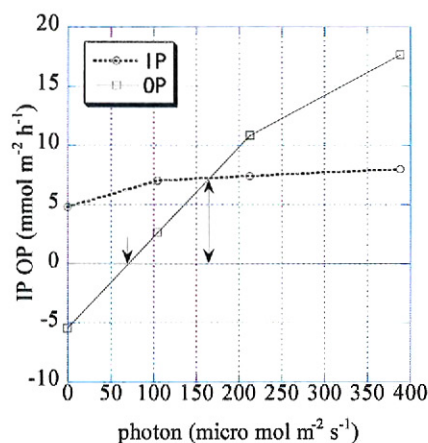


図-7 光量子量とIP, OPの関係

12:00頃ピークとなった後（図中↑）、徐々に減少し、夜間においてさらに減少し、明け方近くに最低値を記録した（図中↓）。同様の傾向は電流を作用させた図-9でも同様で、IPは常に正の値を取り夜間でも石灰化が起きていることがわかる。先に示した図-7においてIPの変化が小さいことを踏まえると、サンゴが昼間に光合成で得たエネルギーを利用して成長し、一部は貯蓄して、そのエネルギーで夜間も成長していること、夜間の石灰化が昼間のおよそ半分程度にまで達することがわかる。また従来の実験において、電場の影響が明瞭でなかった原因としては、この図にあるようにサンゴの日周変化が大きいため、実験をする時間帯によって結果が大きく異なることも一因と考えられる。そこで同様の実験を、数日繰り返して行い比較したところ、50mA/m²と0 mA/m²では、50mA/m²の方が日中で1割程度、夜間では2割程度、IPが大きくなることが分かった。このことから電流がサンゴに与える影響としては、光合成を強めるよりも、そこから得たエネルギーをより効率的に石灰化に振り分けることが影響していると見られる。これについては今後さらに異なる水流や光量、電場条件で繰り返し実施し、実験結果を基に統合的に検討することで、電場によるサンゴの活性化やストレス応答について、定量的に示すことが可能になると考えられる。

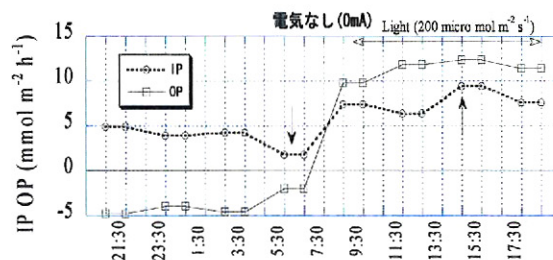


図-8 電気なしの条件におけるIP, OPの日周変化

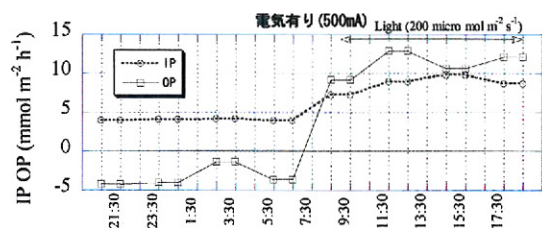


図-9 50mA/m²の条件におけるIP,OPの日周変動

4. まとめ

竹富島浮棧橋の自然着生サンゴの状況調査ならびに電着基盤の構築実験、サンゴ増殖棚における電場とサンゴ成長に関する実海域実験、活性化実験を行った結果、以下のことが分かった。

- ① 電気防食によって微弱な電場が生じている浮棧橋側面では、ハナヤサイサンゴおよびテーブルサンゴが順調に成長していた。
- ② 電場の影響はサンゴの種類によって異なると思われる。
- ③ 既往の研究^{6),8)}で考えられていたよりも更に微弱な電場がサンゴの成長を促進するものと考えられた。
- ④ 電場をコントロールできるサンゴ増殖棚による実海域の実験結果は浮棧橋における結果とほぼ一致した。
- ⑤ 電着基盤は、サンゴの幼生着床に有用な基盤であり、従来から使用されている素焼きタイルに比べ着床数が増大した。
- ⑥ プラヌラ幼生着床時における微弱電流の着床助長効果は顕著ではなかった。
- ⑦ 電着基盤着床後のプラヌラ幼生の成長経過において、電場はサンゴの生残率を高める効果が示唆された。
- ⑧ 様々な条件で海水中のアルカリ度や炭酸塩を測定し、これらを用いてサンゴの代謝や石灰化量を算定することで、サンゴのストレス応答などの生理現象を定量化する飼育装置を構築した。

謝辞：本研究を実施するにあたり、浮棧橋へのサンゴ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、有性生殖着生手法に際し、ご助言ご指導を頂いた阿嘉島臨海研究所 大森信所長に深く感謝するとともにこの場をお借りし、お礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 朝日新聞, 2008年9月10日, 朝刊, 1面, 2008.
- 2) 木原一禎, 鯉淵幸生, 三浦ゆきこ, 近藤康文, 後藤大, 石川光男: 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, 2008.
- 3) 木原一禎, 鯉淵幸生, 谷口洋基, 山本悟, 近藤康文, 石川光男: 微弱電流を利用したサンゴ成長促進試験経過報告, 第17回地球環境シンポジウム, pp.115-119, 2009.
- 4) 木原一禎, 鯉淵幸生, 谷口洋基, 山本悟, 近藤康文: 電着基盤の有性生殖によるサンゴ着生(着床)効果について, 第12回サンゴ礁学会講演要旨集, p.25, 2009.
- 5) 木原一禎, 鯉淵幸生, 谷口洋基, 山本悟, 近藤康文: 電場が及ぼすサンゴ成長促進効果の実海域における検証, 第12回サンゴ礁学会講演要旨集, p.24, 2009.
- 6) Goreau, T. and Hilbertz, J.: Reef restoration using seawater electrolysis in Jamaica, Proc. 8th Int. Coral Reef Symposium, 1997.
- 7) Hilbertz, W. H.: Solar-generated Building Material form Seawater as a Sink for Carbon, Ambio., 21, pp.126-129, 1992.
- 8) Marlowe, G. S. and Helen, T. Y.: Growth and survival of coral transplants with and without electrochemical deposition of CaCO₃, J.Exp.Mar.Biol.Ecol., 272, pp.131-146, 2002.
- 9) Yates, K.K. and Halley, R. B.: Measuring coral reef community metabolism using new benthic chamber technology, Coral Reefs, pp.247-255, 2003.
- 10) Vago, R., Ben-zion, M., Dubinsky, Z., Genin, A., Kizner, Z.: Growth rates of three symbiotic corals in the Red Sea, Limnol.Oceanogr., 42, pp.1814-1819, 1998.