

2009 年度修士論文

サンゴの成長促進に関する実験的研究
Experimental Study on Coral Growth Promotion

2009 年 1 月提出

指導教員 鯉淵 幸生 講師

76854 三浦 ゆきこ

Miura, Yukiko

東京大学大学院新領域創成科学研究科
社会文化環境学専攻

要旨

近年サンゴ礁の減少は著しく、緊急の対策が強く求められている。電流がサンゴの成長を促進するという報告は多数あるが、その詳細には不明な点が多い。そこで本研究では、電流がサンゴの幼生の着生、骨格成長、光合成、呼吸に与える影響を検証する目的で、野外実験及び室内実験を実施し、電流がサンゴに与える影響について考察した。

電流や電着物質がサンゴの幼生の着生数に与える影響について検証した野外実験では、電着物質を析出させておいた金属網と、素焼きタイルを着生基盤として用意し、それぞれの基盤への着生数を比較した。その結果、電流条件と着生数の間には、明確な関係は見られなかったが、単位面積当たりの着生数は、金属網が素焼きタイルの5倍の値を示し、電着物質を析出させた金属網の着生基盤としての適正が示された。

さらに電流が骨格成長に与える影響について把握するため、野外実験と室内実験を実施した。野外実験では、鉄筋で作製した棚を用意して、沖縄県石垣島の海域に設置した。それぞれの棚の電流条件を変えてサンゴの成長率を比較した。その結果、電流条件が強くなるほどサンゴの成長率は低くなる傾向があった。室内実験では、飼育条件を同一にした2つの水槽で、電流条件を変えてサンゴを飼育した。サンゴの重量変化率を比較したところ、 $0.05\text{A}/\text{m}^2$ の電流条件の実験では、電流を流した水槽の方が、 $0\text{A}/\text{m}^2$ の水槽よりもサンゴの重量変化率が低かった。一方、その1/10である $0.005\text{A}/\text{m}^2$ の電流条件の実験では、電流を流した水槽の方が、重量変化率が高いという結果が得られ、強い電流はサンゴの骨格成長に悪影響を与えるが、微弱電流は正の影響を与える可能性が示唆された。

最後に光合成に電流が与える影響を室内実験で検討するため、D0及びクロロフィル蛍光を測定した。電流条件を変えてD0を測定した実験では、D0変化率の変動と電流条件の間には明確な関係は見られなかったが、クロロフィル蛍光を測定した実験では、先ほどの重量変化率を考察した実験と同様に、 $0.05\text{A}/\text{m}^2$ の電流条件の実験では電流を流した水槽のサンゴの方が、 $0\text{A}/\text{m}^2$ の水槽よりも、光合成速度に比例する値が低いのに対して、 $0.005\text{A}/\text{m}^2$ では電流を流した水槽の方が高かった。

以上の結果から、電着物質が着生基盤として適していることが示された。こうした電着物質を析出させた基盤を有効活用することで、サンゴ礁再生の試みを効果的におこなえるものと考えられた。電流がサンゴに与える影響は、単純ではなくある面では正の、ある面では負の影響を与え、電流条件によって影響が異なる可能性も示唆された。これらはサンゴの部位や生活史ごとに電流の影響が異なることを示唆している。また今回の実験において、 $0.05\text{A}/\text{m}^2$ の電流がサンゴの骨格成長や光合成に負の影響を与える結果となったが、既往の研究ではこれよりも非常に強い電流を用いている場合も多く、電流によりサンゴの成長促進を行う上で重要な知見が得られた。

目次

第 1 章	序論	1
第 1 節	研究の背景	1
1.1.1	サンゴとサンゴ礁	1
1.1.2	サンゴ礁の危機	2
1.1.3	サンゴ礁再生の試みと既往の研究	3
1.1.4	電流とサンゴの成長の関係	4
第 2 節	研究の目的	6
第 3 節	研究の方法	7
第 4 節	本論文の構成	9
第 2 章	電流がサンゴの幼生の着生数に与える影響の検証	10
第 1 節	実験場所	10
第 2 節	実験方法	11
第 3 節	実験結果	16
第 4 節	2 章のまとめと今後の課題	25
第 3 章	電流がサンゴの骨格成長に与える影響の検証	26
第 1 節	野外実験	26
3.1.1	実験方法	26
3.1.2	実験結果	29
3.1.3	3.1 章のまとめと今後の課題	48
第 2 節	室内実験	49
3.2.1	実験方法	49
3.2.2	実験結果	61
3.2.3	3.2 章のまとめと今後の課題	75
第 4 章	電流がサンゴの光合成に与える影響の検証	80
第 1 節	DO 測定実験	80
4.1.1	実験方法	80
4.1.2	実験結果	84

4.1.3	4.1 章のまとめ	95
第 2 節	クロロフィル蛍光測定実験	96
4.2.1	実験方法	96
4.2.2	実験結果	103
4.2.3	4.2 章のまとめと今後の課題	109
第 5 章	まとめと今後の展望	113
参考文献		
謝辞		

第 1 章 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 サンゴとサンゴ礁

サンゴ礁は、サンゴを主体とする造礁生物によって形成される地形をさす。一般的に、熱帯亜熱帯海域は貧栄養環境である場合が多いが、サンゴ礁海域は、生産性が高く¹⁾熱帯雨林並みの生産力を持つと言われている。サンゴ礁は、その起伏に富んだ構造から様々な生物の住処となっている。写真 1-1 に、沖縄県石垣島のサンゴ礁の写真を示す。この写真から、サンゴ礁の起伏に富んだ様子や、魚介類が生息する様子がみてとれる。たとえ外洋を回遊する大型の魚類でも、幼稚子期にサンゴ礁を活用する魚種は多いことから、サンゴ礁は生物多様性に寄与しており、沿岸の生態系にとって重要である。また、サンゴ礁周辺は、豊かな漁場であり、それ以外にも、ダイビング等のレクリエーションの場所として、地域に重要な産業を提供している。わが国は、先進国の中では数少ないサンゴ礁保有国で、琉球列島を中心に約 96,000ha のサンゴ礁が分布しており、サンゴ礁再生に関する研究を率先して推進する必要がある。

豊かなサンゴ礁にとって重要であるサンゴは、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あり、渦鞭毛藻類に属する褐虫藻を体内に共生させている。図 1-1 にサンゴの構造を掲載した²⁾。褐虫藻は、サンゴの老廃物を吸収して、光合成をおこない、エネルギーをサンゴに供給する。サンゴは、褐虫藻の光合成から、成長に必要な栄養の 8 割を得ると言われており、褐虫藻の存在はとても重要である。また、褐虫藻が光合成により生産した有機物のおよそ半分は、粘液の形で体外に排出しているという報告もあるくらいに、サンゴからはミューカスと呼ばれる粘液が多量に出て、これはサンゴ礁に住む生物の有機物源となる。サンゴ礁は貧栄養海域に発達するにも関わらず、高い生物多様性を維持できているのは、こうしてサンゴ（および褐虫藻）が生産者としての役割を果たしているためである。

また、サンゴは炭酸カルシウムの骨格形成のための石灰化を通じて、地球規模の無機炭素循環に関与しており、地球温暖化の原因となる二酸化炭素の固定に寄与することが示されている³⁾。



写真 1-1 沖縄県石垣島のサンゴ礁

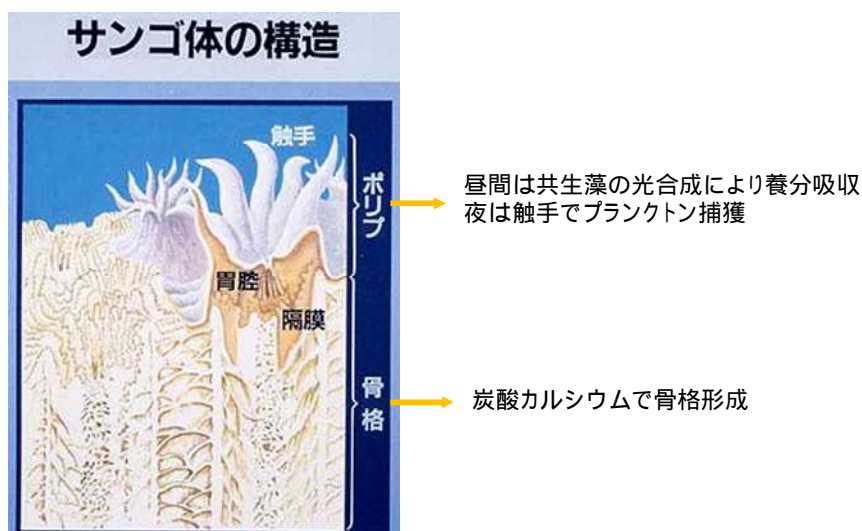


図 1-1 サンゴの構造（日本サンゴ礁学会 HP から引用）

1.1.2 サンゴ礁の危機

近年、世界中のサンゴ礁で、サンゴの死滅とサンゴ礁環境の変化が報告されている。その原因の一つとしては、サンゴを捕食するオニヒトデやシロレイシガイダマシ属の巻貝類などの食害生物の大発生が挙げられる⁴⁾。テレビなどで騒がれるのはオニヒトデが多いが、カイメンのテルピオスも広範囲のサンゴを覆い殺すことがある。

また、近年特に騒がれ始めたホワイトシンドローム（WSD）のような原因不明の病気も原

因の一つとして挙げられる。ホワイトシンドロームに罹患したサンゴは、ポリプが白く変色し、やがては群体全体に拡大して死滅してしまう。

食害生物や病気などの自然の被害以外に、人為的な原因の影響も大きいと考えられる。人間による陸域の開発により、サンゴ礁海域に堆積物や栄養塩の流入が増えると、サンゴは衰退してしまう。堆積物はサンゴを窒息させ、栄養塩は海藻類などに対する競争上の優位を失わせる。琉球列島では、開発現場、農地などから流出する国頭マージ等が問題となり、赤土汚染と呼ばれている。

また、サンゴに対する最大の脅威の一つとして考えられているのが水温の上昇である。サンゴと褐虫藻類の共生関係は、水温・塩分・光などの環境因子に敏感であり、それらが適応範囲を外れると、サンゴ体内の褐虫藻の劣化⁵⁾⁶⁾や体内からの褐虫藻の放出が生じ⁷⁾、サンゴの白い骨格が透けて見える、白化状態となる。写真 1-1 に、沖縄県石垣島の海域で撮影した白化状態のサンゴの写真を示す。白化状態では、サンゴはまだ生きているが、白化はサンゴの生理状態を害し⁸⁾持続するとサンゴは死滅する。1997～1998 年には、世界的な高水温に伴い、多くのサンゴが白化・死滅した。また、2007 年夏季に観測された高水温に伴う大規模な白化では、1998 年以上のサンゴが死滅したと言われている。日本でも、琉球列島で壊滅的な被害を受けた。

白化のようなストレス状態になったサンゴはどのような生理的応答をするのか、ということについては、分子生物学的、遺伝子学的なレベルでも研究がおこなわれている¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾。こうした研究は、サンゴの生態を理解するのにとても重要であると思われる。



写真 1-1 沖縄県石垣島の白化したサンゴ

1.1.3 サンゴ礁再生の試みと既往の研究

以上の背景を受けて、サンゴ礁再生の試みがなされてきた。現在おこなわれているサン

ゴ礁再生の試みは、以下のように大別される⁹⁾。

- (1) 基質投入
- (2) 浅場造成
- (3) 表面加工
- (4) 物理環境の多様化
- (5) 海水交換の促進
- (6) 幼生放流
- (7) 幼サンゴの移植
- (8) サンゴ片の移植
- (9) サンゴ群集の移築

再生の試みは、底質や環境の改善によるものや、人工構造物に対して加工を施して、サンゴ群集の発達を促進させることなどがある。また、サンゴ礁が発達している海域の物理環境やサンゴの生態についての理解、サンゴ礁海域の栄養塩環境や、サンゴ礁内外での海水交換、物理環境の特性について研究がおこなわれてきた^{13) 14) 15) 16)}。こうした知見は、既存のサンゴ礁再生の技術を効果的におこなうのに重要である。しかし、現在のサンゴ礁を取り巻く危機的状況を考えると、こうした既存の方法を効果的におこなうことに加えて、サンゴ礁をより短い時間で再生するための新たな手法の開発や、サンゴのストレス耐性を向上させる技術の開発が急務の課題であると思われる。

1.1.4 電流とサンゴの成長の関係

(1) 電流がサンゴに影響を与える可能性を示唆する事例

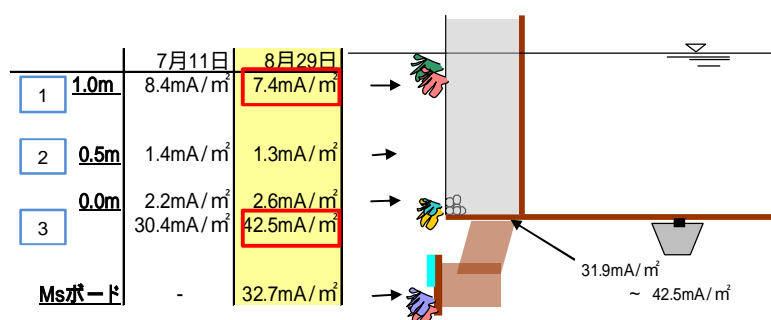
近年、電流がサンゴの成長を促進する可能性が示唆されている。図 1-2 は、沖縄県竹富島竹富東港にある浮棧橋の写真である。この浮棧橋には電気防食によって電流が流れており、棧橋の側面にはサンゴが成長している様子が観察されている。図 1-3 の上図は、この浮棧橋の側壁部の模式図である。下図には、橋の側面に活着したサンゴをプロットした図を掲載した。この橋は、設置して半年が経過後に、サンゴの幼生が自然着生している様子が見られ、4 年が経った現在では側壁部に多数のサンゴが生育している。2005～2007 年の、夏季の浮き棧橋周辺の平均水温は約 29 と高く、2 週間以上連続して 30 を超えていた。この状況はサンゴにとっては非常に厳しい状況だが、浮き棧橋のサンゴは成長を続けた。また、竹富東港内の、岸壁を含む施設でサンゴが生育しているのはこの浮棧橋のみであった。

電場測定の結果、図 1-3 の上図に示したように、橋の側面でも場所によって電場が異なり、また生育しているサンゴの数も異なることがわかった。2007 年 8 月 29 日の電場測定の結果と、棧橋に生育しているサンゴの数の計測の結果から、橋の側面でも、特に赤い四角で示した 7.4mA/m^2 と 42.5mA/m^2 のところに、サンゴが多く生育していることがわかった。図中の 7.4mA/m^2 の部分をエリア 1、 1.3mA/m^2 のところをエリア 2、 42.5mA/m^2 のところをエ

リア 3 として、図中に青い四角で示す。それぞれのエリアに生育していたサンゴの数をグラフにして、図 1-3 に示す。これを見ると、エリア 3 に生育したサンゴの数が最も多く、電流値とサンゴの生息分布との間に正の関係があることが推測される。



図 1-2 沖縄県竹富島にある浮き橋



電流密度の大きいところにサンゴが集中する傾向

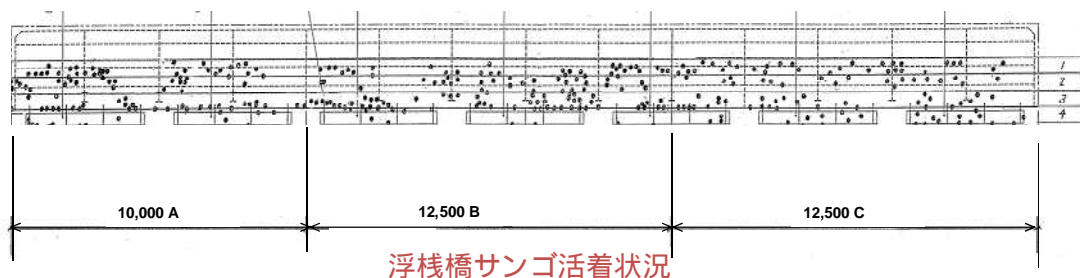


図 1-3 浮棧橋の模式図

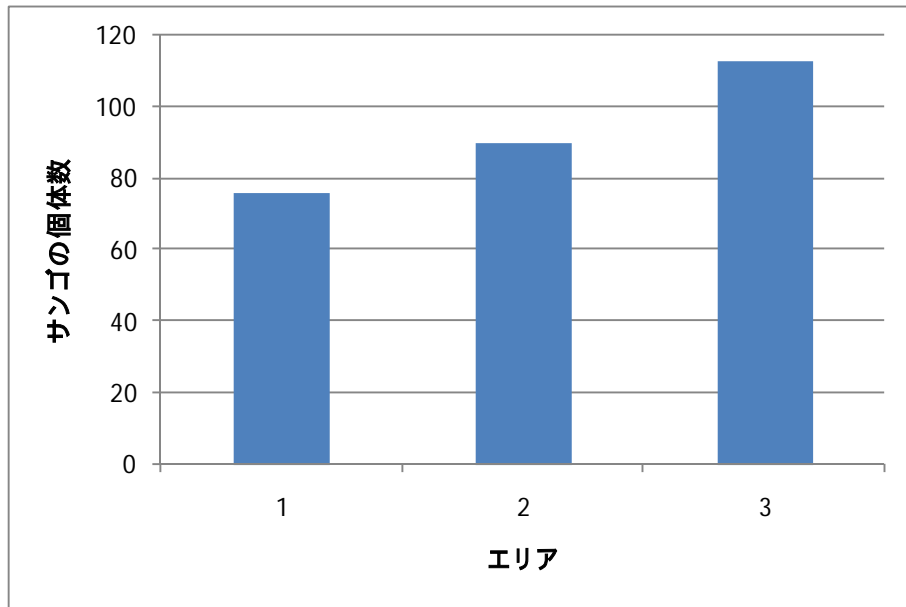


図 1-4 エリア 1、2、3 でカウントされたサンゴの数

(2) 既往の研究と現状

これまでも、海中ケーブルのような、電流の流れる場所の傍ではサンゴの成長が良く、経験的に、電流がサンゴの成長を促進するのではないかと言われてきた。海外では、鉄筋で作製した構造物を海中に設置して電流を流し、そこにサンゴを移植する試みが数多くおこなわれている¹⁷⁾。こうした試みの第一人者である、Goreau らの研究を紹介する。Goreau らは、電流が流れている鉄鋼物上で生育したサンゴは、自然のサンゴと比較して、褐虫藻の密度が高く、増えた褐虫藻の光合成によってより多くの栄養がサンゴに供給されて、成長が促進される可能性を示した¹⁸⁾。このように、電流がサンゴに与える影響について研究はされているものの、先ほど述べたような試みは失敗例も多く、また電流がサンゴに与える影響については科学的に検証した研究例も少ないために、電流は本当にサンゴの成長を促進するのかどうか、また、促進する場合どのように作用するのかについては、不明ことが多いのが現状である。もし電流がサンゴの成長を促進することや、そのメカニズムが明らかになれば、既存の再生手法と組み合わせ、サンゴ礁再生やサンゴの養殖の技術として効果的に利用できる可能性がある。また、先ほどの竹富島の浮き棧橋の例では、棧橋に生育したサンゴは、夏の高水温の期間にも死亡せずに成長を続けていた。こうしたことから、サンゴのストレス耐性を向上させる可能性もあるのではないかと考えた。ストレス耐性の向上については、強い水流がサンゴの白化を抑制する可能性を示唆した既往の研究がある¹⁹⁾。水流と同様に電流にもそうした効果がある可能性も否定できない。

1.2 研究の目的

以上のような背景から、本研究では電流がサンゴに与える影響について様々な角度から検証するために、電流の有無がもたらす影響について、サンゴ幼生の着生、骨格形成、呼吸や光合成など、それぞれの項目ごとに、現地観測や室内実験について検証をおこない、各々の関係を明らかにすることを目的とした。

1.3 研究の方法

(1) 電流がサンゴに与える影響に関する仮説

電流がサンゴに与える影響については、不明なことが多いために、本研究では、まずサンゴの生態のどの部分に、どのように影響するかということについて、3つの仮説を立てた。

サンゴの生活史を段階的に示した図 1-5 を用いて、3つの仮説を説明していく。サンゴは、有性生殖と無性生殖の両方を行って増殖・成長する動物である。有性生殖では、親のサンゴ群体から放卵放精が起こった後、受精し発生が進んだものが幼生となり、海底や岩、構造物の壁などに着生する。着生した幼生は、炭酸カルシウムの骨格を形成して固着する。先に紹介した竹富島の浮き桟橋の例で、桟橋の中でも電流密度の高いところにより多くのサンゴが生育していたという事実から、仮説の 1 つ目として、電流はサンゴの幼生の着生に影響を与えるのではないかと考えた。また、固着した幼生は、無性生殖で分裂し、炭酸カルシウムの骨格を発達させて成長していく。電流の流れるところでは、サンゴがよく成長するという経験的事実から、仮説の 2 つ目として、電流はサンゴの骨格成長に影響を与えるのではないかと考えた。更に、サンゴは成長に必要な栄養のほとんどを、共生藻である褐虫藻から得ていると言われていることから、仮説の 3 つ目として、電流はサンゴ（と褐虫藻）の光合成に影響を与えるのではないかと考えた。

3つの仮説は、図 1-6 に整理して示す。

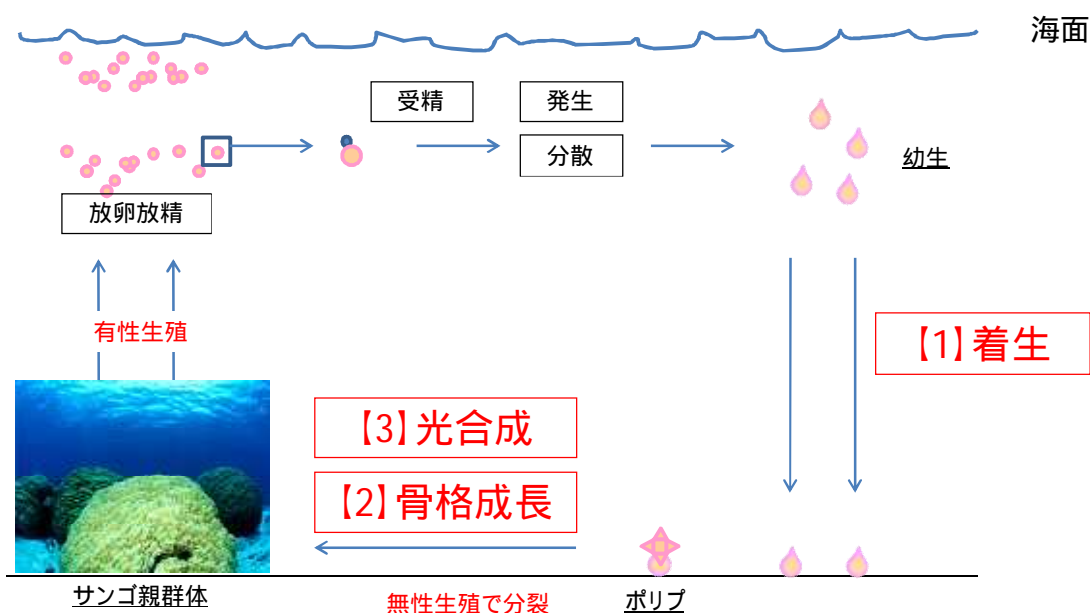


図 1-5 サンゴの生活史

仮説【1】幼生の着生

仮説【2】骨格成長

仮説【3】サンゴと共生藻の光合成や呼吸

図 1-6 電流がサンゴに与える影響に関する仮説

(2) 研究の手法

本研究では、最終的に電流がサンゴに与える影響について検証するために、図 1-6 に示した 3 つの仮説を検証する野外実験及び室内実験を計画した。サンゴの着生、骨格成長、光合成を評価する項目を整理し、図 1-7 に示す。まず、電流がサンゴの着生に与える影響は、野外実験で検証した。電流条件を変化させて、電流条件とサンゴの幼生の着生数との関係や、着生基盤の種類と着生数の関係について考察した。続いて、電流がサンゴの骨格成長に与える影響は、野外実験及び室内実験で検証した。野外実験では、サンゴの骨格成長はサンゴの大きさ（成長率）で評価した。室内実験では、サンゴの骨格成長はサンゴの重量で評価した。いずれの実験でも、電流条件を変化させて、電流条件とそれぞれの項目の関係を考察した。また、電流が光合成に与える影響は、2 種類の室内実験で検証した。評価項目は、DO 変化率とクロロフィル蛍光の 2 種で実験をおこない、電流条件とそれぞれの項目の関係を観察した。

こうして、それぞれの実験から得られた結果をもとに、本研究では電流がサンゴに与える影響について考察をおこなった。

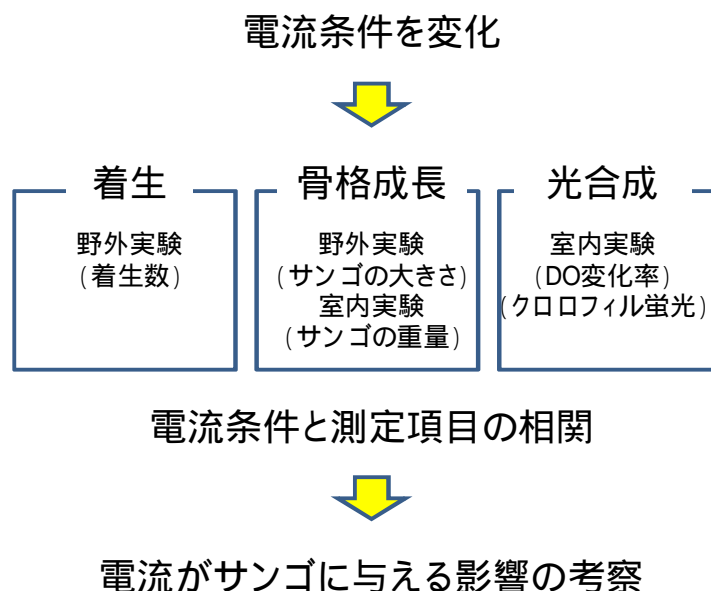


図 1-7 研究の方法

1.4 本論文の構成

第 1 章では、サンゴやサンゴ礁について説明した上で、それらを取り巻く環境や、サンゴ礁の危機的状況を整理した。また、現在おこなわれているサンゴ礁再生の試みを挙げ、本研究の目的である電流がサンゴの成長に与える影響を検証する必要性について説明した。さらに、電流がサンゴに与える影響について仮説を立て、本研究の研究手段の概要について解説した。第 2 章では、本章で説明した電流がサンゴに与える影響の、仮説の 1 つ目であるサンゴの幼生の着生数と電流の関係を検証するための野外実験や、その結果について説明する。第 3 章では、電流とサンゴの骨格成長に関する仮説 2 を検証するためにおこなった野外実験を室内実験の方法や結果を示す。また、第 4 章ではサンゴの光合成に電流が与える影響に関する仮説 3 を検証するべくおこなった 2 種の室内実験の方法や結果について説明する。最後に、第 5 章において、第 2 から 4 章の実験結果を整理し、それらの結果から電流がサンゴに与える影響についてまとめる。

第 2 章 電流がサンゴの幼生の着生数に与える影響の検証

2 章の概要

サンゴは、有性生殖と無性生殖の両方をおこなって、成長していく動物である。有性生殖では、親のサンゴ群体から放卵・放精が起こって、受精後発生が進み幼生になったものは海底や岩、構造物の壁に着生し、変態を進めてポリプとなる。また、この過程で、幼生は炭酸カルシウムの骨格を作って固着する。第 1 章で紹介した、沖縄県竹富島の電気防食された栈橋の事例では、周りの環境と比較して、栈橋に多くのサンゴが育っていた。また、栈橋の中でも流れている電流が相対的に強い場所に、より多くのサンゴが成長していた。このことから、電流がサンゴの幼生の着生に関係している可能性が考えられる。また、海水中に陽極と陰極を設置して電流を流すと、陰極上には炭酸カルシウムや水酸化マグネシウムといった電着物質が析出してくる²⁰⁾。サンゴは、着生後、炭酸カルシウムの骨格を形成して固着し、その後も炭酸カルシウムの骨格を発達させて成長していく。そのため、電氣的に沈降する物質がサンゴの電極に沿った成長を促進する可能性を示した研究もある。そこで本研究では、電流や電着物質とサンゴの幼生の着生数との関係について検討するために、野外実験を行った。

野外実験は、沖縄県石垣島の海域で実施した。着生基盤として、電着物質を析出させた金属網と素焼きタイルを複数組用意して、それぞれの基盤への着生数を定期的にモニタリングした。また、金属網には異なる強さの電流を流して実験をおこなった。

2 種の基盤に着生した幼生の数や、電流値毎の着生数を比較することで、電流や電着物質がサンゴの幼生の着生に与える影響について考察した。

2.1 実験場所

実験は、沖縄県石垣島の玉取でおこなった(図 2-1)。玉取は、石垣島の中でも集落がなく、水質がきれいでサンゴ礁が発達している場所である。



図 2-1 沖縄県石垣島 玉取

2.2 実験方法

(1) サンゴの幼生を着生させる基盤

今回の実験では、サンゴの幼生を着生させるための基盤として、金属網と素焼きタイルの 2 種類を用意した。金属網の構造は、図 2-2 左の通りである。金属網は、写真 2-1 に示した様に、海水に浸した状態で、外部電源を使用して $3A/m^2$ 程度の電流を約 1 か月通電させて、電着物質の析出を促進させた。その後、 $0.5A/m^2$ まで電流を下げて、析出層外面に $CaCO_3$ を主体に析出させた。こうして電着物質を析出させた金属網 4 枚と、同じサイズの素焼きタイル 2 枚を組み合わせ、図 2-2 右図の様に塩ビ管の枠に固定した（写真 2-2）。これを 8 組用意して、実験開始の 1 か月前に自然海域に設置して、石灰藻や自然のバクテリアなどを繁殖させた。造礁サンゴ類の着生・変態機構については、未だ未解明の部分が多いが、着生基質上の生物（バクテリア、珪藻、藻類など）が、サンゴをはじめとする刺胞動物の着生を誘引すると考えられており²²⁾、基盤の自然海域での養生は重要である。図 2-4 の様に、8 組の内 6 組にはアルミニウムを設置し、イオン化傾向の差によって、外部の電源を使用せずに金属網に電流が流れるようにした。

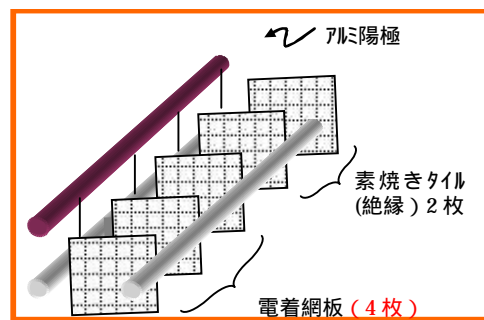
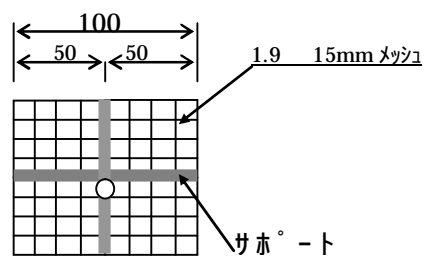


図 2-2 金属網のサイズ (mm) と基盤の組み合わせ

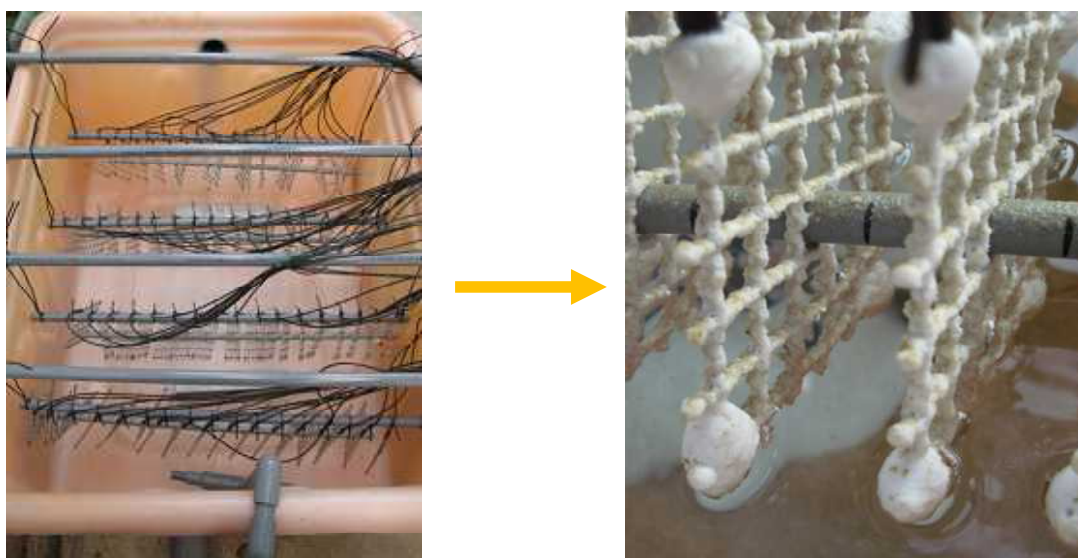


写真 2-1 金属網に電着物質を析出させた様子

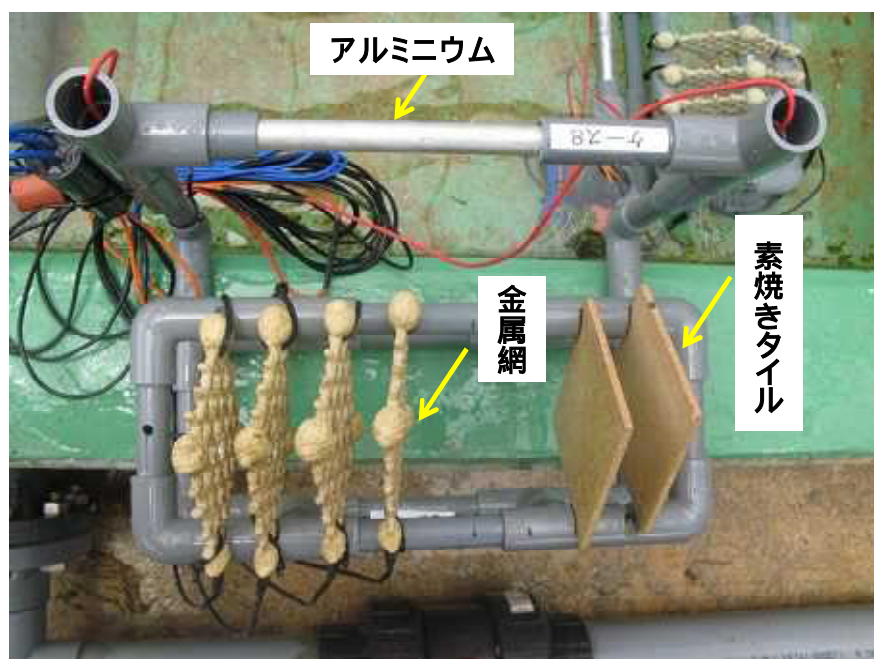


写真 2-2 金属網と素焼きタイルを組み合わせた実験基盤

(2) 実験試料

サンゴのスリックは、サンゴの産卵のあった 2008 年 5 月 20 日の翌朝に石垣島の海域で集めて、20L のポリ容器へ入れ、その後速やかに玉取に運んで実験に使用した。

サンゴの幼生は、ウスエダミドリイシ、スギノキミドリイシ、ハイマツミドリイシの 3 種を使用した。2008 年 5 月 20 日の産卵当日に、石垣島の海域のサンゴにネットを被せて、産卵したバンドルを採取し、玉取のサンゴ養殖業者 CP ファームで種類別に受精させ、幼生へと育成した後、実験に使用した。3 種を合わせて、およそ 17 万匹の幼生を実験に使用した。

(3) 幼生着生実験の手順

実験は、図 2-3 の順番でおこなった。まず、予め用意しておいた 8 個の基盤を実験場所の玉取に設置した。基盤は、図 2-4、写真 2-3 に示した様な棚の中に設置した。基盤を設置した後の様子を写真 2-4 に示す。設置した 8 個の基盤の内、6 個にはアルミニウムが設置しており、イオン化傾向の差によって金網に電流が流れるようになっていた。各基盤を区別するために、ケース 1~8 と番号を振った。各基盤の金網に流れる電流の条件は、4 ケースとして以下の様に設定した。

ケース 1 と 2 : 電流なし

ケース 3 と 4 : $0.01\text{A}/\text{m}^2$

ケース 5 と 6 : $0.05\text{A}/\text{m}^2$

ケース 7 と 8 : $0.1\text{A}/\text{m}^2$

基盤を設置した後、5月21日に、予め用意しておいた良質なスリックを上から散布した。5月22日にはサンゴの幼生17万匹を上から投入して、その後、棚全体にネットを被せた。1週間が経過したら、ネットを外して、金属網と素焼きタイルに着生している幼生の数のモニタリングを開始した。基盤に着生した幼生の数は、目視によるカウントでモニタリングし、作業は石垣島の地元の方に依頼しておこなった。着生数のモニタリングは以下の日におこなった。

第1回目：2008年5月28日（幼生投入から1週間後）

第2回目：2008年6月11日（幼生投入から3週間後）

第3回目：2008年7月12日（幼生投入から7週間後）

第4回目：2008年8月30日（幼生投入から15週間後）

第4回目のモニタリングのときの写真を、モニタリングの様子として写真2-5、2-6に掲載する。

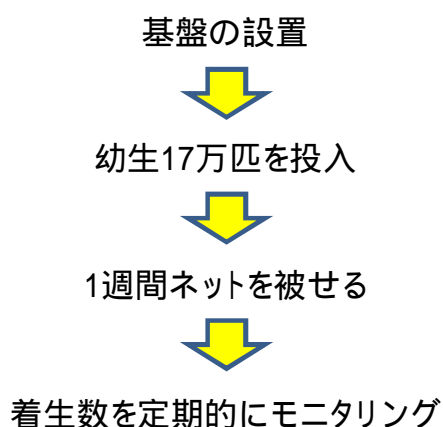


図2-3 実験の手順

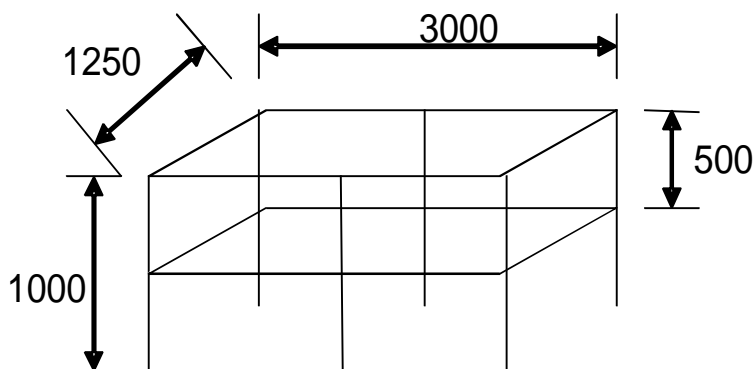


図2-4 幼生を着生させる基盤を設置する棚（mm）



写真 2-3 幼生を着生させる基盤を設置する棚

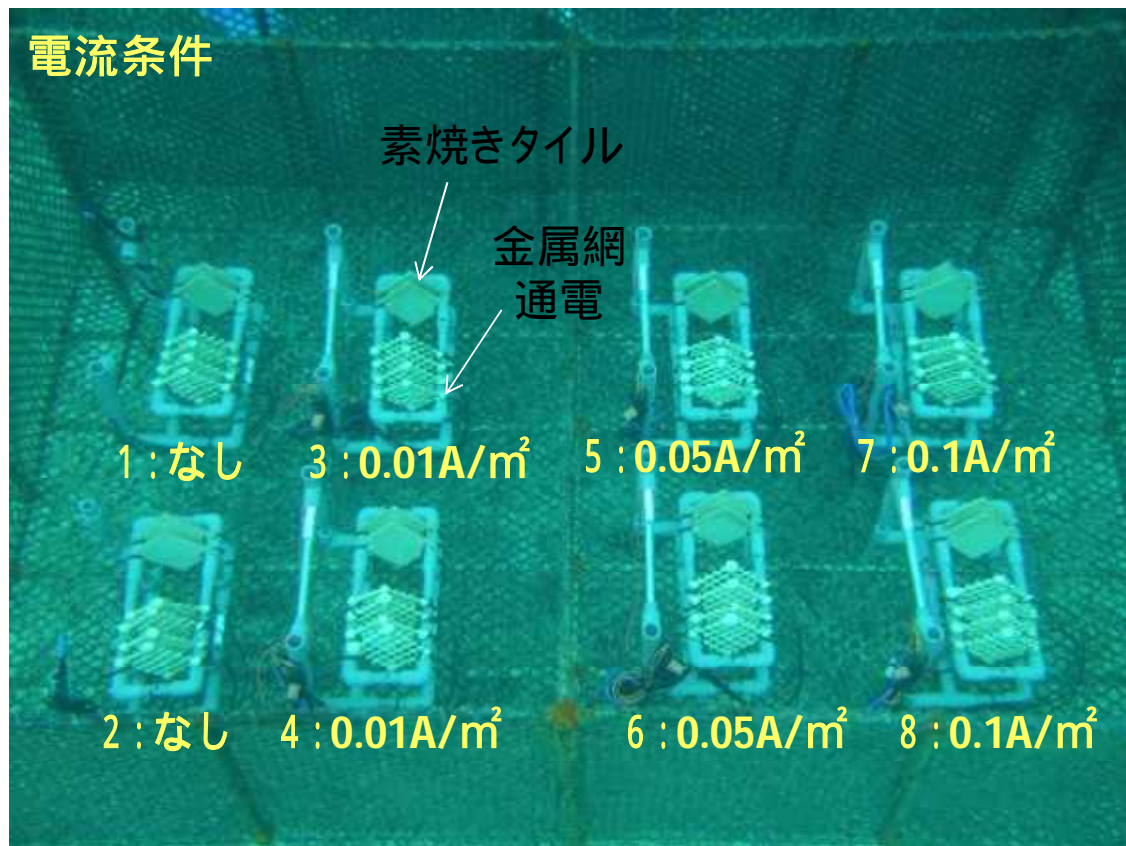


写真 2-4 実験の様子とケース 1～8 の電流条件
写真は、左下が北となる。

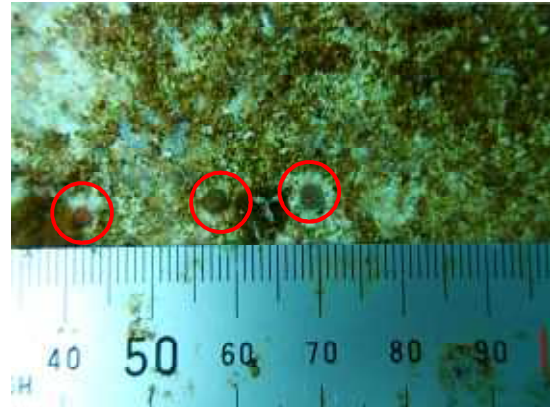
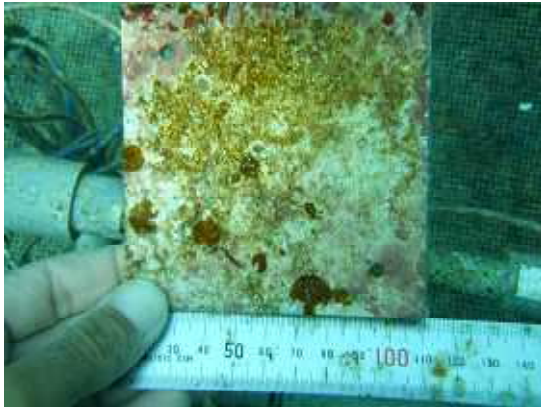


写真 2-5 素焼きタイルのモニタリング時の様子

4 回目のモニタリングのときの写真。右側のアップの写真では、赤丸の中にサンゴ幼生が集まって着生しているのが確認できる。

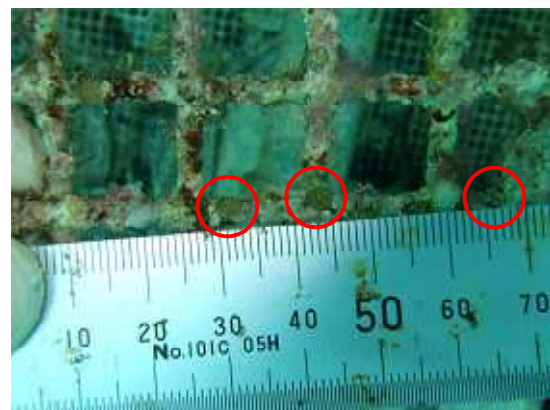


写真 2-6 金属網のモニタリング時の様子

4 回目のモニタリングのときの写真。右側のアップの写真では、素焼きタイルと同様に赤丸の中にサンゴ幼生が集まって着生しているのが確認できる。

2.3 実験結果

第 1 回目～4 回目の着生数の計測結果を、素焼きタイルは表 2-1 に、金属網は表 2-2 に示す。また、各モニタリングの、素焼きタイルと金属網の計測数のグラフを、図 2-5～12 に示す。まず、素焼きタイルと金属網のどちらの基盤についても、第 1 回目～4 回目の着生数を見て、17 万匹の幼生を投入した割に、全体的に着生数が少ない様に感じた。幼生は下に向かって泳ごうとする性質があることから、投入した多くの幼生はネットのないかごの底面から抜け、海底に着生したことが考えられた。

第 1 回目の計測数を見ると、素焼きタイルよりも金属網の方が、全体的に着生数が低い結果となった。これは、金属網がメッシュの構造になっているために、確認しにくい幼生がいたのではないかと考えられた。また、着生時の幼生は 0.5mm 程度と非常に小さく、その

後も 1 年間で 7mm 程度にまでしか成長しないと言われている²³⁾ことから、水中での目視による計測が困難だった幼生が多くいたのではないかと思われた。幼生の、着生時の大きさを 0.5mm として、1 年間で 7mm まで成長すると仮定し、単純に計算すると、幼生は着生から 1 週間後は 0.6mm 程度、3 週間後は 1mm 程度、7 週間後は 1.5mm 程度、15 週間後は 2.5mm 程度に成長すると考えられる。素焼きタイル、金属網のどちらでも、第 1 回目から 4 回目の計測数を見ると、多くのケースで計測数が増加しているが、これは、この様に幼生が成長したことが関係している様に思われた。また、計測者が計測作業に慣れたことも関係している様に思われる。この様な理由から、第 4 回目の計測結果が最も信頼できるデータであると考え、考察を進めることにする。

まず、素焼きタイルについて、第 4 回目の計測数を考察していく。素焼きタイルの第 4 回目の計測数を見ると(表 2-1、図 2-8) 同じ電流条件の組み合わせ(ケース 1 と 2、ケース 3 と 4、ケース 5 と 6、ケース 7 と 8)で、計測数にばらつきがある。特に、0.1A/m²の電流条件の、ケース 7 と 8 の組み合わせでは、3 倍程度の差があり、実験結果の再現性が低いように思われた。また、ケース 3~8 では、電流の流れている金属網が近くに置かれているために、非常に微弱ではあるが、素焼きタイルも電流と電場の影響を受けていると考えられる。ケース 1~8 の計測値を比較するとケース 6、7 の計測数が多いことから、0.05A/m²と 0.1A/m²の電流条件が、他の条件よりも着生数が多いようにも思われる。しかし、ケース 5、8 の計測数を見ると他の条件と余り差がない。この様に、同じ電流条件の組み合わせで、計測数の再現性が低いことから、電流条件の違いによって、計測数に差が出たわけではないと考えられる。むしろ、流れや波といった環境要因によって、偶発的に着生数に差が出たものとみられた。

金属網の第 4 回目の計測結果は、素焼きタイルとは異なる結果となった(表 2-2、図 2-12)。電流なしの組み合わせ、ケース 1 と 2 では、計測数に 20 弱の差があるが、その他の 0.01、0.05、0.1A/m²の電流条件の組み合わせでは、計測数の差は 2 か 3 であり、実験結果の再現性が非常に高いように思われた。続いて、電流条件と結果の関係について考察する。各ケースの計測数では、0.05A/m²の電流条件のケース 5 と 6、0.1A/m²の電流条件のケース 7 と 8 の組み合わせの計測数が、他の電流条件の計測数と比較して、少し多い様に思われ、その差は 30 前後である。このことから、電流条件に関して、若干着生数が多くなっているようにも感じる。サンゴの幼生の着生は、科学的、物理的な特定の刺激によって起こると考えられているが、詳細は明らかにされていない。このため、電流が刺激となって着生が起こる可能性もあるかもしれない。だが、ケース 1 と 2 の計測値の差が 20 程度あることを考慮すると、ケース 5、6、7、8 が他のケースよりも着生数が多いのは、電流条件の違いではなく、環境要因によって生まれた差である可能性が高いと感じる。

次に、素焼きタイルと金属網で、第 1 回目から 4 回目の計測数の増加の程度を比較すると、様子が大きく異なっていることがわかった。4 回目の計測数から、1 回目の計測数を引き、その差を 1 回目の計測数で除したものを増加率として、表 2-3 左に示した。どのケースで

も、素焼きタイルよりも金属網の方が、増加率が非常に大きいことがわかる。素焼きタイルの、ケース 1~8 の増加率の平均と、金属網の増加率の平均を比較すると、素焼きタイルは 0.55 なのに対して、金属網は 22.69 と、約 40 倍の差があった。ただ、先にも述べたように、金属網の第 1 回目の計測数は、全体的に素焼きタイルよりも少ない。第 1 回目と 2 回目の計測数を比較すると、10 倍になっているケースもある。このため、第 1 回目と 4 回目の計測数から着生数の増加率を求めると、金属網の増加率を過大評価する可能性もある。念のために、4 回目の計測数から 2 回目の計測数を引いて、2 回目の計測数で除したものを増加率として計算し、表 2-3 右に示した。先ほどと同様に、平均を比較すると、素焼きタイルは 0.19 なのに対して、金属網は 1.53 と、それでも 10 倍近い差があることがわかった。モニタリングの回数を重ねる毎に、着生数の計測数が増えていくのは、先ほど述べた幼生の大きさや、測定者の測定作業への慣れの影響を考えると、自然なことであると考えられる。また、海域を浮遊していた自然の幼生が着生したことも考えられる。サンゴの産卵は 5 月~9 月にかけて、満月の夜前後におこなわれるが、2008 年は 5 月 20 日と 6 月 19 日が満月だったため、その前後では幼生が多く浮遊していたと予測される。しかし、素焼きタイルと金属網でここまで増加率の差があることには、基盤の特徴が関係していると考えられる。先ほどの、金属網の方が、第 4 回目の計測数の再現性が高かったということと共に、注目すべき点ではないだろうか。実験方法でも説明したが、金属網には予め $3A/m^2$ の強い電流をかけて 1 か月置くことで、電着物質を析出させている。その後、 $0.5A/m^2$ の電流値に切り替えて、炭酸カルシウム $CaCO_3$ を主体として析出させている。金属網の方が計測数の再現性が高いことや、増加率がかなり高いことから、電着物質を表面に析出させた金属網の方が、幼生が安定して着生でき、着生基盤として向いていると思われる。

続いて、素焼きタイルと金属網の計測数を比較していく。素焼きタイルと金属網では、表面積が異なるので、それぞれの表面積から、単位面積当たりの着生数 $polyps/cm^2$ を概算して、比較をおこなう。まず、素焼きタイルの両面の表面積は、1 辺が 10cm なので $200cm^2$ 。金属網は、1 辺が 10cm で、1 辺が 1.5cm のメッシュが 25 個あるので、 $87.5cm^2$ である。それぞれのケースで、素焼きタイルは 2 枚、金属網は 4 枚に着生した幼生の数をカウントしているの、素焼きタイルの総面積は $400cm^2$ 、金属網の総面積は $350cm^2$ と考えられる。この面積と、第 4 回目の計測数から求めた単位面積当たりの着生数 $polyps/cm^2$ を、表 2-4 に載せた。各基盤の値を比較すると、素焼きタイルは $0.05polyps/cm^2$ なのに対して、金属網は $0.25polyps/cm^2$ と、5 倍の値を示した。このことから、電着物質を表面に析出させた金属網の方が、幼生が安定して着生でき、着生基盤として適していると思われる。

金属網に析出させた炭酸カルシウムは、サンゴの骨格の成分であり、幼生は着生後、変態が進んで、この炭酸カルシウムの骨格（霰石）を作って固着・成長する。この過程は、着生後 70 時間程度で進行することを示した研究もあることから²³⁾、電着物質がこの過程に何らかの形で寄与して、今回の様な結果になったのではないかと考えた。

表 2-1 第 1 回目～4 回目のモニタリングの素焼きタイルの計測結果

	1回目	2回目	3回目	4回目
ケース 1	13	13	14	19
ケース 2	9	8	9	8
ケース 3	6	11	13	10
ケース 4	10	12	16	16
ケース 5	15	21	19	19
ケース 6	19	17	26	28
ケース 7	27	38	46	47
ケース 8	7	15	15	16

表 2-2 第 1 回目～4 回目のモニタリングの金属網の計測結果

	1回目	2回目	3回目	4回目
ケース 1	4	30	81	76
ケース 2	3	52	89	93
ケース 3	2	19	62	70
ケース 4	3	56	73	73
ケース 5	2	29	94	106
ケース 6	9	56	142	104
ケース 7	12	38	83	95
ケース 8	12	32	87	93

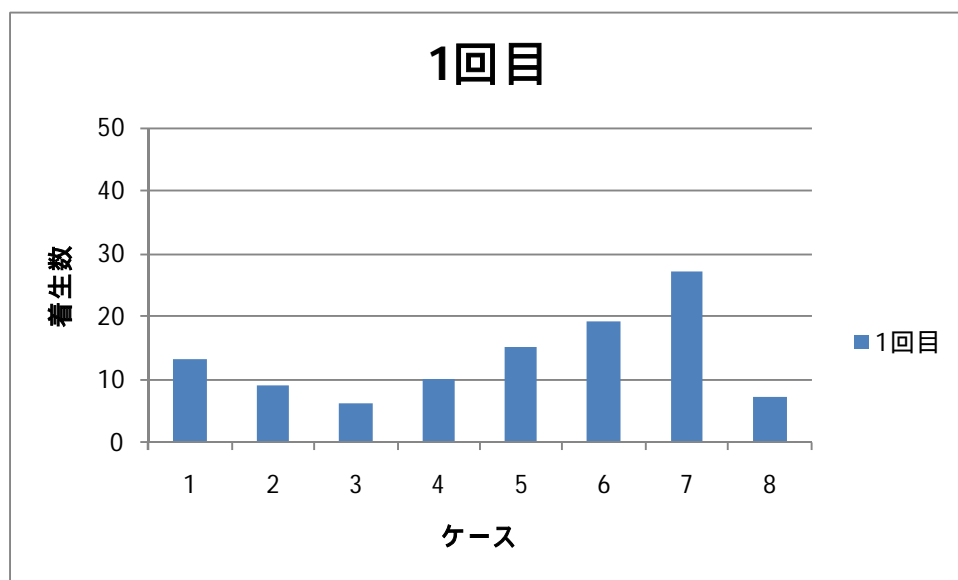


図 2-5 第 1 回目モニタリングの素焼きタイルの計測結果

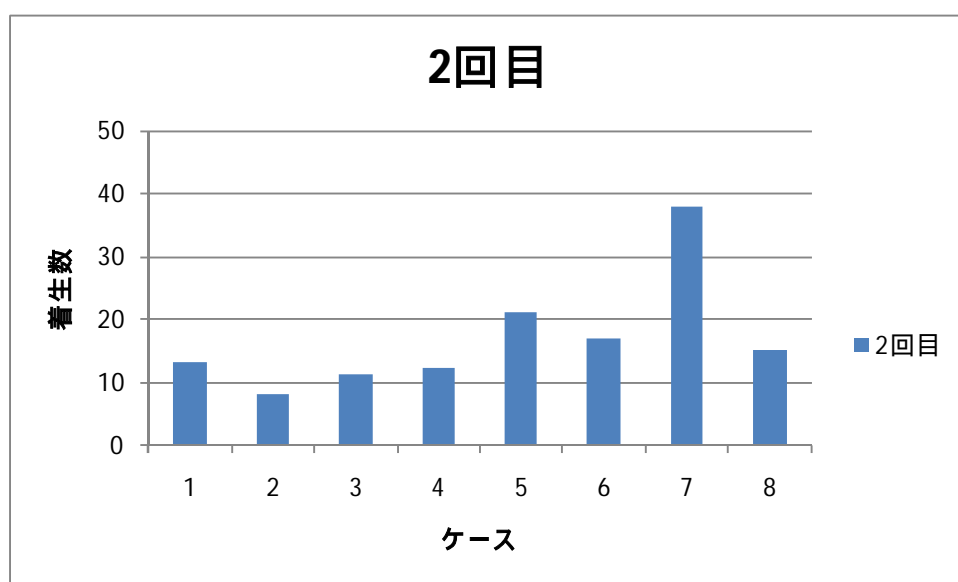


図 2-6 第 2 回目モニタリングの素焼きタイルの計測結果

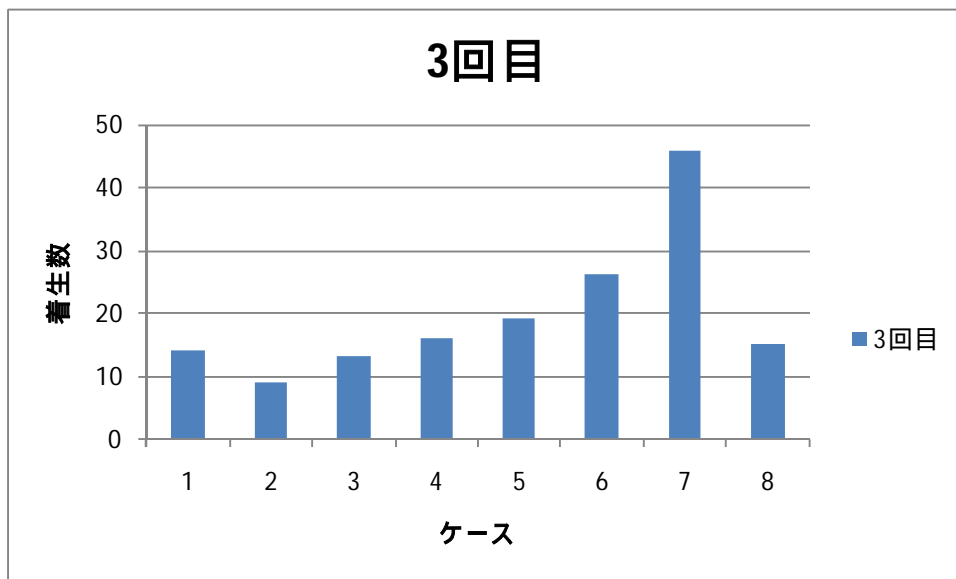


図 2-7 第 3 回目モニタリングの素焼きタイルの計測結果

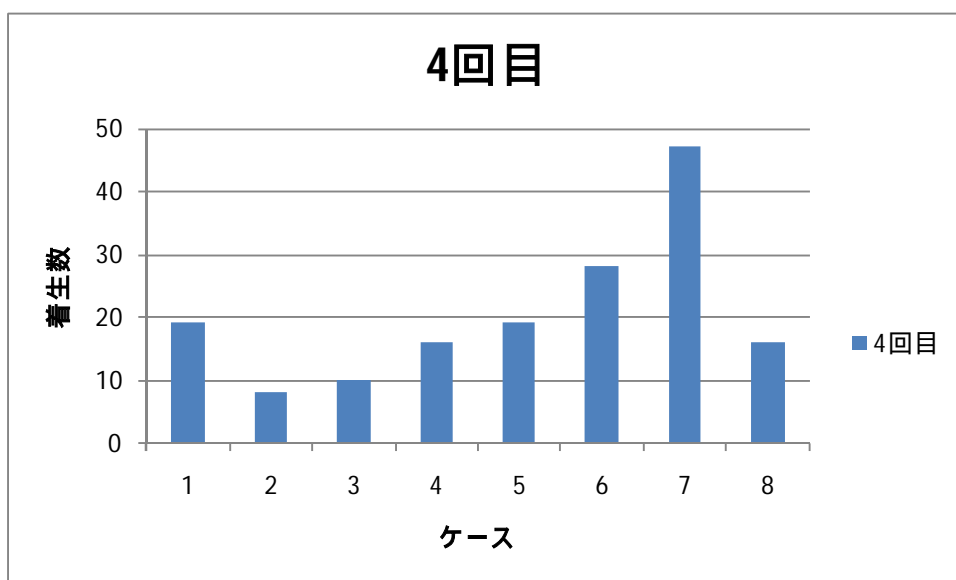


図 2-8 第 4 回目モニタリングの素焼きタイルの計測結果

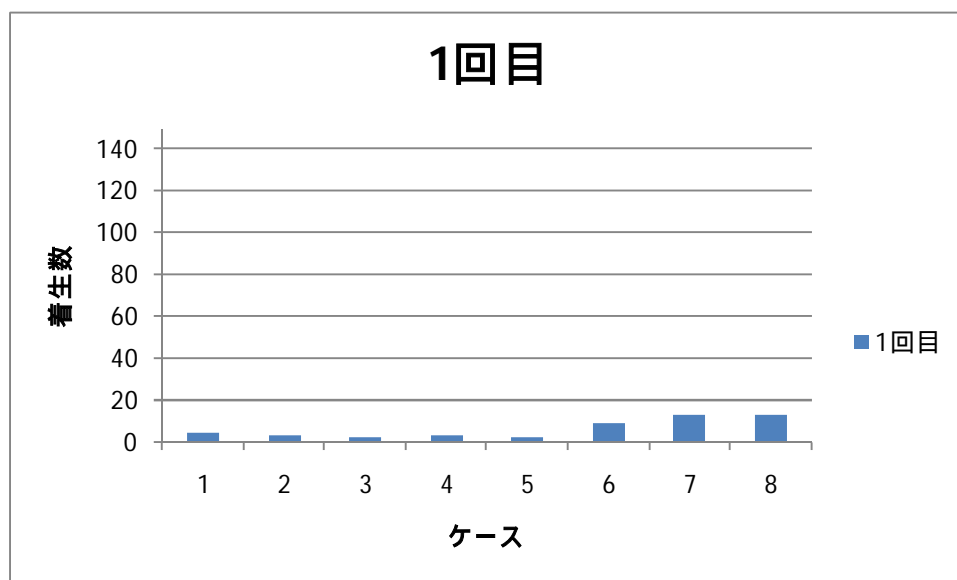


図 2-9 第 1 回目モニタリングの金属網の計測結果

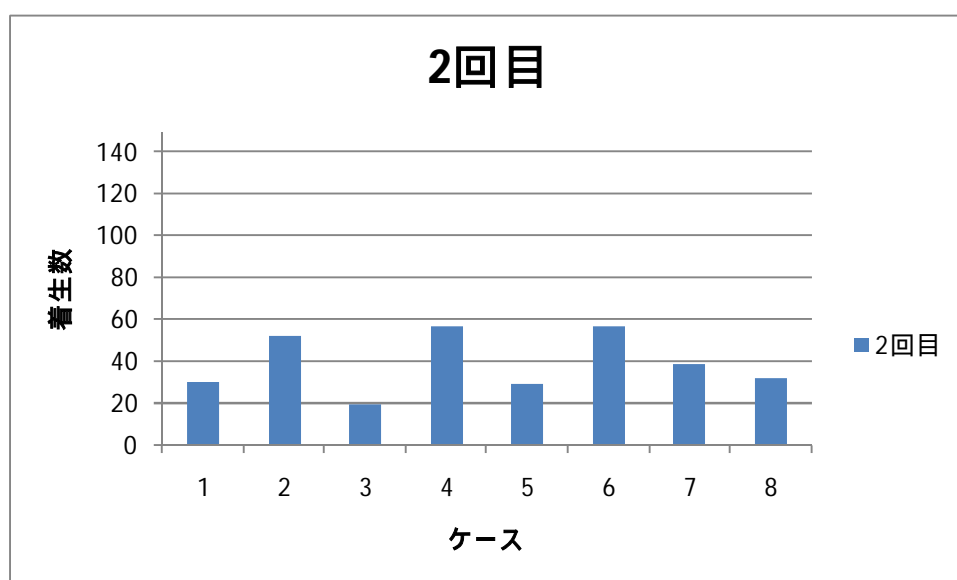


図 2-10 第 2 回目モニタリングの金属網の計測結果

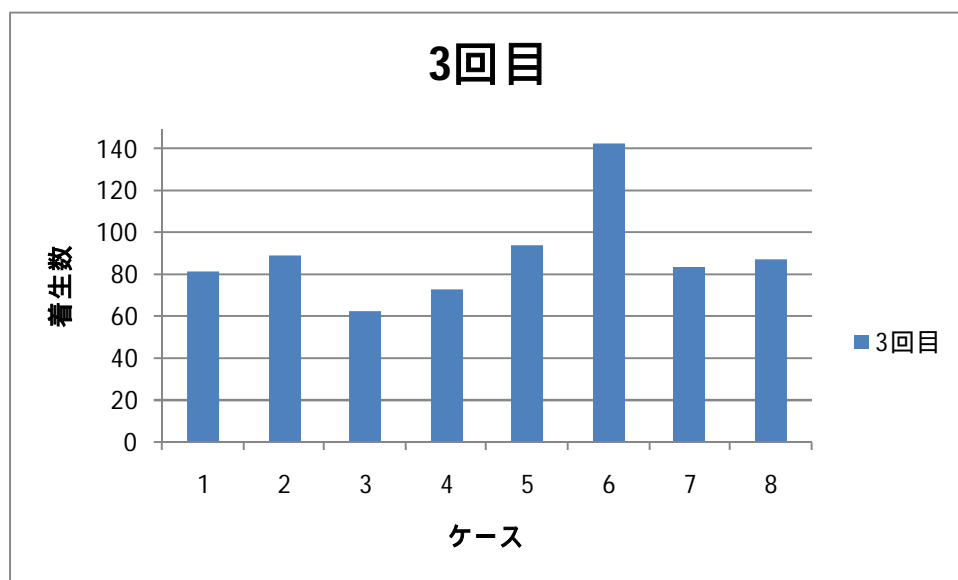


図 2-11 第 3 回目モニタリングの金属網の計測結果

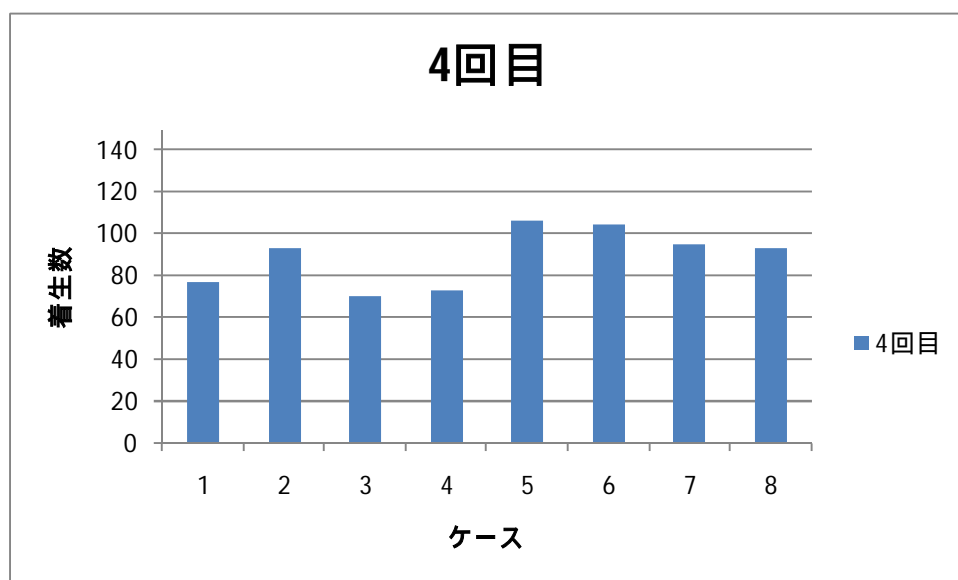


図 2-12 第 4 回目モニタリングの金属網の計測結果

表 2-3 着生数の増加率

左は、第 1 回目の計測数と第 4 回目の計測数から求めた増加率、右は、第 2 回目の計測数と第 4 回目の計測数から求めた増加率である。

	素焼き	金属網		素焼き	金属網
ケース 1	0.46	18.00	ケース 1	0.46	1.53
ケース 2	-0.11	30.00	ケース 2	0.00	0.79
ケース 3	0.67	34.00	ケース 3	-0.09	2.68
ケース 4	0.60	23.33	ケース 4	0.33	0.30
ケース 5	0.27	52.00	ケース 5	-0.10	2.66
ケース 6	0.47	10.56	ケース 6	0.65	0.86
ケース 7	0.74	6.92	ケース 7	0.24	1.50
ケース 8	1.29	6.75	ケース 8	0.07	1.91
平均	0.55	22.69	平均	0.19	1.53

表 2-4 単位面積当たりの着生数

第 4 回目の計測数を面積（素焼きタイル：200c m²、金属網：350c m²）で割って、単位面積当たりの着生数（polyps/c m²）を算出した。

	素焼き	金属網
ケース 1	0.05	0.22
ケース 2	0.02	0.27
ケース 3	0.03	0.20
ケース 4	0.04	0.21
ケース 5	0.05	0.30
ケース 6	0.07	0.30
ケース 7	0.12	0.27
ケース 8	0.04	0.27
平均	0.05	0.25

2.4 2章のまとめと今後の課題

2章では、電着物質を析出させた金属網と、素焼きタイルを着生基盤として石垣島の海域に設置して、サンゴの幼生を人工的に散布し、着生数を定期的にモニタリングした。どちらの基盤でも、モニタリングの回数を重ねる毎に着生数が増えるケースが多かったが、第1回目と4回目の計測数から求めた増加率で比較すると、金属網の増加率は、素焼きタイルの増加率の約40倍であった。また、第2回目と4回目の計測数から求めた増加率では、金属網の増加率は、素焼きタイルの増加率の約10倍だった。更に、第4回目の計測数を用いて、各基盤の単位面積当たりの着生数を求めたところ、金属網の値は素焼きタイルの値の5倍であった。これらのことは、電着物質を析出させた金属網の方が素焼きタイルと比較して着生基盤として適しているということを示唆しているように思われた。また、サンゴの幼生は、まず着生直後に炭酸カルシウムの骨格を形成して固着し、その後も炭酸カルシウムの骨格を成長させて、成長していく。今回の実験でこの過程で、金属網上の電着物質が何かしらの貢献をした可能性があると考えられた。

ただ、ここで気になるのは、素焼きタイルと金属網の形状の違いだ。メッシュ状の金属網と、メッシュのない素焼きタイルでは、流れの影響の大きさが異なると思われる。特に、タイルや金網の面に垂直な流れが当たったときに、その影響は素焼きタイルの方が大きいと考えられ、このことが影響して、素焼きタイルの計測数の再現性が低いという結果や、単位面積当たりの着生数が金属網よりも少ないという結果になった可能性も考えられた。このことから、今後の研究では、基盤の形状について細かく条件を揃えて実験をおこなう必要性があると思われた。

第 3 章 電流がサンゴの骨格成長に与える影響の検証

3 章の概要

第 2 章では、電流とサンゴの着生数との関係を調べるための野外実験結果について検討を行った。本章では、電流とサンゴの骨格成長の関係について、野外実験と室内実験を行った結果に基づいて検討をおこなう。

野外実験は、鉄筋で作成した棚にサンゴを取り付け、第 2 章と同様に石垣島の沖合に設置して実施した。棚を複数用意し、電流条件を変化させて実験を行い、サンゴの成長（枝の長さ）や、電着物質の被覆を定期的にモニタリングした。

室内実験では、東京大学柏キャンパスの実験室に、容量の同じ水槽を 4 つ用意して、サンゴを長期的に飼育した。光量、水温、塩分濃度などの飼育の条件は、全ての水槽で同一とし、電流条件だけを、各水槽で変え、サンゴの水中重量を定期的に測定することで、サンゴの骨格重量の変化を観察した。

野外実験、室内実験の両方において、電流値ごとのサンゴの成長を比較することで、電流がサンゴの成長に与える影響について考察した。

3.1 野外実験

3.1.1 実験方法

（1）実験場所

野外実験は、第 2 章で説明した野外実験と同様に、沖縄県石垣島の海域で行った。

（2）サンゴを取り付けるための構造物（サンゴ棚）の概要

サンゴを取り付けるための構造物は、図 3-1 に示す様な半円形で、横にした円柱を半分に切断したような形状となっており、半円の中心部分にマグネシウム（Mg）をセットし、金属のイオン化傾向の差から電流を通電させる構造とした。半円とすることで、各鉄骨の電流密度が同一となるように工夫されている。鋼材は 22 の鉄筋を使用した。また、鋼材の接続は 1 箇所のみ電線で接続され、棚の電場をコントロールするための抵抗を取り付けた。これにより、抵抗を変化させることで電流密度を変化させることが可能である。左右の張り出し部には、設置後の転倒や滑動防止のために、重り石を置くスペースを設けた。実際の棚の写真を、写真 3-1 に示した。本論では、以下この構造物をサンゴ棚と呼ぶこととする。

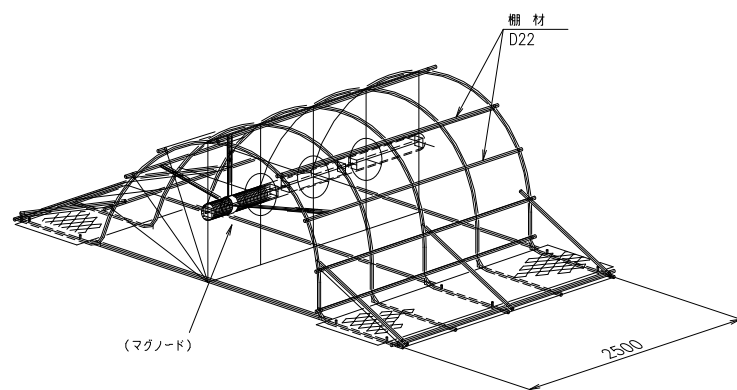


図 3-1 サンゴを取り付ける棚（サンゴ棚）の構造



写真 3-1 サンゴを取り付ける棚（サンゴ棚）の写真

(3) 実験試料

実験に使用したサンゴは、スギノキミドリイシ、ハイマツミドリイシ、ハナヤサイサンゴであった。これらのサンゴは、同じ位の大きさになるように分割した後、実験開始まで海域に置いて馴化した。

(4) 実験の手順

写真 3-1 のサンゴ棚を 4 個用意し、2007 年 3 月に船で石垣島沖に運び、サンゴ棚を設置した。設置後、各サンゴ棚のアーチ型の枠に、分割しておいたスギノキミドリイシ、ハイマツミドリイシ、ハナヤサイサンゴをそれぞれ 20 群体ずつヒモで結びつけて固定した。

この時、各々のサンゴを識別するために、以下で示すような方法で、ラベリングを行った。サンゴへの悪影響を防ぐため、これらのラベルはサンゴ棚に取り付け、ラベルには、X-Y-Z のように、3 つの記号を記入した。この際、X はサンゴの種類を示し、X：スギノキミドリイシ ス、ハイマツミドリイシ マ、ハナヤサイサンゴ ヤとした。また Y は電流密度を示し、Y：0A/m²のサンゴ棚 0、0.1A/m²のサンゴ棚 1、0.3A/m²のサンゴ棚 3、0.5A/m²のサンゴ棚 5 と記入した。また、Z はサンゴの整理番号であり、Z：01～20（何番目に取り付けたサンゴか）とした。例えば、0A/m²のサンゴ棚に 1 番目に取り付けたスギノキミドリイシの場合、ス-0-01 と標記した。

サンゴを取り付けた後に、4 つのサンゴ棚の初期電流がそれぞれ 0A/m²、0.1A/m²、0.3A/m²、0.5A/m²になるように設定して、実験を開始した。写真 3-2 は、石垣の海域にサンゴ棚を設置した後、サンゴを取り付けて実験を開始した時の様子である。実験開始後、それぞれのサンゴ棚に取り付けたサンゴの成長の様子を定期的にモニタリングした。サンゴ棚に設置した全てのサンゴを、大きさの基準となるスケールとともに写真に収めた。

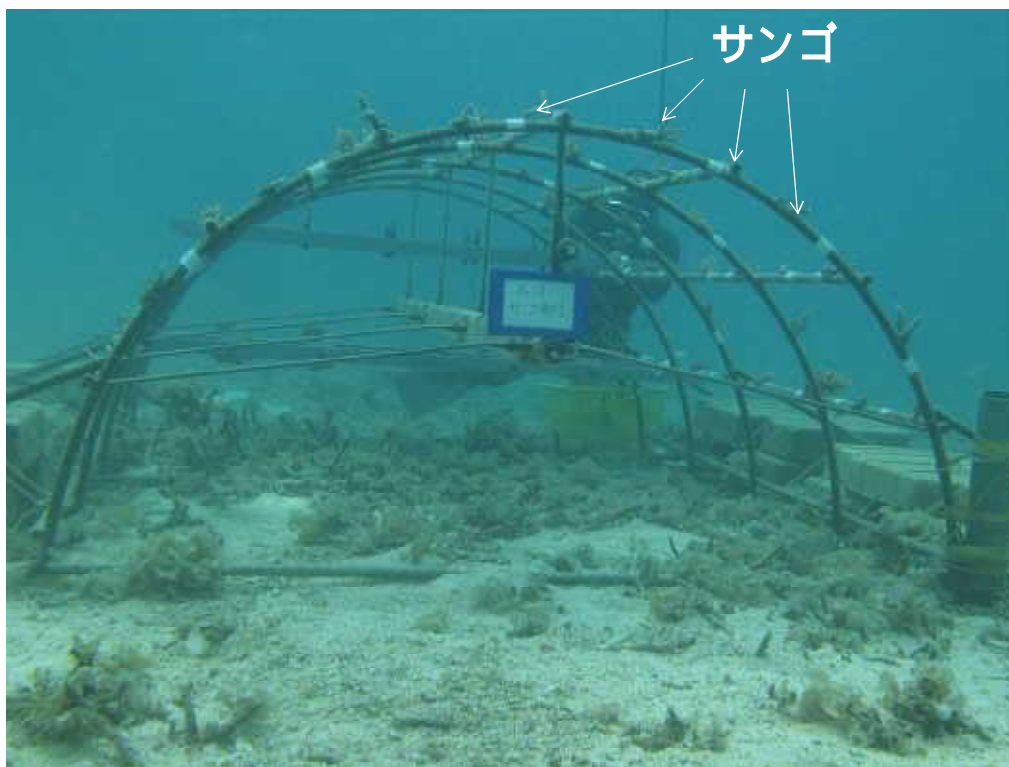


写真 3-2 海域に設置したサンゴ棚の様子
アーチ型の枠の部分にサンゴを取り付けた。

3.1.2 実験結果

2007 年は、台風や降雨量が少なかったことによって、水温が 30 度を超えた期間が前年の 4 倍以上もあった。この水温上昇の影響で、1998 年の大白化を上回る規模で、サンゴの白化が起きたと言われている。この野外実験では、2007 年 3 月にサンゴ棚を設置後、4 月 27 日、8 月 28 日、10 月 28 日にモニタリングをおこなったが、サンゴ棚に取り付けていたサンゴも、この夏の水温上昇によって大多数が白化してしまい、夏以降には殆どが死亡してしまった。このため、本研究ではサンゴが死亡する前の 4 月 27 日と、8 月 28 日のモニタリング結果を考察した。

また、各サンゴ棚には、スギノキミドリイシ、ハイマツミドリイシ、ハナヤサイサンゴの 3 種類を取り付けていたが、今回はスギノキミドリイシのみを考察に使用することとした。これはスギノキミドリイシが他の 2 種と異なり、形状が枝状で、1 本 1 本の枝が太く、成長速度が速いため、成長が写真で確認し易く、モニタリングをした 4 月 27 日から 8 月 28 日の短い間でも、速いものでは数 cm 程度成長していることが期待できるためである。各サンゴ棚にスギノキミドリイシを 20 群体取り付けられているが、その中でも特に枝分かれが少なく、写真で成長の捉えやすいサンゴ 10 群体を各サンゴ棚から選出した。選出したサンゴの、4 月 27 日と 8 月 28 日に撮影した写真を以下に掲載する。

0A/m²サンゴ棚のサンゴ：写真 3-3 (1a) ~ 写真 3-3 (10b) (4 月 27 日は a、8 月 28 日は b)

0.1A/m²サンゴ棚のサンゴ：写真 3-4 (1a) ~ 写真 3-4 (10b)

0.3A/m²サンゴ棚のサンゴ：写真 3-5 (1a) ~ 写真 3-5 (10b)

0.5A/m²サンゴ棚のサンゴ：写真 3-6 (1a) ~ 写真 3-6 (10b)

選出したスギノキミドリイシの中には、枝が分岐しているサンゴもあるため、長さを計測する枝を 1 本選んだ。選んだ枝は、写真の中に赤い矢印で示した。

写真 3-3 ~ 3-6 を見ると、どのサンゴ棚でも、鉄筋の表面には藻類が生えていることがわかる。特に、0.3A/m²のサンゴ棚には他のサンゴ棚と比較して藻類がよく生えていて、8 月 28 日の写真では、死亡して藻類に覆われているサンゴが大多数を占めていた。また、他のサンゴ棚についても、8 月 28 日の写真を見ると、白化したサンゴ、もしくは白化後死亡して、表面の一部に藻類が生えてきているサンゴが大多数を占めた。先ほども述べた様に、2007 年は、異常な水温上昇によって各地で大規模なサンゴの白化、大量死が確認されており、この実験に使用したサンゴもその影響を受けたものと考えられた。

(1) 4月27日と8月28日のモニタリング写真

・0A/m²のサンゴ棚 モニタリング写真

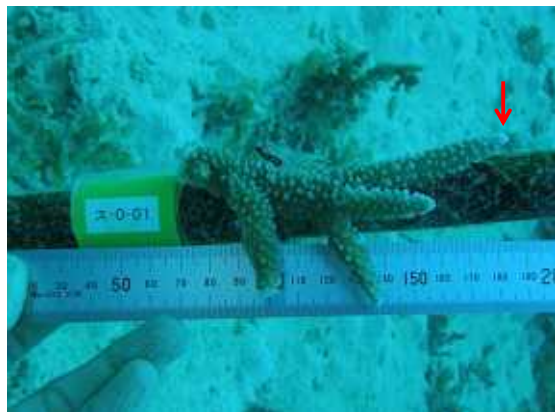


写真 3-3(1a) ス-0-01 4月27日



写真 3-3(1b) ス-0-01 8月28日

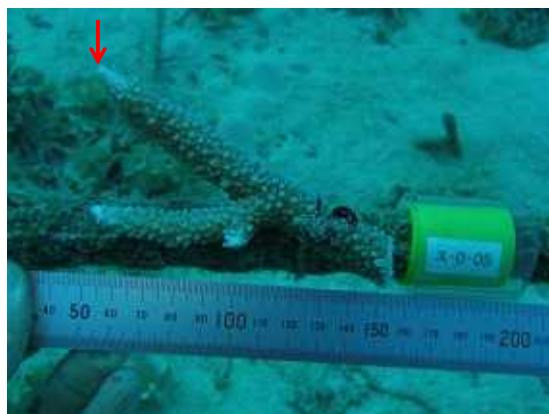


写真 3-3(2a) ス-0-05 4月27日

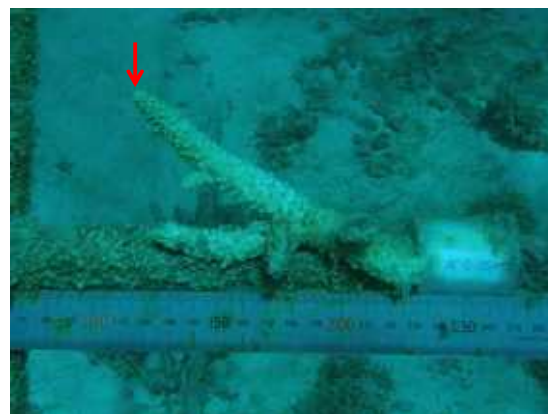


写真 3-3(2b) ス-0-05 8月28日



写真 3-3(3a) ス-0-06 4月27日

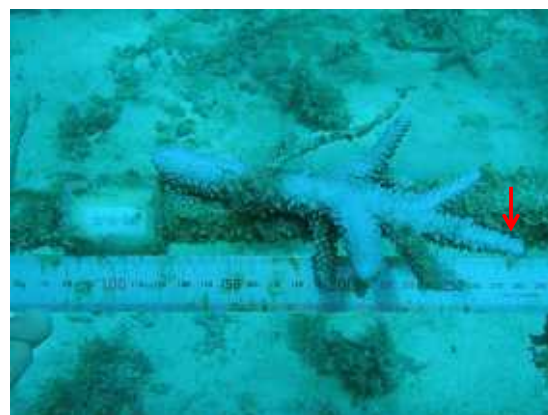


写真 3-3(3b) ス-0-06 8月28日

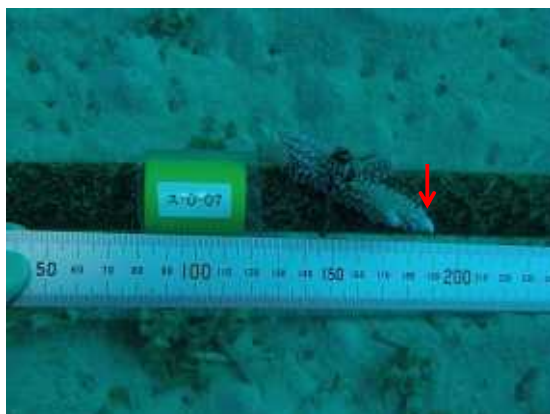


写真 3-3(4a) ス-0-07 4月27日

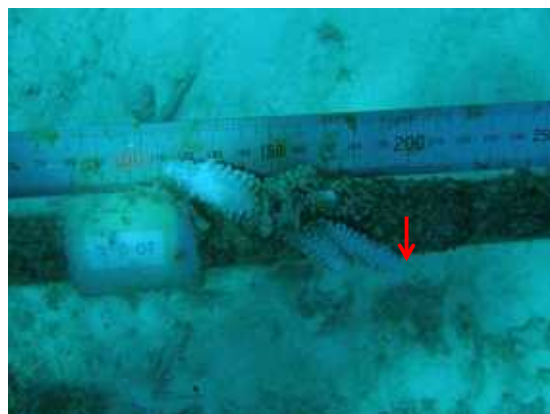


写真 3-3(4b) ス-0-07 8月28日



写真 3-3(5a) ス-0-08 4月27日



写真 3-3(5b) ス-0-08 8月28日

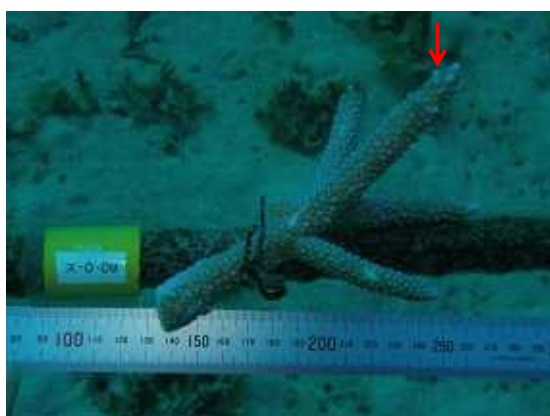


写真 3-3(6a) ス-0-09 4月27日



写真 3-3(6b) ス-0-09 8月28日



写真 3-3(7a) ス-0-10 4月27日

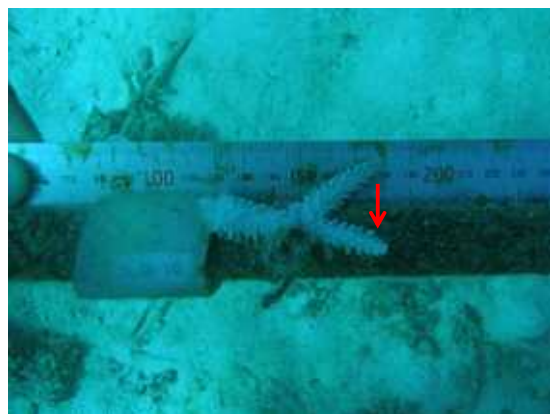


写真 3-3(7b) ス-0-10 8月28日

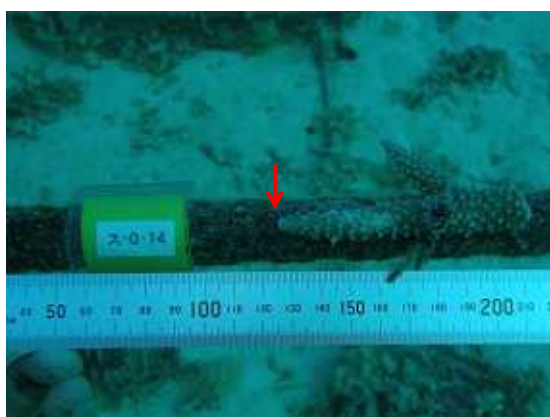


写真 3-3(8a) ス-0-14 4月27日

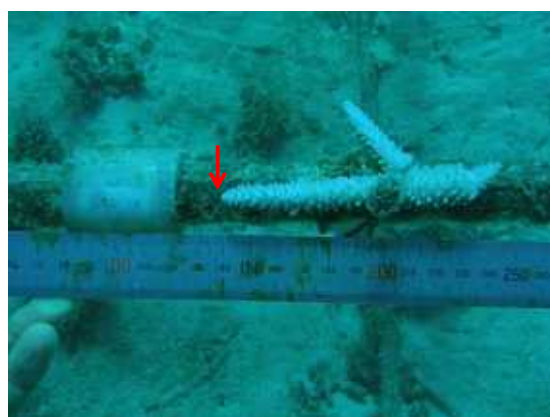


写真 3-3(8b) ス-0-14 8月28日



写真 3-3(9a) ス-0-17 4月27日

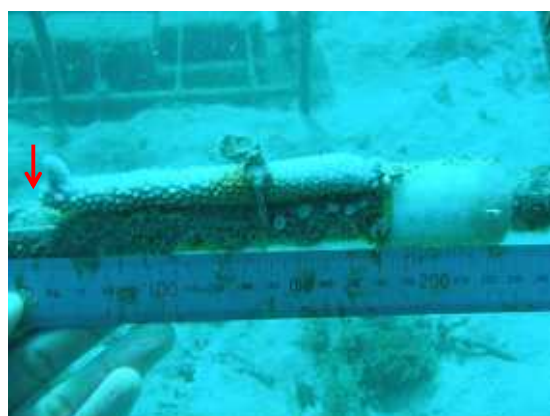


写真 3-3(9b) ス-0-17 8月28日

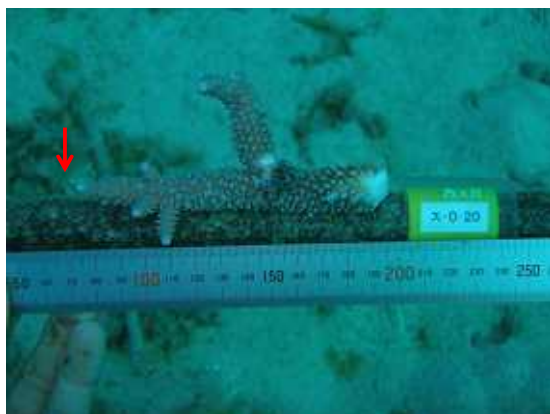


写真 3-3(10a) ス-0-20 4月27日

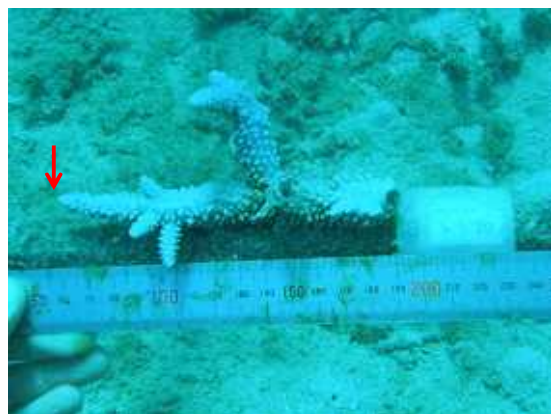


写真 3-3(10b) ス-0-20 8月28日

・0.1A/m²のサンゴ棚 モニタリング写真



写真 3-4(1a) ス-1-01 4月27日



写真 3-4(1b) ス-1-01 8月28日



写真 3-4(2a) ス-1-02 4月27日



写真 3-4(2b) ス-1-02 8月28日

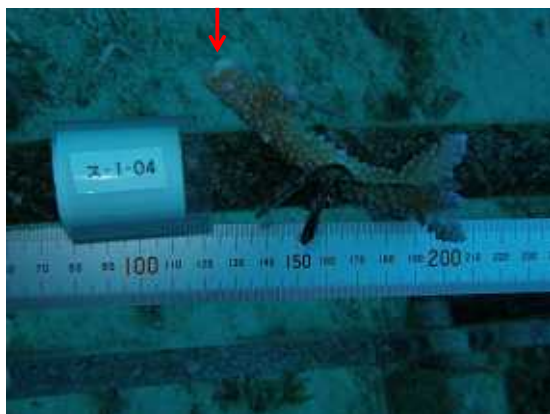


写真 3-4(3a) ス-1-04 4月27日



写真 3-4(3b) ス-1-04 8月28日

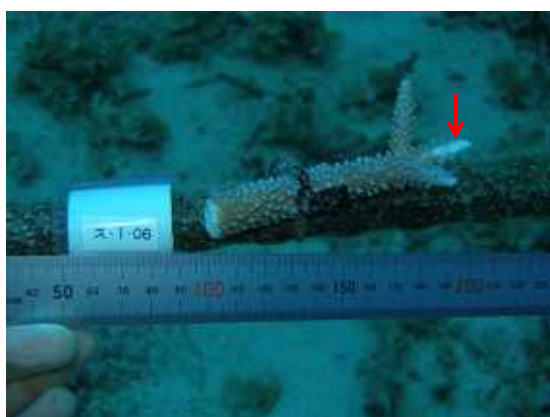


写真 3-4(4a) ス-1-06 4月27日



写真 3-4(4b) ス-1-06 8月28日

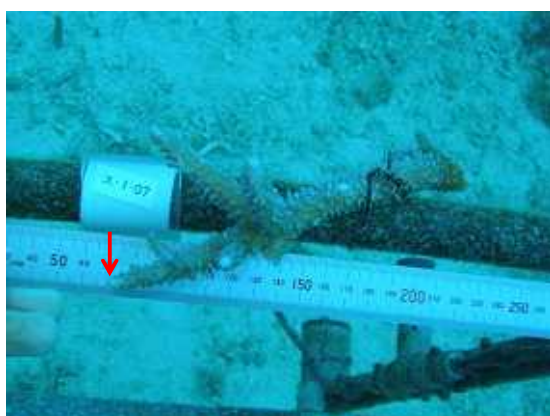


写真 3-4(5a) ス-1-07 4月27日

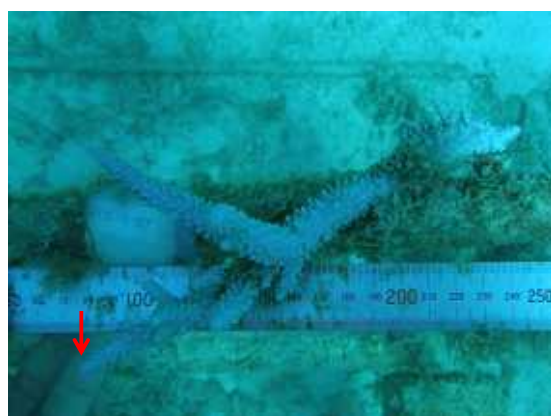


写真 3-4(5b) ス-1-07 8月28日

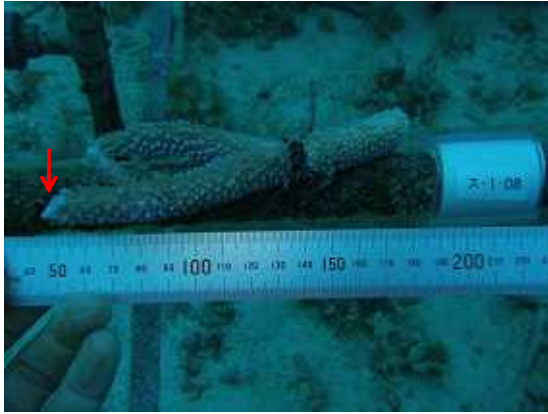


写真 3-4(6a) ス-1-08 4月27日

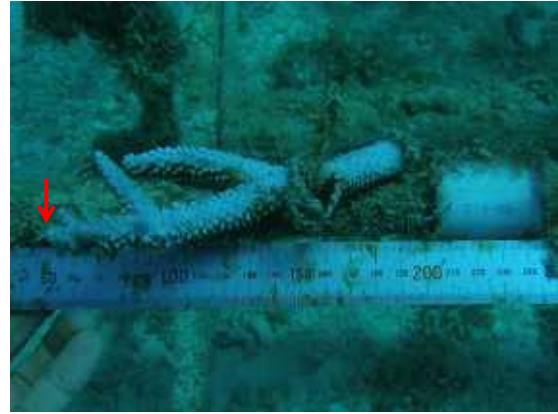


写真 3-4(6b) ス-1-08 8月28日

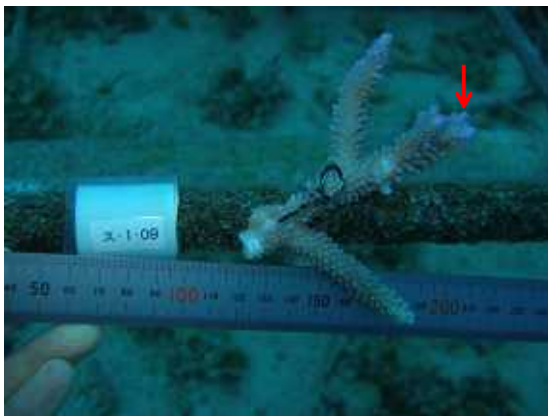


写真 3-4(7a) ス-1-09 4月27日

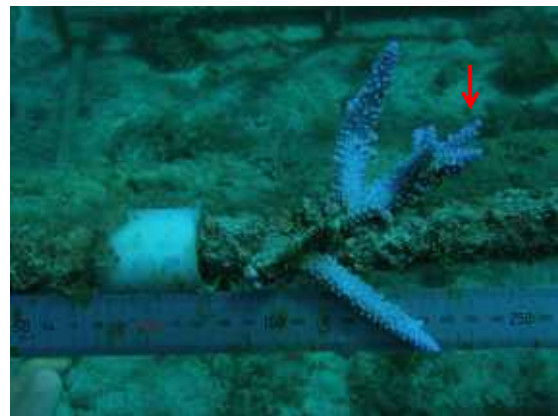


写真 3-4(7b) ス-1-09 8月28日

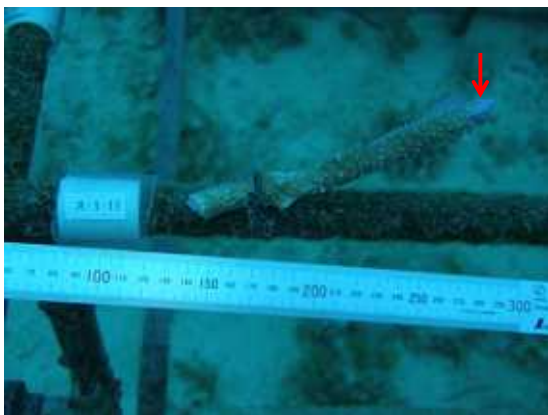


写真 3-4(8a) ス-1-11 4月27日

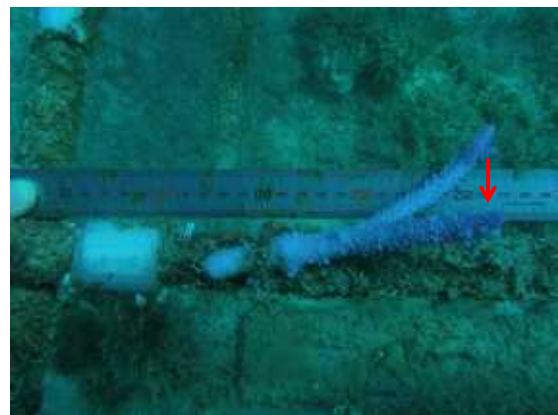


写真 3-4(8b) ス-1-11 8月28日

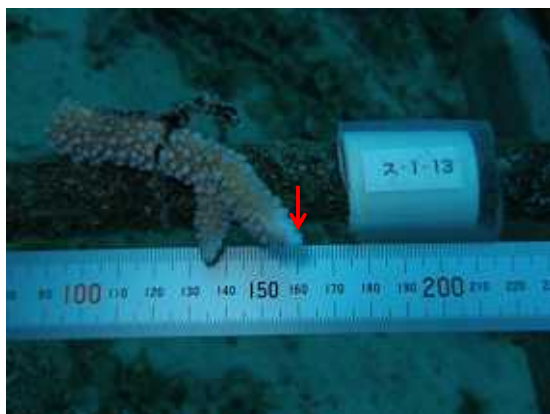


写真 3-4(9a) ス-1-13 4月27日



写真 3-4(9b) ス-1-13 8月28日

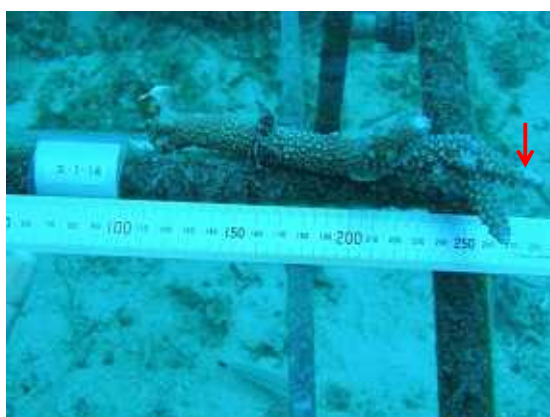


写真 3-4(10a) ス-1-14 4月27日

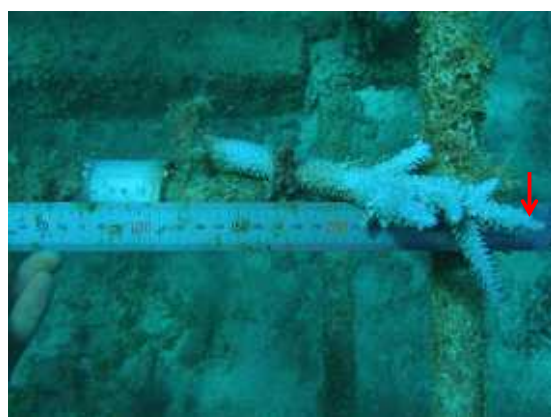


写真 3-4(10b) ス-1-14 8月28日

・0.3A/m²のサンゴ棚 モニタリング写真



写真 3-5(1a) ス-3-02 4月27日



写真 3-5(1b) ス-3-02 8月28日

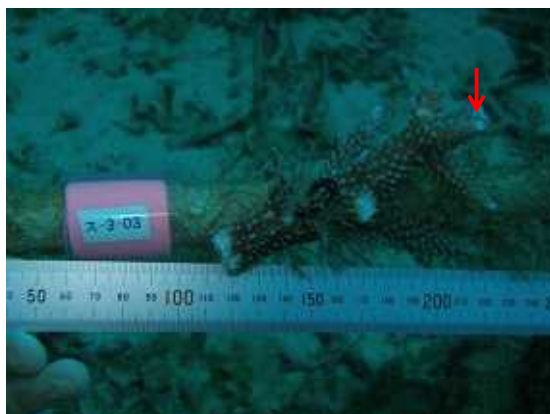


写真 3-5(2a) ス-3-03 4月27日



写真 3-5(2b) ス-3-03 8月28日

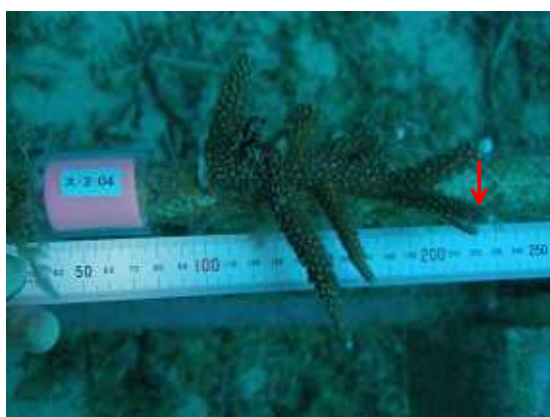


写真 3-5(3a) ス-3-04 4月27日

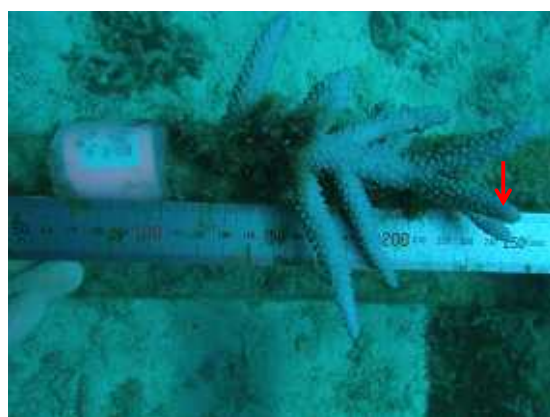


写真 3-5(3b) ス-3-04 8月28日

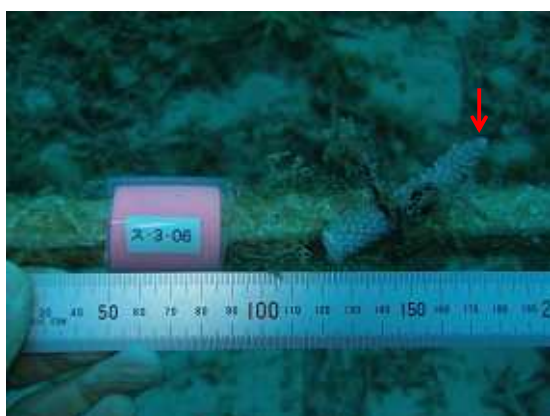


写真 3-5(4a) ス-3-06 4月27日

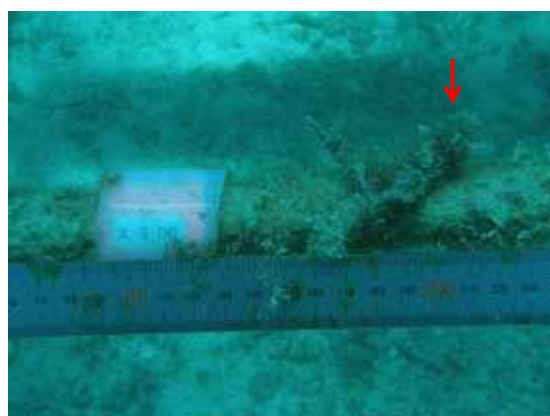


写真 3-5(4b) ス-3-06 8月28日



写真 3-5(5a) ス-3-08 4月27日



写真 3-5(5b) ス-3-08 8月28日

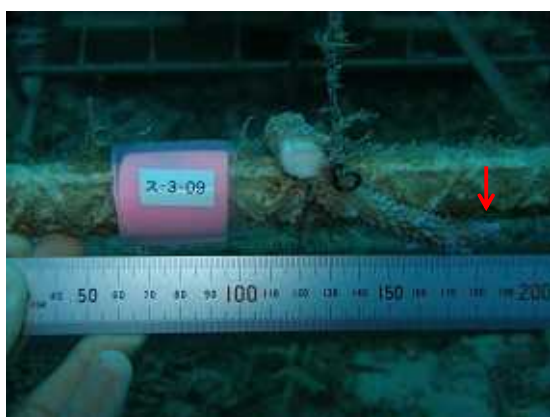


写真 3-5(6a) ス-3-09 4月27日

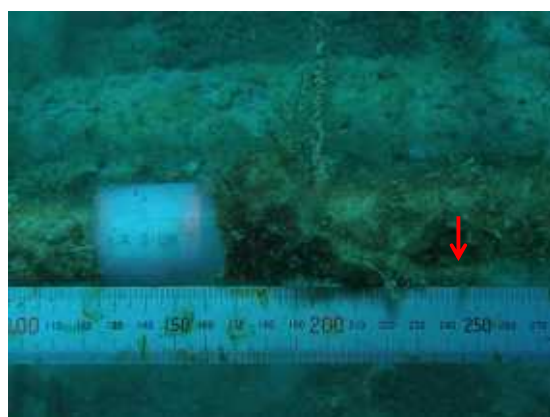


写真 3-5(6b) ス-3-09 8月28日

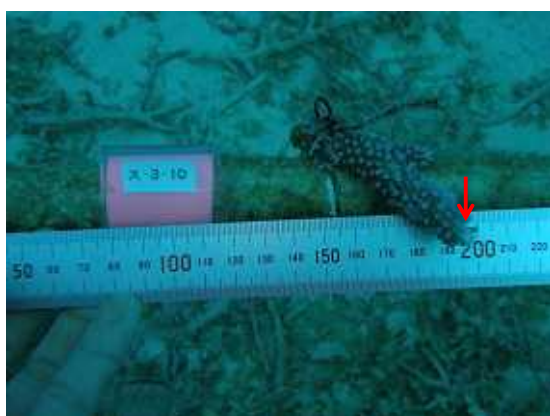


写真 3-5(7a) ス-3-10 4月27日

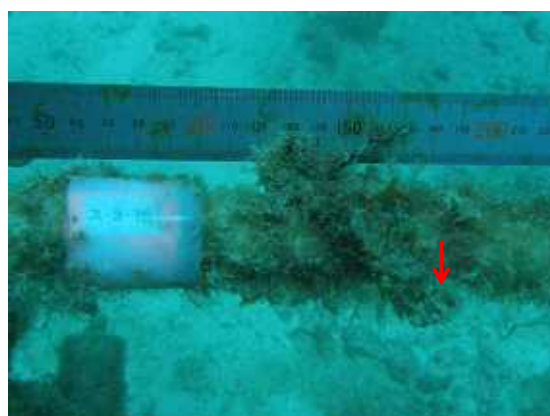


写真 3-5(7b) ス-3-10 8月28日



写真 3-5(8a) ス-3-16 4月27日



写真 3-5(8b) ス-3-16 8月28日



写真 3-5(9a) ス-3-17 4月27日



写真 3-5(9b) ス-3-17 8月28日



写真 3-5(10a) ス-3-18 4月27日



写真 3-5(10b) ス-3-18 8月28日

・0.5A/m²のサンゴ棚 モニタリング写真



写真 3-6(1a) ス-5-01 4月27日

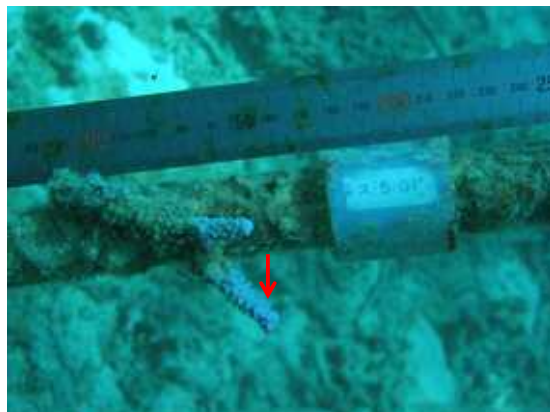


写真 3-6(1b) ス-5-01 8月28日

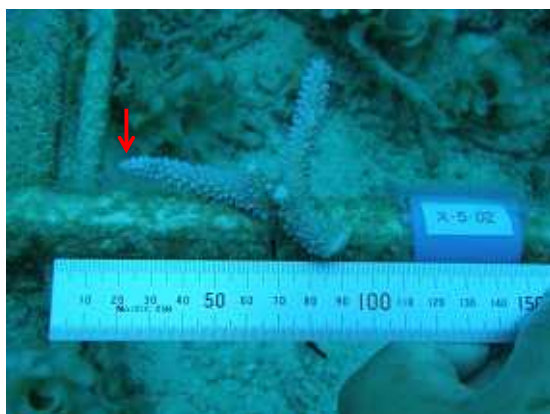


写真 3-6(2a) ス-5-02 4月27日



写真 3-6(2b) ス-5-02 8月28日

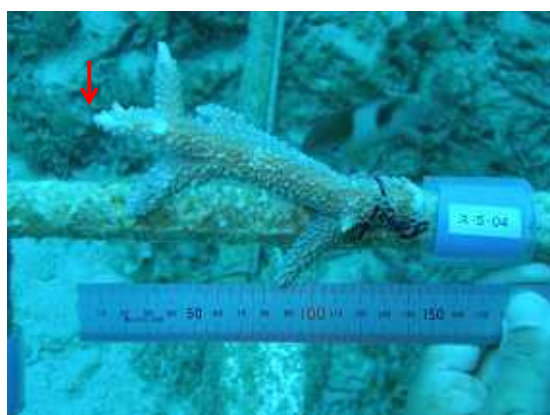


写真 3-6(3a) ス-5-04 4月27日



写真 3-6(3b) ス-5-04 8月28日

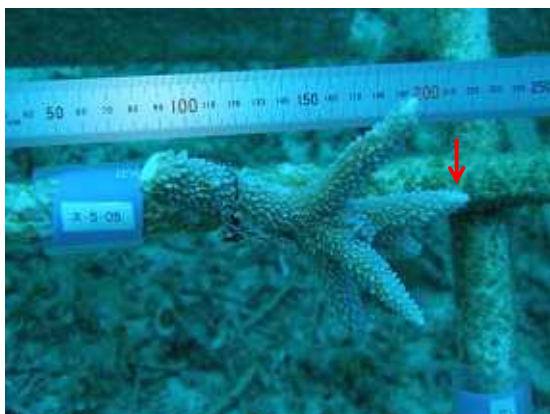


写真 3-6(4a) ス-5-05 4月27日



写真 3-6(4b) ス-5-05 8月28日

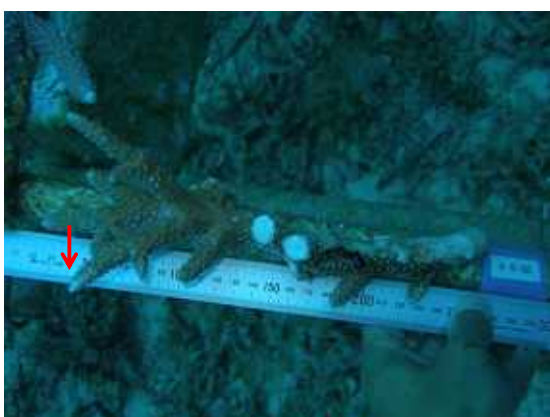


写真 3-6(5a) ス-5-06 4月27日

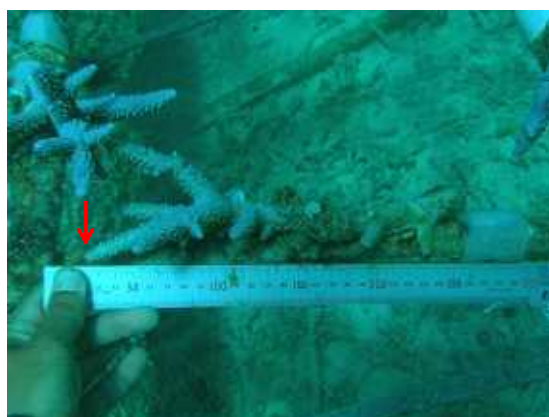


写真 3-6(5b) ス-5-06 8月28日



写真 3-6(6a) ス-5-07 4月27日

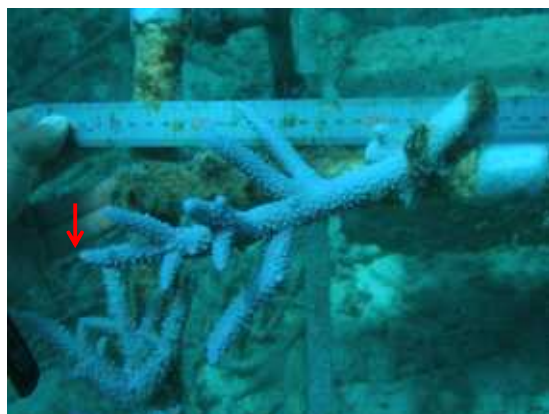


写真 3-6(6b) ス-5-07 8月28日

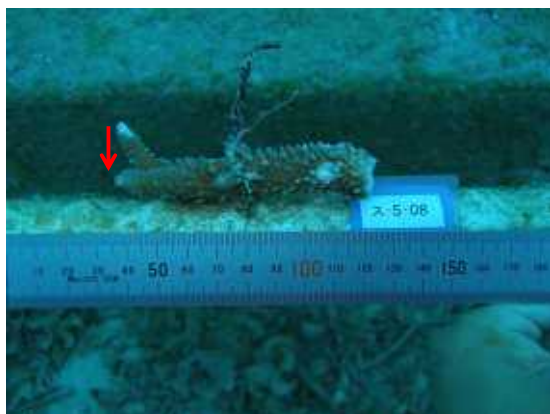


写真 3-6(7a) ス-5-08 4月27日

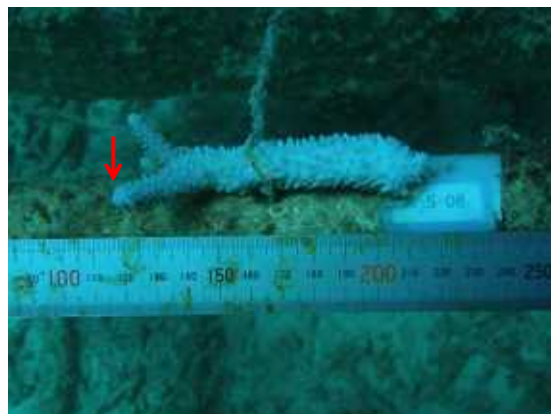


写真 3-6(7b) ス-5-08 8月28日

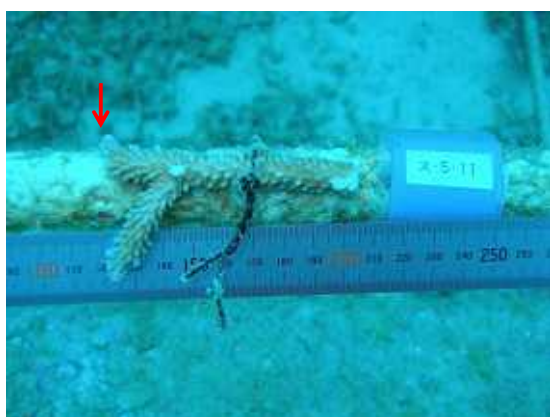


写真 3-6(8a) ス-5-11 4月27日

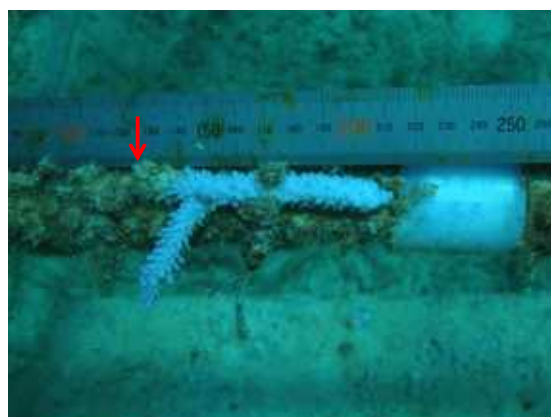


写真 3-6(8b) ス-5-11 8月28日

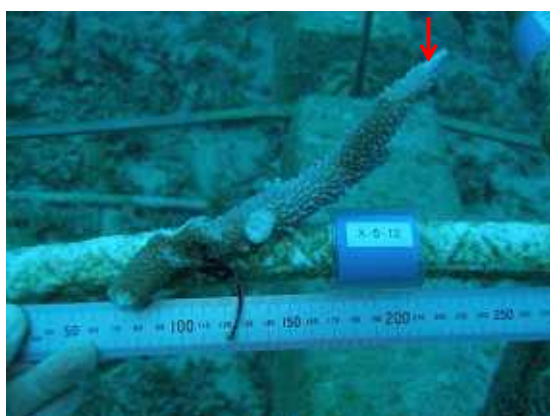


写真 3-6(9a) ス-5-12 4月27日

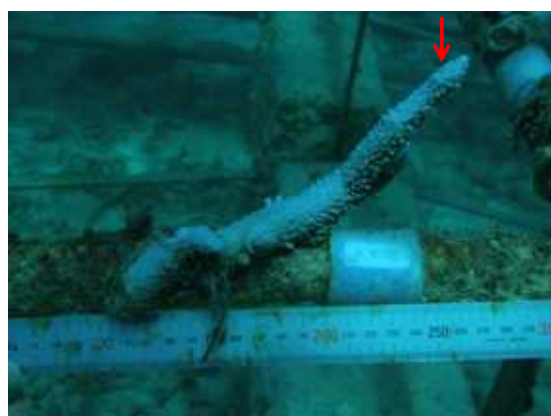


写真 3-6(9b) ス-5-12 8月28日

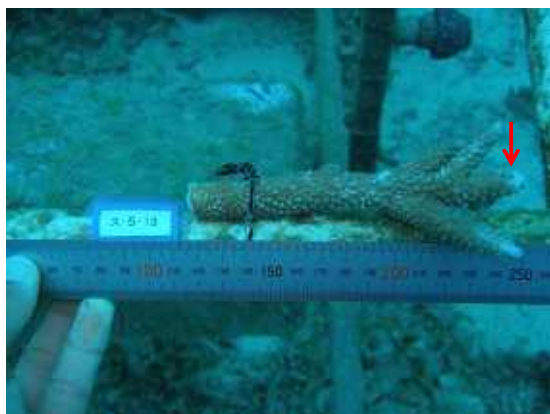


写真 3-6(10a) ス-5-13 4月 27 日

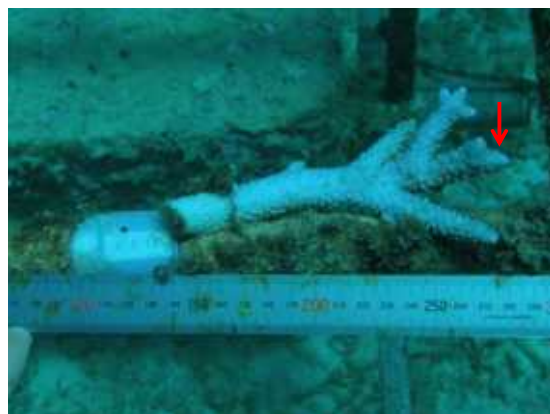


写真 3-6(10b) ス-5-13 8月 28 日

(2) 枝の長さを計測する方法について

サンゴ棚に取り付けたサンゴの成長量を計測するために、本研究ではインターネット上で提供されていた、ホームページの地図、デジカメ写真中の長さ・面積を測定するためのフリーの Excel マクロである lenaraf220²⁴⁾ を利用した。

この Excel マクロを利用して、サンゴの枝の長さを測定するには、まず、Excel の表上に、図 3-2 の様に、スケールと一緒に撮ったサンゴの写真張り付ける。続いて、赤い基準線をスケールに合わせて長さを調整し、図 3-2 の赤い四角の部分に基準線の長さで単位を入力する。その後、描画ツールの「フリーフォーム」で、選択したサンゴの枝の外側の輪郭に合わせて作図し、測定すると、黒い四角の中に描画した図の長さが表示される。このフリーソフトを使った測定では、写真の中のスケールとサンゴの位置、サンゴの向きが測定精度に大きく影響するが、写真 3-3~3-6 の写真を見ると、写真毎にサンゴと物差しの位置関係が異なるため、測定の精度が低い場合もあると思われる。

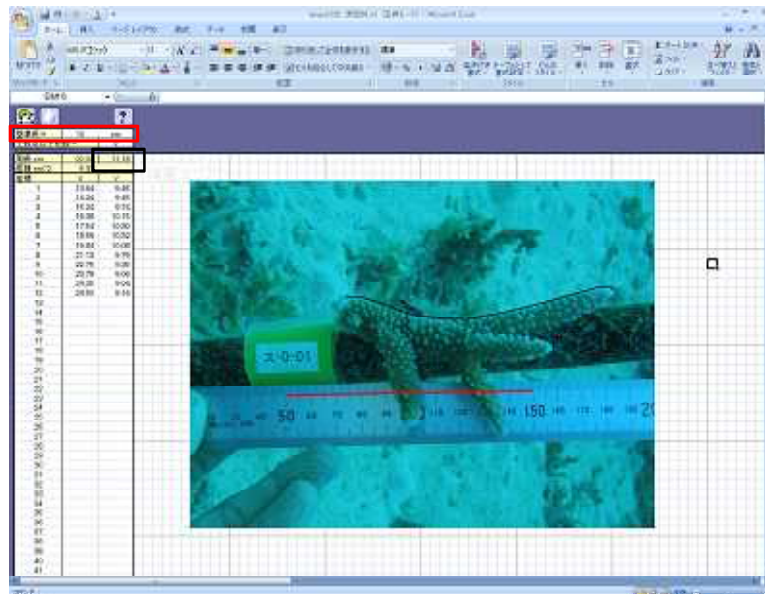


図 3-2 フリーソフトを利用したサンゴの枝の長さの測定

(3) 計測結果と各サンゴ棚のサンゴの成長率

先ほど説明した方法で、写真 3-3~3-6 に載せたサンゴの枝の長さを計測した結果を表 3-1~3-4 に示す。測定精度から勘案して、測定値は小数第二位までとした。今回測定したサンゴの枝の長さは 5~25cm の範囲で様々であるため、4 月 27 日のモニタリングから、8 月 28 日のモニタリングまでの成長は、8 月 28 日の計測値を 4 月 27 日の計測値で除して、成長率を % で評価することとした。この様にして求めた成長率を、表 3-1~3-4 に示す。

各サンゴ棚のサンゴ 10 群体の成長率の値を見ると、どのサンゴ棚でも 1.0~1.4 の範囲の値を示していることがわかる。また各サンゴ棚の成長率の平均を比較すると、どのサンゴ棚でも 1.1~1.2 と、近い値を示している。差を議論するために小数第二位まで成長率を

見ると、その大小関係は $0\text{A}/\text{m}^2$ のサンゴ棚 $> 0.1\text{A}/\text{m}^2$ のサンゴ棚 $> 0.3\text{A}/\text{m}^2$ のサンゴ棚 $> 0.5\text{A}/\text{m}^2$ のサンゴ棚 となった。流した電流が強い棚ほど、成長率の値が小さかったことから、電流がサンゴの骨格成長に対してマイナスの影響を与える可能性が考えられた。特に、 $0\text{A}/\text{m}^2$ のサンゴ棚と $0.1\text{A}/\text{m}^2$ のサンゴ棚を比較するとその差は小さいが、 $0\text{A}/\text{m}^2$ のサンゴ棚と $0.5\text{A}/\text{m}^2$ のサンゴ棚を比較すると、差がみられた。

ここで、気になることがある。サンゴは固着性の動物であり、今回の実験のように移植をすると、カルシウム成分を出して鉄筋に被覆していく。しかし、今回考察に用いたいずれのサンゴでも、4月27日の写真と8月28日の写真を見ると、サンゴの鉄筋への被覆は進んでいないように思われた。これは、先ほども述べたように、鉄筋の表面に藻類が生えている影響であると考えられる。藻類は、サンゴの表面に生えることでサンゴを死亡させてしまい、藻類の生えている場所には、サンゴは被覆することができない。

第2章では、電流がサンゴの幼生の着生数に与える影響についての考察で、電着物質はサンゴの生育に適した基質であると述べた。今回の実験でも、電流を流したサンゴ棚では、陰極となる鉄筋上に、海水中で電流が流れることで電着物質が析出する。陰極上に析出した電着物質は、サンゴの電極に沿った方向への成長を促進することを示した既往の研究があり、被覆が促進されることが考えられる。仮に、サンゴの被覆や、電極に沿った方向への成長に電着物質が作用するとしても、今回の実験では藻類の存在によって、その効果が確認できなかったのだと思われた。

表 3-1 0A/m²のサンゴ棚 測定結果と成長率

サンゴ	2007/4/27(cm)	2007/8/28(cm)	成長率
ス-0-01	11.0	14.2	1.29
ス-0-05	11.4	13.9	1.22
ス-0-06	13.5	16.4	1.21
ス-0-07	6.9	9.5	1.38
ス-0-08	12.5	15.0	1.20
ス-0-09	15.1	17.1	1.13
ス-0-10	5.3	6.9	1.30
ス-0-14	9.0	10.9	1.20
ス-0-17	13.0	15.0	1.16
ス-0-20	13.0	13.2	1.02
平均			1.21

表 3-2 0.1A/m²のサンゴ棚 測定結果と成長率

サンゴ	2007/4/27(cm)	2007/8/28(cm)	成長率
ス-1-01	11.3	13.5	1.19
ス-1-02	13.1	14.3	1.09
ス-1-04	10.0	11.1	1.11
ス-1-06	9.7	12.0	1.24
ス-1-07	14.4	19.8	1.38
ス-1-08	13.1	16.0	1.22
ス-1-09	9.7	11.2	1.15
ス-1-11	15.0	15.2	1.01
ス-1-13	10.2	12.1	1.19
ス-1-14	17.8	18.3	1.03
平均			1.16

表 3-3 0.3A/m²のサンゴ棚 測定結果と成長率

サンゴ	2007/4/27(cm)	2007/8/28(cm)	成長率
ス-3-02	13.6	15.1	1.11
ス-3-03	11.8	12.3	1.04
ス-3-04	13.3	14.8	1.11
ス-3-06	6.3	6.8	1.08
ス-3-08	8.4	11.4	1.36
ス-3-09	7.9	8.5	1.07
ス-3-10	7.5	7.9	1.05
ス-3-16	8.1	8.6	1.07
ス-3-17	6.1	6.6	1.08
ス-3-18	7.6	8.1	1.07
平均			1.10

表 3-4 0.5A/m²のサンゴ棚 測定結果と成長率

サンゴ	2007/4/27 (cm)	2007/8/28 (cm)	成長率
ス-5-01	8.7	9.2	1.06
ス-5-02	8.0	8.9	1.11
ス-5-04	14.7	15.2	1.03
ス-5-05	13.3	15.8	1.19
ス-5-06	23.9	24.2	1.01
ス-5-07	23.5	25.8	1.10
ス-5-08	9.2	10.9	1.18
ス-5-11	9.0	9.5	1.05
ス-5-12	20.0	20.6	1.03
ス-5-13	14.0	15.3	1.09
平均			1.09

3.1.3 3.1 章のまとめと今後の課題

3.1 章では、鉄筋を組み立てて作製したサンゴ棚に、異なる条件の電流を流し、実海域におけるサンゴの成長速度の比較をおこなった。その結果、何れのサンゴ棚でも、サンゴの成長率は近い値を示していたが、流している電流値が小さいサンゴ棚ほど、サンゴの成長率が高く、電流がサンゴにとってストレスとなる可能性が考えられた。

ただ、サンゴは、種類にもよるが、枝状のスギノキミドリイシだと年間 10cm 程度成長すると言われている。今回の実験では、夏の異常な水温上昇によって、実験に使用したサンゴの多くが、実験の途中で白化して死亡してしまったために、2007 年 4 月 27 日から 8 月 28 日の 4 カ月という短い期間のモニタリング結果で考察した。仮に、より長い期間で実験を行ったならば、今回の実験よりもサンゴの成長が進んで、それぞれのサンゴ棚で、サンゴの成長率に大きな差が出ていた可能性も考えられる。更に長く実験をおこなうことが今後の課題として挙げられる。

3.2 室内実験

3.2.1 実験方法

(1) 実験試料

実験に使用したサンゴは、石垣島から取り寄せた枝状のスギノキミドリイシである。石垣の海域で、5cm 程度の長さに枝を折り、しばらく石垣の海域で養生させた群体を使用した。取り寄せたサンゴは、東大の水槽で人工的に飼育し、水槽の環境に順化させた。取り寄せたサンゴの中には、すぐに白化して死亡してしまう群体も多かったために、実験には水槽で半年以上飼育に成功した群体のみを使用した。

実験の準備として、25cm の釣り糸を用意し、図 3-3 の様に、一方の端をサンゴに結びつけ、もう一方の端には輪を作った。1 と書かれた黄色い札の様に、取り外しのできる番号札を釣り糸につけ、実験に使用するサンゴに番号を振って区別した。

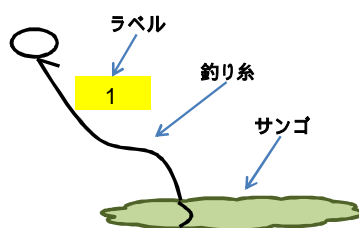


図 3-3 水中重量測定の準備

(2) 水中重量法について

水中重量法とは、サンゴの重量を海水中で測り、その重量の変化からサンゴの骨格の成長を知る方法である。サンゴの体の構造は単純で、主にポリプと炭酸カルシウムの骨格によって構成される。ポリプ部分は、海水を主成分としていて、比重は海水とほぼ同じである。また、サンゴの骨格（霰石）は比重が 2.94 で海水よりかなり重い。このため、サンゴを海水中に浮かべて重量を測定すると、ポリプ部分の重量は無視することができ、骨格部分の成長量だけが、水中重量の変化として測定される。本研究では、水中重量を計測し、サンゴの骨格成長量を定量化した。

水中重量の測定は、天秤の床下秤量を利用しておこなう。今回の実験では、適度な長さの釣り糸を用意して、片端をサンゴに結び、もう一方の端に輪を作って、その輪を天秤の床下秤量のフックにかけて測定をおこなった。図 3-4 に、測定の様子の模式図を示す。台の上に天秤を置き、天秤の床下秤量のフックにサンゴの糸が吊るせるように、台に穴をあけた。サンゴを海水に浸した状態で、釣り糸の片端に作った輪を、天秤のフックにかけ、測定をおこなった。また、天秤は、分析用電子天秤（エーアンドデー社製、GR-202）を使用した。

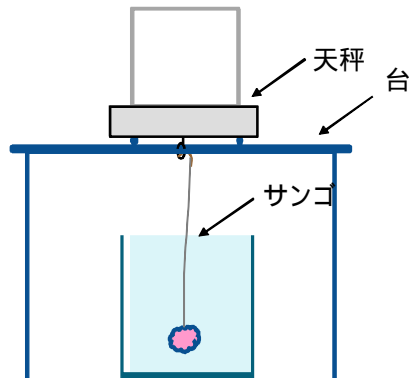


図 3-4 水中重量測定の様式図

水中重量法は、測定が簡単で、非破壊的測定であるため、繰り返し測定することが可能である。また、測定結果が、サンゴの骨格の重量変化を表すため、サンゴの成長が理解しやすい。更に、海水中で測定するため、サンゴへのダメージがないことが利点として挙げられる。その一方で、測定の精度を確保するための注意点もある。海水の密度が測定結果に影響を与えるために、測定時の海水の温度・密度を一定にする必要がある。それができない場合は、測定時の海水の密度を正確に測定して、重量の測定値の補正をおこなう必要がある。また、天秤の床下秤量は、風があると測定結果に影響を受けるので、空調を切り、台の周りに風除けを設置するなどの工夫が必要となる。更に、測定を行うサンゴに気泡がついていないことを確認し、ついている場合はダメージを与えないように取り除く必要がある。今回の実験では、こういった点に留意して測定をおこなった。

(2) 水中重量法の有用性の検討

実験を開始する前に、水中重量法の有用性について検討をおこなった。本研究では、石垣島から天然のサンゴを取り寄せて、水槽で飼育しながら実験に使用した。しかし、一般的に、人工的な環境でのハードコーラルの飼育は難しいと言われている。このため、人工的な飼育環境では、サンゴが安定した骨格成長をしない可能性があった。人工の飼育環境で、サンゴが安定した骨格成長をするかどうか、またその成長を水中重量法で捉えられるかを確認するために、6 群体のサンゴを水槽で飼育しながら、定期的に水中重量の測定をおこなった。これら 6 群体のサンゴは、2008 年 1 月に石垣から取り寄せた後、水槽で半年以上飼育したサンゴで、非常に状態が安定していた。これらの群体と同時に取り寄せた他の群体は、飼育の途中で死亡した。全てのサンゴを同じ水槽で飼育していたため、この差は各サンゴの生理状態によるものであったと思われる。水中重量の測定は、2008 年 6 月 11 日から 7 月 22 日までおこなった。重量を測定したサンゴ 6 群体は、識別するためにサンゴ 1 ~ 6 と番号を振った。測定した水中重量は、測定時の海水の密度から、空中重量に換算した

・測定結果

サンゴ1～6の水中重量測定は、2008年6月11日から7月22日までの間に7回おこなった。測定日は以下の7日であった。

- 1回目：6月11日
- 2回目：6月17日
- 3回目：6月18日
- 4回目：6月25日
- 5回目：6月26日
- 6回目：7月4日
- 7回目：7月22日

図3-4の様に測定した水中重量を、空中重量に換算した値(g)を表3-5に示す。測定の精度を勘案して、小数第2位まで示している。6月12日から7月22日の間に、いずれのサンゴでも重量は増加し続けていた。

また、それぞれのサンゴについて、6月12日から7月4日までと、7月4日から7月22日までの間の、1日当たりの重量変化率を求めた。7月4日の空中重量から6月12日の空中重量を引いて、その差を6月12日の空中重量で除した値を、実験日数で更に除したものを1日当たりの重量変化率、%/dとして表3-6に示す。7月4日から7月22日の期間についても、同様にして求めた重量変化率を表3-7に掲載した。また、2つの期間の重量変化率を比較するために、並べて表3-8に示す。表3-8から、どちらの期間においても、重量変化率の値はいずれのサンゴでも、0.1～0.2%/d程度の近い値をとっていることがわかった。また、2つの期間の重量変化率の値を比較すると、殆どのサンゴは似た値を示していた。このことから、多少の変化はあるものの、いずれの期間においても、どのサンゴも安定して骨格成長をしていることが推察された。また、サンゴ5の重量変化率は、6月12日から7月4日の間では0.22%/d、7月4日から7月22日の間では0.14%/dで、他のサンゴと比較して、最も大きい差0.08%/dを示した。

続いて、それぞれのサンゴについて、6月12日から7月22日の間の空中重量のデータを、図3-5から3-10に示す。また、それぞれのグラフには近似曲線と R^2 値を掲載する。これらのグラフから、いずれのサンゴでも、 R^2 は高い値を示していて、空中重量の増加は直線的であることがわかった。このことから、今回測定に用いたどのサンゴも、測定期間に安定して骨格成長をしていたと推察された。以上のことから、東大の飼育環境でも、サンゴは成長し、その成長は水中重量で捉えられるということがわかった。

最後に、表3-6を利用して、実験期間について考察する。表3-6の差の平均0.48というのは、6月12日から7月4日の間に、重量測定したサンゴ1～6の空中重量が、平均して0.48g増加したことを示している。これを、測定期間の23日で割ると、1日当たりの空中

重量の増加は 0.0208g/d となる。先に述べた、海水の密度の影響や、気泡の影響によって、測定値には微妙に誤差が出てしまうことが考えられる。このため、水中重量の増加でサンゴの骨格成長を観察する場合、こういった誤差の影響を小さくできるように、 0.1g 以上の十分な増加が観察できることが望ましい。このことから、実験期間は、1 週間以上は確保することが望ましいと考えられた。また、今回の測定には、飼育水槽で半年以上飼育できた状態の安定したサンゴを使用していた。石垣から取り寄せたサンゴは、先にも述べた様に白化・死亡し易いために、実験には今回の測定の様に取り寄せてから長期間飼育に成功した、状態の安定したサンゴを使用することとした。

以上のことを考慮しておこなった実験について、(4) から説明する。

表 3-5 6 月 12 日から 7 月 22 日のサンゴ 1～6 の空中重量 (g)

	6月12日	6月17日	6月18日	6月25日	6月26日	7月4日	7月22日
サンゴ1	9.79	9.93	9.96	10.15	10.18	10.38	10.88
サンゴ2	6.07	6.12	6.13	6.22	6.23	6.31	6.50
サンゴ3	14.08	14.25	14.28	14.38	14.41	14.70	15.11
サンゴ4	8.91	9.03	9.05	9.21	9.23	9.32	9.62
サンゴ5	15.40	15.58	15.61	15.82	15.83	16.14	16.54
サンゴ6	10.33	10.46	10.48	10.56	10.58	10.62	10.95
平均	10.76	10.90	10.92	11.06	11.08	11.24	11.60

表 3-6 6 月 12 日から 7 月 4 日の空中重量変化

	6月12日	7月4日	差	%/d
サンゴ1	9.79	10.38	0.59	0.27
サンゴ2	6.07	6.31	0.24	0.18
サンゴ3	14.08	14.70	0.62	0.20
サンゴ4	8.91	9.32	0.41	0.21
サンゴ5	15.40	16.14	0.73	0.22
サンゴ6	10.33	10.62	0.29	0.13
平均	10.76	11.24	0.48	0.20

表 3-7 7 月 4 日から 7 月 22 日の空中重量変化

	7月4日	7月22日	差	%/d
サンゴ1	10.38	10.88	0.50	0.27
サンゴ2	6.31	6.50	0.19	0.16
サンゴ3	14.70	15.11	0.42	0.16
サンゴ4	9.32	9.62	0.30	0.18
サンゴ5	16.14	16.54	0.40	0.14
サンゴ6	10.62	10.95	0.33	0.17
平均	11.24	11.60	0.35	0.18

表 3-8 6 月 12 日から 7 月 4 日と 7 月 4 日から 7 月 22 日の重量変化率の比較

	6/12-7/4	7/4-7/22
サンゴ1	0.27	0.27
サンゴ2	0.18	0.16
サンゴ3	0.20	0.16
サンゴ4	0.21	0.18
サンゴ5	0.22	0.14
サンゴ6	0.13	0.17
平均	0.20	0.18

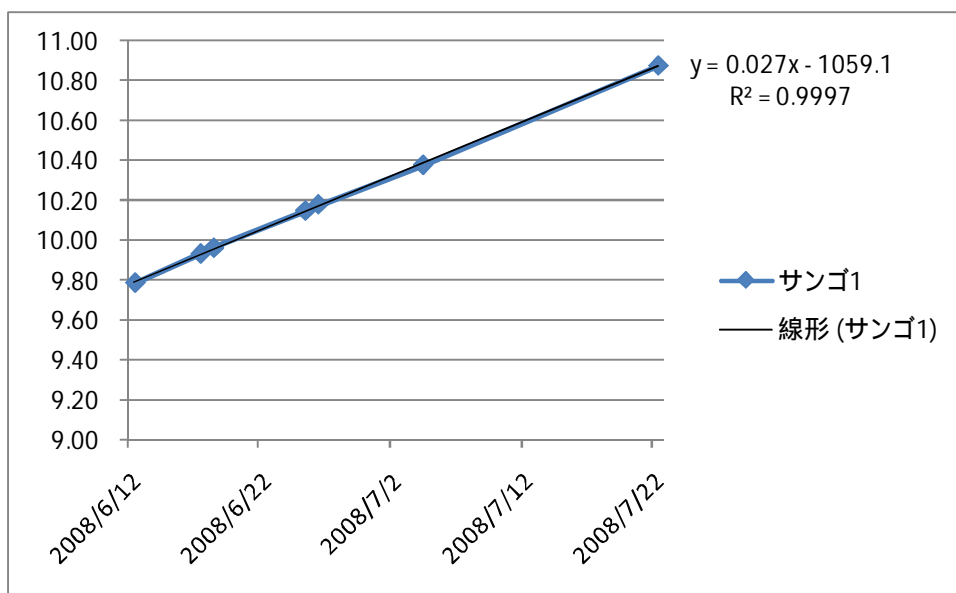


図 3-5 6 月 12 日から 7 月 22 日のサンゴ 1 の空中重量変化

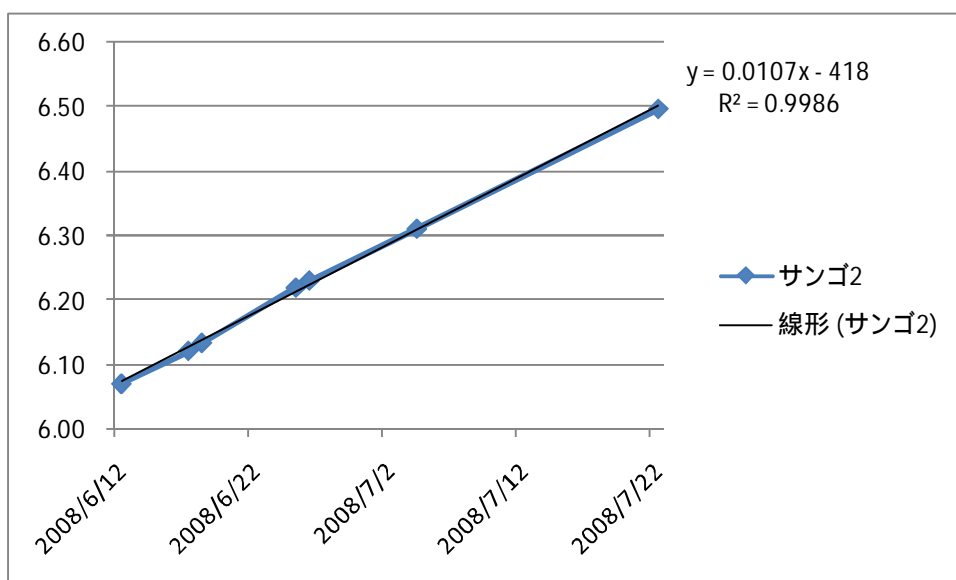


図 3-6 6 月 12 日から 7 月 22 日のサンゴ 2 の空中重量変化

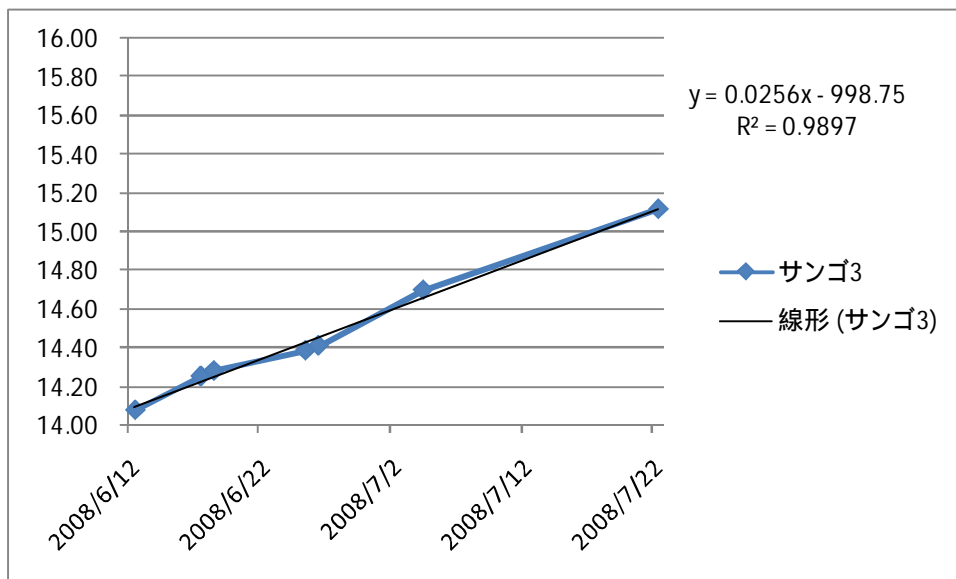


図 3-7 6 月 12 日から 7 月 22 日のサンゴ 3 の空中重量変化

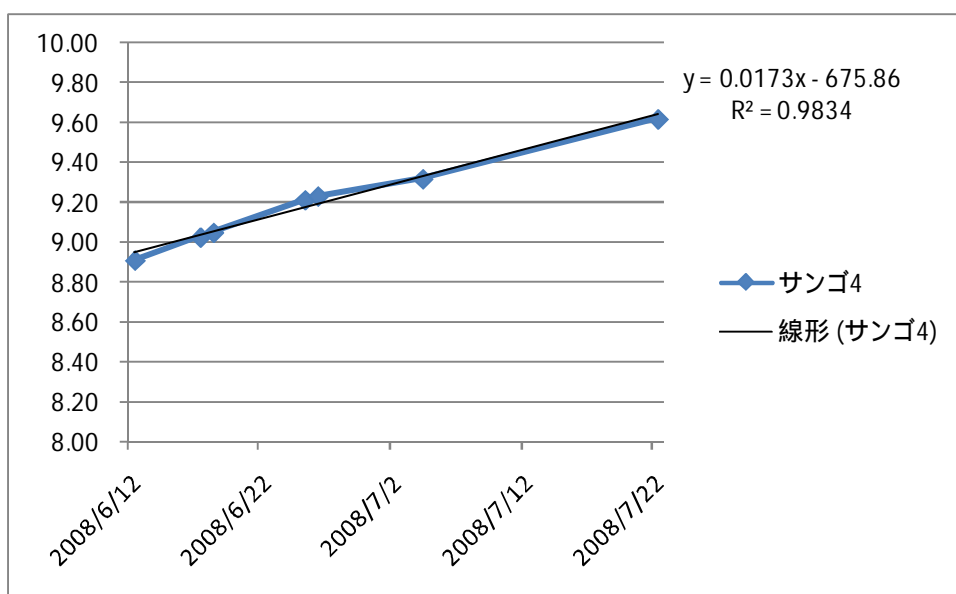


図 3-8 6 月 12 日から 7 月 22 日のサンゴ 4 の空中重量変化

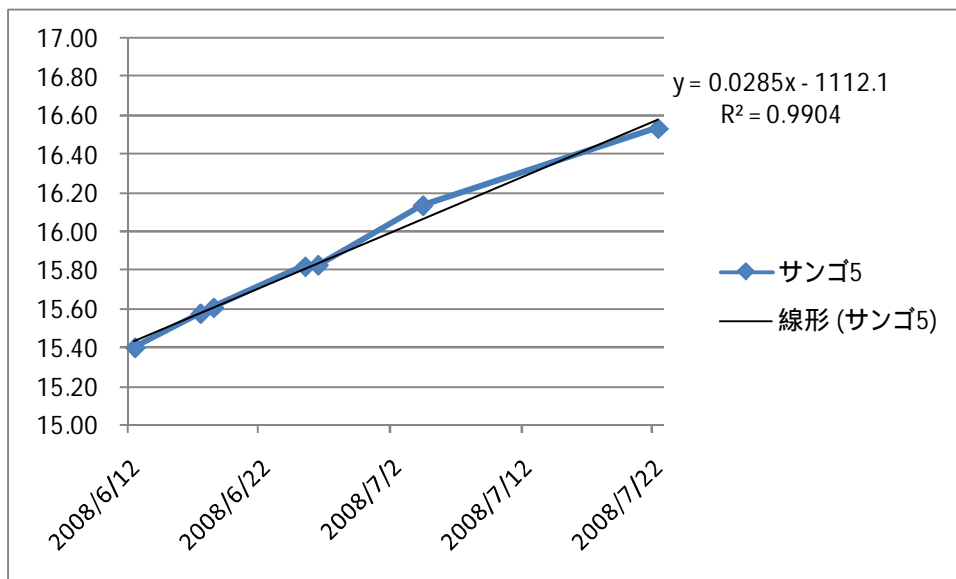


図 3-9 6 月 12 日から 7 月 22 日のサンゴ 5 の空中重量変化

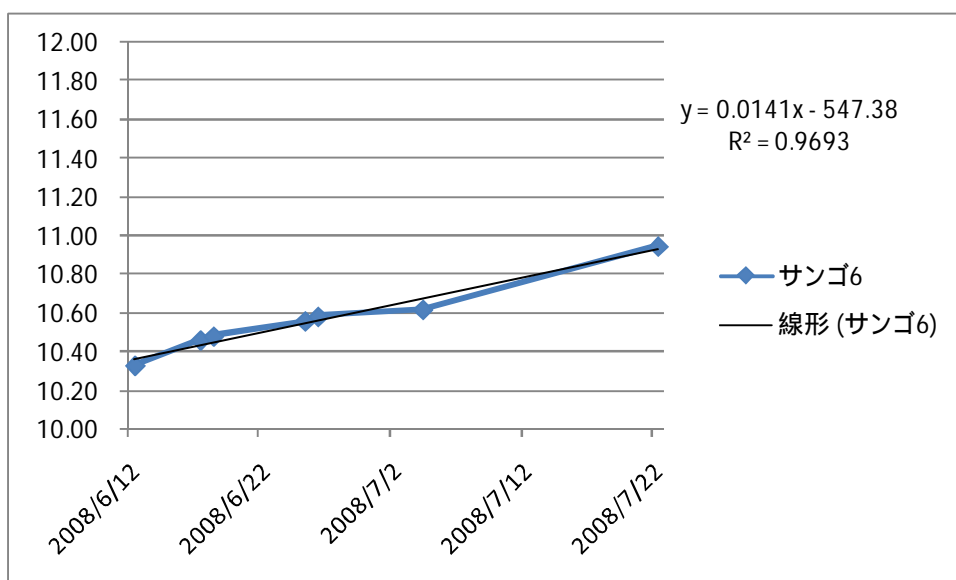


図 3-10 6 月 12 日から 7 月 22 日のサンゴ 6 の空中重量変化

(4) 実験に使用した水槽

実験は写真 3-7 の水槽を使用しておこなった。この水槽は、大きな飼育水槽（サイズ：600×900×450mm、容量約 240L）、小さな 4 つの実験水槽（サイズ：200×150×300mm、容量約 9L）そしてこれらの水質を保つための濾過水槽（380×400×430mm、容量約 65L）で構成されている。これらの水槽は全て塩ビ管で繋がっていて、水温、水質が全ての水槽で同一になっている。飼育水槽では、ソフトコーラルやヤドカリ、ゴカイなど、ハードコーラル以外の生物も飼育して、水質が安定するようにした。

先にも述べた様に、人工飼育環境下でのハードコーラルの飼育は難しい。今回の実験では、石垣から取り寄せてから半年以上水槽で飼育できたサンゴのみを使用した。そのサンゴの数の関係から、実験は 4 つの実験水槽の内、2 つを使用しておこなった。また、実験に使用したサンゴは、実験実施時以外は飼育水槽で飼育した。実験水槽と飼育水槽の環境が同一なため、これらの水槽間でサンゴを移動させた時に、サンゴにかかる負担を小さくできるのが特徴である。実験の説明のために、4 つの実験水槽の拡大写真を図 3-7 右に掲載する。また、4 つの水槽には右から順に 1～4 とした。全ての水槽が繋がっているので、1～4 の実験水槽の水温、水質はそれぞれ同じ状態になっている。

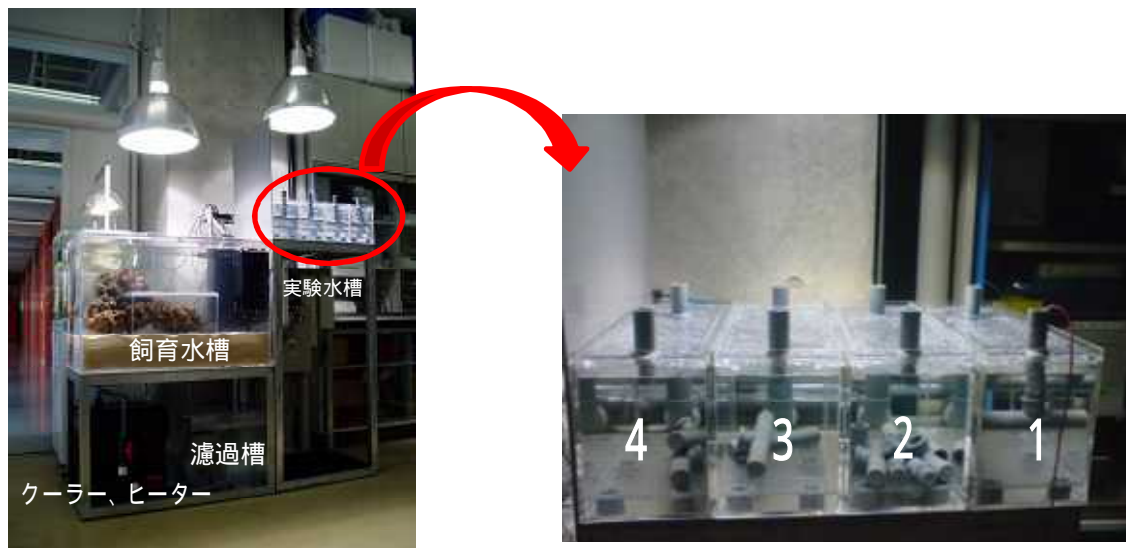


写真 3-7 実験に使用した水槽

実験水槽の飼育条件は以下の通りであった。

光量：朝 8 時～夜 8 時は約 300PAR 夜 8 時～朝 8 時は約 1PAR 以下

水温：クーラーとヒーターで 25 ± 2 に調整

塩分濃度：32.0～33.0

流量：8.3ml/s

(5) 実験の手順

電流条件を様々に変化させてサンゴの飼育をおこない、それぞれの水槽のサンゴの骨格成長を比較するために、本研究では3回の実験をおこなった(実験A、B、C)。各実験の条件を、表3-9に示す。また、実験の手順は図3-11に示す。まず、予め番号を振って、水槽に順化させておいた5cm程の枝状スギノキミドリイシを、実験水槽2と3に移動させた。実験水槽2で使用したサンゴは、サンゴ1、サンゴ2、サンゴ3、サンゴ4、サンゴ6の5群体であった。実験水槽3で使用したサンゴは、サンゴ7、サンゴ11、サンゴ15、サンゴ19、サンゴ27の5群体であった。使用したサンゴの写真を、写真3-8に掲載する。これらは、石垣から2008年1月と4月に取り寄せた後、半年以上の飼育に成功したサンゴで、状態が安定していた。続いて、実験水槽2と3の内、片方に陽極と陰極を設置して、電流条件を設定した。電極は白金電極を使用した。白金電極を使用して海水に電流を流すと、海水の電気分解によって陽極には塩素が発生し、陰極には強アルカリ性の電着物質が析出する。閉鎖系水槽で実験をおこなったために、このような発生物質は水槽の水質を悪化させると考えられた。このために、食用の寒天を満たした塩ビのキャップを電極にはめることで、発生した物質が水槽に影響しないようにした。

片方の水槽に、設定した電流を流し続けたまま、1週間以上飼育をおこない、定期的に各水槽のサンゴの水中重量を測定した。水中重量の測定時には、海水の塩分濃度(ppt)と水温()を記録して、後ほど水中重量を空中重量に換算した。その後、電流を流しておいた水槽のサンゴの重量増加率と、流さなかった水槽のサンゴの重量増加率を比較することで、電流がサンゴの骨格成長に与える影響について考察した。

各実験水槽にサンゴを入れる



1 電流条件の設定



2 1週間程度飼育



3 定期的に水中重量測定



1～3を繰り返す

図3-11 実験の手順



サンゴ1



サンゴ2



サンゴ3



サンゴ4



サンゴ6



サンゴ7



サンゴ11



サンゴ15



サンゴ19



サンゴ27

写真 3-8 実験に使用したサンゴ

表 3-9 実験条件表

実験 A から C の間、実験水槽 2 と実験水槽 3 ではずっと同じサンゴを使用した（実験水槽 2 ではサンゴ 1、2、3、4、6、実験水槽 3 ではサンゴ 7、11、15、19、27）。サンゴは、実験 A では横置きにして使用した後、ニッパーで半分に折った。半分は横置きに、もう半分はアクリル板に接着させて縦置きにして、実験 B と実験 C をおこなった。

	電流値		サンゴ	
	水槽2	水槽3	水槽2	水槽3
実験A 11/18-12/14	0.05A/m ²	0A/m ²	横置き 5群体	横置き 5群体
実験B 12/17-1/8	0.05A/m ²	0A/m ²	横置き:5 縦置き:5 10群体	横置き:5 縦置き:5 10群体
実験C 1/8-1/18	0A/m ²	0.005A/m ²	横置き:5 縦置き:5 10群体	横置き:5 縦置き:5 10群体

（6）実験 A、B、C の目的

表 3-9 に条件を示した実験 A、B、C の目的を以下に示す。

・実験 A の目的

水槽に流す電流条件を変えて、サンゴの飼育をおこない、サンゴの骨格成長を比較することが、重量を測定する実験の目的である。実験 A では、実験水槽 2 に 0.05A/m²の電流を流し、実験水槽 3 には流さなかった。この、0.05A/m²という電流条件は、第 1 章で紹介した沖縄県竹富島の栈橋の事例で、栈橋の中でも特にサンゴが多く育っていた場所で測定された電流値を参考にした。実験 A では、この電流値を流した実験水槽 2 と実験水槽 3 のサンゴの重量変化を比較し、骨格成長への影響を確認することを目的とした。

・実験 B の目的

実験 B では、電流条件は実験 A と同じだが、実験に使用するサンゴの置き方に違いがある。実験 A では横置きのみだが、実験 B では横置きに加えて縦置きのサンゴも用意した。

実験 A の終了後、実験に使用したサンゴをニッパーで半分に折った。半分に折ったサンゴは、図 3-12 の様に、半分は実験 A と同様で横置きに、もう半分はアクリル板（30×40mm）に接着剤で接着させて縦置きにした。サンゴは固着性の生物であり、横置きにすると、置かれた板の上でカルシウムの成分を分泌して固着しようとする。このため、サンゴを横置きにして実験に使用すると、水中重量測定のために移動させる度に、進行していた固着をひきはがすことになり、これはサンゴに対してストレスになるのではないかと考え、このようにした。縦置きのサンゴと横置きのサンゴでは、縦置きのサンゴの方が重量変化の様

子が良いのではないかと考えた。実験 B では、縦置きと横置きのサンゴの重量変化を比較することと、実験 A の再現性を確認すること、電流の重量変化への影響が縦置きと横置きのサンゴで異なるかどうかを確認することを目的とした。

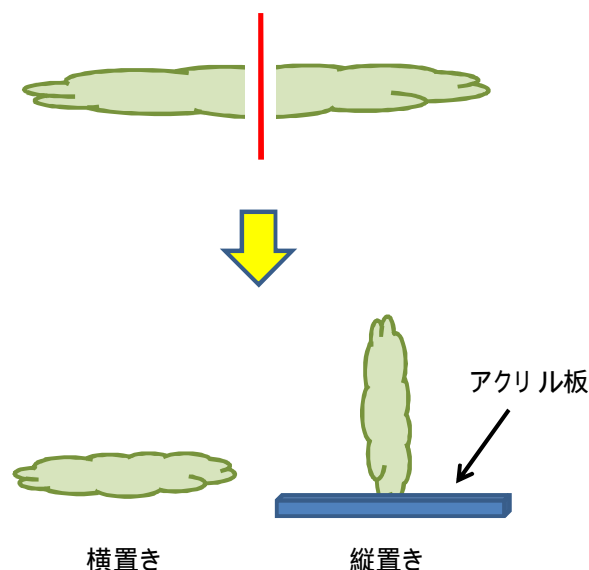


図 3-12 サンゴ切断の様子

・実験 C の目的

実験 A、B では、 $0.05\text{A}/\text{m}^2$ を実験水槽 2 にかけて、実験水槽 3 には電流を流さなかった。実験 C では、電流を流す水槽を実験 3 に変えて、流す電流値も $0.005\text{A}/\text{m}^2$ と、実験 A、B の 1/10 に設定した。実験 C では、実験 B と同様、縦置きと横置きのサンゴの重量変化を比較することに加えて、実験 B の 1/10 の電流を流したときに、実験 B と結果が異なるのかどうかを調べることを目的とした。

3.2.2 実験結果

(1) 実験 A

実験 A は、2008 年 11 月 18 日から 12 月 14 日の間に、実験水槽 2 と 3 を使用しておこなった。条件は表 3-9 の通りであった。実験水槽 2 に $0.05\text{A}/\text{m}^2$ の電流を流して、実験水槽 3 には電流を流さずに実験をおこなった。また、実験 A では、サンゴは横置きにして使用した。

実験に使用したサンゴの水中重量測定は、以下の 6 日におこなった。

- 1 回目：11 月 20 日
- 2 回目：11 月 22 日
- 3 回目：11 月 24 日
- 4 回目：12 月 8 日

5 回目：12 月 11 日

6 回目：12 月 14 日

それぞれのサンゴについて、測定した水中重量を、空中重量（g）に換算して、実験水槽 2 のサンゴは表 3-10 に、実験水槽 3 のサンゴは表 3-11 にそれぞれ示す。測定の精度を勘案して、小数第 2 位まで示す。11 月 20 日から 12 月 14 日の間に、いずれのサンゴでも重量は増加し続けていた。

（1-a）実験期間における重量変化率のばらつき

重量変化率にどの程度のばらつきがあるか調べるため、それぞれのサンゴについて、11 月 20 日から 11 月 24 日まで（期間 1）と、11 月 24 日から 12 月 8 日まで（期間 2）、そして 12 月 8 日から 12 月 14 日まで（期間 3）の 3 つの期間について、1 日当たりの重量変化率 %/d を求めた。求めた重量変化率は、表 3-12 に示す（左：実験水槽 2、右：実験水槽 3）。左表から、実験水槽 2 のサンゴの重量変化率は 3 つの期間で、近い値をとっていた。それぞれの期間の平均を比較すると、その差は 0.04%/d だった。次に、右表から、実験水槽 3 では、サンゴ 1 以外のサンゴの重量変化率は 3 つの期間で近い値をとっていた。それぞれの期間の平均を比較すると、その差は 0.03%/d だった。それぞれの期間のばらつきを考慮して、実験水槽 2 と実験水槽 3 の %/d を比較するときには、0.04%/d 程度の差は、有意な差ではないと解釈することにした。

（1-b）実験水槽 2 と実験水槽 3 の重量変化率の比較

（1-a）から、サンゴ 1 以外では、重量変化率のばらつきが小さいということがわかったので、11 月 20 日から 12 月 14 日の期間について、実験水槽 2 と実験水槽 3 のサンゴの重量変化率の比較をおこなった。実験水槽 2 の重量変化率は表 3-13 に、実験水槽 3 は表 3-14 に示す。また、それぞれの水槽の、重量変化率の平均値を並べて、表 3-15 に示す。重量変化率の平均を比較すると、どちらも 0.30%/d で同じ値を示していることがわかった。また、先ほどの考察で、実験水槽 3 のサンゴ 1 の重量変化率が、期間 3 に、他のサンゴの 2 倍近い値を示していた。これは測定誤差を含む可能性があるために、サンゴ 1 を除いた 4 群体の値を使って、実験水槽 3 の重量変化率の平均を求めると 0.28%/d となった。サンゴ 1 を除いた場合でも、実験水槽 2 と実験水槽 3 の重量変化率の平均値は非常に近い値を示した。実験 A では、実験水槽 2 の電流条件は 0.05A/m²、実験水槽 3 は 0A/m²であったが、この実験では、電流を流した場合と流していない場合で、サンゴの骨格成長に変化はないという結果となった。

表 3-10 11 月 20 日から 12 月 14 日の実験水槽 2 のサンゴの空中重量 (g)

水槽2	11月20日	11月22日	11月24日	12月8日	12月11日	12月14日
サンゴ7	8.18	8.22	8.27	8.63	8.70	8.78
サンゴ11	13.22	13.27	13.35	13.81	13.91	14.01
サンゴ15	12.72	12.80	12.86	13.30	13.39	13.48
サンゴ19	15.03	15.14	15.27	15.98	16.12	16.26
サンゴ27	7.82	7.88	7.94	8.34	8.42	8.49
平均	11.39	11.46	11.54	12.01	12.11	12.20

表 3-11 11 月 20 日から 12 月 14 日の実験水槽 3 のサンゴの空中重量 (g)

水槽3	11月20日	11月22日	11月24日	12月8日	12月11日	12月14日
サンゴ1	13.60	13.72	13.78	14.33	14.46	14.79
サンゴ2	7.76	7.79	7.83	8.09	8.14	8.19
サンゴ3	18.03	18.13	18.24	19.03	19.20	19.37
サンゴ4	12.67	12.74	12.84	13.38	13.48	13.60
サンゴ6	11.90	11.97	12.06	12.50	12.60	12.69
平均	12.79	12.87	12.95	13.47	13.57	13.73

表 3-12 実験水槽 2 と実験水槽 3 のサンゴの期間 1 から期間 3 における重量変化率 (%/d)

水槽2	期間1	期間2	期間3
サンゴ7	0.29	0.31	0.30
サンゴ11	0.24	0.25	0.24
サンゴ15	0.27	0.24	0.23
サンゴ19	0.40	0.33	0.29
サンゴ27	0.37	0.36	0.31
平均	0.31	0.30	0.27

水槽3	期間1	期間2	期間3
サンゴ1	0.32	0.29	0.54
サンゴ2	0.20	0.24	0.21
サンゴ3	0.29	0.31	0.30
サンゴ4	0.35	0.30	0.27
サンゴ6	0.34	0.26	0.26
平均	0.30	0.28	0.31

表 3-13 11 月 20 日から 12 月 14 日の実験水槽 2 の重量変化率

水槽2	11月20日	12月14日	差	%/d
サンゴ7	8.18	8.78	0.61	0.31
サンゴ11	13.22	14.01	0.79	0.25
サンゴ15	12.72	13.48	0.76	0.25
サンゴ19	15.03	16.26	1.23	0.34
サンゴ27	7.82	8.49	0.67	0.35
平均	11.39	12.20	0.81	0.30

表 3-14 11 月 20 日から 12 月 14 日の実験水槽 3 の重量変化率

水槽3	11月20日	12月14日	差	%/d
サンゴ1	13.60	14.79	1.19	0.36
サンゴ2	7.76	8.19	0.43	0.23
サンゴ3	18.03	19.37	1.33	0.31
サンゴ4	12.67	13.60	0.93	0.31
サンゴ6	11.90	12.69	0.80	0.28
平均	12.79	13.73	0.94	0.30

表 3-15 11 月 20 日から 12 月 14 日における水槽 2 と水槽 3 の平均重量変化率の比較

	水槽2	水槽3
%/d 平均	0.30	0.30
電流条件	0.05A/m ²	0A/m ²
大小関係	電流あり = 電流なし	

(2) 実験 B

実験 B では、実験 A で横置きにして使用していたサンゴを半分に切断して、半分は横置き（5 群体）に、もう半分は縦置き（5 群体）にして、計 10 群体を使用した。実験 B の条件は、表 3-9 の通りであった。実験水槽 2 には 0.05A/m²の電流を流し、実験水槽 3 には電流を流さずに実験をおこなった。

実験に使用したサンゴの水中重量測定は、以下の 4 日におこなった。

1 回目：12 月 17 日

2 回目：12 月 21 日

3 回目：1 月 4 日

4 回目：1 月 8 日

それぞれのサンゴについて、測定した水中重量を、空中重量（g）に換算して、横置きのサンゴは表 3-16 に、縦置きのサンゴは表 3-17 に示す。12 月 17 日から 1 月 8 日の間に、いずれのサンゴでも重量は増加し続けていた。

(2-a) 実験期間における重量変化率のばらつき

実験 A と同様に、重量変化率にどの程度のばらつきがあるか調べるために、それぞれのサンゴについて、12 月 17 日から 12 月 21 日まで（期間 4）と、12 月 21 日から 1 月 4 日まで（期間 5）、そして 1 月 4 日から 1 月 8 日まで（期間 6）の 3 つの期間について、1 日当たりの重量変化率%/d を求めた。求めた重量変化率は、横置きのサンゴは表 3-18 に、縦置きのサンゴは表 3-19 に示す。実験水槽 2 の重量変化率は左に、実験水槽 3 の重量変化率は右に掲載した。表 3-18 の左の表から、実験水槽 2 の横置きのサンゴの重量変化率は、期間 4 から 6 の 3 つの期間で、近い値をとっていた。それぞれの期間の平均を比較すると、その差は 0.02%/d だった。次に、右の表から、実験水槽 3 の横置きのサンゴの重量変化率も、3 つの期間で近い値をとっていた。それぞれの期間の平均を比較すると、その差は 0.02%/d で、実験水槽 2 と同じだった。それぞれの期間のばらつきを考慮して、実験水槽 2 と実験水槽 3 の横置きのサンゴの重量変化率を比較するときには、0.02%/d 程度の差は、有意な差ではないと解釈することにした。

続いて縦置きのサンゴの、3 つの期間における重量変化率を比較する。表 3-19 の左の表

から、実験水槽 2 の縦置きサンゴの重量変化率は、サンゴ 11 以外は、期間 4 から 6 の 3 つの期間で近い値をとっていた。サンゴ 11 は、期間 6 の重量変化率が 0.02%/d で、他の期間との差が大きく、ばらつきが大きかった。それぞれの期間の平均を比較すると、その差は 0.05%/d だった。サンゴ 11 の重量変化率のばらつきが大きかったため、期間 6 の平均を、サンゴ 11 を除いたサンゴ 7、サンゴ 15、サンゴ 19、サンゴ 27 の重量変化率から求めると、0.24%/d となり、3 つの期間の差は 0.02%/d となった。次に、右の表から、実験水槽 3 の縦置きサンゴの重量変化率は、3 つの期間で近い値をとっていることがわかった。それぞれの期間の平均を比較すると、その差は 0.01%/d だった。それぞれの期間のばらつきを考慮して、実験水槽 2 と実験水槽 3 の縦置きサンゴの重量変化率を比較するときには、0.02%/d 程度の差は、有意な差ではないと解釈することにした。

(2-b) 実験水槽 2 と実験水槽 3 の重量変化率の比較

(2-a) から、縦置きサンゴ 11 以外では、重量変化率のばらつきが小さいということがわかったので、12 月 17 日から 1 月 8 日の期間について、実験水槽 2 と実験水槽 3 のサンゴの重量変化率の比較をおこなった。実験水槽 2 の重量変化率は、横置きは表 3-20 に、縦置きは表 3-21 に示す。実験水槽 3 は、横置きは表 3-22 に、縦置きは表 3-23 に示す。

まず、それぞれの水槽の、横置きサンゴの重量変化率の平均値を比較する。比較のために、表 3-20 と表 3-22 の実験水槽 2 と実験水槽 3 の重量変化率の平均を表 3-24 に並べて掲載した。実験水槽 2 の横置きサンゴの重量変化率の平均は 0.25%/d、実験水槽 3 は 0.26%/d で、近い値を示していることがわかった。

続いて、それぞれの水槽の縦置きサンゴの重量変化率の平均値を比較する。比較のために、表 3-21 と 3-23 の実験水槽 2 と実験水槽 3 の重量変化率の平均を表 3-25 に並べて掲載した。実験水槽 2 の重量変化率の平均は、サンゴ 11 の重量変化率を除いて算出した。(2-a) で述べた、重量変化率のばらつきについての考察で、実験水槽 2 の縦置きサンゴ 11 が期間 6 に、他の期間と比較して非常に低い変化率を示していて、これは測定誤差を含む可能性が高いために除くこととした。実験水槽 2 の縦置きサンゴの重量変化率の平均は 0.25%/d、実験水槽 3 は 0.28%/d で、水槽 3 の方が若干高く、その差は 0.03%/d だった。先ほどの、(2-a) で、縦置きサンゴの重量変化率のばらつきが 0.02%/d 程度だったことを考慮すると、それよりは大きい差であった。

実験 B では、実験水槽 2 の電流条件は 0.05A/m²、実験水槽 3 は 0A/m²だった。この実験では、電流を流した場合と流していない場合で、横置きサンゴでは骨格成長に変化はないという結果となり、これは実験 A と一致している。また縦置きサンゴでは、電流を流していない水槽 3 のサンゴの方が、重量変化率が高かった。

(2-c) 縦置きサンゴと横置きサンゴの重量変化率の比較

実験 B では、実験 A と異なり、横置きサンゴに加えて、縦置きサンゴも実験に使用

した。サンゴは固着性の生物であり、横置きにすると、置かれた板の上でカルシウムの成分を分泌して固着しようとする。このため、サンゴを横置きにして実験に使用すると、水中重量測定のために移動させる度に、進行していた固着をひきはがすことになり、これはサンゴに対してストレスになるのではないかと考えた。縦置きのサンゴと横置きのサンゴでは、縦置きのサンゴの方が、重量変化率が高いのではないかと推察していた。

実験水槽 2 と実験水槽 3 の縦置きのサンゴと横置きのサンゴの重量変化率を比較するために、表 3-24 と表 3-25 の重量変化率の平均を並べて、表 3-26 と表 3-27 に示す。表 3-26 から、実験水槽 2 では、縦置きのサンゴの重量変化率の平均は $0.25\%/d$ 、横置きのサンゴの重量変化率の平均も $0.25\%/d$ で、同じ値だった。また、表 3-27 から、実験水槽 3 では、縦置きのサンゴの重量変化率の平均は $0.28\%/d$ 、横置きのサンゴの重量変化率の平均は $0.26\%/d$ で、その差は $0.02\%/d$ だった。縦置きの方が若干高い値だが、(2-a) で考察した重量変化率のばらつきを考慮すると、その差はないに等しいと解釈するのが良いように思われた。しかし、固着のために分泌した被覆を、移動の度に剥がされることが、サンゴにとってストレスになるのは確かである。また、サンゴは共生藻である褐虫藻の光合成によって、成長に必要な栄養の大半を得ていると言われているが、光合成できる面積という視点では、横置きのサンゴは縦置きのサンゴと比較して明らかに不利である。縦置きのサンゴと横置きのサンゴの重量変化率が等しくなった理由を考えると、サンゴは端から成長をおこなうために、両端が解放されている横置きのサンゴと、片端がアクリル板に接着されている縦置きのサンゴでは、縦置きのサンゴの方が骨格成長をするのに不利な面があることが挙げられる。こういったことが関係して、今回の様に骨格成長では差が見られなかったのではないかとと思われる。光合成の活性を評価したときには差が見られる可能性があると思われた。

表 3-16 12月17日から1月8日の横置きサンゴの空中重量 (g)

左には実験水槽2、右には実験水槽3の横置きサンゴの空中重量を掲載した。

水槽2	12月17日	12月21日	1月4日	1月8日
サンゴ7	4.60	4.66	4.86	4.92
サンゴ11	10.94	11.03	11.40	11.50
サンゴ15	5.75	5.78	5.90	5.94
サンゴ19	12.59	12.71	13.23	13.39
サンゴ27	5.23	5.28	5.46	5.51
平均	7.82	7.89	8.17	8.25

水槽3	12月17日	12月21日	1月4日	1月8日
サンゴ1	7.23	7.31	7.63	7.72
サンゴ2	1.66	1.67	1.74	1.76
サンゴ3	14.97	15.11	15.51	15.61
サンゴ4	6.66	6.72	6.95	7.03
サンゴ6	5.83	5.88	6.10	6.16
平均	7.27	7.34	7.58	7.65

表 3-17 12月17日から1月8日の縦置きサンゴの空中重量 (g)

左には実験水槽2、右には実験水槽3の縦置きサンゴの空中重量を掲載した。

水槽2	12月17日	12月21日	1月4日	1月8日
サンゴ7	5.06	5.11	5.25	5.28
サンゴ11	4.35	4.38	4.51	4.51
サンゴ15	7.33	7.40	7.59	7.66
サンゴ19	5.07	5.12	5.37	5.43
サンゴ27	4.06	4.11	4.24	4.28
平均	5.17	5.22	5.39	5.43

水槽3	12月17日	12月21日	1月4日	1月8日
サンゴ1	8.49	8.63	9.10	9.24
サンゴ2	7.94	7.99	8.19	8.25
サンゴ3	5.90	5.96	6.19	6.26
サンゴ4	7.75	7.84	8.11	8.19
サンゴ6	8.07	8.16	8.48	8.60
平均	7.63	7.71	8.01	8.11

表 3-18 期間4から期間6における横置きサンゴの重量変化率 (%/d)

左には実験水槽2、右には実験水槽3の横置きサンゴの空中重量を掲載した。

水槽2	期間4	期間5	期間6
サンゴ7	0.29	0.31	0.29
サンゴ11	0.21	0.24	0.22
サンゴ15	0.17	0.14	0.18
サンゴ19	0.23	0.29	0.29
サンゴ27	0.24	0.25	0.20
平均	0.23	0.25	0.24

水槽3	期間4	期間5	期間6
サンゴ1	0.26	0.32	0.30
サンゴ2	0.25	0.28	0.24
サンゴ3	0.22	0.19	0.16
サンゴ4	0.22	0.24	0.27
サンゴ6	0.22	0.27	0.27
平均	0.24	0.26	0.25

表 3-19 期間4から期間6における縦置きサンゴの重量変化率 (%/d)

左には実験水槽2、右には実験水槽3の縦置きサンゴの空中重量を掲載した。

水槽2	期間4	期間5	期間6
サンゴ7	0.25	0.20	0.17
サンゴ11	0.16	0.21	0.02
サンゴ15	0.22	0.19	0.24
サンゴ19	0.27	0.34	0.28
サンゴ27	0.35	0.21	0.28
平均	0.25	0.23	0.20

水槽3	期間4	期間5	期間6
サンゴ1	0.40	0.39	0.37
サンゴ2	0.15	0.18	0.18
サンゴ3	0.27	0.28	0.28
サンゴ4	0.28	0.25	0.24
サンゴ6	0.27	0.28	0.33
平均	0.27	0.28	0.28

表 3-20 12 月 17 日から 1 月 8 日における実験水槽 2 の横置きサンゴの重量変化率

水槽2	12月17日	1月8日	差	%/d
サンゴ7	4.60	4.92	0.31	0.31
サンゴ11	10.94	11.50	0.56	0.23
サンゴ15	5.75	5.94	0.20	0.16
サンゴ19	12.59	13.39	0.79	0.29
サンゴ27	5.23	5.51	0.28	0.24
平均	7.82	8.25	0.43	0.25

表 3-21 12 月 17 日から 1 月 8 日における実験水槽 2 の縦置きサンゴの重量変化率

水槽2	12月17日	1月8日	差	%/d
サンゴ7	5.06	5.28	0.23	0.21
サンゴ11	4.35	4.51	0.16	0.17
サンゴ15	7.33	7.66	0.33	0.21
サンゴ19	5.07	5.43	0.36	0.32
サンゴ27	4.06	4.28	0.23	0.25
平均	5.17	5.43	0.26	0.23

表 3-22 12 月 17 日から 1 月 8 日における実験水槽 3 の横置きサンゴの重量変化率

水槽3	12月17日	1月8日	差	%/d
サンゴ1	7.23	7.72	0.49	0.31
サンゴ2	1.66	1.76	0.10	0.27
サンゴ3	14.97	15.61	0.63	0.19
サンゴ4	6.66	7.03	0.36	0.25
サンゴ6	5.83	6.16	0.34	0.26
平均	7.27	7.65	0.38	0.26

表 3-23 12 月 17 日から 1 月 8 日における実験水槽 3 の縦置きサンゴの重量変化率

水槽3	12月17日	1月8日	差	%/d
サンゴ1	8.49	9.24	0.75	0.40
サンゴ2	7.94	8.25	0.31	0.18
サンゴ3	5.90	6.26	0.36	0.28
サンゴ4	7.75	8.19	0.44	0.26
サンゴ6	8.07	8.60	0.53	0.30
平均	7.63	8.11	0.48	0.28

表 3-24 12 月 17 日から 1 月 8 日における横置きサンゴの平均重量変化率の比較

	水槽2	水槽3
%/d 平均	0.25	0.26
電流条件	0.05A/m ²	0A/m ²
大小関係	電流あり 電流なし	

表 3-25 12 月 17 日から 1 月 8 日における縦置きサンゴの平均重量変化率の比較
 水槽 2 の重量変化率の平均は、表 3-21 からサンゴ 11 の重量変化率を除いて算出したため、
 表 3-21 の重量変化率の平均とは異なっている。

	水槽2	水槽3
%/d 平均	0.25	0.28
電流条件	0.05A/m ²	0A/m ²
大小関係	電流あり < 電流なし	

表 3-26 実験水槽 2 の縦置きサンゴと横置きサンゴの平均重量変化率の比較

水槽2	縦置き	横置き
%/d 平均	0.25	0.25
電流条件	0.05A/m ²	
大小関係	縦 = 横	

表 3-27 実験水槽 3 の縦置きサンゴと横置きサンゴの平均重量変化率の比較

水槽3	縦置き	横置き
%/d 平均	0.28	0.26
電流条件	0A/m ²	
大小関係	縦 横	

(3) 実験 C

実験 C は、2009 年 1 月 8 日から 1 月 14 日におこなった。条件は、表 3-9 の通りであった。実験 C では、実験 B と同様に、縦置きサンゴと横置きサンゴを 5 群体ずつ実験に使用した。また、実験 A、B と異なり、実験水槽 3 に電流を流した。更に、実験 C では電流値を $0.005\text{A}/\text{m}^2$ と、実験 A、B の $1/10$ にした。

実験に使用したサンゴの水中重量測定を以下の 3 日におこなった。

1 回目：1 月 8 日

2 回目：1 月 14 日

3 回目：1 月 18 日

測定した水中重量を空中重量に換算して、横置きサンゴは表 3-21 に、縦置きサンゴは表 3-22 に示す。1 月 8 日から 1 月 18 日の間に、いずれのサンゴでも重量は増加し続けていた。

(3-a) 実験期間における重量変化率のばらつき

実験 A、B と同様に、重量変化率にどの程度のばらつきがあるか調べるために、それぞれのサンゴについて、1 月 8 日から 1 月 14 日まで（期間 7）と、1 月 14 日から 1 月 18 日まで（期間 8）の 2 つの期間について、1 日当たりの重量変化率 $\%/d$ を求めた。求めた重量変化率は、横置きサンゴは表 3-32 に、縦置きサンゴは表 3-33 に示す。表 3-32 の左表から、実験水槽 2 の横置きサンゴの重量変化率は、2 つの期間で近い値をとっていた。それぞれの期間の平均を比較すると、その差は $0.04\%/d$ だった。次に、右の表から、実験水槽 3 の横置きサンゴの重量変化率は、2 つの期間で割と近い値をとっていた。2 つの期間の平均を比較すると、その差は $0.05\%/d$ だった。2 つの期間のばらつきを考慮して、実験水槽 2 と実験水槽 3 の横置きサンゴの重量変化率を比較するときには、 $0.05\%/d$ 程度の差は、有意な差ではないと解釈することにした。

続いて、縦置きサンゴの、2 つの期間の重量変化率を比較する。表 3-33 の左の表から、実験水槽 2 の縦置きサンゴの重量変化率は、サンゴ 15 以外は、2 つの期間で近い値をとっていた。サンゴ 15 は、期間 7 が若干低く、期間 7 と期間 8 の差は 0.12 だった。サンゴ 15 は期間 7 の間も、白化などの目視で確認できる異常はなかったために、測定の作業による誤差によって、期間 7 の値が低くなったのではないかと思われた。実験水槽 2 の縦置きサンゴの重量変化率を、2 つの期間で比較すると、その差は $0.03\%/d$ だった。サンゴ 15 のばらつきが少し大きかったために、期間 7 の平均を、サンゴ 15 を除いたサンゴ 7、サンゴ 11、サンゴ 19、サンゴ 27 の重量変化率から求めると、 $0.23\%/d$ となり、2 つの期間で同じ値となった。次に、表 3-33 の右の表から、実験水槽 3 の縦置きサンゴの重量変化率は、2 つの期間で近い値をとっていることがわかった。2 つの期間の平均を比較すると、その差は $0.02\%/d$ だった。それぞれの期間のばらつきを考慮して、実験水槽 2 と実験水槽 3 の縦置きサンゴの重量変化率を比較するときには、 $0.02\%/d$ 程度の差は、有意な差では

ないと解釈することにした。

(3-b) 実験水槽 2 と実験水槽 3 の重量変化率の比較

(3-a) から、縦置きサンゴ 15 以外では、重量変化率のばらつきが小さいということがわかったので、1 月 8 日から 1 月 18 日の期間について、実験水槽 2 と実験水槽 3 のサンゴの重量変化率の比較をおこなった。実験水槽 2 の重量変化率は、横置きは表 3-32 に、縦置きは表 3-33 に示す。実験水槽 3 は、横置きは表 3-34 に、縦置きは表 3-35 に示す。

まず、それぞれの水槽の、横置きサンゴの重量変化率の平均値を比較する。比較のために、表 3-32 と表 3-34 の実験水槽 2 と実験水槽 3 の重量変化率の平均を表 3-36 に並べて掲載した。実験水槽 2 の重量変化率の平均は $0.23\%/d$ 、実験水槽 3 は $0.29\%/d$ で、実験水槽 3 の方が高く、その差は $0.06\%/d$ だった。先ほどの (3-a) で、横置きサンゴの重量変化率のばらつきが $0.05\%/d$ 程度だったことを考慮すると、それよりは大きな差だった。

続いて、それぞれの水槽の縦置きサンゴの重量変化率の平均値を比較する。表 3-33 と表 3-35 の実験水槽 2 と実験水槽 3 の重量変化率の平均を表 3-37 に並べて掲載した。実験水槽 2 の重量変化率の平均は、サンゴ 15 の重量変化率を除いて算出した。(3-a) で述べた、重量変化率のばらつきについての考察で、実験水槽 2 の縦置きサンゴ 15 が期間 7 に、期間 8 と比較して低い変化率を示し、これは誤差を含む可能性が高いために除くこととした。実験水槽 2 の重量変化率の平均は $0.24\%/d$ 、実験水槽 3 は $0.30\%/d$ で、実験水槽 3 の方が高く、その差は $0.06\%/d$ だった。先ほどの (3-a) で、縦置きサンゴの重量変化率のばらつきが 0.02 程度だったことを考慮すると、その 3 倍の差だった。

実験 C では、B とは異なり、電流を実験水槽 3 に流し、実験水槽 2 には電流を流さなかった。また、流した電流値は $0.005A/m^2$ で、実験 A、B の $1/10$ の値だった。この実験では、電流を流した場合と流していない場合の重量変化率を比較した結果、横置きサンゴでは $0.005A/m^2$ の電流を流した水槽 3 のサンゴの方が若干高かったが、その差は (3-a) で考察した重量変化率のばらつきを考慮すると小さいようにも思われた。縦置きサンゴでも、水槽 3 の方が、重量変化率が高く、その差は (3-a) で考察した重量変化率のばらつきを考慮しても明確だった。

(3-C) 縦置きサンゴと横置きサンゴの重量変化率の比較

実験 C では、実験 B と同様に、横置きと縦置きサンゴを実験に使用した。先にも述べた様に、サンゴは固着性の生物であり、横置きにすると、置かれた板の上でカルシウムの成分を分泌して固着しようとする。このため、サンゴを横置きにして実験に使用すると、水中重量測定のために移動させる度に、進行していた固着をひきはがすことになり、これはサンゴに対してストレスになるのではないかと考えた。縦置きサンゴと横置きサンゴでは、縦置きサンゴの方が、重量変化率が高いのではないかと推察していた。しかし、実験 B では、縦置きの場合も横置きの場合でも、重量変化率は同じ位だった。

実験 C でも、実験 B と同じように比較をおこなう。実験水槽 2 と実験水槽 3 の縦置きサンゴと横置きサンゴの重量変化率を比較するために、表 3-36、と表 3-37 の重量変化率の平均を並べて、表 3-38 と表 3-39 に示す。表 3-38 から、実験水槽 2 の縦置きサンゴの重量変化率の平均は 0.24%/d、横置きサンゴの重量変化率の平均は 0.23%/d で、ほぼ等しい値だった。また、表 3-39 から、実験水槽 3 の縦置きサンゴの重量変化率の平均は 0.30%/d で、横置きサンゴの重量変化率の平均は 0.29%/d で、こちらもほぼ等しい値だった。先ほども述べたように、固着のために分泌した被覆を、移動の度に剥がされることが、サンゴにとってストレスになるのは確かである。また、サンゴは共生藻である褐虫藻の光合成によって、成長に必要な栄養の大半を得ていると言われているが、光合成できる面積という視点では、横置きサンゴは縦置きサンゴと比較して明らかに不利である。縦置きサンゴと横置きサンゴの重量変化率が等しくなった理由を考えると、サンゴは端から成長をおこなうために、両端が解放されている横置きサンゴと、片端がアクリル板に接着されている縦置きサンゴでは、縦置きサンゴの方が骨格成長をするのに不利な面があることが挙げられる。こういったことが関係して、実験 B と同様に、実験 C でも骨格成長では差が見られなかったのではないかと思われる。光合成の活性を評価したときには差が見られる可能性があると思われる。

表 3-28 1 月 8 日から 1 月 18 日の横置きサンゴの空中重量 (g)

左には実験水槽 2、右には実験水槽 3 の横置きサンゴの空中重量を掲載した。

水槽2	1月8日	1月14日	1月18日
サンゴ7	4.92	5.01	5.07
サンゴ11	11.50	11.67	11.77
サンゴ15	5.94	5.98	6.00
サンゴ19	13.39	13.67	13.85
サンゴ27	5.51	5.57	5.61
平均	8.25	8.38	8.46

水槽3	1月8日	1月14日	1月18日
サンゴ1	7.72	7.90	7.99
サンゴ2	1.76	1.79	1.80
サンゴ3	15.61	15.81	15.96
サンゴ4	7.03	7.17	7.25
サンゴ6	6.16	6.27	6.34
平均	7.65	7.79	7.87

表 3-29 1 月 8 日から 1 月 18 日の縦置きサンゴの空中重量 (g)

左には実験水槽 2、右には実験水槽 3 の縦置きサンゴの空中重量を掲載した。

水槽2	1月8日	1月14日	1月18日
サンゴ7	5.28	5.32	5.35
サンゴ11	4.51	4.55	4.59
サンゴ15	7.66	7.69	7.75
サンゴ19	5.43	5.55	5.65
サンゴ27	4.28	4.35	4.38
平均	5.43	5.49	5.54

水槽3	1月8日	1月14日	1月18日
サンゴ1	9.24	9.47	9.63
サンゴ2	8.24	8.35	8.41
サンゴ3	6.26	6.39	6.47
サンゴ4	8.18	8.31	8.39
サンゴ6	8.60	8.74	8.85
平均	8.10	8.25	8.35

表 3-30 期間 7、期間 8 における横置きサンゴの重量変化率（%/d）

左には実験水槽 2、右には実験水槽 3 の横置きサンゴの空中重量を掲載した。

水槽2	期間7	期間8
サンゴ7	0.31	0.29
サンゴ11	0.25	0.21
サンゴ15	0.10	0.08
サンゴ19	0.37	0.32
サンゴ27	0.20	0.15
平均	0.25	0.21

水槽3	期間7	期間8
サンゴ1	0.39	0.29
サンゴ2	0.29	0.21
サンゴ3	0.23	0.24
サンゴ4	0.35	0.29
サンゴ6	0.31	0.26
平均	0.31	0.26

表 3-31 期間 7、期間 8 における縦置きサンゴの重量変化率（%/d）

左には実験水槽 2、右には実験水槽 3 の縦置きサンゴの空中重量を掲載した。

水槽2	期間7	期間8
サンゴ7	0.12	0.13
サンゴ11	0.17	0.19
サンゴ15	0.07	0.19
サンゴ19	0.39	0.43
サンゴ27	0.25	0.21
平均	0.20	0.23

水槽3	期間7	期間8
サンゴ1	0.43	0.42
サンゴ2	0.21	0.18
サンゴ3	0.35	0.31
サンゴ4	0.27	0.23
サンゴ6	0.28	0.30
平均	0.31	0.29

表 3-32 1 月 8 日から 1 月 18 日における実験水槽 2 の横置きサンゴの重量変化率

水槽2	1月8日	1月18日	差	%/d
サンゴ7	4.92	5.07	0.15	0.31
サンゴ11	11.50	11.77	0.27	0.23
サンゴ15	5.94	6.00	0.06	0.10
サンゴ19	13.38	13.85	0.47	0.35
サンゴ27	5.51	5.61	0.10	0.18
平均	8.25	8.46	0.21	0.23

表 3-33 1 月 8 日から 1 月 18 日における実験水槽 2 の縦置きサンゴの重量変化率

水槽2	1月8日	1月18日	差	%/d
サンゴ7	5.28	5.35	0.07	0.13
サンゴ11	4.51	4.59	0.08	0.18
サンゴ15	7.66	7.75	0.09	0.12
サンゴ19	5.43	5.65	0.22	0.41
サンゴ27	4.28	4.38	0.10	0.24
平均	5.43	5.54	0.11	0.21

表 3-34 1 月 8 日から 1 月 18 日における実験水槽 3 の横置きサンゴの重量変化率

水槽3	1月8日	1月18日	差	%/d
サンゴ1	7.72	7.99	0.27	0.35
サンゴ2	1.75	1.80	0.04	0.26
サンゴ3	15.60	15.96	0.37	0.23
サンゴ4	7.02	7.25	0.23	0.33
サンゴ6	6.16	6.34	0.18	0.29
平均	7.65	7.87	0.22	0.29

表 3-35 1 月 8 日から 1 月 18 日における実験水槽 3 の縦置きサンゴの重量変化率

水槽3	1月8日	1月18日	差	%/d
サンゴ1	9.24	9.63	0.39	0.43
サンゴ2	8.24	8.41	0.16	0.20
サンゴ3	6.26	6.47	0.21	0.34
サンゴ4	8.18	8.39	0.21	0.25
サンゴ6	8.60	8.85	0.25	0.29
平均	8.10	8.35	0.25	0.30

表 3-36 1 月 8 日から 1 月 18 日における横置きサンゴの平均重量変化率の比較

	水槽2	水槽3
%/d 平均	0.23	0.29
電流条件	0A/m ²	0.005A/m ²
大小関係	電流なし < 電流あり	

表 3-37 1 月 8 日から 1 月 18 日における縦置きサンゴの平均重量変化率の比較
 水槽 2 の重量変化率の平均は、表 3-33 からサンゴ 15 の重量変化率を除いて算出したため、
 表 3-33 の重量変化率の平均とは異なっている。

	水槽2	水槽3
%/d 平均	0.24	0.30
電流条件	0A/m ²	0.005A/m ²
大小関係	電流なし < 電流あり	

表 3-38 実験水槽 2 の縦置きと横置きのサンゴの平均重量変化率の比較

水槽2	縦置き	横置き
%/d 平均	0.24	0.23
電流条件	0A/m ²	
大小関係	縦 横	

表 3-39 実験水槽 3 の縦置きと横置きのサンゴの平均重量変化率の比較

水槽3	縦置き	横置き
%/d 平均	0.30	0.29
電流条件	0.005A/m ²	
大小関係	縦 横	

3.2.3 3.2 章のまとめと今後の課題

実験 A、B、C では、実験水槽 2 と実験水槽 3 を使って実験をおこなってきた。また、それぞれの水槽では、全ての実験で同じサンゴを使用した。つまり、実験水槽 2 ではずっとサンゴ 7、サンゴ 11、サンゴ 15、サンゴ 19、サンゴ 27 を使用し、実験水槽 3 ではずっとサンゴ 1、サンゴ 2、サンゴ 3、サンゴ 4、サンゴ 6 を使用した。それぞれの実験の条件と、実験結果をまとめて、表 3-40 に示す。

(1) 電流がサンゴの骨格成長に与える影響について

表 3-40 から、電流の有無と重量変化率の関係について考察する。実験 A では、実験水槽 2 に 0.05A/m²の電流を流し、実験水槽 3 には電流を流さなかった。また、実験にはサンゴを横置きにして使用した。実験の結果、どちらの水槽のサンゴの水中重量変化率の平均も同じであり、電流の有無によるサンゴの骨格成長への影響は確認されなかった。実験 B では、実験 A と同様に、実験水槽 2 に 0.05A/m²の電流を流し、実験水槽 3 には電流を流さなかった。しかし、実験 A と違う点として、横置きのサンゴと縦置きのサンゴの両方を実験に使用した。実験の結果、横置きのサンゴでは、どちらの水槽のサンゴの水中重量変化率の平均もほぼ等しかった。縦置きのサンゴでは、電流を流さなかった水槽 3 のサンゴの方が高かった。実験 C では、実験 A、B とは電流を流す水槽を逆にして、実験水槽 3 に電流を流し、実験水槽 2 には電流を流さなかった。また、実験水槽 3 に流した電流は、実験 A、B の 1/10 の 0.005A/m²だった。実験の結果、横置きのサンゴでも縦置きのサンゴでも、0.005A/

m²の電流を流した実験水槽 3の方が重量変化率の平均が高かった。

電流を流している水槽と、流していない水槽では、どちらの重量変化率が高いか、という視点で見ると、実験 A では同程度で、実験 B では電流なしの方が高く、実験 C では電流ありの方が高い。しかし、実験 A、B と、実験 C では、流した電流の強さがそれぞれ 0.05A/m²と 0.005A/m²で、異なっている。また、実験 A、B、C のどの実験でも、実験水槽 2 ではサンゴ 7、サンゴ 11、サンゴ 15、サンゴ 19、サンゴ 27 を、実験水槽 3 ではサンゴ 1、サンゴ 2、サンゴ 3、サンゴ 4、サンゴ 6 を使用したため、それぞれのサンゴの重量変化率が実験 A、B、C でどう変化したかを比較できる。実験 A、B、C における、実験水槽 2 と実験水槽 3 の横置きサンゴの重量変化率の平均を比較するために、表 3-41 に並べて示す。実験水槽 2 の重量変化率の平均は実験 A > 実験 B > 実験 C と、段々と小さくなっていた。これに対して実験水槽 3 の重量変化率の平均は、実験 A > 実験 C > 実験 B で、実験 B では少し低下したが、実験 C では実験 A と同程度の値を示した。続いて、実験 A、B、C における、実験水槽 2 と実験水槽 3 の縦置きサンゴの重量変化率の平均を比較するために、表 3-42 に並べて示す。実験 A では、サンゴは全て横置きで使用したが、縦置きと横置きサンゴの重量変化率は差がなかったため、重量変化率の平均の変化を見るために、参考として横置きサンゴの重量変化率の平均を掲載した。実験 A の値は横置きサンゴの値を参考にすると、実験水槽 2 の縦置きサンゴの重量変化率の平均は、実験 A > 実験 B > 実験 C と、段々と小さくなっていた。これは、実験水槽 2 の横置きサンゴの重量変化率の変化と一致している。また、実験水槽 3 についても、同じ様に重量変化率の平均値を見ると、実験 A = 実験 C > 実験 B で、実験 B では少し低下したが、実験 C は実験 A と同じ値を示した。この、実験水槽 2 と実験水槽 3 のサンゴの、重量変化率の平均の変化の違いには意味があるように思われる。実験水槽 2 は、実験 A でも実験 B でも、0.05A/m²の電流を流した。そして実験水槽 3 には電流を流さなかった。実験水槽 2 では、縦置きサンゴでも、横置きサンゴでも、重量変化率の平均が段々と小さくなっていったのは、この 0.05A/m²という電流が影響を与えた可能性が考えられる。つまり、0.05A/m²の電流がサンゴにとってストレスとなった可能性があるのではないかと。ここで気になるのは、実験 C では 0.005A/m²の電流を実験水槽 3 に流していたにもかかわらず、実験 C のときの実験水槽 3 のサンゴの重量変化率の平均は、実験 B と比較して下がっていないということだ。縦置きサンゴでも横置きサンゴでも、むしろ上がっている。電流がストレスになるのなら、実験 B と比較して下がるのではないかと推察されが、推察とは逆の様子を示していた。この理由としては、0.05A/m²という電流は、サンゴにとってストレスになるが、その 1/10 の 0.005A/m²という電流は弱いためにストレスにはならないという可能性が考えられるが、実験期間の違いを考慮しなければならない。0.005A/m²という電流を実験水槽 3 に流した期間（実験 C、8 日）が、0.05A/m²という電流を実験水槽 2 に流した時間（実験 A と実験 B、約 50 日）よりも短いために、ストレスとなっても、実験期間が短いという理由で、その影響が確認できなかった可能性もあると思われる。

今後の課題としては、実験 C のように、電流条件を 0.005A/m²程度にした実験を、更に長

期的におこなう必要があると思われた。そして、 $0.05\text{A}/\text{m}^2$ の電流値はストレスで、 $0.005\text{A}/\text{m}^2$ の電流値はサンゴの骨格成長にとってストレスにはならないのか、むしろ今回の実験結果の通りに正の影響があるのか、それとも実験期間を長くとると、どちらもストレスになる可能性があるのかということを確認する必要があると思われた。

(2) サンゴの置き方による重量変化率の違いについて

サンゴは固着性の生物であるという特徴から、アクリル板に接着して縦置きにした場合と、横置きにした場合では、重量変化率が異なるのではないかと推察して、実験 B と実験 C で、それぞれの置き方のサンゴの重量変化率を比較した。ところが、表 3-40 を見るとわかるように、実験 B でも実験 C でも置き方の違いによって、重量変化率に差は見られなかった。これは何回か述べたことだが、固着のために分泌した被覆を、移動の度に剥がされることが、サンゴにとってストレスになるのは確かである。また、サンゴは共生藻である褐虫藻の光合成によって、成長に必要な栄養の大半を得ていると言われているが、光合成できる面積という視点では、横置きのサンゴは縦置きのサンゴと比較して明らかに不利である。縦置きのサンゴと横置きのサンゴの重量変化率が等しくなった理由を考えると、サンゴは端から成長をおこなうために、両端が解放されている横置きのサンゴと、片端がアクリル板に接着されている縦置きのサンゴでは、縦置きのサンゴの方が骨格成長をするのに不利な面があることが挙げられる。こういったことが関係して、実験 B と同様に、実験 C でも骨格成長では差が見られなかったのではないかとと思われる。光合成の活性を評価したときには差が見られる可能性があると思われた。このことについては、電流がサンゴの光合成に与える影響について検証した第 4 章や、第 5 章のまとめで論じることにする。

最後に、参考のため、期間 1 から 8 における、実験水槽 2 と実験水槽 3 の横置きのサンゴの重量変化率の平均を表 3-44 と 3-45 に、期間 4 から 8 における縦置きのサンゴの重量変化率の平均を表 3-46 と表 3-47 にそれぞれ示す。

表 3-40 実験 A、B、C の実験条件と実験結果のまとめ

	電流値		サンゴ		重量変化率の大小関係	
	水槽2	水槽3	水槽2	水槽3	電流の有無	サンゴの置き方
実験A 11/18-12/14	$0.05\text{A}/\text{m}^2$	$0\text{A}/\text{m}^2$	横置き 5群体	横置き 5群体	電流あり = 電流なし	縦置き 横置き
実験B 12/17-1/8	$0.05\text{A}/\text{m}^2$	$0\text{A}/\text{m}^2$	横置き:5 縦置き:5 10群体	横置き:5 縦置き:5 10群体	横置き:電流あり 電流なし 縦置き:電流あり < 電流なし	
実験C 1/8-1/18	$0\text{A}/\text{m}^2$	$0.005\text{A}/\text{m}^2$	横置き:5 縦置き:5 10群体	横置き:5 縦置き:5 10群体	横置き:電流あり > 電流なし 縦置き:電流あり > 電流なし	縦置き 横置き

表 3-41 実験 A、B、C の実験条件と横置きサンゴの重量変化率の平均の比較

	実験A		実験B		実験C	
	水槽2	水槽3	水槽2	水槽3	水槽2	水槽3
%/d 平均	0.30	0.30	0.25	0.26	0.23	0.29
電流条件	0.05A/m ²	0A/m ²	0.05A/m ²	0A/m ²	0A/m ²	0.005A/m ²
大小関係	電流あり = 電流なし		電流あり 電流なし		電流なし < 電流あり	

表 3-42 実験 B、C の実験条件と縦置きサンゴの重量変化率の平均の比較

	実験A		実験B		実験C	
	水槽2	水槽3	水槽2	水槽3	水槽2	水槽3
%/d 平均	0.30	0.30	0.25	0.28	0.24	0.30
電流条件	0.05A/m ²	0A/m ²	0.05A/m ²	0A/m ²	0A/m ²	0.005A/m ²
大小関係	電流あり = 電流なし		電流あり < 電流なし		電流なし < 電流あり	

表 3-43 期間 1 から期間 8 における実験水槽 2 の横置きサンゴの重量変化率 (%/d)

水槽2	期間1	期間2	期間3	期間4	期間5	期間6	期間7	期間8
サンゴ7	0.29	0.31	0.30	0.29	0.31	0.29	0.31	0.29
サンゴ11	0.24	0.25	0.24	0.21	0.24	0.22	0.25	0.21
サンゴ15	0.27	0.24	0.23	0.17	0.14	0.18	0.10	0.08
サンゴ19	0.40	0.33	0.29	0.23	0.29	0.29	0.37	0.32
サンゴ27	0.37	0.36	0.31	0.24	0.25	0.20	0.20	0.15
平均	0.31	0.30	0.27	0.23	0.25	0.24	0.25	0.21

表 3-44 期間 1 から期間 8 における実験水槽 3 の横置きサンゴの重量変化率 (%/d)

水槽3	期間1	期間2	期間3	期間4	期間5	期間6	期間7	期間8
サンゴ1	0.32	0.29	0.54	0.26	0.32	0.30	0.39	0.29
サンゴ2	0.20	0.24	0.21	0.25	0.28	0.24	0.29	0.21
サンゴ3	0.29	0.31	0.30	0.22	0.19	0.16	0.23	0.24
サンゴ4	0.35	0.30	0.27	0.22	0.24	0.27	0.35	0.29
サンゴ6	0.34	0.26	0.26	0.22	0.27	0.27	0.31	0.26
平均	0.30	0.28	0.31	0.24	0.26	0.25	0.31	0.26

表 3-45 期間 1 から期間 8 における実験水槽 2 の縦置きサンゴの重量変化率 (%/d)

水槽2	期間4	期間5	期間6	期間7	期間8
サンゴ7	0.25	0.20	0.17	0.12	0.13
サンゴ11	0.16	0.21	0.02	0.17	0.19
サンゴ15	0.22	0.19	0.24	0.07	0.19
サンゴ19	0.27	0.34	0.28	0.39	0.43
サンゴ27	0.35	0.21	0.28	0.25	0.21
平均	0.25	0.23	0.20	0.20	0.23

表 3-46 期間 1 から期間 8 における実験水槽 3 の縦置きサンゴの重量変化率（%/d）

水槽3	期間4	期間5	期間6	期間7	期間8
サンゴ1	0.40	0.39	0.37	0.43	0.42
サンゴ2	0.15	0.18	0.18	0.21	0.18
サンゴ3	0.27	0.28	0.28	0.35	0.31
サンゴ4	0.28	0.25	0.24	0.27	0.23
サンゴ6	0.27	0.28	0.33	0.28	0.30
平均	0.27	0.28	0.28	0.31	0.29

第4章 電流がサンゴの光合成に与える影響の検証

4章の概要

第3章では、電流とサンゴの骨格成長の関係を調べるための、野外実験と室内実験の結果について検討をおこなった。本章では、電流がサンゴと共生藻の光合成に与える影響について、室内実験をおこなった結果に基づいて検討をおこなう。

サンゴは、褐虫藻という、渦鞭毛藻類に属する植物プランクトンを体内に共生させている。この褐虫藻は光合成をして、酸素と有機物を合成する。サンゴは呼吸をして、酸素を消費しながら褐虫藻の合成した有機物を利用して成長している。サンゴは、成長に必要な栄養の殆どを、この褐虫藻が合成する有機物から得ていると言われており、光合成や呼吸はサンゴの成長にとって非常に重要である。この光合成と呼吸には、どちらにも酸素が関係している。本研究では、電流がサンゴと褐虫藻の光合成や呼吸に影響することで、最終的にサンゴの成長を促進するのではないかと考え、水温、光量など実験条件の制御できる室内実験により検証をおこなった。具体的には、密閉容器にサンゴを封入して、電流条件を変えたときの、D0の変化率を比較することで、電流が光合成に与える影響を考察した。

ところで、光合成の変化は、溶存酸素以外の項目でも評価することができる。光合成はクロロフィルが光エネルギーを化学エネルギーに変換することによって進行するが、当たった光エネルギーの内、光合成の回路で使われなかった分は、光合成回路の破壊を防ぐために、蛍光か熱として発散される。このときに出る蛍光はクロロフィル蛍光と呼ばれる。クロロフィル蛍光の強度は、光合成の状態によって変化するため、光合成についての情報を得るのに有用である²⁶⁾。また、クロロフィル蛍光を測定する様々な機械が開発されている。本研究では、クロロフィル蛍光を画像として捉えられる Photon Systems Instruments 社の Handy FluorCam SN-HFC046 を使用した。この FluorCam で測定して、得られる値の一つに光合成速度に比例する F_v/F_m がある。今回の実験では、電流条件の異なる環境で飼育したサンゴの、 F_v/F_m の値を比較することで、電流が光合成に与える影響を考察した。

4.1 D0 測定実験

4.1.1 実験方法

(1) 実験試料

実験に使用したサンゴは、石垣島から取り寄せた枝状のスギノキミドリイシである。石垣の海域で、5cm 程度の長さに枝を折り、しばらく石垣の海域で養生させた群体を使用した。取り寄せたサンゴは、東大の水槽で人工的に飼育し、水槽の環境に順化させた。取り寄せたサンゴの中には、すぐに白化して死亡してしまう群体も多かったが、実験には水槽で半年以上飼育に成功した群体のみを使用した。実験に使用するサンゴは、番号を振って区別

した。水槽での飼育条件は以下の通りだった。

光量：朝 8 時～夜 8 時は約 300PAR、夜 8 時～朝 8 時は約 1PAR 以下

水温：クーラーとヒーターで 25 ± 2 に調整

塩分濃度：32.0～33.0

(2) 実験装置

D0 測定実験は、写真 4-1 に示す、密閉可能な実験装置を使用しておこなった。この実験装置は、アクリルと塩ビパイプでできている。サイズは $160 \times 224 \times 300$ (mm) で、容量は 10.8L である。



写真 4-1 D0 測定実験の装置

(3) 実験の手順

電流条件を様々に変えて、D0 の変化率の比較をおこなうために、本研究では、7 回の D0 測定実験をおこなった。D0 の測定には、ポータブル測定器 (HACH 社製、HQ40d) と、蛍光式 D0 計 (HACH 社製、LD010103) を使用した。各実験で流した電流条件を、表 4-1 に示す。実験の手順は、図 4-1 に示す。まず、実験装置に海水を満たして、予め番号を振って飼育しておいた 5cm 程度の枝状スギノキミドリイシ 6 群体 (サンゴ 1～6) を移動し、装置を密閉した。実験には、沖縄県石垣島の玉取から取り寄せた海水を使用した。自然の海水には、生物の死骸や植物プランクトンが含まれている可能性があるために、40 ミクロンのメッシュで濾過して、10 分以上エアレーションをしてから使

用した。実験装置は恒温槽に沈めて、ヒーターをとりつけ、水温が一定になるようにした（ 25 ± 2 ）。恒温槽にライトを設置して、光量（明条件：約 300PAR か暗条件約：1PAR 以下）を設定した。そのまま、1 時間程度置いておき、装置内の環境にサンゴを順化させた。その後、装置の両端に設置してある塩ビ管に、陽極と陰極を設置して、電流条件を設定した。電極は白金電極を使用した。白金電極を使用して海水に電流を流すと、海水の電気分解によって陽極には塩素が発生し、陰極には強アルカリ性の電着物質が析出する²⁰⁾。閉鎖系の水槽で実験をおこなったために、このような発生物質は水槽の水質を悪化させると考えられた。このために、食用の寒天を満たした塩ビのキャップを電極にはめることで、発生した物質が水槽に影響しないようにした。

電流密度は、0（なし）、0.025、0.05、0.075、0.1A/m²のいずれかにした。そのまま 1～2 時間程度置いて、連続的に DO 値、pH 値を記録した。実験の間、装置内の海水は十分に循環させた。電流の条件を変えて、図 4-1 の 1～3 を繰り返し行った。電流条件を変える際には、装置内の海水を半分以上入れ替えるようにした。電流密度の条件は、第 1 章で紹介した、竹富島の浮き桟橋の例で、サンゴが特に多くついていた場所の電流値を参考に、微弱電流として 0.1A/m²以下にした。

明条件のときには光合成と呼吸が、暗条件のときには呼吸が密閉した実験水槽内の DO 変化率に関係しているために、正味の光合成率（DO 変化率）は、明条件時の DO 増加率から暗条件時の DO 減少率を引いた値となる。このため、正味の DO 変化率を求めるために、明条件と暗条件は必ず両方おこなうこととした。

実験条件を以下に整理する。

水温： 25 ± 2

光量：明条件 約 300PAR、暗条件 約 1PAR 以下

電流密度：0（なし）、0.025、0.05、0.075、0.1

塩分濃度：約 33.5

サンゴ：サンゴ 1～6 の 6 群体



写真 4-2 サンゴ 1～6

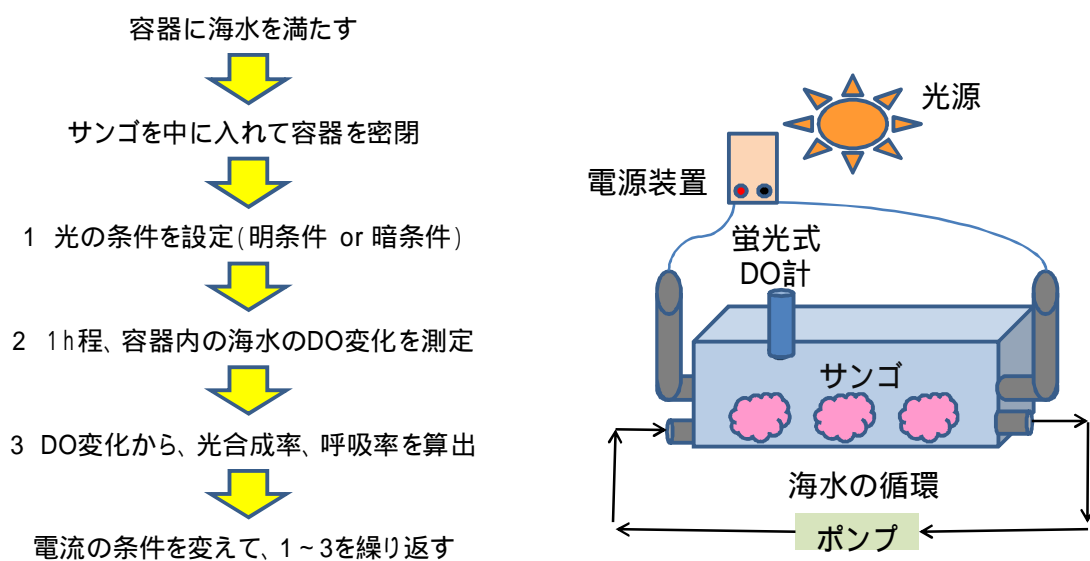


図 4-1 実験の手順

表 4-1 実験 1 から実験 7 で実験した電流条件

	実験1	実験2	実験3	実験4	実験5	実験6	実験7
電流値 A/m ²	0.025A/m ²	0.05A/m ²	0.05A/m ²	0.075A/m ²	0.1A/m ²	0.1A/m ²	0.025A/m ² 0.05A/m ² 0.1A/m ²

(4) DO 変化の評価について

この実験では、電流条件を変えて、DO 変化を比較する。DO 変化は、実験開始時の DO と実験終了時の DO から、変化率を求めて評価した。変化率は、開始時の測定値と、終了時の測定値の差を実験時間で除して、それを更に実験で使用したサンゴの空中重量で除して、その値に実験装置の容量をかけて求めた。単位は、mgO₂/g サンゴ・day となり、1 日当たり、

サンゴ単位重量当たりの D0 変化とした。

$$\begin{aligned} & \{(\text{最後の測定値mg/L}) - (\text{最初の測定値mg/L})\} \div (\text{測定した時間min}) \times (60\text{min/h}) \times (24\text{h/d}) \div \\ & (\text{使用したサンゴの空中重量g}) \times (\text{装置容量 } 10.8\text{L}) \\ & = (\text{mgO}_2/\text{gサンゴ} \cdot \text{day}) \end{aligned}$$

式 4-1 測定値 (mgO₂/L) mgO₂/g サンゴ・day に単位を換算するための式

4.1.2 実験結果

(1) 予備実験

(1-a) D0 値の変化率の日変動について

電流を流す実験を開始する前に、光合成による D0 の変化率の、日変動を調べる予備実験をおこなった。実験の流れは図 4-2 のようであった。図 4-1 の手順で実験準備をおこない、サンゴを実験装置に封入して、D0 値と pH 値を 1 時間測定し続ける、という流れを 12 回繰り返した (RUN1 から RUN12)。各 RUN の間では、装置内の海水を半分以上入れ替えた。実験は、12 時から 24 時の間におこなった。

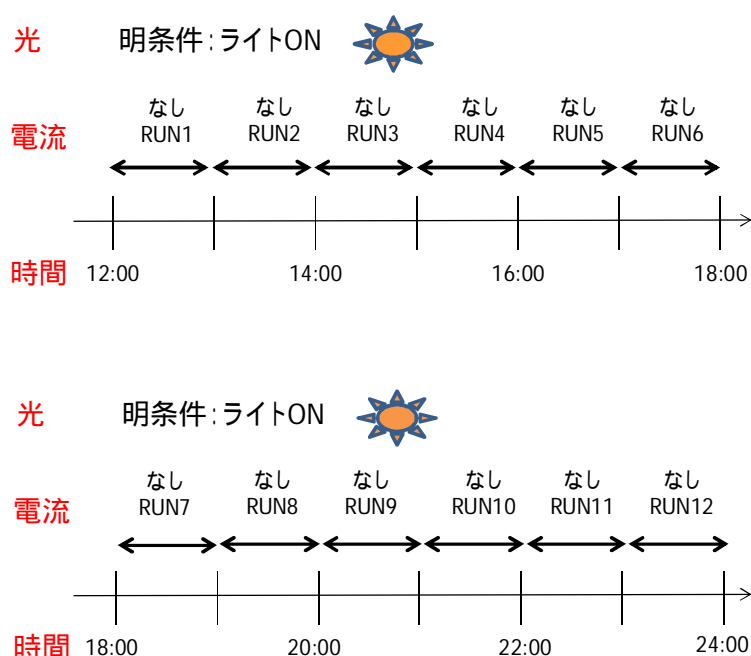


図 4-2 予備実験の流れ

RUN1 から RUN12 について、実験開始時の D0 と、実験終了時の D0 を式 4-1 に代入して、D0 変化率、mgO₂/g サンゴ・day を求めた。それぞれの RUN の D0 変化率を棒図 4-3 に示す。RUN1 から RUN12 で、D0 変化率が最も大きかったのは RUN4 の 1.76 mgO₂/g サンゴ・day だった。また、最も小さかったのは RUN11 の 1.15 mgO₂/g サンゴ・day であった。実験に使用したサンゴは、飼育水槽では朝 8 時～夜 8 時の間を明条件として飼育しているために、その

時間帯に当てはまる RUN1 から RUN8 は、D0 変化率が他の RUN と比較して高いのではないかと推察していた。RUN1 から 8 と、RUN9 から RUN12 の D0 変化率を比較すると、RUN10 が RUN1 より高く、RUN6 と同じ D0 変化率 $1.47 \text{ mgO}_2/\text{g}$ サンゴ・day を示しているが、RUN9、RUN11、RUN12 は RUN1 から RUN8 よりも低い値を示していた。このことから、明条件の実験は夜 8 時よりも前の時間帯におこなうことにした。

RUN1 から RUN8 を比較すると、D0 変化率には多少の差があった。RUN1 から RUN8 の平均は $1.55 \text{ mgO}_2/\text{g}$ サンゴ・day だった。平均との差が大きかったのは RUN1 と RUN4 で、その差はそれぞれ $0.14 \text{ mgO}_2/\text{g}$ サンゴ・day と $0.21 \text{ mgO}_2/\text{g}$ サンゴ・day であった。しかし、他の RUN の平均との差は、 $0.1 \text{ mgO}_2/\text{g}$ サンゴ・day 以下で、安定した値を示していた。このことから、電流を流した場合と、流していない場合で、D0 変化率を mgO_2/g サンゴ・day を比較するときには、 $0.1 \text{ mgO}_2/\text{g}$ サンゴ・day 程度の差は有意な差ではないと解釈することにした。

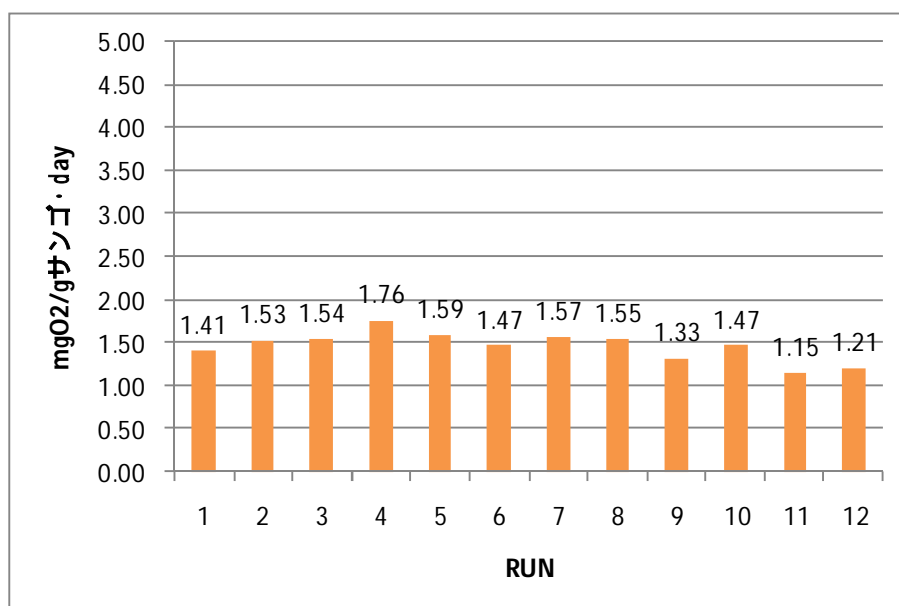


図 4-3 予備実験の D0 変化率

(1-b) 実験開始時の D0 値と D0 変化率の関係について

この実験には石垣から取り寄せた海水をろ過して、10 分以上エアレーションをしてから使用した。それでも、実験開始時の D0 値をいつも一定にすることができなかったために、それが D0 変化率に影響するのではないかと懸念があった。それを確認するために、D0 変化率を縦軸に、実験開始時の D0 値を横軸にとったグラフに、RUN1 から 12 のデータをプロットした(図 4-4)。これを見ると、実験開始時の D0 値が 6.7 から $7.3 \text{ mgO}_2/\text{g}$ サンゴ・day の間にある場合は、実験開始時の D0 値と D0 変化率には相関がないことがわかる。実験に使用する海水は、10 分以上エアレーションをおこなうと大抵この範囲の D0 値を示すので、影響はないということがわかった。

以上のことを考慮しておこなった実験の結果を以下で説明する。

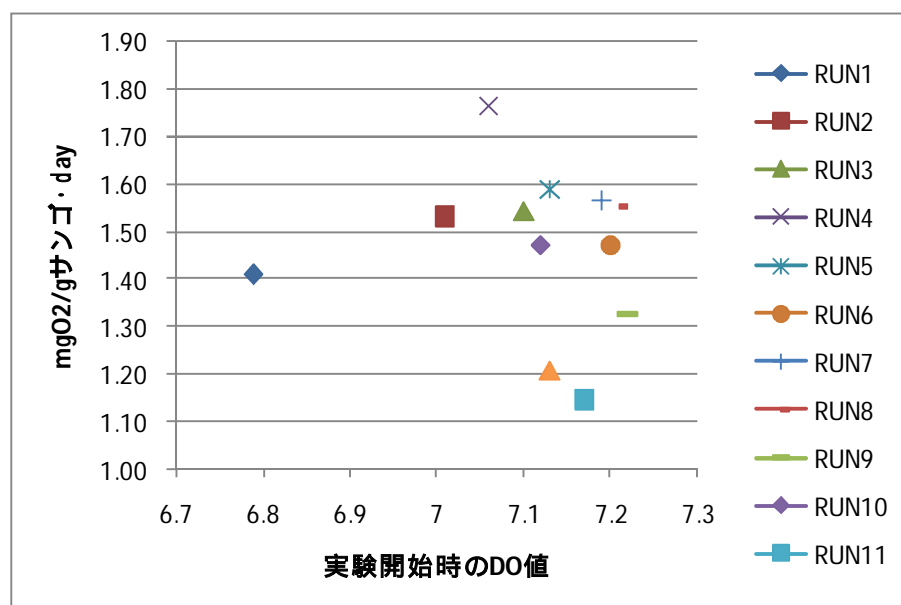


図 4-4 実験開始時の DO 値と DO 変化率の関係

(2) 電流条件 0.025A/m²の実験 (実験 1) の結果

まず、電流を流さなかった場合と、0.025A/m²の電流を流した場合の DO 変化率を比較した、実験 1 の結果を示す。図 4-5 のように、実験 1 ではまず、光条件を明条件にして、サンゴを実験装置に移動して順化させた後、電流を流さずに 1 時間 DO 値の測定をおこなった。その後、0.025A/m²の電流を流しながら 1 時間 DO 値の測定をおこなった。更にその後、電流を切って、再び電流を流さずに 1 時間 DO 値の測定をおこなった。明条件の実験終了後、光条件を暗条件にして、明条件と同じ流れで実験をおこなった。電流条件を切り替える際には、装置内の海水を半分以上入れ替えるようにした。

明条件時の DO 変化率から、暗条件時の DO 減少率を引いて求めた正味の光合成率 (DO 変化率) を棒グラフにして、図 4-6 に示した。棒グラフの時間経過は、左から右となっている。DO 変化率の大小関係は 1 回目の電流なし < 2 回目の電流なし < 0.025A/m²となっていた。1 回目の電流なしの DO 変化率と、0.025A/m²の DO 変化率の差は 0.77 mgO₂/g サンゴ · day、2 回目の電流なしの DO 変化率と 0.025A/m²の DO 変化率の差は 0.61 mgO₂/g サンゴ · day だった。また、1 回目の電流なしの DO 変化率と 2 回目の電流なし DO 変化率の差は 0.16 mgO₂/g サンゴ · day だった。実験 1 では、0.025A/m²の電流を流したときの方が、電流を流さなかった場合と比較して DO 変化率が大きかった。また、1 回目の電流なしよりも、2 回目の電流なしの方が、DO 変化率が大きかった。

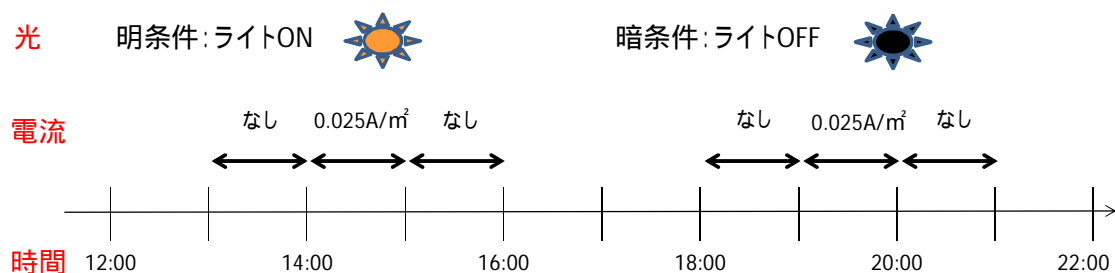


図 4-5 実験 1 の流れ

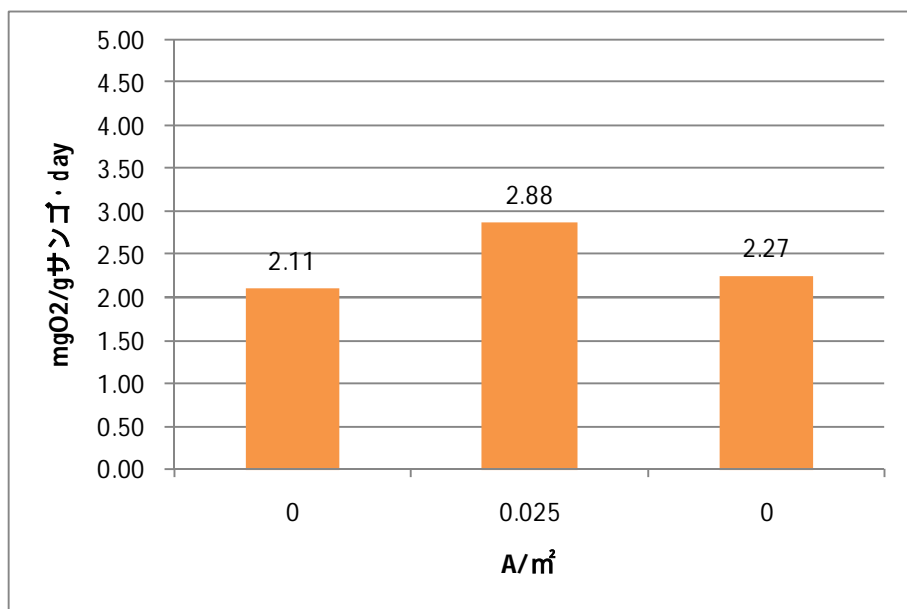


図 4-6 実験 1 の D0 変化率

(2) 電流条件 0.05A/m²の実験 (実験 2、3) の結果

電流を流さなかった場合と、0.05A/m²の電流を流した場合の D0 変化率を比較した、実験 2、3 の結果を示す。図 4-7 のように、実験 2、3 ではまず、光条件を明条件にして、サンゴを実験装置に移動して順化させた後、電流を流さずに 1 時間 D0 値の測定をおこなった。その後、0.05A/m²の電流を流しながら 1 時間 D0 値の測定をおこなった。更にその後、電流を切って、再び電流を流さずに 1 時間 D0 値の測定をおこなった。明条件の実験終了後、光条件を暗条件にして、明条件と同じ流れで実験をおこなった。電流条件を切り替える際には、装置内の海水を半分以上入れ替えるようにした。

実験 2 の結果について、明条件時の D0 変化率から暗条件時の D0 減少率を引いて求めた正味の光合成率 (D0 変化率) を棒グラフにして、図 4-8 に示す。棒グラフの時間経過は、左から右となっている。D0 変化率の大小関係は 2 回目の電流なし < 0.05A/m² < 1 回目の電流なしとなっていた。1 回目の電流なしの D0 変化率と、0.05A/m²の D0 変化率の差は 0.14 mgO₂/g サンゴ・day、2 回目の電流なしの D0 変化率と 0.05A/m²の D0 変化率の差は 0.35 mgO₂/g

サンゴ・day だった。また、1 回目の電流なしと 2 回目の電流なしの差は $0.49 \text{ mgO}_2/\text{g}$ サンゴ・day だった。実験 2 では、 $0.05\text{A}/\text{m}^2$ の電流を流したときの D0 変化は、2 回目の電流なしよりは大きい、1 回目の電流なしよりは小さかった。電流を流す前の、1 回目の電流なしの方が、電流を流した場合よりも D0 変化率が高いというのは、実験 1 の結果と傾向が異なる。また、2 回目の電流なしよりも、1 回目の電流なしの方が、D0 変化率が大きかった。これも、実験 1 の結果とは異なることだ。実験 2 の結果では、時間の経過に従って D0 変化率が小さくなっていくように思われた。

実験 3 の結果について、明条件時の D0 変化率から暗条件時の D0 減少率を引いて求めた正味の光合成率（D0 変化率）を棒グラフにして、図 4-9 に示す。D0 変化率の大小関係は 1 回目の電流なし $< 0.025\text{A}/\text{m}^2 < 2$ 回目の電流なしとなっていた。1 回目の電流なしの D0 変化率と、 $0.05\text{A}/\text{m}^2$ の D0 変化率の差は $1.01 \text{ mgO}_2/\text{g}$ サンゴ・day、2 回目の電流なしと $0.05\text{A}/\text{m}^2$ の変化率の差は $0.08 \text{ mgO}_2/\text{g}$ サンゴ・day だった。また、1 回目の電流なしの D0 変化率と 2 回目の電流なしの D0 変化率の差は $1.09 \text{ mgO}_2/\text{g}$ サンゴ・day だった。実験 3 では、 $0.05\text{A}/\text{m}^2$ の電流を流したときの D0 変化率は、1 回目の電流なしよりは大きい、2 回目の電流なしよりは少し小さかった。実験 3 の結果では、時間の経過に従って、D0 変化率が大きくなっていくように思われた。

実験 3 の結果の傾向は、同じ条件で実験をした実験 2 とは異なっていた。また、D0 変化率の値を見ると、実験 1、2 では $2.0 \sim 2.5 \text{ mgO}_2/\text{g}$ サンゴ・day 程度の値なのに対して、実験 3 では $4.0 \text{ mgO}_2/\text{g}$ サンゴ・day 程度の値が見られた。

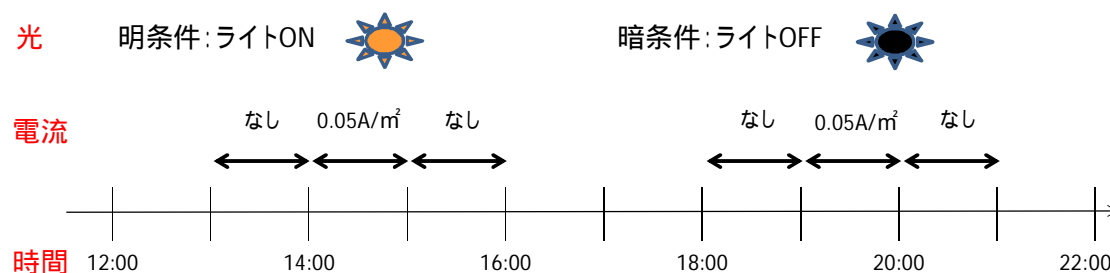


図 4-7 実験 2、実験 3 の流れ

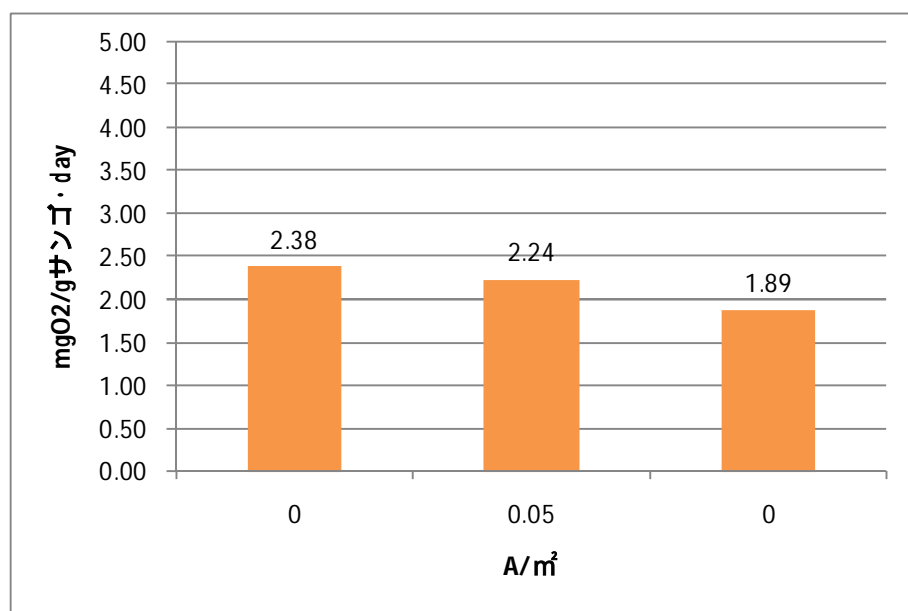


図 4-8 実験 2 の D0 変化率

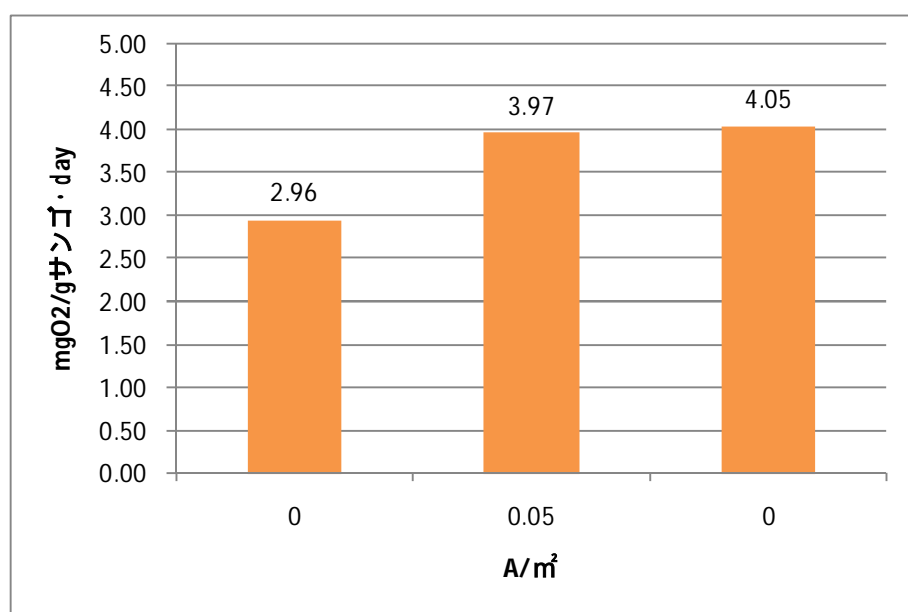


図 4-9 実験 3 の D0 変化率

(3) 電流条件 $0.075\text{A}/\text{m}^2$ の実験 (実験4) の結果

電流を流さなかった場合と、 $0.075\text{A}/\text{m}^2$ の電流を流した場合の D_0 変化率を比較した、実験4の結果を示す。図4-10のように、実験4ではまず、光条件を明条件にして、サンゴを実験装置に移動して順化させた後、電流を流さずに1時間 D_0 値の測定をおこなった。その後、 $0.075\text{A}/\text{m}^2$ の電流を流しながら1時間 D_0 値の測定をおこなった。更にその後、電流を切って、再び電流を流さずに1時間 D_0 値の測定をおこなった。明条件の実験終了後、光条件を暗条件にして、明条件と同じ流れで実験をおこなった。電流条件を切り替える際には、装置内の海水を半分以上入れ替えるようにした。

実験4の結果について、明条件時の D_0 変化率から暗条件時の D_0 減少率を引いて求めた正味の光合成率 (D_0 変化率) を棒グラフにして、図4-11に示す。 D_0 変化率の大小関係は1回目の電流なし < 2回目の電流なし < $0.075\text{A}/\text{m}^2$ となっていた。1回目の電流なしの D_0 変化率と、 $0.075\text{A}/\text{m}^2$ の D_0 変化率の差は $0.16\text{ mgO}_2/\text{g}$ サンゴ・day、2回目の電流なしと $0.075\text{A}/\text{m}^2$ の D_0 変化率の差は $0.10\text{ mgO}_2/\text{g}$ サンゴ・day だった。また、1回目の電流なしと2回目の電流なしの D_0 変化率の差は $0.06\text{ mgO}_2/\text{g}$ サンゴ・day だった。実験4では、 $0.075\text{A}/\text{m}^2$ の電流を流したときの D_0 変化率は、いずれの電流なしより高かった。電流なしよりも、電流を流した場合の方が、 D_0 変化率が大きいのというのは、実験1の結果と一致している。しかし、 D_0 変化率の差を見ると、実験1と比較して実験4の方がかなり小さかった。

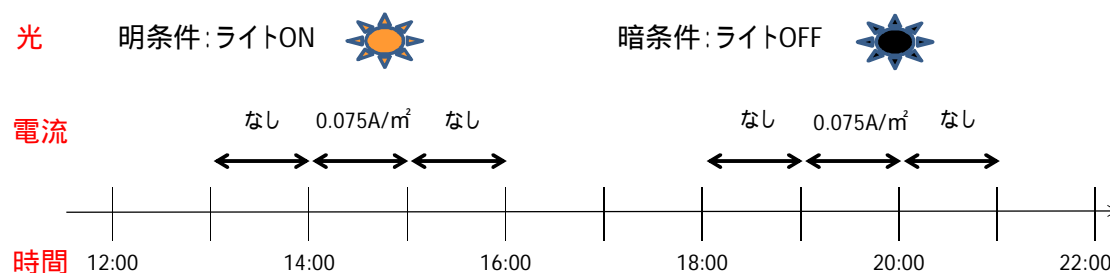


図 4-10 実験4の流れ

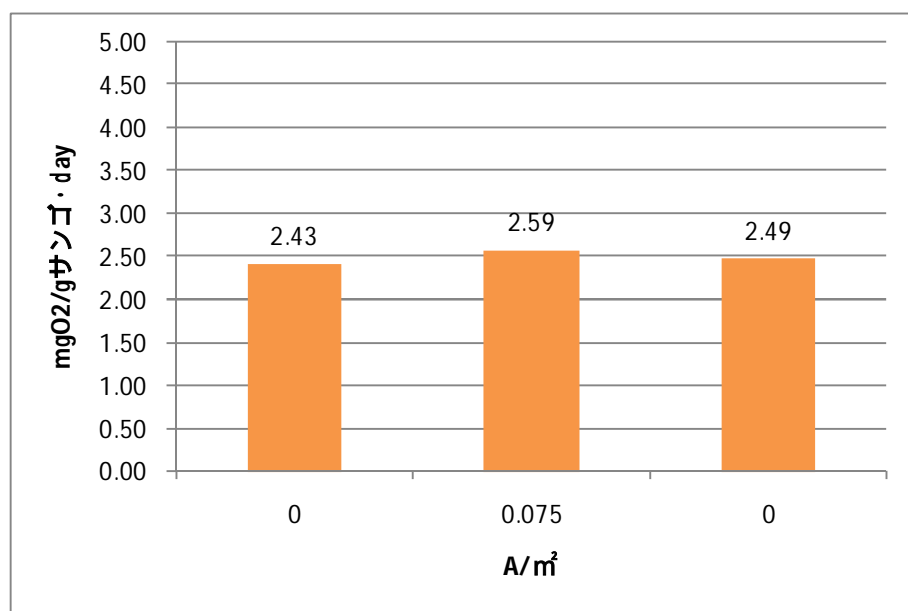


図 4-11 実験 4 の DO 変化率

(4) 電流条件 0.1A/m²の実験（実験 5、6）の結果

電流を流さなかった場合と、0.1A/m²の電流を流した場合の DO 変化率を比較した、実験 5、6 の結果を示す。図 4-12 のように、実験 4 ではまず、光条件を明条件にして、サンゴを実験装置に移動して順化させた後、電流を流さずに 1 時間 DO 値の測定をおこなった。その後、0.1A/m²の電流を流しながら 1 時間 DO 値の測定をおこなった。更にその後、電流を切って再び電流を流さずに 1 時間 DO 値の測定をおこなった。明条件の実験終了後、光条件を暗条件にして、明条件と同じ流れで実験をおこなった。電流条件を切り替える際には、装置内の海水を半分以上入れ替えるようにした。

実験 5 の結果について、明条件時の DO 変化率から暗条件時の DO 減少率を引いて求めた正味の光合成率（DO 変化率）を棒グラフにして、図 4-13 に示す。DO 変化率の大小関係は 1 回目の電流なし < 2 回目の電流なし < 0.1A/m²となっていた。1 回目の電流なしと、0.1A/m²の DO 変化率の差は 1.65 mgO₂/g サンゴ・day、2 回目の電流なしと 0.1A/m²の変化率の差は 0.7 mgO₂/g サンゴ・day だった。また、1 回目の電流なしと 2 回目の電流なしの差は 0.95 mgO₂/g サンゴ・day だった。実験 5 では、0.1A/m²の電流を流したときの DO 変化率は、いずれの電流なしより高かった。電流なしよりも、電流を流した場合の方が、DO 変化率が大きいというのは、実験 1、実験 4 の結果と一致していた。

実験 6 の結果についても、明条件時の DO 変化率から暗条件時の DO 減少率を引いて求めた正味の光合成率（DO 変化率）を棒グラフにして、図 4-14 に示す。DO 変化率の大小関係は 1 回目の電流なし < 2 回目の電流なし < 0.1A/m²となっていた。1 回目の電流なしと、0.1A/m²の DO 変化率の差は 0.41 mgO₂/g サンゴ・day、2 回目の電流なしと 0.1A/m²の DO 変化率の差は 0.09 mgO₂/g サンゴ・day だった。また、1 回目の電流なしと 2 回目の電流なしの差は

0.32 mgO₂/g サンゴ・day だった。実験 6 では、実験 5 と同様に、0.1A/m²の電流を流したときの D0 変化率は、いずれの電流なしより高かった。しかし、その差を比較すると、実験 5の方が大きく、実験 6 の差の方が小さかった。また、この結果も、実験 1、実験 4 の結果と一致していた。

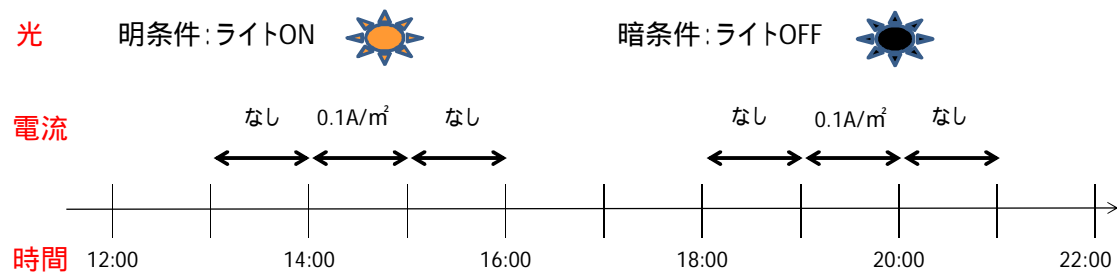


図 4-12 実験 5、実験 6 の流れ

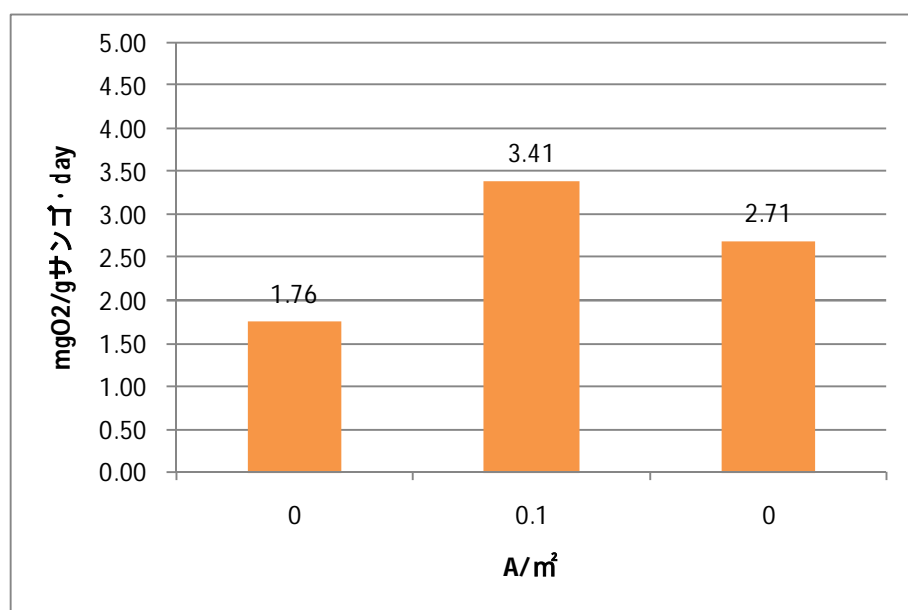


図 4-13 実験 5 の D0 変化率

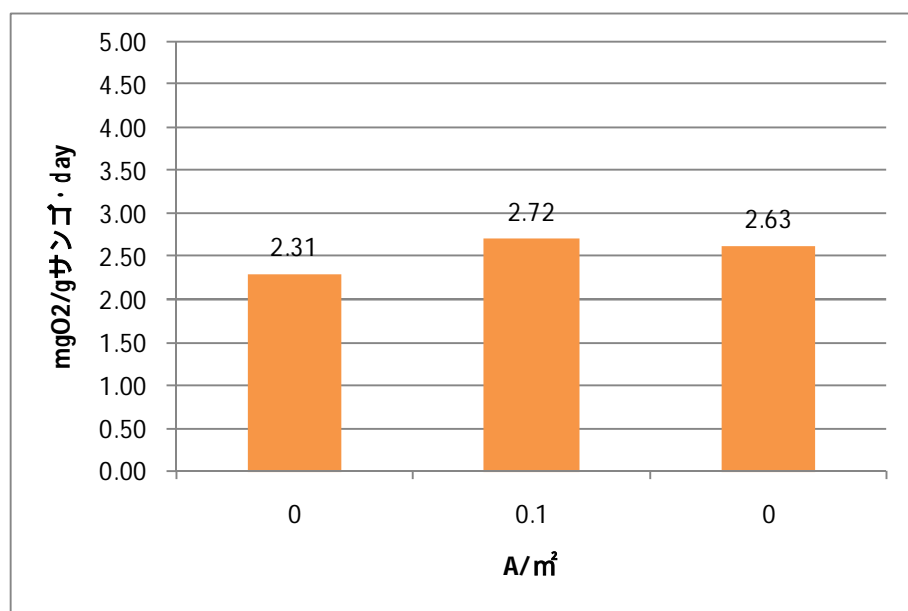


図 4-14 実験 6 の D0 変化率

(5) 電流条件 0.025、0.05、0.1A/m²の実験（実験 7）の結果

実験 1 から 6 では、電流なしで実験した後に、電流を流し、その後再び電流なしで実験するという流れを、0.025、0.05、0.075、0.1 の 4 段階の電流条件でおこなってきた。実験 7 では、この流れを何回か繰り返して、D0 変化率がどう変化するかを調べるために、図 4-15 に示す流れで実験をおこなった。

実験結果を棒グラフにしたものを、図 4-16 に示す。D0 変化率の大小関係は、4 回目の電流なし < 0.05A/m² < 0.025A/m² < 1 回目の電流なし < 2 回目の電流なし < 0.1A/m² < 3 回目の電流なしとなっていた。しかし、4 回目の電流なしと 0.05A/m² 以外の条件の D0 変化率は、割と近い値を示しており、その差は 0.1 mgO₂/g サンゴ・day 程度だった。電流なしの D0 変化率と電流を流したときの D0 変化率を比較すると、どちらの方が大きいという明確な傾向は見られなかった。

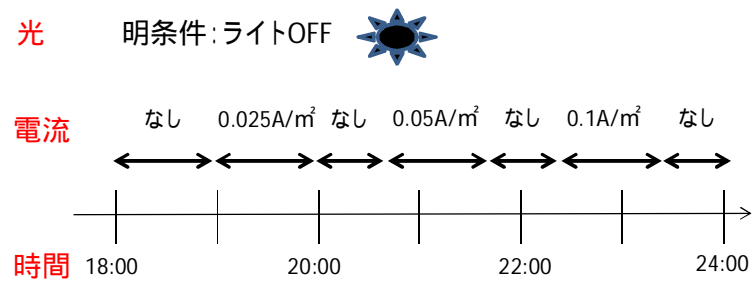
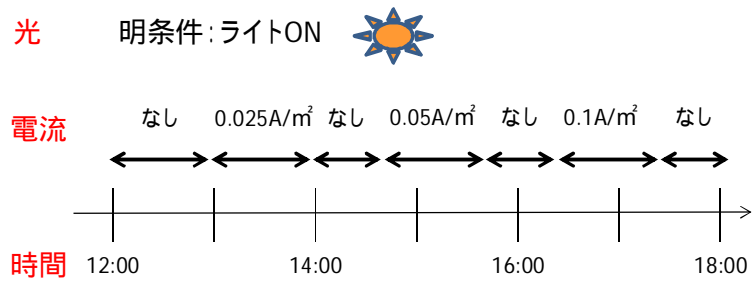


図 4-15 実験 7 の流れ

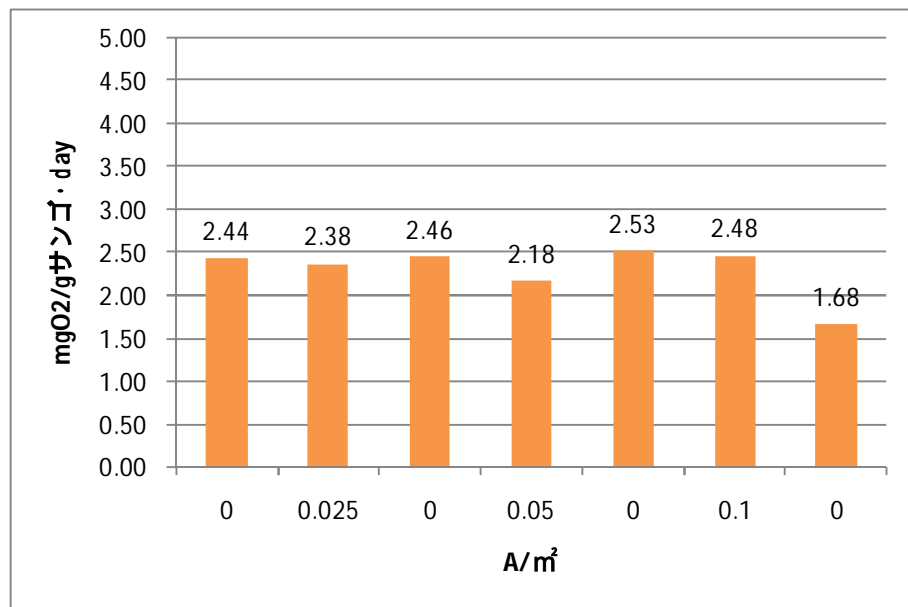


図 4-16 実験 7 の DO 変化率

4.1.3 4.1 章のまとめ

4.1 章でおこなった、実験 1 から 7 の結果を見ると、電流を流したときの D0 変化率の方が、電流を流さなかった場合の D0 変化率よりも高いことを示す実験結果もあれば、その逆を示す実験結果もあった。図 4-16 の、実験 7 の実験結果では、電流なしと電流ありを繰り返し実験したが、D0 変化率の大小関係に一貫した傾向はなかった。このことから、仮に、電流がサンゴと褐虫藻の光合成に影響を与えてとしても、その影響は電流のスイッチの ON、OFF の切り替えで、明確に表れるような影響ではないということがわかった。ある程度、持続性のある影響なのかもしれない。

実験 1 から 6 の実験結果を比較するために、D0 変化率の大小関係をまとめて表 4-2 に示す。これを見ると、1 回目、2 回目の電流なしよりも、電流を流したときの D0 変化率の方が高いのは実験 1、実験 4、実験 5、実験 6 だった。また、これらの実験では、2 回目の電流なしの D0 変化率の方が 1 回目の電流なしの D0 変化率よりも高かった。しかし、1 回目の電流なしと 2 回目の電流なし、そして電流を流したときの D0 変化率の差は、 $1.0 \text{ mgO}_2/\text{g}$ サンゴ・day 以上の結果もあれば、 $0.1 \text{ mgO}_2/\text{g}$ サンゴ・day 程度の結果もあった。実験 2 では $0.05\text{A}/\text{m}^2$ の電流を流したときよりも、1 回目の電流なしの方が、D0 変化率が高く、実験 3 では 2 回目の電流なしの方が、D0 変化率が高かった。

本研究では、電流がサンゴと褐虫藻の光合成に与える影響について更に検証するために、クロロフィル蛍光を測定する実験をおこなった。飼育条件を同一にした水槽の電流条件を変えて、長期的にサンゴの飼育をおこない、定期的にクロロフィル蛍光を測定して、それぞれの水槽の比較をおこなった。その実験について、4.2 章で説明する。

表 4-2 実験 1 から実験 6 の実験結果の比較

実験1	1回目の 電流なし	<	2回目の 電流なし	<	$0.025\text{A}/\text{m}^2$
実験2	2回目の 電流なし	<	$0.05\text{A}/\text{m}^2$	<	1回目の 電流なし
実験3	1回目の 電流なし	<	$0.05\text{A}/\text{m}^2$	<	2回目の 電流なし
実験4	1回目の 電流なし	<	2回目の 電流なし	<	$0.025\text{A}/\text{m}^2$
実験5	1回目の 電流なし	<	2回目の 電流なし	<	$0.1\text{A}/\text{m}^2$
実験6	1回目の 電流なし	<	2回目の 電流なし	<	$0.1\text{A}/\text{m}^2$

4.2 クロロフィル蛍光測定実験

4.2.1 実験方法

(1) 実験試料

実験に使用したサンゴは、沖縄県石垣島から取り寄せた枝状のスギノキミドリイシである。石垣の海域で、5cm 程度の長さに枝を折り、しばらく石垣の海域で養生させた群体を使用した。取り寄せたサンゴは、東大の水槽で人工的に飼育し、水槽の環境に順化させた。取り寄せたサンゴの中には、すぐに白化して死亡してしまう群体も多かったために、実験には、水槽で半年以上飼育に成功した群体のみを使用した。サンゴには番号を振って区別した。

(2) クロロフィル蛍光とは

クロロフィル蛍光とは、光エネルギーを受け取ったクロロフィルが、光合成には使用せずに放出した光のことを言う。光エネルギーを吸収したクロロフィルは、3つの方法でそのエネルギーを失う(図 4-17)。1つ目は、光エネルギーという物理エネルギーを、電子という化学エネルギーに変換して光合成で消費する方法。2つ目は、熱として放散する方法。そして3つ目が、クロロフィル蛍光である。クロロフィルが吸収した光のうち、蛍光として放出されたエネルギーの割合を蛍光収率という。

クロロフィル蛍光は、680nm 付近にピークをもつ赤い光である。クロロフィル蛍光の放出エネルギーは、一般に吸収エネルギーの 0.5~3%程度であると言われている。エネルギーとしては弱く、重要な意味はもたない。しかし、クロロフィル蛍光の蛍光強度は、光合成の状態によって変化するために、光合成の状態を知るのに有用である。

非常に弱い光の下では、クロロフィルが吸収したエネルギーの大部分は光合成に使われる。ここで、光合成の阻害剤を利用して、光合成への電子伝達を停止させると、行き場のなくなったエネルギーが増えて、その結果、蛍光収率が増える。行き場のなくなったエネルギーが、そのまま全てクロロフィル蛍光になるわけではないが、光合成回路の状態が正常であれば蛍光は少なく、問題があれば蛍光は増えるようになる²⁷⁾。

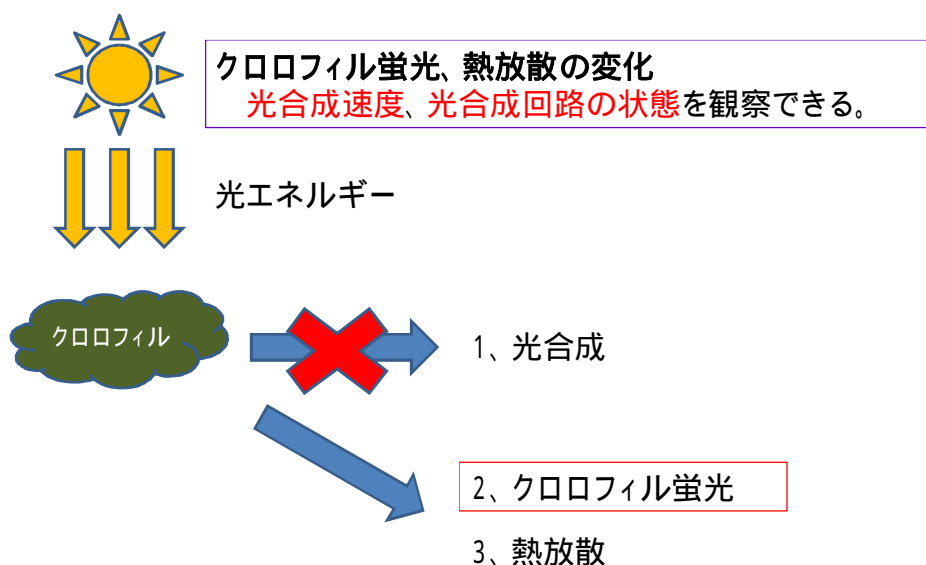


図 4-17 クロロフィル蛍光とは

(3) クロロフィル蛍光を測定する方法

今回の実験では、Handy FluorCam (Photon Systems Instruments 社製、SN-HFC046) を使用して、クロロフィル蛍光を測定した。FluorCam では、測定光、照射光、飽和 Pulse の 3 種類の光を測定対象に当て、クロロフィル蛍光を測定する。測定光、測定光と飽和 Pulse、測定光と照射光、測定光と照射光と飽和 Pulse、といったように、3 種類の光を組み合わせ、測定対象に連続的に当て、それぞれのときに測定されたクロロフィル蛍光の差や比を自動的に算出する。この差や比からは、光合成の状態に限らず、熱放散の程度、余剰エネルギーの大きさも知ることができる。今回の実験では、電流条件を変えたときの、光合成率の差を知りたいので、光合成速度に比例する という測定値を考察に使用した。写真 4-3 の左側に、FluorCam のセンサー部位の写真を示す。測定は、赤丸で示した部分にサンゴを置いておこなった。

実際の測定作業について説明する。測定では、まず FluorCam を PC に接続し、専用のソフトウェア FluorCam 7 を立ち上げ、測定プロトコルの選択をおこなった。今回の実験には、ソフトウェアの Quenching analysis というプロトコルを使用した。続いて、測定対象のサンゴを、海水を入れた容器に移して、写真 4-3 の赤丸に移動し、ピントを調整した後に、測定をおこなった。

測定結果の説明のために、写真 4-3 の右側に示したサンゴの測定結果を、図 4-18 に示す。FluorCam では、測定したクロロフィル蛍光を図 4-18 のように、画像として見るができる。また、色のグラデーションで、場所ごとのクロロフィル蛍光の大小関係を、視覚的に知ることができる。

今回の実験では、測定終了後、クロロフィル蛍光が検出されたエリアを自動で選択して、そのエリアの測定値の平均を考察に使用した。写真 4-3 の右写真のサンゴの形状と、図 4-18

の画像の緑の部分の形状を見ると、同じ形をしているのがわかり、サンゴから発されたクロロフィル蛍光が測定できたことがわかる。また、図 4-18 では、緑色の周りは青くなっていて、海水の部分からは蛍光が測定されていないことがわかる。

この FluorCam を使用しておこなった実験について、以下で説明する。



写真 4-3 クロロフィル蛍光を測定する FluorCam
赤丸の部分に、測定対象を置いて、測定をおこなう。

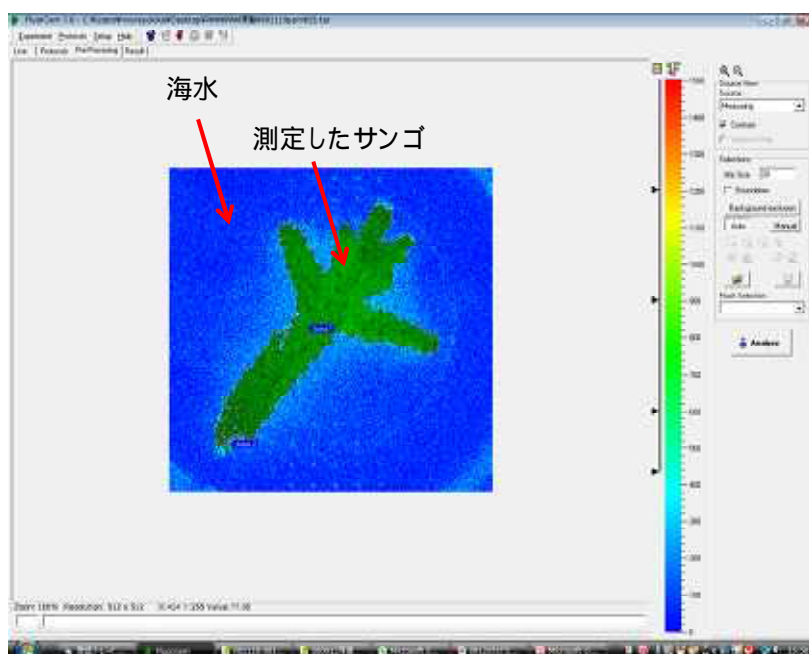


図 4-18 FluorCam を使用したクロロフィル蛍光の測定結果

(4) 実験に使用した水槽

実験は写真 4-4 の水槽を使用しておこなった。この水槽は、第 3 章で紹介した、電流がサンゴの骨格成長に与える影響を検証した室内実験（水中重量を測定した実験）で使った水槽と同一である。この水槽は、大きな飼育水槽（サイズ：600×900×450mm、容量約 240L）、小さな 4 つの実験水槽（サイズ：200×150×300mm、容量約 9L）そしてこれらの水質を保つための濾過水槽（380×400×430mm、容量約 65L）で構成されている。これらの水槽は全て塩ビ管で繋がっていて、水温、水質が全ての水槽で同一になっている。飼育水槽では、ソフトコーラルやヤドカリ、ゴカイなど、ハードコーラル以外の生物も飼育して、水質が安定するようにした。

一般的に、人工飼育環境下でのハードコーラルの飼育は難しい。今回の実験では、石垣から取り寄せてから半年以上水槽で飼育できたサンゴのみを使用した。そのサンゴの数の関係から、実験は 4 つの実験水槽の内、2 つを使用しておこなった。また、実験に使用したサンゴは、実験実施時以外は飼育水槽で飼育した。実験水槽と飼育水槽の環境が同一なため、これらの水槽間でサンゴを移動させた時に、サンゴにかかる負担を小さくできるのが特徴である。実験の説明のために、4 つの実験水槽の拡大写真を図 4-4 右に掲載する。また、4 つの水槽は右から順に 1～4 とした。全ての水槽が繋がっているので、1～4 の実験水槽の水温、水質はそれぞれ同じ状態になっている。

実験水槽の飼育条件は以下の通りであった。

光量：朝 8 時～夜 8 時は約 300PAR 夜 8 時～朝 8 時は約 1PAR 以下

水温：クーラーとヒーターで 25 ± 2 に調整

塩分濃度：32.0～33.0

流量：8.3ml/s

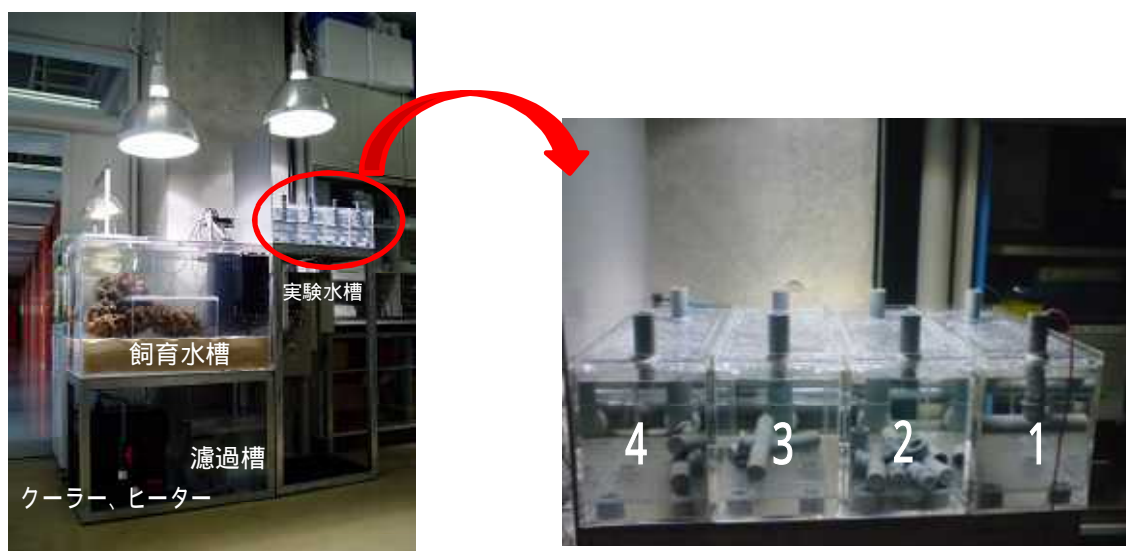


写真 4-4 実験に使用した水槽

(5) 実験の手順

電流条件を変化させて、サンゴの飼育をおこない、それぞれの水槽のサンゴの の値を比較するために、本研究では3回の実験をおこなった(実験A、B、C)。この実験A、B、Cは、第3章の室内実験で説明した、水中重量を測定した実験A、B、Cと同一である。水中重量を測定と、クロロフィル蛍光の測定は同時におこなっていた。

各実験の条件を、表4-3に示す。また、実験の手順は写真4-5に示す。まず、予め番号を振って、水槽に順化させておいた5cm程の枝状スギノキミドリイシを、実験水槽2と3に移動させた。実験水槽2で使用したサンゴは、サンゴ1、サンゴ2、サンゴ3、サンゴ4、サンゴ6の5群体であった。実験水槽3で使用したサンゴは、サンゴ7、サンゴ11、サンゴ15、サンゴ19、サンゴ27の5群体であった。使用したサンゴの写真を、写真4-5に掲載した。これらは、石垣から2008年1月と4月に取り寄せた後、半年以上の飼育に成功したサンゴで、状態が安定していた。続いて、実験水槽2と3の内、片方に陽極と陰極を設置して、電流条件を設定した。電極は白金電極を使用した。白金電極を使用して海水に電流を流すと、海水の電気分解によって陽極には塩素が発生し、陰極には強アルカリ性の電着物質が析出する。閉鎖系水槽で実験をおこなったために、このような発生物質は水槽の水質を悪化させると考えられた。このために、食用の寒天を満たした塩ビのキャップを電極にはめることで、発生した物質が水槽に影響しないようにした。

片方の水槽に、設定した電流を流し続けたまま、1週間以上飼育をおこない、定期的に各水槽のサンゴをFluorCamで測定した。電流を流しておいた水槽のサンゴの測定値と、流さなかった水槽のサンゴの測定値を比較することで、電流がサンゴと褐虫藻の光合成に与える影響について考察した。

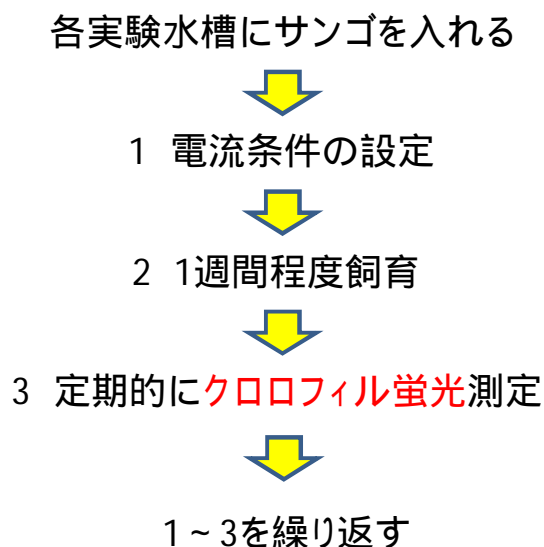


図4-19 実験の手順



サンゴ1



サンゴ2



サンゴ3



サンゴ4



サンゴ6



サンゴ7



サンゴ11



サンゴ15



サンゴ19



サンゴ27

写真 4-5 実験に使用したサンゴ

表 4-3 実験条件表

実験 A から C の間、実験水槽 2 ではサンゴ 1、2、3、4、6、実験水槽 3 ではサンゴ 7、11、15、19、27 をずっと使用していた。サンゴは、実験 A では横置きにして使用した後、ニッパーで半分に折った。半分は横置きに、もう半分はアクリル板に接着させて縦置きにして、実験 B と実験 C をおこなった。

	電流値		サンゴ	
	水槽2	水槽3	水槽2	水槽3
実験A 11/18-12/14	0.05A/m ²	0A/m ²	横置き 5群体	横置き 5群体
実験B 12/17-1/8	0.05A/m ²	0A/m ²	横置き:5 縦置き:5 10群体	横置き:5 縦置き:5 10群体
実験C 1/8-1/18	0A/m ²	0.005A/m ²	横置き:5 縦置き:5 10群体	横置き:5 縦置き:5 10群体

(6) 実験 A、B、C の目的

表 4-3 に条件を示した実験 A、B、C の目的を以下に示す。

・実験 A の目的

水槽に流す電流条件を変えてサンゴの飼育をおこない、それぞれの水槽のサンゴを定期的に FluorCam で測定して、
の値を比較することが今回の実験の目的である。実験 A では、実験水槽 2 に 0.05A/m²の電流を流し、実験水槽 3 には流さなかった。この 0.05A/m²という電流条件は、第 1 章で紹介した沖縄県竹富島の栈橋の事例で、栈橋の中でも特にサンゴが多く育っていた場所で測定された電流値を参考にした。実験 A では、この電流値を流した実験水槽 2 と実験水槽 3 のサンゴの
の値を比較し、光合成への影響を確認することを目的とした。

・実験 B の目的

実験 B では、電流条件は実験 A と同じだが、実験に使用するサンゴの置き方に違いがある。実験 A では横置きのみだが、実験 B では横置きに加えて縦置きのサンゴも用意した。

実験 A の終了後、実験に使用したサンゴをニッパーで半分に折った。半分に折ったサンゴは、図 4-20 の様に、半分は実験 A と同様で横置きに、もう半分はアクリル板 (30 × 40mm) に接着剤で接着させて縦置きにした。サンゴは固着性の生物であり、横置きにすると、置かれた板の上でカルシウムの成分を分泌して固着しようとする。このため、サンゴを横置きにして実験に使用すると、測定作業のために移動させる度に、進行していた固着をひきはがすことになり、これはサンゴに対してストレスになるのではないかと考え、このよう

にした。また、縦置きと横置きのサンゴでは、光合成できる面積や、水面からの距離、光の当たり方の関係から、縦置きの方が光合成をするのに有利なのではないかと考えた。実験 B では、縦置きと横置きのサンゴの の値を比較することと、実験 A の再現性を確認すること、電流の光合成への影響が縦置きと横置きのサンゴで異なるかどうかを確認することを目的とした。

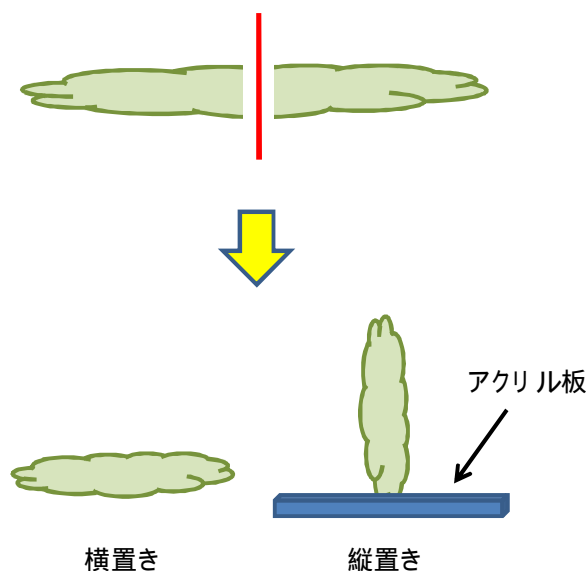


図 4-20 サンゴ切断の様子

・実験 C の目的

実験 A、B では、 $0.05\text{A}/\text{m}^2$ を実験水槽 2 に流し、実験水槽 3 には電流を流さなかった。実験 C では、電流を流す水槽を実験 3 に変えて、流す電流値も $0.005\text{A}/\text{m}^2$ と、実験 A、B の $1/10$ に設定した。実験 C では、実験 B と同様、縦置きと横置きのサンゴの測定値を比較することに加えて、実験 B の $1/10$ の電流を流したときに、実験 B と結果が異なるのかどうかを調べることを目的とした。

4.2.2 実験結果

(1) 実験 A

実験 A は、2008 年 11 月 18 日から 12 月 14 日の間に、実験水槽 2 と 3 を使用しておこなった。条件は表 4-3 の通りであった。実験水槽 2 に $0.05\text{A}/\text{m}^2$ の電流を流して、実験水槽 3 には電流を流さずに実験をおこなった。また、実験 A では、サンゴは全て横置きにして使用した。

実験に使用したサンゴの FluorCam の測定は、以下の 9 日におこなった。

1 回目：11 月 19 日

2 回目：11 月 20 日

3 回目：11 月 21 日
 4 回目：11 月 22 日
 5 回目：11 月 23 日
 6 回目：11 月 24 日
 7 回目：11 月 25 日
 8 回目：12 月 6 日
 9 回目：12 月 14 日

それぞれのサンゴについて、光合成速度に比例する の値を、実験水槽 2 のサンゴは表 4-4 に、実験水槽 3 のサンゴは表 4-5 に示す。サンゴでは、 は 0.3 から 0.4 程度の値を示すと言われている。11 月 19 日から 12 月 14 日の間に、実験水槽 2 のサンゴ 15、サンゴ 27 の は 0.25 程度の値を示しているが、その他のサンゴの は 0.3 から 0.4 の値を示した。

(1-a) 実験水槽 2 と実験水槽 3 の の比較

実験水槽 2 と実験水槽 3 の の平均を表 4-6 に示す。また、表 4-6 に掲載した平均の のグラフを図 4-21 に示す。11 月 19 日は実験水槽 2 の の平均も、実験水槽 3 の の平均も 0.34 で、同じ値だった。そして、11 月 20 日では、実験水槽 2 の の平均は 0.35、実験水槽 3 の の平均は 0.33 で、実験水槽 2 の方が高かった。しかし、その 2 日以外の測定日の の平均を比較すると、全ての日で実験水槽 3 の方が高かった。実験 A では、実験水槽 2 の電流条件は 0.05A/m^2 、実験水槽 3 は 0A/m^2 であり、この実験では、電流を流さない水槽の方が、 の値が高い結果となった。

表 4-4 11 月 19 日から 12 月 14 日の実験水槽 2 のサンゴの

水槽2	11月19日	11月20日	11月21日	11月22日	11月23日	11月24日	11月25日	12月6日	12月14日
サンゴ7	0.32	0.34	0.29	0.31	0.28	0.27	0.37	0.38	0.32
サンゴ11	0.38	0.35	0.31	0.29	0.30	0.31	0.31	0.34	0.34
サンゴ15	0.32	0.33	0.30	0.28	0.29	0.30	0.25	0.26	0.26
サンゴ19	0.38	0.41	0.34	0.36	0.33	0.32	0.40	0.31	0.40
サンゴ27	0.31	0.33	0.29	0.27	0.28	0.26	0.30	0.28	0.28
平均	0.34	0.35	0.31	0.30	0.30	0.29	0.33	0.31	0.32

表 4-5 11 月 19 日から 12 月 14 日の実験水槽 3 のサンゴの

水槽3	11月19日	11月20日	11月21日	11月22日	11月23日	11月24日	11月25日	12月6日	12月14日
サンゴ1	0.37	0.35	0.35	0.36	0.35	0.34	0.39	0.38	0.39
サンゴ2	0.37	0.33	0.35	0.35	0.39	0.38	0.39	0.39	0.34
サンゴ3	0.33	0.33	0.33	0.31	0.29	0.34	0.31	0.35	0.36
サンゴ4	0.32	0.32	0.29	0.28	0.33	0.32	0.31	0.34	0.33
サンゴ6	0.31	0.32	0.37	0.31	0.32	0.32	0.33	0.32	0.35
平均	0.34	0.33	0.34	0.32	0.34	0.34	0.35	0.36	0.35

表 4-6 11 月 19 日から 12 月 14 日における実験水槽 2 と 3 の の平均の比較

平均	11月19日	11月20日	11月21日	11月22日	11月23日	11月24日	11月25日	12月6日	12月14日
水槽2	0.34	0.35	0.31	0.30	0.30	0.29	0.33	0.31	0.32
水槽3	0.34	0.33	0.34	0.32	0.34	0.34	0.35	0.36	0.35

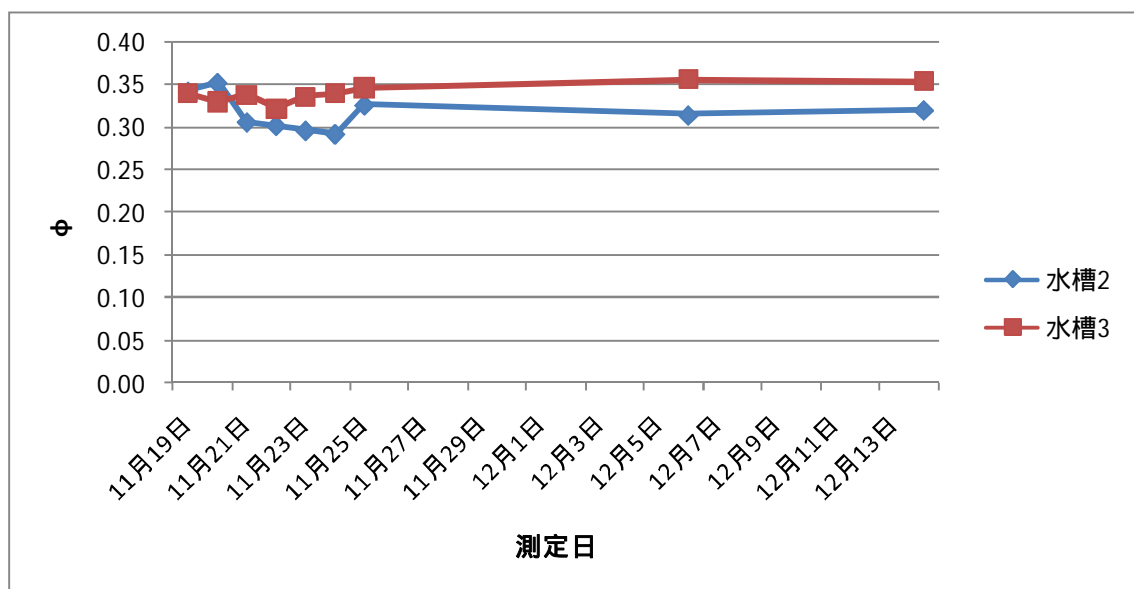


図 4-21 11 月 19 日から 12 月 14 日における実験水槽 2 と 3 の の平均

(2) 実験 B

実験 B では、実験 A で横置きにして使用していたサンゴを半分に切断して、半分は横置き（5 群体）に、もう半分は縦置き（5 群体）にして、計 10 群体を使用した。実験 B の条件は、表 4-3 の通りであった。実験期間は 2008 年 12 月 17 日から 2009 年 1 月 8 日の期間に実施した。実験水槽 2 には $0.05\text{A}/\text{m}^2$ の電流を流し、実験水槽 3 には電流を流さずに実験をおこなった。

実験に使用したサンゴの FluorCam の測定は、以下の 3 日におこなった。

1 回目：12 月 21 日

2 回目：1 月 3 日

3 回目：1 月 10 日

それぞれのサンゴについて、光合成速度に比例する の値を、横置きのサンゴは表 4-7 に、縦置きのサンゴは表 4-8 にそれぞれ示す。サンゴでは、 は 0.3 から 0.4 程度の値を示すと言われている（参考文献）。表 4-7 から、12 月 21 日から 1 月 10 日の間に、実験水槽 2 の横置きのサンゴ 11、サンゴ 15、サンゴ 27 と、縦置きのサンゴ 15 では、 が 0.25 未満の値を示しているが、その他のサンゴの は 0.3 から 0.4 の値を示した。

(2-a) 実験水槽 2 と実験水槽 3 の の比較

実験水槽 2 と実験水槽 3 の平均の を表 4-9 に示す。また、表 4-9 に示した平均の のグラフを図 4-22 に示す。左には横置きサンゴの値を、右には縦置きサンゴの値を示す。表 4-9 から、全ての測定日において、どちらの置き方のサンゴの の平均値も、実験水槽 3 の方が高かった。実験 B では、実験水槽 2 の電流条件は 0.05 A/m^2 、実験水槽 3 は 0 A/m^2 であったが、この実験では、電流を流さない水槽の方が、 の値が高い結果となった。また、この結果は、実験 A の結果と一致していた。

(2-b) 縦置きサンゴと横置きサンゴの の比較

実験 B では、実験 A と異なり、横置きサンゴに加えて縦置きサンゴも実験に使用した。光合成可能な面積の広さ、光源からの距離、光の当たり方という面では、横置きサンゴよりも縦置きサンゴの方が、明らかに有利であると思われ、縦置きサンゴの方が高い値を示すのではないかと推察していた。

それぞれの水槽について、縦置きサンゴと横置きサンゴの の平均を表 4-10 に示す。全ての測定日で、どちらの水槽においても、横置きサンゴよりも、縦置きサンゴの方が高かった。この結果は、推察と一致していた。

表 4-7 12月21日から1月10日の横置きサンゴの
左には実験水槽 2、右には実験水槽 3 のサンゴの を示す。

水槽2	12月21日	1月3日	1月10日
サンゴ7	0.36	0.29	0.33
サンゴ11	0.29	0.23	0.25
サンゴ15	0.26	0.19	0.23
サンゴ19	0.37	0.32	0.32
サンゴ27	0.23	0.21	0.28
平均	0.30	0.25	0.28

水槽3	12月21日	1月3日	1月10日
サンゴ1	0.38	0.27	0.40
サンゴ2	0.35	0.33	0.32
サンゴ3	0.36	0.32	0.33
サンゴ4	0.36	0.35	0.36
サンゴ6	0.41	0.29	0.37
平均	0.37	0.31	0.36

表 4-8 12月21日から1月10日の縦置きサンゴの
左には実験水槽 2、右には実験水槽 3 のサンゴの を示す。

水槽2	12月21日	1月3日	1月10日
サンゴ7	0.35	0.28	0.32
サンゴ11	0.39	0.32	0.36
サンゴ15	0.31	0.23	0.27
サンゴ19	0.43	0.37	0.42
サンゴ27	0.33	0.26	0.30
平均	0.36	0.29	0.33

水槽3	12月21日	1月3日	1月10日
サンゴ1	0.40	0.39	0.43
サンゴ2	0.38	0.35	0.38
サンゴ3	0.43	0.40	0.41
サンゴ4	0.41	0.36	0.42
サンゴ6	0.43	0.40	0.43
平均	0.41	0.38	0.41

表 4-9 12 月 21 日から 1 月 10 日における実験水槽 2 と 3 の の平均の比較

左には横置き of サング、右には縦置き of サングの を示す。

平均	12月21日	1月3日	1月10日
水槽2	0.30	0.25	0.28
水槽3	0.37	0.31	0.36

平均	12月21日	1月3日	1月10日
水槽2	0.36	0.29	0.33
水槽3	0.41	0.38	0.41

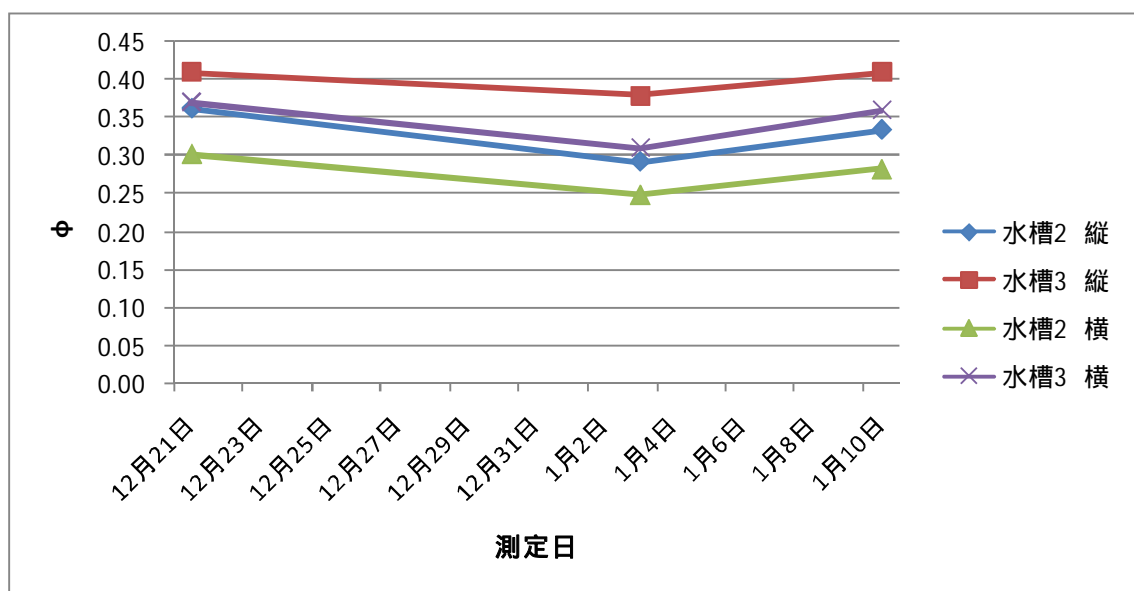


図 4-22 12 月 21 日から 1 月 10 日における実験水槽 2 と 3 の の平均

表 4-10 12 月 21 日から 1 月 10 日における縦置きと横置き of サングの の平均の比較

左には実験水槽 2、右には実験水槽 3 of サングの を示す。

水槽2	12月21日	1月3日	1月10日
縦	0.36	0.29	0.33
横	0.30	0.25	0.28

水槽3	12月21日	1月3日	1月10日
縦	0.41	0.38	0.41
横	0.37	0.31	0.36

(3) 実験 C

実験 C は、2009 年 1 月 8 日から 1 月 14 日におこなった。条件は、表 4-3 の通りであった。実験 C では、実験 B と同様に、縦置き of サングと横置き of サングを 5 群体ずつ実験に使用した。また、実験 A、B と異なり、実験水槽 3 に電流を流した。更に、実験 C では電流値を $0.005A/m^2$ と、実験 A、B の 1/10 にした。

実験に使用したサング of FluorCam 測定を以下の 3 日におこなった。

1 回目：1 月 10 日

2 回目：1 月 15 日

3 回目：1 月 18 日

それぞれのサングについて、光合成速度に比例する の値を、横置き of サングは表 4-11 に、縦置き of サングは表 4-12 にそれぞれ示す。表 4-11 から、1 月 10 日から 1 月 18 日の

間に、実験水槽 2 の横置きサンゴ 15、サンゴ 27、実験水槽 3 の横置きサンゴ 3 では、
が 0.25 未満の値を示しているが、その他のサンゴの は 0.3 から 0.4 の値を示した。

(3-a) 実験水槽 2 と実験水槽 3 の の比較

実験水槽 2 と実験水槽 3 の平均の を表 4-11 に示す。また、表 4-11 に示した平均の
のグラフを図 4-23 に示す。左には横置きサンゴの値を、右には縦置きサンゴの値
を示す。表 4-11 から、全ての測定日において、どちらの置き方のサンゴの の平均値も、
実験水槽 3 の方が高かった。実験 B では、実験水槽 2 の電流条件は 0 A/m^2 、実験水槽 3 は
 0.005 A/m^2 であったが、この実験では、電流を流した水槽の方が、 の値が高い結果と
なった。この結果は、実験 A、実験 B の結果と異なっていた。

(3-b) 縦置きサンゴと横置きサンゴの の比較

実験 C では、実験 B と同様に、横置きサンゴに加えて縦置きサンゴも実験に使用し
た。先にも述べた様に、光合成可能な面積の広さ、光源からの距離、光の当たり方という
面では、横置きサンゴよりも縦置きサンゴの方が明らかに有利であると思われ、縦置
きサンゴの の方が高い値を示すのではないかと推察していた。

それぞれの水槽について、縦置きサンゴと横置きサンゴの の平均を表 4-14 に示
す。全ての測定日で、どちらの水槽においても、横置きサンゴよりも、縦置きサンゴ
の の方が高かった。この結果は、推察と一致しており、実験 B の結果とも一致してい
る。

表 4-11 1月10日から1月18日の横置きサンゴの

水槽2	1月10日	1月15日	1月18日	水槽3	1月10日	1月15日	1月18日
サンゴ7	0.33	0.31	0.29	サンゴ1	0.40	0.35	0.36
サンゴ11	0.25	0.26	0.29	サンゴ2	0.32	0.31	0.30
サンゴ15	0.23	0.27	0.22	サンゴ3	0.33	0.32	0.37
サンゴ19	0.32	0.31	0.36	サンゴ4	0.36	0.29	0.37
サンゴ27	0.28	0.24	0.23	サンゴ6	0.37	0.40	0.37
平均	0.28	0.28	0.28	平均	0.36	0.33	0.35

表 4-12 1月10日から1月18日の縦置きサンゴの

水槽2	1月10日	1月15日	1月18日	水槽3	1月10日	1月15日	1月18日
サンゴ7	0.32	0.31	0.31	サンゴ1	0.43	0.40	0.37
サンゴ11	0.36	0.29	0.32	サンゴ2	0.38	0.36	0.34
サンゴ15	0.27	0.29	0.25	サンゴ3	0.41	0.39	0.39
サンゴ19	0.42	0.40	0.38	サンゴ4	0.42	0.37	0.39
サンゴ27	0.30	0.29	0.26	サンゴ6	0.43	0.42	0.40
平均	0.33	0.32	0.30	平均	0.41	0.39	0.38

表 4-13 1 月 10 日から 1 月 18 日における実験水槽 2 と 3 の の平均の比較

左には横置き of サンゴ、右には横置き of サンゴの を示す。

平均	1月10日	1月15日	1月18日
水槽2	0.28	0.28	0.28
水槽3	0.36	0.33	0.35

平均	1月10日	1月15日	1月18日
水槽2	0.33	0.32	0.30
水槽3	0.41	0.39	0.38

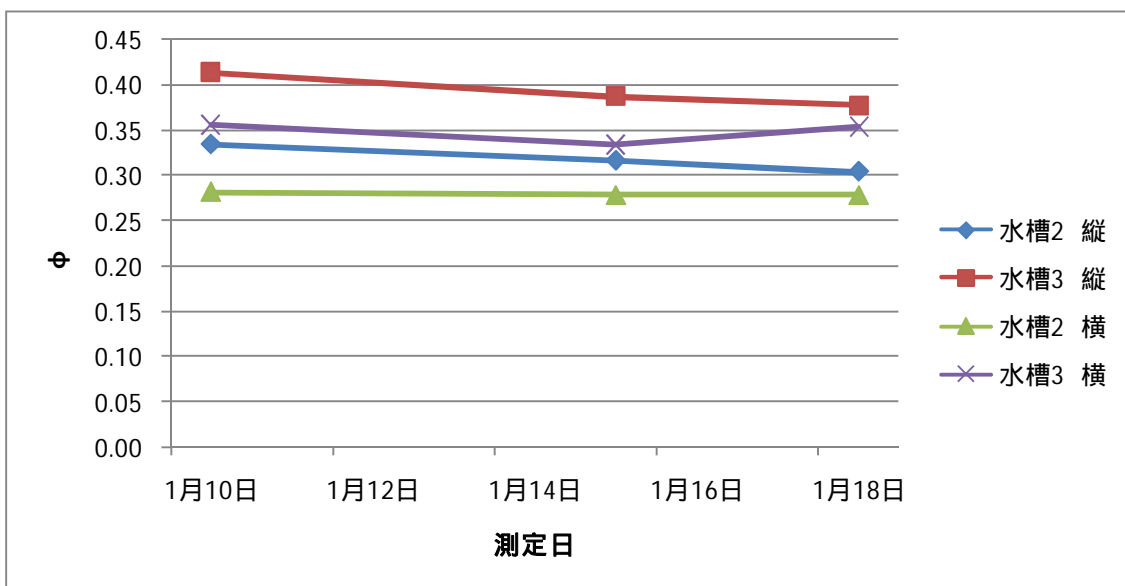


図 4-23 1 月 10 日から 1 月 13 日における実験水槽 2 と 3 の の平均

表 4-14 1 月 10 日から 1 月 18 日における縦置きと横置き of サンゴの の平均の比較

左には実験水槽 2、右には実験水槽 3 of サンゴの を示す。

水槽2	1月10日	1月15日	1月18日
縦	0.33	0.32	0.30
横	0.28	0.28	0.28

水槽3	1月10日	1月15日	1月18日
縦	0.41	0.39	0.38
横	0.36	0.33	0.35

4.2.3 4.2 章のまとめと今後の課題

4.2 章でおこなった、実験 A、B、C では、実験水槽 2 と実験水槽 3 を使用して、実験をおこなってきた。また、それぞれの水槽では、全ての実験で同じサンゴを使用した。実験水槽 2 ではずっとサンゴ 7、サンゴ 11、サンゴ 15、サンゴ 19、サンゴ 27 を使用し、実験水槽 3 ではずっとサンゴ 1、サンゴ 2、サンゴ 3、サンゴ 4、サンゴ 6 を使用した。それぞれの実験の条件と、実験結果をまとめて、表 4-15 に示す。

(1) サンゴの置き方による の違いについて

サンゴをアクリル板に接着して、縦置きにした場合と、横置きにした場合では、光合成

可能な面積の広さ、光源からの距離、光の当たり方の関係で、縦置きサンゴの方が値が高くなるのではないかと推察して、実験 B と実験 C で、それぞれの置き方のサンゴの値を比較した。その結果、実験 B、実験 C のどちらにおいても、両方の水槽で、縦置きサンゴの方が横置きサンゴよりも値が高かった。このことから、推察は正しく、縦置きサンゴの方が光合成に有利だということがわかった。

(2) 電流がサンゴの光合成与える影響について

表 4-15 から、電流の有無と、光合成速度に比例する値の関係について考察する。実験 A では、実験水槽 2 に $0.05\text{A}/\text{m}^2$ の電流を流し、実験水槽 3 には電流を流さなかった。また、実験にはサンゴを横置きにして使用した。実験の結果、実験 A の殆どの測定日において、電流を流さなかった水槽 3 の平均の方が、 $0.05\text{A}/\text{m}^2$ の電流を流した実験水槽 2 の平均よりも高かった。実験 B では、実験 A と同様に、実験水槽 2 に $0.05\text{A}/\text{m}^2$ の電流を流し、実験水槽 3 には電流を流さなかった。しかし、実験 A と違う点として、横置きサンゴと縦置きサンゴの両方を実験に使用した。実験の結果、全ての測定日において、縦置きサンゴでも、横置きサンゴでも、電流を流さなかった水槽 3 の平均値の方が高かった。実験 C では、実験 A、B とは電流を流す水槽を逆にして、実験水槽 3 に電流を流し、実験水槽 2 には電流を流さなかった。また、実験水槽 3 に流した電流は、実験 A、B の $1/10$ の $0.005\text{A}/\text{m}^2$ だった。実験の結果、横置きサンゴでも縦置きサンゴでも、 $0.005\text{A}/\text{m}^2$ の電流を流した実験水槽 3 の方が、平均値が高かった。

電流を流している水槽と、流していない水槽では、どちらの平均値が高いか、という視点で見ると、実験 A、実験 B では電流なしの方が高く、実験 C では電流ありの方が高い。しかし、実験 A、B と、実験 C では、流した電流の強さがそれぞれ $0.05\text{A}/\text{m}^2$ と $0.005\text{A}/\text{m}^2$ で、異なっている。また、実験 A、B、C のどの実験でも、実験水槽 2 ではサンゴ 7、サンゴ 11、サンゴ 15、サンゴ 19、サンゴ 27 を、実験水槽 3 ではサンゴ 1、サンゴ 2、サンゴ 3、サンゴ 4、サンゴ 6 を使用したため、実験水槽 2 と実験水槽 3 の平均値が実験 A、B、C でどう変化したか、比較をおこなうことができる。比較のために、各実験の、全ての測定日の平均値を、更に平均化した値を表 4-16 に示す。左には、横置きサンゴの値を、右には縦置きサンゴの値を示す。実験 A では、横置きサンゴのみを実験に使用したので、右表の実験 A の値は空欄になっている。左表から、横置きサンゴでは、実験水槽 2、実験水槽 3 のどちらでも、実験 A、B、C は近い値を示した。また、右表の縦置きサンゴについても同様で、実験水槽 2、実験水槽 3 のどちらでも、実験 B、C は近い値を示した。また、置き方に関係なく、全ての実験で、実験水槽 3 の値の方が実験水槽 2 より高かった。しかし、ここで 1 つ注目したいことがある。それを説明するために、実験 A の全測定日の平均を表 4-17 に再度掲載する。また、表 4-17 に示す平均のグラフを図 4-24 に示す。この表の 11 月 19 日の値を見ると、実験水槽 2 と実験水槽 3 の値は、どちらも同じ 0.34 だった。また、その次の日の 11 月 20 日の値を見ると、実験水槽 2 の値は 0.35 、実

実験水槽 3 の値は 0.33 で、実験水槽 2 の方が高い。しかし、11 月 21 日からは、実験水槽 3 の方が高い値をとっていた。つまり、実験 A の開始段階では、実験水槽 2 のサンゴも、実験水槽 3 のサンゴも、光合成速度が同程度の状態にあって、11 月 20 日には実験水槽 2 の方が高くなったが、その後は実験水槽 2 の方が低かったということを意味している。この傾向には、意味があるように思われる。実験水槽 2 は、実験 A でも実験 B でも、 $0.05\text{A}/\text{m}^2$ の電流を流した。そして実験水槽 3 には電流を流さなかった。実験水槽 2 の の平均が、このように変化したのは、 $0.05\text{A}/\text{m}^2$ という電流が影響を与えた可能性が考えられる。つまり、 $0.05\text{A}/\text{m}^2$ の電流がサンゴにとってストレスとなった可能性があるのではないかと。ここで気になるのは、実験 C では $0.005\text{A}/\text{m}^2$ の電流を実験水槽 3 に流していたにも関わらず、実験 C のときの、実験水槽 3 の の平均は、実験水槽 2 よりも小さくないということだ。電流がストレスになるのなら、実験水槽 2 と比較して下がるのではないかと推察されが、推察とは逆の様子を示していた。この理由としては、 $0.05\text{A}/\text{m}^2$ という電流は、サンゴにとってストレスになるが、その $1/10$ の $0.005\text{A}/\text{m}^2$ という電流は、弱いためにストレスにならないという可能性が考えられるが、実験期間の違いも考慮しなければならない。 $0.005\text{A}/\text{m}^2$ という電流を実験水槽 3 に流した期間（実験 C、8 日）が、 $0.05\text{A}/\text{m}^2$ という電流を実験水槽 2 に流した時間（実験 A と実験 B、約 50 日）よりも短いために、ストレスとなっても、実験期間が短いという理由で、その影響が確認できなかった可能性もあると思われた。今後更なる検討が必要であると思われる。

表 4-15 実験 A、B、C の実験条件とまとめ

	電流値		サンゴ		の大小関係	
	水槽2	水槽3	水槽2	水槽3	電流の有無	サンゴの置き方
実験A 11/18-12/14	$0.05\text{A}/\text{m}^2$	$0\text{A}/\text{m}^2$	横置き 5群体	横置き 5群体	電流あり<電流なし	縦置き>横置き
実験B 12/17-1/8	$0.05\text{A}/\text{m}^2$	$0\text{A}/\text{m}^2$	横置き:5 縦置き:5 10群体	横置き:5 縦置き:5 10群体	横置き:電流あり<電流なし 縦置き:電流あり<電流なし	
実験C 1/8-1/18	$0\text{A}/\text{m}^2$	$0.005\text{A}/\text{m}^2$	横置き:5 縦置き:5 10群体	横置き:5 縦置き:5 10群体	横置き:電流あり>電流なし 縦置き:電流あり>電流なし	縦置き>横置き

表 4-16 各実験の全測定日の の平均を更に平均化した値の比較

平均	実験A	実験B	実験C
水槽2	0.31	0.28	0.28
水槽3	0.34	0.35	0.35

平均	実験A	実験B	実験C
水槽2		0.33	0.32
水槽3		0.40	0.39

表 4-17 実験 A の全測定日の の平均

平均	11月19日	11月20日	11月21日	11月22日	11月23日	11月24日	11月25日	12月6日	12月14日
水槽2	0.34	0.35	0.31	0.30	0.30	0.29	0.33	0.31	0.32
水槽3	0.34	0.33	0.34	0.32	0.34	0.34	0.35	0.36	0.35

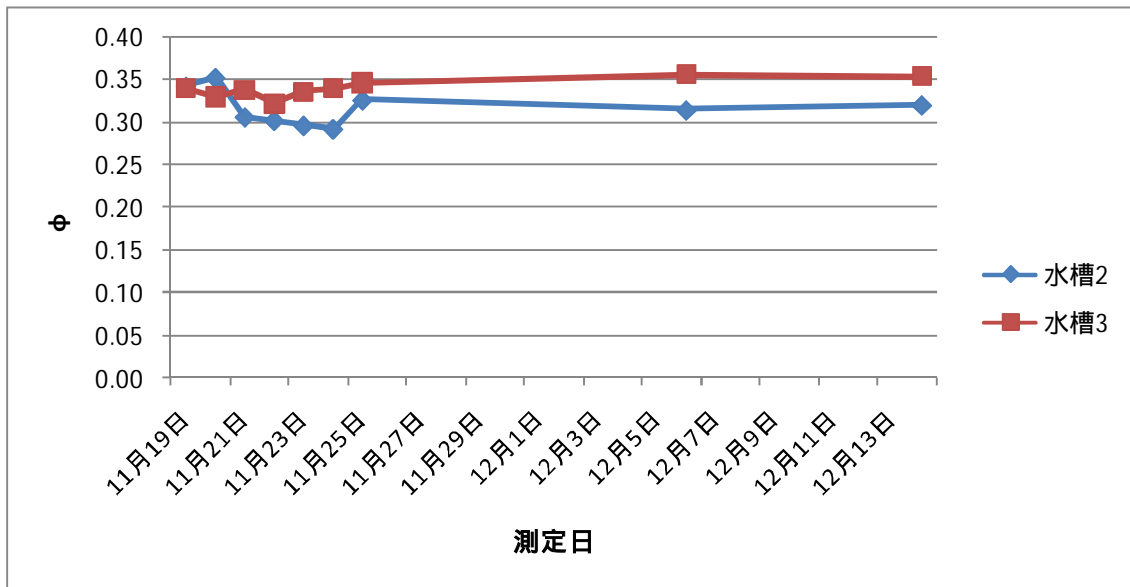


図 4-24 11 月 19 日から 12 月 14 日における実験水槽 2 と 3 の の平均

第5章 まとめと今後の展望

5.1 実験結果のまとめ

本研究では、電流がサンゴの成長を促進する可能性について検証するために、電流がサンゴのどの部分にどのように影響するかについて、3つの仮説を立てて、それぞれの仮説を検証する実験をおこなった。

【仮説1】サンゴの幼生の着生

【仮説2】骨格成長

【仮説3】光合成

本章では一連の実験方法や結果についてまとめる。

(1) サンゴの幼生の着生への影響を検証した実験

まず、第2章では、電流や電着物質がサンゴの幼生の着生数に与える影響について検証した野外実験について述べた。この実験では、電着物質を予め析出させておいた金属網と、素焼きタイルを着生基盤として用意し、沖縄県石垣島の海域に設置した。金属網4枚と素焼きタイル2枚を塩ビ管の枠に固定したものを、8セット用意してならべて、それぞれの金属網に流す電流条件を変えた(ケース1と2は $0\text{A}/\text{m}^2$ 、ケース3と4は $0.01\text{A}/\text{m}^2$ 、ケース5と6は $0.05\text{A}/\text{m}^2$ 、ケース7と8は $0.1\text{A}/\text{m}^2$)。基盤の設置後、人工的にサンゴの幼生を投入して、計4回、各基盤に着生した幼生の計測をした。幼生の投入から15週間後にあたる、第4回目の計測数から、それぞれの基盤の着生数について考察したところ、電流条件が同じ組(例: ケース1と2)で、それぞれの基盤の計測数を見ると、金属網の方が、再現性が高い結果となった。また、今回の実験では、金属網の電流条件の違いと着生数の間には、明確な関係は見られなかった。

各基盤について単位面積当たりの着生数の平均を比較したところ、金属網が素焼きタイルの5倍の値を示した。更に、幼生の投入から1週間後にあたる、第1回目の計測数と第4回目の計測数から求めた着生数の増加率では、金属網は素焼きタイルの40倍近い値を示した。素焼きタイルと金属網の、こうした単位面積当たりの着生数や、増加率の差は、電着物質を析出させた金属網には、幼生が安定して着生することができ、電着物質が着生基盤として適している可能性を示唆している。

(2) サンゴの骨格成長への影響を検証した実験

第3章では、電流がサンゴの骨格成長に与える影響について検証した野外実験と室内実験について述べた。

野外実験では、鉄筋で作製したサンゴ棚を4つ用意して、石垣の海域に設置した。4つの

サンゴ棚の電流条件を、0、0.1、0.3、0.5A/m²にして、それぞれの棚に枝状のサンゴを 20 群体ずつ設置した。それぞれの棚のサンゴの、4 ヶ月の間の成長率を、枝の長さを計測して求めたところ、どの棚の成長率も近い値を示していたが、0A/m²で最も成長率が高く、電流条件が強くなるほど成長率は下がる傾向が確認された。

また、室内実験では、飼育条件を同一にした 2 つの水槽で、電流条件を変えてサンゴを飼育し、それぞれの水槽のサンゴの水中重量を定期的に測定して、重量変化率を比較した。その結果、0.05A/m²程度の微弱な電流でもサンゴの骨格成長に対して負の影響を与える可能性があることがわかった。また、それとは逆に、その 1/10 の 0.005A/m²の電流だと、電流を流さない場合よりも重量変化率は大きく、むしろ正の影響がある可能性が示唆された。電流の強さによって異なる影響が見られ、今後更に実験を繰り返すことで最適な電流密度を解明することが可能になると考えられる。

(3) サンゴの光合成への影響を検証した実験

第 4 章では、電流がサンゴの光合成に与える影響について検証した 2 種類の室内実験について述べた。

D0 を測定した実験では、密閉装置にサンゴを封入して、電流条件を変化させたときの D0 変化率を比較した。その結果、電流を流したときの方が、D0 変化率が大きい結果もあれば、電流を流していない方が大きかった結果もあった。D0 変化は光合成だけでなく、サンゴの代謝に影響されるために、光合成に対する影響だけを単純に見ることは難しかった。このため、クロロフィル蛍光を測定する実験をおこなった。

クロロフィル蛍光を測定した実験は、水中重量を測定した第 3 章の室内実験と同時におこなった。飼育条件を同一にした 2 つの水槽で、電流条件を変えてサンゴを飼育し、それぞれの水槽のサンゴのクロロフィル蛍光を自動測定器 FluorCam で測定した。考察には、測定結果から自動で算出される、 $\frac{F_v}{F_m}$ という光合成速度に比例する値を用いた。その結果、0.05A/m²程度の電流でもサンゴの光合成に負の影響を与える可能性が示唆された。また、その 1/10 の 0.005A/m²の電流条件だと、電流を流さない場合よりも $\frac{F_v}{F_m}$ の値は大きく、むしろ正の影響がある可能性が示唆された。この結果は重量を測定した実験とも一致していた。

5.2 電流がサンゴに与える影響について

電流がサンゴの着生数、骨格成長、光合成に対して与える影響について検証するための様々な実験を実施し、電流がサンゴに与える影響について考察した。その結果、電流がサンゴの幼生の着生に与える影響については、電流条件と着生数の明確な相関は確認されなかったが、海水中に電流が流れることによって、陰極上に析出する電着物質の存在は、サンゴ幼生の着生に正の影響を与える可能性があることがわかった。また、骨格成長と光合成に対する影響については、従来提案されてきた数値と比較して²¹⁾、極めて微弱な 0.05A/

m²程度の電流値でも、負の影響を与える可能性があるということがわかった。更に、その 1/10 の 0.005A/m²では、逆に骨格成長と光合成に対して正の影響を与える可能性が示唆された。

本研究の結果から、電流がサンゴに与える影響は、サンゴの部位や生活史によって異なり、単に強い電流に曝せば良いというような単純なものではないということが明らかになった。既往の研究では、本研究で用いた 0.05A/m²よりもかなり強い電流で実験していた例もあり、本研究の結果は今後の実験を考える上で極めて有用である。更に、0.005A/m²程度の微弱電流について検証をおこなうことで、有用な知見が得られると期待される。

5.3 今後の課題と解決策について

本研究では、電流がサンゴに与える影響について検証するために、実験をおこなってきた。最後に、それぞれの実験について、今後の課題と解決策を提示する。

まず、第 2 章で説明した実験では、着生基盤として用意した素焼きタイルと金属網の形状を考えなければならない。メッシュ状の金属網と、メッシュのない素焼きタイルでは、面に対して垂直な流れが当たったときに、水の流れていく様子が異なると推察される。今後は、こうした条件を更に細かく揃えた実験をおこなう必要があると思われる。

また、第 3 章で説明した野外実験では、棚の鉄筋上に電着物質が析出すると推察され、そういった電着物質はサンゴの成長や電極上への被覆を促進すると言われている。しかし、今回の実験では、鉄筋上に藻類が繁茂しており、サンゴの被覆は進んでおらず、電着物質も藻類の存在によって作用できなかった可能性が考えられた。今後は、第 2 章で実験準備としておこなったように、電着物質を予め鉄筋の表面にある程度析出させて、こうした藻類の繁茂を防ぐ必要があると思われる。また、今回は夏の水温上昇によって実験時間が 4 か月と短くなってしまったが、実験をおこなう時期を工夫して、1 年程度の実験をおこなう必要があるだろう。

第 4 章で説明した、D₀ を測定する実験では、電流を流すと D₀ 変化率が高くなる結果もあれば、低くなる結果も見られた。D₀ 変化には、光合成に限らずサンゴの代謝が関係しており、その変化は理解が難しい部分がある。しかし、この実験は、電流がサンゴの光合成や代謝に与える影響があった場合、その影響時間は電流を流している間だけではない可能性を示唆しているように思われた。この影響時間を把握することは、電流がサンゴに与える影響を考察する上でとても重要であると思われる。また、この実験では、電源から入ってくるノイズを取り除くことに苦労した。D₀ 測定実験では、ノイズの影響を受けて、D₀ 値が異常に変動した実験結果もあった（その実験結果は掲載していない）。こうした目に見えない影響があると実験結果に大きな影響が出てしまうため、注意が必要だと思われる。

最後に、5.2 では、電着物質が幼生の着生基盤として適していると述べたが、電着物質は、どのような形状の電極を使用するか、どの程度の電流を流すかによって、組成は変わると言われており、今後電極の形状や電流の強さの最適値を検証することが必要と思われる。

参考文献

- 1) 深見公雄 (2005) サンゴ礁生態系の物質循環において微生物はどのような役割を果たしているか, 海洋と生物, 161, 27 (6), pp572-578
- 2) 日本サンゴ礁学会ホームページ
(<http://www.soc.nii.ac.jp/jcrs/>)
- 3) 山室真澄・茅根創編集 (1997) 工業技術院指定研究 (平成元年度～8 年度) 研究成果報告書「モデルサンゴ礁における CO2 循環機構に関する研究」, 工業技術院地質調査所
- 4) 環境省・日本サンゴ礁学会編 (2004) 日本のサンゴ礁, 環境省
- 5) Takeshi Mise・Michio Hidaka (2003) Degradation of zooxanthellae in the coral *Acropora nasuta* during bleaching, *Galaxea*, 5, pp.33-39
- 6) Yamano H., M. Tamura, Y. Kunii, and M. Hidaka (2003) Spectral reflectance as a potential tool for detecting stressed corals, *Galaxea*, 5, pp.1-10
- 7) Bhagooli R.・M. Hidaka (2002) Physiological responses of the coral *Galaxea fascicularis* and its algal symbiont to elevated temperatures, *Galaxea*, 4, pp.33-42
- 8) Fujimura H・Oomori T・Maehira T・Miyahira K (2001) Change of coral carbon metabolism influenced by coral bleaching, *Galaxea*, 3, pp.41-50
- 9) 国土交通省港湾局監修・海の自然再生ワーキンググループ (2003) 海の自然再生ハンドブック その計画・技術・実践 第4巻サンゴ礁編
- 10) Fujimura H・Oomori T・Maehira T・Miyahira K (2001) Change of coral carbon metabolism influenced by coral bleaching, *Galaxea*, 3, pp.41-50
- 11) RANJEET BHAGOOI・IRINA YAKOVLEVA (2004) Differential bleaching susceptibility and mortality patterns among four corals in response to thermal stress. *Symbiosis*, 37, pp.121-136
- 12) Kazumasa H・Toshiaki K (2003) ハナヤサイサンゴのストレス応答, バイオサイエン

スとインダストリー , 61 (6) , pp371-372

- 13) 下田徹・市川忠史・松川康夫 (1998) 琉球諸島のサンゴ礁における栄養塩環境とそのサンゴ生育への影響 , 中央水研研報 , 12 , pp71-80
- 14) Steven B.Kraines・Atsushi Suzuki・Tetsuo Yanagi , Masahiko Isobe , Xinyu Guo , Hiroshi Komiyama (1999) Rapid water change between the lagoon and the open ocean at Majuro Atoll due to wind, waves, and tide , JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESERCH , 104 (C7) , pp15635-15653
- 15) 灘岡和夫・二瓶康雄・横堀達也・熊野良子・大見謝辰男 (1999) サンゴ礁海域の水環境に関する陸水・外洋水影響の検討 , 海岸工学論文集 , 46 , pp.1181-1185
- 16) 灘岡和夫・若木研水・二瓶泰雄・今井陽介・青木康哲・丸田直美・大見謝辰男・満本裕彰・小林孝・藤井智史 (2001) 現地観測に基づく石垣島サンゴ礁海域の流動特性と微細土砂・熱輸送特性に関する解析 , 海岸工学論文集 , 48 , pp.1151-1155
- 17) Biorock.net
(<http://www.biorock.net/>)
- 18) THOMAS J.GOREAU・JAMES M.CERVINO・RACHAEL POLLINA (2004) Increased Zooxanthellae Number and Mitotic Index in Electrically Stimulated Corals, Symbiosis, 37, pp107-120
- 19) Nakamura, T・R. van Woesik・H. Yamasaki (2005) Photoinhibition of photosynthesis is reduced by water flow in the reef-building coral *Acropora digitifera*, Marine Pollution Bulletin , 5 , pp109-118
- 20) 赤嶺健一・樫木勇 (2003) 海水中における石灰質膜の電着機構 , 石川島播磨技報 , 43 (1)
- 21) Marlowe G.Sabater・Helen T.Yap (2002) Growth and survival of coral transplants with and without electrochemical deposition of CaCO_3 , JOURNAL OF EXPERIMENTAL MARINE BIOLOGY AND ECOLOGY
- 22) 岩尾研二 (1997) サンゴ幼生の変態促進物質 , みどりいし , 8 , pp20-22

- 23) 岩尾研二・大矢正樹 (1998) ウスエダミドリイシの初期ポリプ形成過程の観察, みどりいし, 9, pp32-34
- 24) Vector (<http://www.vector.co.jp/>)
- 25) 琉球大学理学部海洋資源科学科 日高研究室ホームページ
(<http://www.cc.u-ryukyu.ac.jp/hidakom/>)
- 26) 寺島一郎 (2002) 個葉および個体レベルにおける光合成, 植物生理学講座シリーズ第3巻 光合成, pp125-149
- 27) 村岡裕由・可知直毅 (2003) 光と水と植物のかたち: 植物生理生態学入門, pp246-258

謝辞

指導教官である鯉渕先生には、いつも親身になってご指導いただき、本当にありがとうございました。特に修論提出の間際には、学生に指導するためにお休みでも学校にきて、ご指導してくださいました。研究に限らず、先生からは多くのことを学ばせていただきました。

サンゴの研究を進めるに当たり、共同研究をさせていただいた三菱重工橋梁エンジニアリング、日本防蝕、CP ファームの皆様には大変お世話になりました。鯉渕先生がお仕事でアメリカに出張されている間は、大変ご迷惑をおかけしました。特に、CP ファームの近藤さん、日本防蝕の石川さんには、わからないことをいつも教えていただき、私の就職活動のことまで心配していただきました。本当にありがとうございました。また、CP ファームの増川さんには、研究で石垣に行ったときに、車を出していただいたり、とてもお世話になりました。ありがとうございました。

産総研の鈴木淳先生には、サンゴの実験に関する知識など、研究を進める上でとても重要なことを教えていただきました。お忙しいところいつもお時間を作ってくださいありがとうございました。

同じく東京大学大学院理学研究系の島田くんとは、偶然の出会いでしたが、サンゴの研究をしているという共通の部分があって、論文を紹介してもらうなどお世話になりました。

それ以外にも、研究室や専攻の友人のお陰で、何とか修士論文を書き上げることができました。ゼミでの的確なコメントをくださった先生方、いつも温かくアドバイスをくださった先輩方、いろんな時間を共有した同期に、この場を借りてお礼申し上げます。

最後に、大学院にまで進学した私の長い学生生活をずっと支えてくれた優しい両親に心からの感謝を込めてお礼を言いたいと思います。本当にありがとうございました。