

5. 電着を利用したサンゴ成長促進技術

木原 一禎^{1*}・鯉渕 幸生²・三浦 ゆきこ²・近藤 康文³・後藤 大⁴・石川 光男⁵

¹三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)

²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)

³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)

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

⁵石川技術士事務所 (〒362-0035 埼玉県上尾市仲町1-4-15)

* E-mail: kazuyoshi_kihara@mbe.mhi.co.jp

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。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。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、石垣島沖合に設置してモニタリングを行った。さらにサンゴの電場影響を詳細に調べるために、昼間の光合成中、夜間の動物活動中のDO変化を微弱電流あり、なしで比較することで、電流によるサンゴの活性増加を定量的に確認した。

Key Words : Coral transplantation, Electrochemical reef construction, Mitigation, Steel cathode

1. 浮棧橋におけるサンゴ着生事例

(1) 浮棧橋へのサンゴ着生状況

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)

2005～2007年の7月～8月の浮棧橋付近の平均水温は28.9～29.9℃(図-7)と高く最高水温は2週間以上連続して30℃を超えていた。この状況は、サンゴにとって良好な環境とは言えないがそれに関わらず浮棧橋におけるサンゴには成長が見られた。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る。

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 -800 ～ -1000mV に保っている。

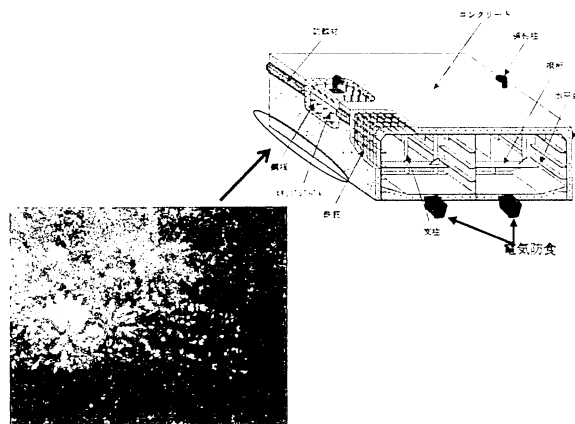


図-1 浮棧橋着生状況

サンゴの着生は、浮棧橋水線面と浮棧橋下部の隅角部の2箇所に集中し、特に下部のコンクリートと鋼の境目に集中的に着生していることが明らかになった。このことから、防食による微弱電流（電場）がサンゴ着生やサンゴの成長と関係があると考え、浮棧橋における電場状況の調査を行った。

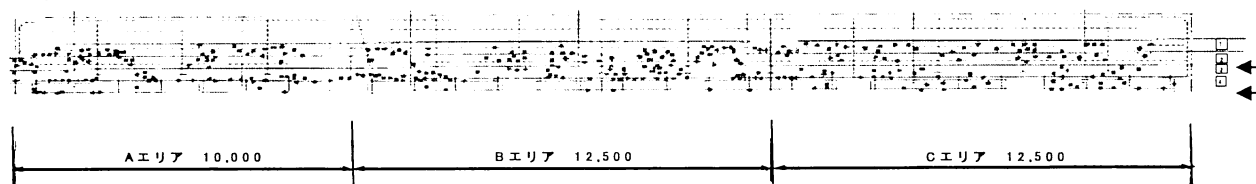


図-2 浮棧橋のサンゴ着生状況(ビデオトランセクト法)

(2)浮棧橋の電場状況

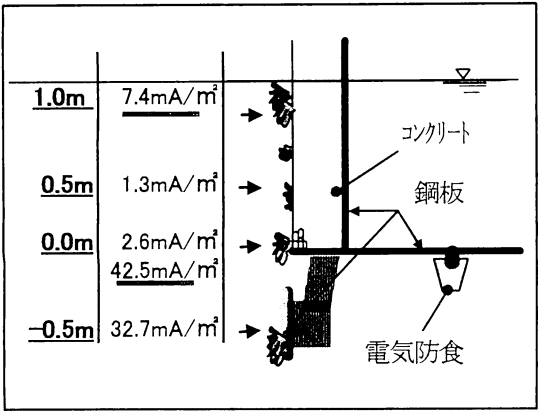


図-3 浮棧橋の電場測定結果

浮棧橋の電場状況の測定を行い、電場とサンゴの関係を考察した。図-2よりサンゴは水面付近および底板付近に着生している。図-3に測定した浮棧橋の電場状況を示す。浮棧橋の電場（電流密度）は、50mA/m²以下と微弱ではあるが、水面付近および底板付近の電場が大きくなっており、電場の大きい場所にサンゴが多く着生する傾向がある。微弱電流（電場）とサンゴの着生、成長に何らかの関わりがあることがわかる。

なお、サンゴと電場の関わりにおいて電場状況は1000mA/m²以下が望ましい。昨年実施した電着実験より、電流密度が1000mA/m²をこえるとサンゴの成長を逆に阻害する知見を得ている¹⁾。

以上のように、サンゴの着生と電場には何らかの関係があり、さらにサンゴに最適な電流密度があることが示された。以上の知見を踏まえて、自然界のサンゴに最適な電場状況を作りだす、伝導体としての基盤材の構築の研究を行った。

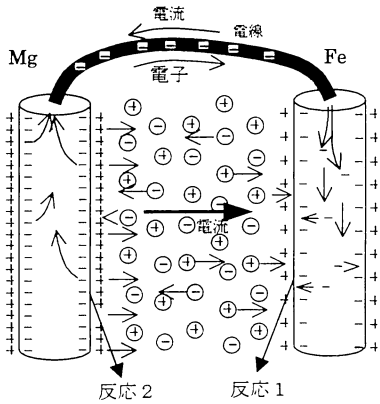
2.電着基盤の構築

サンゴの基盤の構築は、港湾構造物の防食技術として古くから知られている電着工法が有用であると考えられており、Schillak(1994)²⁾、Goreau, Hilbertz(1997)³⁾ Hilbertz (1988,1992)⁴⁾らの電着基盤の研究がある。

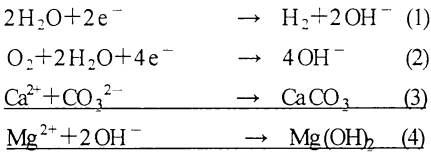
電着により、サンゴの着生が促進され、電着電流（微弱電流）が着生後のサンゴの成長を促進させると考えている。

電着とは、鉄筋等を陰極とし、海水を電解液として陽極から電流を流して、電解反応を促進させた結果、陰極となる鉄筋（基盤材）の周りに炭酸カルシウムなどの石灰質が析出する作用である。通電方法は大きく分けて、外部電源方式と流電陽極方式の2つの方式があり、これまでの研究では外部電源方式が用いられてきた。

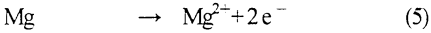
外部電源方式では、太陽電池パネルなどの電力が必要であり、サンゴ基盤などの海洋構造物の沖合への設置は困難であることに加えて、メンテナンスなどに課題があった。本研究では、電着において、①電源が不要 ②通電過程で塩素など有害な気体が発生しない ③環境にやさしい、など様々な利点がある流電陽極方式を主体に開発を進めてきた。



反応1 (陰極側)



反応2 (陽極)



反応3 (海水中)

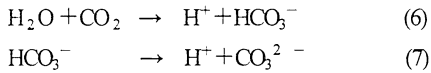


図-4 流電陽極方式の電流

流電陽極方式は、電解質である海水中に置かれた金属のイオン化傾向により電流が流れる。陽極にマグネシウム (Mg) を使用して、初期の電流を大きくすることで電着を促進する。図-4に電流の流れのイメージ示す。鉄筋と自然電位の異なる（イオン化傾向の大きい）Mgを電解水である海水に浸漬すると図のような電子の交換が行われ、微弱電流が流れる。

化学反応の結果、陰極側の鉄には、海水中に多数存在するカルシウムイオン (Ca²⁺)、マグネシウムイオン (Mg²⁺) が炭酸イオン (CO₃²⁻)、水酸イオン (OH⁻) などと結びつき固定化され、炭酸カルシウム、水酸化マグネシウムが析出される。一方、サンゴの骨格成分は、炭酸カルシウムで形成されており、電解によって集められた炭酸カルシウム（イオン）と微弱電流がサンゴの代謝を助長しているのではないかと考えている。

3.電着物質とサンゴ骨格

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。図-5に示すような構造の供試体を用い表1に示すような試験条件で175日間通電を行った。

図-6にφ22鉄筋のスケール組成の結果を示すが、電流密度の大きさとCaとMgの比率に差が見られ、電流密度が小さいほどCaが主体的に電着する傾向が確認された。この傾向は、他の鉄筋についても同様な傾向であった。

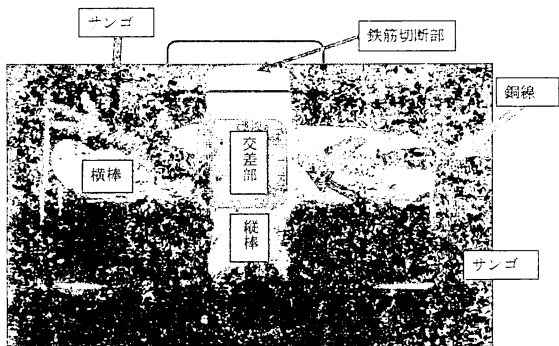


図-5 電着供試体概要

表-1 各試験試料の試験条件

試験試料No.	鉄筋	通電電流	試験試料No.	鉄筋	通電電流
No.1	φ4	500mA/m ²	No.9	φ22	500mA/m ²
No.2		1000mA/m ²	No.10		1000mA/m ²
No.3		2000mA/m ²	No.11		2000mA/m ²
No.4		3000mA/m ²	No.12		3000mA/m ²
No.5	φ13	500mA/m ²			
No.6		1000mA/m ²			
No.7		2000mA/m ²			
No.8		3000mA/m ²			

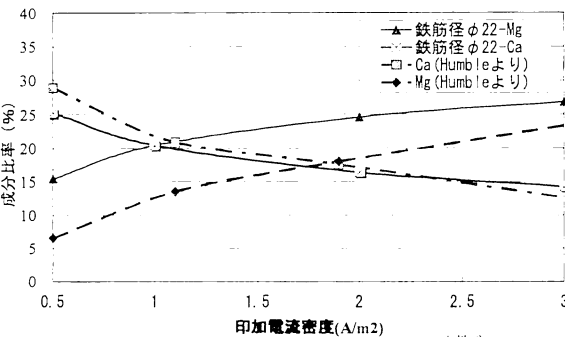


図-6 エレクトロコーティング組成（φ22）

(独)森林総合研究所(2004)⁷⁾によるとサンゴの骨格成分は92%がCaCO₃で組織されており、基盤構築においては、初期に3000～4000mA/m²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500mA/m²以下の微弱電流に切り替えて基盤を構築するのが有用であると考える。

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-5は電流密度3000mA/m²の実験供試体であるが、3000mA/m²では、サンゴの成長より電着が進みサンゴが電着物質に埋もれてしまったことから、サンゴを電着で人工的に飼育する際、電流密度の大きさに注意することが重要である。

4. 電場によるサンゴの耐力向上

電着効果を検証するため、黒島港浮桟橋に電着装置を取り付け、枝折法によりサンゴの観察を行った。枝折法で取り付けたサンゴは、昨年の石垣地方の海水温の異常上昇の影響を受けて全滅したが、白化が確認される直前のモニタリング結果では、電着なしの株の生存率が41.7%に対して電着ありの株が62.5%と生存率が高い結果が得られた。

一方、上述のような微弱電流が存在する竹富東港の3年間の夏場の温度分布を図-7に示す。夏季の水温はサンゴの生育限界値される28度を大幅に超えており、昨年の温度の異常上昇にもかかわらず生存率が80%以上と極めて高い生存率が認められた。これらを総合して考えると微弱電流がサンゴの耐力を向上させている（活性化させている）ものと考えられる。

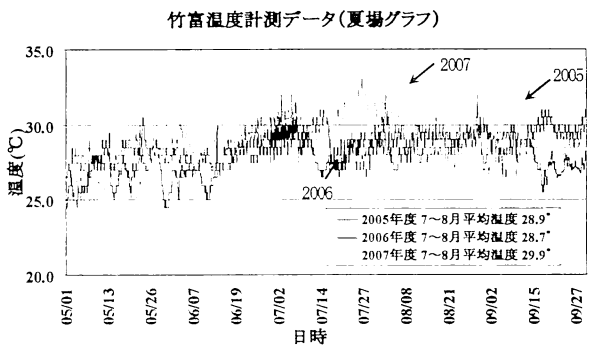


図-7 竹富東港温度分布

5.電場によるサンゴの代謝向上

自然界におけるサンゴの成長には、様々な要因が同時に関与するため、その定量化は困難である。そこで電着がサンゴの活性に及ぼす影響を、定量的かつ短時間で把握する一手段として、培養容器を使った室内実験を行う

方法について検討を行った⁸⁾。この実験は、密閉した容器内にサンゴを入れて1日程度培養し、密閉容器内の海水の主にCO₂、pH、DOの時間変化などから、サンゴの活性を定量化することを目的とした。同一のサンゴについて、異なる条件で実験をすることで、サンゴ成長の好適条件が把握できる。この方法の長所は、室内実験であるので、条件が明確であること、明条件・暗条件を入れても比較的短時間で終了すること、定量的なデータが得られることなどが挙げられる。

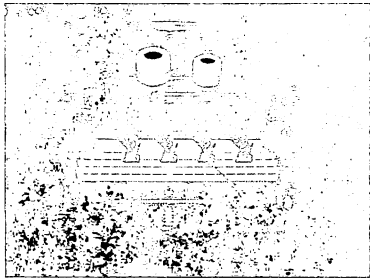


図-8 電場測定装置

また、サンゴについては個体差も大きいので、複数のサンゴ体をチャンバーに入れたり、逆に同一のサンゴについて、異なる実験条件を設定して、個体差を確認する実験を行うことも可能である。将来的には、様々な環境条件への適応性が高く、見た目にも美しいサンゴを養殖することにもつながる可能性もある。

図-8に実験装置を示す。密閉容器の容量は約10Lで、上面からメタハラ（光源）で光を照射し、容器内でサンゴを飼育する⁷⁾。電場影響については、外部電源方式により通電させ、陽極で発生する塩素ガスは装置内に設けたフィルターで容器内への流入を抑制することで、電場のみを変化させた。

活性化量（呼吸量）は、暗条件のDO減少速度で表され、光合成量は、{（明条件のDOの増加量）－（暗条件でのDO減少量）}として算出される。

実験条件は以下とした。

- ① 光の有無（PAR 0,300 mol m⁻²Sec⁻¹）
- ② 電流は、0mA/m²、50mA/m²、100mA/m²の3ケースとし、陽極と陰極はサンゴと非接触で容器の左右で電場を発生する方式とした
- ③ サンゴはスギノキミドリイシ1種類とした

図-9に暗条件における50mA/m²と電流なしの結果を示す。この図から実験期間中にDOが直線的に減少していることが解る。直線の傾きからサンゴの呼吸速度が、50mA/m²で9.41mgO₂L⁻¹day⁻¹、電流影響間隔期で10.82mgO₂L⁻¹day⁻¹、電流なしで5.11mgO₂L⁻¹day⁻¹と電場影響によりサンゴが活性化されている結果が得られた。

図-10に明条件における電場なし、50mA/m²、100mA/m²

でのDOの時系列を示す。この図からDOが直線的に増加していることが解る。直線の傾きから、サンゴの（光合成＋呼吸速度）がそれぞれ、8.82mgO₂L⁻¹day⁻¹、13.19mgO₂L⁻¹day⁻¹、18.20mgO₂L⁻¹day⁻¹、となっており、電場有りの条件で光合成活性が活発になった。

また、サンゴの光合成によって生成されたDOは、電場なしで(5.11+8.82=13.93)mgO₂L⁻¹day⁻¹、電場50mA/ m²で(9.41+13.19=22.6)mgO₂L⁻¹day⁻¹と電場ありの状況で活性量が約2倍になっている結果が得られた。さらに、このくらいの微弱電流の電場レベルでは、通電を止めても効果が持続する履歴効果がある事がわかった。

今後はさらに詳細に電流値を変更して実験を行うと同時に電場の与え方（上下、左右）の条件等も変更して検討していく必要がある。

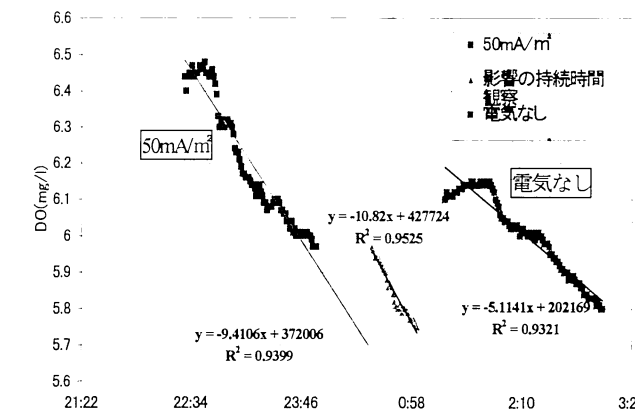


図-9 光合成活性（暗条件）

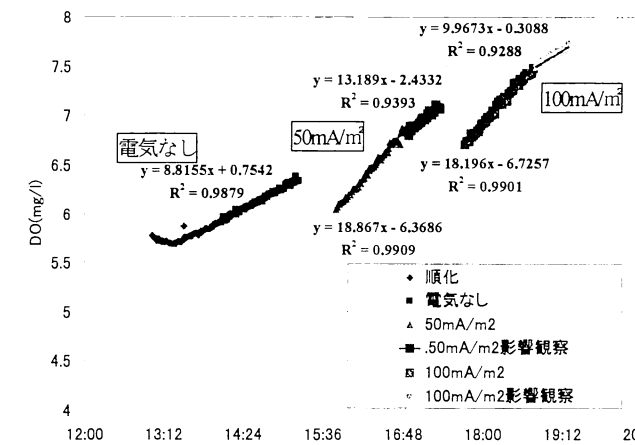


図-10 光合成活性（明条件）

6. 実海域におけるサンゴの着生、活性化確認実験

これまでの調査及び実験結果から、サンゴの活性と電場には明瞭な関係がみられたことを踏まえて、図-11に示すサンゴ用棚（サンゴ棚）を考案して平成19年3月に石垣島沖合の実海域に設置した。

(1) サンゴ棚の概要

サンゴ棚は図-11に示すような半円形の構造で、半円の中心部分にマグネシウム(陽極)をセットし、構造体である鋼材(陰極)に電気を通電させる構造としている。鋼材は、石垣島現地で加工可能な出来るだけ径の大きい22φの鉄筋を使用した。

また、マグネシウムと鋼材の接続は1箇所のみ電線で接続され、電線の中にサンゴ棚の電場をコントロールするための抵抗を取付けた。この抵抗には海中で定期的に電流を測定するための端子をとりつけて、モニタリング時に電流値を測定した。

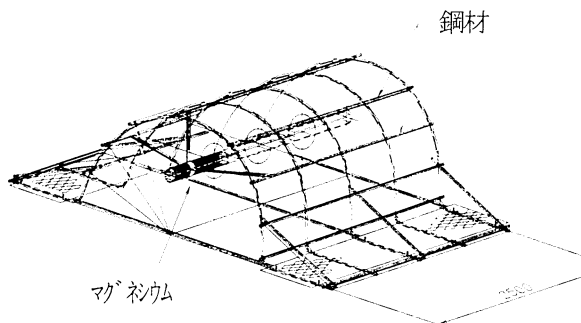


図-11 サンゴ棚 概要図

(2) 実験ケース

上述のようにサンゴの成長には1000mA/m²以下の微弱電流が望ましいと考えられ、竹富東港の調査や電着実験により、500mA/m²以下の低いレベルでサンゴ棚の電流の設定を行った。（表2参照）

表-2 初期電流の設定ケース

	電流密度	想定鉄筋電位
ケース1	電着なし	- 600mV
ケース2	100mA/m ²	-1000mV
ケース3	300mA/m ²	-1200mV
ケース4	500mA/m ²	-1300mV

(3) 電場分布

電流分布（電場）は図-12に示すようにマグネシウム（Mg）から距離に反比例する。すなわち、Mg（陽極）と鋼材（陰極）の距離が遠くなると抵抗が大きくなり、電場は、Mgに面していない鋼板反対面（外側）の電流は距離が遠くなるので、小さな値となると考えた。

また、電場は、電着の進行にともない、被覆物質の抵抗、分極抵抗により（距離の影響より析出物の抵抗が影響してくるので）、均一化していくと考えている。

電流密度 500A/m²、300A/m²、100A/m²棚の電場の測定結果を表3,4に示す。

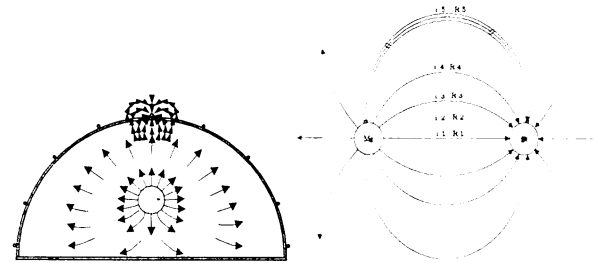


図-12 電流分布図

a) 直線方向鉄筋周囲の電場分布

棚外部の電場は基準に対し0～0.2の強さであり、電流密度が小さいほど弱くなった。

棚内側の電場は、Mgと鉄筋の距離が近いほど強く、遠いほど弱くなり、その程度は電流密度によって異なることを確認した。500mA/m²の電場は、Mg直を1（基準）とすると、それに対し、最も遠い鉄筋のMg側は1/3程度まで降下した。（電流降下が大）

電流が小さくなるに従い電流降下が小さくなり、100mA/m²で最も遠い鉄筋のMg側は近い鉄筋（Mg直上）の0.7倍であった。（図-11）

以上のことより棚の電場は電流密度によってその広がり異なるが、棚外側へはほとんど広がらないことが分かる。

表 3 直線方向鉄筋電場分布（相対表示）

*)各電流密度の Mg 真上の電場を 1 とする。

	棚内側	棚外側
500 mA/m ² 棚	0.3～1.0	0.0～0.2
300 mA/m ² 棚	0.5～1.0	0.0～0.2
100mA/m ² 棚	0.7～1.0	0.0～0.1

b) アーチ方向鉄筋周囲の電場分布

棚外側の電場は内側（Mg側）に比べて0～0.3の強さであり、電流密度が小さいほど弱くなった。棚内部の電場の傾向も直線鉄筋周囲の電場と同様で、電流密度が大きいほど不均一（電流降下が大）に、電流密度が小さいほど（電流降下小）均一になった。

表 4 アーチ方向鉄筋電場分布（相対表示）

*)各電流密度の Mg 真上の電場を 1 とする

	棚内側	棚側面
500 mA/m ² 棚	0.6～1.2	0.3～0.6
300mA/m ² 棚	0.5～1.2	0.3～0.7
100 mA/m ² 棚	0.6～1.0	0.1～0.3

本設備ではアーチ状鉄筋が5本直線方向に並び、それを結ぶ面を「棚側面」と呼ぶ。棚側面は棚内部に比べ約半分ほどの強さであった。

以上のことより棚の電場は電流密度によって異なるが、棚外部へはほとんど広がらず、棚側面には内部の約半分の強さの電場が存在することが分かる。

(4)サンゴ棚モニタリング

サンゴ棚は、電着を促進させた後に写真-2に示すように、サンゴを枝折法により取り付けられている。今後、このサンゴの成長をモニタリングしていく予定である。



写真-2 サンゴ棚状況

6. まとめ

- (1)浮棧橋のサンゴ着生調査から、 100mA/m^2 以下の微弱電流がサンゴの着生を助長しているものと考ええる。
- (2)サンゴ基盤の構築方法として、電流制御可能な新方式の電着システム(流電陽極方式)を考案した。
- (3)電着過程において、電流密度を微弱に保つことでカルシウム生成物を(CaCO_3)主体的に析出させることがサンゴの基盤の構築有用ではないかと考える。
- (4)サンゴの電場による代謝状況を定量的に計測できる装置を製作した。
- (5)サンゴの代謝は電場により活性化することが明白となった。そして、 50mA/m^2 程度の微弱電流で代謝量(光合成活性量)が2倍になることを確認した。
- (6)サンゴ棚を考案し、石垣島海域に設置した。今後、モニタリングを実施していく予定である。

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、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)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
- 2)Schuhmacher H, Schillak L: Integrated electrochemical and biogenic deposition of hard material – a nature-like colonization substrate, Bull Mar Sci 55:672-679
- 3) Goreau TJ, Hilbertz: Reef restoration using seawater electrolysis in Jamaica. Proc 8th Int Coral Reef Symp (1997)
- 4)Wolf H, Hilbertz: Growing and fading structures, experiments, applications, idas, Mitt Sonderforschungsbereich 230' Natürliche Konstruktionen – Leichbau in Architektur und Natur' 2:107-114
- 5)Wolf H, Hilbertz: Solar-generated Building Material form Seawater as a Sink for Carbon. Ambio 21:126-129(1992)
- 6)H. A. Humble: Corrosion, 4[7] 358 (1948)
- 7)独)森林総合研究所: 森林, 「海洋等におけるCO₂収支の評価の高度化」 2004.3 P133
- 8)中村恵理子:「温帯性サンゴの光合成-温度特性とその測定法」『藻類』51(1) 2003.5
- 9)Marlowe G, Sabater, Helen T. Yap: Growth and survival of coral transplants with and without electrochemical deposition of CaCO_3 , J.Exp.Mar.Biol.Ecol.272:131-146(2002)
- 10)Marlowe G, Sabater, Helen T. Yap: Long-term effect of induced mineral accretion on growth, survival and corallite properties of *Porites cylindrica* Dana. J.Exp.Mar.Biol.Ecol.311:355-374(2004)
- 11)K.K. Yates, R.B. Halley: Measuring coral reef community metabolism using new benthic chamber technology. Coral Reefs. 22:247-255(2003)
- 12)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)