

平成 24 年度環境技術実証事業

閉鎖性海域における水環境改善技術 実証試験結果報告書

平成 25 年 3 月

実証機関 : 一般財団法人 みなと合研究財団

環境技術開発者 : 三菱重工鉄構エンジニアリング株式会社

技術・製品の名称 : 微弱電流を利用したサンゴ成長促進及び
電着基盤利用技術

目 次

○全体概要	
1. 実証対象技術の概要	1
2. 実証試験の概要	2
3. 維持管理にかかる技術情報	4
4. 実証試験結果	5
5. 過去に調査した試験データの活用	6
6. 実証試験結果の結論	6
7. 技術実証検討会の見解	7
8. 参考情報	8
○本編	
1. 導入と背景	9
2. 実証試験参加組織と実証試験参加者の責任分掌	10
3. 実証対象技術の概要	11
3-1. 技術の目的	11
3-2. 技術の原理	12
3-3. 期待される効果	13
3-4. 他の技術との差異	13
3-5. 適用条件、適用環境	14
4. 実証試験実施場所の概要	15
4-1. 実証試験実施場所の名称・所在地・管理者	15
4-2. 海域の概要	16
5. 実証試験の内容	17
5-1. 調査目標及び項目	17
5-1-1. 調査目標	17
5-1-2. 調査項目	18
5-2. 調査内容	19
5-2-1. 電着基盤による稚サンゴの着生促進効果調査（実証試験 1）	19
5-2-2. 微弱電流によるサンゴの成長促進効果調査（実証試験 2）	21
5-2-3. 海域環境調査	24
5-3. 調査工程	25
5-4. 設置及び回復に関する留意事項	26
5-5. 維持管理	26
6. 実証試験結果	27
6-1. 電着基盤による稚サンゴの着生促進効果	27
6-2. 微弱電流によるサンゴの成長促進効果	29
6-3. 海域環境調査	41

6-3-1. 流況調査	41
6-3-2. 水質調査	42
6-3-3. 水温・照度の連続観測	42
7. 過去に調査した試験データの活用	44
7-1. 電着基盤による稚サンゴの着生促進効果：同種試験	44
7-2. 微弱電流によるサンゴの成長促進効果：長期的な効果試験	45
8. 実証試験結果の結論	46
8-1. 電着基盤による稚サンゴの着生促進効果	46
8-2. 微弱電流によるサンゴの成長促進効果	46
9. 技術実証検討会の見解	47
9-1. 電着基盤による稚サンゴの着生促進	47
9-2. 微弱電流によるサンゴの成長促進効果	47
10. まとめ	48
○付録	
・用語集	49
○資料編	
1. 過去に実施された調査内容	資料 1
2. 引用論文	資料 11
3. サンゴ写真集	資料 16
4. 写真集：調査の状況	資料 40
5. 計量証明書	資料 51

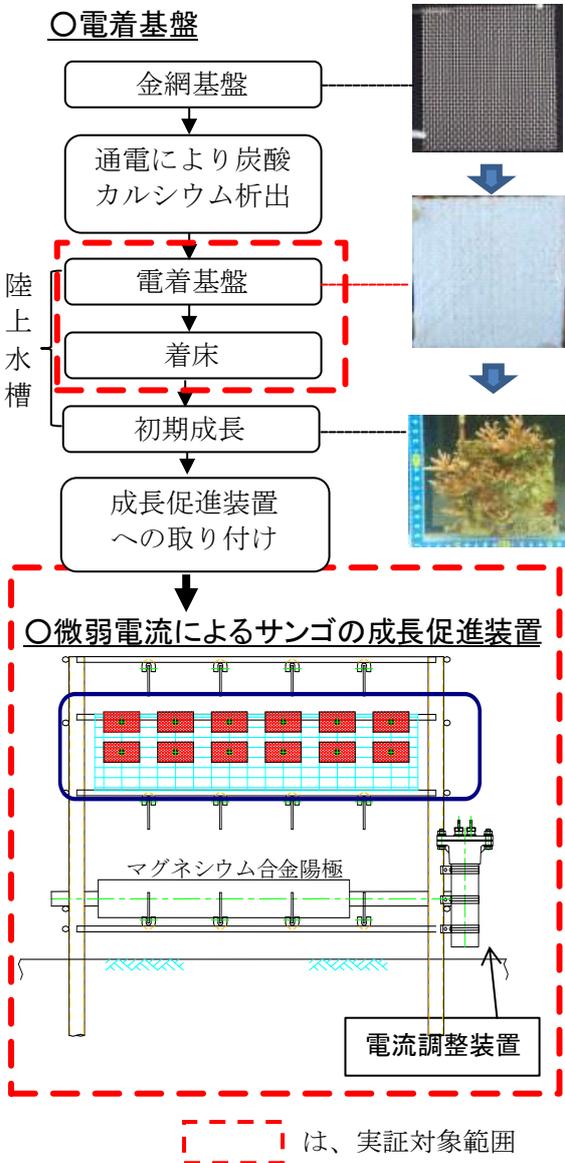
○全体概要

様式 2

実証対象技術	微弱電流を利用したサンゴ成長促進及び電着基盤利用技術
環境技術開発者	三菱重工鉄構エンジニアリング株式会社
実証機関	一般財団法人 みなと総合研究財団
実証試験期間	平成 24 年 8 月 1 日～平成 25 年 3 月 29 日
実証の目的	電着基盤による稚サンゴの着生促進効果の検証 微弱電流によるサンゴの成長促進効果の検証

1. 実証対象技術の概要

技術の模式図



原理と目的

○電着基盤

①鋼材と流電陽極（マグネシウム合金陽極）を接続し海水中に浸すと、鋼材表面に電流が通電し、鋼材表面ではアルカリ成分 OH^- が生成する。

②海水中のカルシウムイオン Ca^{2+} 、炭酸水素イオン HCO_3^- およびマグネシウムイオン Mg^{2+} は以下の式に示す沈殿物を形成して鋼材表面に付着する。この付着物を電着物（エレクトロレーティング）と呼んでいる。



③電着物は造礁サンゴの骨格の主成分である炭酸カルシウムに近いので、稚サンゴが着生しやすい特長がある。

④この原理を活用して金属基盤に電流を流して表面に炭酸カルシウムを析出させた基盤が電着基盤で、稚サンゴの着生促進を目的とする。

○微弱電流によるサンゴの成長促進装置

①電場（電流密度）が形成されている場所ではサンゴの成長が速いことが知られている。

②これは、電場がサンゴの石灰化やサンゴに共生している褐虫藻の光合成活性を高めるためであることが判明している。

③この原理を活用した技術が微弱電流によるサンゴの成長促進装置で、マグネシウム合金陽極により微弱電流の電場を発生させ、着生したサンゴの成長促進を目的とする。なお、本技術実証試験における微弱電流とは、外部電源（商用電源や蓄電池）を用いなくて $5 \sim 100 \text{mA}/\text{m}^2$ 程度の電場（電流密度）を形成することができる規模の電流を示す。

2. 実証試験の概要

(1) 実証試験実施場所の概要

海域の名称 主な利用状況 規模	<ul style="list-style-type: none"> ・沖縄県石垣市伊原間地先 ・(株)シーピーファームがサンゴの受精等を行うサンゴの養殖場として利用している。 ・実証試験は水深 7m 程度の海底。面積は 20m×20m の範囲。
海域の課題	2007 年以前は海域全体がサンゴ礁地帯であった。2007 年の海水温上昇により、この海域のサンゴが減少した。そのため、サンゴの回復には人為的なサポートが必要である。
海域の状況	水質 COD, 1.0mg/L, T-N, 0.081-0.084mg/L, T-P, 0.005-0.006mg/L (1012.9.) COD, 0.7-0.8mg/L, T-N, 0.059-0.14mg/L, T-P, 0.004-0.005mg/L (1013.2.)
	底質 サンゴ礁地形で、底質は琉球石灰岩とサンゴ砂である。
	生物生育環境 環境省の石垣島モニタリングセンター「2004年 石垣島周辺海域サンゴ礁モニタリング調査結果」によると当該海域はサンゴ被覆度が70～90%の地域となっていて、サンゴにとって「生育空間」が良好な地域となっている。 また、環境省の生物多様性センター「2008 年 西表石垣国立公園石西礁湖及びその近隣海域におけるサンゴ礁モニタリング調査報告書」によると、2007 年の大白化では相当のダメージを受けており、被覆度は 50～75%程度まで落ち込んでいる。現在は 2007 年以前ほどには戻っていないが、稚サンゴが多くみられるようになり、全体として回復傾向にある。



実証試験実施場所

(2) 実証対象技術の状況

①電着基盤による稚サンゴの着生促進効果調査（実証試験1）

フロー図にしたがって電着基盤の実証試験を行った。電着基盤を陸上水槽内に設置し、5月7日夜のサンゴの産卵時に採取した卵と精子を受精させ、誕生したプラヌラ幼生を5月11日から12日に電着基盤に着生させ、その後着生数の変化を実体顕微鏡で観察した。

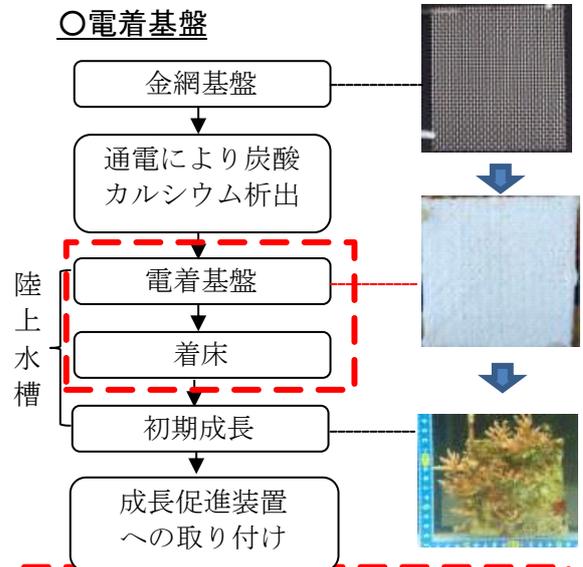
対照区として、従来からサンゴの増殖に用いられている素焼きタイル基盤にもサンゴを着生させた。

②微弱電流によるサンゴの成長促進効果調査（実証試験2）

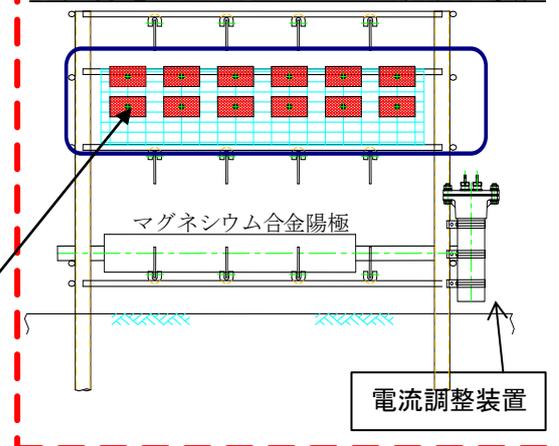
試験は、実海域に試験装置2基を試験区として設置し、海中において電着基盤にサンゴを取り付け、経過を観察した。装置の電流密度（電場）は、 $5\text{mA}/\text{m}^2$ （金属の電気防食程度）と $50\text{mA}/\text{m}^2$ に加え、対照区として「通電無し」を試験区近傍に設定し、同様にサンゴを取り付けて経過を観察した（合計3ケース）。

各ケースには、魚類等からの食害防止のためのカゴとネットを設置した。

電着基盤(10cm×10cm)にサンゴ断片を取り付けた試験体



○微弱電流によるサンゴの成長促進装置



実験フローと微弱電流によるサンゴの成長促進装置

は、実証対象範囲

●食害防止対策



(3) 海域環境調査

流況調査、水質調査、連続水質調査を試験区海域と周辺の天然礁海域で実施した。

3. 維持管理にかかる技術情報

(1) 使用資源量・生成物処理量

項目	単位	結果
消耗品及び電力使用量	-	マグネシウム合金陽極が消耗するまでメンテナンスの必要はない
汚泥や廃棄物の物理的・化学的特徴と頻度	-	汚泥や廃棄物の発生はない
薬剤	-	薬剤の使用はない

(2) 維持管理項目

管理項目	技術者の必要性	一回当たりの管理時間	管理頻度
維持管理に必要な作業項目	不要	-	-
使用者に必要な維持管理技能	不要	-	-

(3) 維持管理に係るその他の特記事項

特になし

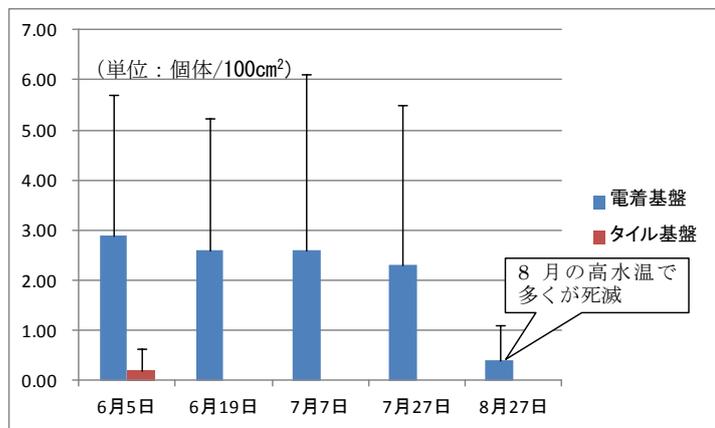
4. 実証試験結果

(1) 実証試験の目標

実証項目	目 標
電着基盤による稚サンゴの着生促進効果調査	従来用いられている素焼タイル基盤に比べて電着基盤の方が稚サンゴの加入量が多い
微弱電流によるサンゴの成長促進効果調査	電場無しに比べて電場有りの方がサンゴの成長が速い

(2) 電着基盤による稚サンゴの着生促進効果

電着基盤の効果調査結果として、基盤の違いによる稚サンゴの加入量とその後の生残量を示す。サンゴの幼生は各基盤に5月10,11日に着生させた。8月27日までのモニタリング調査結果によると、従来型のタイル基盤と比較して、電着基盤では、顕著に稚サンゴの加入量とその後の生残量が多い。



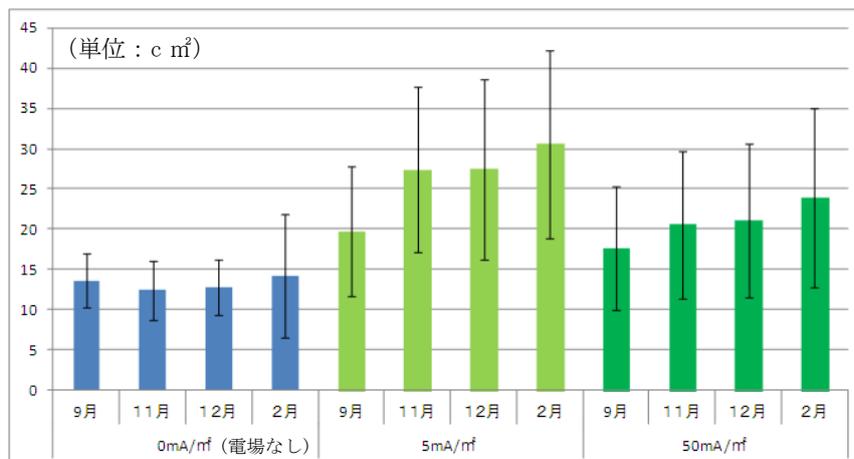
基盤の違いによる稚サンゴの加入量とその後の生残量 (個/100cm²)

(3) 微弱電流によるサンゴの成長促進効果

サンゴ面積の変化の状況を示す。

成長量は、明らかに電場無しの場合よりも電場有りの場合の方が大きく、微弱電流による電場形成の効果が確認できる。

電場（電流密度）の条件別にみると、5mA/m²の微弱電流で有意な効果が確認できる。

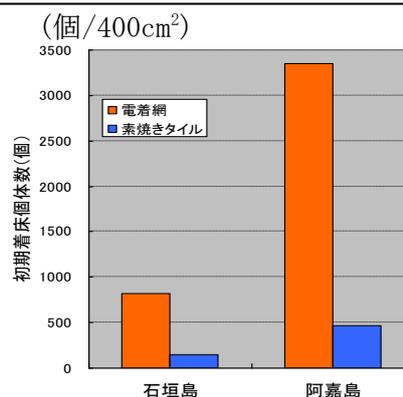


電場影響下におけるサンゴ面積の変化

5. 過去に調査した試験データの活用

(1) 電着基盤による稚サンゴの着生促進効果

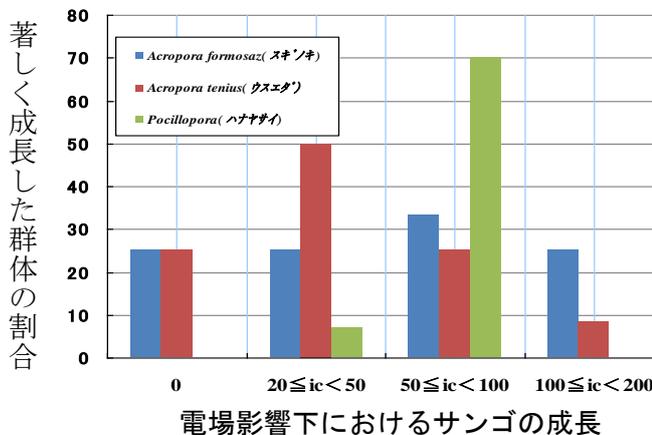
2009年に石垣島と阿嘉島で実施された野外実験では、従来用いられている素焼タイル基盤と比較して電着基盤では稚サンゴの初期着床個体数は高く、実証試験と同様の傾向を示している。



(2) 微弱電流によるサンゴの成長促進効果：

長期的な効果試験

電場無しを含めて4種類の電場が形成できるサンゴ棚を石垣島海域に設置し、3種類のサンゴを枝折り法（無性生殖）で棚に取り付けてモニタリングを行った。モニタリングは、3回/年程度行っている。取り付け後2年目の結果はサンゴの種類によって電場の影響が異なるが、20~100mA/m²の電場がサンゴの成長を促進する結果が得られている。



【(1) 及び (2) の出典】 鯉淵幸生・木原一禎・山本悟・近藤康文 (2010) 微弱電流がサンゴの着床や成長に及ぼす影響、土木学会論文集 B2(海岸工学)、Vol.66, No.1,1216-1220.

6. 実証試験結果の結論

(1) 電着基盤による稚サンゴの着生促進効果

本実証試験によると、従来型の素焼タイル基盤と比較して、電着基盤では顕著に稚サンゴの加入量が多く、本技術の優位性を示している。この結果は、これまでの報告と同様の傾向を示しており、再現性が検証された。

(2) 微弱電流によるサンゴの成長促進効果

本実証試験によると、平成24年9月23日にサンゴ断片を設置してから平成25年2月23日の第4回モニタリング調査までの153日間の短期的な成長促進効果について、成長量は電場無しの場合よりも電場有りの場合の方が有意に大きく、微弱電流による電場形成の効果が確認できる。ただし、対照区と試験区で照度が異なる影響を考慮する必要はある。

電場（電流密度）が有する長期的なサンゴの成長促進効果については、本実証試験で

は試験期間の関係から明確にならないが、過去の調査結果によると取り付け後2年目ではサンゴの種類によって電場の影響が異なるが、20～100mA/m²の電場がサンゴの成長を促進する結果が得られている。

技術の概要と本試験によって明らかになった技術の特徴を以下に示す。

技術名	電着基盤	微弱電流によるサンゴの成長促進装置
技術の概要	金網基盤に電流を流して表面に炭酸カルシウムを析出させた基盤	マグネシウム合金陽極により微弱電流による電場を発生させる装置
実証事業としての意義	従来用いられている素焼タイル基盤に比べて、電着基盤の方が稚サンゴの加入量が多かったことにより、本技術による稚サンゴの着生促進効果が検証された。	電場無しに比べて、本成長促進装置における電場有りの条件でサンゴの成長が有意に速かったことにより、本技術によるサンゴの成長促進効果が検証された。
期待される導入効果	本技術を導入することにより、効率的に稚サンゴを増殖することが可能になる。	本技術を導入することにより、サンゴ礁の再生の期間短縮が可能になる。
技術としての新規性	従来は素焼タイルなどが用いられており、電着基盤の新規性・優位性は高い。	従来技術では微弱電流による検討はなされていない。従来技術では外部電力を必要として維持管理が必要なこととサンゴへの悪影響も懸念された。本技術は電気防食程度の微弱電流を用いることから、外部電力を用いず、サンゴへの悪影響もない点が新規性・優位性は高い。
従来技術に対する優位性		
普及拡大にむけた課題	稚サンゴの成長促進効果に関する検証	長期的な成長促進効果の検証 他の環境因子との関係の検証 種類別の効果の検証

7. 技術実証検討会の見解

(1) 電着基盤による稚サンゴの着生促進

① 技術的課題や改善の方向性

- ・今回実証できなかった稚サンゴが着生した後の初期成長まで効果を確認するためには、陸上水槽における適切な光量管理と海水温度の管理が必要である。

(2) 微弱電流によるサンゴの成長促進

① 技術的課題や改善の方向性

- ・既存の知見により成長促進の効果がサンゴの種類によって異なることから、できるだけ多くの種類を対象とすることや、様々な適用形態（防波堤・岸壁・魚礁等）への技術的な検討を行うことが望ましい。

② 他の実水域への適用可能性を検討する際の注意点

- ・他の実海域においても、本技術の効果を適切に発揮させるためには、流況や水深等の適用条件を明らかにすることが重要である。

8. 参考情報

注意：このページに示された技術情報は、全て環境技術開発者が自らの責任において申請した内容であり、環境省および実施機関は、内容に関して一切の責任を負いません。

○技術データ

項目		環境技術開発者 記入欄			
技術名称		微弱電流を利用したサンゴ成長促進及び電着基盤利用技術			
形式		電流発生：流電陽極方式			
企業名		三菱重工鉄構エンジニアリング株式会社			
連絡先	TEL/FAX	TEL(045)200-8310/FAX(045)200-8352			
	Webアドレス	http://www.mhi-bridge-eng.co.jp			
	E-mail	kazuyoshi.kihara@mbe.mhi.co.jp			
設置方法		サンゴ増殖棚(～150kg)：浮力体取付による人力設置(ダイバー作業) “(150Kg～)：漁船巻き上げ装置より設置			
設置・調整期間		ニーズに応じて対応可			
コスト概算 (10基で試算)	費用		単価(円)	数量	計(円)
	イニシャルコスト				
	サンゴ棚 2.0×2.0m		300,000	1	300,000
	ランニングコスト(月間)				
		メンテナンスフリーである。			

○その他 本技術に関する補足説明(導入実績, 受賞歴, 特許, 実用新案, コストの考え方の補足 等)

○製品特性:

- ・流電陽極法(電源レス)の採用により、設置後のメンテナンスが不要。
- ・有害物質の排出がない。(海水中の物質を電着物質として固定化)
- ・簡易な構造であるため、構造体の地元調達が可能。(大型工場を必要としない)

○特許

1 特願2005-363132	特許第4652221号	珊瑚育成装置及び珊瑚育成用構造物
2 特願2006-199599	特許第4931047号	珊瑚幼生捕獲育成装置
3 特願2006-223553	特許第4942422号	サンゴ育成用構造物
4 特願2007-173207	特許第4939320号	サンゴ造礁用構造物の電流計測方法及びサンゴ造礁用構造物の電流計測装置
5 特願2007-259939	特許第4825768号	サンゴの光合成活性評価装置
6 特願2008-212226	特許第4950146号	サンゴ育成装置及びサンゴ育成方法
7 特願2010-226071	審査中	サンゴ育成方法
8 特願2010-534852	審査中	サンゴ育成方法及び電着鉱物析出サンゴ着生基礎体の製造方法、並びに電着鉱物析出サンゴ着生基礎体

○受賞歴

- 1 地球環境シンポジウムパネル 14回, 15回, 17回 において通算三回地球環境技術賞を受賞

○主要論文

- 1 K. Kihara, H. Taniguchi, Y. Koibuchi, S. Yamamoto, Y. Kondo and Y. Hosokawa (2013) Enhancing settlement and growth of corals using feeble electrochemical method, Galaxea, in printing
- 2 微弱電流がサンゴの着床や成長に及ぼす影響, 土木学会論文集B2(海岸工学) Vol.66, No.1, pp1216-1220, 2010
- 3 微弱電流を利用したサンゴ増殖に関する研究, 海洋開発論文集 pp467-472
- 4 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, 海洋開発論文集, pp375-379, 2010
- 5 電着技術を利用したサンゴ増殖に関する電場について, 日本サンゴ礁学会第14回大会, 講演要旨集, p55, 2011
- 6 サンゴ電着棚の5年間における成長, 日本サンゴ礁学会第15回大会, 2012

○本 編

1. 導入と背景

日本サンゴ礁学会(2011)によると、地球環境の悪化による平均海水温の上昇や酸性化などの影響により、地球上の海洋生物の 25%の種類が生存するといわれるサンゴ礁が年々衰退している。サンゴ礁の衰退によって、食物連鎖が崩れ、サンゴが着生すべき基盤に藻類が繁殖して新たなサンゴの着生の弊害となり、サンゴが増殖できないという負の連鎖が生じている。また、瓦礫化したサンゴ片は、健全なサンゴに損傷を与えるなど、サンゴ礁の回復を妨げる一因にもなっている。このような背景から、人工的にサンゴを増殖する方法が提案されている。

人工的にサンゴを増殖する方法としては、天然のサンゴを断片化して無性生殖的に移植する技術や、有性生殖によって稚サンゴを種苗生産して移植する技術等が実施されているが、いずれも移植後の生残率（移植したサンゴが生き残る割合）に課題がある。

そこで、サンゴの増殖を目的として、稚サンゴが着生しやすい電着基盤と、着生したサンゴの成長を促進する微弱電流を利用したサンゴの成長促進装置を開発した。これまでの実験結果によると、電着基盤は従来使用されている素焼きの人工基盤（素焼きタイル）に比較して、稚サンゴの着生数が増加する効果が確認されており、基盤材として有効であることが判明している。また、微弱電流を利用したサンゴの成長促進装置では継続的な通電によって生じる微弱な電場（電流密度）によって、サンゴの成長が促進される効果が確認されている。

本実証試験は、「微弱電流を利用したサンゴ成長促進及び電着基盤利用技術」として、サンゴの再生を効率良く進めることを目的として開発した電着基盤による稚サンゴの着生促進効果及び微弱電流によるサンゴの成長促進効果のモニタリング調査を実施し、環境技術の実証と普及促進、環境保全と環境産業の発展に資することを目標としている。

本技術の最終目標は、電着基盤による稚サンゴの着生促進と微弱電流によるサンゴの成長促進技術を組み合わせたシステムを提供することにより、造礁サンゴの増殖とサンゴの卵の供給源（サンゴ種苗ターミナル）の創出を実現することである。

【参考資料】 日本サンゴ礁学会(2011)サンゴ礁学、東海大学出版会、362p.

2. 実証試験参加組織と実証試験参加者の責任分掌

実証試験参加組織は図 1-1 に示すとおりであり、その責任分掌は表 1-1 に示すとおりである。

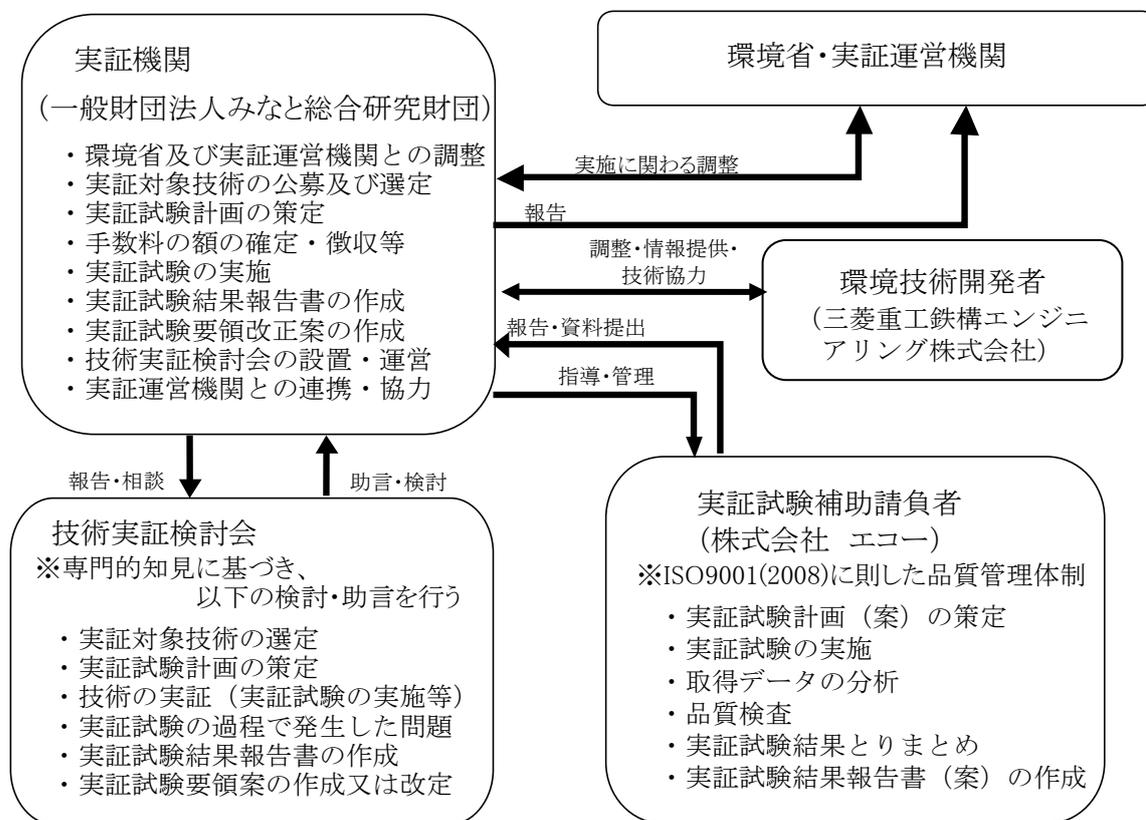


図 1-1 実証試験評価実施体制

表 1-1 実証試験実施機関の責任分掌

区分	実証試験参加機関	責任分掌
実証機関	一般財団法人 みなと総合研究財団	環境省及び実証運営機関との調整
		実証対象技術の公募及び選定
		実証試験計画の策定
		手数料の額の確定・徴収等
		実証試験の実施
		実証試験結果報告書の作成
		実証試験要領改正案の作成
		技術実証検討会の設置・運営
		実証運営機関との連携・協力
環境技術開発者	三菱重工鉄構エンジニアリング株式会社	実証対象技術の準備、設置及びこれらの経費の負担
実証試験補助請負者	株式会社エコー	実証試験計画(案)の策定
		実証試験の実施
		取得データの分析
		品質検査
		実証試験結果とりまとめ 実証試験結果報告書(案)の作成

3. 実証対象技術の概要

3-1. 技術の目的

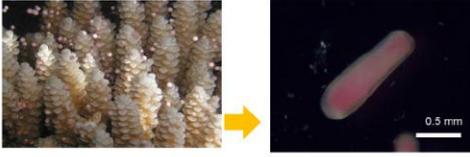
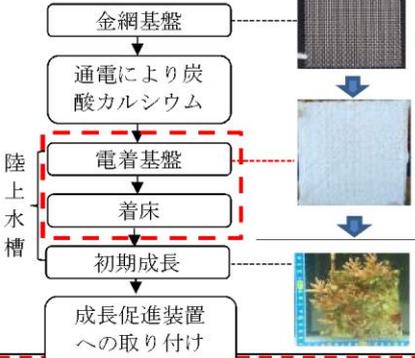
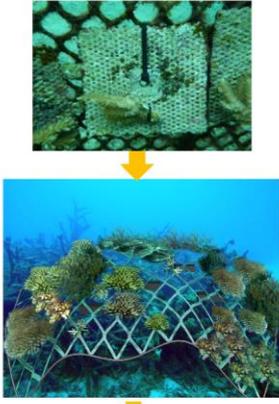
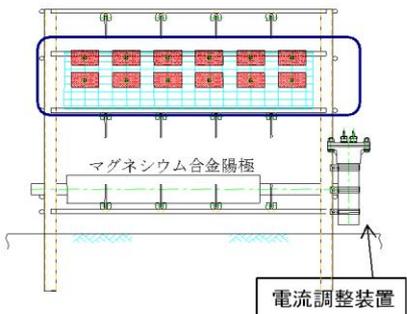
実証対象技術は、以下の2つとする。

①電着基盤は、金網基盤に電流を流して表面に炭酸カルシウムを析出させた基盤を用いることにより稚サンゴの着生促進を目的とする。

②微弱電流によるサンゴの成長促進装置は、マグネシウム合金陽極により微弱電流による電場を発生させる装置で、着生したサンゴの成長促進を目的とする。

それぞれの技術とサンゴの生活史との関係を表 3-1 に示す。

表 3-1 実証対象技術とサンゴの生活史との関係

サンゴの生活史	技術の概要
<p>①産卵、②受精 ⇒③プラヌラ幼生</p> 	<p>—</p> <p>は、実証対象範囲</p>
<p>④着生</p> 	<p>電着基盤: 金網基盤に電流を流して表面に炭酸カルシウムを析出させた基盤</p>  <p>陸上水槽</p>
<p>⑤初期成長</p> 	<p>成長促進装置への取り付け</p>
<p>⑥成長</p>  <p>①へ</p>	<p>微弱電流によるサンゴの成長促進装置: マグネシウム合金陽極により微弱電流による電場を発生させる装置</p> 

3-2. 技術の原理

○電着基盤

①鋼材と流電陽極（マグネシウム合金陽極）とを接続し海水中に浸すと、鋼材表面に電流が通電する。鋼材表面では図 3-1 に示すようにアルカリ成分 OH^- が生成する。

②海水中のカルシウムイオン Ca^{2+} 、炭酸水素イオン HCO_3^- およびマグネシウムイオン Mg^{2+} は式 (1) および式 (2) に示すように沈殿物を形成して鋼材表面に付着する。この付着物を電着物（エレクトロプレATING）と呼んでいる。

③電着物は造礁サンゴの骨格の主成分である炭酸カルシウムに近いので、稚サンゴが着生しやすい特長がある。この原理を活用した技術が電着基盤である。

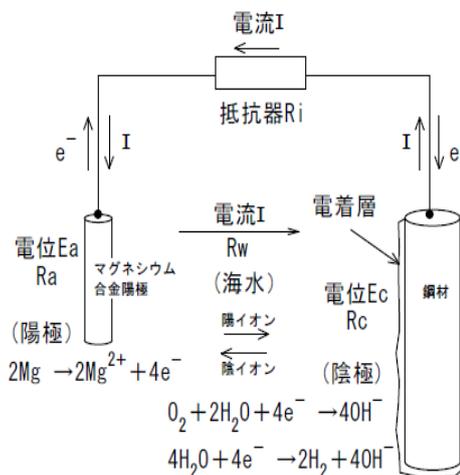
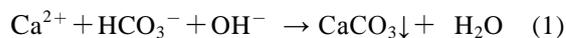


図 3-1 実施対象技術の原理



○微弱電流によるサンゴの成長促進

①電場（電流密度）が形成されている場所ではサンゴの成長が速いことが知られている。これは、電場がサンゴの石灰化やサンゴに共生している褐虫藻の光合成活性を高めるためであることが判明している。この原理を活用した技術が微弱電流によるサンゴの成長促進装置である。

なお、本技術実証試験における微弱電流とは、外部電源（商用電源や蓄電池）を用いなくて $5\sim 100\text{mA}/\text{m}^2$ 程度の電場（電流密度）を形成することができる規模の電流を示す。

3-3. 期待される効果

本技術は、それぞれ以下の効果が期待される。

①電着基盤による稚サンゴの着生促進

電着物は造礁サンゴの骨格成分に近いことから、稚サンゴの着生数の増加が期待される。具体的には、現在多く使用されている素焼きタイルに比較して、着生数が増加する結果が得られている。

実証試験では、電着基盤の採用により、従来の素焼きタイルに比べて、稚サンゴの加入量が多いことを実証する。

②微弱電流によるサンゴの成長促進

微弱な電場を維持することによって、サンゴ単体の石灰化が活発になることとサンゴに生息している褐虫藻の光合成活性を高めることが確認されている。このことにより、微弱電流によるサンゴの成長促進技術によってサンゴの成長を促進し、環境変化に対する耐性が高くなることで、環境が悪化した場合でも、サンゴの生残率を向上することが期待できる。

実証試験では、比較モニタリングにより、電場無しに比べて、電場有りで成長が促進されることを実証する。

3-4. 他の技術との差異

サンゴの再生には基盤への稚サンゴの着生促進とその後の成長促進が重要であり、電着基盤及び微弱電流によるサンゴの成長促進装置は、それぞれ以下の点で他の技術と異なる。

①電着基盤

稚サンゴの着生のための従来技術としては、着床具や素焼タイルが開発されている(水産庁 2009)。しかし、着生数が低いといった課題がある。

本技術では、素焼タイルと比較して稚サンゴの着生数の増大が期待できる。

【参考資料】

- ・水産庁漁港漁場整備部(2009)有性生殖によるサンゴ増殖の手引き,

http://www.jfa.maff.go.jp/j/gyoko_gyozyo/g_hourei/pdf/sub7931.pdf,172p.

②微弱電流によるサンゴの成長促進装置

従来、成長促進効果に関する技術については海外での電着技術の実験事例があるが、本技術のように微弱電流による検討はなされていない(Sabater and Yap 2002; van Treeck and Schumacher 1997)。また、従来技術では人為的な管理に手間がかかることやサンゴに悪影響がでることも懸念されることから、自然海域で大量のサンゴを再生するための抜本的な対策になっているとは言い難い。本技術では外部電源を用いない等、人為的な管理を低減しつつサンゴの成長促進効果が期待できる。

【参考資料】

- ・ Sabater MG, Yap HT (2002) Growth and survival of coral transplants with and without electrochemical deposition of CaCO₃. Journ. Experimental Marine Biology & Ecology, 272: 131-146
- ・ van Treeck P, Schumacher H (1997) Initial survival of coral nubbins transplanted by a new coral transplantation technology – options for reef rehabilitation. Mar. Ecol. Prog. Ser., 150: 287-292

3-5. 適用条件、適用環境

本技術は外部電源（商用電源や蓄電池）を用いない。また、生物に有害な塩素ガスを発生する陽極材を用いないことから、環境への配慮面でも優れている。メンテナンスについては陽極が消耗するまで必要が無い。

以上より、本技術は過去あるいは現在においてサンゴが自然に生育できる環境条件であれば適用可能である。ただし、**微弱電流によるサンゴの成長促進装置の適用に当たっては、以下について注意が必要である。**

- ・ サンゴ着生時に電場（電流密度）が過大であると、サンゴに悪影響を与えるため、適切な電場の管理に注意が必要である。
- ・ 実海域では、潮流や荒天時の波浪など陸上より過酷な条件となるため、電流装置の固定を確実に行う必要がある。特に、電流を流すための抵抗やケーブルなどの個縛が破損すると構築した基盤を損傷させるため、特に注意を払う必要がある。
- ・ サンゴを設置する場合、サンゴが波によって動かないように固定することや防護網などの食害防止対策を講じる必要がある。

表 3-2 維持管理に必要な作業及び技能等の必要性

項目	必要性及び発生の有無
消耗品及び電力消費量	無
実証対象機器の維持管理に必要な作業項目	無
汚泥や廃棄物の物理化学的特性と発生頻度等	無
実証対象機器の使用者に必要な維持管理技能	無

4. 実証試験実施場所の概要

4-1. 実証試験実施場所の名称・所在地・管理者

実証試験実施場所の名称（所在地）、管理者を表 4-1 に、また実証試験実施場所を図 4-1 に示す。

表 4-1 実証試験実施場所の名称（所在地）、管理者

名称（所在地）	沖縄県石垣市伊原間地先
管理者	(株)シーヒーファーム本社



図 4-1 実証試験実施場所

4-2. 海域の概要

実証試験実施場所周辺海域の概要を表 4-2 に示す。

表 4-2 実証試験実施場所周辺海域の概要

主な利用状況	○ 港湾、船舶の航行状況、漁場の有無など ほとんど利用はされていない状況で、サンゴの受精などを行う実験水槽がある(株)シーピーファームがサンゴの養殖場として活用している。
実証試験場実施場所の規模	○ 水深、面積 玉取崎周辺は、自然のサンゴ礁地形で、水深 0.5~20m である。実証実験は、水深 7m 前後の海底。面積は 20m×20m の範囲。
流況の状況	○ 流況 当該海域はサンゴの成育が確認されており、サンゴの生育にとって良好な流動環境を有している。平均流速が 8.5cm/s 程度。
水質の状況	○ 水質 当該海域はサンゴの生育が確認されており、サンゴの生育にとって良好な水質環境を有している。COD, 1.0mg/L, T-N, 0.081-0.084mg/L, T-P, 0.005-0.006mg/L(1012.9.)
底質の状況	○ 底質に関する情報 琉球石灰岩とサンゴ砂で形成されたサンゴ礁地形。
生物生息環境	○ 底生生物、植物などの生育状況に関する情報 環境省の石垣島モニタリングセンター「2004年 石垣島周辺海域サンゴ礁モニタリング調査結果」によると当該海域はサンゴ被覆度が70~90%の地域となっていて、サンゴにとって「生育空間」が良好な地域となっている。 また、環境省の生物多様性センター「2008年 西表石垣国立公園石西礁湖及びその近隣海域におけるサンゴ礁モニタリング調査報告書」によると、2007年の大白化では相当のダメージを受けており、被覆度は50~75%程度まで落ち込んでいる。現在は2007年以前ほどには戻ってはいないが、稚サンゴが多くみられるようになり、全体として回復傾向にある。
課題	○ 水質、底質、生物環境の観点からどのような改善が必要？ 2007年以前は、海域全体が自然のサンゴが生息したサンゴ礁地帯であった。しかし、2007年夏の海水温上昇により、この海域のサンゴが減少した。そのため、サンゴ礁の回復のため、人為的なサポートが必要である。
実証試験環境	○ 実証対象機器などの搬入は確保出来るか : 可能 (船舶による) ○ 実証試験の攪乱要因となるような特性はないか? : なし ○ 試料採取は可能か : 可能 ○ 実証試験の期間、時期 : 1ヶ年を予定

5. 実証試験の内容

5-1. 調査目標及び項目

5-1-1. 調査目標

実証試験では、電着基盤による稚サンゴの着生促進効果と微弱電流によるサンゴの成長促進効果調査を行う。それぞれ、対照区と比較して試験区で基盤への着生促進効果や成長促進効果があることを実証する。本試験の評価目標は、対照区よりも試験区で効果が高いこととする(表 5-1)。

なお、実験場所の妥当性を確認するために、試験区海域と周辺の天然サンゴ礁海域において流況調査と水質調査を行う。

表 5-1 実証項目及び目標

実証項目	目標水準
電着基盤による稚サンゴの着生促進効果調査	従来用いられている素焼タイル基盤に比べて電着基盤の方が加入量が多い
微弱電流によるサンゴの成長促進効果調査	電場無しに比べて電場有りの方が成長が速い

5-1-2. 調査項目

実証試験では、微弱電流によるサンゴの成長促進効果調査と電着基盤による稚サンゴの着生促進効果調査を行った。それぞれの試験区・対照区及び周辺海域において、表5-2に示すモニタリング調査と海域環境調査を実施した。

各調査日の状況を表5-3に示す。

表 5-2 調査項目

調査区分	項目	方法・対象	回数・数量
電着基盤による稚サンゴの着生促進効果調査			
モニタリング調査	目視調査	試験区の電着基盤、対照区の素焼タイル基盤に着生した稚サンゴを目視観察し、計数する。	4回 9, 11, 12, 2月
	写真撮影による画像解析調査	直上から写真撮影したものをパソコン画面上で画像解析し、成長量を計測する。	4回 9, 11, 12, 2月
微弱電流によるサンゴの成長促進効果調査			
モニタリング調査	目視調査	試験区（電場有り）と対照区（電場無し）に設置したサンゴ断片を観察し、縦横寸法を計測する。	4回 9, 11, 12, 2月
	写真撮影による画像解析調査	直上から写真撮影したものをパソコン画面上で画像解析し、サンゴ断片の成長量を計測する。	4回 9, 11, 12, 2月
	電場調査	照合電極を用いてサンゴ周辺の電場を測定する。	4回 9, 11, 12, 2月
海域環境調査	流況調査	試験区海域と周辺の天然礁海域に流況観測用の石膏球を一昼夜設置・回収して流況を観測する。	1回 9月
	水質調査	試験区海域と周辺の天然礁海域の海水を採取し、TN, TP, CODの分析を行う。	2回 9, 2月
	連続水質調査	試験区海域と周辺の天然礁海域に水温・照度の連続観測計を設置し回収する。	9月設置2月回収

表 5-3 調査の概要

調査日	主な調査項目（成長促進効果調査）	備考
平成 24 年 9 月 23 日	サンゴ断片の設置、水質・流況調査	曇、水温 28.7℃
平成 24 年 11 月 12 日	モニタリング調査	曇、水温 23.5℃
平成 24 年 12 月 16 日	モニタリング調査	晴、水温 22.9℃
平成 25 年 2 月 23 日	モニタリング調査、水質調査	曇、水温 21.5℃

5-2. 調査内容

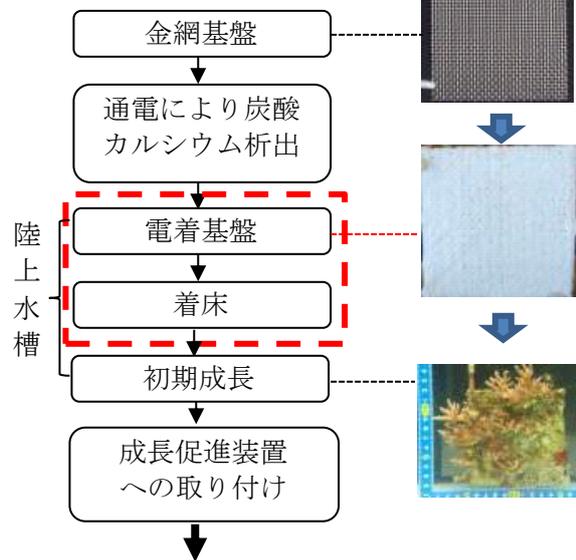
5-2-1. 電着基盤による稚サンゴの着生促進効果調査（実証試験 1）

（1）概要

電着技術を利用して作成した基盤の有用性を実証するため、図5-1に従い電着基盤の実証試験を行った。2mmメッシュの金網に電流を通電させて作成した電着基盤を陸上水槽内に設置し、5月7日夜のサンゴの産卵時に採取した卵と精子を受精させ、誕生したプラヌラ幼生を5月11日から12日に電着基盤に着生させ、その後着生数の変化を実体顕微鏡で観察した。

対照区として、従来からサンゴの増殖に用いられている素焼きタイル基盤にもサンゴを着生させた。対照区として金網基盤を用いないのは、金網は海中では錆びて朽ちることから素材に適していないためである。

電着基盤：金網基盤に電流を流して表面に炭酸カルシウムを析出させた基盤



微弱電流によるサンゴの成長促進装置：マグネシウム合金陽極により微弱電流による電場を発生させる

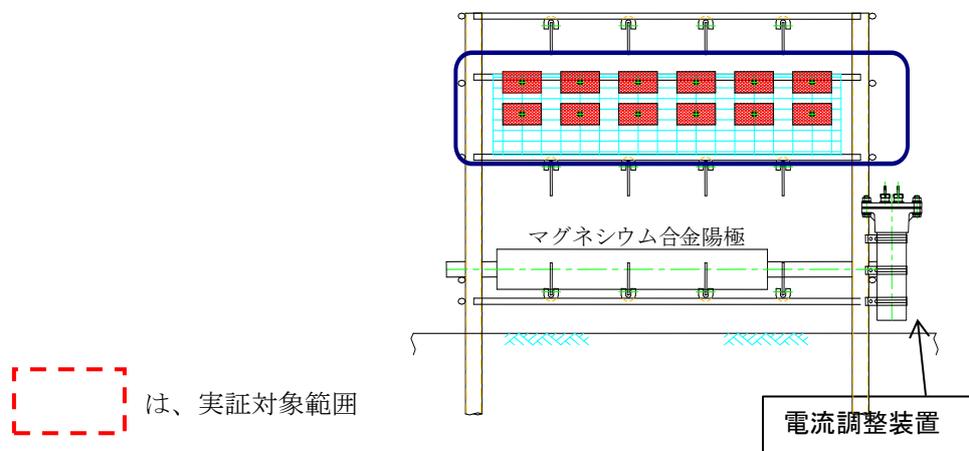


図5-1 実験フロー

金網基盤に通電して電着物質を析出させて作成した電着基盤は、図5-2に示すように、陸上水槽内で、採取したサンゴの卵と精子を受精させ、上記の電着基盤と素焼きタイルにそれぞれにプラヌラ幼生を着生させ、その後の着生数の生残を確認した。サンゴは受精後に図5-3のように変態し、3ヶ月後には2mm程度の大きさに成長する。

稚サンゴが着生した基盤は、半年経過後に稚サンゴの生育状況が良好と判断されれば実証試験実施海域に設置し、その後の経過を目視観測することとしたが、8月中の高水温の影響で水槽内の稚サンゴの生育が十分でない判断されたため水槽内試験を継続した。

(2) 目視調査

サンゴ着生初期には、サンゴを目視で観測できないことから、実体顕微鏡を用いて電着基盤に着生したプラヌラ幼生（ポリプ）を計数した。重複しないように電着基盤を動かして、全面・全数を計測した。

(3) 写真撮影による画像解析調査

目視調査時に、直上から写真撮影し、写真をパソコン画面上で画像解析し、成長量を計測することとした。



図 5-2 サンゴの卵採取状況

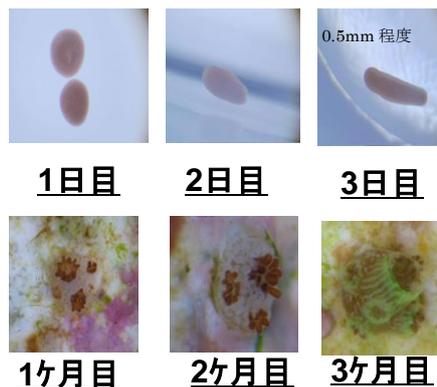


図 5-3 受精後のサンゴの変態



図 5-4 着生後 15 カ月経過状況

5-2-2. 微弱電流によるサンゴの成長促進効果調査（実証試験 2）

（1）概要

試験は、実海域に試験装置 2 基を試験区として設置し、海中において電着基盤にサンゴを取り付け、経過を観察した。装置の電流密度（電場）は、 $5\text{mA}/\text{m}^2$ （金属の電気防食程度）と $50\text{mA}/\text{m}^2$ に加え、対照区として「通電無し」を試験区近傍に設定し、同様にサンゴを取り付けて経過を観察した（合計 3 ケース）。

各ケースには、魚類等からの食害防止のためのカゴとネットを設置した。

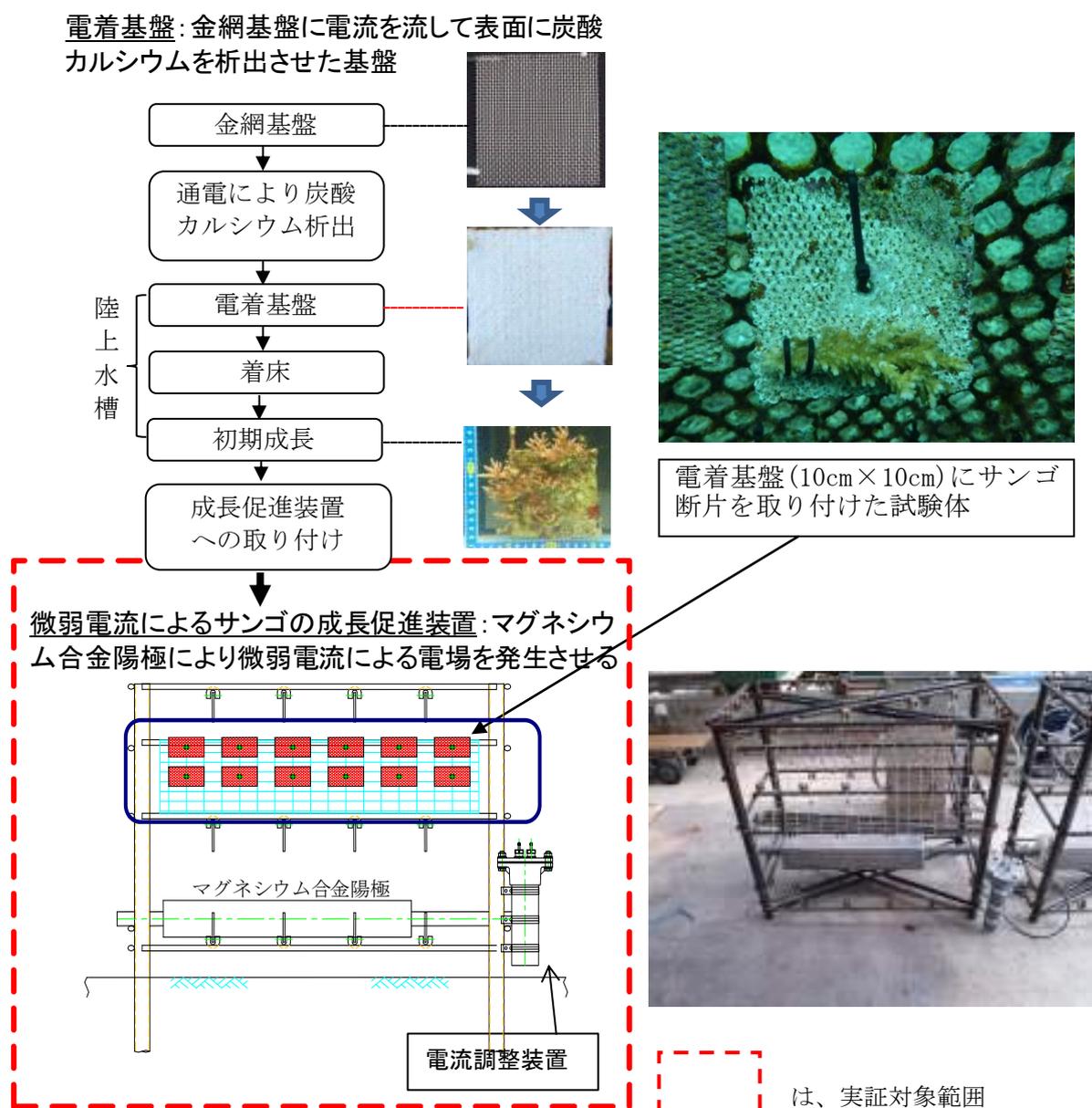
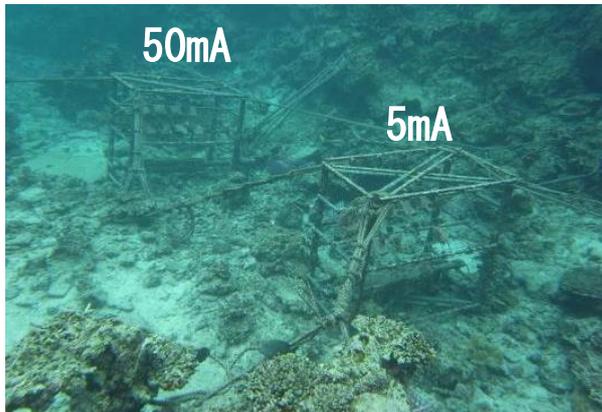
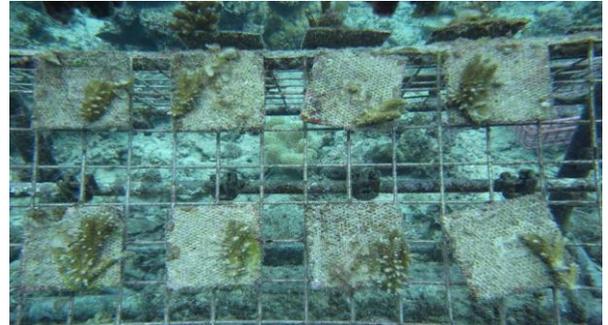


図 5-5 実験フローと微弱電流によるサンゴの成長促進装置



(試験区全景)



(試験区サンゴ設置状況)

図 5-6 試験区の成長促進装置

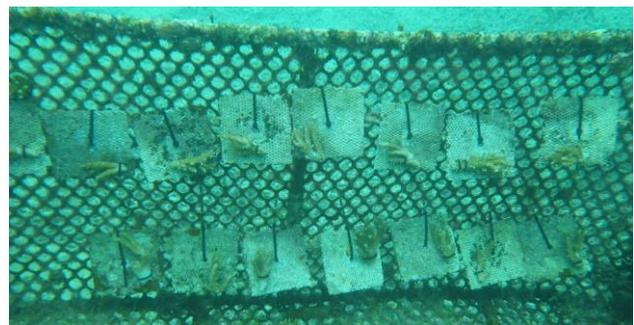


図 5-7 対照区の状況



図5-8 食害防止対策

(2) 目視調査

使用するサンゴは、平成21、22年度に有性生殖法で着生・養殖したサンゴ（ウスエダミドリイシ）を使用した。概ね同じサイズのサンゴ断片 15群体/基に対照区を加えて計 45群体を用いて実験を行った。

サンゴの成長に関する指標としては、サンゴの縦横寸法を計測した。

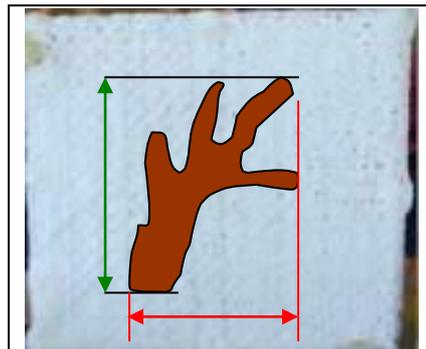
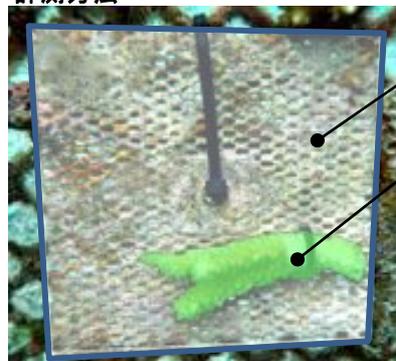


図 5-9 サンゴ縦横寸法

(3) 写真撮影による画像解析調査

目視調査時に、直上から写真撮影し、写真をパソコン画面上で画像解析してサンゴ面積を計測した。サンゴ面積の計測方法を図5-10に示す。

計測方法



枠の中のピクセル数をフォトショップで測定する
サンゴのピクセル数をフォトショップで測定する

(4) サンゴの電場及び成長量測定

電場は、マグネシウム合金陽極と陰極となる棚の構造部との接続により生じる。

サンゴの電場影響は、図5-11に示すように設置部から少し離れた位置が最も大きいと考えられる。

そこで、照合電極を用いて、各々のサンゴ周辺の電場を測定した。(図5-12)

計算式

サンゴ面積: 枠の面積 = サンゴのピクセル数: 枠の中のピクセル数
サンゴの面積 = (枠の面積 × サンゴのピクセル数) ÷ 枠の中のピクセル数

図 5-10 サンゴ面積の計測方法

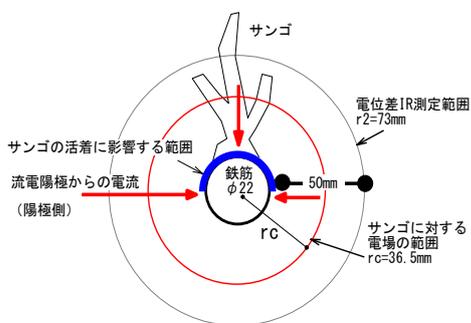


図 5-11 サンゴが受ける電場

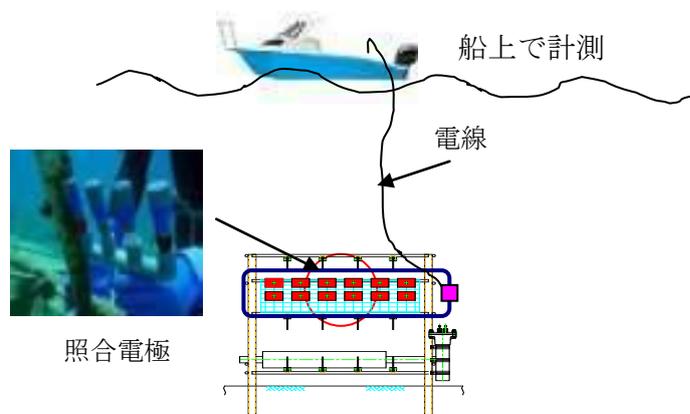


図 5-12 電場測定方法

5-2-3. 海域環境調査

海域環境を把握するため、石膏球を用いた流況調査、水質（TN、TP、COD）の採水分析と、水温、照度の連続観測を行った。調査地点は、試験区海域と周辺の天然礁海域とし、流況調査は夏季に行い、採水分析は夏季と冬季に行い、水温・照度の連続観測は8月から2月まで行うこととした。石膏球と水温・照度の連続観測計を図5-13, 14に示す。

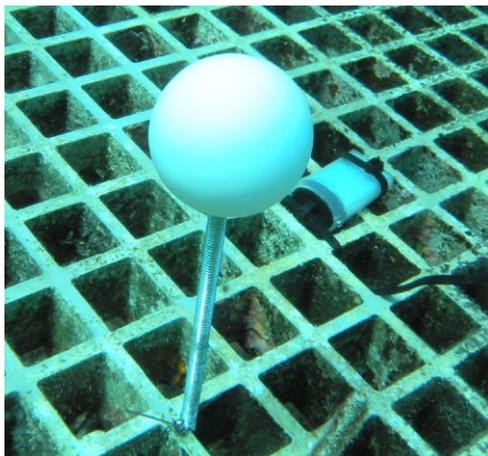


図5-13 石膏球設置例

直径 48mm の均質な石膏の球で、水中に一時的時間設置して石膏の溶解量（設置前後の重量差）を計測することで流速の時間平均値を計測する。



図5-14 水温・照度連続観測計

ホボペンダントロガー（耐圧防水温度/光強度データロガー）：小型軽量・防水構造で、温度と光強度（照度）を同時に一定期間記録できる。

5-4. 設置及び回復に関する留意事項

実験場所は、石垣島北部のシーピーファーム(株)本社前の海域で行った。

この海域は、サンゴやシャコ貝の養殖場としてシーピーファーム(株)が八重山漁協より許可を受けている区域であり、手続き上の制約がなく、すぐに観測が行える。試験終了後は、現状に回復するが、その期間は3ヶ月以内(準備～撤去については7日間)と想定している。状況によっては、協議のうえで設置期間を延長する場合もある。

5-5. 維持管理

施設が試験期間を通じ効果を維持するために、調査実施時には施設の設置状況や周囲の状況を確認した。今後の試験の継続に問題がある場合は速やかに技術実証検討会、技術開発者に連絡を取り、協議の上、措置を決定することとした。

6. 実証試験結果

6-1. 電着基盤による稚サンゴの着生促進効果

電着基盤の効果調査結果として、基盤の違いによる稚サンゴの加入量とその後の生残量を表 6-1 と図 6-1 に示す。サンゴの幼生は各基盤に 5 月 10, 11 日に着生させた。8 月 27 日までのモニタリング調査結果によると、従来型のタイル基盤と比較して、電着基盤では、顕著に稚サンゴの加入量とその後の生残量が多い。

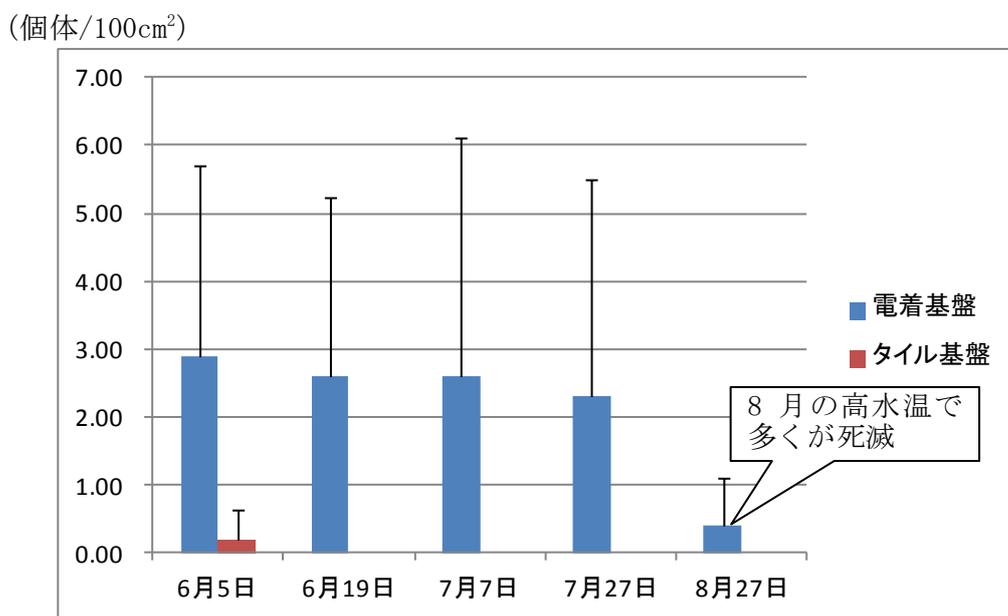


図 6-1 基盤の違いによる稚サンゴの加入量とその後の生残量 (個/100cm²)

表 6-1 基盤の違いによる稚サンゴの加入量とその後の生残量 (個/100cm²)

条件	No.	第1回	第2回	第3回	第4回	第5回
		6月5日	6月19日	7月7日	7月27日	8月27日
電着基盤	No. 1	1	1	3	3	2
	No. 2	1	0	0	0	0
	No. 3	7	7	9	9	1
	No. 4	5	4	0	0	0
	No. 5	1	1	1	1	1
	No. 6	1	1	1	0	0
	No. 7	3	3	1	1	0
	No. 8	2	2	2	2	0
	No. 9	8	7	9	7	0
	No. 10	0	0	0	0	0
	平均	2.9	2.6	2.6	2.3	0.4
	標準偏差	2.81	2.63	3.50	3.20	0.70
タイル基盤	No. 1	0	0	0	0	0
	No. 2	0	0	0	0	0
	No. 3	0	0	0	0	0
	No. 4	1	0	0	0	0
	No. 5	0	0	0	0	0
	No. 6	0	0	0	0	0
	No. 7	0	0	0	0	0
	No. 8	0	0	0	0	0
	No. 9	1	0	0	0	0
	No. 10	0	0	0	0	0
	平均	0.2	0	0	0	0
	標準偏差	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00

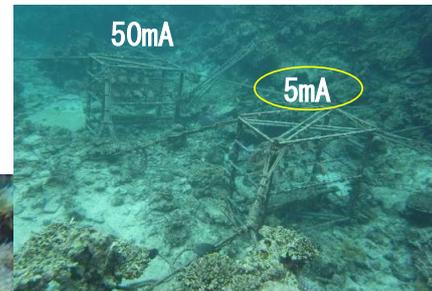
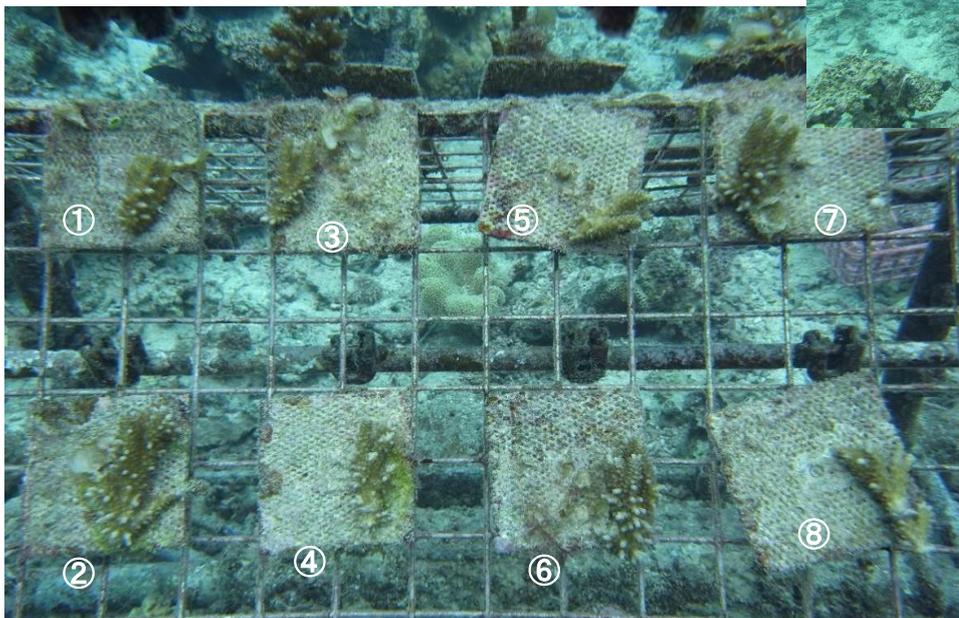
6-2. 微弱電流によるサンゴの成長促進効果

本実証試験結果をもとに、平成 24 年 9 月 23 日にサンゴ片を設置してから平成 25 年 2 月 23 日の第 4 回モニタリング調査までの成長促進効果について、電場無しの場合と電場有りの場合の成長量の違いを整理した。

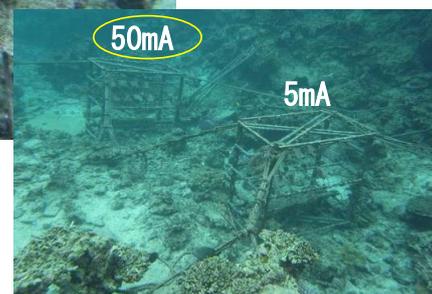
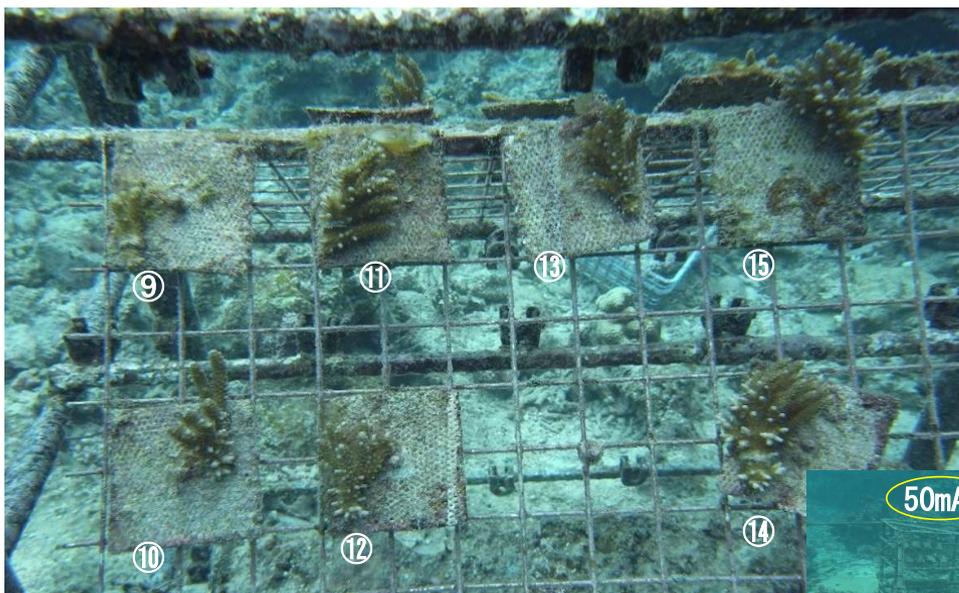
(1) 設置状況

サンゴ断片を移植した電着基盤の設置状況を示す。

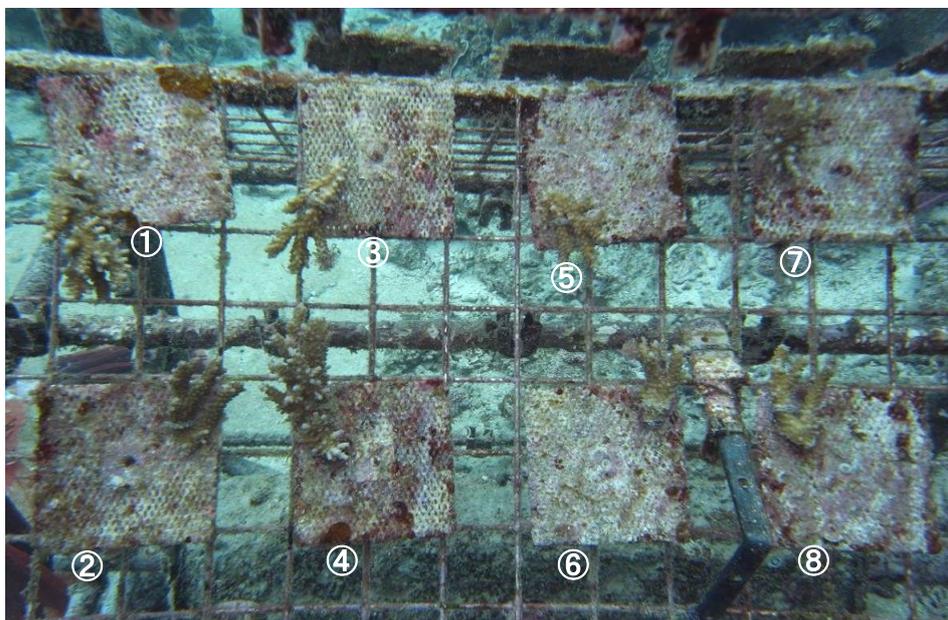
●5mA (a)



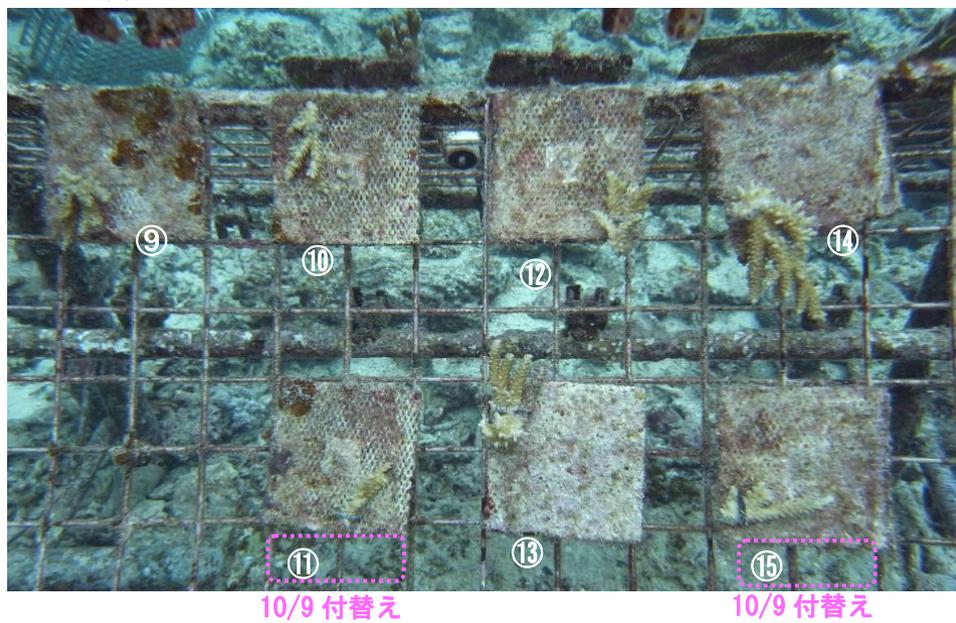
●5mA (b)



●50mA (a)

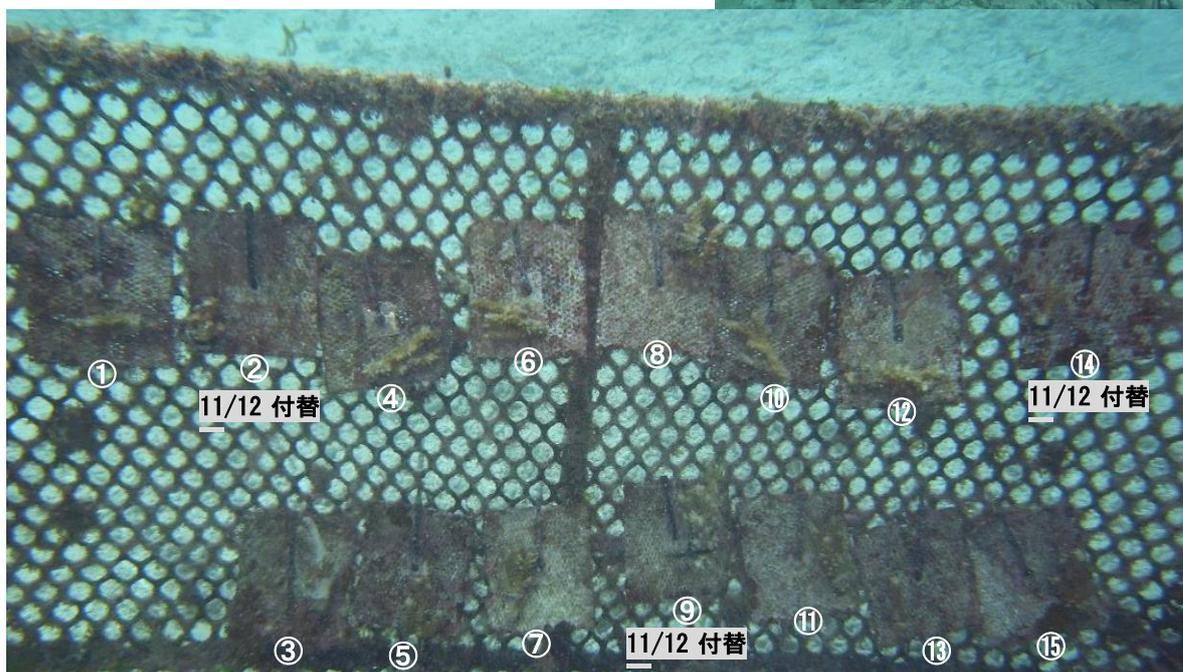


●50mA (b)



※⑪と⑮については9月設置後に脱落したため10月9日に付替えた。

● 対照区 (0mA/m²)



※②と⑨と⑭については9月設置後に脱落したため11月12日に付替えた。

(2) 目視調査結果

①第2回モニタリング結果：実験系設定後50日目

目視調査結果によるサンゴサイズの変化過程を資料編の写真1～45に示す。また、第2回モニタリング調査時の状況を以下に示す。第2回モニタリング時のサンゴの成長率を大きい順に並べると、以下のようになっており、明らかに電場無しの場合よりも電場有りの場合の方が成長率大きい。

試験区 5mA/m² > 試験区 50mA/m² > 対照区 0mA/m²

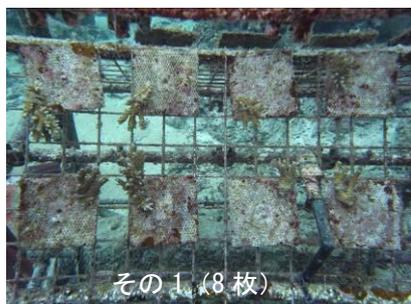
○試験区 5mA (N=15 枚) : サンゴの大きさ 84mm (±17mm) × 52mm (±15mm)

[移植時からの成長率] 110.2% (±5.2%) × 120.0% (±18.9%)



○試験区 50mA (N=13 枚) : サンゴの大きさ 61mm (±20mm) × 62mm (±28mm)

[移植時からの成長率] 105.3% (±14.7%) × 113.9% (±19.0%)



○対照区 0mA (N=12 枚) : サンゴの大きさ 53mm (±21mm) × 47mm (±17mm)

[移植時からの成長率] 93.8% (±12.6%) × 90.8% (±18.7%)

(一部に死滅や折損が見られ、全体的にサイズは小さくなっている。)



表 6-2(1) サンゴサイズの変化：9月23日→11月12日

○試験区

5mA No.	H24.9.23		H24.11.12		成長率	
	辺1:縦 (mm)	辺2:横 (mm)	辺1:縦 (mm)	辺2:横 (mm)	辺1:縦 (mm)	辺2:横 (mm)
1	54	28	59	39	109.3%	139.3%
2	91	65	102	68	112.1%	104.6%
3	58	34	61	44	105.2%	129.4%
4	73	25	84	42	115.1%	168.0%
5	54	32	56	37	103.7%	115.6%
6	80	37	91	52	113.8%	140.5%
7	90	48	91	51	101.1%	106.3%
8	71	39	77	45	108.5%	115.4%
9	63	24	74	26	117.5%	108.3%
10	90	31	105	42	116.7%	135.5%
11	86	62	92	69	107.0%	111.3%
12	74	58	78	63	105.4%	108.6%
13	73	58	85	62	116.4%	106.9%
14	104	71	112	80	107.7%	112.7%
15	83	67	94	65	113.3%	97.0%
平均	76	45	84	52	110.2%	120.0%
標準偏差	15	17	17	15	5.2%	18.9%

50mA No.	H24.9.23		H24.11.12		成長率	
	辺1:縦 (mm)	辺2:横 (mm)	辺1 (mm)	辺2 (mm)	辺1:縦 (mm)	辺2:横 (mm)
1	43	95	50	107	116.3%	112.6%
2	50	66	51	71	102.0%	107.6%
3	48	75	60	112	125.0%	149.3%
4	112	54	111	61	99.1%	113.0%
5	62	35	78	45	125.8%	128.6%
6	62	34	71	49	114.5%	144.1%
7	55	39	61	49	110.9%	125.6%
8	70	35	72	38	102.9%	108.6%
9	57	45	59	39	103.5%	86.7%
10	34	63	32	63	94.1%	100.0%
11	64	40	48	33	10/9付け替え	
12	55	42	57	46	103.6%	109.5%
13	77	44	79	38	102.6%	86.4%
14	82	105	56	114	68.3%	108.6%
15	30	54	31	69	10/9付け替え	
平均	60	55	61	62	105.3%	113.9%
標準偏差	20	22	20	28	14.7%	19.0%

○対照区

0mA No.	H24.9.23		H24.11.12		成長率	
	辺1:縦 (mm)	辺2:横 (mm)	辺1 (mm)	辺2 (mm)	辺1:縦 (mm)	辺2:横 (mm)
1	27	65	21	51	77.8%	78.5%
2	28	58	38	33	11/12付け替え	
3	89	51	82	46	92.1%	90.2%
4	29	67	35	62	120.7%	92.5%
5	67	41	62	39	92.5%	95.1%
6	32	66	32	64	100.0%	97.0%
7	68	43	68	40	100.0%	93.0%
8	69	47	64	42	92.8%	89.4%
9	80	64	103	50	11/12付け替え	
10	44	73	49	74	111.4%	101.4%
11	72	32	59	36	81.9%	112.5%
12	40	95	33	79	82.5%	83.2%
13	63	43	53	18	84.1%	41.9%
14	44	65	45	28	11/12付け替え	
15	61	39	55	45	90.2%	115.4%
平均	54	57	53	47	93.8%	90.8%
標準偏差	20	16	21	17	12.6%	18.7%

②第3回モニタリング結果：実験系設定後84日目

目視調査結果によるサンゴサイズの変化過程を資料編の写真1～45に示す。また、第3回モニタリング調査時の状況を以下に示す。第3回モニタリング時のサンゴの成長率を大きい順に並べると、以下のようになっており、明らかに電場無しの場合よりも電場有りの場合の方が成長率大きい。

試験区 5mA/m² > 試験区 50mA/m² > 対照区 0mA/m²

○試験区 5mA (N=15 枚) : 生残サンゴの大きさ 86mm (±15mm) × 54mm (±16mm)
[移植直後からの成長率 (N=15)] 113.9% (±8.1%) × 124.0% (±20.8%)

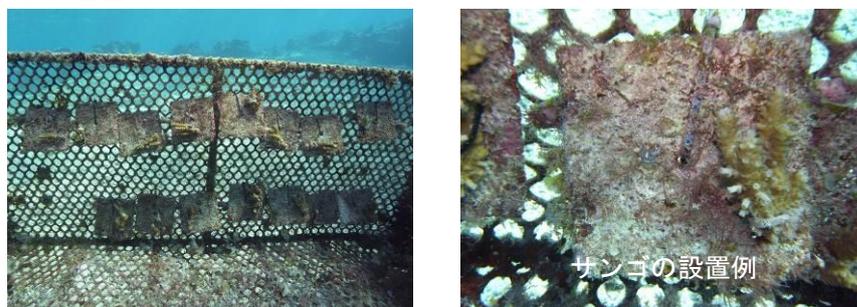


○試験区 50mA (N=13 枚) : 生残サンゴの大きさ 66mm (±19mm) × 62mm (±28mm)
[移植直後からの成長率] 107.0% (±14.9%) × 110.5% (±21.1%)



※前回までに脱落して再度取り付けた2枚については、全体の枚数に含めていない。

○対照区 0mA (N=11 枚) : 生残サンゴの大きさ 49mm (±15mm) × 50mm (±20mm)
[移植直後からの成長率] 96.6% (±15.3%) × 90.6% (±19.2%)



※前回までに脱落して再度取り付けた3枚については、全体の枚数に含めていない。また、今回死滅していた1枚については、大きさと成長率の計算に含めていない。

表 6-2(2) サンゴサイズの変化：9月23日→12月16日

○試験区

5mA No.	H24.9.23(直後)		H24.12.16(3ヶ月目)		成長率	
	辺1:縦 (mm)	辺2:横 (mm)	辺1:縦 (mm)	辺2:横 (mm)	辺1:縦 (mm)	辺2:横 (mm)
1	54	28	59	45	109.3%	160.7%
2	91	65	102	67	112.1%	103.1%
3	58	34	62	44	106.9%	129.4%
4	73	25	87	41	119.2%	164.0%
5	54	32	66	38	122.2%	118.8%
6	80	37	94	56	117.5%	151.4%
7	90	48	96	53	106.7%	110.4%
8	71	39	80	43	112.7%	110.3%
9	63	24	79	28	125.4%	116.7%
10	90	31	94	43	104.4%	138.7%
11	86	62	95	77	110.5%	124.2%
12	74	58	78	63	105.4%	108.6%
13	73	58	93	57	127.4%	98.3%
14	104	71	109	77	104.8%	108.5%
15	83	67	103	78	124.1%	116.4%
大きさ平均	76	45	86	54	113.9%	124.0%
標準偏差	15	17	15	16	8.1%	20.8%

50mA No.	H24.9.23(直後)		H24.12.16(3ヶ月目)		成長率	
	辺1 (mm)	辺2 (mm)	辺1:縦 (mm)	辺2:横 (mm)	辺1:縦 (mm)	辺2:横 (mm)
1	43	95	49	109	114.0%	114.7%
2	50	66	68	52	136.0%	78.8%
3	48	75	52	89	108.3%	118.7%
4	112	54	113	58	100.9%	107.4%
5	62	35	75	56	121.0%	160.0%
6	62	34	65	40	104.8%	117.6%
7	55	39	65	52	118.2%	133.3%
8	70	35	72	37	102.9%	105.7%
9	57	45	57	40	100.0%	88.9%
10	34	63	30	63	88.2%	100.0%
11	64	40	39	32	10/9付け替え	
12	55	42	64	46	116.4%	109.5%
13	77	44	80	38	103.9%	86.4%
14	82	105	63	121	76.8%	115.2%
15	30	54	27	69	10/9付け替え	
大きさ平均	62	56	66	62	107.0%	110.5%
標準偏差	20	23	19	28	14.9%	21.1%

○対照区

0mA No.	H24.9.23(直後)		H24.12.16(3ヶ月目)		成長率	
	辺1 (mm)	辺2 (mm)	辺1:縦 (mm)	辺2:横 (mm)	辺1:縦 (mm)	辺2:横 (mm)
1	27	65	23	48	85.2%	73.8%
2	28	58	18	26	11/12付け替え	
3	89	51	0	0	0.0%	0.0%
4	29	67	34	69	117.2%	103.0%
5	67	41	45	35	67.2%	85.4%
6	32	66	33	68	103.1%	103.0%
7	68	43	66	38	97.1%	88.4%
8	69	47	63	43	91.3%	91.5%
9	80	64	108	56	11/12付け替え	
10	44	73	54	76	122.7%	104.1%
11	72	32	67	36	93.1%	112.5%
12	40	95	42	81	105.0%	85.3%
13	63	43	55	19	87.3%	44.2%
14	44	65	0	0	11/12付け替え	
15	61	39	57	41	93.4%	105.1%
大きさ平均	52	56	49	50	96.6%	90.6%
標準偏差	18	19	15	20	15.3%	19.2%

*付け替えたものおよび死亡したものは、大きさと成長率の計算に含めていない。

③第4モニタリング結果：実験系設定後153日目

目視調査結果によるサンゴサイズの変化過程を資料編の写真1～45に示す。また、第4回モニタリング調査時の状況を以下に示す。第4回モニタリング時のサンゴの成長率を大きい順に並べると、以下のようになっており、明らかに電場無しの場合よりも電場有りの場合の方が成長率大きい。

試験区 5mA/m² > 試験区 50mA/m² > 対照区 0mA/m²

○試験区 5mA (N=15 枚) : サンゴの大きさ (N=15) 90mm (±15mm) × 59mm (±14mm)
[移植直後からの成長率 (N=15)] 118.7% (±10.5%) × 139.7% (±31.9%)



○試験区 50mA (N=13 枚) : サンゴの大きさ (N=13) 73mm (±25mm) × 60mm (±21mm)
[移植直後からの成長率 (N=13)] 118.1% (±16.3%) × 110.7% (±22.5%)



○対照区 0mA (N=8 枚) : サンゴの大きさ (N=8) 50mm (±12mm) × 48mm (±21mm)
[移植直後からの成長率 (N=8)] 98.7% (±26.7%) × 92.9% (±24.3%)



※9月と比較して、付け替えたものおよび目視で死亡が確認されたものは、大きさと成長率の計算に含めていない。

表 6-2(3) サンゴサイズの変化：9月23日→2月23日

○試験区

5mA No.	H24.9.23(直後)		H25.2.23(5ヶ月目)		成長率(N=15)	
	辺1:縦 (mm)	辺2:横 (mm)	辺1:縦 (mm)	辺2:横 (mm)	辺1:縦 (mm)	辺2:横 (mm)
1	54	28	60	51	112.0%	181.5%
2	91	65	105	69	115.2%	106.0%
3	58	34	72	52	123.5%	152.5%
4	73	25	86	47	117.9%	186.5%
5	54	32	75	50	139.0%	154.8%
6	80	37	94	62	117.3%	166.3%
7	90	48	93	59	103.5%	123.8%
8	71	39	86	38	121.3%	96.4%
9	63	24	86	40	136.3%	165.0%
10	90	31	100	57	111.2%	183.7%
11	86	62	96	72	111.8%	115.9%
12	74	58	83	63	111.5%	108.2%
13	73	58	84	62	114.5%	106.9%
14	104	71	116	81	111.1%	113.4%
15	83	67	112	90	134.7%	134.2%
大きさ平均	76	45	90	59	118.7%	139.7%
標準偏差	15	17	15	14	10.5%	31.9%

50mA No.	H24.9.23(直後)		H25.2.23(5ヶ月目)		成長率(N=13)	
	辺1 (mm)	辺2 (mm)	辺1:縦 (mm)	辺2:横 (mm)	辺1:縦 (mm)	辺2:横 (mm)
1	43	95	60	112	139.0%	117.4%
2	50	66	68	51	135.1%	77.6%
3	48	75	58	90	120.6%	119.4%
4	112	54	123	67	109.6%	124.2%
5	62	35	69	52	111.5%	149.3%
6	62	34	62	40	99.5%	116.6%
7	55	39	71	51	129.6%	129.6%
8	70	35	80	41	114.7%	115.8%
9	57	45	63	50	110.5%	111.7%
10	34	63	31	66	91.2%	104.7%
11	64	40	55	30	10/9付け替え	
12	55	42	66	49	120.4%	117.8%
13	77	44	81	40	105.5%	91.9%
14	82	105	121	66	148.0%	62.5%
15	30	54	32	73	10/9付け替え	
大きさ平均	62	56	73	60	118.1%	110.7%
標準偏差	20	23	25	21	16.3%	22.5%

○対照区

0mA No.	H24.9.23(直後)		H25.2.23(5ヶ月目)		成長率(N=8)	
	辺1 (mm)	辺2 (mm)	辺1:縦 (mm)	辺2:横 (mm)	辺1:縦 (mm)	辺2:横 (mm)
1	27	65	30	52	109.4%	80.6%
2	28	58	0	0	11/12付け替え・死滅	
3	89	51	0	0	2/23死滅	
4	29	67	40	72	137.3%	107.8%
5	67	41	0	0	2/23死滅	
6	32	66	0	0	2/23死滅	
7	68	43	45	35	66.1%	80.3%
8	69	47	66	50	96.2%	106.4%
9	80	64	80	48	11/12付け替え・死滅	
10	44	73	60	83	135.3%	113.6%
11	72	32	55	31	75.7%	97.7%
12	40	95	0	0	2/23死滅	
13	63	43	51	18	80.2%	42.5%
14	44	65	0	0	11/12付け替え・死滅	
15	61	39	54	44	89.3%	114.0%
大きさ平均	54	51	50	48	98.7%	92.9%
標準偏差	18	15	12	21	26.7%	24.3%

※途中で脱落したものや死亡が確認されたものは、大きさと成長率の計算から除外した。

(3) 写真撮影による画像解析調査結果

写真撮影による画像解析調査結果によるサンゴ面積の変化の状況を図 6-2, 3 および表 6-3 に示す。

成長量は、明らかに電場無しの場合よりも電場有りの場合の方が大きく、微弱電流による電場形成の効果が確認できる。11月から12月については全体的に成長量が小さい。

電場（電流密度）の条件別にみると、9月から2月までの日当り成長量は $5\text{mA}/\text{m}^2$ の微弱電流で他と比較して有意に効果がある（有意水準 5%）。

(単位: cm^2)

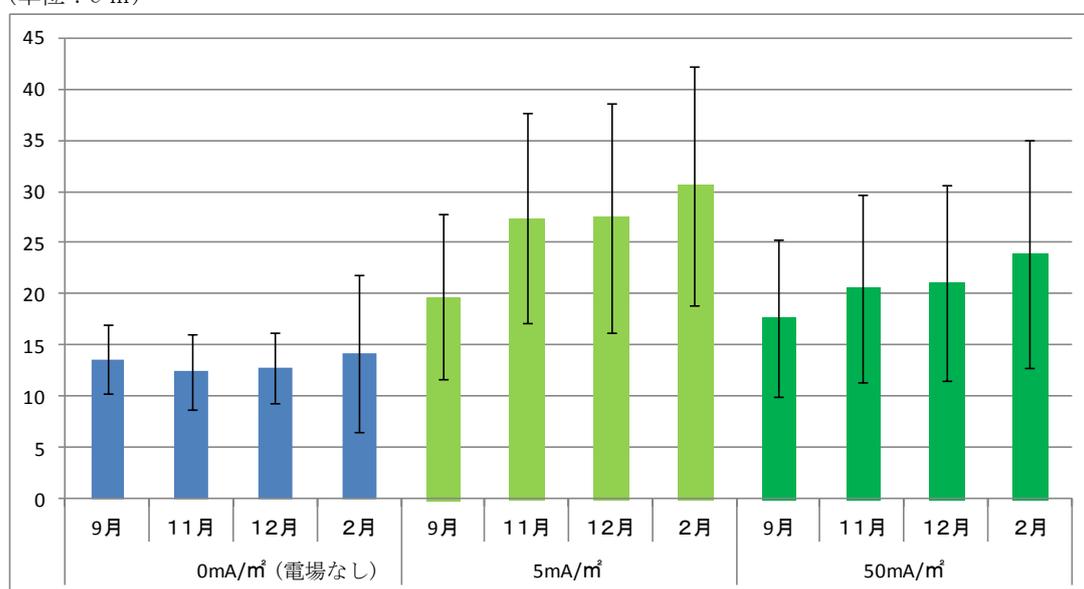


図 6-2 電場影響下におけるサンゴ面積の変化

(単位: cm^2/day)

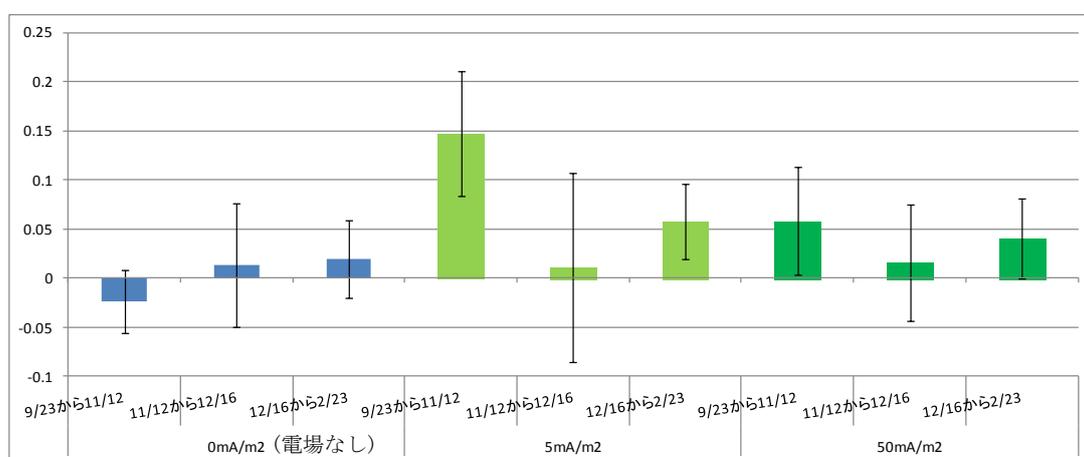


図 6-3 サンゴの日当り成長量 (cm^2/day)

表 6-3(1) サンゴ面積の変化 (対照区)

単位:cm ²				
0mA No.	第1回調査 2012/9/23	第2回調査 2012/11/12	第3回調査 2012/12/16	第4回調査 2013/2/23
1	9.1	6.9	6.8	9.0
2	11.3	7.6	7.1	0.0
3	17.7	16.4	0.0	0.0
4	12.6	11.6	15.0	17.2
5	12.1	10.7	11.09	0.0
6	12.2	17.0	13.4	0.0
7	15.6	16.4	13.9	13.2
8	15.9	17.0	14.9	18.7
9	26.6	29.1	32.0	30.8
10	14.7	13.6	14.9	19.6
11	15.9	14.4	17.2	13.2
12	21.7	14.6	14.6	0.0
13	10.5	6.8	6.4	6.9
14	19.5	5.5	3.9	0.0
15	14.6	12.5	13.6	15.6
平均	13.62	12.41	12.85	14.17
標準偏差	3.37	3.63	3.45	7.63
	データ削除		脱落による付け替え	

表 6-3(2) サンゴ面積の変化 (試験区:5mA)

単位:cm ²				
5mA No.	第1回調査 2012/9/23	第2回調査 2012/11/12	第3回調査 2012/12/16	第4回調査 2013/2/23
1	10.8	16.0	15.1	20.2
2	24.8	35.1	35.3	40.5
3	11.0	16.1	13.8	18.7
4	14.5	21.2	20.7	25.6
5	10.7	17.0	14.2	20.6
6	23.0	33.3	30.8	35.5
7	26.7	32.8	34.9	37.5
8	13.6	17.5	19.8	19.8
9	10.6	13.9	13.3	18.4
10	14.7	24.1	25.9	29.5
11	28.7	41.4	42.2	42.3
12	20.1	29.9	26.8	33.3
13	21.8	29.9	29.8	30.0
14	33.9	47.3	43.8	50.9
15	30.9	35.3	44.9	53.8
平均	19.7	27.4	27.4	30.6
標準偏差	8.0	10.3	11.2	11.6

表 6-3(3) サンゴ面積の変化 (試験区:50mA)

単位:cm ²				
50mA No.	第1回調査 2012/9/23	第2回調査 2012/11/12	第3回調査 2012/12/16	第4回調査 2013/2/23
1	24.2	31.9	34.1	40.0
2	17.5	22.1	19.7	20.6
3	15.9	18.8	18.7	20.2
4	30.8	32.4	30.6	40.0
5	14.7	16.6	19.7	19.1
6	12.0	16.0	13.6	15.5
7	11.7	16.2	19.2	23.5
8	13.3	16.4	15.7	19.7
9	12.6	13.0	12.8	16.7
10	11.0	10.5	10.5	12.1
11	12.5	6.1	6.6	8.0
12	11.8	13.7	16.4	15.1
13	19.4	17.8	19.3	20.6
14	34.7	41.8	44.0	47.2
15	10.1	11.4	10.3	13.4
平均	17.7	20.5	21.1	23.9
標準偏差	7.7	9.2	9.5	11.1
	データ削除		脱落による付け替え	

※途中で脱落したものや死亡が確認されたものは、計算から除外した。

(4) サンゴの電場測定結果

電場の測定は、5mA と 50mA の試験装置の各 12 箇所の点について測定を行った。電場状況を表 6-4(1) (2)に示す。サンゴを移植した場所の電場は、概ね設定値と同等の値を示していることが確認された。

表 6-4(1) 5mA 実験装置電場測定結果

表 6-4(2) 50mA 実験装置電場測定結果

設定 5mA/m²

電着基盤番号	測定年月日	電場電流密度(mA/m ²)
8	2012/9/23	7
	2012/11/12	3
	2012/12/16	6
	2013/2/23	7
12	2012/9/23	3
	2012/11/12	2
	2012/12/16	5
	2013/2/23	2

設定 50mA/m²

電着基盤番号	測定年月日	電場電流密度(mA/m ²)
15	2012/9/23	32
	2012/11/12	27
	2012/12/16	25
	2013/2/23	39
4	2012/9/23	57
	2012/11/12	41
	2012/12/16	26
	2013/2/23	34



図 6-4 電場測定状況

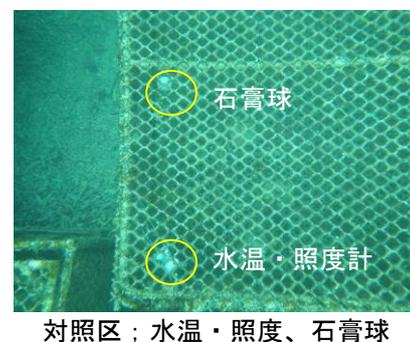
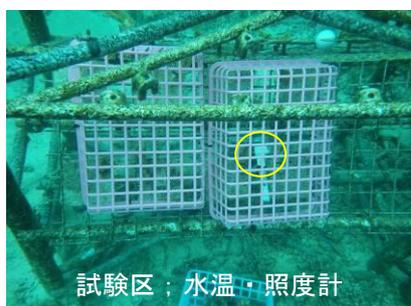
6-3. 海域環境調査

6-3-1. 流況調査

石膏球を用いた9月23日～24日の約24時間の期間平均流速は、試験区；7.5cm/s、対照区；6.7cm/s、天然礁区；8.5cm/sであった。天然礁区＞試験区＞対照区の順番で、試験区と対照区では期間平均流が若干小さいがほぼ同等の環境条件と考えられる。

表 6-5 流速(9月23日～24日の約24時間の期間平均流速:cm/s)

試験区	対照区	天然礁
7.5cm/s	6.7cm/s	8.5cm/s



6-3-2. 水質調査

透明度はいずれも着底である。COD, T-N, T-P の値は小さく、試験区と天然礁区では大きな違いは見られない。

表 6-6 水質試験結果 (COD・T-N・T-P)

分析項目	平成 24 年 9 月 23 日		平成 25 年 2 月 23 日	
	試験区	天然礁区	試験区	天然礁区
COD	1.0	1.0	0.7	0.8
T-N	0.081	0.084	0.059	0.14
T-P	0.005	0.006	0.005	0.004

単位：mg/L

6-3-3. 水温・照度の連続観測

水温の連続観測結果を図 6-5 に示すとともに、照度の連続観測結果を図 6-6 に示す。

観測期間中の水温は 29℃から 17℃の範囲で推移しており、試験区・対照区と比較して天然礁で低い傾向にあるが、これは天然礁区の方が海岸線に近く、陸域の影響を受けているためと考えられる。対照区と試験区は同様の傾向を示している。

観測期間中の照度は、0（夜間）から 100,000Lux（昼間）の範囲で推移している。観測期間の日平均照度は表 6-7 に示すように試験区・対照区と比較して天然礁で高い傾向にあるが、これは試験区と対照区では食害防止ネットを設置していることにより照度が低下するためである。試験区と対照区は、試験区の方が対照区よりも照度が低い。これも食害防止ネットによる影響である。

表 6-7 日平均照度 (Lux) 2012. 9. 24-2013. 2. 22

	試験区	対照区	天然礁
日平均照度	6,275	14,947	33,869

サンゴの成長に影響を及ぼす環境因子である水温は、試験区・対照区ともにサンゴが自然に生育している天然礁と同等の環境条件であり、本実証試験を行うのに妥当な条件である。照度については、食害防止ネットの影響により天然礁と比較して対照区・試験区で低い値となっているが、サンゴの成長に関する実証試験結果によると試験区では対照区よりも成長量が多いことから、本実証試験におけるこの程度の照度であればサンゴの成長を阻害していないものと考えられる。



図 6-5 水温の連続観測結果

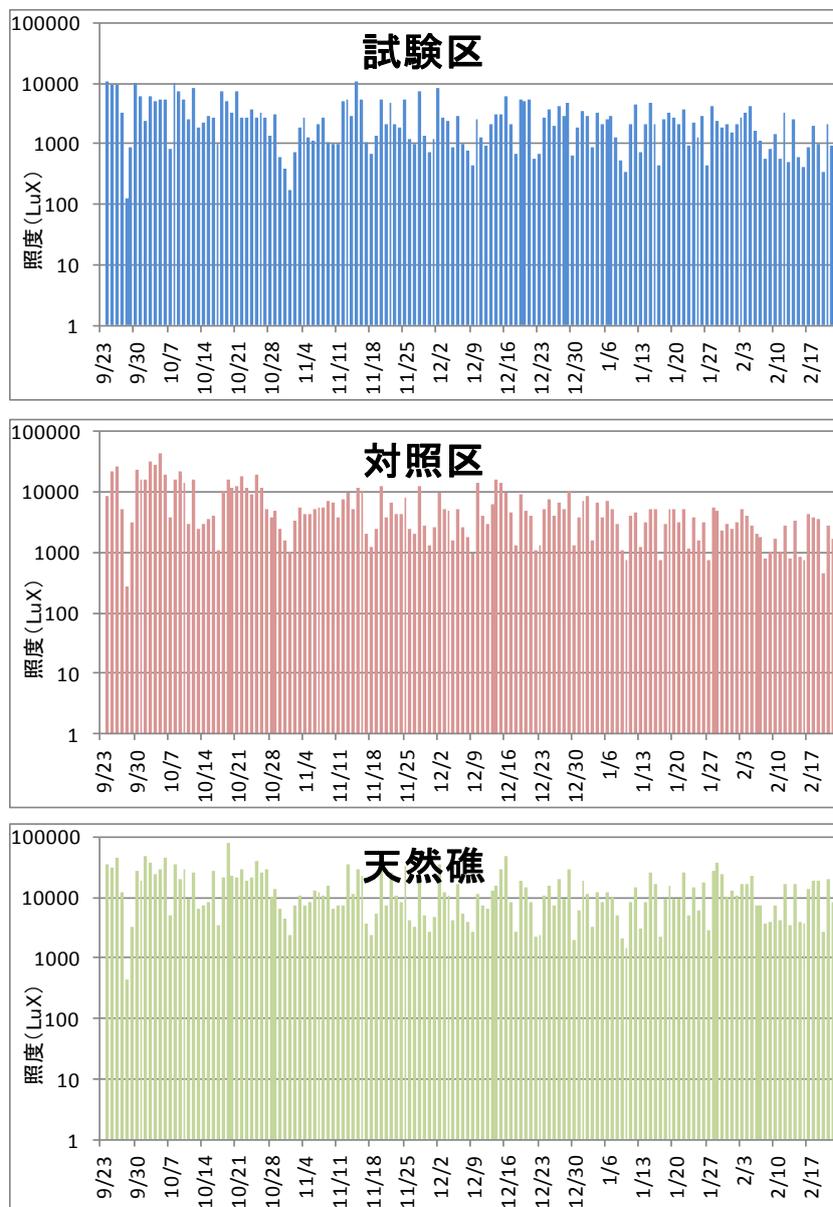


図 6-6 照度の連続観測結果

7. 過去に調査した試験データの活用

7-1. 電着基盤による稚サンゴの着生促進効果：同種試験

これまでの報告（鯉淵他、2010）では、以下のような成果が得られている。

2009年に石垣島と阿嘉島で実施された野外実験では、従来用いられている素焼タイル基盤と比較して電着基盤では稚サンゴの初期着床個体数は高く、実証試験と同様の傾向を示している。

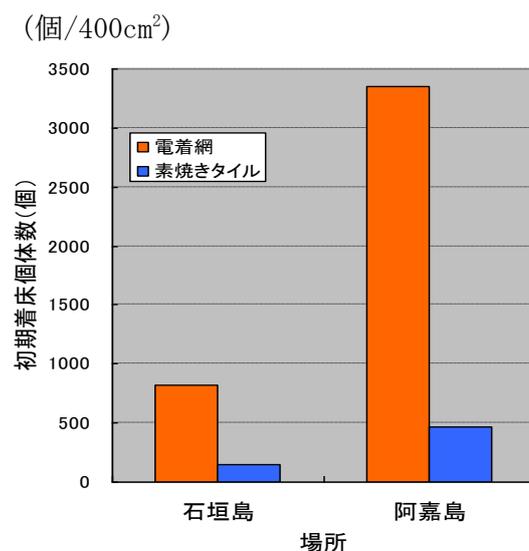


図 7-1 電着基盤と素焼タイルの着床数の比較

【出典】鯉淵幸生・木原一禎・山本悟・近藤康文 (2010) 微弱電流がサンゴの着床や成長に及ぼす影響、土木学会論文集 B2(海岸工学)、Vol.66, No.1,1216-1220.

7-2. 微弱電流によるサンゴの成長促進効果：長期的な効果試験

これまでの報告（鯉淵他，2010）では、以下のような成果が得られている。

電場無しを含めて4種類の電場が形成できるサンゴ棚（図7-2）を石垣島海域に設置し、3種類のサンゴを枝折り法（無性生殖）で棚に取り付けてモニタリングを行った。モニタリングは、3回／年程度行っている。取り付け後2年目の結果は図7-3に示すようにサンゴの種類によって電場の影響が異なるが、20～100mA/m²の電場がサンゴの成長を促進する結果が得られている。

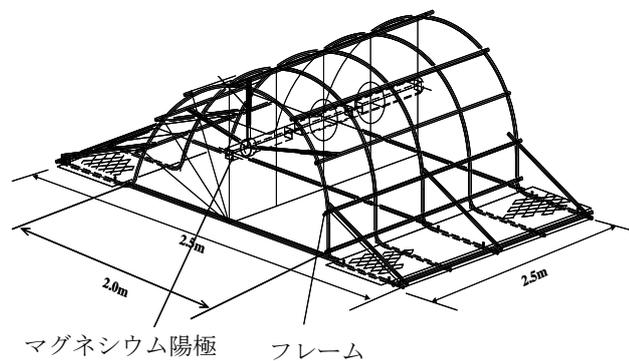


図7-2 微弱電流試験用のサンゴ棚

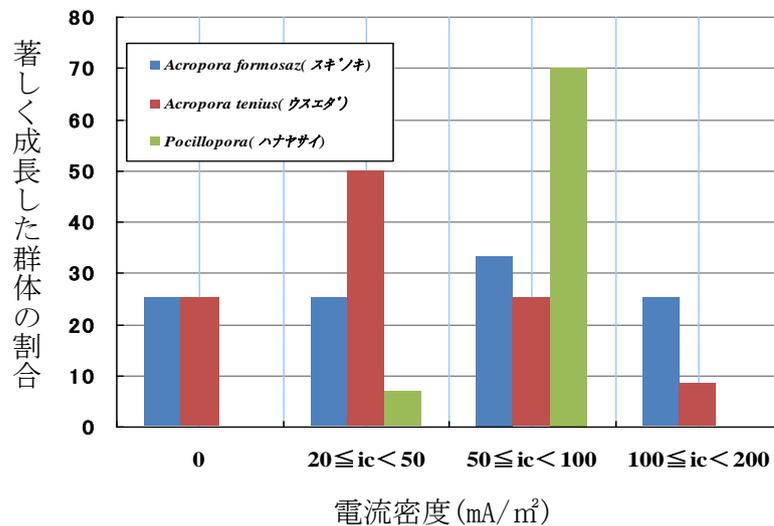


図7-3 電場影響下におけるサンゴの成長率

【出典】鯉淵幸生・木原一禎・山本悟・近藤康文 (2010) 微弱電流がサンゴの着床や成長に及ぼす影響、土木学会論文集 B2(海岸工学)、Vol.66, No.1,1216-1220.

8. 実証試験結果の結論

8-1. 電着基盤による稚サンゴの着生促進効果

本実証試験によると、従来型の素焼タイル基盤と比較して、電着基盤では顕著に稚サンゴの加入量が多く、本技術の優位性を示している。

8-2. 微弱電流によるサンゴの成長促進効果

本実証試験によると、平成24年9月23日にサンゴ断片を設置してから平成25年2月23日の第4回モニタリング調査までの153日間の短期的な成長促進効果について、成長量は電場無しの場合よりも電場有りの場合の方が有意に大きく、微弱電流による電場形成の効果が確認できる。ただし、対照区と試験区で照度が異なる影響を考慮する必要がある。

電場（電流密度）が有する長期的なサンゴの成長促進効果については、本実証試験では試験期間の関係から明確にならないが、過去の調査結果によると取り付け後2年目ではサンゴの種類によって電場の影響が異なるが、20～100mA/m²の電場がサンゴの成長を促進する結果が得られている。本試験で用いたウスエダミドリイシでは電場5mA/m²で効果が確認された。

技術の概要と本試験によって明らかになった技術の特徴を表8-1に示す。

表 8-1 技術の概要と特徴

技術名	電着基盤	微弱電流によるサンゴの成長促進装置
技術の概要	金網基盤に電流を流して表面に炭酸カルシウムを析出させた基盤	マグネシウム合金陽極により微弱電流による電場を発生させる装置
実証事業としての意義	従来用いられている素焼タイル基盤に比べて、電着基盤の方が稚サンゴの加入量が多かったことにより、本技術による稚サンゴの着生促進効果が検証された。	電場無しに比べて、本成長促進装置における電場有りの条件でサンゴの成長が有意に速かったことにより、本技術によるサンゴの成長促進効果が検証された。
期待される導入効果	本技術を導入することにより、効率的に稚サンゴを増殖することが可能になる。	本技術を導入することにより、サンゴ礁の再生の期間短縮が可能になる。
技術としての新規性	従来は素焼タイルなどが用いられており、電着基盤の新規性・優位性は高い。	従来技術では微弱電流による検討はなされていない。従来技術では外部電力を必要として維持管理が必要なこととサンゴへの悪影響も懸念された。本技術は電気防食程度の微弱電流を用いることから、外部電力を用いず、サンゴへの悪影響もない点が新規性・優位性は高い。
従来技術に対する優位性		
普及拡大にむけた課題	稚サンゴの成長促進効果に関する検証	長期的な成長促進効果の検証 他の環境因子との関係の検証 種類別の効果の検証

9. 技術実証検討会の見解

9-1. 電着基盤による稚サンゴの着生促進

① 技術的課題や改善の方向性

- ・陸上水槽において適切な光量管理と海水温度の管理をした上で、稚サンゴが着生した後の初期成長まで効果を検証することが望ましいと考えられる。

② 他の実水域への適用可能性を検討する際の注意点

- ・特になし。

9-2. 微弱電流によるサンゴの成長促進

① 技術的課題や改善の方向性

- ・既存の知見により成長促進の効果がサンゴの種類によって異なることから、できるだけ多くの種類を対象とすることや、様々な適用形態（防波堤・岸壁・魚礁等）への技術的な検討を行うことが望ましい。

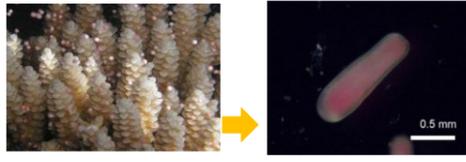
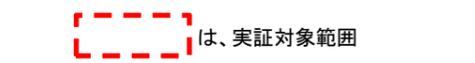
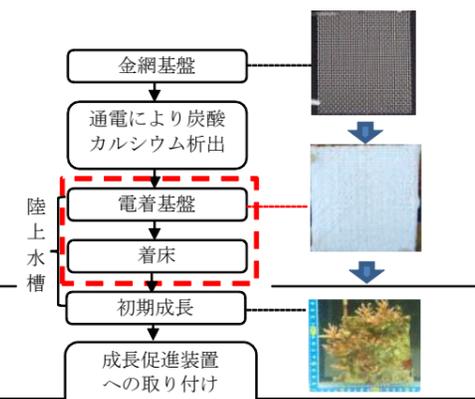
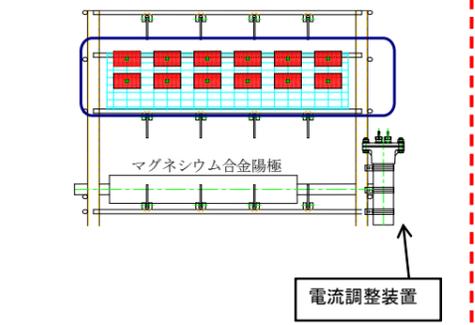
② 他の実水域への適用可能性を検討する際の注意点

- ・他の実海域においても、本技術の効果を適切に発揮させるためには、流況や水深等の適用条件を明らかにすることが重要である。

10. まとめ

実証試験結果の総括表を表 10-1 に示す。

表 10-1 微弱電流を利用したサンゴ成長促進及び電着基盤利用技術に関する実証試験結果の総括表

サンゴの生活史	技術の概要	目標	実証試験の内容	実証試験の結果	課題	過去の試験データの活用	結論
①産卵、②受精 ⇒③プラヌラ幼生 	 <p>は、実証対象範囲</p>	—	産卵・受精・プラヌラ幼生の飼育は陸上水槽で集約的に行った。 (実海域では幼生密度が低いいため)	—	—	—	—
④着生 	電着基盤 :金網基盤に電流を流して表面に炭酸カルシウムを析出させた基盤  <p>陸上水槽</p>	【電着基盤による稚サンゴの着生促進効果】 ・従来用いられている素焼タイル基盤(以下、タイル基盤)に比べて電着基盤の方が加入量が多い。	【試験区】 ・電着基盤10枚 【対照区】 ・タイル基盤10枚 【使用したサンゴ】 ・5月7日夜のサンゴの産卵時に採取した卵と精子を受精させ、誕生したプラヌラ幼生を5月11日から12日に基盤に着生させ、加入量を計測した。	・タイル基盤と比較して、電着基盤では、顕著にサンゴ幼生の加入量が多く、電着基盤による稚サンゴの着生促進効果が確認できた。	・特になし。	【同種試験】 ・タイル基盤に比べて電着基盤の方が初期の加入量が多い。 出典: 鯉淵他、2010	【電着基盤による稚サンゴの着生促進効果】 ・電着基盤への稚サンゴの加入量はタイル基盤と比較して顕著に多いことから、着生促進効果が確認できる。
⑤初期成長 	 <p>成長促進装置への取り付け</p>	—	—	—	—	—	—
⑥成長   <p>①へ</p>	微弱電流によるサンゴの成長促進装置 :マグネシウム合金陽極により微弱電流による電場を発生させる装置  <p>電流調整装置</p>	【成長促進装置によるサンゴの成長促進効果】 ・電場無しに比べて電場有りの方が成長が速い。	【試験区】 ・装置の通電電流密度(電場)を5mA/m ² と50mA/m ² とした装置2基を設置した。 【対照区】 ・通電電流密度(電場)が0mA/m ² の装置1基を設置した。 【使用したサンゴ】 ・平成21、22年度に有性生殖法で着生・養殖したサンゴ(ウスエダミドリイシ)を用いた。 ・概ね同じサイズのサンゴ断片を15群体/基(合計45群体)を用いた。	・成長量は、明らかに電場無しの場合よりも電場有りの場合の方が大きく、微弱電流による電場形成の効果が確認できる。 ・電場(電流密度)の条件別にみると、5mA/m ² という微弱電流で最も効果がある。	・長期的な効果は不明である。	【長期的な効果試験】 ・移植後2-3年目のハナヤサイサンゴでは、電場0mA/m ² 以下と100 mA/m ² 以上と比較すると、電場50-100mA/m ² でサンゴの成長率が高い。 出典: 鯉淵他、2010	【成長促進装置による長期的なサンゴの成長促進効果】 ・本実証試験では明確でない。 ・過去の試験データによると、長期的にも電場無しの場合よりも電場有りの場合の方が成長量は大きく、効果が確認できる。

○付録

・用語集

サンゴの生活史	サンゴの増殖過程には、成熟した親サンゴが産卵し、卵と精子が受精した後にプラヌラ幼生となり海中を浮遊し、基盤に着生してポリプとなる有性生殖過程と、ポリプが次々にクローンを作って群体を形成する無性生殖過程がある。
プラヌラ幼生	サンゴ等刺胞動物の幼生で繊毛によって運動し、遊泳する。
刺胞動物	サンゴ、クラゲ、イソギンチャク等の刺胞を持っている動物。
刺胞	摂餌や攻撃する際に用いる細胞器官。
褐虫藻	造礁サンゴに共生する単細胞の渦鞭毛藻(植物プランクトン)。サンゴの組織内で光合成により増殖し、サンゴに栄養分を供給する。
石灰化	造礁サンゴが炭酸カルシウムの基盤を生産すること。
着生	ポリプが基盤につくこと。
ポリプ	生きているサンゴの基本単位。プラヌラ幼生が基盤に着生するとポリプになる、ポリプが分裂してサンゴ群体となる。
群体	共通の親個体が分裂して形成されたポリプの集まり。
有性生殖	卵と精子など配偶子を用いて子孫を生産する生殖方法。有性生殖によって形成される個体は遺伝子組成が異なる。
無性生殖	配偶子を用いずに子孫を増やす増殖方法。無性生殖によって形成される個体は遺伝子組成が同じ。
金網基盤	電着基盤を作るために用いる電流の通る金網でできた基盤。
電着基盤	金網基盤に電流を流して表面に炭酸カルシウムを析出させた基盤。
成長促進装置	マグネシウム合金陽極により微弱電流による電場を発生させる装置。
通電電流密度 (電場)	電流を流すことによって発生する電場の大きさ。単位は、mA/m ² 。

【参考資料】水産庁漁港漁場整備部(2009)有性生殖によるサンゴ増殖の手引き