

2009 年度 修 士 論 文

環境因子がサンゴの骨格成長と光合成に  
与える影響に関する実験的研究

Experimental research into influence that environmental factors give to  
coral calcification and photosynthesis

多田 希

Tada, Nozomi

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

# 目次

<b>1. 序論</b> .....	<b>4</b>
1.1. 研究の背景 .....	4
1.1.1. サンゴとは .....	4
1.1.2. サンゴ礁の攪乱と保全 .....	5
1.2. 既往の研究・先行研究 .....	6
1.3. 本研究の目的 .....	8
1.4. 本論文の構成 .....	8
<b>2. 研究の方法</b> .....	<b>9</b>
2.1. サンゴの飼育方法 .....	9
2.2. 測定方法 .....	14
2.2.1. クロロフィル蛍光測定 .....	14
2.2.2. 水中重量測定 .....	18
2.2.3. 全アルカリ度・全炭酸測定 .....	20
2.3. 測定方法の検証 .....	23
2.3.1. クロロフィル蛍光測定 .....	23
2.3.2. 水中重量測定 .....	23
2.3.3. 全アルカリ度・全炭酸測定 .....	23
<b>3. サンゴの生理活動による骨格成長と光合成への影響</b> .....	<b>27</b>
3.1. サンゴの健康状態による骨格成長と光合成への影響 .....	28
3.1.1. 実験方法 .....	28
3.1.2. 実験結果 .....	31
3.1.3. 考察 .....	41
3.2. 骨格成長と光合成の日周変動 .....	44
3.2.1. 実験方法 .....	44
3.2.2. 実験結果 .....	47
3.2.3. 考察 .....	51
3.3. 閉鎖空間における骨格成長と光合成の変動 .....	56
3.3.1. 実験方法 .....	56
3.3.2. 実験結果 .....	56
3.3.3. 考察 .....	57

<b>4. 光による骨格成長と光合成への影響</b> .....	<b>58</b>
4.1. 光量変化による骨格成長と光合成の変動 .....	59
4.1.1. 実験方法 .....	59
4.1.2. 実験結果 .....	61
4.1.3. 考察 .....	65
<b>5. 電気による骨格成長と光合成への影響</b> .....	<b>69</b>
5.1. ブランク実験 .....	70
5.1.1. 実験方法 .....	70
5.1.2. 実験結果 .....	72
5.1.3. 考察 .....	76
5.2. 条件毎の比較実験 .....	77
5.2.1. 実験方法 .....	77
5.2.2. 実験結果 .....	78
5.2.3. 考察 .....	80
5.3. 短時間応答実験 .....	81
5.3.1. 実験方法 .....	81
5.3.2. 実験結果 .....	83
5.3.3. 考察 .....	87
5.4. 日周変動実験 .....	88
5.4.1. 実験方法 .....	88
5.4.2. 実験結果 .....	89
5.4.3. 考察 .....	92
5.5. 電気による石灰化促進に関する検証 .....	95
5.5.1. 実験方法 .....	96
5.5.2. 実験結果 .....	97
5.5.3. 考察 .....	102
5.6. 閉鎖状態における電気の影響の検証 .....	104
5.6.1. 実験方法 .....	104
5.6.2. 実験結果 .....	105
5.6.3. 考察 .....	106
<b>6. 流れによる骨格成長と光合成への影響</b> .....	<b>107</b>
6.1. 実験方法 .....	108
6.2. 実験結果 .....	111
6.3. 考察 .....	113

7. まとめ.....	116
8. 付録.....	118
8.1. クロロフィル蛍光測定における環境光の影響.....	118
8.1.1. 実験方法.....	118
8.1.2. 実験結果.....	118
8.2. 単位の換算.....	118
8.3. 実験結果の補正作業.....	120
8.4. 水中重量測定とクロロフィル蛍光測定の実験結果.....	121
8.5. 全アルカリ度・全炭酸測定の実験結果.....	129
参考文献.....	152
謝辞.....	155

# 1. 序論

## 1.1. 研究の背景

### 1.1.1. サンゴとは

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た動物で、ポリプ体内には渦鞭毛藻類の褐虫藻が共生している。そのため、ポリプによるプランクトンの摂食に加え、褐虫藻が行う光合成によってエネルギーを得ている。サンゴの体の構造を図 1.1-1 に示す<sup>1)</sup>。



図 1.1-1 サンゴの構造

ポリプは餌をとらえる触手、摂食や排泄をする口、食べた物を消化する胃腔などからなる軟体組織と骨格から成り立っている。サンゴは個々のポリプが共骨と共肉によってつながって群体を作っており、個々のポリプは共肉部で連絡しあっている。ポリプと骨格の間では Calcify fluid が存在し、その領域がアルカリ化することで骨格が形成されると考えられている。

この群体はポリプが骨格を作りながら出芽と分裂を繰り返すことによって成長する。これらの群体が一つの場所に多数生育して形成されたものがサンゴ群集である<sup>2)</sup>。大きなサンゴ群集をサンゴ礁と呼び、その一次生産力は熱帯雨林にも匹敵するといわれている<sup>3)</sup>。また、サンゴ礁は入り組んだ構造と高い生産力によって、多様な生物の棲息場となっており、外洋の生物の稚魚なども多く生息している。そのため、漁場やレクリエーションの場として人間活動にとって重要である。また、生物多様性への貢献に加え、近年問題になっている地球温暖化の原因の一つである CO<sub>2</sub> を吸収するといわれており<sup>4)</sup>、地球環境にとっても非常に重要である。

### 1.1.2. サンゴ礁の攪乱と保全

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<sup>1)</sup>。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<sup>2)</sup>。

また、近年特に騒がれ始めた<sup>1)</sup>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、人為的な被害も大きいと考えられる<sup>2)</sup>。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からである。琉球列島では、開発現場、農地などから流出する国頭マーヅ等が赤土汚染と呼ばれ、問題となっている。

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や体内からの褐虫藻の放出が生じ<sup>5) 6) 7)</sup>、サンゴの白い骨格が透けて見える、白化状態となる。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。

こういったサンゴの危機的状況を受けて、様々なサンゴ礁の保全や再生の試みがなされてきた<sup>1) 2) 6) 7)</sup>。それらを以下に紹介する。

- (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
- (10) オニヒトデの駆除
- (11) エコツアーリズム

その他にも、法の改正や水質・底質の改善もしくは環境の維持などの試みもなされてい

---

<sup>1)</sup> Asahi.com(2007/6/23)「サンゴ襲う「白い死線」 沖縄や豪州などで被害」  
(<http://www.asahi.com/special/070110/TKY200706230292.html>)などを参照

る。

サンゴの保全や再生はサンゴの状態によってその対策方法が異なる。サンゴの状態が良好である時は維持や悪化の予防に努めることが重要となってくるため、水質や底質の改善、水温上昇の抑制またはエコツーリズムや教育などの対策が考えられる。また、サンゴが弱まる恐れのある状態では、悪化原因の回避が必要となるので、オニヒトデの駆除やサンゴ群集の移築が考えられる。さらに、サンゴが弱っている状態では、回復と修復が必要となるので、サンゴ片の移植、病気のサンゴの隔離や手術などの対策が考えられる。そして、サンゴが死滅してしまった状態では、再生が必要になり、幼生放流や基質投入などが考えられる。現在のサンゴの危機的状況や再生技術の状況を見ると、回復や修復、再生が緊急の課題だということが出来る。しかし、これらの保全・再生技術には問題点や改善すべき点も多い。例えば、サンゴ片の移植はダイバーが気軽に行えることで数多くなされているが、適地選定が不十分であるために移植してもそこで白化してしまうといった問題がある。移植の適地選定に関しては多くの研究がなされているが<sup>8) 9) 10)</sup>、多様な環境因子があるために、サンゴの生育に影響を及ぼしているものを特定しきれていない。また、これらの対策を行う上では、サンゴの状態を出来るだけ良好に保っておく必要がある。保全や再生技術を改善するためにもサンゴの生態や挙動をより詳しく知る必要に迫られているといえる。これまでもサンゴ礁が発達している海域の物理環境やサンゴのモニタリング、サンゴ礁海域の栄養塩環境についての研究は多数おこなわれてきた<sup>7) 11) 12) 13) 14)</sup>。しかし、これらは自然界で行ったものであり、色々な環境要因が複雑に絡み合っている。そのため、それぞれの検証が必要だが、サンゴの生態や光や水流といった重要な環境因子による影響を個別に行った研究はまだ不十分であり、そのようなサンゴの特性を考慮した保全・再生技術の改善が求められている。さらに、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を進めていく必要にも迫られていると思われる。

## 1.2. 既往の研究・先行研究

そうした状況の中で、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<sup>15)</sup>。沖縄県竹富島竹富東港にある浮棧橋で、電気防食によって電流が流していたところ、棧橋の側面にサンゴが成長している様子が観察された。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、数年後には側壁部に多数のサンゴが生育していた。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き棧橋のみであった<sup>16)</sup>。

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いうことが言われてきた。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<sup>17)</sup>。こうした試みの第一人者である、Goreau らの研究を紹介する<sup>15)</sup>。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。このように、電流がサンゴに与える影響について研究は報告されているものの、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。そのため、電流は本当にサンゴの成長を促進するのだろうか、また、促進する場合どのように作用するのかについては、不明なことが多いのが現状である。本研究の先行研究として、三浦がサンゴの成長促進に関する研究を行っている<sup>16)</sup>。ここでは、サンゴ幼生の着生と微弱電流による骨格成長と光合成に対して、電流が正の影響を与える可能性が示唆されている。しかし、サンゴの生活史や部位による影響の違いがあることも指摘されており、それらの解明が必要であると考えられる。そのため、電流の影響を明らかにするとともに他の環境因子が与えるサンゴの代謝に関する知見を得ることが出来れば、既存の再生手法の改善のみならず、電気をサンゴ礁再生技術として効果的に利用できる可能性がある。さらに、先ほどの竹富島の浮き桟橋の例では、桟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。

サンゴの骨格成長量および光合成量は光<sup>18)</sup>や水温<sup>19)</sup>などの環境因子によって変化することが分かっている。また、水流がサンゴの成長に影響を及ぼすことも分かっており、サンゴの移植場所における成長率と水流や波の関係を調べた研究<sup>12)</sup>もある。その研究では、ある範囲の波高で成長率が最も高くなることが分かっている。また、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<sup>20)</sup>。Nakamura らは屋外の飼育水槽で 3cm/s と 20cm/s の流速条件における光阻害への影響を比較したところ、20cm/s の水流において水温と強光に対してストレス耐性が上がることを明らかにした。

サンゴに影響を及ぼす環境因子は、以下のように大別できる。

- 1) 波浪(波高, 流速)
- 2) 日照 (水深, 懸濁粒子, 光量)
- 3) 水質(水温, 塩分, 有機物・無機物, 堆積物)
- 4) 他の生物(捕食生物, 競合生物, 他のサンゴ)
- 5) 病気

しかし、サンゴの生理活動によっても骨格成長量や光合成量は大きく左右されるはずである。実際に、サンゴの日周変動<sup>21)</sup>や季節変動<sup>4)</sup>などが確認されており、サンゴの生理活動は骨格成長や光合成を支配する要因として重要であるといえる。しかし、これまでのサンゴの骨格成長や光合成に関する研究は生理活動をあまり考慮せずに、環境因子の影響を



見ているものが多く、それではサンゴの代謝の挙動を解明するには不十分だと考えられる。もし、そうした生理活動を考慮して環境因子と代謝の関係性を明らかにすることで出来れば、サンゴの代謝に関するより汎用的な知見を得ることになる。そうすれば、サンゴが効率的に成長する条件を明らかにすることが出来る可能性がある。

自然界では複合的な環境因子を室内実験によって個別に影響を見ることにより、どの環境因子がサンゴにより多く影響を与えているかを明らかにし、保全や再生において重要な考察を得ることが出来ると考える。

### 1.3. 本研究の目的

サンゴの保全活動の改良、再生技術の開発および改良において、環境因子がサンゴの代謝に与える影響を明らかにすることは極めて重要である。そこで本研究では、サンゴの生育において重要なサンゴの生理活動・光・水流に加えて、成長促進の方法として開発中である電流によるサンゴの代謝への影響とその挙動を明らかにすることを目的とする。

### 1.4. 本論文の構成

本論文ではまず、第2章で研究の方法と題して、飼育状況の概要や測定方法の紹介を行う。次に、サンゴの代謝の挙動にとって、極めて影響力が大きいと考えられるサンゴの生理活動を第3章で、光による影響を第4章で議論する。それにより、サンゴの生態的な特徴の解明やモニタリングおよび実験でのサンゴの代謝測定方法の検討を行った。さらに、電流の影響を第5章で議論する。本研究で行ってきた様々な実験について議論し、電流の影響の解明と電流の影響に関する仮説の検証を行った。最後に成長率やストレス耐性の向上として注目され、環境因子として重要なものの一つである、水流の影響を第6章で議論する。これらを統合し、第7章でまとめとしてサンゴの骨格成長と光合成の挙動に関して考察を行う。

## 2. 研究の方法

### 2.1. サングの飼育方法

水槽は大きな飼育水槽と小さな実験水槽 4 つ，そして温度の調節やカルシウムの供給および水質の保持を行うための濾過水槽が繋がっており，ポンプを用いて，水を循環させている．それらの水槽系の様子を図 2.1-1 で，実験水槽を図 2.1-2 で示す．また，水槽の水の流れを簡単に図式したものを図 2.1-3 で示す．飼育水槽，実験水槽，濾過水槽の容積はそれぞれ約 150L(875×400×425mm)，約 8L(165×140×360mm)，約 45L(390×270×420mm)であり，この水槽系には通常約 230L の水が循環している．飼育水槽の下に位置する濾過水槽において，カルシウムリアクターによりカルシウムの供給を行っているため，通常からサングが石灰化を行ってもカルシウムが不足することはない．

実験に使用したサングは実験水槽で飼育していた．実験水槽の飼育条件を以下に示す．

光量	8 時～20 時：約 $200 \mu \text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$	20 時～8 時：約 $0 \mu \text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$
水温	$25 \pm 2^\circ\text{C}$ (濾過水槽のヒーターおよびクーラーで調節)	
塩分濃度	$34 \pm 1.0 \text{ PSU}$	
流量	8.3 ml/s	

飼育用電灯は 8 時からと 20 時から 12 時間ずつ ON と OFF で切り替える．以降，8 時から 20 時の ON の時を昼間，20 時から 8 時までの OFF の状態を夜間と定義する．昼間および夜間は，上記の飼育条件で示した光量でほぼ一定に保たれている．

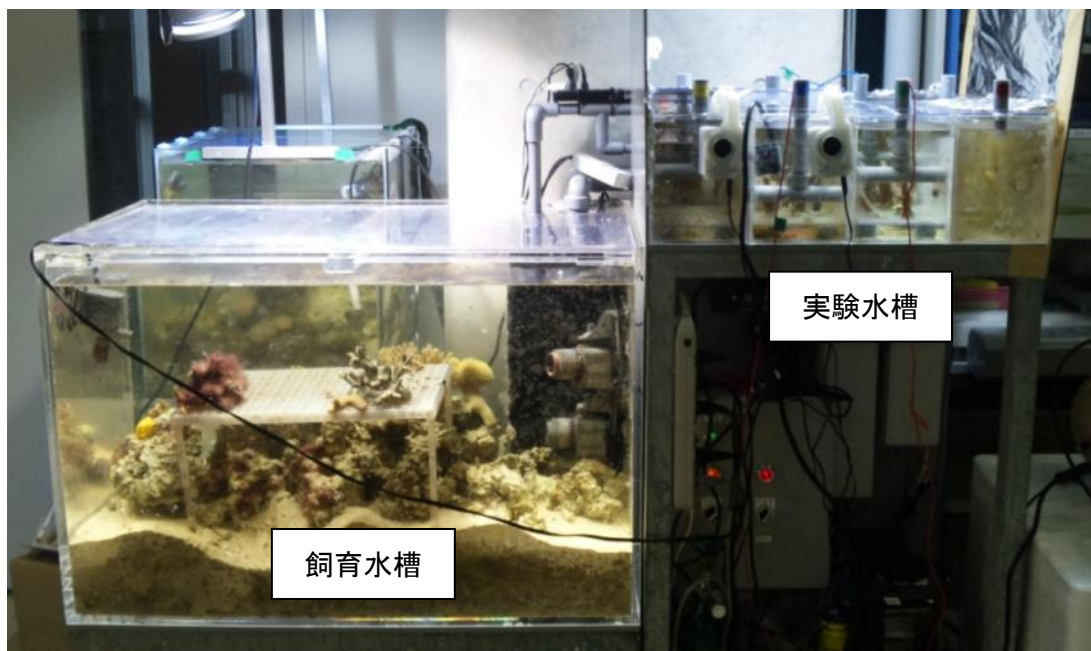


図 2.1-1 水槽系の様子

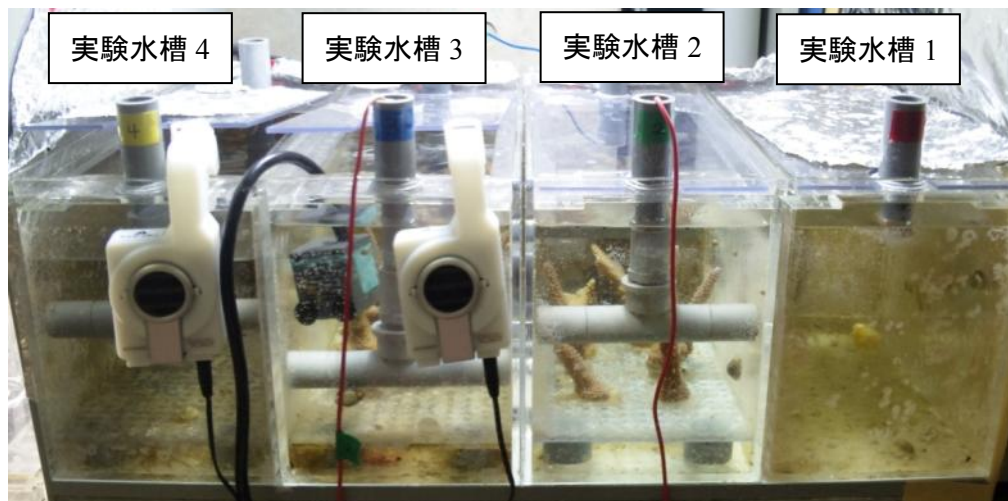


図 2.1-2 実験水槽の様子

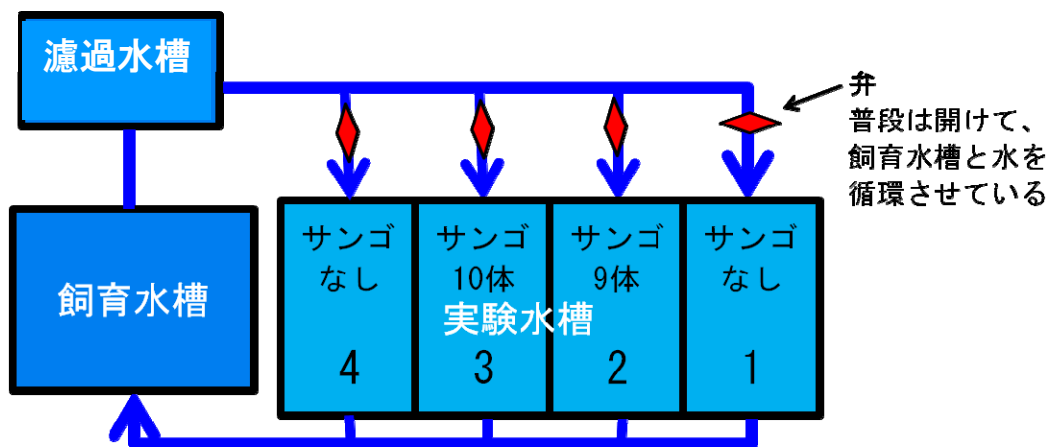


図 2.1-3 水槽の水の流れ

サンゴは初め、横置きにして飼育していた。しかし、横置きから縦置きに変えた。それには、二つの理由がある。一つは、縦置きの方が野外のサンゴの状態に近く、サンゴの飼育における光条件としてより好ましいと考えられるからである。もう一つは、サンゴの石灰化においてより好ましいと考えられるからである。サンゴは基盤を定着させようと、下にも骨格を成長させる。しかし、実験の際に横置きのサンゴを水槽から持ち上げるにより、それまでに成長した骨格部分が引き離される。横置きにしていると実験の度に骨格量が減り、また引き離すことがサンゴにストレスを与えられられる。以上の理由により縦置きにした。横置きから縦置きにする過程の飼育状況を置き方の状態により3段階に分けて説明する。

まず第1段階は、2008年6月から2008年12月14日までの約6ヵ月間である。その期間に、実験水槽2(サンゴの群体番号:7, 11, 15, 19, 27)と実験水槽3(サンゴの群体番号:1, 2, 3, 4, 6)に5群体ずつ入れた。サンゴは大きな群体から切り取ったものに釣り糸を

つけて、横に置いて飼育した。横置きにしたサンゴの模式図を図 2.1-4 に示す。

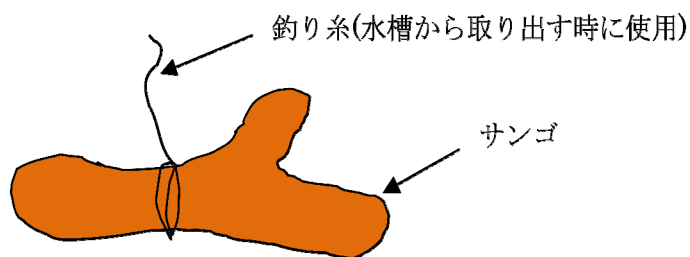


図 2.1-4 横置きサンゴ

次に第 2 段階は、2008 年 12 月 14 日から 2009 年 1 月 23 日である。初めは縦置きにした方がサンゴの健康の状態がよくなるかを見るためにサンゴを二つに切り、その半分を縦置きにして経過を見た。2008 年 12 月 14 日にそれぞれのサンゴを二つに切り分け、片方をそのまま横に置き(サンゴの群体番号: 1y, 2y, 3y, 4y, 6y, 7y, 11y, 15y, 19y, 27y), もう一方をアクリル板に水中ボンドで備え付け縦置き(サンゴの群体番号: 1t, 2t, 3t, 4t, 6t, 7t, 11t, 15t, 19t, 27t)にした。縦置きにしたサンゴの模式図を図 2.1-5 に示す。

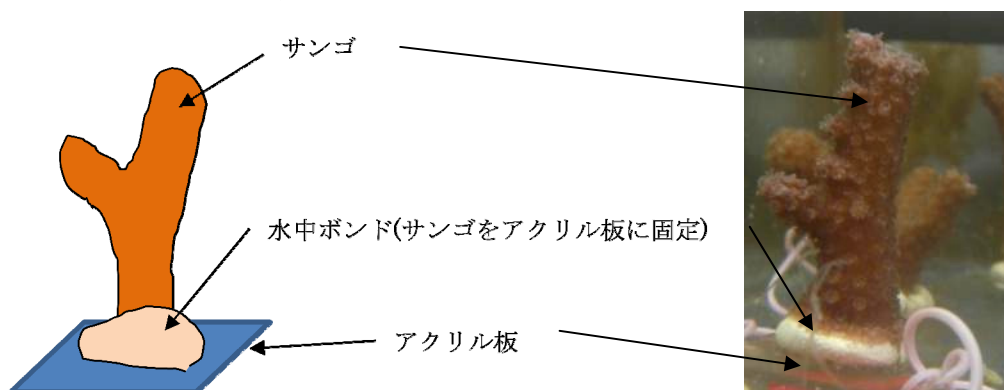
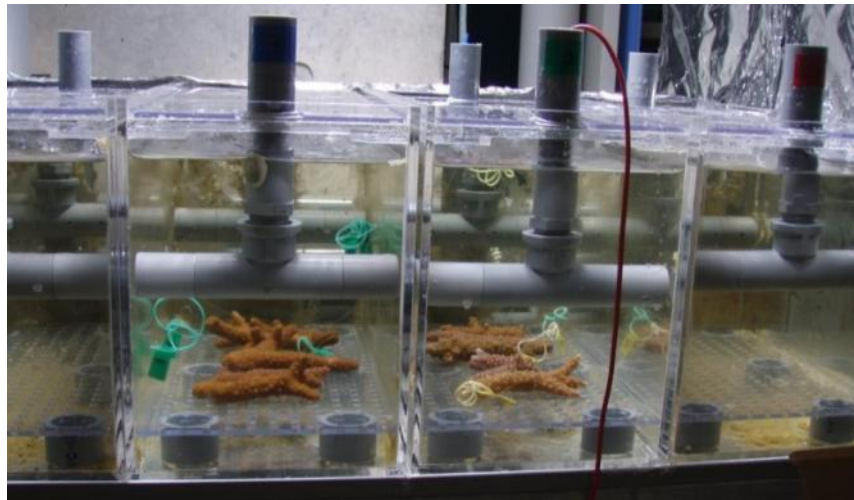


図 2.1-5 サンゴの飼育の様子(縦置き)

さらに第 3 段階は、2009 年 1 月 23 日から現在に至るまでの期間である。しばらくサンゴの健康状態を見ることにより、縦置きが好ましいと判断したため、全てを縦置きに変えた。2009 年 1 月 23 日にそのまま横置きにしていた残りのサンゴの群体をアクリル板に水中ボンドで備え付け縦置きにして飼育した。飼育の様子を図 2.1-6 に示す。



a 飼育の様子(横置き)

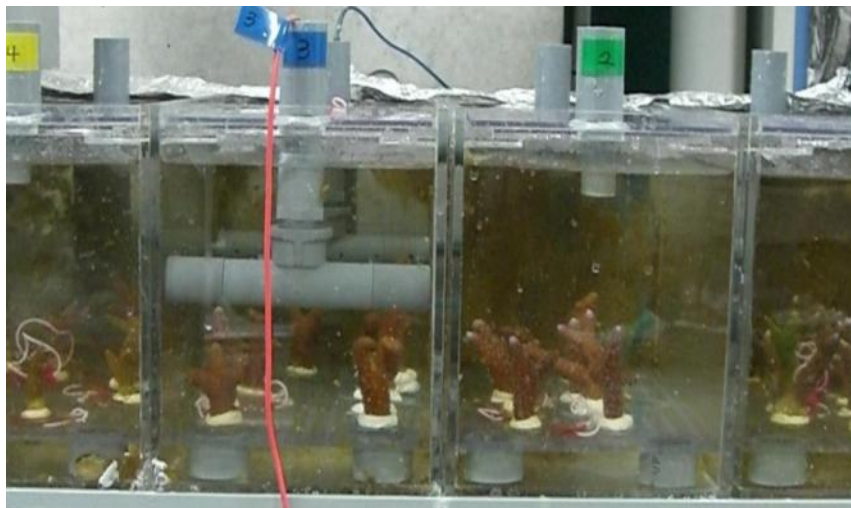


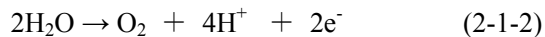
図 2.1-6 b 飼育の様子(縦置き)

電気を流す場合は、塩化ビニール管(以下、塩ビ管と記す)を用いる。塩ビ管はT字型になっており、図 2.1-7 で示すようにT字を上下逆さにした状態で実験水槽内の左右の端に備え付ける。塩ビ管の中央部分にゲルを溶かし入れ、上部と下部で水が行き来出来ないように固めてふさいだ。ゲルは食用のものを使っており、海水に寒天の粉を4%溶かして作成した。このゲル上部の塩ビ管の中に満たしている海水に電極を浸し電流を流す。ゲルは電気分解によってゲル上部の塩ビ管内に発生する塩素などの有害物質が水槽内に流出するのを防いでいる。しかし、イオンはゲルを通るため、陽極と陰極の間を電子が流れ、電気が流れるという仕組みになっている。T字の水平部分には水槽内部方向に等間隔に穴を開け、電気は水槽を比較的満遍なく流れるようにした。

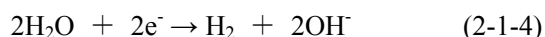
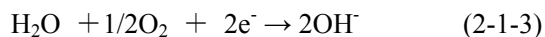
電極付近での反応は陽極と陰極部分において(2-1-1), (2-1-2), (2-1-3), (2-1-4)式のようになっている。



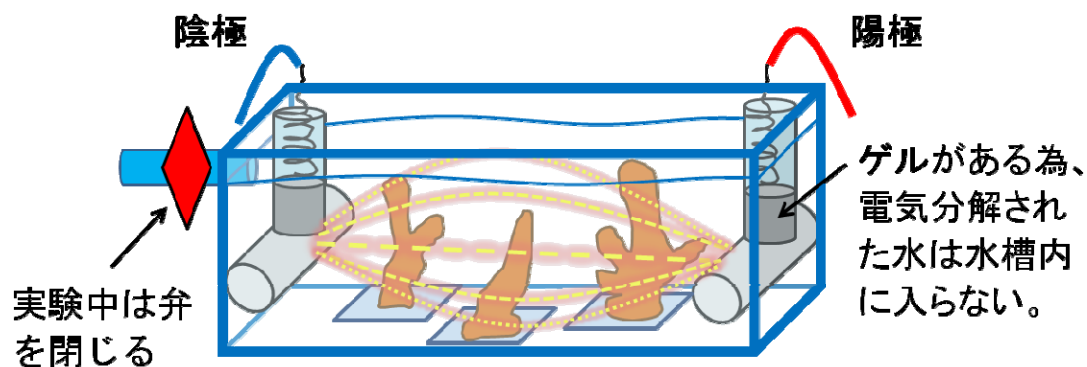
陽極：塩素ガス発生，酸素ガス発生，水素イオンによる酸性化



陰極：酸素還元によるアルカリの発生，水素発生によるアルカリ化



殺菌作用のある塩素や酸など，サンゴにとって有害であると考えられる物質を水槽内に入れないために，ゲルによって仕切りとした．しかし，ゲルの強度が弱まったり電極付近の濃度が上がると水槽内に流出したりする恐れがあるので，電極付近の海水やゲルはこまめに交換する必要がある．



ファンとポンプによって  
水流と水温を保つ

図 2.1-7 実験水槽の様子(電気を流す場合)

以下の期間においては，電気条件は表 2-1 のように設定した．電気はその期間中継続して流していた．2009年5月27日以降は，実験時以外は電気を流さない状態で飼育を行った．

表 2-1 飼育条件

	飼育条件				
期間	11/18~12/14	12/14~1/8	1/8~1/23	1/23~2/25	2/25~5/26
水槽 2	50mA/m <sup>2</sup>	50mA/m <sup>2</sup>	0 mA/m <sup>2</sup>	0 mA/m <sup>2</sup>	5mA/m <sup>2</sup>
水槽 3	0mA/m <sup>2</sup>	0 mA/m <sup>2</sup>	5mA/m <sup>2</sup>	5mA/m <sup>2</sup>	0 mA/m <sup>2</sup>
置き方	全て横置き	半分縦置き/半分横置き		全て縦置き	

## 2.2. 測定方法

### 2.2.1. クロロフィル蛍光測定

サンゴと共生している褐虫藻の光合成活性がどの程度かを測定するために、Photon Systems Instruments 社の Fluor Cam を用いてクロロフィル蛍光測定を行った。植物プランクトンに光を照射すると、その光をクロロフィルが受容し、そこから得られるエネルギーを光合成に使う。しかし、使い切れない光エネルギーは、熱放射やクロロフィル蛍光として体外に放出される。その現象を利用して、クロロフィル蛍光を測定することで光合成量を知ることが出来る。その原理を簡単に図式化すると、図 2.2-1 のようになる。

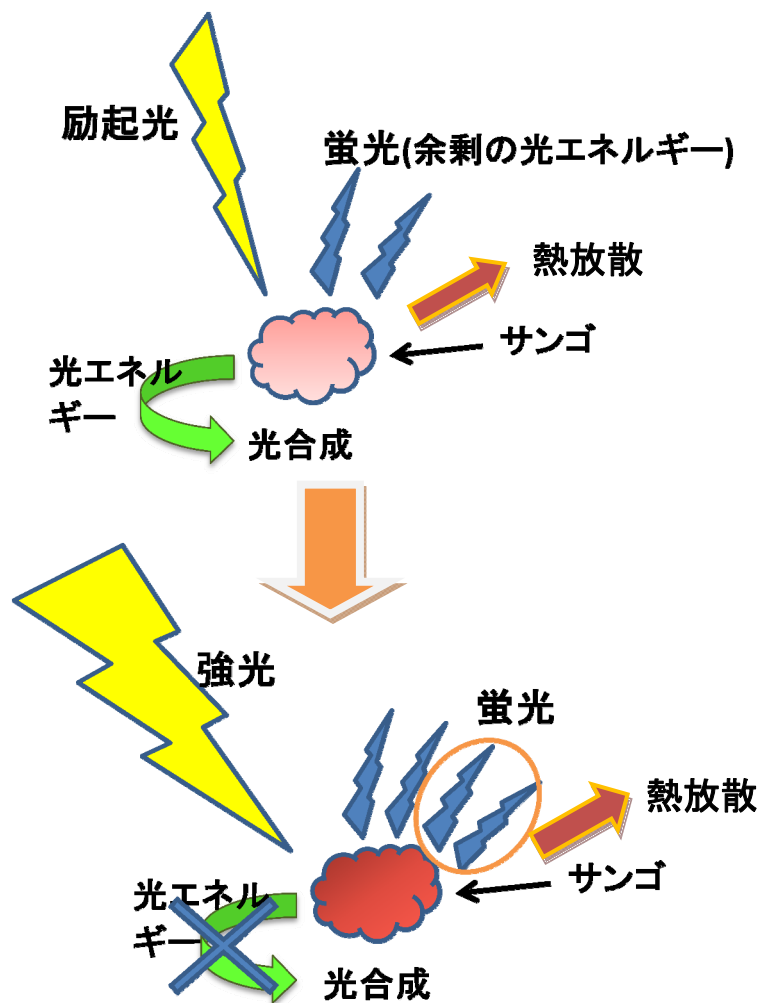


図 2.2-1 クロロフィル蛍光測定の実理

光合成に適した光量である励起光を照射している時は、褐虫藻は吸収した光エネルギーを光合成に使う。ある程度は熱放射やクロロフィル蛍光として放出する。ここに強光を当てると、光合成回路が飽和し、吸収した光エネルギーは全て熱放射とクロロフィル蛍光として放出される。そのため、クロロフィル蛍光の増加量によって励起光を照射している時に光合成に使っている光エネルギーを知ることが出来る。

Fluor Cam は測定光・励起光・飽和光を照射し、それに対応して放出されるクロロフィル蛍光を測定している。その測定値から光合成系にどれだけ光エネルギーが伝達されているかを算出することが出来る。

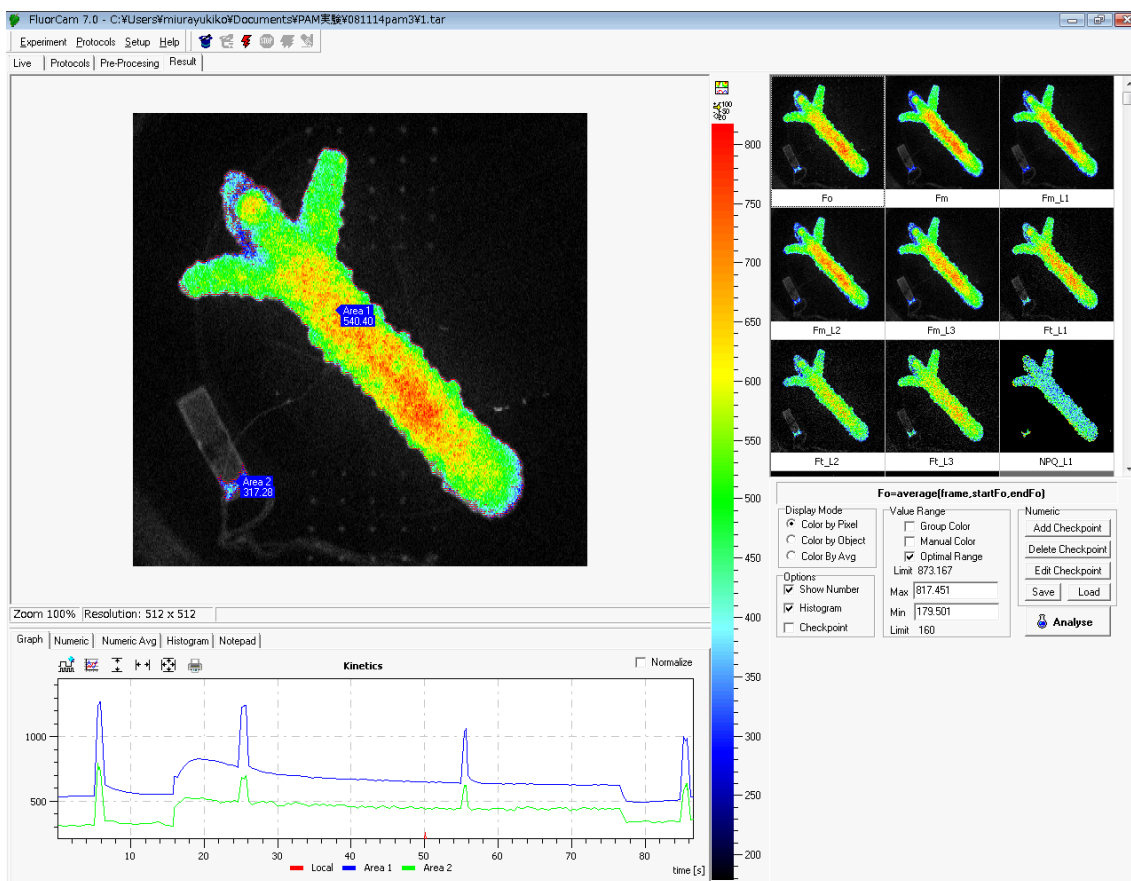


図 2.2-2 クロロフィル蛍光測定の測定結果画面

Fluor Cam で行ったサンゴのクロロフィル蛍光測定結果の画面を図 2.2-2 に示す。Fluor Cam は写真を撮るようにサンゴ全体のクロロフィル蛍光を時間経過で測定する。左上の画面に映っているのが測定したサンゴである。測定したクロロフィル蛍光収量に応じて色分けがなされている。赤に近づくほどクロロフィル蛍光は多く、青に近づくほど少ない。右下のグラフがクロロフィル蛍光の時間経過の値である。このグラフを拡大したものを図 2.2-3 に示す。



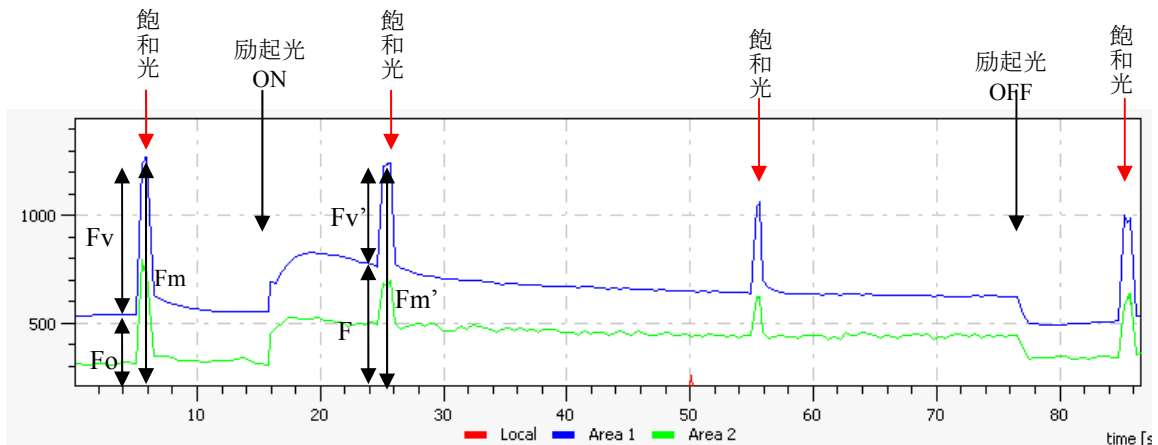


図 2.2-3 クロロフィル蛍光測定結果のグラフ

測定光はクロロフィル蛍光を測定するために一定間隔で照射される。励起光は図 2.2-3 の一つ目の黒の矢印で示した時点で ON になり、二つ目の黒の矢印で示した時点で OFF になる。そして、赤の矢印で示した時点で飽和光がその瞬間のみ照射される。測定光や励起光を照射している時は、光合成の回路は未飽和の状態であり、植物はいつでも光合成できる状態である。この時も褐虫藻は恒常的にクロロフィル蛍光を発している。しかし、飽和光を照射すると、光合成回路は飽和し、吸収した光エネルギーがクロロフィル蛍光として放出されるため、クロロフィル蛍光の値が大きくなる。そうしたクロロフィル蛍光値が、図 2.2-3 中の  $F_m$  や  $F_m'$  のように表れる。この内、 $F_v'$  と  $F_m'$  の値から、(2-2-1)式を用いて、電子伝達速度  $\phi_{II}$  を割り出すことが出来る。熱放散量(NPQ)の求め方を(2-2-2)式に、光合成系 II の最大量子収率(Yield)を(2-2-3)式に示す。

$$\phi_{II} = F_v' / F_m' \quad (2-2-1)$$

$$NPQ = (F_m - F_m') / F_m' \quad (2-2-2)$$

$$Yield = F_v / F_m \quad (2-2-3)$$

電子伝達速度  $\phi_{II}$  は、光合成速度とは正確には比例しない。それは、電子が伝達しても光合成のみに使用されるのではなく、光呼吸にも使用されるためである。しかし、褐虫藻などの藻類の性質上、 $\phi_{II}$  を用いている。なぜなら、正味の光合成活性を知る指標として通常用いられる光合成系 II の最大量子収率 Yield は熱放散の値が大きいと光合成を知る指標としては不確実なものになる。藻類はこの熱放散の値が比較的大きいため、光合成系 II の最大量子収率を指標として用いるのは不適切であると言われている<sup>22)23)</sup>。高等植物の測定では、暗条件下に数十分程度置くことで暗順化させ、この熱放散の値を下げる事が出来るが、藻類は熱放散を暗条件でも行う為、この方法を用いることは出来ない。そのため、熱放散の影響を受けない電子伝達速度  $\phi_{II}$  を、褐虫藻の光合成活性の指標とするのが最も

有効である。

Fluor Cam による測定の様子は図 2.2-4 に示す。この Fluor Cam の下部にサンゴを設置する。Fluor Cam の下部にあるライトから光が照射され、ライトの横にあるセンサーでクロロフィル蛍光を測定する。Fluor Cam の本体は、パソコンに接続し操作を行う。



図 2.2-4 Fluor Cam の外観写真

### 2.2.2. 水中重量測定

サンゴの骨格成長を測定するために、水中重量の測定を行った。サンゴの重量を海水中で測定した場合、ポリプや粘液などの有機体の比重は海水とほぼ同じであるので、無視することが出来る。つまり、サンゴの水中重量を測定すると、比重の大きな骨格の重さだけを測ることが出来る。海水の密度は  $1.022 \text{ g/cm}^3$  程度で、サンゴ骨格の密度は  $2.94 \text{ g/cm}^3$  である。そうして測定した重量の変化量から、骨格成長量を知ることができる。また、この方法では海水に浸して測定するのでサンゴへのダメージが比較的少なく、サンゴの形状に左右されないという利点もあると言われている<sup>24)</sup>。測定の様子を図 2.2-5 に示す。釣り糸につないだサンゴを海水で満たした容器に浸す。この時サンゴが容器に触れないように注意する。また、測定前に出来るだけ釣り糸やサンゴ、アクリル板や水中ボンドに付着した藻や貝などの生物を取り除いておく。そして、容器内の海水に浸したまま釣り糸を天秤に接続し、その重量を測定する。

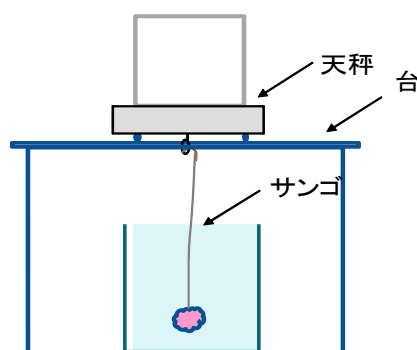


図 2.2-5 水中重量測定の様子

水中重量から空中重量を割り出す。海水の密度、サンゴ骨格(アラゴナイト)の密度を用いて、(2-2-5)式で空中重量を求めることが出来る<sup>24)</sup>。

$D_{sw}$  = 海水の密度(塩分および水温から計算出来る)

$D_{sk}$  = サンゴ骨格の密度 =  $2.94 \text{ g/cm}^3$

$W_{air}$  = サンゴ骨格の空中重量

$W_{sw}$  = サンゴの水中重量

以上のように定義すると、アルキメデスの原理から

$$W_{air} = \frac{W_{sw}}{1 - D_{sw}/D_{sk}} \quad (2-2-5)$$

と表せる。塩分および水温は測定の度に測っており、そこから海水の密度を算出した。

その値を測定日の重量とし、測定日と測定日の空中重量の差を測定日間の日数とそれぞれ先の測定日に測ったサンゴの空中重量で割り、成長率を割り出した。簡単のために、計算式(2-2-6)を示す。

Ex )	測定日	1 月 3 日	1 月 10 日	
	空中重量	X g	Y g	
	骨格成長量 :	(Y - X)		g
	骨格成長率 :	(Y - X) ÷ 7(day) ÷ X × 100		(%/day) (2-2-6)

### 2.2.3. 全アルカリ度・全炭酸測定

サンゴの光合成量および石灰化量の短期変動を測定するために、紀本工業化学の全アルカリ度滴定装置 ATT-05 で全アルカリ度および全炭酸を測定した。短期とは、有意な差を測定するのに一週間程度かかる水中重量測定と区別して、数時間から1日のスケールのことを指す。測定は30分毎や1時間毎に行い、サンゴの群体数や光条件によっては30分から1時間で有意な差が表れる。本研究では約  $200 \mu \text{mol/m}^2/\text{s}$  の光量子量条件下で、サンゴの表面積が約  $400 \text{cm}^2$  程度であり、槽の容量が約 8L の時、1時間の全アルカリ度および全炭酸の減少量は約  $40 \sim 100 \mu \text{mol/kg}$  ある。これは、全アルカリ度・全炭酸の値の1~5%程度で、測定誤差から見れば10~20倍程度あるため、有意な差といえる。

全アルカリ度滴定装置 ATT-05 を図 2.2-6 に示す。中央に置かれた採水ビンに海水を採取し、測定を行う。ふたをして密封状態で1日程度なら保存することもできるが、本研究においては、多くの実験で採水した直後に測定を行っている。各採水ビンの容量は、全アルカリ度滴定装置に入力されており、それをを用いて計算を行っているため、複数の採水ビンを用いても、正確な値が算出される。測定の際は、採水ビンの蓋を取り、温度センサーと pH メーターと塩酸の供給用の管をビンの中に差し込む。そして、塩酸を少量ずつ加えながら、pH の変化を追うことで、全アルカリ度および全炭酸を測定する。採水ビンの中にはスターラーを入れるため、測定中塩酸は十分に攪拌される。



図 2.2-6 全アルカリ度滴定装置(左:全体図 右:採水ビンとセンサー類)

全アルカリ度は、(2-2-7)式で表わされ、海水の弱酸成分を塩酸で滴定し、炭酸塩の脱気をモニターすることにより、炭酸カルシウムの当量として測定することが出来る。その時の滴定曲線を図 2.2-7 に示す。全炭酸は(2-2-8)式で表わされ、全アルカリ度と pH と塩分に

よって算出することが出来る<sup>25)</sup>。測定項と算出される値の関連図は図 2.2-8 に示す。

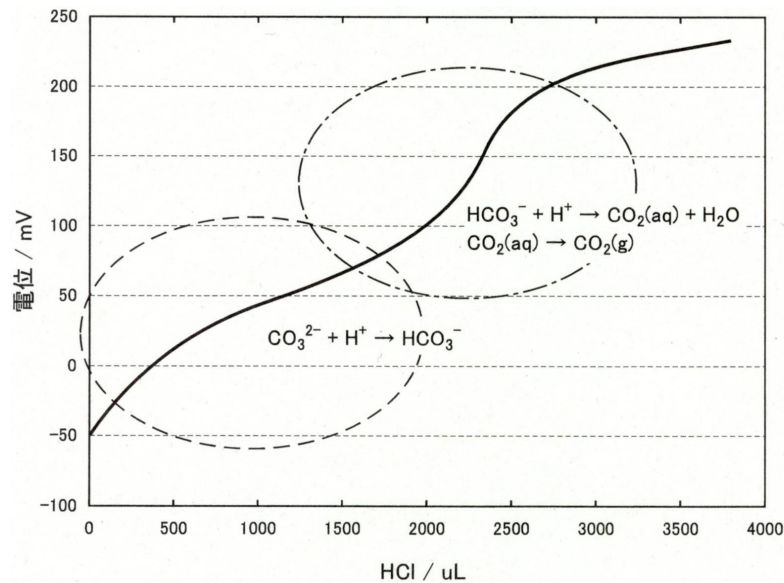


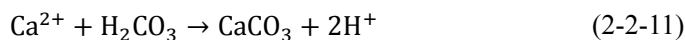
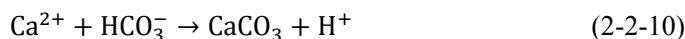
図 2.2-7 海水(一般濃度:2200  $\mu\text{mol/kg}$  程度)の塩酸による滴定曲線<sup>2)</sup> ※電位 0mV:pH7,電位 236mV:pH3

$$A_T = [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}] + [\text{B}(\text{OH})_4^-] + [\text{OH}^-] - [\text{H}^+] \quad (\text{mol/kg}) \quad (2-2-7)$$

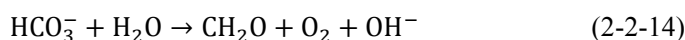
$$C_T = [\text{CO}_2(\text{aq})] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}] \quad (\text{mol/kg}) \quad (2-2-8)$$

全アルカリ度と全炭酸の値を用いて、サンゴの炭素代謝生産量を算出することができる。石灰化と溶解の収支を無機炭素代謝生産量(Inorganic carbon Production rates: IP)といい、光合成と呼吸の収支を有機炭素代謝生産量(Organic carbon Production rates: OP)という。IP と OP はそれぞれ石灰化と光合成が発達すると正の値になる。石灰化は(2-2-9), (2-2-10), (2-2-11)式の化学式に従って起きるため、1mol の  $\text{CaCO}_3$  が生成される時には、全アルカリ度が 2mol 減少する。溶解はその逆の反応であるから、全アルカリ度( $A_T$ )の初期値を  $A_{T0}$  とし、1 時間経過後の値を  $A_{T1}$  とすると、IP は(2-2-12)式によって求めることができる。これは、光合成および呼吸時には全アルカリ度は変化しないためである。光合成の化学反応は(2-2-13), (2-2-14), (2-2-15)式で表わせられる。しかし、この反応の時全アルカリ度は光合成や呼吸では変化しない。例えば(2-2-14)式では、 $\text{HCO}_3^-$  が減少するがその当量の  $\text{OH}^-$  が生成されるため、全アルカリ度の値は一定である。一方、光合成は(2-2-13), (2-2-14), (2-2-15)式の化学式に従って起きるため、光合成で 1mol の  $\text{CH}_2\text{O}$  が生成される時に当量の全炭酸が減る。ただし、全炭酸 ( $C_T$ ) は石灰化の時にも  $\text{CaCO}_3$  と当量減る。よて、全炭酸( $C_T$ )の初期値を  $C_{T0}$  とし、1 時間経過後の値を  $C_{T1}$  とすると、IP を用いて、OP は(2-2-16)式によって求めることができる<sup>25)</sup>。

<sup>2)</sup>紀本工業化学全アルカリ度滴定装置 ATT-05 取扱説明書から出典



$$\text{IP} = \frac{A_{T0} - A_{T1}}{2} \quad (\text{mol/kg/h}) \quad (2-2-12)$$



$$\text{OP} = (\text{C}_{T0} - \text{C}_{T1}) - \text{IP} \quad (\text{mol/kg/h}) \quad (2-2-16)$$

全アルカリ度・全炭酸の変動や骨格成長・光合成の関連図を図 2.2-8 に示す。

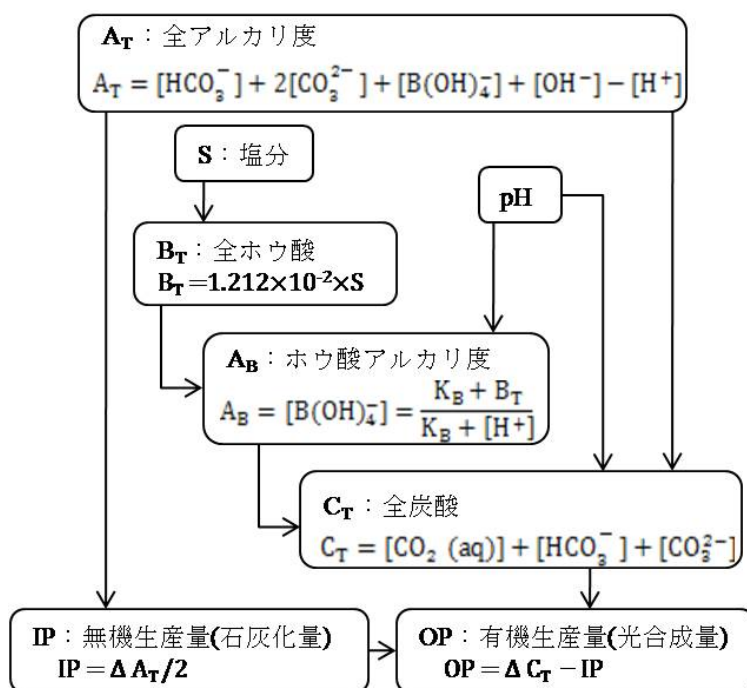


図 2.2-8 炭酸化学種の関連図

ここで求まる IP・OP は 1kg の海水における 1 時間当たりの mol 変化量である。そのままでは文献値などと比較できないことを考慮し、単位の換算を行った。単位の換算に関する詳細は付録 8.2 に示す。実験結果におけるグラフと表内の値は基本的には、1 時間毎のサンゴの単位面積当たりの mol 変化量として換算した単位に基づいて記すが、場合によっては単位の換算を行わない。たとえば、サンゴを入れていない水槽での実験やその水槽とサンゴを入れている水槽との比較においては、サンゴを入れていない水槽においては単位の換算が行えないため、元々の単位における測定値を用いる。さらに、誤差の検証など単位の換算が必要でないものも行わない。また、測定値を表にして付録などで示す場合は単位の換算を行わず、そのままの値を記載する。



## 2.3. 測定方法の検証

実験先立ち、測定方法の有効性を明らかにするために研究手法に関して検証を行った。

### 2.3.1. クロロフィル蛍光測定

環境光の影響を知るために、光条件を変化させて測定を行った。その結果、室内実験で与えられる光条件の範囲内および屋外のサンゴが生息している場所で与えられる程度の環境光の影響はほぼないものと考えられた。実験の詳細に関しては、付録 8.1 に記す。

### 2.3.2. 水中重量測定

重量測定の結果から、飼育水槽で飼育しているスギノキミドリイシサンゴが他の論文で扱われている野外のものとの程度生育速度がどうかを検証した。成長率からおおよその伸び率を計算した。状態の良いサンゴの成長率は  $0.35\% \cdot \text{day}^{-1}$  で、実験期間のサンゴの成長率の平均は、 $0.2\sim 0.3\% \cdot \text{day}^{-1}$  である。これを年間に換算すると、状態の良い状態が続けば年間で  $358.0\% \cdot \text{year}^{-1}$  で、平均の成長率でも  $207.4\sim 298.4\% \cdot \text{year}^{-1}$  である。ミドリイシサンゴは比較的成長が速く、年間に  $10\sim 15\text{cm}$  程度成長すると言われている<sup>10)</sup>。実験に使用したサンゴは  $5\sim 10\text{cm}$  の長さがあるため、平均的に  $10\text{cm}\sim 30\text{cm}$  成長することになる。実際には、長くなるだけではなく太くもなるので、それほど伸びているわけではないが、1年前からおおよそ2倍近く伸長している。ここから、飼育しているサンゴの成長率は野生のサンゴに比べるとさほど変わらないか、少し遅い程度のものだと分かる。加えて、水中重量測定から算出した成長率は実際のサンゴの成長と比べて妥当であり、水中重量測定がサンゴの骨格成長を測る上で有効であることが分かった。

### 2.3.3. 全アルカリ度・全炭酸測定

#### 2.3.3.1. 骨格成長量の妥当性

水中重量測定の見直しと同様に、全アルカリ度測定によって算出された骨格成長量が妥当であるかを検証する。水槽3における昼間と夜間のIPはそれぞれ  $7.4 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 、と  $3.0 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  である。そこから、1日の骨格成長量は  $125 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  であると概算できる。この値を年間に換算すると  $45510 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{year}^{-1}$  となった。これは炭酸カルシウムに換算すると  $4551 \text{ gCaCO}_3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{year}^{-1}$  となる。水槽3のサンゴの総表面積は  $315 \text{ cm}^2$  であるから、水槽3における1年間の成長量は  $143 \text{ g CaCO}_3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{year}^{-1}$  である。2009年5月30日の水槽3におけるサンゴの骨格総重量が  $89 \text{ g}$  であるから、1年間の成長率は  $260\% \cdot \text{year}^{-1}$  程度となり、水中重量測定とも一致し、妥当だと考えられる。

#### 2.3.3.2. 測定誤差の検証

サンゴを入れていない実験水槽4において、暗条件や明条件でブランク実験を行い、その値のばらつきから測定誤差の検証を行った。ブランク実験の詳細に関しては、5.1 に記す。これらの実験から、通常  $1.1 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  ( $5 \mu \text{ mol} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ) 程度の測定誤差があることが分かった。全アルカリ度・全炭酸を比較する場合はあまり大きな影響を及ぼさないが、IPやOPは全アルカリ度や全炭酸の差によって算出されるため、IPとOPの値に大きく影



響を及ぼすことがある。また、稀に全アルカリ度や全炭酸が異常値を示すことがある。その原因としては、実験操作のミスや測定器の不調が考えられるが、前後の測定値を参考にすることで異常値を発見し、取り除くことが出来る。そのため、誤差を少なくするために補正作業を行った。その詳細に関しては付録 8.3 に記す。

### 2.3.3.3. 採水時から時間経過した状態での誤差の検証

18:00 にボトル 4 本に採水をし、ふたをしたまま暗所に置いた。そして、実験フローに記した時間に測定を行った。それぞれ 30 分程度の測定を行い、時間経過による測定結果の誤差を検討した。実験条件を表 2-2 に、実験フローを図 2.3-1 に示す。

表 2-2 誤差の検証実験の実験条件

実験	水槽	光量( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )	水温( $^{\circ}\text{C}$ )	塩分濃度(PSU)
採水から時間経過後の測定	飼育水槽	200~210	25.5	33.7



図 2.3-1 時間経過後の測定検証実験の実験フロー

全アルカリ度および全炭酸の値は、表 2-3 に示す。それを時間ごとにプロットしたグラフを図 2.3-2 に示す。実験の詳細値は付録の表 8-6 に示す。最大で 4 時間経過後に測定を行ったが、値はほとんど変わらなかった。ばらつきはあるが、測定誤差によるものと判断でき、分散の値からも、その誤差がかなり小さいものと判断できる。そのため、時間経過後、少なくとも 4 時間程度であれば測定結果にあまり違いが表れないということが示唆された。

表 2-3 時間経過後の測定値と分散

測定	全アルカリ度 ( $\mu\text{mol}/\text{kg}$ )	全炭酸 ( $\mu\text{mol}/\text{kg}$ )
18:05	2508.01	2227.55
18:55	2505.57	2229.13
20:35	2508.07	2231.7
22:00	2509.22	2228.56
分散	1.769769	2.345525

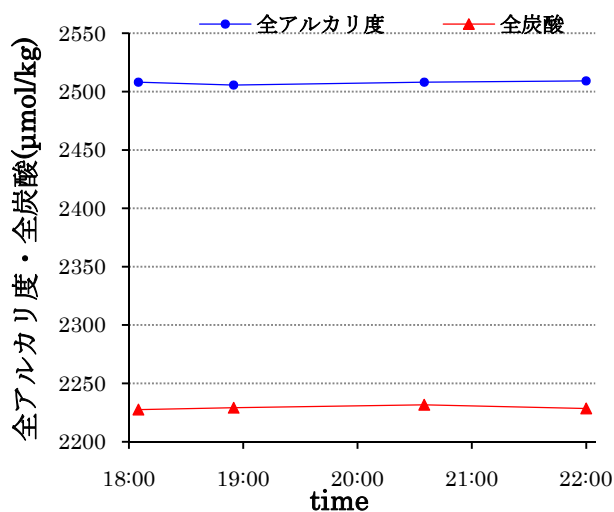


図 2.3-2 時間経過後の測定値の推移

### 2.3.3.4. 水の交換に関する検証

全アルカリ度・全炭酸測定のためには水の交換を止める必要があるが、長時間閉鎖すると水槽中の栄養塩濃度が増加し、サンゴに悪影響を及ぼす恐れがある。また、測定が進むにつれ全アルカリ度と全炭酸の値が下がり、炭酸イオンなどが減る。それにより平衡が崩れ、測定値に影響が及ぶ危険がある。それらを防ぐためにも水の交換が必要であると考えられる。そのため、実験の途中で、弁を開け5分間で通常時の水の交換(8.31ml/sの流量)をすると同時に、約1Lの水を5、6回流し込むという水の交換を行い、それによる影響を検討した。実験条件を表2-4に実験フローを図2.3-3に示す。

表 2-4 水交換に関する検証実験の実験条件

実験	実験日	水槽	光量 ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )	水温 ( $^{\circ}\text{C}$ )	塩分濃度 (PSU)
水の交換検証実験	2009/8/5	3	200~210	24.8~25.4	33.8~34.1

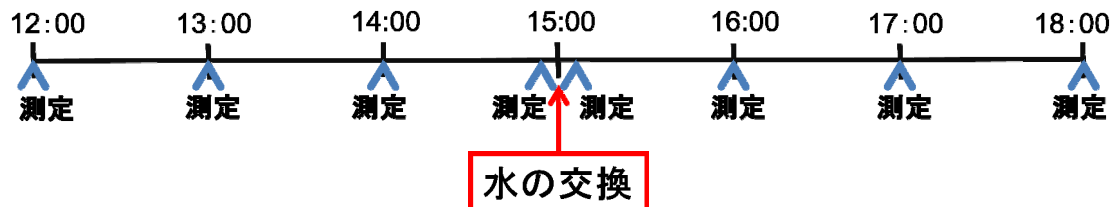


図 2.3-3 水交換に関する検証実験の実験フロー

全アルカリ度と全炭酸の値を図2.3-4に示す。

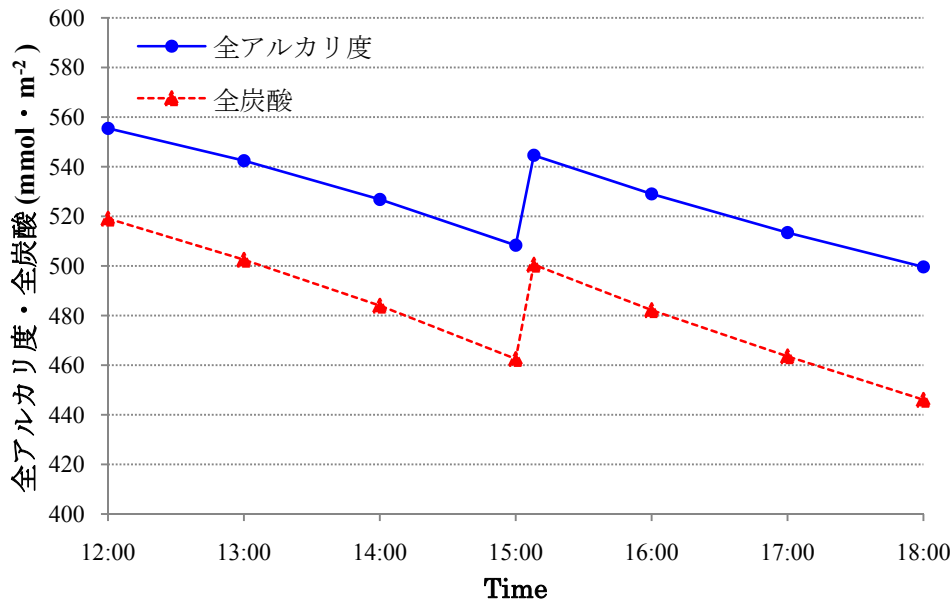


図 2.3-4 水交換に関する検証実験の実験

このグラフから交換の前後ともにほぼ一直線に減少していていることが分かる。そこで、交換前と交換後の全アルカリ度および全炭酸の傾きを表 2-5 にまとめた。

表 2-5 水の交換前後の全アルカリ度と全炭酸の傾き

	全アルカリ度の傾き ( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )	全炭酸の傾き ( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )
交換前	-15.70	-18.85
交換後	-15.66	-18.94

2.3.3.1 からサンゴを入れている水槽の測定では  $1.1 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  程度の誤差があることが分かっている。また、日周変動の影響により、夕方になると IP と OP の値が下がる傾向にある。IP や OP の値が低くなるということは、全アルカリ度や全炭酸の減少率、つまり傾きが緩やかになるということである。これらのことを考慮すると、今回の値は水の交換によってサンゴに悪影響を及ぼすものではないことを示していると考えられる。

また、この水の交換方法では交換後の全アルカリ度・全炭酸の値が 2 時間前の値とほぼ同程度になる。水の交換を行っても水を全て入れ替えられるわけではなく、飼育水槽でも全アルカリ度や全炭酸の値は日周変動などの影響で常に変化しているので、元の値に戻ることは難しい。だが、5 分程度の海水の交換によって 2 時間分の値が回復したということは、この水の交換方法による全アルカリ度・全炭酸の濃度の回復は十分見込め、栄養塩も同様に十分拡散されたと考えられる。

これらのことから、この水の交換方法は妥当であると考えられる。よって、実験によってはこの水の交換方法を適用した。他にも 1 時間もしくは 30 分間、通常の水の交換を行った実験もあるが、水流は通常の飼育状況と変わらず、サンゴへのダメージはないと考えられ、全アルカリ度と全炭酸の値も十分回復するので、問題ないと思われる。

### 3. サンゴの生理活動による骨格成長と光合成への影響

既往の研究から、サンゴの日周や季節による生体リズムが存在することが確認されている。しかし、一定の光環境では概日リズムは見られないとする報告もあり<sup>18)</sup>、議論がなされている。また、白化の機構やサンゴに対する栄養塩の影響も多く報告されている<sup>26) 27)</sup>。しかし、サンゴの健康状態、生体リズムのメカニズムや閉鎖空間がサンゴの代謝にどのような影響を及ぼすかを明らかにした研究は少ない。この章では、サンゴの生理活動の中でも健康状態と概日リズム、閉鎖系における代謝に注目し、実験を行った。まず、健康状態に関しては、飼育水槽における長期的な健康状態の変動が骨格成長量と光合成量にどのような影響を与えるかを観察した。次に概日リズムに関しては、骨格成長と光合成の日周変動を明らかにした。また、老廃物の代謝に関しては、水槽を閉鎖状態にしたものと水の交換を行ったもので比較し、骨格成長および光合成がどのような挙動の違いを見せるかを調べた。これらの実験は、環境因子の制御が比較的簡便に出来る飼育実験で行うことにより、野外での実験よりも生理活動の影響を明確にすることが出来ると考えられる。それによって、サンゴの骨格成長と光合成の変動を支配する大きな要因の一つである生理活動を解明することを目的とした。

## 3.1. サンゴの健康状態による骨格成長と光合成への影響

サンゴは個体差やその時々々の健康状態による骨格成長量や光合成量の変動が大きい。そのため、健康状態が変わるとどれくらい骨格成長や光合成が変化するかを明らかにすることは、環境変化によってダメージを受けやすいサンゴを測定する上で必要であると考えられる。このことはサンゴの健康状態が不安定になる飼育実験では特に重要である。さらに、健康状態によって、骨格成長量と光合成量がどのような関係にあるかを明らかにすることは、野外でのサンゴの健康状態を知るために重要である。それにより、サンゴのダメージを白化より前に知ることが出来、対策を打つことが出来る可能性があるためである。そこで、サンゴの骨格成長と光合成の変化が群体ごとに分かる水中重量測定とクロロフィル蛍光測定によって、それらを明らかにしようとした。この実験では、第5章の電気による骨格成長と光合成への影響の先行研究として行った実験でもあるため、電気の影響を知るために電気を流している。ただし、この実験では電気の影響よりもサンゴの健康状態が値に大きく影響しているため、ここでは議論しない。

### 3.1.1. 実験方法

#### 3.1.1.1. クロロフィル蛍光の長期変化測定

2008年11月19日から2009年5月26日まで、一週間に一回程度の頻度でクロロフィル蛍光測定実験を行った。測定の時間帯としては14時前後からのスタートとし、1~2時間程度を要する。サンゴを実験水槽から1もしくは2群体ずつ取り出し、海水を張った小さな容器に移し替えて、Fluor Cam を用いてクロロフィル蛍光を測定した。測定のプロトコルを表 3-1 で示す。実際の実験結果のグラフとそれぞれの測定値を対応させると図 3.1-1 のようになる。

表 3-1 クロロフィル蛍光測定のプロトコル

```
;protocol body - generated by wizard
;version PK June 24, 2005
include default.inc ;Includes standard options, do not remove it !
ElectronicShutter=0
Sensitivity=60
Irradiance=40
SuperIrradiance=50
f0duration=5.04
;
```

```

;this is Fo definition
;
<0,1s..5.04s>=>mfmsub
<0s>=>checkPoint,"startFo"
<5.04s>=>checkPoint,"endFo"
;
;this saturation pulse Fm measurement
;
<5.04s+80ms>=>SatPulse(800ms+40ms+20ms)
<5.04s+80ms>=>actinlightOn(800ms+40ms+20ms)
<5.04s+80ms+800ms/2,5.04s+80ms+800ms/2+80ms..5.04s+80ms+800ms>=>mfmsub
<5.04s+80ms+800ms/2>=>checkPoint,"startFm"
<5.04s+80ms+800ms+20ms>=>checkPoint,"endFm"
;
;dark pause
;
<5.04s+80ms+800ms+40ms*13,5.04s+80ms+800ms+120ms*13..5.04s+800ms+10s>=>mfmsub
;
;actinic light definition
;
<5.04s+800ms+10s+80ms>=>actinlightOn(61s)
;
;measuring in Kautsky induction and after Dark relaxation
;
<5.04s+800ms+10s+80ms,5.04s+800ms+10s+80ms+80ms*6..5.04s+800ms+10s+61s+10s>=>mfmsub
;
;saturation pulses in Kautsky induction and Dark relaxation
;
<24.96s-80ms*6>=>checkPoint,"startFt_L1"
<24.96s>=>SatPulse(800ms-20ms)
<24.96s+800ms/2>=>checkPoint,"startFm_L1"
<24.96s+800ms-80ms>=>checkPoint,"endFm_L1"
<24.96s+800ms/2,24.96s+800ms/2+80ms..24.96s+800ms-80ms>=>mfmsub
<24.96s+30s-80ms*6>=>checkPoint,"startFt_L2"
<24.96s+30s>=>SatPulse(800ms-20ms)

```

```

<24.96s+30s+800ms/2>=>checkPoint,"startFm_L2"
<24.96s+30s+800ms-80ms>=>checkPoint,"endFm_L2"
<24.96s+30s+800ms/2,24.96s+30s+800ms/2+80ms..24.96s+30s+800ms-80ms>=>mfmsub
<24.96s+2*30s-80ms*6>=>checkPoint,"startFt_L3"
<24.96s+2*30s>=>SatPulse(800ms-20ms)
<24.96s+2*30s+800ms/2>=>checkPoint,"startFm_L3"
<24.96s+2*30s+800ms-80ms>=>checkPoint,"endFm_L3"
<24.96s+2*30s+800ms/2,24.96s+2*30s+800ms/2+80ms..24.96s+2*30s+800ms-80ms>=>mfmsub
<5.04s+500ms>=>checkPoint,"timeVisual"

```

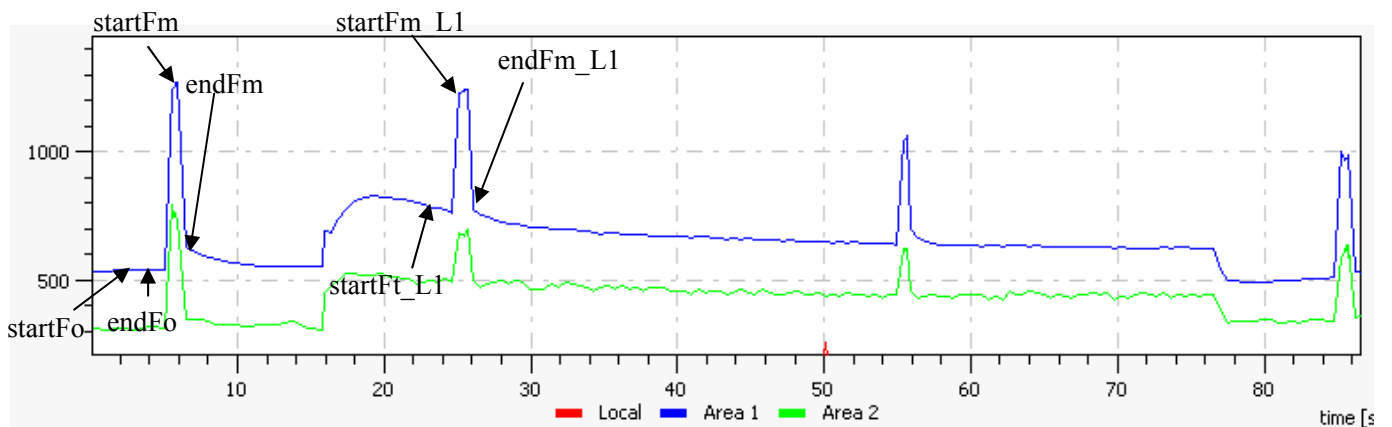


図 3.1-1 プロトコルとクロロフィル蛍光結果

(2-2-1), (2-2-2), (2-2-3), (2-2-4)式の計算に用いられる値は図 3.1-1 に示す値から、以下のよう求められる。

Fo : startFo と endFo の平均  
 Fm : startFm と endFm の平均  
 F : startFt\_L1  
 Fm' : startFm\_L1 と endFm\_L1 の平均

### 3.1.1.2. 水中重量の長期変化測定

2008年11月20日から2009年5月30日まで、一週間に一度程度の頻度で水中重量の測定を行った。測定の時間帯は、18時前後からのスタートとし、1~2時間を要した。実験水槽から、サンゴを1群体ずつ取り出し、海水で満たした1Lビーカーにサンゴを入れ、サンゴに巻きつけてある釣り糸、もしくはアクリル板に取り付けてある釣り糸を電子天秤に吊るし、サンゴの水中重量を測定した。この時、藻や貝などの他の生物を出来るだけ取り除いた。アクリル板は軽いため、誤差を少なくするために縦置きサンゴに関してはアクリル板の重量を引き、空中重量の算出を行った。重量を測定し、それぞれの測定日間を測定期間として設定した。設定した期間を表 3-2 で示す。そして、それぞれの期間での成長率を算

出した。

表 3-2 水中重量測定 of 各期間

期間 1	期間 2	期間 3	期間 4	期間 5	期間 6	期間 7
11/20～11/24	11/24～12/8	12/8～12/14	12/17～12/21	12/21～1/4	1/4～1/8	1/8～1/14
期間 8	期間 9	期間 10	期間 11	期間 12	期間 13	期間 14
1/14～1/18	1/18～1/21	1/21～1/29	1/29～2/5	2/5～2/12	2/12～2/19	2/19～2/26
期間 15	期間 16	期間 17	期間 18	期間 19	期間 20	期間 21
2/26～3/5	3/5～3/13	3/13～4/22	4/22～5/4	5/4～5/12	5/12～5/22	5/22～5/30

### 3.1.2. 実験結果

実験結果のうち、骨格成長率と水中重量および $\phi$  II の値をまとめたものを付録の表 8-3、表 8-4、表 8-5 に示す。また、骨格成長率の値が所々抜けているが、測定上のミスではなく、変化率を計算できなかったためである。なぜなら、横置きから縦置きにしたり、アクリル板から取れてしまったりした時には水中ボンドを付けるため、骨格成長による変化量だけを知ることが出来ない。水中ボンドは取り付けている際に削れたり取れたりするので水中ボンドのみの正味の重量を測ることは出来ないからである。さらに、サンゴ 27y に関しては、白化したため、3月5日以降の値はない。サンゴ 7t に関しても、2月26日から3月13日は損傷を受けていたため、その期間の計測結果は欠損している。

まず、水中重量測定によって得られた骨格成長率を図 3.1-2 に示す。グラフの値は水槽毎、条件毎のサンゴの骨格成長率をそれぞれ平均したものである。期間9は値が大きく、誤差が大きいと思われるため、省いてグラフを作成した。水槽3のサンゴは青で示し、水槽2のサンゴは赤で示している。縦置きは四角のマーカで、横置きは×のマーカで表現し、電気を流しているものは点線で、流していないものは実線で表した。



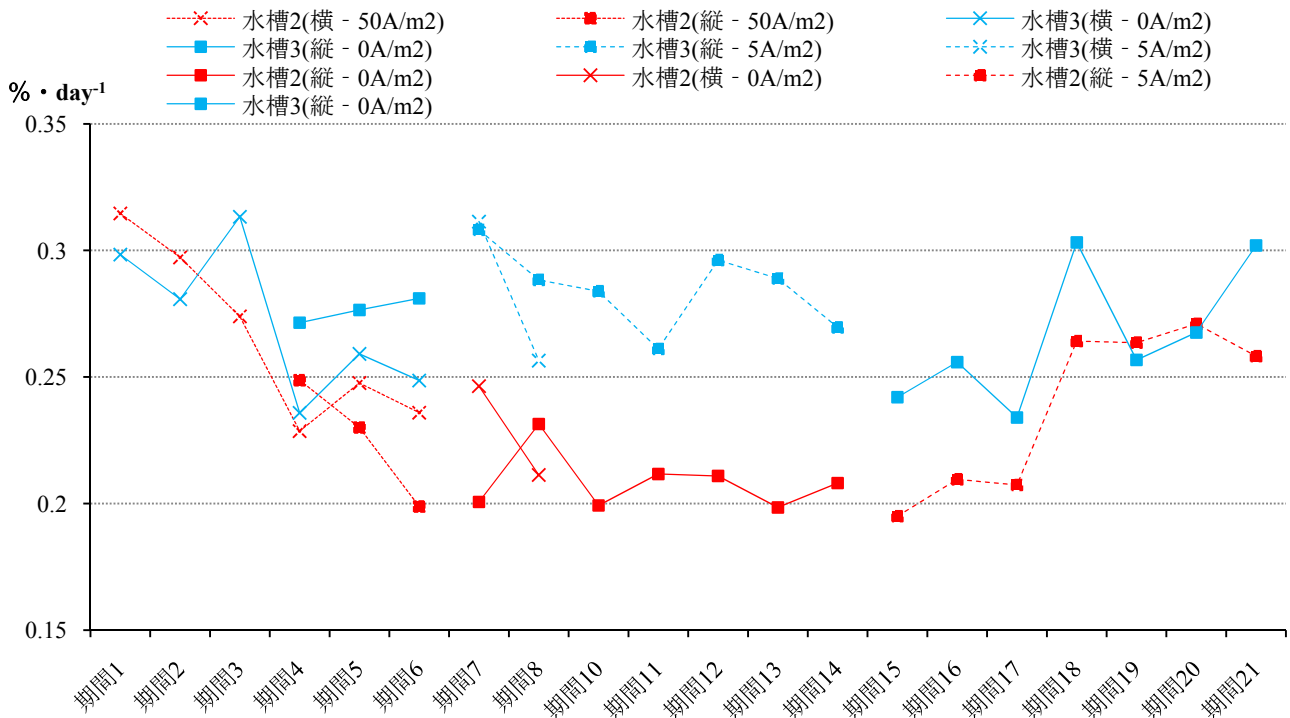


図 3.1-2 骨格成長率の時間変化

これらの平均値は、測定ミスなどによる異常値を除外してある。

グラフから、期間3から期間4では、その間にサンゴを二つに切断したため大きくダメージを受けて値が下がっていることが分かる。ただ、それ以降回復はあまりしないものの、期間7まではほぼ様に値を保っていた。しかし、期間8から期間11までの1月頃と期間14から期間17までの3月頃に値が落ち込んでいる。これは、メンテナンスが行き届いていなかったためだと考えられる。

また、全般的に水槽3が全期間を通して比較的良好な値を示していることが分かる。これは、水槽3にいるサンゴの方が全般的に良好な状態を維持できるサンゴであった、つまり個体差による違いだと考えるのが妥当である。

次に、クロロフィル蛍光測定によって得られた光合成活性の指標となる $\phi II$ の値を水槽毎・条件毎のサンゴについて平均し、グラフにしたものを以下に示す。2008年12月6日から2009年2月26日までの $\phi II$ を図3.1-3に、2009年2月26日から2009年5月26日までの $\phi II$ を図3.1-4に示す。

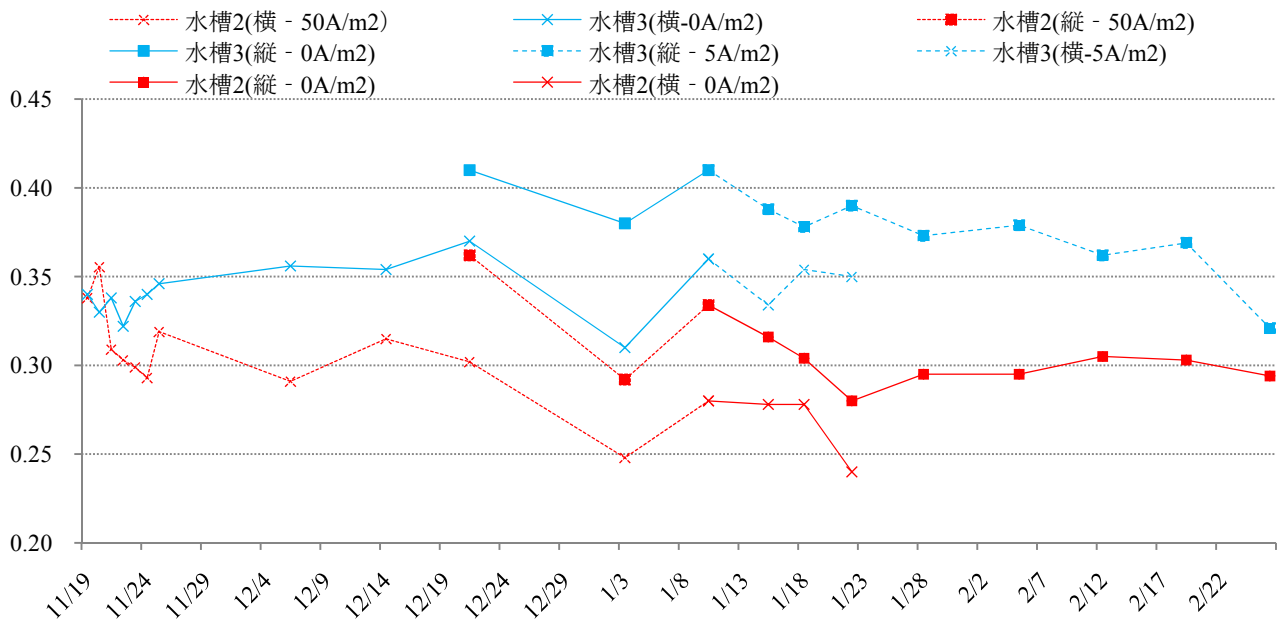


図 3.1-3 2009年2月26日までの  $\phi$  II

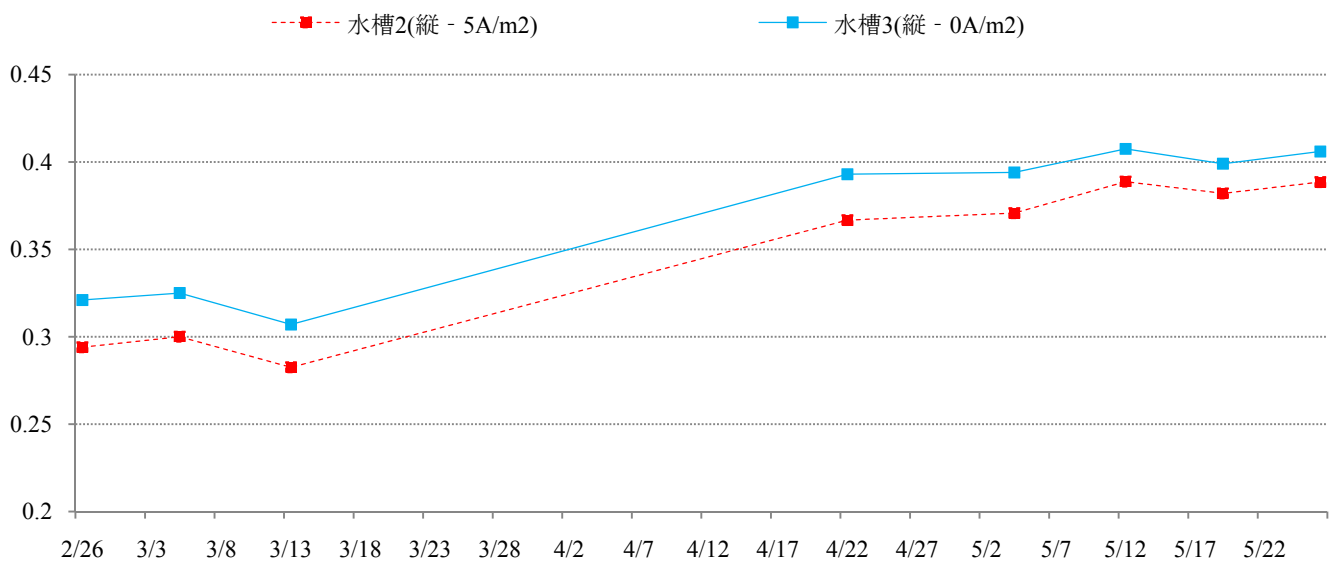


図 3.1-4 2009年2月26日から2009年5月26日までの  $\phi$  II

$\phi$  II に関しても、測定ミスなどによる異常値を除外してある。1月と3月頃に値が落ち込んでいるのは、水中重量測定の結果と同様、メンテナンスが行き届いていなかったためだと考えられる。

また、 $\phi_{II}$  の値とその期間の成長率の値をプロットし、相関を表したものを図 3.1-5、図 3.1-6、図 3.1-7 に示す。図 3.1-5 は水槽 2 だけに  $50\text{mA}/\text{m}^2$  の電気を流していた期間のグラフ、図 3.1-6 は水槽 3 だけに  $50\text{mA}/\text{m}^2$  の電気を流していた期間のグラフ、図 3.1-7 は再び水槽 2 だけに  $50\text{mA}/\text{m}^2$  の電気を流していた期間のグラフである。グラフに記している日にはクロロフィル蛍光測定の日である。

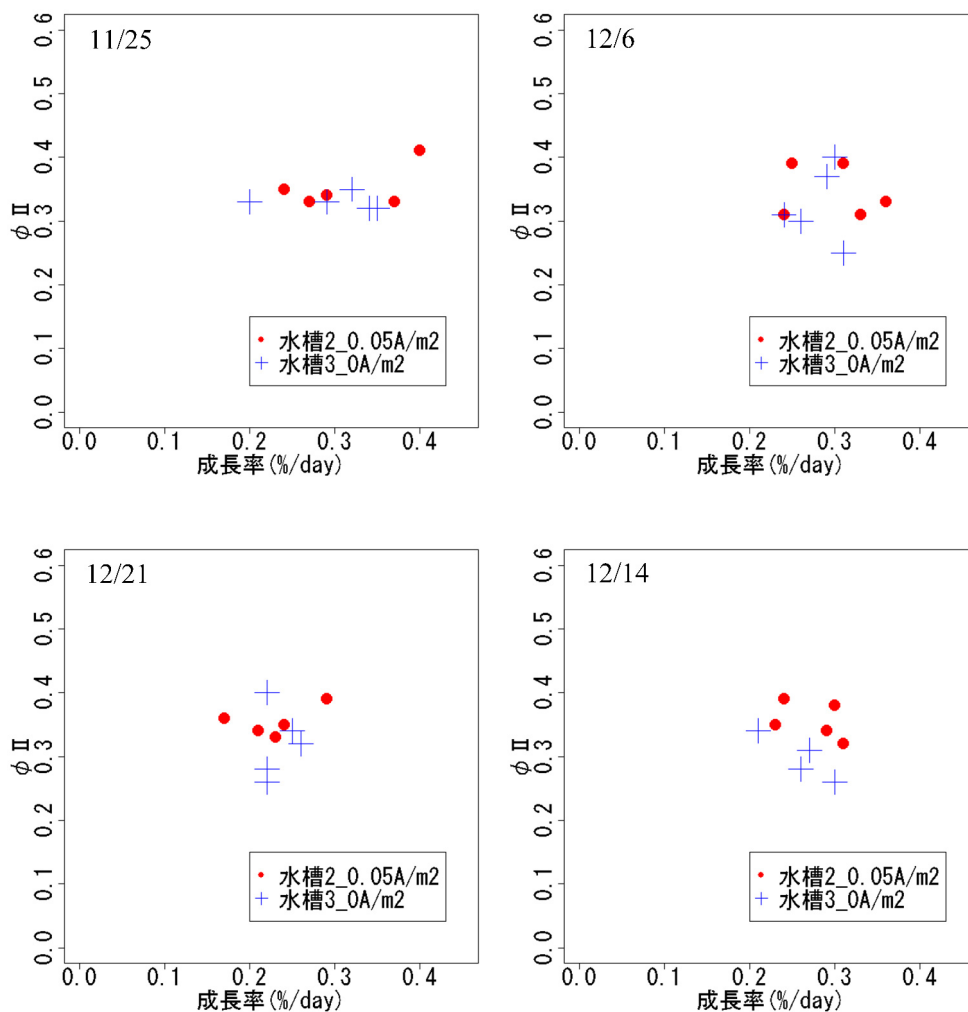


図 3.1-5.a 11/25~1/8 の  $\phi_{II}$  と成長率の相関図①

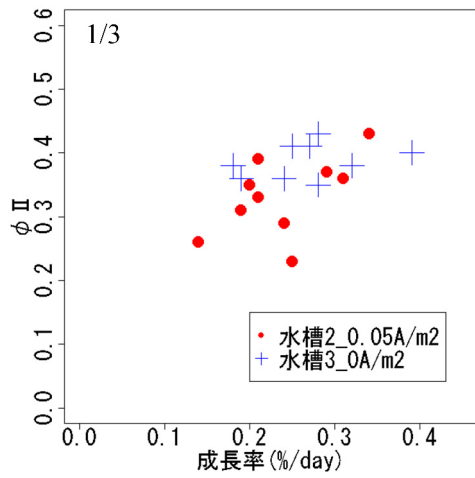


図 3.1-5.b 11/25~1/8 の  $\phi II$  と成長率の相関図②

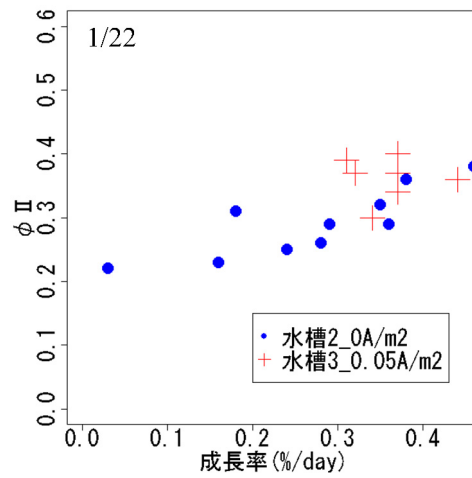
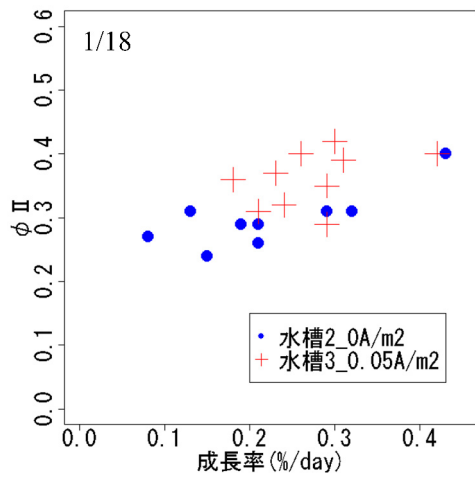
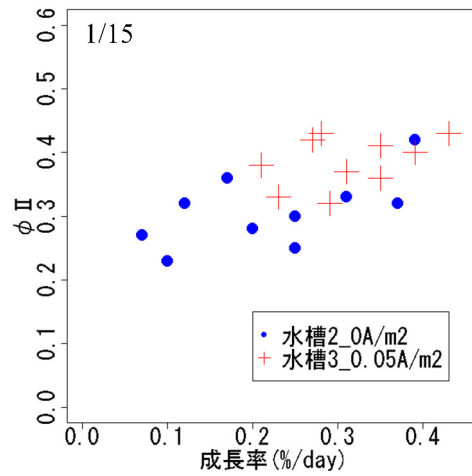
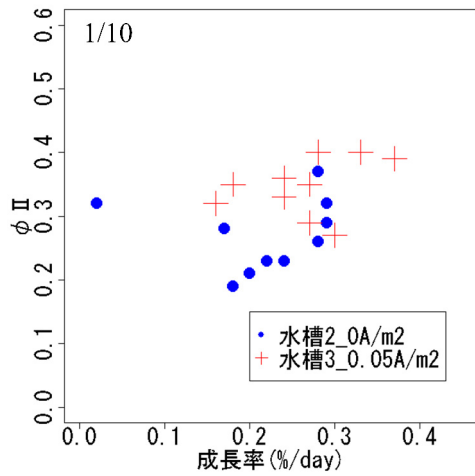


図 3.1-6.a 1/8~2/25 の  $\phi II$  と成長率の相関図①

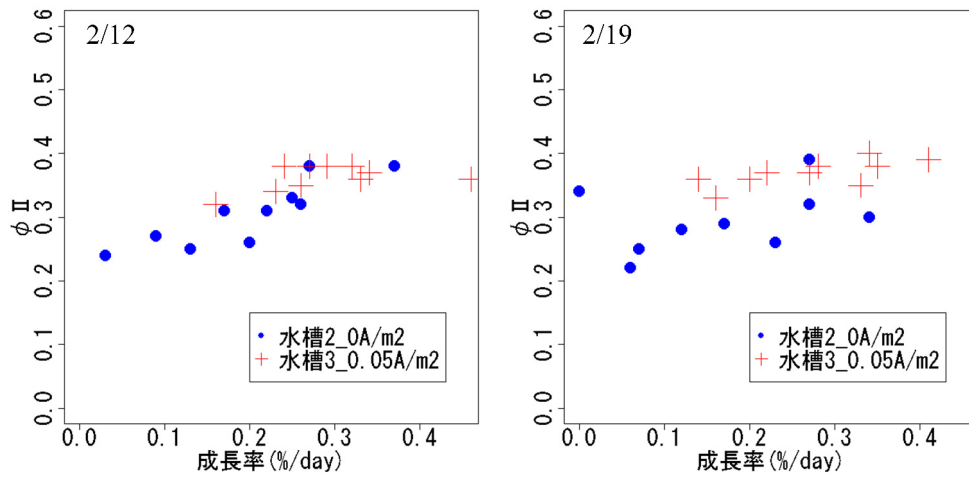
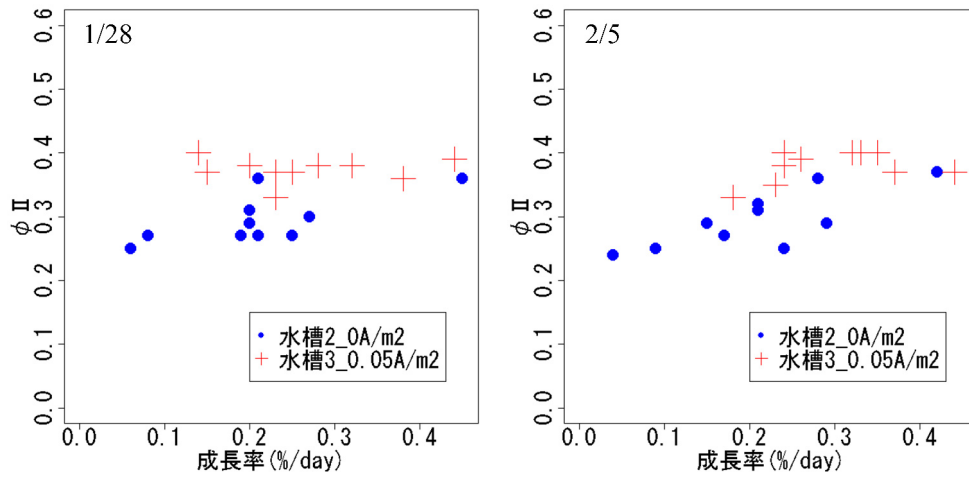


図 3.1-6.b 1/8~2/25 の  $\phi II$  と成長率の相関②

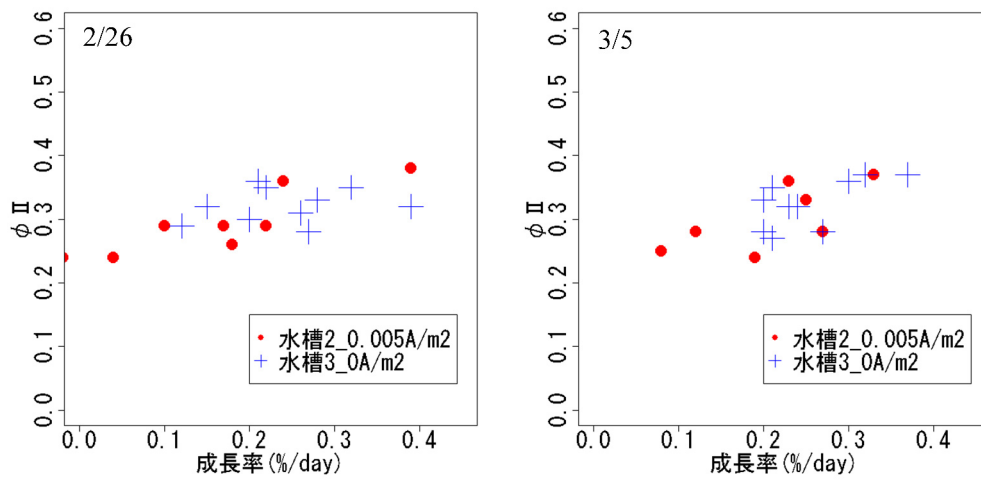


図 3.1-7.a 2/25~5/26 の  $\phi II$  と成長率の相関

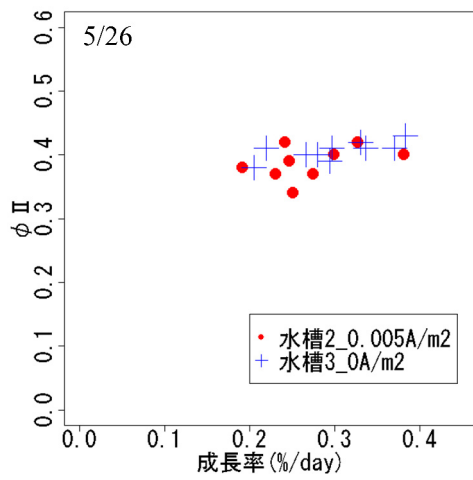
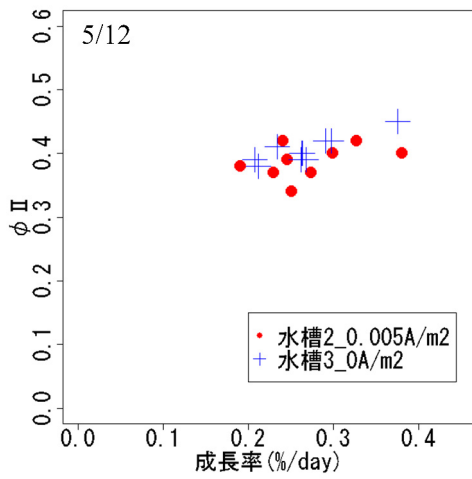
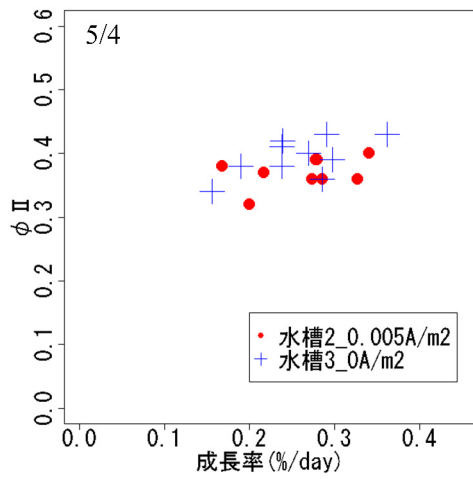
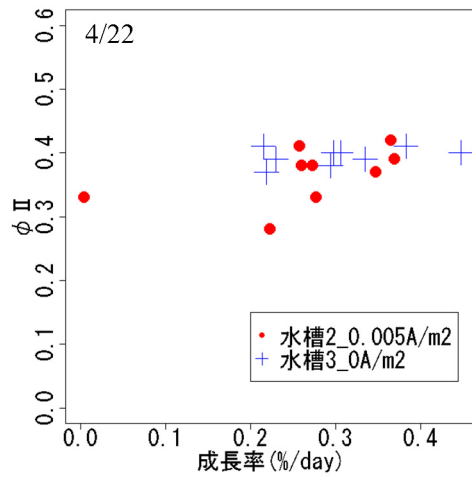
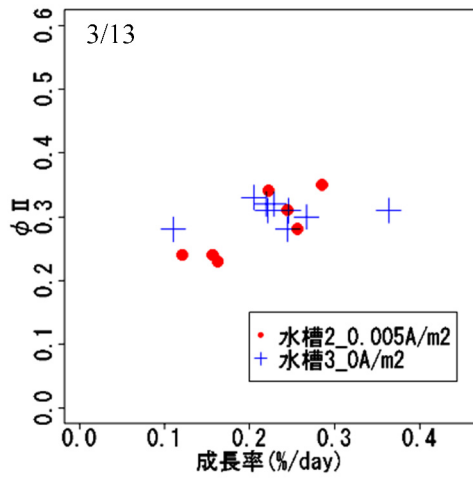


図 3.1-7.b 2/25~5/26 の  $\phi_{II}$  と成長率の相関

この相関図から、 $\phi$  II と成長率は正の相関があると言える。それは、サンゴの状態が良好であつても悪化していても当てはまる。

27t のサンゴは 2/19 頃、白化が始まった。しかし、その前の 2/12 から成長率が減少していた。そして、白化が進むとさらに成長率は減少し、全てが白化してしまう前に成長率はマイナスの値を示した。つまり成長率が十分に低くなると白化が始まり、白化が始まると成長率は著しく低下する。その状態が続くと  $\phi$  II も徐々に低下するが、値が 0 になることはない。

また、サンゴが良好な時の  $\phi$  II の値は 0.4 程度、成長率の値は 0.35%/day 程度である。悪化すると、 $\phi$  II は 0.3 以下、成長率は 0.15%/day 程度になる。ただし、成長率は個体差が激しく、値の変動から良し悪しを判断する必要がある。 $\phi$  II は白化するまで 0.2 を切ることはほぼないと言えるが、成長率は 0%/day になることもある。

最後に、それぞれのサンゴについて、 $\phi$  II と成長率の時間変移をプロットしたものを図 3.1-8, 図 3.1-9 に示す。図 3.1-8 は水槽 2, 図 3.1-9 は水槽 3 のサンゴである。青の線が  $\phi$  II, 緑の線が成長率になっており、違うサンゴのグラフを比較するために  $\phi$  II および成長率がある程度良好だと考えられる 0.3 の値を standard としてプロットしている。グラフに値がプロットされていない時期については測定ができなかった時のものである。グラフ作成の都合上、測定値がない時期の前後において、線がグラフ上部へ向かっているが、それは値が大きくなったというわけではなく、プロットできないということを表している。

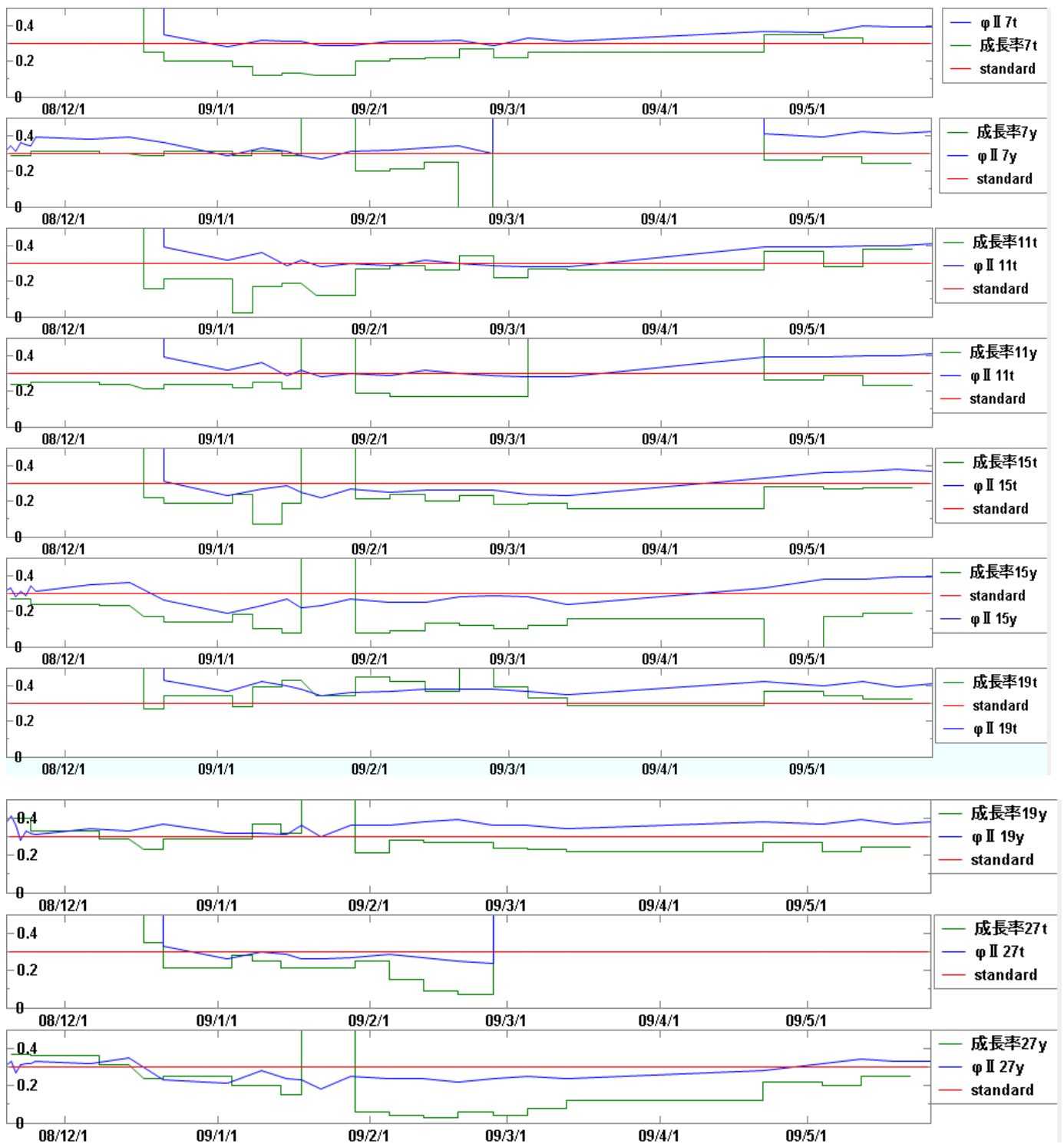


図 3.1-8 水槽 2 におけるサンゴ群体の  $\phi$  II および成長率の時間経過



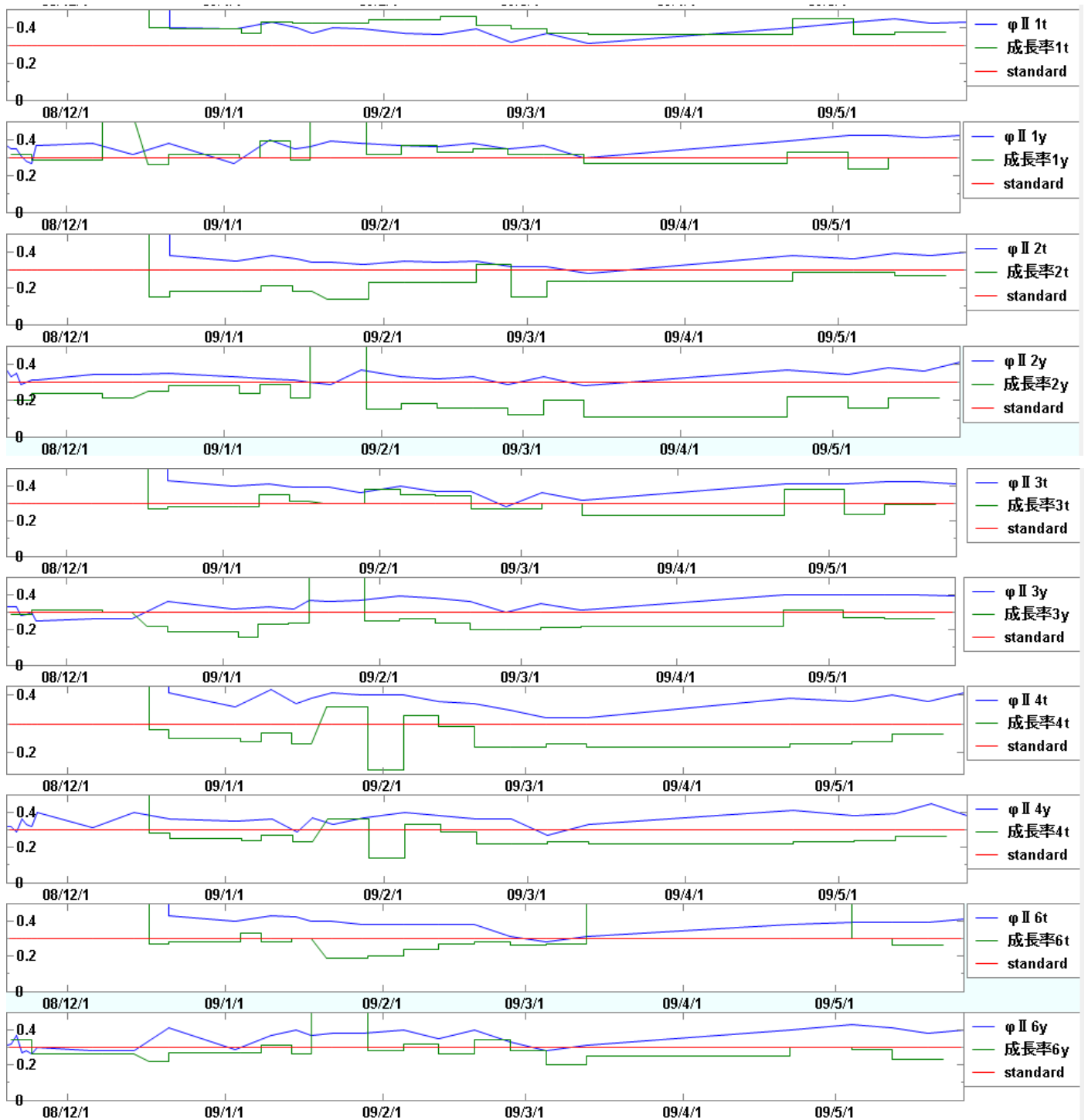


図 3.1-9 水槽 3 におけるサンゴ群体の  $\phi$  II および成長率の時間経過

$\phi$  II の値が上昇する時期に成長率も上昇し、 $\phi$  II が低下する時期に成長率も低下していることが多い。ここからも、サンゴの個体差はあるものの、 $\phi$  II と成長率の変動に相関があることが確かめられた。つまり、光合成能と骨格成長率は同時に変動すると言える。

### 3.1.3. 考察

まず、何をもち健康状態が良好というのかを議論する。白化はサンゴの状態悪化を最も簡便に知ることのできる指標である。しかし、白化になった場合、回復することもあるが多くの場合手遅れである。本実験において、白化が起こる前に成長率の低下が表れており、その後白化が始まったことから、その状態がすでに良好でないということが出来る。その様子を図 3.1-10 に示す。これは、サンゴ 27t が白化するまでの成長率と  $\phi II$  の遷移である。

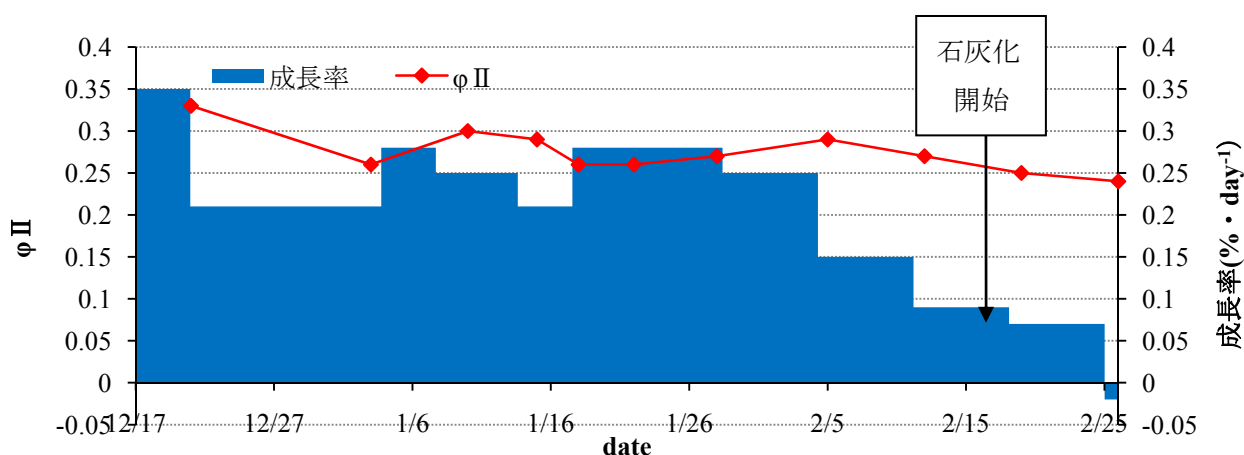


図 3.1-10 サンゴ 27t の成長率と  $\phi II$

逆に、良好な健康状態では  $\phi II$  も成長率も高い値を示す。このような挙動から、健康状態を以下のように定義できると考える。

良好：骨格成長と光合成がともに高い値を示す場合

弱体化、悪化の可能性がある：骨格成長、光合成のどちらかが低下している場合

悪化、危機的状況：骨格成長、光合成のどちらの値も低い場合

さらに、健康状態による骨格成長と光合成の変動、および関係性について言及する。本実験から、1 週間スケールではほぼ同時期に変動しており、相関もある程度見られる。そのため、良好であるかを長期間モニタリングする場合にはどちらかを測定するだけでも、もう片方の傾向を知ることではできると考えられる。しかし、上述のように、悪化する可能性のあるサンゴを見つけるためには両方をモニタリングするのが理想的である。加えて、白化したサンゴは、 $\phi II$  が下がる前に成長率の方が下がっていることから、悪化する可能性のあるサンゴの兆候は骨格成長に先に現れると考えられる。

これを踏まえて、健康状態の測り方をどうするべきかを考える。白化以前に健康状態を知ることが出来れば、対策を打つことが可能になってくるため、弱まっている状態を把握できることが重要である。そうした場合、以下のことに注意する必要があると考えられる。

まず、測定の際にサンゴにストレスを与えてしまうと、逆効果になるため、(1)ストレスを与えないような測定である必要がある。次に、(2)個体差が少ない指標を用いるか、もし

くは(3)同じサンゴに対してモニタリングを行う必要がある。さらに、見落とす可能性があるため、(4)健康状態によって値の変動が大きい、もしくは安定であることが必要である。

こうした点を考慮しつつ、本章で用いた測定方法の検討を行いたいと思う。

水中重量測定は骨格成長を知るという点では先に悪化の兆候が見られることから状態を知りやすい。サンゴはストレスを感じると石灰化のエネルギーをストレス耐性に回すといわれており<sup>15)</sup>、石灰化量が下がることはストレスやダメージを受けていると捉えることができる。さらに、値の変動が比較的大きく、変化を直ちに察知することができる。だが、サンゴを移動させることにより、温度変化や接触などの危険に曝すことになってしまうため、ストレスを与える可能性が大きいと考えられる。また、個体差が大きいという欠点もある。加えて室内実験では測定可能であるが、野外でのモニタリングは不可能である。

クロロフィル蛍光測定は骨格成長率とある程度比例関係にあるため、指標として用いることができる可能性はある。ある程度近距離で、しかも静止した状態での測定が必要であるが、装置や測定方法を工夫することにより、サンゴにストレスを与えず測定することも可能であり、野外での測定もできる。しかし、サンゴの種による差は大きいため、事前に測る必要はある。ただし、値の変動が小さく、不安定であるため、変化を確認しにくい。さらに、良好である場合は分かるが、単に弱まっているのか危機的状況にあるのかを判断することは難しい。そのため、定期的な健康状態のモニタリングには測定方法を工夫したクロロフィル蛍光を用い、その値が下がってきた時は水中重量など骨格成長を測定する方法を用いてさらに詳しく分析することが好ましいと考えられる。

	水中重量測定	クロロフィル蛍光測定
長所	状態を反映しやすい 値の変動が大きい	個体差が少ない 野外でも測定可能
短所	ストレスを与える可能性 個体差が大きい 野外でのモニタリングは不可能	値が不安定(測定方法の工夫が必要) 弱体化と悪化の判断が難しい

さらに、本実験から考えられる健康状態を左右する要因に関して議論する。健康状態を左右するものとして、物理的ダメージと藻や栄養塩の増加など生物学的もしくは化学的ダメージとがある。ダメージを受けても回復することは可能だが、環境の改善が必要である。物理的ダメージは褐虫藻には直接影響がないが、それによるサンゴのダメージによって骨格成長の低下が長引くことによって褐虫藻の放出につながり、間接的に光合成へ影響すると思われる。これは縦置きにした時に、成長率はすぐ低下したのに対し、光合成の値の落ち込みが切断の1週間後に見られたことから考えられる。しかし、水質の悪化や藻類の繁茂は物理的ダメージとは異なり光を遮る要素ともなるため、褐虫藻の光合成に直接影響を与える。また、懸濁粒子を体表から除去するために粘液を出すことで、体内の窒素が奪わ

れ、サンゴもダメージを受けることがある<sup>27)</sup>。そういった水質の悪化が直接的、間接的に褐虫藻とサンゴにダメージを与えたと考えられる。そのために、光合成と成長率の低下が同時期に見られたのだと考えられる。回復に関しては、光合成も成長率もほぼ同時期に起こっているため、サンゴの状態がよくなれば、褐虫藻を再び取り込み、それによってエネルギーを得て成長を再び活性化させるものと考えられる。

最後にサンゴの代謝を知る方法としての、クロロフィル蛍光測定と水中重量測定の妥当性はどうかを議論する。長期間の代謝を知る上では、どちらも妥当であると考えられる。ただし、今のところ、どちらもサンゴを実験水槽から取り出して測定を行わなくてはならないため、サンゴへのストレスが懸念される。また、短期間での変動は非常に少なく、誤差の方が大きく出てしまうので、短時間での代謝を知ることは難しい。よって、1時間スケールでの代謝変動には別の測定方法が必要である。

## 3.2. 骨格成長と光合成の日周変動

サンゴの日周変動に関しては、近年飼育水槽での実験でも進められている<sup>17) 21) 28)</sup>。そこから、サンゴの石灰化量と光合成量や全アルカリ度や pH の日周変動などが明らかになっている。一方で Aurelie らは光量が一定であれば、日周変動は起こらないと言及しており<sup>18)</sup>、議論がなされている。しかし、夜間の実験の密度は低く、夜間にサンゴがどのような挙動を示すかを明らかにしておらず、また実験数の少なさから昼の変動がばらつきによるものか、日周変動かを判断することは出来ない。本研究では、サンゴの日周変動実験を行うことにより、一定の光量条件下における日周変動の傾向のみならず、サンゴの夜間の挙動を明らかにした。また、昼間も暗条件にし、サンゴの骨格成長の挙動を見た。それにより、昼間と夜間で IP の値が変わるのが、光の影響によるものなのかそれともサンゴの概日リズムによるものなのかを明らかにしようとした。これらの結果から、サンゴの保全や成長促進において重要な知見を得ることが出来ると考えられる。

### 3.2.1. 実験方法

実験水槽 3 において全アルカリ度・全炭酸の測定を行った。測定の際は、ポンプにより水流を発生させ、ファンによって水温が急激に変化しないようにした。

#### 3.2.1.1. 日周変動実験

水槽 3 において、日周変動を知るための実験を行った。採水は 1 時間毎に行い、水の交換を 1 時間毎に停止と交換を繰り返すことで、2 時間に 1 時間分の測定を繰り返した。これを 24 時間通して行った。実験のフローを図 3.2-1 に示す。これを、3 回電気を流さない状態で行った。実験条件を表 3-3 の日周変動実験①～③に記す。以降、実験フロー内では、水槽の状態として、水の交換を停止し閉鎖した状態を“閉鎖”，水の交換を行っている状態を“解放”と呼び、白とグレーの色分けによって表現する。また、採水をサンプリングとして水色の矢印で表記し、実験開始時からの時間経過を  $t$  として記す。

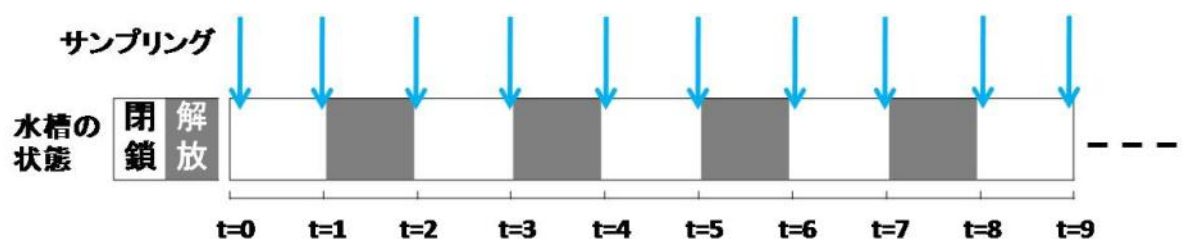


図 3.2-1 日周変動の実験フロー(2 時間に 1 度の水の交換)

表 3-3 日周変動実験の実験条件

実験	実験日	水槽	光量 ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )	水温 ( $^{\circ}\text{C}$ )	塩分濃度 (PSU)
日周変動実験①	2009/7/18	3	0(夜間) ~210(昼間)	24.4~25.7	33.7~34.5
日周変動実験②	2009/7/28	3	0(夜間) ~210(昼間)	24~27.9	33.3~34
日周変動実験③	2009/8/18	3	0(夜間) ~210(昼間)	24.2~26.6	33.7~34.2
日周変動実験④	2009/12/16	3	0(夜間) ~210(昼間)	25.0~26.1	33~33.7

また、補正を行って測定誤差を出来るだけなくすために、水槽の閉鎖を2時間行い、水の交換を1時間行うという操作を繰り返し行って測定した。採水は、上記の実験と同じで水槽3において1時間毎24時間通して行った。実験条件は表3-3の日周変動実験④に記す。実験フローを図3.2-2に示す。

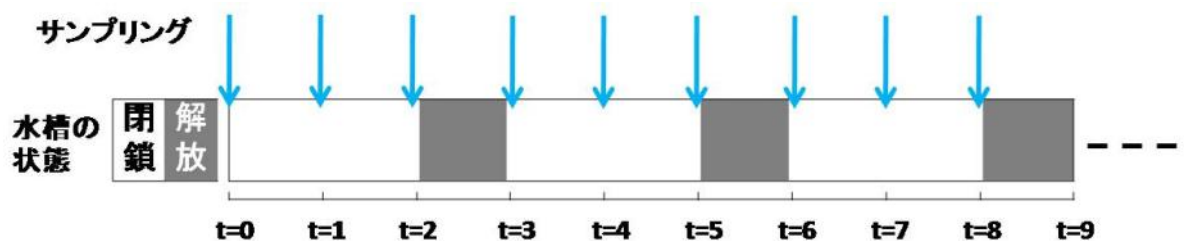


図 3.2-2 日周変動実験の実験フロー(3 時間に 1 度の水の交換)

### 3.2.1.2. 暗条件での実験

水槽3において、暗条件下の骨格成長の変動を知るための実験を行った。前日の夜間に実験水槽をアルミ箔で覆い、次の日の昼間暗条件になるようにした。光量は前日の20時から実験日の昼間から夜間にかけて、約  $0\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  である。測定は暗条件にした昼間の全アルカリ度・全炭酸の挙動およびその日の夜間の全アルカリ度・全炭酸の挙動をそれぞれ測定した。それぞれの実験条件を表 3-4 に、実験フローを図 3.2-3 に示す。

表 3-4 暗条件実験の実験条件

実験	実験日	水槽	光量 ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )	水温 ( $^{\circ}\text{C}$ )	塩分濃度 (PSU)
暗条件実験(昼間)	2009/10/27	3	200~210	25.4~26.3	33.8~34.1
暗条件実験(夜間)	2009/11/21	3	0	24.6~25.3	33.2~33.4

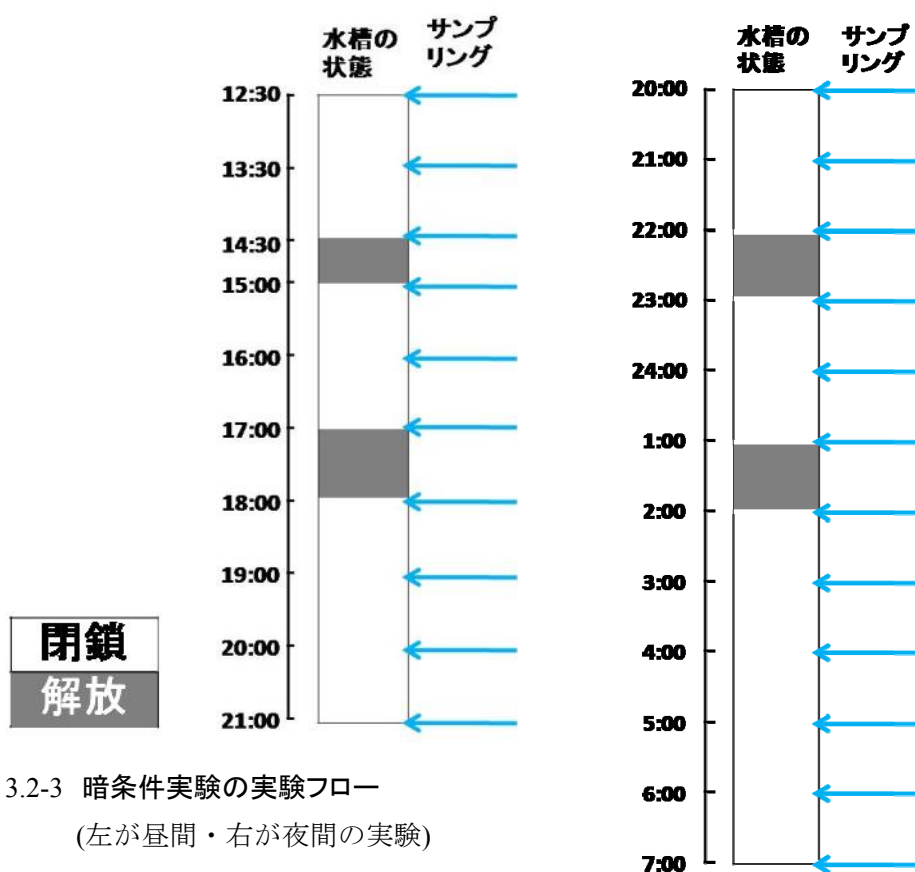


図 3.2-3 暗条件実験の実験フロー  
(左が昼間・右が夜間の実験)

### 3.2.2. 実験結果

#### 3.2.2.1. 日周変動

日周変動の4つの結果を図 3.2-4 に示す。グラフの横軸の時間は、IP・OP を算出するために用いた二つの測定値を採水した時間のちょうど中央の時刻を示している。正確な採水時間と詳細な測定値は付録の表 8-9 に示す。

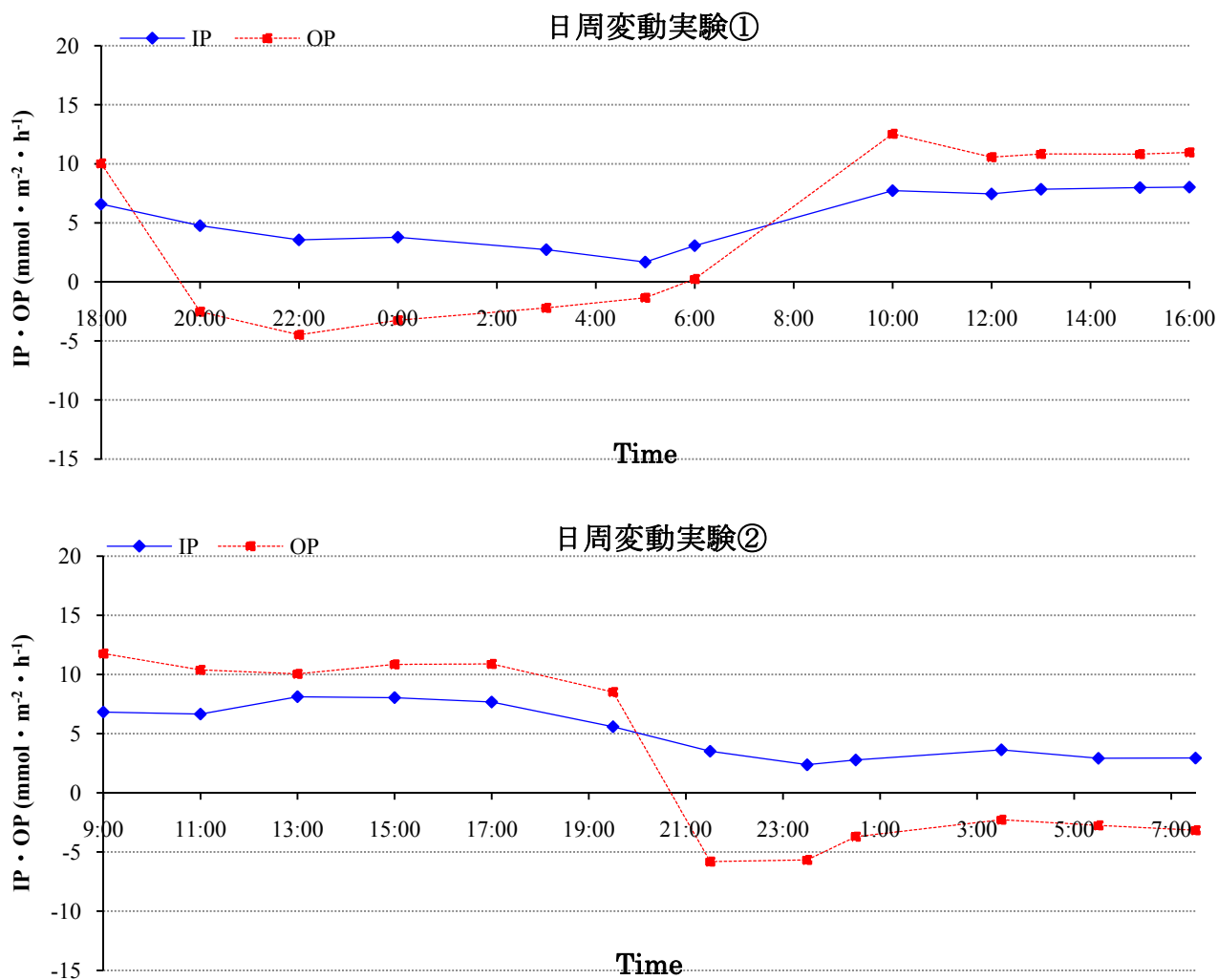


図 3.2-4.a 日周変動実験①, 日周変動実験②



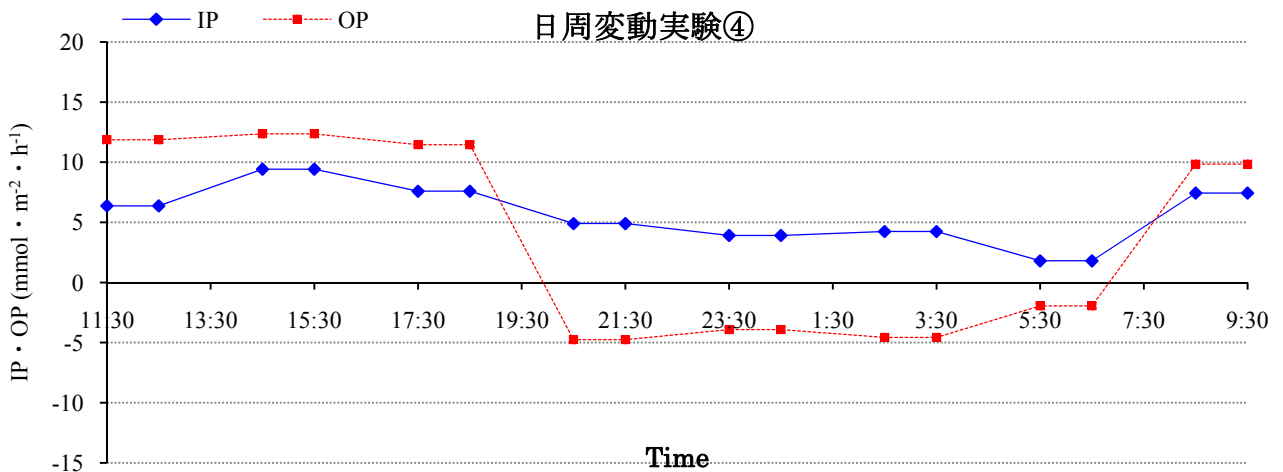
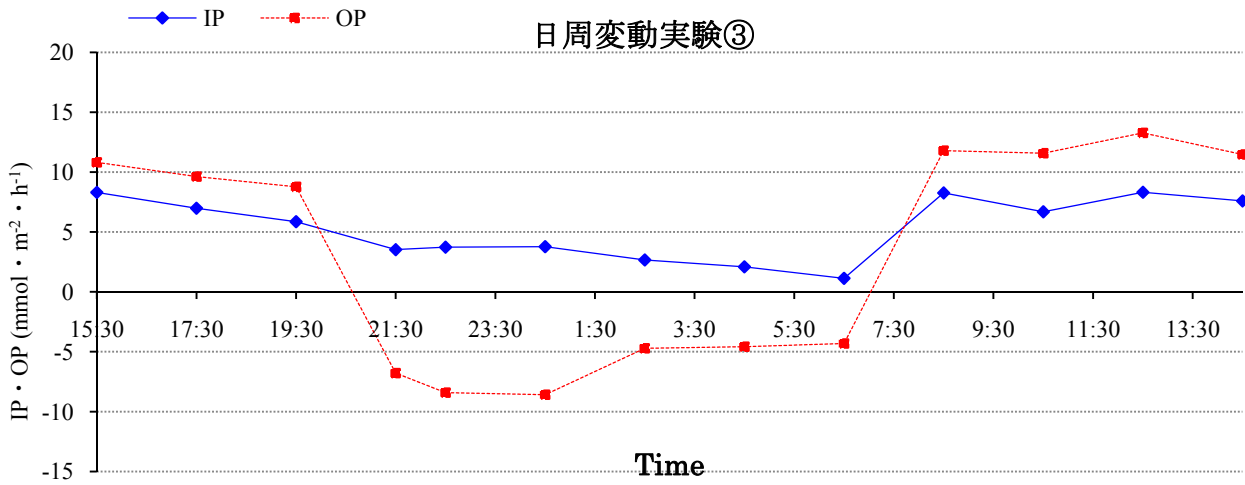


図 3.2-4.b 日周変動実験③, 日周変動実験④

すべての実験において、夕方方の IP の値が低くなるという傾向が見られる。

また、①と③の実験から、昼間の IP と OP の増減が対応関係にあるように見受けられる。そのため、光合成と石灰化が同時に起こるといえる。また、夜になっても石灰化を続けるが、時間が経つにつれ石灰化の速度が減少していることが分かる。また、夜間の石灰化のピークは22時前後であるということもこのグラフから読み取れる。そして、石灰化の速度が遅くなる明け方になると、OP もゼロに近づく。昼間は、光が当たっている条件が同じであっても、朝は IP · OP ともすぐに高くなるが、14時頃に極大値になり、夕方は減少するという傾向が見られる。夜間の傾向は②の実験ではあまり見られないが、値の信頼性がより高いと思われる④の実験には見られる。そこから日周変動の傾向としてより確からしいと考えられる。

### 3.2.2.2. 暗条件での実験

昼夜それぞれの実験結果を図 3.2-5 に示す。グラフの横軸の時間は、IP・OP を算出するために用いた二つの測定値を採水した時間のちょうど中央の時刻を示している。正確な採水時間と詳細な測定値は付録の表 8-11 に示す。

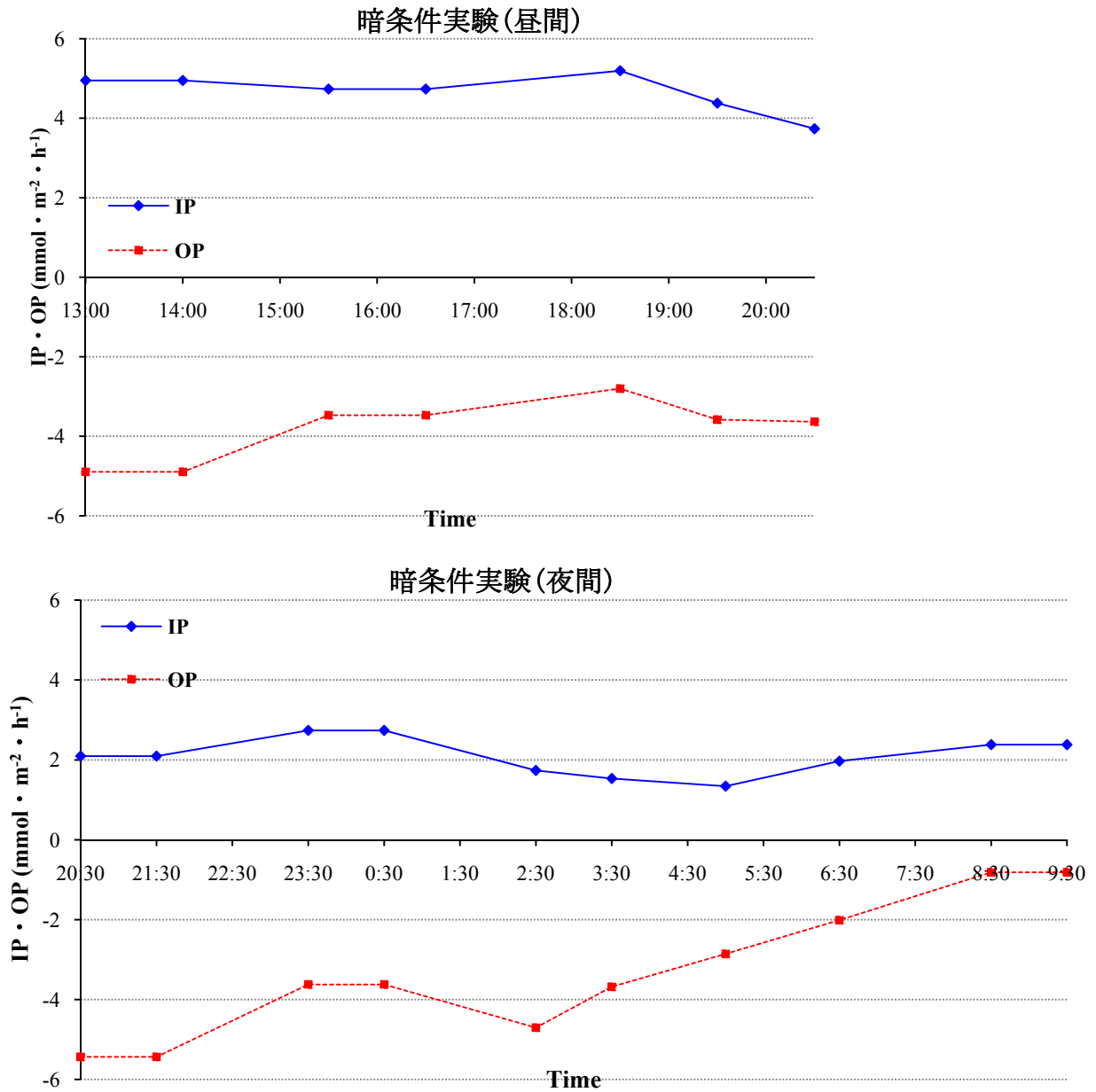


図 3.2-5 暗条件実験の実験結果

暗条件実験でも、日周変動実験で見られたような夕方の IP の減少と夜間 22 時頃の IP が極大になること、そして明け方の IP の値の減少といった傾向が見られる。そして、朝になると IP の値が再び高くなるという挙動も見られる。ここから、暗条件下でも日周変動があると示唆できる。

次に、通常の光条件での IP・OP との比較を行う。日周変動の実験や他の章の実験から、水槽 3 における通常の光条件での昼と夜の IP・OP の値が分かっている。それぞれの平均値と暗条件での IP・OP の平均値を表 3-5 に示す。それをプロットしたグラフを図 3.2-6 に示す。

表 3-5 光量子量に対応する IP と OP の平均値

光量 ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )	昼間		夜間	
	IP	OP	IP	OP
通常：200	7.4	10.9	3.0	-5.2
暗条件：0	4.8	-5.4	2.2	-4.6

(単位： $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )

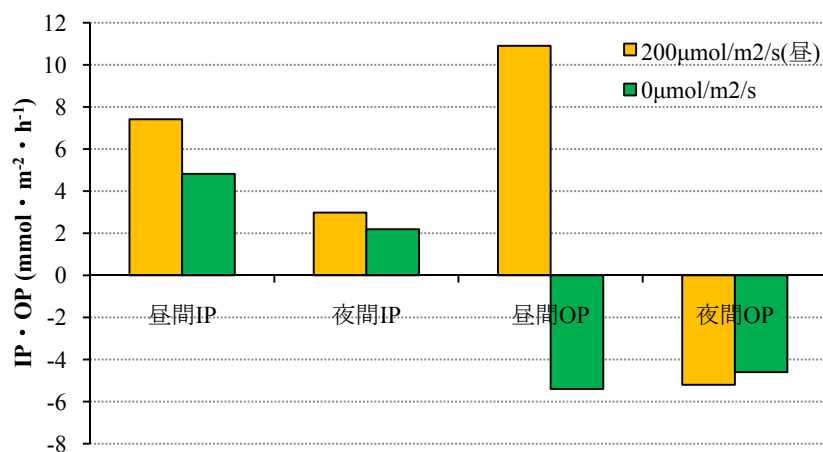


図 3.2-6 光量子量に対応する IP と OP の平均値

通常時と暗条件の値を比較してみると、暗条件の昼間の値は明条件の昼間よりも低い値ではあるが、明条件の日の夜間よりも高いであることが分かる。

### 3.2.3. 考察

まず、骨格成長と光合成の関係に関して議論する。4 度の日周変動実験で得られた結果から、昼間と夜間の IP と OP の相関を図 3.2-7 に示す。

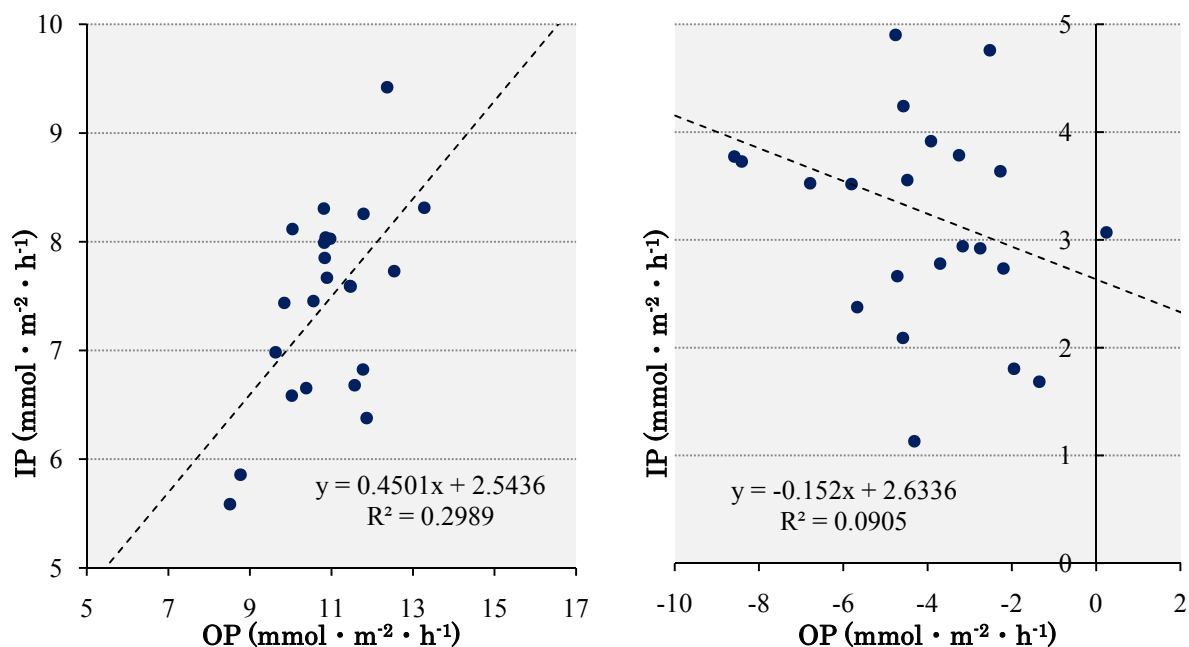


図 3.2-7 IP と OP の相関(左:昼間 右:夜間)

このグラフから昼間の IP と OP にはゆるやかな相関が見られるが、夜間の IP と OP にはほとんど相関は見られない。ここから、呼吸と石灰化には、関連性がないと考えられる。一方、光合成と石灰化の関係は、光合成が石灰化を支配しているか、もしくは石灰化が光合成を支配しているものと考えられる。ただし、完全に同期しているわけではなく、どちらかが補助的な役割を持っている可能性がある。これに関しては、Goreau の光合成による石灰化促進の説<sup>29)30)</sup>と McConnaughey らの石灰化による光合成促進の説<sup>31)32)33)</sup>があり、メカニズムとしても説明のつくものである。これは、光合成もしくは石灰化のみを変化させることで確かめることが出来ると考えられる。

続いて、日周変動実験に見られるサンゴの概日リズムについて議論する。光環境は一様であっても昼間は 14 時ごろをピークとした増減がある。その傾向は石灰化で、より明確に見られる。しかし、夜に近づくにつれ、石灰化・光合成ともに低下する。飼育実験であるため、光量の変化はほとんどないはずであるが、この傾向はほとんどの実験結果で見られる。夕方の値の減少も季節に関係なく 17 時頃から起こる。もし、太陽光の影響などがあるとすると、夏と冬の実験では減少する時間帯が変化するはずである。しかし、そのような変化は見られないことから太陽光の影響は少ないといえる。また、これらの変動は温度の変化にほとんど左右されない。そのため、昼間のサンゴには上記のような 24 時間周期で変

動する生体リズムである概日リズム<sup>3</sup>が存在することが示唆され、それは必ずしも光量に依存するわけではないと考えられる。さらに、暗条件の実験を見ても、夕方頃に減少する傾向が見られる。時間帯は少しずれているが、ここからも光量に依存せず日周変動が起こるといえる。このことは、暗条件下における自由継続リズム<sup>3</sup>によるものだと考えることが出来る。さらに、通常時の夜間よりも暗条件の昼間の IP 値が大きく、暗条件 2 日目の朝(昼間)に、夜間にながっていた IP 値が再び回復したことからも、光量に関係なく、昼間と夜間で石灰化量が増減していることが分かる。

また、夜間にも変動のパターンが見られる。夜間において、初めの数時間は石灰化も呼吸量も比較的多い。そのため、夜間の石灰化から、昼間に光合成で生成したエネルギーをためておき、それを使用して石灰化を行っていると推測できる。夜間の石灰化のピークは 22 時前後である。時間が経つにつれ、少しずつ減る傾向にある。特に明け方の 5 時～6 時頃に最も減少する。Kenneth らは朝の石灰化量の減少を呼吸量が比較的上昇したことにより、ポリプ内で pH が下がったことによるものだとしている<sup>28)</sup>。そこで、光の影響を受けていない暗条件において、pH との相関を取った。その相関図を図 3.2-8 に示す。

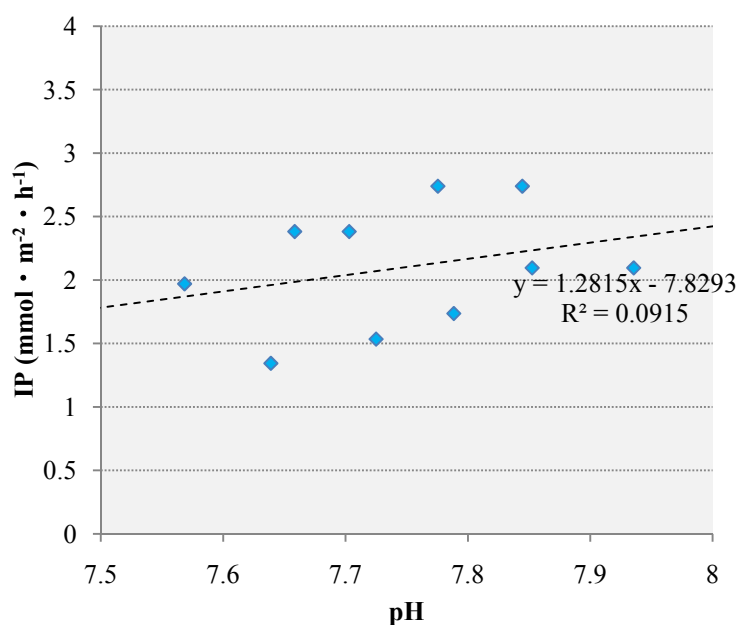


図 3.2-8 pH と IP の相関

このグラフからは、pH と石灰化に相関があるとは言えない。また、図 3.2-7 から夜間の IP と OP の相関も見られないことから、呼吸が石灰化を阻害しているとは言えない。そのため、石灰化を阻害している要因として pH の低下はあまり重要でないと考えられる。こ

<sup>3</sup>生物リズム学概論

(<http://www.obihiro.ac.jp/~rhythms/life&rhythm/03/IntroBiolRhythmsRes.html>)

概日リズムおよび自由継続リズムの詳細に関しては上記を参照

うしたことから光量や pH といった外的要因だけではなく、何時頃かという概日リズム・自由継続リズムによって石灰化と光合成の値が変動すると考えられる。ただし、飼育電灯がつき、昼間になると直ちに光合成および石灰化が活発に行われることから、光の影響も大きいと考えられる。ただし、図 3.2-8 から相関を得られないのは、自然界で起こりうる pH の変動よりも概日リズムの影響が強いためであるとも考えられる。そのため、pH の変動が石灰化に影響を及ぼしている可能性を否定することは本実験では出来ない。よって、水の交換を行って pH が急激に増加した時には石灰化が促進される可能性がある。これは閉鎖実験と水替え実験を比較するによって明らかに出来ると考える。

本実験で見られた概日リズムは、自然界の光環境もしくは温度環境のリズムに近い。飼育しているため、光や温度の変化は野外とは違い、比較的一定に保たれているが、温度に関しては昼夜での変動はあるものと考えられる。しかし、温度の変化による石灰化や光合成への影響は少ないと思われる。それは、採水時の水温と石灰化や光合成量とは明確な相関は見られないことから分かる。特に、水の交換によって水温が急激に変化した時の石灰化や光合成にはそれに呼応した挙動は見られない。よって、その時々温度や光量に全て支配されているというわけではなく、普段の水温や光といった環境因子によって作られたサンゴの概日リズムが光合成や特に石灰化の変動をある程度支配しているものと考えられる。サンゴの中にはクリプトクロムと呼ばれる概日リズムに関する遺伝子が存在することが確認されている<sup>34)</sup>。この遺伝子は光受容に関わる物質であり、この遺伝子は光と暗闇が繰り返される露出サイクルのもとでは概日リズムを示すが、常に暗闇の時には示さないことが分かっている。しかし、この遺伝子以外にも時計遺伝子が存在する可能性はある。その遺伝子によっては、サンゴが暗条件下で長期間飼育された時に自由継続リズムに従って行動する可能性もある<sup>35)</sup>。本実験の結果からはその可能性が非常に高いと考えられる。

さらに、暗条件実験の結果から、夜間には石灰化を少なく行い、昼になると石灰化を多く行うことが分かっている。ここから、日周変動実験で示唆された概日リズムが存在することが明らかになっただけでなく、サンゴがエネルギー貯蓄を行っていることが分かる。それにより、暗条件や光量が少ない条件下に置かれても、直ちにダメージを受けることはないものと推測される。貯蓄に関しては、さらに光量実験を行うことでより確からしいものに出来ると考えられる。

最後に上述の光合成と石灰化の関係に関して、イオンや細胞レベルでの反応を簡単に説明する<sup>36)</sup>。光合成と石灰化の相互作用には二つのモデルがある。Goreau らのモデルは光合成によってサンゴ組織内の  $p\text{CO}_2$  が低下し、それにより炭酸塩飽和度が上がり石灰化を補助するというものである。もう一つの McConnaughey のモデルはトランス石灰化というものである。 $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase が  $\text{Ca}^{2+}$  を石灰化部位にもたらし、 $\text{H}^+$  を石灰化部位から取り除く。 $\text{H}^+$  が取り除かれた石灰化部位はアルカリ性が保たれ、石灰化が起こりやすくなる。 $\text{H}^+$  がもたらされた口腔内では  $\text{HCO}_3^-$  が  $\text{CO}_2$  に変換され光合成が促進されているというものであり、

光合成とは違う部位で石灰化が起こるといいうモデルである。後者のモデルにおけるサンゴ内での反応を概念化したものを図 3.2-9 に示す<sup>37)</sup>。エネルギーを貯蔵している ATP を加水分解させる酵素である ATPase は光依存性を持つ。そのため、光を当てると ATPase が活性化し、石灰化が促進される<sup>37)</sup>。A はポリプの表面であり、海水と接している。A と B の間が口腔組織(Oral tissue)である。B 部分は腔腸であり、B と C の間が反口組織(aboral tissue)である。

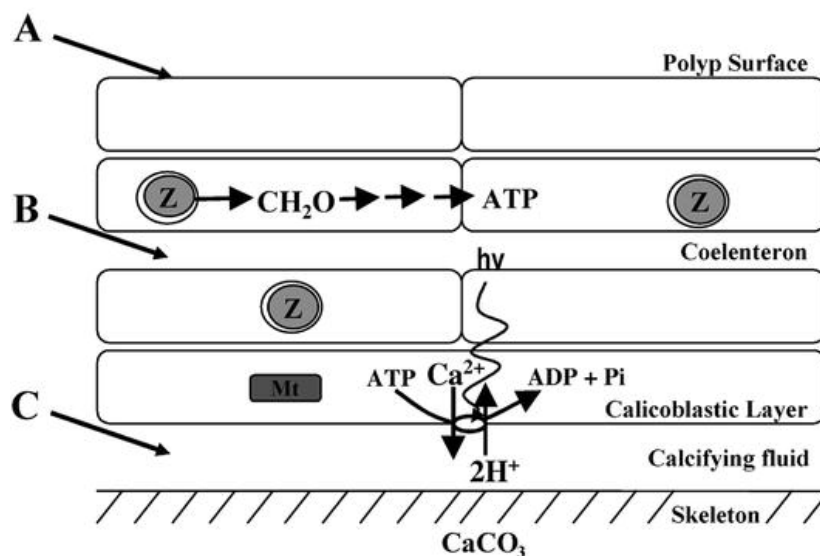


図 3.2-9 簡略化したサンゴ内での石灰化のメカニズム概念図

Z : 褐虫藻, Mt : ミトコンドリア, hv : 光を示す. ATPase は Calicoblastic layer(cell)に存在し, 濃度勾配に反して  $\text{Ca}^{2+}$  を Calcifying fluid に送り込み, 代わりにプロトン( $\text{H}^+$ )を取り込む. そのため,  $\text{Ca}^{2+}$  と  $\text{CO}_3^{2-}$  の濃度が上昇し,  $\text{CaCO}_3$  が沈殿する. 光は酵素機能のトリガーとなるが, ATP は主に呼吸によって供給される.

無機炭素に関しては、褐虫藻による光合成が輸送を補助している可能性<sup>38)</sup>や光合成と石灰化の炭素プールへの競合関係<sup>39)</sup>などが報告されている。PAOLA らは石灰化のための無機炭素は calicoblastic layer に集中して存在する炭酸脱水酵素活性(CA)などが供給を行っていると報告している<sup>38)</sup>。また、褐虫藻が持っている二酸化炭素濃縮機構によって腔腸に無機炭素が蓄積されていると示唆している。このように、物質移動の点でも、光合成と石灰化が同時に起こっているわけではなくても、両者の関係が密接に絡んでいると考えられる。Paola らによる全溶解無機炭素の吸収のメカニズムのモデルを図 3.2-10 に示す。

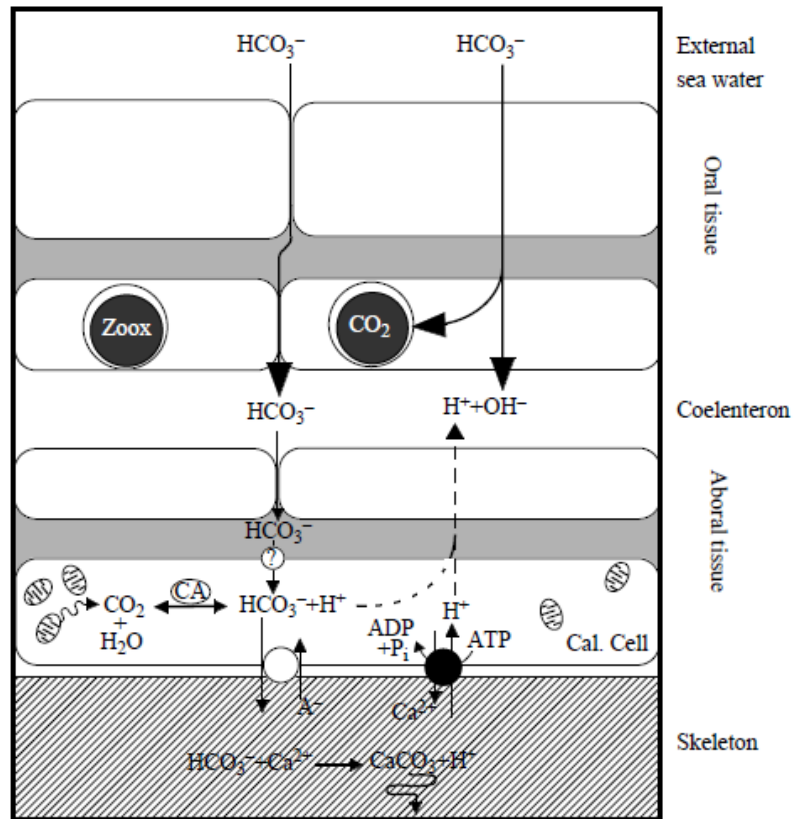


図 3.2-10 光合成と骨格成長に必要な無機炭素の吸収メカニズムのモデル

Cal.Cell : calicoblastic cell(layer), Zoox : 褐虫藻, Pi : 無機リン酸塩, CA : 炭酸脱水酵素活性

他にも、石灰化を行う光合成生物の Ca や無機炭素の取り込みや無機炭素の光合成と石灰化への振り分けなどが明らかになっているが<sup>40)</sup>、サンゴに関しては、まだ分からないことも多く、細胞レベルでの光合成と石灰化の理解も今後のサンゴに関する研究を飛躍させるためには重要であると考えられる。



### 3.3. 閉鎖空間における骨格成長と光合成の変動

実験時に水槽を閉鎖するが、その閉鎖状態が長く続くことによりサンゴにどのような影響が出るかは明らかでない。流れはあるため、排出された粘液はサンゴのすぐ近くに滞ることはないが、閉鎖した空間で分泌された粘液などにより栄養塩濃度は上昇すると考えられる。ただし、この栄養塩を褐虫藻が取り込み、栄養塩濃度は変化しないことも考えられる<sup>27)</sup>。ここで、懸濁物が生成され、サンゴに悪影響を及ぼすという仮説と、栄養塩が供給されることにより、排出された栄養塩を褐虫藻が取り込み、活発に生産を行うことで、サンゴの成長を助長する<sup>41)</sup>という仮説が考えられる。また、昼間光合成を行っている状態で閉鎖することで、pHの上昇が速まると考えられる。それによる石灰化促進の可能性もある。ただし、実際にサンゴへの影響が表れるかは分からない。どのような影響が出るかを明らかにすることで、閉鎖系でのサンゴの挙動が分かると考えた。

#### 3.3.1. 実験方法

全アルカリ度・全炭酸の測定を行った。実験の間は、ポンプにより水流を発生させ、ファンによって水温が急激に変化しないようにした。

実験水槽2において6時間の閉鎖実験を行った。また、実験水槽3において3時間閉鎖し水替えを一度行ってからもう一度3時間閉鎖するという実験を行った。測定は実験水槽を閉鎖した状態の時に1時間毎に行い、全アルカリ度・全炭酸の変動からIP・OPを算出した。実験条件を表3-6に示す。

表 3-6 閉鎖実験, 水替えありの実験の実験条件

実験	実験日	水槽	光量 ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )	水温 ( $^{\circ}\text{C}$ )	塩分濃度 (PSU)
閉鎖実験	2009/10/26	2	200~210	24.8~27	34.0~34.3
水替えありの実験	2009/8/5	3	200~210	24.8~25.4	33.8~34.1

#### 3.3.2. 実験結果

実験結果を図3.3-1に示す。IP・OPの値は補正を行ったものである。グラフの横軸の時間は、IP・OPを算出するために用いた二つの測定値を採水した時間のちょうど中央の時刻を示している。正確な採水時間は詳細な測定値とともに付録の表8-8に示す。

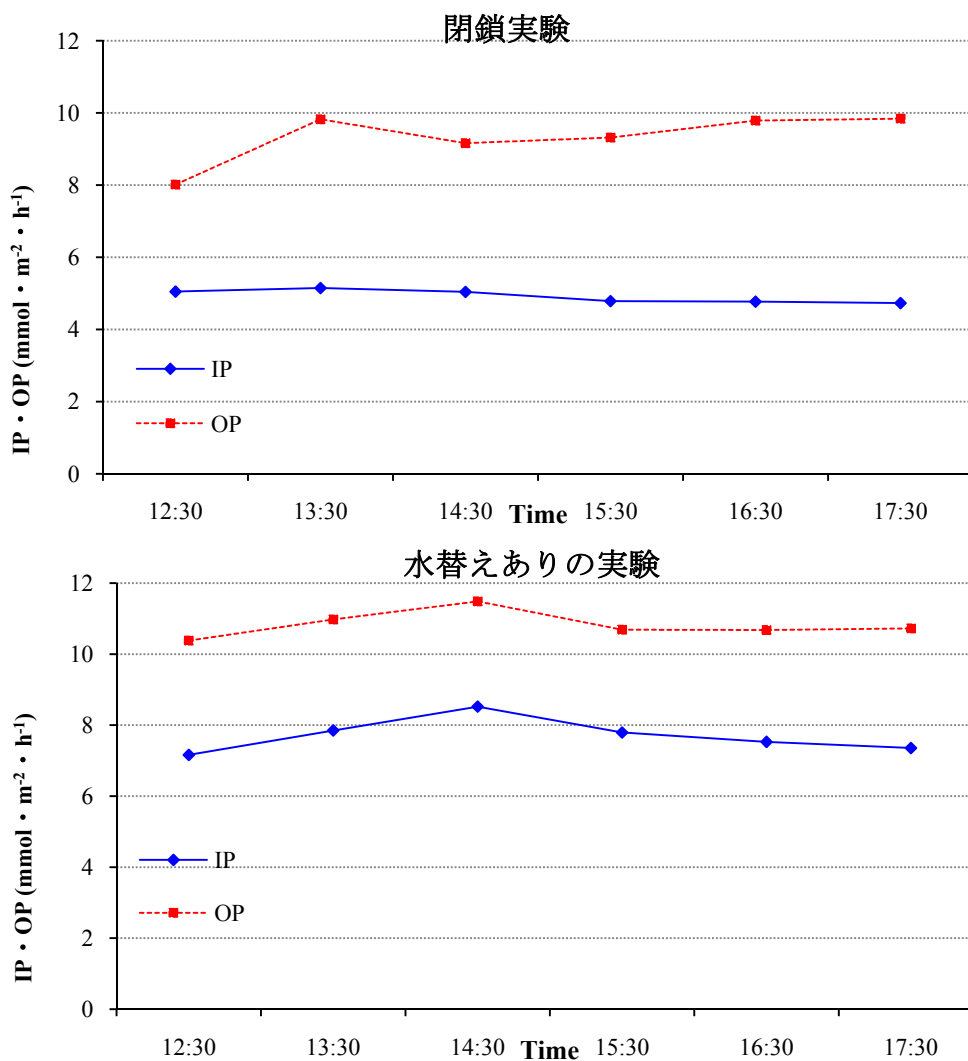


図 3.3-1 閉鎖実験(上), 水替えありの実験(下)

水替えありの実験では、日周変動実験で示唆されたように、石灰化と光合成で14時頃にピークが見られるのに対し、閉鎖実験では、光合成でも石灰化でもそれが見られない。

また、閉鎖実験では、閉鎖してからの時間が長くなるにつれて、光合成量が日周変動に反して上昇している石灰化の値もさほど減少していない。

### 3.3.3. 考察

栄養塩濃度が高まることにより、褐虫藻の活動が活発になっている可能性がある。そのため、夕方になっても光合成が活発に行われ、それによって石灰化も行われたと考えることが出来る。もしくは、閉鎖状態にあると pH 上昇速度が上がるため、それによって石灰化が促進され、さらに石灰化が活発に行われることにより光合成促進に繋がったとも考えることが出来る。しかし、この違いが有意な差があるとは言い難く、6 時間程度の閉鎖状態ではさほど違いが表れないと捉えるのが妥当であると考えられる。

## 4. 光による骨格成長と光合成への影響

既往の研究から、光量と光合成量や石灰化量の相関は明らかにされてきた<sup>42)43)44)</sup>。ただ、屋外の実験やこれまでの室内実験では、夜間を暗条件としていたため、日周変動の影響を除去できていない。しかし、第3章で述べた通り、サンゴの概日リズムの影響は光量に関わらず表れるため、それを考慮した実験や考察が必要である。

また、室内実験で適用されるような光の範囲での光と代謝の関係を報告した例は少ない。強光での光阻害の研究は多いが、光量が小さい場合の回復などは明らかでなく、浅水域では適用可能だが、水深が深いところだと適応出来ないと考えられる。

さらに、本研究では第3章の日周変動実験や暗条件実験から、サンゴがエネルギーの貯蓄を行っていることが示唆されたため、光量とサンゴの代謝を調べることによって、そのエネルギーの貯蓄の存在を確かめられると考えた。貯蓄があるかを知ることは、サンゴがCO<sub>2</sub>を吸収しているかどうかという議論<sup>4)</sup>に関わっており、重要な位置づけにある。

それらに加えて、骨格成長と光合成の相互作用の考察を加え、光による代謝への影響のみならず、サンゴの代謝のメカニズムに関する知見を得ることを目的とした。

## 4.1. 光量変化による骨格成長と光合成の変動

サンゴは褐虫藻の行う光合成によってエネルギーを得ている。その光合成を支配する大きな要因が光である。その光量を変化させた時、光合成量がどのように変化し、それによってどのように骨格成長が変化するかを明らかにした。それにより、サンゴの光合成および骨格成長が光にどの程度依存するのかを明らかにすることが出来ると考えた。

### 4.1.1. 実験方法

実験水槽3において全アルカリ度・全炭酸の測定を行った。実験の間は、ポンプにより水流を発生させ、ファンによって水温が急激に変化しないようにしつつ、飼育水槽と水を交換するための弁を閉じ、実験水槽を閉鎖した状態の時に1時間毎に採水した。閉鎖状態は数時間続け、弁を開けて30分もしくは1時間の水交換を行い、再び閉鎖状態にして測定を再開するという操作を繰り返す。実験は飼育用の電灯が点灯する8時から通常時の飼育状態とは光量が変わるようにセットした。測定は、光量を変化させた日の昼から消灯する20時付近までの6時間～10時間程度と、通常時に戻した翌日の昼間に数時間程度行った。それぞれの実験フローを図4.1-1と図4.1-2に示す。

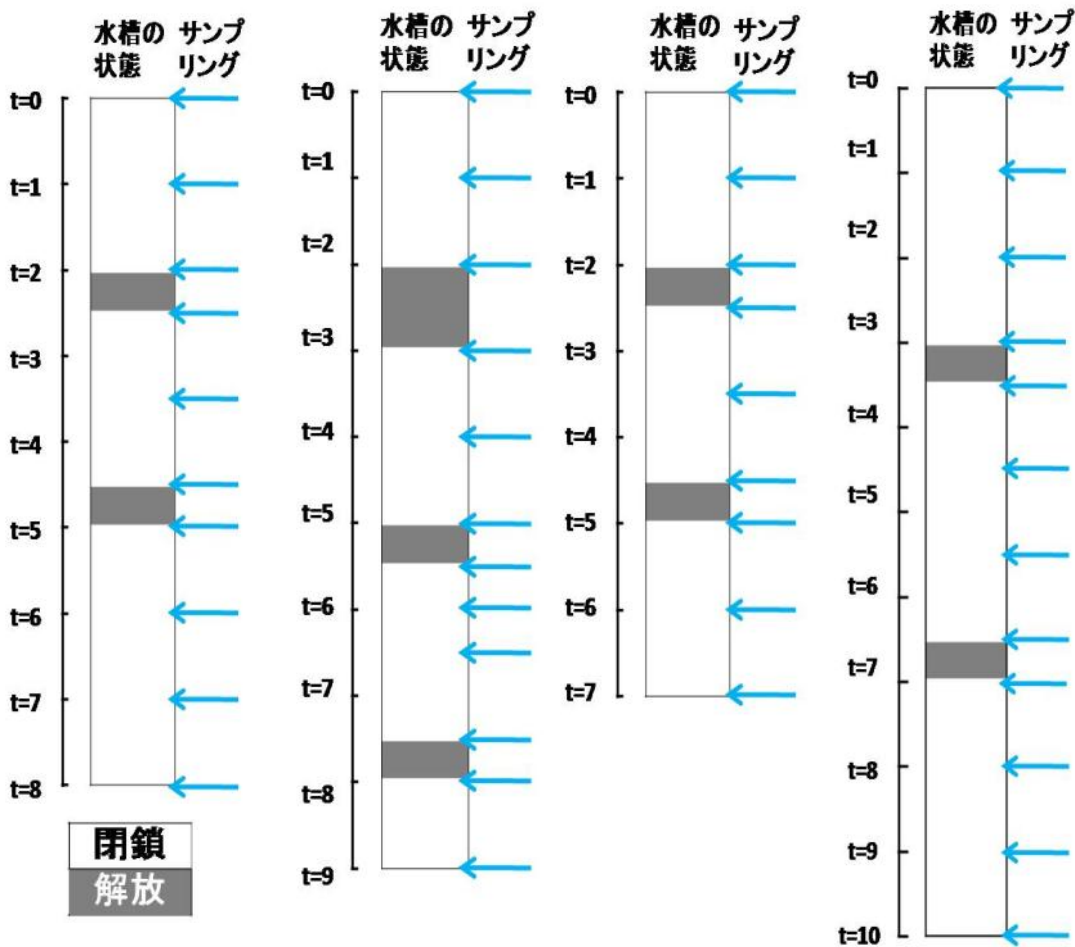


図 4.1-1 光量実験の実験フロー(左から、暗条件・弱光実験・強光実験①・強光実験②)

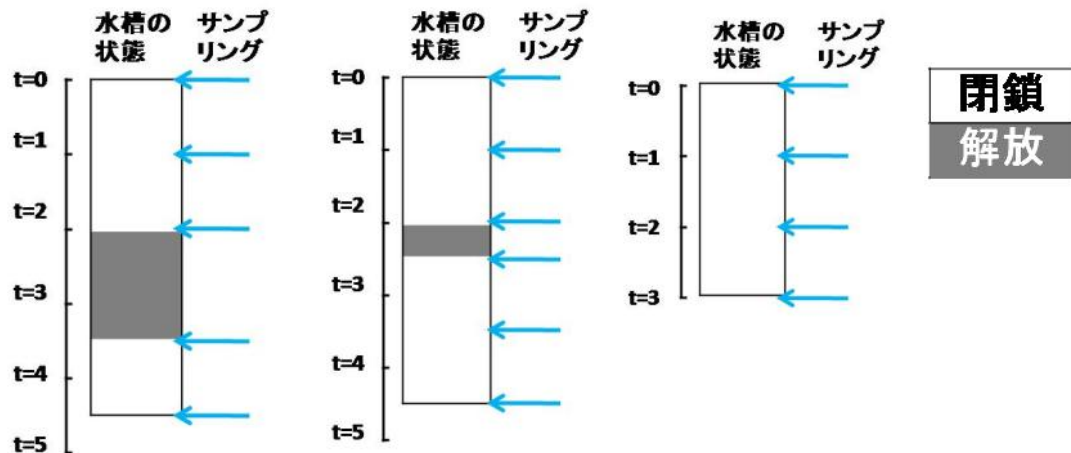


図 4.1-2 光量実験の実験フロー(左から暗条件の翌日・弱光実験の翌日・強光実験の翌日)

#### 4.1.1.1. 暗条件下の実験

実験水槽をアルミホイルで覆い、実験水槽内の光量を前日の 20 時からほぼゼロにした。実験条件を表 4-1 に示す。

表 4-1 暗条件下の実験の実験条件

実験	実験日	水槽	光量 ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )	水温 ( $^{\circ}\text{C}$ )	塩分濃度 (PSU)	開始時刻	終了時刻
暗条件実験	2009/10/27	3	0	25.4~26.3	33.8~34.1	12:30	21:00
暗条件の翌日	2009/10/28	3	0	24.0~26.3	34.4~34.6	12:30	17:00

#### 4.1.1.2. 弱光条件下の実験

実験水槽の上部に半透明のビニール袋を乗せ、実験水槽内の光量を  $100\sim 110\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  にした。実験条件を表 4-2 に示す。

表 4-2 弱光条件下の実験の実験条件

実験	実験日	水槽	光量 ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )	水温 ( $^{\circ}\text{C}$ )	塩分濃度 (PSU)	開始時刻	終了時刻
弱光条件実験	2009/10/21	3	100~110	24.8~25.6	33.8~34.0	14:00	23:00
弱光条件の翌日	2009/10/22	3	200~210	25.4~26.0	33.8~34.1	12:00	16:30

#### 4.1.1.3. 強光条件下の実験

強光実験①では、通常の飼育用電灯に加え、光量を上げるために補助電灯を取り付け、実験水槽内の光量を約  $390\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  にした。さらに、強光実験②では、実験開始から 2 時間、飼育用電灯の点灯時からは 5 時間経過後に約  $367\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  にした。そうすることで、

光量を変えた時の IP・OP の挙動を見た。それぞれの実験条件を表 4-3 に示す。

表 4-3 強光条件下の実験の実験条件

実験	実験日	水槽	光量 ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )	水温 ( $^{\circ}\text{C}$ )	塩分濃度 (PSU)	開始時刻	終了時刻
強光条件実験①	2009/11/19	3	390	24.1~26	34~35.4	12:00	19:00
強光条件の翌日	2009/11/20	3	200~210	24.5~25.4	34.2~34.4	13:00	16:00
強光条件実験②	2009/11/4	3	213~367	24.1~25.7	34.2~34.4	11:00	21:00

#### 4.1.2. 実験結果

グラフの横軸の時間は、IP・OP を算出するために用いた二つの測定値を採水した時間のちょうど中央の時刻を示している。正確な採水時間はそれぞれの付録に記す。

また、比較のために、水槽 3 における通常の光条件  $200\sim 210\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  で実験した結果から、昼間と夜間の IP と OP の平均値を表 4-4 に示す。

表 4-4 通常時の光条件での IP・OP の平均値(水槽 3)

	IP	OP
昼間	7.4	10.9
夜間	3.0	-5.2

(単位： $\text{mmol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ )

##### 4.1.2.1. 暗条件下の実験

IP・OP の値は補正したものである。実験の詳細の値は、付録の表 8-10 に示す。

暗条件の日の実験結果を図 4.1-3 に示す。

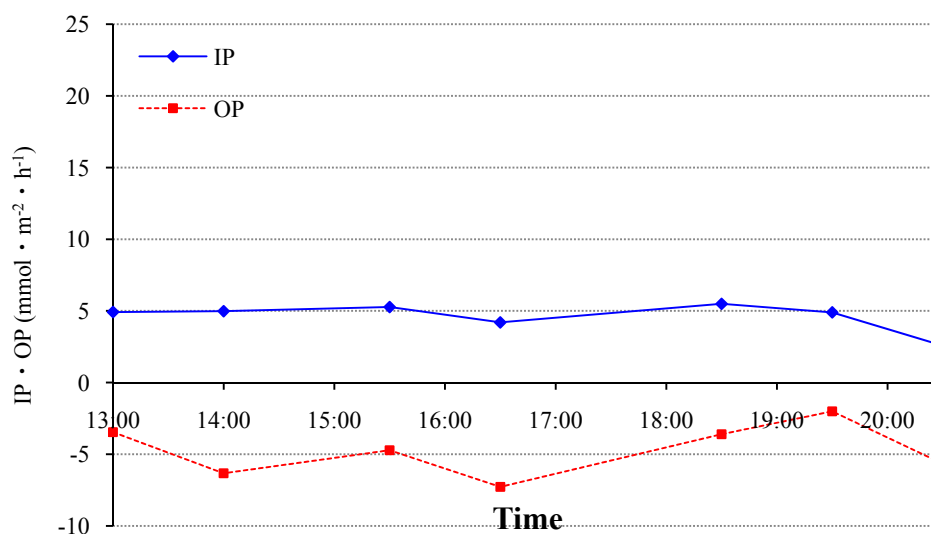


図 4.1-3 暗条件実験

光合成は行われなため、呼吸が卓越し、OP はマイナスの値を示す。その値は通常時の夜間の値とほぼ同程度である。IP は通常時の昼間の半分以上ある。通常時の夜間よりも高い値である。

また、翌日の値を図 4.1-4 に示す。翌日は、これは通常時よりも OP は高く、IP は低くなっている。

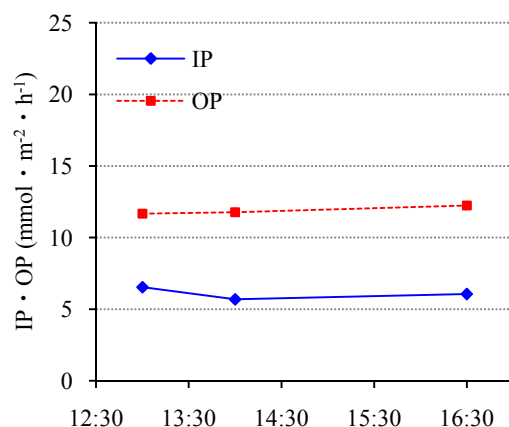


図 4.1-4 暗条件の翌日

#### 4.1.2.2. 弱光条件下の実験

IP · OP の値は補正したものである。実験の詳細の値は付録の表 8-10 に示す。弱光条件の日の実験結果を図 4.1-5 に示す。

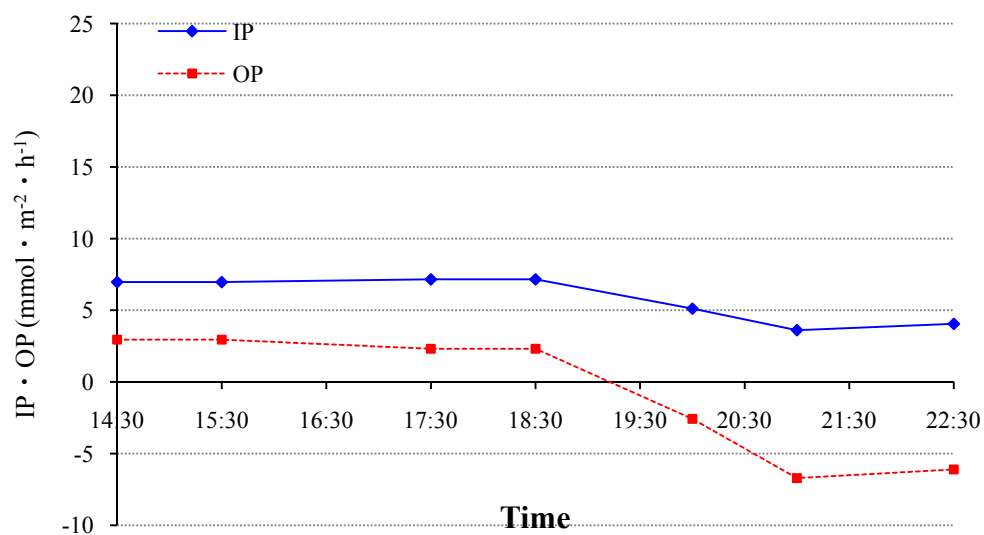


図 4.1-5 弱光条件実験

昼間の OP の値は通常時の昼間の半分以下であった。OP は光合成と呼吸の収支なので、

実際の光合成量は OP の値に呼吸量を足したものである。よって、暗条件時の OP の値を引いた光合成量で比較すれば、通常時の半分程度になる。一方、IP は通常時の 9 割程度である。

また、翌日の値を図 4.1-6 に示す。翌日は、通常時とほぼ同程度に回復している。

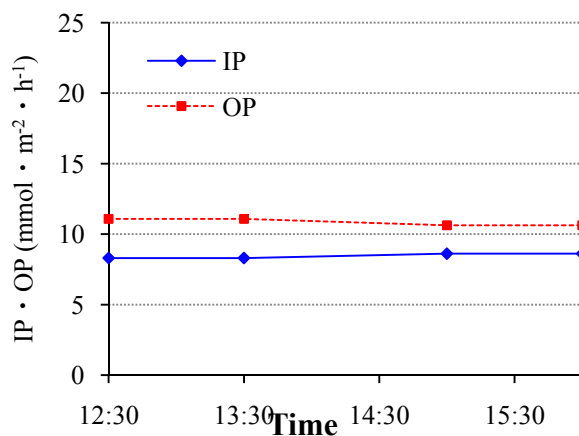


図 4.1-6 弱光条件の翌日

#### 4.1.2.3. 強光条件下の実験

IP · OP の値は補正したものである。実験の詳細の値は、付録の表 8-10 に示す。強光条件の日の実験結果を図 4.1-7 に示す。

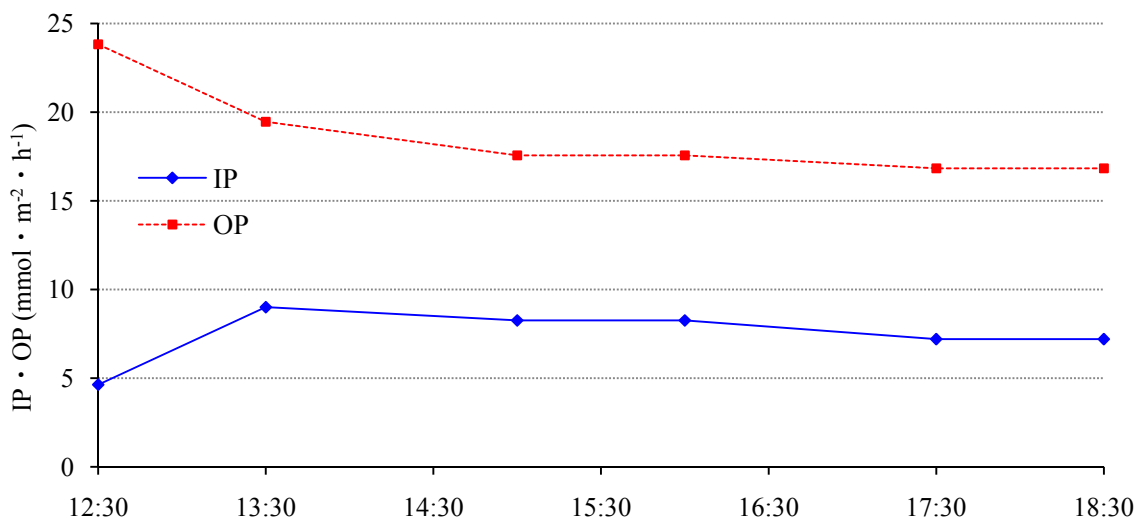


図 4.1-7 強光条件実験①



また、翌日の結果を図 4.1-8 に示す。

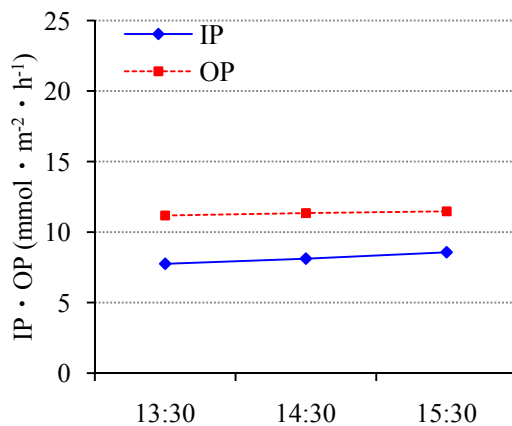


図 4.1-8 強条件の翌日

さらに、朝からではなく、昼間から光量を強くした実験である強光実験②の実験結果を図 4.1-9 に示す。

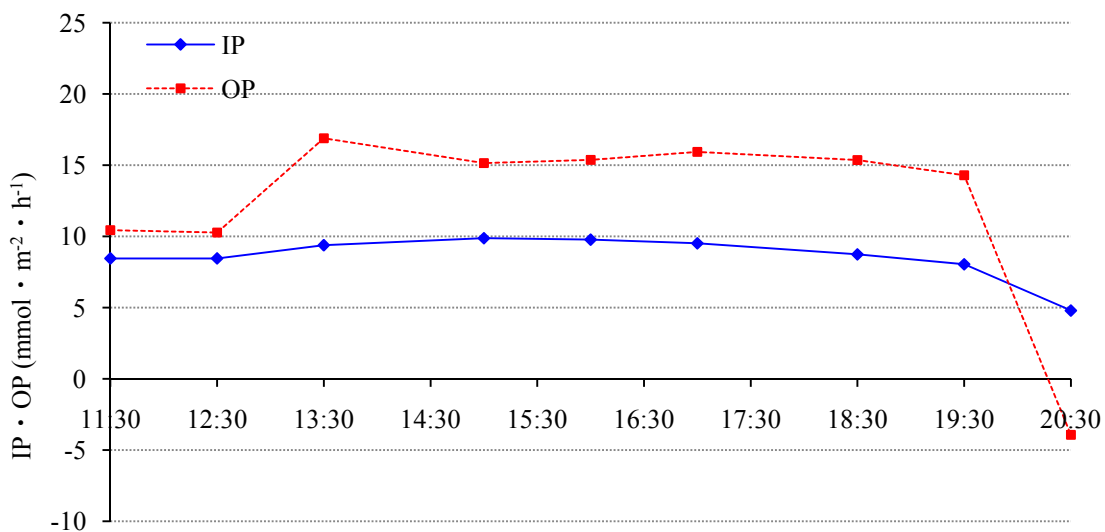


図 4.1-9 強光条件実験②

強光条件実験①と②から、IP・OPともに光量が増えると増加することが分かる。しかし、①と②を比較したところ、OPの値は光量に比例し①の方が高かったにもかかわらず、IPの値は①よりも、②の方が大きくなった。

翌日はIP・OPともに通常と同程度の値に戻った。ただし、IPは少しだけ高くなっている。

### 4.1.3. 考察

考察のために、光量と IP・OP の関係をグラフにしたものを図 4.1-10 に示す。同条件のものを比較するために、強光条件の値に関しては強光実験①を用いる。そして、それらの点から近似線を引き、その近似曲線の数式を示す。

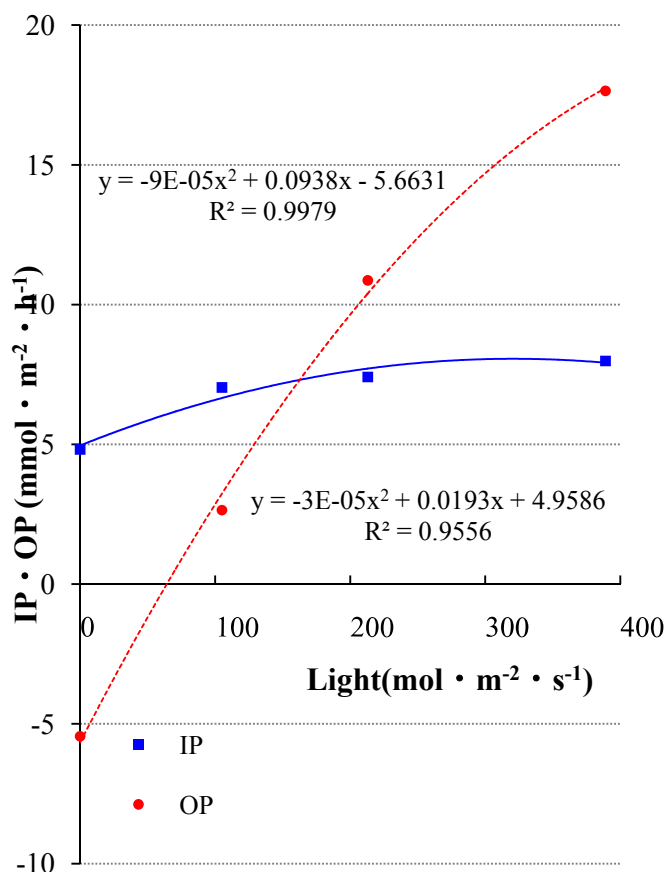


図 4.1-10 光量と IP・OP の関係

図 4.1-10 から IP と OP で増加率は 3 倍程度違うことが分かる。特に IP では、光量がある場合はほぼ一直線上に増加していくように見えるが、暗条件下ではその直線には乗らず、少し低い値を示している<sup>42)43)</sup>。この挙動は他の研究で報告されているものと一致している。これは、石灰化を促進する Ca<sup>2+</sup>ATPase は光を引き金としているため、光を当てると ATPase が活発化するからだと考えられる。そして、光合成量の増加や ATP の活性化によって石灰化速度は高くなるが、石灰化における飽和速度は光合成に比べて低いために、一定の値で安定するものと考えられる。ただし、強光実験②から、まだ石灰化速度が上がる余地はあるものと考えられる。

一方、光合成は光量によって支配されるといえる。光量と光合成は図 4.1-10 から本実験の光条件では、正の相関が強いことが分かる。光阻害が起こる光の強さは 1000 $\mu$ mol/m<sup>2</sup>/s 以上といわれており、有害な紫外線もないため、光によるダメージはほとんど見られない

はずである。光量が強くなると、OP が直線上に乗らず、少し小さな値を示すが、これは光呼吸の増加によるものと思われる。

また、有機炭素生産速度と無機炭素生産速度の関係を示すために、第3章の日周変動実験④におけるIPとOPの相関を図4.1-11に示す。また、光の影響を明らかにするために光量を変化させた時のIPとOPの相関を図4.1-12に示す。

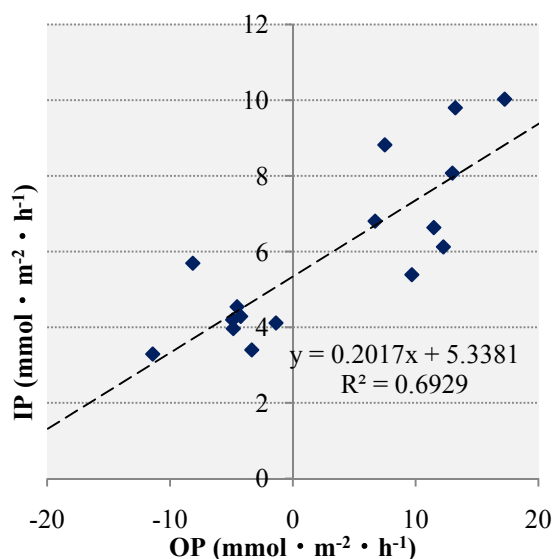


図 4.1-11 日周実験におけるIPとOPの関係

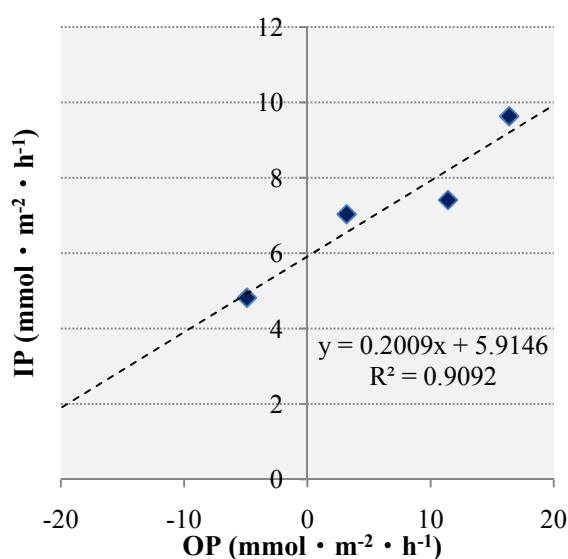


図 4.1-12 光実験におけるIPとOPの関係

第3章の日周変動実験と光量変化実験におけるIPとOPの比は1:5である。大森らの研究<sup>21)</sup>では、無機炭素生産と有機炭素生産の比は1:3であり、他の研究では1:3.8であると言及されており<sup>45)</sup>、ミドリイシサンゴのような枝状サンゴは、エネルギーの多くを光合成から得る<sup>43)</sup>ことから、この値は矛盾しないものと考えられる。また、日周変動でのIPとOPの比と光量を変化させた時のIPとOPの比がほぼ同程度であったことから、本研究における飼育実験での一定光量のONとOFFによる環境での日周変動による無機炭素生産速度と有機炭素生産速度の関係と光量変化による無機炭素生産速度と有機炭素生産速度は同じような関係性を持っていることが示唆される。つまり、この結果から光阻害が起こらない範囲で光量を変化させた時、光合成と石灰化の関係は一定であると予想される。

しかし、光量の変化の方法によって、サンゴの石灰化速度が促進される可能性がある。強光実験①と②の比較から、飼育用電灯の点灯時から光量が強い場合と途中から光量が強くなる場合では、後者のIP値の方が大きい。その理由として、強光実験①の数日前に暗条件実験を行っていたため、強光実験①の時には石灰化の回復が遅れていたのではないかと考えることも出来る。しかし、図4.1-10のIPと光の曲線から考えるとその可能性は少ない。なぜなら、暗条件、弱光実験、通常時の平均値から考えて、強光実験①のIPの挙動は妥当であると考えられるからである。強光実験②のIPの値は図4.1-13に示すように、この曲線より上に位置することからも、強光実験②の挙動が他の実験と違うと考える方が妥

当である.

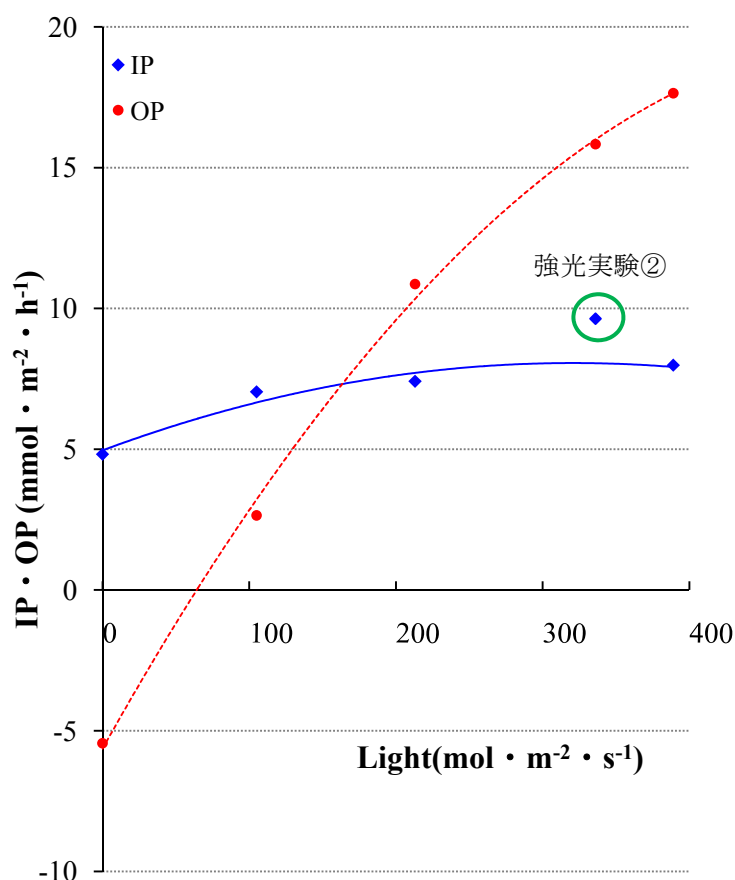


図 4.1-13 強光実験②の結果を加えた光量と IP·OP の関係

そのため、自然界での日周変動のように、徐々に光量が上昇もしくは減少すると、それに呼応して光合成と石灰化が増えるのではないかと考えることが出来る。つまり、光量だけではなくその変動も石灰化には関連があるという考え方である。これには二つメカニズムが考えられ、光量の増加が石灰化の促進に影響しているのではないのかというものと、概日リズムに合わせた光量変化が石灰化の促進に影響しているのではないのかというものである。前者に関しては、光依存性の ATPase が光量子量の増加によってさらに活発化する可能性を示唆している。後者では、概日リズムの同期が起こり、それによって石灰化の概日リズムが自然界の光環境に呼応した挙動を示したと考えられる。

この仮説が正しいとすれば、光合成量の増減の割合に対応して石灰化量が増減するのではなく、光合成量の変遷によって石灰化量が変化すると言える。これは飼育実験での光環境設定や、適地選定時の光環境条件の定義に役立つ可能性がある。

さらに、暗条件の翌日に光合成量が通常時より増加したことは、ポリプ内が呼吸と石灰化によって十分に酸性化されており、光合成が活発化したと考えられる。こうした働きから、自然界において、数日程度弱光条件や暗条件になったとしても、光量が再び強まった時には、光合成速度が速まり回復されると考えられる。

また、第3章でもあると示唆されたサンゴのエネルギー貯蓄が本実験でも確認された。暗条件下でも石灰化を行うことから、光合成によるエネルギーをその場で使うだけではなく、エネルギー貯蓄を行っていると考えられる。各条件での実験日と翌日の IP・OP の値をグラフにまとめたものを図 4.1-14 に示す。

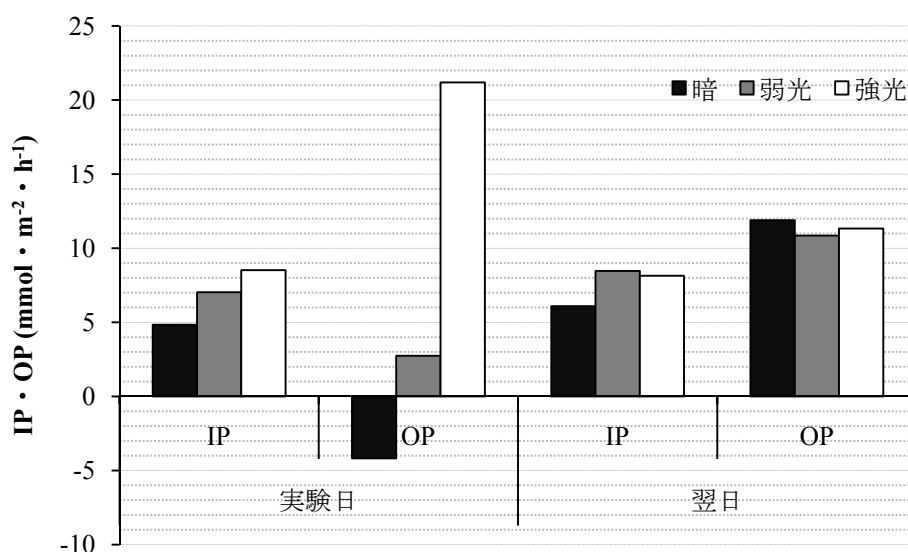


図 4.1-14 各光条件下の実験日とその翌日の IP と OP

通常時は表 4-4 に示すように IP は  $7.4 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 、OP は  $10.9 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  である。暗条件の翌日の実験で通常時より IP が減っていることと強光条件の翌日の実験で通常時より IP が増加していることから、前日の光合成によってエネルギー貯蓄を行い、それを翌日の石灰化でも使用していることが示唆される。そのため、エネルギー貯蓄の存在は明らかであり、それが前日もしくは数日前からの光合成量に影響を受けることも示唆された。エネルギー貯蓄方法の一つの仮説としては、ATP を体内に貯蓄していることが考えられる。さらに弱光条件では IP の値が実験日は少しだけ減少し、翌日は通常時より高くなったことから、弱光条件で光依存性の ATPase の活性が下がり、石灰化量が減少した可能性がある。そして、石灰化するのに十分な光合成は行われているとしても、光によって石灰化量が調節されることによって、貯蓄量の維持もしくは増加につながった可能性がある。自然界でも光量が一時的に低くなることは多分にあり、もしこの仮説が正しければ、光量が回復した時に石灰化を促進させていると考えられ、こういった仕組みが一時的な光量減少に対する対処法となっている可能性がある。

## 5. 電気による骨格成長と光合成への影響

既往の研究から、電気による長期的なサンゴの影響が確認されたものもあるが、確認できなかったものもあり、電流の影響のメカニズムは明らかでない。先行研究から他の環境因子の影響が大きく、サンゴの生活史や部位による影響の違いもあることがその原因だと考えられる。

そこで、本研究では先行研究で行ってきたクロロフィル蛍光測定と水中重量測定に変わり、全アルカリ度・全炭酸測定を導入することで電気の影響を明らかにすることを試みた。

全アルカリ度・全炭酸測定にしたのには、以下のような理由がある。まず、光合成と骨格成長を同じ時間スケールで比較できることである。それにより、光合成と骨格成長の関係性がより明確になると考えた。また、クロロフィル蛍光測定と水中重量測定では、長期間での変化を追っていたが、その間にサンゴの健康状態が変化し、その影響が大きく反映されてしまうため、測定法として好ましくない。また、サンゴは個体差が激しく、二つの別のサンゴ群(水槽)を比較することは難しい。そのため、短期間での実験を繰り返すことによって、健康状態が大きく変化する前に電気の影響をより正確に観察することが出来ると考えた。

本章では、電気がサンゴに与える影響を、(1)どの程度の期間で影響が出るのか(2)どういった状態の時に影響が表れるかといった点を留意しながら行った。実験方法の変遷を追いつつ、それぞれの改善点と次の実験を行う上での考察を加えながら議論する。電気による影響の可能性を探っていきながら、再生技術としての電気の有用性と、有用である場合はどのような影響かを明らかにすることを目的とする。それにより、電気による成長促進技術の開発に役立つと考えられる。

## 5.1. ブランク実験

サンゴの挙動以外に電気の有無が、全アルカリ度や全炭酸の値に影響を及ぼしているかを知るために、サンゴを入れていない実験水槽 4 において電気の有無を比較するブランク実験を行った。電気を流すことで電極付近では(2-1-1) , (2-1-2) , (2-1-3), (2-1-4)式で表されたような反応が起こる。これは、全アルカリ度および全炭酸に影響を及ぼす可能性がある。ただし、水槽内の水が良く混ざっており、電極部分での反応が測定時間に対して十分に短ければ全アルカリ度や全炭酸には影響がないと考えられる。

加えて、電着が起こるためゲル上部での  $\text{Ca}^{2+}$  濃度が低下し、それにより実験水槽内の  $\text{Ca}^{2+}$  がゲルを通してゲル上部へ移行することがあれば、全アルカリ度の値に影響を及ぼすことも考えられる。そのため、それらの影響がどの程度であるかをブランク実験によって明らかにしようとした。条件の違う実験に対応できるよう様々な条件下でブランク実験を行った。

### 5.1.1. 実験方法

#### A) 短時間ブランク実験

実験水槽 4 において、条件を変えて 2 時間水槽を閉鎖し、1 時間毎に測定を行った。条件に関しては表 5-1 に示す。

表 5-1 短時間ブランク実験の実験条件

実験	実験日	水槽	光量 ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )	水温 ( $^{\circ}\text{C}$ )	塩分濃度 (PSU)	電流密度 ( $\text{mA}/\text{m}^2$ )
昼間 電気なし①	2009/6/18	4	200~210	26~27	33.2~33.3	0
昼間 電気なし②	2009/6/19	4	200~210	25.5~27.5	33.5~33.6	0
昼間 電気あり	2009/6/25	4	200~210	25.2~26	33.6~33.7	50
夜間 電気なし	2009/12/3	4	0	26.4~27.2	34.6	0
夜間 電気あり	2009/10/19	4	0	33.9~34	25.8~26.7	50

実験フローは図 5.1-1 に示す。

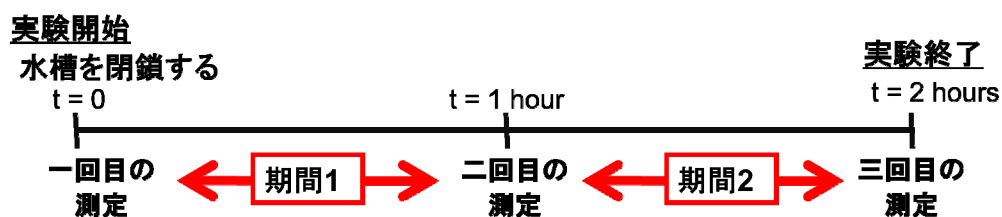


図 5.1-1 2 時間実験の実験フロー

### B) 短時間応答ブランク実験

実験水槽 4 において、条件を変えて水槽を閉鎖し 1 時間毎に測定を行った。測定開始時は電気を流さず、測定開始から実験①と実験②は 2 時間経過後、実験③は 3 時間経過後、採水後に電気を流し、挙動を見た。実験条件は表 5-2 に示す。

表 5-2 短時間応答ブランク実験の実験条件

実験	実験日	水槽	光量 ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )	水温 ( $^{\circ}\text{C}$ )	塩分濃度 (PSU)	電流密度 ( $\text{mA}/\text{m}^2$ )
短時間応答ブランク実験①	2009/7/27	4	200~210	25.2~26.0	34.5~35.5	0→50
短時間応答ブランク実験②	2009/8/5	4	200~210	25~26.5	33.8~34.1	0→50
短時間応答ブランク実験③	2009/11/21	4	0	24.6~25.3	33.2~33.4	0→50

### C) 長時間ブランク実験

実験水槽 4 において、水槽をアルミホイルで囲って暗条件にし、電気を流した状態で水槽を閉鎖し 30 分もしくは 1 時間間隔で測定を行った。ただし、この実験結果から多少の光が漏れていたと考えられたため、電気を流さない状態での同じ光条件下でのブランク水槽の挙動を見るために追加実験を行った。実験条件は表 5-3 に示す。

表 5-3 長時間ブランク実験の実験条件

実験	実験日	水槽	光量 ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )	水温 ( $^{\circ}\text{C}$ )	塩分濃度 (PSU)	電流密度 ( $\text{mA}/\text{m}^2$ )
長時間ブランク実験①	2009/11/29	4	0	24.3~26.2	33.8~34	50
長時間ブランク実験②	2009/12/3	4	0	26.4~27.6	34.4~34.6	0



### 5.1.2. 実験結果

ブランク実験では、サンゴを入れていない水槽での実験のため、単位換算は行わない。グラフの横軸の時間は、IP・OPを算出するために用いた二つの測定値を採水した時間のちょうど中央の時刻を示している。正確な採水時間は詳細な測定値とともに付録の表 8-7 に記す。

#### A) 2時間ブランク実験

測定値を補正し、算出されたIPとOPの値を表 5-4 に示す。暗条件で電気を流さない実験に関しては、2時間実験を行っていないので、比較のためにC)の長時間ブランク実験②の夜間21時から23時までの2時間の変動からIPとOPを算出し、表 5-4 に追加した。その値をそれぞれの条件毎にグラフにしたものを図 5.1-2 に示す。

表 5-4 2時間ブランク実験の結果

	IP	OP
昼間 電気なし	1.9	9.5
	2.1	23.9
昼間 電気あり	9.8	14.1
夜間 電気なし	1.3	3.8
夜間 電気あり	-5.4	-18.5

(単位： $\mu\text{mol}/\text{kg}/\text{h}$ )

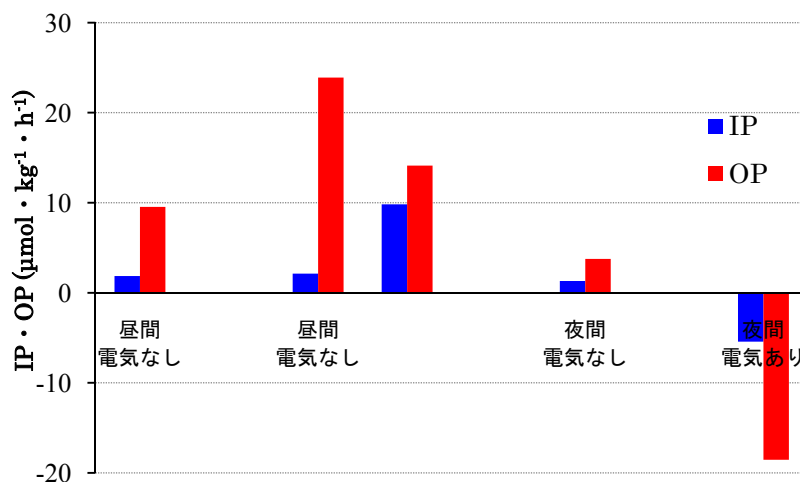


図 5.1-2 2時間ブランク実験の結果

電気なしの実験では、IPは $2\mu\text{mol}/\text{kg}/\text{h}$ 以下に収まっており、ブランク水槽には石灰化する生物がほとんど生息していないことから、それが測定の誤差と考えられる。しかし、藻類やプランクトンの存在からか、OPの値はかなり大きくなることもある。電気ありの実験では、IPの値がプラスマイナス関係なく大きく振れる。

B) 短時間応答ブランク実験

実験結果をそれぞれグラフにしたものを図 5.1-3 に示す。

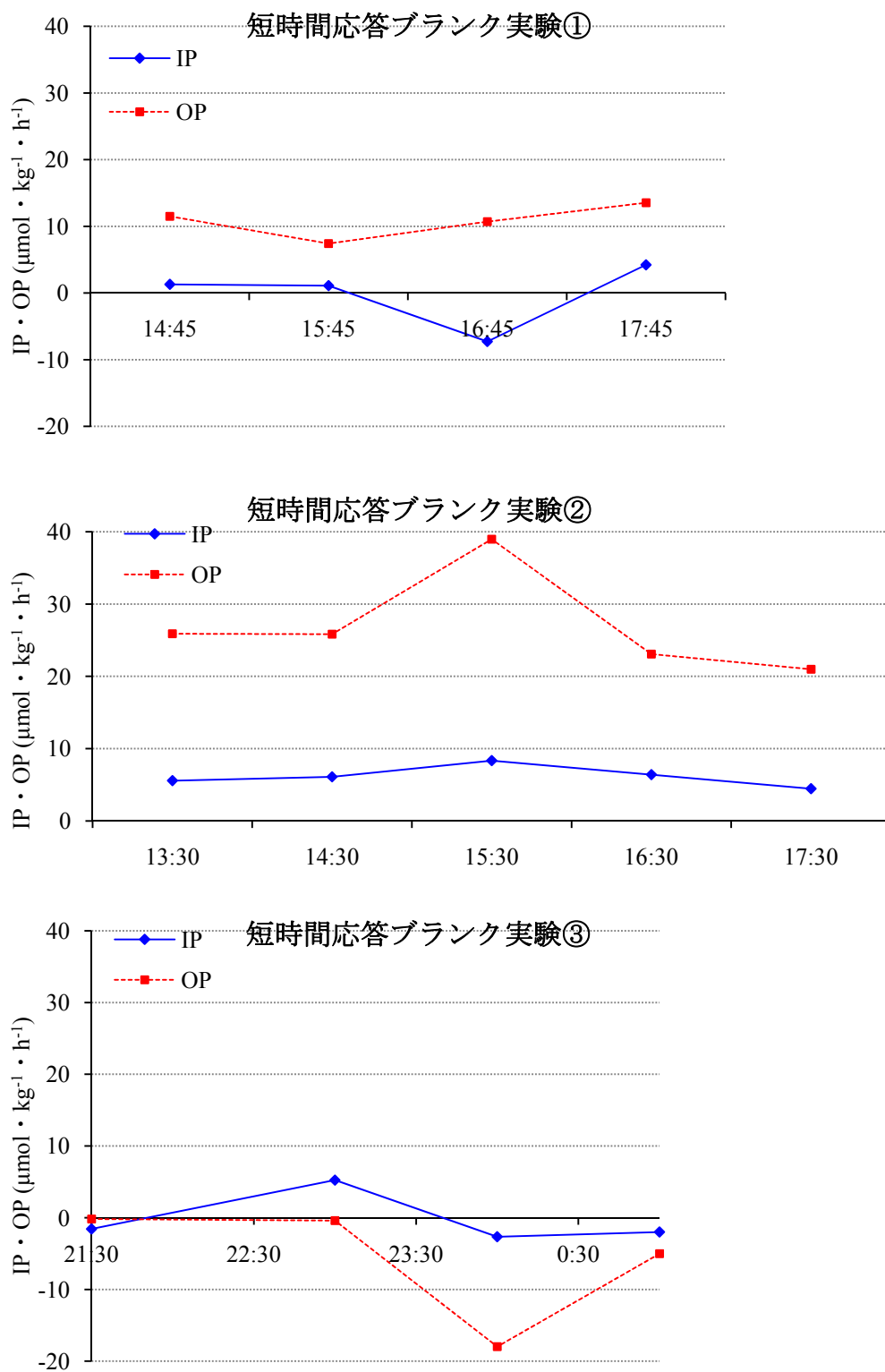


図 5.1-3 短時間応答ブランク実験

①と②では、光を当てた場合のブランクの OP はかなり高く、サンゴを入れている水槽の OP の 5 分の 1 から 3 分の 1 程度もある。しかし、サンゴを入れている水槽での実験において、夜間の呼吸量は小さく、それ程に藻類が繁茂しているとは考えにくい。そのため、水槽 4 においてこの実験時にかなりの量の藻類がいたか、もしくは電極部分の海水が流出するなどの外的要因から全体的に値が高くなったのだと推測される。そのため、この実験の絶対値を信頼することは出来ない。

また、全ての実験において、電気を流し始めた後の 1 時間に異常値が観測される。異常値は、IP と OP どちらともに見られるが、必ずしも起こるわけではなく、プラスマイナスどちらに振れるかということに関しても、実験ごとに異なる。異常値と通常値の差は測定誤差と考えられる  $5 \mu \text{ mol/kg/h}$  よりもはるかに大きいため、短時間応答実験では、電気を流し始めた最初の 1 時間の値はあまり信用できないと考えられる。

以上のことを除けば、IP は  $5 \mu \text{ mol/kg/h}$  以内にほぼ収まっており、サンゴがいる水槽での誤差は  $1.1 \text{ mmol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  程度であると推測される。A)の実験と誤差が違うことは、B)の実験までの期間に藻類や貝類が繁殖したためだと考えられる。ただし、これらも補正を行うことで、測定誤差と同様にブランクの影響も少なくできると考えられる。OP に関しては、ブランク水槽では昼間は  $10 \mu \text{ mol/kg/h}$  程度の光合成を行われていることが、短時間ブランク実験からも示唆される。ただ、サンゴを入れている水槽においては、サンゴが遮光効果を持つため、この値よりも小さな値を示すと考えられる。

また、夜間の OP に関しては、ブランク水槽では  $5 \mu \text{ mol/kg/h}$  程度であると推測される。

C) 長時間ブランク実験

実験結果をそれぞれグラフにしたものを図 5.1-4 に示す。

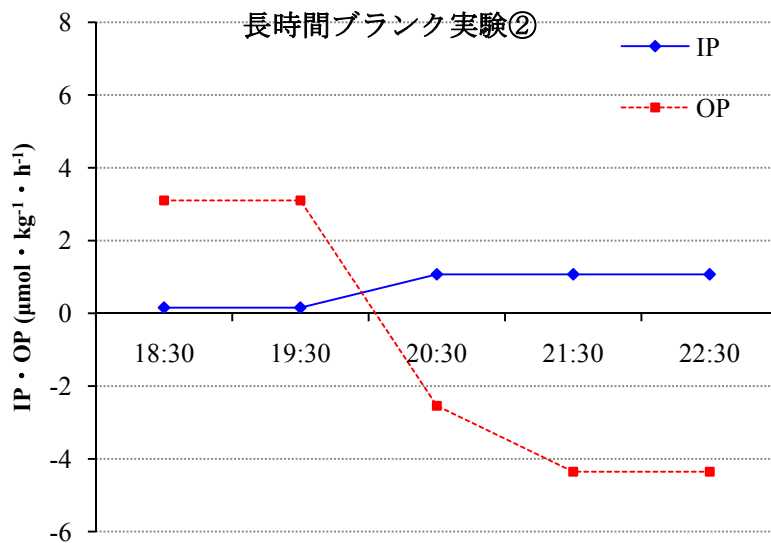
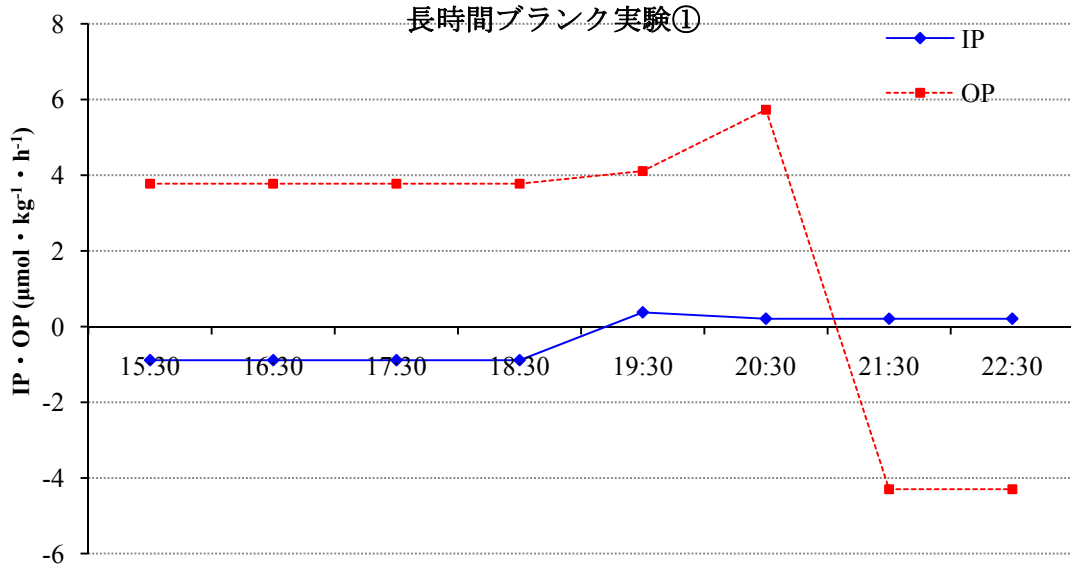


図 5.1-4 長時間ブランク実験

どちらの実験においても昼間に光合成を行っていることから、どこかから光が漏れていたものと考えられる。

IP に関しては、石灰化を行う生物がほとんど生息していないことやどちらも  $\pm 1 \mu \text{mol/kg/h}$  以下の値を示していることから、夜間の誤差範囲はこの程度だと考えられる。

### 5.1.3. 考察

2時間実験および短時間応答実験から、電気を流すことにより、IP・OPの値が変化することが示唆される。ただし、この時点では、それが化学的な反応によるものか、生物学的な反応によるものかは判断できない。しかし、電気の有無によって、イオンなどの流入が起こりIP・OPの値に大きな影響が及ぶことは長時間実験からは考えられない。

長時間実験においては、電気なしに比べて電気ありの方がOPの値が大きくなっていることから、電気には藻類の光合成を活発化させる作用がある可能性もある。夜間のOPの値が電気の有無ではほぼ違いがないため、光合成にのみ影響を及ぼしていると考えられる。これは、電極部分の海水が水槽内に流入し、OPの値が大きくなったとすると、より時間の経過している夜間の方がOPの値に影響を及ぼすはずだからである。

さらに、Goreouも指摘しているように、サンゴ以外の藻類などへの影響があると考えられる<sup>15)</sup>。サンゴの生育状況は藻類など他生物の影響は無視できない。そのため、そちらの研究をすることも海中での電気を流した構造物がサンゴの生育に適しているかを判断する手助けになると考えられる。

## 5.2. 条件毎の比較実験

昼間や夜間に数時間電気を流すことによる影響を明らかにするために、複数の条件下で IP と OP の挙動を追った。この実験では、電気の影響が骨格成長や光合成に対して数時間ですぐに表れると仮定し、実験を行った。

### 5.2.1. 実験方法

#### (1) 2 時間実験

実験水槽 2 および 3 において、条件を変えて 2 時間水槽を閉鎖し 1 時間毎に測定を行った。実験条件に関しては表 5-5 に示す。電気を流した実験においては、電気は 30 分前から流している。

表 5-5 2 時間実験の実験条件

実験	実験日	水槽	光量 ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )	水温 ( $^{\circ}\text{C}$ )	塩分濃度 (PSU)	電流密度 ( $\text{mA}/\text{m}^2$ )	開始時刻	終了時刻
昼間/電気なし	2009/6/25	3	200~210	26.9~27.1	33.6~33.7	0	12:00	14:00
昼間/電気あり	2009/6/25	3	200~210	26.4~26.8	33.6~33.8	50	15:00	17:00
夜間/電気なし	2009/6/23	3	0	25.5~26.5	33.3~33.4	0	21:47	23:47
	2009/7/2	3	0	25.4~25.6	33.4~33.8	0	21:25	23:25
夜間/電気あり	2009/6/24	3	0	24~24.8	33.2~33.4	50	20:50	22:50
昼間/電気なし	2009/6/25	2	200~210	25.1~26.1	33.5~33.7	0	15:00	17:00
	2009/10/16	2	200~210	23.8~25.3	33.8~34.2	0	11:15	13:15
昼間/電気あり	2009/8/5	2	200~210	24.8~25.1	33.9~34	50	12:30	14:30
夜間/電気なし	2009/6/24	2	0	25.1~25.2	33.2~33.4	0	20:20	22:20
夜間/電気あり	2009/6/23	2	0	25.8~26.5	33.3~33.4	50	22:20	0:20
	2009/7/2	2	0	25.1~25.7	33.6~33.8	50	21:55	23:55

#### (2) 4 時間実験

2 時間では、データ数が少ないことと電気の影響が表れにくいのではないかと考え、実験水槽 2 および 3 において、4 時間程度の実験を条件毎に行い比較した。実験条件に関しては表 5-6 4 時間実験の実験条件に示す。電気を流した実験においては、電気は 30 分前から流している。

表 5-6 4 時間実験の実験条件

実験	実験日	水槽	光量 ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )	水温 ( $^{\circ}\text{C}$ )	塩分濃度 (PSU)	電流密度 ( $\text{mA}/\text{m}^2$ )	開始時刻	終了時刻
昼間/電気なし	2009/7/8	3	200~210	25.7~25.9	34.0~34.2	0	12:00	16:00
昼間/電気あり	2009/9/9	3	200~210	24.7~26.4	34.1~34.4	50	12:00	16:05

## 5.2.2. 実験結果

グラフの横軸の時間は、IP・OPを算出するために用いた二つの測定値を採水した時間のちょうど中央の時刻を示している。正確な採水時間は詳細な測定値とともに付録の表 8-12 に記す。

### (1) 2時間実験

それぞれの実験結果を表 5-7 に示す。これらの値は、測定値3点から補正を行って出た値を用いている。同じ条件の実験が二つ以上あるものに関しては、平均値を用いている。その値を水槽ごとに分け、条件毎にグラフにしたものを図 5.2-1 に示す。

表 5-7 2時間実験の実験結果(平均値)

実験				IP	OP
条件	電気	実験日			
水槽2	昼間	×	2009/6/25	5.058	8.037
			2009/10/16	4.079	7.775
		○	2009/8/5	5.543	9.256
	夜間	×	2009/6/24	2.416	-5.113
		○	2009/6/23	1.908	-4.303
			2009/7/2	2.898	-4.159
水槽3	昼間	×	2009/6/25	7.171	10.42
		○	2009/6/25	6.989	10.353
	夜間	×	2009/6/23	2.366	-6.191
			2009/7/2	3.787	-5.882
		○	2009/6/24	2.295	-5.867

(単位：mmol・m<sup>2</sup>・h<sup>-1</sup>)

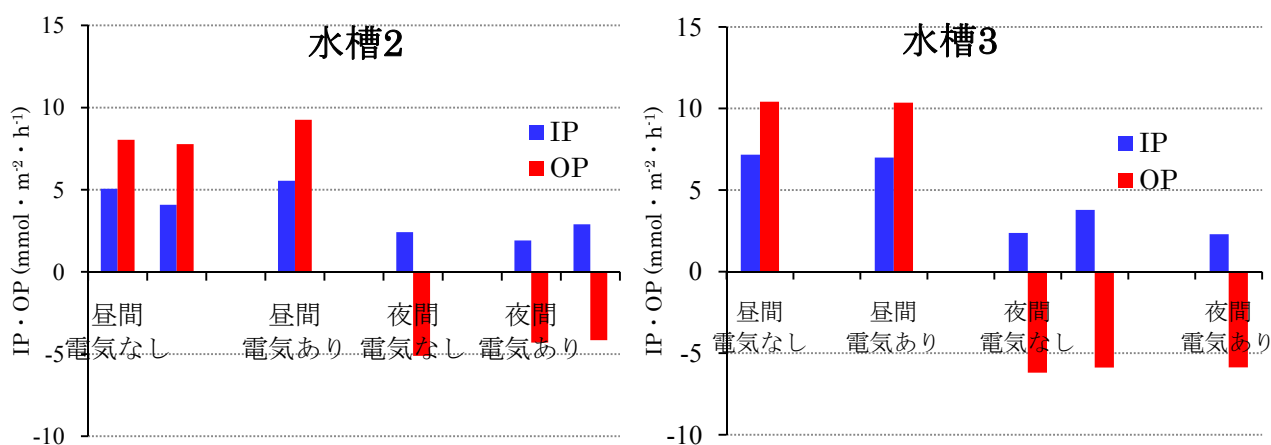


図 5.2-1 2時間実験の実験結果

この結果から、以下のことが分かる。

まず、電気を流すと値が大きくなる傾向にある。これは、ブランク実験と同じ挙動で、必ずしも増える訳ではなく、減っている場合もある。また、水槽ごとでは比較できないことは分かっていたが、同じ水槽で同じ条件でも、日にちが違くと値が変わってしまう。電気の有無による違いは日による違いとさほど変わらないため、比較は困難だと分かった。この実験によって、電気の影響は測れなかったが、それぞれの水槽や条件下での大体の値を把握することが出来た。

## (2) 4時間実験

それぞれの実験結果をグラフにしたものを図 5.2-2 に示す。これらの値は補正を行った結果である。

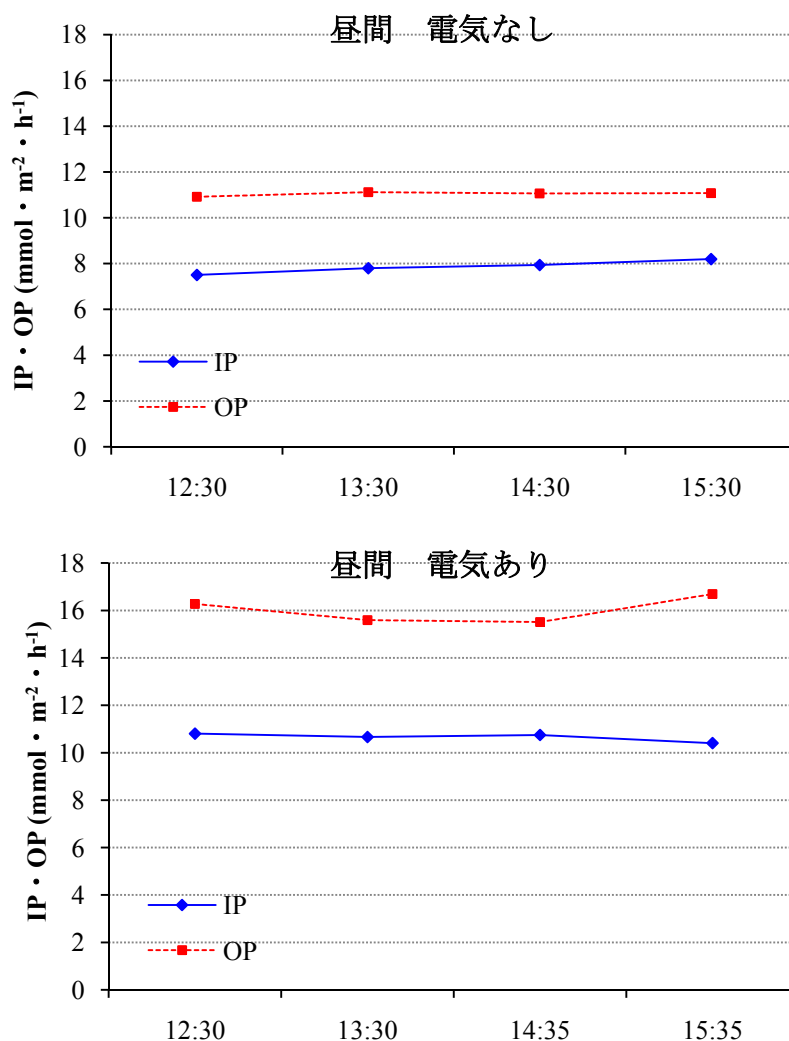


図 5.2-2 4時間実験



それぞれの結果で絶対値が違うのは、時期や水槽の違いによるものである。5.2 で述べたとおり、実験した日にちが違ったり、実験水槽が違い、そこにいるサンゴが違ったりすると絶対値の比較は難しくなる。ただし、もし電気の影響があるのならば IP・OP の値が時間経過ごとに増えていくなど、IP・OP の挙動に違いが出るはずであるが、4 時間連続で電気を流しても、挙動にほとんど違いは見られなかった。

### 5.2.3. 考察

短時間では、電気の影響は表れにくい。もっと長時間での影響を見る必要があると分かった。

また、生理活動や光の実験に比べて違いが出にくいことが分かる。つまり、電気は画期的に代謝を変えるのではなく、補助的な役割だと考える方が良い。その場合、どのような状態で補助的役割を果たすかを明らかにする必要がある。もしくは、どのような状態では成長阻害要因となるのかも明らかにすべきである。Goreau らは電気分解によるアルカリ化がサンゴの石灰化を促進しているのではと考察しているが<sup>15)</sup>、第3章の結果から、アルカリ化つまり pH 上昇による石灰化促進の可能性は低いと考えられる。

## 5.3. 短時間応答実験

条件毎の実験では、電気を流す時間が短かったことと異なる日に測定してしまったことから、電気の影響が見にくかったと考えられる。そのため、同じ日に電気を流さない状態から電気を流す状態へと変化させ、その時の IP と OP の変動を見ることで電気の影響を明らかにすることが出来ると考え、実験を行った。

### 5.3.1. 実験方法

実験水槽 2 および 3 において、全アルカリ度・全炭酸の測定を行った。実験の間は、ポンプにより水流を発生させ、ファンによって水温が急激に変化しないようにした。そして、実験水槽を閉鎖した状態の時に 1 時間毎に採水した。測定開始時は電気を流さず、測定開始から 2 時間経過後、電気を流し挙動を見た。電気を流す時間は 2 時間から 6 時間と幅がある。これは、電気の影響がすぐに出ると仮定して行った実験としばらくしてから影響が出ると仮定した実験があるためである。ただし、電気を流す時間が 3 時間以下のものに関しては、それ以降の測定にミスがあり中断したものである。実験時間の長いものに関してはサンゴへの悪影響を考え、途中で何度か水替えを行った。水替えに関しては 2.3.3.4 で示した方法と同じ方法を用いている。実験フローに関しては図 5.3-1 に示す。電気をかけた期間に関しては、黄色の棒矢印で示す。それぞれの実験条件に関しては表 5-8 に示す。

表 5-8 短時間応答実験の実験条件

実験	実験日	水槽	光量 ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )	水温 ( $^{\circ}\text{C}$ )	塩分濃度 (PSU)	電流密度 ( $\text{mA}/\text{m}^2$ )	開始時刻	終了時刻
短時間応答実験①	2009/9/28	3	200~210	24.3~26.1	34~35.1	0→50	11:50	15:55
短時間応答実験②	2009/8/21	3	200~210	25.1~26.3	33.9~34.3	0→50	13:10	18:15
短時間応答実験③	2009/7/6	3	200~210	25~25.9	34~34.5	0→50	12:00	18:00
短時間応答実験④	2009/9/3	3	200~210	25.1~26.0	34.3~35	0→50	10:30	18:45
短時間応答実験⑤	2009/9/3	2	200~210	24.5~25.6	34.5~34.9	0→50	10:55	19:05
短時間応答実験⑥	2009/9/9	2	200~210	24.9~26.2	34~34.3	0→50	11:15	19:30
短時間応答実験⑦	2009/8/18	2	0	24.3~25.3	33.7~34.1	0→50	22:30	4:23

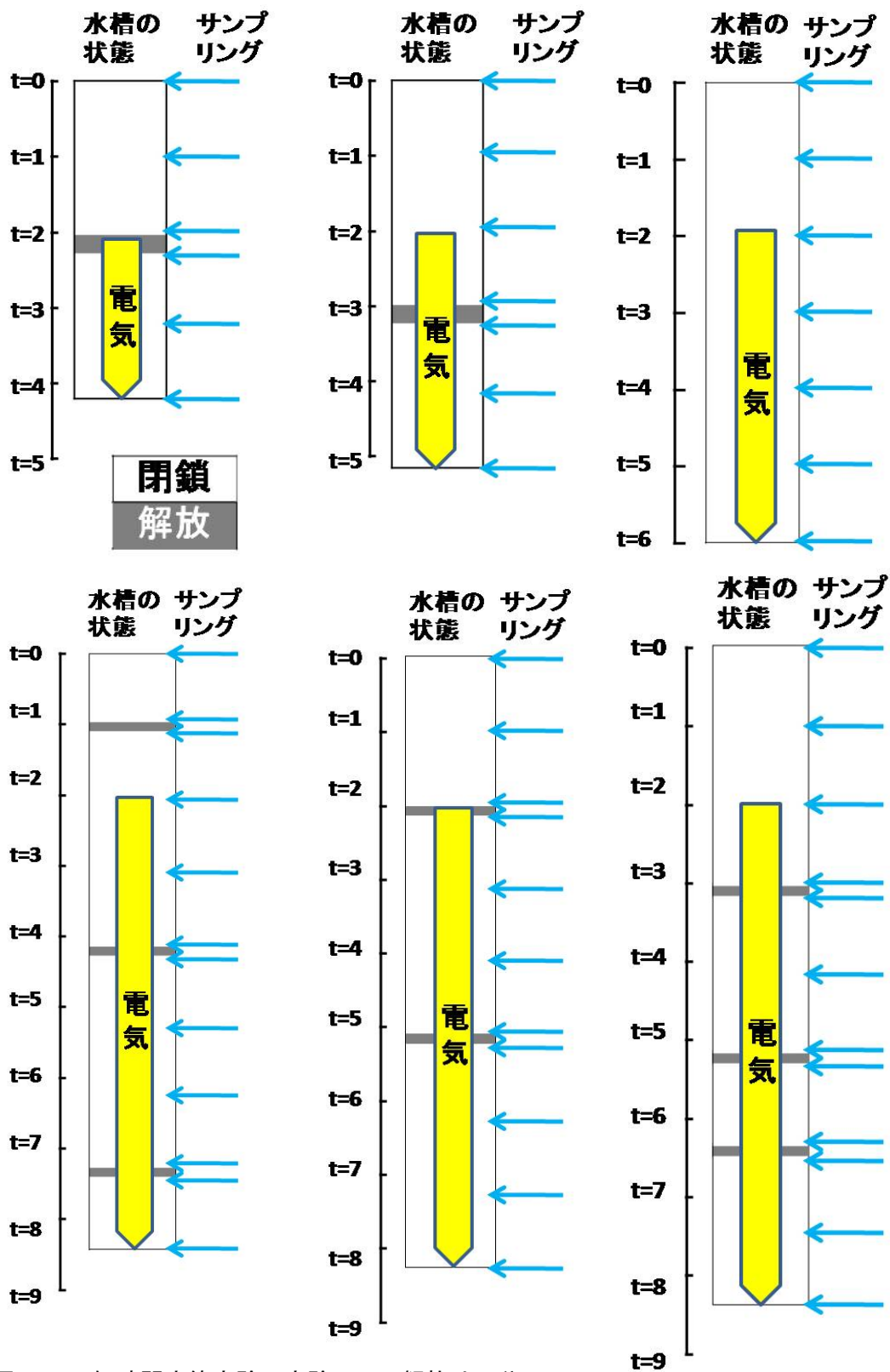


図 5.3-1 短時間応答実験の実験フロー(解放は5分)

(左上：短時間応答実験① 中央上：短時間応答実験② 右上：短時間応答実験③  
 左下：短時間応答実験④ 中央下：短時間応答実験⑤ 右下：短時間応答実験⑥)

### 5.3.2. 実験結果

それぞれの実験結果をグラフにしたものを図 5.3-2 に示す。これらの値は出来るだけ補正を行った結果である。グラフの横軸の時間は、IP・OP を算出するために用いた二つの測定値を採水した時間のちょうど中央の時刻を示している。正確な採水時間と詳細な測定値は付録の表 8-13 に記す。

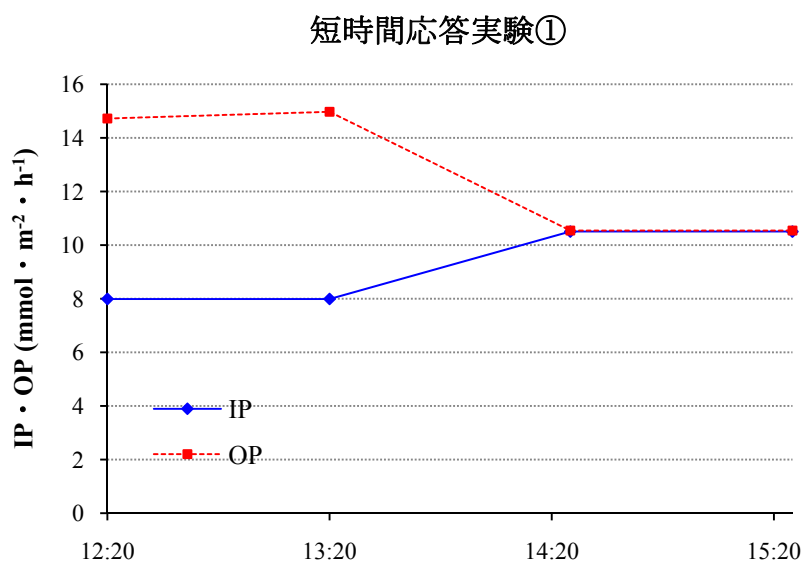


図 5.3-2.a 短時間応答実験①

この実験においては、電気を流すことで石灰化が促進され、光合成が阻害されたように見える。だが、ブランク実験から、電気を流した後 1 時間の値は信頼できないと言及したが、この実験においてもそういった電気を流すことでの影響がサンゴの代謝以外に起こっている可能性がある。

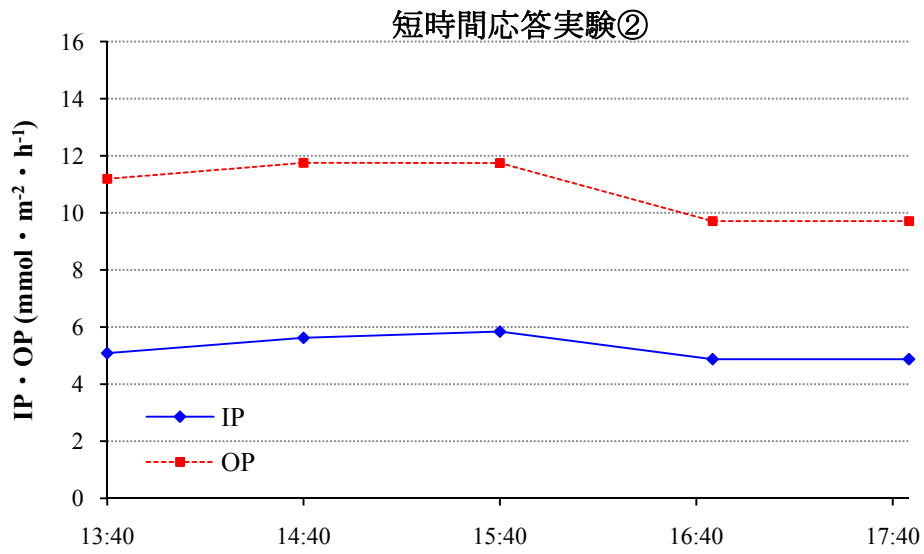


図 5.3-2.b 短時間応答実験②

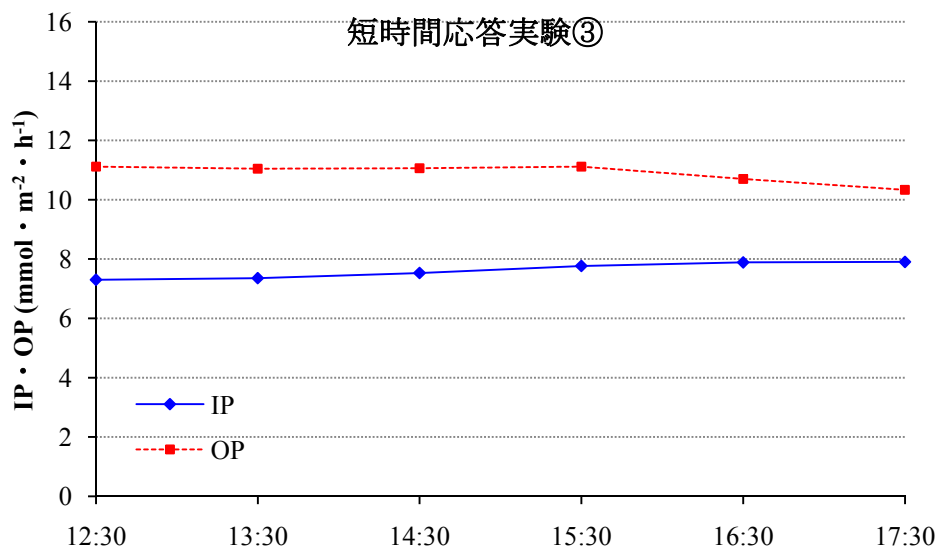


図 5.3-2.c 短時間応答実験③

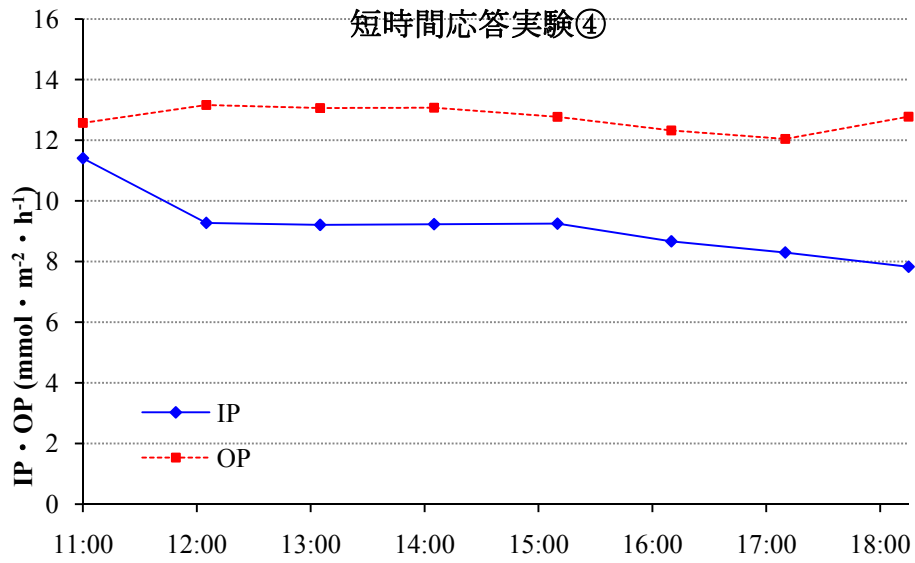


図 5.3-2.d 短時間応答実験④

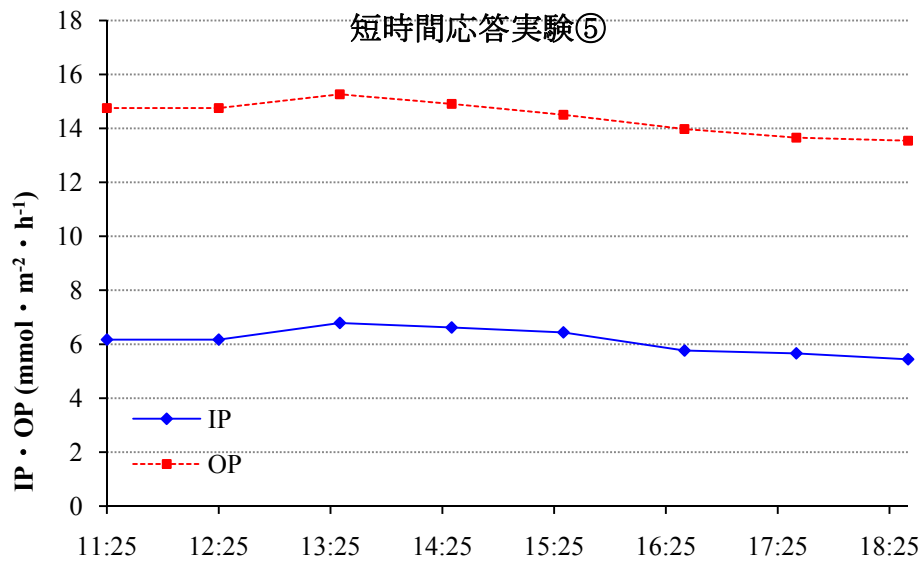


図 5.3-2.e 短時間応答実験⑤

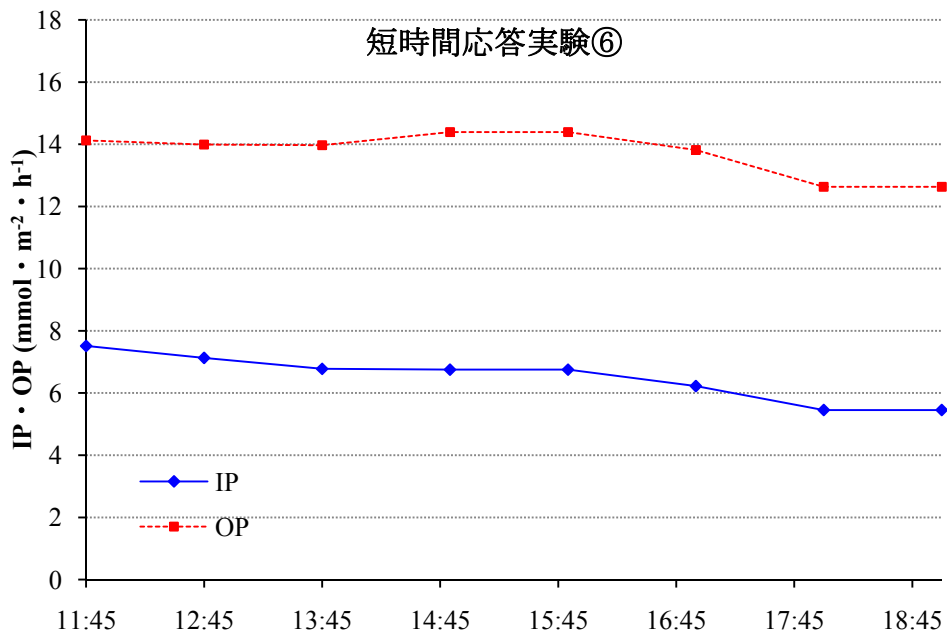


図 5.3-2.f 短時間応答実験⑥

電気を流した後に値が下がるという実験もあったが、誤差範囲もしくは測定ミスであると考えられる。いずれの結果も 14 時頃にピークを迎えて、夕方にかけて小さくなるという日周変動の影響はみられるものの、電気を流したことによる変化は見る事ができなかった。

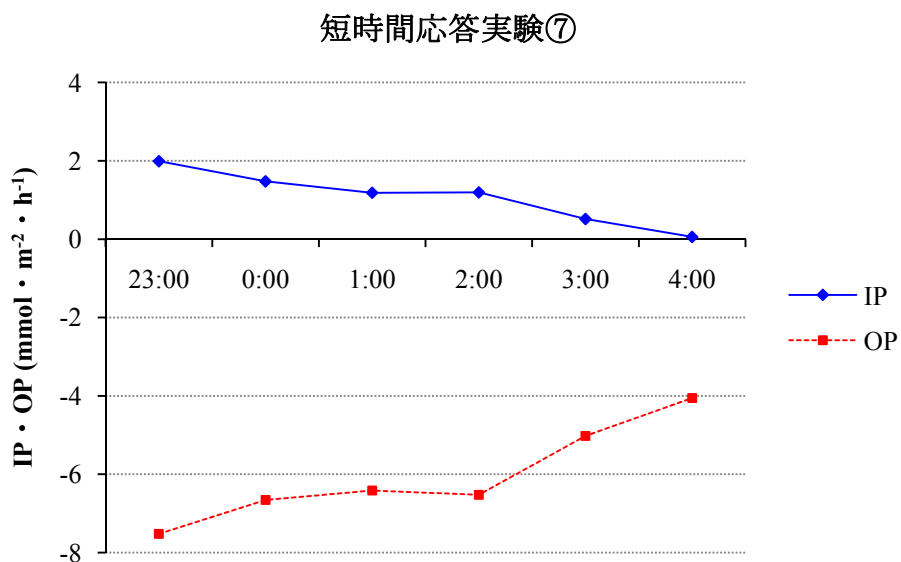


図 5.3-2.g 短時間応答実験⑦

夜間に行ったこの実験では、朝方にかけて、石灰化量・呼吸量が小さくなっている。

### 5.3.3. 考察

短時間応答では、電気は最大で6時間かけたが変化が見られなかったことから、サンゴの代謝における電気の影響が短時間で表れることはないと考えられる。また、もし数時間程度で表れるとしても、サンゴの生理活動の変動よりも微小な変化であるため、観測できない。よって、長時間の実験を行い、サンゴの生理活動を考慮した上で電気の影響の出現を見る必要がある。

夜間での短時間応答実験でも、日周変動実験で見られたような挙動を示している。また、4時の時点で、石灰化がほとんど行われなくなっていることが電気の影響である可能性も考えられるため、昼間の実験と同様に夜間の実験においても長時間電気を流し、日周変動を考慮した実験をする必要があると考えられる。



## 5.4. 日周変動実験

短時間応答実験の結果から、電気条件下でもサンゴには IP と OP の値が変化する日周変動があると確認された。第 3 章で行った実験でもそれは明らかである。そのため、24 時間測定を行うことにより、日周変動の中で電気の影響がどのように表れるかを明らかにしようとした。この実験では、12 時間程度電気を流すことにより電気の影響は表れると仮定した。

### 5.4.1. 実験方法

水槽 3 において、全アルカリ度・全炭酸の測定を行った。実験の間は、ポンプにより水流を発生させ、ファンによって水温が急激に変化しないようにした。採水は 1 時間毎に行い、水の交換を 1 時間毎に停止と交換を繰り返すことで、2 時間に 1 時間分の測定を繰り返した。これを 24 時間通して行った。実験のフローは図 3.2-1 に示す。

これを、電気を流さない状態で 3 回、電気を流した状態で 3 回行った。実験条件は表 5-9 に示す。電気を流した実験では、1 日中電気を流すもの、昼間電気を流すもの、夜間電気を流すものの 3 条件で実験を行った。日周変動実験⑤では実験の間、つまり 24 時間ずっと 50 mA/m<sup>2</sup> の電気を流していた。日周変動実験⑥では、昼間 11 時から 20 時までの間だけ 50 mA/m<sup>2</sup> の電気を流し、日周変動実験⑦では夜間の 20 時から 8 時までの間だけ 50 mA/m<sup>2</sup> の電気を流していた。

表 5-9 日周変動実験の実験条件

実験	実験日	水槽	光量(昼間) ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )	水温 ( $^{\circ}\text{C}$ )	塩分濃度 (PSU)	電流密度【期間】 (mA/m <sup>2</sup> )
日周変動実験①	2009/7/18	3	200~210	24.4~25.7	33.7~34.5	0
日周変動実験②	2009/7/28	3	200~210	24~27.9	33.3~34	0
日周変動実験③	2009/8/18	3	200~210	24.2~26.6	33.7~34.2	0
日周変動実験④	2009/12/16	3	200~210	25.0~26.1	33~33.7	0
日周変動実験⑤	2009/9/18	3	200~210	24.3~26.1	34~34.7	50【終日】
日周変動実験⑥	2009/10/4	3	200~210	24.1~25.5	32.9~34.1	50【昼間】
日周変動実験⑦	2009/10/13	3	200~210	24.8~26.1	33.6~33.9	50【夜間】
日周変動実験⑧	2009/12/18	3	200~210	24.1~25.7	33.6~34	50【終日】

また、補正を行って測定誤差を出来るだけなくすために、水槽の閉鎖を 2 時間行い、水の交換を 1 時間行うという操作を繰り返し行って測定した。採水は、上記の実験と同じで水槽 3 において 1 時間毎 24 時間通して行った。実験フローを図 3.2-2 に示す。

この実験を 24 時間通して電気を流さない状態と流した状態の 2 パターン行った。電気条

件は  $50\text{mA}/\text{m}^2$  であり、電気は実験開始より 2 時間前から流し始めた。実験条件は表 5-9 の日周変動実験④および日周変動実験⑧に記す。

電気を流さない実験は 3.2 の日周変動実験で扱ったものと同じであるが、電気の有無で比較するためにこの章でも扱う。

### 5.4.2. 実験結果

それぞれの実験結果を図 5.4-1 に示す。実験④と⑧に関しては補正した値を用いている。グラフの横軸の時間は、IP・OP を算出するために用いた二つの測定値を採水した時間のちょうど中央の時刻を示している。正確な採水時間と詳細な測定値は付録の表 8-9 に記す。

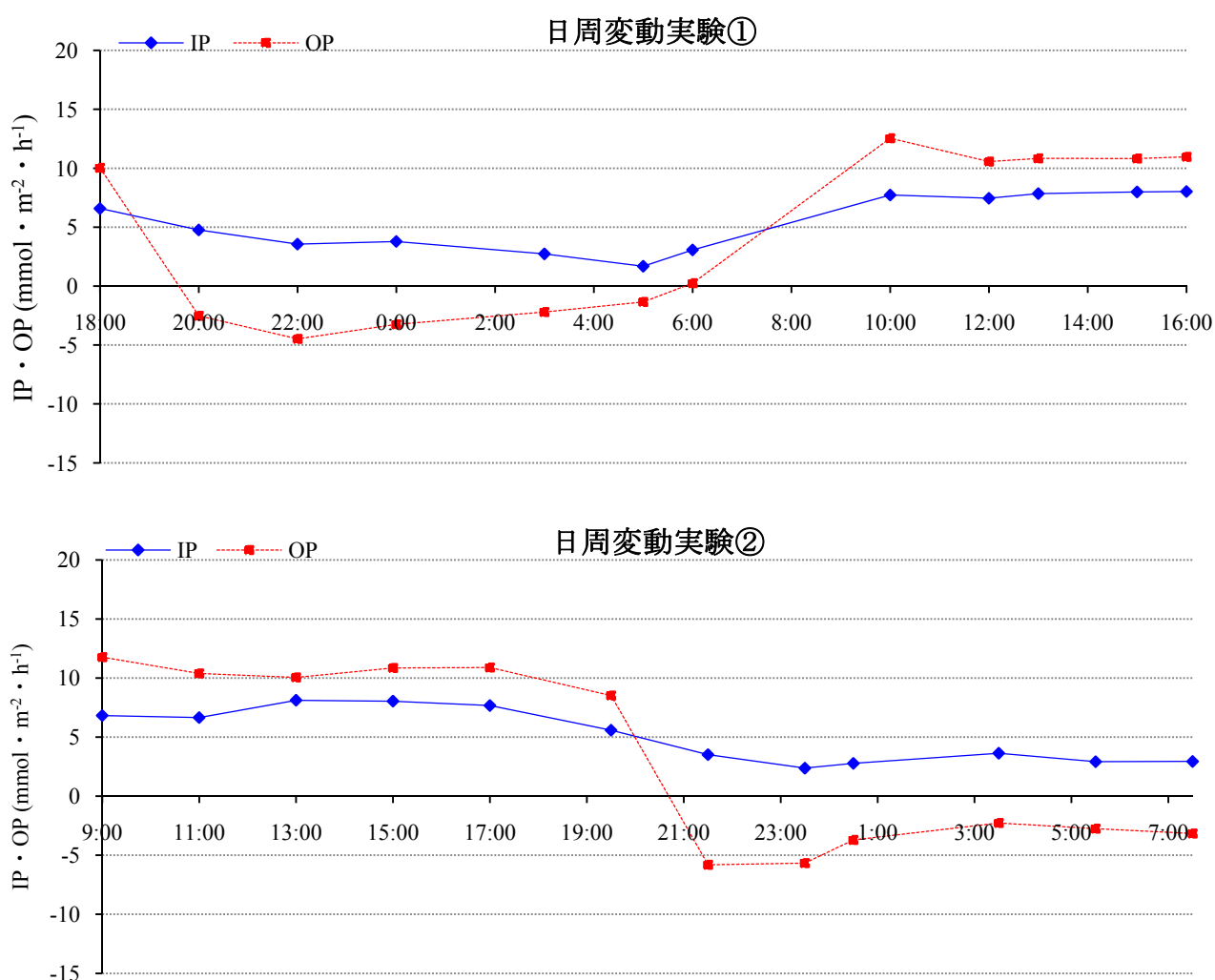


図 5.4-1a 日周変動実験①, 日周変動実験②

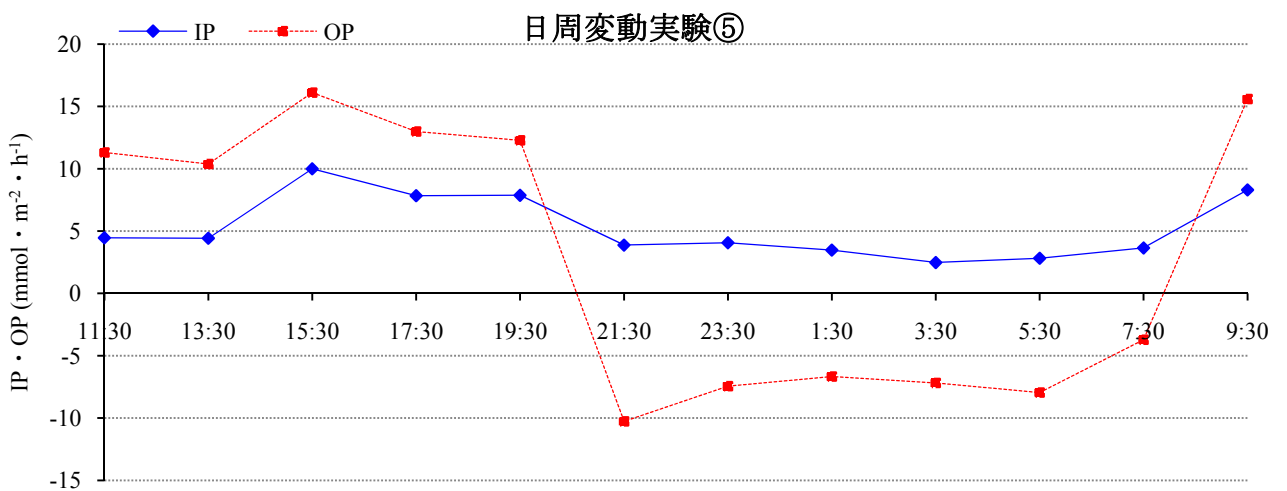
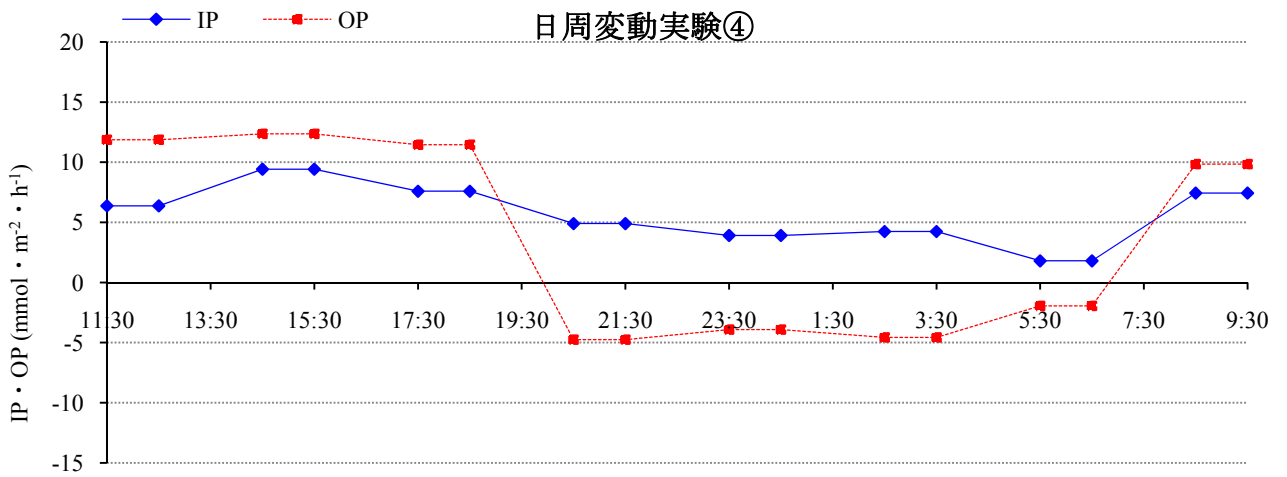
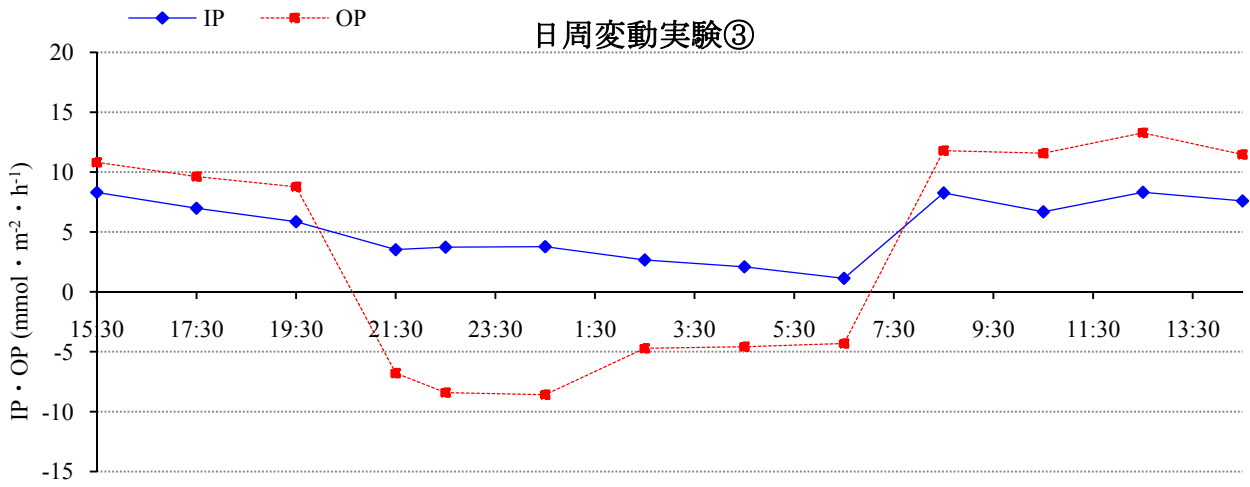


図 5.4-1.b 日周変動実験③, 日周変動実験④, 日周変動実験⑤

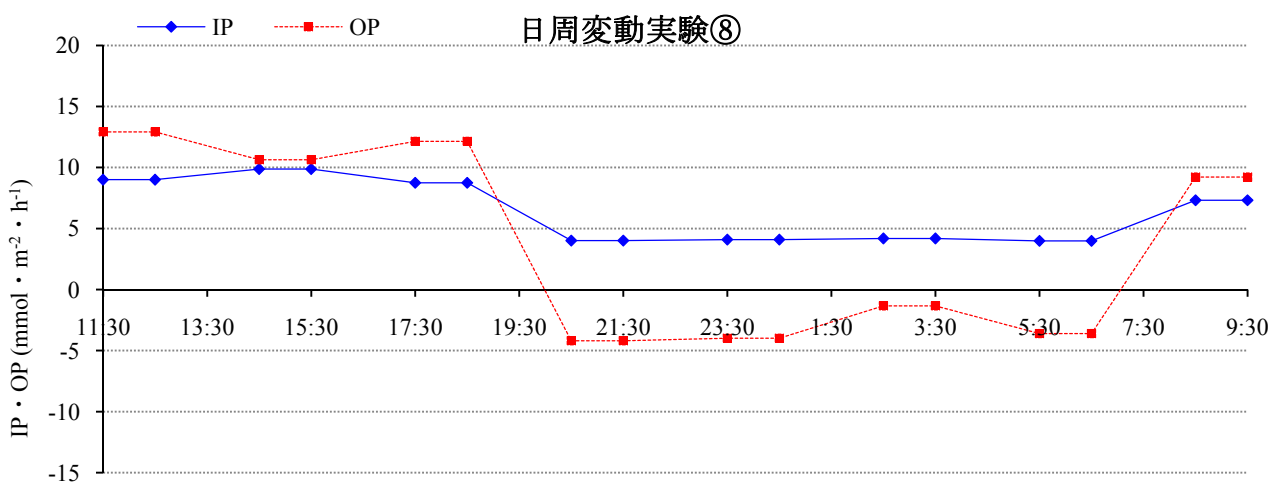
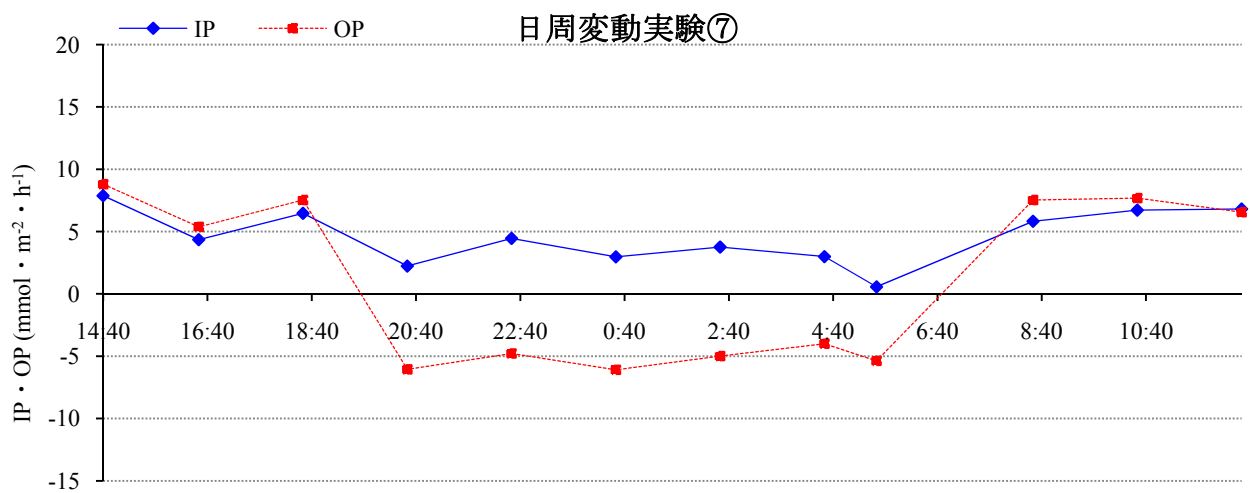
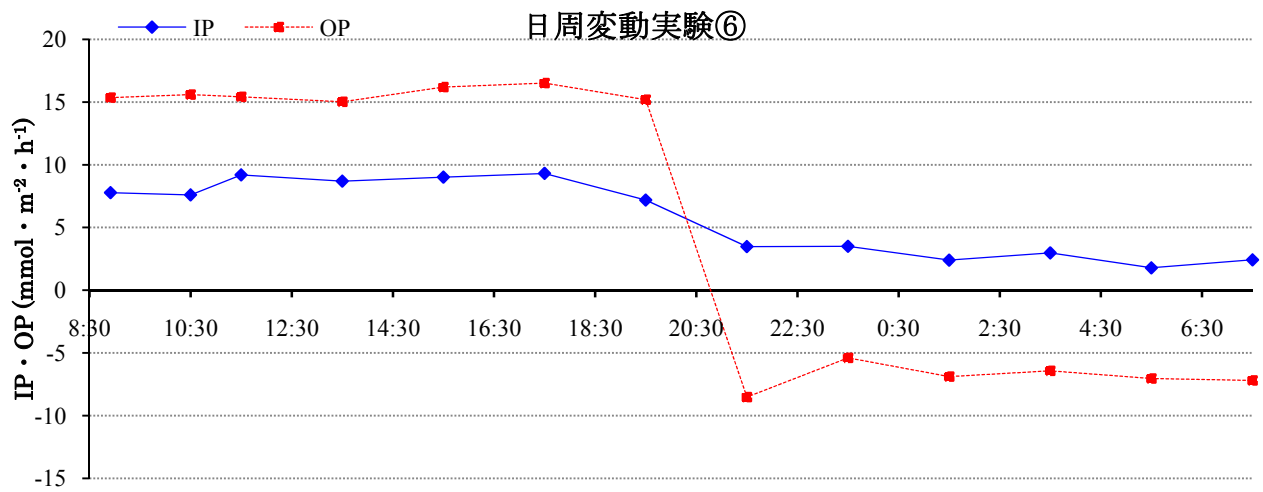


図 5.4-1.c 日周変動実験⑥, 日周変動実験⑦, 日周変動実験⑧

⑤⑥に関しては、水槽内に藻などが繁殖したことと、サンゴの健康状態が良かったために、値が大きくなったのだと考えられる。⑦に関しては水槽清掃のすぐ後だったこともあり、光合成と石灰化ともに阻害されている。日周変動の傾向については 3.2 で記した通りである。電気の有無による違いとしては、明け方の IP の減少が、電気を流した時は緩やかになる傾向にあることが挙げられる。

### 5.4.3. 考察

電気を流すと、昼間の IP と OP の比が変わっている可能性がある。比較のため、最も信頼性の高い④と⑧の実験結果を比較する。IP と OP の総和を  $S_{IP} \cdot S_{OP}$  として、それぞれの昼間と夜間の値を算出し、表 5-10 に示すような計算を行った。

表 5-10 IP・OP の比

	実験④ (電気なし)	実験⑧ (電気あり)
(A) $S_{IP}$ (昼間) / $S_{OP}$ (昼間)	67.7	77.8
(B) $S_{IP}$ (夜間) / $S_{IP}$ (昼間)	48.2	46.6

(%)

ここから、有意な差が見られるのは(A)  $S_{IP}$  (昼間) /  $S_{OP}$  (昼間) (昼間の石灰化量を昼間の光合成量で除したもの) であることが分かる。逆に、(B)  $S_{IP}$  (夜間) /  $S_{IP}$  (昼間) (夜間の石灰化量を昼間の石灰化量で除したもの) は違いがほぼ見られない。

(A)は、光合成量あたりの石灰化量を示している。つまり、光合成量がほぼ同じとき、この値が電気の有無によって差が表れなければ、昼間の石灰化量は光合成量に依存しており、電気の影響はないと言える。これは、第 4 章の光の実験で描いた光量と IP・OP の関係のグラフからも明らかである。

この実験における電気の有無による(A)の違いは 10%程度である。しかし、実験④と実験⑧の昼間の光合成量はどちらもほぼ同量であり、昼間の OP の平均値の差は  $0.015 \text{ mmol/m}^2/\text{h}$  で、平均値と比べても 1.3%ほどである。そのため、OP 値の差はほとんどないものと考えられる。一方で、IP の平均値の差は  $1.03 \text{ mmol/m}^2/\text{h}$  程度であり、平均値の 12%程度になる。実験④と実験⑧に関しては誤差を少なくする補正作業も行っているため、OP の違いは十分誤差の範囲内だが、IP の違いは誤差でない可能性が高い。そして、この両実験が 2009 年 12 月 16~17 日と 2009 年 12 月 18~19 日で行われていることから、サンゴの健康状態や水槽の状態の違いはほぼないものと考えられる。そのため、この違いは電気の影響によるものである可能性がある。電気を流した実験⑧が流していない実験④に比べ、光合成量に対する石灰化量が多いため、電気の影響として石灰化促進が示唆される。夜間についても議論する。昼間の石灰化量が増えているということは、その分昼間にエネルギーを多く

使っているはずである。しかし、夜間においても電気を流した実験での石灰化量が微小ではあるが多かった。IP 平均値の差は  $0.35 \text{ mmol/m}^2/\text{h}$  程度で、夜間の IP 平均値の 9%程度である。ここから、夜間にも石灰化促進の可能性があると考えられる。

さらに、1日の有機生産量と無機生産量の割合を知るために、実験④と⑧の IP と OP の相関図を図 5.4-2 に示す。

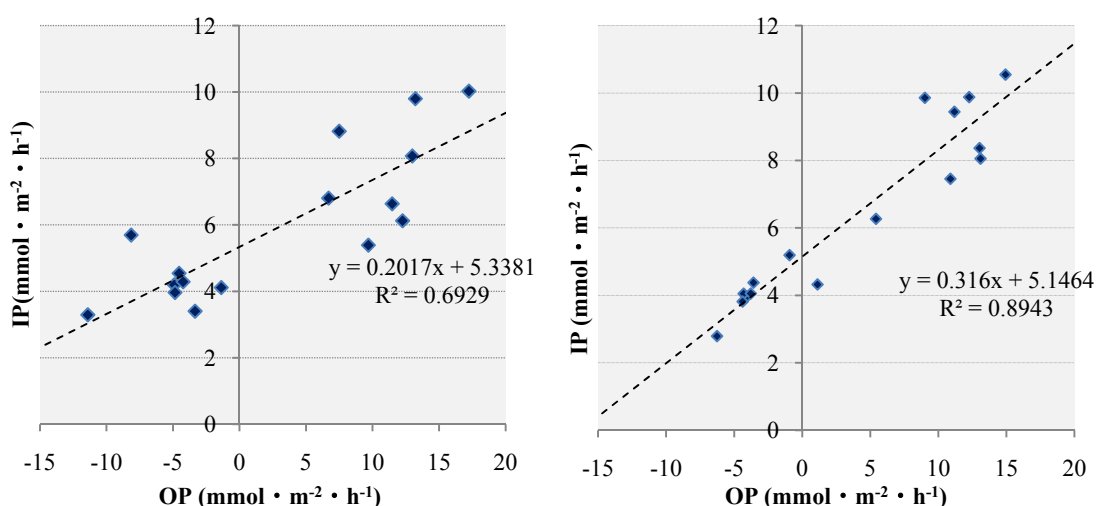


図 5.4-2 IP と OP の相関(左:実験④ 右:実験⑧)

図 5.4-2 から、実験④では石灰化と光合成の比が 1 : 5 程度であるのに対して、実験⑧では 1 : 3 程度になっていることが分かる。よって、有機生産量に対する無機生産量が電気を流した実験においては大きくなることが示唆される。そして、その原因は上記の考察から、石灰化促進によるものと考えられる。

実験④と実験⑧の夜間における IP の挙動を見ると、電気を流した実験⑧は第 3 章で述べたような朝に近づくとも IP の値が減少するという日周変動が見られない。そのため、電気が概日リズムに影響を及ぼす可能性があると言える。そのため、概日リズムへの影響を見るために、(B)の昼間と夜間の IP の比を算出した。第 3 章から、昼間と夜間の IP の挙動を概日リズムが支配している可能性があるからである。しかし、(B)の値からは、電気の有無によって違いはほとんど見られない。ここから、光の明暗によって支配されるような概日リズムに関して電気は影響を及ぼさず、朝方の微小な減少のような概日リズムもしくは自由継続リズムに対して影響を及ぼす可能性があると考えられる。

これらの結果から、電流がサンゴに与える影響として以下の仮説が考えられる。ここで言及するエネルギーとは光合成や摂食によって得られたエネルギーのことを指す。

- I. 電流によって、小さなエネルギー供給で石灰化を行うことができる。
- II. 電流によって、エネルギーが石灰化へより多く使われるようになる。
- III. 電流によって、生体リズムが変化する。

これらの仮説を検証するためには、光に支配される概日リズムの影響を最小限にし、サンゴが同程度のエネルギーを持った状態で、電気の有無により石灰化量が変わることが好ましい。そこで、第3章および第4章で判明したサンゴのエネルギー貯蓄量の減少を暗条件下で見ることで、これらの仮説を検証できると考えた。

## 5.5. 電気による石灰化促進に関する検証

日周変動実験の結果から、石灰化が促進されていると示唆された。その結果に基づくと、以下の三つの仮説が考えられる。

- I. 電流によって、小さなエネルギーによって石灰化を行うことが出来る。
- II. 電流によって、エネルギーが石灰化へより多く使われるようになる。
- III. 電流によって、生体リズムが変化する。

これらの仮説を検証するために、サンゴを暗条件に置き、褐虫藻によるエネルギー生産をなくした状態で石灰化量の推移を調べた。もし、IかIIの仮説が正しければ、一定のエネルギー量に対して石灰化が多く起こるはずであり、全体の石灰化量は多くなるはずである。しかし、Iであればエネルギーが尽きるのは遅くなるはずなので、電気を流さない条件のものと比べるとサンゴが石灰化を行わなくなるまでの期間は長くなるはずである。一方、IIでは、エネルギーを早く消費してしまうため、サンゴが石灰化を行わなくなるまでの期間は短くなるはずである。もし、石灰化が起こらなくなるまでの期間が変わらないようならば、どちらも起こっている可能性があり、石灰化量が電気の有無で変わらないのであれば、別の仮説を考える必要がある。また、IIIに関しては、時間経過を追うことで糸口が掴めるものと考えられる。



### 5.5.1. 実験方法

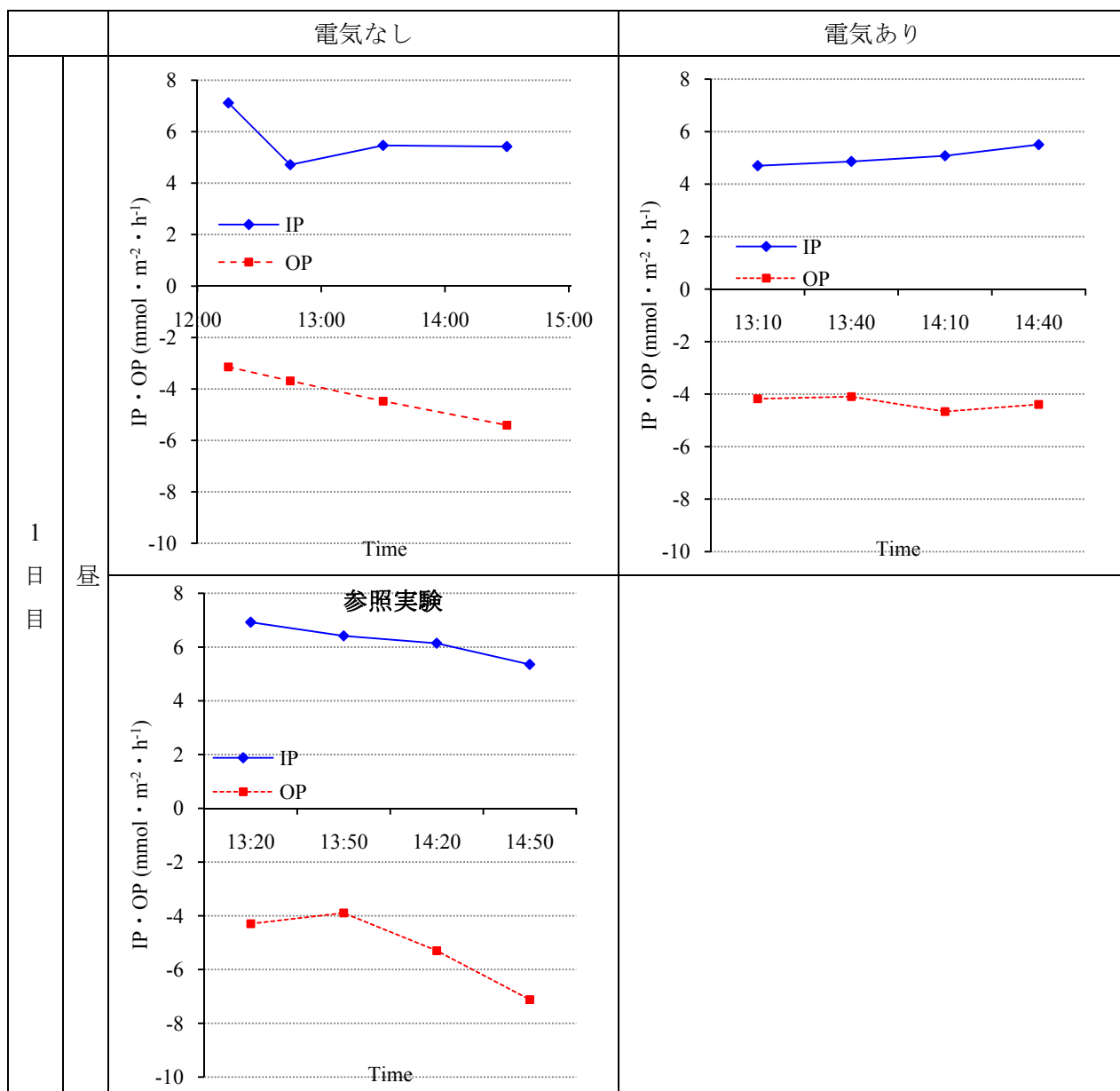
実験水槽 3 をアルミホイルで囲い、3 日間暗条件にした。その状態で昼と夜に水槽を数時間閉鎖し、30 分もしくは 1 時間毎に測定を行った。それらの値から、その日の平均的な IP・OP 値を算出した。計測誤差の補正を行うため、測定は一度に 5 回行った。この実験を電気ありと電気なしの 2 条件で行い、その値を比較した。12 月 22 日の夜の回は測定することが出来なかったため、2010 年 1 月 14 日に暗条件実験を追加実験として行い、1 日目の昼と夜の値を参照実験として載せた。また、3.2 の暗条件実験の結果も参考値として載せる。

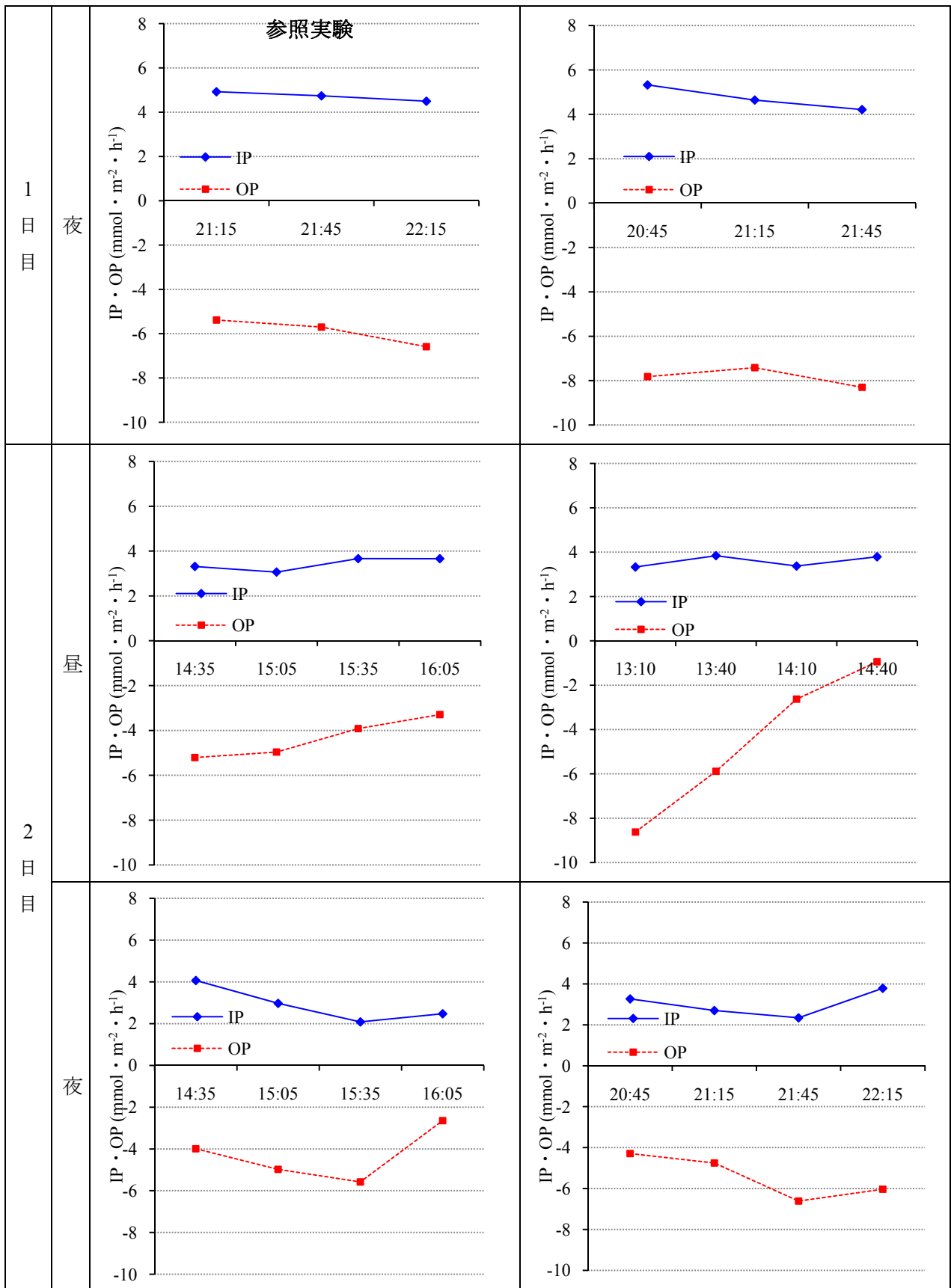
表 5-11 暗条件連続実験の実験条件

実験		実験日	水槽	光量 ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )	水温 ( $^{\circ}\text{C}$ )	塩分濃度 (PSU)	電流密度 ( $\text{mA}/\text{m}^2$ )	
電 気 な し	暗条件 1 日目 昼	2009/12/22	3	0	25~25.6	34.0~34.8	0	
	暗条件 1 日目 夜	—	—	—	—	—	—	
	暗条件 2 日目 昼	2009/12/23	3	0	25.7~26.5	33.8~34.2	0	
	暗条件 2 日目 夜	2009/12/23	3	0	25.1~26.0	34.1~34.2	0	
	暗条件 3 日目 昼	2009/12/24	3	0	26.3~27.2	34.1~34.4	0	
	暗条件 3 日目 夜	2009/12/24	3	0	33.7~34.1	25.6~25.9	0	
電 気 あ り	暗条件 1 日目 昼	2010/1/6	3	0	25.2~26.0	34.5~35.5	50	
	暗条件 1 日目 夜	2010/1/6	3	0	25.2~25.4	33.7~34	50	
	暗条件 2 日目 昼	2010/1/7	3	0	25.6~25.7	34.1	50	
	暗条件 2 日目 夜	2010/1/7	3	0	24.5~25.7	34~34.1	50	
	暗条件 3 日目 昼	2010/1/8	3	0	24.8~25.3	34~34.2	50	
	暗条件 3 日目 夜	2010/1/8	3	0	24.8~25.3	34~34.1	50	
電 気 な し	参照実験							
	暗条件 1 日目 昼	2010/1/14	3	0	25.0~25.2	33.9	0	
	暗条件 1 日目 夜	2010/1/14	3	0	24.7~25.4	33.7~33.9	0	
電 気 な し	参考値							
	暗条件実験 昼	2009/10/27	3	0	25.4~26.1	33.8~34.1	0	
	暗条件実験 夜	2009/11/21	3	0	24.5~25.4	33.2~33.3	0	

### 5.5.2. 実験結果

電気ありと電気なしの日変動を図 5.5-1 に記す. この値は連続する測定値 5 点から測定期間の IP・OP の補正值である. グラフの横軸の時間は, IP・OP を算出するために用いた二つの測定値を採水した時間のちょうど中央の時刻を示している. 正確な採水時間と詳細な測定値は付録の表 8-11 に記す.





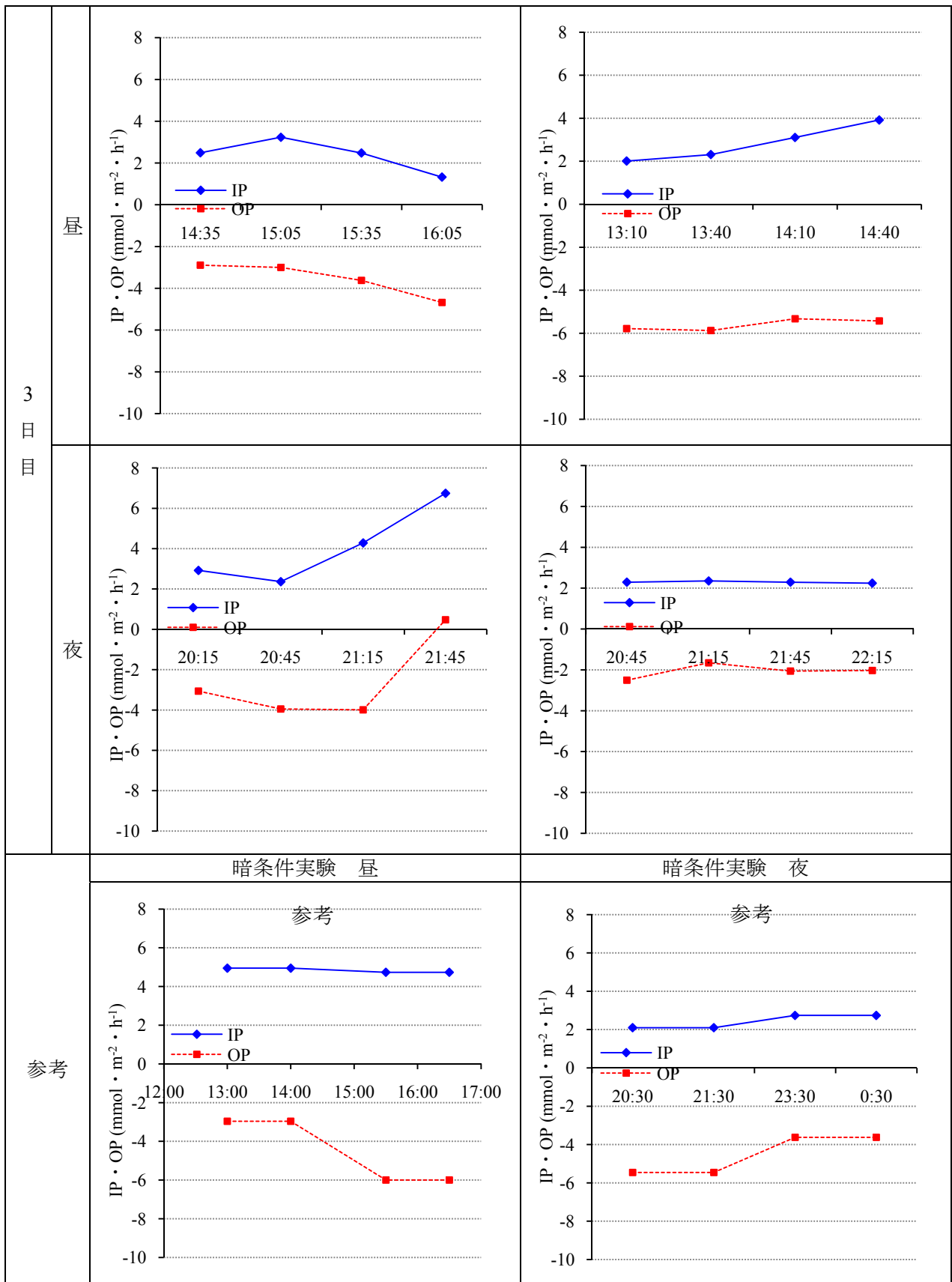


图 5.5-1 暗条件連続測定実験

これらの実験は同じ時間帯で、常に同じ光条件であるので、ほぼ一様の変動をするはずである。3.2 からも暗条件のこれらの時間帯はほぼ一様であり、昼間および夜間の IP の値を代表できると考えられる。実際にほとんどの実験において、IP はあまり大きな変動がない。よって、上記の実験結果グラフの挙動から、異常値と思われるものを取り除き、各条件下の各時間帯での IP と OP を算出したものを表 5-12 に示す。

表 5-12 暗条件連続測定実験の実験結果

	IP	OP	IP	OP
	電気なし		電気あり	
暗条件 1 日目 昼	5.59	-4.43	5.04	-4.33
暗条件 1 日目 夜	NA	NA	4.64	-7.41
暗条件 2 日目 昼	3.426	-4.345	3.58	-4.52
暗条件 2 日目 夜	2.90	-4.34	3.43	-5.00
暗条件 3 日目 昼	2.38	-3.55	2.84	-5.60
暗条件 3 日目 夜	2.36	-3.95	2.29	-2.06

(単位：mmol・m<sup>-2</sup>・h<sup>-1</sup>)

参照実験の結果と参考値も表 5-13 に載せる。

表 5-13 参照実験の結果および参考値

	IP	OP
参照実験		
暗条件 1 日目 昼	6.14	-5.30
暗条件 1 日目 夜	4.74	-5.70
参考値		
暗条件実験 昼	4.84	-5.45
暗条件実験 夜	2.42	-4.54

(単位：mmol・m<sup>-2</sup>・h<sup>-1</sup>)

比較のために、水槽 3 における通常の光条件 200~210μmol/m<sup>2</sup>/s で実験した結果から、昼間と夜間の IP と OP の平均値を表 5-14 に示す。

表 5-14 通常の光条件での IP・OP

	IP	OP
昼間	7.41	10.87
夜間	2.98	-5.18

(単位：mmol・m<sup>-2</sup>・h<sup>-1</sup>)

参照実験から、暗条件 1 日目の昼間と夜間の IP の比を求め、本実験の暗条件 1 日目の昼の値から暗条件 1 日目の夜の IP の概算値を算出した。その IP の値を含めた本実験の IP の変動をグラフにした。それを図 5.5-2 に示す。

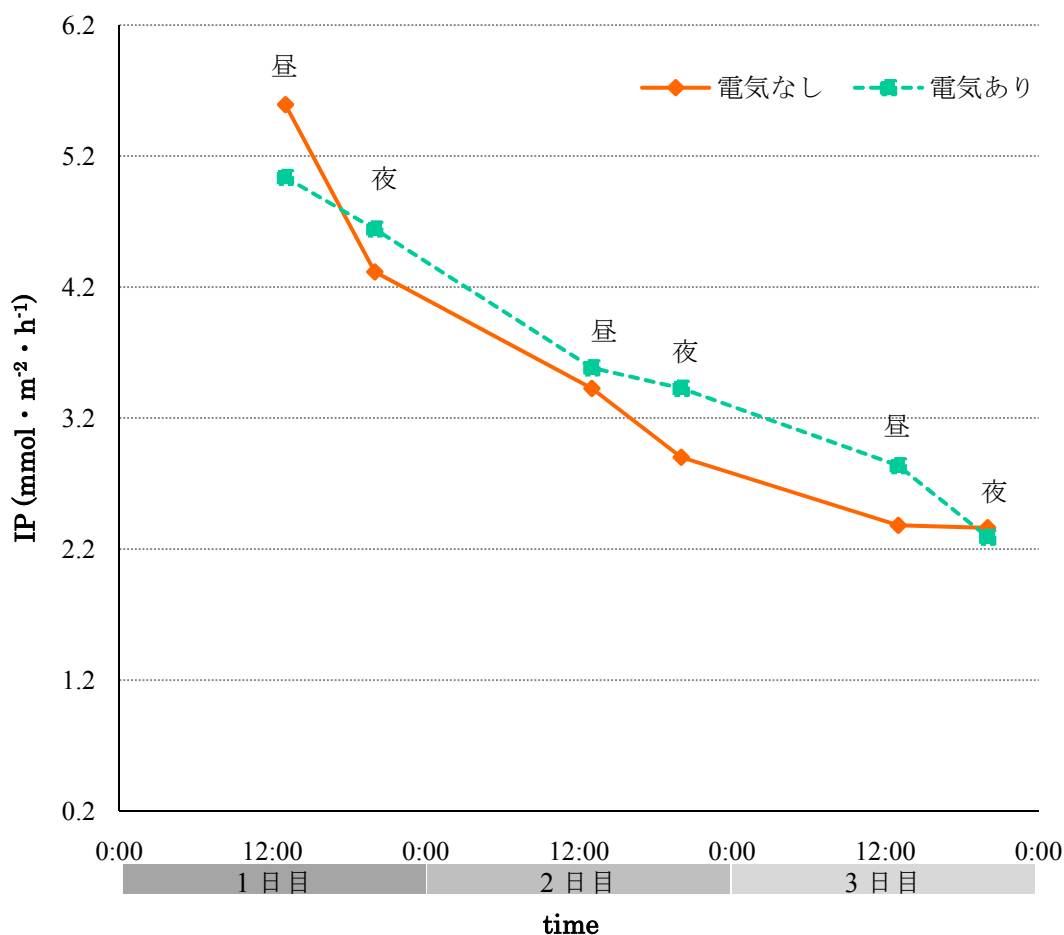


図 5.5-2 暗条件下における IP の挙動(電気の有無での比較)

電気の有無にかかわらず、日にちが経つにつれて、IP の値が減少している。暗条件の 1 日目昼の値は通常時の夜間よりも大きいため、日周変動の影響が見られる。しかし、暗条件が続くことにより、徐々に石灰化量が少なくなっていく。しかし、電気を流している実験では、1 日目の昼と 3 日目の夜以外は電気を流さない実験よりも IP が大きな値を示している。また、電気の有無で挙動が違う。電気を流さない実験ではカーブを描いて減少しているように見えるのに対し、電気を流した実験では、ほぼ直線状に減少していくように見える。そして、最後の 3 日目の夜には電気の有無で IP の大小が逆転する。

### 5.5.3. 考察

本実験から、電気条件下では暗条件で日周変動があまり見られないと示唆される。それは、図 5.5-2 で見られたように電気の有無で挙動が違ってくるからである。電気を流していない実験では、石灰化量はカーブを描いて減少しているように見えるが。これはつまり、昼から夜にかけての減少率より夜から昼にかけての減少率が低いことを示している。これは、第3章で確認された自由継続リズムによるものと思われる。ただし、日数が経つにつれ、減少率も低下しており、3日目の夜では、このリズムによる影響が見られなくなっている。しかし、電気を流した実験では、ほぼ直線上に減少しているように見え、減少率の増減の挙動が電気を流さなかった実験と違う。そこから、日周変動が見られないといえる。そのため、電気によって自由継続リズムが打ち消されていると考えることが出来る。これは、仮説Ⅲを支持する結果である。

こうした変動をより分かりやすくするために、各実験での昼から夜および夜から昼の減少率を計算した。2点間での減少量をその間の時間と先の値で割り、それぞれの減少率(%/h)を算出し、それをグラフにしたものを図 5.5-3 に示す。

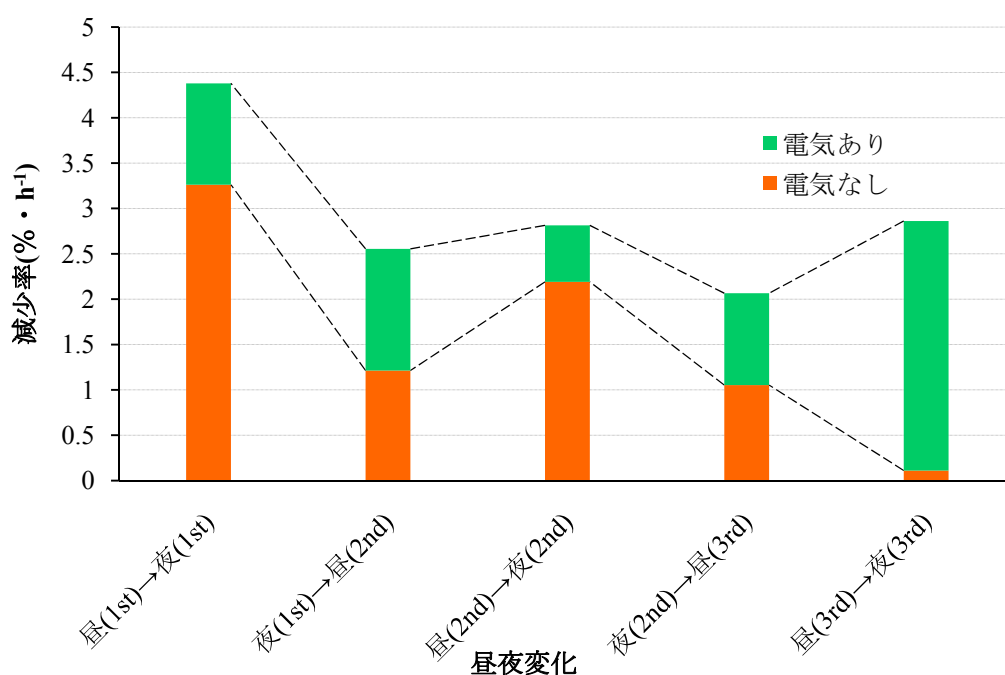


図 5.5-3 電気有無での昼夜減少率の比較(カッコ内は日にちを表す)

3日目の昼から夜にかけての挙動以外をまず議論する。夜間から昼間にかけての減少率はほぼ同程度だが、昼間から夜間にかけての減少率は電気を流さない実験の方が明らかに大きくなっている。このことと第3章での自由継続リズムの傾向から、電気なしの条件では昼から夜になる時は石灰化を抑制し、夜から昼になる時は石灰化を促進する生体リズムがあると考えられる。しかし、エネルギーが不足しているために、夜から昼にかけても

減少してしまうのだと考えられる。一方、電気ありの条件では、石灰化を抑制するリズムがないために、減少率は低いままであると考えられる。3日目の昼間から夜間への減少率については、電気を流していない実験ではほぼ見られなくなっている。しかし、電気を流した実験の値は、電気を流していない実験の昼から夜にかけての減少率と同じくらいの高い値を示している。このことから、3日目の夜の挙動として、電気なし条件では、概日リズムがなくなり、継続して同程度の石灰化を行っていた可能性が考えられる。電気あり条件では、図 5.5-2 からほぼ一直線上に減少していると考ええると、石灰化量自体が小さくなったため、減少量と比べた減少率が高い値を示したものと考えられる。

また、図 5.5-2 から3日目までの IP の値は電気を流した実験の方が大きいと分かる。そのため、その間では石灰化促進と呼べる状態であったと示唆される。1日目の IP 値に関する議論は、減少率から推測できる。夜から昼にかけての減少率は電気の有無にかかわらずほぼ同程度であったことから、電気あり条件の実験の方が初期値は低かったものと考えられる。本章の日周変動実験から、電気の有無で昼夜での IP の比がほとんど変わらないこと、また第3章で光合成と石灰化量にはある程度の相関があることから、電気あり条件の実験の方が前日の石灰化量および光合成量は低かったと考えられる。それにもかかわらず、石灰化量が増加したことから、石灰化促進の可能性があるとと言える。しかし、3日目以降の挙動は確認できず、それ以上続けた場合の石灰化量の総和は確認できない。そこで、3日目の夜の IP の値に注目する。3日目の夜には、電気を流した実験の IP 値が電気を流さないものに比べ小さくなっている。減少の挙動からも、その先に電気を流した実験の石灰化量が流していない実験を下回る可能性を示唆している。ここから、仮説 I と II を検証する。

I ではより小さなエネルギーで石灰化を行えると考えられるため、同じエネルギー貯蓄からより多くの石灰化を行えるはずであり、II では石灰化が強制的に促進されるため、エネルギー対石灰化量の比率は変化しないと考えられる。そのため、本実験の結果はより仮説 II に近いものであるということが出来る。

電気による石灰化促進のメカニズムとして、以下の仮説を考えた。自由継続リズムが電気によって狂わされることによって、石灰化の昼夜での増減がなくなり、常に一定の割合でエネルギーが消費される。さらに、電気が光のように ATPase を活発化させる働きを持ち、ATP の量は光合成量によって既定されていると仮定すると、石灰化は促進されるが ATP の量が減少すると石灰化量も減ってくると考えることが出来る。もしくは、電気が刺激を与え電位の変化を与えることでイオン輸送を行い、石灰化を促進しているとも考えられる。ただ、電気が生体リズムを攪乱する可能性や電気が分子レベルで酵素やイオンの輸送に影響を与えるメカニズムは明らかではない。

さらに、今回の実験は3日分しか行うことが出来ず、それ以降の挙動を知ることは出来なかった。もう少し長い期間この実験を行えば、上記の仮説が正しいかを明らかにすることが出来ると考えられる。



## 5.6. 閉鎖状態における電気の影響の検証

8 時間程度水槽を閉鎖することでは、サンゴの骨格成長や光合成に影響が及ばないことは 3.3 で述べた通りである。ここでは、さらに電気を流すことで影響が出るかを検証することを目的としている。これは、電気がサンゴに与える影響の一つとして、サンゴの代謝が考えられ、その内でも老廃物の分泌量を変化させているのではないかという仮説にたったものである。そのため、閉鎖状態にして栄養塩の収支がサンゴ以外の要素で変わらないようにして、その状態での骨格成長および光合成の変動を見ることで、その影響を明らかに出来ると考えた。

### 5.6.1. 実験方法

実験水槽 2 において全アルカリ度・全炭酸の測定を行った。実験の間は、ポンプにより水流を発生させ、ファンによって水温が急激に変化しないようにした。採水は 1 時間毎に行い、全アルカリ度・全炭酸の変動から IP・OP を算出した。7 時間の実験を電気の有無の 2 条件で行った。電気を流した実験では、11:00 から測定を開始し、12:00 から電気を流した。電気を流さない実験は 12:00 から行っている。実験条件を表 5-15 に示す。

表 5-15 閉鎖実験の実験条件

実験	実験日	水槽	光量 ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )	水温 ( $^{\circ}\text{C}$ )	塩分濃度 (PSU)	電流密度 ( $\text{mA}/\text{m}^2$ )
閉鎖実験(電気なし)	2009/10/26	2	200~210	24.8~27	34.0~34.3	0
閉鎖実験(電気あり)	2009/10/28	2	200~210	24.0~26.3	34.4~34.6	50

## 5.6.2. 実験結果

閉鎖実験の実験結果を図 5.6-1 に示す。グラフの横軸の時間は、IP・OP を算出するために用いた二つの測定値を採水した時間のちょうど中央の時刻を示している。正確な採水時間と詳細な測定値は付録の表 8-8 に示す。

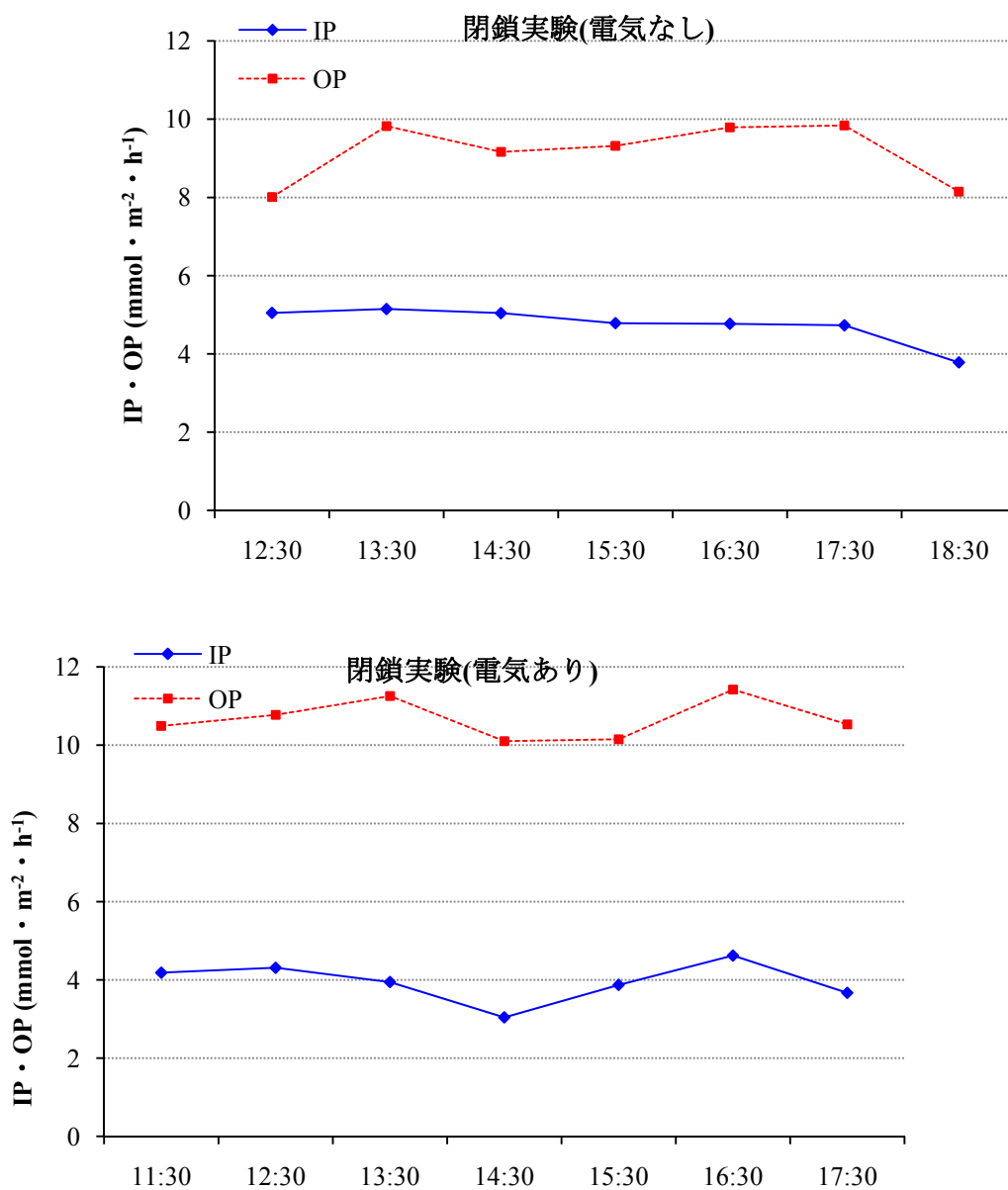


図 5.6-1 閉鎖実験

どちらの結果においても、13 時頃にピークがあり、14 時～16 時頃に一度値が落ち込んで 17 時頃にまた回復し、夕方にかけて減少するという OP の挙動は同じである。電気ありの実験の IP も 14:30 では落ち込んでいるが、それは前後の測定ミスによるものだと考えら

れる。

ただし、IP と OP の絶対値に関しては、同じ水槽で 1 日空けて行ったにも関わらず、差が見られた。電気を流した方の OP は値が大きくなり、IP は値が小さくなった。しかし、この特徴は、電気を流していない最初の 1 時間にも見られるものである。

### 5.6.3. 考察

閉鎖実験において、電気による石灰化促進や概日リズムの攪乱などの影響は見られなかった。本実験では、両実験におけるサンゴの無機・有機生産が電気の有無による影響よりも生理活動による影響によって支配されていると考えられるため、比較することは難しい。また、栄養塩の点からも、サンゴ礁域の栄養塩濃度は非常に小さく、栄養塩を測ることで違いを見るのは難しいと考えられる。ただ、栄養塩レベルが非常に低い状態でサンゴの生育が左右される可能性があることを示唆している研究もあり<sup>11)</sup>、もう少し長い時間水槽を閉鎖すれば、影響を確認することが出来るかもしれない。しかし、本研究の全アルカリ度・全炭酸測定実験では、1 回の採水で 120ml 程度の採水を行うため、本研究のようなさほど大きくない水槽では、あまり多数のサンプリングを得ることは出来ない。そのため、さらに長時間の閉鎖実験を行うときには、測定頻度を落とす必要がある。また、長時間の閉鎖実験を行う場合には、日周変動の影響が出ることも考えられるため、必ず電気の有無での同実験を行う必要がある。

## 6. 流れによる骨格成長と光合成への影響

既往の研究から、水流により光阻害の軽減が起こることや成長率が上昇する可能性があることが示唆されている<sup>12)20)46)47)</sup>。しかし、そのメカニズムは明らかでなく、骨格成長と光合成のどちらに影響を及ぼしているのかや水流だけの影響を明らかにしたものは少ない。そのため、本章では流速および水流のパターンによって骨格成長と光合成がどのような挙動を示すかを明らかにすることを目的とする。水流は、サンゴの体表についた微小粒子などを取り除き、褐虫藻付近にCO<sub>2</sub>を運ぶと考えられるため、骨格成長にも光合成にも良いのではないかと考えた。しかし、水流が強すぎると体表組織が剥がれてしまうなど、マイナスの効果も出てくるため適切な水流があると考えられる。それを探る上で骨格成長と光合成を同時に測定することはその適切な値を知るために重要であると考えられる。

## 6.1. 実験方法

実験水槽2において，ポンプおよび水槽の仕切りを設置し，水流を発生させた．ポンプおよび水槽の仕切りは以下のように配置した．

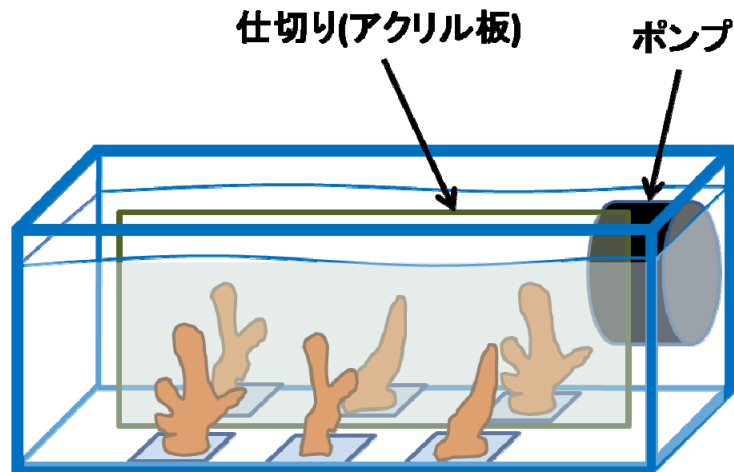


図 6.1-1 流れの実験における水槽の模式図

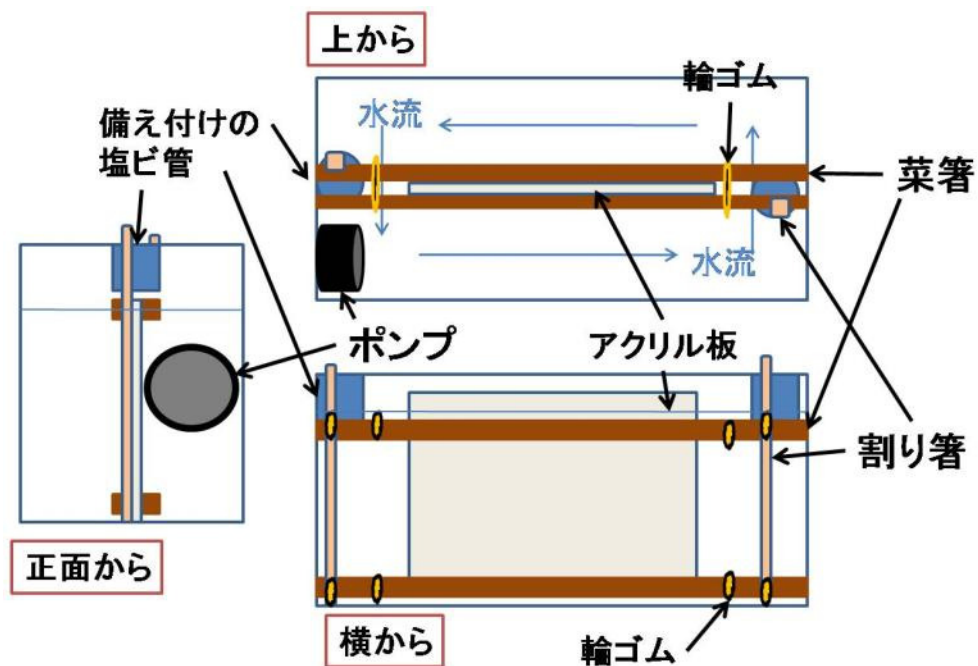


図 6.1-2 仕切りの取り付け方法

菜箸を4本用意し，2本ずつ輪ゴムで固定する．その2つを用いて，透明下敷きを挟む．それだけでは倒れるので，塩ビ管を通した割り箸を2本用意し，菜箸と輪ゴムで固定する．

図 6.1-1 のように真ん中に仕切りを，中央の仕切りの両側にサンゴを配置し，ポンプは仕切りの片側に配置した．それにより，一方向に水流が生まれるようにした．ポンプから

見て、反時計回りに水流は流れる。仕切りは図 6.1-2 のように取り付けた。輪ゴムで固定した 2 本の菜箸を 2 セット用意し、それでアクリル板を上下で挟む。それを水槽の両端にある備え付けの塩ビ管に通した割り箸に輪ゴムで固定した。アクリル板と水槽の壁の最短距離はほぼ一定である。

この状態で水槽を 3 時間閉鎖し、1 時間毎に 4 回測定を行った。測定は 10 時から 16 時半の時間帯に行った。この実験を、流速を変えて行い、流速と骨格成長および光合成への関係を調べた。ポンプは ECOTECH MARINE 社の VorTech PROPELLER PUMP MP10 を使用した。このポンプには流速を自動で変えて波を作るいくつかのモードがある。今回の実験では、サンゴの生育に適していると思われるラグーンランダムモード(以下ラグーンモードもしくはラグーンと記す)と一定の流速で流れを作るコンスタントモード(以下コンスタントもしくはコンスタントモードと記す)と 50% 程度のパワーで運転する夜間モードを使用した。ラグーンモードは、設定した流速が最速になるように穏やかでランダムな波を生成する。その変動パターン<sup>4</sup>を図 6.1-3 に示す。

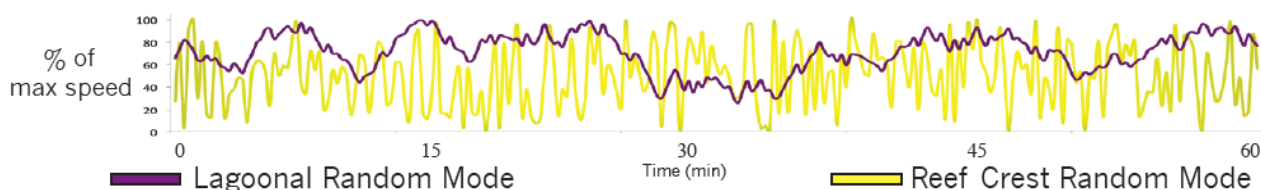


図 6.1-3 ラグーンモードの流速変動

ラグーンモードは紫で示した線グラフであり、設定した流速を 100% として、流速の%を示している。

モードや流速を設定できるドライバーのダイヤルを回すことにより、流速の強弱を設定できる。これらのモードを使い、波を生成し、ダイヤルを回すことによって流速を変化させた。ダイヤルは左から右に回して流速を変えるようになっており、今回使用したのは、左いっぱいに戻した時の流速(小)と 4 分の 1 程度回した時の流速(中)とちょうど半分回した時の流速(大)である。ただし、このダイヤルでは流速の値までは分からないので、表面流速を求めた。水槽を閉鎖した状態で、それぞれのモードとダイヤルの強さを設定し、ビニール片を浮かべて一定距離を流れる時間を計測した。水槽の仕切りのポンプ側は、水流が不安定で流速を測ることができない設定もあったのでポンプと反対側の表面流速だけを測定した。また、ポンプを全く動かさない流速 0 の状態でも測定を行った。

<sup>4</sup> 出典は Ecotech Marine 社の HP  
(<http://ecotechmarine.com/products/vortech-mp10/>)

実験ごとの設定を，モードとダイヤルの強さと表面流速，そして説明書に記載されている水量と断面積から概算した推定流速を表 6-1 に示す．推定流速のかっこ内はラグーンモードの平均流速を最大流速の 8 割程度と仮定して計算した数値である．ポンプの説明書に描いてあるラグーンモードの流速の変動から，その程度であると判断した．

表 6-1 各実験における水流状況

実験	モード	ダイヤルの強さ	表面流速(cm/s)	推定流速(cm/s)
流れの実験①	—	—	0	0
流れの実験②	夜間モード	小	3.2	3.05
流れの実験③	ラグーン	小	3.5	～6.1 (4.9)
流れの実験④	ラグーン	中	4.5	～10.30(8.2)
流れの実験⑤	ラグーン	強	7.4	～14.5(11.6)
流れの実験⑥	コンスタント	小	3.6	6.1
流れの実験⑦	コンスタント	強	10.4	14.5

実験条件に関しては，表 6-2 に示す．

表 6-2 流れの実験における実験条件

実験	実験日	水槽	光量 ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )	水温 ( $^{\circ}\text{C}$ )	塩分濃度 (PSU)	表面流速 (cm/s)
流れの実験①	2010/1/6	2	200~210	25.2~25.7	34.8~35	0
流れの実験②	2010/1/8	2	200~210	25.2~26.5	33.9~34.1	3.2
流れの実験③	2010/1/7	2	200~210	25.6~26.1	33.8~33.9	3.5
流れの実験④	2010/1/7	2	200~210	24.8~25.4	34	4.5
流れの実験⑤	2010/1/14	2	200~210	24.9~26.3	33.9~34	7.4
流れの実験⑥	2010/1/8	2	200~210	25.6~26.8	34.1~34.2	3.6
流れの実験⑦	2010/1/14	2	200~210	25~26.3	33.8~33.9	10.4

## 6.2. 実験結果

実験結果は図 6.2-1 に示す。ここでの IP・OP は補正値であり、詳細な測定値は付録の表 8-14 に記す。グラフの横軸の時間は、IP・OP を算出するために用いた二つの測定値を採水した時間のちょうど中央の時刻を示している。正確な採水時間は付録の表 8-14 に記す。

この実験を行った時間帯の IP と OP の値は安定していることが、これまでの実験で分かっている。日周変動により 14 時に極大値をとることがあるが、この実験を行った実験水槽 2 ではこれまでの実験ではその傾向が顕著に観察されることはなかった。

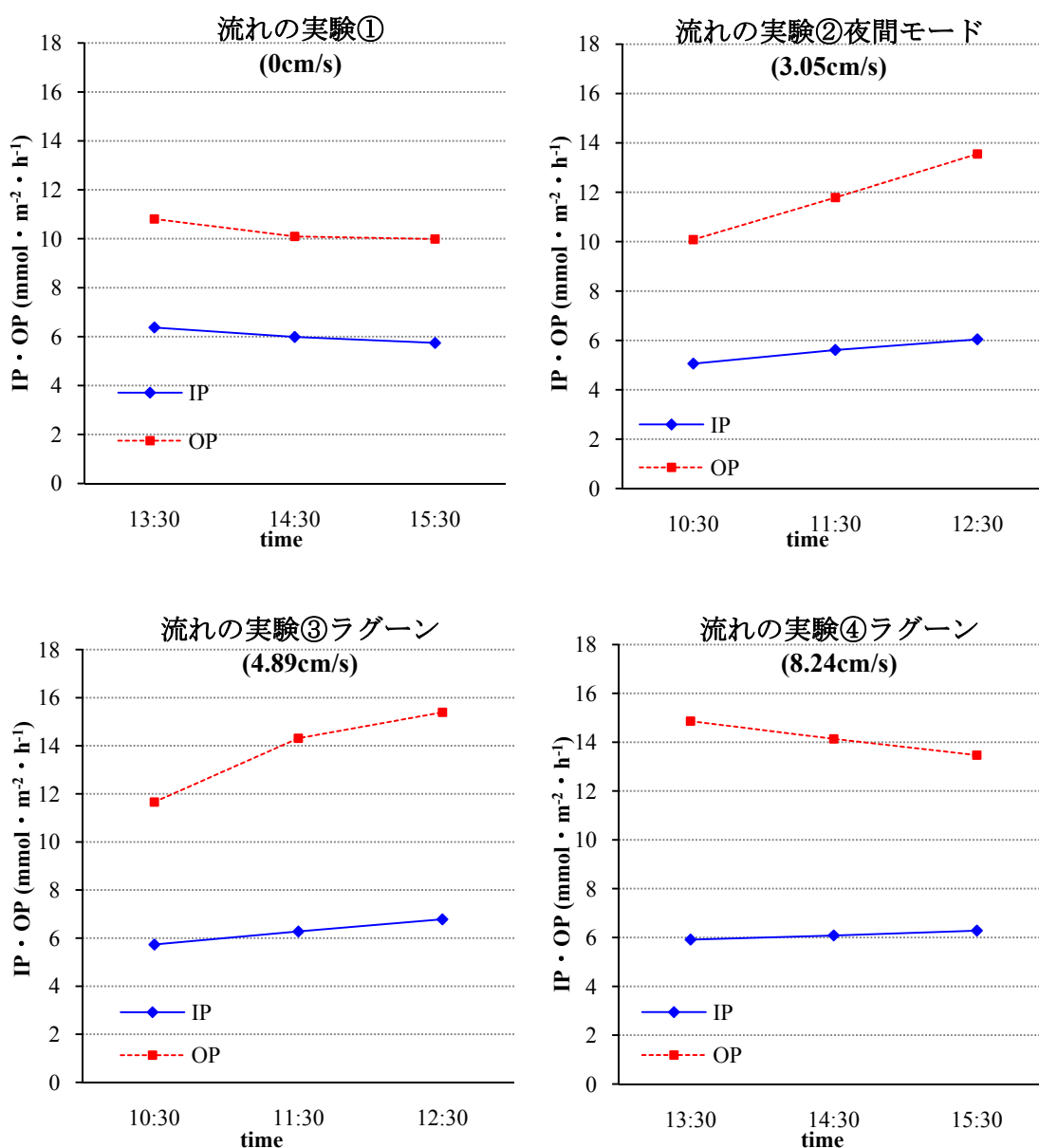


図 6.2-1.a 流れの実験①, 流れの実験②, 流れの実験③, 流れの実験④  
(モードとカッコ内に推定流速を表記)



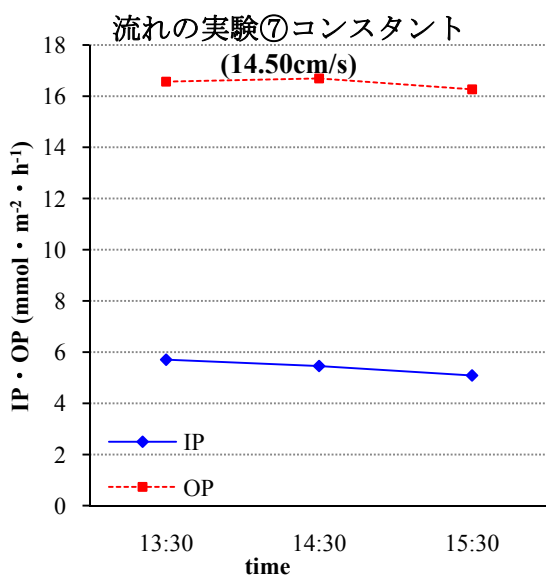
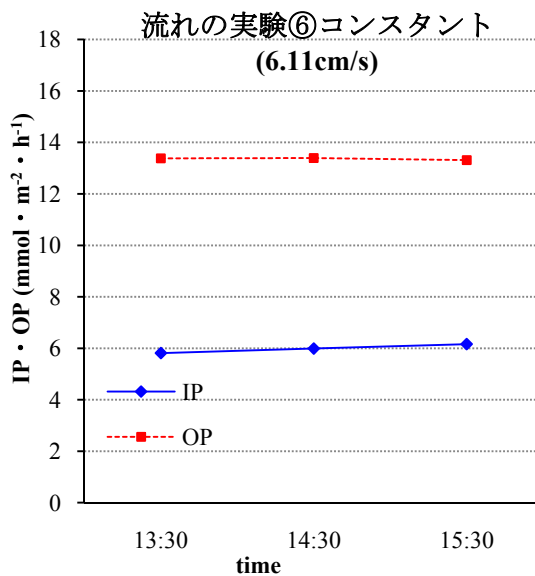
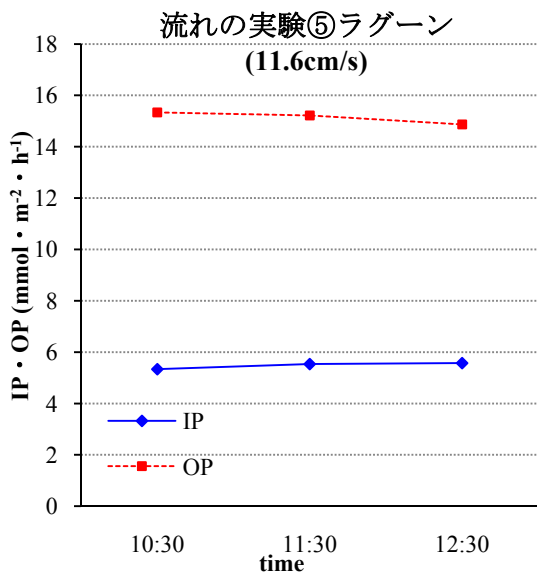


図 6.2-1.b 流れの実験⑤, 流れの実験⑥, 流れの実験⑦(モードとかつこ内に推定流速を表記)

これらの結果から、流速が小さい実験では OP の挙動が大きく変化する、流速が大きい実験ではほぼ一定に光合成を行っているか少しだけ減少していることが分かる。ただし、流速に比例して OP の値が増えていることが分かる。ここから流速を変えることによる短時間の影響としては、光合成に特に影響があると分かる。一方、石灰化はほぼ変わりはないようだが、流速のない実験と 14.5cm/s の流速のある実験では石灰化はは少しずつ減少しているのに対し、流速が 3~10cm/s 程度の実験では IP の変動が一定かもしくは増加していることが分かる。そこから、IP においては、3~10cm/s 程度の流速が好ましい可能性がある。

### 6.3. 考察

流速と IP・OP の関係性を明らかにするために、ラグーンモードの流速を最大流速の 8 割にした推定流速と IP・OP の値をプロットしたグラフを図 6.3-1 に示す。

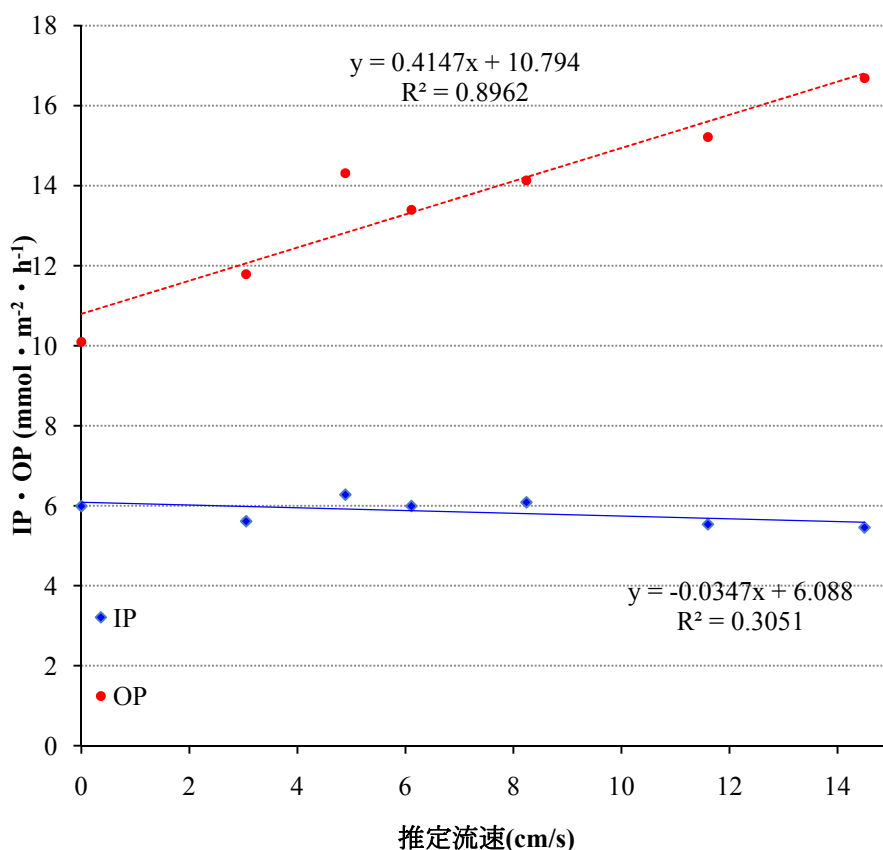


図 6.3-1 流速と IP・OP の関係

ここから、光合成と流速には相関があることが分かる。流速が強まるにつれて、光合成量は増していく。一方、流速が増しても、石灰化量の値はほぼ一定である。ただし、時間経過の挙動から石灰化は 4~10cm/s 程度の流速が好ましい可能性がある。

これらの結果から、流速 0~15cm/s の範囲であれば、流速と光合成量は比例することが分かる。これは既存の研究<sup>20)</sup>と相違ないことから、水流によって褐虫藻に CO<sub>2</sub> や栄養塩の供給が速やかに行われ、より活発に光合成が行われるものと考えられる。

しかし、光合成量が増えても石灰化は増えない。これまで、光合成量が増加すると石灰化量も増加すると考えられてきた。しかし、本実験では、石灰化量は増加もしくは減少している。その理由として、3つの可能性を挙げる。

まず一つは、水流がサンゴのストレスとなった可能性である。水流により栄養塩の除去

もされるが、濃度勾配によってさらに栄養塩を放出し、エネルギーを逃がしてしまうことが考えられる。さらに、一方向の水流によってポリプがダメージを受けたり、巻上がりによって体表に粒子が付着する割合が増えたりしたためにサンゴがストレスを感じ、光合成量は増加して石灰化促進に繋がったが、ストレスにより石灰化量は減り、全体としてほぼ変わらないという結果になったと考えられる。

次に、石灰化量はある一定の値以上は増えないという可能性がある。水流の有無は石灰化にはほとんど影響は及ぼさないと考えられる。そして、水流がない状態での光合成量が石灰化を行うのに十分な量であり、一定の値に達していたため、違いが見られなかったものと考えられる。

最後の一つは、光合成は石灰化を促進しないという可能性である。そうであるとする、光合成が石灰化を支配しているのではないため、McConnaughey のモデル<sup>31) 32) 33)</sup>を支持する結果となりうる。第4章の光量変化の実験では、石灰化の増加が見られたことから、光が石灰化における制限要素であることは明らかであるが、本実験から光合成が制限要素でない可能性が高まったといえる。

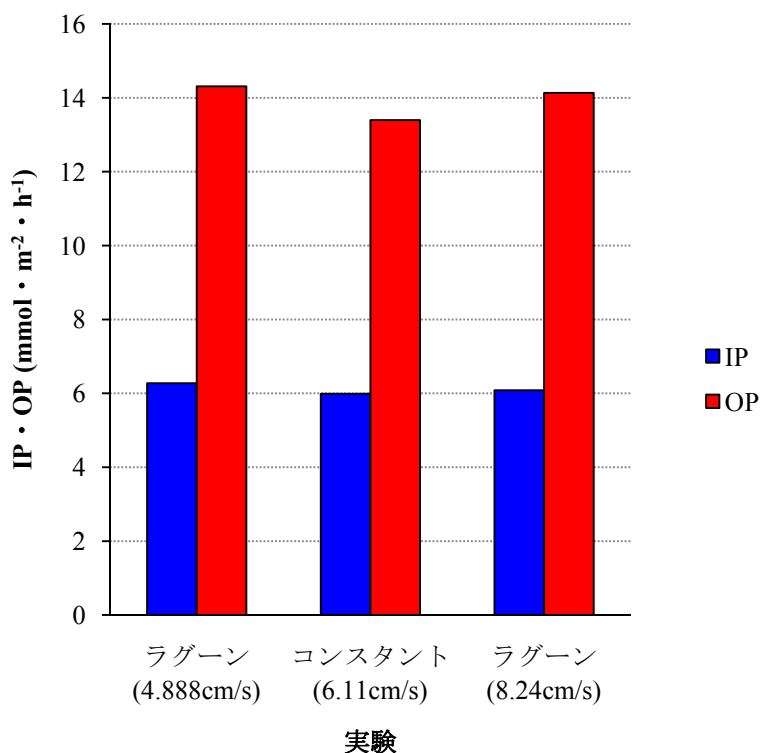


図 6.3-2 ラグーンモードとコンスタントモードの比較

さらに、サンゴに適した水流に関して議論をする。一方向に卓越した流れよりも多方向で振動のある流れの方がサンゴにとって好ましい可能性がある。ラグーンモードでは水流

の強弱が時間とともにランダムに変化するため、必ずしも一方向ではない流れが多数発生する。それがサンゴに多方向から水流を与え、サンゴにストレスを与えることなく物質交換により貢献できると考えられる。そこで、ラグーンモードとコンスタントモードを比較するため、4~10cm/sの流速条件下にある実験③、④、⑥の値をグラフにした。それを図 6.3-2 に示す。ここから、コンスタントモードの実験⑥が流速の大小にかかわらず最も OP の値が低いことが分かる。このことから、ラグーンモードのようなランダムな水流がサンゴにとっては好ましい可能性があるといえる。

また、水流が小さいと光合成や石灰化の値の変動が穏やかに行われ、IP・OPの変動が大きくなる。この変化が、概日リズムによる変動ではないと仮定すると、時間経過における光合成量と石灰化量の変化が穏やかであることを示していると考えられる。しかし、この変動が大きかった実験③においては、実験開始の12時間以上前から同じ流速であったため、流速を変えたことによる変化ではないことが分かっている。また、④においても変動が見られるが、④よりも流速の小さい⑥では、この変動は見られない。よって、流速が小さく水槽内の水の攪拌が不十分であったことによる変動である可能性も少ない。そのため、概日リズムを刺激するような水流であった可能性がある。今回は0~15cm/sの流速および2つのモードのみの比較となったが、さらに強い流速による骨格成長と光合成の挙動、水流パターンの違う水流による骨格成長と光合成の変動、および概日リズムを考慮した実験を行うことで水流とサンゴの成長の関係をさらに明らかにすることが出来ると考えられる。

## 7. まとめ

本研究では、飼育しているサンゴについて、光や電気、水流によるサンゴの代謝の変動を室内実験によって、短時間から長期間にわたった様々な時間スケールで追跡した。それにより、環境因子が及ぼすサンゴの骨格成長と光合成の影響及び骨格成長と光合成の関係を検討した。実験内容としては、環境条件を変化させた数時間の実験の比較や、24時間連続観測によるサンゴの日周変動、また1週間ごとの測定による数カ月の骨格成長および光合成能のモニタリングなどを行った。それらの実験から、サンゴの生理的特徴や電気の影響だと示唆される現象を捉えることが出来た。さらに、各環境因子と骨格成長・光合成との関係性や骨格成長と光合成の相互作用に関する考察を行った。加えて、実験や観測における留意点や改善点を提案した。

第3章では、サンゴの生理活動による骨格成長と光合成への影響を明らかにすることにより、現地でのモニタリングや室内実験での知見を得ることが出来た。まず長期的に骨格成長と光合成を追跡することにより、成長率が低下すると白化が始まり、白化中期の段階で骨格成長をしなくなることが分かった。この骨格成長と光合成の挙動から、サンゴの健康状態をモニタリングする方法として、定期的なクロロフィル蛍光測定と弱体化した可能性のある時点での水中重量測定を組み合わせた測定が好ましいと考えられる。ただし、測定方法を工夫する必要がある。

また、日周変動実験と暗条件実験によって、サンゴの概日リズムの存在が明らかになり、エネルギーの貯蓄があることが示唆された。これは、日単位の実験を行う上では必ず考慮すべき点であるとともに、これを利用した成長促進の可能性もあると考えられる。また、エネルギーの貯蓄量をさらに詳細に測定することにより、サンゴがCO<sub>2</sub>の吸収源であるか否かという議論にも役立つ。

閉鎖実験においては、栄養塩の挙動によって光合成に影響がある可能性が示唆された。だが、本研究での実験では不十分であるので、改善点を踏まえて実験を行うことにより、褐虫藻の光合成を促進するための知見を得ることが出来ると考えられる。

第4章では、光量と骨格成長および光合成の関係性を明らかにすることにより、光量による光合成と石灰化の支配およびエネルギーの貯蓄の存在がより明らかになった。また、光合成が必ずしも石灰化を支配しているのではないことが示唆された。石灰化は光合成量や光量子量によって変動するが、その挙動は値の大小だけではなく、光合成や光量の変化に影響を受ける可能性がある。そのため、他の環境因子において実験や観測を行う際に、貯蓄量の存在と石灰化の挙動を考慮する必要があると考えられる。また、適地選定においては、光量だけでなく、光量変化を知る必要があると考えられる。光量変化が起こりやすい場所、例えばある程度日陰になる可能性のある場所でも適地となる可能性があるからで

ある。

第5章では、電気がサンゴの骨格成長と光合成に影響を及ぼす可能性があることを明らかにした。これまでに行った実験の改善点や第3章および第4章で得られた知見を考慮した結果、日周変動における電気の有無での挙動の違いを比較する実験を行った。その結果、光合成量に対して石灰化量が増加する可能性が示唆された。そこから、以下三つの仮説が導かれた。それは、電気によって、Ⅰ. 小さなエネルギーで石灰化を行うことが出来るというものと、Ⅱ. エネルギーが石灰化へより多く使われるようになるというもの、そして、Ⅲ. 生体リズムが変化するというものである。これらを考察するために暗条件での石灰化量の追跡を数日に渡って行った。そこから、電流による石灰化量の増加と生体リズムの攪乱が示唆された。その挙動から仮説のⅡとⅢの可能性が高いと考えられる。ここから、電気によるサンゴの成長促進の可能性と同時に、電気を流す上での懸念事項も示唆された。そのため、生体リズム攪乱による影響を考慮しながら、電気によるサンゴ再生技術の開発をする必要があると考えられる。

加えて、閉鎖状態での実験も行ったが、電気による影響は見られなかった。ただし、栄養塩による影響も重要であると考えられるため、実験方法の改善を提案した。

第6章では、流れが短時間で光合成に正の影響を及ぼすことを明らかにした。一方で、骨格成長に変化がほぼ見られなかったが、水流のパターンを変化させることで好転させられる可能性がある。また、本実験やこれまでの章での結果から、石灰化がある一定以上は促進されないという可能性と、光合成が石灰化を促進する割合が小さいという可能性が示唆された。つまり、一次生産のためには流速はある程度強い方がよいが、骨格成長の点からは、他に憂慮すべき点があると考えられる。さらに、流れの実験でも光合成量と石灰化量の変動に概日リズムが影響を及ぼしている可能性もあり、概日リズムと環境因子の関係性に関するさらなる解明を期待する。

本研究では、光と水流による光合成の促進とサンゴのエネルギー貯蓄が確認された。また、サンゴの概日リズムが光合成や石灰化の挙動に影響を及ぼしている可能性が高いことが分かった。さらに光や流速といった環境因子の変化の挙動が光合成や石灰化の促進につながる可能性がある。そして、電気による石灰化促進の可能性もあると言える。電気は単純に石灰化の促進をするというだけではなく、概日リズムに影響を及ぼす可能性もあると示唆された。このようなサンゴの代謝に関する基礎的知見はその汎用性から、非常に重要であると考えられる。電気による成長促進のような新しい再生技術の開発や移植の適地選定のような保全・再生技術の改善のためにも、光合成と石灰化の関係やサンゴの概日リズムなどの知見を考慮した実験を行うことでサンゴの成長のメカニズムを明らかにし、それに基づいたサンゴ保全・再生のための対策が必要であると考えられる。

## 8. 付録

### 8.1. クロロフィル蛍光測定における環境光の影響

#### 8.1.1. 実験方法

普段、室内実験を行っている  $6\sim 16\ \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  の範囲の光環境での測定を 4 ケース，暗条件での測定を 1 ケース，屋外のサンゴが普通生息している程度  $300\ \mu\text{mol}/\text{m}^2$  の光環境での測定を 1 ケース行い，比較した．使用したサンゴは，何度も行う測定に耐えられるような元気なサンゴ 4 群体(1t, 1y, 7t, 7y)を用いた．

#### 8.1.2. 実験結果

光条件とそれぞれのサンゴの  $\phi\Pi$  の値を表にしたものを表 8-1 に示す．

表 8-1 環境光による  $\phi\Pi$  の変化の結果

日付	$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$	1t	1y	7t	7y
5月26日	0.01	0.42	0.41	0.37	0.39
5月22日	6.4	0.43	0.42	0.4	0.42
5月19日	11.91	0.42	0.41	0.39	0.41
5月20日	13.01	0.42	0.43	0.38	0.41
5月26日	15.43	0.43	0.42	0.39	0.42
5月27日	297.3	0.4	0.39	0.37	0.43
平均		0.42	0.41	0.38	0.41
分散		0.00012	0.00019	0.00015	0.00019

ここから，室内実験で行う程度の光条件では，0.02 程の誤差範囲で収まることが分かる．また，暗条件では 0.02~0.03 程度の値の低下が見られ，強光条件では，誤差が 0.04 程度に大きくなると分かった．

### 8.2. 単位の換算

全アルカリ度と全炭酸の測定値から(2-2-12)，(2-2-16)式で求められる IP・OP は 1kg の海水における 1 時間当たりの mol 変化量である．そのままでは水槽ごとや文献値などと比較できないことを考慮し，単位の換算を行った．

まず，それぞれの水槽に置かれているサンゴの表面積を，Excel マクロ (lenaraf220<sup>5</sup>) を用いて推定した．この Excel マクロは，写真からその被写体の長さや面積を計算する

<sup>5</sup> Vector (<http://www.vector.co.jp/>) からダウンロード

ことのできるソフトである。それを用いて、それぞれのサンゴを多方向から写真を撮り、断面積から表面積を推測して算出した。Excel マクロの操作画面の一例を図 8.2-1 に示す。

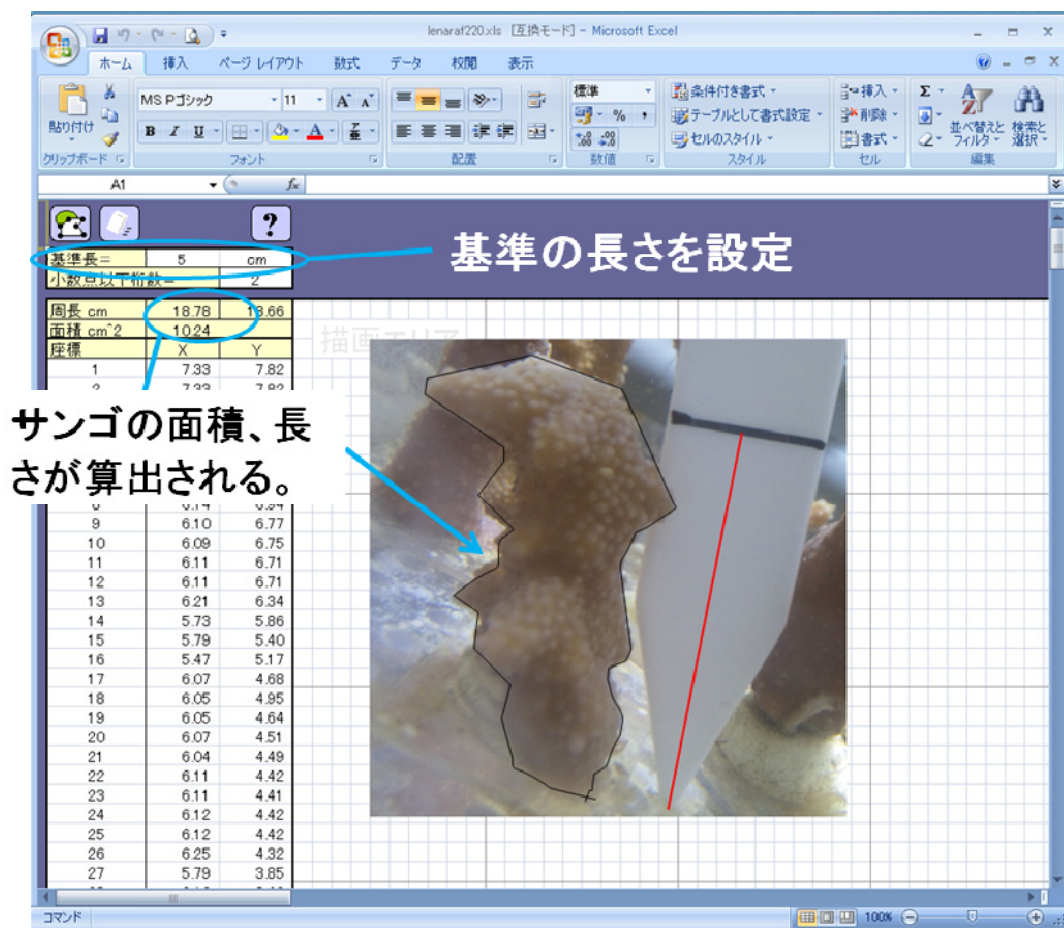


図 8.2-1 Excel マクロの操作画面

図の中の赤線の長さを左上の青丸で示した基準長の欄に入力し、それを基準として、オートシェイプで囲った面積や引いた線の長さがその下の青丸の部分に表示される。サンゴの語りはほぼ円柱であると仮定し、断面積に $\pi$ をかけることでおおよその表面積とした。枝別れの部分や根元に広がっている部分は別に面積を測り、加えた。それぞれの表面積を表 8-2 に示す。

表 8-2 各水槽の表面積

	水槽 3	水槽 2
表面積	354.7 cm <sup>2</sup>	350.6 cm <sup>2</sup>

水槽 2, 水槽 3 それぞれの表面積と水槽の容量から単位を mmol/m<sup>2</sup>/h<sup>-1</sup> に換算した。



ただし、単位をサンゴの表面積毎に換算し計算したが、水槽 2 と水槽 3 の値を比較することは難しかった。そのため、飼育実験のようなサンゴの数が少なく状態も不安定である実験系ではサンゴの数やその表面積よりもサンゴの個体差が最も値に影響していると考えられる。

### 8.3. 実験結果の補正作業

全アルカリ度の測定値の差をとる IP や全炭酸の測定値の差から IP を引いて、求める OP は測定誤差に影響を受けやすい。そのため、IP・OP の値を出す際、補正を行った。補正後の IP・OP の値を IP'・OP' とする。IP' および OP' の算出方法は、次の手段で行う。まず、全アルカリ度および全炭酸の連続値を 3 点以上測定し、それらの近似線を引く。その近似線の傾きから複数点での傾きを知ることができる。複数の測定間において、ほぼ一定に値が変化していると仮定すると、その傾きは測定誤差による影響を小さくした値であると言える。傾きは 1 時間毎の増減量として求められるので、それぞれの増減率を  $\Delta A_T$ ,  $\Delta C_T$  とすると、IP・OP を求める(2-2-12), (2-2-16)式に当てはめて、(8-4-1), (8-4-2)式から IP'・OP' を求めることができる。

$$IP' = -\Delta A_T / 2 \quad (\text{mol/kg/h}) \quad (8-4-1)$$

$$OP' = -\Delta C_T - IP' \quad (\text{mol/kg/h}) \quad (8-4-2)$$

## 8.4. 水中重量測定とクロロフィル蛍光測定の実験

### 結果

表 8-3 骨格成長率

期間番号	期間 1	期間 2	期間 3	期間 4	期間 5	期間 6	期間 7
測定期間	11/20~ 11/24	11/24~ 12/8	12/8~ 12/14	12/17~ 12/21	12/21~ 1/4	1/4~ 1/8	1/8~ 1/14
サンゴ 7t	NA	NA	NA	0.25	0.2	0.17	0.12
サンゴ 7	0.29	0.31	0.3	0.29	0.31	0.29	0.31
サンゴ 11t	NA	NA	NA	0.16	0.21	0.02	0.17
サンゴ 11	0.24	0.25	0.24	0.21	0.24	0.22	0.25
サンゴ 15t	NA	NA	NA	0.22	0.19	0.24	0.07
サンゴ 15	0.27	0.24	0.23	0.17	0.14	0.18	0.1
サンゴ 19t	NA	NA	NA	0.27	0.34	0.28	0.39
サンゴ 19	0.4	0.33	0.29	0.23	0.29	0.29	0.37
サンゴ 27t	NA	NA	NA	0.35	0.21	0.28	0.25
サンゴ 27	0.37	0.36	0.31	0.24	0.25	0.2	0.2
サンゴ 1t	NA	NA	NA	0.4	0.39	0.37	0.43
サンゴ 1	0.32	0.29	0.54	0.26	0.32	0.3	0.39
サンゴ 2t	NA	NA	NA	0.15	0.18	0.18	0.21
サンゴ 2	0.2	0.24	0.21	0.25	0.28	0.24	0.29
サンゴ 3t	NA	NA	NA	0.27	0.28	0.28	0.35
サンゴ 3	0.29	0.31	0.3	0.22	0.19	0.16	0.23
サンゴ 4t	NA	NA	NA	0.28	0.25	0.24	0.27
サンゴ 4	0.35	0.3	0.27	0.22	0.24	0.27	0.35
サンゴ 6t	NA	NA	NA	0.27	0.28	0.33	0.28
サンゴ 6	0.34	0.26	0.26	0.22	0.27	0.27	0.31

(単位 : % · day<sup>-1</sup>)

期間番号	期間 8	期間 9	期間 10	期間 11	期間 12	期間 13	期間 14
測定期間	1/14～ 1/18	1/18～ 1/21	1/21～ 1/29	1/29～ 2/5	2/5～ 2/12	2/12～ 2/19	2/1～ 2/26
サンゴ 7t	0.13	0.18	0.12	0.2	0.21	0.22	0.27
サンゴ 7y	0.29	0.36	NA	0.2	0.21	0.25	0
サンゴ 11t	0.19	0.35	0.12	0.27	0.29	0.26	0.34
サンゴ 11y	0.21	0.29	NA	0.19	0.17	0.17	0.17
サンゴ 15t	0.19	0.24	NA	0.21	0.24	0.2	0.23
サンゴ 15y	0.08	0.03	NA	0.08	0.09	0.13	0.12
サンゴ 19t	0.43	0.46	0.34	0.45	0.42	0.37	0.56
サンゴ 19y	0.32	0.38	NA	0.21	0.28	0.27	0.27
サンゴ 27t	0.21	0.28	0.21	0.25	0.15	0.09	0.07
サンゴ 27y	0.15	0.16	NA	0.06	0.04	0.03	0.06
サンゴ 1t	0.42	0.52	0.42	0.44	0.44	0.46	0.41
サンゴ 1y	0.29	0.44	NA	0.32	0.37	0.33	0.35
サンゴ 2t	0.18	0.37	0.14	0.23	0.23	0.23	0.33
サンゴ 2y	0.21	0.34	NA	0.15	0.18	0.16	0.16
サンゴ 3t	0.31	0.5	0.3	0.38	0.35	0.34	0.27
サンゴ 3y	0.24	0.32	NA	0.25	0.26	0.24	0.2
サンゴ 4t	0.23	0.31	0.36	0.14	0.33	0.29	0.22
サンゴ 4y	0.29	0.37	NA	0.23	0.24	0.32	0.14
サンゴ 6t	0.3	0.37	0.19	0.2	0.24	0.27	0.28
サンゴ 6y	0.26	0.37	NA	0.28	0.32	0.26	0.34

(単位 : %・day<sup>-1</sup>)

期間番号	期間 15	期間 16	期間 17	期間 18	期間 19	期間 20	期間 21
測定期間	2/26～ 3/5	3/5～ 3/13	3/13～ 4/22	4/22～ 5/4	5/4～ 5/12	5/12～ 5/22	5/2～ 5/30
サンゴ 7t	0.22	0.25	0.245	0.348	0.327	0.299	0.299
サンゴ 7y	NA	NA	NA	0.258	0.28	0.241	0.287
サンゴ 11t	0.22	0.27	0.257	0.37	0.278	0.381	0.203
サンゴ 11y	0.17	NA	NA	0.26	0.286	0.23	0.252
サンゴ 15t	0.18	0.19	0.163	0.277	0.274	0.274	0.274
サンゴ 15y	0.1	0.12	0.157	0.004	0.168	0.191	0.198
サンゴ 19t	0.39	0.33	0.286	0.366	0.341	0.327	0.328
サンゴ 19y	0.24	0.23	0.223	0.273	0.217	0.246	0.245
サンゴ 27t	-0.02	NA	NA	NA	NA	NA	NA
サンゴ 27y	0.04	0.08	0.121	0.223	0.2	0.251	0.257
サンゴ 1t	0.39	0.37	0.364	0.448	0.362	0.376	0.383
サンゴ 1y	0.32	0.32	0.267	0.335	0.239	0.298	0.330
サンゴ 2t	0.15	0.24	0.245	0.294	0.286	0.268	0.279
サンゴ 2y	0.12	0.2	0.11	0.219	0.156	0.212	0.219
サンゴ 3t	0.27	0.3	0.229	0.383	0.238	0.291	0.370
サンゴ 3y	0.2	0.21	0.221	0.306	0.27	0.263	0.294
サンゴ 4t	0.22	0.23	0.22	0.23	0.238	0.264	0.336
サンゴ 4y	0.21	0.21	0.205	0.215	0.19	0.208	0.205
サンゴ 6t	0.26	0.27	NA	NA	0.298	0.262	0.296
サンゴ 6y	0.28	0.2	0.246	0.298	0.291	0.234	0.266

(単位 : %・day<sup>-1</sup>)

表 8-4 水中重量

測定日	2008/11/20	2008/11/22	2008/11/24	2008/12/8	2008/12/11	2008/12/14
海水密度 サンゴ	1.022 g/cm <sup>3</sup>	1.021 g/cm <sup>3</sup>	1.022 g/cm <sup>3</sup>	1.021 g/cm <sup>3</sup>	1.022 g/cm <sup>3</sup>	1.022 g/cm <sup>3</sup>
サンゴ 7	5.334	5.364	5.397	5.631	5.678	5.729
サンゴ 11	8.624	8.663	8.708	9.014	9.075	9.139
サンゴ 15	8.299	8.352	8.390	8.679	8.735	8.794
サンゴ 19	9.804	9.882	9.960	10.430	10.517	10.607
サンゴ 27	5.105	5.141	5.179	5.443	5.493	5.540
サンゴ 1	8.874	8.958	8.988	9.353	9.431	9.650
サンゴ 2	5.066	5.087	5.105	5.283	5.309	5.345
サンゴ 3	11.764	11.833	11.900	12.420	12.523	12.635
サンゴ 4	8.263	8.317	8.378	8.735	8.792	8.871
サンゴ 6	7.761	7.811	7.866	8.160	8.217	8.281

(水中重量 単位 : g)

測定日	2008/12/17	2009/12/21	2009/1/4	2009/1/8	2009/1/14	2009/1/18	2009/1/21	2009/1/29
海水密度 サンゴ	1.022 g/cm <sup>3</sup>	1.022 g/cm <sup>3</sup>	1.022 g/cm <sup>3</sup>	1.022 g/cm <sup>3</sup>	1.021 g/cm <sup>3</sup>	1.022 g/cm <sup>3</sup>	1.022 g/cm <sup>3</sup>	1.023 g/cm <sup>3</sup>
サンゴ 7t	3.786	3.819	3.9122	3.935	3.958	3.9765	3.9952	4.0284
サンゴ 7y	3.004	3.040	3.1712	3.208	3.2671	3.3048	3.3409	5.0725
サンゴ 11t	3.326	3.344	3.4272	3.430	3.4585	3.4808	3.5121	3.5391
サンゴ 11y	7.136	7.200	7.4383	7.503	7.6108	7.6757	7.7427	9.7721
サンゴ 15t	5.271	5.313	5.439	5.487	5.506	5.5444	5.5815	6.0164
サンゴ 15y	3.748	3.776	3.849	3.877	3.8992	3.9122	3.9155	5.972
サンゴ 19t	3.794	3.829	3.9902	4.030	4.1113	4.1737	4.2244	4.3248
サンゴ 19y	8.216	8.296	8.6339	8.733	8.9205	9.0342	9.1376	11.1341
サンゴ 27t	3.136	3.172	3.2521	3.283	3.3231	3.3474	3.371	3.4182
サンゴ 27y	3.413	3.448	3.5651	3.593	3.6346	3.6568	3.6749	5.5439
サンゴ 1t	6.030	6.117	6.4277	6.516	6.6685	6.7713	6.9194	7.1326
サンゴ 1y	4.716	4.769	4.9779	5.038	5.152	5.2113	5.2799	6.9034
サンゴ 2t	5.668	5.698	5.8291	5.867	5.9329	5.9724	6.033	6.0936
サンゴ 2y	1.081	1.092	1.1345	1.145	1.1645	1.1741	1.1859	2.7957
サンゴ 3t	4.335	4.376	4.5259	4.572	4.657	4.7086	4.772	4.871
サンゴ 3y	9.768	9.860	10.1171	10.181	10.316	10.4143	10.515	12.8578
サンゴ 4t	5.544	5.600	5.778	5.828	5.912	5.9623	6.0127	6.17
サンゴ 4y	4.347	4.388	4.5334	4.583	4.676	4.7307	4.7826	7.8507
サンゴ 6t	5.754	5.811	6.0234	6.098	6.1906	6.2598	6.3231	6.4105
サンゴ 6y	3.801	3.8359	3.9777	4.020	4.0926	4.1348	4.1811	5.7095

(水中重量 単位 : g)

測定日	2009/1/30	2009/2/5	2009/2/12	2009/2/25	2009/2/26	2009/3/5	2009/3/13	2009/4/22
海水密度 サンゴ	1.022 g/cm <sup>3</sup>	1.022 g/cm <sup>3</sup>	1.022 g/cm <sup>3</sup>	1.022 g/cm <sup>3</sup>	1.022 g/cm <sup>3</sup>	1.022 g/cm <sup>3</sup>	1.022 g/cm <sup>3</sup>	1.022 g/cm <sup>3</sup>
サンゴ 7t	NA	4.1317	4.1882	NA	4.258	4.315	4.392	4.775
サンゴ 7y	NA	5.2074	5.291	NA	NA	5.403	NA	5.692
サンゴ 11t	NA	3.6621	3.7189	NA	3.796	3.848	3.921	4.274
サンゴ 11y	NA	10.0148	10.1252	NA	10.24	10.358	NA	11.659
サンゴ 15t	NA	6.1939	6.2752	NA	6.367	6.442	6.533	6.926
サンゴ 15y	NA	6.0408	6.0895	NA	6.135	6.174	6.229	6.589
サンゴ 19t	NA	4.5647	4.6711	4.812	5.044	5.15	5.273	5.82
サンゴ 19y	NA	11.5117	11.7174	NA	11.927	12.119	12.33	13.384
サンゴ 27t	NA	3.5023	3.521	NA	3.536	3.532	NA	NA
サンゴ 27y	NA	5.5815	5.5929	NA	5.614	5.627	5.658	5.909
サンゴ 1t	NA	4.1317	4.1882	NA	7.984	8.19	8.421	9.576
サンゴ 1y	NA	5.2074	5.291	NA	7.548	7.705	7.891	8.682
サンゴ 2t	NA	3.6621	3.7189	NA	6.509	6.571	6.687	7.294
サンゴ 2y	NA	10.0148	10.1252	NA	2.904	2.924	2.963	3.072
サンゴ 3t	NA	6.1939	6.2752	NA	5.300	5.392	5.509	5.968
サンゴ 3y	NA	6.0408	6.0895	NA	13.702	13.891	14.112	15.314
サンゴ 4t	NA	4.5647	4.6711	NA	6.571	6.665	6.78	7.334
サンゴ 4y	NA	11.5117	11.7174	NA	8.347	8.462	8.596	9.261
サンゴ 6t	6.4674	3.5023	3.521	NA	6.873	6.988	7.13	NA
サンゴ 6y	NA	5.5815	5.5929	NA	6.164	6.275	6.369	6.947

(水中重量 単位 : g)

測定日	2009/5/4	2009/5/12	2009/5/22	2009/5/30
海水密度 サンゴ	1.022 g/cm <sup>3</sup>	1.022 g/cm <sup>3</sup>	1.022 g/cm <sup>3</sup>	1.022 g/cm <sup>3</sup>
サンゴ 7t	4.954	5.071	5.208	5.321
サンゴ 7y	5.853	5.973	6.105	6.234
サンゴ 11t	4.442	4.53	4.684	4.752
サンゴ 11y	12.007	12.271	12.542	12.785
サンゴ 15t	7.14	7.286	7.472	7.625
サンゴ 15y	6.592	6.674	6.792	6.892
サンゴ 19t	6.054	6.206	6.393	6.548
サンゴ 19y	13.806	14.037	14.37	14.642
サンゴ 27t	NA	NA	NA	NA
サンゴ 27y	6.054	6.143	6.285	6.4043
サンゴ 1t	10.065	10.342	10.713	11.026
サンゴ 1y	9.011	9.174	9.433	9.669
サンゴ 2t	7.534	7.695	7.888	8.053
サンゴ 2y	3.14	3.173	3.23	3.278
サンゴ 3t	6.220	6.329	6.499	6.677
サンゴ 3y	15.859	16.191	16.604	16.983
サンゴ 4t	7.523	7.657	7.846	7.556
サンゴ 4y	9.487	9.624	9.814	9.967
サンゴ 6t	8.29	8.476	8.685	8.391
サンゴ 6y	7.178	7.334	7.494	7.643

(水中重量 単位 : g)

表 8-5 φ II

測定日	11/19	11/20	11/21	11/22	11/23	11/24	11/25	12/6	12/14
サンゴ 7t	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
サンゴ 7	0.32	0.34	0.31	0.36	0.35	0.34	0.39	0.38	0.39
サンゴ 11t	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
サンゴ 11	0.38	0.35	0.29	0.35	0.39	0.38	0.39	0.39	0.34
サンゴ 15t	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
サンゴ 15	0.32	0.33	0.28	0.31	0.29	0.34	0.31	0.35	0.36
サンゴ 19t	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
サンゴ 19	0.38	0.41	0.36	0.28	0.33	0.32	0.31	0.34	0.33
サンゴ 27t	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
サンゴ 27	0.31	0.33	0.27	0.31	0.32	0.32	0.33	0.32	0.35
サンゴ 1t	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
サンゴ 1	0.37	0.35	0.35	0.31	0.28	0.27	0.37	0.38	0.32
サンゴ 2t	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
サンゴ 2	0.37	0.33	0.35	0.29	0.30	0.31	0.31	0.34	0.34
サンゴ 3t	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
サンゴ 3	0.33	0.33	0.33	0.28	0.29	0.30	0.25	0.26	0.26
サンゴ 4t	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
サンゴ 4	0.32	0.32	0.29	0.36	0.33	0.32	0.40	0.31	0.40
サンゴ 6t	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
サンゴ 6	0.31	0.32	0.37	0.27	0.28	0.26	0.30	0.28	0.28



測定期間	1/3	1/10	1/15	1/18	1/22	1/28	2/5	2/12	2/19
サンゴ 7t	0.28	0.32	0.31	0.31	0.29	0.29	0.31	0.31	0.32
サンゴ 7y	0.29	0.33	0.31	0.29	0.27	0.31	0.32	0.33	0.34
サンゴ 11t	0.32	0.36	0.29	0.32	0.28	0.30	0.29	0.32	0.30
サンゴ 11y	0.23	0.25	0.26	0.29	0.22	0.27	0.27	0.31	0.29
サンゴ 15t	0.23	0.27	0.29	0.25	0.22	0.27	0.25	0.26	0.26
サンゴ 15y	0.19	0.23	0.27	0.22	0.23	0.27	0.25	0.25	0.28
サンゴ 19t	0.37	0.42	0.40	0.38	0.34	0.36	0.37	0.38	0.38
サンゴ 19y	0.32	0.32	0.31	0.36	0.30	0.36	0.36	0.38	0.39
サンゴ 27t	0.26	0.30	0.29	0.26	0.26	0.27	0.29	0.27	0.25
サンゴ 27y	0.21	0.28	0.24	0.23	0.18	0.25	0.24	0.24	0.22
サンゴ 1t	0.39	0.43	0.40	0.37	0.40	0.39	0.37	0.36	0.39
サンゴ 1y	0.27	0.40	0.35	0.36	0.39	0.38	0.37	0.36	0.38
サンゴ 2t	0.35	0.38	0.36	0.34	0.34	0.33	0.35	0.34	0.35
サンゴ 2y	0.33	0.32	0.31	0.30	0.29	0.37	0.33	0.32	0.33
サンゴ 3t	0.40	0.41	0.39	0.39	0.39	0.36	0.40	0.37	0.37
サンゴ 3y	0.32	0.33	0.32	0.37	0.36	0.37	0.39	0.38	0.36
サンゴ 4t	0.36	0.42	0.37	0.39	0.41	0.40	0.40	0.38	0.37
サンゴ 4y	0.35	0.36	0.29	0.37	0.33	0.37	0.40	0.38	0.36
サンゴ 6t	0.40	0.43	0.42	0.40	0.40	0.38	0.38	0.38	0.38
サンゴ 6y	0.29	0.37	0.40	0.37	0.38	0.38	0.40	0.35	0.40

測定期間	2/26	3/5	3/13	4/22	5/4	5/12	5/19	5/26
サンゴ 7t	0.29	0.33	0.31	0.37	0.36	0.4	0.39	0.39
サンゴ 7y	0.30	NA	NA	0.41	0.39	0.42	0.41	0.42
サンゴ 11t	0.29	0.28	0.28	0.39	0.39	0.4	0.4	0.41
サンゴ 11y	0.29	0.29	0.27	0.38	0.36	0.37	0.37	0.39
サンゴ 15t	0.26	0.24	0.23	0.33	0.36	0.37	0.38	0.37
サンゴ 15y	0.29	0.28	0.24	0.33	0.38	0.38	0.39	0.39
サンゴ 19t	0.38	0.37	0.35	0.42	0.4	0.42	0.39	0.41
サンゴ 19y	0.36	0.36	0.34	0.38	0.37	0.39	0.37	0.38
サンゴ 27t	0.24	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
サンゴ 27y	0.24	0.25	0.24	0.28	0.32	0.34	0.33	0.33
サンゴ 1t	0.32	0.37	0.31	0.4	0.43	0.45	0.42	0.43
サンゴ 1y	0.35	0.37	0.30	0.39	0.42	0.42	0.41	0.42
サンゴ 2t	0.32	0.32	0.28	0.38	0.36	0.39	0.38	0.4
サンゴ 2y	0.29	0.33	0.28	0.37	0.34	0.38	0.36	0.41
サンゴ 3t	0.28	0.36	0.32	0.41	0.41	0.42	0.42	0.41
サンゴ 3y	0.30	0.35	0.31	0.4	0.4	0.4	0.4	0.39
サンゴ 4t	0.35	0.32	0.32	0.39	0.38	0.4	0.38	0.41
サンゴ 4y	0.36	0.27	0.33	0.41	0.38	0.39	0.45	0.38
サンゴ 6t	0.31	0.28	0.31	0.38	0.39	0.39	0.39	0.41
サンゴ 6y	0.33	0.28	0.31	0.4	0.43	0.41	0.38	0.4

## 8.5. 全アルカリ度・全炭酸測定の実験結果

表 8-6 時間経過

測定日時	採水日時	重量(g)	塩分 (PSU)	液温 (°C)	室温 (°C)	全アルカリ度 (μmol/kg)	全炭酸 (μmol/kg)	pH	参照段落
2009/8/4 18:09	2009/8/4 18:00	105.893	33.7	25.3	25.2	2508.01	2227.55	8.058	2.3.3.3
2009/8/4 18:58	2009/8/4 18:00	104.144	33.7	24.8	25.3	2505.57	2229.13	8.072	
2009/8/4 20:40	2009/8/4 18:00	103.655	33.7	25.6	26.5	2508.07	2231.7	8.053	
2009/8/4 22:03	2009/8/4 18:00	103.16	33.7	23.9	25.3	2509.22	2228.56	8.078	

表 8-7 ブランク実験

測定日時	採水日時	重量(g)	塩分 (PSU)	液温 (°C)	室温 (°C)	全アルカリ度 (μmol/kg)	全炭酸 (μmol/kg)	pH	電流密度 (mA/m <sup>2</sup> )	参照段落
条件毎										
2009/6/18 10:32	2009/6/18 10:30	102.492	33.2	26.6	26.1	2422.99	2325.08	7.607	0	5.1
2009/6/18 12:07	2009/6/18 12:12	102.493	33.3	28.7	28.7	2417.51	2308.16	7.61		
2009/6/18 13:13	2009/6/18 13:15	102.492	33.3	29.2	29.1	2412.61	2293.32	7.622		
2009/6/19 15:16	2009/6/19 15:23	102.513	33.5	27	26.2	2409.66	2228.63	7.794	0	5.1
2009/6/19 16:16	2009/6/19 16:23	102.517	33.6	28.2	26.9	2410.23	2206.86	7.815		
2009/6/19 17:15	2009/6/19 17:23	102.507	33.5	29.3	29.3	2401.14	2176.59	7.849		
2009/6/25 11:33	2009/6/25 11:30	102.522	33.6	26.5	26.6	2451.17	2279.97	7.764	50	5.1
2009/6/25 12:32	2009/6/25 12:30	102.528	33.7	27.1	26.8	2413.12	2246.1	7.776		
2009/6/25 15:33	2009/6/25 13:30	102.514	33.5	26.9	26.2	2345.87	2132.55	7.88		
2009/12/3 21:00	2009/12/3 21:00	104.067	34.6	27.7	26.2	3111.3	2854.36	7.875	0	5.1
2009/12/3 22:05	2009/12/3 22:00	104.067	34.6	27.8	26.2	3106.94	2851.25	7.869		
2009/12/3 23:05	2009/12/3 23:00	104.069	34.6	27.3	25.4	3106.05	2844.21	7.847		
2009/10/19 21:45	2009/10/19 21:40	104.025	34	26.7	26.3	2530.51	2232.51	8.059	50	5.1
2009/10/19 22:56	2009/10/19 22:52	104.019	33.9	26.2	26.6	2545.43	2265.78	8.051		
2009/10/19 23:46	2009/10/19 23:40	104.028	34	25.8	26	2551.97	2279.82	8.046		

前ページから続く

短時間応答										
2009/7/27 14:18	2009/7/27 14:15	102.552	34	26.5	25.7	2359.83	2159.97	7.876	0	5.1
2009/7/27 15:16	2009/7/27 15:15	102.554	34	26.1	26.8	2357.23	2147.17	7.902		
2009/7/27 16:16	2009/7/27 16:15	102.562	34.1	26.1	26.3	2355.02	2138.65	7.914	50 (ON)	
2009/7/27 17:16	2009/7/27 17:15	102.576	34.3	26.3	25.9	2369.58	2135.22	7.903	50	
2009/7/27 18:16	2009/7/27 18:15	102.568	34.2	26.5	25.6	2361.11	2117.44	7.924		
2009/7/27 19:19	2009/7/27 19:15	102.575	34.3	26.6	26.2	2359.12	2103.5	7.942		
2009/8/5 13:24	2009/8/5 13:00	104.016	34	26.9	27	2573.18	2397.07	7.835	0	5.1
2009/8/5 14:14	2009/8/5 14:00	104.006	33.8	27.5	26.9	2562.04	2365.61	7.851		
2009/8/5 15:28	2009/8/5 15:00	104.008	33.8	26.9	27.3	2549.86	2333.68	7.887	50 (ON)	
2009/8/5 16:20	2009/8/5 16:00	104.017	33.9	26.6	27.1	2533.18	2286.38	7.962	50	
2009/8/5 17:34	2009/8/5 17:00	104.018	33.9	26.3	26.4	2520.38	2256.9	7.995		
2009/8/5 18:25	2009/8/5 18:00	104.026	34.1	26.3	26.9	2511.48	2231.48	8.012		
2009/11/21 20:33	2009/11/21 20:30	104.104	33.2	25.1	23.4	2741.28	2494.34	7.966	0	5.1
2009/11/21 22:31	2009/11/21 22:30	104.107	33.2	24.5	23.8	2747.55	2497.82	7.963		
2009/11/21 23:35	2009/11/21 23:30	104.106	33.2	24.8	23.9	2737.05	2492.97	7.952	50 (ON)	
2009/11/22 0:33	2009/11/22 0:30	104.107	33.2	24.5	24.1	2742.36	2513.6	7.942		
2009/11/22 1:32	2009/11/22 1:30	104.114	33.3	24.7	24	2746.35	2520.61	7.933		
長時間										
2009/11/29 14:33	2009/11/29 14:30	104.035	34	24	21.3	3158.02	2922.02	7.915	50	5.1
2009/11/29 15:05	2009/11/29 15:00	104.016	33.8	24.9	22.8	3161.57	2919.18	7.898		
2009/11/29 15:34	2009/11/29 15:30	104.149	33.8	25.5	23.5	3165.45	2918.67	7.894		
2009/11/29 16:03	2009/11/29 16:00	104.012	33.8	26	23.7	3158.37	2912.86	7.892		
2009/11/29 17:03	2009/11/29 17:00	104.011	33.8	26.1	24	3166.96	2920.11	7.879		
2009/11/29 18:01	2009/11/29 18:00	104.01	33.8	26.5	24.5	3163.47	2909.97	7.898		
2009/11/29 19:01	2009/11/29 19:00	104.009	33.8	26.8	24.2	3167.9	2906.19	7.899		
2009/11/29 20:03	2009/11/29 20:00	104.008	33.8	27	24.4	3159.37	2893.78	7.901		
2009/11/29 21:04	2009/11/29 21:00	104.008	33.8	26.9	24.3	3155.54	2881.11	7.874		

前ページから続く

2009/11/29 22:05	2009/11/29 22:00	104.024	34	26.8	24.1	3158.2	2883.24	7.86		
2009/11/29 23:02	2009/11/29 23:00	104.025	34	26.5	23.1	3157.1	2889.29	7.869		
2009/12/3 18:08	2009/12/3 18:05	104.07	34.6	26.8	25.9	3113.25	2854.68	7.886	0	5.1
2009/12/3 18:59	2009/12/3 19:00	104.069	34.6	27.2	26.1	3109.02	2851.42	7.886		
2009/12/3 20:04	2009/12/3 20:00	104.067	34.6	27.6	26.1	3111.74	2832.24	7.829		
2009/12/3 21:00	2009/12/3 21:00	104.067	34.6	27.7	26.2	3111.3	2854.36	7.875		
2009/12/3 22:05	2009/12/3 22:00	104.067	34.6	27.8	26.2	3106.94	2851.25	7.869		
2009/12/3 23:05	2009/12/3 23:00	104.069	34.6	27.3	25.4	3106.05	2844.21	7.847		

表 8-8 閉鎖実験

測定 日時	採水 日時	重量(g)	塩分 (PSU)	液温 (°C)	室温 (°C)	全アルカ リ度 ( $\mu\text{mol/kg}$ )	全炭酸 ( $\mu\text{mol/kg}$ )	pH	電流密度 ( $\text{mA/m}^2$ )	参照段 落
閉鎖実験										
2009/10/26 12:06	2009/10/26 12:00	104.02	33.8	24	21.4	2528.16	2337.8	7.862	0	3.3 5.6
2009/10/26 13:06	2009/10/26 13:00	104.167	34	24.8	23.6	2483.66	2287.56	7.927		
2009/10/26 14:04	2009/10/26 14:00	104.172	34.1	25.4	24.1	2435.36	2217.77	7.955		
2009/10/26 15:03	2009/10/26 15:00	104.17	34.1	25.9	24.4	2389.02	2149.96	7.989		
2009/10/26 16:04	2009/10/26 16:00	104.163	34	25.9	24.5	2348.71	2087.21	8.028		
2009/10/26 17:04	2009/10/26 17:00	104.18	34.2	25.5	24.5	2301.05	2020.36	8.081		
2009/10/26 18:06	2009/10/26 18:00	104.186	34.3	25.9	24.7	2257.58	1953.41	8.117		
2009/10/26 19:03	2009/10/26 19:00	104.184	34.3	26.3	24.8	2222.83	1898.6	8.148		
2009/10/28 11:08	2009/10/28 11:00	104.207	34.5	24.6	23.3	2671.16	2478.98	7.846	0	5.6
2009/10/28 12:06	2009/10/28 12:00	104.195	34.4	25.6	24.7	2632.7	2411.54	7.883	50 (ON)	
2009/10/28 13:04	2009/10/28 13:00	104.198	34.5	26.7	25.3	2591.95	2340.36	7.93	50	
2009/10/28 14:04	2009/10/28 14:00	104.198	34.5	26.6	25.8	2560.2	2271.84	7.987		
2009/10/28 15:04	2009/10/28 15:00	104.206	34.6	26.8	26.4	2536.07	2219.56	8.029		
2009/10/28 16:07	2009/10/28 16:00	104.218	34.7	25.6	21.9	2489.05	2142.98	8.113		
2009/10/28 17:05	2009/10/28 17:00	104.224	34.8	25.9	25.5	2451.1	2072.09	8.157		
2009/10/28 18:06	2009/10/28 18:00	104.224	34.8	25.9	25.4	2421.63	2012.48	8.211		

前ページから続く

水替えありの実験										
2009/8/5 12:35	2009/8/5 12:00	104.153	33.9	26.3	26.7	2581.89	2412.75	7.805	0	2.3.3.4 3.3
2009/8/5 13:50	2009/8/5 13:00	103.674	34	26.6	27.2	2521.27	2335.78	7.842		
2009/8/5 15:03	2009/8/5 14:00	104.152	33.9	26.6	27.1	2448.74	2249.66	7.866		
2009/8/5 16:47	2009/8/5 15:00	103.669	33.9	25.9	27.1	2362.83	2149.77	7.912		
2009/8/5 17:10	2009/8/5 15:08	103.159	33.8	25.9	26.6	2531.41	2326.51	7.89		
2009/8/5 17:58	2009/8/5 16:00	104.153	33.9	26.3	27.2	2458.99	2241.32	7.913		
2009/8/5 18:49	2009/8/5 17:00	105.914	34	26.1	27.2	2386.53	2154.72	7.951		
2009/8/5 19:13	2009/8/5 18:00	103.683	34.1	26.2	25.1	2322.25	2073.26	7.98		

表 8-9 日周変動実験

測定日時	採水日時	重量(g)	塩分 (PSU)	液温 (°C)	室温 (°C)	全アルカリ度 (μmol/kg)	全炭酸 (μmol/kg)	pH	電流密度 (mA/m <sup>2</sup> )	参照段落
日周変動実験①										
2009/7/18 18:03	2009/7/18 18:00	102.584	34.4	26.1	26.6	2296.56	2061.07	7.951	0	3.2 5.4
2009/7/18 19:01	2009/7/18 19:00	102.592	34.5	26.2	28.6	2235.35	1983.85	7.98		
2009/7/18 20:01	2009/7/18 20:00	102.551	34	26.9	27.4	2267.79	2028.34	7.953		
2009/7/18 21:01	2009/7/18 21:00	102.554	34	26.1	26.5	2223.54	2017.94	7.904		
2009/7/18 22:01	2009/7/18 22:00	102.546	33.9	26.2	27.9	2263.84	2072.51	7.86		
2009/7/18 23:01	2009/7/18 23:00	102.546	33.9	26.2	27.9	2230.79	2076.81	7.781		
2009/7/19 0:01	2009/7/19 0:00	102.537	33.8	26.6	28.4	2271.02	2123.5	7.763		
2009/7/19 1:02	2009/7/19 1:00	102.545	33.9	26.5	28.2	2235.83	2121.03	7.683		
2009/7/19 2:04	2009/7/19 2:00	102.537	33.8	26.5	27.9	2283.12	2165.18	7.692		
2009/7/19 3:03	2009/7/19 3:00	102.531	33.7	26.3	27.8	2294.73	2181.53	7.678		
2009/7/19 4:03	2009/7/19 4:00	102.545	33.9	26.4	28.6	2269.31	2179.05	7.618		
2009/7/19 5:01	2009/7/19 5:00	102.536	33.8	26.8	28.6	2303.56	2201.14	7.651		
2009/7/19 6:01	2009/7/19 6:00	102.537	33.8	26.5	28.2	2287.91	2199.58	7.614		
2009/7/19 7:00	2009/7/19 7:00	102.529	33.7	26.7	28.9	2259.38	2184.18	7.568		
2009/7/19 10:15	2009/7/19 10:00	102.535	33.8	27.2	27.4	2333.29	2190.95	7.738		

前ページから続く

2009/7/19 11:01	2009/7/19 11:00	102.543	33.9	27	27.2	2261.43	2096.73	7.784		
2009/7/19 12:01	2009/7/19 12:00	102.544	33.9	26.8	27.9	2324.19	2145.31	7.823		
2009/7/19 13:02	2009/7/19 13:00	102.544	33.9	26.8	27.4	2254.89	2061.58	7.861		
2009/7/19 14:01	2009/7/19 14:00	102.55	34	27.1	27.4	2181.9	1974.72	7.89		
2009/7/19 15:02	2009/7/19 15:00	102.537	33.8	26.7	27.4	2301.15	2083.61	7.911		
2009/7/19 16:01	2009/7/19 16:00	102.552	34	26.8	27.3	2226.85	1996.15	7.945		
2009/7/19 17:00	2009/7/19 17:00	102.551	34	27	27.2	2152.22	1907.85	7.968		
日周変動実験②										
2009/7/28 8:34	2009/7/28 8:30	102.537	33.8	26.6	26.2	2404.03	2290.86	7.708		
2009/7/28 9:33	2009/7/28 9:30	102.552	34	26.7	26.2	2340.58	2204.41	7.768		
2009/7/28 10:36	2009/7/28 10:30	102.541	33.9	27.9	27.2	2394.46	2231.87	7.804		
2009/7/28 11:35	2009/7/28 11:30	102.551	34	27	25.8	2332.61	2152.69	7.803		
2009/7/28 12:34	2009/7/28 12:30	102.549	34	27.7	25.8	2381.95	2193.78	7.846		
2009/7/28 13:34	2009/7/28 13:30	102.55	34	27.4	26.3	2306.49	2109.36	7.886		
2009/7/28 14:34	2009/7/28 14:30	102.54	33.9	28	26.6	2360.74	2150.66	7.904		
2009/7/28 15:33	2009/7/28 15:30	102.549	34	27.6	24.4	2286.01	2062.83	7.92		
2009/7/28 16:34	2009/7/28 16:30	102.524	33.6	26.1	25.2	2325.94	2097.28	7.966		
2009/7/28 17:32	2009/7/28 17:30	102.538	33.8	26.2	24.7	2254.65	2011.01	8	0	3.2
2009/7/28 19:07	2009/7/28 19:00	102.53	33.7	26.6	24.7	2308.92	2064.3	7.991		5.4
2009/7/28 20:06	2009/7/28 20:00	102.536	33.8	26.8	24.7	2256.99	1998.77	8.013		
2009/7/28 21:06	2009/7/28 21:00	102.519	33.5	25.4	25.3	2317.97	2093.33	7.959		
2009/7/28 22:06	2009/7/28 22:00	102.519	33.5	25.3	25.8	2285.27	2103.96	7.875		
2009/7/28 23:06	2009/7/28 23:00	102.509	33.4	25.9	27	2324.03	2151.15	7.852		
2009/7/29 0:06	2009/7/29 0:00	102.517	33.5	25.9	26.6	2301.94	2166.46	7.765		
2009/7/29 1:08	2009/7/29 1:00	102.524	33.6	25.9	25.9	2276.1	2170.75	7.695		
2009/7/29 2:04	2009/7/29 2:00	102.516	33.5	26.2	27.8	2290.86	2194.58	7.669		
2009/7/29 3:08	2009/7/29 3:00	102.515	33.5	26.5	25.2	2368.63	2249.14	7.731		
2009/7/29 4:06	2009/7/29 4:00	102.517	33.5	26	25.2	2334.82	2242.8	7.661		

前ページから続く

2009/7/29 5:05	2009/7/29 5:00	102.516	33.5	26.2	27.6	2393.2	2283.83	7.702		
2009/7/29 6:06	2009/7/29 6:00	102.498	33.3	27	28.9	2366.04	2283.04	7.623		
2009/7/29 7:05	2009/7/29 7:00	102.504	33.4	27.4	29.7	2406.98	2304.29	7.671		
2009/7/29 8:06	2009/7/29 8:00	102.515	33.5	26.6	25.3	2379.64	2305.34	7.614		
日周変動実験③										
2009/8/18 15:06	2009/8/18 15:00	104.037	34.1	25.4	26	2324.38	2113.52	7.935		
2009/8/18 16:06	2009/8/18 16:00	104.035	34.1	25.9	26.1	2247.17	2024.65	7.949		
2009/8/18 17:05	2009/8/18 17:00	104.019	33.9	26.1	27	2303.88	2081.46	7.95		
2009/8/18 18:05	2009/8/18 18:00	104.028	34	25.6	26.8	2238.96	2004.24	7.984		
2009/8/18 19:04	2009/8/18 19:00	104.021	33.9	25.6	27.4	2290.72	2056.81	7.99		
2009/8/18 20:04	2009/8/18 20:00	104.045	34.2	25.3	26.8	2236.27	1988.82	8.015		
2009/8/18 21:04	2009/8/18 21:00	103.975	34	25.6	26.5	2291.19	2081.58	7.942		
2009/8/18 22:05	2009/8/18 22:00	104.022	33.9	25.3	26.5	2258.42	2096.74	7.825		
2009/8/18 23:04	2009/8/18 23:00	104.023	33.9	25	26.3	2223.77	2118.51	7.739		
2009/8/19 0:04	2009/8/19 0:00	104.01	33.8	26.4	27.7	2301.17	2161.66	7.752		
2009/8/19 1:04	2009/8/19 1:00	104.029	34	25.5	26.4	2266.09	2184.02	7.677		
2009/8/19 2:05	2009/8/19 2:00	104.027	34	26	26.1	2318.71	2211.91	7.677	0	3.2
2009/8/19 3:05	2009/8/19 3:00	104.036	34.1	25.7	26.5	2293.95	2221.46	7.594		5.4
2009/8/19 4:06	2009/8/19 4:00	104.038	34.1	25.3	25.9	2332.8	2245.13	7.653		
2009/8/19 5:33	2009/8/19 5:00	104.019	33.9	26.1	28.3	2313.37	2256.73	7.543		
2009/8/19 6:05	2009/8/19 6:00	104.004	33.7	25.9	27	2346.42	2271.54	7.593		
2009/8/19 7:04	2009/8/19 7:00	104.022	33.9	25.4	26.1	2335.9	2286.33	7.523		
2009/8/19 8:04	2009/8/19 8:00	104.011	33.8	26.1	27.3	2381.02	2309.74	7.588		
2009/8/19 9:05	2009/8/19 9:00	104.034	34.1	26.3	25.8	2304.26	2216.57	7.636		
2009/8/19 10:04	2009/8/19 10:00	104.029	34	25.4	26.2	2374.8	2255.42	7.698		
2009/8/19 11:04	2009/8/19 11:00	104.028	34	25.7	26.1	2312.7	2170.59	7.743		
2009/8/19 12:05	2009/8/19 12:00	104.026	34	26.3	25.8	2366.06	2211.99	7.773		
2009/8/19 13:04	2009/8/19 13:00	104.041	34.2	26.3	27	2288.78	2111.63	7.823		

前ページから続く

2009/8/19 14:05	2009/8/19 14:00	104.039	34.2	27	26.5	2350.27	2170.22	7.821		
2009/8/19 15:03	2009/8/19 15:00	104.033	34.1	26.6	25.4	2279.72	2081.62	7.862		
日周変動実験④										
2009/12/16 11:11	2009/12/16 11:00	103.956	33	24.6	23.8	2875.4	2734.66	7.791	0	3.2 5.4
2009/12/16 12:01	2009/12/16 12:00	103.967	33.2	25.7	25.2	2818.48	2649.24	7.807		
2009/12/16 13:03	2009/12/16 13:00	103.967	33.2	25.8	25.8	2756.81	2565.07	7.828		
2009/12/16 14:03	2009/12/16 14:00	103.956	33.1	26.6	26.2	2906.25	2713.41	7.85		
2009/12/16 15:04	2009/12/16 15:00	103.956	33.1	26.4	26.3	2824.28	2637.62	7.875		
2009/12/16 16:01	2009/12/16 16:00	103.957	33.5	26.4	26.3	2731.08	2510.87	7.895		
2009/12/16 17:04	2009/12/16 17:00	103.981	33.4	26	26.4	2892.64	2667.4	7.921		
2009/12/16 18:14	2009/12/16 18:00	103.974	33.3	25.8	26.3	2801.56	2560.4	7.947		
2009/12/16 19:00	2009/12/16 19:00	103.974	33.5	25.8	26.2	2751.47	2490.33	7.968		
2009/12/16 20:01	2009/12/16 20:00	103.995	33.6	26.3	25.7	2880.72	2622.95	7.945		
2009/12/16 21:04	2009/12/16 21:00	103.975	33.3	25.7	25.4	2842.49	2610.22	7.882		
2009/12/16 22:03	2009/12/16 22:00	103.981	33.4	25.9	25.2	2789.58	2621.64	7.793		
2009/12/16 23:04	2009/12/16 23:00	103.974	33.3	25.9	25.3	2885.71	2659.97	7.832		
2009/12/17 0:00	2009/12/17 0:00	103.973	33.3	26.2	25.3	2855.11	2697.7	7.78		
2009/12/17 1:02	2009/12/17 1:00	103.973	33.3	26	24.8	2812.9	2697.71	7.69		
2009/12/17 2:01	2009/12/17 2:00	103.974	33.3	25.7	24.8	2906.43	2738.48	7.809		
2009/12/17 2:59	2009/12/17 3:00	103.982	33.4	25.9	24.9	2867.42	2741.76	7.721		
2009/12/17 4:01	2009/12/17 4:00	103.982	33.4	25.8	24.7	2827.48	2741.57	7.63		
2009/12/17 5:01	2009/12/17 5:00	103.975	33.3	25.4	24.6	2921.62	2775.38	7.774		
2009/12/17 6:02	2009/12/17 6:00	103.983	33.4	25.5	24.6	2884.77	2779.5	7.681		
2009/12/17 7:33	2009/12/17 7:30	103.982	33.4	25.7	24.7	2837.35	2779.11	7.554		
2009/12/17 8:01	2009/12/17 8:00	103.983	33.4	25.4	24.9	2946.26	2809.39	7.749		
2009/12/17 9:02	2009/12/17 9:00	103.997	33.6	25.8	25.1	2883.01	2746.63	7.743		
2009/12/17 10:02	2009/12/17 10:00	104.006	33.7	25.5	24.8	2807.97	2648.73	7.786		



前ページから続く

日周変動実験⑤										
2009/9/18 11:07	2009/9/18 11:00	104.03	34	25.2	24.7	2450.07	2297.77	7.779	50	5.4
2009/9/18 12:06	2009/9/18 12:00	103.991	34	25.4	26.6	2408.62	2224.48	7.825		
2009/9/18 13:05	2009/9/18 13:00	103.995	34	26.3	27	2408.69	2225.63	7.835		
2009/9/18 14:06	2009/9/18 14:00	103.973	34	26.1	27	2367.55	2156.84	7.889		
2009/9/18 15:05	2009/9/18 15:00	103.978	34	26.8	27.2	2402.6	2189.31	7.896		
2009/9/18 16:05	2009/9/18 16:00	104.034	34.1	26.2	26.8	2309.71	2068.02	7.967		
2009/9/18 17:07	2009/9/18 17:00	104.027	34	26.1	27.5	2362.21	2124.93	7.965		
2009/9/18 18:06	2009/9/18 18:00	104.035	34.1	26	27.7	2289.35	2028.11	8.018		
2009/9/18 19:07	2009/9/18 19:00	104.175	34.2	26.6	27.5	2347.74	2088.13	7.997		
2009/9/18 20:06	2009/9/18 20:00	104.049	34.3	26.3	27.8	2274.56	1994.44	8.046		
2009/9/18 21:07	2009/9/18 21:00	104.183	34.3	26.7	27.9	2338.06	2096.66	7.948		
2009/9/18 22:06	2009/9/18 22:00	104.042	34.2	26	27.4	2302.01	2126.38	7.836		
2009/9/18 23:06	2009/9/18 23:00	104.047	34.3	26.8	27.7	2353.12	2173.5	7.836		
2009/9/19 0:06	2009/9/19 0:00	104.066	34.5	25.9	27.9	2315.36	2189.19	7.725		
2009/9/19 1:04	2009/9/19 1:00	104.04	34.2	26.6	27	2362.78	2227.45	7.737		
2009/9/19 2:09	2009/9/19 2:00	104.058	34.4	25.9	26.7	2330.47	2242.3	7.622		
2009/9/19 3:18	2009/9/19 3:00	104.047	34.3	26.7	27.8	2379.63	2274.42	7.648		
2009/9/19 4:15	2009/9/19 4:00	104.043	34.2	25.8	27	2356.57	2296.31	7.544		
2009/9/19 6:03	2009/9/19 5:00	104.033	34.2	28.8	27.8	2395.98	2302.61	7.6		
2009/9/19 6:34	2009/9/19 6:00	104.194	34.4	25.8	27.4	2369.74	2326.47	7.504		
2009/9/19 7:06	2009/9/19 7:00	104.056	34.4	26.6	27.9	2422.95	2350.02	7.578		
2009/9/19 8:10	2009/9/19 8:00	104.074	34.6	25.9	27.3	2389.02	2350.33	7.485		
2009/9/19 9:08	2009/9/19 9:00	104.062	34.5	26.9	27.3	2420.63	2321.63	7.645		
2009/9/19 10:09	2009/9/19 10:00	104.079	34.7	26.6	27.3	2343.44	2210.53	7.728		
日周変動実験⑥										
2009/10/4 8:29	2009/10/4 8:25	104.037	34.1	25.5	25.9	2469.97	2375.56	7.671	0	5.4
2009/10/4 9:29	2009/10/4 9:25	104.035	34.1	25.8	26.4	2397.69	2268.04	7.762	0	

前ページから続く

2009/10/4 10:06	2009/10/4 10:00	103.958	33.1	26	26.8	2402.37	2270.73	7.774	0	
2009/10/4 11:05	2009/10/4 11:00	103.958	33.1	26.1	26.8	2331.74	2162.93	7.853	50	
2009/10/4 12:06	2009/10/4 12:00	103.966	33.2	25.9	26.2	2246.28	2048.51	7.93	50	
2009/10/4 13:08	2009/10/4 13:00	103.942	32.9	26.1	26.5	2385.32	2198.82	7.891	50	
2009/10/4 14:05	2009/10/4 14:00	103.965	33.2	26.1	26.3	2304.49	2088.57	7.952	50	
2009/10/4 15:08	2009/10/4 15:00	103.951	33	25.7	26.8	2376.04	2161.89	7.959	50	
2009/10/4 16:58	2009/10/4 16:00	103.943	33	28.2	26.8	2292.25	2044.68	7.984	50	
2009/10/4 17:38	2009/10/4 17:00	103.96	33.1	25.5	26.6	2364.36	2129.62	8.007	50	
2009/10/4 18:08	2009/10/4 18:00	103.949	33	26.2	26.5	2277.81	2009.58	8.062	50	
2009/10/4 19:06	2009/10/4 19:00	103.944	32.9	25.7	26.8	2347	2094.11	8.029	50	
2009/10/4 20:10	2009/10/4 20:00	103.943	32.9	25.8	27.1	2280.2	1990.1	8.07	0	
2009/10/4 21:06	2009/10/4 21:00	103.942	32.9	26.3	26.6	2345.31	2108.94	7.991	0	
2009/10/4 22:16	2009/10/4 22:10	103.959	33.1	25.7	26.9	2307.57	2136.32	7.866	0	
2009/10/4 23:07	2009/10/4 23:00	103.949	33	26.3	26.6	2359.2	2174.18	7.887	0	
2009/10/5 0:05	2009/10/5 0:00	103.944	32.9	25.8	27.3	2326.64	2182.97	7.769	0	
2009/10/5 1:06	2009/10/5 1:00	103.951	33	25.7	27.2	2365.48	2216.69	7.811	0	
2009/10/5 2:11	2009/10/5 2:07	103.952	33.9	25.5	27.4	2340.57	2239.97	7.689	0	
2009/10/5 3:04	2009/10/5 3:00	103.951	33	25.9	27.2	2384.02	2263.68	7.745	0	
2009/10/5 4:07	2009/10/5 4:00	103.952	33	25.7	27.3	2356.36	2279.76	7.625	0	
2009/10/5 5:06	2009/10/5 5:00	103.951	33	26	27.2	2395.74	2291.88	7.698	0	
2009/10/5 6:03	2009/10/5 6:00	103.951	33	25.9	27.1	2379.13	2316.29	7.582	0	
2009/10/5 6:46	2009/10/5 6:40	103.942	32.9	26.2	27.2	2412.57	2320.08	7.671	0	
2009/10/5 7:47	2009/10/5 7:40	103.951	33	25.8	27.5	2390.04	2342.24	7.552	0	
日周変動実験⑦										
2009/10/13 12:41	2009/10/13 11:30	104.01	33.7	24.6	24.8	2231.05	2262.67	7.302	0	5.4
2009/10/13 14:14	2009/10/13 14:10	104.012	33.8	25.8	26.2	2445.65	2251.41	7.906	0	
2009/10/13 15:18	2009/10/13 15:10	104.021	33.9	25.6	26.5	2372.47	2173.92	7.915	0	
2009/10/13 16:06	2009/10/13 16:00	104.018	33.9	26.5	26.8	2486.78	2268.13	7.912	0	

前ページから続く

2009/10/13 17:05	2009/10/13 17:00	104.019	33.9	26.2	26.6	2446.35	2222.93	7.941	0	
2009/10/13 18:03	2009/10/13 18:00	104.021	33.9	25.5	26.7	2439.49	2207.58	7.981	0	
2009/10/13 19:03	2009/10/13 19:00	104.021	33.8	25.5	27	2379.43	2142.56	7.982	0	
2009/10/13 20:34	2009/10/13 20:00	104.017	33.8	26.6	27	2351.59	2101.64	8	50	
2009/10/13 21:05	2009/10/13 21:00	104.013	33.8	25.6	26.8	2330.82	2119.39	7.942	50	
2009/10/13 22:04	2009/10/13 22:00	103.988	33.5	26.3	26.4	2424.81	2226.2	7.904	50	
2009/10/13 23:08	2009/10/13 23:00	104.004	33.7	26	26.4	2383.43	2227.77	7.803	50	
2009/10/14 0:05	2009/10/14 0:00	103.995	33.6	26.4	26.5	2431.77	2274.61	7.798	50	
2009/10/14 1:04	2009/10/14 1:00	104.004	33.7	26.1	26.3	2404.18	2289.16	7.706	50	
2009/10/14 2:04	2009/10/14 2:00	103.995	33.6	26.3	26.3	2453.15	2326.77	7.729	50	
2009/10/14 3:11	2009/10/14 3:00	104.004	33.7	25.9	26.2	2418.23	2332.52	7.637	50	
2009/10/14 4:05	2009/10/14 4:00	103.996	33.6	26.1	26.2	2464.02	2361.94	7.68	50	
2009/10/14 5:06	2009/10/14 5:00	103.997	33.6	25.8	26.1	2436.22	2366.62	7.592	50	
2009/10/14 6:08	2009/10/14 6:00	104.006	33.7	25.5	25.8	2430.97	2388.99	7.515	50	
2009/10/14 8:04	2009/10/14 8:00	103.998	33.6	25.6	25.6	2477.77	2430.04	7.545	50	
2009/10/14 9:06	2009/10/14 9:00	104.005	33.7	25.9	26.6	2423.61	2367.95	7.56	0	
2009/10/14 10:06	2009/10/14 10:00	103.994	33.6	26.7	27.1	2494.71	2369.35	7.717	0	
2009/10/14 11:05	2009/10/14 11:00	104.011	33.8	26.2	27.2	2432.29	2302.41	7.747	0	
2009/10/14 12:05	2009/10/14 12:00	104.003	33.7	26.2	26.9	2484.85	2316.89	7.82	0	
NA	2009/10/14 13:00	NA	33.8	26.2	26.4	2421.56	2254.76	7.822	0	
日周変動実験⑧										
2009/12/18 11:03	2009/12/18 11:00	104.008	33.7	25	23.2	2974.95	2814.49	7.813		
2009/12/18 12:00	2009/12/18 12:00	104.016	33.8	25	23.8	2905.64	2729.23	7.838		
2009/12/18 13:01	2009/12/18 13:00	104.03	34	25.2	24.4	2807.58	2610.78	7.858		
2009/12/18 14:01	2009/12/18 14:00	104.013	33.8	25.7	24.5	2966.21	2744.02	7.858	50	5.4
2009/12/18 15:05	2009/12/18 15:00	104.022	33.9	25.3	24.2	2874.56	2656.32	7.911		
2009/12/18 16:02	2009/12/18 16:00	104.023	33.9	25.1	24.1	2782.71	2553.4	7.93		
2009/12/18 17:05	2009/12/18 17:00	104.02	33.9	25.9	24.3	2944.17	2701.12	7.942		

前ページから続く

2009/12/18 19:01	2009/12/18 18:00	104.014	33.9	27.7	24.5	2869.29	2602.8	7.95		
2009/12/18 19:30	2009/12/18 19:00	103.011	34	24.6	24.5	2781.5	2506.94	8.01		
2009/12/18 20:02	2009/12/18 20:00	103.996	33.6	26.2	24.7	2924.68	2662.29	7.97		
2009/12/18 21:00	2009/12/18 21:00	104.014	33.8	25.3	24.2	2887.8	2662.75	7.913		
2009/12/18 22:00	2009/12/18 22:00	104.018	33.8	24.5	23.9	2850.16	2663.98	7.769		
2009/12/18 23:12	2009/12/18 23:00	104.007	33.7	25.3	23.8	2933.84	2726.55	7.885		
2009/12/19 0:17	2009/12/19 0:00	104.007	33.7	25.2	23.5	2893.16	2722.88	7.756		
2009/12/19 1:12	2009/12/19 1:00	104.009	33.8	24.7	23.1	2857.7	2725.54	7.63		
2009/12/19 2:01	2009/12/19 2:00	104.024	33.9	24.9	22.8	2947.87	2781.61	7.829		
2009/12/19 3:00	2009/12/19 3:00	104.009	33.7	24.7	22.7	2907.69	2756.32	7.684		
2009/12/19 4:00	2009/12/19 4:00	104.008	33.7	24.9	22.7	2870	2755.07	7.602		
2009/12/19 5:02	2009/12/19 5:00	104.008	33.7	24.9	22.7	2972.9	2824.57	7.787		
2009/12/19 6:01	2009/12/19 6:00	104.009	33.7	24.8	22.6	2924.64	2804.79	7.728		
2009/12/19 7:00	2009/12/19 7:30	104.008	33.7	25.1	22.8	2898.71	2820.95	7.629		
2009/12/19 8:02	2009/12/19 8:00	104.002	33.6	24.6	22.9	2984.53	2845.52	7.774		
2009/12/19 9:01	2009/12/19 9:00	104	33.6	25.1	23.1	2926.26	2791.21	7.755		
2009/12/19 10:01	2009/12/19 10:00	104.022	33.9	25.4	23.3	2848.48	2691.77	7.792		

表 8-10 光量実験

測定日時	採水日時	重量(g)	塩分 (PSU)	液温 (°C)	室温 (°C)	全アルカリ度 (μmol/kg)	全炭酸 (μmol/kg)	pH	光量子量	参照段落
暗条件										
2009/10/27 12:34	2009/10/27 12:30	104.016	33.8	24.8	23.2	2668.6	2473.06	7.868	0.008	4.1 5.5
2009/10/27 13:34	2009/10/27 13:30	104.028	34	25.6	25.6	2622.87	2466.28	7.766		
2009/10/27 14:35	2009/10/27 14:30	104.02	33.9	25.8	25.9	2576.57	2472.54	7.701		
2009/10/27 15:07	2009/10/27 15:00	104.035	34.1	25.9	25.9	2657.72	2431.93	7.905		
2009/10/27 16:03	2009/10/27 16:00	104.027	34	26.1	26	2608.72	2429.37	7.812		
2009/10/27 17:03	2009/10/27 17:00	104.026	34	26.2	25.9	2569.71	2443.67	7.746		
2009/10/27 18:01	2009/10/27 18:00	104.034	34.1	26.1	25.7	2645.02	2404.38	7.927		

前ページから続く

2009/10/27 19:05	2009/10/27 19:00	104.027	34	26	25.6	2593.97	2395.58	7.848		
2009/10/27 20:04	2009/10/27 20:00	104.035	34.1	26	25.7	2548.46	2382.13	7.736		
2009/10/27 21:04	2009/10/27 21:00	104.035	34.1	25.8	25.4	2524.51	2396.53	7.637		
暗条件の翌日										
2009/10/28 12:33	2009/10/28 12:30	104.066	34.5	25.9	25	2662.61	2443.39	7.879	105	4.1
2009/10/28 13:34	2009/10/28 13:30	104.059	34.4	25.6	25.5	2601.86	2358.79	7.935		
2009/10/28 14:34	2009/10/28 14:30	104.076	34.6	25.3	25.8	2549	2277.67	7.986		
2009/10/28 16:35	2009/10/28 16:00	104.062	34.4	24.9	24	2637.17	2375.14	7.985		
2009/10/28 17:33	2009/10/28 17:00	104.059	34.4	25.7	25.6	2580.84	2290.07	8.019		
弱光条件										
2009/10/21 14:05	2009/10/21 14:00	103.987	33.8	26.4	26.3	2536.7	2324.03	7.882	105	4.1
2009/10/21 15:05	2009/10/21 15:00	104.01	33.8	26.4	27.2	2469.21	2284.7	7.877		
2009/10/21 16:05	2009/10/21 16:00	104.026	34	26.2	27.2	2407.16	2231.85	7.843		
2009/10/21 17:04	2009/10/21 17:00	104.007	33.8	27.3	27.2	2520.44	2269.97	7.938	106	
2009/10/21 18:07	2009/10/21 18:00	104.017	33.9	26.7	26.6	2447.79	2228.24	7.938	107	
2009/10/21 19:08	2009/10/21 19:00	104.026	34	26.3	26.3	2387.32	2181.85	7.919	110.7	
2009/10/21 19:35	2009/10/21 19:30	104.01	33.8	26.6	26.1	2500.61	2232.25	7.979	102.9	
2009/10/21 20:04	2009/10/21 20:00	104.01	33.8	26.5	26.1	2466.27	2219.59	7.996	0.004	
2009/10/21 20:36	2009/10/21 20:30	104.018	33.9	26.3	24.8	2439.13	2208.71	7.967		
2009/10/21 21:33	2009/10/21 21:30	104.021	33.9	25.5	24.3	2405.54	2223.11	7.886		
2009/10/21 22:03	2009/10/21 22:00	104.026	34	26.2	23.8	2500.8	2288.45	7.923		
2009/10/21 23:02	2009/10/21 23:00	104.028	33.8	25.7	25.3	2463.13	2297.98	7.84		
弱光条件の翌日										
2009/10/22 12:06	2009/10/22 12:00	104.015	33.9	27.2	27.1	2545	2366	7.842	210	4.1
2009/10/22 13:03	2009/10/22 13:00	104.017	33.9	26.8	27.7	2473.43	2279.34	7.881		
2009/10/22 14:04	2009/10/22 14:00	104.032	34.1	26.8	27.8	2390.56	2185.75	7.909		
2009/10/22 14:35	2009/10/22 14:30	104.017	33.9	26.8	27.8	2531.58	2293.87	7.913		
2009/10/22 15:33	2009/10/22 15:30	104.009	33.8	26.8	27.8	2454.52	2214.48	7.955		

前ページから続く

2009/10/22 16:40	2009/10/22 16:30	104.032	34.1	26.8	27.7	2371.32	2114.96	7.999		
強光条件①										
2009/11/19 12:09	2009/11/19 12:00	104.093	34.7	23.2	20.6	2711.84	2614.49	7.67	389	4.1
2009/11/19 13:02	2009/11/19 13:00	104.097	34.9	25.7	23.7	2709.4	2525.64	7.85		
2009/11/19 14:06	2009/11/19 14:00	104.137	35	25.3	24.6	2625.1	2351.2	7.995		
2009/11/19 14:35	2009/11/19 14:30	104.03	34	25.4	24.7	2675.69	2446.59	7.935		
2009/11/19 15:32	2009/11/19 15:30	104.038	34.1	25.3	25	2603.76	2328.39	8.007		
2009/11/19 16:34	2009/11/19 16:30	104.037	34.1	25.3	25	2522.21	2206.61	8.08		
2009/11/19 17:04	2009/11/19 17:00	104.028	34	25.7	25	2667.43	2414.25	7.969		
2009/11/19 18:03	2009/11/19 18:00	104.037	34.1	25.5	25.2	2608	2311.14	8.041		
2009/11/19 19:11	2009/11/19 19:00	104.058	34.4	25.8	25.3	2533.54	2190.85	8.118		
強光条件の翌日										
2009/11/20 12:59	2009/11/20 13:00	104.016	34.2	25	23	2753.78	2546.35	7.874	100	4.1
2009/11/20 13:58	2009/11/20 14:00	104.054	34.3	25.1	24.5	2687.67	2461.62	7.92		
2009/11/20 14:57	2009/11/20 15:00	104.045	34.2	25.2	25.1	2609.7	2370.36	7.938		
2009/11/20 16:00	2009/11/20 16:00	104.06	34.4	25.5	25.7	2528.33	2275.27	7.962		
強光条件②										
2009/11/4 11:04	2009/11/4 11:00	104.087	34.4	23	19.2	2563.96	2386.85	7.85	213	4.1
2009/11/4 12:05	2009/11/4 12:00	104.065	34.4	24.2	21	2491.58	2298.19	7.874		
2009/11/4 13:09	2009/11/4 13:00	104.054	34.3	25	21.9	2407.06	2211.16	7.925	336	
2009/11/4 14:04	2009/11/4 14:00	104.051	34.3	25.7	22.4	2319.82	2089.03	7.982		
2009/11/4 15:13	2009/11/4 14:30	104.053	34.3	25.2	23	2547.24	2300.64	7.958		
2009/11/4 15:40	2009/11/4 15:30	104.049	34.2	24.4	23.2	2418.85	2138.81	7.977		
2009/11/4 16:35	2009/11/4 16:30	104.053	34.3	25.2	23.1	2363.65	2068	8.097		
2009/11/4 17:34	2009/11/4 17:30	104.054	34.3	25.1	23.4	2275.21	1949.74	8.155		
2009/11/4 18:03	2009/11/4 18:00	104.045	34.2	25.3	23.3	2519.45	2237.11	8.022		
2009/11/4 19:03	2009/11/4 19:00	104.043	34.2	25.7	23	2438.23	2125.12	8.072		
2009/11/4 20:03	2009/11/4 20:00	104.045	34.2	25.2	22.6	2369.89	2029.44	8.166		

前ページから続く

2009/11/4 21:06	2009/11/4 21:00	104.065	34.4	24.3	22.1	2325.3	2025.42	8.112	0	
--------------------	--------------------	---------	------	------	------	--------	---------	-------	---	--

表 8-11 暗条件実験

測定日時	採水日時	重量(g)	塩分 (PSU)	液温 (°C)	室温 (°C)	全アルカリ度 (μmol/kg)	全炭酸 (μmol/kg)	pH	電流密度 (mA/m <sup>2</sup> )	参照段落
暗条件 夜										
2009/11/21 20:05	2009/11/21 20:00	103.972	33.2	24.5	23.1	2730.18	2483.23	7.984	0	3.2 5.5
2009/11/21 21:01	2009/11/21 21:00	103.969	33.2	25.1	23.6	2707.44	2493.9	7.887		
2009/11/21 22:01	2009/11/21 22:00	103.97	33.2	25	23.7	2691.16	2514.46	7.818		
2009/11/21 23:02	2009/11/21 23:00	103.97	33.2	24.8	23.9	2746.44	2548.23	7.877		
2009/11/22 0:04	2009/11/22 0:00	103.978	33.3	24.9	24	2717.49	2554.58	7.812		
2009/11/22 1:02	2009/11/22 1:00	103.97	33.2	25	23.9	2695.51	2556.46	7.739		
2009/11/22 2:58	2009/11/22 2:00	103.975	33.3	25.5	23.3	2759.74	2592.99	7.818		
2009/11/22 3:33	2009/11/22 3:00	104.117	33.3	23.9	23.2	2743.63	2610.61	7.759		
2009/11/22 4:04	2009/11/22 4:00	103.97	33.2	24.9	23.5	2727.47	2620.55	7.691		
2009/11/22 5:02	2009/11/22 5:00	103.985	33.4	25.1	23.3	3109.09	2990.32	7.293		
2009/11/22 6:03	2009/11/22 6:00	103.97	33.2	24.9	23.1	2702.5	2634.62	7.587		
2009/11/22 7:03	2009/11/22 7:00	103.972	33.2	24.5	23.4	2669.63	2617.7	7.55		
暗条件 2 日目 朝										
2009/11/22 8:00	2009/11/22 8:00	103.969	33.2	25	23.4	2814.2	2686.18	7.739	0	3.25.5
2009/11/22 8:57	2009/11/22 9:00	103.968	33.2	25.5	23.9	2795.37	2695.49	7.667		
2009/11/22 11:04	2009/11/22 10:00	103.967	33.2	25.7	22	2769.92	2671.61	7.65		
電気なし 1 日目 昼										
2009/12/22 12:04	2009/12/22 12:00	104.048	34.6	21.4	17.1	3089.58	2874.12	7.93	0	5.5
2009/12/22 12:42	2009/12/22 12:30	104.085	34.6	23.3	20.3	3059.5	2871.03	7.824		
2009/12/22 13:38	2009/12/22 13:00	104.225	34.6	22.4	22.3	3023.37	2855.63	7.796		
2009/12/22 14:06	2009/12/22 14:00	104.095	34.8	24.4	22.8	3001.68	2866.94	7.625		
2009/12/22 15:02	2009/12/22 15:00	104.092	34.8	25.1	23.5	2922.55	2855.51	7.607		
電気なし 2 日目 昼										
2009/12/23 14:22	2009/12/23 14:20	104.015	34.1	25.1	23.6	3063.51	2822.23	7.904	0	5.5

前ページから続く

2009/12/23 14:52	2009/12/23 14:50	104.036	34.1	25.8	23.9	3052.05	2829.13	7.865		
2009/12/23 15:21	2009/12/23 15:20	104.043	34.2	25.9	23.3	3032.7	2831.03	7.826		
2009/12/23 15:51	2009/12/23 15:50	104.043	34.2	25.9	22.7	3022.5	2836.33	7.796		
2009/12/23 16:22	2009/12/23 16:20	104.044	34.2	25.6	22.4	2998.66	2829.31	7.765		
電気なし 2日目夜										
2009/12/23 20:48	2009/12/23 20:46	104.023	34.1	25	22.6	3050.7	2777.47	7.949	0	5.5
2009/12/23 21:18	2009/12/23 21:16	104.039	34.1	25	22.5	3020.22	2753.94	7.871		
2009/12/23 21:47	2009/12/23 21:46	104.038	34.1	25.1	22.6	3012.87	2777.83	7.898		
2009/12/23 22:17	2009/12/23 22:16	104.038	34.1	25.2	22.9	3007.06	2785.02	7.868		
2009/12/23 22:48	2009/12/23 22:46	104.045	34.2	25.2	23.4	2989.87	2778.61	7.855		
電気なし 3日目昼										
2009/12/24 14:25	2009/12/24 14:20	104.037	34.3	25.5	23.6	3098.36	2848.58	7.908	0	5.5
2009/12/24 14:54	2009/12/24 14:50	104.049	34.3	26.3	23.8	3094.49	2856.66	7.876		
2009/12/24 15:23	2009/12/24 15:20	104.057	34.4	26.3	23.6	3075.22	2850.45	7.859		
2009/12/24 15:52	2009/12/24 15:50	104.056	34.4	26.5	23.2	3054.69	2848.84	7.827		
2009/12/24 16:23	2009/12/24 16:20	104.059	34.4	25.6	23.8	3062.92	2866.05	7.807		
電気なし 3日目夜										
2009/12/24 20:00	2009/12/24 20:00	104.038	34.1	25.3	24.8	3032.35	2730.55	7.998	0	5.5
2009/12/24 20:31	2009/12/24 20:30	104.021	33.9	25.7	25	3005.74	2700.37	7.932		
2009/12/24 21:01	2009/12/24 21:00	104.012	33.8	25.9	25.2	3005.18	2731.19	7.898		
2009/12/24 21:30	2009/12/24 21:30	104.011	33.8	26.1	25.2	2995.93	2732.56	7.888		
2009/12/24 22:01	2009/12/24 22:00	104.004	33.7	25.9	24.1	2942.45	2697.63	7.865		
電気あり 1日目昼										
2010/1/6 12:58	2010/1/6 12:55	103.991	35	23.7	21.3	3188.78	2925.66	7.959	50	5.5
2010/1/6 13:28	2010/1/6 13:25	104.009	35	24.4	22.4	3037.33	2799.28	7.907		
2010/1/6 13:58	2010/1/6 13:55	103.984	35	25.2	22.9	3018.24	2802.8	7.842		
2010/1/6 14:27	2010/1/6 14:25	103.975	35	25.5	23.3	2992.95	2798.12	7.774		
2010/1/6 14:58	2010/1/6 14:55	103.984	35	25.2	23.4	2967.06	2797.63	7.713		



前ページから続く

電気あり 1日目夜										
2010/1/6 20:33	2010/1/6 20:30	104.029	33.8	25.4	24	3074.31	2708.44	8.031	50	5.5
2010/1/6 21:02	2010/1/6 21:00	104.014	33.8	25.4	23.9	2917.95	2626.89	7.993		
2010/1/6 21:32	2010/1/6 21:30	104.007	33.7	25.2	24.1	2893.54	2624.8	7.965		
2010/1/6 22:01	2010/1/6 22:00	104.014	33.8	25.5	23.8	2868.46	2638.49	7.94		
2010/1/6 22:33	2010/1/6 22:30	104.013	33.8	25.5	23.9	2854.37	2643.79	7.908		
電気あり 2日目昼										
2010/1/7 12:57	2010/1/7 12:55	104.042	34.1	24.3	20.5	2864.96	2706.58	7.684	50	5.5
2010/1/7 13:26	2010/1/7 13:25	104.042	34.1	24.3	20.7	2842.47	2719.52	7.739		
2010/1/7 13:55	2010/1/7 13:55	104.041	34.1	24.5	21	2834	2731.17	7.687		
2010/1/7 14:25	2010/1/7 14:25	104.041	34.1	24.5	20.8	2808.28	2718.52	7.661		
2010/1/7 14:56	2010/1/7 14:55	104.043	34.1	24.1	20.6	2798.77	2717.95	7.653		
電気あり 2日目夜										
2010/1/7 20:31	2010/1/7 20:30	104.037	34.1	25.4	23.4	2958.95	2647.56	8.013	50	5.5
2010/1/7 21:01	2010/1/7 21:00	104.038	34.1	25.2	23.3	2925.46	2631.01	8.002		
2010/1/7 21:31	2010/1/7 21:30	104.038	34.1	25.2	23.3	2928.56	2652.32	7.966		
2010/1/7 22:03	2010/1/7 22:00	104.029	34	25.4	23.5	2916.05	2656.36	7.928		
2010/1/7 22:33	2010/1/7 22:30	104.037	34.1	25.4	24.6	2893.34	2662.75	7.937		
電気あり 3日目昼										
2010/1/8 13:02	2010/1/8 13:00	104.034	34.1	26.1	25.5	2972.07	2710.2	7.885	50	5.5
2010/1/8 13:32	2010/1/8 13:30	104.027	34	26.1	25.7	2960.12	2720.08	7.896		
2010/1/8 14:01	2010/1/8 14:00	104.041	34.2	26.3	25.9	2953.4	2727.75	7.863		
2010/1/8 14:30	2010/1/8 14:30	104.041	34.2	26.5	25.6	2938.49	2735.24	7.826		
2010/1/8 15:00	2010/1/8 15:00	104.041	34.2	26.3	25.4	2916.95	2734.76	7.836		
電気あり 3日目夜										
2010/1/8 20:32	2010/1/8 20:30	104.04	34.1	24.6	22.2	2934.73	2619.54	8.039	50	5.5
2010/1/8 23:45	2010/1/8 21:00	103.188	34	22.9	23.3	2963.88	2637.6	8.074		
2010/1/8 21:30	2010/1/8 21:30	104.031	34	25	22.8	2913.42	2620.54	8.001		
2010/1/9 16:25	2010/1/8 22:00	103.418	34.1	19.1	20	2901.78	2613.62	NA		

前ページから続く

2010/1/8 22:31	2010/1/8 22:30	104.03	34	25.2	23.3	2892.57	2626.87	7.957		
電気なし 1日目昼										
2010/1/14 13:28	2010/1/14 13:05	104.026	33.9	24.5	22.7	2835.38	2573.26	7.981	0	5.5
2010/1/14 13:58	2010/1/14 13:35	103.377	33.9	23.9	22.3	2757.45	2557.06	7.895		
2010/1/14 14:36	2010/1/14 14:10	104.032	33.9	23.1	21.9	2771.01	2561.03	7.902		
2010/1/14 15:56	2010/1/14 14:35	103.388	33.9	21.7	21.2	2747.12	2555.81	7.883		
2010/1/14 15:13	2010/1/14 15:10	104.026	33.9	24.3	21.7	2721.24	2569.22	7.794		
電気なし 1日目夜										
2010/1/14 20:31	2010/1/14 20:30	104.026	33.9	24.5	23	2844.42	2506.58	8.079	0	5.5
2010/1/14 21:00	2010/1/14 21:00	104.016	33.8	25	23	2791	2496.64	8.039		
2010/1/14 21:31	2010/1/14 21:30	104.009	33.7	24.7	22.8	2766.41	2492.15	8.008		
2010/1/14 22:00	2010/1/14 22:00	104.01	33.7	24.6	22.7	2745.23	2498.79	7.97		
2010/1/14 22:31	2010/1/14 22:30	104.009	33.7	24.8	22.8	2724.61	2501.88	7.931		

表 8-12 電気実験 条件毎の比較実験

測定 日時	採水 日時	重量(g)	塩分 (PSU)	液温 (°C)	室温 (°C)	全アルカ リ度 ( $\mu\text{mol/kg}$ )	全炭酸 ( $\mu\text{mol/kg}$ )	pH	電流密度 ( $\text{mA/m}^2$ )	参照段 落
2 時間実験										
水槽 2 昼 電気なし										
2009/6/25 14:33	2009/6/25 15:00	102.531	33.7	26.2	25.9	2391.81	2188.94	7.871	0	5.2
2009/6/25 15:33	2009/6/25 16:00	102.514	33.5	26.9	26.2	2345.87	2132.55	7.88		
2009/6/25 16:33	2009/6/25 17:00	102.529	33.7	26.8	26.5	2298.85	2068.6	7.916		
2009/10/16 11:46	2009/10/16 11:15	103.161	33.8	25.5	25.8	2660.64	2485.03	7.801	0	5.2
2009/10/16 13:10	2009/10/16 12:15	103.179	34	24.7	26.9	2625.27	2428.74	7.851		
2009/10/16 13:52	2009/10/16 13:15	103.338	34.2	25.1	27.3	2585.65	2376.07	7.869		
水槽 3 昼 電気なし										
2009/6/25 12:02	2009/6/25 12:00	102.528	33.7	26.9	26.8	2411.94	2247.1	7.774	0	5.2
2009/6/25 13:02	2009/6/25 13:00	102.527	33.7	27.4	28.4	2343.51	2163.92	7.803		
2009/6/25 14:02	2009/6/25 14:00	102.52	33.6	27.1	26.1	2278.63	2083.58	7.846		
水槽 2 昼 電気あり										

前ページから続く

2009/8/5 13:00	2009/8/5 12:30	105.904	33.9	26.5	26.6	2579.52	2405.09	7.824	50	5.2
2009/8/5 14:39	2009/8/5 13:25	103.173	34	26.3	26.8	2535.79	2349.17	7.851		
2009/8/5 15:53	2009/8/5 14:30	105.905	33.9	26.4	27.4	2477.77	2269.4	7.888		
水槽3 昼 電気あり										
2009/6/25 15:02	2009/6/25 15:00	102.523	33.6	26.4	25.7	2385.19	2180.25	7.869	50	5.2
2009/6/25 16:02	2009/6/25 16:00	102.537	33.8	26.8	26.7	2320.01	2098.73	7.894		
2009/6/25 17:03	2009/6/25 17:00	102.529	33.7	26.9	26.5	2255.25	2019.03	7.929		
水槽2 夜 電気なし										
2009/6/24 20:26	2009/6/24 20:20	102.514	33.5	26.8	27.6	2381.43	2110.83	7.984	0	5.2
2009/6/24 21:29	2009/6/24 21:25	102.507	33.4	26.6	27.3	2358.3	2124.39	7.927		
2009/6/24 22:25	2009/6/24 22:20	102.492	33.2	26.6	27.7	2336.97	2135.61	7.867		
水槽3 夜 電気なし										
2009/6/23 21:51	2009/6/23 21:47	102.497	33.3	27.2	28.5	2382.85	2172.34	7.874	0	5.2
2009/6/23 22:50	2009/6/23 22:47	102.506	33.4	26.9	26.8	2364.94	2192.84	7.797		
2009/6/23 23:51	2009/6/23 23:47	102.506	33.4	26.8	26	2338.85	2207.91	7.705		
2009/7/2 21:28	2009/7/2 21:25	102.507	33.6	26.5	26.3	2348.4	2127.99	7.896	0	5.2
2009/7/2 22:27	2009/7/2 22:25	102.538	33.8	26.5	27.2	2303.33	2130.11	7.806		
2009/7/2 23:27	2009/7/2 23:25	102.531	33.7	26.2	26.9	2277.97	2147.48	7.71		
水槽2 夜 電気あり										
2009/6/23 22:21	2009/6/23 22:20	102.505	33.4	27.3	27.8	2391.45	2192.64	7.844	50	5.2
2009/6/23 23:23	2009/6/23 23:20	102.499	33.3	26.6	26.1	2364.5	2196.21	7.795		
2009/6/24 0:22	2009/6/24 0:20	102.506	33.4	27	27.2	2356.37	2214.65	7.726		
2009/7/2 21:57	2009/7/2 21:55	102.522	33.6	26.6	26.5	2343.41	2138.26	7.867	50	5.2
2009/7/2 22:57	2009/7/2 22:55	102.538	33.8	26.4	26.4	2315.63	2145.25	7.799		
2009/7/2 23:56	2009/7/2 23:55	102.538	33.8	26.2	26.7	2290.16	2149.85	7.735		
水槽3 夜 電気あり										
2009/6/24 20:55	2009/6/24 20:50	102.509	33.4	25.9	27.9	2379.39	2124.85	7.976	50	5.2
2009/6/24 21:56	2009/6/24 21:50	102.508	33.4	26.2	27.1	2356.68	2141.83	7.896		
2009/6/24 22:55	2009/6/24 22:50	102.492	33.2	26.4	28.7	2336.72	2158.06	7.82		

前ページから続く

4 時間実験										
電気なし										
2009/7/8 12:02	2009/7/8 12:00	102.552	34	26.8	26.6	2360.6	2197.36	7.777	0	5.2
2009/7/8 13:02	2009/7/8 13:00	102.559	34.1	26.8	26.5	2288.12	2110.03	7.815		
2009/7/8 14:01	2009/7/8 14:00	102.551	34	26.9	26.3	2221.07	2026.1	7.85		
2009/7/8 15:02	2009/7/8 15:00	102.559	34.1	26.7	26.7	2141.33	1932.2	7.888		
2009/7/8 16:02	2009/7/8 16:00	102.567	34.2	26.7	26.3	2068.69	1846.92	7.917		
電気あり										
2009/9/9 12:02	2009/9/9 12:00	104.032	34.1	26.9	27.4	2668.79	2423.01	7.918	50	5.2
2009/9/9 13:03	2009/9/9 13:00	104.034	34.1	26.2	27.6	2568.32	2297.13	7.978		
2009/9/9 14:26	2009/9/9 14:00	104.059	34.4	25.7	27.8	2469.19	2175.07	8.029		
2009/9/9 15:02	2009/9/9 14:05	103.329	34.1	25.4	27.3	2649.18	2362.79	7.99		
2009/9/9 16:20	2009/9/9 15:05	104.038	34.1	25.2	27.2	2549.25	2241.71	8.053		
2009/9/9 18:19	2009/9/9 16:05	103.352	34.4	25.3	27.4	2452.52	2114.75	8.102		

表 8-13 電気実験 短時間応答実験

測定 日時	採水 日時	重量(g)	塩分 (PSU)	液温 (°C)	室温 (°C)	全アルカ リ度 ( $\mu\text{mol}/\text{kg}$ )	全炭酸 ( $\mu\text{mol}/\text{kg}$ )	pH	電流密度 ( $\text{mA}/\text{m}^2$ )	参照段 落
水槽 2 夜 短時間応答実験⑦										
2009/8/18 22:35	2009/8/18 22:30	104.147	33.8	25.9	26.3	2296.38	2124.83	7.829	0	5.3
2009/8/18 23:32	2009/8/18 23:27	104.142	33.7	25.4	26.1	2279.77	2145.13	7.757		
2009/8/19 0:31	2009/8/19 0:26	104.157	33.9	25.4	26.7	2261	2173.92	7.683	50(ON)	
2009/8/19 1:35	2009/8/19 1:29	104.212	34	25.2	26.3	2257.46	2194.1	7.611	50	
2009/8/19 2:34	2009/8/19 1:35	103.322	34.1	25.2	26.4	2309.1	2199.25	7.684		
2009/8/19 3:35	2009/8/19 2:28	104.175	34.1	24.9	26.1	2295.85	2216.21	7.614	0	
2009/8/19 4:31	2009/8/19 3:30	103.331	34.1	24.7	26.1	2287.88	2245.99	7.562		
2009/8/19 4:55	2009/8/19 4:23	104.157	33.9	25.4	27.5	2296.96	2254.14	7.481		
水槽 3 短時間応答実験①										
2009/9/28 12:07	2009/9/28 11:50	104.066	35	25.9	25.5	2409.75	2209.49	7.924	0	5.3
2009/9/28 12:57	2009/9/28 12:50	104.111	35.1	26.1	26.5	2340.31	2114.02	7.981		

前ページから続く

2009/9/28 13:54	2009/9/28 13:50	104.097	34.9	25.9	26.2	2261.17	1998.31	8.004	50(ON)	
2009/9/28 14:57	2009/9/28 13:55	103.192	34.2	25.4	26.1	2489.49	2179.96	8.117	50	
2009/9/28 15:29	2009/9/28 14:55	104.067	34.5	25.6	25.9	2382.88	2064.6	8.148		
2009/9/28 16:00	2009/9/28 15:55	104.067	34.5	25.5	26	2294.11	1948.22	8.206		
水槽3 短時間応答実験②										
2009/8/21 14:08	2009/8/21 13:10	104.158	34	27.2	27.3	2346.5	2176.57	7.806	0	5.3
2009/8/21 14:34	2009/8/21 14:10	103.18	34.1	26.6	27.3	2295.45	2093.77	7.877		
2009/8/21 15:12	2009/8/21 15:10	104.177	34.2	26.3	28.2	2251.96	2025.25	7.931	50(ON)	
2009/8/21 16:20	2009/8/21 16:10	104.185	34.3	26.1	26.9	2186.83	1930.29	8.007	50	
2009/8/21 17:16	2009/8/21 16:15	103.167	33.9	25.9	26.5	2517.74	2264.05	7.979		
2009/8/21 17:40	2009/8/21 17:15	103.319	34	26	27.1	2465.19	2182.98	8.027		
2009/8/21 18:18	2009/8/21 18:15	104.161	34	26.3	26.6	2427.13	2128.49	8.053		
水槽3 短時間応答実験③										
2009/7/6 12:02	2009/7/6 12:00	102.554	34	26.2	26.4	2400.99	2239.92	7.776	0	5.3
2009/7/6 13:03	2009/7/6 13:00	102.561	34.1	26.3	27.4	2333.21	2153.72	7.821		
2009/7/6 14:03	2009/7/6 14:00	102.558	34.1	27.2	27	2265.27	2068.71	7.841	50(ON)	
2009/7/6 15:02	2009/7/6 15:00	102.566	34.2	26.9	26.5	2195.79	1983.2	7.88	50	
2009/7/6 16:01	2009/7/6 16:00	102.567	34.2	26.8	26.6	2123.07	1894.17	7.927		
2009/7/6 17:02	2009/7/6 17:00	102.574	34.3	26.8	26.6	2048.83	1805.83	7.962		
2009/7/6 18:02	2009/7/6 18:00	102.589	34.5	26.8	26.9	1976.13	1724.66	8.016		
水槽3 短時間応答実験④										
2009/9/3 10:35	2009/9/3 10:30	104.056	34.4	26.6	26.9	2436.65	2259.55	7.818	0	5.3
2009/9/3 11:32	2009/9/3 11:30	104.049	34.3	26.3	26.8	2330.69	2148.09	7.856		
2009/9/3 11:57	2009/9/3 11:35	103.226	34.7	26.4	27.1	2402.02	2210.42	7.851		
2009/9/3 12:47	2009/9/3 12:35	104.049	34.3	26.2	27	2317.64	2108.16	7.911	50(ON)	
2009/9/3 14:07	2009/9/3 13:35	104.067	34.5	25.7	26.9	2229.61	2001.83	7.96	50	
2009/9/3 14:54	2009/9/3 14:35	104.09	34.8	25.7	26.8	2146	1900.78	8		
2009/9/3 15:17	2009/9/3 14:40	103.227	34.7	26.2	26.6	2376.63	2138.46	7.953		

前ページから続く

2009/9/3 16:06	2009/9/3 15:40	104.097	34.9	25.9	26.7	2291.26	2036.69	7.996			
2009/9/3 17:21	2009/9/3 16:40	104.082	34.7	25.7	26.7	2204.64	1933.72	8.044			
2009/9/3 18:11	2009/9/3 17:40	103.252	35	25.5	26.9	2136.97	1847.59	8.077			
2009/9/3 18:34	2009/9/3 17:45	103.431	34.7	25.7	27.2	2355.1	2091.81	8.014			
2009/9/3 20:00	2009/9/3 18:45	104.093	34.8	24.9	27	2282.33	1996.03	8.076			
水槽2 短時間応答実験⑤											
2009/9/3 11:02	2009/9/3 10:55	104.199	34.5	26.5	26.8	2406.31	2234.36	7.832	0		
2009/9/3 12:23	2009/9/3 11:55	104.209	34.6	26	27.3	2356.31	2133.82	7.886			
2009/9/3 13:15	2009/9/3 12:55	104.215	34.5	26.2	27.4	2292.95	2042.08	7.991	50(ON)		
2009/9/3 13:43	2009/9/3 13:00	103.371	34.7	26.3	27.4	2394.34	2176.3	7.913		5.3	
2009/9/3 14:31	2009/9/3 14:00	104.194	34.4	25.8	26.9	2329.12	2071.78	8.005			
2009/9/3 15:42	2009/9/3 15:00	104.226	34.8	25.5	27	2268.57	1973.65	8.081			
2009/9/3 16:30	2009/9/3 16:00	103.382	34.8	25.5	26.6	2210.79	1879.29	8.147			
2009/9/3 16:57	2009/9/3 16:05	103.061	34.7	25.2	26.4	2373.38	2113.88	8.003	50		
2009/9/3 17:45	2009/9/3 17:05	104.204	34.5	25.2	27	2316.27	2022.42	8.078			
2009/9/3 19:00	2009/9/3 18:05	103.368	34.6	25.2	26.9	2267.45	1932.47	8.153			
2009/9/3 20:31	2009/9/3 19:05	104.236	34.9	25	27.2	2216.31	1847.98	8.214			
水槽2 短時間応答実験⑥											
2009/9/9 11:18	2009/9/9 11:15	104.183	34.3	26.7	27	2675.86	2440.23	7.891	0		
2009/9/9 12:32	2009/9/9 12:15	104.177	34.2	26.1	27.7	2604.13	2340.44	7.959			
2009/9/9 14:00	2009/9/9 13:15	104.187	34.3	25.6	27.4	2537.72	2241.35	8.024	50(ON)		
2009/9/9 15:28	2009/9/9 14:15	103.014	34.1	25.8	27.5	2642	2350.94	8.006		5.3	
2009/9/9 15:54	2009/9/9 14:20	104.179	34.2	25.8	27.3	2577.13	2250.91	8.065			
2009/9/9 16:47	2009/9/9 15:20	103.192	34.2	25.3	27.7	2479.55	2149.77	8.082			
2009/9/9 17:12	2009/9/9 16:20	104.196	34.4	25.3	27.3	2517.88	2156.63	8.135	50		
2009/9/9 17:50	2009/9/9 16:25	103.007	34	25.4	27.2	2616.59	2297.39	8.054			
2009/9/9 18:44	2009/9/9 17:25	103.183	34.1	25.7	27.4	2559.39	2205.3	8.112			
2009/9/9 19:11	2009/9/9 17:30	104.036	34.1	25.6	27	2603.46	2276.09	8.075			

前ページから続く

2009/9/9 19:37	2009/9/9 18:30	104.181	34.2	25.3	26.5	2549.47	2187.73	8.135		
2009/9/9 20:11	2009/9/9 19:30	103.03	34.3	25.5	27.3	2503.23	2109.89	8.179		

表 8-14 流れの実験

測定 日時	採水 日時	重量(g)	塩分 (PSU)	液温 (°C)	室温 (°C)	全アルカ リ度 ( $\mu\text{mol/kg}$ )	全炭酸 ( $\mu\text{mol/kg}$ )	pH	参照段落
流速 0									
2010/1/6 15:30	2010/1/6 13:00	104.153	34.8	23.6	23.8	3062.42	2796.45	7.968	6
2010/1/6 15:59	2010/1/6 14:00	103.189	35	23.3	24	3004.25	2722.79	7.973	
2010/1/6 16:28	2010/1/6 15:00	103.33	35	23.4	24.1	2945.29	2638.57	8.037	
2010/1/6 16:58	2010/1/6 16:00	103.08	34.9	24.3	24.5	2898.68	2578.23	8.045	
流速 弱 ラグーン									
2010/1/7 10:04	2010/1/7 10:00	104.151	33.8	24.9	22	2985.57	2775.81	7.851	6
2010/1/7 11:03	2010/1/7 11:00	103.171	33.9	25	21.2	2936.93	2688.4	7.913	
2010/1/7 12:01	2010/1/7 12:00	103.315	33.9	25.1	20.6	2880.22	2615.98	7.994	
2010/1/7 15:24	2010/1/7 13:00	103.022	33.9	20.8	20.5	2812.25	2484.64	8.131	
流速 中 ラグーン									
2010/1/7 15:52	2010/1/7 13:00	104.186	34	20.9	19.9	2967.46	2694.36	8.039	6
2010/1/7 16:22	2010/1/7 14:00	103.198	34	21	20.9	2915.42	2597.64	8.107	
2010/1/7 16:59	2010/1/7 15:00	103.338	34	21.7	22.3	2858.79	2503.44	8.152	
2010/1/7 17:33	2010/1/7 16:00	103.02	34	22.6	21.5	2799.97	2416.12	8.198	
流速 夜間									
2010/1/8 10:05	2010/1/8 10:00	104.021	33.9	25.5	24.7	2947.66	2725.58	7.862	6
2010/1/8 11:02	2010/1/8 11:00	103.174	34	26	25.4	2902.89	2665.53	7.919	
2010/1/8 12:02	2010/1/8 12:00	103.324	34.1	26.6	25.5	2854.71	2586.43	7.971	
2010/1/8 15:35	2010/1/8 13:00	103.018	34.1	24.6	24.3	2791.83	2485.49	8.064	
流速弱 コンスタント									
2010/1/8 16:02	2010/1/8 13:00	104.177	34.1	24.3	23.5	2952.86	2676.96	7.979	6
2010/1/8 16:36	2010/1/8 14:00	103.197	34.2	24.1	23	2900.94	2588.24	8.043	
2010/1/8 17:07	2010/1/8 15:00	103.335	34.1	23.9	22.7	2845.99	2500.57	8.104	

前ページから続く

2010/1/8 23:08	2010/1/8 16:00	103.016	34	23.4	23.4	2787.69	2409.26	8.178	
流速 強 ラグーン									
2010/1/14 10:03	2010/1/14 10:00	104.161	33.9	24.5	22.8	2848.87	2638.39	7.897	6
2010/1/14 11:02	2010/1/14 11:00	103.178	34	25	23.4	2797.22	2538.4	7.989	
2010/1/14 12:01	2010/1/14 12:00	103.321	34	25.4	23.7	2750.8	2448.4	8.052	
2010/1/14 13:02	2010/1/14 13:00	102.998	33.9	25.8	23.4	2694.8	2350.57	8.111	
流速 強 コンスタント									
2010/1/14 16:29	2010/1/14 13:30	104.175	33.9	21.6	21	2831.54	2554.97	8.039	6
2010/1/14 18:19	2010/1/14 14:30	103.186	33.9	21.7	22	2772.24	2441.32	8.127	
2010/1/14 17:11	2010/1/14 15:30	103.326	33.8	21.2	20.8	2726.68	2350.29	8.199	
2010/1/14 17:51	2010/1/14 16:40	103.011	33.8	21.4	21.3	2670.99	2229.08	8.274	



# 参考文献

- 1) 日本サンゴ礁学会ホームページ (<http://www.soc.nii.ac.jp/jcrs/>)
- 2) 環境省・日本サンゴ礁学会編 (2004) 日本のサンゴ礁, 環境省
- 3) 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
- 4) 茅根創 (1990) 地球規模の CO<sub>2</sub> 循環におけるサンゴ礁の役割, 地質ニュース 436 号, p6-16
- 5) 日高道雄, サンゴの白化機構に関する研究—ストレスによる褐虫藻の形態変化: 高温と光の相乗作用—
- 6) 本川達雄 (2008) サンゴとサンゴ礁のはなし, 中央公論新社
- 7) 東海大学出版会 (2006) 美ら島の自然史—サンゴ礁島嶼系の生物多様性, 琉球大学 21 世紀 COE プログラム編集委員会編
- 8) 澁野 拓郎 (2003-2005) サンゴ礁生物多様性保全地域の選定に関する研究
- 9) 遠藤秀文, Rahmadi Prasetyo, 西平守孝, 大中 晋 (2006) 移植サンゴの定着率に関する長期現地モニタリングおよびサンゴ移植の適用性の検討, 海岸工学論文集 53 巻, p1196-1200
- 10) 遠藤秀文, ラフマディ プラセティオ, 西平守孝, 大中 晋 (2007) バリ島クタ海岸におけるサンゴ移植の適用性に関する研究, こうえいフォーラム第 16 号
- 11) 木村匡, 林原毅, 下池和幸 (1993) 阿嘉島のサンゴ礁と水質, 沖縄本島との比較(予報), みどりいし, (4): p20-22
- 12) 青田徹, 綿貫啓, 柴田早苗, 熊谷航, 灘岡和夫, 三井順, 岩尾研二, 谷口洋基, 大森信 (2004) サンゴ礁形成要因としてのサンゴの成長量に与える物理環境の影響, 海岸工学論文集, 第 51 巻, 土木学会, p 1071-1075
- 13) 谷口 洋基 (2001) 阿嘉島周辺海域における時間平均流の測定, みどりいし, (12): p18-20
- 14) 山室真澄 (1991) サンゴ礁での物質循環, 特に栄養塩収支に関する諸問題, 月刊海洋 23(12), p785-793
- 15) THOMAS J.GOREAU, JAMES M.CERVINO, RACHAEL POLLINA (2004) Increased Zooxanthellae Number and Mitotic Index in Electrically Stimulated Corals, Symbiosis, 37, pp107-120
- 16) 三浦ゆきこ (2009) サンゴの成長促進に関する実験的研究, 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 修士論文
- 17) Biorock.net (<http://www.biorock.net/>)

- 18) Aurelie Moya, Sylvie Tambutte, Eric Tambutte, Didier Soccola, Natacha Caminiti and Denis Allemand (2006) Study of calcification during a daily cycle of the coral *Stylophora postillata*: implications for 'light-enhanced calcification', the journal of experimental biology 209, p3413-3419
- 19) Hiroyuki Fujimura, Tomihiko Higuchi, Kazuyo Shiroma, Takemitsu Arakaki, Asha Mansour Hamdun, Yoshikatsu Naono, Tamotsu Oomori (2008) Continuous-flow complete-mixing system for assessing the effects of environmental factors on colony-level coral metabolism, J. Biochem. Biophys. Methods 70, p865-872
- 20) 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
- 21) 大森保 (1993) サンゴによる石灰化と二酸化炭素の固定—サンゴ飼育水槽実験—, 地質ニュース 465 号, p26-31
- 22) 光合成とクロロフィル蛍光 (<http://www.photosynthesis.jp/keikou.html>)
- 23) fluorescence (<http://hostgk3.biology.tohoku.ac.jp/Hikosaka/fluorescence.html>)
- 24) 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/>)
- 25) 鈴木淳 (1994) 海水の炭酸系とサンゴ礁の光合成・石灰化によるその変化—理論と代謝量測定法—, 地質調査所月報, 第 45 巻, 第 10 号, p.573-623
- 26) Fujimura H · Oomori T · Maehira T · Miyahira K (2001) Change of coral carbon metabolism influenced by coral bleaching, Galaxea, 3, pp.41-50
- 27) 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 CO<sub>2</sub> 循環機構に関する研究」, 工業技術院地質調査所
- 28) Kenneth Schneider, Oren Levy, Svy Dubinsky and Jonathan Erez (2009) In situ diel cycles of photosynthesis and calcification in hermatypic corals, Limnol.Oceanogr 54(6),p1995-2002
- 29) Goreau, T.F. (1959) The physiology of skeleton formation in corals. I. A method for measuring the rate of calcium deposition by corals under different conditions, Biol. Bull. 116:p59-75.
- 30) Goreau, T. F. (1961) Problems of growth and calcium deposition in reef corals, Endeavour 20 : p32-39.
- 31) McConnaughey, T.A. (1991) Calcification in *Chara corallina*: CO<sub>2</sub> hydroxylation generates protons for bicarbonate assimilation. Limnol. Oceanogr. 36:p619-628.
- 32) McConnaughey, T. A. (1995) Ion transport and the generation of biomineral supersaturation. Bull. Inst. Oceanogr., Monaco n° spe'c. 14:p1-18
- 33) McConnaughey, T. A. and J. F. Whelan. (1997) Calcification generates protons for nutrient and bicarbonate uptake. Earth Sci. Rev. 42:p95-117

- 34) O.Levy, L.Appelbaum, W.Leggat, Y.Gothlif, D.C.Hayward, D.J. Miller, O.Hoegh-Guldberg (2007) Light-responsive cryptochromes from a simple multicellular animal, the coral *Acropora millepora*, *Science* 318, p467-470.
- 35) PETER D. VIZE (2009) Transcriptome Analysis of the Circadian Regulatory Network in the Coral *Acropora millepora*, *Biol. Bull.*216 : p131-137
- 36) Gattuso, J P. Allemand, D. Frankignoulle, M. (1999) Photosynthesis and calcification at cellular, organismal and community levels in coral reefs: A review on interactions and control by carbonate chemistry, *Am Zool*, 39(1) pp 160-183
- 37) F.A. Al-Horani, S.M. Al-Moghrabi, D.de Beer (2003) The mechanism of calcification and its relation to photosynthesis and respiration in the scleractinian coral *Galaxea fascicularis*, *Marine Biology*142;p419-426
- 38) Paola Furla, Isabelle Galgani, Isabelle Durand, Denis Allemand (2000) Sources and mechanisms of inorganic carbon transport for coral calcification and photosynthesis, *The Journal of Experimental Biology* 203:p3445-3457
- 39) Langdon, C. Atkinson, M J. (2005) Effect of elevated pCO<sub>2</sub> on photosynthesis and calcification of corals and interactions with seasonal change in temperature/irradiance and nutrient enrichment., *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH-OCEANS*, 110(C9)
- 40) 白岩善博(2001)光合成生物による石灰化と地球CO<sub>2</sub>環境, 日本結晶成長学会誌 Vol.28, No.2, p53-60
- 41) Dubinsky, Z., Stambler, N., Ben-Zion, M., McCloskey, L. R., Muscatine, L., Falkowski, P. G. (1990) The effect of external nutrient resources on the optical properties and photosynthetic efficiency of *Stylophora pistillata*, *Proc. R.Soc. London, Ser. B.*, 239, p231-246
- 42) 茅根 創 (1996) サンゴ礁による CO<sub>2</sub> 固定バイオリクター構築技術の開発, 環境低負荷型の社会システム, p937-940
- 43) 秦 浩司, 藏野 憲秀 (1999) 造礁性サンゴ *Montipora digitata*, *Porites cylindrica* および *Favia pallida* の炭素収支の比較, *みどりいし*(10), p14-16
- 44) 藤田和彦, 岩尾研二 (2002) サンゴ礁海域の光環境について, *みどりいし*, (13) : p12-14
- 45) Hidaka.M, Minei. T (1993) Effect of short-term irradiance on calcification of the coral *Galaxea fascicularis*. *Proceedings of VII Pacific Science Inter-congress(Okinawa)*, in press
- 46) 山里清 (1991) サンゴの生物学, 東京大学出版会
- 47) 山本秀一 (2003) 人工構造物上のサンゴ群集の成長過程における各種環境因子の影響とその評価に関する研究, 筑波大学博士 (生物資源工学) 学位論文

## 謝辞

研究室の磯部雅彦教授，黄光偉准教授，鯉渕幸生講師には大変お世話になり，本当にありがとうございました．講義や毎週のゼミはもちろんのこと，合宿や観測，さらに飲み会でも様々なことをご教授いただきました．磯部先生には，ゼミでいつもはっと気付かされるようなご指摘をいただき，いつも有り難く拝聴しておりました．昼食でご一緒させていただいた時や飲み会の時には，ゼミの時とはまた違った鋭さでコメントをされており，たくさん楽しませていただきました．黄先生には，いつも温かく面白いお話を聞かせていただきました．オープンキャンパスや観測のお手伝いでは，私にたくさん至らぬ点があったにも関わらず，明るく接していただき，何度も救われた気持ちになったことを記憶しております．本当に感謝申し上げます．指導教官であった鯉渕先生には大変ご迷惑をおかけしたとともに，多くのことを学ばせていただきました．修士2年間で研究に励めたのは，先生のおかげです．いつか先生が仰っていた「2年間で何かを得てほしい」「楽しんで研究してほしい」という言葉を，今は成し遂げられたと思っております．本当にありがとうございました．

また，サンゴの研究を行うにあたって，共同研究をさせていただいた三菱重工鉄構エンジニアリング，日本防蝕，CPファームの皆様には，温かい言葉とたくさんの知識とご協力をいただき本当にありがとうございました．特に修士論文提出前の私をお気遣いいただき，メールにて励ましと研究の資料をお送りくださった木原様，私の電気に関する質問に丁寧にお答えいただき，サンゴミーティングでも実験のアドバイスなどをいただいた山本様，いつもサンゴの飼育に関する相談に親身になっていただいた近藤様，サンゴミーティングではいつも優しく色んなことをご教授くださり温かいお言葉をかけてくださった渡辺様，皆様のご指導・ご支援には心から感謝致しております．

さらに，クロロフィル蛍光測定に関して貴重なご教授をいただいた園池先生には心より感謝申し上げます．実験測定器機に関して何度も相談に乗っていただいた，環境計測の村尾様，津田様はじめ紀本工業の皆様にも感謝申し上げます．

そして，修士論文の内容や発表の仕方，考慮すべき項目やアドバイスなど短い時間でしたがたくさんのご指導をいただいた味埜先生には，先生の大学時代にご使用されていた統計の本まで貸していただき，ありがとうございました！

社会文化環境学専攻の先生方には，講義やワインセミナーなどで本当に貴重なお話をたくさん伺うことが出来，大変ありがたく思っております．2年になってから，ほとんど行かなくなってしまいましたが，また是非ワインセミナーに参加させていただきたいと思っております．

秘書の室園さんには事務手続きだけでなく，お菓子やお茶，そして室園さんのおかげで大好きになったお赤飯などの差し入れやお掃除などをしていただき，本当に Westech の母的(お姉さんの)存在であったと思います．本当にいつもありがとうございます．

Westech の先輩方、後輩の皆、そして同期には本当にお世話になりました。まず、先行研究をされていた三浦さんにお礼申し上げたいと思います。修士1年の時には本当に様々なことをご教授いただき、今もまた三浦さんの研究への姿勢を思い出し、研究に励んでおります。修士1年の時には研究のみならず私事にも御憂慮いただき本当にありがとうございます。いまいた。

博士の皆様にも大変お世話になりました。佐藤さんにはお忙しい中での要旨のチェックをしていただき、何度か飲み会でもお世話になりました。またよろしく申し上げます。本当にありがとうございます。篠原さんには実験室のことやアンモニア測定などで大変お世話になり、本当にありがとうございました。神野さんには、特に修士2年になって席が近くなってからたくさんのご教授いただき、また夕飯などをご一緒させていただいた時には面白い議論をたくさん聞かせていただきました。楽しいお話やハイテンションな励まし、そして優しく親身になって色々なご指導をいただき、心より感謝申し上げます。神野さんがいらっしゃらなかつたら、研究をここまで楽しむことは出来なかつたと思います。

近藤さんには、夜遅くの実験や修論の追いこみで励ましやご協力をいただき、大変感謝しております。至らぬ後輩でしたが、就職活動や英語などに関してお話できたことは本当に自分の肥やしになったと思っております。木村さんはお仕事でお忙しくこの一年はあまりお会いできませんでしたが、磯部杯の準備などでは大変お世話になりました。木村さんにはいつも元気をもらっていました。森田さんや平塚さん、伊津野さんもお忙しい中で会う機会は少なかつたですが、その中で色々なことを学ばせていただきました。皆様ありがとうございます。

後輩の皆にも色々とお世話になりました。特に上代君と遠藤君には日周変動実験を手伝っていただき、本当に助かりました。ありがとうございます。岡本君には R25 や面白い話と芸でいつも楽しませてもらっていました。石橋さん、熊井君もポテンシャルが高いようですので、きっと楽しい Westech を作っていつてくれると信じています。

同期の皆様には、心からありがとうと伝えたいです。全員の誕生日にお祝いをしたり、夜中に電話したり、こんなに仲の良い同期に恵まれて幸せでした。実験を手伝ってくれたり、体調や精神状態を心配してくれたり、たまには愚痴を言い合ったり、一緒にテニスや卓球に励んでみたり、この2年間を豊かなものにしてくれたのは間違いなく同期の3人だと思っています。砂原君、寺門君、中村君、2年間本当にありがとうございました。全ては伝えきれませんが、修士を全うできたのも3人の力添えがあつたことだと思っています。

最後に、大阪から励ましてくれた両親と姉にも感謝申し上げます。