

A-0804 海洋酸性化が石灰化生物に与える影響の実験的研究

(4) CO₂増加が造礁サンゴの生活史に与える影響に関する研究

琉球大学熱帯生物圏研究センター
琉球大学

酒井一彦
小池勲夫

<研究協力者>

琉球大学熱帯生物圏研究センター
琉球大学熱帯生物圏研究センター
琉球大学熱帯生物圏研究センター

大木 駿
中村雅子
加藤亜記

平成20～22年度累計予算額：13,223千円（うち、平成22年度予算額：5,100千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨] 近年、人間活動による大気中の二酸化炭素濃度（CO₂）増加による海洋酸性化が、海洋生態系に影響を与えることが懸念されている。海洋酸性化は、産業革命以降から既に起きており、今後100年間で確実に進行するとされている。熱帯・亜熱帯に広がるサンゴ礁生態系の基盤を形成する造礁サンゴ類は、代表的な石灰化生物であり、顕著に酸性化した海水中ではサンゴの石灰化率が減少することが既に報告されている。しかし、酸性化海水中でサンゴの各生活史段階においてどのような影響が生じるかは未解明のままである。本課題では、まず簡易pCO₂制御装置を用いて、サンゴの代表種群であるミドリイシ属サンゴの一種、コユビミドリイシを用いて、受精・発生、浮遊幼生の生残率・変態率、着底後の初期ポリプの成長及び褐虫藻との共生成立への酸性化海水の影響を評価した。その結果、酸性化海水中では、精子の鞭毛運動の低下、幼生の変態率、初期ポリプの成長率低下及び褐虫藻との共生成立の遅れなどが観察された。また、本プロジェクトで開発された精密pCO₂制御装置を用いて、初期ポリプと群体形成期の石灰化率の比較を行なったところ、酸性化海水への耐性は、群体形成期>褐虫藻有りの初期ポリプ>褐虫藻無しの初期ポリプの順になることが分かった。また、精密pCO₂制御装置によって作成した産業革命前の酸性化海水中では、群体形成期において顕著な石灰化率の増加が見られた。これは、既にこれまでに起こった低いレベルの海洋酸性化によっても、サンゴが影響を受けている可能性を示唆するものである。今後はより多くのサンゴ種を対象に同様の実験を行い、種による酸性化海水への反応の違いを考慮することで、今後の海洋酸性化進行に伴う野外での群集組成の変化を予測することが、生態系レベルでの影響評価という観点から重要である。そこで、種間比較を行うための予備的観察として、コユビミドリイシと同様に沖縄周辺で多く見られるハマサンゴを対象とした飼育実験も行った。

[キーワード] 海洋酸性化、精密pCO₂制御装置、造礁サンゴ、石灰化、初期生活史

1. はじめに

現在、世界的な注目を集めている全地球的な環境問題の一つに、地球温暖化があるが、IPCC

(Intergovernmental Panel on Climate Change : 気候変動に関する政府間パネル) 第4次評価報告書においては、海洋酸性化が生態系に与える負の影響も危惧されている (IPCC 2007)¹⁾。これまでの報告によると、1700年代に始まった産業革命以降、大気中の二酸化炭素 (CO₂) 濃度は着実に増加し、それまで大気中の二酸化炭素分圧 (pCO₂) は300 ppm程度であったが、現在の大気中のpCO₂ は400 ppmまで上昇した。今後、大気中のpCO₂増加がさらに加速し、2100年までに最大でpCO₂が1000 ppmまで上昇すると予測されている (IPCC 2007)。海洋酸性化によって、今後多くの石灰化生物が、石灰化の抑制などによって負の影響を受けることが、主に室内飼育実験の結果から示唆されている (Kleypas et al. 2006)²⁾。造礁サンゴ類 (以下サンゴ) は、炭酸カルシウムの骨格を形成する石灰化生物であり、サンゴ礁域で量的にも卓越し、サンゴ礁を形成する代表的な造礁生物である。さらにサンゴは、他の生物に生息場所を提供し、体内に共生する褐虫藻がサンゴ礁での主要な一次生産を担うなど、サンゴ礁生物群集が成立する基盤ともなっている。

これまでの酸性化海水を用いた室内水槽実験の結果からは、様々な種において、サンゴは酸性化海水中では石灰化が抑制されることが報告されている (Anthony et al. 2008³⁾、Gattuso et al. 1998⁴⁾、Marubini et al. 2008⁵⁾、レビューとしてKleypas et al. 2006²⁾)。近年の様々な分類群を対象とした酸性化海水実験の結果では、甲殻類のように酸性化海水で成長が促進されるようなケースも報告されてはいるものの (Ries et al. 2009)⁶⁾、サンゴは一般的に、酸性化海水によって石灰化が抑制されることは多くの研究者で意見が一致しているようである。一方で、サンゴは受精から発生、浮遊幼生、着底後の褐虫藻との共生関係の成立、石灰化に伴う成長、群体形成期など、様々な生活史段階を経るが、それぞれの生活史段階において、酸性化海水によってどのような影響を受けるかは不明な点が多い。特に受精や浮遊幼生期などの初期生活史段階は、環境ストレスの影響を受けやすいことが示唆されているが (Thorson 1950)⁷⁾、サンゴの初期生活史段階での酸性化海水の影響は、本プロジェクトが開始した2008年の時点ではほとんど明らかにされていなかった。

また、これまでのサンゴを対象とした海洋酸性化に関する研究では、成体のサンゴ群体が主な実験材料として用いられてきた (Anthony et al. 2008³⁾、Gattuso et al. 1998⁴⁾、Marubini et al. 2008⁵⁾、レビューとしてKleypas et al. 2006²⁾)。海産無脊椎動物では、初期生活史は他の生活史段階と比較して環境変化の影響を受けやすく (Thorson 1950)⁷⁾、海洋酸性化影響に関しても、同様の可能性が示されている (Kurihara 2008)⁸⁾。しかし一方で、これまで初期生活史段階での酸性化海水への感受性と、成体での感受性を、同じ実験条件で厳密に評価した研究はほとんどない。サンゴを対象とした室内実験においても、サンゴの初期生活史段階が、成体の段階 (以降、群体形成期とする) と比べて、酸性化海水への影響を受けやすいかどうかを明確に示した研究はこれまでなかった。また、これまでの酸性化海水を用いた室内実験は、酸・アルカリ添加による実験も多くあり、大気中のCO₂の増加で生じる海洋酸性化を模倣した実験系だったとは言い難かった。用いている種も様々で、得られた結果が種間の違いなのか、実験条件の違いなのか不明確な場合が多々あった。よって、サンゴが今後の海洋酸性化によってどのような影響を受けるのかを厳密に評価するためには、種を統一し、様々な生活史段階を対象に、同じ実験系で体系的に評価する必要性があった。

2. 研究目的

上記の背景を踏まえ、本研究では、サンゴの生活史のうち、受精・発生、浮遊幼生・変態、着

底後の初期ポリプの成長および共生成立、石灰化を行う初期ポリプ（褐虫藻有無）と群体形成期に着目し、沖縄周辺の造礁サンゴの代表種の一つであるコユビミドリイシ (*Acropora digitifera*) を対象に、複数段階の $p\text{CO}_2$ の異なる海水を用いて評価し、どの生活史段階で、酸性化海水による悪影響が出るのかを把握することを目的とした。まず簡易 $p\text{CO}_2$ 制御装置によって、初期生活史段階での酸性化海水影響を網羅的に把握することを第一の目的とした。そして本プロジェクトで開発された精密 $p\text{CO}_2$ 制御装置によって、過去及び近未来の CO_2 処理海水を作成し、第一の目的で影響が出ることが分かったサンゴ初期ポリプの石灰化と群体形成期の石灰化を比較することで、サンゴの初期生活史段階が、成体と比べてどの程度影響を受けやすいのかを把握することを第二の目的とした。また、今後種間比較を行うための予備的観察を行うために、コユビミドリイシと同様に、沖縄周辺で多く見られるハマサンゴ (*Porites australiensis*) の群体形成期の石灰化を対象とした実験も行い、ミドリイシ属サンゴと比べて、酸性化海水に対する反応がどの程度異なるのかを把握することも目的とした。

3. 研究方法

計測されたpH値によって100 V交流電源を制御可能な簡易pH計(Micro pH、(株)アクアベース)、液化炭酸ガスポンプ及び CO_2 流量制御用の電磁弁（(株)アクアベース、100 V交流電源用）、そして曝露水槽からなる簡易 $p\text{CO}_2$ 制御装置を作成した(図1)。このシステムは、水草等の飼育水槽の CO_2 添加装置を基に作成されたものである。このシステムを3-6連で運用し、海水pHは3-6段階で設定した。簡易pH計附属のpH複合電極は、pH 7.00およびpH 4.01の標準溶液を用いて校正する規格となっており、近似的にNBSスケールに準拠しているため、曝露水槽の海水pH設定は、NBSスケールで設定した後に、水槽の海水を定期的に取り出して全水素イオン濃度スケールで測定した。海水pH値から海水の炭酸系の化学平衡計算プログラム CO_2SYS を用いて、海水のあられ石(アラゴナイト)に対する飽和度と CO_2 分圧を計算した(Lewis and Wallace 1998)⁹⁾。なお、この計算に際して、全アルカリ度を2280 $\mu\text{mol}/\text{kg}$ と仮定とした。曝露水槽として、複数の約20 Lのガラス水槽を

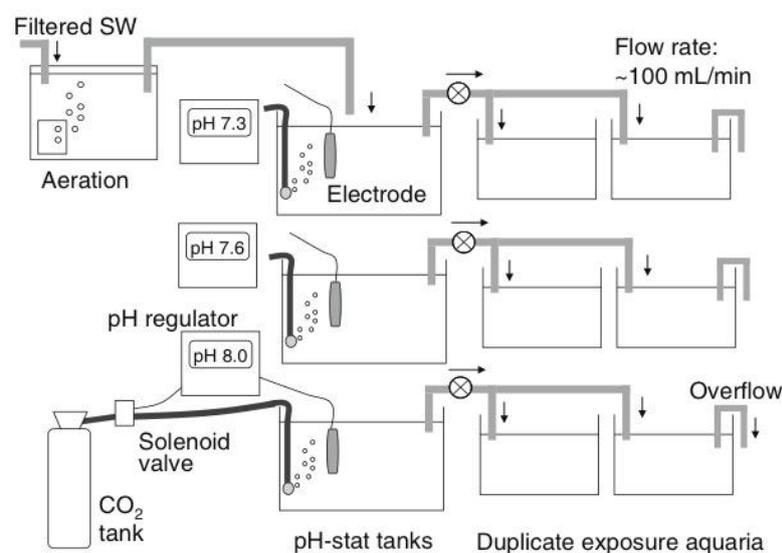


図1 簡易 $p\text{CO}_2$ 制御装置の模式図

用い、外周に冷却水を巡回させるとともに、ガラス水槽内には温調装置およびヒーターを設置して実験期間中の水温を27℃になるように制御した。水槽1個あたり約100 mL/minの流量でろ過海水を掛け流しした。

精子鞭毛運動の観察では、卵を100 μL の CO_2 処理海水中に入れ、素早く精子懸濁液を約0.2 μL 加え、精子の運動性を暗視野もしくは位相差コンデンサーを用いて観察した。精子鞭毛運動の観察では、分離した精子を、ろ過海水中に $1 \times 10^{5-6}$ cell/mLの状態ですべて室温にて保存した。卵を100 μL の CO_2 処理海水中に希釈し、素早く精子懸濁液を約0.2 μL 加え、精子の運動性を暗視野もしくは位相差コンデンサーを用いて観察した。精子の遊泳は、顕微鏡に取り付けたCCDカメラを介してデジタルビデオに記録した。精子の遊泳軌跡および運動率を算出するために、記録した画像をAdobe Premiere 6.5を用いてコンピューターにQuick Timeファイル形式で保存した。保存した動画ファイルを60 フレーム（2秒間）に編集し、NIH Imageのマクロを用いて精子の頭部の軌跡を描いた。また、精子の遊泳率もカウンターを用いて算出した。

また、卵と精子を混ぜ合わせることで受精卵を作成した1時間後に、 CO_2 処理海水中に受精卵を入れ、それから1時間後に発生途中の受精卵をホルマリンで固定し、平均細胞分裂数を算出した。浮遊幼生への影響を見るために、自然海水中で受精、発生させた5日齢の幼生を各 CO_2 処理海水中で飼育し、飼育開始から3日後、7日後に生存率を算出した。さらに、各 CO_2 処理海水中で2時間飼育した幼生のポリプへの変態を、変態ペプチド (Hym-248; Iwao et al. 2002)¹⁰⁾によって誘引し、変態率を算出した。初期ポリプの成長を測定するために、産卵から7日後のコユビミドリイシのプラヌラ幼生を6穴プラスチックプレート内にて、変態ペプチド (Hym-248)に曝し、プラスチックプレート上への定着と変態を誘引することでサンゴの初期ポリプを作成した。初期ポリプは、10日間各 CO_2 処理海水に曝された。初期ポリプの成長は、実体顕微鏡に接続したデジタルカメラにて撮影した写真を元に投影面積を測定することで算出した。また、初期ポリプを CO_2 処理海水で14日間飼育した後に、ヒメジャコガイから単離培養した褐虫藻を与えることで、サンゴポリプと褐虫藻との共生成立への CO_2 処理海水の影響を調べた。幼生実験、初期ポリプ実験共に、水温は27℃に調整した。また、ハマサンゴの群体形成期の石灰化率を測定するために、瀬底島周辺で採集したハマサンゴ3群体から枝片を作成し、実験に用いた。枝片は、4 cm^2 となるようにサンゴ片を切断し、アクリル板に固定した後、屋外水槽で養生した。実験は8週間行った。実験期間中は水温を27℃、光量を120-140 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ に調節した。また、骨格成長量として水中重量法によって枝片の重量を測定した。重量の計測は実験開始時と、実験終了時に行った。水中重量から枝片の成長率を $\{(\text{実験終了時の重量} - \text{初期重量})/\text{初期重量} \times 100\}$ として求めた。また、光合成活性を示す光化学反応の量子収率 (F_v/F_m)、褐虫藻密度、クロロフィル量を測定し、体内に共生する褐虫藻への影響評価も行った。

本プロジェクトで開発された精密 pCO_2 制御装置 (図2) を用いて、褐虫藻有無での初期ポリプの石灰化率と群体形成期の石灰化率の比較を行なった。紀本電子工業社製の精密 pCO_2 制御装置を用いて、実験海水の pCO_2 を制御した。10 μm フィルターと1 μm フィルターで濾過した海水に、精密 pCO_2 制御装置によって CO_2 を吹き込み、 CO_2 処理海水を作成した。 CO_2 処理海水を、毎分平均150 mlの流量で実験水槽に流し、オーバーフローによって排水した。 CO_2 処理海水の pCO_2 は1時間に1回自動的に記録した。コユビミドリイシの群体形成期の石灰化率を測定するために、瀬底島周辺で採集したコユビミドリイシの5群体から枝片を作成し、実験に用いた。枝片は、1つの中軸ポリプ

を含み、長さが2~3 cmとなるように枝の基部から切断し、瞬間接着剤によってプラスチックねじの頭部に固定した後、屋外水槽で1週間養生した。実験は6週間行った。実験期間中は水温を27℃、光量を75 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ に調節した。また、骨格成長量として水中重量法によって枝片の重量を測定した。重量の計測は実験開始時と、開始してから毎週1回行った。水中重量から枝片の成長率を{(実験終了時の重量-初期重量)/初期重量 \times 100}として求めた。また、初期ポリプ期の石灰化率を測定するために、上記と同様の方法で、初期ポリプを作成し、ヒメジャコガイから単離培養した褐虫藻を与えて、褐虫藻有無の初期ポリプを用意した。これらのポリプを10日間、CO₂処理海水に暴露した。実験期間中は水温を27℃、光量を75 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ に調節した。初期ポリプの石灰化率を、実験終了後に計測した初期ポリプの骨格重量を投影面積で割ることで算出した。

4. 結果・考察

CO₂処理海水にコユビミドリイシの精子を暴露すると、わずかなpH低下でも精子鞭毛運動の有意な減少が見られた(図3;一元配置分散分析、 $p < 0.01$)。サンゴは初夏に限られた期間に一斉産卵を行う。サンゴの中でも特に種数が多いミドリイシ属サンゴの多くは、精子と卵が一緒になったバンドルを海水中に放出し、バンドルは水面近くで割れて受精が行われる。これは、精子濃度が希釈されやすい海水中での受精率を少しでも上げるための戦略だと考えられているが、それでもなお、急速に精子濃度が希釈される海水中での受精は困難が予想される。そのため、より受精率を確実に行うために、サンゴは卵から化学物質を放出し、精子の動きを活性・誘因させるこ



図2 瀬底実験施設に設置された精密pCO₂制御装置の写真

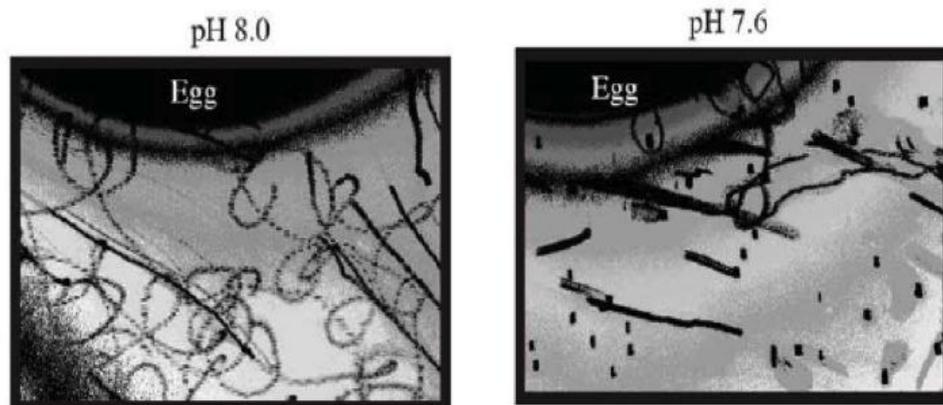


図3 酸性化海水がコユビミドリイシの精子鞭毛運動に及ぼす影響。左はコントロール海水 (pH8.0)、右は酸性化海水(pH7.6)での精子鞭毛運動の様子。

とが報告されている (Morita et al. 2006)¹¹⁾。酸性化海水中で見られた精子鞭毛運動の低下は、元々条件の厳しい海水中での受精がより困難になる可能性を示唆する。

初期発生に関しては、平均細胞分裂数では、処理間で明確な差は見られなかった (図4；一元配置分散分析、 $p > 0.05$)。また、浮遊幼生の生存率に処理間で有意な差は見られなかった (図5；一元配置分散分析、 $p > 0.05$)。これは幼生期で酸性化海水の影響を受けるとする、ウニや二枚貝を対象とした過去の報告とは異なる (Kurihara et al. 2008)⁸⁾。これは、幼生期で石灰化を行うかどうか起因されると考えられる。ウニや二枚貝は、幼生期から石灰化を行うため、酸性化海水の影響が生じるのは、幼生期における石灰化が阻害されることが大きいと考えられる。一方でサンゴの場合は、幼生期には石灰化が生じないため、酸性化海水の影響は生じにくいかもしれない。

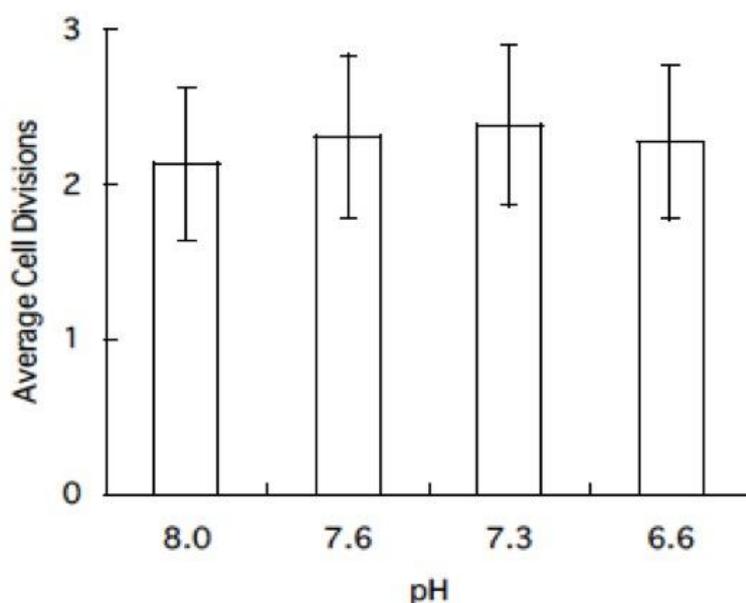


図4 酸性化海水がコユビミドリイシの初期発生に及ぼす影響。縦軸は平均細胞分裂数、横軸は実験に用いた海水のpHを示す。図中のエラーバーは標準誤差を示す。

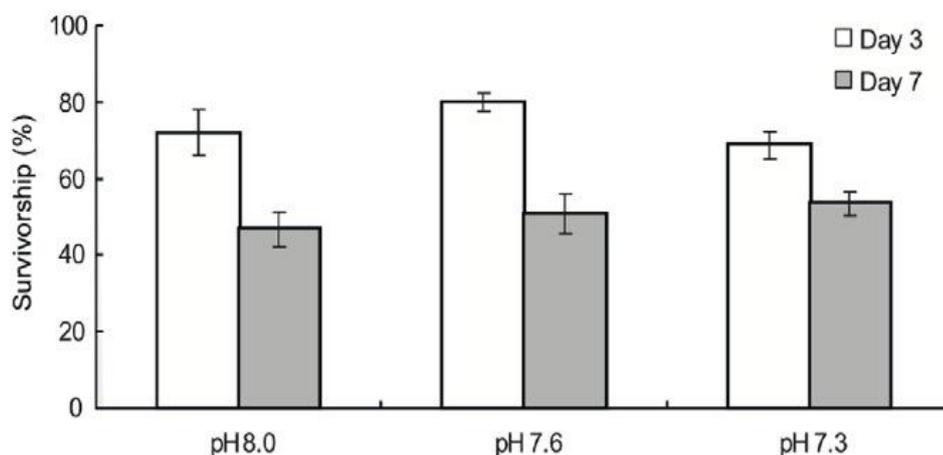


図5 酸性化海水がココビミドリイシの幼生の生残率に及ぼす影響。縦軸は幼生生残率、横軸は実験に用いた海水のpHを示す。図中のエラーバーは標準誤差を示す。

一方で、浮遊幼生の初期ポリプへの変態を正常に完了した幼生数は、pH8.0で飼育した実験区で有意に多く、pH7.6で飼育した実験区では正常に変態した幼生は減少した（図6；一元配置分散分析、 $p < 0.01$ ）。サンゴの幼生は、海底の石灰藻などによって変態・着底が誘因されると考えられている（Kitamura et al. 2007）¹²。酸性化海水中でサンゴの幼生の変態率が減少したことは、サンゴの初期加入において深刻な影響が生じることが予想される。また、石灰藻自身も酸性化海水の影響を受けることが報告されているため（Kuffner et al. 2008）¹³、将来海洋酸性化が急速に進むと、サンゴの加入による集団形成に大きな影響が生じる可能性がある。低いpH海水中で幼生の変態が正常に進まなかった理由は不明であり、今後詳細なメカニズムの解明が望まれる。近年、サンゴの変態期におけるマイクロアレイ解析も行われており、こうした遺伝子解析技術を適用することで、酸性化海水がサンゴの変態抑制を引き起こす原因も解明されることが期待される。

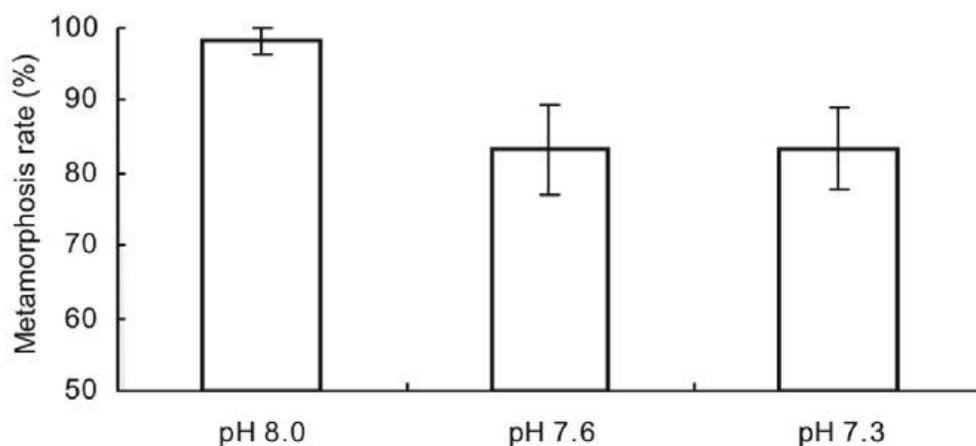


図6 酸性化海水がココビミドリイシの幼生の変態率に及ぼす影響。縦軸は幼生変態率、横軸は実験に用いた海水のpHを示す。図中のエラーバーは標準誤差を示す。

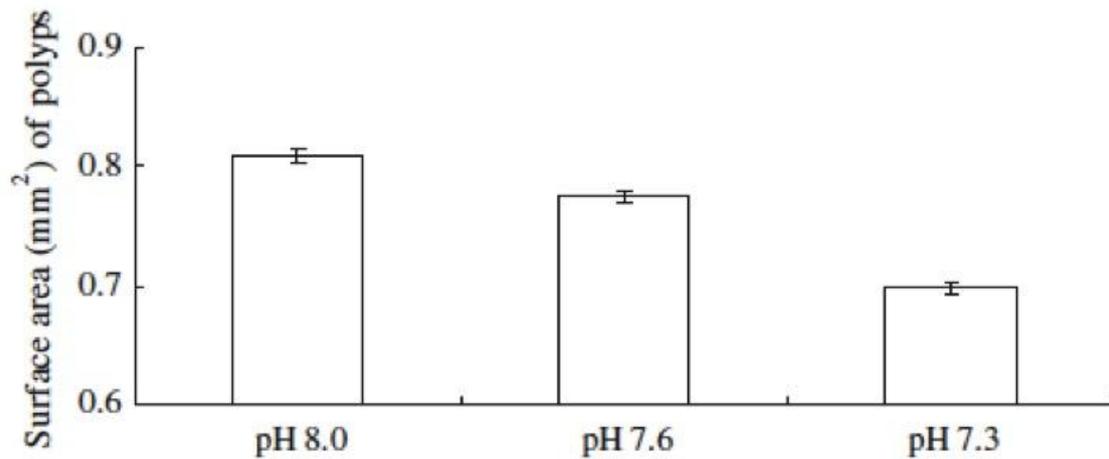


図7 酸性化海水がココビミドリイシの初期ポリプの成長に及ぼす影響。縦軸はポリプの投影面積(mm²)、横軸は実験に用いた海水のpHを示す。図中のエラーバーは標準誤差を示す。

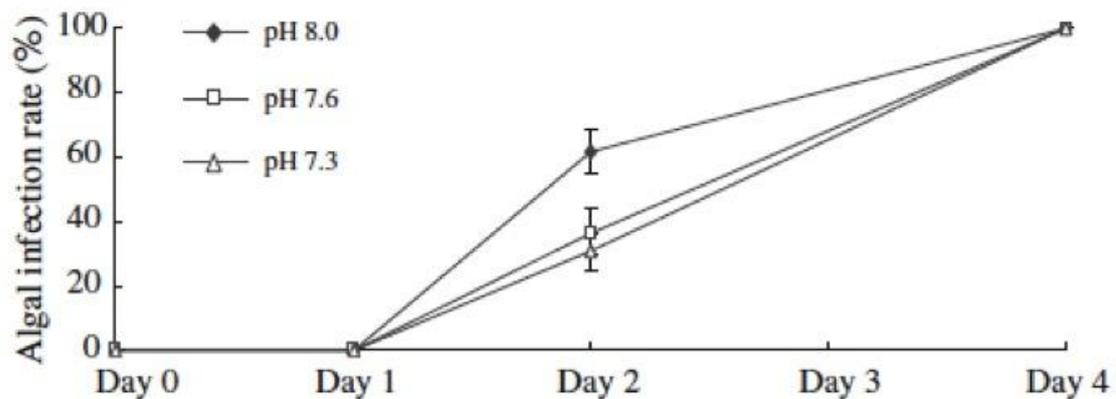


図8 酸性化海水がココビミドリイシ一次ポリプの共生藻感染率に及ぼす影響。縦軸は共生藻の感染したポリプの割合、横軸は実験に用いた海水のpHを示す。図中のエラーバーは標準誤差を示す。

着底後のポリプに対する酸性化海水の影響評価では、低pH海水で飼育したポリプの面積は小さくなる傾向が見られた(図7; 一元配置分散分析、 $p < 0.01$)。これは、着底後の骨格成長が低pH海水では抑制されたためだと考えられる。また、初期ポリプの褐虫藻の取り込み率がpHの低下に伴って減少した(図8; 二元配置分散分析、 $p < 0.01$)。観察されたポリプの褐虫藻感染率の低下は、ポリプサイズが低pH海水によって抑制されたことで、褐虫藻の感染経路である口のサイズが小さくなったために、褐虫藻の取り込みの効率が低下したためと考えられたが、その後の褐虫藻を与えてから4日目には全てのポリプで褐虫藻の感染が観察された。

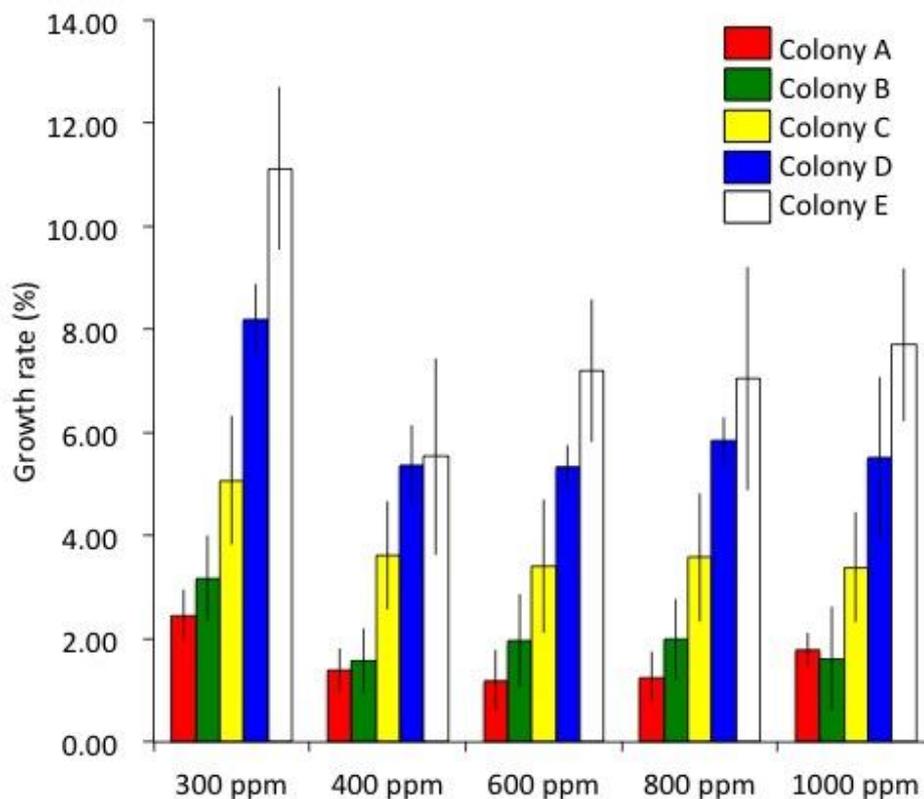


図9 酸性化海水がコユビミドリイシの群体形成期の石灰化率に及ぼす影響。縦軸は石灰化率、横軸は実験に用いた海水のpCO₂を示す。図中のエラーバーは標準誤差を示す。

群体形成期の石灰化率を測定するための枝片実験では、近未来の海洋酸性化を想定した600、800および1000 ppmのpCO₂条件と、現在を想定した400 ppmとの間で、石灰化率には差は見られなかった（図9）。一方で、300 ppmと他のpCO₂条件間では、明らかな差が見られた（図9；一元配置分散分析）。褐虫藻有無の初期ポリプの石灰化率を調べた実験では、どちらの初期ポリプでも、酸性化海水中での石灰化率の低下が見られた（図10）。しかし褐虫藻有の初期ポリプでは、処理間で有意差は見られない一方で、褐虫藻無の初期ポリプでは、300 ppmと400 ppm、800 ppmと1000 ppmの間で有意差が見られた（一元配置分散分析、 $p < 0.01$ ）。また、群体形成期と同様に、褐虫藻有の初期ポリプは、300 ppmで最も石灰化率が高かった。これらの結果から、酸性化海水への耐性は、群体形成期>褐虫藻有りの初期ポリプ>褐虫藻無しの初期ポリプの順になることが示された。

サンゴは、初期ポリプの時期から細胞内に褐虫藻を取り込み、共生する褐虫藻の光合成産物をエネルギー源として、代謝を維持していることが報告されている（Yellowlees et al. 2008）¹⁴⁾。また、海水中のCO₂濃度の上昇に伴って重炭酸イオン濃度が上昇することが知られている（Kleypas et al. 2006）²⁾。Marubini et al. (2008)⁵⁾は、同じpHの海水中において、通常よりも重炭酸イオン濃度が高い海水中では、光合成量がより高くなることを報告した。本実験においても、pCO₂の増加に伴って重炭酸イオン濃度が増加し、その結果、褐虫藻の光合成量が増加したかもしれない。そのため、褐虫藻と共生する枝片及び初期ポリプでは、褐虫藻を持たない初期ポリプよりも、pCO₂の増加が石灰化に及ぼす影響が緩和された可能性がある。

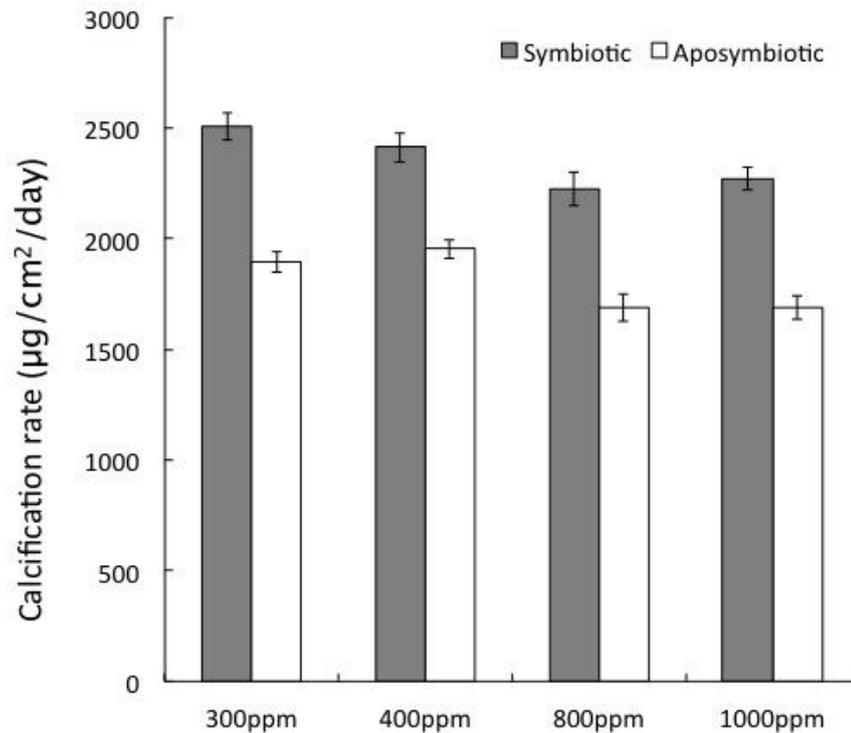


図10 酸性化海水がココビミドリイシの初期ポリプの石灰化率に及ぼす影響。縦軸は石灰化率、横軸は実験に用いた海水のpCO₂を示す。灰色バーが褐虫藻あり、白色バーが褐虫藻なし。図中のエラーバーは標準誤差を示す。

褐虫藻を持つ初期ポリプと群体形成期の間で、酸性化海水への反応に違いが見られた理由としては、群体形成期のサンゴポリプと初期ポリプとで、ポリプの表面積と体積の比が異なることである。群体形成期のサンゴポリプは初期ポリプに比べて、石灰化を行っている体表面部分に対する既存の骨格部分の割合が大きい。そのため、pCO₂の変化に対する単位表面積当たりの石灰化量の変化率が同じであっても、群体形成期のサンゴポリプよりも初期ポリプで、pCO₂の影響が成長により強く表れたのかも知れない。別の可能性としては、群体形成期のサンゴポリプと初期ポリプの軟体部組織の厚さの違いである。石灰化を行う組織は体表面の細胞ではなく、骨格に近い深部の細胞と考えられている (Allemand et al. 2004)¹⁵⁾。サンゴ体内のpHは軟体部組織にある種の酵素によって、外環境のpHよりも高く保たれていることが示唆されている (Al-Horani et al. 2003)¹⁶⁾。組織の厚い群体形成期のサンゴポリプでは、サンゴ軟体部組織のバッファー効果によって、酸性化海水の石灰化組織への影響が緩和されたが、軟体部組織の薄い初期ポリプでは、このバッファー効果が十分ではなかったために、pCO₂の増加によって石灰化組織がより大きな影響を受けたのかも知れない。

以上の結果、海洋酸性化は、サンゴの様々な生活史段階において、負の影響を及ぼすことが示唆された。サンゴの鞭毛運動の低下は、海水中での受精率の低下を引き起こす可能性がある。また、サンゴの生存率は一般的にサイズに依存するため (Hughes and Jackson 1985)¹⁷⁾、初期ポリプが海洋酸性化の影響を強く受けるのであれば、初期ポリプの成長の低下に起因する死亡率の上昇が引き起こされ、新規加入量が減少し、サンゴ個体群が維持されなくなる可能性もあるだろう。

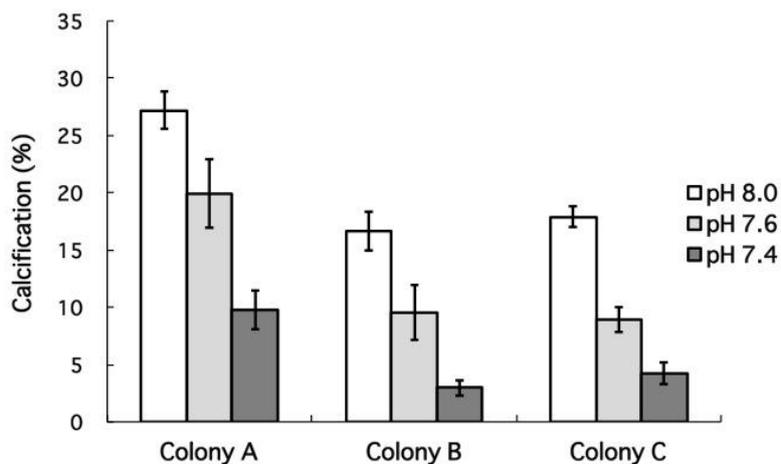


図11 酸性化海水がハマサンゴの群体形成期の石灰化率に及ぼす影響。縦軸は石灰化率、横軸は実験に用いた群体番号を示す。図中のエラーバーは標準誤差を示す。

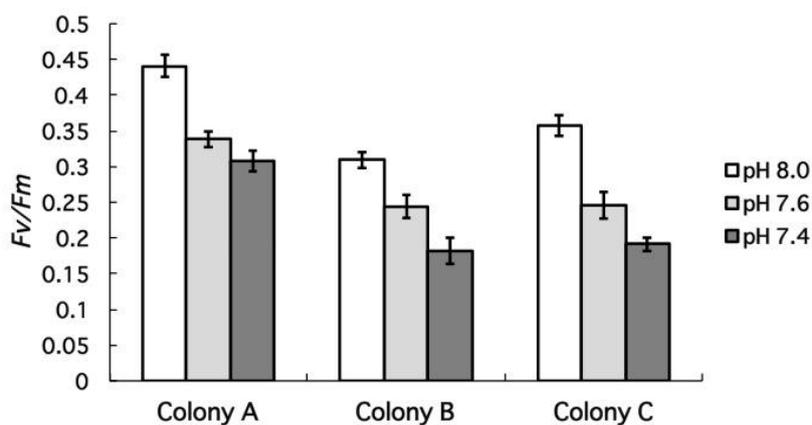


図12 酸性化海水がハマサンゴのFv/Fm値に及ぼす影響。縦軸はFv/Fm値、横軸は実験に用いた群体番号を示す。図中のエラーバーは標準誤差を示す。

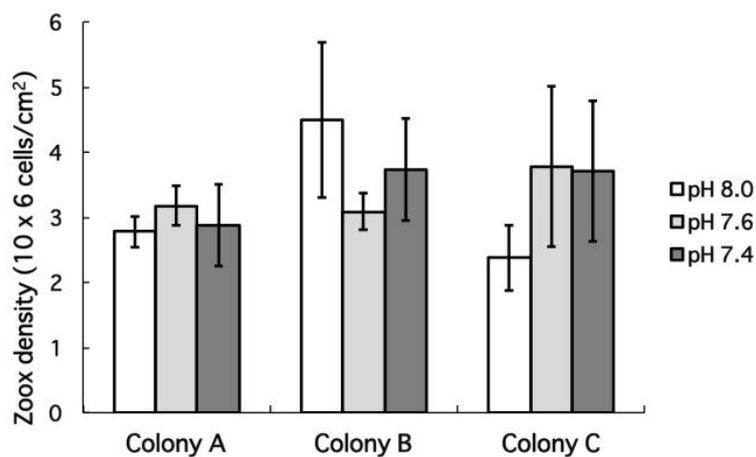


図13 酸性化海水がハマサンゴの褐虫藻密度に及ぼす影響。縦軸は褐虫藻密度、横軸は実験に用いた群体番号を示す。図中のエラーバーは標準誤差を示す。

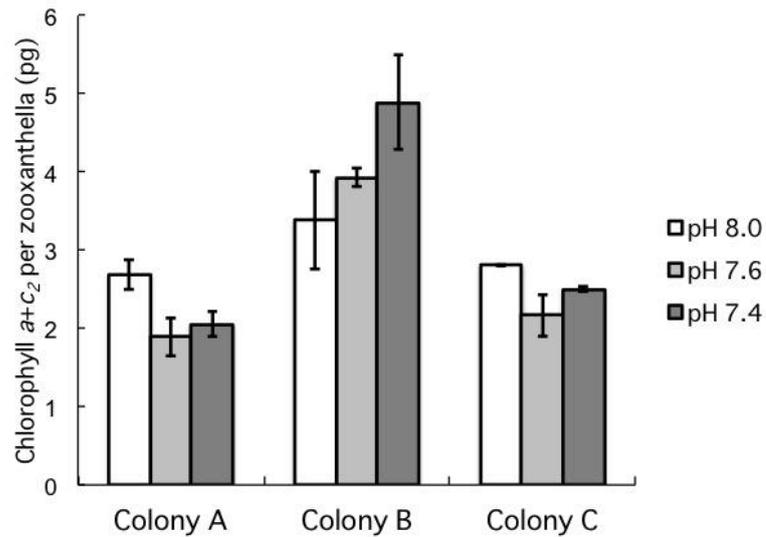


図14 酸性化海水がハマサンゴのクロロフィル量に及ぼす影響。縦軸はクロロフィル量、横軸は実験に用いた群体番号を示す。図中のエラーバーは標準誤差を示す。

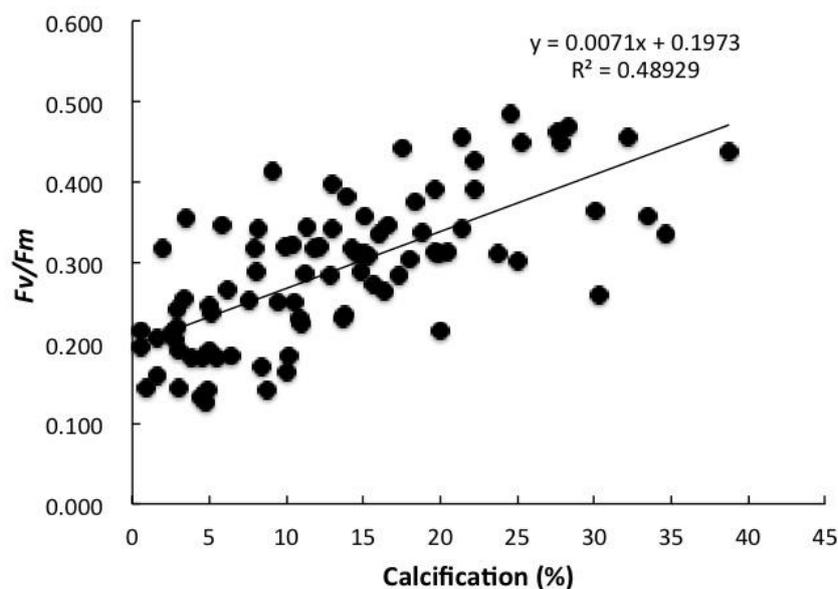


図15 石灰化率とFv/Fm値の相関関係

酸性化海水中でのサンゴの変態率の低下は、新規加入量の低下に拍車をかけることが危惧される。今後さらに種数を増やして同様の実験を行い、今回見られたような影響が、サンゴ群集においてどれくらい一般的な現象なのかを見定め、生態系レベルでの影響評価につなげていくことが望まれる。

今後種間比較を行うための予備的観察を行うために、コユビミドリイシと同様に、沖縄周辺で多く見られるハマサンゴの群体形成期の石灰化を対象とした実験を行い、ミドリイシ属サンゴと比べて、酸性化海水に対する反応がどの程度異なるのか、また、Fv/Fm値、褐虫藻密度、クロロフィル量を測定し、体内に共生する褐虫藻への影響評価も行った。その結果、ハマサンゴでは、海

水中のpHの低下とともに石灰化とFv/Fm値は抑制される一方で（図11、図12；一元配置分散分析、 $p < 0.01$ ）、褐虫藻密度とクロロフィル量には変化が見られなかった（図13、14；一元配置分散分析、 $p > 0.05$ ）。また、石灰化率とFv/Fm値には有意な相関関係が見られた（図15； $p < 0.01$ ）。これまで、酸性化海水中でサンゴの石灰化が抑制される理由として、海水中のpHの低下に伴う炭酸イオンの低下が大きな要因であるとされている（Kleypas et al. 2006）²⁾。しかし海水中のpCO₂の増加に伴うpHの低下は、重炭酸イオンの増加を引き起こし、サンゴ体内の褐虫藻への光合成の増加を引き起こす可能性もある。しかし今回の結果では、光合成活性は酸性化海水では低下する傾向が見られた。光合成活性と石灰化率との間に有意な相関関係が見られたことは、酸性化海水によって光合成活性が阻害されたことも、石灰化率が下がった要因の一つであると考えられる。先攻研究では、ミドリイシ属サンゴの一種では、酸性化海水中でのクロロフィル量の増加が報告されており（Crowley et al. 2009）¹⁷⁾、ハマサンゴ属サンゴとミドリイシ属サンゴとの間で、酸性化海水に対する順応機構に違いがあることが示唆される。今後複数のサンゴ種を対象にした種間比較実験を行うことが、多種多様な生物が生息する、サンゴ礁生態系における海洋酸性化影響を理解する上で重要である。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

造礁サンゴは、サンゴ礁生態系の基盤を形成する重要分類群である。サンゴ礁生態系は、漁業、観光、防災などの面から、経済的価値の高い生態系であるため、その衰退は人間社会においても大きな損失につながる。上記の成果より、今後起こりえる海洋酸性化は、サンゴの生存に深刻な影響を及ぼし、サンゴ礁生態系の衰退につながるということが強く示唆された。また、過去から既に進展している海洋酸性化も、既にサンゴの生育に影響を及ぼしていることが示唆され、一刻も早い対策の必要性が、科学的にも示された。



図16 ウェブサイトのトップページ

(2) 環境政策への貢献

本プロジェクトが実施された期間の中で、国内外における学会やシンポジウム、ワークショップでの発表を行い、成果の普及に積極的努めた。またシンポジウムの企画、運営も行った。さらに、査読有りの論文も4本出版され、国内外からも注目される成果となった。また、本プロジェクトの成果をより広く発信するために、ウェブサイトの構築も行った(図16)。本サイトは、GoogleやYahooでの「海洋酸性化」キーワード検索でトップに位置する(2011年4月15日現在)。アクセス解析の結果も、「海洋酸性化」や「AICAL」で検索されるケースが多く、本プロジェクトへの関心の高さが示された。今後も引き続き、新聞報道や学会発表等を通じて、今後の海洋酸性化がサンゴの生残に深刻な影響を与えることを広く普及することで、今後のCO₂排出抑制の科学的根拠として活用されるように努める。

6. 引用文献

- 1) IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007) Climate Change 2007 Synthesis report, Cambridge University Press, New York.
- 2) Kleypas JA et al. (2006) Impacts of ocean acidification on coral reefs and other marine calcifiers: a guide for future research. Report of a workshop held on 18-20 April 2005, St. Petersburg, FL, sponsored by NSF, NOAA, and the U.S. Geological Survey, pp 88.
- 3) Anthony KRN, Kline DI, Diaz-Pulido G, Dove S, Hoegh-Guldberg O (2008) Ocean acidification causes bleaching and productivity loss in coral reef builders. Proc Natl Acad Sci USA 105:17442-17443.
- 4) Gattuso JP, Frankignoulle M, Bourge I, Romaine S, Buddemeier RW (1998) Effect of calcium carbonate saturation of seawater on coral calcification. Global Planet Change 18:37-46.
- 5) Marubini F, Christine AE, Ferrier-Page's AE, Furla P, Allemand D (2008) Coral calcification responds to sea water acidification: a working hypothesis towards a physiological mechanism. Coral Reefs 27:491-499.
- 6) Ries JB, Cohen AL, McCorkle DC (2009) Marine calcifiers exhibit mixed responses to CO₂-induced ocean acidification. Geology 37:1131-1134.
- 7) Thorson G (1950) Reproductive and larval ecology of marine bottom invertebrates. Biol Rev Cambridge Phil Sot 25:1-45.
- 8) Kurihara, H. (2008) Effects of CO₂-driven ocean acidification on the early developmental stages of invertebrates. Mar Ecol Prog Ser 373, 275-284.
- 9) Lewis E, Wallace DWR (1998) Program developed for CO₂ system calculations, ORNL/ CDIAC-105. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge
- 10) Iwao K, Fujisawa T, Hatta M (2002) A cnidarian neuropeptide of the GLWamide family in duces metamorphosis of reef-building corals in the genus *Acropora*. Coral Reefs 21:127-129.
- 11) 15) Morita M et al. (2006) Eggs regulate sperm flagellar motility initiation, chemotaxis, and inhibition in the coral, *Acropora digitifera*, *A. gemmifera*, and *A. tenuis*. J Exp Biol 209, 4574-4579.
- 12) Kitamura M, Koyama T, Nakano Y, Uemura D (2007) Characterization of a natural inducer of coral larval metamorphosis. J Exp Mar Biol Ecol 340:96-102.
- 13) Kuffner IB, Andersson AJ, Jokiel PL, Rodgers KS, Mackenzie FT (2008) Decreased abundance of

- crustose coralline algae due to ocean acidification. *Nature Geoscience* 1:114-117.
- 14) Yellowlees D, Rees TAV, Leggat W (2008) Metabolic interactions between algal symbionts and invertebrate hosts. *Plant Cell Env* 31:679-694.
- 15) Allemand D, Ferrier-Pagès C, Furla P, Houlbrèque F, Puvarel S, Reynaud S, Tambutté É, Tambutté S, Zoccola D (2004): Biomineralization in reef-building corals: from molecular mechanisms to environmental control. *C R Palevol* 3:453-467.
- 16) Al-Horain FA, Al-moghrabi SM, de beer D (2003): Microsensor study of photosynthesis and calcification in the scleractinian coral, *Galaxea fascicularis*: active internal carbon cycle. *J Exp Mar Biol Ecol* 288:1-15.
- 17) Hughes TP, Jackson JB (1985) Population dynamics and life histories of foliaceous corals. *Ecol Monog* 55:141-166.
- 18) Crawley A, Kline DI, Dunn S, Anthony K, Dove S (2009) The effect of ocean acidification on symbiont photorespiration and productivity in *Acropora formosa*. *Global Change Biol* 16:851-863.

7. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文 (査読あり)>

- 1) Morita M, Suwa R, Iguchi A, Nakamura M, Shimada K, Sakai K, Suzuki A. Ocean acidification reduces sperm flagellar motility in broadcast spawning reef invertebrates. *Zygote* 2010, 18:103-107
- 2) 諏訪僚太・中村崇・井口亮・中村雅子・守田昌哉・加藤垂記・藤田和彦・井上麻夕里・酒井一彦・鈴木淳・小池勲夫・白山義久・野尻幸宏. 海洋酸性化がサンゴ礁域の石灰化生物に及ぼす影響. *海の研究* 2010, 19:21-40
- 3) Suwa R, Nakamura M, Morita M, Shimada K, Iguchi A, Sakai K, Suzuki A. Effects of acidified seawater on early life stages of scleractinian corals (Genus *Acropora*). *Fisheries Science* 2010, 76:93-99
- 4) Nakamura M, Ohki S, Suzuki A, Sakai K, Suzuki A. Coral Larvae under Ocean Acidification: Survival, Metabolism, and Metamorphosis. *PLoS ONE* 2011, 6(1): e14521.

(2) 口頭発表 (学会等)

- 1) 守田昌哉 (琉大・熱生研)・諏訪僚太 (琉大・熱生研)・中村雅子 (琉大・理工)・島田和明 (東大・海洋研)・井口亮 (琉大・熱生研)・酒井一彦 (琉大・熱生研)・鈴木淳 (産総研) 「海洋酸性化が造礁サンゴとナマコの精子鞭毛に及ぼす影響」. 2008年度日本サンゴ礁学会大会.
- 2) Masako Nakamura, Ryota Suwa, Masaya Morita, Kazuaki Shimada, Akira Iguchi, Kazuhiko Sakai, Atsushi Suzuki. Effects of Ocean Acidification on early life stages of scleractinian corals (Genus *Acropora*). The 11th Pacific Science Inter-Congress, Tahiti, 2009.
- 3) Mayuri Inoue, Ryota Suwa, Akira Iguchi, Atsushi Suzuki, Hodaka Kawahata. Effects of increased CO₂

on growth and trace elements of the coral polyp skeletons. 日本地球惑星科学連合2009年大会.

- 4) 井口亮 (琉大・熱生研). 「CO₂シンポジウム開催の趣旨について」. 2009年度日本サンゴ礁学会大会シンポジウム「二酸化炭素増加がサンゴ礁域の海洋生物に及ぼす影響-分子から生理、生態まで-」.
- 5) 諏訪僚太 (京都大・フィールド研) 「シンポジウムの概要紹介」. 2009年度日本サンゴ礁学会大会シンポジウム「二酸化炭素増加がサンゴ礁域の海洋生物に及ぼす影響-分子から生理、生態まで-」.
- 6) 中村雅子 (琉大・理工) 「酸性化海水がサンゴの初期生活史に与える影響について」. 2009年度日本サンゴ礁学会大会シンポジウム「二酸化炭素増加がサンゴ礁域の海洋生物に及ぼす影響-分子から生理、生態まで-」.
- 7) 井口亮 (琉大・熱生研). 「酸性化海水がサンゴに及ぼす影響について」. 「海洋酸性化による環境影響：現状と展望」. 企画者：石田明生 (JAMSTEC) ・河宮未知生 (JAMSTEC) ・鈴木昌弘 (産総研). 日本海洋学会2010年度春季大会シンポジウム. 2010年3月26日. 東京海洋大学.

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない

(4) シンポジウム、セミナーの開催 (主催のもの)

2009年度日本サンゴ礁学会大会シンポジウム「二酸化炭素増加がサンゴ礁域の海洋生物に及ぼす影響-分子から生理、生態まで-」. 企画者：諏訪僚太 (京大・フィールド研) ・井口亮 (琉大・熱生研). 2009年11月28日. 本部町中央公民館大ホール. 観客200名.

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 2009年12月1日 紀伊民報9面 「CO₂が海を脅かす：精子の運動が低下 サンゴやナマコ」
- 2) 2009年11月18日 中国新聞社 「CO₂が海を脅かす：精子の運動大幅に低下」
- 3) 2009年5月9日 朝日新聞記事 「CO₂放出増→海が酸性化→生態系に打撃」

(6) その他

特に記載すべき事項はない