

18. 微弱電流を利用したサンゴ成長促進試験経過報告

木原 一禎^{1*}・鯉渕 幸生²・谷口 洋基³・山本 悟⁴・近藤 康文⁵・石川 光男⁶

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阿嘉島臨海研究所 (〒901-3311 沖縄県島尻郡座間味村字阿嘉179)

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)

⁶石川技術士事務所 (〒362-0035 埼玉県上尾市仲町1-4-15)

* E-mail: kazu Yoshi_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、緊急の対策が強く求められている。そのための手段としてのサンゴの成長促進については、電流の影響が示唆されているものの、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る。ところで、竹富島東港においては、近隣の岸壁などには全くサンゴが認められないにも拘わらず、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。この桟橋には電気防食がなされており、電流とサンゴの関係を検討するのに最適と考えられた。そこで、2007年よりこの桟橋において防食電流とサンゴの自然着生数と成長について検討することを目的に調査を実施した。さらにサンゴの成長促進を目的とした、微弱電流をコントロール可能な鋼製のサンゴ増殖棚を考案・製作し、2007年より石垣港沖の実海域に設置して、微弱電流が及ぼすサンゴ成長への影響を種ごとに検討した。その結果、浮桟橋ではサンゴが順調に成長し、電流密度とその着生数の間に正の相関が示された。サンゴ増殖棚での電場解析結果から、50mA/m²程度の微弱な電場がサンゴの成長を促進することが明らかになった。

以上のように本研究は、サンゴと電流密度の関係をはじめて定量的に示しただけでなく、その影響が種によって異なることを明らかにしており、電流による成長促進メカニズム解明の一助になると期待される。

Key Words : Reef-building coral, Electro-coating, Sacrificial anode, Electric Field, Current density

1. 浮桟橋におけるサンゴ着生調査

(1) 調査の経緯

竹富島の浮桟橋は図-1 に示すように鋼板と鉄筋コンクリートで構成された RC ハイブリッド構造で、2004 年 1 月に竹富東港に設置された。この浮桟橋は、底板鋼板およびコンクリート内部の鉄筋を防食する目的で、流電陽極を取り付けて電気防食を施している。設置後数ヶ月後に浮桟橋を観察したところ、多数のサンゴが側面部および端壁部に自然着生していることが分かり、2004 年から観察を続けている。一方、電気防食を施していない近隣のコンクリート製岸壁はサンゴの着生が認められないことから、電気防食の電流によって生じる電場がサンゴの着生・成長に良好に作用すると考えた。¹⁾²⁾その後、2007 年 7 月より浮桟橋側面の電場の状況を調査する目的で、浮桟橋側面に流入する電流密度を定期的に測定している。電場の測定は複数の照合電極を測定面に対して垂直に当て、照合電極間の電圧 IR を計測した。この電圧 IR を照合電極間の海水抵抗 R で割って求めた電流 I を、単位面積当たりの電流密度 i とした。本報では、この電流密度 i を電場として表した。

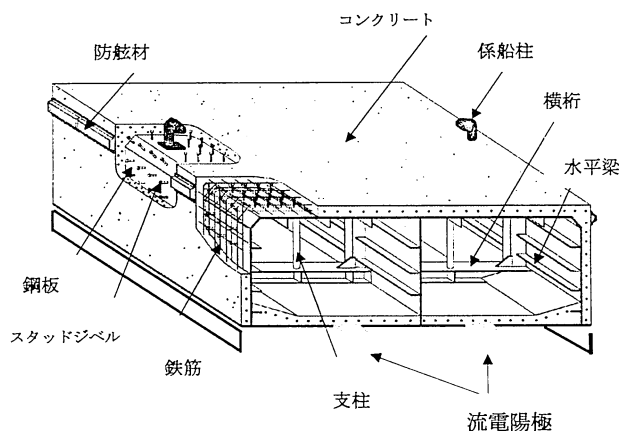


図-1 竹富島の浮桟橋の概要図

その結果、図-2 に示すように電場が比較的に強い箇所においてサンゴの着生が多く、電場と着生数に相関性があることが示唆された。³⁾

(2) 着生したサンゴの調査

浮桟橋側面に自然着生したサンゴの種類と数量の調査を 2009 年 2 月に行った。調査方法は図-3 に示すような枠 (25cm×25cm/枠) を桟橋側壁に当て、ダイバーに

より水深毎のサンゴの種類を記録した。ダイバーの作業状況を図-3 に示す。

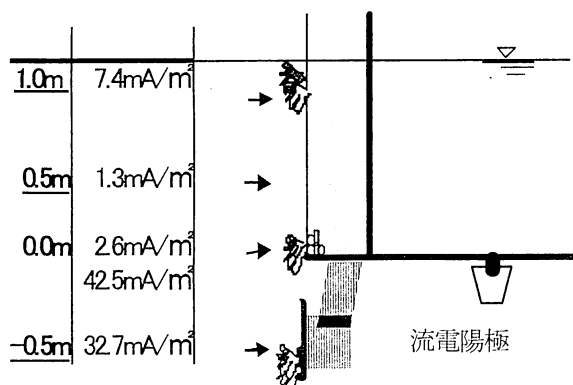


図-2 2007 年に行った電場とサンゴ着生状況の結果

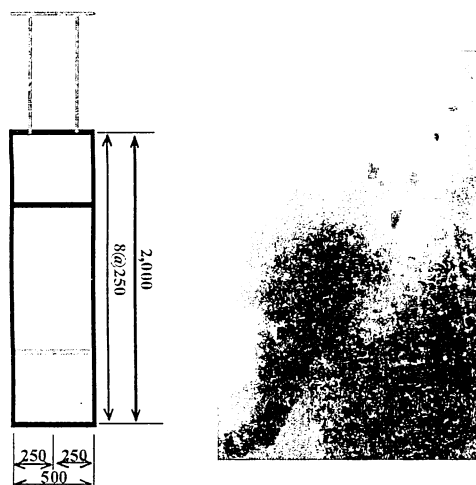


図-3 調査用の枠およびダイバーの作業状況

(3) 調査結果

2009 年 2 月に行った調査結果を図-4 に示す。サンゴの着生数は 2007 年の調査結果と同様に浮桟橋側面の上端部および下端部に多かった。

また、サンゴが 2007 年よりも大きくなっていたことから、当環境においてサンゴが順調に成長していることが分かった。このことから適切な電場はサンゴの着生・成長に対して良好に作用することが確認できた。なお、サンゴの種類はハナヤサイサンゴおよびテーブルサンゴが多かった。

2. 電場測定

2.1 サンゴ増殖棚の電場測定方法

微弱電流を流すことのできる鋼製のサンゴ増殖棚を考案・製作し、2007 年 3 月に石垣港沖の実海域に設置した。サンゴ増殖棚は、図-5 に示すように流電陽極を取り付けてあり、棚の鉄筋を陰極とすることで陰極面がアルカリ性となる化学反応（反応 1 の(1)および(2)：アルカリ化）の結果、海水中のカルシウムイオンならびにマグネシウムイオンが鉄筋表面に析出する化学反応（反応 1 の(3)および(4)：析出）が生じる。この過程での析出物を電着析出物と呼んでいる。このアルカリ化や鋼材表面の電着析出物がサンゴの成長を促進すると考えられる。また、陽極からの電流は海水を介して鉄筋表面に到達するので海水抵抗 R と電流 I によって生じる電場（電圧 IR ）がサンゴの成長を促進することも考えられる。これらの影響を調べるために、実海域に設置したサンゴ増殖棚の鉄筋近傍の電場を測定し、電場とサンゴの成長率との関係を検証した。なお、増殖棚の鋼材に対する電流密度は 0, 100, 300 および 500mA/m² の 4 水準に設定した。

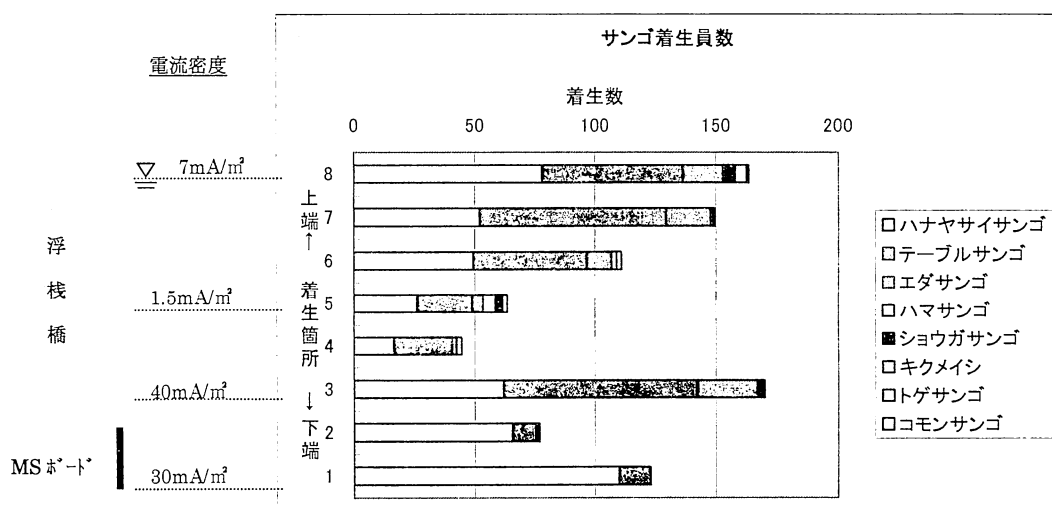
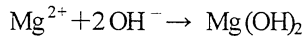
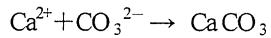
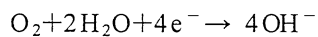
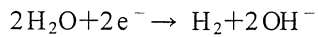


図-4 サンゴの種類と数量

反応 1 (陰極側)



反応2 (海水中の HCO_3^- が CO_3^{2-} へ変化)

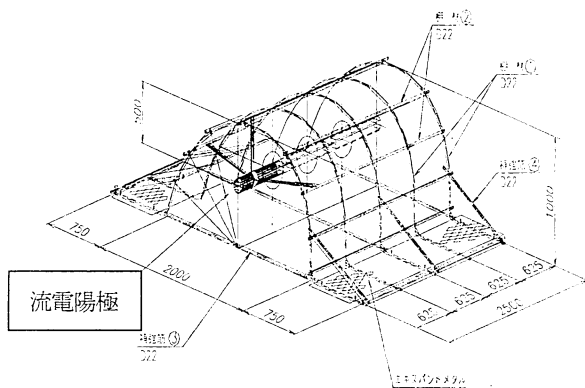
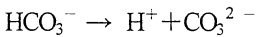
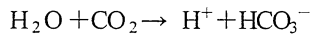


図-5 サンゴ増殖棚

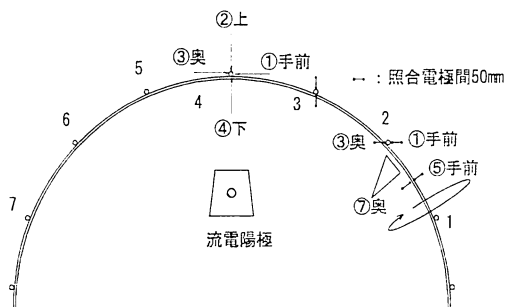


図-6 照合電極の当て方

電場の測定方法は、2 本の高性能海水銀塩化銀照合電極を用い、図-6 に示す要領で照合電極を鉄筋に当て照合電極間の電圧 IR を測定した。照合電極の間隔は 50mm としダイバーが照合電極を保持した状態で船上にて直流電圧計で電圧 IR を読み取った。鉄筋と照合電極の位置関係を図-7 に示す。電場は、測定した電圧 IR を下式によって電流密度 i を計算し、電場の強さとして表した。

$$\begin{aligned} R &= (\rho / 2 \pi L) \times \ln(r_2/r_1) \\ &= (20 / (2 \pi * 100)) \times \ln(7.3 / 2.3) \\ &= 0.0368 \quad (\Omega) \end{aligned}$$

電流 $I=IR/R$ (mA)

サンゴに対する海水の面積 $Ac =$

$$36.5 \times 2 \times \pi \times 1000 \times 10^{-6} = 0.229 \quad (\text{m}^2)$$

サンゴに対する電流密度 $i_c = I \div A_c$ (mA/m²)

電場の考え方を図-9 に示す。電流密度 i は鉄筋に対する電流密度 i_r および鉄筋中心から 36.5mm 離れた位置における海水の円柱表面積に対する電流密度 i_c とした。ここで、サンゴ増殖棚における電流分布を FEM 解析した例を図-8 に示す。図-8 から分かるように鉄筋に流入する電流 I は鉄筋と流電陽極との位置関係によって異なることが分かる。従って、サンゴの着生に影響すると考えられる電流密度 i_c は、0 時、3 時および 9 時の 3 方向の電圧 IR の平均値を用い算出した。

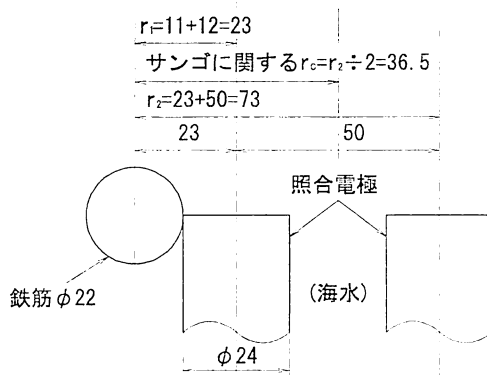


図-7 鉄筋と照合電極の位置関係

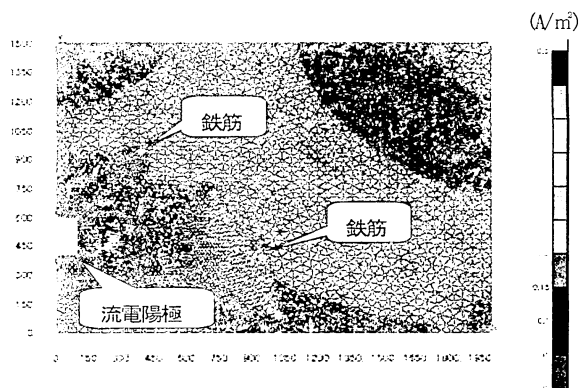


図-8 サンゴ増殖棚の鉄筋に流入する電流のFEM解析例

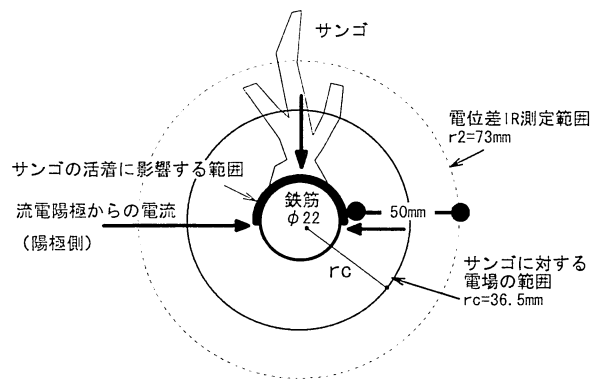


図-9 電場の考え方

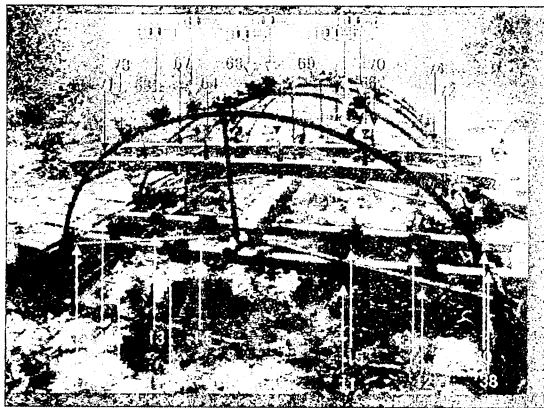


写真-1 阿嘉島試験の設置状況

また、サンゴが電着析出物の影響を受けない条件での調査を行うため、比較としてにサンゴを樹脂製の支持架台に固定したケースの実験を行った。(着生個所に電流が流入しないが、海水中の電場の影響を受ける条件とした。)これを「阿嘉島試験」と呼んで区別した。サンゴを取り付けた個所において電圧 IR を同様に測定し、照合電極間に均等な電流が流れるものとして電流密度 ic を求めた。阿嘉島試験では、有性生殖を利用して人工的に養殖したウスエダミドリイシサンゴを供試した。阿嘉島試験の設置状況を写真-1 に示す。

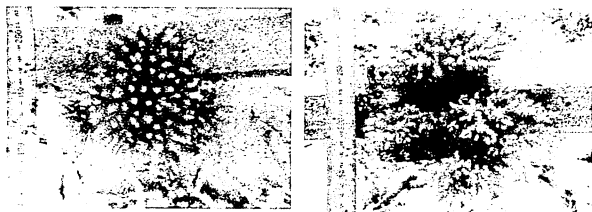


写真-2 寸法測定の場合

サンゴの寸法 L_m は定規で測定した。成長率 G は試験開始時の寸法 L_0 に対する比率で表した。(式7) 寸法測定の場合を写真-2 に示す。

$$\text{成長率 } G = (L_m - L_0) / L_0 \quad (7)$$

2.2 電場とサンゴ成長率の結果

サンゴに対する電場 ic と成長率 G の関係をハナヤサイサンゴを例として図-10 にプロットした。サンゴの成長率 G は同一の電場 ic においてもばらつきが大きかった。そこで電場 ic がサンゴの成長に及ぼす影響を統計的に整理した。サンゴの種類ごとに電場 ic が 0 mA/m^2 における成長率 G の平均値 AVR と標準偏差 σ の和 S を基準とし、表-1 に示す各電場 ic の範囲における個体数を数え、その内、成長率 G が S を越える個体数の割合を求めた。これを「有意な個体数の率」とした。

なお、鉄筋に対する電場 ir はサンゴに対する電場 ic の 3.3 倍であった。ここでは、浮桟橋の結果、増殖棚の結果ならびに阿嘉島試験の結果をサンゴに対する電場 ic で整理し考察した。

増殖棚における電場と有意な個体の割合を図-11 に示す。サンゴの種類がハナヤサイサンゴでは、電場 ic が $20 \sim 100 \text{ mA/m}^2$ の範囲で成長率 G が有意になった。特に $50 \sim 100 \text{ mA/m}^2$ で顕著な促進効果が認められ、図-4 に示す浮桟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、促進する傾向が認められた。このようにサンゴの種類によって電場の影響が異なることが分かった。

また、阿嘉島試験の結果を図-12 に示す。ウスエダミドリイシサンゴでは電場が $20 \sim 50 \text{ mA/m}^2$ の範囲において最も有意となり、他の試験結果と同様に、 50 mA/m^2 前後の微弱な電場がサンゴの成長を促進するものと考えられる。

なお、実海域での試験では海水の温度、流速、水質、光量の変化に加え、海藻の繁茂や魚による食害などの要因からデータが大きくばらつくことを考慮して解析を行わなくてはならない。電場がサンゴ成長に及ぼす影響を明らかにするために今後も試験を継続する予定である。

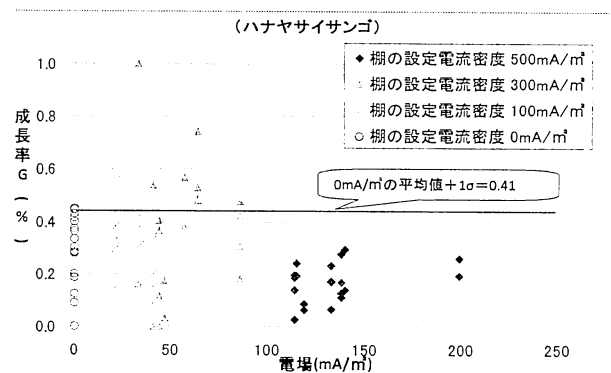


図-10 電場と成長率の関係
(ハナヤサイサンゴ)

表-1 各電場の範囲における有意な個体数の割合

サンゴに対する電流密度 ic 電場 (mA/m^2)	平均値 AVR 標準偏差 σ $S=AVR+\sigma$ at 0 mA/m^2 (%)			S 以上の 個体数	総数	割合 (%)
スギノキミドリイシ サンゴ	0	0.075	0.095	0.17	5	20
	$20 \leq ic < 50$	0.075	0.095	0.17	7	28
	$50 \leq ic < 100$	0.075	0.095	0.17	4	12
	$100 \leq ic < 200$	0.075	0.095	0.17	5	20
ハナヤサイ サンゴ	0	0.248	0.162	0.41	6	20
	$20 \leq ic < 50$	0.248	0.162	0.41	2	30
	$50 \leq ic < 100$	0.248	0.162	0.41	7	10
	$100 \leq ic < 200$	0.248	0.162	0.41	0	20

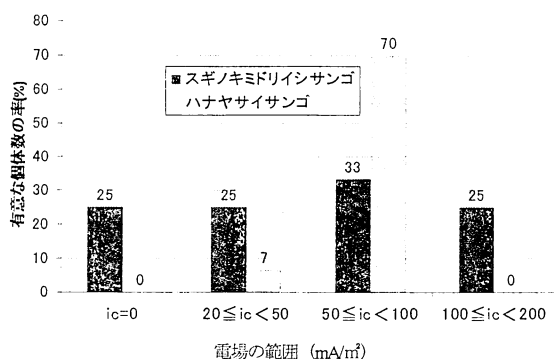


図-11 各電場の範囲における有意な個体数の割合
(鋼製増殖棚)

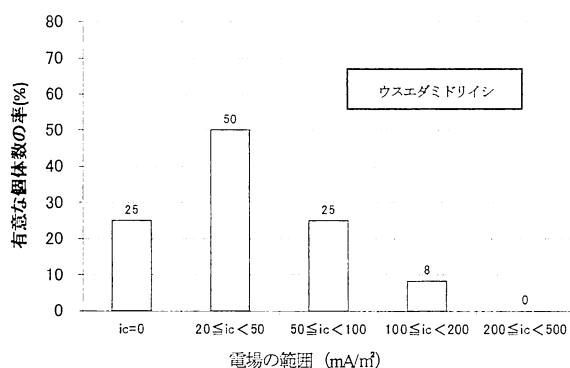


図-12 各電場の範囲における有意な個体数の割合
(阿嘉島試験)

5. 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試験を行った結果、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考えられた。
- (3) 既往の研究^{4),9),7)}で考えられていたよりも小さな50mA/m²程度の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) 増殖棚における電場がサンゴ成長に及ぼす影響は浮棧橋における結果とほぼ一致すると考えられる。
- (5) 実海域実験においては、気象状況、食害などサンゴの成長に影響する因子が多いため、サンゴの成長に対する電場の影響は、今後の試験結果を含めて判断することが望ましい。

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)木原一禎, 田村一美, 鯉渕幸生, 石川光男, 田代賢吉, 近藤康文：「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)木原一禎, 鯉渕幸生, 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 2008年8月30-31日
- 3)木原一禎, 鯉渕幸生, 近藤康文, 山本悟：「微弱電流を利用したサンゴ増殖に関する研究」第34回海洋開発シンポジウム 2009年6月29-30日
- 4)Schuhmacher H,Schillak L :Integrated electrochemical and biogenic deposition of hard material – a nature –like colonization substrate ,Bull Mar Sci 55:672-679
- 5) Goreau TJ,Hilbertz:Reef restoration using seawater electrolysis in Jamaica. Proc 8th Int Coral Reef Symp (1997)
- 6)Wolf H.Hilbertz : Growing and fading structures , experiments, applications,idas,Mitt Sonderforschungsbereich 230' Natürliche Konstruktionen – Leichbau in Architek-tur und Natur' 2:107-114
- 7)Wolf H.Hilbertz : Solar-generated Building Material form Seawater as a Sink for Carbon.Ambio 21:126-129(1992)
- 8)H.A.Humble : Corrosion,4[7] 358 (1948)
- 9)Marlowe G.Sabater, Helen T. Yap: Growth and survival of coral transplants with and without electrochemical deposition of CaCO₃, 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)