

# 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

学籍番号 86757  
氏名 多田 希 (tada, nozomi)  
指導教員 鯉淵 幸生 講師

## 1 研究の背景と目的

サンゴは石灰化によって炭酸カルシウムの骨格を作る動物で、光合成を行う褐虫藻を体内に共生させる。サンゴの骨格が形成したサンゴ礁は、豊かな生態系を育み、漁業・観光資源として重要となっている。しかしサンゴは光・水流・水温・栄養塩などの環境因子の影響を受けやすく、近年、陸域負荷や水温上昇などによって世界的に減少しつつある。再生のために移植や電気による新技術の開発が試みられているが、環境因子がサンゴの生理活動に与える影響やその機構が十分解明されていないため、適地選定や効果検証が難しい。さらにこれらの影響・機構は、複数の環境因子が同時に変動する現場では把握し難い。

そこで本研究では、再生活動において選択可能な環境因子である光・水流・電流などが、サンゴの骨格成長と光合成、及びそれらの日周変動に与える影響を飼育実験によって調べ、さらに機構の考察を試みた。

## 2 実験の方法

### i. 実験の種類

本研究で行った実験の一覧を表1に示す。ここではアルファベットで示した実験のみを取り扱う。

### ii. 測定項目

全ての実験で、全アルカリ度・全炭酸を測り、無機炭素生産速度(IP:  $\text{mmol/m}^2/\text{h}^{-1}$ )と有機炭素生産速度(OP:  $\text{mmol/m}^2/\text{h}^{-1}$ )を算出

した。IPは石灰化速度を、OPは呼吸速度を引いたみかけの光合成速度を表わしている。

表1. 本研究における実験の一覧

実験名	変化させた項目	解明したいこと
クロロフィル蛍光測定 <sup>②⑥</sup>	電気	光合成に対する電気、健康状態、個体差の影響
水中重量測定 <sup>②④</sup>	電気	石灰化に対する電気、健康状態、個体差の影響
A)日周変動実験 <sup>⑧</sup>	電気	日周変動、電気の影響
B)光量変化実験 <sup>⑧</sup>	光量 (昼夜の暗条件、弱光条件、強光条件、各条件の翌日)	光の影響、エネルギーの貯蓄、日周変動
C)流速変化実験 <sup>⑦</sup>	流速	水流の影響
ブランク実験 <sup>⑩</sup>	電気	(比較用の実験)
条件毎の比較実験 <sup>⑪</sup>	電気	電気の影響
短時間応答実験 <sup>⑦</sup>	電気	電気の影響
D)3日間連続暗条件実験 <sup>②</sup>	電気	電気の影響
閉鎖実験 <sup>③</sup>	電気・水槽の閉鎖状態	栄養塩の影響

※○内の数字は反復回数

### iii. 実験条件

海水中のアルカリや炭酸塩の濃度変化を測定するため、実験中は基本的に実験水槽を閉鎖する。8:00~20:00は飼育用電灯が点いており、水中光量は約  $200\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$  であ

る。その間を昼間、20:00~8:00 を夜間と定義する。夜間は約  $0\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  である。この状態を通常状態として、光量や水流、電気の有無を変えて実験を行った。図1に電気実験での実験水槽の状況を例示する。

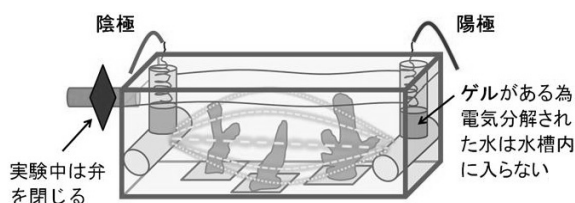


図1 実験水槽の模式図

各実験の詳細を以下にまとめる。

#### A) 日周変動実験

11:00 から 24 時間、1 時間毎のサンプリングを行った。水槽を 2 時間閉鎖し 3 点の連続した測定値を取り、測定誤差によるばらつきを補正した値を算出する。以降全ての実験において、複数の連続した測定値を取り補正を行う。1 時間の開放にて水を交換し、サンゴの状態を維持しつつ実験を行った。この実験を電気の有無で比較した。実験開始 2 時間前から  $50\text{mA}/\text{m}^2$  の電流を流し始めた。実験フローを図 2 に示す。

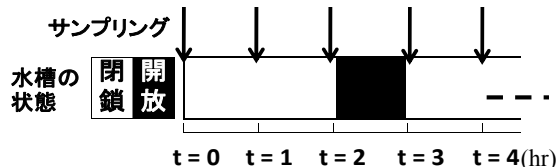


図2 日周変動実験の実験フロー

#### B) 光量変化実験

8:00 からそれぞれ暗条件(約  $0\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )、弱光条件(約  $110\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )、強光条件(約  $390\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )にし、実験日の昼間と通常状態に戻した翌日の昼間に測定を行った。暗条件においては、夜間の値も測定した。

#### C) 流速変化実験

水槽の中央部を仕切り、ポンプを回すことで一定方向に循環する水流を発生させ、流速を変化させて測定を行った。設定した流速は  $0\text{cm}/\text{s}$ ,  $3.1\text{cm}/\text{s}$ ,  $4.9\text{cm}/\text{s}$ ,  $6.1\text{cm}/\text{s}$ ,  $8.2\text{cm}/\text{s}$ ,  $11.6\text{cm}/\text{s}$ ,  $14.5\text{cm}/\text{s}$  である。

#### D) 3日間連続暗条件実験

サンゴを 3 日間暗条件下に置き、電気有

無でそれぞれ昼間と夜間に測定を行った。 $50\text{mA}/\text{m}^2$  の電流を前日の夜間から流した。

### 3 実験結果と考察

#### i. サンゴの生理活動

##### 概日リズムの存在

サンゴの生体リズムを明らかにするために、日周変動実験および暗条件での昼夜の挙動を明らかにした。図 A-1 に示した日周変動実験(電気なし)と、図 B-1 に示した暗条件での昼夜の挙動には以下の共通点がある:(1)夜間になる数時間前の IP 値の減少(2)昼間になる数時間前の IP 値の減少および昼間での回復。これらは光の有無に関らず起こるため、概日リズムの影響だと示唆される。さらに、図 B-2 に通常状態と暗条件下の昼夜の IP の平均値を示す。通常状態の夜間よりも暗条件下の昼間の値の方が大きいことから、昼間に石灰化が活発になるという概日リズムを持っていると考えられる。

##### エネルギー貯蓄

暗条件下においても IP が比較的高いことと、図 B-3 に示した光量変化実験の翌日の結果からサンゴのエネルギー貯蓄が示唆される。暗条件の翌日の IP の減少は、光合成によるエネルギー生産がない状態で石灰化を行うことにより、エネルギー貯蓄が減ったためだと考えられる。一方で、弱光条件および強光条件の翌日の IP は図 B-2 で示した通常状態の昼間の IP よりも高い。強光条件では、光合成によるエネルギー生産が多く、貯蓄量が増えたためであろう。弱光条件で実験日の IP が通常状態よりも小さい理由は、光は石灰化を促進することから、光量が減少したことによる石灰化の抑制である。そのため、光合成によるエネルギー生産は十分であったが、貯蓄によるエネルギーの使用が減り、翌日の石灰化促進に繋がったと考えられる。これは、石灰化量が光合成量に支配されないという仮説に立った場合の考察である。石灰化と光合成の相互作用については、次の節で詳しく議論する。

## ii. 環境因子の影響

### 光の影響

図 B-4 に各実験での光量に対する IP・OP の依存性を示す。光合成と石灰化は光量に対応して増加する。OP は光呼吸の増加により線形的な増加を示さない。IP は、石灰化速度が光量に対して飽和したため、増加率が減少したのだと考えられる。

### 水流の影響

図 C に各実験での流速と IP・OP の散布図を示す。OP は流速の増加とともに線形的に増加するが、IP はほぼ変化がない。光合成は、水流による褐虫藻への CO<sub>2</sub> や栄養塩などの供給によって増加したと考えられる。一方、石灰化に変化がなかった理由を以下に挙げる：(1)水流による懸濁粒子とサンゴの接触がサンゴにストレスを与えた(2)石灰化速度が飽和値に達した(3)光合成による石灰化促進がない。光量変化実験では光合成速度が上昇すると石灰化速度も上昇し、本実験とは矛盾する。よって、(3)の可能性について、次の項で議論する。

### 光合成と石灰化の相互作用

光合成と石灰化の相互作用は、Goreau (1961) が提唱した、光合成による体内の CO<sub>2</sub> 消費が炭酸飽和度上昇を起こし、石灰化が促進されるというモデルと McConnaughey (1997) が提唱した、ATP による石灰化部位への Ca<sup>2+</sup>供給と H<sup>+</sup>の除去が石灰化に有利な状態を作り、体内での H<sup>+</sup>の供給による HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>の CO<sub>2</sub>変換が光合成を促進するというモデルがある。後者のモデルによれば、石灰化は光合成と独立に起こる。ATP を働かせる酵素は光依存性を持つため、光実験では石灰化は促進される。石灰化が水流実験で変化しなかったことは、光合成ではなく光に依存することを示唆している。

## iii. 電気の影響

図 A-2 に電気を流した日周変動実験を示す。図 A-1 との比較から電気の有無による違いは、概日リズムの影響：(1)夜間になる数時間前の IP 減少(2)昼間になる数時間前

の IP 減少が見られない、もしくは小さいことである。図 A-3 に両実験の IP と OP の相関を示す。回帰直線の傾きから、電気による光合成量に対する石灰化量の増加が示唆される。これらの結果から電気の影響として以下の仮説を立てる：I.小さなエネルギーで石灰化を行う II.エネルギーが石灰化へ多く使われる III.生体リズムが変化する。これらの検証のため 3 日間連続暗条件実験を行った。図 D-1 に暗条件での IP 減少の挙動を示す。図 D-2 に減少率の推移を電気の有無で比較したものを示す。電気なし実験の減少率は、昼~夜では大きく夜~昼では小さい。従って電気なし実験では、昼間に石灰化が活発になるという概日リズムが見られる。一方、電気あり実験の減少率はほぼ一定で概日リズムが見られず、IP も比較的高い値を示す。しかし、図 D-1 から 3 日目の夜では電気なし実験よりも IP が低いことがわかり、エネルギー効率は等しいと考えられる。よって、電気が仮説の II と III のような影響を与える可能性が示唆された。

## 4 まとめ

本研究の主な結論は以下の通りである。

- サンゴが暗条件下においても概日リズムを有することを明らかにした。
- サンゴがエネルギー貯蓄を行っていることを明らかにした。
- 流速による光合成促進を明らかにした。
- 光合成が石灰化を促進しないという可能性を示した。
- 電気が概日リズムの攪乱と石灰化促進を起こす可能性を示した。
- 今後の課題を、次に挙げる：(1)概日リズムがサンゴの生育に与える影響の解明(2)弱光条件下での流速変化実験による光合成と骨格成長の相互作用の解明(3)さらに長期間での暗条件モニタリングによる電気の影響の解明。また、サンゴの挙動を分子・遺伝子レベルで理解することも必要である。

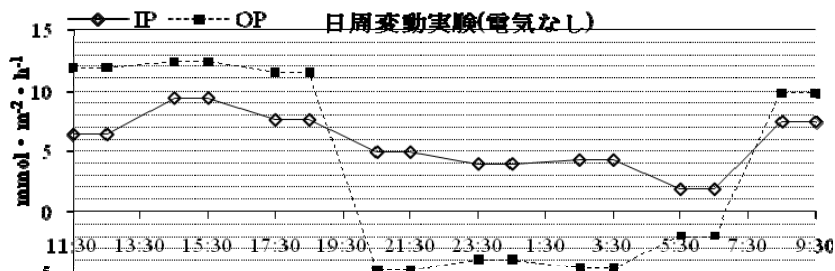


図 A-1 日周変動実験(電気なし)

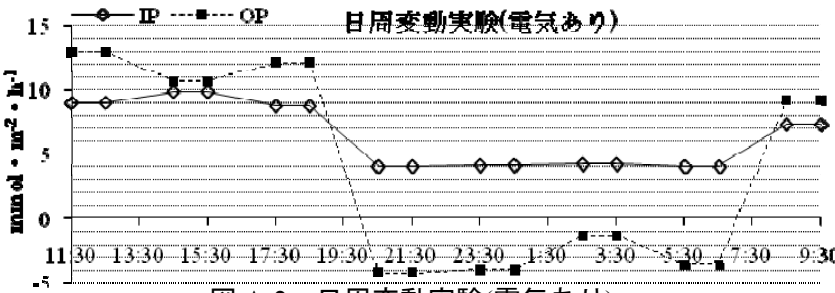


図 A-2 日周変動実験(電気あり)

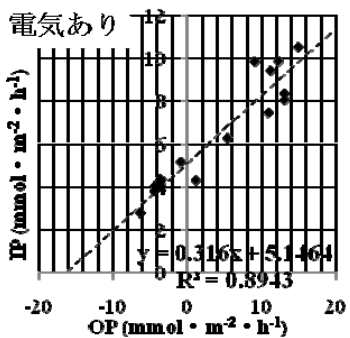
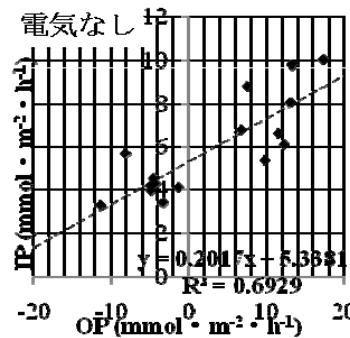


図 A-3 日周変動における IP と OP の相関 (左: 電気なし 右: 電気あり)

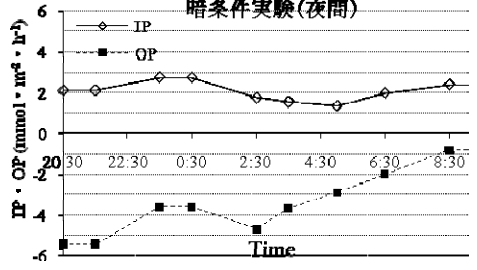
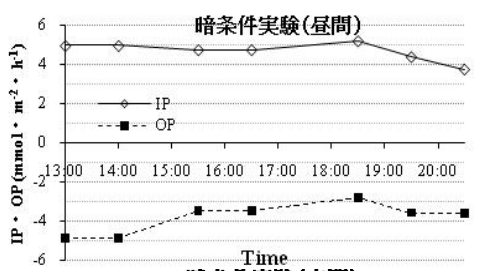


図 B-1 暗条件実験の昼間と夜間の変動 (上: 昼間 下: 夜間)

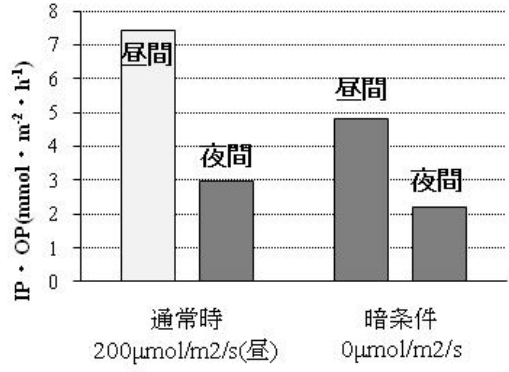


図 B-2 通常状態と暗条件の IP 比較

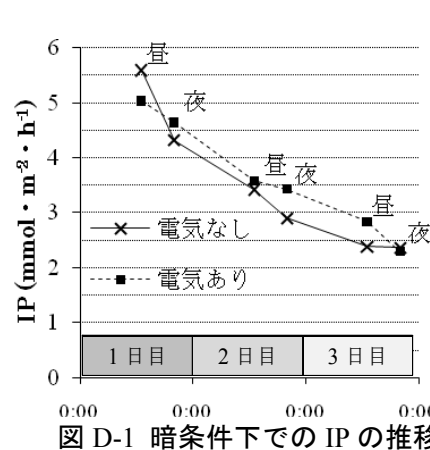


図 D-1 暗条件下での IP の推移

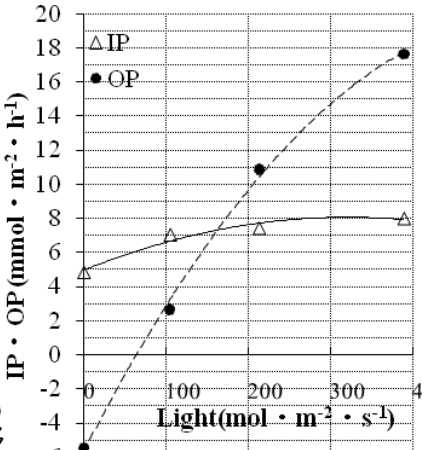


図 B-4 光量と IP · OP との関係

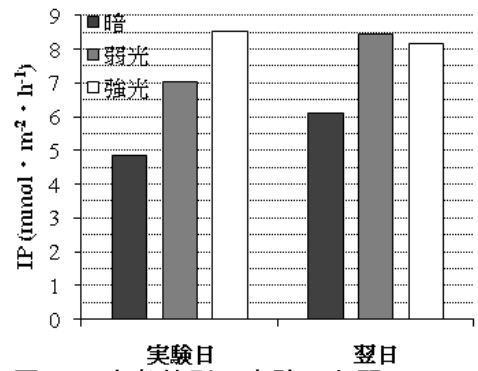


図 B-3 光条件別の実験日と翌日の IP

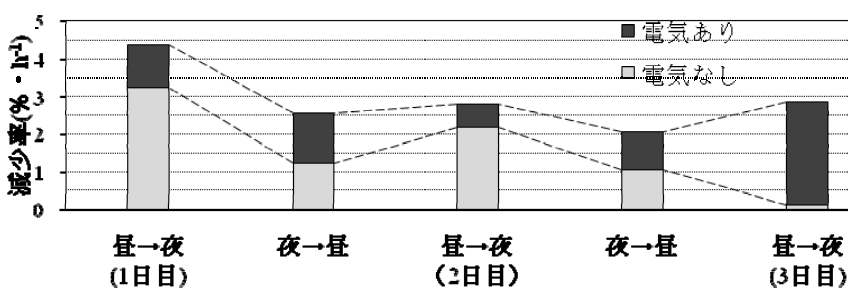


図 D-2 暗条件下での IP の減少率

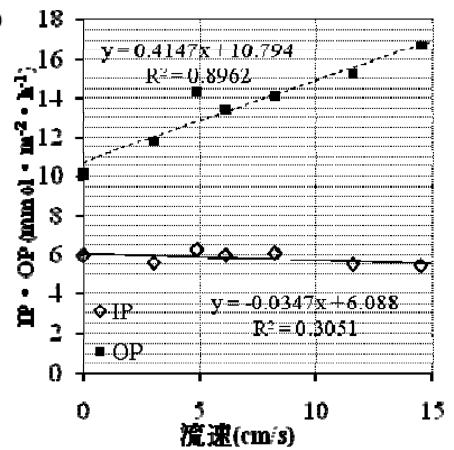


図 C 流速と IP · OP との関係