

## 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

(3) CO<sub>2</sub>増加が造礁サンゴおよび有孔虫類の石灰化に与える影響に関する研究

独立行政法人産業技術総合研究所

地質情報研究部門 物質循環研究グループ

鈴木 淳

&lt;研究協力者&gt;

琉球大学熱帯生物圏研究センター

井口 亮・大木 駿

琉球大学理学部地球物質科学科

藤田和彦

東京大学大気海洋研究所

黒柳あずみ・井上麻夕里

琉球大学理学部海洋自然学科

中村 崇

東京大学大学院新領域創成科学研究科

氷上 愛・川幡穂高

平成20-22年度累計予算額：11,577千円（うち、平成22年度予算額：3,500千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨] 本サブテーマでは、サンゴ礁を構築する主要な石灰化生物グループである造礁サンゴ類（以下サンゴ）とサンゴ礁棲底生有孔虫類（以下有孔虫）に着目する。サンゴおよび有孔虫の石灰化量が海水の炭酸カルシウム飽和度、すなわち、pHあるいはCO<sub>2</sub>分圧に依存することがいくつかの種について報告されているが、わが国のサンゴ礁を代表するサンゴおよび有孔虫については知見が十分ではない。そこで、亜熱帯域に生息するサンゴおよび有孔虫を対象に、近未来に予想されるCO<sub>2</sub>分圧条件における石灰化量の変化を明らかにすることを目的とした。初年度は、酸アルカリ添加により大型有孔虫ゼニイシ (*Marginopora kudakajimensis*) を対象に予察的実験を行い、酸性化の進行に伴い石灰化量が単調に減少する傾向が認められた。また、CO<sub>2</sub>ガス添加による簡易pH制御装置を用いて、比較的小型の有孔虫 (*Amphistegina lobifera*) の成体を3週間、低pH条件で飼育したところ、pH 7.3（全水素イオン濃度スケール）以下の条件で殻の部分的溶解が確認された。研究期間第2年度より、近未来に予想されるCO<sub>2</sub>分圧条件における石灰化量の変化を明らかにすることを目的として開発された精密CO<sub>2</sub>制御システム（AICAL装置）による低pH（高CO<sub>2</sub>分圧）条件でサンゴおよび有孔虫の石灰化量計測実験を実施した。対象とした種は、サンゴ類3種（ウスエダミドリイシ、ハマサンゴ、ニオウミドリイシ）と大型有孔虫類4種（*Baculogypisna sphaerulata*ほか）である。ほとんどの種でCO<sub>2</sub>分圧1000  $\mu$ atm以上の条件区では石灰化量に減少傾向が見られた。一方、酸性化海水への感受性が低いもの、あるいは600 - 800  $\mu$ atmの中程度の条件区で石灰化量が増進するものも見られた。これは、海水中の全炭酸の増加に伴う光合成の増進効果が関係している可能性が示唆される。今後、遺伝子型や個体群、種、さらに高次分類群など、さまざまなレベルで、酸性化海水に対する反応の多様性を明らかにしていくことが重要と考えられる。

[キーワード] 二酸化炭素、海洋酸性化、サンゴ、有孔虫、石灰化

## 1. はじめに

海洋酸性化は、人為起源の二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）の増加によって引き起こされる、現在最も注目さ

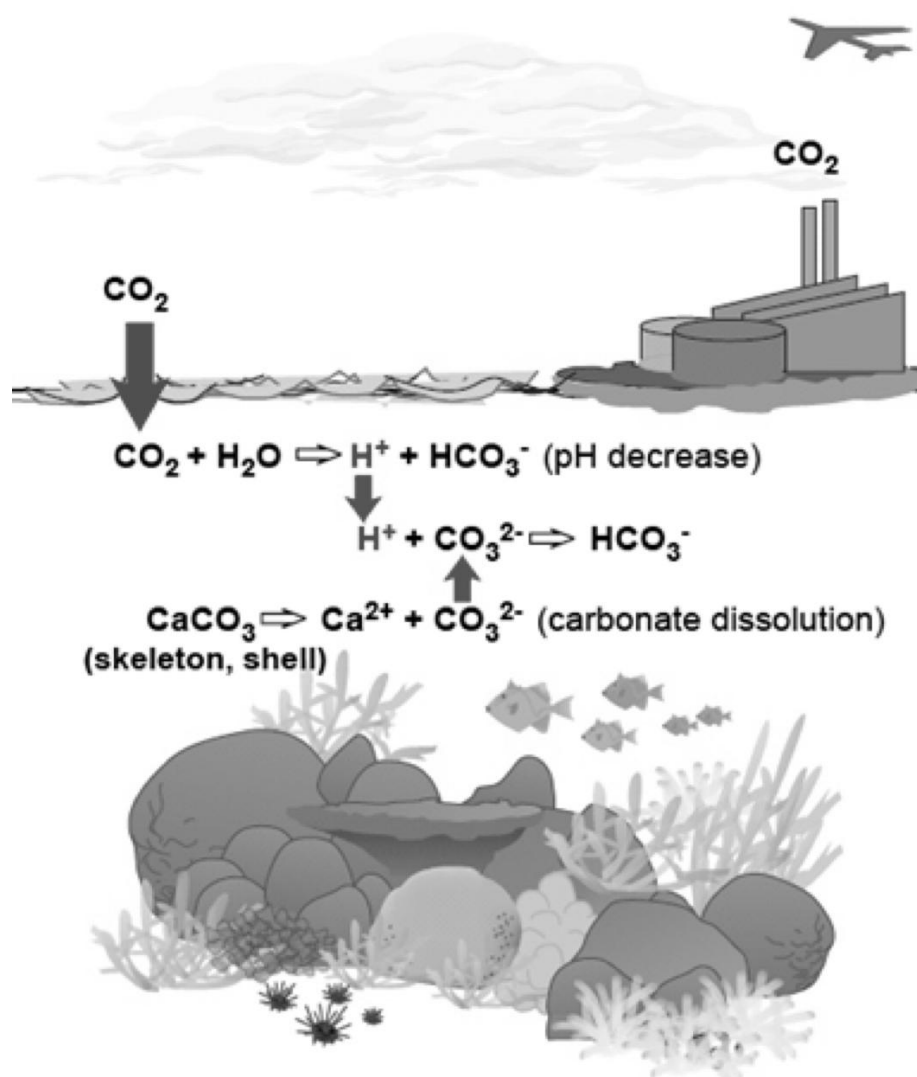


図1 大気中CO<sub>2</sub>の上昇と海洋酸性化による石灰化生物の石灰化量低下の関係。人間活動によって大気中に放出されたCO<sub>2</sub>は海水中に溶け込み、水分子と結合することで炭酸水素イオンを生成し、この反応により放出された水素イオンが炭酸イオンと結合し、サンゴを含む石灰化生物が石灰化に利用できる炭酸イオン濃度の減少が起こる。

れる地球環境問題の一つである (Hoegh-Guldberg et al., 2007<sup>1)</sup> ; Orr et al., 2005<sup>2)</sup> )。2007年に公開された気候変動に関する政府間パネル (Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC) の第4次評価報告書においても、海洋酸性化は、石灰化生物が多く生息する海洋生態系に深刻な影響を及ぼす可能性があるとして、緊急に研究を実施する必要性が指摘されている (IPCC, 2007<sup>3)</sup> )。

大気中で増加したCO<sub>2</sub>が海水に溶け込み、炭酸イオンが減少することによって炭酸カルシウムの飽和度 (Ω) が減少し、海洋生物の石灰化が阻害される可能性が指摘されている (Orr et al., 2005<sup>2)</sup> ; 図1)。これまでの室内飼育実験によるアプローチでは、酸性化海中では多くの石灰化生物において、石灰化速度が低下することが報告されている (Kleypas et al., 2006<sup>4)</sup> )。しかし一方で、近年では酸性化海水に対する石灰化生物の反応は多様であることも分かりつつある (Ries et al.,

2009<sup>5)</sup> )。また、大気中のCO<sub>2</sub>が上昇すると海水中の炭酸イオン (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) が減少する一方で、海水中の炭酸水素イオン (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) は増加する。体内に褐虫藻を共生させる造礁サンゴ類においては、炭酸水素イオンが増加すると、光合成が活性化されることも報告されており (例えばMarubini et al., 2008<sup>6)</sup> )、海洋酸性化が石灰化生物に及ぼす影響は、未解明な点が多い。

Orr et al. (2005)<sup>2)</sup> は、産業革命から現在、そして今後の炭酸カルシウムの飽和度の変化について、高緯度海域とサンゴ礁の多い低緯度海域とではいくつかの違いがあることを指摘している。まず、高緯度海域、特に太平洋の高緯度海域は、低温に加えて、有機物の分解によって酸性化している深層からの海水が湧昇してくるといった効果が重なって炭酸イオン濃度が低い。さらに大気からの二酸化炭素の溶け込みが加わって、今世紀中にも表層海水のあられ石に対する飽和度が1を下回ると予測されている。一方、低緯度のサンゴ礁域では海洋が成層して深層水の影響を受けず、高緯度や全球平均と比べて元々炭酸イオン濃度が高いため、炭酸カルシウムに対して未飽和になる時期は大きく遅延する。しかしながら、サンゴ礁生物の酸性化影響の発現が遠い将来のことであると安心することはできない。なぜならば、サンゴ礁生物は海水が炭酸カルシウムに対して十分に過飽和であっても、炭酸イオン濃度の低下に対応して石灰化量が低下する可能性があるからである (Kleypas et al., 1999)<sup>7)</sup>。産業革命から現在までの炭酸イオン濃度の低下量は、高緯度域の18 μmol/kgに対して熱帯域では29 μmol/kgと推定されており (Orr et al., 2005<sup>2)</sup>; 図2)、むしろ熱帯域で急激である。サンゴ礁は、サンゴや有孔虫などの石灰化生物の炭酸カルシウム骨格が蓄積して形成される、生物相豊かな生態系である。サンゴ礁域における石灰化生物への海洋酸性化影響の解明は急務である。

## 2. 研究目的

サンゴの石灰化量が海水の炭酸カルシウム飽和度、すなわちCO<sub>2</sub>分圧あるいはpHに依存することがいくつかの種について報告されているが、わが国のサンゴ礁を代表する種について知見が十分でない。そこで、近未来に予想されるCO<sub>2</sub>分圧条件においてわが国の亜熱帯域に生息するサンゴ類の石灰化量の変化を実験的

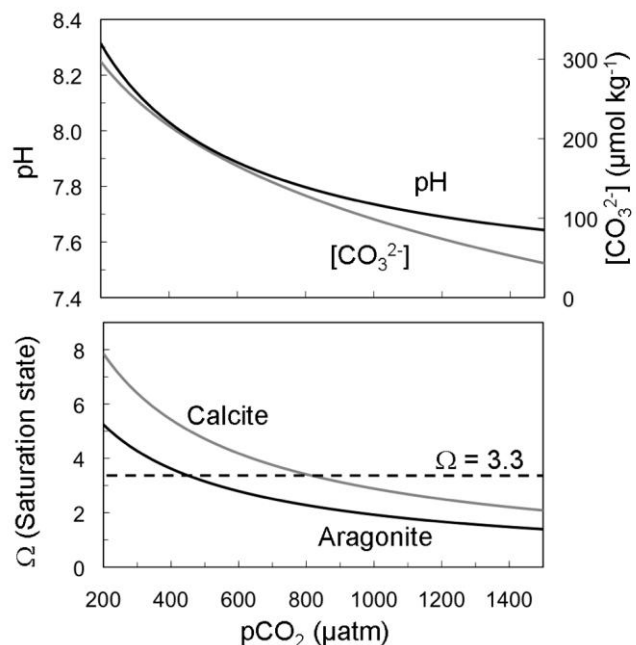


図2 サンゴ礁海域において想定される表層海水の二酸化炭素分圧とpHと炭酸イオン (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) 濃度、あられ石と方解石の飽和度 (Ω) の関係。pHと炭酸イオン濃度及び飽和度はKawahata et al. (1997)<sup>8)</sup> によるマーシャル諸島のマジュロ環礁より得られた全アルカリ度 (2205 μmol/kg)、全炭酸 (1855 μmol/kg)、水温 (29.8 °C) 及び塩分 (33.72) の平均値よりプログラムCO2SYS (Lewis and Wallace, 1998)<sup>9)</sup> を用いて算出した。あられ石の飽和度3.3 (Ω = 3.3) は、Kleypas et al. (1999)<sup>7)</sup> によって提唱されている炭酸カルシウムの溶解量が石灰化量を上回るサンゴ礁の成長に関する限界値。

に明らかにする。また、サンゴ礁でサンゴに次いで石灰化に寄与している有孔虫類について、CO<sub>2</sub>分圧増加の影響を把握する。

### 3. 研究方法

#### (1) 酸・アルカリ添加による有孔虫類の予察的な石灰化影響評価実験

2009年5月に沖縄県瀬底島のサンゴ礁で採取したサンゴ礁棲の大型有孔虫ゼニイシ(*Marginopora kudakajimensis*)を、東京大学海洋研究所へ輸送し、実験室内の水槽で飼育していたところ、そのうちの1個体が6月9日に無性生殖をした。その3日後に、この無性生殖直後の幼個体(メガロリック個体)を、4段階の異なるpHの海水を満たしたガラスバイアルで飼育した。海水pHの調節には、塩酸および水酸化ナトリウムを用い、pH 8.3、8.2(対照区)、7.9、7.7の4条件区が設定された(NBSスケール)。海水pH 8.3は、産業革命以前の状態を想定したものである。なお、これらのpHは、全水素イオン濃度スケールの値に換算すると、概ね8.1、8.0、7.8、7.6に相当する。71日間の飼育後、殻サイズ・殻重量・殻室数(chamber数)などを測定した。飼育期間中、水温は25°Cに制御され、メタルハライドランプ(スーパークール115、ランプネットワーク社製、150 W、散光型、色温度20000 K+6400 K)を1台使用して、午前7時から午後7時までの点灯による12時間サイクルの光周期を与えた。有孔虫が受ける光量は、前出のハンディー型の光量子計(QSL-2100, Biospherical Instruments Inc.)で計測した。有孔虫の殻サイズ等の計測値の有意差検定には、統計解析ソフトウェアJMP 7(SAS Institute Japan)を用い、殻サイズと計測週数、pHとの関係については、計測週数およびpHを固定効果とした直交型二元配置分散分析(two-way crossed ANOVA)から求めた。また殻重量とpHとの関係については、有孔虫の円盤状形態を考慮して、殻重量値の平方根をとった上で、一元配置分散分析(one-way ANOVA)で求めた。

#### (2) 簡易pH制御システムによる有孔虫類の石灰化影響評価実験

計測された海水の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)、液化炭酸ガスボンベおよびCO<sub>2</sub>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水槽pH制御システムを作成して、有孔虫類の曝露実験を行なった(図3)。このシステムは、水草等の飼育水槽のCO<sub>2</sub>添加装置を基に作成されたものであり、後述するCO<sub>2</sub>分圧制御生物飼育装置(精密CO<sub>2</sub>制御システム)と対比して「簡易pH制御システム」と呼称する。このシステムを最大6連で運用し、海水pHは6段階で設定した。簡易pH計付属の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、曝露水槽の海水を定期的に採取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<sub>2</sub>SYs」を用いて、海水のあらゆる石に対する飽和度とCO<sub>2</sub>分圧を計算した(Lewis and Wallace, 1998)<sup>9)</sup>。なお、この計算に際して、全アルカリ度を2280 μmol/kgと仮定した。曝露水槽として、複数の約20 Lのガラス水槽を用い、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26°C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。照明には蛍光灯を用い、午前7時から午後7時までの点灯による12時間サイクルの光周期を与えた。水槽底面の光量は、ハンディー型の光量子計(QSL-2100, Biospherical Instruments Inc.)で計測した。また、2009年10月に

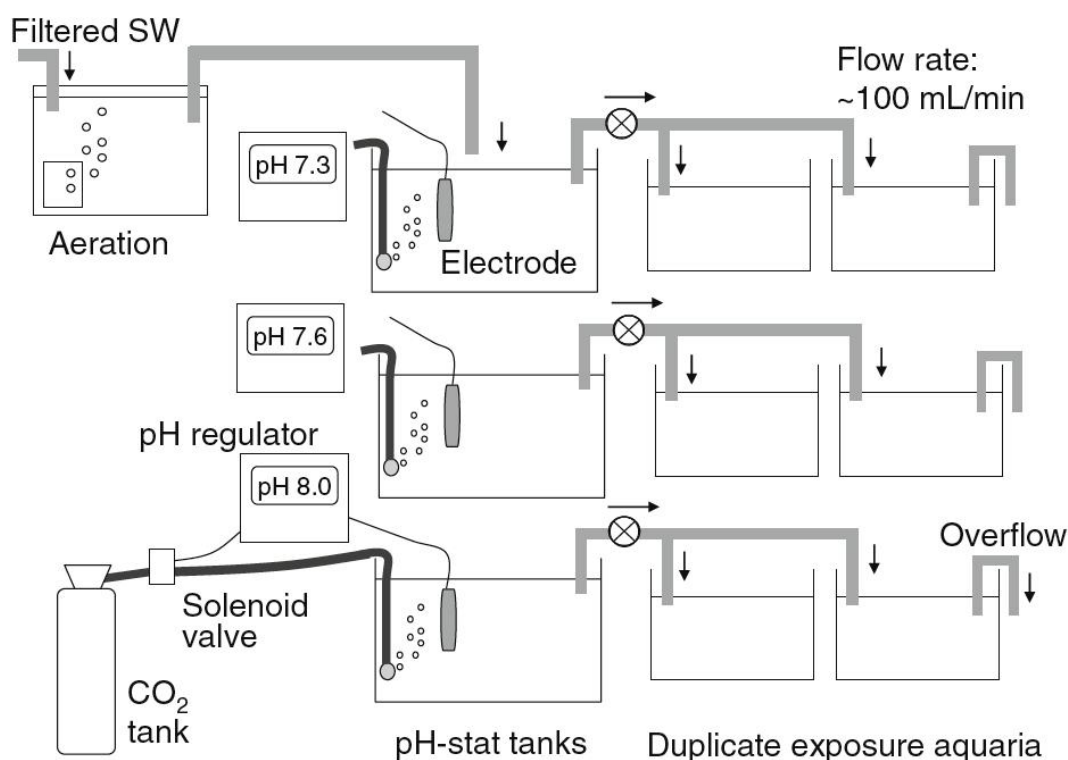


図3 CO<sub>2</sub>ガス添加とpH電極による簡易pH制御システムの模式図。

沖縄県瀬底島のサンゴ礁で採取した有孔虫類についての石灰化影響評価実験を、琉球大学熱帯生物圏研究センター瀬底実験所で実施した。

### (3) 精密CO<sub>2</sub>制御システム (AICAL装置) によるサンゴ・有孔虫類の石灰化影響評価実験

#### 1) 精密CO<sub>2</sub>制御システムの構成と運用

研究期間第2年目にあたる平成21年度以降は、本地球環境研究総合推進費課題で開発されたCO<sub>2</sub>濃度制御生物飼育装置 (精密CO<sub>2</sub>制御システム: AICAL装置) を用いて酸性化海水の石灰化生物 (サンゴおよび有孔虫) への影響評価実験を試みた (図4)。この精密CO<sub>2</sub>制御システム (紀本電子工業社製) は、二酸化炭素ガスと除湿した大気との混合により正確にCO<sub>2</sub>濃度を調整された気体を大量に海水に吹き込むことで気液平衡を達成させ、海水のCO<sub>2</sub>分圧を調整する機能を持つ。海水は、孔径10 μmと1 μmのフィルターで2段階濾過した。CO<sub>2</sub>分圧調整海水の二酸化炭素濃度は1時間に1回自動的に記録した。通常、海水のCO<sub>2</sub>分圧の設定値からの誤差は数10 μatm以下に維持される。最大で5段階のCO<sub>2</sub>分圧設定が可能で、ペリスタポンプによって最大で毎分およそ300 mLの調整海水を飼育水槽に供給することが可能である。2008年末より琉球大学熱帯生物圏研究センター瀬底研究施設に設置され運用が開始されている。

この精密CO<sub>2</sub>制御システムを用いて、CO<sub>2</sub>分圧5段階 (約280, 380, 600, 800, 1000 μatm) の設定でサンゴ類および有孔虫類の曝露実験を実施した。CO<sub>2</sub>分圧280 μatmの実験区は、産業革命以前の海洋環境を再現するべく設定したものである。メタルハライドランプ (ファンネル2, 150 W, 20000 Kブルー球、神畑養魚株式会社製) を3台使用し、ライト下面にステンレスネットを取り付けるこ

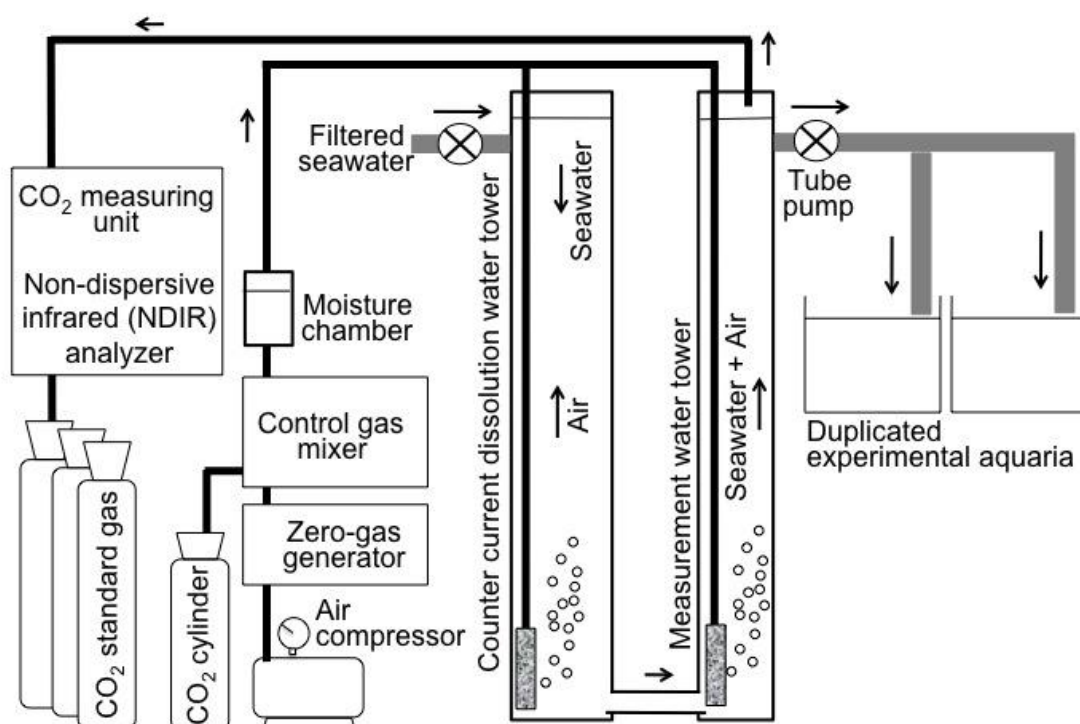


図4 精密CO<sub>2</sub>制御システム（AICAL装置）の模式図。

とにより、光量の調節と均一性を確保した。照明は、午前7時から午後7時までの12時間を点灯時間とする12h:12hのサイクルとした。

なお、飼育期間中週2回、飼育水槽中の海水のpH測定を行った（713 pH meter, Metrohm社）。毎回の測定時には、標準溶液としてNBSスケールに加え、TrisとAMPを用いて校正を行い、pHは全水素イオン濃度スケール（total hydrogen ion scale）で算出した（Dickson et al., 2007）<sup>10)</sup>。また、精密CO<sub>2</sub>制御システム運用開始後しばらくは、おおよそ2ヶ月に一度、原水、測定塔および曝露水槽の炭酸系の状態を確認するための採水を実施し、試料は塩化水銀溶液の添加により長期保存された。

精密pCO<sub>2</sub>制御装置（図4）は、当初、吸収塔および測定塔ともにエアストーンが目詰まりが著しく、長期的な運用は困難であった。目詰まりの原因の特定には時間を要したが、目詰まりを起こしたエアストーンを切断して、塩が詰まっていることを突き止めることができた（図5）。酸性化海水を作成するための吸収塔と測定塔において、除湿された空気とCO<sub>2</sub>の混合気体をエアストーンを通して常時注入しているため、エアストーン内に塩が析出しやすことが原因であると考えられた。そこで、吸収塔、測定塔に混合気体を添加する前に、加湿器を通して湿度を上げるように工夫した（図6）。その結果、塩詰まりは著しく改善され、精密pCO<sub>2</sub>制御装置の長期運用が可能となった。本報告書では、琉球大学熱帯生物圏研究センター瀬底研究施設において精密CO<sub>2</sub>制御システムを用いて実施された実験のうちから、その一部について報告する（図7）。

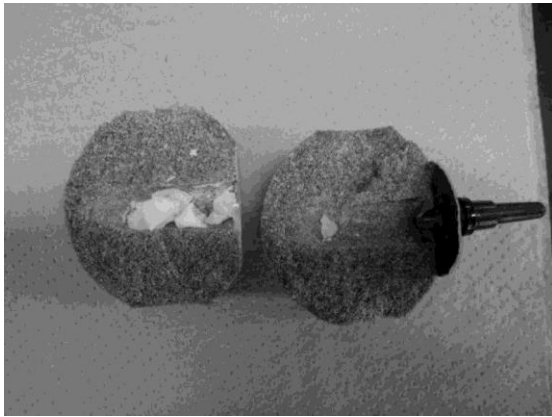


図5 塩詰まりしたエアストーン。



図6 エアストーン用の加湿器。内部には純水が入っている。

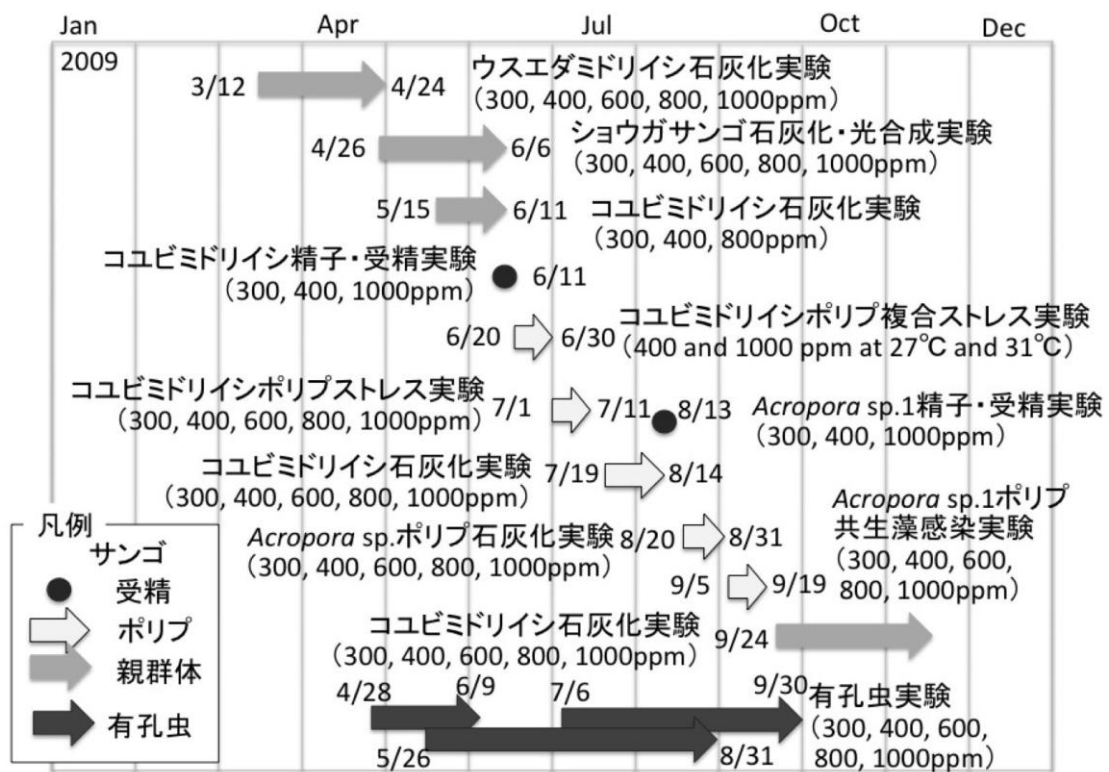


図7 琉球大学熱帯生物圏研究センター瀬底研究施設において、2009年に実施された精密CO<sub>2</sub>制御システムを用いて実施されたサンゴおよび有孔虫の酸性化海水影響評価実験の実施期間。サンゴについては、受精、ポリプおよび親群体を対象とした実験に区分して示した。( )内は、実験区のCO<sub>2</sub>分圧設定値。

## 2) 精密CO<sub>2</sub>制御システムによるハマサンゴとウスエダミドリイシの石灰化影響評価

琉球大学熱帯生物圏研究センター瀬底実験所において、精密pCO<sub>2</sub>制御装置（図4）を用いて、2種のサンゴ群体、すなわち円形の群体でコリンボース型の枝を持つウスエダミドリイシ (*Acropora tenuis*)と塊状群体のハマサンゴ(*Porites australiensis*)を対象に、親群体の石灰化速度に対する海洋酸性化の影響評価実験を行なった。CO<sub>2</sub>分圧は、おおよそ次の5段階、すなわち、300, 400, 600, 800, 1000  $\mu\text{atm}$ に設定するようにした。CO<sub>2</sub>調整海水を、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。

ウスエダミドリイシとハマサンゴ共に瀬底島周辺で採集した一つの群体からの切り分けによるサンゴ小片を用意した。この小片は遺伝的に同質なクローンであり、酸性化海水影響を含めたストレス耐性評価実験に適していると考えられる。ウスエダミドリイシについては、ニップを用いて群体から枝の先端部を約4 cmの長さで切断した。一部の枝には、2~3本の分枝が入ってしまうことがあった。これをポリカーボネート製の六角ボルト(規格:M6)の頭部に、ゼリー状のシアノアクリレート系瞬間接着剤(アロンアルファ、東亜合成株式会社製)で骨格露出部分を覆うように接着した。

ハマサンゴについては、バンドソーを用いて2 cm角のキューブ状に切断した。切断中は海水を洗瓶から掛けつつ粘液と切断の際に出る泥水を除去してサンゴへのストレスの低減を試みた。切断されたサンゴ片は、ウスエダミドリイシと同様にポリカーボネート製の六角ボルトの頭部に瞬間接着剤で固定した。

ウスエダミドリイシとハマサンゴ共に屋外水槽で約3週間の養生期間をおいた後、共に約6週間の酸性化海水曝露実験を行った。サンゴの石灰化量、すなわち骨格成長速度は水中重量法によって計測した。水中重量法は、サンゴの成長に関する研究では一般的に用いられる方法である。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{(実験終了時の重量-初期重量)/初期重量 $\times$ 100}として求めた。

## 3) 精密CO<sub>2</sub>制御システムによるハマサンゴとニオウミドリイシの石灰化影響評価

ハマサンゴ(*Porites australiensis*)とニオウミドリイシ(*Isopora palifera*)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それぞれの種1群体から枝片を作成し、実験に用いた。枝片は、塊状または被覆状となるハマサンゴとニオウミドリイシについて、切断面の面積がおおよそ4cm<sup>2</sup>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。前述の実験について、ハマサンゴについてもウスエダミドリイシの枝片と同じように、瞬間接着剤によってポリカーボネート製六角ボルトの頭部に固定する方法を採用したが、塊状または被覆状の群体に適用することが不適切と考えられたため、アクリル板への固定が考案されたものである。実験は、ハマサンゴは6週間、ニオウミドリイシは4週間の酸性化海水の曝露を行なった。実験期間中は水温をおおよそ27°C、光量は約100  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 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。

## 4) 精密CO<sub>2</sub>制御システムによる有孔虫類の多種間の石灰化影響評価

西太平洋サンゴ礁域に多く棲息する *Baculogypsina sphaerulata*、*Calcarina gaudichaudii*、*Amphisorus hemprichii* (*Marginopora kudakajimensis*と近縁)を対象とし、遺伝的な要因を取り除く



ため、無性生殖によって生まれたクローン個体群を用いた。精密CO<sub>2</sub>制御システムによって、CO<sub>2</sub>分圧について5段階(およそ300, 400, 600, 800, 1000  $\mu\text{atm}$ )に調整された海水に有孔虫を約12週間暴露した。プランクトンネットを利用した飼育容器を作成し、水流ポンプと組み合わせて常時水流があたるような実験条件を採用した。実験前後の殻直径と殻重量を測定した。まず実験開始前の個体と実験後に回収した個体を実体顕微鏡下で写真撮影した。その後、画像計測合成ソフトを用いてそれらの写真画像から殻直径を計測した。殻直径は最終室から中心を通る直径とそれに直交する直径の平均値を採用した。殻重量の測定には、超精密天秤(Thermo Cahn, C-35 microbalance)を用いて1個体ずつ秤量した。

#### 5) 精密CO<sub>2</sub>制御システムによる有孔虫類の多種間の石灰化影響評価

前節の主要なサンゴ礁棲有孔虫4種の多種間における石灰化影響の変化の原因を考察するために、西太平洋サンゴ礁域に多く棲息する*Calcarina gaudichaudii*および*Marginopora kudakajimensis*を対象として、再実験を行なった。遺伝的な要因を取り除くため無性生殖によって生まれたクローン個体群を用いた。精密CO<sub>2</sub>分圧<sub>2</sub>制御装置によってCO<sub>2</sub>分圧を5段階(約300, 400, 600, 800, 1000  $\mu\text{atm}$ )に設定し、水温27°Cにおいて有孔虫の飼育が行なわれた。有孔虫の飼育期間は約4週間であった。有孔虫類の石灰化量は、採取して軟体部を除去後に乾燥させ、超精密天秤(Thermo Cahn, C-35 microbalance)で秤量した。この結果は、次の節(4)で記述する炭酸系調整海水を用いた実験の結果と併せて議論する。

#### (4) 炭酸系調整海水による有孔虫類の石灰化影響評価実験

有孔虫の石灰化規定要因の理解を目的として、海水の炭酸イオン(CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>)と炭酸水素イオンイオン(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)の濃度を調整した海水による4週間飼育実験を*Calcarina gaudichaudii*および*Amphisorus hemprichii*(*Marginopora kudakajimensis*と近縁)を対象として実施した。炭酸イオン濃度を現在の平均的な値216  $\mu\text{mol/kg}$ として、重炭酸イオン濃度は産業革命前から近未来に予想される濃度5段階を設定した。有孔虫の石灰化量は実験前後の殻直径と殻重量から評価した。

### 4. 結果・考察

#### (1) 酸・アルカリ添加による有孔虫類の予察的な石灰化影響評価実験

酸・アルカリ添加により設定された4段階の海水pHに対応するCO<sub>2</sub>分圧値は、おおよそ260 ppm(pH 8.3)、380 ppm(pH 8.2)、560 ppm(pH 7.9)、1000 ppm(pH 7.7)であり、対照区である未調整の海水よりもpH値が高い条件区(pH 8.3, 180 ppm)は、産業革命以前の環境を仮定したものである。ゼニイシ(*M. kudakajimensis*)は、水温25°C、光量約190  $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ の環境下で約10週間飼育された。殻のサイズ・重量・殻室数は共にpHに依存して変化し、pH 7.7と7.9そして8.3の間で顕著な違いが見られ、高いpHほど大きな成長を示した(図8、9、10)。一方、pH 7.9と対照区として用いた未調整の海水(pH約8.2)では、各パラメータに有意な差は見られなかった(図8)。これは、海洋のpH低下が7.9までの範囲では、有孔虫が産業革命以前の殻の成長を保つことが出来るが、酸性化がそれ以上に進行した場合、殻形成が急速に減少する可能性を示唆する。測定項目のうち、pHによる差を最も反映していたのは有孔虫の殻重量であり、殻のサイズや殻室数では、重量ほどの顕著な違いは見られなかった(図8、9)。

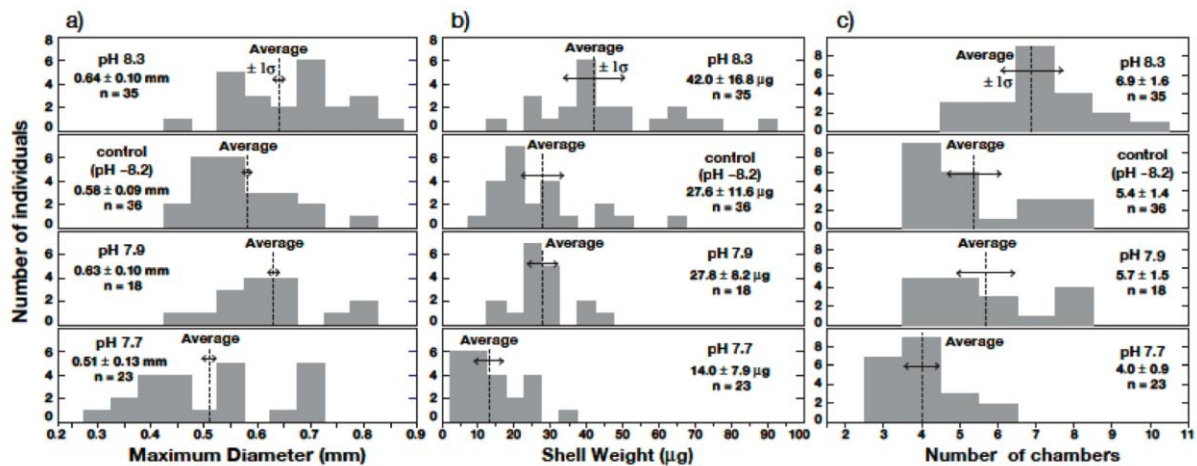


図8 海水pHがゼニイシ(*M. kudakajimensis*)の無性生殖直後の幼個体(メガロスリック個体)の成長に与える影響。各パラメータについてヒストグラムを示した。(a)個体の最大径、(b)殻重量、(c)殻室の数。海水pH値は、NBSスケールで表示されている。

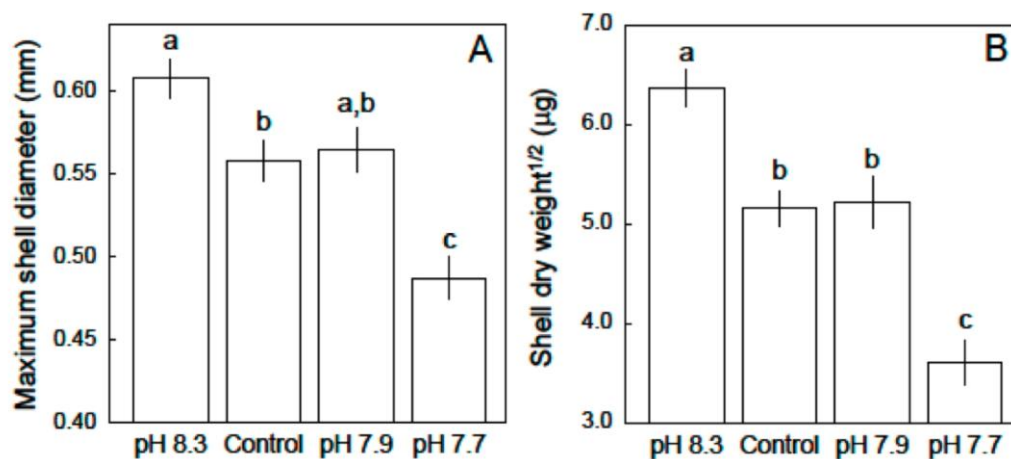


図9 海水pHがゼニイシの無性生殖直後の幼個体の成長に与える影響。(A)個体の最大径、(B)殻乾燥重量。海水pH値はNBSスケール。同一英字の間では有意な差が認められた(Tukey's HSD test,  $\alpha=0.05$ )。

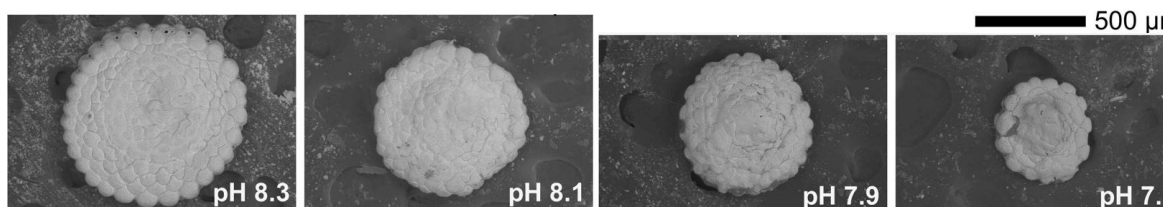


図10 ゼニイシの幼個体(メガロスリック個体)の走査電子顕微鏡画像。各pH条件区の平均的な最大径を持つ個体を比較した。海水pH値はNBSスケール。

有孔虫の個体成長に伴い殻重量の変化は、他の石灰化生物同様に幾何学的な制約から殻のサイズの放物線関数によって近似されることが知られているが、今回の実験の各pHにおいてもこの関係が認められた。そして、F検定 (F-test) によると、殻サイズと殻重量の関係は、各pHにおいて有意に異なることが示された(n=112, F=47.875, P<0.0001)。このことは、堆積物中の有孔虫化石試料から、殻サイズと殻重量変化に着目することにより過去の海水pH変遷の推定できる可能性を示唆する(Kuroyanagi et al., 2009)<sup>11)</sup>。

## (2) 簡易pH制御システムによる有孔虫類の石灰化影響評価実験

簡易pH制御システムによる曝露水槽のpHは6段階で設定された。実験期間中の各水槽のほぼ毎日の実測pH実測値を平均した結果を表1に示す。長期間にわたり、このシステムを安定的に維持・運用することに成功し、サンゴ礁棲有孔虫に対する曝露実験以外にも、サンゴの初期生活史に対する低pH影響評価実験にもこのシステムを使用することができた(サブテーマ4)。対照区であるpH 8.0水槽のCO<sub>2</sub>分圧は約400 ppmと推定されるのに対し、pH 7.8水槽のCO<sub>2</sub>分圧は約800 ppmであって、CO<sub>2</sub>排出シナリオIS92aによると、おおよそ西暦2100年における海洋状態に対応する。

サンゴ礁棲有孔虫 (*Amphistegina lobifera*) を対象に、pH 8.0、7.6、7.3および6.6の4段階の酸性化海水曝露実験を行った(図11)。殻の直径から判断して、実験に用いられた個体は成体と考えられる。この期間中の平均水温は26°Cであり、水槽底面での光量は、約23  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ であった。3週間後の観察では、pH 6.6において有孔虫殻が部分的に溶解している様子が認められた(図11d)。また、対照区(pH8.0、図11a)の個体が通常の褐色を呈しているのに比べて、明らかに、減色していた(図11d)。pH 7.3の有孔虫殻にもわずかであるが部分的な溶解が認められた(図11c)。これは、殻の外側を覆う原形質(ectoplasm)の一部が失われたことによるものと思われる。また、最終殻室のいくつかに溶解によって穴があいてお

表1 簡易pH制御システムの有孔虫*Amphistegina lobifera*の3週間にわたる低pH曝露実験曝露実験期間中の各水槽の平均実測pHと炭酸系諸量。IS92a CO<sub>2</sub>排出シナリオによる対応する年代を示した。

水槽	pH (SWS)	pH (NBS)	pCO <sub>2</sub> (ppm)	$\Omega_{\text{arag}}$	IS92a
pH 8.0	8.03	8.14	402	3.31	(現在)
pH 7.8	7.77	7.88	814	2.02	2100年
pH 7.7	7.69	7.81	1001	1.72	
pH 7.6	7.64	7.67	1138	1.55	
pH 7.3	7.31	7.38	2576	0.77	
pH 6.6	6.55	6.78	15490	0.14	

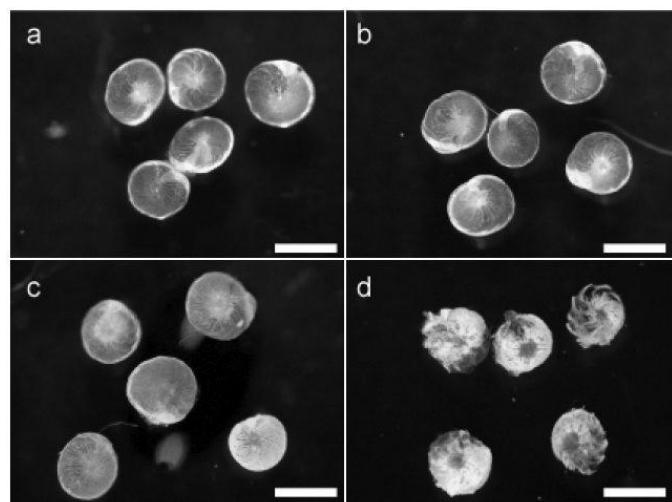


図11 サンゴ礁棲有孔虫 (*Amphistegina lobifera*)の3週間にわたる低pH曝露実験の結果: 水槽pH 8.0 (a)、7.6 (b)、7.3 (c)および6.6 (d)。スケールバーは1 mm。

り、殻室に含まれる原形質(endoplasm)が露出している様子が確認された(図11d)。一方、pH 7.6では、有孔虫に対照区と異なる特徴は目視では判別できなかった(図11b)。したがって、この有孔虫について、酸性化海水による影響の閾値は、7.3と7.7の間にあるように思われる。同様の実験を、他のサンゴ礁棲有孔虫(*Baculogypsina*, *Calcarina peneroplis* and *Sorites*)に実施したところ、*Amphistegina lobifera*と同様の殻の溶解が認められたのは、7.3以下のpH条件に限られていた。これらの結果は、今世紀中に予想される海水pHの低下に対して、これらのサンゴ礁棲有孔虫が甚大な被害を免れうる可能性を示唆する。しかし、目視では顕著な影響が見られないpH 7.3以上の海水中でも、石灰化量が低下している可能性があり、今後、有孔虫の石灰化量の直接計測を含め、詳細な検討が必要である。殻成長の低下や殻の厚さの減少などは、捕食者に対する抵抗力の減退をもたらして死亡率の上昇に寄与し、また死亡後の殻が溶解し易くなることによって、長期的にはサンゴ礁の造礁能力の低下につながる可能性は懸念される。

### (3) 精密CO<sub>2</sub>制御システム(AICAL装置)によるサンゴ・有孔虫類の石灰化影響評価実験

#### 1) 造礁サンゴ類2種、ハマサンゴとウスエダミドリイシの石灰化影響評価

精密CO<sub>2</sub>制御システム(AICAL装置)の運用結果を図7に示す。平成21年度の精密CO<sub>2</sub>制御システムによる飼育実験ではいずれも高い安定性でCO<sub>2</sub>分圧が制御された。また、飼育期間中の各実

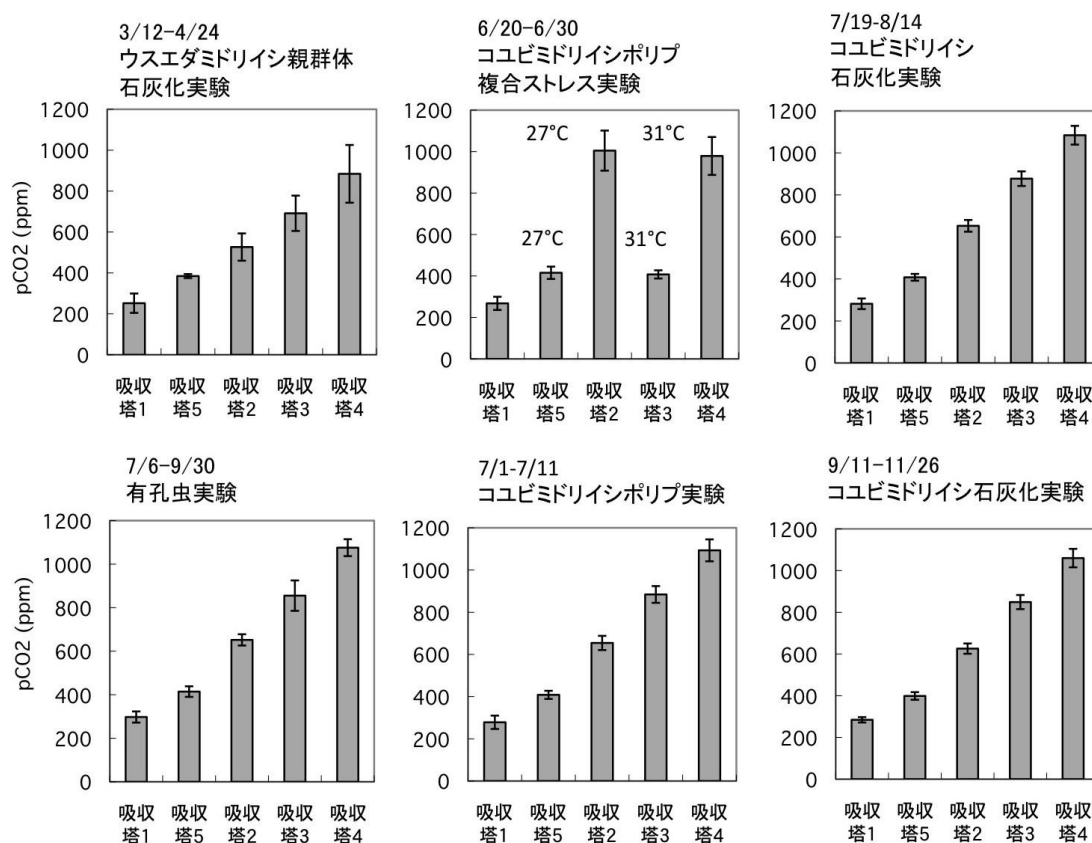


図12 2009年に実施された代表的な実験期間6例の各実験区のCO<sub>2</sub>分圧の計測値。おおよそ毎時計測の結果について、平均+/-標準偏差を示した。

表2 簡易pH制御システムによる飼育実験の曝露水槽の炭酸系の例。Suwa et al. (2010)<sup>12)</sup>より抜粋。塩分34、全アルカリ度 2300  $\mu\text{mol/kg}$ を仮定。pH値には標準偏差を示した (N=7)。

pH (Total hydrogen ion scale)	Water temperature (°C)	$\text{HCO}_3^-$ ( $\mu\text{mol/kg}$ )	$\text{CO}_3^{2-}$ ( $\mu\text{mol/kg}$ )	$\text{pCO}_2$ ( $\mu\text{atm}$ )	$\Omega_{\text{arag}}$
8.03 $\pm$ 0.03	26.8 $\pm$ 0.5	1760 - 1815	195 - 220	400 - 475	3.2-3.5
7.64 $\pm$ 0.12	26.8 $\pm$ 0.5	1995 - 2115	75 - 125	905 - 1600	1.2-2.0
7.31 $\pm$ 0.11	26.8 $\pm$ 0.5	2150 - 2205	40 - 60	2115 - 3585	0.6 - 1.0

験区の海水のpHの変動範囲は、 $\pm 0.01 - 0.04$ に収まっており、pH測定の結果からも、 $\text{CO}_2$ 分圧が安定した海水が供給されていることが確認された。また、著者らの研究グループでは、当初掛け流し式の簡易pH制御装置を用いた酸性化海水実験を行っていた（例えばSuwa et al, 2010<sup>12)</sup>）。この装置における $\text{pCO}_2$ 制御能は低く、数百 $\mu\text{atm}$ の変動が見られる場合もあった（表2）。一方で、精密 $\text{pCO}_2$ 制御装置では、掛け流し式でも $\text{pCO}_2$ は数十 $\mu\text{atm}$ で抑えられ（図12）、その制御能の高さが示された。

コリンボース型の枝を持つウスエダミドリイシ (*Acropora tenuis*) と塊状群体のハマサンゴ (*Porites australiensis*) を対象に、精密 $\text{CO}_2$ 制御システムを用いて、親群体の石灰化速度に対する海洋酸性化の影響評価実験を行なった。海水の $\text{CO}_2$ 分圧について5段階（およそ 300, 400, 600, 800, 1000 ppm）の条件区で、サンゴ類の曝露実験を実施した。 $\text{CO}_2$ 分圧300 ppmの実験区は、産業革命以前の海洋環境を再現するべく設定したものである。

ウスエダミドリイシとハ

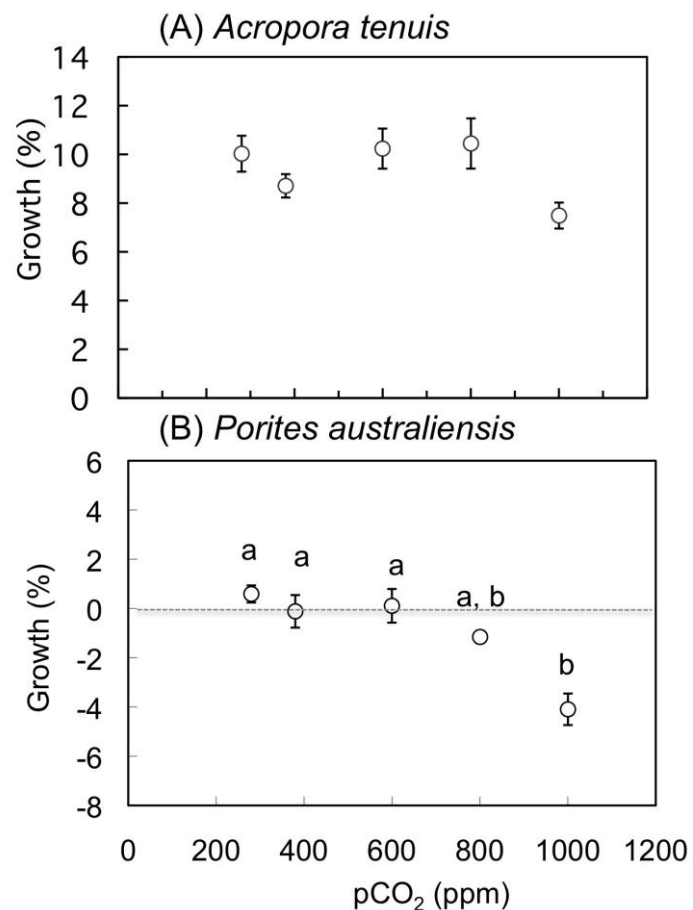


図13 精密 $\text{CO}_2$ 制御システムで飼育したウスエダミドリイシとハマサンゴの小群体の水中重量増加率と海水 $\text{CO}_2$ 分圧の関係。平均 $\pm$ 標準偏差を示した。飼育期間は、2009年4月16日から5月12日に掛けての26日間。異なるアルファベット(a, b)は水中重量増加率における有意差を示す (Tukey - HSD test,  $\alpha=0.05$ )。

マサンゴ共に、水温27°C、光量150  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ の条件における26日間の骨格重量増加率を図13に示す。共に、海水のCO<sub>2</sub>分圧が低い条件ではほぼ一定の骨格成長を示すが、高いCO<sub>2</sub>分圧で骨格成長が低減する傾向が見られる。ただし、一元配置分散分析(one-way ANOVA)によると、ウスエダミドリイシの水中重量増加率のCO<sub>2</sub>分圧への依存性に有意差は認められなかった (Tukey's HSD test,  $\alpha=0.05$ )。これは、各pCO<sub>2</sub>区のサンプルサイズ(n=6)が小さいためと考えられる。一方、ハマサンゴについては、骨格重量増加率がわずかであり、800 ppm以上の条件区の平均値は負の値を示した。これは、ハマサンゴの石灰化速度よりも酸性化海水による骨格の溶解作用が勝っていることを示す。そして、600 ppm以下の条件区と1000 ppmの条件区の間には有意な差が認められた。これは、ハマサンゴの方が、ウスエダミドリイシよりも酸性化海水への感受性が高いことを示唆する。ただし、この違いは、実験に用いられたウスエダミドリイシの群体の骨格は、生物組織によりほぼ完全に覆われた状態で酸性化海水に設置しているのに対し、ハマサンゴの方は、立方体状に切断された骨格の断面が海水に露出しているという条件の違いに起因する可能性が考えられる。この問題を解決するために、現在、アクリル板上にハマサンゴの骨格片を接着させて、骨格断面の露出を避けた試料を用いることを検討している。

## 2) 精密CO<sub>2</sub>制御システムによるハマサンゴとニオウミドリイシの石灰化影響評価

前述の実験では、ハマサンゴについてもウスエダミドリイシの枝片と同じように、瞬間接着剤によってプラスチックねじの頭部に固定する方法を採用したが、塊状または被覆状の群体に適用することが不適切と考えられたため、ハマサンゴについて、再実験を実施した。同時に、ニオウミドリイシの群体形成期の石灰化率の測定を行なった。ハマサンゴとニオウミドリイシについて、4 cm<sup>2</sup>となるようにサンゴ片を切断し、アクリル板に貼付け固定した試料を用いた。

ハマサンゴを用いた酸性化海水暴露実験においては、pCO<sub>2</sub>の増加とともに、石灰化率は有意に単調減少した (図14; 一元配置分散分析、 $p < 0.01$ )。一方で、ニオウミドリイシは300  $\mu\text{atm}$ で石灰化率が極端に高く、800  $\mu\text{atm}$ までは石灰化率は横ばいで、1000  $\mu\text{atm}$ では顕著な減少が見られた (図12; 一元配置分散分析、 $p < 0.01$ )。ウスエダミドリイシにおいては、1000  $\mu\text{atm}$ において、石灰化の顕著な減少が見られた (図11) と類似の結果である。産業革命以降の人為的なCO<sub>2</sub>放出により、現在までに海洋のpHは、0.1程度減少したことが示唆されている (Caldeira and Wickett 2003)<sup>13)</sup>。ハマサンゴとニオウミドリイシにおいては、産業革命前の酸性化海水を模倣した海水中では最も高い石灰化率を示したことから、これら2種においては、既に海洋酸性化による負の影響を受けていることが示唆される。過去の飼育実験においても、産業革命以前や氷期のpHを再現した海水中では、サンゴの石灰化率が高くなることは報告されている (Gattuso et al. 1998)<sup>14)</sup>。しかし、これまでの研究では、アルカリ添加によってpHを上げた海水を用いているため、当時の海洋環境を模倣したとは言えない。本研究における結果は、サンゴが現在、既にCO<sub>2</sub>増加によって負の影響を受けていることを明確に示した点でたいへん興味深い。一方で、ウスエダミドリイシにおいては、300  $\mu\text{atm}$ の海水中において顕著な石灰化率の増加は見られず、種によって、酸性化海水への反応が異なることが示唆された。今後より多くの種間での比較実験を行い、種間での酸性化海水への反応の違いが、生息環境の違いなどによるものかを検証する必要がある。

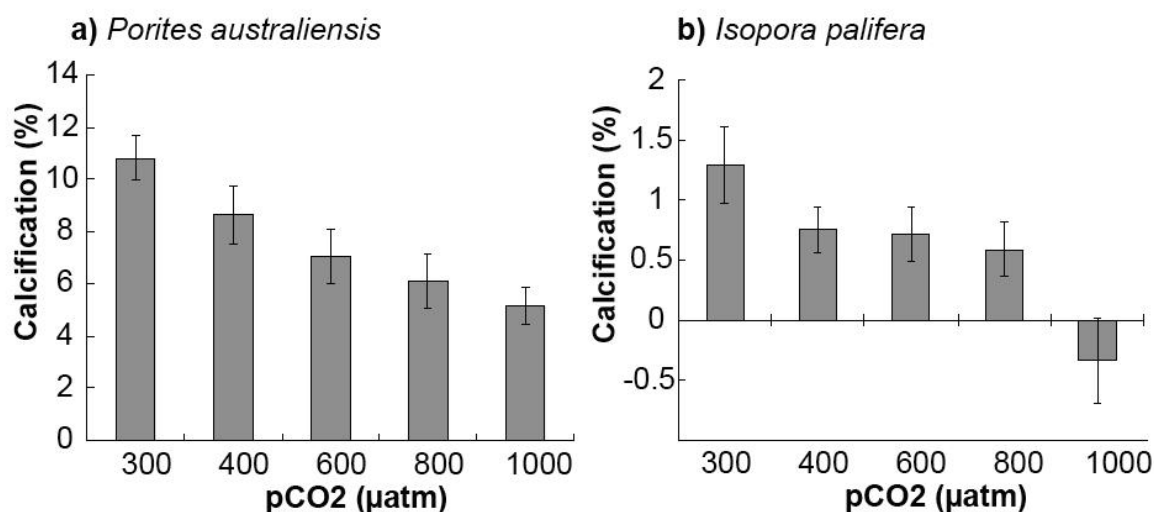


図14 異なるCO<sub>2</sub>分圧条件における(a)ハマサンゴ*Porites australiensis*と(b)ニオウサンゴ*Isopora palifera*の骨格成長量。平均±標準誤差を示した。

### 3) 有孔虫類の石灰化影響の多種間比較

精密CO<sub>2</sub>分圧制御装置によって水温27°CにおいてCO<sub>2</sub>分圧がおおよそ200, 300, 600, 800, 1000 μatmの5段階の海水で有孔虫の飼育が行なわれた(実際には、245 μatmから907 μatmに至る5段階)。有孔虫ここでは、*Baculogypsina sphaerulata*についての結果を報告する。殻直径と殻重量は、CO<sub>2</sub>分圧600 μatmと800 μatmで他の条件よりも大きい傾向がみられる(図15)。実験前個体の殻直径と殻重量は、α・β個体群それぞれ0.181 ± 0.003 mm, 4.05 ± 0.20 μgと0.200 ± 0.003 mm, 4.04 ± 0.20 μg(平均±標準誤差)である。*B. sphaerulata*のα個体群の殻重量とβ個体群の殻直径・殻重量では、異なるCO<sub>2</sub>分圧条件間で有意な差がみられる(F=4, p<0.01)。α・β個体群ともに、400 μatmに対して600 μatm, 800 μatmの殻重量は有意に大きい(p<0.05)。また、600 μatm, 800 μatmに対して1000 μatmの殻重量は有意に小さい(p<0.05)。そして、有意な差は認められないが、α・β個体群ともに殻直径と殻重量は300 μatmよりも400 μatmの方が小さい。

*B. sphaerulata*ではCO<sub>2</sub>分圧600 μatmと800 μatmで、他の条件区に比べて有意な石灰化量の増大がみられた。サンゴ礁棲有孔虫は共生藻の光合成により得たエネルギーを効率よく利用している(Lee, 2006)<sup>15)</sup>。一般に高CO<sub>2</sub>分圧環境下において植物の光合成速度は増大することから(例えば, Makino, 1997)<sup>16)</sup>、この*B. sphaerulata*でも共生藻の光合成が活性化して石灰化を促進させた可能性が考えられる。円石藻の*Emiliana huxleyi*はCO<sub>2</sub>分圧の上昇に伴い光合成量は増加し、石灰化量も490 μatmから750 μatmにかけて著しく増加すると報告されている(Iglesias-Rodriguez et al., 2008)<sup>17)</sup>。また、サンゴ藻とハリメダについても、600 μatmから900 μatmの間で石灰化量が増大することが報告されている(Reis et al., 2010)<sup>5)</sup>。

本報告書では、*C. gaudichaudii*および*A. hemprichii*の結果については省略するが、酸性化海水に対して、*B. sphaerulata*とは異なった反応が見られた。今後、個体群、種、さらに高次分類群など、さまざまなレベルで、酸性化海水に対する反応の多様性を明らかにしていくことは重要な課題と考えられる。

また、従来の研究では、昼夜実験は多いが、石灰化の日周サイクルを考慮した研究はまだ行われていない。今後、精密CO<sub>2</sub>制御システムを駆使して、海水pHに日周変化を与えた場合の影響や夜間の低pHの影響などが、サンゴ類や有孔虫類の石灰化に与える影響をも総合的に解析する必要がある。

前節で述べた簡易pH制御システムによる有孔虫 *Amphistegina lobifera* の成体を用いた実験では、顕著な影響（殻の溶解）はpH 7.3以下に限られていた。種の違い、海水の酸性化方法の違いから厳密な判定は難しいが、成体のほうが酸性化に対する耐性が強いという傾向を示唆するものと思われる。このことから、海水酸性化影響の種間比較などを行なう際に、無性生殖直後のメガロスリック個体を用いる実験手法は有効であり、特に殻重量が有用なパラメータであることが示唆された。翻れば、サンゴ礁棲の有孔虫は、生活史のなかで

も無性生殖直後の時期が海洋酸性化に対して感受性が高く、成長や生残率などに影響して、個体群の維持を損なう可能性が考えられる。生活史初期に海洋酸性化に対して敏感な反応を示す例は、ウニや軟体動物についても報告されている(Kuroyanagi et al., 2009)<sup>11)</sup>。今後もサンゴ礁棲有孔虫の多くの種について、無性生殖後の幼群体を用いた曝露実験により海洋酸性化耐性の種間比較を行うことは意義がある。

#### 4) 有孔虫類の石灰化影響評価の多様性とその要因

前節の主要なサンゴ礁棲有孔虫3種の多種間における石灰化影響の変化の原因を考察するため

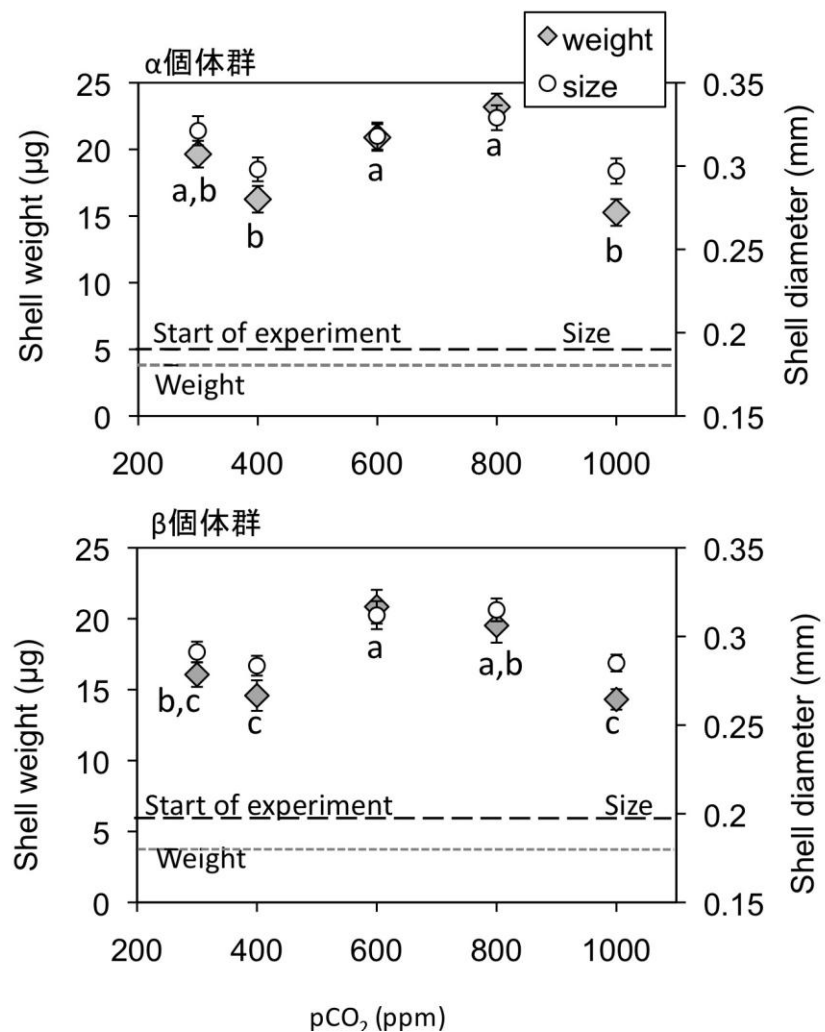


図 15 異なる CO<sub>2</sub> 分圧条件におけるサンゴ礁棲底生有孔虫 *Baculogypsina sphaerulata* の殻直径（右目盛）と殻重量（左目盛）。平均±標準誤差を示した。(a) α個体群、(b) β個体群。異なるアルファベット(a, b, c)は殻重量における有意差を示す (Tukey - HSD test, α=0.05)。点線は実験前個体の殻重量と殻直径（平均±標準誤差）を示す。



に、西太平洋サンゴ礁域に多く棲息する *Calcarina gaudichaudii* および *Marginopora kudakajimensis* を対象として、再実験を行なった。遺伝的な要因を取り除くため無性生殖によって生まれたクローン個体群を用いた。精密CO<sub>2</sub>分圧制御装置によってCO<sub>2</sub>分圧を5段階（約300, 400, 600, 800, 1000  $\mu\text{atm}$ ）に設定し、水温27°Cにおいて245  $\mu\text{atm}$ から907  $\mu\text{atm}$ に至る5段階の海水で有孔虫の飼育が行なわれた（表3）。これらの実験条件に対応する方解石の飽和度は、6.8から2.9であった。有孔虫の飼育期間は約4週間であった。そして実験前後の殻直径と殻重量を測定した。海水のCO<sub>2</sub>分圧の増加に伴い *Marginopora kudakajimensis* の石灰化量は単調な減少傾向を示し、*Calcarina gaudichaudii* の殻重量は増加傾向を示した（図16）。一方、炭酸イオン濃度を現在の平均的な値216  $\mu\text{mol/kg}$ として、重炭酸イオン濃度を産業革命前から近未来に予想される範囲（1630–1966  $\mu\text{mol/kg}$ ）に調整した炭酸種調整海水による実験では、どちらの種も石灰化量に有意な傾向はみられなかった。

まず、*Marginopora kudakajimensis* については、酸アルカリ添加実験によって酸性化海水で石灰化

表3 有孔虫の酸性化海水曝露実験の炭酸系緒量。AICAL装置で計測された二酸化炭素濃度と水温から曝露水槽のCO<sub>2</sub>分圧 ( $p\text{CO}_2$ ) を計算し、全アルカリ度 (TA) 実測値と合わせてCO2SYS<sup>9)</sup>を用いて計算した。

Treatment	pH at 25°C	TA	DIC	$p\text{CO}_2$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{CO}_3^{2-}$	$\text{CO}_2$	$\Omega_{\text{cal}}$
Ocean Acidification (OA) Experiment (~27.1 °C, salinity 34.1)								
Low $p\text{CO}_2$	8.232	2224	1821	245	1536	278	7	6.8
Control	8.085	2224	1914	375	1686	218	10	5.3
High $p\text{CO}_2$ - 1	7.924	2224	2002	588	1823	163	16	4.0
High $p\text{CO}_2$ - 2	7.826	2224	2047	763	1891	135	21	3.3
High $p\text{CO}_2$ - 3	7.761	2224	2075	907	1932	119	24	2.9

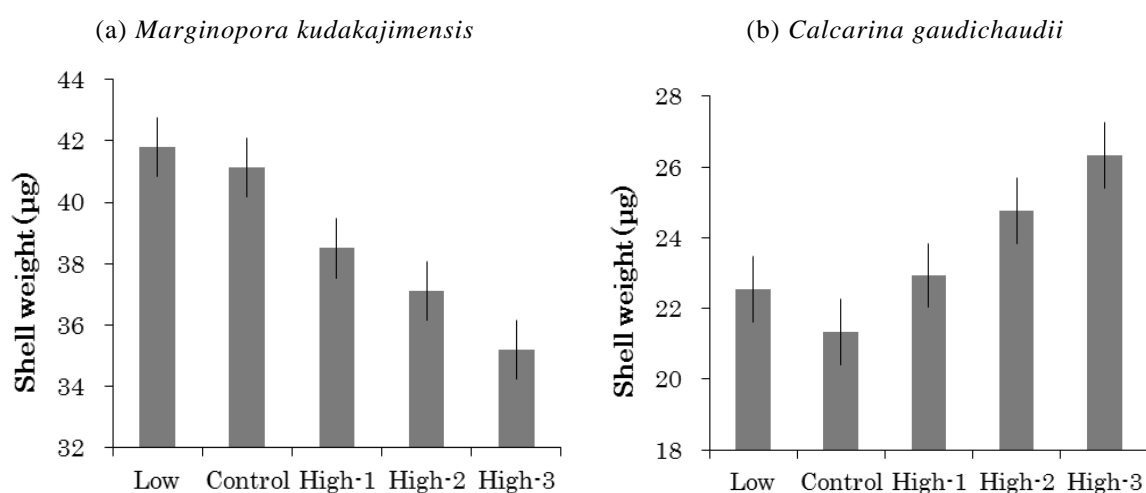


図16 精密CO<sub>2</sub>制御システムを用いたサンゴ礁棲有孔虫2種の酸性化海水に対する石灰化量の応答性の違い。誤差棒は標準誤差 ( $\pm 1$  SE) を示す。

量が低下することが知られている (Kuroyanagi *et al.*, 2009)<sup>11)</sup>。今後の海洋で生じる酸性化状態を再現したAICAL装置によっても同様の結果が得られたことは、この種において石灰化減退の確実性が高いことを示唆する。一方、*Calcarina gaudichaudii*は、酸性化海水で石灰化の増進が見られた。石灰質殻をもつ植物プランクトンであるハプト藻について同様の例が報告されており、酸性化海水による光合成増進効果の影響と考えられている (Iglesias-Rodriguez *et al.*, 2008)<sup>17)</sup>。そこで、炭酸種調整飼育実験を行い、サンゴ礁棲有孔虫の石灰化メカニズムについて検討を試みた。炭酸イオン濃度を一定にしつつ炭酸水素イオン濃度を変化させたところ、2種とも石灰化量に変動はみられなかった。このことから、炭酸水素イオン濃度は石灰化量の規定因子とは考えられない。*Marginopora kudakajimensis*の共生藻はサンゴと同じように渦鞭毛藻類であるのに対して、*Calcarina gaudichaudii*は珪藻を共生させている。海水中のCO<sub>2</sub>濃度に対する両者の光合成特性の違いが、石灰化量の違いを引き起こしている可能性が示唆される。今回の発見は、海洋酸性化現象に対する海洋生物の反応の多様性を考える上で興味深い。また、AICAL装置実験と炭酸種調整実験の組み合わせは、サンゴ礁棲有孔虫の石灰化において炭酸イオンと炭酸水素イオンの影響を分離する試みとして、海洋生物の海洋酸性化影響を議論するために有効な手法である。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

琉球大学熱帯生物圏研究センター瀬底研究施設において、精密pCO<sub>2</sub>制御装置を用いて、3種のサンゴ群体（ハマサンゴ、ウスエダミドリイシ、ニオウミドリイシ）および3種のサンゴ礁棲有孔虫の酸性化海水中における石灰化速度の比較を行なった。CO<sub>2</sub>分圧は、おおよそ300, 400, 600, 800, 1000  $\mu\text{atm}$ の5段階に設定するようにした。ほとんどの種でCO<sub>2</sub>分圧1000  $\mu\text{atm}$ の条件区では石灰化量に減少傾向が見られた。一方、酸性化海水への感受性が低いもの、あるいは600 - 800  $\mu\text{atm}$ の中程度の条件区で石灰化量が増進するものも見られた。これは、海水中の全炭酸の増加に伴う光合成の増進効果が関係している可能性が示唆される。

また、サンゴ礁棲有孔虫の一種*Calcarina gaudichaudii*は、約1000  $\mu\text{atm}$ までのCO<sub>2</sub>分圧の増加に伴って石灰化量が単調に増加する傾向を示した。同時に実験を行なった*Marginopora kudakajimensis*が石灰化量の単調減少を示したのと好対象で、2種間で石灰化応答に際立った違いが認められた。*M. kudakajimensis*共生藻はサンゴと同じように渦鞭毛藻類であるのに対して、*C. gaudichaudii*は珪藻を共生させている。海水中のCO<sub>2</sub>濃度に対する両者の光合成特性の違いが、石灰化量の違いを引き起こしている可能性が示唆される。

最近の報告では、生物群によって酸性化海水に対する石灰化応答に大きな差異があることが知られている。高精度CO<sub>2</sub>分圧調整装置を用いた飼育実験装置によるサンゴと有孔虫についての我々の検討結果も、これに整合的である。海水中の全炭酸の増加、あるいはCO<sub>2</sub>濃度増加に伴う光合成の増進効果が関係している可能性が示唆される。今後、遺伝子型や個体群、種、さらに高次分類群など、さまざまなレベルで、酸性化海水に対しての反応の多様性を明らかにしていくことが重要と考えられる。

### (2) 環境政策への貢献

2011年1月に沖縄県名護市で開催されたIPCC海洋酸性化ワークショップに参加し、議論に参加

するとともに、サンゴ礁棲有孔虫の2種間で石灰化応答に際立った違いが認められた結果などについて、ポスター発表を行なった。4日間の議論のまとめとして作成されるレポートは、IPCC第5次評価報告書の作成の基礎資料となる。また、今後、ホームページ等を通じ、成果の広報・普及に努める。

## 6. 引用文献

- 1) Hoegh-Guldberg O, Mumby PJ, Hooten AJ, Steneck RS, Greenfield P, Gomez E, Harvell CD, Sale PF, Edwards AJ, Caldeira K, Knowlton N, Eakin CM, Iglesias-Prieto R, Muthiga N, Bradbury RH, Dubi A, Hatzilios ME (2007) Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science* 318:1737-1742
- 2) Orr JC, Fabry VJ, Aumont O, Bopp L, Doney SC, Feely RA, Gnanadesikan A, Gruber N, Ishida A, Joos F, Key RM, Lindsay K, Maier-Reimer E, Matear R, Monfray P, Mouchet A, Najjar RG, Plattner GK, Rodgers KB, Sabine CL, Sarmiento JL, Schlitzer R, Slater RD, Totterdell IJ, Weirig MF, Yamanaka Y, Yool A (2005b) Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature* 437:681-686.
- 3) IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007) *Climate Change 2007 Synthesis report*, Cambridge University Press, New York.
- 4) 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.
- 5) Ries JB, Cohen AL, McCorkle DC (2009) Marine calcifiers exhibit mixed responses to CO<sub>2</sub>-induced ocean acidification. *Geology* 37:1131-1134.
- 6) 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.
- 7) Kleypas JA, Buddemeier RW, Archer D, Gattuso J-P, Langdon CC, Opdyke, BN (1999) Geochemical consequences of increased atmospheric carbon dioxide on coral reefs. *Science*, 284:118-120.
- 8) Kawahata H, Suzuki A, Goto K (1997) Coral reef ecosystems as a source of atmospheric CO<sub>2</sub>: evidence from PCO<sub>2</sub> measurements of surface waters. *Coral Reefs*, 16:261-266.
- 9) Lewis E, Wallace DWR (1998) Program developed for CO<sub>2</sub> system calculations, ORNL/ CDIAC-105. Oak Ridge: Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy.
- 10) Dickson AG, Sabine CL, Christian JR (2007) *Guide to Best Practices for Ocean CO<sub>2</sub> Measurements* PICES Special Publication 3, 191pp.
- 11) Kuroyanagi A, Kawahata H, Suzuki A, Fujita K, Irie T (2009) Impacts of ocean acidification on large benthic foraminifers: Results from laboratory experiments. *Marine Micropaleontology*, 73:190-195.
- 12) Suwa R, Nakamura M, Morita M, Shimada K, Iguchi A, Sakai K, Suzuki A (2010) Effects of acidified seawater on early life stages of scleractinian corals (Genus *Acropora*). *Fisheries Science* 76:93-99.
- 13) Caldeira K, Wickett ME (2003) Anthropogenic carbon and ocean pH. *Nature* 425: 365

- 14) Gattuso JP, Frankignoulle M, Bourgeb I, Romaine S, Buddemeier RW (1998) Effect of calcium carbonate saturation of seawater on coral calcification. *Global Planet Change* 18:37-46
- 15) Lee JJ (2006) Algal symbiosis in larger foraminifera. *Symbiosis*, 42:63-75.
- 16) Makino A (1997) Leaf photosynthesis and whole plant growth of C3 plants in high CO<sub>2</sub> environments: physiology and biochemistry of rice. *Japanese Journal of Ecology*, 47, 301-305.
- 17) Iglesias-Rodriguez MD, Halloran PR, Rickabry RE, Hall IR, Colmenero-Hidalgo E, Gittins JR, Green DR, Tyrrell T, Gibbs SJ, von Dassow P, Rehm E, Armbrust EV, Boessenkool KP (2008) Phytoplankton calcification in a high-CO<sub>2</sub> world. *Science*, 320:336-340.

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) Kuroyanagi A, Kawahata H, Suzuki A, Fujita K, Irie T. Impacts of ocean acidification on large benthic foraminifers: Results from laboratory experiments. *Marine Micropaleontology*, 73:190-195 (2009).
- 2) 諏訪僚太・中村崇・井口亮・中村雅子・守田昌哉・加藤亜記・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*, 19:21-40 (2010).
- 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*, 76, 93-99 (2011).
- 4) Nakamura M, Ohki S, Suzuki A, Sakai K. Coral larvae under ocean acidification: survival, metabolism, and metamorphosis. *PLoS One*, e14521. doi:10.1371/journal.pone.0014521 (2011).
- 5) Fujita K, Hikami M, Suzuki A, Kuroyanagi A, Kawahata H. Effects of ocean acidification on calcification of symbiont-bearing reef foraminifers. *Biogeosciences Discussion*, 8:1809-1829 (2011).

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) 藤田和彦(琉大・理)「サンゴ礁棲有孔虫への海洋酸性化の影響」. 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-」
- 2) 氷上 愛(琉大・理)・藤田和彦(琉大・理)・鈴木 淳(産総研)・酒井一彦(琉大・熱生研)・黒柳あずみ(東大・海洋研)・川幡穂高(東大・海洋研)「海洋酸性化がサンゴ礁棲有孔虫の石灰化に与える影響」. 日本地球惑星連合2010年大会
- 3) Mana Hikami, Kazuhiko Fujita, Atsushi Suzuki, Akira Iguchi, Kazuhiko Sakai, Azumi Kuroyanagi and Hodaka Kawahata. Effects of ocean acidification on calcification of symbiont-bearing reef foraminifers. *International Symposium on Foraminifera, Forams 2010*

(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）

- 1) バイオミネラリゼーションと石灰化-遺伝子から地球環境まで（2009年4月23日-24日、東京大学海洋研究所講堂、観客80名）
- 2) バイオミネラリゼーションと石灰化-遺伝子から地球環境まで（2011年2月10日、東京大学大気海洋研究所講堂、観客30名）

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない

(6) その他

Kuroyanagi et al. (*Marine Micropaleontology*, 2009, 73:190-195)の論文が、2010年5月の*Marine Micropaleontology*誌のMost Downloaded Articlesに選ばれた。