

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 18 日現在

機関番号：34416

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25550065

研究課題名(和文) 自立型発電システムを用いたサンゴ再生促進技術の開発

研究課題名(英文) Development of a system encouraging coral restoration by using an independent hydroelectric power generator

研究代表者

高橋 智幸 (Takahashi, Tomoyuki)

関西大学・社会安全学部・教授

研究者番号：40261599

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,600,000円

研究成果の概要(和文)：微弱電流によりサンゴの成長を促進させる技術の開発を目的として、以下のような現地調査、水理実験、サンゴ育成用モルタル基盤の開発およびサンゴ飼育実験を実施した。現地調査は沖縄県において実施し、実際のサンゴ被害およびサンゴ再生の現状について調べた。水理実験では循環型水路を使用して、サンゴ再生を目的とした自立型発電システムの設計および性能試験を実施した。サンゴ育成用モルタル基盤の開発では材料や形状について検討し、設計した。飼育実験では実際にサンゴが生息している海底を再現した水槽においてサンゴを飼育し、サンゴ育成用モルタル基盤の条件や微弱電流の有無による成長率を比較した。

研究成果の概要(英文)：To develop a system encouraging coral restoration by using a weak electric current, the following field investigations, hydraulic experiment, design of the mortar base for coral reproduction and coral growing experiment have been conducted. The field investigations were carried out in Okinawa, and studied actual coral damages and the present situation of coral restoration. In the hydraulic experiment, an independent hydroelectric power generator was tested its design and performance by using a circulated water channel. The mortar base for coral reproduction was examined on its material and structure, and designed suitable for coral restoration. In the coral growing experiment, coral has been raised in two water tanks simulating the actual sea bottom environment of coral reef, and a growth rate of coral was compared about the material of mortar base and the weak electric current.

研究分野：水に関連した災害や環境問題

キーワード：サンゴ育成用モルタル基盤 微弱電流 現地調査 水理実験 サンゴ飼育実験

### 1. 研究開始当初の背景

サンゴ礁には全海洋生物の 15%以上が住み、海のオアシスと呼ばれる豊かな生態系を作り出している。また、光合成による二酸化炭素の固定など、地球環境において極めて重要な役割を担っている。さらに、人類には水産資源や観光資源を与えてくれるのみでなく、近年多くの生理活性物質が発見されており、将来的に各種の医薬品を提供してくれると期待されている。

しかし、世界中でサンゴの破壊が進行している(図1)。その原因は地球温暖化による海水温の上昇や森林伐採による土砂流出、オニヒトデの異常発生など多岐に渡り、環境問題と深く関わっている。また、2004年インド洋大津波では、各地でサンゴの損傷が報告されている(Pennisi, 2005)。



図1 サンゴの白化現象

サンゴの破壊は、貴重な自然環境の損失のみならず、人間社会へも大きな打撃を与え始めている。例えば、モルディブ共和国などでは、サンゴ礁の死滅と地球温暖化に伴う海面上昇により、国土が消滅する危機に瀕している。また、我国の沖ノ鳥島は東西約 4.5km、南北約 1.7km のサンゴ礁の中に存在する東小島と北小島から構成されているが、同様に水面下に没してしまう危険性が高い。その場合、我が国は国土を上回る面積の排他的経済水域を失うことになる。

このような状況を踏まえて、サンゴの再生が世界中で試みられている。我国においても、2004年に開催された第10回国際サンゴ礁シンポジウムでは「危機にある世界のサンゴ礁の保全と再生に関する沖縄宣言」が採択されている。また、沖ノ鳥島に対しては、水産庁が「生育環境が厳しい条件下における増養殖技術開発調査事業」を平成18年度から開始している。

サンゴ再生の一般的な方法は、稚サンゴを養殖して、あるいは近くの海域から健康な小サンゴを採取して、実際の海に移植するものである。しかし、サンゴの成長速度は種類にもよるが一般的に数 cm/年と遅く、また群生に達するまでは海藻に覆われるなどの外的要因で容易に死滅してしまう。そこで近年注目されているのが、微弱電流をサンゴの移植

用架台に流して、サンゴの成長を促進させる方法である(Hilbertz, 1979)。サンゴは骨格を形成するために炭酸カルシウムを必要とするが、通電により海水中の炭酸カルシウムが架台に付着する。そして、サンゴはその炭酸カルシウムを利用して急速に成長することができるのである。既にインドネシアやモルディブ、ドバイなどで実験されており、サンゴの成長速度が通常の5倍程度まで増加したと報告されている。

しかし、その微弱電流の供給には問題を抱えている。現在は、陸上から海底まで電線ケーブルを設置しているが、実用化を考えると観光地で太くて長い電線ケーブルをビーチに敷設することは現実的でない。そこで、海面に浮かべたブイ式の太陽光発電(Hilberts, 1997)などを検討しているが、ブイは暴風による波浪で損傷を受ける頻度が高いため、維持コストが高くなる。

### 2. 研究の目的

微弱電流によりサンゴを活性化する方法を広く普及させるためには、サンゴ移植用架台付近の海中で発電し、サンゴに微弱電流を供給し続けられる電力システムが必要である。そこで、本研究では自立型水力発電システムにより微弱電流を発生させてサンゴ再生を促進する技術の開発を目的とした。

### 3. 研究の方法

微弱電流によりサンゴの成長を促進させる技術の開発を目的として、以下のような現地調査、水理実験、サンゴ育成用モルタル基盤の開発およびサンゴ飼育実験を実施した。現地調査は沖縄県において実施し、実際のサンゴ被害およびサンゴ再生の現状について調べた。水理実験では循環型水路を使用してサンゴ再生を目的とした自立型発電システムの設計および性能試験を実施した。サンゴ育成用モルタル基盤の開発では材料や形状について検討し、設計した。飼育実験では実際にサンゴが生息している海底を再現した水槽においてサンゴを飼育し、サンゴ育成用モルタル基盤の条件や微弱電流の有無による成長率を比較した。

### 4. 研究成果

(1) サンゴ再生を行っている沖縄県において現地調査を実施した。サンゴ育成用モルタル基盤の形状、大きさ、材料、表面、サンゴの設置方法等について、サンゴ植樹を行っているNPO等と検討を行った。また、サンゴが生育している海域で潜水調査を実施して、実証実験を行うサイトの選定を行った。

(2) サンゴ育成用モルタル基盤に通電する発電装置に関する水理実験で使用した循環型水路を図2に示す。流速は水路の中心線上、50cm間隔(P1~P6)で、電磁流速計を用いて測定した。水深を変化させた予備実験の結果、水深20cmの条件におけるP6で比較的安定した流速(36cm/s)が発生していたため、以降の実験はこの条件で実施した。

発電方式としては、図3に示す流力振動を

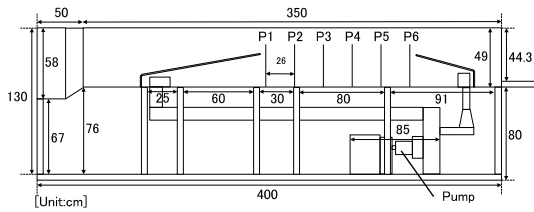


図2 循環型水路

利用した圧電セラミックによる発電装置（朝倉・高橋，2010）を検討した．圧電セラミックとは機械エネルギーを電気エネルギーに変換する機能を有したセラミックで，変位（伸縮）に応じた起電力を発生させることができる．したがって，圧電セラミックに振動を与え続けることにより，継続的な発電が可能となる．継続的に振動を与える方法としては，流体力学において流力振動とよばれる自然現象を利用している．水流中に円柱など（以下，振動柱という）を設置するとカルマン渦列が発生し，振動柱には揚力方向（流れに対して垂直な方向）の応力が周期的に発生する．この周期的な応力により振動柱の振動が継続的に励起されるため，この振動柱に圧電セラミックを接続することにより，発電を持続させることができる．

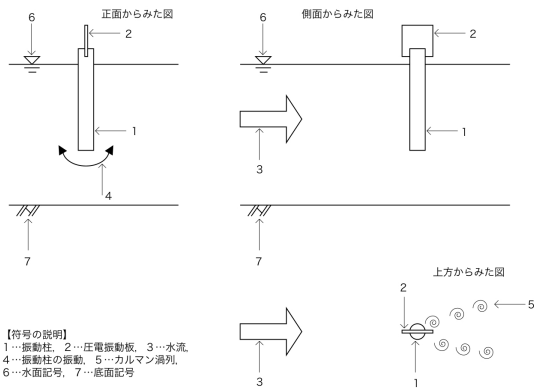


図3 流力振動を利用した圧電セラミックによる発電装置

振動柱は円柱とし，材料には木材とウレタンゴムを使用した．外径は，木材では 18mm, 20mm, 24mm, 27mm, 32mm, ウレタンゴムでは 20mm, 25mm, 30mm, 長さは両者 250mm, 300mm, 350mm と変化させ，計 24 種類の振動柱について実験を行った．実験結果を表 1 および表 2 に示す．素材の違いによる発生電圧を比較するとウレタンゴムを使用した振動柱がより優位であることがわかった．また，木材を使用した振動柱では形状により卓越した条件はみられなかったが，ウレタンゴムにおいては長さ 300mm で比較的発生電圧が高い結果となった．

(3)サンゴ育成用モルタル基盤としてはサンゴ骨格に近い成分を持つセメント系材料を

表 1 木材の振動柱による発電結果

| 長さ   | 内径(mm) | 18  | 20 | 24  | 27  | 32  |
|------|--------|-----|----|-----|-----|-----|
| 250m | 最大(mV) | 50  | 50 | 100 | 130 | 130 |
|      | 平均(mV) | 30  | 30 | 40  | 50  | 50  |
| 300m | 最大(mV) | 60  | 50 | 100 | 70  | 80  |
|      | 平均(mV) | 30  | 30 | 40  | 40  | 30  |
| 350m | 最大(mV) | 340 | 90 | 70  | 110 | 70  |
|      | 平均(mV) | 60  | 30 | 30  | 50  | 40  |

表 2 ウレタンゴムの振動柱による発電結果

| 長さ   | 内径(mm) | 20  | 25  | 30  |
|------|--------|-----|-----|-----|
| 250m | 最大(mV) | 40  | 300 | 400 |
|      | 平均(mV) | 20  | 150 | 110 |
| 300m | 最大(mV) | 250 | 600 | 600 |
|      | 平均(mV) | 130 | 200 | 100 |
| 350m | 最大(mV) | 200 | 150 | 300 |
|      | 平均(mV) | 100 | 80  | 90  |

表 3 モルタルの種類と配合

| 供試体名      | W / C (%) | S (%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |      | SP (kg/m <sup>3</sup> ) |
|-----------|-----------|-------|--------------------------|-----|------|-------------------------|
|           |           |       | W                        | C   | Z    |                         |
| ZCM 30-40 | 30.0      | 40.4  | 290                      | 966 | 776  | 0                       |
| ZCM 30-60 | 30.0      | 56.3  | 198                      | 708 | 1081 | 14.2                    |
| ZCM 50-40 | 50.0      | 40.2  | 366                      | 732 | 772  | 0                       |
| ZCM 50-60 | 50.0      | 56.3  | 256                      | 535 | 1081 | 10.7                    |
| ZCM 70-40 | 70.0      | 40.2  | 412                      | 588 | 772  | 0                       |
| ZCM 70-60 | 70.0      | 56.3  | 301                      | 430 | 1081 | 0                       |

用いた．まず，天然ゼオライトを骨材および混和材料として用いたセメントモルタルについて検討を行った．セメントは普通ポルトランドセメント（C：密度 3.15g/cm<sup>3</sup>），細骨材には天然ゼオライト（密度 1.92kg/m<sup>3</sup>，吸収率 19.5%，秋田県二ツ井産）および珪砂（SS：密度 2.64kg/m<sup>3</sup>，吸収率 0.42%，JISR5201 標準砂）を用いた．また混和剤に高性能減水剤（ナフタレンスルホン酸系：SP）を用いた．モルタルの配合を表 3 に示す．水セメント比を 30%，50%，70% の 3 種類，ゼオライト（Z）の細骨材の容積割合（単位細骨材率（S））を 40%，60% の 2 種類の組合せで，6 種類のモルタルを作製した．養生は標準養生とした．

供試体は 20×15×60mm の角柱とした．供試体両端部に電極としてステンレス製のネジを埋め込み，電極の接触面積を二種類（ワッシャーの有無）用意し，これによりモルタル内の電流の流れ方が測定値に及ぼす影響も検討した．電気抵抗率は二電極法で測定した．周波数は 73.3Hz と 10Hz，電圧 4.0V の交流電流を印加した．測定は材齢 3 日～91 日まで所定の経過日数で行った．なお，電気抵抗率  $\nu$  (Ω·m) の算出は次式を用いている．

$$\nu = V/I \times S/L \quad (1)$$

ここで，V：測定電圧（V），I：電流（A），S：断面積（m<sup>2</sup>），L：測定間距離（m）である．さらに供試体の曲げ強度も材齢 14，28，35，91 日で測定した．

モルタルの電気抵抗率と材齢の関係を図 4

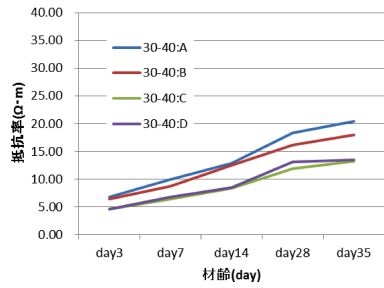


図 4 ZCM30-40

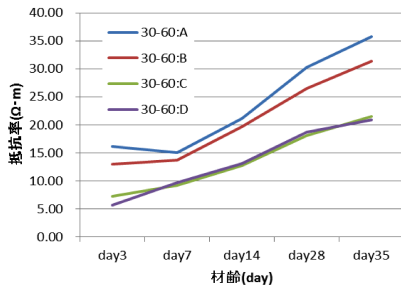


図 5 ZCM30-60

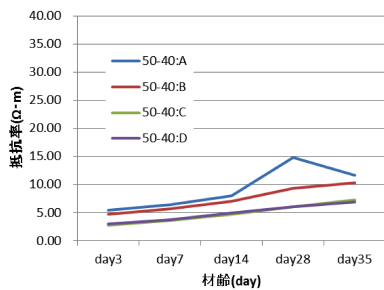


図 6 ZCM50-40

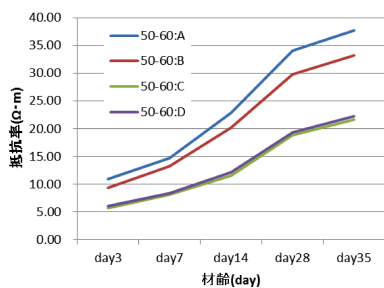


図 7 ZCM50-60

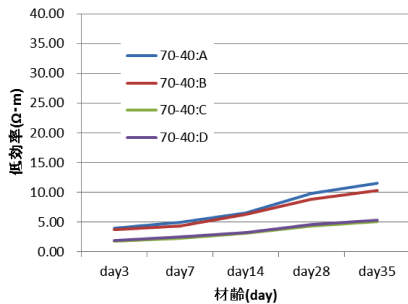


図 8 ZCM70-40

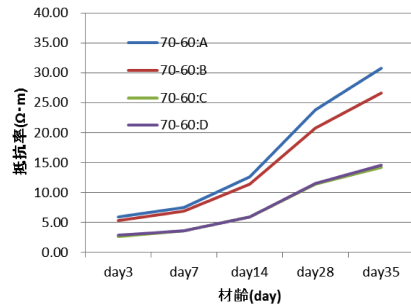


図 9 ZCM70-60

～図 9 に示す．電気抵抗率はゼオライトの単位細骨材率が高いほど，材齢が進むにつれ抵抗率が上昇する傾向を示した．また，水セメント比を大きくした場合には電気抵抗率が抑えられる傾向を示した．

天然ゼオライトの単位細骨材率が 40% の場合は，セメント水比と電気抵抗率は図 10 に示すようにほぼ比例関係になる．しかし単位粗骨材率を 60% とすると，セメント水比と電気抵抗率の関係は漸近する傾向となることが明らかとなった．また，電極面積を狭くすることにより測定値は低下し，適切な電極の選定が必要である．

モルタルのフレッシュ時の空気量と電気抵抗率の関係を図 11 に示す．空気量の増加に伴い電気抵抗率は上昇し，空隙中に電気抵抗率の高い空気の層が増加したためであると考えられる．

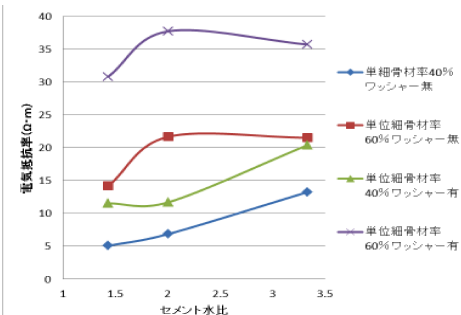


図 10 セメント水比と電気抵抗率の関係

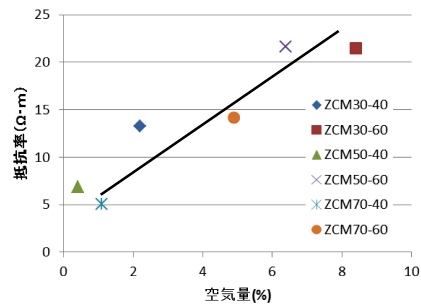


図 11 空気量と抵抗率の関係

次に，炭素粒子を混入したモルタルについて検討を行った．使用した材料とその物性値を表 4 に，配合を表 5 に示す．人工海水(SW)は，市販の人工海水粉を上水道水に 38.2g/L 混入することで製作した．W/C=50% の普通モルタルを NW50，海水練りで炭素粒子を 20% 添

加したW/C=50%のモルタルをCPSW-20-50とした。目標空気量は1.0%とし、他の配合も同様とした。モルタル配合としてよく用いられている砂セメント比S/C=2.0に対して実験要因として炭素粒子添加率、練混ぜ水を選定した。炭素粒子添加率はモルタルの体積比で0%、20%とした。また、炭素粒子添加率が20%の時のみ目標フロー値を満たすために単位水量を360kg/m<sup>3</sup>とした。なお、供試体は各配合および各養生方法で2体、または3体ずつ製作した。

表4 使用材料の物性および記号

| 材料   | 種類          | 物性  | 記号 |
|------|-------------|---|----|
| 水    | 上水道水        | 密度 1.00g/cm <sup>3</sup>                        | W  |
| 人工海水 | Ro水+人工海水粉   | 密度 1.04g/cm <sup>3</sup>                        | SW |
| セメント | 普通ポルトランド    | 密度 3.15g/cm <sup>3</sup>                        | C  |
| 細骨材  | 川砂(淀川産)     | 表乾密度 2.59g/cm <sup>3</sup><br>吸水率 0.67%, FM2.43 | S  |
| 炭素粒子 | 粒径 0.3mm 以下 | 密度 2.12(g/cm <sup>3</sup> )                     | CP |

表5 配合

| 配合         | W/C (%) | 単位量(kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |      |     |
|------------|---------|-------------------------|-----|-----|------|-----|
|            |         | W                       | SW  | C   | S    | CP  |
| NW50       | 50      | 316                     | -   | 632 | 1226 | 0   |
| CPSW-20-50 | -       | -                       | 360 | 720 | 522  | 424 |

炭素粒子、供試体幅、電極間距離がモルタル供試体の比抵抗、あるいは抵抗値に及ぼす影響を確認するために電流値を測定した。電気抵抗の測定は30Vの電圧をかけて行った。供試体は40×40×160mmの角柱供試体を使用し、供試体の中央に距離Lでステンレス棒を電極として埋め込んだ。ステンレス棒は直径6mmで長さは3cmであり、2cmをモルタルに埋め込み、残りの1cmを露出させた。養生は海水中養生で行い、材齢が1, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 56日において電気抵抗測定を行った。また測定を行う際は、供試体を表乾・浸漬・水中のそれぞれの状態で回路に繋いで測定した。モルタル供試体の導電性を評価する指標として電極間距離、断面積の異なる場合を比較するために、以下の式を用いて比抵抗を算出した。

$$D = V/I \times A/L \quad (2)$$

ここで、D:比抵抗(Ω・m)、A:供試体の断面積(m<sup>2</sup>)、L:電極間距離(m)、V:電圧(V)、I:電流(A)である。

図12に材齢と比抵抗の関係を示す。水中状態においては炭素粒子の有無による違いがほとんどなかった。一方、表乾状態・浸漬状態では水中状態とは異なる傾向であった。これは炭素粒子が比抵抗に及ぼす影響よりも水が比抵抗に及ぼす影響の方が大きいからだと考えられる。

図13に供試体幅と抵抗値の関係を示す。表乾状態での測定で供試体幅に着目すると、供試体幅が大きくなると抵抗値は減少する傾向がみられる。これから供試体幅8cm程度

まで電流が広がりを持って流れると考えられる。また、供試体幅よりも水分の影響の方が大きいことがわかった。

図14に電極間距離と抵抗値の関係を示す。同一材齢、表乾状態での測定において、電極間距離が大きくなると抵抗値が増加し、電流が流れにくくなっている傾向がある。これは電極間距離が長くなると、分流による電流のロスが大きくなるからと考えられる。また、電極間距離による影響よりも水環境の影響の方が大きいことが確認できる。サンゴの成長を促進させるといわれている20~100mA/m<sup>2</sup>の電流密度(鯉淵ら, 2010)を発生させるためには、供試体1個あたり10~50mV程度の電圧で十分であることがわかった。

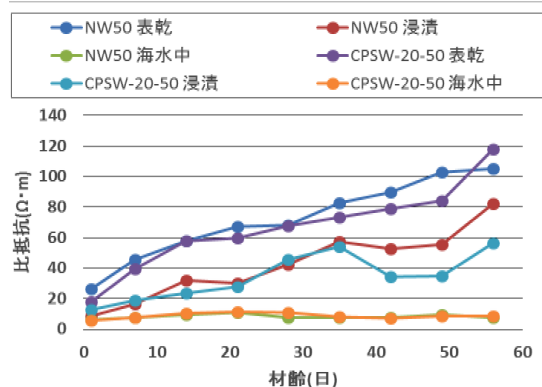


図12 材齢と比抵抗の関係

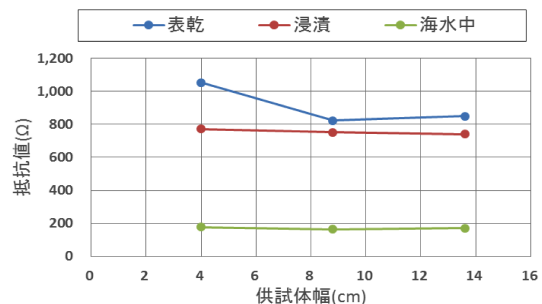


図13 供試体幅と比抵抗の関係

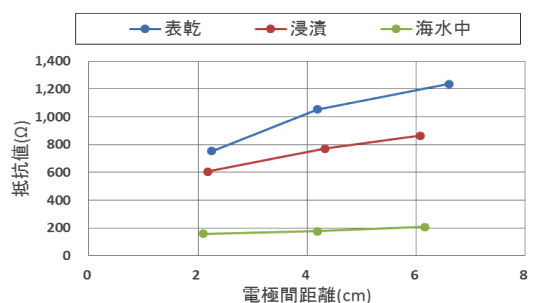


図14 電極間距離と抵抗値の関係

(4) 実際にサンゴが生息している海底の水流、水質、照明等の条件を再現した水槽(図15)を2台用いて、サンゴの飼育実験を実施した。水槽は幅60cm、奥行き30cm、高さ30cm(250リットル)の亚克力製であり、ヒーターおよびクーラーを設置した。水流はオーバーフロー方式で、水槽下部にはろ過材やタンパク

質等の有機物を除去するプロテインスキマー、サンゴの骨格形成に必要なカルシウム濃度とKH(炭酸塩濃度)を一定に保ち、水槽へ供給するカルシウムリアクターを本水槽の下に設置した。水温は平均25℃、塩分濃度は実用塩分単位1.024、硝酸塩は0ppm、リン酸塩は0.1ppm、マグネシウムは1200ppm、カルシウムは410ppm、炭酸塩硬度は7.0dHになるように制御した。また、硝酸塩とリン酸塩を減少させる専用の薬剤、カルシウム・炭酸塩硬度・マグネシウムを調整する専用の薬剤を投入して調整を行った。

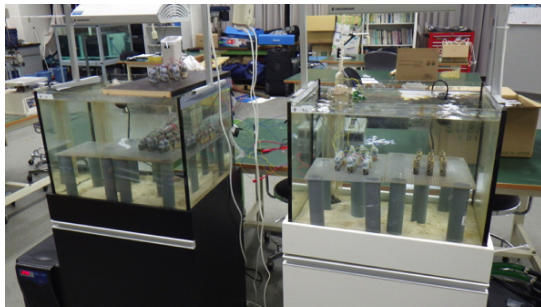


図15 飼育実験で使った水槽

図16に水槽内の回路の模式図を示すが、サンゴには比較的成長の早いクシハダミドリイシ、スギノキミドリイシ、ハナヤサイサンゴ(図中はク、ス、ハ)を用いた。サンゴ育成用モルタル基盤の材料としては普通モルタル、ゼオライトモルタル、炭素粒子モルタル(図中は普、ゼ、炭)を選択した。電力としては、安定して長時間荷電できるように定電圧装置を2台組み合わせ、それぞれの基盤に0, 5, 50, 500mA/m<sup>2</sup>の電流密度(図中はなし, 小, 中, 大)を与えた。

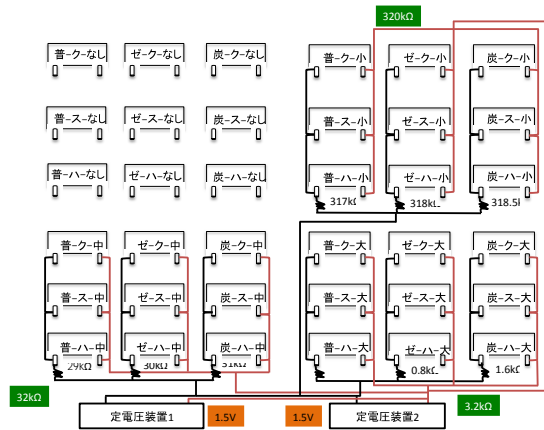


図16 回路の模式図

実験開始から1ヶ月後に電流小と電流大のモルタル基板からサビのようなものが発生し、徐々にサンゴの白化が進行した。電極が完全に防水できていなかったことが原因と考えられるため、電極の材料および防水方法について検討し、試行錯誤を繰り返しながら飼育実験を継続中である。しかし、現段階ではサンゴの成長率にはバラツキが大きく、サンゴ育成用モルタル基盤の材料および電流

密度の大小による系統的な変化がみられるには至っていない。

<引用文献>

Pennisi, E. (2005): "Powerful Tsunami's Impact on Coral Reefs Was Hit and Miss", Science, vol. 307, p.657.  
 Hilbertz, W. H. (1979): "Electrodeposition of Minerals in Sea Water: Experiments and Applications", IEEE Journal On Oceanic Engineering, Vol 0-E4, No.3, pp.94-113.  
 Hilbertz, W. and Goreau, T. (1997): "Third Generation Artificial Reefs", Ocean Realm magazine.  
 朝倉 壘・高橋智幸(2010): カルマン渦列を利用した小型水力発電装置の開発と基礎的検討, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.66, No.1, pp.1286-1290.  
 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, pp.1216-1220.

5. 主な発表論文等

(学会発表)(計4件)

平井孝明, 竹田真義, 鶴田浩章, 高橋智幸, 徳重英信, 上田尚史, サンゴ再生に用いるモルタル基盤の電気抵抗性の評価, 土木学会関西支部年次学術講演会, 2015年05月30日, 摂南大学(大阪府寝屋川市)  
 勝間田成, 徳重英信, 山森澯夕, 高橋智幸, 鶴田浩章, 天然ゼオライトを用いたサンゴ育成用基盤モルタルの導電性, 土木学会東北支部技術研究発表会, 2015年03月09日, 東北学院大学(宮城県仙台市)  
 大高理美, 徳重英信, 山森澯夕, 高橋智幸, 鶴田浩章, 天然ゼオライト混和モルタルの電気抵抗率に及ぼす配合要因, 土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集, 2014年03月08日, 八戸工業大学(青森県八戸市)  
 平林大弥, 徳重英信, 加藤芽衣, 鈴木弘実, 秋田県沿岸部における藻場再生コンクリート基盤の浸漬実験, 土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集, 2014年03月08日, 八戸工業大学(青森県八戸市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 智幸 (TAKAHASHI, Tomoyuki)  
 関西大学・社会安全学部・教授  
 研究者番号: 40261599

(2) 研究分担者

徳重 英信 (TOKUSHIGE, Hidenobu)  
 秋田大学・工学資源学研究所・教授  
 研究者番号: 80291269  
 鶴田 浩章 (TSURUTA, Hiroaki)  
 関西大学・環境都市工学部・准教授  
 研究者番号: 90253484